2024年9月12日(木)

口頭講演 | S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

10:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

座長:吉村 俊平(北海道大学)、萩原 雄貴(海洋研究開発機構)、浜田 盛久(海洋研究開発機構)

10:00 ~ 10:20

[S1-01] 沈み込み帯水流体中のタングステン(VI)溶存化学種とスラブ脱水過程におけるW安定同位体分別への影響

「招待講演」

*高橋 菜緒子[1]、中村 美千彦[2]、山下 茂[3]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理、2. 東北大・院理、3. 岡山大・惑星研)

10:20 ~ 10:40

[S1-02] 中国安徽省女山マール産カンラン岩捕獲岩から復元したマントル構造と水分布：スラブの水はどこまで届く？

「招待講演」

*佐藤 侑人[1]、高橋 栄一[2] (1. JAMSTEC高知、2. 広州地球化学研究所)

10:40 ~ 10:55

[S1-03] 西部アイフェル火山地域のマントル捕獲岩を用いたマール噴火に至る深部プロセスの解明

「発表賞エントリー」

*荒尾 眞成[1]、中村 美千彦[1]、無盡 真弓[1]、新谷 直己[1]、澤 燦道[1]、中谷 貴之[2]、隅田 まり[3]、Schmincke Hans-Ulrich[3] (1. 東北大・院理、2. 産総研、3. ヘルムホルツ海洋研究センター)

10:55 ~ 11:10

[S1-04] 非噴出珪長質マグマ中のメルトの含水量と圧力：花崗岩に含まれるジルコン中メルト包有物の均質化実験とSEM-EDS分析からの制約

「発表賞エントリー」

*川島 泰地[1]、下岡 和也[2]、福井 堂子[1]、斉藤 哲[1] (1. 愛媛大、2. 関西学院大)

11:10 ~ 11:25

[S1-05] 十和田火山御倉山溶岩ドームディクティタキシティック組織部の浸透率と空隙構造

*関谷 夏子[1]、中村 美千彦[2]、櫻井 亮輔[3]、無盡 真弓[2]、新谷 直己[2]、竹内 晋吾[4]、諏訪 由起子[5] (1. 東北大・理、2. 東北大・院理、3. 東京大、4. 電中研、5. セレス)

11:25 ~ 11:40

[S1-06] 引張変形下における珪酸塩メルト・ガラスの分子動力学シミュレーション

*馬見塚 亮太[1]、奥村 聡[1]、佐久間 博[2] (1. 東北大・院理、2. NIMS)

11:40 ~ 11:55

[S1-07] 伊豆大島火山のマグマ供給系：H_2O飽和斜長石リキダスからの制約

*石橋 秀巳[1] (1. 静岡大学)

口頭講演 | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

10:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

座長:黒澤 正紀(筑波大学)、北脇 裕士(中央宝石研究所)

10:00 ~ 10:20

[R1-01] 電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）による極微量元素定量分析の測定条件決定：電流と計数時間

「招待講演」

*加藤 丈典[1] (1. 名古屋大・ISEE)

10:20 ~ 10:35

[R1-02] ブリッジマナイトのメスバウアースペクトルとFe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットピークの強度テンソル

*篠田 圭司[1]、小林 康浩[2]、奥地 拓生[2] (1. 大公大・院理、2. 京大・複合研)

10:35 ~ 10:50

[R1-03] 光熱変換型赤外分光法（O-PTIR）による粘土鉱物の同定

「発表賞エントリー」

*城戸 太朗[1]、鈴木 庸平[1] (1. 東大・院理)

10:50 ~ 11:05

[R1-04] 宝飾用合成カラー・ダイヤモンドの特性評価と宝石鑑別

*北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1]、久永 美生[1]、山本 正博[1] (1. ㈱中央宝石研究所)

11:05 ~ 11:15

[1Lecture-201-07-5add] 休憩

11:15 ~ 11:30

[R1-05] オーストラリア産サファイアとその産地特徴

*江森 健太郎[1]、北脇 裕士[1] (1. ㈱中央宝石研究所)

11:30 ~ 11:45

[R1-06] エメラルドの原産地特徴と原産地鑑別における問題点

*趙 政皓[1]、北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1] (1. 中央宝石研究所)

11:45 ~ 12:00

[R1-07] 宝石品質のジルコンとサファイアの年代測定とその原産地同定への応用；オーストラリア、ニューサウスウェールズ州、ニューイングランド地方のサファイア鉱山からの研究例

*阿依 アヒマディ[1] (1. Tokyo Gem Science LLC.)

口頭講演 | R3：高圧科学・地球深部

10:00 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

座長:境 毅(愛媛大学)、新名 良介(明治大学)、石井 貴之(岡山大学)、川添 貴章(広島大学)

10:00 ~ 10:15

[R3-01] 弾性波速度および放射光X線回折測定と分子動力学シミュレーションによる$CaAl_2O_4$ガラスの圧力誘起ポリアモルフィック転移の解明

「招待講演」

*大平 格[1]、河野 義生[2,3]、Gréaux Steeve[3]、Drewitt James W E[4]、Jahn Sandro[5]、則竹 史哉[6]、尾原 幸浩[7,8]、廣井 慧[7,8]、近藤 望[9]、Hrubiak Rostislav[10]、肥後 祐司[8]、辻野 典秀[8]、柿澤 翔[8]、新田 清文[8]、関澤 央輝[8] (1. 学習院大・理、2. 関西学院大・理、3. 愛媛大・GRC、4. ブリストル大・物理、5. ケルン大・IGM、6. 山梨大・総合研究、7. 島根大・材料エネルギー、8. 高輝度光科学研究センター、9. 岡山大・IPM、10. アルゴンヌ国立研究所・HPCAT)

10:15 ~ 10:30

[R3-02] 分子動力学シミュレーションと放射光X線回折実験によるCO_2含有ナトリウムケイ酸塩メルトの構造解析

「発表賞エントリー」

*早舩 紫野[1]、小野寺 陽平[2]、小原 真司[2]、市川 晴貴[3]、坂巻 竜也[1]、舟越 賢一[4]、鈴木 昭夫[1] (1. 東北大・院理、2. NIMS、3. 東北大・理学部、4. CROSS)

10:30 ~ 10:45

[R3-03] 地球深部における$(Mg,Fe)_2SiO_4$高圧相ポワリエライトの存在可能性

*富岡 尚敬[1]、奥地 拓生[2]、Purevjav Narangoo[3]、宮原 正明[4] (1. JAMSTEC・高知コア研、2. 京都大・複合研、3. ソウル国立大・地球環境、4. 広島大・地球惑星)

10:45 ~ 11:00

[R3-04] Wadsleyite及びringwoodite中の含水量の温度依存性

*井上 徹[1,2]、濵田 雄士[2]、嘉屋 華恵[2]、江木 祐介[1]、前田 大地[1]、山口 和貴[1]、山田 晃之亮[1]、川添 貴章[1,2] (1. 広島大・院先進理工、2. 広島大・理)

11:00 ~ 11:15

[R3-05] 電子エネルギー損失分光法（EELS）を用いたウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の温度依存性の解明

「発表賞エントリー」

*山口 和貴[1]、川添 貴章[1]、井上 徹[1]、富岡 尚敬[2] (1. 広島大学、2. JAMSTEC高知コア研)

11:15 ~ 11:30

[R3-06] 中性子回折による陽イオンサイト占有率解析の利点と高圧鉱物への応用例

*奥地 拓生[1] (1. 京都大・複合研)

11:30 ~ 11:45

[R3-07] 下部マントル最上部条件までの$CaSiO_3$-H_2O系でのデイブマオアイトのその場格子体積観察

*高市 合流[1]、石井 貴之[2]、西原 遊[1]、松影 香子[3]、肥後 祐司[4]、辻野 典秀[4]、柿澤 翔[4] (1. 愛媛大学GRC、2. 岡山大学惑星物質研究所、3. 帝京科学大学自然環境学科、4. (公財）高輝度光科学研究センター)

11:45 ~ 12:00

[R3-08] 含水SiO_2の高圧下弾性波速度測定と下部マントル中の低速剪断波領域の起源への考察

「発表賞エントリー」

*森 悠一郎[1,2]、村上 元彦[2]、芳野 極[3]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理、2. ETHZ・地球科学部、3. 岡大・惑星研)

口頭講演 | R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

14:00 ~ 17:30 | ESホール 東山キャンパス

R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

座長:秋澤 紀克(東京大学大気海洋研究所)、越後 拓也(秋田大学)

14:00 ~ 14:25

[R7-01] イルメナイトのウラン–鉛系に基づく年代学研究の最前線

「招待講演」

*伊藤 健吾[1]、仁木 創太[2]、飯塚 毅[3]、平田 岳史[1] (1. 東大・地殻化学、2. 名大・ISEE、3. 東大・院理地惑)

14:25 ~ 14:40

[R7-02] LA-ICP-MS分析に基づく日本国内の熱水性鉱床中に含まれるReの分布領域

「発表賞エントリー」

*小笠原 光基[1]、大田 隼一郎[1,2]、安川 和孝[1]、中村 謙太郎[2,1]、加藤 泰浩[1,2] (1. 東京大・院工学、2. 千葉工大・次世代海洋資源研究センター)

14:40 ~ 14:55

[R7-03] 南アフリカ共和国ブッシュフェルト複合岩体におけるPGE含有(Fe,Ni,Co)AsS固溶体の産状

「発表賞エントリー」

*窪田 朔也[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院国際資源)

14:55 ~ 15:10

[R7-04] 熊本県美里町払川における砂白金鉱床と新鉱物・不知火鉱について

*浜根 大輔[1]、田中 崇裕、新町 正 (1. 東京大学)

15:10 ~ 15:25

[R7-05] 南太平洋クック諸島アイツタキ島に産するマントルかんらん岩捕獲岩の地球化学的特徴

*芳川 雅子[1]、秋澤 紀克[2] (1. 広島大・院先進理工、2. 東京大・AORI)

15:25 ~ 15:40

[R7-06] 伊豆・小笠原・マリアナ前弧域のマントル加水作用とマグマ形成史

*山岡 璃音[1]、秋澤 紀克[1]、市山 祐司[2]、森下 知晃[3]、田村 明弘[3]、山下 浩之[4]、針金 由美子[5]、小原 泰彦[6,7,8] (1. 東大院、2. 千葉大、3. 金沢大、4. 神奈川県立生命の星・地球博物館、5. 産総研、6. 海上保安庁海洋情報部、7. 海洋研究開発機構、8. 名古屋大)

15:40 ~ 15:50

[1Lecture-108-19-7add] 休憩

15:50 ~ 16:15

[R7-07] Fault-rock mineralogy and weakening mechanisms at deep- to shallow-crustal depths of Main Himalayan Thrust, NW India

「招待講演」

*Dyuti Prakash SARKAR[1], Takehiro Hirose[1], Jun-ichi Ando[2], Kaushik Das[2], Gautam Ghosh[3] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Hiroshima University, 3. Presidency University)

16:15 ~ 16:30

[R7-08] オーストラリア産鉄鉱石中のゲーサイトに見られるリンの濃集と微細組織の関係

*三河内 岳[1]、村尾 玲子[2]、高山 透[2] (1. 東大・総研博、2. 日本製鉄)

16:30 ~ 16:45

[R7-09] 妙見山リチウムペグマタイト周辺の鉱物分帯と生成温度

「発表賞エントリー」

*石嵜 拓海[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院資源)

16:45 ~ 17:00

[R7-10] 加部島の東松浦玄武岩晶洞に産する淡青色セピオライトの呈色要因となり得るCuの存在状態について

「発表賞エントリー」

*木尾 颯月[1]、江島 輝美[2]、昆 慶明[3]、南澤 比佳理[4]、堀田 将臣[4] (1. 信州大・院理、2. 信州大・理、3. 産総研、4. 信州大・工)

17:00 ~ 17:15

[R7-11] 粉末X線回折による全岩鉱物量比・累帯構造量比の数値化：ビッグデータ時代に向けて

「発表賞エントリー」

*松野 哲士[1]、米谷 珠萌[2]、吉田 健太[3]、平野 伸夫[1]、新名 良介[2]、大坂 恵一[4]、山崎 慎一[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1] (1. 東北大学、2. 明治大学、3. 海洋研究開発機構、4. 高輝度光科学研究センター)

17:15 ~ 17:30

[R7-12] 地質試料を用いた暗黒物質探索の試みについて

*阿部 なつ江[1,2]、廣瀬 重信[1]、常 青[1]、羽生 毅[1]、長谷部 徳子[2]、星野 靖[3]、加美山 隆[4]、川村 洋史[1]、村瀬 孔大[5]、中 竜大[6]、小國 健二[1]、鈴木 勝彦[1]、山崎 誠子[7] (1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2. 金沢大学、3. 神奈川大学、4. 北海道大学、5. ペンシルベニア州立大学、6. 東邦大学、7. 国立研究開発法人産業技術総合研究所)

口頭講演 | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

14:00 ~ 15:15 | ES024 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

座長:門馬 綱一(国立科学博物館)、白勢 洋平(愛媛大学)

14:00 ~ 14:15

[R1-08] マダガスカル産天然サファイア中のウルトラナノインクルージョン

*三宅 亮[1]、乙 星華[1]、伊神 洋平[1]、江森 健太郎[2] (1. 京都大学、2. 中央宝石研究所)

14:15 ~ 14:30

[R1-09] 糸魚川石の対称性の再検討

*清原 千雅子、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1] (1. 京都大・院理)

14:30 ~ 14:45

[R1-10] 小笠原諸島父島, 宮之浜から産出したzeoliteと変質したボニナイトの関係

*井上 裕貴[1]、安井 万奈[2]、石橋 純一郎[3]、萩谷 宏[4]、島田 和彦[1]、山﨑 淳司[2] (1. 九大・院理、2. 早大・理工、3. 神戸大、4. 都市大)

14:45 ~ 15:00

[R1-11] 長野県浜横川産ニッケル滑石

*松原 聰[1]、門馬 綱一[1]、柳澤 教雄[2]、草葉 陽子[1]、徳本 明子[1]、宮脇 律郎[1] (1. 国立科学博物館、2. 産総研・地質調査総合センター)

15:00 ~ 15:15

[R1-12] 静岡県河津鉱山から産出したゼーマン石の２価鉄置換体について

*門馬 綱一[1]、Missen Owen[2]、Mills Stuart[3]、宮脇 律郎[1]、松原 聰[1]、大谷 栄治[4]、鎌田 誠司[5]、小澤 信[4] (1. 国立科学博物館、2. タスマニア大学、3. The Arkenstone、4. 東北大学、5. (株)アド・サイエンス)

口頭講演 | R3：高圧科学・地球深部

14:00 ~ 15:15 | ES025 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

座長:境 毅(愛媛大学)、新名 良介(明治大学)、石井 貴之(岡山大学)、川添 貴章(広島大学)

14:00 ~ 14:15

[R3-09] 高圧下における下部マントル物質の電気伝導度と価数およびスピン状態との関係

「招待講演」

*増野 いづみ[1] (1. 岡山大・惑星研)

14:15 ~ 14:30

[R3-10] GHz-DAC音速法によるフェロペリクレース中の鉄イオンスピン転移に伴う弾性異常測定

*米田 明[1]、増野 いづみ[2]、松井 亮介[1]、石田 遼真[1]、近藤 忠[1] (1. 大阪大学・理学研究科、2. 岡山大学・惑星物質研究所)

14:30 ~ 14:45

[R3-11] Reaction between water and iron in the early magma ocean and the present core-mantle boundary

*Yongjae Lee[1] (1. Yonsei University)

14:45 ~ 15:00

[R3-12] 高温高圧下におけるB2-FeNiSi相の音速測定と地球核の構成

*大谷 栄治[1]、生田 大穣[2]、福井 宏之[3,4]、坂巻 竜也[1]、石川 大介[3,4]、バロン アルフレッド[3,4] (1. 東北大・院理、2. 岡山大惑星物質研、3. JASRI、4. 理研)

15:00 ~ 15:15

[R3-13] FeS IVとVの相境界について

*浦川 啓[1] (1. 岡山大学)

口頭講演 | R8：変成岩とテクトニクス

15:30 ~ 18:00 | ES024 東山キャンパス

R8：変成岩とテクトニクス

座長:纐纈 佑衣(名古屋大学)、遠藤 俊祐(島根大学)

15:30 ~ 15:45

[R8-01] 「コーサイト相転移石英のEBSD検出法」の確立に向けて―西南日本四国三波川変成帯権現地域の組み込み―

「発表賞エントリー」

*箕輪 桃子[1]、永冶 方敬[1]、伊藤 泰輔[2]、ウォリス サイモン[2] (1. 東京学芸大学、2. 東京大学)

15:45 ~ 16:00

[R8-02] Pressure-Temperature-Time Conditions of The Basement Rocks in The Banggai-Sula Microcontinent, Indonesia

「発表賞エントリー」

*Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari[1], Nobuhiko Nakano[1], Tatsuro Adachi[1], Nugroho Imam Setiawan[2] (1. Kyushu Univ., 2. Gadjah Mada Univ.)

16:00 ~ 16:15

[R8-03] 嶺岡帯角閃岩再訪

*市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、伊藤 久敏[2]、田村 明弘[3]、森下 知晃[3] (1. 千葉大学、2. 電力中央研究所、3. 金沢大学)

16:15 ~ 16:30

[R8-04] チェコ共和国・ザクロ石-黒雲母珪長質グラニュライト中のザクロ石の組成不均質

*中村 大輔[1]、藤村 祐花[1]、小寺 勇気[1] (1. 岡山大学)

16:30 ~ 16:45

[R8-05] 岐阜県春日地域の帯状スカルン脈の形成と変質：U-Th酸化物のEPMA年代

*遠藤 俊祐[1] (1. 島根大学)

16:45 ~ 17:00

[R8-06] 大陸プレート境界断層での歪の解放に伴う地質構造と岩石組織の観察

「発表賞エントリー」

*吉朝 開[1]、安東 淳一[1,2]、Das Kaushik[1,2]、Sarkar Dyuti Prakash[3] (1. 広島大学、2. 広大 HiPeR、3. 海洋研究開発機構)

17:00 ~ 17:15

[R8-07] 炭質物ラマン温度計における新しい試料形態の比較検討

「発表賞エントリー」

*荻野 竣右[1]、纐纈 佑衣[1]、高橋 聡[1] (1. 名古屋大・院環境)

17:15 ~ 17:30

[R8-08] 関東山地三波川帯の泥質変成岩における指標鉱物出現の温度圧力条件：炭質物ラマン温度計からの推定

*纐纈 佑衣[1]、清水 以知子[2] (1. 名古屋大学・院環境、2. 京都大学・院理)

17:30 ~ 17:45

[R8-09] 愛知県新城地域の中央構造線沿いに分布する領家帯マイロナイトの構造岩石学的特徴

*丹羽 美春[1,2]、道林 克禎[1,3]、谷 健一郎[4]、西村 拓真[5] (1. 名古屋大・環境、2. 豊橋市自然史博物館、3. 海洋研究開発機構、4. 国立科学博物館、5. 鳳来寺山自然科学博物館)

17:45 ~ 18:00

[R8-10] 鉱物組合せと白雲母K-Ar年代に基づく神居古潭帯幌加内地域の地帯区分の再提案

*平島 崇男[1]、苗村 康輔[2]、吉田 健太[3] (1. 京都大学、2. 岩手大学・教育、3. 海洋研究開発機構)

口頭講演 | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

15:30 ~ 18:00 | ES025 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

座長:片山 郁夫(広島大学)、道林 克禎(名古屋大学)

15:30 ~ 15:50

[S3-01] 放射光X線を用いた高温高圧下での高速時分割その場応力―歪測定

「招待講演」

*辻野 典秀[1] (1. 高輝度光科学研究センター)

15:50 ~ 16:05

[S3-02] ε-FeOOHの変形誘起選択配向

*西原 遊[1]、森 ゆい[1]、呉 文天[1]、辻野 典秀[2] (1. 愛媛大・GRC、2. 高輝度光科学研究センター)

16:05 ~ 16:20

[S3-03] 準安定オリビンの流動強度と遷移層スラブのレオロジー

「発表賞エントリー」

*本田 陸人[1]、久保 友明[1]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、柿澤 翔[2]、柴崎 裕樹[3]、西原 遊[4] (1. 九州大学、2. JASRI、3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 愛媛大・GRC)

16:20 ~ 16:40

[S3-04] 新しい低温強制振動実験装置による氷の非弾性の高精度・広帯域測定

「招待講演」

*山内 初希[1]、Christine McCarthy[1]、Benjamin Holtzman[1]、David Goldsby[2]、Travis Hager[2] (1. コロンビア大・LDEO、2. ペンシルベニア大)

16:40 ~ 16:55

[S3-05] 共連続構造をもつ岩石のクリープと粒成長の関係

「発表賞エントリー」

*姜 勝皓[1]、平賀 岳彦[1] (1. 東京大学)

16:55 ~ 17:10

[S3-06] ハンレイ岩ウルトラマイロナイトの斜長石微細構造と四重点解析

*夏目 樹[1]、道林 克禎[2,3]、伊神 洋平[4] (1. 神奈川県立生命の星・地球博物館、2. 名古屋大学、3. JAMSTEC、4. 京都大学)

17:10 ~ 17:25

[S3-07] オマーンオフィオライト最上部マントル連続構造の復元

*奥脇 健生[1]、夏目 樹[2]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境、2. 神奈川県立　生命の星・地球博物館)

17:25 ~ 17:40

[S3-08] 幌満かんらん岩体における変形と岩石メルト相互作用：MHL系列とBDH系列の構造岩石学的研究

「発表賞エントリー」

*日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、栗原 圭佑[1]、谷内 元[2]、川本 竜彦[1] (1. 静岡大、2. 産総研)

17:40 ~ 17:55

[S3-09] 片理の発達した蛇紋岩とかんらん岩の地震波速度と電気比抵抗の多成分測定

「発表賞エントリー」

*伊藤 禎宏[1]、片山 郁夫[1]、道林 克禎[2]、松山 和樹[2] (1. 広島大学、2. 名古屋大学)

ポスター | S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-01] HIMU海洋島玄武岩の酸化還元状態： 急冷ガラスとメルト包有物のμ-XANES分析による知見

*萩原 雄貴[1]、石橋 秀巳[2]、羽生 毅[1] (1. 海洋研究開発機構、2. 静岡大学)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-02] 火成岩の菫青石を用いた結晶マッシュ内の流体組成と圧力の推定の試み

*吉村 俊平[1] (1. 北大・地惑)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-03] 海底コア試料中のメルト包有物の分析に基づく伊豆大島火山のマグマの組成進化

*浜田 盛久[1]、田中 えりか[2]、羽生 毅[1]、清水 健二[3]、牛久保 孝行[2]、常 青[1]、田村 芳彦[1] (1. JAMSTEC海域地震火山部門、2. 高知大学海洋コア国際研究所、3. JAMSTEC高知コア研究所)

ポスター | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00

[S3-P-01] 回転式DACによる含水スティショバイトの変形実験の予察的結果

*東 真太郎[1]、岡崎 啓史[2]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、Gréaux Steeve[4]、奥田 善之[1,5]、夏井 文凛[1]、Jayawickrama Eranga[2]、太田 健二[1] (1. 東工大、2. 広島大、3. 高輝度光科学研究センター、4. 愛媛大、5. ハワイ大)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-02] Mg_2SiO_4リングウッダイトの加水軟化

「発表賞エントリー」

*後藤 佑太[1]、久保 友明[1]、本田 陸人[1]、柴崎 裕樹[2] (1. 九州大学、2. KEK-PF)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-03] 部分的に蛇紋化したスラブカンラン岩の深発地震発生領域での脱水プロセスの理解に向けて

*久保 友明[1]、江崎 武蔵[1]、藤原 伸匡[1]、本田 陸人[1]、後藤 佑太[1]、辻野 典秀[2] (1. 九州大学、2. JASRI)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-04] マイクロビッカース試験によるかんらん石多結晶体の粘性異方性

「発表賞エントリー」

*藤井 七夢[1]、田阪 美樹[1] (1. 静岡大学)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-05] 主成分分析を用いた結晶ファブリック解析：幌満カンラン岩の例

「発表賞エントリー」

*松山 和樹[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境学)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-06] 渡島大島火山のピクライト玄武岩のかんらん石斑晶内部のマントル流体/メルトの痕跡

*塚脇 遼[1]、江島 輝美[2]、二ノ宮 淳[3]、荒井 章司[4] (1. 信大・院理、2. 信大・理、3. 住鉱資源開発、4. 金沢大)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-07] 四国海盆土佐メガムリオンの超苦鉄質岩の構造岩石学的研究

「発表賞エントリー」

*井上 創[1]、道林 克禎[1,2]、針金 由美子[3]、小原 泰彦[1,2,4] (1. 名古屋大・院環境、2. 海洋研究開発機構、3. 産総研・地質情報研究部門、4. 海上保安庁・海洋情報部)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-08] 飛騨変成帯に産出する花崗岩マイロナイトの変形微細構造

「発表賞エントリー」

*堀江 正陽[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境)

ポスター | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

12:30 ~ 14:00

[R1-P-01] SEM-EDSによる輝沸石の化学定量分析 ー ビームダメージに弱い沸石の化学組成をどう正確に見積もるか？

「発表賞エントリー」

*石原 篤[1]、大藤 弘明[1] (1. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-02] EPMAによるゼノタイムの定量分析

*坂野 靖行[1] (1. 産総研)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-03] 電子線後方散乱回折法とエネルギー分散型X線分光法の同時分析による斜長石の変形と組成変化履歴の解明

「発表賞エントリー」

*二村 康平[1]、道林 克禎[1,2] (1. 名古屋大・院環境、2. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-04] イラク北東部ヤシン・テペ遺跡出土の金属製錬スラグの鉱物学的特徴

*黒澤 正紀[1]、西山 伸一[2] (1. 筑波大・生命環境、2. 中部大・人間力創成)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-05] 京都府和束町石寺地域の石英脈に多量に含まれる石墨の起源について

*西尾 真輝[1]、三津川 到[1]、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1] (1. 京都大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-06] 熊本県美里町払川から見出されたゲルマニウムを含む白金族鉱物の新鉱物・三千年鉱

*田中 崇裕[1]、浜根 大輔[2]、新町 正 (1. 日鉄鉱業㈱、2. 東大・物性研)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-07] ローズクォーツ中の繊維状インクルージョンについて

*白勢 洋平[1]、札元 颯人[1]、井上 紗綾子[2] (1. 愛媛大学・理、2. 愛媛大学・GRC)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-08] 愛媛県魚島の片麻岩中から産するローズクォーツについて

*白勢 洋平[1]、坂井 翔真[1] (1. 愛媛大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-09] 兵庫県琢美鉱山から産する二次砒酸塩鉱物

*白勢 洋平[1]、上世 莉可子[1]、西田 勝一、藤原 由輝 (1. 愛媛大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-10] 兵庫県新井鉱山産ラウテンタール石およびローウォルフ石の鉱物学的性質

*大西 政之、下林 典正[1]、浜根 大輔[2]、篠田 圭司[3]、久野 武 (1. 京大・院理、2. 東大・物性研、3. 大阪公大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-11] 糸魚川市橋立の曹長岩中のSrに富む燐灰石の再検討

*上原 誠一郎[1]、門馬 綱一[2]、大西 政之、大角 駿介、大木 良弥、岡 紘希[3] (1. 九州大・博物館、2. 国立科博、3. 応用地質（株）)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-12] 宮崎県西臼杵郡日之影町小河内産の水酸コンドロ石について

*岡田 敏朗[1]、上原 誠一郎[2]、行則 功[3]、白勢 洋平[4] (1. 福岡市立香椎第2中学校、2. 九大・総合博物館、3. 福岡石の会、4. 愛媛大・理工)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-13] 鹿児島県大和鉱山産arsenmedaite

*大角 駿介、浜根 大輔[1]、岡 紘希[2]、田村 雅史[3]、高木 皓介[4] (1. 東大・物性研、2. 応用地質（株）、3. 三重大・工・技術部、4. 三重大・半導体デバイス研究室)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-14] 熊本県阿蘇外輪山俵山（護王峠）の“普通角閃石”

*井上 晴貴[1]、上原 誠一郎[2] (1. エネコム株式会社、2. 九大・博物館)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-15] 愛媛県梶島に産出する斑れい岩類に伴う電気石と角閃石の化学組成

「発表賞エントリー」

*太田 一樹[1]、下岡 和也[2]、斉藤 哲[1]、白勢 洋平[1] (1. 愛媛大・院理工、2. 関西学院大)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-16] 福岡県長垂のペグマタイト岩脈に伴う粘土の構成鉱物

*武田 侑也[1]、上原 誠一郎[2]、桑原 義博[3] (1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-17] 長野県大鹿村のカンラン岩中の蛇紋石脈の微細構造

*武田 侑也[1]、桑原 義博[3]、上原 誠一郎[2] (1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文)

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3-P-01] 沈み込み帯の高温高圧下におけるアルカンの化学反応に対する無機鉱物の影響

*篠崎 彩子[1]、滝本 樹奈[1]、永井 隆哉[1]、三村 耕一[2] (1. 北海道大学・院理、2. 名古屋大学・環境)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-02] Mn_2SiO_4テフロアイトの示差走査熱量測定

*浅見 祐汰[1]、大平 格[2]、糀谷 浩[2] (1. 学習院大・自然研、2. 学習院大・理)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-03] 含水ブリッジマナイトにおける偏光赤外スペクトルと水素位置の第一原理計算

*稲垣 喜久代[1]、土屋 旬[1]、Zhang Yanyao[3]、Lin Jung-Fu[2]、唐戸 俊一郎[4]、Kung Jennifer[5]、Li ChingChien[5] (1. 愛媛大・GRC、2. テキサス大学、3. スタンフォード大学、4. イェール大学、5. 国立成功大学)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-04] 高速X線回折測定による高圧力下シリカ相安定性の解明

*新名 良介[1]、河口 沙織[2]、石井 貴之[3]、佐久間 博[4]、小川 彪聖[1]、小林 建太[1]、米谷 珠萌[1] (1. 明治大・理工、2. JASRI、3. 岡山大・惑星物質研、4. NIMS)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-05] 下部マントル圧力下大歪変形実験より検討するFerropericlase多結晶体の結晶選択配向特性

「発表賞エントリー」

*夏井 文凜[1]、東 真太郎[1]、岡﨑 啓史[2,5]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、河口 沙織[3]、野村 龍一[4]、太田 健二[1] (1. 東工大、2. 広大、3. JASRI、4. 京大、5. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-06] 中性子イメージングを用いた高温高圧下における水素封止材の検討

*柿澤 翔[1]、鍵 裕之[2]、高野 将大[2]、佐野 亜沙美[3]、服部 高典[3]、阿部 淳[4]、舟越 賢一[4] (1. JASRI、2. 東大・院理、3. JAEA J-PARCセンター、4. CROSS 中性子科学センター)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-07] 高温高圧条件下における硫化鉄と水素の反応の再検討

「発表賞エントリー」

*高野 将大[1]、鍵 裕之[1]、森 悠一郎[1]、青木 勝敏[1]、柿澤 翔[2]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、佐野 亜沙美[3] (1. 東大･院理、2. JASRI、3. 日本原子力研究開発機構 J-PARC)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-08] 静的圧縮手段による極高圧発生技術開発

*境 毅[1]、中本 有紀[2]、中村 悟[1]、岩津 壮太郎[2]、福田 脩斗[2]、加藤 悠暉[2]、清水 克哉[2]、門林 宏和[3]、河口 沙織[3] (1. 愛媛大・GRC、2. 阪大基極セ、3. JASRI)

2024年9月13日(金)

口頭講演 | T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

9:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

9:00 ~ 9:25

[T1-01] 脱炭素化社会と必須金属資源

「招待講演」

*細井 義孝[1] (1. JICA)

9:25 ~ 9:50

[T1-02] 鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

「招待講演」

*米村 和紘[1] (1. （独）エネルギー・金属鉱物資源機構)

9:50 ~ 10:15

[T1-03] Critical metal potentiality of Mongolia

「招待講演」

*Jargalan Sereenen[1]、Arvinzun M.[2] (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:15 ~ 10:30

[2Lecture-101-06-4add] 休憩

10:30 ~ 10:55

[T1-04] Geology, sedimentation environment of the
Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

「招待講演」

*Ochirbat Magsarjav[2]、Jargalan Sereenen[1] (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:55 ~ 11:20

[T1-05] Insights into the mineralogical characteristics of Li-enriched metasomatic albitite from the Iwagi islet, SW Japan

「招待講演」

*永嶌 真理子[1]、今岡 照喜[1] (1. 山口大・院創成)

11:20 ~ 11:45

[T1-06] イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

「招待講演」

*渡辺 寧[1] (1. 秋大・国資)

11:45 ~ 12:00

[2Lecture-101-06-8add] 休憩

口頭講演 | S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

9:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

9:00 ~ 9:05

[2Lecture-201-10-1add] コンビーナ挨拶

9:05 ~ 9:35

[S2-01] 背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

「招待講演」

*山本 順司[1] (1. 九州大・院理)

9:35 ~ 9:50

[S2-02] マントルウェッジ起源超苦鉄質岩中に形成される直方輝石仮像の地球化学的多様性とその意義

「発表賞エントリー」

*和仁 拓望[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大学、2. 金沢大学)

9:50 ~ 10:05

[S2-03] 金崎蛇紋岩岩体(関東山地)にみられる蛇灰岩の形成条件とその意義

*大柳 良介[1,2]、沢田 輝[3,2]、Chang Qing[2]、Satish-Kumar Madhusoodhan [4] (1. 国士舘大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大)

10:05 ~ 10:20

[S2-04] CO_2 mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses

*Otgonbayar DANDAR[1], Atsushi Okamoto [1], Masaoki Uno[1], Miku Takeya[2] (1. Tohoku University, 2. INPEX)

10:20 ~ 10:30

[2Lecture-201-10-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

[S2-05] 愛媛県西部、頃時鼻超苦鉄質岩体の塊状蛇紋岩と片状蛇紋岩の産状

「発表賞エントリー」

*城口 結衣[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

10:45 ~ 11:00

[S2-06] "Element transport and magnetite decomposition during alteration of the gabbroic vein in serpentinite body from the Bayankhongor ophiolite, Mongolia"

「発表賞エントリー」

*Nomin Tumurkhuu[1], Otgonbayar Dandar[1], Masaoki Uno[1], Manzshir Bayarbold[1], Atsushi Okamoto[1] (1. Tohoku University)

11:00 ~ 11:15

[S2-07] 葛根田花崗岩の坑井試料を用いた熱源花崗岩および超臨界地熱貯留層内の長石の溶解再沈殿―再平衡プロセス

「発表賞エントリー」

*星田 昌慶[1]、宇野 正起[1]、松野 哲士[1]、ヌルディアナ アスティン[1]、土屋 範芳[2,1] (1. 東北大・院環境科学、2. 八戸高専)

11:15 ~ 11:30

[S2-08] “cleavable olivine”の成因

*安東 淳一[1,2]、富岡 尚敬[3,2]、前川 寛和[4] (1. 広島大学・先進理工、2. 広島大学・HiPeR、3. JAMSTEC・高知コア研、4. 大阪公立大学)

11:30 ~ 11:45

[S2-09] 海底熱水系の硫化物チムニー発達プロセスおよび発電特性解明に向けた実験的研究

「発表賞エントリー」

*戸田 賢太朗[1]、岡本 敦[1]、オトゴンバヤル ダンダル[1]、高橋 美咲[1]、佐藤 義倫[1] (1. 東北大・院環境科学)

11:45 ~ 12:00
[S2-10] カンラン岩の炭酸塩化：流体包有物分析と水熱合成実験によるアプローチ

*川本 竜彦[1] (1. 静岡大学理学部地球科学科)

口頭講演 | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

9:00 ~ 10:00 | ES025 東山キャンパス
S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

座長:田阪 美樹(静岡大学)

9:00 ~ 9:15
[S3-10] マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

*道林 克禎[1,2]、奥脇 健生[1]、夏目 樹[3] (1. 名古屋大学・院環境学、2. 海洋研究開発機構、3. 神奈川県立生命の星・地球博物館)

9:15 ~ 9:30
[S3-11] 稍深発地震の温度圧力条件下におけるカンラン石の一軸圧縮試験：特にアコースティック・エミッション震源及び断層の空間分布について

*大内 智博[1]、星野 真人[2]、上杉 健太郎[2]、奥村 聡[3]、肥後 祐司[2]、辻野 典秀[2]、柿澤 翔[2] (1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. 東北大・院理)

9:30 ~ 9:45
[S3-12] 岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

*福田 惇一[1] (1. 大阪公立大学・理・地球)

9:45 ~ 10:00
[S3-13] アウターライズ断層での海水の浸透によるマントル炭酸塩化の可能性

*片山 郁夫[1]、岡崎 啓史[1]、岡本 敦[2] (1. 広島大学、2. 東北大学)

口頭講演 | R4：地球表層・環境・生命

10:15 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

座長:佐久間 博(物質・材料研究機構)、甕 聡子(山形大学)、川野 潤(北海道大学)

10:15 ~ 10:35

[R4-01] 球状コンクリーションの理解と応用-自然に学ぶ恒久的シーリング新素材の開発-

「招待講演」

*吉田 英一[1] (1. 名古屋大学)

10:35 ~ 10:50

[R4-02] 広島花崗岩の風化による色変化過程

*横山 正[1]、院去 由佳、海堀 正博[1] (1. 広島大学)

10:50 ~ 11:05

[R4-03] 陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

*松影 香子[1]、井出 桃花[2]、倉田 雅也[2]、西原 遊[3] (1. 帝科大・自然環境/総合教育センター、2. 帝科大・アニマルサイエンス、3. 愛媛大・GRC)

11:05 ~ 11:20

[R4-04] 生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

*奥村 大河[1]、鈴木 道生[2]、Perez-Huerta Alberto[3]、Samajpati Eshita[3]、小暮 敏博[1] (1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.)

11:20 ~ 11:40

[R4-05] バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

「招待講演」

*鈴木 道生[1] (1. 東大・院農)

11:40 ~ 11:55

[R4-06] n-ブチルアミンの添加による非晶質炭酸カルシウム(ACC)からのアラゴナイト生成

*鍵 裕之[1]、村岡 賢佑[1] (1. 東京大学)

ポスター | T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

12:30 ~ 14:00

[T1-P-01] Syenitic veining at the northern Eastern Ghats Belt, India: Formation mechanism, fluid-rock interaction and a review of its economic mineral potential

*Kaushik DAS[1,5], Proloy Ganguly[2], Aparupa Banerjee[3], Sankar Bose[4,5] (1. Hiroshima University, 2. Kazi Nazrul University, 3. Shahid Matangini Hazra Government General Degree College, 4. Presidency University, 5. HiPeR, Hiroshima University)

12:30 ~ 14:00

[T1-P-02] Amphibole-bearing granitic rocks in the Ereendavaa block, NE Mongolia: Insights into multi-stage magmatic sources and crystallization conditions

*Munkhdelger Bold[1], Tatsuki Tsujimori[1], Yasuhito Osanai[2], Nobuhiko Nakano[2], Tatsuro Adachi[2], Otgonbayar Dandar[1], Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari [2] (1. Tohoku Univ., 2. Kyushu Univ)

ポスター | S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00

[S2-P-01] 下部地殻へのマグマ貫入で発生するせん断開口破壊の規模と地震のマグニチュード：高度変成岩中の岩脈群と深部低周波地震の規模比較

「発表賞エントリー」

*奈良 拓実[1]、宇野 正起[1]、哲生 河上[2]、東野 文子[2]、足立 達郎[3]、土屋 範芳[1,4] (1. 東北大学・院環境、2. 京大・院理、3. 九大・院比較文化、4. 八戸高専)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-02] 愛媛県四国中央市浦山川に産する蛇紋岩の炭酸塩化とリスウェナイトの形成過程

「発表賞エントリー」

*高垣 光[1]、白勢 洋平[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-03] 愛媛県東赤石かんらん岩体保土野における蛇紋岩化過程の組織変化

「発表賞エントリー」

*和田 姫名乃[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-04] 愛媛県伯方島に産するエピ閃長岩類に記録された岩石-水相互作用

「発表賞エントリー」

*福井 堂子[1]、下岡 和也[2]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[1] (1. 愛媛大学、2. 関西学院大学、3. 新潟大学)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-05] 蛇紋岩の炭酸化における反応誘起破壊メカニズム：水熱反応実験と地化学モデリングによる検討

「発表賞エントリー」

*五十嵐 大輝[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1] (1. 東北大学)

ポスター | R4：地球表層・環境・生命

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

12:30 ~ 14:00

[R4-P-01] プラスチック等の強化材に向けたアラゴナイトの設計と合成

*佐久間 博[1]、末原 茂[1]、加門 真純[1]、田村 堅志[1] (1. NIMS)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-03] 200℃でのドロマイト化反応中に多糖類がドロマイトのカチオンオーダーに与える抑制効果：予察的実験

小西 博巳[1]、*Chen Yao[1] (1. 新潟大学・院自然)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-04] 非水溶媒中での炭酸塩鉱物形成プロセス：陽イオンの水和状態の違いによる影響の検討

岩根 直[1]、*川野 潤[1]、鍵 裕之[2]、篠崎 彩子[1]、永井 隆哉[1] (1. 北大・院理、2. 東大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-05] 苦鉄質・超苦鉄質岩の溶解と蒸発を用いたCO_2鉱物固定の検証：効率的な風化促進法の確立に向けた取り組み

*西山 直毅[1]、徂徠 正夫[1]、福士 圭介[2]、西木 悠人[1] (1. 産総研、2. 金沢大・環日)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-06] 宮城県大崎市吹上温泉の現世ストロマトライト中のフランボイダルパイライト

「発表賞エントリー」

*鎌田 樹也[1]、大藤 弘明[1] (1. 東北大・理)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-07] 高分解能走査透過電子顕微鏡法によるアモサイト石綿断面微細組織観察

*三浦 颯人[1]、大西 市朗[1] (1. 日本電子（株）)

ポスター | R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-01] 北海道北西部の砂白金鉱床と新鉱物・蝦夷地鉱について

*浜根 大輔[1]、斎藤 勝幸 (1. 東京大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-02] 鉱物動向：鉱物資源，ヘリテージストーン，SDGs

*高橋 裕平[1] (1. 名経大)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-03] 落合ー北房超マフィック岩体のレールゾライトに産する“斜消光”するように見えるかんらん石の成因

*江島 輝美[1]、高嶋 千洋[2]、荒井 章司[3] (1. 信州大学・理学部、2. 株）ダイヤ精機製作所、3. 金沢大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-04] ナトリウムイオンが forsterite の炭酸塩化反応に与える影響

*長谷川 拓紀[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、山口 航佑[1] (1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-05] 南アフリカ共和国Bushveld 複合岩体西縁におけるPothole ReefとPseudo Merensky Reefの鉱物学的特徴

「発表賞エントリー」

*梅里 彩夢[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院国際資源)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-06] 秋吉帯石灰岩基盤のアルカリ火山岩中に含まれる高Ti黒雲母岩片とその意義

*木村 光佑[1]、Das Kaushik[2]、早坂 康隆[3] (1. 大公大・院理、2. 広島大・院先進理工、3. 御所浦恐竜の島博物館)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-07] カンラン石中に存在する微小包有物を用いた幌満カンラン岩体SDWの起源推定

「発表賞エントリー」

*明田 将治[1]、三宅 亮[1]、秋澤 紀克[2]、松本 恵[3]、伊神 洋平[1]、三津川 到[1] (1. 京都大学、2. 東京大学、3. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-08] 愛媛県新居浜市別子地域芋野カンラン岩体にみられるFe-Ni-S-As系鉱物について

「発表賞エントリー」

*国吉 真斗[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-09] 広島県神武‐三原鉱床におけるアルカリ交代作用に伴う蛍石鉱化作用

「発表賞エントリー」

*砂田 雅裕[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大学・院国際資源)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-10] 熊本市東方木山地域に産する超苦鉄質岩類の岩石学

西尾 成道[1]、*石丸 聡子[2] (1. 熊本大学・理、2. 熊本大学・院自然)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-11] FLUID INCLUSION STUDIES IN QUARTZ VEINS WITH TIN MINERALIZATION IN THE KIBARAN INTRUSIVE ROCKS IN KALEHE (SOUTH KIVU, DR CONGO)

「発表賞エントリー」

*MUSA Moise-Kam's SAIDI[1], MADDHUSOODHAN Satish Kumar[1] (1. Niigata Univ.)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-12] 北海道日高変成帯、幌満かんらん岩体中の縞状ダナイト・ハルツバージャイトが記録する枯渇したかんらん岩とメルトの反応

「発表賞エントリー」

*栗原 圭佑[1]、川本 竜彦[1]、日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、谷内 元[2]、栗谷 豪[3]、松本 亜希子[3] (1. 静岡大、2. 産総研、3. 北海道大)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-13] 鉱物飛跡検出器を用いた未知宇宙線事象探索のための研究開発

*井戸 悠生[1]、中 竜大[2]、二村 翔大[3]、織 瞳磨[4]、加藤 丈典[5] (1. 名大・環境、2. 東邦・理、3. 名大・理、4. 鈴鹿高専・専攻科、5. 名大・ISEE)

ポスター | R8：変成岩とテクトニクス

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R8：変成岩とテクトニクス

12:30 ~ 14:00

[R8-P-01] Mineralogical characterization of serpentinite varieties in Sangun-Renge Belt exposed at Sasaguri, Fukuoka Prefecture, and their geological implications

「発表賞エントリー」

*Swarnaa ANNADURAI MUNUSAMY[1], Jun-ichi ANDO[1,2], Yuki IWASAKI[3], Kaushik DAS[1,2], Dyuti Prakash SARKAR[4], Seiichiro UEHARA[5] (1. Hiroshima Univ., 2. HiPeR, Hiroshima, 3. NIPPON STEEL CORP., 4. JAMSTEC, 5. The Kyushu Univ. Museum)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-02] 愛知県新城市南部に分布する三波川帯の変成温度構造

「発表賞エントリー」

*松﨑 茜[1]、纐纈 佑衣[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-03] 鳥取県大山に産する片麻状花崗岩ゼノリスの起源とパイロ変成作用

「発表賞エントリー」

*高橋 瑞季[1]、遠藤 俊祐[1] (1. 島根大学)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-04] 東ネパール・ヒマラヤの泥質変成岩中に産するモナズ石の記載とモナズ石のTh-Pb年代測定法の開発

「発表賞エントリー」

*工藤 駿平[1]、河上 哲生[1]、仁木 創太[2]、中嶋 徹[3]、平田 岳史[4]、今山 武志[5] (1. 京大・院理、2. 名大・宇宙地球環境研究所、3. 日本原子力研究開発機構、4. 東大・院理、5. 岡山理大・フロンティア理工学研究所)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-05] 長野県伊那地域を例とした，三波川帯低変成度域に分布する超苦鉄質岩類の岩石学的記載

「発表賞エントリー」

*延原 香穂[1]、森 宏[1]、永冶 方敬[2] (1. 信州大、2. 東京学芸大)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-06] 紀伊半島中央部，三波川帯–秩父帯境界域の砕屑性ジルコンU–Pb年代測定と炭質物ラマン分光分析

*森 宏[1]、碓井 虎次郎[1,2]、常盤 哲也[1]、小澤 和浩[3] (1. 信州大学、2. 日本工営株式会社、3. 精密林業計測株式会社)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-07] 北海道神居古潭変成帯・幌加内地域の角閃岩におけるwakefieldite-(Y)の発見とその意義

*加藤 太朗[1]、苗村 康輔[1]、竹下 徹[2] (1. 岩手大学、2. パシフィックコンサルタンツ株式会社)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-08] 栃木県西部足尾山地に産する珪線石―クリソベリル含有片麻岩の熱履歴と原岩砕屑物供給源

*北野 一平[1] (1. 北大・総合博)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-09] 舞鶴帯北帯に産する変成岩の岩石学的特徴と地質年代学

*室井 颯太[1]、Das Kaushik[1]、川口 健太[1]、早坂 康隆[2] (1. 広島大学、2. 天草市立御所浦恐竜の島博物館)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-10] 沈み込む有機炭素挙動の解明：四国中央部三波川帯の泥質片岩中炭質物約200試料の顕微ラマン分光分析と炭素同位体地球化学

*原田 浩伸[1]、辻森 樹[1]、石田 章純[1]、掛川 武[1]、板谷 徹丸[2] (1. 東北大、2. 地球年代学ネットワーク)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-11] イタリア・アペニン山脈のオフィカーボネイトの流体包有物

金子 広幸[1]、*川本 竜彦[1]、メネギーニ フランチェスカ[2]、大澤 陽介[1] (1. 静岡大学理学部地球科学科、2. ピサ大学地球科学教室)

一般社団法人日本鉱物科学会　定時総会・授賞式

14:00 ~ 15:15 | ESホール 東山キャンパス

一般社団法人日本鉱物科学会　定時総会・授賞式

14:00 ~ 15:15

[2Lecture-1-1400-1add] 定時総会・授賞式

受賞者講演

15:30 ~ 17:00 | ESホール 東山キャンパス

受賞者講演

2024年9月14日(土)

口頭講演 | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

9:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

座長:川本 竜彦(静岡大学)、湯口 貴史(熊本大学)、亀井 淳志(島根大学)

9:00 ~ 9:15

[R6-01] マントルウェッジを上昇するスラブ由来流体の化学組成変化と島弧初生マグマの起源：水流体とメルト間の微量成分元素分配からの制約

*谷内 元[1]、川本 竜彦[2]、中谷 貴之[1]、石塚 治[1]、鈴木 敏弘[1]、東宮 昭彦[1] (1. 産総研・地調、2. 静岡大・理)

9:15 ~ 9:30

[R6-02] 試料作りから切り開く新たな地殻・マントル物性研究

「招待講演」

*小泉 早苗[1] (1. 東京大学)

9:30 ~ 9:45

[R6-03] The use of contact metamorphism to identify plutons associated with major contemporaneous eruption and estimate magma flux

*Simon R WALLIS[1], Ken Yamaoka[2], Akira Miyake[3], Catherine Annen[4] (1. The University of Tokyo, 2. AIST, 3. Aichi University of Education, 4. Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences)

9:45 ~ 10:00

[R6-04] 北上山地，久喜花崗岩体の岩石学的研究と年代学的研究：大陸地殻浅部におけるマグマの貫入・定置プロセス

*鈴木 哲士[1]、湯口 貴史[2]、石黒 啓斗[1]、遠藤 京香[1]、加藤 あすか[1]、横山 公祐[1]、小北 康弘[3]、横山 立憲[3]、坂田 周平[4]、大野 剛[5]、笹尾 英嗣[3] (1. 山形大学、2. 熊本大学、3. 原子力機構、4. 東大地震研、5. 学習院大学)

10:00 ~ 10:15

[R6-05] 山口県西部・鳳翩山地域の花崗岩類のジルコンU-Pb年代

*堤 之恭[1]、谷 健一郎[1] (1. 国立科学博物館)

10:15 ~ 10:30

[R6-06] 山陰帯島根県東部に分布する花崗岩類の形成温度圧力条件見積もり

*中橋 甲斐[1]、齊藤 哲[1] (1. 愛媛大学大学院理工学研究科地球科学分野)

10:30 ~ 10:45

[R6-07] 白亜紀北部九州バソリスのマグマ形成過程–Cumulateからのアプローチ–

*江島 圭祐[1]、大和田 正明[1]、亀井 淳志[2] (1. 山口大学創成科学、2. 島根大学)

10:45 ~ 11:00

[R6-08] 西南日本における白亜紀フレアアップの発生要因

*山岡 健[1]、諸星 暁之[2]、佐藤 大介[1]、三國 和音[1] (1. 産総研、2. 東大・院理)

11:00 ~ 11:15

[3Lecture-101-11-9add] 休憩

11:15 ~ 11:30

[R6-09] 西南日本弧東九州姫島火山群第四紀流紋岩中に含まれるザクロ石の成因

*平山 剛大[1,2]、柴田 知之[2]、芳川 雅子[2] (1. 東京大学・理学研究科、2. 広島大・先進理工)

11:30 ~ 11:45

[R6-10] 九州地方南部に分布する前期更新世安山岩類のK–Ar年代と化学組成

*山田 来樹[1]、丹羽 正和[1]、梅田 浩司[2]、八木 公史[3]、藤原 泰誠[3]、岡田 郁生[3]、木田 福香[1] (1. 日本原子力研究開発機構、2. 弘前大学、3. 蒜山地質年代学研究所)

11:45 ~ 12:00

[R6-11] 斜長石のSr拡散を用いた深成岩体の熱史究明：マグマフラックス推定と大規模な噴火を伴って形成した深成岩体の特定

「発表賞エントリー」

*諸星 暁之[1]、ウォリス サイモン[1] (1. 東大・院理)

口頭講演 | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

9:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

座長:則竹 史哉、永嶌 真理子、徳田 誠(熊本大学)

9:00 ~ 9:20

[R2-01] 配位水の脱水によって生じる含水鉱物の物性・構造の変化

「招待講演」

*山根 崚[1] (1. 東北大学)

9:20 ~ 9:35

[R2-02] Priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5 \cdot H_2O$の熱分解過程における相変化

*興野 純[1]、山口 航佑[1]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1] (1. 筑波大学・生命環境系)

9:35 ~ 9:50

[R2-03] Alを含むorthoenstatiteにおける水の溶解機構：NMR測定と第一原理計算による解明

*薛 献宇[1]、神崎 正美[1]、Yin Rongzhang [2] (1. 岡山大学、2. 北京大学)

9:50 ~ 10:05

[R2-04] フッ素アパタイト中の水素拡散における研磨状態の影響評価と拡散メカニズムの推定

「発表賞エントリー」

*吉元 史[1]、坂口 勲[2]、伊藤 正一[1] (1. 京都大学、2. 物質・材料研究機構)

10:05 ~ 10:20

[R2-05] 低圧H_2-H_2O雰囲気下におけるフォルステライト蒸発の速度論

「発表賞エントリー」

*稲田 栞里[1]、橘 省吾[1] (1. 東京大学)

10:20 ~ 10:30

[3Lecture-201-11-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

[R2-06] 下部四万十層群佐伯亜層砂岩中に産するフランボイダルゲーサイトの成因

*大藤 弘明[1]、小西 星良[1]、山本 啓司[2] (1. 東北大・院理、2. 鹿児島大・理)

10:45 ~ 11:00

[R2-07] ウルトラナノライトの結晶化前駆現象：火山ガラス中に見られる液相不混和

*無盡 真弓[1]、松本 恵子[2]、三宅 亮[3]、伊神 洋平[3]、中村 美千彦[1]、横尾 亮彦[3]、吉本 充宏[4] (1. 東北大学、2. 産業技術総合研究所、3. 京都大学、4. 山梨県富士山科学研究所)

11:00 ~ 11:15

[R2-08] 熱量測定による$MgAl_2O_4$スピネルの陽イオン無秩序エンタルピーの制約

*糀谷 浩[1]、松木 龍志[1]、西村 祐太[1]、大平 格[1] (1. 学習院大学)

11:15 ~ 11:30

[R2-09] ペロブスカイト型$SrTiO_3$へのNa^+とK^+の固溶について

北井 亮吾[2]、*永井 隆哉[1]、川野 潤[1]、篠崎 彩子[1] (1. 北大・院理、2. 北大・理)

11:30 ~ 11:45

[R2-10] ペロブスカイト構造を有する(Li,La)TiO_3のLi電導度測定値とSIMS測定中のLi移動の整合性に関する研究

*坂口 勲[1]、大西 剛[1] (1. 物質・材料研究機構)

11:45 ~ 12:00

[R2-11] Fe-Ti-O 相の高圧構造転移機構

*山中 高光[1,2]、服部 高典[3]、毛 河光[1] (1. 中国高圧科学技術研究中心、2. 大阪大学大学院理学研究科、3. 日本原子力研究所)

口頭講演 | R5：地球外物質

9:00 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

9:00 ~ 9:15

[R5-01] 非晶質ケイ酸塩の凝縮実験と分光分析から制約されるAGB星周ダストの化学組成の多様性

「発表賞エントリー」

*榎本 華子[1]、瀧川 晶[1]、茅原 弘毅[2]、小池 千代枝[2] (1. 東大・地惑、2. 大阪産業大)

9:15 ~ 9:30

[R5-02] 炭素質コンドライトDOM 08006中のプレソーラー酸化物から探る星周ダストの形成過程

「発表賞エントリー」

*橋爪 宏幸[1]、瀧川 晶[1] (1. 東京大・院地惑)

9:30 ~ 9:45

[R5-03] 原始惑星系円盤を運動するダストの不可逆化学反応の進行

*石﨑 梨理[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・地惑)

9:45 ~ 10:00

[R5-04] 蒸発–結晶化実験によるタイプB CAI形成における昇温過程での蒸発の影響の評価

「発表賞エントリー」

*鶴岡 靖朗[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・院理)

10:00 ~ 10:20

[R5-05] 揮発性物質を含んだ微惑星の衝突によるコンドリュールの形成

「招待講演」

*城野 信一[1] (1. 名古屋大・環境学)

10:20 ~ 10:35

[3Lecture-301-10-6add] 休憩

10:35 ~ 10:55

[R5-06] コンドルール構成鉱物の化学組成から制約する真のコンドルール形成期間

「招待講演」

*福田 航平[1]、木多 紀子[2]、木村 眞[3] (1. 阪大・院理、2. ウィスコンシン大、3. 国立極地研究所)

10:55 ~ 11:10

[R5-07] 放射状輝石コンドリュールの形成プロセス：浮遊させたメルトの結晶化実験に基づく制約

「発表賞エントリー」

*渡邉 華奈[1]、中村 智樹[1]、森田 朋代[1] (1. 東北大・院理)

11:10 ~ 11:25

[R5-08] ポイキリティック・シャーゴッタイト火星隕石の岩石組織・鉱物組成多様性から読み解く母岩体層状構造の推定

「発表賞エントリー」

*山﨑 奏次郎[1]、山口 亮[2]、三河内 岳[3] (1. 東大・院理、2. 国立極地研、3. 東大・総研博)

11:25 ~ 11:40

[R5-09] 火星隕石Asuka 12325のTi-Crに富むスピネルの高圧相転移

*竹之内 惇志[1]、伊神 洋平[2]、三河内 岳[3]、三宅 亮[2]、山口 亮[4] (1. 京大・総博、2. 京大・院理、3. 東大・総研博、4. 極地研)

11:40 ~ 11:55

[R5-10] シリカ鉱物を用いたメソシデライトの熱史推定

*大野 遼[1]、竹之内 惇志[2]、三河内 岳[3]、山口 亮[4]、杉浦 直治[5]、三宅 亮[1] (1. 京大・理、2. 京大博、3. 東大博、4. 極地研、5. 千葉工大)

口頭講演 | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

14:00 ~ 15:00 | ESホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

座長:星出 隆志(秋田大学)

14:00 ~ 14:20

[R6-12] 超苦鉄質岩中のジルコニウム鉱物

「招待講演」

*沢田 輝[1,2]、大柳 良介[3,2] (1. 富山大学、2. 海洋研究開発機構、3. 国士舘大学)

14:20 ~ 14:35

[R6-13] ジルコン中メルト包有物を用いた花崗岩質マグマ固結過程の物理条件解析

*谷脇 由華[1]、齊藤 哲[2] (1. （株）シアテック、2. 愛媛大・院理)

14:35 ~ 14:50

[R6-14] 石英の結晶化温度の正確な決定のためのTiO_2活動度の導出

*小北 康弘[1]、加藤 丈典[2]、湯口 貴史[3] (1. 山形大学、2. 名古屋大学、3. 熊本大学)

口頭講演 | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

14:00 ~ 15:30 | ES024 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

座長:小松 一生

14:00 ~ 14:30

[R2-12] 黄鉄鉱型化合物の構造安定化と陰イオンの化学結合性

「招待講演」

*吉朝 朗[1]、徳田 誠[1]、北原 銀河[1]、中塚 晃彦[2]、杉山 和正[3] (1. 熊本大学、2. 山口大学、3. 東北大学)

14:30 ~ 14:45

[R2-13] カルシウムホウ酸塩鉱物のFundamental Building Blocks（基本構造単位）の形成条件の解明

「発表賞エントリー」

*山口 航佑[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1] (1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系)

14:45 ~ 15:00

[R2-14] 木村石とロッカ石の結晶構造

*宮脇 律郎[1]、門馬 綱一[1] (1. 国立科学博物館)

15:00 ~ 15:15

[R2-15] Keatite結晶中における酸素の熱振動について

*則竹 史哉[1] (1. 山梨大・院総合)

15:15 ~ 15:30

[R2-16] 動力学的理論に基づく電子後方散乱回折のシミュレーション手法の開発と鉱物学への応用

*瀬戸 雄介[1]、大塚 真弘[2] (1. 大阪公立大・院理、2. 名古屋大・未来材料・システム研)

口頭講演 | R5：地球外物質

14:00 ~ 15:30 | ES025 東山キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

14:00 ~ 14:15

[R5-11] たんぽぽ計画によってISSに搭載されたシリカエアロゲルに捕獲されたマイクロメテオロイドの鉱物学的特徴

*野口 高明[1]、三宅 亮[1]、藪田 ひかる[2]、癸生川 陽子[3]、菅 大暉[4]、田端 誠[5]、奥平 恭子[6]、山岸 明彦[7]、矢野 創[8] (1. 京都大学・院理、2. 広島大学・院先進理工、3. 東京工業大学・院理、4. 高輝度光科学研究センター 、5. 千葉大学・院理、6. 会津大学・コンピュータ理工、7. 東京薬科大・生命科学、8. 宇宙航空研究開発機構)

14:15 ~ 14:30

[R5-12] ナトリウムに富むリュウグウ粒子のSTXM分析

*松本 徹[1]、野口 高明[1]、荒木 暢[2]、湯澤 勇人[2]、三宅 亮[1] (1. 京都大学、2. 分子科学研究所)

14:30 ~ 14:45

[R5-13] 小惑星リュウグウ試料およびCIコンドライトに見られる非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩の重要性

*三河内 岳[1]、吉田 英人[2]、林 悟[2]、増田 みなみ[2]、鍵 裕之[2]、杉山 和正[3]、中村 智樹[4]、ゾレンスキー マイケル[5] (1. 東大・総研博、2. 東大・理、3. 東北大・金研、4. 東北大・理、5. NASAジョンソン宇宙センター)

14:45 ~ 15:00

[R5-14] 小惑星リュウグウ試料の岩相分類と水質変成度の関連について

*増田 みなみ[1]、三河内 岳[2]、吉田 英人[1]、中村 智樹[3]、ゾレンスキー マイケル[4] (1. 東大・理、2. 東大・総研博、3. 東北大・理、4. NASAジョンソン宇宙センター)

15:00 ~ 15:15

[R5-15] リュウグウサンプル中のGEMS様非晶質ケイ酸塩を含む始原的岩相

*松本 恵[1]、土`山 明[2,3]、安武 正展[4]、中村 智樹[1] (1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 広州地球科学研究所、4. JASRI/SPring-8)

15:15 ~ 15:30

[R5-16] GEMS模擬粒子を用いた水質変成実験

*土`山 明[1,2]、延寿 里美[3]、　海洋[1]、　琦[1]、丁 兴[1]、王 园园[4]、何 昭露[1]、杜 静[1]、李 珊[1]、席 佳鑫[1]、林　[1]、邸 健[1]、井村 悠登[5] (1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理)

ポスター | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

12:30 ~ 14:00

[R2-P-01] PF BL-10Aの単結晶構造解析の新たな取り組みと現状について　～X線異常散乱実験と高圧下その場単結晶X線回折実験

*栗林 貴弘[1]、山根 崚[2]、原田 敬太[1]、長瀬 敏郎[3]、杉山 和正[2] (1. 東北大・院理、2. 東北大・金研、3. 東北大・博物館)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-02] KEK-PF BL-6Cにおける単結晶X線異常散乱法による精密構造解析の取り組み

*徳田 誠[1]、市村 卓視[2]、門馬 綱一[6]、宮脇 律郎[6]、三河内 岳[4]、吉朝 朗[3]、杉山 和正[5] (1. 熊本大・産業ナノ、2. 東北大・院工、3. 熊本大・理、4. 東大・総研博、5. 東北大・金研、6. 国立科博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-03] Fe K端XANESの吸収異方性の評価および多変量統計解析による微小領域の高精度Fe^{2+}/Fe^{3+}定量法の開発：単斜輝石の例

「発表賞エントリー」

*伊藤 泰輔[1]、ウォリス サイモン[1]、高橋 嘉夫[1] (1. 東京大・院地惑)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-04] MnおよびFeを含有するDiopside(Violan)の精密構造解析

「発表賞エントリー」

*千葉 颯斗[1]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4] (1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-05] 単結晶X線回折法によるCs交換した天然Ca菱沸石の構造研究：その優れたCs交換能力に対する結晶化学的要因

河田 尚美[1]、古橋 陵[1]、藤原 恵子[1]、大川 真紀雄[2]、*中塚 晃彦[1] (1. 山口大・院創成、2. 広島大・先進理工)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-06] X線異常散乱法によるMn^{3+}/Mn^{4+}の分布の決定：woodruffite中の MnO_6 八面体が形成する3×4トンネル構造の詳細

「発表賞エントリー」

*宮﨑 クリストファー[1]、山根 崚[2]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4] (1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-07] GTS型Na珪チタン酸塩のMg^{2+} およびBa^{2+} イオン交換とその構造評価

*藤原 恵子[1]、河田 尚美[1]、中塚 晃彦[1] (1. 山口大・院創成)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-08] ゲーレナイトー鉄ゲーレナイト系合成メリライトの4配位席における鉄の分布と結晶構造変化

*濵田 麻希[1]、永嶌 真理子[2] (1. 金沢大学、2. 山口大・院創成)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-09] ALCHEMIによるオリビンの微量元素のサイト選択性

*伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、若林 凌[1]、秋澤 紀克[2] (1. 京都大学、2. 東京大学)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-10] 多様な形状の輝石の離溶組織

*藤 昇一[1] (1. 福岡大学)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-11] MORB組成から期待されるAl/Fe含有量をもつブリッジマナイトの結晶化学

*中塚 晃彦[1]、福井 宏之[2]、鎌田 誠司[3]、平尾 直久[2]、大川 真紀雄[4]、杉山 和正[5]、芳野 極[6] (1. 山口大・院創成、2. JASRI、3. （株）アド・サイエンス、4. 広島大・先進理工、5. 東北大・金研、6. 岡山大・惑星物質研)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-12] 非晶質炭酸カルシウムの圧力誘起結晶化メカニズム

*森田 千歩[1]、小林 大輝[1]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-13] LiとCsによるvateriteのcalcite化への影響の相違

*古川 登[1]、木之田 亜海[2] (1. 千葉大学、2. （株）俄)

ポスター | R5：地球外物質

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス
R5：地球外物質

12:30 ~ 14:00
[R5-P-01] Newberyite($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$)の低圧条件での脱水

*松本 有香子[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・理)

12:30 ~ 14:00
[R5-P-02] 低圧環境下でのコンドリュールメルト-水蒸気間の酸素同位体交換実験

*山本 大貴[1]、川崎 教行[2] (1. 九州大学、2. 北海道大学)

12:30 ~ 14:00
[R5-P-03] ユークライト型エコンドライトにみられる太陽系初期の衝突の痕跡

*山口 亮[1] (1. 国立極地研究所)

12:30 ~ 14:00
[R5-P-04] Yamato-8448ユレイライト中炭素質物質の内部組織分析

*安武 正展[1]、松本 恵[2]、圡山 明[3,4]、上杉 健太朗[1]、竹内 晃久[1]、山口 亮[5] (1. 高輝度光科学研究センター、2. 東北大、3. 立命館大、4. 広州地球化学研究所、5. 国立極地研究所)

12:30 ~ 14:00
[R5-P-05] 初期空隙がルチルの衝撃変成微細組織へ与える影響

*梅田 悠平[1,2]、永井 優馬[1,2]、富岡 尚敬[3]、関根 利守[4]、宮川 仁[5]、小林 敬道[5]、遊佐 斉[5]、奥地 拓生[1,2] (1. 京大複合研、2. 京大院工、3. 海洋研究開発機構、4. HPSTAR、5. 物質材料研究機構)

ポスター | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

12:30 ~ 14:00

[R6-P-01] マリアナ前弧蛇紋岩泥火山に産する直方輝石沈積岩：前弧モホ遷移帯の構成岩類

*安宅 飛明[1]、市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大、2. 金沢大)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-02] 瀬戸川帯オフィオライト岩類に伴う高マグネシウム安山岩の形成過程

*加藤 紬[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大学、2. 金沢大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-03] 九重火山群火山岩類の岩石学的・地球化学的研究

「発表賞エントリー」

*山中 壮馬[1]、柴田 知之[1]、藤原 涼太郎[1]、芳川 雅子[1]、柴田 智朗[2] (1. 広大・先進理工、2. 福岡大・理)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-04] 山形県温海・鈴地域の貫入岩と地殻起源捕獲岩の岩石学的研究

*東條 壱優[1]、星出 隆志[1] (1. 秋田大·国資)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-05] 北上山地，遠野複合深成岩体に産出するジルコンの晶出条件と周辺鉱物との晶出関係

*小北 康弘[1,2]、坂田 周平[3]、大野 剛[4]、横山 立憲[2]、鈴木 哲士[1]、遠藤 京香[1]、湯口 貴史[5] (1. 山形大学、2. 原子力機構 東濃地科学センター、3. 東京大学 地震研究所、4. 学習院大学、5. 熊本大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-06] 山口県萩市川上地域に産する花崗閃緑岩体の岩石学的特徴とマグマ過程

「発表賞エントリー」

*杉浦 諒成[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-07] 山口県東部、土生花崗閃緑岩の年代とSr–Nd–Hf 同位体組成

*大和田 正明[1]、秋本 悠作[2]、永嶌 真理子[1]、江島 圭祐[1]、亀井 淳志[3]、中野 伸彦[4]、川口 健太[5]、小山内 康人[4] (1. 山口大学・院創成、2. 四電技術コンサルタント、3. 島根大学・院理工、4. 九州大学・院比文、5. 広島大学・院総合)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-08] 北部九州西部，能古島に分布する花崗閃緑斑岩の希土類元素組成とU-Pbジルコン年代

*柚原 雅樹[1]、川野 良信[2]、東田 和弘[3]、SUKHBAATAR Purevdulam[4] (1. 福岡大・理、2. 立正大・地球環境、3. 名古屋大・博物館、4. 名古屋大・院・環境学研究科)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-09] 北部九州，朝倉花崗閃緑岩の組成変化と岩体成長過程

「発表賞エントリー」

*濱野 裕大[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大・理地球圏)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-10] 福岡県東部に産する花崗岩–花崗閃緑岩の貫入関係と岩相区分

「発表賞エントリー」

*中村 領[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-11] 花崗岩中の石英の結晶化プロセス：九州の大崩山花崗岩体のマグマ溜りプロセスの理解

*湯口 貴史[1]、加藤 丈典[4]、小北 康弘[2]、渡邊 みのり[6]、加藤 あすか[6]、伊藤 大智[6]、横山 立憲[2]、坂田 周平[3]、大野 剛[5] (1. 熊本大学、2. 原子力機構、3. 東京大学・地震研、4. 名古屋大学、5. 学習院大学、6. 山形大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-13] 愛媛県芸予諸島大島に分布する“大島石”に記録された花崗岩質マグマ溜まりの分化プロセス

*下岡 和也[1,2]、青野 荘一郎[2]、大西 隆仁[2]、福井 堂子[2]、壷井 基裕[1]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[2] (1. 関西学院大学、2. 愛媛大学、3. 新潟大学)

一般普及講演

15:30 ~ 17:00 | ESホール 東山キャンパス

一般普及講演

15:30 ~ 17:00

[3Lecture-1-1530-1add] 一般普及講演

口頭講演 | S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

2024年9月12日(木) 10:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

座長:吉村 俊平(北海道大学)、萩原 雄貴(海洋研究開発機構)、浜田 盛久(海洋研究開発機構)

10:00 ~ 10:20

[S1-01] 沈み込み帯水流体中のタングステン(VI)溶存化学種とスラブ脱水過程におけるW安定同位体分別への影響

「招待講演」

*高橋 菜緒子[1]、中村 美千彦[2]、山下 茂[3]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理、2. 東北大・院理、3. 岡山大・惑星研)

10:20 ~ 10:40

[S1-02] 中国安徽省女山マール産カンラン岩捕獲岩から復元したマントル構造と水分布：スラブの水はどこまで届く？

「招待講演」

*佐藤 侑人[1]、高橋 栄一[2] (1. JAMSTEC高知、2. 広州地球化学研究所)

10:40 ~ 10:55

[S1-03] 西部アイフェル火山地域のマントル捕獲岩を用いたマール噴火に至る深部プロセスの解明

「発表賞エントリー」

*荒尾 眞成[1]、中村 美千彦[1]、無盡 真弓[1]、新谷 直己[1]、澤 燦道[1]、中谷 貴之[2]、隅田 まり[3]、Schmincke Hans-Ulrich[3] (1. 東北大・院理、2. 産総研、3. ヘルムホルツ海洋研究センター)

10:55 ~ 11:10

[S1-04] 非噴出珪長質マグマ中のメルトの含水量と圧力：花崗岩に含まれるジルコン中メルト包有物の均質化実験とSEM-EDS分析からの制約

「発表賞エントリー」

*川島 泰地[1]、下岡 和也[2]、福井 堂子[1]、斉藤 哲[1] (1. 愛媛大、2. 関西学院大)

11:10 ~ 11:25

[S1-05] 十和田火山御倉山溶岩ドームディクティタキシティック組織部の浸透率と空隙構造

*関谷 夏子[1]、中村 美千彦[2]、櫻井 亮輔[3]、無盡 真弓[2]、新谷 直己[2]、竹内 晋吾[4]、諏訪 由起子[5] (1. 東北大・理、2. 東北大・院理、3. 東京大、4. 電中研、5. セレス)

11:25 ~ 11:40

[S1-06] 引張変形下における珪酸塩メルト・ガラスの分子動力学シミュレーション

*馬見塚 亮太[1]、奥村 聡[1]、佐久間 博[2] (1. 東北大・院理、2. NIMS)

11:40 ~ 11:55

[S1-07] 伊豆大島火山のマグマ供給系：H_2O飽和斜長石リキダスからの制約

*石橋 秀巳[1] (1. 静岡大学)

11:55 ~ 12:00

調整

沈み込み帯水流体中のタングステン(VI)溶存化学種とスラブ脱水過程におけるW安定同位体分別への影響

Tungsten (VI) speciation in subduction-zone aqueous fluids and its significance for W stable isotope fractionation during slab dehydration

*高橋 菜緒子[1]、中村 美千彦[2]、山下 茂[3]、鍵 裕之[1]
*Naoko TAKAHASHI[1], Michihiko Nakamura[2], Shigeru Yamashita[3], Hiroyuki Kagi[1]

1. 東大・院理、2. 東北大・院理、3. 岡山大・惑星研
1. UTokyo Sci., 2. Tohoku Univ. Sci., 3. Okayama Univ. IPM

“Non-traditional stable isotopes”と呼ばれる金属元素の安定同位体比は、地球表層や地殻・マントルのプロセスを解読し、物質循環を追跡する指標として現在盛んに研究されている。最近ではWの高精度同位体分析法の確立により、沈み込み帯に産する火成岩においてW安定同位体比の多様性が明らかになった。例えば、マリアナ、伊豆、キプロス島弧の溶岩では、マントル由来の中央海嶺玄武岩や海洋島玄武岩と比較して重いW安定同位体比が報告され ([1-3])、特にStubbs et al. (2022) [3]は重いW 安定同位体比がスラブ流体の指標と相関していることを見出した。しかしながら、沈み込み帯深部でのスラブ脱水過程におけるW同位体分別を引き起こす化学反応素過程は分かっていない。平衡同位体分別の大きさは、化学種間での結合強度の違いに依存し、重い同位体はより強い結合環境に優先的に分配されると考えられている。そのため、スラブ脱水過程における同位体分別機構を理解するためには、沈み込み帯水流体中のW(VI)の溶存化学種を理解する必要がある。これまでのタングステン鉱物に関する溶解度実験では、W(VI)は主に単純なモノマー種 (e.g., $[WO_4]^{2-}$、$[HWO_4]^{-}$)として溶解すると考えられてきたが([4])、沈み込み帯深部条件におけるその場観察実験は現在までに行われていない。本研究では、ダイヤモンドアンビルセルを用いて最高800 ℃、1.2 GPaまでの条件下で、溶存タングステン酸塩の変化をラマン分光法により観察した。実験の圧力決定には、合成ジルコンまたは合成^{13}Cダイヤモンドのラマン圧力計を利用した。

一定濃度の水溶液を用いた実験では、温度圧力上昇に伴い特徴的なラマンスペクトルの変化を確認した。常温常圧下では、pH~8の0.1 *m* [mol/kg H_2O] Na_2WO_4水溶液はタングステン酸イオン$[WO_4]^{2-}$のW=O対称伸縮振動に起因する930 cm^{-1}付近のラマンピークを示すが、約400 ℃で950cm^{-1}付近に新たなラマンピークが現れ、温度圧力上昇に伴い優勢になった。また、pH~2の0.1 *m* Na_2WO_4水溶液でも同様に約400 ℃以上で950cm^{-1}付近のピークが優勢になることがわかった。さらに、WO_3–H_2O系における酸化タングステン飽和流体のラマン分光測定により、950 cm^{-1}と975 cm^{-1}付近のピークが500 ℃以上で検出された。高温高圧下で新たに検出された高波数側のピークを示す溶存種は、波数の温度圧力依存性と常温常圧下で観察される主要な溶存種に基づくと、八面体ユニットからなるポリクラスター（例えば、$[W_7O_{24}]^{6-}$）が有力な候補として挙げられる。さらに室温・高圧実験の結果と併せて、温度上昇がポリクラスター形成の重要因子であることが判明した。これらの結果は、沈み込み帯深部条件では溶存タングステン酸塩のモノマー種から配位数変化を伴う複雑な構造変化が起きることを示唆している。つまり、沈み込みスラブの脱水過程におけるW同位体分別の程度は、温度条件に応じた溶存タングステンの配位状態変化に起因して変化する可能性がある。

References: [1] Kurzweil et al. (2019) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 251, 176-191. [2] Mazza et al. (2020) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 530, 115942. [3] Stubbs et al. (2022) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 334, 135-154. [4] Bali et al. (2012) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 351-352, 195-207.

キーワード：ダイヤモンドアンビルセル、その場ラマン分光、タングステン(VI)化学種、沈み込み帯
Keywords: Diamond anvil cell, In-situ Raman spectroscopy, Tungsten (VI) speciation, Subduction zone

中国安徽省女山マール産カンラン岩捕獲岩から復元したマントル構造と水分布：スラブの水はどこまで届く？

Reconstruction of mantle structures using mantle xenoliths from Nushan, SE-edge of Sino-Korean craton: How far does the subduction fluid reach?

*佐藤 侑人[1]、高橋 栄一[2]
*Yuto SATO[1], Eiichi Takahashi[2]

1. JAMSTEC高知、2. 広州地球化学研究所
1. JAMSTEC Kochi, 2. GIG

リソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)はプレートテクトニクスにおける「プレートの底」であり、上部マントルに存在する粘性コントラストである。粘性コントラストの成因にはマントルに微量に含まれる水が密接に関係しており、(1)水がマントルカンラン岩の粘性を直接下げる、(2)粘性低下を引き起こす部分溶融の温度を下げる、という二方向の働きからLABの深度・温度・性質を劇的に変化させる。沈み込み帯は、海溝から沈み込んだ含水化スラブから放出された流体によりウェッジマントルが広範に含水化された場として重要である。しかし、この水が水平方向にどこまで広がっているかは自明ではない。

我々はこれまで海溝に近い沈み込み帯の例として、秋田県男鹿半島一ノ目潟マールに産するマントル捕獲岩を用いて岩石学的にLABを復元し、沈み込み帯LABの成因が含水カンラン岩の部分溶融にあると明らかにした(Sato et al., 2023EPSL)。本発表では海溝から離れた大陸内側の例として、中国安徽省女山マールに産するマントル捕獲岩を用いて岩石学的マントル構造と含水量分布を復元する。また、結果を一ノ目潟のケースと比較することで、スラブ由来の水が沈み込み帯LABへ及ぼす影響がどこまで到達するかを評価する。女山マールはSino-Koreanクラトンの南東端に位置する。地震波高速異常域として示唆されるStagnant slabの西端上方にあり、Big mantle wedgeのほぼ端部に相当する。さらに、直下にはStagnant slabを迂回して深部から上昇するプルームの存在も認められる。

女山産マントル捕獲岩は多様な岩石学的特徴を示す。鉱物モード組成と化学組成の間に相関が見られ、捕獲岩は以下の三グループに分けられる。①MORBマントル様のレルゾライト。稀にザクロ石または金雲母を含み、CPX中のNa_2O含有量が1.5 wt.%前後でOLのMg#が89-90程度。②含水鉱物として角閃石と燐灰石を含む交代作用を受けたレルゾライト。CPX中のNa_2O含有量が顕著に高く（>2wt.%）OLのMg#が低い（87-90）。③ハルツバージャイト。SPLのCr#が顕著に高く（17-48）OLのMg#が比較的高い（89-91）。

Sato & Ozawa (2019AM)の平衡組成探索手法に則りCa-in-OL温度圧力計（Aoki et al., 2020）およびCa-in-OPX温度圧力計（Lindsley, 1983を改変）を用いて捕獲岩の由来深度を推定した。推定圧力は0.4-2.6 GPa、温度は830-1150 ℃と推定され、これはHuang et al. (2004)で推定されたグラニュライトとザクロ石カンラン岩の温度圧力推定値と整合的であった。得られた圧力を用いて図のような女山下のマントル構造を復元した。

● 上層は粗粒なプロトグラニュラー組織を示し、顕著に含水鉱物を含む。①MORB様マントルと②交代されたマントルが互層を成す。

● 下層は細粒なタビュラーグラニュラー組織とポーフィロクラスティック組織を呈し、①MORB様マントルで構成される。

● 最下層は細粒なタビュラーグラニュラー組織を呈し、③ハルツバージャイトから成る。

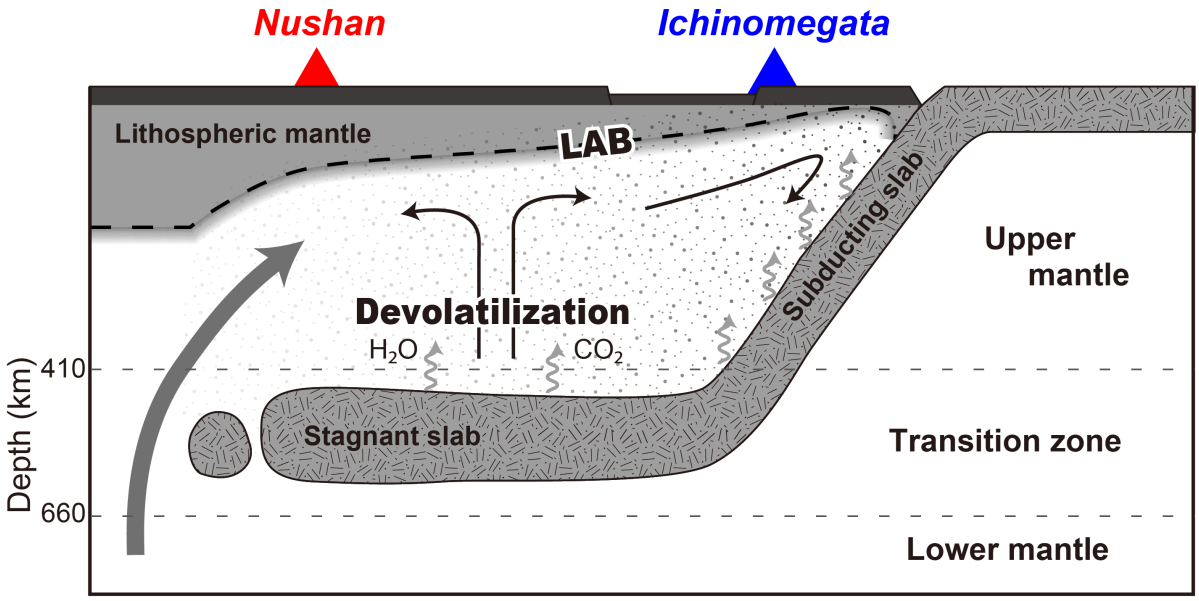
変形組織が発達し始める深さ約60kmがリソスフェアの底であることが期待されるが、このようなマントルの成層構造は、下層にて角閃石が無くなりメルトが生じて変形組織が発達する一ノ目潟のケースと類似する。

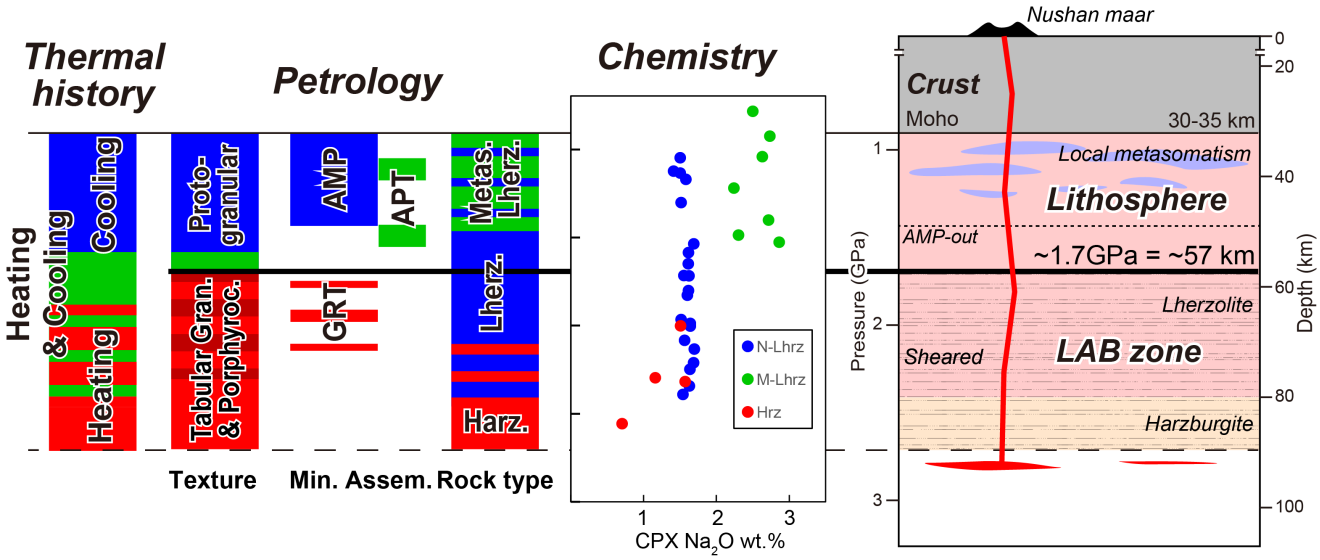
FTIRを用いて分析した女山産捕獲岩のカンラン石に含まれる水は3571、3522、3229cm^{-1}に主要な

ピークを示し、前二者がTi-clinohumiteに類似した欠陥（$MgTiH_2O_4$）に、後者がMgサイトの欠陥（MgH_2SiO_4）に帰属する。Fe^{3+}に関連した欠陥に由来する3355、3327 cm^{-1}のピークが存在しない点は一ノ目潟と異なっており、女山産捕獲岩の低い酸素フガシティー(ΔFMQ -0.6から-1.6)を反映すると考えられる。予察的な分析結果ではあるが、女山のカンラン石の含水量については深さ変化が認められるようであり、マントル上層では含水鉱物が含まれるにも関わらず2-4ppm、下層では十数ppm程度の水が含まれる。

一ノ目潟と女山はそれぞれ類似したマントル構造を示す一方で、リソスフェアの底の深さは一ノ目潟が約40kmで、女山が約60kmと深くなる。また、一ノ目潟ではマントルが深部から浅部まで全体に含水化されており、LABを介した含水量コントラストは存在しないのに対して、女山では含水化が限定的である。今後は水の起源について、沈み込み由来であるかプルーム由来であるかを検討し、沈み込み帯の水の到達限界について評価したい。

キーワード：マントル捕獲岩、Big mantle wedge、通常非含水鉱物、マントル岩石学、FTIR
Keywords: Mantle xenolith, Big mantle wedge, NAMs, Mantle petrology, FTIR





西部アイフェル火山地域のマントル捕獲岩を用いたマール噴火に至る深部プロセスの解明

Elucidating Deep processes leading to maar eruptions using mantle xenoliths in the West Eifel volcanic field

*荒尾 眞成[1]、中村 美千彦[1]、無盡 真弓[1]、新谷 直己[1]、澤 燦道[1]、中谷 貴之[2]、隅田 まり[3]、Schmincke Hans-Ulrich[3]
*Masanari Arao[1], Michihiko Nakamura[1], Mayumi Mujin[1], Naoki Araya[1], Sando Sawa[1], Takayuki Nakatani[2], Mari Sumita[3], Hans-Ulrich Schmincke[3]

1. 東北大・院理、2. 産総研、3. ヘルムホルツ海洋研究センター
1. Tohoku Univ.Sci., 2. AIST, 3. GEOMAR

マール火山の噴出物には，しばしばマントルや地殻下部由来の捕獲岩が含まれる．また，堆積物の岩相も単純な降下火砕物では無く火砕サージなどの構造が発達する場合が多い．このような火山では地下深部からごく短時間でマグマが上昇してくるため，低頻度ながらも高リスクの活動である．噴火時のマグマ上昇速度は，マントル捕獲岩の輸送条件やマグマに接した鉱物の元素拡散速度などに基づく研究例があるが，噴火に至るまでの深部プロセスについてはほとんど理解されていない．多くの火山活動に共通して観察される地殻深部での前兆的活動に深部低周波地震があり，一般に流体の移動と関連付けられる．本研究ではドイツ・西部アイフェル火山地域西端に位置するMeerfelder Maarで採集されたマントル捕獲岩に，地殻の破砕に関連して生成されたと考えられる流体包有物を見出した．そして，その分布特性や閉鎖圧力から，最上部マントルから噴火に至る一連のマグマ・流体活動を明らかにすることを試みた．

アイフェル火山地域はマール火山の世界的模式地であり，地下構造やマグマ供給系に関する捕獲岩を用いた研究が多く行われている（Duda and Schmincke, 1985 ; Witt-Eickschen et al., 2003 ; Cliff 2004）．最新の噴火は，西部アイフェル火山地域のUlmener Maarで，約11,000年前である．同地域に位置するMeerfelder MaarやPulver maarも比較的噴火時期が新しいため，この地域での将来的な噴火の可能性が指摘されている．

Meerfelder Maarで採取されたマントル捕獲岩の多くは，肉眼および偏光顕微鏡観察から以下の特徴が見られる．1) 捕獲岩の断面形状が角ばっており，取り囲むアルカリ玄武岩質マグマ(メリライトを含むカンラン石ネフェリナイト）との境界面が平面で構成されることが多い 2)平面的な境界面付近には、外形に平行なマイクロクラックが卓越しており，その傾向は捕獲岩内部では弱まる 3) マイクロクラックに沿って流体包有物が存在する．流体包有物のラマン分光分析を行ったところ，水のピークは検出されず，Yamamoto et al., (2002)の方法に従いCOのフェルミ分裂のピーク幅を用いた残留圧力からマイクロクラックの閉鎖圧力を推定したところ，捕獲岩5試料中の71点の流体包有物のうち16点で1GPaを超える圧力を保持していることがわかった．これらの特徴は，捕獲岩がCO2流体による水圧破砕で破砕されたのち、マグマに取り込まれたことを示唆する．クラックの閉鎖時間について明確な推定はできていないが，数日はかかると見積もる事ができ，圧力が低い包有物についてはクラックの閉鎖が不十分で抜けた可能性がある．

捕獲岩がマグマに取り込まれてから噴火に至るまでの時間を推定するため，マントル捕獲岩13試料の研磨試料についてホストマグマとの平面状の境界付近の反射電子像の観察と化学組成のEMPA面分析を行った．計算に用いたカンラン石のFe-Mg相互拡散係数は，結晶異方性があるため，EBSD法を用いた結晶方位解析を行い，測定プロファイル方向に対して補正を行った．元素拡散の速いカンラン石のFe・Mgに関し，10試料で，明確な拡散が確認されなかった．これらの分析の空間分解能から，拡散があったとしてもその幅は2 μm以下と考えられ，温度を1200℃と仮定すると拡散時間は3時間程度と見積もられる．

マントル捕獲岩がマグマによって捕獲される以前に受けた熱的な影響(プレヒート)を評価するため，マントル捕獲岩内部についても面分析を行った．13試料中，拡散速度の速いカンラン石中のFe-Mg組成には，すべ

ての試料で累帯構造は確認できなかった．一方，拡散速度の遅い斜方輝石中のCa組成では8試料で累帯構造が確認でき，その拡散時間は7試料で数百年～数万年と幅広く，１試料のみ約20年と見積もられた．両輝石コアを用いた平衡温度は950～1100℃であり，これらの温度は大陸地域の地温勾配曲線よりも数百度程度高いため，アイフェル地域のモホ面直下のマントルは継続的なマグマ貫入で加熱されていることを示している．

以上の結果から，マール火山の噴火に関与したマグマ活動について以下のような描像が得られた． CO2に富むアルカリ玄武岩質マグマが長期間にわたってMOHO面付近に貫入を繰り返し，周囲のかんらん岩を加熱し，同時にマグマから放出された流体が周囲のカンラン岩を過剰圧で水圧破砕を行い，この際に深部低周波地震が発生する．マグマが地表まで到達する最終噴火が起きる際には，流体が破壊した亀裂内を利用してマグマが高速に移動しながら周囲のかんらん岩を捕獲岩として取り込み，数時間以内の短時間で上昇し，噴火する．

キーワード：西部アイフェル火山地域、マントル捕獲岩、流体包有物、マイクロクラック、水圧破砕
Keywords: West Eifel volcanic field, Mantle xenolith, Fluid inclusion, Microcrack, Hydraulic fracturing

非噴出珪長質マグマ中のメルトの含水量と圧力：花崗岩に含まれるジルコン中メルト包有物の均質化実験とSEM-EDS分析からの制約

Water contents and pressures of melts in unerupted felsic magma constrained by SEM-EDS analysis of homogenized melt inclusions in zircon

*川島 泰地[1]、下岡 和也[2]、福井 堂子[1]、斉藤 哲[1]
*Taichi Kawashima[1], Kazuya Shimooka[2], Toko Fukui[1], Satoshi Saito[1]

1. 愛媛大、2. 関西学院大
1. Ehime Univ., 2. Kwansei Gakuin Univ.

花崗岩類は地殻内で固結した非噴出珪長質マグマに相当する。本研究では花崗岩類に普遍的に含まれる鉱物であるジルコン中のメルト包有物を用いて、花崗岩質マグマ中のメルトの含水量とジルコン結晶化圧力を見積もった。研究対象は西南日本の屋代島に産する白亜紀蒲野花崗閃緑岩である。ジルコン中メルト包有物はマグマ冷却中の結晶化により不均質な多相包有物となっているため、ピストンシリンダー型高温高圧装置を用いた均質化実験を行った。均質化実験後のジルコン中メルト包有物についてSEM-EDS分析をおこなったところ、メルト包有物は高い含水量(6.4 ~ 11.3 wt%)と高いSiO_2含有量(76 ~ 78 wt%, 主要元素totalを100%にノーマライズした値)を示す。このことから、ジルコンは結晶成長時に分化した含水メルトを包有したものと考えられる。近年提案されたMagMaTaB地質圧力計を適用したところ、563 ~ 266 MPaの圧力が計算された。これらの圧力はジルコンが結晶化した際の圧力に相当すると解釈できる。メルト包有物組成から得られた含水量と圧力は、含水量-圧力図上において、ハプロ花崗岩メルトの含水飽和曲線に沿ってプロットされる。このことから、ジルコンが包有した際の花崗岩質マグマ中のメルトは、ほぼ含水飽和状態であったと考えられる。本研究結果から、蒲野花崗閃緑岩中のジルコン中メルト包有物は、マグマが深部地殻へ貫入(およそ563 ~ 500 MPa)してから最終的に固結(およそ266 MPa)するまでの広い範囲の圧力を記録していると考えられる。

キーワード：非噴出珪長質マグマ、含水量、結晶化圧力、ジルコン中メルト包有物
Keywords: Unerupted felsic magma, Water contents, Crystallization pressures, Melt inclusion in zircon

十和田火山御倉山溶岩ドームディクティタキシティック組織部の浸透率と空隙構造

Permeability and pore microstructures on the diktytaxitic texture of Ogurayama lava dome, Towada volcano

*関谷 夏子[1]、中村 美千彦[2]、櫻井 亮輔[3]、無盡 真弓[2]、新谷 直己[2]、竹内 晋吾[4]、諏訪 由起子[5]
*Natsuko Sekiya[1], Michihiko Nakamura[2], Ryosuke Sakurai[3], Mayumi Mujin[2], Naoki Araya[2], Shingo Takeuchi[4], Yukiko Suwa[5]

1. 東北大・理、2. 東北大・院理、3. 東京大、4. 電中研、5. セレス
1. Tohoku Univ. Sci., 2. Grad. Sch. of Sci., Tohoku Univ., 3. Univ. Tokyo, 4. CRIEPI, 5. CERES

溶岩ドームの形成は．沈み込み帯での普遍的な火山噴火様式の一つである．溶岩内に残存するガス過剰圧はドームの爆発やblock & ash flowの自破砕性を支配し，これを左右する溶岩の浸透性構造を理解することは重要である．溶岩ドーム内部や岩頸程度の封圧下における含水マグマの晩期結晶作用では，ガス相を介した蒸発凝縮作用によりディクティタキシティック組織と呼ばれる連結度の高い空隙構造が形成されることが知られている．そこで我々は，溶岩ドーム内部が広範囲に露出する十和田火山御倉山溶岩ドームの露頭において，ドーム表面から約100m内部の赤色試料とドーム頂上部由来と思われる転石の灰色試料の２種類の溶岩試料を採取し，それらの浸透率と空隙構造を測定・分析することで，本組織の脱ガスへの役割を検討した．

両試料にはディクティタキシティック組織が全面的に形成されており，その空隙内には気相成長した準安定相のシリカ鉱物が見い出された．赤色試料より灰色試料の方がより豊富であった．また赤色試料の石基部にのみ，やはり準安定の角閃石と黒雲母が存在し，溶岩ドーム内部では表面付近よりも比較的高い水蒸気圧下がマグマ固化の晩期まで続いたことを示唆している．ガスピクノメータを使用して測定した全空隙率と連結空隙率は，赤色試料でそれぞれ0.180–0.253，0.137–0.213であり，一方，灰色試料ではそれぞれ0.252–0.324，0.227–0.301と4割程高かった．蒸発ー凝縮作用は基本的にメルトと鉱物相の再配置のみを引き起こすので，両試料の差はマグマ定置時の気泡量の差を反映していると考えられる．一方浸透率は，赤色試料と灰色試料でそれぞれ，1.016×10^{-15}–2.588×10^{-15} (m^2)，4.885×10^{-15}–1.321×10^{-14} (m^2)となり、連結空隙率の相対的な大小と整合的な結果となった．これらは絶対値でtuffisite veinの値よりも2–4桁低く（Kendrick et al., 2016）．ディクティタキシティック組織の開口径が小さいことによると考えられる．またディクティタキシティック組織はtuffisite veinのような局所構造とは異なりpervasiveな構造なので，脱ガス流束に対する効果は大きくなる，本講演では，得られた浸透率を用いて，冷却結晶化による溶岩ドーム内部の過剰間隙圧を計算し，溶岩ドームの爆発性に対するするディクティタキシティック組織の効果を評価する予定である．

キーワード：浸透率、空隙率、蒸発凝縮作用、脱ガス、ガスピクノメーター
Keywords: permeability, porosity, evaporation-condensation, degassing, Gas pycnometer

引張変形下における珪酸塩メルト・ガラスの分子動力学シミュレーション

MD simulation of silicate melt and glass under tension deformation

*馬見塚 亮太[1]、奥村 聡[1]、佐久間 博[2]
*Ryota Mamizuka[1], Satoshi Okumura[1], Hiroshi Sakuma[2]

1. 東北大・院理、2. NIMS
1. Tohoku Univ. Sci., 2. NIMS

爆発的な火山噴火は，火道内を上昇するマグマが脆性的に破壊することで発生する。マグマが脆性的に破壊するのは，珪酸塩メルトが粘弾性的性質を持っており，高速変形下においてメルトが固体的に振舞うためだと考えられている（e.g., Dingwell, 1996）。一方で，高速変形下では，変形速度の上昇に伴いメルト粘性が低下（シェアシニング）することも知られている (e.g., Simmons et al., 1982)。このように高速変形下の珪酸塩メルトは固体的な性質と液体的な性質を併せ持つことがわかっているが，それらの分子構造的な起源はよくわかってない。Okumura et al. (2023) は，X線回折を用いて引張変形中の珪酸塩メルトの構造変化を調べ，回折パターンのFSDP (First Sharp Diffraction Peak) の変化から変形に伴い中距離構造が変化していることを示した。珪酸塩メルトにおいて，FSDPに対応する中距離構造はSiO_4四面体からなるリング構造だと考えられており，この実験により引張変形によってリング構造が変化する可能性が示されたことになる。さらに，この実験では粘性的変形下と弾性的変形下において中距離構造が異なる変化をすることを見出した。すなわち，試料スケールで粘性変形する場合，平均リングサイズは等方的に大きくなるのに対し，弾性変形する時，引張方向により強くリングが変形することが示された。これらの結果は，珪酸塩メルト中のリング構造の変化がシェアシニングを誘発し，さらなる変形によるリング破断がマクロな破壊と関係している可能性を提案する。この考えを検証するために，本研究では分子動力学（MD）シミュレーションを用いて，引張変形下におけるSiO_2メルトのリング構造変化を調べ，リング構造変化がシェアシニングと破壊の起源となるのか明らかにすることを目指している。本発表では，MDシミュレーションにより再現された引張変形下のリング構造の変化について報告する。

本研究では，Bamer et al. (2019)で報告されているSiO_2ガラスの引張変形シミュレーションを参考にした。Vashishta et al. (1990)で提案されているポテンシャルを用いて，引張変形と保持を繰り返すシミュレーションを行った。まず初めに10000 Kでアニーリングした後，300 Kまで9.0×10^{15} K/minで急冷した。この出発物質に対して，300 K，1000 K, 1500 K，2000 K，2500 K，3000 Kの温度条件において引張変形を行った。すべての実験において，歪み速度は0.001 ps^{-1}とし，0.01の歪量ごとにRINGS（Roux and Jund, 2010）を用いてリングサイズ分布を調べた。また，温度と密度の関係から推定されたガラス転移温度は2023±370 Kであった。

引張変形前，1500 K以下の温度では，5・6員環のリングが全体のおおよそ60%を占めた。一方で，2000 K以上では，温度が増加するにつれて5・6員環の数が減少し，8員環など，より大きいリングが増加した。変形を進めると，1500 K以下の温度条件においては，5・6員環の系統的な減少及び8員環の系統的な増加が確認された。この結果は，常温での計算を行ったBamer et al. (2019)の結果とほぼ同じである。一方で，2000 K以上の温度条件における変形では，リングサイズ分布の系統的な変化が確認されなかった。つまり，ガラス転移温度付近以下のメルトおよびガラスでは，相対的に安定な5・6員環が支配的であり引張変形に伴い大きなリングが形成される一方で，高温ではより大きなリングサイズが安定であり，かつ変形によってリングサイズ分布は大きく変化しなかった。

実際のマグマを用いた引張試験では，高速変形下において構造緩和が遅れる，つまりガラス化することがシェアシニングと破壊の原因だと考えられてきた。また本研究では，ガラス転移温度付近においてリングサイズが変化することが見いだされた。このことは，構造緩和が遅れる条件においてリングサイズが変化することが，シェアシニングの起源である可能性を示唆する。今後，本研究で計算された構造を持つメルトの粘性係数

を計算し，構造とシェアシニングの関係を明らかにしていく予定である。

キーワード：珪酸塩メルト、MDシミュレーション、引張変形、環状構造
Keywords: silicate melt, MD simulation, tensional deformation, ring structure

伊豆大島火山のマグマ供給系：H_2O飽和斜長石リキダスからの制約

The magma plumbing system of Izu-Oshima Volcano: Constraints from the H_2O-saturated plagioclase liquidus

*石橋 秀巳[1]
*Hidemi ISHIBASHI[1]

1. 静岡大学
1. Shizuoka University

伊豆大島は, 近1500年間に6.4×10^9トンものマグマを噴出している（津久井他, 2009），国内で最も活発な火山のひとつである．この火山の地下には深さ～3-5kmに浅部マグマだまり，～8-10kmに深部マグマだまりが存在することが地球物理学的研究から示唆されており，これはHamada et al. (2011)による斜長石斑晶の含水量測定の結果からも支持される．伊豆大島で噴出するマグマは，その岩石学的特徴から3つに大別される(浜田, 2016)．このうち，ほぼ無斑晶質で化学的に均質(SiO_2～53wt%)なGroup-1が最も主要なマグマであり，このマグマが深部マグマだまりに由来すると従来考えられてきた．しかし， Group-1マグマはそのプレ噴火温度(1986年A噴火のマグマ～1100-1150℃；藤井他, 1988)，H_2O飽和の条件下では，深さ810kmにおいて斜長石と共存できないことが高温高圧平衡実験 (Hamada et al., 2007)によって示されており，従来の解釈と矛盾がある．このため，伊豆大島のマグマ供給系を理解するためには，信頼性の高い方法でGroup-1マグマの貯蔵条件を制約する必要がある．ところで近年，伊豆大島1986年B噴火の玄武岩質安山岩を出発物質に用いた高圧平衡実験により，Putirka (2008)の斜長石リキダス温度計とNewman and Lowenstern (2002)のメルトH_2O溶解度モデルの組み合わせ(本研究ではPNL法とよぶ)によって，H_2O飽和条件下での斜長石リキダス(H_2O-saturated plagioclase liquidus：HSPL)をうまく再現できることが示された(Oida et al., 2022)．そこで本研究では，伊豆大島Group-1のマグマにPNL法を適用してHSPLを決定し，これらのマグマのプレ噴火圧力(深度)を制約した．　PNL法を適用するうえで，伊豆大島のマグマが深さ~10kmより浅部でH_2Oに飽和していること(Hamada et al., 2011)と，その温度が1100-1150℃ (藤井他, 1988) であることを仮定した．Group-1のうち，1986年A噴火スコリアの石基メルト(86Agm；石橋・種田,2018)，1778年溶岩(78L；Sato, 1995)，比較的未分化で高Al/SiのMA43と低Al/SiのMA44(Hamada et al., 2014)の4つの組成のメルトにPNL法を適用し，それぞれのHSPLを決定した．その結果，1100-1150℃で斜長石と共存できる圧力範囲は86Agmと78Lで2-42MPa，MA44で5-60MPa，MA43で60-160MPaと見積もられた．これらの値を深さに換算すると，86Agmと78Lで0.1-1.9km，MA44で0.2-2.6 km，MA43で2.6-6.5kmの値が得られた．このうち，MA43のプレ噴火深度は浅部マグマだまりの深さと一致する一方で，他の3試料のプレ噴火深度はより浅い．以上の結果から，Group-1マグマは深部マグマだまりから直接上昇・噴火するのではなく，浅部マグマだまりもしくはそれより浅部で一旦停滞し，斜長石を結晶分別していると考えられる．それでは，どのような化学組成のマグマであれば，深部マグマだまりで斜長石と共存できるのだろうか？これを明らかにするために，78Lに様々な量の斜長石(An92)成分を加えた化学組成のメルトについてHSPLを計算し，深さ8kmでの圧力~220MPaより高圧かつ1100℃より高温の条件で斜長石と共存できるメルトの組成条件を検討した．その結果，メルトに~18.5wt%以上のAl_2O_3が含まれる必要があることがわかった．このような組成のガラスは伊豆大島では未報告だが，三宅島ではアノーサイト巨晶と共存するガラスとして存在が確認されている(清野他, 2021)．このような高Al_2O_3の含水マグマが減圧すると，脱水に伴ってリキダスが上昇するため，冷却せずとも斜長石を晶出できる．このことは，火道上昇過程の比較的短い時間でも斜長石に富むマグマを形成できる可能性を示唆する．伊豆大島のマグマのうち，斜長石斑晶に富むGroup-3(浜田, 2016)は，Group-1マグマが斜長石斑晶を取り込んだものと従来考えられてきた．しかし，その中には深部マグマだまり由来の高Al_2O_3メルトが斜長石を晶出するも，分別せずに噴出したものも含まれる可能性がある．今後，Group-3マグマに含まれる斜長石斑晶の成因について詳しい検討が必要である．

キーワード：伊豆大島火山、マグマ供給系、斜長石、リキダス、プレ噴火条件
Keywords: Izu-Oshima volcano, Magma plumbing system, plagioclase, liquidus, pre-eruptive condition

口頭講演 | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

2024年9月12日(木) 10:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

座長:黒澤 正紀(筑波大学)、北脇 裕士(中央宝石研究所)

10:00 ~ 10:20

[R1-01] 電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）による極微量元素定量分析の測定条件決定：電流と計数時間

「招待講演」

*加藤 丈典[1] (1. 名古屋大・ISEE)

10:20 ~ 10:35

[R1-02] ブリッジマナイトのメスバウアースペクトルとFe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットピークの強度テンソル

*篠田 圭司[1]、小林 康浩[2]、奥地 拓生[2] (1. 大公大・院理、2. 京大・複合研)

10:35 ~ 10:50

[R1-03] 光熱変換型赤外分光法（O-PTIR）による粘土鉱物の同定

「発表賞エントリー」

*城戸 太朗[1]、鈴木 庸平[1] (1. 東大・院理)

10:50 ~ 11:05

[R1-04] 宝飾用合成カラー・ダイヤモンドの特性評価と宝石鑑別

*北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1]、久永 美生[1]、山本 正博[1] (1. ㈱中央宝石研究所)

11:05 ~ 11:15

[1Lecture-201-07-5add] 休憩

11:15 ~ 11:30

[R1-05] オーストラリア産サファイアとその産地特徴

*江森 健太郎[1]、北脇 裕士[1] (1. ㈱中央宝石研究所)

11:30 ~ 11:45

[R1-06] エメラルドの原産地特徴と原産地鑑別における問題点

*趙 政皓[1]、北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1] (1. 中央宝石研究所)

11:45 ~ 12:00

[R1-07] 宝石品質のジルコンとサファイアの年代測定とその原産地同定への応用；オーストラリア、ニューサウスウェールズ州、ニューイングランド地方のサファイア鉱山からの研究例

*阿依 アヒマディ[1] (1. Tokyo Gem Science LLC.)

電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）による極微量元素定量分析の測定条件決定：電流と計数時間

Determination of analytical conditions in quantitative electron probe microanalysis of ultra-trace elements: probe current and sampling time

*加藤 丈典[1]
*Takenori KATO[1]

1. 名古屋大・ISEE
1. ISEE, Nagoya University

電子マイクロプローブアナライザー（EPMA）は、加速した電子を試料に照射し、発生するX線の強度を計数してミクロンスケールの化学組成を非破壊で分析することができる。近年EPMAを用いた極微量元素定量分析が様々な地質学的試料に対して行われ、分析条件などについて様々な検討がなされている。電子が試料に照射された時、特性X線と連続X線が発生する。特性X線の真の強度を直接計数することができないため、波長分散型分光法（WDS）では、通常バックグラウンドとなる連続X線の強度（I_{BG}）を推定し、ピーク強度（I_{OBS}）から差し引いて特性X線の真の強度（I_{PK}）を推定する。すなわち、

$I_{PK} = I_{OBS} - I_{BG}$（式1）

となる。この時、特性X線の強度の誤差は、

$\delta I_{PK}^{\ 2} = \delta I_{OBS}^{\ 2} + \delta I_{BG}^{\ 2}$（式2）

と表される。ただし、δXはXの誤差を表す。　微量元素の測定において、（１）検出限界から分析条件を決定する場合と、（２）目標とする濃度と相対誤差を決めて決定する場合について考える。測定対象元素の臨界励起ポテンシャルと試料内での電子線の散乱をどこまで許容するか、および、どの程度のX線強度を得る必要があるかが決まれば加速電圧はほぼ決まる。そこで、照射電流と計数時間の積について検討する。以下では計算を簡略化するため、ピーク強度と連続X線の強度の計数時間は同じであるとし、照射電流は一定であるとする。また、X線の計数値はポアソン分布に従うものとする。さらに、標準物質や補正計算に起因する誤差は無視できるものとする。

(0) 単位電流・単位濃度あたりの特性X線とバックグラウンド強度の推定

特性X線の強度は濃度にほぼ比例する。そこで、標準物質を測定し、その濃度と分析条件から、電流1 nAあたりの濃度1 μg/gにおける特性X線強度（I^c_1）を求める。次に、未知試料の測定を行い、電流1 nAあたりのバックグラウンド強度（I_2）を求める。これらの値をあらかじめ測定しておき、以下のように分析条件を求める。

(1) 検出限界から電流と計数時間を決定する場合

検出限界は、単純に特性X線の真の計数値（N_{PK}）がバックグラウンドの計数値 (N_{BG})の誤差の3倍で定義されるものとする。この時、ピークの計数値（N_{OBS}）は、

$N_{OBS} = N_{BG} + 3\cdot(N_{BG})^{1/2}$ (式3)

と表される。検出限界をC_{DL} μg/gとすると、照射電流がi nA、計数時間がt秒である場合の検出限界は、

$(I^c_1\cdot C_{DL} + I_2)\cdot it = I_2 it + 3\cdot(I_2\cdot it)^{1/2}$ （式4）となる。

したがって、$it = 9I_2 / (I^c_1\cdot C_{DL})^2$ （式5）

（例）$I^c_1 = 0.001$ cps·nA^{-1}·g·μg^{-1}で$I_2 = 3.2$ cps·nA^{-1}の場合、

$it = 2.88\times10^7 / C_{DL}^{\ 2}$ (式6)

が得られる。

(2) 目標の濃度と相対誤差を設定する場合

濃度C_T μg/gにおける誤差をδC_Tとし、RSD = δC_T / C_Tとする。照射電流がi nA、計数時間がt秒である場合、特性X線の真の計数値 (N_{PK})、バックグラウンドの計数値 (N_{BK})及びピークの計数値 (N_{OBS}) はそれぞれ、

$N_{PK} = f^c_1 \cdot C_T \cdot it$ (式7)

$N_{BK} = I_2 \cdot it$ (式8)

$N_{OBS} = (f^c_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it$ (式9)

となる。RSD = δN_{PK} / N_{PK}として、

$RSD = [(f^c_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it + I_2 \cdot it]^{1/2} / [(f^c_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it - I_2 \cdot it]$ (式10)

となり、

$it = (f^c_1 \cdot C_T + 2I_2) / (f^c_1 \cdot C_T \cdot RSD)^2$ (式12)

と表すことができる。

以上のように照射電流と計数時間の積が得られるので、試料の損傷や測定時間を考慮して適切な分析条件を決める。そして、実際に測定を行い要求が満たされているか評価し、必要に応じて照射電流や計数時間を変更することで最適な測定条件を決定する。

さて、式2に表されるように、微量元素のEPMA定量分析ではバックグラウンドの不確かさが主要元素の分析に比べて大きく影響する。バックグラウンドの誤差要因として、計数値のほかに、（1）微弱な発光スペクトルの重なり、（2）バックグラウンド形状のモデルの正しさや、（3）バックグラウンドホールの影響などがある。これらについて、あらかじめ十分に検討しておかなければならない。また、大電流測定ではX線強度が高くなるため、不感時間補正の正確さも重要になる。

キーワード：電子プローブマイクロアナライザー (EPMA)、微量元素、定量分析、分析条件
Keywords: electron probe microanalysis (EPMA), trace elements, quantitative analysis, analytical conditions

ブリッジマナイトのメスバウアースペクトルとFe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットピークの強度テンソル

Mössbauer Spectra and Intensity Tensors of Quadrupole Doublets for Fe^{3+} and Fe^{2+} of Bridgmanite

*篠田 圭司[1]、小林 康浩[2]、奥地 拓生[2]
*Keiji SHINODA[1], Yasuhiro Kobayashi[2], Takuo Okuchi[2]

1. 大公大・院理、2. 京大・複合研
1. Osaka Met. Univ. Sci, 2. KURNS

はじめに　ブリッジマナイトは地球の下部マントルの主要な構成鉱物と考えられている高圧鉱物である。ブリッジマナイトは、代表的な化学組成が$MgSiO_3$で、ペロブスカイト構造をとり、直方晶系に属する。ブリッジマナイトは無水鉱物であるが、水素をOH^-の形で結晶構造中に取り込むと考えられ、下部マントルでの“水”のリザーバーとなりうると考えられている。Purevjav *et al.* (2024)は高圧合成後のメスバウアースペクトル測定を考慮して、$^{57}Fe_2O_3$を出発物質の一部として用いて、化学組成$(Mg_{0.88}Fe^{2+}_{0.05}Fe^{3+}_{0.05}Al_{0.03})(Si_{0.88}Al_{0.11}H_{0.01})O_3$のブリッジマナイトの高品質な単結晶を高圧合成し、中性子回折・赤外分光測定などを用いて結晶構造中の水素の位置を決定した。Purevjav *et al.* (2024)では合成ブリッジマナイト単結晶中のFe^{2+}とFe^{3+}の量比をメスバウアースペクトルを用いて解析している。ブリッジマナイトのFe^{2+}とFe^{3+}はそれぞれ四極子分裂幅が異なるダブレットピークを示す。四極子分裂ピークは^{57}Feメスバウアー原子核位置での電場勾配に起因する。電場勾配は3行3列のテンソル量として表される。四極子分裂ダブレットピークの低速度側のピーク強度をI_l、高速度側のピーク強度をI_hとした時、高速度側の相対強度（ピーク強度：$[I_h/(I_h+I_l)]$）は電場勾配と相関を持ち、ピーク強度は3行3列のピーク強度テンソルから計算できる。単結晶試料の場合、一般的にI_lとI_hは等しくなく入射ガンマ線の方向に対する結晶方位に依存してそのピーク強度は変化する。しかし、Purevjav *et al.* (2024)におけるブリッジマナイト単結晶のメスバウアースペクトルの解析では、Fe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットーピークの分離においてそれぞれのピーク強度が等しいと仮定して分離している。粉末試料の場合にはピーク強度が等しいとして解析できるが、単結晶の場合にはピーク分離の際にピーク強度も解析時のパラメーターとして考慮しなければならない。本研究では、X線回折法で結晶方位を定めたブリッジマナイト単結晶のメスバウアースペクトルを測定し、Fe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットの強度テンソルを求めピーク分離を行った。

実験と結果　Purevjav *et al.* (2024)が合成したブリッジマナイト単結晶２粒を、X線プリセッションカメラを用いて結晶方位を特定し、*a*, *b*, *c*軸に垂直の定方位研磨片とし単結晶メスバウアースペクトル測定試料とした。直方晶系の場合、四極子ダブレットのピーク強度を決める強度テンソルは3行3列の対角行列と設定できる。結晶軸方向に対するガンマ線入射方向を等方的に複数選び、その複数のスペクトルを足し合わせ平均化することにより、ピーク強度は強度テンソルの対角成分の値に関わらず0.5とできる。本研究では等方的にガンマ線入射方向を９方向選び、単結晶メスバウアースペクトルを測定した。９つの単結晶メスバウアースペクトルの透過率を規格化・平均化したスペクトルに対して、ピーク強度0.5と固定して、メスバウアースペクトル解析ソフトウェアMosswinnを用いてFe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットピークに分離した。このピーク分離で得たアイソマーシフト、四極子分裂幅、半値幅の値を用いて９つの単結晶メスバウアースペクトルを解析し、結晶軸方向に対するガンマ線の入射方向とピーク強度を求めた。そしてZimmermann (1975)の方法を用いてガンマ線の入射方向とピーク強度の関係から、ブリッジマナイトのFe^{2+}とFe^{3+}の四極子ダブレットの強度テンソルを求めた。

REFERENCES:[1] Purevjav, N. et al. (2024) American Mineralogist. https://doi.org/10.2138/am-2022-8680[2] Zimmermann, R. (1975) Nucl. Instr. and Meth. **128**, 537-543

キーワード：ブリッジマナイト、メスバウアー分光法、強度テンソル
Keywords: Bridgmanite, Mössbauer spectroscopy, Intensity tensor

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

光熱変換型赤外分光法（O-PTIR）による粘土鉱物の同定

Clay mineral characterization by Optical Photothermal Induced Resonance (O-PTIR)

*城戸 太朗[1]、鈴木 庸平[1]
*Taro Kido[1], Yohey Suzuki[1]

1. 東大・院理
1. The University of Tokyo

粘土鉱物の同定で最も有効な分析手法は粉末試料のX線回折法（XRD）である。粘土鉱物の中でも膨潤性に富むスメクタイトは、エチレングリコールで処理することで底角側のピークがシフトすることで同定が可能である。しかし、この方法では岩石中の鉱物から形成した微少量の粘土鉱物を同定する場合にはしばしば問題が発生する。例えば、岩石中で一次鉱物と粘土鉱物の位置関係を明らかにできない問題、また十分な量の試料が得られないと明瞭なピークの取得が困難という問題がある。これらの問題を解決するために、結晶中の結合の情報と元素情報の両方を明らかにできる赤外分光法、特に光熱変換型赤外分光法（O-PTIR）を用いた粘土鉱物の同定を試みた。O-PTIRの原理は、試料に波長を変えられる赤外光レーザーを照射し、試料を赤外光で熱膨張させ、その熱膨張を赤外光レーザーと同軸の可視光レーザープローブで測定する。このように、O-PTIRは通常の赤外分光法と同様のスペクトルが得られる分析手法である。通常の赤外分光法の分析では、透過試料を作成する必要があり、透過しない岩石薄片から赤外スペクトルを得ることは困難であった。一方で、O-PTIRでは試料の上部から非接触・不透過で分析可能なため、岩石薄片に含まれる粘土鉱物の赤外スペクトルを容易に得られることが予想される。粘土鉱物の標準試料を顕微赤外分光法（μFT-IR）とO-PTIRで分析し、O-PTIRで粘土鉱物の赤外スペクトルが得られるか検証した。また、O-PTIRの分析で標準試料から得られたスペクトルと天然試料との比較することで、岩石薄片に含まれる粘土鉱物の位置の特定と同定を実施した。天然試料には東北沖のマントルゼノリスを含むプチスポット火山の玄武岩を対象とし、噴出後の深海底でマントルゼノリスと海水が反応することで形成した粘土鉱物を同定することを目的とした。モンモリロナイトの標準試料（JCSS-3101）のμFT-IRの分析では、910 cm^{-1}、1030 cm^{-1}、1110 cm^{-1}、1640 cm^{-1}のピークが認められ、O-PTIRでも同様のピークが認められた。よって、O-PTIRの分析では粘土鉱物、特にスメクタイトからスペクトルが得られることが確かめられた。当日の発表では、標準試料と天然試料について、μFT-IRとO-PTIRのスペクトルだけでなく、顕微ラマン分光法による分光分析やエネルギー分散型X線分光装置付属の走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)による元素分析の結果と比較し、天然試料におけるO-PTIRによる粘土鉱物の同定の可能性や分析対象の拡張性について議論する。

キーワード：スメクタイト、赤外分光法、ラマン分光法、X線回折法、SEM-EDS
Keywords: smectite, IR spectroscopy, Raman spectroscopy, X-ray diffraction, SEM-EDS

宝飾用合成カラー・ダイヤモンドの特性評価と宝石鑑別

Characterization and Identification of Synthetic Colored Diamonds for Jewelry Use

*北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1]、久永 美生[1]、山本 正博[1]
*Hiroshi KITAWAKI[1], Kentaro Emori[1], Mio Hisanaga[1], Masahiro Yamamoto[1]

1. ㈱中央宝石研究所
1. Central Gem Laboratory

宝飾用に供される合成ダイヤモンドのサイズおよび品質は年々向上しており、現在ではカット研磨後に50ctを超える大型の無色石も製造が可能である。いっぽうで、メレサイズ（0.2ct未満の小粒石）の各色のファンシーカラー・ダイヤモンドもジュエリーの素材として利用され始めている。宝飾用合成ダイヤモンドの製造はHPHT法とCVD法の２つの製法が用いられているが、両者では得られた製品の諸特徴が異なるためにそれぞれについて理解を深めておくことは宝石鑑別にとって重要である。

本研究では、CVD合成ダイヤモンドとして市販されていた0.1 ct未満の小粒の合成ファンシーカラー・ダイヤモンドを入手し、その特性評価を行い、鑑別特徴について検討した。試料はGreen、Greenish Blue、Yellow、Pink、Orangy Pink、Reddish Orange、Orangeの７種類の色に分類し、それぞれ5個ずつ計35 個を用いた。これらについて宝石顕微鏡による観察、赤外吸収スペクトルおよび紫外-可視吸収スペクトルの測定、DiamondView^{TM}による深紫外線蛍光像の観察、顕微Raman分光装置を用いての457nm、488nm、514nm、633nmおよび830nmレーザーによるフォトルミネッセンス分析(PL)を行った。結果的にOrangeの2 個のみがCVD合成法で製造されたもので、他の33 個はHPHT合成法で製造されたものであった。

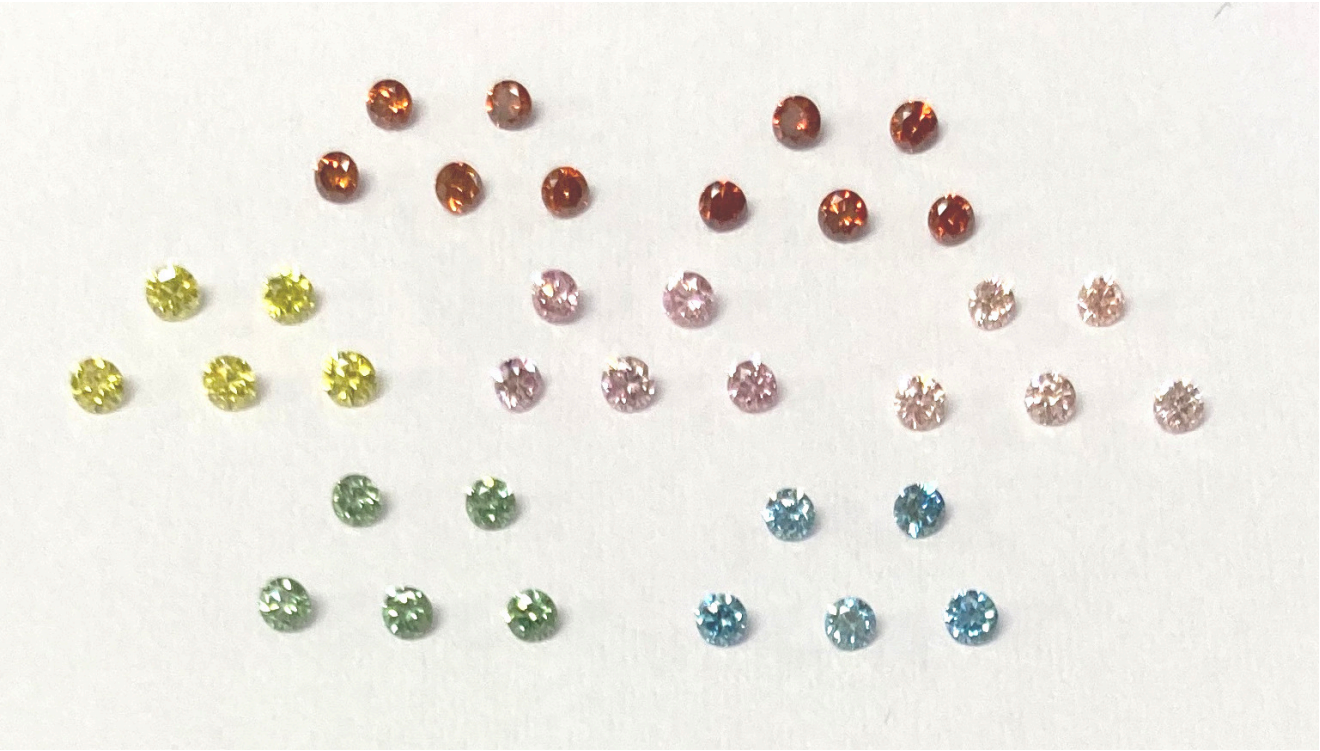
GreenおよびGreenish Blueについては、赤外吸収スペクトルで窒素が検出限界未満であり、紫外-可視吸収スペクトルとPLスペクトルで明瞭な741 nm(GR1)が観察された。また、GreenからはPLスペクトルにてGR1 (741 nm)より強い575 nm (NV^0)と 488.9nm、470.2nm（TR12）が検出された。深紫外線蛍光像の観察でHPHT合成特有の像が得られたが、Greenは黄橙色、Greenish Blueは青緑色の蛍光を呈した。これらのことからGreenおよびGreenish Blueには放射線照射が行われているが、Greenish Blueはさらに低温下（500℃程度）のアニールが施されていると考えられる

Yellowは赤外吸収スペクトルから高濃度のAセンタを有するⅠa型であり、微弱なCセンタおよび3107cm^{-1}が検出された。さらにPLスペクトルにおける544.5nmおよび523.8nmの存在などから、HPHT合成後に放射線照射とHPHT処理が施されたと考えられる。

Pink、Orangy Pink、Reddish Orange、Orangeは赤外吸収スペクトルで微弱な窒素関連の吸収が見られた。これらの色調のものにはすべてにおいて非常に強い575nm (NV^0)とそれよりも弱い637nm(NV^-)のPLピークが見られた。また、Reddish Orangeには741 nm(GR1)が紫外-可視吸収スペクトルとPLスペクトルの双方に見られた。このようにPink～Orange系の色調のものは合成後に放射線照射とアニーリング（800℃程度）が施されることで575nm (NV^0)、637nm(NV^-)および741 nm(GR1)が形成され、これらの強弱により色調が変化するものと考えられる。また、Orangeの2個については深紫外線蛍光像の観察とPLスペクトルの737nmの存在からCVD法で合成されたことが明らかとなった。

本研究では、メレサイズのファンシーカラー合成ダイヤモンドについてルースの状態で検査を行いその特性を評価した。CVD合成石として入手したが、CVD合成とHPHT合成が混在し、放射線照射やHPHT処理など複数の処理が施されていた。これらがジュエリーにセッティングされた状態で検査に供された場合、分析手法に制限がかかり、得られる情報が限定的となることも予測される。したがって、合成法や処理の特性を十分に理解し、鑑別に臨むことが重要である。

キーワード：メレサイズ、合成ダイヤモンド、ファンシー・カラー・ダイヤモンド、CVD、HPHT
Keywords: melee size, synthetic diamond, fancy color diamond, CVD, HPHT



@Japan Association of Mineralogical Sciences.

口頭講演

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

座長:黒澤 正紀(筑波大学)、北脇 裕士(中央宝石研究所)

2024年9月12日(木) 10:00 〜 12:00 ES024 (東山キャンパス)

11:05 〜 11:15

[1Lecture-201-07-5add]休憩

©日本鉱物科学会

オーストラリア産サファイアとその産地特徴

Blue Sapphire from Australia and its origin

*江森 健太郎[1]、北脇 裕士[1]
*Kentaro Emori[1], Hiroshi Kitawaki[1]

1. ㈱中央宝石研究所
1. Central Gem Laboratory

サファイアは歴史的に最も好まれてきたカラー・ストーンの一つである。現在でもサファイアとルビーを合わせたコランダムは、世界のカラー・ストーン市場に流通する宝石の1/3～1/2を占めると言われている。また、宝石の原産地は、歴史的に認知度の高い地域はブランドとして宝石に付加価値を与えるだけでなく、昨今のトレーサビリティなどの社会的欲求や消費者の知的好奇心を満たす不可欠な情報となっている。

筆者らは2015年の本会においてLA-ICP-MSを用いた宝石コランダムの原産地鑑別についての報告を行った。その後も研究を継続し、新たな原産地のアップデートを行っている。昨年はグリーンランド産ルビー、アメリカ合衆国モンタナ産ブルー・サファイアについて報告したが、今回は、オーストラリア産サファイアについて報告する。

オーストラリアでは1850年頃のゴールドラッシュで最初にサファイアが発見されており、大陸東部のアルカリ玄武岩噴出地域において3か所の重要な採掘地がある。ニューサウスウェールズ州のNew England Fields、クイーンズランド州のAnakie Fields およびクイーンズランド州北部のLava Plaines である。1800年代後半頃はロシアからの出稼ぎ労働者やドイツからの宝石商人らが買い付けを行い、一部はロシア皇帝一族に献上され、多くはロシアを初めとするヨーロッパの上流階級に供給されていた。その後、第一次大戦が勃発し、帝政ロシアの凋落により、オーストラリアでの採掘は実質的に停止した。その後、1960年代後半にタイの宝石商人が大挙して買い付けに訪れ、大量の原石を自国に持ち帰って加熱処理を行い、世界の宝石市場に供給した。オーストラリア産のサファイアは玄武岩関連起源で殆どが暗い色調であるため、タイの技術による加熱処理を施す必要があった。1970～1980年代には全世界のブルー・サファイアの生産量の70%近くがオーストラリア産であったと言われている。当時、タイのディーラーにより、品質の良いものはスリランカ産やタイ／カンボジア産として販売され、黒くて質の悪いものがオーストラリア産として供給されていた。そのためオーストラリア産には低品質のイメージが付きまとっていたが、近年はオーストラリアのディーラーが自国のサファイアをプロモートし、世界の宝石市場に供給している。日本国内においては、近年新たに市場供給されているものだけでなく、過去にジュエリーとして使用されていた還流品のサファイアにオーストラリア産が多く含まれており、オーストラリア産サファイアの原産地鑑別は非常に重要なものとなっている。

本研究では、日本国内にもっとも多く供給されたと思われるクイーンズランド州Anakie Fields産サファイア30点を用いた。うち20点はファセットカットされており、10点は原石の状態であった。色はイエローグリーン、ブルーグリーン、ブルー、イエローである。標準的な宝石学的検査に加え、分析にはフーリエ変換型赤外分光分析装置(日本分光FT/IR4100)、紫外可視分光光度計(V650)、LA-ICP-MS (LAとしてESI NWR213、ICP-MSとしてAgilent 7900rb)を用いて分析を行った。

オーストラリア産サファイアの包有物は他の玄武岩関連起源のサファイアと類似した特徴を示し、殆どは加熱処理が施されているため、原産地鑑別の手助けとなるケースは少ない。時折パイロクロアの結晶が見られ、カンボジア産の特徴とされるパイロクロアは赤味が強いのに対し、オーストラリア産は概して橙色である。LA-ICP-MS分析の結果、微量元素組成は玄武岩関連起源のブルー・サファイアの特徴と一致する。玄武岩関連起源のブルー・サファイアとしてはタイ、カンボジア、ナイジェリアといった原産地がよく知られている。これらの産地と比較し、オーストラリア産ブルー・サファイアはMg、Ti、Vの量は同レベルを含有するが、FeとGaの含有量が非常に高いという特徴があることが分かった。

LA-ICP-MS法を用いた微量元素測定のデータは一部がオーバーラップするが、オーストラリア産サファイ

アは比較的特徴があり、詳細な内部特徴の観察や標準的な宝石学特性を併用し相互補充的に用いることで原産地鑑別の精度を向上させることができる。

キーワード：LA-ICP-MS、コランダム、原産地鑑別、オーストラリア
Keywords: LA-ICP-MS, corundum, origin determination, Australia

エメラルドの原産地特徴と原産地鑑別における問題点

Emerald origin characteristics and problems in origin determination

*趙 政皓[1]、北脇 裕士[1]、江森 健太郎[1]
*Zhenghao Zhao[1], Hiroshi Kitawaki[1], Kentaro Emori[1]

1. 中央宝石研究所
1. Central Gem Laboratory

エメラルドはベリル（$Be_3Al_2Si_6O_{18}$）の一種であり、Al^{3+}を置換するCr^{3+}やV^{3+}によって鮮やかな緑色を呈する。古くから貴重な宝石として認識され、16世紀以降コロンビア産の高品質のエメラルドが最も高く評価されている。近年では、世界各地から品質の良いエメラルドが産出するようになり、トレーサビリティの観点からもエメラルドの原産地鑑別の重要性が急速に高まっている。

エメラルドの原産地鑑別についてはこれまで複数の先行研究があり、いくつかの分類法が提唱されている。例えば、S. Saeseaw et al. (2019)はエメラルドの形成環境と宝石学的特徴によって、エメラルドを熱水/変成型（以下熱水型と略す）と片岩ホスト/マグマ型（以下片岩型と略す）の2種類に分類した。世界中のエメラルドの大多数は片岩型であり（例えばザンビア・カフブ地域、ブラジル、ロシアなど）、Beを含有する花崗岩マグマがCrを含有する苦鉄質岩に侵入することでエメラルドを形成する。一方、熱水型エメラルドに属する産地は比較的少なく、コロンビアがその代表である。熱水型エメラルドの形成は、熱水による岩石内部の元素の移動に起因する。エメラルドの形成過程の違いはそれぞれに異なる諸特徴を生じ、原産地鑑別の重要な手がかりとなる。

本発表では主要な宝石エメラルドの原産地特徴と筆者らが採用している原産地鑑別の手法を紹介し、新たに明らかになった問題点についても言及する。本研究にはコロンビア、ザンビア、ブラジル、ロシア、アフガニスタン、パキスタン、エチオピアなど主要10ヶ国の産地のエメラルド合計284石を用い、宝石顕微鏡による内部特徴の観察、屈折率測定、赤外吸収スペクトルおよび紫外-可視吸収スペクトルの測定、LA-ICP-MSによる分析を行った。

国内での流通量が最も多いコロンビア産エメラルドは、熱水型に属し、他に多く存在する片岩型エメラルドに比べ、いくつか際立った特徴がある。例えば、ギザギザとした輪郭をもつキャビティ中に液体と気泡とNaCl結晶を含む三相包有物が頻度高く観察される。これは、形成時に取り込んだ熱水の性質に起因している。また、アルカリ金属と鉄の含有量が低いことにより、吸収スペクトルにも特徴があらわれる：赤外スペクトルに5447 cm^{-1}付近の金属イオンに影響されていないH_2Oの吸収が見られる；紫外可視スペクトルにFe^{2+}による830 nm中心の吸収がほぼ認められない。

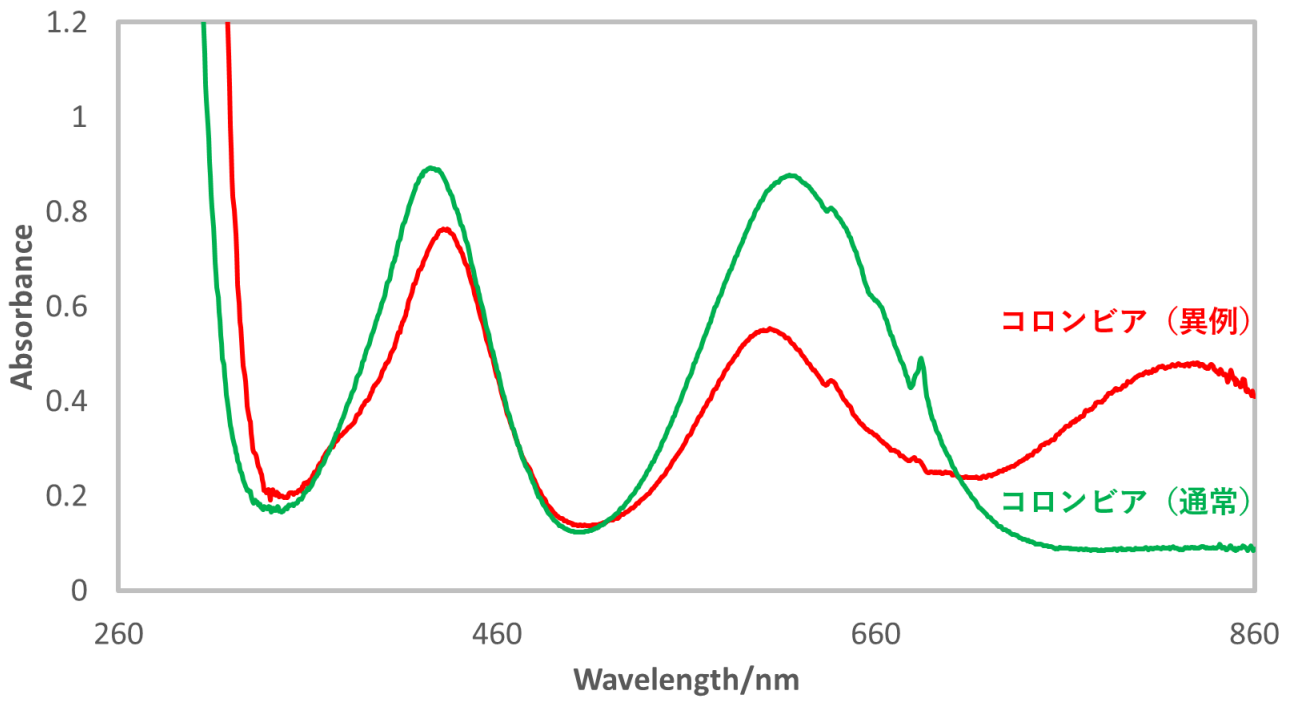
しかし、これらの特徴は他の熱水型の産地（例えばアフガニスタンとザンビア・ムサカシ地域）の石にもしばしば観察されている。さらに、本研究において図1に示すように、コロンビア産エメラルドにも明瞭な830 nm中心の吸収を示すものもあることがわかった。このように宝石学的な諸特徴が類似する場合にもLA-ICP-MSによる微量元素の分析が極めて有効であることがあらためて確認できた。

また、同じ原産国であっても採掘される場所や時期により得られる分析結果が異なることもある。例えば、現在国内に流通しているブラジル産エメラルドは主にミナス・ジェライス州産であるが、過去にバイーア州産のものも多く流通していた。両者とも片岩型であるが、それぞれの微量元素に特徴が見られた。しかし、バイーア州で最近採掘されたとされるエメラルドは、過去のものに見られなかった特徴を示し、むしろザンビア産に近似するものであった。このような場合においてもLA-ICP-MSによる微量元素の分析と線形判別分析による解析が極めて有効であることがわかった。

このように、明らかなコロンビアの諸特徴を示すもの以外のエメラルドについては原産地の決定をサポートするために微量元素の正確なデータが常に必要である。エメラルドの原産地については新たな産地が発見されるだけでなく、過去に流通したものについても精通しておく必要があり、データベースも常に更新しておくこ

とが極めて重要である。

キーワード：エメラルド、原産地鑑別、フーリエ変換赤外スペクトル、紫外可視近赤外スペクトル、レーザーアブレーションICP質量分析
Keywords: Emerald, Origin determination, FTIR Spectrum, UV-Vis-NIR Spectrum, LA-ICP-MS



宝石品質のジルコンとサファイアの年代測定とその原産地同定への応用；オーストラリア、ニューサウスウェールズ州、ニューイングランド地方のサファイア鉱山からの研究例

Gem zircon and sapphire age dating and application of origin determination; A study from New England sapphire fields, New South Wales, Australia

*阿依 アヒマディ[1]
*Ahmadjan ABDURIYIM[1]

1. Tokyo Gem Science LLC.
1. Tokyo Gem Science LLC

宝石品質のジルコンは、玄武岩質由来の残積層と漂砂層のサファイア/ルビー鉱床によく見られ、コランダムと同様に耐久性が高く、宝飾品として古くから使用されてきた。このようなジルコンは、オーストラリア東部、東南アジア、ロシアの大陸縁辺、アフリカ、マダガスカルに沿って広く分布している。また、内包物として変成岩と玄武岩起源のルビー／サファイアにも含まれている。地球化学的な年代測定法は鉱物試料に広く用いられているが、LA-ICP-MS分析装置によるU-Pb年代測定法は１９９０年代後半から宝石分野へ導入するようになり、オーストラリアのクインズランド産ブルー～グリーンサファイア、２０１５年以降に、ミャンマー、マダガスカル、スリランカ産などのブルーサファイアに含まれる微小なジルコン結晶を直径30～20ミクロンのエキシマレーザーで短時間照射し、U-Pb年代測定を行うようになったが、内包物であるジルコンを表面露出するまで研磨しなければならない。また、宝石の原産地を正確に同定するために、内包物の識別や分光分析や微量元素によるフィンガープリントの組成分類法などが応用されているが、U-Pb年代測定による年代情報から原産地同定への応用例は少ない。年代測定の研究例として、本発表の前半では、オーストラリア東部、ニューサウスウェールズ州、ニューイングランド地方のインベレル地区の白亜紀後期-新生代アルカリ玄武岩に関連する漂砂コランダム鉱床で発見されたジルコン斑晶について、LA-ICP-MS分析技術を用いた化学組成と地質年代学的データを提示する。インベレル地区に分布するキングスプレーンズ(Kings Plains)、スワンブルック(Swan Brook)、メアリーアンガリー(Mary Anne Gully)の3つの産地では、宝石品質の透明なブラウンとイエローのジルコンが産出され、そのほとんどが10mm未満。ブラウンジルコンはHfとREEの相対的な濃縮を示すが、色間の相対的な遷移金属元素の濃度に違いがなく、単結晶内の化学的均一性は、安定した結晶化条件を示す。3つの産地からのジルコンの$^{206}Pb/^{238}U$年代は、それぞれ174-216 Maと37.7-45 Maの古いグループと若いグループに分けられる。このインベレル地区の漂砂鉱床から産出されたジルコンには、三畳紀後期-ジュラ紀前期と始新世のエピソードの前後で、2つの主な形成時期があった。ほとんどはリソスフェアマントルに由来し、その後ホスト玄武岩質のマグマによって地表にもたらされた。発表の後半では、インベレル地区のブルーサファイアに含まれる縦幅60～100ミクロン、横幅30～40ミクロンのジルコンインクルージョンを標的とした年代測定例を報告する。その結果、$^{206}Pb/^{238}U$の平均年齢は34.9±1.4 Maが得られた。形態的特徴に基づいて、ジルコンはサファイア内部に共生インクルージョンとして観察され、サファイアの成長とジルコンインクルージョンの成長はほぼ同じ形成年代があることが示された。したがって、インベレル地区のブルーサファイアは始新世の間に形成され、始新世後期の火山噴火に関連している可能性があると推定される。異なる鉱床からのコランダムは、異なる地質時代に形成された可能性があり、年代測定法は、原産地の同定に役立つ証拠となり得る。

キーワード：ジルコン、サファイア、U-Pb年代測定、原産地、LA-ICP-MS
Keywords: zircon, sapphire, U-Pb age dating, geographic origin, LA-ICP-MS

口頭講演 | R3：高圧科学・地球深部

2024年9月12日(木) 10:00 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

座長:境 毅(愛媛大学)、新名 良介(明治大学)、石井 貴之(岡山大学)、川添 貴章(広島大学)

10:00 ~ 10:15

[R3-01] 弾性波速度および放射光X線回折測定と分子動力学シミュレーションによる$CaAl_2O_4$ガラスの圧力誘起ポリアモルフィック転移の解明

「招待講演」

*大平 格[1]、河野 義生[2,3]、Gréaux Steeve[3]、Drewitt James W E[4]、Jahn Sandro[5]、則竹 史哉[6]、尾原 幸浩[7,8]、廣井 慧[7,8]、近藤 望[9]、Hrubiak Rostislav[10]、肥後 祐司[8]、辻野 典秀[8]、柿澤 翔[8]、新田 清文[8]、関澤 央輝[8] (1. 学習院大・理、2. 関西学院大・理、3. 愛媛大・GRC、4. ブリストル大・物理、5. ケルン大・IGM、6. 山梨大・総合研究、7. 島根大・材料エネルギー、8. 高輝度光科学研究センター、9. 岡山大・IPM、10. アルゴンヌ国立研究所・HPCAT)

10:15 ~ 10:30

[R3-02] 分子動力学シミュレーションと放射光X線回折実験によるCO_2含有ナトリウムケイ酸塩メルトの構造解析

「発表賞エントリー」

*早舩 紫野[1]、小野寺 陽平[2]、小原 真司[2]、市川 晴貴[3]、坂巻 竜也[1]、舟越 賢一[4]、鈴木 昭夫[1] (1. 東北大・院理、2. NIMS、3. 東北大・理学部、4. CROSS)

10:30 ~ 10:45

[R3-03] 地球深部における$(Mg,Fe)_2SiO_4$高圧相ポワリエライトの存在可能性

*富岡 尚敬[1]、奥地 拓生[2]、Purevjav Narangoo[3]、宮原 正明[4] (1. JAMSTEC・高知コア研、2. 京都大・複合研、3. ソウル国立大・地球環境、4. 広島大・地球惑星)

10:45 ~ 11:00

[R3-04] Wadsleyite及びringwoodite中の含水量の温度依存性

*井上 徹[1,2]、濵田 雄士[2]、嘉屋 華恵[2]、江木 祐介[1]、前田 大地[1]、山口 和貴[1]、山田 晃之亮[1]、川添 貴章[1,2] (1. 広島大・院先進理工、2. 広島大・理)

11:00 ~ 11:15

[R3-05] 電子エネルギー損失分光法（EELS）を用いたウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の温度依存性の解明

「発表賞エントリー」

*山口 和貴[1]、川添 貴章[1]、井上 徹[1]、富岡 尚敬[2] (1. 広島大学、2. JAMSTEC高知コア研)

11:15 ~ 11:30

[R3-06] 中性子回折による陽イオンサイト占有率解析の利点と高圧鉱物への応用例

*奥地 拓生[1] (1. 京都大・複合研)

11:30 ~ 11:45

[R3-07] 下部マントル最上部条件までの$CaSiO_3$-H_2O系でのデイブマオアイトのその場格子体積観察

*高市 合流[1]、石井 貴之[2]、西原 遊[1]、松影 香子[3]、肥後 祐司[4]、辻野 典秀[4]、柿澤 翔[4] (1. 愛媛大学GRC、2. 岡山大学惑星物質研究所、3. 帝京科学大学自然環境学科、4. (公財）高輝度光科学研究センター)

11:45 ~ 12:00

[R3-08] 含水SiO_2の高圧下弾性波速度測定と下部マントル中の低速剪断波領域の起源への考察

「発表賞エントリー」

*森 悠一郎[1,2]、村上 元彦[2]、芳野 極[3]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理、2. ETHZ・地球科学部、3. 岡大・惑星研)

弾性波速度および放射光X線回折測定と分子動力学シミュレーションによる$CaAl_2O_4$ガラスの圧力誘起ポリアモルフィック転移の解明

Pressure-induced polyamorphic transition in $CaAl_2O_4$ glass revealed by elastic wave velocity and X-ray diffraction measurements and molecular dynamics simulations

*大平 格[1]、河野 義生[2,3]、Gréaux Steeve[3]、Drewitt James W E[4]、Jahn Sandro[5]、則竹 史哉[6]、尾原 幸浩[7,8]、廣井 慧[7,8]、近藤 望[9]、Hrubiak Rostislav[10]、肥後 祐司[8]、辻野 典秀[8]、柿澤 翔[8]、新田 清文[8]、関澤 央輝[8]
*Itaru Ohira[1], Yoshio Kono[2,3], Steeve Gréaux[3], James W E Drewitt[4], Sandro Jahn[5], Fumiya Noritake[6], Koji Ohara[7,8], Satoshi Hiroi[7,8], Nozomi M Kondo[9], Rostislav Hrubiak[10], Yuji Higo[8], Noriyoshi Tsujino[8], Sho Kakizawa[8], Kiyofumi Nitta[8], Oki Sekizawa[8]

1. 学習院大・理、2. 関西学院大・理、3. 愛媛大・GRC、4. ブリストル大・物理、5. ケルン大・IGM、6. 山梨大・総合研究、7. 島根大・材料エネルギー、8. 高輝度光科学研究センター、9. 岡山大・IPM、10. アルゴンヌ国立研究所・HPCAT
1. Gakushuin Univ. Sci., 2. Kwansei Gakuin Univ. Sci., 3. Ehime Univ. GRC, 4. U. Bristol Phys., 5. U. Cologne IGM, 6. U. Yamanashi Interdisciplinary Research, 7. Shimane Univ. Materials for Energy, 8. JASRI, 9. Okayama Univ. IPM, 10. ANL HPCAT

In recent years, there has been increasing emphasis on the fabrication and characterization of non-conventional network glass formers such as $CaO–Al_2O_3$, $BaO–Al_2O_3$, and $BaO–TiO_2$ in material science [e.g., 1]. Although these systems are different from those of magmas traditionally studied in geoscience field, recent experiments have confirmed the formation of network-modifiers- and Al-rich partial melts at the conditions of the transition zone and the lower mantle [2,3]. Therefore, the high-pressure studies of non-conventional network glass formers, as well as typical network-forming oxide glasses such as SiO_2 glass, are also important in understanding the pressure-induced changes of structure and physical properties of the magmas in the deep earth.

In this study, we conducted elastic wave velocity and XRD measurements and molecular dynamics (MD) simulations on $CaAl_2O_4$ glass. Ultrasonic velocity measurements up to 24 GPa at BL04B1 at SPring-8 reveal abrupt and irreversible increases in the v_P and v_S at ~8–10 GPa. Total structure factor and pair distribution functions measured by synchrotron XRD at 16-BM-B at APS and BL37XU at SPring-8 show a rapid change in the intermediate range structure, which is likely attributed to a rearrangement of Ca ions over this narrow pressure condition. Structure models obtained from MD simulations reveal that this intermediate range structure is explained by a transition of Ca–O void radius distribution from a bimodal distribution with peaks at ~2.1 Åand ~2.4 Åto a single distribution centered at ~2.1 Å. The abrupt structural changes involving the rapid increase in elastic wave velocity in $CaAl_2O_4$ glass are markedly different to the continuous transformations reported in SiO_2 glass. The polyamorphic transition observed in this study may be one of the key mechanisms in the densification and the changes in seismic wave velocity of the magma just above the 410 km discontinuity.

References
[1] A. Masuno, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 091003 (2022).
[2] G. K. Pradhan *et al.*, Earth Planet. Sci. Lett., **431**, 247 (2015).
[3] A. Nakajima *et al.* Sci. Rep. **9**, 7420 (2019).

キーワード：酸化物ガラス、ポリアモルフィズム、弾性波速度、放射光X線回折、分子動力学シミュレーション
Keywords: oxide glass, polyamorphism, elastic wave velocity, synchrtron X-ray diffraction, molecular dynamics simulations

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

分子動力学シミュレーションと放射光X線回折実験によるCO_2含有ナトリウムケイ酸塩メルトの構造解析

Structural analysis of CO_2-bearing sodium silicate melts using molecular dynamics simulations and synchrotron radiation X-ray diffraction experiments

*早舩 紫野[1]、小野寺 陽平[2]、小原 真司[2]、市川 晴貴[3]、坂巻 竜也[1]、舟越 賢一[4]、鈴木 昭夫[1]
*Shino HAYAFUNE[1], Yohei Onodera[2], Shinji Kohara[2], Haruki Ichikawa[3], Tatsuya Sakamaki[1], Kenichi Funakoshi[4], Akio Suzuki[1]

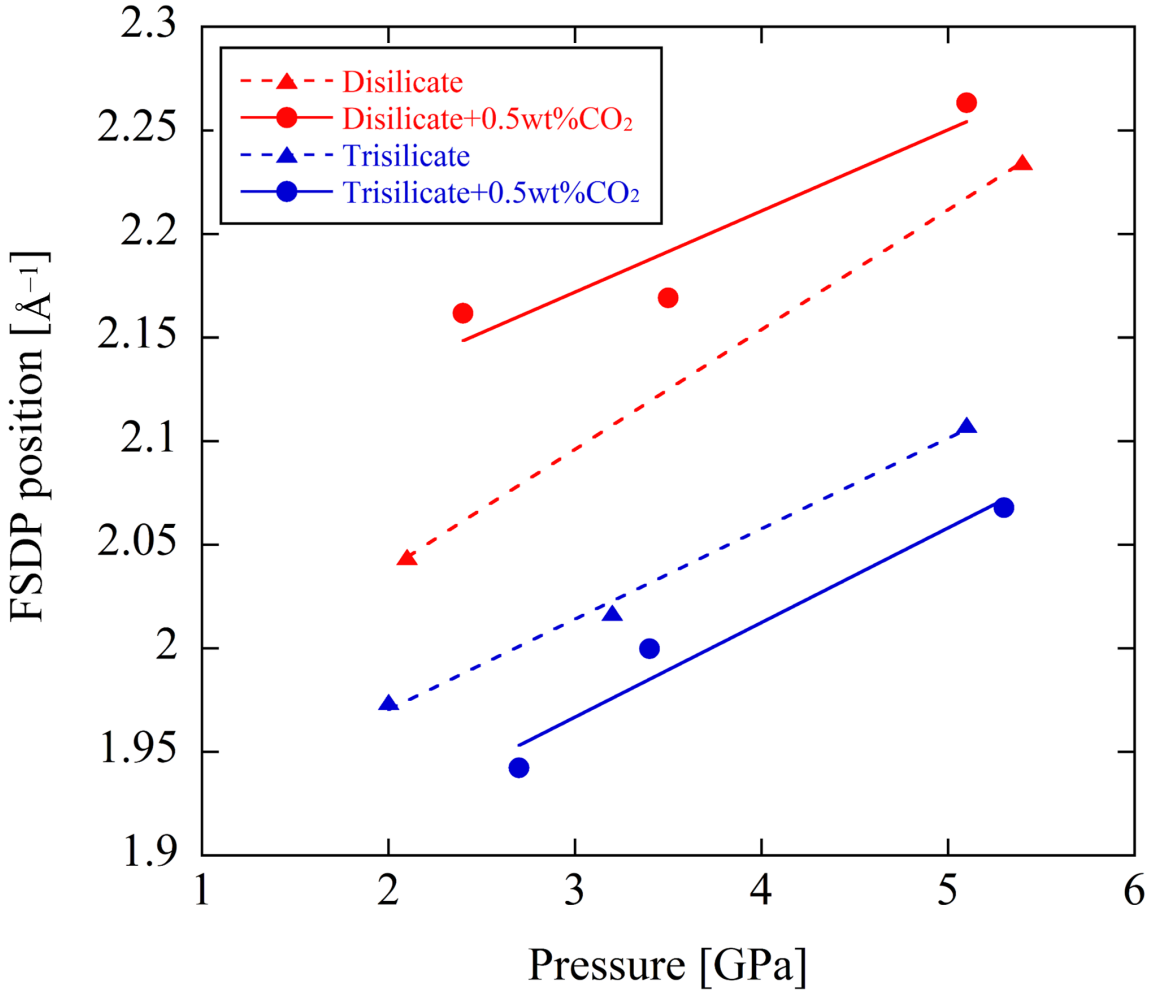
1. 東北大・院理、2. NIMS、3. 東北大・理学部、4. CROSS
1. Tohoku Univ. Graduate School of Science., 2. NIMS, 3. Tohoku Univ. School of Science., 4. CROSS

地球内部においてH_2OやCO_2などの揮発性成分はマントル構成岩石の溶融温度を効率的に下げる性質を持ち, 地球内部でのマグマ生成を引き起こす. そして, マグマ中に溶け込んだ揮発性成分はマグマの輸送特性を支配する密度や粘性などの物理的性質に対しても影響を及ぼすことが知られている. そのため, H_2Oを含むケイ酸塩メルトの構造の解明を目指す研究は数多く報告されている。それに対し, CO_2を含むケイ酸塩メルトの構造に関する研究はその重要性にも関わらず研究例は限られている. これは長距離秩序を持たない液体構造のモデリングや単純化が困難であること, 高圧力下のCO_2含有珪酸塩メルトのその場実験観察が実験的に困難であることなどが原因として考えられる. 特に, 高圧力条件下でCO_2が重合度やSiO_4ネットワークに与える影響について, 詳細な理解には及んでいない. そこで本研究ではそれらを解明するために, 高温高圧条件下において CO_2含有3成分系であるNa_2O–SiO_2–CO_2メルトの構造を古典的分子動力学(MD)シミュレーションとX線回折(XRD)実験を用いることで調べた.

放射光XRD実験は高エネルギー加速器研究機構(KEK)のPF–ARのNE5Cビームラインで行った. 圧力5.4 GPaまでの条件下で, 0.5 wt%のCO_2を含むナトリウムケイ酸塩メルト(Na_2O–$2SiO_2$ (disilicate), Na_2O–$3SiO_2$ (trisilicate))の構造をエネルギー分散X線回折法により測定した. 得られたX線散乱パターンをMCEDXを用いて構造因子$S(Q)$に規格化し,フーリエ変換して二体分布関数$g(r)$を得た. MDシミュレーションは, ケイ酸塩液体中のCO_2の反応 [CO_2+O^{2-}(ケイ酸塩メルト) ⇔CO_3^{2-}]を記述する経験的な二体ポテンシャル[4]を用いて, 60–700個のCO_2分子を含む約30000粒子の系において, NPTアンサンブルを用いて実施した. 計算は分子動力学シミュレータのLAMMPSを使用した.

XRD実験から, CO_2含有によりDisilicateでは第一回折ピーク(FSDP)が高Q側にシフトしたのに対し, Trisilicateでは低Q側にシフトしていることが明らかになった. MDシミュレーションからは, ケイ酸塩メルトにおいてCO_2分子とCO_3^{2-}イオンの生成が確認され, 高圧になるほどCO_2分子に対してCO_3^{2-}イオンの割合が増加する傾向が見られた. 当日は, カチオンの周りのOの配位数やQ^n分布など, メルトの三次元ネットワーク構造にCO_2がどのように影響するかについて定量的に議論する.

キーワード：ナトリウムケイ酸塩メルト、非晶質構造解析、二酸化炭素
Keywords: Sodium Silicate melt, Amorphous Structure Analysis, CO2


Disilicate
Disilicate+0.5wt%CO2
Trisilicate
Trisilicate+0.5wt%CO2
FSDP position [Å⁻¹]
Pressure [GPa]
2.3
2.25
2.2
2.15
2.1
2.05
2
1.95
1.9
1
2
3
4
5
6

地球深部における$(Mg,Fe)_2SiO_4$高圧相ポワリエライトの存在可能性

Possible presence of poirierite, a high-pressure phase of $(Mg,Fe)_2SiO_4$, in the deep Earth's mantle

*富岡 尚敬[1]、奥地 拓生[2]、Purevjav Narangoo[3]、宮原 正明[4]
*Naotaka TOMIOKA[1], Takuo Okuchi[2], Narangoo Purevjav[3], Masaaki Miyahara[4]

1. JAMSTEC・高知コア研、2. 京都大・複合研、3. ソウル国立大・地球環境、4. 広島大・地球惑星
1. KOCHI, JAMSTEC, 2. KRUNS, Kyoto Univ., 3. Seoul National Univ., 4. Earth Planet Sci., Hiroshima Univ.

オリビンは圧力の増加に伴い、準スピネル構造のワズレアイト、スピネル構造のリングウッダイトに相転移する。これらの多形間のトポロジー的解析により、第３の高圧相であるイプシロン相が予測された[1]。イプシロン相は準スピネル構造で最も小さな単位格子を持ち、この構造モジュールの配向の違いにより、ワズレアイト、リングウッダイトの構造が表現できる。一方、オリビンとイプシロン相は、酸素のパッキングは異なるが陽イオンの配列は同じ、という共通点を持つ。このように、イプシロン相は全てのオリビン多形と結晶構造的な類似性を持つため、各安定相間の相転移を中継する準安定構造としての役割を担っている可能性がある。

最近、筆者らは強い衝撃を受けた隕石中に同相を発見し、新鉱物ポワリエライトと命名した [2, 3]。ポワリエライトはリングウッダイト、ワズレアイト中にナノスケールのコヒーレントラメラとして形成されており、衝撃圧力の開放過程で両相から準安定的に形成されたと考えられる。しかし、その詳しい形成条件は明らかでない。そこで本研究では、オリビンの静的高圧相転移実験を行い、ポワリエライトの形成条件を探ることを目的とした。

高圧相転移実験では、米国サンカルロス産の$(Mg_{0.91}, Fe_{0.09})_2SiO_4$オリビン単結晶を粉砕し、100μm以下の不均一な粒径を持つ粉末とした。この粉末をMgOカプセルに封入し、川井型マルチアンビル装置により12, 14, 16 GPa、900 ℃の圧力温度条件で120分間保持した。急冷減圧して回収した試料について、微小部X線による相同定（Rigaku SmartLab）、走査電子顕微鏡による全体組織の観察を行った後、オリビンの相転移境界部分をFIB（(Hitachi SMI-4050）で超薄切片に加工してTEM（JEOL JEM-ARM200F）による極微細組織観察を行った。

相転移実験において、オリビン粒子は粒界にて部分的に高圧相転移していた。12、14、16 GPaにおける生成相はそれぞれ、ワズレアイト、ワズレアイト+リングウッダイト、リングウッダイトであった。ワズレアイト、リングウッダイトの粒径は0.5-1.5 μmである。大半のリングウッダイト結晶粒子は、{110}上に積層欠陥を持つ。それらの電子回折パターンは、リングウッダイトの回折スポットに加えて、ポワリエライトに対応する微弱な回折スポットを示し、両相の結晶方位関係は、隕石で観察されたものと同じであった。いくつかのワズレアイト粒子は(010)面に積層欠陥を持つが、これまでの観察では、ポワリエライトの電子線回折スポットは見つかっていない。未反応のオリビン粒子内に高圧相は一切みられず、塑性変形を示す転位のみが観察される。転位密度は$1.4–2.1\times10^9/cm^2$で、オリビン差応力計 [4] によると、0.5–0.6 GPaの差応力に相当する。

以上の隕石試料と実験試料の微細構造および結晶学的観察結果から、14 GPa以上の圧力にてオリビンに高差応力が加えられると、ナノスケールのポワリエライトを含むリングウッダイトに相転移することが明らかになった。ワズレアイト中のポワリエライト形成条件については、引き続き実験的検討を行う予定である。

文献 [1] Madon, M. and Poirier, J. P. (1983) *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 33, 31–44. [2] Tomioka, N. and Okuchi, T. (2017) *Sci. Rep.* 7, 17351. [3] Tomioka, N., Bindi, L., Okuchi, T., Miyahara, M., Iitaka, T., Li, Z., Kawatsu, T., Xie, X., Purevjav, N., Tani, R., and Kodama, Y. (2021) *Commun. Earth & Environ.* 2, 16. [4] Kohlstedt, D. L., Goetze, C., and Durham, W. B. (1976) in *Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*, 35–49.

キーワード：オリビン、ポワリエライト、高圧相転移、透過電子顕微鏡
Keywords: olivine, poirierite, high-pressure phase transformation, transmission electron microscope

Wadsleyite及びringwoodite中の含水量の温度依存性

Temperature dependence of water content in wadsleyite and ringwoodite

*井上 徹[1,2]、濵田 雄士[2]、嘉屋 華恵[2]、江木 祐介[1]、前田 大地[1]、山口 和貴[1]、山田 晃之亮[1]、川添 貴章[1,2]

*Toru INOUE[1,2], Yuji HAMADA[2], Hanae KAYA[2], Yusuke EGI[1], Daichi MAEDA[1], Kazutaka YAMAGUCHI[1], Konosuke YAMADA[1], Takaaki KAWAZOE[1,2]

1. 広島大・院先進理工、2. 広島大・理
1. Hiroshima Univ. Adv. Sci. Eng., 2. Hiroshima Univ. Sci.

１．はじめに

マントル遷移層（地球深部約410 km～660 kmに相当）の主要構成鉱物はolivineの高圧相であるwadsleyite (Wd) 及び ringwoodite (Rw) であることは多くの研究者が認めるところである。これらの相は名目上無水鉱物（Nominally anhydrous mineral (NAM)）であるが，数wt%レベルの水が結晶構造中に含まれうることが明らかにされており（例えばInoue et al., 1995; Kohlstedt et al., 1996），マントル遷移層は水の貯蔵庫として働くことが示唆されてきた。そのような中，Pearson et al. (2014) において~1.4 wt%含水化したRwがダイヤモンド包有物中に発見され，マントル遷移層が少なくとも局所的には含水化していることが明らかとなった。鉱物の含水量はその物性に多大な影響を及ぼすため，Wd及びRw中の含水量の温度依存性を明らかにすることは地球深部ダイナミクスを議論するうえで重要である。この温度依存性に関しては，先行研究結果が既に出されてはいるが (Ohtani et al., 2001; Litasov and Ohtani, 2003) ，その結果には不一致も見られ，明確に決定されたとは言い難い。したがって本研究では，WdとRwの含水量の温度依存性を再検討することを目的に，実験的研究を行った。

２．実験方法

実験試料はMg_2SiO_4 及び$(Mg_{0.9}, Fe_{0.1})_2SiO_4$ にH_2Oを5 wt%加えた2種類の試料を準備した。出発試料としては，上記の組成になる$Mg(OH)_2$, MgO, SiO_2, Fe_2SiO_4の粉末混合試料を準備した。H_2O成分の流出を防ぐため，試料はAuPdカプセルに封入した。

高圧合成実験は広島大学設置の川井型（MA8型）高圧発生装置MAPLE600を使用して行った。実験条件は，Wdは15 GPa, 1200-1600℃, Rwは20 GPa, 1200-1500℃とした。保持時間は1時間で統一した。

回収した試料は鏡面研磨を行った後，SEMで組織観察を行い，EPMAで化学組成を測定した。相同定は微小部XRDを用いて行った。含水量はEPMA total欠損値から推定した。尚，今回の測定では粒径がプローブ径より十分大きく，かつ平滑な面を測定したため，total欠損はH_2Oの寄与以外は考えにくい。したがってEPMA定量分析の際のZAF補正（マトリックス補正）には，水素の存在も考慮した補正を行った。更にWdについては，clinoenstatite (CEn) が共存したため，このCEnはほぼ無水（含水量 0 wt%）と仮定し規格化して推定を行った。加えて，比較検討のため，Inoue et al. (1995)で示唆されている含水置換 ($[Mg^{2+}+Fe^{2+}] \leftrightarrow 2H^{+}$)から推定される含水量も計算した。

３．結果及び考察

図1に15 GPaでのMg_2SiO_4 Wdの最大含水量の温度依存性を示す。本研究で1300-1600℃で得られたWdはすべて含水メルトと共存していたため，各温度での最大含水量を示していると考えられる。尚，This study (CEn補正) はCEnを無水と仮定して規格化した値，This study (置換様式) はInoue et al. (1995)で示唆された置換を仮定して推定した値を示す。無水条件下での融点は約2500℃ (Ohtani&Kumazawa, 1981)であることから，温度低下とともに最大含水量は1300℃まで著しく増加することが解る。この傾向はDemouchy et al. (2005) の1300-1400℃でのデータとも一致する。一方，Demouchy et al. (2005) のデータ引用になるが1200℃以下では含水量はほとんど変わらない結果となっている。本研究結果から，例えば15 GPaでのマント

ルの温度を約1500℃と仮定すると，Mg_2SiO_4 Wd中には最大1~1.5 wt%程度の水が含まれ得ると予想される。

一方，20 GPa, 1200-1500℃で含水メルトと共存したRwが合成され，各温度での最大含水量が決定できた。RwでもWd同様，温度低下とともに最大含水量が著しく増加する傾向を示した。本研究結果から，Pearson et al. (2014)のダイヤモンド包有物中のRwは含水量が~1.4 wt%であることから，1400-1500℃の条件下で生成されたと推定される。

キーワード：ウォズレアイト、リングウッダイト、最大含水量、マントル遷移層
Keywords: wadsleyite, ringwoodite, maximum water solubility, mantle transition zone

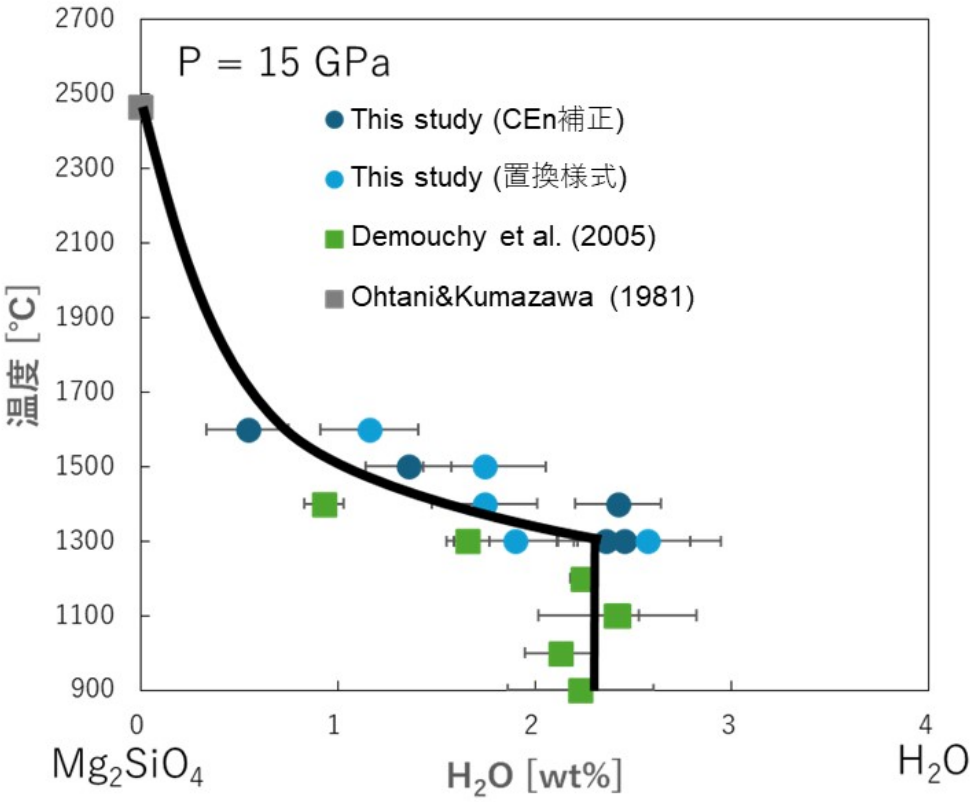


図1. Mg_2SiO_4 wadsleyite の最大含水量の温度依存性

電子エネルギー損失分光法（EELS）を用いたウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の温度依存性の解明

Temperature dependence of the $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ ratio in wadsleyite by electron energy loss spectroscopy (EELS)

*山口 和貴[1]、川添 貴章[1]、井上 徹[1]、富岡 尚敬[2]
*Kazutaka YAMAGUCHI[1], Takaaki Kawazoe[1], Toru Inoue[1], Naotaka Tomioka[2]

1. 広島大学、2. JAMSTEC高知コア研
1. Hiroshima University, 2. JAMSTEC, Kochi institute

地球のマントル遷移層上部の約60%はカンラン石の高圧相であるウォズリアイトで構成されている。マントル遷移層には海洋プレートの沈み込みにより水や３価の鉄イオンが供給されている。3価の鉄イオンは、ウォズリアイトの弾性的性質（Buchen et al. 2017）と含水化メカニズム（Kawazoe et al. 2016）に影響することが分かっている。また、酸素分圧がウォズリアイトのソリダス温度（山口 2023 修士論文）と粒成長速度（Nishihara et al. 2006）に影響することも明らかになっている。マントル遷移層の平均温度は約1600℃（Katsura, 2022）とされているが、マントル遷移層の温度は沈み込むスラブとホットプルームにおいて大きく異なり、その差はマントル遷移層下部で約1100℃である（Maruyama et al., 2001; Maruyama et al., 2007; Kubo et al., 2009）。このため、3価の鉄イオンがウォズリアイトの物性に及ぼす影響を制約するためには、ウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の温度依存性の解明が必要不可欠である。そこで本研究では、川井型マルチアンビル装置と電子エネルギー損失分光法（EELS）を用いてウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の温度依存性を明らかにするための高温高圧実験と回収試料の分析を行った。出発物質にはサンカルロス産カンラン石の粉末を用いた。出発物質は酸素分圧バッファーとともにAuカプセルに封入した。高温高圧実験は、広島大学設置の川井型マルチアンビル装置MAPLE600を用いて行った。実験は13.7～14.6 GPa、1300～1600℃の温度圧力条件で行った。これらの温度圧力条件を1分から30分保持し急冷した。酸素分圧は$Re\text{-}ReO_2$バッファーと$Mo\text{-}MoO_2$バッファーを用いて制御した。回収試料は、鏡面研磨後、反射顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザーを用いて観察し、元素組成を分析した。回収試料の相同定には、微小領域Ｘ線回折法、顕微ラマン分光法と電子線回折法を用いた。ウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比の測定には電子エネルギー損失分光法（EELS）を用いた。$Re\text{-}ReO_2$バッファー試料における各温度での$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比は、1300, 1400, 1500, 1600℃においてそれぞれ0.15±0.03, 0.26±0.06, 0.29±0.04, 0.20±0.03であった。このように1300～1500℃において、ウォズリアイトの$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比は温度上昇とともに増加した。一方1600℃において、$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比が1500℃のものよりも減少した。1500℃と1600℃では急冷メルトが存在していたため、部分熔融が$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比に影響した可能性がある。　本測定の前には、電子線による試料へのダメージの影響を評価するためにタイムランを行った。タイムランは、10秒×1回の測定を積算する方法で行った。この結果、少なくともビーム照射時間が100秒までは電子線によるダメージは受けていないことが分かった。本測定は60～90秒で行ったため、本研究で報告した$Fe^{3+}/\Sigma Fe$比はビームダメージの影響を受けていないと評価できる。

キーワード：ウォズリアイト、３価の鉄イオン、酸素フィガシティー、電子エネルギー損失分光
Keywords: Wadsleyite, Ferric iron, Oxygen fugacity, Electron energy loss spectroscopy

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

中性子回折による陽イオンサイト占有率解析の利点と高圧鉱物への応用例

Advantage on the analysis of cation site occupancies by neutron diffraction and some examples of application for high-pressure minerals

*奥地 拓生[1]
*Takuo OKUCHI[1]

1. 京都大・複合研
1. Kyoto Univ.

中性子回折は結晶中の水素の構造パラメーターの決定、磁性を有する結晶の磁気的構造の解析、および非晶質物質の局所構造の解析に対して広く用いられてきた手法である。これらの要素を含まない結晶構造解析に対してはX線回折を利用する場合が一般的である。一方で、そのような場合においても中性子回折の利用が科学的意義のある結果をもたらす場合がある。これは中性子が (i) 酸素などの水素以外の軽元素の構造パラメーター決定にも非常に有効であり、(ii) 原子番号が近い元素を見分けることが容易であり、さらに (iii) d値の小さな反射の計測が行いやすいプローブであることによる。本発表では、中性子のこれらの特徴を改めて考慮した上での鉱物学研究への応用の可能性を、高圧鉱物へのいくつかの応用例を踏まえて提案する。

例えば上記の利点のうち (iii) を充分に活用することができれば、高い空間分解能の構造解析を実現できるとともに、用いる反射の総数の増加によってサイト占有率の精度を大きく向上させることができる。単結晶回折法では最小のd値が0.30〜0.50 Åに達する解析も可能であり、ここからサイト占有率を三桁の有効数字で求めることができる[1-3]。また、粉末回折法においても最小の計測可能なd値が小さくなって反射の総数が増えることで、同じような効果が得られる場合は多い[4]。特に陽イオンのサイト占有率は複数種類のイオンが相関をとりつつ変化するパラメーターである場合が多く、各イオンの占有率の動向を注意深く比較検討することで置換の様式が具体的にわかってくる場合は多い。

将来に予定されている大型中性子散乱施設の新たな稼働と、その場での中性子回折装置の新たな設置の計画を踏まえて[5]、鉱物学の分野における中性子回折の広い応用の可能性を、今後も提案していきたい。

文献
[1] Purevjav, Okuchi et al., Acta Cryst., B74, 115 (2018)
[2] Purevjav, Okuchi et al. IUCrJ, 7. 370 (2020)
[3] Purevjav et al. Am. Mineral., 109, 1036 (2024)
[4] Tomioka, Okuchi et al., Phys. Chem. Mierals, 43, 267 (2016)
[5] https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/labnrr/

キーワード：中性子回折
Keywords: Neutron diffracton

下部マントル最上部条件までの$CaSiO_3$-H_2O系でのデイブマオアイトのその場格子体積観察

In situ lattice volume observation of davemaoite in the $CaSiO_3$-H_2O system up to uppermost lower mantle conditions

*高市 合流[1]、石井 貴之[2]、西原 遊[1]、松影 香子[3]、肥後 祐司[4]、辻野 典秀[4]、柿澤 翔[4]
*Goru Takaichi[1], Takayuki Ishii[2], Yu Nishihara[1], Kyoko Matsukage[3], Yuji Higo[4], Noiyoshi Tsujino[4], Sho Kakizawa[4]

1. 愛媛大学GRC、2. 岡山大学惑星物質研究所、3. 帝京科学大学自然環境学科、4. (公財）高輝度光科学研究センター
1. GRC, Ehime Univ., 2. IPM, Okayama Univ., 3. Teikyo University of Science, 4. JASRI

下部マントルの主要な鉱物であるデイブマオナイト ($CaSiO_3$ペロブスカイト、以下Dm)の水の溶解度は、 下部マントルにおける水の分布や輸送量を正確に理解する上で重要である。 近年、 下部マントル圧力でのダイヤモンドアンビルセル（DAC）を用いた実験や理論計算により、 Dmの体積は水の含有により縮小すると提唱された(Chen et al., 2020)(Shim et al., 2022)。 これらの先行研究では、2-3%の格子体積縮小率が、0.5-2wt%の含水量に相当すると報告している。しかし、含水量と格子体積変化の関連は実験例が少なく、Dmの飽和含水量とその安定性はよく分かっていない。 そこで本研究では、技術開発により実現した水飽和系でのマルチアンビル装置を用いたその場X線観察実験により、高温高圧下でのDmの格子体積を調査した。含水量~14 wt%の天然の鉱物、 スオルナイト（$Ca_2Si_2O_5(OH)_2 \cdot H_2O$）を出発物質として、 SPring-8のBL04B1に設置されている高圧発生装置SPEED-MkIIを用いて圧力10-30 GPa、 温度1723℃までのX線その場観察実験を行った。 揺動を行いながらエネルギー分散型システムにより高温高圧下での試料中の金と試料のX線回折パターンを取得し、 出現相の確認および圧力と試料の格子体積を算出した。加熱中の各温度圧力で取得された試料のXRDから、出現が確認された相は、スオルナイト・Dm・氷VII相であった。また10-28 GPaの1000℃以下では未同定ピークが観察された。これは未知含水相に由来するものだと考えており、発表で詳細を説明する。その場格子体積観察では、 約15 GPaでのDmの格子体積は、500℃で出現後1300℃まで無水の格子体積とほぼ等しいことが分かった。 一方で、 約20-28 GPaでは、最初に出現したDmの格子体積は最大+0.8~+4.3%と過剰に膨張していた(過剰体積)。 しかし過剰体積は温度の上昇・時間経過により縮小した。さらに20 GPa以上では、縮小した格子体積は昇温に伴い無水Dmの格子体積よりも小さい値を示すことが分かった（-0.2~-0.7%）。水飽和系でのDmの格子体積が縮小することはChen et al. (2020)と整合的な観察であるため、Chen et al. (2020)の見積もりを参考にすると約0.1 wt%の水の含有に相当する。しかしより正確に飽和含水量を推定するため、二次イオン質量分析計（SIMS）による含水量測定を検討中である。

キーワード：水輸送、名目上無水鉱物、デイブマオアイト、マントル遷移層、下部マントル
Keywords: Water transport, Nominally anhydrous minerals, Davemaoite, Mantle transition zone, Lower mantle

含水SiO_2の高圧下弾性波速度測定と下部マントル中の低速剪断波領域の起源への考察

Elasticity Measurements of Hydrous SiO_2 post-stishovite and its implication to the seismic anomalies in the lower mantle

*森 悠一郎[1,2]、村上 元彦[2]、芳野 極[3]、鍵 裕之[1]
*Yuichiro MORI[1,2], Motohiko MURAKAMI[2], Takashi YOSHINO[3], Hiroyuki KAGI[1]

1. 東大・院理、2. ETHZ・地球科学部、3. 岡大・惑星研
1. UTokyo. Sci., 2. ETHZ. D-ERDW., 3. Okayama Univ. IPM

含水SiO_2の高圧下弾性波速度測定と下部マントル中の低速剪断波領域の起源への考察 沈み込むスラブを通して下部マントルへと供給された地殻物質は、*S*-to-*P*散乱体や核マントル境界(CMB)上部のLLSVPの剪断波速度異常低下の成因として有力な候補の一つである。SiO_2の高圧相はMORB中で最も「硬い」鉱物として知られ、下部マントル全圧力領域において、MORB総体積の20-30%を占める。しかし、Rutile型から$CaCl_2$型への2次相転移によって、急激に剪断波速度が低くなる（Reuss平均では剛性率が0）ため、SiO_2は*S*-to-*P*散乱体の低い剪断波をもたらす起源の候補である。これらの散乱体は下部マントル中800-1600 kmという非常に幅広い深さで検知されているが、純粋なSiO_2の相転移圧力はこれに比べて高すぎる[1]。SiO_2の強弾性相転移は水やアルミニウムの固溶によって優位に低下することから[2]、MORB中の含水SiO_2が*S*-to-*P*散乱体を作り出すという仮説が有力である。加えて、SiO_2の$CaCl_2$相(post-stishovite)は水を多く固溶し、高温高圧環境まで wt.%オーダーの水を保持することが近年の研究で示唆されている[3,4]。しかし、下部マントルの中域～マントル最下部圧力までの含水SiO_2の弾性波速度の測定実験を一貫しておこなった実験はこれまでにない。 そこで、本研究では、高圧合成した含水StishoviteをDACに封入し、ブリルアン散乱分光実験をおこない、高圧下での含水post-stishovite剪断波速度を決定した。得られたBrillouin散乱スペクトルのピーク位置から弾性波速度を計算している。

弾性波速度の含水による効果を抽出するため、無水SiO_2の剪断波速度の圧力依存性を知りたい。無水SiO_2の横波速度に関して、約70 GPaまでBrillouin散乱分光実験が行われた先行研究をもちいて[5]、有限歪の方程式でフィッティングをおこなった。その結果、(1)無水post-stishoviteの弾性波速度は理論値[6]よりも大幅に小さく、(2)含水post-stishoviteはそれよりさらに低速であったが、横波速度は圧縮されるほどに無水のそれに近づく様子が見られた。

本研究で得られた結果を用いた地球科学的な議論は以下の通りである。なお、地温勾配・熱弾性パラメーターなど幾らかの仮定をおいていることは注意されたい。マントルジオサームに沿った場合、下部マントル中域まで含水SiO_2相の剪断波速度がPREMのそれよりも低い値を示した。このことは、*S*-to-*P*散乱体の剪断波速度異常は、旧来提唱されてきた相転移時の一時的な弾性波速度低下のみではなくSiO_2の含水がこれら弾性波速度低下でも再現し得ることを示唆している。一方で、CMB直上でのMORBの弾性波速度はSiO_2が無水の場合と含水の場合[本研究]でほとんど変わらなかった。以上の含水post-stishoviteの圧縮挙動に関する傾向は、つい最近発表された第一原理計算の結果と調和的である[7]。本研究結果ならびに先行研究の再解析により、無水・含水いずれの場合でもMORBの弾性波速度はPREMのそれを下回りLLSVPsの形成に寄与する可能性が示唆された。

[1] Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2021).
[2] Lakshtanov *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. (2007).

[3] Tsutsumi *et al.*, Nat. Geosci. (2024).
[4] Lin *et al.*, Earth Planet. Sci. Lett. (2022).
[5] Asahara *et al.*, Am. Mineral. (2013).
[6] Stixrude and Lithgow-Bertelloni GJI(2022).
[7] Zhang *et al.*, Geophys. Res. Lett. (2024).

キーワード：高圧実験、下部マントル、水、弾性波測定
Keywords: High-pressure experiments, Lower mantle, Water, Sound velocity measurements

口頭講演 | R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

2024年9月12日(木) 14:00 ~ 17:30 | ESホール 東山キャンパス

R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

座長:秋澤 紀克(東京大学大気海洋研究所)、越後 拓也(秋田大学)

岩石学，鉱物学，鉱床学，地球化学などの分野をはじめとして，地球・惑星物質科学全般にわたる岩石及び鉱物に関する研究発表を広く募集する。地球構成物質についての多様な研究成果の発表の場となることを期待する。

14:00 ~ 14:25

[R7-01] イルメナイトのウラン–鉛系に基づく年代学研究の最前線

「招待講演」

*伊藤 健吾[1]、仁木 創太[2]、飯塚 毅[3]、平田 岳史[1] (1. 東大・地殻化学、2. 名大・ISEE、3. 東大・院理地惑)

14:25 ~ 14:40

[R7-02] LA-ICP-MS分析に基づく日本国内の熱水性鉱床中に含まれるReの分布領域

「発表賞エントリー」

*小笠原 光基[1]、大田 隼一郎[1,2]、安川 和孝[1]、中村 謙太郎[2,1]、加藤 泰浩[1,2] (1. 東京大・院工学、2. 千葉工大・次世代海洋資源研究センター)

14:40 ~ 14:55

[R7-03] 南アフリカ共和国ブッシュフェルト複合岩体におけるPGE含有(Fe,Ni,Co)AsS固溶体の産状

「発表賞エントリー」

*窪田 朔也[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院国際資源)

14:55 ~ 15:10

[R7-04] 熊本県美里町払川における砂白金鉱床と新鉱物・不知火鉱について

*浜根 大輔[1]、田中 崇裕、新町 正 (1. 東京大学)

15:10 ~ 15:25

[R7-05] 南太平洋クック諸島アイツタキ島に産するマントルかんらん岩捕獲岩の地球化学的特徴

*芳川 雅子[1]、秋澤 紀克[2] (1. 広島大・院先進理工、2. 東京大・AORI)

15:25 ~ 15:40

[R7-06] 伊豆・小笠原・マリアナ前弧域のマントル加水作用とマグマ形成史

*山岡 璃音[1]、秋澤 紀克[1]、市山 祐司[2]、森下 知晃[3]、田村 明弘[3]、山下 浩之[4]、針金 由美子[5]、小原 泰彦[6,7,8] (1. 東大院、2. 千葉大、3. 金沢大、4. 神奈川県立生命の星・地球博物館、5. 産総研、6. 海上保安庁海洋情報部、7. 海洋研究開発機構、8. 名古屋大)

15:40 ~ 15:50

[1Lecture-108-19-7add] 休憩

15:50 ~ 16:15

[R7-07] Fault-rock mineralogy and weakening mechanisms at deep- to shallow-crustal depths of Main Himalayan Thrust, NW India

「招待講演」

*Dyuti Prakash SARKAR[1], Takehiro Hirose[1], Jun-ichi Ando[2], Kaushik Das[2], Gautam Ghosh[3] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Hiroshima University, 3. Presidency University)

16:15 ~ 16:30

[R7-08] オーストラリア産鉄鉱石中のゲーサイトに見られるリンの濃集と微細組織の関係

*三河内 岳[1]、村尾 玲子[2]、高山 透[2] (1. 東大・総研博、2. 日本製鉄)

16:30 ~ 16:45

[R7-09] 妙見山リチウムペグマタイト周辺の鉱物分帯と生成温度

「発表賞エントリー」

*石嵜 拓海[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院資源)

16:45 ~ 17:00

[R7-10] 加部島の東松浦玄武岩晶洞に産する淡青色セピオライトの呈色要因となり得るCuの存在状態について

「発表賞エントリー」

*木尾 颯月[1]、江島 輝美[2]、昆 慶明[3]、南澤 比佳理[4]、堀田 将臣[4] (1. 信州大・院理、2. 信州大・理、3. 産総研、4. 信州大・工)

17:00 ~ 17:15

[R7-11] 粉末X線回折による全岩鉱物量比・累帯構造量比の数値化：ビッグデータ時代に向けて

「発表賞エントリー」

*松野 哲士[1]、米谷 珠萌[2]、吉田 健太[3]、平野 伸夫[1]、新名 良介[2]、大坂 恵一[4]、山崎 慎一[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1] (1. 東北大学、2. 明治大学、3. 海洋研究開発機構、4. 高輝度光科学研究センター)

17:15 ~ 17:30

[R7-12] 地質試料を用いた暗黒物質探索の試みについて

*阿部 なつ江[1,2]、廣瀬 重信[1]、常 青[1]、羽生 毅[1]、長谷部 徳子[2]、星野 靖[3]、加美山 隆[4]、川村 洋史[1]、村瀬 孔大[5]、中 竜大[6]、小國 健二[1]、鈴木 勝彦[1]、山崎 誠子[7] (1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2. 金沢大学、3. 神奈川大学、4. 北海道大学、5. ペンシルベニア州立大学、6. 東邦大学、7. 国立研究開発法人産業技術総合研究所)

イルメナイトのウラン–鉛系に基づく年代学研究の最前線

The Frontier of Ilmenite Geochronology Using the Uranium-Lead Decay System

*伊藤 健吾[1]、仁木 創太[2]、飯塚 毅[3]、平田 岳史[1]
*Kengo Ito[1], Sota Niki[2], Tsuyoshi Iizuka[3], Takafumi Hirata[1]

1. 東大・地殻化学、2. 名大・ISEE、3. 東大・院理地惑
1. The Univ. of Tokyo. GcRC, 2. Nagoya Univ. ISEE, 3. The Univ. of Tokyo. Sci. EPS

地質現象のタイミングを記録する放射性同位体年代系の中でも二種類のウラン–鉛系を活用した年代測定法を実施することで，太陽系形成から第四紀までに至る幅広い年代範囲の宇宙地球試料から時間情報を取得できる．現在，レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法（LA-ICP-MS）を用いたウラン–鉛年代測定が広く実施されている．この手法は次の二点，（i）高い空間分解能（~10 μm）での局所同位体分析，（ii）100 spots/hourを超える迅速な分析，を同時に達成できることが強みである．これまで本手法は，ウランを 1 μg g-1以上と高濃度に含有するジルコンやリン酸塩鉱物といった副成分鉱物の年代測定に広く適用されてきた．さらに，近年の分析感度向上と標準物質の探索を基軸として，これまでウラン–鉛年代測定の対象ではなかったイルメナイトやザクロ石といった新たな低ウラン濃度主成分鉱物系への応用が日々進展している（Seman et al., 2017; Thompson et al., 2021）．

私たちが現在着目しているイルメナイト（FeTiO3）はFe2+とTi4+の酸化物であり，ジルコンなどの高ウラン濃度鉱物の産出が稀な苦鉄質岩に幅広く産する．さらに，火山岩中のイルメナイトはしばしばヘマタイトとの離溶組織を形成し，古地磁気記録を残すことが知られている（Robinson et al., 2002）．このような背景から，イルメナイトのウラン–鉛年代系はこれまで年代制約を行うことが困難であった「苦鉄質岩という未分化な岩相の年代決定」と「古地磁気記録と放射性同位体年代の直接的な対応付け」という2つの応用的側面を有する．イルメナイトのウラン濃度は極めて低く（0.01–0.1 μg g-1）（Noyes et al., 2011），これまで実際的な年代測定の対象として扱われなかった．しかしながら，イルメナイトは鉛を結晶中にほとんど取り込まない（Klemme et al., 2006）ことから原理的には年代測定の対象となり得る．そして近年の質量分析法の高感度化に伴い，その高精度年代決定が可能となりつつある．

先行研究におけるイルメナイトのウラン–鉛年代測定には次の三つの課題が存在する．一点目は，鉱物結晶化後の二次的な変成・変質作用を示唆するような（i）散乱したウラン–鉛同位体比がしばしば取得され，年代値の解釈に不確かな余地が残る点である（Thompson et al., 2021）．次に，元素比の測定に系統誤差が生じ得る（ii）非マトリックス合致標準物質を用いたウラン/鉛比の較正が実施されていることや，ごく僅かな鉛の検出に必要な分析感度の不足のため（iii）大スポット径を用いた分析が要求され，その応用が特殊な産状の巨晶イルメナイトのみに限定されることも問題となっている．

以上の問題に対処するため，本研究ではI. 分析点の選定方法，II. 年代標準イルメナイトの整備，III. 分析装置の高感度化に取り組んでいる．分析スポットの選定にあたっては同位体分析前の微量元素イメージングが強力なツールとなり得る（Chew et al., 2021）ことから，私たちは現在，同位体分析前の鉱物組織観察と微量元素イメージングに基づく分析箇所の事前選定に取り組んでいる．さらに，あらゆるイルメナイトの産状に対応した信頼度の高いイルメナイト年代測定の開発を目的として，新たなFe-Ti酸化物標準物質を用いた，高感度のフェムト秒レーザーアブレーション多重検出型誘導結合プラズマ質量分析法（fsLA-MC-ICP-MS）による分析システムを構築している．本研究では，2~20億年の範囲に及ぶ幅広い年代域の地質体からイルメナイトを準備し，ウランや鉛といった極微量の元素のイルメナイト中での分布を調査し，本分析システムを用いた年代測定の正確性評価を行った結果について報告する．微量元素イメージングの結果からは，イルメナイト中ではウランがヘマタイト離溶部やバデレアイトといった微小な包有物を担体としていること，鉛の濃集する2次的な脈やクラックによって結晶化後以降の情報をもたらされうることが示された．また，年代測定に関して本分析で

は，先行研究よりも小さい領域の50 μm四方からウランと鉛の信号取得が可能であり，さまざまな産状のイルメナイト分析に対応できる．さらに，得られたウラン–鉛年代は，先行研究で報告されている当該地域のジルコン年代と調和的で，約10億年前の試料から分析精度約2 %の精確な年代を得ることに成功した．これらの結果は，幅広い時代区分のイルメナイトに対して，精確な年代測定が可能であることを示している．本発表では最後に，ウラン–鉛放射壊変系を用いたイルメナイトの年代研究の今後の展望について議論する．

キーワード：イルメナイト、地球年代学、ウラン–鉛年代、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法
Keywords: Ilmenite, Geochronology, U-Pb dating, LA-ICP-MS

LA-ICP-MS分析に基づく日本国内の熱水性鉱床中に含まれるReの分布領域

Distribution of rhenium in hydrothermal deposits in Japan, based on LA-ICP-MS analysis

*小笠原 光基[1]、大田 隼一郎[1,2]、安川 和孝[1]、中村 謙太郎[2,1]、加藤 泰浩[1,2]
*Mitsuki Ogasawara[1], Junichiro Ohta[1,2], Kazutaka Yasukawa[1], Kentaro Nakamura[2,1], Yasuhiro Kato[1,2]

1. 東京大・院工学、2. 千葉工大・次世代海洋資源研究センター
1. Univ. Tokyo. Eng, 2. CIT. ORCeNG

熱水性鉱床は日本各地に普遍的に分布し，かつての日本の金属生産を支えてきた鉱床である．こうした金属鉱床の形成プロセスを理解するうえで，鉱床の形成年代は非常に重要な制約条件となる．そのため，鉱化年代の決定は火成活動をはじめとした鉱床形成時における地質セッティングの理解に貢献してきた．熱水性鉱床の形成年代は従来，脈石鉱物として含まれている氷長石などに対してK-Ar放射年代法を用いることで決定されてきた．近年，新たに金属鉱床の形成年代を決定する手法としてRe-Os放射年代法が注目されている．Reは鉱石鉱物に含まれる有用金属と似た挙動をとるため，鉱床中の有用金属が析出した年代を測定できる手法とされている(Selby et al., 2009)．一方で，ReおよびOsは地球表層において極めて稀な元素であるため，よく知られた濃集相である輝水鉛鉱を除いて，熱水性鉱床中のどの部分にそれらが濃集しているのかは十分に理解されていない．そのため，輝水鉛鉱を産出しない熱水性鉱床に対するRe-Os放射年代法による年代決定が困難であるという問題がある．そこで本研究では，Reの濃集相を把握することを目的として，日本国内の様々な熱水性鉱床の鉱石に対してレーザーアブレーション (LA)-ICP-MSを用いて局所微量元素組成分析を実施した．LA-ICP-MSによる局所微量元素組成分析の結果，例えば兵庫県明延鉱床の鉱石においては，黄銅鉱や閃亜鉛鉱などの硫化鉱物と脈石鉱物の石英との境界部分にReが濃集していることが示された．Reを検出した部分を偏光顕微鏡，実体顕微鏡，SEM-EDSを用いて観察したところ，粒径30~40 μm程度の細粒な輝水鉛鉱を確認した．Reは輝水鉛鉱中のMoを置換する形で結晶中に濃集することが知られているため(Takahashi et al., 2007)，検出された強いReシグナルはおそらく細粒な輝水鉛鉱に起因するものと考えられる．これらの輝水鉛鉱は微小であるが，Re-Os年代測定法による鉱床の形成年代を決定には十分な量のReを濃集している可能性が高い．このような細粒な輝水鉛鉱の存在がその他の熱水性鉱床において観察されれば，様々な熱水性鉱床の形成年代を直接的に決定できる可能性がある．

Selby, D., Kelley, K.D., Hitzman, M.W., and Zieg, J., 2009, Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks Range, Alaska: Economic Geology, v. 104, no. 3, p. 437–444.

Takahashi, Y., Uruga, T., Suzuki, K., Tanida, H., Terada, Y., and Hattori, K.H., 2007, An atomic level study of rhenium and radiogenic osmium in molybdenite: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 71, no. 21, p. 5180–5190.

キーワード：熱水性鉱床、LA-ICP-MS、Re局所分析、Re-Os放射年代法
Keywords: Hydrothermal deposit, LA-ICP-MS, Re mapping, Re-Os radiometric dating

南アフリカ共和国ブッシュフェルト複合岩体におけるPGE含有(Fe,Ni,Co)AsS固溶体の産状

Occurrences of the PGE bearing (Fe,Ni,Co)AsS solid solution in the Bushveld Complex, South Africa

*窪田 朔也[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1]
*Sakuya Kubota[1], Takuya Echigo[1], Yasushi Watanabe[1]

1. 秋田大・院国際資源
1. Akita Univ. Irs.

世界最大のPlatinum Group Elements (PGE) 鉱床である南アフリカ共和国のBushveld Igneous Complex中の鉱化帯の一つであるPlatreefは，マグマと堆積岩が混成あるいは反応したことが多くの先行研究によって確認されている．主に輝岩で構成されるPlatreef中のNi-Co-PGE鉱化作用については多くの研究がされているが，下位の堆積岩中の同鉱化作用は明らかではなかった．Platreef南部のIvanplats鉱山周辺では苦灰岩，珪岩，頁岩など多様な堆積岩が分布しており，本研究では，Ivanplats鉱山で得られた試錐試料の鉱物記載を主とした各種分析を行った．本試料には堆積岩と火成岩が混ざった組織を持つ岩石が見られ，混成岩とした．主な岩相は苦灰岩との混成岩，珪岩，頁岩との混成岩，Platreefの粗粒輝岩と輝岩である．顕微鏡観察，SEM-EDS分析の結果，珪岩以外の岩相でPGE鉱化作用がみられた．その中でも頁岩との混成岩でみられたPlatinum Group Minetals (PGM) はおおむね自形の (Fe,Ni,Co)AsS固溶体に内包されるという特徴的な産状を示す．このとき周囲のBase Metal Sulfides (BMS) には共生しない．EPMAの結果，(Fe,Ni,Co)AsS固溶体はPtが最大で0.038wt%，Pdが0.993wt%含まれていた．ポータブルXRFで測定したPlatreef輝岩中のヒ素濃度は最大5ppmだが，頁岩との混成岩では最大45ppmであった．頁岩との混成岩でみられた (Fe,Ni,Co)AsS固溶体は自形であり，他形を示す他のBMSと比較して晶出が早かったと考えられる．頁岩との混成岩でみられた(Fe,Ni,Co)AsS固溶体と共生するPGMは，概ね(Fe,Ni,Co)AsS固溶体に内包され，(Fe,Ni,Co)AsS固溶体中にPGEが微量に含まれることからPGMがヒ素に富む硫化物メルトから晶出したと考えられる．先行研究によると，Transvaal累層群中の頁岩のヒ素濃度は最大300ppmと高い値を示し，ポータブルXRFで測定したPlatreef輝岩のヒ素含有量は低かった．これらの結果より，頁岩が硫化物メルトにヒ素を供給し，ヒ素に富んだ硫化物メルト内でPGMに富む (Fe,Ni,Co)AsS固溶体が晶出し，PGMが (Fe,Ni,Co)AsS固溶体から離溶し，後にBMSが晶出したと考えられる．これらの考察から頁岩との混成岩では，頁岩から供給されたヒ素によって生成されたヒ素に富む硫化物メルトがPGEを含む (Fe,Ni,Co)AsS固溶体を形成し，その後 (Fe,Ni,Co)AsS固溶体からPGMが離溶して晶出したと結論付けた．

キーワード：PGE鉱化作用、ブッシュフェルト複合岩体、同化作用
Keywords: PGE mineralization, Bushveld Complex, Assimilation

熊本県美里町払川における砂白金鉱床と新鉱物・不知火鉱について

Shiranuiite and placer deposit of platinum group minerals, Haraigawa, Misato machi, Kumamoto Prefecture, Japan

*浜根 大輔[1]、田中 崇裕、新町 正
*Daisuke HAMANE[1], Takahiro Tanaka, Tadashi Shinmachi

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

これまで日本では北海道を除き砂白金鉱床は知られていなかったが、熊本県美里町払川において砂白金鉱床を見出した（Nishio-Hamane et al., 2019）。その鉱床は小規模ではあるものの、パラジウム系白金族元素（Pd, Rh, Pt）が主体であり、日本では初めて確認された鉱床であった。また、この鉱床から二つの新鉱物、皆川鉱（Minakawaite）：RhSbと三千年鉱（Michitoshiite-(Cu)）：Rh($Cu_{1-x}Ge_x$)を発見し、さらにチオスピネル族の未詳鉱物を見いだした。この未詳鉱物を、熊本県の古称「火の国」の伝承にちなんで不知火鉱（Shiranuiite）と命名し、新鉱物・鉱物・命名委員会から新鉱物として承認を受けた（IMA2023-072a）。ここでは払川の砂白金鉱床と、新鉱物・不知火鉱の特徴について報告したい。

払川には透輝石が主体の単斜輝石岩が分布しており、2005年には5万分の1地質図（砥用）にも記された。超苦鉄質の集積岩である単斜輝石岩は白金族元素鉱物（PGM）探査において重要な指標であり、払川においても岩体を横切る小河川でやはり砂白金の堆積が確認された。砂白金はイソフェロプラチナ鉱：Pt_3Feを主体とする銀白色の粒子がほとんどで、それ以外（例えば自然オスミウム）の粒子は極めて少ない。また、一般にイソフェロプラチナ鉱は一つの地域で得られる粒子であっても、それぞれの組成はばらつくことが多いが、払川ではいずれも端成分に非常に近い。ただし、茶褐色の砂白金粒子については外縁部（数～数百μm）がトラミーン鉱：Pt_2CuFeやテトラフェロプラチナ鉱：PtFeへ変化しているように、一部の砂白金には後マグマ過程における変質作用の影響が認められる。

砂白金粒子は微細ながらも多様な白金族元素鉱物（PGM）を包有し、現時点で確認できたPGMは全体で約40種となる（図1）。これらのPGM包有物はコブのように粒子表面に露出することもあるが、ラウラ鉱：RuS_2やエルリッチマン鉱：OsS_2を除き、PGM包有物の大半は変質作用にさらされる環境では安定ではないため、包有物として二番目に多いバウィー鉱：Rh_2S_3でさえ、粒子表面で観察されることは稀である。また、バウィー鉱が観察される場合でも硫銅ロジウム鉱：$(Cu^{+}_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})Rh^{3+}_{2}S_4$や不知火鉱：$Cu^{+}(Rh^{3+}Rh^{4+})S_4$を伴うことが多い（図1）。不知火鉱は硫銅ロジウム鉱集合に生じた亀裂に沿って生じることがある。

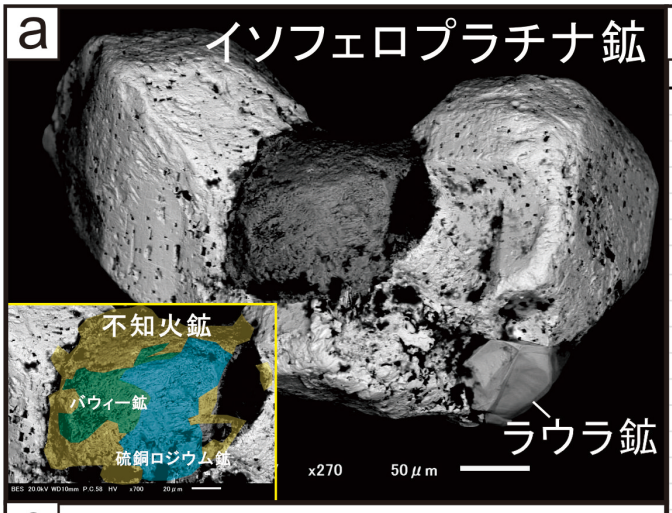
得られた分析値からRhの価数分布を見積もると、不知火鉱の平均化学組成は$(Cu^{+}_{0.95}Fe^{3+}_{0.04}Ni_{0.01})(Rh^{3+}_{1.19}Rh^{4+}_{0.77}Ir^{4+}_{0.06})S_{3.99}$となり、$Cu^{+}(Rh^{3+}Rh^{4+})S_4$の理想化学式が導かれた。微小部XRDにより得られた格子定数は空間群Fd-3mにおいてa = 9.757 Åであり、Cuおよび白金族元素を含むチオスピネルの中で不知火鉱は最も小さな体積を示した。これはイオン半径の小さいRh^{4+}が主成分ということと調和的である。

スピネル超族の命名規約の成立に伴い、銅と白金族元素を含むチオスピネルは、実質的にはCu内容によってリンネ鉱亜族とカーロール鉱亜族を分け、それぞれについてRh-Ir-Pt内容を検討することで種が決定されるようになっている。そこで、払川から産出するチオスピネル鉱物の分類を行った（図1）。組成はリンネ鉱亜族とカーロール鉱亜族に不連続に分布することが判明した。それぞれのRh-Ir-Ptを検討すると、リンネ鉱亜族についてはすべて硫銅ロジウム鉱に、カーロール鉱亜族についてはすべて不知火鉱に分類された。一方で、硫銅ロジウム鉱と不知火鉱のRh-Ir-Pt分布は完全に一致しており、起源が共通であることが示唆される。そし

て、払川で産出するロジウム硫化鉱物、バウィー鉱：Rh_2S_3、キングストン鉱：Rh_3S_4、ミアス鉱：$Rh_{17}S_{15}$の組成を比較すると、バウィー鉱の組成分布だけが硫銅ロジウム鉱や不知火鉱と一致した（図1）。バウィー鉱の、包有物および外部での出現頻度の違い、外部に出現した際の共生関係、組成分布を考慮すると、硫銅ロジウム鉱や不知火鉱がバウィー鉱の変質によって生じたことは明白である。一方で、硫銅ロジウム鉱と不知火鉱のCu内容の不連続性や、不知火鉱が硫銅ロジウム鉱を横切る産状があることから、硫銅ロジウム鉱と不知火鉱の生成ステージは異なると考えられる (Nishio-Hamane et al., in press)。

Nishio-Hamane et al. (2019) JMPS, 114, 252-262.
Nishio-Hamane et al. (in press) JMPS, 119.

キーワード：白金族元素鉱物、砂白金、不知火鉱
Keywords: Platinum-group minerals (PGM), Placer PGM, Shiranuiite



b

No.	鉱物名	理想化学式	産状
1	Andrieslombaardite	RhSbS	コブ
2	Bowieite	Rh_2S_3	包有物（多）、コブ（稀）
3	Braggite	$PdPt_3S_4$	粒子の外縁
4	Chengdeite	Ir_3Fe	自然イリジウムの外縁
5	Cherepanovite	RhAs	コブ
6	Cooperite	PtS	粒子の外縁
7	Cuprorhodsite	$(Cu^{+}_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})Rh^{3+}_{2}S_4$	コブ
8	Erlichmanite	OsS_2	包有物、コブ
9	Ferrotorryweiserite	$Rh_5Fe_{10}S_{16}$	コブ
10	Genkinite	Pt_4Sb_3	包有物
11	Geversite	$PtSb_2$	包有物
12	Hexaferrium	(Fe,Os,Ru,Ir)	包有物
13	Hollingworthite	RhAsS	外縁の包有物
14	Irarsite	IrAsS	外縁の包有物
15	Iridium	Ir	自然オスミウム粒子に付属
16	Isoferroplatinum	Pt_3Fe	粒子
17	Keithconnite	$Pd_{20}Te_7$	包有物
18	Kingstonite	Rh_3S_4	包有物
19	Kuvaevite	$Ir_5Ni_{10}S_{16}$	包有物
20	Laurite	RuS_2	包有物、コブ
21	Miassite	$Rh_{17}S_{15}$	包有物
22	Michitoshiite-(Cu)	$Rh(Cu_{1-x}Ge_x)$ $0<x\leq0.5$	コブの外縁
23	Minakawaite	RhSb	コブの外縁
24	Moncheite	$Pt(Te,Bi)_2$	包有物
25	Naldrettite	Pd_2Sb	包有物
26	Osmium	Os	包有物（多）、粒子（稀）
27	Palladinite	PdO	包有物
28	Platinum	Pt	粒子の外縁
29	Rustenburgite	Pt_3Sn	コブ
30	Shiranuiite	$Cu^{+}(Rh^{3+}Rh^{4+})S_4$	コブ
31	Sperrylite	$PtAs_2$	粒子の外縁
32	Stibiopalladinite	Pd_5Sb_2	包有物
33	Tamuraite	$Ir_5Fe_{10}S_{16}$	コブ
34	Telluropalladinite	Pd_9Te_4	包有物
35	Tetraferroplatinum	PtFe	粒子の外縁
36	Tolovkite	IrSbS	外縁の包有物
37	Tomamaeite	Cu_3Pt	外縁の包有物
38	Torryweiserite	$Rh_5Ni_{10}S_{16}$	包有物
39	Tulameenite	Pt_2CuFe	粒子の外縁

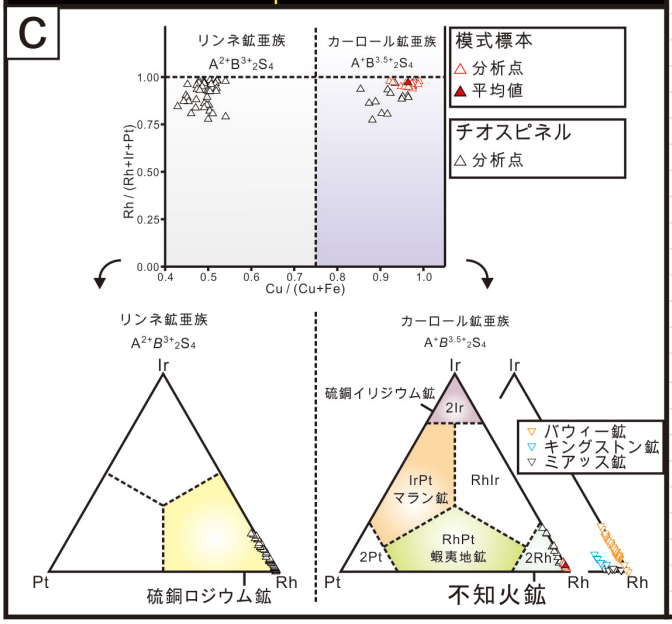


図1. 砂白金粒子の表面に露出したバウィー鉱と不知火鉱（硫銅ロジウム鉱）の分布（a）、産出鉱物の一覧（b）、不知火鉱（硫銅ロジウム鉱）とRh-S鉱物（バウィー鉱、キングストン鉱、ミアス鉱）の組成分布（c）。

南太平洋クック諸島アイツタキ島に産するマントルかんらん岩捕獲岩の地球化学的特徴

Geochmical and Sr-Nd isotopic characteristics of the Aitutaki peridotite xenoliths from the Cook islands

*芳川 雅子[1]、秋澤 紀克[2]
*Masako YOSHIKAWA[1], Norikatsu Akizawa[2]

1. 広島大・院先進理工、2. 東京大・AORI
1. Hiroshima Univ., 2. Tokyo Univ. AORI

南西太平洋クック諸島は15の島からなり、その北部のアイツタキ島では主にカンラン石ネフェリナイト溶岩が露出する（Turner & Jarrad, 1982, JVGR）。このカンラン石ネフェリナイト（1.382–1.941 Ma；Rose & Koppers, 2019, G3）中には、スピネルレルゾライトを主とするマントルかんらん岩捕獲岩（＜5㎝）が報告されている（例えばWood, 1978, N.Z.J. Geol. Geophys；Folder et al., 1982, N.Z.J. Geol. Geophys）。最近それらの捕獲岩のなかに、スピネルを取り囲んだザクロ石分解生成物（FMA）を含むレルゾライトの存在をAkizawa et al. (印刷中，PEPS)が報告した。Akizawa et al. (印刷中，PEPS)は、レルゾライト中の輝石の組成累帯やFMAの組織および化学組成の解析から、FMAを含むレルゾライトがスピネルからザクロ石レルゾライト領域への圧力上昇（下降流）とその後の温度低下（上昇流）を経験したと主張し、この流れがが小規模マントル対流による圧力・温度変化である可能性を示した。一方、スピネルレルゾライトやハルツバージャイトは単純な温度低下を示すとされている（大嶋ほか, 2020, 鉱物科学会講演要旨）。本研究では、FMAを含むレルゾライト3試料、スピネルレルゾライト2試料、ハルツバージャイト1試料を対象とし、それらを構成する単斜輝石の微量元素組成とNd同位体を測定した。これらのレルゾライトとハルツバージャイトはそれぞれ粗粒な等粒状組織と細粒な等粒状組織を示す。FMAの有無にかかわらず、レルゾライトとハルツバージャイト中の単斜輝石の希土類元素コンドライト規格化パターンは、基本的には重希土類に対して軽希土類に富む左上がりのパターンを示すことがわかった。これらのパターンは濃度が異なるものの、アイツタキ島マントルかんらん岩全岩の希土類元素パターン(Snortum et al., 2019, J.Petrol.)や捕獲岩を含むカンラン石ネフェリナイトのパターンと類似する。また、ハンドピック後に酸で洗浄した単斜輝石のNd同位体比は、中央海嶺玄武岩と母岩のカンラン石ネフェリナイトのNd同位体比の間に分散した。FMAを含まないレルゾライト、FMAを含むレルゾライト、ハルツバージャイトの順にNd同位体比が低下した。本講演では、今後行うSr同位体比の結果や鉱物の主要元素組成やその累帯構造から求めた温度・圧力も含め、アイツタキ島下の上部マントルの地球化学的特徴について考察したい。

キーワード：クック諸島アイツタキ島、マントルかんらん岩捕獲岩、Sr-Nd同位体比
Keywords: Aitutaki island, mantle peridotite xenolith, Sr-Nd isotopic ratios

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

伊豆・小笠原・マリアナ前弧域のマントル加水作用とマグマ形成史

Hydration of the mantle and magma genesis in the Izu–Bonin-Mariana fore-arc

*山岡 璃音[1]、秋澤 紀克[1]、市山 祐司[2]、森下 知晃[3]、田村 明弘[3]、山下 浩之[4]、針金 由美子[5]、小原 泰彦[6,7,8]
*Rion Yamaoka[1], Norikatsu Akizawa[1], Yuji Ichiyama[2], ToTomoaki Morishita[3], Akihiro Tamura[3], Hiroyuki Yamashita[4], Yumiko Harigane[5], Yasuhiko Ohara[6,7,8]

1. 東大院、2. 千葉大、3. 金沢大、4. 神奈川県立生命の星・地球博物館、5. 産総研、6. 海上保安庁海洋情報部、7. 海洋研究開発機構、8. 名古屋大
1. University of Tokyo, 2. Chiba Univ., 3. Kanazawa Univ., 4. Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 5. AIST, 6. Japan Coast Guard,Hydrographic and Oceanographic Department, 7. JAMSTEC, 8. Nagoya Univ.

沈み込み帯は、海洋プレートが地球内部に沈み込むことで巨大地震や島弧火成活動が生じる、地球上で最も活動的なテクトニックセッティングである。また、沈み込み帯は汎地球規模の物質循環が進行する場でもあり、固体地球化学の進化に重要な役割を果たすため、沈み込み帯の物質的実態解明が望まれている。伊豆・小笠原・マリアナ前弧域に分布する蛇紋岩海山や海溝陸側斜面では、沈み込み帯のマントル由来物質を採取されており、沈み込み帯におけるマントルへの深部物質輸送を理解する上で格好の研究対象である。そこで本研究では、前弧域マントルの加水作用と沈み込み開始に伴うマグマ形成史を総合的に理解するために、伊豆・小笠原・マリアナ弧海溝陸側斜面に露出するマントルカンラン岩を用いて、岩石記載と地球化学的分析を実施した。本研究では、海洋研究開発機構が保有している伊豆・小笠原海溝、マリアナ海溝南部、ヤップ海溝の海溝陸側斜面から採取されたカンラン岩(53試料)と、2023年11月から12月に実施された白鳳丸航海（KH-23-9）において、マリアナ海溝南部の最深部であるChallenger Deepの東側(D01-D05)と西側(D09-D14)の海溝陸側斜面からドレッジによって採取されたカンラン岩(42試料)を用いた。３つの海溝(伊豆・小笠原海溝、マリアナ海溝南部、ヤップ海溝)から採取されたカンラン岩は、メルト成分に枯渇しており、様々な程度に蛇紋岩化したハルツバージャイトとダナイトであった。マリアナ海溝南部のカンラン岩は針状～繊維状の角閃石(パーガス閃石、エデン閃石、マグネシオホルンブレンド、トレモラ閃石、カミングトン閃石)に富む特徴が認められた。一方で、ヤップ海溝のカンラン岩は他の地域では見られない単斜輝石を含み、1試料を除いて角閃石を含まないことで特徴づけられた。全岩主要元素組成では、本研究のカンラン岩は一般的な海洋性カンラン岩よりもAlOに乏しく、より枯渇した性質を示す。加えて、KH-23-9で採取したChallenger deep西側で採取された試料は他の試料よりもCrO含有量が高く(1.03-2.47 wt.%)、TiO含有量(＜0.01 wt.%)が低い特徴が認められた。カンラン岩に含まれるクロムスピネルの Cr#(=Cr/(Cr+Al)原子比)及びMg#(=Mg/(Mg+Fe)原子比)からOhara and Ishii (1998)の分類に従い、低いCr#と高いMg#を示すスピネル(Cr#=0.69,Mg#=0.52)を持つA-typeカンラン岩、高いCr#と低いMg#を示すスピネル(Cr#=0.57-0.86,Mg#=0.25-0.38)を持つH-typeカンラン岩、中間的な組成を示すスピネルを持つI-typeカンラン岩の3つのタイプに分類される。また、マリアナ海溝南部でCr#は最も高く（0.57-0.86）、ヤップ海溝で最も低かった(0.42-0.67)ことから、マリアナ海溝南部のカンラン岩が最もメルト成分に枯渇していることが示された。角閃石には累帯構造を示すものがあり、トレモラ閃石はカミングトン閃石に囲まれるように産していることから、温度冷却過程に伴って形成されたと考えられる。AlO に富むCa角閃石(パーガス閃石、エデン閃石、マグネシオホルンブレンド)はアルカリ元素に富むことから、アルカリ元素に富む角閃石はより深部での形成が、その他の角閃石はより浅部での形成が示唆される。角閃石の微量元素組成は、全体的にBaやSrなどの流体移動元素に富むことから、全ての角閃石の形成には流体が関与していることが示唆される。さらに、角閃石の微量元素パターンが前弧噴出岩であるボニナイトの微量元素パターンと似ていることから、角閃石の形成に関与した流体はボニナイトを形成した流体と似た組成を持った流体であることが推察される。また、Fabries

(1979)のカンラン石-スピネル温度計を用いたことで、カンラン石とスピネル間の平衡温度を求めた。その結果、マリアナ海溝南部の試料では、角閃石を含まず直方輝石を含むA-typeカンラン岩が最も温度が高く(757℃)、角閃石を豊富に含むH-typeカンラン岩が最も温度が低く(644-737℃)、A-typeからH-typeにかけての平衡温度の低下を示す。これは、マリアナ海溝南部のH-typeカンラン岩では流体との反応により、低い平衡温度で角閃石を形成したことを示唆している。ヤップ海溝のカンラン岩はマリアナ海溝南部のA-typeカンラン岩と似た高い平衡温度(736-798℃)を示した。この特徴は、ヤップ海溝のカンラン岩が単斜輝石や直方輝石に富み、肥沃な組成を示すことと整合的である。

キーワード：沈み込み帯、加水作用、前弧域マグマ生成過程、かんらん岩、角閃石
Keywords: Subduction zone, Hydration, Fore-arc magma genesis, Peridotite, Amphibole

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

口頭講演

R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

座長:秋澤 紀克(東京大学大気海洋研究所)、越後 拓也(秋田大学)

2024年9月12日(木) 14:00 〜 17:30 ESホール (東山キャンパス)

岩石学，鉱物学，鉱床学，地球化学などの分野をはじめとして，地球・惑星物質科学全般にわたる岩石及び鉱物に関する研究発表を広く募集する。地球構成物質についての多様な研究成果の発表の場となることを期待する。

15:40 〜 15:50

[1Lecture-108-19-7add]休憩

©日本鉱物科学会

Fault-rock mineralogy and weakening mechanisms at deep- to shallow-crustal depths of Main Himalayan Thrust, NW India

*Dyuti Prakash SARKAR[1], Takehiro Hirose[1], Jun-ichi Ando[2], Kaushik Das[2], Gautam Ghosh[3]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Hiroshima University, 3. Presidency University

Fault rock mineralogy and deformation microstructures of crustal-scale faults provide insights into the stress accommodation mechanisms in terms of fault weakening and possibilities of earthquake nucleation. The Main Himalayan Thrust is considered to be the crustal-scale collisional boundary along which the Indian plate subducts beneath the Asian plate. The near-surface exposure of the present active boundary of the subduction is considered the Main Frontal Thrust, while the Main Central Thrust at the northernmost boundary represents the older post-collisional paleo-thrust boundaries between Indian and Asian plates. Here we present a comparative study of our findings on the fault rocks from the Nahan Thrust and North Almora Thrust belonging to the Main Frontal Thrust and the Main Central Thrust respectively. The deformation zone from North Almora Thrust represents the deep crustal part of the Main Himalayan Thrust exhibiting granite mylonite-ultramylonite zone. Quartz microstructures indicate deformation temperatures of 450–550 ℃ with evidence of grain-size sensitive creep as the dominant weakening mechanism. Additionally, two-feldspar thermometry has been used to estimate temperatures from sheared myrmekitic feldspar in the mylonites and ultramylonites. Crystallographic preferred orientations of quartz and mica indicate a shift in partitioning of strain from quartz to mica with an increase in mica content. In comparison, the fault zone from the Nahan Thrust shows the dominance of brittle deformation structures consisting of highly brecciated sandstone and a wide gouge zone. Microstructures of the gouge zone indicate distributed deformation and progressive stress localization leading to fracture development, cataclasis, and frictional sliding. Especially the ultra-fine bands of the principle slip zone exhibit a possible fingerprint of frictional heating during the seismic slips. The frictional properties of the fault rocks estimated from the rotary-shear velocity step experiments also indicate a velocity weakening to strengthening behavior based on phyllosilicate content. Our results on fault rocks from deep- to shallow-crustal depth indicate that phyllosilicate content play a pivotal role in frictional behavior and weakening mechanisms along the subduction boundary.

Keywords: Main Himalayan Thrust, Main Central Thrust, Main Frontal Thrust, rock friction, phyllosilicates

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

オーストラリア産鉄鉱石中のゲーサイトに見られるリンの濃集と微細組織の関係

On the Relationship between Phosphorus Concentration and Microstructure in Australian Iron Ore

*三河内 岳[1]、村尾 玲子[2]、高山 透[2]
*Takashi MIKOUCHI[1], Reiko Murao[2], Toru Takayama[2]

1. 東大・総研博、2. 日本製鉄
1. Univ. Museum, Univ. of Tokyo, 2. Nippon Steel

はじめに：オーストラリアは、日本が鉄鉱石を輸入する最主要国であるが、近年、その鉱石中に含まれるリン濃度の上昇が問題となっている。そこで、本研究では、オーストラリア産鉄鉱石試料において主要な鉄資源鉱物になっているゲーサイトに注目して、含まれるリン濃度とその微細組織との関係について、主にFE-EPMAによる観察・分析を通じて検証を行った。

結果と考察：分析に使用したのは、２種類のオーストラリア産鉄鉱石試料（“Ore A”と“Ore B”）の研磨片で、合計144粒子（粒度1～3 ミリメートル）のゲーサイト粒子をFE-EPMA（JEOL JXA-8530F：東大・理・地球惑星科学専攻に設置）を用いて、元素マッピング分析と定量分析を行った。

Ore A、Bともにゲーサイトが主要な構成鉱物で、その次にヘマタイト（“マータイト”）が多く、脈石成分であるカオリナイトや石英などを少量含んでいる粒子がほとんどであった。Ore AはOre Bに比べ、ややゲーサイト量が少なく、その分、ヘマタイト量が相対的に多く含まれていた。リンはゲーサイトに最も多く入っており、含有量は、最大4.6 wt% P_2O_5であった。ただし、Ore Aに含まれるリン量の方が、Ore Bに含まれるリン量よりも多い傾向があった。ヘマタイトにはリンがほとんど含まれておらず（＜0.5 wt% P_2O_5）、その結果、バルク組成的にはOre AとBのリン量はほぼ同等であった。

ゲーサイトにリンが少量含まれていることは、吸着によるメカニズムが考えられていることから、本研究では、特にゲーサイトの微細組織とリン量の関係に注目することとした。FE-EPMAによる観察の結果、Ore A、Ｂの両試料ともゲーサイトは微細組織の違いにより、①繊維状・羽毛状、②板状・柱状、③塊状・層状、④その他の大きく４つに分けることができた。ただし、①と②は漸移的な組織関係となっている。これらの微細組織での分類によると、ゲーサイトのうちで、有意にリン含有量が高いものは、①と②、特に①の微細組織を持つものであり、Ore Aにおいては、①を主体とするゲーサイト粒子の最大P_2O_5量の平均値は2.87 wt%であった。この数値は、②の平均値1.43 wt%、③の平均値1.40 wt%、④の平均値0.52 wt%より明らかに高かった。一方で、Ore Bでは、Ore Aに比べて、①の繊維状・羽毛状と②の板状・柱状のような微細組織を持つゲーサイトの数は少なかったが、①のゲーサイトがやはり高いリン濃度を持っており、①のゲーサイトの最大P_2O_5量の平均値が1.55 wt%であるのに対して、②のものは1.38 wt%、③のものは0.60 wt%、④のものは0.81 wt%であった。また、①と②の微細組織を持つゲーサイトにおいては、結晶サイズが主に20マイクロメートル以下のことが普通であるが、ゲーサイトの平均結晶サイズに注目した結果、Ore A、Bともに粒子サイズが小さいゲーサイトの方が高いリン量を持っていることが示された。①と②のような微細組織を持つゲーサイトでは、サブミクロンスケールでの微小空隙がゲーサイトの結晶粒間に富むような多孔質組織を持っていることが多い。このことは、このような特に微細なゲーサイトが効率的にリンを吸着している可能性を示唆している。そこで、このような微結晶粒間を持つゲーサイトと持たないゲーサイトに分けて、リン含有量を比較してみたところ、やはり明らかに微結晶粒間のあるゲーサイトの方が無いものよりもリン含有量が高かった（Ore A：粒間ありは平均2.33 wt% P_2O_5で、無しは平均1.29 wt% P_2O_5、Ore B：粒間ありは平均1.53 wt% P_2O_5で、無しは平均0.56 wt% P_2O_5）。

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

結論：FE-EPMAを用いて、オーストラリア産ゲーサイトの観察・分析を行った結果、繊維状・羽毛状の微細組織を持つゲーサイトは、微小結晶粒間の空隙を介することで効率的にリンが吸着しており、このことが、鉱石のP濃度の上昇を引き起こしている最大の要因と考察された。

謝辞：この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の助成事業（JPNP12004）の結果得られたもので、ここに感謝を示す。

キーワード：鉄鉱石、ゲーサイト、リン、微細組織
Keywords: Iron Ore, Goethite, Phosphorous, Microstructure

妙見山リチウムペグマタイト周辺の鉱物分帯と生成温度

Mineral zoning and formation temperatures around the Myokenzan lithium pegmatites

*石嵜 拓海[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1]
*Takumi Ishizaki[1], Takuya Echigo[1], Yasushi Watanabe[1]

1. 秋田大・院資源
1. Akita Univ.

茨城県常陸太田市に位置する妙見山リチウムペグマタイトは，日本有数のリチウムペグマタイトであり，その鉱物組み合わせからLCTペグマタイトに分類される（櫻井ほか, 1977）．LCTペグマタイトの成因は従来，過アルミナ花崗岩質マグマの結晶分化作用が主とされており，本ペグマタイトは妙見山周辺に分布する前期白亜紀に貫入した含ザクロ石両雲母花崗岩を形成した花崗岩質マグマの結晶分化によって生成したと推定されているが(石原, 2010)，確証は得られていない．本研究では，妙見山ペグマタイトの起源となった花崗岩質マグマの検討を行い，その成因を明らかにすることを目的とし，地表踏査による岩相及び産状の記載，薄片観察とXRF，ICP-MSによる全岩化学組成結果に基づく岩石種の決定，EPMA-WDSによる鉱物化学組成の決定，ザクロ石ー黒雲母温度計（Hodges and Spear, 1982）による花崗岩類の形成温度の推定を行った．地表踏査及び薄片観察，XRF分析の結果，妙見山周辺には砂質片麻岩，輝石角閃石石英斑れい岩~斑れい岩，黒雲母角閃石トーナル岩~石英閃緑岩及び角閃石トーナル岩，角閃石黒雲母花崗岩及び黒雲母花崗岩，含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩といった多様な岩相が分布しており，本ペグマタイトは構成鉱物によって，リチウムペグマタイト: 石英，長石，白雲母，リチウム鉱物, 白雲母ペグマタイト: 石英，長石，白雲母，白雲母黒雲母ペグマタイト: 石英，長石，白雲母，黒雲母, 黒雲母ペグマタイト: 石英，長石，黒雲母 の4種類に分けられた．全岩化学組成分析の結果，花崗岩類のアルミナ飽和度を求めたところ，黒雲母花崗岩，角閃石黒雲母花崗岩はASI≦1.1を示し，含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩はASI≧1.1を示した．Li濃度は角閃石黒雲母花崗岩で96ppmと最も高く，含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩では49ppmであった．EPMAによる鉱物化学組成分析の結果，黒雲母ペグマタイト中のザクロ石は MgO: 0.88-1.36wt%, CaO: 0.98-4.89wt% に対し，白雲母黒雲母ペグマタイト中のザクロ石では MgO: 0.50-0.70wt%, CaO: 0.41-1.25wt%，白雲母ペグマタイト中のザクロ石では MgO: 0.62-1.02wt%, CaO: 0.20-0.25wt% の組成範囲を示す．また，黒雲母ペグマタイトにおいてはザクロ石の組成が FeO: 17.68-36.98wt%, MnO: 2.56-20.63wt% と組成変化が大きい．黒雲母ペグマタイト中の斜長石は Ab_{81}-Ab_{72}程度を示し, 白雲母黒雲母ペグマタイト中の斜長石ではAb_{85}-$Ab_{88,}$ Ab_{93}-Ab_{98}，白雲母ペグマタイト中の斜長石ではAb_{94}-Ab_{97}，リチウムペグマタイト中の斜長石ではAb_{99}を示す．ザクロ石ー黒雲母温度計の結果から，黒雲母ペグマタイトは427℃-790℃を示し，白雲母黒雲母ペグマタイトは313℃-643℃を示す．本ペグマタイトの構成鉱物が黒雲母を主体とするペグマタイトから白雲母を主体とするペグマタイトに変化し，斜長石の組成が黒雲母ペグマタイトからリチウムペグマタイトにかけてAb成分に富むことは，本ペグマタイトが黒雲母ペグマタイトからリチウムペグマタイトにかけて結晶分化作用が進んだことを示している．また，ザクロ石ー黒雲母温度計から見積もられた固結温度には大きな温度差がみられるが，これはペグマタイト中のザクロ石の組成変化が大きいためである．この結果は，ペグマタイトの生成温度の推定にはザクロ石-黒雲母温度計が適応できない可能性を示す．本研究で調べた含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩はリチウム濃度が低いが，これはリチウムの分配係数が白雲母より黒雲母の方が高く，白雲母に対しては不適合元素だが，黒雲母に対しては適合元素となることから，白雲母の結晶分化作用によって残余メルトにリチウムが濃集したためと考えられる．以上の結果は，含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩が妙見山リチウムペグマタイトの関係火成岩であることを示している．

キーワード：ペグマタイト、結晶分化作用、ザクロ石ー黒雲母温度計、鉱物分帯
Keywords: Pegmatite, Crystallization fractionation, Garnet-biotite geothermometer, Mineral zoning

加部島の東松浦玄武岩晶洞に産する淡青色セピオライトの呈色要因となり得るCuの存在状態について

Copper as a Coloring Factor of Pale Blue Sepiolite in amygdales in Higashimatsuura basalt from Kabeshima, Saga Prefecture, SW Japan

*木尾 颯月[1]、江島 輝美[2]、昆 慶明[3]、南澤 比佳理[4]、堀田 将臣[4]
*Satsuki KIO[1], Terumi Ezima[2], Yoshiaki Kon[3], Hikari Minamisawa[4], Masaomi Horita[4]

1. 信州大・院理、2. 信州大・理、3. 産総研、4. 信州大・工
1. Shinshu Univ. Sci., 2. Shinshu Univ. Sci. , 3. GSJ, AIST, 4. Shinshu Univ. Eng.

佐賀県呼子町周辺に分布するアルカリ玄武岩は東松浦玄武岩と呼ばれており，呼子町の加部島には，白色～淡青色を呈するセピオライトが玄武岩晶洞中に産出する。　先行研究では，加部島に産する白色から淡青色セピオライトについては微量元素測定によりFe, MnおよびCuが検出され，Cuが呈色原因として最も可能性が高いことが示された。しかし，白色と淡青色セピオライトの両方からCuが検出されている。このため，Cuが淡青色セピオライトの呈色要因であるとするには，さらに微細領域での観察および微量元素測定を行う必要がある。本研究ではエネルギー分散型X線分析装置搭載の走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）を用いた組成像観察とLA-ICP-MSを用いた局所での微量元素測定からセピオライトのCuおよびその他の遷移金属元素の含有量を決定した。さらに高分解能透過型電子顕微鏡（TEM）による観察からセピオライトの微小領域におけるCuの含有と分布を明らかにすることで，加部島に産する淡青色セピオライトの呈色要因の解明を目的とした。TEMによる微細領域観察用の試料成型にはモリブデンのグリットを使用し，試料表面の成膜にはタングステンを用いた。

加部島は九州北西部の東松浦半島の北方先端部に位置し，研究対象の淡青色セピオライトを産する無斑晶質玄武岩が古第三紀の堆積層を覆っている（小林ほか,1955）。無斑晶質玄武岩は青灰色で緻密な岩石であり，100 μm以下のかんらん石および斜長石の斑晶と斜長石，アルカリ長石，イルメナイトおよびチタノマグネタイトからなる基質から構成されるが，斑晶および硫化物は少ない。加えて，無斑晶質玄武岩中にはマントル物質および地殻物質の捕獲岩が存在する。岩石中には直径最大5 cm程度の楕円形の晶洞が存在し，晶洞鉱物としてセピオライト，炭酸塩鉱物，イルメナイト，Mn酸化物が存在する。

晶洞中に産するセピオライトは海綿状組織を有する。また，晶洞断面を観察するとセピオライトは母岩である無斑晶質玄武岩を覆う黄褐色の緑泥石様鉱物をさらに覆うように産し，その厚さは5-10 μmである。LA-ICP-MSによる微量元素測定では遷移金属元素として，Mnが0.40 wt.%，Feが0.39 wt.%，Cuが0.15 wt.%，Tiが0.04 wt.%，Crが0.01 wt.%，Niが0.01 wt.%検出された。また，加部島のセピオライトには白色のものと淡青色のものがあるが，両者のCu含有量には差が無かった。白色と淡青色のうち，後者のセピオライトについてSEM-EDSによる組成像の観察および組成分析を行うと， Cuの濃集部が散在した。この淡青色セピオライトについてFIB-SEMによる薄膜の切り出しを行い，TEMを用いて微小領域についての定性分析を行うと，Si，Mg，Alに加えCuが検出された。微量元素測定にて検出されたFe，Ti，CrおよびNiについてはTEMによるナノメートルオーダーでの定性分析では検出されず，Mnについては含まれるCuに対し有意に少ない量しか検出されなかった。また，薄膜試料中の淡青色セピオライトのどの範囲からも一定量のCuが検出され，その含有量に差違は無い。

微量元素測定および微少領域の結果より，加部島のセピオライトのCu含有量はMn，Fe等の他の遷移金属元素よりも有意に多い。以上のことから，加部島の淡青色セピオライト自体に呈色要因がある場合は，遷移金属元素であるCuが呈色要因である可能性が高い。しかし，白色と淡青色のセピオライトでCuの含有量に差が無いことから，セピオライト中のCuが呈色要因であるとするにはより詳細な検討が必要である。Cuの濃集部に他のナノメートルオーダーの鉱物が存在し，この鉱物が青色呈色の要因である可能性もある。

キーワード：加部島、セピオライト、銅、東松浦玄武岩
Keywords: Kabeshima Island, sepiolite, copper, Higashimatsuura Basalt

粉末X線回折による全岩鉱物量比・累帯構造量比の数値化：ビッグデータ時代に向けて

Quantification of Mineral Modal and Zoning Ratios by Powder X-ray Diffraction: Advancing Towards Big Data Era

*松野 哲士[1]、米谷 珠萌[2]、吉田 健太[3]、平野 伸夫[1]、新名 良介[2]、大坂 恵一[4]、山崎 慎一[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1]
*Satoshi MATSUNO[1], Shuhou Maitani[2], Kenta Yoshida[3], Nobuo Hirano[1], Ryosuke Sinmyo[2], Keiichi Osaka[4], Shin-ichi Yamasaki[1], Masaoki Uno[1], Atsushi Okamoto[1]

1. 東北大学、2. 明治大学、3. 海洋研究開発機構、4. 高輝度光科学研究センター
1. Tohoku University, 2. Meiji University, 3. JAMSTEC, 4. Japan Synchrotron Radiation Research Institute

岩石学分野では、鉱物組成の定量分析と組織観察による示強変数的取り扱いが主流である一方、反応過程とその進行度を記録する岩石中の構成鉱物・反応組織の数値化は殆どされていない。粉末X線回折データ（PXRD）は、鉱物の結晶構造・鉱物組成の変化に加え、全岩鉱物量比・累帯構造量比の情報を内包している(e.g., Antao et al. 2015)。しかし、天然岩石のPXRDによる定量的な分析例は非常に少なく（e.g., Hill et al. 1993）、また多相岩石PXRDで固溶体鉱物の累帯構造を分離して解析した例はない。本研究の目的は、PXRDを用いて多相岩石試料の全岩鉱物量比・反応組織量比の数値化手法を確立することである。

検証試料として、三波川変成帯の四国中央部・汗見川地域に露出する泥質-苦鉄質片岩の岩相境界から採取した、計48試料を用いた。この露頭では、岩相境界に向かって鉱物組み合わせが顕著に変化しており、Na-角閃石とアクチノ閃石で構成される角閃石の不連続な累帯構造が観察されることから、全岩鉱物量比・反応組織量比の数値化を検証する試料群として最適である。

PXRDの測定は、実験室PXRD（Rigaku MiniFlex600）および放射光PXRD（SPring-8、BL19B2）で実施し、得られたデータをリートベルト解析ソフトProfex（Doebelin & Kleeberg, 2015）で解析した。解析結果は、累帯構造ごとのピーク同定、全岩組成の比較、薄片から得られる鉱物量比との比較を行った。

結果として、放射光PXRDで角閃石の累帯構造ごとの明瞭なピーク分離が観察され、実験室PXRDでは、角度分解能不足のため、肩を持つピークが見られるに留まった。全岩組成の比較では、低含有量成分（濃度<1%）を除き、実験室・放射光PXRDの両方でXRFから得られた全岩組成と一致した（差異<±30%）。一方で、低含有量では、実験室PXRDで過大評価が見られた。

実験室PXRDと放射光PXRDから得られた鉱物量比の比較では、高含有量の鉱物（e.g., Albite, Quartz, Chlorite, Epidote）で一致し、低含有量のApatite、Titaniteでは実験室PXRDに不一致が見られた。また、角閃石のうち、量の少ないNa-角閃石では、実験室PXRDで過大評価が見られた。しかし、Na-角閃石とアクチノ閃石の量比は、放射光PXRDから得られる値と定性的に一致していた。これらの低含有量鉱物における実験室PXRDの差異は、S/N比と角度分解能の問題による解析誤差に起因すると考えられる。

本研究は、PXRDを用いた鉱物量比・累帯構造量比の数値化を検証し、特に放射光PXRDが低含有量鉱物や固溶体鉱物の累帯構造の分析にまで有用であることを示した。本研究成果は、これまで岩石学分野で行われてこなかった岩石記載の示量変数化を推し進め、これから迎えるビッグデータ時代に岩石学分野が適応するための一歩となる。

Antao, Sytle M., Mashrur Zaman, Vitor L. Gontijo, Eric S. Camargo, and Robert A. Marr. 2015. “Optical Anisotropy, Zoning, and Coexistence of Two Cubic Phases in Andradites from Quebec and New York.” Contributions to Mineralogy and Petrology. Beitrage Zur Mineralogie Und Petrologie 169 (2): 10.

Hill, R. J., G. Tsambourakis, and I. C. Madsen. 1993. “Improved Petrological Modal Analyses from X-Ray

Powder Diffraction Data by Use of the Rietveld Method I. Selected Igneous, Volcanic, and Metamorphic Rocks.” Journal of Petrology 34 (5): 867–900.
Doebelin, Nicola, and Reinhard Kleeberg. 2015. “Profex: A Graphical User Interface for the Rietveld Refinement Program BGMN.” Journal of Applied Crystallography 48 (Pt 5): 1573–80.

キーワード：粉末X線回折、リートベルト解析、鉱物量比、累帯構造、数値化
Keywords: Powder X-ray Diffraction, Rietveld Refinement, Mineral Modal, Mineral Zoning, Quantification

地質試料を用いた暗黒物質探索の試みについて

Searching for Dark Matter Using Geological Samples: Techniques and Preliminary Results

*阿部 なつ江[1,2]、廣瀬 重信[1]、常 青[1]、羽生 毅[1]、長谷部 徳子[2]、星野 靖[3]、加美山 隆[4]、川村 洋史[1]、村瀬 孔大[5]、中 竜大[6]、小國 健二[1]、鈴木 勝彦[1]、山崎 誠子[7]
*Natsue ABE[1,2], Shigenobu Hirose[1], Qing CHANG[1], Takeshi Hanyu[1], Noriko Hasebe[2], Yasushi Hoshino[3], Takashi Kamiyama[4], Yoji Kawamura[1], Kohta Murase[5], Tatsuhiro Naka[6], Kenji Oguni[1], Katsuhiko Suzuki[1], Seiko Yamazaki[7]

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2. 金沢大学、3. 神奈川大学、4. 北海道大学、5. ペンシルベニア州立大学、6. 東邦大学、7. 国立研究開発法人産業技術総合研究所
1. JAMSTEC, 2. Kanazawa University, 3. Kanagawa University, 4. Hokkaido University, 5. Penn State University, 6. Toho University, 7. AIST

地質試料に記録された宇宙線や地球内外の物質の痕跡は、地質学や天体物理学の研究に有効に利用できる。例えば、南極の氷床コアを用いた研究では、地球外部から到達するニュートリノなどの宇宙線の痕跡を観察して超新星爆発の回数や年代を推定したり、地球内部から放出されるジオニュートリノを観測する試みがある。また、海底のサンプルを使って宇宙線の強度を測定する研究は、長い地質学的期間にわたるさまざまな出来事についての洞察をもたらすと期待されている。一方で、宇宙に存在する物質のうち、このような宇宙線を含む直接観測できる物質は約5%に過ぎない。一方、約70%弱はダークエネルギーであり、残りの25%強はダークマター（暗黒物質）である。このような未知の物質やエネルギーを探索するため、暗黒物質の検出にはキセノンを用いた大型検出器が一般的である。しかし、検出器の拡張性には限界があり、検出限界の向上は困難である。この状況を鑑み、大型検出器以外の手法を検討している。例えば、雲母のような天然鉱物は、地質学的な時間スケールで存在しており、小さなサンプルでも十分な被ばく量がある。これらの鉱物は、暗黒物質の相互作用の証拠である核反跳の痕跡を、地球の年齢よりも長い期間保持することができる。これらの痕跡は、エッチングされると観察可能なピットとして現れる。1995年、スノーデン-イフトたちは、5億年前の天然白雲母をわずか0.08平方ミリメートルの面積で研究した。我々は、形成期間が長く、海底や大陸の深部から採取され、周囲の放射性物質が少ない天然の鉱物（カンラン石や雲母など）を利用することを提案している。我々は、これらの試料から「古物質検出器」として暗黒物質の痕跡を同定するために必要な観測技術を開発中である。未だ実観測までは遠い道のりではあるが、本発表では、我々の現在の取り組みを紹介し、より効率的な観測方法について議論したい。

キーワード：パレオ･ディテクター、暗黒物質、地球ニュートリノ、宇宙線
Keywords: Paleo-detectors, Dark Matter, Geoneutrino, Cosmic rays

口頭講演 | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

2024年9月12日(木) 14:00 ~ 15:15 | ES024 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

座長:門馬 綱一(国立科学博物館)、白勢 洋平(愛媛大学)

14:00 ~ 14:15

[R1-08] マダガスカル産天然サファイア中のウルトラナノインクルージョン

*三宅 亮[1]、乙 星華[1]、伊神 洋平[1]、江森 健太郎[2] (1. 京都大学、2. 中央宝石研究所)

14:15 ~ 14:30

[R1-09] 糸魚川石の対称性の再検討

*清原 千雅子、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1] (1. 京都大・院理)

14:30 ~ 14:45

[R1-10] 小笠原諸島父島, 宮之浜から産出したzeoliteと変質したボニナイトの関係

*井上 裕貴[1]、安井 万奈[2]、石橋 純一郎[3]、萩谷 宏[4]、島田 和彦[1]、山﨑 淳司[2] (1. 九大・院理、2. 早大・理工、3. 神戸大、4. 都市大)

14:45 ~ 15:00

[R1-11] 長野県浜横川産ニッケル滑石

*松原 聰[1]、門馬 綱一[1]、柳澤 教雄[2]、草葉 陽子[1]、徳本 明子[1]、宮脇 律郎[1] (1. 国立科学博物館、2. 産総研・地質調査総合センター)

15:00 ~ 15:15

[R1-12] 静岡県河津鉱山から産出したゼーマン石の２価鉄置換体について

*門馬 綱一[1]、Missen Owen[2]、Mills Stuart [3]、宮脇 律郎[1]、松原 聰[1]、大谷 栄治[4]、鎌田 誠司[5]、小澤 信[4] (1. 国立科学博物館、2. タスマニア大学、3. The Arkenstone、4. 東北大学、5. (株)アド・サイエンス)

マダガスカル産天然サファイア中のウルトラナノインクルージョン

Ultra nano inclusion in blue sapphire from Diego, Madagascar

*三宅 亮[1]、乙 星華[1]、伊神 洋平[1]、江森 健太郎[2]
*Akira MIYAKE[1], Seika Oto[1], Yohei Igami[1], Kentaro Emori[2]

1. 京都大学、2. 中央宝石研究所
1. Kyoto University, 2. CGL

【はじめに】サファイアという宝石名で一般的に広く知られているコランダム（Al_2O_3, Crn）には、しばしば針状のルチル（TiO_2）がインクルージョンとして含まれる。しかし、マダガスカル産の天然サファイア中では、ルチルとは異なるナノインクルージョンが発見されている（Shen et al., 2012; 江森ほか, 2018）。Shen et al. (2012)は、イラカカ産非加熱サファイア中のBe, Ti, Nb, Taを微量に含む雲状に濁った箇所からナノインクルージョンを観察し、長さ20~40 nm、幅5~10 nm で、α-PbO_2構造をもつTi-richな単一相（スリランカイト）であると報告した。江森ほか(2018)も、Be, Ti, Nb, Taを微量に含むディエゴ産天然サファイア中にTi, Nb, Taを含む長さ40 nm、幅10 nm程度のナノインクルージョンを発見し、組成がBe: Ti : Nb : Ta = 3 : 16 : 1 : 4の未知の鉱物である可能性があるとした。昨年2023年の鉱物科学会において、江森ほか(2018)で報告したナノインクルージョンは、α-PbO_2構造を持つ「スリランカイト」であったことを報告した。さらに10nm以下のさらに小さいウルトラナノインクルージョンが存在することもあわせて報告したが、この相については未決定であった。本発表では、この相についての報告を行う。

【試料と手法】本研究では、昨年の発表と同じ江森ほか(2018)で使用した天然Beを含有するマダガスカル・ディエゴ産非加熱ブルーサファイア原石サンプルを用いた。このサンプルは、江森ほか(2018)の分析により、LA-ICP-MSを用いて分析が行われており、Beが一番高濃度であった付近で、FEI（Thermo Fisher scientific）社Helios G3 CXを用いてFIB加工を行いコランダム(Crn)の[001]方向からの試料を作製し、JEOL JEM-2100Fを用いてTEM観察を行った。

【結果と考察】4D-STEM (Diffraction Mapping)の結果、10nm以下のウルトラナノインクルージョンからは、コランダムおよびスリランカイトとは異なる反射がえられた。このウルトラナノインクルージョンのSTEM-EDS分析では組成の情報は得られなかった。一方で、昨年報告したアトムプローブを用いた分析の結果、ナノインクルージョン中にTi, Fe, Nb, Taが含まれていることがわかった。このアトムプローブで分析したナノインクルージョンの大きさが10nm以下であることから、TEMで回折図形が得られたウルトラナノインクルージョンが同じであるとして、以下に考察を行う。電子回折図形を指数付けした結果、このウルトラナノインクルージョンはWolframite 構造 (*P*2/*c*)と呼ばれるABO_4酸化物構造として説明がつくことがわかった。つまり$(Ti, Fe, Nb, Ta)_2O_4$組成の酸化物によりなると考えられる。Wolframite 構造はα-PbO_2構造を基本構造としつつ、陽イオンの位置にA, Bが秩序配列した構造である。このウルトラナノインクルージョンと母相であるコランダムの間には$\{010\}_{inclusion} \parallel \{10\text{-}10\}_{Crn}$、$\{100\}_{inclusion} \parallel \{0001\}_{Crn}$、$\{001\}_{inclusion} \parallel \{1\text{-}210\}_{Crn}$ という、昨年報告した「スリランカイト」とコランダムとで得られた方位関係と同じ方位関係が得られた。またスリランカイト同様に３連双晶も確認された。ウルトラナノインクルージョン相と母相がトポタキシャルな関係であり、ウルトラナノインクルージョンがコランダムから析出してできたことを示唆する。

Shen A. & Wirth R., (2012). Gems & Gemology, 48(2), 150-151江森健太郎, 北脇裕士, 三宅亮 (2018) GCL通信, 45号, 1-8

キーワード：ウルトラナノインクルージョン、コランダム
Keywords: Ultra-nano inclusion, corundum)

糸魚川石の対称性の再検討

Reexamination of the symmetry of itoigawaite

*清原 千雅子、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1]
*Chigako KIYOHARA, Yohei Igami[1], Akira Miyake[1], Norimasa Shimobayashi[1]

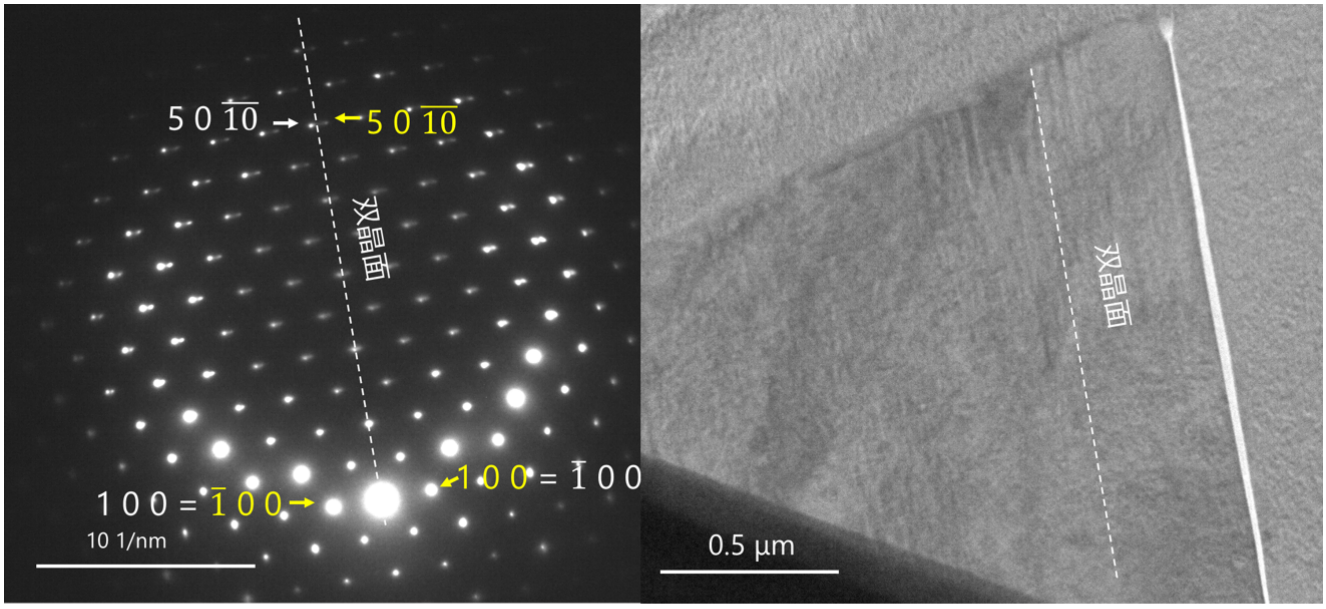
1. 京都大・院理
1. Kyoto Univ. Sci.

糸魚川石は、$SrAl_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$で表される、ローソン石（$CaAl_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$）のストロンチウム（Sr）置換体である。糸魚川石は、世界でも新潟県糸魚川-青海地域と鳥取県若桜地域の2カ所からしか産出の報告がない稀産鉱物である（Miyajima et al., 1999、下林・山田, 2003）。

糸魚川石の空間群については、模式標本の分析と併せて提示されたものと合成実験結果を基に提唱されたものがある。Miyajima et al.（1999）は、糸魚川-青海産の糸魚川石 について、粉末X線回折パターンの解析から、ローソン石の構造を参考に空間群を*Cmcm*（a = 6.031 Å, b = 8.945 Å, c = 13.219 Å）と報告している。一方、Liebscher et al. (2010）は、 (Ca, Sr)Cl_2水溶液中で4 GPa/600 ℃, 800 ℃での合成実験を行い、粉末X線回折測定とリートベルト解析によって糸魚川石が空間群$P2_1/m$（a = 5.4231 Å, b = 13.2761 Å, c = 5.8583 Å, β = 124.42˚）で生成されたという報告をしている。またローソン石については、高圧で*Cmcm*から $P2_1/m$へ可逆的な相転移が起こることが知られている（Scott and Williams 1999; Daniel et al. 2000）。一見すると2つの空間群に対応した単位格子には大きな差異があって両者の識別は容易に思えるが、実際には両相の構造の違いは僅かであって、糸魚川石の空間群が$P2_1/m$か*Cmcm*かを判別するのは非常に困難であり、どちらの空間群が正しいのかについてはまだ詳しくは検討されていないと思われる。本研究では、糸魚川石の結晶構造に着目し、透過型電子顕微鏡（TEM）観察・電子回折法を利用して、糸魚川石の詳細な観察をおこなった。試料は、鳥取県若桜産および糸魚川産の糸魚川石を用いた。

鳥取県若桜産および糸魚川産の糸魚川石をSEMおよびTEMで観察した結果、TEM明視野像では、SEMスケールでは見られなかった細かい筋状の組織（図）が、どちらの産地のものからも見られた。この領域から得られた電子回折図形（図）では、糸魚川石の結晶格子の軸角が90˚からわずかにずれ、回折点が2つに分裂している様子が観察できた。そのため、糸魚川石は直方晶系よりも低対称な構造で双晶を形成していると考えられ、双晶の各個体についてはLiebscher et al. (2010）が報告している$P2_1/m$で矛盾なく説明できることがわかった。すなわち、細かい筋状の組織は$P2_1/m$構造の双晶であることが判明し、通常のX線回折法ではこのような微細な双晶を判別できずに両者を平均した*Cmcm*構造と誤認する可能性があることがわかった。本研究の結果からは糸魚川石の空間群が$P2_1/m$であることが強く示唆される。

キーワード：糸魚川石、対称性
Keywords: Itoigawaite, symmetry



図：糸魚川石中の細かい筋状組織のTEM明視野像とその部分から得られた電子回折図形。
端の方のスポットは2つに分裂しており、そのため結晶格子の軸角が 90° からわずかにずれていると考えられる。

小笠原諸島父島, 宮之浜から産出したzeoliteと変質したボニナイトの関係

Zeolite and altered boninite from Miyanohama, Ogasawara, Japan

*井上 裕貴[1]、安井 万奈[2]、石橋 純一郎[3]、萩谷 宏[4]、島田 和彦[1]、山﨑 淳司[2]
*Yuki INOUE[1], Mana Yasui[2], Jun-ichiro Ishibashi[3], Hagiya Hiroshi[4], Kazuhiko Shimada[1], Athushi Yamazaki[2]

1. 九大・院理、2. 早大・理工、3. 神戸大、4. 都市大
1. Kyushu Univ. Sci., 2. Waseda Univ. , 3. Kobe Univ., 4. Tokyo City Univ.

はじめに　ボニナイトはMg, Cr, Niに富み液相濃集元素に乏しい安山岩で, olivine, clinoenstatite, enstatite, augite, Cr-spinelからなるガラス質の岩石である。ボニナイトの空隙を充填する形で多様なzeolite鉱物が産出することがNishido（1982）, Fujita et al(2016)らによって報告されている。ボニナイトは岩石分類的にはplagioclaseを含まないとされており, plagioclaseの分解に伴ってzeolite鉱物が形成されるとする一般的な生成過程を考えることが難しい。本研究では, ボニナイトにおけるzeolite鉱物の生成過程を解明することを目指して, 検討を行った。方法　試料は父島北部の宮之浜海岸の露頭から採取し, ボニナイトの空隙内に産出するzeolite鉱物を含む晶洞鉱物を対象に解析を行った。偏光顕微鏡観察と粉末X線回折法（XRD）により各鉱物相の同定を行った。化学組成は研磨片を作成し, 晶洞鉱物およびボニナイトのガラス石基を電子線マイクロアナライザー（EPMA）により求めた.
結果　ボニナイトの空隙内に産出する晶洞鉱物としてanalcime, phillipsite, erionite, chabazite, heulandite, dachialdite, mordenite, apophyllite, barite, calciteが同定された。これらの晶洞鉱物中のzeolite鉱物は, 主要化学組成比(Si/Al比とCa/(Na＋K+Ca)比)のダイアグラムから, ２つのグループに分けられた。Type Iは, 母岩であるボニナイトのガラス石基の組成とほぼ同じSi/Al比を示し, I価からII価の陽イオンに幅広く分布するもので, analcime, phillipsite, erionite, chabaziteがこのグループに分類された。Type II には, 母岩の組成に対して, Si/Al比が比較的高くなるにつれ, I価の陽イオンに富む傾向を示すもので, heulandite, dachialdite, mordeniteが分類された。火山角礫岩に取り込まれたボニナイトにはType Iのzeolite鉱物だけが同定されたのに対し, 枕状溶岩のボニナイトには, Type I, IIの両方のzeolite鉱物が見いだされた。また, 枕状溶岩のボニナイトにはType Iのzeolite鉱物結晶の外縁にType IIのzeolite鉱物が分布する組織が認められた。
考察　火山角礫岩中のzeolite鉱物も枕状溶岩中のzeolite鉱物も,そのSi/Al比と陽イオン組成は母岩のガラス石基の組成領域を起点とした連続的な組成分布を示した。このことは母岩のガラス石基から２Typeのzeolite鉱物が生成したことを示唆する。また, phillipsiteやchabaziteの各結晶相はSi/Al比が異なる組成分布を示しており，Siに富む傾向へ成長を示している。このことは産状ともよく一致しており, ① Type IとType II が生成する異なる熱水環境の存在，② 局所的にType I の生成後にType II が生成する比較的高温・低pHの熱水条件へ形成条件変化があったことを示唆している(Chipera and Apps, 2001; Taylor and Surdam, 1981)。すなわち，ボニナイト中のzeolite鉱物はガラス石基を起源とした２次的な熱水変質により生成したものであり，比較的低温の熱水条件であった形成条件と，局所的に高温の熱水条件への形成条件変化があったと考えられる。本研究では, zeolite鉱物の化学組成分布を詳細に検討したことにより, ボニナイト中のガラス石基を起源とするzeolite鉱物の生成環境に関わる知見が得られた。

キーワード：沸石、ボニナイト、十字沸石
Keywords: zeolite, Boninite, phillipsite

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

長野県浜横川産ニッケル滑石

Willemseite from the Hamayokawa mine, Nagano Prefecture, Japan

*松原 聰[1]、門馬 綱一[1]、柳澤 教雄[2]、草葉 陽子[1]、徳本 明子[1]、宮脇 律郎[1]
*Satoshi Matsubara[1], Koichi Momma[1], Norio Yanagisawa[2], Yoko Kusaba[1], Akiko Tokumoto[1], Ritsuro Miyawaki[1]

1. 国立科学博物館、2. 産総研・地質調査総合センター
1. National Museum of Nature and Science, 2. Geological Survey of Japan, AIST

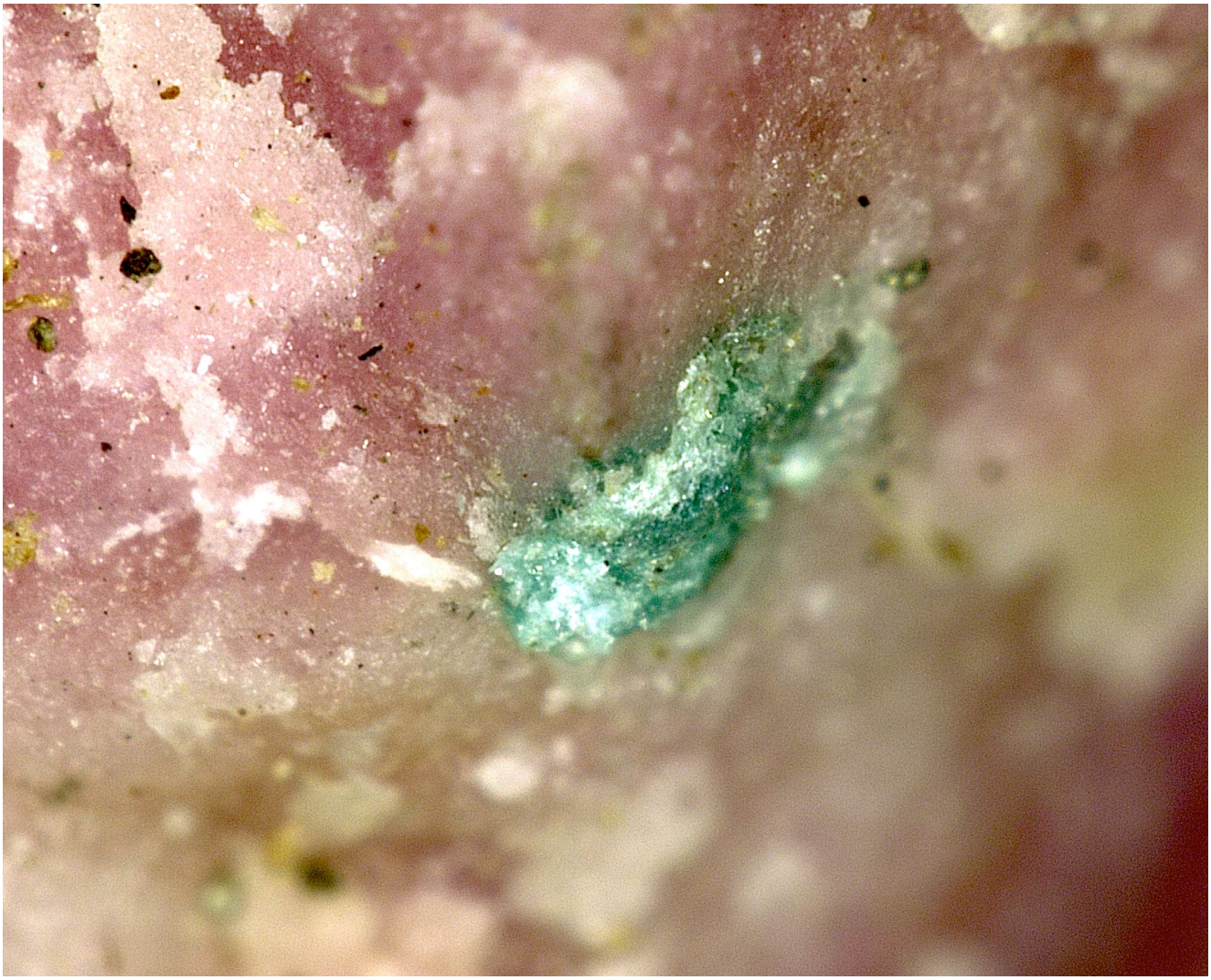
長野県辰野町にあった浜横川鉱山の変成マンガン鉱床からは，稀産の鈴木石[suzukiite, $Ba_2V^{4+}{}_2O_2Si_4O_{12}$]が報告されていた（広渡・吉江，1978）．国立科学博物館や地質調査所標本館に，鉱物愛好家から寄贈された浜横川鉱山産鈴木石と称する標本がいくつか登録されているが，最近、それら数点について再検討したところ，鈴木石ではなく，日本新産のニッケル滑石[wiilemseite,$Ni_3Si_4O_{10}(OH)_2$]であることが判明した．

主に菱マンガン鉱からなる鉱石中に，濃緑～鮮緑色の1.5 mm以下の粒が含まれている．実体顕微鏡下では，鈴木石のような明瞭なガラス光沢はなく，鈍い樹脂～真珠光沢があり，以前から観察眼の鋭い人から，雲母か緑泥石の仲間ではないかと言われていた．まず小片試料のままEDXを用いて半定量分析をしたところ，ほとんどニッケルとケイ素しか検出できなかった．この時点で，鈴木石，雲母や緑泥石でないことが確認できた．次にそれを単結晶X線回折装置によって疑似的粉末回折パターンを測定したところ，滑石のパターンとよく一致した．得られた回折線は，以下のようである．d(Å)(Iobs):9.35(100),4.56(9),3.11(24), 2.63(5),2.50(12),2.24(3),1.52(7).

さらにWDXを用いてより精密な化学分析を試みた．柔らかい鉱物であるため，鏡面研磨は困難で，試料を導電性接着テープに圧着固定し，劈開面を分析に供した．分析値例：地質調査所標本館の標本（GSJ M20093）（6ヶ所の分析点の平均値）：SiO_2 50.74, Al_2O_3 0.04, NiO 42.01,FeO 0.08, MnO 1.13, MgO 0.24, CaO 0.02, Na_2O 0.21, K_2O 0.00, total 94.47 wt.%. Si = 4として規格化すると，八面体層の組成は$(Ni_{2.66}Mn_{0.08}Na_{0.03}Mg_{0.03})_{2.80}$となる．理想値の3からやや少ないが，SEM像で見た劈開面はやや湾曲しており，その点を考慮すれば，ニッケル滑石と考えてよい化学分析値と言えよう．　変成マンガン鉱床中からは，少量ながらニッケルを主成分とする鉱物[ゲルスドルフ鉱，NiAsS；紅砒ニッケル鉱,NiAs；ジーゲン鉱，$CoNi_2S_4$など]がしばしば見つかる．マンガン鉱床の源となったマンガンノジュールやマンガンクラスト中には，鉄以外にも，コバルト，ニッケル，銅，亜鉛，ヒ素などが含まれるので，ニッケルは元々存在したと思われる．しかし，どうして滑石型のケイ酸塩鉱物となったかは今の時点では不明である．

キーワード：鈴木石、ニッケル滑石、浜横川鉱山
Keywords: suzukiite, willemseite, Hamayokokawa mine

@Japan Association of Mineralogical Sciences.



@Japan Association of Mineralogical Sciences.

静岡県河津鉱山から産出したゼーマン石の２価鉄置換体について

On the Fe^{2+}-analogue of zemannite from Kawazu mine, Shizuoka Prefecture, Japan

*門馬 綱一[1]、Missen Owen[2]、Mills Stuart [3]、宮脇 律郎[1]、松原 聰[1]、大谷 栄治[4]、鎌田 誠司[5]、小澤 信[4]
*Koichi MOMMA[1], Owen Missen[2], Stuart Mills[3], Ritsuro Miyawaki[1], Satoshi Matsubara[1], Eiji Ohtani[4], Seiji Kamada[5], Shin Ozawa[4]

1. 国立科学博物館、2. タスマニア大学、3. The Arkenstone、4. 東北大学、5. (株)アド・サイエンス
1. National Museum of Nature and Science, 2. University of Tasmania, 3. The Arkenstone, 4. Tohoku Univ., 5. AD Science Inc.

はじめに

静岡県下田市の河津鉱山（別名、蓮台寺鉱山）からはテルルを含む鉱物を数多く産出し、新鉱物として河津鉱(Bi_2Te_2Se)と欽一石が記載されている。欽一石の原記載では$(Fe^{2+}_{1.13}Mg_{0.47}Zn_{0.43}Mn^{2+}_{0.17})_{\Sigma 2.20}(Te_{2.97}Se_{0.03})_{\Sigma 3.00}O_{9.00}(H_{1.38}Na_{0.22})_{\Sigma 1.60}\cdot 3.2H_2O$なる組成が報告され、これは当時のゼーマン石の定義に照らし合わせて、その鉄置換体に相当するとして新種に認定された。ところがその後、ゼーマン石の理想化学組成として$Mg_{0.5}[ZnFe^{3+}(TeO_3)_3]\cdot 4.5H_2O$が与えられ、電荷バランスの観点から2価の亜鉛と3価の鉄はどちらも本質的成分であることが明らかになった。鉄の一部を3価として原記載の欽一石の組成を再計算すると、2価イオンとしては亜鉛が鉄を上回るため、ゼーマン石の組成範囲にとどまる。しかし、R.Miletich (1995)はゼーマン石の再検討を行う中で、河津鉱山産の“欽一石”についても検討を行い、2価のイオンとしてマンガンが卓越する分析結果が得られたため、これを欽一石として扱い、その端成分組成として$Mg_{0.5}[MnFe^{3+}(TeO_3)_3]\cdot 4.5H_2O$が与えられた。今回、我々は河津鉱山産のゼーマン石グループ鉱物を分析し、その中に２価鉄が亜鉛を上回る部位を見出したので、報告する。

試料および実験

試料は国立科学博物館の収蔵標本（NSM-M41022）で、石英の空隙に暗褐色の六角長柱状結晶が放射状に集合したものである。化学組成分析は電子線ダメージを避けるため、波長分散型(WDS)ではなくエネルギー分散型X線分光検出器(EDS)を備えた走査電子顕微鏡（JEOL JSM-6610）を用いて行った。含水量はEDS分析値の100%からの差分により見積もった。結晶によっては中心部と外周部とで組成変化が見られたため、一定組成の部分のみを使用して結晶構造解析をするべく、収束イオンビーム(FIB)を用いて試料の切り出しを行ったが、結果的に用いた試料の組成は均質であった。単結晶X線回折実験は回転対陰極と多層膜X線集光ミラー(VariMax)を備えたRigaku Synergy Customを用いた。

結果

4点の分析値の平均から得られた組成式は$Mg_{0.40}(Fe^{2+}_{0.54}Zn_{0.33}Cu_{0.18}Mn_{0.05})_{\Sigma 1.10}Fe^{3+}_{1.00}(Te_{2.92}P_{0.06}O_9)\cdot 4.12H_2O$であり、ゼーマン石および欽一石の鉄置換体に相当する。同一試料について、単結晶X線回折による結晶構造解析を行ったところ、空間群$P6_3$ (または$P6_3/m$)、格子定数a = 9.37765(11), c = 7.58379(9), V = 577.570(15)、解析の信頼度$R1$ = 1.56%との結果が得られ、ゼーマン石、欽一石と同形構造であることが確認された。チャネル中の陽イオン分布、およびフレームワークのMサイトの結合距離から、真の対称性は$P6_3/m$ではなく$P6_3$に低下していることが示唆された。

キーワード：ゼーマン石、欽一石、河津鉱山
Keywords: zemannite, kinichilite, Kawazu mine

口頭講演 | R3：高圧科学・地球深部

2024年9月12日(木) 14:00 ~ 15:15 | ES025 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

座長:境 毅(愛媛大学)、新名 良介(明治大学)、石井 貴之(岡山大学)、川添 貴章(広島大学)

14:00 ~ 14:15

[R3-09] 高圧下における下部マントル物質の電気伝導度と価数およびスピン状態との関係

「招待講演」

*増野 いづみ[1] (1. 岡山大・惑星研)

14:15 ~ 14:30

[R3-10] GHz-DAC音速法によるフェロペリクレース中の鉄イオンスピン転移に伴う弾性異常測定

*米田 明[1]、増野 いづみ[2]、松井 亮介[1]、石田 遼真[1]、近藤 忠[1] (1. 大阪大学・理学研究科、2. 岡山大学・惑星物質研究所)

14:30 ~ 14:45

[R3-11] Reaction between water and iron in the early magma ocean and the present core-mantle boundary

*Yongjae Lee[1] (1. Yonsei University)

14:45 ~ 15:00

[R3-12] 高温高圧下におけるB2-FeNiSi相の音速測定と地球核の構成

*大谷 栄治[1]、生田 大穣[2]、福井 宏之[3,4]、坂巻 竜也[1]、石川 大介[3,4]、バロン アルフレッド[3,4] (1. 東北大・院理、2. 岡山大惑星物質研、3. JASRI、4. 理研)

15:00 ~ 15:15

[R3-13] FeS IVとVの相境界について

*浦川 啓[1] (1. 岡山大学)

高圧下における下部マントル物質の電気伝導度と価数およびスピン状態との関係

Electrical conductivity of the lower mantle materials under high pressure with implication for valence and spin states of iron

*増野 いづみ[1]
*Izumi MASHINO[1]

1. 岡山大・惑星研
1. Okayama Univ.

主要な下部マントル鉱物には鉄が多く含まれており、ブリッジマナイトやフェロペリクレース中の鉄は圧力をかけることでスピン転移を起こすことが知られている。下部マントル物質中の鉄のスピン転移はその鉱物の密度、電気伝導度、熱伝導度、鉄の分配係数、電気伝導度などに大きな影響を与える。特に電気伝導度には敏感であり、例えばフェロペリクレース中の鉄は下部マントル圧力条件で高スピンから低スピンへとスピン状態が変化し、不対 d 軌道電子が減少することにより電気伝導度の有意な低下が観察されている（e.g. Lin et al., 2007; Ohta et al., 2007; Yoshino et al., 2011）。本発表ではダイヤモンドアンビルセルを用いた高圧下における電気電導度測定とメスバウアー分光測定を基に、下部マントルに関係する物質の鉄のスピン状態と電気伝導度の関係を議論する。

キーワード：スピン転移、下部マントル、電気伝導度
Keywords: Spin transition, The lower mantle, Electrical conductivity

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

GHz-DAC音速法によるフェロペリクレース中の鉄イオンスピン転移に伴う弾性異常測定

GHz-DAC ultrasonics to measure elastic anomaly with the spin transition of ferrous ion in ferropericlase

*米田 明[1]、増野 いづみ[2]、松井 亮介[1]、石田 遼真[1]、近藤 忠[1]
*Akira Yoneda[1], Izumi Mashino[2], Ryosuke Matsui[1], Ryoma Ishida[1], Tadashi Kondo[1]

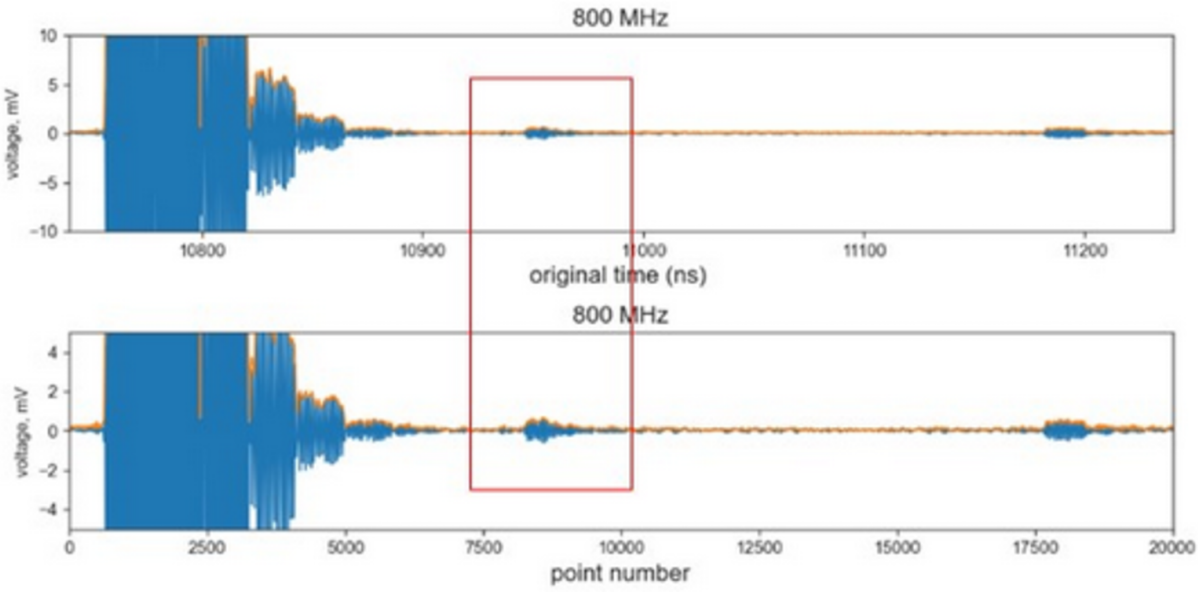
1. 大阪大学・理学研究科、2. 岡山大学・惑星物質研究所
1. Osaka Univ. Sci, 2. Okayama Univ. IPM

GHz-DAC音速法により66GPaでのフェロペリクレース（Fe17Mg83O）のトラベルタイム測定に成功した。試料中の鉄2価イオンが低スピン状態であることをメスバウワー分光法で確認した。今後、減圧過程においてトラベルタイム測定を実施し、スピン転移に伴うP波S波速度の挙動解明を目指す。学会では、その時点までに取得できたデータを開示したい。

添付図は66GPaでのP波シグナルの観測例である。枠で囲んだ部分が試料からの反射波である。上下の二つの図は同じデータをプロットしたものであるが、縦軸のスケールが異なっている。また、横軸は時間（上図）とポイント数（下図）である。

キーワード：GHz-DAC音速法、スピン転移、フェロペリクレース
Keywords: GHz-DAC ultrasonics, Spin transition, feropericlase

@Japan Association of Mineralogical Sciences.


800 MHz
voltage, mV
10
5
0
−5
−10
10800
10900
11000
11100
11200
original time (ns)
800 MHz
voltage, mV
4
2
0
−2
−4
0
2500
5000
7500
10000
12500
15000
17500
20000
point number

Reaction between water and iron in the early magma ocean and the present core-mantle boundary

*Yongjae Lee[1]

1. Yonsei University

Recent interest in hydrogen as a clean geological resource has been escalating, leading to active research on the formation and exploration of natural hydrogen worldwide. Paradoxically, however, hydrogen is the most abundant element in the universe and is also widely distributed in the Earth, as contained in mineral structures from the crust to the core. Hydrogen in minerals can exist in the form of molecular water (H2O), hydroxyl group (OH), or monatomic hydrogen (H), and is, therefore, directly related to the global transport and distribution of water. From this perspective, it is notable that the hydrogen budget increases innards to the mantle transition zone, lower mantle, and core, compared to the amount in the hydrosphere on the Earth’s surface. In this presentation, I will introduce the reactions between water and iron based on two recent experimental results to simulate the conditions of the early magma ocean [1] and the present core-mantle boundary [2], which could be linked to the initial distribution of hydrogen and its enrichment in the topmost outer core.

[1] J. Choi, R.J. Husband, H. Hwang, T. Kim, Y. Bang, S. Yun, J. Lee, H. Sim, S. Kim, D. Nam, B. Chae, H.-P. Liermann, Y. Lee*, Oxidation of iron by giant impact and its implication on the formation of reduced atmosphere in the early Earth, Science Advances, Vol.9, eadi6096, 2023
[2] T. Kim, J.G. O’Rourke, J. Lee, S. Chariton, V. Prakapenka, R.J. Husband, N. Giordano, H.-P. Liermann, S.-H. Shim*, Y. Lee*, “A hydrogen-enriched layer in the topmost outer core sourced from deeply subducted water”, Nature Geoscience, Vol.16, 1208-1214, 2023

Keywords: Hydrogen, Magma ocean, Core-mantle boundary

高温高圧下におけるB2-FeNiSi相の音速測定と地球核の構成

Sound velocity of B2-FeNiSi alloy at high pressure and high temperature and constitution of the Earth’s inner core

*大谷 栄治[1]、生田 大穣[2]、福井 宏之[3,4]、坂巻 竜也[1]、石川 大介[3,4]、バロン アルフレッド[3,4]
*Eiji OHTANI[1], Daijo IKUTA[2], Hiroshi FUKUI[3,4], Tatsuya SAKAMAKI[1], Daisuke Ishikawa[3,4], Alfred Q. R. BARON[3,4]

1. 東北大・院理、2. 岡山大惑星物質研、3. JASRI、4. 理研
1. Tohoku University, 2. Institute for Planetary Materials, Okayama University, 3. JASRI, 4. RIKEN

Fe-Ni-Si系の高温高圧下における相関係（Ikuta et al., 2021）によると，B2相の$Fe_{0.67}Ni_{0.06}Si_{0.27}$合金は地球核の高温高圧下において，Si量の少ないhcp-FeNi合金（またはSiをほとんど含まないhcp-Fe-Ni合金）と共存する．内核がB2相とhcp相の混合物からなる可能性を検証するために，B2-$Fe_{0.67}Ni_{0.06}Si_{0.27}$(7wt% Ni-15wt% Si)の高温高圧下（130 GPa、2300 Kまでの温度圧力条件）における音速と密度を，SPring-8のBL43LXUビームラインの高分解能X線非弾性散乱法とX線粉末法を用いて測定した．高圧の発生にはダイヤモンドアンビル高圧装置を，高温の発生と測温には，ポータブルレーザー加熱測温装置を用いた．その結果，縦波速度（Vp）と密度（ρ）には，線形の関係（バーチ則）が成り立ち，その温度依存性はほとんど存在しないことが明らかになった．このようにバーチ則の弱い温度依存性は，純鉄のbcc相（Shibazaki et al., 2016）およびFeSi合金のB20相（Whitaker et al., 2009）に見られる温度依存性と同様である．本研究で得られたB2-$Fe_{0.67}Ni_{0.06}Si_{0.27}$合金の$V_P$-$\rho$関係を内核の条件に外挿するとともに，状態方程式との組み合わせで横波速度（V_S）を見積もり，地震学的モデルPREMの内核の値と比較した．内核の温度を6000 Kと見積もると，内核の条件において，B2-$Fe_{0.67}Ni_{0.06}Si_{0.27}$合金とhcp-Fe-Ni合金の二相混合物の$V_P$と$V_S$は，PREMの値と比較して，どちらも誤差の範囲ではあるが僅かに大きい値を示す．この結果から，PREMの内核はFe-Ni-Si合金のB2相とhcp相の混合物として説明可能であるが，PREMの内核をより良く説明できる可能性として，（1）内核の温度が本研究で想定した6000 Kより高い，（2）ケイ素に加えて，鉄合金に含有されることで音速（V_PとV_S）を下げる性質を示すと考えられるケイ素以外の軽元素成分（例えば硫黄）が内核に含まれていることなどの可能性が考えられる．

引用文献

Dziewonski and Anderson (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**, 297-356.

Ikuta et al. (2021). Two-phase mixture of iron–nickel–silicon alloys in the Earth’s inner core, *Communications Earth and Environments*, **2**, 225.

Shibazaki et al. (2016). Compressional and shear wave velocities for polycrystalline bcc-Fe up to 6.3 GPa and 800 K. *American Mineralogist*, ***101*(5)**, 1150–1160.

Whitaker et al. (2009). Thermoelasticity of ε-FeSi to 8 GPa and 1273 K. *American Mineralogist*, **94**, 1039–104

キーワード：音速、B2-FeNiSi合金、高温高圧、内核
Keywords: Sound velocity, B2-FeNiSi alloy, High pressure and high temperature, Inner core

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

FeS IVとVの相境界について

On the phase boundary between FeS IV and V

*浦川 啓[1]
*Satoru URAKAWA[1]

1. 岡山大学
1. Okayama University

FeSは惑星や小惑星，衛星のコアの構成成分のひとつであると考えられている。そのため，高温高圧下の相平衡や物性については様々な研究がなされてきた。FeSの多形の多くはNiAs型構造に関連した超格子構造を持っている。数GPaまでの圧力ではFeSは高スピン状態をとる。室温ではFeS I（troilite）が安定で，温度上昇に伴いFeS IV（hexagonal相）からFeS V（単純NiAs型相）へと相転移する。これらは二次相転移で，FeS IとIVは反強磁性でFeS Vは常磁性である。Kusaba et al. (1998)とUrakawa et al. (2004)は高温高圧X線回折実験を行い，FeS IVの超格子反射の存否からFeS IVとVの境界が約20GPaまでほぼ直線的に変化することを報告した。この相境界を1気圧まで外挿すると約450 Kとなる。一方，磁化率測定（Horwood et al., 1976）による反強磁性から常磁性への変化は約590 K（Néel温度）で起こり140度の違いがある。本研究では放射光X線を用いたその場観察に基づき高スピンのFeS IVとVの相境界を再検討した。

KEKのPF-AR NE5CにおいてMAX80を用いてエネルギー分散法でX線回折測定を行った。出発試料には合成したトロイライト粉末を用いた。温度はW25%Re—W3%Re熱電対で測温し，圧力はNaClの状態方程式から求めた。荷重一定で1100 Kまで昇温したのち降温過程でFeSの粉末X線回折プロファイルを得た。データ解析にはPDIndexerを用いた。

300 K から1000 Kまでの温度範囲で25度毎にデータ収集してFeSの格子定数の温度変化を調べた。温度の減少に伴い圧力は約3 GPaから2 GPaまで下がった。等温体積弾性率を用いて各温度の体積を2.5 GPaの値に補正した。補正した体積は概ね温度に線形に変化するが2.5 GPa・625 K 付近で折れ曲がっており，2次相転移で期待される熱膨張率の不連続を示している。1気圧でも中性子回折実験から熱膨張率の不連続変化がNéel温度で起こることが報告されている（Tenailleau et al.，2005）。熱膨張率の比較から1気圧と2.5 GPaの2次相転移は同じものであると考えられる。これらを総合すると，高スピンのFeS Vの安定領域は，FeS IVの超格子反射から決められた境界より高温側にシフトする。

参考文献 Kusaba et al., J. Phys. Chem. Solids, **59**, 945 (1998). Urakawa et al., Phys. Earth Planet. Inter., **143-144**, 469 (2004). Horwood et al., J. Solid State Chem., **17**, 35 (1976). Tenailleau et al., Mineral. Mag., **69**, 205 (2005).

キーワード：硫化鉄、二次相転移、熱膨張率、高圧、X線回折
Keywords: iron sulfide, second order phase transition, thermal expansivity, high pressure, X-ray diffraction

口頭講演 | R8：変成岩とテクトニクス

2024年9月12日(木) 15:30 ~ 18:00 | ES024 東山キャンパス

R8：変成岩とテクトニクス

座長:纐纈 佑衣(名古屋大学)、遠藤 俊祐(島根大学)

15:30 ~ 15:45

[R8-01] 「コーサイト相転移石英のEBSD検出法」の確立に向けて―西南日本四国三波川変成帯権現地域の組み込み―

「発表賞エントリー」

*箕輪 桃子[1]、永冶 方敬[1]、伊藤 泰輔[2]、ウォリス サイモン[2] (1. 東京学芸大学、2. 東京大学)

15:45 ~ 16:00

[R8-02] Pressure-Temperature-Time Conditions of The Basement Rocks in The Banggai-Sula Microcontinent, Indonesia

「発表賞エントリー」

*Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari[1], Nobuhiko Nakano[1], Tatsuro Adachi[1], Nugroho Imam Setiawan[2] (1. Kyushu Univ., 2. Gadjah Mada Univ.)

16:00 ~ 16:15

[R8-03] 嶺岡帯角閃岩再訪

*市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、伊藤 久敏[2]、田村 明弘[3]、森下 知晃[3] (1. 千葉大学、2. 電力中央研究所、3. 金沢大学)

16:15 ~ 16:30

[R8-04] チェコ共和国・ザクロ石-黒雲母珪長質グラニュライト中のザクロ石の組成不均質

*中村 大輔[1]、藤村 祐花[1]、小寺 勇気[1] (1. 岡山大学)

16:30 ~ 16:45

[R8-05] 岐阜県春日地域の帯状スカルン脈の形成と変質：U-Th酸化物のEPMA年代

*遠藤 俊祐[1] (1. 島根大学)

16:45 ~ 17:00

[R8-06] 大陸プレート境界断層での歪の解放に伴う地質構造と岩石組織の観察

「発表賞エントリー」

*吉朝 開[1]、安東 淳一[1,2]、Das Kaushik[1,2]、Sarkar Dyuti Prakash[3] (1. 広島大学、2. 広大 HiPeR、3. 海洋研究開発機構)

17:00 ~ 17:15

[R8-07] 炭質物ラマン温度計における新しい試料形態の比較検討

「発表賞エントリー」

*荻野 竣右[1]、纐纈 佑衣[1]、高橋 聡[1] (1. 名古屋大・院環境)

17:15 ~ 17:30

[R8-08] 関東山地三波川帯の泥質変成岩における指標鉱物出現の温度圧力条件：炭質物ラマン温度計からの推定

*纐纈 佑衣[1]、清水 以知子[2] (1. 名古屋大学・院環境、2. 京都大学・院理)

17:30 ~ 17:45

[R8-09] 愛知県新城地域の中央構造線沿いに分布する領家帯マイロナイトの構造岩石学的特徴

*丹羽 美春[1,2]、道林 克禎[1,3]、谷 健一郎[4]、西村 拓真[5] (1. 名古屋大・環境、2. 豊橋市自然史博物館、3. 海洋研究開発機構、4. 国立科学博物館、5. 鳳来寺山自然科学博物館)

17:45 ~ 18:00

[R8-10] 鉱物組合せと白雲母K-Ar年代に基づく神居古潭帯幌加内地域の地帯区分の再提案

*平島 崇男[1]、苗村 康輔[2]、吉田 健太[3] (1. 京都大学、2. 岩手大学・教育、3. 海洋研究開発機構)

「コーサイト相転移石英のEBSD検出法」の確立に向けて一西南日本四国三波川変成帯権現地域の組み込み一

Toward the establishment of "EBSD method for the detection of quartz with phase transition to coesite": Incorporation of the Gongen area, Sanbagawa metamorphic belt, Shikoku, SW-Japan

*箕輪 桃子[1]、永冶 方敬[1]、伊藤 泰輔[2]、ウォリス サイモン[2]
*Momoko Minowa[1], Takayoshi Nagaya[1], Taisuke Ito[2], Simon Wallis[2]

1. 東京学芸大学、2. 東京大学
1. Tokyo Gakugei University, 2. The University of Tokyo

石英は主要な地殻構成物質であり、高圧下ではコーサイト(coesite, Coe)に相転移する。コーサイトへの高圧相転移は、プレート収束域では深さ約80 km以上のプレート沈み込み後に上昇した広域変成岩から報告される。広域変成作用に伴うCoeは、ザクロ石やオンファス輝石等に包有される場合や、速い上昇速度、急激な温度勾配、H_2Oの低い関与と関連して特定の条件で残存し得る。そのため、 広域変成岩類でCoeを確認できれば、沈み込んだ深さの下限が推定できる。また、変成岩から報告された殆どのCoeは、他の鉱物に包有された状態で発見されるため、そのようなホスト鉱物の組成累帯構造や共生鉱物、鉱物年代測定等、複数の観察・分析との組み合わせは、変成条件に強い制約を与え、P-T-t履歴の推定に決定的な役割を果たす。

しかし、Coeの形成条件に達した多くの天然試料で、Coeは上昇による減圧に伴って低圧相の石英に戻っており、保存されたCoeの観察は稀である。それゆえCoeへの相転移を経験したことを示す痕跡は長年議論があり、例えば特有の形態を持つ石英多結晶体や、石英包有物周囲の放射状割れ目等の微細組織観察は、保存されたCoeと同様に(超)高圧変成作用を示す指標として重要視される。現在まで国内からCoeは未報告だが、長崎変成岩類等Coeの痕跡とされる微細組織は一部地域から報告されている。

一方、上記の特徴的な微細組織がCoeの痕跡であれば、天然試料の沈み込みと上昇の履歴を探る重要な鍵となるが、Coeの痕跡かの観察に基づく判断・判定には、定性的な要素を含み、観察者の経験にも左右され得る側面がある。しかし近年、石英多結晶体への後方散乱電子回折(EBSD)によるマッピング結果から、Coeの痕跡の判別に有効な解析手法が報告された(Bidgood et al., 2021)。この手法により、従来の定性的な判定法と異なり、Coeへの相転移を経験した石英多結晶体の微細組織の特徴として結晶学的特徴に基づく定義がされ、Coeへの相転移の痕跡であるかの定量的な判別が可能になった。しかし、この手法は２地域(アルプス・ヒマラヤ)の分析に基づいて提案されたものであり、その一般性については懸念がある。

本研究グループは、現在Coeやその痕跡が未報告である地域にもEBSDによる再検証を行なっている。本研究では、高圧条件下での広域変成作用が報告された四国三波川変成帯権現地域の石英エクロジャイトを対象とした。権現地域の石英エクロジャイトからは、一部放射状割れ目を示唆する観察のほか、各地の超高圧変成岩で見られる石英離溶ラメラの報告もあるが、明確なCoeは見つかっていない。本研究では、石英エクロジャイト中の石英多結晶体から上記の判別手法を適用したことで、ザクロ石の包有物中の石英多結晶体領域から、Coeへの相転移を経験したことを示す石英粒子間の結晶方位関係を得たため、これについて報告する。

特に、このCoeの痕跡は石基中から見つからず、 ザクロ石の包有物の一部(5領域中1領域)から発見されたことは、極細粒(20 μm以下)のCoeの存在の見過ごしの可能性や、藍晶石中のCoe包有物での異方的な残留応力が近年指摘されるように、結晶軸方向に依存した異方的な弾性常数をもつホスト鉱物と包有物の互いの結晶学的な位置関係と関係して局所的に形成する可能性がある。この場合、例えばホスト鉱物の体積変化が小さく弾性常数が高い結晶軸方向に接する位置で、体積変化が大きく弾性常数が高い結晶軸方向を有する包有物が存在する等、ホスト鉱物一包有物境界の特定の方向で局所的な応力の集中を引き起こし、石英包有物で部分的なCoeへの相転移を生じさせたと考えられる。ホスト鉱物の割れ目による包有物の圧力解放等に加え、包有物を

含む鉱物内での微小空間における応力集中に関連した、特定の結晶方位関係でのみ形成されるCoeへの相転移は、天然試料中でのCoeの発見が難しい要因になり得る。このような応力集中の効果がどのような条件下でCoeを形成させるのか定量的な評価は今後の課題であるが、特にコーサイト–石英相転移平衡曲線に近い温度圧力条件から上昇する場合には重要となる可能性がある。これは、これまでの権現地域のピーク温度圧力条件の推定結果はCoeの安定条件に達していなかったが、本研究では、Coeの痕跡が認められたことを説明できるかもしれない。本研究はBidgood et al. (2021)の手法に、本研究のようなホスト鉱物一包有物間の弾性異方性と結晶方位関係を考慮した石英多結晶体領域の選定を組み込むことで、Coeの痕跡の発見により有用なアプローチとなることを提案する。

[引用文献] Bidgood et al. (2021), Jour. Metamorphic Geol., 39, 165–180.

キーワード：三波川変成帯、権現地域、コーサイト–石英相転移、後方散乱電子回折、異方性
Keywords: Sanbagawa metamorphic belt, Gongen area, coesite–quartz phase transition, EBSD (Electron Back Scatter Diffraction), anisotropy

Pressure-Temperature-Time Conditions of The Basement Rocks in The Banggai-Sula Microcontinent, Indonesia

*Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari[1], Nobuhiko Nakano[1], Tatsuro Adachi[1], Nugroho Imam Setiawan[2]

1. Kyushu Univ., 2. Gadjah Mada Univ.

The Banggai-Sula microcontinent in the eastern Indonesia region is known to be derived from the Northwest Australia continental margin (Sula Spur). The basement rocks of Banggai-Sula microcontinents are often associated with the high-temperature/low-pressure metamorphic rocks of Kemum Basement High of the Bird’ s Head region in Papua which intruded by granitoids of Devonian–Carboniferous and Permian–Triassic age. This study reports the petrological and geochemical characteristics, and monazite EPMA ages of these basement rocks to understand its origin and the relation with tectonic events along the northeastern margin of Gondwana in the Paleozoic. Metamorphic rocks collected from Banggai and Peleng Islands imply differences in metamorphic conditions between Banggai Island in the east (garnet-andalusite-muscovite schist) and the western part of Peleng Island (garnet-staurolite-biotite-muscovite schist). The preservation of garnet growth zoning during prograde metamorphism is indicated by decreasing Mn from the core towards the rim of the garnet grains obtained from metamorphic rocks in this region. The monazite EPMA ages were determined from biotite granite in Banggai Island and staurolite-bearing pelitic schist in Peleng Island. The biotite granite from Banggai Island gives a weighted mean age of 271 ±8 and 263 ±14 Ma from the core and rim of monazite. The staurolite-bearing pelitic schist from Peleng Island yields a weighted mean age of 434 ±3 and 449 ±12 Ma from the core and mantle, and 403 ±8 Ma from the rim of monazite. This Silurian-Devonian metamorphic age has not been reported before from the Banggai-Sula microcontinent and Eastern Indonesia region. The differences in metamorphic grade and timing with the Kemum Basement High suggest that an earlier tectonic event influenced the metamorphism in the Banggai-Sula microcontinent. Such early Paleozoic igneous activity and metamorphism happened along the northern margin of East Gondwana related to the subduction of the Proto-Tethys Oceanic crust. Silurian–Devonian metamorphism in the Banggai-Sula microcontinent might represent the eastern continuation of this tectonic event. In the presentation, we will also discuss the pressure-temperature conditions of these basement rocks.

Keywords: Banggai-Sula microcontinent, Paleozoic basement, monazite EPMA ages

嶺岡帯角閃岩再訪

Amphibolites from the Mineoka belt revisited

*市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、伊藤 久敏[2]、田村 明弘[3]、森下 知晃[3]
*Yuji ICHIYAMA[1], Shun Takamizawa[1], Hisatoshi Ito[2], Akihiro Tamura[3], Tomoaki Morishita[3]

1. 千葉大学、2. 電力中央研究所、3. 金沢大学
1. Chiba University, 2. Central Research Institute of ElectricPower Industry, 3. Kanazawa University

房総半島から静岡県にかけて伊豆半島周縁に分布する古第三紀付加体の嶺岡帯・瀬戸川帯中には、蛇紋岩、苦鉄質～珪長質深成岩、玄武岩質火山岩といったオフィオライトに類似する構成岩類が断片的に分布する（例えば、荒井1994）。これらのオフィオライト構成岩類に伴い、わずかながらの変成岩の存在も知られる（兼平ほか 1968；Arai and Hirai 1985；大胡・廣井 1992）。鴨川市に露出する変成岩は、角礫化した緑簾石角閃岩で、紅簾石を含む珪質片岩や砂質片岩の薄層を伴う。また南房総市では、蛇紋岩に伴ってざくろ石緑簾石角閃岩のブロックが産出する。大胡・廣井（1992）は、鴨川市の緑簾石角閃岩に対し、500–550 ℃、～0.5 GPaの変成条件を見積もった。この角閃岩からは、39.6 ±1.4 Maと33.1 ±2.3 Maの角閃石K–Ar年代が報告されている（柴田・内海，1995）。その一方で、嶺岡帯に産する角閃岩の地球科学的意義については、これまで検討が行われていないままである。

鴨川市八岡海岸では、嶺岡帯のオフィオライト構成岩類を含む角礫岩が露出し、これらの礫が海岸の転石として見られる。本研究では、これらの転石から見いだした、ざくろ石角閃岩について岩石学的特徴とその意義について検討した。この試料は、ざくろ石＋単斜輝石＋褐色ホルンブレンド＋斜長石からなり、副成分鉱物として石英＋ルチル＋チタン石＋イルメナイト＋アパタイト＋黒雲母＋ジルコン＋黄鉄鉱を含む。単斜輝石はひすい輝石成分を最大で10 %程度含む。いくつかの地質温度計はおおむね約700 ℃を示し、おおよそ～1.0 GPa程度の圧力が見積もられる。ジルコンは、CL像で明瞭な累帯構造を示さず、重希土類元素の枯渇とEuの負異常を持つ希土類元素パターンを示す。ジルコンのU–Pb加重平均年代は、角閃石K–Ar年代と調和的な38.4 ± 2.3 Ma の値を示し、変成ピーク年代と解釈される。全岩化学組成はソレアイト質玄武岩組成を示し、微量元素パターンはNbやTiに負異常を示さず、よりインコンパティブルな元素に枯渇した中央海嶺玄武岩に類似した性質を示す。

オフィオライトのマントルかんらん岩の下底に見られる角閃岩～グラニュライト相の変成岩は、メタモルフィック・ソールと呼ばれ、沈み込み開始時の高い地温勾配によって変成作用を受けた沈み込む海洋プレート上面を起源とすると考えられている（例えばAgard et al., 2016）。例えばオマーンオフィオライトのメタモルフィック・ソールでは、600～800 ℃、0.5～1.0 GPa程度の温度・圧力が見積もられている（Agard et al., 2016）。また、オフィオライト中の火成岩類とメタモルフィック・ソールの年代は、おおよそ一致する（Wakabayashi and Dilek, 2000）。嶺岡帯角閃岩類から見積もられる温度・圧力条件の範囲は、メタモルフィック・ソールのそれと調和する。また、嶺岡帯角閃岩類から得られたジルコンU–Pb年代は、嶺岡帯の苦鉄質～珪長質深成岩類から得られた火成起源ジルコンのU–Pb加重平均年代（35.0～38.6 Ma; Ichiyama et al., 2017）とも一致する。嶺岡帯の角閃岩類は、始新世にマントルかんらん岩の下底に形成されたメタモルフィック・ソールが断片化したものである可能性が示唆される。

Ichiyama et al. (2017)は、嶺岡帯のオフィオライト質岩類が伊豆–マリアナ–ボニン（IBM）弧の断片である可能性を示唆した。IBM弧は約50Maに形成された海洋性島弧であり、現在のIBM弧の前弧域下に沈み込むスラブは、青色片岩相に至る変成作用を受けていると考えられる（Ichiyama et al., 2021）。嶺岡帯の角閃岩は、少なくともIBM弧北部のマントルウェッジが始新世頃まで現在よりも高温であったことを示しているかもしれない。始新世の北西太平洋では、日本列島と平行するイザナギ–太平洋海嶺（I–P海嶺）が沈み込んだとされている（例えばWu and Wu, 2019）。Straub et al. (2009)は、IBM弧で形成された42Ma以降の火成岩が、I–P海嶺からのスラブ成分の影響を受けたマントルから形成されたと考えた。北海道日高帯の35.6 Maアダ

カイト質深成岩（Yamazaki et al., 2021）やポロシリオフィオライト中のマントルかんらん岩下底に形成された37.9 Maの角閃岩（Dong et al., 2024）は、I–P海嶺の沈み込みに関連した形成が示唆されている。嶺岡帯角閃岩は、若くて熱いI–P海嶺の沈み込みによって形成されたのかもしれない。

キーワード：嶺岡帯、角閃岩、メタモルフィック・ソール
Keywords: Mineoka belt, Amphibolites, Metamorphic sole

チェコ共和国・ザクロ石-黒雲母珪長質グラニュライト中のザクロ石の組成不均質

Compositional heterogeneity of garnet in garnet-biotite felsic granulite, Czech Republic

*中村 大輔[1]、藤村 祐花[1]、小寺 勇気[1]
*Daisuke NAKAMURA[1], Yuuka FUJIMURA[1], Yuuki KODERA[1]

1. 岡山大学
1. Okayama University

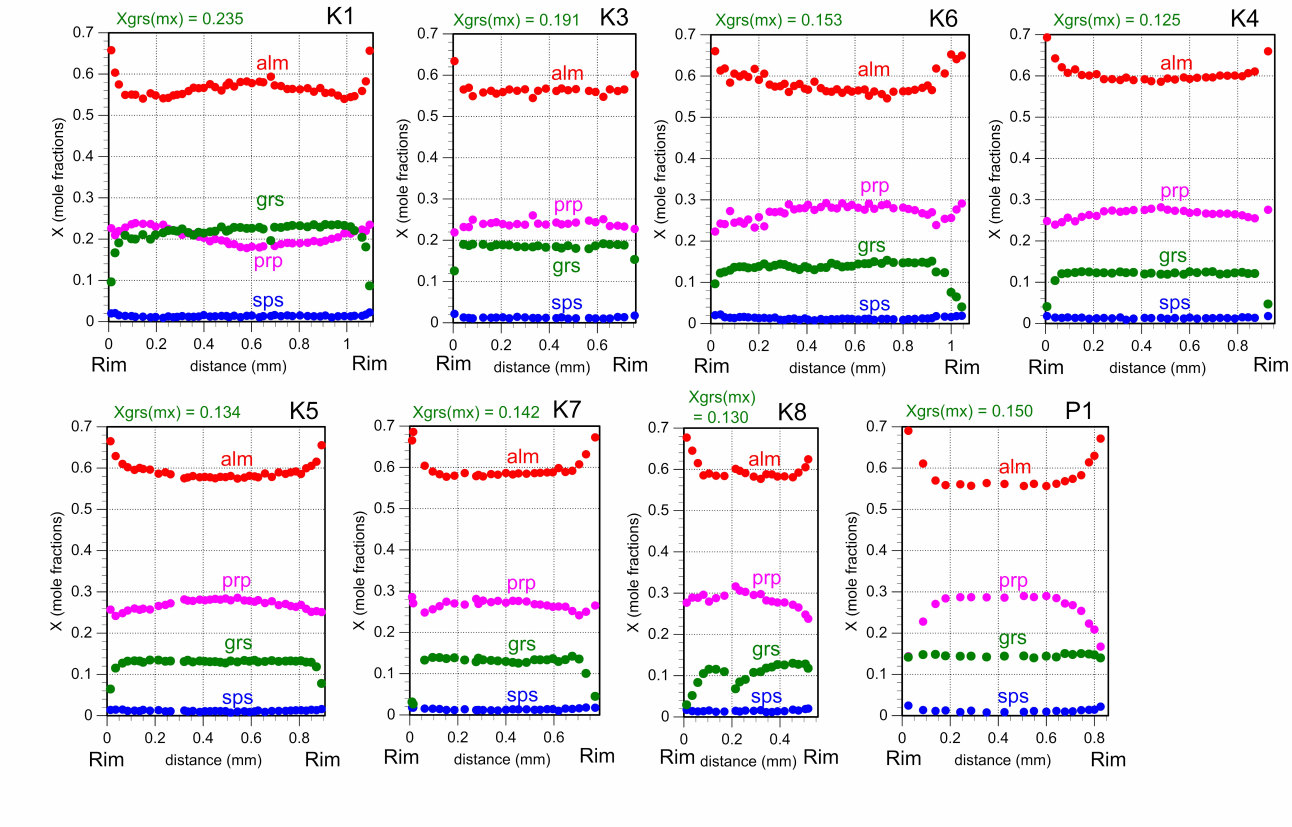
チェコ共和国の東部に位置するHorni Bory採石場には、ザクロ石と黒雲母に富む黒色の珪長質グラニュライトが広く産し、その中に塊状やレンズ状、層状のかんらん岩や輝岩が産する。今回、その珪長質グラニュライトを調べたところ、ザクロ石に著しい化学組成不均質が確認されたので、その記載岩石学的特徴を報告し、そこから得られる元素拡散に関する情報と地質学的意義をまとめる。

Horni Bory採石場はボヘミア地塊内に位置し、含まれる輝岩からは超高圧条件（約4 GPa）の変成作用が記録されており（Naemura et al., 2009: JMPS 104, 168-175）、本研究地域は、モルダヌビア帯のクフェールユニットに属すると考えられる。研究した試料はザクロ石と黒雲母に著しく富むものの、クフェールユニットに産する一般的な珪長質グラニュライトと同様の鉱物組合せ（ザクロ石＋黒雲母＋藍晶石／珪線石＋斜長石＋カリ長石＋石英＋ルチル＋イルメナイト＋燐灰石等）を持つ。その試料に産するザクロ石粒子の大部分は直径1mmほどで包有物をあまり多くは含まないが、中には直径1.6mmを超える比較的大きいザクロ石粒子が産し、そのザクロ石粒子は包有物に富むポイキロブラスティクな組織を持つ。

今回は一つの薄片内に分布する合計24粒子のザクロ石を線状に分析し、それらの組成プロファイル図を作成した。なお、それらの代表的なものを図に示している。多くのザクロ石粒子は中心部から縁辺部近傍まで、均一なCa含有量を持つが、そのCa含有量は粒子によって大きく異なり、X_{Ca} [= Ca/(Fe + Mn + Mg + Ca)]が0.12から0.26までの幅がある（図）。またMg# [= 100 Mg/(Fe + Mg)]にもザクロ石の中心部での顕著な違いがあり（Mg# = 23～35）、見かけ上、Mg#が縁辺部方向へ増加する昇温型累帯構造を示す粒子と縁辺部方向へMg#が減少する後退型累帯構造を持つ粒子がある。また、Mg#の値は粒子の最外縁部から0.1mmほど内側において粒子間で一致する傾向がある。

以上のザクロ石の組成上の特徴は次の二つのことを示唆する。１）ザクロ石中のCa含有量はその核形成と成長の間、局所的な組成を反映した量を維持したまま変化しなかった。２）Mg#に関しては、個々のザクロ石の核形成の際に粒子間での著しい違いがあったが、その後の成長過程で粒子間での違いが緩和されるように組成が変化した。１）のことは、Caの拡散がザクロ石内で遅いだけでなく、粒界においても遅く、ザクロ石が成長する間も粒子間でのCa含有量の差を解消することが出来なかったことを意味する。一方、２）のことは、ザクロ石の核形成時には局所的な環境を反映したMg#を持ったザクロ石が形成されたが、その後の成長過程では粒界でのFe, Mgの拡散が比較的速くなり粒子間でのMg#の違いを解消するようなったことを示している。しかし、個々のザクロ石粒子内にはMg#の違いがあり、そうした組成差を解消できるほどザクロ石内でのFe, Mgの拡散は速くなかったとも言える。同様のザクロ石の組成不均質は同じクフェールユニットに属するNové Dvoryザクロ石かんらん岩に伴われるエクロジャイト中でも見つかっており（Itami et al., 2022; JMPS 117）、少なくともクフェールユニットの一部の岩石ではザクロ石中のMg#の違いを解消できないほど著しく短い高温状態の保持時間しかなかったのだろう。また、ボヘミア地塊南部のクフェールユニットに産する珪長質グラニュライト中に昇温型累帯構造を持つザクロ石が存在し、その変成温度は1000℃を超えている（内藤他, 2024; 岩石鉱物科学 53）という結果も上記の考えを支持する。

キーワード：ザクロ石
Keywords: Garnet



岐阜県春日地域の帯状スカルン脈の形成と変質：U-Th酸化物のEPMA年代

Formation and alteration of a zoned calcsilicate vein from the contact aureole of Kasuga area, central Japan: insights from chemical ages of U-Th oxides

*遠藤 俊祐[1]
*Shunsuke ENDO[1]

1. 島根大学
1. Shimane University

地殻浅所に貫入定置した花崗岩体周囲の流体活動の継続期間を調べるため，白亜紀貝月山花崗岩の接触変成帯（岐阜県春日地域）から採取したドロマイト質大理石中の帯状スカルン脈について，岩石学的研究およびU-Th 酸化物の化学年代測定を実施した．ドロマイト質大理石は方解石とH_2O-CO_2流体を過剰相として1成分(Mg,Fe)O単純系とみなせるため，それと反応した流体の化学組成や交代作用を調べる目的に適している．本研究で記載する脈は幅4 cm程度で，母岩（ドロマイト + 方解石）から脈中央に向かって以下の鉱物組合せをもつ帯状構造が認められる:

Zone 1 (母岩側から3つのsubzoneに区分：単斜ヒューム石 + 方解石 / 苦土かんらん石 + 方解石 / 透輝石 + 苦土かんらん石 + 方解石)
Zone 2 (クリントン雲母 + スピネル + Al に富む単斜輝石またはパーガス閃石 + 方解石)
Zone 3 (グロシュラー + 単斜輝石 + 灰長石 + 方解石)

Zone 2と3には，U, Th, REE, Zrに富むさまざまな副成分鉱物（緑れん石族鉱物，U-Th酸化物，バッデレイ石，ジルコノライト，ジルコンなど）が存在する．また，Zone 3のグロシュラーと灰長石は，後期鉱物 (単斜灰れん石またはぶどう石 + 白雲母) によって置換されている．

Zone 1 は明瞭なsubzone境界をもち，系成分としてSiO_2を欠く母岩側からSiO_2/(Mg,Fe)O比が単調上昇する変化から，母岩のドロマイト質大理石のクラックに流入した流体の溶存シリカの壁岩側への拡散に支配された交代反応脈と考えられる．同様な鉱物組合せの苦土かんらん石透輝石脈は周辺に普遍的にみられ，この交代反応が進行した後の流体はシリカに枯渇し，アルミナやアルカリ，不適合微量元素に富んでいったことが推定される．そのようなアルミナ成分に富む流体とZone 1の反応により，Zone 2の鉱物組合せを説明することができる（透輝石＋苦土かんらん石＋Al_2O_3 aq ⇒クリントン雲母＋スピネル＋Alに富む単斜輝石）．Zone 1と2の鉱物組合せは接触変成帯のピーク温度（~600℃）で安定であり，等温での継続的な流体ー岩石反応とみなせる．Zone 2の方トリウム鉱のEPMA年代として97.0±1.1 Ma が得られ，これは貝月山花崗岩の全岩Rb-Sr年代（96.4 ±4.8 Ma：沢田ほか1994）と一致する．

Zone 3 の初生鉱物は，付近にみられる塩基性交代岩中のザクロ石単斜輝石斜長石脈（鈴木1975）と類似する．塩基性交代岩を通過し，これら鉱物に過飽和となった流体が流入し，Zone 3の初生鉱物を脈中央に析出させたと考えられる．Zone 3の初生鉱物はピーク温度から450℃までの範囲で安定である．さらにZone 3はFeを含まない純粋な単斜灰れん石やぶどう石の形成を伴う低温熱水変質を被った．Zone 3の閃ウラン鉱のEPMA年代として88.1±0.8 Maが得られ，低温熱水変質の時期に対応すると考えられる．

貝月山花崗岩は定置年代（全岩Rb-Sr年代）と冷却年代（黒雲母K-Ar年代）に差がなく，ソリダス温度から黒雲母K-Ar系の閉鎖温度（300±50℃）までの急速な冷却史が示唆される（斎藤・沢田2000）．その後の徐冷期に花崗岩体の周囲では低温の熱水活動が長期（9 Myr）にわたって継続した可能性がある．

文献
斎藤・沢田（2000）1/5万地質図幅「横山」説明書
沢田ほか（1994）地質雑99, 975-990
鈴木（1975）地質雑81，487-504.

キーワード：脈
Keywords: Vein

大陸プレート境界断層での歪の解放に伴う地質構造と岩石組織の観察

Observations of geological structures and microstructures associated with strain release at a continental plate boundary fault

*吉朝 開[1]、安東 淳一[1,2]、Das Kaushik[1,2]、Sarkar Dyuti Prakash[3]
*Haruki Yoshiasa[1], Jun-ichi Ando[1,2], Kaushik Das[1,2], Dyuti Prakash Sarkar[3]

1. 広島大学、2. 広大 HiPeR、3. 海洋研究開発機構
1. Hiroshima University, 2. HiPeR, 3. JAMSTEC

はじめに：インド亜大陸は現在も約～15 mm/yearの速度で北上を続けており、それに伴いヒマラヤ地域では地震が発生している。Bilham（2019）は、ヒマラヤ地域の沈み込みに伴って蓄積された歪と、地震によって解放された歪を計算した。その結果、蓄積された歪は地震によって完全には解放されておらず、今後Mw＝8.6レベルの地震が1回、あるいは2回発生する可能性があると結論づけている。しかし、蓄積された歪の解消が地震だけによるものかどうかを考えるためには、プレート収束境界域の地質現象を理解する必要がある。ヒマラヤ地域には、インド亜大陸の衝突に伴い3つの主要なプレート収束境界断層（主前縁衝上断層（MFT）・主境界衝上断層（MBT）・主中央衝上断層（MCT））が形成されている。現在の収束を重荷になっているのはMFTであるが、MBTとMCT沿いには地球内部のプレート収束にともなう構造を有した地層が地表に露出している。本研究では、脆性変形領域における地質現象を把握するために、MBTを対象として地質調査および岩石の微細組織の観察を行った。

研究対象：インド ヒマチャル プラデシュ州サバスー市に露出するMBTの上盤、約1 Kmの範囲を調査した。地表に露出するMBTは、約10 Maから約0.5 Maの期間に活動したプレート収束境界断層であり、地下260℃の温度で変形した岩石が露出する（Sarkar et al., 2021）。MBTの上盤には、先カンブリア時代の砂岩層が主に分布する。砂岩単層の層厚は約5 cm-30 cmである。また泥岩層（単層の層厚約2 ㎝）との互層も確認できる。

結果と考察：地質調査の結果、以下のことが明らかとなった。1）調査地域の全域で、多数の層面すべりが確認された。層面すべりのすべ面上には、条線が発達し、条線に沿って微細な石英脈が認められる。また、層面すべりに関連して、層理面に平行なデュープレックス構造やキンクバンドが顕著に発達する。しかし、調査地域では、層面すべりを引き起こすようなフレクシャー褶曲は存在しない。2）キンクバンドから求めた主圧縮軸方向と条線から求めたすべり方向は、MBTの傾斜方向にほぼ平行なものが多い。1）と2）の結果は、MBTの上盤では、プレートの沈み込みに伴い層面すべりが卓越することを強く示唆する。　層面すべりを受けた砂岩の微細組織観察からは以下のことが明らかとなった。3）層面すべりの多くは、砂岩単層内部に層理面に平行に発達した層厚10 μm -1 mmの複数の剪断面に沿って発達する。4）この各剪断面は小歪から大歪の状態を記録している。小歪から大歪に至る微細組織の特徴は、砂岩層を構成する基質支持の粒径50 μm –100 μmの石英が、剪断に伴ってその間隔を広げて行くことである。間隔を広げながら石英は流体と反応し細粒化が進み、反応によって白雲母が晶出する。晶出した白雲母は（100）が剪断面に平行に配列する。大歪になると、粒径が数mmの白雲母のみから構成されるようになり、顕著なリーデル剪断面が発達する。5）剪断帯の内部には、剪断方向に伸長する粒径数100 μmの波動消光を示す石英が存在し、この様な石英から石英脈が発生している。すなわち石英脈は、砂岩を構成する石英粒子が剪断による摩擦熱によって塑性変形し形成されたことが強く示唆される。この石英脈は、野外において確認できた条線に沿って発達する石英脈であると考えられる。6）石英脈のc軸は、剪断方向に垂直に集中するタイプと剪断方向に集中するタイプがある。それぞれbasalすべりとprism<c>すべりによる転位クリープで形成されたと考えられる。basalすべりは300~400℃で、prism<c>すべりは550℃以上で卓越することが知られている。石英脈中の動的再結晶を受けた石英の粒径（約5 μm）から、再結晶粒径による地質差応力計を用いて差応力を見積もることがでる。その結果は190 MPaとなる。c軸ファブリックから求めた温度と地質差応力計から求めた差応力値から石英脈形成時の歪速度

を推定すると10-10˜10-13 /sと10-5˜10-7 /sとなる。この値は、プレートの沈み込みに際して生じる層面すべりの歪速度と考えられる。本研究は、プレートの沈み込みを起因として生じる歪の一部は、層面すべりの運動、そしてすべりによる摩擦発熱によって開放されている可能性が強いことを示唆する。現在、炭質物ラマン温度計を用いてすべり面とその周辺での温度をより正確に推定するために分析中である。それらを元に、本講演ではすべり面での温度上昇についても議論する予定である。

キーワード：層面滑り、主境界衝上断層、微細組織、摩擦熱、動的再結晶
Keywords: Bedding plane slip, MBT, Microstructure, Frictional heat, Dynamic recrystallization

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

炭質物ラマン温度計における新しい試料形態の比較検討

Comparison and verification study of new sample forms for use in Raman carbonaceous material geothermometer

*荻野 竣右[1]、纐纈 佑衣[1]、高橋 聡[1]
*Shunsuke Ogino[1], Yui Kouketsu[1], Satoshi Takahashi[1]

1. 名古屋大・院環境
1. Nagoya Univ. Env.

ラマン分光法を用いて炭質物の結晶化度を評価し，岩石が経験した最高被熱温度を推定する炭質物ラマン温度計は，岩石薄片内において透明なホスト鉱物に内包されている炭質物が測定対象とされてきた（Beyssac et al., 2002；Aoya et al., 2010；Kouketsu et al., 2014）．これは，炭質物の薄片作成時の研磨によるダメージや測定時のレーザー加熱による損傷を避けるためである（Nakamura et al., 2019；Kouketsu et al., 2019）．しかし，岩石試料によっては脆い試料や試料の量が少いことがあるため，薄片にするのが難しい場合がある．本研究では，新しい試料形態として岩石切断面，岩石破断面およびフッ酸処理を行った試料に対し，レーザー照射の影響を評価することで, 炭質物ラマン温度計に適応可能な試料形態が拡大可能か検証した．

先行研究において, 高結晶化度の炭質物（＝石墨）におけるレーザー照射の影響は評価されているが（Kagi et al., 1994；Niwase, 1995），低結晶化度の炭質物へのレーザー照射の影響は十分に評価されていない．そこで，本研究では中生界の泥岩と泥質片岩を分析対象とした．各試料に対してレーザー強度を変えてラマン分光測定を行った結果，レーザー強度が3.0 mW以上でラマンスペクトルの形状に変化が見られ，炭質物ラマン温度計の温度推定に影響与える可能性があることが分かった．次に，(1) 岩石薄片，(2) 岩石切断面，(3) 岩石破断面，(4) 研磨面, および (5) フッ酸処理で分離した炭質物ラマンスペクトルの比較検証を行い，炭質物ラマン温度計を用いた場合の推定続成・変成温度値に与える影響の評価を行った．その結果, 内包された炭質物を対象とした従来の測定方法で得られた炭質物ラマン温度計の続成・変成温度が，300 ℃より低い試料では（1）岩石薄片と(2) 岩石切断面, (3) 岩石破断面の炭質物ラマン温度計の推定温度に大きな差が見られなかった．それに対して, (5) フッ酸処理で分離した炭質物では, 試料によって（1）岩石薄片との推定温度の差が大きかった．また, 炭質物ラマン温度計の続成・変成温度が，300 ℃より高い試料では, 試料形態によって推定温度がばらついていた．本発表では, 炭質物ラマン温度計に適応可能な試料形態を検証するとともに, 炭質物ラマン温度計の続成・変成温度が，300 ℃より高い試料において試料形態によって推定温度がばらついた原因について考察を行う．

引用文献　Aoya et al. (2010) *J. Metamorp. Geol.*, **28**, 895–914／Beyssac et al. (2002) *J. Metamorph. Geol.*, **20**, 858–871／Kagi et al. (1994) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 3527–3530／Kouketsu et al. (2014) *Isl. Arc*, **52**, 33–50／Kouketsu et al. (2019) *Prog. Earth Planet. Sci.*, **6**:23／Nakamura et al. (2019) *Isl. Arc*, **28**, e12318／Niwase (1995) *Phys. Rev. B*, **23**, 15785–15798.

キーワード：炭質物、ラマン分光法、炭質物ラマン温度計、泥岩、泥質片岩
Keywords: Carbonaceous material, Raman spectroscopy, Raman CM geothermometer, Mudstone, Pelitic schist

関東山地三波川帯の泥質変成岩における指標鉱物出現の温度圧力条件：炭質物ラマン温度計からの推定

Pressure and temperature conditions for the occurrence of index minerals in pelitic schists in the Sanbagawa belt, Kanto Mountains, Japan, inferred from Raman carbonaceous material geothermometry

*纐纈 佑衣[1]、清水 以知子[2]
*Yui KOUKETSU[1], Ichiko Shimizu[2]

1. 名古屋大学・院環境、2. 京都大学・院理
1. Nagoya Univ. Env., 2. Kyoto Univ. Sci.

関東山地三波川帯は三波川帯の模式地として古くから研究が行われているが，指標鉱物の出現や石墨化度が複雑な分布を示すため，isogradの境界線は研究者によって異なる．本研究では，鮎川－三波川地域において採取された泥質片岩及び珪質片岩に対して炭質物ラマン温度計を適用し，温度構造を推定するとともに，全岩化学組成を用いたシュードセクション解析を実施して，指標鉱物であるザクロ石，黒雲母，灰曹長石の安定領域を解析することで，温度と指標鉱物の関係を検証した．関東山地三波川帯の鮎川－三波川地域では，複数の先行研究において詳細な地質構造や鉱物組合せ，XRDを用いた炭質物の石墨化度に関連したデータが報告されている．これらのデータを参照すると，おおむね南から北に向かって変成度がChlorite zone（I帯）, Garnet zone（II帯），Biotite zone（III帯）へと上昇するが，ざくろ石の出現や石墨化度(GD)の分布は複雑である．また，Miyashita（1997）はBiotite zoneのいくつかの泥質片岩中に含まれる斜長石の縁部には灰曹長石が存在することを報告している．鮎川－三波川地域において炭質物ラマン温度計を適用した結果，360℃から520℃までの温度領域を示した．鉱物組合せから行った変成分帯と炭質物ラマン温度計の結果を比較すると，Chlorite zoneは400–440℃程度，Garnet zoneは360–470℃程度，Biotite zoneは470–520℃程度の温度を示した．一方，石墨化度と炭質物ラマン温度の関係は，I帯が360–400℃程度，II帯が440–470℃，III帯が460–520℃となり，変成度の上昇と温度の増加がおおむね調和的な結果となった．関東山地三波川帯の平均的な全岩化学組成を示すBiotite zoneの泥質片岩（AM41P, Miyashita 1997)の全岩化学組成を用いてシュードセクション図を作成したところ，温度の上昇とともにざくろ石，黒雲母，灰曹長石が出現した．ざくろ石の安定領域は，先行研究ですでに示されている通り，全岩化学組成のMnOによって強く影響を受けることが示され，Chlorite zoneとGarnet zoneの温度領域が重複する原因を説明できる．一方，黒雲母の安定領域はK_2O量によって影響を受けるが，関東山地三波川帯では，全岩化学組成のK_2Oは2–4 wt.%程度に収まっており，全岩化学組成による黒雲母の安定領域変化の影響は小さいと考えらえる．温度データと比較すると関東山地三波川帯の黒雲母帯は0.8 GPa程度で形成されたと考えられ，四国三波川帯よりも低い圧力条件を経験した可能性がある．灰曹長石（$X_{An} > 0.1$）は0.9 GPa程度までの低圧条件であれば黒雲母の出現から＋20–30℃程度で出現するが，0.9 GPa以上の高圧条件になるとより高温側に安定領域が遷移する傾向が見られた．この結果は，Biotite zoneに灰曹長石が均質に出現する関東山地と，Albite-biotite zoneとOligocase-biotite zoneが明確に区分できる四国の間に圧力差があるとする仮説と整合的である．

引用文献：Miyashita (1997) Bull. Natn. Sci. Mus., Tokyo, Ser. C, vol.23, 1-25.

キーワード：炭質物ラマン温度計、シュードセクション解析、ざくろ石、黒雲母、灰曹長石
Keywords: Raman carbonaceous material geothermometry, Pseudosection modelling, Garnet, Biotite, Oligoclase

愛知県新城地域の中央構造線沿いに分布する領家帯マイロナイトの構造岩石学的特徴

Microstructural and petrological characteristics of the Ryoke mylonite occurred along the Median Tectonic Line in the Shinshiro area, Aichi Prefecture

*丹羽 美春[1,2]、道林 克禎[1,3]、谷 健一郎[4]、西村 拓真[5]
*Miharu Niwa[1,2], Katsuyoshi Michibayashi[1,3], Kenichiro Tani[4], Takuma Nishimura[5]

1. 名古屋大・環境、2. 豊橋市自然史博物館、3. 海洋研究開発機構、4. 国立科学博物館、5. 鳳来寺山自然科学博物館
1. Nagoya Univ. Env., 2. TMNH, 3. JAMSTEC, 4. NMNS, 5. HMNH

愛知県東三河地域新城市の中央構造線（MTL）周辺には，内帯の領家変成岩類から深成岩類，外帯の三波川変成岩類，さらにこれらの基盤岩類を覆う設楽層群などが分布する複雑な地質である．長野県，静岡県や三重県と同様に本地域のMTL沿いには断層岩が見られるが、本地域の断層岩は，ほとんどカタクレーサイトでありマイロナイトについては愛知県新城市鳳来町付近で確認されている程度であり，詳細な構造岩石学的研究は他の地域と比較して報告例はほとんどない．今回，新城市桜淵公園付近で連続したマイロナイトの露頭を確認した．この露頭は中央構造線沿いで最も南西側に位置する．本研究では，偏光顕微鏡による微細構造観察及びSEM-EBSDシステムによる石英の結晶方位測定，さらに年代測定を行い，変形時の温度条件，剪断センス及び原岩について検討を行った．本地域のマイロナイトは露頭では緑白色を呈し，白い斑点状の斜長石粒子が特徴的な鹿塩マイロナイト様である．主な構成鉱物は石英，斜長石，黒雲母であり，その他カリ長石，褐簾石，ジルコンが含まれるトーナル岩質である．微細組織は，粗粒な斜長石の残晶からなる典型的なポーフィロクラスト状組織と斜長石の残晶と石英のストレインシャドウからなる非対称組織が認められる．石英のc軸ファブリックは，変形時の温度が比較的中温時に形成されるY軸集中のパターンを示す．降温期の変形を示す斜長石ー石英の残晶組織との組み合わせによると，350–450℃の降温期に塑性剪断変形して形成されたと推定される．さらに定方位サンプルの研磨薄片観察により剪断センスを調べたところ他地域で報告されている左ずれではない右ずれを示した．以上の結果をもとに三河地域の地域的な構造岩石的特徴を他の地域と比較しつつ考察する．

キーワード：マイロナイト、中央構造線、領家帯、断層岩
Keywords: Mylonite, Median Tectonic Line, Ryoke belt, Fault rock

鉱物組合せと白雲母K-Ar年代に基づく神居古潭帯幌加内地域の地帯区分の再提案

Re-proposal of the metamorphic zone division in the Horokanai area of the Kamuikotan Belt based on the mineral paragenesis and phengite K-Ar Age.

*平島 崇男[1]、苗村 康輔[2]、吉田 健太[3]
*Takao HIRAJIMA[1], Kousuke Naemura[2], Kenta Yoshida[3]

1. 京都大学、2. 岩手大学・教育、3. 海洋研究開発機構
1. Kyoto University, 2. Iwate University, 3. JAMSTEC

北海道・神居古潭変成帯・幌加内地域では、変成鉱物の分布に基づく変成分帯(柴草、1974)と白雲母のK-Ar年代による地帯構造区分（榊原ほか、2007）が提案され、見解が分かれていた。柴草(1974)はローソン石(Lws)・パンペリー石(Pmp)・緑簾石(Ep)の出現消滅関係から、地域を3つに分帯した。平島ほか(2023)は塩基性変成岩中の鉱物組合せを用いて、柴草のZone Iはアルカリ輝石パンペリー石亜相｛Lws+Pmp+アルカリ輝石(Napx)＋緑泥石（Chl）組合せ｝、柴草のZone II/IIIは青色片岩相であると指摘した。また、当該地域の青色片岩ではアルカリ角閃石(Namp)-Napx-Chlに加えEp, Lws, Pmpの３相が共存可能であることを示し、三重点青色片岩(Triple Point Blueschist)という名称を提案した。榊原ほか(2007)は、当該地域の変成岩を、白雲母のK-Ar年代や母岩の変形の程度により、以下の様な分帯を提案した：幌加内ユニット：HP1 泥質変成岩も塩基性変成岩も全て片状構造を示し、白雲母のK-Ar年代は135-120Ma。変成塩基性岩中の鉱物組合せはEp/Lws-Namp -(Napx or Pmp)。K-Ar年代は後述する美瑛・春志内ユニットより古いので、片岩を形成した変成作用をHP1と命名した。なお、幌加内ユニットの分布範囲は柴草のZone II/III地域と概ね一致する。美瑛ユニット：HP2 泥質変成岩は片理構造を示すが、塩基性変成岩は弱変形で、Nampが出現しないため緑色を呈す。代表的鉱物組合せはLws-Napx-Pmp。白雲母のK-Ar年代は115-100Ma。美瑛ユニットの分布範囲は柴草のZone I地域と概ね一致。しかし、我々の野外調査で、榊原ほか(2007)が美瑛ユニットに区分したシラッケ山とその北方の砂利川から沼牛山にかけて、片理の発達した青色片岩が分布することを確認した。更に、当該地域の変成岩のK-Ar年代値は未報告であった。以上の点を踏まえて、砂利川と沼牛山、並びにその周辺から採集した片岩から白雲母を分離し、K-Ar年代測定を行った。なお、白雲母の分析作業は蒜山地質年代学研究所に委託した。その結果は以下のとおりである：榊原ほか(2007)の幌加内ユニット：EP256：江丹別峠, 115.1MaKD12:沼牛川東方,　123.3/106.6MaKD13:沼牛川東方, 126.9/101.8Ma榊原ほか(2007)美瑛ユニット:KHK121:沼牛山、120.2MaKHK331/KHK333:砂利川、109.2Ma/105.6Ma　青色片岩中の白雲母は総じて細粒であるため、年代測定を行った白雲母フラクションの粒径は0.2-2μmに調整した。但し、KD12/13には粗粒の白雲母が含まれていたので、50120μmのフラクションについても年代測定を行った。　KD12/KD13の50120μmフラクションは123.3/126.9Maを示し、0.2-2μmフラクションは106.6/101.8Maとなり、その差は、12～25Maに達した。細粒フラクションの年代が若くなる現象は、九州黒瀬川帯(Sato et al., 2014)や関東山地の秩父帯(Lu et al., 2022)でも確認されており、その理由については諸説ある。粒子径の影響を排除するために、細粒フラクション年代を検討すると、幌加内ユニットでは115.1～106.6Ma、美瑛ユニットでは120.2～105.6となり、両者を区別することは困難である。幌加内地域で報告されているK-Ar年代をまとめると以下のようになる：・異地性岩塊（Ep角閃岩）:145-132 Ma（3例）・青色片岩相地域:134-101Ma（13例）・アルカリ輝石パンペリー石亜相地域：107-102 Ma（3例）アルカリ輝石パンペリー石亜相（Zone I, 或いは美瑛ユニット）から報告されたK-Ar年代は青色片岩のK-Ar年代値と重複する。幌加内地域において、アルカリ輝石パンペリー石亜相からLws青色片岩やEp青色片岩に変化する変成反応はほぼ同一のPT条件で生じることが報告されている(平島ほか、2023)。これらのこと

を考慮すると、幌加内地域の弱変形部（アルカリ輝石パンペリー石亜相）と青色片岩部は連続した変成作用を示し、両者の間に構造的不連続を想定する必要は無い。

キーワード：白雲母K-Ar年代、三重点青色片岩、幌加内地域、神居古潭帯
Keywords: Phengite K-Ar age, Triple Point bluecshit, Horokanai area, Kamuikotan Belt

口頭講演 | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

2024年9月12日(木) 15:30 ~ 18:00 | ES025 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

座長:片山 郁夫(広島大学)、道林 克禎(名古屋大学)

15:30 ~ 15:50

[S3-01] 放射光X線を用いた高温高圧下での高速時分割その場応力―歪測定

「招待講演」

*辻野 典秀[1] (1. 高輝度光科学研究センター)

15:50 ~ 16:05

[S3-02] ε-FeOOHの変形誘起選択配向

*西原 遊[1]、森 ゆい[1]、呉 文天[1]、辻野 典秀[2] (1. 愛媛大・GRC、2. 高輝度光科学研究センター)

16:05 ~ 16:20

[S3-03] 準安定オリビンの流動強度と遷移層スラブのレオロジー

「発表賞エントリー」

*本田 陸人[1]、久保 友明[1]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、柿澤 翔[2]、柴崎 裕樹[3]、西原 遊[4] (1. 九州大学、2. JASRI、3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 愛媛大・GRC)

16:20 ~ 16:40

[S3-04] 新しい低温強制振動実験装置による氷の非弾性の高精度・広帯域測定

「招待講演」

*山内 初希[1]、Christine McCarthy[1]、Benjamin Holtzman[1]、David Goldsby[2]、Travis Hager[2] (1. コロンビア大・LDEO、2. ペンシルベニア大)

16:40 ~ 16:55

[S3-05] 共連続構造をもつ岩石のクリープと粒成長の関係

「発表賞エントリー」

*姜 勝皓[1]、平賀 岳彦[1] (1. 東京大学)

16:55 ~ 17:10

[S3-06] ハンレイ岩ウルトラマイロナイトの斜長石微細構造と四重点解析

*夏目 樹[1]、道林 克禎[2,3]、伊神 洋平[4] (1. 神奈川県立生命の星・地球博物館、2. 名古屋大学、3. JAMSTEC、4. 京都大学)

17:10 ~ 17:25

[S3-07] オマーンオフィオライト最上部マントル連続構造の復元

*奥脇 健生[1]、夏目 樹[2]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境、2. 神奈川県立　生命の星・地球博物館)

17:25 ~ 17:40

[S3-08] 幌満かんらん岩体における変形と岩石メルト相互作用：MHL系列とBDH系列の構造岩石学的研究

「発表賞エントリー」

*日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、栗原 圭佑[1]、谷内 元[2]、川本 竜彦[1] (1. 静岡大、2. 産総研)

17:40 ~ 17:55

[S3-09] 片理の発達した蛇紋岩とかんらん岩の地震波速度と電気比抵抗の多成分測定

「発表賞エントリー」

*伊藤 禎宏[1]、片山 郁夫[1]、道林 克禎[2]、松山 和樹[2] (1. 広島大学、2. 名古屋大学)

17:55 ~ 18:00

調整

放射光X線を用いた高温高圧下での高速時分割その場応力ー歪測定

High-speed time-resolved in-situ stress-strain measurements under high pressure and high temperature using synchrotron radiation X-rays

*辻野 典秀[1]
*Noriyosi TSUJINO[1]

1. 高輝度光科学研究センター
1. JASRI

１．はじめに

地球マントルダイナミクスを理解するためには、高圧下でのマントル鉱物のレオロジー特性の知識が必要不可欠である。レオロジー特性の中でも粘性率はマントル対流を理解するうえで最も重要な基礎データの一つである。2003年以降、放射光を利用した変形機構付き大容量プレスによる高圧下での応力ー歪測定技術の開発により、4万気圧を超える条件でのマントル鉱物の粘性率が報告されるようになった(Wang et al., 2003)。最近では、D111型ガイドブロックの開発(Hunt et al., 2016)、回転ドリッカマー装置の開発などもあり、下部マントル最上部条件での粘性率測定が可能となった。その結果、下部マントル最主要鉱物であるブリッジマナイトの粘性率(Tsujino et al., 2022)やポストスピネル相の歪量に伴う粘性率変化の可能性(Girard et al., 2016)が報告され、地球物理学的観測から報告されている下部マントルの高粘性率はブリッジマナイトにより説明できることが明らかにされるとともに、ポストスピネル相において変形とともに粘性率を支配する鉱物がブリッジマナイトからフェロペリクレースへと変わる可能性が報告された。一方で、これまでの研究では、その場応力ー歪測定、特に応力測定に1～5分程度の時間を要するため、定常状態に達したと判断するために長時間を要するだけでなく、地震現象を含む破壊のような高速度で進行する動的過程を理解することは現状では困難を極める。そこで、本研究では、SPring-8のアンジュレーター光源ビームラインであるBL05XUで得られる高輝度高エネルギーピンクビームを利用して、大容量プレスを用いた高圧下でのサブ秒までの高速時分割その場応力ー歪測定を試みた。

２．実験手法

高速でのスリットサイズの変更を可能とするため、二枚の円盤からなる回転スリットを新に開発することにより、最大で144Hzでのビームサイズの切り替えを可能とした。応力を見積もるための二次元XRD測定にはフラットパネル検出器を、歪量を見積もるためのX線ラジオグラフィー像の取得には、LuAGシンチレーターとCMOSカメラを用いた。これらを組み合わせることにより最大で6Hzでの二次元XRDとX線ラジオグラフィー像の測定を可能とした。また、大容量プレスとして、最大で1mm/sの移動速度を持つプレスステージに搭載された200tonD-DIAプレスを使用し、高圧下でD-ramを動かすことにより試料の変形を行った。また試料として、フォルステライト多結晶焼結体を使用し、上下にPt箔を設置することでラジオグラフィー像から試料の歪量の測定を可能とした。

３．結果

約3GPaに加圧後、加圧によって蓄えられたFo多結晶体の応力が600℃から1000℃への昇温とともに緩和され、同時に試料の歪量の増大する様子が観察された。この結果は、Nishihara et al. (2009)により報告されているカンラン石の応力緩和の結果と整合的であることが明らかとなった。このように、大容量プレスを用いた高圧条件下においても3Hz以上の測定回数で応力ー歪測定が可能となることが明らかとなった。本講演では、実験結果に加え測定系の詳細と今後のビームライン構想等についても詳しく紹介したい。

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

キーワード：高圧力、高速時分割、その場測定、レオロジー
Keywords: High pressure, High-speed time-resolution, In-situ measurement, Rheology

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

ε-FeOOHの変形誘起選択配向

Deformation-induced crystallographic-preferred orientation of ε-FeOOH

*西原 遊[1]、森 ゆい[1]、呉 文天[1]、辻野 典秀[2]
*Yu NISHIHARA[1], Yui MORI[1], Wentian WU[1], Noriyoshi TSUJINO[2]

1. 愛媛大・GRC、2. 高輝度光科学研究センター
1. GRC, Ehime Univ., 2. JASRI

地球下部マントル上部のスラブ近傍には、ブリッジマナイトなどの無水の下部マントル主要鉱物によっては説明できない地震波異方性が存在する(Lynner and Long, 2015)。高圧含水鉱物H相($MgSiO_2(OH)_2$)は、マントルの岩石がスラブによって持ち込まれた水と反応することにより生成すると考えられるうえ、大きな単結晶弾性異方性を持つことから(Tsuchiya and Mookherjee, 2015)、観測される地震波異方性の成因として有力な候補である。本研究では、高圧含水鉱物H相と同一結晶構造を持つアナログ物質でより低圧で安定なε-FeOOHの結晶選択配向を高温高圧変形実験により決定し、これに基づいて下部マントル上部の地震波異方性の成因を明らかにすることを目指す。

変形実験はSPring-8、BL04B1設置のD111型装置を用いて行った(西原他, 2020)。12 GPa, 700 ºCで合成したε-FeOOHの粉末を成型したペレット、または粉末をさらに12 GPa, 600 ºCで焼結したものを実験に用いた。先端5 mmのアンビル、一辺10 mmの圧力媒体を用いて、圧力12 GPa、温度500–700 ºCで歪速度一定の一軸圧縮、一軸引張および単純剪断変形実験を行なった。回収試料の断面をSEM-EBSDにより分析し、結晶選択配向を決定した。一部の実験では、~60 keVの放射光単色X線を用いたX線その場観察を行い、変形中の試料の歪と選択配向の変化を決定した。

一軸圧縮変形実験の回収試料では[010]が圧縮軸方向に配列していることが確認された。一軸引張実験では加圧時の圧縮により形成された[010]の軸方向への集中が引張変形の進行とともに弱まり、代わって[001]が引張軸に集中し始めることが分かった。単純剪断変形実験では、剪断面法線方向に[010]が、剪断方向に[001]が集中することが観察された。以上の結果から、実験条件下でのε-FeOOHのすべり系が(010)[001]であることが示唆される。下部マントル上部の条件下で水平方向の剪断変形を受けたH相は、$V_{SV} > V_{SH}$（V_{SV}、V_{SH}はそれぞれ垂直方向と水平方向に振動するS波の速度）を示し、海溝と平行に振動するS波が高速となる偏向異方性が生じる可能性がある。

Lynner and Long (2015) J. Geophys. Int., 201, 1545-1552.
西原 他 (2020) 高圧力の科学と技術, 30, 78-84.
Tsuchiya and Mookherjee (2015) Sci. Rep., 5, 15534.

キーワード：結晶選択配向、地震波異方性、 ε-FeOOH
Keywords: Crystallographic-preferred orientation, Seismic anisotropy, ε-FeOOH

準安定オリビンの流動強度と遷移層スラブのレオロジー

Strength of metastable olivine and the rheology of subducting cold slab at mantle transition zone

*本田 陸人[1]、久保 友明[1]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、柿澤 翔[2]、柴崎 裕樹[3]、西原 遊[4]
*Rikuto HONDA[1], Tomoaki Kubo[1], Noriyoshi Tsujino[2], Yuji Higo[2], Sho Kakizawa[2], Yuki Shibazaki[3], Yu Nishihara[4]

1. 九州大学、2. JASRI、3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 愛媛大・GRC
1. Kyushu University, 2. JASRI, 3. KEK, 4. Ehime Univ. GRC

スラブの主要鉱物であるオリビンのレオロジー特性は、プレート境界での沈み込みの開始から下部マントルへのスラブ貫入に至るまでの広い深さ領域で起こる諸現象を解釈する上で非常に重要である。中でもマントル遷移層（深さ410-680km）においては、冷たいスラブの中心低温部に準安定オリビンウェッジが形成されると考えられており、そのレオロジーが遷移層スラブの力学挙動に重要な役割を果たすと考えられる。特に低温で卓越するパイエルス機構による塑性流動（low-temperature plasticity）については、これまで実験的研究が数多くなされてきた（e.g. Mei et al., 2010; Hansen et al., 2019）ものの、それらはリソスフェアマントル条件（<9 GPa）に限られたもので、強度の圧力依存性もよく決まっていない（V^*=0-30 cm^3/mol）。そこで、本研究ではマントル遷移層条件（11–20 GPa, 470–1020℃）の広い温度圧力条件でマントルオリビンの変形実験を行ない、準安定オリビンのパイエルス機構による流動則を直接的に決定した。またこれまでの研究もふまえ、準安定オリビンが相転移を起こすことによってスラブレオロジーがどのように変化するのかについてもあわせて検討した。

実験はKEK PF-AR NE7AおよびSPring-8 BL04B1設置のD111型高圧変形装置を用いて、放射光その場観察手法と組み合わせて行なった。歪速度2.8–8.5x10^{-5} /sでの一軸圧縮変形場において、60keV単色X線を用いて2次元X線回折パターンと試料部ラジオグラフィーをそれぞれ時分割（1–5分毎）で測定し、応力-歪曲線を取得しつつ相転移の有無も確認した。なお、相転移に伴う断層形成も起こる可能性があるため、一部では8素子アコースティックエミッション測定も組み合わせて行なった。回収試料はFE-SEM、FE-TEM等で微細組織を観察した。

11–20GPaのいずれの圧力においても、470-660℃では相転移がみられなかった。470–570℃において圧力11GPa、15GPa、20GPaで得られた流動応力は、4.8GPa、6.2GPa、6.6GPaと、圧力上昇にともなって増加した。これらの強度は、転位クリープ（Kawazoe et al., 2009）や粒径依存クリープ（Ohuchi et al., 2015）から推定される強度よりも小さく、またその温度依存性もより小さいことから、パイエルス機構による流動が卓越していると考えられる。なお、比較的低温の実験では応力が定常に達した後、歪硬化する傾向があった。

低温で卓越するパイエルス機構の流動則（Frost and Ashby, 1987; n=2, p=3/4, q=4/3）と、それを基に常圧で決められたパイエルス応力および活性化エネルギーのパラメータ（Evans & Goetze, 1979; Tsenn & Carter, 1987）から、流動則の圧力依存性を決定すると、活性化体積はV^*=24.3±0.04 cm^3/molとなった。この流動則は、過去に4–9GPa付近で得られたパイエルス機構によるオリビン強度データ（Mei et al., 2010; Kawazoe et al., 2009）もおおよそ説明することができる。

760℃以上の変形実験では、オリビン粒内の転位が濃集した領域から、ウォズレアイトおよびリングウッダイトへのごく少量の相転移が開始する。その領域のオリビン強度も上述した流動則におおよそ従うが、特に20GPaでは1–2GPaの応力降下やAEを伴う断層形成が顕著に観察され、不安定すべりが卓越した。そして、1020℃では最大約50%まで相転移が進行し、細粒のウォズレアイト、リングウッダイトの拡散クリープによる軟化（いわゆる超塑性流動）が起こる。

本研究で得られた流動則を遷移層スラブスケール（500-600℃、10^{-14} /s）に外挿すると、ドライな準安

定オリビンウェッジではパイエルス流動が卓越し、圧力15–20 GPaでは3.3–4.2 GPaと高い強度をもつことがわかった。そして準安定オリビンウェッジの外側境界付近では、パイエルス流動で生じたオリビン粒内欠陥をきっかけに、相転移誘起による断熱不安定すべりが卓越する領域が存在する。一方、スラブ外側のより高温で相転移のほぼ完了した部分では、非平衡相転移によって生じた細粒高圧相の超塑性によるバルク強度の低下が期待される。このため冷たい遷移層スラブでは、スラブコアの準安定オリビン領域が極端に硬いレオロジー構造となり、その領域への応力集中とその周辺で卓越する不安定すべり領域が、深発地震の発生と深く関わっていると考えられる。

キーワード：準安定オリビン、パイエルス機構、深部スラブ、高圧変形実験、深発地震
Keywords: metastable olivine, Peierls mechanism, deep slab, high-pressure deformation experiments, deep-focus earthquake

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

新しい低温強制振動実験装置による氷の非弾性の高精度・広帯域測定

High-resolution measurement of ice anelasticity over a broad frequency range with a new cryogenic forced oscillation apparatus

*山内 初希[1]、Christine McCarthy[1]、Benjamin Holtzman[1]、David Goldsby[2]、Travis Hager[2]
*Hatsuki Yamauchi[1], Christine McCarthy[1], Benjamin Holtzman[1], David Goldsby[2], Travis Hager[2]

1. コロンビア大・LDEO、2. ペンシルベニア大
1. Columbia Univ. LDEO, 2. U. Penn

氷は、地球や他の惑星・衛星に普遍的に存在する鉱物である。氷河の運動や氷衛星の潮汐応答など、氷に関連したさまざまな変形現象を理解するために、広いタイムスケールに及ぶ氷の粘弾性的性質の実験的測定が古くから行われている。しかし、氷の粘弾性的性質の中でも特に、弾性と粘性の中間的なタイムスケールでのふるまいである「非弾性」に関しては、実験の技術的な難しさとそれに伴うデータ不足が原因で、その物理的メカニズムや、実験結果を地球や惑星内部条件に応用するために必要なスケーリング則についての理解が未だ限られている。

本研究では、氷の非弾性に関する系統的な実験的研究の展開に向けて、既存の室温近傍・高精度強制振動実験装置（Takei et al., 2014, JGR）の設計を改良することで、新たに低温・一軸圧縮強制振動実験装置を開発し、広い周波数範囲（10^{-4} ～ 10 Hz）で氷のヤング率と減衰を高精度で測定することを可能にした（Yamauchi et al., 2024, Rev. Sci. Instrum., in press）。この装置を使って、微小な応力条件のもとで氷多結晶体のヤング率と減衰を測定した結果、非弾性応答は歪みの振幅に依存しない、つまり線形であることが示された。これまで線形領域にある多結晶体非弾性については、地震波構造を解釈する目的で、岩石やそのアナログ物質（ボルネオール）を用いた実験によって精力的に調べられている（e.g., Jackson et al., 2002, JGR; Takei et al., 2014）。そして特に低周波数域における主要な非弾性メカニズムは「拡散律速型の粒界滑り」であり、マクスウェル周波数によるスケーリングが有効であることが明らかにされている（e.g., McCarthy et al., 2011, JGR）。具体的には、さまざまな実験条件（温度・粒径など）で取得された減衰データを、マクスウェル周波数（$f_M = M_U/\eta$; M_U = 非緩和弾性定数, η = 拡散クリープ粘性）で規格化した周波数に対してプロットすると、低い規格化周波数域（$f/f_M <\sim 10^4$）で、すべてのデータが一本の曲線上に重なるというものである。そこで、今回の実験条件における氷のマクスウェル周波数を計算し、規格化した周波数に対して氷の減衰データをプロットしたところ、低い規格化周波数域で氷の減衰データも岩石とアナログ物質のデータと同じ曲線上に重なることがわかった。この結果から、新しい装置による非弾性測定の妥当性とともに、氷多結晶体の線形非弾性応答も、岩石やアナログ物質と共通の物理メカニズム（拡散律速型の粒界すべり）によって引き起こされることが示された。

さらに我々は現在、以上の結果から求まった氷多結晶体の線形非弾性を表す減衰スペクトルを“ベースライン”として、氷多結晶体の非弾性に対する「変形」による付加的な影響を調べている。先行研究による氷の非弾性実験の結果によると、変形による転位密度の増加に起因する非弾性緩和の顕著な増大（Vassoille et al., 1978, J. Glaciol.）や、比較的高い応力条件のもとで測定された非弾性応答の非線形性（McCarthy & Cooper, 2016, EPSL）が報告されているが、前述のようにその定量的な理解は限られている。本研究では、ペンシルベニア大学の低温ガス圧変形試験機を使って氷多結晶体を変形させ、系統的に歪み量を変えた試料（歪み = 0–20%）を複数用意し、新しい強制振動実験装置を使って、さまざまな応力条件のもとでこれらの試料の非弾性を測定する計画である。本実験により、変形に伴う「転位の増加」とさらに「結晶配向度の変化」が氷の非弾性応答にどのような影響を与えるのかを定量的に明らかにすることを目指している。これらの実験結果は、潮汐変動を受ける氷河や氷衛星の変形に直接応用することができるが、我々はさらに、適切なスケーリン

グ則を用いて実験結果を他の物質（オリビン）に適用し、変形下にある地球のマントルの地震波速度や減衰の理解に応用することも目指している。発表では、新しい実験装置の詳細を紹介するとともに、最新の実験データについても議論する。

キーワード：氷、非弾性、減衰
Keywords: ice, anelasticity, attenuation

共連続構造をもつ岩石のクリープと粒成長の関係

Relationship between creep and grain growth in rock with bicontinuous structure

*姜 勝皓[1]、平賀 岳彦[1]
*Shenghao Jiang[1], Takehiko Hiraga[1]

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

拡散クリープは地球内部の重要な変形メカニズムである。拡散クリープのひずみ速度は粒径に非常に敏感であるため、粒径の変化は地球のレオロジー特性に大きな影響を与える。一般に、結晶粒子は自発的に成長する。したがって、地球内部物質の流れを理解するためには、クリープは粒成長と合わせて考える必要がある。

Okamoto and Hiraga (2022) は、第二相が孤立している二相系では第二相のオストワルド熟成がクリープと同じ拡散メカニズムで進行することを実験的に示した。しかし、系は第一相がほとんどを占めるため、拡散が粒界拡散である場合、同相界面が重要な役割を果たす。異相界面がクリープと粒成長に及ぼす影響については、まだ研究されていない。

本研究では、異相界面の影響の多い共連続構造(両相とも繋がっている)を持つForsterite+50 vol%Diopside（FoDi50）およびForsterite+50 vol%Periclase（FoPer50）を用い、クリープと粒成長実験を行った。FoDi50とFoPer50は、それぞれ二相系の強度および結晶粒成長とクリープの関係を調べるために用いられた。実験結果をクリープ速度、粒成長速度、活性化エネルギーの観点から比較した。

実験の結果、FoDi50は約 800kJ/mol の高い活性化エネルギーを持つ拡散クリープによって変形することがわかった。強度はForsteriteに富む試料の強度と一致した。このことは、共連続構造を持つ固体二相系の強度が、強い相によって決定されることを示唆している。粒成長実験でも、Forsteriteに富む試料と似たような特性を示したが、クリープより低い活性化エネルギー約620 kJ/mol を持つことがわかった。

参考文献：
Okamoto Okamoto, A., & Hiraga, T. (2022). A common diffusional mechanism for creep and grain growth in polymineralic rocks: Experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024638.

キーワード：カンラン石、透輝石
Keywords: Forsterite, Diopside

ハンレイ岩ウルトラマイロナイトの斜長石微細構造と四重点解析

Microstructures of plagioclase in gabbroic ultramylonites and quadruple point analysis

*夏目 樹[1]、道林 克禎[2,3]、伊神 洋平[4]
*Itsuki Natsume[1], Katsuyoshi Michibayashi[2,3], Yohei Igami[4]

1. 神奈川県立生命の星・地球博物館、2. 名古屋大学、3. JAMSTEC、4. 京都大学
1. Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 2. Nagoya Univ., 3. JAMSTEC, 4. Kyoto Univ.

岩石の変形機構の一つである粒界すべりは、粒子どうしが粒界で滑り合あうことで変形する。この際、粒子のスイッチングで4つの結晶粒子が面上の1点で交わる四重点が形成されるモデル(Ashby and Verrall, 1973)が提案されており、粒子のスイッチングと四重点形成の様子が実験的で直接観察された(Maruyama and Hiraga, 2017)。また、天然のウルトラマイロナイトなどからも四重点は観察されており、粒界すべりを示唆する証拠の一つとして扱われているものの、その数や分布については着目されていない(Casini et al., 2021; Precigout et al., 2017; Menegon et al., 2013)。そこで、本研究ではオマーンオフィオライト北部フィズ岩体に発達するハンレイ岩ウルトラマイロナイトのEBSDマップデータから斜長石四重点の自動検出を試みた。

オマーンオフィオライトはテチス海を構成していた海洋プレートが、後期白亜紀に現アラビア半島上にオブダクションして形成されたオフィオライトであり、複数の延性剪断帯が発達する (Boudier et al., 1988)。特に北部フィズ岩体では含水鉱物を含む延性剪断帯が地殻ーマントル境界に発達しており、カンラン岩側の変形についてはMichibayashi and Oohara (2013)、含水鉱物の微細構造については夏目ほか(2024)よって研究されている。

本研究で扱うハンレイ岩ウルトラマイロナイトは主に角閃石と斜長石から構成される。角閃石は基質部だけでなくポーフィロクラストも多く、ポーフィロクラストの破断部には細粒な角閃石または緑泥石が充填している。一方、斜長石はほとんど基質部のみでポーフィロクラストは少ない。基質部は両鉱物ともに粒径数μm程度で、相混合の程度は弱い。

本研究ではこのウルトラマイロナイト試料から、面構造に垂直、線構造に平行な面(XZ面)で研磨薄片を作成し、名古屋大学岩石鉱物学研究室にてSEM-EBSD分析を行った。分析条件は、加速電圧20 kV、ステップサイズ0.5 μmである。取得したEBSDマップデータからMATLABのMTEX Toolboxを用いて粒子を復元し、結晶方位解析と粒径解析を行った。さらに復元した粒子データから、四重点を十分に距離が近い二つの三重点の中間点とみなして四重点の検出を行った。その後、薄片上での粒子の欠損や四重点を構成する４つの粒子の大きさなどを考慮して検出した四重点をフィルタリングした。

結晶方位解析・粒径解析の結果、斜長石の結晶方位ファブリックについてはランダムで平均粒径約5 μm、角閃石の結晶方位ファブリックは(100)[001]のパターンであった。また、四重点は斜長石基質部に普遍的に観察された。本発表ではハンレイ岩ウルトラマイロナイトの微細構造について解析によって得られた四重点のより詳細な分布を基に議論する。

【引用文献】Ashby and Verrall, 1973, *Acta Metall*, **21**, 149-163. Maruyama and Hiraga, 2017, *J. Geophys. Res*, **122**, 5890-5915. Casini et al., 2021, *J. Geophys. Res.*, **126**, e2021JB022215. Edington et al., 1976, *Prog. Mater. Sci.*, **21**, 61-170. Precigout et al., 2017, *Nat. Commun.*, **8**, 15736. Menegon et al., 2013, *J. Struct. Geol.*, **48**, 95-112. Boudier et al., 1988, *Tectonophysics*, **151**, 275-296. Michibayashi and Oohara, 2013, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **377**, 299-310. 夏目ほか, 2024, JpGU2024, SCG46-13.

キーワード：四重点、微細構造、斜長石、ウルトラマイロナイト
Keywords: Quadruple points, Microstructure, Plagioclase, Ultramylonite

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

オマーンオフィオライト最上部マントル連続構造の復元

Reconstruction of the uppermost mantle continuous structure of the Oman ophiolite

*奥脇 健生[1]、夏目 樹[2]、道林 克禎[1]
*Takeo Okuwaki[1], Natsume Itsuki[2], Katsuyoshi Michibayashi[1]

1. 名古屋大・院環境、2. 神奈川県立　生命の星・地球博物館
1. Nagoya Univ. Env, 2. Kanagawa Pref. Mus. Nat. Hist.

オマーンオフィオライトは海洋リソスフェアの巨大断片であり、最上部マントル構造を理解する上で格好の研究対象である[1]。マントルセクションのカンラン岩中にはマントルアセノスフェア時の変形履歴が残されており、構造学的解析から、活発なマントル上昇流による強いマントル水平流を経験したと考えられている[2][3]。一方で、露頭間の連続的なサンプリングは困難であり、構造学的な連続性は不明瞭であるという課題がある。

オマーン掘削プロジェクト(OmanDP)では、オマーンオフィオライトの複数地点で300～400mの連続コアが掘削された[4]。本研究では、最上部マントル領域に相当するBA3A円柱状コアを使用し、経験した剪断センスおよびマントル流動の連続的構造の復元を行った。はじめに、試料ごとにコア半割面とそれに直交する面の二面で研磨薄片を作成した。ここでは半割面の短辺方向をX軸、長辺方向(鉛直方向)をZ軸、法線方向をY軸とする直交座標系を設定した。その後、両面における輝石粒子の平均方位を測定し、それらの外積を計算することによりカンラン岩の面構造の法線方位(V_f)を取得した。

次に、SEM-EBSD法によりカンラン石の結晶方位定向配列(CPO)を取得した。本研究の円柱状コア試料は、掘削時に水平回転していることと研磨薄片が任意の面で作成されていることから、各試料間の方位が一定ではなく、XYZ軸は構造岩石学で定義されるXYZ軸と斜交する。そこで、構造岩石学的解析を行うため、BA3A掘削地点では経験した剪断方向が一定で、初期の構造を保持しているという仮定を置き、取得データの回転補正を行った。ここで、単純剪断を受けた最上部マントルではカンラン石a[100]軸すべりが卓越すること[5]を踏まえて、カンラン石a[100]軸の最大集中方位(max100)が剪断方向と一致すると考え、max100が一定方位に位置するまで、取得データをZ軸を回転軸として水平回転するMATLABスクリプトを開発した。面構造とCPOの回転補正後、すべり軸方向(max100)のプランジ角や、面構造とmax100の斜交角について鉛直プロファイルを作成し、剪断方向や剪断センスの変化について議論した。

結果として、max100のプランジ角がモホ面の伏角よりも小さいことから、BA3A掘削地点では剪断の主方向がマントル水平流の方向と斜交する可能性が高い。また、マントル対流内の相対速度に起因する単純剪断は、右横ずれセンスと左横ずれセンスを交互に示し、マントル対流内の速度に複数の極大域が存在することが示唆された。

References
[1] Nicolas, 1989, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
[2] Nicolas et al, 1988, Marine Geophysical Researches, 9(4), 293–310.
[3] Michibayashi et al, 2000, Marine Geophysical Researches, 21(3-4), 259–268.
[4] Kelemen et al., 2020, Proceedings of the Oman Drilling Project.
[5]Karato et al., 2008, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 36, 59-95.

キーワード：マントル流動、オマーンオフィオライト、カンラン岩、面構造、結晶方位定向配列
Keywords: mantle flow, Oman ophiolite, peridotite, foliation, Crystallographic Preferred Orientation (CPO)

幌満かんらん岩体における変形と岩石メルト相互作用：MHL系列とBDH系列の構造岩石学的研究

Deformation and melt-rock interaction in the Horoman peridotite: Petrological and structual study of the MHL suite and BDH suite rocks

*日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、栗原 圭佑[1]、谷内 元[2]、川本 竜彦[1]
*Aya Hihara[1], Miki Tasaka[1], Keisuke Kurihara[1], Hajime Taniuchi[2], Tastuhiko Kawamoto[1]

1. 静岡大、2. 産総研
1. Shizuoka Univ., 2. AIST

変形はメルトの浸透を促進しメルトの分布をコントロールする可能性がある. Holtzman et al. (2003)のオリビン＋メルトの剪断変形実験では, 変形によりメルトに富むバンドとメルトに乏しいバンドに分離することが示されている. また, メルト存在下での変形は歪みを局在化させ，結晶方位に影響を与えることが示唆されている. 幌満かんらん岩体は, 北海道日高変成帯南縁部に位置するアルプス型のかんらん岩体で,多様なかんらん岩とmafic岩, 輝岩によって顕著な層構造が発達している. 幌満かんらん岩体のかんらん岩類はTakahashi (1991)により, 3つの特徴的な系列に区分されている: MHL系列 (Main harzburgaite-lherzolite), SDW系列 (Spinel-rich dunite-wehrlite), BDH系列 (Banded dunite-harzburgaite). 先行研究より, MHL系列のかんらん岩は海嶺起源であり (Yoshiukawa and Nakamura, 2000), BDH系列のかんらん岩類は沈み込み帯起源 (松藤ほか, 2006)である可能性が指摘されている. 本研究ではアポイ岳, 幌満川, 不動の沢の露頭からMHL系列とBDH系列の層状かんらん岩試料を採取し, 構造岩石学データを分析することで海嶺下と沈み込み帯における変形と岩石メルト相互作用について議論する. 露頭観察と微細構造観察から層状のかんらん岩における岩相境界と面構造は概ね一致することが確認された．電子線後方散乱回折 (EBSD)による解析では, オリビンは強い形態定向配列 (SPO)を示し, 結晶方位の集中度を示すJ-Indexの値は他のかんらん岩体と比較して低い値を示した. 結晶方位解析では2種類のCPOファブリックが観察された. ひとつはオリビンの [100]が面構造に方向な方向に[010]が面構造に垂直な方向に集中するCPOファブリック (A-type)で, もうひとつは [010]が面構造に垂直な方向に集中を示し, [100]と[001]は面構造に平行な方向に帯状分布を示すCPOファブリック (AG-type)である. この2種類のCPOファブリックは輝石の量比によって変化することから, メルトの存在が転位クリープから拡散クリープへと変形メカニズムを変化させ, CPOの発達に影響を与えたと考える. また, オリビン以外の鉱物 (斜方輝石, 単斜輝石, 斜長石, パーガス閃石)は粒界に入り込むような不規則な形状で存在し, 明瞭なCPOとSPOを示すため, メルトの浸透は変形と同時に起きたと考えられる. マイクロXRF分析のデータから算出した岩石の平均化学組成のMg#(=100×Mg/(Mg+Fe))は, MHL系列の岩石では69~82, BDH系列の岩石では 87と比較的高い値を示した. 電子線プローブマイクロアナライザ (EPMA)によるオリビンの Fo# (=100×Mg/(Mg+Fe))の測定では, MHL系列の岩石では83~92を示し, BDH系列ではダナイトで93~94, ハルツバージャイトで90~91を示した. Mg#に相違が明確に見られることは, 2つの系列間でかんらん岩とメルトの反応の程度が異なることを示唆する.

引用文献

Holtzman et al., 2003, Melt segregation and strain partitioning: implications for seismic anisotropy and mantle flow, Science, 301 (5637), 1227-30.Takahashi, 1991, Origin of three peridotite suite from Horoman peridotite complex, Hokkaido, Japan; Melting, melt segregation and solidification processes in the upper mantle., J. Mineral. Petrol. Econ. Geol., 86, 199–215.Yoshikawa and Nakamura, 2000, Geochemical evolution of the Horoman peridotite complex: implications for melt extraction, metasomatism, and compositional layeringin the mantle, J. Geophys. Res., 105, 2879–2901.

キーワード：マントル、かんらん岩、変形、結晶方位、電子線後方散乱回折
Keywords: mantle, peridotite, deformation, crystallographic preferred orientation, EBSD

片理の発達した蛇紋岩とかんらん岩の地震波速度と電気比抵抗の多成分測定

Multicomponent measurements of seismic velocity and electrical resistivity using foliated serpentinite and peridotite

*伊藤 禎宏[1]、片山 郁夫[1]、道林 克禎[2]、松山 和樹[2]
*Tomohiro Ito[1], Ikuo Katayama[1], Katsuyoshi Michibayashi[2], Kazuki Matsuyama[2]

1. 広島大学、2. 名古屋大学
1. Hiroshima University, 2. Nagoya University

沈み込み帯で起こるさまざまな現象には水が関わっている．蛇紋岩の形成もそのうちの一つである．沈み込むプレートがマントルウェッジに水を放出する際，プレートの表面やマントルウェッジと水が反応し蛇紋岩が形成される．特にプレートの表面に形成される蛇紋岩は強く変形を受け，片理面が発達している．地球深部における水は地震波速度や電気比抵抗の地球物理観測によって近年明らかになっている．これらの結果の解釈には等方的な蛇紋岩やかんらん岩の物性値が使われている．しかし，実際の沈み込み帯の蛇紋岩やかんらん岩は，強く変形を受け片理面や線構造を持ち，岩石中に見られる割れ目も異方的に分布する．このような片理の発達した蛇紋岩やかんらん岩の実験室下での物性測定はいまだ少ない．そのため本研究では，片理の発達したな蛇紋岩やかんらん岩の地震波速度や電気比抵抗の多成分測定を行い，その結果と地球物理観測から，沈み込み帯での流体の移動経路を議論することを目的とする．

本研究で用いた岩石試料は，長崎県野母半島で採取された蛇紋岩と愛媛県東赤石山で採取されたかんらん岩である．これらの岩石は偏光顕微鏡下でも強い鉱物の定向配列を持っている．また，測定する方向を決めるために，線構造に平行な方向をX軸，片理面に垂直な方向をZ軸とした．これらの岩石について，実験室での地震波速度と電気比抵抗の同時測定を行った．地震波速度と電気比抵抗の測定実験には，容器内透水変形試験機を用いた．実験条件は封圧を5 MPaから200 MPaまで段階的に加圧・制御し，圧力効果を調べた．流体には0.5 mol/LのNaCl溶液を用い，流体圧は1 MPaに制御して室温下で実験を行った．また，EBSDを用いた鉱物の結晶方位測定を行い，結晶選択配向による異方性を評価した．

蛇紋岩，かんらん岩のP波速度はX軸，Y軸方向が，片理面にZ軸方向よりも速い傾向を示した．蛇紋岩は，X軸，Y軸方向でのP波速度がほぼ同じ値であることに対し，かんらん岩はX軸方向が最もP波速度が速い傾向を示した．S波速度は片理面に平行に伝播振動する成分が，片理面を横切る伝播方向や振動方向に比べて速い傾向を示した．これらの結果は，片理面に平行なクラックの効果と鉱物の異方性の効果で説明できる．地震波速度は，封圧の上昇とともにやや早くなり，これは割れ目の閉鎖の影響だと考えられる．最大圧力200 MPaでは，異方性が15%程度の孤影，これは鉱物の結晶選択配向によるものだと考えられる．蛇紋岩の電気比抵抗は，Z軸方向よりもX軸方向で測った場合の方が1桁程度低い傾向を示した．一方，かんらん岩の電気比抵抗はZ軸方向とX軸方向でほぼ値が変わらず，蛇紋岩のZ軸成分とほぼ同じ値を示した．電気比抵抗は，封圧の上昇とともに上昇し，これは割れ目の閉鎖の影響だと考えられる．この実験から得られた多成分の地震波速度から，弾性定数テンソルを計算し，岩石のバルクの地震波速度極図を作成した（Mainprice, 2014）．この地震波速度極図は，結晶選択配向から作られたものとは異なり，鉱物とクラックの2つの影響を含んでいる．この極点図から異方的な岩石中の地震波速度は，その伝播方向や振動方向に強く依存することが示された．これらの結果と地震波速度や電気比抵抗のトモグラフィーとの比較から，沈み込み帯での流体移動や，クラックの密度について議論を行う．

キーワード：超塩基性岩、地震波速度、電気比抵抗、異方性

Keywords: Ultramafic rocks, Seismic velocity, Electrical resistivity, Anisotropy

ポスター | S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

2024年9月12日(木) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S1: 火成作用のダイナミクス (スペシャルセッション)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-01] HIMU海洋島玄武岩の酸化還元状態： 急冷ガラスとメルト包有物のμ-XANES分析による知見

*萩原 雄貴[1]、石橋 秀巳[2]、羽生 毅[1] (1. 海洋研究開発機構、2. 静岡大学)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-02] 火成岩の菫青石を用いた結晶マッシュ内の流体組成と圧力の推定の試み

*吉村 俊平[1] (1. 北大・地惑)

12:30 ~ 14:00

[S1-P-03] 海底コア試料中のメルト包有物の分析に基づく伊豆大島火山のマグマの組成進化

*浜田 盛久[1]、田中 えりか[2]、羽生 毅[1]、清水 健二[3]、牛久保 孝行[2]、常 青[1]、田村 芳彦[1] (1. JAMSTEC海域地震火山部門、2. 高知大学海洋コア国際研究所、3. JAMSTEC高知コア研究所)

HIMU海洋島玄武岩の酸化還元状態： 急冷ガラスとメルト包有物の μ-XANES分析による知見

Oxidation states of HIMU-type ocean island basalts: Insights from μ-XANES analysis of quenched glasses and melt inclusions

*萩原 雄貴[1]、石橋 秀巳[2]、羽生 毅[1]
*Yuuki HAGIWARA[1], Hidemi Ishibashi[2], Takeshi Hanyu[1]

1. 海洋研究開発機構、2. 静岡大学
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Shizuoka Univ.

地球特有のハビタビリティはリソスフェアのリサイクルによりマントルの酸素フガシティー(fO_2)が変化したことに関連する可能性が指摘されている (Cockell et al. 2016)．リサイクル物質がマントルの酸化や還元を引き起こすかどうかを検証するには，海洋島玄武岩(OIB)のfO_2を調査することが有用である．特に，HIMUマントルソースは他のOIBと比較して多様なfO_2を示すことが知られており(Willhite et al. 2024)，マントルソースのfO_2の変化を引き起こす要因を探る上で重要なマントル端成分である．マグマのfO_2を推定するために様々な方法が提案されている．例えば，V濃度を基に世界中の様々なOIBの酸化還元度を推定したWillhite et al. (2024)によると，HIMU typeのOIBは他のタイプのOIB (e.g., EM1, EM2, DM)と比較して酸化的であることが示された．しかし， V濃度に基づく方法は，XANESによる$Fe^{3+}/\Sigma Fe$の直接測定と比較して酸化状態の変化を検出する感度が低く (Wang et al. 2019)，実際，XANESとV濃度による指標を比較した研究では，両者は一致しないことが報告されている(e.g., O’Neil et al. 2024)．また，マグマのfO_2は脱ガスにより変化することも知られており，マントルソースの真のfO_2を推定するためには，試料の選択も重要である．そこで本研究では，脱ガスの影響が最小限である均質なメルト包有物を対象にμ-XANESを用いて$Fe^{3+}/\Sigma Fe$の直接測定を行い，HIMU-type OIBのソースマントルの酸化還元状態を推定した． 分析試料はしんかい6500により深海から採取されたフレンチポリネシアのRurutuとTubuaiのOIBを用いた．Rurutuの試料は若い噴出年代(1–2 Ma)と古い年代(13–17 Ma)を示す2つに分けられる (Hanyu et al. 2013)．従って，試料は年代と産地により young-Rurutu, old-Rurutu, Tubuaiの3つに分けられる．噴出年代が古いold-RurutuとTubuaiの試料はHIMU的で，噴出年代が若いyoung-RurutuはEM1的な同位体組成を示す (Hanyu et al. 2013)．これらの試料のうち，XENESによる分析が可能な急冷ガラスを含む試料は合計18個得られた．本研究では，これらの試料の急冷ガラスとかんらん石中の均質なメルト包有物を分析した．Fe-K端μ-XANESによる分析は高エネルギー加速器研究機構Photon FactoryのBL4Aで行った．分析の結果，噴出年代が古くHIMU的な組成を持つOIBの殆どは$Fe^{3+}/\Sigma Fe \sim 0.15$から0.18程度であった．しかし，その中の2つの試料は$Fe^{3+}/\Sigma Fe$は0.20と0.26と酸化的であった．XRFにより測定した全岩S濃度と$Fe^{3+}/\Sigma Fe$には 負の相関が存在したため，酸化的な試料はSO_2の脱ガスによる酸化を被っている可能性がある．脱ガスの影響が最小限だと考えられるメルト包有物の$Fe^{3+}/\Sigma Fe$は0.13–0.17であり，溶岩の急冷ガラスよりも僅かに還元的であった．一方，噴出年代が若くEM的な組成を持つOIBは$Fe^{3+}/\Sigma Fe \sim 0.23$–0.36と酸化的であった．EM的な試料は斑晶に乏しいため分析可能なメルト包有物はまだ見つかっていない．HIMU的な組成を持つOIBのfO_2は，$\Delta FMQ \sim -0.2$程度であった．この値は，MORBの平均値 ($\Delta FMQ \sim 0.0$ (Fe XANES))と同程度である．EM的な組成を持つOIBのfO_2は$\Delta FMQ \sim +2.3$であり，報告されている他のOIB試料のそれと比較しても高い．以上の結果から，fO_2が高いEM1タイプOIB (young-Rurutu)の起源は，酸化的なリサイクル物質がプルームソースに存在するためという従来の解釈(e.g., Taracsák et al. 2022)が適用できるが，fO_2が低いHIMUタイプOIB (old-RurutuとTubuai)の起源はそれでは説明できない．一方，Cottrell and Kelley (2013)はE-MORBが他のMORBよりも還元的である理由として，古代の無酸素海洋堆積物の添加による局所的な還元を考えた．従って，RurutuやTubuaiのプルームソースには，そのような還元的な物質が存在する可能性がある．今後は，高いfO_2を示す斑晶に乏しい試料から分析可能なメ

ルト包有物を探して，溶岩だけでなくメルト包有物も酸化的な特徴を示すのかどうかを検証する．また，揮発性元素，微量元素，同位体比を組み合わせ，RurutuやTubuaiの還元的なマグマをもたらしたプルームソースの起源物質を制約する．

キーワード：海洋島玄武岩、酸化還元状態、メルト包有物、μ-XENES
Keywords: Ocean island basalt, Oxidation state, Melt inclusion, μ-XENES

火成岩の菫青石を用いた結晶マッシュ内の流体組成と圧力の推定の試み

The composition and pressure of the fluid in crystal mush estimated from cordierite in tonalitic polycrystalline volcanic ejecta

*吉村 俊平[1]
*Shumpei YOSHIMURA[1]

1. 北大・地惑
1. Hokkaido University

■はじめに

低温で半固結状態となっていたマグマ（結晶マッシュ）が再び流動性を取り戻し，噴火可能な状態になるには，結晶マッシュのバルク粘性を下げる過程が必要である．そのモデルの１つとして，高温のH2O–CO2流体が結晶マッシュに注入し，熱で鉱物を溶かす過程が提案されている（e.g., Bachamann & Berganz, 2006）．この可能性を検討するには，結晶マッシュ内に存在する流体の組成やその時間変化の情報が必要であるが，ほとんどのケイ酸塩鉱物は揮発性成分を取り込まないため，噴出物からこの情報を得ることは難しかった．

稀ではあるが，火山噴出物の中に菫青石を含む多結晶体礫が含まれることがある．今から10万年前に起きた安達火山の噴火はそのような例の１つである．この噴火では，軽石・火山灰と同源と考えられる菫青石を含むトーナル岩質の多結晶体礫が噴出しており（蟹沢, 1985； 蟹沢・柴田, 1987），結晶マッシュの一部が噴出したものと考えられている（蟹沢, 1992）．菫青石はc軸に平行なチューブ構造の中にH2OやCO2などの分子を捕獲する性質がある．そのため，変成岩岩石学の分野では，菫青石を変成流体の組成センサーとして用いる研究が盛んに行われてきた．同様の手法を菫青石を含む火成岩の多結晶体礫に応用すれば，結晶マッシュ内に存在していた流体の組成や圧力の情報を得ることができる可能性がある．そこで本研究では，安達火山の噴出物を対象として菫青石の揮発性成分の分析を行い，流体組成と圧力を推定できるかどうかを予察的に検討した．

■方法

礫の観察を行ったのち，自形の菫青石結晶を取り出し，結晶の外形と多色性をもとに結晶軸の方向を決め，c-a方向，c-b方向に平行な両面研磨薄片を作製した．そして，顕微FT-IRを用いて直線偏光のビームを試料に入射し，赤外透過分析を行った．また，菫青石の化学組成をEPMAで分析した．

■結果

礫の主要構成鉱物は石英と斜長石であり，少量のカミングトン閃石，微量の菫青石，不透明鉱物が含まれていた．石英には流体包有物とメルト包有物の両方が見つかった．菫青石のXMgは0.82であった．赤外スペクトル解析により，すべての菫青石試料に type-I-H2O（H-Hの方向がc軸に平行なH2O分子），type-II H2O（垂直なH2O分子），CO2が検出された．含水量をランベルト・ベール則より計算した結果，Goldman & Rossman (1997) のモル吸光係数を用いるとtype-I H2O = 1.27 wt%, type-II H2O = 0.36 wt%であった（total H2O = 1.63 wt%）．一方，Della Ventura et al. (2012)の吸光係数を用いると，それぞれ0.64 wt%, 0.23 wt%と算出された（total H2O = 0.87 wt%）．CO2濃度は，Della Ventura et al. (2012)のモル吸光係数を用いて0.03 wt%と計算された．

■流体組成と圧力の推定

石英に流体包有物が含まれることから，結晶マッシュは流体に飽和していたと考えられる．また，菫青石のCO2/H2O比は非常に低いため，平衡共存していた流体は，Harley et al. (2002)のモデルに基づき，ほぼ純粋

なH2Oであったと考えられる．そこで，水ーメルトー菫青石系の平衡モデル（Harley & Carrington, 2001），流体の状態方程式（Duan & Zhang, 2006），安達火山のマグマ温度である850 ˚C（蟹沢, 1992）を用いて平衡圧力を計算した結果，total H2O=1.63 wt%を採用すると4.4 kbar，0.87 wt%を採用すると1.5 kbarとなった．現状ではモル吸光係数の不確定性が大きいため，推定圧力に大きな違いが生じてしまう．ただし，後者の圧力（1.5 kbar）は，蟹沢 (1992)のマグマ溜まりモデルの圧力範囲（<2 kbar）と一致している．

キーワード：菫青石、結晶マッシュ
Keywords: Cordierite, Crystal mush

海底コア試料中のメルト包有物の分析に基づく伊豆大島火山のマグマの組成進化

Geochemical evolution of Izu-Oshima volcano: Constraints from analysis of melt inclusions in a submarine core

*浜田 盛久[1]、田中 えりか[2]、羽生 毅[1]、清水 健二[3]、牛久保 孝行[2]、常 青[1]、田村 芳彦[1]
*Morihisa HAMADA[1], Erika TANAKA[2], Takeshi HANYU[1], Kenji SHIMIZU[3], Takayuki USHIKUBO[2], Qing CHANG[1], Yoshihiko TAMURA[1]

1. JAMSTEC海域地震火山部門、2. 高知大学海洋コア国際研究所、3. JAMSTEC高知コア研究所
1. IMG, JAMSTEC , 2. Marine Core Research Institute, Kochi Univ. , 3. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC

研究の背景

伊豆大島火山から噴出するマグマは、背弧側に位置する伊豆東部火山のマグマと相互作用をしており、マグマの混入を受けている（Ishizuka et al. 2015, Earth and Planetary Science Letters）。Ishizuka et al. (2015)は、伊豆大島陸域から採取された岩石試料の全岩化学組成に基づき、伊豆大島火山と伊豆東部火山のマグマの相互作用の程度が時間の経過に伴って変化してきたことを議論した。この先行研究をさらに進めるため、本研究では、研究航海によって伊豆大島火山東方沖の海底堆積物中から採取されたプッシュコア試料中のメルト包有物を分析した。メルト包有物を分析すれば、端成分マグマを直接的に制約したり、それぞれの端成分マグマの揮発性成分の特徴を明らかにできるなど、岩石試料の全岩化学組成に基づく議論をさらに前に進められる可能性があるためである。

試料と分析手法

2021年9～10月に海洋研究開発機構の研究船「かいれい」を用いて実施された伊豆・小笠原海域への研究航海KR21-16において、伊豆大島から約10km東方沖から25cmの長さの海底堆積物のプッシュコア試料を採取した。プッシュコア試料中に含まれている有孔虫の殻の^{14}C年代測定に基づき、このコア試料は4,500年前から3,200年前にかけての1300年間に堆積したテフラであることが判明した。この時期は、伊豆大島古期（山頂にカルデラが形成された1,700年前から16,000－17,000年前まで）の一部である。25㎝の長さのプッシュコア試料を10等分した厚さ2.5㎝毎の部分から、実体顕微鏡下で観察しながら鉱物（かんらん石、斜長石、直方輝石）を取り出し、研磨してメルト包有物の表面を削りだした。メルト包有物は全て急冷されてガラス化していた。本研究ではまず，メルト包有物の揮発性元素（H_2O, CO_2, S, F and Cl）とP_2O_5を二次イオン質量分析計（SIMS）を用いて，次に主成分元素を電子線プローブマイクロアナライザー（EPMA）を用いて分析した。さらに、比較的大きい（30μm）メルト包有物の微量元素をレーザーアブレーションICP質量分析計を用いて局所分析した。

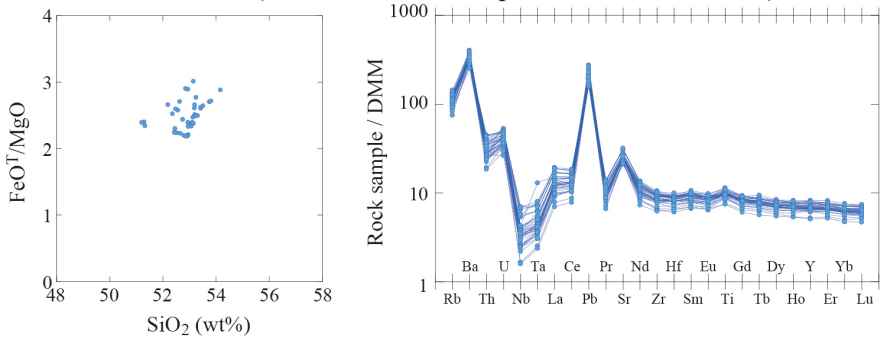
分析結果と議論

結果的に100個のメルト包有物を分析した。メルト包有物は、SiO_2量が51～56 wt%（揮発性成分を除いて合計100 wt%に規格化）の玄武岩～玄武岩質安山岩の組成を示す。メルト包有物の化学組成の特徴に基づき、メルト包有物は３つのグループ（Group A, B, C　図参照）に分類される。Group Aは、Ishizuka et al. (2015)が報告している伊豆大島火山の火山岩の全岩化学組成の特徴と一致することから、伊豆大島火山のメルト組成そのものである。H_2O量とCO_2量の関係から、100MPaよりもやや低圧のマグマ溜まりで結晶分化作用が進行したことを示している。Group Aはプッシュコア試料中では上部で多く見られる。Group Cは、伊豆大島火山のマグマと伊豆東部火山のマグマの中間的な特徴を示すことから、伊豆大島火山と伊豆東部火山の混合

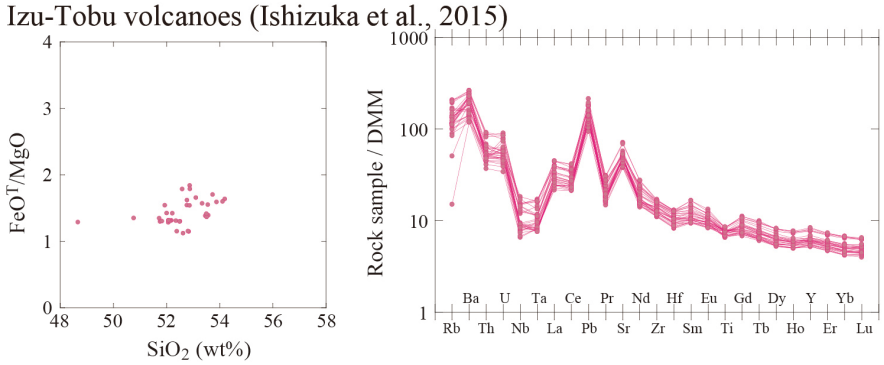
マグマである。H_2O量とCO_2量の関係から、100MPaよりもやや高圧のマグマ溜まりで結晶分化作用が進行したことを示している。Group Cはプッシュコア試料中では下部で多く見られる。Group Bは、Group AとGroup Cの中間的な組成のメルトであり、プッシュコア試料の中間（約4,000年前）で多く見られる。Group AのメルトとGroup Cのメルトが圧力約100MPa付近で混合し、混合マグマからの結晶分化作用が進行したと考えられる。メルト包有物の分析を行うことにより、伊豆大島火山周辺ではGroup AとGroup Cという2種類の端成分マグマが存在しており、Group Cを主体とした4,500年前からGroup Aが主体となる3,200年前へと、火山活動の主体となる端成分マグマが時間の経過に伴って変化したことが明らかとなった。また、Group CからGroup Aへと火山活動の主体となるマグマの端成分が変化する過程で、Group AとGroup Cが圧力約100MPaという条件下で混合し、両者の中間的な化学的特徴を持つGroup Bが噴出したことも明らかとなった。

キーワード：伊豆大島火山、メルト包有物
Keywords: Izu-Oshima volcano, melt inclusion

Izu-Oshima volcano (Older Oshima Group; Ishizuka et al., 2015)

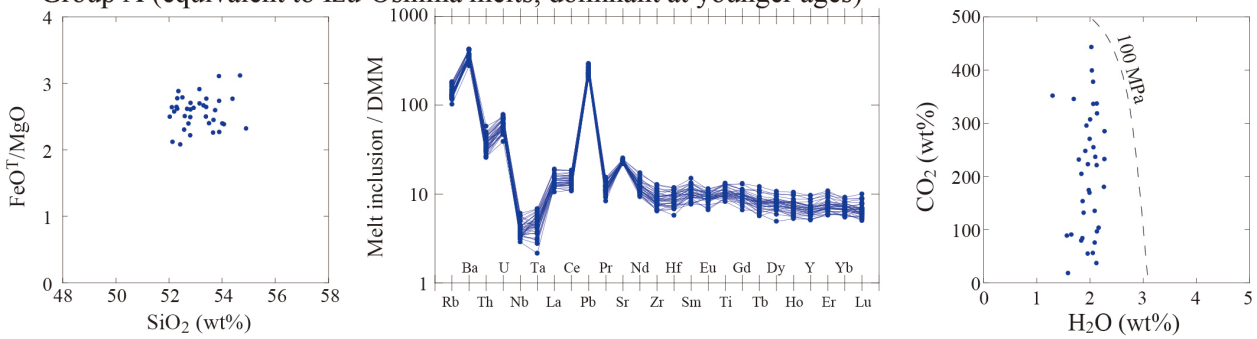


Izu-Tobu volcanoes (Ishizuka et al., 2015)

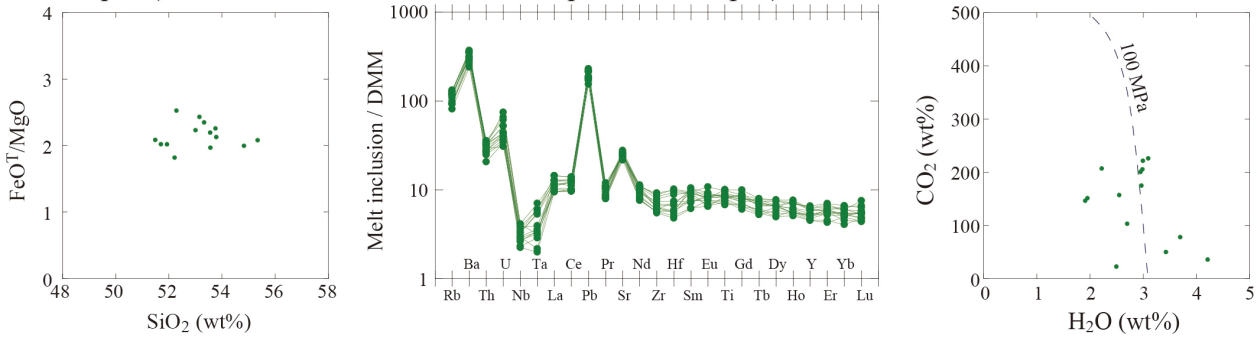


This study

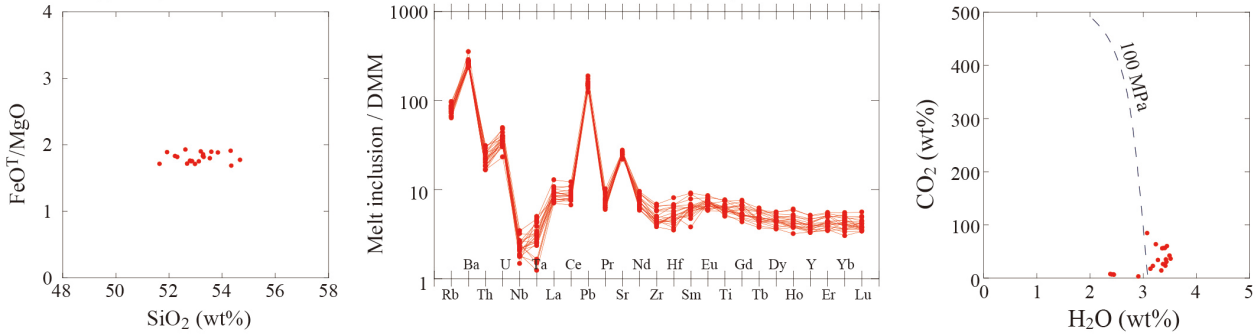
Group A (equivalent to Izu-Oshima melts, dominant at younger ages)



Group B (intermediate melts betwenen Group A and Group C)



Group C (closer to Izu-Tobu melts, dominant at older ages)



@Japan Association of Mineralogical Sciences.

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

ポスター | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

2024年9月12日(木) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00

[S3-P-01] 回転式DACによる含水スティショバイトの変形実験の予察的結果

*東 真太郎[1]、岡崎 啓史[2]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、Gréaux Steeve[4]、奥田 善之[1,5]、夏井 文凛[1]、Jayawickrama Eranga[2]、太田 健二[1] (1. 東工大、2. 広島大、3. 高輝度光科学研究センター、4. 愛媛大、5. ハワイ大)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-02] Mg_2SiO_4リングウッダイトの加水軟化

「発表賞エントリー」

*後藤 佑太[1]、久保 友明[1]、本田 陸人[1]、柴崎 裕樹[2] (1. 九州大学、2. KEK-PF)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-03] 部分的に蛇紋化したスラブカンラン岩の深発地震発生領域での脱水プロセスの理解に向けて

*久保 友明[1]、江崎 武蔵[1]、藤原 伸匡[1]、本田 陸人[1]、後藤 佑太[1]、辻野 典秀[2] (1. 九州大学、2. JASRI)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-04] マイクロビッカース試験によるかんらん石多結晶体の粘性異方性

「発表賞エントリー」

*藤井 七夢[1]、田阪 美樹[1] (1. 静岡大学)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-05] 主成分分析を用いた結晶ファブリック解析：幌満カンラン岩の例

「発表賞エントリー」

*松山 和樹[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境学)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-06] 渡島大島火山のピクライト玄武岩のかんらん石斑晶内部のマントル流体/メルトの痕跡

*塚脇 遼[1]、江島 輝美[2]、二ノ宮 淳[3]、荒井 章司[4] (1. 信大・院理、2. 信大・理、3. 住鉱資源開発、4. 金沢大)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-07] 四国海盆土佐メガムリオンの超苦鉄質岩の構造岩石学的研究

「発表賞エントリー」

*井上 創[1]、道林 克禎[1,2]、針金 由美子[3]、小原 泰彦[1,2,4] (1. 名古屋大・院環境、2. 海洋研究開発機構、3. 産総研・地質情報研究部門、4. 海上保安庁・海洋情報部)

12:30 ~ 14:00

[S3-P-08] 飛騨変成帯に産出する花崗岩マイロナイトの変形微細構造

「発表賞エントリー」

*堀江 正陽[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境)

回転式DACによる含水スティショバイトの変形実験の予察的結果

Preliminary results of deformation experiments on hydrous stishovite using a rotational DAC

*東 真太郎[1]、岡崎 啓史[2]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、Gréaux Steeve[4]、奥田 善之[1,5]、夏井 文凛[1]、Jayawickrama Eranga[2]、太田 健二[1]
*Shintaro AZUMA[1], Keishi Okazaki[2], Kentaro Uesugi[3], Masahiro Yasutake[3], Steeve Gréaux[4], Yoshiyuki Okuda[1,5], Bunrin Natsui[1], Eranga Jayawickrama[2], Kenji Ohta[1]

1. 東工大、2. 広島大、3. 高輝度光科学研究センター、4. 愛媛大、5. ハワイ大
1. Tokyo Tech., 2. Hiroshima Univ., 3. JASRI, 4. Ehime Univ., 5. University of Hawai'i

近年の地震波観測の進展により下部マントルに沈み込んだスラブの形態が明らかになってきた(Fukao and Obayashi, 2013)。スラブの振る舞いは地球史を通して地球内部全体の物質循環とその進化に重要な影響を及ぼしたことが予想される。その中でも放射性熱源を多く含む海洋地殻がどこまで沈み込み、どこで滞留するのかを明らかにすることは、マントルにおける物質循環と熱循環を解明するために必要不可欠な研究項目である。これらを明らかにするためには、海洋地殻を構成する鉱物のレオロジー特性（流動強度、結晶方位選択配向(CPO)、地震波異方性）を実験的に検証することが有効な手段であるが、下部マントルの超高圧、かつ、大ひずみの定量的な変形実験を行うことが技術的に困難であったため、実験的な力学データに乏しかった。本研究では、我々研究グループが独自開発してきた回転式ダイヤモンドアンビルセル(rDAC)を用いて(Nomura et al., 2017; Azuma et al., 2018, Park et al., 2022; Azuma et al., 2024)、海洋地殻を構成する高圧鉱物、特に含水スティショバイト(Al bearing SiO_2)の変形特性を明らかにすることを目的とした変形実験を行った。本発表では、その予察的結果について紹介する。

変形実験に用いた含水スティショバイト(1750±140 ppmH_2O)は、愛媛大学GRCのマルチアンビルプレス(ORANGE-3000)によって、SiO2 glass + 7.4 wt% $Al(OH)_3$ (2.6 wt% H_2O)粉末から合成された(12 GPa, 1673 K, 1 hour)。合成された試料に対し、SPring-8(BL47XU)において、rDACによる超高圧高温大歪変形実験を行った。rDACのダイヤモンドアンビルにはキュレットサイズ0.3-0.5 mmのものを使用し、アンビル表面には試料との滑りを防ぐための溝を作成した(Azuma et al., 2018)。ガスケットに封入されている試料に対して、対になったダイヤモンドアンビルを押し込むことで高圧にし、新たにrDACへ導入した近赤外線集光加熱(イメージ炉)によって試料は加熱された(Azuma et al., 2024)。温度の測定はガスケットと試料に熱電対を限りなく近づけて測定を行った。試料を封入したrDACをビームライン上に設置し、高温高圧を再現したのち、rDACの上部アンビルを一定速度で回転させることで、ねじり変形を行った。変形実験条件は、下部マントルへと沈み込んだスラブ内の実際の温度圧力に近い条件も含めた圧力10-55 GPa, 温度300-1073 K、一定の歪速度10^{-4}–10^{-3} /s、歪200 %以上で実施した。変形中の試料に対しては、その場XRD測定を行うことで応力を決定した。

実験結果として、含水スティショバイトは変形開始直後に応力が上昇し、その後、定常状態へと遷移し、塑性変形していることが確認された。各実験条件の歪一応力曲線からは、含水スティショバイトの強度の圧力依存性、温度依存性が観察された。下部マントルの主要構成鉱物であるブリッジマナイト((Mg,Fe)SiO_3)やフェロペリクレース((Mg,Fe)O)の力学データと、今回の実験結果を比較すると、ブリッジマナイト(nominally dry)より強度が低く、フェロペリクレース(nominally dry)より強度が高い、双方の中間的な強度という結果になった。一方で、本研究では非常に多量の水を含んだスティショバイトを用いていることを鑑みると、下部マントルに沈み込んだ地殻のレオロジーにおけるスティショバイトの重要性は、構成鉱物間の水の分配が非常に重要な鍵である可能性を示唆している。

キーワード：回転式ダイヤモンドアンビルセル、高温高圧、含水スティショバイト、レオロジー、変形実験
Keywords: Rotational diamond anvil cell, High temperature and pressure, Hydrous stishovite, Rheology, Deformation experiment

Mg_2SiO_4リングウッダイトの加水軟化

Water weakening of Mg_2SiO_4 ringwoodite

*後藤 佑太[1]、久保 友明[1]、本田 陸人[1]、柴崎 裕樹[2]
*Yuta Goto[1], Tomoaki Kubo[1], Rikuto Honda[1], Yuki Shibazaki[2]

1. 九州大学、2. KEK-PF
1. Kyushu Univ., 2. KEK-PF

リングウッダイトは遷移層マントル下部の主要構成鉱物であり、そのレオロジーを明らかにすることは、上下マントル境界の粘性構造の解明、ひいてはスラブスタグナントやプレートテクトニクス型のマントル対流などの問題を読み解いていく上で非常に重要である。また、リングウッダイトは最大3wt.%の水を含むことができることが知られていて、マントルの電気伝導度測定などから実際の遷移層マントル中のリングウッダイトでも最大~1wt.%の水を含んでいることが示唆されており、粘性率に対する水の効果も重要となる。上部マントルの主要構成鉱物であるオリビンでは水に飽和した環境下でパイエルス機構、転位クリープ、拡散クリープのどの流動機構でも加水軟化が起こることが報告されているが(e.g. Katayama-Karato, 2008)、リングウッダイトの塑性変形強度に与える水の効果は全く検証されていない。本研究では遷移層圧力下において含水量の異なるMg_2SiO_4組成のリングウッダイトを用いた変形実験を行い、リングウッダイトの組成変形強度に対する水の効果を検討した。

高圧変形実験は、放射光施設PF-ARのNE7A設置の高圧発生装置MAX-IIIにD-111型ガイドブロックを組み込んで行った。高含水量リングウッダイトの出発試料にはMg_2SiO_4オリビン単結晶を吸着水の除去処理を施さずに粉末化したものを用いた。これをNaClシリンダーに詰め変形用セルアセンブリに組み込み、21GPa・1000℃で1時間アニールして高含水量リングウッダイト多結晶体を合成し、そのまま変形を行った。また低含水量リングウッダイトの変形実験の出発物質には、Mg_2SiO_4オリビン単結晶を予め22GPa・1400℃で合成したリングウッダイト多結晶体を用いた。60keVの単色X線を入射X線としてラジオグラフィ像と2次元X線回折パターンを取得することで、変形中の試料歪みと応力を測定した。変形実験は歪み速度一定条件で温度をステップさせる実験と、温度一定条件で歪み速度をステップさせる実験の2種類を行った。実験条件は圧力21GPa、温度400-1300℃、試料の歪み速度0.51-18×10^{-5}/s、最終歪み量は24-43%である。回収試料はFT-IRを用いて含水量測定を行い、FE-SEMを用いて微細組織観察を行った。

出発試料および回収試料の含水量測定から、高含水量リングウッダイトには1700-2000 wt.ppm H_2O、低含水量リングウッダイトには290 wt.ppm H_2Oの水が含まれていた。先行研究ではマントルオリビン組成のリングウッダイトに対し、低温側のパイエルス機構で含水量200-1860 wt.ppm H_2O (Imamura et al., 2018)、高温側の転位クリープで含水量290-1100 wt.ppm H_2O (Kawazoe et al., 2016)の条件で流動則が報告されているが、いずれも含水量のばらつきが大きいのが問題である。本研究では低含水量リングウッダイトは1100-1300℃で、高含水量リングウッダイトは400-1100℃で変形実験を行ったが、過去の研究と比較すると、低含水量は高温側に、高含水量は低温側に、それぞれ～200-300℃の違いに相当するような強度差が確認された。本研究の1100℃のデータで比較すると、含水量が約5倍に増加することで変形強度は約1/10に低下する。

高含水リングウッダイトでは、高温になるほど強度の温度依存性が大きくなる傾向が見られ、また歪み速度ステップ変形実験の結果、歪み速度の応力依存性を表す指数nが、低温側の750℃ではn=5.7、高温側の900℃ではn=2.2となった。応力指数については今後より慎重な解析が必要であるが、現時点の予備的な解析では約800-850℃付近を境に低温側ではパイエルス機構、高温側では転位クリープによる流動が卓越しているかもしれない。先行研究のパイエルス機構ー転位クリープの流動機構の切り替わりは約1050℃の応力~2GPa付近で起こっているが、本研究の高含水量リングウッダイトでは、より低温低応力側の800-850℃、~0.8GPa付近で起こることが示された。

このように本研究の結果から、Mg_2SiO_4リングウッダイトの明らかな加水軟化現象が確認された。これは脱水する遷移層スラブの強度や遷移層下部で示唆される低粘性層の解釈に対しても重要であると考える。今後は、鉄を含む試料での加水軟化現象の実証や、同一変形機構における定量的な含水量依存性の決定を行っていく必要がある。

キーワード：放射光その場観察、高圧変形実験、含水量、加水軟化、マントル遷移層
Keywords: in-situ X-ray observation, high-pressure deformation experiment, water content, water weakening, mantle transition zone

部分的に蛇紋化したスラブカンラン岩の深発地震発生領域での脱水プロセスの理解に向けて

Toward an understanding of dehydration process of partially serpentinized slab peridotite under conditions where deep earthquakes occur

*久保 友明[1]、江崎 武蔵[1]、藤原 伸匡[1]、本田 陸人[1]、後藤 佑太[1]、辻野 典秀[2]
*Tomoaki KUBO[1], Musashi Ezaki[1], Nobumasa Fujiwara[1], Rikuto Honda[1], Goto Yuta[1], Noriyoshi Tsujino[2]

1. 九州大学、2. JASRI
1. Kyushu University, 2. JASRI

部分的に蛇紋化したスラブかんらん岩の沈み込みは、地球深部への水の輸送や深発地震の発生、スラブ軟化現象を理解するうえで極めて重要である。我々は、深部スラブにおける蛇紋石の脱水プロセスと周囲カンラン岩への透水および含水化過程、またそれらが変形の局所化や不安定化、軟化を引き起こす過程を実験的に検討している。本発表では特に前者の蛇紋石脱水とカンラン岩含水化過程について、その予備的結果を報告する。

実験は、MA型高圧装置を用いて、放射光その場観察法(SPring-8, BL04B1およびBL05XU)および試料急冷法(九州大)を併用して行っている。長崎県野母半島産アンチゴライト(Atg)を円柱状にくり抜いた多結晶体を出発物質として、それをNaCl媒体に埋め込んだ開放系、もしくは幌満産カンラン岩カプセルに入れたカンラン岩反応系の2種類の環境下で脱水実験を行っている。圧力条件は、1)温度誘起のAtg脱水境界が負の勾配となる~4-7GPa, 2)圧力誘起のAtg脱水反応でDHMS相が形成しはじめる~8-10GPa, 3)カンラン岩の相転移が起こる~20GPa、の大きく3つの領域に分けられる。

圧力領域1)および2)でX線その場観察によりカイネティクスも含めた脱水プロセスを調べたところ、これまで過去研究で報告のあった閉鎖系での結果に対し、本研究の開放系では大きな違いが確認された。圧力領域1)の開放系では、温度上昇とともに Atg => olivine (Ol) + 10Å phase (10Å) + H2O => Ol + enstatite (En) + H2O の反応が起こり、~500-650˚Cで起こる部分脱水の方が、~700˚C以上で起こる完全脱水よりもフルイド生成率が大きくなる特徴がある。同様に圧力領域2)の開放系では、Atg => Phase E (PhE) + 10Å => Ol + hCEn + H2O の新たな反応プロセスが見出され、600˚C以下では脱水せず高圧分解反応が起こる。同様の実験をカンラン岩反応系で行ったところ、まだ予備的解析の段階ではあるが、~4GPaではほぼ閉鎖系に近いプロセスで反応が進行するが、高圧になるにつれ開放系に近い反応挙動をすることが示唆された。

一方で、圧力領域2)および3)、~500-850˚Cのカンラン岩反応系において、試料急冷法による実験を行って回収試料を分析したところ、Atgが複数のDHMS相へ脱水分解してフルイドを放出するとともに、そのAtgと周囲カンラン岩との間に複数のDHMS反応帯が形成することが確認された。そしてさらに外側のカンラン岩領域へも脈状フルイドが貫入し、そこでもDHMS相やカンラン石高圧相が形成されることがわかった。特に圧力領域3)では、時間の経過とともに貫入したフルイド脈の両側に高圧相転移が進行し、カンラン岩カプセル全体の高圧相転移が急速に進行する様子が観察された。

これらの結果はまだ予備的であり系統的な解釈には至っていないが、部分的に蛇紋化したスラブカンラン岩が地球深部で脱水する際、圧力によって周囲カンラン岩とフルイドとの反応プロセスが変化し、それが局所的な間隙水圧や水のフガシティー、ひいては蛇紋石の脱水プロセスや脱水温度をコントロールしていることが予想される。

キーワード：深部スラブ、脱水プロセス、脱水脆性化、加水軟化

Keywords: deep slab, dehydration process, dehydration embrittlement, water weakening

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

マイクロビッカース試験によるかんらん石多結晶体の粘性異方性

Viscous anisotropy of olivine aggregates using micro Vickers indentation tests

*藤井 七夢[1]、田阪 美樹[1]
*Namu Fujii[1], Miki Tasaka[1]

1. 静岡大学
1. Shizuoka University

プレートの大部分はマントルで構成されており、プレートの強度はマントルの物性に支配されている。プレートは低温、高応力の低温塑性変形(パイエルス機構)で変形している。マイクロインデンテーション試験は岩石を構成する鉱物だけでなく、金属やセラミックスなど様々な材料の硬度を調べるために幅広く使用されてきた。地球マントルの大部分を構成するかんらん石についてもその変形特性を調べるためにマイクロインデンテーション試験の一種であるビッカース硬度試験が行われ、温度や粒径による変形特性の変化の理解に用いられてきた。ビッカース硬度試験は先端に微小なピラミッド形状のダイヤモンド圧子を試料に押し込むことで微小領域の硬さを調べる。ビッカース硬度試験で得られた結果は温塑性変形であるパイエルス機構の流動メカニズムに対応させることができる。プレートではマントル流動の方向にかんらん石の[100]軸が揃うような異方性を持つことが知られており、転位クリープではかんらん石が特定の方向に配列した異方性を持つ試料が等方的な試料に比べて粘性が1桁程度低下することが明らかになっている。一方でパイエルス機構では粘性の異方性は調べられていない。そこで、本研究はかんらん石多結晶体の異方性が粘性に及ぼす影響について調べるため、かんらん岩を用いてビッカース硬度試験を行った。実験には地球マントルの模擬物質としてForsterite＋20vol%Diopside多結晶体を用いた。荷重は0.98-9.81 N、保持時間は15 s、常温常圧下で試験を行った。本研究では等方的な試料と異方的な試料を4種類作製した。細粒かんらん石多結晶体に関する実験から、焼結温度によって異なる形状の粒子が形成されることが明らかになっている。より高い温度では異方的な形状を持つ粒子(タビュラー状粒子)が、低い温度では等粒状粒子が形成される。そのため本実験において異方的な試料はタビュラー状試料を70%圧縮変形させ、かんらん石のb軸を圧縮方向に並ばせた試料を用いた。研磨面とb面が垂直な試料(yz試料)と研磨面とb面が平行な試料(xy試料)を準備した。等方的な試料としては等粒状試料を用いた。さらに、タビュラー状の等方的な試料(reference試料)も作製した。本研究のマイクロビッカース試験の結果より、荷重が0.98 Nのときのビッカース硬度がyz試料では8.6 GPa、xy試料では8.3 GPa、等方的試料では10.0 GPa、reference試料では9.2 GPaとなった。この結果は粒径の効果と粘性の異方性の効果を含んでいると考えられるため、koizumi et al.(2020)と比較することで粒径の効果を除き、粘性の異方性の効果を比較した。異方的な試料、特にyz試料では等方的な試料と比較して硬度が小さくなった。これはかんらん石の配向による異方性によりかんらん石の硬度が下がったことを示唆する。本研究の結果は、マントル流動によって結晶の方向が揃い、異方性を持ったかんらん石では等方的なかんらん石よりもパイエルス変形機構で変形したときに粘性が下がる可能性を示唆する。

キーワード：かんらん石 、 低温塑性変形 、マイクロビッカース試験、異方性 、粘性
Keywords: olivine, low temperature plasticity, Vickers indentation tests, anisotropy, viscosity

主成分分析を用いた結晶ファブリック解析：幌満カンラン岩の例

Crystal-fabric analysis using principal component analysis method for the Horoman peridotite

*松山 和樹[1]、道林 克禎[1]
*Kazuki Matsuyama[1], Katsuyoshi Michibayashi[1]

1. 名古屋大・院環境学
1. Nagoya Univ. Env.

本研究では、結晶ファブリックと微細組織の関係性解明を目的として、主成分分析（principal component analysis; PCA）を用いた解析を行った。主成分分析は、高次元データを低次元に圧縮する多変量解析手法である（Jolliffe, 2002）。主成分分析はこれまで、データのノイズ除去や特徴量の抽出を得意とすることから、固体地球科学分野においては地球化学的特徴の解析で利用されてきた（Nakamura et al., 205; Yang and Cheng, 2015など）。本研究では、幌満カンラン岩体から採取されたカンラン岩試料49個のEBSDデータ（Matsuyama and Michibayashi, 2023, 2024）を使用した。解析には、鉱物量比、結晶方位定向配列の構造強度（*J*-index, *M*-index, pf*J*-index）とFabric Index Angle、鉱物粒子の直径・周囲長・長軸を用いた。Fabric Index Angleは、カンラン石の結晶方位定向配列を定量的に特徴づける指標である（Michibayashi et al., 2016）。本研究で使用した変量はそれぞれ単位が異なるため、各変数の平均が0、分散が1となるように標準化した。標準化したデータから対称行列を作成し、すべての変数の対について共分散（対角成分については分散）を計算することで共分散行列を求めた。共分散行列から固有値（分散）と固有ベクトル（主成分軸）を求め、固有値が大きい順に固有ベクトルを並べ替えた。この時、大きい方から順に第1主成分、第2主成分、…と呼ぶ。本研究では第1–3主成分で分散全体の 75%以上を説明できるという結果が得られた。　主成分分析の結果は2次元及び3次元バイプロット（Greenacre, 2013）で表される。バイプロットは主成分の散布図上に、各変数の寄与の程度をベクトルで表現した図である（Greenacre, 2013）。第1主成分は鉱物粒子の直径・周囲長・長軸の中央値で良く説明された。一方で、第2主成分は、そのパターンは構造強度（*J*-index, *M*-index）とカンラン石の存在量でよく説明されたものの、分散に対する寄与が大きいのは[100]軸のpf*J*-indexであった。この結果は、カンラン石の存在量と構造強度が正の相関を持つこと、また構造強度およびカンラン石の存在量と粒子形状の間には相関が無いことを意味する。これに加えて、[100]軸のpf*J*-indexはFabric Index Angleと正の相関を示した。これはカンラン石の結晶方位定向配列がAG, A, Eタイプと変化するにつれ、[100]軸の集中度が大きくなることを意味する。幌満カンラン岩体におけるカンラン石の結晶方位定向配列の結晶方位定向配列の多様性は、経験した変形イベントの違いによって生じたものである（Matsuyama and Michibayashi, 2023, 2024）。それゆえ、[100]軸の集中度はイベント時に支配的であった変形機構の違いを反映している可能性がある。

引用文献：
Greenacre (2013) ***Journal of Computational and Graphical Statistics***.
Jolliffe (2002) ***Springer***.
Matsuyama and Michibayashi (2023) ***Journal of Geodynamics***.
Matsuyama and Michibayashi (2024) ***Tectonophysics*** (under review).
Nakamura et al. (2015) ***Chemosphere***.
Yang and Cheng (2015) ***Journal of Geochemical Exploration***.

キーワード：カンラン石、結晶ファブリック、幌満カンラン岩体、主成分分析

Keywords: Olivine, Crystal-fabric, Horoman peridotite complex, Principal component analysis

渡島大島火山のピクライト玄武岩のかんらん石斑晶内部のマントル流体/メルトの痕跡

Traces of mantle fluid/melt within olivine phenocrysts from Ohima-Ōshima picritic basalts

*塚脇 遼[1]、江島 輝美[2]、二ノ宮 淳[3]、荒井 章司[4]
*Ryo Tsukawaki[1], Terumi Ejima[2], Atusi Ninomiya[3], Shoji Arai[4]

1. 信大・院理、2. 信大・理、3. 住鉱資源開発、4. 金沢大
1. Shinshu Univ. Sci., 2. Shinshu Univ. Sci. , 3. Sumiko Res. Exp. & Dev. Co., 4. Kanazawa Univ.

マントルにおける流体またはメルト（流体/メルト）の存在形態および移動法は深発地震や火山噴火の発生に関わるため重要である。流体/メルトはマントルの構成鉱物の粒間を通り移動すると一般に信じられており，それらが集まると収束流となり移動することが知られている（e.g., Kelemen et al., 1995）。これらの痕跡は，かんらん岩体においてダナイト脈やバンドとしてしばしば観察される（e.g., Zhou et al., 2021）。しかし，集積する前の流体/メルトの存在・移動の様子はマントル由来のかんらん岩からは直接観察されたことはない。これらは，マントル物質の冷却，流動，再結晶により失われているためであると考えられる。このため，マグマ形成場付近でのマントルかんらん岩中の流体/メルトの実際の存在形態・移動経路に関する直接的情報は得られていない。

本研究ではピクライト玄武岩中のかんらん石から，マントル環境下に存在した流体/メルトの痕跡を発見したため，その存在形態や分布を明らかにし，マントルおける流体の移動経路に関する新知見を提供する。

観察・組成分析には電界放出型電子プローブマイクロアナライザ（FE-EPMA）を用い，結晶方位測定(EBSD法)には電界放出型走査電子顕微鏡（FE-SEM）を用いた。

渡島大島は東北日本において最も背弧側に位置する第四紀火山であり，ピクライト玄武岩が産する（Yamamoto, 1988）。渡島大島ピクライト玄武岩中に含まれるかんらん石斑晶のコアは黒色～褐色を呈する（このコアを以降は“Black core”とよぶ）。この“Black core”にはキンクバンドや波動消光が見られ，応力を受ける環境下に存在していたものであり，マグマから晶出したものでないことがわかる。さらに，“Black core”のかんらん石のFo含有量およびNiO値は上部マントル由来のかんらん石（高橋, 1986）と同様の値を示す。ピクライト玄武岩マグマの成因を合わせ考えると，渡島大島ピクライト玄武岩中のかんらん石斑晶中の“Black core”はマントルかんらん石の捕獲結晶であると考えられる。

かんらん石中の“Black core”は，直径数μm以下の球形の“多相包有物”が多数存在することで黒色に見えており，“多相包有物”は自形のスピネル，ガラス，空隙から構成される。“多相包有物”中のガラスはかんらん石が構成元素としないNaなどの元素を含む。“多相包有物”は3次元的には複数の面上に分布し，その面は90°の角度で交わることがある。この“多相包有物”が分布する面は，かんらん石の（100）、（010）、（001）の結晶面と一致する。これらの面は，マントル環境下ではマントル対流に影響するかんらん石のすべり面として良く知られている(e.g., Jung and Karato, 2001)。

上記の結果より，“多相包有物”は外部からかんらん石に注入されたケイ酸塩メルトと流体の混合物質により形成したものであり，かんらん石の“Black core”に存在する多数の“多相包有物”は上部マントルの流体/メルトが保存されたものであると考察される。したがって，島弧下の上部マントルにおいて流体/メルトが，粒間だけでなくかんらん石（マントル構成鉱物）内を移動経路としていることを強く示唆する。

References:
Jung, H. and Karato, S., (2001), *Science*, **293**, 1460-1463.
Kelemen. P.B. et al., (1995), *J. Geophys. Res.*, **100**, 475-496.

高橋栄一，（1986），*火山*，**30**, 17-40.
Yamamoto, M. (1988) *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 352-359.

キーワード：マントル、ピクライト玄武岩、かんらん石、流体/メルト、渡島大島
Keywords: Mantle, Picritic basalt, Olivine, Fluid/melt, Oshima-Ōshima

四国海盆土佐メガムリオンの超苦鉄質岩の構造岩石学的研究

Microstructural characteristics of ultramafic rocks in the Tosa Megamullion, the Shikoku Basin.

*井上 創[1]、道林 克禎[1,2]、針金 由美子[3]、小原 泰彦[1,2,4]
*So Inoue[1], Katsuyoshi Michibayashi[1,2], Yumiko Harigane[3], Yasuhiko Ohara[1,2,4]

1. 名古屋大・院環境、2. 海洋研究開発機構、3. 産総研・地質情報研究部門、4. 海上保安庁・海洋情報部
1. GSES, Nagoya Univ. , 2. JAMSTEC, 3. GSJ/AIST, 4. JCG

中央海嶺の低速拡大軸や背弧海盆の拡大域にはメガムリオン（または海洋コアコンプレックス）と呼ばれる表面に畝のような凹凸の地形ファブリックを持つドーム状構造が部分的に存在する[1]．メガムリオンからは，下部地殻や上部マントル由来の岩石が延性変形して形成された断層岩が確認され[2]，デタッチメント断層深部延長部の延性剪断帯起源と考えられている[3]．メガムリオンはプレート拡大地域における地球内部のダイナミクスを理解するうえで重要な構造である．日本の南方に広がる背弧海盆，フィリピン海四国海盆においても，複数のメガムリオンが発見されている[4]．近年の研究航海（YK21-06S, YK22-18S, YK23-05S）によって，四国海盆の拡大初期に形成した複数のメガムリオンの詳細が明らかになった．本研究では，それらのメガムリオンの１つである土佐メガムリオンから採取した超苦鉄質岩を対象とし，微細構造解析を行うことで構造発達過程を考察した．

研究試料は，研究航海YK23-05Sで実施された潜水調査船しんかい6500の潜航調査によって土佐メガムリオンから採取された超苦鉄質岩を使用した．岩石試料を面構造に垂直，線構造に平行な面(XZ面)で切断し，研磨して観察した後，研磨薄片を作成した．岩石試料は全て著しい蛇紋岩化作用を受けていたが，部分的にカンラン岩の組織が残されていた．肉眼観察において，強く発達した面構造と直方輝石の残晶からなるポーフィロクラスト状組織が確認された．偏光顕微鏡下で確認された主要構成鉱物は，カンラン石，直方輝石，単斜輝石，斜長石，スピネルであった．ポーフィロクラスト状組織の基質部の大部分は細粒化したカンラン石であり，粒径が2–7 mmの円形の直方輝石の残晶の周辺に非対称に分布する非対称組織が発達していた．また，直方輝石は数cmまで伸長した残晶としても観察され，粒子内にキンクや波動消光などの結晶内歪が見られた．単斜輝石と斜長石は細粒化し，面構造に平行な面で分布していた．カンラン石を多く含む3試料について，走査型電子顕微鏡による後方散乱電子回折（SEM-EBSD）によって分析を行い，結晶方位定向配列（CPO）を測定した．カンラン石については粒径も測定した．カンラン石のCPOは，分析した3試料とも(001)[100]すべりの弱い集中とともに[100]にXZガードルが見られた．また，伸長した直方輝石の残晶のCPOは(100)[001]すべり系であった．カンラン石の粒径は平均で295–339 ㎛であった．

以上の結果より，土佐メガムリオンで採取された超苦鉄質岩の断層岩は，面構造が強く非対称構造を示すポーフィロクラスト状組織をもつことから，延性剪断変形を経験した断層岩であると推定される．また，伸長した直方輝石は大きな歪を受けたことを示唆し，(100)[001]すべり系が発達していたことから1000 ℃程度の温度条件で変形したことを示す[5] ．さらに，カンラン石の[100]のXZガードルは 拡散クリープによる粒界すべりを特徴づけるとの報告があり[6]，本研究の断層岩は粒界すべりに至る大変形を強く示唆する．したがって，土佐メガムリオンの超苦鉄質岩はリソスフェア内の比較的高温（~1000 ℃）条件下で著しく延性剪断変形した後にデタッチメント断層に沿って海底面へ露出し，ドーム状の構造を形成したと解釈される．

[1]Blackman et al. 2009, Geophysical Journal International, 178, 593–613.
[2]Cannat et al. 1991, Tectonophysics, 190, 73–94.
[3]Tucholke et al. 1998, Journal of Geophysical Research, 103, 9857–9866.
[4]Okino et al. 2023, Progress in Earth and Planetary Science, 10, https://doi.org/10.1186/s40645-023-00570-2.

[5]Suhr 1993, Journal of Structural Geology, 15, 1273–1292.
[6]Weeler 2009, Geophysical Journal International, 178, 1723–1732.

キーワード：メガムリオン、カンラン石、背弧海盆、延性剪断変形
Keywords: Megamullion, Olivine, Back-arc basin, ductile shear deformation

飛騨変成帯に産出する花崗岩マイロナイトの変形微細構造

Deformation microstructures of granitic mylonite in Hida Metamorphic Belt

*堀江 正陽[1]、道林 克禎[1]
*Masaaki Horie[1], Katsuyoshi Michibayashi[1]

1. 名古屋大・院環境
1. GSES. Nagoya Univ.

大陸地塊の断片である飛騨変成帯には花崗岩や片麻岩起源のマイロナイト帯が富山県～岐阜県において分布し、中生代前期に活動した延性剪断帯とみなされている(Takehara & Horie, 2019)。飛騨変成帯のマイロナイトの微細構造を詳細に調べることで、大陸地殻のレオロジー及び剪断帯の形成史に関する情報が取得できる(高木・原, 1994)。しかしながら、飛騨変成帯の延性剪断帯について微細構造に着目した研究は少なく(高木・原, 1994)、流動特性および剪断帯の形成プロセスに関する理解が進んでいない。そこで本研究では、飛騨変成帯南西部の花崗岩マイロナイトの微細構造に着目し、その流動特性とマイロナイトを形成した延性剪断帯の形成条件を明らかにすることを目的とした。岐阜県飛騨市の神岡地域と宮川地域についてマイロナイトの露頭調査と岩石試料を採取した。マイロナイトの岩石試料は面構造に垂直、線構造に水平な面で薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて微細構造の観察を行った。また、SEM-EBSD法によってマイロナイトの結晶方位を測定し、MATLAB MTEX Toolboxを用いて石英の結晶方位ファブリック並びに粒径と粒面積を解析した。薄片観察の結果、宮川地域のマイロナイトでは石英がプール状に密集した多結晶体として基質部に存在し、長石が主にポーフィロクラストの形態で確認された。一方神岡地域では、石英がリボン状に伸長した多結晶体を形成し、長石の再結晶粒子の集合体が普遍的に見られた。またSEM-EBSD法の結果、宮川地域のマイロナイトでは全サンプルにおいて石英の柱面a軸滑りを示唆する結晶方位ファブリック(Y-maxima)が確認された。神岡地域では、Y-maximaの他に柱面c軸滑りを示唆する単集中(X-maxima)及びランダムなファブリックが測定された。さらに石英の粒径・粒子面積のヒストグラムの比較を行ったところ、神岡地域の方が、数の少ない粗粒側の粒子において全体に占める面積比が大きい傾向が強かった。　本発表では微細構造、結晶方位、粒径及び粒子面積の解析結果から、宮川地域と神岡地域での花崗岩マイロナイトの変形メカニズム及び変形環境について議論する。さらに両地域の微細構造、変形特性を比較し、各地域の剪断帯の差異について考察する。

■参考文献

高木秀雄, 原崇, 1994, 飛騨地帯の延性剪断帯の運動像とテクトニクス. 地質学雑誌, 100, 931-950.

Takehara, M., Horie, K. 2019, U–Pb zircon geochronology of the Hida gneiss and granites in the Kamioka area, Hida Belt. Island Arc, e12303.

キーワード：花崗岩マイロナイト、変形微細構造、結晶方位ファブリック、飛騨変成帯
Keywords: Granitic mylonite, Deformation microstructure, Crystallographic preferred orientation, Hida Metamorphic Belt

ポスター | R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

2024年9月12日(木) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R1：鉱物記載・分析評価（宝石学会(日本) との共催セッション）

12:30 ~ 14:00

[R1-P-01] SEM-EDSによる輝沸石の化学定量分析 ー ビームダメージに弱い沸石の化学組成をどう正確に見積もるか？

「発表賞エントリー」

*石原 篤[1]、大藤 弘明[1] (1. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-02] EPMAによるゼノタイムの定量分析

*坂野 靖行[1] (1. 産総研)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-03] 電子線後方散乱回折法とエネルギー分散型X線分光法の同時分析による斜長石の変形と組成変化履歴の解明

「発表賞エントリー」

*二村 康平[1]、道林 克禎[1,2] (1. 名古屋大・院環境、2. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-04] イラク北東部ヤシン・テペ遺跡出土の金属製錬スラグの鉱物学的特徴

*黒澤 正紀[1]、西山 伸一[2] (1. 筑波大・生命環境、2. 中部大・人間力創成)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-05] 京都府和束町石寺地域の石英脈に多量に含まれる石墨の起源について

*西尾 真輝[1]、三津川 到[1]、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1] (1. 京都大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-06] 熊本県美里町払川から見出されたゲルマニウムを含む白金族鉱物の新鉱物・三千年鉱

*田中 崇裕[1]、浜根 大輔[2]、新町 正 (1. 日鉄鉱業㈱、2. 東大・物性研)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-07] ローズクォーツ中の繊維状インクルージョンについて

*白勢 洋平[1]、札元 颯人[1]、井上 紗綾子[2] (1. 愛媛大学・理、2. 愛媛大学・GRC)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-08] 愛媛県魚島の片麻岩中から産するローズクォーツについて

*白勢 洋平[1]、坂井 翔真[1] (1. 愛媛大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-09] 兵庫県琢美鉱山から産する二次砒酸塩鉱物

*白勢 洋平[1]、上世 莉可子[1]、西田 勝一、藤原 由輝 (1. 愛媛大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-10] 兵庫県新井鉱山産ラウテンタール石およびローウォルフ石の鉱物学的性質

*大西 政之、下林 典正[1]、浜根 大輔[2]、篠田 圭司[3]、久野 武 (1. 京大・院理、2. 東大・物性研、3. 大阪公大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-11] 糸魚川市橋立の曹長岩中のSrに富む燐灰石の再検討

*上原 誠一郎[1]、門馬 綱一[2]、大西 政之、大角 駿介、大木 良弥、岡 紘希[3] (1. 九州大・博物館、2. 国立科博、3. 応用地質（株）)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-12] 宮崎県西臼杵郡日之影町小河内産の水酸コンドロ石について

*岡田 敏朗[1]、上原 誠一郎[2]、行則 功[3]、白勢 洋平[4] (1. 福岡市立香椎第2中学校、2. 九大・総合博物館、3. 福岡石の会、4. 愛媛大・理工)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-13] 鹿児島県大和鉱山産arsenmedaite

*大角 駿介、浜根 大輔[1]、岡 紘希[2]、田村 雅史[3]、高木 皓介[4] (1. 東大・物性研、2. 応用地質（株）、3. 三重大・工・技術部、4. 三重大・半導体デバイス研究室)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-14] 熊本県阿蘇外輪山俵山（護王峠）の“普通角閃石”

*井上 晴貴[1]、上原 誠一郎[2] (1. エネコム株式会社、2. 九大・博物館)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-15] 愛媛県梶島に産出する斑れい岩類に伴う電気石と角閃石の化学組成

「発表賞エントリー」

*太田 一樹[1]、下岡 和也[2]、斉藤 哲[1]、白勢 洋平[1] (1. 愛媛大・院理工、2. 関西学院大)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-16] 福岡県長垂のペグマタイト岩脈に伴う粘土の構成鉱物

*武田 侑也[1]、上原 誠一郎[2]、桑原 義博[3] (1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文)

12:30 ~ 14:00

[R1-P-17] 長野県大鹿村のカンラン岩中の蛇紋石脈の微細構造

*武田 侑也[1]、桑原 義博[3]、上原 誠一郎[2] (1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文)

SEM-EDSによる輝沸石の化学定量分析 ー ビームダメージに弱い沸石の化学組成をどう正確に見積もるか？

Chemical quantitative analysis of heulandite using SEM-EDS - How can we accurately estimate the chemical composition of zeolite?

*石原 篤[1]、大藤 弘明[1]
*Atsushi ISHIHARA[1], Hiroaki Ohfuji[1]

1. 東北大学
1. Tohoku uiversity

沸石の化学組成は古くは重量法や滴定法といった湿式分析で見積もられてきたが、近年では局所化学定量分析の定番である電子マイクロプローブ分析（EPMA）法による分析も行われている。しかし、EPMA分析では細く絞った電子ビームを微小領域に照射し続けるため、脱水による構造改変や元素の蒸発などの試料ダメージの可能性を孕んでいる。特に、沸石はビーム照射による表面ダメージが大きい材料の一つであり、信頼できる化学定量値を得るためにはビームダメージを抑える必要がある（Campbell et al., 2016）。本研究では、より簡便な局所定量分析として広く普及しているSEM-EDSを用いた沸石定量分析を行い、電子ビームの照射モード（点分析、面分析）や照射電流値、照射時間などを変化させ、試料表面のダメージと分析値の評価を行った。分析中にビームを局所（ターゲット）に固定する点分析で測定を行った場合、ビーム照射位置周辺でチャージアップが生じ、その周囲には輝沸石の（010）に平行に細長く伸びたふくらみが観察された。これはビーム照射によって試料の局所が急激に加熱され、分析点直下で輝沸石の結晶構造が一部破壊され、脱水が生じたためと推測される。この際、構成元素の一部も高真空の試料室中へ蒸発するため、定量値は大きく影響を受け、分析精度の低下が認められ、特にAlの定量値の減少が顕著であった。これは結晶構造中でAlを多く配位するサイトではAl-O-Al結合の破壊が優先的に進むことを反映している可能性がある。このような試料表面のビームダメージは、照射時間に比例して大きくなるが、照射時間を短くするほど今度はX線カウントが少なくなるため、S/N（シグナル-ノイズ）比が低下し、定量精度（再現性）は悪くなる。そのため、試料表面へのダメージを抑えながら定量分析に十分なＸ線カウントを得ることが不可欠となる。そこで、試料表面で電子線を走査しながら測定を行う面分析（ラスタースキャン）モードによる分析を試みた。ラスタースキャンでは各点当たりの照射時間は各段に短くなるため、ビームダメージは大幅に軽減されると期待される（吉原, 2000; Ohfuji and Yamamoto, 2015）。倍率を色々変えて分析を行ったところ、観察倍率5,000倍（領域サイズ：16×24 μm）以下の低倍率では試料表面のダメージは認められなかった。それ以上高倍（～40,000倍）の場合、分析後に試料表面にわずかなブライトネス/コントラスト変化が生じるが、沸石の化学組成の定量精度の評価に用いられる指標E *の値は±10%の範囲内に収まっており、質量濃度のトータルも90%前後であることから、十分に信頼できる分析値が得られると判断できる。さらに最近のEDS解析ソフトAZtec（オックスフォード・インストゥルメンツ社）では、マッピング分析やライン分析データの一部から領域を指定してスペクトルを再構築する機能が備わっており、これを利用することによって実際のスキャン領域よりもはるかに小さい領域（～数μm）の化学組成を正確に見積もることも可能である。

キーワード：沸石、SEM-EDS、輝沸石
Keywords: Zeolite, SEM-EDS, heulandite

$$\text{*balance error：} E = \frac{[\mathrm{Al}]-([\mathrm{Na}]+[\mathrm{K}]+[\mathrm{Ca}]\times 2)}{([\mathrm{Na}]+[\mathrm{K}]+[\mathrm{Ca}]\times 2)} \times 100 \ \text{(Passaglia, 1970)}$$

EPMAによるゼノタイムの定量分析

Quantitative electron microprobe analysis of xenotime

*坂野 靖行[1]
*Yasuyuki BANNO[1]

1. 産総研
1. AIST

Ⅰ．はじめに

ゼノタイムは花崗岩中に普通に産するYと重希土類元素に富むリン酸塩鉱物である。しかしながらEPMAを用いて希土類元素の定量分析を行なうには互いに干渉し合う希土類元素の特性X線強度を補正しなければならないという困難さがあるため本邦花崗岩産ゼノタイムのEPMA定量分析の報告は非常に少ない。今回，三重県竹原鉱山産ゼノタイムを用いて主成分元素用定量分析条件の検討を行なったのでその概要を報告する。

Ⅱ．定量分析条件

1．検討手順

使用したEPMAはJEOL JXA-iHP200Fである。最初に定性分析を実施し主要構成元素を同定し，測定する特性X線位置とバックグラウンド位置を決定した。定性分析で得られた半定量値を基にピークの重なりの程度を確認し，重なりの程度が大きい測定元素には高次X線が干渉する場合は波高分析器を使用する設定とし，1次線が干渉する場合は干渉補正係数を求めて補正する設定とした。

2．検討結果

加速電圧は15 kV，照射電流は50 nA，ビーム径は3 μmである。Pyle *et al.* (2002) により推奨された特性X線を選択して各元素の測定を行った。希土類元素の標準試料は，$Y_3Al_5O_{12}$ (Y$L\alpha$)，NdB_6 (Nd$L\alpha$)，含Sm, Yb合成ガラス(Sm$L\alpha$, Yb$L\alpha$)，$Gd_3Ga_5O_{12}$ (Gd$L\alpha$)，含Tb合成ガラス(Tb$L\alpha$)，含Dy, Er合成ガラス(Dy$L\alpha$, Er$L\alpha$)，含Tm, Ho合成ガラス(Tm$L\alpha$, Ho$L\beta$)を用いた。その他の元素の標準試料にはSmP_5O_{14} (P$K\alpha$)，$CaSiO_3$ (Si$K\alpha$)，鈴木ら（1999）の合成ガラス (Ca$K\alpha$)，ThO_2 (Th$M\alpha$)，U metal (U$M\beta$)を使用した。3チャンネルで測定を行ない，用いた分光結晶と測定元素の順は以下の通りである：1CH PETH (Ca$K\alpha$→P$K\alpha$→Y$L\alpha$→Si$K\alpha$)，4CH LIFH (Ho$L\beta$→Yb$L\alpha$→Tm$L\alpha$→Er$L\alpha$→Dy$L\alpha$→Tb$L\alpha$→Gd$L\alpha$→Sm$L\alpha$→Nd$L\alpha$)，5CH PETL (Th$M\alpha$→U$M\beta$)。X線計測時間はTh・Uが100秒，Ca・Hoが40秒，他の元素が20秒である。バックグラウンドはピークの両側の2点で測定した。ピーク及びバックグラウンドは2回計測し，その平均を真のX線強度とした。補正方法はZAF法を用いた。

高次X線との重なりを除去するためCa, Si, P, Dy, Ho, Yb, Th, Uに対して各特性X線のエネルギー幅に波高分析器を設定した。

1次線が干渉するケースは以下のものが認められた：Tm$L\alpha_1$線対するSm$L\gamma_1$線及びDy$L\beta_4$線の干渉，U$M\beta$線に対するTh$M\gamma$線及びThM_3-N_4線の干渉，P$K\alpha$線に対するY$L\beta$線の干渉。これらについてはそれぞれSmP_5O_{14}, DyP_5O_{14}, ThO_2, $Y_3Al_5O_{12}$を用いてÅmli and Griffin (1975)の方法で各妨害元線に対応する干渉補正係数を求めて補正を行なった。

バックグラウンド測定位置（BG-, BG+）は以下の通りである：Ca$K\alpha$ (3.60, 5.80), P$K\alpha$ (5.00,4.50), Y$L\alpha$ (4.00, 3.50), Si$K\alpha$ (4.30, 5.50), Ho$L\beta$ (2.56, 3.44), Yb$L\alpha$ (4.26, 1.74), Tm$L\alpha$ (2.07, 2.43), Er$L\alpha$ (1.57, 2.93), Dy$L\alpha$ (5.73, 2.77), Tb$L\alpha$ (1.94, 8.56), Gd$L\alpha$ (6.83, 3.67), Sm$L\alpha$ (6.96, 3.00), Nd$L\alpha$ (2.83, 3.77) , Th$M\alpha$ (3.00, 3.00), U$M\beta$ (3.04, 4.24)。

文献

Åmli, R. and Griffin, W.L. (1975) *Amer. Mineral.*, **60**, 599-606.

Pyle, J.M., Spear, F.S. and Wark, D.A. (2002) *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**, Mineral. Soc. Amer., Washington, D.C., 337-362.
鈴木和博，足立　守，加藤丈典，與語節生 (1999)地球化学, **33**, 1-22.

キーワード：電子プローブマイクロアラライザー、ゼノタイム、化学組成、竹原鉱山
Keywords: EPMA, Xenotime, Chemical composition, Takehara mine

電子線後方散乱回折法とエネルギー分散型X線分光法の同時分析による斜長石の変形と組成変化履歴の解明

Deformation and compositional changes of plagioclase: A combined electron backscattered diffraction and energy dispersive X-ray spectroscopy approach

*二村 康平[1]、道林 克禎[1,2]
*Kohei Nimura[1], Katsuyoshi Michibayashi[1,2]

1. 名古屋大・院環境、2. JAMSTEC
1. Nagoya University, 2. JAMSTEC

斜長石は、下部地殻の主要構成鉱物であり、その変形と組成変化は下部地殻のダイナミクスに大きな影響を与える。従来の研究は、走査型電子顕微鏡（SEM）ー電子線後方散乱回折（EBSD）による結晶方位解析や、エネルギー分散型X線分光法（EDS）などの組成分析を独立に行い、その結果を組み合わせて、斜長石の変形と組成変化の履歴を解明してきた。しかし、結晶方位と化学組成を独立に分析した場合、それらの関係が不明瞭になるという欠点がある。そのため、例えば斜長石の亜粒子と組成分布の関係が見過ごされていた可能性がある。SEM-EBSD-EDS法は、鉱物の結晶方位と化学組成の情報を直接結びつけられる、有用な手法である。この手法は、似たような結晶構造を持つ材料を区別する手法として、主に金属学の分野で利用されてきた。一方で、鉱物を対象にした実例はほとんどなく、実用的な解析手法は確立されていない。本研究では、海洋下部地殻から採取された変形ハンレイ岩中の斜長石について、ポーフィロクラストとその周囲のマトリクスに着目する。そして、SEM-EBSD-EDS分析によって得られた結晶方位と化学組成データについて、MATLAB® MTEX Toolboxを用いた解析を行い、斜長石の変形と組成変化の履歴について議論する。SEM-EBSD-EDS分析は、XZ面で切り出して研磨した薄片試料を対象に、EBSD検出器を挿れた状態で、EDS検出器の挿入位置を検出感度が最大となるように調整して行った。MTEX Toolboxを用いた解析では、斜長石におけるアノーサイト（An）値（Ca/[Ca+Na]）のEDS Mapを作成した。また、ポーフィロクラストの結晶方位に対する各粒子の方位差を示したMis2Ref Mapを作成した。ポーフィロクラスト周りのマトリクスのAn値は、ポーフィロクラストと同様の値を示した。また、ポーフィロクラストとその周りのマトリクスの結晶方位差は、40°以内と小さい値を示した。従って、斜長石は化学組成の変化を伴わない亜粒回転再結晶を経験したと考えられる。ポーフィロクラストの内部には、亜粒子を横切る脈状の組織が存在し、そのAn値はポーフィロクラストより低い値を示した。従って、斜長石は、亜粒回転再結晶を経験した後に、脈の貫入に伴う組成変化を経験したと考えられる。

キーワード：斜長石、再結晶、電子線後方散乱回折、エネルギー分散型X線分光
Keywords: plagioclase, recrystallization, electron backscattered diffraction, energy dispersive X-ray spectroscopy

イラク北東部ヤシン・テペ遺跡出土の金属製錬スラグの鉱物学的特徴

Mineralogical features of smelting slags from the Early Iron Age Yashin Tepe site, northeastern Iraq

*黒澤 正紀[1]、西山 伸一[2]
*Masanori KUROSAWA[1], Shin'ichi Nishiyama[2]

1. 筑波大・生命環境、2. 中部大・人間力創成
1. Univ. Tsukuba, 2. Chubu Univ.

金属器は、完成までに多くの知識・技術・連携作業を必要とするため、化学組成・組織・同位体等の分析を通じ、多様な情報が抽出できる重要な考古学的資料となっている。しかし、金属器は土中で非常に腐食しやすく、大半の情報を失っていることが多い。これに対し、金属製錬の過程で副産物として排出されるスラグは、微小な金属を含むが、大半はケイ酸塩や酸化物からなるため、腐食に強く、様々な技術レベルの情報を保存することができる。また、腐食した金属器の断片情報と合わせると、人類の金属利用の状況を相当程度まで復元することが可能となる。そのため、金属製錬が本格化する青銅器時代以降の遺跡の研究では、金属器と合わせてスラグを調査・研究することが、考古科学の潮流となっている。

但し、スラグには金属・ガラス・析出鉱物の三相が混合しており、その解析には三相に記録された微小組織や微小構造・微小部分組成の分析と解析が必須となる。その様な物質化学的情報と研究手法は、自然金属・天然ガラス・天然鉱物・合成鉱物の研究を通じ、鉱物学に集中的に蓄積されている。そのため、古代スラグの研究では、鉱物学の立場から主に研究が進められてきた。今回は、人類史初期の鉄利用を検討する上で重要な、前期鉄器時代末頃のヤシン・テペ遺跡から出土した製鉄スラグについて、鉱物学的な検討を試みた。

ヤシン・テペ遺跡は、イラク北部スレイマニヤ県にある新アッシリア帝国(911 BC～609 BC)の都市遺跡で、帝国の東端に位置する主要都市の址の一つとされている。この遺跡は、2015年から中部大学による発掘調査が開始され、紀元前8～前7世紀頃の貴重な未盗掘墓も発見されている。未盗掘墓では、遺骸が納められた土器製の棺と、金製品・銀製品・ビーズ・ガラス製品・土器・多数の青銅製品・鉄製品の副葬品が見いだされた。副葬品は青銅製品が多く、鉄製品が少ないことから、鉄器利用の普及途上の状況だったと考えられる。この時期は、西アジアでは鉄製品の本格生産と鋼の生産開始の時期の前後に当たり、農具や武器への鋼の利用が地域の人口増加と国家の武力統一に直接関係するため、当時の鉄生産の状況や技術レベルの検討が重要となっている。また、遺跡からは製鉄スラグも発見され、鉄生産関連の遺物が非常に少ないこの時代の遺跡として重要な位置を占めている。元々、新アッシリア帝国は、周辺諸国の征服・領地拡大のために鉄需要が旺盛であり、それを賄うために帝国に服属した辺境地での鉄の生産・貢納が盛んだったとされる。実際、帝国の西側の辺境地に当たるイスラエル付近の遺跡からは、比較的豊富なスラグの出土が認められ、鉄生産の状況がよく把握されているが、東側の辺境地では産出が少なく研究がなされていない。そこで、今回、中部大学ヤシン・テペ考古学プロジェクトの了承とイラクのスレイマニヤ文化財局の許可を得て、帝国東側の辺境地域に当たるヤシン・テペ遺跡のスラグおよび鉄腐食物の組織・構成物質・化学組成をSEM-EDSを用いて分析した。

分析の結果、薄緑色のスラグと黒色の製鉄スラグの2種類のスラグが確認され、両者ともに表面は薄い変質した被膜で覆われていた。薄緑色スラグは、内部が薄緑色ガラス質で、Ca-Al珪酸塩ガラスと普通輝石の析出結晶から主に構成されており、スラグ中には溶融反応途中の石灰石の微小片も含まれていた。このスラグには金属粒子・硫化物が含まれておらず、鉄製錬との関係は現在検討中である。青銅生産に関連した銅製錬では、類似のスラグが時々見つかっている。製鉄スラグは、内部が黒色亜金属光沢で、ウスタイトとCa-Al珪酸塩ガラス、Ca-Al珪酸塩鉱物の析出物で構成されており、反応途中の石灰石の微小片も含まれていた。また、そのCa-Al珪酸塩は1200～1300℃で析出したものであることが示された。遺跡周辺は石灰石の利用が容易な環境であることから、石灰石が鉱石の溶融と不純物を除去する補助剤(フラックス材料・造滓剤)として利用されたと考えられる。石灰石の混入によって生じるCaOに富むスラグは、高純度の鉄の生産に好都合なスラ

グ組成であるため、東側の辺境地域では高品質の鉄生産が行われていたことが示唆された。また、腐食した鉄器は、鉄水酸化物と少量の鉄酸化物からなり、ほぼ完全に腐食していた。但し、一部に微小な金属鉄の残存物が認められ、その金属鉄は不純物が非常に少ない高品質の鉄であった。以上のことから、イラク北東部では、紀元前800年頃から造滓剤として石灰石を利用し、高温を利用した高い製錬技術で、不純物の少ない鉄を生産していた可能性が示された。

キーワード：スラグ、鉄製錬、鉄器、SEM-EDS、ヤシン・テペ
Keywords: slag, iron smelting, ironware, SEM-EDS, Yasin-Tepe site

京都府和束町石寺地域の石英脈に多量に含まれる石墨の起源について

The origin of abundant graphite in quartz veins in Ishidera area, Wazuka Town, Kyoto Prefecture, Japan

*西尾 真輝[1]、三津川 到[1]、伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、下林 典正[1]
*Masaki Nishio[1], Itaru Mitsukawa[1], Yohei Igami[1], Akira Miyake[1], Norimasa Shimobayashi[1]

1. 京都大・院理
1. Kyoto Univ. Sci.

【はじめに】京都府和束町石寺地域に見られる石英脈からは多くの稀産鉱物が報告されている(鶴田ほか 2008; Morimitsu et al., 2021等)。この石英脈は微細な石墨などを多量に含むことで灰色を呈しているのが特徴である(森光2021)。一般に石墨の起源は2つに大別でき、炭質物が変成作用を受け石墨化した場合と、C-O-H流体から晶出した場合があることが提唱されている(Luque et al., 1998)。本地域には新期領家花崗岩類である木屋花崗岩と、石墨を含みその接触変成作用を受けた変成泥岩(菫青石帯)が分布している。よって地質環境を考慮すると石寺の灰色石英脈中の石墨の起源としては、母岩である変成泥岩中の石墨を石英脈が貫入した際に取り込んだ可能性と、石英熱水中にC-O-H流体が含まれておりそこから石墨が晶出した可能性が考えられる。

【目的】そこで本研究では、灰色石英脈中の石墨の起源はどちらであるのか、そして具体的にどのようなプロセスを経て石英中にもたらされたのかを明らかにすることを目的とし、母岩との構成鉱物の比較、石墨の産状の詳細な記載、流体包有物の分析を行った。

【手法・結果】木屋花崗岩と接する変成泥岩の構成鉱物を調べた結果、黒雲母、白雲母、石英、菫青石、チタン鉄鉱、電気石が含まれることが分かった。一方、灰色石英中には先行研究(森光 2021)において報告されている肉眼的なサイズの白雲母、黄鉄鉱、燐灰石、電気石などや微細な石墨に加えて、白雲母が微細な固相包有物としても存在することが分かった。しかし、変成泥岩に普遍的かつ大量に含まれる黒雲母は一切見いだせず、また先行研究(森光 2021)と同様に、石英脈中に変成泥岩の岩片は一切確認できなかった。

石英中の石墨は石英粒界、粒内の両方に存在した。粒界に位置する石墨は他形あるいは球状粒子集合体であった。粒内に位置する石墨は流体包有物と分布が共通しており、共存する固相は顕微鏡下では確認できなかった。また形態は球状と不規則状であった。特に不規則状の石墨のほとんどが周縁部に空隙を伴っていた。球状石墨粒子に関して、石英粒界、粒内からそれぞれ1つずつFIBで切り出し、TEMでの観察を行った。その結果、一見球状であった石墨は空隙内に樹枝状の結晶として成長していることが分かった(図)。また大型放射光施設SPring-8でのX線CTによる撮影でもTEMでの観察と同様に空隙に樹枝状に存在する石墨が多数確認された。石英中の石墨について、レーザーラマン分光光度計による結晶化度の測定を実施したところ、先行研究において報告されている流体起源の石墨と同様に、高い結晶化度を有することが分かった。また、一部の石英粒内の石墨からは二酸化炭素とメタンのラマンスペクトルを検出した。周囲に流体のdecrepitation haloを有する石墨粒子も存在した。流体のみからなる包有物も存在し、その形状は大きく不規則化している事が光学顕微鏡やX線CTにより確認され、ラマンスペクトルの結果、H_2O、$H_2O+CO_2+CH_4$、CO_2+CH_4で構成される事が判明した。

【考察】石英脈の微細な石墨の起源として、まず母岩から固相のまま石墨が物理的に取り込まれた場合と比較・検討を行った。この場合、石英脈中に母岩の岩片が存在し、石墨は岩片との粒界に脈状に分布し、石墨はフレーク状で、流体包有物はほぼH_2O(>93%)であるとされており(Crespo et al., 2005)、本研究での観察・分析結果とは一致しない。そして石墨が樹枝状をなすこと、流体包有物と分布の共通性があること、石墨が一部は流体で充填されるような空隙を伴うことは周囲の変成泥岩からの取り込みでは説明がつかない。一方、C-O-H流体から石墨が晶出した場合、母岩の岩片がなく、共生鉱物に乏しい(Luque et al., 2014)。また石墨はフレーク状に限らず様々な形態をなし(Barrenechea et al., 2009)、本研究での石墨と形態が類似する報告

例もある(Satish-Kumar, 2005)。さらに世界中の流体起源の石墨鉱床では炭素に富む流体が石英中の包有物として存在することが報告されている(Luque et al., 2011)。そのため、石寺の石英脈中の石墨はC-O-H流体から晶出することでもたらされたと考えられる。ただし、C-O-H流体からの石墨晶出時に発生すると思われるH_2Oは石墨と直接共存する形では存在しておらず、具体的な晶出反応の特定は今後の課題である。

キーワード：石墨、流体包有物、C-O-H流体、石英脈
Keywords: Graphite, Fluid inclusion, C-O-H fluid, Quartz vein

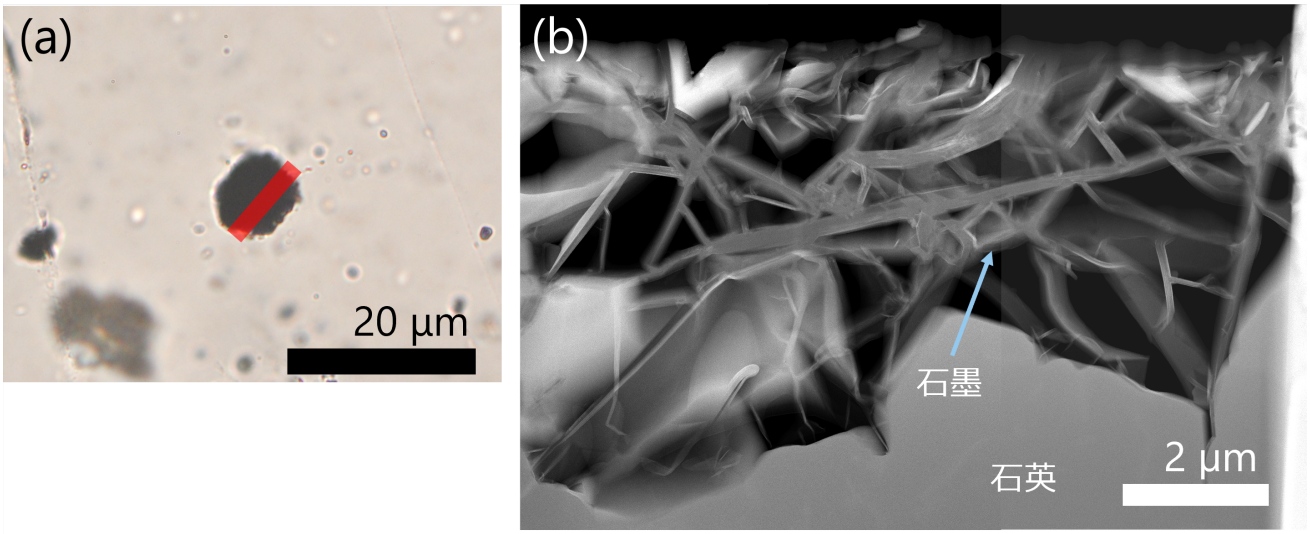


図　(a) 光学顕微鏡下で球状の外形をなす、石英粒子内の石墨 (※赤線はFIBで切り出した場所を示す)
(b) (a)から切り出した試料のTEMでのHAADF-STEM像

熊本県美里町払川から見出されたゲルマニウムを含む白金族鉱物の新鉱物・三千年鉱

Michitoshiite-(Cu), a new Ge-containing platinum group mineral from Haraigawa, Misato machi, Kumamoto Prefecture, Japan

*田中 崇裕[1]、浜根 大輔[2]、新町 正
*Takahiro TANAKA[1], Daisuke Nishio Hamane[2], Tadashi Shinmachi

1. 日鉄鉱業㈱、2. 東大・物性研
1. Nittetsu Mining Co., Ltd., 2. ISSP, Univ. of Tokyo

Michitoshiite-(Cu)（三千年鉱）は，熊本県美里町払川から発見されたGeを含む白金族鉱物（PGM）の新鉱物である．この新鉱物は，かつて資源としてのGeに注目し，九州産のGe含有鉱物を研究していた経歴を持ち，日本の鉱物学，岩石学，応用地質学の発展に大きく貢献した愛媛大学元教授の宮久三千年（1928-1983）に敬意を表して命名された．鉱物および名称はIMAの新鉱物・鉱物・命名委員会から新鉱物として承認を受けた（IMA2019-029a）．Michitoshiite-(Cu)が見出された砂白金鉱床は，単斜輝石岩体を横切る小河川から見出された（Nishio-Hamane et al., 2019）．ほぼ全ての砂白金粒子はisoferroplatinumを主体としている．Isoferroplatinumを主体とする粒子は，多様な鉱物を包有するほか，表面にコブ状のPGM集合体を伴う．このコブ状のPGM集合体は，erlichmanite，laurite，cuprorhodsite，ferrotorryweiseriteなどからなり，稀にmichitoshiite-(Cu)やshiranuiiteが伴われる．Michitoshiite-(Cu)は，コブの外側に認められることが多いが，稀にコブ内部の構成物としても産する．Michitoshiite-(Cu)がコブ内部の構成物として見られる場合は，cuprorhodsiteやferrotorryweiseriteの集合体を横切る亀裂に沿って発達する場合，また，それらと密に混合して層状にコントラストを形成する場合などがある．Cuprorhodsiteをベースとするコブは，bowieiteが変質を被ることで形成されることが判明しており（Nishio-Hamane et al., 2024），形成反応は定かでないもののferrotorryweiseriteをベースとするコブもまた同様だと推測される．ただし，isoferroplatinumの粒に含まれるbowieiteやkingstoniteなどの初生のRh鉱物にはGeが含まれていないことから，michitoshiite-(Cu)に含まれるGeは変質の際にもたらされた元素である．Michitoshiite-(Cu)は，肉眼的には不透明で金属光沢を呈し，銀灰色である．反射顕微鏡下では，褐色を帯びた淡灰色を呈し，多色性及び異方性は認められない．モース硬度は5，経験式と粉末X線回折（XRD）データから計算された密度は10.78 g/cm^3．経験式は2apfuとして計算され，$(Rh_{0.95}Pt_{0.03}Ir_{0.01})_{\Sigma 0.99}[(Cu_{0.36}Fe_{0.24})_{\Sigma 0.60}Ge_{0.41}]_{\Sigma 1.01}$である．粉末XRDパターンは，強い5つのピーク[d in Å(I/I0) hkl]，2.103 (100) 110，1.717 (3) 111，1.487 (15) 200，1.332 (6) 210， 1.216 (70) 211を示し，格子定数a=2.9771(11)Å，V=26.39(3)Å^3 (Z=1)の立方晶Pm-3m (#221)であった．先行研究から，RhCu-RhFe-RhGe系では，RhCuは面心立方（*fcc*）型構造，RhFeはCsCl型構造，RhGeはMnP型構造と，それぞれの端成分が，異なる構造を持つが，固溶体の構造については検討されていない．特に，RhFeで見られるCsCl型構造は，固溶体の組成によって無秩序な*bcc* 型構造から完全秩序なホイスラー型構造に派生する可能性がある．しかし，天然の試料は非常に限られており，これらを検討することは不可能であるため，合成実験によってこの問題に対処した．天然試料の経験式を模して合成された$Rh[(Cu_{0.35}Fe_{0.25})_{\Sigma 0.60}Ge_{0.40}]$がCsCl型構造であったことから，michitoshiite-(Cu)の結晶構造はCsCl型だと考えられる．また，合成実験において，Rh(Cu,Fe)組成の合成物が，*bcc*ベースの結晶構造ではなく，寧ろ*fcc* 構造であったことを考慮すると，Geの存在は，*bcc*ベースの結晶構造を形成するために必須であると考えられる．従って，その他の合成物質の挙動から得られた組成と結晶構造の関係から，michitoshiite-(Cu)の理想式は$Rh(Cu_{1-x}Ge_x)$ $0 < x$ 0.5となる．

キーワード：三千年鉱、ゲルマニウム、白金族鉱物、合成実験、熊本
Keywords: Michitoshiite-(Cu), Germanium, Platinum group mineral, Synthetic experiment, Kumamoto

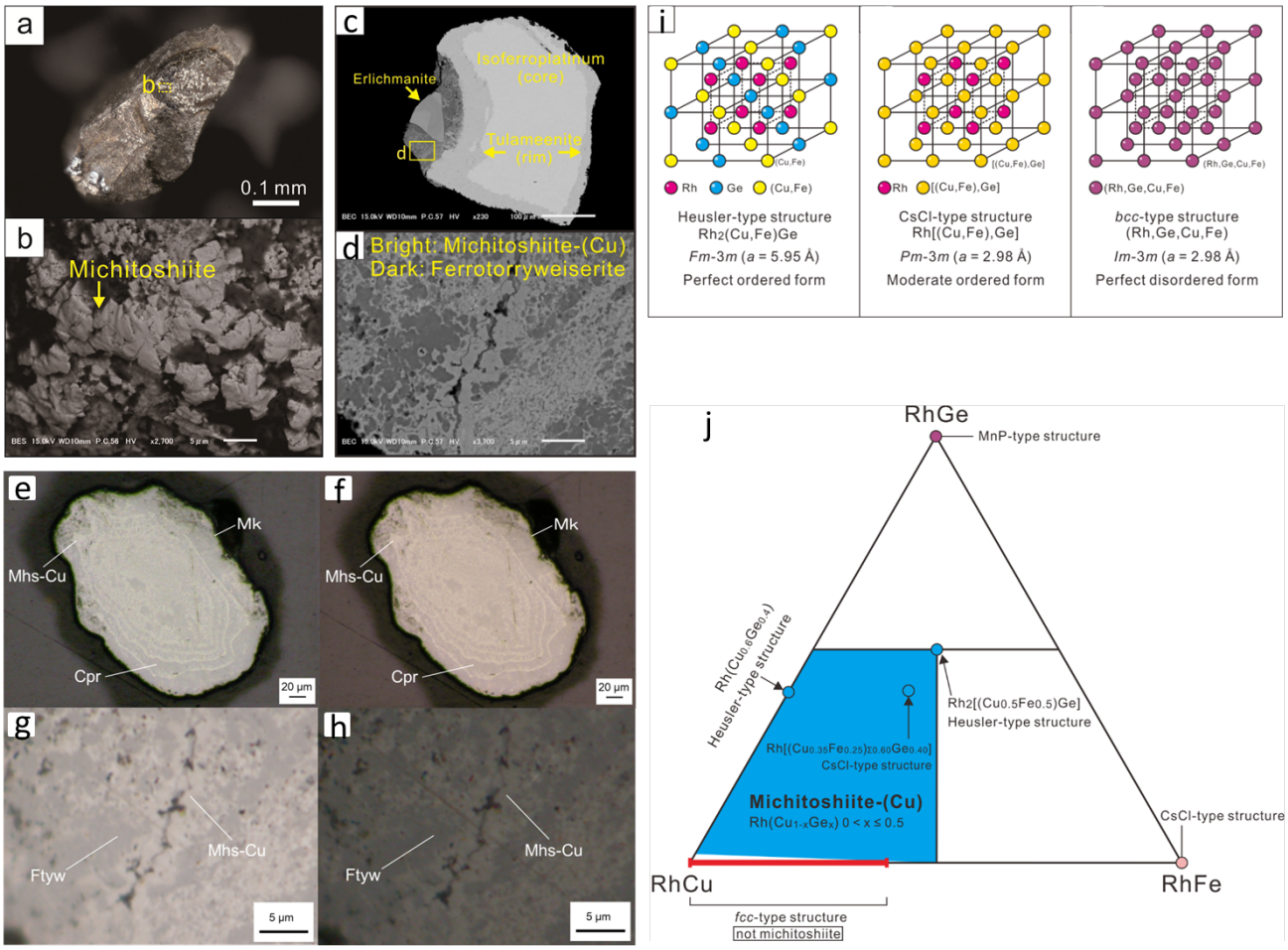


図. 三千年鉱の産状（a：写真，b：SEM像，c：BSE像，d：BSE像），三千年鉱の反射顕微鏡写真（e：オープンニコル，f：クロスニコル，g：オープンニコル，h：クロスニコル），三千年鉱の取りうる結晶構造（i），合成実験における三千年鉱の組成範囲及び固溶体の結晶構造 (j).

ローズクォーツ中の繊維状インクルージョンについて

Fibrous inclusions in rose quartz

*白勢 洋平[1]、札元 颯人[1]、井上 紗綾子[2]
*Yohei SHIROSE[1], Hayato Fudamoto[1], Sayako Inoue[2]

1. 愛媛大学・理、2. 愛媛大学・GRC
1. Ehime Univ. Sci., 2. Ehime Univ. GRC

【はじめに】

ローズクォーツ（rose quartz; ばら石英）は淡い桃色を呈した石英であり，ペグマタイト等から塊状で産する。ローズクォーツの呈色の原因は，石英内部の幅1 μm以下の繊維状インクルージョンによるものとされている（e.g, Goreva and Rossman, 2001）。この繊維状インクルージョンについてはローズクォーツをフッ酸で溶解させ抽出したものを分析に用いており，TEM観察からデュモルチ石の2倍の長さの*a*軸，*b*軸の超構造を持つ鉱物であることが報告されている（Ma et al., 2002）。これらの先行研究では石英を溶解させ抽出することでインクルージョンの鉱物学的な性質を明らかにしてきたが，本研究では石英内でインクルージョンがどのような組織を有するか明らかにすることで，その成因や呈色への影響を解明することを目的とする。

本研究では，福岡県福吉ペグマタイト産のローズクォーツについて薄片を作成し，SEM-EDSを用いて石英内の繊維状インクルージョンの特徴と分布について検討を行った。またSEM観察で見出された繊維状インクルージョンについてFIBを用いて直接薄膜試料を作成し，TEM/STEM-EDSを用いて詳細な分析を行った。

【試料・実験手法】

福岡県糸島市福吉地域には糸島花崗閃緑岩が広く分布しており，ペグマタイトが多く分布する。福吉ペグマタイトは電気石や紅柱石の産出が特徴的な花崗岩質ペグマタイトで，周囲には泥質片岩が分布している。現在露頭は確認できないが塊状のローズクォーツの転石が多く存在する。ローズクォーツ及び同産地の暗桃色，黒色，無色の石英についても観察を行った。観察，分析にはJEOL製走査型電子顕微鏡JSM-6510LV及びJEOL製走査透過型電子顕微鏡JEM-2100Fを使用した。

【結果・考察】

SEM-EDS観察の結果，桃色のローズクォーツ中には幅0.1-0.5 μm，長さ3-30 μm程度の繊維状インクルージョンが確認できた。微細なため定性的ではあるがアルミニウムと微量の鉄，チタンの含有が確認でき，先行研究で報告されているデュモルチ石様鉱物と考えられる。このデュモルチ石様繊維状インクルージョンは，伸長方向が確認できたものではほとんどが同一方向に伸長している。また，桃色のローズクォーツ及び暗桃色の石英においてはデュモルチ石様繊維状インクルージョンがいずれも200 ×500 μmの領域中に30個程度含まれていることが確認できた。一方で同産地の黒色や無色の石英中にはこのようなデュモルチ石様繊維状インクルージョンはほとんど確認できなかった。

桃色のローズクォーツ中の繊維状インクルージョンについて，STEM-EDSを用いて求めた化学組成は $(Al_{0.87}Ti_{0.09}Fe_{0.03})Al_6(Si_{2.99}Al_{0.01})O_{12}(BO_3)$となり，デュモルチ石と同様の組成となり微量のチタン及び鉄を含むことが特徴的である。長軸方向（*c*軸方向）から観察した形態は直径200 nm程度の多角柱状で，(010)面や(120)面などの結晶面が確認できた。[001]方向からの電子回折パターンについては，デュモルチ石で指数を付けることができよく一致する。この場合の格子定数はa = 11.80 Å, b = 20.57 Å程度となる。しかし，[001]方向からの電子回折像では超構造の有無を判別できず（Ma et al., 2002），[001]方向から15-20˚程度傾斜させて得られた電子回折パターンでは，デュモルチ石の110反射の2倍の周期を持つ20.45 Åのスポットが確認できたため，本産地の繊維状インクルージョンについても先行研究と同様の超構造を持つデュモルチ石様鉱物である可能性が高い。

TEM観察では石英との明瞭な方位の関係性は確認できなかったが，繊維状インクルージョンは石英の[01-1]方向に近い方向に伸長している。また，本研究で繊維状インクルージョンの色は確認できていない

が，Fe/(Fe + Ti)の値が高いと青色，低いと桃色を呈することが報告されており（Alexanders et al., 1986），本研究のデュモルチ石様鉱物も鉄よりもチタンを多く含むため桃色に近い呈色を示すと思われる。

キーワード：ばら石英、デュモルチ石、デュモルチ石様鉱物、ペグマタイト、福吉
Keywords: rose quartz, dumortierite, dumortierite-like mineral, pegmatite, Fukuyoshi

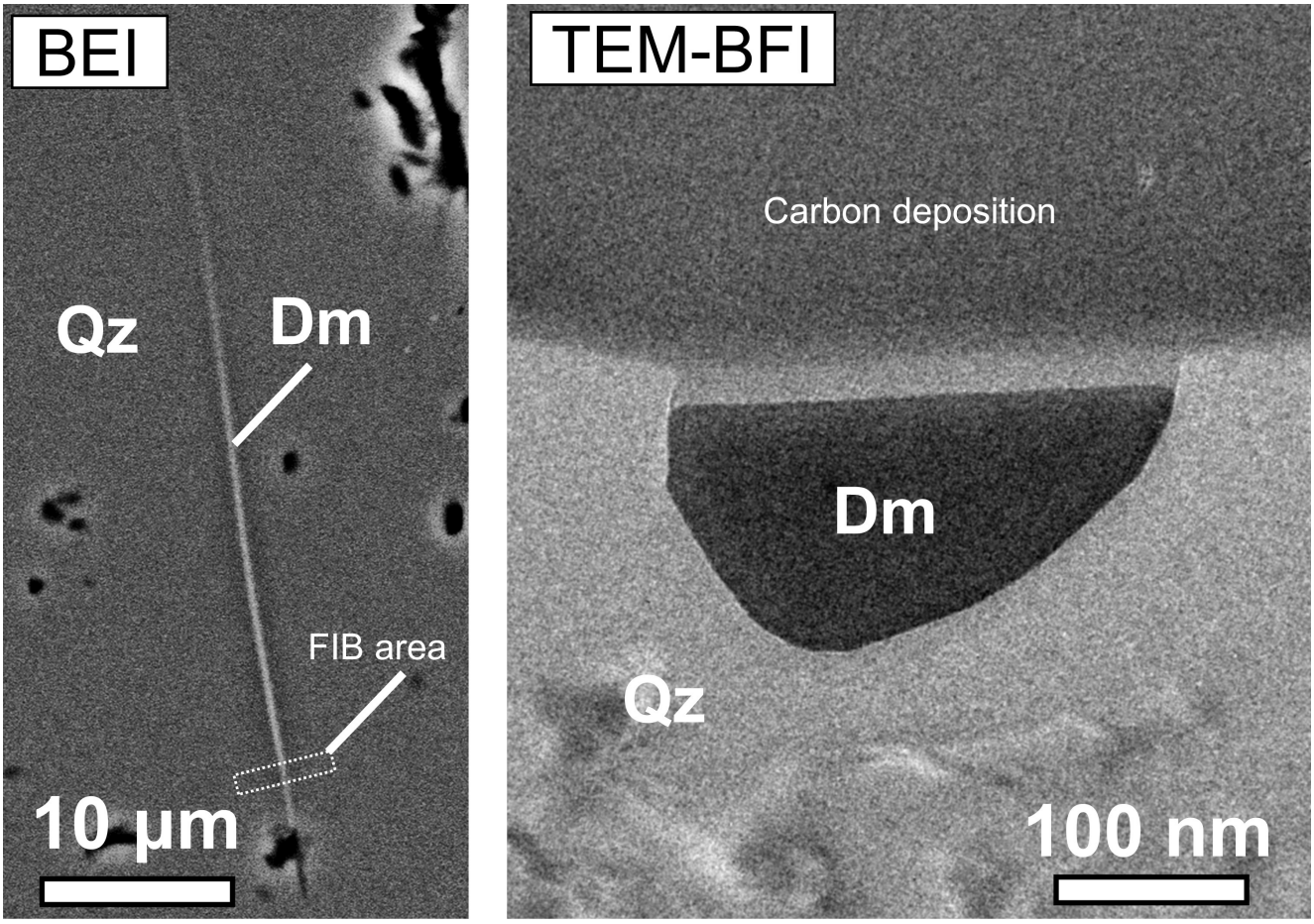


Fig. SEM-BEI and TEM-BFI of dumortierite-like fibrous inclusion (Dm) in rose quartz (Qz)

愛媛県魚島の片麻岩中から産するローズクォーツについて

Rose quartz in gneisses from Uoshima Island, Ehime Prefecture

*白勢 洋平[1]、坂井 翔真[1]
*Yohei SHIROSE[1], Shoma Sakai[1]

1. 愛媛大学・理
1. Ehime Univ. Sci.

【はじめに】

愛媛県上島町魚島には領家変成帯の片麻岩類が分布している。泥質片麻岩及び珪質片麻岩中にローズクォーツ（rose quartz; ばら石英）が広く分布することを新たに見出したので，その産状及び周囲の片麻岩類の鉱物学的な特徴について報告を行う。ローズクォーツは淡い桃色を帯びた石英で，本邦では福島県石川地方や福岡県福吉などのペグマタイト中からの産出がよく知られているが，本産地のような変成岩中からの産出報告はほとんどされていない。また，ローズクォーツの持つ特徴としてデュモルチ石様鉱物をインクルージョンとして含むことが報告されており(e.g., Goreva et al., 2001: Ma et al., 2002)，変成岩中でのホウ素の挙動を捉えるうえでもこのような変成岩中でのローズクォーツの産状は重要な手がかりとなる。

【地質・産状】

瀬戸内海中央部に位置する愛媛県上島町魚島の地質は，泥質や珪質の片麻岩類及び深成岩類から構成されている（濡木，1995; 瀬尾ほか，1984）。魚島南西部の泥質片麻岩中には長さ2 cm程度の珪線石の柱状結晶が産出することが特徴的である。ローズクォーツは泥質，珪質片麻岩中に5-30 cm程度のレンズ状，脈状またはブーディン様構造を持ち産出し，珪質片麻岩よりも泥質片麻岩中で多産する。ローズクォーツと泥質片麻岩の境には細粒な桃色の石榴石が顕著に確認できるが，珪質片麻岩との境には確認できない。

【実験手法】

組織観察，化学分析，鉱物同定にはJEOL製走査型電子顕微鏡JSM-6510LV及びRIGAKU製粉末X線回折装置Ultima IVを用いた。

【結果・考察】

泥質片麻岩中のローズクォーツは粒径が1 cm以下の石英の塊状集合からなり，桃色の呈色には濃淡がある。周囲の泥質片麻岩は主に鉄礬石榴石，石英，黒雲母，斜長石を主にし，チタン鉄鉱（-パイロファン石），白雲母，緑泥石，フッ素燐灰石を含む。ローズクォーツと泥質片麻岩の境界部には，黒雲母をほとんど含まない鉄礬柘榴石と斜長石を主とする優白質部が存在する。鉄礬柘榴石はマンガンを多く含み（0.98-1.23 *apfu*），石英などの包有物を多く含むコアと一切含まないリムを持つ。明瞭な組成累帯構造は持たないが，リムの縁辺部ではわずかにマグネシウム，カルシウムが減少し，マンガン，鉄が増加する逆累帯構造を示す。

珪質片麻岩は幅数cmの珪質層ときわめて薄い泥質層とが互層をなしており，石英を主とし，黒雲母，斜長石，白雲母，緑泥石を含む。脈-レンズ状のローズクォーツは層構造に概ね調和的ではあるが，互層を切るような構造を持つ。粒径1 cm以下の石英の集合からなり，桃色の呈色には濃淡がある。

泥質片麻岩中のローズクォーツには，長さ5-30 μm，幅0.5 μm程でアルミニウムと微量のマグネシウム，鉄，チタンを含むデュモルチ石様インクルージョンが多く含まれる。このデュモルチ石様インクルージョンは石英粒子ごとにいずれも一定方向に伸長している。

泥質片麻岩中の鉄礬石榴石と黒雲母について石榴石-黒雲母地質温度計を用いて変成温度を求めたところ530-570℃となった。珪線石が形成されるような昇温期の石榴石の化学組成は失われており，求められた温度は後退変成時の変成温度を示すと考えられる。ローズクォーツは泥質片麻岩中の優白質部の形成と関連するものの，珪質片麻岩中の縞状構造を切るように存在するため，広域変成作用の後に形成されたと考えられる。ローズクォーツ中のデュモルチ石様鉱物の存在から，形成にはホウ素を含む流体が関わっており，変成岩中で電気石の分解などで生じた流体，あるいは泥質片麻岩中には非調和に貫入する電気石を含む花崗岩質ペグ

マタイト脈が存在することから，貫入する花崗岩類を起源とする流体に関連して形成されたと考えられる。

キーワード：ばら石英、片麻岩、デュモルチ石様鉱物、魚島、ホウ素
Keywords: rose quartz, gneiss, dumortierite-like mineral, Uoshima Island, boron

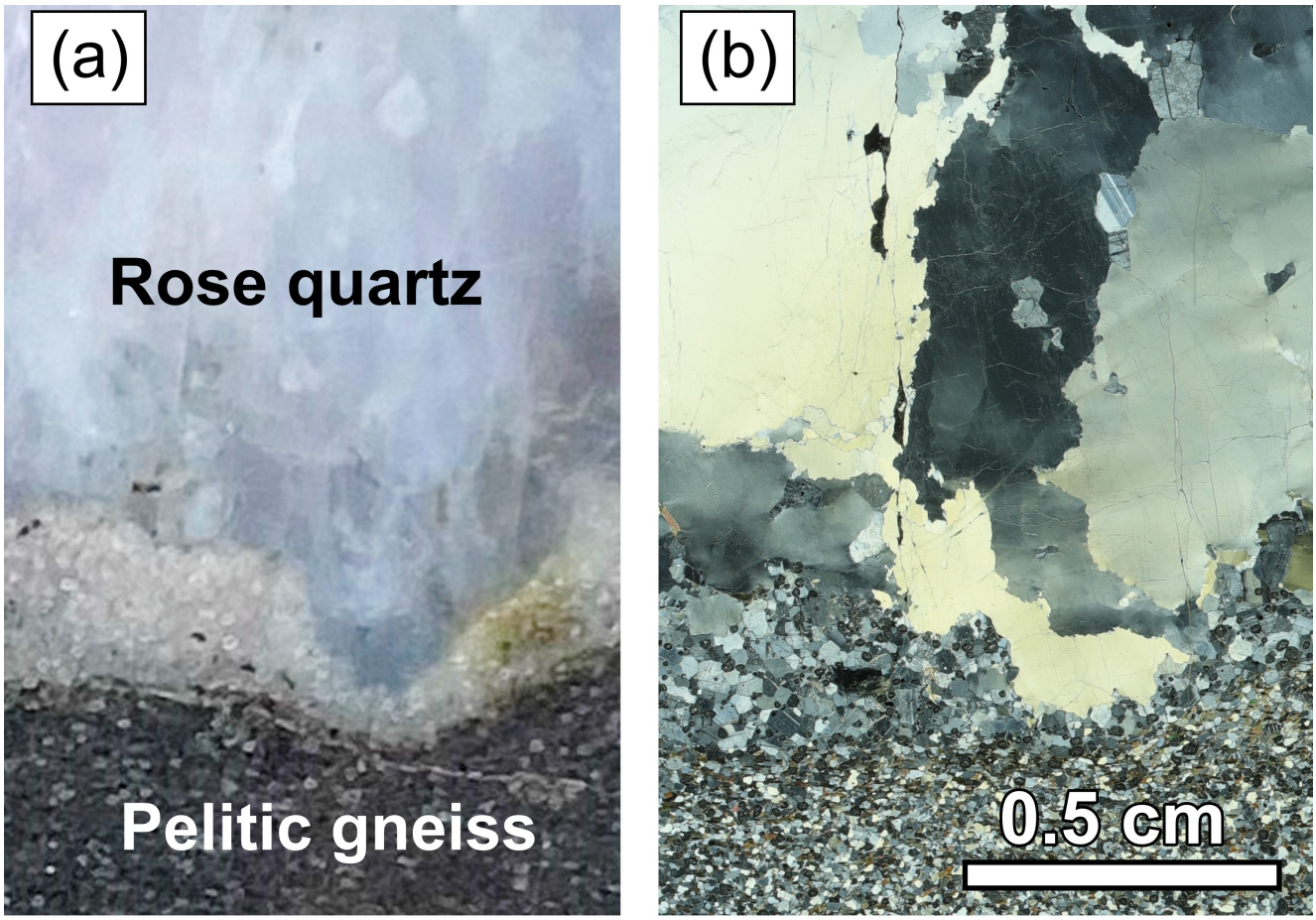


Fig. (a) Photograph and (b) crossed polarized photomicrograph of rose quartz in a gneiss from Uoshima Island.

兵庫県琢美鉱山から産する二次砒酸塩鉱物

Secondary arsenate minerals from the Takumi Mine, Hyogo Prefecture, Japan

*白勢 洋平[1]、上世 莉可子[1]、西田 勝一、藤原 由輝
*Yohei SHIROSE[1], Riakako Kamise[1], Katsuichi Nishida, Yoshiteru Fujiwara

1. 愛媛大学・理
1. Ehime Univ. Sci.

【はじめに】

兵庫県神河町に位置する琢美鉱山では，セリサイトや石英に伴って硫砒鉄鉱などの硫化鉱物が産出する。硫化鉱物に伴い，二次的な砒酸塩鉱物，硫酸塩鉱物，炭酸塩鉱物が産出するため，その産状や鉱物学的な特徴を報告する。特に，二次砒酸塩鉱物であるルーズベルト石（rooseveltite）については本邦からは初の産出報告となる。

ルーズベルト石は$BiAsO_4$の理想化学組成を持ち，錫石に伴うものや，輝蒼鉛鉱やビスマス二次鉱物に伴う酸化帯からの産出が報告されている（Herzenberg, 1946; Bedlivy et al., 1972）。モナズ石グループに属しており，多形として灰重石グループに属する正方ルーズベルト石（tetrarooseveltite）が存在する（Sejkora & Řídkošil, 1994）。

【産状】

琢美鉱山では，古くは銅を，大正から昭和初期にかけては砒素を目的として稼行されていた（橋本・松内，2011）。鉱床は，上部白亜系峰山層への花崗閃緑岩の貫入に伴い胚胎した熱水鉱脈鉱床であり，断層破砕帯中の粘土脈中に硫化鉱を伴う。粘土脈の大部分は細粒なセリサイトであり，桃色のデュモルチ石や繊維状の電気石，自形の硫砒鉄鉱，黄鉄鉱，鋭錐石を伴う（白勢ら，2023）。

硫化鉱は，硫砒鉄鉱，黄鉄鉱，黄銅鉱，閃亜鉛鉱，方鉛鉱，輝蒼鉛鉱，未同定ビスマス鉱物（コベル鉱様鉱物など），硫砒銅鉱，安四面銅鉱，銅藍などからなる。二次鉱物としてはスコロド石が最も多く産出し，孔雀石，ポスンジャク石，亜砒藍鉄鉱，ルーズベルト石が確認できた。

【実験手法】

観察，分析にはJEOL製走査型電子顕微鏡JSM-6510LV及びRIGAKU製X線回折装置RINT RAPID IIを用いた。

【結果・考察】

硫砒鉄鉱を伴う試料では，多くのものに淡黄色膜状～小球状の二次的に形成されたスコロド石が確認できた。また，石英に富む部分には裂罅に1 mm程度の亜砒藍鉄鉱の放射状集合が産する。亜砒藍鉄鉱は，水色，藍色，緑灰色でガラス光沢，自形の板状～針状結晶が放射状に集合したもので，その化学組成は亜鉛を0.26-1.03 (*apfu*)，マンガンを0.06-0.36 (*apfu*)含むことが特徴的である。孔雀石やポスンジャク石は細粒な無色の繊維状電気石に密接に伴って産出し，電気石の繊維状結晶を覆うように産出するものもある。

ルーズベルト石は，塊状の硫砒鉄鉱中に含まれる長柱状の輝蒼鉛鉱の結晶表面や結晶内の割れ目などに膜状，脈状，小球状の集合として産出する。小球状集合は直径50 μm程度，無色，金剛光沢を持つ。コロフォーム組織を有し，きわめて細粒な結晶の集合からなり，最表面のみがやや粗粒な1 μm程度の板状結晶の集合からなっている。まれに集合内部にカオリン鉱物を含むものや，スコロド石とセリサイトに覆われているものもある。SEM-EDSを用いて求めたルーズベルト石の化学組成は$(Bi^{3+}_{0.96}Fe^{3+}_{0.03})(As^{5+}_{0.93}Sb^{5+}_{0.07})O_4$となったが，分析時の質量濃度の合計値がやや低い。これは前述のコロフォーム組織内部が疎になっている，または含水非晶質物質を多く含むためと考えられる。ルーズベルト石のX線回折パターンはICDD PDF#04-007-6816のデータによく一致し，格子定数を求めたところ，a = 6.883(8)，b = 7.155(9)，c = 6.744(7) Å，β = 104.9(1)°，V = 321.0(5) Å^{3}となった。琢美鉱山産のルーズベルト石には，ボリビア及び

アルゼンチンから産したルーズベルト石（Herzenberg, 1946; Bedlivy et al., 1972）と異なり微量の鉄とアンチモンが特徴的に含まれているが，琢美鉱山では初生的な輝蒼鉛鉱の変質によって二次的に形成されており，輝蒼鉛鉱中の微量元素と対応している。

キーワード：ルーズベルト石、亜砒藍鉄鉱、スコロド石、輝蒼鉛鉱、琢美鉱山
Keywords: rooseveltite, parasymplesite, scorodite, bismuthinite, Takumi Mine

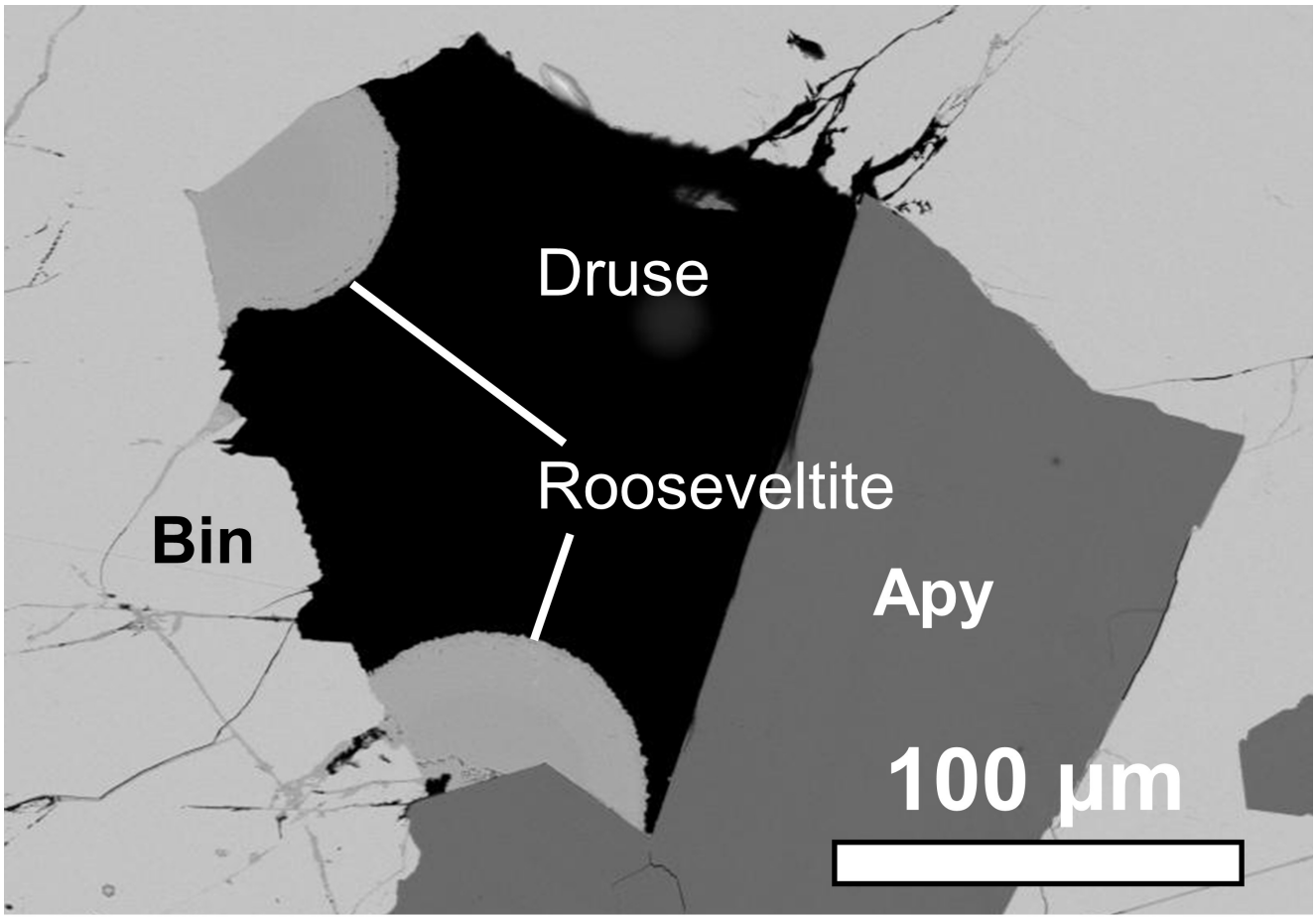


Fig. BEI of rooseveltite with bismuthinite (Bin) and arsenopyrite (Apy).

兵庫県新井鉱山産ラウテンタール石およびローウォルフ石の鉱物学的性質

Mineralogical properties of lautenthalite and wroewolfeite from the Nii mine, Hyogo Prefecture, Japan

*大西 政之、下林 典正[1]、浜根 大輔[2]、篠田 圭司[3]、久野 武
*Masayuki Ohnishi, Norimasa Shimobayashi[1], Daisuke Nishio-Hamane[2], Keiji Shinoda[3], Takeshi Hisano

1. 京大・院理、2. 東大・物性研、3. 大阪公大・院理
1. Sci., Kyoto Univ., 2. ISSP, Univ. of Tokyo, 3. Sci., Osaka Metro. Univ.

1. はじめに

ラウテンタール石はMedenbach and Gebert (1993) によってドイツLautenthalからデビル石のPb置換体として記載された鉱物で，単斜晶系，$P2_1/c$，$PbCu_4(SO_4)_2(OH)_6{\cdot}3H_2O$の理想式をもつ．一方，ローウォルフ石はDunn *et al.*(1975) によって米国Loudville鉛鉱山から$Cu_4SO_4(OH)_6{\cdot}2H_2O$の理想式をもつラング石の多形として報告された．本鉱物の結晶構造はHawthorne and Groat (1985) によって解析され，単斜晶系，*Pc*であることが決定されている．ラウテンタール石，ローウォルフ石ともに希産であり，結晶学的データおよび化学組成を含む鉱物学的性質の報告例はほとんどない．日本では山田・平間 (2000) によって秋田県亀山盛鉱山から両鉱物が報告されている．また，高田・久野 (2008) によって兵庫県新井鉱山産ローウォルフ石の結晶形態が報告されているが，鉱物学的性質の詳細は未報告である．今回，演者の一人 (久野) が新井鉱山で採集した鉱物を検討している過程において，ローウォルフ石と密接に共存するラウテンタール石を見出したので，両鉱物の鉱物学的性質をまとめて報告する．

2. 産状および物理的性質

新井鉱山産ラウテンタール石およびローウォルフ石は，いずれもズリにおいて黄銅鉱，方鉛鉱，閃亜鉛鉱などの鉱石鉱物を含む石英の割れ目に産出する．

ラウテンタール石は長さ0.5 mm，厚さ0.1 mm以下の板状結晶で，常にローウォルフ石にオーバーグロースしている (Fig. 1a, b)．産出は希．肉眼的には青緑色透明でガラス光沢を呈し，鏡下では淡青～青緑色の強い多色性を示す．

ローウォルフ石は長さ1 mm，厚さ0.1 mm以下の板状結晶をなし，ラング石，ブロシャン銅鉱，白鉛鉱，ラウテンタール石などを伴う (Fig. 1a, b, c)．肉眼的には青色透明でガラス光沢を呈し，鏡下では淡青～青色のやや強い多色性を示す．光学的には二軸性負で，屈折率は
α＝1.641(2)，β＝1.691(2)，γ＝1.701(2)，$2V$(calc.)＝47.0˚．ローウォルフ石は大気中で脱水してブロシャン銅鉱に変化することがある．

3. 粉末X線回折

ガンドルフィカメラ (直径114.6 mm，40 kV，20 mA，グラファイトモノクロメーターで単色化したCu$K\alpha$線) で測定した両鉱物の主な粉末X線回折線 [d Å (I) hkl] と最小二乗法で精密化した格子定数は次の通りである．

ラウテンタール石：5.14 (100) 400，3.40 (81) -604，4.53 (69) 310，2.63 (47) -517，2.21 (36) 019，2.26 (33) 308，1.713 (31) -7.1.12；a＝21.557(6)，b＝6.019(1)，c＝22.467(5) Å，β＝108.06(3)˚

ローウォルフ石：7.15 (100) 002，3.58 (54) 004，2.63 (21) 022，2.43 (16) 023，2.01 (15) -215，2.77 (12) -114，2.38 (12) -213；a＝6.042(8)，b＝5.637(6)，c＝14.45(2) Å，β＝93.5(1)˚

4. 化学組成

BSE像の観察では，ラウテンタール石およびローウォルフ石それぞれの領域内で明瞭な組成変化は見られなかった (Fig. 1d)．化学分析はWDS (日本電子JXA-8105，15 kV，1 nA，3 μm) で測定した．水はストイキオメトリーにより求めた．代表的な分析値と実験式は次の通りである．

ラウテンタール石：CuO 39.75，PbO 27.35，ZnO 1.14，CaO 0.40，MnO 0.19，SO_3 18.84，H_2O (calc.) 14.20，Total 101.86 wt%；$(Pb_{0.97}Ca_{0.06})_{1.03}(Cu_{3.97}Zn_{0.11}Mn_{0.02})_{4.10}(SO_4)_{1.87}(OH)_{6.52}\cdot 3H_2O$ (総カチオン数＝7)

ローウォルフ石：CuO 15.65，ZnO 0.69，CaO 0.18，FeO 0.20，PbO 0.57，MnO 0.10，SO_3 15.65，H_2O (calc.) 18.51，Total 99.48 wt%；$(Cu_{3.94}Zn_{0.04}Ca_{0.02}Fe_{0.01}Pb_{0.01}Mn_{0.01})_{4.04}(SO_4)_{0.96}(OH)_{6.14}\cdot 2H_2O$ (総カチオン数＝5)

これまでに報告された両鉱物の化学組成は，いずれも純粋で主成分以外の元素を含まない (Dunn *et al.*, 1975；Medenbach and Gebert, 1993；山田・平間，2000) が，新井鉱山産の両鉱物には微量ながらZn，Ca，Mnなどが含まれている．

キーワード：ラウテンタール石、ローウォルフ石、硫酸塩、新井鉱山
Keywords: Lautenthalite, Wroewolfeite, Sulfate, Nii mine

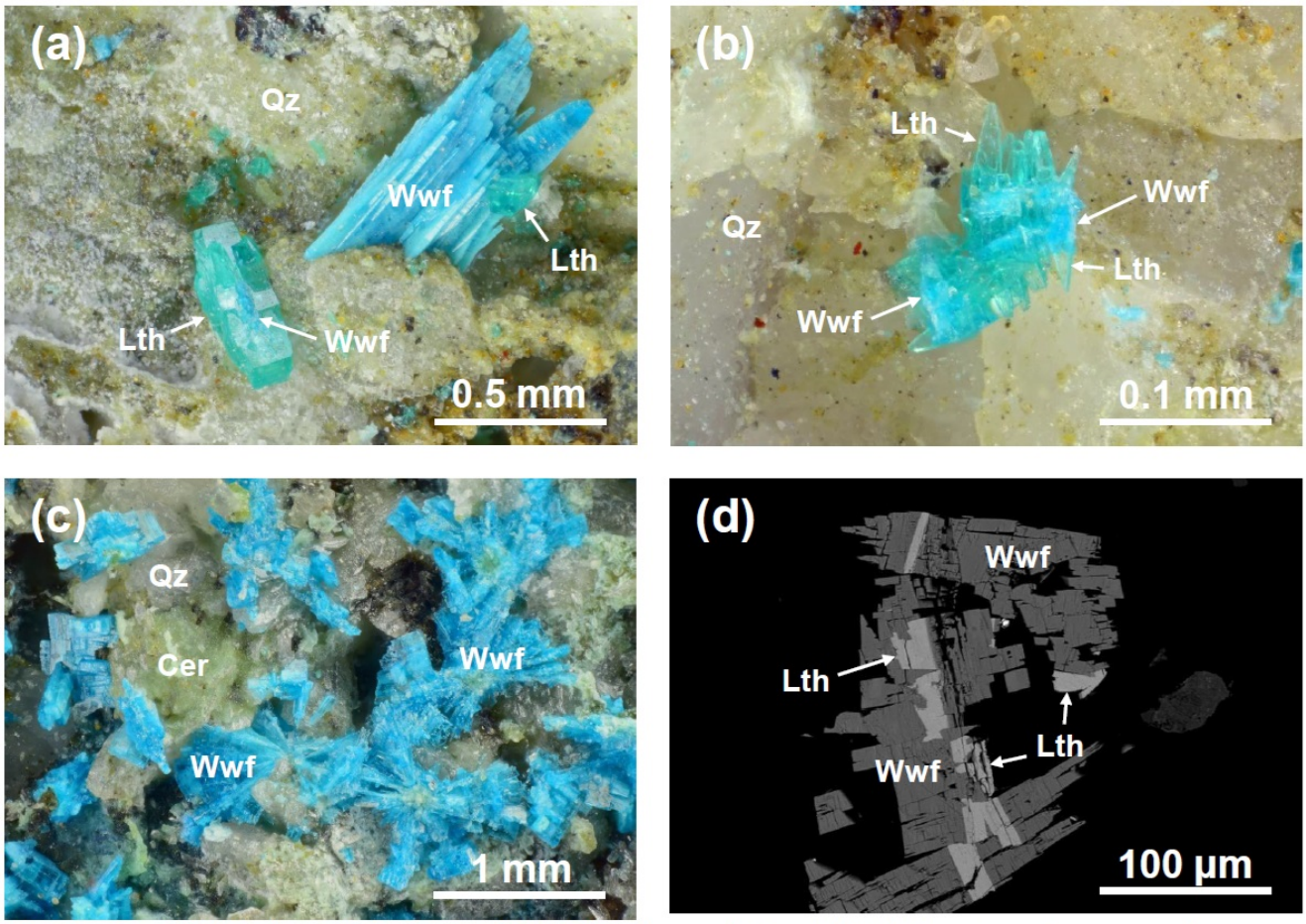


Figure 1. (a) and (b) Photomicrographs of aggregates of lautenthalite and wroewolfeite crystals. (c) A photomicrograph of aggregates of wroewolfeite crystals. (d) A back-scattered electron image of a polished section of lautenthalite and wroewolfeite. Abbreviations: Lth, lautenthalite; Wwf, wroewolfeite; Qz, quartz; Cer, cerussite.

糸魚川市橋立の曹長岩中のSrに富む燐灰石の再検討

A re-examination of Sr-rich apatite from Itoigawa, Niigata Prefecture, Japan

*上原 誠一郎[1]、門馬 綱一[2]、大西 政之、大角 駿介、大木 良弥、岡 紘希[3]
*Seiichiro UEHARA[1], Koichi MONMA[2], Masayuki OHNISHI, Shunsuke OHSUMI, Yoshiya OHKI, Hiroki OKA[3]

1. 九州大・博物館、2. 国立科博、3. 応用地質（株）
1. Kyushu Univ. Museum, 2. Nat’l. Mus. Nat. Sci., 3. OYO Corp.

1．はじめに

青海川（新潟県糸魚川市橋立）の曹長岩中からストロンチウムを主成分に含む青海石（Komatsu *et al.*, 1973), 奴奈川石（ストロンチウム直方ホアキン石），（Chihara *et al.*, 1974），ストロンチウム燐灰石（酒井・赤井，1988）が報告されている．その後，宮島らは糸魚川地域のひすい輝石岩中から多数の新鉱物（糸魚川石，蓮華石，松原石），希産鉱物（タウソン石，輝葉石，ストロンチウム燐灰石（stronadelphite, $Sr_5(PO_4)_3F$），ストロナルシ石，ストロンチウムトムソン沸石，スローソン石）を報告した（宮島ら，1998; Miyajima, 2017 他）．また，ロジン岩他から新潟石，ストロンチウム緑簾石，ストロンチアン石，“margaritenのSr置換体”（Miyajima *et al.*, 1999; 宮島ら，2007）を記載した．現在のストロンチウム燐灰石（stronadelphite）は2008年に承認され，2010年にPekov らにより報告された燐灰石族の鉱物で理想化学式は$Sr_5(PO_4)_3F$とされている．模式地はロシア キロフスキー燐灰石鉱山で，フッ素燐灰石のSr置換体の新鉱物として記載された．我々は青海川に産する曹長岩の構成鉱物の調査中にストロンチウム燐灰石様鉱物を確認したのでその産状と鉱物学的性質の再検討を行った。

2．試料および実験

試料は青海川転石の曹長岩中の白色鉱物で，ペクトライト，白色の青海石，滑石様鉱物，スティーブン石様鉱物，方解石，風化した曹長石様鉱物，およびストロンチウム燐灰石様鉱物を確認した．ストロンチウム燐灰石様鉱物の結晶集合は双眼実体顕微鏡下で白色～淡黄色繊維状に見え，濃青色の角閃石を伴う曹長岩中に産する．X線回折パターンは微小部X線回折装置（Rigaku RINT RAPID Ⅱ），化学組成及び組織観察は走査電子顕微鏡（JEOL JSM-7001F, Oxford EDS）とEPMA（JEOL JXA-8530F）を用いて検討した。また，単結晶構造解析は準備中で，年会で発表予定である．

3．結果

ストロンチウム燐灰石様鉱物のX線回折パターンはPDF 01-083-0632 stronadelphite（合成物）の値とほぼ一致する．8強線のd（Å）値（強度）は
2.916（100），2.807（36），1.823（23），1.931（22），3.184（19），3.342（19），3.643（18），2.022（16）で，得られた格子定数はa = 9.7265 (8)，c = 7.2903 (7)である．格子定数の値はPDFカードのstronadelphite のa = 9.7156，c = 7.2810に比べa軸，c軸ともに僅かに大きい．EPMAを用いて化学組成の検討を行った．陽イオン電荷総数を25，F + OH = 1としてH_2Oを計算した．SrO 67.54，CaO 1.74，P_2O_5 27.13，F 1.22，H_2O 2.32，-O = F -0.51，Total 99.44 wt% で，実験式は$(Sr_{4.84}\ Ca_{0.22})_{\Sigma 5.06}P_{2.87}O_{12}(F_{0.32}\ OH_{0.68})_{\Sigma 1.00}$ が得られた．この結果，（OH)＞Fでstronadelphiteの OH置換体で“hydroxylstronadelphite”に相当する．現在，新鉱物として申請準備中である．

今回検討した曹長岩は酒井・赤井（1988）の記載と同じく非常に破砕された組織を持つ特徴があり，偏光顕微鏡下では微細な包有物を含む曹長石を切るように比較的包有物の少ない透明な曹長石が脈状にある．SEM-EDSを用いて組織観察を行ったところ破砕されたペクトライトが散在し，角閃石とストロンチウム燐灰石は一部変形と破砕が確認された（Fig. 1）．また，脈状に産する曹長石はalbite端成分をもち，微細な包有物を含む曹長石はAb90An10程度のCaを含み，内部に多数の1 μm以下から10 μmのソーダ沸石，含Ba鉱物

（1 μm以下で同定不可）などを含み曹長岩化の履歴を残していた.

引用文献

Komatsu *et al*（1973）MJ **7** 298-301
Chihara *et al*（1974）MJ **7** 395-399
酒井基・赤井純治（1988）三鉱要旨A-16　P16
Pekov *et al*（2010）Eur. J. Min. **22** 869–874
宮島宏ら（1988）鉱要p175
宮島宏ら（2007）鉱要K8-05
Miyajima, H（2017）JMPS **112** 227-236
Miyajima *et al*（1999）Min. Mag. **63** 906–916

キーワード：ストロンチウム燐灰石様鉱物、ストロンチウム燐灰石のOH置換体、新鉱物、新潟県糸魚川市青海川、曹長岩
Keywords: Sr-apatite like mineral, OH-analog of stronadelphite, New Mineral, Omi-gawa River, Itoigawa, Niigata Prefecture, Albitite

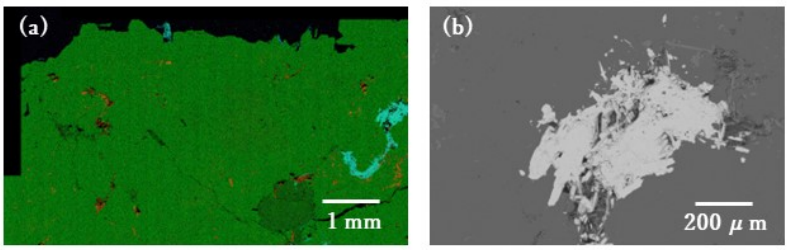


Fig. 1 SEM images of Sr-apatite (‘hydroxylstronadelphite’) in albitite from the Omi-gawa River, Itoigawa, Niigata Prefecture.
(a) Large area RGB X-ray mapping image (R:Ca*Kα*, G:Sr*Lα*, B:P*Kα*). Red grains are pectolite, blue grains are Sr-apatite.
(b) BSE image of Sr-apatite.

宮崎県西臼杵郡日之影町小河内産の水酸コンドロ石について

Hydroxylchondrodite from Ogouchi ,Hinokage, Nisiusuki,Miyazaki Prefecture,Japan

*岡田 敏朗[1]、上原 誠一郎[2]、行則 功[3]、白勢 洋平[4]
*Toshiro Okada[1], Seiichiro Uehara[2], Isao Yukinori[3], Yohei Shirose[4]

1. 福岡市立香椎第2中学校、2. 九大・総合博物館、3. 福岡石の会、4. 愛媛大・理工
1. Kashii 2 JHS, 2. Kyushu Univ, 3. Fukuoka Stc, 4. Ehime Univ

１．はじめに

水酸コンドロ石（hydroxylchondrodite）は，ロシアのPekov *et al.*（2011）によって発見されたマグネシウムのケイ酸塩鉱物でヒューム石グループに属する．化学組成はコンドロ石$Mg_5(SiO_4)_2F_2$のFをOHで置換した$Mg_5(SiO_4)_2(OH)_2$で，結晶系は単斜晶系（空間群$P2_1/c$）に属する．

宮崎県西臼杵郡日之影町北部にはスカルン鉱物を伴う金属鉱床があり，見立鉱山など，かつて多数が採掘された（足立，1996）．その中で小河内・千軒平地区には，岩戸銅山（小河内鉱山）・千軒平鉱山があり，ベスブ石（宮久・足立，1977），フォンセン石（皆川・足立，1990），ハルス石（大越ら，2012）等が報告されている．現在，我々はこの地区の鉱物調査を行っており，その中でスカルン鉱物を伴う小規模な結晶質石灰岩露頭近くから塊状ないし片状の白色の透輝石，褐色ないし白色の金雲母から成る幅1.5 m程度の露頭を確認しその構成鉱物を調査した．その中で，日本新産となる水酸コンドロ石を同定したので，随伴鉱物と共に鉱物学的性質を報告する．

２．試料および実験

試料は2023年～2024年の現地調査によって得た．化学組成は走査電子顕微鏡（JEOL JSM-7001F，Oxford EDS）とEPMA（JEOL JXA-8530F），X線回折パターンはXRD（Rigaku Ultima IV，RINT RAPID II）を用いて検討した．

３．結果

水酸コンドロ石は，主に透輝石からなる白色塊状岩石中に縞状に配列する金雲母に伴われ（図1a，b），色は橙色から赤橙色で，褐色の金雲母中に径1-4 cmの粒状集合や白色の透輝石と共に数mm大の粒状として産出する．粗粒の金雲母結晶（2 cm程度）が濃集する部分に水酸コンドロ石が多く含まれる傾向があった．水酸コンドロ石と共生する透輝石は0.1-0.3 mmであるが，図1aの淡紫色部は非常に微細な透輝石，クリノクロア，金雲母からなる．薄片と反射電子像観察から，金雲母に伴い水酸コンドロ石および灰電気石がある(図1c，d)．そのほかの随伴鉱物として木下雲母，タルク，フッ素パーガス閃石，チタン石，ジルコノ石やフッ素燐灰石を確認した．また，この岩石中に1-2 cmの晶洞があり，無色透明の0.1 mm程度の単柱状の透輝石，灰菱沸石，灰レビ沸石，ベスブ石結晶も観察できた．小河内産の水酸コンドロ石のX線回折パターンは原記載のものとよく一致し，格子定数はa＝7.8525（11），b＝4.7245（7），c＝10.2586（14）Å，β＝109.113˚（6），V＝359.61（9）$Å^3$となり原記載の値に近い．また，EPMAによる実験式は$(Mg_{4.69}Fe_{0.20}Ti_{0.04}Ca_{0.01})_{\Sigma 4.94}Si_{2.01}O_8(OH_{1.37}F_{0.63})_{\Sigma 2.00}$が得られた．OH/(F＋OH)＝0.685で，OHがFより卓越しており水酸コンドロ石となる．また，原産地標本と化学組成を比較すると小河内産水酸コンドロ石はFeO＝4.23wt%，原産地は1.51wt%で，Feが多いが，Mg値（Mg/（Mg+Fe+Ti+Ca））で見ると小河内産は0.949，原産地は0.922，Ti値（Ti/（Mg+Fe+Ti+Ca））で見ると小河内産は0.008，原産地は0.063となり原産地のものはTiを多く含み，小河内産がより端成分に近い．また，本産地の透輝石の化学組成は，FeO = 0.9～1.5wt%でFeが非常に少ない特徴があり，これは金雲母（粗粒結晶でFeO=1wt%程度），クリノクロア（FeO=1wt%以下）も同様である．また，粗粒金雲母の化学組成は木下雲母成分を固溶した組成累帯構造を示す。粗粒結晶の外側の一部は木下雲母の組成を示し，形成末期にBa，Alが濃集している．本産地は飛騨神岡産のコンドロ石の産状（野沢，1952）と一致するところもあり，類似した熱水による

形成過程が推定されるが，本産地では炭酸塩鉱物が認められず，原岩となる岩石種の違いがある．小河内・千軒平地区のスカルンには鉄を含む鉱物が多いが，今回調査した露頭の鉱物中にはFeが少なく，また，Baの濃集もありこの岩石を形成した熱水の特異な性質を示している．

引用文献

Pekov et al Doklady Earth Sciences，**436**，230–236.
足立富男（1996）地学研究, **45-4**, 221-242.
宮久三千年・足立富男（1977）鉱物採集の旅九州南部編p81-82　築地書館.
皆川鉄雄・足立富男（1990）地学研究，**39**，91-95.
大越悠数ら（2012）岩鉱，**41**，61-66.
野沢保（1952）岩鉱，**36,**，176-185

キーワード：水酸コンドロ石、ヒューム石グループ、金雲母、スカルン、宮崎県西臼杵郡日之影町小河内
Keywords: Hydroxylchondrodite, Humite group, Phlogopite, Skarn, Ogouchi Hinokage Nisiusuki Miyazaki Prefecture

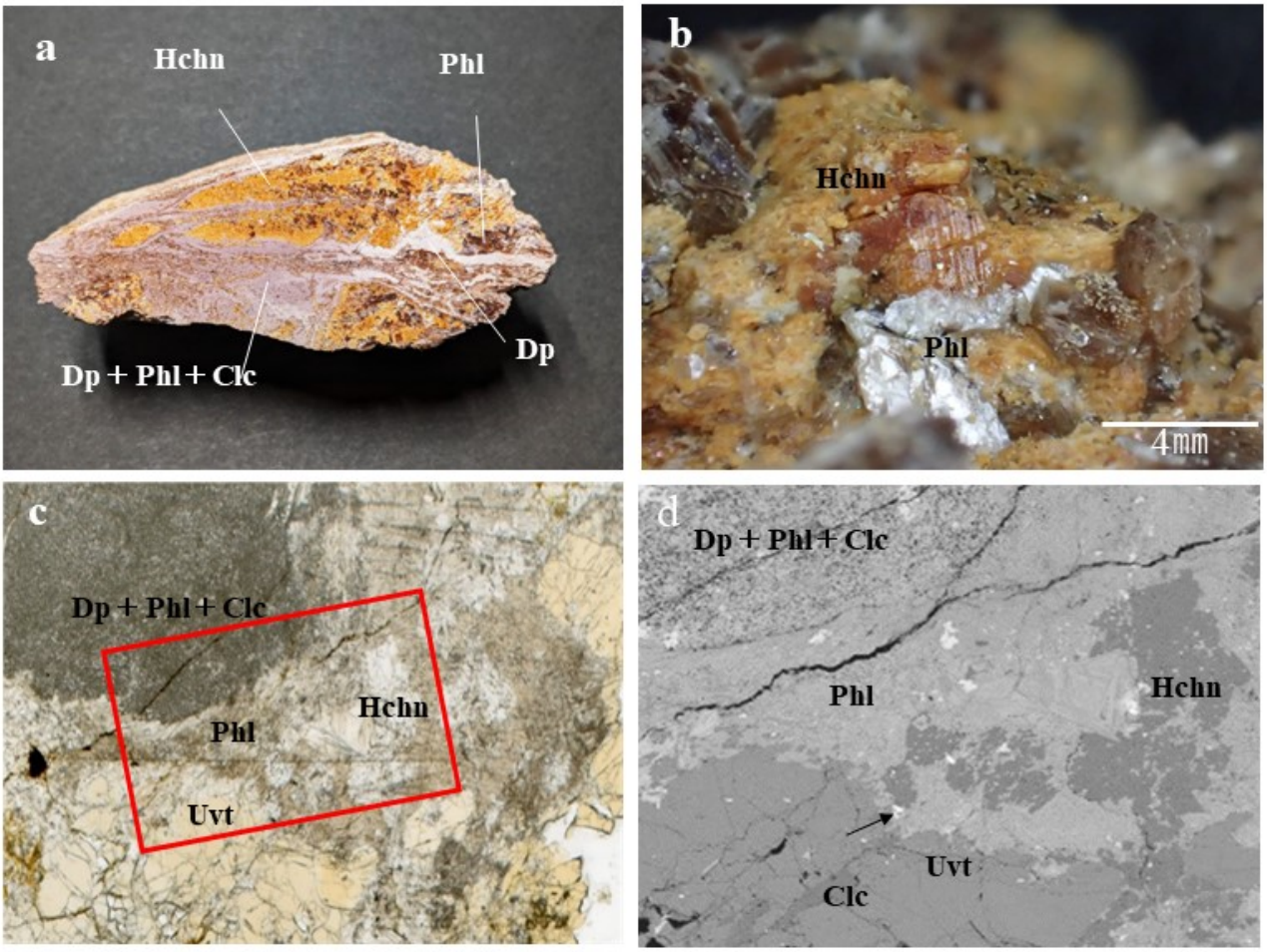


Fig. 1. Hydroxylchondrodite and associated minerals from Ogouchi, Hinokage, Nisiusuki, Miyazaki Prefecture, Japan.
(a) Sample shows occurrence of hydroxylchondrodite of sample No. SD11. Sample width is 6.2 cm.
(b) Hydroxylchondrodite crystal with phlogopite of sample No. SD11.
(c) Thin section image under plane polarized light of sample No. SD01, which contains hydroxylchondrodite, uvite, phlogopite, diopside, clinochlore and titanite. Width is 2.0 cm.
(d) Back scattered electron image of hydroxylchondrodite and associate minerals. The red frame in figure (c) corresponds to this BSE image. Darkest grains are hydroxylchondrodite and clinochlore. Small bright grains are mainly titanite some are zirconolite and apatite. Arrow indicates zirconolite.
Hchn: hydroxylchondrodite. Phl: phlogopite. Dp: diopside. Uvt: uvite. Clc:clinochlore

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

鹿児島県大和鉱山産arsenmedaite

Arsenmedaite from the Yamato mine, Kagoshima Prefecture, SW Japan

*大角 駿介、浜根 大輔[1]、岡 紘希[2]、田村 雅史[3]、高木 皓介[4]
*Shunsuke Ohsumi, Daisuke Nishio-Hamane[1], Hiroki Oka[2], Masashi Tamura[3], Kosuke Takagi[4]

1. 東大・物性研、2. 応用地質（株）、3. 三重大・工・技術部、4. 三重大・半導体デバイス研究室
1. ISSP, Univ. of Tokyo, 2. OYO Corp., 3. Fac. Eng. Tech. Div., Mie Univ., 4. Grad. Sch. of Eng., Mie Univ.

鹿児島県奄美大島に位置する大和鉱山は原田石（Watanabe et al., 1982）の模式地として知られる他、ロスコー雲母（吉村・桃井, 1964）、灰バナジンざくろ石（Momoi, 1964）、ティラガロ石（中尾ら, 2005）、パレンツォーナ石、ナビアス石、東京石及びボーレライネン石（山田ら, 2008）、メダ石及びサネロ石（松原ら, 2013）、ポピー石（丹羽・石橋, 2015）、レッピア石（山田ら, 2018）等の含V-As鉱物の産出が確認されている。筆者らが当地から2018年に採集した珪質マンガン鉱を検討した結果、新たに本邦初産となるarsenmedaite（砒メダ石）を見出したため報告する。

砒メダ石はメダ石（medaite）のV^{5+}をAs^{5+}で置換した鉱物で、イタリア北部アペニン帯の変成チャートに胚胎されるマンガン鉱床から報告された（Biagioni et al., 2019）。模式地ではブラウン鉱を切る石英脈中に最大200 μmの赤橙色の柱状結晶として産し、方解石、Asに富むメダ石、菱マンガン鉱、滑石、ガノフィル石と共生する。

砒メダ石を見出した大和鉱山の珪質マンガン鉱は主に緻密なハウスマン鉱、菱マンガン鉱、粗粒のばら輝石から構成される。砒メダ石は菱マンガン鉱やばら輝石中に最大径1 mm以下の黄色～赤橙色粒状結晶として産出しガラス光沢を呈する。大和鉱山産砒メダ石はばら輝石と密接に共生してメダ石を伴わない点で、模式地のものと産状が異なる。

SEM-EDSによる質量分析の結果はSiO_2 30.12, CaO 0.99, V_2O_5 3.25, MnO 48.03, As_2O_5 13.26, $H_2O_{calc.}$ 1.01, 合計96.65 wt%を得た。MnをすべてMn^{2+}と仮定してO = 18で規格化した場合の実験式は、$(Mn^{2+}_{6.04}Ca_{0.16})_{\Sigma 6.20}[(As_{1.03}V_{0.32})_{\Sigma 1.35}Si_{4.47}]_{5.82}O_{18}(OH)$である。砒メダ石の理想組成式$Mn^{2+}_6As^{5+}Si_5O_{18}(OH)$と比較するとAs-Vがやや過剰でSiが少ないことから、Si四面体骨格の一部をAs-Vが置換しているものと推測される。

ラマン分光分析の結果、340–360, 994 cm^{-1}に弱いピーク、644, 658 cm^{-1}に中程度のピーク、859, 879, 894 cm^{-1}に強いピークが検出された。これらのピークはBiagioni et al. (2019)による砒メダ石およびLafuente et al. (2015)によるメダ石のラマンスペクトルの結果と調和的である。

なお、砒メダ石は現時点では産出が極めてまれであることに加えて、その結晶内に微細なばら輝石を包有しており、精密な結晶構造解析を行うに至っていないことは今後の課題である。

キーワード：砒メダ石、大和鉱山
Keywords: arsenmedaite, Yamato mine

熊本県阿蘇外輪山俵山（護王峠）の“普通角閃石”

“Common Hornblende” from Mt. Tawarayama (Goou-toge), the outer-rim of Mt. Aso, Kumamoto Prefecture

*井上 晴貴[1]、上原 誠一郎[2]
*Haruki Inoue[1], Seiichiro Uehara[2]

1. エネコム株式会社、2. 九大・博物館
1. Enecom Co., Ltd., 2. Kyushu Univ. Museum

1.はじめに

熊本県阿蘇外輪山を構成する山の一つである俵山は日本トップクラスの角閃石標本の産地として知られる．この角閃石は褐色種で，オパサイト化が著しく，その部分は細かい磁鉄鉱と普通輝石の集まりからなり，分離・精製した角閃石の化学分析値から当時の分類で“普通角閃石”と記載された(松本, 1954)．なお，Hawthorne *et al.* (2012)の分類法では苦土ヘスティングス閃石に分類される．また，浜根 (2019)は本産地の角閃石について，角閃石は苦土ヘスティングス閃石に分類され，表面から内部へ向かうほんの数百ミクロン程度の薄皮であり，その内側は微細な透輝石＋オリビン＋磁鉄鉱の集合体となっていたとしている．今回，この角閃石について鉱物学的な再検討を行い，角閃石結晶中の組織，共存鉱物，化学組成を明らかにした．

2.試料・分析手法

俵山の護王峠の安山岩の母岩から分離した角閃石を分析対象とした．角閃石結晶の研磨薄片は，断面が*c*軸と平行および垂直となる方向で作製し，偏光顕微鏡観察・走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行った．

X線回折分析にはRigaku Ultima ⅣおよびRigaku RINT RAPID IIを用いた．組織観察，化学分析および面分析には，SEM (JEOL JSM-7001F)を用いた．

3.結果

X線回折分析では，10個程の角閃石結晶で粉末試料を作製し測定を行った．PDXL2を用いて定性分析を行い苦土普通角閃石，透輝石，苦土橄欖石，斜長石，磁苦土鉄鉱と同定された．定量分析(WPPF法)も続けて行い，上記の鉱物の含有量はそれぞれ33，26，19，16，6 wt%という結果を得た．これは薄片観察の結果ともおおむね一致する．

偏光顕微鏡およびSEM観察の結果，角閃石結晶中の角閃石はほぼ全体が変化して仮像を呈するものから，1～3割残存するものが認められた．角閃石残晶は赤褐～淡黄茶の強い多色性を示す．この残晶は同一の結晶内で消光位が同じであったため，単結晶であったと示唆される．角閃石残晶の組成式の計算はLocock (2014)に従い行った．OH = 2 - 2Ti (apfu)と仮定すると苦土ヘスティングス閃石，OH = 2と仮定すると苦土ヘスティングス閃石およびフェリ定永閃石と分類された．松本 (1954)および浜根 (2019) の記載とおおよそ一致するが，松本 (1954)の分析値と比較すると，Fe^{3+}，Mg，Alに富み，Fe^{2+}に乏しい組成であった．

角閃石結晶はいずれも外側(厚さ数十から数百μm)および角閃石の劈開に沿ってオパサイト化しており，「角閃石は表面から内部へ向かいほんの数百ミクロン程度の薄皮でしかなかった」という浜根 (2019)の記載とは異なっていた．オパサイト化部分は偏光顕微鏡では不透明にしか見えず，同定は困難であった．SEMでは粒径1 μm以下から数μmの微細な結晶の集合であることが分かったが，鉱物種は推定する程度に留まった．正確な同定には透過型電子顕微鏡(TEM)による分析が必要である．

角閃石結晶内部に数μmから30 μm程度の結晶の集合体が虫食い状に散在していた．この部分では苦土橄欖石(Mg# ≈0.95)，透輝石，普通輝石，磁苦土鉄鉱，磁鉄鉱，カリ長石，スピネルを認めた．これらは角閃石の熱分解により生じたと考えられる．分解の例として，pargasite = diopside + forsterite + spinel + anorthite + nepheline + H_2Oの反応式が挙げられる(Deer *et al.*, 1997)．なお，pargasiteはmagnesio-hastingsiteと類縁鉱物で，理想組成式ではC席を占めるAlとFe^{3+}の数に差があるだけである。また，殆どの結晶中に包有物とし

て0.1～1.6 mmの灰長石(An_{90})および0.1～0.3 mmの苦土橄欖石(Mg# ≈0.85)が認められたほか，風化により生じたと思われるアロフェンがオパサイト化部分，熱分解物からなる虫食い状部分および包有物の灰長石の周囲，割れ目に認められた．

参考文献

Deer *et al.* (1997) Rock-Forming Minerals, 2B, The Geological Society, London.
Hawthorne *et al.* (2012) *Am. Min.*, **97**, 2031-2048.
Locock (2014) *Comput. Geosci.*, **62**, 1-11.
浜根大輔 (2019) https://mdcl.issp.u-tokyo.ac.jp/denken/?page_id=12#a164，2022年8月閲覧.
松本幡郎 (1954) 地学研究，**7**，104-107.

キーワード：俵山、護王峠、苦土ヘスティングス閃石、普通角閃石
Keywords: Mt. Tawarayama, Goou-toge, magnesio-hastingsite, common hornblende

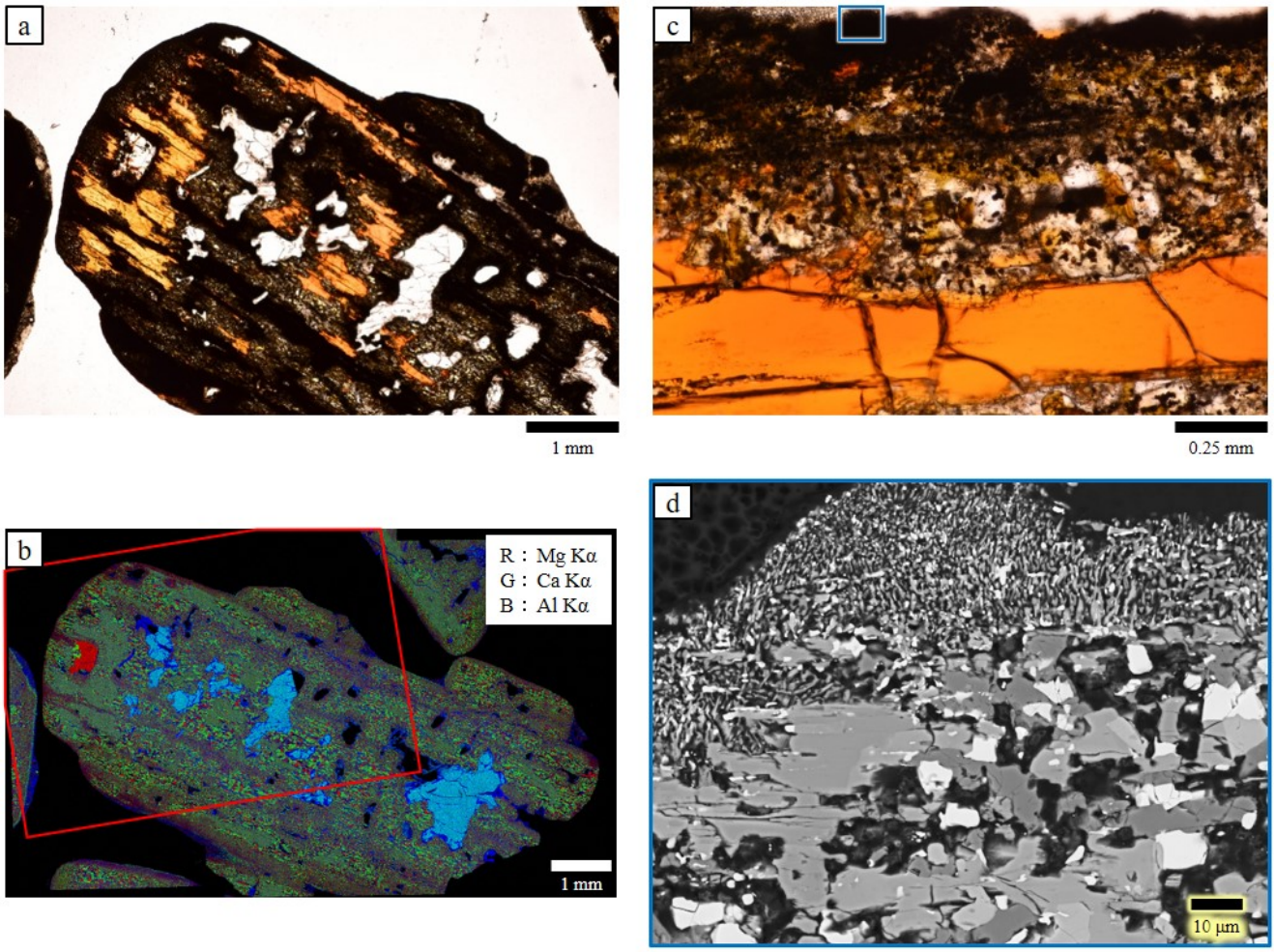


Fig.1. Polarizing microscope images and scanning electron microscope images of “Common Hornblende” from Mt. Tawarayama (Goou-toge), the outer-rim of Mt. Aso, Kumamoto Prefecture, Japan.
(a) Optical microscope image of amphibole phenocryst under plane polarized light. The cross section is parallel to the *c*-axis. (b) EDS X-ray maps of amphibole phenocryst. This image has RGB colors overlaid. The red frame indicates the area in Fig. 1a. (c) Optical microscope image of opacitization of hornblende under plane polarized light. The blue frame indicates the area in Fig. 1d. (d) BSE image of opacitization of “common hornblende”. There are microscopic minerals that cannot be observed with a polarizing microscope.

愛媛県梶島に産出する斑れい岩類に伴う電気石と角閃石の化学組成

Chemical composition of tourmaline and amphibole associated with gabbro from Kajishima, Ehime Prefecture, Japan

*太田 一樹[1]、下岡 和也[2]、斉藤 哲[1]、白勢 洋平[1]
*Itsuki Ota[1], Kazuya Shimooka[2], satoshi saitou[1], youhei shirose[1]

1. 愛媛大・院理工、2. 関西学院大
1. Ehime Univ. Sci and Eng, 2. Kwansei Gakuin Univ. Sci

１．はじめに　愛媛県梶島は愛媛県新居浜市の北約20 kmの瀬戸内海に位置しており、島全体が斑れい岩類からなる。梶島の斑れい岩類は５岩相に区分され、花崗岩類が斑れい岩類の岩相境界または岩体内部幅0.3-３ｍの岩脈状に産出する(堀内, 1985；下岡他, 2024)。また、梶島の斑れい岩類中には幅１ｍ以下の岩脈として粗粒なペグマタイトが産し、斑れい岩類と珪長質岩脈の境界部に黒色の電気石が産する(吉村, 1940)。本発表では梶島の斑れい岩類に伴う電気石と角閃石について、その産状と鉱物学的特徴を報告する。

２．産状　ペグマタイトは斑れい岩類中に脈状または塊状に産する。脈状のものは周囲の斑れい岩類との境界が明瞭であり、脈中に粗粒な角閃石、長石を含む。塊状のものは周囲の斑れい岩類との境界が不明瞭であり、0.5-１cm程度の角閃石の柱状結晶を含む。電気石は斑れい岩類中、花崗岩脈中、石英脈中に脈状・塊状に産する。斑れい岩類中に脈状に産する電気石は斑れい岩類の構造に調和的なもの、非調和なものがあり、境界部では角閃石に富む部分、石英や長石に富む部分がある。

３．実験手法　組織観察及び化学分析にはEDSを装着したJEOL製走査型電子顕微鏡JSM-6510LV、リガク製粉末X線回折装置UltimaIVを使用した。

４．結果・考察　ペグマタイト脈に接する斑れい岩類は主に苦土かんらん石と灰長石からなり、少量のパーガス閃石、鉄スピネル、頑火輝石、チタン鉄鉱、磁鉄鉱を含む。苦土かんらん石と灰長石の粒界にはパーガス閃石が存在し、灰長石から伸長する蛆虫状の鉄スピネル、苦土かんらん石周縁部に伴う頑火輝石からなるシンプレクタイト組織が認められる。シンプレクタイト組織中のパーガス閃石には褐色と薄緑色のものが見られる。ペグマタイト脈は主にパーガス閃石と灰長石からなり、褐色のパーガス閃石はラメラ状及び塊状のチタン鉄鉱のインクルージョンを特徴的に含む。また、褐色のパーガス閃石を切るような青緑色の角閃石も見られる。境界部では滑石と緑泥石が含まれ、滑石は苦土かんらん石を置換するかたちで産する。

島南部に産する電気石脈と斑れい岩類の境界部には緑色の苦土普通角閃石が形成されており、少量の緑泥石、石英を含む。一方、島北西部に産する電気石脈と斑れい岩類の境界部には、緑色のアクチノ閃石が形成されており、少量のカミントン閃石、苦土普通角閃石、石英を含む。周囲に石英が形成されている部分では石英中にアクチノ閃石の針状結晶を含む産状が認められる。電気石の*X*席はNa、*Y*席はMgに富み、鉱物種はいずれも苦土電気石であった。また、電気石はコア部分からリム部分にかけて*X*席の空位がCa、*Y*席のAlがMg、Feに置換していた。

ペグマタイト及び斑れい岩類中の角閃石はパーガス閃石組成となりチェルマック置換が顕著である(Fig. 1)。イルメナイトの離溶を伴う褐色のパーガス閃石はTiを含み、最大0.37 (*apfu*)のTiを含む。シンプレクタイト中の薄緑色のパーガス閃石と褐色のパーガス閃石を切るように産する青緑色の角閃石はいずれもTiをほとんど含まず、青緑色の角閃石は鉄パーガス閃石-パーガス閃石-苦土普通角閃石組成となる。電気石脈に伴う緑色の角閃石はエデナイト置換、チェルマック置換が顕著であり、主に苦土普通角閃石からなるものとアクチノ閃石からなるものとがある。いずれの角閃石もTiをほとんど含まず、主にアクチノ閃石からなるものではカミントン閃石が少量含まれる。

ペグマタイト中のラメラ状のチタン鉄鉱を含む褐色のパーガス閃石は、斑れい岩類に伴って形成され、晶出時はケルスート閃石などのTiを多く含む角閃石であったと考えられる。サブソリダス下で上記のラメラやシンプレクタイト組織が形成され、熱水流体との反応で二次的な青緑色の角閃石が形成された。花崗岩の貫入に関

連するホウ素に富む熱水流体により、電気石脈が形成され、周囲の斑れい岩類との反応により苦土普通角閃石、アクチノ閃石が形成された。

キーワード：梶島、斑れい岩、ペグマタイト、電気石、角閃石
Keywords: kajishima, gabbro, pegmatite, tourmaline, amphibole

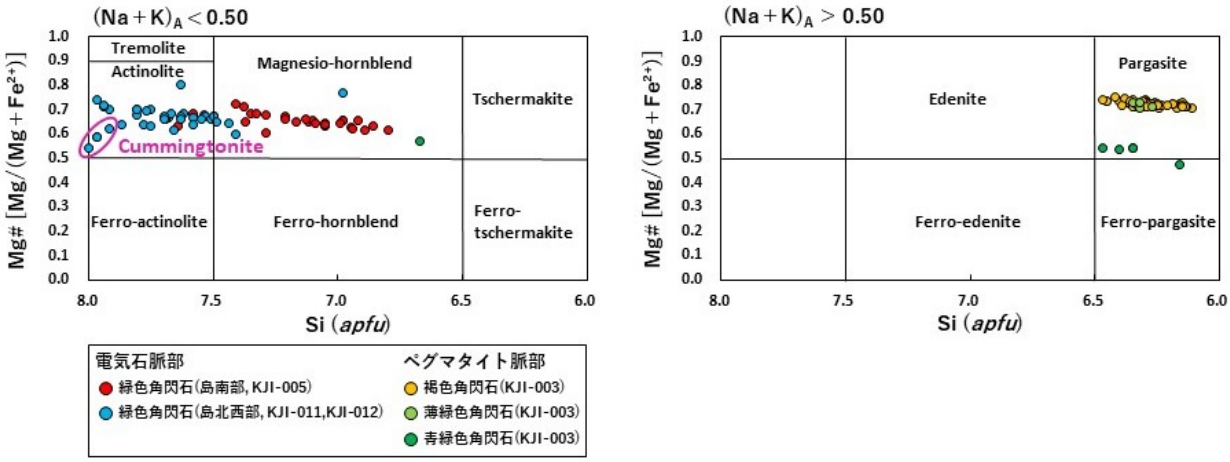


Fig. 1 角閃石の化学組成変化　(分類はHawthorne et al., 2012; Leake, 1997を参考)

福岡県長垂のペグマタイト岩脈に伴う粘土の構成鉱物

Constituent minerals of clay associated with the pegmatite dike in Nagatare, Fukuoka Prefecture, Japan

*武田 侑也[1]、上原 誠一郎[2]、桑原 義博[3]
*Yuya TAKEDA[1], Seiichiro Uehara[2], Yoshihiro Kuwahara[3]

1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文
1. Kyushu Univ. ISGS, 2. Kyushu Univ. Museum, 3. Kyushu Univ. SCS

はじめに

福岡県長垂はリチウムペグマタイトで有名な産地であり，海岸に露出する岩脈は1934年に「長垂の含紅雲母ペグマタイト岩脈」として国の天然記念物に指定されている．岡本 (1944)は長垂からのカオリンの産出を報告しているがその詳細は記述されていない．長垂のリチウムペグマタイト形成の最終段階で，リチウム鉱物やカリ長石は温度の低下とともにクッカイト（リチウム緑泥石），白雲母あるいはセリサイト，トスダイト，スメクタイトなどの粘土鉱物に変質している（Shirose and Uehara, 2013, 2014; Shirose, 2015）．2022年2月に天然記念物指定区域内の東に位置するペグマタイト岩脈の現状変更の申請がなされ，工事が行われた際に現地調査を行った．このとき岩脈の下盤側に褐色の粘土脈を確認した．この粘土脈の特徴を知るために鉱物種の同定や微細構造観察，化学組成の測定を行った．

方法

長垂の粘土脈試料を水簸により，5あるいは2 μm以下の粒子を分離した．2 μm以下の粘土粒子をスライドグラスに塗布した定方位試料と乾燥させて不定方位試料を作製し，X線回折分析(Rigaku Ultima Ⅳ)を行った．定方位試料に関しては未処理，エチレングリコール処理及び加熱処理をした．また，採集した状態の粘土を乾燥させ，エポキシ樹脂を真空デシケータ中でしみこませ固化した後に，乾式法で研磨薄片を作りFIB-SEMを用いて薄膜試料を作成した．水簸試料については一部をマイクログリッドにのせた．これらについて走査型電子顕微鏡（理学部地球惑星科学教室JEOL JSM 7001F）と透過型電子顕微鏡で組織観察及び化学組成の測定を行った．

結果

長垂産粘土の定方位試料のXRDの結果を見ると7 Å付近に強い強度のピークがあり，構成鉱物の大部分がカオリン鉱物であった．カオリン鉱物のピークはブロードであり結晶性が悪い．また，10 Å付近のピークはイライト又はハロイサイトで14 Å付近の小さいピークはスメクタイトである．FIBの薄膜切片は2 μm以下の細長い粒子や石英，チューブ状の粒子，Fe，Tiに富む粒子，Kを含む粒子が観察された．細長い粒子は長さ1~2 μm，幅60 nm前後の板状結晶のカオリナイトで，回折パターンから7 Åの底面反射がみられた(Fig. 1b, 1c)．回折パターンには10 Åの反射も見られ，イライト又はハロイサイトの粒子がカオリナイトの周囲に存在している(Fig. 1c)．また，カオリナイトの格子像には7 Åのカオリナイトの層の間に15 Å前後の層が挟まれている様子が見られ，カオリナイト /スメクタイト混合層鉱物を形成している可能性がある(Fig. 1d)．マイクログリットに乗せた粘土粒子からは長さ最大600 nm，幅70 nm程度のハロイサイトがみられた(Fig. 1a)．カオリナイトのSEM-EDSから得られた平均的な化学組成は$(Al_{1.58}Fe_{0.27}Mg_{0.11}Ca_{0.03}K_{0.05})_{\Sigma 2.05}(Si_{2.02}O_5)(OH)_4$であった．長垂産粘土中にLi鉱物は見られず，スメクタイトがほとんどないことからリチウムペグマタイトの変質後に低温熱水から形成された可能性がある．

参考文献

岡本要八郎 (1944)：福岡県鉱物誌，日本鉱物趣味の会出版部148p, 149p.

Shirose, Y. & Uehara, S. (2013) Li tourmaline from Nagatare, Fukuoka Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 108, 238–243.

Shirose, Y. & Uehara, S. (2014) Secondary phosphates in montebrasite and amblygonite from Nagatare,

Fukuoka Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 109, 103–108.
Shirose, Y. (2015): Mineralogical study of Li pegmatite from Nagatare, Fukuoka Prefecture, Japan: microtextures formed by exsolution and hydrothermal alteration, Kyushu University, doctoral dissertation.

キーワード：カオリン、ハロイサイト、長垂
Keywords: kaoline, halloysite, nagatare

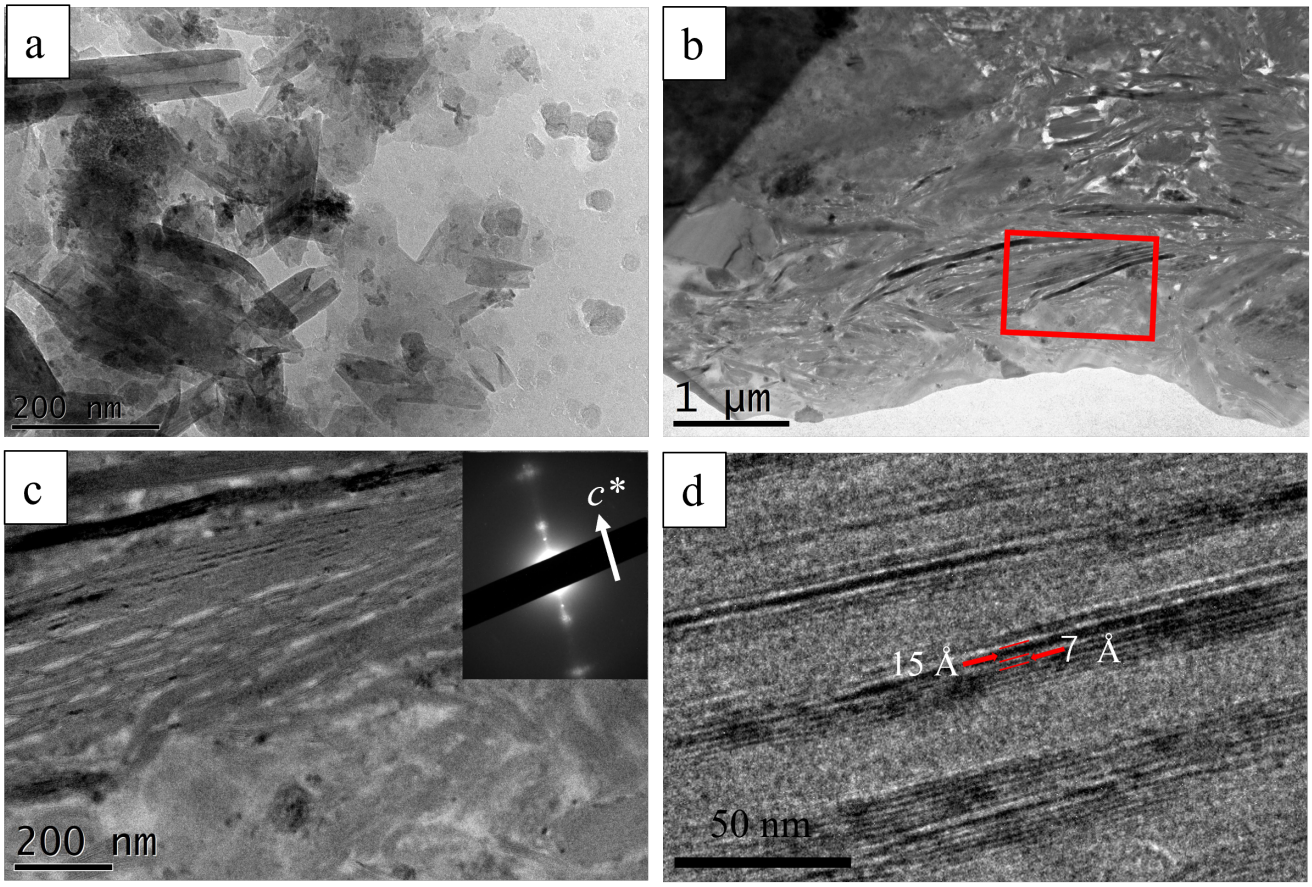


Fig. 1. Photographs of clays in Nagatare. (a) Bright field TEM image of halloysite. (b) Bright field TEM image of FIB thin section. (c) Bright field TEM image of kaolinite in the red box area of (b). (d) Enlarged TEM image of kaolinite.

長野県大鹿村のカンラン岩中の蛇紋石脈の微細構造

Microstructure of serpentine veins in peridotite in Ooshika Village, Nagano Prefecture, Japan

*武田 侑也[1]、桑原 義博[3]、上原 誠一郎[2]
*Yuya TAKEDA[1], Yoshihiro Kuwahara[3], Seiichiro Uehara[2]

1. 九大・地球社会、2. 九大・博物館、3. 九大・比文
1. Kyushu Univ. ISGS, 2. Kyushu Univ. Museum, 3. Kyushu Univ. SCS

はじめに

蛇紋岩化作用はカンラン石と熱水から蛇紋石を生成する反応で，カンラン石中の2価鉄から磁鉄鉱が生成するため2価鉄の一部が3価鉄になる．そのときに水素が発生し，還元的な環境が形成され，自然鉄，アワルワ鉱などが形成される場合がある(Frost, 1985)．長野県大鹿村のカンラン岩は入沢井と大河原にあり，その中の蛇紋石脈に日本で初めて蛇紋岩化作用で生じる自然鉄が報告され，蛇紋石脈はその前後関係から3段階あり，自然鉄は2段階目のクリソタイル(2Mc1)とブルース石からなる脈に見られるとされた(Sakai and Kuroda, 1983; 岡本ら, 1981)．自然鉄を含む蛇紋石脈について，カンラン石に近い場所はクリソタイル+多角柱状蛇紋で構成され，脈の中心はリザーダイト＋ブルース石＋自然鉄で構成されることを昨年の鉱物科学会で報告した．今回は，自然鉄を含まない蛇紋石脈についてのTEM観察を行い，自然鉄を含む蛇紋石脈と比較した．

方法

長野県大鹿村のカンラン岩について薄片を作成し，肉眼及び偏光・反射顕微鏡観察を行った．全岩及び蛇紋石脈の構成鉱物はX線回折分析(Rigaku Ultima Ⅳ，Rigaku RINT RAPID Ⅱ)で決定した．化学組成・微細組織観察にはSEM (JEOL JSM-7001F) 及びFE-EPMA(JEOL JXA-8530F)を用いた．FIB-SEM及びGATAN PIPS Ⅱ M-695を用いて薄膜試料を作成し，透過型電子顕微鏡で組織観察・化学組成の測定を行った．

結果

直線的な蛇紋石脈は前後関係から4方向あり，それらをⅠ～Ⅳとした．蛇紋石脈Ⅰ，Ⅱは自然鉄を含まず，蛇紋石脈Ⅲ，Ⅳは自然鉄を含む．蛇紋石脈Ⅰは幅2, 3 mm ～数百μmで，薄片の肉眼観察では黒色，偏光顕微鏡では黒褐色をしている．蛇紋石脈Ⅱは幅2, 3 mm ～数百 μmで，薄片の肉眼観察では灰緑色，偏光顕微鏡で褐色に見える．X線回折実験，SEM観察から蛇紋石脈Ⅰ，Ⅱはクリソタイルとブルース石，磁鉄鉱，アワルワ鉱で構成され，蛇紋石とブルース石は脈中に混在していた．TEM観察の結果，蛇紋石種は結晶性が悪いクリソタイル，クリソタイルと多角柱状蛇紋石の中間のような結晶が存在していた．蛇紋石脈Ⅰのブルース石は最大500 nmの結晶で一部鉄に富む粒子があった．蛇紋石脈Ⅱのブルース石は1 μm 程度の結晶で，蛇紋石との境界の一部に鉄に富む部分がみられる．TEM-EDSマッピングから蛇紋石，ブルース石の化学組成を求めた．蛇紋石脈Ⅰのクリソタイルの#Mgは0.96で，蛇紋石脈Ⅱのクリソタイルの#Mgは0.97だった．蛇紋石脈Ⅰのブルース石の#Mgは0.84，鉄に富む部分は0.83，蛇紋石脈Ⅱのブルース石の#Mgは0.88，鉄に富むブルース石の#Mgは0.83であった．自然鉄を含む蛇紋石脈はクリソタイル+多角柱状蛇紋で構成され，脈の中心にはリザーダイト＋ブルース石で構成される部分があった．自然鉄は楕円形で蛇紋石脈の中心に並んでいた．これらの蛇紋石脈の構造や構成鉱物の差は自然鉄の生成に関連する可能性がある．

参考文献

B.R. Frost; On the Stability of Sulfides, Oxides, and Native Metals in Serpentinite, *J. Petrol*, 26 (1985) 31-63

岡本 正也，井上 善嗣，黒田 吉益; 長野県大河原付近のかんらん岩より自然鉄の発見, 地質学雑誌, 9 (1981) 597-599

Sakai, Y. Kuroda; Native iron and the associated minerals from the ultramafic masses in the Sanbagawa belt, central Japan, *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* 78 (1983) 467-478.

キーワード：クリソタイル、蛇紋石脈、自然鉄
Keywords: chrysotile, serpentine vein, iron

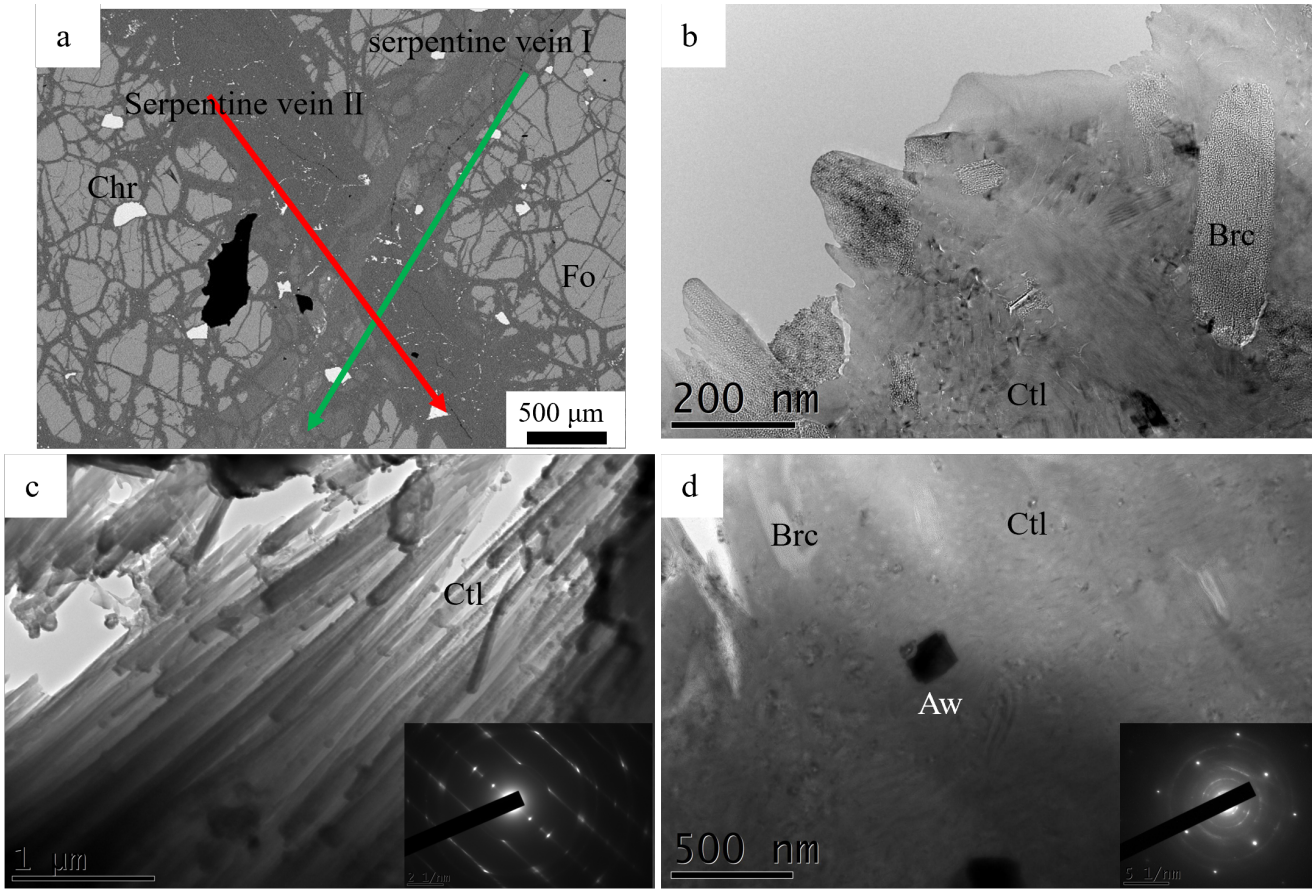


Fig. 1. Photographs of serpentine vein I and II. (a) Back scattered electron image by SEM of serpentine vein I and II. (b) Bright field TEM image of chrysotile and brucite in serpentine vein I. (c) Bright field TEM images of chrysotile and SAED pattern of chrysotile in serpentine vein II. (d) Bright field TEM images of chrysotile and brucite and awaruite in serpentine vein I. SAED pattern of awaruite.
Ctl: chrysotile. Brc: brucite. Aw: awaruite. Chr: chromite. Fo: forsterite.

ポスター | R3：高圧科学・地球深部

2024年9月12日(木) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R3：高圧科学・地球深部

12:30 ~ 14:00

[R3-P-01] 沈み込み帯の高温高圧下におけるアルカンの化学反応に対する無機鉱物の影響

*篠崎 彩子[1]、滝本 樹奈[1]、永井 隆哉[1]、三村 耕一[2] (1. 北海道大学・院理、2. 名古屋大学・環境)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-02] Mn_2SiO_4テフロアイトの示差走査熱量測定

*浅見 祐汰[1]、大平 格[2]、糀谷 浩[2] (1. 学習院大・自然研、2. 学習院大・理)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-03] 含水ブリッジマナイトにおける偏光赤外スペクトルと水素位置の第一原理計算

*稲垣 喜久代[1]、土屋 旬[1]、Zhang Yanyao[3]、Lin Jung-Fu[2]、唐戸 俊一郎[4]、Kung Jennifer[5]、Li ChingChien[5] (1. 愛媛大・GRC、2. テキサス大学、3. スタンフォード大学、4. イェール大学、5. 国立成功大学)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-04] 高速X線回折測定による高圧力下シリカ相安定性の解明

*新名 良介[1]、河口 沙織[2]、石井 貴之[3]、佐久間 博[4]、小川 彪聖[1]、小林 建太[1]、米谷 珠萌[1] (1. 明治大・理工、2. JASRI、3. 岡山大・惑星物質研、4. NIMS)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-05] 下部マントル圧力下大歪変形実験より検討するFerropericlase多結晶体の結晶選択配向特性

「発表賞エントリー」

*夏井 文凜[1]、東 真太郎[1]、岡崎 啓史[2,5]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、河口 沙織[3]、野村 龍一[4]、太田 健二[1] (1. 東工大、2. 広大、3. JASRI、4. 京大、5. JAMSTEC)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-06] 中性子イメージングを用いた高温高圧下における水素封止材の検討

*柿澤 翔[1]、鍵 裕之[2]、高野 将大[2]、佐野 亜沙美[3]、服部 高典[3]、阿部 淳[4]、舟越 賢一[4] (1. JASRI、2. 東大・院理、3. JAEA J-PARCセンター、4. CROSS 中性子科学センター)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-07] 高温高圧条件下における硫化鉄と水素の反応の再検討

「発表賞エントリー」

*高野 将大[1]、鍵 裕之[1]、森 悠一郎[1]、青木 勝敏[1]、柿澤 翔[2]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、佐野 亜沙美[3] (1. 東大·院理、2. JASRI、3. 日本原子力研究開発機構 J-PARC)

12:30 ~ 14:00

[R3-P-08] 静的圧縮手段による極高圧発生技術開発

*境 毅[1]、中本 有紀[2]、中村 悟[1]、岩津 壮太郎[2]、福田 脩斗[2]、加藤 悠暉[2]、清水 克哉[2]、門林 宏和[3]、河口 沙織[3] (1. 愛媛大・GRC、2. 阪大基極セ、3. JASRI)

沈み込み帯の高温高圧下におけるアルカンの化学反応に対する無機鉱物の影響

Influence of co-existing inorganic minerals on chemical reaction of *n*-alkane under high-pressure and high-temprature conditions of subduction zone.

*篠崎 彩子[1]、滝本 樹奈[1]、永井 隆哉[1]、三村 耕一[2]
*Ayako SHINOZAKI[1], Kina Takimoto[1], Takaya Nagai[1], Koichi Mimura[2]

1. 北海道大学・院理、2. 名古屋大学・環境
1. Hokkaido University, 2. Nagoya University

地球表層から地球深部へと物質が供給される唯一の領域である沈み込み帯は、全地球規模での炭素循環を理解する上で特に重要である。海洋底堆積物に含まれる有機物は、炭酸塩鉱物と並ぶ重要な炭素のリザーバーと考えられているが、沈み込み帯の高温高圧条件における有機物の挙動には未解明の点が多い。本研究では、堆積物有機物の重要な構成要素であり、沈み込み帯での存在が指摘されている飽和炭化水素(アルカン)を対象に、深さ25 km程度に相当する温度圧力条件での高温高圧実験を行い、特にアルカンの化学反応に対する共存鉱物の影響に着目して、無機鉱物、有機物双方を対象とした化学分析を行った。高温高圧実験には外熱式ピストンシリンダーを用いた。0.5 GPa、300-400℃で6-192時間の間で反応時間を変えて実験を行った。出発物質は直鎖アルカンの*n*-ペンタコサン($C_{25}H_{52}$, 以下*n*-C_{25})と無機鉱物(石英, アルミナ, San Carlos産カンラン石)を重量比1:4の割合で混合して用いた。金カプセルに封入した試料を高温高圧下で反応させた後、常温常圧へと回収した。ジクロロメタン溶媒中でカプセルを開封して溶媒に可溶な成分を抽出したのち、メンブレンフィルターを用いて不溶性物質と分離した。可溶性物質はガスクロマトグラフ質量分析(GC/MS)、無機鉱物を含む不溶性物質はラマン分光分析、粉末X線回折(XRD)測定により評価した。石英もしくはアルミナと共存する条件では360℃で48時間以上の反応で*n*-C_{25}より低分子量の直鎖アルカンとより高分子量のアルカン(直鎖および分岐)が観察された。低分子直鎖アルカンの生成は*n*-C_{25}のC-C結合が切断される熱クラッキング反応を示している。高分子アルカンは、熱クラッキング反応で生成したアルケンと*n*-C_{25}との間の重合反応により生成したと考えられる。石英との共存条件と、アルミナとの共存条件下とで、*n*-C_{25}の減少率に有意な差異が見られなかったことから、熱クラッキング反応に対するこれらの鉱物の影響は限定的だと考えられる。石英もしくはアルミナが共存する場合、400℃で48時間以上の条件では、低分子直鎖アルカンが検出された一方で高分子アルカンは検出されなかった。同時に不溶性物質のラマンスペクトルからは新たにD-band, G-bandが観察されたことから、高分子アルカンから脱水素反応を伴う重合反応が起きてglassy carbonが生成したと考えられる。カンラン石と共存する条件では、320℃で48時間反応した条件で低分子アルカンと高分子アルカンがともに検出されなかった一方で、顕著な*n*-C_{25}の減少とglassy carbonの生成が観察された。カンラン石が共存する場合には上記の熱クラッキングが進行するより低い温度条件で*n*-C_{25}の脱水素反応が進行することを示している。反応後の不溶性物質のXRDやラマン分析からはカンラン石以外の鉱物は観察されなかったことからカンラン石の触媒的な作用によって脱水素反応が促進された可能性がある。沈み込み帯において、SiO_2やAl_2O_3に富む堆積物起源のスラブではC-C結合の熱クラッキングが進行し、低分子の炭化水素が生成しやすいが、マントルウェッジのようなカンラン石に富む環境では、脱水素反応が進行しやすいと考えられる。

キーワード：炭化水素、カンラン石、ガスクロマトグラフ質量分析計、ラマン分光分析、沈み込み帯
Keywords: Hydrocarbons, olivine, Gas specteometry/Mass spectroscopy , Raman, Subduction zone

Mn_2SiO_4テフロアイトの示差走査熱量測定

Differential Scanning Calorimetry of Mn_2SiO_4 tephroite

*浅見 祐汰[1]、大平 格[2]、糀谷 浩[2]
*Yuta Asami[1], Itaru Ohira[2], Hiroshi Kojitani[2]

1. 学習院大・自然研、2. 学習院大・理
1. Gakushuin Univ. Sci, 2. Gakushuin Univ.

地球の上部マントルの主要鉱物であるオリビン型$(Mg,Fe)_2SiO_4$を熱力学的に扱うためには、オリビン型Mg_2SiO_4およびFe_2SiO_4の定圧熱容量が必要である。このうちオリビン型Fe_2SiO_4の実測値から算出したC_Vは、Dulong-Petitの法則から算出されたCvを約700 Kで上回り、Fe_2SiO_4は格子振動とは別の熱容量による効果があると報告された(Benisek et al. 2012)。Fe^{2+}などd電子をもつ場合は、格子振動寄与の熱容量以外にスピン自由度に由来したショットキー熱容量などの効果が考えられる。このd軌道電子による熱容量を議論するためには、格子振動の熱容量以外の過剰な熱容量の大きさを知る必要がある。様々な3d遷移金属元素の2価の陽イオンを含むオリビン型化合物の熱容量データを比較することで、格子振動以外の過剰な熱容量を検討できるようになる。このような3d遷移金属元素を含むオリビン型のうち、オリビン型Co_2SiO_4およびNi_2SiO_4の熱容量は、Robie et al.(1984)によりそれぞれ360–1000 K、5–1000 Kまで測定がなされている。しかし、オリビン型Mn_2SiO_4であるテフロアイトのC_Pデータは、Robie et al.(1982)により断熱シールド熱量計を使用して5–380 Kまで測定されているが、それより高温のデータは存在しないため比較できない。このため、本研究ではMn_2SiO_4テフロアイトの定圧モル熱容量を300 Kより高温側の温度範囲で決定することを目的とした。

Mn_2SiO_4テフロアイトは、モル比$MnCO_3 : SiO_2 = 2.1 : 1$の混合物を電気炉で1000–1200℃でCO_2:H_2:Ar=3.3:6.7:10(cc/min)の混合ガス気流下で合計80時間加熱して合成した。合成試料は粉末X線回折測定によりオリビン構造を持つ単相であることを確認した。Mn_2SiO_4の熱容量は示差走査熱量計(PerkinElmer Diamond DSC)を使用して測定された。熱量計の温度較正はIn、Sn、Znの融解温度、およびLi_2SO_4の相転移温度を使用した。300–830 Kの温度範囲で、加熱速度は10 K/min、データは10 Kの昇温ステップで取得した。エンタルピーの標準物質としてα–Al_2O_3を使用した。各サンプルはAlパンに詰められ、空のパン、α–Al_2O_3、Mn_2SiO_4の3つを1セットとし、150 Kの温度範囲において測定が行われた。測定された熱流シグナルを用いてエンタルピー法により熱容量を決定した。各温度の熱容量は4~5個のデータの平均値とした。

図1にMn_2SiO_4テフロアイトのDSC測定結果、および比較のため他のオリビン型M_2SiO_4(M=Fe,Co,Ni,Mg)の実測による定圧熱容量を示した。本研究では300–830 Kで新たに熱容量のデータが得られた。また、Robie et al.(1982)によるMn_2SiO_4の300–380 Kにおける測定値と誤差範囲内で一致した。他のオリビン型珪酸塩化合物の熱容量との比較をすると、低温側で熱容量に違いが見られる。その違いは、大まかに調和振動によるC_Vの違いにより説明できる。しかし、Fe_2SiO_4とCo_2SiO_4の熱容量はMn_2SiO_4、Ni_2SiO_4およびMg_2SiO_4より大きい。このことから、Fe_2SiO_4やCo_2SiO_4のショットキー熱容量などによる過剰な熱容量の大きさは、Mn_2SiO_4、Ni_2SiO_4、Mg_2SiO_4と比較して大きいことが推測される。また、Mn_2SiO_4の熱容量は、温度上昇に伴いNi_2SiO_4と同様にd電子を持たないMg_2SiO_4と同等になる傾向が見られる。このことから、ショットキー熱容量などによる過剰な熱容量は、約1200 Kより低温側で寄与するかもしれない。そして、Mn_2SiO_4の過剰な熱容量の寄与の大きさはFe_2SiO_4、Co_2SiO_4より小さく、Ni_2SiO_4と同等になるだろう。

キーワード：テフロアイト、熱容量、d軌道電子
Keywords: Tephroite, Heat capacity, d-orbital electrons

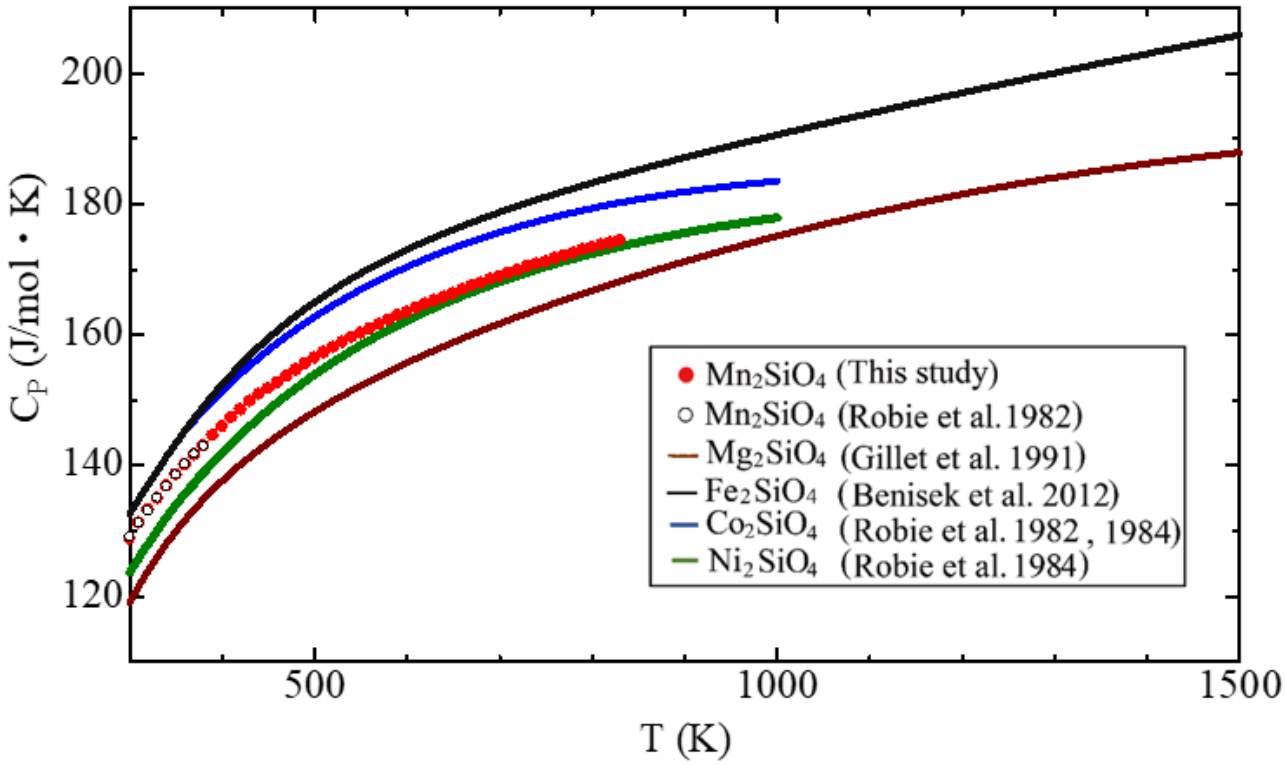


図 1.オリビン型 M_2SiO_4(M=Mn、Fe、Co、Ni、Mg)の定圧モル熱容量

含水ブリッジマナイトにおける偏光赤外スペクトルと水素位置の第一原理計算

Ab initio calculation of the polarized IR spectra and hydrogen positions of hydrous Bridgmanite

*稲垣 喜久代[1]、土屋 旬[1]、Zhang Yanyao[3]、Lin Jung-Fu[2]、唐戸 俊一郎[4]、Kung Jennifer[5]、Li ChingChien[5]
*Kikuyo Inagaki[1], Jun Tsuchiya[1], Yanyao Zhang[3], Jung-Fu Lin[2], Shun-ichiro Karato[4], Jennifer Kung[5], ChingChien Li[5]

1. 愛媛大・GRC、2. テキサス大学、3. スタンフォード大学、4. イェール大学、5. 国立成功大学
1. GRC Ehime Univ. , 2. Univ. Texas Austin , 3. Stanford Univ., 4. Yale Univ., 5. National Cheng Kung Univ.

水素を不純物として含む名目上無水鉱物（NAMs）は、地球内部における水の主要な形態である。NAMs中の水は、融解関係(Inoue,1994）、レオロジー特性(Karato & Jung,2023)、電気伝導度 (Karato & Wang,2013)など様々な物性に影響を与える。そのため、NAMsの構造や物性を解明することは、地球の進化やダイナミクスを理解する上で重要である。マントル遷移層の主要鉱物であるウォズリアイトやリングウッダイトの結晶構造中には最大2-3wt%の水を保持できる(Inoue et al.1995 ; Kohlstedt et al. 1996)。しかしながら、下部マントルに最も多く存在するブリッジマナイトの水の状態については未解明である。

本研究の目的は、最近報告された含水ブリッジマナイトのフーリエ変換赤外分光法（FTIR）の結果（Fu et al. 2019）について第一原理計算で説明できる構造モデルを確立し、ブリッジマナイト中の水素の存在状態について明らかにすることである。

本研究では、密度汎関数法に基づく第一原理計算を用いて、含水ブリッジマナイトの構造を計算した。交換相関汎関数にはPerdew-Burke-Ernzerhof形式の一般化勾配近似(GGA-PBE, Perdew et al. 1996)を用い、Si, Al, O, Hにはノルム保存擬ポテンシャルを用いた(Troullier and Martins 1991)。Mgの擬ポテンシャルはvon Barth-Carの方法で生成した（Karki et al.2000）。これらの擬ポテンシャルは、含水鉱物やNAMsの計算で広く検証されている（Tsuchiya and Tsuchiya 2009など）。電子波動関数は、80 Ryの運動エネルギーカットオフを用いて平面波で展開した。計算に用いた構造は、MgSiO3ブリッジマナイトの単位胞を2×2×1とし、Mg原子の空孔に2個の水素原子（81原子）、Si原子を4個の水素原子（83原子）、SiをAl＋H（81原子と83原子）で置換したスーパーセルである。ブリルアン・ゾーンのサンプリングは、スーパーセルに対して2×2×4のMonkhorst-Packメッシュで行った(Monkhorst and Pack 1976)。構造最適化はすべての構造パラメータを0 Kの静的条件で残留力が1.0×10-5 Ry/au以下になるまで行った。さらにそれらの構造に対し、密度汎関数摂動理論(DFPT) (Baroni et al., 2001)を用いてΓ点におけるフォノン周波数を計算した。

本発表では、上記の計算から含水ブリッジマナイトの構造中における安定な水素位置とその振動特性について議論する。

キーワード：ブリッジマナイト、水素、第一原理計算
Keywords: Bridgmanite, Hydrogen, ab initio calculation

高速X線回折測定による高圧力下シリカ相安定性の解明

Determination of the stability of silica phases under high pressure by ultra-fast X-ray diffraction measurements

*新名 良介[1]、河口 沙織[2]、石井 貴之[3]、佐久間 博[4]、小川 彪聖[1]、小林 建太[1]、米谷 珠萌[1]
*Ryosuke SINMYO[1], Saori Kawaguchi-Imada[2], Takayuki Ishii[3], Hiroshi Sakuma[4], Ayase Ogawa[1], Kenta Kobayashi[1], Shuhou Maitani[1]

1. 明治大・理工、2. JASRI、3. 岡山大・惑星物質研、4. NIMS
1. Meiji Univ. Sci. Tech., 2. JASRI, 3. Okayama Univ. IPM, 4. NIMS

シリカ(SiO_2)は地殻や沈み込み物質を構成する相であり、その高温高圧力下における安定相関係は地球深部の構造やダイナミクスを議論する上で重要な役割を果たす。例えばSiO_2のマントル最下部条件における相関係は、核マントル境界直上に到達した沈み込み物質や、若い核から析出したシリカに富む物質の物理・化学的特性を大きく支配する。また近年では、高圧シリカ相は沈み込み物質中の水のホスト相として注目を集めている。α-PbO_2型結晶構造のSiO_2ザイフェルタイト(seifertite)は下部マントル最下部条件で安定であるとされているが、$CaCl_2$型シリカ相とseifertiteの相境界には議論があり、マントル最下部においてどちらが安定かは未だに不明確である。先行研究によっては、熱力学的平衡状態としては考えにくい、2相が共存する温度圧力領域がマントル最下部に報告されている。結晶構造相転移の際に反応速度論的な影響が大きく、相転移境界の精密な決定が妨げられている可能性がある。本研究では$CaCl_2$型相とseifertiteの相境界を決定するためにレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高圧力実験を行った。先行研究において指摘されている反応速度論的な問題を解決するために、新しく高速X線回折測定を高温高圧力下で行い、かつ出発物質相を従来とは変えて実験を行った。出発物質の合成にはマルチアンビルを用い、高速X線回折測定はSPring-8 BL10XUで実用化された短時間加熱・測定統合制御システムを用いた。最大およそ160 GPaの圧力下で、最長でも1秒間の短時間加熱実験を行い、加熱中に2-200ミリ秒毎の高速X線回折測定を行った。得られたX線回折パターンは比較的圧力の低い試料であれば2ミリ秒の測定でも十分な回折強度が得られることを示していた。今回の条件では加熱開始後、およそ100-300ミリ秒程度で$CaCl_2$型相、あるいはseifertiteの相割合は最大値に達し、以降は変化が見られなかった。先行研究では2相が共存したとされる温度圧力領域において、本研究では2相が同時に成長することはなかった。加熱開始直後の極短時間において出現相を決定することが可能となったことで、従来よりも明確に相境界を制約できると考えられる。得られた結果から、マントル最下部において安定なSiO_2相を議論する。

キーワード：SiO2、高温高圧力、X線回折測定、ザイフェルタイト
Keywords: SiO2, high pressure and high temperature, X-ray diffraction measurement, seifertite

下部マントル圧力下大歪変形実験より検討するFerropericlase多結晶体の結晶選択配向特性

Crystallographic preferred orientation properties of Ferropericlase polycrystals obtained from large strain deformation experiments under lower mantle pressures

*夏井 文凜[1]、東 真太郎[1]、岡崎 啓史[2,5]、上杉 健太朗[3]、安武 正展[3]、河口 沙織[3]、野村 龍一[4]、太田 健二[1]
*Bunrin Natsui[1], Shintaro Azuma[1], Keishi Okazaki[2,5], Kentaro Uesugi[3], Masahiro Yasutake[3], Saori Kawaguchi[3], Ryuichi Nomura[4], Kenji Ohta[1]

1. 東工大、2. 広大、3. JASRI、4. 京大、5. JAMSTEC
1. Tokyo Tech, 2. Hiroshima Univ., 3. JASRI, 4. Kyoto Univ., 5. JAMSTEC

地震波観測より、アフリカと南太平洋地下の下部マントル中部から最下部マントルにかけてS波速度が遅い領域（LLSVP：Large Low Shear Velocity Provinces）が存在することが確認されている。さらにその縁部では波の伝搬方向や振動方向によって地震波速度が異なる地震波異方性が報告されている。地震波異方性は鉱物の結晶軸が特定の方向に並ぶ結晶方位選択配向（CPO：Crystallographic preferred orientation）の発達によって生じている可能性があり、その領域における構成鉱物の変形とCPO発達の関係を調べることで重要な知見が得られる。しかし、下部マントル圧力条件での変形実験の困難さにより実験的アプローチからその関係を議論した研究は少ない。LLSVPが熱的特徴なのか組成的特徴なのかは現在時点で未だ不明であるが、マントル対流による撹拌に耐えるためには、周辺マントルに対して約10%高い密度の組成である必要があり、構成鉱物の候補として鉄に富むPericlaseとBridgmaniteが挙げられている。本研究ではFerropericlase多結晶体について下部マントル圧力条件での大歪変形実験を行い、変形に伴うCPOの発達と支配的なすべり系を調査し、LLSVPの地震波異方性との関係を考察することを目的とする。本研究では、回転式ダイヤモンドアンビルセル（rDAC）を用いて、Ferropericlase多結晶体のねじり変形実験を行った。変形前の試料には、集束イオンビーム（FIB）により試料回転軸に平行にPtを蒸着することで歪マーカーとした。変形実験は大型放射光施設SPring-8 BL47XUにて行った。変形実験前後のX線ラミノグラフィー法によるPt歪マーカーの観察、および変形実験中のその場X線回折（XRD）測定を行った。X線ラミノグラフィー法から得られた再構成断面像から試料の歪を決定し、1角度（回転軸に対して60˚方向）XRDより変形実験中のFerropericlaseのCPO決定を試みた。CPO決定のための組織解析にはMAUDによる結晶方位分布関数（ODF）が組み込まれたRietveld解析を行った。加えて、変形実験後の試料を減圧回収し、SPring-8 BL10XUにて多角度(-35˚～35˚)XRD測定を行い、同じくCPO決定を試みた。圧力0-119 GPa、温度300-950 K、歪速度一定の条件で$(Mg_{0.8}, Fe_{0.2})O$、$(Mg_{0.6}, Fe_{0.4})O$、$(Mg_{0.1}, Fe_{0.9})O$の変形実験に成功した。変形実験中および変形実験後の減圧回収試料より得られたXRDから計算したCPOの結果は調和的であり、減圧による試料変形やXRDのPole figureカバー率の影響は少ないと考えられる。本研究においてFerropericlaseは圧力の増加に伴い、せん断変形時の活性化するすべり面は{110}から{100}へ変化しており、MgO結果と調和的であった。また、鉄のスピン転移のすべり系への影響は見られなかった。

キーワード：レオロジー、変形実験、下部マントル
Keywords: Rheology, Deformation experiment, Lower mantle

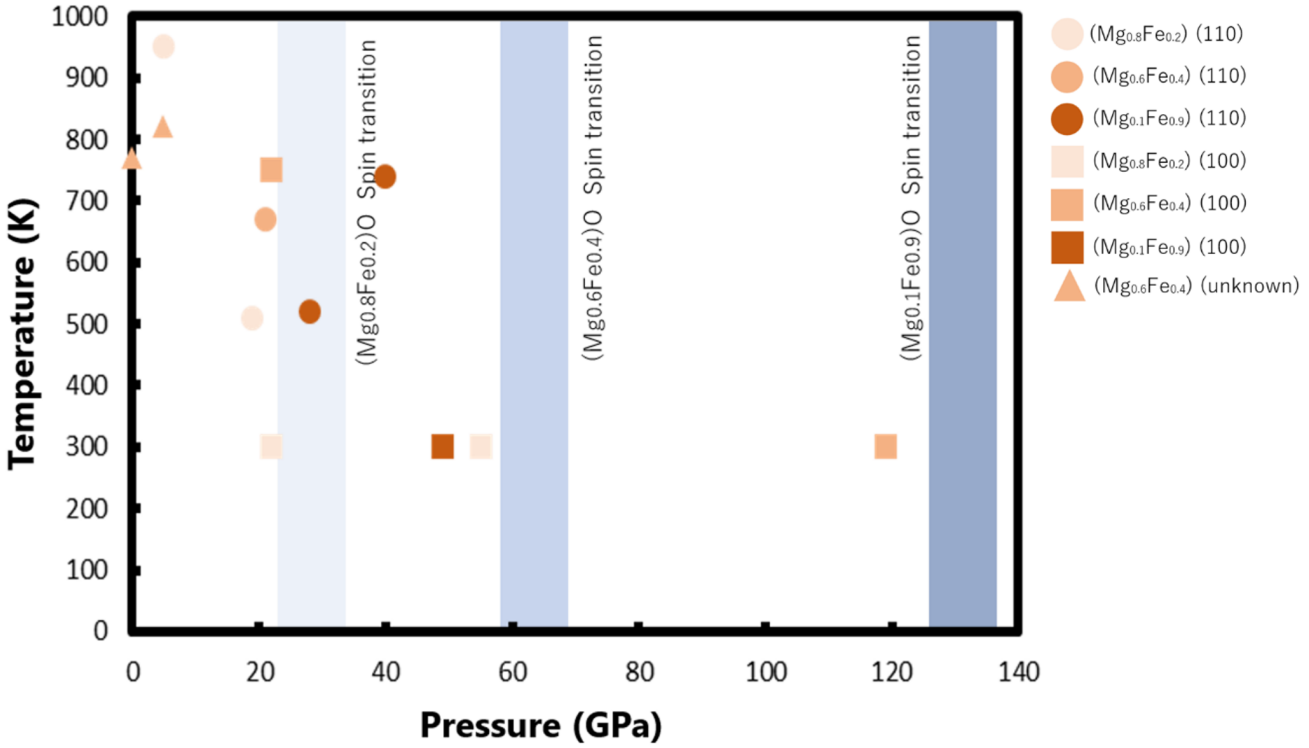


図　活性化するすべり面と温度および圧力の関係

中性子イメージングを用いた高温高圧下における水素封止材の検討

Investigation of hydrogen sealing materials at high temperature and high pressure using neutron imaging

*柿澤 翔[1]、鍵 裕之[2]、高野 将大[2]、佐野 亜沙美[3]、服部 高典[3]、阿部 淳[4]、舟越 賢一[4]
*Sho KAKIZAWA[1], Hiroyuki Kagi[2], Masahiro Takano[2], Asami Sano-Furukawa[3], Takanori Hattori[3], Abe Jun[4], Kenichi Funakoshi[4]

1. JASRI、2. 東大・院理、3. JAEA J-PARCセンター、4. CROSS 中性子科学センター
1. JASRI, 2. UTokyo Sci., 3. JAEA J-PARC Center, 4. CROSS, Neutron Science and Technology Center

鉄をはじめとするある種の金属は高圧下で水素化物を形成する。そのため、高圧発生装置を用いた金属水素化物の高温高圧実験が盛んに行われている。しかし、マルチアンビル型プレスでは、高圧セル内に水素ガスを封入することは困難である。この課題を克服するために、高温高圧条件下で不可逆的に分解して水素を放出する固体内部水素源と水素封止カプセルを用いることで、試料と水素を直接反応させることができる(Fukai, 1984)。カプセルの材料としては、NaClが広く利用されてきた。しかし、利用されてから約40年が経っても、なぜ水素を封止できるのかその理由は解明されていない。また、NaClの高温下での粒成長によって水素封止能力が低下するのではないかと近年研究者間で議論されている。さらにNaClは1200 Kにおいて25 GPa以上の圧力でB1-B2転移し水素と反応して$NaCl(H_2)$を生成することが報告されており（Matsuoka et al., 2019）、水素封止能力の低下が予想される。一方、我々の技術開発により、20 GPa以上の圧力で高温高圧下中性子回折実験ができるようになり、そのような温度圧力領域でも使用可能なカプセル材料の探索や、その探索指針を得るためのNaClの水素封止能力のメカニズムの解明が急務となっている。そこで本研究は、中性子イメージングを用いて高圧セル内の水素を可視化しNaClの水素封止能力の検証を行った。　実験は茨城県東海村にあるJ-PARC MLFのBL11 PLANETで行った。高圧装置には6軸型マルチアンビルプレス「圧姫」を用いた。加圧にはMA6-6方式を採用し上流および下流のアンビルギャップを通して高圧セルを透過観察した。カプセル材には単結晶および多結晶のNaClの2つをテストした。水素の有無は、カプセル内に入れたFeの透過強度から推定し、内部水素源にはアンモニアボラン(NH_3BH_3)を使用した。圧力は5 GPaであり、透過イメージと回折パターンを交互に測定を行った。

図1にNaCl多結晶カプセルを用いたときの実験結果の例を示す。加圧後、370 Kから950 Kまで5分かけて昇温し、昇温中および昇温後保持中に測定を行った。昇温開始後に鉄の透過強度が減少し始め、それは30分間続いた。これは、水素源から供給された水素が鉄中に拡散し、鉄水素化物を形成しためである。その後は一転して透過強度が増加する傾向が見られ、850 Kに降温してもその傾向は続いた。950 Kにおいて多結晶NaClの水素封止能力が低下したことを示している。さらに、別の実験で温度を段階的に上げて同様の観察を行ったが、800 Kから950 Kの間で水素が抜ける様子が観察された。単結晶NaClカプセルを用いた実験でも同様の結果が得られた。これらのことから、NaClの結晶性に関わらず水素封止能力の低下が起こると考えられるが、多結晶を用いた実験では昇温中の粒成長が観察されたため、必ずしも多結晶NaClカプセルの水素封止能力をテストできたわけではないと考えている。

今回の結果から、従来考えられているよりも低い温度で、水素封止能力が低下することがわかった。より高温高圧下での金属水素化物の実験を行うためにもNaCl以外の水素封止カプセル材の探索が必要であると考えられる。

キーワード：水素、中性子イメージング、水素封止材
Keywords: Hydrogen, Neutron Imaging, hydrogen sealing materials

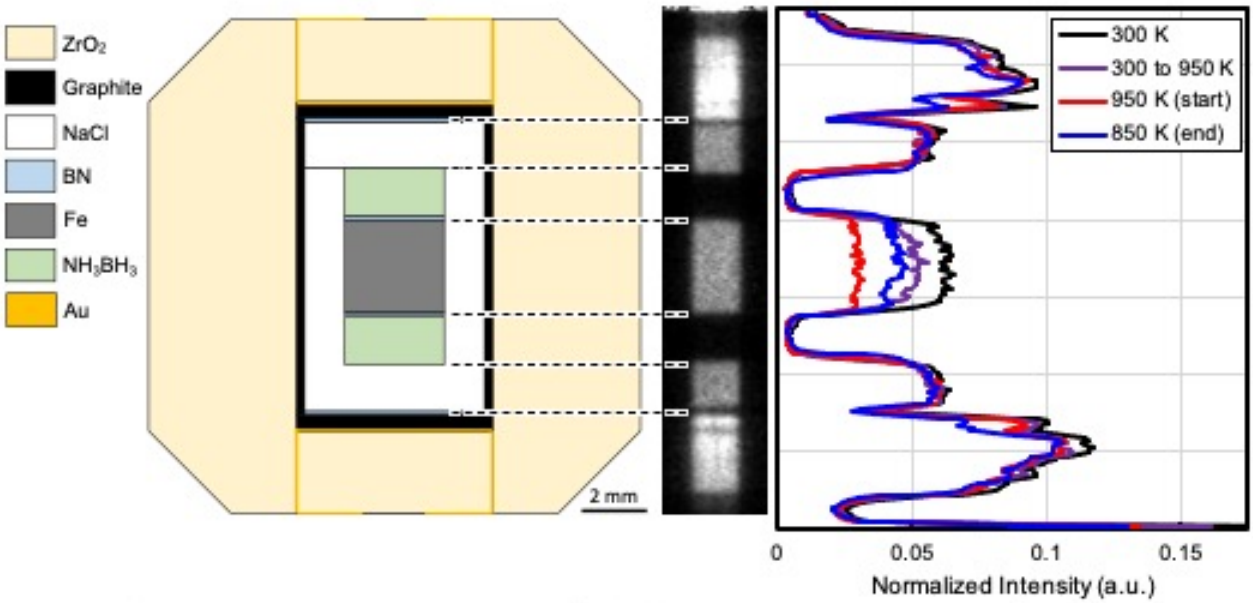


図 1：（左）使用した高圧セルおよび（右）得られた透過像および透過プロファイル

高温高圧条件下における硫化鉄と水素の反応の再検討

Reactions of FeS with hydrogen at high pressure and high temperature revisited

*高野 将大[1]、鍵 裕之[1]、森 悠一郎[1]、青木 勝敏[1]、柿澤 翔[2]、辻野 典秀[2]、肥後 祐司[2]、佐野 亜沙美[3]
*Masahiro Takano[1], Hiroyuki Kagi[1], Yuichiro Mori[1], Katsutoshi Aoki[1], Sho Kakizawa[2], Noriyoshi Tsujino[2], Yuji Higo[2], Asami Sano-Furukawa[3]

1. 東大･院理、2. JASRI、3. 日本原子力研究開発機構 J-PARC
1. UTokyo, 2. JASRI, 3. J-PARC center, JAEA

硫化鉄(II)(FeS)は隕石中に普遍的に含まれ、地球型惑星の金属核に含まれる物質の候補として注目されている。水素共存下における高温高圧条件で硫化鉄の単位胞体積の増加と融点降下から、FeSの高温高圧相であるFeS IV 相(FeS IV)とV相(FeS V)は水素と反応し、侵入型固溶体$FeSH_x$を形成する可能性が示された(Shibazaki et al., 2011)。高温高圧下での中性子回折からFeS重水素化物の結晶構造も報告されている(Abeykoon et al., 2023)が、D原子の原子変位パラメータが、高温高圧条件下における鉄水素化物の先行研究と比較して約10倍の値であり、解析結果には疑問が残る。これらの研究では、試薬会社から入手した硫化鉄試料が出発物質として用いられており、X線回折測定で得られた単位胞体積から化学量論的ではなく鉄欠損があることがわかっている。最近、我々が合成した化学量論的な硫化鉄を出発試料として同様の実験を行ったが、先行研究で報告されたような水素化による大きな体積膨張は起こらず、出発物質の状態によって水素との反応性が大きく異なる可能性が示された。そこで、先行研究で用いられた硫化鉄試薬と、鉄と硫黄の混合物から合成した硫化鉄の水素との反応性の違いを明らかにすることを目的に、高温高圧下における中性子回折実験と放射光X線回折実験を行った。中性子回折実験はJ-PARC MLF BL11(PLANET)で実施した。圧力発生には6軸マルチアンビルプレス「圧姫」を用い、出発試料として、Abeykoon et al. (2023)と同じChemPur製の硫化鉄試薬を用いた。重水素源にはND_3BD_3を用い、放出される重水素の物質量がFeSと等しくなるように調整した。まず試料を5 GPaまで加圧した後、1000 Kまで昇温しND_3BD_3を分解させ、系内に水素を放出させたところ、試料が水素と反応して単位胞体積が膨張する様子が観察された。体積膨張の終了後、1000 Kと700 Kにおいて、1点あたり8時間かけて中性子回折パターンを取得した。Abeykoon et al. (2023)で提案された結晶構造モデルを用いてRietveld解析を行い、硫化鉄中の重水素量を決定した。その結果、Abeykoon et al. (2023)と同様にきわめて大きな原子変位パラメータが得られた。また、水素化していない硫化鉄の結晶構造を初期モデルとして構造精密化を行ったが、Abeykoon et al. (2023)で提案された水素位置には有意な散乱長異常は観察されず、硫化鉄水素化物の結晶構造モデルを再検討する必要性が明らかになった。放射光X線回折実験はSPring-8 BL04B1で行った。高圧発生にはマルチアンビルプレス 「SPEED Mk. II」にDIA型ガイドブロックを組み込み、2段目アンビルに超硬アンビル(TEL = 4 mm)を使用するMA6-8方式を用いた。実験は2 run行い、試料カプセル内には、Shibazaki et al. (2011)またはAbeykoon et al. (2023)で使用された硫化鉄試薬、本研究で合成した硫化鉄、水素源のNH_3BH_3を、それぞれBN薄膜で仕切って順番に投入した。まず5 GPaまで加圧した後、800 Kまで昇温して水素を放出させた。それぞれの硫化鉄試料のX線回折パターンを交互に取得し、水素との反応性の違いを観察した。Abeykoon et al. (2023)で用いられた硫化鉄は1000 Kで, Shibazaki et al. (2011) で用いられた硫化鉄は1200 Kでそれぞれ水素と反応し、単位胞体積が膨張する様子が観察された。一方、我々が合成した化学量論的な硫化鉄試料はいずれの温度点においても単位胞体積の膨張は観察されなかった。これらの結果から、先行研究で用いられた鉄欠損をもつ硫化鉄試料は水素と反応するが、化学量論的な硫化鉄は水素と反応しないことが明らかになった。

キーワード：中性子回折、X線回折、硫化鉄、水素化

Keywords: neutron diffraction, X-ray diffraction, FeS, hydrogenation

静的圧縮手段による極高圧発生技術開発

Extreme pressure generation using toroidal diamond anvil cell

*境 毅[1]、中本 有紀[2]、中村 悟[1]、岩津 壮太郎[2]、福田 脩斗[2]、加藤 悠暉[2]、清水 克哉[2]、門林 宏和[3]、河口 沙織[3]
*Takeshi SAKAI[1], Yuki Nakamoto[2], Satoru Nakamura[1], Sotaro Iwatsu[2], Shuto Fukuda[2], Yuki Kato[2], Katsuya Shimizu[2], Hirokazu Kadobayashi[3], Saori Kawaguchi-Imada[3]

1. 愛媛大・GRC、2. 阪大基極セ、3. JASRI
1. GRC, Ehime University, 2. KYOKUGEN, Osaka University, 3. JASRI

地球や惑星の深部環境は高温高圧の世界になっており，実験的にその環境を再現することで惑星構成物質の結晶構造・物性・化学反応が研究されてきた。惑星科学分野では，近年の惑星探査において5000を超える系外惑星が発見されており，観測技術の制約によるところもあるが，そのほとんどは地球よりも大きな惑星（スーパーアースまたはサブネプチューンなど）である。系外惑星の内部構造や進化の理解のためには，水素，ヘリウム，水，メタン，アンモニア，ケイ酸塩，酸化物，鉄系合金といったあらゆる惑星構成物質について，地球内部の温度圧力条件に留まらないサブテラパスカルからテラパスカルオーダーの非常に広範な温度圧力範囲で研究する必要があり，高圧物質科学にとって広大なフロンティアを提供している。ダイヤモンドアンビルセル（DAC）は地球中心に及ぶ広範な圧力条件を実現できる静的圧縮実験手段として広く利用されてきたが，従来のDACでは400 GPa超の圧力発生は困難であった。これを可能にする手法として2段式DAC(ds-DAC)(Dubrovinsky et al. 2012, 2015; Dubrovinskaia et al. 2018; Sakai et al. 2015, 2018, 2020)とトロイダル型DAC(t-DAC)(Dewaele et al. 2018; Jenei et al. 2018; Zurkowski et al. 2024)が注目されているが、いまなお400 GPa超の圧力発生は容易ではない。本研究では400~500 GPaの圧力発生を目的として，様々な先端形状のt-DACによる高圧力発生実験を行った。

t-DACにおいて先端の凸部とそれを支える平坦部は，ds-DACにおける2段目アンビルと1段目アンビルの関係に対応する。凸部の形状は先端部の圧力分布・勾配を決定する重要な要素である。本研究では特に高い圧力発生報告のあるds-DACにおいて用いられている半球形状を模して，上部に微小なculet相当の平坦部を残しつつ球体上部1/4を切り出した形状を集束イオンビーム加工装置(FIB)によって作製した。Culetサイズは5, 10, 20 umの3種類を試行した。アンビル材は単結晶ダイヤモンド，ガスケットはレニウムを用い，圧力評価はレニウムの状態方程式(Anzellini et al. 2014; Sakai et al. 2018)を用いた。XRD測定はSPring-8 BL10XUにて行った。

Culet 5 umのt-DAC実験で，476~510 GPaまでの圧力発生に成功し，圧力スケールによる幅はあるものの，目的の500 GPa発生を実現することができた。ここでReの体積はRe 100, 101, 110の3本のピークを用いて決定しており，c/aは1.60程度と妥当な値であった。ただピークのブロードニングに起因する体積誤差が大きい（±～40 GPa）ため，もう少し大きなculet径にするなど，非静水圧の効果を低減しより質の良い圧縮状態を実現する工夫が必要と思われる。一方，測定箇所が中心から1~2 μmずれただけでも体積およびc/a比が大きく変化し，従って算出される圧力も大きく低下する。c/aが異常に大きいケースでは，一軸的な応力の効果として体積を過大評価し，従って圧力は過小評価されると考えられるため，先端部における正確な圧力分布の評価は非常に難しい。Culet 10 umおよび20 umのt-DAC実験では，それぞれ455~487 GPa, 421~449 GPaの圧力発生に成功し、いずれも400 GPa超を達成することができた。Culet 10 umでの実験では最高圧条件において数umの範囲においておおよそ均質な圧力場となっていることを確認できた。また、Culet 20 umの実験では最高圧の421 GPaにおいて6本のピークが測定され，c/aは1.58，体積誤差は0.8%であった。このような圧力領域では圧縮率が非常に小さくなるため、わずかな体積差が大きな圧力差に相当する。従って、体積誤差0.8%は圧力誤差±15 GPa (3.5%)と10 GPaを超える圧力差となるが、culet 5 umの実験に比べれば半分以下となっており測定精度としては改善がみられた。

キーワード：トロイダル型DAC
Keywords: Toroidal type DAC(t-DAC)

口頭講演 | T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

2024年9月13日(金) 9:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

9:00 ~ 9:25

[T1-01] 脱炭素化社会と必須金属資源

「招待講演」

*細井 義孝[1] (1. JICA)

9:25 ~ 9:50

[T1-02] 鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

「招待講演」

*米村 和紘[1] (1. （独）エネルギー・金属鉱物資源機構)

9:50 ~ 10:15

[T1-03] Critical metal potentiality of Mongolia

「招待講演」

*Jargalan Sereenen[1]、Arvinzun M.[2] (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:15 ~ 10:30

[2Lecture-101-06-4add] 休憩

10:30 ~ 10:55

[T1-04] Geology, sedimentation environment of the
Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

「招待講演」

*Ochirbat Magsarjav[2]、Jargalan Sereenen[1] (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:55 ~ 11:20

[T1-05] Insights into the mineralogical characteristics of Li-enriched metasomatic albitite from the Iwagi islet, SW Japan

「招待講演」

*永嶌 真理子[1]、今岡 照喜[1] (1. 山口大・院創成)

11:20 ~ 11:45

[T1-06] イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

「招待講演」

*渡辺 寧[1] (1. 秋大・国資)

11:45 ~ 12:00

[2Lecture-101-06-8add] 休憩

脱炭素化社会と必須金属資源

Decarbonized Society and Essential Metal Resources

*細井 義孝[1]
*YOSHITAKA HOSOI[1]

1. JICA
1. JICA

近年、地球の気温上昇により、北極・南極における大規模かつ不可逆的な氷床消失による海面水位の上昇、熱波・豪雨・沿岸域の氾濫などの気象の極端現象の発生、ツンドラの融解による未知の細菌類の出現、作物生産や水の利用可能性の減少、などの問題が発生し、世界的対応を求められている。地球の気温上昇を抑制する対策としては、省エネルギー化、エネルギーの低炭素化（風力発電、太陽光発電、地熱発電等の利用促進）、利用エネルギーの転換（電化、水素利用等）などが考えられている。ここで、エネルギーの低炭素化を試みようとしたとき、特別な金属が異常に大きな量で必要なことがわかってきた。例えば、太陽光発電では、太陽光電池として銅・アルミニウムのほか、ガリウム、カドミウムが必要である。風力発電のタービンには、ネオジウムやジスプロシウムなどの希土類鉱物で構成される永久磁石を使用した発電機が用いられる。地熱発電では、耐熱井戸のためにチタン、その他の技術にもクロムが必要である。蓄電池は、電気自動車、風力発電でも必要だが、リチウム、バナジウムを必要とする。電気自動車の需要は各国で急激に拡大してきており、蓄電池の需要は比例して拡大する。どのくらい伸びるかと言えば、世界銀行の2020年の報告書によれば、2018年度の生産量に対して、2050年度に必要な量を予測すると、グラファイト494%、リチウムで488%、コバルト460%、インジウム231%、バナジウム189%等の量が、カーボンニュートラルの対応への新技術だけで、必要となっている。必要な金属は、これだけではない。世界銀行は17種の鉱種を挙げている。これら金属の、埋蔵、生産、消費はどのようであるか、筆者は重点対応国を考えた。これらの資源は開発途上国に多くが存在する。ここで、重要鉱物資源を確保するための課題を考える。銅、アルミニウムおよびインジウム以外の6つの鉱種はいずれも資源賦存の偏在性が極めて高く、それは今後需要が増大する鉱物資源の安定的な確保において大きな懸念事項である。また、その限られた生産国の中には政情が不安定であったり、鉱山開発に伴う環境汚染が問題となっていたり、社会的混乱が頻発する国が多く含まれていることも懸念される事項である。これまでの経済システムは、平時を前提として効率性を追求し、グローバル化が推し進められてきたが、新型コロナウィルス感染の拡大によってサプライチェーンの混乱が生じ、世界的な経済活動の停滞を引き起こした。コロナ後を考える上では、サプライチェーンの強靭化を視野に入れた戦略の見直しが必要となる。重要鉱物資源の埋蔵量が豊富な国でありながら開発が進んでおらず、生産量が少ない国が多くあり、今後これらの国々で開発を進めることは、需要の増大に対する供給不安の払拭に繋がるし、サプライチェーンの強靭化も図れるものと考えられる。気候変動対策としてエネルギーの低炭素化およびCO2排出量の抑制を図るためには、これまでの生産量をはるかに上回る量を必要とする重要な鉱物資源が種々存在し、それらの多くが偏在しており生産国が限られている。しかしながら、これらの鉱物資源の十分な、かつ安定的な供給なしには2DSシナリオの達成はあり得ない。そのため、今後の持続的かつ安定的な鉱山操業および開発では以下のような対応が肝要となる。　① ソーシャルライセンス（鉱山開発に対する地域社会による許容）を取得すること。　②　環境保全および環境修復に万全を期すこと。　③　鉱物資源の採掘および処理においてクリーンエネルギー利用への移行を図ること。（鉱業は世界のエネルギー使用の11%を占める）　例：ザンビアの鉱業セクターは国内電力消費の半分を占める。さらに鉱業セクターの半分は排水のために消費される。最後に、鉱山のコロナ対策と効率化には鉱山自動化、無人化、遠隔化、人工知能（Artificial Intelligence：AI）の導入が考えられる。それは企業にとってのメリットであるが、国としてジレンマもある。途上国の発展のステップとしては、多くの雇用を生み出し、基礎的技能・技術を身に着け、労働者家族の生活の向上、といった鉱業の特典を甘受するメリットと相反するので、先端技術の導入にはジレンマがあり、当該国の経済構造・経済レベルを見

ながら、技術キャッチアップを図りながら導入しなければならない。JICAは資源開発保有途上国の課題解決に尽力していく所存です。

キーワード：脱炭素化、必須金属、鉱業の課題
Keywords: Decarbonization, Essential metals, Mining challenges

鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

Japan's current approach to securing mineral resources

*米村 和紘[1]
*Kazuhiro YONEMURA[1]

1.（独）エネルギー・金属鉱物資源機構
1. JOGMEC

世界的なグリーントランスフォーメーション（GX）の進展により, バッテリーや半導体等向けの重要鉱物確保競争が激化している. とりわけ, 電気自動車向けに用いられるリチウム, ニッケル, グラファイトについては, 既存の資源会社だけではなく, 各国自動車メーカーやバッテリーメーカーがその権利確保を加速させている. また, これらの鉱種の供給地及び製錬等中流工程が偏在していることなどにより, 経済安全保障上のリスクが懸念されるケースもある.

このような状況の下, 世界的に供給源や中流工程の多角化への各国政府からの資金的支援や制度設計などの取り組みが進む. また, 環境や人権等への配慮を高めることにより, 持続可能な資源開発を推進する動きも高まっている. 日本では, 「蓄電池産業戦略」や経済安全保障推進法に基づく「重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針」などに基づいて, 日本企業による国内外での鉱山開発, 技術開発, 製錬などの中流工程の強化への支援, 具体的には, JOGMECによる探鉱・開発事業への共同出資比率の引き上げや助成金による開発等の支援を行っている. 中流工程の支援強化については, 資源国での高付加価値化政策やアジア各国での新たな産業創出にもつながると期待される.

制度設計による日本企業支援に加え, 資源国との資源外交やマルチ枠組みへの対応も積極的に実施している. 各国の地質調査機関等との協力覚書の締結等を通じて, 具体的には資源国政府の要人を招聘した日本企業向けセミナーやリモートセンシング技術の技術移転, 人材育成等を進めている. アジアにおいては, ASEAN＋日中韓の枠組みにて, 持続可能な鉱物資源開発のための協力を進めている他, 共同探査等を実施し新たな鉱物資源の可能性を共同で評価している.

供給源の多様化の課題は, 既存資源が枯渇する中で有望なプロジェクトに投資が集中していることである. その一方で, これまで資源としてみなされていなかった鉱石鉱物が新たな鉱源として着目され, 新たに探査が拡大している場合もある. また, 地質学的理解が深まり特定のテクトニクスセッティングが明らかになることで, 新たな鉱床帯として認識される場合もある. 新たな鉱石タイプとしては, 近年探査が開始されたニッケル資源であるアワルワ鉱が好例である. アワルワ鉱は, ニッケル-鉄合金（Ni_3Fe）で, 低品位ながら大規模に蛇紋岩化した超苦鉄岩中に含まれる. 温暖化対策として, 低CO_2排出のニッケル生産が求められる中, 既存の製錬に比べ低CO_2排出での生産が可能であることから, 日本のバッテリーメーカーや鉱山会社も注目する. アワルワ鉱は, 沈み込み帯内の低酸素フガシティ, 低硫黄環境で形成されると考えられ (e.g. Frost, 1985; Britten, 2017), 主な産地であるカナダBC州にて研究・探査が進んでいるが, 詳細な地質セッティングについてはまだ解明されていない部分が多く, 鉱物学的, 岩石学的な理解が進むことで効率的な探査が可能になる. 小大陸が離合集散して形成されたアジア大陸には, 様々なテクトニクスセッティングが内包されているが, 詳細な地質調査が行われていないエリアも多く残ることから, アワルワ鉱に限らず、未開発の新たな資源が今後も多く発見されていくと期待される.

キーワード：重要鉱物、鉱物資源確保
Keywords: Critical Minerals, Securing Mineral Resources

Critical metal potentiality of Mongolia

Critical metal potentiality of Mongolia

*Jargalan Sereenen[1]、Arvinzun M.[2]
*Sereenen Jargalan[1], M. Arvinzun[2]

1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists
1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

Critical metals such as copper, lithium, nickel, cobalt and rare earth elements are essential components in many of today’s rapidly growing clean energy technologies –from wind turbines and electricity networks to electric vehicles. Lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite are crucial to battery performance. rare earth elements are essential for permanent magnets used in wind turbines and EV motors.

Mongolia has wide potential on mineral resources in variety of types.

Regarding to critical metal tendency, there is no clear classification in Mongolia, partly identify as high technology minerals and some government official documents use as important minerals. Even though some small projects are carried out to identify how potential is critical metals including REE, Li, Ni, Co as well as graphite in recent years.

Therefore, we carried out geological reconnaissance study to make clear genetic type, regional distribution characteristics and ore mineral identification. As result we have quite good potentiality on REE mineralization, including carbonatite and alkaline metasomatite types. Lithium is not so studied in Mongolia, but recently, we have several discoveries of Li bearing pegmatites in the central-eastern part. Nickel and cobalt are almost not studied instead of small occurrences found during geological mapping at scale 1:200000 and 1:50000, so no clear potentiality is recognized. There are several deposits and occurrence in Mongolia which are closely relate with marbles metamorphic rocks and has possible potentiality. Copper is the most potential resource making in all, almost 1 billion tons of reserves and resources. Annual production is expected to more than double from 300,000 tons of copper concentrate per year to over 600,000 tons per year from 2028 to 2036 once the Oyu Tolgoi mine is fully operational in 2023.

This time we would like to make general introduction of how potential is in critical metal tendency in Mongolia.

キーワード：Metal potentiality、Mongolia
Keywords: Metal potentiality, Mongolia

口頭講演

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

2024年9月13日(金) 09:00 〜 12:00 ESホール (東山キャンパス)

10:15 〜 10:30

[2Lecture-101-06-4add]休憩

©日本鉱物科学会

Geology, sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

Geology, sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

*Ochirbat Magsarjav[2]、Jargalan Sereenen[1]
*Magsarjav Ochirbat[2], Sereenen Jargalan[1]

1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists
1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

Mongolia has abundant resources of coal, which are distributed mainly in the south and southeastern part, including some deposits in the north and west part of the country. In recent years, the exploration of coal deposits has been intensively carried out, but not much effort has been made to determine the origin, regional regularity of coal distribution as well as relationship between geological condition and coal quality.

The purpose of this study is to clarify geology and sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression in order to contribute to the reconstruction of the Mesozoic geologic and geodynamic setting of the Mongolia.

The study area is located at the 1000 km southwest of Ulaanbaatar and 50 km north of the Mongolia-China border, forming latitudinal trending depression which is 40 to 60 km in width and continues more than 200 km. There are five independent coal bearing parts with 16 coal deposits, which are: Bayantes part, contains Elstei, Khurshuut, Khuvd, Gashuu Tolgoi and Khuren tasv deposits; Ovoot Tolgoi part, contains Sunset and Sunrise deposits; Nariin sukhait part contains West Nariin sukhait, Central Nariin sukhait, East Nariin sukhait and Khuren shand deposits; Sumber part contains Central Sumber, Sumber and Biluut deposits and Jargalant part contains Jargalant and South Biluut deposits.

Result of geochemical study indicates that sediments deposited in the Ovoot khural depression is sourced by the weathering and transporting of intermediate and felsic composition magmatic rocks, mainly from dacite, andesite including minor amount of metamorphic, sedimentary and intrusive rocks.

Spider diagrams of trace element composition of sedimentary rocks of the Orgilokhbulag formation, show Nb-depletion and Pb, Mo enrichment, indicating possible origin of magmatic rocks formed under subduction environment and they are intermediate to felsic in composition. The major trace and rare earth element composition of the Orgilokh bulag formation sedimentary rocks, indicate that the source rocks of sediments might have been formed in the active continental margin tectonic setting.

According to provenance model, coal deposition is undertaking with good tissue preservation, in an alternating environment of oxygenic and deoxygenated swamps.

Based on the metamorphic degree, the temperature of peat compression, the amount of volatile, and the depth gradient of temperature, peat was buried and deposited at a depth of 3500-7000 meters. Low sulfur content, low ash content and low volatile content of coal at the various parts of the depression indicates thet the peat deposition is occurred under two stages.

キーワード：Ovoot khural coal、Mongolia
Keywords: Ovoot khural coal, Mongolia

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

Insights into the mineralogical characteristics of Li-enriched metasomatic albitite from the Iwagi islet, SW Japan

Insights into the mineralogical characteristics of Li-enriched metasomatic albitite from the Iwagi islet, SW Japan

*永嶌 真理子[1]、今岡 照喜[1]
*Mariko NAGASHIMA[1], Teruyoshi IMAOKA[1]

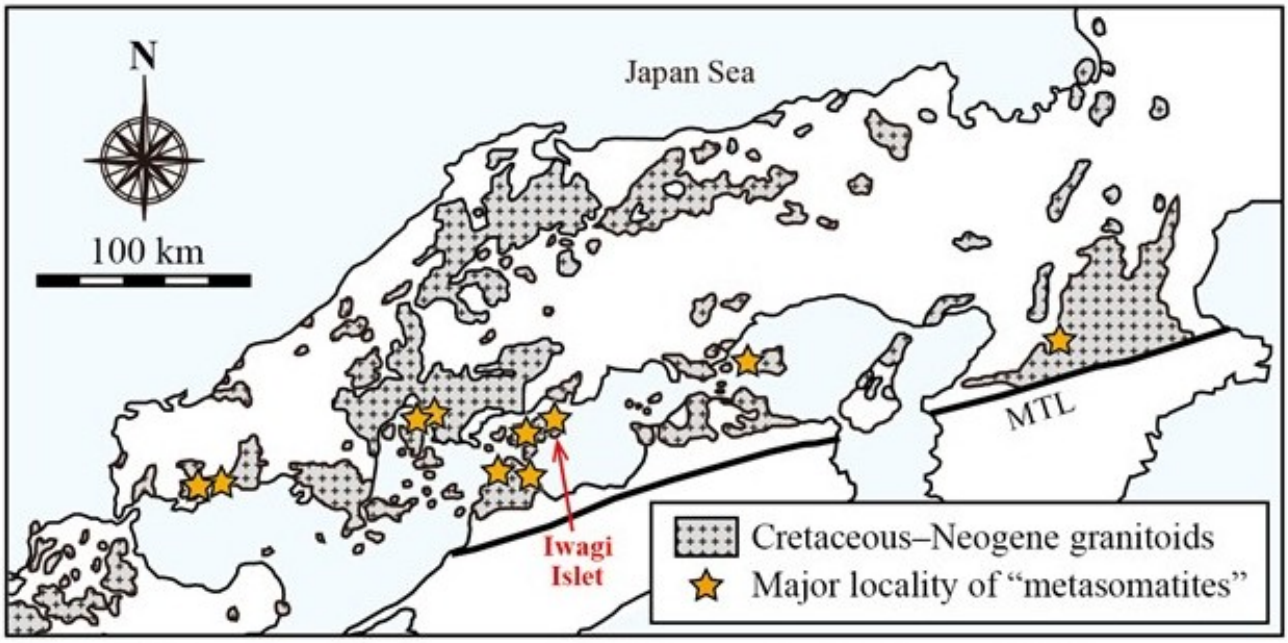
1. 山口大・院創成
1. Yamaguchi Univ. Sci.

The study of metasomatic rocks is essential for comprehending the nature and origin of metasomatic agents. It might provide a clue for fluid circulation within the crust. In the Setouchi Province, metasomatic rocks are distributed along an approximately E–W trend, and these rocks are associated with Late Cretaceous granites. The Iwagi albitite is one such metasomatic rock. However, unlike other metasomatites in the area, its high lithium content (500 ppm) is unique. Detailed investigations of the mineralogical characteristics of Li-minerals have been conducted to better understand the formation and evolution of Iwagi albitites. The albitites exist as small masses, and the textures of the weakly metasomatized ones resemble those of the host adjacent granite. The transition from granite to albitite occurs gradually and can be understood through the mineral assemblages. The Iwagi albitite is known as the type locality of four Li-analog minerals: sugilite $KNa_2(Fe^{3+}, Mn^{3+}, Al)_2Li_3Si_{12}O_{30}$, katayamalite $KLi_3Ca_7Ti_2(SiO_3)_{12}(OH)_2$, murakamiite $LiCa_2Si_3O_8(OH)$, and ferro-ferri-holmquistite $\square Li_2(Fe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2)Si_8O_{22}(OH)_2$. The former three minerals were found in the fully albitized rock, while the latter was found in the weakly albitized granite. The albitites display a variety of replacement textures due to Na–Li metasomatism, and they also exhibit noticeable strain-induced textures.

The δ^7Li values of murakamiite and Li-rich pectolite show a wide range from -9.1 to +0.4‰ (ave. -2.9‰) and should have resulted from hydrothermal fluid-rock interactions at 300–600 ˚C. The very low δ7Li values may have originated from intra-crystalline Li isotope diffusion or involvement of deep-seated, Li–Na-enriched subduction-zone fluids with low δ7Li values. This finding highlights the significance of fluid-rock interactions in the formation of metasomatic rocks. Deformation-induced fracturing of the rock may have enhanced fluid circulation, leading to the formation of the metasomatic rocks along the E–W trending lineament.

キーワード：Lithium、albitite、metasomatism
Keywords: Lithium, albitite, metasomatism

@Japan Association of Mineralogical Sciences.



Distribution of metasomatites in Setouchi Province, SW Japan.
(after Murakami 1976)

イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

Ion adsorption-type REE deposits: the source of HREE

*渡辺 寧[1]
*Yasushi Watanabe[1]

1. 秋大・国資
1. Akita Univ. Int. Res. Sci.

イオン吸着型鉱床は，1970年代後半に中国南部の江西省を中心とした地域で確認されたユニークな鉱床タイプである．花崗岩の風化に伴い形成されたカオリナイトやハロイサイト等の粘土鉱物に希土類イオンが吸着されることにより形成される鉱床で，鉱石となる粘土中の希土類の品位は，カーボナタイトなど他のタイプの希土類鉱床と比較すると低いが(~0.2 wt%)，希土類の抽出が極めて簡単で生産コストが低いという特徴がある．このタイプの鉱床が脚光を浴びるようになったのは2000年以降で，重希土類元素の供給源としてである．1983年の希土類磁石の発明と1985年の製品化，1997年の初代プリウスの発売以降，ネオジム磁石の需要が増したため重希土類の需要が増してきた．希土類元素の主要な供給源であるカーボナタイトや漂砂鉱床は，軽希土類元素に富んでいるが重希土類には乏しいため，イオン吸着型鉱床は重要な重希土類元素の供給源となった．重希土類に富む鉱床の探査は世界各地で行われ，幾つかの重希土類に富むアルカリ岩鉱床が発見されたが，イオン吸着型鉱床に勝る鉱床はなく，未だ重希土類はこのタイプの鉱床から供給されている．このタイプの鉱床は，中国南部地域のみでなく，東南アジアに広く分布する．またマラウイやマダガスカル等南部アフリカやブラジル，チリなど南米にも分布する．現在は中国と接するミャンマーがイオン鉱の主な生産地になっている．重希土類に富むイオン吸着型鉱床の形成には，１）重希土類に富む母岩の存在，２）粘土に富む厚い(>10m)風化殻の形成，３）風化に際し分解しやすい希土類鉱物の存在，の３条件が必要である．１）の条件を満たすものとしては，分化した閃長岩やチタン鉄鉱系列の花崗岩類が相当する．チタン鉄鉱系列の花崗岩を形成するマグマは，結晶分化の過程でチタン石を晶出しないため，残液に重希土類が濃集する．このような花崗岩マグマは錫に富み，錫鉱床を伴うことが多い．２）の粘土に富む厚い風化殻が形成される地域は亜熱帯湿潤気候地域に相当する．熱帯地域では風化が進みすぎ，カオリナイトが分解してギブサイトが生じるため，希土類元素の吸着が起こらない．また珪長質岩以外の母岩では，カオリナイトがほとんど生成されず吸着が起こらない．形成された風化殻が削剥を受けない地質環境も重要で，沈み込み帯に面している日本列島はあまり適さない環境と言える．３）の風化に際し分解しやすい鉱物は，炭酸塩鉱物であり，イオン吸着鉱下部の母岩には，しばしば二次的に形成された希土類炭酸塩鉱物(バストネサイトやシンキサイトなど)が認められる．リン酸塩鉱物は風化に対して耐性があるが，アパタイトは風化を受けると分解する．モナザイトやニオブ酸化物はしばしば風化残留鉱床を形成する．イオン吸着鉱から希土類を抽出するために，一般には硫酸アンモニウム水溶液が用いられ，抽出された希土類はシュウ酸や水酸化ナトリウムを用いて希土類水酸化物として回収される．近年中国では，その場リーチングが行われている．これは風化殻からなる地山に直接硫酸アンモニウム水溶液を注入し，地山のふもとで抽出された希土類を含む水溶液を回収する方法である．このような抽出は，約半年，乾季の間行われ，抽出が終わると新規の場所へと移動する．抽出が終わった現場は植林され，植生の回復が行われている．イオン吸着型鉱床は，品位の低い地表の風化殻を広く開発するため，地表の植生が失われるとともに，希土類抽出後の粘土が流出し地滑りが起こったり，抽出の際に用いられた溶液が，下流域の田畑や河川を汚染する例が報告されている．そのためイオン吸着型鉱床の開発には環境汚染を防止する細心の注意が必要となる．現在世界各国でカーボンニュートラル社会実現のために自動車の電動化が進められている．アジアの国々は独自の希土類サプライチェーンの確立を目指し，イオン吸着型鉱床の開発に目が向けられている．今後，イオン鉱の開発が各国で行われるかどうかが電動化推進の一つの鍵になる．

キーワード：イオン吸着型鉱床、重希土類、風化、磁石
Keywords: ion adsorption-type deposit, heavy rare earth elements, weathering, magnet

口頭講演

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

2024年9月13日(金) 09:00 〜 12:00 ESホール (東山キャンパス)

11:45 〜 12:00

[2Lecture-101-06-8add]休憩

©日本鉱物科学会

口頭講演 | S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

2024年9月13日(金) 9:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

9:00 ~ 9:05

[2Lecture-201-10-1add] コンビーナ挨拶

9:05 ~ 9:35

[S2-01] 背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

「招待講演」

*山本 順司[1] (1. 九州大・院理)

9:35 ~ 9:50

[S2-02] マントルウェッジ起源超苦鉄質岩中に形成される直方輝石仮像の地球化学的多様性とその意義

「発表賞エントリー」

*和仁 拓望[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大学、2. 金沢大学)

9:50 ~ 10:05

[S2-03] 金崎蛇紋岩岩体(関東山地)にみられる蛇灰岩の形成条件とその意義

*大柳 良介[1,2]、沢田 輝[3,2]、Chang Qing[2]、Satish-Kumar Madhusoodhan [4] (1. 国士舘大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大)

10:05 ~ 10:20

[S2-04] CO_2 mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses

*Otgonbayar DANDAR[1], Atsushi Okamoto [1], Masaoki Uno[1], Miku Takeya[2] (1. Tohoku University, 2. INPEX)

10:20 ~ 10:30

[2Lecture-201-10-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

[S2-05] 愛媛県西部、頃時鼻超苦鉄質岩体の塊状蛇紋岩と片状蛇紋岩の産状

「発表賞エントリー」

*城口 結衣[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

10:45 ~ 11:00

[S2-06] "Element transport and magnetite decomposition during alteration of the gabbroic vein in serpentinite body from the Bayankhongor ophiolite, Mongolia"

「発表賞エントリー」

*Nomin Tumurkhuu[1], Otgonbayar Dandar[1], Masaoki Uno[1], Manzshir Bayarbold[1], Atsushi Okamoto[1] (1. Tohoku University)

11:00 ~ 11:15

[S2-07] 葛根田花崗岩の坑井試料を用いた熱源花崗岩および超臨界地熱貯留層内の長石の溶解再沈殿―再平衡プロセス

「発表賞エントリー」

*星田 昌慶[1]、宇野 正起[1]、松野 哲士[1]、ヌルディアナ アスティン[1]、土屋 範芳[2,1] (1. 東北大・院環境科学、2. 八戸高専)

11:15 ~ 11:30

[S2-08] “cleavable olivine”の成因

*安東 淳一[1,2]、富岡 尚敬[3,2]、前川 寛和[4] (1. 広島大学・先進理工、2. 広島大学・HiPeR、3. JAMSTEC・高知コア研、4. 大阪公立大学)

11:30 ~ 11:45

[S2-09] 海底熱水系の硫化物チムニー発達プロセスおよび発電特性解明に向けた実験的研究

「発表賞エントリー」

*戸田 賢太朗[1]、岡本 敦[1]、オトゴンバヤル ダンダル[1]、高橋 美咲[1]、佐藤 義倫[1] (1. 東北大・院環境科学)

11:45 ~ 12:00

[S2-10] カンラン岩の炭酸塩化：流体包有物分析と水熱合成実験によるアプローチ

*川本 竜彦[1] (1. 静岡大学理学部地球科学科)

口頭講演

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

2024年9月13日(金) 09:00 〜 12:00 ES024 (東山キャンパス)

09:00 〜 09:05

[2Lecture-201-10-1add]コンビーナ挨拶

©日本鉱物科学会

背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

Slab-derived fluid infiltrating back-arc mantle

*山本 順司[1]
*Junji YAMAMOTO[1]

1. 九州大・院理
1. Kyushu University

日本から極東ロシアにわたる東アジア地域には，新生代の玄武岩が広く分布している．この火成活動にスラブ由来流体が関わっている可能性が主に物理的研究（地震波トモグラフィーや電気伝導度観測，高温高圧実験，数値計算等）を基に提唱されており，全球的な熱ー物質循環系の議論に波及する重要な課題として注目を集めている．しかし，スラブ由来流体の関与を決定づけるには，背弧マントルにおける水の痕跡やその起源を化学的に究明する必要がある．

玄武岩質マグマがマントル中を上昇する際，その一部はマントル内に岩脈や粒界成分，メルト包有物として取り残される．東アジアにおける新生界玄武岩も，その痕跡をマントル内に残しているに違いない．そこで本研究では，極東ロシアの三つの地域（EnnokentievとSveyagin，Tok）で採取したかんらん岩捕獲岩に焦点を当て，スラブ由来流体の関与を調べた．

極東ロシアのかんらん岩捕獲岩には揮発性成分のポケットが三種類見られる．一つは二酸化炭素を主成分とする流体包有物であり，二つ目は珪酸塩メルトの包有物，そして三つ目は粒界成分である．Ennokentievの捕獲岩には，高い成熟度を示す負結晶タイプの二酸化炭素流体包有物が多く見られる．その二酸化炭素密度と地質温度を二酸化炭素の状態方程式に照らし合わせることで，これらの捕獲岩が1000˚C・1 GPa程度のリソスフェアマントルから由来したことが分かった．一方，Sveyagin及びTokの捕獲岩には負結晶タイプの二酸化炭素包有物は見られない．しかし，それらの輝石温度（883–1022˚C）をEnnokentiev試料の温度圧力値から推定される地温勾配（～100 mW/m^2）に照らすと，0.86–1.12 GPaの圧力が得られ，やはり当該地域の捕獲岩もリソスフェアマントル由来であると推定できた．

これらの捕獲岩試料からスラブ由来流体の痕跡を探るため，まずSveyagin試料の微量元素組成をICP-MSを用いて測定した．捕獲岩を鉱物種ごとに選別し，希硝酸で洗浄した後に酸分解した溶液を分析したところ，その微量元素組成に目立った特徴は見られなかった．しかし，酸洗浄せずに酸分解した溶液には，HFSEやCe，Thの負異常が明瞭に見られた．同様の特徴はメルト包有物のLA-ICP-MS分析でも得られたため，当該地域のマントルには水が関与したマグマが存在していたと推察される（Yamamoto *et al.,* 2009 *Island Arc*）．

このマグマの起源を見極めるため，窒素と希ガスの同位体比を測定した．窒素と希ガスは真空破砕法を用いて抽出したため，それらは主にメルト包有物の収縮気泡由来であると考えられる．窒素同位体比は，大気的な値（0‰）から–10‰を下回る幅広い値を見せた．これらを$N_2/^{36}Ar$とのグラフにプロットすると，窒素同位体比の幅広い分布は大気的端成分からの質量分別に因ると分かった（図１）．Sveyagin地域は，その直下400～500 kmに太平洋プレートが沈み込んでおり，電気伝導度観測から脱水流体がマントルへ浸入している可能性が提唱されている．スラブに含まれている海水の脱水は溶存窒素（N_2）の同位体比に質量分別をもたらす．それゆえ，図１に見られるSveyagin試料の分布は，当該地域のマントルにスラブ由来の海水を含むマグマが通過したことを示唆する（Yamamoto *et al.,* 2020 *EPSL*）．

一方，Tok試料の窒素同位体比に際だって低い値は見られず，むしろ+3‰程度の高い窒素同位体比が目立つ（図１）．このような高い窒素同位体比は島弧や背弧の噴気ガスから得られることが多く，地表堆積物の影響が考えられている．しかし，そのような値がマントルから得られたことは特筆に値する．つまり，Tok試料の高い窒素同位体比は，当該地域のマントルにスラブ由来の窒素が存在する可能性を示唆する．Tok試料の窒素同位体比分布をスラブの影響として解釈できるか考察してみる．スラブ中の堆積物において，窒素は主にNH_3（またはNH^{4+}）として存在するが，沈み込みとともにNH_3はN_2へ化学変化し，水溶液とともに粒界へ脱窒す

る．この化学変化は窒素同位体比を数‰低下させ，その後の脱窒過程も窒素同位体比に更なる低下をもたらす．この考えに照らすと，図１においてTok試料が堆積物と大気間の混合線沿いから低い窒素同位体比方向へ分布する様子は，やはりスラブ中のNH_3がマントルに浸入した証左と見なして良いのではなかろうか．

これらの結果は，スラブ由来流体を含むマグマが極東ロシアのリソスフェアマントルを通過したことを示す．つまり，東アジアにおける新生代火成活動にスラブが関与しているという物理的モデルを化学的に補強できたと言えよう．

キーワード：スラブ、マントル遷移層、窒素同位体比、捕獲岩、流体包有物
Keywords: slab, mantle transition zone, nitrogen isotope ratio, xenolith, fluid inclusion

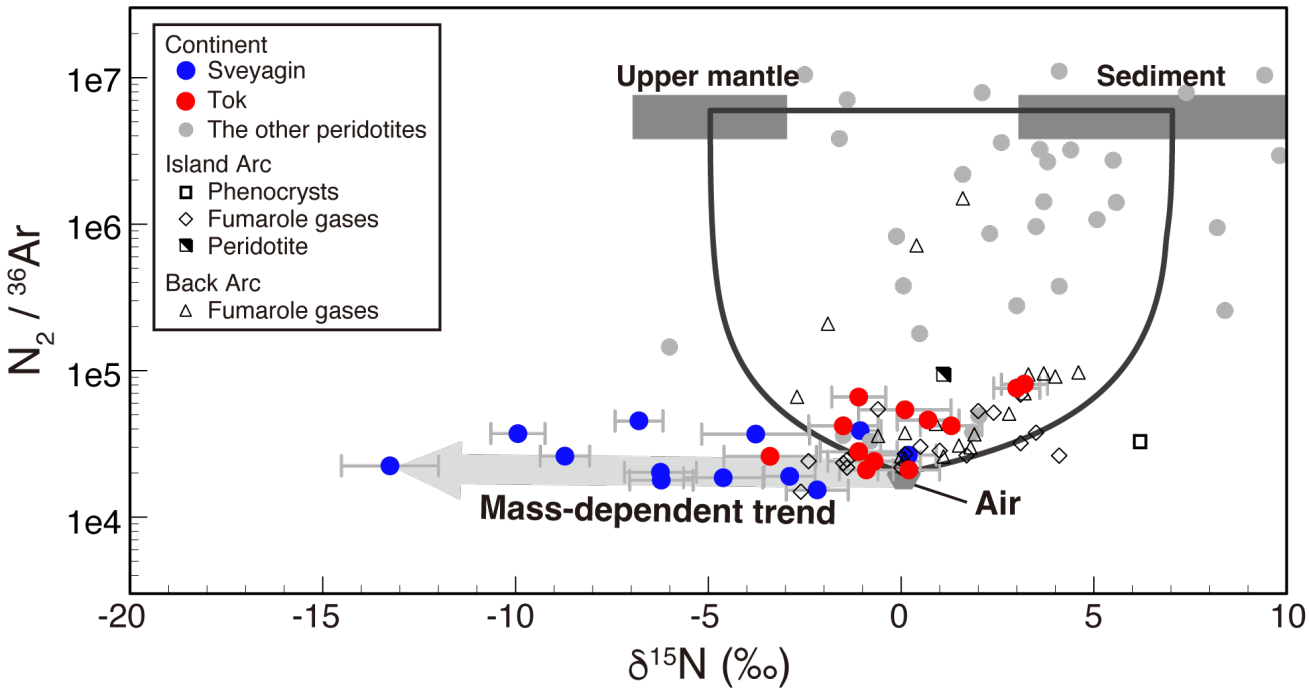


図１． $N_2/^{36}Ar$ vs. $\delta^{15}N$ of Far Eastern Russian xenoliths with data referred from earlier studies (see Yamamoto et al. (2020) EPSL).

マントルウェッジ起源超苦鉄質岩中に形成される直方輝石仮像の地球化学的多様性とその意義

Geochemical diversity and significance of orthopyroxene pseudomorphs in ultramafic rocks derived from mantle wedges

*和仁 拓望[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2]
*Takumi Wani[1], Yuji Ichiyama[1], Akihiro Tamura[2], Tomoaki Morishita[2]

1. 千葉大学、2. 金沢大学
1. Chiba University, 2. Kanazawa University

マントルウェッジへのスラブ起源流体の浸透とそれによる交代作用によって形成される含水鉱物は，マントルウェッジ中の流体移動元素の固定に重要な役割を果たしていると考えられる．特に金雲母や角閃石のようなアルカリ元素を含む含水鉱物は，島弧マグマ組成の側方変化に関与するなど(Tatsumi, 1989)，沈み込み帯における元素移動・元素循環を解明する上で重要な含水鉱物である．しかしながら，スラブ起源流体によって形成されたこれらの鉱物がどのように固定され，どのような地球化学的特徴を持つかは不明瞭である．本研究では，マントルウェッジを起源とする超苦鉄質岩の金雲母・角閃石を含む直方輝石仮像に着目し，H_2O流体を媒介したスラブ-マントル間の元素移動について議論する．　関東山地の十石峠超苦鉄質岩体は，マントルウェッジを起源とし(Arai and Hisada, 1991)，木呂子一名栗テクトニックメランジュに産する古生代前期の角閃岩とともに黒瀬川帯の構成要素とされる．十石峠の蛇紋岩化したハルツバージャイトには，金雲母＋リヒター閃石＋変成単斜輝石＋変成かんらん石＋アンチゴライト±モンチセリ石からなる直方輝石の仮像が確認される．CMSH系の相平衡下における鉄に富む変成かんらん石＋変成単斜輝石＋アンチゴライトの共生関係から，輝石仮像は500～600℃で後退変成作用時に形成されたことが推定される．全岩組成を用いたKNCMASH系のシュードセクションは、金雲母とリヒター閃石もこの温度で形成されたことを示唆する．木呂子一名栗テクトニックメランジュの角閃岩は，Ca角閃石のリムに高圧変成作用を示唆するNa-Ca角閃石が形成されるタイプ１と形成されないタイプ２に分類される．タイプ１角閃岩の全岩微量元素パターンは，Sr正異常とNb，Ta，Zr，Ti負異常を示し，島弧玄武岩に類似する一方，タイプ２角閃岩はMORBに類似する．したがって，十石峠の超苦鉄質岩と木呂子一名栗テクトニックメランジュのタイプ１とタイプ２角閃岩は，それぞれ前期古生代のマントルウェッジ，構造浸食により削剥された島弧地殻，沈み込む海洋地殻に相当すると推定される．輝石仮像の元素マッピングから計算した仮像の主要元素組成は，同岩体内の初生直方輝石と比較してK_2O，Na_2O，CaOで10～100倍，Cs，Rb，Baが100倍以上増加している．これらの元素は角閃岩相の変成岩の脱水によるスラブ起源流体によって付加されている可能性がある．十石峠超苦鉄質岩に類似した輝石仮像組織は，古生代の沈み込みオフィオライトである宮守オフィオライト，白亜紀の蛇紋岩メランジュである神居古潭帯，マリアナ前弧コニカル海山(Hole779Aと780C)のマントルウェッジを起源とする蛇紋岩化したハルツバージャイトからも確認される．輝石仮像の構成鉱物は，それぞれ単斜輝石+アンチゴライト，Na-Ca角閃石+変成単斜輝石+変成かんらん石+アンチゴライト±金雲母，Na-Ca角閃石＋Ca角閃石＋タルク＋アンチゴライト(779A)，Na-Ca角閃石＋Ca角閃石＋単斜輝石＋アンチゴライト(780C)である．鉱物組み合わせから，神居古潭帯の仮像は十石峠と同様の温度での形成が考えられるが，宮守オフィオライトの仮像は，単斜輝石＋アンチゴライトの共存から450-500℃以下で形成されたと推定される．また，コニカル海山の試料はタルク，単斜輝石の有無から，779Aで780Cよりも高い温度が推定される．これらの仮像の初生直方輝石に対する元素収支を見積った結果，十石峠に比べて宮守オフィオライトではKOとNaOの流入量が小さく，CaOの流入量が大きい一方，神居古潭帯とマリアナ蛇紋岩海山ではCaOとKOの流入が低くNa_2Oの流入量が大きい．仮像の微量元素組成は，単斜輝石が多く形成される宮守オフィオライトの仮像でSrに富み， Na-Ca角閃石の多いコニカル海山779Aの仮像は，Na-Ca角閃石の乏しい780Cの仮像と比較してCsとRbで約10倍富む．超苦鉄質岩に伴うス

ラブ由来の変成岩の変成相は，黒瀬川帯や宮守オフィオライトで緑簾石角閃岩相～角閃岩相，神居古潭帯やコニカル海山で青色片岩相であり，沈み込むスラブの温度勾配の違いに起因する脱水鉱物の相違が推測される．黒瀬川帯や宮守オフィオライトは角閃岩のホルンブレンドの脱水によるCa富む流体が，神居古潭帯やマリアナ蛇紋岩海山は青色片岩のNa角閃石やパラゴナイトの脱水によりNaに富んだ流体が流入し，輝石仮像組成に影響した可能性がある．また， 黒瀬川帯の仮像の高いK_2O量は変堆積岩起源流体の影響が大きいと考えられる．輝石仮像を構成する鉱物の形成とそれによる流体移動元素の固定には，流入する流体組成と温度が重要であると考えられる．

キーワード：マントルウェッジ、マントル交代作用、スラブ流体、輝石仮像
Keywords: mantle wedge, mantle metasomatism, slab fluid, orthopyroxene pseudomorph

金崎蛇紋岩岩体(関東山地)にみられる蛇灰岩の形成条件とその意義

Petrogenesis and significance of ophicarbonate in the Kanasaki serpentinite body (Kanto Mountains, Central Japan)

*大柳 良介[1,2]、沢田 輝[3,2]、Chang Qing[2]、Satish-Kumar Madhusoodhan [4]
*Ryosuke OYANAGI[1,2], Hikaru Sawada[3,2], Qing Chang[2], Madhusoodhan Satish-Kumar[4]

1. 国士舘大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大
1. Kokushikan Univ., 2. JAMSTEC, 3. Toyama Univ., 4. Niigata Univ.

地球では大気・海洋・地球内部で炭素が循環することにより、大気中の二酸化炭素量がうまく調節され、ハビタブルな環境が維持されてきた(e.g., Plank and Manning, 2019, *Nature*)。しかし、地球内部における炭素循環の全容はつかめていない。超塩基性岩は、地質学的に速い速度で炭素を含む流体と反応することが知られており(Beinlich et al. 2020, *Nat. Geo*)、多くの炭素を炭酸塩鉱物として貯蔵できるポテンシャルを有している。そのため、どのようなテクトニックセッティングにおいて、どのような流体と反応することで超塩基性岩が炭素を貯蔵するのか、その多様性を明らかにすることが重要だと考えられる。

本研究では、沈み込み帯における超塩基性岩の炭酸化過程をより理解するために、岩石学的および地球化学的分析を用いて、日本の関東山地の金崎地域に産する蛇灰岩（炭酸塩鉱物と蛇紋石で構成されている岩石）の成因を議論する。金崎地域では、みかぶユニットの塩基性岩や泥質片岩、超塩基性岩が露出している。蛇紋岩や蛇灰岩は泥質片岩に囲まれたブロックとして存在している。蛇紋石はメッシュ組織を示し、メッシュコアはリザーダイトもしくはクリソタイルが、メッシュリムにはアンチゴライトが存在する。蛇灰岩は4つの産状を示した。(タイプI)角礫化した蛇紋岩の間を充填する方解石、 (タイプII) 角礫化した蛇紋岩の間を充填する方解石＋ドロマイト、(タイプIII)直線状の方解石脈、 (タイプIV) 直線状の方解石＋ドロマイト脈である。直線状の炭酸塩脈は、炭酸塩セメントを含む蛇灰岩マトリックスを切っている。

タイプII—IVの炭酸塩鉱物は、^{13}Cに乏しく（$\delta^{13}C_{(VPDB)}$ = -6 - -8‰）、幅広い$\delta^{18}O_{(VSMOW)}$値を示す(13 – 22‰)。また、これらの炭酸塩鉱物は、Euの正の異常を示すREEパターンを示す。一方で、タイプIの炭酸塩鉱物は、^{13}Cに富み（$\delta^{13}C_{(VPDB)}$ = -2 - +2‰）、比較的狭いδ^{18}O値を示す(13 –16‰)。タイプIの炭酸塩鉱物は多様なREEパターンを示した。負のCeの異常とYの正の異常を示しHREEに富むパターンや、Euの正の異常とややLREEに富むパターン、それらの中間のパターンが観察された。以上のような、蛇灰岩に含まれる炭酸塩鉱物の産状や地化学的特徴の違いは、超塩基性岩の炭酸塩化作用が多様な流体によって引き起こされ、多様なテクトニックセッティングで起きたことを示唆している。講演では、炭酸塩化作用を引き起こした流体や炭酸塩化作用のテクトニックセッティングをもとに、地球規模炭素循環における超塩基性岩の役割について考察を行う。

キーワード：蛇紋岩、蛇灰岩、炭素循環
Keywords: Serpentine, Ophicarbonate, Carbon cycle

CO_2 mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses

*Otgonbayar DANDAR[1], Atsushi Okamoto [1], Masaoki Uno[1], Miku Takeya[2]

1. Tohoku University, 2. INPEX

Mineral carbonation enables long-term stable CO_2 storage. Among rocks, basalts and ultramafic rocks (high Mg and Ca contents) are known to have high potential to store CO_2. Although, andesitic rocks (composition is wide; microstructures are diverse) are widely distributed in Japan (in a subduction zone), their suitability for mineral carbonation and CO_2 storage is not well understood. In this study, we report preliminary results of hydrothermal reaction experiments (exps) using andesitic agglomerate rocks from the Nagaoka area, Niigata Prefecture and thermal analyses of the products.The andesite agglomerate consists mainly of volcanic glass, plagioclase, clinopyroxene, with small amounts of orthopyroxene, hornblende, and iron oxides. Two types (a batch-type vessel and a stirred apparatus) of exps have been conducted with the powder samples (150-250 μm). In the batch exp (filling ratio = 43% and remained space is CO_2 gas), powder sample is placed at two locations: the top (supercritical CO_2 saturated in water) and bottom (reacted with a CO_2 dissolved solution) of the reaction vessel. The batch exps were conducted at 75 ℃, 18 MPa (80 days), 150 ℃, 20 MPa (20 days), and 200 ℃, 25 MPa (20, 40, and 60 days). The solid phase after exp is observed by EPMA, TG, and TPD-MS, and the solutions are analyzed for element contents by ICP-OES. To accelerate the reaction, a stirred reaction apparatus was used for the exp at 200 ℃, 20MPa, and 10 days.In the batch exps at 75 ℃ and 150 ℃ (Ca and Mg+Fe contents = 10-80 mg/kgH_2O), dissolution of volcanic glass is observed only with small dissolution of plagioclase and other minerals. Significant carbonate precipitation was observed in a 60-day batch exp at 200 ℃ (Fe- and Ca-rich magnesite) and a 10-day stirred exp (calcite and dolomite). The precipitation proceeded not only at the bottom (CO_2 dissolved solution), but also at the top (supercritical CO_2), suggesting the reaction accelerated by water vapor. The experimental solution (carbonate precipitated, the pH increased to >7 and the concentrations of Mg and Ca <20 mg/kH_2O), suggests the pH in the reaction vessel increased and reached to condition of carbonate precipitation.Based on the above exps, the andesitic rocks in the Nagaoka area are considered to have sufficient potential for mineral carbonation and CO_2 storage.

Keywords: Mineral carbonation , CO2 storage, Andesite, Hydrothermal reaction experiment, the Nagaoka area, Niigata Prefecture

口頭講演

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

2024年9月13日(金) 09:00 〜 12:00 ES024 (東山キャンパス)

10:20 〜 10:30

[2Lecture-201-10-6add]休憩

©日本鉱物科学会

愛媛県西部、頃時鼻超苦鉄質岩体の塊状蛇紋岩と片状蛇紋岩の産状

Massive and foliated serpentinites from the Udonohana ultramafic body, Western Ehime Prefecture, Japan.

*城口 結衣[1]、延寿 里美[1]
*Yui Joguchi[1], Satomi Enju[1]

1. 愛媛大・院理工
1. Ehime Univ. Sci. &Egn.

【はじめに】

愛媛県八幡浜市から西予市にかけて分布する三瓶超苦鉄質岩体は，御荷鉾帯，北部秩父帯，黒瀬川帯に囲まれるようにして存在し，周辺の真穴層や低中圧大島変成岩と共に真穴帯を形成している．三瓶超苦鉄質岩体は東部の鴫山超苦鉄質岩体と西部の頃時鼻超苦鉄質岩体から構成され，かんらん石などの化学組成か島弧環境下で生成された様々な枯渇度を持つマグマから形成されたキュームレートの一部であったと考えられている(Ichiyama 2015)．鴫山超苦鉄質岩体はダナイトやウェールライト，輝岩，頃時鼻超苦鉄質岩体はダナイトやウェールライト起源の蛇紋岩から構成される．鴫山超苦鉄質岩体は蛇紋岩化作用や脱水反応を伴わず，600～700℃で超苦鉄質岩が平衡状態となった．一方で頃時鼻超苦鉄質岩体は蛇紋岩化した後，400～500℃で脱水したといわれている．しかし，蛇紋岩化の過程やその多様性については明らかになっていない．本調査地域である頃時鼻海岸では頃時鼻超苦鉄質岩体と隣接する北部秩父帯の連続した露頭が見られ，蛇紋岩が広く分布している．本研究では調査地域における蛇紋岩の多様性と産状を明らかにし，それら形成過程について考察を行う．

【研究手法】

調査地域における22地点で野外調査と観察できた岩相ごとに62サンプルの採取を行った．RIGAKU製Ultima Ⅳを使用して粉末X線回折実験(XRD)と，偏光顕微鏡にて組織観察を行った．また代表的な蛇紋岩の試料に関してはOxford製エネルギー分散型X線分析装置EDSを装着したJEOL製 走査型顕微鏡(SEM)JSM-6510LVを用いて分析を行った．

【結果・考察】

本調査地域では南北方向の海岸線に沿って蛇紋岩の連続露頭が見られ，北部には黒色片状蛇紋岩，南部には茶色塊状蛇紋岩が分布しており，両岩相とも層状あるいは塊状の透輝石の濃集部が見られる．黒色片状蛇紋岩は主にアンチゴライトから構成され苦土かんらん石は含まない．蛇紋岩に含まれる脈には灰鉄ざくろ石脈，炭酸塩鉱物脈，透輝石脈がある．灰鉄ざくろ石脈は割れ目を充填しているものと透輝石の濃集部をざくろ石が置換しているものの２種類が存在し，蛇紋岩中の透輝石濃集部がみられないエリアに多産する．茶色塊状蛇紋岩はアンチゴライトと細粒な再結晶かんらん石から構成される．蛇紋岩に含まれる脈には炭酸塩鉱物脈とクロム鉄鉱脈があり，北部と比較すると岩石に含まれている脈の量は少ない．黒色片状蛇紋岩と茶色塊状蛇紋岩は明瞭な境界で接しており，黒色片状蛇紋岩内に茶色塊状蛇紋岩がブロック状に取り込まれている様子が観察できる．境界部にそって破砕帯が見られた．調査地域には蛇紋岩のほかに結晶片岩，ロジン岩，角閃岩が分布している．結晶片岩は北部で400ｍにわたって連続して分布しており，緑色片岩と黒色片岩の２種類が存在する．角閃岩は南部の茶色塊状蛇紋岩と黒色片状蛇紋岩の境界部にて10mの岩体として一か所のみで確認された．ロジン岩は北部，南部の局所で９ｍほどの岩脈や20㎝ほどのレンズ状で産出し，構成鉱物は主に透輝石，緑泥石，一部灰鉄ざくろ石，ベスブ石，ペロブスカイトを含む． 蛇紋岩の主要構成鉱物の割合から，頃時鼻海岸に分布する蛇紋岩の原岩はダナイトであり，一部に透輝石が濃集したウェールライト～単斜輝石岩があったことが考えられる．この様子はこの岩体がキュームレート由来であることを表しており，Ichiyama (2015)と一致する．茶色塊状蛇紋岩は細粒かんらん石を含むことから，Ichiyama (2015)で述べているように，原岩が蛇紋岩化作用で強く変質したのちに，脱水作用を受けた可能性がある．一方で黒色片状蛇紋岩の原

岩は一部試料で粗粒かんらん石と細粒かんらん石が共存していることから，脱水後に再び蛇紋岩化が起こった可能性がある．黒色片状蛇紋岩中の灰鉄ざくろ石脈や透輝石脈は，原岩の透輝石が利用されてできたと考えられるが，茶色塊状蛇紋岩中の透輝石濃集部付近には見られないため，黒色片状蛇紋岩と茶色塊状蛇紋岩が合流するより以前に脈の形成があったことが示唆される．炭酸塩鉱物脈は全域で見られ，境界部の破砕帯で特に多く観察できることから，合流した後にCO流体によって形成されたと考えられる．

キーワード：蛇紋岩、超苦鉄質岩、キュームレート、三瓶超苦鉄質岩体
Keywords: serpentinite, ultramafic rocks, cumulate, Mikame ultramafic body

"Element transport and magnetite decomposition during alteration of the gabbroic vein in serpentinite body from the Bayankhongor ophiolite, Mongolia"

*Nomin Tumurkhuu[1], Otgonbayar Dandar[1], Masaoki Uno[1], Manzshir Bayarbold[1], Atsushi Okamoto[1]

1. Tohoku University

Hydration of mantle rocks is important for elucidating the dynamics of global water circulation, elemental transport, and geological processes. The crust-mantle interface constitutes a significant geological boundary where element transport occurs. However, research on the multi-stage hydration of mantle rocks within this zone, particularly in the oceanic lithosphere (mid-ocean ridge), is still lacking. Therefore, to understand element transport during the hydration of the crustal vein in the mantle at the crust-mantle transition zone, we investigate the mantle-crust section preserved in the Bayankhongor ophiolite (BO; mid-ocean ridge origin) Mongolia.The outcrop of the crust-mantle section (~30 m in diameter) in the BO is characterized by a brownish gabbroic body with a massive and sheared mantle body fully serpentinized. Mantle rock samples mainly consist of lizardite in two forms: mesh core (Mg# = 0.95-0.98) with fine magnetite (Mgt) and vein (Mg# = 0.94-0.98) with vein Mgt (<30 μm width), along with spinel (Mg# = 0.42-0.52 & Cr# = 0.46-0.48), and chlorite (Chl; Mg# = 0.87-0.96). The absence of brucite in the serpentinites suggests infiltration of Si-rich fluids. Green veins (80-95 cm in width; it mainly consists of clinopyroxene (Cpx; Mg# = 0.92) replaced by a mixture of Chl-serpentine (Srp) and cut by serpentine and epidote (Ep) veins), along with white veins (~15 cm in width; ~40 cm long; it is mostly consisted of Ep and Cpx with a minor amount of Chl) cut through the mantle rocks. Additionally, black veins (~2 cm in width; it is composed of Chl patches (Mg# = 0.83-0.93) and Chl-Srp patches with clear cleavages and fine Ti-rich minerals) intersect the serpentinite. The reaction zone (~3 mm) between host serpentinite and black vein shows that Mgt disappeared and Mgt is replaced by Al-rich (1.1-6.9 wt%) Srp. Mass balance on black vein (assuming protoliths: Cpx for Chl-Srp and plagioclase for Chl patch shows gain of Fe and Mg, and loss of Si, Al, and Ca whereas that on the reaction zone shows loss of Fe and gain of Si, and Al. This implies that Mg-rich fluid and chl formation cause Mgt disappearance and mobility of Fe, Si, and Al. Reaction zone and mass balance result imply that local mobility of Si, Al, Fe, Mg, and Ca could occur at the crust-mantle section in the oceanic lithosphere during multi-stage hydration.

Keywords: Element transport, Serpentine, Gabbroic vein

Element transport and magnetite decomposition during alteration of gabbroic vein in serpentinite body from the Bayankhongor ophiolite, Mongolia.

Nomin TUMURKHUU, Otgonbayar DANDAR, Masaoki UNO, Manzshir BAYARBOLD, Atsushi OKAMOTO

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Hydration of mantle rocks is important for elucidating the dynamics of global water circulation, elemental transport, and geological processes. The crust-mantle interface constitutes a significant geological boundary where element transport occurs. However, research on the multi-stage hydration of mantle rocks within this zone, particularly in the oceanic lithosphere (mid-ocean ridge), is still lacking. Therefore, to understand element transport during the hydration of the crustal vein in the mantle at the crust-mantle transition zone, we investigate the mantle-crust section preserved in the Bayankhongor ophiolite (BO; mid-ocean ridge origin) Mongolia.

The outcrop of the crust-mantle section (~30 m in diameter) in the BO is characterized by a brownish gabbroic body with a massive and sheared mantle body fully serpentinized. Mantle rock samples mainly consist of lizardite in two forms: mesh core (Mg# = 0.95-0.98) with fine magnetite (Mgt) and vein (Mg# = 0.94-0.98) with vein Mgt (<30 μm width), along with spinel (Mg# = 0.42-0.52 & Cr# = 0.46-0.48), and chlorite (Chl; Mg# = 0.87-0.96). The absence of brucite in the serpentinites suggests infiltration of Si-rich fluids. Green veins (80-95 cm in width; it mainly consists of clinopyroxene (Cpx; Mg# = 0.92) replaced by a mixture of Chl-serpentine (Srp) and cut by serpentine and epidote (Ep) veins), along with white veins (~15 cm in width; ~40 cm long; it is mostly consisted of Ep and Cpx with a minor amount of Chl) cut through the mantle rocks. Additionally, black veins (~2 cm in width; it is composed of Chl patches (Mg# = 0.83-0.93) and Chl-Srp patches with clear cleavages and fine Ti-rich minerals) intersect the serpentinite.

The reaction zone (~3 mm) between host serpentinite and black vein shows that Mgt disappeared and Mgt is replaced by Al-rich (1.1-6.9 wt%) Srp. Mass balance on black vein (assuming protoliths: Cpx for Chl-Srp and plagioclase for Chl patch shows gain of Fe and Mg, and loss of Si, Al, and Ca whereas that on the reaction zone shows loss of Fe and gain of Si, and Al. This implies that Mg-rich fluid and chl formation cause Mgt disappearance and mobility of Fe, Si, and Al. Reaction zone and mass balance result imply that local mobility of Si, Al, Fe, Mg, and Ca could occur at the crust-mantle section in the oceanic lithosphere during multi-stage hydration.

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

葛根田花崗岩の坑井試料を用いた熱源花崗岩および超臨界地熱貯留層内の長石の溶解再沈殿ー再平衡プロセス

Dissolution reprecipitation - re-equilibration process of feldspar in heat source granite and supercritical geothermal reservoir using borehole samples from Kakkonda granite

*星田 昌慶[1]、宇野 正起[1]、松野 哲士[1]、ヌルディアナ アスティン[1]、土屋 範芳[2,1]
*Masayoshi Hoshida[1], Masaoki Uno[1], Satoshi Matsuno[1], Astin Nurdiana[1], Noriyoshi Tsuchiya[2,1]

1. 東北大・院環境科学、2. 八戸高専
1. Tohoku University, 2. National Institute of Technology, Hachinohe College

超臨界状態の水(i.e., >374℃)を貯留する超臨界地熱貯留層は、従来の地熱貯留層より高温で5–10倍ほど高い発電ポテンシャルを持つ次世代の地熱資源として調査が進められている。地熱開発において、貯留層温度の推定は発電ポテンシャルの評価のために重要であるが、掘削機器の耐熱性能の問題により循環水を供給して坑井温度を下げながら掘削するため、掘削時にリアルタイムで真の坑井温度を推定することは困難である。そこで、超臨界状態の坑井温度を推定するために、坑井試料であるカッティングスの長石温度計への適用可能性を検証した。従来の長石温度計の校正温度は700–900℃であるため、380–580℃の低温領域の超臨界状態での適用可能性は解明されていない。先行研究によると、水の超臨界状態下(i.e., 600℃, 200MPa)での水熱実験では、長石は５日程度で変質するため (Duan et al., 2021)、超臨界地熱流体にさらされた長石は普遍的に変質している可能性がある。本研究では、500℃を超える高温岩体から直接採取された花崗岩のカッティングス中の斜長石とカリ長石の産状を分析し、高温地殻中における原位置での長石の再平衡過程と長石温度計の適用可能性を検証した。

岩手県仙岩地域の葛根田地熱地帯を研究フィールドとした。WD-1aの地層は、深度2,860–3,729mは第四紀の葛根田花崗岩であり(Uchida et al., 1998)、深度3,500mで500℃を超える温度の花崗岩を掘削している(Ikeuchi et al., 1998)。

坑井温度が約380–580℃の範囲と推定される深度2,895–3,725mから24サンプルを選び、長石類の組成をEPMAで同定した。長石類が再結晶した温度を推定するため、斜長石とカリ長石のペアの組成を計40個の長石温度計に適用した。加えて、2,895–3,685mから13サンプル選び、水銀ポロシメーターを用いてカッティングスの細孔容積を測定した。

後方散乱電子像の観察の結果、斜長石とカリ長石の粒径は、それぞれ約100–400μm、50–400μmだった。古期花崗岩の長石類は、カリ長石は粒子全体が均質的に再結晶しており、10μm未満の空隙が多数見られた。また、斜長石はその中心が比較的Caに富む組成累帯構造を示し(XAn=0.46–0.85)、リムはNaに富み(XAn=0.02–0.39)、コアとリムの間にはシャープな境界が見られた。対照的に、新期花崗岩ではカリ長石内部の空隙は見られず、斜長石の組成累帯構造はわずかであった(XAn=0.05–0.50)。

水銀ポロシメーターの結果、古期花崗岩、新期花崗岩において、0.001–10μmの細孔が計測され、その容積の平均値と標準偏差はそれぞれ5.92±1.18、5.57±1.27vol%であった。

Naに富む斜長石のリムと、その隣接するカリ長石のリムの組成をそれぞれ 463点測定した。斜長石中のAlbite成分 (XAb = Na/(Na+K+Ca))は、深度2,895mから3,725mにかけて0.72–0.92mol%から0.61–0.70mol%に系統的に減少した。また、カリ長石中のOrthoclase成分 (XOr = K/(Na+K+Ca))は、深度2,895mから3,725mにかけて0.88–0.93mol%から0.81–0.86mol%に系統的に減少した。

Powell & Powell (1977)の長石温度計は、深度2,985mで362–439℃、深度3,725mで513–614℃の温度範囲を示し、380–580℃の超臨界条件下でホーナープロット法によって推定された坑井温度に近い結果を得た。

古期花崗岩のカリ長石には、μmスケールの空隙が多数見られた。加えて、カリ長石に接する斜長石のコア

からリムにかけての組成変化は、グラジュアルではなくシャープな境界が見られた。これらの組織は、斜長石のリムが溶解再沈殿し、その接するカリ長石と超臨界流体が反応してカリ長石内部に空隙を形成したことを示唆している。熱水変質による長石の空隙の形成は、600℃での長石置換実験で生じた空隙の生成と整合的である (Nurdiana et al., 2023)。一方で、新期花崗岩ではカリ長石内部の空隙がないことや、斜長石の組成累帯構造はわずかしか見られないことから、固体拡散により再平衡に達した可能性がある。

カッティングス中の長石類に関して、反応組織や深度方向の系統的な組成変化、長石温度計への適用結果と坑井温度の類似性は、現在の坑井温度380–580℃での長石類の溶解再沈殿による再結晶または固体拡散による再平衡を強く示唆する。したがって、カッティングスの長石温度計への適用により、超臨界地熱貯留層における長石の再結晶化温度を評価できることが明らかになった。

キーワード：長石、長石温度計、超臨界地熱貯留層、溶解再沈殿、再平衡
Keywords: Feldspar, Feldspar thermometer, Supercritical geothermal reservoir, Dissolution reprecipitation, Re-equilibration

“cleavable olivine”の成因

Formation mechanism of "cleavable olivine"

*安東 淳一[1,2]、富岡 尚敬[3,2]、前川 寛和[4]
*Jun-ichi ANDO[1,2], Naotaka Tomioka[3,2], Hirokazu Maekawa[4]

1. 広島大学・先進理工、2. 広島大学・HiPeR、3. JAMSTEC・高知コア研、4. 大阪公立大学
1. Hiroshima Univ., 2. Hiroshima Univ., HiPeR, 3. JAMSTEC, 4. Osaka Metropolitan Univ.

蛇紋岩化した超塩基性岩体にはcleavable olivineと呼ばれる劈開が発達したオリビンが存在する場合がある。日本国内では、神居古潭帯鷹泊超苦鉄質岩体をはじめ約10の岩体中で確認されている。通常オリビンはそれほど顕著な劈開を示さないが、cleavable olivineは(100)、(010)、(001)に平行に発達する劈開が顕著に認められ、劈開中には蛇紋石の一種であるアンチゴライトが存在する。cleavable olivineの劈開の成因は、通常の劈開の形成とは異なると考えられるため、劈開と区別して“裂開”と呼ばれている（相川、1981；Nozaka and Ito, 2011）。cleavable olivineの成因の解明は、アンチゴライト蛇紋岩の生成過程すなわち超塩基性岩体の含水化過程を明らかにし、そして超塩基性岩体の上昇のテクトニクスを考えるうえで重要だと考えられる。本研究はcleavable olivineの成因を微細組織のキャラクタリゼーションによって明らかにすることを目的とした。

用いた試料は、マリアナ前弧北部の海溝軸に沿って露出する雷神海山から採取した蛇紋岩化が進んだ超塩基性岩（ダナイト）である。このダナイトを構成するオリビンは、cleavable olivine化が進んでいる。微細組織の観察は主に、1）偏光顕微鏡、2）SEM、4）SEM-EBSD、5）TEMを用い、6）ラマン分光分析による蛇紋石鉱物の同定も行った。

観察の結果、cleavable olivineは以下の特徴を有することが明らかとなった。1）ダナイトを構成するオリビンには、[100]{0kl}のすべり系によって形成された強い格子選択配向が認められる。また、オリビンには（100）に平行な波動消光の軸（= 亜結晶粒界）が発達する。このことから、オリビンは[100]{0kl}のすべり系による転位クリープによって塑性変形したことが分かる。2）裂開は、(100)に平行に発達した亜結晶粒界上に形成されていることが多い。亜結晶粒界は転位の配列によって形成されるため、転位の存在と裂開の形成は強く関係することが分かる。3) 裂開中にはアンチゴライトが晶出しており、その(001)とホストのオリビンの(100)はトポタキシャルな関係にある。この両者の境界は明瞭ではなく、オリビンが徐々にアンチゴライトに変化している。4）裂開中のアンチゴライト以外に、オリビンの粒界にはアンチゴライトとリザーダイトが晶出している。また、粒界にはマグネタイト、カルサイトの晶出が確認できた。すなわち本試料は二段階の蛇紋岩化作用を受けていることが明らかとなった。上記した1）～3）の特徴は、神居古潭帯鷹泊超苦鉄質岩体中から採取したcleavable olivineでも確認することができた。

微細組織の観察から考えられる雷神海山のcleavable olivineの形成過程は以下である。1) 上部マントルで、ダナイトを構成するオリビンが[100]{0kl}すべり系による転位クリープによって塑性変形した。その結果、格子選択配向が形成され、かつ(100)に平行な面上に転位が配列し亜結晶粒界が形成された。2) 亜結晶粒界を構成する転位に沿って水が拡散（パイプ拡散）し、亜結晶粒界上にアンチゴライトが晶出した。これにより裂開が形成された。その後、3）粒界にアンチゴライト、リザーダイトと、それとマグネタイト、カルサイトが晶出した。

本研究では、cleavable olivineの成因は亜結晶粒界に沿う水の拡散（パイプ拡散）と結論づけた。一般的には、オリビンのアンチゴライト化は粒界から進行する。すなわち、アンチゴライト化は体拡散による現象である。発表では、なぜ水のパイプ拡散が卓越したのかということを議論したい。

引用文献：相川 (1981) 岩石鉱物鉱床学会誌, 76, 61-67. Nozaka and Ito (2011) Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106, 36-50.

キーワード：cleavable olivine、亜結晶粒界、パイプ拡散
Keywords: cleavable olivine, Subgrain boundary, Pipe diffusion

海底熱水系の硫化物チムニー発達プロセスおよび発電特性解明に向けた実験的研究

Experimental study to elucidate sulfide chimney development process and power generation characteristics in submarine hydrothermal systems

*戸田 賢太朗[1]、岡本 敦[1]、オトゴンバヤル ダンダル[1]、高橋 美咲[1]、佐藤 義倫[1]
*Kentaro Toda[1], Atsushi Okamoto[1], Dandar Otgonbayar[1], Misaki Takahashi[1], Yoshinori Sato[1]

1. 東北大・院環境科学
1. Tohoku Univ. Environmental Sci

海底熱水噴出孔は海嶺近傍の海洋底に分布し、マグマや海洋地殻に由来する硫黄や亜鉛などの元素を含む熱水と海水との混合により硫化鉱物から成るチムニー状の構造物を形成する。熱水はHS-を豊富に含み還元的であるのに対して海水は酸化的であり、両者の酸化還元電位差が駆動力となり深海底への電子供給とそれに伴う熱水/海水の酸化/還元反応が起きることが報告された(Yamamoto et.al, 2018)。またチムニー周辺では生物活性が認められ、熱水から海中へ供給される電子が太陽光の届かない深海底エコシステムへのエネルギー供給を担う可能性が示唆され、ひいては熱水噴出孔における発電現象が太古の海洋底での始祖生命の誕生に関与したとの仮説が提唱された(Yamamoto et.al, 2018)。チムニーを構成する硫化鉱物は半導体特性を有することが知られているが、熱水-海水間の温度勾配と半導体の熱電特性のマッチングによって酸化還元電位差に匹敵する電気的ポテンシャルが生じうることが報告された。特に噴出孔周辺の閃亜鉛鉱を置換して形成されたとみられる黄銅鉱や方鉛鉱からなる高密度組織では海中への電子供給に有為な熱起電力が生じうることが見出され、このことからチムニーの発達に伴う高密度化に伴い熱電効果による発電現象が生じる可能性が示唆された。本研究では、硫化鉱物置換反応を実験室系で再現しそれに伴うチムニーの熱電性能変化を検証することを目的として水熱実験を実施した。チムニーの構成鉱物である閃亜鉛鉱と黄鉄鉱、方鉛鉱に加えて閃亜鉛鉱と黄鉄鉱からなるチムニーサンプルを出発物として模擬熱水と反応させる水熱実験を行い、硫化鉱物の置換組織の観察とともに生成物の比抵抗および熱起電力の測定を行った。その上で、チムニーの硫化鉱物の置換反応が海底の発電現象に与える影響について検討した。　実験条件は200,250,300℃で飽和蒸気圧であり、適宜NaCl(1M)を添加した。反応時間を12日間(288時間)とした実験では、閃亜鉛鉱や方鉛鉱にFe2+, Cu2+イオンを含む水溶液との反応では出発鉱物表面にCu2SとCuSの間で同の価数が変化するCu-S系の硫化物の被膜が形成された。また特に方鉛鉱を出発物とした場合には生成物中に空隙が含まれる組織が形成された。閃亜鉛鉱、方鉛鉱を出発物に用いた場合は比抵抗値がそれぞれ10桁、４桁と大きく低下した。一方、黄鉄鉱を出発物に用いてCu2+イオンを含む水溶液との反応では、黄鉄鉱結晶に亀裂が生じ、生成鉱物が、表面にはCu2S、亀裂内部には黄銅鉱と系統的に変化した。この反応により、計測した比抵抗値は４桁低下している。出発物表面からの置換する場合と、亀裂が生じて内部に２次鉱物ができるのは、硫黄を固定した反応を考えた場合、前者が固体体積の現象、後者が増加するときに対応しており、体積増加に伴う反応誘起応力による破壊と考えられる。黄鉄鉱内部への生成物の変化は、FeとCuの化学ポテンシャル勾配を反映していると考えられる。水熱実験の生成物について独自に開発した装置を用いてゼーベック係数S[mV/K]を測定し、ゼーベック係数の二乗と導電性の積で表され熱電材料の発電性能を示すパワーファクターPFを算出した。測定よりチムニーの主要構成鉱物である閃亜鉛鉱が生成物であるCu-S系硫化物によって置換されることで最大10^6オーダーで向上するという結果が得られた。　水熱実験の結果を総合すると、チムニー累帯構造発達過程における熱起電力発生プロセスについて以下の示唆が与えられる。まずチムニーの発達初期段階では閃亜鉛鉱などからなる導電性が低く空隙率の高い組織から構成されるため電子の移動は大きく制限され、かつ微粒子状の硫化鉱物にかかる温度勾配が小さいため生じる熱起電力も小さい。一方で発達後期段階では導電性の高い銅硫化物や銅・鉄硫化物の緻密な層が低導電性

の硫化鉱物上に形成され電子はより移動しやすくなり、高密度化のために電子の移動に十分な熱起電力が発現する。その結果チムニー壁で電流が生じ、海洋底へのエネルギー供給が生じうる。Yamamoto, M., Nakamura, R., & Takai, K. 2018, *ChemElectroChem*, Deep-sea hydrothermal fields as natural power plants. 5(16), 2162-2166.

キーワード：Hydrothermal Chimney
Keywords: Hydrothermal Chimney

カンラン岩の炭酸塩化：流体包有物分析と水熱合成実験によるアプローチ

Carbonation of Mantle Peridotite: An Approach From Fluid Inclusion Analysis and Hydrothermal Experiments

*川本 竜彦[1]
*Tatsuhiko KAWAMOTO[1]

1. 静岡大学理学部地球科学科
1. Shizuoka University

カンラン岩中の炭酸塩鉱物の産状としては、蛇紋岩中の炭酸塩脈と蛇紋岩角礫が炭酸塩の基質に囲まれる2つがある。これらは、いずれもオフィカーボネイトと呼ばれている。これまで、以下にのべるオフィカーボネイト中の炭酸塩に塩水からなる流体包有物を記載、報告してきた。（1）高速拡大海嶺で生成されたとされるオマーンオフィオライトの蛇紋岩に入る炭酸塩脈、（2） 低速拡大海嶺で生成されたとする西アルプスのオフィオライトの蛇紋岩に入る炭酸塩脈と炭酸塩基質、（3） 伊豆マリアナ海溝の蛇紋岩泥火山中のカルサイト、（4） 秩父の三波川帯のマントルウェッジ起源の蛇紋岩中の炭酸塩脈。その結果、（1）のオマーンオフィオライトの蛇紋岩の後期の脈に真水の流体包有物を発見した以外は、炭酸塩中の流体包有物に含まれる塩水は海水、または海水よりも少し高い塩濃度であった。（1）のオマーンオフィオライトの蛇紋岩中にも真水の流体包有物を持つカルサイト脈よりも前には、海底下で生成されたと考える脈に海水に似た塩濃度を持つ流体包有物が存在する。つまり、（1）と（2）に見られる海洋底の下の変成作用でできるオフィカーボネイトには海水に似た塩水が関与しており、（3）と（4）で見られるリソスフェアーが沈み込むマントルウェッジにも海水に似た塩濃度を持つ流体が持ち込まれていることを示す。

マントル岩と水・二酸化炭素の混合流体との反応を再現するために、流体包有物の解析と並行して鉄を含む系で水熱合成実験を行っている。実験結果は、広い温度領域においてタルクが石英とマグネサイトが共存し、このタルクは非平衡で晶出すると考えないと辻褄が合わない。今後、平衡な鉱物組み合わせを決定できると、Perple_Xなどの熱力学計算できるCaO-MgO-SiO_2-H_2O-CO_2系での相平衡図と比較して、鉱物安定領域の温度圧力条件に鉄が与える影響を理解できる。また、上述の（2）西アルプスのケラス地域では、タルク、アンティゴライト、カルサイトとマグネサイトが共存する（大澤陽介、研究中）。CaO-MgO-SiO_2-H_2O-CO_2の系での熱力学計算では、0.1GPaでは、流体の$CO_2/(H_2O+CO_2)$モル比は0.03以下、温度は360℃以下である。0.5G Paだと、$CO_2/(H_2O+CO_2)$モル比は0.002以下、温度は340℃以下と推定できる。さらに、その岩石中の流体包有物の均質化温度から求められる温度圧力条件と、これらの条件が一致するか確認するによって、マントルの炭酸塩化の条件がより精確に理解できると期待する。

キーワード：流体包有物、蛇紋岩、海水、二酸化炭素、マントル
Keywords: fluid inclusions, serpentinite, seawater, carbon dioxide, mantle

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

口頭講演 | S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

2024年9月13日(金) 9:00 ~ 10:00 | ES025 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

座長:田阪 美樹(静岡大学)

9:00 ~ 9:15

[S3-10] マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

*道林 克禎[1,2]、奥脇 健生[1]、夏目 樹[3] (1. 名古屋大学・院環境学、2. 海洋研究開発機構、3. 神奈川県立生命の星・地球博物館)

9:15 ~ 9:30

[S3-11] 稍深発地震の温度圧力条件下におけるカンラン石の一軸圧縮試験：特にアコースティック・エミッション震源及び断層の空間分布について

*大内 智博[1]、星野 真人[2]、上杉 健太郎[2]、奥村 聡[3]、肥後 祐司[2]、辻野 典秀[2]、柿澤 翔[2] (1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. 東北大・院理)

9:30 ~ 9:45

[S3-12] 岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

*福田 惇一[1] (1. 大阪公立大学・理・地球)

9:45 ~ 10:00

[S3-13] アウターライズ断層での海水の浸透によるマントル炭酸塩化の可能性

*片山 郁夫[1]、岡崎 啓史[1]、岡本 敦[2] (1. 広島大学、2. 東北大学)

マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

Rheological evolution of olivine during formation of the mantle lithosphere

*道林 克禎[1,2]、奥脇 健生[1]、夏目 樹[3]
*Katsuyoshi MICHIBAYASHI[1,2], Takeo Okuwaki[1], Itsuki Natsume[3]

1. 名古屋大学・院環境学、2. 海洋研究開発機構、3. 神奈川県立生命の星・地球博物館
1. Nagoya University, 2. JAMSTEC, 3. Kanagawa Prefectural Museum of Natural History

2016年から2018年にかけて実施された国際陸上掘削計画(ICDP)オマーン掘削プロジェクト(OmanDP)は、オマーン王国に露出するSamailオフィオライトWadi Tayin岩体に対して上部地殻～マントルセクション～オフィオライト岩体底部までそれぞれ300m～400m掘削することに成功した[1, 2]。本研究では、マントルセクションを掘削したBAサイトのうちBA3Aコアの蛇紋岩掘削コア試料が保存するカンラン石の結晶方位ファブリックに特徴を明らかにすることを目的とした。

BA3Aコアの大部分は蛇紋岩化したハルツバージャイトで構成される[1–3]。主な初生鉱物はカンラン石、直方輝石、単斜輝石、スピネルである。二次鉱物として蛇紋石、磁鉄鉱、角閃石、炭酸塩鉱物が観察された。本研究では、BA3Aコアから蛇紋岩化度が平均よりやや低い部分から岩石試料を採取し、薄片を掘削コアの半割面について鉛直方向が長辺と平行になるように作成した。各研磨薄片の鉱物相と結晶方位はSEM-EBSDを用いて分析した。そして、EBSDマップを基にしてマントルファブリックであるカンラン石の結晶方位ファブリックを解析した。

結果として、蛇紋岩から復元したBA3Aコアのカンラン岩の微細組織は主にポーフィロクラスト状組織であり、地殻ーマントル境界とほぼ平行な面構造を示すことが明らかとなった。さらにカンラン石の結晶方位ファブリックは、高温のアセノスフェアマントルに典型的なA～AGタイプ[4–8]ではなく、Samailオフィオライトの比較的低温の延性剪断帯に典型的なA～Dタイプのファブリック[6, 9]で特徴づけられることがわかった。しかし、BA3A コアは、高温マントルの粗粒組織と同様に、地殻-マントル境界に平行な水平な面構造を保持した状態で低温側のポーフィロクラスト状組織に変化していることから、BA3Aコアに保存されているるカンラン石の結晶方位ファブリックが、高温から徐々に低温になり、マントルがリソスフェアとして固結するまでの連続的なマントル変形の過程で変化した可能性を示唆する。

[1] Kelemen, P. B. et al., 2020a. Methods and explanatory notes. *In* Kelemen, P. B. et al., *Proceedings of the Oman Drilling Project*: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). https://doi.org/OmanDP.proc.2020
[2] Kelemen, P. B. et al., 2020b. Site BA3. *In* Kelemen, P. B. et al., *Proceedings of the Oman Drilling Project*: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). https://doi.org/OmanDP.proc.117.2020
[3] Kelemen, P. B. et al., 2021. Jour. Geophys. Res.: Solid Earth, 126, e2021JB022729.
[4] Ismail, W. B., Mainprice, D., 1998. Tectonophysics, 296, 145–157.
[5] Dijkstra, A. et al., 2002. Jour. Geophys. Res., 107, 2270.
[6] Michibayashi, K. and Mainprice, D., 2004. Jour. Petrol., 45, 405-414.
[7] Tommasi, A., Vauchez, A., 2015. Tectonophysics, 661, 11–37.
[8] Michibayashi, K. et al., 2016. Earth Planet. Sci. Lett., 443, 70-80.
[9] Michibayashi, K. et al., 2006. Earth Planet. Sci. Lett., 244, 695-708.

キーワード：カンラン石、マントル
Keywords: Olivine, Mantle

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

稍深発地震の温度圧力条件下におけるカンラン石の一軸圧縮試験：特にアコースティック・エミッション震源及び断層の空間分布について

Three-dimensional location analysis on acoustic emissions and faults in olivine under pressure-temperature conditions of subducting slabs

*大内 智博[1]、星野 真人[2]、上杉 健太郎[2]、奥村 聡[3]、肥後 祐司[2]、辻野 典秀[2]、柿澤 翔[2]
*Tomohiro OHUCHI[1], Masato Hoshino[2], Kentaro Uesugi[2], Satoshi Okumura[3], Yuji Higo[2], Noriyoshi Tsujino[2], Sho Kakizawa[2]

1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. 東北大・院理
1. GRC, Ehime Univ., 2. JASRI, 3. Tohoku Univ Sci.

沈み込むプレート内の深さ40 km以深でのスラブ内地震（稍深発及び深発地震）の発生メカニズムは、未だ大きな謎に包まれている。封圧下における岩石の破壊強度は「差応力>封圧の条件を満たす場合にのみ破壊が起きうる」ことを意味するGoetze基準にて規定される。地球のリソスフェアマントルの差応力の上限はおおむね0.3GPa程度であるため、封圧が1GPa以上となる上部マントル以深では脆性破壊や摩擦すべりは困難であるはずにもかかわらず、実際には沈み込むスラブ内部では地震が多発している。そのようなパラドックスを説明するため、含水鉱物の脱水分解による「脱水不安定」モデル（Raleigh & Paterson, 1965）や「転移断層」モデル（Green & Burnley, 1989）、「断熱不安定」モデル（Kelemen & Hirth, 2007）などの、高圧環境下に特有の種々の仮説が提案されてきた。これらの仮説を検証することを目的とした実験が数多くなされてきており、特にこの10年では、高温高圧下における一軸圧縮試験と放射光“その場観察”法及びアコーステック・エミッション（AE）測定法を組み合わせた実験手法（Schubnel et al., 2013）が行われるようになり、応力、歪、AE発生頻度の時間変遷の複合評価が可能となった。しかし、破壊が進行するタイムスケールは秒単位であることや断層の不安定すべり時の応力降下のタイムスケールはミリ秒単位であること（例えばOkazaki & Katayama, 2015）を勘案すると、放射光“その場観察”によって破壊の素過程に迫るのは容易ではない。例えば、現在SPring-8のBL04B1に常設されているCCD検出器と60keVの単色X線の組み合わせでは、差応力測定に耐えうるクオリティーの2次元X線回折パターンを得るのに300秒程度の露光時間を要する。

そこで本研究では、SPring-8のBL05XUビームラインに小型D-DIA型変形装置及びシンチレーションレスの2次元半導体検出器（WidePix 5x5、Advacam社製）をはじめとした光学系を仮設し、スラブ内浅部の温度圧力条件下（500－900℃、2－3 GPa）におけるカンラン石多結晶体の一軸圧縮試験を行った。MA6-6型加圧方式（2段目アンビル先端7mm）を採用し、試料の一軸圧縮は一定のD-ramストローク速度にて行った。高エネルギーアンジュレーター光源から供給されるピンクビーム（約100keV）を試料に入射し、2次元X線回折パターン及びラジオグラフを交互に撮影することにより（露光時間はいずれも0.4秒）、試料の被る応力及び歪を測定した。2段目アンビルの背面には計6個の圧電素子を貼り付け、それぞれの圧電素子にて試料から放出されるAEを測定した。AE波形（P波）の初動時刻より、AEの震源位置を決定した。回収試料中に発達した断層の空間分布状態は、SPring-8のBL20B2にてX線マイクロトモグラフィー法を用いて観察した。

いずれの条件でも、2GPaを超える差応力にて降伏が起き、その後に“見かけの”定常的な流動とそれに伴うAE発生が継続した。塑性変形がより卓越するであろう、高温側の800－900℃ではより多くのAEが発生した一方で（数百件程度）、低温側のAE発生件数は高温側の半数程度にとどまった。歪が10%を超える領域では、応力一定にて歪速度が1.5－2倍となる軟化が起き、それに合わせてAEの発生頻度が変化（多くの場合では上昇）した。多くの場合では、軟化後に断層すべりが起きた。歪が10%未満の変形初期ではAE震源は比較的ランダムに分散していた一方で、歪が10%を超える変形中後期では、AE震源はクラスターを形成する傾向が見られた。X線マイクロトモグラフィー法で観察した断層とAEの震源分布には、ある程度の相関関係があったものの、そうではないAE震源も多く見られた。同様のことは、ゲルマニウムオリビン多結晶体（Wang et al.,

2017）でも報告されており、断層形成及びすべりの結果として発生するAEがある一方で、断層とは無関係に発生するAEも存在するということを意味しているのかもしれない。

キーワード：カンラン石、アコースティック・エミッション、断層、稍深発地震
Keywords: Olivine, Acoustic emission, Fault, Intermediate earthquake

岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

In-situ observation of grain growth and fluid movement using camphor as a rock analogue

*福田 惇一[1]
*Junichi Fukuda[1]

1. 大阪公立大学・理・地球
1. Dept. Geos. Osaka Metrop. Univ.

地殻やマントルにおいて粒径は変形や反応に寄与する．粒成長は粒径を増加させる重要な機構である．しかし地球内部における実際の粒成長は，構成鉱物集合体を用いた実験からも示唆されている通り，何千年，何万年とかけて有意な変化が見られる現象である（例えば石英集合体についての粒成長実験としてFukuda et al. 2019）．粒成長実験では，このような天然での長い時間変化を加速させて行う．そのために，天然条件よりも高温高圧条件下で実験を行うことで，数時間から数日程度で有意な粒成長を得る．このような実験では，高温高圧実験装置を用いて，金属ジャケットに封入した試料と実験ピースを実験毎に装置から取り出し，凍結された試料組織を観察することがほとんどである．したがって，実際の地球内部での粒成長は当然ながら，実験においても刻々と変化する組織を観察することはできない．さらに，地球内部には流体が鉱物粒界や流体包有物として粒内に普遍的に存在する．このような流体は粒成長に伴って移動すると考えられる．

以上の背景の下，本研究では岩石模擬物質である樟脳を用いて，粒成長その場観察実験と，流体相としてエタノールを加えた同様の実験を行った．実験手順として，乳鉢に数百mgの樟脳のみ，またはそこに数十μlのエタノールを加えてすりつぶした．その後，約5 mgの試料をスライドガラスにセットし，上部から別のスライドガラスを押し付けた．上部のスライドガラスを取り除いた後，試料を偏光顕微鏡下で観察すると，平均粒径10 μmからなる緻密な樟脳集合体が見られた．空隙は1面積%以下であった．エタノールを加えた樟脳試料は，エタノールが数面積%として，樟脳粒界と樟脳粒内に流体包有物として保持されている．このように，樟脳のみの試料と樟脳＋エタノール試料のそれぞれを室温かつ偏光顕微鏡下で動画を撮影することで粒成長過程を観察した．

実験の結果，樟脳のみの試料では，正常粒成長が起きる様子が観察され，２時間程度で平均粒径が10 μmから40 μmへと変化した．この結果はFukuda（2024）で報告した．樟脳＋エタノール試料では，樟脳の正常粒成長に加えて，次の３種の流体の挙動が確認された（図）．１．近傍の流体同士が合体し，大きな流体となる（図中のCombination）．２．元々は樟脳粒界にあった流体が，粒成長による粒界移動に伴って粒子内部に移動し，流体包有物となる（Left behind）．３．元々は流体包有物であったが粒界移動により，近傍の粒界に取り込まれる（Incorporation into GB）．先の１は当然の結果であろう．２と３の違いは流体包有物の体積とそれを保持できる近傍の粒界の体積に関係があると考えられる．すなわち，１の流体の合体により流体の体積が増加する，または粒成長に伴い一つの粒界の体積増加または減少により，流体の体積>粒界の体積となれば２が起き，流体の体積<粒界の体積であれば３が起きる．

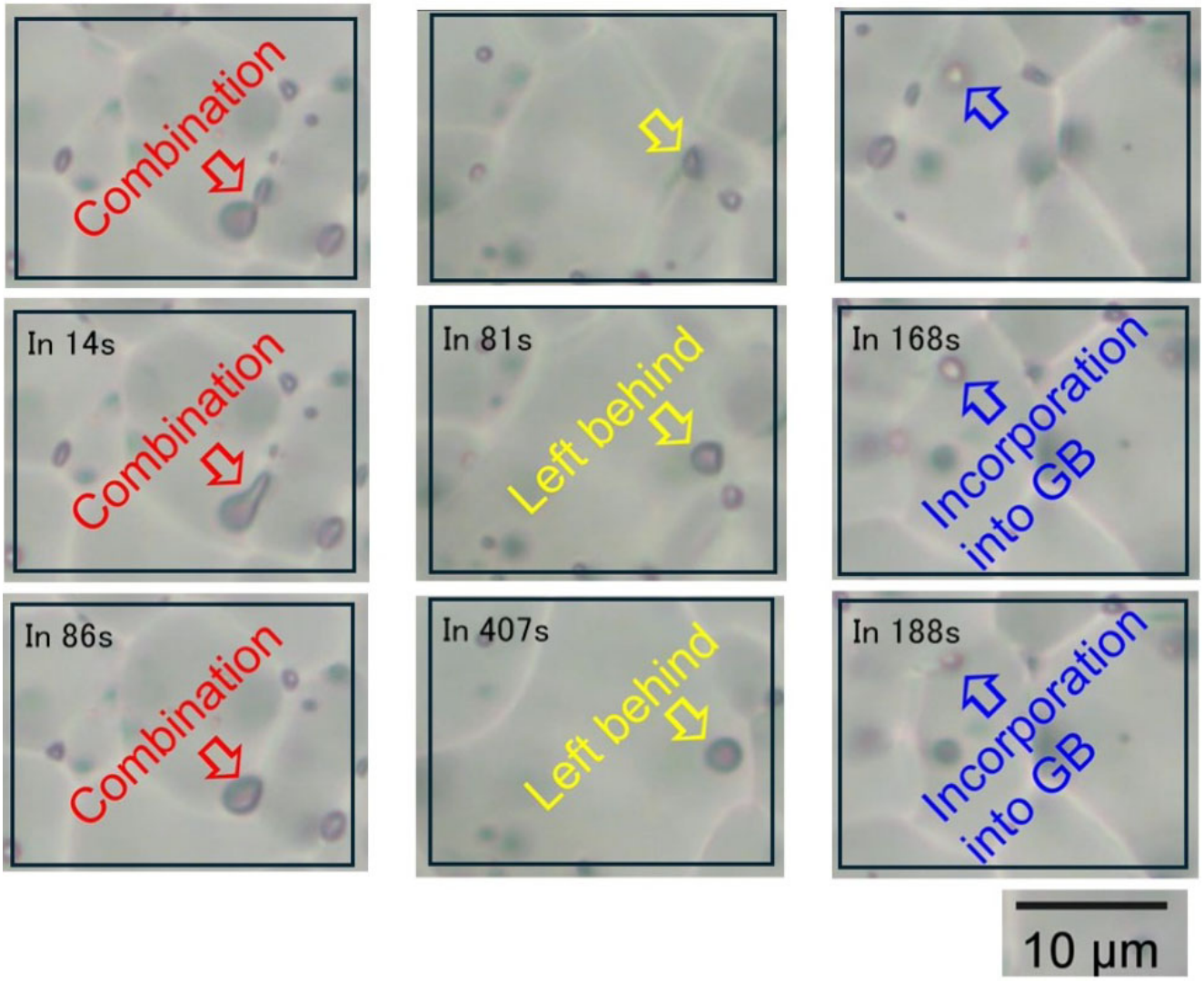
次に，樟脳＋エタノール粒成長実験において，実験開始時と任意の時間後の流体の分布を測定した．その結果，流体同士の合体により，時間の経過と共に個々の流体の平均面積（実際は体積）は増加するが，単位画像面積あたりの流体の数は減少した．しかし，単位画像面積あたりの流体の総面積は実験前後で保持されていた．実際の天然においても，粒成長に伴うこのような流体の挙動が示唆される．

Fukuda J., Raimbourg H., Shimizu I., Neufeld K., Stünitz H. (2019) Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature. Solid Earth, Vol. 10, pp. 621–636

Fukuda J. (2024) Grain growth of camphor as a rock analogue: microstructural development and grain

growth law. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. Vol. 119:010

キーワード：岩石模擬物質、樟脳、粒成長、流体
Keywords: Rock analogue, Camphor, Grain growth, Fluid



アウターライズ断層での海水の浸透によるマントル炭酸塩化の可能性

Mantle carbonation through seawater penetration along the outer-rise faults

*片山 郁夫[1]、岡崎 啓史[1]、岡本 敦[2]
*Ikuo KATAYAMA[1], Keishi Okazaki[1], Atsushi Okamoto[2]

1. 広島大学、2. 東北大学
1. Hiroshima University, 2. Tohoku University

近年の地球物理観測によって海溝付近のプレートが折れ曲がるアウターライズ断層沿いに，海水がマントルまで浸透している証拠が数多く報告されている。オマーンなどのオフィオライト岩体では，炭酸水とカンラン岩による交代作用が広く確認されていることから，マントルにまで海水が浸透するのであれば，プレート内では蛇紋岩化に加え炭酸塩化も起きている可能性が高い。一方で，マントルの蛇紋岩化と炭酸塩化はどちらも地震波速度を低下させる方向に働くため，地震波速度だけからマントルでの炭酸塩の割合や進行度を推定することは難しい。そこで本研究では，熱力学計算を導入することで，マントル中の炭酸塩化を評価する手法を開発し，それを海洋マントルでの地震波速度の低下に適用することで，マントル中の炭酸塩化を評価した。熱力学計算では，温度100℃および圧力200MPaの条件で，炭素が溶け込む海水とカンラン石の平衡関係から，水岩石比を変化させた際の安定な鉱物相の割合を計算した。水岩石比が低い場合は，蛇紋石やブルーサイトが安定であるのに対し，水岩石比が高くなるとマグネサイトが晶出し，その割合が増える傾向にある。固相の地震波速度は既知であるため，それらの鉱物の組み合わせから岩石の地震波速度を計算した。マグネサイトは蛇紋石より地震波速度が速いため，水岩石比が増えると地震波速度はやや速くなる傾向にある。鉱物の量比は水岩石比によるため，地震波速度の観測結果から炭酸塩の量を見積もるには，水岩石比を制約する必要がある。そこで本研究では，断層沿いに流体が通過しながら炭酸塩化が起きることを想定し，比較的高い水岩石比（W/R=500）を仮定し，マントルでの速度低下から炭酸塩の割合を推定した。その結果，最上部マントルの地震波速度から，マントルは20%ほど蛇紋岩化しており，それと同時に1%ほどの炭酸塩化が起きていることが予想される。なお，その際の岩石中の炭素重量は400ppm程度である。この手法を世界中のアウターライズ領域の地震波速度構造に適用すると，マントルでの炭素フラックスは15Mt/yrとなり，海洋地殻による炭素フラックスにほぼ匹敵する。しかし，今回の見積もりは水岩石比を仮定しているため大きな誤差を含み，そのあたりをどう評価すればいいのかが今後の課題である。

キーワード：炭素循環、炭酸塩化、マントル
Keywords: Carbon cycle, Carbonation, Mantle

口頭講演 | R4：地球表層・環境・生命

2024年9月13日(金) 10:15 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

座長:佐久間 博(物質・材料研究機構)、甕 聡子(山形大学)、川野 潤(北海道大学)

10:15 ~ 10:35

[R4-01] 球状コンクリーションの理解と応用-自然に学ぶ恒久的シーリング新素材の開発-

「招待講演」

*吉田 英一[1] (1. 名古屋大学)

10:35 ~ 10:50

[R4-02] 広島花崗岩の風化による色変化過程

*横山 正[1]、院去 由佳、海堀 正博[1] (1. 広島大学)

10:50 ~ 11:05

[R4-03] 陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

*松影 香子[1]、井出 桃花[2]、倉田 雅也[2]、西原 遊[3] (1. 帝科大・自然環境/総合教育センター、2. 帝科大・アニマルサイエンス、3. 愛媛大・GRC)

11:05 ~ 11:20

[R4-04] 生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

*奥村 大河[1]、鈴木 道生[2]、Perez-Huerta Alberto[3]、Samajpati Eshita[3]、小暮 敏博[1] (1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.)

11:20 ~ 11:40

[R4-05] バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

「招待講演」

*鈴木 道生[1] (1. 東大・院農)

11:40 ~ 11:55

[R4-06] n-ブチルアミンの添加による非晶質炭酸カルシウム(ACC)からのアラゴナイト生成

*鍵 裕之[1]、村岡 賢佑[1] (1. 東京大学)

11:55 ~ 12:00

調整

球状コンクリーションの理解と応用-自然に学ぶ恒久的シーリング新素材の開発-

Understanding and application of spherical concretions: A new durable sealing material learnt from nature

*吉田 英一[1]
*Hidekazu Yoshida[1]

1. 名古屋大学
1. Nagoya University

地球表層での続成（岩石化）作用や化石化作用は、物質循環に伴う元素の移動・固定によるものである。このような物質循環プロセスは、自然界ではおおよそ緩慢である。一方、人間活動に伴う資源の消費やコンクリート生成に伴う材料・物質の循環は非常に速く、その速度的ギャップがCO_2による温暖化や放射性廃棄物の蓄積などといった、これまでに直面してこなかった地球規模での現象を顕在化させている。その課題に対処するための方法として進められているのが、CO_2地下貯留（CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage）や放射性廃棄物の地下処分（隔離）といった地下環境の活用である。

地下環境を利用する最大の理由は、少なくとも10^3年以上もの時間スケールでのCO_2の貯留や廃棄物の隔離が求められることにある。そのためには、物質循環の激しい地表に保管（管理）するのではなく、石油や鉱物鉱床が長期に渡って保持されてきた地下環境に委ねる方が技術的かつ倫理的にも現実的であるという考えに基づいている（OECD/NEA, 2021）。しかしながら、CO_2や放射性廃棄物を地下に埋設・隔離するためには、ボーリング孔や搬入立坑、トンネルが必須であり、漏洩・汚染拡大させないためにもこれらの「穴」を恒久的にシーリングすることが不可欠となる。一方で、このような恒久的シーリング技術（材料）を現状我々は有していない。現在、工学的に用いられるセメントを基本とするグラウチング素材においても、注入後のカルシウムイオンの溶出等に伴い数百年以上は持たないと考えられている。この課題を解決するには、シーリング剤として長期に渡って地下環境においても安定に存在し続ける素材（鉱物）を用いるしかない。この背景のもと、着目したのがコンクリーションである。

コンクリーションには、主にCa, Si, Feをセメントの主成分とするものがある。とくに$CaCO_3$を主成分とするコンクリーションは、保存良好な化石を内包するなど最もよく知られた鉱物素材であり、メートルサイズでも数年程度で形成されることが明らかとなった（Yoshida et al., 2015, 2018, 2020）。その形成・成長は、海底堆積物中の生物遺骸から拡散・放出される有機酸起源の炭酸と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応に伴う、カルサイトの急速沈殿・空隙シーリングによる。その結果、数百万年以上もの長期に渡って生物殻がコンクリーション中に保存され、風化・変質することなく産出する。

この特性を応用し、民間化学工業会社と人工的コンクリーション化剤‘コンクリーションシード(略称コンシード：特許第6889508号；7164119号；7215762号)’を開発し、このコンシードによるシーリング実証試験を、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター（北海道幌延町）の地下350 mで行った。その結果、トンネル掘削に伴う岩盤の破壊領域（掘削損傷領域：EDZ)の透水係数が、半年で２～３オーダー以上低下し、周辺母岩とほぼ同レベルの透水性に改善された。さらに、本試験中にM5.4の直下型地震が発生し、透水性が一旦上昇したにも関わらず、数ヶ月後には元の低透水性にリカバリーした（Yoshida et al.,2024）。このようなシーリング効果は、地層処分だけでなく、岩盤中の割れ目帯や断層破砕帯などの大規模水みちの止水対策や，既存トンネルの修復に用いられるグラウト技術の代替策として、さらにはCCSや石油廃孔の恒久的シーリングを担保するものである。

$CaCO_3$(カルサイト)は、自然界に豊富に存在し、生成が速くかつ鉱物的にも安定である。生物化石を含むコンクリーションの存在は、そのことを明確に語っている。このような自然現象を理解し、応用へと展開させ

るには、地球化学的アプローチが重要かつ不可欠あるとともに、地質学・鉱物学・古生物学・地球物理学並びに関連する工学分野との協働が、直面している長期化する環境問題の解決に向けてさらに重要かつ効果的だと考える。

文献Yoshida et al. (2015) *Scientific Reports*; Yoshida et al. (2018) *Scientific Reports*; Yoshida et al. (2020) *Geochemical Journal.*; OECD/NEA (2021) *OECD publishing Paris*, NEA/RWM/R1. Yoshida et al. (2024) *Communications Engineering (nature)* https://doi.org/10.1038/s44172-024-00216-1.

キーワード：球状コンクリーション、炭酸カルシウム、恒久的シーリング剤
Keywords: Spherical concretion, Calciumu carbonate, Durable sealing material

広島花崗岩の風化による色変化過程

Color change process of Hiroshima granite due to weathering

*横山 正[1]、院去 由佳、海堀 正博[1]
*Tadashi YOKOYAMA[1], Yuka Inkyo, Masahiro Kaibori[1]

1. 広島大学
1. Hiroshima University

中国地方には花崗岩が広く分布している。花崗岩の風化断面を観察すると，地表付近の風化が進行した部分は鉄の二次鉱物の生成により黄～褐色を呈し，地下の未風化部に近づくにつれて白っぽくなることが多い。本研究では，広島花崗岩を例として，風化による色変化の特徴やメカニズムを調べた。広島大学東広島キャンパス横のががら山において深さ20 mまで掘削された花崗岩のコアを研究対象とした。分光測色計を用いて，各深度の色（L* a* b*値）を約2-10 cmおきに測定した。色の値は，L*値が大きいほど明るく，a*値が大きいほど赤みが強く（a* > 0の場合），b*値が大きいほど黄色味が強い（b* > 0の場合）。コアの色は，深さ12 m以深の白っぽい未風化部はa*値，b*値共に小さく，L*値は大きい。一方，深さ約12 mから約4 mにかけては，位置によりばらつきがあるものの，全体としては地表に近い部分ほどa*値，b*値共に増大し，L*値は低下する。各深度の色を，風化で生じる鉄の二次鉱物として代表的な4種類の含鉄鉱物で作成した標準物質の色と比較した。この標準物質は，goethite（黄色），ferrihydrite（暗褐色）, lepidocrocite（明褐色），hematite（暗赤色）を，それぞれSiO_2粉末と0-100%のさまざまな割合で混合したものである。掘削コアの風化の初期段階に相当する部分では，割れ目の周辺に濃褐色の帯があるがそれより奥は白っぽいことが多く，この濃褐色の帯はferrihydriteとgoethiteの混合物に相当する色を示した。一方，風化が進んだ部分では岩石マトリクス全体が黄色味を帯びていることが多く，この部分の色はgoethiteの色に近かった。一般に，ferrihydriteは時間の経過と共により安定なgoethiteやhematiteに変化していくことが知られている。掘削コアの色測定の結果から，風化の初期段階ではまずferrihydriteが多く生成し，その後風化の進行に伴いferrihydriteからgoethiteへの変化が進んだことが推察される。また，掘削コアの風化度が異なる数カ所について，選択的鉄溶解法で鉄の二次鉱物を溶かして定量した。コアの色と標準物質の色との比較からコアの各地点の鉄の二次鉱物の量（全てgoethiteと仮定）を推定し，選択的鉄溶解法で得られた値に対してプロットすると，概ね比例関係が認められた。現段階ではferrihydriteの寄与を評価できておらず，その影響を補正すると結果が変わる可能性はあるが，迅速・簡便なコアの色測定のみから鉄の二次鉱物の量を大まかには推定できる可能性が示された。

キーワード：花崗岩、風化、色
Keywords: Granite, Weathering, Color

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

Crystallographic preferred orientation and grain size of apatite in terrestrial mammalian bones

*松影 香子[1]、井出 桃花[2]、倉田 雅也[2]、西原 遊[3]
*Kyoko N. MATSUKAGE[1], Momoka Ide[2], Masaya Kurata[2], Yu Nishihara[3]

1. 帝科大・自然環境/総合教育センター、2. 帝科大・アニマルサイエンス、3. 愛媛大・GRC
1. Teikyo Univ. of Sci. Natural and Environmental Sci., 2. Teikyo Univ. of Sci. Aminal Sci., 3. Ehime Univ.

陸生哺乳類動物の骨は主に水酸基を含む燐灰石$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$多結晶体からなることが知られている。現世の動物の骨組織の研究は過去に地球上に生息していた動物の生態や機能を化石から推定するさいの重要な基礎データになるだけでなく、特に陸生哺乳類の骨格の組織解析から得られた知見は医療に用いられる人工歯や人工骨の開発に役立てられている。例えば、Nakano et al. (2008)はウサギの尺骨の燐灰石が、骨の伸張方向に対してc軸が向くように定向配列していること、透過型電子顕微鏡による観察によって結晶サイズが数10nm程度であり光学顕微鏡では結晶子が観察出来ないぐらい細粒であることを報告している。本研究では、帝京科学大学アニマルサイエンス学科の濱野氏より提供されたタヌキの骨を使用し、哺乳類動物の骨の組織を詳細に記載することを目的とした。

初めに実体顕微鏡で骨の表面観察を行った上で骨の薄片を作成し偏光顕微鏡観察を行った。先行研究では、哺乳類の骨の結晶粒径は数10nm程度であり可視光の波長よりも細粒であるため、光学顕微鏡では結晶方位や組織等の観察は不可能であるとされていたが、クロスニコルで観察したところ全ての薄片で消光が認められた。例えば、足根骨の伸張方向の断面、足根骨の輪切り断面、手首の関節断面は明瞭な消光が観察できた。足根骨の伸張方向の断面の組織は外側と内側に分けられ、外側は硬く緻密な部分と生体組織が充填していたと考えられる空孔がある部分の二重構造がみられた。内側の層は外側2層にくらべて空隙が多く、繊維状組織を有していた。骨全体では三重構造になっていることがわかった。内側の層では、繊維状結晶の束を構成する結晶では消光角がある程度そろった消光がみられたが、繊維の束ごとの方向がランダムなため、全体でランダムな方向に結晶が存在しているように見えた。足根骨の輪切り断面では、中心の繊維状組織にランダムな消光が見られた。手首の関節輪切りは特に関節の先端外側で強い一方向の消光が見られ、内側ではランダムな消光が見られた。

偏光顕微鏡観察を行った上記三つの試料に関して、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター設置のマイクロフォーカスX線回折装置による結晶方位解析を行った（瀬戸, 2012）。Mo KαX線を用いた透過法による2次元回折パターンを、ソフトウェアMAUD (Lutterotti et al., 2014)を用いて解析した。伸張方向に切った試料では外側の緻密な組織で骨の伸張方向に強いｃ軸の定向配列が見られた。伸張方向と垂直な断面で外側の緻密部分を測定したところ、a軸は伸張軸と直交する面内でランダムな方向を向いていた。内側の繊維状組織の部分ではc軸方向の定向配列は外側よりも弱く、明瞭に見られる部分と不明瞭な部分があった。この結果は繊維の束が束ごとに一方向にそろってはいない組織の任意断面を測定したことによると考えられる。燐灰石のc軸はa軸に比べ非圧縮率が大きいことが知られており(Matsukage et al., 2004)、力が一番強くかかる骨の伸張方向に結晶の強度が大きいｃ軸が向いているという結果は骨の機能から予想される骨組織と調和的である。

さらにマイクロフォーカスX線回折ピークの半値幅を用いてScherrerの式から結晶の粒径を推定した。粒径は全ての分析点において20nm以下となり、非常な細粒であるという結果になった。本来光学顕微鏡では観察が不可能なほどの細粒であることが示されたが、本研究では偏光顕微鏡による観察にて、全ての薄片で消光が観察された。可視光を用いた偏光顕微鏡で消光がみられるという事は、結晶の大きさが可視光（数100nm）よりも大きいことを示唆する。この矛盾の解釈として、10－20nm程度の細粒の結晶がみなほぼ同じ方向を向いており、揃って大きな結晶の“フリ”をしていたため消光がみられ、光学顕微鏡でも定向配列の有無が観察出来たのではないかと結論づけた。多結晶体では細粒であるほど降伏応力が高くなるという

Hall-Petchの関係があり、細粒である事が骨の強度に寄与していると考えられる。

引用文献
Matsukage et al. (2004) Physics and Chemistry of Minerals, 31, 580-584
Nakano et al. (2008) Journal of the Ceramic Society of Japan, 116, 2, 313-315.
Lutterotti et al. (2014) Crystallography Education, 29, 76-84.
瀬戸雄介 (2012) 高圧力の科学と技術，22，2，144-152.

キーワード：燐灰石、陸生哺乳類、骨、定向配列、粒径
Keywords: Apatite, terrestrial mammal, Bone, Pregerred orientation, Grain size

生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

Microscopic distribution of sodium in biogenic aragonite

*奥村 大河[1]、鈴木 道生[2]、Perez-Huerta Alberto[3]、Samajpati Eshita[3]、小暮 敏博[1]
*Taiga Okumura[1], Michio Suzuki[2], Alberto Perez-Huerta[3], Eshita Samajpati[3], Toshihiro Kogure[1]

1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.
1. UTokyo Sci., 2. UTokyo Agri. Life Sci., 3. Univ. Alabama Geol. Sci.

多くの生物起源あられ石には、結晶内に様々な微量元素が含まれる。その中でもNaは最も主要な元素であり、生物の生息環境に応じて含有量が変化する。しかし、あられ石中でのNaの存在状態は完全には明らかになっていない。我々は本学会の一昨年の年会において、生物起源あられ石および*in vitro*で合成したNa含有あられ石について、その結晶構造について報告した。生物起源あられ石では、陸生 ＜ 淡水生 ＜ 汽水生 ＜ 海水生の貝殻の順で軸率（*a*/*b*と*c*/*b*）が大きく、軸率の増大はNaの含有量と相関していた。合成あられ石においても同様な傾向が見られたため、異方的な格子定数変化はNaがCaを置換することが原因であると考えられた。一方、Pokroy *et al.* (2007) では加熱処理によってこうした異方性が緩和することが報告されている。そこで本研究では、生物起源あられ石に加熱処理を施し、格子定数やNaの微視的分布の変化を調べることにより、結晶中に含まれるNaの存在状態の解明を目指した。

試料は海水生貝類のアワビ（*Haliotis discus*）とアコヤガイ（*Pinctada fucata*）の真珠層を用いた。これらの貝殻粉末を250˚Cで加熱し、加熱前後で粉末X線回折により格子定数を測定した。加熱前の軸長は非生物起源あられ石に比べて*a*軸と*c*軸は長く、*b*軸はやや短かったが、加熱後は非生物起源あられ石とほぼ同じ値に変化した。走査電子顕微鏡を用いてエネルギー分散型X線分光（EDS）分析を行うと、加熱前後でNa含有量に大きな変化は見られなかった。次に、イオンミリング法によってアワビ真珠層断面の薄膜試料を作製し、走査透過電子顕微鏡を用いたEDS分析により加熱前後のNaの微視的分布を調べた。その結果、加熱前はNaが結晶内に均一に分布していたのに対し、加熱後は結晶内に存在するNaの量は減少し、結晶端面に濃集していた。さらに詳細なNaの分布を調べるため、加熱前後のアワビ真珠層から集束イオンビーム試料加工装置により半径50 nm程度の針状試料を作製し、3次元アトムプローブを用いて分析した。加熱前は結晶全体にNa^+が検出されたが、ややNa^+濃度が高い部分がCOH^+の分布と一致していたため、一部のNaは有機物に結合して存在することが示唆された。一方、加熱後には結晶内にはNa^+がほとんど存在せず、結晶界面に存在する有機膜の周辺に濃集していた。Na^+の分布は$Na_2CO_3^+$ではなくNa_2O^+の分布と相関が見られたため、Naは有機物と結合した可能性が考えられる。以上の結果から、生物起源あられ石に含まれるNaにはCaを置換するものと有機物に結合するものが存在するが、加熱によってNaが散逸して結晶格子から抜けることで軸長の異方性が緩和されたと考えられる。今後は合成したNa含有あられ石でも同様な実験を行い、Naの存在状態をより詳細に調べる予定である。

キーワード：あられ石、ナトリウム、バイオミネラリゼーション、STEM-EDS、3次元アトムプローブ
Keywords: Aragonite, Sodium, Biomineralization, STEM-EDS, Atom probe tomography

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

Structural and functional analyses of organic matrices regulating the formation of minerals in biomineralization.

*鈴木 道生[1]
*Michio Suzuki[1]

1. 東大・院農
1. UTokyo

貝類の貝殻は炭酸カルシウムを主成分とする代表的なバイオミネラルの一つである。日本では真珠養殖に利用されるアコヤガイの貝殻は、宝石の真珠と同じ構造を有する扁平状の炭酸カルシウムを含む内側の真珠層、柱状の炭酸カルシウムから成る外側の稜柱層、二枚貝を繋ぐ蝶番部に存在する炭酸カルシウムナノファイバーを含む靭帯と複数の複雑な微細構造により構成されている。これらの微細構造の形成において、炭酸カルシウムのサイズ、形態、多形、方位、結晶欠陥などの特徴が全く異なっており、アコヤガイは有機基質や微量元素、イオン濃度などを生体内外で調整することで緻密に作り分けることが可能である。

これまで発表者の研究において、特に貝殻内に存在する有機基質に着目して研究を進めており、有機基質の構造と機能がどのように貝殻微細構造を形成に寄与するのか明らかにすることを目的に研究を進めてきた。真珠層には炭酸カルシウムの脱灰と共に溶出する可溶性成分に含まれる炭酸脱水酵素であるnacrein、不溶性成分から変性剤で溶出され有機基質の枠組みを形成するPif、有機基質の架橋を行うtyrosinase、変性剤でも可溶化しない不溶性成分として有機基質の骨格を構成するキチン、MSI60、NU-5などが同定されてきた。この中でPif関連タンパク質は貝殻の基質タンパク質として、有機物間相互作用と炭酸カルシウムとの相互作用の両方の機能を持ち真珠層以外の多くの貝殻微細構造に含まれることが分かってきた。核磁気共鳴を用いた解析により、固体表面でPifの繰り返し配列が伸長し結合することが判明した。また、有機基質の骨格を形成するキチンはキチン分解酵素による作用でナノファイバー化することで欠陥の誘導や有機膜の薄膜化を実現していることが示された。以上のように、貝殻内には多くのタンパク質が存在し、様々な役割分担をして貝殻微細構造を形成していると言える。このような有機基質のバイオミネラル内での機能や役割について最新の研究成果を紹介する。

キーワード：バイオミネラリゼーション、有機基質、炭酸カルシウム、アコヤガイ
Keywords: biomineralization, organic matrices, calcium carbonate, Pinctada fucata

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

n-ブチルアミンの添加による非晶質炭酸カルシウム(ACC)からのアラゴナイト生成

Aragonite formation from amorphous calcium carbonate (ACC) with addition of *n*-butylamine

*鍵 裕之[1]、村岡 賢佑[1]
*Hiroyuki KAGI[1], Kensuke Muraoka[1]

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

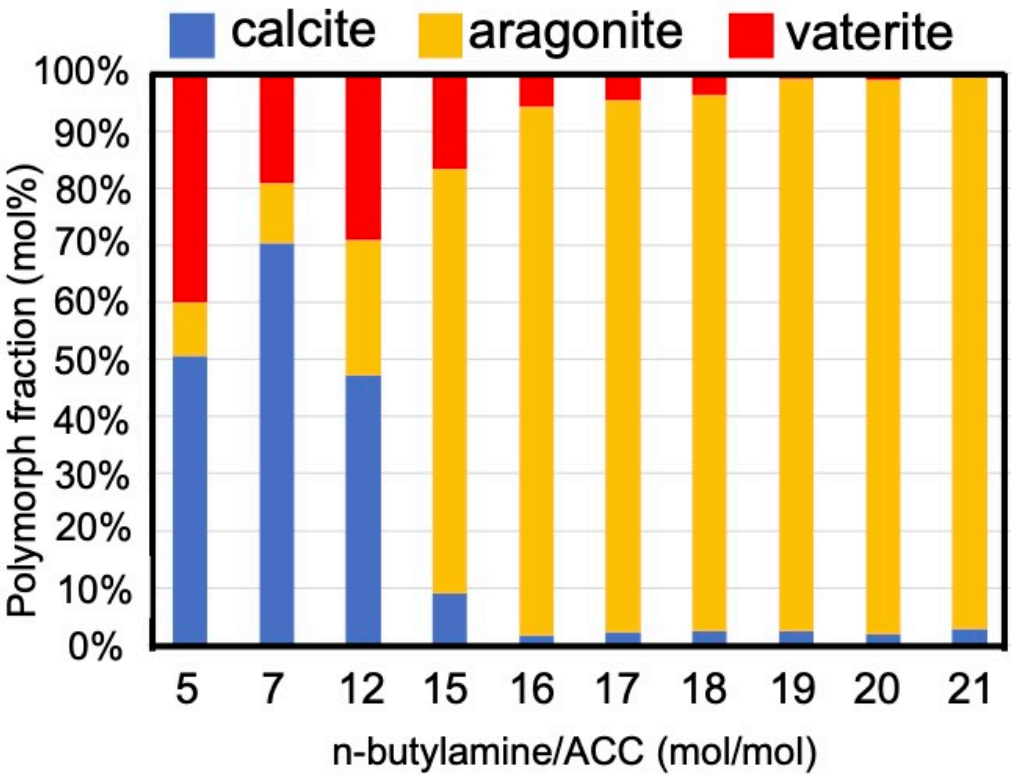
炭酸カルシウムは普遍的な鉱物で、3つの結晶多形、すなわちカルサイト、アラゴナイト、ファーテライトが存在する。準安定な非晶質炭酸カルシウム(ACC）は化学式$CaCO_3$・nH_2O（n<1.5）で表され、バイオミネラリゼーションにおいて上記の結晶多形の前駆体として働くことが知られている。ACCは高温、高圧、湿潤環境といった条件でのin vivo実験で、カルサイトとファーテライトに結晶化することが多く報告されている[e.g., 1-3]。一方、ACCからアラゴナイトへの結晶化は報告例がきわめて少なく、アラゴナイト生成を誘導することが古くから知られているマグネシウムイオン(塩化マグネシウム水溶液)を添加したエタノールからの析出といったものに限られている[4]。一方、過飽和水溶液からの炭酸カルシウムの生成で、アミン類がアラゴナイトの生成を誘導することが報告されている[5]。本研究では、ACCから炭酸カルシウムへの結晶化における多形制御、特にアラゴナイトへの選択的結晶化の条件を調べることとした。

ACCは先行研究に従って合成した[1, 2]。 ACCと*n*-ブチルアミンを様々な割合で混合し、温度30℃、相対湿度90%RH、80%RHの条件でそれぞれ2時間放置した。ACCと*n*-ブチルアミンのみを混合するだけでは炭酸カルシウムへの結晶化は起こらず、湿潤条件によるACCへの水の添加が結晶化に効いていることがわかった。

実験の結果、*n*-ブチルアミンとACCの量比と得られた多形の割合は添付の図のようになった。注目すべきは、アラゴナイト生成をもたらすことで知られるMg^{2+}イオンを添加することなく、きわめて高純度なアラゴナイトが得られたことである。アラゴナイトの生成に、*n*-ブチルアミンの疎水性あるいは塩基性のどちらが効いているのかを理解するために、疎水性のヘキサン、塩基性のアンモニア水、そしてヘキサンとアンモニア水の混合物それぞれをACCと混合し、室温条件で2週間放置した。これら3種類の試料の中で、ヘキサンとアンモニア水との混合物のみがACCからアラゴナイトを生成した。この結果は、ACCからアラゴナイトへの結晶化には疎水性と塩基性の両方が必要であることを示唆している。本研究は、ACCからの結晶多形制御への新たな可能性を拓くと期待される。

[1] Koga et al (1998) Thermochimica Acta, 318, 239-244. [2] Yoshino et al. (2012) Crystal Growth and Design, 343, 62-67. [3] Xu et al. (2006) Journal of Physical Chemistry B, 110, 2764-2770. [4] Zhang et al. (2012) Journal of Crystal Growth, 343, 62-67. [4] Chuajiw et al. (2013) Journal of Crystal Growth, 386, 119-127.

キーワード：非晶質炭酸カルシウム、アラゴナイト、多形制御
Keywords: amorphous calcium carbonate, aragonite, polymorph control


calcite
aragonite
vaterite
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Polymorph fraction (mol%)
5
7
12
15
16
17
18
19
20
21
n-butylamine/ACC (mol/mol)

ポスター | T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

12:30 ~ 14:00

[T1-P-01] Syenitic veining at the northern Eastern Ghats Belt, India: Formation mechanism, fluid-rock interaction and a review of its economic mineral potential

*Kaushik DAS[1,5], Proloy Ganguly[2], Aparupa Banerjee[3], Sankar Bose[4,5] (1. Hiroshima University, 2. Kazi Nazrul University, 3. Shahid Matangini Hazra Government General Degree College, 4. Presidency University, 5. HiPeR, Hiroshima University)

12:30 ~ 14:00

[T1-P-02] Amphibole-bearing granitic rocks in the Ereendavaa block, NE Mongolia: Insights into multi-stage magmatic sources and crystallization conditions

*Munkhdelger Bold[1], Tatsuki Tsujimori[1], Yasuhito Osanai[2], Nobuhiko Nakano[2], Tatsuro Adachi[2], Otgonbayar Dandar[1], Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari [2] (1. Tohoku Univ., 2. Kyushu Univ)

Syenitic veining at the northern Eastern Ghats Belt, India: Formation mechanism, fluid-rock interaction and a review of its economic mineral potential

*Kaushik DAS[1,5], Proloy Ganguly[2], Aparupa Banerjee[3], Sankar Bose[4,5]

1. Hiroshima University, 2. Kazi Nazrul University, 3. Shahid Matangini Hazra Government General Degree College, 4. Presidency University, 5. HiPeR, Hiroshima University

Extensive development of meter-to-micrometer scale felsic bands and veins at the contact between the calc-silicate granulite (clinopyroxene-plagioclase-scapolite-wollastonite-calcite-grandite garnet-titanite-apatite-quartz), charnockite (plagioclase-K-feldspar-orthopyroxene-ilmenite-quartz± garnet), and mafic granulite (clinopyroxene-orthopyroxene-plagioclase±garnet-hornblende±quartz) is observed at a 50-60 km wide area near the northern boundary (south of Mahanadi shear zone) of the Eastern Ghats Province of the Eastern Ghats Belt, India. The calc-silicate and mafic granulites witnessed HT to UHT metamorphism at ca. 1000 Ma, and two pulses of charnockite magmatism between ca. 970 Ma and 950 Ma. Clinopyroxene-bearing syenitic (clinopyroxene-K-feldspar-titanite-REE-phases-minor quartz) bands and veins occur in these rocks sometimes at the rock interface and even as a vein network inside one of the preexisting rocks. Inside the veins close to their wall clinopyroxene (+titanite) formed at the expense of orthopyroxene (+ilmenite). Anorthitic patches and myrmekite intergrowth replaced the albitic plagioclase of the wall zone of charnockite. All these reactions suggest selective mobility of at least Ca and Si in the vein with a definite gradient of these from the interior to the wall. Primary and secondary fluid inclusions in the vein mineralogy are rich in CO_2. Compositional variation in apatite from the host rock to the vein also shows scavenging of REE and new profuse formation of REE-rich megacrystic allanite, titanite, apatite, and zircon inside the vein. The contact rocks of charnockite show reactions of monazite to allanite, apatite, and zircon.
It seems that veins were formed by carbo-fracturing followed by metasomatism post-dating the charnockite magmatism. The nature of the fluid was possibly slightly saline, but carbonic. From our own data and that in the existing literature, we also review the economic potential of these veins.

Keywords: Carbo-fracturing, Syenite veining, Trace element mobility, Metasomatism

Amphibole-bearing granitic rocks in the Ereendavaa block, NE Mongolia: Insights into multi-stage magmatic sources and crystallization conditions

*Munkhdelger Bold[1], Tatsuki Tsujimori[1], Yasuhito Osanai[2], Nobuhiko Nakano[2], Tatsuro Adachi[2], Otgonbayar Dandar[1], Fransiska Ayuni Catur Wahyuandari [2]

1. Tohoku Univ., 2. Kyushu Univ

The Ereendavaa block (EDB) is located along the southern part of the Mongol-Okhotsk Belt within the eastern Central Asian Orogenic Belt. The EDB has experienced multi-stage magmatism through tectonic cycles, including northward subduction of the Paleo-Asian Ocean during the early Paleozoic and southward subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean during the early Mesozoic. However, melt evolution and magma crystallization conditions during magmatic pulses at 540, 470, and 220 Ma are poorly constrained. This study aims to elucidate magmatic crystallization conditions through mineral chemistry (EPMA) analysis of amphibole-bearing granitic rocks from these periods. The granitic rocks in the EDB typically comprise quartz, feldspar, amphibole, and mica, with accessory minerals like opaque. Compositional data for feldspar and hydrous mafic minerals (amphibole and biotite) reveal the following compositions: (1)**~540 Ma granodiorite**: orthoclase, oligoclase, pargasite, and Mg-rich biotite; (2)**~470 Ma granite**: orthoclase, oligoclase, ferro-pargasite, and Fe-rich biotite; (3)**~220 Ma granodiorite**: orthoclase, andesine-oligoclase, edenite, and Mg-rich biotite. The mineral chemistry indicates a sub-alkaline nature for the 540 and 220 Ma granodiorites, while the 470 Ma granite is alkaline. Temperature estimates, based on Ti-in-Ca amphibole geothermometer, range from 957–869˚C (540 Ma) and 918–858˚C (470 Ma), to 825–782˚C (220 Ma). Based on Al-in-Ca amphibole geobarometer, pressure estimates suggest these rocks formed at ~8–6 kbar, ~9–7 kbar, and ~4–3 kbar, respectively. Average oxygen fugacity values are -14.11 (470 Ma granite), -11.82 (540 Ma granodiorite), and -13.04 (220 Ma granodiorite). In summary, the parental magmas for the 540 Ma and 220 Ma granodiorites evolved from orogenic, calc-alkaline to sub-alkaline magmas, emplaced at middle (~26 km) and upper (~12.5 km) crustal levels. They crystallized at high (up to 957˚C) and lower temperatures (up to 825˚C) under oxidizing conditions. The 470 Ma granitoid likely evolved from more alkaline magmas, emplaced at deep crustal levels (~29 km) approaching the lower crust, and crystallized at high temperatures (up to 918˚C) under more reducing conditions than the 540 Ma and 220 Ma granodiorites.

Keywords: CAOB, geothermobarometer, EPMA

ポスター | S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 （スペシャルセッション）

12:30 ~ 14:00

[S2-P-01] 下部地殻へのマグマ貫入で発生するせん断開口破壊の規模と地震のマグニチュード：高度変成岩中の岩脈群と深部低周波地震の規模比較

「発表賞エントリー」

*奈良 拓実[1]、宇野 正起[1]、哲生 河上[2]、東野 文子[2]、足立 達郎[3]、土屋 範芳[1,4] (1. 東北大学・院環境、2. 京大・院理、3. 九大・院比較文化、4. 八戸高専)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-02] 愛媛県四国中央市浦山川に産する蛇紋岩の炭酸塩化とリスウェナイトの形成過程

「発表賞エントリー」

*高垣 光[1]、白勢 洋平[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-03] 愛媛県東赤石かんらん岩体保土野における蛇紋岩化過程の組織変化

「発表賞エントリー」

*和田 姫名乃[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-04] 愛媛県伯方島に産するエピ閃長岩類に記録された岩石-水相互作用

「発表賞エントリー」

*福井 堂子[1]、下岡 和也[2]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[1] (1. 愛媛大学、2. 関西学院大学、3. 新潟大学)

12:30 ~ 14:00

[S2-P-05] 蛇紋岩の炭酸化における反応誘起破壊メカニズム：水熱反応実験と地化学モデリングによる検討

「発表賞エントリー」

*五十嵐 大輝[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1] (1. 東北大学)

下部地殻へのマグマ貫入で発生するせん断開口破壊の規模と地震のマグニチュード：高度変成岩中の岩脈群と深部低周波地震の規模比較

Scales of extensional-shear fracturing and magnitudes of seismicity induced by magma intrusions into lower crust: Scale comparisons of dike swarm in the high-grade metamorphic rocks and deep low-frequency earthquakes

*奈良 拓実[1]、宇野 正起[1]、哲生 河上[2]、東野 文子[2]、足立 達郎[3]、土屋 範芳[1,4]
*Takumi Nara[1], Masaoki Uno[1], Tetsuo Kawakami[2], Fumiko Higashino[2], Tatsuro Adachi[3], Noriyoshi Tsuchiya[1,4]

1. 東北大学・院環境、2. 京大・院理、3. 九大・院比較文化、4. 八戸高専
1. TOHOKU Univ. Env., 2. Kyoto Univ. Sci, 3. Kyushu Univ. Soc., 4. Hachinohe Kosen

近年の地震観測で，火山性深部低周波地震がマグマ性流体の移動により誘発される可能性が示唆されている(Yukutake et al.，2019)．その実態検討には，マグマ貫入による地殻破壊の物質科学的な理解が重要であり，これが下部地殻中の高度変成岩に記録されている可能性がある．これまでの研究で，高度変成岩から，下部地殻におけるマグマ貫入の深度，温度，応力状態，破砕様式，マグマから放出された流体の母岩への浸透時間を推定し，これらが火山性深部低周波地震の地震観測（e.g., Kurihara & Obara，2021）と調和的な値を示すことを確認した(Nara et al., 2023 JpGU)．そこで，本研究ではこれらの岩脈群の貫入に伴う地震のエネルギー量をモーメントマグニチュードとして推定し，火山性深部低周波地震の観測結果と比較した．

調査地域は東南極セール・ロンダーネ山地中央部ブラットニーパネ人差し指尾根で，約6億年前の東西ゴンドワナ大陸の衝突に関連した高度変成岩が分布する地域である（Osanai et al., 2013）．花崗岩質岩脈(長さ~100m)とそこから派生した角閃石脈によって，母岩の面構造が高角に切られ，岩脈には開口せん断き裂が観察された．母岩は赤褐色の中間質から苦鉄質のグラニュライトで主要構成鉱物は斜長石，角閃石，直方輝石，単斜輝石，石英である．また，花崗岩質岩脈の両側に暗灰色の反応帯を伴い，反応帯内部では，母岩中の直方輝石と単斜輝石は角閃石や黒雲母に置換される．

本研究では，幅5.5 cmの花崗岩質岩脈と，その周囲の反応帯および母岩を解析した．地質温度圧力計を岩脈ー反応帯境界に適用した結果と，熱力学ソフトウェアPerple_X (Connolly, 2005, updated 2024)の解析結果を比較し，反応帯形成時の温度圧力条件は700–750℃，0.7–0.8 GPaと推定した．また，反応帯中に産する燐灰石の塩素濃度が花崗岩質岩脈からの距離に応じて移流ー拡散的なプロファイルを示すことから，これに反応輸送方程式を適用し，流体浸透時間を22-180 hと推定した．また，岩脈中にはジルコンが産し，全岩Zr濃度が150-170 ppmであることから，Zr飽和状態温度（Watson & Harrison, 1983）として約820℃を見積もった．これは岩脈貫入時の最低温度に相当すると考えられる．

また，ドローン写真から200 mスケールの3次元露頭モデルを生成し，101本の岩脈のサイズを測定し，モデルと詳細な露頭写真からせん断変位を測定した．岩脈の幅は1 cmから10 mであり，長さは0.1から250 mであった．岩脈幅と長さには比例関係が見られ，対数サイズの最頻値は幅3-6 cm，長さ6-13 m程度である．せん断量は1 cmから1.3 mであり，岩脈幅との線形な比例関係はみられなかったが，せん断変位/岩脈幅比は0.01から10の範囲であった． さらに，マグマが放出した流体の量と注水量ーマグニチュード経験式(McGarr, 2014)を用いて，岩石ー水反応による水消費の前に，流体注入に伴い誘発されうる地震の最大マグニチュードを推定した．メルトの含水量は，反応帯形成に必要な含水量および岩脈の含水量から最低3.2 wt%，820℃におけるメルトの飽和含水量から最大12 wt%（Papale et al., 2006），母岩の剛性率は，鉱物のモードに基づき38.4 GPaと推定できる．岩脈の形状を円盤状と仮定すると，各岩脈の幅と長さから体積を4.7×10^{-3}から110 m

^{3}と推定でき，メルトの含水量から，単一の岩脈から放出された水は3.7×10^{-8}から1.4×10^{4}m^{3}と推定される．この水が誘発しうる地震の最大マグニチュードは-1.4から3.8である．また，岩脈のサイズ分布からマグニチュードの頻度分布を推定し，-0.4から1.4のマグニチュードの地震が主に発生していることが分かった．一方，岩脈サイズの頻度分布とせん断変位／岩脈幅比から推定されるマグニチュードは，-2.0から4.9であった．

本研究において推定した岩脈貫入に伴う地殻破壊によって生じうる地震のモーメントマグニチュードは，最大値は4-5と高いものの，-1から1の範囲に多く，火山性深部低周波地震の観測（Ikegaya et al., 2023; Aso et al., 2013）とおおむね同じ傾向であることが示された.また，東南極セール・ロンダーネ山地の他の露頭ではせん断変位を伴う熱水性鉱物脈も観察されている（e.g., Higashino et al., 2019; Mindaleva et al., 2023）ため，単一の岩脈による地殻破壊により，深部低周波地震の長時間継続と小さなマグニチュードの地震を説明できる可能性がある．

キーワード：火山性地震、マグマ貫入、南極
Keywords: volcanic earthquakes, magma intrusion, Antarctica

愛媛県四国中央市浦山川に産する蛇紋岩の炭酸塩化とリスウェナイトの形成過程

Carbonation of serpentinite and formation process of listvenite from Urayama River, Shikokuchuo City, Ehime Prefecture, Japan

*高垣 光[1]、白勢 洋平[1]
*Hikaru Takagaki[1], Yohei Shirose[1]

1. 愛媛大・院理工
1. Ehime Univ. Sci.&Egn.

【はじめに】リスウェナイトは蛇紋岩などの超苦鉄質岩類の変質によって形成され，炭酸塩鉱物や石英を主とする緑色の岩石である（Hall and Zhao, 1995）。日本では四国の中央構造線付近及び三波川帯の変成岩中からの産出が報告されている（皆川ほか，2008；白勢ほか，2022）。また三波川帯の蛇紋岩についてはスラブ由来のCO_2によるマントルウェッジ蛇紋岩の炭酸塩化反応が報告されている（Okamoto et al., 2021）。高垣・白勢（2023）では愛媛県四国中央市浦山川の中央構造線の活動に伴う剪断帯より産するリスウェナイトの原岩について蛇紋岩と泥質片岩がその起源であると考えた。今回は全岩化学組成をもととするアイソコン図から流体による元素の移動，蛇紋岩化やリスウェナイト化の温度の推定，鉱物の組織や化学組成をもとにした炭酸塩化，リスウェナイト化の反応について議論を行う。

【産状・試料】中央構造線付近の浦山川には三波川変成帯に属する泥質片岩の剪断帯が分布している。剪断帯中に幅20 cm - 2 m程度の特徴の異なる3タイプの緑色の片状～塊状のリスウェナイトが共に産し，蛇紋岩を伴う。それぞれのリスウェナイトは下流から泥質片岩中に産する脆い片状タイプ，泥質片岩と蛇紋岩の境界付近に産する濃緑色で硬い塊状タイプ，青緑色で硬い塊状タイプである。蛇紋岩体の幅は3 m程度で，漸移的に炭酸塩化している。

【実験手法】組織観察，分析にはJEOL製SEM JSM-6510LV，リガク製XRD Ultima IVを用い，全岩化学組成分析にはリガク製XRF ZSX PRIMUSIIを用いた。

【結果・考察】リスウェナイトはいずれも石英，マグネサイト，ドロマイトを主とし，微量の針ニッケル鉱，ゲルスドルフ鉱（片状タイプ），クロム鉄鉱と輝コバルト鉱（濃緑色塊状タイプ）などが含まれる。泥質片岩由来の片状タイプの緑色部では50～500 μmの含クロムカオリナイトが含まれる。蛇紋岩由来の濃緑色塊状タイプでは緑色部は細粒の石英の集合中に25 μm程度の含クロム白雲母が，青緑色塊状タイプは5 μm程度の含クロムモンモリロナイトが含まれる。蛇紋岩はアンチゴライトに加えてマグネサイトや石英を含み，漸移的に炭酸塩化し，リスウェナイトとなる。青緑色塊状のリスウェナイトと蛇紋岩の境界部のアンチゴライトではサブミクロンオーダーで石英が入り混じる。リスウェナイトからやや離れた部分ではアンチゴライト短冊状結晶は周縁部がマグネサイトに置換された組織を持つ。アンチゴライトはFe^{2+}，Al，Crを含み，境界部でFe^{2+}＝0.31-0.32，Al = 0.14-0.21，Cr = 0.02-0.04（*apfu*）となる。やや離れた部分のアンチゴライトでFe^{2+}＝0.26-0.31，Al = 0.03-0.15，Cr = 0.01-0.05（*apfu*）となり，Alの含有量に幅がある。蛇紋岩はクロム鉄鉱，輝コバルト鉱，針ニッケル鉱，ゲルスドルフ鉱などを含む。アンチゴライトのMg＃の平均値は0.90となり，マグネサイトのMg#の平均値は蛇紋岩中では0.87，濃緑色塊状タイプで0.89，青緑色塊状タイプで0.87と近い値になるのに対し，片状タイプのマグネサイトのMg#の平均値は0.66と組成が異なっている。全岩化学組成をもとにアイソコン図を用いて比較を行うと，泥質片岩に比べ片状タイプは
MgO，CaO，Cr，Ni，Co，LOIの値が顕著に高く，K_2O，Na_2Oの値が低くなり，蛇紋岩に比べ濃緑色塊状タイプはCaO，K_2O，Na_2O，Srの値が高くなり，青緑色塊状タイプはCaO，Na_2O，Sr，LOIが高くなる。浦山川のリスウェナイトは蛇紋岩とCa，Sr，K，Na，CO_2を含む流体との反応により，蛇紋石が脱水しマグネサイトと石英が形成される。その際にAlが少ないアンチゴライトの周縁部から反応が進み，最終的にAlとCrを含む

アンチゴライトが分解することで含クロム白雲母や含クロムモンモリロナイトが形成され，濃緑色塊状・青緑色塊状タイプのリスウェナイトが形成される。また滑石ではなく，マグネサイトと石英が形成される反応から比較的CO_2濃度の高い流体が反応したと考えられる。蛇紋岩のリスウェナイト化に伴い，Mg，Ca，Cr，Ni，Co，CO_2を含む流体を放出し，剪断帯を介して泥質片岩と反応する。泥質片岩が含む曹長石や白雲母の変質により含クロムカオリナイトが形成され，片状タイプのリスウェナイトが形成される。Fe-Ni-Co鉱物の化学組成及びクロムを含む粘土鉱物種の違いから， 500～600℃にて蛇紋岩化しアンチゴライトが形成され，濃緑色塊状タイプのリスウェナイトは約150～400℃，青緑色塊状タイプは150℃以下，片状タイプは約100～250℃にて形成されたと考えられる。

キーワード：リスウェナイト、アンチゴライト、炭酸塩化、蛇紋岩、浦山川
Keywords: listvenite, antigorite, carbonation, serpentinite, Urayama River

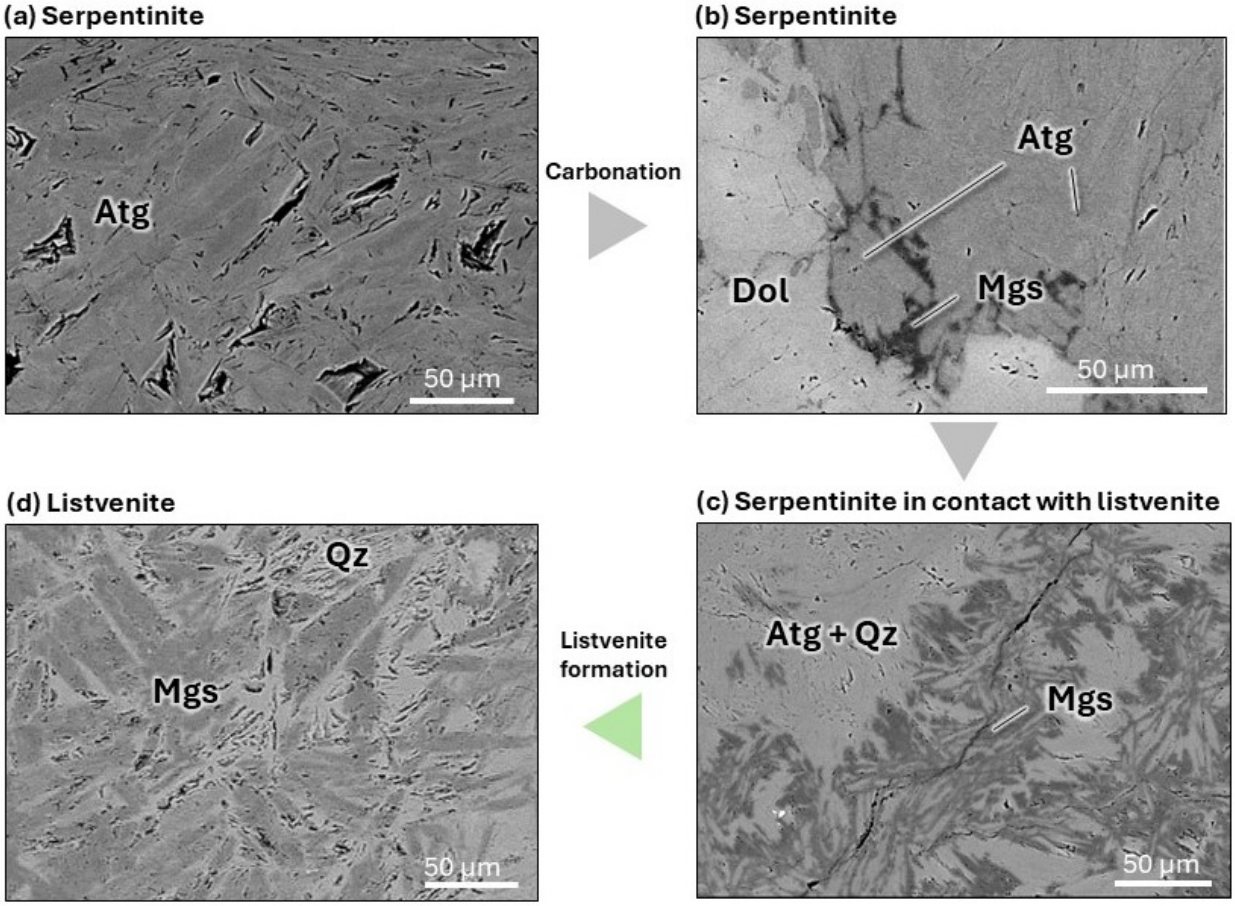


Figure. Carbonation and listvenite formation from serpentinite.
BSE images of (a) serpentinite, (b) carbonated serpentinite,
(c) carbonated serpentinite in contact with listvenite, (d) listvenite.
Atg : antigorite, Qz : quartz, Mgs : magnesite, Dol : dolomite.

愛媛県東赤石かんらん岩体保土野における蛇紋岩化過程の組織変化

Texture transition during serpentinization in Hodono, Ehime Prefecture

*和田 姫名乃[1]、延寿 里美[1]
*Hinano Wada[1], Enju Satomi[1]

1. 愛媛大・院理工
1. Ehime Univ. S/E

蛇紋岩の主な構成鉱物である蛇紋石は平板状のリザーダイト, 筒状のクリソタイル, 波状のアンチゴライトに分けられる。アンチゴライトはリザーダイトより高温条件でできやすい。リザーダイトを含む低温型蛇紋岩の代表的な組織として, かんらん石の粒間や割れ目から水が進入し, 流路に近い外側から中心部へ順に蛇紋石へ置換されできるメッシュ組織がある。また, アンチゴライトを含む高温型蛇紋岩の代表的な組織として, Schwartz et al. (2013) ではメッシュ組織のリムのリザーダイトとコアのクリソタイルが短冊状のアンチゴライトに置換された組織, Boudier et al. (2009) ではかんらん石の一定方向の亀裂に沿うように直接アンチゴライトが形成された組織が報告されている。しかし, アンチゴライトがかんらん石と共存する場合の組織形成の過程や蛇紋岩化の程度に伴う多様性などは明らかになっていない。本研究では三波川変成帯の東赤石かんらん岩体の南端に位置する保土野谷川上流でかんらん石と共存するアンチゴライトの組織に着目し, 当地域のかんらん岩体の形成過程を明らかにすることを研究目的とする。

本調査では南北50 m程の露頭の14地点にて試料を採取した。RIGAKU製 Ultima Ⅳを使用し粉末X線回折実験と, 偏光顕微鏡で組織を観察した。代表的な蛇紋岩試料はOxford製EDSを装着したJEOL製走査型顕微鏡JSM-6510LVを用いて分析を行った。

試料はかんらん石の含有量, 蛇紋石の種類から, かんらん岩(タイプ①), 蛇紋岩化の進んだかんらん岩, 蛇紋岩(タイプ④)に分けた。さらに, 産状や断面の組織から蛇紋岩化の進んだかんらん岩をタイプ②と③に分類した。露頭上部は片状または塊状のかんらん岩(タイプ①)で構成され, 露頭表面は風化しベージュ色, 断面は鮮やかな黄緑色で粗粒なかんらん石と少量の蛇紋石からなる。露頭下部は塊状のかんらん岩で構成されているが, 蛇紋岩化が進んでおりアンチゴライトを多く含む(タイプ②)。葉状構造を持ち, 露頭表面は風化しベージュ色である。断面は外側がベージュや緑色, 内側が黒色で内側のみブルーサイトを含む。色の境界部は不明瞭である。露頭中部では二種類の小規模な岩体がみられた。一方は, 塊状のかんらん岩で構成され, 蛇紋岩化が進んでおりリザーダイトを多く含む(タイプ③)。露頭表面は風化しベージュ-青緑色でクロム鉄鉱と菫泥石が脈状または点在し, タイプ②や④に似た部分を含むが両者の境界は明瞭である。もう一方は, 片状または塊状の蛇紋岩(タイプ④)で構成され, 表面・断面共に黒色や暗緑色である。主要鉱物はアンチゴライトで, 炭酸塩脈を含む。

偏光顕微鏡観察から, かんらん石の形状に複数特徴が見られた(図1)。最も多いのは短冊状のアンチゴライトと共存する直線的な輪郭を持つくさび状-板状のかんらん石(a)である。対して, 曲線的な輪郭を持つ粒状のかんらん石(b)が見られ, 多くは短冊状のアンチゴライトと共存するが, リザーダイトに富む試料ではメッシュ組織のコアとして存在する(c)。直線的な輪郭を持つかんらん石はかんらん石が直接アンチゴライトに置換したと考えられ, 塑性変形時の転移クリープによる一定方位の亀裂から発達したと思われる組織も見られた。一方で, メッシュ組織は変質時の体積膨張により形成された亀裂から中心へリムが形成され, コア形成前に反応が終了し粒状かんらん石が残存した。短冊と共存するものは, メッシュコアとの類似性からリム部がアンチゴライトの短冊状組織に置換した可能性がある。

蛇紋石は, アンチゴライトに富む試料では短冊部分と結晶間を埋める細粒部, リザーダイトに富む試料ではメッシュ組織のリムとして存在し, 化学組成に違いも見られた。短冊状結晶はタイプごとに差はあるが一定量のAlを含み(タイプ②0.05-0.1 *apfu*, タイプ④0.01-0.1 *apfu*), Mgに乏しい。対して細粒部やメッシュリムはAlを全く含まず, Mgに富んでいた。一方で, Feは結晶の形状に関わらず, タイプごとに異なり, (タイプ③

(0.07-0.09 *apfu*, タイプ②0.09-0.14 *apfu*, タイプ④0.18-0.24 *apfu*), アンチゴライトに富む試料ほどFeが多い傾向にある。

本産地の蛇紋岩はアンチゴライトとリザーダイトを含み, ブルーサイトも普遍的に見られたことから先行研究(e.g. Mizukami & Wallis, 2005)で推察されているよりも低温側も含む広い温度領域で蛇紋岩化が起こっていると考えられる。また, かんらん石と蛇紋石の共存する組織や組成に複数の型が見られたことから, 全体が一律の条件や時期で蛇紋岩化したのではなく異なる環境で形成したと考えられる。

キーワード：かんらん岩、蛇紋岩、アンチゴライト、東赤石かんらん岩体
Keywords: peridotite, serpentinite, antigorite, Higashi-akaishi peridotite body

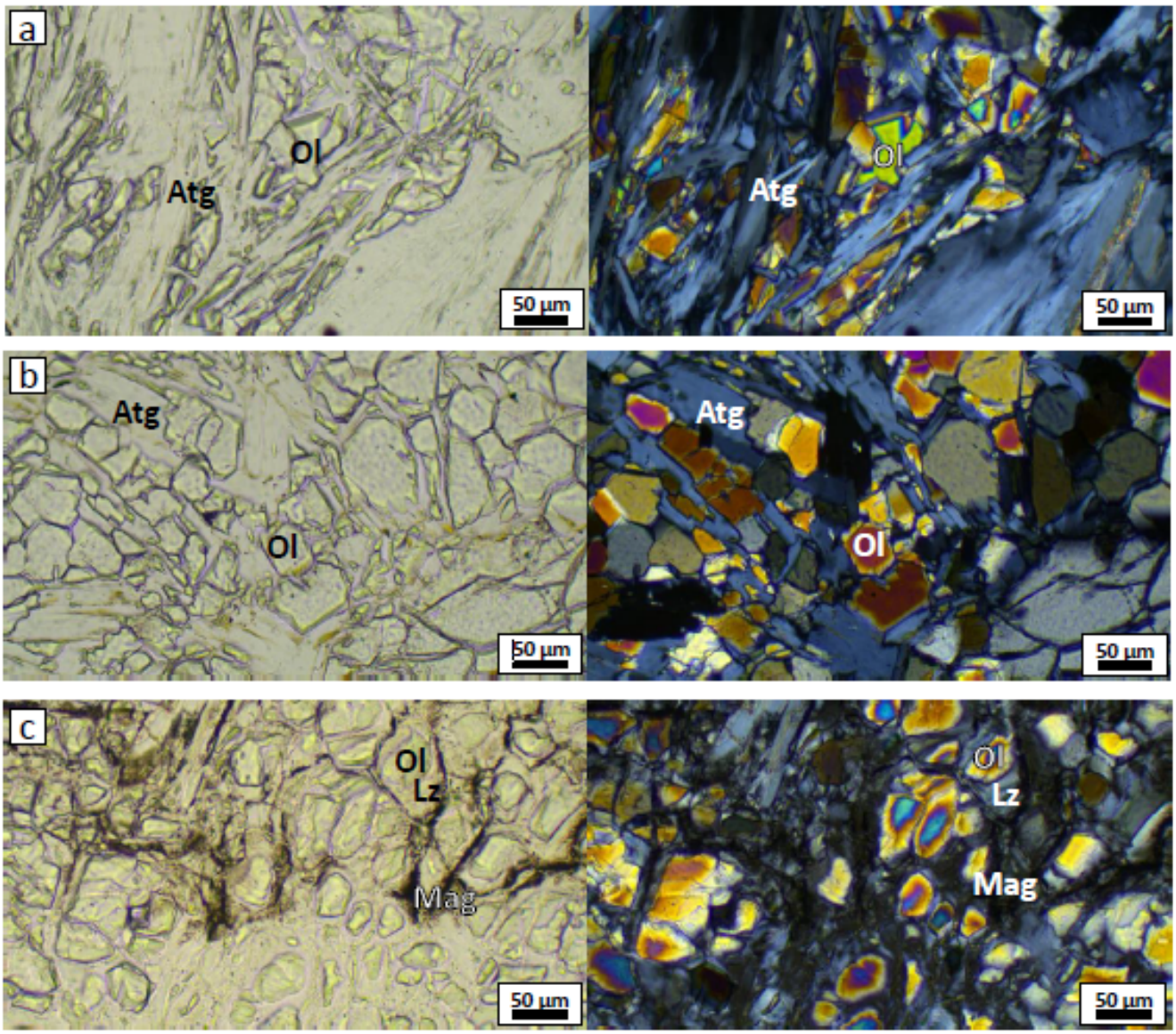


図1 ：試料中に含まれる蛇紋石とかんらん石の共存組織 (左 オープンニコル, 右 クロスニコル), (a)直線的な輪郭を持つくさび状-板状のかんらん石と短冊状アンチゴライト, (b)曲線的な輪郭を持つ粒状のかんらん石と短冊状アンチゴライト, (c)メッシュ組織のコアとして存在するかんらん石とリザーダイトリム
Ol：かんらん石, Atg：アンチゴライト, Lz：リザーダイト, Mag：磁鉄鉱

愛媛県伯方島に産するエピ閃長岩類に記録された岩石-水相互作用

Water-rock interaction recorded in episyenites from Hakatajima Island, Ehime Prefecture

*福井 堂子[1]、下岡 和也[2]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[1]
*Toko FUKUI[1], Kazuya SHIMOOKA[2], Toshiro TAKAHASHI[3], Satoshi SAITO[1]

1. 愛媛大学、2. 関西学院大学、3. 新潟大学
1. Ehime Univ., 2. Kwansei Gakuin Univ., 3. Niigata Univ.

【はじめに】

エピ閃長岩は, 花崗岩類とアルカリ成分に富む流体の岩石-水相互作用によって形成される. エピ閃長岩の形成過程を明らかにすることは, 大陸地殻の成熟, および熱水変質にともなう流体の活動について理解していく上で重要である. 日本産のエピ閃長岩については, 西南日本内帯の花崗岩岩体に点在するものが多く記載されている（例えば, 村上, 1976, 岩鉱特別号）. また近年では, エピ閃長岩中の希少鉱物について鉱物学的な研究が盛んにおこなわれている（例えば, 今岡・永嶌, 2022, 地学雑誌; 中野ほか, 2023, 地質学雑誌）. 一方で, 岩石-流体相互作用の観点から, エピ閃長岩形成時の元素挙動について検討した例としては, 土岐花崗岩体のコア試料として得られたエピ閃長岩についての研究が挙げられる（Nishimoto et al., 2014, Contrib. Mineral. Petrol.）. しかしながら, 野外に露出するエピ閃長岩を対象とした研究例は限られている. 本研究では, エピ閃長岩形成時に起こる岩石-流体相互作用を解明するために, 愛媛県伯方島に分布するエピ閃長岩類の野外産状および岩石記載, 全岩化学組成分析・希土類元素（REE）組成分析, Sr-Nd同位体組成分析をおこない, エピ閃長岩形成時の元素の挙動について検討した.

【野外産状・岩石記載】

当地域には2種類のエピ閃長岩が産し, その色調の違いにより, 真珠色閃長岩と牡蠣色閃長岩に区別される. これらのエピ閃長岩類は花崗岩に伴って産出し, いずれも周囲の花崗岩との境界は不明瞭である. 真珠色閃長岩は多孔質な岩相を示し, 露頭中に多数の空隙が認められる. 一方, 牡蠣色閃長岩は塊状・緻密な岩相であり, 真珠色閃長岩に比べ, 母岩の花崗岩の組織が残存している. 主な構成鉱物はいずれもアルカリ長石, 単斜輝石, 柘榴石, チタン石であるが, 有色鉱物の量は, 真珠色閃長岩では柘榴石が, 牡蠣色閃長岩では単斜輝石が最も多い. 真珠色閃長岩中では柘榴石とチタン石が空隙を埋めるように産する. 牡蠣色閃長岩中では単斜輝石と柘榴石の粒状集合組織が認められるほか, 一部では, 角閃石の単斜輝石への交代も認められる.

【REE組成・Sr-Nd同位体組成分析】

REEの存在度は母岩の花崗岩よりも真珠色閃長岩では低く, 牡蠣色閃長岩では高い値を示す. また, Sr-Nd同位体組成について, 真珠色閃長岩は母岩の花崗岩類と類似した ε Srt (90 Ma)を示すが, ε Ndt (90 Ma)は母岩よりも有意に低い値を示す. 一方, 牡蠣色閃長岩は母岩の花崗岩類と類似したSr-Nd同位体組成を示す.

【Isocon解析】

花崗岩がエピ閃長岩化する際の元素の移動を検討するためにエピ閃長岩類および母岩の花崗岩類の全岩化学組成データを用いて, Isocon解析（Grant, 1986, Econ. Geol.）を行った. 花崗岩に多く含有され, エピ閃長岩化後も長石の結晶構造に保持されるAlを不動元素として設定し, 解析をおこなった. その結果, 両エピ閃長岩のいずれも母岩からのSiの減少と, Li, Na, Kといったアルカリ元素の増加が認められた. 一方, 他の元素に着目すると, 花崗岩中の苦鉄質鉱物に含まれるTi, Fe, Caや, ジルコンなど副成分鉱物に含まれるZr, REEなど, 多くの元素が真珠色閃長岩では母岩の花崗岩類に比べて減少するのに対し, 牡蠣色閃長岩では増加する, という対照的な結果が得られた.

【考察】

Isocon解析結果から, 真珠色閃長岩で減少したTi, Fe, Ca, Zr, REEなどの元素が, 牡蠣色閃長岩では増加したと考えられる. このことは, 真珠色閃長岩形成時に母岩から取り去られた元素が, 牡蠣色閃長岩に付加したことを示唆する. また, 牡蠣色閃長岩は母岩の花崗岩と類似したSr-Nd同位体組成を示すが, このことはエピ閃長岩形成をもたらした流体が花崗岩質マグマ由来であることを示唆する. 一方, 真珠色閃長岩は花崗岩類より有意に低いεNdt (90 Ma)組成を持つことから, Nd同位体比の低い別起源の流体の関与があったことが示唆される. したがって, 真珠色閃長岩形成時には, 花崗岩質マグマ起源の流体との反応により同位体組成の類似するSrがアルカリ長石中に保持されるとともに, ①Ndを含む多くの元素が取り去られ空隙に富む岩相をつくる. さらに, ②花崗岩より低いNd同位体組成をもつ流体が供給され, 空隙を埋めるように低いNd同位体組成をもつ柘榴石およびチタン石が晶出する, といった過程を経たと考えらえる. また, 牡蠣色閃長岩形成時には, ①で母岩から取り去られた元素が濃集した流体との反応により, 花崗岩と類似したSr-Nd同位体比を保持しつつ, 有色鉱物の交代や, 石英の溶脱によってできた空隙の充填が進んだものと考えられる.

キーワード：エピ閃長岩、交代作用、伯方島
Keywords: Episyenite, metasomatism, Hakatajima Island

蛇紋岩の炭酸化における反応誘起破壊メカニズム：水熱反応実験と地化学モデリングによる検討

Mechanisms of Reaction-Induced Fracturing in Serpentinite Carbonation; Insights from Hydrothermal Experiments and Geochemical Modeling

*五十嵐 大輝[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1]
*Taiki Taiki[1], Masaoki Uno[1], Atsushi Okamoto[1]

1. 東北大学
1. Tohoku University

蛇紋岩の原位置炭酸塩化は、大量の二酸化炭素を貯蔵する方法として期待されているが、透水性が低く、反応表面積が少ない等の課題がある。天然では体積増加反応による破壊(反応誘起破壊)が岩石内部の反応を促進することが示唆されており[1]、炭酸塩化では破壊に十分な結晶化応力が発生し得ることが熱力学的に予想されているが[2]、天然岩石の炭酸塩化実験では明確な反応誘起破壊は報告されていない。極端な体積増加(+119 vol%)を伴うペリクレースの水和反応によりブルーサイトを生成する実験では、力学的応答は流体の輸送速度と反応速度のバランスに依存することが示されている[3]。輸送速度が反応速度よりも速ければ物質は一様に膨張するが、反応速度が輸送速度に対して速い場合、体積増加により破壊が起こる。ブルーサイトの炭酸塩化は反応速度/輸送速度の比が十分に大きいことから、ブルーサイトの炭酸塩化では反応誘起破壊が起こることが期待される。 本研究では、天然岩石の炭酸塩化における反応誘起破壊を再現するため、ブルーサイトに富む蛇紋岩を用いた水熱反応実験を行い、反応速度/輸送速度比に基づく反応様式と結晶化応力の関係をモデル化した。ブルーサイトに富む蛇紋岩のコア試料をCO_2飽和水（CO_2圧力10 MPa）と1M $NaHCO_3$水溶液中で90℃、150℃、200℃の計６条件について１週間反応させた。実験後の試料は主に表面の0.5mm程度が反応し、CO飽和水150℃、$NaHCO_3$水溶液150℃、200℃では明瞭な亀裂が生じた。CO_2飽和水試料について着目すると、外周からある距離(数百㎛)でブルーサイトが溶解し、その外側に炭酸塩が析出していた。90℃ではマグネサイトは析出せず低温で安定なネスケホナイトが析出、150℃ではブルーサイト溶解フロントから～150 μm外側にマグネサイトが析出、200℃では溶解フロントのすぐ外側にマグネサイトが隙間なく析出した。総じて、ブルーサイト溶解フロントとマグネサイト析出位置との距離は、温度が高くなるにつれて近くなっていた。試料中の反応した領域では、元の蛇紋石ーブルーサイト混合物の周囲に多孔質の蛇紋石が形成され、その外側にマグネサイト-蛇紋石混合物が形成されていた。観察結果に基づき、反応-輸送モデリングソフトウェアCrunch-Flow[4]を用いて、CO_2飽和水における実験中の反応を再現する１次元モデリングを試みた。モデルでは、Mgの拡散速度とマグネサイトの析出速度の比によって反応様式が変化することがわかった。90℃ではマグネサイトの析出速度が遅くブルーサイトの溶解が卓越し、マグネサイトは析出せずMgが溶液中に拡散したのに対し、150℃では拡散-析出速度が同程度であり、Mgが多少拡散した後にマグネサイトが析出することで試料表面から比較的内部までマグネサイトが析出し、目詰まりした。200℃では析出速度の増加により、Mgがほとんど拡散することなくマグネサイトが試料表面に析出し、目詰まりを起こしてブルーサイトの溶解を阻害した。一方で、目詰まりした150、200℃モデルにおいて、マグネサイトの過飽和度に基づいて発生しうる結晶化応力を計算すると、いずれも10～100 MPa以上であり、一般的な岩石の引張強度(約10 MPa)より高い値を示した。また、反応フロントでは、空隙率が最も低い領域にマグネサイト飽和度の高い岩石外の溶液が浸透することで極めて高い結晶化応力（～1 GPa）が予想され、反応誘起破壊が発生する可能性が高い。本研究では、ブルーサイトに富む蛇紋岩におけるブルーサイトの炭酸塩化と反応誘起破壊の可否に関する輸送速度と反応速度の影響を調べるため、水熱実験と反応輸送モデリングを行い、炭酸塩化実験における反応誘起破壊の実証に成功した。目詰まりした試料(CO_2飽和水200℃)では表面の反応のみであったが、割れた試料(CO_2飽和水

150℃)では亀裂表面からさらに反応が進行していた。拡散速度＞反応速度の場合、目詰まりに時間がかかり、より多くのブルーサイトを溶解させることができると予測される。一方、拡散速度＜反応速度の場合は目詰まりを起こすが、過飽和度が高ければ十分な結晶化応力が発生し、反応誘起破壊が生じる可能性があることが明らかになった。 引用[1]Kelemen and Hirth, 2011, EPSL, 345-348, 81-89.[2]Kelemen et al., 2011, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 39, 545-576.[3]Uno et al., 2022, PNAS, 119, e2110776118.[4]Steefel and Lagasa, 1994, American Journal of Science, 294, 529-592.

キーワード：炭酸塩化、二酸化炭素鉱物化、蛇紋岩、反応誘起破壊
Keywords: Carbonation, Carbon Mineralization, Serpentinite, Reaction-induced fracturing

ポスター | R4：地球表層・環境・生命

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

12:30 ~ 14:00

[R4-P-01] プラスチック等の強化材に向けたアラゴナイトの設計と合成

*佐久間 博[1]、末原 茂[1]、加門 真純[1]、田村 堅志[1] (1. NIMS)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-03] 200℃でのドロマイト化反応中に多糖類がドロマイトのカチオンオーダーに与える抑制効果：予察的実験

小西 博巳[1]、*Chen Yao[1] (1. 新潟大学・院自然)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-04] 非水溶媒中での炭酸塩鉱物形成プロセス：陽イオンの水和状態の違いによる影響の検討

岩根 直[1]、*川野 潤[1]、鍵 裕之[2]、篠崎 彩子[1]、永井 隆哉[1] (1. 北大・院理、2. 東大・院理)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-05] 苦鉄質・超苦鉄質岩の溶解と蒸発を用いたCO_2鉱物固定の検証：効率的な風化促進法の確立に向けた取り組み

*西山 直毅[1]、徂徠 正夫[1]、福士 圭介[2]、西木 悠人[1] (1. 産総研、2. 金沢大・環日)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-06] 宮城県大崎市吹上温泉の現世ストロマトライト中のフランボイダルパイライト

「発表賞エントリー」

*鎌田 樹也[1]、大藤 弘明[1] (1. 東北大・理)

12:30 ~ 14:00

[R4-P-07] 高分解能走査透過電子顕微鏡法によるアモサイト石綿断面微細組織観察

*三浦 颯人[1]、大西 市朗[1] (1. 日本電子（株）)

プラスチック等の強化材に向けたアラゴナイトの設計と合成

Design and synthesis of aragonite particles as a reinforcement of plastic materials

*佐久間 博[1]、末原 茂[1]、加門 真純[1]、田村 堅志[1]
*Hiroshi SAKUMA[1], Shigeru SUEHARA[1], Masumi KAMON[1], Kenji TAMURA[1]

1. NIMS
1. NIMS

近年環境問題への対応からカーボンニュートラルや資源循環の研究が必要とされている。プラスチックは採掘時に二酸化炭素を多く排出する石油由来ではなく、バイオ由来のプラスチックへの転換が求められている。バイオ由来プラスチックの一つの欠点は強度が弱いことである。そこで本研究では、大気中の二酸化炭素を活用したバイオ由来プラスチックの強化材の開発を目指し、アラゴナイトに着目する。

アラゴナイトは炭酸カルシウムの高圧相として知られているが、表層環境において多く産出し、高圧でなくても条件によって合成することができる。アラゴナイトの特徴としては、カルサイトよりも密度が高く、比較的アスペクト比の高い針状の外形を示すことが多い。複合材料の引張強度や曲げ強度は、強化材の弾性率とアスペクト比に依存することがHalpin-Tsaiモデルを通して理論的に知られており、アラゴナイトはこのような材料物性の強化に有用である。本研究では、強化材として活用するアラゴナイトの理想的な結晶成長方向を検討するとともに、合成条件の探索を行う。

アラゴナイトの合成は炭酸ガス化合法を用いた。Ca源としては石灰岩の利用を想定し消石灰($Ca(OH)_2$)を用いた。炭酸ガスは空気との混合ガスを用いた。温度・添加物（Mg塩）・pH・ガス流量を制御・計測し、生成されたアラゴナイトは顕微鏡、XRD等で分析した。アラゴナイトの理想的な結晶成長方向を検討するため、弾性率の結晶方位依存性を理論的に導出した。

発表では、まず炭酸ガス化合法によるアラゴナイト合成の先行研究について紹介する。次に本研究の合成実験の結果を報告する。合成開始から2時間後の試料のXRDから、アラゴナイト・ブルーサイトの生成が観察された。その後時間の経過とともにブルーサイトのピークは減少し、アラゴナイトのピーク強度が増加したことから、アラゴナイトを主成分とする炭酸塩結晶の合成に成功したことを確認した。結晶の外形は針状であり、合成時間に依存して長軸が伸びた。アラゴナイトの弾性率に関しての理論計算から、弾性率は結晶軸の方向に依存して変化し、成長方向を制御できれば従来のアラゴナイトよりも有用なプラスチック強化材となることがわかり、今後の研究課題となることがわかった。

キーワード：炭酸塩、弾性率、アスペクト比、炭酸ガス
Keywords: Calcium carbonate, Elastic modulus, Aspect ratio, Carbon dioxide

200℃でのドロマイト化反応中に多糖類がドロマイトのカチオンオーダーに与える抑制効果：予察的実験

Experiments on the Inhibitory Effect of Polysaccharides on Cation Ordering of Dolomite During Dolomitization Reaction at 200˚C: Preliminary Results

小西 博巳[1]、*Chen Yao[1]
Hiromi KONISHI[1], *Yao Chen[1]

1. 新潟大学・院自然
1. Niigata Univ. Sci.

最近の研究では、カルボキシメチルセルロース（CMC）、寒天、およびバイオマスなどの多糖類が室温でdisordered dolomiteの形成を促進することが示されている（Zhang他、2015; 2021）。WeiとKonishi（投稿中）は、CMCと寒天が200˚Cでのカルサイトのドロマイト化反応を抑制することを見出したが、カチオンオーダーへの影響は明確ではない。

本研究では、CMCが200˚Cでのドロマイト化反応中のカチオンオーダーに与える影響を検討した。 実験は、異なる時間で2つのセットの実験溶液を加熱した。両方のセットでは、MgおよびCa濃度が0.5M、炭酸イオンの濃度が0.1Mに固定した。1つのセットには0.2g/LのCMCが含まれており、他のセットには含まれていない。加熱前に溶液のpHを8に調整した。異なる加熱時間での015ピーク強度と110ピーク強度の比の変化を測定した。この比率はドロマイト構造中のCaおよびMgのオーダリングを示す指数となる。13の異なる加熱時間で、6つがCMCを含むと大幅にオーダリング指数が低く、6つが類似の値を示し、1つがCMCを含まない場合に高かった。全体的傾向は、CMCの存在がドロマイトのオーダリング指数を低くし、カチオンオーダーに対する抑制効果を示唆している。

キーワード：ドロマイト、多糖類、ドロマイト化作用、抑制効果
Keywords: dolomite, Polysaccharides, dolomitization, Inhibitory Effect

非水溶媒中での炭酸塩鉱物形成プロセス：陽イオンの水和状態の違いによる影響の検討

Formation Process of Carbonate Minerals in Non-aqueous Solvents: Consideration of the Effects of Different Hydration States of Cations

岩根 直[1]、*川野 潤[1]、鍵 裕之[2]、篠崎 彩子[1]、永井 隆哉[1]
Naoki IWANE[1], *Jun KAWANO[1], Hiroyuki KAGI[2], Ayako SHINOZAKI[1], Takaya NAGAI[1]

1. 北大・院理、2. 東大・院理
1. Hokkaido Univ. Sci., 2. UTokyo Sci.

【はじめに】

炭酸カルシウム$CaCO_3$は、常温常圧で安定なcalcite、高圧相であるaragoniteなど様々な多形をもつ。これらに加えて、monohydrocalcite (MHC)、ikaiteなどの水和物や非晶質相も存在しており、水溶液中における炭酸カルシウムの形成プロセスにおいては、これらの準安定相が容易に形成して複雑な様相を示す。さらに溶液中にMg^{2+}が存在すると、このような形成プロセスに大きな影響を与えることが古くから注目されている。例えば、Mg^{2+}は固相中に取り込まれにくい一方で、aragoniteやMHCの形成を促進することが知られているほか、非晶質相の安定性や相変化に影響を及ぼすとの報告もある。一般的に、このような現象が生じるのは、水溶液中のMg^{2+}がCa^{2+}に比べて強固な水和殻を形成しており、脱水和しにくいためであると信じられているが、現時点で詳細なメカニズムは不明である。

本研究においては、有機溶媒と水との混合溶液を用いることで、溶存する陽イオンの水和状態が異なる状況を実現できると考え、そこからの炭酸塩形成プロセスを解析することで、陽イオンの水和状態の違いの影響を検討することを試みた。ここでは、双極子モーメントが水と比較的近いホルムアミド(NH_2CHO)と水を、一定の割合で混合した溶媒について、①溶存させた**陽イオンの水和状態が実際に変化するかを評価**するとともに、②その**混合溶媒を用いたMg-Ca-CO_3系の合成実験**を行って、炭酸塩鉱物の形成プロセスに水和状態の違いがどのように影響を及ぼすかを解析した。

【陽イオンの水和状態の評価】

液中のイオンが水和すると、水分子同士の水素結合の状態が変化する。そのため、ラマン分光分析を行えば、O-H伸縮振動のスペクトルの違いとして、水和状態を評価できる。本分析にあたっては、水のO-H伸縮振動とホルムアミドのN-H伸縮振動の波数帯が重なるため重水を用い、割合を変えて混合したホルムアミドとの混合溶媒を作成した。これらの溶媒に、$CaCl_2 \cdot 2H_2O$または$MgCl_2 \cdot 6H_2O$を0～1.5Mとなるように溶解させた溶液について、ラマン分光分析を行ってCa^{2+}およびMg^{2+}の水和状態を評価した。

それぞれのホルムアミド割合の混合溶媒に溶解する陽イオンの濃度を増加させていくと、O-Dラマンスペクトル形状が変化し、水和状態が変わっていることが確認された。ホルムアミド割合が高い混合溶媒ほどその変化量は小さくなっており、陽イオンが水和しにくくなっていると考えられる。この傾向は、Mg^{2+}の方がCa^{2+}に比べて強い。特にホルムアミド割合50%の混合溶媒では、Mg^{2+}の濃度変化に伴うO-Dスペクトル形状の変化が見られず、この溶媒中でMg^{2+}はほぼ水和していないことが示唆される。以上を踏まえ、これらの混合溶媒を用いた炭酸塩鉱物の合成実験を行った。

【混合溶媒中での炭酸塩鉱物合成実験】

炭酸塩鉱物の合成は、上記の混合溶媒中に、$CaCl_2 \cdot 2H_2O$と$MgCl_2 \cdot 6H_2O$をそれぞれ10mM含む溶液と、Na_2CO_3を20mM含む溶液を混合し、25℃で攪拌することにより行った。混合直後、1時間、2時間、24時間後にろ過することで析出物を回収し、粉末X線回折により相を同定した。

その結果、いずれの実験においても溶液混合直後に白濁が生じ、これらは非晶質相であることが明らかになった。溶媒として水のみを用いた実験では2時間後に非晶質相が結晶化していたのに対し、ホルムアミド割

合50%の溶液では混合直後に回収した試料から、結晶による回折ピークが検出された。上記より、ホルムアミド割合の高い溶媒ほどMg^{2+}の水和の影響は少ないと考えられるため、この結果は、水和したMg^{2+}が多く存在するほど、非晶質相の存在期間が長くなったものと解釈できる。また、最終的に形成する多形について、水のみの溶液からはMHCが析出し、ホルムアミド割合が10%の溶液からはaragoniteが、25%以上ではcalciteが析出した。従来の報告では、溶液中のMg^{2+}濃度が高いとMHCやaragoniteが析出しやすいとされているが、水和していないMg^{2+}の影響が強くあらわれると考えられるホルムアミド混合溶媒からcalciteが析出したことは、MHCやaragoniteの析出に影響を与えるのは、水和したMg^{2+}であることを示している。

本研究により、有機溶媒と水の混合溶媒を用いることで、溶存する陽イオンの水和状態が異なる状況を実現できることが確認された。今後様々な条件で実験を行ない、Mg^{2+}の結晶への取り込み量などを検討することにより、結晶成長における水和の影響の実態を明らかにすることができると期待される。

キーワード：炭酸カルシウム、水和、多形、非晶質相
Keywords: calcium carbonate, hydration, polymorph, amorphous

苦鉄質・超苦鉄質岩の溶解と蒸発を用いたCO_2鉱物固定の検証：効率的な風化促進法の確立に向けた取り組み

Impact of evaporation on CO2 mineralization during enhanced rock weathering

*西山 直毅[1]、徂徠 正夫[1]、福士 圭介[2]、西木 悠人[1]
*Naoki NISHIYAMA[1], Masao SORAI[1], Keisuke FUKUSHI[2], Yuto NISHIKI[1]

1. 産総研、2. 金沢大・環日
1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Kanazawa University

地球温暖化対策として注目される岩石風化促進法は、粉砕した苦鉄質・超苦鉄質岩を土壌や農耕地に噴霧し、人工的に風化を促進して大気CO_2を除去する技術である。CO_2の除去メカニズムの一つは、雨水に暴露された苦鉄質岩等から溶出したCa^{2+}やMg^{2+}イオンが、炭酸塩鉱物として沈殿することである。しかしながら、ケイ酸塩鉱物の溶解は一般に遅く、炭酸塩鉱物に対して過飽和状態になりにくいという問題がある。一方、モンゴル等の乾燥地域に見られるアルカリ塩湖では、蒸発により溶存イオンが濃縮され、カルシウムやマグネシウム炭酸塩が形成されることが知られている[1, 2]。本研究はこの点に着目し、苦鉄質等を溶解させた水を蒸発・濃縮させることで、どのような蒸発沈殿物が形成されるか、またどの程度濃縮することでCO_2の鉱物固定が可能かを検証した。

試料には、玄武岩（秋田県）と橄欖岩（北海道）を用いた。さらに、溶解が速くカルシウムを豊富に含む灰長石（東京都）も試料として採用した。各試料を粒径<105 μmに粉砕後、粉末5 gを超純水500 mLに加え、7–14日間撹拌しながら溶解させた。その後、減圧濾過によって固液分離し、蒸発実験用の溶液を回収した。これらの岩石溶解水を約20 cm ×20 cmのトレーに入れ、温度約20℃の条件下で蒸発させた。蒸発を加速するために、送風機を用いて溶液上部に空気を流した。トレーの質量は定期的に測定し、溶液の濃縮率（=[蒸発前の溶液の質量]/[ある時間蒸発させた溶液の質量]）を計算した。溶液は適宜採取し、蒸発に伴うpHと溶存イオン濃度の変化を評価した。蒸発過程で形成された沈殿物は室温下で風乾させた後、エネルギー分散型X線分光器付きの走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）を用いて形態観察と化学組成分析を行った。比較のため、玄武岩粉末を固液比1:50で超純水中で撹拌しながら約30日間溶解させ、蒸発のない条件において炭酸塩鉱物が形成されるかを検証した。

各岩石の溶解水を蒸発させると、pHは7.6–7.8から最大9.2まで上昇した。いずれの溶解水についても、濃縮率約10までは濃縮率に比例して各イオン濃度は増加した。一方、濃縮率が約10を超えるとCa濃度は比例関係から逸脱しはじめ、カルシウムを含む沈殿物が生じ始めたことが示唆された。橄欖岩の溶解水については、濃縮率約40以上からMg濃度も減少しはじめ、マグネシウムを含む蒸発沈殿物が形成されたことが示唆された。蒸発沈殿物のSEM-EDS分析から、モノハイドロカルサイトやアラゴナイトの形態に類似したカルシウム炭酸塩の形成が認められた。また、橄欖岩の溶解水については、ネスケホナイト（$MgCO_3 \cdot 3H_2O$）の形態に類似した蒸発沈殿物も確認された。飽和指数を計算したところ、いずれの溶解水も蒸発前は各種カルシウム炭酸塩に対して未飽和であったが、濃縮率約10を超えるとカルサイトやモノハイドロカルサイトに対して過飽和となっていた。物質収支計算から、灰長石の溶解水を濃縮率100まで蒸発させた場合、溶存Caの93 %が炭酸塩として沈殿したことが示唆された。一方で、蒸発のない条件で玄武岩を溶解させた場合、溶液は常に各種カルシウム・マグネシウム炭酸塩に対して未飽和であった。以上より、苦鉄質および超苦鉄質岩の溶解水を約10倍に濃縮することで炭酸塩の沈殿が開始し、約100倍まで濃縮することで溶存Caの大部分を大気CO_2の鉱物固定に利用できることが示された。

引用文献

[1] Fukushi, K., Imai, E., Sekine, Y., Kitajima, T., Gankhurel, B., Davaasuren, D., & Hasebe, N. (2020) *Minerals*, 10, 669. doi:10.3390/min10080669
[2] Raudsepp, M.J., Wilson, S., Zeyen, N., Arizaleta, M.L., & Power, I.M. (2024) *Chem. Geol.*, 648, 121951. doi:10.1016/j.chemgeo.2024.121951

キーワード：岩石風化促進、CO2鉱物化、蒸発、苦鉄質岩、溶解
Keywords: Enhanced rock weathering, CO2 mineralization, Evaporation, Mafic rock, Dissolution

宮城県大崎市吹上温泉の現世ストロマトライト中のフランボイダルパイライト

Framboidal pyrite in modern stromatolite from Fukiage-Jigoku, Onikobe Spring, Miyagi, Japan

*鎌田 樹也[1]、大藤 弘明[1]
*Tatsuya Kamada[1], Hiroaki Ohfuji[1]

1. 東北大・理
1. Tohoku Univ. Sci.

はじめに

フランボイダルパイライトは，形体とサイズが均一な多数の微結晶（マイクロクリスタル）が集合した微視的な木苺状の黄鉄鉱であり，堆積物中などに普遍的に産する．その起源や形成過程については半世紀以上議論が続いており，無機的形成説（Wilkin and Barnes, 1996など）と生物形成説（Wacey et al., 2015など）が提案されている．生物形成説では，硫酸塩還元菌や微生物の作るバイオフィルムがその生成に関与している可能性が言われているが，その具体的なメカニズムは言及されていない．よって，それらの痕跡を保持している可能性のある，現在進行系で形成されているフランボイダルパイライトを観察することは極めて重要であるが，その報告例は少ない．本研究ではその手がかりを得られる可能性のある試料として，宮城県大崎市の吹上温泉の熱水噴出孔付近に生じている現生ストロマトライト中含まれるフランボイダルパイライトに着目した．

研究試料と手法

宮城県大崎市鳴子の吹上温泉の遊歩道沿いには高温のアルカリ性熱水が噴出しており，噴出口周辺には現生のストロマトライトの形成が報告されている(赤井ら，1995)．噴出孔から１ｍほど離れたバイオマットに覆われている地点より表層堆積物（熱水沈殿物が固結したもの）を採取した．採取した試料は，まず光学顕微鏡（デジタルマイクロスコープ）を用いて表面および破断面を観察し，特徴的な部位の写真撮影や研磨加工位置の特定などを行った．その後，紫外線硬化樹脂に試料を包埋して機械研磨およびArイオンビーム（JEOL，クロスセクションポリッシャ）を用いたイオン研磨により断面試料を作成し，SEM-EDSによる微細組織観察と局所化学分析を行った．

結果と考察

光学顕微鏡観察の結果，表層堆積物は全体として層構造をなし，高い透光性を示す上部（表層部，厚さ～80 μm）と暗緑灰色の層と白色の層の互層よりなる中部，透光性のある白色粒子の集合よりなる底部の3つのユニットに分けられた．透過性を示す表層部を真上から観察すると，内部に黒色～黄黒色で直径7~10 μmの球状～半球状の粒子が多数含まれていた．中部のユニットを構成する暗緑灰色の層中には～数十 μmの金属光沢のある鉱物が多数散在しており，一方，白色の層では緻密な部分とフィラメント状の組織よりなる多孔質な部分が混在し，100 μm以下のオレンジ色の領域も一部、層状に含まれていた．

イオン研磨断面のSEM-EDS分析を行ったところ，透光性を示す表層部は粘土鉱物を主体とするフレーク状組織の周囲を厚さ1～2 μmほどの緻密なシリカ（オパール）が被覆した構造を示し，直径～3 μmのフランボイダルパイライトも含まれていた． 中部のユニットを構成する白色の層はほぼシリカからなり，径5 μmほどの円形の組織 を部分的に含む緻密な領域と，球状の組織とフィラメント状組織の混在した多孔質な領域が観察された．これらの組織は熱水噴出孔付近のバイオマット中で生息していたシアノバクテリアに由来すると考えられる．一方，暗緑灰色の層はシリカの他にAl，Na，Caの濃集が認められ，白色層に比べて粘土鉱物を多く含んでいると判断される．この層にはパイライトが多く含まれており，立方体を含む単結晶状（ ＜1～40 μm）とフランボイダル状（5～7 μm）の二種類の形態が観察された．前者は普遍的に散在しているのに対して，後者は局所に偏在しており，厚さ1 μmほどのシリカ層で被覆されているケースも認められた .

以上の産状を踏まえると本地域のストロマトライトの形成には，シアノバクテリアの活動に加えて，硫酸塩還元バクテリアの活動が深く関与している可能性が高いと考えられる．ストロマトライト生成における硫酸塩還元バクテリアの関与については先行研究（Reid et al., 2000）でも指摘されており，微生物の細胞壁やバイオフィルムがシリカの核形成サイトを提供するという報告(Kurt et al. 2001など)もある．フランボイダルパイライトの形成に不可欠な極めて高い結晶化駆動力（＝溶液過飽和度）は，バイオマット内部における非常に大きな酸化還元勾配の中で優先的に獲得されるのかもしれない．

参考文献

Wilkin, R.T. and Barnes, H.L. (1996) Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 4167–4179.
Wacey, D. et al., (2015) Geology, 43, 27–30.
赤井くるみ他（1995）地球科学, 49, 292–297.
Reid, R.P. et al., (2000) Nature, 406, 989–992.
Kurt, O.K. et al. (2001) Sedimentology, 48, 2, 415–433.

キーワード：フランボイダルパイライト、ストロマトライト
Keywords: Framboidal pyrite, stromatolite

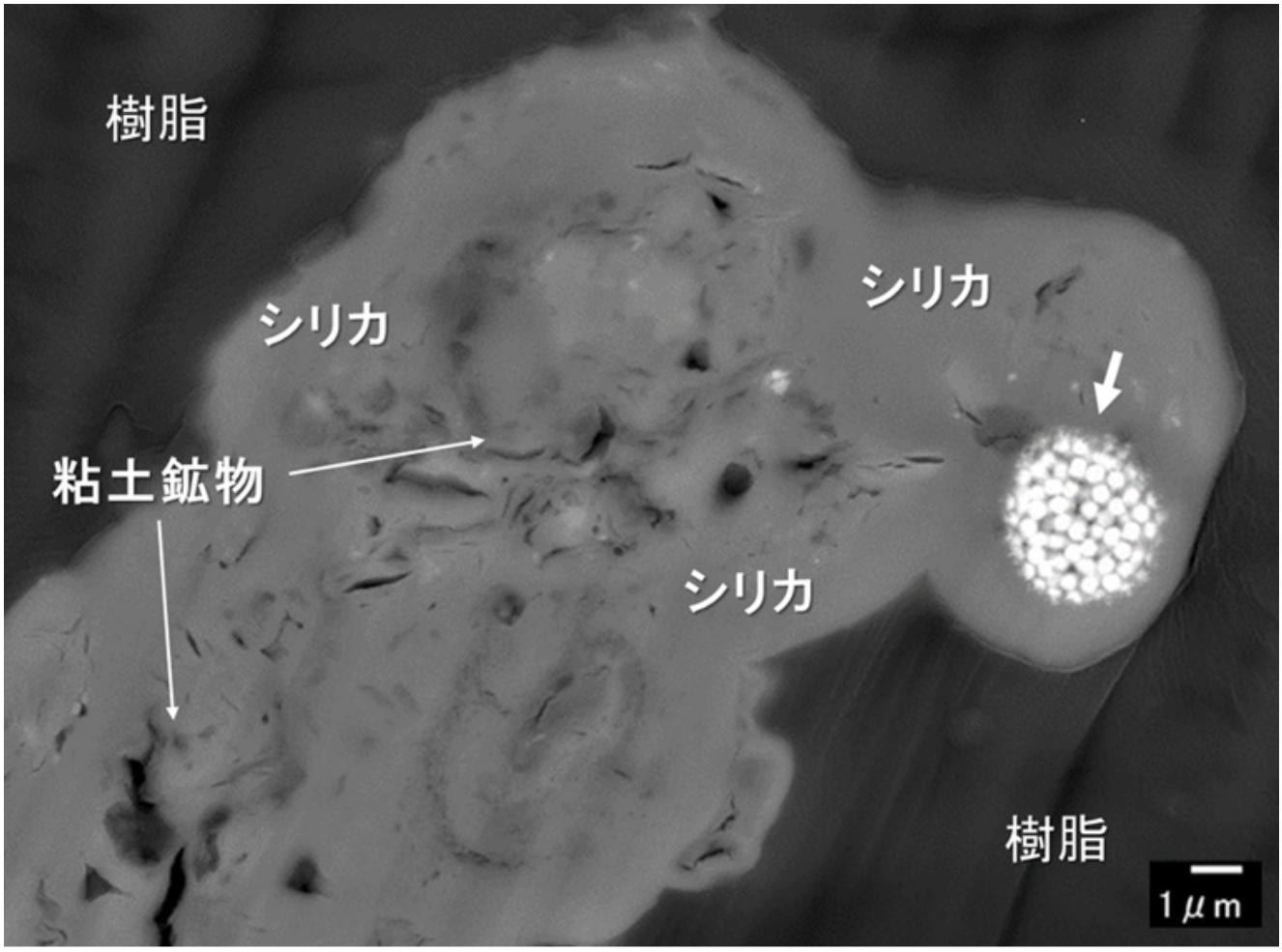


Figure. 1 Framboidal pyrite enclosed in amorphous silica (opal) in a modern stromatolite from Fukiage-onsen as indicated by the arrow

高分解能走査透過電子顕微鏡法によるアモサイト石綿断面微細組織観察

Observations of nano-texture for amosite asbestos by using high-resolution STEM imaging

*三浦 颯人[1]、大西 市朗[1]
*Hayato Miura[1], Ichiro Ohnishi[1]

1. 日本電子（株）
1. JEOL Ltd.

はじめに： 角閃石系石綿の中でもクロシドライト石綿は微細化しやすく，吸引性が高いことから，人体への毒性が高いと考えられている．その微細化に関しては，これまで多くの研究がなされており(例えば[1])，クロシドライト石綿が多結晶の微繊維の集まりであり，微繊維内外に存在する多くの積層不整や層状ケイ酸塩が起因となって微細化する可能性が示唆されている[1]．筆者らは，走査透過電子顕微鏡法(STEM)の一つである最適明視野STEM(OBF-STEM)[2]を用いたクロシドライト石綿断面の微細組織観察を行い，低電子線照射条件においても高いコントラストにて原子分解能観察が可能なOBF-STEMを用いることで，クロシドライト石綿微繊維の隙間に存在する層状ケイ酸塩鉱物がタルク様ケイ酸塩であることを明らかにし，昨年の本会にてその詳細結果を報告した[3]．一方，同じ角閃石系石綿の一つであるアモサイト石綿は，その縦横比が大きいことから，クロシドライト石綿と並び人体への影響力が大きい可能性が示唆されている[4]. しかしながら, これまで詳細な断面観察を行った研究は少なく，その微細化メカニズムはよく分かっていない．微細化メカニズムの解明のためには，他の石綿との鉱物学的類似性や相違点を明らかにすることは重要である．本研究では，クロシドライト石綿との比較を行うことを目的として高分解能STEMによるアモサイト石綿の微細組織観察を行った．

実験方法： 試料は南アフリカ産アモサイト石綿を用いた．石綿繊維をエポキシ樹脂に包埋後，日本電子製イオンミリング装置・イオンスライサ^{TM}を用いて断面薄膜試料を作成した．STEM観察には，JEOL製200kV収差補正S/TEM・JEM-ARM200Fを用いた．STEM観察時の加速電圧は200kV，プローブ電流は10 pAである．

結果＆考察： クロシドライト石綿と同様，アモサイト石綿も多結晶微繊維の集まりであるが，アモサイト石綿の微繊維の大きさ(長径0.1～1.0 um)はクロシドライト石綿の微繊維(長径10～200 nm)よりも大きく，微繊維間の隙間(粒界)も小さい傾向が見られた．また，微繊維の粒界三重点などの隙間を埋めるように層状ケイ酸塩がしばしば存在する(大きさ10～数百nm)ことが分かった(図1)．エネルギー分散形X線分光(EDS)分析の結果，層状ケイ酸塩は，カリウム，マグネシウム, 鉄などの元素に富み，高分解能STEM観察の結果，層状ケイ酸塩の層間の底面間隔が約1nmであることが判明した(図1)．これらの結果は，アモサイト石綿中に存在する層状ケイ酸塩が雲母様ケイ酸塩であることを示唆する．さらに，クロシドライト石綿においては微繊維内外の多くの領域において発見された積層不整や多重鎖ケイ酸塩は，アモサイト石綿では存在量が少なく，粒界を埋めた層状ケイ酸塩の周囲の微繊維にのみ限定的に存在することが分かった．以上のように，アモサイト石綿は，クロシドライト石綿と比べ，微繊維の大きさや粒界の状態，積層不整や多重鎖ケイ酸塩の存在比や密度，層状ケイ酸塩の種類などが異なることが分かった．今後OBF-STEMなどを用いてさらに詳細な微細組織観察を行い，他の石綿との比較から，石綿繊維の微細化メカニズム解明の手掛かりを得ていきたいと考えている．

引用文献： [1] J.H. Ahn & P.R. Buseck (1991) *Am. Min.*, **76**, 1467-1478, [2] Ooe et al. (2021) *Ultramicroscopy* **220**, 113133, [3] 大西 & 三浦 (2023) 日本鉱物科学会2023年年会講演要旨集 279-280, [4] 村井 (2006) 岩石鉱物科学35, 34-39.

キーワード：石綿、透過電子顕微鏡、走査透過電子顕微鏡
Keywords: Asbestos, TEM, STEM

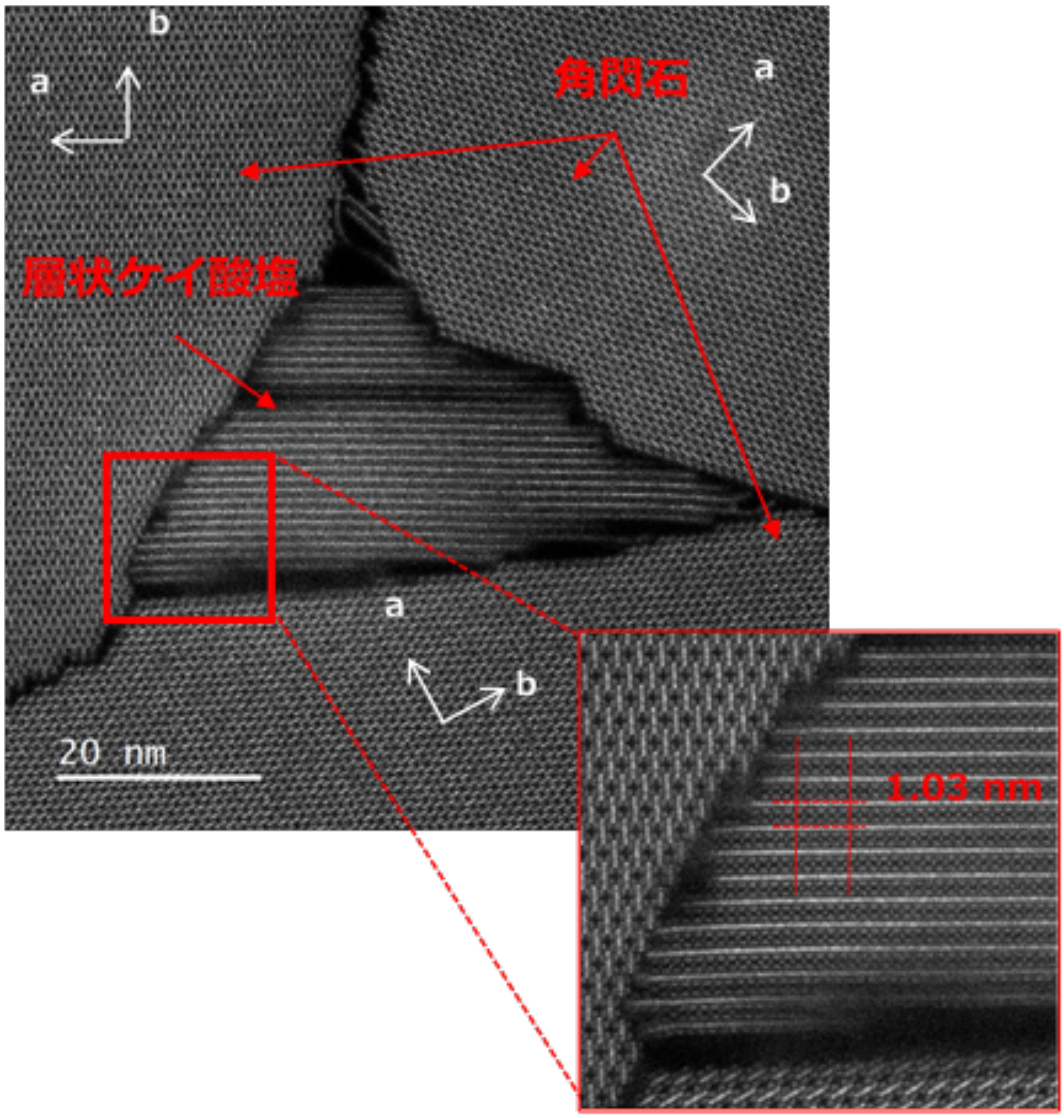


図 1 アモサイト石綿中に存在する層状ケイ酸塩の高分解能 ADF-STEM 像

ポスター | R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R7：岩石・鉱物・鉱床 (資源地質学会 との共催 セッション)

岩石学，鉱物学，鉱床学，地球化学などの分野をはじめとして，地球・惑星物質科学全般にわたる岩石及び鉱物に関する研究発表を広く募集する。地球構成物質についての多様な研究成果の発表の場となることを期待する。

12:30 ~ 14:00

[R7-P-01] 北海道北西部の砂白金鉱床と新鉱物・蝦夷地鉱について

*浜根 大輔[1]、斎藤 勝幸 (1. 東京大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-02] 鉱物動向：鉱物資源，ヘリテージストーン，SDGs

*高橋 裕平[1] (1. 名経大)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-03] 落合－北房超マフィック岩体のレールゾライトに産する“斜消光”するように見えるかんらん石の成因

*江島 輝美[1]、高嶋 千洋[2]、荒井 章司[3] (1. 信州大学・理学部、2. 株）ダイヤ精機製作所、3. 金沢大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-04] ナトリウムイオンが forsterite の炭酸塩化反応に与える影響

*長谷川 拓紀[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、山口 航佑[1] (1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-05] 南アフリカ共和国Bushveld 複合岩体西縁におけるPothole ReefとPseudo Merensky Reefの鉱物学的特徴

「発表賞エントリー」

*梅里 彩夢[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大・院国際資源)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-06] 秋吉帯石灰岩基盤のアルカリ火山岩中に含まれる高Ti黒雲母岩片とその意義

*木村 光佑[1]、Das Kaushik[2]、早坂 康隆[3] (1. 大公大・院理、2. 広島大・院先進理工、3. 御所浦恐竜の島博物館)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-07] カンラン石中に存在する微小包有物を用いた幌満カンラン岩体SDWの起源推定

「発表賞エントリー」

*明田 将治[1]、三宅 亮[1]、秋澤 紀克[2]、松本 恵[3]、伊神 洋平[1]、三津川 到[1] (1. 京都大学、2. 東京大学、3. 東北大学)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-08] 愛媛県新居浜市別子地域芋野カンラン岩体にみられるFe-Ni-S-As系鉱物について

「発表賞エントリー」

*国吉 真斗[1]、延寿 里美[1] (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-09] 広島県神武‐三原鉱床におけるアルカリ交代作用に伴う蛍石鉱化作用

「発表賞エントリー」

*砂田 雅裕[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1] (1. 秋田大学・院国際資源)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-10] 熊本市東方木山地域に産する超苦鉄質岩類の岩石学

西尾 成道[1]、*石丸 聡子[2] (1. 熊本大学・理、2. 熊本大学・院自然)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-11] FLUID INCLUSION STUDIES IN QUARTZ VEINS WITH TIN MINERALIZATION IN THE KIBARAN INTRUSIVE ROCKS IN KALEHE (SOUTH KIVU, DR CONGO)

「発表賞エントリー」

*MUSA Moise-Kam's SAIDI[1], MADDHUSOODHAN Satish Kumar[1] (1. Niigata Univ.)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-12] 北海道日高変成帯、幌満かんらん岩体中の縞状ダナイト・ハルツバージャイトが記録する枯渇したかんらん岩とメルトの反応

「発表賞エントリー」

*栗原 圭佑[1]、川本 竜彦[1]、日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、谷内 元[2]、栗谷 豪[3]、松本 亜希子[3] (1. 静岡大、2. 産総研、3. 北海道大)

12:30 ~ 14:00

[R7-P-13] 鉱物飛跡検出器を用いた未知宇宙線事象探索のための研究開発

*井戸 悠生[1]、中 竜大[2]、二村 翔大[3]、織 瞳磨[4]、加藤 丈典[5] (1. 名大・環境、2. 東邦・理、3. 名大・理、4. 鈴鹿高専・専攻科、5. 名大・ISEE)

北海道北西部の砂白金鉱床と新鉱物・蝦夷地鉱について

Ezochiite and placer deposit of platinum group minerals in northwestern Hokkaido, Japan

*浜根 大輔[1]、斎藤 勝幸
*Daisuke HAMANE[1], Katsuyuki Saito

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

明治期に北海道で砂白金が発見されて以降、北海道中軸に分布するかんらん岩体（蛇紋岩体）に沿って産地が開拓されてきた。当初、採掘は小規模な個人事業であったが、第二次大戦中には砂白金を軍事物質として確保するために数十万人を動員した乱獲が行われた。その結果、北海道中軸沿いの砂白金は姿を消し、今ではほとんど採集できない状態になっている。一方で、北海道中軸の北部にそびえる天塩山地から供給された土砂が基盤岩となった北海道北西部にも、砂白金鉱床が分布することが判明した。本研究では北海道北西部の砂白金鉱床と、そこから発見されたチオスピネル族の新鉱物・蝦夷地鉱（Ezochiite：IMA2022-101）について報告したい（Nishio-Hamane and Saito, 2024）。

北海道北西部、特に留萌管内を中心として南北に70km、東西に30kmにまたがった範囲で現地調査と採集を行い、計9カ所（茂初山別川、初山別川、アイヌ沢川、苫前町海岸、小平町海岸、上記念別沢川、小平藥川、沼田ポン川、雨竜川）から砂白金を得た。いずれの砂白金もイリジウム系白金族元素（IPGE: Ir,Os,Ru）を主体とした粒子が大半で、それらはルテニイリドスミン、自然オスミウム、自然ルテニウム、自然イリジウムからなり、ひとつの粒子に複数が混合することも多い。パラジウム系白金族元素（PPGE: Pd,Pt,Rh）を主体とした粒子の産出量は少なく、それらはイソフェロプラチナ鉱を主体とする。そのイソフェロプラチナ鉱を主体とする粒子は多様な白金族元素鉱物（PGM）の包有物に富むことが特徴で、蝦夷地鉱も包有物として伴われる。砂白金粒子、粒子の外縁、包有物のすべての産状を総合して、現時点で70種ほどのPGMの産出を確認している（図1）。

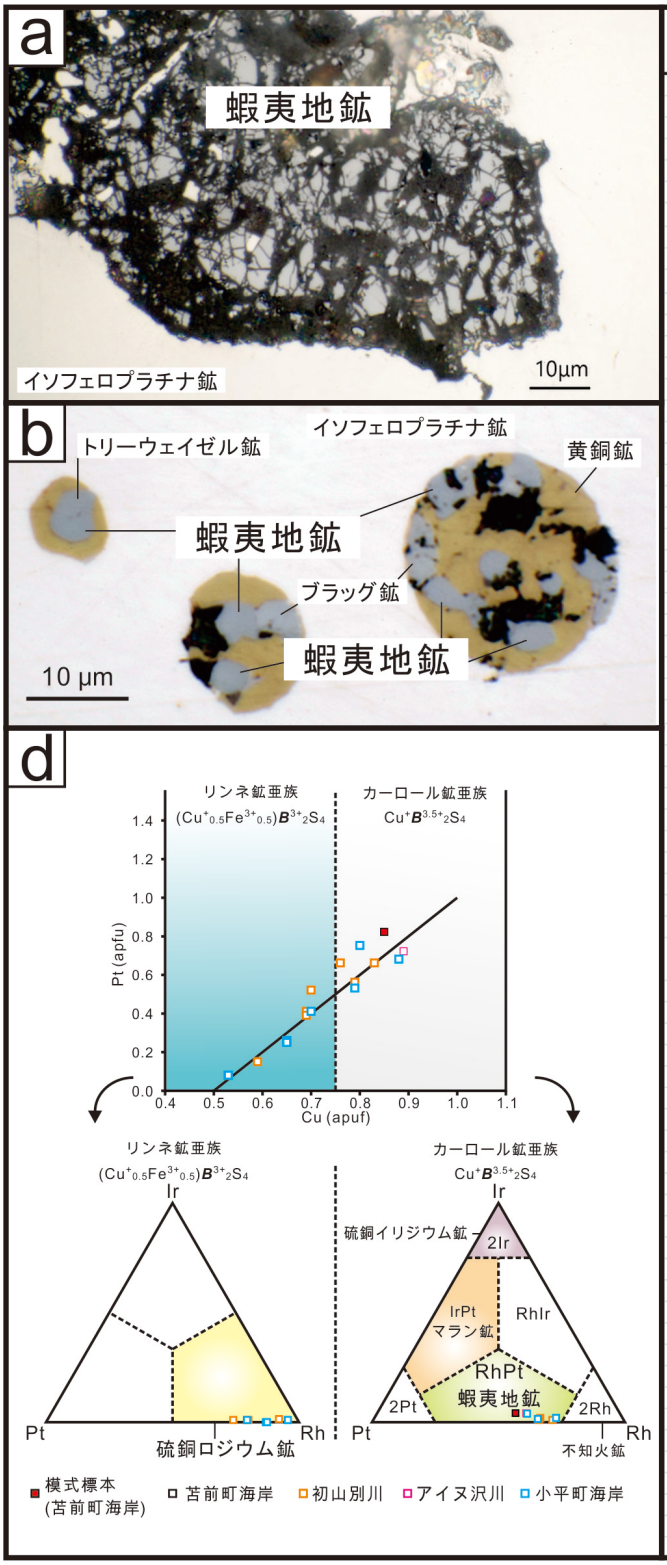
蝦夷地鉱は苫前町海岸（模式地）から見出されたのち、初山別川、アイヌ沢川、小平町海岸からも見出された。いずこでも蝦夷地鉱は別の硫化鉱物と共に球形から楕円球形集合となって、イソフェロプラチナ鉱に包有される。この産状は、イソフェロプラチナ鉱が結晶成長する際に硫化物メルトを捕獲し、その捕獲されたメルトから蝦夷地鉱が結晶化したことを示唆しており、包有されるメルトごとに組成や共生鉱物が異なる。模式標本において、蝦夷地鉱の化学組成は$(Cu^{+}_{0.85}Fe^{3+}_{0.15})(Rh^{3+}_{1.09}Pt^{4+}_{0.78}Ir^{3+}_{0.08}Pt^{2+}_{0.05})S_{4.00}$であり、理想化学組成は$Cu^{+}(Rh^{3+}Pt^{4+})S_4$となる。解析的に$Pt^{2+}$を見積もっているが、それがスピネル構造中で実在するかは今後の検討課題になろう。微小部粉末XRDでは空間群Fd-3mにおいてa = 9.8559(14) Åの格子定数が得られた。

スピネル超族の命名規約の成立に伴い、銅と白金族元素を含むチオスピネルは、実質的にはCu内容によってリンネ鉱亜族とカーロール鉱亜族を分け、それぞれについてRh-Ir-Pt内容を検討することで種が決定されるようになっている。そこで組成分布をプロットすると、本調査地域からのチオスピネルは硫銅ロジウムと蝦夷地鉱に分類され、Cu-Pt間に直線的な正相関が認められた。そのため、蝦夷地鉱：$Cu^{+}(Rh^{3+}Pt^{4+})S_4$と硫銅ロジウム鉱：$(Cu^{+}_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})Rh^{3+}_2S_4$は、$Cu^{+}_{0.5}Pt^{4+}-Fe^{3+}_{0.5}Rh^{3+}$の置換関係にもとづく連続固溶体が存在すると考えられる。また、命名規約の変更によって、かつての硫銅ロジウム鉱は、①今の硫銅ロジウム鉱、②蝦夷地鉱、③不知火鉱、④未命名RhIr鉱物のいずれかに再分類される。そこで世界各国から報告された硫銅ロジウム鉱を今の分類法で再確認したところ、オフィオライト、ウラル-アラスカ型岩体、正マグマ鉱床のすべての産状で、蝦夷地鉱が確認された。蝦夷地鉱は新鉱物として承認されたばかりの鉱物だが、普遍的なPGMの一つであ

ろう。

Nishio-Hamane and Saito (2024), JMPS, 119, 008.

キーワード：白金族元素鉱物、砂白金、蝦夷地鉱
Keywords: Platinum-group minerals (PGM), Placer PGM, Ezochiite



c	鉱物名	理想化学式	産地	主な産状
1	Arsenopalladinite	Pd_8As_3	A, OC, TC	包有物
2	Bowieite	Rh_2S_3	TC	包有物
3	Braggite	$PdPt_3S_4$	TC, OC	包有物
4	Chengdeite	Ir_3Fe	S, A, N, U	粒子の外縁
5	Cherepanovite	RhAs	M, S, A, TC, OC, N, U	包有物
6	Cooperite	PtS	S, TC, OC	包有物
7	Cuprorhodsite	$(Cu^{+}_{0.5}Fe^{3+}_{0.5})Rh^{3+}_2S_4$	S, TC, OC	包有物
8	Driekopite	PtBi	TC, OC, U	包有物
9	Erlichmanite	OsS_2	S, A, TC, OC	粒子の外縁
10	Ezochiite	$Cu^{+}(Rh^{3+}Pt^{4+})S_4$	S, A, TC, OC	包有物
11	Ferronickelplatinum	Pt_2FeNi	M, S, A, TC, OC, O, U	粒子の外縁
12	Fleetite	$Cu_2RhIrSb_2$	A	包有物
13	Garutiite	(Ni,Fe,Ir)	S, A, TC	粒子の外縁
14	Genkinite	Pt_4Sb_3	OC	包有物
15	Geversite	$PtSb_2$	U	包有物
16	Hexaferrium	(Fe,Os,Ru,Ir)	S	包有物
17	Hollingworthite	RhAsS	S, A, TC, OC, U	粒子の外縁、包有物
18	Hongshiite	PtCu	M, S, A, TC, OC, K, N, U	離溶組織
19	Irarsite	IrAsS	M, S, A, TC, K, O, N, U	粒子の外縁、包有物
20	Iridarsenite	$IrAs_2$	S, A, U	包有物
21	Iridium	Ir	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子、離溶組織
22	Isoferroplatinum	Pt_3Fe	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子、離溶組織
23	Isomertieite	$Pd_{11}Sb_2As_2$	TC, OC, U	包有物
24	Kashinite	Ir_2S_3	OC	包有物
25	Keithconnite	$Pd_{20}Te_7$	OC, U	包有物
26	Kingstonite	Rh_3S_4	OC	包有物
27	Kitagohaite	Pt_7Cu	TC	離溶組織
28	Kuvaevite	$Ir_9Ni_{10}S_{16}$	OC	包有物
29	Laurite	RuS_2	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子の外縁、包有物
30	Malanite	$Cu^{+}(Ir^{3+}Pt^{4+})S_4$	OC	包有物
31	Maslovite	PtBiTe	OC	包有物
32	Mertieite	$Pd_8Sb_{2.5}As_{0.5}$	TC, OC	包有物
33	Miassite	$Rh_{17}S_{15}$	S, OC, U	包有物
34	Miessiite	$Pd_{11}Te_2Se_2$	OC	包有物
35	Minakawaite	RhSb	TC, N, U	外縁の包有物
36	Moncheite	$Pt(Te,Bi)_2$	TC, OC	包有物
37	Orthocuproplatinum	Pt_3Cu	M, N, U	包有物
38	Osmium	Os	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子、離溶組織
39	Palladinite	PdO	OC	包有物
40	Palladium	Pd	OC	粒子
41	Palladoarsenide (Palladodymite)	Pd_2As	A, TC, OC, U	包有物
42	Platinum	Pt	M, S, A, TC, OC, K	粒子、外縁の包有物
43	Polkanovite	$Rh_{12}As_7$	S, A, TC, OC, N, U	包有物
44	Pseudomertieite	$Pd_{11}(Sb,As)_4$	A, TC, OC, U	包有物
45	Rhodarsenide	Rh_2As	M, S, A, TC, OC, K, N, U	包有物
46	Rustenburgite	Pt_3Sn	OC	包有物
47	Ruthenarsenite	(Ru,Ni)As	TC, U	包有物
48	Ruthenirodosmine	(Ir,Os,Ru)	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子、離溶組織
49	Ruthenium	Ru	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子、離溶組織
50	Skaergaardite	PdCu	TC, OC	包有物
51	Sobolevskite	PdBi	OC	包有物
52	Sperrylite	$PtAs_2$	M, S, A, TC, OC, K, N, U	外縁の包有物
53	Stibiopalladinite	Pd_5Sb_2	TC, OC, O, U	包有物
54	Stillwaterite	Pd_8As_3	TC, OC	包有物
55	Stumpflite	PtSb	U	外縁の包有物
56	Tamuraite	$Ir_9Fe_{10}S_{16}$	OC	包有物
57	Telluropalladinite	Pd_9Te_4	TC, OC	包有物
58	Tetraferroplatinum	PtFe	TC, OC, N, U	粒子の外縁
59	Tolovkite	IrSbS	S, A, N, U	粒子の外縁、包有物
60	Tomamaeite	Cu_3Pt	M, S, A, TC, OC, N, U	外縁の包有物
61	Tömroosite	$Pd_{11}As_2Te_2$	TC, OC	包有物
62	Torryweiserite	$Rh_9Ni_{10}S_{16}$	OC	包有物
63	Tulameenite	Pt_2CuFe	M, S, A, TC, OC, K, O, N, U	粒子の外縁
64	Vasilite	$(Pd,Cu)_{16}(S,Te)_7$	S, TC, OC, U	包有物
65	Vincentite	$PdAs_3$	OC, U	包有物
66	Vysotskite	(Pd,Ni)S	OC	包有物
67	Zaccariniite	RhNiAs	M, S, A, TC, OC, K, N, U	外縁の包有物
68	Zvyagintsevite	Pd_3Pb	TC, OC	包有物

図1. 模式標本の蝦夷地鉱（苫前町海岸）（a）、初山別川試料の蝦夷地鉱（b）、これまでに確認された白金族鉱物と主な産状（c）、北海道産試料の硫銅ロジウム鉱ー蝦夷地鉱の組成分布と鉱物分類（d）。産地：茂初山別川（M）、初山別川（S）、アイヌ沢川（A）、苫前町海岸（TC）、小平町海岸（OC）、上記念別沢川（K）、小平藥川（O）、沼田ポン川（N）、雨竜川（U）

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

鉱物動向：鉱物資源，ヘリテージストーン，SDGs

Review for Mineralogical Science: Mineral Resources, Heritage Stone, and SDGs

*高橋 裕平[1]
*Yuhei Takahashi[1]

1. 名経大
1. NUE

英文ニュース誌から野外系の鉱物科学分野に関する話題を「岩石鉱物科学」に紹介してきた。それらから数項目を選んで記す。

1鉱物資源と経済 (米国2023年の例)

米国鉱物資源の開発，リサイクル，加工が米国経済にどのように貢献しているかを記す。

・米国の鉱山から採掘される鉱物資源は1050億ドル。
・このうち鉱物資源正味輸出は47億ドル(輸出 106億ドルー輸入 59億ドル)。
・米国国内でリサイクルされる金属や鉱物は450億ドル。
・スクラップ正味輸出は170億ドル(輸出２５0億ドルー輸入80億ドル)である。

鉱石が加工(製錬)されて，製造業で使う材料となる段階では次のようになる。

・米国内で加工された原材料8900億ドルである。
・加工原材料の正味輸入は1020億ドル(輸入 2030億ドルー輸出 1010億ドル)である。

鉱物資源からの材料は製造業で使われ製品となり経済的価値が増す。

・鉱物材料を利用する産業の経済は3兆8400 億ドルで，米国の経済 (国内総生産27兆3560億ドル)に貢献する。鉱物資源は，米国経済全体の約15%となる。

2未発見銅鉱床は35億トン

既存鉱床と今後発見予想の銅鉱床の埋蔵量が次のように推定できる。(1)既知鉱床の地質データを整理，(2)どんな地質にどんな鉱床タイプが伴うかのモデルから地域を特定，(3)品位モデルから既知鉱床の埋蔵量と未発見鉱床の埋蔵量推定。

南アメリカでは，未開発確認鉱床810,000千トン(斑岩タイプ)，510千トン(堆積性タイプ)である。未発見鉱床750,000千トン(斑岩), 堆積性タイプはない。

北中央アジアでは，斑岩タイプはモンゴルとカザフスタンに巨大鉱床がある。堆積性タイプはロシアとカザフスタンに巨大鉱床がある。未開発確認鉱床130,000千トン(斑岩タイプ)，48,000千t(堆積性タイプ)である。未発見鉱床440,000千トン(斑岩タイプ), 53,000千トン(堆積性タイプ)である。

上記地域にそのほかの地域の推定を加えると，世界全体で確認できている鉱床は21億トン，未発見鉱床は35億トンと見積もられる。

3 米国のクリティカルミネラル

これまでの35種から2022年に50種となった。ニッケルと亜鉛が加わり，これまで希土類元素と一括されていた元素が個々の元素となった。白金族は白金とパラジウムであったものから白金族6元素となった。一方，ヘリウム，カリウム，レニウム，ストロンチウム，ウランが除かれた。

4 ヘリテージストーン

4.1 グローバルヘリテージストーン資源(GHSR)

2012年のIGCでヘリテージストーン作業グループ(HSTG)が発足し，自然の岩石をグローバルヘリテージス

トーン資源(GHSR)として人類の文化の中で意識することをめざすこととなった。この指定を受けることで，岩石資源管理の意識が高まり，石材採掘を将来にわたって続けていくこととなる。

事例紹介　カンブリア紀ウェールズ粘板岩

採掘の歴史は，ローマ時代からの歴史がある。著名な建造物として，ローマ時代の砦，中世のエドワード一世の白の屋根，近世のバッキンガム宮殿がある。産業の歴史的側面では，水力，蒸気機関，電力を積極的に取り入れてきた。19世紀に採石場から水運の場まで蒸気機関車を利用した運搬が行なわれた。これは世界中に波及した。

4.2 ヘリテージストーン(HS)

GHSR認定における欧州を主にした地理的偏在と対象岩石の種類を広げる見直しが2022年に行われ，ヘリテージストーン(HS)の目的が改められた。その結果2022年に発展途上国から4つのHS(インド3，メキシコ1)が認定された。

事例紹介　テソアントラ凝灰岩Tezoantla Tuff

メキシコで最初のHSで，いままで対象にならなかった凝灰岩が認定された。採掘の歴史は，16世紀のスペイン植民地時代までさかのぼる。19世紀後半には英国コーンウォールから技術者と資本家が来て採掘するようになった。現在は火薬を用い，ハンマーやバールなどの手作業で，60-80cmのブロックとして切り出している。建造物として，16世紀建立のサンタ・ベラクルス教会，メキシコ革命100年記念で1910年建立のイタルゴ州都の時計塔があげられる。産業の歴史では，アコスタ銀鉱山の蒸気機関動力舎がある。

5　SDGsに絡めて

2015年9月国連は持続可能な開発目標(SDGs)を採択した。そこでは17の目標と169のターゲットを定めた。Gill(2017)は， 17の目標と地質学諸分野の役割を整理した。

例 「鉱物岩石分野」では何が求められるか。鉱物岩石資源の同定と開発が求められる。製品の原料となる鉱床，建材原石，ガラス材料の開発である。従来の資源探査に加えて，専門家は地質学がSDGsにどう貢献するかの説明責任がある。すなわち，開発に加え持続可能性を説明する。

キーワード：鉱物資源、ヘリテージストーン
Keywords: Mineral Resources, Heritage Stone

落合ー北房超マフィック岩体のレールゾライトに産する“斜消光”するように見えるかんらん石の成因

Formation process of olivine with remarkable parting and apparently oblique extinction in the lherzolite of Ochiai-Hokudo peridotite complex, Okayama Prefecture, Japan

*江島 輝美[1]、高嶋 千洋[2]、荒井 章司[3]
*Terumi EJIMA[1], Takashima Chihiro[2], Arai Shoji[3]

1. 信州大学・理学部、2. 株）ダイヤ精機製作所、3. 金沢大学
1. Shinshu University, 2. DAIYA SEIKI Co., Ltd., 3. Kanazawa University

マントルかんらん岩中のかんらん石の特殊な組織の形成過程を明らかにすることは，マントル物質の地表への上昇過程における熱変成の影響や加水・脱水等の様々なイベントを知る上で重要である(Nozaka and Ito, 2010 etc.)。一般にかんらん石は，劈開は認められず，よく不規則な割れ目ができ，劈開が認められる場合には$(010)_{Ol}$面に平行な弱い劈開を持ち，直消光することで知られる（都城・久城，1972）。しかし、造山帯地域のかんらん岩体からは、上記のような特徴とは異なるかんらん石が報告されている。その一つである“cleavable olivine”は、$(010)_{Ol}$以外にも$(100)_{Ol}$,$(001)_{Ol}$に平行な完全な劈開面を持つように見え，面に対し直消光するかんらん石であり（Hawkes., 1946 etc.）、熱変成後のアニーリングで形成されたかんらん石の裂開へアンチゴライトが形成されることで形成したとされている(相川,1981 etc.)。また、“cleavable olivine”と同様に顕著な裂開が発達しているが，“cleavable olivine”とは異なり，裂開に対し消光位が大きくずれたかんらん石（一見斜消光しているように見えるかんらん石）が，Arai and Oyama（1981）およびPlümper et al.(2012)によって報告されている。本研究では、Arai and Oyama (1981)によって岡山県真庭市の落合–北房超マフィック岩体から報告された、斜消光しているように見えるかんらん石を対象とし、記載と結晶学的知見からこの特徴的な組織を持つかんらん石の形成過程を解明することを目的とした。鉱物の組成分析には、FE-EPMAを用いた。裂開が発達するかんらん石の結晶方位と裂開の関係を明らかにするため， EBSD法を用いて両者の結晶方位を解析した。研究試料はArai and Oyama (1981)によりレールゾライト帯から採取されたものを用いた，初生鉱物のかんらん石，単斜輝石，クロムスピネル、および二次鉱物の緑泥石，蛇紋石および褐色の微細鉱物の集合体からなる。試料は、母岩の組織をよく残しているが、直方輝石は存在しない。かんらん石は粒径0.1–1 mmの他形で，不規則な割れ目が存在する。一部のかんらん石は蛇紋石の脈を伴う。このようなかんらん石はArai and Oyama (1981)が初生的としたものに相当し，以後‘初生的かんらん石’と記す。他方，従来’cleavable olivine’と記述されることが多かった裂開が発達したかんらん石は、粒径0.05–0.5 mmの他形で，従来知られているcleavable olivineとは異なり裂開に対してさまざまな消光角で消光を示し，干渉色の異なる複数のドメインから構成されている。このようなかんらん石は多くの場合周囲が褐色の細粒鉱物集合体と共生し、蛇紋石脈に沿って産出する。初生的なかんらん石のFo値は89であり，裂開が発達するかんらん石”のFo値は81である。かんらん石の裂開を蛇紋石が充填し、この裂開沿いにCa元素濃度が高い箇所が存在する。裂開の2次元面はかんらん石a軸に対して約90˚の方向にあるが，b軸とc軸の方向に対しては不規則な方位を示す。裂開に沿ってCaが分布しており，直方輝石から溶出した単斜輝石の離溶ラメラのように見えること，裂開が発達したかんらん石を伴う鉱物集合体が母岩であるレールゾライトの直方輝石の粒子サイズや形状に類似することから，起源鉱物は単斜輝石の離溶ラメラを伴う直方輝石であることが示唆される。これは、Plümper et al.（2012）の見解と一致する。ただし、Plümper et al.（2012）は，この単斜輝石の離溶ラメラをもつ直方輝石が一度蛇紋石化し，その後脱水作用によって二次的にかんらん石が晶出したことを報告した。しかし，落合-北房かんらん岩体の履歴（Arai et al., 2019）からは，蛇紋石の脱水作用は考えられない。また，脱蛇紋岩化で形成したかんらん石は一般に高いFo値（95程度）を示すが、本研究でのかんらん

石の組成はFoは81と初生的なかんらん石よりも低い値であることとも整合的である。本研究試料の裂開の発達したかんらん石が蛇紋石の脱水で形成したとは考えにくい。また、裂開が、直方輝石の単斜輝石の離溶ラメラ面であったとすれば、直方輝石とかんらん石には$(100)_{opx}$//$(100)_{ol}$のトポタキシャルな関係がある可能性が高く、かんらん石はトポタキシャルな関係を持って直方輝石から直接晶出したと考えられる。したがって、落合-北房地域のかんらん岩に産する裂開の発達したかんらん石は、単斜輝石の離溶を伴う直方輝石が、周防変成作用（沈み込み）時に直接かんらん石に変化したものであると結論される。

キーワード：落合ー北房、かんらん岩体、かんらん石
Keywords: Ochiai-Hokudo, peridotite complex, olivine

ナトリウムイオンが forsterite の炭酸塩化反応に与える影響

The effect of Na ion on carbonation reaction of forsterite

*長谷川 拓紀[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、山口 航佑[1]
*Hiroki Hasegawa[1], Atsushi Kyono[2], Satoru Okada[1], Kosuke Yamaguchi[1]

1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系
1. Univ of Tsukuba, Grad. sch. of Life and Environmental. Sci, 2. Univ of Tsukuba, Life and Environmental Science

近年カーボンニュートラルの観点から，CO 回収・貯留技術(CCS)の一つである地質学的炭素貯留（GCS）が注目されている．GCS は，岩体に圧入した CO を岩石中の鉱物と反応させ，炭酸塩化反応によって化学的に安定な炭酸塩鉱物として固定される方法である．Forsterite（苦土カンラン石:MgSiO）は，かんらん岩や玄武岩のような塩基性岩中に普遍的に存在し，主要造岩鉱物の中では最も風化作用を受けやすい鉱物である．また，forsterite は熱水やCOに富んだ流体と容易に反応し，lizardite [MgSiO(OH)]や talc [MgSiO(OH)]，magnesite (MgCO)を生成する．Magnesite は地質学的時間スケールにおいて化学的に安定であり，CO のリザーバーとして有用な鉱物の一つである．このように，高い反応性と CO 吸収ポテンシャルを持つ forsterite は GCS において最適なターゲット鉱物として期待されており， forsterite の炭酸塩化メカニズムを調査した研究はこれまで数多く行われてきた．Forsterite の水熱反応においては，T ≈180℃，PCO ≈135 bar，1mol/L の NaCl および0.64Mの NaHCO を含む水溶液が炭酸塩化を促進する最適条件として提案されている（Bearat et al., 2006）．一方で，炭酸化学種の違いが炭酸塩化にもたらす影響については不明瞭な部分が多く議論の余地がある．そこで本研究では，forsterite と溶存二酸化炭素(COaq)の水熱反応実験を行い，得られた生成物に対して放射光X線回折(XRD)法を用いて解析した． XRD は高エネルギー加速器研究機構放射光施設（KEK-PF）の BL8B の大型二次元 imaging plate 検出器を備えた回折計を用いて行った．24時間の水熱反応では，140℃において lizardite が形成され，160℃から180℃の温度範囲では，lizardite と magnesite が形成された．また，200℃で行った水熱反応では3日目まで magnesite の形成と増加が確認されたが，5日目以降においては生成物の量比に有意な変化はみられなかった．溶存二酸化炭素に NaCl，KCl を加えた水熱反応では，溶存二酸化炭素のみで行った実験と比較して，より多くの magnesite の形成が確認された．本研究の結果から，溶存二酸化炭素においても forsterite の炭酸塩化反応に温度依存性を示すこと，さらに本研究の実験条件において，NaCl のようなアルカリ金属イオンが forsterite の炭酸塩化反応を加速させることが明らかになった．

キーワード：Forsterite、Magnesite、炭酸塩化、地質学的炭素貯留
Keywords: Forsterite, Magnesite, Carbonation, Geological Carbon Storage

南アフリカ共和国Bushveld 複合岩体西縁におけるPothole Reefと Pseudo Merensky Reefの鉱物学的特徴

Mineralogical characteristics of Pothole Reef and Pseudo Merensky Reef at the western limb of the Bushveld Complex, South Africa

*梅里 彩夢[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1]
*Amu Umesato[1], Takuya Echigo[1], Yasushi Watanabe[1]

1. 秋田大・院国際資源
1. Akita Univ. Int.

南アフリカ共和国北部に位置するBushveld複合岩体は，白金族元素(Platinum Group Elements: PGE)鉱化帯を胚胎する世界最大の層状貫入岩体である．この岩体は珪長質岩体と苦鉄質岩体で構成されており，PGE鉱化帯は苦鉄質岩体であるRustenburg層状岩体のUpper Critical Zone中に胚胎する．PGE鉱化帯としてMerensky Reef，UG2 Chromititeが西縁及び東縁に位置し，本研究地域であるSiyanda鉱山はBushveld複合岩体西縁北部に位置している．この地域ではPothole ReefというPGE鉱化帯が確認できる．Pothole ReefとはMerensky Reefを形態や岩相で4タイプに区分した際の最下位に相当するreefである．4タイプのMerensky Reefのうち，比較的PGE品位が高いとされているPothole Reefとその下位に存在するPGE品位の低いPseudo Merensky Reef中のPGE鉱物の観察・記載を行い，鉱物種や産状の違いについて明らかにするとともに2つのreefにおけるPGE鉱化作用について考察した．研究手法は，コア観察，薄片・研磨片を用いた顕微鏡観察，XRF，SEM-EDS，EPMAである．Pseudo Merensky Reefの岩相はpegmatoidal feldspathic harzburgiteであり，Pothole Reefはpegmatoidal feldspathic pyroxeniteであった．2つの岩相で見られる鉱物の違いはカンラン石が晶出するか否かである．また，両reefで観察される主な硫化鉱物は共通しており，ペントランド鉱，黄銅鉱，磁硫鉄鉱，黄鉄鉱がほとんどを占める．全体としてPGE鉱物は主にペントランド鉱や黄銅鉱の縁に晶出しており，金銀鉱物はほとんどが斜長石や石英など二次的に形成されたケイ酸塩鉱物中に形成されている．また両reefで形成されるPGE鉱物を比較すると，Pseudo Merensky Reefではtetraferroplatinum (PtTe)やzvyagintsevite (Pd_3Pb)といったPGE-卑金属合金が支配的で，これらは主にペントランド鉱などのNi硫化鉱物と共生している．Pothole Reefではmoncheite ($(Pt,Pd)(Te,Bi)_2$)やsperrylite ($PtAs_2$)といったTe-Bi鉱物やAs鉱物が優勢であり，発見されたPGE鉱物の約半数を占め，硫化鉱物，特に黄銅鉱と共に晶出している．両reefにおけるPGE鉱物の鉱物学的違いは，マグマ溜まり中のPGEに富む硫化物メルトの結晶分別作用によって説明される．まず初めに，液相不混和によってケイ酸塩マグマから分離したPGEに富む硫化物メルトが冷却し，最初に晶出するのはNiに富むmonosulfide solid solution (mss)である．TeやBiといった半金属元素は，mssに対して不適合元素となるため硫化物メルトに残される．そしてPGEに富むmssがさらに冷却すると，ペントランド鉱とPd-PbやPd-Snといった合金などに分離する．一方，硫化物メルトに残されたTeやBiは冷却に伴って晶出するCuに富むintermediate solid solution (iss)に取り込まれる．このissがさらに冷却し，黄銅鉱とPt-Te-BiやPd-Te-BiといったPGEを含むTe-Bi鉱物などに分離したと考えられる．

キーワード：Bushveld 複合岩体、白金族元素、メレンスキーリーフ、単硫化物固溶体、中間固溶体
Keywords: Bushveld Complex, Platinum Group Elements, Merensky Reef, Monosulfide Solid Solution, Intermediate Solid Solution

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

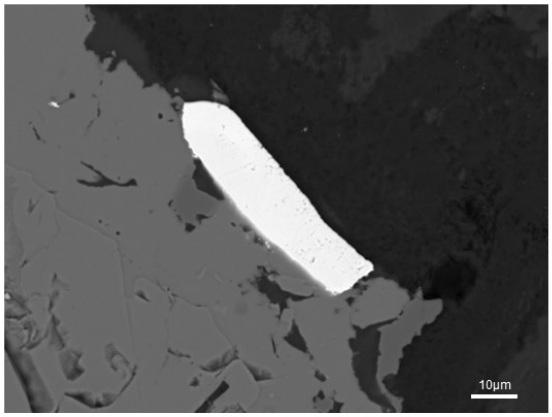


Fig. 1. Moncheite (white) formed on the rim of Nickel sulfide minerals (gray) in Pothole Reef. BSE image.

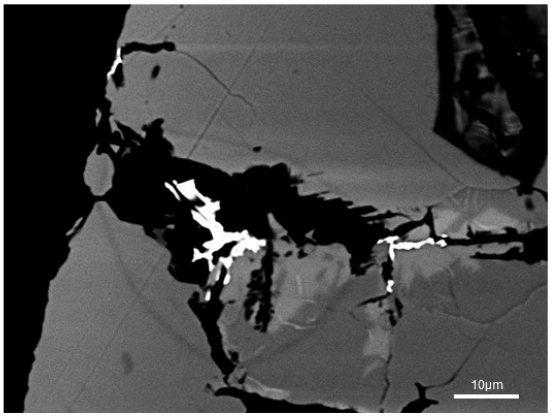


Fig. 2. Zvyagintsevite (white) formed on the rim of pentlandite (gray), in Pseudo Merensky Reef. BSE image.

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

秋吉帯石灰岩基盤のアルカリ火山岩中に含まれる高Ti黒雲母岩片とその意義

High-Ti biotite in the alkali volcanic rock from the Akiyoshi Belt and its significance

*木村 光佑[1]、Das Kaushik[2]、早坂 康隆[3]
*Kosuke Kimura[1], Kaushik Das[2], Yasutaka Hayasaka[3]

1. 大公大・院理、2. 広島大・院先進理工、3. 御所浦恐竜の島博物館
1. Osaka Metro. Univ. Sci., 2. Hiroshima Univ., 3. Amakusa Mus. Goshoura Dinosaur Isl.

秋吉帯は西南日本内帯に分布するペルム紀付加体を主とする地質体であり，石灰岩台地を構成するような巨大な石灰岩体を特徴的に含む．この石灰岩は海山/海洋島起原の緑色岩類を基盤とする石炭紀からペルム紀にかけての礁石灰岩であり，緑色岩類と接する最下部層からは共通して石炭紀のVisean期まで遡ることが確認されている．したがって，これら岩石はパンサラッサ海の大洋域に起原を持つ海山/海洋島とその頂部に堆積した石灰岩からなる石炭紀からペルム紀にかけての海洋性の岩石であると解釈されている．

広島県東部の矢川地域に分布する白亜系関門層群相当層の稲倉層には，数十m規模の秋吉帯由来の石灰岩-緑色岩ブロックが含まれている．木村ほか(2012)はその石灰岩基盤の緑色岩類からジルコンを含むアルカリ火山岩を発見し，SHRIMP年代として350 ±10 Maを報告した．またこのアルカリ火山岩を含む矢川地域の緑色岩類はホットスポット起原の全岩化学組成を示した．今回，LA-ICP-MSを用いてジルコンU-Pb年代およびジルコン微量元素組成を分析した結果，335.8 ±1.6 Maの$^{206}Pb/^{238}U$年代が得られ，ジルコン微量元素組成はGrimes et al. (2007)の判別図ではcontinental zircon fieldにプロットされ，Grimes et al. (2015)の判別図においてはホットスポットタイプの組成を示す．continental zircon fieldにプロットされたのは分化した全岩組成に由来するものと考えられる．

含ジルコンアルカリ火山岩は，斑晶として斜長石と黒雲母を含む．黒雲母は粒子全体がほぼ黒雲母だけからなるものもあるが，多くは粒子中に黒雲母に加え石英と鉄酸化物を含む岩片として産し，これらが層状に配列し面構造を形成している．この黒雲母はTiを高濃度に含んでおり(TiO_2 = 7.3–8.9 wt.%; Ti = 0.83–1.03 (O=22))，SEM観察では黒雲母内部で明るさが異なり，明るい領域の方が暗い領域よりもTi濃度が高い．また黒雲母中には極細粒なTi濃集鉱物(TiO_2 = ~ 80%)が存在しており，離溶している．更に黒雲母の中にはキンクが見られるものがあり，キンク部分にも極細粒なTi濃集鉱物が集中する．SEM-EBSD分析では，黒雲母岩片中の石英の結晶方位が揃っているのが観察される．更に，ジルコン結晶中にもこれら黒雲母に類似の層状珪酸塩鉱物がインクルージョンとして含まれる．

このような黒雲母岩片の構成鉱物や内部構造から，この岩片は泥質結晶片岩由来の捕獲結晶の可能性が示唆される．このような泥質片岩は例えば沈み込み帯で形成され得る．しかし秋吉帯の礁石灰岩-海山起原緑色岩はこれまで，周囲に陸源砕屑物を供給するものがないパンサラッサ海大洋域で形成されたものと考えられており，秋吉帯からの火成弧起源の緑色岩の報告例もない．本講演ではこの黒雲母岩片の意義について議論する．

引用文献: 木村ほか(2012)日本地質学会第119年学術大会講演要旨，R2-O-5．Grimes et al. (2007) Geology, 35, 643–646. Grimes et al. (2015) Contrib. Mineral. Petrol., 170, 46.

キーワード：秋吉帯、緑色岩、ジルコンU-Pb年代、高Ti黒雲母
Keywords: Akiyoshi Belt, Greenstone, Zircon U-Pb age, High titanium biotite

カンラン石中に存在する微小包有物を用いた幌満カンラン岩体SDWの起源推定

Estimation of the origin of SDW in the Horoman peridotite complex by analysis of micro-inclusions in the olivine

*明田 将治[1]、三宅 亮[1]、秋澤 紀克[2]、松本 恵[3]、伊神 洋平[1]、三津川 到[1]
*Masaharu Aketa[1], Akira Miyake[1], Norikatsu Akizawa[2], Megumi Matsumoto[3], Yohei Igami[1], Itaru Mitsukawa[1]

1. 京都大学、2. 東京大学、3. 東北大学
1. Kyoto University, 2. University of Tokyo, 3. Tohoku University

幌満カンラン岩体はマントル由来の岩石で構成されており、大部分を占めるMain harzburgite-lherzolite suite (MHL)とそれに伴うSpinel-rich dunite-wehrlite suite (SDW)が特徴的である。高温メルトがMHLに貫入してMHLの岩相を改変しながら、SDWは形成したと考えられている[1]。MHLはMORBと同様の同位体組成を示し[2]、MHLとSDWは互いに調和的な変形をしているため両者が大規模な変位を被っていないとするとSDWも中央海嶺起源であると考えられてきた[2,3]。一方、Arai et al. [4] は黒色を呈するダナイト中のカンラン石（黒色カンラン石）中の磁鉄鉱と透輝石で構成される包有物がカンラン石中のOH面欠陥[5]を元に析出したとし、初生的なカンラン石中には77-430 ppmの水が存在したと推定した。これは、クラトン下のカンラン石中の水の量（最大300 ppm[6]）と比較して多いため、SDWが沈み込み帯起源であると提案した。Aketa et al. [7] も SDWに産出する黒色カンラン石の包有物を研究し、磁鉄鉱・透輝石に加えて含水鉱物を新たに発見し、析出反応に水が関与していた確証を得た。しかし、初生的なカンラン石中の水の量を推定すると、11-27 ppmとなった。この値は [4] が報告した値よりもはるかに低く、SDWの起源を沈み込み帯とする議論は再検討が必要である。また、 [4,7] の研究試料はSDWの中央部に産出する黒色カンラン石のみであり、SDW全体での包有物やそれに伴う含水量の詳細な分布は未解明である。そこで本研究ではSDW内から新たにサンプリングを行い [7]と同様にカンラン石中の包有物の詳細観察を行った。分析には、X線CT（SPring-8、BL20B2,BL47XU）、走査型電子顕微鏡(JEOL社JSM-7001F)、透過型電子顕微鏡(JEOL社JEM-2100F)を用いた。試料にはSDW中央部から採取した四試料(C1, C2, D, D2)と外縁部から採取した三試料(D1, D3, D4)を用いた。どの試料のカンラン石中にも包有物が多く存在し黒色カンラン石はSDW中央部のみならず外縁部にも広く存在していることが判明した。包有物をその鉱物組み合わせによりType 1, 2, 3に分類した。Type 1は磁鉄鉱・透輝石・緑泥石または角閃石・流体からなる包有物である(0.5-20 μmφ)。Type 1はD以外の全ての試料から発見された。Type 2はクロム鉄鉱・モンチセリ石・$NaAlSiO_4$（構造未同定）からなる包有物(10-200 μmφ)で、その周辺には多数の微小磁鉄鉱包有物(1-2 μmφ)が分布する特徴を持つ。Type 2は試料C2, D, D3から発見された。Type 1,2は基本的に[7]と同様の結晶方位関係が認められる。Type 3は磁鉄鉱の単相包有物(0.02-1 μmφ)である。Type 3は全ての試料から発見された。Type 1はカンラン石の粒界には存在せず基本的に低指数の結晶方位や伸長方位の関係を持っているため、SDW全体として水を含むカンラン石が初生的に存在したことを示唆している。さらに、Type 1中の磁鉄鉱がカンラン石中に占める割合をX線CTによって計測した結果、SDW中央部で採取したC1, C2, D2でそれぞれ0.50, 0.43, 0.14 vol%であった。一方、SDW外縁部から採取したD4で磁鉄鉱の割合は0.03 vol%であった。[1,4]は分別作用により含水量がSDW中央部で増加することを示唆しており、今回得られたType 1の磁鉄鉱がカンラン石中に占める割合と、Type 1の各鉱物相の体積比はほとんど一定であることから、磁鉄鉱の割合に比例すると考えられる含水量[7]が中央部の方が外縁部より多いという結果は整合的である。つまり、SDW全体で考えれば、初生的なカンラン石中の水の量は中央部試料(C1)から推定した11-27 ppm[7]より低いと考えられる。よって、SDWの形成場所を沈み込み帯に求める必要はないと考えられる。 引用文献[1] Takahashi (1992) *Nature*, 359, 52-55 [2]

Takazawa et al. (1999) *J. Petrol.*, 40, 1827-1851[3] Akizawa et al. (2021) *J. Geol. Soc. Japan*, 127, 269-291[4] Arai et al. (2021) *Lithos,* 384–385, 105967 [5] Kitamura et al. (1987) *Nature,* 328, 143-145[6] Peslier et al. (2017) *Space Sci. Rev.,* 212, 743-810 [7] Aketa et al. (2024) *JpGU meeting abstract*

キーワード：幌満カンラン岩体、カンラン石、包有物、電子顕微鏡、X線ナノトモグラフィー
Keywords: Horoman peridotites, olivine, inclusion, Electron Microscope, XnCT

愛媛県新居浜市別子地域芋野カンラン岩体にみられるFe-Ni-S-As系鉱物について

Fe-Ni-S-As minerals in the Imono peridotite body, Besshi area, Niihama city, Ehime prefecture.

*国吉 真斗[1]、延寿 里美[1]
*Masato Kuniyoshi[1], Satomi Enju[1]

1. 愛媛大・院理工
1. Ehime Univ.Sci and Eng.

はじめに

芋野岩体は愛媛県新居浜市の東赤石山南東地域の三波川変成帯に位置する超苦鉄質岩体であり，主にダナイトと蛇紋岩から構成されている（椚座，1984）．芋野岩体のカンラン岩は椚座（1984）やTasaka et al.,（2008）によってカンラン岩の起源やカンラン石の動的再結晶について考察されているが，蛇紋岩や芋野岩体中の硫化鉱物及び金属鉱物の情報は少ない．カンラン岩や蛇紋岩中の硫化鉱物及び金属鉱物は岩体が経過した温度，圧力，酸化還元状態を推察する上で重要な要素となるため（北風, 1998；Klein and Bach, 2009），本研究では芋野岩体を構成するカンラン岩や蛇紋岩にみられた硫化鉱物や金属鉱物，砒化鉱物について記載するとともに，形成環境について推察を行う．

研究手法

岩石試料採取は芋野岩体東部の露頭で行い，4地点に分けて採取した．採取した試料はRIGAKU製Ultima IVを用いたX 線回折（XRD）実験による分析の他，偏光顕微鏡観察，Oxford製エネルギー分散型 X線分析装置(EDS)を搭載したJEOL製走査型電子顕微鏡（SEM）JSM-6510LVを用いて組織観察や各鉱物の化学分析及び同定を行った．

観察結果

芋野岩体は主に部分的に蛇紋岩化した塊状カンラン岩から構成されており，一部ではほぼ完全に蛇紋岩化した蛇紋岩もまた，蛇紋岩は塊状のものと片状のものがみられた．

カンラン岩中のカンラン石の粒径はむらがあり数百μm～2 mm程度の粗粒な結晶と，数十μmのやや細粒な結晶が, それぞれ集合をなし混在していた. 蛇紋岩中のものは変質しているためもとの粒形がわかりづらいが, 最も大きな部分はカンラン岩の粗粒部と類似していた.カンラン石の組成は一つの薄片内でも幅があるものの, 蛇紋岩中のもの(平均Mg# 89.59)の方がカンラン岩中のもの(平均Mg# 92.52)に比べFeに富んでいた．蛇紋石の種類は両方ともアンチゴライトが主であるが，少量のリザーダイトもみられる．蛇紋石は短冊状のアンチゴライトと，間を埋めるような細粒部からなる．蛇紋石のFeの含有量には幅があり(Mg#= 92.58~98.50)，両岩で差は認められない．また，AlやCrをほとんど含まず，最大でもAl 0.80 wt%，Cr 0.60 wt%である．炭酸塩鉱物は，両岩ともにブルグナテライトがみられ，カンラン岩のみにハイドロタルサイトグループ鉱物がみられた．

両岩ともにペントランド鉱($(Fe,Ni)_9S_8$)とアワルワ鉱(Ni_3Fe)の共生組織が普遍的に存在する．この共生組織は蛇紋石脈中の磁鉄鉱に伴ってみられ，蛇紋岩ではクロンステッドタイト様鉱物が接する組織もみられた．ペントランド鉱は粒径5 μm以上の粒子であるが，アワルワ鉱は 1 μm以下の粒子の集合体として産する．ペントランド鉱はCoを含まないものから2.08wt%~12.17wt%程のCoを固溶するものまで幅がみられた．アワルワ鉱は両岩の蛇紋石脈内部に単独でもみられ，カンラン岩ではオルセル鉱($Ni_{5-x}As_2$ (x = 0.23))を置換する組織もみられた．オルセル鉱は微量のSbを含み，カンラン岩では蛇紋石脈中でしばしば観察され，蛇紋岩では磁鉄鉱内部で非常に細粒な結晶として稀にみられた．他にも蛇紋岩ではシャンド鉱($(Ni,Fe)_3Pb_2S_2$)や自然銅が磁鉄鉱に伴い産出し，カンラン岩ではごくまれに蛇紋石脈中に硫砒鉄鉱 (FeAsS)が，クロム鉄鉱中に重晶石がみられ

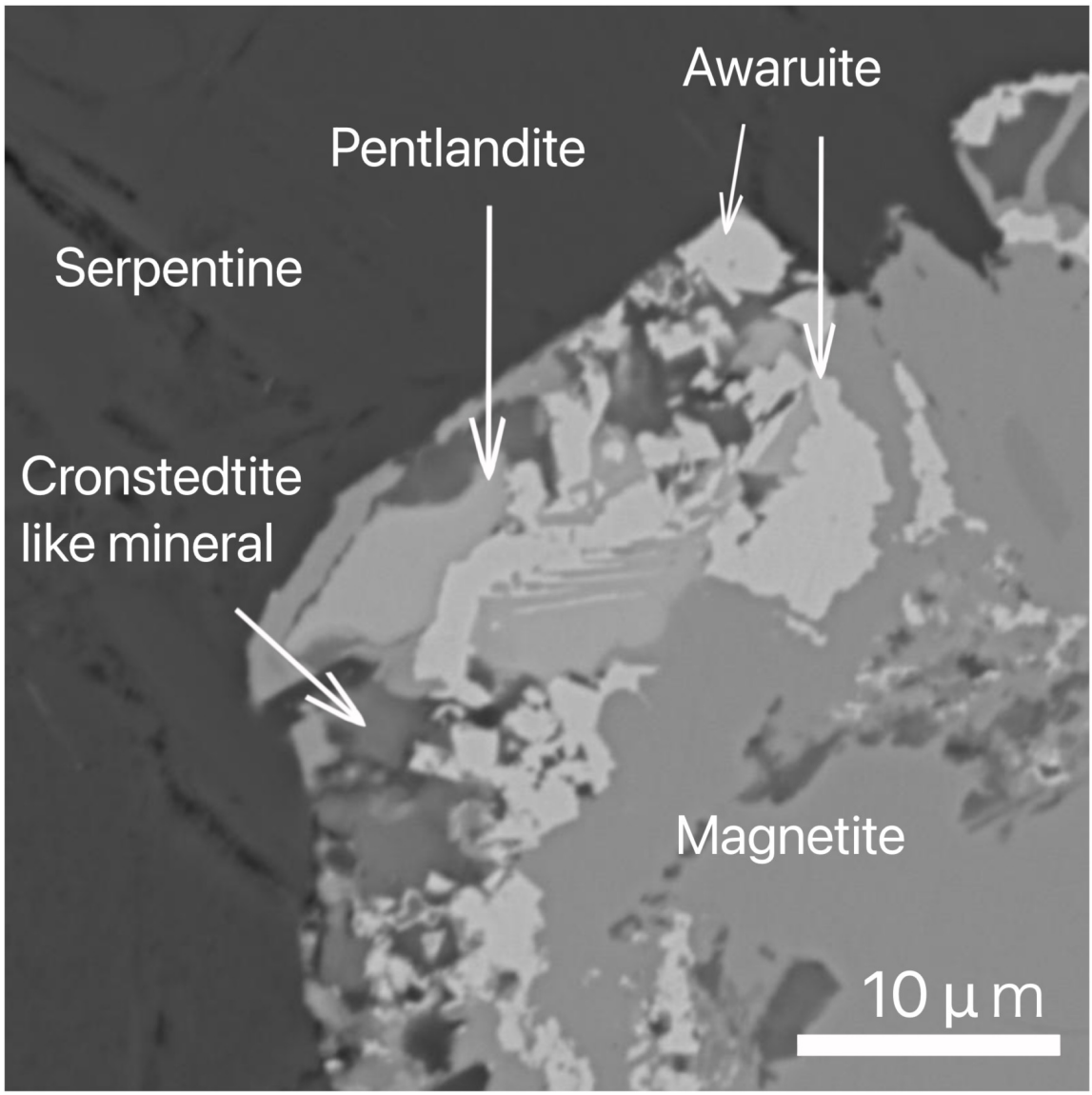
た．

考察

磁鉄鉱とアワルワ鉱，ペントランド鉱の共生組織からは，ペントランド鉱が最初に晶出あるいはアワルワ鉱とほぼ同時に晶出したのちに，磁鉄鉱がペントランド鉱とアワルワ鉱を囲むようにして晶出したと考えられる．また，ペントランド鉱とアワルワ鉱は還元的な条件で晶出する事，クロンステッドタイトはアワルワ鉱よりも酸化的な条件で晶出する事から，蛇紋岩でみられた磁鉄鉱，ペントランド鉱，アワルワ鉱，クロンステッドタイト様鉱物の共生組織の形成時には，より酸化的な条件へと酸化還元状態が変化していたと考えられる．芋野岩体の半径7 km以内に位置する超苦鉄質岩体である東赤石岩体や藤原岩体でも，アワルワ鉱やヒーズルウッド鉱，テオフラスタイトが産し(曽田ほか，2016；Arai et al., 2020)，岩体の形成後に酸化的条件へ遷移したと推察されており, 本産地も同様の環境変化が起こったと考えられる．

また、芋野岩体ではAsやSb，Baを含む砒化鉱物や硫酸塩鉱物がみられるが，藤原岩体においてAsやSb，Ba等の元素がスラブ由来の流体から供給された可能性について考察されており(Arai et al., 2020)，芋野岩体でもスラブ由来の流体からの元素供給が起きたと考えられる．

キーワード：Fe-Ni-S-As系鉱物、蛇紋岩、カンラン岩、芋野カンラン岩体
Keywords: Fe-Ni-S-As mineral, Serpentinite, Peridotite, Imono peridotite body



図：蛇紋岩中の磁鉄鉱，ペントランド鉱，アワルワ鉱，
クロンステッドタイト様鉱物の共生組織

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

広島県神武-三原鉱床におけるアルカリ交代作用に伴う蛍石鉱化作用

Fluorite mineralization associated with alkaline metasomatism in the Jinmu-Mihara deposit, Hiroshima, Japan.

*砂田 雅裕[1]、越後 拓也[1]、渡辺 寧[1]
*Masahiro SUNADA[1], Takuya Echigo[1], Yasushi Watanabe[1]

1. 秋田大学・院国際資源
1. Akita Univ. IRS.

西南日本内帯には後期白亜紀花崗岩類の分布域に交代作用を被った岩石が分布しており[1]，広島県神武-三原鉱床ではアルカリ岩的性質を示唆する閃長岩及びモンゾニ岩の産出が知られている[2, 3]．本研究において新たに蛍石を含む交代作用を被った岩石(以下，交代岩)を見出した．本研究では，広島県神武-三原鉱床に産出する蛍石を伴う交代岩について，岩石記載および鉱物学的特徴を報告する．

鉱床周辺の地質はルーフペンダント状に分布するジュラ紀丹波帯の堆積岩コンプレックスとそれらに貫入する後期白亜紀の広島花崗岩類からなる．スカルン及び交代岩はこれら花崗岩類と堆積岩コンプレックスの間に位置する．

顕微鏡観察，SEM-EDSにより，交代岩は主にalbite，fluoriteから構成され，albiteは半自形～他形であり，微細な微小間隙が存在する．fluoriteはalbite中に他形，鉱染状に産する．Fluoriteは一般に無色であり，部分的に紫色を呈す．副成分鉱物は紫色を呈すfluoriteに粒状のthorite，zirconが産する．また，一部albite中に熱水変質を被ったzirconが認められた．また，交代岩の中にはalbite, garnet, hedenbergiteが粒状の組織を示し，蛍石が空隙を充填する産状も認められた．

以上の結果より神武-三原鉱床に産する交代岩に認められる蛍石鉱化作用は，albite中に鉱染状で認められることから，長石中のCa成分が熱水と反応する(e.g. albitization)ことにより含F鉱物のfluoriteを形成したと考えられる．また，albite及び副成分鉱物の産状から，アルカリに富む流体による交代作用が起こったことが示唆される．引用文献：[1] 村上(1976) 岩鉱; [2]添田(1964) 通商産業省; [3]青木・肥田(1974) 鉱山地質．

キーワード：蛍石、アルカリ(Na-K)交代作用、神武ー三原鉱床
Keywords: Fluorite, Alkali (Na-K) metasomatism, Jinmu-Mihara deposit

熊本市東方木山地域に産する超苦鉄質岩類の岩石学

Petrological study of ultramafic rocks from the Kiyama area, eastern Kumamoto City

西尾 成道[1]、*石丸 聡子[2]
Narumichi Nishio[1], *Satoko ISHIMARU[2]

1. 熊本大学・理、2. 熊本大学・院自然
1. Kumamoto Univ. Sci., 2. Kumamoto Univ. FAST

熊本県は九州中央に位置し，県中央部の中央構造線の西方延長とみなされる臼杵–八代構造線を挟んで，南側に黒瀬川構造帯，北側に肥後変成帯といった先白亜紀変成岩類が広く分布している（小山内ほか，2014）。この他にも，木山変成岩や木の葉変成岩といった小規模な変成岩も確認されており，木山変成岩類は，変成鉱物組合せや結晶片岩中の白雲母の同位体年代測定により，三郡–蓮華変成岩と同一の起源をもつと判断されている（樺島ほか，1995）。この木山変成岩は，変成度の異なる東部岩体（藍閃石片岩相）と西部岩体（緑れん石角閃岩相）に区分され，その境界部に小規模な蛇紋岩を挟むことが知られていたが（坂野，1963；山本，1964），その岩石学的特徴については蛇紋岩化・風化の程度が激しく，詳細な記載がされていないままであった。我々は，熊本市東方の上益城郡益城町下陳地域での現地調査で試料採集をおこなった。露頭では，蛇紋岩は風化して茶褐色を呈し非常に脆いが，クロムスピネルに富むダナイト質のものが観察された。クロムスピネルの化学組成は，超苦鉄質岩の形成過程や形成場推定に有用であり，この蛇紋岩の記載をおこなうことで蛇紋岩を伴う木山変成岩の帰属に関する議論が深まることが期待される。

現地調査で採集したのは，露頭に産する風化したダナイトと，露頭の脇を流れる小川で風化の程度が比較的小さいウェールライトとダナイトである。ダナイト，ウェールライトともにカンラン石は残存していない。ウェールライト中の単斜輝石のMg# (= Mg/(Mg + Fe^{2+}) 原子比) は0.85-0.87でAl_2O_3を1.8-2.7 wt.%含む。風化の激しいダナイト中であっても，クロムスピネルは三価の鉄の含有量が低く (Fe^{3+}/(Cr + Al + Fe^{3+}) < 0.10) 火成岩的な組成を保持している（Mg# = 0.46-0.55, Cr/(Cr + Al) = 0.86-0.87）。クロムスピネル中に角閃石包有物（パーガス閃石）が観察される。鉄–ニッケル合金を少量含む。ウェールライト中の不透明鉱物は三価の鉄の含有量が高く(Fe^{3+}/(Cr + Al + Fe^{3+}) > 0.83)，（クロム）磁鉄鉱である。鉱物組合せとクロムスピネルの化学組成から，木山変成岩に伴う蛇紋岩は沈み込み帯で形成された結晶集積岩であると推定される。

キーワード：蛇紋岩、ダナイト、クロムスピネル、木山変成岩
Keywords: Serpentinite, Dunite, Chromian spinel, Kiyama metamorphic rock

FLUID INCLUSION STUDIES IN QUARTZ VEINS WITH TIN MINERALIZATION IN THE KIBARAN INTRUSIVE ROCKS IN KALEHE (SOUTH KIVU, DR CONGO)

*MUSA Moise-Kam's SAIDI[1], MADDHUSOODHAN Satish Kumar[1]

1. Niigata Univ.

The Mesoproterozoic Kibaran granitoid formations host numerous mineral resources which are highly demanded in new technology industries, mineral such as Sn-W, Nb, Ta and Au. This mobile belt is formed by collision of the Western Congo with the Eastern Tanzanian, Bangwelu and Zimbabwe cratons, producing four generations of granite. These ore deposits are hosted in granite pegmatite (Nb, Ta) and Sn-W in quartz veins.

Fluid inclusions were studied in quartz vein samples in order to unravel the evolution of the mineralizing fluid controlling the ore deposits in Kalehe(DR Congo). In the study area the field and petrographic studies indicate that major rocks constitute of a variety of metapelites including sericite schists, micas schists, quartzites and igneous rocks such as granites, greisens and pegmatites. The quartz veins crosscutting the metapelite show a NE-SW trending, whereas the pegmatitic vein trend in a NW-SE direction crosscutting the Kibaran metasediments.
Fluid inclusions are abundant in quartz veins and metallic mineralized quartz veins. Primary, secondary and pseudo secondary inclusion are observed, in which the biphase inclusions are most common.The mineralizing fluids of the quartz-vein in the sericite schist have a heterogeneous nature at the time of trapping. The temperature of homogenization(Th) and salinities of the fluid inclusions were determined; some were having high Th with high salinity, others were with high Th but with low salinity, whereas another group have low Th with moderate salinity. The biphase Inclusions homogenization temperature range is 17.7- 303˚C and the salinity range is 0.88-16.24˚Wt%. The temperature of first ice melting(Tmice)values obtained so far from fluid inclusion microthermometry indicate various fluid compositions mainly CO2, CO2 + H2O rich, CO2+H20+/-CH4. These phases were confirmed by Raman spectroscopy and consistent with Tmice as well as the freezing point depression indicating the presence of salt (NaCl or other salts).

The mineralizing fluids trapped as fluid inclusions in the metallic quartz veins crosscutting shale formations can also be categorized as primary, secondary and pseudo secondary, these fluids were multiphase fluid inclusion (solid, liquid and vapor). Detailed studies on these inclusions are being carried out and will be presented.

Keywords: Fluid inclusion, microthermotry, Kibaran mobile belt, Tin, Raman spectroscopy

北海道日高変成帯、幌満かんらん岩体中の縞状ダナイト・ハルツバージャイトが記録する枯渇したかんらん岩とメルトの反応

Depleted peridotite and melt reaction as recorded by layered dunite-harzburgite in the Horoman peridotite, Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, Japan.

*栗原 圭佑[1]、川本 竜彦[1]、日原 彩[1]、田阪 美樹[1]、谷内 元[2]、栗谷 豪[3]、松本 亜希子[3]
*Keisuke Kurihara[1], Tatsuhiko Kawamoto[1], Aya Hihara[1], Miki Tasaka[1], Hajime Taniuchi[2], Takeshi Kuritani[3], Akiko Matsumoto[3]

1. 静岡大、2. 産総研、3. 北海道大
1. Shizuoka Univ., 2. AIST, 3. Hokkaido Univ.

北海道の日高変成帯の最南端に位置する幌満かんらん岩体は、大規模に露出する造山帯かんらん岩体としてよく研究されている。岩体の98%以上を占めるMain Harzburgite-Lherzolite (MHL)は、斜長石レルゾライト・スピネルレルゾライト・ハルツバージャイトによって構成され、層状構造を成す(Niida, 1984, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. IV*; Takazawa et al., 1999, *J. Petrol.*)。MHLはMORBに似たSr-Nd同位体比を示すことから、中央海嶺で形成されたマントル岩と推測された(Yoshikawa & Nakamura, 2000, *J. Geophys. Res.*)。本岩体はその後、島弧のリソスフェアへ転じたと推定されている。島弧環境で形成されたと考えられているかんらん岩類は特定の層準にブロックもしくはレンズ状に分布し、それらはBanded Dunite-Harzburgite(BDH)と呼ばれる(Arai & Takahashi, 1986, *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*; Takahashi, 1991, *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, 1992, *Nature*; 松藤ほか, 2006, 岩石鉱物科学)。BDHとそれに付随するマフィック岩の成因としては、異地性のものを幌満岩体が機械的に取り込んだとする説(Takahashi, 1991; Morishita, 1999, Doctoral thesis, Kanazawa Univ.; 松藤ほか, 2006)と、局所的にスラブ由来流体が流入することによってマントルかんらん岩がフラックス溶融し、その結果として生成したメルトが分離・結晶化したとする説(秋澤ほか, 2021, 地質雑)がある。BDHはダナイト、ハルツバージャイト、直方輝石岩から構成される(Takahashi, 1991, 1992)。カンラン石とスピネルの高いMgとCrの含有量が特徴で、ボニナイトあるいは高Mg安山岩質マグマからの結晶集積岩と考えられる(Takahashi, 1991)。本研究では、幌満川とアポイ岳登山道露頭からBDHかんらん岩の試料を採取し、鉱物組成について先行研究との比較を行ったほか、全岩化学組成を新たに報告する。本岩石と周囲の岩石との関係などを調べることによって、幌満岩体の沈み込み帯での記録を理解したい。

幌満川露頭では、ダナイトとハルツバージャイトないし直方輝石岩が数cmスケールで互層する。ダナイトと直方輝石岩の両方の層内には、ブーディン構造がみられる伸張したスピネルが含まれる。BDHかんらん岩全体の層厚は不明であるが、採取した高さ約2 mの露頭にマフィック岩は含まれない。カンラン石はFo content = 93~94、スピネルはCr#(=100Cr/(Cr+Al)) = 84~92と高く、マントル列(Arai, 1987, *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*) の領域内にプロットされる。カンラン石のNiO含有量はマントル領域(Takahashi et al., 1987, *Tech. Rep., Inst. Study Earth's Int. Okayama Univ., Ser. A*)よりやや低い。これらの鉱物組成範囲は先行研究とおおよそ一致する。全岩微量元素濃度は全体的に直方輝石岩でダナイトより高く、軽希土類元素に富むパターンを示す。これに対してアポイ岳登山道露頭は、先行研究によってBDHに分類されているが、ハルツバージャイトの単層で、スピネルの伸長は幌満川地点と比較すると弱い。その層厚は数cm～数10 cmと変化し、上下をタイプⅠマフィック岩に挟まれている(松藤ほか, 2006)。試料は層厚約50 cmほどの、最も厚い部分から採取した。カンラン石はFo content = 90~91、スピネルはCr# = 55~60を示し、先行研究とは大きく異なる。全岩微量元素濃度は幌満川地点よりも重希土類元素に富み、軽希土類元素を同程度含む。これらのような露頭間で異なるBDHのモード組成や化学組成は、マフィック岩との相互作用などの程度の違いによるものと推測される。今回、不動の沢において幌満川やアポイ岳登山道と同じ層準で露出するBDHかんらん岩試料

を、新潟大学の高澤栄一博士の案内によって採取することができた。発表では、その試料の分析結果も含めて比較したい。

キーワード：かんらん岩、幌満、縞状ダナイトーハルツバージャイト、メルトー岩石反応、化学組成
Keywords: peridotite, Horoman, banded dunite-harzburgite, melt-rock reaction, chemical composition

鉱物飛跡検出器を用いた未知宇宙線事象探索のための研究開発

Research and development for the exploration of unknown cosmic ray events using Paleo-Detector

*井戸 悠生[1]、中 竜大[2]、二村 翔大[3]、織 瞳磨[4]、加藤 丈典[5]
*Yuki Ido[1], Tatsuhiro Naka[2], Shota Futamura[3], Tohma Ori[4], Takenori Kato[5]

1. 名大・環境、2. 東邦・理、3. 名大・理、4. 鈴鹿高専・専攻科、5. 名大・ISEE
1. Nagoya Univ. Env., 2. Toho Univ. Sci, 3. Nagoya Univ. Sci., 4. N.I.T. Suzuka, 5. Nagoya Univ. ISEE

本研究では鉱物を未知粒子の飛跡検出器として大規模な探索を行うことを目指している。粒子との相互作用により鉱物の中に飛跡が残ることが1960年代に報告されている。地球科学においてはフィッショントラック年代測定法として用いられている。一方で物理学、特に素粒子物理学実験領域においては主に宇宙線の検出器として性能評価が行われ、運用されてきた実績があるものの、注目度の高い探索対象粒子の変遷やより高感度の検出器の開発により、近年は鉱物飛跡検出器を用いた探索実験は行われていなかった。

しかしながら、特定の条件下では鉱物飛跡検出器は依然として高い探索性能を誇ることが示されている。また、粒子と鉱物の相互作用の頻度が極端に低かった場合はヒトスケールの探索では十分でないことや、地球近傍での発生割合が1回/100yr程度である超新星爆発に起因する粒子の探索など、鉱物飛跡検出器でしか行い得ない探索があることが示唆されている。

そこで、本研究では白雲母とかんらん石を用いて、鉱物飛跡検出器の再検討を行っている。これらの鉱物はバックグラウンドとなるウランの含有量が少なく、透過度が高いため光学顕微鏡を用いた探索が容易であるという点が挙げられる。ハンドリングに関しては白雲母はエッチングや入手という点を含め比較的容易であることに対し、かんらん石の処理は煩雑である。先行研究に関しては、白雲母は大面積が稼げる点、かんらん石は隕石に含まれる鉱物を探索することで大気の影響を受けない点をメリットとしてどちらも探索に運用された実績がある。さらに白雲母の探索はCharged Q-ballの探索上限の推定に用いられているが、この推定には飛跡形成や光学像に対する十分な議論が無いため、再検証の必要がある。元となった磁気単極子の探索実験は数億年程度の形成年代を持つ白雲母を600cm2程度探索し、対象となる飛跡が未発見であったことから、磁気単極子のFluxに制限を付けている。これをCharged Q-ball探索に外挿する際、結果のみを適応しているものの、磁気単極子とCharged Q-ballでは飛跡形成過程および飛跡光学像が同様であるとする実験的な根拠はないため、この推定がどの程度正確なのか検証することは喫緊の課題となっている。

Charged Q-ballは現在の物質アシンメトリー問題と呼ばれる物質優勢の世界を説明するために考えられた理論の中に現れる粒子であるが、研究が進むにつれ、暗黒物質となっている可能性も示唆されている。暗黒物質とは宇宙の構成要素の3割を占める、未知の粒子を指すが、つまり、このCharged Q-ballは素粒子物理学における物質アシンメトリー問題と暗黒物質問題を同時に扱う粒子であり、探索によって幾つかの物理量に制限をかけられる。しかしながら、暗黒物質であるがために、低速粒子としての性質を持つため、鉱物飛跡検出器に入射した際にどのような飛跡を残すかが不明である。これは反応の小ささに起因するものである。高速粒子は比較的飛跡が長くなることから観察が容易であり、校正が容易である。一方で例えばXeで300 km/sという暗黒物質程度の低速粒子を白雲母に照射すると飛程は約30 nmとなり、光学顕微鏡では観察が不可能である。

そこで、本研究では高速粒子から低速粒子まで用いて照射実験を行い、この飛跡を透過電子顕微鏡(TEM)や原子間力顕微鏡(AFM)を用いて飛跡の形状、および、飛跡形成閾値の検証を行った。

実験は量子科学技術研究開発機構（QST）の重粒子線がん治療装置（HIMAC）および日本原子力研究開発機構（JAEA）のTandem加速器を用いて20 GeV~5MeVのFe, Xe, Auイオンを照射することで行った。また、角度は10度,30度,60度,90度と角度を振ることで飛跡形成の変化の有無を検証した。なお、光学顕微鏡での観察の際にはエッチングを行い、必要なサンプルにはアニーリング処理を行うことで、バックグラウンドとなっているウランの崩壊によって生じるアルファリコイルトラックを制御しつつ校正を行った。

これらの実験から探索時の参考となる、角度およびエネルギーの異なる飛跡光学像画像を取得するとともに、今後、これらのデータセットを用いて低速粒子の飛跡光学像をシミュレーションで予測することを目指す。

また、現在飛跡を自動で読み出すシステムを開発中である。ソフトウェアに関しては上記の校正実験で得られた飛跡を基に基礎部分が完成しており、今後はハードウエアの開発を加速させる。これにより、鉱物飛跡検出器を用いた物理探索を世界最高感度で行うことを目指しており、ポスターでは研究手法ならびに研究の進捗状況について報告する。

キーワード：白雲母、かんらん石、素粒子物理
Keywords: Muscovite, Olivine, Particle physics

ポスター | R8：変成岩とテクトニクス

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R8：変成岩とテクトニクス

12:30 ~ 14:00

[R8-P-01] Mineralogical characterization of serpentinite varieties in Sangun-Renge Belt exposed at Sasaguri, Fukuoka Prefecture, and their geological implications

「発表賞エントリー」

*Swarnaa ANNADURAI MUNUSAMY[1], Jun-ichi ANDO[1,2], Yuki IWASAKI[3], Kaushik DAS[1,2], Dyuti Prakash SARKAR[4], Seiichiro UEHARA[5] (1. Hiroshima Univ., 2. HiPeR, Hiroshima, 3. NIPPON STEEL CORP., 4. JAMSTEC, 5. The Kyushu Univ. Museum)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-02] 愛知県新城市南部に分布する三波川帯の変成温度構造

「発表賞エントリー」

*松﨑 茜[1]、纐纈 佑衣[1]、道林 克禎[1] (1. 名古屋大・院環境)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-03] 鳥取県大山に産する片麻状花崗岩ゼノリスの起源とパイロ変成作用

「発表賞エントリー」

*高橋 瑞季[1]、遠藤 俊祐[1] (1. 島根大学)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-04] 東ネパール・ヒマラヤの泥質変成岩中に産するモナズ石の記載とモナズ石のTh-Pb年代測定法の開発

「発表賞エントリー」

*工藤 駿平[1]、河上 哲生[1]、仁木 創太[2]、中嶋 徹[3]、平田 岳史[4]、今山 武志[5] (1. 京大・院理、2. 名大・宇宙地球環境研究所、3. 日本原子力研究開発機構、4. 東大・院理、5. 岡山理大・フロンティア理工学研究所)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-05] 長野県伊那地域を例とした，三波川帯低変成度域に分布する超苦鉄質岩類の岩石学的記載

「発表賞エントリー」

*延原 香穂[1]、森 宏[1]、永冶 方敬[2] (1. 信州大、2. 東京学芸大)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-06] 紀伊半島中央部，三波川帯–秩父帯境界域の砕屑性ジルコンU–Pb年代測定と炭質物ラマン分光分析

*森 宏[1]、碓井 虎次郎[1,2]、常盤 哲也[1]、小澤 和浩[3] (1. 信州大学、2. 日本工営株式会社、3. 精密林業計測株式会社)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-07] 北海道神居古潭変成帯・幌加内地域の角閃岩におけるwakefieldite-(Y)の発見とその意義

*加藤 太朗[1]、苗村 康輔[1]、竹下 徹[2] (1. 岩手大学、2. パシフィックコンサルタンツ株式会社)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-08] 栃木県西部足尾山地に産する珪線石―クリソベリル含有片麻岩の熱履歴と原岩砕屑物供給源

*北野 一平[1] (1. 北大・総合博)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-09] 舞鶴帯北帯に産する変成岩の岩石学的特徴と地質年代学

*室井 颯太[1]、Das Kaushik[1]、川口 健太[1]、早坂 康隆[2] (1. 広島大学、2. 天草市立御所浦恐竜の島博物館)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-10] 沈み込む有機炭素挙動の解明：四国中央部三波川帯の泥質片岩中炭質物約200試料の顕微ラマン分光分析と炭素同位体地球化学

*原田 浩伸[1]、辻森 樹[1]、石田 章純[1]、掛川 武[1]、板谷 徹丸[2] (1. 東北大、2. 地球年代学ネットワーク)

12:30 ~ 14:00

[R8-P-11] イタリア・アペニン山脈のオフィカーボネイトの流体包有物

金子 広幸[1]、*川本 竜彦[1]、メネギーニ フランチェスカ[2]、大澤 陽介[1] (1. 静岡大学理学部地球科学科、2. ピサ大学地球科学教室)

Mineralogical characterization of serpentinite varieties in Sangun-Renge Belt exposed at Sasaguri, Fukuoka Prefecture, and their geological implications

*Swarnaa ANNADURAI MUNUSAMY[1], Jun-ichi ANDO[1,2], Yuki IWASAKI[3], Kaushik DAS[1,2], Dyuti Prakash SARKAR[4], Seiichiro UEHARA[5]

1. Hiroshima Univ., 2. HiPeR, Hiroshima, 3. NIPPON STEEL CORP., 4. JAMSTEC, 5. The Kyushu Univ. Museum

Serpentinite (serp) of Sangun-Renge Belt are widely exposed around the Narubuchi dam in Sasaguri area, Fukuoka Prefecture. The purpose of this study is to investigate the mineralogical characteristics of different types of serp in this region in order to understand the tectonic and metamorphic history of the Sangun-Renge Belt serp. Optical microscopy reveals the petrographic characteristics, EPMA is used to measure the composition of Cr-spinel, and Raman spectroscopy is utilized to distinguish serpentine polymorphs. The serp in the Sasaguri area primarily consists of serpentine group minerals, with minor amounts of magnetite, calcite, chlorite, talc, and Cr-spinel. Three types are identified on the basis of their dominant serpentine polymorph. Type 1: Lizardite serp, showing the hourglass textures with chrysotile veins. Type 2: Lizardite-Chrysotile serp, dominated by a mesh texture where the core and rim minerals are lizardite and chrysotile, and lizardite, respectively. And the antigorite (atg) veins are observed. Type 3: Atg serp, exposed to the north and south of the study area. Their microstructures are different. The serp in the north is composed of atg a few mm in grain size, showing undulose extinction and dynamic recrystallization, but no CPO. The serp in the south is composed of atg less than 200 μm in size, with atg veins. At the north, the mylonitized zones can be identified where the atg grain size is less than 100 μm, with (001) and [010] oriented parallel to foliation and lineation, respectively. The chemical composition of the Cr-spinel in the north serp indicates a forearc peridotite origin. The ferritchromite rim in the Cr-spinel suggests that the peridotite is re-equilibrated at greenschist to amphibolite temperatures (400-700˚C). A magnetite overgrowth around the ferritchromite rim indicates the serpentinization after ferritchromitization, which occurs at 250-400˚C. Based on the above results, the geological implications of the identified serpentine polymorphs and associated mineral assemblages for understanding the tectonic and metamorphic history of the Sangun-Renge Belt serp will be discussed in our presentation.

Keywords: Serpentinization, Antigorite, Serpentine polymorphs, Cr-spinel

愛知県新城市南部に分布する三波川帯の変成温度構造

Metamorphic temperature structure of Sanbagawa Metamorphic Belt in the southern part of Shinshiro City, Aichi Prefecture, Japan

*松崎 茜[1]、纐纈 佑衣[1]、道林 克禎[1]
*Akane Matsuzaki[1], Yui Kouketsu[1], Katsuyoshi Michibayashi[1]

1. 名古屋大・院環境
1. Nagoya Univ. Env.

三波川帯は中央構造線に隣接した外帯側に関東から九州まで続く低温高圧型の変成帯である．愛知県新城市南部には三波川結晶片岩と断続的に分布する御荷鉾緑色岩が分布し，三波川結晶片岩の変成度は東野 (1975)[1]の分類によると最も低変成度の緑泥石帯である[2]．関ほか(1959)[3]は，豊橋東方の三波川変成岩の変成分布を4帯に分類した．本研究地域の中央構造線沿いの泥質片岩の大部分は第2帯に，第2帯よりも南側の緑色片岩や泥質片岩は第1帯に区分される[3]．その後の研究で，磯貝 (1977)[4]はさらに中部地方三波川帯を7帯に分類している．本研究地域の大部分はD帯に区分される[4]．中央構造線沿いの西側の地域はE帯に，東側の地域はF帯・G帯に区分される[4]．本研究は愛知県新城市南部に分布する三波川変成帯の地質構造と変成温度の関係を明らかにすることを目的とした．3回の調査で24個の試料を採取し，薄片を作成後，偏光顕微鏡で微細構造の観察を行った．泥質片岩の主要構成鉱物は石英，白雲母，曹長石，炭質物であった．16個の泥質片岩試料に対しては，炭質物のラマンスペクトルから最高被熱温度を算出する炭質物ラマン温度計[5–8]を用いた．Kouketsu et al. (2014)[7] のD1バンドの半値全幅 (FWHM-D1) を用いる方法で変成温度を算出した．また，走査型電子顕微鏡の後方散乱電子回折(SEM-EBSD)によって泥質片岩中の石英脈，珪長質脈の組織を解析した．結果として，炭質物ラマン温度計で算出された温度は約300–400℃の範囲であった．全体として中央構造線から離れるにつれて次第に温度が下がる温度構造を示した．新城市の緑色片岩の分布地域より北側に分布する泥質片岩は350–400℃程度と比較的高い温度を示すのに対し，南側に分布する泥質片岩は300–330℃程度と北側に比べ低温を示した．SEM-EBSDの結果では，石英粒子が温度によらず強く変形した組織を示すのに対して，共存する曹長石粒子は楕円状で高温の泥質片岩ほど粗粒になる傾向を示した．本研究では，変成温度300–400℃の温度構造をもつ泥質片岩の形成過程について，他の地域の三波川帯の温度構造と比較しながら，SEM-EBSDによる組織解析を合わせて本調査範囲における地質構造を考察した．

引用文献
[1]東野　外志男 (1975) 地質学雑誌, **81**, 653–670.
[2]牧本　博　ほか (2004) 20万分の1地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」産業技術総合研究所, 地質調査総合センター
[3]関　陽太郎　ほか (1959) 地質学雑誌, **65**, 618–623.
[4]磯貝　勝則 (1977) 広島大学出版研究会, 広島, 237–245.
[5]Beyssac, O. et al. (2002) *Journal of Metamorphic Geology*, **20**, 859–871.
[6]Aoya, M. et al. (2010) *Journal of Metamorphic Geology*, **28**, 895–914.
[7]Kouketsu, Y. et al. (2014) *Island Arc*, **23**, 33–50.
[8]Kaneki, S., Kouketsu, Y. (2022) *Island Arc*, **31**, e12467.

キーワード：石英、炭質物ラマン温度計、三波川変成帯
Keywords: Quartz, Raman carbonaceous material geothermometer, Sanbagawa Metamorphic Belt

鳥取県大山に産する片麻状花崗岩ゼノリスの起源とパイロ変成作用

Origin and pyrometamorphism of gneissose granitoid xenoliths from Mt. Daisen, Tottori Prefecture, SW Japan

*高橋 瑞季[1]、遠藤 俊祐[1]
*Mizuki TAKAHASHI[1], Shunsuke Endo[1]

1. 島根大学
1. Shimane University

鳥取県西部に位置する大山は第四紀火山であり，主にデイサイトから構成される．大山の基盤岩として，大山西麓地域では片麻状花崗岩や片麻岩類が産すことに加え，これらのジルコンU-Pb年代から古期飛騨花崗岩（260 - 230 Ma）および新規飛騨花崗岩（190 Ma）の分布が強く支持されている（Tsutsumi et al., 2017; Kawaguchi et al., 2023）．一方，大山周辺を含む山陰地域の基盤岩としては，白亜紀末から古第三紀にかけて活動していた山陰バソリスの花崗岩類が広く分布している．

大山北壁の直下に位置する元谷は，大山新期噴出物のデイサイト河床礫中にゼノリスとして塊状花崗岩類，片麻状花崗岩類，苦鉄質岩を産する．これらゼノリスは三浦（1989）により初めてその存在が報告され，輝石を含むことや飛騨帯構成岩類との関連性が述べられているが，詳しい研究は行われていない．

花崗岩類のゼノリスはいずれも少量の融食形を示す石英を含み，アルカリ長石をほとんど含まない石英閃緑岩質からトーナル岩質の鉱物組成をもつ．また，角閃石が存在せず，輝石集合体（直方輝石＋オージャイト）が形成されている．片麻状構造はこの輝石集合体の定向配列による．以上の特徴に加えて，パッチ状に微晶質領域が存在することは，ゼノリスが顕著なパイロ変成作用とそれに伴う脱水融解を受けたことを示している．黒雲母は普遍的に含まれるが，いずれもフッ素含有量が高く（F＝5 wt%程度），そのため高温のパイロ変成作用時に安定化したと解釈される．微晶質領域は針状のトリディマイト＋オリゴクレース～アノーソクレース＋サニディンからなり，メルトの急冷組織と解釈される．これらの化学組成から，メルト組成はアルカリ花崗岩質であったことを示す．また，輝石集合体周辺の斜長石組成のみ，特異的にCaに富む．輝石および長石の化学組成とトリディマイトの存在から，パイロ変成作用の条件はサニディナイト相（900℃程度）と推定される．注目すべき組織として，チェフキン石と直方輝石と斜長石からなる非常に微細なシンプレクタイトが形成されており，花崗岩類の希土類に富む副成分鉱物（おそらく褐簾石）がパイロ変成作用時に分解したものと考えられる．

片麻状花崗岩類のゼノリス中の副成分鉱物として新鮮なトール石がみられた．1粒子18点でEPMAによる年代測定をおこなった結果，74 - 42 Maと見かけ年代が大きくばらつき，まとまりのある古いグループ（n = 11）で加重平均をとった場合，69.0 ±1.9 Ma（MSWD =7.1）と白亜紀末を示した．

これら花崗岩類のゼノリスにみられる鉱物学的特徴は，Patino Douce (1997)による角閃石を含むカルクアルカリ花崗岩類の低圧脱水融解実験の結果（直方輝石，Caに富む斜長石およびAタイプ花崗岩質メルトの生成）と共通しており，本研究はパイロ変成作用によるカルクアルカリ花崗岩類の低圧脱水融解実験の自然例といえる．また，片麻状花崗岩類のゼノリスの起源については2通りの解釈ができる．1つは，白亜紀末の見かけ年代から山陰花崗岩類の深部相を起源とする解釈，もう1つは飛騨花崗岩起源であるがトール石の年代は山陰花崗岩類による熱的影響で若返ったという解釈である．どちらの解釈により妥当性があるかは，データを増やしたうえで議論する予定である．

文献：Kawaguchi et al. (2023) Gondwana Res. 117, 56-85; 三浦 (1989) 島根大学教育学部紀要. 自然科学 23 (1), 25-34; Patino Douce (1997) Geology 25, 8, 743-746; Tsutsumi et al. (2017) J. Asian Earth Sci. 145, 530-541

キーワード：大山、ゼノリス、パイロ変成作用
Keywords: Mt. Daisen, xenolith, pyrometamorphism

東ネパール・ヒマラヤの泥質変成岩中に産するモナズ石の記載とモナズ石のTh-Pb年代測定法の開発

Petrography of monazite in a metapelite in the eastern Nepal Himalaya and Development of Th-Pb dating method for monazite

*工藤 駿平[1]、河上 哲生[1]、仁木 創太[2]、中嶋 徹[3]、平田 岳史[4]、今山 武志[5]
*Shumpei KUDO[1], Tetsuo Kawakami[1], Sota Niki[2], Toru Nakajima[3], Takafumi Hirata[4], Takeshi Imayama[5]

1. 京大・院理、2. 名大・宇宙地球環境研究所、3. 日本原子力研究開発機構、4. 東大・院理、5. 岡山理大・フロンティア理工学研究所
1. Kyoto Univ. Sci., 2. Nagoya Univ. ISEE., 3. JAEA, 4. UTokyo. Sci., 5. Okayama Univ. of Sci.

ヒマラヤ造山帯には、かつて衝突帯中～下部地殻を構成していた高度変成岩類Higher Himalayan Crystallines (HHC)が広範囲にわたって露出している。HHCが地表に露出するに至るテクトニクスについては、現在も議論が続いているが、その制約には岩石の鉱物共生関係の変化を吟味した上で、それに対応する年代軸を与えることで得られる温度-圧力-時間履歴(*P-T-t*履歴)の構築を行うことが重要である。しかし、HHCの変成度は高度変成岩類の中では低い部類のため、年代軸の決定に有利なジルコンの変成リムの発達は十分でなく粒径も<100 μm程度と小さく、従来手法の分析径(数十μm)では変成時に成長した小領域の年代を測定することが困難で、報告例も少ない[e.g. 1]。一方、HHC中のモナズ石は粗粒(>100 μm)なものが多く、年代情報を抽出する上で有益なツールである[e.g. 2]。

先行研究では、中央ネパールのHHCに産する泥質片麻岩から分離されたザクロ石に包有されるモナズ石のTh-Pb年代が決定されており、古生代初期から新生代までの年代値が報告されている[3]。さらには、[4]は東ネパールのザクロ石のin-situ Lu-Hf年代測定の結果、ザクロ石のコアから古生代の年代、リムから新生代の年代を報告した。このことは、ヒマラヤ地域に露出する変成岩類が、古生代の変成岩類がさらに新生代に変成されるという、複変成作用を被った可能性を示唆する。従って、*P-T*履歴を構築するのに用いるザクロ石のような重要な変成鉱物の成長年代を意識しながら変成岩類の*P-T-t*履歴を復元することが、衝突帯テクトニクスを議論する上では必要不可欠である。

そこで本研究では、東ネパールのHHCに産する泥質片麻岩中のモナズ石の産状記載を行うとともに、Th-Pb同位体比分析法の立ち上げに向けて、多重検出方式のレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)を用いた実験を行った。

本研究で用いた泥質片麻岩は、[4]と同地域の東ネパールのHHCから採取したザクロ石-黒雲母-珪線石片麻岩である。本試料の主要鉱物組み合わせはザクロ石、藍晶石、珪線石、黒雲母、斜長石、カリ長石、石英である。モナズ石はザクロ石や黒雲母、珪線石、石英に包有されており、一般的な傾向として、ザクロ石に包有されるモナズ石の粒径は<100 μm以下であるのに対して、マトリクスに産するモナズ石の粒径は>100 μmである。モナズ石はBSE像で認識できるコアとリムをもち、いくつかの粒子ではコア中にBSE像が暗い領域が観察される。

本研究で立ち上げを進めているモナズ石の^{232}Th-^{208}Pb年代測定法はU-Pb年代測定法に比して利点を有する。それは、モナズ石は3-9 wt%のThO_2を含有するため、たとえモナズ石が閉鎖系を達成してから数百万年しか経過していなくても、測定可能な十分量の^{208}Pbが生成され、正確な年代測定が可能であるという点である(e.g. [3])。一方、U-Pb年代測定法では数百万年では^{206}Pb、^{207}Pbの生成量が少ないため従来手法では誤差が大きくなってしまう。このことは、若い造山帯であるヒマラヤにおいてもモナズ石の^{232}Th-^{208}Pb年代測定法が有用であることを意味する。本研究では、プライマリースタンダードとしてDelaware 44069[5]を使用し、Namaqualandのモナズ石[6]の^{232}Th-^{208}Pb年代測定を行った。その結果、^{232}Th-^{208}Pb年代は904±24 Ma

(2s, n = 10, MSDW = 39)。また、$^{206}Pb/^{238}U$年代, $^{207}Pb/^{235}U$年代は、それぞれ、922±13 Ma(2s, n = 10, MSDW = 12), 1018±37 Ma(2s, n = 10, MSWD = 3.7)であった。これらを参照値の1033Maと比較すると、それぞれ若い方向へ系統誤差が生じている。系統誤差が生じた原因のひとつとして、LA時に掘削量が大きいために元素分別が生じてしまった可能性が考えられる。今後、確度を向上させることが実用化に向けて必要不可欠である。

発表では、先行研究や実際の試料に産するモナズ石の産状や組織、ICP-MSを用いて得られたモナズ石の^{232}Th-^{208}Pb年代測定法の実験結果を交え、モナズ石の^{232}Th-^{208}Pb年代測定法の本研究試料への適用に向けた議論を行う。

引用文献 [1] Imayama+ (2012) *Lithos*. [2] Rubatto+ (2013) *CMP*. [3] Martin+ (2007) *Chem Geol*. [4] Larson+ (2024) *Geosci Front*. [5] Aleonikoff+ (2006) *Geol Soc Am Bull*. [6] Knoper+ (2001) . *JES*.

キーワード：モナズ石、Th-Pb年代測定法、高ヒマラヤ変成岩
Keywords: Monazite, Th-Pb dating method, Higher Himalayan Crystallines

長野県伊那地域を例とした，三波川帯低変成度域に分布する超苦鉄質岩類の岩石学的記載

Petrological description of ultramafic rocks in the low-grade metamorphic zone of the Sanbagawa belt: A case study of the Ina area, Nagano Prefecture, central Japan

*延原 香穂[1]、森 宏[1]、永冶 方敬[2]
*Kaho Nobuhara[1], Hiroshi Mori[1], Takayoshi Nagaya[2]

1. 信州大、2. 東京学芸大
1. Shinshu Univ. , 2. Tokyo Gakugei Univ.

沈み込み帯起源低温高圧型変成岩の分布地域では，高変成度域に産する超苦鉄質岩類は，沈み込み帯深部の情報を保持する可能性がある．これら超苦鉄質岩類は，海洋プレート側の「沈み込むスラブ」と大陸プレート側の「ウェッジマントル」を起源とする2つの可能性が挙げられる．高圧変成帯の一つである三波川帯では，四国中央部において上記起源に関する詳細な議論がなされている（Hattori et al., 2010; Aoya et al., 2013）．特に，Aoya et al. (2013)は，超苦鉄質岩類の分布と同地域の主要岩相である泥質岩の鉱物組み合わせに基づく変成分帯との空間的関係性を議論し，超苦鉄質岩類の分布が深さ~30－35 kmに相当するざくろ石帯以上の高変成度域にのみ偏在することから，ウェッジマントル起源であると結論付けている．一方，他地域の三波川帯では，より浅部域からの上昇を示唆する緑泥石帯においても超苦鉄質岩類の分布が確認されている．これら低変成度域における岩石学的な検討は，四国中央部との比較検討，ウェッジマントルの分布深度推定，さらには，三波川帯の上部マントル物質の広域的な上昇メカニズムの議論において重要である．そこで本研究では，長野県伊那地域の緑泥石帯に分布する超苦鉄質岩類に着目し，岩石学的記載と鉱物化学組成分析を行った．

研究地域は，中央構造線と糸魚川一静岡構造線の会合部にあたり，これら2つの断層に挟まれて三波川帯が南北方向に狭長に分布している．三波川帯は，断層を境に西の泥質岩，苦鉄質岩，および超苦鉄質岩類を主体とした三波川結晶片岩類と，東の苦鉄質岩類および超苦鉄質岩類を主体とした御荷鉾緑色岩類から構成される（牧本ほか，1996）．本研究では，三波川結晶片岩類分布域において，東西200 m×南北3 kmの規模で泥質岩に挟まれて産する芝平地域の超苦鉄質岩体（以下，芝平超苦鉄質岩体とする）を対象として，隣接する泥質岩との境界部から岩体中央部にかけて計7試料を採取した．

芝平超苦鉄質岩体は，大部分が強い蛇紋岩化作用を受けている．主な鉱物組み合わせは，蛇紋石，磁鉄鉱，およびクロムスピネルであり，一部，カンラン石，単斜輝石，およびブルーサイトを含む．蛇紋石は，主にメッシュ状組織を示すリザダイトとそれらを切るクリソタイル脈から構成され，メッシュリムに沿って細粒な磁鉄鉱が濃集する．クロムスピネルは，蛇紋石やカンラン石の粒間や包有物として認められ，半自形～自形を示す．空間的な特徴としては，泥質岩境界に近いほど蛇紋岩化作用が顕著に認められる一方，岩体中央部では，カンラン石を含むものやメッシュ組織内部にのみブルーサイトを残すものが認められる．また，岩体中央部のカンラン石を含む試料のクロムスピネルのMg# [= $Mg/(Mg + Fe^{2+})$]は0.40～0.42，Cr# [= $Cr/(Cr + Al + Fe^{3+})$]は0.51～0.53，Y_{Fe} [= $Fe^{3+}/(Cr + Al + Fe^{3+})$]は0.14～0.16，$TiO_2$の含有量は1.7～1.9 %である．

上記クロムスピネルの組成データは，大局的には前弧かんらん岩の組成（e.g., Ishii et al., 1992）と類似する．一方で，四国中央部三波川帯の超苦鉄質岩体と比較すると，Cr#は低い値を示す．また，四国中央部の蛇紋石が主にアンチゴライトから構成されていることも相違点として挙げられ（e.g., Kawahara et al., 2016），本研究地域を含め三波川帯低変成度域に産する超苦鉄質岩体の起源推定には更なる検討が必要である．

【引用文献】Aoya et al., 2013, Geology, 41, 451–454; Hattori et al., 2010, Island Arc, 19, 192–207;

Ishii et al., 1992, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 125, 445–485; Kawahara et al., 2016, 254–255, 53–66; 牧本ほか, 1996, 地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）.

キーワード：三波川帯、超苦鉄質岩類、緑泥石帯、伊那地域
Keywords: Sanbagawa (Sambagawa) belt, ultramafic rock, chlorite zone, Ina area

紀伊半島中央部，三波川帯–秩父帯境界域の砕屑性ジルコンU–Pb年代測定と炭質物ラマン分光分析

Detrital zircon U–Pb dating and Raman spectral analysis of carbonaceous material in the boundary area of the Sanbagawa–Chichibu belts, central Kii Peninsula

*森 宏[1]、碓井 虎次郎[1,2]、常盤 哲也[1]、小澤 和浩[3]
*Hiroshi MORI[1], Kojiro USUI[1,2], Tetsuya Tokiwa[1], Kazuhiro Ozawa[3]

1. 信州大学、2. 日本工営株式会社、3. 精密林業計測株式会社
1. Shinshu University, 2. Nippon Koei Co., Ltd., 3. Precision Forestry Measurement Ltd.

三波川帯の白亜紀高圧変成岩類と秩父帯のジュラ紀付加体構成岩類は，関東山地から四国地方にかけて並走配列しており，アジア縁辺における中生代の沈み込み帯発達過程の究明に欠かせない存在である．通常，両地質体の間には，御荷鉾緑色岩類が分布しており，三波川帯ー秩父帯境界を規定する鍵相となっている．ただし，紀伊半島中央部においては，御荷鉾緑色岩類が欠落する．また，この欠落部の三波川帯ー秩父帯境界域における主要岩相は，両地質体ともに低変成度の泥質岩であり，岩相観察に基づく帰属識別が困難となっている（青矢，2010）．この問題は，正確な地質構造境界の追跡に直結するとともに，両地質体の構造関係（上下関係）や紀伊半島西部～四国地方と紀伊半島東部～関東山地の広域的な側方連続性を明らかにする上でも重要である．

そこで本研究では，紀伊半島中央部・三重県滝原地域に露出し，三波川帯ー秩父帯の地質構造境界とされている滝原スラスト（TK-T；Kimura, 1954）の周辺域を対象として，1) TK-Tの両側から採取した砂質岩中の砕屑性ジルコンU–Pb年代測定より，TK-Tが三波川帯ー秩父帯境界であることを検証するとともに，2) TK-Tを横断して連続的に採取した砕屑岩（主に泥質岩）試料に含まれる炭質物のラマン分光分析より，各種スペクトル特性を用いた帰属識別が可能か否かを検討した．

U–Pb年代測定では，TK-Tの北側と南側から採取した砂質岩1試料ずつを使用した．TK-Tの北側から得られた砕屑性ジルコンU–Pb年代（以下，ジルコン年代）は，白亜紀～ペルム紀の粒子が46.5%で，先カンブリア紀の粒子が52.8%を占める．また，最も若いジルコン年代が116.8±3.8 (2σ) Maであり，最も若いクラスター年代が118.0±2.6 (2σ) Maを示す．一方，TK-Tの南側のジルコン年代は，ジュラ紀～ペルム紀の粒子が54.4%で，先カンブリア紀の粒子が45.6%を占める．また，最も若いジルコン年代が156.0±5.1 (2σ) Maであり，最も若いクラスター年代が157.5±4.4 (2σ) Maを示す．これら年代構成と最若（クラスター）年代の特徴を，他地域の三波川帯および秩父帯と比較すると，TK-Tの北側は三波川帯，南側は秩父帯と類似しており，TK-Tが三波川帯ー秩父帯境界であることを支持する．

炭質物のラマン分光分析では，TK–Tを横断して採取した砕屑岩計9試料（TK-Tの北側6試料，南側3試料）を使用した．分析により得られたラマンスペクトルは，ピーク分離を行った上で，400 ºC未満の低変成度域の変成温度見積もりに用いられている*D1*・*D2*バンド半値幅を用いた温度換算値（T_{D1}とT_{D2}；Kaneki & Kouketsu, 2022），および，他地域において三波川帯ー秩父帯間で差異が認められている*D4/D1*バンド強度比（$D4/D1_{int}$；Hara et al., 2022）を指標として，TK-Tを横断した空間変化を検討した．TK-Tの北側（三波川帯）では，T_{D1} = ~270–290 ºC，T_{D2} = ~250–310 ºC　，$D4/D1_{int}$ = ~0.23–0.29を示す．一方，TK-Tの南側（秩父帯）では，T_{D1} = ~260–270 ºC，T_{D2} = ~270–310 ºC，$D4/D1_{int}$ = ~0.33–0.37を示し，$D4/D1_{int}$に関して，TK-Tを境に明瞭な差異が認識された．このことは，$D4/D1_{int}$が，低変成度の三波川帯ー秩父帯境界域における有用な帰属識別の指標になり得ることを示す．

【引用文献】青矢, 2010, 地質調査報告，61，195–202；Hara et al., 2021, 11, 854；Kaneki & Kouketsu, 2022, Island Arc, 31, e12467；Kimura, 1954, Journal of Earth Sciences, Nagoya University, 7, 243–272.

キーワード：三波川帯、秩父帯、砕屑性ジルコンU–Pb年代測定、ラマン分光分析、炭質物
Keywords: Sanbagawa Belt, Chichibu Belt, detrital zircon U–Pb dating, Raman spectral analysis, carbonaceous material

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

北海道神居古潭変成帯・幌加内地域の角閃岩におけるwakefieldite-(Y)の発見とその意義

New finding of wakefieldite from an amphibolite in the Horokanai area, Kamuikotan HP metamorphic belt, Hokkaido, Japan

*加藤 太朗[1]、苗村 康輔[1]、竹下 徹[2]
*Taro Kato[1], Kosuke NAEMURA[1], Toru Takeshita[2]

1. 岩手大学、2. パシフィックコンサルタンツ株式会社
1. Iwate University, 2. Pacific Consultants Co., Ltd.

高圧変成岩研究の主要テーマの一つは、温度圧力（時間）履歴の導出である。これまで多くの変成帯において重複変成作用が報告されてきた。沈み込み帯を代表する岩石である青色片岩では、同一の岩石が沈み込み初期の低*P/T*勾配(>15℃/km)で安定な角閃岩の鉱物組み合わせと高*P/T*勾配(≃10℃/km)で安定な青色片岩の鉱物組み合わせを記録することが世界中から報告されてきた（Willner *et al.*, 2005; Takeshita *et al.*, 2023）。これは海嶺の沈み込みなどにより高温状態となった沈み込み帯がその後数千万年かけて冷却したためと解釈されてきた。それでは、沈み込み帯深部で形成された角閃岩はプレートが冷却するまでの間一体どこに留まっていたのだろうか？第一の可能性は、プレート運動から切り離された角閃岩がマントルウェッジに底付けし、数千万年のちに冷たくなったプレートと共に浮上したとする説である（Angiboust *et al.*, 2016）。別の可能性は、初期の沈み込み運動で形成された角閃岩が、いったん地殻浅部に浮上し、数千万年のちに再び沈み込んだとする説である。多くの研究者は前者を支持しており、岩石が等圧冷却（反時計回り）経路を記録したことを示唆している。この定説に対して、本研究はWakefiedlite-(Y)という鉱物の産状に基づいて、後者の可能性もありえるということを主張したい。神居古潭変成帯は日本を代表する青色片岩の産地であり、そこには沈み込みプレートに由来する高圧変成岩が見られる。とりわけ神居古潭変成岩の幌加内地域では累進的なカルシウムアルミノケイ酸塩鉱物の変化が見られる：ローソン石が卓越する構造的下位のⅠ帯から、上位に向かって緑簾石が出現し（Ⅱ帯）、幌加内オフィオライトとの境界近傍でローソン石が消滅する（Ⅲ帯）。（Shibakusa, 1989）。III帯相当の幌加内峠には青色変成岩よりも形成年代が古い角閃岩が見られ、異地性岩体（テクトニックブロック）と解釈されてきた（Imaizumi and Ueda, 1981）。この異地性岩体では沈み込み初期の角閃岩鉱物組み合わせが部分的に青色片岩の鉱物組み合わせに置換されている。本研究で研究した角閃岩は竹下の分類によれば“Epidote amphibolite”に分類される。岩石は弱い片理をもち、片理を構成する鉱物組み合わせはホルンブレンド（一部アクチノ閃石）、緑簾石、斜長石、ルチル、白雲母、±緑泥石である。これらの鉱物はリムやプルアパートで青色片岩の鉱物組み合わせへと変化し、その鉱物組み合わせは藍閃石、パンペリ石、緑簾石、斜長石、チタン石、白雲母、緑泥石である。片理を構成する白雲母はSi=3.3-3.5 apfu（O=11）なのに対して、緑簾石や角閃石のプルアパートを埋める白雲母はSi=3.5-3.8 apfuとフェンジャイト成分に富み低温高圧下で形成されたことを示唆する。今回発見した4粒子のyttrium vanadateは、緑簾石やホルンブレンドのプルアパートや分解組織中に見られた。YとVの比は0.7:1.0であり、Yにクロム、希土類、カルシウムなどが置換したwakefieldite-(Y)と考えられる。プルアパートはフェンジャイト成分に富む白雲母で充填されている。このことは、wakefiedlite-(Y)が青色片岩の変成作用時かそれ以前の変質作用により形成されたことを示唆する。　Wakefiedlite-(Y)はこれまでアルプスの高圧変成岩から報告されてきたが、それらは上昇過程に伴う超高酸化状態で形成されたとされてきた（Tumiati et al., 2015）。もし同様に浅所での高酸化条件で形成されたと見なせば、神居古潭変成帯に見られる角閃岩のテクトニックブロックは、深部に留まって等圧冷却したのではなく、角閃岩相における変成作用を被ったあと、1度浅所に浮上した可能性がある。Wakefiedliteは数%のウランを含むことがあるため、今後、この鉱物の産状を記載し、年代測定をすることで角閃岩が1度地殻深度に浮上し変質作用を受けた年代を決定することができる可能性がある。

キーワード：神居古潭変成帯、イットリウムバナジン酸塩、ウェイクフィールダイト-(Y)、温度圧力時間経路
Keywords: Kamuikotan metamorphic belt, yttrium vanadate, wakefieldite-(Y), P-T-t path

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

栃木県西部足尾山地に産する珪線石ークリソベリル含有片麻岩の熱履歴と原岩砕屑物供給源

Thermal history and protolithic detritus provenance of a sillimanite–chrysoberyl-bearing gneiss from the Ashio mountains in the western part of Tochigi prefecture

*北野 一平[1]
*Ippei KITANO[1]

1. 北大・総合博
1. Hokkaido Univ. Mus.

栃木県西部の足尾山地では足尾帯のジュラ紀付加体が広く分布し，白亜紀～古第三紀花崗岩類の貫入による熱変成を受けて，局所的にホルンフェルス化している（河田・大澤，1955など）．最近，線構造と面構造を有する珪線石含有片麻岩が見出され，その産状，岩石学的特徴，温度圧力条件から，領家帯泥質変成岩と類似した原岩および複数回の熱イベントを経験した可能性が示唆されている（北野，2023a）．一方で，この片麻岩は，半自形～他形のクリソベリル，Fに富む黒雲母，白雲母，およびアパタイト，Nbを含有するルチルなど特異な鉱物を含む特徴があり（北野，2023b），領家帯変成岩類にはこのような特徴は認められない．そのため，足尾山地の片麻岩が領家帯東方延長の一部である可能性については，検討の余地が残されている．本発表では，珪線石含有片麻岩に貫入する紅柱石含有花崗岩の温度条件を含めた熱履歴と，片麻岩中の特異な鉱物に着目した原岩形成時の砕屑物供給源を考察した．調査地域では，ジュラ紀付加体の層状チャートが分布し古第三紀初期の黒雲母花崗岩に貫入され，タングステン鉱床を胚胎している（Ishihara and Sasaki, 1995）．珪線石含有片麻岩は紅柱石含有花崗岩の付近に産し，主にカリ長石，石英，定向配列する黒雲母，白雲母およびフィブロライト，ランダムに配向する紅柱石からなる．最高変成条件は約>4.5 kbar，580–600 ℃で，後退変成条件は約3.7–4.2 kbar，540–560 ℃と見積もられている（北野，2023a）．片麻岩中のクリソベリルは産状，組織，化学的特徴から，分化した花崗岩質岩を起源とし，原岩形成時に砕屑物として供給された可能性が示唆されている（北野，2023b）．片麻岩に貫入する紅柱石含有花崗岩は塊状で，半自形～自形の紅柱石，斜長石，カリ長石の斑晶と黒雲母，白雲母，少量のイルメナイト，黄鉄鉱，モナズ石，ジルコン，アパタイト，トパーズを含む．黒雲母と白雲母は，鉄とフッ素に富む化学組成をしめす．地質温度圧力計の計算結果と紅柱石安定領域を考慮すると，花崗岩の貫入温度圧力条件は，<4 kbar, 560–600 ˚Cと推定された．この結果は，一般的な花崗岩質マグマのウェットソリダスよりも低温であるが，Li-B-Fに富む花崗岩質マグマのそれ（Pichavant et al., 1981）と調和的である．したがって，片麻岩は最高変成条件到達後に減圧して，上述の条件で花崗岩に貫入されて二次的な紅柱石が形成された熱履歴を有することが推察される．片麻岩の原岩は，周囲の足尾帯ジュラ紀付加体の一部と考えられている．Kojima et al. (2008)によると，足尾帯は美濃ー丹波帯とともに，極東ロシアに位置するジュラ紀付加体に対比され，日本海形成以前は最も極東ロシア側に位置していた．極東ロシアのジュラ紀付加体と断層を介して隣接する，先カンブリア紀の地質体であるKhanka terraneは，オルドビス紀～シルル紀の花崗岩活動に伴うBe-Nb-Ta-F鉱床を胚胎する．この鉱床には，クリソベリルなどのBe鉱物をはじめ，トパーズや蛍石などのF鉱物，アメサイトやセラアイトのMgに富む鉱物，ルチル，アパタイトなどを含む鉱石が産する．そのため，片麻岩中に含まれるクリソベリル，Fに富むアパタイト，Nb含有ルチルは，原岩堆積時に砕屑物としてこの鉱床から供給された可能性が想定される．また，上記のMgまたはFに富む鉱物は，片麻岩の高F含有量でややMgに富む黒雲母および白雲母の形成に寄与したと考えられる．つまり，足尾山地産の片麻岩の原岩は，足尾帯の一部として堆積したが，古地理学的に比較的近接していたKhanka terraneのBe-Nb-Ta-F鉱床からクリソベリルなどの特異な鉱物の砕屑物を局所的に供給されたために，他の足尾帯・美濃ー丹波帯および領家帯にない特徴をもったと想定される．そして，白亜紀～古第三紀

初期にかけて珪線石および紅柱石安定領域のそれぞれ異なる深度で熱変成を受けたと考えられる．領家帯との地質学的な関連性を明らかにするためには，詳細な年代学的解析が必要である．

キーワード：珪線石ークリソベリル含有片麻岩、紅柱石含有花崗岩、熱履歴、砕屑物供給源、足尾山地
Keywords: sillimanite–chrysoberyl-bearing gneiss, andalusite-bearing granite, thermal history, detritus provenance, Ashio mountains

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

舞鶴帯北帯に産する変成岩の岩石学的特徴と地質年代学

Petrological characterlization and geochronology of metamorphic rocks from the Northern Subzone of the Maizuru Terrane

*室井 颯太[1]、Das Kaushik[1]、川口 健太[1]、早坂 康隆[2]
*Sota Muroi[1], Kaushik Das[1], Kenta Kawaguchi[1], Yasutaka Hayasaka[2]

1. 広島大学、2. 天草市立御所浦恐竜の島博物館
1. Hiroshima University, 2. Amakusa Museum of Goshoura Dinosaur Island

西南日本内帯に分布する舞鶴帯は、岩相によって北帯、中帯、南帯に区分される(加納ほか1959)。南帯は夜久野オフィオライトとそれに貫入するペルム紀前期の海洋内島弧起源の火成岩類で構成され、中帯は背弧海盆地殻とその上に堆積したペルム系舞鶴層群からなる。南帯と中帯は島弧-海溝系の様相を呈する一方、北帯は花崗岩類を主体とし、角閃岩や泥質片岩を中心とした変成岩類も産する(池田・早坂 1994; Fujii et al., 2008)。したがって、北帯は大陸地殻の様相を呈し、その岩相は東アジアの大陸地塊群と類似していることから、東アジアとの対比において極めて重要な意味を持つ。しかし北帯は、中帯、南帯と比べ地質学的・岩石学的研究が不十分であり、正確な岩相の把握と変成岩の精密な岩石学的解析はなされていない。変成岩の精密岩石学的・年代学的解析は、時間軸を含めた変成プロセスの解析を可能とし、同様の変成プロセスを持つ東アジア大陸地塊群との比較検討を行うことで、舞鶴帯北帯の起源を決定し、現在までの定置過程におけるプレート運動像の推定を行うことができる。これらを踏まえ、本研究では舞鶴帯北帯における変成プロセスを解明するため、舞鶴帯北帯構成岩類がまとまって露出する河守ー桑飼地域において地表踏査を行い、採取した角閃岩、泥質片岩について、全岩と鉱物化学組成の測定を行った。それらのデータからザクロ石ー黒雲母地質温度計、斜長石ーホルンブレンド地質温度圧力計による温度圧力推定、モナザイトTh–U–Total Pb 化学年代測定を試みた。

角閃岩からは斜長石ーホルンブレンド地質温度圧力計により1.8–4.3 kbar, 460–670℃の温度圧力条件が得られた。また、泥質片岩のザクロ石ー黒雲母地質温度計は角閃岩とほぼ同じ475–694℃を示した。泥質片岩のモナザイトTh–U–Total Pb化学年代は約466 Maの集中する結果が得られた。得られた温度結果を精査すると、角閃岩は629℃と480℃、泥質片岩は600 ℃と515 ℃のバイモーダルな温度ピークを示した。両岩相のおける高温側のピークは、角閃岩においては斜長石とホルンブレンドのコア部、泥質片岩においてはザクロ石と黒雲母のコア部の組成に対応する一方、低温側のピークは、これらの鉱物のリム部に対応し、これは約600–629℃の変成温度を経たのち、約475–515℃まで冷却されたことを示す。これらの変成岩類は、圧力に沿って深さ約15–20 kmで変成作用を受けたことが推定される。角閃岩と泥質片岩は共通して脆性変形を受けておりホルンブレンドの割れ目を緑泥石が充填している。これらの結果をまとめると、河守ー桑飼地域の変成岩は約466Maに深さ約15–20 kmで高温低圧型の角閃岩相の変成作用を受け、その後の上昇過程で脆性変形を受け、緑泥石化が進行したことが伺える。本発表では、モナザイトTh–U–Total Pb化学年代の測定数を増やし、緑泥石化の年代、シュードセクション法の結果も加え、議論を行う予定である。

キーワード：舞鶴帯、北帯、河守ー桑飼変成岩、P-T経路推定、モナザイトTh–U–Total Pb化学年代
Keywords: Maizuru Terrane, Northern Subzone, Komori-Kuwagai metamorphic rocks, P-T estimates, CHIME age of monazite

沈み込む有機炭素挙動の解明：四国中央部三波川帯の泥質片岩中炭質物約200試料の顕微ラマン分光分析と炭素同位体地球化学

The fate of organic carbon during subduction: Raman micro-spectroscopy and C-isotope geochemistry of carbonaceous materials in Sambagawa pelitic schists, central Shikoku, Japan

*原田 浩伸[1]、辻森 樹[1]、石田 章純[1]、掛川 武[1]、板谷 徹丸[2]
*Hironobu Harada[1], Tatsuki Tsujimori[1], Akizumi Ishida[1], Takeshi Kakegawa[1], Tetsumaru Itaya[2]

1. 東北大、2. 地球年代学ネットワーク
1. Tohoku Univ., 2. jGnet

変成堆積岩は炭酸塩鉱物及び炭質物として炭素を含み、沈み込むスラブにおいて最も多量の炭素を固体地球内部へ輸送する役割を担っている。炭酸塩鉱物については水流体への溶解や脱炭酸反応、溶融により岩石から失われる。過去20年間に高圧/超高圧変成岩試料の解析、相平衡モデリング、実験岩石学的研究などにより諸プロセスの理解が飛躍的に進んだ。一方、有機炭素由来の炭質物の役割については理解が遅れており、最近になって、"不動"とされてきた炭質物の挙動が単純ではないことが指摘されはじめた（例、Galvez et al., 2013; Vitale Brovarone et al., 2020）。我々は沈み込みに伴う有機炭素の挙動の解明を目指して、四国中央部三波川帯泥質片岩中の炭質物約200試料について、炭質物が記録する変成帯鉛直断面に沿った地質記録の解析を進めている。本講演では、Itaya (1981) においてXRD測定と化学組成の分析が行われた炭質物（泥質片岩から分離されたもの）について、変成温度変化に対する炭素同位体組成（$\delta^{13}C$）の変化傾向を紹介し、沈み込む有機炭素量の推定に向けた展望を論じたい。

得られた炭素同位体組成の変化幅は$\delta^{13}C$ = −28.7 to −20.1‰で、有機物由来のものとして整合的な同位体組成であった。炭質物から推定される変成温度については、緑泥石帯は大部分がおよそ300–350˚Cの範囲内であったが、ざくろ石帯との境界付近において急激に温度上昇し、Kouketsu et al. (2021) で報告された温度構造不連続が四国中央部三波川帯の広範囲で確認された（原田ほか, 2024 地質学会）。汗見川–猿田川ルート北部及び中の川ルートにおける大歩危ユニットや五良津岩体南部に位置する「中七番ユニット」[=大歩危ユニット]（青矢・横山, 2009）は他地域の緑泥石帯と同程度の炭質物温度であり、炭素同位体組成についても差異は見られない。南部の思地-長沢地域において、秩父北帯相当の弱変成付加体構成岩石を原岩にもつ「思地ユニット」（青矢・横山, 2009; 脇田ほか, 2007）及び三波川南縁帯（小島ほか, 1956）に相当する「川又ユニット」では、白滝及び大歩危ユニットに比べて低い温度を示すものが見られた。一方、炭素同位体組成については思地・川又ユニット境界付近の試料がやや低い$\delta^{13}C$値（〜−28.5‰）を有する以外は$\delta^{13}C$ = −26.2 to −22.8‰でユニットごとの違いは確認されなかった。炭質物の温度幅がおおよそ250˚Cに達する汗見川ルート南北約15 km・51試料に着目すると、$\delta^{13}C$ = −28.7 to −21.4‰で、鉱物帯ごとに比較してみると、緑泥石帯：$\delta^{13}C$ = −28.7 to −23.4‰（平均：−26.7‰）、ざくろ石帯：$\delta^{13}C$ = −27.6 to −22.5‰（平均：−24.5‰）、曹長石–黒雲母帯：$\delta^{13}C$ = −23.0 to −21.9‰（平均：−22.4‰）、灰曹長石–黒雲母帯：$\delta^{13}C$ = −25.8 to −21.4‰（平均：−23.0‰、1試料を除くと−22.3‰）と見かけの変成度上昇に伴って$\delta^{13}C$値がわずかに上昇する。炭質物温度との関係をみると、緑泥石帯内での$\delta^{13}C$の幅は大きく、緑泥石帯の高温部以上では温度上昇に伴う$\delta^{13}C$値増大が明瞭に見られた。こうした$\delta^{13}C$値増大については、三波川帯の泥質片岩に広く含まれる炭酸塩鉱物と炭質物との間での炭素同位体交換と炭質物からのメタン（CH_4）としての炭素の放出による同位体分別で説明できる。さらに、メタンとしての炭素の放出はメタンを含む流体包有物の報告（例、Yoshida et al., 2015）と整合的である。もし、炭酸塩炭素量及び有機炭素量の取得により炭酸塩鉱物と炭質物の間での同位体交換による$\delta^{13}C$変化の寄与を束縛することができれば、CH_4としての炭素放出量の推定が期待される。

引用文献
青矢・横山, 2009. 日比原地域の地質. 産総研地質調査総合センター.
Galvez et al., 2013. Nature Geoscience, 6, 473–477.
Itaya, 1981. Lithos, 14, 215–224.
小島ほか, 1956. 地質学雑誌, 62, 317–326.
Kouketsu et al., 2021. Journal of Metamorphic Geology, 39, 727–749.
Vitale Brovarone et al., 2020. Chemical Geology, 549, 119682.
脇田ほか, 2007. 伊野地域の地質. 産総研地質調査総合センター.
Yoshida et al., 2015. Lithos, 226, 50–64.

キーワード：炭質物、炭素同位体、顕微ラマン分光法、三波川帯、泥質片岩
Keywords: carbonaceous materials, carbon isotope, Raman micro-spectroscopy, Sambagawa Belt, pelitic schist

イタリア・アペニン山脈のオフィカーボネイトの流体包有物

Fluid inclusions of ophicarbonates in the Apennine Mountains, Italy

金子 広幸[1]、*川本 竜彦[1]、メネギーニ フランチェスカ[2]、大澤 陽介[1]
Hiroyuki Kaneko[1], *Tatsuhiko KAWAMOTO[1], Francesca Meneghini[2], Yosuke Osawa[1]

1. 静岡大学理学部地球科学科、2. ピサ大学地球科学教室
1. Shizuoka University, 2. Università di Pisa | UNIPI ·Department of Earth Sciences

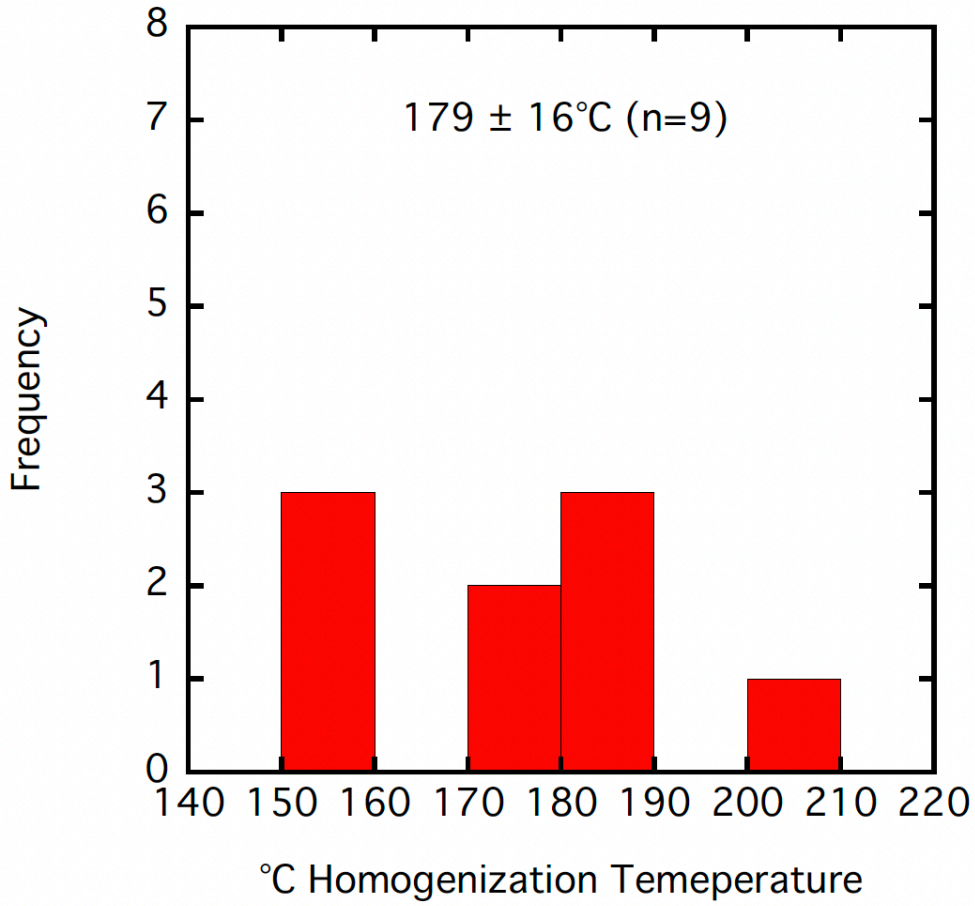
イタリアのアペニン山脈のBraccoオフィカーボネイトを採取し、その岩石記載とカルサイト中の流体包有物のマイクロサーモメトリーを行っている。この蛇紋岩体はパンペリー石相とされる比較的低い変成度を受けたオフィオライトの一部をなし、海洋底での変成作用の水熱変成脈組織や海洋底での堆積組織を保持しており、ジュラ紀の海水との相互作用を記録していると考えられる（Cannao et al., 2020, Chemical Geology）。

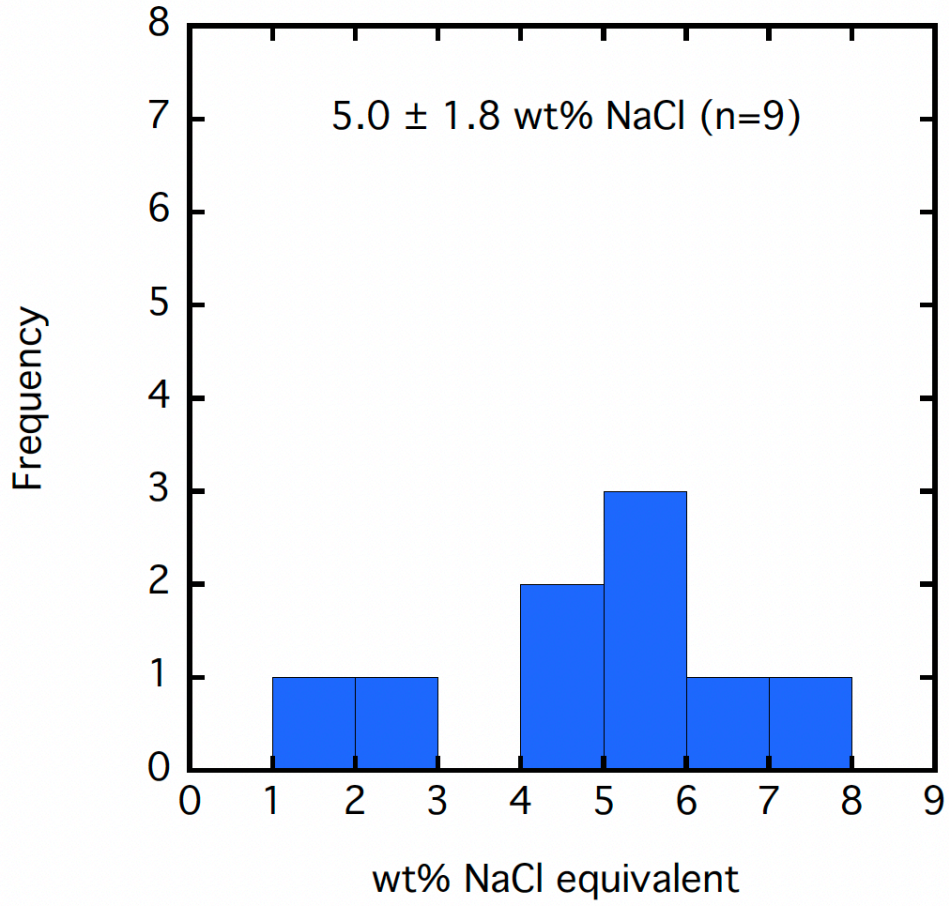
ラマン分光法とマイクロ蛍光X線分析によると、岩石は主にアンティゴライトとリザーダイトとカルサイトから構成される。今回は、カルサイトが作る脈の比較的大きな結晶中の塩水流体包有物のマイクロサーモメトリーを行った。他に細粒なカルサイト結晶も存在するが、流体包有物のマイクロサーモメトリーは難しく今回分析できなかった。また、同じ露頭に堆積性のオフィカーボネイト（Cannao et al., 2020）も存在するので、それらの流体包有物のデータも今後取得したい。

マイクロサーモメトリーの結果、凝固点降下量から見積もられる塩濃度は5.0±1.8 NaCl wt%（n=9）で、気相と液相の均質化温度は179±16℃（n=9）であった。同一薄片内で塩濃度は1から8 NaCl wt%の範囲で変動するが、同一の結晶内でも塩濃度が3 NaCl wt% 異なるものが存在し、その程度の変動幅を持つ塩水が蛇紋岩の炭酸塩化に関与したことを示す。

講演では、犬飼ほか（2023、鉱物科学会要旨）などの先行研究で報告した西アルプスの低変成度地域のオフィオライトに含まれるカルサイト中の流体包有物の塩濃度や均質化温度と比較することで、海洋底での蛇紋岩の炭酸塩化過程を議論したい。

キーワード：流体包有物、蛇紋岩、海水、二酸化炭素、オフィカーボネート
Keywords: fluid inclusions, serpentinite, seawater, carbon dioxide, ophicarbonate





@Japan Association of Mineralogical Sciences.

一般社団法人日本鉱物科学会　定時総会・授賞式

2024年9月13日(金) 14:00 ~ 15:15 | ESホール 東山キャンパス

一般社団法人日本鉱物科学会　定時総会・授賞式

14:00 ~ 15:15

[2Lecture-1-1400-1add] 定時総会・授賞式

一般社団法人日本鉱物科学会　定時総会・授賞式

2024年9月13日(金) 14:00 〜 15:15 ESホール (東山キャンパス)

14:00 〜 15:15

[2Lecture-1-1400-1add]定時総会・授賞式

©日本鉱物科学会

受賞者講演

2024年9月13日(金) 15:30 ~ 17:00 | ESホール 東山キャンパス

受賞者講演

15:30 ~ 17:00

受賞者講演

口頭講演 | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

2024年9月14日(土) 9:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

座長:川本 竜彦(静岡大学)、湯口 貴史(熊本大学)、亀井 淳志(島根大学)

9:00 ~ 9:15

[R6-01] マントルウェッジを上昇するスラブ由来流体の化学組成変化と島弧初生マグマの起源：水流体とメルト間の微量成分元素分配からの制約

*谷内 元[1]、川本 竜彦[2]、中谷 貴之[1]、石塚 治[1]、鈴木 敏弘[1]、東宮 昭彦[1] (1. 産総研・地調、2. 静岡大・理)

9:15 ~ 9:30

[R6-02] 試料作りから切り開く新たな地殻・マントル物性研究

「招待講演」

*小泉 早苗[1] (1. 東京大学)

9:30 ~ 9:45

[R6-03] The use of contact metamorphism to identify plutons associated with major contemporaneous eruption and estimate magma flux

*Simon R WALLIS[1], Ken Yamaoka[2], Akira Miyake[3], Catherine Annen[4] (1. The University of Tokyo, 2. AIST, 3. Aichi University of Education, 4. Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences)

9:45 ~ 10:00

[R6-04] 北上山地，久喜花崗岩体の岩石学的研究と年代学的研究：大陸地殻浅部におけるマグマの貫入・定置プロセス

*鈴木 哲士[1]、湯口 貴史[2]、石黒 啓斗[1]、遠藤 京香[1]、加藤 あすか[1]、横山 公祐[1]、小北 康弘[3]、横山 立憲[3]、坂田 周平[4]、大野 剛[5]、笹尾 英嗣[3] (1. 山形大学、2. 熊本大学、3. 原子力機構、4. 東大地震研、5. 学習院大学)

10:00 ~ 10:15

[R6-05] 山口県西部・鳳翩山地域の花崗岩類のジルコンU-Pb年代

*堤 之恭[1]、谷 健一郎[1] (1. 国立科学博物館)

10:15 ~ 10:30

[R6-06] 山陰帯島根県東部に分布する花崗岩類の形成温度圧力条件見積もり

*中橋 甲斐[1]、齊藤 哲[1] (1. 愛媛大学大学院理工学研究科地球科学分野)

10:30 ~ 10:45

[R6-07] 白亜紀北部九州バソリスのマグマ形成過程–Cumulateからのアプローチ–

*江島 圭祐[1]、大和田 正明[1]、亀井 淳志[2] (1. 山口大学創成科学、2. 島根大学)

10:45 ~ 11:00

[R6-08] 西南日本における白亜紀フレアアップの発生要因

*山岡 健[1]、諸星 暁之[2]、佐藤 大介[1]、三國 和音[1] (1. 産総研、2. 東大・院理)

11:00 ~ 11:15

[3Lecture-101-11-9add] 休憩

11:15 ~ 11:30

[R6-09] 西南日本弧東九州姫島火山群第四紀流紋岩中に含まれるザクロ石の成因

*平山 剛大[1,2]、柴田 知之[2]、芳川 雅子[2] (1. 東京大学・理学研究科、2. 広島大・先進理工)

11:30 ~ 11:45

[R6-10] 九州地方南部に分布する前期更新世安山岩類のK–Ar年代と化学組成

*山田 来樹[1]、丹羽 正和[1]、梅田 浩司[2]、八木 公史[3]、藤原 泰誠[3]、岡田 郁生[3]、木田 福香[1] (1. 日本原子力研究開発機構、2. 弘前大学、3. 蒜山地質年代学研究所)

11:45 ~ 12:00

[R6-11] 斜長石のSr拡散を用いた深成岩体の熱史究明：マグマフラックス推定と大規模な噴火を伴って形成した深成岩体の特定

「発表賞エントリー」

*諸星 暁之[1]、ウォリス サイモン[1] (1. 東大・院理)

マントルウェッジを上昇するスラブ由来流体の化学組成変化と島弧初生マグマの起源：水流体とメルト間の微量成分元素分配からの制約

Compositional evolution of slab-derived fluids during ascent and origin of subduction-zone primary magmas: Implications from trace-element partition between hydrous melts and Cl-free or Cl-rich aqueous fluids

*谷内 元[1]、川本 竜彦[2]、中谷 貴之[1]、石塚 治[1]、鈴木 敏弘[1]、東宮 昭彦[1]
*Hajime TANIUCHI[1], Tatsuhiko KAWAMOTO[2], Takayuki NAKATANI[1], Osamu ISHIZUKA[1], Toshihiro SUZUKI[1], Akihiko Tomiya[1]

1. 産総研・地調、2. 静岡大・理
1. GSJ, AIST, 2. Shizuoka Univ.

スラブから放出された超臨界流体はマントルウェッジ中を上昇する過程で水流体とメルトの2相に分離する。分離後の水流体は更なる上昇中に過飽和となったメルト成分を放出する。また、メルトも過飽和となった水流体を放出する。これらのプロセスでは、水流体とメルト間での元素分配が起こることで、スラブ由来流体の化学組成が変化する。本研究は、この化学組成変化を明らかにするため、産業技術総合研究所に設置された内熱式ガス圧装置、炎光光度計、誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた実験を行い、26元素に関して、Clを含まない水流体とメルト、及びClに富む水流体とメルト間における分配係数（$D^{fluid/melt}$）を、温度1100ºC、圧力0.3 GPa または0.7 GPaの条件で決定した。

Thを除くHigh-field strength elements (HFSE: Nb, Zr)は、水流体の塩分濃度および圧力に関係なく、水流体にはほとんど分配されない。これとは対照的に、その他の元素の分配係数は水流体の塩分濃度に強く影響を受ける。Large-ion lithophile elements (LILE: K, Cs, Ba, Rb, Sr, Pb)とUの$D^{fluid/melt}$は水流体の塩分量の増大とともに大きくなる一方、Rare-earth elements (REE: Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)とThの$D^{fluid/melt}$は水流体の塩分量の増大とともに逆に小さくなる。

上述の実験結果は、Clを含む塩水であると考えられているスラブ由来流体起源の水流体はマントルウェッジを上昇する間に、メルト成分を分別することによってLILEとUに富み、REEとThに乏しい化学組成へと変化することを示す。つまりスラブ由来流体起源の水流体は、上昇の過程でLILEとUに富みHFSE、REE、そしてThに乏しいという島弧玄武岩の基本的な化学的特徴と合致する組成へ進化する。火山フロントからの水平距離においては、より浅部まで上昇することで、よりメルト成分を分離した水流体のフラックス溶融で生成される前弧側初生玄武岩が、より深部でメルト成分をほとんど分離していない水流体あるいは超臨界流体のフラックス溶融によって生成される背弧側初生玄武岩に比べ、高いLILE/HFSE比やLILE/REE比を示すという特徴も説明する。以上のことから、我々は、スラブ由来流体からのメルト成分の分離とその程度が、島弧初生玄武岩の地球化学的特徴とその島弧横断方向変化を決定づけるひとつの要因であると提案する。

また、単一の火山あるいは火山地域に着目すると、スラブからの流体の放出深度が大きいためにスラブ流体がメルト成分に富んでいると予想される千島弧背弧の利尻火山では、2種類の玄武岩質マグマが存在する。これらは、それぞれ超臨界流体とそれから分離した水流体成分がマントルかんらん岩をフラックス溶融することで生成したと考えられる(Taniuchi et al., 2021, *J. Petrol.*)。一方、スラブ温度が高いためにスラブ流体がメルト成分に富むと予想されるカスケード弧のMt. Shasta、Crater Lake、Lassen Peak (Mullen et al., 2017, *Chem. Geol.*)などの各火山においても、放射性同位体比からみると同一の起源物質から、2種類の初生マグマ（High-alumina olivine tholeiiteとCalc-alkaline basalt）が生成している。このような単一火山における2種類の初生玄武岩も、超臨界流体の分離とそれ以降の元素分配によって異なる微量成分元素の特徴を有す

る水流体とメルトが、それぞれマントルかんらん岩と反応することで生成した可能性を議論する。

キーワード：初生マグマ、スラブ由来流体、分配係数、高圧高温実験
Keywords: Primary magma, Slab-derived fluid, Partition coefficient, High-pressure and high-temperature experiment

試料作りから切り開く新たな地殻・マントル物性研究

New crust and mantle physical properties research from the development of rock synthesis methods

*小泉 早苗[1]
*Sanae Koizumi[1]

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

地殻・マントル物性を明らかにするためには実験的研究が欠かせない。実験的研究の試料にはこれまで種々の岩石（鉱物多結晶体）試料が各研究室で独自に合成され使用されてきたが、異なる研究グループで用いられる試料(の化学組成、微細構造、製法)由来の物性値の混乱の問題があった。この混乱は、実際に地球物理学観測の結果（例えば、マントル地震波速度や粘性率構造、電気伝導度）を解釈する上で議論を引き起こしてきた。我々の研究グループでは、この問題を解消するために地殻・マントル物性の高精度測定のための試料合成法の開発から物性測定まで一貫して行っている。試料合成に関しては最上部マントルの主要構成鉱物であるカンラン石の多結晶体合成法の開発から取り組み、非常に緻密でかつ<１μmの小さい結晶粒から成る実験用鉱物多結晶体の合成に成功している（Koizumi et al. 2010）。合成した高品質な鉱物多結晶体は我々のグループだけではなく、これまでに我々の研究室を含めて５つの研究グループにより、カンラン石多結晶体の粒成長、クリープ、電気伝導度および原子拡散実験が同一試料に対して行われ、それらの素過程の共通性、化学効果、温度・圧力依存性が高精度で明らかになっている。これらの結果は、従来の研究室毎に異なった物性値の理解や上部マントルの高精度のレオロジー解明にもつながっている。試料は、微細構造の均質性、緻密性だけでなく化学組成の安定性や制御性、試料寸法や形状、微構造の自由度の高さおよび合成コストの低さに優れている。試料の汎用性・拡張性の高さを活用し、既存手法では不可能であった物性測定を可能にすることを目的として、新規の試料開発を継続して行っている（例えばKoizumi et al. 2016, Koizumi et al. 2020）。近年ではカンラン石以外の鉱物種である輝石（Ghosh et al. 2021）, 灰長石（Fukuda et al. 2022, Yabe et al. 2023）多結晶体による成果も得られている。講演ではこれまで開発した試料とその試料を用いた様々な地球内部物性測定の成果を概説するとともに、現在取り組んでいる天然由来原料を用いた試料合成についても紹介する。

キーワード：カンラン石、マントル、地殻、試料合成
Keywords: Olivine, Mantle, Crust, Sample synthesis

The use of contact metamorphism to identify plutons associated with major contemporaneous eruption and estimate magma flux

*Simon R WALLIS[1], Ken Yamaoka[2], Akira Miyake[3], Catherine Annen[4]

1. The University of Tokyo, 2. AIST, 3. Aichi University of Education, 4. Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences

Magmatic flux is an important factor controlling the heat and material transport in the continental crust; it is also thought to be a major control on the potential for any mamga to erupt, and duration of eruption and time scale between major events. Plutons are a clear record of magma input into the earth’ s crust and volume estimates combined with geochronological studies have been used to estimate past magma flux rates. However, areas suitable for such studies are limited and this approach cannot asses possible loss of magma through associated volcanic eruption. Contact metamorphic aureoles developed around plutons record the thermal effects of magma input into the crust and their study provides a potential way to use the geological record to estimate ancient magma flux rates even if material has been lost from the system by eruption.

A compilation of aureoles surrounding silicic plutons around the world shows that there is a wide variation in normalized thicknesses. Comparison with thermal modelling shows some aureoles are compatible with rapid input of the entire volume of magma recorded in the pluton whereas other aureoles are very narrow and imply slow rates of magma input. There are also numerous examples of aureoles broader than can be explained easily by either instantaneous intrusion models or incremental growth of plutons. Such broad aureoles may be explained by 1) unusually high crustal temperatures just before intrusion and 2) the contribution of magma that has subsequently been lost from the pluton system due to eruption.

The Shinshiro tonalite and the Busetsu granite are two plutons formed in the same Hongusan area and have similar zircon U–Pb ages. Although the Busetsu granite has a larger volume, it is associated with a much narrower aureole than the Shinshiro tonalite. Because the intrusions formed at the same time in the same area, the difference in aureole widths cannot be explained by contrasting background crustal temperatures. Thermal modeling shows that only eruptive loss of magma can adequately account for the characteristics of the Shinshiro tonalite aureole. Combining petrological studies of metamorphic aureoles with thermal modeling can identify plutons that developed in association with major volcanic eruptions and constrain ancient magma flux.

Keywords: Magma flux, Pluton, Contact metamorphism

北上山地，久喜花崗岩体の岩石学的研究と年代学的研究：大陸地殻浅部におけるマグマの貫入・定置プロセス

Petrography and geochronology of the Kuki granite, Kitakami Mountains, northeastern Japan: Shallow crustal intrusion and emplacement processes of granitic magma

*鈴木 哲士[1]、湯口 貴史[2]、石黒 啓斗[1]、遠藤 京香[1]、加藤 あすか[1]、横山 公祐[1]、小北 康弘[3]、横山 立憲[3]、坂田 周平[4]、大野 剛[5]、笹尾 英嗣[3]
*Satoshi SUZUKI[1], Takashi YUGUCHI[2], Keito ISHIGURO[1], Kyoka ENDO[1], Asuka KATO[1], Kosuke YOKOYAMA[1], Yasuhiro OGITA[3], Tatsunori YOKOYAMA[3], Shuhei SAKATA[4], Takeshi OHNO[5], Eiji SASAO[3]

1. 山形大学、2. 熊本大学、3. 原子力機構、4. 東大地震研、5. 学習院大学
1. Yamagata University, 2. Kumamoto University, 3. Japan Atomic Energy Agency, 4. University of Tokyo, 5. Gakushuin University

島弧-海溝系の沈み込み帯で生じるカルクアルカリ～ショショナイト質マグマ（非アダカイト質マグマ）の形成は，大陸地殻の発達・進化に大きく寄与する（例えば，Gill, 1981; 巽, 2004）．さらに，島弧-海溝系の沈み込み帯では，若い海洋地殻の沈み込みの部分溶融により生じるアダカイト質マグマの産出も報告される（Martin, 1986; Defant and Drummond, 1990）．また，島弧-海溝系の沈み込み帯において，「フレアアップ（Paterson and Ducea, 2015）」と呼ばれるマグマの生成量が爆発的に増加する時期が知られており，フレアアップ期には，マグマの上昇や貫入・定置プロセスに関連し，大陸地殻の大規模な発達・進化が生じる．そのため，島弧-海溝系のフレアアップ期におけるアダカイト質マグマ・非アダカイト質マグマの貫入・定置プロセスを把握することは，大陸地殻の発達・進化を理解する上で重要なピースとなる．

島弧-海溝系の沈み込み帯のマグマ活動のダイナミクスを評価する上で，北上山地の深成岩体は，マグマの生成量が増大する白亜紀「フレアアップ期（Pastor-Galán et al., 2021）」，「アダカイト質マグマ」と「非アダカイト質マグマ（カルクアルカリ～ショショナイト質マグマ）」（土谷ほか, 2015）の特徴を併せ持つため，最適な研究対象と言える．北上山地の深成岩体の産状として，非アダカイト質マグマ単独で形成されるカルクアルカリ～ショショナイト質深成岩類と，アダカイト質岩の周囲に非アダカイト質岩が分布する累帯深成岩体に分類される（土谷ほか, 2015）．本研究では，非アダカイト質マグマの一例として北部北上山地の久喜花崗岩体の貫入・定置プロセスを解明することで，フレアアップ期の大陸地殻浅部への大量のマグマ供給に由来する大陸地殻の発達・進化の理解の第一歩と位置付ける．

本研究では，久喜花崗岩体に対し，岩石学的研究と年代学的研究を実施したため，大陸地殻浅部におけるマグマのマグマ溜りプロセス（冷却過程，分別結晶作用など）について議論する．岩石学的研究ではホルンブレンドの化学組成から結晶化温度と圧力を導出し，マグマの温度-圧力（*P-T*）履歴が明らかとなった（図1a）．ここで，圧力は深度に読み替えることができるため，久喜花崗岩体の*P-T*履歴からは，マグマの冷却（800 ℃から730 ℃へ）と深度の変化に相関が認められないことがわかる．また，その導出された圧力から深度約9-10 kmにマグマが定置したと解釈できた．年代学的研究として，ジルコンのU-Pb年代，Ti濃度，Th/U比の同時測定から，（1）マグマが固化するまでの時間-温度（*t-T*）履歴，（2）ジルコンの結晶化温度とTh/U比の関係からマグマの分別結晶作用について考察した．ジルコンの*t-T*履歴は，マグマ溜りが約125 Maにおいて約900 ℃から700 ℃まで冷却したことを示唆する（図1b）．ジルコンのTh/U比の変化については，マグマ溜りの温度低下に対する分別結晶作用の評価に有用であることが知られる（Schofield, 2010; Kirkland et al., 2015; Pineda et al., 2022）．この変化はUよりもThを取り込みやすい鉱物，例えばトーライトの結晶化に伴う分別に起因しており，ジルコンと共結晶化することでジルコン中のTh/U比の低下につながる

と理解されている（Pineda et al., 2022）．久喜花崗岩体では鏡下観察からジルコンと接触（共存）関係にあるトーライトが確認されており，ジルコンとトーライトは共結晶化していたことが示唆される．ジルコンのTh/U比と温度変化の関係では，800 ℃以上でジルコンの結晶化温度の低下に対するTh/U比の減少が大きいことから，800 ℃以上でマグマ溜り内での鉱物の分別結晶作用が活発であったと解釈できる（図1c）．つまり，約125 Maにおいて，久喜花崗岩体を形成したマグマ溜りは，比較的活発な分別結晶作用（ホルンブレンドやジルコンの晶出）を生じながら深度約9-10 kmに温度800 ℃で定置しその後，比較的穏やかな分別結晶作用を生じつつ冷却し，約700 ℃においてホルンブレンドとジルコンの結晶化が終了したと結論した．

キーワード：フレアアップ、非ダカイト質マグマ、分別結晶作用、P-T履歴、t-T履歴
Keywords: Flare-up, Non-adakitic magma, Fractional crystallization, P-T history, t-T history

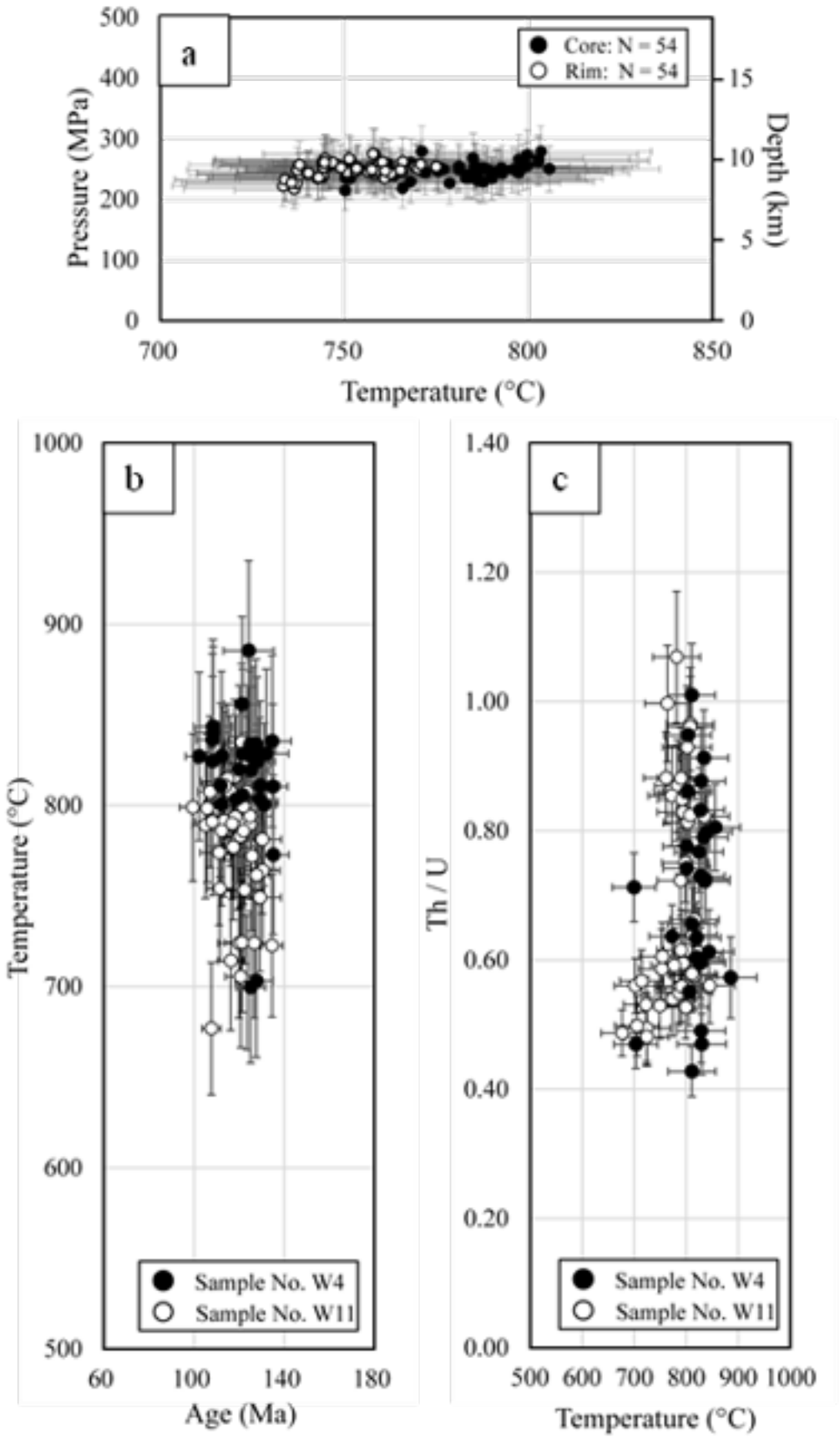


図 1 久喜花崗岩体のホルンブレンドから導出した温度と圧力（深度）の関係（a）．ジルコン U-Pb 年代・Ti 濃度・Th/U 比の同時測定による *t-T* 履歴（b）と Th/U 比と温度の関係（c）．

山口県西部・鳳翩山地域の花崗岩類のジルコンU-Pb年代

Zircon U-Pb dating of granitoids in the Hobenzan area, western Yamaguchi Prefecture, southwest Japan

*堤 之恭[1]、谷 健一郎[1]
*Yukiyasu TSUTSUMI[1], Kenichiro TANI[1]

1. 国立科学博物館
1. National Museum of Nature and Science

白亜紀から古第三紀は，東アジアの火成活動が活発な時期であった．その痕跡は西南日本内帯に花崗岩類として残されており，北から山陰帯，山陽帯，領家帯の3つの花崗岩区に分けられる（石原, 1973; 金谷・石原, 1973）．伝統的年代の解釈によると，これらの年代は西に向かって古くなる傾向があり，白亜紀に海嶺の沈み込みが西から東に移動した結果と考えられた（Nakajima, 1994）．一方で，中国地方東部の花崗岩類のジルコン年代は，海洋側に向かって古くなる傾向が見えている（Iida et al., 2015）．また，中部ー北部九州の白亜紀花崗岩のジルコン年代は，中心から大陸側と海洋側双方に向かって古くなる傾向があり，これらはそれぞれ朝鮮半島西部および中国・四国地方に対応し，九州は双方の特徴を併せ持つ「端」と解釈された（堤・谷, 2023）．

中国地方東部と九州の花崗岩類のジルコン年代は豊富であるが，その間に位置する山口県・広島県の，特に山陽帯のジルコン年代はまだ報告が少ない．東アジアにおける白亜紀火成活動を検証する上で，この空白を埋めることは重要である．その第一歩として，本研究では鳳翩山地域の花崗岩類のジルコンU-Pb年代の測定を行った．鳳翩山岩体は中心部が花崗岩，周縁部が花崗閃緑岩からなり（松浦ほか, 2007），山陽帯に位置するが，磁鉄鉱系列の組成を持つものもある（石原ほか, 1979）．Rb-Sr全岩年代は102 Maを示し（Shibata & Ishihara, 1979），これは西南日本の白亜紀花崗岩が「西に向かって古くなる説」の根拠の一つでもあった．

鳳翩山岩体の花崗閃緑岩試料4点は95.4 ±0.7 Ma，96.3 ±1.0 Ma，96.3 ±0.8 Ma,および96.2 ±0.6 Maを，花崗岩試料2点は93.9 ±0.7 Maおよび90.2 ±0.8 Maを，近傍の矢櫃山の花崗閃緑斑岩試料1点は97.1 ± 0.7 Maを示した．各々の誤差は95%信頼区間を示す．これらの年代は，北部九州の香春岩体・嘉穂岩体および早良岩体に対応する（堤・谷, 2022）一方，中国地方東部に93 Maを超える花崗岩類のジルコン年代の報告はない（Iida et al., 2015）．西南日本の花崗岩の東西連続性の検証には，さらなるデータ蓄積が必要である．

Iida et al. (2015) *Island Arc* **24**, 205-220.; 石原 (1973) *鉱山地質* **23**, 1332.; 石原ほか (1979) *地雑* **85**, 47-50.; 金谷・石原 (1973) *岩鉱* **68**, 211-224.; 松浦ほか (2007) 20万分の1図幅.; Nakajima (1994) *Lithos* **33**, 51-66.; Shibata & Ishihara, (1979) *Geochemical J.* **13**, 113-119.; 堤・谷 (2022) *地質学会要旨* **129**, T6-O-5.; 堤・谷 (2023) *地質学会要旨* **130**, S1-O-2.

キーワード：西南日本、山陽帯、白亜紀、花崗岩類、ジルコンU-Pb年代
Keywords: SW Japan, San-yo Province, Cretaceous, granitoid, zircon U-Pb age

山陰帯島根県東部に分布する花崗岩類の形成温度圧力条件見積もり

Estimation of temperature and pressure conditions of granitoids in the eastern part of Shimane Prefecture, San'in Belt.

*中橋 甲斐[1]、齊藤 哲[1]
*Kai Nakahashi[1], Satoshi SAITO[1]

1. 愛媛大学大学院理工学研究科地球科学分野
1. Ehime University Graduate School of Science and Engineering, Earth Science Division

はじめに 西南日本内帯に分布する山陰帯花崗岩類は，磁鉄鉱系列に分類される (例えばIshihara, 1977など)．Kawakatsu and Yamaguchi (1986)は，山陰帯花崗岩類に含まれる角閃石のゾーニングから，磁鉄鉱が二次的な晶出鉱物であり，マグマの固結末期におきた脱水により生成された熱水流体よるFe-Ti酸化物の再平衡で晶出したものと指摘している．またこの熱水変質作用により斜長石や黒雲母の変質も確認される (Takagi et al., 2010)．このため，主成分鉱物の化学組成を用いた地質温度圧力計による山陰帯花崗岩類の形成温度圧力条件の推定について，その報告は限られている．一方で近年，マグマの高温高圧平衡実験データに基づいた角閃石単相温度圧力計が提案されている (Ridolfi and Renzulli., 2012; Putirka, 2016など)．角閃石単相温度圧力計は経験的温度圧力計であり，適用の際に共存相の平衡状態を仮定する必要がなく，さらに一つの分析点から独立した結果が得られる(石橋ほか, 2021)．そのため本研究は，山陰帯花崗岩類の形成環境を推定することを目的として，島根県木次～竹崎地域の花崗岩類について，岩石記載と角閃石単相地質温度圧力計を用いた温度圧力条件の解析をおこなった．

研究手法 本研究は大東岩体，小木石英閃緑岩，阿毘縁岩体を対象に行った．これらの岩体については，火成活動についての議論が既になされている (薬師寺ほか, 2012; 岩田ほか, 2013; 野口ほか, 2021)．各岩体から試料を採集し，薄片の作成，観察をおこなった．形成温度圧力の検討は，Ridolfi and Renzulli (2012)による角閃石単相圧力計，Putirka (2016) による角閃石単相温度計を用いた．角閃石の組成分析は愛媛大学理学部設置のSEM-EDS を用いた．

結果・考察 本研究で検討した全ての岩体の試料について，角閃石は内部の褐色部とそれを覆う緑色部に分けられた．褐色部は累帯構造やパッチ状組織を呈している．また褐色部の縁辺や緑色部は磁鉄鉱を包有する．角閃石の化学組成は褐色部から緑色部にかけて $^{[A]}$(Na +Ca)，Fe/(Fe +Mg)，Al^{T}が減少する．さらに角閃石は，Hawthorn et al. (2012)による角閃石の分類において，主にマグネシオホルンブレンド に分類された．本研究では，角閃石の褐色部がマグマから晶出した際の組成を保持しているものと考え，褐色部の化学組成を用いて角閃石単相温度圧力計を適用した．その温度圧力見積もりの結果は，大東岩体で78～169 MPa，761～804 ℃ (n=4)，小木石英閃緑岩で98～147 MPa，747～794 ℃ (n=6)，阿毘縁岩体で158～235 MPa，763～830 ℃ (n=8)であった．これらの温度圧力見積もり結果はH_2Oに飽和した花崗岩質からトーナル岩質マグマのソリダス曲線 (Piwinskii and Wylli, 1970)にそれぞれ調和的である．また，先行研究の全岩化学組成分析結果を用いて，ジルコン飽和温度計 (Watson and Harrison, 1983)を適用すると，大東岩体で736～786 ℃，小木石英閃緑岩で640～753 ℃，阿毘縁岩体で759～791 ℃を示し本研究の温度見積もりの結果と調和的である．さらに大東岩体については，溶結凝灰岩に貫入している産状が認められる（野口ほか, 2021)．このことは大東岩体が地殻浅所で形成されたことを示唆しており，本研究の圧力見積もりと調和的である．

引用文献 Hawthorn (2012)，Am Mineral，97，2031-2048，Ishihara (1977)，Min Geol，27，293-305; 石橋ほか (2021)，火山，66，2，119-129; 岩田ほか (2013)，地質雑，119，3，190-204; Kawakatsu and Yamaguchi (1986)，GCA，51，535-540; 野口ほか (2021)，地質雑，127，8，461-478; Piwinskii and Wyllie (1970)，J Geol，78，52-76; Putirka (2016)，Am Mineral，101，841-858; Ridolfi and Renzulli (2012)，CMP，163，877-895; Takagi et al.（2010)，JMPS，105，194-214; Watson and Harrison

(1983)，EPSL，64，295-304; 薬師寺ほか (2012)，地質雑，118，1，20-38

キーワード：花崗岩類、角閃石単相地質圧力計、山陰帯花崗岩類
Keywords: granitoids, Amphibole only geothermobarometer, San-in granitoids

白亜紀北部九州バソリスのマグマ形成過程–Cumulateからのアプローチ–

Primary magma of Cretaceous Northern Kyushu batholith: New approach from Cumulus rocks

*江島 圭祐[1]、大和田 正明[1]、亀井 淳志[2]
*Keisuke ESHIMA[1], Masaaki OWADA[1], Atsushi KAMEI[2]

1. 山口大学創成科学、2. 島根大学
1. Yamaguchi Univ. Sci. , 2. Shimane Univ.

【はじめに】北東アジア大陸縁辺部にはイザナギプレートの沈み込みに関連するジュラ紀から白亜紀の火成岩類が広く発達し，火成活動やテクトニクスの研究が精力的に行われている（Kim et al., 2016, *Lithos* 262, 88–106 ; Yu et al., 2021, *Int. Geol. Rev.,* 1881920）．日本列島に産する火成岩類も大陸側（北東中国，韓半島）の火成岩類と同様にイザナギプレートのユーラシア大陸への沈み込み（200–50Ma）に関連することは明確であり（Seton et al., 2015, *Geophys. Res. Lett.* 42, 1732–1740），日本国土の約30%は花崗岩を代表とする深成岩類が占めている。そして，日本各地にはバソリスと呼ばれる面積100km^{2}以上の大規模な花崗岩複合岩体が露出しており，島弧地殻の主たる部分を構成する．また，日本国土に露出する花崗岩類の約80%は50–130Ma（主に白亜紀から古第三紀）に活動年代が集中している．このような大陸規模の周期的な大規模火成活動はMagmatic flare-upsと呼ばれ，大量の珪長質マグマの発生機構や地殻成長過程の変遷を考える上で非常に重要な火成活動イベントである（Ducea, 2001, *GSA Today*, 11, 4–10）．そこで，本発表では白亜紀北部九州バソリスを対象にマグマ発生機構を含めた包括的な火成活動の解明を目指し，バソリスを構成する花崗岩質岩の本源マグマの形成過程・生成機構を議論する．また，本源マグマの検討には白亜紀北部九州バソリスに付随する北多久苦鉄質複合岩体の集積岩類を使用する．初生的なマグマから晶出・集積した集積鉱物を利用し，初生マグマの特徴を追求することは，同時期の火山岩類の露出が非常に少ない（つまり，火山岩類からメルト組成の検討が難しい）北部九州バソリスにおける最善の手法であると考えている．【北多久苦鉄質複合岩体の地質概要】北多久苦鉄質複合岩体が露出する佐賀県多久市天山周辺の地質は，角閃岩と蛇紋岩を母岩とし，それを貫く北多久苦鉄質複合岩体と深江花崗岩および北多久苦鉄質複合岩体を貫く珪長質岩脈と斑状細粒閃緑岩岩脈から構成される．北多久苦鉄質複合岩体は主に斑れい岩類からなり，集積岩相と非集積岩相に分類され，互いに明瞭な境界を持たず，複雑な産状を示す． 【親マグマの性質】 北多久苦鉄質複合岩体中で最も未分化組成に近い岩石のCpxの組成から平衡メルト組成を計算した．その結果，算出された液組成はSanukitic高Mg安山岩質のマグマに類似する組成を示すことが明らかとなった．また，その初生マグマが共存したマントルかんらん岩の組成はCr#>0.8が推定される．さらに，白亜紀北部九州バソリスに点在するSanukitic 高Mg安山岩マグマ由来の岩石（高Mg閃緑岩）と比較しても類似の組成的特徴を持つ．つまり，このことは，Sanukitic 高Mg安山岩マグマが白亜紀北部九州の広範囲で実質的に活動したことを示唆している．【北部九州バソリスの形成テクトニクス】北多久苦鉄質岩体に産するミグマタイトの産状からは，苦鉄質マグマを熱源とした角閃岩の部分溶融現象が考えられる．微量元素を用いたモデル計算の結果から角閃岩の部分溶融メルトとSanukitic 高Mg安山岩マグマを混合することによって北多久苦鉄質複合岩体周辺に産する花崗岩質マグマの多様性を説明することができる．そして，Sanukitic 高Mg安山岩質マグマの北部九州での空間的な広がりと北部九州花崗岩バソリス構成岩体のモデル計算から，白亜紀北部九州バソリスを構成する花崗岩類の一部は，北多久苦鉄質複合岩体の親マグマであるSanukitic 高Mg安山岩マグマとそれを熱源とした部分溶融によって形成したanatexisメルトとの混合により形成可能である．また，Sanukitic 高Mg安山岩マグマも一般に同化作用や分化作用により高Mg閃緑岩や他の苦鉄質マグマとして上昇している．よって，白亜紀北部九州バソリスの火成活動の熱源はSanukitic 高Mg安山岩を代表としたマグマであった可能性が高い．また，江島（2021, 地質学雑誌127, 605–619）では北部九州から山口県西部に広く露出する関門層群の堆積時に花崗岩質マグマがほぼ同時期に貫入する産状を報告しており，北部九州バソリス火成活動もスラブロールバックによ

る引張応力場でのイベントであると予想される．つまり，本研究で検討したバソリス火成活動・形成テクトニクスは，同様のプレートモーションに属する白亜紀北東アジア大陸縁辺部のバソリス火成活動，熱源および複雑な地殻成熟過程に新たな知見を与える．

キーワード：白亜紀北部九州バソリス、北多久苦鉄質複合岩体、集積岩、本源マグマ、Sanukitic高Mg安山岩
Keywords: Cretaceous Northern Kyushu Batholith, Kita-taku mafic complex, Cumulate, Primary magma, Sanukitic HMA

西南日本における白亜紀フレアアップの発生要因

Origin of the Cretaceous ignimbrite flare-up in SW Japan

*山岡 健[1]、諸星 暁之[2]、佐藤 大介[1]、三國 和音[1]
*Ken Yamaoka[1], Tokiyuki Morohoshi[2], Daisuke Sato[1], Kazuto Mikuni[1]

1. 産総研、2. 東大・院理
1. AIST, 2. Univ. Tokyo. Sci.

時間・空間的に大規模なカルデラ形成噴火が集結するフレアアップは地球表層環境や社会に甚大な影響を与えうる現象であるため、過去の事例から関連するマグマ活動のタイムスケールやその原因を特定することは重要な課題のひとつである（Paterson & Ducea, 2015)。フレアアップの原因について、一般的には島弧地殻に付加される玄武岩質マグマフラックスの増加が関連する可能性が高いことが指摘されているが、その背景となるテクトニクスの理解は依然として大きな不確かさがある。本研究では、テクトニクスに関して理解の進んでいる日本と朝鮮半島を含むユーラシア大陸東縁部の130–30 Maの火成活動に着目し、主に火成活動の年代と全岩Sr・Nd同位体比に関する蓄積データのコンパイルに基づいてマグマの化学的特徴の時空間変化と広域的なテクトニクスとの関係性、および大規模カルデラ発生との関係性を検討した。

網羅的なデータコンパイルの結果、火成活動年代分布の特徴として、日本と朝鮮半島では~130–60 Maにそれぞれ独立した火成弧が存在し、両者ともに日本海側に向かって100 kmスケールで活動場が移動する履歴が明らかになった。２つの火成弧は50 Maごろには移動を終了する。また、同位体組成については日本と朝鮮半島を通じてマグマの化学組成に関わらずSr・Nd同位体比に明瞭なギャップを(SrI, εNd(t))=(0.706, -4)付近に伴うことから、２つのグループに区分できることが明らかになった。よりエンリッチしたデータ群をグループ1、枯渇したデータ群をグループ2とすると、日本では100–60 Ma、朝鮮半島では130–70 Maにグループ1が卓越し、それ以外ではグループ2が卓越する傾向が認められる。また、グループ1は全体として日本より朝鮮半島の方がエンリッチした値を示す傾向にあるとともに、日本ではグループ1の中でもより後期の80–60 Maによりエンリッチした値が集中しており、エンリッチしたマグマソースが~130 Maに朝鮮半島の北西部から南東部を通過して100 Ma以降に日本に到達したのち、60 Maごろに全域的に枯渇したマグマソースに切り替わる空間的変化を示す。150–140 Maは日本より2000 kmほど大陸側で海洋プレートの水平沈み込みとその崩壊に伴う海側への火成弧移動が推定されており（Wu et al. 2019）、その移動トレンドは朝鮮半島南東部まで追うことができる。またそれらの火成活動ではエンリッチした同位体組成が卓越し、北中国地塊を構成していた大陸リソスフェアや地殻物質の関与が指摘されている。一方で130–60 Maごろはイザナギプレートの高速沈み込み、60–50 Ma以降は太平洋プレートの沈み込みが推定されており（Wu et al. 2024）、グループ2の組成は海洋プレートの沈み込みに伴う一般的な（外的な不均質物質の寄与のない）島弧型の火成活動で説明できると思われる。したがって、日本で認められる80–60 Maにピークをもつ100–60 Maでのエンリッチしたマグマソースの卓越は北中国地塊を構成していた大陸リソスフェアの崩壊に由来していると考えることができ、80–60 Maにもっともその影響が高かったと言える。日本での濃飛流紋岩や湖東流紋岩をはじめとする世界的な規模のカルデラ形成はこの時期に集中的に発生しており（Sato et al., 2016）、マグマ組成がエンリッチしている時期と大規模カルデラ形成期はよい一致を示す。大陸リソスフェアの崩壊は下部地殻への活発なアセノスフェアの流入を伴うために地殻をより効果的に加熱することができ、加えて当時のイザナギプレートは年間20 cm近い高速の沈み込みによって多量の水が沈み込み帯内部に持ち込まれていたと考えられるため、大規模なカルデラ噴火を引き起こすために地殻浅部で必要な高いマグマ生成量と地温勾配を達成することができたと考えることができる。以上から、日本における白亜紀のフレアアップ現象は、大局的には通常の沈み込み火成活動と大陸リソスフェアの崩壊の足し合わせによって達成された可能性が高いと結論づけられる。

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

【引用文献】
Peterson SR et al. (2015) doi: 10.2113/gselements.11.2.91; Sato D. et al. (2016) doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.11.014; Wu F.-Y. et al. (2019) doi:10.1146/annurev-earth-053018060342; Wu J. et al. (2024) doi: DOI: 10.2138/gselements.20.2.103.

キーワード：白亜紀、フレアアップ、同位体比、マグマ、西南日本
Keywords: Cretaceous, flare-up, isotope ratio, magma, southwest Japan

口頭講演

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

座長:川本 竜彦(静岡大学)、湯口 貴史(熊本大学)、亀井 淳志(島根大学)

2024年9月14日(土) 09:00 〜 12:00 ESホール (東山キャンパス)

11:00 〜 11:15

[3Lecture-101-11-9add]休憩

©日本鉱物科学会

西南日本弧東九州姫島火山群第四紀流紋岩中に含まれるザクロ石の成因

The genesis of garnet in the Quaternary rhyolite of Hime-shima volcanic group, EEast Kyushu, Southwest Japan Arc.

*平山 剛大[1,2]、柴田 知之[2]、芳川 雅子[2]
*Takehiro HIRAYAMA[1,2], Tomoyuki SHIBATA[2], Masako YOSHIKAWA[2]

1. 東京大学・理学研究科、2. 広島大・先進理工
1. Tokyo University, 2. Hiroshima University

一般に，火成岩中にザクロ石が存在することは希で，火山岩ではメタアルミナスな安山岩やパーアルミナスなデイサイト・流紋岩などから少数報告されている(e.g., Bach et al., 2012; Kawabata & Takafuji, 2005)．日本では奈良県・大阪府の二上山，香川県の雨滝山の安山岩そして熊野酸性火成岩類等からザクロ石の含有が報告されている(Miyashiro, 1955)．西南日本弧第四紀火山フロント沿いの九州東部の国東半島沖に位置する姫島火山群（Hime-shima Volcanic Group; HVG）は，デイサイトと流紋岩の溶岩からなる７つの単成火山から構成されている(e.g., Itoh, 1990)． HVGの流紋岩から斑晶状のザクロ石が報告されている(Miyashiro, 1955; Itoh, 1990)．このザクロ石についてMiyashiro (1955)は斑晶か外来結晶かの判断は困難であるとしたが，Itoh (1990)はこのザクロ石が自形であることから斑晶であると主張した．Miyashiro (1955)はザクロ石が泥質変成岩由来の外来結晶であっても，マグマの化学組成や物理的条件次第では，流紋岩マグマ中に安定に存在しうることを指摘している．姫島のデイサイトは高いSr/Y比と低いY濃度を示し，これをShibata et al (2014)は沈み込むスラブの部分溶融で説明した．しかし，HVGの流紋岩中のザクロ石が斑晶ならデイサイトの地球化学的特徴をザクロ石の結晶分化作用で説明できるかもしれない．そこで我々は，HVGの流紋岩中のザクロ石の記載岩石学的・地球化学的研究を行った．

我々の観察によるHVGの流紋岩の重要な記載岩石学的特徴は，斑晶状のザクロ石が半自形（城山溶岩）から他形（達磨山溶岩）を呈することであり，このことはHVGのザクロ石は自形であるというItoh (1990)の報告とは異なる．さらに，城山溶岩中の一部のザクロ石が，斜長石の集斑中で珪線石，ジルコンと共存することも記載岩石学的に重要であると考えられる．ザクロ石，斜長石，珪線石，ジルコンは全て自形性に乏しく半自形から他形を示す．ザクロ石と並び，珪線石も火成岩中に存在することは稀で，その起源は泥質変成岩からの外来結晶である可能性が指摘されている(Caffe et al., 2012; Kawabata & Takafuji, 2005)．一方，姫島のデイサイト溶岩中からはザクロ石-黒雲母-珪線石-ジルコンという鉱物組み合わせを持つ泥質変成岩が捕獲岩として報告されている(Hirayama et al., 2022)．このことから，城山溶岩中の鉱物は，泥質変成岩が流紋岩マグマ中に取り込まれ溶融したときの溶け残りでザクロ石が外来結晶であると考えても不自然ではない．次にザクロ石の主成分元素組成について検討する．Harangi et al (2001)は，M-, I-, S-タイプのマグマや泥質変成岩等に含まれるザクロ石の主成分元素組成を調べ，ザクロ石のCaOとMnO濃度の関係が，それぞれのマグマや岩石で異なることを示した．そこで，本研究では流紋岩中に観察されるザクロ石の主成分元素組成を分析し，火成岩や変成岩中で晶出したとされるザクロ石が示す組成との比較を行い，その起源について解析した．HVGの流紋岩中のザクロ石のCaO 濃度は 0.5 –1.2 wt%でMnO濃度は5. 6 –6.9 wt%であった．この組成範囲はHarangi et al. (2001)が示したM-, I-, S-タイプのマグマ中のザクロ石が示す範囲ではなく，泥質変成岩中で再結晶したザクロ石が示す組成（CaO < 3.2 wt%，MnO = 0.3 –8.0 wt%)と調和的である．HVGの流紋岩中のザクロ石は，この組成範囲のうちMnO濃度が高い領域にプロットされる．このことと，上述の記載岩石学的特徴は，HVGの流紋岩中のザクロ石は泥質変成岩起源の外来結晶であることを強く示唆する．

キーワード：ザクロ石、流紋岩、外来結晶、姫島火山群
Keywords: Garnet, Rhyolite, Xenocryst, Hime-shima volcanic group

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

九州地方南部に分布する前期更新世安山岩類のK–Ar年代と化学組成

K–Ar ages and geochemical compositions of Early Pleistocene andesites from southern Kyushu, Japan

*山田 来樹[1]、丹羽 正和[1]、梅田 浩司[2]、八木 公史[3]、藤原 泰誠[3]、岡田 郁生[3]、木田 福香[1]
*Raiki YAMADA[1], Masakazu Niwa[1], Koji Umeda[2], Koshi Yagi[3], Taisei Fujiwara[3], Ikuo Okada[3], Fukuka Kida[1]

1. 日本原子力研究開発機構、2. 弘前大学、3. 蒜山地質年代学研究所
1. Japan Atomic Energy Agency, 2. Hirosaki University, 3. Hiruzen Institute for Geology and Geochronology

現在の日本列島では，千島弧～東北日本弧～伊豆・小笠原弧に至る領域と，中国地方～九州・琉球弧に至る領域で島弧火山活動が起きている。このうち東北日本弧では，前弧側から背弧側の火山へ向かってK_2O量が増大するなど化学組成分帯が見出されている[1]。東北日本弧の火山分布や化学組成分帯に関しては，海洋地殻の脱水分解やマントルの熱状態の不均質性などによって様々な説明が試みられてきた[1–3]。これに対して九州・琉球弧[4]は，火山フロントは見られるものの，阿蘇火山や姶良火山といった大規模カルデラの存在や，豊肥火山地域での噴出量の大きい火山活動，背弧域でのアルカリ玄武岩の活動など[5]，東北日本弧とは異なる様相の火山活動が起きている。このような地域差を明らかにする目的で，本研究では化学組成によるマグマ成因の推定を行っている。本発表では，九州地方南部の火山フロントに位置する前期更新世安山岩類に対してK–Ar年代測定と全岩主要・微量元素組成分析を行った結果を報告し，その火山活動やマグマ成因に関して若干の考察をする。

本研究では，鹿児島県曾於市の高の峯，宮崎県都城市の長尾山および小林市橘八重から試料を採取した。高の峯と長尾山は古い火山体の名残と思われる地形的高まりが認められるものの，橘八重では安山岩の分布は局所的で火山地形も保存されていない。各地域についてそれぞれ2試料ずつ石基のK–Ar年代測定を行ったところ，高の峯からは1.29 ±0.05 Maと1.21 ±0.05 Maの，長尾山からは1.80 ±0.06 Maと1.65 ±0.08 Maの年代値が得られた。橘八重については，非放射性起源の^{40}Arの割合が非常に高かったため有効な年代値を得られなかったと考えられるものの，火山体を残していないなどの理由から他の安山岩類と同時期に活動したものと推定される。大規模火砕流堆積物を除いて，これらの安山岩類よりも前弧側に第四紀の火山岩は露出していないことから，これらの安山岩類は前期更新世の火山フロントを形成していた火山の噴出物であると考えられる。

全岩化学組成の結果から，高の峯は玄武岩質安山岩，長尾山と橘八重は安山岩[6]であることが分かった。これらはいずれも非アルカリ系列[7]かつ中間カリウム系列[8]の安山岩類である。しかし，高の峯と橘八重のMg#（~50）とCr量（<100 ppm）は高くない一方で，長尾山のMg#とCr量はそれぞれ~60と>250 ppmに達するなど，地域ごとの化学組成差も認められる。始原的マントル[9]で規格化した微量元素パターンではいずれの安山岩類もNbの負異常を示すものの，高の峯と長尾山は非常に高いY量（>50 ppm）をもつ。以上のことから，これらの安山岩類は沈み込み帯の特徴を持ちつつも，特異なメカニズムで生成された苦鉄質～中間質マグマに由来すると考えられる。したがって，九州・琉球弧では，東北日本弧で示されているような火成活動モデル[1–3]が単純には成立しないことを示唆する。これらの理由については，フィリピン海プレートの運動や沖縄トラフの拡大なども考慮して議論する必要があるだろう。

本報告には，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和6年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性総合評価技術開発）（JPJ007597）」の成果の一部を使用している。

引用文献

[1]Shuto et al. (2015): *Jour. Petrol.*, 56, 2257–2294.
[2]Tatsumi (1986): *Geophys. Res. Lett.*, 13, 717–720.
[3]Tamura et al. (2002): *Earth Planet. Sci. Lett.*, 197, 105–116.

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

[4]Moreno et al. (2016): The Geology of Japan. pp. 522, The Geological Society of London, London.
[5]Mahony et al. (2011): *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 123, 2201–2223.
[6]LeMaitre et al. (2002): A classification of igneous rocks and glossary of terms, second edition. pp. 236, Blackwell, Oxford.
[7]Miyashiro (1978): *Contrib. Mineral. Petrol.*, 66, 91–104.
[8]Peccerillo and Taylor (1976): *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63–81.
[9]Sun and McDonough (1989): *Geol. Soc., London, Special Pub.*, 42, 313–345.

キーワード：九州、前期更新世、火山フロント、安山岩
Keywords: Kyushu, Early Pleistocene, Volcanic front, Andesite

斜長石のSr拡散を用いた深成岩体の熱史究明：マグマフラックス推定と大規模な噴火を伴って形成した深成岩体の特定

Thermal history of pluton formation from Sr diffusion in plagioclase: implications for magma flux estimation and identification of plutons associated with major eruptions

*諸星 暁之[1]、ウォリス サイモン[1]
*Tokiyuki Morohoshi[1], Simon Richard Wallis[1]

1. 東大・院理
1. The University of Tokyo

深成岩体形成時のマグマ供給は、岩体のもととなるマグマ貫入領域の内部状態を決定づける。特にマグマフラックスや貫入継続時間は貫入領域の内部温度に強く影響し、メルト割合やメルト維持時間など、噴火可能性に関わる重要なファクターである。マグマ供給の内部温度への影響を利用すれば、深成岩体に残された温度履歴記録を用いて、マグマ供給時のフラックスや貫入継続時間について情報を得られることが期待される。火成岩で用いられる温度履歴記録に結晶中の元素拡散がある。火山岩では噴火準備期間の長さ推定に使われる一方、深成岩体ではほとんど報告例がない。特に大陸地殻成長を考えるうえで重要な、地殻中部～上部で形成される珪長質深成岩体では、数百万年スケールの形成期間が多くみられ、斜長石中のSrやMg、カリ長石中のSrなど一般的な鉱物・元素の組み合わせでは拡散が進行して感度を失うと考えられてきた。しかしながら近年の研究で、珪長質深成岩体は一般的に断片的 (piecemeal) なマグマ供給によって成長することが明らかになった。断片的マグマ供給では短期間のパルス状昇温を除きソリダス以下の温度が維持され、拡散が進行しないために温度履歴に対する感度の維持が期待される。本研究では拡散が深成岩体の有効な温度履歴記録となる可能性に着目し、数値的に利用可能性を検証した。対象鉱物には斜長石を、拡散元素には斜長石に高濃度で含まれ、拡散の特性により拡散の効果を高感度に検知できるSrを選択した。断片的マグマ供給による岩体形成を想定して拡散モデリングを行ったところ、斜長石のSr拡散は温度履歴に十分な感度をもつことが明らかになった。これをもとに、斜長石のSr拡散を用いたマグマ供給様式制約を天然に適用した。

愛知県三河地方の新城トーナル岩・武節花崗岩は同年代・同深度に隣接して形成されたが、武節岩体は数百メートル、新城岩体は数キロメートルの接触変成帯を伴う。Yamaoka et al. (2023) は、熱モデルを用いて接触変成帯の温度構造を満たすマグマ供給過程を推定し、武節岩体では貫入したマグマの熱量で説明可能な一方、新城岩体は現存するマグマ量では熱量が不足し、200万年程度の継続的なマグマの供給と噴火が必要であることを示した。岩体の内部温度構造に着目すると、噴火を伴わない岩体形成では母岩からの冷却により、縁辺部は急冷されるが中心部では高温が長期間維持される。一方噴火を伴う長期貫入では、初期に貫入して主に岩体辺縁部に残された岩相は長く高温状態を維持する一方、晩期に貫入した岩相は初期の貫入部と比較して短期間で冷却されることが想定される。この仮説に則れば、岩体の噴火への関与の有無が、岩体内部と縁辺部の温度履歴の逆転として観察できると考えられる。本研究ではこのモデルを斜長石中のSr拡散による温度履歴記録を用いて検証するため、両岩体の中心部及び辺縁部試料でSr拡散量を比較した。

分析の結果、武節岩体では中心部で有意な拡散が見られた一方、辺縁部では拡散がほぼ進行していない。また新城岩体では辺縁部の周辺岩相領域で拡散が進行する一方、中心部の主岩相では拡散が弱いことを示すプロファイルが観測された。武節岩体の結果は、岩体内部で高温による拡散が進行する反面、辺縁部では冷却により進行しなかったと解釈できる。一方継続的な貫入と噴火を経験した新城岩体で観測された、主岩相で弱く周辺岩相の一部で強い拡散は、周辺岩相の一部が活動初期に貫入し、継続的な貫入の後に主岩相が貫入したことを示唆する。この結果は、マグマ排出と大規模噴火を伴う深成岩体形成では、噴火を伴わない岩体と反対に、晩期に貫入した岩体中心部ほど短期間で冷却されるとしたモデルを支持する。また噴火に関連した岩体の

検知に際して、斜長石中のSr拡散分析が新たな手法として有用であることを示唆する。

斜長石のSrプロファイルに記録された温度履歴を明らかにすることでフラックス推定も可能となる。この新手法を武節岩体で適用し、熱モデルと組み合わせて岩体形成時のフラックスを推定した。フラックスは $1.6\sim1.7\times10^{-3}$ [km^3/yr]と推定され、新城岩体の1.5×10^{-3} [km^3/yr] (Yamaoka et al., 2023) と同程度である。噴火に関与した新城岩体と関与しない武節岩体で同様のフラックスが推定されたことは、フラックスが噴火可能性に与える影響が限定的であることを示唆する。一方マグマ貫入期間は武節岩体で13万年程度に対して新城岩体では200万年程度と推定され、貫入継続時間が重要なパラメータとなる可能性を示す。

参考

K. Yamaoka, S. R. Wallis, A. Miyake, C. Annen, *Geology* 51 (12), 1173-1177 (2023)

キーワード：深成岩体形成、化学拡散、マグマフラックス、領家深成岩類
Keywords: pluton formation, chemical diffusion, magma flux, Ryoke plutonic rocks

口頭講演 | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

2024年9月14日(土) 9:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

座長:則竹 史哉、永嶌 真理子、徳田 誠(熊本大学)

9:00 ~ 9:20

[R2-01] 配位水の脱水によって生じる含水鉱物の物性・構造の変化

「招待講演」

*山根 崚[1] (1. 東北大学)

9:20 ~ 9:35

[R2-02] Priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5 \cdot H_2O$の熱分解過程における相変化

*興野 純[1]、山口 航佑[1]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1] (1. 筑波大学・生命環境系)

9:35 ~ 9:50

[R2-03] Alを含むorthoenstatiteにおける水の溶解機構：NMR測定と第一原理計算による解明

*薛 献宇[1]、神崎 正美[1]、Yin Rongzhang [2] (1. 岡山大学、2. 北京大学)

9:50 ~ 10:05

[R2-04] フッ素アパタイト中の水素拡散における研磨状態の影響評価と拡散メカニズムの推定

「発表賞エントリー」

*吉元 史[1]、坂口 勲[2]、伊藤 正一[1] (1. 京都大学、2. 物質・材料研究機構)

10:05 ~ 10:20

[R2-05] 低圧H_2-H_2O雰囲気下におけるフォルステライト蒸発の速度論

「発表賞エントリー」

*稲田 栞里[1]、橘 省吾[1] (1. 東京大学)

10:20 ~ 10:30

[3Lecture-201-11-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

[R2-06] 下部四万十層群佐伯亜層砂岩中に産するフランボイダルゲーサイトの成因

*大藤 弘明[1]、小西 星良[1]、山本 啓司[2] (1. 東北大・院理、2. 鹿児島大・理)

10:45 ~ 11:00

[R2-07] ウルトラナノライトの結晶化前駆現象：火山ガラス中に見られる液相不混和

*無盡 真弓[1]、松本 恵子[2]、三宅 亮[3]、伊神 洋平[3]、中村 美千彦[1]、横尾 亮彦[3]、吉本 充宏[4] (1. 東北大学、2. 産業技術総合研究所、3. 京都大学、4. 山梨県富士山科学研究所)

11:00 ~ 11:15

[R2-08] 熱量測定による$MgAl_2O_4$スピネルの陽イオン無秩序エンタルピーの制約

*糀谷 浩[1]、松木 龍志[1]、西村 祐太[1]、大平 格[1] (1. 学習院大学)

11:15 ~ 11:30

[R2-09] ペロブスカイト型$SrTiO_3$へのNa^+とK^+の固溶について

北井 亮吾[2]、*永井 隆哉[1]、川野 潤[1]、篠崎 彩子[1] (1. 北大・院理、2. 北大・理)

11:30 ~ 11:45

[R2-10] ペロブスカイト構造を有する(Li,La)TiO_3のLi電導度測定値とSIMS測定中のLi移動の整合性に関する研究

*坂口 勲[1]、大西 剛[1] (1. 物質・材料研究機構)

11:45 ~ 12:00

[R2-11] Fe-Ti-O 相の高圧構造転移機構

*山中 高光[1,2]、服部 高典[3]、毛 河光[1] (1. 中国高圧科学技術研究中心、2. 大阪大学大学院理学研究科、3. 日本原子力研究所)

配位水の脱水によって生じる含水鉱物の物性・構造の変化

Changes of physical and structural properties of hydrous minerals induced by dehydration of coordinated water molecules

*山根 崚[1]
*Ryo YAMANE[1]

1. 東北大学
1. Tohoku University

最近、含水鉄（II）リン酸塩鉱物であるビビアナイト（$Fe_3(PO_4)_2$・$8H_2O$）に120℃程の低温加熱を施すことで、ビビアナイトがカチオンの電気化学的な挿入脱離に適した化学状態・構造に変化することが報告された[1]。この報告は、ビビアナイトの蓄電池正極材への応用を期待させる。

この低温加熱においてビビアナイトの2価の鉄は、鉄に配位する水分子の脱プロトンを伴って3価に酸化されるが、母構造はある程度（単位胞の相関程度）保持される。この低温加熱試料は常温常圧で放置しても復水が生じることはない。私は、[1]の研究から、含水鉱物の脱水を意図的に途中で中断し、それを常温常圧で取り出すことにより得られる、母物質とも、完全に脱水した（もしくは分解）生成物ともまた違った物性・構造、そしてそれに起因する機能性を持った物質群に着目している。中でも私は、配位水を含む物質に関心を持っている。配位水は、構造中の水としてよく注目されるゼオライト的な水よりも、骨格構造とより強く相互作用している。そのため配位水は、低温加熱において、ビビアナイトで見られたような骨格構造の化学状態を変えてしまうような反応にも関与しうるからである。

ここでは、母構造に対して脱水途中であり、次の条件を満たす状態を部分脱水生成物と呼ぶ：①構造中に配位水を含むこと②加熱、真空引きなどの操作を経て脱水させ、常温・常圧条件で放置したとき、例えば復水などで、母構造の含水量に戻らない状態。例えば、胆礬（$CuSO_4$・$5H_2O$）は高校化学でも登場するような含水鉱物であるが、次の脱水過程を経る[2]：$CuSO_4$・$5H_2O$ →$CuSO_4$・$3H_2O$ →$CuSO_4$・H_2O →$CuSO_4$。3, 1水和物は部分的に脱水された状態であるが放置しておくと、5水和物への復水が生じるため[2]、ここで想定する部分脱水生成物ではない。一方で例えばビビアナイトは低温加熱によりサンタバーバライトに変化し、120℃では$Fe_3(PO_4)_2(OH)_3$・$1.4H_2O$という化学組成で表される[1]。復水しないので、部分脱水生成物である。私の知る限り、部分脱水生成物の多くは加熱による脱水だと200℃程度までの低温加熱で得られ、X線回折パターンにおいて母構造と比べ、顕著にブロードなブラッグピークを示すか、明瞭なブラッグピークを示さない、構造にランダムネスを抱えた状態である。そしてさらに脱水が進む、もしくは完全に脱水し終えると、再び結晶性の高い構造を有する相が出現する。

これらのことから、低温加熱では母物質の構造からの大規模な再編成が起きず、部分脱水生成物は脱水による欠陥を内包したポーラスな構造的特徴を有するのではないかと考えている。

発表では、部分脱水生成物を考えるに至ったビビアナイトの電気化学・構造研究に関して概説し、部分脱水によってビビアナイトが獲得する物性（機能性）や構造的特徴について議論し、他の含水鉱物の部分脱水生成物についても現状わかっていることやビビアナイトの部分脱水生成物との類似点・相違点などを議論したい。

[1] Yamane, R. et al., PCCP. 25, 31346-31351 (2023)[2] Ferhcaud, C. et al., IMPRES. 073 (2013)

キーワード：含水鉱物、脱水、ビビアナイト、配位水
Keywords: hydrous mineral, dehydration, vivianite, coordinated water molecule

Priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5{\cdot}H_2O$の熱分解過程における相変化

Phase change of priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5{\cdot}H_2O$ during thermal decomposition

*興野 純[1]、山口 航佑[1]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1]
*Atsushi KYONO[1], Kosuke Yamaguchi[1], Satoru Okada[1], Hiroki Hasegawa[1]

1. 筑波大学・生命環境系
1. Life & Environmental Sciences, University of Tsukuba

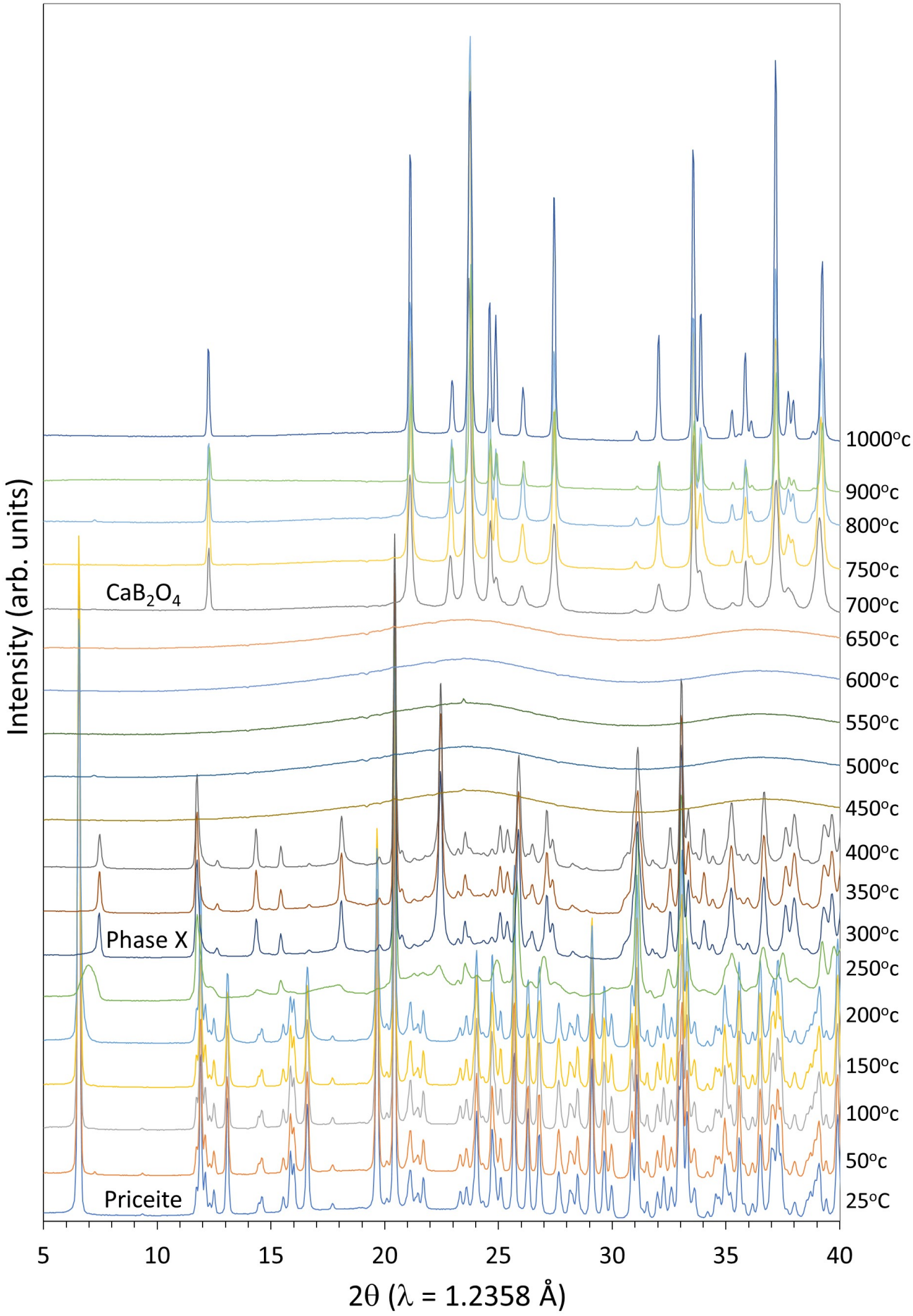
【はじめに】CI炭素質コンドライトのホウ素濃度は0.78 ppmと僅かであり(Shearer & Simon, 2017），地球のMORBのホウ素濃度も1 ppm以下と非常に少ない(Wunder et al., 2005)．しかし，ホウ素は水に可溶であるため，MORBから海洋に到達すると徐々に海水に溶出し，海水のホウ素濃度は4.5 ppmまで上昇する(Wunder et al., 2005）．その後，海洋堆積物や含水鉱物に取り込まれ大陸地殻まで運ばれると，大陸地殻のホウ素濃度はさらに17 ppmに達する(Rudnick & Gao, 2014)．インコンパティブル元素であるホウ素は，マグマ中ではメルトに濃集するため，花崗岩質ペグマタイト中でのホウ素濃度は200 ppm以上に上昇する(Stiling et al., 2006; Simmons et al., 2016）．その後，花崗岩質ペグマタイトが地表で風化すると地表水に溶け出し，最終的に盆地に濃集し，大規模な非海洋性蒸発岩ホウ素鉱床を形成している(Helvaci & Palmer, 2017)．ホウ酸塩鉱物は，これまでに299種類が報告されている(IMA Database)．近年，ホウ素鉱物の多様性は地質学的な時間と共に増加し，高温変成作用を伴う超大陸の衝突時に加速することが提唱され (Grew et al., 2017)，ホウ素鉱物の多様性メカニズムが注目されている(Kyono & Yamaguchi, 2024, AM in press）．Priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5{\cdot}H_2O$は，蒸発岩鉱床(Helvaci & Alonso, 2000)や熱水鉱床(Palache et al., 1951)など様々な地域から産出し，日本からも岡山県布賀鉱山から報告されている(Kobayashi et al., 2017, JMPS)．Priceiteは合成も容易である(Sun et al., 2011)．しかしながら，priceiteの熱分解に伴う相変化は明らかになっていない．そこで，本研究では，priceiteの熱分解に伴う相変化を，熱分析，X線回折実験によって明らかにした．

【実験方法】カルフォルニア州Death Valley産のpriceiteと合成priceiteを実験に用いた．合成priceiteは，塩化カルシウム，ホウ酸，水酸化ナトリウムをMilli-Q水に加え攪拌し，150℃で6時間加熱して合成した．熱重量-示差熱分析(TG-DTA)は，50℃から1000℃までを昇温速度10℃/minで測定した．高温ex-situ放射光X線回折実験の試料は，粉末にしたpriceiteを白金るつぼに入れ50℃から1000℃の温度範囲をそれぞれ1時間大気下で加熱し作成した．放射光粉末XRD測定は，KEK-PF BL8Bで行った．

【結果と考察】TG-DTAの結果，priceiteは120℃から重量減少を開始し，360℃付近までに1.0 H_2O分の脱水が起きた[$Ca_2B_5O_7(OH)_5$]．その後，連続的に重量が減少し，430℃から580℃の間にすべての脱水酸基した[$Ca_2B_5O_{9.5}$]．高温ex-situ X線回折の結果，priceiteは200℃までpriceiteの回折パターンを維持し，250℃から結晶相Xに変化した．その後，400℃までは結晶相Xを示し，450℃で完全に非晶質化した．その後，700℃からCaB_2O_4の回折パターンが出現し1000℃まで継続した．Priceiteのホウ酸塩の基本構造単位(Fundamental building blocks; FBBs)は，Burns et al. (1995)の表記法に従うと<3□>-<△2□>と表記される．これは3つの4配位のホウ酸(□)の環状構造(<3□>)と，一つの3配位のホウ酸(△)と二つの4配位のホウ酸(2□)の環状構造(<△2□>)が，一つのホウ酸を共有し二量体(<3□>-<△2□>)を構成している．このpriceiteが120℃から脱水を開始し，250℃まではpriceite の構造を維持するが，その後，1.0 H_2O分の脱水が起こり，結晶相Xに変化している．続いて，結晶相Xの1.0 OH基分の脱水酸基が起こると非晶質相に変化している．そして，580℃では無水の非晶質相($Ca_2B_5O_{9.5}$)になるが，700℃で$CaB_2O_4 + 1/2B_2O_3$ に分解してCaB_2O_4が結晶化している．CaB_2O_4のホウ酸塩のFBBは，△-△-△と表記され，これは3配位のホウ酸(△)の鎖状構造である．PriceiteとCaB_2O_4のFBBを比べると共通する構造単位はない．したがって，結晶相X，非晶質相を経てCaB_2O_4になるまでに，priceiteの<3□>-<△2□>のFBBは完全に再構成されると考えられる．

キーワード：Priceite、ホウ酸塩鉱物、熱分解、放射光X線回折
Keywords: Priceite, Borate mineral, Thermal decomposition, Synchrotron X-ray Diffraction

@Japan Association of Mineralogical Sciences.



@Japan Association of Mineralogical Sciences.

Alを含むorthoenstatiteにおける水の溶解機構：NMR測定と第一原理計算による解明

The incorporation mechanisms of water in aluminous orthoenstatite clarified via comprehensive NMR measurements and first-principles calculations

*薛 献宇[1]、神崎 正美[1]、Yin Rongzhang [2]
*Xianyu XUE[1], Masami Kanzaki[1], Rongzhang Yin[2]

1. 岡山大学、2. 北京大学
1. Okayama University, 2. Peking University

Alを含むorthoenstatiteにおける水の溶解機構について、1.5 GPa and 900Cで合成した4 ～8 wt% Al_2O_3 を含む、含水aluminous orthoenstatiteにおける１次元および２次元 ^{1}H、 ^{29}Si 、 ^{27}Al NMR測定、および第一原理計算により、明らかにした。従来仮定されていたH＋Al によるSiまたは2Mgのcoupled substitutionよりも、Al近傍のM2欠陥に存在する$(2H)_{M2}$欠陥の方が重要であることが判明した。後者はAlとの相互作用により、2Hのうちの一つのプロトンは、水素結合距離が長くなり、^{1}H化学シフトが小さくなり、OH伸縮振動周波数が大きくなることがわかった（図参照）。他のAlを含むマントル鉱物においても、H＋Al によるSiまたは2Mgのcoupled substitutionがよく仮定されるが、検証する必要はあるであろう。なお、本第一原理計算により、これまで報告された、よりAl_2O_3含有量の少ないorthoenstatiteや、天然輝石の赤外スペクトルの解釈にも制約を与えることができた。

キーワード：直方輝石、水、アルミニウム、核磁気共鳴、第一原理計算
Keywords: orthopyroxene, water, aluminum, NMR, first-principles calculation

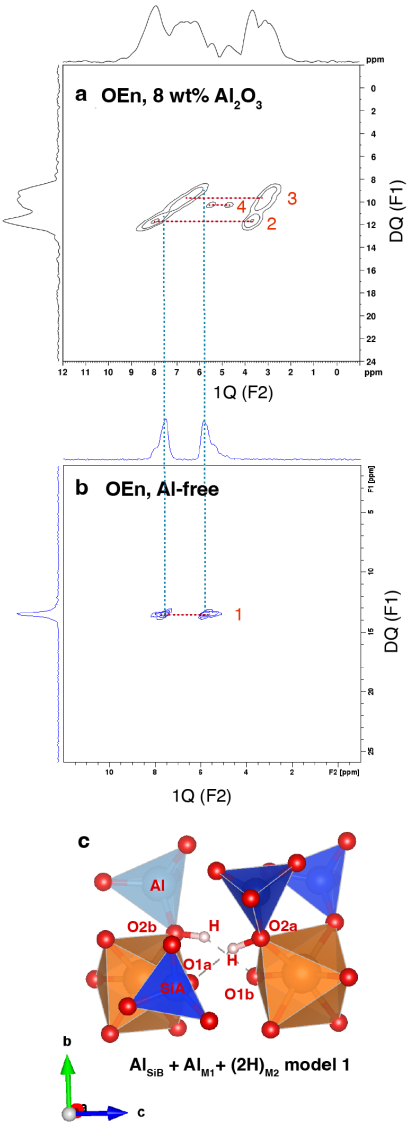


Figure. ^{1}H double-quantum (DQ)-single quantum (1Q) correlation MAS NMR spectrum for hydrous aluminous OEn with 8 wt% Al_2O_3 synthesized at 1.5 GPa and 900˚C (a), compared with that for a hydrous $MgSiO_3$ OEn synthesized at 7 GPa and 1200˚C (b). The horizontal dashed lines connect the observed proton pairs (labelled pair 1 to 4). Vertical lines are guides for the proton pair 1. Also shown in (c) is an example of energetically favorable 2H in an M2 vacancy ($(2H)_{M2}$) model for aluminous OEn from first-principles calculation. The Al^{IV}-O2b-H···O1b linkage yields smaller ^{1}H chemical shift and higher OH stretching frequency than $(2H)_{M2}$ defects in Al-free OEn.

フッ素アパタイト中の水素拡散における研磨状態の影響評価と拡散メカニズムの推定

Evaluation of the influence of polishing condition on hydrogen diffusion in fluorapatite and estimation of the diffusion mechanism

*吉元 史[1]、坂口 勲[2]、伊藤 正一[1]
*Chikashi Yoshimoto[1], Isao Sakaguchi[2], Shoichi Itoh[1]

1. 京都大学、2. 物質・材料研究機構
1. Kyoto University, 2. NIMS

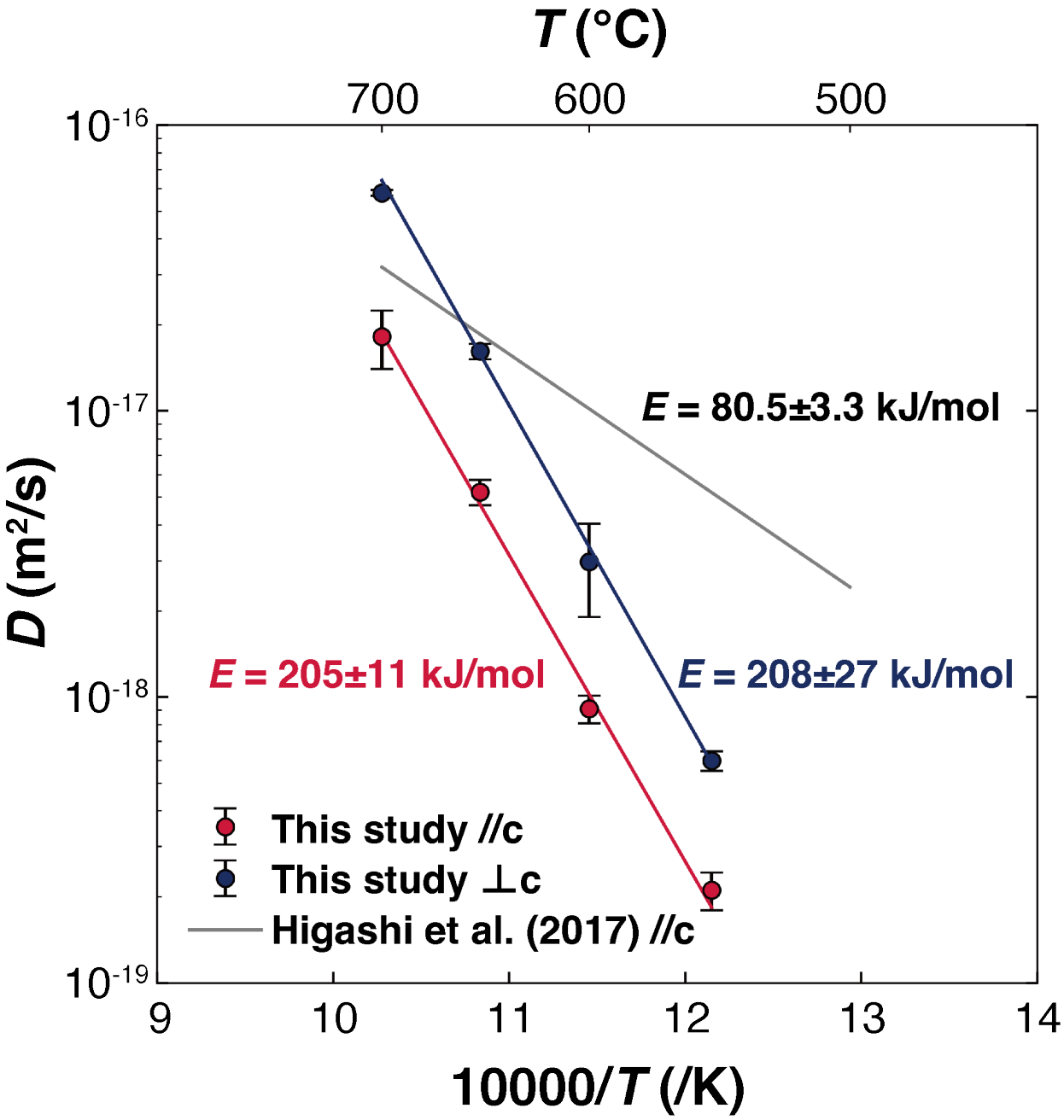
含水鉱物の水素同位体組成は地球などの太陽系天体における水の起源・進化を評価するための指標として利用されてきた．アパタイトは構造中にヒドロキシ基として水素を含んでおり，太陽系のさまざまな惑星天体に遍在している．アパタイトは他の含水鉱物に比べて変成・変質に強いため水素同位体組成を測定する対象として有用である．しかし，アパタイト中の水素同位体組成は拡散現象によって形成時の組成から変化し得るにも拘らず，拡散が起きていない仮定のもとアパタイト水素同位体組成が測定されてきた．したがって，太陽系天体の水の起源・進化を制約するには，実験により拡散係数を求め，アパタイト中の水素同位体組成変化を評価する必要がある．先行研究のHigashi et al. (2017)では，$^{2}H_{2}O$を拡散源としてフッ素アパタイトのフロー型の拡散実験を行い，二次イオン質量分析計（SIMS）による深さ方向分析によってc軸に平行な方向の拡散プロファイルを取得し，500 ˚C，600 ˚C，700 ˚Cにおける拡散係数を求めた．先行研究では拡散プロファイルの表面付近でのみのフィッティングから拡散係数を求めている．このことから研磨による傷や結晶の持つ欠陥等を通ることで早く拡散し(高速拡散)，格子拡散の拡散係数を得られていないことが考えられる．つまり，格子拡散と高速拡散の加重平均となり，自己拡散係数を正確に推定できていない可能性があった． そこで本研究では，先行研究での研磨よりさらに粒度の低い振動研磨法で実験試料の最終研磨を行い，アパタイト表面での損傷を軽減することを試みた．550 ℃，600 ˚C，650 ˚C，700 ˚Cの各温度で$^{2}H_{2}O$を拡散源としたc軸方向の実験により得られた試料に対してSIMSを用いて深さ方向の拡散プロファイルを取得した．フィックの第二法則に基づいたフィッティングでは，すべての条件で表面のみならずよくあうフィッティング結果がえられ，550-700℃での拡散係数の温度依存性は以下のように得られた．

$D=1.89\times10^{-6}\exp(-(205\pm11[\mathrm{kJ/mol}])/RT)$ [m^2/s]

これは，Higashi et al.（2017）によって報告された高速拡散の影響が減少していることを示している．これらの拡散係数は，格子拡散によるアパタイト中の水素自己拡散係数であり，代わりに採用されるべきである．また，拡散の活性化エネルギーはwet条件下での酸素拡散(Farver and Giletti, 1989)と一致したことから，アパタイト中では酸素と同様のメカニズムで水素が拡散することが示唆された．さらに，より詳細な拡散メカニズムの議論および，拡散係数の天然への適用のためにc軸方向に加えてc軸に垂直な方向の拡散係数の取得c軸鉛直方向の実験を試みたが，フィッティングの合う領域は表面付近のみであった．確度の良い拡散係数を得るため，700 ℃でのwet flowによるプレアニールを行い，更なる転位の除去を試みた．フィッティングはよく合い，さらにプレアニールを行なっていない実験結果とアレニウスプロット上で一直線上に乗る結果となった．これら全てのデータによる拡散係数の温度依存性は以下．$D=9.77\times10^{-6}\exp(-(208\pm27\mathrm{kJ/mol})/RT)$ [m^2/s]

活性化エネルギーはc軸方向のものと誤差の範囲で一致し，拡散係数はおよそ3倍であった．また，活性化エネルギーが一致するため，同様のOHを拡散種とする拡散が起きており，拡散係数の違いは幾何学的な距離によるものであることを提案する．

キーワード：アパタイト、水素、拡散、SIMS
Keywords: apatite, hydrogen, diffusion, Secondary Ion Mass Spectrometry



@Japan Association of Mineralogical Sciences.

低圧H_2-H_2O雰囲気下におけるフォルステライト蒸発の速度論

Evaporation kinetics of forsterite in low-pressure H_2-H_2O atmosphere

*稲田 栞里[1]、橘 省吾[1]
*Shiori Inada[1], Shogo Tachibana[1]

1. 東京大学
1. The University of Tokyo

背景：初期太陽系の高温・低圧環境における鉱物の蒸発（昇華）は，揮発性に依存した元素分別を通じて，惑星材料物質の化学進化に寄与する．この過程で重要となる鉱物の多くは，ケイ酸塩や酸化物などのイオン性～共有結合性化合物であり，氷などの分子性結晶とは異なり複数の気体分子種に分解しながら蒸発する．このような分解性の蒸発は，化学反応を伴う固-気相転移として理解でき，非平衡条件で進行する場合には，相界面の反応ダイナミクスが速度を決定づけると考えられる．Inada et al. (2024) [1] では，真空下の実験で定量された分解性蒸発速度が，結晶表層を構成する原子間の結合解離により説明されることが示された．一方，初期太陽系への応用の観点では，蒸発場に存在するガスの影響を考慮する必要がある．先行研究では，初期太陽系環境を模擬した低圧 (0.1-10 Pa) H_2雰囲気下で，初期太陽系の代表的ケイ酸塩鉱物であるフォルステライト(Mg_2SiO_4) の蒸発実験が行われ，蒸発速度がH_2圧力の1/2乗に比例して増加することが明らかにされた [2,3]．この実験結果は，蒸発を律速する表面反応にH_2が関与することを示唆するが，その具体的なメカニズムは不明である．

本研究では，雰囲気が蒸発に及ぼす影響についてより一般的な理解を得るため，第二の気体成分としてH_2Oを加えた1 PaのH_2-H_2O雰囲気下でフォルステライトの蒸発実験を実施する．初期太陽系の主要ガス成分の一つであるH_2Oは，ケイ酸塩表面と化学的に強く相互作用するため，蒸発速度に影響する可能性が高い．本研究では，雰囲気のH_2O/H_2分圧比と蒸発速度との関係に特に着目し，反応メカニズムの理解を目指した速度論的解析を行う．

手法：フォルステライト単結晶試料を1350-1600 Kの炉で3-48時間加熱し，加熱前後の重量変化から蒸発量を調べた．試料の加熱中， H_2-H_2O混合ガスを導入しながら炉を排気することにより，全圧を1 Paに維持した．ガス組成は，H_2とH_2Oの流量をそれぞれ制御することによりP_{H2O}/P_{H2} = 0–0.015で変化させ，四重極質量分析を用いて測定した．

結果・議論：実験を行った全ての温度で，H_2O存在下での蒸発速度が純粋なH_2中と比べて低下することが確認された．この効果は低温ほど顕著であった．さらに，蒸発速度低下がみられる条件において，蒸発速度とP_{H2}/P_{H2O}が比例に近い関係を示すことが明らかとなった（Fig. 1）．この関係から定義した速度定数のアレニウスプロットにより，H_2-H_2O雰囲気下での蒸発の活性化エネルギー~440 kJ mol^{-1}が得られた．この値は，H_2中の活性化エネルギー~330 kJ mol^{-1}よりも大きく，H_2O存在下で活性化エネルギーが増加することが示された．

これらの実験結果は，フォルステライト蒸発にH_2とH_2Oの両者が関与し，H_2の蒸発促進効果をH_2Oが抑制することを示す．このことから， H_2-H_2O雰囲気下でのフォルステライト蒸発は，H_2・H_2O・蒸発サイトの三体衝突を必要とする結晶表面と気体分子の直接反応（Eley-Rideal機構）ではなく，表面吸着種を経由した反応（Langmuir-Hinshelwood機構）であることが推測される．H_2による蒸発促進は，解離吸着が誘発する金属カチオンの還元 [4] と表面OH生成により説明できるが， H_2O解離吸着は後者の逆過程であり [5]，蒸発抑制の原因となっている可能性がある．また，本実験で得られた蒸発速度とP_{H2}/P_{H2O}の比例関係は，平衡蒸気圧のP_{H2}・P_{H2O}依存性と一致する．このことは，非化学平衡下の蒸発が，熱平衡的な状態分布のもとで進行することを示唆している．

本実験では，H_2O/H_2が太陽系平均6×10^{-4}の数倍となる条件で，蒸発抑制が確認された．このようなH_2

O濃集は，初期太陽系において，氷ダストのスノーライン内側への降着・昇華により実現した可能性がある[6]．このことは，始原的隕石中の高温構成物質をはじめとする惑星材料物質の蒸発速度が，蒸発場のH_2O濃集度に左右された可能性を示唆する．

[1] Inada et al. (2024) JCP 160, 154710. [2] Tsuchiyama et al. (1998) Mineral. J. 20, 113. [3] Takigawa et al. (2009) ApJ 97, L97. [4] Goumans et al. (2009) MNRAS 393, 1403. [5] Langel and Prrinello (1995) JCP 103, 3240. [6] Booth et al. (2017) MNRAS 469, 3994.

キーワード：フォルステライト、蒸発、速度論
Keywords: forsterite, evaporation, kinetics

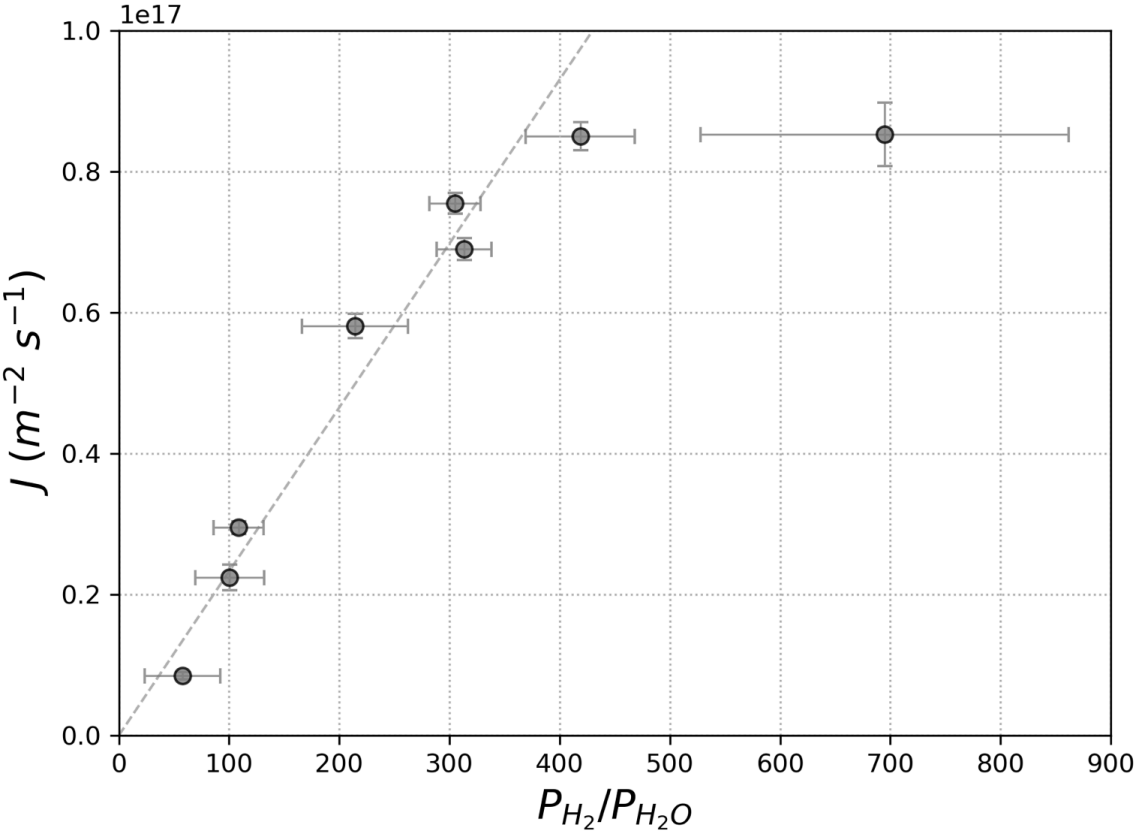


Fig. 1. 単位面積あたりの蒸発速度 $J\ (\mathrm{m^{-2}\ s^{-1}})$ と雰囲気ガス組成 P_{H2}/P_{H2O} の関係（全圧 1 Pa, 温度 1400 K）．

口頭講演

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

座長:則竹 史哉、永嶌 真理子、徳田 誠(熊本大学)

2024年9月14日(土) 09:00 〜 12:00 ES024 (東山キャンパス)

10:20 〜 10:30

[3Lecture-201-11-6add]休憩

©日本鉱物科学会

下部四万十層群佐伯亜層砂岩中に産するフランボイダルゲーサイトの成因

Origine of framboidal goethite in sandstone in the Saiki Subgroup of the Lower Shimanto Group

*大藤 弘明[1]、小西 星良[1]、山本 啓司[2]
*Hiroaki OHFUJI[1], Seira Konishi[1], Hiroshi Yamamoto[2]

1. 東北大・院理、2. 鹿児島大・理
1. Tohoku Univ. Sci, 2. Kagoshima Univ. Sci

はじめに

木苺状のフランボイダル組織は，顕微的なパイライトにおいてごく普遍的に見られるユニークな結晶化組織である．フランボイダルパイライトは，堆積岩中および現世堆積物中に広く産出し，そのサイズ分布は生成時の周囲の酸化還元環境の指標としても使われている．一方，例はそう多くはないが，ヘマタイトやゲーサイトなどの酸化，水酸化鉄からまりフランボイダル集合体も報告されている．それらはフランボイダルパイライトの仮像であると考えられているが，鉱物学的に詳細に調べられてはいない．一部の炭素質コンドライト隕石中にはフランボイダルマグネタイトが含まれ，それらは水熱反応により直接自生したと考えられているが，地表においても同様にパイライト以外の酸化鉄でもフランボイド状組織が形成されるかどうかは興味のあるところである．

本研究では，鹿児島県西部に分布する四万十層群佐伯亜層の砂岩中に含まれる酸化鉄よりなるフランボイダル集合体（江上ほか，2021）に着目し，微細組織と局所化学組成を調べ，その成因を検討した．

研究手法

本研究では，江上ほか（2021）で研究に使用された鹿児島県西部北薩地域西目地区に分布する下部四万十層群佐伯亜層群相当層より採取した，暗色球状粒子を多数含む砂岩試料を使用した．砂岩試料をエポキシ樹脂中に包埋して機械研磨したブロック試料と薄片試料をSEM-EDSで観察し，フランボイダル粒子の砂岩中での産状や組織の特徴と周辺領域を含めた化学組成分布を調べた．また一部のフランボイダル粒子からは集束イオンビームを用いて薄膜を切り出し，TEM（STEM-EDS）による微細組織観察と電子線回折による鉱物相の同定を行った．

結果と考察

観察の結果，フランボイダル粒子は砂岩中の局所に濃集して分布し，しばしばクラスター（ポリフランボイド）を形成していた．その周辺部には，変質によって生じた粘土鉱物が共存しており，石英，長石などの砕屑物の一部の交代変質や溶解の痕跡が普遍的に認められたが，パイライトや硫酸塩鉱物など硫黄を含む鉱物は一切認められなかった．フランボイダル粒子は後述するTEM観察（電子線回折）の結果，江上らが報告していたヘマタイトではなく，ゲーサイトで構成されることが分かった．フランボイダル粒子の多くは，構成マイクロクリスタルの粒間が充填されて境界が不明瞭になっており（infilled framboids），EDS分析の結果，それらの粒間にはSiやAlの局所濃集が観察され，変質粘土がフランボイド内部にも生じていることが分かった．

FIBを用いてフランボイダル粒子から切り出した薄膜のTEM観察では，マイクロクリスタルの内部および外部に同心円状の組織が観察され，それらが数十nmほどの微細なゲーサイトのナノクリスタルの層と粘土鉱物およびアモルファスシリカを主体とする層より構成されることが分かった．ゲーサイトの結晶はマイクロクリスタルの界面から内側へ向かって伸長成長しており，おそらく前駆体のパイライトのマイクロクリスタルを交代して形成されたことが明らかとなった．またマイクロクリスタルの界面より外側に向かって伸長成長したゲーサイトの被覆層も観察され，これがオリジナルのマイクロクリスタル粒間を埋めた結果，infilled組織が形成されたと推測された．以上の観察結果より，フランボイダルゲーサイトは，続成過程で地層中の間隙に生じ

たフランボイダルパイライトが酸化を受けてゲーサイト化した仮像であると結論付けられる.

キーワード：フランボイダルゲーサイト、フランボイダルパイライト、粘土鉱物、変質作用
Keywords: Framboida goethite, Framboidal pyrite, Clay mineral, Alteration

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

ウルトラナノライトの結晶化前駆現象：火山ガラス中に見られる液相不混和

Precursor phenomenon of ultrananolite crystallization: liquid immiscibility in the volcanic glass

*無盡 真弓[1]、松本 恵子[2]、三宅 亮[3]、伊神 洋平[3]、中村 美千彦[1]、横尾 亮彦[3]、吉本 充宏[4]
*Mayumi Mujin[1], Keiko Matsumoto[2], Akira Miyake[3], Yohei Igami[3], Michihiko Nakamura[1], Akihiko Yokoo[3], Mitsuhiro Yoshimoto[4]

1. 東北大学、2. 産業技術総合研究所、3. 京都大学、4. 山梨県富士山科学研究所
1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3. Kyoto University, 4. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government

近年，高数密度で晶出する30nmより小さいナノ結晶が安山岩質の火山岩の岩片中に見つかり［1］，石基中のマイクロライト，ナノライトとは区別をしてウルトラナノライトと定義がされた［2］．マグマだまり内での冷却により晶出する斑晶とは異なり，石基中のマイクロライトの結晶化の駆動力は，マグマが火道を上昇する際に減圧脱水し，鉱物のリキダス温度が上昇することで，実効的な過冷却が生じることによるものだと考えられ，1990年代以降，記載的な研究とともに減圧結晶化実験も精力的に進められた．つまり，火山岩中の結晶化の駆動力としては，温度が低下することによる「冷却」と「減圧脱水」による2種類が主に考えられている．ウルトラナノライトも同じ枠組みで考えられる結晶化なのかどうか，結晶化メカニズムはよくわかっていない．

高数密度のナノ結晶の結晶化メカニズムに関して，ソフトマターの分野において，亜リン酸トリフェニルという液液相転移をする物質を使った実験的な研究で，一度スピノーダル温度付近に条件をおいた後に結晶化温度で保持すると，核形成頻度が増大したという論文が報告された［3］．古くから特に玄武岩の溶岩において，液相不混和の存在は知られている［4］．最近，海底溶岩中にナノスケールの液相不混和が観察され，そこにナノ結晶が生じているという論文が報告された［5］．しかし，火山岩中のナノ結晶と液相不混和の関係性について報告された論文は，この論文のみで事例が少なく，普遍性や結晶化メカニズムとの関係についてはよくわかっていない．液相不混和がよく観察される溶岩は，一般的には冷却速度が遅く，液相不混和と冷却の効果を区別することは難しい．そこで本研究では冷却速度が速いと考えられる火砕物を対象に，ウルトラナノライトの結晶化と液相不混和との関係について調べた．火砕物は，富士山の宝永噴火のスコリア32粒子，三宅島の新鼻新山のスコリア6粒，阿蘇山の2014年11月27日と12月10日のスコリア3粒子を用いた．電解放出型-走査型電子顕微鏡（FE-SEM）を用いて全体をよく観察した上で，ラマン分光分析および透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて，結晶とガラスの有無を確かめた．

富士山のスコリアの中には，マイクロライトが高結晶度で晶出し，その粒間にバイノーダル型で分解したと考えられる液滴が存在するものもあったが，多くのスコリアは，マイクロライトが低～中結晶度でガラス部分が残っていた．以下ではマイクロライトが低～中結晶度のスコリアの観察，分析結果をまとめる．FE-SEMの反射電子像において，斜長石マイクロライトと石基の界面で，輝度の高い膜や50nmより小さな斑点をよく観察することができた．これらは輝石との界面では見られなかった．STEM-EDS（走査透過電子顕微鏡に装着したエネルギー分散型X線分析装置）を用いた分析より，輝度の高い膜や斑点は比較的Feに富むものであることがわかった．阿蘇のスコリアの斜長石の周囲の斑点は，三宅島や富士山のそれよりも大きかった．阿蘇ではラマン分光分析やTEMを用いた分析でナノ結晶の晶出が確認されず，これらの膜や斑点は組成の異なるガラスであることがわかった．一方で，富士山や三宅島の場合，ナノ結晶が晶出している領域もみられ，Fe-richな層から晶出しているように見えた．

斜長石周囲で見られたこと，斜長石から遠くなるにつれて斑点が小さく見えにくくなることから，膜や斑

点は，Honourら［6］が提案したものと同様に，斜長石の組成境界層で生じた液相不混和によるものだと考えられる．この場合，実験的に考えられている液相不混和がおこる温度よりも高温で液相不混和が生じる可能性があることが示唆されている．ナノ結晶の晶出は，Fe-richな層が構造や組成的に結晶を作りやすいためだと考えられ，液相不混和がウルトラナノライトの結晶化の前駆現象であった可能性がある．液相不混和がおこることで，想定される過冷却度よりも小さい過冷却度でウルトラナノライトの結晶化が生じている可能性がある．一方で，阿蘇のように，スピノーダル分解型の液相不混和の波長が大きくても，ナノ結晶が晶出しない場合もあった．ウルトラナノライトの結晶化には液相不混和に加えて結晶化を引き起こすきっかけが必要だと考えられる．

参考文献

[1] Mujin and Nakamura, (2014）*Geology*, [2] Mujin et al., (2017) *Am. Mineral.*, [3] Kurita and Tanaka (2019) *PNAS*, [4] Fujii et al., (1980) *Jour. Geol. Soc. Japan*, [5] Thivet et al (2023) *Commun. Earth & Environ.*, [6] Honour, V. et al., (2019) *Nat. Commun.*

キーワード：液相不混和、ウルトラナノライト、ナノ結晶、火山ガラス
Keywords: liquid immiscibility, ultrananolite, nanocrystal, volcanic glass

熱量測定による$MgAl_2O_4$スピネルの陽イオン無秩序エンタルピーの制約

Calorimetric constraint of cation disordering enthalpy in $MgAl_2O_4$ spinel

*糀谷 浩[1]、松木 龍志[1]、西村 祐太[1]、大平 格[1]
*Hiroshi KOJITANI[1], Ryuji Matsuki[1], Yuta Nishimura[1], Itaru Ohira[1]

1. 学習院大学
1. Gakushuin University

スピネル型酸化物AB_2O_4において、温度の上昇に伴って四面体型と八面体型の陽イオンサイト間で陽イオンAとBの交換の割合が大きくなることが一般的に知られている。その陽イオンサイト間における交換反応は (A)^{tet} + [B]^{oct} (B)^{tet} + [A]^{oct} と表される。四面体サイトを占めるBイオンのモル分率をxとしたときの化学組成式は、$(A_{1-x}B_x)[B_{2-x}A_x]O_4$となる。$x$は無秩序の程度と呼ばれ、$x = 0$のとき正スピネル構造、$x = 1$のとき逆スピネル構造となる。この交換反応において、$x = 0$の時の完全な正スピネル構造と、あるxの値を持つスピネル構造とのギブスエネルギー差が無秩序化のギブスエネルギー$\Delta G_D = \Delta H_D - T\Delta S_D$である。ここで、$\Delta H_D$および$\Delta S_D$は、無秩序化のエンタルピーとエントロピーである。なお、ΔS_Dは完全ランダムを仮定した配置のエントロピーに等しいとする。このΔG_Dが最小となるところで熱力学的に平衡となることから、$d\Delta G_D/dx = d\Delta H_D/dx - T(d\Delta S_D/dx) = 0$ よりxとTの関係式：

$$RT\ln[x^2/(1-x)/(2-x)] = -d\Delta H_D/dx \quad (1)$$

が導かれる。これまでNMR測定や単結晶X線回折測定を用いて式(1) のxとTの関係を決定する研究がなされてきたが、測定試料のxが凍結された温度が不確実であったり、高温NMRではデータのばらつきが大きかったりしたため、未だに十分に制約がなされていない。本研究では、それらの研究とは異なり、式(1)中のΔH_Dを落下溶解熱量測定から決定することによ$x-T$関係を熱力学的に求める手法を採る。昨年度はx = 0.23、0.30、0.35の3つのxにおいて測定データを報告した。ΔH_Dのx依存性をモデル化するためには、より広範囲にわたる様々なxでのデータを取得する必要があった。そこで、本研究では、さらに落下溶解熱測定により３つのデータを追加し、ΔH_Dのｘ依存性のモデル化について検討を行った。

合成$MgAl_2O_4$スピネルについて、873K、1173 K、または1473 Kでアニール後急冷した3種類の試料を準備した。それぞれについてリートベルト解析により酸素の原子座標パラメータuを決定し、Andreozzi and Princivalle (2002)による$x-u$関係からxの値を求めた。落下溶解熱測定にはカルベー型高温微少熱量計を用いた。ペレット状に固めた約3 mgの試料を、室温の熱量計の外から978 Kの熱量計内に置かれたホウ酸鉛（$2PbO{\cdot}B_2O_3$）溶媒に落下させ、落下溶解エンタルピー（$\Delta H_{d\text{-}s}$）を測定した。

873、1173、または1473 *Kの各温度でアニールした試料のxは、リートベルト解析の結果から得られたuより、それぞれ0.20、0.23、0.32と決定された。落下溶解熱測定による$\Delta H_{d\text{-}s}$は、163.39±2.29* (x = 0.20)、162.66±2.52 (x = 0.23)、160.63±0.99 (x = 0.32) kJ/molであった。落下溶解熱測定の結果を昨年の報告値と併せてFig. 1に示す。測定誤差を考慮すると、xの変化に伴い$\Delta H_{d\text{-}s}$はほぼ直線的に変化することがより明確になった。このことから、ΔH_Dをxの一次関数：

$$\Delta H_D = \Delta H_{int} \quad x \quad (2)$$

とすると、無秩序化の程度がxのスピネルの落下溶解エンタルピーは

$$\Delta H_{d\text{-}s}(x) = \Delta H_{d\text{-}s}(0) - \Delta H_{int} \quad x \quad (3)$$

と表せる。ここで、ΔH_{int}は1 molの完全な$MgAl_2O_4$正スピネルを完全なAl(Mg,Al)O_4逆スピネルにするために必要となるエンタルピーである。測定データに式(3)を用いて重み付けを適用した最小二乗フィットを行うと、$\Delta H_{d\text{-}s}$(x=0) =169.0(2.9) kJ/mol、ΔH_{int} = 25.9(9.8) kJ/molが得られる。また、O‘Neill and Navrotsky (1983)では、理論的にΔH_Dをxの2次式

$$\Delta H_D(x) = \alpha x + \beta x^2 \quad (4)$$

のモデルで取り扱うことができるとしている。ここで、 α と β は係数である。敢えてこのモデルを適用して

$$\Delta H_{d\text{-}s}(x) = \Delta H_{d\text{-}s}(0) - (\alpha x + \beta x^2) \quad (5)$$

で最小二乗フィットを行うと、$\Delta H_{d\text{-}s}(0)$ = 169.0(2.9) kJ/mol、α = 25.9(9.8) kJ/mol、β = −0.02(2.3) kJ/molが得られる。O‘Neill and Navrotsky (1983)によると$\alpha \simeq -\beta$とされているが、本研究の熱量測定からはβはαに比べてかなり小さな値となることが制約された。したがって、従来のスピネル型化合物の無秩序化のエンタルピーΔH_Dの熱力学モデルには、再考の余地がある。

キーワード：スピネル、陽イオン無秩序、熱量測定、無秩序化エンタルピー、熱力学
Keywords: spinel, cation disorder, calorimetry, enthalpy of disordering, thermodynamics

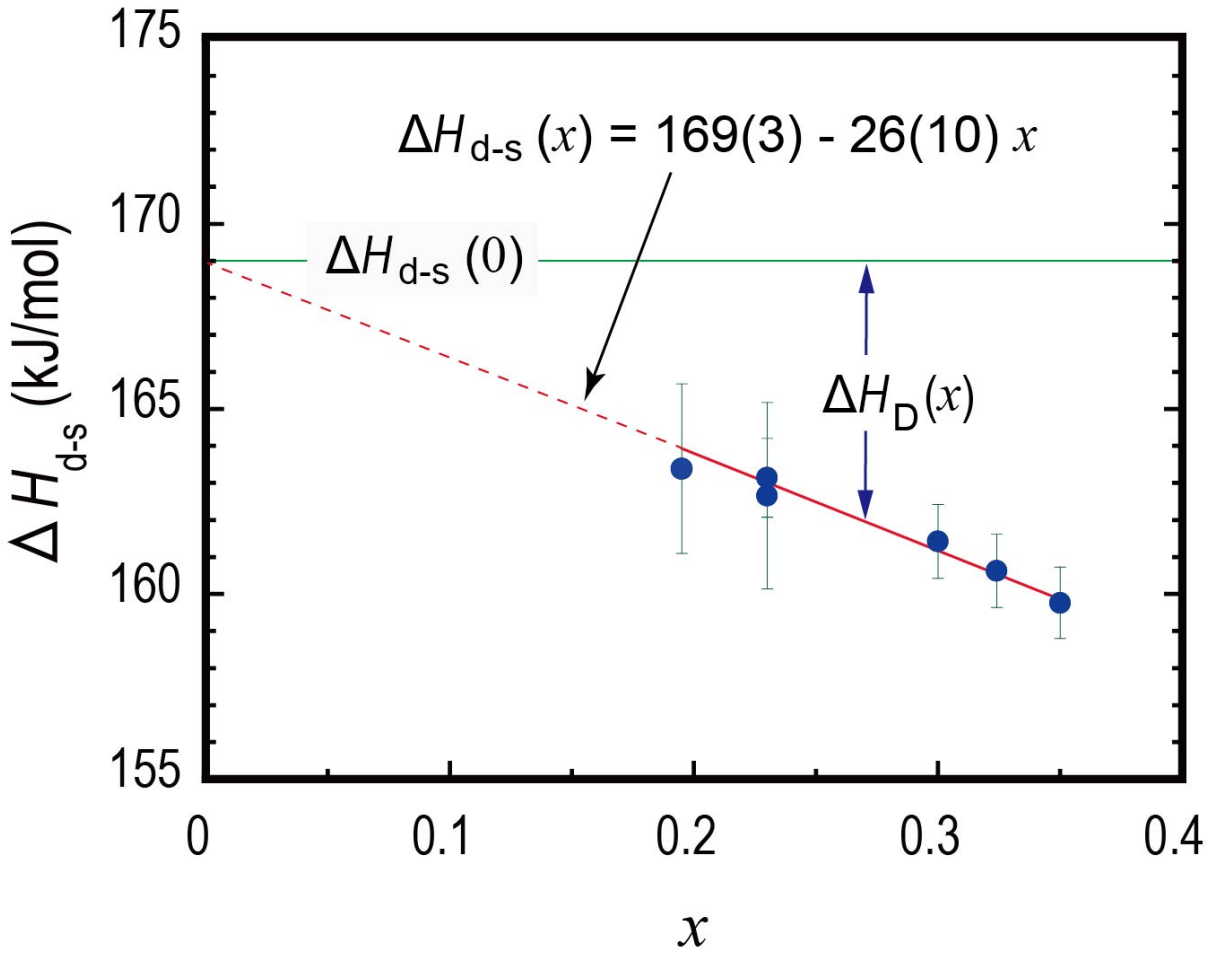


Fig. 1. 様々な陽イオン無秩序化の程度を持つ $MgAl_2O_4$ スピネルの落下溶解エンタルピー測定結果

ペロブスカイト型$SrTiO_3$へのNa^+とK^+の固溶について

Solid solubilities of Na^+ and K^+ in perovskite type $SrTiO_3$

北井 亮吾[2]、*永井 隆哉[1]、川野 潤[1]、篠崎 彩子[1]
Ryogo KITAI[2], *Takaya NAGAI[1], Jun KAWANO[1], Ayako Shinozaki[1]

1. 北大・院理、2. 北大・理
1. Hokkaido Univ. Faculty SCi., 2. Hokkaido Univ. School SCi.

ABO_3で表されるペロブスカイト構造を有する酸化物結晶は、多様なイオンの固溶に寛容であることが知られている。そのチタン酸塩$A^{2+}Ti^{4+}O_3$の場合の固溶メカニズムとしては、A^{2+}やTi^{4+}を他の2価や4価の陽イオンでそれぞれ置換するものだけでなく、結晶全体の電荷を中性に保つように、2個のA^{2+}を1価と3価の陽イオンでカップル置換したり（例：$2Sr^{2+}\rightarrow Na^{+}+La^{3+}$）、$A^{2+}$と$Ti^{4+}$をそれぞれ3価の陽イオンで置換したり（例：$Ca^{2+}+Ti^{4+}\rightarrow La^{3+}+Al^{3+}$、1価と5価の陽イオンでカップル置換する（例：$Ca^{2+}+Ti^{4+}\rightarrow Na^{+}+Nb^{5+}$）ものなど多くが知られている。その他にも、$Ti^{4+}$を3価の陽イオンで置換すると同時に電荷補償のために酸素欠陥を導入するメカニズムもあり、私たちの研究室では$Ti^{4+}\rightarrow Al^{3+}$の置換に伴う構造変化や$Al^{3+}$の局所構造を調べてきた。ところで、酸素欠陥を導入するメカニズムは、A^{2+}を1価の陽イオンだけで置換した場合にも成立しそうであるがそのような研究例を見つけられていない。そこで本研究では、立方晶系のペロブスカイト構造を持つ$SrTiO_3$への、Na^+とK^+の固溶について調べた合成実験の結果を報告する。なお、Shannon(1976)によるとNa^+とK^+の6配位におけるイオン半径はTi^{4+}よりはるかに大きく、12配位のイオン半径はSr^{2+}と近いことから、Na^+とK^+はSr^{2+}のみを置換すると仮定した。

合成実験の出発物質は$SrCO_3$、アナターゼ型TiO_2、Na_2CO_3またはK_2CO_3の粉末試薬を用い、焼成後のバルク組成が$Sr_{1-x}Na_xTiO_{3-0.5x}$または$Sr_{1-x}K_xTiO_{3-0.5x}$（x=0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50）として各試薬を秤量し、アルミナ乳鉢と乳棒を用いて十分に混合した。なお、Na_2CO_3については3 wt%過剰に秤量、混合した。その後、WC製のペレタイザーでペレット化し、高温炉で、室温から45 ℃/hで1050 ℃まで昇温し、48時間焼成した後、炉外に迅速に取り出して急冷、回収した。回収試料は粉末X線回折装置を用いX線回折パターンを測定し、生成相の同定、ペロブスカイト構造相の格子定数の精密化などを行った。

バルク組成が$Sr_{1-x}Na_xTiO_{3-0.5x}$のX線回折パターンについては、xが0～0.1においては立方晶系のペロブスカイト構造相として説明可能なピーク以外は出現していないが、x=0.2と0.5については、$Na_2Ti_6O_{13}$、$Na_2Ti_3O_7$などと同定可能なピークが共存した。バルク組成が$Sr_{1-x}K_xTiO_{3-0.5x}$のX線回折パターンについては、xが0～0.1においては立方晶系のペロブスカイト構造相として説明可能なピーク以外は出現していないが、x=0.2と0.5については、$K_2Ti_6O_{13}$と同定可能なピークが共存した。立方晶系のペロブスカイト構造相として説明可能な相の格子定数の変化は、バルク組成が$Sr_{1-x}Na_xTiO_{3-0.5x}$については、xが0～0.1においては約0.001 Å減少し、$Sr_{1-x}K_xTiO_{3-0.5x}$については、xが0～0.1においては約0.001 Å増加した。しかしいずれもx=0.2と0.5において生成した立方晶系のペロブスカイト構造相として説明可能な相の格子定数はx=0.1のときの値とほぼ変化がない。格子定数の減少と増加の傾向は、Na^+とK^+のSr^{2+}に対するイオン半径の大小関係から説明可能で、Na^+とK^+いずれも$SrTiO_3$へSr^{2+}を置換し、酸素欠陥を生成する形で10 mol%程度まで固溶することがわかった。

キーワード：ペロブスカイト構造、SrTiO3、ナトリウム、カリウム、酸素欠陥
Keywords: perovskite structure, SrTiO3, Na, K, oxygen vacancy

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

ペロブスカイト構造を有する(Li,La)TiO_3のLi電導度測定値とSIMS測定中のLi移動の整合性に関する研究

Study on the consistency of Li conductivity measurements of (Li,La)TiO_3 with perovskite structure and Li migration during SIMS measurements

*坂口 勲[1]、大西 剛[1]
*Isao SAKAGUCHI[1], Tsuyoshi Onishi[1]

1. 物質・材料研究機構
1. National Institute for Materials Science

「緒言」カーボンニュートラルで温暖化を抑制する方向に社会が動き出し、この流れを受けてリチウム２次電池、水素燃料電池他の研究が推進されてる。リチウム２次電池の中でも車載に向けた全固体Li電池の開発はカーボンニュートラルの達成、電気自動車の安全性に重要と位置付けられ、活発な研究・開発が行われている。全固体リチウム電池を構成する電解質では多くの酸化物が提案されている。ここではその中でもペロブスカイト構造を有する酸化物である(Li,La)TiO_3を取り上げる。この物質のLi電導度は粒子内のバルク電導度が大きく$1x10^{-3}$ S/cmに達する、一方で結晶粒界ではLi電導度が小さく($1x10^{-4}$ S/cm)、粒界での電導度の改善が課題となっている。このような室温で物質内を移動するLiを分析するには軽元素分析に有利な２次イオン質量分析法が考えられるが、イオンをサンプル表面に照射するために、照射による表面電荷の蓄積によりLiが移動してしまう。通常はサンプル冷却のような機構は必要である。今回、表面電荷の蓄積を利用したLi電池電解質に関して２次イオン質量分析法を応用する新しい手法を試した。その得られた分析結果と電気的評価を合わせて紹介する。

「実験」

(Li,La)TIO_3（以下、LLT）は東邦チタニウム社から板、ディスク、粉末等を購入でき、今回は標準サンプルとして板状を利用した。これに対する比較試料は新たに合成した。サンプル合成はLLT粉末（豊島製作所）と酸化ランタン（La_2O_3 高純度科学）を用いて合成した。La_2O_3の使用に際して、粉末を1000 ºCで3時間加熱し、水成分を取り除いた。使用したLLT粉末はLiリッチの組成(($La_{0.57}$,$Li_{0.29}$)TiO_3)でCubic構造である。これにLa_2O_3を添加し、目的のLi電導度になるように合成した。分析はNIMS設置のSIMS (CAMECA, IMS-4f)を利用し、酸素負イオンを１次イオンに、正の2次イオンを検出した。照射した1次イオンの電流量は2-3 nA程度あり、400x400 μm領域を走査した。

「結果と議論」

図１に購入したLLTの分析結果を示す。図1(a)は1次イオン照射直後のLiの2次イオンイメージで、Liは全体的に均一な強度が得られた。図1(b)は1次イオンを連続照射した後のLiの2次イオンイメージである。Liの強度には明らかな不均一性が見られるようになった。このディスクは数百μmの巨大粒子の隙間を数十μmの粒子が埋める構造である、これを考えると図1(b)のLi強度分布はディスク内の微細構造を反映している。分析中に1次イオン、酸素負イオン、を照射すると、照射領域はマイナスになる、Liはプラスイオンであり、その電荷を補償するようにLiが移動すると考えられる。Liが高強度に変化した領域は巨大粒子であり、Li電導度が$1x10^{-3}$ S/cmに達している領域である。1次イオンの電流密度が小さいために、表面に移動してきたLiは酸素と反応しLiO_xを生成していると考えられる。また、Li強度が小さい領域は数十μmの粒子が多い領域であり、粒界の寄与が大きくなる。粒界のLi電導度は$6x10^{-4}$ S/cmであるために、ディスク内のLiの移動量が少ないために、このようなLi強度の不均一が生成されたと考えられる。

「まとめ」Li電池の電解質のような物質では室温でLiが物質内を移動する。このため、2次イオン質量分析法のような手法では評価が難しい。今回の研究で、1次イオン照射で表面の電荷状態を変化させることでLiを移動

させられることが明らかとなり、その移動経路が電気的測定で分かる移動経路と同じであることが分かった。この手法を最適化することにより、結晶方位や粒界の詳細な評価が可能となると期待している。

キーワード：ペロブスカイト構造
Keywords: Perovskite structure

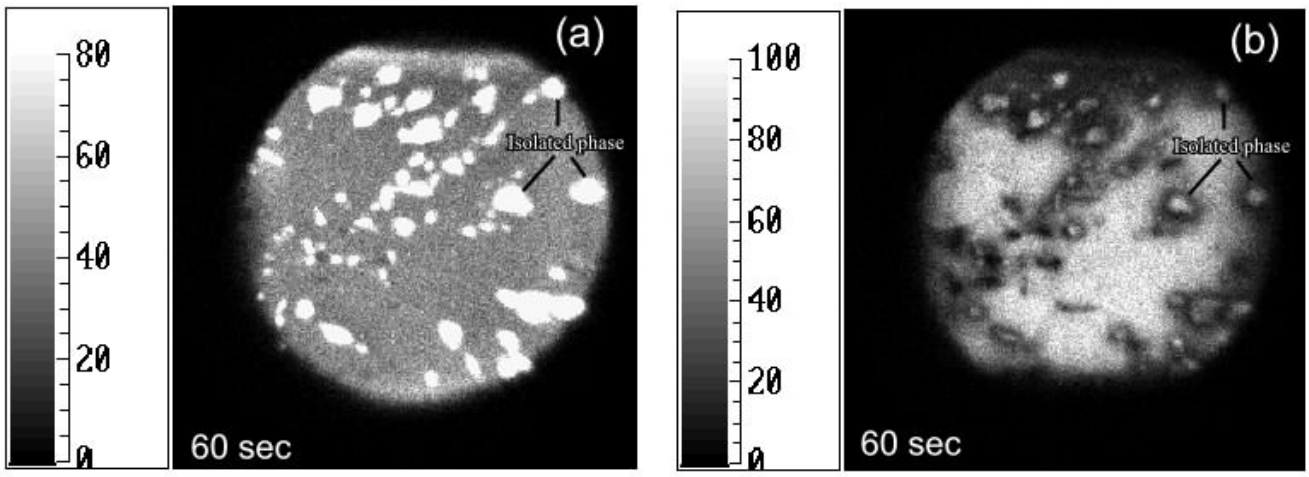


Fig. 1. Li images obtained by SIMS. (a) is the first image by O- irradiatation. (b) is the image obtained after about 1.5 hours.

Fe-Ti-O 相の高圧構造転移機構

Structure transition mechanism under high pressure of Fe-Ti-0 system phases

*山中 高光[1,2]、服部 高典[3]、毛 河光[1]
*Takamitsu YAMANAKA[1,2], Takanori Hattori[3], Ho-kwang Mao[1]

1. 中国高圧科学技術研究中心、2. 大阪大学大学院理学研究科、3. 日本原子力研究所
1. Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, 2. Graduate School of Science Osaka University, 3. J-PARC

緒言　珪酸鉱物に含まれる酸化鉱物や硫化鉱物のフェリ磁性を示す多くの磁性鉱物は、古地磁気の研究や、プレートテクトニックスなどの地球物理の研究対象にされて来た。とくにFe-Ti-O系の研究は、Ishikawa et al. (1971), Akimoto et al. (1957)がなされ, また高圧下の相平衡実験もYamanaka et al. (2013), Akaogi et al. (2016)が行った。　ulvöspinel-magnetite series ($Fe_{3-x}Ti_xO_4$), ilmenite-hematite series ($Fe_{2-x}Ti_xO_3$), pseudobrookite series ($Fe_{1+x}Ti_{2-x}O_5$) は地球物質として、広く分布している。近年極端条件下での誘電体，半導体，金属などの構造物性について温度，圧力に即応した物性変化の研究,電子状態の格子力学的な効果,格子振動，原子間の電子密度，電子状態の変化の研究がなされて来た。それぞれ高圧転移でFe_2TiO_4 （cubic spinel→tetragonal spinel→hp-spinel→postspinel）, $FeTiO_3$は（ilmenite→perovskite→$CaIrO_3$型）に準安定構造である急冷構造の$LiNbO_3$型、またFe_2TiO_5(pseudobrookite)は(Fe_2O_3とTiO_2に分解)が報告されている。
実験　Fe-Ti-O 相は陽イオン間の圧力効果の変化を，DACを用いて，それぞれの試料についてJ-PARCでの高圧中性子回折で陽イオン分布解析を行った．正確なFe, Tiの原子位置の、圧力依存を解析した。X線の原子散乱因子はFe(26) Ti(22)で散乱能に差がないが、中性子散乱断面積はFe(9.54fm)とTi(-3.30fm)で大きな差があり解析精度が著しく向上する。パルス中性子源を用いてParis-Edinburgh pressを利用して28 GPaまで高圧回折実験を行った。**解析結果**　**1.**上記の物質の結晶構造は酸素原子の秩序配列で構成され、形成される陽イオンのsite symmetryが構築される。酸素原子による4、5、6、7、８配位などのサイトができる。　**2.** 物質の状態の圧縮率、ヤング率、剛性率、体積弾性率、状態方程式（EOS）などがある。３次のBirch –Murnaghan状態方程式の式を用いて等温過程での、unit cellや構成する幾つかの陽イオン、さらに空孔サイトの高圧での熱力学的な圧力効果を明らかにした。スピネル構造の酸素原子の四面体（-43*m*）と八面体(.-3*m*)と空隙サイトが構築される.しかし陽イオンは前者の1/8, 後者の1/2の位置に秩序分布しており、残りは空隙である。　**3.** 大部分の空孔サイトは単位胞体積の60%以上である。空孔サイトの存在確率が圧力と供に変化する。Fe_2TiO_4, $FeTiO_3$, Fe_2TiO_5の高圧多形はいずれも２つの異なる陽イオンサイトFe^{2+}, Fe^{3+}, Ti^{4+}が存在し、加圧にともなり圧縮率が異なる。単位胞の体積弾性率は最も多い空孔サイトに起因していることが明らかになった。　**4.** FeO_6とTiO_6八面体の圧縮率の違いは*d-p-p*　結合の電子密度分布の圧力変化が異なる。Fe^{2+} ($3d^6$)の方がTi^{4+} ($3d^0$)よりも電子状態分布の圧力変化が大きい。 固溶体の磁性は、主として Feイオンの分布か〝担っている。**5.** X線エミッション（XES）実験から加圧にともなり、high spin状態にあるFeの電子状態が low spin状態や intermediate spin状態に移行する。Fe-O原子間距離が収縮すし、圧縮率がます事が明らかになった。
Akimoto S J. Geomagnetism and Geoelectricity **8**, 1-14 (1954)Ishikawa Y and Syono Y Phys. Rev. Lett **26**, 1335 (1971)Yamanaka T, Kyono A, Nakamoto Y, Meng Y, Kharlamova S, Struzhkin VV, Mao HK Am Miner 98:736–744 (2013)Akaogi, M.; Abe, K.; Yusa, H.; Ishii, T.; Tajima, T.; Kojitani, H.; Mori, D.; Inaguma, Y. (2016). Physics and Chemistry of Minerals, 66, (2016)

キーワード：ウルヴォスピネル、イルメナイト 、擬ブルッカイト
Keywords: ulvöspinel, ilmenite, pseudobrookite

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

口頭講演 | R5：地球外物質

2024年9月14日(土) 9:00 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

9:00 ~ 9:15

[R5-01] 非晶質ケイ酸塩の凝縮実験と分光分析から制約されるAGB星周ダストの化学組成の多様性

「発表賞エントリー」

*榎本 華子[1]、瀧川 晶[1]、茅原 弘毅[2]、小池 千代枝[2] (1. 東大・地惑、2. 大阪産業大)

9:15 ~ 9:30

[R5-02] 炭素質コンドライトDOM 08006中のプレソーラー酸化物から探る星周ダストの形成過程

「発表賞エントリー」

*橋爪 宏幸[1]、瀧川 晶[1] (1. 東京大・院地惑)

9:30 ~ 9:45

[R5-03] 原始惑星系円盤を運動するダストの不可逆化学反応の進行

*石﨑 梨理[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・地惑)

9:45 ~ 10:00

[R5-04] 蒸発–結晶化実験によるタイプB CAI形成における昇温過程での蒸発の影響の評価

「発表賞エントリー」

*鶴岡 靖朗[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・院理)

10:00 ~ 10:20

[R5-05] 揮発性物質を含んだ微惑星の衝突によるコンドリュールの形成

「招待講演」

*城野 信一[1] (1. 名古屋大・環境学)

10:20 ~ 10:35

[3Lecture-301-10-6add] 休憩

10:35 ~ 10:55

[R5-06] コンドルール構成鉱物の化学組成から制約する真のコンドルール形成期間

「招待講演」

*福田 航平[1]、木多 紀子[2]、木村 眞[3] (1. 阪大・院理、2. ウィスコンシン大、3. 国立極地研究所)

10:55 ~ 11:10

[R5-07] 放射状輝石コンドリュールの形成プロセス：浮遊させたメルトの結晶化実験に基づく制約

「発表賞エントリー」

*渡邉 華奈[1]、中村 智樹[1]、森田 朋代[1] (1. 東北大・院理)

11:10 ~ 11:25

[R5-08] ポイキリティック・シャーゴッタイト火星隕石の岩石組織・鉱物組成多様性から読み解く母岩体層状構造の推定

「発表賞エントリー」

*山﨑 奏次郎[1]、山口 亮[2]、三河内 岳[3] (1. 東大・院理、2. 国立極地研、3. 東大・総研博)

11:25 ~ 11:40

[R5-09] 火星隕石Asuka 12325のTi-Crに富むスピネルの高圧相転移

*竹之内 惇志[1]、伊神 洋平[2]、三河内 岳[3]、三宅 亮[2]、山口 亮[4] (1. 京大・総博、2. 京大・院理、3. 東大・総研博、4. 極地研)

11:40 ~ 11:55

[R5-10] シリカ鉱物を用いたメソシデライトの熱史推定

*大野 遼[1]、竹之内 惇志[2]、三河内 岳[3]、山口 亮[4]、杉浦 直治[5]、三宅 亮[1] (1. 京大・理、2. 京大博、3. 東大博、4. 極地研、5. 千葉工大)

11:55 ~ 12:00

調整

非晶質ケイ酸塩の凝縮実験と分光分析から制約されるAGB星周ダストの化学組成の多様性

Revealing Chemical Compositional Variety of Amorphous Silicate Dust around AGB Stars by Condensation Experiment and Spectroscopic Analysis

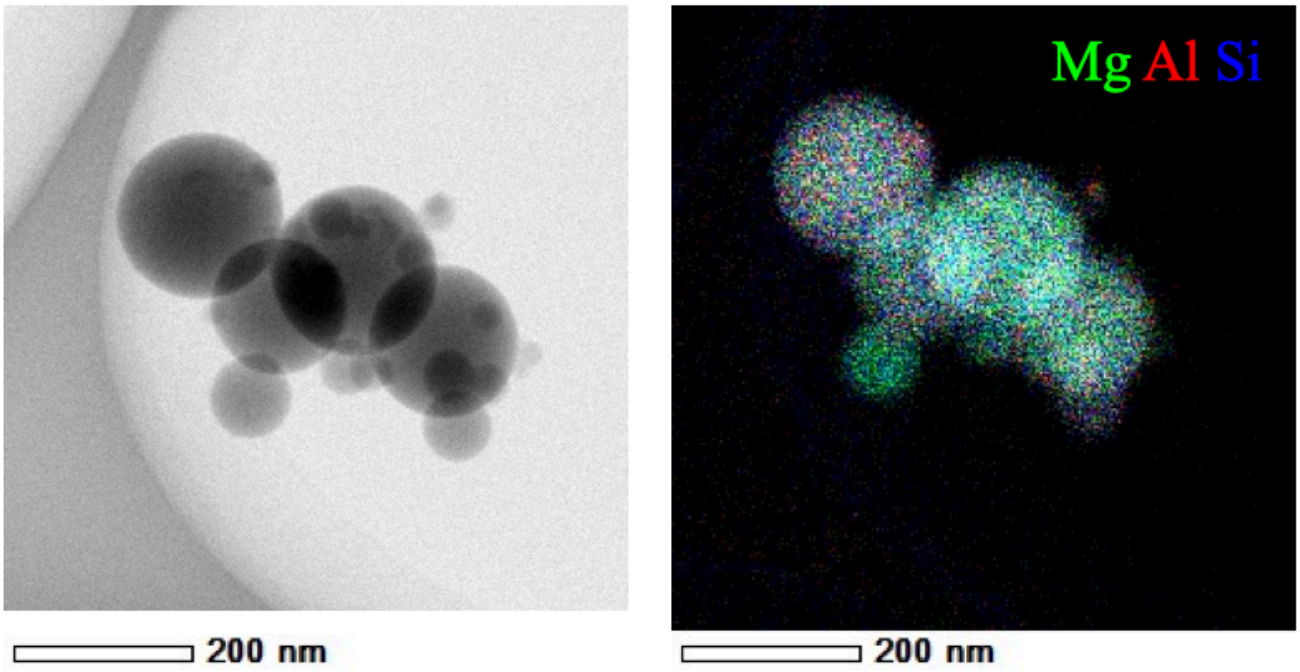
*榎本 華子[1]、瀧川 晶[1]、茅原 弘毅[2]、小池 千代枝[2]
*Hanako Enomoto[1], Aki Takigawa[1], Hiroki Chihara[2], Chiyoe Koike[2]

1. 東大・地惑、2. 大阪産業大
1. UTokyo, 2. Osaka Sangyo univ.

進化末期の中小質量星である漸近巨星分枝 (AGB) 星は，先太陽系から生き残ったプレソーラー粒子の主な起源である．AGB星起源のプレソーラーケイ酸塩は，(Mg+Fe)/Siの値に幅があることや(Floss & Haenecour, 2016)，Alに富む非晶質ケイ酸塩の存在が明らかになっている(Nguyen et al., 2016)．一方，酸素に富むAGB星の観測スペクトルは10，18 μmに非晶質ケイ酸塩ダストに由来するピークを示す．ピークの位置や幅が星ごとに異なることから，星周ダストの化学組成も多様であることが示唆される．しかし，非晶質ケイ酸塩の具体的な化学組成の制約は困難で，星周ダストとプレソーラー粒子の性質がどのように対応するのかは，十分に議論されていない．従来，AGB星周ダストは，複数の観測データと鉱物の実験室データから合成された光学定数が与えられた「アストロノミカルシリケイト」で広く解釈されてきた (Draine&Lee, 1984; Ossenkopf et al., 1992)．しかし，アストロノミカルシリケイトは，化学組成や構造が想定されていない架空の物質であり，ダストの形成条件や過程を議論できない．また，実験によって様々なダスト模擬物質が合成されてきたが (Dorschner, et al., 1995, Jäger et al., 2003, Mutschke et al., 1998)，アストロノミカルシリケイトに代わり観測を解釈できる物質は提示されていない．これはダストの模擬物質として使われる非晶質ケイ酸塩の多くがMg-Si-Fe系の化学量論的組成で合成され，ダストの化学組成制約に利用できる光学定数が限られているためである．そこで，本研究は，Mg-Al-Si，Mg-Ca-Al-Si系で系統的な凝縮実験を行い，ダスト模擬物質の光学定数を決定した．誘導熱プラズマ装置（JEOL TP-40020NPS; Kim et al., 2021）を用い，出発物質の組成を系統的に変化させたダスト凝縮実験を行った．生成物の結晶相をXRD (Rigaku RINT-2100)，バルク組成をEPMA (JEOL JXA-8530F)，粒子ごとの組成と構造をSTEM (JEOL JEM-2800）で分析し，KBr媒質に分散させた生成物の吸光度を測定した (JASCO FT/IR-4200）．一部の生成物について，生成物を圧密したペレットで反射率を測定した（Thermo Nicolet 6700)．生成物の光学定数は，反射率から決定した高波数での誘電率を用いて，吸収スペクトルをローレンツ振動子モデルでフィッティングすることによって求めた．また，決定した光学定数を用い，KBr媒質の影響のない，すなわち真空中での生成物の吸収スペクトルを，球状粒子を仮定し直径0.1-10 μmのサイズ範囲で算出した．生成物は主に球状の非晶質ナノ粒子（10-150 nm）であり，バルク化学組成は出発物質からわずかに変化していたが，出発物質が完全に蒸発しなかったためである．Mg-Al-Si系では，Al/Siが0.07から0.53までの非晶質ケイ酸塩が生成した．Mg-Ca-Al-Si系では，(Mg+Ca)/Si~1のもとで0から1のCa/Mg比を持つ生成物，(Mg+Ca)/Si~2のもとでCa/Mg~0.2, 0.5の生成物が得られた．ケイ酸塩の吸収ピークには，次のような組成依存性が見られた．Al/Siが0.07から0.53に増加すると，10 μmピークは9.4から9.6 μmに移動した．Ca/Mgが0から1に増加すると，10 μmピークは9.4から9.7 μmへ，18 μmピークは17.7から19.1 μmへ移動した．(Mg+Ca)/Si~1から2へ変化すると，10 μmピークは長波長へ，18 μmピークは短波長へ系統的に変化した．最もケイ酸塩に富むグループのAGB星であるTY DraとIK Tau のダストスペクトルと，実験生成物の吸収スペクトルの計算結果を比較した．TY Draは1.5 μmサイズのCIコンドライト的組成（$Mg_{0.89}Al_{0.07}Si$）の非晶質ケイ酸塩で，IK Tauは< 1 μmサイズのAlに富む非晶質ケイ酸塩（$Mg_{0.93}Al_{0.53}Si$）で最もよく再現された．本研究により，アストロノミカルシリケイトで解釈できなかった，星ごとに異なるダストの化

学組成が制約された．しかし，最もケイ酸塩に富むと分類されるAGB星にもAlに富むダストが存在することは，プレソーラーケイ酸塩の多くがAlに乏しいことと矛盾する．これは，従来知られていない，星周低温領域でのSiに富むダスト形成過程がある可能性を示す．

キーワード：星周ダスト、非晶質ケイ酸塩、プレソーラー粒子、実験、分光
Keywords: circumstellar dust, amorphous silicate, presolar grain, experiment, spectroscopy



実験で生成した非晶質ナノ粒子のSTEM-BF像(左)とSTEM-EDS元素マップ(右)

炭素質コンドライトDOM 08006中のプレソーラー酸化物から探る星周ダストの形成過程

Formation process of circumstellar dust studied from presolar oxides in carbonaceous chondrite DOM 08006.

*橋爪 宏幸[1]、瀧川 晶[1]
*Hiroyuki Hashizume[1], Aki Takigawa[1]

1. 東京大・院地惑
1. UTokyo EPSS

プレソーラー粒子は隕石や惑星間塵, 彗星の塵などで稀に見つかる非常に大きな同位体比異常を持つ粒子で, 太陽系形成以前の星周ダストの生き残りと推定されている[1]. プレソーラー酸化物/珪酸塩の主な起源天体は酸素に富むAGB星で, その星周には天体観測から結晶質アルミナ, スピネルに加え, 非晶質珪酸塩や非晶質/遷移アルミナも多く存在すると考えられている[2]. 酸処理残渣の分析で同定された酸化物の多くは結晶質コランダムやスピネルである. 酸処理残渣のプレソーラースピネル粒子は，化学量論的なスピネルに加え，多様なAl/Mg比の粒子が存在する[3]. プレソーラー粒子の結晶構造や組織は，星周ダスト形成場の条件や変化を記録している可能性があるが，酸処理法では，結晶構造によってはAlに富む酸化物でも溶解してしまうため，一部のプレソーラー酸化物を見逃してしまう可能性がある．一方，隕石薄片のその場同位体分析により求められた隕石マトリクス中のプレソーラー粒子の存在度は, 珪酸塩の数百ppmに対し酸化物は数十ppmと低いため，結晶構造などが調べられた酸化物の数はいまだに数個しかない [4]．本研究では，星周でのダスト形成過程およびその後の変成過程の解明のため, その場分析で酸素同位体異常を持つAlに富むプレソーラー酸化物を同定し，透過型電子顕微鏡(TEM)分析により結晶構造や組成を決定した． 炭素質コンドライトDOM 08006(CO3.00)薄片のマトリクスのサブミクロンサイズのAlに富む粒子を含む領域をSEM-EDS (HITACHI HT-SU6600, JAXA ISAS)の元素MAPを用いて抽出し, CAMECA NanoSIMS50(東京大学AORI)/50L(東京大学農学部)を用いて同位体測定をおこなった. 1辺10 μmの領域にCs+ビーム(～0.9 pA)を照射して二次イオン(16O, 17O, 18O, 12C2, 12C13C, 28Si, 27Al16O)および二次電子像を同時に取得した. 酸素同位体比(17O/16Oまたは18O/16O)を計算し, 太陽系物質と有意に異なる(ポアソン分布での4 σ 以上)ものをプレソーラー粒子とした. このうちいくつかを集束イオンビーム(FIB)法により約200 nmの厚さに切り出し(FEI Versa3D Dualbeam, 東京大学), TEM (JEOL JEM-2800, 東京大学)で電子回折像とEDSマップを取得し，結晶構造と化学組成を分析した. マトリクス中の太陽系組成のAlに富む酸化物粒子についてもFIB-TEM分析をおこなった. マトリクス領域7500 μm^2の分析により, プレソーラー酸化物4個, プレソーラー珪酸塩20個を同定した(Extreme Group 1が1個，Group 1が18個，Group 3が2個，Group 4が3個). Alに富む粒子を含む領域に限って同位体分析を行うことで，従来より5倍程度効率よくプレソーラー酸化物が発見できることがわかった．このうち，低中質量のAGB星や赤色巨星を起源とすると考えられているGroup 1に分類される粒子のFIB-TEM分析を実施した. 分析したプレソーラー酸化物は2個で, 1つは非化学量論的スピネル(Mg/Al＝0.1–0.4)の結晶であり, ガスから直接凝縮したか, 星周でコランダムまたは欠陥スピネル構造を持つ遷移アルミナとして凝縮したのちMg, Oガスと反応して形成したと考えられる. もう1つはAlに富む粒子と珪酸塩の混合粒子で, 今回は珪酸塩の領域のみ切り出すことができた. 切り出した粒子は (Fe+Mg)/Si＝約1.25の非化学量論的な非晶質珪酸塩と推定された. さらに2個のプレソーラー珪酸塩をTEM分析した結果, いずれも非晶質珪酸塩であった. これらの珪酸塩は, 星周で直接非晶質なものとして凝縮したか, あるいはより結晶性が高い状態で凝縮したが宇宙線などの影響により非晶質化して形成したと考えられる. 発表ではこれらの粒子に加え, 他のGroupに分類されるプレソーラー粒子についても詳細な微細構造分析をおこなった結果を紹介する. (参考文献)[1] Nittler, L. R. and Ciesla, F. (2016) *ARAA* **54**, 53. [2] Takigawa, A., et al. (2019) *ApJL* **878**, L7. [3] Zinner, E., et al. (2005) *GCA* **69**, 4149. [4] Zega, T. J., et al.

(2019) *M&PS* **55**, 1207.

キーワード：プレソーラー粒子、隕石、スピネル、星周ダスト、 酸化物
Keywords: Presolar grains, meteorite, spinel, circumstellar dust, oxides

原始惑星系円盤を運動するダストの不可逆化学反応の進行

Progress of irreversible chemical reactions on dust moving in a protoplanetary disk

*石﨑 梨理[1]、橘 省吾[1]
*Lily Ishizaki[1], Shogo Tachibana[1]

1. 東大・地惑
1. UT EPS

背景

原始太陽系円盤でダストが経験した化学反応は、現在の太陽系天体の化学的性質の決定に重要な役割を果たしたと考えられる。原始太陽系円盤で進行したと考えられる化学反応の実験的研究は多数なされてきた。例えばYamamoto et al. (2018)では非晶質フォルステライト(Mg_2SiO_4)と円盤環境を模擬した低圧H_2Oガス間の酸素同位体交換速度を決定し、典型的な円盤寿命と比較することで、現在の太陽系天体の酸素同位体組成を達成するには、材料となった非晶質ケイ酸塩ダストが~500 K以上の高温環境で円盤H_2Oガスと酸素同位体交換をおこなう必要があると示した。しかし、実際の円盤ではダストの運動によって温度や圧力などが刻々と変化するため、原始太陽系円盤でのダストの化学反応進行を理解するにはダストのダイナミクスを考慮する必要がある。本研究では、原始惑星系円盤内を運動するダストが経験する仮想的な不可逆化学反応の進行を調べた。

手法

原始惑星系円盤内をガスとよく馴染んで運動するダスト粒子を追跡する3Dモンテカルロシミュレーションをおこなった(Ciesla 2010; 2011; Okamoto & Ida 2022)。円盤モデルとして、ガス密度に比例する粘性加熱(α粘性モデル; Shakura & Sunyaev 1973)を熱源とする鉛直・動径温度構造を持つ定常降着円盤を採用した。ダストの吸光度は2.5 cm^2/g、主星質量は太陽質量$M_\odot$で一定とした。乱流粘性係数αは10^{-2}、10^{-3}、質量降着率M_gは10^{-6}、10^{-7}、10^{-8} $M_\odot$/yrとし、計6通りの円盤で計算をおこなった。各パラメータセットに対してダスト粒子1万個をスノーライン中心面で放出し、ダストの温度履歴に基づいてJMA式(Johnson & Mehl 1973; Avrami 1973)で表される仮想不可逆反応の進行を調べた。スノーラインにおいて反応進行度X=0でシミュレーションを開始し、JMA式を微分して得られた微小反応進行度δXを積算することで反応進行を計算した。広範な化学反応を調べるため、活性化エネルギーE_aは20-1000 kJ/mol、前指数因子ν(/s)の自然対数は10-60、アブラミ指数nは0.5-4の範囲とし、~200–1500 Kの温度範囲で進行する反応を計算した。全反応が完了した(Xが0.99を超えた)時点で計算を打ち切り、最大10^6年間計算した。

結果・議論

全ての円盤パラメータに対し、全ての反応がそれぞれ固有の狭い温度帯で進行・完了することがわかった。反応進行度Xが特定の値(0.8、0.9、0.99)を超える以前に経験した最高経験温度のヒストグラムは対数正規分布によってよくフィッティングされ、この最大値および分散を「反応ライン温度(T_{reac})」およびその「幅」と定義した。反応タイムスケールと拡散移動タイムスケールを比較することで、これら2つの「反応ライン」パラメータを半解析的に予測できる式の開発に成功した(Ishizaki et al. 2023)。不可逆反応が実際に円盤で完了する際の反応タイムスケールt_{eff}も「反応ライン」予測式から得られる。t_{eff}は中心星からのある距離におけるダストの降着タイムスケールとほぼ等しくなる反応タイムスケールに相当する。t_{eff}は円盤・反応パラメータの双方に依存し、本研究で扱ったパラメータ範囲では~0.005-266年となる。円盤パラメータを固定した場合、t_{eff}は反応パラメータに依って最大4桁程度の範囲に収まる(例：α=10^{-3}、M_g=10^{-7} $M_\odot$/yrで~0.1-160年)。

t_{eff}は前指数因子に負、アブラミ指数に正の相関をもち、活性化エネルギーに対しては負の相関(例：α=10^{-3}

、$M_g=10^{-7}M_\odot$/yr、ln(ν[/s])=30、n=1のときE_a=500 kJ/molで~2.6年、E_a=100 kJ/molで~32年)をもつ。850 kJ/mol程度の大きな活性化エネルギーをもつ非晶質エンスタタイト($MgSiO_3$)の結晶化(Kobayashi et al. in prep; ln(ν[/s])=81.0、n=1.5)では、t_{eff}は円盤パラメータに依って22日から2年となる。一方、活性化エネルギーが414 kJ/mol程度の非晶質フォルステライトの結晶化(Yamamoto & Tachibana 2018; ln(ν[/s])=40.2、n=1.5)では、t_{eff}は73日から8年となる。このt_{eff}の違いは、活性化エネルギーが大きな反応では低温での反応進行がほぼなく、十分高温領域に到達してから効果的に反応進行することで説明できる。これら非晶質ケイ酸塩の結晶化の例では、t_{eff}は実験室で実現可能な反応時間も含み、室内実験で得た結果をそのまま円盤に応用できる円盤条件が存在しうることを示唆する。

キーワード：原始惑星系円盤、原始太陽系円盤、ダスト、モンテカルロシミュレーション
Keywords: protoplanetary disk, protosolar disk, dust, Monte Carlo simulation

蒸発–結晶化実験によるタイプB CAI形成における昇温過程での蒸発の影響の評価

Experimental study of the effect of evaporation during temperature rise on type B CAI formation

*鶴岡 靖朗[1]、橘 省吾[1]
*Yasuaki Tsuruoka[1], Shogo Tachibana[1]

1. 東大・院理
1. UTokyo Sci.

隕石中の難揮発性包有物 (CAI) は，太陽系で形成された最古の物質であり，原始太陽系円盤の初期進化の過程が記録されている．タイプB CAIは円盤ガス中で溶融と結晶化を経験し，その際にMgとSiが蒸発したと考えられている [1-4]．タイプB CAIは，その組織から，メリライト (ゲーレナイト($Ca_2Al_2SiO_7$)–オケルマナイト($Ca_2MgSi_2O_7$)) のマントル構造を持つタイプB1とそれを持たないタイプB2の2つに分類される [e.g., 5]．低圧の水素ガス中でのCAIメルトの蒸発–結晶化実験 [6] により，水素ガス圧が1 Pa以上の場合，水素により蒸発が促進され，メルトの表面付近がMgとSiに枯渇することで，タイプB1 CAIに類似したメリライトマントルが形成されることが示された．しかし，先行研究 [6] は，最高温度からの冷却過程の蒸発に注目しており，昇温過程で起こりうる蒸発については考慮していない．タイプB CAIの加熱メカニズムは判明しておらず，昇温と冷却のタイムスケールが同程度だった場合 [e.g., 7]，昇温時の蒸発がCAIの組成や組織に影響した可能性がある．本研究では，CAIメルトの蒸発–結晶化実験を行い，昇温時の蒸発によるメリライトマントル形成への影響について議論した．

太陽系元素存在度からの平衡凝縮トレンド上のCAI χ 組成 [8] のメルトの蒸発–結晶化実験を，真空炉 [4, 6] を用いて行った．ガラスとスピネルからなる出発物質を，水素ガス圧1, 10 Pa下で，1100˚Cから最高温度1420˚Cまで20˚C hr^{-1}で昇温し，1420˚Cで1時間加熱した後，1100˚Cまで20˚C hr^{-1}で冷却した．昇温時の蒸発の効果を見るため，最高温度に達した直後に急冷した試料も作成した．また，先行研究 [6] と同様に，最高温度に達してから水素ガスを導入し，1時間加熱した後，20˚C hr^{-1}で冷却した試料も作成した．実験前後に試料の重量を測定し，蒸発量を決定した．走査電子顕微鏡 (SEM) と付属のエネルギー分散型X線分光法 (EDS) 装置を用いて，試料断面の組織観察と鉱物元素分析を行った．

水素ガス圧10 Pa下では，昇温時の水素ガスの有無に関わらず，メリライトマントルが形成された．しかし，昇温時から水素を導入した試料の方がマントルの組成変化が緩やかであった (図1)．また，昇温時から水素を導入した試料の方が水素にさらされる時間が長いにも関わらず，最高温度に達してから水素を導入した試料と蒸発量が同程度であった．最高温度に達した直後に急冷した試料には，樹枝状メリライトとガラスのほか，表面全体を覆ってはいないものの表面付近にÅk ~ 10 mol% のメリライト結晶も見られた．水素ガス圧1Pa下では，最高温度に達してから水素を導入した試料は，メリライトが部分的に表面を覆う一方 [6]，昇温時から水素を導入した試料ではメリライトマントルが形成された．

最高温度に達した直後に急冷した試料のÅk ~ 10 mol% のメリライトは，CAI χ 組成メルトからの析出が予測されない組成であり，昇温中のMgとSiの蒸発に伴うメルト組成変化が影響したと考えられる．昇温中のメルト組成変化や結晶成長は，メリライトの析出を促進し，マントルの組成ゾーニングの違いや，水素ガス圧1Pa下でのマントル形成に寄与したと予想される．また，早期のマントル形成はメルトからの蒸発を妨げたと考えられる．

今回，昇温中の蒸発がメルトの組成変化やメリライト結晶成長を引き起こし，メリライトマントル形成に影響することを明らかにした．今後は，条件を系統的に変化させた実験を行い，メリライトマントル形成に対する昇温中の蒸発の効果を理解し，加熱イベントの制約も含め，原始太陽系円盤でのCAI形成過程の解明を目指

す.

[1] Grossman, L. et al. (2000) *GCA 64*, 2879. [2] Richter, F. M. et al. (2002) *GCA 66*, 521. [3] Richter, F. M. et al. (2007) *GCA 71*, 5544. [4] Mendybaev, R. A. et al. (2021) *GCA 292*, 557. [5] Wark, D. A. & Lovering, J. F. (1982) *GCA 46*, 2581. [6] Kamibayashi, M. et al. (2021) *ApJ 923*, L12. [7] McNally, C. P. et al. (2014) *ApJ 791*, 62. [8] Grossman, L. et al. (2002) *GCA 66*, 145.

キーワード：難揮発性包有物、溶融、蒸発、結晶成長、原始太陽系円盤
Keywords: CAIs, melting, evaporation, crystal growth, protosolar disk

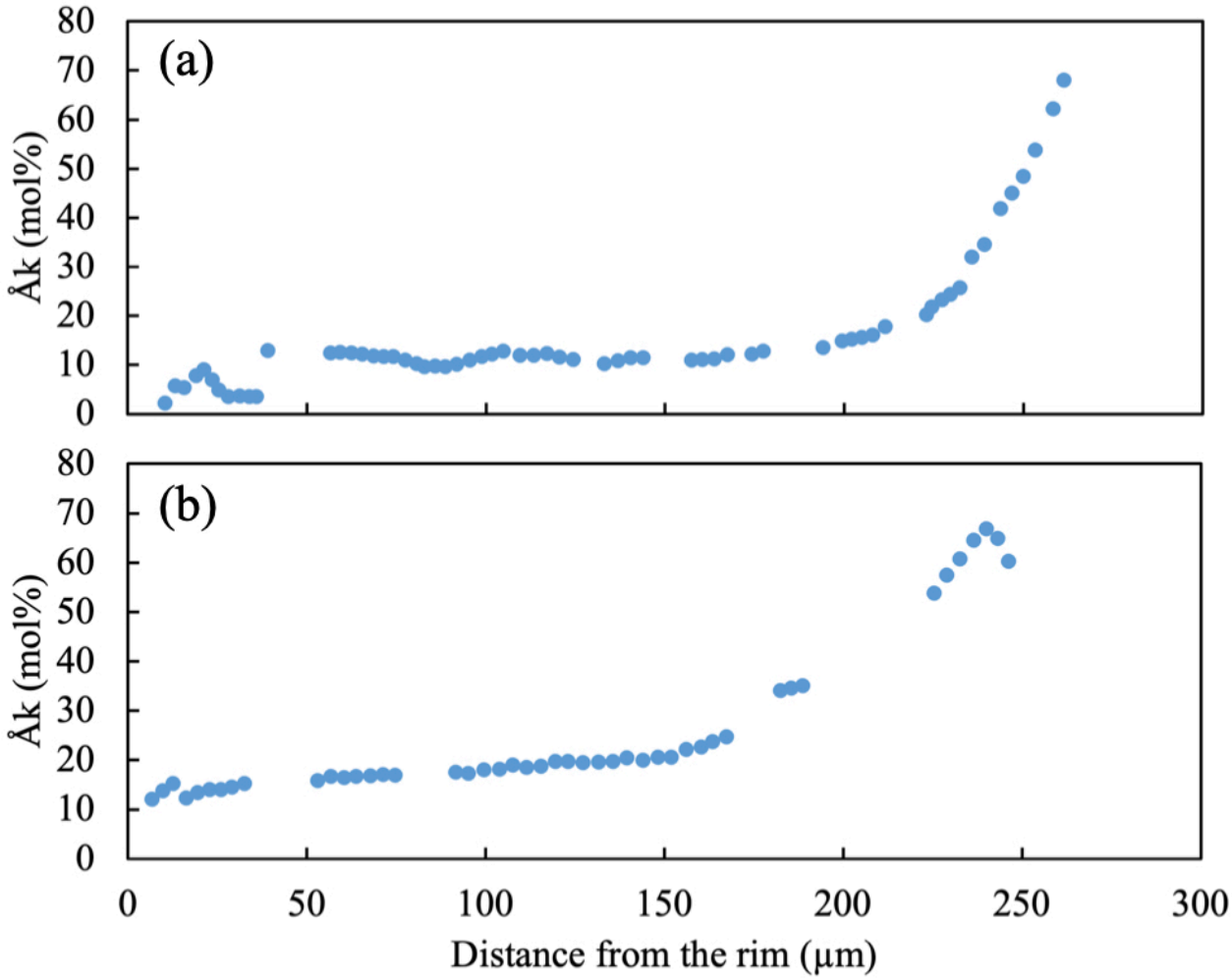


図１．メリライトマントルの組成ゾーニング．最高温度からの冷却過程のみ水素を導入した試料 (a) では，組成がほぼ一定の部分が見られる一方，昇温時から水素を導入した試料 (b) では，試料中心に向かって緩やかにオケルマナイト (Åk) 成分の割合が上昇している．

揮発性物質を含んだ微惑星の衝突によるコンドリュールの形成

Chondrule formation by collisions of planetesimals containing volatiles

*城野 信一[1]
*Sin-iti Sirono[1]

1. 名古屋大・環境学
1. Navoya Univ.

地球に落下してくる隕石の８割を「普通コンドライト」と呼ばれる種類が占めています．その体積の８割を「コンドリュール」と呼ばれる直径0.1-1mm程度の球体が占めます．年代を計測すると太陽系で最初の固体(CAI)が凝縮してから1-3百万年であることから，太陽系形成時に何らかの加熱イベントが発生し岩石が融解した上，何らかのメカニズムで細粒化した後に隕石母天体に落下，その後に熱変性および水質変性を受けて隕石になったものと考えられています．コンドリュールの組織から冷却速度が推定されており，10-1000 K/hrと見積もられています．第二次世界大戦直後から研究がされていますが未だに形成メカニズムが明らかになっていませせん．そのため，隕石中に残されている様々な記録の解釈ができていないのが現状です．形成メカニズムが明らかになれば膨大な隕石データから惑星形成過程に関する情報を取り出せるようになります．

これまでに提案されてきた形成メカニズムの中でも有力なものは「衝撃波加熱モデル」と「微惑星衝突モデル」です．前者においては，原始太陽系円盤に浮かぶダストアグリゲイトが衝撃波を通過することでガスとの摩擦によって加熱されます．後者では，惑星形成過程で必然的に発生する微惑星の相互衝突によって微惑星を溶融します．しかし両方には問題点があります．衝撃波が弱いとダストアグリゲイトは加熱されず，強いと蒸発してしまうため，衝撃波加熱モデルではコンドリュールを生成するパラメータ空間が狭いです．一方で微惑星の衝突においては，かなり高速の衝突速度が必要でありまた溶融したメルトをmmサイズまで分裂させるのが困難でした．

木星が形成されると，木星の巨大な質量によって周囲の微惑星の運動が励起されます．その結果として微惑星は高速衝突します．高速衝突した微惑星は岩石が溶融する程度まで温度が上昇します．水や有機物といった揮発性物質が微惑星に含まれていれば，温度上昇に伴って揮発性物質が急速に膨張し，岩石メルトが細かいサイズまで分裂することが可能です．ガスは膨張にエネルギーを使うため温度が低下します．ガスと接触しているメルトから熱がガスに移ることでメルトの温度も低下します．ここから冷却速度が決定されます．このプロセスの数値シミュレーションを行いました．その結果，コンドリュールのサイズは0.4-1.8mm，冷却速度は30-18,000 K/hrとなり，観測されているデータをよく説明することがわかりました．

普通コンドライト隕石は鉄の量と酸化還元度の違いでH，L，LLと分類されています．微惑星に含まれる揮発性物質が水の場合と有機物の場合とで酸化還元度が異なるため，コンドライト隕石の酸化還元度の多様性も揮発性成分の違いで説明できます．また，放射性物質の壊変によって微惑星内部が高温になっていることも考えられます．この場合金属鉄の一部は微惑星の中心へ移動してコアを形成し，衝突に関与する表面付近の鉄の量は少なくなります．これによって鉄の量の多様性も説明できます．コンドリュールの別の特徴として，KやNaといった揮発性物質が残されていること，また同位体分別を起こしていない，という点が上げられます．これらの特徴を満たすためには，コンドリュールの空間的密度が原始太陽系円盤における値よりもかなり高い必要があると言われてきました．衝突で形成されたコンドリュールの空間的密度およびガスの密度は非常に高いため，これらの特徴も自動的に満たすことができます．

キーワード：コンドリュール、微惑星、衝突
Keywords: chondrule, planetesimal, collision

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

口頭講演

R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)
2024年9月14日(土) 09:00 〜 12:00 ES025 (東山キャンパス)

10:20 〜 10:35

[3Lecture-301-10-6add]休憩

©日本鉱物科学会

コンドルール構成鉱物の化学組成から制約する真のコンドルール形成期間

Constraining the true timescale of chondrule formation through chondrule mineral chemistry

*福田 航平[1]、木多 紀子[2]、木村 眞[3]
*Kohei Fukuda[1], Noriko T Kita[2], Makoto Kimura[3]

1. 阪大・院理、2. ウィスコンシン大、3. 国立極地研究所
1. Osaka Univ. Sci., 2. UW-Madison, 3. NIPR

^{26}Alは半減期約70万年で^{26}Mgに壊変する短寿命放射性核種であり、コンドルールの形成年代決定に広く用いられている [1]。斜長石はAl/Mg比が比較的高く（^{27}Al/^{24}Mg ~25-2,000程度）、コンドルールのAl-Mg年代測定を行う上で重要な鉱物である。しかし、斜長石の化学組成・同位体比はカンラン石や輝石に比べて母天体上での二次的な熱変成作用に敏感なため、Al-Mg年代測定結果を解釈する上で変成作用の影響評価が重要となる。本研究では、コンドルールが経験した熱変成の程度を推定することを目的とし、熱変成度の異なるCVコンドライトに含まれるコンドルール中カンラン石・輝石・斜長石の元素分析を行った。将来的に、本研究結果と高精度Al-Mg年代測定法を組み合わせることで、変成による影響を取り除いた真のコンドルール形成期間を決定することを主たる目的とする。

８つのCVコンドライト [Allende (CV3.6), MIL 07002 (CV3.7), MIL 07671 (CV3.7), MIL 15381 (CV3.6), NWA 6991 (CV3), NWA 5028 (CV3), Leoville (CV3.1-3.4), RBT 04143 (CV3.6)]中に見つかった51個のコンドルールを分析した。元素分析にはウィスコンシン大学設置のCAMECA社製SX-Five FE EPMAを使用した。

カンラン石・輝石のMg# (= Mg/[Mg + Fe] molar %)の比較を行った。カンラン石は輝石に比べてFe-Mg相互拡散速度が大きいため、熱変成度の高い隕石中のコンドルールに含まれるカンラン石のMg#は、輝石に比べて低い傾向にある [2]。つまり、カンラン石と輝石のMg#を比較することで、個々のコンドルールが被った熱変成度を評価することができる。熱変成度の低いコンドライト中のコンドルールに含まれるカンラン石・輝石のMg#は互いに良い一致を示した。このことは、両鉱物が化学的に均一なメルトから晶出したことを示唆する。しかし、NWA 5028を除き、他７つのCVコンドライト中コンドルールにおけるカンラン石・輝石のMg#は一部非平衡であり、かつカンラン石のMg#は輝石に比べて系統的に低いことが確認された。熱変成度の高いコンドライト(Cv3.6-3.7)中のコンドルールは、熱変成度の比較的低いLeoville (CV3.1-3.4) に比べて高い非平衡度を示した。このことから、カンラン石・輝石のMg#の非平衡度合いは、母天体上における熱変成の影響を反映していると解釈した。

斜長石のMgO 量、An# (= [Ca]/ [Na + K + Ca] molar %)、シリカ過剰 ([]Si_4O_8) の度合いを評価することで、斜長石の変成度の推定を試みた。シリカ過剰は月玄武岩の斜長石に見出されており [3]、斜長石が高温条件下（1200-1500度, 1気圧下）で結晶化することでシリカ過剰が顕著になることが実験的に示されている [4]。したがって、コンドルール中の斜長石に記録されたシリカ過剰は、コンドルール形成時の高温段階の情報を斜長石がそのまま保持している証拠となり得る [5]。NWA 5028およびRBT 04143の一部のコンドルールを除き、ほとんどのコンドルールはシリカ過剰を示さなかった。NWA 5028はサブタイプの分類がなされていないものの、当初CR2に分類された隕石であり、CVコンドライトの中でも変成度の低いサンプルである。RBT 04143は角礫岩であり、一部熱変成度の低いクラストの存在が明らかとなっている [6]。本研究の結果も、RBT 04143には熱変成を免れた始原的なコンドルールが含まれていることを示唆しており、今後これらのコンドルールに対しAl-Mg年代測定を実施することでCVコンドライトに含まれるコンドルールの形成期間を制約できると期待される。NWA 5028およびRBT 04143以外のCVコンドライト中のコンドルールはシリカ過剰を示さなかったため、コンドルール形成時に記録されたシリカ過剰は、母天体上での熱変成によって失われたと解釈できる。このことは、カンラン石・輝石間に見られたMg#非平衡度と熱変成度の関係とも整合的である。

参考文献: [1] Kita et al. (2000) GCA 64, 3913-3922. [2] Kiumura and Ikeda (1997) Antarct. Meteorites 8, 123-138. [3] Dymek et al. (1975) LPSC 6th, 49-77. [4] Longhi & Hays (1979) Am. J. Sci. 279, 876-890. [5] Tenner et al. (2019) GCA 260, 133-160. [6] Ishida et al. (2012) Polar Sci. 6, 252-262.

キーワード：コンドルール、Al-Mg年代、斜長石、シリカ過剰
Keywords: chondrule, Al-Mg chronology, plagioclase, excess Si

放射状輝石コンドリュールの形成プロセス：浮遊させたメルトの結晶化実験に基づく制約

Reproduction Experiments of Radial Pyroxene Chondrules Using a Gas-jet Levitation System under Reducing Conditions

*渡邉 華奈[1]、中村 智樹[1]、森田 朋代[1]
*Kana Watanabe[1], Tomoki Nakamura[1], Tomoyo Morita[1]

1. 東北大・院理
1. Tohoku Univ. Sci.

【目的】

コンドリュールは隕石中に含まれる数μm～数cmの球状粒子である(図1(a))。この粒子は主にかんらん石や輝石等のケイ酸塩結晶と、その隙間のメソスタシスガラス・鉄ニッケル合金や鉄硫化物から成り、特有の結晶形態を示す。コンドリュールは、原始太陽系星雲中で前駆物質が加熱され、溶融・冷却を経て形成された。コンドリュールの結晶形態・化学/同位体組成等は形成時の何らかの条件を反映しているが(e.g., Jones, 2012)、それら条件は未解明である。本研究では、輝石が放射状に伸長したコンドリュール(Radial Pyroxene (RP))の浮遊結晶化実験を行った。実験でRPコンドリュールの結晶形態および結晶とガラスの化学組成を再現し、形成時の条件を制約することを目指した。

【手法】

本研究ではガスジェット浮遊装置を用いた。この装置では、出発物質をArガス又はAr-H_2ガスで浮遊させ、CO_2レーザーを照射して加熱・冷却を行う。酸化還元度を制御したチャンバーを用い、原始太陽系星雲中と同等の酸素フガシティ下(Villeneuve et al., 2015)で実験を行った。まず浮遊状態の出発物質を約1900℃程度で全溶融させ、冷却した。冷却途中の任意の温度でseedingを行いメルトを結晶化させた。Seedingとは、星雲中のダストを想定した粉末をメルトに衝突させる操作である(Nagashima et al., 2008)。その後seedingした温度で一定時間(6～7200秒間)温度保持し、急冷した。出発物質には、天然RPコンドリュールの主要元素の酸化物粉末(Na_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, CaO, FeO)を混合させ、平均的な天然物のバルク組成(Dodd, 1978; Lux et al.,1981; Nagahara, 1981)となるよう調合したものを用いた。

さらに、計31個の実験合成試料と計14個の天然RPコンドリュールについて、FE-SEM/EDS、FE-EPMA/WDSによる観察・分析を行った。使用したコンドライト隕石(H3.2, LL3.2, CO3.0)は国立極地研究所からの提供を受けた。

【結果】

浮遊状態のメルトにseed粉末が接触すると、接触点から即座に結晶が成長した。実験合成試料には、試料表面上の数点から放射状に伸長した低カルシウム輝石が確認された(図1(b))。この放射状輝石は、天然のRPコンドリュールの典型的な特徴(Gooding & Keil, 1981)と一致していた。また結晶化後の温度保持時間が500秒以上と長い試料にのみ、メソスタシスガラス中に金属鉄の粒子が見られ、天然RPコンドリュールにも類似した鉄ニッケル合金の粒子や鉄硫化物の粒子が確認された(図1(c), (d))。輝石結晶とメソスタシスガラス間の鉄分配係数D_{Fe}(D_{Fe}=Fe mol%$_{pyroxene}$/Fe mol%$_{mesostasis}$)について、天然RPコンドリュールのD_{Fe}の平均は2.7と非常に高く、メソスタシスガラスよりも結晶の方がはるかに鉄に富んでいた。それに対し実験試料では、結晶化後の温度保持時間が150秒以下と短い時、低いD_{Fe}を示した(平均0.4)。一方で温度保持時間が1000秒以上と長い場合D_{Fe}は1に近付き、いくつかの実験試料では1を超えていた。本結果から、結晶化後の温度保持時間が長い試料が、天然のRPコンドリュールに近いD_{Fe}を示すことが確認された。

【考察】

本結果は、温度保持時間が長い実験試料と天然RPコンドリュールが同じ条件を経たことを示している。温度保持時間が長い実験試料のメソスタシスガラスには、金属鉄の粒子が晶出しており、これら粒子は温度保持時間が短い試料中には確認されなかった。出発物質中の鉄はFeOとして存在するため、この結果は結晶成長後に残液中(固化後メソスタシスガラスになる)に溶けたFeOが還元され、金属鉄となって晶出したことを示している。残液中のFeOが還元され金属鉄中に取り込まれると、残液中のFeOが取り除かれFeO濃度が低下する。その結果輝石結晶に対して残液中のFeO濃度が低くなり、D_{Fe}が高くなったと考えられる。天然RPコンドリュールの形成時にも同様の反応が起こった可能性がある。天然RPコンドリュールのメソスタシスガラス中には鉄ニッケル合金の粒子・鉄硫化物の粒子が確認されることから、輝石結晶の成長後に残液中に溶けたFeOが還元または硫化されて残液中からFeOが取り除かれ、高いD_{Fe}を示すと考えられる。これはRPコンドリュールのD_{Fe}が、コンドリュール形成時の酸化還元度・冷却速度を制約する指標となることを示す成果である。なお本成果はWatanabe et al. (2024), *The Astrophysical Journal*で発表済みである。

キーワード：コンドリュール、輝石、浮遊実験、分配係数、還元反応
Keywords: chondrule, pyroxene, levitation experiment, partition coefficients, reduction reaction

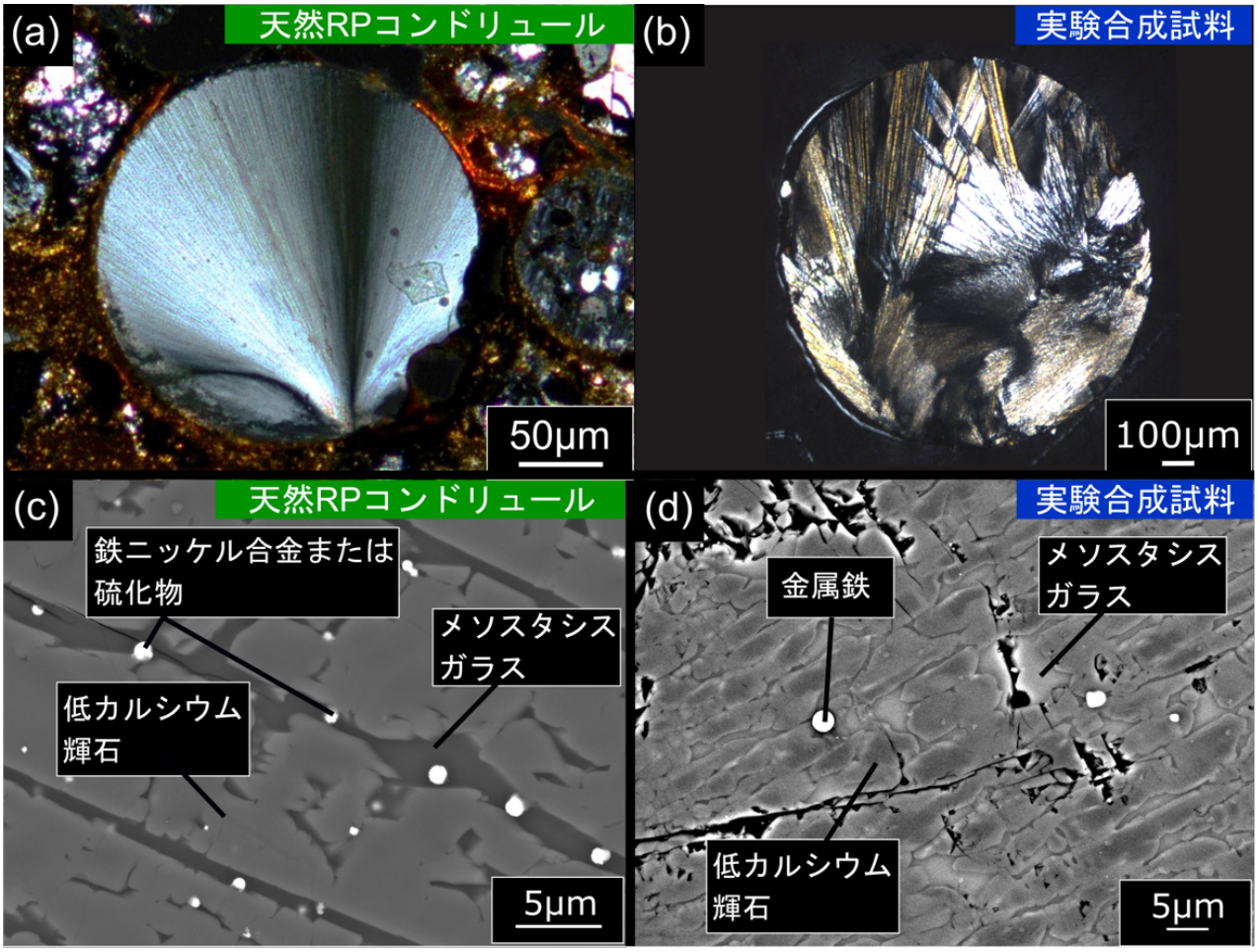


図１．天然RPコンドリュールと実験合成試料の比較。(a)-(b)偏光顕微鏡による観察像(クロスニコル像)、(c)-(d)SEM-BSE像。(d)の実験合成試料は1536℃で3600秒間温度保持した。

ポイキリティック・シャーゴッタイト火星隕石の岩石組織・鉱物組成多様性から読み解く母岩体層状構造の推定

Stratigraphy of poikilitic shergottite parent body(ies) as deduced from their textural and mineral compositional diversities

*山﨑 奏次郎[1]、山口 亮[2]、三河内 岳[3]
*Sojiro Yamazaki[1], Akira Yamaguchi[2], Takashi Mikouchi[3]

1. 東大・院理、2. 国立極地研、3. 東大・総研博
1. Fac. Sci., Univ. Tokyo, 2. Natl. Inst. Polar Res., 3. Univ. Museum, Univ. Tokyo

はじめに：シャーゴッタイトは岩石学的特徴から、カンラン石フィリック、玄武岩質、ポイキリティックの３タイプに分類され、それぞれ異なる分化度のマグマ、もしくは結晶化過程を経て形成されたと考えられている (e.g., Udry+ 2020)。これらの中で、ポイキリティック・シャーゴッタイト（P-She）は、数mmサイズの輝石オイコクリストが、小さなカンラン石チャダクリストを取り囲む特徴的なポイキリティック組織を示す。輝石オイコクリストはコアが低Ca輝石で、ピジョン輝石を経て普通輝石のリム部分からなり、最初に深部マグマ溜まりで形成され、最終的にこれらを含むマグマが地表付近に上昇・貫入し、固化することでP-Sheが形成されたと考えられている(e.g., Rahib+ 2019)。しかし、地表付近でのマグマ最終結晶化過程についてはあまり議論されていない。本研究では、近年、南極やサハラ砂漠で数多くのP-Sheが発見され、岩石学・地球化学的な多様性が明らかになってきていることから、これらP-Sheの岩石組織・鉱物組成を分析・比較することで、火星地殻内に普遍的に存在していると考えられるP-She母岩体の最終結晶化過程に制約を与えることを試みた。
試料及び分析手法：本研究では、4個のenriched P-She (RBT 04261, NWA 4468, NWA 13227, NWA 14127)、5個のintermediate P-She (NWA 12241, NWA 13250, NWA 13366, NWA 13369, ALH 77005)、現在唯一のdepleted P-SheであるAsuka 12325の薄片試料について、EPMA (JEOL JXA-8900L, JXA-8200)で元素マップの取得及び鉱物組成の分析を行なった。各鉱物相のモード組成と、非ポイキリティック組織中のカンラン石の結晶サイズ分布(CSD)分析については、取得した元素マップからImage Jを用いて解析した。
結果：合計９つのP-Sheの分析の結果、輝石の鉱物組成については試料間に大きな差は見られず、コア部分が$En_{69\pm8}Wo_{12\pm7}$、リム部分は$En_{51\pm5}Wo_{35\pm5}$程度であった。マスケリナイト（斜長石衝撃変成ガラス）についても、$Ab_{35}Or_1$-$Ab_{55}Or_5$と類似した組成を示すものが多かったが、NWA 14127は$Ab_{35}Or_1$-$Ab_{45}Or_{10}$とKに富むトレンドを示した。マスケリナイトは、ポイキリティック組織の外側の非ポイキリティック組織にのみ存在するが、そのモード組成は、斜長石が結晶化後期に晶出することから、マグマ最終結晶化時の他の鉱物の集積度合いを反映していると考えられる。試料の浅部貫入時の冷却速度については、輝石オイコクリストのオージャイトリムに見られるTi拡散プロファイルから、輝石温度計より初期温度を1200 ℃として冷却速度を見積もった(Cherniak 2012)。その結果、NWA 12241など、冷却速度が約0.17℃/年、CSD分析によるマグマの滞留時間が約120日と、比較的ゆっくり冷却されたと考えられる試料ほどカンラン石組成幅が$Fo_{62\text{-}70}$と狭く、一方でNWA 13227やNWA 14127など冷却速度が約1℃/年、マグマの滞留時間が約40日と比較的速く冷却されたとされる試料については$Fo_{40\text{-}70}$とカンラン石の組成幅が広くなっていた。また、マグマの冷却速度と非ポイキリティック組織中のマスケリナイトのモード組成には負の相関が見られた。P-Sheの貫入マグマ岩体の熱進化を、ポイキリティック組織の輝石組成から初期温度を1200 ℃、固化温度を1000 ℃とし、熱拡散方程式を用いて見積もった結果、約500 m の母岩体サイズが得られた。
考察と結論：冷却速度が比較的遅いと考えられるNWA 12241については、非ポイキリティック組織でのカンラン石の結晶サイズが比較的大きく、Mg-Fe組成幅も狭いことから、深部マグマ溜まりから地表付近に貫入したマグマが、岩体の中心付近で他の鉱物を集積させながらゆっくり冷却されて形成されたと考えられる。一方で、冷却速度が比較的速いと推定されるNWA 14127やNWA 13227については、カンラン石の結晶サイズが

比較的小さく、組成幅も広いことから、貫入マグマが貫入岩体の岩壁に近い部分で集積が進む前に急冷されて固化した可能性がある。以上のように、本研究から、P-Sheの岩石組織・鉱物組成に多様性を与える要因は、同一貫入岩体内での冷却速度及び、集積深度の違いであることが示唆され、ポイキリティック組織を含む、同様の層状構造を持つP-She母岩体が、火星地殻内に普遍的に存在している可能性があることが明らかになった。

キーワード：ポイキリティック シャーゴッタイト、カンラン石、輝石、貫入、冷却速度
Keywords: Poikilitic shergottite, Olivine, Pyroxene, Intrusion, Cooling rate

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

火星隕石Asuka 12325のTi-Crに富むスピネルの高圧相転移

High pressure phase transition of Ti-Cr-rich spinel in Asuka 12325 Martian meteorite

*竹之内 惇志[1]、伊神 洋平[2]、三河内 岳[3]、三宅 亮[2]、山口 亮[4]
*Atsushi TAKENOUCHI[1], Yohei Igami[2], Takashi Mikouchi[3], Akira Miyake[2], Akira Yamaguchi[4]

1. 京大・総博、2. 京大・院理、3. 東大・総研博、4. 極地研
1. The Kyoto Univ. Museum, 2. Kyoto Univ. Sci., 3. The Univ. Museum, The Univ. of Tokyo, 4. NIPR

高圧相の研究は隕石の衝撃変成の理解や地球深部の状態を探る上で重要である。隕石ではこれまで様々な鉱物の高圧相が発見されているが、本研究ではTiやCrに富むスピネルであるクロマイト-ウルボスピネル固溶体の相転移に着目する。クロマイトには約16~18 GPa以上で高圧相が２種類存在し、約1300 ˚C以上の高温側ではxieite（空間群*Cmcm*）、それ以下ではchenmingite（空間群*Pnma*）が安定である（Ma et al. 2019）。ウルボスピネルは4~16 GPaでは$FeTiO_3$とFeOに分解するが、それ以上の高圧ではtschaunerite（空間群*Cmcm*）になることが知られている（Ma et al. 2021）。いずれも火星隕石中の衝撃溶融領域の近くで発見・記載された典型的な高温高圧鉱物である。近年、火星隕石Asuka 12325 （A 12325）を観察していたところ、TiとCrに富むスピネル中に、イルメナイトの離溶とは異なる、高圧相転移と見られるラメラ状の構造が見られた（Takenouchi et al. 2023）。今回はその詳細な観察と相同定を行い、TiとCrに富むスピネルの高圧相転移条件について報告する。

観察した試料は国立極地研究所より貸与されたA 12325の薄片と厚片１枚ずつを用いた。走査型電子顕微鏡（SEM）による観察と電子後方散乱回折（EBSD）分析は国立極地研究所のSEM（JEOL JSM-7100F）を用いた。また、元素組成分析では国立極地研究所の電子プローブマイクロアナライザー（EPMA、JXA-8200）を用いた。鉄の価数測定のために高エネルギー加速器研究機構BL-4Aにて放射光X線吸収端近傍構造(SR-XANES)分析を行った。集束イオンビーム（FIB）による切り出しと透過型電子顕微鏡（TEM）による観察には、京都大学大院理学研究科のFIB-SEM（Helios NanoLab G3 CX）とTEM（JEM-2100F）を用いた。

EPMAによる組成分析では、A 12325中のスピネルはCr_2O_3量が18～57 wt%、TiO_2が1～18 wt%と幅広い組成を示した。各分析点では化学量論数が酸素24に対して0.5ほどずれていたため、FeOの一部をFe_2O_3に置き換えることで化学量論数を合わせる操作を行った。その結果、最もTiに富むスピネルにおいて約8 wt%ほどのFe_2O_3が含まれる計算となり、その平均的な組成は$(Mg_{0.18}Fe^{2+}_{0.80}Mn_{0.02})_{\Sigma 1}(Cr_{0.66}Al_{0.21}Fe^{2+}_{0.45}Fe^{3+}_{0.22}Ti_{0.46})_{\Sigma 2}O_4$であった。観察したスピネルは命名規則に従うとすべてTiに富むクロマイトであった。XANESによる鉄の価数測定では、今のところ有意な三価鉄は検出できていないが、配位数の差による強度変化も考慮した詳細な解析が必要と考えられる。　SEM観察では、Tiに富むクロマイトにのみラメラ状の構造が見られた。ラメラは衝撃溶融脈の分布とは関連せず、脈から離れた場所でも広く観察された。EBSD分析によると、ラメラ部はクロマイトとは異なりchenmingiteに近い菊池パターンを示した。FIBで切り出してTEMで観察したところ、明瞭なラメラ状の組織が確認され、その回折像は消滅則を考慮するとやはりchenmingiteで指数付けされた。ラメラは特定の結晶方位に沿って形成しており、$(111)_{chr}//(1\text{-}11)_{chen}$等の方位関係が見られた。ラメラの内部は結晶方位の概ね揃った細粒な粒子の集合であったが、一部の回折スポットの強度が弱くなる雁行脈状の領域がラメラ内部に存在していた。

A 12325はこれまでの研究で、衝撃圧力が17-22 GPa程度と推定されている。その場合、溶融脈から離れた場所での上昇温度はおよそ 250 ˚Cに満たない。つまり、今回のTiに富むchenmingiteは17-22 GPa、250 ˚C以下という条件で相転移していた。従来chenmingiteへの相転移は速度論的な制約で衝撃溶融脈から数ミクロン離れた高温領域（～1350 ˚C）でのみ見つかっていたが、Tiが入ることで相転移が容易に起こせる可能性が示唆された。

通常高圧鉱物から見積もられる衝撃圧力は下限値のみである。今回のTiに富むchenmingiteは、相転移の

速度論的な制約が弱く、よりピーク圧力に近い衝撃変成条件を反映できる可能性がある。また、衝撃溶融脈の様な局所的な組織がなくても衝撃圧を見積もることが可能なため、試料の少ない火星隕石の衝撃変成度を見積もる指標として非常に有用である。よりTiに富む場合（Crに富むウルボスピネル）でも同様の高圧相転移が見られるかは今のところ不明だが、今後化学組成と高圧相転移条件の関係を明らかにしていく。

キーワード：クロマイト、火星隕石、衝撃変成作用、高圧相転移
Keywords: Chromite, Martian meteorite, shock metamorphism, high-pressure phase transition

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

シリカ鉱物を用いたメソシデライトの熱史推定

Estimation of thermal history using silica minerals in mesosiderites

*大野 遼[1]、竹之内 惇志[2]、三河内 岳[3]、山口 亮[4]、杉浦 直治[5]、三宅 亮[1]
*Haruka OONO[1], Atsushi Takenouchi[2], Takashi Mikouchi[3], Akira Yamaguchi[4], Naoji Sugiura[5], Akira Miyake[1]

1. 京大・理、2. 京大博、3. 東大博、4. 極地研、5. 千葉工大
1. Kyoto Univ., 2. Museum of Kyoto Univ., 3. Museum of Univ. Tokyo, 4. NiPR, 5. Chiba Int. Tech.

はじめに：我々はこれまでシリカ鉱物が隕石の特に400°C以下の低温での冷却速度を見積もる上で有用である可能性を示した(Ono+ 2021)。例えば、シリカ鉱物はメルトから最初にクリストバライト（Crs）として晶出した場合、冷却の過程で、その冷却速度の違いにより、石英やトリディマイトに相転移すると示唆した。この場合、石英に相転移するよりもトリディマイトに相転移するほうが遅い冷却速度を経験していることを示し、その時のトリディマイトは、400℃以下における冷却速度の違いによって擬直方晶系トリディマイト（PO）と単斜晶系トリディマイト（MC）に分かれるとしている。しかし、POやMCに相転移する際に期待される冷却速度は～10^-4 ℃/yrと非常に遅いため、実験での定量的な推定は困難である。そこで本研究では、シリカ鉱物に加え、メソシデライトは、これらに加えて、800-1000℃程度での冷却速度を推定可能な輝石も含まれている。そのため、Fe-Niメタルと輝石が示す冷却速度と存在するシリカ鉱物の相や形態を比較することで、ユークライトと同様にメソシデライトの熱史を推定することができると考えた。結果：今回は3つの試料（ALH-77219 (1B)、NWA 2924 (3A)、Asuka- (A) 881154 (1A)）の観察および分析を行なった。それぞれの試料に含まれているシリカ鉱物をSEM（JEOL JSM-7100; JSM-7001F）で観察し、相同定は顕微ラマン分光計（JASCO NRS-1000）を用いて行なった。メソシデライトは鉱物学的および再結晶化度合いによって、それぞれA～Cおよび1～4のサブタイプに分類されており（Hewins, 1984; 1988）、各試料のサブタイプは上述括弧内に示している。全ての試料に共通してMC中にラメラ状のPOが存在していた。その他に、NWA 2924ではCrsが存在しており、”Fish-scale”と呼ばれる割れ目が顕著に見られ、稀にPOと共存していた。A 881154では、石英がMCおよびラメラ状POと共存していたが、MCは単体でも存在していた。考察：今回の結果では、再結晶化度合いが高いタイプ3に分類したNWA 2924にCrsが見られ、タイプ1の両試料にはCrsは存在せず、MCとPOが見られた。メソシデライトは形成過程が複雑であるため、その分類においても形成過程の複雑さが反映されていると指摘されている（Zachen, 2024）。本研究の結果においても、分類の複雑さが現れていると考えられ、再結晶化度合いとシリカ鉱物の組み合わせについては、慎重に議論すべきである。また、NWA 2924中にCrsとPOが共存している様子が確認された。これは、Crsが部分的にトリディマイトに相転移した結果であると考えられる。同じ組み合わせのシリカ相は、UngroupedのエコンドライトであるErg Chech 002（EC002）隕石中でも報告されており、その冷却速度は輝石の離溶ラメラを用いて~1000-1200℃において3^-3℃/day程度と推定されている（e.g., Barrat et al. 2021）。このことから、NWA 2924はEC002と同様に3^-3℃/day程度の冷却速度を経験したと考えられる。一方で、NWA 2924にはPOラメラを持つMCも見つかっており、これは集積岩ユークライトのMoamaで類似したものが見つかっている(Ono+ 2019)。Moamaは輝石の離溶ラメラから冷却速度が~800-900℃において10^-4℃/yr程度と見積もられており、先のCrsとPOの組み合わせよりも非常に遅い冷却を経験したことになる。以上のことから、NWA2924は母天体の表層付近と深部の物質が混合した隕石であると考えられる。先行研究では、メソシデライトは母天体上で一度破砕された物質が、地殻物質と混合して形成されたと報告されており(Haba+ 2019)、NWA2924ではそれと矛盾しない熱履歴が推測された。まとめ：本研究では、今後は、定量的な見積もりを行うため、輝石の離溶ラメラや化学的ゾーニングおよびFe-Niメタルから冷却速度を推定していく予定である。また、再結晶化度合いとシリカ鉱物の組み合わせにおいても、これまでの分類と比較しながら慎重に検討して議論を行っていきたいと考えている。

キーワード：メソシデライト、シリカ鉱物、トリディマイト、クリストバライト、隕石
Keywords: Mesosiderite, Silica minerals, Tridymite, Cristobalite, Meteorites

口頭講演 | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

2024年9月14日(土) 14:00 ~ 15:00 | ESホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

座長:星出 隆志(秋田大学)

14:00 ~ 14:20

[R6-12] 超苦鉄質岩中のジルコニウム鉱物

「招待講演」

*沢田 輝[1,2]、大柳 良介[3,2] (1. 富山大学、2. 海洋研究開発機構、3. 国士舘大学)

14:20 ~ 14:35

[R6-13] ジルコン中メルト包有物を用いた花崗岩質マグマ固結過程の物理条件解析

*谷脇 由華[1]、齊藤 哲[2] (1. （株）シアテック、2. 愛媛大・院理)

14:35 ~ 14:50

[R6-14] 石英の結晶化温度の正確な決定のためのTiO_2活動度の導出

*小北 康弘[1]、加藤 丈典[2]、湯口 貴史[3] (1. 山形大学、2. 名古屋大学、3. 熊本大学)

14:50 ~ 15:00

調整

超苦鉄質岩中のジルコニウム鉱物

Zirconium minerals in ultramafic rocks

*沢田 輝[1,2]、大柳 良介[3,2]
*Hikaru Sawada[1,2], Ryosuke Oyanagi[3,2]

1. 富山大学、2. 海洋研究開発機構、3. 国士舘大学
1. University of Toyama, 2. JAMSTEC, 3. Kokushikan University

ジルコニウムは代表的な液相濃集元素の1つであり、超苦鉄質岩の中では各種鉱物中の微量成分として含まれるに過ぎず、ジルコンなどの鉱物種を成しての産出は多くの場合において珪長質の岩石に限られる。しかし、ここ10年ほどの間に様々な構造場のかんらん岩や蛇紋岩、クロミタイトなど超苦鉄質岩からジルコンやバデレアイトの報告が相次いでいる。それらの共生関係は、苦土カンラン石±ジルコン±バデレアイトやアンチゴライト±ジルコン±バデレアイトといった様々なパターンが報告されている。本発表では、発表者らが近年報告した事例も含めて、超苦鉄質岩中のジルコニウム鉱物の産出についてレビューし、それらを活用した研究の展望に付いて議論する。超苦鉄質岩中のジルコニウム鉱物は火成起源、変質起源、さらにそれらが変成や変質を被ったものの3通りに分類できる。火成起源ものは主に沈積岩体で生じ、局所的なマグマ分化やマグマ混合によって晶出したと考えられる。変質起源のものは超苦鉄質岩そのものの中ではなくロディン岩やヒスイ輝石岩など蛇紋岩化作用に伴って生じる変質岩の中で流体から晶出するものが多い。ただし、これらの変質岩はミリメートル以下の細脈として超苦鉄質岩の中に生じたり、二次的な変形で超苦鉄質岩と機械的に混合することも多いため、あたかも超苦鉄質岩の中で直接晶出したかのように見えるものも存在する。最後に、火成起源や変質起源のジルコニウム鉱物がさらに変成・変質作用を被ることがある。Xiang et al. (2022)は超苦鉄質岩の主要構成鉱物とジルコニウム鉱物の間の熱力学的安定関係を計算した。その結果、シリカ活動度などの条件にも依存するが、おおよそ500～1200 ℃あたりの温度領域では苦土カンラン石+ジルコンが共存し、それ以上の温度では頑火輝石+バデレアイトに変化し、逆に400-500℃以下で蛇紋岩化作用が進むとアンチゴライト+バデレアイトに変化しうることを示している。実際、天然試料においてもこのようなジルコニウム鉱物の変成過程を捉えている例が見られる。ジルコニウム鉱物は閉鎖温度が高く風化や変質に耐えるためウラン鉛年代測定に用いられる鉱物であるという印象が強いが、超苦鉄質岩の中においてはその限りではない。逆に、超苦鉄質岩の中におけるジルコニウム鉱物は、その年代測定や微量成分分析によって変質作用の時期と組成の詳細を明らかにするためのツールとしての活用が期待できる。

Xiang, H. et al. (2022). *Sci. China Earth Sci.*, 1-17.

キーワード：蛇紋岩、かんらん岩、ジルコン、バデレアイト
Keywords: Serpentinite, Peridotite, Zircon, Baddeleyite

ジルコン中メルト包有物を用いた花崗岩質マグマ固結過程の物理条件解析

Estimation of physical conditions during granitic magma crystallization process using melt inclusions in zircon

*谷脇 由華[1]、齊藤 哲[2]
*Yuka TANIWAKI[1], Satoshi SAITO[2]

1.（株）シアテック、2. 愛媛大・院理
1. Ciatec.,Co LTD, 2. Ehime Univ.

1.はじめに　花崗岩質マグマの物理条件は，造山帯の構造発達史から個々の花崗岩体のマグマ過程まで，広い範囲にわたる地質現象の理解に欠かせない基本情報である．花崗岩体に記録された物理条件の解析には，角閃石を用いた地質温度圧力計が広く用いられているが，角閃石を含まない花崗岩類には適用できない問題がある．そこでTaniwaki et al. (2023)では，花崗岩類に普遍的に含まれる鉱物であるジルコン中のメルト包有物組成を用いた物理条件の解析方法を提案した．本研究では，角閃石を含む花崗岩体である甲斐駒ヶ岳岩体と角閃石を含まない花崗岩体である御内岩体を対象に，高温高圧実験によって均質化したメルト包有物の組成を用いた物理条件の解析を行った．さらに，甲斐駒ヶ岳岩体については，既報の角閃石地質温度圧力計の結果と比較・検討した．

2.実験試料・実験手法　伊豆衝突帯花崗岩類の1つである甲斐駒ヶ岳岩体と，西南日本外帯酸性岩類の1つである御内岩体の2つの新第三紀花崗岩質岩体を対象とし，ジルコン中メルト包有物を用いた物理解析をおこなった．Watanabe et al. (2020) は甲斐駒ヶ岳岩体内の8試料について角閃石Ti温度計 (Femenias et al., 2006) および角閃石Al圧力計 (Mutch et al., 2016)を適用し，花崗岩質メルトの含水ソリダス曲線に近い温度圧力条件を示す3試料を岩体固結時の圧力 (240～220 MPa) を記録したものと解釈し，岩体の定置深度を約9～8 kmと見積もった．なお，この定置深度はSueoka et al. (2017) によって報告された熱年代学的手法から見積もられた甲斐駒ヶ岳岩体分布域である赤石山脈北部の地殻削剥量と整合的である．一方，Taniwaki et al. (2023) は御内岩体について，ジルコン中メルト包有物の組成を用いて114～80 MPaの固結圧力を見積もった．この圧力見積もり値は岩体でみられる比較的低圧を示唆する野外産状とも調和的である．それぞれの岩体から採集した岩石試料からジルコンを分離し，内部構造をSEM-EDSで観察したところ，微細な石英・長石類と空隙を含む不定形の多相包有物が認められた．本研究では，Taniwaki et al. (2023) にしたがい，実験圧力を0.3 GPa，実験温度を甲斐駒ヶ岳岩体の試料は780℃，御内岩体の試料は840℃と設定してメルト包有物の均質化実験を行った．

3.結果　どちらの岩体もメルト包有物は花崗岩質の組成を持ち，実験試料の全岩化学組成よりSiO_2含有量が高い．ハーカー図上では，メルト包有物の組成は岩体の全岩化学組成に比べてSiO_2含有量の高いところに位置する．

4.考察　メルト組成を用いた最新の地質温度圧力計であるMagMaTaB地質温度圧力計(Weber and Blundy, 2024)を適用して温度圧力条件を検討したところ，甲斐駒ヶ岳岩体のメルト包有物組成から734～702 ℃，303～185 MPa (±110～130 MPa)の温度圧力が見積もられた．このうち，温度条件は既報の角閃石温度圧力計の結果と調和的だが，圧力値はやや低い．薄片観察から，角閃石は自形～半自形でマグマの固結過程の初期から結晶化していたものと考えられる．一方で，ジルコンは一部に角閃石の周縁部に包有されているものがあるが，多くは黒雲母の周縁部に包有されるものや，主成分鉱物の粒間にみとめられる．さらに，ジルコンのメルト包有物はSiO_2含有量が高いことから，マグマ固結直前の粒間の残液がジルコン結晶成長時に取り込まれたと考えられる．したがって，当試料についての角閃石圧力計との圧力の不一致は，上昇するマグマ中の角閃石とジルコンの結晶化時期の違いを反映したものと解釈することができる．さらに，御内岩体についても同様にMagMaTaB地質温度圧力計による温度圧力見積もりを行った．その結果，785～733 ℃，235～92 MPaと，甲斐駒ヶ岳岩体と比較して高温・低圧を示す値が得られた．この温度圧力条件の差は，2岩体のマグ

マの冷却・固結過程の違いを反映していると考えられるが，どちらの岩体においても温度と圧力に負の相関が認められる．本研究によりジルコン中メルト包有物から新たに得られた温度圧力条件は，花崗岩質マグマ上昇過程においてのマグマの再加熱の記録と解釈することができる．

キーワード：メルト包有物、花崗岩、ジルコン、物理条件
Keywords: melt inclusion, granite, zircon, physical conditions

石英の結晶化温度の正確な決定のためのTiO_2活動度の導出

Estimation of TiO_2 activity for accurate determination of quartz crystallization temperature

*小北 康弘[1]、加藤 丈典[2]、湯口 貴史[3]
*Yasuhiro OGITA[1], Takenori Kato[2], Takashi Yuguchi[3]

1. 山形大学、2. 名古屋大学、3. 熊本大学
1. Yamagata Univ., 2. Nagoya Univ., 3. Kumamoto Univ.

珪長質マグマの地殻への貫入から定置，固化の間に生じるマグマ溜りプロセスは，マグマ中で結晶化する初生鉱物の結晶成長の履歴として記録される．初生鉱物のうち，石英は珪長質岩に普遍的に含まれる鉱物であり，そのカソードルミネッセンス（以下，CL）パターンやチタン（以下，Ti）濃度等の微量元素組成に基づき，石英の結晶成長プロセスが論じられている（例えば，Yuguchi et al., 2020, J. Asian Earth Sci.）．石英中のTi濃度は結晶化温度を反映し，その関係はTitaniQ温度計（Wark and Watson, 2006, CMP）として定式化されている．TitaniQ温度計を用いて結晶化温度を導出するためには，石英中のTi濃度の他，メルト中のTiO_2活動度の設定が必要である．TiO_2活動度は，石英と共生するTi含有鉱物の種類により仮定する方法（Schiller and Finger, 2019, CMP）や，熱力学計算プログラムrhyolite-MELTS（Gualda et al., 2012, J. Petrology）を用いる方法（Ghiorso and Gualda, 2013, CMP）により仮定され議論が行われるが，岩石学的な観察と整合した仮定となっている必要がある．そこで本研究では，TiO_2活動度を適切に決定して石英の結晶化温度を得るために，石英とジルコンが包有関係にあるサンプルを用いてTiO_2活動度の決定を試みた．また，この手法で得た石英の結晶化温度に基づき，深成岩体形成時のマグマ溜りプロセスに制約を与えることを目的として，遠野複合深成岩体（以下，遠野岩体）を例とした検討を実施した．

試料は，東北日本の北上山地中央部の遠野岩体に産出する岩石試料を用いた．遠野岩体の中心部はアダカイト質岩からなる累帯深成岩体であり，その周囲に分布するカルクアルカリ花崗岩とのマグマの起源や貫入時期の相違について議論されている（Tsuchiya et al., 2007, JVGR）．遠野岩体の岩石サンプルから薄片を作製し，山形大学の走査型電子顕微鏡（JEOL JSM-IT100A + Gatan mini CL）を用いて石英のCL像に基づく結晶成長様式の観察を行った．その観察結果に基づいて，名古屋大学宇宙地球環境研究所のEPMA（JEOL JCXA-733）を用いて石英中のTi濃度の定量分析を行った．ジルコンのTi濃度は，日本原子力研究開発機構・電力中央研究所（2023）のデータを用いた．

TiO_2活動度を導出するために，次の2つの条件を検討した．(1) 石英は深成岩体の中で900℃程度からソリダス付近の温度条件まで晶出する鉱物である（例えば，Sasaki et al., 2022, 地調研究資料集）．このうち，ソリダス付近で晶出した石英では，[岩体のソリダス温度]≦[石英の結晶化温度]であることが必要となる（Fonseca Teixeira et al., 2023, Geology）．(2) ジルコンを包有する石英に着目すると，晶出順序はジルコン，石英の順であることから，温度条件は[石英の結晶化温度]≦[ジルコンの結晶化温度]であることが必要となる．本研究で得た石英のCL像および Ti濃度から，これら2つの条件を検討し，TiO_2活動度の取り得る値を制約する．また，石英の結晶化温度を各サンプルで比較することにより，遠野岩体のマグマ溜りプロセスについて論じる．

キーワード：石英、カソードルミネッセンスパターン、Ti濃度、TiO2活動度、遠野複合深成岩体
Keywords: Quartz, Cathodoluminescence pattern, Ti concentration, TiO2 activity, Tono Plutonic Complex

口頭講演 | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

2024年9月14日(土) 14:00 ~ 15:30 | ES024 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

座長:小松 一生

14:00 ~ 14:30

[R2-12] 黄鉄鉱型化合物の構造安定化と陰イオンの化学結合性

「招待講演」

*吉朝 朗[1]、徳田 誠[1]、北原 銀河[1]、中塚 晃彦[2]、杉山 和正[3] (1. 熊本大学、2. 山口大学、3. 東北大学)

14:30 ~ 14:45

[R2-13] カルシウムホウ酸塩鉱物のFundamental Building Blocks（基本構造単位）の形成条件の解明

「発表賞エントリー」

*山口 航佑[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1] (1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系)

14:45 ~ 15:00

[R2-14] 木村石とロッカ石の結晶構造

*宮脇 律郎[1]、門馬 綱一[1] (1. 国立科学博物館)

15:00 ~ 15:15

[R2-15] Keatite結晶中における酸素の熱振動について

*則竹 史哉[1] (1. 山梨大・院総合)

15:15 ~ 15:30

[R2-16] 動力学的理論に基づく電子後方散乱回折のシミュレーション手法の開発と鉱物学への応用

*瀬戸 雄介[1]、大塚 真弘[2] (1. 大阪公立大・院理、2. 名古屋大・未来材料・システム研)

黄鉄鉱型化合物の構造安定化と陰イオンの化学結合性

Structural stabilization of pyrite-type compounds and chemical bonds of anions.

*吉朝 朗[1]、徳田 誠[1]、北原 銀河[1]、中塚 晃彦[2]、杉山 和正[3]
*Akira YOSHIASA[1], Makoto Tokuda[1], Ginga Kitahara[1], Akihiko Nakatsuka[2], Kazumasa Sugiyama[3]

1. 熊本大学、2. 山口大学、3. 東北大学
1. Kumamoto University, 2. Yomaguchi University, 3. Tohoku University

FeS_2黄鉄鉱は、天然に広く産出する代表的な硫化物で、高度6.5で鉄よりも硬い。MnS_2ハウエル鉱は、高度４で脆い。黄鉄鉱型化合物の遷移金属は多くが低スピン状態で、Mn系の化合物など高スピン状態の例は少なく、エネルギーの高い低スピン状態を多くが取っている。鉄・金・白金族遷移金属のニクトゲン(第15族元素)およびカルコゲン(第16族元素)化合物の多くが黄鉄鉱型をとる。黄鉄鉱型化合物は、多様な物性を有し、席対称性の高さに起因した系統的でユニークな結合距離やスピン状態変化が観測される[1-3]。単結晶構造解析では結晶構造の詳細に加え、Debye-Waller因子から各サイトのDebye温度θ_D等の原子の動的挙動を観測することができる[1-3]。Debye温度は硬度や融点に関連した物質の固有値である。今回、黄鉄鉱型化合物の物性に関わる陰イオンの役割についての総合報告を行う。

多様な黄鉄鉱型鉱物や化合物の単結晶精密構造解析を行った[1-3]。Debye-Waller因子から、黄鉄鉱型化合物のDebye温度θ_Dを見積もり、原子間距離を指標に比較した。ニクトゲンとカルコゲンを問わず黄鉄鉱型化合物には大きな規則性があることが判明した[1-3]。黄鉄鉱型構造での陰イオン間距離（X-X距離）は、周期律表のニクトゲンとカルコゲンの同じ周期の元素(S:P、Se:As、Te:Sb)で、ほぼ同じ原子間距離になっている。白金族鉱物はマントル岩に多く産出する。RuS_2 (laurite)やOsS_2 (erlichmanite)がクロムスピネル中に自形で産出することが知られ、主要マントルケイ酸塩鉱物粒子の結晶形成核の役割も果たす。lauriteの融点は1500℃を超える。図1にM-SとS-S距離の組成変化を示している。奇妙なことにM-S距離はほとんど変化せず一定であるのに対し、S-S距離は0.1Åも変化している。RuS_2 とOsS_2のDebye温度θ_D値は、それぞれ661Kと688Kであった。$Os_{1-x-y}Ru_xRh_ySb_2$固溶体のθ_D値（580-523K）はRh置換により著しく低下している。M-X距離やX-X距離の変化の規則性から読み取れる構造の安定機構について議論する。

キーワード：AuSb2、RuS2、pyrite-type compounds、single crystal diffraction、Debye temperature
Keywords: AuSb2, RuS2, pyrite-type compounds, single crystal diffraction, Debye temperature

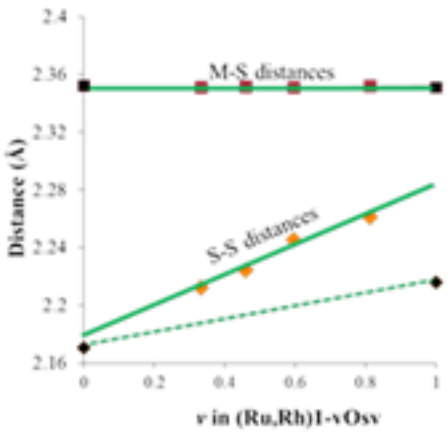


Fig. 1. Compositional dependences in M-S and S-S bonding distances with respect to Os content in the erlichmanite - laurite solid solutions (Os1-x-yRuxRhyS2) (y=0.07–0.10)[3].

カルシウムホウ酸塩鉱物のFundamental Building Blocks（基本構造単位）の形成条件の解明

Formation of Fundamental Building Blocks Composed of Calcium Borate Minerals

*山口 航佑[1]、興野 純[2]、岡田 慧[1]、長谷川 拓紀[1]
*Kosuke Yamaguchi[1], Atsushi Kyono[2], Satoru Okada[1], Hiroki Hasegawa[1]

1. 筑波大・院生命環境、2. 筑波大・生命環境系
1. Univ of Tsukuba. Grad. Sch. of Life and Env., Sci, 2. Univ of Tsukuba. Life and Environmental Science

ホウ酸塩鉱物は，結晶構造内で3配位と4配位のホウ酸[$BO_x(OH)_y$; $x+y=3$ or 4]が結合して基本構造単位(Fundamental building blocks; FBBs)を構成している．このホウ酸の組み合わせからなるFBBがきわめて多様である．例えば，主要ホウ酸塩鉱物には，colemanite $CaB_3O_4(OH)_3 \cdot 5H_2O$，ulexite $NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5H_2O$，kernite $Na_2B_4O_6(OH)_2 \cdot 3H_2O$，borax $Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$がある．Burns et al. (1995)の表記法に従うと，colemaniteのFBBは<△2□>と表記され，これは一つの3配位のホウ酸(△)と二つの4配位のホウ酸(2□)の環状構造(<△2□>)から構成されていることを表す．UlexiteのFBBは<△2□>-<△2□>と表記され，これは二つの<△2□>環が一つのホウ酸を共有した二量体(<△2□>-<△2□>)から構成されている．KerniteのFBBは<△2□>-<△2□>-<△2□>と表記され，<△2□>環が一つのホウ酸を共有して一方向に伸びた鎖状構造(<△2□>-<△2□>-<△2□>)を構成している．さらにboraxのFBBは<△2□>=<△2□>と表記され，二つの<△2□>環が二つのホウ酸を共有したクラスターを構成している．このように多様なFBBを持つホウ酸塩鉱物であるが，ホウ酸塩鉱物のFBBがどのような条件で形成され，どのように重合し，結果としてどのようなホウ酸塩鉱物が晶出するのかその詳細は明らかになっていない．そこで，本研究では，出発物質としてH_3BO_3，NaOH，$CaCl_2$を用いた水熱合成実験を実施し，生成物の分析・解析，およびそのフィードバックサイクルを通して，ホウ酸塩鉱物の生成環境を実験室で明らかにし，ホウ酸塩鉱物のFBBの形成条件を検討した．本研究の水熱合成実験の結果，gowerite $CaB_6O_8(OH)_4 \cdot 3H_2O$; FBB = <△2□>-<2△□>,△，priceite $Ca_2B_5O_7(OH)_5 \cdot H_2O$; FBB = <△2□>-<3□>，nobleite $CaB_6O_9(OH)_2 \cdot 3H_2O$; FBB = [Φ]<△2□>|<△2□>|<△2□>|の三相が生成された．Goweriteは加熱温度120℃および150℃で，反応時間12hで得られた．Priceiteは，加熱温度150℃で反応時間を12hから48hに増加されることで得られた．したがって，長時間の加熱ではgoweriteは溶解再沈殿してpriceiteが生成される可能性が高い．また，priceiteは，加熱温度を150℃から180～240℃に上昇させ，反応時間12hに短縮させることでも得られ，pHを上昇（≒pH14）させることによっても得られた．一方，加熱温度210℃で反応時間48h加熱後，その後自然放冷し室温で15日間保持すると，nobleiteが得られた．したがってpriceiteが溶解再沈殿するとnobleiteが生成される．Gowerite，priceite，nobleiteの三相のFBBは<△2□>環が共通している．Goweriteは短時間の反応で生成されたことから，<△2□>環は反応初期に形成されている．Goweriteは長時間の加熱で溶解するが，溶液中で<△2□>環は維持され，priceiteが沈殿するときに<△2□>環がpriceiteのFBBとして取り込まれていると考えられる．さらに，priceiteは長時間室温で溶液中に静置すると溶解するが，このとき溶液中で<△2□>環は維持され，nobleiteとして沈殿するときに<△2□>環がnobleiteのFBBとして取り込まれていると考えられる．ホウ酸塩鉱物は，温度，反応時間，pH，陽イオン濃度に応じて最適な結晶構造を構築するが，そのFBBは，前後の安定な相の間でFBBの一部（特に<△2□>環）を継承することが明らかになった．本研究によって，生成環境の変化に応じて晶出するホウ酸塩鉱物が変化しても，FBBの一部が継承されることが確認できたことは，自然界に存在するホウ酸塩鉱物から過去の晶出環境を明らかにできる可能性が示唆され，古環境推定にホウ酸塩鉱物が利用可能であることが示唆される．

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

キーワード：水熱合成実験、溶解再沈殿、gowerite、priceite、nobleite
Keywords: hydrothermal method, dissolution-reprecipitation, gowerite, priceite, nobleite

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

木村石とロッカ石の結晶構造

Crystal structures of kimuraite-(Y) and lokkaite-(Y)

*宮脇 律郎[1]、門馬 綱一[1]
*Ritsuro Miyawaki[1], Koichi Momma[1]

1. 国立科学博物館
1. National Museum of Nature and Science

木村石[kimuraite-(Y) $CaY_2(CO_3)_4{\cdot}6H_2O$] [1)]とロッカ石[2)][lokkaite-(Y) $CaY_4(CO_3)_7{\cdot}9H_2O$][1)]は希土類元素とカルシウムの含水炭酸塩鉱物で、その結晶格子からカルシウム層がテンゲル石[tengerite-(Y) $Y_2(CO_3)_3{\cdot}2\text{-}3H_2O$]に見られる波板状構造の希土類層と積層している類縁の鉱物と推察されている[3)]。木村石の原記載論文では結晶構造は報告されず、プリセッションカメラや四軸自動回折計による単結晶X線回折データの消滅則から直方晶系の*Imm*2、*Immm*、*I*222または$I2_12_12_1$の空間群が示されたに留まる。その後、湾曲型2次元検出器による単結晶X線回折データを用い、ラセミ体双晶モデルを導入し空間群*I*2*cb*で基本構造を決定し、同時に、ロッカ石についても空間群*C*2*bm*で基本構造を決定した[4)]。*R*値はそれぞれ0.0389と0.0858と収斂したが、いくつかの回折線で、消滅則との矛盾など実測強度と構造モデルからの計算強度に不一致が見られるという問題が残った。

今回、微弱ながらも消滅則に反して回折強度を示す反射を特に考慮し、空間群を見直しながら結晶構造を再検討した。消滅則から、木村石の空間群は直方晶系では原記載のとおり*Imm*2、*Immm*、*I*222または$I2_12_12_1$となる。これらの空間群は、ミラー面、2回軸、2回らせん軸のどれかが3方向いずれにも存在するという高い対称性を持つ。このため、構造モデルの構築には大きな制約が生じる。そこで、メロヘドラル双晶に加え、複数の構造モデルが高い対称性に統計分布した平均構造も考慮して、特にカルシウム原子の配置に留意しながらモデル構築と精密化を進めた。その結果消滅則との矛盾なく空間群*I*222で、*I*2*cb*での解析結果と同じ基調の結晶構造モデルを得た。

一方、ロッカ石の原記載論文[2)]では消滅則に基づき、空間群に*C*222、*Cmm*2、*Cmmm*、*Cm*2*m*が示されている。これらの空間群も高い対称性により構造モデルの構築に大きく制約する。木村石と同様に双晶モデルと平均構造を考慮してモデル構築と精密化を進めた。直方晶系*C*222で、消滅則との矛盾なく、*C*2*bm*の基本構造を基調とする構造モデルが得られたが、精密化を進めるには複雑な平均構造を解かなければならない壁に当たった。そこで、平均構造の基となる構造を探るため、単斜晶系の空間群*Cm*で解析を試み、精密化を進めた。

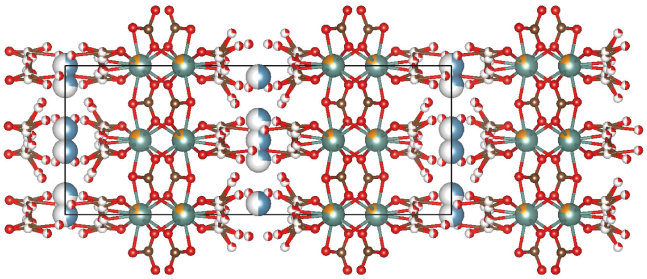
木村石とロッカ石の結晶構造は、平坦なカルシウム層と波板状の希土類層の2層から構成されている（図）。木村石とロッカ石の波板状の希土類層はどちらもテンゲル石の希土類層と同じ構造で、いずれの希土類元素の席も9つの酸素原子に配位されている。希土類元素の配位多面体は炭酸イオンを介在して頂点の酸素原子を共有し連なっている。一方、カルシウム原子は平坦なカルシウム層の中央に位置するが、直上と直下の波板状の希土類層との相対位置に変位がある。この変位は、カルシウム近傍でカルシウムに配位する酸素や炭素の位置に影響していると見られる。

Nagashima *et al*. (1986) *Am. Mineral*., **71**,1023-1033.
Perttunen (1971) *Geol. Soc. Finland Bull*., **43**, 67-72.
Miyawaki *et al*. (1993) *Am. Mineral*., **78**, 425-432.
Miyawaki *et al*. (2014) *IMA2014 abstract*, MC-3, 328.

キーワード：木村石、ロッカ石、結晶構造
Keywords: kimuraite-(Y), lokkaite-(Y), crystal structure

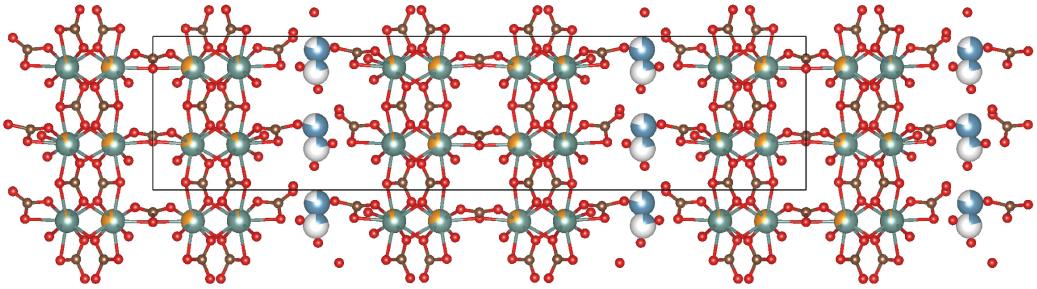
Kimuraite-(Y)

a **= 9.2673(7)**
b **= 24.0435(2)**
c = 6.0537(2)



Lokkaite-(Y)

a **= 9.242(4)**
b **= 39.328(18)**
c = 6.110(2)



Tengerite-(Y)

a **= 9.157(2)**
b **= 15.114((6)**
c = 6.078(4)

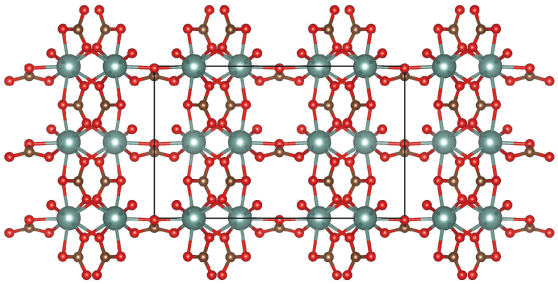


図　木村石、ロッカ石、テンゲル石の結晶構造

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

Keatite結晶中における酸素の熱振動について

Thermal Vibration of Oxygen atoms in Keatite Crystal

*則竹 史哉[1]
*Fumiya NORITAKE[1]

1. 山梨大・院総合
1. University of Yamanashi

Keatiteは合成によって得られた二酸化珪素多形のひとつで、1954年にKeatによって合成された(Keat, 1954, Science)。天然では柘榴石輝岩から発見された(Hill et al., 2013, Am. Min.)。SiO_4四面体が頂点共有して作るネットワーク構造は、Spodumeneの高温多形のSiO_4 /AlO_4四面体フレームワークと同様で、固溶体を形成する。Noritake and Naito (2023, J. Non-Cryst. Sol.)に基づく分類法では五員環を主としその他に六・七・八員環が存在するネットワーク構造とされ、結晶構造中に奇数員環が見られる変わった結晶構造である。Keatiteは負の体積熱膨張率を持っており、上述の固溶体は耐熱材料として利用されている。疎な多形を除くと、同様に負の熱膨張率を示すのはQuartz(Kihara, 2001, Phys. Chem. Min.)やCristobalite(Yamahara et al., 2001, J. Non-Cryst. Sol.)の高温相である。そのため神崎(2023, 鉱物科学会年会)はKeatiteが常温ですでに高温相であると指摘している。Huang and Kieffer (2005, Phys. Rev. Lett.)はQuartzとCristobaliteの高温相が負の熱膨張率を持つ原因として、Si–O–Si面の方向の不安定さにあるとしている。本研究では、分子動力学法を用いてKeatite中に於ける酸素の熱振動について解析し、それを基に負の熱膨張率の原因について議論する。分子動力学法のプログラムはMXDORTOを用いた(Sakuma and Kawamura, 2009, Geochim. Cosmochim. Acta)。まず初めに筆者は、二体ポテンシャルモデルであるBKS(van Beest et al., 1991, Phys. Rev. Lett.)、PMMCS(Pedone et al., 2006, J. Phys. Chem. B)、それから三体ポテンシャルも含むFG(Feuston and Garofalini, 1988, J. Chem. Phys,)、およびMGFF(Mahadevan et al., 2019, J. Phys. Chem. B)での計算を行い、それぞれのモデルに於いて格子定数の温度依存性を調べた。ユニットセル内の原子数は10,000を多少超える程度で、運動方程式の積分時間は1.0 fsとした。このうち、Keatiteに於いて負の熱膨張率を示したのはFGモデルだけであった。また、Keatらが報告しているように、温度の上昇に伴ってa, b軸方向には膨張しc軸方向に収縮した。FGモデルでの計算で得られた軌跡を用いて酸素の熱振動について解析を行った。振動方向をそれぞれの架橋について平均Si–O–Si平面に垂直な成分、平均Si–Siヴェクターに平行な成分、そしてその二つと直交する成分に分解した。その結果、Si–Siヴェクターに平行な成分の熱振動はその他の二つの成分に比べて顕著に小さいことが分かった。そのため、過去のQuartzおよびCristobaliteについての研究で指摘されているようにSi–O–Si面の方向の不安定さがKeatiteでも負の熱膨張率の原因になっていると考えられる。Keatiteの低温・高温転移および、Quartz/Cristobaliteとの比較については現在検討中である。

キーワード：キータイト、負の熱膨張、分子動力学シミュレーション
Keywords: Keatite, Negative Thermal Expansion, Molecular Dynamics Simulation

動力学的理論に基づく電子後方散乱回折のシミュレーション手法の開発と鉱物学への応用

Development of a simulation method for electron back-scattered diffraction based on dynamical theory and its application to mineralogy

*瀬戸 雄介[1]、大塚 真弘[2]
*Yusuke SETO[1], Masahiro Ohtsuka[2]

1. 大阪公立大・院理、2. 名古屋大・未来材料・システム研
1. Osaka Metropolitan Univ. Sci., 2. Nagoya Univ. Sci. IMaSS.

岩石を構成する結晶の形状や大きさ・各結晶相の空間分布・結晶方位分布などの要素は、岩石全体の物性（弾性定数、電気・熱伝導度、粘性など）を支配しており、地震波速度の異方性やレオロジー特性などの理解に欠かせない情報である。現在、結晶の種類や方位を解析する最も強力な手法はSEM-EBSD法である。この手法は、試料調製が比較的容易であることや少ない時間で大きな試料領域を分析できることから、岩石試料、セラミックス材料、金属材料の評価に重要な役割を果たしている。ただし、リファレンスとなるEBSDシミュレーションが不正確な場合には、当然ながら正確な指数付けを行うことが出来ない。特に地質試料の指数付けは難しい場合が多く、例えば断層岩を構成する主要鉱物の一つである蛇紋石の指数付け成功率は高々70%程度であり[1]、滑石に至っては成功率10–20%程度に留まっている[2]。もしこれらの鉱物について、指数付けに成功しやすい結晶方位と失敗しやすい結晶方位があるとすれば、偏った解析バイアスがかかってしまうことになり、当然その結果から導かれる岩石学的解釈も誤ったものとなる。EBSDシミュレーションの不正確さは、現在普及している解析ソフトウェアの多くが運動学的近似（１次摂動論）に基づいて計算していることに起因する。実際の電子回折では電子が複数回散乱される過程を考慮する必要があり、この効果（動力学的回折）によって、バンドの強度が変化するだけでなく、バンドの位置や湾曲度が有意に変化する。このような問題のため、公表されたEBSD解析の結果のほとんどは人間の判断に基づいた「データの修正・補正」が少なからず施されており、必ずしも客観性は保証されていない現状がある。

本研究では、正確に後方散乱電子回折現象を取り扱うために、ブロッホ波法基づく動力学的回折計算を行った。この方法は結晶中の電子波を、波動方程式とブロッホの定理で記述し、試料界面での入射波あるいは散乱波と試料内のブロッホ波とをなめらかに繋げることで、散乱波（回折波）の振幅を得る方法である。ブロッホ波の導出は固有値問題に帰着し、これを解くことが最大の計算コストとなるが、一旦固有値を求めてしまえば任意の厚みの試料についての散乱振幅を即座に求めることが出来るという利点がある。本研究では、方位空間を細かく（100万~1000万）分割し、それらの固有値・固有ベクトルを求めることで、任意の深さ/方位からの回折強度を計算した。また電子の侵入深さはモンテカルロシミュレーションで算出した。最近発表者らはブロッホ波法に基づく電子回折シミュレーションを高速に実施するアルゴリズムを発表しており、本研究はその手法の直接的な応用である[3]。実際に、Corundum (Al2O3), Magnetite (Fe3O4), Copper (Cu)のEBSDの実測パターンと、著者らが計算したパターンを示す。運動学的シミュレーションではバンドの幾何学的配置のみが再現されるが、動力学シミュレーションではバンドの内側と外側の明暗コントラストや、複数のバンド重なった部分（晶帯軸）の明るさなどが良く再現されている様子が分かる。今後は吸収の効果や散乱強度の方位依存性を組み込んでさらに正確な計算を行う予定である。[1] Nagaya, Wallis, Seto, et al. Journal of Structural Geology 95, 127–141, 2017. [2] Nagaya, Okamoto, Oyanagi, Seto, et al. American Mineralogist 105, 873-893, 2020. [3] Seto & Ohtsuka. Journal of Applied Crystallography 55, 397-410, 2022.

キーワード：後方散乱電子回折、ブロッホ波、動力学理論
Keywords: Electron back-scattered diffraction, Bloch wave, Dynamical theory

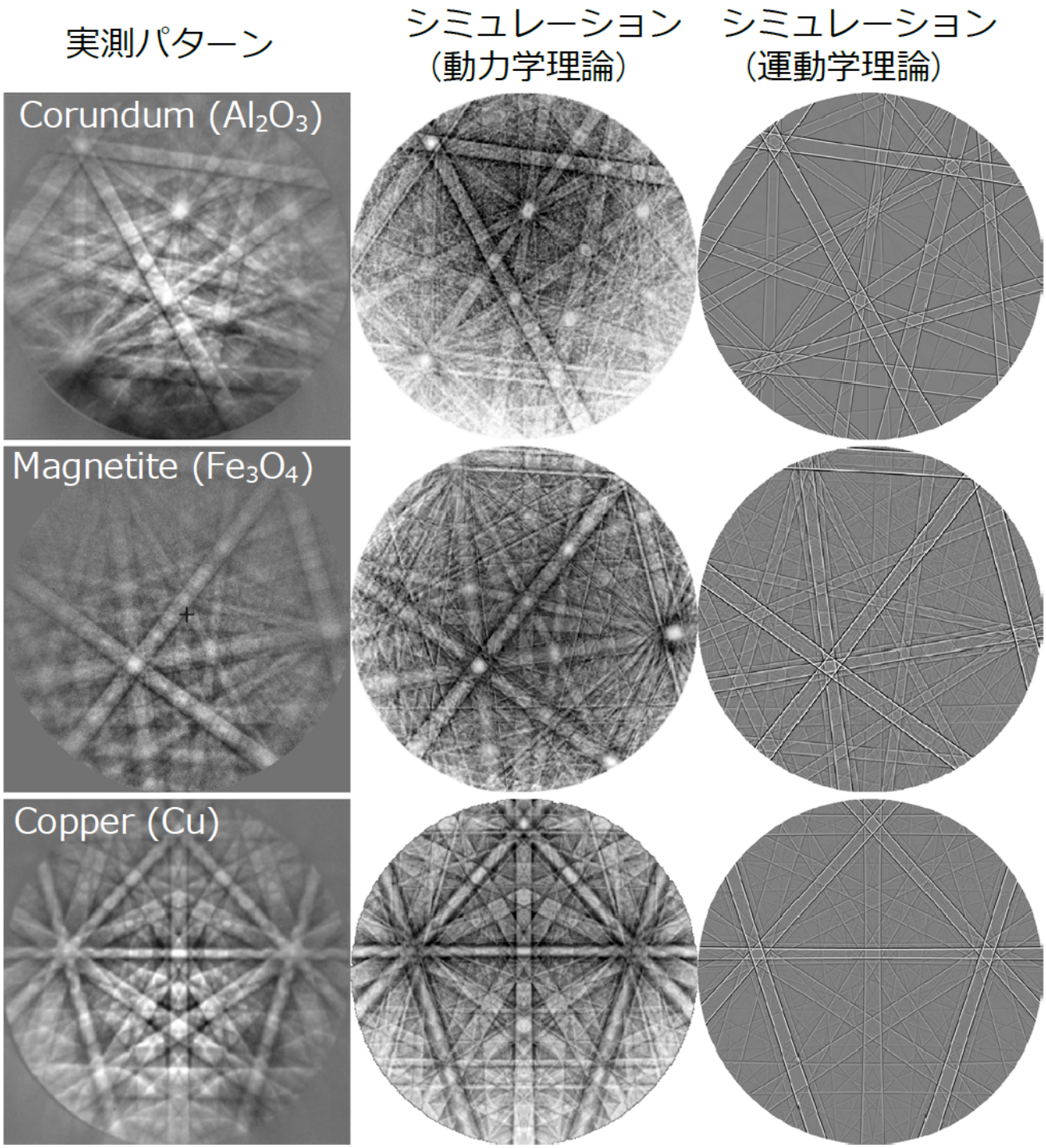


図. 実測のEBSDパターンと発表者らのシミュレーション結果との比較

口頭講演 | R5：地球外物質

2024年9月14日(土) 14:00 ~ 15:30 | ES025 東山キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵(東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、松本 徹(京都大学)

14:00 ~ 14:15

[R5-11] たんぽぽ計画によってISSに搭載されたシリカエアロゲルに捕獲されたマイクロメテオロイドの鉱物学的特徴

*野口 高明[1]、三宅 亮[1]、藪田 ひかる[2]、癸生川 陽子[3]、菅 大暉[4]、田端 誠[5]、奥平 恭子[6]、山岸 明彦[7]、矢野 創[8] (1. 京都大学・院理、2. 広島大学・院先進理工、3. 東京工業大学・院理、4. 高輝度光科学研究センター 、5. 千葉大学・院理、6. 会津大学・コンピュータ理工、7. 東京薬科大・生命科学、8. 宇宙航空研究開発機構)

14:15 ~ 14:30

[R5-12] ナトリウムに富むリュウグウ粒子のSTXM分析

*松本 徹[1]、野口 高明[1]、荒木 暢[2]、湯澤 勇人[2]、三宅 亮[1] (1. 京都大学、2. 分子科学研究所)

14:30 ~ 14:45

[R5-13] 小惑星リュウグウ試料およびCIコンドライトに見られる非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩の重要性

*三河内 岳[1]、吉田 英人[2]、林 悟[2]、増田 みなみ[2]、鍵 裕之[2]、杉山 和正[3]、中村 智樹[4]、ゾレンスキー マイケル[5] (1. 東大・総研博、2. 東大・理、3. 東北大・金研、4. 東北大・理、5. NASAジョンソン宇宙センター)

14:45 ~ 15:00

[R5-14] 小惑星リュウグウ試料の岩相分類と水質変成度の関連について

*増田 みなみ[1]、三河内 岳[2]、吉田 英人[1]、中村 智樹[3]、ゾレンスキー マイケル[4] (1. 東大・理、2. 東大・総研博、3. 東北大・理、4. NASAジョンソン宇宙センター)

15:00 ~ 15:15

[R5-15] リュウグウサンプル中のGEMS様非晶質ケイ酸塩を含む始原的岩相

*土`山 明[1,2]、延寿 里美[3]、　海洋[4]、　琦[4]、丁 兴[1]、王 园园[4]、何 昭露[1]、杜 静[1]、李 珊[1]、席 佳鑫[1]、林　[1]、邸 健[1]、井村 悠登[5] (1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理)

15:15 ~ 15:30

[R5-16] GEMS模擬粒子を用いた水質変成実験

*土`山 明[1,2]、延寿 里美[3]、　海洋[4]、　琦[4]、丁 兴[1]、王 园园[4]、何 昭露[1]、杜 静[1]、李 珊[1]、席 佳鑫[1]、林　[1]、邸 健[1]、井村 悠登[5] (1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理)

たんぽぽ計画によってISSに搭載されたシリカエアロゲルに捕獲されたマイクロメテオロイドの鉱物学的特徴

Mineralogy of micrometeoroids captured in silica aerogel aboard the ISS by the Dandelion Project

*野口 高明[1]、三宅 亮[1]、藪田 ひかる[2]、癸生川 陽子[3]、菅 大暉[4]、田端 誠[5]、奥平 恭子[6]、山岸 明彦[7]、矢野 創[8]
*Takaaki NOGUCHI[1], Akira MIYAKE[1], Hikaru Yabuta[2], Yoko Kebukawa[3], Daiki Suga[4], Makoto Tabata[5], Kyoko Okudaira[6], Akihiko Yamagishi[7], Hajime Yano[8]

1. 京都大学・院理、2. 広島大学・院先進理工、3. 東京工業大学・院理、4. 高輝度光科学研究センター 、5. 千葉大学・院理、6. 会津大学・コンピュータ理工、7. 東京薬科大・生命科学、8. 宇宙航空研究開発機構
1. Kyoto University, 2. Hiroshima University, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. JASRI, 5. Chiba University, 6. University of Aizu, 7. Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, 8. JAXA

はじめに：地球低軌道には2〜4万t/yのメテオロイド（惑星間空間を移動している天然の固体物質）が到達している[1]。一方，南極宇宙塵からの推算降下率は3〜5千t/yであり[2]，大部分のメテオロイドは大気圏突入時に蒸発すると推定される。このため，大気圏突入前のメテオロイド研究は重要である。メテオロイドは，回収可能人工衛星表面の衝突痕残留物[3，4]，宇宙空間に曝露したシリカエアロゲル中の捕獲粒子[5，6]として捕集できる。本発表では，JAXAが2015–2019年に国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」船外プラットフォームで実施した「たんぽぽ」計画のうち、2016~2017年に反地球面で曝露した超低密度シリカエアロゲルから摘出したメテオロイドについて報告する。

試料と実験方法：メテオロイド超高速衝突時に形成された細長い穴（衝突トラック）を含むエアロゲルをJAXA/ISASの初期分析設備の高清浄環境にて同定，計測，摘出した（試料ID: SD2A0000T）。この衝突トラックは全長約8mmで，球根状部分から直線状トラックが2本伸び、終端に残留粒子が捕獲されていた。九大にてスライドグラス2枚で本試料を挟み圧縮し，終端粒子がエアロゲル表面に現れる直前まで超音波切削し，金板に圧入した。終端粒子からは，（走査）透過電子顕微鏡（（S）TEM）観察および走査透過X線顕微鏡を使ったX線吸収端微細構造（STXM-XANES）分析試料を，京大のThermo Fisher Helios NanoLab G3 CX集束イオンビーム装置で切り出した。(S)TEMは九大のThermo Fisher Tecnai G2-F20を用いた。STXM-XANES分析はKEK-PFのBL-13で行った。

結果と議論：SD2A0000Tの終端粒子1と2（TP1と2）の大きさはそれぞれ，約10×6×5 μm，約6×5×3 μmであった。TP1と2共にエアロゲルへの侵入方向は丸くなっており，背後側に溶融発泡した粒子由来物質とエアロゲルの混合物が存在していた。共に低Ca単斜輝石の単結晶であり，それぞれ$En_{88.4±0.4}$と$En_{89.2±1.8}$，CaとAlは検出限界以下，0.1–0.2 wt.% Cr_2O_3であった。STXM-XANES分析では，低Ca単斜輝石に特徴的なO-, Mg-, Fe-XANESスペクトルが得られた。ISS船外曝露した別のエアロゲルから終端粒子を回収分析した先行研究では，終端粒子中のオリビンと低Ca単斜輝石はFeに富んでいた（$Fo_{64–84}$，$Wo_{3–4}En_{84–86}$）[6]。[6]の試料では3酸素同位体比が測定されており，$\Delta^{17}O$ (=0.52× $\delta^{18}O$– $\delta^{17}O$)が–2.6〜0で，CRコンドライトのタイプII（オリビンや低Ca単斜輝石が<90 Mg#=Mg/(Mg+Fe)×100）コンドルールやWild 2彗星のコンドルール様物体に類似していた[7，8]。本研究と[6]だけでなく，過去の地球低軌道での捕獲メテオロイドのオリビンと低Ca単斜輝石もFeに富む[3：$Fo_{66–83}$；4：$Fo_{56–71}$，$En_{63–71}$；5：$Fo_{29–77}$]。81P/Wild2彗星から回収されたコンドルール様物体ではタイプI（≧90 Mg#）に比べてタイプIIの比率が高い[9]。試料数はまだ限られるとはいえ，本結果及び先行研究を総合すると、地球低軌道から回収されたメテオロイドでもタイプII類似物質の割合が高いと推定

される。黄道光ダストの軌道計算から，地球軌道付近のメテオロイドの9割以上が木星族彗星起源と推定されている[10]。今後，たんぽぽで捕集したメテオロイドの酸素同位体測定を行うことで，上述の理論的推定に物質科学的な裏付けが与えられると期待される。

引用：[1] Love & Brownlee 1994. Science 262, 550. [2] Rojas+ 2021. EPSL 560, 116794. [3] Rietmeijer & Blandord 1988. JGR 93, 11943. [4] Zolensky+ 1994. In: Analysis of Interplanetary Dust, 291. [5] Hörz+ 2000. Icarus 147, 559. [6] Noguchi+ 2011. EPSL 309, 198. [7]Nakamura+ 2008. Science 321, 1664. [8] Tenner+ 2018. In: Chondrules, Chap. 8. [9] Gainsforth et al. (2015) MAPS 50, 976. [10]Nesvorný+ 2010. ApJ 713, 816.

キーワード：マイクロメテオロイド、たんぽぽ計画、国際宇宙ステーション、輝石
Keywords: micrometeoroid, TANPOPO mission, International Space Station, pyroxene

ナトリウムに富むリュウグウ粒子のSTXM分析

STEM analysis of sodium-rich grains recovered from asteroid Ryugu

*松本 徹[1]、野口 高明[1]、荒木 暢[2]、湯澤 勇人[2]、三宅 亮[1]
*Toru MATSUMOTO[1], Takaaki Noguchi[1], Toru Araki[2], Hayato Yuzawa[2], Akira Miyake[1]

1. 京都大学、2. 分子科学研究所
1. Kyoto University, 2. UVSOR

はじめに：C型小惑星リュウグウの試料は粘土鉱物など水質変成物が主成分である。これらは、リュウグウの母天体において、氷と無水鉱物、そして有機物が化学反応すること（水質変成）によって形成された [e.g., 1,2]。リュウグウの試料には、ナトリウムに富む岩相が見つかっているが[2,3]、詳細な記載は行われていなかった。一方で、著者らはこれまでにリュウグウの試料に地球外物質で観察例がないナトリウム炭酸塩を報告した[4]。ナトリウム炭酸塩は母天体が冷却された段階での0度以下の低温の水環境で形成したと考察された。リュウグウにおける水質変成はこれまで40度程度の温水環境が想定されていたが、従来知られているよりも更に低温領域での小惑星内部の水環境の痕跡が試料に残されている可能性がある。本研究ではナトリウム炭酸塩が含有する化合物種を調べることで、リュウグウの低温水に溶け込んだ物質を理解することを目的とした。

実験：本研究では、国際公募分析によって配布されたC室から回収されたリュウグウ粒子(C0071)を試料として用いた。粒子をインジウムに固定し、走査型電子顕微鏡を用いた粒子表面の元素マッピングを行なった。そして分析対象とする領域から、集束イオンビーム加工装置を使い、厚さ約150nm、10x5μmの面積をもつ切片を切り出した。この切片に対して、分子科学研究所に設置された走査型透過X線顕微鏡(STXM)を用いて、X線吸収端近傍構造分析(XANES)を行った。STXM測定では、大気暴露で試料輸送を行った。測定は炭素のK吸収端(C-XANES), 窒素のK吸収端(N-XANES)、硫黄のL吸収端(S-XANES)の領域で行った。

結果と議論：粒子C0071は長径約1.5mmの大きさで、その表面に見られたナトリウムに富む部分から切片を取り出した。粒子の表面の約1μmの深さあたりまでのC-XANESスペクトルでは炭酸塩(290.4eV)のピークが見られ、これは炭酸塩鉱物に対応すると推定される。SEM観察によってNaの濃集が確認されていることからNa炭酸塩である可能性がある。炭酸塩の強いピークが見られた領域から取得したS-XANESでは、170eV付近、182eV付近にピークが見られ、この特徴は硫酸塩化合物に類似する[5]。加えて、炭酸塩の強いピークが見られた領域のN-XANESスペクトルにおいては、401eV付近と405eV付近にピークが現れた。この組み合わせは硝酸塩化合物に類似している[6]。　リュウグウ試料には地球上での変質の産物であるカルシウム硫酸塩が報告されている[7]。しかし、本試料は窒素置換で継続的に保管されており、大気暴露された時間はおよそ2分程度であることから、地球での風化・変質の影響は非常に少ないと考えられる。 そのため硫酸塩のシグナルはリュウグウ試料に元々含まれていた物質に由来すると推定される。先行研究のリュウグウ試料の熱水抽出実験によって、硫酸イオンと硝酸イオンが報告されている[8]。本分析で確認されたピークが硫酸塩・硝酸塩化合物に対応するならば、これらは、水への可溶性の高い成分としてリュウグウの母天体を流れた水に溶け込んでおり、炭酸塩鉱物とともに沈殿した物質であると推測される。今後、切片に含まれる鉱物の詳細を明らかにするため、透過型電子顕微鏡によって切片を観察する予定である。

引用：[1] Yokoyama et al. 2022 Science 379 7850 [2] Nakamura et al. 2022 Science 379: 8671 [3] Yamaguchi et al, 2023 Nature Astronomy 7:398-405 [4] 松本, 他, 2024 JpGU abstract#PPS08-02 [5] Sarret et al. 1999 Geochimica et Cosmochimica Acta 63 22 3737-3779 [6] Leinweber et al. 2007 Journal of Synchrotron Radiation 14.6 500-511 [7] Imae et al. 2024 Meteorite and Planetary Science. doi: org/10.1111/maps.14178 [8] Yoshimura et al. 2023 Nature Communications 14:5284

キーワード：リュウグウ
Keywords: Ryugu

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

小惑星リュウグウ試料およびCIコンドライトに見られる非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩の重要性

Important occurrence of amorphous hydrated Na-bearing Mg phosphate in Asteroid Ryugu samples and CI chondrites

*三河内 岳[1]、吉田 英人[2]、林 悟[2]、増田 みなみ[2]、鍵 裕之[2]、杉山 和正[3]、中村 智樹[4]、ゾレンスキー マイケル[5]
*Takashi MIKOUCHI[1], Hideto Yoshida[2], Satoru Hayashi[2], Minami Masuda[2], Hiroyuki Kagi[2], Kazumasa Sugiyama[3], Tomoki Nakamura[4], Michael Zolensky[5]

1. 東大・総研博、2. 東大・理、3. 東北大・金研、4. 東北大・理、5. NASAジョンソン宇宙センター
1. Univ. Museum, Univ. of Tokyo, 2. Fac. of Sci., Univ. of Tokyo, 3. Inst. Mat. Res., Tohoku Univ., 4. Fac. of Sci., Tohoku Univ., 5. NASA-JSC

はじめに：JAXA小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウ試料が、鉱物学的・化学的にCIコンドライトとほぼ同じであるという発見は、初期太陽系におけるCIコンドライトの重要性を再認識させた。リュウグウ試料やCIコンドライトなどの「CIコンドライト的試料」は、母天体で強い水質変成を受け、Mg-Fe層状ケイ酸塩や炭酸塩・磁鉄鉱・磁硫鉄鉱などの変質鉱物から成る。これらの鉱物は、水質変成の度合いに応じて、存在量や化学組成が異なることが議論されているが、本研究では、微小量しか存在しないものの、その存在の重要性が示唆されるMgリン酸塩についてリュウグウ試料とCIコンドライトの両方において詳細な分析を行ったので、その結果を報告する。

試料と分析手法：リュウグウ試料とCIコンドライト（OrgueilとIvuna）の研磨片を東京大学のFE-EPMA（JEOL JXA-8530F）で分析した。Mgリン酸塩については、東京大学地殻化学研究施設で顕微ラマン分光を行った。Orgueil切片中のMgリン酸塩については、0.1 mm以下の粒子を研磨片より分離して、XRDでの分析も行った（東北大Rigaku XtaLAB Synergy-S）。

結果と考察：リュウグウ試料では、Mgリン酸塩の粒子は最大で0.15 x 0.1 mmの不定形で、0.4 x 0.3 mmに達するクラスターを形成しているものも見られたが、多くの場合は、0.1 mm以下の微小な粒子として少量のみ存在していた（全体での存在量は0.1 vol%以下で、C0040-01のみMgリン酸塩が約10 vol%)。Mgリン酸塩の特徴的な組織は、劈開状の割れ目で、時には2方向に沿って発達するが、ランダムな方向を持つ細い割れ目も存在した。MgリンEPMA分析でのトータルは通常60-70 wt%であったが、まれに80 wt%を超える粒子も存在した（最大90 wt%：31 MgO、2 Na2O、54 P2O5, wt%）。割れ目が顕著であるほどトータルが低くなる傾向が見られ、元のMgリン酸塩からの水和（脱水?）の程度が様々であることが示唆された。

CIコンドライトでは、Ivuna、Orgueilともに、リュウグウ試料とサイズ、組織、化学組成がよく似たMgリン酸塩を少量ながらも見出すことができた。ただし、地球風化の影響を明瞭に受けており、CI中のMgリン酸塩では、P2O5とNa2Oの含有量が減少するにつれて、SO3（～24 wt%）、MnO（～7 wt%）、Niを多く含む傾向が見られた。SとNiの供給源は明らかにFe-Ni硫化物で、Mnは炭酸塩またはイルメナイトからと考えられる。CI中のMgリン酸塩には小さなピット状の穴が見られ、地球での風化によって元素の溶脱が起きたことを支持していた。

CIコンドライト的試料はミリ～サブミリスケールで角レキ化しているが、角レキ岩片の一部には、水質変成の程度が低いものがあり、少量のカンラン石などが残存している。そこで、Mgリン酸塩の存在と水質変成との関連を議論するために、どのような岩片にMgリン酸塩が存在するかを解析した。その結果、リュウグウ試料では、Mgリン酸塩は水質変成度の低い岩片にのみ存在していることが明らかになった。このような岩片で

は、Mgリン酸塩は、水／岩石比がまだ低い時に、流体から析出する最初のリン酸塩相と考えられ、Fe-Niリン化物と共存することから、低酸素雰囲気で形成したことが示唆された。CIコンドライトのMgリン酸塩も同様の産状であり、カンラン石が存在するあまり水質変成を受けていない岩片に伴っていた。

顕微ラマン分光では、蛍光の影響が強く明確なラマン信号は得られなかったが、ごく弱いラマンピークが見られるMgリン酸塩粒子が存在した。しかし、Orgueilから分離したMgリン酸塩は、XRD分析では非晶質であった。

結論：このように、CIコンドライト的物質の水質変成度の低い岩片には、Mgリン酸塩が少量ながらも普遍的に含まれることが明らかになった。最近、同様のMgリン酸塩はNASA OSIRIS-RExがサンプルリターンした小惑星ベンヌ試料中にも豊富に含まれることが明らかになっている。ベンヌ試料にはカンラン石を含む水質変成度の低い岩片が多いことから、Mgリン酸塩と水質変成の関係は、我々の結果と一致する。これらのMgリン酸塩は、トータルが低いことから含水と考えられ、Naを最大5 wt%近く含むこと、さらに非晶質であることから、正確には「非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩」である。このようなMgリン酸塩は、これまで認識されていなかった初期太陽系の重要な水のキャリアであり、より多くのCIコンドライト的物質でのMgリン酸塩の捜索、分析が必要と言える。

キーワード：Mgリン酸塩、小惑星リュウグウ、CIコンドライト、水質変成、小惑星ベンヌ
Keywords: Mg phosphate, Asteroid Ryugu, CI chondrites, Aqueous alteration, Asteroid Bennu

小惑星リュウグウ試料の岩相分類と水質変成度の関連について

On the relationship between lithological classification and degree of aqueous alteration in Asteroid Ryugu samples

*増田 みなみ[1]、三河内 岳[2]、吉田 英人[1]、中村 智樹[3]、ゾレンスキー マイケル[4]
*Minami Masuda[1], Takashi Mikouchi[2], Hideto Yoshida[1], Tomoki Nakamura[3], Michael Zolensky[4]

1. 東大・理、2. 東大・総研博、3. 東北大・理、4. NASAジョンソン宇宙センター
1. Univ. Tokyo, Sci., 2. Univ. Tokyo, Univ. Museum, 3. Tohoku Univ., Sci., 4. NASA-JSC

はじめに

「はやぶさ2」小惑星探査機によって地球に持ち帰られた小惑星リュウグウの試料は、太陽系初期の物質進化を理解する上で貴重な情報源となっている。リュウグウはC型小惑星に分類され、太陽系でも最も始原的な物質の一つとされているCIコンドライトとの鉱物学的・化学的類似性が指摘されている。リュウグウ試料、CIコンドライトともに、岩石学的・鉱物学的には不均質な隕石で、角礫化した岩片で構成されることが特徴である。主な構成鉱物として、層状ケイ酸塩、マグネタイト、磁硫鉄鉱、炭酸塩、リン酸塩、カンラン石などが挙げられる。

リュウグウ母天体は、太陽系の外側の低温領域（約-200℃以下）で形成されたと考えられており、水と二酸化炭素が氷として存在していた可能性が示唆されている。その後、放射性元素の崩壊熱により氷が融解し、天体内部で水-岩石反応が進行した。この過程で、天体内部は強く含水化される一方、表層は比較的弱い含水化を受けたと推測される。さらに、大規模衝突により分裂された小さな岩片が再集積することで現在のリュウグウが形成されたと考えられており、これが角礫化岩片で構成される現在の姿につながっている。

これまでにリュウグウ試料の鉱物組合わせに注目した岩相分類が行われているが、本研究では、各岩相の割合を正確に見積もり、さらに水質変成度との関連に注目することで、リュウグウ母天体における水質変成プロセスの解明を目指した。

試料と分析手法

「はやぶさ2」が採取したチャンバーA（表層物質）とチャンバーC（地下物質を含む）の合23枚のリュウグウ試料研磨片を対象に、FE-EPMA（東大・理・地惑のJEOL JXA-8530F）によるBEI観察と元素マッピングを行った。観察された鉱物組み合わせに基づき、これまでに試料を6つの主要な岩相（I～VI）と「その他」に分類が行われているが（Mikouchi T.+2022）、各岩相の存在度を元素マップを対象としてAdobe Photoshopで解析した。

結果と考察

分析を行った試料の総面積は46.57 mm^2であった。リュウグウ試料全体では、水質変成度の弱い岩相II（23%）、水質変成度の強い岩相III（41%）、IV（18%）が多く観察され、最も水質変成の進んでいない岩相I（0.1%）は非常に稀であった。これは、リュウグウ母天体が中程度からそれ以上に進んだ水質変成を経験した角礫を多く含むことを示している。研磨片のサイズと岩相の関係については、4-5 mm程度の研磨片では複数の岩相が混在する一方、1-2 mm程度の研磨片では単一の主要岩相が観察される傾向が見られた。この結果は、リュウグウを構成する角礫化岩片が主に数mm程度のサイズを主体として存在することを示唆している。

チャンバーAとチャンバーCの試料を比較すると、チャンバーAの試料は岩相III（50%）、IV（30%）が多く、チャンバーCの試料は岩相II（36%）が多い傾向が見られた。また、粗粒の炭酸塩が特徴の岩相V（7.2%）がチャンバーCの研磨片ではほとんど見られなかったことから、岩相Vは岩相IIと共存することが少ないことが推測される。

これらの結果は、リュウグウ母天体内部での不均一な水-岩石反応の痕跡を示していると考えられ、天体内部での水/岩石比の違いによる不均一な水質変成の進行を反映していると考えられる（Nakamura T.+

2022）。岩片は水/岩石比を基準とすると、水の割合が少ない環境（水/岩石< 0.2）でできた物質と、水の割合が高い環境（0.2 < 水/岩石< 0.9）でできた物質の大きく2種類に分けることができる。前者は天体の表層付近の冷えやすく氷が溶けにくかった環境でできた物質、後者は天体内部の水が豊富な環境でできた物質と推測される。

結論

リュウグウ試料の岩相存在度と水質変成度の関連性から、リュウグウ母天体内部での不均一な水-岩石反応の痕跡が明らかになった。この結果は、C型小惑星の形成・進化過程や、太陽系初期の物質進化を理解する上で重要な知見を提供する。

現在のリュウグウには、リュウグウ母天体の表層と内部の物質が混在しており、これらの岩片を構成する鉱物の多様性は、水との化学反応の際の条件の違いで説明できる。本研究の結果は、リュウグウが地球上で発見される隕石と異なり、地球上での風化を受けていない貴重な試料であることを改めて示している。

今後の課題として、各岩相内のより詳細な鉱物モード組成分析や、CIコンドライトとの定量的比較が挙げられる。特に、CIコンドライトの代表であるOrgueilやIvunaに対しても同様の岩相分け、鉱物モード組成分析を行う必要がある。これらの研究を通じて、リュウグウ母天体における水質変成プロセスのより詳細な理解が期待される。

キーワード：小惑星リュウグウ、CIコンドライト、水質変成、角礫化
Keywords: Asteroid Ryugu, CI chondrite, aqueous alteration, brecciation

リュウグウサンプル中のGEMS様非晶質ケイ酸塩を含む始原的岩相

Highly primitive clasts with GEMS-like grains in Ryugu C0002 sample

*松本 恵[1]、土`山 明[2,3]、安武 正展[4]、中村 智樹[1]
*Megumi MATSUMOTO[1], Akira Tsuchiyama[2,3], Masahiro Yasutake[4], Tomoki Nakamura[1]

1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 広州地球科学研究所、4. JASRI/SPring-8
1. Tohoku Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. GIG, 4. JASRI/SPring-8

小惑星リュウグウは木星以遠の太陽系遠方で形成した微惑星に起源をもつラブルパイル小惑星である[1]。探査機はやぶさ2が持ち帰ったリュウグウ粒子は、主にMgに富む層状ケイ酸塩、Fe-Ni硫化物、マグネタイト、炭酸塩、アパタイトからなり、水質変成度の高いCIコンドライトに類似した化学的・岩石鉱物学的特徴をもつことが分かっている[1,2]。このうち初期分析が行われたC0002粒子中の岩片Fragment 4, 5は、彗星塵中のGEMS（glass with embedded metal and sulfide）[3]に似た特徴をもつ非晶質ケイ酸塩粒子を含み、これまで分析されたリュウグウサンプルの中で最も始原的な岩片と考えられている[1]。これらの岩片はリュウグウ母天体の材料となった太陽系遠方の始原物質を明らかにする上で重要な試料である。本研究ではFragment 4, 5の鉱物学的特徴を明らかにするため、放射光X線ナノCT（XnCT）、透過型電子顕微鏡（STEM-EDS）による分析を行った。

本研究ではC0002粒子の研磨片C0002-Plate5[1]から集束イオンビーム（FIB）を用いて切り出したFragment 4, 5のブロックサンプル（それぞれ25 μm, 15 μmの立方体）をDET-SIXM法によるXnCT分析[4]に用いた（実効的な空間分解能は約200 nm/pix）。またこれらのブロックサンプルからFIBを用いて超薄切片を切り出しSTEM-EDS分析に用いた。

XnCTおよびSTEM-EDS分析からFragment 4, 5はよく似た特徴をもち、主にGEMS様非晶質ケイ酸塩（~100-500 nm）からなる細粒多孔質なマトリクス中に細粒（最大数μm程度）なMgに富むカンラン石と輝石、ピロータイト、マグネタイト、カルサイト、有機物を含むことが分かった。また直径数μm-10 μmの球状の低結晶質ケイ酸塩粒子も複数含まれていた。カンラン石、輝石は板状、ウィスカー状、不定形など様々な形状をもつ。ピロータイトは不定形の細粒粒子として含まれており、リュウグウの主要な岩相に含まれる六角板状粒子[1]は観察されなかった。マグネタイトはフランボイド状の粒子またはその集合体として主にクラックに沿って形成しており、カルサイトは球状の形状をもつ。球状の低結晶質ケイ酸塩粒子はピロータイト粒子からなるリムをもち、内部にクラックを含むものも見られた。

GEMS様非晶質ケイ酸塩はピロータイト、ペントランダイトのナノ粒子をインクルージョンとして含む。主要元素（Si, Fe, Mg）組成は彗星塵中のGEMS粒子に比べてやや均質で組織的、化学的な特徴は始原的炭素質コンドライトに含まれるGEMS様非晶質ケイ酸塩[5]に類似している。またGEMS様非晶質ケイ酸塩は縁から低結晶質の含水層状ケイ酸塩に交代しており、弱い水質変成を受けていることが分かった。カンラン石、輝石の輪郭は明瞭で含水層状ケイ酸塩に交代している様子は見られないことから、水質変成の程度は主要なリュウグウ岩相に比べて非常に低いと考えられる。球状の低結晶質ケイ酸塩粒子は全体が低結晶質の含水層状ケイ酸塩に交代していることから、交代変成を受ける前の前駆物質は非晶のケイ酸塩であったと考えられる。そのような球形状の非晶質ケイ酸塩粒子は、これまで隕石、宇宙塵サンプル中には報告されておらず、リュウグウサンプルに特有の構成物である可能性がある。

[1] Nakamura et al. (2022) *Science*. [2] Yokoyama et al. (2022) *Science*. [3] Keller and Messenger et al. (2011) *Geochim. Cosmochim. Acta.* [4] Tsuchiyama et al. (2024) *Geochim. Cosmochim. Acta.* [5] Leroux et al. (2015) *Geochim. Cosmochim. Acta.*

キーワード：小惑星リュウグウ、GEMS、水質変成

Keywords: asteroid (162173) Ryugu, GEMS, Aqueous alteration

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

GEMS模擬粒子を用いた水質変成実験

Aqueous alteration experiments using GEMS simulant particles

*土`山 明[1,2]、延寿 里美[3]、 海洋[1]、 琦[1]、丁 [1]、王 [4]、何 昭露[1]、杜 静[1]、李 珊[1]、席 佳鑫[1]、林 [1]、邸 健[1]、井村 悠登[5]
*Akira TSUCHIYAMA[1,2], Satomi Enju[3], Haiyang Xian[1], Mingqi Sun[1], Ding Xing[1], Yuanyuan Wang[4], Zhaolu He[1], Jing Du[1], Shan Li[1], Jiaxin Xi[1], Xiaoju Lin[1], Jian Di[1], Yuto Imura[5]

1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理
1. Guangzhou Inst. Geochem., 2. Ritsumeikan Univ., 3. Ehime Univ. Sci, 4. Tokyo Univ. Sci., 5. Kyoto Univ. Sci.

はやぶさ２探査機が小惑星リュウグウから地球に持ち帰ったサンプルは、初期分析によりCIコンドライトに対応した物質であることが明らかにされた(例えば[1])。その水質変成作用の詳細が調べられ、主として非晶質珪酸塩からなるGEMS様物質などの岩石成分と氷が集積して形成されたリュウグウ母天体内部で、氷が融けて生じた水質流体にGEMS様物質が溶解し、含水層状ケイ酸塩、磁鉄鉱、磁硫鉄鉱、アパタイト、ドロマイト、ブリュネライトなどの二次鉱物が、水溶液の過飽和度低下とともにこの順に析出した、というモデルが提唱された[2]。本研究では、このような水質変成作用の初期段階を再現するために、GEMS模擬粒子を出発物質として水質変成作用実験を行った。GEMS模擬物質は誘導熱プラズマ（ITP）法[3]により作成した。これはCI組成（Si:Mg:Fe:S:Al:Ca:Na:Ni＝1 : 1.03 : 0.848 : 0.421 : 0.085 : 0.06 : 0.058 : 0.049）をもち、 (Fe,Ni), FeSを含む非晶質珪酸塩の球状微粒子（~100 nm径）から主としてなっている（少量のMgO, (Fe,Ni), FeS、珪酸塩ガラスなどの不完全反応物質を含む）。一部の実験では、GEMSの平均組成（Si:Mg:Fe:S:Al:Ca:Ni＝1 : 0.67 : 0.56 : 0.3 : 0.07 : 0.04 : 0.03）を用いた。窒素置換した純水に還元剤および炭酸イオン源として（1）ギ酸、（2）ヘキサメチレンテトラミン＋炭酸水素アンモニウム、あるいは（3）酢酸アンモニウム＋炭酸水素アンモニウムを溶解させた水溶液（$X(CO_2)/X(H_2O)$ = 0~0.0612、$X(NH_3)/X(H_2O)$ = 0~0.0365）を、岩石/水比が5（一部は1）となるようにGEMS模擬物質を加え、密閉されたテフロン容器中で、200℃で168~1550時間加熱した。実験生成物の分析は、粉末X線回折、SEM/EDS、TEM/EELS、顕微ラマン分光を用いて行った。全ての実験において、低結晶度の含水層状ケイ酸塩（M–S–H）が生成し、底面反射の位置からは、純水あるいは（1）（2）の水溶液の場合にはサーペンティン的、（3）の場合にはサポナイト的なものであった。鉄酸化物として、純水の場合には赤鉄鉱、(1)（2）の場合には磁赤鉄鉱、（3）の場合には磁鉄鉱＋赤鉄鉱が生成されたが、リュウグウ試料のような磁鉄鉱のみからなる生成物は得られなかった。これらの鉄酸化物は微細粒子（多くは数10 nm以下）が単独あるいは集合体としてM–S–Hからなるマトリクス中に存在し、一部には樹枝状晶も見られた（Fig. 1a）。ほとんどの実験で、少量の硬石膏が生成していたが、炭酸塩の生成は認められなかった。（1）の一部には$C_{20}H_{14}$, $C_{14}H_{10}O$と考えられる有機結晶、（2）の一部にはBoussingaultite（$(NH_4)_2$ Mg $(SO_4)_2$・$6H_2O$）、(3)にはefremovite（$(NH_4)_2Mg_2(SO_4)_3$）, C_2H_5NOの生成が見られた。また、ラマン分光により、GおよびDバンドを持つIOMを確認できた。実験生成物は、空隙率の異なる数10 μmサイズの塊の集合体である（Fig. 1b）。出発物質は、GEMS模擬粒子（～100 nmの球状粒子）は集合して空隙率の異なる数10 μmサイズの塊から成っており、実験生成物に見られた組織は、この出発物質の組織を反映している。リュウグウ試料のマトリクスも同様のサイズスケールで空隙率の異なる領域から成り[2]、母天体での集積の組織を反映しているのかもしれない。より長時間の加熱により鉄酸化物微細粒子の粗大化が期待され、実験生成物はリュウグウ試料に見られる水質変成作用の最初期の状態を示しているのかもしれない。一方で、ITPにおける不完全反応物質である珪酸塩ガラスの球状物質（数10 μmサイズ）は、炭素質コンドライトにおけるコンドリュールの模擬物質と見なすことができ、炭素質コンドライトと同様にこれが水質変成を受けていることも確認できた。今回の実験ではリュウグウ試料に見られたような鉱物やその結晶形状の再現は不完全で、とくに磁赤鉄鉱や硬石膏の生成は、今回よりも還元的な条件での実験が今後必要であることを示している。[1] Nakamura T. et al. (2023) Science, 379, eabn867. [2]

Tsuchiyama A. et al. (2024) GCA, 375, 146-172. [3] Enju S. et al. (2022) A&A, 661, A121.

キーワード：リュウグウサンプル、Mg-S-H、炭素質コンドライト、GEMS様物質、誘導熱プラズマ
Keywords: Ryugu samples, Mg-S-H, carbonaceous chondrites, GEMS-like material, induction thermal plasma

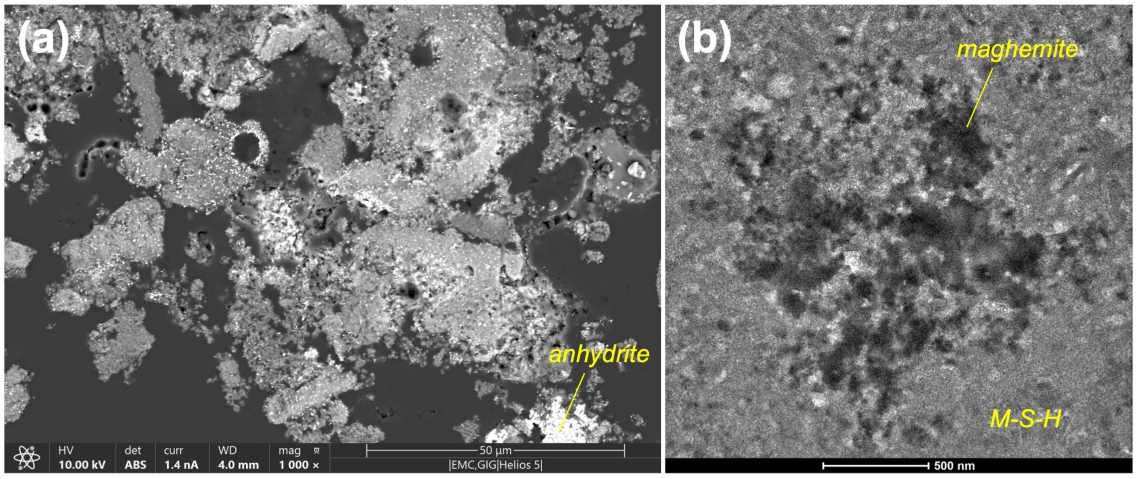


Figure 1. (a) SEM/BSE image of Run 11 (CI composition, water + NH_4HCO_3: $X(CO_2)/X(H_2O)$=0.0317, $X(NH_3)/X(H_2O)$=0.0317, W/R=5, 200°C, 1550 hrs.). Different brightness of matrix roughly corresponds to different porosity. (b) TEM/bright field image of Run 07 (CI composition, water + CH_2O_2: $X(CO_2)/X(H_2O)$= 0.0435, $X(NH_3)/X(H_2O)$=0, W/R=5, 200°C, 168 hrs.) showing a dendritic aggregate of maghemite.

ポスター | R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

2024年9月14日(土) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R2：結晶構造・結晶化学・物性・結晶成長・応用鉱物

12:30 ~ 14:00

[R2-P-01] PF BL-10Aの単結晶構造解析の新たな取り組みと現状について　～X線異常散乱実験と高圧下その場単結晶X線回折実験

*栗林 貴弘[1]、山根 崚[2]、原田 敬太[1]、長瀬 敏郎[3]、杉山 和正[2] (1. 東北大・院理、2. 東北大・金研、3. 東北大・博物館)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-02] KEK-PF BL-6Cにおける単結晶X線異常散乱法による精密構造解析の取り組み

*徳田 誠[1]、市村 卓視[2]、門馬 綱一[6]、宮脇 律郎[6]、三河内 岳[4]、吉朝 朗[3]、杉山 和正[5] (1. 熊本大・産業ナノ、2. 東北大・院工、3. 熊本大・理、4. 東大・総研博、5. 東北大・金研、6. 国立科博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-03] Fe K端XANESの吸収異方性の評価および多変量統計解析による微小領域の高精度 Fe^{2+}/Fe^{3+}定量法の開発：単斜輝石の例

「発表賞エントリー」

*伊藤 泰輔[1]、ウォリス サイモン[1]、高橋 嘉夫[1] (1. 東京大・院地惑)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-04] MnおよびFeを含有するDiopside(Violan)の精密構造解析

「発表賞エントリー」

*千葉 颯斗[1]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4] (1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-05] 単結晶X線回折法によるCs交換した天然Ca菱沸石の構造研究：その優れたCs交換能力に対する結晶化学的要因

河田 尚美[1]、古橋 陵[1]、藤原 恵子[1]、大川 真紀雄[2]、*中塚 晃彦[1] (1. 山口大・院創成、2. 広島大・先進理工)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-06] X線異常散乱法によるMn^{3+}/Mn^{4+}の分布の決定：woodruffite中の MnO_6 八面体が形成する3×4トンネル構造の詳細

「発表賞エントリー」

*宮﨑 クリストファー[1]、山根 崚[2]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4] (1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-07] GTS型Na珪チタン酸塩のMg^{2+} およびBa^{2+} イオン交換とその構造評価

*藤原 恵子[1]、河田 尚美[1]、中塚 晃彦[1] (1. 山口大・院創成)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-08] ゲーレナイトー鉄ゲーレナイト系合成メリライトの4配位席における鉄の分布と結晶構造変化

*濵田 麻希[1]、永嶌 真理子[2] (1. 金沢大学、2. 山口大・院創成)

12:30 ~ 14:00

[R2-P-09] ALCHEMIによるオリビンの微量元素のサイト選択性

*伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、若林 凌[1]、秋澤 紀克[2] (1. 京都大学、2. 東京大学)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-10] 多様な形状の輝石の離溶組織
*藤 昇一[1] (1. 福岡大学)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-11] MORB組成から期待されるAl/Fe含有量をもつブリッジマナイトの結晶化学
*中塚 晃彦[1]、福井 宏之[2]、鎌田 誠司[3]、平尾 直久[2]、大川 真紀雄[4]、杉山 和正[5]、芳野 極[6] (1. 山口大・院創成、2. JASRI、3. （株）アド・サイエンス、4. 広島大・先進理工、5. 東北大・金研、6. 岡山大・惑星物質研)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-12] 非晶質炭酸カルシウムの圧力誘起結晶化メカニズム
*森田 千歩[1]、小林 大輝[1]、鍵 裕之[1] (1. 東大・院理)

12:30 ~ 14:00
[R2-P-13] LiとCsによるvateriteのcalcite化への影響の相違
*古川 登[1]、木之田 亜海[2] (1. 千葉大学、2. （株）俄)

PF BL-10Aの単結晶構造解析の新たな取り組みと現状について　～X線異常散乱実験と高圧下その場単結晶X線回折実験

Advanced four-circle goniometer system for single-crystal diffraction measurements at BL-10A, PF: anomalous X-ray scattering method & in situ high-pressure experiments

*栗林 貴弘[1]、山根 崚[2]、原田 敬太[1]、長瀬 敏郎[3]、杉山 和正[2]
*Takahiro KURIBAYASHI[1], Ryo Yamane[2], Keita Harada[1], Toshiro Nagase[3], Kazumasa Sugiyama[2]

1. 東北大・院理、2. 東北大・金研、3. 東北大・博物館
1. Tohoku University (Sci), 2. Tohoku University (IMR), 3. Tohoku University (Mus)

放射光共同利用施設PFのBL-10Aの単結晶回折計の運用が開始されて40年強が経過し、この間、鉱物科学会関係者により、数多くの成果報告がなされてきた[1-4]。放射光の重要な活用方法の一つに、入射X線エネルギーの選択性が挙げられるが、回折実験としての活用は限定されている。一般に、X線回折強度を使用した構造解析では、周期律表上で隣り合う元素を直接区別することは困難である。特に、材料物質等では、周期律表で隣り合う遷移金属元素のイオン半径は類似し、アルミノ珪酸塩鉱物中の四面体席のように結合距離を利用して元素の存在比を推察することも難しい。目的元素の吸収端近傍で生じる異常散乱を有効活用する回折実験は、周期律表上で隣接する元素の区別に対して非常に強力なツールとなり得るが、国内の放射光施設では、異常散乱(AXS)実験を実施可能なビームラインはほとんどない。このような現状を踏まえ、今回BL-10Aが得意とするエネルギー領域(8 - 20 keV)でのAXS実験の効率化に取り組んだ。四軸回折計の装置制御および計測システムを刷新し、高精度のXAFS測定も可能とした。本報告では、BL-10Aの四軸回折計を活かした測定システムの改善・改良の詳細、そしてこれらのシステムを利用した最新の研究成果に関して報告する。　AXS実験では、我々のグループは、四面銅鉱におけるCu/Zn分布[5-6]、機能性単結晶素材CNGGのNbおよびGaの分布[7]、日立鉱におけるPb/Bi分布とその変調構造の可能性に関する研究を進めている。なお、BL-10Aでは、Fe/Co/Niなどの吸収端を活用した磁性体に対する回折実験が行われてきた[3]が、新たにPb L_{III} (13.044 keV) やCu K (8.940 keV), Zn K (9.660 keV), Ga K (9.234 keV), Nb K (16.520 keV)といった吸収端を活用したAXSを試みている。特にBL-10A開設当初に実施されたPb L_{III}の吸収端近傍における異常散乱実験に関しては放射光ビームの安定性とそれに対応した実験データの収集方法や結晶自身の吸収効果といった検討課題が報告されている[4]。今回のシステム更新は、入射ビームの強度をモニタリングしており、指摘されていた検討課題に関しても解決可能と考え、検討を進めている。　高圧下その場単結晶X線回折実験では、圧力誘起相転移とこれに伴う変調構造の出現[6]が観察され、この精査にBL-10Aの四軸回折計の逆空間スキャンが活かされた。現在、四面銅鉱の高圧下その場観察実験に取り組んでいる。参考文献[1] 佐々木聡 (1997) 鉱物学雑誌, **19**, 377-385. [2] 佐々木聡 (1997) 結晶学会誌, **39**, 37-44. [3] 奥部真樹、佐々木聡 (2014) 結晶学会誌, **56**, 158-165. [4] 大隅一政 (1985) 結晶学会誌 **27**, 73-80. [5] Yamane et al. (2022) AO-SRI 2022 in Sendai. [6] 原田ら (2024) PF-symposium. [7] Yamane et al. (2024) CGCT-9 2024 in Jeju [8] Okamoto et al. (2021) JMPS, **116**, 251-262.

キーワード：X線異常散乱、高圧その場単結晶X線回折、放射光
Keywords: anomalous X-ray scattering, In situ single-crystal X-ray diffraction, synchrotron radiation

KEK-PF BL-6Cにおける単結晶X線異常散乱法による精密構造解析の取り組み

Fine Structural Analysis using Single-Crystal Anomalous X-ray Scattering in KEK Photon Factory BL-6C

*徳田 誠[1]、市村 卓視[2]、門馬 綱一[6]、宮脇 律郎[6]、三河内 岳[4]、吉朝 朗[3]、杉山 和正[5]
*Makoto TOKUDA[1], Takumi Ichimura[2], Koichi Momma[6], Ritsuro Miyawaki[6], Takashi Mikouchi[4], Akira Yoshiasa[3], Kazumasa Sugiyama[5]

1. 熊本大・産業ナノ、2. 東北大・院工、3. 熊本大・理、4. 東大・総研博、5. 東北大・金研、6. 国立科博
1. IINa, Kumamoto Univ., 2. Tohoku Univ. Eng, 3. Kumamoto Univ. Sci, 4. Univ. of Tokyo UMUT , 5. IMR, Tohoku Univ., 6. Nat’l. Mus. Nat. Sci.

結晶学的に等価でない複数の陽イオン席を有する多成分系の鉱物における陽イオン分布は，その鉱物の温度・圧力の履歴に関する情報を内包する．鉱物を地質学的温度・圧力系として応用するために，構造中の陽イオン分布を決定する試みはこれまでに数多くなされてきた[1]．　結晶構造中の陽イオンの分布は，メスバウアー法，X線吸収微細構造法，X線および中性子回折測定による構造解析によって決定することができる．特に，X線構造解析は，各陽イオン席の電子密度と配位数および原子間距離などの情報から陽イオン分布を決定するための強力なツールである．しかし，実験室系のX線源では隣接原子番号の元素をそれぞれ識別することは困難である．X線原子散乱因子はエネルギー依存性を持つ異常散乱項を内包し，異常散乱項は各元素のX線吸収端近傍で急峻な変化を示す．異常散乱 (Anomalous X-ray Scattering: AXS) 法は，この異常散乱項を積極的に利用し，目的元素の環境構造解析ができることを特徴とする[2]．さらに，酸化状態により吸収端には数eVの化学シフトが生じることを活用すると，異なる原子価の同種元素間も分別する先端的な解析が可能である[3]．本発表では，発表者らがKEK PF BL-6Cにて実施した単結晶AXS実験についてこれまでの結果を報告する．物質構造科学研究所 Photon Factory BL-6CにおけるAXS測定システムはSi(111)二結晶分光器，ダイヤモンド位相子およびAFC-7SおよびSynergy-Custom 回折計から構成される (Figure)．偏光電磁石からの水平行方向に偏光したX線ビームはSi(111)二結晶分光器により単色化され，BL-6Cハッチ内上流に設置したダイヤモンド位相子によって円偏光へと変換されたのち，下流部にある回折計へと導かれる．通常，目的遷移金属元素の分布を解析するためには，それぞれのK-edge吸収端低エネルギー側より-25 eVおよび-300 eVの範囲の2波長を用いる．原子価差コントラスト解析では，例えば, Fe^{2+}/Fe^{3+}の場合はFe^{2+}-K edge (7.117 keV) から-1.6 eV, Mn^{2+}/Mn^{3+}の場合はMn^{2+}-K edge (6.543 keV) から-1.7 eV のエネルギーを使用した．元素分布および原子価差コントラスト解析に必要な各サイトの座標値および原子変位パラメータは実験室系線源(Mo-Kα)を用いて精密化したパラメータを利用した．元素分布解析の一例として，Violarite $Fe_{1.00}Co_{0.36}Ni_{1.64}S_4$ (ジンバブエ産) のAXS実験を紹介する．Fe-, Co-および Ni-K edge吸収端近傍でそれぞれ2波長の回折強度を収集し，構造因子の差をフーリエ変換することで元素分布マップを得ることができた．酸素四面体(MT)席はNiによって占有され，酸素八面体(MO)席にFe, CoおよびNiが統計分布していることが明らかとなった．Fe^{2+}およびFe^{3+}が共存するBabingtonite $Ca_2Fe^{2+}_{0.64}Fe^{3+}_{0.98}Mn_{0.27}Mg_{0.09}Al_{0.02}Si_5O_{14}$(OH) (福島県八茎鉱山産)のAXS実験例を紹介する．Babingtonite構造中には2つの酸素6配位席(MO1およびMO2席)がある．Fe^{2+}およびFe^{3+}の異常散乱項の変化を積極的に利用することによって，Fe^{2+}はMO1席Fe^{3+}はMO2席に秩序配列することを決定することに成功した．

参考文献
[1] Araki T. & Zoltani, T. (1972). Z. Kristallogr. 135, 355-373.
[2] Arima, H., Tani, Y., Sugiyama, K. & Yoshiasa, A. (2018). J. Miner. Petrol. Sci. 113, 273-279.

[3] Okube, M., Oshiumi, T., Nagase, T., Miyawaki, R., Yoshiasa, Akira., Sasaki, S. & Sugiyama, K. (2018). J. Synchrotron Rad. 25, 1694-1702.

キーワード：X線異常散乱、単結晶X線回折、元素コントラスト、原子価差コントラスト
Keywords: Anomalous X-ray Scattering, Single-crystal X-ray Diffraction, Element Distribution, Valence-Difference Contrast







Fe K端XANESの吸収異方性の評価および多変量統計解析による微小領域の高精度Fe^{2+}/Fe^{3+}定量法の開発：単斜輝石の例

Evaluation of Fe K-edge XANES anisotropy and accurate determination of micro-area Fe^{2+}/Fe^{3+} in clinopyroxene using multivariate analysis

*伊藤 泰輔[1]、ウォリス サイモン[1]、高橋 嘉夫[1]
*Taisuke Ito[1], Simon Richard Wallis[1], Yoshio Takahashi[1]

1. 東京大・院地惑
1. The Univ. of Tokyo, EPS

珪酸塩鉱物や火山ガラス中の微小領域のFe^{2+}/Fe^{3+}は、地殻およびマントル中の岩石・マグマの形成条件や酸素フュガシティを与える重要な情報である。なかでも、単斜輝石は様々な火成岩・変成岩に含まれる主要なMg-Fe珪酸塩鉱物であり、共存する鉱物との間の$Mg\text{-}Fe^{2+}$分配関係は、マントル深さから上昇した岩石の形成条件の推定に広く利用されている。ただし、単斜輝石中ではFeはFe^{2+}とFe^{3+}として様々な割合で存在するため、微小領域におけるこれらの量を正確に決定することが重要である。放射光X線を用いたX線吸収微細構造(XAFS)分光法は、従来のEPMAでは定量が困難だった鉱物中のμmスケール以下の局所的なFe^{2+}/Fe^{3+}を、非破壊で直接測定できる革新的な手法として、近年地球科学的な応用が進んでいる。

ところが、Fe K端 XANESのpre-edgeピーク(1s→3d/4p)の面積加重平均に基づいた典型的な$Fe^{3+}/\Sigma Fe$算出法[1]には、±約20%の極めて大きな誤差が存在する[2]。これは、光学的異方体である単斜輝石に、可視光と同様、X線波長領域でも強い吸収異方性(結晶方位依存性)があることに起因する。しかし、単斜輝石の吸収異方性と化学組成の複雑さから、この問題は長らく未解決だった。

最近、XANESスペクトル全体を利用した多変量統計解析による造岩鉱物・珪酸塩ガラス中のFe^{2+}/Fe^{3+}や酸素フュガシティ(f_{O2})の高精度な定量手法が、Dyarらを中心とするグループで精力的に開発されている。本手法は、既にざくろ石[3]や角閃石[4]、珪酸塩ガラス[5,6]に適用され、それらでは予測誤差±5.4–6.9%Fe^{3+}が達成された。そこで本研究では、岩石学的・地球化学的に重要な単斜輝石について、(1) X線吸収の結晶方位依存性の系統的評価、および(2) 多変量解析によるFe^{2+}/Fe^{3+}の高精度定量手法の開発を試みた。

まず、新鮮かつ様々な組成をもつ天然の均質な単斜輝石の単結晶を11種集め、EPMAによる主要元素の定量分析、EBSD分析による結晶方位測定、そしてMössbauer分析による正確なFe^{2+}/Fe^{3+}の測定をおこなった。ついで、これら単斜輝石を対象に、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-4Aにおいて直線偏光X線を用いたFe K端の角度分解XANES測定をおこない、XANESの結晶方位依存性を調べた。そして、複数の結晶方位のXANESスペクトルを学習データとして、単斜輝石のFe^{2+}/Fe^{3+}の多変量予測モデルを構築した。

結果、入射X線の振動方向に依存した強い吸収異方性が、1s→4p電気双極子遷移に由来するabsorption-edgeで検出された。一方で、1s→3d/4p遷移に由来するpre-edgeピークは、入射X線の振動方向と伝播方向の両者に依存した複雑な吸収異方性を示し、四重極遷移の異方性ならびにd-p混成軌道の配向性に応じた電気双極子遷移の異方性の存在が示唆された。

そして、説明変数間の多重共線性やp>>N(p: パラメータの数、N: 観測数)な条件が特徴であるスペクトルデータに有効な種々の多変量解析手法(PLS、Lasso、Ridge)を適用した結果、ランダム方位の単斜輝石の$\%Fe^{3+}$を絶対誤差±7.2%で推定することに成功した。また学習データと同じ結晶方位の単斜輝石については、さらに高精度な±5.1%Fe^{3+}の推定性能を得られた。特に、Lasso法による多変量モデルは、高い予測精度だけでなく、回帰係数のスパース性も特徴とし、今後、単斜輝石のXANESの各ピークの個別の遷移への帰属や、Fe^{2+}/Fe^{3+}の面的不均質性の定量に応用できる可能性がある。本研究で新たに構築した多変量モデルを利用することで、例えば薄片試料中の任意の結晶方位の単斜輝石について、その局所的なFe^{2+}/Fe^{3+}を正確に定量でき、地質

温度圧力計や酸素分圧計の高精度化、さらにはこれらを用いた地球内部の熱構造や酸化還元状態の推定精度の向上が期待される。

【引用文献】

[1] Wilke et al. (2001), Am. Mineral., 86, 714–730.
[2] Dyar et al. (2002), Can. Mineral., 40, 1375–1393.
[3] Dyar et al. (2012), Am. Mineral., 97, 1726–1740.
[4] Dyar et al. (2016), Am. Mineral., 101, 1171–1189.
[5] Lanzirotti et al. (2018), Am. Mineral., 103, 1282–1297.
[6] Dyar et al. (2023), Chem. Geol., 635, 121605.

キーワード：XAFS分光法、単斜輝石、Fe2+/Fe3+、多変量解析
Keywords: XAFS spectroscopy, clinopyroxene, Fe2+/Fe3+, multivariate analysis

MnおよびFeを含有するDiopside(Violan)の精密構造解析

Fine structural analysis of Diopside (Violan) containing Mn and Fe

*千葉 颯斗[1]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4]
*Hayato Chiba[1], Kazumasa Sugiyama[2], Makoto Tokuda[3], Takashi Mikouchi[4]

1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博
1. Tohoku Univ. Eng., 2. Tohoku Univ. IMR, 3. Kumamoto Univ. IINa, 4. UMUT

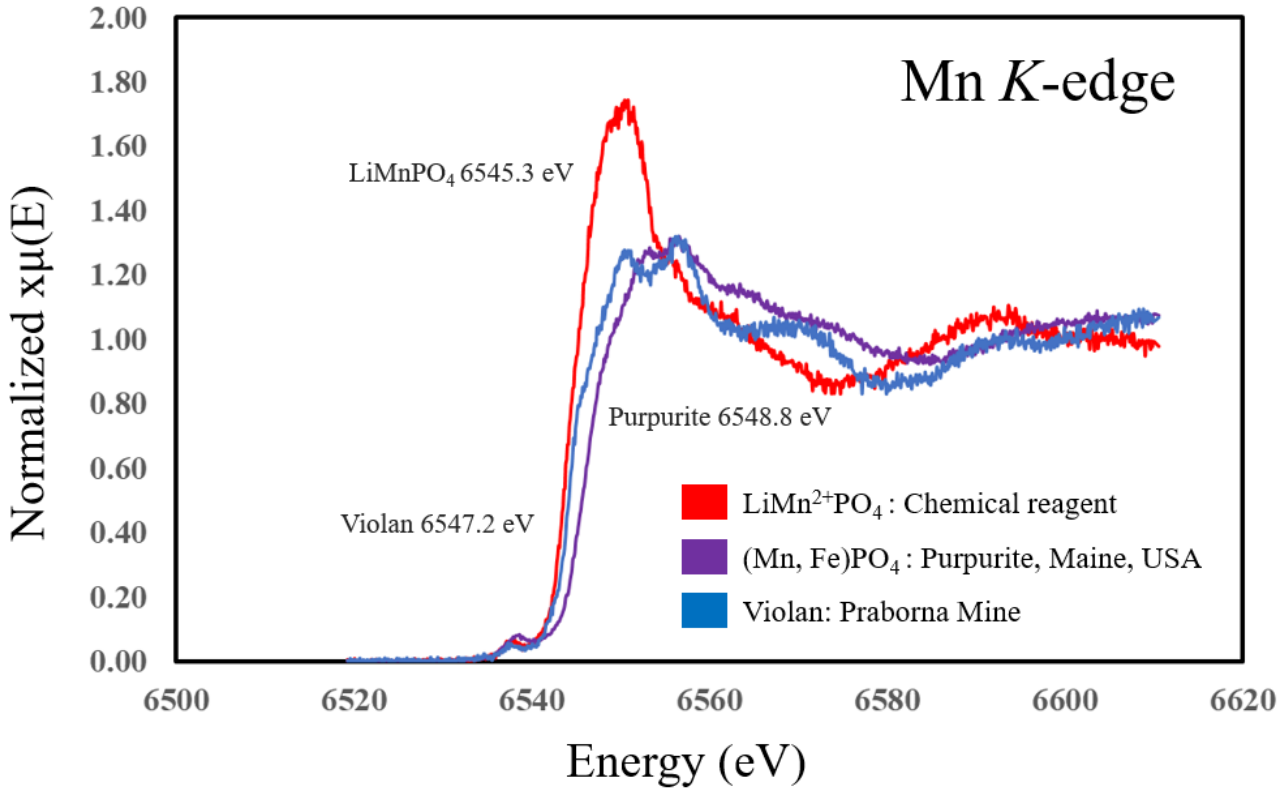
【緒言】透輝石（Diopside）は，アルカリ土類金属CaおよびMgを主成分とする単斜輝石であり$CaMgSi_2O_6$の化学組成で表される．Diopsideには，各種遷移元素の固溶があり，Crを固溶し緑色を示す山梨県南部町佐野川のChromian Diopsideは有名である．様々な色を示すDiopsideのなかで，特に紫色のものはViolanと呼ばれ，装飾品として使われている．この特徴的な紫色は構造中にMnが存在することに由来するとされている※1．赤色や緑色の発色には2価のMnが関与することが知られているが，Violanにおける紫色の発色原因は3価のMnによる作用が考えられている．しかしViolanに含有するMnは微量であり，過去の研究ではMnの酸化状態と色との関係を解明することはできていなかった．本研究では，Violanに含まれる遷移元素の電子状態や占有サイトを確認することで，Violanが紫色になる原因を突き止めたいと考えた．

【実験方法】試料はViolan（Praborna Mine, Saint-Marcel, Aosta Valley, Italy）を選択した．KEK PF BL-4AにおいてX-ray Absorption Near Edge Structure（XANES）測定を行い，含有されるFeおよびMnの電子状態を決定した．また，X線回折装置 （Synergy-S（Mo *Ka*））を用いて単結晶構造解析を行い，結晶構造を確定した．さらに，KEK PF BL-6CにおいてAnomalous X-ray Scattering （AXS）を行い，Mnの結晶構造内の占有サイトを調べた．試料の化学組成に関しては，Electron Probe Micro Analyzer（EPMA: JEOL JXA-8530F）を用いた定量分析を行った．

【結果】Violan試料についてXANES測定で得られたFeおよびMnの*K*吸収端エネルギーは，標準試料 ($LiFePO_4$および$LiMnPO_4$) に対して高エネルギー側にシフトしており，FeはFe^{3+}，MnはほぼMn^{2+}であるが若干Mn^{3+}が共存していることが判明した．Mo Kα線を用いた構造解析では，Ca席に軽元素が分布していること，さらにMg席には重元素が分布していることを結論することができた．さらに，Mnの環境構造を解析できるMn-AXS実験から，微量元素であるMnはMgサイトを占有していることが確認できた．EPMAの分析結果を踏まえると，今回のイタリア産Violan試料では，$Ca^{2+}_{VIII} + Mg^{2+}_{VI} = Na^{+}_{VIII} + (Fe^{3+}, Mn^{3+}, Al^{3+})_{VI}$および　$Mg_{VI} = Mn^{2+}_{VI}$の置換メカニズムが機能していることが明らかとなった．Fe^{3+}，Mn^{2+}およびMn^{3+}が八面体チェインに含有されるPurpurite（Maine, USA）も紫色を示すこととの関連性は興味深い．

【参考文献】※1 Mottana, A., Rossi, G., Kracher, A. *et al.* Violan revisited: Mn-bearing omphacite and diopside. *TMPM Tschermaks Petr. Mitt.* **26**, 187–201 (1979).

キーワード：透輝石、ビオラン、X線異常散乱、エックス線吸収端近傍構造
Keywords: Diopside, Violan, AXS, XANES


Mn K-edge
LiMnPO4 6545.3 eV
Purpurite 6548.8 eV
Violan 6547.2 eV
LiMn2+PO4 : Chemical reagent
(Mn, Fe)PO4 : Purpurite, Maine, USA
Violan: Praborna Mine
Normalized xμ(E)
Energy (eV)
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
6500
6520
6540
6560
6580
6600
6620

単結晶X線回折法によるCs交換した天然Ca菱沸石の構造研究：その優れたCs交換能力に対する結晶化学的要因

Single-crystal X-ray diffraction study of a largely Cs-exchanged natural Ca-chabazite: crystal-chemical factors for its excellent Cs-exchange ability

河田 尚美[1]、古橋 陵[1]、藤原 恵子[1]、大川 真紀雄[2]、*中塚 晃彦[1]
Naomi KAWATA[1], Ryo FURUHASHI[1], Keiko FUJIWARA[1], Makio OHKAWA[2], *Akihiko NAKATSUKA[1]

1. 山口大・院創成、2. 広島大・先進理工
1. Yamaguchi Univ. Sci. Tech. Innov., 2. Hiroshima Univ. Adv. Sci. Eng.

The amount of contaminated water generated by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, caused by the Great East Japan Earthquake (March 11, 2011), continues to increase and has become a serious problem. Among the radioactive elements contained in contaminated water, ^{137}Cs (30.1 years) and ^{90}Sr (28.8years) with a long half-life were released in large quantities by the nuclear accident. The search and development of ion-exchangers for highly efficient recovery and removal of these radioactive elements are eagerly desired. Currently, natural zeolite minerals such as chabazite, mordenite and clinoptilolite are practically utilized at the crippled nuclear power plant as the radioactive element removers. To design and develop highly-effective radioactive element removers, it is significant to reveal the relationship between the crystal structural features and the exchange abilities for radioactive ions. Here we conduct the single-crystal X-ray diffraction study of a hydrated natural Ca-chabazite from Burnt Cabin Creek, Spray, Wheeler Co., Oregon, USA and its largely Cs-exchanged form. The sample compositions are $(Ca_{1.86}Na_{0.13}K_{0.09})(Al_{3.98}Si_{8.03})O_{24}\cdot 12.38H_2O$ for the former and $(Cs_{2.66}Ca_{0.45}Na_{0.04}K_{0.10})(Al_{4.04}Si_{8.04})O_{24}\cdot 8.52H_2O$ for the latter.

We revealed that the Cs-exchanged form has the essentially ten occupied-sites in extraframework: four water sites (OW2’, OW3, OW4, OW5), essentially two Cs sites (Cs1/Cs1’, Cs2) and four Ca sites (Ca1, Ca2, Ca3, Ca4). The Cs^+ ions more preferentially occupy the Cs1/Cs1’ site, located at/around the centers of the 8-membered ring windows, than the Cs2 site. In terms of interatomic distances, the coordination environments of the extraframework species in the chabazite crystals before and after the Cs-exchange treatment are discussed. In particular, both samples have a common feature that possible hydrogen bonds are relatively weak between water molecules and framework O atoms, whereas those are relatively strong between water molecules. On the basis of these findings, we discuss the crystal-chemical key factors for an excellent Cs-exchange ability of chabazite as a highly efficient radioactive-element remover.

キーワード：Ca-chabazite、Single-crystal X-ray Diffraction、Cs-exchange ability
Keywords: Ca-chabazite, Single-crystal X-ray Diffraction, Cs-exchange ability

X線異常散乱法によるMn^{3+}/Mn^{4+}の分布の決定：woodruffite中の MnO_6 八面体が形成する3×4トンネル構造の詳細

Distribution of Mn^{3+} and Mn^{4+} studied by X anomalous scattering: the details of 3×4 tunneled structure formed by MnO_6 octahedron in woodruffite

*宮﨑 クリストファー[1]、山根 崚[2]、杉山 和正[2]、徳田 誠[3]、三河内 岳[4]
*Christopher Miyazaki[1], Ryo Yamane[2], Kazumasa Sugiyama[2], Makoto Tokuda[3], Takeshi Mikouchi[4]

1. 東北大・工院、2. 東北大・金研、3. 熊本大・産研、4. 東京大・総博
1. Tohoku Univ. Eng., 2. Tohoku Univ. IMR, 3. Kumamoto Univ. IINa, 4. UMUT

【緒言】Woodruffiteは結晶構造中にMnO_6八面体が3×4に配列するトンネル構造（骨格構造）を有し，MnはMn^{3+}とMn^{4+}の混合状態にある[1]．また，トンネル内隙間空間には，電荷不足を保証する陽イオンZn^{2+}と水分子が存在している[1,2]．同様のMnO_6八面体が3×3に配列したトンネル構造をもつtodorokiteは，トンネル内隙間空間の陽イオンの挿入脱離を利用する蓄電池正極材として注目されることから，woodruffiteの蓄電池正極材への応用も期待される．本研究では，単結晶X線異常散乱測定により骨格構造中のMn^{3+}の分布について調べ，詳細なwoodruffiteの構造検討を行った．

【実験】Woodruffiteの試料はアメリカ・ニューメキシコ州産の天然試料を用いた．針状試料（0.09 ×0.02 ×0.02 mm）をガラスファイバー（25 μm ϕ）に取り付け，KEK PF BL6CにおいてMn^{3+}の*K*吸収端（6.548keV）の低エネルギー側6.541および 6.514 keVの入射X線エネルギーを用いて単結晶X線異常散乱測定を行った．平均構造解析は，単結晶X線回折装置Synergy-S（Mo Kα）用いて実験を行った（2Θ max. = 90˚, -48 *h* 48, -5 *k* 5, -19 *l* 19）．試料のZn/Mn比はEPMA分析（JEOL JXA–8900L）により行った．さらに，Zn^{2+}周囲の水和水は平均構造解析の結果から見積もった．

【結果】woodruffiteの結晶構造およびX線異常散乱測定によって得られたMnコントラストマップをFig. 1(a), (b)に示す．Woodruffiteには4種類のMn八面体席（Mn1-4）が存在する（Fig.1）．X線異常散乱法で得られたMnコントラストマップから，骨格構造を形成する八面体席にはMnが分布し，トンネル内隙間空間にはMnは分布していないことが明らかとなった．さらに，実験に用いた入射X線に対するMn^{4+}およびMn^{3+}の異常分散項を考慮すると，比較的強いコントラストが観測されるMn2席には，Mn^{3+}が選択的に配列していることを示していると判断できる．MnO_6多面体のMn-O原子間距離はMn1：1.909(1) Å，Mn2：2.020(1) Å，Mn3：1.908(1) Å，Mn4：1.901(1) Åであり，Mn2O_6多面体は顕著に歪んでいる．この事実は，Mn^{3+}のMn2への選択的な配列によって生じるJahn-Teller歪みと考えることができ，異常散乱の結果から得られるMn2席へのMn^{3+}の選択的配列と調和的である．Zn-*K*吸収端で実施したZnの分布に関する研究成果[2]と総合すると，woodruffiteの構造組成式は，$Zn_{2.8}Mn^{3+}_{5.6}Mn^{4+}_{8.4}O_{28}\cdot 12.8H_2O$と書くことができる．発表当日は，ZnおよびMn吸収端において行った異常散乱実験および骨格構造内のMn^{3+}の分布について詳細に議論する．

[1] Post et al., American Mineralogist, 88, 1697–1702(2003)
[2] 宮﨑ら，日本金属学会東北支部(2023)

キーワード：ウッドルファイト
Keywords: woodruffite

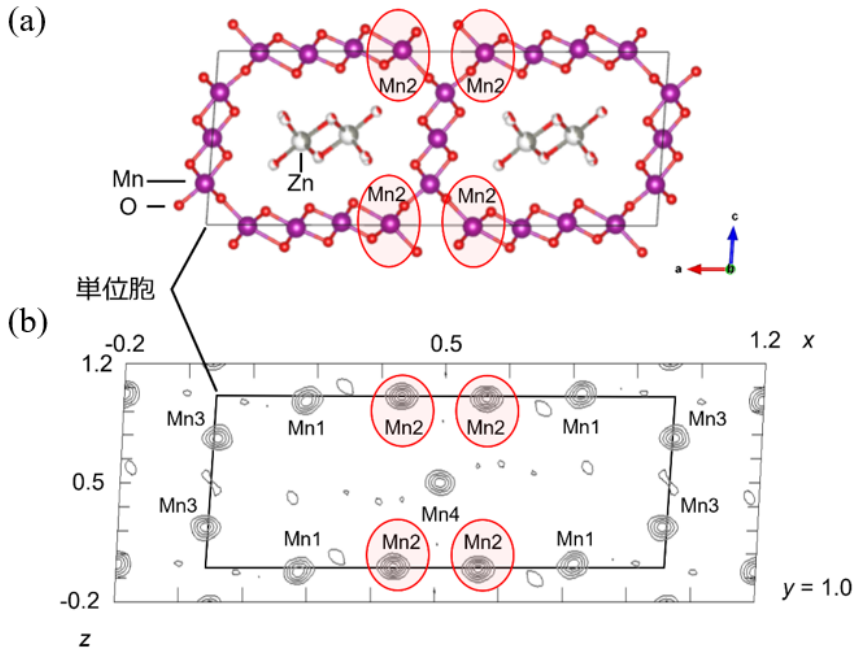


Fig. 1 (a) Woodruffiteの結晶構造（VESTAにより描画）
(b) MnのX線異常散乱によって求めたコントラストマップ（等高線間隔：1.2 e/Å^3）

GTS型Na珪チタン酸塩のMg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換とその構造評価

Mg^{2+} and Ba^{2+} ion-exchange of GTS-type Na titanosilicate and its structural characterization

*藤原 恵子[1]、河田 尚美[1]、中塚 晃彦[1]
*Keiko FUJIWARA[1], Naomi Kawata[1], Akihiko Nakatsuka [1]

1. 山口大・院創成
1. Yamaguchi Univ. Sci. Tech. Innov.

我々は、放射性廃棄物処理への応用を目指して、マイクロポーラス結晶であるGTS型Na珪チタン酸塩（Na-GTS：$Na_4[(TiO)_4(SiO_4)_3]\cdot 6H_2O$）に対して様々な陽イオンのイオン交換特性を調査してきた。この研究は、福島第一原子力発電所において増え続ける汚染水の処理材料開発に重要である。Na-GTSは、4つのTiO_6八面体が稜共有することによって1つのクラスターを形成し、そのクラスター同士がSiO_4四面体と頂点共有によって結合することで骨格構造を形成する。1つの細孔内に4つのNa^+イオンと6つのH_2O分子が占有すると報告されている(Dadachov et al., 1997)。結晶構造は立方晶系から僅かに歪んだ三方晶系［$R3m$, a = 7.8123(6) Å, α = 88.794(9)˚］に属する。福島第一原発事故で生じた汚染水に含まれる放射性元素のうち、放出量が多く半減期が長いCsやSrを効率よく回収・除去するための吸着剤の探索・開発が切望されている。本研究では、Sr^{2+}とは有効イオン半径が異なるが、同じ2価の価数をもつMg^{2+}とBa^{2+}に焦点を当て、Na-GTSのイオン交換特性に及ぼすイオンサイズ効果の影響を検討した。

水熱合成したNa-GTSの単一相を、$MgCl_2$および$BaCl_2$水溶液中（0 < C_M 7.9 mol/L）25 ˚Cで24時間振とう処理することで、Mg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換を行った。粉末XRDおよびTG-DTAにより各交換体の評価を行ない、Na-GTSから上澄み溶液中に溶出したNa^+の原子吸光分析によりMg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換体$[Na_{4(1-x)}M_{2x}[(TiO)_4(SiO_4)_3]\cdot yH_2O]$ (M：Mg, Ba)の交換率xを決定した。Mg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換体におけるMg^{2+}, Ba^{2+}の最大イオン交換率は、それぞれC_{Mg} = 3.0 mol/Lとき x = 0.76、C_{Ba} = 0.25 mol/Lのとき x = 0.86であった。各交換体の粉末XRDパターンから単位格子体積(V)、TGから含水量(y)を求めた。その結果、xの増加に伴い、Mg^{2+}イオン交換体のVとyは増加傾向を示したが、Ba^{2+}イオン交換体の両者はともに減少した。2価の陽イオンの場合、$2Na^+ \rightarrow M^{2+}$の置換による陽イオン数減少のため陽イオンに配位する水分子数の減少が期待される。しかし、この期待に反して、Mg^{2+}イオン交換体では、含水量(y)は増加した。これは、有効イオン半径の小さなMg^{2+} (例えばr^{VI} = 0.72 Å)が大きなNa^+ (例えばr^{VI} = 1.02 Å)と交換することにより、水分子が入るための細孔内の空きスペースが増加したためであると考えられる。この陽イオンに配位する水分子数減少の効果よりも空きスペースへの水分子導入効果の方がより効果的であったと考えられる。そこで、Mg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換体の陽イオンが、細孔内において、どのように分布しているかを検討した。Sr-GTS(立方晶系；空間群)の単結晶X線構造解析(Spiridonova et al., 2011)によって報告されたSr^{2+}席(4eと6g)が、擬立方構造をもつMg^{2+}およびBa^{2+}イオン交換体のMg^{2+}およびBa^{2+}の可能な占有席とし、いくつかの占有モデルを仮定して粉末XRDパターンをシミュレーションした。実測のXRDパターンと比較した結果、Ba^{2+}交換体中のBa^{2+}は擬立方構造における4e席と6g席の両方を占有することが示唆された。

キーワード：GTS型Na珪チタン酸塩、イオン交換、粉末XRD
Keywords: Na-GTS, Ion-exchange, Powder XRD

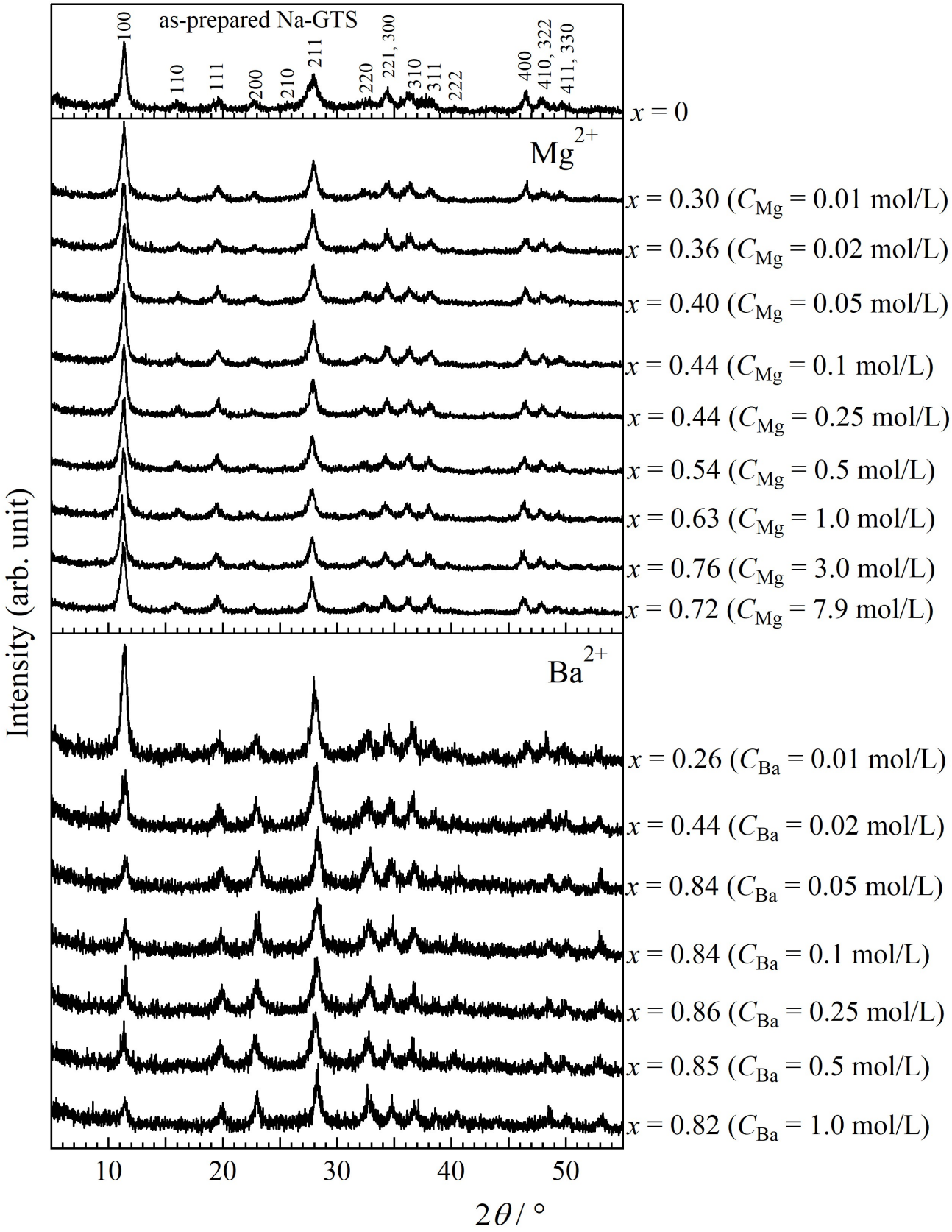


Fig. 1. Observed XRD patterns of Mg^{2+} and Ba^{2+}-exchanged Na-GTS.

ゲーレナイト一鉄ゲーレナイト系合成メリライトの4配位席における鉄の分布と結晶構造変化

Distribution of Fe^{3+} among tetrahedral sites and crystal structural change of gehlenite-Fe^{3+} gehlenite

*濵田 麻希[1]、永嶌 真理子[2]
*Maki HAMADA[1], Mariko Nagashima[2]

1. 金沢大学、2. 山口大・院創成
1. Kanazawa University, 2. Yamaguchi University

メリライト（$W_2T1T2_2O_7$）は結晶学的に独立した二つの4配位席を持ち，そのどちらにも鉄が分布する．本研究ではゲーレナイト（$Ca_2Al_2SiO_7$: Geh）一鉄ゲーレナイト（$Ca_2Fe_2SiO_7$: FGeh）系列のメリライトを合成し，4配位席の陽イオン置換に伴う結晶構造変化を検討する．合成メリライトはGeh_{100}，$Geh_{87.5}FGeh_{12.5}$，$Geh_{75}FGeh_{25}$，$Geh_{62.5}FGeh_{37.5}$，$Geh_{50}FGeh_{50}$（mol%）の5つの出発物質を秤量し，1500-1650℃で加熱し，10℃/minで1200℃まで冷却した．その後，鉄の価数を3価にするために1100℃で24時間以上加熱した．合成メリライトの化学組成はJEOL-JXA8230（山口大学）を用いて決定した． それぞれの平均化学組成は，$Ca_{2.008}Al_{1.969}Si_{1.018}O_7$（$Geh_{100}$），$Ca_{1.980}Al_{1.757}Fe^{3+}_{0.236}Si_{1.015}O_7$（$Geh_{87.5}FGeh_{12.5}$），$Ca_{1.966}Al_{1.551}Fe^{3+}_{0.438}Si_{1.025}O_7$（$Geh_{75}FGeh_{25}$），$Ca_{1.991}Al_{1.937}Fe^{3+}_{1.016}Si_{1.028}O_7$（$Geh_{62.5}FGeh_{37.5}$），$Ca_{1.990}Al_{1.332}Fe^{3+}_{0.633}Si_{1.031}O_7$（$Geh_{50}FGeh_{50}$）である．$Geh_{62.5}FGeh_{37.5}$の組成はメリライトの理想化学組成とは異なるため今回は使用しない．$Geh_{50}FGeh_{50}$の化学組成は予定していた鉄の分量より少なくFGeh成分が31.7 mol%しかないがメリライトであるので，この組成の合成メリライトとして使用する．合成メリライトの結晶構造はXtaLAB Synergy-R/DW（山口大学）を用いて測定を行い，SHELXL（Sheldrick, 2015）によって精密化した．格子定数はFGeh成分が増加するとともに*a*軸長は，*c*軸長とも増加し，FGeh成分が25 mol%を超えると急激に格子定数が大きくなる．さらにFGeh成分が0から31.7 mol%まで増加すると，*a*軸長は約0.09 Å，c軸長は約0.05 Å増加している．従って4配位席で起こっている$Al^{3+} \rightleftarrows Fe^{3+}$陽イオン置換によって， *a*軸方向がc軸よりも拡張することが判明した．天然に存在するもう一つのメリライト端成分であるオケルマナイトは，4配位席にAlやFe^{3+}が多く配位するとa軸長が減少し，c軸長が増加する，その増加・減少量はともに約0.03 Åである．オケルマナイトとゲーレナイトでは同じ陽イオン置換をしていても構造変化にかなり違いがあることが明らかになった．

キーワード：合成メリライト、結晶構造変化、ゲーレナイト
Keywords: synthetic melilite, crystal structural change, gehlenite

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

ALCHEMIによるオリビンの微量元素のサイト選択性

Crystallographic site preference of impurity elements in olivine by ALCHEMI method

*伊神 洋平[1]、三宅 亮[1]、若林 凌[1]、秋澤 紀克[2]
*Yohei IGAMI[1], Akira MIYAKE[1], Ryo WAKABAYASHI[1], Norikatsu AKIZAWA[2]

1. 京都大学、2. 東京大学
1. Kyoto University, 2. The University of Tokyo

オリビン$[Mg,Fe]_2SiO_4$は結晶構造中に二種類の酸素八面体サイト(M1, M2)を持つ。MgとFeはおおざっぱにはM1, M2サイトに同程度に分布するが、実際にはFeは僅かにM1サイトへの配置を好む性質があり加熱によりその傾向は顕著になることが知られる(e.g., Heinemann et al. 2006)。こうしたオリビンにおける各陽イオンのM1-M2サイト間分配挙動は、一般に高温下で生じる配列の無秩序化と一見して反する挙動に見えることもあり興味が持たれてきた (e.g., Aikawa et al., 1985)。地質学的応用の観点では、オリビンのM1-M2 サイト間の元素交換速度が輝石などと比べてもとても速いため、上記の温度依存性から高温時の情報を抽出することはそれほど期待できない。しかしその反面、高温時のM1-M2サイト間分配の残存(凍結)程度が冷却速度をよく反映する可能性がある(e.g., Redfern et al.，1996)。さらに天然のオリビンには微量元素として特にCa、Mn、Niなどが普遍的に存在する。Mg, Feに加えてこれら各元素のサイト間分配を全て計測することで、一つのオリビン粒子に対してより詳細な冷却過程の情報を得られる可能性がある。複数元素あるいは微量元素のサイト占有率の決定は一般的なX線回折法などでは困難なため、Spence & Taftø (1983)やMotoyama et al. (1995)らは電子チャネリングを活用した結晶内のサイト選択的EDS分析であるALCHEMI (Atom-location by channeling-enhanced microanalysis) を用いることでオリビン中複数微量元素のサイト分布計測を試みた。しかし、これらは数点のビーム傾斜に対するX線スペクトル変化を用いた計測であることなどの理由で、得られた値は必ずしも十分な精度があったとは言えない。ALCHEMIは近年、電子顕微鏡のデジタル制御を活用して多くのビーム傾斜に対するX線スペクトル変化を取得する実験方法や理論計算との比較による解析方法によりHARECXS (High angular-resolution electron-channeling X-ray spectroscopy)として拡張がなされ、複合的な構造を持つ鉱物においても結晶内元素分布を精度よく決定することが可能となった(e.g., Soeda et al., 2000; Muto & Ohtsuka, 2017; Igami et al., 2018)。本研究ではこの手法を用いて改めて様々なオリビン中の複数微量元素のサイト間分配を計測し、それらの産状との関係について検討した。

サンプルには冷却速度が異なると期待される天然のオリビン試料を複数用意した。また、San Carlos産オリビンを高温アニールした後急冷回収した試料も作成した。これらの化学組成についてSEM-EDSやEPMAで測定した後に集束イオンビーム装置(FIB, FEI Quanta 200 3DS or Helios NanoLab G3 CX)で薄膜を作成し、TEM-EDS (JEOL JEM-2100F, JED-2300T)を用いてALCHEMI分析を行った。分析ではM1, M2席が明確に分離する(004)面に着目し、001系統列反射条件下で電子線傾斜に対する各元素の特性X線強度変化プロファイルを収集した。得られたX線強度プロファイルを、ICSC (Oxley & Allen, 2003)を用いて算出した各サイトからの理論プロファイルに対して線形回帰することで、各元素の結晶内分布の評価を試みた。以上の分析により、0.1 wt%レベルまでの微量元素についてM1, M2サイトへの分配率を計測できた。各元素のサイト選択性は、定性的には全て先行研究同様であることが分かった。すなわち、Feはわずかに M1サイトへ、Niは強くM1サイトへ、MnやCaは強くM2サイトへ集中する傾向を示した。その上で、試料により分配率に有意な差がみられ、それらが産状と相関することを確認した。また、San Carlos産オリビンは高温アニール後に急冷することでより火成オリビンが示す分配率に近づくことが分かった。

キーワード：オリビン、陽イオンサイト分配、分析電子顕微鏡、ALCHEMI

Keywords: olivine, cation site distribution, analytical electron microscopy, ALCHEMI

多様な形状の輝石の離溶組織

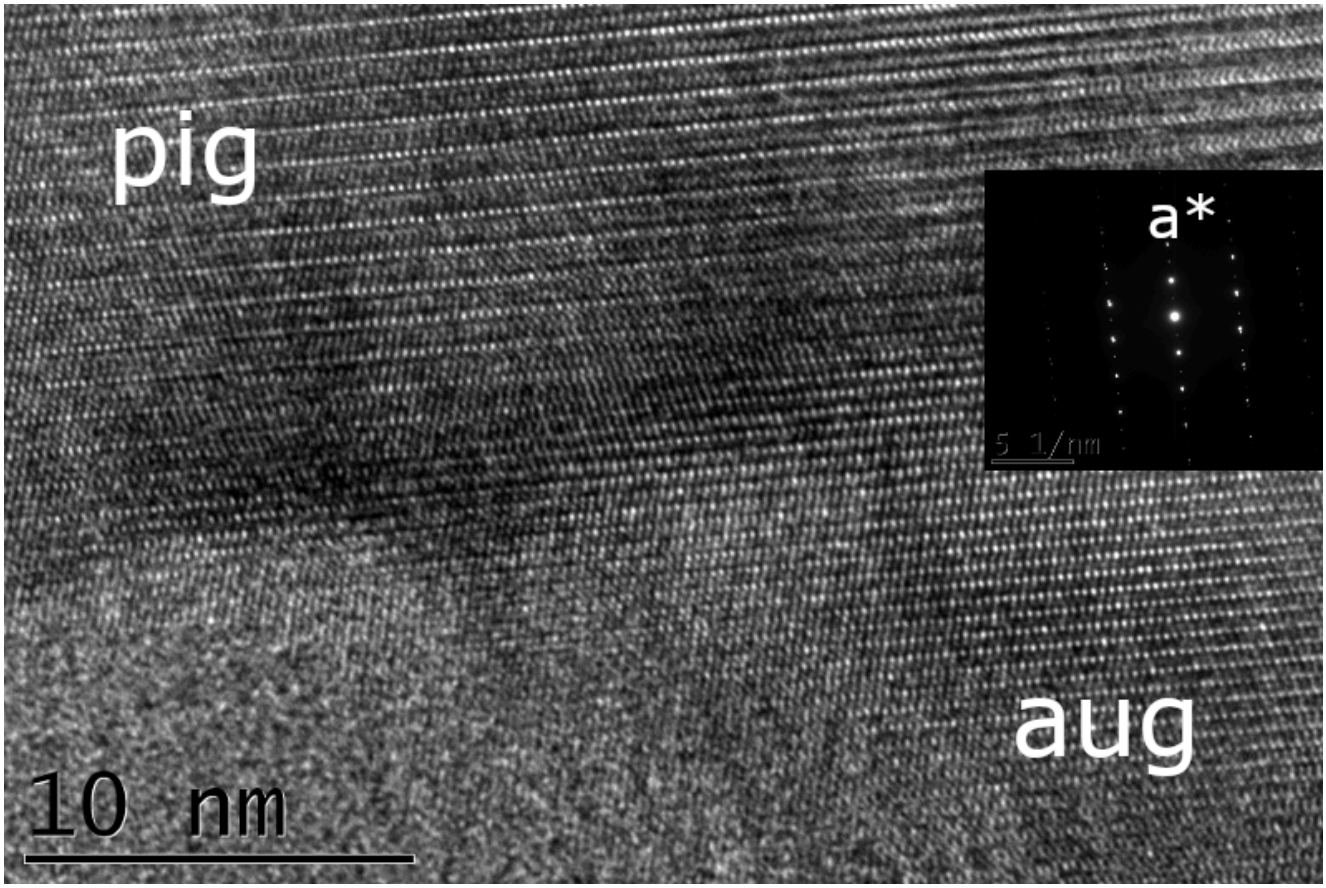
Precipitated structures of pyroxene lamellar with various directions

*藤 昇一[1]
*Shoichi TOH[1]

1. 福岡大学
1. Fukuoka University

本研究で試料として用いたのは、南極大陸で採取された超高温変成岩の、グラニュライトである。（九州大学理学部、宮本知治博士より提供）南極大陸は、かつてゴンドワナ超大陸の一部であったと考えられており、超高温変成岩は大陸の衝突や分裂の記録を残していると考えられているらしい。藤と宮本（2020）はこれらの岩石中の輝石に離溶組織を見出した。さらに、走査型電子顕微鏡観察により、普通輝石内部にピジョン輝石が離溶しており、それらが複数の方位を持つ特徴を確認した。離溶現象は析出現象として各種の材料において知られている。一般に結晶での離溶相の形状はひずみエネルギーと界面エネルギーによって支配され、鉱物においても同様の現象が認められる。その中でも、普通輝石(aug)とピジョン輝石(pig)間の場合は、基本的に(100)面と(001)面上に析出相が形成されるが、実際にはそれらの方位からわずかに傾く場合があることが古くから知られており、”100”や”001”と表記される。この現象を説明するために、Robinsonら(1977)[1]は、BollmannとNissen(1968)[2]が提唱した、Optimal Phase Boundaryモデルを輝石に適用し、Exact Phase Boundaryと呼んだ。このモデルによれば、augとpigは構造が似ているため(100)や(001)から僅かに傾いた界面を形成することで格子のミスフィットがなく、ひずみエネルギーがゼロの状態を達成できると考えた。さらに、これらの界面の方位は一旦形成されると、その方位を保ったまま変化しないと考えた。したがって、これらの界面の結晶学的方位から離溶時の温度を見積もる温度計を提唱した。その一方でこれまでの超高温変成岩の研究において、FeやMgの拡散を伴ういわゆる地質学的温度計は最高変成温度を示すのではなく、冷却過程における温度をしめしていると考えられているらしい。これらを考え合わせると、aug-pigの界面方位に基づくRobinsonらが提唱した温度計を適用すれば、超高温変成岩が経験した最高変成温度を知ることができるはずである。実際に我々のグループで試算をしたところ、1000℃から1100℃の温度を示しており、岩石学における鉱物組み合わせや実験岩石学から導かれた温度と整合的である。しかしながら、Robinsonらのモデル図では格子定数が一致する任意の方位で界面が接合することになっているが、実際にこのような界面付近での原子構造もしくは配置に疑問が残る。これまでの我々の調査では文献[1}で示された界面のモデルを実際に高分解能像で観察した例は無いと思われる。そこで、昨今の（超）高分解能電子顕微鏡技術ならびに化学組成分析技術を用いて、界面における原子配列構造を明らかにする試みを行っている（図）。今回はそれらの結果について発表するとともに、その結果に基づき、Robinsonらのモデルを再検証し離溶ラメラの界面の方位や特徴的な形状を取る原因について考察したい。[1] Robinson et al., Am. Mineral, **Vol. 62.**, 857-873 (1977). [2] Bollmann and NIssen, Acta Crystalogr., A24, 546-557 (1968).

キーワード：普通輝石、ピジョン輝石、離溶、組織
Keywords: augite, pigeonite, exsolution, texture


pig
a*
5 1/nm
aug
10 nm

MORB組成から期待されるAl/Fe含有量をもつブリッジマナイトの結晶化学

Crystal chemistry of bridgmanite with Al/Fe contents expected in MORB component

*中塚 晃彦[1]、福井 宏之[2]、鎌田 誠司[3]、平尾 直久[2]、大川 真紀雄[4]、杉山 和正[5]、芳野 極[6]
*Akihiko NAKATSUKA[1], Hiroshi FUKUI[2], Seiji KAMADA[3], Naohisa HIRAO[2], Makio OHKAWA[4], Kazumasa SUGIYAMA[5], Takashi YOSHINO[6]

1. 山口大・院創成、2. JASRI、3. （株）アド・サイエンス、4. 広島大・先進理工、5. 東北大・金研、6. 岡山大・惑星物質研
1. Yamaguchi Univ. Sci. Tech. Innov., 2. JASRI, 3. AD Science Inc., 4. Hiroshima Univ. Adv. Sci. Eng., 5. Tohoku Univ. IMR, 6. Okayama Univ. IPM

Bridgmanite (simplified formula $MgSiO_3$) is the most abundant constituent in the Earth’s lower mantle. The effects of the incorporation of Fe and Al into bridgmanite can have a large effect on the physical properties and rheology of the lower mantle. Bridgmanite formed from a mid-ocean ridge basalt (MORB) component of subducting slabs contains larger amounts of Fe and Al than that formed from a pyrolytic composition. This difference in bridgmanite composition can cause a difference in the incorporation mechanism of Fe and Al into the crystal structure between subducting slabs and their surrounding lower mantle. This should cause heterogeneity in the physical properties and rheology of the lower mantle. Elucidating the crystal chemistry of bridgmanite formed from the MORB composition is a key to resolving this issue. The precise crystal chemistry examined employing a single crystal is, therefore, significant for gaining a detailed understanding of lower-mantle dynamics. In particular, the use of ^{57}Fe-Mössbauer spectroscopy is indispensable for distinguishing the valence and spin states of Fe, which cannot be directly observed by X-ray diffraction. For this purpose, we characterize $Mg_{0.662}Fe_{0.338}Si_{0.662}Al_{0.338}O_3$ bridgmanite single-crystal, with the Fe and Al contents expected in MORB, by a combination of single-crystal X-ray diffraction, synchrotron ^{57}Fe-Mössbauer spectroscopy conducted at SPring-8 BL10XU, and electron probe microanalysis.

The present study reveals that the charge-coupled substitution $^{A}Mg^{2+} + {}^{B}Si^{4+} <---> {}^{A}Fe^{3+}$(high-spin) + $^{B}Al^{3+}$ is predominant in the incorporation of Fe and Al into the practically eightfold-coordinated A-site and the sixfold-coordinated B-site in bridgmanite structure. The incorporation of both cations via this substitution enhances the structural distortion due to the tilting of BO_6 octahedra, yielding the unusual expansion of mean <A-O> bond-length due to flexibility of A-O bonds for the structural distortion, in contrast to mean <B-O> bond-length depending reasonably on the ionic radius effect. Moreover, we imply the phase transition behavior and the elasticity of bridgmanite in slabs subducting into deeper parts of the lower mantle, in terms of the relative compressibility of AO_{12} (practically AO_8) and BO_6 polyhedra.

キーワード：ブリッジマナイト、MORB、単結晶X線回折、放射光メスバウアー
Keywords: Bridgmanite, MORB, Single-crystal X-ray diffraction, Synchrotron Mössbauer

非晶質炭酸カルシウムの圧力誘起結晶化メカニズム

Mechanism of the pressure-induced crystallization of amorphous calcium carbonate

*森田 千歩[1]、小林 大輝[1]、鍵 裕之[1]
*Chiho Morita[1], Hiroki Kobayashi[1], Hiroyuki Kagi[1]

1. 東大・院理
1. UTokyo. Sci.

【緒言】

炭酸カルシウムにはcalcite, vaterite, aragoniteなどの結晶多形の他、非晶質炭酸カルシウム(Amorphous Calcium Carbonate: ACC)の存在が知られている。ACCは組成式$CaCO_3 \cdot nH_2O$ ($n < 1.5$)で表される準安定物質で、高温・高湿度・高圧といった条件に曝すことで炭酸カルシウムの結晶相へと容易に結晶化する。高湿度下での先行研究では、ACCから炭酸カルシウム結晶相への変化は、溶解および再析出を伴う過程であると報告されている (e.g., Xu et al., 2006)。高圧条件の結晶化においても、ACC内に含まれる水が重要な働きをしていると考えられる。Yoshino et al. (2012)は室温下で0.4 –0.8 GPaの範囲でACCはcalciteとvateriteに結晶化するが、ACCの含水量が低いほど結晶化圧力が高くなることを報告した。一方、近年20 GPaまでのACCの弾性波速度測定(Pennacchioni et al., 2023)などから、ACCが地球深部の地震波異常の原因となる可能性が指摘されているが、これらはACCが1 GPa以下の低圧条件で結晶化するという結果とは相反する。先行研究では使用する高圧装置や圧媒体などが大きく異なり、我々はACCの含水量と圧力媒体の有無や量の違いがACCの結晶化に大きな影響を及ぼしている、と仮説を立てた。

本研究では、(1)部分的ないし完全に脱水したACCに対する加圧実験、(2)異なる圧力媒体を用いた加圧実験を通じて、ACCの圧力誘起結晶化メカニズムを考察した。

【手法】

ACC試料(含水量およそn=1.3)は氷冷された0.1 M塩化カルシウム水溶液と0.1 M炭酸ナトリウム水溶液を体積比1:1で混合し、懸濁液を吸引濾過したのちアセトンで洗浄し、得られた濾過物を真空デシケーターで1日乾燥することで作製した。ACCの含水量は熱重量測定により求めた。ダイアモンドアンビルセルを用い、KEK Photon Factory BL-18Cにおける高圧下その場X線回折実験によりACCの結晶化過程を追跡した。圧力は金の状態方程式ないしルビー蛍光法により決定した。

【結果と考察】

ACCの圧力誘起結晶化における初期含水量の効果

合成したACC(含水量n=1.3)をダイアモンドアンビルセルに入れ、圧力媒体を封入せずに加圧すると、0.32 GPaでcalcite、0.36 GPaでvateriteが出現し、先行研究(Yoshino et al., 2012)と調和的な結果が得られた。しかし、先行研究では生成したvateriteは高圧下で残り続けたのに対し、本研究では準安定相であるvateriteは0.84 GPaでcalciteへと相転移し消失した。次に、合成したACCを200 ℃で20分間および130 ℃で5分間加熱し脱水させたACC(それぞれn = 0.0およびn=0.5)を同様に加圧したが、本実験での最高圧力である9-11 GPaまでは結晶化しなかった。これらの結果から、ACCが高圧下で結晶化するためには、ACCに一定量以上の水が含まれている必要があることが示された。

ACCの圧力誘起結晶化における圧力媒体の効果

MgOを加えずACC(含水量1.3)のみを加圧すると、上述のように0.32 GPaでcalcite、0.36 GPaでvateriteが出現し、vateriteは0.84 GPaでcalciteへと相転移した。MgOとACCを混合した試料について

は、ACC:MgO = 10:1(質量比)で混合した場合、0.36 GPaでcalciteおよびvateriteが出現し、高圧条件でもvateriteの強度低下は観察されなかった。一方、ACC:MgO = 1:1、3:1(質量比)で混合したものは、1 GPaを超えてもACCが結晶化しなかった。

以上の結果から、ACCの圧力誘起結晶化はACCから吐き出された水により起きていると考えられる。またMgOを一定量以上混合させると、MgOの粒界に水が入り込みACCから吐き出された水を奪ってしまうために、結晶化が進行せず高い圧力でも非晶質状態を保つことができると考えられる。以上の結果から、ACCの圧力誘起結晶化はACCに水が含まれることが必要で、ACCから放出された水による溶解再析出が結晶化プロセスとして示唆される。MgOを一定量以上出発物質のACCに混合させると、MgOの粒界に水が侵入し、ACCから放出された水を奪うために、結晶化が進行せず非晶質状態が保たれたと考えられる。

キーワード：非晶質炭酸カルシウム、方解石、高圧
Keywords: Amorphous calcium carbonate, Calcite, High pressure

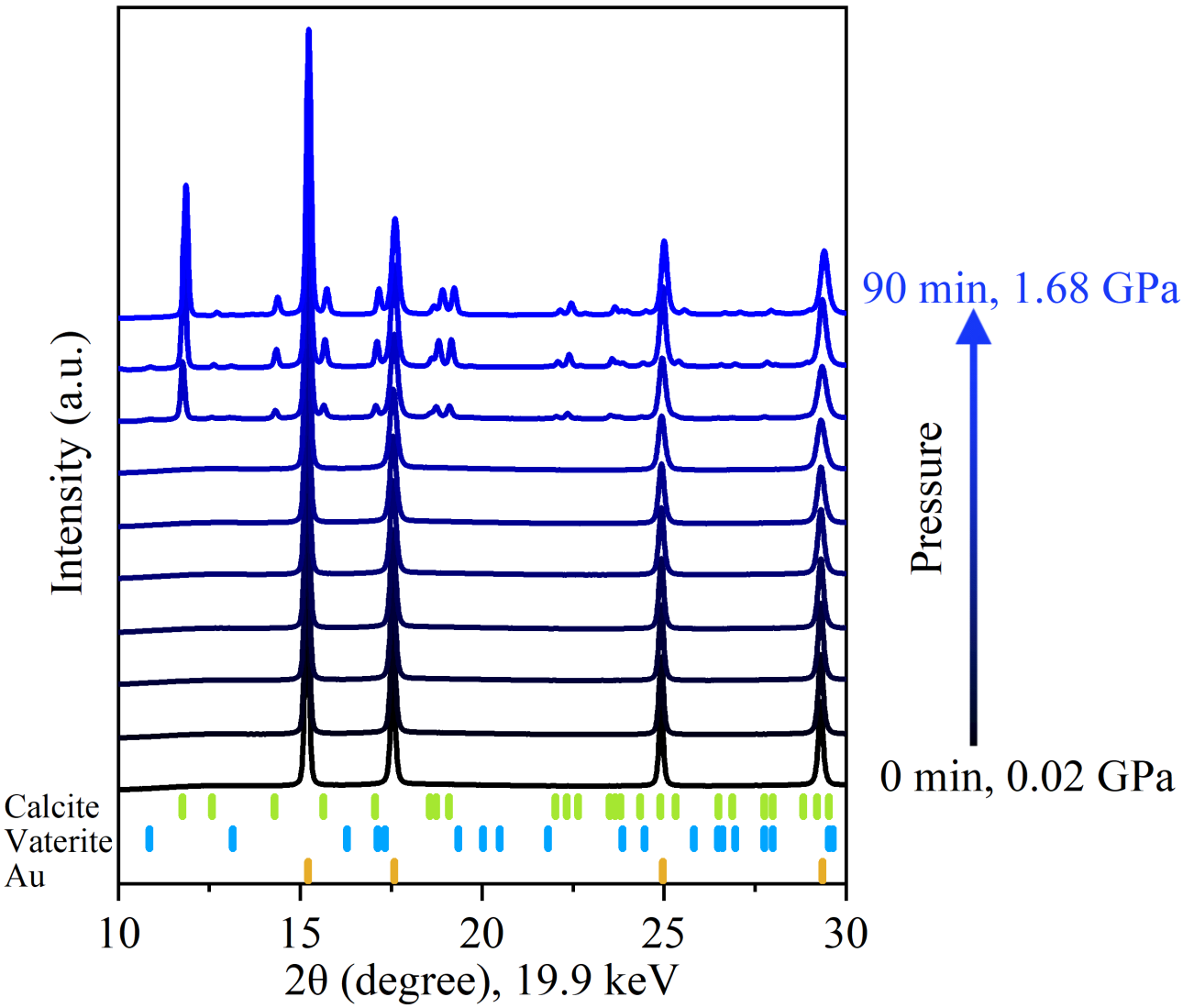


図. ACCの圧力誘起結晶化の時分割X線回折パターン

LiとCsによるvateriteのcalcite化への影響の相違

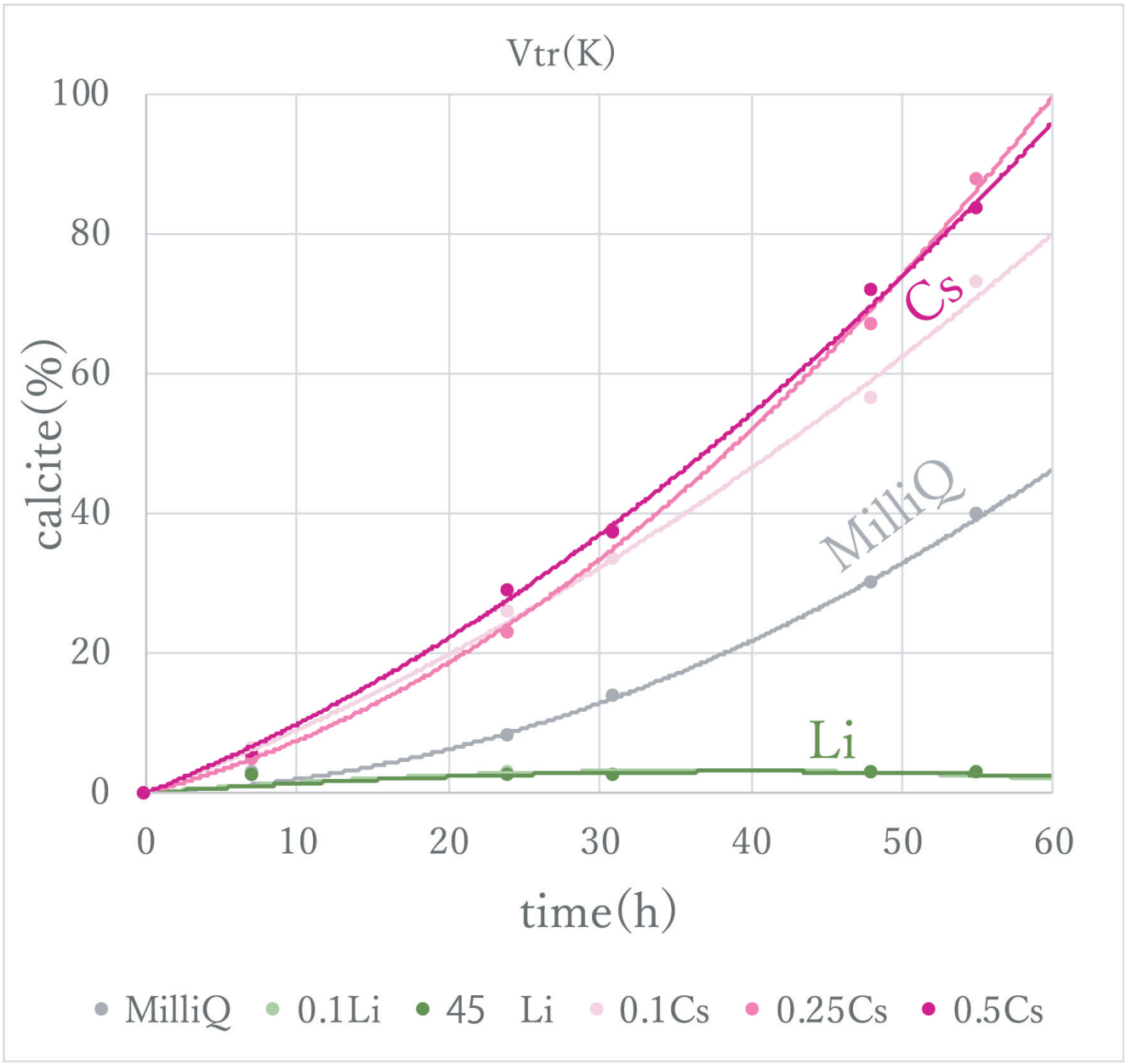
Differences in the effects of Li and Cs on the calcitization of vaterite.

*古川 登[1]、木之田 亜海[2]
*Noboru FURUKAWA[1], Ami Kinoda[2]

1. 千葉大学、2. （株）俄
1. Chiba University, 2. NIWAKA

発表者らは，合成vateriteが溶液媒介転移でcalciteに変化する速度が，K_2CO_3溶液では純水より速く，Na_2CO_3溶液では遅くなることを見いだした。その要因として，水溶液中では，K^+イオンは構造破壊型イオン（負の水和）なのに対し，Na^+イオンは構造形成型イオン（正の水和）という水溶液中の水和の状態の違いによることが示唆された（上平， 1998）。そこで，この効果を確認するために，Naと同じ構造形成型イオンであるLiと構造破壊型イオンであるCsを用いて同様の実験を行いその影響を検討した。vateriteの合成方法は松田他，(1968)及びFernández-Díaz et al.(2010)の方法に従って調整した。0.5ｍLのマイクロチューブに，これらのvateriteと溶液を入れ，30℃の恒温槽に設置し55時間後まで定期的に回収し，XRDでcalcite化した量を求めた。溶液は超純水，及び 0.1, 0.18M/L（炭酸リチウムは0.18M/Lで飽和するため）のLi_2CO_3水溶液もしくは 0.1, 0.25, 0.5M/LのCs_2CO_3水溶液を用いた。vateriteからcalciteへの変化量は，Rao（1973）の方法を用いて求めた。 Li_2CO_3溶液との反応では，Na_2CO_3溶液と同様にcalcite化が抑制され，その効果はNa溶液よりも大きく, 55時間程度ではほとんどcalciteには変化しない結果となった. また, Cs_2CO_3溶液との反応では, K_2CO_3溶液と同様に濃度の増大とともにcalcite化の速度も増大する傾向を示した. したがって, 溶液中のNaとKによるcalcite化の速度の違いは, Na^+は正の水和をし, K^+は負の水和をするという傾向と一致する. ただし, Cs^+の方がK^+よりもイオン半径が大きく, 負の水和の効果が強いはずであるにもかかわらず, K_2CO_3溶液の方がCs_2CO_3溶液よりもcalcite化の速度が大きいという結果となった. この現象やLi_2CO_3溶液ではほとんどcalcite化が進まない要因として，正及び負の水和以外の効果，たとえば水溶液中でのイオンの配位数などの影響を考慮する必要があるのかもしれない。

キーワード：バテライト、方解石化、リチウム、セシウム
Keywords: vaterite, calcitization, Lithium, Cesium


Vtr(K)
100
80
60
40
20
0
calcite(%)
0
10
20
30
40
50
60
time(h)
Cs
MilliQ
Li
MilliQ
0.1Li
45 Li
0.1Cs
0.25Cs
0.5Cs

ポスター | R5：地球外物質

2024年9月14日(土) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R5：地球外物質

12:30 ~ 14:00

[R5-P-01] Newberyite($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$)の低圧条件での脱水

*松本 有香子[1]、橘 省吾[1] (1. 東大・理)

12:30 ~ 14:00

[R5-P-02] 低圧環境下でのコンドリュールメルト-水蒸気間の酸素同位体交換実験

*山本 大貴[1]、川崎 教行[2] (1. 九州大学、2. 北海道大学)

12:30 ~ 14:00

[R5-P-03] ユークライト型エコンドライトにみられる太陽系初期の衝突の痕跡

*山口 亮[1] (1. 国立極地研究所)

12:30 ~ 14:00

[R5-P-04] Yamato-8448ユレイライト中炭素質物質の内部組織分析

*安武 正展[1]、松本 恵[2]、圡山 明[3,4]、上杉 健太朗[1]、竹内 晃久[1]、山口 亮[5] (1. 高輝度光科学研究センター、2. 東北大、3. 立命館大、4. 広州地球化学研究所、5. 国立極地研究所)

12:30 ~ 14:00

[R5-P-05] 初期空隙がルチルの衝撃変成微細組織へ与える影響

*梅田 悠平[1,2]、永井 優馬[1,2]、富岡 尚敬[3]、関根 利守[4]、宮川 仁[5]、小林 敬道[5]、遊佐 斉[5]、奥地 拓生[1,2] (1. 京大複合研、2. 京大院工、3. 海洋研究開発機構、4. HPSTAR、5. 物質材料研究機構)

Newberyite($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$)の低圧条件での脱水

Dehydration of Newberyite($MgHPO_4.3H_2O$) under low pressures

*松本 有香子[1]、橘 省吾[1]
*Yukako Matsumoto[1], Shogo Tachibana[1]

1. 東大・理
1. UTokyo

始原的小惑星の構成鉱物には，太陽系初期進化の情報のみならず，現在にいたるまでの小惑星の進化が記録されていると考えられる (e.g., Tachibana et al. 2014)．「はやぶさ2」およびOSIRIS-RExが持ち帰ったC型小惑星リュウグウ，B型小惑星ベヌーのサンプルはともに鉱物学・岩石学・地球化学的にCIコンドライトに類似し，太陽系元素存在度をもつ材料物質が母天体で水質変成を被ったものであることが判明した (Yokoyama et al. 2022; Nakamura T. et al. 2022; Okazaki et al. 2022a, b; Noguchi et al. 2023; Yabuta et al. 2023; Naraoka et al. 2023; Lauretta et al. 2024).

リュウグウ，ベヌーサンプルには，体積の 80-90 %を占めるフィロケイ酸塩（蛇紋石およびサポナイト）(e.g., Nakamura T. et al. 2022; Lauretta et al. 2024) に加え，磁鉄鉱，硫化鉄，炭酸塩，リン酸塩などが存在する．ベヌーではNaを含む白色のMgリン酸塩が粒子表面に集合体として見られるような粒子もあり，Mgリン酸塩が主要なリン酸塩である可能性が指摘されている (Lauretta et al. 2024)．リュウグウにも水質変成度の低い試料中にNaを含むMgリン酸塩が存在する (Nakamura T. et al. 2022; Ma et al. 2022)．リュウグウ試料中のMgリン酸塩は非晶質であり，$MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ (Newberyite) などの含水Mgリン酸塩鉱物が脱水・非晶質化を経験した可能性が指摘されている (Ma et al. 2022)．ベヌー中のMgリン酸塩の顕微FTIR分析スペクトルは，$MgHPO_4 \cdot 3H_2O$との類似性を示すが，その組織からは加熱による脱水を経験したのではないかと考えられている(Lauretta et al. 2024)．すなわち，両天体のMgリン酸塩は母天体での水質変成で形成後，加熱脱水を経験し，水質変成後の小惑星の熱史を反映している可能性がある．両天体ともに近地球型小惑星であり，太陽光による100˚C程度までの表面加熱で脱水することも考えられる．

Newberyiteの脱水挙動は常圧では調べられているが (e.g., Petranović et al. 1987; Kullyakool et al., 2023)，低圧条件では調べられていない．本研究では，Mgリン酸塩の含水度から，ベヌーやリュウグウの熱史を議論するための基礎データを得ることを目的とし，真空炉 (Yamamoto and Tachibana 2018; Yamamoto et al. 2020) を用いて，低圧 (~200または~10^{-4}–10^{-5} Pa)，50–300˚CでNewberyiteの脱水実験をおこなった (加熱時間0–4200分)．実験には合成$MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ (太平化学産業) を用いた．実験前後での質量減少を測定し，加熱後の試料について，走査型電子顕微鏡での観察，赤外分光法・粉末X線回折法での分析をおこなった．~10^{-4}–10^{-5} Paでの加熱実験の一部で，四重極型質量分析計で炉内のガス分析をおこなった．

四重極型質量分析計による分析で，試料からの放出ガスがH_2Oと確認され，実験前後の質量変化から，脱水度を算出した．低圧条件でのNewberyiteの脱水は常圧 (e.g., Petranović et al. 1987; Kullyakool et al. 2023) よりも低温で進行し，全圧200 Paと10^{-4} Paで大きな違いは見られなかった．また，加熱温度に応じたある脱水度に到達すると，脱水速度が非常に小さくなり，脱水反応がほとんど進行しなくなった．その脱水度は，50˚CではNewberyite中の総H_2O量の65 %，250˚Cでは94 %であった．300˚Cの加熱では完全に脱水した．走査型電子顕微鏡観察では加熱前後で粒子サイズや形状の変化は見られず，脱水度に対する粒子サイズの寄与は小さいと考えられる．粉末X線回折では，加熱・脱水により，Newberyiteが非晶質化したことが確認された．加熱前後の赤外吸収スペクトルの変化からも，脱水が示唆された．

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

NewberyiteではMgイオンにH_2O分子が3つ配位しており，H_2O分子脱離とそれに伴う非晶質化の進行とともに，残ったH_2O分子の脱離に必要なエネルギーが増加し，脱水速度が急激に低下する（脱水反応がほとんど進行しなくなる）ことが予想される．詳細な解析は今後の課題だが，本研究で明らかとなった低圧条件での脱水進行に伴う脱水速度の低下は，リターンサンプル中のMgリン酸塩に含まれるH_2O量から，Mgリン酸塩が経験した温度に関する制約を与えられる可能性を示唆する．

キーワード：ベヌー、リン酸塩、脱水、小惑星、ニューベリーアイト
Keywords: Bennu, phosphate, dehydration, asteroid, Newberyite

低圧環境下でのコンドリュールメルト-水蒸気間の酸素同位体交換実験

Experimental simulation of oxygen isotope exchange between chondrule melt and low-pressure water vapor

*山本 大貴[1]、川崎 教行[2]
*Daiki YAMAMOTO[1], Noriyuki Kawasaki[2]

1. 九州大学、2. 北海道大学
1. Kyushu University, 2. Hokkaido University

ミリメートルサイズのケイ酸塩球状粒子「コンドリュール」は、コンドライト隕石の主要構成物であり、原始太陽系円盤中で、前駆物質が加熱され溶融・冷却し形成したものである。コンドリュールは非質量依存の酸素同位体分別を示し、溶融時のコンドリュールメルトと円盤ガス (e.g., H_2O) との同位体交換に起因する可能性が指摘されている (e.g., Tenner et al., 2018)。コンドリュールメルトの同位体交換反応の機構や時間スケールは、単一のコンドリュール内部における酸素同位体組成の均質性 (e.g., Ushikubo et al., 2012) の解釈や、コンドリュール加熱機構やその材料物質の同位体組成 (e.g., Williams et al., 2020) を制約する上で重要である。先行研究によって、円盤環境よりも明らかに高圧のH_2Oガス (P_{H2O} ~ 0.01–0.5 bar) とコンドリュールメルトの酸素同位体交換実験がおこなわれた (e.g., Yu et al., 1995; Di Rocco and Pack, 2015). しかしそのような高圧条件の結果を、円盤の低圧環境に応用する際には大きな不確定性が伴う。例えば、低圧条件ではメルト内部の酸素同位体拡散ではなく、ガスの供給量が全体の反応速度を律速する可能性がある (e.g., Yamamoto et al., 2021)。本研究では、コンドリュールの酸素同位体組成分布の定量的解釈に向けて、円盤を模した低圧H_2Oガス環境下でのコンドリュールメルト-H_2O間の酸素同位体交換反応実験を実施した。

実験の出発物質には、Feを含まないCa-Mg-Al-Si-Ti-Mn系で、Feに乏しくAlに富むコンドリュール (Bischoff and Keil, 1984) に類似した組成のものを用いた。この出発物質は、大気中において白金線ループ上で、上記組成のリキダスよりも高温 (1480˚C) で加熱・急冷し作成したものであり、結晶を含まない球形ガラスである。同位体交換実験には、H_2Oガス供給機構を備えた真空高温加熱炉を用い、低温で保持した$H_2{}^{18}O$ (~97% ^{18}O) からの低圧水蒸気存在下 ($P_{H2O} = 5 \times 10^{-7}$ bar) で、出発物質を1480および1520˚Cで0.5–5 h 加熱後、急冷した。加熱後物質は、電子顕微鏡での観察および元素組成の分析後に、酸素同位体組成の二次元分布を二次イオン質量分析計 (Cameca ims-1280HR @北海道大学) で測定した。

同位体交換後の実験サンプル中の$^{18}O/^{16}O$比は、メルト内部でおおよそ一定であった。このことは、同位体交換反応速度が、メルト表面での同位体交換プロセスに律速されていることを示す。反応率から推定されるメルト表面での同位体交換率は、1480, 1520˚Cでどちらも~0.1であり、これはメルト表面に衝突するH_2O分子のうち約10%が同位体交換を起こすことを示している。

上記の速度データに基づき、1500˚Cにおいて直径1 mmのコンドリュールメルトが周囲のH_2Oガスと90%同位体交換をする時間スケール ($t_{0.9}$)を計算した。H_2Oガス供給律速時の$t_{0.9}$は、加熱時のP_{H2O}に依存し、例えば$P_{H2O} = 1 \times 10^{-7}$ barでは~343 h、$P_{H2O} = 1 \times 10^{-5}$ bar では~3.4 hであった。一方で、高圧条件ではメルト内部の拡散プロセスが同位体交換速度を律速する可能性がある (e.g., Yamamoto et al., 2021)。Liang et al. (1996) から見積もられる酸素同位体拡散速度を考慮すると、$P_{H2O} > \sim 1 \times 10^{-4}$ barの高水蒸気圧条件では、$t_{0.9}$はP_{H2O}に依存せずメルト内部の酸素同位体拡散律速になり、コンドリュールメルトとH_2Oガスとが~15分で90%同位体を交換することになる。炭素質コンドライト隕石に含まれる個々のコンドリュール中の斑晶鉱物は、僅かな溶け残り部分を除いて均質な酸素同位体組成を持つことがを報告されている (e.g., Tenner et al., 2018 and references therein)。もしこの単一コンドリュール中の同位体的均質性が、コンドリュールメルト-円盤ガス間での同位体平衡の達成に起因していた場合、原始太陽系円盤の全圧 (~10^{-5} bar; e.g., Mendybaev et al., 2006; Kamibayashi et al., 2021) 及びコンドリュール酸化還元状態 (IW–2から–1程度; Grossman et al., 2012) から推定されるP_{H2O} ~ (1–3) $\times 10^{-6}$ barを仮定すると、コンドリュールは1500–1600˚Cで~11–35 h以上加熱される

必要があることが推定される。今後はFeを含む系での同位体交換実験を実施し、コンドリュールメルトの酸素同位体分布の起源の定量的解明を目指す。

キーワード：コンドリュールメルト、低圧水蒸気、酸素同位体交換、速度論、原始太陽系円盤
Keywords: chondrule melt, low-pressure water vapor, oxygen isotope exchange, kinetics, protosolar disk

ユークライト型エコンドライトにみられる太陽系初期の衝突の痕跡

Early impact events recorded in anomalous eucrites

*山口 亮[1]
*Akira YAMAGUCHI[1]

1. 国立極地研究所
1. National Institute of Polar Research

太陽系初期に形成した微惑星や原始惑星は、集積後、短寿命核種などによる加熱を受け、水質変成作用や熱変成作用、さらには火成活動などを経験したとされる。最も加熱をうけた天体は、部分溶融やマグマオーシャンの形成など通じて分化したと考えられる。分化エコンドライトは、そのような分化天体を起源とする隕石である。分化エコンドライトは、その岩石学的特徴から、ユークライト、アングライト、安山岩質エコンドライトなどに分けられる。ユークライトは、主に低Ca輝石と斜長石からなる玄武岩もしくはガブロで、ほとんどは小惑星ベスタを起源だとされる。しかし、別天体を起源とするユークライトも見つかっている。これらは、ユークライト型エコンドライト（eucrite-like achondrites）や特異なユークライト（anomalous eucrites）と呼ばれ、これまでに10個以上確認されている[e.g., 1-3]。その中で、NWA 011の同位体的特徴は、炭素質コンドライトに類似し、原始木星以遠で形成したとされる[4]。したがって、NWA 011とペアの隕石を調べることで、外側太陽系に存在した分化天体の形成過程を知ることができる。本研究では、NWA 011とNWA 2978（NWA 011/2978）について組織と鉱物組成から熱史と衝撃史を詳細に検討し、他の分化エコンドライトとの比較を行った。

NWA 011/2978は、主に低Ca輝石と斜長石からなり、副成分鉱物としてシリカ鉱物、リン酸塩鉱物、イルメナイト、クロマイト、トロイライトなどを含む。自然ニッケル鉄は確認できなかった。NWA 2978には、数mmのイルメナイトとクロマイトの集合体が見つかった。低Ca輝石には、非常に薄い普通輝石のラメラが均質に入っている。しかし、若干のCaやTiのゾーニングの痕跡が見られた。これは、タイプ４もしくは５のユークライトと同等レベルの熱変成作用を受けたことを示す。トリディマイトとともに、クリストバライトが見つかった。輝石のバルク組成から求められた平衡温度は~1190℃で、普通輝石の離溶ラメラの厚さから推定される冷却速度は数℃/yr (1190-1000℃）である[1]。しかし、クリストバライトの存在は、1000℃付近から急冷（~0.1-1℃/day）したことを示す[5]。

NWA 011/2978は、少なくとも２回の衝突の痕跡を残している。NWA 011は、普通ユークライトに比べ高い濃度の親鉄元素が含まれている（CIx0.01-0.1） [1,6]。しかし、風化の影響による元素組成の変化のため衝突体の特定は難しい。珪酸塩鉱物の組織や組成（特にシリカ鉱物）に影響が見られないことから、かんらん石を含むような衝突体（コンドライト隕石など）は考えにくい。衝突体は金属FeNi（分化天体のコア）であったと考えられる。金属FeNiが衝突して形成したとされる隕石は、メソシデライトやユークライト型エコンドライト（EET 92023, Dho 007）など数種類確認されている[2]。NWA 011/2978は、鉱物そのものに衝撃変成作用の痕跡を残さない結晶質な岩石であることから、母天体が加熱されている最中に衝突が起こったと考えることができる。2回目の衝突は、熱変成作用中（母天体の冷却中）に起こったと考えられる。高温部で徐冷したのち急冷（~0.1-1℃/day）したという現象は、高温の地殻内部（数km以深）から衝突により地表に放出し急冷したためだと説明することができる。このように、外側太陽系においても母天体が熱い時期（火成活動、変成作用中）にも活発な衝突が起こり、その形成に大きな影響を及ぼしたと推察される。今後は、鉱物科学的研究により熱や衝撃履歴を解析すると同時に、バルク元素組成の検討、高精度年代決定により、太陽系初期の衝突現象について明らかにする必要がある。

引用文献
[1] Yamaguchi A. et al. (2002) Science 296, 334-336. [2] Yamaguchi A. et al. (2017) Meteor. Planet. Sci.

52, 709-721.[3] Mittlefehldt D.W. et al. (2022) Meteor. Planet. Sci. 57, 484-526.[4] Warren P.H. (2011) Geochim. Cosmochim. Acta 75, 6912-6926. [5] Ono H. et al. (2020) Meteor. Planet. Sci. 56, 1086-1108. [6] Isa J. et al. (2008) Meteor. Planet. Sci. Suppl. 43, 5204.

キーワード：隕石、エコンドライト、熱史、衝突
Keywords: meteorites, achondrites, thermal history, impact

Yamato-8448ユレイライト中炭素質物質の内部組織分析

Internal Structure Analaysis of Carbonaceous Material in Yamato 8448 Ureilite

*安武 正展[1]、松本 恵[2]、辻山 明[3,4]、上杉 健太朗[1]、竹内 晃久[1]、山口 亮[5]
*Masahiro YASUTAKE[1], Megumi Matsumoto[2], Akira Tsuchiyama[3,4], Kentaro Uesugi[1], Akihisa Takeuchi[1], Akira Yamaguchi[5]

1. 高輝度光科学研究センター、2. 東北大、3. 立命館大、4. 広州地球化学研究所、5. 国立極地研究所
1. JASRI, 2. Tohoku Univ., 3. Ritsumeikan Univ., 4. CAS/GIG, 5. NIPR

はじめに：ユレイライトはエコンドライトの一種であり、それらの中では唯一多量の炭素を含む。その中にはダイヤモンドが含まれ、その形成過程について数種の仮説が提唱されている。これまで我々は、放射光CTによってDaG 999ユレイライト中の炭素質物質の内部組織は複雑かつ多様である事を明らかにした。本研究では、強い衝撃を経験していないにも関わらず、ダイヤモンドが産する事が報告されている[1]、Yamato (Y-)8448ユレイライトを分析し、ダイヤモンドの形成過程について考察を行った。

試料と分析手法：国立極地研究所より薄片試料の貸与を受け分析を行った。炭素質物質は、分布と形状を光学顕微鏡観察により観察し、国立極地研究所にて顕微レーザーラマン分光装置により表面分布相の同定を行った。表面元素組成分析はSPring-8にてFIBに搭載されたEDSにより行った。その後関心領域の微小試料（約40 μm）をFIBにより作成した。微小試料の内部組織観察はSPring-8、BL47XUに設置されたナノCT装置を用いて行った。

結果と考察：Y-8448は、粗粒組織を持ち、主にカンラン石と少量の低Ca輝石よりなる。炭素質物質は、ケイ酸塩鉱物中もしくは粒界に沿うように板状に産する。カンラン石はクロスニコル下にて明瞭な消光を示し、平面割れ目は卓越していない。衝撃度合いU-S2相当であり、強い衝撃を経験していないと考えられる。炭素質物質のマクロ組織は可視光反射光下において表面から出っ張った黒色部と平坦な茶色部に分けられる。境界は明瞭であり、黒色部のラマンスペクトルは1333cm^{-1}付近にピークがあり主にダイヤモンドから成ると推測される。一方、茶色部のラマンスペクトルは1354^{-1}、1584^{-1}、1624^{-1}付近にピークがあり主にグラファイトから成ると推測される。二つの領域には化学組成差が確認され、比較すると黒色部は炭素に加え硫黄と鉄を含むが、茶色部は炭素を主体とし鉄や硫黄に乏しい。炭素質物質のうち、黒色部と茶色部両方を含む物を一つ選択し、黒色部、茶色部、その境界部の3領域から微小試料をサンプリングしナノCTによる内部観察を行った。

黒色部は全体がほぼダイヤモンドから成っており薄い膜に仕切られている。この膜はほぼ60度120度で交差し（図1a）、主にグラファイト様の低密度物質、まれに鉄に富む相から成っている。3次元的に観察すると正四面体とその頂点を切った形状が連なったような構造となっている。この構造は少なくとも一辺40 μmの試料全体に分布する。ダイヤモンドは非常に多量の包有物を含む。多くは硫化鉄であり、一部は鉄ニッケル合金もしくは鉄ニッケル炭化物である。微小試料表面の元素分布とCT像を比較すると、ダイヤモンドを区切る面構造に一致する領域に鉄と硫黄が濃集していた。一方、茶色部はほぼ全体がグラファイトからなり、その劈開に由来すると思われる層状構造を持つ（図1b）。鉄に富む相はほぼ含まれず、稀に層構造の間にわずかに分布するのみである。これら黒色部と茶色部の二つの領域の境界では鉄に富む層が分布する（図1b）。主に（水）酸化鉄から成っており、一部は鉄ニッケル合金であった。また少量の硫黄が検出される。このことから鉄ニッケル合金と硫化鉄から成っていた層が風化したものであると考えられる。境界層付近では特徴的な多孔質になった虫食い状のダイヤモンドが見られる。

これらの結果は、先行研究によって提唱されたFe-C系の流体存在下でダイヤモンドが形成した可能性を支持するものである[1]。一方で、本研究では黒色部に鉄、硫黄が偏在している事から実際にはFe-S-C系であったと推測される。また、観察された組織と合成ダイヤモンドの組織を比較すると、スケールに違いがあるものの、HPHT法により合成された平行連晶組織を持つダイヤモンドに類似する[2]。黒色部と茶色部の境界に見ら

れる鉄に富む相は金属溶媒を用いたHPHT法における金属フォイルのような役割をしていたかもしれない。もし、このようなプロセスでダイヤモンドが形成されたとすると、多量に観察された包有物、鉄に富む膜は、結晶成長過程で取り込まれたものと考えられる。またユレイライトは母天体崩壊により急冷されたことが知られており、境界付近に存在する虫食い状ダイヤモンドは、その際の急減圧によってダイヤモンドが分解され生じた可能性が考えられる。

このような溶媒環境下でのダイヤモンド形成プロセスは、Y-8448が強い衝撃を経験していないにも関わらずダイヤモンドを含むことを整合的に説明する事ができるかもしれない。[1] Nakamuta et al. (2016) *JMPS*, 111, 252-269. [2]Chepurov et al. (2020) *EJM*, 32, 41-55.

キーワード：ユレイライト、ダイヤモンド、放射光X線CT
Keywords: Ureilite, Diamond, SR-XCT

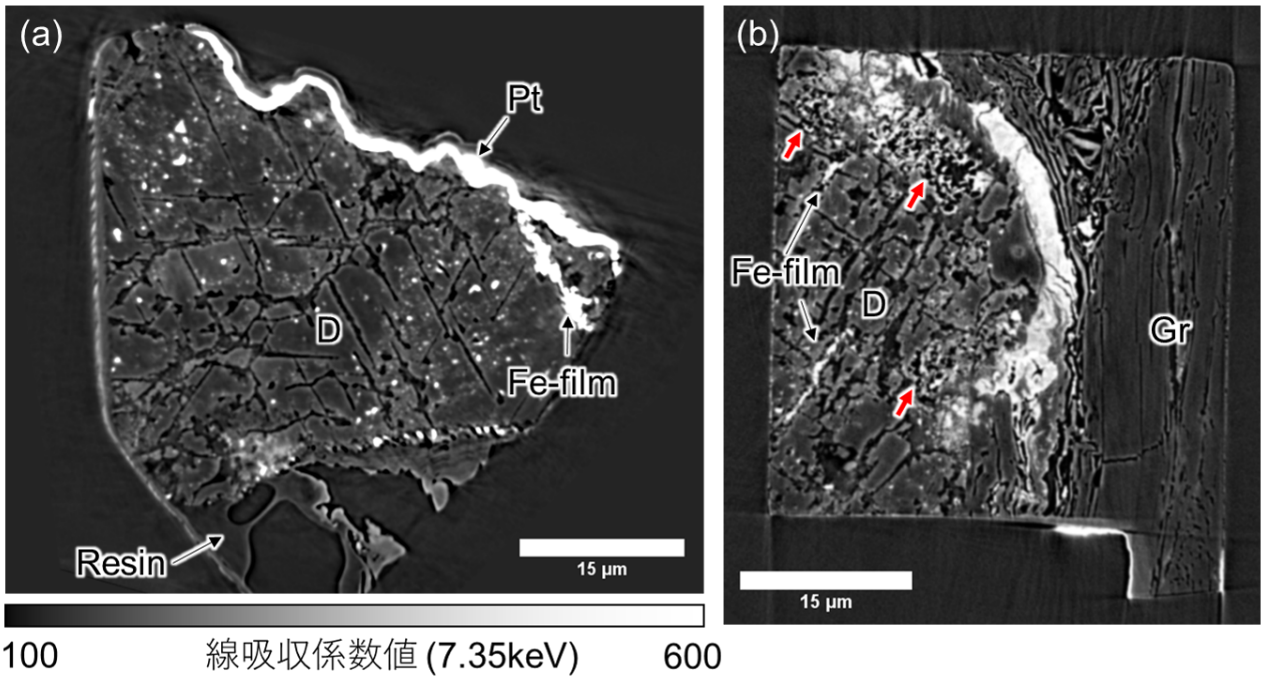


図１．炭素質物質のCT断面像。X線エネルギーは7.35keV。左下に表示コントラストを示す。(a) 黒色部からサンプリングした試料の断面像。60度120度で交わる線構造が確認できる。図中白い粒は鉄に富む包有物である。図中右端にはダイヤを区切る鉄に富む膜が分布している。(b) 境界部からサンプリングした試料の断面像。図中右側にグラファイトから成る茶色部が、左側にダイヤを主体とする黒色部が分布する。図中中央に分布する白色部は鉄に富む層である。茶色部は黒色部と比較し鉄に富む物質に乏しい事が分かる。赤矢印は虫食い状になったダイヤを示す。図中略語：D:ダイヤ、Gr:グラファイト、Pt:プラチナ保護膜、Fe-film:鉄に富む膜、Resin:樹脂。

初期空隙がルチルの衝撃変成微細組織へ与える影響

Effects of initial porosity on shock deformation microstructures in rutile

*梅田 悠平[1,2]、永井 優馬[1,2]、富岡 尚敬[3]、関根 利守[4]、宮川 仁[5]、小林 敬道[5]、遊佐 斉[5]、奥地 拓生[1,2]
*Yuhei Umeda[1,2], Yuma Nagai[1,2], Naotaka Tomioka[3], Toshimori Sekine[4], Masashi Miyakawa[5], Takamichi Kobayashi[5], Hitoshi Yusa[5], Takuo Okuchi[1,2]

1. 京大複合研、2. 京大院工、3. 海洋研究開発機構、4. HPSTAR、5. 物質材料研究機構
1. KURNS, 2. Kyoto Univ. Eng., 3. JAMSTEC, 4. HPSTAR, 5. NIMS

隕石やクレーター物質に含まれる鉱物の衝撃変成組織を調べ、その変成度を評価することは、過去の衝突の規模、強度、熱履歴などを読み解くために必要不可欠である。衝撃圧力と衝撃変成組織の関係については、主に衝撃回収実験データを参考に多くの鉱物種について検討され、衝撃スケールを見積もるための指標として用いられている[1]。しかし、各指標が制約できる圧力範囲は広く、さらに重複していることから現状においても精度の良い指標とはなっていない。この問題を解決するためには、飛翔体及び被衝突体の空隙率をきちんと考慮する必要があるということを本発表では問題提起したい。本研究では、衝撃変成組織に対する空隙の効果を検討するために、出発試料には二酸化チタン（ルチル）の単結晶（空隙無）とペレット化した粉末（空隙率30%）に対して、両者の衝撃圧力を30 GPaに揃えた条件で行った。二酸化チタンは圧力・温度によって様々な結晶構造へ変化し[2]、自然界では、TiO_2の多形がドイツ・リースクレーター[3]、月クレーター[4]、コンドライト隕石[5]などから見つかっている。

衝撃回収実験は、物質・材料研究機構の一段式火薬銃を用いて行った。衝撃圧縮後、回収した試料について、X線回折法（XRD）による結晶相同定、透過型電子顕微鏡（TEM）による微細組織観察を行った。回収試料分析の結果、空隙の有無によって両者の衝撃変成組織は全く異なっていた。単結晶試料（空隙無）のXRDとTEM分析の結果、ルチルの{101}面に積層欠陥が卓越しており、塑性変形における支配的な転位のすべり系が{101}<01>であったことが明らかとなった。また、ルチルの一部においてα-PbO_2型構造への高圧相転移が確認され、シェアメカニズムによる無拡散型の相転移が起きたことが示唆された。一方、粉末回収試料（空隙30%）では、α-PbO_2型構造への相転移は確認されなかった。ルチル相のみからなり、絡み合った転位を持つ粒子と転位がほとんどない再結晶化した粒子から構成されていた。また、積層欠陥はほとんど存在しなかった。本研究から空隙の有無によって、同じ衝撃圧力においても衝撃変成組織が全く異なることが明らかとなった。本発表では、この違いが生じた要因について、塑性変形におけるルチルのすべり系の観点から考察する。

参考文献
[1] Stöffler et al., Meteoritics & Planetary Science, (2018)
[2] Nishio-Hamane et al., Physics and Chemistry of Minerals, (2010).
[3] El Goresy et al., Earth and Planetary Science Letters, (2001).
[4] Hou et al., IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (2021).
[5] Xie et al., Acta Geochimica, (2023).

キーワード：ルチル、衝撃変成微細組織、空隙
Keywords: Rutile, Shock deformation microstructures, Porosity

ポスター | R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

2024年9月14日(土) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

R6：深成岩・火山岩及び サブダクションファクトリー

12:30 ~ 14:00

[R6-P-01] マリアナ前弧蛇紋岩泥火山に産する直方輝石沈積岩：前弧モホ遷移帯の構成岩類

*安宅 飛明[1]、市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大、2. 金沢大)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-02] 瀬戸川帯オフィオライト岩類に伴う高マグネシウム安山岩の形成過程

*加藤 紬[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2] (1. 千葉大学、2. 金沢大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-03] 九重火山群火山岩類の岩石学的・地球化学的研究

「発表賞エントリー」

*山中 壮馬[1]、柴田 知之[1]、藤原 涼太郎[1]、芳川 雅子[1]、柴田 智朗[2] (1. 広大・先進理工、2. 福岡大・理)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-04] 山形県温海・鈴地域の貫入岩と地殻起源捕獲岩の岩石学的研究

*東條 壱優[1]、星出 隆志[1] (1. 秋田大·国資)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-05] 北上山地，遠野複合深成岩体に産出するジルコンの晶出条件と周辺鉱物との晶出関係

*小北 康弘[1,2]、坂田 周平[3]、大野 剛[4]、横山 立憲[2]、鈴木 哲士[1]、遠藤 京香[1]、湯口 貴史[5] (1. 山形大学、2. 原子力機構 東濃地科学センター、3. 東京大学 地震研究所、4. 学習院大学、5. 熊本大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-06] 山口県萩市川上地域に産する花崗閃緑岩体の岩石学的特徴とマグマ過程

「発表賞エントリー」

*杉浦 諒成[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大学・理)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-07] 山口県東部、土生花崗閃緑岩の年代とSr–Nd–Hf 同位体組成

*大和田 正明[1]、秋本 悠作[2]、永嶌 真理子[1]、江島 圭祐[1]、亀井 淳志[3]、中野 伸彦[4]、川口 健太[5]、小山内 康人[4] (1. 山口大学・院創成、2. 四電技術コンサルタント、3. 島根大学・院理工、4. 九州大学・院比文、5. 広島大学・院総合)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-08] 北部九州西部，能古島に分布する花崗閃緑斑岩の希土類元素組成とU-Pbジルコン年代

*柚原 雅樹[1]、川野 良信[2]、東田 和弘[3]、SUKHBAATAR Purevdulam[4] (1. 福岡大・理、2. 立正大・地球環境、3. 名古屋大・博物館、4. 名古屋大・院・環境学研究科)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-09] 北部九州，朝倉花崗閃緑岩の組成変化と岩体成長過程

「発表賞エントリー」

*濱野 裕大[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大・理地球圏)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-10] 福岡県東部に産する花崗岩–花崗閃緑岩の貫入関係と岩相区分

「発表賞エントリー」

*中村 領[1]、江島 圭祐[1] (1. 山口大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-11] 花崗岩中の石英の結晶化プロセス：九州の大崩山花崗岩体のマグマ溜りプロセスの理解

*湯口 貴史[1]、加藤 丈典[4]、小北 康弘[2]、渡邊 みのり[6]、加藤 あすか[6]、伊藤 大智[6]、横山 立憲[2]、坂田 周平[3]、大野 剛[5] (1. 熊本大学、2. 原子力機構、3. 東京大学・地震研、4. 名古屋大学、5. 学習院大学、6. 山形大学)

12:30 ~ 14:00

[R6-P-13] 愛媛県芸予諸島大島に分布する“大島石”に記録された花崗岩質マグマ溜まりの分化プロセス

*下岡 和也[1,2]、青野 荘一郎[2]、大西 隆仁[2]、福井 堂子[2]、壷井 基裕[1]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[2] (1. 関西学院大学、2. 愛媛大学、3. 新潟大学)

マリアナ前弧蛇紋岩泥火山に産する直方輝石沈積岩：前弧モホ遷移帯の構成岩類

Orthopyroxene cumulates from a serpentinite mud-volcano in the mariana forearc: constituent rocks of the forearc Moho transition zone

*安宅 飛明[1]、市山 祐司[1]、高見澤 駿[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2]
*Pia Ataka[1], Yuji Ichiyama[1], Shun Takamizawa[1], Akihiro Tamura[2], Tomoaki Motishita[2]

1. 千葉大、2. 金沢大
1. Chiba University, 2. Kanazawa University

伊豆・ボニン・マリアナ弧(IBM弧)は、約50Maに太平洋プレートのフィリピン海プレートへの沈み込みによって形成された未成熟な海洋性島弧で、IBM弧前弧域には沈み込み帯形成初期のプロセスが記録されていると期待される。IBM弧前弧で見られる火成層序は、拡大環境によって形成されるMORBに類似した玄武岩(前弧玄武岩：FAB)から、より枯渇したマントルのフラックス溶融によって形成されるボニナイトへの移行を示唆する(Ishizuka et al., 2014)。IBM弧前弧域には、蛇紋岩海山と呼ばれるマントル由来の泥火山が点在しており、前弧マントルに由来する岩片を包有する(Fryer., 1987)。2022年に独国海洋調査船ゾンネによって実施されたSO292/2航海では、3つの蛇紋岩海山から岩石採取が実施された。そのうち海溝からの距離が最も近い蛇紋岩泥火山からは、ボニナイト、ノーライト、直方輝岩、ガブロノーライト、蛇紋岩化したかんらん岩が回収された。本研究では、これらの岩石学的、地球化学的特徴を明らかにし、それらの成因と前弧地殻～マントル構造、島弧形成初期の環境の復元を試みる。

本研究のボニナイトは、かんらん石(15 vol%)、直方輝石(11 vol%)、クロムスピネル (＜1 vol%)、クリノエンスタタイト(＜1 vol%)の斑晶を含む高Siボニナイト(HSB; Pearce and Reagan, 2019)で、石基(72 vol%)には単斜輝石と直方輝石の急冷結晶とガラスが含まれる。ノーライトと直方輝岩は、直方輝石(39 vol%、70 vol%)、斜長石(6 vol%、1 vol%)、単斜輝石 (1 vol%、<1 vol%)の初生鉱物と、蛇紋石などの変成鉱物(54 vol%、26 vol%)で構成され、直方輝石を単斜輝石がポイキリティックに包有する。ガブロノーライトは、斜長石(32 vol%)、直方輝石(14 vol%)、単斜輝石 (16 vol%)、石英(5 vol%)と変成鉱物(34 vol%)から構成される。かんらん岩はハルツバージャイトとダナイトであり、沈積岩と溶け残り岩がある。沈積性かんらん岩は、蛇紋石化したかんらん石仮像（76 vol%）を直方輝石仮像（12 vol%）がポイキリティックに囲み、＜6 μmの珪長質包有物を含むクロムスピネル（4 vol%）が両方の仮像に包有される。溶け残りかんらん岩は、蛇紋石化したかんらん石仮像（78 vol%）と、稀に残存直方輝石を含むバスタイト(16 vol%)と単斜輝石(<1 vol%)、クロムスピネル(2 vol%)からなる。ノーライト、直方輝岩、沈積性かんらん岩中のクロムスピネルのCr#は 0.60-0.72で、HSBのクロムスピネルの値(0.78-0.86)よりも、低Siボニナイト(LSB)のクロムスピネルの値に類似する。溶け残りかんらん岩中のクロムスピネルの値(0.46-0.70)は試料によってLSBからFABの組成を示す。ガブロノーライト中に共存する斜長石のAn値と単斜輝石のMg＃の関係は、中央海嶺玄武岩と島弧ソレアイとの中間的組成を示すFABに類似する一方で、ノーライトと直方輝石岩は、ボニナイトの分化トレンド上の組成を示す。分配係数から求めた直方輝石沈積岩中の単斜輝石はLSBに類似したフラット～中希土類にやや枯渇したパターンを示す。ガブロノーライト中の単斜輝石と平衡な液相の希土類元素パターンは、FABに類似した軽希土類元素に枯渇したパターンを示すが、単斜輝石は直方輝石沈積岩と同様のHFSE元素に枯渇したパターンを示し、LSBとの成因的関連性が示唆される。

沈積岩類の鉱物組み合わせと鉱物化学組成は、これらがLSBマグマからの結晶沈積によって形成されたことを示唆する。IODP第352次航海では、LSBの枕状溶岩とその下位にある複合岩脈が採取されたことから、LSBがFABに続き拡大環境で形成された可能性が示されている（Reagan et al., 2015）。もしそうならば、マリアナ前弧域には、LSBマグマ生成を通じて形成された"オフィオライト層序"が存在するだろう。マリア

ナ海溝陸側斜面には、ボニナイトマグマ由来の閃緑岩質深成岩も露出する（Jonson et al., 2014）。本研究の沈積岩類は、海底拡大環境でLSB質地殻と溶け残り岩の間に形成されたモホ遷移帯に由来する可能性がある。Ichiyama et al. (2021)は、海溝からマリアナ蛇紋岩海山の距離に従い、より深部の蛇紋岩化マントルが泥火山中の岩片として上昇していることを示した。海溝に最も近い蛇紋岩海山から沈積岩類が産出することは、蛇紋岩化が前弧モホ遷移帯に達している可能性を示唆する。

キーワード：蛇紋岩、オフォライト、マリアナ前弧、モホ遷移帯、沈積岩
Keywords: Serpentine, Ophiolite, Mariana Forearc, Moho transition zone, cumulate

瀬戸川帯オフィオライト岩類に伴う高マグネシウム安山岩の形成過程

Formation processes of high-Mg andesite associated with ophiolitic rocks in the Setogawa belt

*加藤 紬[1]、市山 祐司[1]、田村 明弘[2]、森下 知晃[2]
*Tsumugi Kato[1], Yuji Ichiyama[1], Akihiro Tamura[2], Tomoaki Morishita[2]

1. 千葉大学、2. 金沢大学
1. Chiba Univ., 2. Kanazawa Univ.

高マグネシウム安山岩（HMA）は、MgOに富み（Mg#＞60；Kelemen, 2003）、FeO*/MgO比が1以下（巽, 2003）の初生的な組成で特徴付けられる安山岩である。HMAは沈み込み帯のマグマ成因を明らかにする上で重要な成分であり、安山岩質化学組成を示す大陸地殻の生成過程において大きな役割を果たすと考えられている（巽, 2003）。HMAは、現在の火山弧に産しており、沈み込み帯由来のオフィオライトにも産出することがある（例えば、オマーンオフィオライト；Ishikawa et al., 2002）。このようなオフィオライト中のHMAの形成過程を理解することによって、沈み込み帯の発達過程に束縛条件を与えることが期待される。日本列島では、静岡県中央部に分布する古第三紀付加体の瀬戸川帯に、断片化したオフィオライト岩類が存在し、HMAがオフィオライト岩類に伴って産出する（大橋・白木, 1981）。本研究では、瀬戸川帯オフィオライト岩類中におけるHMAの組織観察や全岩・鉱物化学組成分析を行うことによって、その形成過程について考察する。

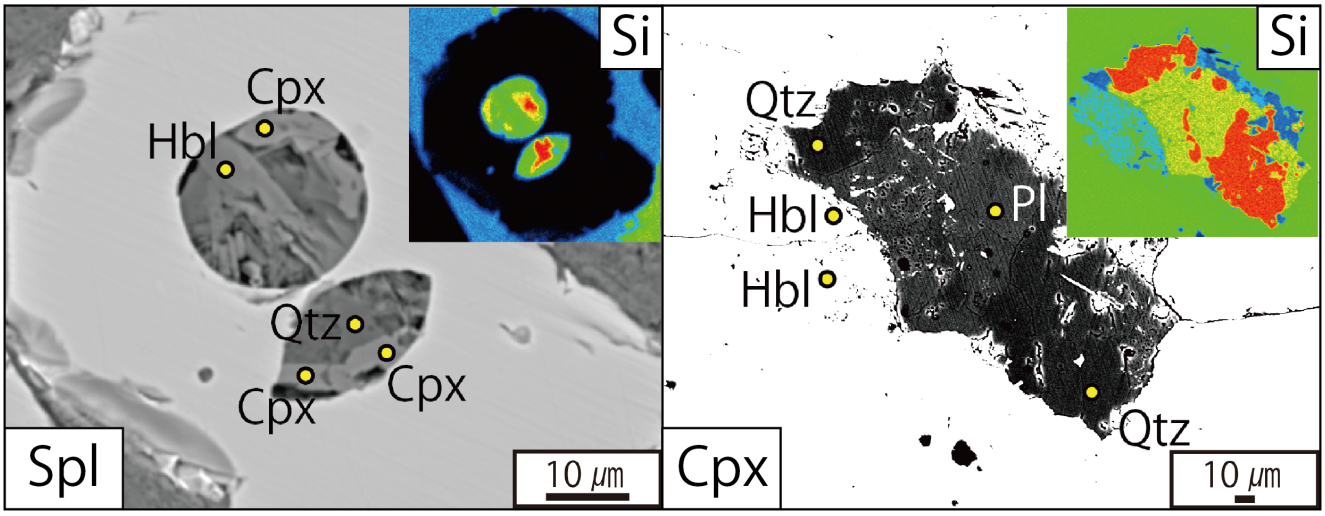
瀬戸川帯のHMAは、瀬戸川帯の西端に位置する大岳衝上体の奥仙俣地域に分布する角礫岩中の様々なサイズの砕屑物（最大で2－3 m径）として産出する。HMA礫には肉眼で鮮緑色の単斜輝石斑晶が特徴的に見られる。HMA礫のほかに安山岩、斑れい岩、単斜輝岩、蛇紋岩などのオフィオライトを構成する岩相の砕屑物も認められる。瀬戸川帯のHMAは、クロムスピネルを包有するかんらん石仮像と単斜輝石の斑晶を含み、稀に丸みを帯びた他形の斜長石斑晶も含まれる。石基は単斜輝石、斜長石及び二次鉱物から構成され、稀に石英を含む。かんらん石仮像、クロムスピネル、単斜輝石には、角閃石、単斜輝石、斜長石と稀に石英やカリ長石からなる珪長質な結晶包有物が確認され（下図）、一部の単斜輝石や角閃石は急冷組織を示す。単斜輝石斑晶の組成累帯は、コア部ではよりMg#に富む部分がMg#に乏しい部分を不規則に取り囲み、リム部では内側から外側に向かってMg#が減少する。また、コア部とリム部の境界では急激なMg#の減少が見られる。全岩のMgO量とかんらん石仮像・単斜輝石の斑晶量の間には正の相関があり、玄武岩質から安山岩質に変化する全岩化学組成変化は、結晶の集積によって説明することができる。単斜輝石の微量元素及び希土類元素パターンは、コア部とリム部で同じ特徴を示しており、同一の親マグマからの分化程度の異なるマグマによって結晶化したことが示唆される。また、単斜輝岩中の単斜輝石の微量元素及び希土類元素パターンもHMA中の単斜輝石のパターンと類似する。N-MORBで規格化された全岩微量元素パターンは、LILEで正異常、HSFEで負異常が見られ、島弧マグマの特徴を示す。希土類元素パターンでは、LREEに乏しい左下がりの特徴を示す。微量元素パターンの特徴は、嶺岡・瀬戸川帯の深成岩や伊豆・ボニン・マリアナ（IBM）弧の火山岩に類似する。

無斑晶質のHMA試料から見積もられる平衡なかんらん石のMg#（＝88）とNiO量(＝0.11 wt.%)は、マントルかんらん岩中の値（Mg#=84－93、NiO＝0.3－0.4 wt.%；高橋, 1986)に比べてNiO量に乏しく、瀬戸川帯HMAがマントル溶融で形成されたのではないことを示している。また、スラブメルトが関与したアダカイト質HMAは高いSr量（＞1000 ppm）と高いSr/Y比（50－350）の特徴を持つが（Yogodzinski et al., 2015）、瀬戸川帯HMAはSr量（60－271 ppm）が低くSr/Y比（5－17）も低いことから、スラブメルトが関与した可能性は低い。

Siに富むメルト由来の珪長質結晶包有物の存在と、単斜輝石斑晶のコア部からリム部への急激なMg＃の減少は、瀬戸川帯HMAが高温で未分化な苦鉄質マグマとより分化したSiOに富むマグマが混合することによって形成された可能性を示唆する。この2つのマグマは同じ親マグマに由来すると考えられ、島弧環境における単一

のマグマ供給系で、より分化の進んだマグマ溜まり中に未分化な苦鉄質マグマが供給されることによって混合したのであろう。単斜輝岩は、未分化なマグマから結晶化した単斜輝石の分別によって形成された結晶沈積岩であろう。瀬戸川帯のオフィオライト岩類は、付加体に取り込まれた断片化したIBM弧由来の地殻～マントルの断片岩である可能性が指摘されている（Ichiyama et al.,2017, 2020）。もしそうであるならば、IBM弧に存在するとされる安山岩質中部地殻は、HMAマグマを形成するようなマグマ混合によって形成されている可能性がある。

キーワード：高マグネシウム安山岩、瀬戸川帯、珪長質結晶包有物、マグマ混合
Keywords: high-Mg andesite, Setogawa belt, felsic crystalline inclusions, magma mixing



九重火山群火山岩類の岩石学的・地球化学的研究

Petrological and geochemical study of volcanics from Kuju volcanic group, Kyushu Island, Southwest Japan Arc.

*山中 壮馬[1]、柴田 知之[1]、藤原 涼太郎[1]、芳川 雅子[1]、柴田 智朗[2]
*Soma Yamanaka[1], Tomoyuki Shibata[1], Ryotaro Fujihara[1], Masako Yoshikawa[1], Tomo Shibata[2]

1. 広大・先進理工、2. 福岡大・理
1. Hiroshima Univ. Sci. & Tech, 2. Fukuoka Univ. Sci.

南日本弧と琉球弧の第四紀火山の活動は南海トラフと琉球海溝で沈み込むフィリピン海プレートに関連する。フィリピン海プレートは九州-パラオ海嶺北東 側では四国海盆で生じた若い（26~15 Ma）海洋地殻が、南西 側ではより古い（60~40 Ma）西フィリピン海盆由来の海洋地殻が沈み込んでいる(Mahony et al., 2011)。およそ25 Maより若いスラブは部分溶融しマグマを生成し、より古いスラブは脱水流体をマントルに付加することでマグマを発生させるとされるので (Defant & Drummond, 1990)、西南日本弧と琉球弧ではマグマの成因は異なると考えられている (Mahony et al., 2011; Shibata et al., 2014) 。九州のテクトニクスを理解する上で、この西南日本弧と琉球弧の境界となる九州-パラオ海嶺の延長の決定は重要であるが、Mahoney et al. (2011) はそれが阿蘇火山直下にあるとし，Shibata et al. (2014) は阿蘇と霧島火山はフィリピン海プレートと九州-パラオ海嶺の境界付近に位置すると考えた。

九重火山群はMahoney et al. (2011)やShibata et al. (2014)の主張によると、西南日本弧の最西南端に位置する第四紀火山であり、それ以西には九州-パラオ海嶺の延長上に位置する可能性のある阿蘇火山が位置するため、西南日本弧と琉球弧境界を議論する上で重要な火山である。川辺ほか (2015) によると、その活動は4つの活動期（第１期～第４期）に分けられ、石英とカンラン 石の共存などの非平衡な鉱物組み合わせなどから苦鉄質と珪長質なマグマの混合が起きていたと考えられている。本研究では九重火山群のほぼすべてのフローユニットから採取した火山岩類の鉱物モード・主成分化学組成と微量元素組成（Rb, Ba, Sr, Nb, Zr, Y濃度）を測定し、マグマの進化過程を議論することを目的とした。

本研究で測定した火山岩類のモード組成をカンラン 石（Ol）、直方輝石（Opx）、そして角閃石（Hbl）モード組成の三角ダイアグラムとして図に示した。この図上で各火山岩類は辺Ol-Opx上のグループと辺Hbl-Opx上のグループに２分される。我々はこれらをOpx含有量40%を基準に、それぞれ細分化し、九重火山群の火山岩類を、（1）Olに富むグループ（Ol-rich）、（2）Hblに富むグループ（Hbl-rich）、（3）Opxに富みカンラン石を含むグループ（Opx-rich）、（4）OpxとHblがともに富むグループ（Opx・Hbl-rich）に分類した。さらに、これら試料のSiO_2とK_2O含有量に基づき、Ol-richはOl-rich1とOl-rich2に、 Hbl-richをHbl-rich1とHbl-rich2 にそれぞれ細分化し、九重火山群の火山岩類を6グループに分類した。

鉱物モード組成に基づいて分類した6グループと主成分化学組成を比較すると、Ol-rich1、2が玄武岩質安山岩組成、Opx-rich、Opx・Hbl-rich、Hbl-rich2は安山岩組成、Hbl-rich1は安山岩からデイサイト組成を示す。また、TiO_2含有量はSiO_2含有量の増加に伴いSiO_2含有量が約58 (wt. %) までは増加傾向を示すが、その後減少に転じるため、九重火山群下のマグマは苦鉄質端成分と珪長質端成分の単純な2端成分混合だけでは説明できない可能性が考えられる。微量元素組成では、LILE (large-ion lithophile elements) に比べHFSE (high field strength elements) が枯渇する典型的な島弧マグマの特徴を示す。本講演では、鉱物モード組成に基づいて分類した6グループに様々な地球化学的特徴の違いがみられたため、主成分元素組成と微量元素組成を用いて、その違いを解説し、それぞれのグループはどのようなマグマの進化過程を経験し噴出したのか議論する。

キーワード：鉱物モード組成、九重、島弧マグマ

Keywords: modal composition, Kuju, arc magma

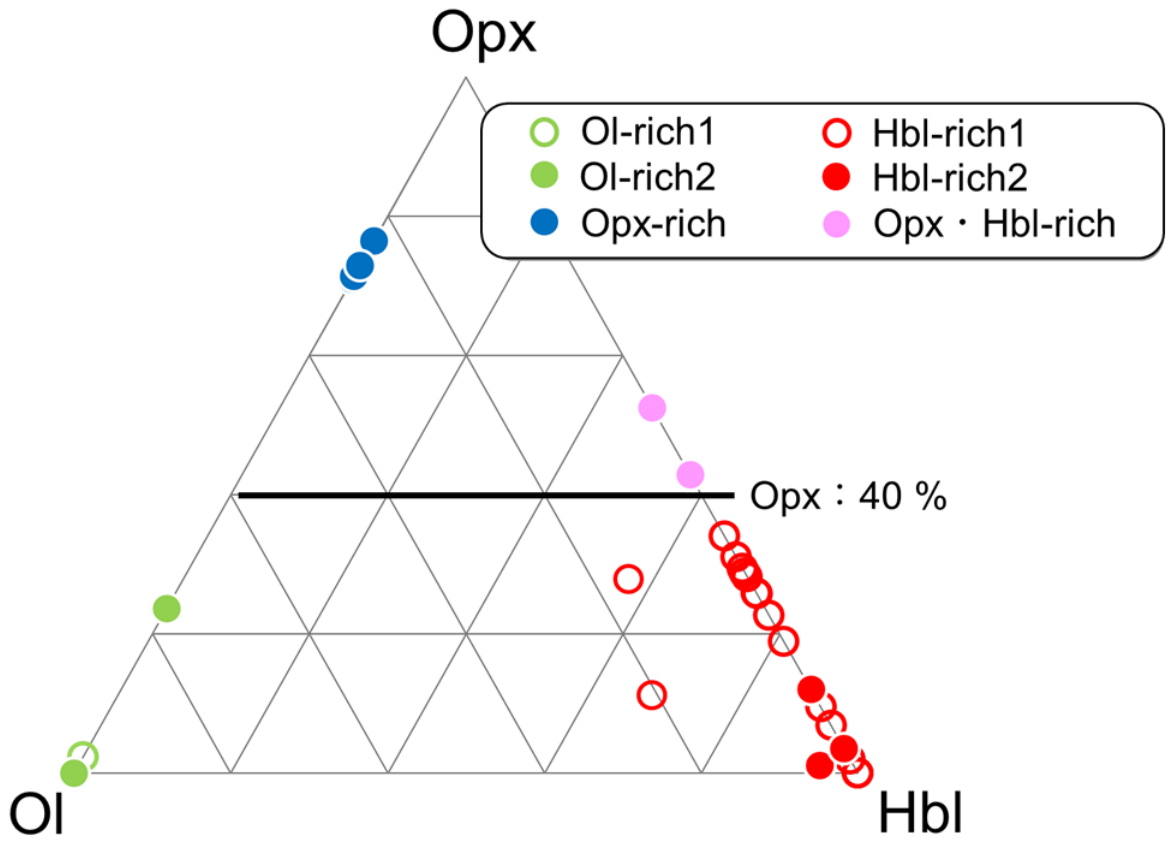


図　九重火山群火山岩類のモード組成。

山形県温海・鈴地域の貫入岩と地殻起源捕獲岩の岩石学的研究

Petrological study of intrusive rocks and their crustal xenoliths in the Suzu area, Atsumi district, Yamagata

*東條 壱優[1]、星出 隆志[1]
*Kazuhiro Tojo[1], Takashi Hoshide[1]

1. 秋田大·国資
1. Akita Univ.

タイトル：山形県温海・鈴地域の安山岩類に含まれる斑れい岩質捕獲岩の特徴
東條壱優・星出隆志
山形県鶴岡市温海周辺地域には中新統鼠ヶ関層に貫入したドレライト岩床が分布している。同岩床に伴って、鶴岡市五十川・鈴～黒滝付近にデイサイト～安山岩質岩脈、鈴漁港から南方1kmの立岩にはデイサイト質溶岩ドームが分布する（土谷ほか、2003）。これら安山岩～デイサイトには斑れい岩質捕獲岩が含まれる。近藤ほか(1999)は、岩石学的特徴と同位体化学組成およびSm-Nd鉱物アイソクロン年代に基づき、同地域の斑れい岩質捕獲岩を古第三紀に活動したアルカリ岩質マグマに由来するかんらん石を含むタイプと、後期白亜紀に活動したマグマに由来するかんらん石を含まないタイプに分類し、両タイプともに新第三紀に活動した温海ドレライトやそれに伴うデイサイト～安山岩とは成因的な関係がないと考えた。一方、土谷ほか(2003)は、斜長石、普通角閃石、単斜輝石、磁鉄鉱からなる捕獲岩を下部地殻起源、かんらん石、単斜輝石、斜長石、クロムスピネルからなる捕獲岩をドレライト質マグマの集積岩であると考え、捕獲岩の母岩のデイサイトはドレライトの熱によって下部地殻が部分溶融して形成されたとしている。このように、温海地域に産する斑れい岩質捕獲岩の起源について異なる解釈がなされており、未だ検討の余地がある。そこで我々は、鈴～黒滝付近の火山岩及びドレライトの分布と、斑れい岩質捕獲岩の岩石学的特徴を調べた。鈴漁港の南南西約350 mの黒滝付近の沿岸に鼠ヶ関層泥岩と岩床（玄武岩質粗面安山岩）の接触部が露出し、玄武岩質粗面安山岩に伴ってデイサイト（SiO_2=64.5 wt%）が分布している。玄武岩質粗面安山岩の露出はごく小規模で、泥岩とデイサイトの間に幅約20 cmの範囲で板状に分布する。泥岩－玄武岩質粗面安山岩あるいは玄武岩質粗面安山岩ーデイサイトの両接触面の走向傾斜はいずれも泥岩の層理面とほぼ平行である。黒滝～鈴漁港までの間に分布するデイサイト～安山岩には、長径数cm～40 cmの斑れい岩質捕獲岩が含まれる。同捕獲岩約20個を採取し、岩石学的特徴に基づき以下の5種類に分類した。・中粒かんらん石斑れい岩（Pl-poorタイプ: SiO2=50 wt%, MgO=8.8 wt%）…斜長石（An87-89）・単斜輝石（Mg#79-81）・かんらん石が等粒状組織を呈する。多くの部分で構成鉱物同士は密着しているが、一部結晶粒界に極細粒部が認められる。かんらん石はほぼ全て蛇紋石等に変質している。・中粒かんらん石斑れい岩（Pl-richタイプ: SiO2=48.6-48.7 wt%, MgO=4.9-5.5 wt%）…自形の斜長石の間隙を他形の単斜輝石とかんらん石が埋める組織を呈する。構成鉱物同士は密着していることが多いが、一部結晶粒界や結晶内部に極細粒部が認められる。・磁鉄鉱含有粗粒かんらん石斑れい岩…斜長石（An84-85），単斜輝石（Mg#74），チタン磁鉄鉱，かんらん石からなるペグマティティック組織を示す。・細粒斑れい岩（SiO2=48 wt%, MgO=5.8 wt%）…細粒（粒径0.2-1 mm程度）の斜長石（An71-81），単斜輝石（Mg#73-76），燐灰石の間隙を，粒径数10㎛程度の単斜輝石、斜長石、磁鉄鉱等からなる極細粒の石基が埋める組織を呈する。岩石全体に対する石基の割合は4割程度である。・角閃石斑れい岩…斜長石（An84-89），普通角閃石，チタン磁鉄鉱からなり、多数の自形の斜長石を粗粒な多形普通角閃石が包有するオフィティック組織を呈する。 中粒かんらん石斑れい岩や細粒斑れい岩に見られる極細粒部の組織は急冷されたことを示す。ほぼ完晶質な中粒かんらん石斑れい岩は、固体岩石としてマグマに捕獲されたと考えられる。それに比べて極細粒部の石基の割合が高い細粒斑れい岩は、デイサイト～安山岩質マグマに取り込まれた時にクリスタルマッシュの状態であった可能性がある.

キーワード：岩石学、捕獲岩
Keywords: Petrology, Xenoliths

@Japan Association of Mineralogical Sciences.

北上山地，遠野複合深成岩体に産出するジルコンの晶出条件と周辺鉱物との晶出関係

Crystallization conditions of zircon and its crystallization relationship with surrounding minerals in the Tono plutonic complex, Kitakami mountains

*小北 康弘[1,2]、坂田 周平[3]、大野 剛[4]、横山 立憲[2]、鈴木 哲士[1]、遠藤 京香[1]、湯口 貴史[5]
*Yasuhiro OGITA[1,2], Shuhei Sakata[3], Takeshi Ohno[4], Tatsunori Yokoyama[2], Satoshi Suzuki[1], Kyoka Endo[1], Takashi Yuguchi[5]

1. 山形大学、2. 原子力機構 東濃地科学センター、3. 東京大学 地震研究所、4. 学習院大学、5. 熊本大学
1. Yamagata Univ., 2. JAEA, Tono Geoscience Center, 3. The Univ. Tokyo, Earthquake Research Inst., 4. Gakushuin Univ., 5. Kumamoto Univ.

ジルコンは珪長質深成岩体で普遍的に産出する副成分鉱物であり，マグマの地殻への貫入から定置，固化に至るマグマ溜りプロセスの温度・時間履歴の推定（例えば，Suzuki et al., 2023, J. Miner. Petrol. Sci.）や地殻の隆起・侵食量評価における起点の情報（Kawakami et al., 2021, Island Arc）に用いられる．ジルコンU–Pb年代は火成活動の時期の指標として広く用いられる一方で，ジルコンの結晶化に数百万年程度の期間の幅があるケースが報告されている（Annamária et al., 2023, Miner. Petrol.）．ジルコンのU–Pb年代測定から得られる年代値は，あくまでジルコンの結晶化年代を示すに過ぎず，マグマ溜りプロセスをより精緻に議論するためには岩石学的情報を踏まえた解釈が必要となる．そこで本研究では，単一の花崗岩体におけるジルコンの結晶化条件（年代，温度）を，ジルコン周辺の鉱物との晶出関係と関連させて解釈を行うことを目的として，薄片中のジルコンに対して結晶化年代・結晶化温度の推定を実施した．

対象とした岩体は，北上山地中央部に位置する遠野複合深成岩体（以下，遠野岩体）とした．遠野岩体は北上山地の白亜紀深成岩体で最大の露出面積を有することから（小野・曽屋, 1974, 地調報告），大規模のマグマ溜りを生成していたことが示唆される．深成岩体内の複数地点の試料を用いることで，マグマ溜り内の位置によるジルコン結晶化条件の相違を評価できることが期待される．また，遠野岩体は全岩化学組成の特徴によりアダカイト質の中心相と非アダカイト質の主岩相とに岩相が区分されており，中心相と主岩相は異なる起源マグマに由来すると考えられている（Tsuchiya and Kanisawa, 1994, J. Geophys Res.）．このような特徴の異なるマグマにおいてジルコンの結晶化条件の相違を比較することで，それぞれの岩相を形成したマグマの相違を議論する．

ジルコンとその周辺鉱物（隣接する鉱物）との晶出関係を議論するために，遠野岩体の岩石サンプル（中心相3サンプル，主岩相3サンプル）それぞれについて薄片を作製し，山形大学の走査型電子顕微鏡を用いてジルコンのカソードルミネッセンス（以下，CL）像による結晶成長様式の観察を行った．その観察結果に基づいて，学習院大学のレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置によりU–Pb年代及びTi濃度の同時取得分析を行った．

遠野岩体のジルコンの産状は，石英に包有されているジルコン，黒雲母に包有されているジルコン，粒間に晶出するジルコンの3タイプが認められた（表1）．中心相の3サンプルでは，それぞれで石英に包有されているジルコンが認められた．主岩相の3サンプルでは，黒雲母に包有されているジルコンが卓越するサンプルを確認した（表1のサンプル405）．ジルコン1粒子の中で複数点の同位体分析を行い，それらのU–Pb年代，Ti濃度および分別結晶作用の指標となるTh/U比を粒子内で比較したところ，遠野岩体のジルコンでは，粒子内で誤差の範囲を超える有意な相違が認められる粒子があった．このような粒子は，ジルコンが結晶化する際のマグマの温度等の変化を記録している可能性がある．CLパターンが共通な粒子同士，例えばオシラトリーゾーニングを有する粒子同士を比較すると，石英に包有されているジルコンと黒雲母に包有されているジ

ルコンとで結晶化年代の分布範囲に相違は認められなかった．結晶化温度を反映するTi濃度も，石英に包有されているジルコンと黒雲母に包有されているジルコンとで組成範囲に相違は認められなかった．また，石英や黒雲母に包有されるジルコンと粒間に存在するジルコンとで結晶化年代やTi濃度の組成範囲が重なることがわかった．産状によるジルコンの結晶化条件に相違がみられないことは，ジルコンや周囲の鉱物の晶出が同じ時間・温度条件で並行して進んだことを示す．このことは，花崗岩質マグマが地殻へ貫入・定置後に急速に冷却・固化するケース（Large et al., 2021, Earth Planet. Sci. Lett.）と類似しており，遠野岩体を形成したマグマ溜りの急速な冷却（Yuguchi et al., 2020, Lithos）を支持する．本報告では，岩相によるジルコンの晶出条件の相違から，遠野岩体を形成したマグマの地殻への貫入から定置，固化に至るプロセスについても議論する．

本件には，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性総合評価技術開発）」（JPJ007597）の成果の一部を使用している．

キーワード：ジルコン、U-Pb年代、Ti濃度、遠野複合深成岩体
Keywords: Zircon, U-Pb age, Ti concentration, Tono Plutonic Complex

表1　遠野岩体のジルコンの産状と分析数

岩相	サンプル名	分析点数	ジルコン粒子数				
				in Qtz	in Bt	in Afs	粒間
中心相	025	23	4	1	1	0	2
	029	3	1	1	0	0	0
	102	11	4	1	0	1	2
主岩相	021	5	4	1	1	0	2
	404	6	3	0	0	0	3
	405	31	11	0	3	0	8

in Qtz: 石英に包有されるジルコン，in Bt: 黒雲母に包有されるジルコン，
in Afs: アルカリ長石に包有されるジルコン，粒間: 粒間に産出するジルコン

山口県萩市川上地域に産する花崗閃緑岩体の岩石学的特徴とマグマ過程

Petrography and magmatic processes of a diorite body distributed in the Kawakami region, Yamaguchi Prefecture, Japan

*杉浦 諒成[1]、江島 圭祐[1]
*Ryosei Sugiura[1], Keisuke Eshima[1]

1. 山口大学・理
1. Yamaguchi University

【研究目的】西南西日本内帯には白亜紀陸弧火成活動によって形成された珪長質火山岩類が広く分布する. この火成活動は活動的大陸縁辺部における地殻形成に関連し, 産物として日本各地に火山深成複合岩体を形成している(今岡ほか, 2019). また, こういった複合岩体は, 火山岩と深成岩の両者を地表で観察できるため, マグマ溜まりの構造や進化を検討する上で，重要な情報を有するとされている(今岡, 2001). 山口県を含む西中国地方では阿武層群, 関門層群および周南層群を代表とする白亜紀火山岩類と白亜紀深成岩類が広く分布し, 数多くの火山深成複合岩体が露出する (村上・今岡, 1980). こういった地質状況は白亜紀の火山岩類の露出が少ない北部九州地域に比べ, 火山深成活動の検討に適していると言える．特に関門層群は山口県北西部に広く分布し, 構成岩石の記載や火山岩類の化学組成など検討は進められているが, 山口県中部以東における分布は限られているため, 研究例は数少ない(例えば, 村上・今岡, 1980). 本調査地域である山口県北部萩市川上地域も同様に, 関門層群, 周南層群が露出するとされているが両者の構造関係や白亜紀花崗岩類の貫入状況は不明な点が多く, 火山深成活動の検討は未だ不十分である. そこで, 本研究では野外踏査を主とする野外地質学的検討から火山岩類と深成岩類の構造的な関係性と貫入関係などの情報を抽出し, 各種化学分析を用いた岩石学的検討を統合することで本調査地域の火成テクトニクスとマグマ過程を明らかにする．また, 本調査地で検討した火山深成活動史を周辺地域と比較することで, 白亜紀火成活動の普遍的な情報を抽出できると考えている.

【地質概要】萩市川上地域の地質は火山岩類と混在岩(付加体堆積物)を母岩とし, それらに花崗閃緑岩が鉛直に貫入している. 火山岩類は関門層群と周南層群に区分され, 前者は安山岩質の凝灰岩と凝灰角礫岩. 後者は, 安山岩～流紋岩質で構成される. 本調査地域では周南層群が関門層群の構造的上位に分布し, 両者とも火山礫凝灰岩(lapilli tuff), 凝灰岩(tuff), 細粒凝灰岩(fine tuff)で構成される. 両者とも岩片はガラス質なものが大半を占める. 石英脈に貫かれている産状もしばしば確認できる.

【岩石記載】花崗閃緑岩は一般に完晶質で塊状であるが, 一部では0.5～0.7cmの石英, 斜長石およびアルカリ長石結晶が肉眼で観察できる．鏡下観察において, 一般的な塊状の岩相は半自形粒状組織を示し, 構成鉱物は自形～半自形の斜長石(0.7～1.3mm), 半自形から他形の石英(0.5-1.0mm), ホルンブレンド(0.1–0.2mm), 黒雲母(0.1–0.2mm), カリ長石(0.7–1.0mm)である. また黒雲母は緑泥石化しており, 変質が進んでいる. 凝灰岩類は暗灰色～灰色の岩相を呈し,ホルンブレンド, 石英および斜長石結晶の破片が確認される．また, それらの結晶はしばしば集斑状組織を示す. 基質は細粒な他形の石英, 半自形～他形の斜長石, 他形のホルンブレンドを含む. また全体として風化が進み変質している.

【形成過程】本地域の母岩である付加体堆積物(混在岩)がプレート収束域で形成された. その後, 関門層群, 周南層群のような白亜紀陸弧火成活動が起き, 本地域に広く分布する火山岩類が堆積した. 火山岩類は, 様々な岩相が産し, 火山岩の粒度変化が定常的ではないことから本地域では複数回の噴火が発生したことが考えられる. また, この2つの岩体を花崗閃緑岩が貫いていることから, その後花崗閃緑岩が貫入してきたといえる. しかし火山岩類が花崗閃緑岩による接触変成作用を受けていないためほぼ同時期に発生したと考える.

【引用文献】今岡照喜, 2001, 火山－深成複合岩体, 山内靖喜・三梨 昂編, 地学ハンドブックシリーズ13, 新版地質調査法, 地学団体研究会, 168ー181. 今岡ほか, 2019, 山口県中央部の後期白亜紀カルデラ群の地質：吉部, 山口, 生雲, 佐々並カルデラ, 地質学雑誌, 第125巻, 第7号, 529–553. 村上允英・今岡照喜, 1980, 西南日本内帯における後期中生代～古第三紀火山岩類の化学性ーとくに西中国地域を中心としてー, 岩石鉱物床学会誌

特別号, 2号,263ー278.

キーワード：花崗閃緑岩、火山深成複合岩体、関門層群、周南層群
Keywords: Grandiorite, Volcanic-plutonic complex, Kwanmon Group, Shunan Group

山口県東部、土生花崗閃緑岩の年代とSr–Nd–Hf 同位体組成

Sr–Nd–Hf isotopic systematics for the Habu granodiorite, eastern part of Yamaguchi Prefecture

*大和田 正明[1]、秋本 悠作[2]、永嶌 真理子[1]、江島 圭祐[1]、亀井 淳志[3]、中野 伸彦[4]、川口 健太[5]、小山内 康人[4]
*Masaaki OWADA[1], Yusaku Akimoto[2], Mariko Nagashima[1], Keisuke Eshima[1], Atsushi Kamei[3], Nobuhisko Nakano[4], Kenta Kawaguchi[5], Yasuhito Osanai[4]

1. 山口大学・院創成、2. 四電技術コンサルタント、3. 島根大学・院理工、4. 九州大学・院比文、5. 広島大学・院総合
1. Yamaguchi Univ., 2. YON-C, 3. Shimane Uni., 4. Kyushu Univ., 5. Hiroshima Univ.

山口県東部には後期白亜紀の火成活動に伴う花崗岩類が分布している。これら花崗岩類は東アジア東縁に発達した白亜紀の間欠的な大規模火成活動(magmatic flare ups)期に対応し，高温型変成岩類の熱源と考えられている。本研究は，土生花崗閃緑岩の産状と記載岩石学的特徴を整理し，ジルコンU–Pb年代とその年代値で補正したSr–Nd同位体組成とジルコンのHf同位体組成によるマグマ過程と起源物質について議論する。本研究の成果は，白亜紀の大規模火成活動をもたらしたマグマの起源物質やその火成活動と同時代の高温型変成岩類との相互関係を検討するための基礎的なデータとなりうる。

土生花崗閃緑岩は東西約5km，南北約4kmの露出域をもち，ジュラ紀付加体の玖珂層群に対してラコリス状に貫入した。本岩体は母岩との接触部（岩体外縁部とルーフ部）において角閃石黒雲母トーナル岩～花崗閃緑岩（以後，優黒質相）が，岩体の内部に黒雲母花崗閃緑岩（優白質相）が分布し，後者が大部分を占める。また，優黒質相はしばしば暗色包有物を伴う。優黒質相は角閃石を含み苦鉄質鉱物に富むが，角閃石を含むこと以外の記載的特徴は優白質相と類似する。黒雲母や角閃石は自形～半自形で，斜長石と石英を主体とし，少量のアルカリ長石を伴う。優黒質相の角閃石は，しばしば黒雲母を包有することから，黒雲母の晶出は角閃石と同時期もしくはそれ以前と考えられる。また両岩相には，共通して汚濁帯を伴う斜長石が産する。このような産状は，固結しつつある優白質相に優黒質相が貫入し，両マグマの接触部でマグマ混交が生じたことを示唆する。

両岩相からジルコンを抽出し，九州大学のLA-ICP-MS，LA-MC-ICP-MSでU–Pb年代とHf同位体組成を求めたところ，優黒質相と優白質相のU–Pb年代が誤差の範囲で一致し，約105 Maを示した。また，優黒質相(n=13)と優白質相(n=12)のイプシロンHf (t)値はそれぞれ+0.1～+3.1, -1.9～+1.1 で，優白質相がややエンリッチした値を示す。全岩化学組成は，両岩相で一連のトレンドを形成し，Sr–Nd同位体初生値（105 Maで補正）を考慮すると，分化の進んだ優白質相は上昇過程で周囲の泥質岩を取り込み，同化したことを示唆する．産状，岩石組織および全岩化学組成の特徴から，土生花崗閃緑岩は優黒質相のマグマから分化した優白質相が地殻物質を同化しつつ定置したと考えられる。また，地殻物質の同化が限定的な優黒質相の2段階Hfモデル年代は1.0～1.2 Gaを示すことから，土生花崗閃緑岩マグマは，中期原生代にマントルから分離した下部地殻物質の溶融によって生じたと推察される。

キーワード：土生花崗閃緑岩、マグマ過程、起源物質、マルチ同位体比組成、西南日本白亜紀火成活動
Keywords: Habu granodiorite, Magmatic processes, Source materials, Multi-isotopic systematics, Igneous activities Southwest Japan

北部九州西部，能古島に分布する花崗閃緑斑岩の希土類元素組成とU-Pbジルコン年代

Rare earth element compositions and U-Pb zircon age of granodiorite porphyrites in the Noko Island, western part of northern Kyushu

*柚原 雅樹[1]、川野 良信[2]、束田 和弘[3]、SUKHBAATAR Purevdulam[4]
*Masaki YUHARA[1], Yoshinobu KAWANO[2], Kazuhiro TSUKADA[3], Purevdulam SUKHBAATAR[4]

1. 福岡大・理、2. 立正大・地球環境、3. 名古屋大・博物館、4. 名古屋大・院・環境学研究科
1. Fukuoka Univ. Sci., 2. Rissho Univ. Env. Sci., 3. Nagoya Univ. Mus., 4. Nagoya Univ. Env. St.

北部九州西部，能古島に分布する北崎トーナル岩ならびに蓮華変成岩中に貫入する花崗閃緑斑岩岩脈（唐木田，1965；唐木田ほか，1994）は，記載岩石学的特徴，全岩化学組成の特徴から，花崗岩質マグマと北崎トーナル岩とは異なるトーナル岩質マグマの混合によって形成されたことが明らかになった（柚原，2017；柚原ほか，2019）．しかし，その貫入時期については不明であった．そこで，花崗閃緑斑岩岩脈のU-Pbジルコン年代を測定した．本報告ではそれらの結果を報告するとともに，希土類元素ならびにSr・Nd同位対比組成からマグマ混合の端成分について検討を行う．花崗閃緑斑岩岩脈は主に，能古島および周辺地域の北崎トーナル岩と蓮華変成岩中に認められる．能古島西海岸の蓮華変成岩中に認められる花崗閃緑斑岩岩脈は，厚さ最大12 mで，NNEあるいはENE方向に高角度に貫入している．塊状で斑状の花崗閃緑斑岩からなり，最大長径120 cmの苦鉄質包有岩を多量に包有する．本花崗閃緑斑岩は，主に斜長石，普通角閃石，黒雲母，石英，アルカリ長石からなり，副成分鉱物として燐灰石，チタン石，ジルコン，不透明鉱物を含む．斑晶は斜長石，普通角閃石，黒雲母，石英からなる．石英斑晶は融食形を示し，斜長石斑晶には汚濁帯が認められる．普通角閃石と黒雲母斑晶の周囲は複雑に入り組んでいる．苦鉄質包有岩は，主に斜長石，普通角閃石，黒雲母，少量の石英からなり，副成分鉱物として燐灰石，チタン石，ジルコン，不透明鉱物を含む．斑晶は斜長石，普通角閃石，黒雲母と少量の石英からなる．石英斑晶は融食形を示し，反応縁が認められる場合がある．斜長石斑晶には汚濁帯が認められる．これらの斑晶の産状は，マグマ混合を示唆する．組成変化図において，本花崗閃緑斑岩は，岩脈中の苦鉄質包有岩と北崎トーナル岩中に貫入する細粒花崗岩岩脈の間の組成を示す．苦鉄質包有岩は多くの元素で北崎トーナル岩の組成範囲内にあるが，MgO，Na_2O，Crに富み，Yにやや乏しい傾向にある．SiO_2-A.S.I.図やMgO-Fe_2O_3*図では，細粒花崗岩，花崗閃緑斑岩，苦鉄質包有岩の形成するトレンドと，北崎トーナル岩の変化トレンドは大きく異なる．以上のことから，柚原（2017）は，本花崗閃緑斑岩は，花崗岩質マグマと苦鉄質包有岩の元となった北崎トーナル岩とは異なる組成を持つトーナル岩質マグマの混合により形成されたと考えた．花崗閃緑斑岩からジルコンを分離し，名古屋大学に設置のLA-ICP-MSを用いてU-Pb同位体比を測定した．U-Pbジルコン年代として112.8 ±1.2 Maが得られた．測定に使用したジルコンは，オシラトリー累帯構造を示すことや，Th/U比が高いことから，火成起源であると考えられる．したがって，得られた年代は花崗閃緑斑岩の貫入時期と見なすことが可能である．北崎トーナル岩からは111.5 ±1.3 MaのU-Pbジルコン年代が報告されており（村岡，2021），両者の活動時期がほぼ同時期であったことが推定される．C1コンドライト（Anders and Grevesse, 1989）で規格化した希土類元素パターンは，細粒花崗岩の一部を除き，軽希土類元素に富み，重希土類元素に乏しい右下がりで，重希土類元素側でややフラットになるパターンを示す．北崎トーナル岩，花崗閃緑斑岩中の苦鉄質包有岩，花崗閃緑斑岩の順に含有量が低くなる．細粒花崗岩のパターンは変化に富む．112.8 Maで年代補正した花崗閃緑斑岩と苦鉄質包有岩のSrおよびNd同位体比初生値（SrI）は，それぞれ0.70439～0.70462；0.512526～0.512583，0.70403～0.70438；0.512565～0.512594である．これに対し，111.5 Maで年代補正したSr・Nd同位体比は，北崎トーナル岩で0.70420～0.70449；0.512532～0.512723，細粒花崗岩で0.70442～0.70512；0.512439～0.512559で

ある．イプシロン図では，北崎トーナル岩よりも花崗閃緑斑岩がややエンリッチした同位体比組成を示すが，一部重複している．

キーワード：花崗閃緑斑岩、能古島、Sr・Nd同位体組成、希土類元素組成、U-Pbジルコン年代
Keywords: granodiorite porphyrite, Noko Island, Sr and Nd isotopic composition, Rare earth element compositions, U-Pb zircon age

北部九州，朝倉花崗閃緑岩の組成変化と岩体成長過程

Compositional changes and growth processes of the Asakura granodiorite, Northern Kyushu, Japan.

*濱野 裕大[1]、江島 圭祐[1]
*Yudai HAMANO[1], Keisuke ESHIMA[1]

1. 山口大・理地球圏
1. Yamaguchi Uni. Sci

【はじめに】北部九州には白亜紀花崗岩類（北部九州バソリス）が広く分布しており，岩相や貫入関係などから17~19岩体が認識されている（大和田・亀井, 2010, 日本地方地質誌8, 朝倉書店, 304–311）．近年では，ジルコンU–Pb年代測定を用いた地質年代学的な検討が精力的に進められ，白亜紀北部九州バソリス火成活動の時間軸がより明確になった（Miyazaki et al., 2018, *Int. Geol. Rev.* 61, 649–674；柚原ほか, 2019, 地質雑, 125, 405–420）．また，大規模火成活動と関連する高温変成岩の形成過程や火成テクトニクスに対してもより高解像度の解析が可能になった．一方で，同一岩体から約10Maも異なるジルコンU–Pb年代値が得られるなど，マグマ溜まりの成長過程，結晶化作用および３次元的な組成変化の検討を用いた各岩体単位の解析が必要になってきている．そこで，本研究では北部九州バソリスを構成する朝倉花崗閃緑岩を対象に岩体の組成変化と岩体成長過程を議論する．朝倉岩体は北部九州バソリスを構成する花崗岩体の中では，糸島岩体（約800km²），早良岩体（約450km²）に次いで3番目の露出面積（約300km²）を誇り，他の花崗岩類と貫入関係を持たない独立した岩体である．つまり，岩体成長過程や岩体規模の組成変化を検討する上で最も適した岩体であると言える．しかしながら，朝倉花崗閃緑岩体の先行研究は岩体東部の油須原地域を除くと非常に少なく，議論の余地がある．そのため本研究では，東西約4.5km，南北約9kmの範囲について詳細な地質図を作成し，記載岩石学的検討や全岩化学組成分析などを通して，岩体の南北縦断組成変化と岩体形状を明らかにする．このような検討は，大規模独立深成岩体における組成変化や成長過程のケーススタディーになると考えられる．【地質概説】朝倉花崗閃緑岩体は福岡県南部の朝倉市と嘉麻市を中心に，東西約25km，南北約12kmの範囲に分布し，ジルコンU–Pb年代：98.6±1.3Ma（Miyazaki et al., 2018），98.7±0.6 Ma（柚原ほか, 2023, 地球科学 77, 147–163）および黒雲母K–Ar年代：95.2±4.8Ma（村上, 1988, 別府大学紀要, 30, 10–17）が報告されている．本調査地の南北には周防変成岩類が母岩として分布し，朝倉花崗閃緑岩が貫入する．南部の泥質変成岩中には結晶質石灰岩が分布しており，標高859.4ｍの古処山山頂部に露出する．北部には古第三紀や第四紀の堆積岩が分布する．朝倉花崗閃緑岩には大型の角閃石結晶（最大粒径約3cm）が観察され，北部九州バソリスを構成する花崗閃緑岩類と同様の特徴を持つ．また，一部の岩相では角閃石と斜長石結晶が定向配列し，流理構造を示す．さらに，貫入母岩である周防変成岩類（泥質変成岩）は，230～160Maに高圧の変成作用を受けたのちに，朝倉花崗閃緑岩体の貫入によって接触変成作用を被られている（北野ほか, 2012, 地質雑, 118, 801–809）．【岩石記載】朝倉花崗閃緑岩は稀にMMEを含み，優白質岩脈やペグマタイトが産する．花崗閃緑岩は中粒～粗粒で，半自形粒状組織を示し，自形の大型角閃石の斑晶を含む．主に斜長石，角閃石，黒雲母，石英およびアルカリ長石で構成され，副成分鉱物として緑泥石と緑簾石を含む．また，花崗閃緑岩体内部において細粒黒雲母花崗岩の分布が確認された．細粒黒雲母花崗岩は主に石英，斜長石，アルカリ長石および黒雲母で構成され，朝倉花崗閃緑岩に比べ，細粒緻密な岩石である．一方，貫入母岩である周防変成岩類は調査範囲の南北で異なり，北側は角閃岩，南側では泥質変成岩が卓越する．角閃岩は主に角閃石，斜長石および石英で構成され，南側の泥質変成岩は主に黒雲母，斜長石，アルカリ長石および石英で構成される．花崗閃緑岩と変成岩との境界では，片理に対して調和的な境界と非調和的な境界がみられたほか，境界部では急冷周縁相や花崗閃緑岩中に取り込まれる変成岩ゼノリスが確認された．南部の泥質変成岩は微褶曲しており，境界部付近にかけて北から南に傾斜角が変化する．【岩体の成長過程】朝倉花崗閃緑岩は，ゼノリスの存在や貫入形態から，母岩のストーピングを伴いながら貫入したと考えられる．また，朝倉花崗閃緑岩体内において

は，結晶分化作用により細粒黒雲母花崗岩を形成したほか，アプライトなどの優白質岩が朝倉花崗閃緑岩に貫入したことが示唆された．今後は全岩化学組成分析などを行い，岩体内における岩体の周縁部から中心部にかけての構成鉱物の化学的な変化や母岩物質による影響などに着目し，さらなる岩体の成長過程について研究を進めていきたい．

キーワード：白亜紀、北部九州バソリス、花崗閃緑岩、岩相変化、岩体成長過程
Keywords: Cretaceous, Northern Kyushu batholith, Granodiorite, Lithofacies change, Growth processes

福岡県東部に産する花崗岩–花崗閃緑岩の貫入関係と岩相区分

Intrusive relationship and lithofacies classification of Granite–Granodiorite in Eastern Fukuoka Prefecture

*中村 領[1]、江島 圭祐[1]
*Ryo Nakamura[1], Keisuke Eshima[1]

1. 山口大学
1. Yamaguchi University

【はじめに】北部九州には白亜紀花崗岩類が広く分布し, 岩相や貫入関係から17～19岩体が認識されている（大和田ほか, 1999, 地質学論集 53, 349–363; 柚原ほか, 2019, 地球科学 73, 163–178）．また, 小倉–田川構造線を境界にその東側と西側では岩石化学的特徴（特に, Sr含有量）が異なり（井沢ほか, 1994, 西南学院大児童教育学論集 20, 21–54）, 構造線より西側に分布する花崗岩類を「北九州主部花崗岩類」, 東側に分布する花崗岩類を「北九州西部花崗岩類」（唐木田, 1992, 日本の地質9 九州地方, 85–89; 大和田・亀井, 2010, 日本地質学会編, 日本地方地質誌8 九州・沖縄地方, 304–311）と区別して議論される場合がある．北部九州主部花崗岩類に関してはこれまで多くの岩石学的な検討がなされてきたが, 北部九州東部花崗岩類の研究例（柚原ほか, 2019, 地球科学 73, 163-–178）は数少なく, 未だ貫入関係や岩相区分などの基本的情報も不明瞭な点が多い．白亜紀北部九州バソリスの火成活動を包括的に理解するためには北部九州東部花崗岩類の岩石学的検討の蓄積が非常に重要である．このような背景から近年, 北部九州東部花崗岩類を対象にジルコンU–Pb年代測定を用いた地質年代学的検討が精力的に進められ, 包括的な貫入関係図が確立された（例えば, 柚原ほか, 2023, 地球科学 77, 147–163）．しかしながら, 直接的な貫入関係を示す野外地質学的証拠は少ないほか, 貫入関係や岩相区分に関しても様々な見解があり（村上・藤本, 1957, 岩石鉱物鉱床学会誌41, 164–171; 村上, 1994, 西南学院大児童教育学論集 20, 21–54; 唐木田, 1985, 日本応用地質学会 九州支部会報 6, 2–12）, 議論の余地がある．そこで, 本研究では福岡県赤村からみやこ町にかけて露出する北部九州東部花崗岩類を対象に野外地質学的検討を主として貫入関係と岩相区分を再検討することを目的とする．また, 複数の花崗岩体が複雑に分布する地域において各花崗岩体と母岩との構造関係を明確にし, 複合岩体の３次元的な貫入関係も考察する．

【地質概説・岩石記載】本調査地域の地質は白亜紀に形成した落合花崗閃緑岩, 朝倉花崗閃緑岩, 油須原花崗岩および真崎花崗岩の４つの花崗岩体から構成され, 中新世後期～鮮新世前期の坂本累層が真崎花崗岩と油須原花崗岩を不整合に覆う．石英閃緑岩は南東側に小規模岩体として存在する．真崎花崗岩は半自形粒状～斑状組織を示し, 主構成鉱物として石英, アルカリ長石, 斜長石および黒雲母で構成される粗粒な岩石である．また, 斑状組織の岩相では一般に石英とアルカリ長石が斑晶鉱物となる．一方で, 油須原花崗岩は真崎花崗岩と同様の鉱物組み合わせを持つが, 細粒かつ塊状の岩相が特徴である．朝倉花崗閃緑岩は半自形粒状～斑状組織を示し, 主構成鉱物として斜長石, 黒雲母, 角閃石および石英で構成される．また, 稀に黒雲母や角閃石の集斑状組織が確認される．

【各花崗岩体の岩石学的特徴と貫入関係】複合岩体を構成する花崗岩体の中には苦鉄質の同時性岩脈やMMEが確認される．同時性岩脈は真崎花崗岩と油須原花崗岩中でしばしば確認されるが，朝倉花崗閃緑岩と落合花崗閃緑岩には少ない．が, そのほとんどは真崎花崗岩でみられる．油須原花崗岩は苦鉄質岩脈みられるが, MMEはほとんど確認されない．朝倉花崗閃緑岩は苦鉄質岩脈やMMEは見られない．また, 本地域に分布する朝倉花崗閃緑岩赤岩体は朝倉市周辺に分布する朝倉花崗閃緑岩本岩体と異なり, 一部斑状組織を示す岩相をもつ．油須原花崗岩は真崎花崗岩と朝倉花崗岩閃緑岩を貫入し, 優白質花崗岩に貫入される（柚原ほか, 2023）とされているが朝倉花崗閃緑岩赤岩体と油須原花崗岩が混合している産状が確認された. 朝倉花崗岩閃緑岩赤岩体の形成年代は98.7±0.6Ma（柚原ほか, 2023）, 油須原花崗岩の活動形成年代98.6±0.9Ma（柚原ほか, 2022, 地球科学, 第76, 87–104）であり, 両岩体の形成年代は誤差範囲といえる. これらより両岩体は同時性であったと考えられる. また, 真崎花崗岩にルーフ状に接する油須原花崗岩の産状が確認された. このように

油須原花崗岩と真崎花崗岩の貫入関係やその前後関係は複雑である．現状の各岩体の貫入関係は, 落合花崗閃緑岩, 真崎花崗岩, 油須原花崗岩および朝倉花崗閃緑岩赤岩体（油須原花崗岩と朝倉花崗閃緑岩赤岩体同時期）の貫入順序であると推察される．今後の目標としては貫入関係をさらに明確化し, 苦鉄質岩脈や石英閃緑岩の活動時期を考察する．

キーワード：深成岩、白亜紀、複合岩体、貫入関係、マグマ混合
Keywords: plutonic rock, Cretaceous , plutonic complex, intrusive relationship, magma mixing

花崗岩中の石英の結晶化プロセス：九州の大崩山花崗岩体のマグマ溜りプロセスの理解

Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan

*湯口 貴史[1]、加藤 丈典[4]、小北 康弘[2]、渡邊 みのり[6]、加藤 あすか[6]、伊藤 大智[6]、横山 立憲[2]、坂田 周平[3]、大野 剛[5]
*Takashi YUGUCHI[1], Takenori Kato[4], Yasuhiro Ogita[2], Minori Watanabe[6], Asuka Kato[6], Daichi Itoh[6], Tatsunori Yokoyama[2], Shuhei Sakata[3], Takeshi Ohno[5]

1. 熊本大学、2. 原子力機構、3. 東京大学・地震研、4. 名古屋大学、5. 学習院大学、6. 山形大学
1. Kumamoto University, 2. JAEA, 3. Uni. Tokyo ERI, 4. Nagoya University, 5. Gakushuin University, 6. Yamagata University

石英は珪長質深成岩中に普遍的に含有される鉱物である。このため，石英の結晶化プロセス（結晶の内部構造や温度条件などの結晶化の際の情報）は，花崗岩質マグマの貫入・定置に関するマグマ溜りプロセスの情報を保存する。本研究では宮崎県の大崩山花崗岩体の石英の結晶化プロセスを解明することを目的とする。1つの珪長質の深成岩体において，その岩体内部の異なる岩相においても石英はしばしば共通して産出する。本研究で対象とする大崩山花崗岩体は鉛直方向において上方の珪長質の黒雲母花崗岩から，ホルンブレンド黒雲母花崗岩を経て，下方の苦鉄質のホルンブレンド黒雲母花崗閃緑岩へと変化するが，そのいずれでも石英は観察される。このため，複数の岩相の石英から温度条件などの結晶化の際の情報を取得し，結晶化プロセスを解明することは，深成岩体全体のマグマ溜りプロセスの把握へと発展可能である。本研究では石英の結晶化プロセスの解明に，カソードルミネッセンス（CL）像およびチタン（Ti）濃度を組み合わせる方法を用いる。CL像は，結晶構造の乱れや結晶中の微量な含有成分（不純物）を反映するため，結晶成長の様式と関連付けることが可能である（例えば，Drivenes et al., 2016）。石英中のTi濃度は石英の結晶化温度の推定に利用できる（例えば，Wark and Watson, 2006）。本研究は，1）薄片による石英結晶の観察，2）分離した石英の複数断面による観察の2つのアプローチにより，マグマ溜りの中の石英結晶の石英粒の三次元的な内部構造と成長特性を明らかにした。薄片中のジルコンを包有する石英は，ジルコンの結晶化に続いて石英の結晶化が生じたことを示す。このことは，冷却中のマグマ溜りの中で石英の結晶化温度はジルコンの結晶化温度よりも低温であるという制約を与える。このような岩石学的な制約により，適切な地質温度計の採用が可能となり，正確な石英の結晶化温度の決定が可能となった。分離した石英結晶の複数断面を用いた観察により，結晶粒子内の三次元内部構造と真の結晶化の開始地点が取得できる。花崗岩体内の岩相間のCL特性や結晶化温度の違いは，時空間的なマグマ溜りプロセスの解明に貢献する。なお，本研究は名古屋大学宇宙地球環境研究所・一般共同研究プログラムおよび科研費・基盤研究B〔21H01865〕の支援のもと実施された。また，ジルコンのデータは経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成31-令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」（JPJ007597）の成果の一部である。

キーワード：石英、カソードルミネッセンス、TitaniQ温度計、大崩山花崗岩体、Ti-in-zircon温度計
Keywords: Quartz, Cathodoluminescence, TitaniQ thermometer, Okueyama granite, Ti-in-zircon thermometer

愛媛県芸予諸島大島に分布する“大島石”に記録された花崗岩質マグマ溜まりの分化プロセス

Differentiation Processes of Granitic Magma Chamber Recorded in 'Oshima-ishi' Distributed in Oshima, Geiyo islands, Ehime Prefecture

*下岡 和也[1,2]、青野 荘一郎[2]、大西 隆仁[2]、福井 堂子[2]、壷井 基裕[1]、高橋 俊郎[3]、齊藤 哲[2]
*Kazuya SHIMOOKA[1,2], Soichiro AONO[2], Takahito ONISHI[2], Toko FUKUI[2], Motohiro TSUBOI[1], Toshiro TAKAHASHI[3], Satoshi SAITO[2]

1. 関西学院大学、2. 愛媛大学、3. 新潟大学
1. Kwansei Gakuin Univ., 2. Ehime Univ., 3. Niigata Univ.

分化した組成を示す花崗岩質マグマの生成プロセスは，活動的大陸縁における大陸地殻の成長・成熟プロセスを考える上で重要な情報である。西南日本内帯には白亜紀に形成された花崗岩類が広く分布している。これらの分布は当時の最も海溝側に位置しており，白亜紀の活動的大陸縁における大陸地殻の成長・成熟過程を記録していると考えられる。また，これらの地域には花崗岩中にしばしば同時性の苦鉄質岩脈や苦鉄質包有岩（MME）がみられ，花崗岩質マグマ溜まりプロセスにおいて苦鉄質マグマが関与したことを示唆している。しかしながら，苦鉄質マグマに関連した花崗岩質マグマの分化プロセスについては不明な点が多い。

愛媛県芸予諸島大島北部には花崗岩石材として知られる“大島石”が分布する。本研究では，この“大島石”とそれらに伴って産出する閃緑岩について記載岩石学研究，鉱物化学組成分析，全岩主要微量元素組成分析を行い，その分化プロセスについて議論した。

大島北部に分布する花崗岩類は記載岩石学的特徴から，大島Ⅰ型と大島Ⅱ型に区分できる。これらは，大島Ⅱ型が大島Ⅰ型を胚胎するような累帯深成岩体様の分布域を示し，両者の境界は漸移的である。大島Ⅰ型は優白質塊状で部分的にペグマタイトを伴う。一方で，大島Ⅱ型は大島Ⅰ型と比較するとわずかに優黒質であり，岩体周縁部では閃緑岩質なMMEや黒雲母からなるクロットが特徴的に含まれる。鉱物化学組成分析では，閃緑岩と大島Ⅰ型において，黒雲母のMg#（Mg# = Mg/(Mg+Fe)）がそれぞれ0.26～0.30と0.15～0.18の異なる値を示した。全岩化学組成分析では，大島Ⅰ型と大島Ⅱ型において主要元素含有量（TiO_2, MnO, MgO, CaO, Na_2O, P_2O_5）およびMgO/(FeO + MgO) (mol比)，CaO/(CaO + NaO) (mol比)で両者に有意な差が認められ，多くの元素がハーカー図上で異なる組成トレンドを示した。燐灰石飽和温度計(Harrison and Watson, 1984, Geochim. Cosmochim. Acta)を用いた温度推定では，大島Ⅰ型が870～890 ℃，大島Ⅱ型が890～920 ℃であり，大島Ⅱ型がより高い飽和温度を示した。大島Ⅱ型はMMEやクロットなどの苦鉄質マグマとのミキシングを示唆する産状（Hibbard, 1995, Prentice Hall）を示しており，燐灰石飽和温度計による温度見積もりと整合的である。

大島Ⅰ型と大島Ⅱ型および閃緑岩の示すこれらの岩石学的特徴は，閃緑岩質マグマからの結晶分化による連続的な岩相変化を支持せず，むしろ，閃緑岩質マグマによる花崗岩質マグマの加熱およびマグマ混合による大島Ⅱ型の形成とその際のメルトの絞り出しによる大島Ⅰ型の形成を示唆する。

謝辞　NPO法人能島の里村上利雄氏，大島石協同組合組合長小田信喜氏をはじめ大島石の丁場の皆様には大島における野外調査において多大なるご協力をいただいた。記して感謝申し上げる。

キーワード：大島石、白亜紀花崗岩類、分化プロセス、苦鉄質マグマ、芸予諸島大島
Keywords: Oshima-ishi, Cretaceous granitoids, Differentiation Processes, Mafic magma, Oshima, Geiyo islands

一般普及講演

2024年9月14日(土) 15:30 ~ 17:00 | ESホール 東山キャンパス

一般普及講演

15:30 ~ 17:00

[3Lecture-1-1530-1add] 一般普及講演

一般普及講演

一般普及講演

2024年9月14日(土) 15:30 〜 17:00 ESホール (東山キャンパス)

15:30 〜 17:00

[3Lecture-1-1530-1add]一般普及講演

©日本鉱物科学会