

## 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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、山下 茂<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、高橋 栄一<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>1</sup>、無盡 真弓<sup>1</sup>、新谷 直己<sup>1</sup>、澤 燦道<sup>1</sup>、中谷 貴之<sup>2</sup>、隅田 まり<sup>3</sup>、Schmincke Hans-Ulrich<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、下岡 和也<sup>2</sup>、福井 堂子<sup>1</sup>、斉藤 哲<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、櫻井 亮輔<sup>3</sup>、無盡 真弓<sup>2</sup>、新谷 直己<sup>2</sup>、竹内 晋吾<sup>4</sup>、諏訪 由起子<sup>5</sup> (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<sup>1</sup>、奥村 聡<sup>1</sup>、佐久間 博<sup>2</sup> (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<sub>2</sub>O飽和斜長石リキダスからの制約\*石橋 秀巳<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>(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<sup>2+</sup>とFe<sup>3+</sup>の四極子ダブルレットピークの強度テンソル

\*篠田 圭司<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup>(1. 大工大・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 太郎<sup>1</sup>、鈴木 庸平<sup>1</sup>(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<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup>、久永 美生<sup>1</sup>、山本 正博<sup>1</sup>(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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup>(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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup>(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<sup>1</sup>(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<sub>2</sub>O<sub>4</sub>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<sup>1</sup>、河野 義生<sup>2,3</sup>、Gréaux Steeve<sup>3</sup>、Drewitt James W E<sup>4</sup>、Jahn Sandro<sup>5</sup>、則竹 史哉<sup>6</sup>、尾原 幸浩<sup>7,8</sup>、廣井 慧<sup>7,8</sup>、近藤 望<sup>9</sup>、Hrubiak Rostislav<sup>10</sup>、肥後 祐司<sup>8</sup>、辻野 典秀<sup>8</sup>、柿澤 翔<sup>8</sup>、新田 清文<sup>8</sup>、関澤 央輝<sup>8</sup> (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<sub>2</sub>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」

\*早船 紫野<sup>1</sup>、小野寺 陽平<sup>2</sup>、小原 真司<sup>2</sup>、市川 晴貴<sup>3</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、舟越 賢一<sup>4</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup> (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)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>高圧相ポワリエライトの存在可能性

\*富岡 尚敬<sup>1</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup>、Purevjav Narangoo<sup>3</sup>、宮原 正明<sup>4</sup> (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<sup>1,2</sup>、濱田 雄士<sup>2</sup>、嘉屋 華恵<sup>2</sup>、江木 祐介<sup>1</sup>、前田 大地<sup>1</sup>、山口 和貴<sup>1</sup>、山田 晃之亮<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1,2</sup> (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<sup>3+</sup>/ΣFe比の温度依存性の解明

「発表賞エントリー」

\*山口 和貴<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1</sup>、井上 徹<sup>1</sup>、富岡 尚敬<sup>2</sup> (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<sup>1</sup> (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<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O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<sup>1</sup>、石井 貴之<sup>2</sup>、西原 遊<sup>1</sup>、松影 香子<sup>3</sup>、肥後 祐司<sup>4</sup>、辻野 典秀<sup>4</sup>、柿澤 翔<sup>4</sup> (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<sub>2</sub>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<sup>1,2</sup>、村上 元彦<sup>2</sup>、芳野 極<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、仁木 創太<sup>2</sup>、飯塚 毅<sup>3</sup>、平田 岳史<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、大田 隼一郎<sup>1,2</sup>、安川 和孝<sup>1</sup>、中村 謙太郎<sup>2,1</sup>、加藤 泰浩<sup>1,2</sup> (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<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、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<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>1</sup>、市山 祐司<sup>2</sup>、森下 知晃<sup>3</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、山下 浩之<sup>4</sup>、針金 由美子<sup>5</sup>、小原 泰彦<sup>6,7,8</sup> (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<sup>1</sup>、Takehiro Hirose<sup>1</sup>、Jun-ichi Ando<sup>2</sup>、Kaushik Das<sup>2</sup>、Gautam Ghosh<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、村尾 玲子<sup>2</sup>、高山 透<sup>2</sup> (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」

\*石寄 拓海<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、江島 輝美<sup>2</sup>、昆 慶明<sup>3</sup>、南澤 比佳理<sup>4</sup>、堀田 将臣<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、米谷 珠萌<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、新名 良介<sup>2</sup>、大坂 恵一<sup>4</sup>、山崎 慎一<sup>1</sup>、宇野 正起<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup> (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<sup>1,2</sup>、廣瀬 重信<sup>1</sup>、常 青<sup>1</sup>、羽生 毅<sup>1</sup>、長谷部 徳子<sup>2</sup>、星野 靖<sup>3</sup>、加美山 隆<sup>4</sup>、川村 洋史<sup>1</sup>、村瀬 孔大<sup>5</sup>、中 竜大<sup>6</sup>、小國 健二<sup>1</sup>、鈴木 勝彦<sup>1</sup>、山崎 誠子<sup>7</sup> (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<sup>1</sup>、乙 星華<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、三宅 亮<sup>1</sup>、下林 典正<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、安井 万奈<sup>2</sup>、石橋 純一郎<sup>3</sup>、萩谷 宏<sup>4</sup>、島田 和彦<sup>1</sup>、山崎 淳司<sup>2</sup> (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 聡<sup>1</sup>、門馬 綱一<sup>1</sup>、柳澤 教雄<sup>2</sup>、草葉 陽子<sup>1</sup>、徳本 明子<sup>1</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、Missen Owen<sup>2</sup>、Mills Stuart<sup>3</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup>、松原 聡<sup>1</sup>、大谷 栄治<sup>4</sup>、鎌田 誠司<sup>5</sup>、小澤 信<sup>4</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、増野 いづみ<sup>2</sup>、松井 亮介<sup>1</sup>、石田 遼真<sup>1</sup>、近藤 忠<sup>1</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、生田 大穰<sup>2</sup>、福井 宏之<sup>3,4</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、石川 大介<sup>3,4</sup>、バロン アルフレッド<sup>3,4</sup> (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<sup>1</sup> (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: 瀬瀬 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<sup>1</sup>、永治 方敬<sup>1</sup>、伊藤 泰輔<sup>2</sup>、ウォリス サイモン<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>, Nobuhiko Nakano<sup>1</sup>, Tatsuro Adachi<sup>1</sup>, Nugroho Imam Setiawan<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、高見澤 駿<sup>1</sup>、伊藤 久敏<sup>2</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、森下 知晃<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、藤村 祐花<sup>1</sup>、小寺 勇氣<sup>1</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、安東 淳一<sup>1,2</sup>、Das Kaushik<sup>1,2</sup>、Sarkar Dyuti Prakash<sup>3</sup> (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 峻右<sup>1</sup>、瀬瀬 佑衣<sup>1</sup>、高橋 聡<sup>1</sup> (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

\*瀬瀬 佑衣<sup>1</sup>、清水 以知子<sup>2</sup> (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<sup>1,2</sup>、道林 克禎<sup>1,3</sup>、谷 健一郎<sup>4</sup>、西村 拓真<sup>5</sup> (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<sup>1</sup>、苗村 康輔<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup> (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一歪測定

「招待講演」

\*辻野 典秀<sup>1</sup> (1. 高輝度光科学研究センター)

15:50 ~ 16:05

[S3-02]  $\epsilon$ -FeOOHの変形誘起選択配向\*西原 遊<sup>1</sup>、森 ゆい<sup>1</sup>、呉 文天<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、久保 友明<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup>、肥後 祐司<sup>2</sup>、柿澤 翔<sup>2</sup>、柴崎 裕樹<sup>3</sup>、西原 遊<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、Christine McCarthy<sup>1</sup>、Benjamin Holtzman<sup>1</sup>、David Goldsby<sup>2</sup>、Travis Hager<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、平賀 岳彦<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2,3</sup>、伊神 洋平<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、夏目 樹<sup>2</sup>、道林 克禎<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、田阪 美樹<sup>1</sup>、栗原 圭佑<sup>1</sup>、谷内 元<sup>2</sup>、川本 竜彦<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、片山 郁夫<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2</sup>、松山 和樹<sup>2</sup> (1. 広島大学、2. 名古屋大学)

## 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 | 会場 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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、山下 茂<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、高橋 栄一<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>1</sup>、無盡 真弓<sup>1</sup>、新谷 直己<sup>1</sup>、澤 燦道<sup>1</sup>、中谷 貴之<sup>2</sup>、隅田 まり<sup>3</sup>、Schmincke Hans-Ulrich<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、下岡 和也<sup>2</sup>、福井 堂子<sup>1</sup>、斉藤 哲<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、櫻井 亮輔<sup>3</sup>、無盡 真弓<sup>2</sup>、新谷 直己<sup>2</sup>、竹内 晋吾<sup>4</sup>、諏訪 由起子<sup>5</sup> (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<sup>1</sup>、奥村 聡<sup>1</sup>、佐久間 博<sup>2</sup> (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<sub>2</sub>O飽和斜長石リキダスからの制約\*石橋 秀巳<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、山下 茂<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup>

\*Naoko TAKAHASHI<sup>1</sup>, Michihiko Nakamura<sup>2</sup>, Shigeru Yamashita<sup>3</sup>, Hiroyuki Kagi<sup>1</sup>

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・マンツルのプロセスを解説し、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、マンツ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.,  $[\text{WO}_4]^{2-}$ 、 $[\text{HWO}_4]^-$ )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 °C、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<sup>13</sup>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<sup>~</sup>8の0.1 m [mol/kg H<sub>2</sub>O] Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>水溶液はタングステン酸イオン $[\text{WO}_4]^{2-}$ のW=O対称伸縮振動に起因する930 cm<sup>-1</sup>付近のラマンピークを示すが、約400 °Cで950 cm<sup>-1</sup>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<sup>~</sup>2の0.1 m Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>水溶液でも同様に約400 °C以上で950 cm<sup>-1</sup>付近のピークが優勢になることがわかった。さらに、WO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O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<sup>-1</sup>と975 cm<sup>-1</sup>付近のピークが500 °C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、 $[\text{W}_7\text{O}_{24}]^{6-}$ ) 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<sup>1</sup>、高橋 栄一<sup>2</sup>

\*Yuto SATO<sup>1</sup>, Eiichi Takahashi<sup>2</sup>

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ブ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<sub>2</sub>O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<sub>2</sub>O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 °C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。

● 下層は細粒なタピ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。

● 最下層は細粒なタピ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。

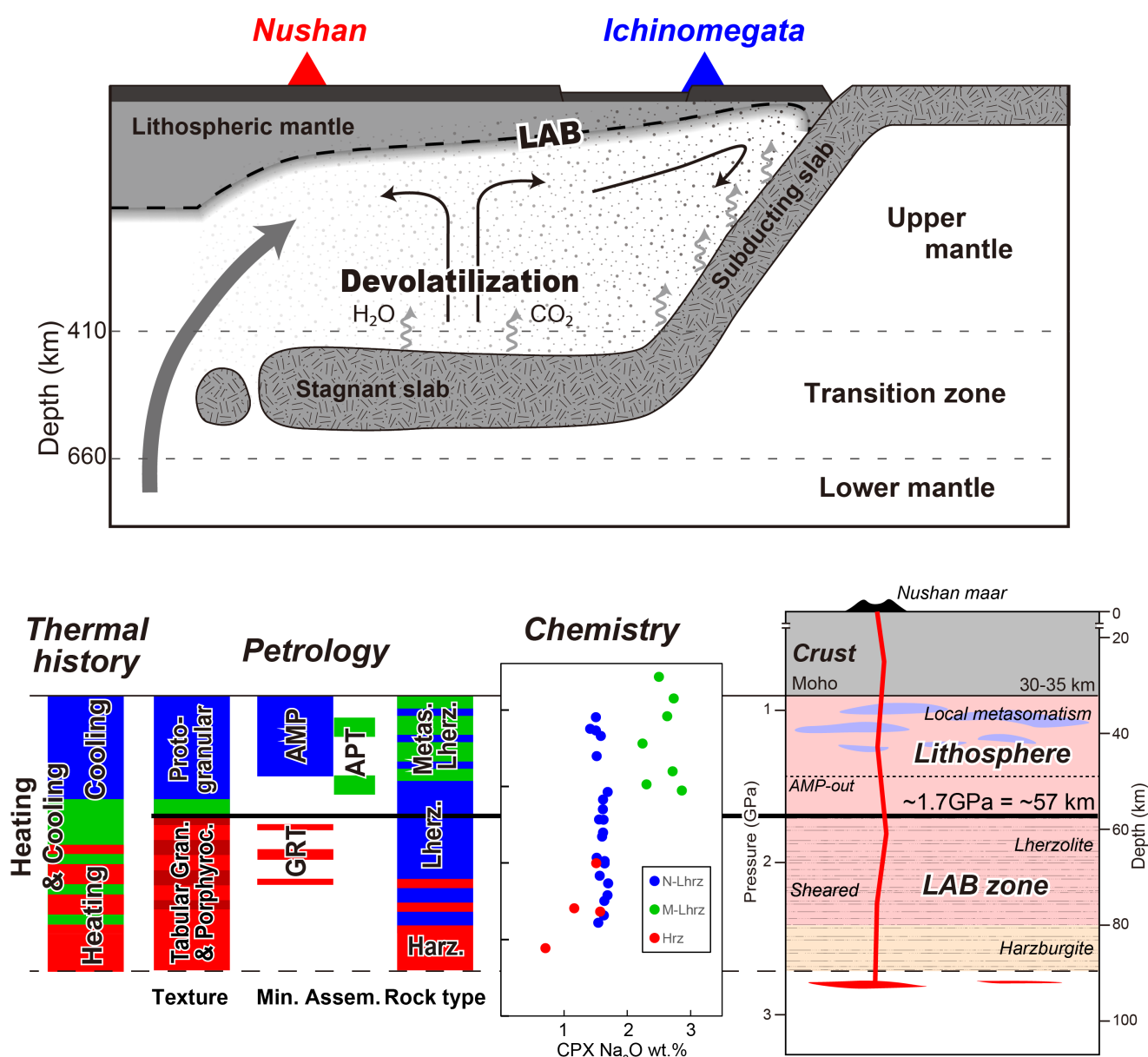
FTIRを用いて分析した女山産捕獲岩のカンラン石に含まれる水は3571、3522、3229cm<sup>-1</sup>に主要な

ピークを示し、前二者がTi-clinohumiteに類似した欠陥 ( $\text{MgTiH}_2\text{O}_4$ ) に、後者がMgサイトの欠陥 ( $\text{MgH}_2\text{SiO}_4$ ) に帰属する。Fe<sup>3+</sup>に関連した欠陥に由来する3355、3327  $\text{cm}^{-1}$ 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( $\Delta\text{FMQ}$  -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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>1</sup>、無盡 真弓<sup>1</sup>、新谷 直己<sup>1</sup>、澤 燦道<sup>1</sup>、中谷 貴之<sup>2</sup>、隅田 まり<sup>3</sup>  
、Schmincke Hans-Ulrich<sup>3</sup>

\*Masanari Arai<sup>1</sup>, Michihiko Nakamura<sup>1</sup>, Mayumi Mujin<sup>1</sup>, Naoki Araya<sup>1</sup>, Sando Sawa<sup>1</sup>, Takayuki Nakatani<sup>2</sup>, Mari Sumita<sup>3</sup>, Hans-Ulrich Schmincke<sup>3</sup>

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、地殻の破碎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<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>流体による水圧破碎で破碎されたのち、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。CO<sub>2</sub>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碎を行い、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、水圧破碎

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<sup>1</sup>、下岡 和也<sup>2</sup>、福井 堂子<sup>1</sup>、斉藤 哲<sup>1</sup>

\*Taichi Kawashima<sup>1</sup>, Kazuya Shimooka<sup>2</sup>, Toko Fukui<sup>1</sup>, Satoshi Saito<sup>1</sup>

1. 愛媛大、2. 関西学院大

1. Ehime Univ., 2. Kwansai 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压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<sub>2</sub>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<sup>1</sup>、中村 美千彦<sup>2</sup>、櫻井 亮輔<sup>3</sup>、無盡 真弓<sup>2</sup>、新谷 直己<sup>2</sup>、竹内 晋吾<sup>4</sup>、諏訪 由起子<sup>5</sup>

\*Natsuko Sekiya<sup>1</sup>, Michihiko Nakamura<sup>2</sup>, Ryosuke Sakurai<sup>3</sup>, Mayumi Mujin<sup>2</sup>, Naoki Araya<sup>2</sup>, Shingo Takeuchi<sup>4</sup>, Yukiko Suwa<sup>5</sup>

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で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-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、 $1.016 \times 10^{-15}$ - $2.588 \times 10^{-15}$  (m<sup>2</sup>),  $4.885 \times 10^{-15}$ - $1.321 \times 10^{-14}$  (m<sup>2</sup>)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

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<sup>1</sup>、奥村 聡<sup>1</sup>、佐久間 博<sup>2</sup>

\*Ryota Mamizuka<sup>1</sup>, Satoshi Okumura<sup>1</sup>, Hiroshi Sakuma<sup>2</sup>

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 (シアニング) 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いない。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<sub>4</sub>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アニングを誘発し、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<sub>2</sub>メルトのリング構造変化を調べ、リング構造変化がシアニングと破壊の起源となるのか明らかにすることを目的としている。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<sub>2</sub>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 $9.0 \times 10^{15}$  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 $0.001 \text{ ps}^{-1}$ 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 $2023 \pm 370 \text{ K}$ 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ア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、シア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、構造とシア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<sub>2</sub>O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<sub>2</sub>O-saturated plagioclase liquidus\*石橋 秀巳<sup>1</sup>\*Hidemi ISHIBASHI<sup>1</sup>

1. 静岡大学

1. Shizuoka University

伊豆大島は、近1500年間に $6.4 \times 10^9$ 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<sub>2</sub>～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<sub>2</sub>O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压平衡実験(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压平衡実験により，Putirka (2008)の斜長石リキダス温度計とNewman and Lowenstern (2002)のメルトH<sub>2</sub>O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<sub>2</sub>O飽和条件下での斜長石リキダス(H<sub>2</sub>O-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<sub>2</sub>O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0.2-2.6km，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より高压かつ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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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 | 会場 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<sup>1</sup> (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<sup>2+</sup>とFe<sup>3+</sup>の四極子ダブルレットピークの強度テンソル

\*篠田 圭司<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup> (1. 大工大・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 太郎<sup>1</sup>、鈴木 庸平<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup>、久永 美生<sup>1</sup>、山本 正博<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>

\*Takenori KATO<sup>1</sup>

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、

$$I_{PK} = I_{OBS} - I_{BG} \quad (\text{式1})$$

となる。この時、特性X線の強度の誤差は、

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

と表される。ただし、 $\delta X$ 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  $\mu\text{g/g}$ における特性X線強度（ $f_1$ ）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、

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

と表される。検出限界を $C_{DL}$   $\mu\text{g/g}$ 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、

$$(f_1 \cdot C_{DL} + I_2) \cdot it = I_2 it + 3 \cdot (I_2 \cdot it)^{1/2} \quad (\text{式4}) \text{ となる。}$$

$$\text{したがって、} it = 9I_2 / (f_1 \cdot C_{DL})^2 \quad (\text{式5})$$

(例)  $f_1 = 0.001 \text{ cps} \cdot \text{nA}^{-1} \cdot \mu\text{g}^{-1}$  で  $I_2 = 3.2 \text{ cps} \cdot \text{nA}^{-1}$  の場合、

$$it = 2.88 \times 10^7 / C_{DL}^2 \quad (\text{式6})$$

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  $C_T$   $\mu\text{g/g}$  における誤差を  $\delta C_T$  とし、 $\text{RSD} = \delta C_T / C_T$  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 ( $N_{\text{PK}}$ )、バックグラウンドの計数値 ( $N_{\text{BK}}$ ) 及びピークの計数値 ( $N_{\text{OBS}}$ ) はそれぞれ、

$$N_{\text{PK}} = f_1 \cdot C_T \cdot it \quad (\text{式7})$$

$$N_{\text{BK}} = I_2 \cdot it \quad (\text{式8})$$

$$N_{\text{OBS}} = (f_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it \quad (\text{式9})$$

となる。RSD =  $\delta N_{\text{PK}} / N_{\text{PK}}$  として、

$$\text{RSD} = [(f_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it + I_2 \cdot it]^{1/2} / [(f_1 \cdot C_T + I_2) \cdot it - I_2 \cdot it] \quad (\text{式10})$$

となり、

$$it = (f_1 \cdot C_T + 2I_2) / (f_1 \cdot C_T \cdot \text{RSD})^2 \quad (\text{式12})$$

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 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ の四極子ダブルレットピークの強度テンソル

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

\*篠田 圭司<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup>

\*Keiji SHINODA<sup>1</sup>, Yasuhiro Kobayashi<sup>2</sup>, Takuo Okuchi<sup>2</sup>

1. 大工大・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 $\text{MgSiO}_3$ 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、 $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$ を出発物質の一部として用いて、化学組成( $\text{Mg}_{0.88}\text{Fe}^{2+}_{0.05}\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{Al}_{0.03}$ )( $\text{Si}_{0.88}\text{Al}_{0.11}\text{H}_{0.01}$ ) $\text{O}_3$ 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 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ 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 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ はそれぞれ四極子分裂幅が異なるダブルレットピークを示す。四極子分裂ピークは $^{57}\text{Fe}$ 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。四極子分裂ダブル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、 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ の四極子ダブルレット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、 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ の四極子ダブル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、四極子ダブル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 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ の四極子ダブル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 $\text{Fe}^{2+}$ と $\text{Fe}^{3+}$ の四極子ダブル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

## 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 太郎<sup>1</sup>、鈴木 庸平<sup>1</sup>

\*Taro Kido<sup>1</sup>, Yohey Suzuki<sup>1</sup>

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（ $\mu$ FT-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 $\mu$ FT-IRの分析では、 $910\text{ cm}^{-1}$ 、 $1030\text{ cm}^{-1}$ 、 $1110\text{ cm}^{-1}$ 、 $1640\text{ cm}^{-1}$ 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、 $\mu$ FT-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<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup>、久永 美生<sup>1</sup>、山本 正博<sup>1</sup>

\*Hiroshi KITAWAKI<sup>1</sup>, Kentaro Emori<sup>1</sup>, Mio Hisanaga<sup>1</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>1</sup>

1. (株)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™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。

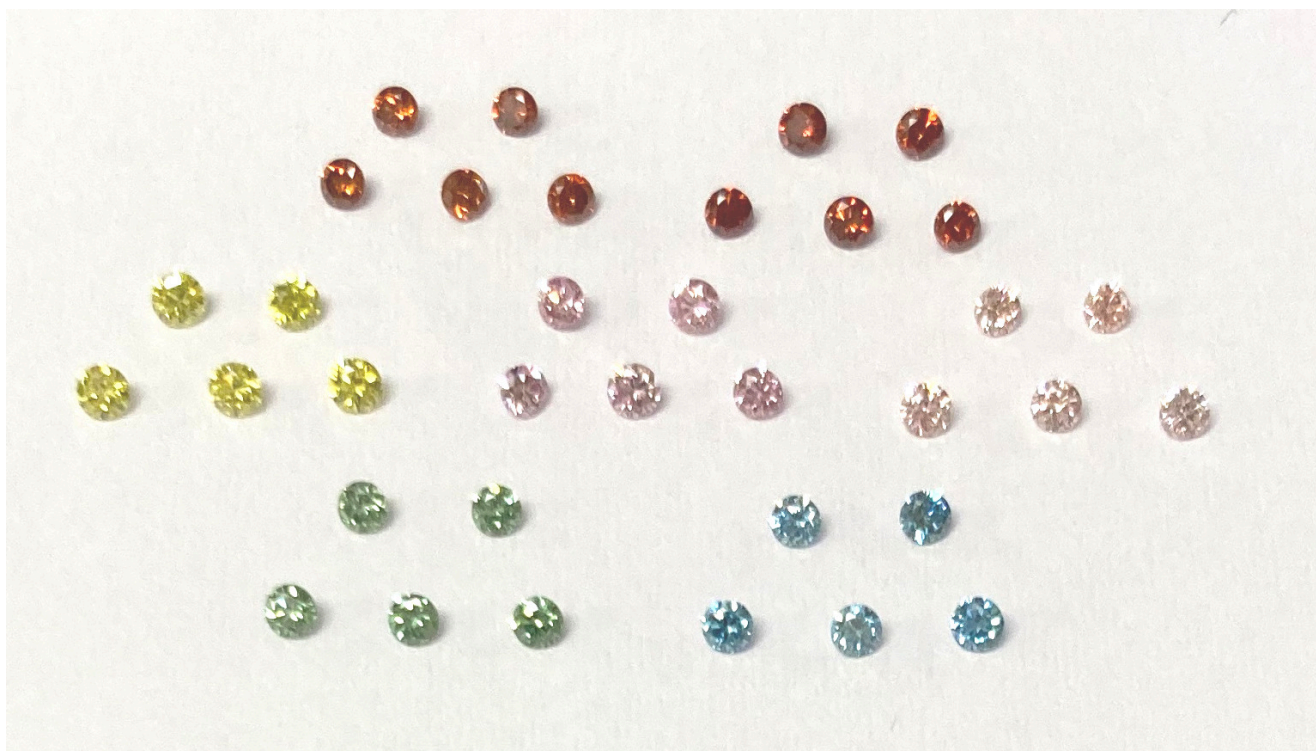
GreenおよびGreenish Blueについては、赤外吸収スペクトルで窒素が検出限界未満であり、紫外-可視吸収スペクトルとPLスペクトルで明瞭な741 nm(GR1)が観察された。また、GreenからはPLスペクトルにてGR1 (741 nm)より強い575 nm ( $NV^0$ )と488.9nm、470.2nm (TR12) が検出された。深紫外線蛍光像の観察でHPHT合成特有の像が得られたが、Greenは黄橙色、Greenish Blueは青緑色の蛍光を呈した。これらのことからGreenおよびGreenish Blueには放射線照射が行われているが、Greenish Blueはさらに低温下（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 $3107\text{cm}^{-1}$ 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の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



---

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

## 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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup>

\*Kentaro Emori<sup>1</sup>, Hiroshi Kitawaki<sup>1</sup>

1. 榊中央宝石研究所

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結果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的に用い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<sup>1</sup>、北脇 裕士<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>1</sup>

\*Zhenghao Zhao<sup>1</sup>, Hiroshi Kitawaki<sup>1</sup>, Kentaro Emori<sup>1</sup>

1. 中央宝石研究所

1. Central Gem Laboratory

エメラルドはベリル ( $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ) の一種であり、 $\text{Al}^{3+}$ を置換する $\text{Cr}^{3+}$ や $\text{V}^{3+}$ 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 $5447\text{ cm}^{-1}$ 付近の金属イオンに影響されていない $\text{H}_2\text{O}$ の吸収が見られる；紫外可視スペクトルに $\text{Fe}^{2+}$ による $830\text{ nm}$ 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 $830\text{ nm}$ 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。

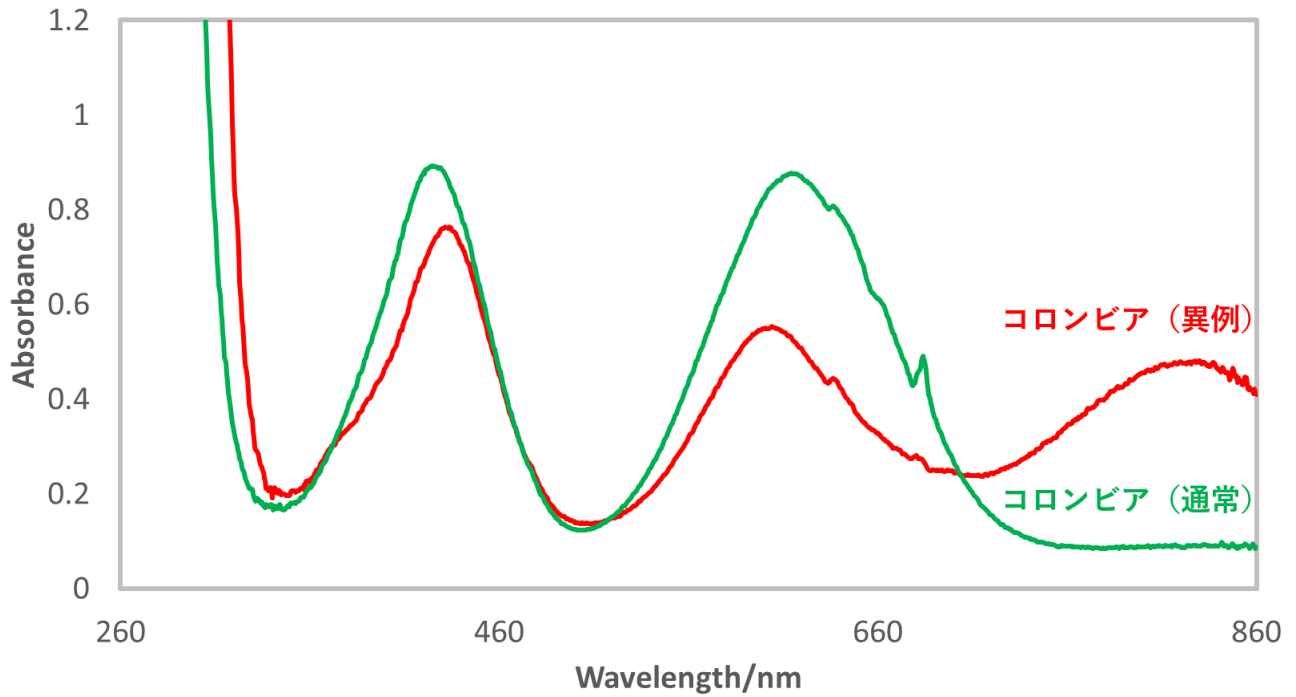
また、同じ原産国であっても採掘される場所や時期により得られる分析結果が異なることもある。例えば、現在国内に流通しているブラジル産エメラルドは主にミナス・ジェライス州産であるが、過去にバイーア州産のものも多く流通していた。両者とも片岩型であるが、それぞれの微量元素に特徴が見られた。しかし、バイーア州で最近採掘されたとされるエメラルドは、過去のものに見られなかった特徴を示し、むしろザンビア産に近似するものであった。このような場合においてもLA-ICP-MSによる微量元素の分析と線形判別分析による解析が極めて有効であることがわかった。

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<sup>1</sup>

\*Ahmadjan ABDURIYIM<sup>1</sup>

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<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>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メントルに由来し、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、<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>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して推定される。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 | 会場 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<sub>2</sub>O<sub>4</sub>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<sup>1</sup>、河野 義生<sup>2,3</sup>、Gréaux Steeve<sup>3</sup>、Drewitt James W E<sup>4</sup>、Jahn Sandro<sup>5</sup>、則竹 史哉<sup>6</sup>、尾原 幸浩<sup>7,8</sup>、廣井 慧<sup>7,8</sup>、近藤 望<sup>9</sup>、Hrubiak Rostislav<sup>10</sup>、肥後 祐司<sup>8</sup>、辻野 典秀<sup>8</sup>、柿澤 翔<sup>8</sup>、新田 清文<sup>8</sup>、関澤 央輝<sup>8</sup> (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<sub>2</sub>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」

\*早船 紫野<sup>1</sup>、小野寺 陽平<sup>2</sup>、小原 真司<sup>2</sup>、市川 晴貴<sup>3</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、舟越 賢一<sup>4</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup> (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)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>高圧相ポワリエライトの存在可能性

\*富岡 尚敬<sup>1</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup>、Purejav Narango<sup>3</sup>、宮原 正明<sup>4</sup> (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<sup>1,2</sup>、濱田 雄士<sup>2</sup>、嘉屋 華恵<sup>2</sup>、江木 祐介<sup>1</sup>、前田 大地<sup>1</sup>、山口 和貴<sup>1</sup>、山田 晃之亮<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1,2</sup> (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<sup>3+</sup>/ΣFe比の温度依存性の解明

「発表賞エントリー」

\*山口 和貴<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1</sup>、井上 徹<sup>1</sup>、富岡 尚敬<sup>2</sup> (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<sup>1</sup> (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<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O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<sup>1</sup>、石井 貴之<sup>2</sup>、西原 遊<sup>1</sup>、松影 香子<sup>3</sup>、肥後 祐司<sup>4</sup>、辻野 典秀<sup>4</sup>、柿澤 翔<sup>4</sup> (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<sub>2</sub>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<sup>1,2</sup>、村上 元彦<sup>2</sup>、芳野 極<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup> (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<sub>2</sub>O<sub>4</sub>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<sub>2</sub>O<sub>4</sub> glass revealed by elastic wave velocity and X-ray diffraction measurements and molecular dynamics simulations

\*大平 格<sup>1</sup>、河野 義生<sup>2,3</sup>、Gréaux Steeve<sup>3</sup>、Drewitt James W E<sup>4</sup>、Jahn Sandro<sup>5</sup>、則竹 史哉<sup>6</sup>、尾原 幸浩<sup>7,8</sup>、廣井 慧<sup>7,8</sup>、近藤 望<sup>9</sup>、Hrubiak Rostislav<sup>10</sup>、肥後 祐司<sup>8</sup>、辻野 典秀<sup>8</sup>、柿澤 翔<sup>8</sup>、新田 清文<sup>8</sup>、関澤 央輝<sup>8</sup>

\*Itaru Ohira<sup>1</sup>, Yoshio Kono<sup>2,3</sup>, Steeve Gréaux<sup>3</sup>, James W E Drewitt<sup>4</sup>, Sandro Jahn<sup>5</sup>, Fumiya Noritake<sup>6</sup>, Koji Ohara<sup>7,8</sup>, Satoshi Hiroi<sup>7,8</sup>, Nozomi M Kondo<sup>9</sup>, Rostislav Hrubiak<sup>10</sup>, Yuji Higo<sup>8</sup>, Noriyoshi Tsujino<sup>8</sup>, Sho Kakizawa<sup>8</sup>, Kiyofumi Nitta<sup>8</sup>, Oki Sekizawa<sup>8</sup>

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. Kwansai 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and BaO–TiO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 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 Å and ~2.4 Å to a single distribution centered at ~2.1 Å. The abrupt structural changes involving the rapid increase in elastic wave velocity in CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> glass are markedly different to the continuous transformations reported in SiO<sub>2</sub> 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, synchrotron X-ray diffraction, molecular dynamics simulations

## 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<sub>2</sub>含有ナトリウムケイ酸塩メルトの構造解析

### Structural analysis of CO<sub>2</sub>-bearing sodium silicate melts using molecular dynamics simulations and synchrotron radiation X-ray diffraction experiments

\*早船 紫野<sup>1</sup>、小野寺 陽平<sup>2</sup>、小原 真司<sup>2</sup>、市川 晴貴<sup>3</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、舟越 賢一<sup>4</sup>、鈴木 昭夫<sup>1</sup>

\*Shino HAYAFUNE<sup>1</sup>, Yohei Onodera<sup>2</sup>, Shinji Kohara<sup>2</sup>, Haruki Ichikawa<sup>3</sup>, Tatsuya Sakamaki<sup>1</sup>, Kenichi Funakoshi<sup>4</sup>, Akio Suzuki<sup>1</sup>

1. 東北大学大学院理学部、2. NIMS、3. 東北大学理学部、4. CROSS

1. Tohoku Univ. Graduate School of Science., 2. NIMS, 3. Tohoku Univ. School of Science., 4. CROSS

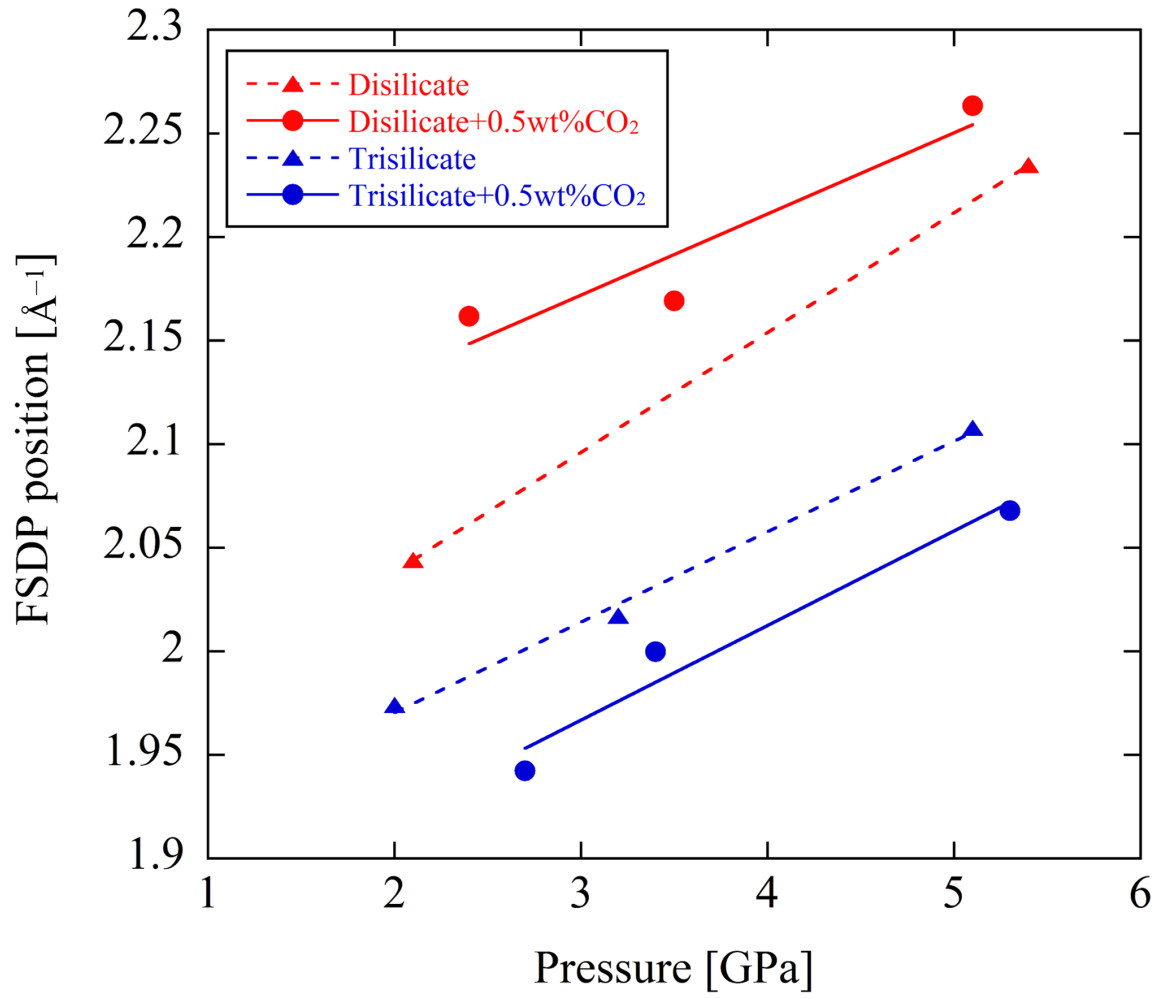
地球内部においてH<sub>2</sub>OやCO<sub>2</sub>などの揮発性成分はマントル構成岩石の溶融温度を効率的に下げる性質を持ち、地球内部でのマグマ生成を引き起こす。そして、マグマ中に溶け込んだ揮発性成分はマグマの輸送特性を支配する密度や粘性などの物理的性質に対しても影響を及ぼすことが知られている。そのため、H<sub>2</sub>Oを含むケイ酸塩メルトの構造の解明を目指す研究は数多く報告されている。それに対し、CO<sub>2</sub>を含むケイ酸塩メルトの構造に関する研究はその重要性にも関わらず研究例は限られている。これは長距離秩序を持たない液体構造のモデリングや単純化が困難であること、高压力下のCO<sub>2</sub>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、高压力条件下でCO<sub>2</sub>が重合度やSiO<sub>4</sub>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、高温高压条件下においてCO<sub>2</sub>含有3成分系であるNa<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>を含むナトリウムケイ酸塩メルト(Na<sub>2</sub>O-2SiO<sub>2</sub> (disilicate), Na<sub>2</sub>O-3SiO<sub>2</sub> (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<sub>2</sub>の反応[CO<sub>2</sub>+O<sup>2-</sup>(ケイ酸塩メルト)⇌CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>]を記述する経験的な二体ポテンシャル<sup>[4]</sup>を用いて、60-700個のCO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>分子とCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>イオンの生成が確認され、高压になるほどCO<sub>2</sub>分子に対してCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>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<sup>n</sup>分布など、メルトの三次元ネットワーク構造にCO<sub>2</sub>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, CO<sub>2</sub>



地球深部における(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 高压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)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, in the deep Earth's mantle

\*富岡 尚敬<sup>1</sup>、奥地 拓生<sup>2</sup>、Purevjav Narangoo<sup>3</sup>、宮原 正明<sup>4</sup>

\*Naotaka TOMIOKA<sup>1</sup>, Takuo Okuchi<sup>2</sup>, Narangoo Purevjav<sup>3</sup>, Masaaki Miyahara<sup>4</sup>

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.

オリピ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ドイトに相転移する。これらの多形間のトポロジック解析により、第3の高压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、リングウッドイトの構造が表現できる。一方、オリピ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ピ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ドイト、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、オリピンの静的な高压相転移実験を行い、ポワリエライトの形成条件を探ることを目的とした。

高压相転移実験では、米国サンカルロス産の(Mg<sub>0.91</sub>, Fe<sub>0.09</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>オリピン単結晶を粉砕し、100 μm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 °C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、オリピ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、オリピン粒子は粒界にて部分的に高压相転移していた。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+リングウッドイト、リングウッドイトであった。ワズレアイト、リングウッドイトの粒径は0.5-1.5 μmである。大半のリングウッドイト結晶粒子は、{110}上に積層欠陥を持つ。それらの電子回折パターンは、リングウッド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。未反応のオリピン粒子内に高压相は一切みられず、塑性変形を示す転位のみが観察される。転位密度は1.4-2.1×10<sup>9</sup>/cm<sup>2</sup>で、オリピン差応力計 [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ピ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ド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<sup>1,2</sup>、濱田 雄士<sup>2</sup>、嘉屋 華恵<sup>2</sup>、江木 祐介<sup>1</sup>、前田 大地<sup>1</sup>、山口 和貴<sup>1</sup>、山田 晃之亮<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1,2</sup>

\*Toru INOUE<sup>1,2</sup>, Yuji HAMADA<sup>2</sup>, Hanae KAYA<sup>2</sup>, Yusuke EGI<sup>1</sup>, Daichi MAEDA<sup>1</sup>, Kazutaka YAMAGUCHI<sup>1</sup>, Konosuke YAMADA<sup>1</sup>, Takaaki KAWAZOE<sup>1,2</sup>

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°C, Rwは20 GPa, 1200-1500°C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°C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°C (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°C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°C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°C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°Cと仮定すると、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  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°C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°Cの条件下で生成されたと推定される。

キーワード：ウォズレイト、リングウッドイト、最大含水量、マントル遷移層

Keywords: wadsleyite, ringwoodite, maximum water solubility, mantle transition zone

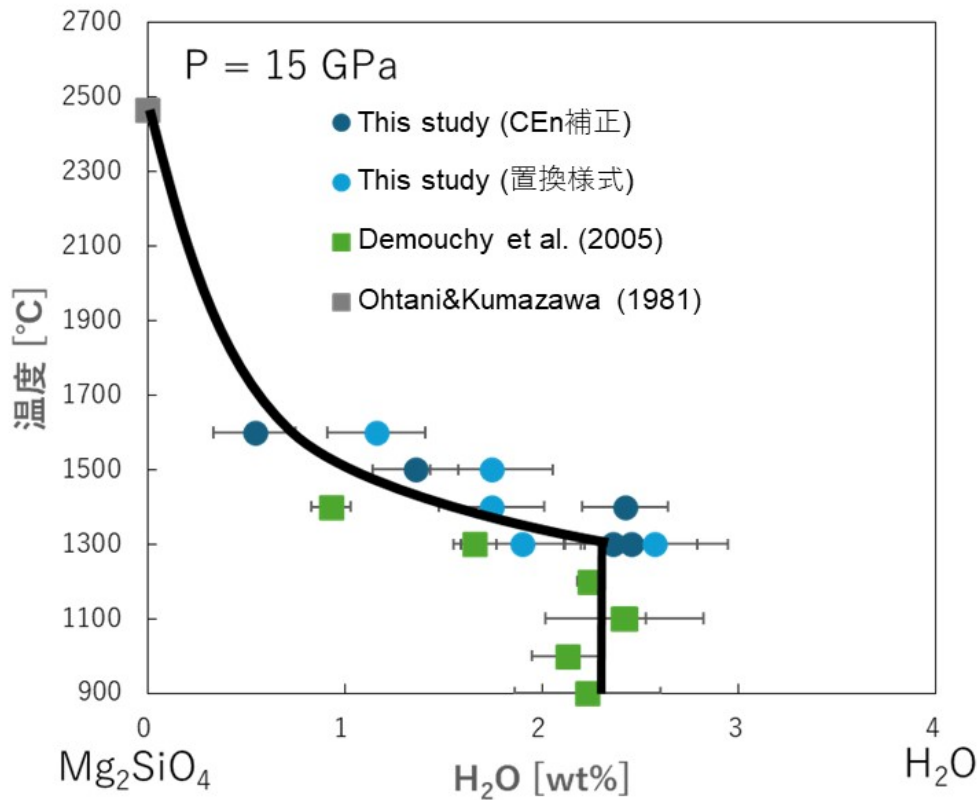


図1.  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  wadsleyite の最大含水量の温度依存性

## 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 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$ Fe比の温度依存性の解明

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

\*山口 和貴<sup>1</sup>、川添 貴章<sup>1</sup>、井上 徹<sup>1</sup>、富岡 尚敬<sup>2</sup>

\*Kazutaka YAMAGUCHI<sup>1</sup>, Takaaki Kawazoe<sup>1</sup>, Toru Inoue<sup>1</sup>, Naotaka Tomioka<sup>2</sup>

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°C (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°C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 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  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 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  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°C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-ReO<sub>2</sub>バッファーとMo-MoO<sub>2</sub>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 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  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-ReO<sub>2</sub>バッファー試料における各温度での $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  Fe比は、1300, 1400, 1500, 1600°Cにおいてそれぞれ $0.15\pm 0.03$ ,  $0.26\pm 0.06$ ,  $0.29\pm 0.04$ ,  $0.20\pm 0.03$ であった。このように1300~1500°Cにおいて、ウォズリアイトの $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  Fe比は温度上昇とともに増加した。一方1600°Cにおいて、 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  Fe比が1500°Cのものよりも減少した。1500°Cと1600°Cでは急冷メルトが存在していたため、部分熔融が $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  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 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma$  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

## 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<sup>1</sup>

\*Takuo OKUCHI<sup>1</sup>

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氣的構造の解析、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) を十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. Minerals*, 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<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O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<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O system up to uppermost lower mantle conditions

\*高市 合流<sup>1</sup>、石井 貴之<sup>2</sup>、西原 遊<sup>1</sup>、松影 香子<sup>3</sup>、肥後 祐司<sup>4</sup>、辻野 典秀<sup>4</sup>、柿澤 翔<sup>4</sup>

\*Goru Takaichi<sup>1</sup>, Takayuki Ishii<sup>2</sup>, Yu Nishihara<sup>1</sup>, Kyoko Matsukage<sup>3</sup>, Yuji Higo<sup>4</sup>, Noiyoshi Tsujino<sup>4</sup>, Sho Kakizawa<sup>4</sup>

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<sub>3</sub>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<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O) 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°C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°C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°Cで出現後1300°C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<sub>2</sub>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 Hydrated SiO<sub>2</sub> post-stishovite and its implication to the seismic anomalies in the lower mantle

\*森 悠一郎<sup>1,2</sup>、村上 元彦<sup>2</sup>、芳野 極<sup>3</sup>、鍵 裕之<sup>1</sup>

\*Yuichiro MORI<sup>1,2</sup>, Motohiko MURAKAMI<sup>2</sup>, Takashi YOSHINO<sup>3</sup>, Hiroyuki KAGI<sup>1</sup>

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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>の相転移圧力はこれに比べて高すぎる[1]。SiO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>のCaCl<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>の剪断波速度の圧力依存性を知りたい。無水SiO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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 | 会場 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<sup>1</sup>、仁木 創太<sup>2</sup>、飯塚 毅<sup>3</sup>、平田 岳史<sup>1</sup> (1. 東大・地殻化学、2. 名大・ISEE、3. 東大・院理地感)

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<sup>1</sup>、大田 隼一郎<sup>1,2</sup>、安川 和孝<sup>1</sup>、中村 謙太郎<sup>2,1</sup>、加藤 泰浩<sup>1,2</sup> (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<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup> (1. 秋田大・院国際資源)

14:55 ~ 15:10

[R7-04] 熊本県美里町弘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<sup>1</sup>、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<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>1</sup>、市山 祐司<sup>2</sup>、森下 知晃<sup>3</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、山下 浩之<sup>4</sup>、針金 由美子<sup>5</sup>、小原 泰彦<sup>6,7,8</sup> (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<sup>1</sup>, Takehiro Hirose<sup>1</sup>, Jun-ichi Ando<sup>2</sup>, Kaushik Das<sup>2</sup>, Gautam Ghosh<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、村尾 玲子<sup>2</sup>、高山 透<sup>2</sup> (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」

\*石寄 拓海<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、江島 輝美<sup>2</sup>、昆 慶明<sup>3</sup>、南澤 比佳理<sup>4</sup>、堀田 将臣<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、米谷 珠萌<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、新名 良介<sup>2</sup>、大坂 恵一<sup>4</sup>、山崎 慎一<sup>1</sup>、宇野 正起<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup> (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<sup>1,2</sup>、廣瀬 重信<sup>1</sup>、常 青<sup>1</sup>、羽生 毅<sup>1</sup>、長谷部 徳子<sup>2</sup>、星野 靖<sup>3</sup>、加美山 隆<sup>4</sup>、川村 洋史<sup>1</sup>、村瀬 孔大<sup>5</sup>、中 竜大<sup>6</sup>、小國 健二<sup>1</sup>、鈴木 勝彦<sup>1</sup>、山崎 誠子<sup>7</sup> (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<sup>1</sup>、仁木 創太<sup>2</sup>、飯塚 毅<sup>3</sup>、平田 岳史<sup>1</sup>

\*Kengo Ito<sup>1</sup>, Sota Niki<sup>2</sup>, Tsuyoshi Iizuka<sup>3</sup>, Takafumi Hirata<sup>1</sup>

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  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{g g}^{-1}$ 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 ( $\text{FeTiO}_3$ ) は  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Ti}^{4+}$  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  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) (Noyes et al., 2011)、これまで実際の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ラ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  $\mu\text{m}$ 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<sup>1</sup>、大田 隼一郎<sup>1,2</sup>、安川 和孝<sup>1</sup>、中村 謙太郎<sup>2,1</sup>、加藤 泰浩<sup>1,2</sup>

\*Mitsuki Ogasawara<sup>1</sup>, Junichiro Ohta<sup>1,2</sup>, Kazutaka Yasukawa<sup>1</sup>, Kentaro Nakamura<sup>2,1</sup>, Yasuhiro Kato<sup>1,2</sup>

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<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup>

\*Sakuya Kubota<sup>1</sup>, Takuya Echigo<sup>1</sup>, Yasushi Watanabe<sup>1</sup>

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 Minerals (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<sup>1</sup>、田中 崇裕、新町 正\*Daisuke HAMANE<sup>1</sup>, 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<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)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 (紙用) 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<sub>3</sub>Fe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) がトラミン鉱 : Pt<sub>2</sub>CuFe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<sub>2</sub>やエルリッチマン鉱 : OsS<sub>2</sub>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イー鉱 : Rh<sub>2</sub>S<sub>3</sub>でさえ、粒子表面で観察されることは稀である。また、バウイー鉱が観察される場合でも硫銅ロジウム鉱 : (Cu<sup>+</sup><sub>0.5</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.5</sub>)Rh<sup>3+</sup><sub>2</sub>S<sub>4</sub>や不知火鉱 : Cu<sup>+</sup>(Rh<sup>3+</sup>Rh<sup>4+</sup>)<sub>2</sub>S<sub>4</sub>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<sup>+</sup><sub>0.95</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.04</sub>Ni<sub>0.01</sub>)(Rh<sup>3+</sup><sub>1.19</sub>Rh<sup>4+</sup><sub>0.77</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>0.06</sub>)S<sub>3.99</sub>となり、Cu<sup>+</sup>(Rh<sup>3+</sup>Rh<sup>4+</sup>)<sub>2</sub>S<sub>4</sub>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<sup>4+</sup>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、パウイー鉱： $Rh_2S_3$ 、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、パウイ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）。パウイー鉱の、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パウイ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

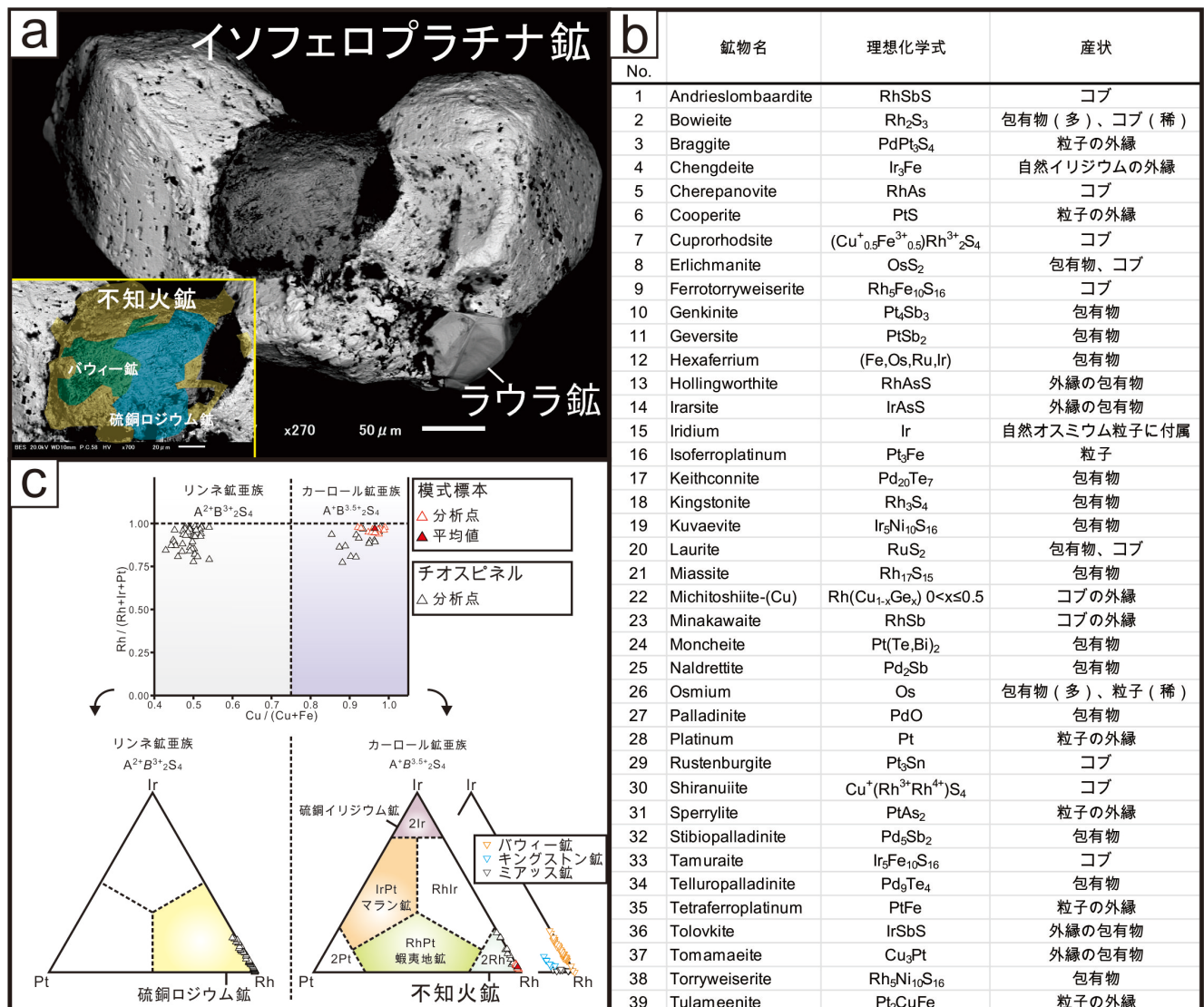


図1. 砂白金粒子の表面に露出したパウイー鉱と不知火鉱 (硫銅ロジウム鉱) の分布 (a)、産出鉱物の一覧 (b)、不知火鉱 (硫銅ロジウム鉱) とRh-S鉱物 (パウイー鉱、キングストン鉱、ミアス鉱) の組成分布 (c)。

## 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

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

\*芳川 雅子<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>2</sup>

\*Masako YOSHIKAWA<sup>1</sup>, Norikatsu Akizawa<sup>2</sup>

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 (<5cm) 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)。最近こ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

## 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<sup>1</sup>、秋澤 紀克<sup>1</sup>、市山 祐司<sup>2</sup>、森下 知晃<sup>3</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、山下 浩之<sup>4</sup>、針金 由美子<sup>5</sup>、小原 泰彦<sup>6,7,8</sup>

\*Rion Yamaoka<sup>1</sup>, Norikatsu Akizawa<sup>1</sup>, Yuji Ichiyama<sup>2</sup>, ToTomoaki Morishita<sup>3</sup>, Akihiro Tamura<sup>3</sup>, Hiroyuki Yamashita<sup>4</sup>, Yumiko Harigane<sup>5</sup>, Yasuhiko Ohara<sup>6,7,8</sup>

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°C)、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°C)、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°C)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

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

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

\*Dyuti Prakash SARKAR<sup>1</sup>, Takehiro Hirose<sup>1</sup>, Jun-ichi Ando<sup>2</sup>, Kaushik Das<sup>2</sup>, Gautam Ghosh<sup>3</sup>

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 °C 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

## 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 Goethite in Australian Iron Ore

\*三河内 岳<sup>1</sup>、村尾 玲子<sup>2</sup>、高山 透<sup>2</sup>

\*Takashi MIKOUCHI<sup>1</sup>, Reiko Murao<sup>2</sup>, Toru Takayama<sup>2</sup>

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%  $P_2O_5$ ）。

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

\*石寄 拓海<sup>1</sup>、越後 拓也<sup>1</sup>、渡辺 寧<sup>1</sup>

\*Takumi Ishizaki<sup>1</sup>, Takuya Echigo<sup>1</sup>, Yasushi Watanabe<sup>1</sup>

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-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、黒雲母角閃石トータル岩~石英閃緑岩及び角閃石トータル岩、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 $ASI \leq 1.1$ を示し、含ザクロ石白雲母黒雲母花崗岩は $ASI \geq 1.1$ 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-黒雲母温度計の結果から、黒雲母ペグマタイトは427°C-790°Cを示し、白雲母黒雲母ペグマタイトは313°C-643°C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-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ですが、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－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<sup>1</sup>、江島 輝美<sup>2</sup>、昆 慶明<sup>3</sup>、南澤 比佳理<sup>4</sup>、堀田 将臣<sup>4</sup>

\*Satsuki KIO<sup>1</sup>, Terumi Ezima<sup>2</sup>, Yoshiaki Kon<sup>3</sup>, Hikari Minamisawa<sup>4</sup>, Masaomi Horita<sup>4</sup>

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含有量には差がなかった。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<sup>1</sup>、米谷 珠萌<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、新名 良介<sup>2</sup>、大坂 恵一<sup>4</sup>、山崎 慎一<sup>1</sup>、宇野 正起<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup>

\*Satoshi MATSUNO<sup>1</sup>, Shuhou Maitani<sup>2</sup>, Kenta Yoshida<sup>3</sup>, Nobuo Hirano<sup>1</sup>, Ryosuke Sinmyo<sup>2</sup>, Keiichi Osaka<sup>4</sup>, Shin-ichi Yamasaki<sup>1</sup>, Masaoki Uno<sup>1</sup>, Atsushi Okamoto<sup>1</sup>

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<sup>1,2</sup>、廣瀬 重信<sup>1</sup>、常 青<sup>1</sup>、羽生 毅<sup>1</sup>、長谷部 徳子<sup>2</sup>、星野 靖<sup>3</sup>、加美山 隆<sup>4</sup>、川村 洋史<sup>1</sup>、村瀬 孔大<sup>5</sup>、中 竜大<sup>6</sup>、小國 健二<sup>1</sup>、鈴木 勝彦<sup>1</sup>、山崎 誠子<sup>7</sup>

\*Natsue ABE<sup>1,2</sup>, Shigenobu Hirose<sup>1</sup>, Qing CHANG<sup>1</sup>, Takeshi Hanyu<sup>1</sup>, Noriko Hasebe<sup>2</sup>, Yasushi Hoshino<sup>3</sup>, Takashi Kamiyama<sup>4</sup>, Yoji Kawamura<sup>1</sup>, Kohta Murase<sup>5</sup>, Tatsuhiro Naka<sup>6</sup>, Kenji Oguni<sup>1</sup>, Katsuhiko Suzuki<sup>1</sup>, Seiko Yamazaki<sup>7</sup>

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 | 会場 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<sup>1</sup>、乙 星華<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、三宅 亮<sup>1</sup>、下林 典正<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、安井 万奈<sup>2</sup>、石橋 純一郎<sup>3</sup>、萩谷 宏<sup>4</sup>、島田 和彦<sup>1</sup>、山崎 淳司<sup>2</sup> (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 聡<sup>1</sup>、門馬 綱一<sup>1</sup>、柳澤 教雄<sup>2</sup>、草葉 陽子<sup>1</sup>、徳本 明子<sup>1</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、Missen Owen<sup>2</sup>、Mills Stuart<sup>3</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup>、松原 聡<sup>1</sup>、大谷 栄治<sup>4</sup>、鎌田 誠司<sup>5</sup>、小澤 信<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、乙 星華<sup>1</sup>、伊神 洋平<sup>1</sup>、江森 健太郎<sup>2</sup>

\*Akira MIYAKE<sup>1</sup>, Seika Oto<sup>1</sup>, Yohei Igami<sup>1</sup>, Kentaro Emori<sup>2</sup>

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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Crn) には、しばしば針状のルチル ( $\text{TiO}_2$ ) 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、 $\alpha$ - $\text{PbO}_2$ 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った。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、 $\alpha$ - $\text{PbO}_2$ 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 ( $P2/c$ )と呼ばれる $\text{ABO}_4$ 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) $_2\text{O}_4$ 組成の酸化物によりなると考えられる。Wolframite 構造は $\alpha$ - $\text{PbO}_2$ 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 $\{010\}_{\text{inclusion}} \parallel \{10\cdot10\}_{\text{Crn}}$ 、 $\{100\}_{\text{inclusion}} \parallel \{0001\}_{\text{Crn}}$ 、 $\{001\}_{\text{inclusion}} \parallel \{1\cdot210\}_{\text{Crn}}$  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<sup>1</sup>、三宅 亮<sup>1</sup>、下林 典正<sup>1</sup>

\*Chigako KIYOHARA, Yohei Igami<sup>1</sup>, Akira Miyake<sup>1</sup>, Norimasa Shimobayashi<sup>1</sup>

1. 京都大・院理

1. Kyoto Univ. Sci.

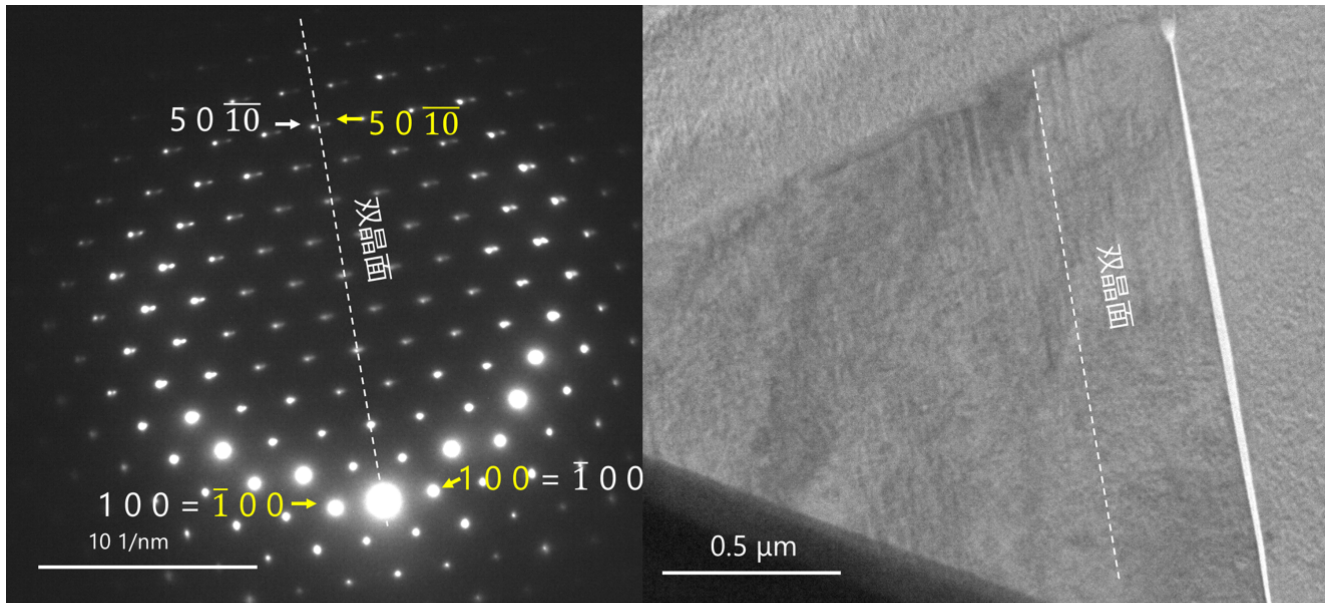
糸魚川石は、 $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ で表される、ローソン石 ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) のストロンチウム (Sr) 置換体である。糸魚川石は、世界でも新潟県糸魚川-青海地域と鳥取県若桜地域の2カ所からしか産出の報告がない稀産鉱物である (Miyajima et al., 1999、下林・山田, 2003)。

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  $Cmcm$  ( $a = 6.031 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.945 \text{ \AA}$ ,  $c = 13.219 \text{ \AA}$ ) と報告している。一方、Liebscher et al. (2010) は、 $(\text{Ca}, \text{Sr})\text{Cl}_2$ 水溶液中で4 GPa/600 °C, 800 °C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  $P2_1/m$  ( $a = 5.4231 \text{ \AA}$ ,  $b = 13.2761 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.8583 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 124.42^\circ$ ) 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  $90^\circ$  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<sup>1</sup>、安井 万奈<sup>2</sup>、石橋 純一郎<sup>3</sup>、萩谷 宏<sup>4</sup>、島田 和彦<sup>1</sup>、山崎 淳司<sup>2</sup>

\*Yuki INOUE<sup>1</sup>, Mana Yasui<sup>2</sup>, Jun-ichiro Ishibashi<sup>3</sup>, Hagiya Hiroshi<sup>4</sup>, Kazuhiko Shimada<sup>1</sup>, Athushi Yamazaki<sup>2</sup>

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2 Type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(Chiperu 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

## 長野県浜横川産ニッケル滑石

## Willemseite from the Hamayokawa mine, Nagano Prefecture, Japan

\*松原 聡<sup>1</sup>、門馬 綱一<sup>1</sup>、柳澤 教雄<sup>2</sup>、草葉 陽子<sup>1</sup>、徳本 明子<sup>1</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup>

\*Satoshi Matsubara<sup>1</sup>, Koichi Momma<sup>1</sup>, Norio Yanagisawa<sup>2</sup>, Yoko Kusaba<sup>1</sup>, Akiko Tokumoto<sup>1</sup>, Ritsuro Miyawaki<sup>1</sup>

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

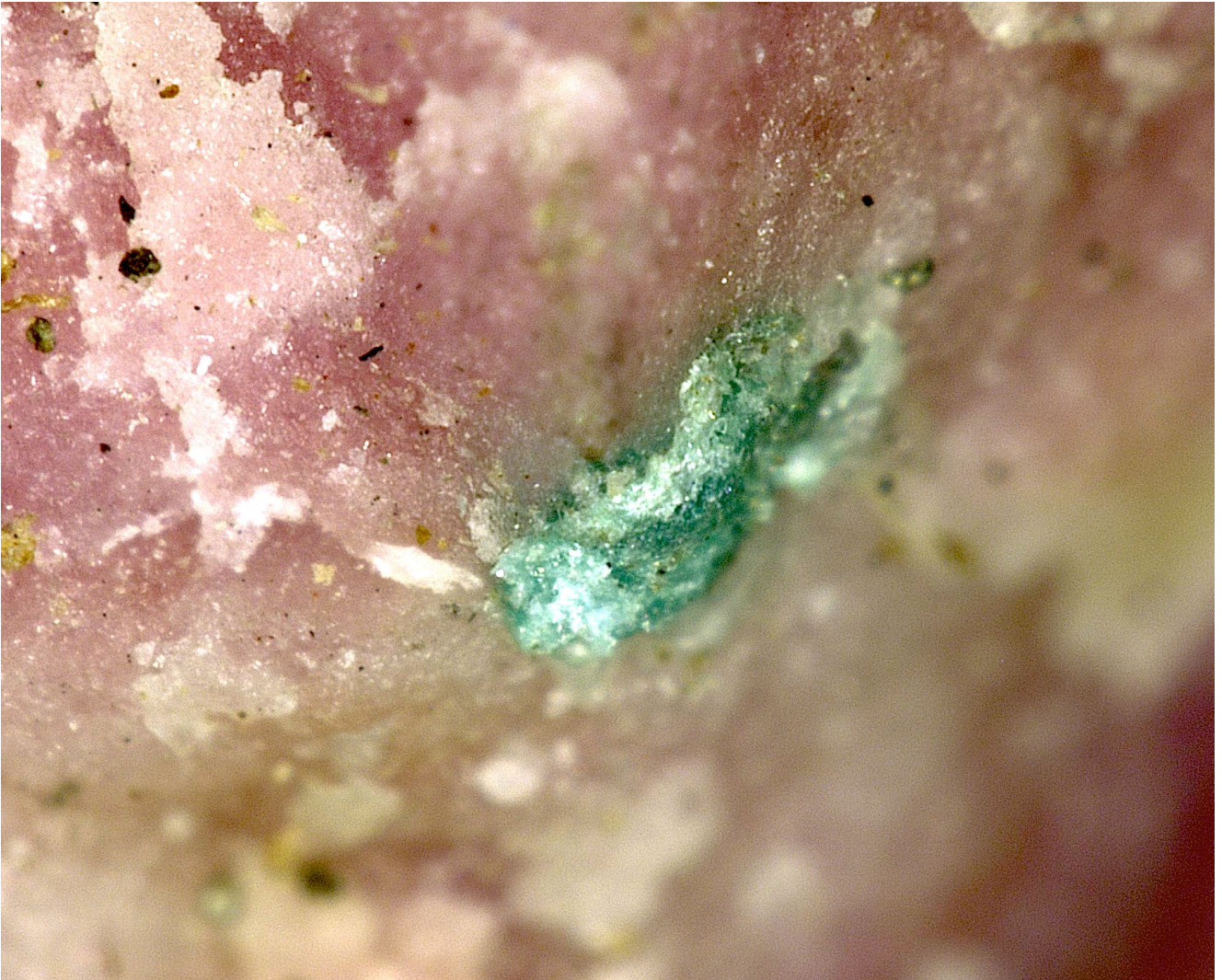
長野県辰野町にあった浜横川鉱山の変成マンガン鉱床からは、稀産の鈴木石[suzukiite,  $Ba_2V^{4+}_2O_2Si_4O_{12}$ ]が報告されていた(広渡・吉江, 1978)。国立科学博物館や地質調査所標本館に、鉱物愛好家から寄贈された浜横川鉱山産鈴木石と称する標本がいくつか登録されているが、最近、それら数点について再検討したところ、鈴木石ではなく、日本新産のニッケル滑石[willemseite,  $Ni_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ]であることが判明した。

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、以下のものである。d(Å)(lobs):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<sub>2</sub> 50.74, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.04, NiO 42.01, FeO 0.08, MnO 1.13, MgO 0.24, CaO 0.02, Na<sub>2</sub>O 0.21, K<sub>2</sub>O 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<sub>2.66</sub>Mn<sub>0.08</sub>Na<sub>0.03</sub>Mg<sub>0.03</sub>)<sub>2.80</sub>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<sub>2</sub>S<sub>4</sub>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



## 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<sup>2+</sup>-analogue of zemannite from Kawazu mine, Shizuoka Prefecture, Japan

\*門馬 綱一<sup>1</sup>、Missen Owen<sup>2</sup>、Mills Stuart<sup>3</sup>、宮脇 律郎<sup>1</sup>、松原 聡<sup>1</sup>、大谷 栄治<sup>4</sup>、鎌田 誠司<sup>5</sup>、小澤 信<sup>4</sup>

\*Koichi MOMMA<sup>1</sup>, Owen Missen<sup>2</sup>, Stuart Mills<sup>3</sup>, Ritsuro Miyawaki<sup>1</sup>, Satoshi Matsubara<sup>1</sup>, Eiji Ohtani<sup>4</sup>, Seiji Kamada<sup>5</sup>, Shin Ozawa<sup>4</sup>

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<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se)と欽一石が記載されている。欽一石の原記載では(Fe<sup>2+</sup><sub>1.13</sub>Mg<sub>0.47</sub>Zn<sub>0.43</sub>Mn<sup>2+</sup><sub>0.17</sub>)<sub>Σ2.20</sub>(Te<sub>2.97</sub>Se<sub>0.03</sub>)<sub>Σ3.00</sub>O<sub>9.00</sub>(H<sub>1.38</sub>Na<sub>0.22</sub>)<sub>Σ1.60</sub>・3.2H<sub>2</sub>O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<sub>0.5</sub>[ZnFe<sup>3+</sup>(TeO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]・4.5H<sub>2</sub>O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<sub>0.5</sub>[MnFe<sup>3+</sup>(TeO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]・4.5H<sub>2</sub>O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<sub>0.40</sub>(Fe<sup>2+</sup><sub>0.54</sub>Zn<sub>0.33</sub>Cu<sub>0.18</sub>Mn<sub>0.05</sub>)<sub>Σ1.10</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>1.00</sub>(Te<sub>2.92</sub>P<sub>0.06</sub>O<sub>9</sub>)・4.12H<sub>2</sub>O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<sub>3</sub>（またはP6<sub>3</sub>/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。チャン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<sub>3</sub>/mではなくP6<sub>3</sub>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 | 会場 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 いくみ<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、増野いくみ<sup>2</sup>、松井亮介<sup>1</sup>、石田遼真<sup>1</sup>、近藤忠<sup>1</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、生田大穰<sup>2</sup>、福井宏之<sup>3,4</sup>、坂巻竜也<sup>1</sup>、石川大介<sup>3,4</sup>、バロンアルフレッド<sup>3,4</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>

\*Izumi MASHINO<sup>1</sup>

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伝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

## 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トランスferに伴う弾性異常測定

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

\*米田 明<sup>1</sup>、増野 いくみ<sup>2</sup>、松井 亮介<sup>1</sup>、石田 遼真<sup>1</sup>、近藤 忠<sup>1</sup>

\*Akira Yoneda<sup>1</sup>, Izumi Mashino<sup>2</sup>, Ryosuke Matsui<sup>1</sup>, Ryoma Ishida<sup>1</sup>, Tadashi Kondo<sup>1</sup>

1. 大阪大学・理学研究科、2. 岡山大学・惑星物質研究所

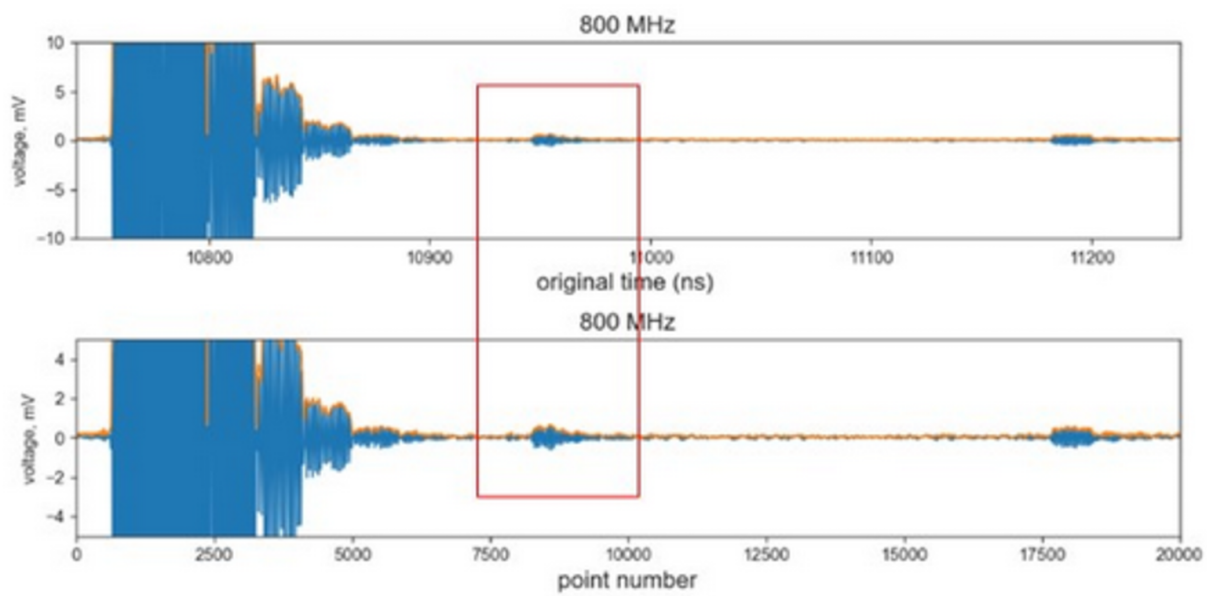
1. Osaka Univ. Sci, 2. Okayama Univ. IPM

GHz-DAC音速法により66GPaでのフェロペリクレース (Fe<sub>17</sub>Mg<sub>83</sub>O) 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、スピントランスfer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、スピントランスfer、フェロペリクレース

Keywords: GHz-DAC ultrasonics, Spin transition, ferroperriclerase



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

\*Yongjae Lee<sup>1</sup>

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 (H<sub>2</sub>O), 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<sup>1</sup>、生田 大穰<sup>2</sup>、福井 宏之<sup>3,4</sup>、坂巻 竜也<sup>1</sup>、石川 大介<sup>3,4</sup>、バロン アルフレッド<sup>3,4</sup>

\*Eiji OHTANI<sup>1</sup>, Daijo IKUTA<sup>2</sup>, Hiroshi FUKUI<sup>3,4</sup>, Tatsuya SAKAMAKI<sup>1</sup>, Daisuke Ishikawa<sup>3,4</sup>, Alfred Q. R. BARON<sup>3,4</sup>

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 $\text{Fe}_{0.67}\text{Ni}_{0.06}\text{Si}_{0.27}$ 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- $\text{Fe}_{0.67}\text{Ni}_{0.06}\text{Si}_{0.27}$  (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 ( $V_p$ ) と密度 ( $\rho$ ) 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- $\text{Fe}_{0.67}\text{Ni}_{0.06}\text{Si}_{0.27}$ 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- $\text{Fe}_{0.67}\text{Ni}_{0.06}\text{Si}_{0.27}$ 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  $\epsilon$ -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

## FeS IVとVの相境界について

### On the phase boundary between FeS IV and V

\*浦川 啓<sup>1</sup>

\*Satoru URAKAWA<sup>1</sup>

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、高温高压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 (toroillite) 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)は高温高压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熱電対で测温し、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、高压、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: 瀬瀬 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<sup>1</sup>、永冶 方敬<sup>1</sup>、伊藤 泰輔<sup>2</sup>、ウォリス サイモン<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>, Nobuhiko Nakano<sup>1</sup>, Tatsuro Adachi<sup>1</sup>, Nugroho Imam Setiawan<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、高見澤 駿<sup>1</sup>、伊藤 久敏<sup>2</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、森下 知晃<sup>3</sup> (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<sup>1</sup>、藤村 祐花<sup>1</sup>、小寺 勇氣<sup>1</sup> (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<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、安東 淳<sup>1,2</sup>、Das Kaushik<sup>1,2</sup>、Sarkar Dyuti Prakash<sup>3</sup> (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 峻右<sup>1</sup>、瀬瀬 佑衣<sup>1</sup>、高橋 聡<sup>1</sup> (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

\*瀬瀬 佑衣<sup>1</sup>、清水 以知子<sup>2</sup> (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<sup>1,2</sup>、道林 克禎<sup>1,3</sup>、谷 健一郎<sup>4</sup>、西村 拓真<sup>5</sup> (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<sup>1</sup>、苗村 康輔<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup> (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」の確立に向けてー西南日本四国三波川変成帯権現地域の組み込みー

## 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<sup>1</sup>、永冶 方敬<sup>1</sup>、伊藤 泰輔<sup>2</sup>、ウォリス サイモン<sup>2</sup>

\*Momoko Minowa<sup>1</sup>, Takayoshi Nagaya<sup>1</sup>, Taisuke Ito<sup>2</sup>, Simon Wallis<sup>2</sup>

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<sub>2</sub>O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、そのような宿主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イトを対象とした。権現地域の石英エクロジイトからは、一部放射状割れ目を示唆する観察のほか、各地の超高压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宿主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、例えば宿主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、宿主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。宿主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、本研究のような宿主鉱物-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<sup>1</sup>, Nobuhiko Nakano<sup>1</sup>, Tatsuro Adachi<sup>1</sup>, Nugroho Imam Setiawan<sup>2</sup>

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  $271 \pm 8$  and  $263 \pm 14$  Ma from the core and rim of monazite. The staurolite-bearing pelitic schist from Peleng Island yields a weighted mean age of  $434 \pm 3$  and  $449 \pm 12$  Ma from the core and mantle, and  $403 \pm 8$  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<sup>1</sup>、高見澤 駿<sup>1</sup>、伊藤 久敏<sup>2</sup>、田村 明弘<sup>3</sup>、森下 知晃<sup>3</sup>

\*Yuji ICHIYAMA<sup>1</sup>, Shun Takamizawa<sup>1</sup>, Hisatoshi Ito<sup>2</sup>, Akihiro Tamura<sup>3</sup>, Tomoaki Morishita<sup>3</sup>

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 Electric Power 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 °C、～0.5 GPaの変成条件を見積もった。この角閃岩からは、 $39.6 \pm 1.4$  Maと $33.1 \pm 2.3$  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 °Cを示し、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 $38.4 \pm 2.3$  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ラ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 °C、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<sup>1</sup>、藤村 祐花<sup>1</sup>、小寺 勇氣<sup>1</sup>

\*Daisuke NAKAMURA<sup>1</sup>, Yuuka FUJIMURA<sup>1</sup>, Yuuki KODERA<sup>1</sup>

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。

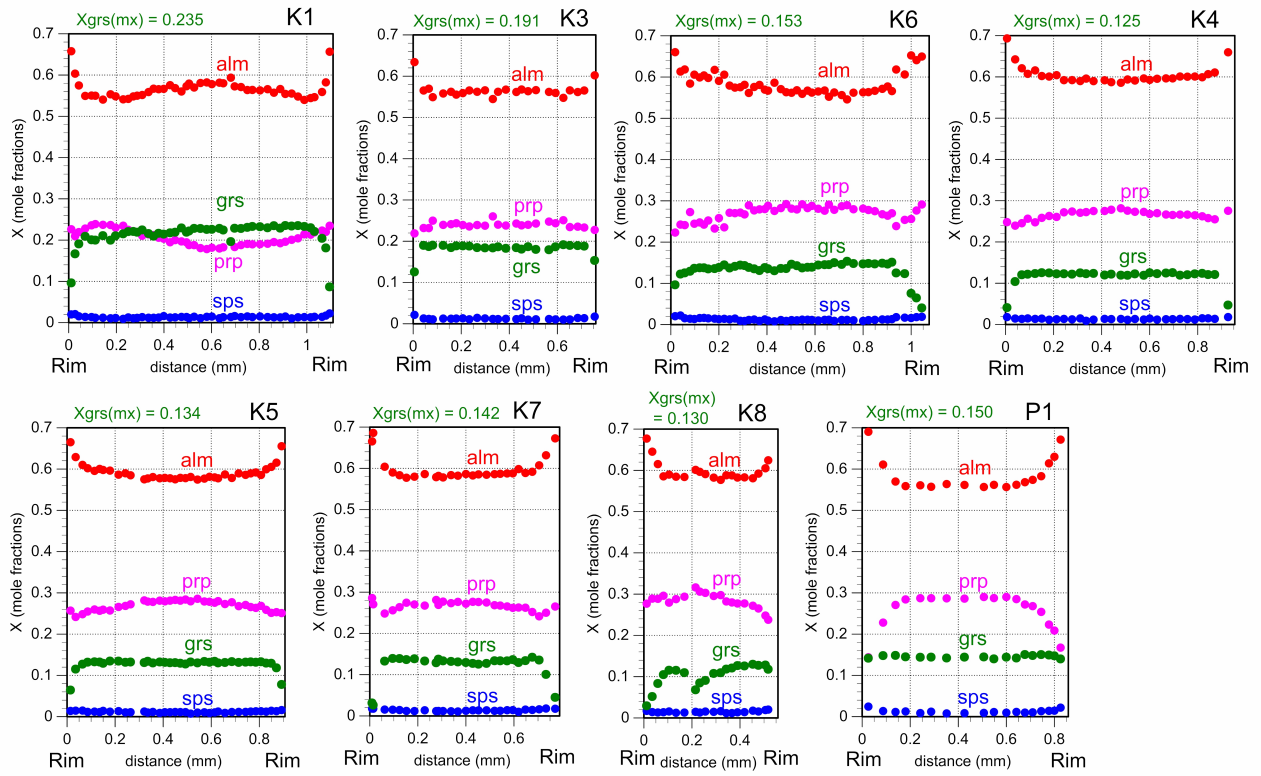
Horni Bory採石場はボヘミア地塊内に位置し、含まれる輝岩からは超高压条件（約4 GPa）の変成作用が記録されており（Naemura et al., 2009: JMPS 104, 168-175）、本研究地域は、モルダヌビア帯のクフェールユニットに属すると考えられる。研究した試料はザクロ石と黒雲母に著しく富むものの、クフェールユニットに産する一般的な珪長質グラニュライトと同様の鉱物組合せ（ザクロ石+黒雲母+藍晶石/珪線石+斜長石+カリ長石+石英+ルチル+イルメナイト+燐灰石等）を持つ。その試料に産するザクロ石粒子の大部分は直径1mmほどで包有物をあまり多くは含まないが、中には直径1.6mm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йкиロプラスチックな組織を持つ。

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に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°C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<sup>1</sup>

\*Shunsuke ENDO<sup>1</sup>

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<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>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、バッドレイ石、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<sub>2</sub>を欠く母岩側からSiO<sub>2</sub>/(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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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°C）で安定であり、等温での継続的な流体-岩石反応とみなせる。Zone 2の方トリウム鉱物の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°C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の閃ウラン鉱物の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°C）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<sup>1</sup>、安東 淳一<sup>1,2</sup>、Das Kaushik<sup>1,2</sup>、Sarkar Dyuti Prakash<sup>3</sup>

\*Haruki Yoshiasa<sup>1</sup>、Jun-ichi Ando<sup>1,2</sup>、Kaushik Das<sup>1,2</sup>、Dyuti Prakash Sarkar<sup>3</sup>

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 $\sim 15$  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ースー市に露出する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°C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 cm）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チ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 $10 \mu\text{m}$ -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 $50 \mu\text{m}$ - $100 \mu\text{m}$ 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 $100 \mu\text{m}$ の波動消光を示す石英が存在し、このよう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 $300\sim 400^\circ\text{C}$ で、prism<c>すべりは $550^\circ\text{C}$ 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 $5 \mu\text{m}$ ）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出来る。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

## 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 峻右<sup>1</sup>、瀬瀬 佑衣<sup>1</sup>、高橋 聡<sup>1</sup>

\*Shunsuke Ogino<sup>1</sup>, Yui Kouketsu<sup>1</sup>, Satoshi Takahashi<sup>1</sup>

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 °C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 °C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 °C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. Metamorph. 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

\*瀨瀬 佑衣<sup>1</sup>、清水 以知子<sup>2</sup>

\*Yui KOUKETSU<sup>1</sup>, Ichiko Shimizu<sup>2</sup>

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°Cから520°C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°C程度、Garnet zoneは360-470°C程度、Biotite zoneは470-520°C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°C程度、II帯が440-470°C、III帯が460-520°C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<sub>2</sub>O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<sub>2</sub>O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れる。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<sub>An</sub> > 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°C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Oligoclase-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<sup>1,2</sup>、道林 克禎<sup>1,3</sup>、谷 健一郎<sup>4</sup>、西村 拓真<sup>5</sup>

\*Miharu Niwa<sup>1,2</sup>, Katsuyoshi Michibayashi<sup>1,3</sup>, Kenichiro Tani<sup>4</sup>, Takuma Nishimura<sup>5</sup>

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タル岩質である。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-石英の残晶組織との組み合わせによると、350-450°C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学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<sup>1</sup>、苗村 康輔<sup>2</sup>、吉田 健太<sup>3</sup>

\*Takao HIRAJIMA<sup>1</sup>, Kousuke Naemura<sup>2</sup>, Kenta Yoshida<sup>3</sup>

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ツ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0.2-2 $\mu$ mに調整した。但し、KD12/13には粗粒の白雲母が含まれていたため、50120 $\mu$ mのフラクションについても年代測定を行った。KD12/KD13の50120 $\mu$ mフラクションは123.3/126.9Maを示し、0.2-2 $\mu$ m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):145-132Ma(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:107-102Ma(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、両者の間に構造的な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 blueschist, 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 | 会場 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一歪測定

「招待講演」

\*辻野 典秀<sup>1</sup> (1. 高輝度光科学研究センター)

15:50 ~ 16:05

[S3-02]  $\epsilon$ -FeOOHの変形誘起選択配向\*西原 遊<sup>1</sup>、森 ゆい<sup>1</sup>、呉 文天<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、久保 友明<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup>、肥後 祐司<sup>2</sup>、柿澤 翔<sup>2</sup>、柴崎 裕樹<sup>3</sup>、西原 遊<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、Christine McCarthy<sup>1</sup>、Benjamin Holtzman<sup>1</sup>、David Goldsby<sup>2</sup>、Travis Hager<sup>2</sup> (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<sup>1</sup>、平賀 岳彦<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2,3</sup>、伊神 洋平<sup>4</sup> (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<sup>1</sup>、夏目 樹<sup>2</sup>、道林 克禎<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、田阪 美樹<sup>1</sup>、栗原 圭佑<sup>1</sup>、谷内 元<sup>2</sup>、川本 竜彦<sup>1</sup> (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<sup>1</sup>、片山 郁夫<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2</sup>、松山 和樹<sup>2</sup> (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一歪測定

## High-speed time-resolved in-situ stress-strain measurements under high pressure and high temperature using synchrotron radiation X-rays

\*辻野 典秀<sup>1</sup>\*Noriyosi TSUJINO<sup>1</sup>

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一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、その場応力一歪測定、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一歪測定を試みた。

## 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多結晶の応力が600°Cから1000°Cへの昇温とともに緩和され、同時に試料の歪量の増大の様子が観察された。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一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。

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

## $\epsilon$ -FeOOHの変形誘起選択配向

### Deformation-induced crystallographic-preferred orientation of $\epsilon$ -FeOOH

\*西原 遊<sup>1</sup>、森 ゆい<sup>1</sup>、呉 文天<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup>

\*Yu NISHIHARA<sup>1</sup>, Yui MORI<sup>1</sup>, Wentian WU<sup>1</sup>, Noriyoshi TSUJINO<sup>2</sup>

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( $\text{MgSiO}_2(\text{OH})_2$ )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 $\epsilon$ -FeOOHの結晶選択配向を高圧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旨とする。

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 °Cで合成した $\epsilon$ -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 °C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 °C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 $\epsilon$ -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、 $\epsilon$ -FeOOH

Keywords: Crystallographic-preferred orientation, Seismic anisotropy,  $\epsilon$ -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<sup>1</sup>、久保 友明<sup>1</sup>、辻野 典秀<sup>2</sup>、肥後 祐司<sup>2</sup>、柿澤 翔<sup>2</sup>、柴崎 裕樹<sup>3</sup>、西原 遊<sup>4</sup>

\*Rikuto HONDA<sup>1</sup>, Tomoaki Kubo<sup>1</sup>, Noriyoshi Tsujino<sup>2</sup>, Yuji Higo<sup>2</sup>, Sho Kakizawa<sup>2</sup>, Yuki Shibazaki<sup>3</sup>, Yu Nishihara<sup>4</sup>

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（ $V^*=0-30 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ）。そこで、本研究ではマントル遷移層条件（11-20 GPa, 470-1020°C）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 $2.8-8.5 \times 10^{-5} / \text{s}$ 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を確認した。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°Cでは相転移がみられなかった。470-570°C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 $V^*=24.3 \pm 0.04 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 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°C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ド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°C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、リングウッド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°C、 $10^{-14} / \text{s}$ ）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

## 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<sup>1</sup>、Christine McCarthy<sup>1</sup>、Benjamin Holtzman<sup>1</sup>、David Goldsby<sup>2</sup>、Travis Hager<sup>2</sup>

\*Hatsuki Yamauchi<sup>1</sup>、Christine McCarthy<sup>1</sup>、Benjamin Holtzman<sup>1</sup>、David Goldsby<sup>2</sup>、Travis Hager<sup>2</sup>

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ル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 ( $10^{-4} \sim 10$  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ル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,  $\eta$  = 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、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、以上の結果から求め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 (Vassouille 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、適切なスケールリン

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<sup>1</sup>、平賀 岳彦<sup>1</sup>

\*Shenghao Jiang<sup>1</sup>, Takehiko Hiraga<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2,3</sup>、伊神 洋平<sup>4</sup>

\*Itsuki Natsume<sup>1</sup>, Katsuyoshi Michibayashi<sup>2,3</sup>, Yohei Igami<sup>4</sup>

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-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)に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 $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ 、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



## 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<sup>1</sup>、夏目 樹<sup>2</sup>、道林 克禎<sup>1</sup>

\*Takeo Okuwaki<sup>1</sup>, Natsume Itsuki<sup>2</sup>, Katsuyoshi Michibayashi<sup>1</sup>

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2][3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。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、試料ごとにコア半断面とそれに直交する面の二面で研磨薄片を作成した。ここでは半断面の短辺方向を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( $V_p$ )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<sup>[5]</sup>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 structural study of the MHL suite and BDH suite rocks

\*日原 彩<sup>1</sup>、田阪 美樹<sup>1</sup>、栗原 圭佑<sup>1</sup>、谷内 元<sup>2</sup>、川本 竜彦<sup>1</sup>

\*Aya Hihara<sup>1</sup>, Miki Tasaka<sup>1</sup>, Keisuke Kurihara<sup>1</sup>, Hajime Taniuchi<sup>2</sup>, Tastuhiko Kawamoto<sup>1</sup>

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 harzburgite-Iherzolite), SDW系列 (Spinel-rich dunite-wehrlite), BDH系列 (Banded dunite-harzburgite)。先行研究より、MHL系列のかんらん岩は海嶺起源であり (Yoshiokawa 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  $Mg\# (=100 \times Mg / (Mg + Fe))$  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  $Fo\# (=100 \times Mg / (Mg + Fe))$  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. Yoshiokawa and Nakamura, 2000, Geochemical evolution of the Horoman peridotite complex: implications for melt extraction, metasomatism, and compositional layering in 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<sup>1</sup>、片山 郁夫<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2</sup>、松山 和樹<sup>2</sup>

\*Tomohiro Ito<sup>1</sup>, Ikuo Katayama<sup>1</sup>, Katsuyoshi Michibayashi<sup>2</sup>, Kazuki Matsuyama<sup>2</sup>

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