

2024年9月13日(金)

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

9:00 ~ 12:00 | ESホール 東山キャンパス

T1: アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解 (シンポジウム)

座長: 小山内 康人、大和田 正明

9:00 ~ 9:25

[T1-01] 脱炭素化社会と必須金属資源

「招待講演」

*細井 義孝¹ (1. JICA)

9:25 ~ 9:50

[T1-02] 鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

「招待講演」

*米村 和紘¹ (1. (独) エネルギー・金属鉱物資源機構)

9:50 ~ 10:15

[T1-03] Critical metal potentiality of Mongolia

「招待講演」

*Jargalan Sereenen¹、Arvinzun M.² (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:15 ~ 10:30

[2Lecture-101-06-4add] 休憩

10:30 ~ 10:55

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

「招待講演」

*Ochirbat Magsarjav²、Jargalan Sereenen¹ (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:55 ~ 11:20

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

「招待講演」

*永嶋 真理子¹、今岡 照喜¹ (1. 山口大・院創成)

11:20 ~ 11:45

[T1-06] イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

「招待講演」

*渡辺 寧¹ (1. 秋大・国資)

11:45 ~ 12:00

[2Lecture-101-06-8add] 休憩

口頭講演 | S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

9:00 ~ 12:00 | ES024 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

座長:土屋 範芳

9:00 ~ 9:05

[2Lecture-201-10-1add] コンビーナ挨拶

9:05 ~ 9:35

[S2-01] 背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

「招待講演」

*山本 順司¹ (1. 九州大・院理)

9:35 ~ 9:50

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

「発表賞エントリー」

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

9:50 ~ 10:05

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

*大柳 良介^{1,2}、沢田 輝^{3,2}、Chang Qing²、Satish-Kumar Madhusoodhan⁴ (1. 国士舘大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大)

10:05 ~ 10:20

[S2-04] CO₂ mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses*Otgonbayar DANDAR¹, Atsushi Okamoto¹, Masaaki Uno¹, Miku Takeya² (1. Tohoku University, 2. INPEX)

10:20 ~ 10:30

[2Lecture-201-10-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

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

「発表賞エントリー」

*城口 結衣¹、延寿 里美¹ (1. 愛媛大・院理工)

10:45 ~ 11:00

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

「発表賞エントリー」

*Nomin Tumurkhuu¹, Otgonbayar Dandar¹, Masaaki Uno¹, Manzshir Bayarbold¹, Atsushi Okamoto¹ (1. Tohoku University)

11:00 ~ 11:15

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

「発表賞エントリー」

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

11:15 ~ 11:30

[S2-08] “cleavable olivine”の成因

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

11:30 ~ 11:45

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

「発表賞エントリー」

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

11:45 ~ 12:00

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

*川本 竜彦¹ (1. 静岡大学理学部地球科学科)

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

9:00 ~ 10:00 | ES025 東山キャンパス

S3：マントル・地殻のレオロジーと物質移動（スペシャルセッション）

座長:田阪 美樹(静岡大学)

9:00 ~ 9:15

[S3-10] マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

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

9:15 ~ 9:30

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

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

9:30 ~ 9:45

[S3-12] 岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

*福田 惇一¹ (1. 大阪公立大学・理・地球)

9:45 ~ 10:00

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

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

口頭講演 | R4：地球表層・環境・生命

10:15 ~ 12:00 | ES025 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

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

10:15 ~ 10:35

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

「招待講演」

*吉田 英一¹ (1. 名古屋大学)

10:35 ~ 10:50

[R4-02] 広島花崗岩の風化による色変化過程

*横山 正¹、院去 由佳、海堀 正博¹ (1. 広島大学)

10:50 ~ 11:05

[R4-03] 陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

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

11:05 ~ 11:20

[R4-04] 生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

*奥村 大河¹、鈴木 道生²、Perez-Huerta Alberto³、Samajpati Eshita³、小暮 敏博¹ (1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.)

11:20 ~ 11:40

[R4-05] バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

「招待講演」

*鈴木 道生¹ (1. 東大・院農)

11:40 ~ 11:55

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

*鍵 裕之¹、村岡 賢佑¹ (1. 東京大学)

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

■ 2024年9月13日(金) 9:00 ~ 12:00 | 会場 ESホール 東山キャンパス

T1: アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解 (シンポジウム)

座長: 小山内 康人、大和田 正明

9:00 ~ 9:25

[T1-01] 脱炭素化社会と必須金属資源

「招待講演」

*細井 義孝¹ (1. JICA)

9:25 ~ 9:50

[T1-02] 鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

「招待講演」

*米村 和紘¹ (1. (独) エネルギー・金属鉱物資源機構)

9:50 ~ 10:15

[T1-03] Critical metal potentiality of Mongolia

「招待講演」

*Jargalan Sereenen¹、Arvinzun M.² (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:15 ~ 10:30

[2Lecture-101-06-4add] 休憩

10:30 ~ 10:55

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

「招待講演」

*Ochirbat Magsarjav²、Jargalan Sereenen¹ (1. Mongolian University of Science and Technology、2. Mongolian Society of Economic Geologists)

10:55 ~ 11:20

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

「招待講演」

*永嶋 真理子¹、今岡 照喜¹ (1. 山口大・院創成)

11:20 ~ 11:45

[T1-06] イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

「招待講演」

*渡辺 寧¹ (1. 秋大・国資)

11:45 ~ 12:00

[2Lecture-101-06-8add] 休憩

脱炭素化社会と必須金属資源

Decarbonized Society and Essential Metal Resources

*細井 義孝¹

*YOSHITAKA HOSOI¹

1. JICA

1. JICA

近年、地球の気温上昇により、北極・南極における大規模かつ不可逆的な氷床消失による海面水位の上昇、熱波・豪雨・沿岸域の氾濫などの気象の極端現象の発生、ツンドラの融解による未知の細菌類の出現、作物生産や水の利用可能性の減少、などの問題が発生し、世界的対応を求められている。地球の気温上昇を抑制する対策としては、省エネルギー化、エネルギーの低炭素化（風力発電、太陽光発電、地熱発電等の利用促進）、利用エネルギーの転換（電化、水素利用等）などが考えられている。ここで、エネルギーの低炭素化を試みようとしたとき、特別な金属が異常に大きな量で必要なことがわかってきた。例えば、太陽光発電では、太陽光電池として銅・アルミニウムのほか、ガリウム、カドミウムが必要である。風力発電のタービンには、ネオジウムやジスプロシウムなどの希土類鉱物で構成される永久磁石を使用した発電機が用いられる。地熱発電では、耐熱井戸のためにチタン、その他の技術にもクロムが必要である。蓄電池は、電気自動車、風力発電でも必要だが、リチウム、バナジウムを必要とする。電気自動車の需要は各国で急激に拡大してきており、蓄電池の需要は比例して拡大する。どのくらい伸びるかと言えば、世界銀行の2020年の報告書によれば、2018年度の生産量に対して、2050年度に必要な量を予測すると、グラファイト494%、リチウムで488%、コバルト460%、インジウム231%、バナジウム189%等の量が、カーボンニュートラルの対応への新技術だけで、必要となっている。必要な金属は、これだけではない。世界銀行は17種の鉱種を挙げている。これら金属の、埋蔵、生産、消費はどのようであるか、筆者は重点対応国を考えた。これらの資源は開発途上国に多くが存在する。ここで、重要鉱物資源を確保するための課題を考える。銅、アルミニウムおよびインジウム以外の6つの鉱種はいずれも資源賦存の偏在性が極めて高く、それは今後需要が増大する鉱物資源の安定的な確保において大きな懸念事項である。また、その限られた生産国の中には政情が不安定であったり、鉱山開発に伴う環境汚染が問題となっていたり、社会的混乱が頻発する国が多く含まれていることも懸念される事項である。これまでの経済システムは、平時を前提として効率性を追求し、グローバル化が推し進められてきたが、新型コロナウイルス感染の拡大によってサプライチェーンの混乱が生じ、世界的な経済活動の停滞を引き起こした。コロナ後を考える上では、サプライチェーンの強靱化を視野に入れた戦略の見直しが必要となる。重要鉱物資源の埋蔵量が豊富な国でありながら開発が進んでおらず、生産量が少ない国が多くあり、今後これらの国々で開発を進めることは、需要の増大に対する供給不安の払拭に繋がるし、サプライチェーンの強靱化も図れるものと考えられる。気候変動対策としてエネルギーの低炭素化およびCO₂排出量の抑制を図るためには、これまでの生産量をはるかに上回る量を必要とする重要な鉱物資源が種々存在し、それらの多くが偏在しており生産国が限られている。しかしながら、これらの鉱物資源の十分な、かつ安定的な供給なしには2DSシナリオの達成はあり得ない。そのため、今後の持続的かつ安定的な鉱山操業および開発では以下のような対応が肝要となる。① ソーシャルライセンス（鉱山開発に対する地域社会による許容）を取得すること。② 環境保全および環境修復に万全を期すこと。③ 鉱物資源の採掘および処理においてクリーンエネルギー利用への移行を図ること。（鉱業は世界のエネルギー使用の11%を占める）例：ザンビアの鉱業セクターは国内電力消費の半分を占める。さらに鉱業セクターの半分は排水のために消費される。最後に、鉱山のコロナ対策と効率化には鉱山自動化、無人化、遠隔化、人工知能（Artificial Intelligence : AI）の導入が考えられる。それは企業にとってのメリットであるが、国としてジレンマもある。途上国の発展のステップとしては、多くの雇用を生み出し、基礎的技能・技術を身に付け、労働者家族の生活の向上、といった鉱業の特典を甘受するメリットと相反するので、先端技術の導入にはジレンマがあり、当該国の経済構造・経済レベルを見

ながら、技術キャッチアップを図りながら導入しなければならない。JICAは資源開発保有途上国の課題解決に尽力していく所存です。

キーワード：脱炭素化、必須金属、鉱業の課題

Keywords: Decarbonization, Essential metals, Mining challenges

鉱物資源確保に関する日本の最近の取り組み

Japan's current approach to securing mineral resources

*米村 和紘¹

*Kazuhiro YONEMURA¹

1. (独) エネルギー・金属鉱物資源機構

1. JOGMEC

世界的なグリーントランスフォーメーション（GX）の進展により、バッテリーや半導体等向けの重要鉱物確保競争が激化している。とりわけ、電気自動車向けに用いられるリチウム、ニッケル、グラファイトについては、既存の資源会社だけではなく、各国自動車メーカーやバッテリーメーカーがその権利確保を加速させている。また、これらの鉱種の供給地及び製錬等中流工程が偏在していることなどにより、経済安全保障上のリスクが懸念されるケースもある。

このような状況の下、世界的に供給源や中流工程の多角化への各国政府からの資金的支援や制度設計などの取り組みが進む。また、環境や人権等への配慮を高めることにより、持続可能な資源開発を推進する動きも高まっている。日本では、「蓄電池産業戦略」や経済安全保障推進法に基づく「重要鉱物に係る安定供給確保を図るための取組方針」などに基づいて、日本企業による国内外での鉱山開発、技術開発、製錬などの中流工程の強化への支援、具体的には、JOGMECによる探鉱・開発事業への共同出資比率の引き上げや助成金による開発等の支援を行っている。中流工程の支援強化については、資源国での高付加価値化政策やアジア各国での新たな産業創出にもつながると期待される。

制度設計による日本企業支援に加え、資源国との資源外交やマルチ枠組みへの対応も積極的に実施している。各国の地質調査機関等との協力覚書の締結等を通じて、具体的には資源国政府の要人を招聘した日本企業向けセミナーやリモートセンシング技術の技術移転、人材育成等を進めている。アジアにおいては、ASEAN+日中韓の枠組みにて、持続可能な鉱物資源開発のための協力を進めている他、共同探査等を実施し新たな鉱物資源の可能性を共同で評価している。

供給源の多様化の課題は、既存資源が枯渇する中で有望なプロジェクトに投資が集中していることである。その一方で、これまで資源としてみなされていなかった鉱石鉱物が新たな鉱源として着目され、新たに探査が拡大している場合もある。また、地質学的理解が深まり特定のテクトニクスセッティングが明らかになることで、新たな鉱床帯として認識される場合もある。新たな鉱石タイプとしては、近年探査が開始されたニッケル資源であるアワルワ鉱が好例である。アワルワ鉱は、ニッケル-鉄合金（Ni₃Fe）で、低品位ながら大規模に蛇紋岩化した超苦鉄岩中に含まれる。温暖化対策として、低CO₂排出のニッケル生産が求められる中、既存の製錬に比べ低CO₂排出での生産が可能であることから、日本のバッテリーメーカーや鉱山会社も注目する。アワルワ鉱は、沈み込み帯内の低酸素フガシィ、低硫黄環境で形成されると考えられ（e.g. Frost, 1985; Britten, 2017）、主な産地であるカナダBC州にて研究・探査が進んでいるが、詳細な地質セッティングについてはまだ解明されていない部分が多く、鉱物学的、岩石学的な理解が進むことで効率的な探査が可能になる。小大陸が離合集散して形成されたアジア大陸には、様々なテクトニクスセッティングが内包されているが、詳細な地質調査が行われていないエリアも多く残ることから、アワルワ鉱に限らず、未開発の新たな資源が今後も多く発見されていくと期待される。

キーワード：重要鉱物、鉱物資源確保

Keywords: Critical Minerals, Securing Mineral Resources

Critical metal potentiality of Mongolia

Critical metal potentiality of Mongolia

*Jargalan Sereenen¹、Arvinzun M.²

*Sereenen Jargalan¹, M. Arvinzun²

1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

Critical metals such as copper, lithium, nickel, cobalt and rare earth elements are essential components in many of today's rapidly growing clean energy technologies –from wind turbines and electricity networks to electric vehicles. Lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite are crucial to battery performance. rare earth elements are essential for permanent magnets used in wind turbines and EV motors.

Mongolia has wide potential on mineral resources in variety of types.

Regarding to critical metal tendency, there is no clear classification in Mongolia, partly identify as high technology minerals and some government official documents use as important minerals. Even though some small projects are carried out to identify how potential is critical metals including REE, Li, Ni, Co as well as graphite in recent years.

Therefore, we carried out geological reconnaissance study to make clear genetic type, regional distribution characteristics and ore mineral identification. As result we have quite good potentiality on REE mineralization, including carbonatite and alkaline metasomatite types. Lithium is not so studied in Mongolia, but recently, we have several discoveries of Li bearing pegmatites in the central-eastern part. Nickel and cobalt are almost not studied instead of small occurrences found during geological mapping at scale 1:200000 and 1:50000, so no clear potentiality is recognized. There are several deposits and occurrence in Mongolia which are closely relate with marbles metamorphic rocks and has possible potentiality. Copper is the most potential resource making in all, almost 1 billion tons of reserves and resources. Annual production is expected to more than double from 300,000 tons of copper concentrate per year to over 600,000 tons per year from 2028 to 2036 once the Oyu Tolgoi mine is fully operational in 2023.

This time we would like to make general introduction of how potential is in critical metal tendency in Mongolia.

キーワード : Metal potentiality、 Mongolia

Keywords: Metal potentiality, Mongolia

口頭講演

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

2024年9月13日(金) 09:00 ~ 12:00 ESホール (東山キャンパス)

10:15 ~ 10:30

[2Lecture-101-06-4add]休憩

Geology, sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

Geology, sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression, in South Mongolia

*Ochirbat Magsarjav², Jargalan Sereenen¹

*Magsarjav Ochirbat², Sereenen Jargalan¹

1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

1. Mongolian University of Science and Technology, 2. Mongolian Society of Economic Geologists

Mongolia has abundant resources of coal, which are distributed mainly in the south and southeastern part, including some deposits in the north and west part of the country. In recent years, the exploration of coal deposits has been intensively carried out, but not much effort has been made to determine the origin, regional regularity of coal distribution as well as relationship between geological condition and coal quality.

The purpose of this study is to clarify geology and sedimentation environment of the Ovoot khural coal bearing depression in order to contribute to the reconstruction of the Mesozoic geologic and geodynamic setting of the Mongolia.

The study area is located at the 1000 km southwest of Ulaanbaatar and 50 km north of the Mongolia-China border, forming latitudinal trending depression which is 40 to 60 km in width and continues more than 200 km. There are five independent coal bearing parts with 16 coal deposits, which are: Bayantes part, contains Elstei, Khurshuut, Khuvd, Gashuu Tolgoi and Khuren tasv deposits; Ovoot Tolgoi part, contains Sunset and Sunrise deposits; Nariin sukhait part contains West Nariin sukhait, Central Nariin sukhait, East Nariin sukhait and Khuren shand deposits; Sumber part contains Central Sumber, Sumber and Biluut deposits and Jargalant part contains Jargalant and South Biluut deposits.

Result of geochemical study indicates that sediments deposited in the Ovoot khural depression is sourced by the weathering and transporting of intermediate and felsic composition magmatic rocks, mainly from dacite, andesite including minor amount of metamorphic, sedimentary and intrusive rocks.

Spider diagrams of trace element composition of sedimentary rocks of the Orgilokhbulag formation, show Nb-depletion and Pb, Mo enrichment, indicating possible origin of magmatic rocks formed under subduction environment and they are intermediate to felsic in composition. The major trace and rare earth element composition of the Orgilokh bulag formation sedimentary rocks, indicate that the source rocks of sediments might have been formed in the active continental margin tectonic setting.

According to provenance model, coal deposition is undertaken with good tissue preservation, in an alternating environment of oxygenic and deoxygenated swamps.

Based on the metamorphic degree, the temperature of peat compression, the amount of volatile, and the depth gradient of temperature, peat was buried and deposited at a depth of 3500-7000 meters. Low sulfur content, low ash content and low volatile content of coal at the various parts of the depression indicates that the peat deposition is occurred under two stages.

キーワード : Ovoot khural coal、 Mongolia

Keywords: Ovoot khural coal, Mongolia

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

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

*永嵩 真理子¹、今岡 照喜¹

*Mariko NAGASHIMA¹, Teruyoshi IMAOKA¹

1. 山口大・院創成

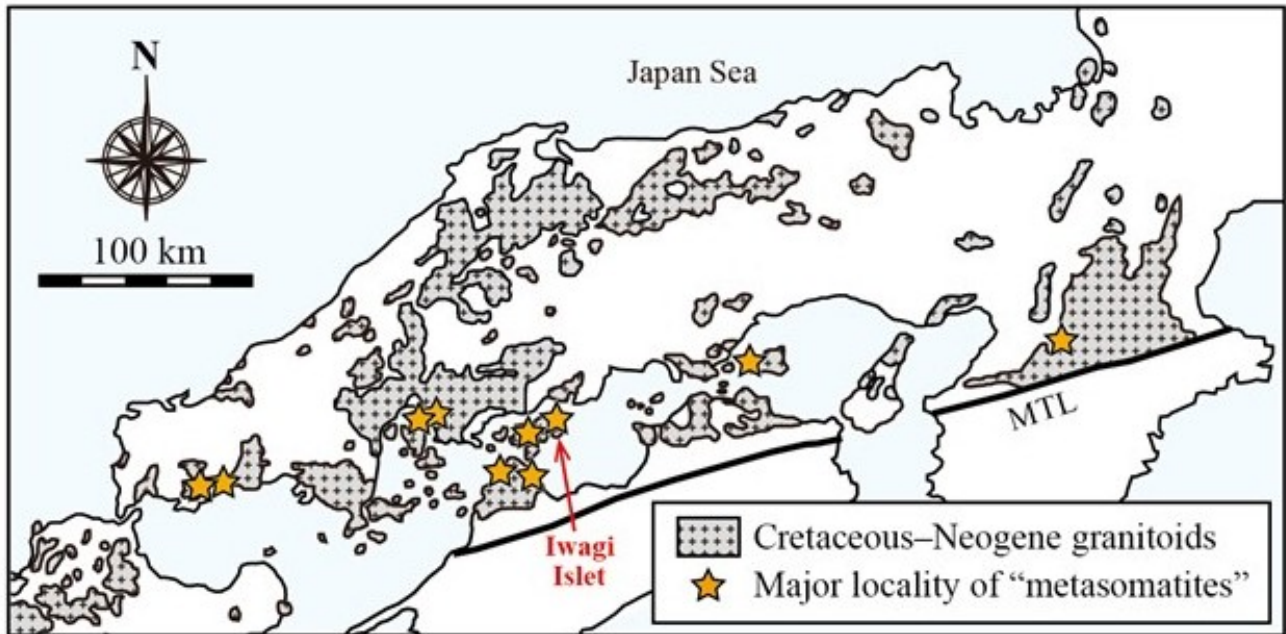
1. Yamaguchi Univ. Sci.

The study of metasomatic rocks is essential for comprehending the nature and origin of metasomatic agents. It might provide a clue for fluid circulation within the crust. In the Setouchi Province, metasomatic rocks are distributed along an approximately E–W trend, and these rocks are associated with Late Cretaceous granites. The Iwagi albitite is one such metasomatic rock. However, unlike other metasomatites in the area, its high lithium content (500 ppm) is unique. Detailed investigations of the mineralogical characteristics of Li-minerals have been conducted to better understand the formation and evolution of Iwagi albitites. The albitites exist as small masses, and the textures of the weakly metasomatized ones resemble those of the host adjacent granite. The transition from granite to albitite occurs gradually and can be understood through the mineral assemblages. The Iwagi albitite is known as the type locality of four Li-analog minerals: sugilite $\text{KNa}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+}, \text{Al})_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$, katayamalite $\text{KLi}_3\text{Ca}_7\text{Ti}_2(\text{SiO}_3)_{12}(\text{OH})_2$, murakamiite $\text{LiCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})$, and ferro-ferri-holmquistite $\square\text{Li}_2(\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. The former three minerals were found in the fully albitized rock, while the latter was found in the weakly albitized granite. The albitites display a variety of replacement textures due to Na–Li metasomatism, and they also exhibit noticeable strain-induced textures.

The $\delta^7\text{Li}$ values of murakamiite and Li-rich pectolite show a wide range from -9.1 to +0.4‰ (ave. -2.9‰) and should have resulted from hydrothermal fluid-rock interactions at 300–600 °C. The very low $\delta^7\text{Li}$ values may have originated from intra-crystalline Li isotope diffusion or involvement of deep-seated, Li–Na-enriched subduction-zone fluids with low $\delta^7\text{Li}$ values. This finding highlights the significance of fluid-rock interactions in the formation of metasomatic rocks. Deformation-induced fracturing of the rock may have enhanced fluid circulation, leading to the formation of the metasomatic rocks along the E–W trending lineament.

キーワード : Lithium、albitite、metasomatism

Keywords: Lithium, albitite, metasomatism



Distribution of metasomatites in Setouchi Province, SW Japan.
(after Murakami 1976)

イオン吸着型希土類鉱床：重希土類資源の供給源

Ion adsorption-type REE deposits: the source of HREE

*渡辺 寧¹

*Yasushi Watanabe¹

1. 秋大・国資

1. Akita Univ. Int. Res. Sci.

イオン吸着型鉱床は、1970年代後半に中国南部の江西省を中心とした地域で確認されたユニークな鉱床タイプである。花崗岩の風化に伴い形成されたカオリナイトやハロイサイト等の粘土鉱物に希土類イオンが吸着されることにより形成される鉱床で、鉱石となる粘土中の希土類の品位は、カーボナタイトなど他のタイプの希土類鉱床と比較すると低いが(~0.2 wt%)、希土類の抽出が極めて簡単で生産コストが低いという特徴がある。このタイプの鉱床が脚光を浴びるようになったのは2000年以降で、重希土類元素の供給源としてである。1983年の希土類磁石の発明と1985年の製品化、1997年の初代プリウスの発売以降、ネオジム磁石の需要が増したため重希土類の需要が増してきた。希土類元素の主要な供給源であるカーボナタイトや漂砂鉱床は、軽希土類元素に富んでいるが重希土類には乏しいため、イオン吸着型鉱床は重要な重希土類元素の供給源となった。重希土類に富む鉱床の探査は世界各地で行われ、幾つかの重希土類に富むアルカリ岩鉱床が発見されたが、イオン吸着型鉱床に勝る鉱床はなく、未だ重希土類はこのタイプの鉱床から供給されている。このタイプの鉱床は、中国南部地域のみでなく、東南アジアに広く分布する。またマラウイやマダガスカル等南部アフリカやブラジル、チリなど南米にも分布する。現在は中国と接するミャンマーがイオン鉱の主な生産地になっている。重希土類に富むイオン吸着型鉱床の形成には、1) 重希土類に富む母岩の存在、2) 粘土に富む厚い(>10m)風化殻の形成、3) 風化に際し分解しやすい希土類鉱物の存在、の3条件が必要である。1) の条件を満たすものとしては、分化した閃長岩やチタン鉄鉱系列の花崗岩類が相当する。チタン鉄鉱系列の花崗岩を形成するマグマは、結晶分化の過程でチタン石を晶出しないため、残液に重希土類が濃集する。このような花崗岩マグマは錫に富み、錫鉱床を伴うことが多い。2) の粘土に富む厚い風化殻が形成される地域は亜熱帯湿潤気候地域に相当する。熱帯地域では風化が進みすぎ、カオリナイトが分解してギブサイトが生じるため、希土類元素の吸着が起こらない。また珪長質岩以外の母岩では、カオリナイトがほとんど生成されず吸着が起こらない。形成された風化殻が剝削を受けない地質環境も重要で、沈み込み帯に面している日本列島はあまり適さない環境と言える。3) の風化に際し分解しやすい鉱物は、炭酸塩鉱物であり、イオン吸着鉱下部の母岩には、しばしば二次的に形成された希土類炭酸塩鉱物(バストネサイトやシンキサイトなど)が認められる。リン酸塩鉱物は風化に対して耐性があるが、アパタイトは風化を受けると分解する。モナサイトやニオブ酸化物はしばしば風化残留鉱床を形成する。イオン吸着鉱から希土類を抽出するために、一般には硫酸アンモニウム水溶液が用いられ、抽出された希土類はシュウ酸や水酸化ナトリウムを用いて希土類水酸化物として回収される。近年中国では、その場リーチングが行われている。これは風化殻からなる地山に直接硫酸アンモニウム水溶液を注入し、地山のふもとで抽出された希土類を含む水溶液を回収する方法である。このような抽出は、約半年、乾季の間行われ、抽出が終わると新規の場所へと移動する。抽出が終わった現場は植林され、植生の回復が行われている。イオン吸着型鉱床は、品位の低い地表の風化殻を広く開発するため、地表の植生が失われるとともに、希土類抽出後の粘土が流出し地滑りが起こったり、抽出の際に用いられた溶液が、下流域の田畑や河川を汚染する例が報告されている。そのためイオン吸着型鉱床の開発には環境汚染を防止する細心の注意が必要となる。現在世界各国でカーボンニュートラル社会実現のために自動車の電動化が進められている。アジアの国々は独自の希土類サプライチェーンの確立を目指し、イオン吸着型鉱床の開発に目が向けられている。今後、イオン鉱の開発が各国で行われるかどうかは電動化推進の一つの鍵になる。

キーワード：イオン吸着型鉱床、重希土類、風化、磁石

Keywords: ion adsorption-type deposit, heavy rare earth elements, weathering, magnet

口頭講演

T1：アジアの地殻進化と資源開発に関する総合的理解（シンポジウム）

座長:小山内 康人、大和田 正明

2024年9月13日(金) 09:00 ~ 12:00 ESホール (東山キャンパス)

11:45 ~ 12:00

[2Lecture-101-06-8add]休憩

口頭講演 | S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

■ 2024年9月13日(金) 9:00 ~ 12:00 | 会場 ES024 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

座長: 土屋 範芳

9:00 ~ 9:05

[2Lecture-201-10-1add] コンビーナ挨拶

9:05 ~ 9:35

[S2-01] 背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

「招待講演」

*山本 順司¹ (1. 九州大・院理)

9:35 ~ 9:50

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

「発表賞エントリー」

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

9:50 ~ 10:05

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

*大柳 良介^{1,2}、沢田 輝^{3,2}、Chang Qing²、Satish-Kumar Madhusoodhan⁴ (1. 国士舘大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大)

10:05 ~ 10:20

[S2-04] CO₂ mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses*Otgonbayar DANDAR¹, Atsushi Okamoto¹, Masaaki Uno¹, Miku Takeya² (1. Tohoku University, 2. INPEX)

10:20 ~ 10:30

[2Lecture-201-10-6add] 休憩

10:30 ~ 10:45

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

「発表賞エントリー」

*城口 結衣¹、延寿 里美¹ (1. 愛媛大・院理工)

10:45 ~ 11:00

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

「発表賞エントリー」

*Nomin Tumurkhuu¹, Otgonbayar Dandar¹, Masaaki Uno¹, Manzshir Bayarbold¹, Atsushi Okamoto¹ (1. Tohoku University)

11:00 ~ 11:15

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

「発表賞エントリー」

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

11:15 ~ 11:30

[S2-08] “cleavable olivine”の成因

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

11:30 ~ 11:45

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

「発表賞エントリー」

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

11:45 ~ 12:00

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

*川本 竜彦¹ (1. 静岡大学理学部地球科学科)

口頭講演

S2: 岩石-水相互作用（スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

2024年9月13日(金) 09:00 ~ 12:00 ES024 (東山キャンパス)

09:00 ~ 09:05

[2Lecture-201-10-1add]コンビーナ挨拶

背弧マントルに染み渡るスラブ由来流体

Slab-derived fluid infiltrating back-arc mantle

*山本 順司¹

*Junji YAMAMOTO¹

1. 九州大・院理

1. Kyushu University

日本から極東ロシアにわたる東アジア地域には、新生代の玄武岩が広く分布している。この火成活動にスラブ由来流体が関わっている可能性が主に物理的研究（地震波トモグラフィや電気伝導度観測、高温高圧実験、数値計算等）を基に提唱されており、全球的な熱-物質循環系の議論に波及する重要な課題として注目を集めている。しかし、スラブ由来流体の関与を決定づけるには、背弧マントルにおける水の痕跡やその起源を化学的に究明する必要がある。

玄武岩質マグマがマントル中を上昇する際、その一部はマントル内に岩脈や粒界成分、メルト包有物として取り残される。東アジアにおける新生界玄武岩も、その痕跡をマントル内に残しているに違いない。そこで本研究では、極東ロシアの三つの地域（EnnokentievとSveyagin, Tok）で採取したかんらん岩捕獲岩に焦点を当て、スラブ由来流体の関与を調べた。

極東ロシアのかんらん岩捕獲岩には揮発性成分のポケットが三種類見られる。一つは二酸化炭素を主成分とする流体包有物であり、二つ目は珪酸塩メルトの包有物、そして三つ目は粒界成分である。Ennokentievの捕獲岩には、高い成熟度を示す負結晶タイプの二酸化炭素流体包有物が多く見られる。その二酸化炭素密度と地質温度を二酸化炭素の状態方程式に照らし合わせることで、これらの捕獲岩が1000°C・1 GPa程度のリソスフェアマントルから由来したことが分かった。一方、Sveyagin及びTokの捕獲岩には負結晶タイプの二酸化炭素包有物は見られない。しかし、それらの輝石温度（883-1022°C）をEnnokentiev試料の温度圧力値から推定される地温勾配（ $\sim 100 \text{ mW/m}^2$ ）に照らすと、0.86-1.12 GPaの圧力が得られ、やはり当該地域の捕獲岩もリソスフェアマントル由来であると推定できた。

これらの捕獲岩試料からスラブ由来流体の痕跡を探るため、まずSveyagin試料の微量元素組成をICP-MSを用いて測定した。捕獲岩を鉱物種ごとに選別し、希硝酸で洗浄した後に酸分解した溶液を分析したところ、その微量元素組成に目立った特徴は見られなかった。しかし、酸洗浄せずに酸分解した溶液には、HFSEやCe, Thの負異常が明瞭に見られた。同様の特徴はメルト包有物のLA-ICP-MS分析でも得られたため、当該地域のマントルには水が関与したマグマが存在していたと推察される（Yamamoto *et al.*, 2009 *Island Arc*）。

このマグマの起源を見極めるため、窒素と希ガスの同位体比を測定した。窒素と希ガスは真空破砕法を用いて抽出したため、それらは主にメルト包有物の収縮気泡由来であると考えられる。窒素同位体比は、大気的な値（0‰）から-10‰を下回る幅広い値を見せた。これらを $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ とのグラフにプロットすると、窒素同位体比の幅広い分布は大気的端成分からの質量分別に因ると分かった（図1）。Sveyagin地域は、その直下400~500 kmに太平洋プレートが沈み込んでおり、電気伝導度観測から脱水流体がマントルへ浸入している可能性が提唱されている。スラブに含まれている海水の脱水は溶存窒素（ N_2 ）の同位体比に質量分別をもたらす。それゆえ、図1に見られるSveyagin試料の分布は、当該地域のマントルにスラブ由来の海水を含むマグマが通過したことを示唆する（Yamamoto *et al.*, 2020 *EPSL*）。

一方、Tok試料の窒素同位体比に際だって低い値は見られず、むしろ+3‰程度の高い窒素同位体比が目立つ（図1）。このような高い窒素同位体比は島弧や背弧の噴気ガスから得られることが多く、地表堆積物の影響が考えられている。しかし、そのような値がマントルから得られたことは特筆に値する。つまり、Tok試料の高い窒素同位体比は、当該地域のマントルにスラブ由来の窒素が存在する可能性を示唆する。Tok試料の窒素同位体比分布をスラブの影響として解釈できるか考察してみる。スラブ中の堆積物において、窒素は主に NH_3 （または NH_4^+ ）として存在するが、沈み込みとともに NH_3 は N_2 へ化学変化し、水溶液とともに粒界へ脱窒す

る。この化学変化は窒素同位体比を数‰低下させ、その後の脱窒過程も窒素同位体比に更なる低下をもたらす。この考えに照らすと、図1においてTok試料が堆積物と大気間の混合線沿いから低い窒素同位体比方向へ分布する様子は、やはりスラブ中の NH_3 がマントルに浸入した証左と見なして良いのではなかろうか。

これらの結果は、スラブ由来流体を含むマグマが極東ロシアのリソスフェアマントルを通過したことを示す。つまり、東アジアにおける新生代火成活動にスラブが関与しているという物理的モデルを化学的に補強できたと言えよう。

キーワード：スラブ、マントル遷移層、窒素同位体比、捕獲岩、流体包有物

Keywords: slab, mantle transition zone, nitrogen isotope ratio, xenolith, fluid inclusion

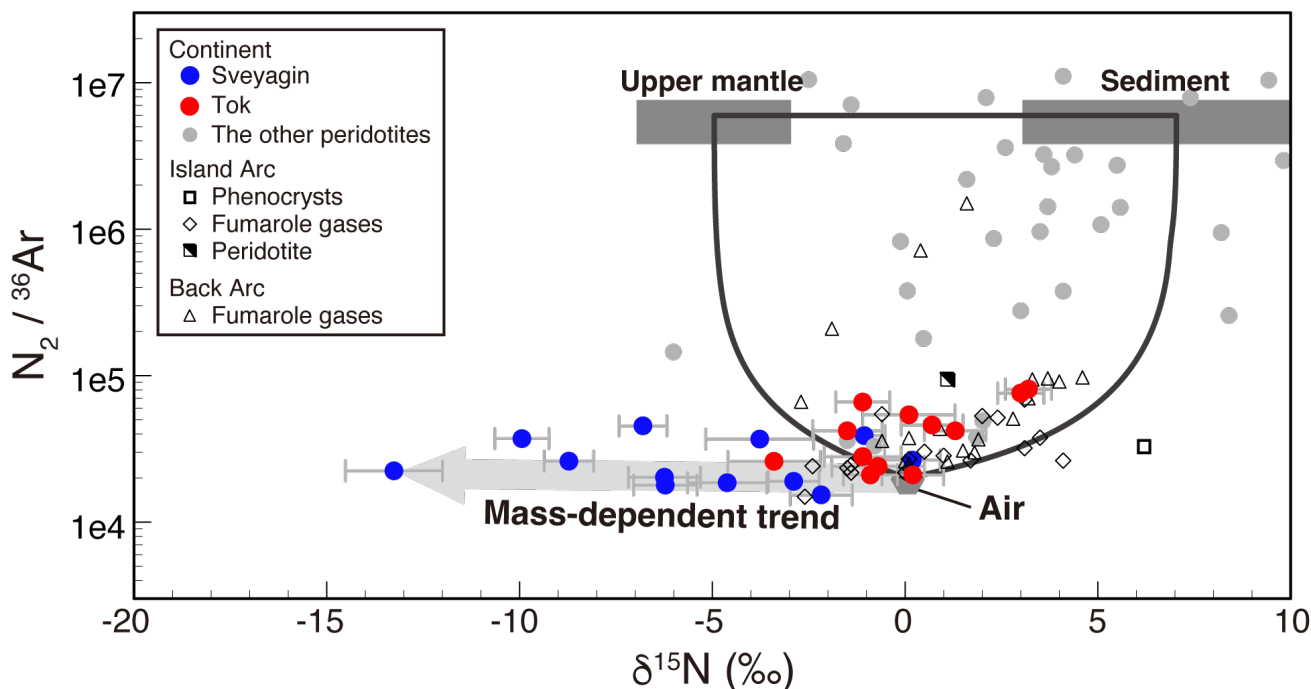


図1. $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ vs. $\delta^{15}\text{N}$ of Far Eastern Russian xenoliths with data referred from earlier studies (see Yamamoto et al. (2020) EPSL).

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

Geochemical diversity and significance of orthopyroxene pseudomorphs in ultramafic rocks derived from mantle wedges

*和仁 拓望¹、市山 祐司¹、田村 明弘²、森下 知晃²

*Takumi Wani¹, Yuji Ichiyama¹, Akihiro Tamura², Tomoaki Morishita²

1. 千葉大学、2. 金沢大学

1. Chiba University, 2. Kanazawa University

マントルウェッジへのスラブ起源流体の浸透とそれによる交代作用によって形成される含水鉱物は、マントルウェッジ中の流体移動元素の固定に重要な役割を果たしていると考えられる。特に金雲母や角閃石のようなアルカリ元素を含む含水鉱物は、島弧マグマ組成の側方変化に関与するなど(Tatsumi, 1989)、沈み込み帯における元素移動・元素循環を解明する上で重要な含水鉱物である。しかしながら、スラブ起源流体によって形成されたこれらの鉱物がどのように固定され、どのような地球化学的特徴を持つかは不明瞭である。本研究では、マントルウェッジを起源とする超苦鉄質岩の金雲母・角閃石を含む直方輝石仮像に着目し、H₂O流体を媒介したスラブ-マントル間の元素移動について議論する。関東山地の十石峠超苦鉄質岩体は、マントルウェッジを起源とし(Arai and Hisada, 1991)、木呂子一名栗テクトニックメランジュに産する古生代前期の角閃岩とともに黒瀬川帯の構成要素とされる。十石峠の蛇紋岩化したハルツバージャイトには、金雲母+リヒター閃石+変成単斜輝石+変成かんらん石+アンチゴライト±モンチセリ石からなる直方輝石の仮像が確認される。CMSH系の相平衡下における鉄に富む変成かんらん石+変成単斜輝石+アンチゴライトの共生関係から、輝石仮像は500~600°Cで後退変成作用時に形成されたことが推定される。全岩組成を用いたKNCMASH系のシュードセクションは、金雲母とリヒター閃石もこの温度で形成されたことを示唆する。木呂子一名栗テクトニックメランジュの角閃岩は、Ca角閃石のリムに高压変成作用を示唆するNa-Ca角閃石が形成されるタイプ1と形成されないタイプ2に分類される。タイプ1角閃岩の全岩微量元素パターンは、Sr正異常とNb, Ta, Zr, Ti負異常を示し、島弧玄武岩に類似する一方、タイプ2角閃岩はMORBに類似する。したがって、十石峠の超苦鉄質岩と木呂子一名栗テクトニックメランジュのタイプ1とタイプ2角閃岩は、それぞれ前期古生代のマントルウェッジ、構造浸食により削剥された島弧地殻、沈み込む海洋地殻に相当すると推定される。輝石仮像の元素マッピングから計算した仮像の主要元素組成は、同岩体内の初生直方輝石と比較してK₂O, Na₂O, CaOで10~100倍、Cs, Rb, Baが100倍以上増加している。これらの元素は角閃岩相の変成岩の脱水によるスラブ起源流体によって付加されている可能性がある。十石峠超苦鉄質岩に類似した輝石仮像組織は、古生代の沈み込みオフィオライトである宮守オフィオライト、白亜紀の蛇紋岩メランジュである神居古潭帯、マリアナ前弧コニカル海山(Hole779Aと780C)のマントルウェッジを起源とする蛇紋岩化したハルツバージャイトからも確認される。輝石仮像の構成鉱物は、それぞれ単斜輝石+アンチゴライト、Na-Ca角閃石+変成単斜輝石+変成かんらん石+アンチゴライト±金雲母、Na-Ca角閃石+Ca角閃石+タルク+アンチゴライト(779A)、Na-Ca角閃石+Ca角閃石+単斜輝石+アンチゴライト(780C)である。鉱物組み合わせから、神居古潭帯の仮像は十石峠と同様の温度での形成が考えられるが、宮守オフィオライトの仮像は、単斜輝石+アンチゴライトの共存から450-500°C以下で形成されたと推定される。また、コニカル海山の試料はタルク、単斜輝石の有無から、779Aで780Cよりも高い温度が推定される。これらの仮像の初生直方輝石に対する元素収支を見積った結果、十石峠に比べて宮守オフィオライトではKOとNaOの流入量が小さく、CaOの流入量が大い一方、神居古潭帯とマリアナ蛇紋岩海山ではCaOとKOの流入が低くNa₂Oの流入量が大い。仮像の微量元素組成は、単斜輝石が多く形成される宮守オフィオライトの仮像でSrに富み、Na-Ca角閃石の多いコニカル海山779Aの仮像は、Na-Ca角閃石の乏しい780Cの仮像と比較してCsとRbで約10倍富む。超苦鉄質岩に伴うス

ラブ由来の変成岩の変成相は、黒瀬川帯や宮守オフィオライトで緑簾石角閃岩相～角閃岩相、神居古潭帯やコニカル海山で青色片岩相であり、沈み込むスラブの温度勾配の違いに起因する脱水鉱物の相違が推測される。黒瀬川帯や宮守オフィオライトは角閃岩のホルンブレンドの脱水によるCa富む流体が、神居古潭帯やマリアナ蛇紋岩海山は青色片岩のNa角閃石やパラゴナイトの脱水によりNaに富んだ流体が流入し、輝石仮像組成に影響した可能性がある。また、黒瀬川帯の仮像の高いK₂O量は変堆積岩起源流体の影響が大きいと考えられる。輝石仮像を構成する鉱物の形成とそれによる流体移動元素の固定には、流入する流体組成と温度が重要であると考えられる。

キーワード：マントルウェッジ、マントル交代作用、スラブ流体、輝石仮像

Keywords: mantle wedge, mantle metasomatism, slab fluid, orthopyroxene pseudomorph

金崎蛇紋岩岩体(関東山地)にみられる蛇灰岩の形成条件とその意義

Petrogenesis and significance of ophicarbonates in the Kanasaki serpentinite body (Kanto Mountains, Central Japan)

*大柳 良介^{1,2}、沢田 輝^{3,2}、Chang Qing²、Satish-Kumar Madhusoodhan⁴

*Ryosuke OYANAGI^{1,2}、Hikaru Sawada^{3,2}、Qing Chang²、Madhusoodhan Satish-Kumar⁴

1. 国土館大、2. JAMSTEC、3. 富山大、4. 新潟大

1. Kokushikan Univ., 2. JAMSTEC, 3. Toyama Univ., 4. Niigata Univ.

地球では大気・海洋・地球内部で炭素が循環することにより、大気中の二酸化炭素量がうまく調節され、ハビタブルな環境が維持されてきた(e.g., Plank and Manning, 2019, *Nature*)。しかし、地球内部における炭素循環の全容はつかめていない。超塩基性岩は、地質学的に速い速度で炭素を含む流体と反応することが知られており(Beinlich et al. 2020, *Nat. Geo*)、多くの炭素を炭酸塩鉱物として貯蔵できるポテンシャルを有している。そのため、どのようなテクトニックセッティングにおいて、どのような流体と反応することで超塩基性岩が炭素を貯蔵するのか、その多様性を明らかにすることが重要だと考えられる。

本研究では、沈み込み帯における超塩基性岩の炭酸化過程をより理解するために、岩石学および地球化学的分析を用いて、日本の関東山地の金崎地域に産する蛇灰岩(炭酸塩鉱物と蛇紋石で構成されている岩石)の成因を議論する。金崎地域では、みかぶユニットの塩基性岩や泥質片岩、超塩基性岩が露出している。蛇紋岩や蛇灰岩は泥質片岩に囲まれたブロックとして存在している。蛇紋石はメッシュ組織を示し、メッシュコアはリザーダイトもしくはクリソタイルが、メッシュリムにはアンチゴライトが存在する。蛇灰岩は4つの産状を示した。(タイプI)角礫化した蛇紋岩の間を充填する方解石、(タイプII)角礫化した蛇紋岩の間を充填する方解石+ドロマイト、(タイプIII)直線状の方解石脈、(タイプIV)直線状の方解石+ドロマイト脈である。直線状の炭酸塩脈は、炭酸塩セメントを含む蛇灰岩マトリックスを切っている。

タイプII-IVの炭酸塩鉱物は、¹³Cに乏しく($\delta^{13}\text{C}_{\text{(VPDB)}} = -6 \text{ - } -8\text{‰}$)、幅広い $\delta^{18}\text{O}_{\text{(VSMOW)}}$ 値を示す(13 - 22‰)。また、これらの炭酸塩鉱物は、Euの正の異常を示すREEパターンを示す。一方で、タイプIの炭酸塩鉱物は、¹³Cに富み($\delta^{13}\text{C}_{\text{(VPDB)}} = -2 \text{ - } +2\text{‰}$)、比較的狭い $\delta^{18}\text{O}$ 値を示す(13 - 16‰)。タイプIの炭酸塩鉱物は多様なREEパターンを示した。負のCeの異常とYの正の異常を示しHREEに富むパターンや、Euの正の異常とややLREEに富むパターン、それらの中間のパターンが観察された。以上のような、蛇灰岩に含まれる炭酸塩鉱物の産状や地化学的特徴の違いは、超塩基性岩の炭酸化作用が多様な流体によって引き起こされ、多様なテクトニックセッティングで起きたことを示唆している。講演では、炭酸化作用を引き起こした流体や炭酸化作用のテクトニックセッティングをもとに、地球規模炭素循環における超塩基性岩の役割について考察を行う。

キーワード：蛇紋岩、蛇灰岩、炭素循環

Keywords: Serpentine, Ophicarbonates, Carbon cycle

CO₂ mineralization in andesitic rocks revealed by hydrothermal experiments and thermal analyses

*Otgonbayar DANDAR¹, Atsushi Okamoto¹, Masaoki Uno¹, Miku Takeya²

1. Tohoku University, 2. INPEX

Mineral carbonation enables long-term stable CO₂ storage. Among rocks, basalts and ultramafic rocks (high Mg and Ca contents) are known to have high potential to store CO₂. Although, andesitic rocks (composition is wide; microstructures are diverse) are widely distributed in Japan (in a subduction zone), their suitability for mineral carbonation and CO₂ storage is not well understood. In this study, we report preliminary results of hydrothermal reaction experiments (exps) using andesitic agglomerate rocks from the Nagaoka area, Niigata Prefecture and thermal analyses of the products. The andesite agglomerate consists mainly of volcanic glass, plagioclase, clinopyroxene, with small amounts of orthopyroxene, hornblende, and iron oxides. Two types (a batch-type vessel and a stirred apparatus) of exps have been conducted with the powder samples (150-250 μm). In the batch exp (filling ratio = 43% and remained space is CO₂ gas), powder sample is placed at two locations: the top (supercritical CO₂ saturated in water) and bottom (reacted with a CO₂ dissolved solution) of the reaction vessel. The batch exps were conducted at 75 °C, 18 MPa (80 days), 150 °C, 20 MPa (20 days), and 200 °C, 25 MPa (20, 40, and 60 days). The solid phase after exp is observed by EPMA, TG, and TPD-MS, and the solutions are analyzed for element contents by ICP-OES. To accelerate the reaction, a stirred reaction apparatus was used for the exp at 200 °C, 20MPa, and 10 days. In the batch exps at 75 °C and 150 °C (Ca and Mg+Fe contents = 10-80 mg/kgH₂O), dissolution of volcanic glass is observed only with small dissolution of plagioclase and other minerals. Significant carbonate precipitation was observed in a 60-day batch exp at 200 °C (Fe- and Ca-rich magnesite) and a 10-day stirred exp (calcite and dolomite). The precipitation proceeded not only at the bottom (CO₂ dissolved solution), but also at the top (supercritical CO₂), suggesting the reaction accelerated by water vapor. The experimental solution (carbonate precipitated, the pH increased to >7 and the concentrations of Mg and Ca <20 mg/kgH₂O), suggests the pH in the reaction vessel increased and reached to condition of carbonate precipitation. Based on the above exps, the andesitic rocks in the Nagaoka area are considered to have sufficient potential for mineral carbonation and CO₂ storage.

Keywords: Mineral carbonation , CO₂ storage, Andesite, Hydrothermal reaction experiment, the Nagaoka area, Niigata Prefecture

口頭講演

S2: 岩石-水相互作用（スペシャルセッション）

座長:土屋 範芳

2024年9月13日(金) 09:00 ~ 12:00 ES024 (東山キャンパス)

10:20 ~ 10:30

[2Lecture-201-10-6add]休憩

愛媛県西部、頃時鼻超苦鉄質岩体の塊状蛇紋岩と片状蛇紋岩の産状

Massive and foliated serpentinites from the Udonohana ultramafic body, Western Ehime Prefecture, Japan.

*城口 結衣¹、延寿 里美¹

*Yui Joguchi¹, Satomi Enju¹

1. 愛媛大・院理工

1. Ehime Univ. Sci. &Egn.

【はじめに】

愛媛県八幡浜市から西予市にかけて分布する三瓶超苦鉄質岩体は、御荷鉾帯、北部秩父帯、黒瀬川帯に囲まれるようにして存在し、周辺の真穴層や低中庄大島変成岩と共に真穴帯を形成している。三瓶超苦鉄質岩体は東部の嶋山超苦鉄質岩体と西部の頃時鼻超苦鉄質岩体から構成され、かんらん石などの化学組成が島弧環境下で生成された様々な枯渇度を持つマグマから形成されたキュームレートの一部であったと考えられている (Ichiyama 2015)。嶋山超苦鉄質岩体はダナイトやウェールライト、輝岩、頃時鼻超苦鉄質岩体はダナイトやウェールライト起源の蛇紋岩から構成される。嶋山超苦鉄質岩体は蛇紋岩化作用や脱水反応を伴わず、600~700°Cで超苦鉄質岩が平衡状態となった。一方で頃時鼻超苦鉄質岩体は蛇紋岩化した後、400~500°Cで脱水したといわれている。しかし、蛇紋岩化の過程やその多様性については明らかになっていない。本調査地域である頃時鼻海岸では頃時鼻超苦鉄質岩体と隣接する北部秩父帯の連続した露頭が見られ、蛇紋岩が広く分布している。本研究では調査地域における蛇紋岩の多様性と産状を明らかにし、それら形成過程について考察を行う。

【研究手法】

調査地域における22地点で野外調査と観察できた岩相ごとに62サンプルの採取を行った。RIGAKU製 Ultima IVを使用して粉末X線回折実験(XRD)と、偏光顕微鏡にて組織観察を行った。また代表的な蛇紋岩の試料に関してはOxford製エネルギー分散型X線分析装置EDSを装着したJEOL製 走査型顕微鏡 (SEM)JSM-6510LVを用いて分析を行った。

【結果・考察】

本調査地域では南北方向の海岸線に沿って蛇紋岩の連続露頭が見られ、北部には黒色片状蛇紋岩、南部には茶色塊状蛇紋岩が分布しており、両岩相とも層状あるいは塊状の透輝石の濃集部が見られる。黒色片状蛇紋岩は主にアンチゴライトから構成され苦土かんらん石は含まない。蛇紋岩に含まれる脈には灰鉄ざくろ石脈、炭酸塩鉱物脈、透輝石脈がある。灰鉄ざくろ石脈は割れ目を充填しているものと透輝石の濃集部をざくろ石が置換しているものの2種類が存在し、蛇紋岩中の透輝石濃集部がみられないエリアに多産する。茶色塊状蛇紋岩はアンチゴライトと細粒な再結晶かんらん石から構成される。蛇紋岩に含まれる脈には炭酸塩鉱物脈とクロム鉄鉱脈があり、北部と比較すると岩石に含まれている脈の量は少ない。黒色片状蛇紋岩と茶色塊状蛇紋岩は明瞭な境界で接しており、黒色片状蛇紋岩内に茶色塊状蛇紋岩がブロック状に取り込まれている様子が観察できる。境界部にそって破碎帯が見られた。調査地域には蛇紋岩のほかに結晶片岩、ロジン岩、角閃岩が分布している。結晶片岩は北部で400mにわたって連続して分布しており、緑色片岩と黒色片岩の2種類が存在する。角閃岩は南部の茶色塊状蛇紋岩と黒色片状蛇紋岩の境界部にて10mの岩体として一か所のみで確認された。ロジン岩は北部、南部の局所で9mほどの岩脈や20cmほどのレンズ状で産出し、構成鉱物は主に透輝石、緑泥石、一部灰鉄ざくろ石、ベスブ石、ペロプスカイトを含む。蛇紋岩の主要構成鉱物の割合から、頃時鼻海岸に分布する蛇紋岩の原岩はダナイトであり、一部に透輝石が濃集したウェールライト~単斜輝石岩があったことが考えられる。この様子はこの岩体がキュームレート由来であることを表しており、Ichiyama (2015)と一致する。茶色塊状蛇紋岩は細粒かんらん石を含むことから、Ichiyama (2015)で述べているように、原岩が蛇紋岩化作用で強く変質したのちに、脱水作用を受けた可能性がある。一方で黒色片状蛇紋岩の原

岩は一部試料で粗粒かんらん石と細粒かんらん石が共存していることから、脱水後に再び蛇紋岩化が起こった可能性がある。黒色片状蛇紋岩中の灰鉄ざくろ石脈や透輝石脈は、原岩の透輝石が利用されてきたと考えられるが、茶色塊状蛇紋岩中の透輝石濃集部付近には見られないため、黒色片状蛇紋岩と茶色塊状蛇紋岩が合流するより以前に脈の形成があったことが示唆される。炭酸塩鉱物脈は全域で見られ、境界部の破碎帯で特に多く観察できることから、合流した後にCO流体によって形成されたと考えられる。

キーワード：蛇紋岩、超苦鉄質岩、キュームレート、三瓶超苦鉄質岩体

Keywords: serpentinite, ultramafic rocks, cumulate, Mikame ultramafic body

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

*Nomin Tumurkhuu¹, Otgonbayar Dandar¹, Masaoki Uno¹, Manzshir Bayarbold¹, Atsushi Okamoto¹

1. Tohoku University

Hydration of mantle rocks is important for elucidating the dynamics of global water circulation, elemental transport, and geological processes. The crust-mantle interface constitutes a significant geological boundary where element transport occurs. However, research on the multi-stage hydration of mantle rocks within this zone, particularly in the oceanic lithosphere (mid-ocean ridge), is still lacking. Therefore, to understand element transport during the hydration of the crustal vein in the mantle at the crust-mantle transition zone, we investigate the mantle-crust section preserved in the Bayankhongor ophiolite (BO; mid-ocean ridge origin) Mongolia. The outcrop of the crust-mantle section (~30 m in diameter) in the BO is characterized by a brownish gabbroic body with a massive and sheared mantle body fully serpentinitized. Mantle rock samples mainly consist of lizardite in two forms: mesh core (Mg# = 0.95-0.98) with fine magnetite (Mgt) and vein (Mg# = 0.94-0.98) with vein Mgt (<30 μ m width), along with spinel (Mg# = 0.42-0.52 & Cr# = 0.46-0.48), and chlorite (Chl; Mg# = 0.87-0.96). The absence of brucite in the serpentinites suggests infiltration of Si-rich fluids. Green veins (80-95 cm in width; it mainly consists of clinopyroxene (Cpx; Mg# = 0.92) replaced by a mixture of Chl-serpentine (Srp) and cut by serpentine and epidote (Ep) veins), along with white veins (~15 cm in width; ~40 cm long; it is mostly consisted of Ep and Cpx with a minor amount of Chl) cut through the mantle rocks. Additionally, black veins (~2 cm in width; it is composed of Chl patches (Mg# = 0.83-0.93) and Chl-Srp patches with clear cleavages and fine Ti-rich minerals) intersect the serpentinite. The reaction zone (~3 mm) between host serpentinite and black vein shows that Mgt disappeared and Mgt is replaced by Al-rich (1.1-6.9 wt%) Srp. Mass balance on black vein (assuming protoliths: Cpx for Chl-Srp and plagioclase for Chl patch shows gain of Fe and Mg, and loss of Si, Al, and Ca whereas that on the reaction zone shows loss of Fe and gain of Si, and Al. This implies that Mg-rich fluid and chl formation cause Mgt disappearance and mobility of Fe, Si, and Al. Reaction zone and mass balance result imply that local mobility of Si, Al, Fe, Mg, and Ca could occur at the crust-mantle section in the oceanic lithosphere during multi-stage hydration.

Keywords: Element transport, Serpentine, Gabbroic vein

Element transport and magnetite decomposition during alteration of gabbroic vein in serpentinite body from the Bayankhongor ophiolite, Mongolia.

Nomin TUMURKHUU, Otgonbayar DANDAR, Masaoki UNO, Manzshir BAYARBOLD, Atsushi OKAMOTO

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Hydration of mantle rocks is important for elucidating the dynamics of global water circulation, elemental transport, and geological processes. The crust-mantle interface constitutes a significant geological boundary where element transport occurs. However, research on the multi-stage hydration of mantle rocks within this zone, particularly in the oceanic lithosphere (mid-ocean ridge), is still lacking. Therefore, to understand element transport during the hydration of the crustal vein in the mantle at the crust-mantle transition zone, we investigate the mantle-crust section preserved in the Bayankhongor ophiolite (BO; mid-ocean ridge origin) Mongolia.

The outcrop of the crust-mantle section (~30 m in diameter) in the BO is characterized by a brownish gabbroic body with a massive and sheared mantle body fully serpentinitized. Mantle rock samples mainly consist of lizardite in two forms: mesh core ($Mg\# = 0.95-0.98$) with fine magnetite (Mgt) and vein ($Mg\# = 0.94-0.98$) with vein Mgt (<30 μm width), along with spinel ($Mg\# = 0.42-0.52$ & $Cr\# = 0.46-0.48$), and chlorite (Chl; $Mg\# = 0.87-0.96$). The absence of brucite in the serpentinites suggests infiltration of Si-rich fluids. Green veins (80-95 cm in width; it mainly consists of clinopyroxene (Cpx; $Mg\# = 0.92$) replaced by a mixture of Chl-serpentine (Srp) and cut by serpentine and epidote (Ep) veins), along with white veins (~15 cm in width; ~40 cm long; it is mostly consisted of Ep and Cpx with a minor amount of Chl) cut through the mantle rocks. Additionally, black veins (~2 cm in width; it is composed of Chl patches ($Mg\# = 0.83-0.93$) and Chl-Srp patches with clear cleavages and fine Ti-rich minerals) intersect the serpentinite.

The reaction zone (~3 mm) between host serpentinite and black vein shows that Mgt disappeared and Mgt is replaced by Al-rich (1.1-6.9 wt%) Srp. Mass balance on black vein (assuming protoliths: Cpx for Chl-Srp and plagioclase for Chl patch shows gain of Fe and Mg, and loss of Si, Al, and Ca whereas that on the reaction zone shows loss of Fe and gain of Si, and Al. This implies that Mg-rich fluid and chl formation cause Mgt disappearance and mobility of Fe, Si, and Al. Reaction zone and mass balance result imply that local mobility of Si, Al, Fe, Mg, and Ca could occur at the crust-mantle section in the oceanic lithosphere during multi-stage hydration.

葛根田花崗岩の坑井試料を用いた熱源花崗岩および超臨界地熱貯留層内の長石の溶解再沈殿一再平衡プロセス

Dissolution reprecipitation - re-equilibration process of feldspar in heat source granite and supercritical geothermal reservoir using borehole samples from Kakkonda granite

*星田 昌慶¹、宇野 正起¹、松野 哲士¹、ヌルディアナ アスティン¹、土屋 範芳^{2,1}

*Masayoshi Hoshida¹, Masaaki Uno¹, Satoshi Matsuno¹, Astin Nurdiana¹, Noriyoshi Tsuchiya^{2,1}

1. 東北大・院環境科学、2. 八戸高専

1. Tohoku University, 2. National Institute of Technology, Hachinohe College

超臨界状態の水(i.e., >374°C)を貯留する超臨界地熱貯留層は、従来の地熱貯留層より高温で5-10倍ほど高い発電ポテンシャルを持つ次世代の地熱資源として調査が進められている。地熱開発において、貯留層温度の推定は発電ポテンシャルの評価のために重要であるが、掘削機器の耐熱性能の問題により循環水を供給して坑井温度を下げながら掘削するため、掘削時にリアルタイムで真の坑井温度を推定することは困難である。そこで、超臨界状態の坑井温度を推定するために、坑井試料であるカッティングスの長石温度計への適用可能性を検証した。従来の長石温度計の校正温度は700-900°Cであるため、380-580°Cの低温領域の超臨界状態での適用可能性は解明されていない。先行研究によると、水の超臨界状態下(i.e., 600°C, 200MPa)での水熱実験では、長石は5日程度で変質するため(Duan et al., 2021)、超臨界地熱流体にさらされた長石は普遍的に変質している可能性がある。本研究では、500°Cを超える高温岩体から直接採取された花崗岩のカッティングス中の斜長石とカリ長石の産状を分析し、高温地殻中における原位置での長石の再平衡過程と長石温度計の適用可能性を検証した。

岩手県仙岩地域の葛根田地熱地帯を研究フィールドとした。WD-1aの地層は、深度2,860-3,729mは第四紀の葛根田花崗岩であり(Uchida et al., 1998)、深度3,500mで500°Cを超える温度の花崗岩を掘削している(Ikeuchi et al., 1998)。

坑井温度が約380-580°Cの範囲と推定される深度2,895-3,725mから24サンプルを選び、長石類の組成をEPMAで同定した。長石類が再結晶した温度を推定するため、斜長石とカリ長石のペアの組成を計40個の長石温度計に適用した。加えて、2,895-3,685mから13サンプル選び、水銀ポロシメーターを用いてカッティングスの細孔容積を測定した。

後方散乱電子像の観察の結果、斜長石とカリ長石の粒径は、それぞれ約100-400 μ m、50-400 μ mだった。古期花崗岩の長石類は、カリ長石は粒子全体が均質的に再結晶しており、10 μ m未満の空隙が多数見られた。また、斜長石はその中心が比較的Caに富む組成累帯構造を示し(XAn=0.46-0.85)、リムはNaに富み(XAn=0.02-0.39)、コアとリムの間にはシャープな境界が見られた。対照的に、新期花崗岩ではカリ長石内部の空隙は見られず、斜長石の組成累帯構造はわずかであった(XAn=0.05-0.50)。

水銀ポロシメーターの結果、古期花崗岩、新期花崗岩において、0.001-10 μ mの細孔が計測され、その容積の平均値と標準偏差はそれぞれ5.92 \pm 1.18、5.57 \pm 1.27vol%であった。

Naに富む斜長石のリムと、その隣接するカリ長石のリムの組成をそれぞれ463点測定した。斜長石中のAlbite成分(XAb = Na/(Na+K+Ca))は、深度2,895mから3,725mにかけて0.72-0.92mol%から0.61-0.70mol%に系統的に減少した。また、カリ長石中のOrthoclase成分(XOr = K/(Na+K+Ca))は、深度2,895mから3,725mにかけて0.88-0.93mol%から0.81-0.86mol%に系統的に減少した。

Powell & Powell (1977)の長石温度計は、深度2,985mで362-439°C、深度3,725mで513-614°Cの温度範囲を示し、380-580°Cの超臨界条件下でホーナープロット法によって推定された坑井温度に近い結果を得た。

古期花崗岩のカリ長石には、 μ mスケールの空隙が多数見られた。加えて、カリ長石に接する斜長石のコア

からリムにかけての組成変化は、グラジュアルではなくシャープな境界が見られた。これらの組織は、斜長石のリムが溶解再沈殿し、その接するカリ長石と超臨界流体が反応してカリ長石内部に空隙を形成したことを示唆している。熱水変質による長石の空隙の形成は、600°Cでの長石置換実験で生じた空隙の生成と整合的である (Nurdiana et al., 2023)。一方で、新期花崗岩ではカリ長石内部の空隙がないことや、斜長石の組成累帯構造はわずかしか見られないことから、固体拡散により再平衡に達した可能性がある。

カッティングス中の長石類に関して、反応組織や深度方向の系統的な組成変化、長石温度計への適用結果と坑井温度の類似性は、現在の坑井温度380–580°Cでの長石類の溶解再沈殿による再結晶または固体拡散による再平衡を強く示唆する。したがって、カッティングスの長石温度計への適用により、超臨界地熱貯留層における長石の再結晶化温度を評価できることが明らかになった。

キーワード：長石、長石温度計、超臨界地熱貯留層、溶解再沈殿、再平衡

Keywords: Feldspar, Feldspar thermometer, Supercritical geothermal reservoir, Dissolution reprecipitation, Re-equilibration

“cleavable olivine” の成因

Formation mechanism of "cleavable olivine"

*安東 淳一^{1,2}、富岡 尚敬^{3,2}、前川 寛和⁴

*Jun-ichi ANDO^{1,2}, Naotaka Tomioka^{3,2}, Hirokazu Maekawa⁴

1. 広島大学・先進理工、2. 広島大学・HiPeR、3. JAMSTEC・高知コア研、4. 大阪公立大学

1. Hiroshima Univ., 2. Hiroshima Univ., HiPeR, 3. JAMSTEC, 4. Osaka Metropolitan Univ.

蛇紋岩化した超塩基性岩体にはcleavable olivineと呼ばれる劈開が発達したオリビンが存在する場合がある。日本国内では、神居古潭帯鷹泊超苦鉄質岩体をはじめ約10の岩体中で確認されている。通常オリビンはそれほど顕著な劈開を示さないが、cleavable olivineは(100)、(010)、(001)に平行に発達する劈開が顕著に認められ、劈開中には蛇紋石の一種であるアンチゴライトが存在する。cleavable olivineの劈開の成因は、通常の劈開の形成とは異なると考えられるため、劈開と区別して“裂開”と呼ばれている（相川、1981；Nozaka and Ito, 2011）。cleavable olivineの成因の解明は、アンチゴライト蛇紋岩の生成過程すなわち超塩基性岩体の含水化過程を明らかにし、そして超塩基性岩体の上昇のテクトニクスを考えるうえで重要だと考えられる。本研究はcleavable olivineの成因を微細組織のキャラクタリゼーションによって明らかにすることを目的とした。

用いた試料は、マリアナ前弧北部の海溝軸に沿って露出する雷神海山から採取した蛇紋岩化が進んだ超塩基性岩（ダナイト）である。このダナイトを構成するオリビンは、cleavable olivine化が進んでいる。微細組織の観察は主に、1) 偏光顕微鏡、2) SEM、4) SEM-EBSD、5) TEMを用い、6) ラマン分光分析による蛇紋石鉱物の同定も行った。

観察の結果、cleavable olivineは以下の特徴を有することが明らかとなった。1) ダナイトを構成するオリビンには、 $[100]\{0kl\}$ のすべり系によって形成された強い格子選択配向が認めされる。また、オリビンには(100)に平行な波動消光の軸（= 亜結晶粒界）が発達する。このことから、オリビンは $[100]\{0kl\}$ のすべり系による転位クリープによって塑性変形したことが分かる。2) 裂開は、(100)に平行に発達した亜結晶粒界上に形成されていることが多い。亜結晶粒界は転位の配列によって形成されるため、転位の存在と裂開の形成は強く関係することが分かる。3) 裂開中にはアンチゴライトが晶出しており、その(001)とホストのオリビンの(100)はトポタキシャルな関係にある。この両者の境界は明瞭ではなく、オリビンが徐々にアンチゴライトに変化している。4) 裂開中のアンチゴライト以外に、オリビンの粒界にはアンチゴライトとリザーダイトが晶出している。また、粒界にはマグネタイト、カルサイトの晶出が確認できた。すなわち本試料は二段階の蛇紋岩化作用を受けていることが明らかとなった。上記した1)～3)の特徴は、神居古潭帯鷹泊超苦鉄質岩体中から採取したcleavable olivineでも確認することができた。

微細組織の観察から考えられる雷神海山のcleavable olivineの形成過程は以下である。1) 上部マントルで、ダナイトを構成するオリビンが $[100]\{0kl\}$ すべり系による転位クリープによって塑性変形した。その結果、格子選択配向が形成され、かつ(100)に平行な面上に転位が配列し亜結晶粒界が形成された。2) 亜結晶粒界を構成する転位に沿って水が拡散（パイプ拡散）し、亜結晶粒界上にアンチゴライトが晶出した。これにより裂開が形成された。その後、3) 粒界にアンチゴライト、リザーダイトと、それとマグネタイト、カルサイトが晶出した。

本研究では、cleavable olivineの成因は亜結晶粒界に沿う水の拡散（パイプ拡散）と結論づけた。一般的には、オリビンのアンチゴライト化は粒界から進行する。すなわち、アンチゴライト化は体拡散による現象である。発表では、なぜ水のパイプ拡散が卓越したのかということを議論したい。

引用文献：相川 (1981) 岩石鉱物鉱床学会誌, 76, 61-67. Nozaka and Ito (2011) Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 106, 36-50.

キーワード : cleavable olivine、亜結晶粒界、パイプ拡散

Keywords: cleavable olivine, Subgrain boundary, Pipe diffusion

海底熱水系の硫化物チムニー発達プロセスおよび発電特性解明に向けた実験的研究

Experimental study to elucidate sulfide chimney development process and power generation characteristics in submarine hydrothermal systems

*戸田 賢太郎¹、岡本 敦¹、オトゴンバイラル ダンダル¹、高橋 美咲¹、佐藤 義倫¹

*Kentaro Toda¹, Atsushi Okamoto¹, Dandar Otgonbayar¹, Misaki Takahashi¹, Yoshinori Sato¹

1. 東北大・院環境科学

1. Tohoku Univ. Environmental Sci

海底熱水噴出孔は海嶺近傍の海洋底に分布し、マグマや海洋地殻に由来する硫黄や亜鉛などの元素を含む熱水と海水との混合により硫化鉱物から成るチムニー状の構造物を形成する。熱水はHS⁻を豊富に含み還元性であるのに対して海水は酸化性であり、両者の酸化還元電位差が駆動力となり深海底への電子供給とそれに伴う熱水/海水の酸化/還元反応が起きることが報告された(Yamamoto et.al, 2018)。またチムニー周辺では生物活性が認められ、熱水から海中へ供給される電子が太陽光の届かない深海底エコシステムへのエネルギー供給を担う可能性が示唆され、ひいては熱水噴出孔における発電現象が太古の海洋底での始祖生命の誕生に関与したとの仮説が提唱された(Yamamoto et.al, 2018)。チムニーを構成する硫化鉱物は半導体特性を有することが知られているが、熱水-海水間の温度勾配と半導体の熱電特性のマッチングによって酸化還元電位差に匹敵する電気的ポテンシャルが生じることが報告された。特に噴出孔周辺の閃亜鉛鉱を置換して形成されたとみられる黄銅鉱や方鉛鉱からなる高密度組織では海中への電子供給に有為な熱起電力が生じることが見出され、このことからチムニーの発達に伴う高密度化に伴い熱電効果による発電現象が生じる可能性が示唆された。本研究では、硫化鉱物置換反応を実験室系で再現しそれに伴うチムニーの熱電性能変化を検証することを目的として水熱実験を実施した。チムニーの構成鉱物である閃亜鉛鉱と黄鉄鉱、方鉛鉱に加えて閃亜鉛鉱と黄鉄鉱からなるチムニーサンプルを出発物として模擬熱水と反応させる水熱実験を行い、硫化鉱物の置換組織の観察とともに生成物の比抵抗および熱起電力の測定を行った。その上で、チムニーの硫化鉱物の置換反応が海底の発電現象に与える影響について検討した。実験条件は200,250,300°Cで飽和蒸気圧であり、適宜NaCl(1M)を添加した。反応時間を12日間(288時間)とした実験では、閃亜鉛鉱や方鉛鉱にFe²⁺、Cu²⁺イオンを含む水溶液との反応では出発鉱物表面にCu₂SとCuSの間で同の価数が変化するCu-S系の硫化物の被膜が形成された。また特に方鉛鉱を出発物とした場合には生成物中に空隙が含まれる組織が形成された。閃亜鉛鉱、方鉛鉱を出発物に用いた場合は比抵抗値がそれぞれ10桁、4桁と大きく低下した。一方、黄鉄鉱を出発物に用いてCu²⁺イオンを含む水溶液との反応では、黄鉄鉱結晶に亀裂が生じ、生成鉱物が、表面にはCu₂S、亀裂内部には黄銅鉱と系統的に変化した。この反応により、計測した比抵抗値は4桁低下している。出発物表面からの置換する場合と、亀裂が生じて内部に2次鉱物ができるのは、硫黄を固定した反応を考えた場合、前者が固液体積の現象、後者が増加するときに対応しており、体積増加に伴う反応誘起応力による破壊と考えられる。黄鉄鉱内部への生成物の変化は、FeとCuの化学ポテンシャル勾配を反映していると考えられる。水熱実験の生成物について独自に開発した装置を用いてゼーベック係数S[mV/K]を測定し、ゼーベック係数の二乗と導電性の積で表され熱電材料の発電性能を示すパワーファクターPFを算出した。測定よりチムニーの主要構成鉱物である閃亜鉛鉱が生成物であるCu-S系硫化物によって置換されることで最大10⁶オーダーで向上するという結果が得られた。水熱実験の結果を総合すると、チムニー累帯構造発達過程における熱起電力発生プロセスについて以下の示唆が与えられる。まずチムニーの発達初期段階では閃亜鉛鉱などからなる導電性が低く空隙率の高い組織から構成されるため電子の移動は大きく制限され、かつ微粒子状の硫化鉱物にかかる温度勾配が小さいため生じる熱起電力も小さい。一方で発達後期段階では導電性の高い銅硫化物や銅・鉄硫化物の緻密な層が低導電性

の硫化鉱物上に形成され電子はより移動しやすくなり、高密度化のために電子の移動に十分な熱起電力が発現する。その結果チムニー壁で電流が生じ、海洋底へのエネルギー供給が生じうる。Yamamoto, M., Nakamura, R., & Takai, K. 2018, *ChemElectroChem*, Deep-sea hydrothermal fields as natural power plants. 5(16), 2162-2166.

キーワード : Hydrothermal Chimney

Keywords: Hydrothermal Chimney

カンラン岩の炭酸塩化：流体包有物分析と水熱合成実験によるアプローチ

Carbonation of Mantle Peridotite: An Approach From Fluid Inclusion Analysis and Hydrothermal Experiments

*川本 竜彦¹*Tatsuhiko KAWAMOTO¹

1. 静岡大学理学部地球科学科

1. Shizuoka University

カンラン岩中の炭酸塩鉱物の産状としては、蛇紋岩中の炭酸塩脈と蛇紋岩角礫が炭酸塩の基質に囲まれる2つがある。これらは、いずれもオフィカーボネイトと呼ばれている。これまで、以下にのべるオフィカーボネイト中の炭酸塩に塩水からなる流体包有物を記載、報告してきた。(1) 高速拡大海嶺で生成されたとされるオマーンオフィオライトの蛇紋岩に入る炭酸塩脈、(2) 低速拡大海嶺で生成されたとする西アルプスのオフィオライトの蛇紋岩に入る炭酸塩脈と炭酸塩基質、(3) 伊豆マリアナ海溝の蛇紋岩泥火山中のカルサイト、(4) 秩父の三波川帯のマントルウェッジ起源の蛇紋岩中の炭酸塩脈。その結果、(1)のオマーンオフィオライトの蛇紋岩の後期の脈に真水の流体包有物を発見した以外は、炭酸塩中の流体包有物に含まれる塩水は海水、または海水よりも少し高い塩濃度であった。(1)のオマーンオフィオライトの蛇紋岩中にも真水の流体包有物を持つカルサイト脈よりも前には、海底下で生成されたと考える脈に海水に似た塩濃度を持つ流体包有物が存在する。つまり、(1)と(2)に見られる海洋底の下の変成作用でできるオフィカーボネイトには海水に似た塩水が関与しており、(3)と(4)で見られるリソスフェアが沈み込むマントルウェッジにも海水に似た塩濃度を持つ流体が持ち込まれていることを示す。

マントル岩と水・二酸化炭素の混合流体との反応を再現するために、流体包有物の解析と並行して鉄を含む系で水熱合成実験を行っている。実験結果は、広い温度領域においてタルクが石英とマグネサイトが共存し、このタルクは非平衡で晶出すると考えないと辻褄が合わない。今後、平衡な鉱物組み合わせを決定できると、Perple_Xなどの熱力学計算できるCaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂系での相平衡図と比較して、鉱物安定領域の温度圧力条件に鉄が与える影響を理解できる。また、上述の(2)西アルプスのケラス地域では、タルク、アンティゴライト、カルサイトとマグネサイトが共存する(大澤陽介、研究中)。CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂の系での熱力学計算では、0.1GPaでは、流体のCO₂/(H₂O+CO₂)モル比は0.03以下、温度は360°C以下である。0.5G Paだと、CO₂/(H₂O+CO₂)モル比は0.002以下、温度は340°C以下と推定できる。さらに、その岩石中の流体包有物の均質化温度から求められる温度圧力条件と、これらの条件が一致するか確認するによって、マントルの炭酸塩化の条件がより精確に理解できると期待する。

キーワード：流体包有物、蛇紋岩、海水、二酸化炭素、マントル

Keywords: fluid inclusions, serpentinite, seawater, carbon dioxide, mantle

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

2024年9月13日(金) 9:00 ~ 10:00 | 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: 田阪 美樹 (静岡大学)

9:00 ~ 9:15

[S3-10] マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

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

9:15 ~ 9:30

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

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

9:30 ~ 9:45

[S3-12] 岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

*福田 惇一¹ (1. 大阪公立大学・理・地球)

9:45 ~ 10:00

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

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

マントルリソスフェアの形成とカンラン石レオロジーの変遷

Rheological evolution of olivine during formation of the mantle lithosphere

*道林 克禎^{1,2}、奥脇 健生¹、夏目 樹³

*Katsuyoshi MICHIBAYASHI^{1,2}, Takeo Okuwaki¹, Itsuki Natsume³

1. 名古屋大学・院環境学、2. 海洋研究開発機構、3. 神奈川県立生命の星・地球博物館

1. Nagoya University, 2. JAMSTEC, 3. Kanagawa Prefectural Museum of Natural History

2016年から2018年にかけて実施された国際陸上掘削計画(ICDP)オマーン掘削プロジェクト(OmanDP)は、オマーン王国に露出するSamailオフィオライトWadi Tayin岩体に対して上部地殻～マントルセクション～オフィオライト岩体底部までそれぞれ300m～400m掘削することに成功した^[1, 2]。本研究では、マントルセクションを掘削したBAサイトのうちBA3Aコアの蛇紋岩掘削コア試料が保存するカンラン石の結晶方位ファブリックに特徴を明らかにすることを目的とした。

BA3Aコアの大部分は蛇紋岩化したハルツバージャイトで構成される^[1-3]。主な初生鉱物はカンラン石、直方輝石、単斜輝石、スピネルである。二次鉱物として蛇紋石、磁鉄鉱、角閃石、炭酸塩鉱物が観察された。本研究では、BA3Aコアから蛇紋岩化度が平均よりやや低い部分から岩石試料を採取し、薄片を掘削コアの半割面について鉛直方向が長辺と平行になるように作成した。各研磨薄片の鉱物相と結晶方位はSEM-EBSDを用いて分析した。そして、EBSDマップを基にしてマントルファブリックであるカンラン石の結晶方位ファブリックを解析した。

結果として、蛇紋岩から復元したBA3Aコアのカンラン岩の微細組織は主にポーフィロクラスト状組織であり、地殻-マントル境界とほぼ平行な面構造を示すことが明らかとなった。さらにカンラン石の結晶方位ファブリックは、高温のアセノスフェアマントルに典型的なA～AGタイプ^[4-8]ではなく、Samailオフィオライトの比較的低温の延性剪断帯に典型的なA～Dタイプのファブリック^[6, 9]で特徴づけられることがわかった。しかし、BA3A コアは、高温マントルの粗粒組織と同様に、地殻-マントル境界に平行な水平な面構造を保持した状態で低温側のポーフィロクラスト状組織に変化していることから、BA3Aコアに保存されているカンラン石の結晶方位ファブリックが、高温から徐々に低温になり、マントルがリソスフェアとして固結するまでの連続的なマントル変形の過程で変化した可能性を示唆する。

[1] Kelemen, P. B. et al., 2020a. Methods and explanatory notes. *In* Kelemen, P. B. et al., *Proceedings of the Oman Drilling Project*. College Station, TX (International Ocean Discovery Program).

<https://doi.org/OmanDP.proc.2020>

[2] Kelemen, P. B. et al., 2020b. Site BA3. *In* Kelemen, P. B. et al., *Proceedings of the Oman Drilling Project*. College Station, TX (International Ocean Discovery Program).

<https://doi.org/OmanDP.proc.117.2020>

[3] Kelemen, P. B. et al., 2021. *Jour. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB022729.

[4] Ismail, W. B., Mainprice, D., 1998. *Tectonophysics*, 296, 145-157.

[5] Dijkstra, A. et al., 2002. *Jour. Geophys. Res.*, 107, 2270.

[6] Michibayashi, K. and Mainprice, D., 2004. *Jour. Petrol.*, 45, 405-414.

[7] Tommasi, A., Vauchez, A., 2015. *Tectonophysics*, 661, 11-37.

[8] Michibayashi, K. et al., 2016. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 443, 70-80.

[9] Michibayashi, K. et al., 2006. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 244, 695-708.

キーワード：カンラン石、マントル

Keywords: Olivine, Mantle

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

Three-dimensional location analysis on acoustic emissions and faults in olivine under pressure-temperature conditions of subducting slabs

*大内 智博¹、星野 真人²、上杉 健太郎²、奥村 聡³、肥後 祐司²、辻野 典秀²、柿澤 翔²

*Tomohiro OHUCHI¹, Masato Hoshino², Kentaro Uesugi², Satoshi Okumura³, Yuji Higo², Noriyoshi Tsujino², Sho Kakizawa²

1. 愛媛大学・GRC、2. JASRI、3. 東北大・院理

1. GRC, Ehime Univ., 2. JASRI, 3. Tohoku Univ Sci.

沈み込むプレート内の深さ40 km以深でのスラブ内地震（稍深発及び深発地震）の発生メカニズムは、未だ大きな謎に包まれている。封圧下における岩石の破壊強度は「差応力>封圧の条件を満たす場合にのみ破壊が起きうる」ことを意味するGoetze基準にて規定される。地球のリソスフェアマンツルの差応力の上限はおおむね0.3GPa程度であるため、封圧が1GPa以上となる上部マンツル以深では脆性破壊や摩擦すべりは困難であるはずにもかかわらず、実際には沈み込むスラブ内部では地震が多発している。そのようなパラドックスを説明するため、含水鉱物の脱水分解による「脱水不安定」モデル（Raleigh & Paterson, 1965）や「転移断層」モデル（Green & Burnley, 1989）、「断熱不安定」モデル（Kelemen & Hirth, 2007）などの、高圧環境下に特有の種々の仮説が提案されてきた。これらの仮説を検証することを目的とした実験が数多くなされてきており、特にこの10年では、高温高圧下における一軸圧縮試験と放射光“その場観察”法及びアコースティック・エミッション（AE）測定法を組み合わせた実験手法（Schubnel et al., 2013）が行われるようになり、応力、歪、AE発生頻度の時間変遷の複合評価が可能となった。しかし、破壊が進行するタイムスケールは秒単位であることや断層の不安定すべり時の応力降下のタイムスケールはミリ秒単位であること（例えばOkazaki & Katayama, 2015）を勘案すると、放射光“その場観察”によって破壊の素過程に迫るのは容易ではない。例えば、現在SPring-8のBL04B1に常設されているCCD検出器と60keVの単色X線の組み合わせでは、差応力測定に耐えうるクオリティーの2次元X線回折パターンを得るのに300秒程度の露光時間を要する。

そこで本研究では、SPring-8のBL05XUビームラインに小型D-DIA型変形装置及びシンチレーションレスの2次元半導体検出器（WidePix 5x5、Advacam社製）をはじめとした光学系を仮設し、スラブ内浅部の温度圧力条件下（500–900°C、2–3 GPa）におけるカンラン石多結晶の一軸圧縮試験を行った。MA6-6型加圧方式（2段目アンビル先端7mm）を採用し、試料の一軸圧縮は一定のD-ramストローク速度にて行った。高エネルギーアンジュレーター光源から供給されるピンクビーム（約100keV）を試料に入射し、2次元X線回折パターン及びラジオグラフを交互に撮影することにより（露光時間はいずれも0.4秒）、試料の被る応力及び歪を測定した。2段目アンビルの背面には計6個の圧電素子を貼り付け、それぞれの圧電素子にて試料から放出されるAEを測定した。AE波形（P波）の初動時刻より、AEの震源位置を決定した。回収試料中に発達した断層の空間分布状態は、SPring-8のBL20B2にてX線マイクロトモグラフィー法を用いて観察した。

いずれの条件でも、2GPaを超える差応力にて降伏が起き、その後“見かけの”定常的な流動とそれに伴うAE発生が継続した。塑性変形がより卓越するであろう、高温側の800–900°Cではより多くのAEが発生した一方で（数百件程度）、低温側のAE発生件数は高温側の半数程度にとどまった。歪が10%を超える領域では、応力一定にて歪速度が1.5–2倍となる軟化が起き、それに合わせてAEの発生頻度が変化（多くの場合では上昇）した。多くの場合では、軟化後に断層すべりが起きた。歪が10%未満の変形初期ではAE震源は比較的ランダムに分散していた一方で、歪が10%を超える変形中後期では、AE震源はクラスターを形成する傾向が見られた。X線マイクロトモグラフィー法で観察した断層とAEの震源分布には、ある程度の相関関係があったものの、そうではないAE震源も多く見られた。同様のことは、ゲルマニウムオリビン多結晶（Wang et al.,

2017)でも報告されており、断層形成及びすべりの結果として発生するAEがある一方で、断層とは無関係に発生するAEも存在するということを意味しているのかもしれない。

キーワード：カンラン石、アコースティック・エミッション、断層、稍深発地震

Keywords: Olivine, Acoustic emission, Fault, Intermediate earthquake

岩石模擬物質として樟脳を用いた粒成長と流体移動のその場観察

In-situ observation of grain growth and fluid movement using camphor as a rock analogue

*福田 惇一¹

*Junichi Fukuda¹

1. 大阪公立大学・理・地球

1. Dept. Geos. Osaka Metrop. Univ.

地殻やマントルにおいて粒径は変形や反応に寄与する。粒成長は粒径を増加させる重要な機構である。しかし地球内部における実際の粒成長は、構成鉱物集合体を用いた実験からも示唆されている通り、何千年、何万年とかけて有意な変化が見られる現象である（例えば石英集合体についての粒成長実験としてFukuda et al. 2019）。粒成長実験では、このような天然での長い時間変化を加速させて行う。そのために、天然条件よりも高温高圧条件下で実験を行うことで、数時間から数日程度で有意な粒成長を得る。このような実験では、高温高圧実験装置を用いて、金属ジャケットに封入した試料と実験ピースを実験毎に装置から取り出し、凍結された試料組織を観察することがほとんどである。したがって、実際の地球内部での粒成長は当然ながら、実験においても刻々と変化する組織を観察することはできない。さらに、地球内部には流体が鉱物粒界や流体包有物として粒内に普遍的に存在する。このような流体は粒成長に伴って移動すると考えられる。

以上の背景の下、本研究では岩石模擬物質である樟脳を用いて、粒成長その場観察実験と、流体相としてエタノールを加えた同様の実験を行った。実験手順として、乳鉢に数百mgの樟脳のみ、またはそこに数十 μ lのエタノールを加えてすりつぶした。その後、約5 mgの試料をスライドガラスにセットし、上部から別のスライドガラスを押し付けた。上部のスライドガラスを取り除いた後、試料を偏光顕微鏡下で観察すると、平均粒径10 μ mからなる緻密な樟脳集合体が見られた。空隙は1面積%以下であった。エタノールを加えた樟脳試料は、エタノールが数面積%として、樟脳粒界と樟脳粒内に流体包有物として保持されている。このように、樟脳のみと樟脳+エタノール試料のそれぞれを室温かつ偏光顕微鏡下で動画を撮影することで粒成長過程を観察した。

実験の結果、樟脳のみとエタノール試料では、正常粒成長が起きる様子が観察され、2時間程度で平均粒径が10 μ mから40 μ mへと変化した。この結果はFukuda (2024) で報告した。樟脳+エタノール試料では、樟脳の正常粒成長に加えて、次の3種の流体の挙動が確認された（図）。1. 近傍の流体同士が合体し、大きな流体となる（図中のCombination）。2. 元々は樟脳粒界にあった流体が、粒成長による粒界移動に伴って粒子内部に移動し、流体包有物となる（Left behind）。3. 元々は流体包有物であったが粒界移動により、近傍の粒界に取り込まれる（Incorporation into GB）。先の1は当然の結果であろう。2と3の違いは流体包有物の体積とそれを保持できる近傍の粒界の体積に関係があると考えられる。すなわち、1の流体の合体により流体の体積が増加する、または粒成長に伴い一つの粒界の体積増加または減少により、流体の体積>粒界の体積となれば2が起き、流体の体積<粒界の体積であれば3が起きる。

次に、樟脳+エタノール粒成長実験において、実験開始時と任意の時間後の流体の分布を測定した。その結果、流体同士の合体により、時間の経過と共に個々の流体の平均面積（実際は体積）は増加するが、単位画像面積あたりの流体の数は減少した。しかし、単位画像面積あたりの流体の総面積は実験前後で保持されていた。実際の天然においても、粒成長に伴うこのような流体の挙動が示唆される。

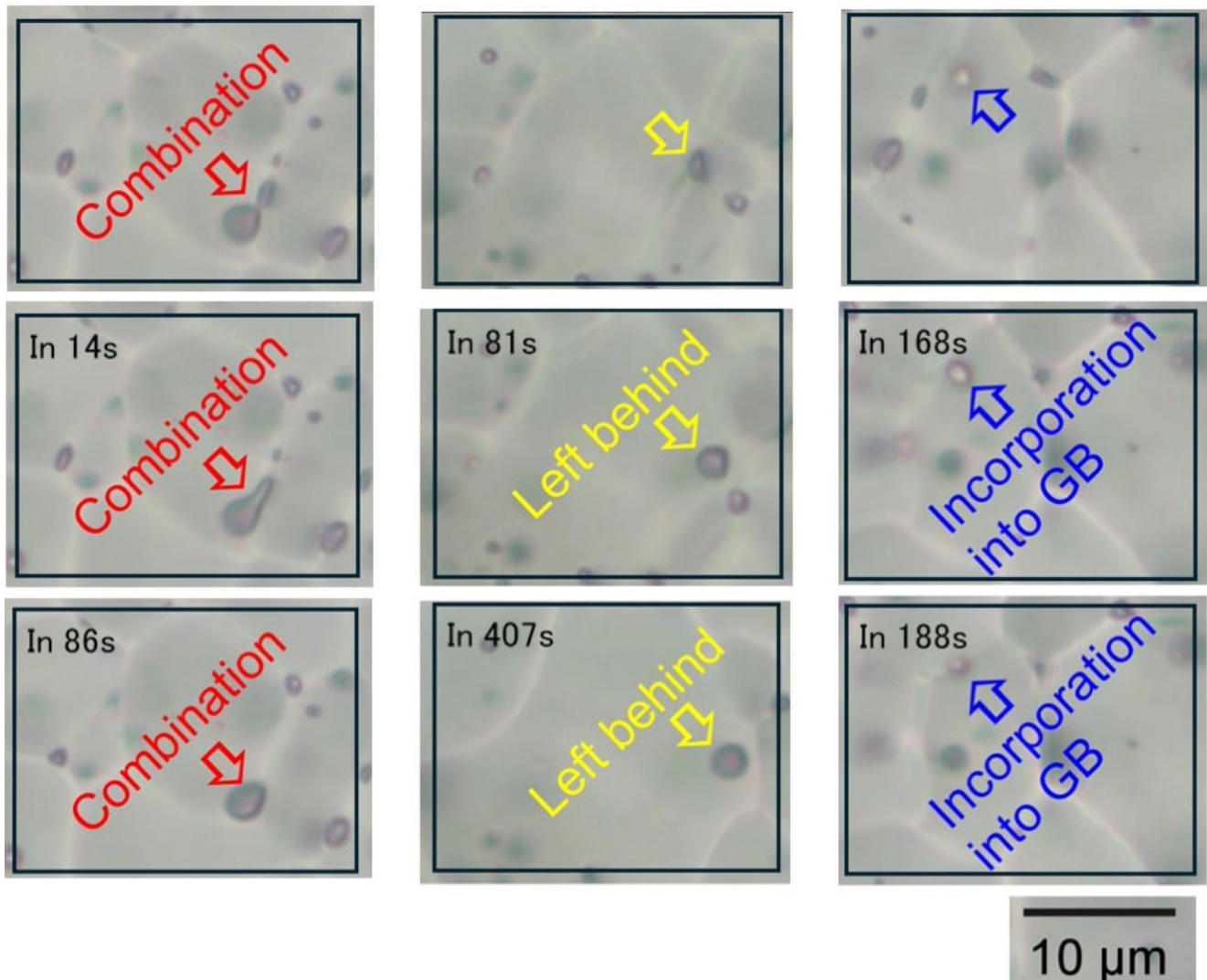
Fukuda J., Raimbourg H., Shimizu I., Neufeld K., Stünitz H. (2019) Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature. *Solid Earth*, Vol. 10, pp. 621–636

Fukuda J. (2024) Grain growth of camphor as a rock analogue: microstructural development and grain

growth law. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. Vol. 119:010

キーワード：岩石模擬物質、樟腦、粒成長、流体

Keywords: Rock analogue, Camphor, Grain growth, Fluid



アウターライズ断層での海水の浸透によるマントル炭酸塩化の可能性

Mantle carbonation through seawater penetration along the outer-rise faults

*片山 郁夫¹、岡崎 啓史¹、岡本 敦²

*Ikuo KATAYAMA¹, Keishi Okazaki¹, Atsushi Okamoto²

1. 広島大学、2. 東北大学

1. Hiroshima University, 2. Tohoku University

近年の地球物理観測によって海溝付近のプレートが折れ曲がるアウターライズ断層沿いに、海水がマントルまで浸透している証拠が数多く報告されている。オマーンなどのオフィオライト岩体では、炭酸水とカンラン岩による交代作用が広く確認されていることから、マントルにまで海水が浸透するのであれば、プレート内では蛇紋岩化に加え炭酸塩化も起きている可能性が高い。一方で、マントルの蛇紋岩化と炭酸塩化はどちらも地震波速度を低下させる方向に働くため、地震波速度だけからマントルでの炭酸塩化の割合や進行度を推定することは難しい。そこで本研究では、熱力学計算を導入することで、マントル中の炭酸塩化を評価する手法を開発し、それを海洋マントルでの地震波速度の低下に適用することで、マントル中の炭酸塩化を評価した。熱力学計算では、温度100°Cおよび圧力200MPaの条件で、炭素が溶け込む海水とカンラン石の平衡関係から、水岩石比を変化させた際の安定な鉱物相の割合を計算した。水岩石比が低い場合は、蛇紋石やブルーサイトが安定であるのに対し、水岩石比が高くなるとマグネサイトが晶出し、その割合が増える傾向にある。固相の地震波速度は既知であるため、それらの鉱物の組み合わせから岩石の地震波速度を計算した。マグネサイトは蛇紋石より地震波速度が速いため、水岩石比が増えると地震波速度はやや速くなる傾向にある。鉱物の量比は水岩石比によるため、地震波速度の観測結果から炭酸塩化の量を見積もるには、水岩石比を制約する必要がある。そこで本研究では、断層沿いに流体が通過しながら炭酸塩化が起きることを想定し、比較的高い水岩石比

(W/R=500)を仮定し、マントルでの速度低下から炭酸塩化の割合を推定した。その結果、最上部マントルの地震波速度から、マントルは20%ほど蛇紋岩化しており、それと同時に1%ほどの炭酸塩化が起きていることが予想される。なお、その際の岩石中の炭素重量は400ppm程度である。この手法を世界中のアウターライズ領域の地震波速度構造に適用すると、マントルでの炭素フラックスは15Mt/yrとなり、海洋地殻による炭素フラックスにほぼ匹敵する。しかし、今回の見積もりは水岩石比を仮定しているため大きな誤差を含み、そのあたりをどう評価すればいいのかが今後の課題である。

キーワード：炭素循環、炭酸塩化、マントル

Keywords: Carbon cycle, Carbonation, Mantle

口頭講演 | R4：地球表層・環境・生命

2024年9月13日(金) 10:15 ~ 12:00 | 会場 ES025 東山キャンパス

R4：地球表層・環境・生命

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

10:15 ~ 10:35

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

「招待講演」

*吉田 英一¹ (1. 名古屋大学)

10:35 ~ 10:50

[R4-02] 広島花崗岩の風化による色変化過程

*横山 正¹、院去 由佳、海堀 正博¹ (1. 広島大学)

10:50 ~ 11:05

[R4-03] 陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

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

11:05 ~ 11:20

[R4-04] 生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

*奥村 大河¹、鈴木 道生²、Perez-Huerta Alberto³、Samajpati Eshita³、小暮 敏博¹ (1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.)

11:20 ~ 11:40

[R4-05] バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

「招待講演」

*鈴木 道生¹ (1. 東大・院農)

11:40 ~ 11:55

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

*鍵 裕之¹、村岡 賢佑¹ (1. 東京大学)

11:55 ~ 12:00

調整

球状コンクリーションの理解と応用-自然に学ぶ恒久的シーリング新素材の開発-

Understanding and application of spherical concretions: A new durable sealing material learnt from nature

*吉田 英一¹

*Hidekazu Yoshida¹

1. 名古屋大学

1. Nagoya University

地球表層での続成（岩石化）作用や化石化作用は、物質循環に伴う元素の移動・固定によるものである。このような物質循環プロセスは、自然界ではおおよそ緩慢である。一方、人間活動に伴う資源の消費やコンクリート生成に伴う材料・物質の循環は非常に速く、その速度的ギャップがCO₂による温暖化や放射性廃棄物の蓄積などといった、これまでに直面してこなかった地球規模での現象を顕在化させている。その課題に対処するための方法として進められているのが、CO₂地下貯留（CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage）や放射性廃棄物の地下処分（隔離）といった地下環境の活用である。

地下環境を利用する最大の理由は、少なくとも10³年以上もの時間スケールでのCO₂の貯留や廃棄物の隔離が求められることにある。そのためには、物質循環の激しい地表に保管（管理）するのではなく、石油や鉱物鉱床が長期に渡って保持されてきた地下環境に委ねる方が技術的かつ倫理的にも現実的であるという考えに基づいている（OECD/NEA, 2021）。しかしながら、CO₂や放射性廃棄物を地下に埋設・隔離するためには、ボーリング孔や搬入立坑、トンネルが必須であり、漏洩・汚染拡大させないためにもこれらの「穴」を恒久的にシーリングすることが不可欠となる。一方で、このような恒久的シーリング技術（材料）を現状我々は有していない。現在、工学的に用いられるセメントを基本とするグラウチング素材においても、注入後のカルシウムイオンの溶出等に伴い数百年以上は持たないと考えられている。この課題を解決するには、シーリング剤として長期に渡って地下環境においても安定に存在し続ける素材（鉱物）を用いるしかない。この背景のもと、着目したのがコンクリーションである。

コンクリーションには、主にCa, Si, Feをセメントの主成分とするものがある。とくにCaCO₃を主成分とするコンクリーションは、保存良好な化石を内包するなど最もよく知られた鉱物素材であり、メートルサイズでも数年程度で形成されることが明らかとなった（Yoshida et al., 2015, 2018, 2020）。その形成・成長は、海底堆積物中の生物遺骸から拡散・放出される有機酸起源の炭酸と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応に伴う、カルサイトの急速沈殿・空隙シーリングによる。その結果、数百万年以上もの長期に渡って生物殻がコンクリーション中に保存され、風化・変質することなく産出する。

この特性を応用し、民間化学工業会社と人工的コンクリーション化剤「コンクリーションシード(略称コンシード：特許第6889508号；7164119号；7215762号)」を開発し、このコンシードによるシーリング実証試験を、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター（北海道幌延町）の地下350 mで行った。その結果、トンネル掘削に伴う岩盤の破壊領域（掘削損傷領域：EDZ）の透水係数が、半年で2～3オーダー以上低下し、周辺母岩とほぼ同レベルの透水性に改善された。さらに、本試験中にM5.4の直下型地震が発生し、透水性が一旦上昇したにも関わらず、数ヶ月後には元の低透水性にリカバリーした（Yoshida et al., 2024）。このようなシーリング効果は、地層処分だけでなく、岩盤中の割れ目帯や断層破碎帯などの大規模水みちの止水対策や、既存トンネルの修復に用いられるグラウト技術の代替策として、さらにはCCSや石油廃孔の恒久的シーリングを担保するものである。

CaCO₃(カルサイト)は、自然界に豊富に存在し、生成が速かつ鉱物的にも安定である。生物化石を含むコンクリーションの存在は、そのことを明確に語っている。このような自然現象を理解し、応用へと展開させ

るには、地球化学的アプローチが重要かつ不可欠あるとともに、地質学・鉱物学・古生物学・地球物理学並びに関連する工学分野との協働が、直面している長期化する環境問題の解決に向けてさらに重要かつ効果的だと考える。

文献Yoshida et al. (2015) *Scientific Reports*; Yoshida et al. (2018) *Scientific Reports*; Yoshida et al. (2020) *Geochemical Journal*.; OECD/NEA (2021) *OECD publishing Paris*, NEA/RWM/R1. Yoshida et al. (2024) *Communications Engineering (nature)* <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00216-1>.

キーワード：球状コンクリーション、炭酸カルシウム、恒久的シーリング剤

Keywords: Spherical concretion, Calcium carbonate, Durable sealing material

広島花崗岩の風化による色変化過程

Color change process of Hiroshima granite due to weathering

*横山 正¹、院去 由佳、海堀 正博¹

*Tadashi YOKOYAMA¹, Yuka Inkyo, Masahiro Kaibori¹

1. 広島大学

1. Hiroshima University

中国地方には花崗岩が広く分布している。花崗岩の風化断面を観察すると、地表付近の風化が進行した部分は鉄の二次鉱物の生成により黄～褐色を呈し、地下の未風化部に近づくにつれて白っぽくなることが多い。本研究では、広島花崗岩を例として、風化による色変化の特徴やメカニズムを調べた。広島大学東広島キャンパス横のががら山において深さ20 mまで掘削された花崗岩のコアを研究対象とした。分光測色計を用いて、各深度の色(L*a*b*値)を約2-10 cmおきに測定した。色の値は、L*値が大きいほど明るく、a*値が大きいほど赤みが強く(a* > 0の場合)、b*値が大きいほど黄色味が強い(b* > 0の場合)。コアの色は、深さ12 m以深の白っぽい未風化部はa*値、b*値共に小さく、L*値は大きい。一方、深さ約12 mから約4 mにかけては、位置によりばらつきがあるものの、全体としては地表に近い部分ほどa*値、b*値共に増大し、L*値は低下する。各深度の色を、風化で生じる鉄の二次鉱物として代表的な4種類の含鉄鉱物で作成した標準物質の色と比較した。この標準物質は、goethite(黄色)、ferrihydrite(暗褐色)、lepidocrocite(明褐色)、hematite(暗赤色)を、それぞれSiO₂粉末と0-100%のさまざまな割合で混合したものである。掘削コアの風化の初期段階に相当する部分では、割れ目の周辺に濃褐色の帯があるがそれより奥は白っぽいことが多く、この濃褐色の帯はferrihydriteとgoethiteの混合物に相当する色を示した。一方、風化が進んだ部分では岩石マトリクス全体が黄色味を帯びていることが多く、この部分の色はgoethiteの色に近かった。一般に、ferrihydriteは時間の経過と共により安定なgoethiteやhematiteに変化していくことが知られている。掘削コアの色測定の結果から、風化の初期段階ではまずferrihydriteが多く生成し、その後風化の進行に伴いferrihydriteからgoethiteへの変化が進んだことが推察される。また、掘削コアの風化度が異なる数カ所について、選択的鉄溶解法で鉄の二次鉱物を溶かして定量した。コアの色と標準物質の色との比較からコアの各地点の鉄の二次鉱物の量(全てgoethiteと仮定)を推定し、選択的鉄溶解法で得られた値に対してプロットすると、概ね比例関係が認められた。現段階ではferrihydriteの寄与を評価できておらず、その影響を補正すると結果が変わる可能性はあるが、迅速・簡便なコアの色測定のみから鉄の二次鉱物の量を大まかには推定できる可能性が示された。

キーワード：花崗岩、風化、色

Keywords: Granite, Weathering, Color

陸生哺乳類の骨格を構成する燐灰石の定向配列と粒径の推定

Crystallographic preferred orientation and grain size of apatite in terrestrial mammalian bones

*松影 香子¹、井出 桃花²、倉田 雅也²、西原 遊³

*Kyoko N. MATSUKAGE¹, Momoka Ide², Masaya Kurata², Yu Nishihara³

1. 帝科大・自然環境/総合教育センター、2. 帝科大・アニマルサイエンス、3. 愛媛大・GRC

1. Teikyo Univ. of Sci. Natural and Environmental Sci., 2. Teikyo Univ. of Sci. Animal Sci., 3. Ehime Univ.

陸生哺乳類動物の骨は主に水酸基を含む燐灰石 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 多結晶体からなることが知られている。現世の動物の骨組織の研究は過去に地球上に生息していた動物の生態や機能を化石から推定するさいの重要な基礎データになるだけでなく、特に陸生哺乳類の骨格の組織解析から得られた知見は医療に用いられる人工歯や人工骨の開発に役立てられている。例えば、Nakano et al. (2008)はウサギの尺骨の燐灰石が、骨の伸張方向に対してc軸が向くように定向配列していること、透過型電子顕微鏡による観察によって結晶サイズが数10nm程度であり光学顕微鏡では結晶子が観察出来ないぐらい細粒であることを報告している。本研究では、帝京科学大学アニマルサイエンス学科の濱野氏より提供されたタヌキの骨を使用し、哺乳類動物の骨の組織を詳細に記載することを目的とした。

初めに実体顕微鏡で骨の表面観察を行った上で骨の薄片を作成し偏光顕微鏡観察を行った。先行研究では、哺乳類の骨の結晶粒径は数10nm程度であり可視光の波長よりも細粒であるため、光学顕微鏡では結晶方位や組織等の観察は不可能であるとされていたが、クロスニコルで観察したところ全ての薄片で消光が認められた。例えば、足根骨の伸張方向の断面、足根骨の輪切り断面、手首の関節断面は明瞭な消光が観察できた。足根骨の伸張方向の断面の組織は外側と内側に分けられ、外側は硬く緻密な部分と生体組織が充填していたと考えられる空孔がある部分の二重構造がみられた。内側の層は外側2層にくらべて空隙が多く、繊維状組織を有していた。骨全体では三重構造になっていることがわかった。内側の層では、繊維状結晶の束を構成する結晶では消光角がある程度そろった消光がみられたが、繊維の束ごとの方向がランダムなため、全体でランダムな方向に結晶が存在しているように見えた。足根骨の輪切り断面では、中心の繊維状組織にランダムな消光が見られた。手首の関節輪切りは特に関節の先端外側で強い一方向の消光が見られ、内側ではランダムな消光が見られた。

偏光顕微鏡観察を行った上記三つの試料に関して、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター設置のマイクロフォーカスX線回折装置による結晶方位解析を行った(瀬戸, 2012)。Mo K α X線を用いた透過法による2次元回折パターンを、ソフトウェアMAUD (Lutterotti et al., 2014)を用いて解析した。伸張方向に切った試料では外側の緻密な組織で骨の伸張方向に強いc軸の定向配列が見られた。伸張方向と垂直な断面で外側の緻密部分を測定したところ、a軸は伸張軸と直交する面内でランダムな方向を向いていた。内側の繊維状組織の部分ではc軸方向の定向配列は外側よりも弱く、明瞭に見られる部分と不明瞭な部分があった。この結果は繊維の束が束ごとに一方向にそろってはいない組織の任意断面を測定したことによると考えられる。燐灰石のc軸はa軸に比べ非圧縮率が大きいことが知られており(Matsukage et al., 2004)、力が一番強くかかる骨の伸張方向に結晶の強度が大きいc軸が向いているという結果は骨の機能から予想される骨組織と調和的である。

さらにマイクロフォーカスX線回折ピークの半値幅を用いてScherrerの式から結晶の粒径を推定した。粒径は全ての分析点において20nm以下となり、非常な細粒であるという結果になった。本来光学顕微鏡では観察が不可能なほどの細粒であることが示されたが、本研究では偏光顕微鏡による観察にて、全ての薄片で消光が観察された。可視光を用いた偏光顕微鏡で消光がみられるという事は、結晶の大きさが可視光(数100nm)よりも大きいことを示唆する。この矛盾の解釈として、10–20nm程度の細粒の結晶がみなほぼ同じ方向を向いており、揃って大きな結晶の“フリ”をしていたため消光がみられ、光学顕微鏡でも定向配列の有無が観察出来たのではないかと結論づけた。多結晶体では細粒であるほど降伏応力が高くなるという

Hall-Petchの関係があり、細粒である事が骨の強度に寄与していると考えられる。

引用文献

Matsukage et al. (2004) *Physics and Chemistry of Minerals*, 31, 580-584

Nakano et al. (2008) *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 116, 2, 313-315.

Lutterotti et al. (2014) *Crystallography Education*, 29, 76-84.

瀬戸雄介 (2012) *高圧力の科学と技術*, 22, 2, 144-152.

キーワード： 燐灰石、陸生哺乳類、骨、定向配列、粒径

Keywords: Apatite, terrestrial mammal, Bone, Preferred orientation, Grain size

生物起源あられ石におけるNaの微視的分布

Microscopic distribution of sodium in biogenic aragonite

*奥村 大河¹、鈴木 道生²、Perez-Huerta Alberto³、Samajpati Eshita³、小暮 敏博¹

*Taiga Okumura¹, Michio Suzuki², Alberto Perez-Huerta³, Eshita Samajpati³, Toshihiro Kogure¹

1. 東大・院理、2. 東大・院農、3. Univ. Alabama Geol. Sci.

1. UTokyo Sci., 2. UTokyo Agri. Life Sci., 3. Univ. Alabama Geol. Sci.

多くの生物起源あられ石には、結晶内に様々な微量元素が含まれる。中でもNaは最も主要な元素であり、生物の生息環境に応じて含有量が変化する。しかし、あられ石中でのNaの存在状態は完全には明らかになっていない。我々は本学会の一昨年(2023)の年会において、生物起源あられ石および*in vitro*で合成したNa含有あられ石について、その結晶構造について報告した。生物起源あられ石では、陸生<淡水生<汽水生<海水生の貝殻の順で軸率(a/b と c/b)が大きく、軸率の増大はNaの含有量と相関していた。合成あられ石においても同様な傾向が見られたため、異方的な格子定数変化はNaがCaを置換することが原因であると考えられた。一方、Pokroy *et al.* (2007) では加熱処理によってこうした異方性が緩和することが報告されている。そこで本研究では、生物起源あられ石に加熱処理を施し、格子定数やNaの微視的分布の変化を調べることで、結晶中に含まれるNaの存在状態の解明を目指した。

試料は海水生貝類のアワビ (*Haliotis discus*) とアコヤガイ (*Pinctada fucata*) の真珠層を用いた。これらの貝殻粉末を250°Cで加熱し、加熱前後で粉末X線回折により格子定数を測定した。加熱前の軸長は非生物起源あられ石に比べてa軸とc軸は長く、b軸はやや短かったが、加熱後は非生物起源あられ石とほぼ同じ値に変化した。走査電子顕微鏡を用いてエネルギー分散型X線分光(EDS)分析を行うと、加熱前後でNa含有量に大きな変化は見られなかった。次に、イオンミリング法によってアワビ真珠層断面の薄膜試料を作製し、走査透過電子顕微鏡を用いたEDS分析により加熱前後のNaの微視的分布を調べた。その結果、加熱前はNaが結晶内に均一に分布していたのに対し、加熱後は結晶内に存在するNaの量は減少し、結晶端面に濃集していた。さらに詳細なNaの分布を調べるため、加熱前後のアワビ真珠層から集束イオンビーム試料加工装置により半径50 nm程度の針状試料を作製し、3次元アトムプローブを用いて分析した。加熱前は結晶全体にNa⁺が検出されたが、ややNa⁺濃度が高い部分がCOH⁺の分布と一致していたため、一部のNaは有機物に結合して存在することが示唆された。一方、加熱後には結晶内にはNa⁺がほとんど存在せず、結晶界面に存在する有機膜の周辺に濃集していた。Na⁺の分布はNa₂CO₃⁺ではなくNa₂O⁺の分布と相関が見られたため、Naは有機物と結合した可能性が考えられる。以上の結果から、生物起源あられ石に含まれるNaにはCaを置換するものと有機物に結合するものが存在するが、加熱によってNaが散逸して結晶格子から抜けることで軸長の異方性が緩和されたと考えられる。今後は合成したNa含有あられ石でも同様な実験を行い、Naの存在状態をより詳細に調べる予定である。

キーワード：あられ石、ナトリウム、バイオミネラリゼーション、STEM-EDS、3次元アトムプローブ

Keywords: Aragonite, Sodium, Biomineralization, STEM-EDS, Atom probe tomography

バイオミネラリゼーションにおける鉱物生成を司る有機基質

Structural and functional analyses of organic matrices regulating the formation of minerals in biomineralization.

*鈴木 道生¹

*Michio Suzuki¹

1. 東大・院農

1. UTokyo

貝類の貝殻は炭酸カルシウムを主成分とする代表的なバイオミネラルの一つである。日本では真珠養殖に利用されるアコヤガイの貝殻は、宝石の真珠と同じ構造を有する扁平状の炭酸カルシウムを含む内側の真珠層、柱状の炭酸カルシウムから成る外側の稜柱層、二枚貝を繋ぐ蝶番部に存在する炭酸カルシウムナノファイバーを含む靱帯と複数の複雑な微細構造により構成されている。これらの微細構造の形成において、炭酸カルシウムのサイズ、形態、多形、方位、結晶欠陥などの特徴が全く異なっており、アコヤガイは有機基質や微量元素、イオン濃度などを生体内外で調整することで緻密に作り分けることが可能である。

これまで発表者の研究において、特に貝殻内に存在する有機基質に着目して研究を進めており、有機基質の構造と機能がどのように貝殻微細構造を形成に寄与するのか明らかにすることを目的に研究を進めてきた。真珠層には炭酸カルシウムの脱灰と共に溶出する可溶性成分に含まれる炭酸脱水酵素であるnacrein、不溶性成分から変性剤で溶出され有機基質の枠組みを形成するPif、有機基質の架橋を行うtyrosinase、変性剤でも可溶化しない不溶性成分として有機基質の骨格を構成するキチン、MSI60、NU-5などが同定されてきた。この中でPif関連タンパク質は貝殻の基質タンパク質として、有機物間相互作用と炭酸カルシウムとの相互作用の両方の機能を持ち真珠層以外の多くの貝殻微細構造に含まれることが分かってきた。核磁気共鳴を用いた解析により、固体表面でPifの繰り返し配列が伸長し結合することが判明した。また、有機基質の骨格を形成するキチンはキチン分解酵素による作用でナノファイバー化することで欠陥の誘導や有機膜の薄膜化を実現していることが示された。以上のように、貝殻内には多くのタンパク質が存在し、様々な役割分担をして貝殻微細構造を形成していると言える。このような有機基質のバイオミネラル内での機能や役割について最新の研究成果を紹介する。

キーワード：バイオミネラリゼーション、有機基質、炭酸カルシウム、アコヤガイ

Keywords: biomineralization, organic matrices, calcium carbonate, Pinctada fucata

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

Aragonite formation from amorphous calcium carbonate (ACC) with addition of *n*-butylamine

*鍵 裕之¹、村岡 賢佑¹

*Hiroyuki KAGI¹, Kensuke Muraoka¹

1. 東京大学

1. The University of Tokyo

炭酸カルシウムは普遍的な鉱物で、3つの結晶多形、すなわちカルサイト、アラゴナイト、ファーテライトが存在する。準安定な非晶質炭酸カルシウム(ACC)は化学式 $\text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n < 1.5$)で表され、バイオミネラル化において上記の結晶多形の前駆体として働くことが知られている。ACCは高温、高圧、湿潤環境といった条件でのin vivo実験で、カルサイトとファーテライトに結晶化することが多く報告されている[e.g., 1-3]。一方、ACCからアラゴナイトへの結晶化は報告例がきわめて少なく、アラゴナイト生成を誘導することが古くから知られているマグネシウムイオン(塩化マグネシウム水溶液)を添加したエタノールからの析出といったものに限られている[4]。一方、過飽和水溶液からの炭酸カルシウムの生成で、アミン類がアラゴナイトの生成を誘導することが報告されている[5]。本研究では、ACCから炭酸カルシウムへの結晶化における多形制御、特にアラゴナイトへの選択的結晶化の条件を調べることにした。

ACCは先行研究に従って合成した[1, 2]。ACCと*n*-ブチルアミンを様々な割合で混合し、温度30°C、相対湿度90%RH、80%RHの条件でそれぞれ2時間放置した。ACCと*n*-ブチルアミンのみを混合するだけでは炭酸カルシウムへの結晶化は起こらず、湿潤条件によるACCへの水の添加が結晶化に効いていることがわかった。

実験の結果、*n*-ブチルアミンとACCの量比と得られた多形の割合は添付の図ようになった。注目すべきは、アラゴナイト生成をもたらすことで知られる Mg^{2+} イオンを添加することなく、きわめて高純度なアラゴナイトが得られたことである。アラゴナイトの生成に、*n*-ブチルアミンの疎水性あるいは塩基性のどちらが効いているのかを理解するために、疎水性のヘキサン、塩基性のアンモニア水、そしてヘキサンとアンモニア水の混合物それぞれをACCと混合し、室温条件で2週間放置した。これら3種類の試料の中で、ヘキサンとアンモニア水との混合物のみがACCからアラゴナイトを生成した。この結果は、ACCからアラゴナイトへの結晶化には疎水性と塩基性の両方が必要であることを示唆している。本研究は、ACCからの結晶多形制御への新たな可能性を拓くと期待される。

[1] Koga et al (1998) *Thermochimica Acta*, 318, 239-244. [2] Yoshino et al. (2012) *Crystal Growth and Design*, 343, 62-67. [3] Xu et al. (2006) *Journal of Physical Chemistry B*, 110, 2764-2770. [4] Zhang et al. (2012) *Journal of Crystal Growth*, 343, 62-67. [4] Chuajiw et al. (2013) *Journal of Crystal Growth*, 386, 119-127.

キーワード：非晶質炭酸カルシウム、アラゴナイト、多形制御

Keywords: amorphous calcium carbonate, aragonite, polymorph control

