

ポスター | S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

2024年9月13日(金) 12:30 ~ 14:00 | エントランスホール 東山キャンパス

S2: 岩石-水相互作用 (スペシャルセッション)

12:30 ~ 14:00

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

「発表賞エントリー」

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

12:30 ~ 14:00

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

「発表賞エントリー」

*高垣 光¹、白勢 洋平¹ (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

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

「発表賞エントリー」

*和田 姫名乃¹、延寿 里美¹ (1. 愛媛大・院理工)

12:30 ~ 14:00

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

「発表賞エントリー」

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

12:30 ~ 14:00

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

「発表賞エントリー」

*五十嵐 大輝¹、宇野 正起¹、岡本 敦¹ (1. 東北大学)

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

Scales of extensional-shear fracturing and magnitudes of seismicity induced by magma intrusions into lower crust: Scale comparisons of dike swarm in the high-grade metamorphic rocks and deep low-frequency earthquakes

*奈良 拓実¹、宇野 正起¹、哲生 河上²、東野 文子²、足立 達郎³、土屋 範芳^{1,4}

*Takumi Nara¹, Masaoki Uno¹, Tetsuo Kawakami², Fumiko Higashino², Tatsuro Adachi³, Noriyoshi Tsuchiya^{1,4}

1. 東北大学・院環境、2. 京大・院理、3. 九大・院比較文化、4. 八戸高専

1. TOHOKU Univ. Env., 2. Kyoto Univ. Sci, 3. Kyushu Univ. Soc., 4. Hachinohe Kosen

近年の地震観測で、火山性深部低周波地震がマグマ性流体の移動により誘発される可能性が示唆されている (Yukutake et al., 2019). その実態検討には、マグマ貫入による地殻破壊の物質科学的な理解が重要であり、これが下部地殻中の高度変成岩に記録されている可能性がある。これまでの研究で、高度変成岩から、下部地殻におけるマグマ貫入の深度、温度、応力状態、破碎様式、マグマから放出された流体の母岩への浸透時間を推定し、これらが火山性深部低周波地震の地震観測 (e.g., Kurihara & Obara, 2021) と調和的な値を示すことを確認した (Nara et al., 2023 JpGU). そこで、本研究ではこれらの岩脈群の貫入に伴う地震のエネルギー量をモーメントマグニチュードとして推定し、火山性深部低周波地震の観測結果と比較した。

調査地域は東南極セール・ロンダーネ山地中央部ブラットニーパネ人差し指尾根で、約6億年前の東西ゴンドワナ大陸の衝突に関連した高度変成岩が分布する地域である (Osanai et al., 2013). 花崗岩質岩脈(長さ~100m)とそこから派生した角閃石脈によって、母岩の面構造が高角に切られ、岩脈には開口せん断き裂が観察された。母岩は赤褐色の中間質から苦鉄質のグラニュライトで主要構成鉱物は斜長石、角閃石、直方輝石、単斜輝石、石英である。また、花崗岩質岩脈の両側に暗灰色の反応帯を伴い、反応帯内部では、母岩中の直方輝石と単斜輝石は角閃石や黒雲母に置換される。

本研究では、幅5.5 cmの花崗岩質岩脈と、その周囲の反応帯および母岩を解析した。地質温度圧力計を岩脈-反応帯境界に適用した結果と、熱力学ソフトウェアPerple_X (Connolly, 2005, updated 2024)の解析結果を比較し、反応帯形成時の温度圧力条件は700-750°C, 0.7-0.8 GPaと推定した。また、反応帯中に産する燐灰石の塩素濃度が花崗岩質岩脈からの距離に応じて移流-拡散的なプロファイルを示すことから、これに反応輸送方程式を適用し、流体浸透時間を22-180 hと推定した。また、岩脈中にはジルコンが産し、全岩Zr濃度が150-170 ppmであることから、Zr飽和状態温度 (Watson & Harrison, 1983) として約820°Cを見積もった。これは岩脈貫入時の最低温度に相当すると考えられる。

また、ドローン写真から200 mスケールの3次元露頭モデルを生成し、101本の岩脈のサイズを測定し、モデルと詳細な露頭写真からせん断変位を測定した。岩脈の幅は1 cmから10 mであり、長さは0.1から250 mであった。岩脈幅と長さには比例関係が見られ、対数サイズの最頻値は幅3-6 cm, 長さ6-13 m程度である。せん断量は1 cmから1.3 mであり、岩脈幅との線形な比例関係はみられなかったが、せん断変位/岩脈幅比は0.01から10の範囲であった。さらに、マグマが放出した流体の量と注水量-マグニチュード経験式 (McGarr, 2014) を用いて、岩石-水反応による水消費の前に、流体注入に伴い誘発されうる地震の最大マグニチュードを推定した。メルトの含水量は、反応帯形成に必要な含水量および岩脈の含水量から最低3.2 wt%, 820°Cにおけるメルトの飽和含水量から最大12 wt% (Papale et al., 2006), 母岩の剛性率は、鉱物のモードに基づき38.4 GPaと推定できる。岩脈の形状を円盤状と仮定すると、各岩脈の幅と長さから体積を 4.7×10^{-3} から110 m

³と推定でき、メルトの含水量から、単一の岩脈から放出された水は 3.7×10^{-8} から $1.4 \times 10^4 \text{m}^3$ と推定される。この水が誘発する地震の最大マグニチュードは-1.4から3.8である。また、岩脈のサイズ分布からマグニチュードの頻度分布を推定し、-0.4から1.4のマグニチュードの地震が主に発生していることが分かった。一方、岩脈サイズの頻度分布とせん断変位／岩脈幅比から推定されるマグニチュードは、-2.0から4.9であった。

本研究において推定した岩脈貫入に伴う地殻破壊によって生じる地震のモーメントマグニチュードは、最大値は4-5と高いものの、-1から1の範囲に多く、火山性深部低周波地震の観測 (Ikegaya et al., 2023; Aso et al., 2013) とおおむね同じ傾向であることが示された。また、東南極セール・ロンダーネ山地の他の露頭ではせん断変位を伴う熱水性鉱物脈も観察されている (e.g., Higashino et al., 2019; Mindaleva et al., 2023) ため、単一の岩脈による地殻破壊により、深部低周波地震の長時間継続と小さなマグニチュードの地震を説明できる可能性がある。

キーワード：火山性地震、マグマ貫入、南極

Keywords: volcanic earthquakes, magma intrusion, Antarctica

愛媛県四国中央市浦山川に産する蛇紋岩の炭酸塩化とリスウェナイトの形成過程

Carbonation of serpentinite and formation process of listvenite from Urayama River, Shikokuchuo City, Ehime Prefecture, Japan

*高垣 光¹、白勢 洋平¹

*Hikaru Takagaki¹, Yohei Shirose¹

1. 愛媛大・院理工

1. Ehime Univ. Sci.&Egn.

【はじめに】リスウェナイトは蛇紋岩などの超苦鉄質岩類の変質によって形成され、炭酸塩鉱物や石英を主とする緑色の岩石である (Hall and Zhao, 1995)。日本では四国の中央構造線付近及び三波川帯の変成岩からの産出が報告されている (皆川ほか, 2008; 白勢ほか, 2022)。また三波川帯の蛇紋岩についてはスラブ由来のCO₂によるマンタルウェッジ蛇紋岩の炭酸塩化反応が報告されている (Okamoto et al., 2021)。高垣・白勢 (2023) では愛媛県四国中央市浦山川の中央構造線の活動に伴う剪断帯より産するリスウェナイトの原岩について蛇紋岩と泥質片岩がその起源であると考えた。今回は全岩化学組成をもととするアイソコン図から流体による元素の移動, 蛇紋岩化やリスウェナイト化の温度の推定, 鉱物の組織や化学組成をもとにした炭酸塩化, リスウェナイト化の反応について議論を行う。

【産状・試料】中央構造線付近の浦山川には三波川変成帯に属する泥質片岩の剪断帯が分布している。剪断帯中に幅20 cm - 2 m程度の特徴の異なる3タイプの緑色の片状~塊状のリスウェナイトが共に産し, 蛇紋岩を伴う。それぞれのリスウェナイトは下流から泥質片岩中に産する脆い片状タイプ, 泥質片岩と蛇紋岩の境界付近に産する濃緑色で硬い塊状タイプ, 青緑色で硬い塊状タイプである。蛇紋岩体の幅は3 m程度で, 漸移的に炭酸塩化している。

【実験手法】組織観察, 分析にはJEOL製SEM JSM-6510LV, リガク製XRD Ultima IVを用い, 全岩化学組成分析にはリガク製XRF ZSX PRIMUSIIを用いた。

【結果・考察】リスウェナイトはいずれも石英, マグネサイト, ドロマイトを主とし, 微量の針ニッケル鉱, ゲルスドルフ鉱 (片状タイプ), クロム鉄鉱と輝コバルト鉱 (濃緑色塊状タイプ) などが含まれる。泥質片岩由来の片状タイプの緑色部では50~500 μmの含クロムカオリナイトが含まれる。蛇紋岩由来の濃緑色塊状タイプでは緑色部は細粒の石英の集合中に25 μm程度の含クロム白雲母が, 青緑色塊状タイプは5 μm程度の含クロムモンモリロナイトが含まれる。蛇紋岩はアンチゴライトに加えてマグネサイトや石英を含み, 漸移的に炭酸塩化し, リスウェナイトとなる。青緑色塊状のリスウェナイトと蛇紋岩の境界部のアンチゴライトではサブミクロンオーダーで石英が入り混じる。リスウェナイトからやや離れた部分ではアンチゴライト短冊状結晶は周縁部がマグネサイトに置換された組織を持つ。アンチゴライトはFe²⁺, Al, Crを含み, 境界部でFe²⁺ = 0.31-0.32, Al = 0.14-0.21, Cr = 0.02-0.04 (apfu) となる。やや離れた部分のアンチゴライトでFe²⁺ = 0.26-0.31, Al = 0.03-0.15, Cr = 0.01-0.05 (apfu) となり, Alの含有量に幅がある。蛇紋岩はクロム鉄鉱, 輝コバルト鉱, 針ニッケル鉱, ゲルスドルフ鉱などを含む。アンチゴライトのMg#の平均値は0.90となり, マグネサイトのMg#の平均値は蛇紋岩中では0.87, 濃緑色塊状タイプで0.89, 青緑色塊状タイプで0.87と近い値になるのに対し, 片状タイプのマグネサイトのMg#の平均値は0.66と組成が異なっている。全岩化学組成をもとにアイソコン図を用いて比較を行うと, 泥質片岩に比べ片状タイプはMgO, CaO, Cr, Ni, Co, LOIの値が顕著に高く, K₂O, Na₂Oの値が低くなり, 蛇紋岩に比べ濃緑色塊状タイプはCaO, K₂O, Na₂O, Srの値が高くなり, 青緑色塊状タイプはCaO, Na₂O, Sr, LOIが高くなる。浦山川のリスウェナイトは蛇紋岩とCa, Sr, K, Na, CO₂を含む流体との反応により, 蛇紋石が脱水しマグネサイトと石英が形成される。その際にAlが少ないアンチゴライトの周縁部から反応が進み, 最終的にAlとCrを含む

アンチゴライトが分解することで含クロム白雲母や含クロムモンモリロナイトが形成され、濃緑色塊状・青緑色塊状タイプのリスウェナイトが形成される。また滑石ではなく、マグネサイトと石英が形成される反応から比較的CO₂濃度の高い流体が反応したと考えられる。蛇紋岩のリスウェナイト化に伴い、Mg, Ca, Cr, Ni, Co, CO₂を含む流体を放出し、剪断帯を介して泥質片岩と反応する。泥質片岩が含む曹長石や白雲母の変質により含クロムカオリナイトが形成され、片状タイプのリスウェナイトが形成される。Fe-Ni-Co鉱物の化学組成及びクロムを含む粘土鉱物種の違いから、500~600℃にて蛇紋岩化しアンチゴライトが形成され、濃緑色塊状タイプのリスウェナイトは約150~400℃、青緑色塊状タイプは150℃以下、片状タイプは約100~250℃にて形成されたと考えられる。

キーワード：リスウェナイト、アンチゴライト、炭酸塩化、蛇紋岩、浦山川

Keywords: listvenite, antigorite, carbonation, serpentinite, Urayama River

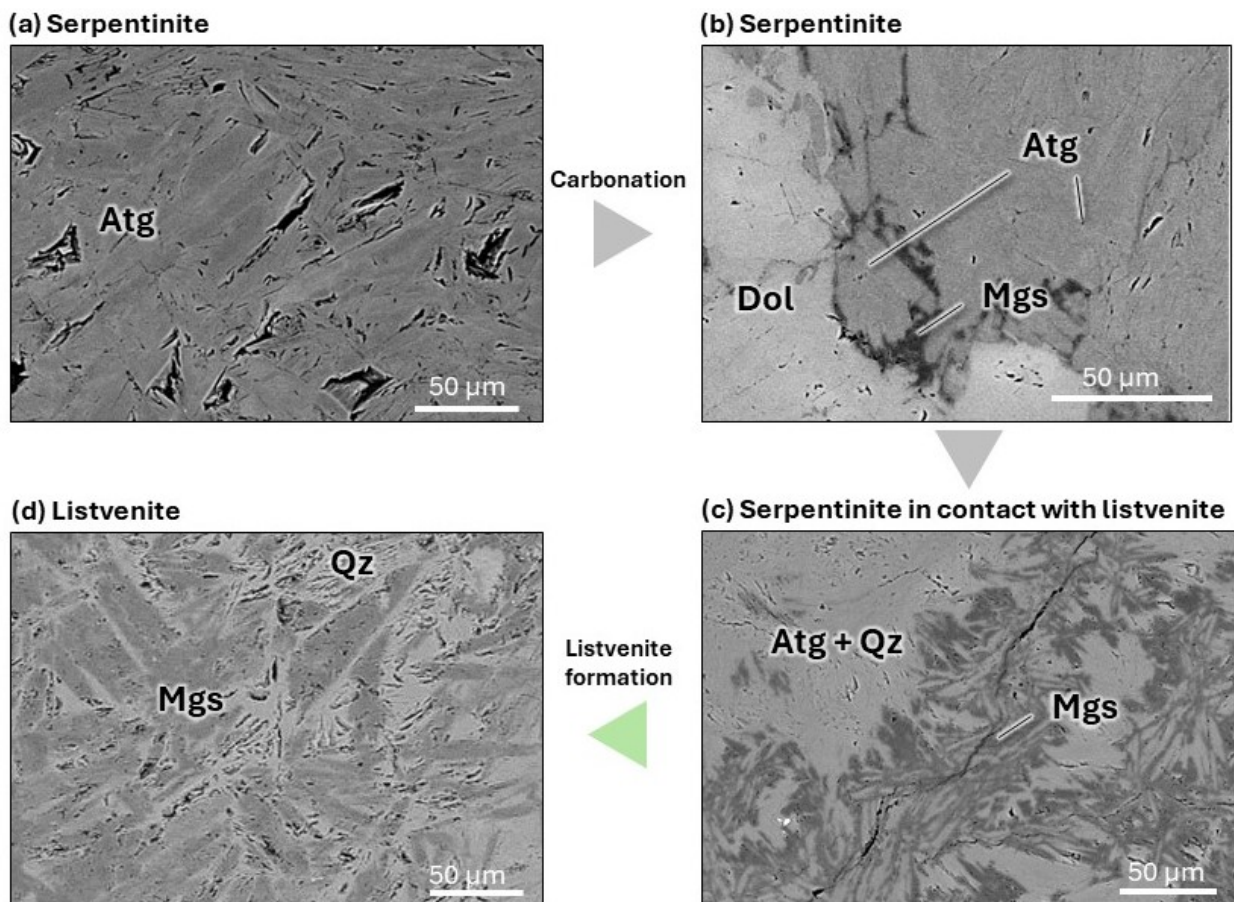


Figure. Carbonation and listvenite formation from serpentinite.

BSE images of (a) serpentinite, (b) carbonated serpentinite, (c) carbonated serpentinite in contact with listvenite, (d) listvenite. Atg : antigorite, Qz : quartz, Mgs : magnesite, Dol : dolomite.

愛媛県東赤石かんらん岩体保土野における蛇紋岩化過程の組織変化

Texture transition during serpentinization in Hodono, Ehime Prefecture

*和田 姫名乃¹、延寿 里美¹*Hinano Wada¹, Enju Satomi¹1. 愛媛大・院理工
1. Ehime Univ. S/E

蛇紋岩の主な構成鉱物である蛇紋石は平板状のリザーダイト、筒状のクリソタイル、波状のアンチゴライトに分けられる。アンチゴライトはリザーダイトより高温条件でできやすい。リザーダイトを含む低温型蛇紋岩の代表的な組織として、かんらん石の粒間や割れ目から水が進入し、流路に近い外側から中心部へ順に蛇紋石へ置換され得るメッシュ組織がある。また、アンチゴライトを含む高温型蛇紋岩の代表的な組織として、Schwartz et al. (2013) ではメッシュ組織のリムのリザーダイトとコアのクリソタイルが短冊状のアンチゴライトに置換された組織、Boudier et al. (2009) ではかんらん石の一定方向の亀裂に沿うように直接アンチゴライトが形成された組織が報告されている。しかし、アンチゴライトがかんらん石と共存する場合の組織形成の過程や蛇紋岩化の程度に伴う多様性などは明らかになっていない。本研究では三波川変成帯の東赤石かんらん岩体の南端に位置する保土野谷川上流でかんらん石と共存するアンチゴライトの組織に着目し、当地域のかんらん岩体の形成過程を明らかにすることを研究目的とする。

本調査では南北50 m程の露頭の14地点にて試料を採取した。RIGAKU製 Ultima IVを使用し粉末X線回折実験と、偏光顕微鏡で組織を観察した。代表的な蛇紋岩試料はOxford製EDSを装着したJEOL製走査型顕微鏡JSM-6510LVを用いて分析を行った。

試料はかんらん石の含有量、蛇紋石の種類から、かんらん岩(タイプ①)、蛇紋岩化の進んだかんらん岩、蛇紋岩(タイプ④)に分けた。さらに、産状や断面の組織から蛇紋岩化の進んだかんらん岩をタイプ②と③に分類した。露頭上部は片状または塊状のかんらん岩(タイプ①)で構成され、露頭表面は風化しベージュ色、断面は鮮やかな黄緑色で粗粒なかんらん石と少量の蛇紋石からなる。露頭下部は塊状のかんらん岩で構成されているが、蛇紋岩化が進んでおりアンチゴライトを多く含む(タイプ②)。葉状構造を持ち、露頭表面は風化しベージュ色である。断面は外側がベージュや緑色、内側が黒色で内側のみブルーサイトを含む。色の境界部は不明瞭である。露頭中部では二種類の小規模な岩体がみられた。一方は、塊状のかんらん岩で構成され、蛇紋岩化が進んでおりリザーダイトを多く含む(タイプ③)。露頭表面は風化しベージュ-青緑色でクロム鉄鉱と堇泥石が脈状または点在し、タイプ②や④に似た部分を含むが両者の境界は明瞭である。もう一方は、片状または塊状の蛇紋岩(タイプ④)で構成され、表面・断面共に黒色や暗緑色である。主要鉱物はアンチゴライトで、炭酸塩脈を含む。

偏光顕微鏡観察から、かんらん石の形状に複数特徴が見られた(図1)。最も多いのは短冊状のアンチゴライトと共存する直線的な輪郭を持つくさび状-板状のかんらん石(a)である。対して、曲線的な輪郭を持つ粒状のかんらん石(b)が見られ、多くは短冊状のアンチゴライトと共存するが、リザーダイトに富む試料ではメッシュ組織のコアとして存在する(c)。直線的な輪郭を持つかんらん石はかんらん石が直接アンチゴライトに置換したと考えられ、塑性変形時の転移クリープによる一定方位の亀裂から発達したと思われる組織も見られた。一方で、メッシュ組織は変質時の体積膨張により形成された亀裂から中心へリムが形成され、コア形成前に反応が終了し粒状かんらん石が残存した。短冊と共存するものは、メッシュコアとの類似性からリム部がアンチゴライトの短冊状組織に置換した可能性がある。

蛇紋石は、アンチゴライトに富む試料では短冊部分と結晶間を埋める細粒部、リザーダイトに富む試料ではメッシュ組織のリムとして存在し、化学組成に違いも見られた。短冊状結晶はタイプごとに差はあるが一定量のAlを含み(タイプ②0.05-0.1 apfu, タイプ④0.01-0.1 apfu), Mgに乏しい。対して細粒部やメッシュリムはAlを全く含まず、Mgに富んでいた。一方で、Feは結晶の形状に関わらず、タイプごとに異なり、(タイプ③

(0.07-0.09 *apfu*, タイプ②0.09-0.14 *apfu*, タイプ④0.18-0.24 *apfu*), アンチゴライトに富む試料ほどFeが多い傾向にある。

本産地の蛇紋岩はアンチゴライトとリザーダイトを含み、ブルーサイトも普遍的に見られたことから先行研究(e.g. Mizukami & Wallis, 2005)で推察されているよりも低温側も含む広い温度領域で蛇紋岩化が起こっていると考えられる。また、かんらん石と蛇紋石の共存する組織や組成に複数の型が見られたことから、全体が一律の条件や時期で蛇紋岩化したのではなく異なる環境で形成したと考えられる。

キーワード：かんらん岩、蛇紋岩、アンチゴライト、東赤石かんらん岩体

Keywords: peridotite, serpentinite, antigorite, Higashi-akaishi peridotite body

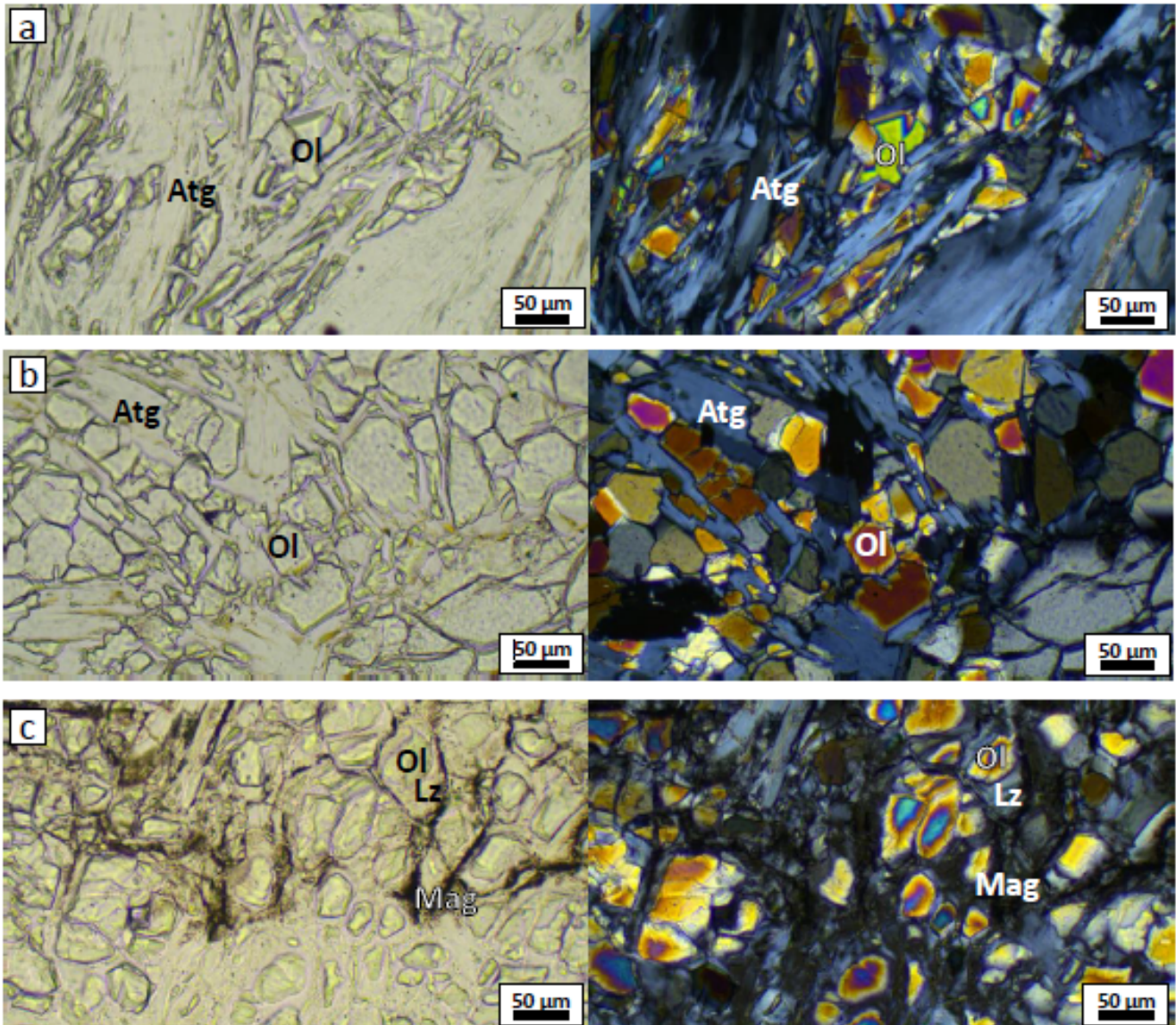


図1：試料中に含まれる蛇紋石とかんらん石の共存組織 (左 オープンニコル, 右 クロスニコル), (a)直線的な輪郭を持つくさび状-板状のかんらん石と短冊状アンチゴライト, (b)曲線的な輪郭を持つ粒状のかんらん石と短冊状アンチゴライト, (c)メッシュ組織のコアとして存在するかんらん石とリザーダイトリム

Ol：かんらん石, Atg：アンチゴライト, Lz：リザーダイト, Mag：磁鉄鉱

愛媛県伯方島に産するエピ閃長岩類に記録された岩石-水相互作用

Water-rock interaction recorded in episyenites from Hakatajima Island, Ehime Prefecture

*福井 堂子¹、下岡 和也²、高橋 俊郎³、齊藤 哲¹

*Toko FUKUI¹, Kazuya SHIMOOKA², Toshiro TAKAHASHI³, Satoshi SAITO¹

1. 愛媛大学、2. 関西学院大学、3. 新潟大学

1. Ehime Univ., 2. Kwansei Gakuin Univ., 3. Niigata Univ.

【はじめに】

エピ閃長岩は、花崗岩類とアルカリ成分に富む流体の岩石-水相互作用によって形成される。エピ閃長岩の形成過程を明らかにすることは、大陸地殻の成熟、および熱水変質にともなう流体の活動について理解していく上で重要である。日本産のエピ閃長岩については、西南日本内帯の花崗岩岩体に点在するものが多く記載されている（例えば、村上、1976、岩鉱特別号）。また近年では、エピ閃長岩中の希少鉱物について鉱物学的な研究が盛んにおこなわれている（例えば、今岡・永篤、2022、地学雑誌；中野ほか、2023、地質学雑誌）。一方で、岩石-流体相互作用の観点から、エピ閃長岩形成時の元素挙動について検討した例としては、土岐花崗岩体のコア試料として得られたエピ閃長岩についての研究が挙げられる（Nishimoto et al., 2014, Contrib. Mineral. Petrol.）。しかしながら、野外に露出するエピ閃長岩を対象とした研究例は限られている。本研究では、エピ閃長岩形成時に起こる岩石-流体相互作用を解明するために、愛媛県伯方島に分布するエピ閃長岩類の野外産状および岩石記載、全岩化学組成分析・希土類元素（REE）組成分析、Sr-Nd同位体組成分析をおこない、エピ閃長岩形成時の元素の挙動について検討した。

【野外産状・岩石記載】

当地域には2種類のエピ閃長岩が産し、その色調の違いにより、真珠色閃長岩と牡蠣色閃長岩に区別される。これらのエピ閃長岩類は花崗岩に伴って産出し、いずれも周囲の花崗岩との境界は不明瞭である。真珠色閃長岩は多孔質な岩相を示し、露頭中に多数の空隙が認められる。一方、牡蠣色閃長岩は塊状・緻密な岩相であり、真珠色閃長岩に比べ、母岩の花崗岩の組織が残存している。主な構成鉱物はいずれもアルカリ長石、単斜輝石、柘榴石、チタン石であるが、有色鉱物の量は、真珠色閃長岩では柘榴石が、牡蠣色閃長岩では単斜輝石が最も多い。真珠色閃長岩中では柘榴石とチタン石が空隙を埋めるように産する。牡蠣色閃長岩中では単斜輝石と柘榴石の粒状集合組織が認められるほか、一部では、角閃石の単斜輝石への交代も認められる。

【REE組成・Sr-Nd同位体組成分析】

REEの存在度は母岩の花崗岩よりも真珠色閃長岩では低く、牡蠣色閃長岩では高い値を示す。また、Sr-Nd同位体組成について、真珠色閃長岩は母岩の花崗岩類と類似した ϵ_{Srt} (90 Ma)を示すが、 ϵ_{Ndt} (90 Ma)は母岩よりも有意に低い値を示す。一方、牡蠣色閃長岩は母岩の花崗岩類と類似したSr-Nd同位体組成を示す。

【Isocon解析】

花崗岩がエピ閃長岩化する際の元素の移動を検討するためにエピ閃長岩類および母岩の花崗岩類の全岩化学組成データを用いて、Isocon解析（Grant, 1986, Econ. Geol.）を行った。花崗岩に多く含有され、エピ閃長岩化後も長石の結晶構造に保持されるAlを不動元素として設定し、解析をおこなった。その結果、両エピ閃長岩のいずれも母岩からのSiの減少と、Li, Na, Kといったアルカリ元素の増加が認められた。一方、他の元素に着目すると、花崗岩中の苦鉄質鉱物に含まれるTi, Fe, Caや、ジルコンなど副成分鉱物に含まれるZr, REEなど、多くの元素が真珠色閃長岩では母岩の花崗岩類に比べて減少するのに対し、牡蠣色閃長岩では増加する、という対照的な結果が得られた。

【考察】

Isocon解析結果から、真珠色閃長岩で減少したTi, Fe, Ca, Zr, REEなどの元素が、牡蠣色閃長岩では増加したと考えられる。このことは、真珠色閃長岩形成時に母岩から取り去られた元素が、牡蠣色閃長岩に付加したことを示唆する。また、牡蠣色閃長岩は母岩の花崗岩と類似したSr-Nd同位体組成を示すが、このことはエピ閃長岩形成をもたらした流体が花崗岩質マグマ由来であることを示唆する。一方、真珠色閃長岩は花崗岩類より有意に低い ϵ_{Nd} (90 Ma)組成を持つことから、Nd同位体比の低い別起源の流体の関与があったことが示唆される。したがって、真珠色閃長岩形成時には、花崗岩質マグマ起源の流体との反応により同位体組成の類似するSrがアルカリ長石中に保持されるとともに、①Ndを含む多くの元素が取り去られ空隙に富む岩相をつくる。さらに、②花崗岩より低いNd同位体組成をもつ流体が供給され、空隙を埋めるように低いNd同位体組成をもつ柘榴石およびチタン石が晶出する、といった過程を経たと考えられる。また、牡蠣色閃長岩形成時には、①で母岩から取り去られた元素が濃集した流体との反応により、花崗岩と類似したSr-Nd同位体比を保持しつつ、有色鉱物の交代や、石英の溶脱によってできた空隙の充填が進んだものと考えられる。

キーワード：エピ閃長岩、交代作用、伯方島

Keywords: Episyenite, metasomatism, Hakatajima Island

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

Mechanisms of Reaction-Induced Fracturing in Serpentinite Carbonation; Insights from Hydrothermal Experiments and Geochemical Modeling

*五十嵐 大輝¹、宇野 正起¹、岡本 敦¹

*Taiki Taiki¹, Masaaki Uno¹, Atsushi Okamoto¹

1. 東北大学

1. Tohoku University

蛇紋岩の原位置炭酸塩化は、大量の二酸化炭素を貯蔵する方法として期待されているが、透水性が低く、反応表面積が少ない等の課題がある。天然では体積増加反応による破壊(反応誘起破壊)が岩石内部の反応を促進することが示唆されており[1]、炭酸塩化では破壊に十分な結晶化応力が発生し得ることが熱力学的に予想されているが[2]、天然岩石の炭酸塩化実験では明確な反応誘起破壊は報告されていない。極端な体積増加(+119 vol%)を伴うペリクレスの水和反応によりブルーサイトを生成する実験では、力学的応答は流体の輸送速度と反応速度のバランスに依存することが示されている[3]。輸送速度が反応速度よりも速ければ物質は一様に膨張するが、反応速度が輸送速度に対して速い場合、体積増加により破壊が起こる。ブルーサイトの炭酸塩化は反応速度/輸送速度の比が十分に大きいことから、ブルーサイトの炭酸塩化では反応誘起破壊が起こることが期待される。本研究では、天然岩石の炭酸塩化における反応誘起破壊を再現するため、ブルーサイトに富む蛇紋岩を用いた水熱反応実験を行い、反応速度/輸送速度比に基づく反応様式と結晶化応力の関係をモデル化した。ブルーサイトに富む蛇紋岩のコア試料をCO₂飽和水(CO₂圧力10 MPa)と1M NaHCO₃水溶液中で90℃、150℃、200℃の計6条件について1週間反応させた。実験後の試料は主に表面の0.5mm程度が反応し、CO飽和水150℃、NaHCO₃水溶液150℃、200℃では明瞭な亀裂が生じた。CO₂飽和水試料について着目すると、外周からある距離(数百μm)でブルーサイトが溶解し、その外側に炭酸塩が析出していた。90℃ではマグネサイトは析出せず低温で安定なネスケホナイトが析出、150℃ではブルーサイト溶解フロントから~150 μm外側にマグネサイトが析出、200℃では溶解フロントのすぐ外側にマグネサイトが隙間なく析出した。総じて、ブルーサイト溶解フロントとマグネサイト析出位置との距離は、温度が高くなるにつれて近くなっていた。試料中の反応した領域では、元の蛇紋石-ブルーサイト混合物の周囲に多孔質の蛇紋石が形成され、その外側にマグネサイト-蛇紋石混合物が形成されていた。観察結果に基づき、反応-輸送モデリングソフトウェアCrunch-Flow[4]を用いて、CO₂飽和水における実験中の反応を再現する1次元モデリングを試みた。モデルでは、Mgの拡散速度とマグネサイトの析出速度の比によって反応様式が変化することがわかった。90℃ではマグネサイトの析出速度が遅くブルーサイトの溶解が卓越し、マグネサイトは析出せずMgが溶液中に拡散したのに対し、150℃では拡散-析出速度が同程度であり、Mgが多少拡散した後にマグネサイトが析出することで試料表面から比較的内部までマグネサイトが析出し、目詰まりした。200℃では析出速度の増加により、Mgがほとんど拡散することなくマグネサイトが試料表面に析出し、目詰まりを起こしてブルーサイトの溶解を阻害した。一方で、目詰まりした150、200℃モデルにおいて、マグネサイトの過飽和度に基づいて発生しうる結晶化応力を計算すると、いずれも10~100 MPa以上であり、一般的な岩石の引張強度(約10 MPa)より高い値を示した。また、反応フロントでは、空隙率が最も低い領域にマグネサイト飽和度の高い岩石外の溶液が浸透することで極めて高い結晶化応力(~1 GPa)が予想され、反応誘起破壊が発生する可能性が高い。本研究では、ブルーサイトに富む蛇紋岩におけるブルーサイトの炭酸塩化と反応誘起破壊の可否に関する輸送速度と反応速度の影響を調べるため、水熱実験と反応輸送モデリングを行い、炭酸塩化実験における反応誘起破壊の実証に成功した。目詰まりした試料(CO₂飽和水200℃)では表面の反応のみであったが、割れた試料(CO₂飽和水

150°C)では亀裂表面からさらに反応が進行していた。拡散速度>反応速度の場合、目詰まりに時間がかかり、より多くのブルーサイトを溶解させることができると予測される。一方、拡散速度<反応速度の場合は目詰まりを起こすが、過飽和度が高ければ十分な結晶化応力が発生し、反応誘起破壊が生じる可能性があることが明らかになった。引用[1]Kelemen and Hirth, 2011, *EPSL*, 345-348, 81-89.[2]Kelemen et al., 2011, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 545-576.[3]Uno et al., 2022, *PNAS*, 119, e2110776118.[4]Steefel and Lagasa, 1994, *American Journal of Science*, 294, 529-592.

キーワード：炭酸塩化、二酸化炭素鉱物化、蛇紋岩、反応誘起破壊

Keywords: Carbonation, Carbon Mineralization, Serpentinite, Reaction-induced fracturing