

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

📅 2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 🏢 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

8:45 ~ 9:00

[T4-O-9]

カルシオカーボナタイト形成プロセスと酸化還元状態：パンダヒル産カーボナタイトの例

*梅宮 穂花¹、辻森 樹¹、ボニフェイス ネルソン² (1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻、2. ダルエスサラーム大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:00 ~ 9:15

[T4-O-10]

脆性-延性遷移領域における変形組織とスロー／ファスト地震の統計性との間の関係：ゲル粒子-粘性流体混合系の剪断アナログ実験

*佐々木 勇人¹、桂木 洋光¹ (1. 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:15 ~ 9:30

[T4-O-11]

固体圧式変形試験機による高封圧条件下における精密応力決定：大理石の変形実験への適用

*永井 嵩也¹、清水 以知子¹ (1. 京都大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:30 ~ 9:45

[T4-O-12]

流通式水熱実験による斑れい岩の熱水変質に伴う元素移動と置換組織の発達

*鈴木 康平¹、ダンダル オトゴンバヤール¹、岡本 敦¹ (1. 東北大学大学院環境科学研究科)

9:45 ~ 10:00

[T4-O-13]

粒成長に伴う流体移動：樟脳-エタノールを用いた透視実験

*福田 惇一¹、瀬戸 雄介¹ (1. 大阪公立大学)

◆ ハイライト講演

10:00 ~ 10:15

[T4-O-14]

[招待講演] 火星表層環境の再現を目指した実験装置の整備と今後の研究展望

*亀田 純¹、Ruj Trishit¹ (1. 岡山大学惑星物質研究所)

10:15 ~ 10:30

[3oral301-12-7add]

休憩

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

10:30 ~ 10:45

[T4-O-15]

三波川帯におけるマイクロブーディング構造を用いた応力・歪解析

*外山 和也¹、道林 克禎¹ (1. 名古屋大学大学院環境学研究科 (岩鉱))

10:45 ~ 11:00

[T4-O-16]

低変成度泥質片岩の石英曹長石レイヤの変形組織：中部地方渋川地域三波川帯の例

*片桐 星来¹、道林 克禎² (1. 産業技術総合研究所地質調査総合センター、2. 名古屋大学大学院 環境学研究科 (岩鉱))

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

11:00 ~ 11:15

[T4-O-17]

石英の変形再結晶組織におけるタイプ P/S 遷移の定量的指標とその要因

*中小路 一真¹、清水 以知子²、道林 克禎³ (1. 東京大学、2. 京都大学、3. 名古屋大学)

11:15 ~ 11:30

[T4-O-18]

Co-seismic ductile deformation in carbonate-hosted active faults

*Yeo Thomas¹、Ujiie Kohtaro¹、Inoue Kaoru¹、Nagaya Takayoshi²、Ken-ichi Hirauchi³ (1. University of Tsukuba、2. Waseda University、3. Shizuoka University)

11:30 ~ 11:45

[T4-O-19]

根尾谷断層極浅部における自形方解石、バライトと摩擦発熱

*大谷 具幸¹、前田 剛志²、吉田 拓海² (1. 岐阜大学、2. 岐阜大学大学院)

11:45 ~ 12:00

[T4-O-20]

cleavable olivineからわかる地質学的に重要なこと

*安東 淳一¹、富岡 尚敬²、前川 寛和³ (1. 広島大学、2. JAMSTEC・高知コア研、3. 大阪公立大学)

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

8:45 ~ 9:00

**[T4-O-9] カルシオカーボナタイト形成プロセスと酸化還元状態：パンダヒル産
カーボナタイトの例***梅宮 穂花¹、辻森 樹¹、ボニフェイス ネルソン² (1. 東北大学大学院理学研究科地学専攻、2. ダル
エスサラーム大学)

キーワード：カーボナタイト、Nb鉱床、酸化還元

カーボナタイトは、炭酸塩鉱物を主成分とする稀有な火成岩であり、しばしばニオブ（Nb）や希土類元素（REEs）に富むことから、経済的に重要な鉱床を構成する岩石として注目されている（Yaxley et al., 2022, Ann. Rev. Earth Planet. Sci.）。これらの元素の濃集機構を解明することは、資源探査や選鉱・精錬技術の高度化に貢献するだけでなく、マントル起源の揮発性成分の挙動や地球内部における酸化還元状態の変遷を復元する上でも、重要な手がかりを提供する。本研究では、タンザニア西部パンダヒル産の粗粒な方解石を主成分とするカーボナタイト（約116Maに貫入）を対象とした。本産地のパイロクロアは放射性元素をほとんど含まないことが先行研究により明らかにされており、環境リスクの低いニオブ鉱床としてのポテンシャルが期待されている。

我々は、本産地を例に、カルシオカーボナタイトの形成プロセスおよびそれに伴う酸化還元状態の変遷を読み解くことを目的として、鉱物学的検討を行ってきた。特に、記載岩石学的手法を駆使し、構成鉱物の晶出順序および酸素フガシティ（ fO_2 ）の時間的变化に着目することで、ニオブ鉱床形成に与える影響の評価を試みた。パンダヒル産カーボナタイトは、主に方解石から構成され、少量のドロマイト、アンケライト、石英、磁鉄鉱、黄鉄鉱、さらにニオブ酸化物鉱物であるパイロクロアを含む。貫入後に変成作用による再結晶は受けていない。方解石およびアパタイトには複数の晶出世代が存在し、それぞれの結晶内部組織および化学組成の変化から晶出時期を判別することができる。また、黄鉄鉱、アンケライト、シデライト、マグネタイトなどの産状や組織、共生関係に基づき、マグマティックな岩石形成過程における酸化還元環境の変化を読み解くことができる。特に、黄鉄鉱に伴って鉄を含む炭酸塩鉱物（アンケライトやシデライト）が形成され、それらの内部に磁鉄鉱が析出している組織からは、より酸化的な状態への変化が示唆される。本発表では、カルシオカーボナタイトにおける酸素フガシティの変動とニオブ鉱床形成との関連性について議論する。

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:00 ~ 9:15

[T4-O-10] 脆性-延性遷移領域における変形組織とスロー／ファスト地震の統計性との間の関係：ゲル粒子-粘性流体混合系の剪断アナログ実験*佐々木 勇人¹、桂木 洋光¹ (1. 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

キーワード：スロー地震、脆性塑性遷移、岩石流体相互作用、ソフトマター、イベント統計、流動則

沈み込み帯におけるプレート境界面上では一般的に、スロー地震と通常地震とがそれぞれ異なる領域で発生している。通常地震性すべりによってシュドタキライトなどの地質学的痕跡が形成される一方で [1], スロー地震の発生にはどのような岩石変形構造が伴うのだろうか。本研究では、降伏強度の大きい脆性粒子と低粘性流体とを混合したアナログ物質を用いて、剪断帯の変形挙動がスロー地震と似た統計性を再現することを実験的に示す。

スロー地震は通常地震と比べて破壊伝播速度が遅いだけでなく、地震の規模ごとの発生頻度および継続時間それぞれについて特徴的な統計則が観測されている。スロー地震は通常地震と比べて小規模の地震が極端に多く、グーテンベルグリヒター則がしばしば成り立たない [2]。また、スロー地震は通常地震と比べて規模と継続時間の間に線形関係が見出され、断層の自己相似則が破れている [3]。こうした2つの統計性の違いは、スロー地震と通常地震との間で本質的に発生メカニズムが異なることを示す主たる根拠となる。スロー地震の多くは、脆性-延性遷移領域に相当する温度圧力条件で発生しており、脆性破壊と粘性流動とが同時に生じていると考えられている。そのため、脆性-延性遷移を示す岩石組織中にスロー地震の起源を求める地質学的仮説が多く提案されている [4, 5, 6, 7]。しかし、こうした脆性-延性遷移挙動がスロー地震を特徴づける2つの統計則に従うか否かについての研究はほとんど無い。

そこで本研究では、粘性流体からなる基質中に粒子を分散させた断層モデル系 [6, 7] の剪断実験を行い、変形中の応力降下イベントの統計解析と変形組織のその場観察を行った。粘性流体として、透明な重液のポリタングステン酸ナトリウム水溶液（比重3）を用い、粒子としてガラスビーズや柔らかいハイドロゲル粒子（粒径 4 mm, 最大4000粒子）を用いた。透明なアクリルの2重円筒容器内に重液を入れて粒子を浮遊分散させ、その中央に挿し入れた回転円柱で回転剪断を加えた。剪断速度 10^{-3} – 10^1 /s, 空隙率 0.2–1（溶液のみ）、粒子の降伏強度よりも十分小さい応力範囲で、室温大気圧下で実験を行った。

実験の結果は以下の3点にまとめられる：

1. 粒子層を重液の液面に単層のみ浮遊分散させた場合は、応力降下イベントの規模別頻度分布はスロー地震に見られる指数分布を示した。この傾向は、他の実験条件によらず定性的には同様だった。一方で、浮遊分散させた粒子層が十分に厚い場合は、応力降下イベントの規模別頻度分布はべき分布（グーテンベルグリヒター則）を示した。この傾向は、流体なし

の乾燥状態でも定性的には同様だった。

2. 粒子層を重液中に浮遊分散させた場合は、応力降下イベントの規模と継続時間との間に線形関係が見られ、スロー地震と似た統計性を示した。この傾向は、粒子層の厚さや流体の表面張力によるなど実験条件によって変化する場合があります、今後詳しく調べる必要がある。一方で、流体なしの乾燥状態では応力降下イベントの規模と継続時間との関係は非線形性を示した。これは通常の地震の自己相似則と似た統計性と言える。

3. 実験中の変形構造をその場観察したところ、回転円柱近傍に歪が集中した剪断帯が形成され、その部分で間欠的な粒子運動が生じていた。この時の粒子-重液混合系の流動則（応力-歪速度関係）はビンガム流体的な特徴を示した。これは固相と液相からなる混相流では比較的典型的な特徴だが、内部の局所的な流動則を調べてみると系全体のビンガム流体挙動から逸脱していた。低歪速度下で降伏強度を持つような条件下であっても、数粒子分の局所スケールでは粒子がゆらぎながら動いていることがわかった。この結果は、脆性-延性遷移挙動を示す剪断帯周辺では、変形組織内部で局所的に成り立つ流動則が必ずしも断層全体にわたる挙動を代表していないことを意味する。

今後は、流体粘性に対して降伏強度の小さい脆性粒子を用いて、地質学的に観察されているような脆性-延性遷移領域の粘性比条件下で実験を行う。高粘性流体からなる基質中で低降伏強度の粒子の剪断実験を行うと、図1に示すようなマイロナイトに似た変形組織を再現することができた。このような条件下でスロー地震の統計性が現れるかを調べていく。

- [1] Rowe & Griffith (2015) JSG
- [2] Chestler & Creager (2017) JGR
- [3] Ide & Beroza (2023) PNAS
- [4] Kirkpatrick et al (2021) Nat Rev
- [5] Behr & Bürgmann (2021) PTRS A
- [6] Sibson (2017) EPS
- [7] Beall et al (2019) G³

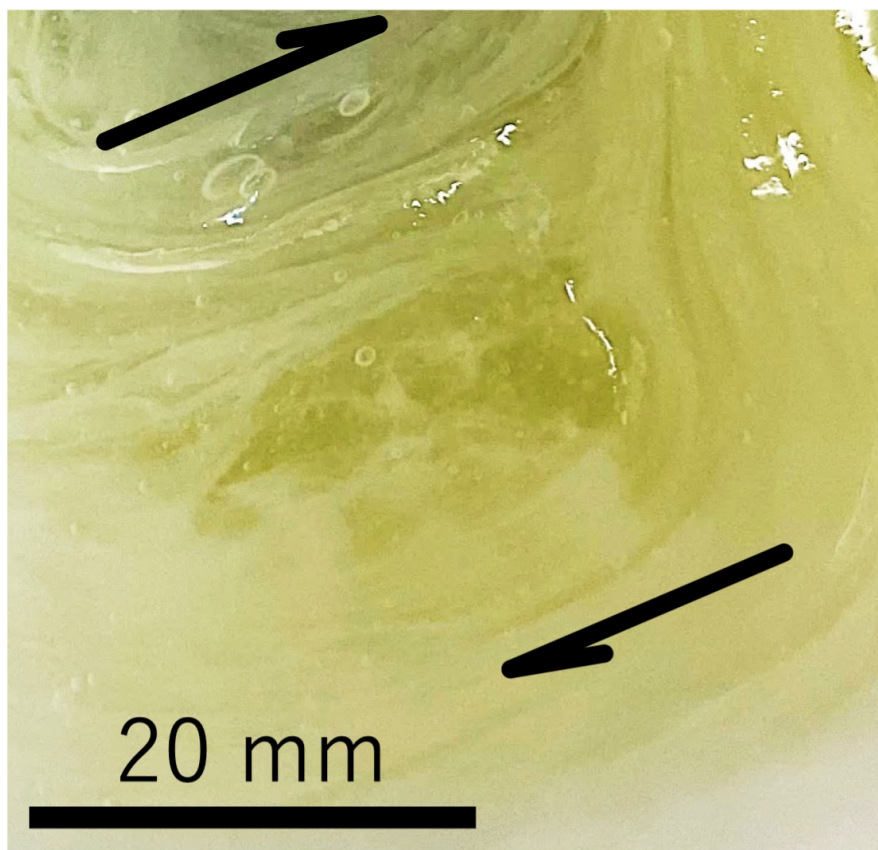


図1. 脆性-延性遷移の力学挙動を示す変形組織

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:15 ~ 9:30

[T4-O-11] 固体圧式変形試験機による高封圧条件下における精密応力決定：大理石の変形実験への適用*永井 嵩也¹、清水 以知子¹ (1. 京都大学)

キーワード：レオロジー、高温高压変形実験、固体圧式試験機、差応力、大理石

地殻深部やマントルにおける岩石鉱物のレオロジー特性を明らかにするために、ガス圧式や固体圧式の変形試験機が高温高压変形実験で広く使用されてきた。ガス圧試験機では常用で封圧が 300 MPa 程度に制限されるのに対し、固体圧媒体を用いる Griggs 型の変形試験機では、1 GPa 超の封圧を発生できる利点がある一方、固体圧媒体との間に生じる摩擦の影響で応力測定精度が悪いことが長年の課題であった。そこで内部摩擦の低減のため、固体塩 (NaCl) をもちいたアセンブリのほか、高温で液体となる熔融塩セルも開発されてきた。Holyoke and Kronenberg (2010) はこれらの圧媒体をもちいて得られた実験データの精度を評価するために、高純度の金属 (Ni, Mo) 等を試料のかわりに用いて、封圧300 MPaにおいて校正試験を行い、応力精度の良いガス圧試験機で得られた結果と直接比較した。その結果、熔融塩セルを用いていても差応力の過大評価が数100 MPaに及ぶことが明らかとなり、補正式が提案された。しかし、Griggs 試験機を用いた、より高封圧 (～1.5 GPa) での校正実験はわずかしかな行われておらず (Kido and Muto, 2016)、石英や大理石 (Gleason and Tullis, 1993) の実験に対しても同じ補正式が適用可能かどうかはよく明らかにされていなかった。一方、熊澤型の固体圧変形試験機は、上下二対の荷重計で応力を測定し、軸上下の平均として内部摩擦をリアルタイムに補正する機構をそなえている (Shimizu and Michibayashi, 2022)。本研究では京都大学に設置されている改良型熊澤型試験機を用いて、内部摩擦の生じる内側スリーブに使用する圧媒体物質を様々に替えて校正試験を行った。実験は Holyoke and Kronenberg (2010) に従って、製造元も同じ高純度NiやMoを試料に使用し、温度600℃ または700℃、封圧300 MPa、歪速度 $1.6 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ で行った。実験の結果、タルクやNaCl ではガス圧試験機で報告されている差応力値より大きく、内部摩擦の影響が除去できていなかったが、Griggs 試験機と比べるとその差は大きく低減されていた、また、低軟化点ガラス (軟化点415℃) を用いた「液体ガラスセル」の実験で600℃、700℃ともに、ガス圧試験機とほぼ同じ降伏応力を得ることができた。発表では、Moや大理石を用いた、より高压 (～1.5 GPa) での変形実験の結果についても報告する。

参考文献

- Gleason, G. C. and Tullis, J. (1993), *Geophysical Research Letters*, 20, 2111-2114.
 Holyoke, C. W. and Kronenberg, A. K. (2010), *Tectonophysics*, 494, 17-31.
 Kido, M. and Muto, J. and Nagahama, H. (2016), *Tectonophysics*, 672-673, 170-176.
 Shimizu, I. and Michibayashi, K. (2022), *Minerals*, 12, 329.

📅 2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 📍 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

9:30 ~ 9:45

[T4-O-12] 流通式水熱実験による斑れい岩の熱水変質に伴う元素移動と置換組織の発達

*鈴木 康平¹、ダンダル オトゴンバヤール¹、岡本 敦¹ (1. 東北大学大学院環境科学研究科)

キーワード：斑れい岩、鉱物置換反応

中央海嶺では海水由来の熱水が地殻内を循環している。熱水は周囲の岩石と反応し、 Mg^{2+} や SO_4^{4-} の除去や、 Cu^{2+} などの金属イオンの溶解のような元素移動が起こる^[1]。有用金属を含んだ熱水は海底熱水噴出孔から放出され、海底熱水鉱床を形成するほか、海水組成にも影響を与えるため、岩石と海水の反応の詳細を知ることは将来の鉱物資源開発に貢献し得る。

多孔質な玄武岩に対し、緻密な組織を有し浸透率が低い斑れい岩においては熱水循環による変質がどの程度の規模で起きているかはわかっていない。既往の研究でも、海嶺翼部の深部での熱水循環に注目した研究は少なく^[2]、実験的研究においても、玄武岩に対して斑れい岩と海水の反応実験はほとんどない^[3]。本研究では、斑れい岩－塩水系の流通式水熱実験を行うことで、海水中の各成分が斑れい岩に対しどのように作用するのか、また緻密な組織において変質がどのように進行するのかについて考察する。

出発物質は細粒の斑れい岩で、主に斜長石と単斜輝石から成る。これを $2.5 \times 2.5 \times 10$ mmの角柱状に切り出して岩石試料とした。反応溶液にはNaCl溶液、NaCl-MgCl₂溶液、NaCl-FeCl₂溶液、NaCl-CaCl₂溶液の4種類を用い、300°C、25MPaの条件で岩石試料と反応させた。流量は0.2mL/min、実験期間は72時間とした。

NaCl溶液およびNaCl-CaCl₂溶液では、斜長石の溶解が見られたが析出物は確認されなかった。NaCl-MgCl₂溶液では斜長石が選択的に反応しMg緑泥石から成る網状の置換組織を形成した。NaCl-FeCl₂溶液では、斜長石と単斜輝石の双方が反応し、斜長石はFe緑泥石、単斜輝石はFe緑泥石とヘマタイトから成る網状の置換組織を形成した。反応後の溶液組成を比較すると、pHはNaCl溶液で8-9と最も高く、NaCl-MgCl₂溶液とNaCl-FeCl₂溶液ではそれぞれ5.5、3.7と低い値であった。溶出元素に注目すると、NaCl-MgCl₂溶液ではSi、Caが溶出する一方で、Feは溶出しなかったが、NaCl-FeCl₂溶液ではSi、Caに加えMgが溶出した。また、全ての実験に共通してAlはほとんど溶出しなかった。NaCl-MgCl₂溶液やNaCl-FeCl₂溶液で見られた置換反応に関して、反応前後の鉱物の密度、組成を用いてマスバランス計算を行うと、溶出元素と計算結果が一致するのは体積が30-50%減少するときであり、網状の置換組織は斑れい岩－塩水反応に伴う元素移動によるものであると確かめられた。さらに、溶液計算ソフトCHIM-xptを用いて今回の実験条件における各溶液と斑れい岩の反応を地化学モデリングした。それぞれの溶液で水－岩石比が1000以上の領域で緑泥石の析出が多くなり、NaCl-MgCl₂溶液ではMg緑泥石が、NaCl-FeCl₂溶液ではFe緑泥石が析出することが確かめられた。また、各溶液のpHが斑れい岩との反応によって変化することも確かめられた。NaCl

溶液ではpHが上昇するが、これは斜長石の溶解に伴い H^+ が吸収されたためであると考えられる。斜長石の溶解に加えて緑泥石が生成する場合、反応全体として H^+ が放出されるため、NaCl-MgCl₂溶液及びNaCl-FeCl₂溶液ではpHが低下すると考えられる。このようなpHの変化は斜長石の溶解速度に影響し、酸性条件においては溶解は進みやすくなる。そのため、緑泥石化によるpHの低下が斜長石の溶解を加速させ、緑泥石化を促進させる可能性がある。実験結果を天然試料と比較するため、中東・オマーン国にあるオフィオライトの岩石試料を分析した。オマーン・オフィオライトでは斑れい岩の一部が数十mスケールで緑泥石岩に変質している^[4]。岩石境界部では単斜輝石のみが緑泥石化しており、緑泥石岩内部では斜長石も緑泥石に置換されていた。緑泥石は置換前の鉱物の外形を残しており、その組成は鉄に富むものであった(Mg# = 0.32-0.40)。実験結果より、オマーン・オフィオライトの緑泥石化は鉄に富む流体が関与したと考えられるが、変質における鉱物の選択性や反応後の組織に相違がある。

参考文献

- [1] Alt, J. C. (1995). *Geophys. monogr. S.*, 91, 85-114.
- [2] Bosch, D., et al. (2004). *Jour. Petrol.*, 45(6), 1181-1208.
- [3] Currin, A., et al. (2018). *Lithos*, 323, 91-102. [4] Yoshitake, N., et al. (2009). *Jour. Mineral. and Petrol. Sci.*, 104(3), 156-163.

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 【トピック】 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

9:45 ~ 10:00

[T4-O-13] 粒成長に伴う流体移動：樟脳-エタノールを用いた透視実験*福田 惇一¹、瀬戸 雄介¹ (1. 大阪公立大学)

キーワード：岩石模擬物質、樟脳、流体、粒成長

地殻内部において、流体（主として水）は普遍的に存在し、粒成長、変形、反応などを促進させ、岩石微細組織の変化に伴って流体分布も変化する。本研究では基本的な現象である粒成長に注目する。

これまでに地殻の主要構成鉱物である石英や長石集合体について粒成長実験が行われ、粒成長則や水の添加による粒成長促進機構が評価されてきた（例えばFukuda et al. 2019）。しかし、実際の地殻構成物質を用いた実験では、ピストンシリンダー試験機などの大掛かりな装置が用いられ、実験温度圧力条件は例えば1 GPa, 1000°Cなどと非常に高い。さらに各温度、圧力、保持時間の実験ごとに試料を回収し、実験回収試料の微細組織観察を行うことから、試料の組織は常に凍結されている。この凍結された微細組織と流体相分布の情報をもとに、実験時の粒成長と流体相の挙動を想像するしかない。

一方、有機物などの岩石模擬物質を用いれば、室温から100°C程度、かつ数分で有意な粒成長が起こり、光学顕微鏡下で微細組織発達のリアルタイム観察を行うことができる。Fukuda

(2024) では岩石模擬物質として樟脳 ($C_{10}H_{16}O$ 、密度0.99 g/cm³) を用い、室温、偏光顕微鏡下で明瞭な粒成長過程を観察した。

本研究では、樟脳に加えて流体相としてエタノールを用いた。実験準備として、室温で乳鉢に樟脳約200 mgに10 vol%程度のエタノールを添加し、すりつぶした。次に樟脳-エタノール混合物約5 mgをスライドガラスに載せ、上から別のスライドガラスで押し付けた。上のスライドガラスを取り除くと、密な樟脳-エタノール混合物が得られる。この混合物の載ったスライドガラスを偏光顕微鏡下に移動させ、40倍または100倍の対物レンズを用いて、適度なエタノール分布領域を選定した。先のスライドガラス上での試料作成後から偏光顕微鏡下での観察領域の選定は、粒成長を最小限にするために1分以内で行った。そして、粒成長に伴う流体挙動を偏光顕微鏡に設置したカメラで録画した。

樟脳集合体の平均初期粒径は約7 μm で、室温で1時間観察すると粒径は約20 μm まで増加した。この粒成長に伴う流体挙動として、次の3種類の特徴的な過程が観察された。1. 粒界に存在する流体が、粒成長による粒界移動により、近接する別の流体と合体して一つの大きな流体となる。2. 粒界に存在し、粒界の形状に合うように伸長した流体が、粒成長による粒界移動により、粒界から樟脳結晶内部に移動する。その結果、流体の形状が球状になる。3. 元々粒内になった球状の流体が、移動してきた粒界中に取り込まれる。

上記の3つの流体挙動のうち、1の合体により流体の平均サイズは大きくなり、視野内の流体数は減少した。一方、視野内の全流体の総面積は一定であった。このように、粒成長に伴い流体相の分布が変化することが観察され、実際に地下内部で行っている機構を推察することができる。

さらに本発表では50°C程度までの加熱その場観察実験方法について紹介する。フィルムヒータ上に上記の樟脳-エタノール混合物を準備したスライドガラスを設置し、偏光顕微鏡下で加熱しながら、粒成長を観察する手法を構築した。

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

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

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ ハイライト講演

10:00 ~ 10:15

[T4-O-14] [招待講演] 火星表層環境の再現を目指した実験装置の整備と今後の研究展望*亀田 純¹、Ruj Trishit¹ (1. 岡山大学惑星物質研究所)

【**ハイライト講演**】 火星の温度・気圧・大気組成・湿度といった環境条件を再現できるスペースチャンバーや、低重力から過重力まで幅広い重力環境を再現可能な3軸クリノスタットなど、火星表層環境を地上で模擬可能な装置群の整備が講演者らによって進められている。本招待講演では、これらの設備の基本仕様や、今後これらの装置を活用して展開可能な研究の展望について紹介していただく。[※ハイライト講演とは...](#)

キーワード：火星、水、スペースチャンバー

近年、探査機による観測や火星隕石の分析を通じて、火星の表層環境に関する理解が着実に進んでいる。たとえば、かつて火星には液体の水が存在していたこと、さらに現在も氷や水蒸気といった形で水が存在している可能性が高いことが明らかとなっている。こうした火星表層環境の理解は、将来的な火星の居住可能性を評価するうえでも極めて重要な課題である。

岡山大学惑星物質研究所では現在、火星表層環境を地上で模擬可能な装置群の整備を進めている。具体的には、火星の温度・気圧・大気組成・湿度といった環境条件を再現できるスペースチャンバーや、低重力から過重力まで幅広い重力環境を再現可能な3軸クリノスタットが含まれる。スペースチャンバーにはハイパースペクトルカメラが上部に設置されており、火星環境下における物質の分光特性を評価することが可能である。本装置は2025年10月末に導入予定であり、テスト運転を経たのち、国内外の研究者を対象とした共同利用設備として公開される計画である。

またこれに先立ち、3軸クリノスタット（松尾製作所）を2025年2月に導入した。本発表では、これらの設備の基本仕様に加え、発表者らが現在計画している研究テーマを含め、今後これらの装置を活用して展開可能な研究の展望について紹介する。

📅 2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 📍 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

10:30 ~ 10:45

[T4-O-15] 三波川帯におけるマイクロブーディン構造を用いた応力・歪解析

*外山 和也¹、道林 克禎¹ (1. 名古屋大学大学院環境学研究科 (岩鉱))

キーワード：マイクロブーディン、古差応力計、三波川帯、レオロジー、藍閃石

藍閃石や紅簾石のような柱状の変成鉱物には、変成作用を受けると差応力で破断して列車が連なったようなマイクロブーディン構造を示すことがある。この構造を有するメタチャート(珪質変成岩)中の紅簾石や断層岩中の電気石から差応力を推定するマイクロブーディン古差応力計が提案された。しかし、これらの古差応力計から算出される差応力は相対値にとどまっている。本研究では、三波川帯の結晶片岩類に着目し、マイクロブーディン古差応力計を再検討することで応力・歪履歴を求める方法を考案した。

三波川帯で採取された試料について研磨薄片を面構造(片理)に垂直で伸長線構造に平行な面(XZ面)で作成した。主要な構成鉱物は石英、曹長石、赤鉄鉱、白雲母、藍閃石、紅簾石であり、藍閃石、紅簾石は柱状であった。マイクロブーディン構造について、各柱状鉱物のアスペクト比(長軸/短軸)やブーディン間距離などの形状指標を計測した。研磨薄片内の数100個以上の柱状鉱物粒子を効率的に計測するため、Python v.3.12.4 (Spyder v.5.5.1.)を用いた画像解析プログラムを開発した。また、電子線後方散乱回折(EBSD)法による結晶方位測定から石英の結晶方位ファブリックと粒径を測定した。

和歌山県四邑川地域のサンプルについて、研磨薄片内の藍閃石の多くはマイクロブーディン構造を示しており、非ブーディン粒子に比べてアスペクト比が高い傾向にあった。ブーディン化した粒子は主に2~3つに分割されていたが、中にはそれ以上に分割された粒子も確認された。一方、石英の平均粒径から動的再結晶粒径差応力計を用いることで差応力を約43 MPaと推定した。

測定したマイクロブーディンの形状パラメーターをLi & Ji (2020)のマイクロブーディン古差応力計(以下、LJ法)に適用した。しかし、LJ法ではブーディン間距離と柱状鉱物のアスペクト比の関係をうまく説明できないため、LJ法の一部を改良した新しい方法(LJ-T法)を導出した。加えて、動的再結晶粒径差応力計の結果とマイクロブーディン古差応力計を組み合わせることで、藍閃石の引張強度が639 MPaと算出された。さらに、ブーディン間距離と柱状鉱物の長軸の長さを用いて歪量、引張強度を用いて各マイクロブーディンが被った差応力を計算した。結果として歪量の小さいマイクロブーディンほど被った差応力が増大する傾向が確認された。以上の結果は、本研究で開発したマイクロブーディン古差応力計(LJ-T法)が、変成岩の応力・歪履歴を解明する強力なツールになることを示す。

文献：Masuda et al., 2004, *J. Metamor. Geol.*, 22; Li and Ji., 2020, *J. Struct. Geol.*, 130; Cross et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6667-6674.

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

10:45 ~ 11:00

[T4-O-16] 低変成度泥質片岩の石英曹長石レイヤの変形組織：中部地方渋川地域三波川帯の例

*片桐 星来¹、道林 克禎² (1. 産業技術総合研究所地質調査総合センター、2. 名古屋大学大学院 環境学研究科 (岩鉱))

キーワード：三波川変成帯、泥質片岩、石英、曹長石、結晶方位定向配列

低温高圧型の変成岩は沈み込み帯における変形を記録しており、沈み込み帯の構造発達を推定する上でこれらの岩石の変形記録を解析することは非常に重要である。特に、変成温度300°Cから350°Cにあたる緑泥石帯相当の低変成度変成岩の形成場は石英曹長石の脆性-塑性遷移領域(Stöckhert, et al., 1999, Papeschi et al., 2018)であり、地震発生領域の下限として注目されている。高圧型変成岩の変形組織は、これまで珪質片岩や変形石英脈など、石英の岩石に占める割合が非常に高い岩石で多くの研究例がある。それに対して本研究では、より普遍的な低変成度変成岩の沈み込み帯における変形記録を明らかにすることを目的として、三波川変成岩類においてより広域に分布する泥質片岩の石英曹長石レイヤについて解析を行った。研究地域の中部地方渋川地域には御荷鉾緑色岩類と三波川結晶片岩が分布する。渋川地域では緑泥石帯の泥質片岩が広く分布し、主要鉱物組み合わせは石英+曹長石+緑泥石+白雲母+炭質物であり、一部の試料ではローソン石が観察される。石英と曹長石は非常に細粒であるため顕微鏡下で両者の識別は困難であるが、石英は泥質片岩の白色レイヤに、曹長石は白色レイヤと主に白雲母、緑泥石、炭質物で構成される黒色レイヤの両方で観察された。本研究では、本地域の泥質片岩に対し炭質物ラマン温度計を適用し、SEM-EBSD分析を行い、石英と曹長石の粒径分布、結晶方位定向配列(CPO)に注目し変形組織の形成条件を考察した。炭質物ラマン温度計を用いて推定した変成温度は280°C~350°C程度だった。SEM-EBSD分析の結果から白色レイヤはさらに石英の割合が大きいレイヤ(石英リッチレイヤ)と曹長石の割合が大きいレイヤ(曹長石リッチレイヤ)に分かれて分布していた。多くの試料で、曹長石リッチレイヤは白色レイヤと黒色レイヤの境界部に観察された。石英の粒径は平均10μm、曹長石の粒径は平均10~16μmであり、どちらも変成温度との相関は示さないが、モード比と弱い正の相関を示した。石英のCPOパターンはクレフトガードル様を示すもの、タイプIクロスガードルを示すものの2パターンが観察された。曹長石は(100)[001]パターンを示す試料が多く、炭質物ラマン温度計から推定された変成温度が340°C以上の高温試料の一部では(010)[001]パターンが観察された。低温条件での曹長石のCPOパターンの報告は乏しく、曹長石の(100)[001]パターンはこれまで報告はないが、本地域の泥質片岩の変形組織は石英、曹長石両方の弱い塑性変形を示しており、低温条件下の遅い歪速度で変形が進行したことを示唆する。引用文献：Stöckhert et al. (1999), Journal of Structural Geology, 21, 351-369. Papeschi et al. (2018), Journal of Structural Geology, 113, 100-114.

📅 2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 📍 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

◆ 学生優秀発表賞エントリー ◆ ECS

11:00 ~ 11:15

[T4-O-17] 石英の変形再結晶組織におけるタイプ P/S 遷移の定量的指標とその要因

*中小路 一真¹、清水 以知子²、道林 克禎³ (1. 東京大学、2. 京都大学、3. 名古屋大学)

キーワード：石英、高温高压変形実験、動的再結晶、転位クリープ

高温下で流動変形をした天然の岩石中にみられる石英の再結晶組織は変形時の温度、歪速度などの条件を反映していると考えられる。石英組織から変形条件を推定するための根拠として、実験的手法が用いられてきた。Masuda & Fujimura (1981, *Tectonophysics*) は細粒の石英メノウに対し封圧0.4 GPa で高温高压変形実験を行い、高温低歪速度条件下で直線状の粒界と等粒状粒子をもつType-P (Polygonal)、低温高歪速度条件下で鋸状の粒界と伸長状粒子をもつType-S (Serrated) の動的再結晶微細組織が形成されることを報告した。さらに、Takahashi et al. (1998, *JSG*) はこれらの条件でできた実験試料に対しより定量的な解析を行い、結晶粒界のギザギザ度合いを表す面積-周囲長のフラクタル次元 D の値が変形時の温度・歪速度条件によって変化することを報告した。天然試料の石英においても、剪断帯からの距離によってフラクタル次元Dが結晶粒径に相関して変化する結果が得られている

(Anderson et al., 2025, *JSG*)。しかしながら、これまでの研究の石英の薄片写真に対する画像解析では、マニュアルで結晶粒界のトレースが行われているため、結晶と亜結晶の判別の基準が人によって同一ではなく、人間の目で粒界を判別できる粒子を選別する際にバイアスが生じる可能性がある。そこで本研究は、細粒の石英岩を用いて高温高压変形実験を行うとともに、実験後の動的再結晶組織の偏光顕微鏡像に対し、新たな画像処理手法を用いて視野内ほぼすべての結晶粒界を特定した。そして、各条件の微細組織の特徴を数値化し、Type-P/S遷移と比較した。

実験には熊澤型固体圧式変形試験機を用いた。本試験機は上下のロードセルで応力を測定することにより、固体圧媒体による摩擦の影響を取り除き、正確な応力決定を行うことができる。出発物質には細粒の含水石英岩メノウを用いた。温度歪速度条件はMasuda & Fujimura (1981) のType-P/S 境界をカバーする800°C–1000°C, 10^{-4} – 10^{-6} /secとした。封圧はType-P/S遷移の封圧依存性を調べるため、Masuda & Fujimura (1981) より高压の1.5 GPaとした。実験回収試料の偏光顕微鏡観察によって、本実験でも、高温低歪速度条件から低温高歪速度条件にかけてType-P/S遷移が見られることが確認された。次に、波動消光の影響を低減するため、異なる偏光角で撮影した6枚の偏光顕微鏡写真を重ね、画像解析ソフトウェアを用いて、勾配フィルターおよび分割アルゴリズムwatershed法を適用し、粒界を半自動的に抽出した。それを用いて、アスペクト比、正規化周囲長（周囲長/同面積の楕円の周囲長）、フラクタル次元の三つの量を計算した。さらに、光学顕微鏡では正確に判別することが難しい薄片の厚さ (15 μm) 未満の粒子の影響も調べるため、走査型電子顕微鏡によるEBSD解析をあわせて行った。ステップ幅は1 μm とした。

偏光顕微鏡像に対する解析においては、アスペクト比の平均値が高温低歪速度条件から低

高温歪速度条件へと系統的に増加し、Type-P/S 遷移とよく対応していることが確認された。本解析結果において、Type-P/S境界はアスペクト比の2.30に対応する。一方、正規化周囲長やフラクタル次元には温度歪速度条件に応じた系統的变化が見られなかった。EBSD像に対する解析においては、いずれの量においても、Type-P/S 遷移に対応する系統的变化は見られなかった。また、典型的な粗粒のType-P組織が見られた最も高温で歪速度が小さい条件を除き、偏光顕微鏡像の解析から得られる値と比べ、EBSD像から計算されるアスペクト比と正規化周囲長の値は小さい値となった。このように、EBSDによって粒子を特定した場合に系統性が見られない理由としては、ピクセル解像度が1ミクロンであるため、結晶粒界の形を正確に描画できていないことが考えられる。

以上の結果から、石英微細構造のType-P/S遷移の特徴は偏光顕微鏡像におけるアスペクト比によってよく捉えられることが明らかになった。本発表では、その物理的理由の考察も試みる。

セッション口頭発表 | T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 [トピック] 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

11:15 ~ 11:30

[T4-O-18] Co-seismic ductile deformation in carbonate-hosted active faults*Yeo Thomas¹、Ujiie Kohtarō¹、Inoue Kaoru¹、Nagaya Takayoshi²、Ken-ichi Hirauchi³ (1. University of Tsukuba、2. Waseda University、3. Shizuoka University)

キーワード: Co-seismic ductile deformation、Frictional heating、Ryukyu Limestone、Yonabaru Fault、EBSD analysis

Identifying co-seismic deformation from faults at shallow depths is of paramount importance in assessing seismic hazards associated with surface rupture and ground shaking. However, while carbonate is a key lithology in seismically active areas, pseudotachylite is rarely preserved because carbonate minerals thermally decompose at temperatures far below the extremely high temperatures required for frictional melting.

This study investigates the active Yonabaru Fault on Miyako Island, southern Ryukyu Arc, which offsets the Pleistocene Ryukyu Limestone and is capable of generating magnitude 6.9–7.2 class earthquakes. The ~50 m thick fault zone hosts multiple fractures and mirror-like polished, lineated slip surfaces associated with narrow (2 mm thick) slip zones. Kinematic indicators indicate normal faulting within a NE-SW extensional regime, consistent with present-day arc-parallel extension. The slip zones comprise fine-grained calcite matrix (<10 μm) and angular limestone clasts. Injection veins orthogonal to the slip surface are observed at the boundaries of the slip zones, suggesting fluidization during faulting.

Electron Backscatter Diffraction (EBSD) analyses reveal distinct deformation microstructures across the slip zone. Calcite grains adjacent to the slip surface exhibit strong shape preferred orientation, dominant $c < a >$ slip and recrystallization, indicating deformation temperatures exceeding 400 °C. In contrast, calcite within injection veins display only static recrystallization, suggesting temperatures above 150 °C. These contrasting microstructures imply the development of a thermal gradient during fault slip, likely driven by frictional heating at temperatures much higher than ambient temperatures of ~25 °C.

The absence of e-twins suggests that co-seismic shear stress did not exceed 10 MPa. Thermal modelling constrains the conditions necessary to produce the observed microstructures, indicating that slip velocities must have exceeded 0.1 m/s. Our findings represent one of the first documented cases of co-seismic ductile deformation and recrystallization in carbonates at shallow crustal depths, offering new insights into the mechanical behaviour of carbonate faults during seismic events.

セッション口頭発表 | T4 【トピック】 岩石・鉱物の変形と反応

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 【トピック】 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 惇一(大阪公立大学)

11:30 ~ 11:45

[T4-O-19] 根尾谷断層極浅部における自形方解石、バライトと摩擦発熱*大谷 具幸¹、前田 剛志²、吉田 拓海² (1. 岐阜大学、2. 岐阜大学大学院)

キーワード：根尾谷断層、極浅部、摩擦発熱

断層の極浅部における地震時の摩擦発熱を明らかにするために、1891年に濃尾地震を引き起こした根尾谷断層の地表から深度400 mまでを対象として、最新すべり面とその周囲における特徴を主にSEM-BSE像観察、EPMA分析により明らかにした。その結果、自形方解石とバライトが認められ、これらは摩擦発熱に起因して生じたと考えられる。根尾谷断層では、近年、岐阜県本巣市根尾水鳥と根尾長嶺においてボーリング掘削が原子力規制庁により行われた。各地点で複数のボーリング掘削が行われ、これらは根尾水鳥では深度85 mと382 m、根尾長嶺では深度17 mと68 mで分布の連続性と直線性から認定した最新すべり面を貫いている。他に最新すべり面の候補となる断層ガウジ帯が見あたらないことから、濃尾地震を含めて最近の地震ではここですべりを生じた可能性が高い。加えて根尾長嶺では地表露頭でも最新すべり面が認められる。いずれの地点でも原岩は美濃帯付加コンプレックスの泥岩基質メランジュであり、根尾水鳥ではチャートと玄武岩がブロックとして含まれている。最新すべり面及びその近傍の断層ガウジをSEMやEPMAにより詳細に観察・分析し、鉱物の分布と形状を確認した。その結果、根尾水鳥の深度382 mでは最新すべり面の近傍にCaの濃集が生じていることが明らかとなった。最新すべり面ではCaの分布は局所的であり、亜円形を示す。最新すべり面に隣接する断層ガウジでは、Caを含む鉱物脈が認められ、ここでは主として粒径数 μm の多数の方解石とフラグメント化した石英等やガウジの基質を含んでいる。また、この方解石の一部は弱い自形性を示している。加えて、細粒方解石とフラグメント化した石英が最新すべり面から離れた側から最新すべり面近傍の断層ガウジに貫入するような産状を示す。根尾長嶺では最新すべり面の分布が不明瞭であるものの、最新すべり面かその近傍のいずれかでバライト（硫酸バリウム）が見いだされた。バライトの産状は亀裂内に分布、放射状、鉱物脈のいずれかである。これらの形成過程として、細粒の自形方解石、バライトともに溶解度の急激な変化に伴う形成が示唆される。この原因として、地震性すべりに伴ってthermal pressurizationによる温度と間隙水圧の上昇、その後の急激な低下が生じたと考えられる。観察対象の最新すべり面のうちもっとも深い深度382 mに分布する自形方解石は最新すべり面の西側に分布しており、根尾谷断層でこれまでに生じた変位が濃尾地震のときと常に同様であると仮定をすると相対的に沈降することとなり、断層変位に伴う深部からの上昇は生じない。また、現状の谷地形の形成を考えると、最大の浸食量として約1 kmが見積もられるため、ここで考えられる現象は1.4 kmより浅い深度で生じたと推定される。よって、これらの自形方解石とバライトが濃尾地震以前の地震に伴って生じた場合であっても、その形成深度は現在と大きく変わらないと推測され、根尾谷断層の極浅部においてthermal pressurizationによる温度と間隙水圧の上昇、さらには摩擦係数の低下が生じたと考えられる。

2025年9月16日(火) 8:45 ~ 12:00 口頭第3会場(E201)

[3oral301-12] T4 【トピック】 岩石・鉱物の変形と反応

座長:向吉 秀樹(島根大学)、宇野 正起(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)、福田 淳一(大阪公立大学)

11:45 ~ 12:00

[T4-O-20] cleavable olivineからわかる地質学的に重要なこと

*安東 淳一¹、富岡 尚敬²、前川 寛和³ (1. 広島大学、2. JAMSTEC・高知コア研、3. 大阪公立大学)

キーワード：蛇紋岩化、パイプ拡散、粒界拡散

【はじめに】 cleavable olivineは“裂開”が発達するオリビンで、蛇紋岩化した超塩基性岩中に存在する。“裂開”とは、オリビンの(100)、(010)、(001)に平行に発達する劈開様の面に沿って蛇紋石の一種であるアンチゴライトが晶出する組織である。“裂開”は(100)に沿って発達するものが多い(相川、1981; Nozaka and Ito, 2011)。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の超塩基性岩体や、伊豆 - 小笠原 - マリアナ海溝に沿って露出する蛇紋岩海山で確認されている。オリビンは、結晶構造的に(100)には劈開は発達しないので、なぜ裂開が形成されるのかといった問題は、オリビンの含水化過程を明らかにす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。

【試料と観察手法】 本研究で使用した試料は、マリアナ前弧北部の雷神海山を構成するアンチゴライト化が進んだ超塩基性岩(ダナイト)である。1) 偏光顕微鏡、SEM、TEMを用いた微細組織観察、2) SEM-EBSDによるオリビンの裂開面と格子選択配向(CPO)の測定、3) ラマン分光分析による蛇紋石鉱物の同定を行った。

【観察結果と考察】 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は、 $[100]\{0kl\}$ のすべり系によって形成された強いCPOを示す。また、このすべり系によって形成されたと考えられる(100)に平行な亜結晶粒界と波動消光が顕著に発達する。以上のことから、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に沿って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、ホストのオリビンの(100)とアンチゴライトの(001)はトポタキシャルな関係を持つ。この結果は、オリビンの結晶構造を利用してアンチゴライトが晶出した事を示す。4) ダナイトを構成する“オリビンの粒界”には、リザーダイトが晶出している。このリザーダイトは、ホストのオリビンとはトポタキシャルな関係を持たない。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。以上の結果は、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(アンチゴライト化の後にリザーダイト化が生じた)。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。これらの観察結果から、cleavable olivineは次の様な形成過程で形成されたと結論できる。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、CPO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、亜結晶粒界上にホストのオリビンとトポタキシャルな関係を持つ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。その後ダナイトが上昇し、3) 粒界にリザーダイト、マグネタイト、カルサイトが晶出した。本研究の重要な結論は、アンチゴライト化が転位に沿った水の拡散(パイプ拡散)によって進行し、その結果

としてcleavable olivineが生成される、ということである。一般的に、オリビンのアンチゴライト化は粒界（粒界拡散）やクラック面から進行する。「粒界拡散」と「パイプ拡散」を比較した場合、cleavable olivine は粒界が閉じた高圧下、すなわち粒界拡散が起こりにくい環境で形成され则认为られる。したがって、cleavable olivine の存在は、高圧下において元素拡散が主にパイプ拡散によって支配されていることを強く示唆する。

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.