

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

■ 2024年9月12日(木) 15:30 ~ 18:00 | 会場 ES025 東山キャンパス

S3: マントル・地殻のレオロジーと物質移動 (スペシャルセッション)

座長: 片山 郁夫(広島大学)、道林 克禎(名古屋大学)

15:30 ~ 15:50

[S3-01] 放射光X線を用いた高温高圧下での高速時分割その場応力一歪測定

「招待講演」

*辻野 典秀¹ (1. 高輝度光科学研究センター)

15:50 ~ 16:05

[S3-02] ϵ -FeOOHの変形誘起選択配向*西原 遊¹、森 ゆい¹、呉 文天¹、辻野 典秀² (1. 愛媛大・GRC、2. 高輝度光科学研究センター)

16:05 ~ 16:20

[S3-03] 準安定オリビンの流動強度と遷移層スラブのレオロジー

「発表賞エントリー」

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

16:20 ~ 16:40

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

「招待講演」

*山内 初希¹、Christine McCarthy¹、Benjamin Holtzman¹、David Goldsby²、Travis Hager² (1. コロンビア大・LDEO、2. ペンシルベニア大)

16:40 ~ 16:55

[S3-05] 共連続構造をもつ岩石のクリープと粒成長の関係

「発表賞エントリー」

*姜 勝皓¹、平賀 岳彦¹ (1. 東京大学)

16:55 ~ 17:10

[S3-06] ハンレイ岩ウルトラマイロナイトの斜長石微細構造と四重点解析

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

17:10 ~ 17:25

[S3-07] オマーンオフィオライト最上部マントル連続構造の復元

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

17:25 ~ 17:40

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

「発表賞エントリー」

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

17:40 ~ 17:55

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

「発表賞エントリー」

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

17:55 ~ 18:00

調整

放射光X線を用いた高温高圧下での高速時分割その場応力一歪測定

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

*辻野 典秀¹*Noriyosi TSUJINO¹

1. 高輝度光科学研究センター

1. JASRI

1. はじめに

地球マントルダイナミクスを理解するためには、高圧下でのマントル鉱物のレオロジー特性の知識が必要不可欠である。レオロジー特性の中でも粘性率はマントル対流を理解するうえで最も重要な基礎データの一つである。2003年以降、放射光を利用した変形機構付き大容量プレスによる高圧下での応力一歪測定技術の開発により、4万気圧を超える条件でのマントル鉱物の粘性率が報告されるようになった(Wang et al., 2003)。最近では、D111型ガイドブロックの開発(Hunt et al., 2016)、回転ドリッカマー装置の開発などもあり、下部マントル最上部条件での粘性率測定が可能となった。その結果、下部マントル最主要鉱物であるブリッジマナイトの粘性率(Tsujino et al., 2022)やポストスピネル相の歪量に伴う粘性率変化の可能性(Girard et al., 2016)が報告され、地球物理学的観測から報告されている下部マントルの高粘性率はブリッジマナイトにより説明できることが明らかにされるとともに、ポストスピネル相において変形とともに粘性率を支配する鉱物がブリッジマナイトからフェロペリクレスへと変わる可能性が報告された。一方で、これまでの研究では、その場応力一歪測定、特に応力測定に1~5分程度の時間を要するため、定常状態に達したと判断するために長時間を要するだけでなく、地震現象を含む破壊のような高速度で進行する動的過程を理解することは現状では困難を極める。そこで、本研究では、SPring-8のアンジュレーター光源ビームラインであるBL05XUで得られる高輝度高エネルギーピンクビームを利用して、大容量プレスを用いた高圧下でのサブ秒までの高速時分割その場応力一歪測定を試みた。

2. 実験手法

高速でのスリットサイズの変更を可能とするため、二枚の円盤からなる回転スリットを新に開発することにより、最大で144Hzでのビームサイズの切り替えを可能とした。応力を見積もるための二次元XRD測定にはフラットパネル検出器を、歪量を見積もるためのX線ラジオグラフィ像の取得には、LuAGシンチレーターとCMOSカメラを用いた。これらを組み合わせることにより最大で6Hzでの二次元XRDとX線ラジオグラフィ像の測定を可能とした。また、大容量プレスとして、最大で1mm/sの移動速度を持つプレスステージに搭載された200tonD-DIAプレスを使用し、高圧下でD-ramを動かすことにより試料の変形を行った。また試料として、フォルステライト多結晶焼結体を使用し、上下にPt箔を設置することでラジオグラフィ像から試料の歪量の測定を可能とした。

3. 結果

約3GPaに加圧後、加圧によって蓄えられたFo多結晶の応力が600°Cから1000°Cへの昇温とともに緩和され、同時に試料の歪量の増大の様子が観察された。この結果は、Nishihara et al. (2009)により報告されているカンラン石の応力緩和の結果と整合的であることが明らかとなった。このように、大容量プレスを用いた高圧条件下においても3Hz以上の測定回数で応力一歪測定が可能となることが明らかとなった。本講演では、実験結果に加え測定系の詳細と今後のビームライン構想等についても詳しく紹介したい。

キーワード：高圧力、高速時分割、その場測定、レオロジー

Keywords: High pressure, High-speed time-resolution, In-situ measurement, Rheology

ϵ -FeOOHの変形誘起選択配向

Deformation-induced crystallographic-preferred orientation of ϵ -FeOOH

*西原 遊¹、森 ゆい¹、呉 文天¹、辻野 典秀²

*Yu NISHIHARA¹, Yui MORI¹, Wentian WU¹, Noriyoshi TSUJINO²

1. 愛媛大・GRC、2. 高輝度光科学研究センター

1. GRC, Ehime Univ., 2. JASRI

地球下部マントル上部のスラブ近傍には、ブリッジマナイトなどの無水の下部マントル主要鉱物によっては説明できない地震波異方性が存在する(Lynner and Long, 2015)。高圧含水鉱物H相($\text{MgSiO}_2(\text{OH})_2$)は、マントルの岩石がスラブによって持ち込まれた水と反応することにより生成すると考えられるうえ、大きな単結晶弾性異方性を持つことから(Tsuchiya and Mookherjee, 2015)、観測される地震波異方性の成因として有力な候補である。本研究では、高圧含水鉱物H相と同一結晶構造を持つアナログ物質でより低圧で安定な ϵ -FeOOHの結晶選択配向を高圧高圧変形実験により決定し、これに基づいて下部マントル上部の地震波異方性の成因を明らかにすることを旨とする。

変形実験はSPring-8、BL04B1設置のD111型装置を用いて行った(西原他, 2020)。12 GPa, 700 °Cで合成した ϵ -FeOOHの粉末を成型したペレット、または粉末をさらに12 GPa, 600 °Cで焼結したものを実験に用いた。先端5 mmのアンビル、一辺10 mmの圧力媒体を用いて、圧力12 GPa、温度500–700 °Cで歪速度一定の一軸圧縮、一軸引張および単純剪断変形実験を行なった。回収試料の断面をSEM-EBSDにより分析し、結晶選択配向を決定した。一部の試験では、~60 keVの放射光単色X線を用いたX線その場観察を行い、変形中の試料の歪と選択配向の変化を決定した。

一軸圧縮変形実験の回収試料では[010]が圧縮軸方向に配列していることが確認された。一軸引張実験では加圧時の圧縮により形成された[010]の軸方向への集中が引張変形の進行とともに弱まり、代わって[001]が引張軸に集中し始めることが分かった。単純剪断変形実験では、剪断面法線方向に[010]が、剪断方向に[001]が集中することが観察された。以上の結果から、実験条件下での ϵ -FeOOHのすべり系が(010)[001]であることが示唆される。下部マントル上部の条件下で水平方向の剪断変形を受けたH相は、 $V_{SV} > V_{SH}$ (V_{SV} 、 V_{SH} はそれぞれ垂直方向と水平方向に振動するS波の速度)を示し、海溝と平行に振動するS波が高速となる偏向異方性が生じる可能性がある。

Lynner and Long (2015) *J. Geophys. Int.*, 201, 1545-1552.

西原 他 (2020) *高圧力の科学と技術*, 30, 78-84.

Tsuchiya and Mookherjee (2015) *Sci. Rep.*, 5, 15534.

キーワード：結晶選択配向、地震波異方性、 ϵ -FeOOH

Keywords: Crystallographic-preferred orientation, Seismic anisotropy, ϵ -FeOOH

準安定オリビンの流動強度と遷移層スラブのレオロジー

Strength of metastable olivine and the rheology of subducting cold slab at mantle transition zone

*本田 陸人¹、久保 友明¹、辻野 典秀²、肥後 祐司²、柿澤 翔²、柴崎 裕樹³、西原 遊⁴

*Rikuto HONDA¹, Tomoaki Kubo¹, Noriyoshi Tsujino², Yuji Higo², Sho Kakizawa², Yuki Shibazaki³, Yu Nishihara⁴

1. 九州大学、2. JASRI、3. 高エネルギー加速器研究機構、4. 愛媛大・GRC

1. Kyushu University, 2. JASRI, 3. KEK, 4. Ehime Univ. GRC

スラブの主要鉱物であるオリビンのレオロジー特性は、プレート境界での沈み込みの開始から下部マントルへのスラブ貫入に至るまでの広い深さ領域で起こる諸現象を解釈する上で非常に重要である。中でもマントル遷移層（深さ410-680km）においては、冷たいスラブの中心低温部に準安定オリビンウェッジが形成されると考えられており、そのレオロジーが遷移層スラブの力学挙動に重要な役割を果たすと考えられる。特に低温で卓越するパイエルス機構による塑性流動（low-temperature plasticity）については、これまで実験的研究が数多くなされてきた（e.g. Mei et al., 2010; Hansen et al., 2019）ものの、それらはリソスフェアマントル条件（<9 GPa）に限られたもので、強度の圧力依存性もよく決まっていない（ $V^*=0-30 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ）。そこで、本研究ではマントル遷移層条件（11-20 GPa, 470-1020°C）の広い温度圧力条件でマントルオリビンの変形実験を行ない、準安定オリビンのパイエルス機構による流動則を直接的に決定した。またこれまでの研究もふまえ、準安定オリビンが相転移を起こすことによってスラブレオロジーがどのように変化するのかについてもあわせて検討した。

実験はKEK PF-AR NE7AおよびSpring-8 BL04B1設置のD111型高圧変形装置を用いて、放射光その場観察手法と組み合わせて行なった。歪速度 $2.8-8.5 \times 10^{-5} / \text{s}$ での一軸圧縮変形場において、60keV単色X線を用いて2次元X線回折パターンと試料部ラジオグラフィをそれぞれ時分割（1-5分毎）で測定し、応力-歪曲線を取得しつつ相転移の有無も確認した。なお、相転移に伴う断層形成も起こる可能性があるため、一部では8素子アコースティックエミッション測定も組み合わせて行なった。回収試料はFE-SEM、FE-TEM等で微細組織を観察した。

11-20GPaのいずれの圧力においても、470-660°Cでは相転移がみられなかった。470-570°Cにおいて圧力11GPa、15GPa、20GPaで得られた流動応力は、4.8GPa、6.2GPa、6.6GPaと、圧力上昇にともなって増加した。これらの強度は、転位クリープ（Kawazoe et al., 2009）や粒径依存クリープ（Ohuchi et al., 2015）から推定される強度よりも小さく、またその温度依存性もより小さいことから、パイエルス機構による流動が卓越していると考えられる。なお、比較的低温の実験では応力が定常に達した後、歪硬化する傾向があった。

低温で卓越するパイエルス機構の流動則（Frost and Ashby, 1987; $n=2, p=3/4, q=4/3$ ）と、それを基に常圧で決められたパイエルス応力および活性化エネルギーのパラメータ（Evans & Goetze, 1979; Tsenn & Carter, 1987）から、流動則の圧力依存性を決定すると、活性化体積は $V^*=24.3 \pm 0.04 \text{ cm}^3/\text{mol}$ となった。この流動則は、過去に4-9GPa付近で得られたパイエルス機構によるオリビン強度データ（Mei et al., 2010; Kawazoe et al., 2009）もおおよそ説明することができる。

760°C以上の変形実験では、オリビン粒内の転位が濃集した領域から、ウォズレアイトおよびリングウッドイトへのごく少量の相転移が開始する。その領域のオリビン強度も上述した流動則におおよそ従うが、特に20GPaでは1-2GPaの応力降下やAEを伴う断層形成が顕著に観察され、不安定すべりが卓越した。そして、1020°Cでは最大約50%まで相転移が進行し、細粒のウォズレアイト、リングウッドイトの拡散クリープによる軟化（いわゆる超塑性流動）が起こる。

本研究で得られた流動則を遷移層スラブスケール（500-600°C、 $10^{-14} / \text{s}$ ）に外挿すると、ドライな準安

定オリビンウェッジではパイエルス流動が卓越し、圧力15–20 GPaでは3.3–4.2 GPaと高い強度をもつことがわかった。そして準安定オリビンウェッジの外側境界付近では、パイエルス流動で生じたオリビン粒内欠陥をきっかけに、相転移誘起による断熱不安定すべりが卓越する領域が存在する。一方、スラブ外側のより高温で相転移のほぼ完了した部分では、非平衡相転移によって生じた細粒高圧相の超塑性によるバルク強度の低下が期待される。このため冷たい遷移層スラブでは、スラブコアの準安定オリビン領域が極端に硬いレオロジー構造となり、その領域への応力集中とその周辺で卓越する不安定すべり領域が、深発地震の発生と深く関わっていると考えられる。

キーワード：準安定オリビン、パイエルス機構、深部スラブ、高圧変形実験、深発地震

Keywords: metastable olivine, Peierls mechanism, deep slab, high-pressure deformation experiments, deep-focus earthquake

新しい低温強制振動実験装置による氷の非弾性の高精度・広帯域測定

High-resolution measurement of ice anelasticity over a broad frequency range with a new cryogenic forced oscillation apparatus

*山内 初希¹、Christine McCarthy¹、Benjamin Holtzman¹、David Goldsby²、Travis Hager²

*Hatsuki Yamauchi¹、Christine McCarthy¹、Benjamin Holtzman¹、David Goldsby²、Travis Hager²

1. コロンビア大・LDEO、2. ペンシルベニア大

1. Columbia Univ. LDEO, 2. U. Penn

氷は、地球や他の惑星・衛星に普遍的に存在する鉱物である。氷河の運動や氷衛星の潮汐応答など、氷に関連したさまざまな変形現象を理解するために、広いタイムスケールに及ぶ氷の粘弾性的性質の実験的測定が古くから行われている。しかし、氷の粘弾性的性質の中でも特に、弾性と粘性の中間的なタイムスケールでのふるまいである「非弾性」に関しては、実験の技術的な難しさとそれに伴うデータ不足が原因で、その物理的メカニズムや、実験結果を地球や惑星内部条件に応用するために必要なスケーリング則についての理解が未だ限られている。

本研究では、氷の非弾性に関する系統的な実験的研究の展開に向けて、既存の室温近傍・高精度強制振動実験装置 (Takei et al., 2014, JGR) の設計を改良することで、新たに低温・一軸圧縮強制振動実験装置を開発し、広い周波数範囲 ($10^{-4} \sim 10$ Hz) で氷のヤング率と減衰を高精度で測定することを可能にした

(Yamauchi et al., 2024, Rev. Sci. Instrum., in press)。この装置を使って、微小な応力条件のもとで氷多結晶体のヤング率と減衰を測定した結果、非弾性応答は歪みの振幅に依存しない、つまり線形であることが示された。これまで線形領域にある多結晶非弾性については、地震波構造を解釈する目的で、岩石やそのアナログ物質 (ボルネオール) を用いた実験によって精力的に調べられている (e.g., Jackson et al., 2002, JGR; Takei et al., 2014)。そして特に低周波数域における主要な非弾性メカニズムは「拡散律速型の粒界滑り」であり、マクスウェル周波数によるスケーリングが有効であることが明らかにされている (e.g., McCarthy et al., 2011, JGR)。具体的には、さまざまな実験条件 (温度・粒径など) で取得された減衰データを、マクスウェル周波数 ($f_M = M_U / \eta$; M_U = 非緩和弾性定数, η = 拡散クリープ粘性) で規格化した周波数に対してプロットすると、低い規格化周波数域 ($f/f_M < \sim 10^4$) で、すべてのデータが一本の曲線上に重なるというものである。そこで、今回の実験条件における氷のマクスウェル周波数を計算し、規格化した周波数に対して氷の減衰データをプロットしたところ、低い規格化周波数域で氷の減衰データも岩石とアナログ物質のデータと同じ曲線上に重なることがわかった。この結果から、新しい装置による非弾性測定の妥当性ととも、氷多結晶体の線形非弾性応答も、岩石やアナログ物質と共通の物理メカニズム (拡散律速型の粒界すべり) によって引き起こされることが示された。

さらに我々は現在、以上の結果から求めた氷多結晶体の線形非弾性を表す減衰スペクトルを“ベースライン”として、氷多結晶体の非弾性に対する「変形」による付加的な影響を調べている。先行研究による氷の非弾性実験の結果によると、変形による転位密度の増加に起因する非弾性緩和の顕著な増大 (Vassaille et al., 1978, J. Glaciol.) や、比較的高い応力条件のもとで測定された非弾性応答の非線形性 (McCarthy & Cooper, 2016, EPSL) が報告されているが、前述のようにその定量的な理解は限られている。本研究では、ペンシルベニア大学の低温ガス圧変形試験機を使って氷多結晶体を変形させ、系統的に歪み量を変えた試料 (歪み = 0 - 20%) を複数用意し、新しい強制振動実験装置を使って、さまざまな応力条件のもとでこれらの試料の非弾性を測定する計画である。本実験により、変形に伴う「転位の増加」とさらに「結晶配向度の変化」が氷の非弾性応答にどのような影響を与えるのかを定量的に明らかにすることを目指している。これらの実験結果は、潮汐変動を受ける氷河や氷衛星の変形に直接応用することができるが、我々はさらに、適切なスケーリン

グ則を用いて実験結果を他の物質（オリビン）に適用し、変形下にある地球のマントルの地震波速度や減衰の理解に応用することも目指している。発表では、新しい実験装置の詳細を紹介するとともに、最新の実験データについても議論する。

キーワード：氷、非弾性、減衰

Keywords: ice, anelasticity, attenuation

共連続構造をもつ岩石のクリープと粒成長の関係

Relationship between creep and grain growth in rock with bicontinuous structure

*姜 勝皓¹、平賀 岳彦¹

*Shenghao Jiang¹, Takehiko Hiraga¹

1. 東京大学

1. The University of Tokyo

拡散クリープは地球内部の重要な変形メカニズムである。拡散クリープのひずみ速度は粒径に非常に敏感であるため、粒径の変化は地球のレオロジー特性に大きな影響を与える。一般に、結晶粒子は自発的に成長する。したがって、地球内部物質の流れを理解するためには、クリープは粒成長と合わせて考える必要がある。

Okamoto and Hiraga (2022) は、第二相が孤立している二相系では第二相のオストワルド熟成がクリープと同じ拡散メカニズムで進行することを実験的に示した。しかし、系は第一相がほとんどを占めるため、拡散が粒界拡散である場合、同相界面が重要な役割を果たす。異相界面がクリープと粒成長に及ぼす影響については、まだ研究されていない。

本研究では、異相界面の影響の多い共連続構造(両相とも繋がっている)を持つForsterite+50 vol%Diopside (FoDi50) およびForsterite+50 vol%Periclase (FoPer50) を用い、クリープと粒成長実験を行った。FoDi50とFoPer50は、それぞれ二相系の強度および結晶粒成長とクリープの関係を調べるために用いられた。実験結果をクリープ速度、粒成長速度、活性化エネルギーの観点から比較した。

実験の結果、FoDi50は約 800kJ/mol の高い活性化エネルギーを持つ拡散クリープによって変形することがわかった。強度はForsteriteに富む試料の強度と一致した。このことは、共連続構造を持つ固体二相系の強度が、強い相によって決定されることを示唆している。粒成長実験でも、Forsteriteに富む試料と似たような特性を示したが、クリープより低い活性化エネルギー約620 kJ/mol を持つことがわかった。

参考文献：

Okamoto Okamoto, A., & Hiraga, T. (2022). A common diffusional mechanism for creep and grain growth in polymineralic rocks: Experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024638.

キーワード：カンラン石、透輝石

Keywords: Forsterite, Diopside

ハンレイ岩ウルトラマイロナイトの斜長石微細構造と四重点解析

Microstructures of plagioclase in gabbroic ultramylonites and quadruple point analysis

*夏目 樹¹、道林 克禎^{2,3}、伊神 洋平⁴

*Itsuki Natsume¹, Katsuyoshi Michibayashi^{2,3}, Yohei Igami⁴

1. 神奈川県立生命の星・地球博物館、2. 名古屋大学、3. JAMSTEC、4. 京都大学

1. Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 2. Nagoya Univ., 3. JAMSTEC, 4. Kyoto Univ.

岩石の変形機構の一つである粒界すべりは、粒子どうしが粒界で滑り合あうことで変形する。この際、粒子のスイッチングで4つの結晶粒子が面上の1点で交わる四重点が形成されるモデル(Ashby and Verrall, 1973)が提案されており、粒子のスイッチングと四重点形成の様子が実験的で直接観察された(Maruyama and Hiraga, 2017)。また、天然のウルトラマイロナイトなどからも四重点は観察されており、粒界すべりを示唆する証拠の一つとして扱われているものの、その数や分布については着目されていない(Casini et al., 2021; Precigout et al., 2017; Menegon et al., 2013)。そこで、本研究ではオマーンオフィオライト北部フィズ岩体に発達するハンレイ岩ウルトラマイロナイトのEBSDマップデータから斜長石四重点の自動検出を試みた。

オマーンオフィオライトはテチス海を構成していた海洋プレートが、後期白亜紀に現アラビア半島上にオブダクションして形成されたオフィオライトであり、複数の延性剪断帯が発達する (Boudier et al., 1988)。特に北部フィズ岩体では含水鉱物を含む延性剪断帯が地殻-マントル境界に発達しており、カンラン岩側の変形についてはMichibayashi and Oohara (2013)、含水鉱物の微細構造については夏目ほか(2024)によって研究されている。

本研究で扱うハンレイ岩ウルトラマイロナイトは主に角閃石と斜長石から構成される。角閃石は基質部だけでなくポーフィロクラストも多く、ポーフィロクラストの破断部には細粒な角閃石または緑泥石が充填している。一方、斜長石はほとんど基質部のみでポーフィロクラストは少ない。基質部は両鉱物ともに粒径数 μm 程度で、相混合の程度は弱い。

本研究ではこのウルトラマイロナイト試料から、面構造に垂直、線構造に平行な面(XZ面)で研磨薄片を作成し、名古屋大学岩石鉱物学研究室にてSEM-EBSD分析を行った。分析条件は、加速電圧20 kV、ステップサイズ0.5 μm である。取得したEBSDマップデータからMATLABのMTEX Toolboxを用いて粒子を復元し、結晶方位解析と粒径解析を行った。さらに復元した粒子データから、四重点を十分に距離に近い二つの三重点の中間点とみなして四重点の検出を行った。その後、薄片上での粒子の欠損や四重点を構成する4つの粒子の大きさなどを考慮して検出した四重点をフィルタリングした。

結晶方位解析・粒径解析の結果、斜長石の結晶方位ファブリックについてはランダムで平均粒径約5 μm 、角閃石の結晶方位ファブリックは(100)[001]のパターンであった。また、四重点は斜長石基質部に普遍的に観察された。本発表ではハンレイ岩ウルトラマイロナイトの微細構造について解析によって得られた四重点のより詳細な分布を基に議論する。

【引用文献】 Ashby and Verrall, 1973, *Acta Metall*, **21**, 149-163. Maruyama and Hiraga, 2017, *J. Geophys. Res*, **122**, 5890-5915. Casini et al., 2021, *J. Geophys. Res.*, **126**, e2021JB022215. Edington et al., 1976, *Prog. Mater. Sci.*, **21**, 61-170. Precigout et al., 2017, *Nat. Commun.*, **8**, 15736. Menegon et al., 2013, *J. Struct. Geol.*, **48**, 95-112. Boudier et al., 1988, *Tectonophysics*, **151**, 275-296. Michibayashi and Oohara, 2013, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **377**, 299-310. 夏目ほか, 2024, JpGU2024, SCG46-13.

キーワード：四重点、微細構造、斜長石、ウルトラマイロナイト

Keywords: Quadruple points, Microstructure, Plagioclase, Ultramylonite

オマーンオフィオライト最上部マントル連続構造の復元

Reconstruction of the uppermost mantle continuous structure of the Oman ophiolite

*奥脇 健生¹、夏目 樹²、道林 克禎¹

*Takeo Okuwaki¹, Natsume Itsuki², Katsuyoshi Michibayashi¹

1. 名古屋大・院環境、2. 神奈川県立 生命の星・地球博物館

1. Nagoya Univ. Env, 2. Kanagawa Pref. Mus. Nat. Hist.

オマーンオフィオライトは海洋リソスフェアの巨大断片であり、最上部マントル構造を理解する上で格好の研究対象である^[1]。マントルセクションのカンラン岩中にはマントルアセノスフェア時の変形履歴が残されており、構造学的解析から、活発なマントル上昇流による強いマントル水平流を経験したと考えられている^{[2][3]}。一方で、露頭間の連続的なサンプリングは困難であり、構造学的な連続性は不明瞭であるという課題がある。

オマーン掘削プロジェクト(OmanDP)では、オマーンオフィオライトの複数地点で300~400mの連続コアが掘削された^[4]。本研究では、最上部マントル領域に相当するBA3A円柱状コアを使用し、経験した剪断センスおよびマントル流動の連続的構造の復元を行った。はじめに、試料ごとにコア半断面とそれに直交する面の二面で研磨薄片を作成した。ここでは半断面の短辺方向をX軸、長辺方向(鉛直方向)をZ軸、法線方向をY軸とする直交座標系を設定した。その後、両面における輝石粒子の平均方位を測定し、それらの外積を計算することによりカンラン岩の面構造の法線方位(V_p)を取得した。

次に、SEM-EBSD法によりカンラン石の結晶方位定向配列(CPO)を取得した。本研究の円柱状コア試料は、掘削時に水平回転していることと研磨薄片が任意の面で作成されていることから、各試料間の方位が一定ではなく、XYZ軸は構造岩石学で定義されるXYZ軸と斜交する。そこで、構造岩石学的解析を行うため、BA3A掘削地点では経験した剪断方向が一定で、初期の構造を保持しているという仮定を置き、取得データの回転補正を行った。ここで、単純剪断を受けた最上部マントルではカンラン石a[100]軸すべりが卓越すること^[5]を踏まえて、カンラン石a[100]軸の最大集中方位(max100)が剪断方向と一致すると考え、max100が一定方位に位置するまで、取得データをZ軸を回転軸として水平回転するMATLABスクリプトを開発した。面構造とCPOの回転補正後、すべり軸方向(max100)のプランジ角や、面構造とmax100の斜交角について鉛直プロファイルを作成し、剪断方向や剪断センスの変化について議論した。

結果として、max100のプランジ角がモホ面の伏角よりも小さいことから、BA3A掘削地点では剪断の主方向がマントル水平流の方向と斜交する可能性が高い。また、マントル対流内の相対速度に起因する単純剪断は、右横ずれセンスと左横ずれセンスを交互に示し、マントル対流内の速度に複数の極大域が存在することが示唆された。

References

- [1] Nicolas, 1989, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [2] Nicolas et al, 1988, Marine Geophysical Researches, 9(4), 293-310.
- [3] Michibayashi et al, 2000, Marine Geophysical Researches, 21(3-4), 259-268.
- [4] Kelemen et al., 2020, Proceedings of the Oman Drilling Project.
- [5] Karato et al., 2008, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 36, 59-95.

キーワード：マントル流動、オマーンオフィオライト、カンラン岩、面構造、結晶方位定向配列

Keywords: mantle flow, Oman ophiolite, peridotite, foliation, Crystallographic Preferred Orientation (CPO)

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

Deformation and melt-rock interaction in the Horoman peridotite: Petrological and structural study of the MHL suite and BDH suite rocks

*日原 彩¹、田阪 美樹¹、栗原 圭佑¹、谷内 元²、川本 竜彦¹

*Aya Hihara¹, Miki Tasaka¹, Keisuke Kurihara¹, Hajime Taniuchi², Tastuhiko Kawamoto¹

1. 静岡大、2. 産総研

1. Shizuoka Univ., 2. AIST

変形はメルトの浸透を促進しメルトの分布をコントロールする可能性がある。Holtzman et al. (2003)のオリビン+メルトの剪断変形実験では、変形によりメルトに富むバンドとメルトに乏しいバンドに分離することが示されている。また、メルト存在下での変形は歪みを局在化させ、結晶方位に影響を与えることが示唆されている。幌満かんらん岩体は、北海道日高変成帯南縁部に位置するアルプス型のかんらん岩体で、多様なかんらん岩と mafic 岩、輝岩によって顕著な層構造が発達している。幌満かんらん岩体のかんらん岩類はTakahashi (1991)により、3つの特徴的な系列に区分されている：MHL系列 (Main harzburgite-Iherzolite), SDW系列 (Spinel-rich dunite-wehrlite), BDH系列 (Banded dunite-harzburgite)。先行研究より、MHL系列のかんらん岩は海嶺起源であり (Yoshiukawa and Nakamura, 2000), BDH系列のかんらん岩類は沈み込み帯起源 (松藤ほか, 2006)である可能性が指摘されている。本研究ではアポイ岳、幌満川、不動の沢の露頭からMHL系列とBDH系列の層状かんらん岩試料を採取し、構造岩石学データを分析することで海嶺下と沈み込み帯における変形と岩石メルト相互作用について議論する。露頭観察と微細構造観察から層状のかんらん岩における岩相境界と面構造は概ね一致することが確認された。電子線後方散乱回折 (EBSD)による解析では、オリビンは強い形態定向配列 (SPO)を示し、結晶方位の集中度を示すJ-Indexの値は他のかんらん岩体と比較して低い値を示した。結晶方位解析では2種類のCPOファブリックが観察された。ひとつはオリビンの [100]が面構造に方向な方向に[010]が面構造に垂直な方向に集中するCPOファブリック (A-type)で、もうひとつは [010]が面構造に垂直な方向に集中を示し、[100]と [001]は面構造に平行な方向に帯状分布を示すCPOファブリック (AG-type)である。この2種類のCPOファブリックは輝石の量比によって変化することから、メルトの存在が転位クリープから拡散クリープへと変形メカニズムを変化させ、CPOの発達に影響を与えたと考える。また、オリビン以外の鉱物 (斜方輝石、単斜輝石、斜長石、パーガス閃石)は粒界に入り込むような不規則な形状で存在し、明瞭なCPOとSPOを示すため、メルトの浸透は変形と同時に起きたと考えられる。マイクロXRF分析のデータから算出した岩石の平均化学組成の $Mg\# (=100 \times Mg / (Mg + Fe))$ は、MHL系列の岩石では69~82, BDH系列の岩石では87と比較的高い値を示した。電子線プローブマイクロアナライザ (EPMA)によるオリビンの $Fo\# (=100 \times Mg / (Mg + Fe))$ の測定では、MHL系列の岩石では83~92を示し、BDH系列ではダナイトで93~94, ハルツバージャイトで90~91を示した。Mg#に相違が明確に見られることは、2つの系列間でかんらん岩とメルトの反応の程度が異なることを示唆する。

引用文献

Holtzman et al., 2003, Melt segregation and strain partitioning: implications for seismic anisotropy and mantle flow, *Science*, 301 (5637), 1227-30. Takahashi, 1991, Origin of three peridotite suite from Horoman peridotite complex, Hokkaido, Japan; Melting, melt segregation and solidification processes in the upper mantle., *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 86, 199-215. Yoshiukawa and Nakamura, 2000, Geochemical evolution of the Horoman peridotite complex: implications for melt extraction, metasomatism, and compositional layering in the mantle, *J. Geophys. Res.*, 105, 2879-2901.

キーワード：マントル、かんらん岩、変形、結晶方位、電子線後方散乱回折

Keywords: mantle, peridotite, deformation, crystallographic preferred orientation, EBSD

片理の発達した蛇紋岩とかんらん岩の地震波速度と電気比抵抗の多成分測定

Multicomponent measurements of seismic velocity and electrical resistivity using foliated serpentinite and peridotite

*伊藤 禎宏¹、片山 郁夫¹、道林 克禎²、松山 和樹²

*Tomohiro Ito¹, Ikuo Katayama¹, Katsuyoshi Michibayashi², Kazuki Matsuyama²

1. 広島大学、2. 名古屋大学

1. Hiroshima University, 2. Nagoya University

沈み込み帯で起こるさまざまな現象には水が関わっている。蛇紋岩の形成もそのうちの一つである。沈み込むプレートがマントルウェッジに水を放出する際、プレートの表面やマントルウェッジと水が反応し蛇紋岩が形成される。特にプレートの表面に形成される蛇紋岩は強く変形を受け、片理面が発達している。地球深部における水は地震波速度や電気比抵抗の地球物理観測によって近年明らかになっている。これらの結果の解釈には等方的な蛇紋岩やかんらん岩の物性値が使われている。しかし、実際の沈み込み帯の蛇紋岩やかんらん岩は、強く変形を受け片理面や線構造を持ち、岩石中に見られる割れ目も異方的に分布する。このような片理の発達した蛇紋岩やかんらん岩の実験室下での物性測定はいまだ少ない。そのため本研究では、片理の発達した蛇紋岩やかんらん岩の地震波速度や電気比抵抗の多成分測定を行い、その結果と地球物理観測から、沈み込み帯での流体の移動経路を議論することを目的とする。

本研究で用いた岩石試料は、長崎県野母半島で採取された蛇紋岩と愛媛県東赤石山で採取されたかんらん岩である。これらの岩石は偏光顕微鏡下でも強い鉱物の定向配列を持っている。また、測定する方向を決めるために、線構造に平行な方向をX軸、片理面に垂直な方向をZ軸とした。これらの岩石について、実験室での地震波速度と電気比抵抗の同時測定を行った。地震波速度と電気比抵抗の測定実験には、容器内透水変形試験機を用いた。実験条件は封圧を5 MPaから200 MPaまで段階的に加圧・制御し、圧力効果を調べた。流体には0.5 mol/LのNaCl溶液を用い、流体圧は1 MPaに制御して室温下で実験を行った。また、EBSDを用いた鉱物の結晶方位測定を行い、結晶選択配向による異方性を評価した。

蛇紋岩、かんらん岩のP波速度はX軸、Y軸方向が、片理面にZ軸方向よりも速い傾向を示した。蛇紋岩は、X軸、Y軸方向でのP波速度がほぼ同じ値であることに対し、かんらん岩はX軸方向が最もP波速度が速い傾向を示した。S波速度は片理面に平行に伝播振動する成分が、片理面を横切る伝播方向や振動方向に比べて速い傾向を示した。これらの結果は、片理面に平行なクラックの効果と鉱物の異方性の効果で説明できる。地震波速度は、封圧の上昇とともにやや早くなり、これは割れ目の閉鎖の影響だと考えられる。最大圧力200 MPaでは、異方性が15%程度の孤影、これは鉱物の結晶選択配向によるものだと考えられる。蛇紋岩の電気比抵抗は、Z軸方向よりもX軸方向で測った場合の方が1桁程度低い傾向を示した。一方、かんらん岩の電気比抵抗はZ軸方向とX軸方向でほぼ値が変わらず、蛇紋岩のZ軸成分とほぼ同じ値を示した。電気比抵抗は、封圧の上昇とともに上昇し、これは割れ目の閉鎖の影響だと考えられる。この実験から得られた多成分の地震波速度から、弾性定数テンソルを計算し、岩石のバルクの地震波速度極図を作成した(Mainprice, 2014)。この地震波速度極図は、結晶選択配向から作られたものとは異なり、鉱物とクラックの2つの影響を含んでいる。この極点図から異方的な岩石中の地震波速度は、その伝播方向や振動方向に強く依存することが示された。これらの結果と地震波速度や電気比抵抗のトモグラフィーとの比較から、沈み込み帯での流体移動や、クラックの密度について議論を行う。

キーワード：超塩基性岩、地震波速度、電気比抵抗、異方性

Keywords: Ultramafic rocks, Seismic velocity, Electrical resistivity, Anisotropy