

## 新しい相分離現象から想像する大陸と海洋の形成過程

### Pattern formation of fracture phase separation and its implications for structuring process of continents and oceans

小山 岳人<sup>1\*</sup>

KOYAMA, Takehito<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

複数成分の混合系における相転移現象に相分離現象 [1-3] あるいは不混和現象 [4] と呼ばれるものが有る。これは最初の混合状態から、温度、圧力などの条件変化により、いくつかの組成の異なる相に分離していく現象である。あらゆる物は混合物であることから、この現象はどのようなものにも現れうる、重要な現象の一つである。最近 2 成分の高分子溶液系において、粘弾性を発現する高分子の濃厚相に脆性破壊的挙動の現れるものが新しく見出され、破壊型相分離と名付けられた [5]。高分子濃厚相は、細い連結をもちながらも、紙を引きちぎった様な、いくつかのほぼ孤立した領域に分れた状態となっている。それらの領域の周囲は、溶媒濃厚相によって満たされている。それら個々の領域の外縁は、ガラスやコンクリート、岩石などの脆性物質の割れ目に現れる、独特の "ギザギザ" で縁取られている。その様子は、世界地図に見られるあの大陸と海洋のパターンに良く似ている。

一方、地球表面上の大陸と海洋の存在は、他の惑星には見られない特徴である。この二つは、具体的に 3 つの特徴をもつ。すなわち、1. 物質的特徴: 珪酸塩を主成分とする大陸地殻構成物質と水を主成分とする海水、2. 水平方向の特徴: 大陸と海洋の二つの領域とそれらを分ける形状、3. 垂直方向の特徴: 陸地部分と海底部分のバイモーダルな高さ分布、である。これらはどのようにして現れたのだろうか。興味深いことに、これらの 3 つの特徴がいずれも、二つの要素あるいは部分により表される。このことが示すのは、これら 3 つの特徴は、あるひとつの現象が発現した結果の別々の側面である、ということではないだろうか。

これらの地球表層における特徴の発生、発展過程の根本に、粘弾性や破壊的挙動の現れる破壊型相分離現象が深く関わっているのではないかというアイデアと、その現実での発現可能性について、簡潔に説明する。

#### 参考文献

- [1] J. D. Gunton, M. San Miguel, and P. Sahni, Phase Transitions and Critical Phenomena (Academic, London, 1983), Vol. 8.
- [2] A. Onuki, Phase Transition Dynamics (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2002).
- [3] H. Tanaka, J. Phys. Condens. Matter, 12, R207 (2000).
- [4] 川さき (山かんむりに奇) 智佑, 岩石熱力学-成因解析の基礎- (共立出版, 2006).
- [5] T. Koyama, Phys. Rev. Lett., 102, 065701 (2009).

キーワード: 大陸, 海洋, 形成過程, 相分離あるいは不混和, 破壊, 粘弾性

Keywords: continents, oceans, structuring process, phase separation, fracture, viscoelasticity

## 粉体層内での圧力伝播則 Pressure transmission in a granular system

桂木 洋光<sup>1\*</sup>  
KATSURAGI, Hiroaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学環境学研究科

<sup>1</sup>Dept. Earth & Environ., Nagoya Univ.

通常の流体では壁圧力はパスカルの法則により一様になることが知られている。しかし、地中の構成物は単純な流体とは異なるので圧力がどのような伝播則を示すのか自明ではない。地中の構造は非常に複雑ではあるが、我々はガラスビーズや標準砂のような理想的な粉体材料を用いてその圧力伝播則を実験的に調べた。小さな円筒容器に粉体が積層され、小鉄球が押し込まれる。その際に鉄球にかかる抵抗力と壁にかかる圧力とを同時に計測した。押し込みのない粉体層では壁圧力が深部で飽和することが知られているが、押し込みによる圧力の伝播はこれまで十分に計測されていなかった。これまで、わずかに押し込みの抵抗力のみが調べられてきた [1,2]。計測結果より我々は抵抗力と壁圧力の非線形関係を経験的に導出した。この結果より実効的な粉体層圧が非常に重要な要素であることが分かった。また、粉体において重要である履歴依存性を調べるために、様々な粉体層の準備法や繰り返し押し込み実験も行った。その結果、抵抗力と圧力の非線形関係の普遍性と堅牢性が実験的に確かめられた。

### 参考文献:

[1] M. B. Stone et al., Phys. Rev. E 70, 041301 (2004).

[2] G. Hill, S. Yeung, and S. A. Koehler, EPL 72, 137 (2005).

キーワード: 粉体

Keywords: granular matter

## 粉体摩擦の速度依存性と特徴的速度

## Rate dependence of granular friction and its characteristic shear rate

桑野 修<sup>1\*</sup>, 安藤 亮輔<sup>2</sup>, 波多野 恭弘<sup>1</sup>

KUWANO, Osamu<sup>1\*</sup>, ANDO, Ryosuke<sup>2</sup>, HATANO, Takahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST

In geoscience, the rate and state-dependent friction law is established, showing negative shear-rate dependence (Scholz, 1998, Nature). In statistical physics, another empirical law holds for much faster deformation than the former, showing positive shear-rate dependence (Jop et al., 2006, Nature). However, it remains unknown how these two distinct laws are connected. In this study, we experimentally show that the crossover from negative to positive shear-rate dependence of friction coefficient occurs at a characteristic shear rate, relating to competition between two different physical processes, namely frictional healing and anelasticity. We determine the expression of the characteristic rate.

キーワード: 摩擦, 粉体, レオロジー

Keywords: friction, granular matter, rheology

## ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化 Physical processes of quartz amorphization due to friction

武藤 潤<sup>1\*</sup>, 中村 悠<sup>1</sup>, 長濱 裕幸<sup>1</sup>, 清水 以知子<sup>2</sup>, 三浦 崇<sup>3</sup>, 荒川 一郎<sup>3</sup>

MUTO, Jun<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Yu<sup>1</sup>, NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>, SHIMIZU, Ichiko<sup>2</sup>, Takashi Miura<sup>3</sup>, Ichiro Arakawa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 学習院大学理学部物理学科  
<sup>1</sup>Dept. Earth Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Univ., <sup>3</sup>Dept. Phys., Gakushuin Univ.

これまでに衝撃実験やインデンテーション・ダイヤモンドアンビルなどを用いた高圧実験から鉱物の非晶質化が生じることが知られている。花崗岩および珪岩を使った摩擦実験からも、摩擦により鉱物の非晶質化が起こることが TEM 分析により確認されており (Yund et al., 1990), 天然では高圧変成岩中の 石英 (Palmeri et al., 2009) やサンアンドレアス断層のコアサンプル (Janssen et al., 2010) 中において非晶質物質の生成が報告されている。石英岩を用いた Rotary shear 摩擦実験から、高速すべり時においてすべり・速度弱化的な挙動 (Di Toro et al., 2004) が明らかになり、生成したガウジは石英とアモルファスシリカから構成されていた。さらに断層表面上に水和したアモルファスシリカの生成が認められ、非晶質化に加え、この水和物のチキソトロピックな挙動が摩擦係数の低下を生じさせたと報告されている (Goldsby and Tullis, 2002; Hayashi and Tsutsumi, 2010)。従って、石英岩のすべり・速度弱化的機構を理解するためには非晶質化の物理過程の把握が重要である。

そこで本研究では石英岩のすべり・速度弱化的を引き起こす非晶質化機構を明らかにするため、ピンオンディスク摩擦実験 (Muto et al., 2007) を行った。石英単結晶を用いた高速摩擦実験から、摩擦係数の弱い速度依存弱化的が認められた。摩擦による非晶質化の物理過程および水和メカニズムの詳細を調べるため、摩擦痕・摩耗物質のラマン分光分析、赤外分光分析および電子顕微鏡観察を行った。

ディスクは人工および天然ブラジル産の単結晶石英を用い、ピンには天然ダイヤモンドおよび水晶 (曲率半径 0.5 mm ~ 1.5 mm) を用いた。荷重は 0.02 N ~ 1 N, すべり速度は 0.001 m/s ~ 2.6 m/s の範囲内で摩擦実験を行った。

ラマン散乱により分子の振動モードが得られるため、ラマン分光法を用いて摩擦による試料の非晶質化の程度を解析した。垂直応力 10 ~ 440 MPa, すべり速度 0.01 ~ 2.6 m/s, すべり距離 > 70 m で、石英ディスク上に生じた摩擦トラックのラマン分光測定 (励起波長 532.1 nm) から、石英の固有振動モード (A<sub>1</sub>) である 464 cm<sup>-1</sup> の高波数側に新たなピーク 490 cm<sup>-1</sup> (非晶質シリカ 4 員環), 500 cm<sup>-1</sup> (モガナイト 4 員環), 515 cm<sup>-1</sup> (コーサイト 4 員環) および 606 cm<sup>-1</sup> (非晶質シリカ平面 3 員環) の存在が認められた。これは、摩擦に伴い SiO<sub>4</sub> 中距離構造が変化し、6 員環の結晶構造を持つ石英中に 3 および 4 員環が生じたことを示唆している。また石英高圧相であるコーサイトの存在は、摩擦痕内のアスペリティでは少なくとも 1.8 GPa 以上の高応力を被っていたことを示す。さらに石英ディスクの赤外分光マッピング分析を行った結果、2900 cm<sup>-1</sup> ~ 3600 cm<sup>-1</sup> に水分子中の OH 基の対称伸縮を示すブロードなピークが摩擦痕上のみを検出され、水和反応は摩擦痕内でのみ生じていることが明らかになった。また摩擦表面の電子顕微鏡による観察では、直径 200 nm 程度、長さ 5 ~ 16 μm からなるダクティルな粘着性の針状摩耗物質 (roll) が認められた。ラマンおよび赤外分光分析、電子顕微鏡観察結果から、アスペリティ下での高応力により、6 員環からなる SiO<sub>4</sub> 中距離構造が変化し、平面 3 および 4 員環中の歪んだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進む (Gibbs et al., 2002; 2003) ことで、摩擦表面に非晶質シリカの水和物を生成したと考えられる。本発表では、以上の分析結果の報告に加え、摩擦に伴い生成した非晶質シリカ水和物が摩擦表面上でダクティル物質として振舞い、速度弱化的を引き起こしたとする弱化的メカニズムを提唱する予定である。

キーワード: 石英非晶質化, 摩擦摩耗試験, 断層弱化的, ラマン分光分析

Keywords: quartz amorphization, friction experiment, fault weakening, raman spectroscopy



## 鏡肌の形成過程と成因 Formation process and mechanism of slickenside

安東 淳一<sup>1\*</sup>, 西脇 隆文<sup>1</sup>, 大藤 弘明<sup>2</sup>, 渡邊 克晃<sup>2</sup>, 早坂 康隆<sup>1</sup>

ANDO, Jun-ichi<sup>1\*</sup>, NISHIWAKI, Takafumi<sup>1</sup>, OHFUJI, Hiroaki<sup>2</sup>, WATANABE, Katsuaki<sup>2</sup>, HAYASAKA, Yasutaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学, <sup>2</sup> 愛媛大学, <sup>3</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Hiroshima University, <sup>2</sup>Ehime University, <sup>3</sup>The University of Tokyo

地球内部のダイナミクスの研究において、断層形成から地震発生に至る過程を岩石物性の見地から解明する研究は非常に重要であり、かつ興味深い。この断層物性に関する研究では、近年の高速摩擦試験機を用いた実験が大きな貢献を果たしている(例えば、Hirose and Shimamoto, 2005; Di Toro et al., 2011)。高速摩擦試験を通じて、幅広いすべり速度条件における断層すべりの力学特性が明らかとされ、更には回収試料の微細組織観察によって摩擦すべりの素過程も解明されつつある。これら一連の研究における重要な結果は、断層すべり運動を断層面で消費される摩擦エネルギーと云う点から把握する視点にある。特に摩擦発熱を起因して断層面に沿って生じる物理化学反応をいかに正確に把握するかという方向性が示された。熔融現象、間隙水圧の変化、熱分解反応等が重要な現象として報告されている。

一方でこのような室内実験によって得られるすべり運動の力学特性が、実際の断層に適用できるかどうかを検証するには、断層岩の組織観察が非常に重要となる。また自然現象として実際の断層面で生じた物理化学反応を把握する為にも断層岩の組織観察は必須である。従って断層のすべり運動の素過程を明らかにする為には、今後も高速摩擦試験と共に断層岩の組織観察が重要となる。

断層岩のうち、断層運動の素過程の情報を残している最も代表的な岩石はシュードタキライト(ST)であり、多くの研究成果が報告されている。STと共に鏡肌も断層面上に発達する組織として古くから知られている。鏡肌は滑らかな光沢のある面を示し、その成因には断層運動による母岩の熔融或いは粉碎といった現象の関与が考えられている(例えば、Spray 1989)。しかし、その詳細はST程には理解されていない。そこで我々は、鏡肌を形成する様な断層運動の素過程に対して何らかの制約を与える事を目的に、主に透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて、チャート岩体中に発達している非常に強い光沢を示す鏡肌の微細組織観察を進めている。チャート岩体に注目した理由は、鏡肌を発達させている岩石の多くはチャートである事、また、チャートは石英を主要構成鉱物(単一鉱物岩石)とするので、微細組織の解釈がしやすいという利点の為である。

試料は山口県東部の弱変成ジュラ紀付加体(玖珂帯)を構成するチャートに発達する鏡肌である。このチャートは礫質泥岩中に約数10m規模の岩体として露出しており、非変形部分は淡青色~白色を呈している。鏡肌面に接する石英粒子の薄片観察では以下の特徴が認められる。1)脆性破壊をしていない。2)塑性変形の特長である粒界でのバルジ形成や強い波動消光を示す。また、EBSDとTEMによる観察では、3)塑性変形による大歪の際に形成される亜結晶粒界の形成は認められない。4)石英粒子はLPOを形成しておらず、5)大きな差応力が加わった際に形成される転位の絡み合いが顕著に発達している事が分かった。そして重要な結果は、6)鏡肌面は厚さ約50nmの非晶質層で覆われている事である。7)この非晶質層のSTEMによる元素分析では、主にSi、Fe、Alが検出された。これらの観察結果は以下の事を示唆する。1)断層形成以前にはチャートはほとんど塑性変形しておらず、2)断層形成直前の高差応力状態によって始めて石英中に転位の絡み合いをもたらす塑性変形が生じた。3)断層運動中には、断層面の極近傍(~50nm)を形成する石英と粘土鉱物が非晶質化した。石英粒子は脆性破壊をしていない為、断層すべりはこの非晶質部分のみで生じたと考えられる。4)断層すべりが生じている際に非晶質層の内部で、石英と粘土鉱物を起源とするSiとFe及びAlが混合した。

本研究結果から断層運動が約50nmの非晶質層のみで生じた事が示唆されるが、この非晶質化現象の成因は現時点では不明である。しかし、本チャートが持つ特徴的な組織として、鏡肌近傍に存在する細粒(約10μm)な等粒状のアパタイト粒子からなる黒色脈が挙げられる。チャート中にはアパタイト組成を有する微化石が多量に確認できるので、この黒色脈はアパタイト組成を有する微化石が断層運動時の摩擦発熱によって選択的に熔融し形成された可能性が高い。従って、上記非晶質層も石英の摩擦熔融によって形成された可能性が考えられる。

現在はサンフランシスコ市内と愛知県田原市に露出するチャート岩体に発達する鏡肌の観察も行っているため、比較研究の結果に関しても言及したい。

Di Toro et al., 2011, Nature, doi10.1038; Hirose and Shimamoto, 2005, JGR 110, B05202; Spray, 1989, JSG 11, 895

キーワード: 鏡肌, シュードタキライト, 断層, チャート, 微細組織

Keywords: slickenside, pseudotachylyte, fault, chert, microstructure

## タルクの摩擦特性における間隙水圧の影響

### Effect of pore pressure on frictional properties of talc under high normal stress

上原 真一<sup>1\*</sup>, 清水 以知子<sup>2</sup>, 岡崎 啓史<sup>3</sup>

UEHARA, Shin-ichi<sup>1\*</sup>, SHIMIZU, Ichiko<sup>2</sup>, OKAZAKI, Keishi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学理学部, <sup>2</sup> 東京大学理学部, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Science, Toho University, <sup>2</sup>Faculty of Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Hiroshima University

近年、地震発生のメカニズムや地殻深部の断層の摩擦挙動における流体の影響が注目されている。しかしながら、地殻深部条件、特に岩石が脆性的な挙動から延性的、塑性的な挙動に遷移する条件での岩石力学特性における間隙流体圧の影響には、いまだ不明な点が多い。既存の岩石破壊・摩擦実験の研究成果から、脆性破壊条件においては、一般に、岩石の破壊強度ならびに摩擦強度は有効応力  $\sigma_e = \sigma - P_p$  に依存すると考えられている(有効応力の法則)。ここでは岩石に働く全応力、 $P_p$  は間隙流体圧であり、 $\sigma_e$  は 0 から 1 の間の値をとり、脆性破壊条件においては 1 に近いことが知られている。一方で、塑性変形条件においては、間隙圧は岩石と等しくなると考えられており、この場合間隙流体圧の影響は脆性破壊条件におけるものと大きく異なることが予想される [1]。これらの中間の領域での間隙流体圧の影響については、よくわかっていないのが現状である。

本研究では、岩石の脆性?塑性変形遷移領域付近における、岩石の摩擦強度における間隙流体圧の影響を評価するための第一歩として、比較的封圧・低温条件で延性、塑性変形をする岩石であるタルク(滑石、中国広西地方原産)を用いて、封圧と間隙水圧を制御した室内摩擦実験を行った。例えば断層面の凹凸が降伏しやすい条件では、岩石がどういった応力履歴を経たかによって接触率などの状態が依存することが考えられる。そこで本発表では、岩石に封圧、間隙率をどのように与えたか(応力経路)がタルクの摩擦強度に与える影響に注目した予察的実験結果について紹介する。

実験に用いた試料は、タルクの直径 20mm の円柱試料を、軸に対して 60° に切断したものである。切断面は # 400 のカーボラダムで研磨した。切断面の間隙水圧を制御できるように、試料には軸方向に直径約 3mm の穴を開けた。タルクの摩擦における間隙圧の影響、ならびに応力の載荷履歴の影響を調べることを目的に、(a) 間隙水圧  $P_p=0\text{MPa}$  で一定とし、封圧  $P_c$  を 10MPa から 110MPa まで増加させ、10MPa に戻す、(b)  $P_c=110\text{MPa}$  で一定とし、 $P_p$  を 100MPa から 0MPa まで減少させ、再び 100MPa に戻す、(c)  $P_c=110\text{MPa}$  で一定とし、 $P_p$  を 0MPa から 110MPa まで増加させる、(d)  $P_c=110\text{MPa}$  で一定とし、せん断させない状態で  $P_p$  を 100MPa のまま 1 時間おき、その後  $P_p=0\text{MPa}$  まで減少させ、せん断する、という、いくつかの応力経路で実験を行った。応力経路 (b) での結果を (a) のものと比較したところ、ある程度定常に達した際のせん断応力と垂直応力の関係は、 $\sigma_e = \sigma - P_p$  とした場合の有効応力の法則で良く説明できることがわかった。一方、応力経路 (c) の結果は、 $\sigma_e = \sigma - P_p$  ではうまく説明できない。応力経路 (d) の結果は、定常すべりでのせん断応力は (a) の結果とほぼ一致するが、せん断過程におけるピーク応力は (a) のものよりも 1.5 倍程度高くなった。これらの結果は、本実験条件では、タルクのせん断応力およびその間隙流体圧の影響は応力経路に依存し、場合によっては有効応力の法則を単純に適用することはできない可能性を示唆する。

謝辞：広島大学の片山郁夫准教授と産業技術総合研究所の高橋美紀博士には、ガス圧式三軸変形試験機を使用させていただき、また有益な議論および示唆をいただいた。ここに記して感謝する。また、本研究の一部は科研費新学術領域研究「地殻流体」の助成を受けたものである。

#### 参考文献

[1] 清水, 月刊地球, 32, 3 (2010)

キーワード: 断層の力学特性, 脆性 - 塑性遷移, 有効応力の法則, タルク, 摩擦実験

Keywords: fault mechanics, brittle-plastic transition, effective stress law, talc, friction experiment

## 東北沖プレート境界逆断層における脆性-延性転移 Brittle-ductile transitional zone in the Tohoku-oki interplate thrust fault

清水 以知子<sup>1\*</sup>

SHIMIZU, Ichiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Science, University of Tokyo

年代の古い冷たいスラブが沈み込む東北日本ではプレート境界はカップリングが弱く、巨大地震は発生しないと考えられてきた。このような「比較沈み込み学」(Uyeda and Kanamori, 1979)の考えに対し、嶋本(1989, 1991)は沈み込み帯のレオロジーが地震発生帯の強度や幅を規定すると考え、東北日本のレオロジー断面を提案した。粘性領域に対しては地質学的な歪速度が仮定された。一方、沈み込み帯浅部を構成する付加体は堆積物がやわらかく、また水を含むために圧力溶解で強度が低下するとして先見的に地震発生帯から除外された。

今回、東北日本の沈み込みプレート境界の摩擦特性を規定するのはスラブ最上部の海洋地殻物質と付加体の堆積物であると考え、プレート境界にそった強度エンベロープを作成した。沈み込むスラブの上面は厚さ2-3 kmの珪質堆積物と玄武岩組成の海山からなると仮定し、珪質堆積物のレオロジーにはwetな細粒石英岩の転位クリープの流動則(Paterson and Luan, 1990)を用いた。2011年の東北地方太平洋沖地震(M9)の震源の深さ20数キロメートルの領域は、付加体最下部ないし、ウェッジマンントル最上部に相当する。この温度圧力条件はwet石英における脆性-延性転移領域の上限付近に相当する、海山の崩壊により脆性-延性転移領域の破壊が一気に進み、震源断層全体がすべったというシナリオが考えられる。従来のM7級の宮城沖地震のアスペリティーは、ウェッジマンントルに接する深度に沈み込んだ海山と考えられる。その周囲の安定性は、脆性-延性転移領域における流動・摩擦物性の速度依存性で決まる。

文献:

Uyeda, S. and Kanamori, H. (1979) *J. Geophys. Res.*, 84, 1049-1061.

嶋本利彦 (1989) *科学*, 59, 170-181.

嶋本利彦 (1991) *月刊地球*, No. 3, 112-117.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, アスペリティ, レオロジー, 沈み込み帯, 脆性-延性転移, 石英

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, asperity, rheology, subduction zone, brittle-ductile transition, quartz



## 石英の高温レオロジー：東南極ルンドボークスヘッタの例 Rheology of quartz at high-temperature: an example from Rundvagshetta, Antarctica

Wallis Simon<sup>1\*</sup>, 井上 祐策<sup>1</sup>

WALLIS, Simon<sup>1\*</sup>, INOUE, Yusaku<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学環境学研究科地球環境科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Environmental Studies, Nagoya University

石英は大陸地殻に豊富で比較的強度が小さく、大陸地殻のレオロジーに大きな影響を与える。そのため大陸地殻の変形を考える上で、石英のレオロジーを理解することは重要である。結晶の塑性変形機構は、主に転位クリープと拡散クリープがある。前者は転位すべりと転位の上昇に起因し、 $\dot{\epsilon} \propto \sigma^n$  の関係があるとされている ( $\dot{\epsilon}$ :歪速度,  $\sigma$ :応力,  $n$ :3-6)。後者は空格子と原子の拡散に起因し、 $\dot{\epsilon} \propto D \sigma^n$  の関係があるとされている。また拡散クリープでは、粒径の依存性もあると考えられている ( $\dot{\epsilon} \propto d^{-n}$ ,  $n=2, 3$ )。ある応力状態を考えた時、変形速度は変形機構にも左右されるため、あらゆる状態でどんな変形機構が卓越するのかを決めることは重要である。実験では拡散クリープは高温細粒 ( $>900\text{K}$ ,  $<1 \mu\text{m}$ ) で活動的であるとされているが、比較的低変成度 ( $<500 \text{oC}$ ) の粒径  $10\text{-}20 \mu\text{m}$  のメタチャートから拡散クリープの証拠が見つかっている。これは、拡散クリープが実験で考えられる以上に広範囲で活動的である可能性を示唆する。この可能性をさらに議論するためには、さらなる天然の研究が必要である。特に、高温での変形に関する情報が少ない。そのため、高温変成作用を経験した東南極ルンドボークスヘッタの同一地点で採取された2試料について (RH-112-20A と RH-112-20B)、石英のc軸方位を調べ、主要な変形機構を推定し、また変形状態 (温度・圧力) を見積もり、実験的理論的研究との比較を行った。

RH-112-20A においては、粒径  $2.9 \pm 1.2\text{mm}$  で、c軸方位は3方向の集中を示した。これは、転位クリープが支配的であったことを示唆する。RH-112-20B においては、粒径  $0.93 \pm 0.03\text{mm}$  で、c軸方位はほぼランダムを示した。この分布は転位クリープでは説明できず、主要な変形機構は拡散クリープの可能性が高い。また石英チタン地質温度圧力計を用いた結果、変形時の温度・圧力を  $600\text{-}700\text{oC}$ ,  $4\text{-}6\text{kbar}$  と見積もった。この結果を実験的・理論的研究から導かれている石英岩の流動則と比較をしたところ、実験で現象論的に求められた流動則より、理論モデルが深く加味された流動則の方が、本研究結果と整合的であった。実験結果で考えられている以上に、大陸地殻内の広範囲で、拡散クリープは活動的である可能性が高い。また、実験で現象論的に求められた流動則より、理論モデルが深く加味された流動則の方が、天然の状態を再現できるかもしれない。

キーワード: 石英, 変形機構, 結晶選択配向, 拡散クリープ, 転位クリープ

Keywords: Quartz, Deformation mechanism, Crystal Preferred Orientation, Diffusion creep, Dislocation creep



## 岩石・鉱物の力学的遷移挙動の現象論的構成則

### Phenomenological constitutive law for transient rheological behavior of rocks and minerals

川田 祐介<sup>1\*</sup>, 長濱 裕幸<sup>2</sup>

KAWADA, Yusuke<sup>1\*</sup>, NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地震研究所 数理系研究部門, <sup>2</sup> 東北大学 大学院理学研究科 地学専攻

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University

加工硬化の効果も含む岩石・鉱物の力学的遷移挙動の構成則を粘弾性理論, 分数階レオロジーの観点から導出した。粘弾性挙動は線形応答理論を用いて定式化でき, 出力される応力は, 歪の入力と粘弾性応答との畳み込み積分で表現される。この応答関数は一般に緩和弾性率(時間に依存して変化する応力と歪の比)といい, これを構成則として扱う。粘弾性応答関数が時間のみの関数のとき, この畳み込み積分は分数階微分の定義式と一致し, フック弾性とニュートン粘性との中間の挙動を粘弾性として記述することができる。この構成式を用いて岩塩・方解石・斜方輝石の応力-歪曲線を解析したところ, 緩和弾性率が時間のべき乗則に従う関係が得られ, そのべき乗指数は流動則の応力指数の逆数になる。結果, 本構成則は遷移挙動と定常挙動を同じ数式(数理的構造)で表現でき, 指数値は遷移挙動に対して0.04から0.13(応力指数では7.5から25に相当), 定常挙動に対して0.14から0.25(応力指数では4.1から7.1に相当)の範囲を取る。つまり, 指数値は変形機構を反映したパラメータとみなせる。また, 特に斜方輝石の場合, 応答関数に加工硬化の影響を表す歪の関数(歪のべき乗)が含まれてくる。この効果も含む応答関数からは, 応力が歪と歪速度のべき乗則に従う加工硬化の経験則も導出することができる。

キーワード: 粘弾性, 分数階微積分, 遷移挙動, レオロジー, 加工硬化

Keywords: viscoelasticity, fractional calculus, transient behavior, rheology, work hardening

## 最上部マントル延性剪断帯における変形メカニズムの遷移過程?オマーンオフィオリイトを例として?

### Olivine fabric transition during ductile shearing in the uppermost mantle: an example from Oman ophiolite

道林 克禎<sup>1\*</sup>

MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学部地球科学科

<sup>1</sup> Institute of Geosciences, Shizuoka University

A ductile shear zone across the crust-mantle boundary occurs in the Fizh massif, Oman ophiolite. The dunites in the ductile shear zone were classified into coarse granular texture, medium-grained texture, protomylonite, mylonite and ultramylonite. The average grain sizes of olivine decreased toward the shear zone, by which a high strain zone was estimated approximately 15 m. Amount of hydrous minerals (amphibole and chlorite) and spinel Cr# in the mylonites increased toward the gabbro boundary, suggesting that water infiltration into the ductile shear zone could occur from the gabbro boundary. The amphibole porphyroclasts show deformation structures, indicating that the water infiltration and subsequent water-induced metamorphic reactions occurred before or during shearing. P-T estimate and equilibrium temperatures show that the shear zone may be thought to preserve higher deformation temperature (around 900 degree C) for outside of the high strain zone and lower deformation temperatures (around 750 degree C) for inside of the high strain zone. Olivine CPO pattern evolutions indicate the following continuous deformation scenario. First, the deformation by dislocation creep at high temperature condition have formed A-type CPO or E-type CPO (more close to high strain zone). Next, the deformation by dislocation creep at low temperature and wet conditions have formed C-type CPO. Finally, superplastic deformation by grain boundary sliding at low temperature and wet conditions have occurred and formed random CPO.

キーワード: オリビン, 結晶方位解析, 延性剪断帯, 最上部マントル

Keywords: olivine, fabric analysis, ductile deformation, uppermost mantle

## 背弧拡大時における最上部マントル構造発達過程：一の目潟かんらん岩捕獲岩からの制約

### The uppermost mantle evolution during back-arc spreading: Microstructural and petrological characteristics of Ichinomega

佐津川 貴子<sup>1\*</sup>, 道林 克禎<sup>1</sup>, Marguerite Godard<sup>2</sup>, Sylvie Demouchy<sup>2</sup>

SATSUKAWA, Takako<sup>1\*</sup>, MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1</sup>, GODARD, Marguerite<sup>2</sup>, DEMOUCHEY, Sylvie<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学・理・地球, <sup>2</sup> モンペリエ第2大学

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Geosciences Montpellier, Universite Montpellier II

This study deals with the microstructural development in the uppermost mantle associated with melt/fluid rock interactions in peridotites induced by the back-arc spreading. We have studied spinel peridotite xenoliths from Ichinomegata volcano, back-arc region of Japan Islands. The mineral chemistry shows a typical residual trend, depleted in LREE. Their strong Th-U positive anomaly indicates a possible metasomatic origin associated to the subduction of the Pacific plate. Water contents in olivine and pyroxenes were low, which values are in the same range of spinel peridotite xenoliths sampling the continental lithosphere. Olivine CPO are consistent with slip on (010)[100] and {0kl}[100]. Moreover, the peridotite xenoliths have distinct foliations defined by the compositional layers between olivine-rich and pyroxene rich layers as well as lineations defined by mineral shapes of olivine and pyroxene. The angles between the foliations and the olivine slip planes decrease with increasing J-index values (i.e. CPOs strength). Such composite planar relationships could result from shearing in the uppermost mantle, so that shear strains may be estimated by the angles between the foliation and the olivine slip plane in terms of simple shear strain. As a consequence, we argue that a suit of the peridotite xenoliths recorded a rare snapshot of the uppermost mantle flow related to back-arc spreading during the opening of Japan Sea. Moreover, the peridotites xenoliths with higher J-index values (higher shear strain) tend to have lower minimum temperature, indicating that a vertical strain gradient could take place from upper to lower in the uppermost mantle section.

キーワード: かんらん石, かんらん岩, ファブリック, 背弧拡大, 上部マントル, マントルダイナミクス

Keywords: olivine, peridotite, fabric, back-arc spreading, upper mantle, mantle dynamics

## フォルステライト異方粒成長がクリープ下での結晶軸配向に与える影響 Influence of anisotropic grain growth on development of lattice preferred orientation of forsterite

宮崎 智詞<sup>1\*</sup>, 平賀 岳彦<sup>1</sup>, 吉田 英弘<sup>2</sup>

MIYAZAKI, Tomonori<sup>1\*</sup>, HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>, YOSHIDA, Hidehiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 物質材料研究機構

<sup>1</sup>ERI, <sup>2</sup>NIMS

地球内部の流動によって、マントルを構成する鉱物が異方的に配向 (LPO) をすることが知られ、地震波速度の異方性を生む原因の一つと考えられている。一般に、変形下での鉱物結晶の選択配向は、鉱物の変形メカニズムの一つである転位クリープ下で形成されると考えられ、変形した岩石中の鉱物に選択配向が見られない場合は、拡散クリープで変形したと通常推定される。

本研究では、フォルステライト + ダイオプサイド (1 ~ 40vol %) の鉱物多結晶体を大気圧・高温下 (1200 ~ 1350 °C)、 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の歪速度で変形させた (歪最大 90 %)。電子線後方散乱回折 (EBSD) パターン解析によるフォルステライト結晶方位の測定により、圧縮試験ではフォルステライトの b 軸が圧縮軸に揃うこと、引張試験では a 軸が引張方向に揃うことがわかった。また、歪速度 - 応力関係により拡散クリープでの変形が確認できた。粒成長実験も同時に行い、その実験後の試料解析により、フォルステライトの長軸が a 軸に平行になる傾向が分かった。本発表では、結晶の異方粒成長と LPO の関係について、粒成長実験・変形実験から得られた結果に基づいて議論する。



## 下部マントル条件での (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-ペロブスカイトの変形実験 Deformation experiments of (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-Perovskite at the lower mantle conditions

辻野 典秀<sup>1\*</sup>, 西原 遊<sup>2</sup>, 瀬戸 雄介<sup>3</sup>

TSUJINO, Noriyoshi<sup>1\*</sup>, NISHIHARA, Yu<sup>2</sup>, SETO, Yusuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学・地球惑星科学科, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>GRC, Ehime University, <sup>3</sup>Kobe University

The Earth's lower mantle is thought to be consisting of ~77 vol% (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-perovskite (Pv), ~16 vol% ferropericlase and ~8 vol% CaSiO<sub>3</sub>-perovskite in pyrolite model. In the uppermost and lowermost lower mantle, presence of seismic anisotropy has been reported. The anisotropy may be produced by lattice preferred orientation of the majority phase Pv. Thus, knowledge of slip system of Pv is important for understanding of rheology in the lower mantle.

Shear deformation experiments at the lower mantle conditions were conducted using Kawai-type apparatus triaxial deformation (KATD) at Tokyo Institute of Technology. Dense aggregates of synthetic (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>- orthopyroxene (Mg# = 0.97) was prepared as starting material using Kawai-type multi anvil apparatus at 2 GPa and 1273 K. The shear deformation assembly consists of a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped MgO pressure medium with 7 mm edge length and a cylindrical LaCrO<sub>3</sub> furnace. Temperature was estimated from power-temperature relationship in a similar cell assembly. Pt foil is placed at the back of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston to assist sideslip of the piston, and Ni foil placed at the center of sample is used as strain marker. Undeformed runs, which were not deliberately deformed by the differential rams, were quenched after phase transitions and relaxation of stress at 25 GPa and 1873 K. In deformation runs, samples were deformed by moving differential rams in the guide blocks each 75 μm (total 150 μm) during 1 h after the annealing process (for 30 min or 1 h).

Lattice preferred orientation (LPO) of sample was determined using 2D-Xray diffraction patterns of sample. The 2D-Xray diffraction patterns were measured using Imaging plate in the SPring-8 (BL04B1). Analysis of LPO was conducted by the software "ReciPro".

Strains of undeformed and deformed recovered samples measured from rotation of strain marker were ~0.4 ± 1 and ~1.3 ± 1, respectively. Then total strains of samples during deformation process in deformation runs are calculated to be ~0.9 ± 1. Average strain rates of sample are  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . LPO of perovskite in shear deformation experiments developed greatly in comparison with that at undeformed experiment. The results suggest that main slip system of Pv at 25 GPa and 1873 K is [100](001).

キーワード: 下部マントル, 変形実験, (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-ペロブスカイト

Keywords: Lower mantle, Deformation experiments, (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>-Perovskite

## 25 GPaにおけるアルミナスペロフスカイト中のSiとMgの拡散 Si and Mg diffusion in aluminous perovskite at 25 GPa

下宿 彰<sup>1\*</sup>, 久保 友明<sup>2</sup>, 加藤 工<sup>2</sup>, 芳野 極<sup>1</sup>, 山崎 大輔<sup>1</sup>, 中村 智樹<sup>3</sup>, 岡崎 隆司<sup>2</sup>, チャクラボルティー スーミット<sup>4</sup>  
SHIMOJUKU, Akira<sup>1\*</sup>, KUBO, Tomoaki<sup>2</sup>, KATO, Takumi<sup>2</sup>, YOSHINO, Takashi<sup>1</sup>, YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>, NAKAMURA,  
Tomoki<sup>3</sup>, OKAZAKI, Ryuji<sup>2</sup>, CHAKRABORTY Sumit<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>2</sup> 九州大・理, <sup>3</sup> 東北大・理, <sup>4</sup> ルール大学ポーフム校

<sup>1</sup>Okayama Univ., <sup>2</sup>Kyushu Univ., <sup>3</sup>Tohoku Univ., <sup>4</sup>Ruhr Univ. Bochum

Silicate perovskite is thought to be a major constituent mineral in the lower mantle. In order to understand rheological properties of the lower mantle, it is essential to determine the diffusion rates of the slowest diffusing species which control high-temperature creep processes involving diffusion creep and climb-controlled dislocation creep. It has been reported that Si diffusion rates in MgSiO<sub>3</sub> perovskite and Mg-Fe interdiffusion rates in (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> perovskite are almost comparable (Yamazaki et al., 2000; Holzapfel et al. 2005). In addition, O diffusion rates in MgSiO<sub>3</sub> perovskite are faster than Si diffusion and Mg-Fe interdiffusion rates (Dobson et al. 2005). Thus, Si or Mg is a candidate for the rate-controlling species in perovskite. In this study, we determined Si and Mg diffusion rates simultaneously in (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite by utilizing <sup>25</sup>Mg and <sup>29</sup>Si enriched (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> thin film as diffusion source. Based on the result, we discuss the rate-controlling species in (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite and rheological properties in the lower mantle.

High-temperature and high-pressure experiments were performed using a Kawai-type high-pressure apparatus. Starting material of polycrystalline (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite was synthesized from San Carlos orthopyroxene powder at 25 GPa and 1973K. Surface of the polycrystalline perovskite was polished and then coated with <sup>25</sup>Mg and <sup>29</sup>Si enriched (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> thin film using pulsed laser deposition (Dohmen et al. 2002). Diffusion experiments were conducted at 25 GPa and 1773-2073K. After the diffusion experiments, concentration profiles of <sup>25</sup>Mg and <sup>29</sup>Si were obtained by the depth-profiling mode using secondary ion mass spectrometry.

It was found that Si and Mg diffusion rates in (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite are almost comparable under our experimental conditions. Thus, Si and Mg are likely to be rate-controlling species in (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite. Si and Mg diffusion rates in (Mg,Fe)(Si,Al)O<sub>3</sub> perovskite could be slightly slower than previously reported Si diffusion rates in MgSiO<sub>3</sub> perovskite.

キーワード: ペロフスカイト, 下部マントル, 拡散, レオロジー

Keywords: perovskite, lower mantle, diffusion, rheology

## Predictions of the shear response of Fe-bearing MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite at lowermost mantle pressures

## Predictions of the shear response of Fe-bearing MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite at lowermost mantle pressures

Arnaud Metsue<sup>1\*</sup>, Taku Tsuchiya<sup>1</sup>

METSUE, Arnaud<sup>1\*</sup>, TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center Ehime University

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center Ehime University

Observation of seismic data put in forth evidence of a spatial anisotropy in the seismic wave velocities in the D'' layer, the lowermost part of the mantle. (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> post-perovskite (PPv) is thought to be the most abundant phase in this part of the mantle. This mineral exhibits a strong elastic anisotropy and may contribute significantly to the seismic anisotropy in the D'' layer. However, the seismic anisotropy cannot be expressed at the rock scale if the orientations of the grains are distributed randomly. Consequently, the formation of lattice preferred orientations with an anisotropic mechanism of plasticity, such as dislocation creep, can cause the seismic anisotropy in the D'' layer. Some experiments have been done on the plasticity of pure and Fe-bearing MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite and lead to textures of deformation dominated by the (100) and (110) slip planes (Merkel et al., 2007) or by the (001) slip plane (Miyagi et al., 2010). On the other hand, theoretical calculations on the dislocations mobility on pure MgSiO<sub>3</sub> (Carrez et al., 2007; Metsue et al., 2009) suggested a texture dominated by the (010) slip plane. A first step to understanding the mechanisms of plasticity and, therefore, the shear wave splitting occurring in the deep Earth is to test the response of the PPv phase to a plastic shear in a geophysical relevant composition.

In this study, we present new results from first-principles calculations on the shear response of pure and ferrous Fe-bearing MgSiO<sub>3</sub> PPv. The originality of this work is the use of internally consistent LSDA+U formalism to accurately describe the local interactions between the d-states of Fe. About 8% of Fe<sup>2+</sup> is incorporated in the high spin and low spin states, as a Mg substitution defect, to test if a spin transition could be induced by shearing mechanisms, even several studies report that Fe<sup>2+</sup> is in the high spin in the D'' layer pressure range (Stackhouse et al., 2006; Metsue and Tsuchiya, 2011). The response of the PPv to a plastic shear is investigated at 120 GPa through the calculations of the Generalized Stacking Faults (GSF) energy in pure and Fe-bearing systems for 10 potential  $\langle uvw \rangle \{hkl\}$  slip systems, since these latter are not well constrained for the PPv phase. The GSF energies are obtained by shearing homogeneously half of an infinite crystal over the other half for every slip system and give the value of the ideal shear stress (ISS), which can be defined as the theoretical elastic limit of the crystal. The [100](001) slip system in pure and Fe-bearing phases exhibits the lowest ISS and may play an important role in the plastic deformation of the PPv phase. The activation of this slip system is compatible with the observed shear wave splitting  $V_{SH} > V_{SV}$ . We show that incorporation of Fe decreases the GSF energy and the ISS of all slip systems. In particular, the decreasing of the energy of stable stacking faults indicates that Fe tends to be adsorbed in the stacking faults, which increases the width of the defect and could have some implications on deformation mechanisms. Finally, we discuss the plastic anisotropy of pure and Fe-bearing phases from the values of the ISS and the orientation of applied tensile stress. Our results suggest that the incorporation of ferrous Fe in the PPv phase has a limited effect on its plastic anisotropy, and, therefore, on the deformation texture.

キーワード: MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite, stacking faults, deformation mechanisms

Keywords: MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite, stacking faults, deformation mechanisms

## 球状のテクトニックブロックの成因について Deformation mechanism of spherical/elliptical sandstone bodies

後藤 繁俊<sup>1\*</sup>

GOTO, Shigetoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 株式会社九州土木設計コンサルタント

<sup>1</sup> Kyushu Civil Engineering Co., Ltd.

宮崎県に分布する四万十累層群中には、逆断層の上盤側において、球状のテクトニックブロック（砂岩が主体で直径10cm前後～10m）や数cm～数10cmの紡錘形の砂岩レンズが形成されることがある。これらのテクトニックブロックはその形状やプレッシャーシャドウの存在から、規模の大きい組織、組織と考えられる。組織と考えられる球状のテクトニックブロックは、硬質で周辺の泥質岩とのダクティリティコントラストが大きい。一方、組織と考えられるレンズ状の砂岩は周辺の泥質岩よりやや硬い程度でダクティリティコントラストは小さい。

このうち、球状のテクトニックブロックの外殻は、内殻より硬くなっていることが多く、外殻には風化変色のゾーニングが見られたりすることから、外殻は熱によって変成していると考えられる。このため、ブロックのうち最も大きいもの（直径10m）の外殻部をサンプリングして薄片を作成し、鏡下で観察した。その結果、最も外側の幅数mmの範囲で、石英粒子が融解流動していることが判明した（以下の写真参照）。また、ほかの球状のテクトニックブロック（遠洋性泥質岩；直径12cm）でも外殻部に圧力溶解によると考えられる様々なへき開（S-C構造、styloliteなど）や温度変化に伴って生じたゾーニングが鏡下で観察された（英文の写真参照）。石英粒子が融解している部分は数mmと薄く、圧力溶解によるへき開が見られる範囲も外縁から数cmの範囲であったものの、C面に対して30°斜交するS面の存在は両薄片で観察された。これは、球状のテクトニックブロック（直径10m）の周辺の泥質岩に見られる様々な方向のせん断断面（S面又はP面）の交わる最小角度とほぼ一致する。よって、球状のテクトニックブロックが形成される脆性-延性領域はC面とS面が30°で交わるような温度-圧力環境であるといえる。

球状のテクトニックブロックの周辺の泥質岩には、ブロックの直径程度の幅でS-C構造、デュプレックス、リーデル線せん断面などが発達していることが多く、ブロックとの境界部では、泥質岩が石墨質となり、油脂状光沢のあるスリッケンサイドが見られ、ピトリナイト反射率も高くなっている。また、球状のテクトニックブロックは比較的整然とした地層中に存在するという特徴がある。

これらのことから、球状のテクトニックブロックの形成時には、ブロックの周辺でのみ特殊なレオロジー転移が生じると考えられる。つまり、整然層中の一部に変形が集中して、硬質な砂岩がせん断され、ブロックとなり、その後、周辺の泥質岩の流動性の変形でブロックとの境界付近で摩擦熱が生じて、ブロックと泥質岩との境界面では粒子の摩擦融解が生じたと考えられる。

よって、球状のテクトニックブロックの成因は、地震断層の上盤側において、一時的に局所的な変形が集中し、その部分でレオロジー転移が生じて脆性-延性領域（S-C構造の発達する横ずれの擬似マイロナイト形成場）が形成され、より硬質なブロックの周辺で泥質岩の変形が進行し、30°ほど角度の異なるS面の回転がブロックの周囲で次々に起こるようなすべりによりブロックとの境界部で石英粒子が融解するほどの摩擦熱が生じて、ブロックが丸く切り取られたと推定される。

以上より、球状のテクトニックブロックは、地震時の断層運動によって形成された可能性があるといえる。

また、西都市と西米良村を結ぶ国道219号線沿いには、四万十累層群の屈曲（人吉屈曲）軸方向（北西南東方向）に発達する右横ずれ断層群に伴う変形構造〔デュプレックス、構造的円摩を受けたテクトニックブロック（直径10cm前後）、インプリケートしたレンズ状の厚層砂岩（厚さ3m～5m）など〕が多く観察される。このことは、右横ずれの変位に伴って、レオロジー転移による脆性-延性領域が横ずれ断層沿いに形成されたことを示している。よって、横ずれの規模はかなり大きいことが推定される。

また、この右横ずれ断層の南東側（西都市山手）では、背斜軸と向斜軸が繰り返す構造的な褶曲がみられるため、圧縮テクトニクス場が形成されたと考えられる。一方、北西側（椎葉村の南部、市房山周辺）では、正断層群が形成されているので、右横ずれ断層の変位によって伸張テクトニクス場が形成されたと考えられる。そして、この伸張テクトニクスにより、中新世中期の市房山花崗閃緑岩の貫入が誘発された可能性がある。

このように、レオロジー転移は、付加体の造構運動に深くかかわっている可能性がある。

キーワード: S-C構造, 摩擦溶解, レオロジー転移

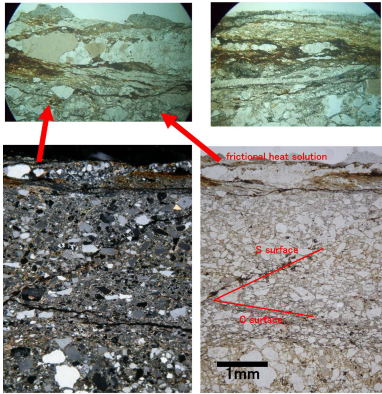
Keywords: S-C structure, friction solution, rheology transition



SIT42-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月22日 17:15-18:30



Spherical tectonic block 10m in diameter  
(sandstone)

## 柱状節理の entablature の形成要因について ~ アナログ実験からの示唆 ~ Factors controlling entablature formation in columnar joints: Suggestions from the analogue experiments

濱田 藍<sup>1\*</sup>, 寅丸 敦志<sup>2</sup>

HAMADA, Ai<sup>1\*</sup>, TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 九大・理・地惑, <sup>2</sup> 九大・理院・地惑

<sup>1</sup>Earth and Planet. Sci., Kyushu Univ., <sup>2</sup>Earth and Planet. Sci., Kyushu Univ.

溶岩流や溶結凝灰岩に発達する柱状節理には、1つのフローユニットにおいて主に2つの形態が観察される。1つは柱の幅が比較的大きく直線的でその配列が規則的な構造を持つ colonnade(コロネード)。もう1つは柱の幅が比較的小さく曲線的でその配列が不規則的な構造を持つ entablature(エンタブラチャー)である。一般的に柱状節理(colonnade)は、冷却中の岩体の体積収縮に伴い岩体内部に蓄積される応力が解放される際に、岩体の等温面に対して垂直にクラックが生じ、それが段階的に伸展していくことで形成される。しかし、entablatureについてはその複雑な構造への遷移が岩体の等温面に関係づけられるのか、冷却中の岩体に何が起ってそのような構造的な遷移が生じたのか、明らかになっていない。天然で観察される柱状節理とデンプンと水の混合物を乾燥させて得られる乾燥節理は類似しており、両者に共通して拡散現象(岩体における熱の拡散および混合物中の水の拡散)と体積の収縮が関わっている。これまでの実験では、colonnadeの形成過程の再現は行われたが、entablatureの形成過程の再現については行われていない。そこで本研究では、先行研究で行われた実験を参考にしながら、いくつかの条件を変えて実験を行い、entablatureの形成過程の再現を試みることを目的とする。混合物の乾燥速度は、混合物上方から照らすランプと混合物表面の距離を調節することで変化させる。実験1:混合物から水が上下両方に蒸発できるようにし、ランプと混合物表面の距離を10cmで一定とした条件で乾燥が進むとcolonnadeが混合物の上端と下端から発達することを確認した。実験2:実験1の条件の下で、colonnadeが途中まで伸展したときに、ランプと混合物表面の距離を10cmから1.5cmに変えて急に乾燥速度を大きくすると、乾燥速度増加前までに発達した構造と増加後に発達した構造の間には構造的な不連続面が観察され、さらに乾燥速度増加後に形成された柱状節理には、容器の周縁部に向かって曲がった構造があることが観察された。実験2の結果について、マイクロフォーカスX線CT解析装置(テスコ製,分解能は119μm,福岡県工業技術センター所有)による連続撮影を行った結果、次のことが分かった。1)乾燥速度増加後には割れ目の数が増加する。2)乾燥速度増加後、既存のコラムの幅が小さくなる。3)乾燥速度増加前のコラムどうしが接してつくる3重点もしくは4重点の部分に、新しいコラムが形成される。実験3:ランプと混合物表面の距離を最初から1.5cmで一定とし、途中まで乾燥の進んだサンプルのX線CT撮影を行ったところ、混合物に発達するクラックは、水の濃度の空間分布に対して垂直に発達していることが分かった。これらの観察事実より、乾燥速度増加後のコラムの数の増加は、蓄積された応力を解消するために新たなコラムを形成し、これに伴って乾燥速度増加前に形成されていたコラムの幅が小さくなったことによると考えられる。また乾燥速度増加後に発達した曲がった構造は、混合物中の水の濃度不均一が割れ目の伸展方向に関係してできたものだと考えられる。このことから天然の柱状節理のentablatureの成因は、岩体の温度分布の不均一である可能性が実験により実証できた。結果3)において新しいコラムの形成過程として、1)既存のコラム内に新しく割れ目が形成されて複数のコラムに分かれる場合、2)3重点もしくは4重点に新しいコラムの核が形成される場合の2つが考えられたが、従来のCT装置の分解能では判別が難しく、どちらか分からなかった。そこで結果3)をより詳細に観察するために、超高分解能産業用3次元X線顕微鏡VersaXRM-500(米国Xradia社製 国内販売総代理店:キヤノンマーケティングジャパン株式会社)を用い、3.76μmの分解能での撮影を行った(キヤノンマーケティングジャパン所有)。その結果、クラックがつくる3重点もしくは4重点付近ではコラムの核形成が起っていることを確認できた。

キーワード: 柱状節理, アナログ実験, 割れ目, 形成過程, マイクロフォーカスX線CT解析装置, 3次元X線顕微鏡

Keywords: columnar joint, analogue experiment, crack, formation process, Micro-focus X-ray CT, 3D X-ray Microscope

## マグマ流動の不安定性を引き起こすレオロジー的性質 Rheological Characteristics Leading to Magma Flow Instability

黒川 愛香<sup>1\*</sup>, 栗田 敬<sup>1</sup>

KUROKAWA, Aika<sup>1\*</sup>, KURITA, Kei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

During volcanic eruptions alternate transitions between two contrasting states are known to generate oscillatory phenomena. Switching between tremor stage and non-tremor stage and periodic transition between eruption stage and quiescent doom growth stage are typical examples. These should reflect dynamics of magma inside volcanoes, which gives us indispensable information about physics of volcanic eruption. One of the main causes for this transition is instability due to double-valued relation between flow rate and driving pressure. It indicates that two flow rates exist at one pressure and jump between two states causes transition. The origin of this double-valued nature of magma flow has not been clarified yet though volatile-dependent viscosity is suggested. To figure out the dynamics of this transition and physical origin of the double-valued relation, rheology of magma should be a key. Similar phenomenon is known as spurt in the fields of polymer science. It is controlled by a jump of flow rate due to the wall friction controlled by the double-valued relation of stress and strain rate. In this phenomenon an abrupt increase in flow rate under certain range of driving pressure is observed.

We focus on rheology of suspension and explore the possibility of the rheology, which has the double-valued nature. In this study PNIPAM aqueous suspension was used as an analogue material of multiphase magma. Since the volume fraction of PNIPAM systematically changes with the concentration of gel powder and temperature, it is possible to measure change of rheology continuously associated with change of the fraction of solid phase. By experiments with controlled shear rate, we revealed the double-valued relation in shear stress and shear rate at certain range of volume fraction of the solid phase. We would like to remark magma has a similar characteristic rheology, which can explain volcanic oscillatory phenomena. This work was collaborated with E.D Giuseppe and A. Davaille.

Keywords: Magma, Rheology, PNIPAN, Instability, Complex fluid

## 黒色断層岩はなぜ黒いのか? -断層帯における鉱物濃集と結晶度変化- Why the black fault rocks appear black color? -Enrichment and alteration processes of minerals in the fault zones-

大橋 聖和<sup>1\*</sup>

OOHASHI, Kiyokazu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University

断層帯中軸部(断層コア)に分布する著しく粉砕された断層岩は、しばしば黒色を呈する(例えば中央構造線、棚倉構造線、跡津川断層系、チェルンプ断層)。しかしながら、溶融性のシュードタキライトを除いては、なぜ黒色断層岩が黒色を呈するのか体系的に明らかとなっていない。岩石の色は主にその“状態”に起因する場合と“物質”(特定の鉱物あるいは元素)に起因する場合の二つに大別することができるが、これらを明らかにすることで、断層帯中軸部での共通する重要なプロセスを見いだせる可能性がある。大橋・青木(2006)は、跡津川断層系、阿寺断層、棚倉構造線などを対象に、黒色断層岩の微量構成鉱物と可視光の反射特性を比較し、多くの場合において炭素鉱物が含まれることを明らかにした。また、炭素鉱物の結晶度とバルク断層岩の光学的特性に関連があることを指摘した。しかしながら対象とした断層は必ずしも網羅的とは言えず、すべての黒色断層岩共通のプロセスを見いだしたとはいえない。そこで本発表では中央構造線安康露頭、岩国断層、下円井断層などの黒色断層岩を含めてこれまでのデータを再検討し、黒色断層岩の着色要因をまとめる。また、炭素鉱物が含まれる断層については、断層帯中軸部での結晶度バリエーションと変形度・活動度との関連性、そして濃集プロセスについて議論する。

[謝辞]

中央構造線安康露頭での試料採取に際し、大鹿村中央構造線博物館の河本和朗氏にご協力いただきました。記して感謝申し上げます。

[引用文献]

大橋・青木, 2006, 黒色断層ガウジはなぜ黒いのか?: グラファイトの地球化学と物質科学に向けて. 日本地質学会学術大会講演要旨 113, 91.

キーワード: グラファイト, 炭素, 黒色断層岩, 元素移動

Keywords: Graphite, Carbon, Black fault rock, Elemental mobilization



## 速度状態依存摩擦法則におけるレオロジー転移 Rheological crossover within the framework of rate- and state-dependent friction

波多野 恭弘<sup>1\*</sup>

HATANO, Takahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研

<sup>1</sup>ERI, University of Tokyo

真接触パッチにおける(メソレベルの)構成法則から出発して速度・状態依存摩擦法則を導出した。結果として、経験的パラメータ  $a, b, L$  の原子論的表式が得られる。ここではそれらの表式に基づいて定常状態摩擦の速度依存性について論じる。まず、すべりとヒーリングが同じクリープ機構によって起こっている場合は負の速度依存性が得られることがすぐに分かる。従って正の速度依存性は、ヒーリングがすべりとは異なる原子論的機構に支配されていることを意味する。ここではその一例として圧力溶解を取り上げ、摩擦係数の速度依存性について定量的な議論を行う。

キーワード: 速度状態依存摩擦, クリープ, 圧力溶解

Keywords: rate- and state-dependent friction, creep, pressure solution

## 剪断変形による低温域における石英単結晶のLPO発達

## LPO development of single crystals of wet synthetic quartz sheared at low temperature

金子 英亮<sup>1\*</sup>, 武藤 潤<sup>1</sup>, 長濱 裕幸<sup>1</sup>KANEKO, Hideaki<sup>1\*</sup>, MUTO, Jun<sup>1</sup>, NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup><sup>1</sup> 東北大・理・地圏<sup>1</sup> Inst. Geol. Paleontol., Tohoku Univ.

剪断帯は岩石の変形の進行に伴うひずみ軟化によって発達し、そのメカニズムの一つに、結晶がより変化しやすいすべり系に向きを変える幾何学的軟化がある (Takeshita and Wenk, 1988 Tectonophysics)。幾何学的軟化は、格子定向配列 (Lattice Preferred Orientation: LPO) の発達を伴い起こり、LPO の発達は動的再結晶に密接に関わっている。

地殻を構成する主要構成鉱物である石英の動的再結晶機構は、温度の上昇とひずみ速度の低下に伴って regime1-3 に分けられる (Hirth and Tullis, 1992 JSG)。石英の c 軸 LPO は温度の上昇、ひずみの増加に伴って、クロスガードル LPO (basal<a>すべりが卓越) から Y 集中 LPO (prism<a>すべりが卓越) に変化する (Toy et al., 2008 JSG; Heilbronner and Tullis, 2006 JGR; Muto et al., 2011 JGR)。

Heilbronner and Tullis (2002 GSL Spec. Publ.) は Hirth and Tullis (1992) の regime1-3 の範囲で剪断変形を行い、各々の regime での LPO の変化を調べた。regime1 での c 軸 LPO は幅の広い非対称の一極集中を示し、わずかに剪断センスと逆に回転している。regime2 での c 軸 LPO は非対称の一極集中を示し、剪断センスと同じ方向に回転している。regime3 のうち、小歪での c 軸 LPO は剪断センスに沿って円周部に集中しており、大歪での c 軸 LPO は Y 軸への一極集中を示す。

Heilbronner and Tullis (2006) は、Regime 3 に相当する高温域での剪断変形実験から、動的再結晶させ、剪断ひずみの増加と再結晶度合いの増加に伴う c 軸 LPO の変化について調べた。c 軸 LPO は basal<a>すべりに対応する歪楕円の Z 軸集中から、prism<a>すべりに対応する Y 集中 LPO へと発達する。

Muto et al. (2011) は、動的再結晶による LPO の発達と、LPO の発達が石英の流動強度に与える影響を詳細に調べるために、含水量の高い人工石英単結晶を用いて剪断変形実験を行った。石英単結晶を用いることで異なる 3 つすべり系 (basal<a>, prism<a>, prism[c]) を任意で活動させることができ、ひずみ量の増加につれてすべり系の活動と動的再結晶の経過を評価した。石英の全てのすべり系において、中から高ひずみにおいて、いずれの方位でも完全に再結晶し、再結晶粒の c 軸 LPO は Y 集中 LPO を示した。この実験条件下では一番強度が弱いのは prism<a>すべり系である。Y 集中 LPO が幾何学的軟化をもたらすと結論づけた。

Heilbronner and Tullis. (2002, 2006) は天然の石英岩の変形で regime1-3 の各領域をカバーする変形実験を行い、Muto et al. (2011) は人工石英を用いて regime3 の領域に注目して変形実験を行なっている。多結晶体を用いた変形実験では再結晶のプロセスがわかりづらい。石英単結晶を用いることで実験開始時に試料の結晶方位を設定でき、開始時の方位と再結晶粒の方位の関係を詳細に決定できる。本研究ではこれまで行われておらず天然の緑色片岩相の変形岩に見られる歪結晶粒回転が優勢な再結晶機構条件において、人工石英単結晶を用いて、Griggs 試験機で剪断変形実験を行う。

実験は東北大学設置の Griggs 試験機を用い、封圧 1.5GPa, 温度 600~700℃, 剪断ひずみ速度 10-5/s の条件で定ひずみ速度実験を行なっている。試料は basal<a>, prism<a>, prism[c] を活動させるようにコアを抜き、1.5mm 厚にカットした石英単結晶を用いる。試料を主応力軸に対し 45° に切断したアルミナピストンに挟み、剪断変形させる。変形前に FTIR を用いて含水量を測定し、含水量は 400~1300ppm H/Si である。変形後の試料の XZ 面を薄片にして、微細構造観察と EBSD を用いた方位測定を行なう。basal<a>, prism<a>, prism[c] 試料のひずみ量を系統的に変化させた場合、ひずみの増加に伴ってどのように LPO が発達していくか調べる。

差応力 140MPa, 剪断歪  $\gamma \sim 0.7$  まで変形した初期方位 basal<a> 試料は、再結晶せず、非再結晶部の c 軸 LPO は、剪断センスと同じ方向に 35° 回転する。差応力 550MPa,  $\gamma \sim 2.5$  まで変形した初期方位 basal<a> 試料は、 $\gamma \sim 1$  で降伏後も  $\gamma \sim 2.5$  までひずみ硬化を示した。非再結晶部の c 軸 LPO は、剪断センスと同じ方向に Z 軸上から 90° 回転し、X 軸上まで円周部に分布している。これは、剪断に伴い結晶格子が 90 度回転することにより、basal<a> と直交する prism[c] にも剪断応力がかかり、ひずみ硬化したとすると調和的である。 $\gamma \sim 2.5$  まで変形した prism<a> 試料は  $\gamma \sim 0.5$  で降伏後、歪硬化せず、差応力 300MPa で定常流動状態を示した。発表では prism[c] を含む 3 方位のひずみ量を系統的に変化させた場合、ひずみ量と強度、LPO の変化の関係を示す。

## 人工アノサイト多結晶体の変形実験：水の効果 Deformation experiment on synthetic polycrystalline anorthite: effect of water

福田 惇一<sup>1\*</sup>, 武藤 潤<sup>1</sup>, 長濱 裕幸<sup>1</sup>  
FUKUDA, Jun-ichi<sup>1\*</sup>, MUTO, Jun<sup>1</sup>, NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University

長石は石英と並び地殻に多く存在し、主として中部-下部地殻におけるレオロジーは長石のそれに代表される。従って、長石の変形機構について、天然試料の分析と変形実験から調べられてきた。一般に物質の塑性変形は、粒径依存型クリープ(転位クリープ)と粒径非依存型クリープ(拡散クリープまたは粒界すべり)に大別され、前者の変形は格子定向配列(LPO)を示し、後者はLPOを示さない。長石の場合、これら二種のクリープの遷移条件は、粒径が15-70 μmで起こると実験的に予想されており、温度、応力条件に加えて、含水量に大きく依存することが報告されている(Rybacki and Dresen 2004, Tectonophysics にレビュー)。

一般に、天然試料は長い地質学的時間を経験しているため、特に含水量の効果に関して、天然試料の分析からでは真に変形条件下での含水量を保持しているかどうかの判別は困難である。また、外部から系へ水が導入されるとき、含水量に応じて、脆性塑性変形遷移も含めた変形機構の変化、変形の促進などが期待されるが、これらの関係性は実験によってのみ構築される。

Stunitz et al. (2003, Tectonophysics) は固体圧(Griggs型)試験機を用い、温度900℃、封圧1 GPaで、長石単結晶試料に外部から水をドープし変形実験を行った。彼らの単結晶の例では、長石単結晶内部への水の体拡散は遅く、水は変形に寄与しないと結論づけている。一方、多結晶体の場合は、物質の高速拡散経路である粒界を伝って、試料内部へ水が容易に拡散し、これに伴う溶液-沈澱が、石英(Vernooij et al. 2006, Tectonophysics) や長石(Heidelbach et al. 2000, JSG) について、粒子形状、溶液-沈澱に支配されたLPOの発達から示唆されている。しかしながら、上述の先行研究では、含水量の定量的な測定、つまり何ppmの水(結晶構造中に保持されたOH、または粒界や流体包有物として保持されたH<sub>2</sub>O)がいかなるクリープ機構を促進し、レオロジー特性がどのように変化するかを追求していない。

上述の先行研究を踏まえて本研究では、中部-下部地殻条件下、外部からの水の導入、長石多結晶体に焦点を当て、次のような実験を行った。固体圧変形試験機を用い、温度を950℃まで、封圧を1 GPaまでで剪断変形実験および一軸圧縮変形実験を行った。実験試料として、アノサイト100の組成を持つ細粒ガラス粉末(粒径が<5 μm程度)を1400℃で4時間真空焼結することによって、<5 μm程度のアノサイト多結晶体を作成し、変形実験の出発試料とした。この試料は1 μmまでの空隙を含み、後方電子散乱回折(EBSD)測定により、ランダムな結晶方位であることを確認した。また、赤外分光法測定では水の吸収帯を示さずドライである。試料中へのH<sub>2</sub>Oのドープは蒸留水の添加またはパイロフィライト粉末の脱水をH<sub>2</sub>Oの供給源とした。実験回収試料薄片の偏光顕微鏡観察から、剪断変形実験試料、一軸圧縮変形実験試料ともに、石膏検板下で試料端から300 μm程度までに干渉色の集中が見られ、LPOの発達を示唆している。また、この領域では、実験前試料に見られた空隙が認められなかった。実験回収試料について赤外分光測定を行ったところ、特に試料端ではゾイサイトの水の吸収帯を示すことが確認され、試料端から300 μmまでに徐々に減少していった。上述したLPOの発達、ゾイサイトの水の吸収帯分布は、水を試料へ導入することによって、差応力下で水の導入に伴い塑性変形が進行し、さらに長石と水が反応し、ゾイサイトが生成したことを示唆する。さらに、本発表では、水の導入とクリープメカニズムをEBSD測定や、粒子形態から推察し、含水量分布と変形機構の関係性についての定量化を目指す。

キーワード: アノサイト, 水の導入, Griggs型変形試験機, EBSD分析, 赤外分光法

Keywords: anorthite, water introduction, Griggs deformation apparatus, EBSD analysis, infrared spectroscopy

高緻密・極細粒斜長石多結晶体の合成  
FABRICATION OF HIGHLY DENSE AND FINE-GRAINED POLYCRYSTALLINE  
ANORTHITE BY VACUUM SINTERING

小泉 早苗<sup>1\*</sup>, 平賀 岳彦<sup>1</sup>

KOIZUMI, Sanae<sup>1\*</sup>, HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

**Introduction:** In laboratory measurements of physical and chemical properties of the earth's lower crust, highly dense polycrystalline aggregates of major constituent minerals such as anorthite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) are required. For precise measurements of these properties, the aggregates should have (1) high density, (2) fine grain size (to escape from cracking during quenching), (3) homogeneous microstructure, (4) controlled sample shape and size, and (5) controlled chemistry. We have developed a technique to synthesize anorthite aggregates which meet the above conditions.

**Experimental:** We used nano-sized powders of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  as starting material to synthesize single phase aggregates of anorthite and, two phase composite of anorthite + diopside and anorthite + quartz. Those powders were mixed to provide a resulting mole ratio of  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , and  $\text{MgO}$  to obtain desired mineral assemblies. Densified aggregates were obtained through the following stages: calcination, forming and sintering. The final materials were characterized with X-ray powder diffraction (XRD) and secondary electron microscopy (SEM).

**Results and Discussion:**

*Anorthite:* Calcination was conducted under temperature of 670-970oC with fixed duration of 30-180 min. Coalescence of the powder was observed > 820oC, which was revealed by SEM. XRD result indicates that decarboxylation of anorthite solid state reaction completes at > 770oC for 90 min. For sintering, a temperature of 1210-1260oC with controlled time can provide essentially full dense aggregates of anorthite with an average grain size of 1.7 micro m and porosity of 0.2 vol%.

*Two-phase materials (anorthite + diopside):* Diopside grains of 10 vol% was introduced to anorthite aggregates. Calcination at 770oC for 30 min and sintering at 1200oC for 50h were found to be the best conditions so far to synthesize highly dense aggregates. Average grain sizes of 1.6 micro m and 0.8 micro m were detected for anorthite and diopside grains, respectively. Density of 99.6% was achieved.

**References:** S. Koizumi et al., Phys. Chem. Miner. 37, 505-518 (2010)

キーワード: 下部地殻, 斜長石, 粒径, 焼結

Keywords: lower crust, anorthite, grain size, sintering



## アンチゴライト蛇紋岩の変形強度に対する方位依存性 — 変形実験回収試料の微細組織観察結果 — Anisotropic strength and deformation behavior of antigorite serpentinite

浦田 義人<sup>1\*</sup>, 安東 淳一<sup>1</sup>, 曾田 祐介<sup>2</sup>

URATA, Yoshito<sup>1\*</sup>, ANDO, Jun-ichi<sup>1</sup>, SODA, yusuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 金沢大学フロンティアサイエンス機構

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Frontier Science Organization, Kanazawa University

はじめに 近年の地震波速度の解析から、沈み込み帯付近において蛇紋岩の存在が示唆されている(例えば、Kawakatsu and Watada, 2007)。また、沈み込み帯において海溝に平行な方向に地震波伝播速度異方性が確認されており(例えば、Jeffrey et al., 2002)、この原因を、転位クリープにより塑性変形したアンチゴライト蛇紋岩の格子選択配向(LPO)によって説明する研究例が報告されている(例えば、Mookherjee and Stixrude, 2009)。これらの研究は、アンチゴライトの塑性変形がプレートの沈み込みやウェッジマントルの対流などに対して重要な役割を果たしている可能性を示唆している。しかし現時点では、アンチゴライトの塑性変形特性は十分に解明されていない。

一般に、LPOを示す程に強く塑性変形した岩石には顕著な面構造と線構造が形成される。面構造が発達した片岩では、その塑性変形強度は最大圧縮軸方向に対する面構造の角度(以後、方位角)によって変化する(例えば、Nasseri et al., 2003)。この塑性変形強度に対する方位角依存性を調べた変形実験結果によると、方位角が0°と90°の場合に試料強度は最大となり、30~45°の場合に最小となる。また、方位角による試料強度の変化量は岩石種によって大きく異なる。そこで本研究ではLPOを有し面構造と線構造が発達しているアンチゴライト蛇紋岩を試料として用い、方位角を変化させた変形実験を行い力学強度の把握を行っている。更に、回収試料の微細組織観察を行う事で、アンチゴライト蛇紋岩の塑性変形特性の解明を進めている。

**変形実験** 変形実験に用いた試料は、飛騨外縁帯に露出する八方超苦鉄質岩体を構成するアンチゴライト蛇紋岩である。この試料は、(001)面が面構造に平行に、[010]が線構造に平行に位置するLPOを示す(Watanabe et al., 2011から引用)。この試料から、方位角が0°、30°、90°となる様な直径約5mm、高さ約8mmの円柱をくり抜いて実験試料とした。また、0°と30°の試料に関しては線構造が最大剪断応力方向に平行になる様に作成している。実験は広島大学理学研究科に設置されている固体圧式変形実験装置を用いて、約 $1.7 \times 10^{-5}$ /sの定歪速度実験を行った。温度と圧力の条件はそれぞれ、500℃、1GPaである。

**結果** 0°、30°、90°における最大圧縮強度の平均値はそれぞれ、約870MPa、約450MPa、約600MPaである。0°の試料強度は30°の試料強度に比べて約2倍の値を示す。また、0°の試料強度は90°の試料強度よりも大きな値を示す。この結果から、アンチゴライトの塑性変形強度は方位角によって大きく異なる事が分かった。また、ほとんどの実験で変形の最終段階において応力降下が生じた。回収試料の微細組織観察の結果、以下の事が明らかとなった。1)0°と30°の回収試料において顕著なキンク組織が確認された。2)このキンク組織の軸は常に面構造と線構造に対してほぼ直交する方向に発達している。そして、3)キンク組織の軸部分に脆性破壊が生じている。4)90°の回収試料においては、圧縮軸方向に対してほぼ平行な割れ目が無数に発達する。

**塑性変形特性の考察** 変形実験で得られた最大圧縮強度の異方性は、以下の様なアンチゴライトの塑性変形特性によって生じると考察できる。アンチゴライトの塑性変形は(001)面が[010]方向へずべる事で進行する。その際、他の結晶面や他の結晶軸方向へのずべりは生じない。その結果、このずべりが阻害される条件ではアンチゴライトの塑性変形は不均質となり、キンク形成へと進む。このキンクの形成が、変形実験の最終段階に生じた応力降下の原因となる。また、面構造に対して引張り応力が働いている際には(001)面に垂直な割れ目によって容易に破断する。この考察は、アンチゴライトにおいては[010](001)のすべり系の臨界分解剪断応力値が他のすべり系よりも極端に小さい事を示唆しており、アンチゴライトは塑性変形時に von Mises の条件を満たす事が困難となる。従って、アンチゴライト蛇紋岩は転位クリープのみの塑性変形では、大きな歪に至らないと考えられる。

キーワード: アンチゴライト蛇紋岩, 変形実験, SEM, 変形メカニズム

Keywords: Antigorite Serpentinite, Deformation Experiment, SEM, Deformation Mechanism



## マイロナイトにおける鉱物粒の衝突・合体とゼナーピンニング Coalescence and Zener pinning of mineral grains in mylonite

平賀 岳彦<sup>1\*</sup>, 宮崎 智詞<sup>1</sup>, 田阪 美樹<sup>1</sup>, 吉田 英弘<sup>2</sup>

HIRAGA, Takehiko<sup>1\*</sup>, MIYAZAKI, Tomonori<sup>1</sup>, TASAKA, Miki<sup>1</sup>, YOSHIDA, Hidehiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 物質材料研究機構

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>National Institute of Material Science

Recently, we have succeeded in demonstrating true superplasticity in geological materials (Hiraga et al. 2010). Superplastic deformation is commonly considered to proceed via grain boundary sliding (GBS) which results in grain switching in the samples. As a result, initial equigranular shape of grains can be remained even after severe deformation of the sample, which is one of the characteristic microstructure of superplastically deformed materials. Further, due to large contribution of intergranular deformation on total strain, development of crystallographic preferred orientation in the materials is not expected either. Thus, it is very difficult to recognize the operation of GBS in microstructure of the deformed rocks. Hiraga et al. (2010) showed coalescence of periclase grains almost perpendicular to the tensile direction after superplastic deformation in forsterite + periclase aggregates, although the paper focused on the deformation enhanced grain growth during superplastic deformation. Here we present more details of the coalescence microstructure and compare it with that of ultramylonite, often considered to have deformed by GBS creep. We show the microstructures of coalescence of similar mineral phases and Zener controlled grain sizes. Such observations indicate pervasive operation of GBS in the earth's mantle and crust.

キーワード: マイロナイト, 粒径, 衝突, ゼナー則, 超塑性

Keywords: Mylonite, Grain size, Coalescence, Zener relation, Superplasticity

## マントル起源のオリビンに記録されている超低歪速度効果の探査 Exploration of microstructure induced by ultra low strain rate in mantle derived olivine

山本 貴史<sup>1\*</sup>, 安東 淳一<sup>1</sup>, 大藤 弘明<sup>2</sup>, 森下 知晃<sup>3</sup>, 富岡 尚敬<sup>4</sup>, 渡邊 克晃<sup>5</sup>

YAMAMOTO, Takafumi<sup>1\*</sup>, ANDO, Jun-ichi<sup>1</sup>, OHFUJI, Hiroaki<sup>2</sup>, MORISHITA, Tomoaki<sup>3</sup>, TOMIOKA, Naotaka<sup>4</sup>, WATANABE, Katsuaki<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 金沢大学大学院フロンティアサイエンス機構, <sup>4</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>5</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>3</sup>Frontier Science Organization, Kanazawa University, <sup>4</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University,

<sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

オリビンは上部マントルの約6割を占める鉱物であり、その流動特性は上部マントルのダイナミクスに大きな影響を与えていると考えている。その為、オリビンの塑性変形特性は良く研究されており、特に近年では“高圧力の効果”や“水の効果”など、地球深部環境に近い条件での塑性変形特性の研究が進められている。このような効果と共に現実の地球内部におけるオリビンの流動特性を明らかにする上で重要な点は、“超低歪速度の効果”である。この“超低歪速度の効果”は、マントル起源の変形したペリドタイトの観察を基にして Kitamura et al. (1986) と Ando et al. (2001) が指摘しているのみである。彼らは、オリビン中に Fe のコットレル雰囲気（Cottrell atmosphere）を有する転位を発見し、マントル中では“超低歪速度の効果”を強く考慮する必要がある事を報告している。コットレル雰囲気とは、転位クリープ中に転位芯部分にある特定の原子が濃集する現象であり、コットレル雰囲気が存在すると、転位の移動速度が遅くなり、塑性変形時の力学特性が大きく変化する。変形実験の様にマントルに比べて超高歪速度条件の場合、このコットレル雰囲気は発現しない可能性が高い。

本研究では、Kitamura et al. (1986) と Ando et al. (2001) が報告したオリビン中の Fe のコットレル雰囲気の存在が、マントル起源の変形したペリドタイトにおいて普遍的な現象なのかを確認する事を目的にした。その為に 1) Xenolith タイプ、2) Alpine タイプ、3) Kimberlite タイプのペリドタイトを用いて、各試料を構成するオリビンの微細組織観察を進めている。研究手法は、1) 偏光顕微鏡を用いた微細組織観察、2) EPMA による化学組成の定量分析と元素マッピング、3) EBSD による LPO の有無の確認、4) TEM、ATEM それと STEM を用いた転位組織のキャラクタリゼーション、及び、転位近傍の化学組成定量分析と元素マッピングである。現時点では以下の試料の観察が終了した。Xenolith タイプとして、佐賀県高島、福岡県黒瀬、秋田県目潟、ハワイオアフ島ソルトレイクの試料、それと Alpine タイプの、幌満、ウエンザル、オマーンの試料である。

Xenolith タイプのペリドタイトの特徴は、オリビン (Fo 値: 89% ~ 92%) の粒径が約 0.5 mm ~ 3 mm と比較的粗粒で、等粒状もしくはポーフィロクラスティック組織を有することである。また、粒界は直線的で三重点も多く観察された。キンクバンド的な亜結晶粒界が発達しているが、亜結晶粒内にはあまり波動消光が認められない。EBSD 測定により全ての試料で LPO の存在が確認された。LPO パターンは D-type (Jung et al., 2006) と考えられるものが多かった。EPMA、ATEM、STEM において、コットレル雰囲気を示唆する特定元素の転位芯への濃集は認められなかった。Alpine タイプのペリドタイトの特徴は、ポーフィロクラスティック組織を有し、オリビン (Fo 値: 89% ~ 91%) の粒径はポーフィロクラストで約 1 mm、動的再結晶粒子で約 0.02 mm ~ 0.1 mm と非常に細粒である。また、粒界は房状もしくはアメーバ状であった。波動消光が顕著に認められ、キンクバンド的な亜結晶粒界も発達している。EBSD 測定より得られた LPO パターンは A-type もしくは E-type であった。Alpine タイプのペリドタイトに関しては、EPMA の化学組成分析において、亜結晶粒界への Fe の濃集が認められた。亜結晶粒界の直上と近傍の Fo 値の差は約 0.4% ~ 0.9% である。

今回の分析から Xenolith タイプのペリドタイト中のオリビンには、コットレル雰囲気を示唆する特定元素の転位芯への濃集は認められなかった。このことから以下の3つの可能性が考えられる。1) そもそもペリドタイトは上部マントル中でコットレル雰囲気を形成しない。2) オリビンの D-type の LPO は高差応力（高歪速度）条件下で形成されるが (Jung et al., 2006)、このような条件ではコットレル雰囲気は形成されない。3) Xenolith タイプのペリドタイトが有する微細組織は静的回復作用を受けたことを強く示唆している。従って、一旦は形成されていたコットレル雰囲気が、静的回復作用によって消失した。

Alpine タイプのペリドタイトに関しては、Kitamura et al. (1986) と Ando et al. (2001) と同様にコットレル雰囲気として説明可能な転位芯部分への Fe の濃集が確認できた。現在はこの濃集が拡散クリープによる現象で説明可能かどうかに関して研究を進めている。

引用文献: Ando et al. (2001) *Nature*, 414, 893. Jung et al. (2006) *Tectonophysics*, 421, 1. Kitamura et al. (1986) *Proc. Japan Acad.*, 62, 149.

Keywords: Olivine, Cottrell Atmosphere, Dislocation Creep, Lattice Preferred Orientation

## フォルステライト-メルト系の圧縮実験 The compression experiments on forsterite-melt system

末善 健太<sup>1\*</sup>, 平賀 岳彦<sup>1</sup>, 宮崎 智詞<sup>1</sup>  
SUEYOSHI, Kenta<sup>1\*</sup>, HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>, MIYAZAKI, Tomonori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

マントルには地震波速度異方性があることが知られている (例えば、Tanimoto and Anderson, 1984)。レイリー波が速く伝播する方向は、プレートの運動方向とおおむね一致する。このことは、マントル流動の過程で速度異方性が形成されることを示唆する。岩石の流動に伴って鉱物の選択的配向が生まれることが知られており、マントルの場合は、マントル主要鉱物であるオリビンが選択配向することで、その速度異方性が生まれると考えられている。

オリビン結晶の配向性が形成されると考えられる場所にはメルトの存在が指摘されており、メルト存在下での変形で、実際にオリビンがどのように配向するかを実験的に明らかにする必要がある。

本実験では、細粒 (5  $\mu$ m 程度) なフォルステライトにアノーサイト成分に富むメルトを加えたバルク体 (約 5\*10 mm) を合成し、これを変形実験に用いた。圧縮試験は、管状炉が付設されたインストロン型の変形試験機を用いて温度 1270 度、歪速度 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> の条件で行われた。ほとんどの試料で実験中にクリープ強度の増加が認められた。これは試験後の微細構造観察より、試験中の著しい粒成長の影響と考えられる。また、増加の後に続く強度の低下が見られた。これは、試料中のクラックの形成の影響と思われる。試験後、実験試料は圧縮方向に平行な面で切断され、その面を研磨し、最終研磨として機械的的化学研磨を行った。その研磨面において走査型電子顕微鏡・後方電子回折法によりフォルステライトの結晶方位が解析された。その結果、フォルステライト結晶の b 軸の圧縮方向への配向があることが分かった。粒成長とともに、クリープ強度の増加が見られることから、フォルステライトは拡散クリープによって変形したと考えられる。拡散クリープ下で軸配向するメカニズムを今後明らかにする必要がある。

キーワード: フォルステライト-メルト系, EBSD, クリープ, 結晶選択配向

Keywords: forsterite-melt system, EBSD, creep, LPO

## 含水メルトを含むダナイトの超塑性：上部マントルにおけるせん断集中 Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle

大内 智博<sup>1\*</sup>, 西原 遊<sup>2</sup>, 川添 貴章<sup>1</sup>, シュペングラー ディルク<sup>3</sup>, 白石 令<sup>4</sup>, 鈴木 昭夫<sup>4</sup>, 亀卦川 卓美<sup>5</sup>, 大谷 栄治<sup>4</sup>

OHUCHI, Tomohiro<sup>1\*</sup>, NISHIHARA, Yu<sup>2</sup>, KAWAZOE, Takaaki<sup>1</sup>, SPENGLER, Dirk<sup>3</sup>, SHIRAIISHI, Rei<sup>4</sup>, SUZUKI, Akio<sup>4</sup>, KIKEGAWA, Takumi<sup>5</sup>, OHTANI Eiji<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 愛媛大学上級研究員センター, <sup>3</sup> ポツダム大学地球環境科学科, <sup>4</sup> 東北大学地球惑星物質科学科, <sup>5</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Senior Research Center, Ehime University, <sup>3</sup>Institute of Earth and Environmental Sciences, Potsdam University, <sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization

かんらん石は上部マントルの主要構成鉱物であり、上部マントルのダイナミクスを支配する。そのため、高温下におけるかんらん石の変形実験が数多くなされてきた。過去の研究によれば、転位クリープと拡散クリープが上部マントルにおける、かんらん石の主要な変形メカニズムであるとされてきた（例えば Karato et al., 1986）。一方、粒界すべりを伴う機構（即ち超塑性）も上部マントルにおいて重要な役割を果たす可能性があることが多数指摘されている（例えば Hirth and Kohlstedt, 1995）。現在のところ、超塑性は地球の一部分（氷河：Goldsby and Kohlstedt, 2001；下部地殻のせん断集中帯：Behrmann and Mainprice, 1987；上部マントルのせん断集中帯：Hiraga et al., 2010；下部マントル：Karato et al., 1995）において支配的な変形メカニズムであると考えられている。

これまでに、系における部分熔融メルトや流体の存在によってかんらん石多結晶体のクリープ強度が低下することが報告されている。かんらん石 - 玄武岩メルト系においては、転位クリープ及び拡散クリープそれぞれの領域においてクリープ強度が低下する（Mei et al., 2002）。部分熔融メルトの量が多い場合には（> 4 vol.%）、粒界すべり支配の変形メカニズムが卓越する（Hirth and Kohlstedt., 1995）。かんらん石 - 水系においても粒界すべり支配の変形メカニズムが卓越することが報告されている（McDonnell et al., 2000）。かんらん石 - 流体間の二面角は圧力の上昇とともに減少することが知られており（Mibe et al., 1999; Yoshino et al., 2007）。このことは全界面における粒界の割合が圧力の上昇とともに減少することを意味する。そのため、かんらん石多結晶体のクリープ強度低下における流体の効果が高圧においてより効果的であることが期待される。しかし、部分熔融系におけるこれまでの変形実験は低圧（< 0.6 GPa）に限定されており、実際の上部マントルの圧力条件において、超塑性が卓越するかどうかについては検討されてこなかった。

そこで本研究では、上部マントル条件下（ $P = 1.3\text{--}5.7$  GPa,  $T = 1270\text{--}1490$  K）における、含水メルトを含むかんらん石のレオロジー的物性を理解することを目的として、含水メルト（< 2.5 vol.%）を含むダナイトの“放射光その場観察”変形実験を行った。実験結果として、歪速度が定常クリープ強度の約 2 乗に比例することや、定常クリープ強度が転位クリープ流動則から予想される強度よりも顕著に低いことが観察された。さらには、33 - 55%の歪を加えたにも拘わらず、結晶の伸張や結晶方位定向配列の発達が始り観察されなかった。これらの特徴から、今回の実験条件における変形メカニズムにおいて粒界すべりが重要な役割を果たしていた（すなわち超塑性）ことが考えられる。天然におけるかんらん石の超塑性は、せん断集中帯のような低温・高応力の条件において卓越し、せん断集中帯への流体の進入によって引き起こされるものと予想される。

キーワード: かんらん石, 含水メルト, 粒界すべり, 超塑性, せん断集中, 沈み込み帯

Keywords: olivine, hydrous melt, grain boundary sliding, superplasticity, shear localization, subduction



## 二次元検出器を利用した多結晶体の結晶選択配向および格子歪み解析手法の開発 Simultaneous analysis of strain and texture of polycrystalline materials using two-dimensional X-ray diffraction pattern

瀬戸 雄介<sup>1\*</sup>  
SETO, Yusuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学・院・理

<sup>1</sup>Kobe Univ. Sci.

Angle dispersive powder X-ray diffraction experiments using a two-dimensional area detector are one of the most powerful methods for Earth material sciences, particularly under high pressure conditions. A two-dimensional intensity distribution on Debye rings immediately involves information of the number of crystallites, lattice preferred orientation (LPO) and lattice strains under stress; i.e. the number of crystallites is directly related with the spottiness on the Debye rings. When a LPO is developed, diffracted intensities along the Debye rings show circumferential oscillations unique to a manner of the three-dimensional orientation distribution. The effect of lattice strain appears in elliptic distortions of the each ring or a deviation of the original crystallographic geometry between rings. These are substantial factors of the bulk physical properties of a polycrystalline material, including seismic velocity, thermal/electric conductivity and so on, but in many cases the quantitative treatments have not yet been developed into a standard technique.

In the present study, the author developed a software code, which simulates a two-dimensional diffraction pattern based on given experimental parameters (e.g. wave length, beam convergence, camera length, pixel size of a detector, and so on) and (poly)crystalline properties (crystal structure, crystallite number, size, orientation distribution, lattice strain and so on). Through the simulation, the effect of the parameters on the diffraction pattern can be quantitatively and visually estimated. Furthermore, to find the orientation distribution and the lattice strain from the observed diffraction pattern, a fitting procedure is incorporated into the code as follows: The software initially generates a large number ( $10^6$ - $10^7$ ) of crystallites with random orientation under a strain-free condition, evaluates the residual of the simulated/observed patterns, and then iteratively modifies the orientation distribution and stress condition. In each iterative step, randomly selected crystallites (0.1-1.0 %) are roughly orientated toward a randomly generated direction, and the modified distribution are (or not) adopted if the residual becomes small (or large). Components of stress tensor are also modified at several intervals. By repeating the iteration step many times ( $>10^5$ ), the simulation seems to converge to a certain condition. A pole figure (density map of a crystallographic axis or plane direction) can be calculated from the obtained orientation distribution. The fitting procedure was applied for several actual diffraction patterns from in-situ uniaxial compression experiments, and its validity was confirmed.

キーワード: 粉末 X 線回折, 選択配向, 格子ひずみ, 二次元検出器, 多結晶体

Keywords: X-ray powder diffraction, lattice preferred orientation, lattice strain, two-dimensional detector, polycrystalline material



## 岩塩中の水の分布 電気伝導度測定からの推定 Brine distribution in halite rocks - Inference from measured electrical conductivity

北野 元基<sup>1\*</sup>, 渡辺 了<sup>1</sup>

KITANO, Motoki<sup>1\*</sup>, WATANABE, Tohru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山大学理学部地球科学科

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Toyama

Intercrystalline fluid can significantly affect rheological and transport properties of rocks. Its influences are strongly dependent on its distribution. The dihedral angle between solid and liquid phases has been widely accepted as a key parameter that controls solid-liquid textures. The liquid phase is not expected to be interconnected if the dihedral angle is larger than 60 degrees. However, observations contradictory to dihedral angle values have been reported. The grain boundary fluid coexists with a positive dihedral angle. Similar thin fluid films might exist in grain boundaries of crustal materials, and play important roles in crustal processes. In order to understand the nature of grain boundary fluid, we measured electrical conductivity of synthetic wet halite rocks at various temperature and pressure conditions.

Halite-water system is used as an analog for crustal rocks. The dihedral angle has been studied systematically at various pressure and temperature conditions. The dihedral angle is larger than 60 degrees at lower pressure and temperature. It decreases to be less than 60 degrees with increasing pressure and temperature. A sample is prepared by cold-pressing (140MPa for 20 minutes) and annealing (T=160C and P=180MPa for 20 hours) of wet NaCl powder. Grains are polygonal and equidimensional with diameters of 50-100 micrometers.

Experiments are performed using a conventional cold-seal vessel with an external heater. The pressure medium is silicon oil (viscosity=0.1 Pa s). Dimensions of a sample are 9 mm in diameter and 7 mm in length. Viton is used as a jacketing material. Platinum electrodes are placed at both ends of the sample. The confining pressure of 30 MPa is first applied to a sample, and then the temperature is increased to 120C and kept for 5days. The temperature is then changed to 180C (162C@sample) and 140C (126C@sample). Electrical impedance of the sample is measured at different pressures. Impedance measurements are made with an LCR meter (NF ZM2353) (40Hz to 200kHz), and a lock-in amplifier (SRS SR830) and a current amplifier (SRS SR570) (40mHz to 400Hz). Debye-type impedance spectra are observed, to which a parallel array of a capacitor and a resistor can be applied as an equivalent circuit. Measured resistance is converted to conductivity.

Measured conductivity is higher than the conductivity of NaCl by 2-3 orders of magnitude, implying that the electrical conduction is dominated by that through brine. Quasi-stationary conductivity observed at T=180C is almost independent of the pressure. This is consistent with a slight change in the dihedral angle with the pressure. The connectivity of brine should mainly be governed by the triple junction tubes, which are difficult to deform. If the interconnection is governed by grain boundary fluid films, the conductivity should be very sensitive to the pressure increase.

The progressive decrease in conductivity at 140C and P<50MPa reflects the increase in the dihedral angle, while the increase in conductivity at 100MPa the decrease in the dihedral angle.

Even at conditions of the dihedral angle larger than 60 degrees (e.g., T=140C, P=30MPa), brine is interconnected. However, we cannot say that connected paths are stable or not. No stationary value is observed. Longer runs should be done to study the connectivity of brine at lower temperature and pressure conditions.

キーワード: 電気伝導度, 岩塩, 二面角, 粒界流体, 流体分布

Keywords: electrical conductivity, halite rocks, dihedral angle, grain boundary fluid, fluid distribution

## 岩石のアナログ物質を用いた地震波減衰の実験：より低温・高周波を目指して Experimental study of seismic attenuation by using a rock analogue

柄澤 史也<sup>1\*</sup>, 武井 康子<sup>1</sup>

KARASAWA, Fumiya<sup>1\*</sup>, TAKEI, Yasuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

本研究では地震波帯域における岩石の非弾性特性の解明を目指している。地震波の観測から得られた3次元地震波速度構造のインバージョンによって上部マントルの温度不均質やメルト分布を定量的に推定するためには、マントル岩石の非弾性特性を詳細に知ることが不可欠である。非弾性とは弾性と粘性の間の遷移的な物性のことである。地震波速度を変化させる要因には、非調和効果による影響と非弾性効果による影響があり、非調和効果に関しては定量的に評価できているが、非弾性効果に関してはよくわかっていない。この非弾性効果のメカニズムを解明するために、実験によって地震波帯域での減衰  $Q^{-1}$  とその周波数依存性、温度依存性、粒径依存性、メルト量依存性を調べるのが重要となる。我々はマントル岩石のアナログ物質として有機多結晶体（ボルネオール）を用い、独自に開発した強制振動型の非弾性実験装置で実験を試みている [Takei et al., 2011]。

先攻研究 [McCarthy et al., 2011; McCarthy and Takei, 2011] では、温度、粒径、メルト量をパラメータとして変化させたときの、有機多結晶体のヤング率  $E$  の分散と減衰  $Q^{-1}$  のスペクトルを求めた。この測定により5桁にわたる周波数範囲での  $Q^{-1}$  スペクトルが得られた。さらに各温度、粒径、メルト量において測定した粘性と、超音波帯域で測定したヤング率  $E_U$  から、マクスウェル周波数  $f_M = E_U/\eta$  を求め、 $Q^{-1}$  スペクトルを規格化周波数  $f/f_M$  の関数としてプロットすると全ての  $Q^{-1}$  スペクトルが1つのマスターカーブにのることが分かった。他研究 [Gibb and Cooper 1998; Jackson et al, 2002] から得られたオリビン多結晶体の  $Q^{-1}$  スペクトルもマクスウェル周波数による規格化で同じマスターカーブにのった。このようにマクスウェル周波数で規格化できることから、実験周波数帯域での非弾性の支配的なメカニズムが「拡散をとまなう粒界すべり」であることが強く示唆された。しかしマントルのマクスウェル周波数で規格化した地震波帯域は、実験で求めた帯域よりも2桁以上高周波側であり、より高周波、低温、粗粒での実験の必要性が明らかとなった。

これをうけて本研究は、まず高いサンプリング周波数に対応した高速の変位計に交換し、高周波（100Hzまで）の測定が可能になった。また低温での運転が可能なインキュベーターを用いることで、先攻研究では行えなかった規格化温度0.61以下の温度での実験が可能になった。これにより地震波帯域により近い帯域でのデータが取れるようになった。しかし試料の  $Q^{-1}$  が小さくなる高周波、低温、粗粒での実験では、実験装置の剛性が問題になってくることが分かってきた。これからの課題として、より剛性の高い実験装置を開発していく必要性が生じている。また小さな  $Q^{-1}$  を精度良く測るためには計測機器のもつ僅かな時間遅れが問題になる。このため、変位計やロードセルのキャリブレーションを行っている。この結果を踏まえて、先行研究の高周波側での  $Q^{-1}$  スペクトルの形を再確認する予定である。

### 参考文献：

Takei, Y., K. Fujisawa, and C. McCarthy, 2011, JGR, 116, doi:10.1029/2011JB008382

McCarthy, C., Y. Takei, and T. Hiraga, 2011, JGR, 116, doi:10.1029/2011JB008384

McCarthy, C., and Y. Takei, 2011, GRL, 38, doi:10.1029/2011GL048776

Gibb, T. T., and R. F. Cooper, 1998, JGR, 103

Jackson, I., J. D. Fitz Gerald, U. H. Faul, and B. H. Tan, 2002, JGR, 107, doi:10.1029/2001JB001225

キーワード: 非弾性, 地震波減衰

Keywords: anelasticity, seismic attenuation

## 存否法による球共振法データ解析と内部摩擦の推定

### Estimates of internal friction by Sompi spectral analysis for resonant sphere spectroscopy

山本 萌美<sup>1\*</sup>, 山本 明彦<sup>1</sup>, 大野 一郎<sup>1</sup>

YAMAMOTO, Megumi<sup>1\*</sup>, YAMAMOTO, Akihiko<sup>1</sup>, OHNO, Ichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Ehime University

岩石・鉱物の弾性率・非弾性率は地球内部の構成や岩石・鉱物の物性特性として重要な意味を持つ。一つの試料で全弾性率の測定が可能のため多用される球共振法では、パルス入力に対するサンプルの振動波形をとって、高速フーリエ変換 (FFT) 法によるスペクトル解析から共振スペクトルを求め (FT 法)、そのピークの半値幅から内部摩擦を決定する。従来から多用される FFT 法には原理的にピーク的位置 (エネルギーピークの値) がずれる可能性があるため、前回の報告では、存否スペクトル法を試料の自由振動の時系列データに対して適用し、弾性定数、内部摩擦の測定結果を示した。その結果、先行研究 (Sumino et al., 1976; Oda et al., 1994) や FFT 解析においては、単結晶 MgO の内部摩擦  $Q_{12}^{-1}$  が負の値を示すのに対し、存否法では正の値を示す結果が得られたため、内部摩擦の推定には存否法が有効である可能性を示唆した (山本ほか, 地球惑星連合大会, 2011)。しかしながら、内部摩擦の値は FFT、存否法ともに使用するモードによって変化してしまうという問題点が残されたままであった。そこで本研究では、より安定した内部摩擦を測定するため、計算に使用するモードの周波数範囲を広くするとともに、振幅の大きいものに限定してモードをピックアップし、内部摩擦を測定した。そして、前回振幅の大小に関わらずにピックアップしたモードを用いて推定した内部摩擦と比較し、変化を見た。試料は単結晶のペリクレーズ (MgO、立方晶系) を使用し、直径は  $8.735 \pm 0.003$  mm、密度は  $3.590$  g/cm<sup>3</sup> である。球共振法による時系列データのデータ長は  $2^{16}$  (=65536)、サンプリング間隔は  $10^{-7}$  s である。実際の時系列データの存否解析では 1200 の AR オーダを使用した。共振時の中心振動数は試料を支える荷重により変化するため、荷重がゼロに外挿した値を使用した。内部摩擦は Sumino et al. (1976) にしたがって計算した。その際、(1) FFT による解析ではスペクトルの各固有振動数の半値幅の外挿値を、(2) 存否法による解析では各固有振動数と減衰定数の外挿値を使用した。

(1),(2) により内部摩擦を測定した結果、FFT、存否法ともに内部摩擦の値は、前回報告した結果よりも、比較的振幅の大きいピークを使用したものの方が誤差が小さくなることがわかった。また、モード数を変化させて内部摩擦を算出したところ、FFT では負の値で安定したが、存否解析では正の値で安定し、かつ、FFT よりも誤差が小さくなることが分かった。以上のことより内部摩擦の算出には存否法が有効であると考えられる。

キーワード: 球共振法, 存否法, 内部摩擦, 弾性定数

Keywords: Resonant Sphere Technique, Sompi method, internal friction, elastic constant