

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^{1*}

KOYAMA, Takehito^{1*}

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構

¹ 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^{1*}
KATSURAGI, Hiroaki^{1*}

¹ 名古屋大学環境学研究科

¹Dept. 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^{1*}, 安藤 亮輔², 波多野 恭弘¹

KUWANO, Osamu^{1*}, ANDO, Ryosuke², HATANO, Takahiro¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 産業技術総合研究所

¹ERI, Univ. of Tokyo, ²Geological 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^{1*}, 中村 悠¹, 長濱 裕幸¹, 清水 以知子², 三浦 崇³, 荒川 一郎³

MUTO, Jun^{1*}, NAKAMURA, Yu¹, NAGAHAMA, Hiroyuki¹, SHIMIZU, Ichiko², Takashi Miura³, Ichiro Arakawa³

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ³ 学習院大学理学部物理学科
¹Dept. Earth Sci., Tohoku Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Univ., ³Dept. 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 (A1) である 464 cm⁻¹ の高波数側に新たなピーク 490 cm⁻¹ (非晶質シリカ 4 員環), 500 cm⁻¹ (モガナイト 4 員環), 515 cm⁻¹ (コーサイト 4 員環) および 606 cm⁻¹ (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 SiO₄ 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⁻¹ ~ 3600 cm⁻¹ 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 SiO₄ 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^{1*}, 西脇 隆文¹, 大藤 弘明², 渡邊 克晃², 早坂 康隆¹

ANDO, Jun-ichi^{1*}, NISHIWAKI, Takafumi¹, OHFUJI, Hiroaki², WATANABE, Katsuaki², HAYASAKA, Yasutaka¹

¹ 広島大学, ² 愛媛大学, ³ 東京大学

¹Hiroshima University, ²Ehime University, ³The 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^{1*}, 清水 以知子², 岡崎 啓史³

UEHARA, Shin-ichi^{1*}, SHIMIZU, Ichiko², OKAZAKI, Keishi³

¹ 東邦大学理学部, ² 東京大学理学部, ³ 広島大学大学院理学研究科

¹ Faculty of Science, Toho University, ² Faculty of Science, The University of Tokyo, ³ 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、 σ_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の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^{1*}
SHIMIZU, Ichiko^{1*}

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻
¹Department 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 Rundvaghsetta, Antarctica

Wallis Simon^{1*}, 井上 祐策¹

WALLIS, Simon^{1*}, INOUE, Yusaku¹

¹ 名古屋大学環境学研究科地球環境科学専攻

¹Department 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, σ :応力, n :3-6)。後者は空格子と原子の拡散に起因し、 $\dot{\epsilon} \propto D \sigma$ 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 ($<500\text{ }^\circ\text{C}$) 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 $600\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$, $4\text{-}6\text{kbar}$ 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^{1*}, 長濱 裕幸²

KAWADA, Yusuke^{1*}, NAGAHAMA, Hiroyuki²

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

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Department 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^{1*}

MICHIBAYASHI, Katsuyoshi^{1*}

¹ 静岡大学理学部地球科学科

¹ 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^{1*}, 道林 克禎¹, Marguerite Godard², Sylvie Demouchy²

SATSUKAWA, Takako^{1*}, MICHIBAYASHI, Katsuyoshi¹, GODARD, Marguerite², DEMOUCHEY, Sylvie²

¹ 静岡大学・理・地球, ² モンペリエ第2大学

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, ²Geosciences 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^{1*}, 平賀 岳彦¹, 吉田 英弘²

MIYAZAKI, Tomonori^{1*}, HIRAGA, Takehiko¹, YOSHIDA, Hidehiro²

¹ 東大地震研, ² 物質材料研究機構

¹ERI, ²NIMS

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)SiO₃-ペロブスカイトの変形実験 Deformation experiments of (Mg,Fe)SiO₃-Perovskite at the lower mantle conditions

辻野 典秀^{1*}, 西原 遊², 瀬戸 雄介³

TSUJINO, Noriyoshi^{1*}, NISHIHARA, Yu², SETO, Yusuke³

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

¹Tokyo Institute of Technology, ²GRC, Ehime University, ³Kobe University

The Earth's lower mantle is thought to be consisting of ~77 vol% (Mg,Fe)SiO₃-perovskite (Pv), ~16 vol% ferropericlase and ~8 vol% CaSiO₃-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)SiO₃- 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 Cr₂O₃-doped MgO pressure medium with 7 mm edge length and a cylindrical LaCrO₃ furnace. Temperature was estimated from power-temperature relationship in a similar cell assembly. Pt foil is placed at the back of Al₂O₃ 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)SiO₃-ペロブスカイト

Keywords: Lower mantle, Deformation experiments, (Mg,Fe)SiO₃-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^{1*}, 久保 友明², 加藤 工², 芳野 極¹, 山崎 大輔¹, 中村 智樹³, 岡崎 隆司², チャクラボルティー スーミット⁴
SHIMOJUKU, Akira^{1*}, KUBO, Tomoaki², KATO, Takumi², YOSHINO, Takashi¹, YAMAZAKI, Daisuke¹, NAKAMURA,
Tomoki³, OKAZAKI, Ryuji², CHAKRABORTY Sumit⁴

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

¹Okayama Univ., ²Kyushu Univ., ³Tohoku Univ., ⁴Ruhr 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 MgSiO₃ perovskite and Mg-Fe interdiffusion rates in (Mg,Fe)SiO₃ perovskite are almost comparable (Yamazaki et al., 2000; Holzapfel et al. 2005). In addition, O diffusion rates in MgSiO₃ 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)O₃ perovskite by utilizing ²⁵Mg and ²⁹Si enriched (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ thin film as diffusion source. Based on the result, we discuss the rate-controlling species in (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ 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)O₃ perovskite was synthesized from San Carlos orthopyroxene powder at 25 GPa and 1973K. Surface of the polycrystalline perovskite was polished and then coated with ²⁵Mg and ²⁹Si enriched (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ 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 ²⁵Mg and ²⁹Si 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)O₃ perovskite are almost comparable under our experimental conditions. Thus, Si and Mg are likely to be rate-controlling species in (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ perovskite. Si and Mg diffusion rates in (Mg,Fe)(Si,Al)O₃ perovskite could be slightly slower than previously reported Si diffusion rates in MgSiO₃ 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 MgSiO₃ post-perovskite at lowermost mantle pressures

Predictions of the shear response of Fe-bearing MgSiO₃ post-perovskite at lowermost mantle pressures

Arnaud Metsue^{1*}, Taku Tsuchiya¹
METSUE, Arnaud^{1*}, TSUCHIYA, Taku¹

¹Geodynamics Research Center Ehime University

¹Geodynamics 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)SiO₃ 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 MgSiO₃ 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 MgSiO₃ (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 MgSiO₃ 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 Fe²⁺ 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 Fe²⁺ 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: MgSiO₃ post-perovskite, stacking faults, deformation mechanisms

Keywords: MgSiO₃ post-perovskite, stacking faults, deformation mechanisms