

二成分混合ガウジの大変位摩擦実験に伴う “弱い断層” の形成

Formation of weak faults during large shear deformation experiments of bimineral mixtures

大橋 聖和^{1*}, 廣瀬 丈洋², 嶋本 利彦³Kiyokazu Oohashi^{1*}, Takehiro Hirose², Toshihiko Shimamoto³¹ 千葉大学大学院理学研究科, ² 独立行政法人海洋研究開発機構 高知コア研究所, ³ 中国地震局地質研究所¹Graduate School of Science, Chiba University, ²Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Institute of Geology, China Earthquake Administration

内陸活断層やプレート境界断層などの成熟した大断層は、短・長期的に弱い強度を持つことが熱流量や応力方位、熱異常の測定などから示唆されている (e.g., Lachenbruch & Sass, 1980, Zoback, 2000, Kano et al., 2006)。このような“弱い断層”を作る一つの説明として、一般的な造岩鉱物よりも強度の低い物質が潤滑剤として機能しているという考えがあり、その検証のために低強度物質を混ぜた二成分混合ガウジの摩擦実験が数多くなされてきた (e.g., Moore & Lockner, 2011)。しかしながら既存の実験の多くは変位量 (歪量) が小さく、天然の大断層に相当する大歪条件下での研究例は少ない。一方で、成熟した天然の断層帯では特定の鉱物の配列・濃集したすべり面がしばしば観察され、このような組織が断層帯の強度低下に影響を及ぼすことが指摘されている (Collettini et al., 2009)。そのため、組織発達のメカニズムとそれに伴う強度変遷の理解には、低歪から大歪条件まで連続的に力学特性と組織を対比させることが重要である。そこで著者らは剪断歪を無限大に与えられる回転剪断式摩擦試験機を用いて二成分混合ガウジの変形実験を様々な変位速度条件下で行い、剪断歪量-微細組織-摩擦強度の関係性に関する研究を行っている。本発表では、乾燥 (大気) 条件下で行ったグラファイト-石英混合ガウジと、乾燥・水飽和条件下で行ったスメクタイト (Na-bentonite) -石英混合ガウジの2種類についてこれまでの結果を報告する。

乾燥条件下で実験を行ったグラファイト-石英混合ガウジは、動的弱化的起らない低速領域を含め実験を行ったすべての速度域において数 m のすべり距離で明瞭な強度弱を示した。低・中速領域では、量比 10-30 vol % の混合ガウジは剪断歪み量 () = 200 程度までは純粋石英に相当する高い摩擦係数 ($\mu = 0.5-0.7$) であったのに対し、さらなるすべりに伴い急激に強度が低下し、 $\mu = 2000-10000$ で約半分の摩擦強度 ($\mu = 0.2-0.5$) にまで低下した。組織観察によると、すべり弱化的は粉碎の著しい変形集中帯の形成と、その内部に発達するグラファイトの配列した薄いすべり面 (Y 面) の出現に対応する。これにより、低歪時には量比約 30 % を境に緩やかに低下していた強度-量比曲線は、大歪後には約 10 % を境に急激に減少するシグモイド曲線へと進化する。一方で水飽和条件下のスメクタイト混合ガウジは、150 $\mu\text{m/s}$ 以下の低速では明瞭なすべり弱化的を示さないが、実験開始直後の低歪条件から量比約 30 % を境に急激に低下するシグモイド型の強度-量比曲線を示す。また、mm/s 以上の中・高速条件下においては熱的もしくは機械的な pressurization process に起因する顕著なすべり弱化的を示した (大橋・廣瀬, 2013, 本大会)。いずれの試料も断層中に著しい粉碎を伴った変形集中帯は存在しないが、円柱形母岩との縁に薄いスメクタイトの配列が認められた。大気条件下のスメクタイト混合ガウジは著しい粉碎を伴うことが一般的であり、高速 (1.3 m/s) および低速 (150 $\mu\text{m/s}$) の両実験では、厚いスメクタイトの濃集層 (segregation zone) の形成が認められた。以上をまとめると、グラファイト-石英混合ガウジおよび乾燥条件下でのスメクタイト-石英混合ガウジは粉碎と弱い鉱物の濃集、再配列によってすべりが局所化し、強度の低下は歪み量に依存する。一方で水飽和条件下のスメクタイト-石英混合ガウジは大きな組織発達を伴わずに (粉碎を必要とせず) 瞬時にすべりが局所化し、歪み量依存性はほとんど見られない。発表では、これらの異なる2つのプロセスが何に起因するのかについても検討を行う。

[引用文献]

Lachenbruch, A. H., and J. H. Sass (1980), Heat-flow and energetics of the San-Andreas fault zone, *J. Geophys. Res.*, 85 (Nb11), 6185-6222, doi:10.1029/JB085iB11p06185.Zoback, M. D. (2000), Strength of the San Andreas, *Nature*, 405, 31-32, doi:10.1038/35011181.Kano, Y., Mori, J., Fujio, R., Ito, H., Yanagidani, T., Nakao, S., Ma, K-F. (2006), Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14306, doi:10.1029/2006GL026733.Collettini, C., A. Niemeijer, C. Viti, and C. Marone (2009), Fault zone fabric and fault weakness, *Nature*, 462, 907-910, doi:10.1038/nature08585.Moore, D. E., and D. A. Lockner (2011), Frictional Strengths of Talc-Serpentine and Talc-Quartz Mixtures, *J. Geophys. Res.*, 116, B01403, doi:10.1029/2010JB007881.

大橋・廣瀬 (2013), スメクタイト質断層の中速度領域における動的強度弱化的とその地震学的重要性, 本大会。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SIT38-01

会場:304

時間:5月23日 11:00-11:15

キーワード: 断層弱化, グラファイト, スメクタイト, 断層ガウジ, 摩擦実験

Keywords: Fault weakening, Graphite, Smectite, Fault gouge, Friction experiment

高速剪断される厚い粉体層の緩和過程

Relaxation processes of a thick granular layer at seismic slip rates

桑野 修^{1*}, Nakatani Masao², 波多野 恭弘², 阪口 秀¹

Osamu Kuwano^{1*}, Masao Nakatani², Takahiro Hatano², Hide Sakaguchi¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 東大・地震研

¹IFREE, JAMSTEC, ²ERI, University of Tokyo

We report on laboratory experiments designed to explore transient responses of a thick granular layer following a step change in slip velocity at seismic slip rates. Experiments were performed at constant normal stresses of 10-30kPa using a ring shear apparatus with inner/outer diameters of 15mm/25mm. We measure the friction coefficient and thickness of glass beads layer at sliding velocities between 0.5 and 3 m/s. Experimental results show that the friction coefficient and layer thickness suddenly increases/decrease as sudden increase/decrease of sliding velocity and then exponentially decay to new steady state with characteristic slip length. We found that characteristic slip length is of the order of 10m when the surface of sliding wall is rough. The response to a velocity step decreases simply symmetric to that to a velocity step increase. In this presentation, we discuss the effect of sliding velocity, normal stress, and surface roughness of the sliding wall on characteristic slip length.

キーワード: high-velocity friction, granular matter, rheology

Keywords: high-velocity friction, granular matter, rheology

ウルトラカタクラスティック脈に記録された地震すべり: 有馬一高槻構造線六甲活断層を例に

Repeated seismic slips recorded in ultracataclastic veins along active faults of the Arima-Takatsuki Tectonic Line

林 愛明^{1*}, 山下和彦²

Aiming Lin^{1*}, Katsuhiko Yamashita²

¹ 京都大学大学院地球惑星科学専攻地球物理学教室, ² 株式会社ジーベック

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., ²GEEBEC Ltd

It is well known that direct evidence of earthquakes within fault zones is limited to the presence of pseudotachylyte (e.g., Lin, 2008). In addition to pseudotachylyte, previous studies have shown that the meso- and microstructural features of cataclastic veins that lack the primary cohesion of the host rocks, including crush-origin pseudotachylyte, fault gouge, fault breccia and some calcite veins, may represent primary evidence of brittle deformation caused by recurrent seismic slip within seismogenic fault zones (e.g., Lin et al., 2012, 2013a,b). It has also been reported that during the 2008 Mw 7.8 Wenchuan earthquake, ultracataclastic veins were produced along the seismic slip plane and injected into fractures within the seismogenic fault zone (Lin, 2011). Therefore, studies on cataclastic veins would provide new insights into the deformation process of seismic slip recorded in seismogenic fault zones.

In this study, we report on the structural mode of typical ultracataclastic veins including crush-origin pseudotachylyte and fault gouge veins that formed repeatedly as simple veins and complex networks within a fault zone along active faults of the Arima-Takatsuki Tectonic Line (ATTL), southwest Japan. We also discuss the formation mechanisms of such veins and their tectonic significance in terms of seismic faulting events.

Field investigations, combined with meso- and microstructural analyses, reveal that numerous ultracataclastic veins are widely developed within a fault zone (<150 m wide) as simple veins, complex lenses, and networks, along active faults of the ATTL, southwest Japan. These veins comprise mainly crush-origin pseudotachylyte vein and weakly consolidated to unconsolidated fault gouge that is black, dark-brown, brown, gray, and brownish-red in color. Meso- and microstructural features show that these pseudotachylyte and fault gouge veins and networks formed during multiple stages, as earlier veins are generally cut and overprinted by younger veins, indicating that the vein-forming events occurred repeatedly and that ultracataclastic material was injected into networks of faults and fractures in the fault zone. The pseudotachylyte and fault gouge veins are characterized by an ultrafine- to fine-grained matrix and angular to subangular fragments of host granitic rocks of various sizes, ranging from sub-micron to millimeters. SEM-EDS and powder X-ray diffraction analyses show that all the ultracataclastic veins are characterized by crystalline materials composed mainly of quartz and feldspar, similar to the host granitic rocks.

The present results support the existing hypothesis that ultrafine- to fine-grained materials formed by comminution can be fluidized and injected rapidly into fracture networks located far from the source fault plane in a solid-fluid-gas system during seismic slip; therefore, such materials provide a record of paleoseismic faulting events that occurred repeatedly within the seismogenic fault zone.

References:

Lin, A., 2011. Seismic slip recorded in the fluidized ultracataclastic veins formed along the coseismic shear zone during the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, *Geology*, 39, 547-550, doi:10.1130/G32065.1.

Lin, A., Shin, J., Kano, K., 2012. Fluidized cataclastic veins along the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line Active Fault System, Central Japan and its Seismotectonic Implications. *Journal of Geology*, 120,453-465, doi: 10.1086/665795.

Lin, A., Toda, T., Rao, G., Tsuchihashi, S., Yan, B., 2013a. Structural analysis of coseismic normal fault zones of the Mw 6.6 Fukushima earthquake, northeast Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 103, in press, doi:10.17850/0120120111.

Lin, A., Yamashita, K., Tanaka, M., 2013b. Repeated seismic slips recorded in ultracataclastic veins along active faults of the Arima-Takatsuki Tectonic Line, southwestern Japan. *Journal of Structural Geology*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2013.01.005>.

キーワード: 有馬一高槻構造線活断層帯, ルトラカタクラスティック脈, シュードタキライト, 断層ガウジ, 細粒破碎物質, 流動化作用

Keywords: Arima-Takatsuki Tectonic Line active fault zone, ultracataclastic vein, pseudotachylyte, fault gouge, fine-grained material, fluidization

フラクタル性を考慮した粉体摩擦の理論 Friction of granular matter with a wide dispersity

波多野 恭弘^{1*}
Takahiro Hatano^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

本講演では、粉体摩擦係数と空隙率の間に成り立つ定量的関係式を導出し、空隙率が高いと摩擦係数が強くなるという結果を報告する。これは「粒子再配置イベント一回あたりの粒子変位」が空隙率とともに増加し、散逸率が上昇するためである。対応する粒子シミュレーションの結果も併せて紹介し、ガウジの摩擦では(離散的な)粒子再配置イベントの繰り返しによってバルク変形が実現されていることを見る。粒度分布がフラクタル的な場合とそうでない場合の違いについても論じる。

キーワード: 断層ガウジ, 粉砕過程
Keywords: fault gouge, comminution

アノーサイト多結晶体の拡散クリープ実験 Diffusion creep experiments on polycrystalline anorthite

谷部 功将^{1*}
Kosuke Yabe^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
¹ Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

下部地殻の粘性変形が内陸地震発生に重要な役割を果たしていると考えられている。したがって、下部地殻のレオロジーを知ることは非常に重要なことである。本研究では、下部地殻を代表する鉱物としてアノーサイトを選び、その流動性について調べた。

これまでの研究より、様々な含水率を持つアノーサイト多結晶体の流動則が得られている。その結果、下部地殻の条件（温度 400 ~ 700 °C、及びマイロナイトで見られる粒径数十 μm 程度）では拡散クリープで変形すると考えられている。しかし、先行研究で用いられた試料には、多結晶体合成法に起因する水やガラス相が含まれており、結晶のみからなる試料のクリープ則は未だ得られていない。そこで我々は水やガラス相を全く含まない試料を作製し、高温変形実験を行うことで流動則のパラメータを求めた。変形実験の温度は 1150 ~ 1380 °C、応力は 10 ~ 120 MPa、歪速度は $5 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、大気圧下で行った。時間に依存せず、一定の歪速度になったところで応力-歪速度を読み取った。実験終了前後の走査型電子顕微鏡観察で、試料の粒径は 1 μm 、変形実験中の粒子成長は見られないことがわかった。応力-歪速度を対数プロットしたところ、両者に線形関係が見られた。その傾きから、応力指数 $n=1$ がえられ、拡散クリープで変形したと推定された。活性化エネルギー $Q=490 \pm 30 \text{ kJ}$ 、比例定数 $A=10^{10.7} \text{ MPa}^{-1} \mu\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ であった。先行研究と比較すると、実験室の温度領域では 2 ケタ固かったが、活性化エネルギーに大きな違いはなかった。この違いは水やガラス相の影響によるものと考えられる。

本研究で得られた流動則を低温領域に適用した。これより、下部地殻が完全なドライ及び粒径が 10 μm とすると、アノーサイト多結晶体はオリビン多結晶体が転位クリープで変形した際に比べて、大きな粘性率を持つことがわかった。

キーワード: アノーサイト多結晶体, 拡散クリープ, 下部地殻

Keywords: polycrystalline anorthite, diffusion creep, the lower crust

人工アノサイト多結晶体中の水の不均質分布と歪の局所化 Heterogeneous distribution of water and strain localization of polycrystalline synthetic anorthite

福田 惇一^{1*}, 武藤 潤¹, 長濱 裕幸¹

Jun-ichi Fukuda^{1*}, Jun Muto¹, Hiroyuki Nagahama¹

¹ 東北大・理・地学

¹Dept. Earth Sci., Tohoku Univ.

近年のトモグラフィーによる地殻の断層帯付近の観測から、下部地殻領域に低地震波速度領域や高電気伝導度領域が観測されている。このような領域は高温、高压の流体に富んだ領域であると推定されている。そこでは岩体中に発達した割れ目を通じて導入された水が、その領域で広がることによって、塑性変形が促進されていると考えられている（例えば Wannamaker et al. 2009）。

下部地殻の主要構成鉱物である長石に関して、これまでの水の効果を検証した変形実験では、多結晶体の粒界や、結晶粒内部で水が平衡に存在した状態で実験が行われてきた。このような実験条件では、上述したトモグラフィーによる観測と対応して、非平衡の系で水が導入され、水の効果による脆性変形から塑性変形の遷移過程や塑性変形の促進過程について評価することはできない。

そこで本研究では無水の人工アノサイト多結晶体に外部から水を導入させることで、試料内部で水の不均質な分布を再現させながら剪断変形実験を行った。実験に用いたアノサイト多結晶体は、平均粒径 $3 \mu\text{m}$ で 5 vol% のシリカリッチなメルトを含む、 6.2 mm の試料を 1 mm 厚、 45° にカットし、厚みと直交方向の試料内部に Ni 箔歪マーカーをセットした。そして試料を上下から 45° にカットしたアルミナ剪断ピストンで挟んだ。固体圧 (Griggs 型) 変形試験機を用いて、 900°C 、封圧 1.0 GPa 、剪断歪速度を $10^{-3.5} \sim 10^{-4.5} / \text{sec}$ 、剪断歪を 2 までの中で実験を行った。試料に対して 0 から 0.5 wt% の水が発生するように、パイロフィライト粉末をピストン周囲に添加した。これが高温、高压下で脱水することによって水の供給源となる。

応力-歪曲線は 0.5 wt% の水を加えたときのみ、実験を行った全ての剪断歪速度において弱化した。例えば、 $10^{-4.5} / \text{sec}$ の剪断歪速度の実験で、0.5 wt% の水を加えた実験では差応力 50 MPa 以下で弱化を示した。一方、同じ剪断歪速度で 0.5 wt% より少ない水を加えた実験では、ドライで行った実験と同様に、最大差応力が 1000 MPa まで到達した後、弱化した。回収試料を偏光顕微鏡で観察すると、添加した水が少ないほど破碎流動が卓越していた。0.5 wt% の水を添加した試料では塑性変形が卓越しており、力学データから求められるバルクの歪が 2 であることにに対して、薄片では局所的に歪マーカーが剪断歪 5 を示す領域も認められた。

赤外分光法面分析を実施し、含水量分布について測定したところ、0.1 wt% の水を加えて破碎流動が卓越した試料の含水量は少なく、最大でも $130 \text{ ppm H}_2\text{O}$ であり、水は分子状の水として含まれていた。一方、0.5 wt% の水を添加し、 $10^{-4.0} / \text{sec}$ の剪断歪速度で行った実験では、剪断歪が局所化している領域では最大 $550 \text{ ppm H}_2\text{O}$ の水が含まれていた。こちらも水は分子状の水として存在していることが分かった。このような水はおそらく粒界に含まれていると考えられる。同試料内でも破碎している領域が見られ、この領域での含水量は $250 \text{ ppm H}_2\text{O}$ 程度であった。このように、微小試料内においても、含水量の不均質性によって、脆性変形から塑性流動までの変形機構の遷移が認められた。以上の実験結果より、実際の天然のマクロの場合においても、水が周囲の岩体に水が導入され、非平衡状態、かつ不均質に分布した中で、水に富んだ領域で塑性変形が局所的に促進されていると推察できる。本発表ではこのような添加した水の量の違いによる応力-歪曲線の変化に加えて、微細組織の発達、そして試料内部での含水量測定から水の存在状態を考察すると共に、その不均質分布と変形との関連性について議論する。

キーワード: Griggs 型変形試験機, 剪断変形実験, 水の導入, 塑性変形の促進, 赤外分光法

Keywords: Griggs deformation apparatus, Shear deformation experiment, Water introduction, Enhancement of plastic deformation, IR spectroscopy

下部地殻グラニュライト中の過冷却メルト包有物とチャンネル流動による急速上昇 Supercooled melt inclusions in lower-crustal granulites and rapid exhumation by channel flow

廣井美邦^{1*}, 柳綾彦¹, 加藤睦実¹, 小林記之¹, プレームベルナルド², 外田智千³, サティッシュクマール M.⁴, 石川正弘⁵, 足立達朗⁶, 小山内康人⁶, 本吉洋一³, 白石和行³

Yoshikuni Hiroi^{1*}, Ayahiko Yanagi¹, Mutsumi Kato¹, Tomoyuki Kobayashi¹, Bernard Prame², Tomokazu Hokada³, M. Satish-Kumar⁴, Masahiro Ishikawa⁵, Tatsuro Adachi⁶, Yasuhito Osanai⁶, Yoichi Motoyoshi³, Kazuyuki Shiraiishi³

¹ 千葉大学, ² スリランカ地質調査所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 新潟大学, ⁵ 横浜国立大学, ⁶ 九州大学

¹Chiba University, ²Geological Survey of Sri Lanka, ³National Institute of Polar Research, ⁴Niigata University, ⁵Yokohama National University, ⁶Kyushu University

我々は従来の想定(常識)をはるかに超える速度でグラニュライトが上昇・冷却したことを示す証拠を、太古代から顕生代までの世界各地の大陸衝突型造山帯(太古代のリンポポ帯、原生代のグレンビル帯、原生代末期-古生代初期のスリランカのハイランド岩体と南極のリュツォ・ホルム岩体、古生代中期のボヘミア岩体)に産出するグラニュライト中に見出した。それはザクロ石結晶中の急冷組織(球晶状、樹枝状、骸晶状の石英、長石、斜方輝石などを含む)をもつメルト包有物であり、部分融解メルトが50%以上の大過冷却度で固結したことで、固結後も再結晶・粗粒化がほとんど起こらない程度に急速に冷却したことを示す。特にスリランカでの広域的で、特定の構造的な位置での産出は注目し、グラニュライトの上昇機構や速度に新しい視点を与えるものである。

キーワード: 珪長質メルト包有物, グラニュライトの上昇, 過冷却, チャンネル流動

Keywords: felsic melt inclusions, granulite exhumation, supercooling, channel flow

下部マントル上部に沈み込んだスラブ内でのフェロペリクレーズの連結とそれに伴う粘性降下とスラブの形態

Interconnection of ferro-periclase reduces viscosity of the subducted slab at the top of lower mantle

山崎 大輔^{1*}

Daisuke Yamazaki^{1*}

¹ 岡山大学

¹ Okayama University

Subduction of cold slab is one of the most important phenomena for dynamics of the Earth and hence many studies have been performed based on geophysical observation, geodynamical simulation and mineral physics. Seismic tomography revealed that the subducting slab classified in two types from the view of shape of slab around 660 km depth discontinuity: one is the continuous penetration into the deep lower mantle and the other is stagnation around 660 km discontinuity forming horizontal layer at this depth (e.g., 1, 2). However, recent tomographic images show the trapped slabs around 1000 km depth, for example, Tonga, Java, Kermadec, Mariana and so on (3, 4). The slab shape around 660 km depth can be explained by the viscosity structure after phase transformation in which relatively low (high) viscosity with colder (warmer) slab because of small (large) grain size (5). However, for understanding the whole mantle convection, the mechanism to trap the subducting slab around 1000 km depth, related to the rheology of lower mantle rock, should be clarified.

The mineral assembly of the subducting slab in the lower mantle is approximately 80 volume % of silicate perovskite and 20 volume % of ferro-periclase. Therefore, we often approximate the bulk rheology of slab by that of silicate perovskite. This approach works well when dominant phase is weaker than secondary phase, for example, a case of the upper mantle (6). However, in the case of the lower mantle, this approximation does not work because silicate perovskite is much stronger than ferro-periclase (7). A presence of ferro-periclase may significantly reduce bulk viscosity when the interconnected layer of ferro-periclase is formed in the bulk rock (8). To estimate the bulk viscosity, we need to understand not only individual viscosities of silicate perovskite and ferro-periclase but also the connectivity of ferro-periclase in the lower mantle rock.

In the present study, we observed the electrical conductivity change of post-spinel phase just after phase transformation from ringwoodite with time at the uppermost lower mantle conditions to detect the interconnectivity of ferro-periclase. The electrical conductivity is very sensitive for the interconnection of high conductive phase of ferro-periclase in mantle composition. Based on the results of the electrical conductivity measurements by means of high pressure experiments, ferro-periclase forms the interconnected layer in the aggregates of silicate perovskite and ferro-periclase. The interconnected microstructure can be maintained for a geological time scale (~10 My) under the condition of the cold subducted slab (~800 °C), indicating the low viscous slab even at lower temperature than the surrounding mantle, because of lower viscosity of ferro-periclase than that of silicate perovskite. The low viscous slab may be prevented the penetration into the deeper lower mantle against the high viscous region at ~1000 km depth, named "viscosity hill" (9, 10), and therefore causes the stagnation at this depth observed in seismic tomography.

references

1. Y. Fukao, M. Obayashi, H. Inoue, M. Nenbai, *J. Geophys. Res.* 97, 4809 (1992).
2. J. Lei, D. Zhao, *Phys. Earth Planet. Inter.* 154, 44 (2006).
3. S. Widiyantoro, A. Gorbato, B. L. N. Kennett, Y. Fukao, *Geophys. J. Inter.* 141, 747 (2000).
4. Y. Fukao, M. Obayashi, DI23C-01, 2010 Fall meeting.
5. S.-i. Karato, M. R. Riedel, D. A. Yuen, *Phys. Earth Planet. Inter.* 127, 83 (2001).
6. S.-I. Karato, P. Wu, *Science* 260, 771 (1993).
7. D. Yamazaki, S.-i. Karato, *American Mineralogist* 86, 385 (2001).
8. M. Handy, *J. Struct. Geol.* 16, 287 (1994).
9. J.X. Mitrovica, A.M. Forte, *Earth and Planetary Science Letters* 255, 177 (2004).
10. R.M. Wentcovitch, J.F. Justo, Z. Wu, C.R.S. da Silva, D.A. Yuen, D. Kohlstedt, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 8447 (2009).

シンクロトロン放射光分析による鉱物の高圧相転移とレオロジーに関する研究 Synchrotron radiation study on rheological properties of minerals during high-pressure transformations

土井 菜保子¹, 加藤 工¹, 久保 友明^{1*}, 野田 真彦¹, 長與 陽子¹, 今村公裕¹, 白石 令², 鈴木 昭夫², 大谷 栄治², 西原 遊³, 亀掛川 卓美⁴, 肥後 祐司⁵

Naoko Doi¹, Takumi Kato¹, Tomoaki Kubo^{1*}, Noda Masahiko¹, Yoko Nagayo¹, Msahiro Imamura¹, Rei Shiraishi², Akio Suzuki², Eiji Ohtani², Yu Nishihara³, Takumi Kikegawa⁴, Yuji Higo⁵

¹ 九大・理, ² 東北大・理, ³ 愛媛大・地球深部研, ⁴ 物構研・高工ネ研, ⁵ JASRI

¹ Kyushu Univ., ² Tohoku Univ., ³ GRC, Ehime Univ., ⁴ IMSS, KEK, ⁵ JASRI

Phase transformations of minerals have an important role on the rheology of subducting slabs. Flow properties and the dominant mechanism of deformation are possibly affected through changes of the crystal structure, grain size and polycrystalline texture during the transformation. In the peridotite layer of subducting slabs, the olivine-spinel and the post-spinel transformations are major reactions, which are thought to be origin of the 410 and 660 km seismic discontinuity in the mantle, respectively. In this study, to investigate effects of these transformations on rheological behavior of the subducting slabs, simultaneous deformation and transformation experiments were conducted using analogue reaction systems. Flow stress and transformed fraction were quantitatively obtained by in-situ X-ray observations during the constant strain rate deformation using deformation-DIA (D-DIA) apparatus.

High-pressure transformations of fayalite (Fe_2SiO_4) and albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) were used for the analogue of the olivine-spinel and the post-spinel transformation in $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, respectively. High-pressure deformation experiments were conducted using D-DIA apparatuses at the NE-7 of PF-AR and BL04B1 of SPring-8. The plastic deformation and high-pressure transformation processes were simultaneously observed by time-resolved two-dimensional X-ray diffraction (2DXRD) measurements using monochromatic X-ray (energy 50 keV). 2DXRD patterns were used to obtain the transformed fraction and the differential stress of the sample that was estimated from the distortion of the Debye ring. Plastic strain of the sample was measured from the X-ray radiography images. The microstructure and crystallography of recovered samples were observed using a FE-SEM with an EBSD system.

The olivine-spinel transformation experiments in polycrystalline fayalite were conducted at 973 and 1173 K under quasi-hydrostatic and non-hydrostatic (the samples deformed with the strain rate of $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) conditions. Overpressure needed for the transformation under non-hydrostatic condition at 973 and 1173 K (2.9 and 0.6 GPa) was smaller than under quasi-hydrostatic condition (3.8 and 1.5 GPa). In deformed sample, creep curves indicated that the sample became harder with increase of the spinel fraction. This observation suggests that the olivine-spinel transformation under relatively small overpressure and high-temperature condition would not cause the slab weakening.

Both the post-spinel transformation and the albite decomposition are eutectoid reactions with having an alternating fine lamellar structure. To investigate the creep behavior during eutectoid transformation, two kinds of polycrystalline starting materials, parental albite and decomposed jadeite + quartz aggregate, were prepared. High-pressure deformation experiments were conducted at 2-4 GPa, 873-1073 K and the strain rate of 10^{-6} - 10^{-5} s^{-1} . The microstructures of recovered samples as well as the flow and kinetic data suggest sequential variation of the creep mechanism from dislocation creep of the transformed eutectoid colony followed by the grain-size sensitive creep in the degenerated eutectoid structure. This study demonstrated that the creep behavior during the eutectoid transformation involves various processes than previously thought. The slabs may not be weakened promptly after entering into the lower mantle when the size of eutectoid colony is enough large, and keep their strength (or harden) over a period of time depending on the degeneration kinetics of the colony.

オリビン - メルト系の拡散クリープ下での微細構造形成 Microstructural development under diffusion creep of olivine-melt system

末善 健太^{1*}, 宮崎 智詞¹, 平賀 岳彦¹
Kenta Sueyoshi^{1*}, Tomonori Miyazaki¹, Takehiko Hiraga¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

天然の岩石中に見出される結晶格子選択配向 (LPO) は、岩石が変形を受ける過程において生じると考えられている。例えば、アセノスフェアにおける地震波異方性の成因は、マントル流動下での剪断変形に伴う LPO 形成にあると考えられる。こうした場所にはメルトの存在が指摘されており、部分溶融下でのマントル岩石のレオロジー及び変形による微細構造形成は、アセノスフェアの実態を知る上で重要である。これまで、オリビン - メルト系の変形実験は数多くなされ (例えば、Zimmerman et al. 1999; Holtzman et al. 2003)、変形によって生じたオリビン LPO のパターンには、いくつかの種類があることが明らかにされている。しかしながら、その LPO パターンの多様性の成因は、未だ明らかになっていない。

本研究では、オリビン-メルトの流動特性と微細構造の関係を明らかにする目的で、オリビン - メルト系での室内変形実験を行った。まず鉄を含まないオリビンにアノーサイト成分に富むメルト (10~20vol %) を加えたバルク体を合成した。圧縮試験は、管状炉が付されたインストロン型の変形試験機を用い、大気圧下・温度 1260 度、歪速度 $10e^{-5}$ ~ $10e^{-4}$ /s の条件で行った。変形中の試料に加わる応力と変位速度を測定することで、応力-歪速度の関係を得た。

それによると、応力指数は概ね 1 であり、このことから本実験における変形のメカニズムは、拡散クリープであったと考えられる。試料回収後、バルク体中のオリビンの結晶方位を走査型電子顕微鏡下での電子後方散乱回折 (EBSD) 法を用いて測定した。その結果、オリビン結晶の b 軸が圧縮方向に配向することが見出された。また、メルトの分布にも特徴的な変化がみられた。変形後の試料中では、大きなメルトポケット (>100 μ m) は、圧縮方向に垂直なメルトバンドを作り、一方で粒間の小さなメルトポケットは、圧縮方向に平行な方向に並んでいる様子が観察できた。前者は、メルトがオリビン結晶より柔らかいため、選択的に大きく変形したものであり、後者は引張軸方向にオリビン粒子が分離し、その間をメルトが埋めたものであると考えている。オリビンの選択配向は、オリビン粒子平衡形の短軸が b 軸に一致していたことによるのかもしれない。

キーワード: 拡散クリープ, オリビン - メルト系, 格子選択配向

Keywords: diffusion creep, olivine-melt system, LPO

オリビン拡散クリープ下での様々なLPOパターン発現 Development of olivine LPO under diffusion creep

宮崎 智詞^{1*}, 末善 健太¹, 平賀 岳彦¹
Tomonori Miyazaki^{1*}, Kenta Sueyoshi¹, Takehiko Hiraga¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Univ. Tokyo

Lattice preferred orientation (LPO) of olivine is considered to be a main cause of anisotropic mantle especially of its elasticity, which can tell its dynamic state such as flow direction of the mantle. Olivine LPO is considered to be a consequence of dislocation creep process in the mantle so that intense investigations of the easy slip systems of the mineral under various geological conditions such as temperature, pressure and water fugacity have been conducted. Here we show that synthetic polycrystalline forsterite (+ Ca-bearing enstatite) aggregates demonstrate strong LPO after deformation under diffusion creep where large contribution of grain boundary sliding (GBS) to the sample strain. Combining the LPO patterns developed under tensile and compression tests, our observations correspond to A- and E-type fabrics, previously identified in experimental and natural samples, depending on temperature conditions without the effect of water and pressure on intragranular slip systems. Development of LPO under GBS creep strongly correlates the shape of grains which is crystallographically controlled. Such crystal shape provides grain boundary planes corresponding to crystallographic planes so that GBS and its consequence of grain rotation proceed at specific direction of the crystal resulting in an alignment of specific crystallographic axis to the flow direction forming LPO. Our finding adds new interpretations of the mechanism to form mantle anisotropy.

キーワード: オリビン, LPO, 拡散クリープ

Keywords: olivine, LPO, diffusion creep

含水かんらん岩における転位すべりと粒界すべりの競合 Cooperation of dislocation gliding and grain boundary sliding in hydrous peridotite

水上 知行^{1*}, David Mainprice², Andrea Tommasi², Fabrice Barou²
Tomoyuki Mizukami^{1*}, David Mainprice², Andrea Tommasi², Fabrice Barou²

¹ 金沢大学自然システム学系地球学コース, ²Geosciences Montpellier, Universite de Montpellier 2

¹Earth Science Course, School of Natural System, Kanazawa University, ²Geosciences Montpellier, Universite de Montpellier 2

Deformational behavior of olivine in mantle wedge strongly affects subduction dynamics and geological processes at convergent margins (mantle flow, volcanism, earthquakes and orogeny). Many experimental works are addressed on the deformation under wet conditions. However, there are some difficulties in extrapolating the results to the conditions in subduction zones, especially for temperature conditions. A recent experimental study showed that a mechanism of grain boundary sliding (GBS) can be prevailing in polycrystalline olivine with interstitial hydrous melt, suggesting that a superplastic flow due to GBS of olivine possibly affects on a coupling between mantle wedge and subducting slab. Our EBSD analyses of natural hydrous peridotite revealed transitional structures due to cooperation of GBS and dislocation gliding. Here we present results of microstructural analyses that constrain a GBS flow law under wet conditions.

We used three dunite samples with different proportions of olivine porphyroclasts (SGB) (about 20, 40 and 60%), representing the various degrees of recrystallization. They were exposed at the Gongen outcrop that belongs to the Higashi-akaishi ultramafic body in the Sanbagawa metamorphic belt. All the samples include mm-sized planar grains of amphibole that define the strain geometry of samples. Strain shadows of chlorite and phlogopite around amphibole porphyroclasts indicate water-rich conditions during deformation. Geothermometry for fine Opx and Cpx in the matrix suggests deformational temperature of 700-770 oC. Pressures are inferred to be in a range of 1-2 GPa.

Using well indexed EBSD maps for these samples, olivine grains are separated into two fractions with and without significant internal misorientation (MO): we call them as wSGB and w/oSGB grains respectively. Then, we analyzed grain size, axial ratio and crystallographic preferred orientation (CPO) for each fraction and internal MOs of representative porphyroclasts using MTEX and HKL software.

The olivine CPO of wSGB is stronger in a more recrystallized sample and shows a weak concentration of a-axis parallel to amphibole lineation. On the other hand, the CPO of w/oSGB is weak and independent of the extent of recrystallization. Grains with SGB are elongated (aspect ratio = 2.0) whereas those without SGB are close to equant. Frequency distributions of grain sizes for wSGB and w/oSGB can be approximated as distinctive log-normal distributions and the mean values are $10^{2.3}$ micron for wSGB and $10^{2.0}$ micron for w/oSGB.

These observations suggest that larger grains are dominated by intracrystalline deformation with a dislocation mechanism. Sub-grain structures in porphyroclasts are consistent with [100] slip in {0kl} planes. On the other hand, smaller grains have been deformed under a mechanism without CPO strengthening. Almost equant shapes of olivine grains and high frequency of quadruple junctions of grain boundaries are consistent with GBS mechanisms rather than diffusion creep. Recrystallizing porphyroclasts is associated with nucleation of neoblasts in support of grain boundary migration, implying that diffusional processes have accommodated displacements among grains.

We interpreted that the microstructures of the hydrous dunite record a mechanism transition from dislocation gliding to diffusion-accommodated GBS due to grain size reduction. The critical grain size for mechanism transition lies between representative grain sizes of wSGB (200 micron) and w/oSGB (120 micron). Differential stress is estimated as 30-130 MPa based on recrystallized grain size piezometers. These values are, however, inconsistent with an extrapolation of an experimentally determined GBS flow law. This indicates that some refinement of the flow law parameters are required in order to discuss deformational mechanisms in cold thermal conditions expected for subduction zones.

Keywords: olivine, microstructure, rheology, grain boundary sliding, hydrous peridotite, subduction zone

カンラン岩中の変形したオリビンの微細組織観察 Microstructural observation on naturally deformed olivine in peridotite

山本 貴史^{1*}, 安東 淳一¹, 大藤 弘明², 富岡 尚敬³, 森下 知晃⁴

Takafumi Yamamoto^{1*}, Jun-ichi Ando¹, Hiroaki Ohfuji², Naotaka Tomioka³, Tomoaki Morishita⁴

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

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Geodynamics Research Center, Ehime University,

³Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, ⁴Frontier Science Organization, Kanazawa University

上部マントルのダイナミクスを理解する上で、マントル起源の塑性変形したオリビンの微細組織観察は重要である。転位のすべり系、転位密度、再結晶粒径と言った微細組織は、鉱物が受けていた変形状態を反映するからである。そこで我々は、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で採取された上部マントル起源のカンラン岩捕獲岩を対象に微細組織観察を行い、各カンラン岩が受けた塑性変形の履歴を推測した。

本研究では、オリビンのすべり系を1)電子線後方散乱回折(EBSD)を用いた結晶方位定向配列(LPO)と2)透過型電子顕微鏡(TEM)を用いたWeak-Beam Dark-Field(WBDF)法から決定した。転位密度の決定にはTEMを用い、再結晶粒径は主に偏光顕微鏡観察を基に決定した。オリビンのすべり系は温度と差応力によって変化する事が知られている(Carter and Ave Lallemand, 1970)。また、Jung et al. (2006)は変形実験を基に、差応力と含水量によって変化する5つのすべり系を報告している。従って、これらの研究結果とマントル起源の変形したオリビンのすべり系を比較する事で、上部マントルに於いてオリビンが受けていた変形状態を推測できる。また、転位密度と再結晶粒径は地質差応力計として使用可能である。転位密度と再結晶粒径は差応力に対する応答速度(定常値に達する速度)が異なる為に、この2つの地質差応力計から求めた差応力値が異なる場合には、岩石の受けた差応力履歴を推定することができる(例えば、Matsumoto and Toriumi, 1989)。

以下に結果をまとめる。LPOから推測されるオリビンのすべり系は、黒瀬、目潟、ソルトレイクの試料では同一であり、(010)[100]-A-type, {0kl}[100]-D-type, (001)[100]-E-typeのいずれかであると考えられる。高島の試料に関してはLPOの集中度が弱い為にすべり系を判断することが困難であるが、(010)[001]-B-type, もしくは(100)[001]-C-typeの可能性が考えられる。

一方、WBDF法より得られたすべり系は、高島とソルトレイクは(010)[100]-A-type, 黒瀬と目潟は(001)[100]-E-typeが卓越していた。黒瀬、目潟、ソルトレイクの結果はLPOから得られるすべり系を支持する結果となっている。Jung et al. (2006)によると、A-typeとE-typeはそれぞれ“低差応力・低含水条件”と“低差応力・高含水条件”で形成されるすべり系なので、高島とソルトレイク及び黒瀬と目潟の捕獲岩はそれぞれ“低差応力・低含水条件”と“低差応力・高含水条件”で塑性変形したと考えられる。高島に関しては、LPOから推測されるすべり系とWBDF法より得られたすべり系が一致しない。これは高島の受けた差応力の履歴を反映していると考えられる。

転位密度と再結晶粒径は、高島で約 $2.8 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ と約1.1mm, 黒瀬で約 $3.5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ と約0.3mm, 目潟で約 $1.8 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ と約1.3mm, ソルトレイクで約 $3.7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ と約0.5mmであった。これらの値から、Kohlstedt and Goetze (1974)とJung and Karato (2001)の転位密度-差応力と粒径-差応力の関係式を用いて差応力値を求めた。粒径-差応力に関してはドライな条件と含水条件の2種類の関係式が提示されており、各々を高島とソルトレイク及び黒瀬と目潟の捕獲岩に適用した。その結果、目潟、高島、ソルトレイクに関しては転位密度から得られた差応力が再結晶粒径から得られた差応力よりも大きな値を示した。転位密度は再結晶粒径に比べ、新しい応力へ早く応答する為に、これらの試料は定常クリープ後に付加的な応力を受けたことが示唆される。一方、黒瀬の試料は、転位密度と再結晶粒径から得られた差応力はほぼ一致していた。従って、この試料は定常クリープ状態を保持していたと考えられる。

現在はAlpine typeのペリドタイト試料に関して、同様の観察と分析を進めている。

Carter and Ave Lallemand (1970) The Geological Society of America, 81, 2181. Jung and Karato (2001) Journal of Structural Geology, 23, 1337. Jung et al. (2006) Tectonophysics, 421, 1. Kohlstedt and Goetze (1974) Journal of Geophysical Research, 79, 2045. Matsumoto and Toriumi (1989) In “Rheology of Solids and of the Earth”, pp.374.

Keywords: Olivine, Peridotite, Slip system, Dislocation, Weak-Beam Dark-Field method

石英岩の格子定向配列に及ぼす動的再結晶の役割 Role of dynamic recrystallization in lattice preferred orientation of quartz rocks

武藤 潤^{1*}, 金子 英亮¹, 長濱 裕幸¹

Jun Muto^{1*}, Hideaki Kaneko¹, Hiroyuki Nagahama¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Dept. Earth Sci., Tohoku University

From the microstructural analysis of plastically deformed rocks, the c-axis lattice preferred orientation (LPO) of quartz has been utilized to infer deformation conditions: sense of shear, deformation temperature, and/or water content. The c-axis LPO patterns change from type I crossed-girdle at lower temperature to point maxima at Y axis of strain ellipsoid (Y max LPO) at intermediate temperature, to point maximum at X axis (X max LPO) at higher temperature. The change in LPO patterns is known to reflect the change in the dominant slip systems of quartz from basal $\langle a \rangle$ and rhomb $\langle a \rangle$ slip, to mainly prism $\langle a \rangle$ slip, to prism [c] slip with deformation temperature (Stipp et al., 2002). Most naturally deformed rocks with a strong LPO are dynamically recrystallized. It is not clear whether the LPO patterns are controlled only by the dominant slip systems or by dynamic recrystallization processes such as grain boundary migration and subgrain rotation. Recent experiments have clarified the formation of Y max LPO patterns with increasing strains and degree of dynamic recrystallization where grain boundary migration is the dominant mechanisms of dynamic recrystallization (Heilbronner and Tullis, 2006; Muto et al., 2011). However, the effect of other mechanisms occurring under lower temperature conditions has been not clear yet. In order to clarify how dynamic recrystallization affects the LPO development under lower temperature than previous experiments, we conducted general shear experiments in a Griggs apparatus using single crystals of synthetic quartz. We utilized three different initial orientations to activate three dominant slip systems of quartz: basal $\langle a \rangle$, prism $\langle a \rangle$ and prism [c] slip. The c-axes of samples with initial orientations for basal $\langle a \rangle$ slip system and prism [c] slip system progressively rotated with the sense of shear with strains. The amount of the rotation at a given strain is larger in the samples with prism [c] initial orientation than those of basal $\langle a \rangle$ initial orientation, implying the rapid consumption of the harder slip system. The c-axis of samples in the basal $\langle a \rangle$ initial orientation rotated 90 degrees to prism [c] orientation at gamma of 2 and further to the orientation suitable for basal $\langle a \rangle$ slip. The samples of the prism [c] initial orientation rotated 90 degrees to orientation suitable for basal a slip and completely recrystallized at gamma ~ 6. Recrystallized grains show symmetric broad single maximum at the Z axis of the strain ellipsoid, consistent with the c-axis LPO of recrystallized grains (Heilbronner and Tullis, 2002) where bulging is the dominant recrystallization mechanism. On the other hand, the samples with prism $\langle a \rangle$ initial orientations did not show any recrystallization up to strains as high as gamma of 7 and kept its c-axis orientation located at the Y axis of the strain ellipsoid. This indicates that grains in basal $\langle a \rangle$ and prism [c] initial orientations were recrystallized to activate easy basal $\langle a \rangle$ slip with progressive deformation. On the other hand, the grains with prism $\langle a \rangle$ initial orientation do not change their c-axis orientations with progressive shear. Therefore, the activation of easy basal $\langle a \rangle$ slip and additional prism $\langle a \rangle$ and/or rhomb $\langle a \rangle$ slip to satisfy von Mises criterion results in the development of type-I crossed or inclined single girdle depending on the deformation geometry. With increasing deformation temperature to higher greenschist to amphibole facies conditions where rapid grain boundary migration can occur, grains oriented for weak prism $\langle a \rangle$ slip can grow at the expense of grains in other orientations, results in development of Y max LPO with dynamic recrystallization (Heilbronner and Tullis, 2006; Muto et al., 2011). Therefore, the LPO transition observed in natural deformed rocks from type I crossed or single girdle to Y max LPO may basically reflect the change in dominant mechanisms of dynamic recrystallization with temperature.

キーワード: 格子定向配列, 石英, 動的再結晶, 地殻のレオロジー

Keywords: Lattice preferred orientation, Quartz, Dynamic recrystallization, Rheology of crust

メジャーライトガーネット中のアルミニウム、シリコン相互拡散と転位微細構造 Al, Si interdiffusion in majoritic garnet and the dislocation microstructures.

宮島 延吉^{1*}
Nobuyoshi Miyajima^{1*}

¹ ドイツ、バイエルン地球科学研究所

¹Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth, Germany

Plastic deformation by dislocations and atomic diffusion by vacancies of minerals at high pressures are important for the rheology of the Earth's mantle. Because those processes are controlled by moving of two agents (line and point defects) in deformations at high temperature, the post-mortem examination by analytical transmission electron microscope is indispensable for evaluating those agents (carriers). Majoritic garnet (MajGt) and magnesium silicate perovskite (MgPv) are major constituents in the mantle transition zone and the lower mantle, respectively. Diffusivity differences of the slowest species between these mantle minerals are very important to understand the changes of the nature of chemical heterogeneity, viscosity through those creep law, and other various transport properties across the upper and lower mantle boundary.

Here I report an Al + Al = Si + Mg interdiffusion between MajGt and pyrope garnet. The diffusion couples using a multi-anvil press are pre-synthetic Mg₃Al₂Si₃O₁₂ pyrope and majoritic garnet. The annealing condition is at 18.5 GPa and 1750-1950 degree Celsius for 120-300 minutes, corresponding to a MajGt-single phase region in the binary system MgSiO₃-Al₂O₃. Diffusion profiles of the recovered sample were examined with electron probe microanalyser (EPMA), scanning electron microscopes (SEM) and scanning transmission electron microscopes (STEM) equipped with an energy dispersive X-ray spectrometer (EDXS). Dislocation microstructures were also examined in weak-beam dark-field images using the thickness-contour fringe method (Ishida et al., 1980; Miyajima and Walte, 2009).

MajGt displays <100> and 1/2 <111> free dislocations and subgrain textures consisting of a dislocation array, suggesting that climb of dislocations was occurred during diffusion annealing. The obtained Al + Al = Mg + Si interdiffusion coefficient (D_{Al}) of MajGt at 18.5 GPa and 1750 degree Celsius is $6.2(4) \times 10^{-19}$ (m²/s), which is comparable with those of Mg and Si self-diffusion coefficients in MgPv under lower mantle conditions (Xu et al., 2011). However, the D_{Al} is significantly higher than those of in previous studies in majoritic garnets at temperatures less than 1750 degree Celsius (e.g., Nishi et al. 2013). The preliminary obtained activation energy in this study is much higher in the temperature from 1750 to 1950 degree Celsius, where is likely to be the intrinsic regime in the interdiffusion. Comparisons with Al, Si interdiffusion in Fe-bearing majoritic garnets are given to highlight the effect of impurities and temperature on those diffusion rates. Considerations for further diffusion experiments in MajGt and aluminous MgPv are discussed toward the rheology from the transition zone from the lower mantle. I thank the generous support from BGI colleagues for commissioning of this study.

References:

Ishida et al. (1980) Determination of the Burgers vector of a dislocation by weak-beam imaging in a HVEM. *Philos. Mag. A*, 42, 453-462.

Miyajima, N., and Walte, N. (2009) Burgers vector determination in deformed perovskite and post-perovskite of CaIrO₃ using thickness fringes in weak-beam dark-field images: *Ultramicroscopy*, 109, 683-692.

Nishi et al. (2013) Slow Si-Al interdiffusion in garnet and stagnation of subducting slabs. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 44-49.

Xu et al. (2011) Silicon and magnesium diffusion in a single crystal of MgSiO₃ perovskite. *J. Geophys. Res.*, 116, B12205.

Keywords: majoritic garnet, Al, Si interdiffusion, analytical transmission electron microscope, weak-beam dark-field image, dislocation microstructures

二次元単色 X 線回折を用いたカンラン石の粒成長実験 Grain-growth experiments of olivine using 2D monochromatic X-ray diffraction pattern.

辻野 典秀^{1*}, 櫻井 萌², 肥後 祐司³, 高橋 栄一², 山崎 大輔¹
Noriyoshi Tsujino^{1*}, Moe Sakurai², Yuji Higo³, Eiichi Takahashi², Daisuke Yamazaki¹

¹ 岡山大学・地球物質科学研究センター, ² 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ (財) 高輝度光科学研究センター
¹ISEI, Okayama University, ²Tokyo Institute of Technology, ³Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Rheology is one of the most important mineral properties which plays a major role in controlling dynamic processes in the Earth's mantle. Olivine is the most abundant mineral in the upper mantle (60vol% in pyrolite mantle). Rheology in the upper mantle is dominated by this mineral. If diffusion creep is the most dominant deformation mechanism, the rheology of an aggregate is a function of the grain size of the constituent minerals. Thus, knowledge of grain size of olivine is important for understanding the rheology of the upper mantle.

The grain size of rock is controlled by several mechanisms (e.g. grain-growth, dynamic recrystallization and recrystallization by phase transformation). Grain-growth is one of the most important processes in controlling the grain size of the rock by which grain size is enlarged. Grain-growth experiments of olivine were conducted by some workers (e.g. Karato 1989, Ohuchi and Nakamura 2006). However grain-growth exponent, which is a parameter of time dependence, is controversial between previous studies.

Thus, in this study, we have investigated grain-growth kinetics in the olivine single phase system at high pressure and temperature (1373 - 1573 K, 2.3 - 10.5 GPa) using an in situ monochromatic X-ray diffraction and Kawai-type multi-anvil apparatus (SPEED-1500) installed at the synchrotron beam line, BL04B1, in the SPring-8 at the Japan Synchrotron Radiation Research Institute. The San Carlos olivine powder was used as starting material. The grain size was estimated by the relationship between the number of diffraction spot and the number of grains per radiated volume reported by Hirsch (1955).

The grain-growth kinetics of olivine is described by $G^n - G_0^n = k_0 \exp(-(E + PV)/RT)t$ where G is the average grain size at annealing time t ; G_0 , the initial average grain size; k_0 is the pre-exponential constant, E is activation energy, P is pressure, V is activation volume, R is the gas constant and T is absolute temperature, with $n = 2.5 \pm 0.2$, $\log_{10} k_0 = -9.2 \pm 2.6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-5}$, $E = 184 \pm 10 \text{ kJ/mol}$, $V = 0.4 \pm 0.2 \text{ cm}^3/\text{mol}$. The activation energy of grain-growth is similar to that of grain boundary migration (Toriumi, 1982). Thus, in terms activation energy and grain-growth exponent, in this study, grain-growth could be caused by grain boundary migration in the single phase system.

キーワード: カンラン石, 粒成長, その場観察実験, 上部マントル
Keywords: olivine, grain-growth, in-situ experiments, upper mantle

DAC 実験における選択配向性および格子ひずみの解析手法の開発 Texture and strain analyses using 2-dimensional X-ray diffraction patterns under DAC experiments

瀬戸 雄介^{1*}

Yusuke Seto^{1*}

¹ 神戸大・院・理

¹ Kobe Univ. Sci.

Angle dispersive X-ray diffraction experiments using area detectors (CCD and CMOS cameras and image-plate recorders) provide wide opportunity for the determination of lattice preferred crystallite orientation (LPO) and lattice strain under stress condition in polycrystalline materials. LPO is reflected in circumferential oscillations along Debye rings, while the effect of lattice strain appears in elliptic distortions of the each ring and a deviation of the original crystallographic geometry among rings. These are substantial factors of bulk physical properties in polycrystalline materials, including seismic velocity, thermal/electric conductivity and so on. Diamond anvil cell (DAC) is the only technique that can create at extreme pressures corresponding to the Earth's core, and it simultaneously involves non-hydrostatic, uniaxial stress in the sample. Although such non-hydrostatic effects under DAC experiments has been reported many previous studies, in many cases the quantitative treatments have not yet been developed into a standard technique.

In order to examine quantitative stress conditions under DAC experiments, high pressure experiments were carried out in a symmetrical DAC in the present study. Two starting materials, Al₂O₃ (~1μm in diameter) and MgO (<0.1 μm), were used as starting materials, and no pressure media were loaded. Each runs were performed at the pressures from 0 GPa to 70 GPa by 10 GPa step under room temperatures, and synchrotron X-ray diffraction patterns were collected using a flat image-plate at BL10XU at SPring-8. A software code was also developed by the author, which simulates a two-dimensional diffraction pattern based on given experimental parameters and (poly)crystalline properties. A fitting procedure was also incorporated into the code, where the orientation distribution and stress condition were iteratively modified according to a residual value of the simulated/observed patterns.

In runs of Al₂O₃ experiments, the diffraction peaks became distinctly broad and asymmetric shapes with increasing pressures, whereas the scattering angles (2θ) were apparently almost constant. This means that lattice compression involved by pressures was cancelled out by deviatoric stress. Nonetheless, the stress conditions could be derived mainly from the shapes of the peaks using the fitting procedure; e.g. at the highest pressure condition in the present study, maximum and minimum principal stresses could be estimated as 73GPa (parallel to compression axis) and 25 GPa, respectively, corresponding to the deviatoric stress of 50 GPa. The maximum principal stress was consistent with the estimated pressure by the diamond Raman pressure scale. On the other hand, MgO experiments maintained pseudo-hydrostatic conditions with small deviatoric stress only up to ~1GPa under all performed pressures. A whole pattern fitting method such as the code developed in the present study may help us understand the stress conditions under DAC experiments

キーワード: 粉末 X 線回折, ダイヤモンドアンビルセル, 二次元検出器, 多結晶体, 選択配向, 格子ひずみ

Keywords: powder X-ray diffraction, diamond anvil cell, area detector, polycrystalline material, lattice preferred orientation, lattice strain

部分溶融系の体積粘性率の測定 Experimental study of bulk viscosity of partially molten rock analogue

鈴木 彩子^{1*}, 武井 康子¹, 渡邊 俊一²
Ayako Suzuki^{1*}, Yasuko Takei¹, Shun-ichi Watanabe²

¹ 東京大学地震研究所, ² 海上保安庁海洋情報部

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Hydrographic & Oceanographic Dept, Japan Coast Guard

Viscosities of partially molten rock change significantly due to melt fraction. However its quantitative effects have not been well constrained theoretically nor experimentally. Deformation of partially molten rock is controlled by two independent viscosities: shear viscosity for shear deformation and bulk viscosity for compaction/decompaction. Bulk viscosity and its ratio to shear viscosity, h_b/h_s , play an important role in melt segregation dynamics (Katz, 2008). Most numerical studies have used the theoretically predicted value of $h_b/h_s = \sim f^{-1}$, where f is the melt fraction. However, Takei and Holtzman (2009a) theoretically obtained a constant value of h_b/h_s by taking into account a diffusion creep mechanism. The discrepancy between two models is significant at small melt fractions. There has not been experimentally determined value of h_b/h_s because very few experimental studies have been done about bulk viscosity although shear viscosity has been measured extensively. Therefore, the purpose of this study is to measure a pair of the bulk and shear viscosities for the same sample. As the first step of the experimental examination, we measured bulk viscosity experimentally as a function of melt fraction using a partially molten rock analogue.

Samples were polycrystalline aggregates of borneol-diphenylamine binary with eutectic temperature of 316K, which has a quite similar equilibrium microstructure to olivine + basalt system (Takei, 2000). Initial melt fraction can be controlled precisely by the concentration of diphenylamine because of its simple eutectic reaction. Before deformation experiments, samples were annealed at 320K for ~ 100 hours in a sealed capsule to make those grain size large enough (~ 0.030 mm), resulted in negligible grain growth during the successive deformation tests at the same temperature.

To measure the bulk viscosity, we carried out compaction experiments in which melt was squeezed from the partially molten sample under the diffusion creep regime. A cylindrical sample contacted with a porous metal at the top end was compacted uniaxially in a rigid sleeve (horizontal strain = 0, vertical strain < 0). Melt can flow out into the porous metal until its fraction becomes nearly zero. Evolution of melt fraction in the sample was calculated from the sample length measured with digital gauge. Apparent viscosity is calculated as a function of melt fraction from an instantaneous strain rate and a constant stress. Precise measurements of melt fractions at very small amounts of melt ($f < 1\%$) is crucial to test the predictions of models. Data obtained so far show the viscosity is proportional to $\exp(-af)$ with $a = \sim 30$ at $f > 3\%$, which is quite consistent with the olivine + melt systems (Renner et al., 2003). At $f < 3\%$, deviation of the viscosity from the exponential curve occurs, suggesting the possible effects of permeability and change of rate limiting process of the volumetric creep (Takei & Holtzman, 2009b).

References:

Katz RF (2008) *J.Petrol.*, 49, 2099-2121.

Renner J, Viskupic K, Hirth G, Evans B (2003) *G³*, 4, doi:10.1029/2002GC000369.

Takei Y (2000) *JGR*, 105, 16665-16682.

Takei Y, Holtzman BK (2009a) *JGR*, 114, doi:10.1029/2008JB005850.

Takei Y, Holtzman BK (2009b) *JGR*, 114, doi:10.1029/2008JB005851.

キーワード: 粘性, 体積粘性率, 部分溶融

Keywords: viscosity, bulk viscosity, partial melt, compaction

オリビン多結晶体クリープおよび電気伝導度同時測定実験 - 律速機構の解明に向けて Simultaneous measurements of creep strength and electron conductivity of polycrystalline olivine

仲小路 理史^{1*}, 平賀 岳彦¹, 三部 賢治¹
Tadashi Nakakoji^{1*}, Takehiko Hiraga¹, Kenji Mibe¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

高温・高歪速度(高応力)条件下で実験的に得られる鉱物の流動則を地球内部流動に適用するにあたっては、高精度の流動則、特に、高精度の活性化エネルギーを求める必要がある。本研究では、岩石流動の変形機構の詳細および温度に伴う流動応力変化を調べるために高温下・大気圧下でのフォルステライト多結晶体の一軸圧縮クリープ試験を行った。また、インピーダンス法により、クリープ試験中に電気伝導度測定を行った。一般に、クリープは最も遅いイオン種の拡散過程により律速され、逆に電気伝導度は最も速いイオン種の拡散過程に律速されていると考えられている。温度によるクリープ速度と電気伝導度の変化(活性化エネルギー)を高精度で求めることにより、拡散メカニズムの詳細が理解できると期待される。これより、地球内部流動における律速過程を推定し、実験室下で得られる流動則を活性化エネルギー値をもって地球内部に適用することができる。

試料は、体積比90%のフォルステライト(Mg_2SiO_4)と10%のエンスタタイト($MgSiO_3$)から成る多結晶焼結体である。圧縮クリープ試験は、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た。実験中の粒径変化を抑えるために、荷重を試料に負荷する前に、実験条件である最高温度で粒径を24時間かけて飽和させた。試験中の応力は10-20MPaの一定値温度は1360 から1200 までゆっくり変化させた。降温速度は高温領域で0.11 /min、中温度領域で0.03 /min、低温領域で0.02 /minにした。これにより、各1 ごとに歪速度を得るに十分な試料歪を得ることができ、より精度の高い応力-歪速度値が得られた。この実験中、同時に、試料のインピーダンスを計測した。ピストンと試料の接触部である上部および下部のSiCをそれぞれ電極として、2Vの交流電圧をかけることで応答電流を得ることができ、その電圧と電流の関係からインピーダンスは求められた。1360 から1200 まで10 毎に計測を行った。実験後と実験前の試料を走査型電子顕微鏡法により観察し、粒径の計測を行った。全温度領域の粘性率・温度のアレニウスプロットにおいて、両者の関係は一直線で近似されることが分かった。706 ± 1kJ/molの活性化エネルギーが求められた。この結果は、実験の温度領域で律速する拡散機構が変わらなかったこと、また、本実験手法によって、地球内部の低温領域に十分に適用できる流動則を得られることを示している。インピーダンス測定の結果は、電気伝導度が系統的に高温から低温にかけて小さくなることが示された。

キーワード: オリビン, クリープ, 多結晶, 活性化エネルギー, 電気伝導度, インピーダンス

Keywords: olivine, creep, polycrystal, activation energy, electrical conductivity, impedance

三重県中央構造線コア試料中のカタクレーサイト化の進展に伴う流体を介した元素移動

Element migration via fluids with progress of fracturing along the Median Tectonic Line, Mie Prefecture, southwest Jap

金子 由実^{1*}, 竹下 徹¹, 渡部 悠登¹, 藤本 光一郎², 重松 紀生³Yumi Kaneko^{1*}, Toru Takeshita¹, Yuto Watanabe¹, Koichiro Fujimoto², Norio Shigematsu³¹北海道大学, ²東京学芸大学, ³産業技術総合研究所¹Hokkaido University, ²Tokyo Gakugei University, ³AIST

白亜紀に形成された領家帯と三波川帯の境界となっている中央構造線においては、上盤の領家岩石中で温度の低下とともに変形が局所化し、その結果マイロナイトからカタクレーサイトまでの多様な断層岩が見られる。本研究では深度473.9 mで中央構造線を貫き、三波川帯の上部破砕帯まで掘削された三重県飯高観測井から得られた、トーナライトを原岩とするカタクレーサイト試料(深度450-470 m)について、蛍光X線分析による全岩化学組成分析に基づき、体積変化と元素移動を明らかにした。また、画像解析の手法等を用いて元素移動に伴う鉱物組み合わせの変化を詳細に明らかにした。すべての岩石はいったん流動変形を受けてマイロナイトとなっているが、その後温度低下の過程で様々な程度にカタクレーサイト化を受けている。鏡下観察により試料をカタクレーサイト化の程度(割れ目密度(本/))に基づき、比較的未変形であり原岩に近いもの、弱変形、中変形、強変形(フィロナイト)に分類した。本研究では、ポイントカウンタによるカタクレーサイト試料の鉱物モード分析を行った。この際、正確な鉱物モード組成を得るために、斜長石を白雲母化の度合いで未変質斜長石・中変質斜長石・最大変質斜長石に分類し、EDSの元素マッピング(Kを持つ部分を白雲母とした)と画像解析を用いて斜長石中の斜長石と白雲母の面積比を求めた。強変形試料におけるガウジ部については、EDSの元素マッピングの画像解析を行い、各鉱物の面積を求めた。これによりガウジ部に斜長石、石英、普通角閃石が破砕片として、緑泥石、方解石、チタナイトが沈殿鉱物として存在することが明らかになった。カタクレーサイト化の進行に伴う元素移動を解析するために、主要元素重量%について、アイソコン法を用いて体積変化と元素変動率を求めた。本研究では、Alを不動元素と仮定した。体積変化については、断層岩の密度変化が無いと仮定し、次式により見積もりを行った。 $V = [(1/S) - 1] \times 100$ 。このときSはアイソコン図の原点と不動である元素のプロットを結んだ直線の傾きである。各元素の増減とカタクレーサイト化の関係については、次式を用いて元素変動率を求めた(元素変動率) $= (El_f / Al_f) / (El_h / Al_h)$ 。このときElは任意の元素、Alは不動な元素であり、f, hは断層岩、比較的未変形な岩石である。アイソコン法による解析は「最も未変形な原岩に近いトーナライトと弱変形断層岩」、「弱変形断層岩と中変形断層岩」、「弱変形断層岩と強変形断層岩」の組み合わせについて行い、それぞれについて24%の体積増加、26%および19%の体積減少という結果が得られた。カタクレーサイトにおいてはSiO₂の増減が最も顕著であるので、未変形から弱変形における体積増加は石英の沈殿、弱変形から中変形及び強変形における体積減少は石英の溶解と流体の岩石外への移動によるものだと考えられる。カタクレーサイト化に伴う各元素変動は、Si, Naは未変形から弱変形にかけて増加し、弱変形から中変形及び強変形にかけて減少した。未変形から弱変形では、斜長石の白雲母化によって放出されたSi, Naは流体に溶解し、カタクレーサイト化によってできた空隙に流体が侵入し沈殿するため増加した。一方、弱変形から中変形及び強変形では強圧縮により流体が外部に移動するため減少したと考えられる。Fe, Mg, Ca, Tiは未変形から弱変形にかけて減少し、弱変形から中変形及び強変形にかけて増加した。ガウジ部では、強圧縮にもかかわらずFe, Mg, Ca, Tiに富む鉱物が流体から沈殿していると考えられるが、これらの元素の絶対量が増加している要因については、現段階では不明である。

キーワード: 元素移動, カタクレーサイト, アイソコン図

Keywords: element migration, cataclasite, isocon diagram

平尾台カルストに露出するカタクレサイト脈の成因 Mechanism of cataclasite occurring in Hiraodai Karst region

石山 沙耶^{1*}, 安東 淳一¹, 中井 俊一², 太田 泰弘³
Saya Ishiyama^{1*}, Jun-ichi Ando¹, Shun'ichi Nakai², Yasuhiro Ota³

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 東京大学地震研究所, ³ 北九州市立自然史・歴史博物館

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ³Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

地殻流体は、沈み込み帯で生じている地震・火山活動に密接に関係していると考えられており、現在では多角的な見地から地殻流体に関する研究が進められている。本研究では、地表に露出するカタクレサイト脈を対象として、流体の存在が起因となって生じた岩石破壊の素過程を明らかにした。

研究対象としたカタクレサイト脈は、平尾台カルスト中に発達する。平尾台カルストを構成する石灰岩は、平尾花崗閃緑岩による接触変成作用を受けて粗粒な方解石からなる大理石となっている。薄片観察を行うと、この脈の近傍の方解石のみに多量の流体包有物が認められる事が分かる。また、カタクレサイト脈内部に存在する破砕礫には、かなり円摩されたものが多く含まれており、脆性破壊時に大規模な流動が脈内で発生した事も分かる。以上の観察事実は、このカタクレサイト脈の形成に流体が関与した事を強く示唆している。本研究では、方解石の変形微細組織観察と流体包有物に対する地球化学的な研究を行い、大理石岩体を破砕させた流体の起源、及び破砕に至るプロセスを明らかにする事を試みた。対象とした試料は、1) 非変形の大粒大理石、そしてカタクレサイト脈内を構成する2) 脆性破壊を受けた大理石岩片(変形角礫)と3) 基質部を構成する方解石(変形細粒部)である。変形微細組織観察には主に偏光顕微鏡とTEMを、流体包有物の均質化温度・氷点の測定には加熱冷却台(heating/freezing stage)を、また流体包有物の起源を明らかにする為に四重極型 ICP-MS を用いた微量元素濃度測定と、マルチコレクタ型 ICP-MS を用いた Sr 同位体比測定を行った。ICP-MS を用いた測定は平尾花崗閃緑岩中の斜長石に対しても行った。

以下に主要な結果をまとめる。1) 変形細粒部を構成する方解石は等粒状で、その粒径は約 100 μm と約 300 μm にピークを持つ分布を示す。後者の粒径分布は変形角礫を構成する方解石のそれと類似する。2) 流体包有物は、変形角礫・非変形部では二次包有物が顕著であり、変形細粒部では二次包有物の他にも初生包有物がみられる。また、3) 変形角礫は変形細粒部より明らかに多くの転位のからみが形成されている。4) 流体包有物の均質化温度は、変形角礫より変形細粒部中のものが高い傾向にある。氷点は両者とも 0 にピークを持ち、塩濃度の低い流体である事が分かる。更に、5) 変形細粒部の流体包有物と平尾花崗閃緑岩中の斜長石が同一の Rb-Sr アイソクロンにのると仮定して Rb/Sr 年代を求めると、平尾花崗閃緑岩の形成年代と近い値を示す。これらの結果は以下の事を示唆する。1) 大理石岩体は明らかに流体による差応力を受け破砕流動を起こし、2) 基質部を構成する破砕された細粒な方解石は流体の存在下で結晶成長した。3) 流体包有物の低い塩濃度、斜長石における Rb-Sr 年代及び Sr 同位体初生比、変形細粒部の高い希土類元素濃度は、この破砕を引き起こした流体が花崗岩マグマに関与した流体である可能性を支持する。

キーワード: カタクレサイト, 地殻流体, 水圧破砕, Sr 同位体比, 流体包有物

Keywords: Cataclasite, Geofluid, Hydrofracturing, Sr isotope, Fluid inclusion

粘土鉱物の非晶質化と結晶度 Amorphization of clay minerals and crystallinity

藤本 光一郎^{1*}, 福地 里菜¹
Koichiro Fujimoto^{1*}, Rina Fukuchi¹

¹ 東京学芸大学
¹Tokyo Gakugei University

粘土鉱物の底面反射のピークの半値幅は結晶度の指標としてしばしば用いられる。結晶度がよいほど、底面の格子間隔のばらつきが小さく、半値幅が小さくなると考えられるからである。

一方、粘土鉱物は粉碎によって容易に非晶質化することもよく知られている。非晶質化に伴い、結晶構造が乱れ、結晶度（底面反射ピークの半値幅）も大きくなることが予想されるが、詳細な解析はあまりされていない。

我々は、日本粘土学会の標準粘土試料（JCSS-1101b カオリナイト（関白）、JCSS-5101 セリサイト（鍋山）、JCSS-3501 合成サポナイト（クニミネ工業））を遊星型ボールミルによって粉碎し、

非晶質化させた。それに伴って、底面反射ピークの半値幅を測定した。

その結果、若干の半値幅の増加（結晶度の低下）は見られるものの、それほど顕著な変化は見られなかった。また、粉碎後の粘土粒子の形状を走査型電子顕微鏡で観察したが、粉碎した微細な粒子が形成されるものの、完全に底面反射が消えた試料においても、元の形状を保った粒子も多く見られた。これらの事実から、非晶質化の過程について考察する。

キーワード: 粘土鉱物, 非晶質化, 結晶度
Keywords: Clay minelas, Amorphization, Crystallinity

タルクおよび蛇紋岩の摩擦特性における間隙水圧と応力履歴の影響

Effect of pore pressure and stress paths on frictional properties of talc and serpentinite under high normal stress

上原 真一^{1*}, 清水 以知子², 岡崎 啓史³, 中谷 正生⁴

Shin-ichi Uehara^{1*}, Ichiko Shimizu², Keishi Okazaki³, Masao Nakatani⁴

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, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Faculty of Science, Toho University, ²Faculty of Science, The University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Hiroshima University, ⁴Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Pore fluid pressure is a critical parameter governing the overall mechanical strength of plate boundary faults. Recent geophysical observations have suggested the importance of fluids in seismogenic processes. Previous works on rock mechanics have suggested that the yield strength of rocks is governed by effective stresses $S_e = S - aP_p$, where S is total stress, P_p is pore fluid pressure, and a is a factor between 0 and 1. The observations in the brittle regime are well accounted for by $a = 1$ [1]. However, it is not well documented how pore fluid pressure influences frictional properties of faults at the brittle-ductile transition zone. Ductile deformation might play important roles in contacts of topographies of fault surfaces, or asperities, at the brittle-ductile transition zone, and therefore there is a possibility that a in the effective stress law may not be 1 and/or pore pressure distributions on the slip surfaces may be inhomogeneous and time-dependent due to reduction of permeability between the slip surfaces. It is also expected that shear stress may depend highly on stress history in the brittle-ductile transition zone. It is generally difficult to conduct laboratory friction experiments at high pressures and temperatures that are comparable to the middle to lower crust and mantle. To overcome the limitation of experimental conditions, we conducted friction experiments by using talc and serpentinite (antigorite) as an analogue material, which shows brittle-ductile transitional behaviors at relatively low pressures and temperatures. In addition, investigating frictional properties of these rocks under high stress is important because these rocks receive attention as a material giving important influences on fault mechanics. Cylindrical samples of talc (Gvangjsih, China) and serpentinite (Nagasaki), 20mm in diameter, were cut at an angle of 30° to the sample axis. The surfaces were ground with carborundum (#400 and #80 for talc and serpentine specimens, respectively). A small hole (3mm in diameter) through the center of each piece ensured adequate communication of the water between the pre-cut surfaces with the rest of the pore pressure system. The specimen was loaded by a triaxial apparatus and sheared under an axial displacement rate of 1 $\mu\text{m/s}$. We used water as a pore fluid. All measurements were performed under conditions of room temperature. Experiments were conducted under several paths of confining pressure and pore pressure. The results indicate a possibility that the shear stresses of these rocks under high normal stress may not be able to be simply explained by an effective stress law with $a = 1$, and stress paths affect the shear stress.

This research is supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, KAKENHI (21109005), JSPS.

References: [1] M.S. Paterson and T.-F. Wong, Experimental rock deformation - the brittle field, 2nd ed., 2005.

キーワード: 摩擦特性, タルク, 蛇紋岩, 間隙圧, 室内実験

Keywords: frictional property, talc, serpentinite, pore pressure, laboratory experiment

真空焼結法による高緻密細粒下部地殻鉱物多結晶体の作製
Synthesis of highly dense and fine-grained lower crustal minerals by vacuum sintering technique

小泉 早苗^{1*}, 平賀 岳彦¹
Sanae Koizumi^{1*}, Takehiko Hiraga¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo

It is important to fabricate polycrystalline rock-forming minerals which have controlled crystallographic orientation, grain size, sample shape, mineral composition, chemistry (e.g., trace elements), and phases (including melt) for investigating the physical and chemical properties of the Earth' interior by room experiments. The vacuum sintering method at ambient pressure has been applied. We developed synthesis method of a wide variety of polycrystalline minerals, including single phase aggregates of anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) and, two phase composite of anorthite + diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), anorthite + quartz (SiO_2) with homogeneous microstructure, which are good analogues for lower crustal composites.

キーワード: 多結晶体, 下部地殻, 鉱物

Keywords: polycrystal, lower crust, mineral

高压下におけるフォルステライト反応帯成長実験 Growth kinetics of forsterite reaction rim at high pressure

丸山 玄太^{1*}, 西原遊², 西真之¹, 大内智博¹, 松影香子¹, 川添貴章¹

Genta Maruyama^{1*}, Yu Nishihara², Masayuki Nishi¹, Tomohiro Ohuchi¹, Kyoko N. Matsukage¹, Takaaki Kawazoe¹

¹ 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, ² 愛媛大学 上級研究員センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Senior Research Fellow Center, Ehime University

地球内部では、地震波の研究から沈み込むスラブやブルームの上昇による物質輸送が起きていると理解されている。このような地球マントルでの物質輸送を正しく理解する上で、地球マントルを構成する鉱物中の元素拡散の情報が欠かせない。なぜなら、元素拡散は鉱物の流動特性を支配する重要な素過程であるからだ。塑性変形メカニズムの1つである拡散クリープによって変形する鉱物の歪速度は、鉱物を構成する主要元素のうち最も拡散の遅い元素によって律速される。過去の研究から、かんらん石中の主要構成元素の拡散速度は少なくとも1 GPa以下の低圧力条件では、Siが最も遅いと考えられている(e.g. Hirth and Kohlstedt 2003)。しかし、元素拡散速度への圧力の効果は明らかにされていない。本研究は、上部マントルの主要鉱物であるかんらん石の主要構成元素の拡散を評価することを目的として、かんらん石の端成分であるフォルステライトの反応帯成長実験を高圧力条件下で行った。

本研究では、フォルステライト反応帯を化学反応 MgO (ペリクレーズ) + MgSiO_3 (エンスタタイト) \Rightarrow Mg_2SiO_4 (フォルステライト) から成長させる。出発物質は、ペリクレーズの単結晶とエンスタタイトの粉末または焼結体とした。この反応帯の幅と粒径から反応帯成長律速元素の拡散係数を求めることができる。出発物質のペリクレーズとエンスタタイトの間に、白金ペーストを配置した。この白金ペーストは、フォルステライトを構成する主要元素のうち、最も拡散の遅い元素を特定するマーカーの役割を果たす。無水条件での実験を行うため、出発物質は白金のカプセル内に封入した。実験条件を圧力 5.7-12.7 GPa, 温度 1673, 1873 K, 保持時間 0-780 分とし、マルチアンビル型高圧発生装置を用いて実験を行った。回収試料の組織観察には走査型電子顕微鏡を使用した。

全ての実験条件において、圧力・温度に依存せず白金マーカーは、ペリクレーズとフォルステライトの境界に位置することを確認した。この結果から、フォルステライトを構成する主要元素のうち、最も拡散の遅い元素は、Siである。フォルステライト中におけるOの拡散は、過去の研究から非常に速いことがわかっている。このためMgが反応帯成長を律速する主要構成元素である可能性が高い。Gardes et al. (2011)は、1.5 GPaにおける反応帯成長実験に基づき、本研究と同様にフォルステライト中でSiが最も拡散の遅い主要構成元素であると結論づけた。本研究の結果は、Siの拡散が上部マントル全領域におけるかんらん石の歪速度を律速することを示唆する。

本研究では、粒内拡散と粒界拡散のどちらがフォルステライト反応帯成長を律速するか特定できなかった。そのため粒内拡散律速、粒界拡散律速それぞれを仮定してMgの拡散係数を計算した。粒内拡散律速で反応帯が成長する場合、Mgの粒内拡散係数の活性化体積は $10 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 程度である。また、粒界拡散律速で反応帯が成長する場合、Mgの粒界拡散係数の活性化体積は $10 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 以上である。

Keywords: forsterite, high pressure, rim growth, diffusion

カンラン石の結晶方位定向配列発達の高圧高温下その場観察実験

In-situ observation of crystallographic preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear

大内 智博^{1*}, 西原 遊², 瀬戸 雄介³, 川添 貴章⁴, 西 真之¹, 丸山 玄太¹, 肥後 祐司⁵, 舟越 賢一⁵, 入船 徹男¹

Tomohiro Ohuchi^{1*}, Yu Nishihara², Yusuke Seto³, Takaaki Kawazoe⁴, Masayuki Nishi¹, Genta Maruyama¹, Yuji Higo⁵, Ken-ichi Funakoshi⁵, Tetsuo Irifune¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 愛媛大学上級研究員センター, ³ 神戸大学地球惑星科学科, ⁴ パイロイト大学バイエルン地球科学研究所, ⁵ 高輝度光科学研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Senior Research Fellow Center, Ehime University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ⁴Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, ⁵Japan Synchrotron Radiation Institute

The characteristics of the seismic anisotropy vary depending on the types of crystallographic preferred orientation (CPO) of olivine. Therefore, the pattern of the seismic anisotropy has been interpreted by taking into account the water-induced olivine fabric transitions in recent studies (Jung and Karato, 2001). The fabric strength of olivine aggregates is also important when we evaluate the magnitude of the seismic anisotropy in the upper mantle. In the actual upper mantle, the steady-state fabric strength of olivine is expected to be achieved due to long time-scales of flows.

The dependency of the fabric strength of olivine aggregates on strain has been evaluated in only limited numbers of experimental studies (e.g., Bystricky et al., 2000). Bystricky et al. (2000) showed that total shear strains higher than 4 are needed to achieve the steady-state fabric strength of olivine (D-type fabric) at 0.3 GPa and 1473 K. However, it has been difficult to evaluate the detailed processes of the developments of fabrics because fabrics of recovered samples have been used. Recently, we have developed experimental techniques for in-situ simple-shear deformation experiments using a D-DIA apparatus. In this paper, we briefly show that our recent experimental results on in-situ observations of stress, strain, and fabric developments in olivine samples.

Simple-shear deformation experiments on olivine aggregates at pressures $P = 1-2$ GPa, temperatures $T = 1290-1490$ K, and shear strain rates of $3E-4$ s⁻¹ were performed using a deformation-DIA apparatus installed at SPring-8. The MA6-6 system (Nishiyama et al., 2008) with a truncated edge length of the second-stage anvils of 5 mm was adopted for the experiments. A sectioned sample of anhydrous olivine aggregates (diameter = 1.5 mm; thickness = 300-500 μ m) was placed into a nickel capsule and then sandwiched between two alumina pistons. Shear strain (up to 5) was measured by the rotation of a platinum strain-marker, which was initially placed perpendicular to the shear direction. Differential stress, generated pressure, and CPO patterns of olivine samples were determined from two-dimensional X-ray diffraction patterns using software (IPAnalyzer, PDIndexer, and ReciPro: Seto et al., 2010; Seto, 2012). The CPO patterns of olivine in the recovered samples were also evaluated by the indexation of the electron backscattered diffraction (EBSD) patterns using a JEOL JSM-7000F at Ehime University. The CPO patterns determined from two-dimensional X-ray diffraction patterns were consistent with those obtained from the EBSD analyses.

A-type olivine fabric was developed at high temperatures (1490 K). CPO patterns showing A-type fabric were observed at strains higher than 1. The fabric strength increased with strain (< 3). Steady-state fabric strength was achieved at shear strains about 3. Strain softening was observed in most of samples due to the developments of CPO of olivine. Developments of B-type and C-type-like fabric were observed at low temperatures (< 1440 K) in relatively wet samples (about 300-400 ppm H/Si in olivine: caused by absorption of water in olivine during deformation).

It has been reported that the developments of the A-type fabric, which is the most commonly observed olivine fabric in natural peridotites (Ismail and Mainprice, 1998). The threshold shear strain of 3, which is needed for the achievement of steady-state fabric strength, corresponds to 100 Myr of mantle flow (under the assumption of a shear strain rate of $1E-15$ s⁻¹). Our results implies that overwriting of an olivine CPO pattern due to a change of the deformation condition requires a long time-scale (i.e., 100 Myr or longer). The seismic anisotropy observed in the upper mantle would reflect the olivine CPOs formed within 100 Myr ago.

キーワード: カンラン石, 結晶方位定向配列, その場, 単純剪断変形

Keywords: olivine, crystallographic preferred orientation, in-situ, simple-shear deformation

せん断応力下におけるかんらん石の高圧相転移 High-pressure phase transition of olivine in shear stress condition

田中一徳¹, 近藤 忠^{1*}, 亀卦川卓美²

Kazunori Tanaka¹, Tadashi Kondo^{1*}, Takumi Kikegawa²

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 物質構造科学研究所

¹Earth and Space Sci., Osaka Univ., ²IMSS, KEK-PF

High-pressure phase transition has been considered to be a possible trigger of deep focused earthquakes which were observed in subducting slab. In the deep slab condition, considerable shear stress was expected due to the sinking force by own weight. However, phase transition in a non-hydrostatic condition was not fully understood at the condition of deep transition zone. In this study, we tried to develop a new method for deformation experiment in a high-confinement pressure corresponding to the lower mantle condition and investigated its effect to high pressure phase transition in olivine. High-pressure experiments were conducted using laser-heated diamond anvil cell (LHDAC). Starting materials are single crystals of natural olivine (San Carlos, USA) and pyrope garnet (Czecho). They were thinned to have a wedge-shaped plate and single-sided coated with metallic iron to stabilize laser heating. Then a set of two plates are confined in a sample hole of rhenium gasket with surrounding pressure medium of sodium chloride to make a direct contact on tilt boundary to compression axis. The shear stress at the contact surface was estimated by major pressure difference between sample center and edge of the sample and was to be around 0.4-0.6 GPa. In-situ X-ray diffraction experiments to evaluate stress evolution in the sample under pressures and temperatures using a LHDAC were performed at KEK-AR-NE1A station, Tsukuba, Japan. After the sample was compressed to the nominal pressure at room temperature, it was heated to the temperature around high-pressure phase boundary. Pressures were determined using the equation of state of sodium chloride (Brown, 1998). The X-ray diffraction pattern at each condition was collected on an imaging plate. High temperatures generated by a Nd:YAG laser driven in multimode were measured based on the emission spectra from the heated area of about 50-70 microns in diameter. We observed high pressure phase of wadsleyite and/or ringwoodite in the laser-scanned area up to 23GPa and 1600K. The result of Hall-Williamson analysis (Hall, 1949) from the X-ray diffraction pattern for high pressure phase indicated a significant non-homogeneous strain or shear stress in the high pressure phase than that in single plate experiments, which suggest this method can generate appropriate stress in the sample. The quenched samples were recovered to ambient condition to make thin sections for observation by a scanning electron microscope. High-pressure phase in the heated sample was localized on the contact region between two plates. No significant textural evolution was observed in the outer rim of the same sample. This result is contrasted to the report by Kubo et al. (1998) in which nucleation starts from outer rim of the single crystal sample in a hydrostatic condition. Planar shear bands without phase transition were also observed in the low temperature less than 1000K and 34GPa. Our results indicate that shear stress promotes the transition to high pressure phase and also induces a possible shear instability in the deep slab.

キーワード: 相転移, せん断変形, 高温高圧

Keywords: phase transition, shear stress deformation, high pressure and high temperature

放射光 X 線と A E 6 - 6 システムを用いた反応、流動、剪断不安定のその場同時観察手法の開発

In-situ observations of reaction, plastic flow, and shear instability by using synchrotron X-rays and the AE 6-6 system

岩里 拓弥^{1*}, 久保 友明¹, 肥後 祐司², 土井 菜保子¹, 加藤 工¹, 金嶋 聡¹, 上原 誠一郎¹, 西原 遊³, 舟越 賢一²

Takuya Iwasato^{1*}, Tomoaki Kubo¹, Yuji Higo², Naoko Doi¹, Takumi Kato¹, Satoshi Kaneshima¹, Seichiro Uehara¹, Yu Nishihara³, Ken-ichi Funakoshi²

¹ 九大・理, ²JASRI, ³ 愛媛大・地球深部研

¹Kyushu Univ., ²JASRI, ³GRC, Ehime Uni.

Intermediate-depth earthquakes are seismic activities in Wadati-Benioff zone at depths from 60 km to 300 km, where subducting plates deform plastically rather than brittle failure. Dehydration embrittlement of serpentinite (Raleigh and Paterson, 1965) is an important mechanism for the seismicity at lower pressures than ~2.2 GPa. To understand the fault mechanisms above this pressure, there have been some acoustic emission (AE) measurements with multi-anvil apparatus to monitor shear instabilities (e.g., Dobson et al., 2002; Jung et al., 2006 and 2009; Gasc et al., 2011). However in these studies, the relationships among dehydration, plastic flow and shear instability were unclear because quantitative flow and reaction kinetics data could not be obtained simultaneously. To conduct quantitative measurements of these processes, we developed a new in-situ observation system combined with synchrotron monochromatic X-ray and AE 6-6 system (multiple acoustic emission measurement for multi-anvil 6-6 type system) using Deformation-DIA (D-DIA) apparatus. In this study, we report results of some preliminary experiments using this system.

In this system, deformation experiments with constant strain rate mode are conducted at high pressure and high temperature using a 1500-ton uniaxial press (SPEED-Mk.ii) with a D-DIA type guide block installed at BL04B1, SPring-8 (Katsura et al., 2004; Kawazoe et al., 2011). 50 keV monochromatic X-ray are used to measure two-dimensional X-ray diffraction (2D-XRD) patterns and X-ray radiography images of sample. Reaction kinetics can be monitored by time-resolved 2D-XRD measurements. Stress and strain of sample are determined by d-value variations with azimuth angle from 2D-XRD patterns and by distance of strain markers from X-ray radiography image, respectively. We developed MA 6-6 type system (Nishiyama et al., 2008) to monitor shear instabilities by AEs from maximum six piezoelectric devices positioned between first and second stage anvils. The multiple AE measurements enable us to determine characters of the seismic event such as origin time and location of seismic source, and focal mechanism.

In the present study, two kinds of experiments were performed at high pressure and room temperature using the new AE 6-6 system, where an X-ray transparent cBN anvil was used as one of the second-stage anvils in down-stream side to collect 2D-XRD patterns. One is cold compression of quartz beads (grain size ~0.1 mm). Another is in-situ X-ray observation of constant strain rate deformation of polycrystalline antigorite cylinder cored from high-temperature serpentinite (Eigami, Nagasaki, Japan). A total of four PZT transducers were used to monitor AEs arising from the sample. AE waveforms were recorded using a four-channel 8-bit digital oscilloscope, which has a resolution of 1000-10000 point at a sampling rate of 50MHz. The AE recording was triggered when the amplitude of the signal was higher than a threshold level.

In the quartz beads experiment, the sample was pressed to 20 ton (~2 GPa) with monitoring AE by three AE detectors (East, West, and Bottom anvils). Many AEs were recorded during cold compression. The AE frequencies became maximum at the load of about 7 ton, and no AEs were recorded at more than 12 ton. These data suggest that the quartz beads were compacted to almost zero porosity by reaching 12 ton. Differences in arrival time from two detectors (E and W) indicate that most sources of those events were located within the sample.

Three deformation experiments of polycrystalline antigorite were conducted with a strain rate of about $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ at pressures of ~0.1-3 GPa. We observed that the constant flow stress of ~2 GPa reached at the sample strain of more than 5%. AE events were not recorded during the deformation stage. These results suggest that mechanical behavior of antigorite is plastic flow under this condition, which is consistent with previous studies (e.g., Escartin et al., 1997).

Keywords: acoustic emission, stress and strain, deformation-DIA, in situ X-ray observation, high pressure, antigorite

物性測定による岩塩中の水の存在形態-岩塩試料の合成-

Synthesis of wet halite rock for the study on brine morphology via physical property measurement

北野 元基^{1*}, 渡辺 了¹

Motoki Kitano^{1*}, Tohru Watanabe¹

¹ 富山大学大学院理工学研究部

¹Department of Earth Sciences Faculty of Science, University of Toyama

岩石中の粒界水は岩石の流動特性・輸送特性に影響を及ぼし、その影響は水の存在形態に強く依存している。これまで水の存在形態は岩石と水の二面角が支配し、60度以上では連結しないと考えられてきた。しかし、含水岩塩を用いた低温 SEM 観察 (Schenk et al., 2006) や電気伝導度測定 (Watanabe, 2010) は、二面角が 60°以上でも、薄膜状の粒界水が連結を保つことを示している。地殻中でもこのような粒界水が存在しているかもしれない。この粒界水の存在を広い温度圧力範囲で調べるために、含水岩塩の電気伝導度、弾性波速度測定を行う。今回は試料の合成について報告する。

含水岩塩試料は、水を付着させた NaCl 粉末 (20-40 μm) を 40 分間圧密 (室温, 140MPa) した後、アニール (180 MPa, 180MPa) することによって合成する。測定試料は次の条件を満たす必要がある。(1) 水の形態変化による物性変化を見るため、粒成長など固体の構造変化が小さいこと。(2) 弾性波速度から水の形態変化を推定するため、空隙率が小さいこと。このことは FTIR 測定による含水量の推定からも要請される。圧密により直径約 9mm, 長さ約 6mm の円柱試料が得られる。この空隙率は 5-8% であり、試料全体が不透明である。どれだけのアニール時間によって 2 つの条件を満たす試料が作成できるかを明らかにするため、アニール時間を 40 から 160 時間まで変えて、合成試料の空隙率および粒径分布を調べた。また、アニールに伴う電気伝導度の変化も調べた。

アニール時間 40 時間の試料に対して 80 時間の試料は平均粒径が 1.2 倍になり、粒径分布幅が狭くなった。また、80, 120, 160 時間アニールした試料では粒径分布のピークが変わらず、80 時間以降は顕著な粒成長がないことを示している。アニールに伴う電気伝導度の変化は、二面角の変化に伴う水の移動や粒成長の構造変化を反映していると考えられる。ほぼ定常的な値に達するのに要した時間は 150 時間であった。アニール時間が長いほど試料の透明度が増し、160 時間アニールした試料は全体が透明になった。この試料内の 9 点で FTIR 測定を行い、水による吸光度を求めると差は 4.2% 以下であった。試料内部での水の分布はほぼ一様であると考えられる。150 時間以上のアニールによって物性測定に適した含水岩塩試料が合成できることが分かった。