かんらん岩の高歪みねじり実験から探るマントル・レオロジー

Rheological properties of mantle rocks using high-strain torsion experiments

田阪 美樹 (Miki TASAKA)*

Mantle deformation is closely related to plate motion, earthquakes, and volcanic activities. In previous experimental studies, the rheological properties of the mantle rocks have been determined based on assumptions that the mantle rocks are composed of single-phase crystal aggregates with a homogeneous chemical composition, and the mechanical data and rock microstructure reach a steady-state even at small strain. However, it is obvious that these assumptions oversimplify the complexity of natural rocks. To overcome such limitations, the author conducted various types of deformation experiments to investigate the rheological properties of rocks by taking into account the secondary mineral phases, different iron content of olivine, and different strain. The obtained results allow us to understand the mantle flow under more realistic conditions. In this paper, I would like to introduce the recent results of high-strain torsion experiments using a Patterson-type gas-medium apparatus.

Keywords: Mantle, Deformation experiments, Water, High-strain, Two-phase aggregates

I. はじめに

マントルの変形特性はプレート運動、地震・火山活動と密接に関係しており、その理解は非常に重要である。これまでの実験岩石学的な研究では、岩石は1つの鉱物より構成され、化学組成は均一、力学データや岩石組織は小さな歪み量で定常状態に達するなど近似した系で変形特性を求めてきた。しかしそれらが大きな単純化であることは天然岩石を知っている人ならば自明なはずである。

そこで筆者らは実験的手法を用いて、岩石変形における第2相鉱物 (Tasaka *et al.*, 2013, 2017a, 2017b, 2020), 化学組成 (Tasaka *et al.*, 2015), 含水下の歪み量 (Tasaka *et al.*, 2016) の影響を研究してきた。これらのことが分かればより現実に近い条件でマントル流動を理解することができると。本稿は筆者らが行ったパターソン型ガス圧式試験機を使った高歪みねじり変形実験について紹介したい。

II. 含水かんらん石多結晶体のねじり実験

水は岩石の歪み速度 (Mei and Kohlstedt, 2000a, 2000b), 粒径差応力計により決まる再結晶粒径 (Jung and Karato, 2001), 粒成長速度 (Karato, 1989), さらにかんらん石多結晶中の変形しやすい方向を変える (Karato *et al.*, 2008) ことが知られている。そのため水はかんらん石の流

動特性や微細構造を考える上で重要である。これまでの研究では含水かんらん岩の流動特性を知るために圧縮変形実験が行われてきた (Chopra and Paterson, 1984; Mei and Kohlstedt, 2000a, 2000b)。しかし圧縮実験において得られる歪み量では、定常状態の変形組織に達していないことが実験から指摘されている (Bystricky *et al.*, 2000; Hansen *et al.*, 2014)。そこで本研究は定常状態の変形組織における含水かんらん岩の変形特性を求めることを目的に、大歪みねじり実験を行った (Tasaka *et al.*, 2016)。

実験はパターソン型ガス圧式試験機を用いた。本研究は実験アセンブリを工夫することで (Figs. 1a and 1b), 試料中の含水量を一定に保ちながら高歪み変形実験を行うことに初めて成功した。先行研究と比較して本実験の利点は、ロードセルが圧力容器の中にあるため力学データの解像度が高いこと、試料サイズが大きいため詳細な変形組織解析ができること、実験前後で含水量に変化がないことを試料上部に埋め込んだかんらん石単結晶で確認できることである。

実験で得られた含水かんらん岩の変形組織 (Fig. 2a) から、出発試料は粗粒等粒状であること、低歪み ($\gamma = 1.3$) 試料ではかんらん石は剪断方向にやや斜交し伸びていること、高歪み ($\gamma = 3.0$) 試料では動的再結晶し粒径は小さく等粒状であることが分かった。さらにこれらの試料につい

doi: 10.2465/gkk.211228

(令和3年12月28日受付, 令和4年1月20日受理, 担当編集委員: 高澤栄一)

* 静岡大学理学部地球科学科, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836

* Department of Earth Science, Shizuoka university, 856 Ohya, Shizuoka 422-8529, Japan E-mail: tasaka.miki@shizuoka.ac.jp

Fig. 1. (1) Schematic diagram of sample assembly for torsion experiments. (b) Hot-pressed olivine (Fo₅₀) aggregate surrounds the central talc solid cylinder. This sample assembly is inserted into a Ni capsule. A piece of the oriented single crystal of San Carlos olivine (Fo₉₀) embedded in the Fo₅₀ sample provides a water meter. (c) Hot-pressed olivine + pyroxene (Fo₅₀ + En₅₀) aggregate surrounds the central nickel solid cylinder. This sample assembly is inserted into a Ni capsule.

てかんらん石の結晶方位を解析し (Fig. 2b), 出発試料や低歪みの試料は等方的でランダムな結晶方位を持つものに対し, 高歪み試料では [100] が剪断方向に平行に強く配列していることが分かった。

次に実験で得られた力学データから, 歪み増加に伴う流動特性の変化を調べた。本研究ではねじり速度一定で実験を行った。代表的な実験における剪断歪みと剪断応力の関係を Figure 3a に示す。試料に荷重を与えると応力は歪みと共に増加しピーク応力に達する。その後応力は緩やかに減少し定常状態の応力になる。本研究では応力が定常状態に達した後, ねじり速度を増減させることで歪み速度の応力依存性 n を $n = 3.3 \pm 0.1$ と求め ($\dot{\epsilon} \propto \sigma^n$) (Fig. 3b), 試料は転位クリープで変形していることが分かった。更にピーク応力と定常状態の応力を比較して歪み速度一定の条件で応力は36%減少することが分かった。

歪みが増えると試料が柔らかくなるのは, 歪みと共に岩石組織が発達し粘性の異方性が発現するためである。ピーク応力における岩石組織は未変形試料における等方的な組織に対応し, 定常状態の応力では変形試料にみられる異方的な組織に対応する (Fig. 2)。結晶方位が良く揃った異方的な試料は, 等方的な試料に比べて流動方向に対して柔らかいために変形組織の発達に伴い歪み弱화가観察されることが分かった。これは試料が転位クリープで変形し歪み速度の応力依存性を $n = 3$ と仮定すると, 変形組織の発達した試料は等方的な試料よりも1桁粘性が下がることを意

味する。ほとんどの地球マントルの岩石は強く変形し異方的な構造を持っている (Michibayashi and Mainprice, 2000)。しかしこれまでの実験研究では等方的な物質を使い変形特性を求めてきた (Mei and Kohlstedt, 2000a, 2000b)。本研究で得られた粘性の異方性は, これまでの実験と天然のマントルをつなぐ上で重要な役割を果たすことが期待できる。

III. かんらん石 + 輝石 2 相系多結晶体の高歪みねじり実験

次に筆者らは, さらに難しい問題として 2 相系の高歪みねじり実験に挑戦した。天然岩石の変形特性を理解するためには複数鉱物から構成される多相系多結晶体の変形が重要だと考えたためである。結果の詳細は Tasaka *et al.* (2017a, 2017b, 2020) にまとめられている。

マントルやリソスフェアで歪み集中帯が形成され, 歪みが局所化する過程を理解することはプレート境界の変形を理解する上で重要である。天然岩石の組織変化から, 剪断帯の中心に向かい歪みが大きくなると, 変形しながら粒子が伸び動的再結晶で細粒化することが分かっている (Michibayashi and Mainprice, 2000; Linckens *et al.*, 2011)。剪断帯の中心では極細粒なウルトラマイロナイトと呼ばれる変形岩が見られ, 岩石が細粒化し粒径依存型クリープ下でこの細粒層に変形が集中することが有力な歪み弱化的メカニズムと考えられている (例えば, Warren and

Fig. 2. (a) Orientation maps of olivine from EBSD analysis for a undeformed and deformed samples. (b) Olivine crystallographic preferred orientations (CPO). Equal-area pole figures, lower hemispheric projections for olivine [100], [010], and [001] axes for an undeformed and deformed sample.

Fig. 3. (a) Shear strain versus shear stress for constant torsional speed experiment. The twist rate was stepped (either increased or decreased) to obtain stress versus strain rate data. The amount of strain at each step is about 0.01, and the change in microstructure during this period is minimal. (b) Relationship between stress and strain rate. Peak stress is shown by blue, and steady state stress is shown by red symbols.

Fig. 4. Shear strain versus stress exponent from twist-rate stepping tests. The circle-green symbols are for olivine + pyroxene aggregates with pyroxene volume fraction of 26% ($f_{\text{px}} = 0.26$). The square-black symbols are for pyroxene free olivine aggregates of $f_{\text{px}} = 0$ (Hansen *et al.*, 2012). The colored boxes are error. For the samples with $f_{\text{opx}} = 0$, $n = 4.1 \pm 0.1$. For the samples with $f_{\text{opx}} = 0.26$, $n = 2.7 \pm 0.3$ at low strain ($\gamma < 8$) and $n = 2.0 \pm 0.2$ at high strain ($\gamma > 8$).

Fig. 5. Secondary electron images from tangential sections of undeformed and deformed samples. All samples were deformed top to the right. Light gray mineral is olivine, and dark gray one is orthopyroxene.

Hirth, 2006)。かんらん岩ウルトラマイロナイトの細粒部はよく混ざったかんらん石と輝石により構成される。先行研究より輝石がかんらん石の粒界をピン止めするために粒径は小さく保たれることが知られているが、どのように鉱物が混ざり合い歪み弱化が起きるのかは未だ明らかになっていない。そこで本研究は鉱物混合層形成と歪弱化の過程を理解するために、かんらん石 + 輝石 2 相系の高歪みのねじり実験を行った。実験にはかんらん石 + 直方輝石の多結晶体試料を使った。実験アセンブリを Figures 1a と 1c に示す。

実験データから流動則における歪み速度の応力依存性 n を調べた。剪断歪みと応力指数 n の関係を Figure 4 に示す。歪みが増えると応力指数 n の値は減少し、歪み増加に伴い変形メカニズムが変化することが分かった。更に詳しい解析から低歪みでは転位律速の粒界すべりクリープで変形するのにに対し、高歪みでは拡散クリープで変形していることが分かった。先行研究(Hansen *et al.*, 2012)より輝石を含まないかんらん石100%の試料($f_{\text{opx}} = 0$)では応力指数 n の値は歪みと関係なく一定で、転位律速の粒界すべりクリープで変形する(Fig. 4)。

実験で得られた微細構造を Figure 5 に示す。一連の実験から歪み増加とともに粗粒な 2 相系多結晶体が動的再結晶し粒径が小さくなり、細粒鉱物混合層を形成する過程を観察することができた。実験で得られた歪み増加に伴う組織変化や変形メカニズムの変化は、天然の剪断帯における岩石組織の観察結果とも整合的である。私たちの一連の研究により、細粒化と歪み弱化的過程には第 2 相鉱物である輝石の存在が重要であることが分かった。

IV. 最後に：天然と実験のリンク

筆者らは、天然岩石の観察を基に新しい実験をデザインし、実験の結果を基に天然のプロセスを新たに理解することを目指し研究を進めている。研究対象は地球にとどまらず月や火星にまで及んでおり (Tasaka *et al.*, 2015; Pommier *et al.*, 2015, 2018; Jiménez-Díaz *et al.*, 2021) ミクロな鉱物スケールの変形から惑星内部のダイナミクスの理解に繋げられる研究ができれば良いと考える。筆者は天然岩石の研究から実験に転向した経歴を持つため天然岩石と実験がリンクできる研究を行うことを目指しているが、思い通りにいかないことも多く、それもまた研究の醍醐味かもしれないと思うようにしている。

謝 辞 この論文は2021年年会日本鉱物科学会受賞記念講演内容を基にしている。日本鉱物科学会研究奨励賞に推薦して下さい先生、選考に関わって頂いた方々に感謝します。学生、ポスドク、教員になった今も、優秀で個性的な先生方、研究室の皆さんに大変お世話になっています。この場を借りて感謝申し上げます。この度、子供の頃から好きだった岩石鉱物に関わる榮譽ある賞を頂いたことを励みに、今後も新しいことに挑戦する研究に邁進したいと思っています。

引用文献

- Bystricky, M., Kunze, K., Burlini, L. and Burg, J.P. (2000): High shear strain of olivine aggregates: Rheological and seismic consequences. *Science*, **290**, 1564–1567, doi:10.1126/science.290.5496.1564.
- Chopra, P.N. and Paterson, M.S. (1984): The role of water in the deformation of dunite. *J. Geophys. Res.*, **89**, B9, 7861–7876.
- Hansen, L.N., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2012): The influence of microstructure on deformation of olivine in the grain-boundary sliding regime. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **117**, B09201, doi:10.1029/2012JB009305.
- Hansen, L.N., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2014): Protracted fabric evolution in olivine: Implications for the relationship among strain, crystallographic fabric, and seismic anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **387**, 157–168, http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.009.
- Jiménez-Díaz, A., Egea-Gonzalez, I., Parro, L., Tasaka, M. and Ruiz, J. (2021): The thermal structure and mechanical behavior of the Martian lithosphere. *ICARUS*, **106**, R2.
- Jung, H. and Karato, S. (2001): effect of water on dynamic recrystallized grain-size of olivine. *J. Struct. Geo.*, **23**, 1337–1344.
- Karato, S. (1989): Grain growth kinetics in olivine aggregates. *Tectonophys.*, **168**, 255–273.
- Karato, S. (2008). Deformation of Earth Materials: an introduction to the rheology of solid Earth (Karato, S. Ed.). Cambridge university press, New York, 255–270.
- Linckens, J., Herwegh, M., Muntener, O. and Mercolli, I. (2011): Evolution of a polymineralic mantle shear zone and the role of second phases on the localization of deformation. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **116**, B06210.
- Mei, S. and Kohlstedt, D.L. (2000a): Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates: 1. Diffusion creep regime. *J. Geophys. Res.*, **105**, 457–469, doi:10.1029/2000JB900179.
- Mei, S. and Kohlstedt, D.L. (2000b): Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates: 2. Dislocation creep regime. *J. Geophys. Res.*, **105**, 471–481, doi:10.1029/2000JB900180.
- Michibayashi, K. and Mainprice, D. (2004): The role of pre-existing mechanical anisotropy on shear zone development within oceanic mantle lithosphere: An example from the Oman Ophiolite. *J. Petrol.*, **45**, 405–414.
- Pommier, A., Leinenweber, K. and Tasaka, M. (2015): Experimental Investigation of the electrical behavior of olivine during partial melting under pressure and application to the Lunar mantle. *Earth Planet. Sci. Letters*, 242–255, DOI: 10.1016/j.epsl.2015.05.052.
- Pommier, A., Kohlstedt, D.L., Hansen, L.N., Mackwell, S., Tasaka, M., Heidelberg, F. and Leinenweber, K. (2018): Transport properties of olivine grain boundaries from electrical conductivity experiments. *Contrib. Miner. Petrol.*, **173**, https://doi.org/10.1007/s00410-018-1468-z.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E. and Hiraga, T. (2013): Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 2: Deformation experiments. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 1–22, doi:10.1002/jgrb.50284.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2015). Creep behavior of Fe-bearing olivine under hydrous conditions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, doi:10.1002/2015JB012096.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2016). Evolution of the rheological and microstructural properties of olivine aggregates during dislocation creep under hydrous conditions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, doi:10.1002/2015JB012134.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2017a): Rheological weakening of olivine + orthopyroxene aggregates due to phase mixing, Part1: Mechanical behavior. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **122**, DOI: 10.1002/2017JB014333.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E. and Kohlstedt, D.L. (2020). Rheological weakening of olivine + orthopyroxene aggregates due to phase mixing: Effects of orthopyroxene volume fraction. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **125**, e2020JB019888. https://doi.org/10.1029/2020JB019888.
- Tasaka, M., Zimmerman, M.E., Kohlstedt, D.L., Stunitz, H. and Heilbronner, R. (2017b): Rheological weakening of olivine + orthopyroxene aggregates due to phase mixing, Part2: Microstructural development. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **122**, DOI: 10.1002/2017JB014311.
- Warren, J.M. and Hirth, G. (2006): Grain size sensitive deformation mechanisms in naturally deformed peridotites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **248**, 1–2, 438–450, doi:10.1016/j.epsl.2006.06.006.