

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340161

研究課題名(和文) マントル660km不連続のレオロジー的構造

研究課題名(英文) Rheological structure of the 660 km discontinuity in the Earth's mantle

研究代表者

西原 遊 (NISHIHARA, Yu)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授

研究者番号：10397036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：深さ660kmでの粘性コントラストをはじめとする固体の流動特性が地球マントル深部の物質挙動に果たす役割を解明することを目的として、マントル鉱物の流動変形の力学特性を高温高圧変形その場観察実験により調べた。上部マントル深部のカンラン石の変形では転位クリープとともに粒径依存クリープが重要であること、マントル遷移層上部のウォズリアイトの流動強度が高い含水量依存性もつこと、リングウッドイトとメジャライトの低い粘性コントラストから深さ660km付近では海洋地殻の剥離は起こらないことを示した。

研究成果の概要(英文)：To understand a role of rheological properties (such as viscosity contrast at 660 km depth) in material behaviors in the Earth's deep mantle, the rheology of mantle minerals were studied based on high-pressure and high-temperature deformation experiments with in situ observation. We demonstrated the importance of grain-size-sensitive creeps, as well as dislocation creep, in deformation of the upper mantle olivine, the significant water-weakening of wadsleyite in the mantle transition zone, and that separation of oceanic crust near 660 km depth is unlikely due to low viscosity contrast between ringwoodite and majorite.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：鉱物物理 マントル遷移層 下部マントル レオロジー 高圧変形実験 上部マントル

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波トモグラフィーの発達により、数多くの沈み込むスラブが地球マントルの深さ 660km の「660km 不連続面」付近に滞留していることがわかっている。マントル対流のコンピュータシミュレーションによれば、「リングウッドイト Mg ペロフスカイト+マグネシオウスタイト」鉱物相転移の負のクラペイロン勾配に加えて、別な要因を考えなければこのスラブの滞留は説明できないという。以前より上下部マントル間の粘性コントラストがこのスラブ滞留の主要因との考えもあるが、その粘性コントラストの大きさは地球物理学的観測では正確に分かっていない。一方で、実験に基づいた物質科学的研究により、このようなマントル深部での粘性的挙動を明らかにするアプローチが存在するものの、関連鉱物のこれまでの研究は実際の地球内部よりはるかに低い温度におけるものか応力-歪測定が不十分なものに限られ、議論に用いることができるデータが不足していた。

2. 研究の目的

(2) 地球マントルの深さ 660km での粘性コントラストの大きさをはじめとする固体の流動特性が地球内部での物質挙動において果たす役割を解明することを目的として実験的研究を行った。マントル深部の主要鉱物、カンラン石、ウォズリアイト、メージャライト、リングウッドイトについて流動変形の力学的特性を明らかにすることを目的として実験的研究を行った。これらの実験はマントル深部に相当する高温高压下での変形その場観察によって行うが、これは今まで自分たちの培ってきた高温高压変形実験と精密応力測定技術を集結することによって初めて可能となるものである。

3. 研究の方法

(3) 高温高压変形実験を D-DIA 型装置を用いて行った。用いた D-DIA 装置は高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、PF-AR、NE7 に設置の D-CAP、および高輝度光科学研究センター (SPring-8)、BL04B1 に設置の SPEED-MkII-D である。あらかじめ整形した焼結多結晶または粉末試料を出発物質として用いた。先端 2.5-5 mm の WC アンビルを用いた MA6-6 加圧方式により加圧し、(Mg,Co)O 圧力媒体に組み込んだ発熱体により加熱した。加熱中の温度は W3Re-W25Re 熱電対により測定した。最高圧力 17 GPa、最高温度 1700 K の幅広い条件下で実験を行った。

(4) 実験中の試料の差応力を 50 keV 前後のエネルギーの単色 X 線を用いた 2 次元 X 線回折により決定した。細く絞られた (典型的には 0.1 mm × 0.1 mm) 入射 X 線を圧力媒体中の試料に照射し、試料からの回折 X 線を装

置の背後に設置したイメージングプレートにより測定した。歪は X 線ラジオグラフィ (KEK および SPring-8) または回収試料中の歪マーカーの観察により決定した。

4. 研究成果

(5) 上部マントルの主要鉱物のカンラン石について、温度 1473-1573 K、圧力 3.0-5.3 GPa、歪速度 $9 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、含水量 < 50 H/10⁶Si の条件で系統的な変形実験を行った。得られた歪速度-応力の関係を 0.1, 300 MPa でのデータと組み合わせて解析した。図 1 に結果を示す。本研究の変形条件は、低応力側の拡散クリープ (応力べき指数 $n = 1$) と高応力側の転位律速粒界すべり ($n = 3.5$) の境界付近であったと解釈される。この結果に基づくと上部マントルでは浅部から深部にわたって転位クリープとともに粒径依存クリープが重要な役割を果たす可能性が高いことが示される。

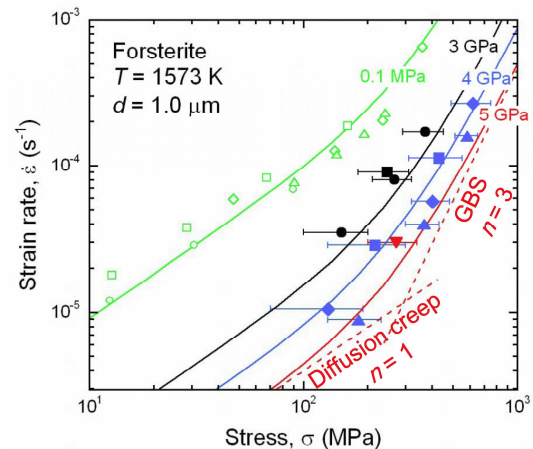


図 1. カンラン石(フォルステライト)の応力-歪速度関係

(6) 圧力 15 GPa、温度 1700 K というマントル遷移層に相当する高温高压条件下で、含水量の異なるマントル遷移層の主要構成鉱物ウォズリアイトの応力-歪曲線を測定した。その結果、ウォズリアイトの流動強度は上部マントルのカンラン石よりも含水量に敏感であり、マントル遷移層での物質輸送は水の分布により大きな影響を受けることを発見した。

(7) メージャライトとリングウッドイトの変形実験を圧力 17 GPa、温度 1473-1673 K の条件下で行い、両鉱物の相対塑性強度を調べた。実験ではメージャライトとリングウッドイトを同一の温度、圧力、差応力条件下で同時に一軸圧縮変形させた。その結果 (図 2) をもとに現実のマントルの歪速度に外挿すると、メージャライトの塑性強度はリングウッドイトのそれと同程度かそれ以下であった。深さ 660 km 付近のマントルで沈み込むスラブから海洋地殻の剥離が起こるか否かはメージャライトを主成分とする海洋地殻とリングウッドイトを主成分とする周囲の

マンツルの塑性強度によって決まる。現実のマンツルでも実験と同一の変形機構が働くと仮定すると、リングウッドイトとメージャライトの低い粘性コントラストから海洋地殻成分の剥離は起こらないことが示唆される。

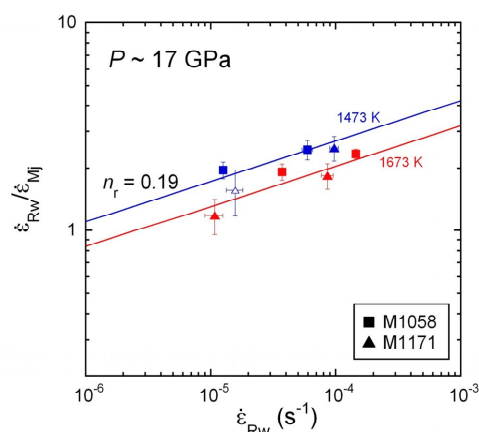


図 2. リングウッドイトとメージャライトの相対塑性強度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 25 件)

Nishihara, Y., Ohuchi, T., Kawazoe, T., Spengler, D., Tasaka, M., Kikegawa, T., Suzuki, A., Ohtani, E., Rheology of fine-grained forsterite aggregate at deep upper mantle conditions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 119, 2014

DOI:10.1002/2013JB010473

Ohuchi, T., Irifune, T., Crystallographic preferred orientation of olivine in the Earth's deep upper mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 228, 220-231, 2014

DOI:10.1016/j.pepi.2013.11.013

Nishi, M., Nishihara, Y., Irifune, T., Growth kinetics of MgSiO₃ perovskite reaction rim between stishovite and periclase up to 50 GPa and its implication for grain boundary diffusivity in the lower mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 377-378, 191-198, 2013

DOI:10.1016/j.epsl.2013.06.045

Ohuchi, T., Irifune, T., Development of A-type olivine fabric in water-rich deep upper mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 362, 20-30, 2013

DOI:10.1016/j.epsl.2012.11.029

Kawazoe, T., Ohuchi, T., Nishihara, Y., Nishiyama, N., Fujino, K., Irifune, T., Seismic anisotropy in the mantle transition zone induced by shear deformation of

wadsleyite, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 216, 91-98, 2013

DOI:10.1016/j.pepi.2012.12.005.

Nishihara, Y., Nakajima, Y., Akashi, A., Tsujino, N., Takahashi, E., Funakoshi, K., Higo, Y., Isothermal compression of face-centered cubic iron, *American Mineralogist*, 査読有, 97(8-9), 1417-1420, 2012

DOI:10.2138/am.2012.3958

Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishihara, Y., Irifune, T., Change of olivine a-axis alignment induced by water: origin of seismic anisotropy in subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 317-318, 111-119, 2012

DOI:10.1016/j.epsl.2011.11.022

Ohuchi, T., Nishihara, Y., Kawazoe, T., Spengler, D., Shiraishi, R., Suzuki, A., Kikegawa, T., Ohtani, E., Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 335-336, 59-71, 2012

DOI:10.1016/j.epsl.2012.04.032

西原遊, 高压下でのマンツル鉱物の流動特性, *高压力の科学と技術*, 査読有, 21, 137-143, 2011

http://dx.doi.org/10.4131/jshpreview.21.137

Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishihara, Y., Nishiyama, N., Irifune, T., High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 304(1-2), 55-63, 2011

DOI:10.1016/j.epsl.2011.01.015

Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Nishiyama, N., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., In situ stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at P-T conditions of the upper part of the mantle transition zone, *American Mineralogist*, 査読有, 96(11-12), 1665-1672, 2011

DOI: 10.2138/am.2011.3818

Ohuchi, T., Karato, S., Fujino, K., Strength of single-crystal orthopyroxene under lithospheric conditions, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 査読有, 161, 961-975, 2011

DOI:10.1007/s00410-010-0574-3

Nishihara, Y., Funakoshi, K., Higo, Y., Tsujino, N., Kawazoe, T., Kubo, T., Shimojuku, A., Terasaki, H., Nishiyama, N., Stress relaxation experiments of olivine under Earth's deep upper mantle conditions, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 183, 164-174, 2010

DOI: 10.1016/j.pepi.2010.07.006

Kawazoe, T., Nishiyama, N., Nishihara, Y., Irifune, T., Deformation experiments at P-T conditions of the mantle transition zone using D-DIA, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 183, 190-195, 2010

DOI:10.1016/j.pepi.2010.07.004

Kawazoe, T., Ohuchi, T., Nishiyama, N., Nishihara, Y., Irifune, T., Preliminary deformation experiment of ringwoodite at 20 GPa and 1700 K using a D-DIA apparatus, *Journal of Earth Science*, 査読有, 21, 517-522, 2010

DOI:10.1007/s12583-010-0120-2

Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishiyama, N., Nishihara, Y., Irifune, T., Technical development of simple shear deformation experiments using a deformation-DIA apparatus, *Journal of Earth Science*, 21, 523-531, 2010

DOI:10.1007/s12583-010-0110-4

Tsujino, N., Nishihara, Y., Effect of pressure on grain-growth kinetics of ferropicicase to lower mantle conditions, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 37, 2010

DOI:10.1029/2010GL043491

Kawazoe, T., Nishiyama, N., Nishihara, Y., Irifune, T., Pressure generation to 25 GPa using a cubic anvil apparatus with a multi-anvil 6-6 assembly, *High Pressure Research*, 査読有, 30, 167-174, 2010

DOI:10.1080/08957950903503912

Kawazoe, T., Karato, S., Ando, J., Jing, Z., Otsuka, K., Hustoft, J.W., Shear deformation of polycrystalline wadsleyite up to 2100 K at 14–17 GPa using a rotational Drickamer apparatus (RDA), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 115, 2010

DOI:10.1029/2009JB007096

Ohuchi, T., Nakamura, M., Michibayashi, K., Effect of grain growth on cation exchange between dunite and fluid: implications for chemical homogenization in the upper mantle, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 査読有, 160, 339-357, 2010

DOI:10.1007/s00410-009-0481-7

〔学会発表〕(計 64 件)

Nishihara, Y., Ohuchi, T., Kawazoe, T., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Seto, Y., Irifune, T., Lattice preferred orientation of hcp-iron induced by shear deformation, *Japan Geoscience Union Meeting 2013*, 2013 年 5 月 21 日, Chiba, Japan

大内智博, 西原遊, 瀬戸雄介, 川添貴章, 西真之, 丸山玄太, 肥後祐司, 舟越賢一, 入船徹男, カンラン石結晶定向配列発達の高圧高温下その場観察実験, *日本地球惑星科学連合 2013*, 2013 年 5 月 23 日, 千

葉

Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., In situ creep strength measurements on ringwoodite at 18 GPa and 1700 K using a deformation-DIA apparatus combined with synchrotron radiation, *AGU Fall Meeting 2013*, 2013 年 12 月 11 日, San Francisco, USA

Nishihara, Y., Deformation experiments of mantle materials at the conditions of deep Earth interior, *The 22nd V.M. Goldschmidt Conference*, 2012 年 6 月 25 日, Montreal, Canada

Nishihara, Y., Kawazoe, T., Nishi, M., Ohuchi, T., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., Majorite-ringwoodite strength contrast: Implication for the separation of crustal material from slab near 660 km depth, *Japan Geoscience Union Meeting 2012*, 2012 年 5 月 22 日, Chiba, Japan

Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Nishi, M., Fujino, K., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., Viscosity structure model around 410-km discontinuity: mineralogical approach, *Japan Geoscience Union Meeting 2012*, 2012 年 5 月 20 日, Chiba, Japan

Ohuchi, T., Nishihara, Y., Kawazoe, T., Spengler, D., Shiraishi, R., Suzuki, A., Kikegawa, T., Ohtani, E., Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle, *Japan Geoscience Union Meeting 2012*, 2012 年 5 月 22 日, Chiba, Japan

Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Nishi, M., Nishiyama, N., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., In situ stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at P-T conditions of the upper part of the mantle transition zone, *AGU Fall Meeting 2011*, 2011 年 12 月 6 日, San Francisco, CA, USA

Spengler, D., Nishihara, Y., Fujino, K., Super-Si garnet breakdown kinetics and implications for craton evolution, *Goldschmidt2011*, 2011 年 8 月 19 日, Prague, Czech Republic

大内智博, 川添貴章, 西原遊, 入船徹男, アセノスフェア条件下におけるかんらん石の結晶方位定向配列における水の効果, 第 52 回高圧討論会, 沖縄キリスト教学院, 2011 年 11 月 11 日

西原遊, 大内智博, 川添貴章, Dirk Spengler, 田阪美樹, 平賀岳彦, 亀卦川卓美, 鈴木昭夫, 大谷栄治, 上部マントルでのカンラン石のレオロジー, 第 51 回高圧討論会, 2010 年 10 月 20 日, 仙台

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西原 遊 (NISHIHARA, Yu)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授

研究者番号：10397036

(2) 研究分担者

大内 智博 (OHUCHI, Tomohiro)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：60570504

川添 貴章 (KAWAZOE, Takaaki)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・グローバルCOE 助教

研究者番号：40527610

（平成 24 年度まで）

(3) 連携研究者

西山 宣正 (NISHIYAMA, Norimasa)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授

研究者番号：10452682

（平成 23 年度まで）