

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月5日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740346

研究課題名（和文） ウォズリアイトの放射光変形実験によるマントル遷移層の粘性率に関する研究

研究課題名（英文） Viscosity of the mantle transition zone investigated by in situ deformation experiments on wadsleyite

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：圧力 14-17 GPa、温度 1400-1700 K、歪速度 $3-15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ における DIA 型変形実験装置を用いた高温高压変形実験および放射光 X 線を用いた変形中の試料の応力・歪時分割測定を可能にした。これによりマントル遷移層上部（深さ 410-500 km）の主要構成鉱物であるウォズリアイトの粘性率（クリープ強度）の精密測定を世界にさきがけて実現した。

研究成果の概要（英文）：Deformation experiments and in situ time-resolved stress-strain measurements were carried out at pressures of 14-17 GPa, temperatures of 1400-1700 K and strain rates of $3-15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ by using a deformation-DIA apparatus and synchrotron radiation. This technical development enables us to investigate viscosity (creep strength) of wadsleyite, which is the most dominant mineral at the upper part of the mantle transition zone.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地球深部の鉱物と岩石のレオロジー

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：マントル遷移層、ウォズリアイト、粘性率、クリープ強度、変形実験、高温高压実験、放射光、応力測定

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の時点において、マントル遷移層上部（深さ 410-500 km）の温度圧力条件下での歪速度を制御した定量的な変形実験が、アメリカ合衆国において DIA 型変形実験装置と回転ドリッカマー装置を用いて行われ始めていた。回転ドリッカマー装置を用いた研究では、16 GPa・1800 K までのウォズリアイトの変形実験が行われていた（Nishihara

et al., 2008; Kawazoe et al., 2010 *Journal of Geophysical Research*）。しかし試料の温度の測定誤差が大きいという欠点を抱えており、得られた実験データによる流動則の解析が困難であった。一方 DIA 型変形実験装置には単純な応力場を発生することができ、試料中の温度勾配が小さく試料が比較的大容量であるといった優位点があり、得られた実験データによる流動則の解析が可能であった。研究

開始当初の時点において、DIA 型変形実験を用いて 18 GPa までの変形実験が可能になっていた (Nishiyama et al., 2007)。しかしヒーター材の相転移による加熱不良や実験セルの小型化による断熱不良といった実験技術的な問題によって、マントル遷移層圧力条件下では発生温度が 900 K までに限られていた。そのためより高い実験温度が必要とされるウォズリアイトの粘性率の研究は行われていなかった。

国内では、DIA 型変形実験装置が高エネルギー加速器研究機構・東京工業大学・愛媛大学に導入され、高温高压変形実験が始められつつあった。私はこの装置の最高発生温度圧力を拡大するために 6-6 加圧方式に関する実験技術開発を行い、この装置の発生可能な温度圧力を大幅に更新することに成功した (Kawazoe et al., 2010 *High Pressure Research*; Kawazoe et al., 2010 *Physics of the Earth and Planetary Interiors*)。その結果、これらの研究施設の中で私の所属する愛媛大学グループのみがマントル遷移層の温度圧力条件下での変形実験に成功していた。

2. 研究の目的

本研究課題の当初の目的は、マントル遷移層上部の粘性率を含水量・歪速度・温度の関数（流動則）として実験的に決定することであった。そのためにマントル遷移層上部の最も主要な鉱物であるウォズリアイトについて、DIA 型変形実験装置に 6-6 加圧方式を組み合わせるによりマントル遷移層上部に相当する温度圧力条件 (~15 GPa・~1700 K) において温度・歪速度を制御したデータの質の高い変形実験を行い、第三世代放射光施設からの放射光 X 線を用いて試料の応力・歪速度を変形中に測定した。

3. 研究の方法

DIA 型変形実験装置に 6-6 加圧方式と放射光 X 線測定を組み合わせることにより、ウォズリアイトを実験試料とした ~15 GPa・~1700 K・ $3\text{--}15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の変形実験を行い、高温高压下での試料変形中に応力・歪速度をその場測定した。放射光変形実験は国内の第三世代放射光施設 SPring-8 のビームライン BL04B1 に DIA 型変形実験装置を導入することにより行った。試料の変形中の応力・歪速度は放射光 X 線回折・ラジオグラフを用いて測定した。実験回収試料の粒径・含水量は愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター設置の電界放出型走査型電子顕微鏡・赤外分光装置を用いて測定した。これらの放射光変形実験および実験回収試料の分析を行うことにより、ウォズリアイトの粘性率を実験的に含水量・歪速度・温度の関数（流動則）として決定した。

4. 研究成果

(1) 主な研究成果

① SPring-8 における DIA 型変形実験装置の立ち上げ

国内の第三世代放射光施設 SPring-8 のビームライン BL04B1 に設置の高压発生装置 SPEED-Mk.II に DIA 型変形ガイドブロックを導入し立ち上げ作業を行った。この DIA 型変形実験装置は他の放射光施設設置のものよりも高精度な加圧・変形が可能である。そのため導入した実験装置を使用して高温高压変形実験を行うことにより、従来の放射光その場応力-歪測定実験よりも高い圧力条件において応力-歪を測定することが可能となった。

② 15 GPa・1700 K までの高温高压変形実験・変形中その場応力-歪測定の実現

高温高压変形実験セル・6-6 加圧方式アンビルガイドを放射光その場応力-歪測定のために改良した。これにより 15 GPa・1700 K までの DIA 型変形実験装置を用いた高温高压変形実験・変形中その場応力-歪測定を世界で初めて実現した。この研究成果は、国際学術雑誌「*American Mineralogist*」にて発表した (Kawazoe et al., 2011)。

③ 含水ウォズリアイトの流動則の決定

マントル遷移層上部の主要構成鉱物であるウォズリアイトの粘性率を含水量・歪速度の関数（流動則）として実験的に決定した。地球（および地球型惑星）はマントル対流をとおりて熱的・化学的に進化している。このマントル対流を理解するための最も重要な物理量の一つはマントルの粘性率であり、本研究ではマントル遷移層上部の粘性率がどの程度の大きさで含水量・歪速度の変化によりどのように変わるかを世界で初めて明らかにした。そのため本研究は地球の熱的・化学的進化を理解する上で非常に重要な意義がある。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

SPring-8 において立ち上げた DIA 型変形実験装置に革新的実験技術を組み合わせることにより、マントル遷移層上部の粘性率がその含水量によってどのように変化するかを国内外の他の研究グループに先駆けて決定した。そのため本研究は、世界的に先端的な研究として位置づけられる。

本研究の成果は国際的に大変評価され、アメリカ地球物理学連合 2011 年秋季大会 (*American Geophysical Union Fall Meeting 2011*) において招待講演を行った。そのため本研究は地球科学分野においてインパクトがあったといえることができる。

(3)今後の展望

①沈み込むスラブのマントル遷移層上部での粘性率

沈み込むスラブのマントル遷移層上部での粘性率は、マントル遷移層でのスラブの滞留現象を理解する上で非常に重要である。沈み込むスラブの温度は周囲のマントルよりも低温であり、変形機構がべき乗則転位クリープからパイエルス機構転位クリープに変化していることが予想される。そのため本研究課題で確立したマントル遷移層上部の温度圧力条件での粘性率測定手法をより低温条件 (~1000-1300 K) に応用することにより、沈み込むスラブの粘性率を明らかにすることが期待できる。

②マントル遷移層下部の粘性率

マントル遷移層下部の粘性率は地球の熱的・化学的進化を理解する上で非常に重要である。しかしその粘性率は明らかになっていない。本研究課題で確立した高温高压変形実験・変形中その場応力-歪測定実験技術をさらに発展させることにより、より高压力条件下での粘性率測定実験が必要となるマントル遷移層下部の粘性率を明らかにすることが期待できる。

③マントル対流シミュレーション

地球（および地球型惑星）はマントル対流をとおして熱的・化学的に進化している。本研究課題によって得られた実験結果をマントル対流シミュレーション研究に導入し、沈み込むスラブや上昇するホットプルームをより現実に近い形でシミュレーションすることにより、地球進化の理解が飛躍的に進むことが期待される。

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9件）

① T. Kawazoe, A miniature cubic anvil apparatus for optical measurement under high pressure, *Review of Scientific Instruments*, 査読有、Vol. 83, 2012, 035111

② T. Ohuchi, T. Kawazoe, Y. Nishihara and T. Irifune, Change of olivine a-axis alignment induced by water: Origin of seismic anisotropy in subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有、Vol. 317-318, 2012, 111-119

③ T. Kawazoe, Y. Nishihara, T. Ohuchi, N. Nishiyama, Y. Higo, K. Funakoshi and T. Irifune, 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、Vol. 96, 2011, 1665-1672

④ T. Ohuchi, T. Kawazoe, Y. Nishihara, N. Nishiyama and T. Irifune, High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有、Vol. 304, 2011, 55-63

⑤ T. Kawazoe, N. Nishiyama, Y. Nishihara and T. Irifune, Deformation experiment at *P-T* conditions of the mantle transition zone using D-DIA apparatus, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有、Vol. 183, 2010, 190-195

⑥ Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, N. Tsujino, T. Kawazoe, T. Kubo, A. Shimajuku, H. Terasaki and N. Nishiyama, Stress relaxation experiments of olivine under conditions of subducted slab in Earth's deep upper mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有、Vol. 183, 2010, 164-174

⑦ T. Kawazoe, T. Ohuchi, N. Nishiyama, Y. Nishihara and T. Irifune, Preliminary deformation experiment of ringwoodite at 20 GPa and 1700 K using a D-DIA apparatus, *Journal of Earth Science*, 査読有、Vol. 21, 2010, 517-522

⑧ T. Ohuchi, T. Kawazoe, N. Nishiyama, Y. Nishihara and T. Irifune, Technical development of simple shear deformation experiments using a deformation-DIA apparatus, *Journal of Earth Science*, 査読有、Vol. 21, 2010, 523-531

⑨ T. Kawazoe, S. Karato, J. Ando, Z. Jing, K. Otsuka and J. W. Hustoft, Shear deformation of polycrystalline wadsleyite up to 2100 K at 14-17 GPa using a rotational Drickamer apparatus (RDA), *Journal of Geophysical Research*, 査読有、Vol. 115, 2010, B08208

〔学会発表〕（計29件）

① L.M. Miyagi, G. Amulele, J. Ando, J.W. Hustoft, T. Irifune, S. Karato, T. Kawazoe, Y. Nishihara, Y. Xu and D. Yamazaki, Development of a rotational Drickamer apparatus: A progress report, American Geophysical Union Fall Meeting 2011, 2011年12月9日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

② T. Kawazoe, Y. Nishihara, T. Ohuchi, M. Nishi, N. Nishiyama, Y. Higo, K. Funakoshi and T. Irifune, *In situ* stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at *P-T* conditions of the upper part of the mantle transition zone, American Geophysical Union Fall Meeting 2011 (招待講演)、2011年12月6日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

③ Y. Nishihara, T. Ohuchi, T. Kawazoe, D. Spengler, M. Tasaka, T. Hiraga, T. Kikegawa, A. Suzuki and E. Ohtani, Effect of pressure on

rheology of fine-grained forsterite aggregate、American Geophysical Union Fall Meeting 2011、2011年12月5日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

④川添貴章、西原遊、大内智博、西真之、西山宣正、肥後祐司、舟越賢一、入船徹男、DIA型変形装置と放射光を用いたクリープ強度測定条件の15 GPa・1700 Kまでの拡大、第52回高压討論会、2011年11月11日、沖縄県西原町

⑤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回高压討論会、2011年11月11日、沖縄県西原町

⑥西原遊、大内智博、川添貴章、Spengler Dirk、田阪美樹、平賀岳彦、亀卦川卓美、鈴木昭夫、大谷栄治、上部マントル深部での支配的変形機構、2011年11月11日、沖縄県西原町

⑦下宿彰、山崎大輔、芳野極、國本健広、西原遊、川添貴章、大内智博、西真之、肥後祐司、舟越賢一、高压高温変形場でのマントル鉱物のラウエスポット移動その場観察によるすべり系の決定、2011年11月9日、沖縄県西原町

⑧T. Kawazoe、In situ stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at *P-T* conditions of the upper part of the mantle transition zone、2011 GL-GRC Inter-Institution Science Symposium、2011年9月19日、アメリカ合衆国ワシントンD.C.

⑨川添貴章、西原遊、大内智博、西真之、肥後祐司、舟越賢一、入船徹男、マントル遷移層温度圧力条件下での含水ウォズリアイトのクリープ強度放射光その場測定実験、日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会、2011年9月10日、茨城県水戸市

⑩大内智博、西原遊、川添貴章、Spengler Dirk、白石令、鈴木昭夫、大谷栄治、亀卦川卓美、かんらん岩の流動強度における含水メルトの効果、日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会、2011年9月10日、茨城県水戸市

⑪西原遊、大内智博、川添貴章、Spengler Dirk、田阪美樹、平賀岳彦、亀卦川卓美、鈴木昭夫、大谷栄治、上部マントル深部でのカンラン石のレオロジー、日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会、2011年9月10日、茨城県水戸市

⑫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でのかんらん石の結晶方位定向配列における水の効果、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月24日、千葉県幕張市

⑬山田明寛、川添貴章、西山宣正、井上徹、八木健彦、高压中性子回折に向けた大容量

6-6型加压方式の開発、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月24日、千葉県幕張市

⑭西原遊、大内智博、川添貴章、Spengler Dirk、田阪美樹、平賀岳彦、亀卦川卓美、鈴木昭夫、大谷栄治、上部マントル深部でのカンラン石のレオロジー、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月24日、千葉県幕張市

⑮川添貴章、西原遊、大内智博、西山宣正、肥後祐司、舟越賢一、入船徹男、DIA型変形装置を用いたマントル遷移層温度圧力条件下でのウォズリアイトのクリープ強度その場測定、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月23日、千葉県幕張市

⑯川添貴章、西原遊、大内智博、西山宣正、肥後祐司、舟越賢一、入船徹男、放射光単色X線とD-DIA型高压変形装置を用いた変形実験・応力測定における温度圧力条件の15 GPa・1700 Kまでの拡大、SPRING-8利用者懇談会高压物質科学研究会・地球惑星科学研究会2010年度合同研究会合、2011年1月5日、兵庫県佐用町

⑰Y. Nishihara, T. Ohuchi, T. Kawazoe, D. Spengler, M. Tasaka, T. Hiraga, T. Kikegawa, A. Suzuki, E. Ohtani、Rheology of fine-grained forsterite aggregate under deep upper mantle conditions、American Geophysical Union Fall Meeting 2010、2010年12月16日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

⑱T. Ohuchi, T. Kawazoe, Y. Nishihara, N. Nishiyama and T. Irifune、High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy、American Geophysical Union Fall Meeting 2010、2010年12月15日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

⑲T. Kawazoe, T. Ohuchi, Y. Nishihara, N. Nishiyama and T. Irifune、Plastic Deformation of Wadsleyite and Seismic Anisotropy in the Mantle Transition Zone、American Geophysical Union Fall Meeting 2010、2010年12月13日、アメリカ合衆国サンフランシスコ

⑳T. Kawazoe, T. Ohuchi, Y. Nishihara, N. Nishiyama and T. Irifune、Deformation experiments of wadsleyite and ringwoodite at P-T conditions of the mantle transition zone using a D-DIA apparatus、2010 TANDEM Symposium on Deep Earth Mineralogy、2010年11月6日、中華人民共和国武漢

㉑T. Ohuchi, T. Kawazoe, Y. Nishihara, N. Nishiyama and T. Irifune、Simple-shear deformation of olivine using a deformation-DIA apparatus: implications for upper mantle seismic anisotropy、2010 TANDEM Symposium on Deep Earth Mineralogy、2010年11月6日、中華人民共和国武漢

㉒川添貴章、大内智博、西原遊、西山宣正、

入船徹男、DIA 型変形装置を用いたウォズリアイトのせん断変形実験、第 51 回高压討論会、2010 年 10 月 20 日、宮城県仙台市

③ 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、上部マントル深部でのカンラン石のレオロジー、第 51 回高压討論会、2010 年 10 月 20 日、宮城県仙台市

④ 大内智博、川添貴章、西原遊、西山宣正、入船徹男、かんらん石結晶方位定向配列における圧力・温度の効果、日本鉱物科学会 2010 年年会、2010 年 9 月 25 日、島根県松江市

⑤ 川添貴章、西山宣正、西原遊、大内智博、入船徹男、DIA 型変形装置を用いたマントル遷移層温度圧力条件下でのウォズリアイト・リングウツダイトの変形実験、日本地球惑星科学連合 2010 年大会（招待講演）、2010 年 5 月 27 日、千葉県幕張市

⑥ 大内智博、川添貴章、西原遊、西山宣正、入船徹男、かんらん石の格子定向配列における圧力・水の効果、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 27 日、千葉県幕張市

⑦ 川添貴章、山田明寛、西山宣正、井上徹、八木健彦、入船徹男、J-PARC でのキュービックアンビル装置を用いた高温高压中性子実験用の実験セル開発、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23 日、千葉県幕張市

⑧ 井上徹、山田明寛、川添貴章、西山宣正、Cuiping Yang、曾我部昭人、6-6 加圧方式を用いた方射光 X 線その場観察実験と中性子実験への有用性、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23 日、千葉県幕張市

⑨ 山田明寛、井上徹、ヤンビンワン、チャンヨンパーク、ゴーインシェン、川添貴章、西山宣正、大容量プレスを使用した珪酸塩メルトの高压 X 線回折実験、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23 日、千葉県幕張市

〔その他〕

ホームページ

<http://earth.sci.ehime-u.ac.jp/~kawazoe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

西原 遊 (NISHIHARA YU)

愛媛大学・上級研究員センター・上級研究員

研究者番号：10397036

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・グローバル COE 研究員

研究者番号：60570504

肥後 祐司 (HIGO YUJI)

高輝度光科学研究センター・利用促進部門・研究員

研究者番号：10423435

西 真之 (NISHI MASAYUKI)

愛媛大学・学術振興会特別研究員 (PD)