

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月26日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011年度～2012年度

課題番号：23740393

研究課題名（和文） 高温高压下でのかんらん石の変形実験による上部マントルの流動パターンの解明

研究課題名（英文） Deformation of olivine under Earth' s upper mantle conditions and its implications for directions of the upper mantle flow

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：地球の上部マントルにおいて、マントルがどのような方向に流れているのかを地震学的な観測結果から推定するのに必要なデータを得るために実験的研究を行った。実験室において上部マントル物質の流動を再現し、回収試料を解析することによって地震学的にどのような観測結果が期待されるかを求めた。本研究の実験結果を実際の観測結果に当てはめることにより、上部マントルにおいては水平流が支配的であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Experimental studies have been conducted to investigate the relationship between the flow direction and seismic anisotropy in Earth' s upper mantle. Mantle flow was experimentally reproduced by using a simple-shear deformation technique under Earth' s upper mantle conditions, and then seismic properties of the samples were evaluated. Based on the experimental results by the present project, horizontal flow is expected to be the dominant flow style in the Earth' s upper mantle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：地球惑星物質・高压地球科学・マントルレオロジー

1. 研究開始当初の背景

地球の上部マントル（深さ30-410km部分）を構成する高温状態の岩石の流動方向は、①地球内部における巨視的な物質循環（スラブの沈み込み・ホットブルーム上昇）の方向や様式を支配するほか、②地球表層を構成する大陸・海洋プレートの移動方向とそれによる地球表層の進化を支配する。すなわち、上部マントルの流動方向を理解することは、地球表層・内部の進化を理解してゆく上で不可欠である。地震波伝播の方位依存性データに基づくマントル流動方向の推定法は、Montagner &

Tanimoto (1991)の発見以降、マントル対流をはじめとした巨視的物質移動を理解するうえで重要かつ強力な手法となっている。当推定法では、上部マントルの主要構成鉱物“かんらん石”のa軸（最も地震波伝播の速い結晶方位）の方位がマントルの流動方向に一致するといった仮定をしている（*転位クリープにより鉱物が流動変形する場合、流動方向と平行に、特定の結晶軸が配向する）。この仮定は、Montagner & Tanimoto (1981)が発表された当時においては、高压下における変形実験技術が未発達であったため、鉱物物理学

的に妥当であるかは検証することができなかった。しかし Jung & Karato (2001) による、最上部マントル条件下 (2GPa, ~1500K) における実験結果により、“かんらん石”の a 軸方位は、かんらん石中の含水量によってはマントルの流動方向に一致しない (直交する) 場合があることが示された。さらに近年、含水量の大小に関わらず、上部マントル中部以深に相当する圧力下では (> 7GPa)、“かんらん石”の a 軸はマントルの流動方向に一致しない (直交する) 可能性が指摘されている (例えば Raterron et al., 2007)。すなわち、上部マントルの種々の条件下においては、“かんらん石”の a 軸の方位は、マントルの流動方向に一致するとは限らず、地震波伝播の観測結果の解釈によっては、マントルの流動方向を大きく誤る可能性を秘めている。

近年、D-DIA 型変形装置が登場したこと (Wang et al., 2003) に加え、申請者らのグループによる技術開発の結果、上部マントル全領域の温度圧力条件下 (2–13GPa, ≤1700K) における、かんらん石の流動変形実験が可能となってきた (Kawazoe et al., 2010; Ohuchi et al., 2010)。そのため、申請者のグループでは、“かんらん石”の a 軸がマントルの流動方向とどのような方位関係にあるのかを、全上部マントル条件下で実験的に明らかにすることが可能となっている。

2. 研究の目的

本研究では、全上部マントルの温度圧力条件下 (2–13GPa, 1400–1700K) における、無水および含水かんらん石多結晶体 (上部マントル構成岩石) のせん断変形実験を行う。それにより、以下の点を明らかにする。

(1): 無水条件下における、かんらん石 a 軸と流動方向の方位関係の解明

無水条件下において、かんらん石の a 軸 (及び b, c 軸) が、流動方向 (= 変形でのせん断方向) に対して、どのような方位関係を示すのかを、上部マントルの主要な温度圧力条件下 (すなわち海洋マントル及び大陸マントルの地温勾配) において明らかにする。

(2): 含水条件下における、かんらん石 a 軸と流動方向の方位関係の解明

含水条件下において、II-1 と同様な実験を行う。これにより、流動方向に対するかんらん石の a 軸方位に対して、水がどのような影響を与えるのかを明らかにする。Jung & Karato (2001) により、マントルのかんらん石に微量に含まれる水 (<2000 ppm H/Si) により、流動方向とかんらん石の結晶軸の方位関係が変化することが知られ

ているため、含水条件下での実験も重要である。

(3): ファブリック・ダイアグラムによる、上部マントル流動パターンへの解読

以上無水及び含水条件下での実験をおこなうことにより、全上部マントル温度圧力条件下における、マントル流動方向とかんらん石の結晶軸の方位関係、及びそれらの関係より計算される地震波速度異方性の特性 (特に S 波速度異方性 V_{SH}/V_{SV} 比) を集約した“ファブリック・ダイアグラム”を完成させる。最終的にはこれを実際の地震波観測結果と比較することにより、上部マントルにおける流動パターンを解読する

3. 研究の方法

本研究でのテーマの中心となる、上部マントル条件下でのかんらん石の変形実験は、国内二ヶ所の放射光施設 (SPring-8、高エネルギー加速器研究機構) に設置されている D-DIA 型高圧変形装置を用いて行う。本研究における変形実験においては、放射光を用いた、試料の高温高圧下での変形の“その場”観察を行う。そのため、本研究では変形装置のみならず放射光関連機器を同時に使用する必要がある。これらの実験においては、代表者および研究協力者 (西原、川添) と連携して実験を行っていく。

以上の手順で得た変形試料は、申請者らが所属する愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センターにて切断・研磨等の処理を行ったうえ、当センター設置の電子線後方散乱回折装置 (EBSD) を用い、変形試料における流動方向とかんらん石の結晶軸の方位関係を分析する。

なお、23年度では、全上部マントルの温度圧力条件下 (2–13GPa, 1400–1700K) における、無水のかんらん石多結晶体に関する実験を行っていく。

4. 研究成果

本研究では、上部マントルの主要構成鉱物“かんらん石”の a 軸 (最も地震波伝播の速い結晶方位) がマントルの流動方向とどのような方位関係にあるのかを実験的に明らかにすることで、上部マントル全体の流動方向を解読するための鍵となる、“ファブリック・ダイアグラム”を構築していくことを目指してきた。

初年度では 2.1–5.2 GPa, 1500–1670 K の無水条件下でのかんらん石多結晶体のせん断変形実験を行った。結果として、水に乏しい条件下 ($C_{OH} < 650$ ppm

H/Si) においては A-type ファブリック ([100]方位がすべり方向に集中、かつ [010]方位がすべり面の法線方向に集中) が発達する一方で、水に富んだ条件下 (> 1000 ppm H/Si) においては B-type ファブリック ([001]方位がすべり方向に集中、かつ [010]方位がすべり面の法線方向に集中) が発達した。

この結果は、かんらん石において地震波速度の伝播が最も速い a 軸の向きがかんらん石中に溶存した水の量によって変化することを示している。すなわち、水に枯渇したマントルにおいては、速い S 波 (VS1) の振動方向がマントルの流れの方向と平行である一方で、水に富んだマントルにおいては VS1 の振動方向がマントルの流れと垂直であると推定される。種々の沈み込み帯において、火山フロントを境として海溝側では VS1 の振動方向がマントルの流れと垂直であり、背弧側では VS1 の振動方向がマントルの流れと平行であるといった観測結果が一般的に報告されている (Smith et al., 2001)。このような地震波速度異方性は、沈み込み帯におけるマントルウェッジにバイモーダルな水の不均質分布が存在すると仮定することで説明することができる。

最終年度では、上部マントル深部の温度圧力条件下 (7–13 GPa, 1400–1800K) における、無水および含水かんらん石多結晶体 (上部マントル構成岩石) のせん断変形実験を行った。その結果として、無水条件下では C-type ファブリックに分類されるかんらん石の結晶方位定向配列の発達が観察された一方で、含水条件下では B-type および A-type ファブリックがそれぞれ中程度の含水条件 (750–2130 ppm H/Si) および水に富んだ条件下 (> 2130 ppm H/Si) において発達することが確認された。すなわち、水の効果によって C-type から B-type 及び B-type から A-type への二段階のファブリック・トランジションが起きることが明らかとなった。

上部マントル深部において観測されている地震波速度異方性の特性のうち、特に S 波速度異方性 V_{SH}/V_{SV} 比は一般的に 1 未満であることが一般的であることが知られている。東太平洋海嶺下における上部マントル深部などの一部の例外では、 V_{SH}/V_{SV} 比

が 1 以上であることが知られている。本研究で作成したファブリック・ダイアグラムにより、一般的な上部マントル深部では水に乏しいマントルの水平流が卓越していると解釈され、東太平洋海嶺下の特異な上部マントル深部では水に富んだマントルの上昇流が卓越していると解釈される。

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 6 件)

(1) Ohuchi, T., Irifune, T. Development of A-type olivine fabric in water-rich deep upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 362 (2013), 20–30. 査読有

(2) Kawazoe, T., Ohuchi, T., et al. Seismic anisotropy in the mantle transition zone induced by shear deformation of wadsleyite. *Phys. Earth Planet. Inter.* 216 (2013) 91–98. 査読有

(3) Ohuchi, T., Nishihara, Y., et al. Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 335–336 (2012) 59–71. 査読有

(4) Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishihara, Y. et al. Change of olivine a-axis alignment induced by water: Origin of seismic anisotropy in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.* 317–318 (2012), 111–119. 査読有

(5) Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., et al. In situ stress-strain measurements in a deformation-DIA apparatus at P-T conditions of the upper part of the mantle transition zone. *Am. Mineral.* 96 (2011), 1665–1672. 査読有

(6) Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishiyama, N., et al. High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 304 (2011) 55–63. 査読有

[学会発表] (計 8 件)

(1) 大内智博、入舩徹男. 上部マントル最下部におけるかんらん石結晶方位定向配列. 日本高圧力学会第 53 回高圧討論会、2012 年 11 月 9 日、大阪

(2) 大内智博、入舩徹男. 上部マントル深部におけるかんらん石結晶方位定向配列. 日本鉱物科学会 2012 年年会、2012 年 9 月 21 日、京都

(3) 大内智博. かんらん石の結晶方位定向配列と上部マントルの不均質構造. 鉱物科学若手の会ショートコース、2012 年 9 月 18 日、京都

(4) Ohuchi, T., Nishihara, Y., et al. Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle. Joint 2012 COMPRESS Annual Meeting and High-Pressure Mineral Physics Seminar-8, 2012 年 7 月 9 日、アメリカ合衆国

(5) 大内智博、西原遊、ほか. 含水メルトを含むダナイトの超塑性: 上部マントルにおけるせん断集中. 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会、2012 年 5 月 22 日、幕張

(6) 大内智博、川添貴章、西原遊、ほか. 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交換. 日本高圧力学会第 52 回高圧討論会、2011 年 11 月 9-11 日、那覇

(7) 大内智博、西原遊、川添貴章、ほか. かんらん岩の流動強度における含水メルトの効果. 日本鉱物科学会 2011 年年会、2011 年 9 月 9-11 日、水戸

(8) 大内智博、川添貴章、西原遊、ほか. 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 年度連合大会、2011 年 5 月 22-27 日、幕張

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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

川添 貴章 (KAWAZOE TAKAAKI)
ドイツ連邦バイロイト大学・バイエルン地球科学研究所・助教
研究者番号: 40527610