

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244062

研究課題名(和文) マントルウェッジカンラン岩のレオロジーと変成プロセス

研究課題名(英文) Rheology and metamorphic process in mantle wedge peridotites

研究代表者

道林 克禎 (Michibayashi, Katsuyoshi)

静岡大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20270978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円、(間接経費) 9,540,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、かんらん岩の主構成鉱物であるかんらん石の結晶方位ファブリックとマンツルのテクトニックな背景との関係について世界中のかんらん岩について精査した。かんらん石の変成鉱物として生じた蛇紋石(アンチゴライト)の結晶方位ファブリックの特徴とかんらん石ファブリックの関係を定量的に明らかにした。かんらん石とアンチゴライトの結晶方位の異なる岩石について弾性波速度を実測して、それぞれの鉱物の結晶方位異方性の強さが地震波異方性にどのような変化を与えるのか明らかにした。青色片岩の主構成鉱物である藍閃石とローソン石のファブリックの発達度合いから沈み込んだ海洋地殻のレオロジーと地震波異方性の効果を示した。

研究成果の概要(英文)：This study showed relationships between olivine fabrics within peridotites and the tectonic background around the world. Antigorite is a metamorphic phase of olivine, high-temperature serpentine. We examined crystallographic fabrics of antigorite and its relation to olivine fabrics. Moreover, we measured seismic velocities of serpentinized peridotites in various degrees and calculated fabric-induced seismic properties of both olivine and serpentine in order to assess their effects on bulk seismic anisotropies. We also discussed the rheology and seismic properties of metamorphosed oceanic crust in the mantle wedge based on crystallographic fabrics of glaucophane and lawsonite.

研究分野：数物系

科研費の分科・細目：地質学

キーワード：マンツル ウェッジマンツル カンラン岩 蛇紋岩 地震波異方性 結晶方位ファブリック

1. 研究開始当初の背景

地質学的に研究可能なマントル領域は最上部マントルである。特に、日本列島直下のような沈み込む海洋プレートと沈み込まれるプレートの間のマントルウェッジは、私たちに災害をもたらす地震や火山の根源である。そのため、マントルウェッジで何が起きているのか理解することは、防災や減災のための基礎的な知識を与えるため重要である。

研究代表者は、最近5年間、マントルウェッジのカンラン岩を研究してきた。これまでにテクトニックセッティングが異なる4つの地域から試料を得た。それぞれ(1)海溝陸側斜面カンラン岩 (Michibayashi et al., 2007, *Tectonophysics*; Michibayashi et al., 2009, *G-cubed*), (2)前弧高圧変成帯の超マフィック岩体 (Tasaka et al., 2008, *EPSL*), (3)火山フロントのカンラン岩捕獲岩 (Michibayashi et al., 2009, *GRL*), (4)背弧火山のカンラン岩捕獲岩 (Michibayashi et al., 2006, *GRL*; 佐津川・道林, 2009, *地雑*)である。これらの岩石の由来は、(1)マントルウェッジ先端部、(2)沈み込むスラブとマントルウェッジの境界面、(3)火山フロント直下の地殻-マントル境界付近の地震波の低速度領域、(4)背弧側の地殻-マントル境界付近の最上部マントルリソスフェアである。これまでに、これらの岩石の主構成鉱物であるカンラン石の結晶方位定向配列 (Crystal-preferred orientation, 略して CPO) を明らかにすることによって、マントルウェッジにおけるリソスフェアの構造とアセノスフェアのレオロジーを研究してきた。こうした研究成果の1つとして、地表で観測されるS波偏向異方性の解釈に地質学的な制約を与えた。S波偏向異方性とは、地下深部でS波スプリッティングした速いS1波の振動方向が火山フロントを境に前弧側では海溝に平行(トレンチパラレル)、背弧側で海溝に直交(トレンチノーマル)に変わることを表し、東北日本弧 (Nakajima & Hasegawa, 2004,

EPSL), 琉球弧 (Long & van der Hilst, 2006, *PEPI*), カムチャッカ半島 (Peyton et al., 2001, *GRL*), マリアナ海溝 (Pozgay et al., 2002, *GJI*), トンガ海溝 (Smith et al., 2001, *Science*) などで報告されているマントルウェッジにおける地震波速度異方性の特徴である。このS波偏向異方性の解釈として、トレンチノーマルはマントルウェッジ内のマントル対流を原因とする説によってほぼ研究者間で一致しているのに対して、トレンチパラレルについては、1) Bタイプと呼ばれるカンラン石のCPOとする説 (Katayama & Karato, 2006, *PEPI*), 2) トレンチパラレルなマントル対流とする説 (Long & Silver, 2008, *Science*), 3) 島弧地殻やスラブ内部の割れ目とする説 (Healy et al., 2009, *EPSL*) の3つが提案され、現在も論争が続いている。研究代表者は、上記の研究をふまえて特に1)のBタイプ説に対して、カンラン石のBタイプは地質学的には前弧域の沈み込むスラブ深部の上面に見られるが、マントルウェッジ最上部に位置する島弧のマントルリソスフェアがBタイプとは正反対のS波偏向異方性をもつAタイプとよばれるカンラン石のCPOをもつため、地表の地震波速度異方性観測ではこれらの結晶方位異方性による影響が弱まる可能性を指摘した (Michibayashi et al., 2009, *GRL*).

最近になって3)スラブ内部の割れ目説として特にスラブカンラン石の蛇紋岩化が強い異方的媒体になるとする説が登場した (Faccenda et al., 2008, *Nature*; Boudier et al., 2009, *J. Petrol.*). これに対して研究代表者は、本研究課題の研究分担者と共著で沈み込むスラブ上面に片状蛇紋岩が発達してトレンチパラレルなS波異方性が生まれる説を発表した (Katayama et al., 2009, *Nature*). 割れ目説では、蛇紋岩は割れ目に沿った水の浸透によって形成されるのに対して、研究代表者の説はこれまでの1~3までの全ての説と異なりスラブからの脱水によってスラブ

と接するマントルウェッジが蛇紋岩化して、さらに剪断変形によって片状構造を形成して著しい地震波速度異方性が生み出される新しいモデルである。このように、現在のマントルウェッジの前弧側のS波偏向異方性の解釈は、かんらん岩のレオロジーから沈み込むスラブの変成過程まで混沌とした状況である。天然の蛇紋岩化したカンラン岩のレオロジー特性と地震波特性を理解することが重要と考えた。そこで、本研究課題では環太平洋プレート収束域で採取可能なカンラン岩と蛇紋岩について、これまで研究代表者が進めてきたカンラン岩の結晶方位異方性に関する研究に加えて、カンラン岩の吸水変形変成作用である蛇紋岩化過程を地質学的物質科学的に明らかにし、さらに蛇紋岩化したカンラン岩の結晶方位異方性がどのように地震波異方性に影響を与えていくのかを地震学的なアプローチを加えて明らかにした。

2. 研究の目的

本研究では、カンラン岩の主構成鉱物であるカンラン石の結晶方位とそこに変成鉱物として生じた蛇紋石（アンチゴライト）の結晶方位の関係を定量的に明らかにし、カンラン石とアンチゴライトの結晶方位異方性の異なる岩石の弾性波速度を実測して、それぞれの鉱物の結晶方位異方性の強さが地震波異方性にどのような変化を与えるのか明らかにすることを目的とした。同時平行として、蛇紋岩及び蛇紋岩化したカンラン岩の変形実験を行い、カンラン石とアンチゴライトの結晶方位異方性の強さが変形条件によってどのように変化するのか明らかにして、マントルウェッジを流れるカンラン岩（マントル対流）の結晶方位異方性に対して、どのようにアンチゴライトが形成されていくのか信頼できるモデルを構築することを目指した。

3. 研究の方法

研究代表者の静大は主に天然のカンラン岩の結晶方位異方性と変成過程を研究した。特に最も変成作用が強いと考えられるマントルウェッジ先端部を研究するため、JAMSTECのしんかい6500を用いてマリアナ海溝とトンガ海溝の調査を行った。研究分担者の富山大は、様々な蛇紋岩の弾性波速度を実測して、蛇紋岩の地震波異方性の特性を明らかにした。研究分担者の広島大は、蛇紋岩と苦鉄質の高圧変成岩を実験室で変形させてそのレオロジー特性と地震波異方性を研究した。本研究課題では、これらの研究計画において必要不可欠な研究設備として、静岡大学に低真空モードを備えた最新の走査型電子顕微鏡を新規購入し、さらに結晶方位解析用のEBSD検出器をより高感度の検出器にアップグレードした。これらの設備によって、一般に取り扱いが難しい蛇紋石の結晶方位解析を確実に実行できる研究環境を構築した。

4. 研究成果

本研究の成果の多くは、順次学術論文として公表している。本研究課題では特に高温蛇紋石（アンチゴライト）の結晶方位分析を精力的に行ってその特徴を明らかにした(Hirauchi et al., 2010; Watanabe et al., 2011; 2014; Shao et al., 2014)。アンチゴライトのファブリックは[010](001)すべりを示した。かんらん石の結晶すべりにおける水の影響を明らかにするためにオマーンオフィオライトフィズ岩体モホ遷移帯に発達したダナイト中の延性剪断帯の構造を詳細に解析した結果、ファブリックが剪断帯の端から中心部に向かってDタイプからEタイプ、そしてCタイプに変化し、最後にランダムになることを示した。このファブリック変化は水の存在量の変化と対応していることを岩石学的に示した。この結果はこれまで変形実験によって提案されていたファブリック変化と対応した初めての天然のかんらん岩の例である(Michibayashi and

Oohara, 2013). 四国中央部東赤石山地の超苦鉄質岩体のダナイトとザクロ石単斜輝岩の微細構造と結晶方位ファブリックの分析から、ザクロ石のモード組成が増加するほど歪み量が大きくなっていることを明らかにした。これから沈み込んだスラブの上部マントル内における挙動を考察した(Muramoto et al., 2011)。さらにダナイトの構造解析から沈み込み帯に大規模な延性剪断帯が存在していたこと、その変形メカニズムは超細粒なかんらん石ウルトラマイロナイトによる超塑性であったことも明らかにした(Muramoto et al., 2011)。若狭湾大島半島の先端部に分布する待ちの山超苦鉄質岩体から沈み込み帯に存在する蛇紋岩海山の深部構造に類似した可能性のある構造を報告した(Michibayashi et al., 2013)。この構造は蛇紋岩の基質と蛇紋岩あるいはかんらん岩のブロックで構成されている。かんらん岩ブロックの組織が粗粒組織から超細粒組織まで多様であることから静的にブロック化したのではなくブロック化してから混沌とした状態であり、これは基質部の蛇紋岩が蛇紋岩泥であったことを示唆した(Michibayashi et al., 2013)。今後、この構造をより詳細に分析してその形成過程を明らかにすることによって蛇紋岩海山の形成過程が理解できるかもしれない。これらの地質調査の他に世界のかんらん岩捕獲岩のかんらん石ファブリックを解析してマントル深部の地震波異方性について議論した(Satsukawa et al., 2011; Michibayashi et al., 2012など)。さらに高圧変成岩である青色片岩中の藍閃石とローソン石の変形実験と結晶方位ファブリックの分析から海洋プレートの上面に分布する地殻物質が沈み込みに伴って高圧変成岩に変化した後のレオロジーについて考察した(Kim et al., 2013a)。さらに青色片岩の組織発達から予想される地震波特性を計算して地震波異方性への寄与を見積もった(Kim et al., 2013b)。また、これらの研究

と平行して、蛇紋岩化したかんらん岩の地震波速度を実測と結晶方位からの計算値を比較して地震波速度の理論計算を向上させた(Watanabe et al., 2011; 2014)。この方法は蛇紋岩だけでなくその他の含水鉱物にも応用可能である(Watanabe et al., 2013)。本研究課題によって国内における結晶方位ファブリック解析の中心的役割を担うことができた。そして、この成果を元にして今後マントルウェッジのレオロジーと蛇紋岩化作用の実体をさらに究明していく足がかりとなった。

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45件)

- Michibayashi, K. and Oohara, T., 2013. Olivine fabric evolution in a hydrated ductile shear zone at the Moho Transition Zone, Oman Ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378, 299-310. 査読有
- Michibayashi, K., Suzuki, M. and Komori, N., 2013. Progressive deformation partitioning during the deformation and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. *Tectonophysics*, 587, 79-88. 査読有
- Harigane, Y., Michibayashi, K., Morishita, T., Tani, K., Dick, H. and Ishizuka, O., 2013. The earliest mantle fabrics formed during subduction zone infancy. *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378, 106-113. 査読有
- Ji, S., Shao, T., Michibayashi, K., Long, C., Wang, Q., Kondo, Y., Zhao, W. and Salisbury, M. H., 2013. A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics and elastic moduli of amphibolite-rich rocks. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-30. 査読有

Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K., Tsujimori, T., 2013. Deformation fabrics of natural blueschists and implications for seismic anisotropy in subducting oceanic crust. *Physics of Earth and Planetary Interior*, 222, 8-21. 査読有

Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K. and Tsujimori, T., 2013. Rheological contrast between glaucophane and lawsonite in naturally deformed blueschist from Diablo Range, California. *Island Arc*, 22, 63-73. 査読有

Watanabe, T., Shirasugi, Y., Yano, H. and Michibayashi, K., 2011. Seismic velocity in antigorite-bearing serpentinite mylonites. *The Geological Society, Deformation Mechanism, Rheology & Tectonics: Microstructures, Mechanics & Anisotropy*, 360, 97-112. 査読有

Nishii, A., Wallis, S. R., Mizukami, T. and Michibayashi, K., 2011. Subduction related antigorite CPO patterns from forearc mantle in the Sanbagawa belt, southwest Japan. *Journal of Structural Geology*, 33, 1436-1445. 査読有

Harigane, Y., Michibayashi, K. and Ohara, Y., 2011b. Deformation and hydrothermal metamorphism of gabbroic rocks within the Godzilla Megamullion, Parece Vela Basin, Philippine Sea. *Lithos*, 124, 185-199.

Doi:10.1016/j.lithos.2011.02.001 査読有

Harigane, Y., Michibayashi, K. and Ohara, Y., 2011a. Relicts of deformed lithospheric mantle within serpentinites and weathered peridotites from the Godzilla Megamullion, Parece Vela Back-Arc Basin, Philippine Sea. *Island Arc*, 20, 174-187. 査読有

Doi:10.1111/j.1440-1738.2011.00759.x

Harigane, Y., Mizukami, T., Morishita, T., Michibayashi, K., Abe, N. and Hirano, N.,

2011. Direct evidence for upper mantle structure within the NW Pacific Plate: microstructural analyses of a petit-spot peridotite xenolith. *Earth and Planetary Science Letters*, 302, 194-202. doi:10.1016/j.epsl.2010.12.011. 査読有

Muramoto, M., Michibayashi, K., Ando, J. and Kagi, H., 2011. Rheological contrast between garnet and clinopyroxene in the mantle wedge: an example from Higashi-akaishi peridotite mass, SW Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 84, 14-33, doi:10.1016/j.pepi.2010.10.008. 査読有

Hirauchi, K., Michibayashi, K., Ueda, H. and Katayama, I., 2010. Spatial variations in antigorite fabric across a serpentine subduction channel: Insight from the Ohmachi Seamount, Izu-Bonin frontal arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 196-206, doi:10.1016/j.epsl.2010.08.035. 査読有

[学会発表](計 107 件)

Michibayashi, K., 2013. Olivine fabric evolution in a hydrated ductile shear zone at the Moho Transition Zone, Oman Ophiolite. Abstract T44A-02, 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9-13 Dec.

Watanabe, T., Shirasugi, Y. and Michibayashi, K., 2013. A new method for calculating seismic velocities in antigorite-bearing serpentinites. Abstract MR43A-2392, 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9-13 Dec.

Harigane, Y., Michibayashi, K., Morishita, T., Tani, K., Dick, H. J. and Ishizuka, O., 2013. The earliest mantle fabrics formed during subduction zone infancy. Abstract

T43G-01, 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9-13 Dec.

Michibayashi, K. and Onoue, A., 2013. Possible lateral variation of seismic anisotropies in the oceanic lithosphere due to an active mantle flow. SIT05-08, 2013 JpGU Meeting, Chiba, 19-24 May.

Kim, D., Azuma, S., Michibayashi, K. and Katayama, I., 2013. Rheological behaviors of subducting oceanic crust: Implications from experimentally deformed blueschists. SIT06-19, 2013 JpGU Meeting, Chiba, 19-24 May.

Kim, D., Katayama, I. and Michibayashi, K., 2012. Fabric analyses of experimentally deformed blueschists: Implications for deformational behaviors of sodic amphibole. Abstract T21C-2583, 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.

Michibayashi, K., Uehara, S., Ohara, Y. and Ishii, T. 2011. Fabric and petrological characteristics of serpentinized peridotites from the southern Mariana Trench. Abstract V51I-02., 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 4-9 Dec.

Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K. and Tsujimori, T., 2011. Fabric analyses of a lawsonite blueschist from Diablo Range, California: Implications for seismic anisotropy of the subducting oceanic crust. Abstract T43C-2333, 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 4-9 Dec.

Katayama, I., Hirauchi, K., Michibayashi, K. and Ando, A., 2010. Serpentine preferred orientation and variation in subduction zone anisotropy. Abstract DI33C-05 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.

Watanabe, T., Yano, H., Michibayashi, K., and Yoneda, A., 2010. Temperature

dependence of elastic wave velocities of serpentinite mylonite at 1 GPa, Western Pacific Geophysics Meeting, June 22-25, Taipei.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~sekmich/EBSD/EBSD.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

道林 克禎 (MICHIBAYASHI, Katsuyohi)
静岡大学・理学研究科・教授
研究者番号：20270978

(2)研究分担者

渡辺 了 (WATANABE, Tohru)
富山大学・大学院理工学研究部 (理学)・教授
研究者番号：30262497

研究分担者

片山 郁夫 (KATAYAMA, Ikuo)
広島大学・理学研究科・教授
研究者番号：10448235