

## 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 4 月 24 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21684030

研究課題名（和文） マントル条件での蛇紋岩のレオロジー特性とプレート境界地震の関連性

研究課題名（英文） Serpentine rheology under mantle conditions and its significance on the interplate earthquake

研究代表者

片山 郁夫 (Katayama Ikuo)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10448235

研究成果の概要（和文）：沈み込みプレート境界に存在する蛇紋岩のレオロジー特性を実験室で検証したところ、高温高压であるマントル条件下では、蛇紋岩は流動的な性質を持つことが明らかとなった。このことは、プレート境界に蛇紋岩が存在する場合、地震を抑制する働きを持つことを示唆し、蛇紋岩の分布域を調べることで地震の発生領域を推定することにつながると期待される。

研究成果の概要（英文）： Deformation experiments of serpentinites indicate that deformation is mostly controlled by plastic flow rather than cataclastic failure at mantle conditions. This suggests that the presence of serpentinite at the subducting plate interface tends to inhibit interplate earthquakes in subduction zones.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	9,600,000	2,880,000	12,480,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：テクトニクス

## 1. 研究開始当初の背景

マントル物質が含水化して形成される蛇紋岩は非常に低い摩擦係数を呈するなど特異な物性を持つことから、沈み込み帯で起こる様々な地震活動に密接に関与している可能性が指摘されている（例えば Hyndman and Peacock 2003）。しかしながら、これまでの蛇紋岩に関する変形実験の多くは低压条件 ( $P < 0.5 \text{ GPa}$ ) に限られている為、マントル条件 ( $P > 1 \text{ GPa}$ ) で蛇紋岩がどのようなレオジ

一的振る舞いをするのかほとんど理解されていなかった。そこで、本研究では蛇紋岩の流動特性をマントル条件下で調べ、沈み込み帯での地震活動との関連性を物質科学的側面から検証した。

## 2. 研究の目的

これまでの蛇紋岩のレオロジー特性に関する研究の多くは摩擦実験に限られ、マントル条件下での流動特性に関する実験の例は

ほとんどない（先駆的に **Raleigh and Paterson (1965)** は高温での蛇紋岩の流動特性を報告しているが、この実験では主に蛇紋岩の脱水不安定による強度低下に注目している）。これは従来の実験ではガス圧試験機による低圧条件 ( $P < 0.5 \text{ GPa}$ ) に限られていた為、摩擦や脆性破壊が支配的な変形メカニズムの条件で実験が行われていたのが主な原因である。しかしながら、脆性-塑性転移は圧力（封圧）に強く依存する特徴を持つため、蛇紋岩が形成されるマントル条件下 ( $P > 1 \text{ GPa}$ ) では塑性流動が変形を支配している可能性が高い。本研究では蛇紋岩の流動特性ならびに脆性-塑性境界を固体圧変形試験機により調べ、実験結果を基に沈み込みプレート境界での地震活動（抑制）と蛇紋岩の関連性を明らかにしたい。

### 3. 研究の方法

本研究では固体圧変形試験機（広島大設置）を用いて、マントル条件下 ( $P > 1 \text{ GPa}$ ) における蛇紋岩（安定領域）の変形実験に取り組んだ。ピストンは最大応力軸に対して  $45^\circ$  の方向に切断しその間に試料を挟むことにより単純ずり（simple shear）のジオメトリで試料を変形させた。このことにより、高歪みを達成することが可能となり試料の変形組織変化を観察することができる。変形微細組織は変形機構を反映するため、回収試料の組織解析から支配的な変形メカニズムを決定する。なお、実験室の変形速度には限度があるため ( $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、実際のテクトニック場 ( $\sim 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ ) に応用するには実験室のデータを外挿する必要がある。この点は天然の蛇紋岩の変形組織と実験試料を比較することにより、実験結果をマントルの動力学条件に適用できるか検討した。

### 4. 研究成果

#### 【結晶選択配向】

四国三波川産の蛇紋岩を圧力  $1 \text{ GPa}$ 、温度  $300\text{--}500^\circ\text{C}$  で変形させ、回収試料の結晶方位を静岡大学のEBSDで解析した。その結果、蛇紋石中の最も地震波速度が遅いc軸が剪断面に垂直に配列し、異方性の強度はS波で最大32%に達することが分かった。琉球弧のように高角でスラブが沈み込む場合は、地震波速度の遅いc軸がスラブに垂直に配列するため、地表面では海溝に平行な異方性が期待される。また、その強度は約15%に達し、かんらん石に比べ1桁ほど強い特徴を持つ。そのため、厚さ  $10 \text{ km}$  程度の蛇紋岩層がマントルウェッジに分布すれば、1-2秒の遅延時間が期待され、琉球弧で観察される地震波異方性の特徴を説明することができる。一方、東北日本で観測

される比較短い遅延時間は、蛇紋石ではなく、かんらん石の異方性に起因している可能性が高い。両地域で異方性の強度が異なる原因としては、琉球弧では比較的高温のスラブが沈み込むため、水が比較的浅所でマントルウェッジへ放出され蛇紋岩が存在するのに対し、東北日本では冷たい太平洋スラブが沈み込むため、脱水がマントル深部に限られ前弧マントルウェッジは蛇紋岩化していないためと考えられる。

#### 【変形メカニズム】

沈み込み帯でのプレート間地震の発生下限は、一般に温度に敏感で  $350\text{--}400^\circ\text{C}$  の脆性-塑性境界に一致すると考えられているが、東北日本の一部などではプレート境界面温度が  $150\text{--}250^\circ\text{C}$  に相当する陸側のモホ面深度で地震発生帯が消滅する。プレート間地震の発生限界が低温領域でみられる原因としては、モホ面下のマントルウェッジが含水化し、蛇紋岩が形成している可能性が報告されている。我々は、このモデルを検証するために、プレートが沈み込む条件 ( $1 \text{ GPa}$ ,  $200\text{--}450^\circ\text{C}$ ) で蛇紋岩の変形実験を行なった。その結果、蛇紋岩には脆性的な破壊はみられず延性的な流動により変形が支配されることを見出した。このことから、プレート境界に蛇紋岩が存在する場合には弾性的な歪みは蓄積されず、プレート間地震の発生を抑制する働きがあると推察される。

#### 【粘性コントラスト】

マントルウェッジとプレート間でのカップリング/デカップリング問題は、マントルウェッジがどの深度までコナーフローによりドラッグされ対流に巻き込まれるかを支配し、沈み込み帯での物質循環や温度構造を議論する上で極めて重要である。我々は、蛇紋石とかんらん石の粘性比を検証するために、両者の鉱物を同時に変形させ強度比を直接決定する実験を行なった。その結果、高温型の蛇紋石（アンチゴライト）はかんらん石に比べ約半分ほどの強度を示すのに対し、低温型の蛇紋岩の強度は著しく低く、かんらん石に比べ1桁ほど低い粘性率をもつ。このことは、高温型の蛇紋岩が沈み込みプレート境界に存在する場合はほぼカップリングした状態なのに対し、低温型の蛇紋岩では強いデカップリングが引き起こされることを示唆している。

### 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 14 件）

(1) Kawano, S., Katayama, I. and Okazaki, K. 2011.

- Permeability anisotropy of serpentinite and fluid pathways in a subduction zone. *Geology*, 39, 939-942. 査読有
- (2) Guo, X., Yoshino, T., and Katayama, I. 2011. Electrical conductivity anisotropy of deformed talc rocks and serpentinites at 3GPa. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 188, 69-81. 査読有
- (3) Katayama, I. and Korenaga, J. 2011. Is the African cratonic lithosphere dry or wet? *Special volume of Geological Society of America, Volcanism and evolution of the African lithosphere*, p. 249-256. (巻なし) 査読有
- (4) Katayama, I., Kurosaki, I. and Hirauchi, K. 2010. Low silica activity for hydrogen generation during serpentinization: an example of natural serpentinites in the Mineoka ophiolite complex, central Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 199-204. 査読有
- (5) Katayama, I., Michibayashi, K., Terao, R., Ando, J. and Komiya, T. 2010. Water content of the mantle xenoliths from Kimberley and implications for explaining textural variations in cratonic roots. *Geological Journal*, 45, 1-10. 査読有
- (6) 片山郁夫, 平内健一、中島淳一 (2010) 日本列島下での沈み込みプロセスの多様性、地学雑誌, 119, 205-223. 査読有
- (7) Hirauchi, K., Michibayashi, K., Ueda, H. and Katayama, I. 2010. Spatial variations in antigorite fabrics across a serpentinite subduction channel: Insights from the Ohmachi seamount, Izu-Bonin frontal arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 196-206. 査読有
- (8) Hirauchi, K., Katayama, I., Uehara, S., Miyahara, M. and Takai, Y. 2010. Inhibition of subduction thrust earthquakes by low-temperature plastic flow in serpentinite. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 349-357. 査読有
- (9) Azuma, S., Katayama, I., Hirauchi, K. and Yamashita, S. 2010. Strength contrast between plagioclase and olivine at water-rich Moho depths. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105, 286-290. 査読有
- (10) 片山郁夫 (2010) 沈み込み帯での蛇紋岩の存在とその役割, 月刊地球, 32, 131-135. 査読無
- (11) 平内健一、片山郁夫 (2010) マントルウェッジ条件下での蛇紋岩の流動特性に関する実験的研究, 月刊地球, 32, 167-171. 査読無
- (12) Katayama, I., Hirauchi, K., Michibayashi, K. and Ando, J. 2009. Trench-parallel anisotropy produced by serpentine deformation in the hydrated mantle wedge. *Nature*, 461, 1114-1117. 査読有
- (13) Katayama, I. 2009. Thin anisotropic layer in the mantle wedge beneath northeast Japan. *Geology*, 37, 211-214. 査読有
- (14) Tajima, F., Katayama, I. and Nakagawa, T. 2009. Variable seismic structure near the 660 km discontinuity associated with stagnant slabs, geochemical implications. *Physics of Earth and Planetary Interior*, 172, 183-198. 査読有
- [学会発表] (計 46 件)
- (1) I. Katayama, K. Hirauchi, Serpentine rheology and its significance on subduction zone processes. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2011/12/9 (Invited)
- (2) I. Katayama, S. Kawano, K. Okazaki, Permeability anisotropy of serpentinite and fluid pathways in a subduction zone. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2011/12/9
- (3) K. Okazaki, I. Katayama, Effect of pore pressure on slip behavior of serpentinite. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2011/12/9
- (4) D. Kim, I. Katayama, K. Michibayashi, T. Tsujimori, Fabric analyses of a lawsonite blueschist from Diablo Range, California: Implications for seismic anisotropy of the subducting oceanic crust. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2011/12/9
- (5) 片山郁夫 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での流体移動 地殻流体シンポジウム (花巻), 年月: 2011/9/18 (依頼講演)
- (6) 奥村聡, 岡崎啓史, 片山郁夫 間隙圧オシレーション法を用いた高温高压下でのマグマの浸透率測定 日本火山学会 (旭川), 年月: 2011/10/3
- (7) 片山郁夫, 川野誠矢, 岡崎啓史 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での流体移動 日本鉱物科学会 (水戸), 年月: 2011/9/10
- (8) 片山郁夫, 東真太郎, 武藤潤 海洋モホ面でのレオロジー的不連続性 日本鉱物科学会 (水戸), 年月: 2011/9/10
- (9) 東真太郎, 片山郁夫 斜長石とかんらん石の相対強度から考察する地球型惑星内部のレオロジー層構造 日本鉱物科学会 (水戸), 年月: 2011/9/10
- (10) 岡崎啓史、片山郁夫, 高橋美紀 高温高間隙水圧下での蛇紋岩のすべり特性 日本地質学会 (水戸)、年月: 2011/9/10
- (11) 片山郁夫、寺田竜也, 岡崎啓史 沈み込み帯での透水率変化による異常流体圧の生成 2011年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2011/5/22
- (12) 澤井みち代, 浜田有紗, 片山郁夫、中嶋悟 顕微赤外高温その場分光観測による蛇紋石の脱水カインテイクス 2011年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2011/5/25

- (13) 東真太郎, 片山郁夫 斜長石とかんらん石の相対強度と地球型惑星内部のレオロジー層構造 2011 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2011/5/23
- (14) 岡崎啓史, 片山郁夫, 高橋美紀, 増田幸治 ガス圧式高温高压試験機を用いた蛇紋岩の変形実験: 沈み込み帯で発生するスロー地震への適用 2011 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2011/5/25
- (15) S. Azuma, I. Katayama, K. Hirauchi, S. Yamashita, Strength contrast between plagioclase and olivine: Implication for rheological layering in the terrestrial planets. Lunar and Planetary Science Conference (Huston, USA), 2011/3/3.
- (16) 片山郁夫, 川野誠也, 岡崎啓史 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での流体移動 日本地質学会西日本支部会 (広島)、年月: 2011/2/19
- (17) 岡崎啓史, 片山郁夫 広島大学設置ガス圧高温高压三軸試験機の基礎性能評価と蛇紋岩を用いた熱水条件下での予察実験 日本地質学会西日本支部会 (広島)、年月: 2011/2/19
- (18) I. Katayama, K. Hirauchi, K. Michibayashi, J. Ando. Serpentine preferred orientation and variation in subduction zone anisotropy. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2010/12/14
- (19) K. Hirauchi, I. Katayama. Rheological contrast between serpentines and olivine and weakening of a subducting plate interface. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2010/12/14
- (20) S. Kawano, I. Katayama, K. Okazaki. Permeability anisotropy of serpentinite and fluid migration in subduction zones. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2010/12/14
- (21) K. Okazaki, I. Katayama, M. Takahashi, K. Masuda. Deformation experiments of serpentinite under high pore pressure and hydrothermal conditions. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2010/12/14
- (22) 片山郁夫, 平内健一 沈み込み帯での蛇紋岩の存在とその役割 生物資源科学ワークショップ (広島)、年月: 2010/9/30 (依頼講演)
- (23) 片山郁夫, 川野誠也, 寺田竜也, 岡崎啓史 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での異常間隙圧 日本鉱物科学会 (松江)、年月: 2010/9/24
- (24) 東真太郎, 片山郁夫, 平内健一, 山下茂 含水条件かでのモホにおける斜長石とかんらん石の相対強度 日本鉱物科学会 (松江)、年月: 2010/9/25
- (25) 片山郁夫, 河野義生, 岡崎啓史, 渡辺了 流体が存在する条件での岩石の弾性波速度測定 日本地質学会 (富山)、年月: 2010/9/20
- (26) 平内健一, 片山郁夫 蛇紋岩のレオロジーが沈み込み帯ダイナミクスに与える影響 日本地質学会 (富山)、年月: 2010/9/20
- (27) 片山郁夫, 平内健一 蛇紋岩の分布と沈み込み帯の活動との関係 地殻流体研究集会 (修善寺)、年月: 2010/9/11 (依頼講演)
- (28) I. Katayama, K. Hirauchi, Subduction zone rheology at the presence of serpentinites. G-COE symposium at Tohoku University (Sendai, Japan), 2010/7/15. *Invited*
- (29) I. Katayama, K. Hirauchi, K. Michibayashi, J. Ando. Is the strong seismic anisotropy at subduction zones caused by serpentine? Western Pacific Geophysical Meeting (Taipei, Taiwan), 2010/6/22. *Invited*
- (30) I. Katayama, K. Hirauchi, K. Rheological contrast between serpentines and olivine and weakening of the subducting interface. Western Pacific Geophysical Meeting (Taipei, Taiwan), 2010/6/25. *Invited*
- (31) 片山郁夫, 平内健一 蛇紋岩が存在する場合の沈み込み帯のレオロジー 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/26
- (32) 片山郁夫, 是永淳 大陸リソスフェア(テクトスフェア) はなぜ安定か? 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/25
- (33) 平内健一, 片山郁夫 蛇紋石とかんらん石の相対強度と沈み込みプレート境界の弱化 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/27
- (34) 東真太郎, 片山郁夫, 平内健一 斜長石とかんらん石の相対強度から考察する地球型惑星内部でのレオロジー層構造 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/26
- (35) 黒崎伊織, 片山郁夫, 平内健一 蛇紋岩化作用における水素発生環境 - 嶺岡帯蛇紋岩の例 - 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/23
- (36) 川野誠也, 片山郁夫, 岡崎啓史 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での流体移動 2010 年地球惑星科学連合大会 (幕張)、年月: 2010/5/25
- (37) I. Katayama, K. Hirauchi, K. Michibayashi, J. Ando. Strong trench-parallel anisotropy produced by serpentine preferred orientation in the mantle wedge. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2009/12/14
- (38) K. Hirauchi, K. Michibayashi, H. Ueda, I.

研究者番号：

- Katayama. Trench-parallel anisotropy developed in the serpentinized forearc mantle: An example from the Ohmachi Seamount, Izu-Bonin frontal. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2009/12/14
- (39) 片山郁夫 地震波異方性からマントルウェッジをみる 日本地球化学会 (広島)、年月：2009/9/14.
- (40) 川野誠也、片山郁夫、岡崎啓史、嶋本利彦 蛇紋岩の透水率異方性と沈み込み帯での流体移動に関する考察 日本地球化学会 (広島)、年月：2009/9/16
- (41) 片山郁夫 マントルウェッジの異方性はどこに存在するのか？ 日本鉱物学会 (札幌)、年月：2009/9/9
- (42) 片山郁夫、寺尾龍二、安東淳一、道林克禎、小宮剛 キンバーライト捕獲岩の変形組織と含水量の関連性 日本地質学会第116年学術大会 (岡山)、年月：2009/9/4
- (43) 平内健一、片山郁夫 低温型・高温型蛇紋石の相対強度実験 日本地質学会第116年学術大会 (岡山)、年月：2009/9/4
- (44) 片山郁夫、平内健一、安東淳一 マントルウェッジ条件での蛇紋岩の剪断変形実験 2009年地球惑星科学連合大会(幕張)、年月：2009/5/18
- (45) 片山郁夫、平内健一、道林克禎、安東淳一 沈み込み帯での強い地震波異方性は蛇紋岩による？ 2009年地球惑星科学連合大会(幕張)、年月：2009/5/17
- (46) 平内健一、片山郁夫 地震発生帯の下限は低温型蛇紋石の存在によって規定されるか？ 2009年地球惑星科学連合大会(幕張)、年月：2009/5/18

[その他]

ホームページ等

<http://www.geol.sci.hiroshima-u.ac.jp/~envi/link/katayamaG.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片山 郁夫 (Ikuo Katayama)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10448235

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )