

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340148

研究課題名(和文)高温高压変形実験による蛇紋岩のレオロジー解明

研究課題名(英文) Rheology of serpentinites clarified by high-PT deformation experiments

研究代表者

清水 以知子(Shimizu, Ichiko)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40211966

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)：H<sub>2</sub>O 流体存在下での沈み込み帯における地震発生過程の特質を明らかにするために、含水マントル物質である蛇紋岩の高温高压変形実験を行なった。高温型蛇紋石(アンチゴライト)よりなる蛇紋岩の脱水反応では顕著な力学挙動の変化がみられ、スラブ内地震の発生過程との関係が示唆される。人工ガウジの摩擦実験では脱水反応が剪断面で促進されることを見いだした。封圧(～380 MPa)と間隙圧を様々に変えた摩擦実験では、室温から300℃までの条件において、摩擦挙動が「有効圧の法則」からずれる傾向が明らかになった。これらの結果は沈み込みプレート境界巨大断層の強度について重要な示唆を与える。

研究成果の概要(英文)：For better understanding of seismogenic processes in subduction zones in the presence of H<sub>2</sub>O-fluids, we performed high-temperature and high-pressure deformation experiments of serpentinites. Serpentinites exhibited drastic changes in mechanical properties associated with dehydration of antigorite, a high-temperature phase of serpentine polymorphs. This suggests a close relationship between intra-slab earthquakes and dehydration of serpentinites. In friction experiments of simulated serpentine gouges, dehydration reaction was enhanced along the shear planes. In the friction experiments with varying confining and pore pressures (up to 380 MPa), frictional properties deviated from those expected from the law of effective stress. These results give an insight for the strength of subduction zone megathrusts.

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：蛇紋岩 マントルウェッジ 高温高压実験 沈み込み帯 摩擦 地震発生過程 脆性-延性転移 脱水反応

## 1. 研究開始当初の背景

蛇紋岩はマントルカンラン岩の加水反応によって生じる岩石である。関東地域の地震波トモグラフィではモホ面直下のウェッジマントル領域に顕著な地震波速度異常領域が発見され、これが蛇紋岩の特異な地震波物性によるものと解釈された。同様の速度異常領域は国内外の他の沈み込み領域からもあいついで報告され、ウェッジマントルが広く蛇紋岩化されていることが示唆されている。これらの蛇紋岩化した領域はプレート境界の巨大地震発生帯よりやや深くに位置し、スロースリップと呼ばれる特異な地震すべり現象の発生域と接しているため、何らかの因果関係が示唆される。蛇紋岩はまた、スラブ内の中深発地震にも関与しているという見方が強まっている。東北日本の温度構造断面や相平衡解析から、蛇紋岩の脱水反応が沈み込むスラブの2重深発地震面における地震を誘発していると考えられたのである。こうした問題提起を受け、蛇紋岩の物質科学的研究も活性化されている。

## 2. 研究の目的

本研究では蛇紋岩の流動破壊物性（レオロジー）を解明することにより、沈み込みプレート境界の剪断強度と地震学的特性の理解に貢献することを目的とする。とくに沈み込むスラブの脱水でもたらされる間隙流体の効果に留意し、スラブマントルウェッジやスラブマントルに存在すると考えられる蛇紋岩の力学物性パラメータを高温高压条件下の変形実験で決定し、その脆性-延性転移挙動を明らかにする。また、本研究期間半ばに発生した2011年東北沖地震(M9.0)を受け、含水地殻・マントル物質がプレート境界断層の強度に与える影響についても広く研究した。

## 3. 研究の方法

### (1) 高温高压実験

蛇紋岩試料の破壊摩擦特性を室内実験によって調べた。間隙圧制御のもとでの圧縮試験や摩擦試験は油圧式3軸変形試験機（東大地震研究所）およびガス圧式変形試験機（産業総合研究所）で行なった。また、ウェッジマントルのリアル条件での実験を目指して、固体圧式変形試験機（東京大学・理）を整備した。

### (2) 試料解析方法

実験回収試料は研磨または薄片試料にした後、偏光顕微鏡・実体顕微鏡・ラマン顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した。ラマン顕微鏡(ナノフoton(株), RAMAN-11 VIS-UT, 図1)は肉眼偏光観察も可能とする特注品であり、造岩鉱物の観察に最適な仕様となっている。試料の酸化還元状態を調べるため、高エネルギー研究所においてXANES解析も行なっている。

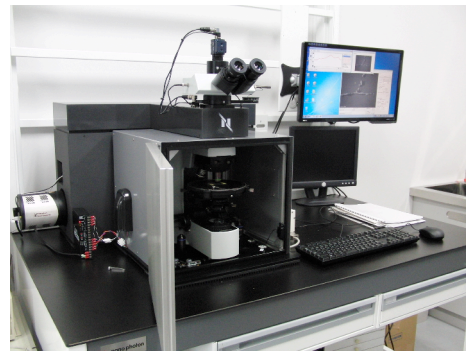


図1 ラマン顕微鏡（東京大学理学系）

## 4. 研究成果

### (1) 蛇紋岩の力学特性

#### ① 蛇紋岩の脱水反応と力学特性

沈み込むスラブの脱水反応とスラブ内地震の発生メカニズムの関係を調べるため、スラブマントルに存在する可能性のあるアンチゴライト蛇紋岩の高温高压下で圧縮試験を行ない、低封圧での脱水脆性と高封圧での脱水軟化という挙動の変化を明らかにした(清水, 2010)。またガウジの摩擦実験では脱水反応が剪断面で促進されることが脱水硬化の一因となることを見いだした(Takahashi et al., 2013)。図2の実験試料のSEM-EDS解析およびラマン分光法により、すべり面に脱水反応生成物であるフォーステライトが選択的に生成していることが確認される。

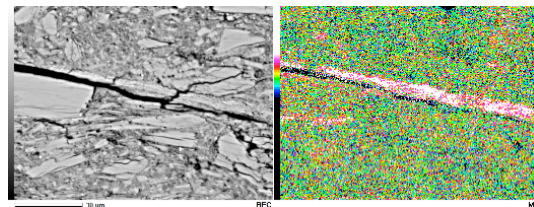


図2 アンチゴライトガウジのSEM（組成）像とMg元素マップ。

#### ② 蛇紋岩の摩擦強度と間隙圧の関係

間隙圧が摩擦強度に与える影響を明らかにするために、含水マントル物質の摩擦実験をおこなった。脆性変形では通常、「有効圧の法則」がよく成り立つことが知られている。しかし、アンチゴライト蛇紋岩のプレカット試料をもちいて、室温下で封圧と間隙圧を380 MPaまで変化させた摩擦実験では、有効圧の法則からずれる傾向が見いだされた(図3)。高温(300°C)高封圧(封圧380 MPa)での実験においても、同様の結果が示唆された。これらの結果は、脆性-延性転移領域付近における岩石の強度を考える上で重要である。

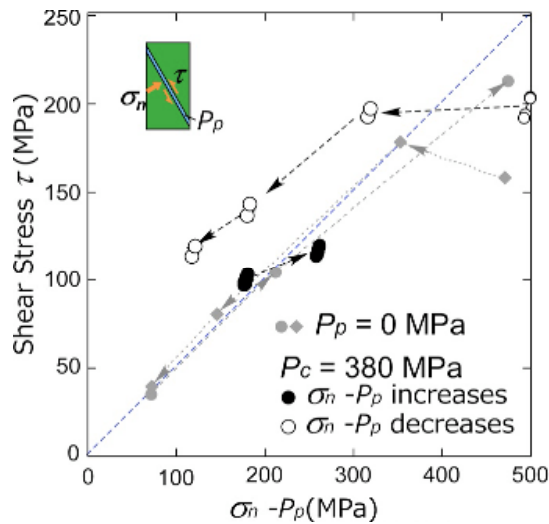


図3 高封圧 ( $P_c$ ) 下のアンチゴライト蛇紋岩の剪断応力と有効圧の関係。

(2) 東北日本M9震源断層の強度モデル

2011年東北沖地震(M9)を引き起こしたプレート境界断層の特性を知るためレオロジーモデルを構築した。地球物理学的観測からは、本震の震源付近とM7級の宮城県沖地震アスペリティー付近に沈み込んだ海山の存在が推定される。温度構造より、プレート境界上部は島弧および海洋地殻物質の脆性変形に支配され、深部では海洋地殻の塑性変形が起きていると考えられる。海洋地殻の堆積層はwet石英±粘土、海山はガブロの摩擦・破壊強度で代表し、間隙圧が深度とともに岩圧に近づいていくことも考慮して、強度エンベロープを作成した。宮城沖地震の震源域は石英の延性領域にあり、M7級アスペリティーの実体は海山である可能性が高い。M9震源の深さでは断層強度が岩相に大きくは依存せず、流体や蛇紋岩化の影響の小さい宮城県沖を中心に巨大なアスペリティーが形成されたと考えられる。

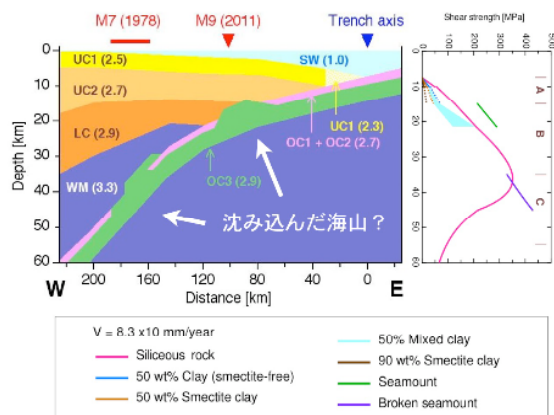


図4 宮城沖の東西断面の構造解釈とプレート境界面に沿う強度断面。

(3) その他の成果

蛇紋岩と同様、ウェッジマントルの含水鉱物として重要視されるタルク（滑石）について、室温下の応力ステップ実験（封圧・間隙圧 < 110 MPa）を行ない、石英ガウジなどで報告されているものとは大きく異なる応答特性を見いだした。

この他にも、本研究経費で環境が整備された実験装置やラマン顕微鏡や走査型電子顕微鏡を使って、沈み込み帯深部の岩石の応力状態や流体移動について幅広い研究が行なわれ、そのいくつかについては国内外の専門誌や学会で報告している。

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 17 件）

- ① Shimizu, I., Rheological profile across the NE Japan interplate megathrust in the source region of the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake. *Earth, Planets and Space*, in press. [査読有]
- ② Uehara, S. and Takahashi, M., Evolution of permeability and microstructure of shear zone in Neogene siliceous mudstone. *Journal of Structural Geology*, **60**, 46–54, 2014. [査読有]
- ③ Noguchi N., Abduriyim A., Shimizu, I., Kamegata, N., Otake, S. and Kagi, H., 2013, Imaging of internal stress around a mineral inclusion in a sapphire crystal: Application of micro-Raman and photoluminescence spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy*, **44**, 147–154, doi: 10.1002/jrs.4161. [査読有]
- ④ Uehara, S., Takahashi, M., How rock mechanical properties affect fault permeability in Neogene mudstone? *Energy Procedia*, **37**, 5588–5595, 2013. [査読なし]
- ⑤ Uehara, S., Shimamoto, T., Okazaki, K., Funaki, H., Kurikami, H., Niizato T., and Ohnishi, Y., Can surface samples be used to infer underground permeability structure? A test case for a Neogene sedimentary basin in Horonobe, Japan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **56**, 1–14, 2012. [査読有]
- ⑥ Nakamura Y., Muto J., Nagahama H., Shimizu, I., Miura T., Arakawa, I., Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces, *Geophysical Research Letter*, **39**, L21303, 2012, doi:10.1029/2012GL053228. [査読有]
- ⑦ Mizoguchi, K., Uehara, S., and Ueta, K., Surface Fault Ruptures and Slip Distributions of the Mw 7.1 April 2011 Hamadōri, Fukushima, northeast Japan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**, 1949–1956, 2012. [査読有]
- ⑧ Katsuta N., Shimizu, I., Helmstaedt, H.,

Takano, M., Kawasaki, S., and Kumazawa, M., Major element distribution in Archean banded iron formation (BIF): Influence of metamorphic differentiation, *Journal of Metamorphic Geology*, **30**, 457–472, 2012. doi: 10.1111/j.1525-1314.2012.00975.x. [査読有]

- ⑨ Shimizu, I., Steady-state grain size in dynamic recrystallization of minerals, In: "Recrystallization", K. Sztwiertnia (ed.), InTech, ISBN 978-953-51-0122-2, pp. 371–386, 2012. (<http://www.intechopen.com/articles/show/title/steady-state-grain-size-in-dynamic-recrystallization-of-minerals>) [査読なし]
- ⑩ Takahashi, M., Uehara, S., Mizoguchi, K., Shimizu, I., Okazaki, K. and Masuda, K., On the transient response of serpentine (antigorite) gouge to stepwise changes in slip velocity under high-temperature conditions, *Journal of Geophysical Research*, **116**, B10405, 2011. doi:10.1029/2010JB008062. [査読有]
- ⑪ Shimizu, I., Erratum to "Theories and applicability of grain size piezometers: The role of dynamic recrystallization mechanisms" [J Struct Geol 30 (2008) 899–917], *Journal of Structural Geology*, **33**, 1136–1137. 2011. [査読有]
- ⑫ 上原 真一, 嶋本 利彦, 松本 拓真, 新里 忠史, 岡崎 啓史, 高橋 美紀, 地下深部における新第三紀泥質軟岩中の亀裂の透水特性～室内試験による推定～, *Journal of MMIJ*, **127**, 139-144, 2011. [査読有]
- ⑬ 清水 以知子, 沈み込みスラブの二重震発面と蛇紋岩の脱水不安定性, 月刊地球, **32**, 162–166, 2010. [査読なし]
- ⑭ 清水 以知子, 2010, 深部 H<sub>2</sub>O 流体の連結性と界面の熱力学, 岩石鉱物科学, **39**, 208–219. [査読有]

[学会発表] (計 20 件)

- ① Shimizu, I., Rheological structure of the NE Japan subduction zone megathrust across the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0), *Geofluid* **3**, 2014.2.29, Tokyo Inst. Technology, Tokyo.
- ② Uehara, S., I. Shimizu, K. Okazaki and M. Nakatani, Effect of pore pore pressure on frictional properties of talc and serpentinite under high normal stress, *Geofluid* **3**, 2014.2.28, Tokyo Inst. Technology, Tokyo.
- ③ Shimizu I., 2013, Rheological profile of the Tohoku-oki interplate megathrust across the source region of the M9 great earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 14.
- ④ 清水 以知子, 東北沖プレート境界逆断層における2種類のアスペリティ, 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013.5.23.
- ⑤ 上原 真一・清水 以知子・岡崎啓史・中谷正生, 蛇紋岩・タルクの摩擦特性にたい

する間隙圧の影響, 日本地質学会, 東北大学, 宮城, Sep. 14, 2013.

- ⑥ 上原 真一・清水 以知子・岡崎 啓史・中谷 正生, タルクおよび蛇紋岩の摩擦特性における間隙水圧と応力履歴の影響, 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013.5.23.
- ⑦ Shimizu, I., Katsuta, N. and Murakami, T., Oxidation of slab mantle due to dehydration of serpentinite, Ann. Meeting of Japan Geophysical Union, Makuhari, Chiba, May 23, 2013.
- ⑧ 清水 以知子, 東北沖プレート境界逆断層における脆性-延性転移, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012.5.22.
- ⑨ 清水 以知子, 東北日本 M9 地震の震源断層強度, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012.5.25.
- ⑩ 清水 以知子・上原 真一, 東北沖沈み込みプレート境界断層における地殻応力問題: 間隙圧の効果, 日本地質学会, 大阪府大, 大阪, 2012.9.15.
- ⑪ Shimizu I., Watanabe Y., Michibayashi K., Takahashi, M. Uehara, S. and Katsuta, N., Dehydration softening of serpentinite and its roles in the intermediate-depth earthquakes. First International Symposium on Geofluids, "Geofluid Processes in Subduction Zones and Mantle Dynamics", Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, March 17, 2011.
- ⑫ 高橋 美紀・清水 以知子, アンチグライトガウジの変形構造と地震発生過程についての実験的研究, 地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2011.5.24.
- ⑬ Shimizu I., Watanabe Y. and Michibayashi K., 2010, Dehydration softening of serpentinite and its roles in the intermediate-depth earthquakes, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 15, 2010.

[その他]

- ① 清水 以知子, 東北日本M9震源断層のレオロジーモデル, 地殻流体 Newsletter, vol 13 & 14, p. 7., 2014. (<http://www.geofluids.titech.ac.jp>)
- ② 清水 以知子・上原 真一, 沈み込み帯の破壊摩擦過程に対する間隙圧の影響, 地殻流体 Newsletter, vol 11 & 12, p. 7, 2013. (<http://www.geofluids.titech.ac.jp>)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

清水 以知子 (SHIMIZU, Ichiko)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 40211966

### (2)研究分担者

上原 真一 (UEHARA, Shinichi)  
東邦大学・理学部・准教授  
研究者番号: 20378813