

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340105

研究課題名(和文) 高間隙水圧下での蛇紋岩のすべり特性とスロー地震の関連性

研究課題名(英文) Slip properties of serpentine under high fluid pressure and implication for slow earthquake

研究代表者

片山 郁夫 (Katayama, Ikuo)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10448235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込みプレート境界で発生するスロー地震には、水の存在が大きく関わっていると考えられる。本申請研究では、蛇紋岩のすべり特性がスロー地震の発生と密接に関わっているとの仮説のもと、すべり特性が流体の存在によりどのような応答を示すかを実験的に検証した。その結果、間隙水圧が著しく高い条件で蛇紋石が脱水すると、不安定なすべり挙動を示し、また応力の開放速度は通常の物質よりも著しくゆっくりであることがわかった。これらの結果に基づき、沈み込みプレート境界に存在する蛇紋岩の脱水分解によりスロー地震が誘発されるとのモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Slow earthquakes occurred at subduction zone are distinct from regular earthquake in terms of their slip behaviors (e.g., Ide et al. 2007). We consider this difference to relate to localized hydration reactions at the plate interface that influence the frictional properties. The results of laboratory friction experiments indicate that, under high fluid pressure, simulated serpentine faults tend to be unstable at elevated temperature close to dehydration, which are characterized by a significantly slow rate of stress drop during instability. These properties are consistent with the characteristics of subduction-related slow earthquakes, which exhibit a relatively long duration for energy release.

研究分野：岩石変形学

キーワード：蛇紋岩 スロー地震 沈み込み帯

1. 研究開始当初の背景

西南日本やカスケーディアなどの沈み込み帯で見られる深部低周波微動やスロースリップなどのスロー地震は、沈み込むプレートとマントルウェッジの会合部付近に集中し発生している (Obara 2002, Brown et al. 2009)。そのような地震の発生領域は高 V_p/V_s で特徴づけられることから、マントルが水と反応して生成する蛇紋岩の存在に加え、間隙流体の存在が指摘されている (Matsubara et al. 2009)。また、震源解析からも有効垂直応力が低いとの報告があり、高間隙流体圧とスロースリップ地震の関連性が示唆されている (例えば Ito and Obara 2006)。沈み込みプレート境界で発生するスロー地震は、プレート間固着域であるアスペリティを縁取るように分布することからも、その素過程の理解はプレート境界型地震の発生プロセスの理解につながると期待されている。

我々のグループでは、これまで岩石の透水率に注目し、沈み込むプレートとマントルウェッジの会合部にみられる高間隙水圧領域の生成メカニズムを透水実験により検証してきた。その結果、蛇紋岩中をプレート境界沿いに上昇した水が島弧モホ面まで到達すると、不透水層 (ガプロ) により上方への移動が妨げられることが予想される。そのような構造により、マントルウェッジ先端において流体が溜まり高間隙水圧が発生しているのかもしれない。このモデルでは、マントルの水理学特性から高間隙水圧の生成プロセスを検証しているが、なぜ高間隙水圧がスロースリップ地震のトリガーになっているかは明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、ガス圧式変形透水試験機により高間隙流体圧下で蛇紋岩を変形させ、蛇紋岩のすべり特性とスロースリップ地震の関連性を力学的側面から検証した。これまでの摩擦実験では、すべり速度変化時の摩擦強度の応答により、すべりの安定性が議論されているが (例えば Takahashi et al. 2011)、本研究では間隙圧を段階的に急変させ、蛇紋岩のすべり特性における間隙水圧の影響を定量的に評価した。

3. 研究の方法

変形実験には広島大学に設置されているガス圧式高温三軸変形試験機を用いた (封圧 <220MPa 間隙水圧 <200MPa 最高温度 800)。本試験機では、圧力媒体として不活性ガスを用いるため、油圧や固体圧に比べ高精度の力学データを測定することができる。実験では、サンプルの断層面に間隙流体のラインを設け、間隙流体圧を制御しながら変形実験を行い、すべり強度への間隙水圧の影響を定量的に評価した。実験では、特に次の二点に焦点を絞った。

(1) 摩擦強度への間隙水圧の影響

岩石の摩擦特性では、有効応力の概念が成り立つ場合、間隙水圧の上昇により剪断強度は一定の割合で減少する。しかしながら、スロースリップ発生領域のように、静岩圧とほぼ等しい間隙水圧がかかっている場合には水の存在により摩擦力が低下する効果が現れるため、上記の概念が成り立つかは自明ではない。そこで本実験では、間隙水圧上昇時の摩擦強度の変化を系統的に調べ、静岩圧とほぼ等しい間隙水圧が働いた場合に、摩擦強度がどのような挙動を示すか検証した。

(2) 間隙水圧急変時の応答

速度状態依存の摩擦則では、速度急変時の過渡的な応答から定常摩擦までの遷移距離であるすべり弱化解距離が求められ、これはアスペリティ (固着域) を切るのに必要な臨界すべり量に関係していると考えられている (例えば Dieterich 1981)。しかしながら、スロースリップ地震のトリガーになっているのは速度の急変ではなく、間隙流体圧の変化と考えられるため、本研究では速度一定のもと、間隙水圧を瞬時に変化させ、その過渡的な応答から定常状態まで遷移する変位量を検証した。また、蛇紋岩以外の岩石などでも同様の実験を行ない、間隙水圧急変時の応答を調べた。スロースリップ地震は通常の地震よりもはるかに遅い速度で発生することから、もし蛇紋岩がスロースリップ地震と関連しているならば、ほかの岩石に比べ定常摩擦に遷移する変位量 (すべり時間) が大きいと期待される。

(3) 脱水時の摩擦挙動の変化

蛇紋岩は高温下で脱水反応を起こし、水を吐き出す。先行研究では、吐き出された間隙水により有効応力が低下し、脆性的な挙動に移行する現象が報告されている (Raleigh and Paterson 1965)。本実験では、蛇紋岩の摩擦性質が脱水時にどのように変化するかを高温高間隙水圧の環境下で検証した。

4. 研究成果

(1) 蛇紋岩の摩擦特性 (とくに定常摩擦) への間隙水圧の影響を調べるために、室温において封圧を一定に保ち ($P_c=150\text{MPa}$)、間隙水圧のみを変化させる変形実験を行なった。その結果、間隙水圧の上昇とともに剪断強度が系統的に下がる有効圧の効果と、第1項の粘着力が水の存在により低下する両方の効果が見られた。これらの実験で得られた摩擦係数は $\mu=0.46$ であり、先行研究とほぼ近い値を示すが、間隙水圧がほぼ封圧に近い条件では (有効圧が非常に小さい場合)、摩擦係数が急激に減少した。このことは、間隙水圧が高く垂直応力がほぼ水圧に支えられる場合、アスペリティの接触面積が限りなく小さくなるため、摩擦強度が著しく低下する可能性を示唆している。スロースリップ地震では実効垂直応力が数 MPa 以下であるため、ほぼ封圧に等

しい間隙水圧がかかっている可能性があるが、そのような条件では上記の急激な摩擦強度の低下が影響しているのかもしれない。

(2) 速度状態依存の摩擦構成則では、速度ステップテストにより、臨界すべり量を求める実験がいくつか報告されているが(例えば Marone and Kilgore 1993), 間隙圧変化時の臨界変位量を検討した実験例はほとんどない。スロー地震の発生では、速度変化ではなく、間隙圧変化がすべりを誘発している可能性が高いため、本実験では間隙水圧をステップ変化させ、定常摩擦への遷移状態を検証した。室温封圧一定($P_c=150\text{MPa}$)のもとで実験を行った結果、間隙水圧変化時の過渡的な応答から定常摩擦までの遷移状態が見られた。解析についてはまだ現在進行中だが、摩擦係数が定常状態に至るまでにかかる時間は断層ガウジの水理特性に支配されていると考えられる。なお、蛇紋岩断層ガウジの浸透率については、変形により異方性が形成され、断層面に垂直な方向の浸透率は他の方向に比べて一桁程度低い値を示した。

(3) 高間隙水圧下で蛇紋岩ガウジの摩擦係数の実験を 400 から 650 まで温度を変化させて行った。400 度ではすべての速度、間隙水圧条件において安定すべりを示した。650 度では剪断変形中に数ミリ秒で強度が大きく下がるスティックスリップが観察された。このスティックスリップの継続時間は通常のスティックスリップより顕著に遅く、数秒かけて強度が落ちるスローな現象が観察された。このスロースティックスリップは実験を行ったすべての間隙水圧の範囲で確認された。スロースティックスリップは安定-不安定条件の境界を横切る幅広い有効垂直応力の範囲でみられたことから、蛇紋岩ガウジが通常のスティックスリップを抑制するような特性をもっていると考えられる。蛇紋岩は脱水条件よりも少し低温から剪断変形に伴い剪断集中域に局所的に脱水反応が起こることが知られており、この剪断に伴う局所的な脱水により生じる不均一な構造がスロースティックスリップを引き起こす原因となっていると予想される。

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 11 件)

- (1) Okazaki, K. and Katayama, I. 2015. Slow stick-slip of antigorite serpentinite under hydrothermal conditions as a possible mechanism for slow earthquakes. *Geophysical Research Letter*, 42, 1099-1104, doi:10.1002/2014GL062735. (査読あり)
- (2) Kim, D., Katayama, I., Wallis, S., Michibayashi, K., Miyake, A. and Seto, Y. 2015. Deformation

microstructures of glaucophane and lawsonite in experimentally deformed blueschists: Implications for intermediate-depth intraplate earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 120, 1229-1242, doi:10.1002/2014JB011528. (査読あり)

- (3) 原田裕也, 片山郁夫, 河野義生 (2014) 蛇紋岩の弾性波速度に対する間隙水圧の影響, *岩石鉱物科学*, 43, 161-173, Doi:10.2465/gkk.130918 (査読あり)
- (4) Azuma, S., Katayama, I. and Nakakuki, T. 2014. Rheological decoupling at the Moho and implication to Venusian tectonics. *Scientific Reports*, 4, 4403, doi:10.1038/srep04403. (査読あり)
- (5) Katayama, I., Iwata, M., Okazaki, K. and Hirauchi, K. 2013. Slow earthquakes associated with fault healing on a serpentized plate interface. *Scientific Reports*, 3, 1784, doi:10.1038/srep01784. (査読あり)
- (6) Hirauchi, K. and Katayama, I. 2013. Rheological contrast between serpentine species and implications for slab-mantle wedge decoupling. *Tectonophysics*, 608, 545-551. (査読あり)
- (7) Kim, D., Katayama, I., Michibayashi, K. and Tsujimori, T. 2013. Deformation fabrics of natural blueschists and implications for seismic anisotropy in subducting oceanic crust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 222, 8-21. (査読あり)
- (8) Okazaki, K., Katayama, I. and Noda, H. 2013. Shear-induced permeability anisotropy of simulated serpentine gouges produced by triaxial deformation experiments. *Geophysical Research Letter*, 40, 1-5. (査読あり)
- (9) Sawai, M., Katayama, I., Hamada, A., Maeda, M. and Nakashima, S. 2013. Dehydration kinetics of antigorite using in situ high-temperature infrared microspectroscopy. *Physics and Chemistry of Minerals*, 40, 319-330. (査読あり)
- (10) Okazaki, K., Katayama, I. and Takahashi, M. 2013. Effect of pore fluid pressure on the frictional strength of antigorite serpentinite. *Tectonophysics*, 583, 49-53. (査読あり)
- (11) 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. (査読あり)

[学会発表](計 32 件)

- (1) I. Katayama, Fluid pathway in deep subduction zone and its implication to slow earthquakes. 12th international workshop on water dynamics (Sendai, Japan), 2015/3/9
- (2) I. Katayama, T. Kubo, H. Sakuma, K. Kawai, Can clay minerals account for the non-asperity on the subducting plate

- interface? American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2014/12/18
- (3) S. Azuma, I. Katayama, Rheological structure in Mars and its time evolution American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2014/12/19
- (4) T. Kubo, I. Katayama, Effect of temperature on frictional behavior of smectite and illite: Implication for the updip limit of seismogenic zone along subduction thrust American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2014/12/19
- (5) 片山郁夫, 久保達郎, 佐久間博, 河合研志 沈み込みプレート境界での非アスペリテイの正体は粘土鉱物? 2014年地球惑星科学連合大会(横浜), 年月: 2014/5/2
- (6) 濱崎翔平, 片山郁夫 間隙水圧下での花崗岩の破壊と浸透率変化 2014年地球惑星科学連合大会(横浜), 年月: 2014/5/2
- (7) 久保達郎, 片山郁夫 スメクタイト及びイライトの摩擦挙動の温度効果: 沈み込み帯での地震発生帯の上限としての可能性 2014年地球惑星科学連合大会(横浜), 年月: 2014/4/29
- (8) 東真太郎, 片山郁夫 模擬物質の摩擦実験から考察する摩擦挙動に対するメルトの影響と深発月震への考察 2014年地球惑星科学連合大会(横浜), 年月: 2014/4/29
- (9) I. Katayama, T. Kubo, Frictional healing of clay minerals and possible cause of non-asperity on the plate interface. Geofluid 3, Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones (Tokyo, Japan), 2014/3/3
- (10) T. Kubo, I. Katayama, Effect of temperature on frictional behavior of smectite and illite: implication for the updip limit of seismogenic zone along subduction thrust, Geofluid 3, Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones (Tokyo, Japan), 2014/3/3
- (11) S. Azuma, I. Katayama, T. Nakakuki, Absence of plate tectonics in Venus is supported from deformation experiments and numerical simulation. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2013/12/9
- (12) H. Noda, K. Okazaki, I. Katayama, Strengthening of synthetic quartz-rich sediments during time-dependent compaction due to pressure solution-precipitation compaction creep. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2013/12/12
- (13) 片山郁夫 沈み込みプレート境界での流体移動とスロー地震 日本地質学会(仙台), 年月: 2013/9/15
- (14) 片山郁夫, 岩田睦美, 岡崎啓史, 平内健一 蛇紋岩の摩擦ヒーリング特性とスロー地震の関連性 2013年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2013/5/20
- (15) Kim Daeyeong, 東真太郎, 道林克禎, 片山郁夫 Rheological behaviors of subducting oceanic crust: Implications from experimentally deformed blueschists 2013年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2013/5/22
- (16) 濱崎翔平, 片山郁夫, 岡崎啓史 三軸破壊による花崗岩の空隙率・浸透率リアルタイム測定 2013年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2013/5/22
- (17) 原田裕也, 片山郁夫, 河野義生 高間隙水圧下における蛇紋岩の弾性波速度 2013年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2013/5/22
- (18) 川口健太, 片山郁夫 玄武岩掘削試料の透水実験に基づく海洋地殻の浸透率変化と海洋底での流体移動 2013年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2013/5/21
- (19) I. Katayama, K. Okazaki, W. Tanikawa, Water accumulation and pore pressure build-up in mantle wedge due to permeability barrier. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2012/12/9
- (20) K. Okazaki, I. Katayama, H. Noda, M. Takahashi, Shear-induced permeability anisotropy of simulated serpentine gouge. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2012/12/9
- (21) S. Azuma, I. Katayama, Missing plate tectonics in Venus caused by rheological contrast at Moho. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2012/12/9
- (22) Y. Harada, I. Katayama, Effects of fluid pressures to the seismic velocity of crustal rocks. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2012/12/9
- (23) D. Kim, I. Katayama, K. Michibayashi, Fabric analyses of experimentally deformed blueschists: Implications for deformational behaviors of sodic amphibole. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2012/12/9
- (24) I. Katayama, K. Hirauchi, Serpentine rheology and its significance on subduction zone processes. Serpentine Days (Porquerolles Island, France), 2012/9/5 (Invited)
- (25) K. Okazaki, I. Katayama, M. Takahashi, Effect of pore fluid pressure on the frictional behaviors of serpentinite. Gordon Research Conference (Andover, USA), 2012/8/20
- (26) 片山郁夫, 山口歌織 稲田花崗岩の破碎実験による空隙率・浸透率変化 日本鉱物科学会(京都), 年月: 2012/9/20
- (27) 片山郁夫, 山口歌織 稲田花崗岩の破碎実験による空隙率・浸透率変化 —高温岩体発電の予備実験として— 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/24

- (28) 片山郁夫, 川野誠矢, 岡崎啓史 蛇紋岩の浸透率異方性と沈み込み帯での流体経路 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/22 (招待講演)
- (29) 原田裕也, 片山郁夫 高封圧, 間隙圧下における地殻岩石の地震波速度測定 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/20
- (30) 東真太郎, 片山郁夫, 中久喜伴益 変形実験から考えられる金星と地球のレオロジー層構造とテクトニクスの相違 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/22
- (31) 川野誠矢, 芳野極, 片山郁夫 剪断変形中における蛇紋岩の電気伝導度その場測定 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/22
- (32) 岡崎啓史, 片山郁夫, 高橋美紀 蛇紋岩の摩擦挙動に対する間隙水圧の影響 2012年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2012/5/21

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.home.hiroshima-u.ac.jp/geoenvi/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・教授

研究者番号: 10448235