

令和元年6月17日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04064

研究課題名(和文) 熱水摩擦実験に基づくスロー地震発生の物理化学プロセスの解明

研究課題名(英文) Physicochemical mechanisms underlying frictional responses at slow to fast earthquakes: inferred from hydrothermal friction experiments

研究代表者

廣瀬 丈洋 (HIROSE, Takehiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー

研究者番号：40470124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込み帯で発生するスロー地震は高温・熱水環境場で発生する。そこで、スロー地震発生場に実際存在すると考えられる岩石を用いて、熱水環境条件で摩擦実験をおこなった。実験結果およびこれまで報告されているデータから、東北プレート境界の深さ方向の断層すべり安定性モデルを構築することができた。また、南海トラフプレート境界においては、泥質片岩の摩擦特性が深部スロー地震の発生に關与している予察的な結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震震源域に実際に存在する岩石の高温熱水条件での摩擦特性を調べることは、ゆっくりとした地震から高速すべりをする巨大地震の発生機構とその関連性を調べる上で重要である。本研究によって、熱水環境下において多様な地震すべり速度条件で摩擦実験が可能な回転式熱水試験機をはじめ開発することができた。さらに実験結果から、東北プレート境界における断層すべり安定性モデルを構築することができた。今後、このようなモデルを用いた数値計算などにより、沈み込み帯で発生する多様な地震の発生に関する理解がより深まると期待される。

研究成果の概要(英文)：Earthquakes involve a wide range of slip rates, from slow/aseismic to fast/seismic slip along faults. Frictional properties of faults over wide slip rates (nm/s to m/s), in particular under hydrothermal conditions similar to those expected in seismogenic zones, are thus essential for a unified understanding of all earthquake events. In this project, we have successfully developed a new hydrothermal, low to high speed rotary-shearing apparatus that is aimed to study in-situ frictional property of faults along subduction zones. Based on the experimental results on materials that potentially exist along the Tohoku plate boundary, we proposed frictional properties of the Tohoku plate boundary. Incorporating the properties in modeling of earthquakes generation, we expect to gain better understanding of diverse earthquakes along subduction zones.

研究分野：岩石力学・構造地質

キーワード：スロー地震 断層 摩擦 熱水

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今世紀に入って測地・地震観測網が大幅に整備され、沈み込みプレート境界地震発生帯の浅部と深部でスロー地震が頻繁に発生していることが明らかとなってきた(例えば Obara, 2002)。このようなスロー地震の発生域は、高ポアソン比で特徴づけられることから、間隙流体の存在が報告されている(例えば Kodaira et al., 2004)。さらに、スロー地震は応力降下量が小さいことから断層面に働く有効垂直応力が小さいことが示唆され、高間隙水圧がスロー地震の発生に密接に関わっていると考えられている(Ito & Obara, 2006)。実際、研究代表者らがおこなった摩擦実験によって、有効垂直応力が低くなるとスロー地震の発生に必要な条件である「正から負への摩擦の速度依存性の変遷」が現れることが明らかになってきた(Sawai et al., 2016)。しかし、スロー地震の発生機構を解明する上で鍵となる、このような有効応力の低下(水圧上昇)に伴う摩擦挙動の変遷を規定する物理・化学プロセスの理解は進んでいないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、地震発生域の熱水環境を再現した低～高速すべり摩擦試験機を開発・調整して、その実験から下記の2つの仮説を検証することである。

- 間隙水圧比(静岩圧に対する水圧の割合)が、摩擦特性の変化を生み出し、スロー地震の発生と密接に関わっている。
 - スロー地震のすべり速度上限(10^{-4} ~ 10^{-3} m/s)において摩擦が速度の増加とともに大きくなること(中間速度域の摩擦バリア)が、スロー地震が大地震に移行できない要因である。
- 特に、上記2つの性質は物質によって異なるということが予想されるため、沈み込み帯スロー地震発生域に実際に存在する可能性がある物質を用いて実験をおこない、物質学的視点からスロー地震の発生機構の解明を目指す。スロー地震は、沈み込み帯地震発生帯を取り囲むように分布している。よって、スロー地震発生機構の解明は、沈み込み帯における多様な地震の発生プロセスの総合的な理解につながることを期待される。

3. 研究の方法

本研究では、熱水条件下で低～高速すべり運動を再現する回転式摩擦試験機を開発・調整して、プレート境界に実存する可能性のある物質の摩擦特性を、スロー地震から巨大地震のすべり速度、すべり変位、発生域温度を含む幅広い条件で調べる。特に、摩擦特性が間隙水圧比およびすべり速度の変化にともなってどのように変化するのかを調べる。

本研究では、世界に先駆けて地震発生場の熱水条件下におけるゆっくりしたすべりから、地震時の高速すべり運動を再現できる試験機の開発に挑戦する。万が一、問題が起こった場合に備えて、既存の高温高压摩擦試験機でもスロー地震発生場の熱水環境での岩石の摩擦特性に対する間隙水圧の影響を調べる。これらの実験結果を組み込んだ断層力学モデルを構築して、沈み込み帯プレート境界で起こっている地震現象を物質学的・力学的視点から理解することを試みる。

4. 研究成果

(1) 回転式熱水剪断試験機の開発:

本研究期間中に、(株)マルイの技術者の協力のもと、本研究課題の開始前に製作していた熱水圧力容器を回転式摩擦試験機に組み込むことに成功した(図1)。そして、水圧120 MPa、温度400 の地震発生域の熱水条件下で、10 nm/s~10 mm/sのすべり速度を再現できることを確認した。さらに、平成30年7月に、本試験機の圧力容器は第一種圧力容器として高知県労働基準監督署から認可を受けることができた。その後、本格的に予察の実験をおこない、下記(3)に記す成果の創出に繋がった。ただ、認可をとるのに予想外に時間を要したため、本研究目的の1つ目の間隙水圧比が摩擦挙動に及ぼす影響については、本研究期間中に検証することができなかった。この仮説検証は、今後の課題として残ることとなった。本熱水摩擦試験機の稼働によって、今後、地震発生場の熱水環境における岩石の低～高速摩擦特性とそれを支配する物理化学現象の解明が期待される。



図1. 海洋研究開発機構・高知コア研究所で開発、そして設置された回転式熱水剪断試験機の全景。水圧120MPa、温度450、垂直応力60MPaの条件で、スロー地震～巨大地震のすべり速度に匹敵する10nm/s～1m/sでのすべり運動を再現できるスペックを有する。写真左部分の透明アクリル板の後ろにあるのが認可を受けた第一種圧力容器。

(2) プレート境界物質の摩擦の性質に基づく東北プレート境界のすべり特性：

東北日本では深さ 20 km 以下のプレート境界浅～中部領域においてスロー地震が起こっており、その震源が東北地震発生域と一部重なることから、海溝型巨大地震との関係も含め注目されている。本研究では、浅～中部プレート境界断層の性質を理解するため、IODP Exp. 343 (JFAST) 掘削によって採取されたプレート境界物質を用いて、この物質の摩擦特性が温度上昇とともにどのように変化していくのかを調べた。実験にはオランダ・ユトレヒト大学設置の回転式剪断試験機を使用し、有効圧 50 MPa、間隙水圧 50 MPa、温度 20～200 °C、すべり速度 0.3～100 μm/s の条件で、断層すべりの安定性を示すパラメータ(a-b)の温度・すべり速度依存性を調べた。その結果、20～50 °C の温度条件では、すべり速度が上昇するにつれて(a-b)が負から正へと増えていき、100～200 °C では正から負に減少する傾向が認められた。また、50～100 °C の温度条件でのみ(a-b)が 0 に近い負の値をとり、150 °C 以上では(a-b)が正となることがわかった。

スロー地震は、(a-b)が負でかつ小さな値をとるような条件で発生しやすい。実験の結果、このような条件が 50-100 °C の温度であらわれることがわかった。東北沖沈み込み帯の温度構造から、スロー地震の下限はおよそ 150 °C だと考えられており、本実験結果はこの観測結果とよい一致を示している。本実験結果と、Sawai et al. (2016)で報告した藍閃石片岩の摩擦特性を組み合わせることによって、東北プレート境界物質の(a-b)の温度依存性、そして東北プレート境界の深さ方向のすべり安定性(a-b)を示すモデルを構築することができた(図 2)(Sawai et al., 2017)。

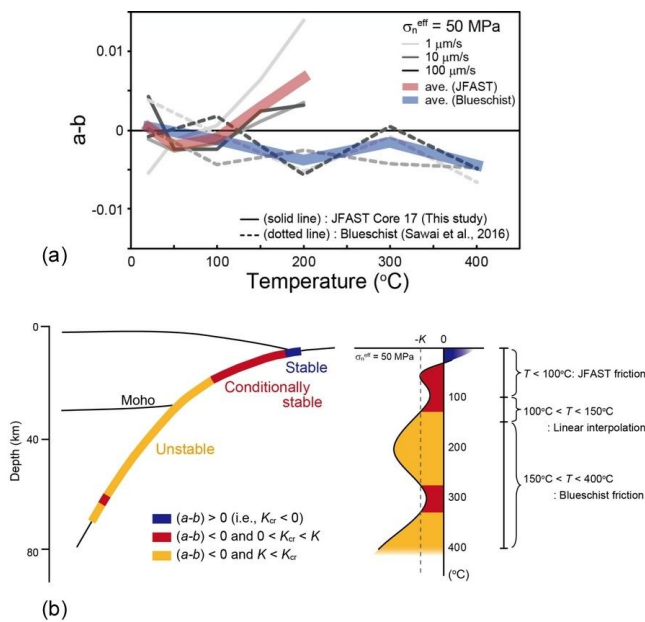
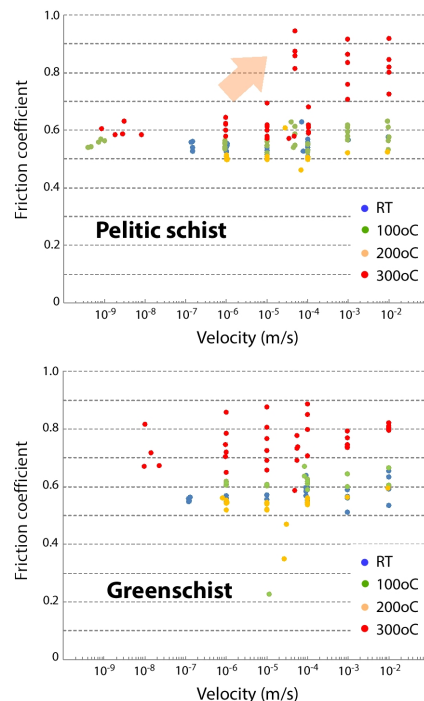


図 2 . (a)東北プレート境界に存在していると考えられる物質のすべり安定性(a-b)の温度依存性。(b)物質の性質に基づく東北プレート境界の深度方向のすべり安定性(a-b)モデル。

(3) 南海トラフ震源域に分布する泥質片岩と緑色片岩の摩擦の速度依存性：

岩石の相図をもとに、南海トラフ地震発生場に存在する岩石を推測すると、緑色片岩およびそれに付随する泥質片岩が震源域に広く分布すると考えられる。本研究では、これら 2 種類の岩石を用いて、南海トラフ震源および震源深部のスロー地震発生場でプレート境界摩擦特性を探ることを試みた。試料は、四国三波川帯猿田川沿いで採取し、ラマン分光顕微鏡を用いて泥質片岩中の炭質物の結晶度を測定することによってこれら試料の最高被熱温度がスロー地震発生域の温度に相当する 370 °C 程度であることを確認した。また、薄片および粉末 X 線回折法で構成鉱物を確認した。その後、岩石試料を乳鉢で粉碎・篩分けをおこない、100～180 μm の粒径サイズの粉末試料を摩擦実験に用いた。実験は、温度 20～300 °C、水圧 20 MPa、有効垂直応力 5 MPa の環境条件下で、スロー地震から巨大地震のすべり速度に相当する 10 nm/s～10 mm/s の 6 桁におよぶすべり速度を再現することに成功した。

図 3 . 泥質片岩 (上) および緑色片岩 (下) の摩擦の速度依存性。色の違いは実験温度の違いを示している。震源域下部の 300 °C で両岩石の摩擦特性の違いが出てくるのが予察的にわかった。



実験の結果、両岩石とも 200 までは摩擦係数 0.5~0.65 を示すこと、300 になると摩擦係数が 0.1~0.3 程度上昇すること、そして 300 の泥質片岩でのみすべり速度 0.1~1mm/s の間ですべり速度とともに摩擦が顕著に上昇する速度強化の性質を示すことが予察的に明らかとなった。このような速度強化の性質は、スロー地震の発生には必要条件であり、この結果は、震源域における泥質岩の存在がスロー地震発生に關与している可能性を示唆している。今後、シール・ジャケットの摩擦の影響を補正して、より精度の高い摩擦の速度依存性を決定するとともに、その間隙水圧の効果を探っていきたい。

<引用文献>

- Obara K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 2002, 1679-1681. DOI: 10.1126/science.1070378
- Kodaira S., Iidaka T., Kato A., Park J.-O., Iwasaki T., and Kaneda Y., High Pore Fluid Pressure May Cause Silent Slip in the Nankai Trough, *Science*, 304, 2004, 1295-1298. DOI: 10.1126/science.1096535
- Ito Y., and Obara K., Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 33, 2006, L02311, Doi:10.1029/2005GL025270.
- Sawai, M., A.R. Niemeijer, O. Plümpner, T. Hirose and C.J. Spiers, Nucleation of frictional instability caused by fluid pressurization in subducted blueschist, *Geophysical Research Letters*, 43, 2016, 2543-2551. Doi:10.1002/2015GL067569

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

- Yamada, Y., Dugan, B., Hirose, T., and Saito, S., Riser Drilling: Access to Deep Subseafloor Science, *OCEANOGRAPHY*, 32(1), 2019, 95-97, doi.org/10.5670/oceanog.2019.127. (査読有)
- Han, R., Kim, J.-S., Kim, C.-M., Hirose, T., Jeong, J.O. and Jeong, G.Y., Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses, *Geology*, 47(2), 2019, 107-110, doi.org/10.1130/G45687.1. (査読有)
- Hamada, Y., Hirose, T., Ijiri, A., (他 38 名), In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary decollement in the Nankai Trough, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:70, 2018, doi.org/10.1186/s40645-018-0228-z. (査読有)
- 高橋 美紀, 廣瀬 丈洋, 飯尾 能久, 断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性, *地質学雑誌*, 124, 2018, 725-739, doi.org/10.5575/geosoc.2018.0015. (査読有)
- Hamada, Y., Kitamura, M., Yamada, Y., Sanada, Y., Sugihara, T., Saito, T., Moe, K., and Hirose, T., Continuous depth profile of the rock strength in the Nankai accretionary prism based on drilling performance parameters, *Scientific Reports*, 8, 2018, DOI:10.1038/s41598-018-20870-8. (査読有)
- 木村 学・木下 正高・金川 久一・金松 敏也・芦 寿一郎・斎藤 実篤・廣瀬 丈洋・山田 泰広・荒木 英一郎・江口 暢久・Toczko Sean, 南海トラフ地震発生帯掘削がもたらした沈み込み帯の新しい描像, *地質学雑誌*, 124, 2018, 47-65, Doi:10.5575/geosoc.2017.0069. (査読有)
- 廣瀬 丈洋, 実験室から探る南海トラフ地震断層運動, *地盤工学会誌*, 講座「南海トラフ巨大地震・津波発生の真実にせまる～強靱な社会の構築に向けて」, 65-11/12, 2017, 70-77. (査読有)
- Kitajima, H., Saffer, D., Sone, H., Tobin, H., and Hirose, T., In-situ stress and pore pressure in a deep interior of the Nankai accretionary wedge, IODP Site C0002, *Geophysical Research Letters*, 44, 2017, 9644-9652, doi.org/10.1002/2017GL075127. (査読有)
- Sawai, M., Niemeijer, A.R., Hirose, T., and Spiers, C.J., Frictional properties of JFAST core samples and implications for slow slip events at the Tohoku subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 44, 2017, 8822-8831, doi:10.1002/2017GL073460. (査読有)
- 林 為人・廣瀬 丈洋・谷川 亘・濱田 洋平, 科学掘削による地震断層の応力状態・物性・すべりパラメーターの評価, *地学雑誌*, 126, 2017, 223-246, doi:10.5026/jgeography.126.223. (査読有)
- Lee, S.K., Han, R., Kim, E.J., Jeong, G.Y., Khim, H., and Hirose, T., Quasi-equilibrium melting of quartzite upon extreme friction, *Nature Geoscience*, 10, 2017, 436-441, doi:10.1038/ngeo2951. (査読有)
- Kitamura, M., and Hirose, T., Strength determination of rocks by using indentation tests with a spherical indenter, *Journal of Structural Geology*, 98, 2017, 1-11, doi.org/10.1016/j.jsg.2017.03.009. (査読有)

Rempe, M., Smith, S., Mitchell, M., Hirose, T., and Di Toro, G., The effect of water on strain localization in calcite fault gouge, *Journal of Structural Geology*, 97, 2017, 104-117, doi.org/10.1016/j.jsg.2017.02.007. (査読有)

Brown, K., Poeppe, D., Josh, M., Sample, J., Even, E., Saffer, D., Tobin, H., Hirose, T., Kulongoskih, J.T., Toczko, S., Maeda, L., and the IODP Expedition 348 Shipboard Party, The action of water films at A-scales in the earth: implications for the Nankai subduction systems, *Earth and Planetary Science Letters*, 463, 2017, 266-276, doi.org/10.1016/j.epsl.2016.12.042. (査読有)

Mizoguchi, K., and Hirose, T., Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, *Geophysical Research Letters*, 43, 2016, 7921-7927, doi:10.1002/2016GL069776. (査読有)

[学会発表](計 19 件)

Kamiya, N., Hirose, T., (他 7 名), Paleo-thermal anomaly along with the decollement off the Cape of Muroto, Japan: controlled by subduction, AGU Fall Meeting, 2018.

Mizoguchi, K., and Hirose, T., Relationship Between Frictional Heating and Water Adsorption in Simulated Fault Gouge Sheared at Elevated Slip Rates, AOGS 15th Annual Meeting, 2018.

廣瀬 丈洋, 渋谷 岳造, 新しい回転式熱水剪断試験機の開発～エンセラダスの海底地下震断層運動の再現に向けて～日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

廣瀬 丈洋, (他 14 名), インド東沿岸域クリシュナ・ゴダバリ盆地における堆積層の強度特性, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

神谷 奈々, 廣瀬 丈洋, 濱田 洋平, 山本 由弦, 林為人, Expedition 370 乗船研究者, 室戸沖における南海トラフ沈み込み帯先端部の古地温異常, 日本地質学会第 125 年学術大会, 2018.

Mizoguchi, K., and Hirose, T., Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, AGU Fall Meeting, 2017.

Park, Y., Ree, J.H., and Hirose, T., Anti-aging Friction of Carbonate Fault Mirror and its Microstructural Interpretation, AGU fall meeting, 2017.

Hirose, T., Kamiya, N., Yamamoto, Y., Heuer, V., Inagaki, F., Kubo, Y., Fluid pressure development beneath the decollement at the Nankai subduction zone: its implications for slow earthquakes, AGU fall meeting, 2017.

濱田 洋平・北村 真奈美・山田 泰広・真田 佳典・杉原 孝充・斎藤 実篤・MOE KYAW・廣瀬 丈洋, 南海トラフにおける掘削パラメータを利用した連続地層強度の推定と地質解釈の例, 日本地質学会第 124 年学術大会, 2017.

川口 健太・早坂 康隆・廣瀬 丈洋, 四国中央部三波川変成帯猿田川流域におけるナップ境界近傍の温度構造と年代分布, 日本地質学会第 124 年学術大会, 2017.

濱田 洋平, 北村 真奈美, 山田 泰広, 真田 佳典, MOE KYAW, 廣瀬 丈洋, 掘削パラメータを用いた地層の連続強度推定: NanTro SEIZE サイト C0002 での例, JpGU-AGU joint meeting, 2017.

Kamiya, N., Okutsu, N., Hirose, T., Inagaki, F., Heuer, V., Morono, Y., Kubo, Y., Physical properties of the Nankai accretionary prism, off Cape Muroto: Preliminary results of IODP Expedition 370, JpGU-AGU joint meeting, 2017.

Hirose, T., Kamiya, N., Yamamoto, Y., Heuer, V., Inagaki, F., Morono, Y., Kubo, Y., Expedition 370 Scientists, Excess fluid pressure development beneath the decollement at the Nankai subduction zone, JpGU-AGU joint meeting, 2017.

Tobin, H., Saffer, D., Castillo, D., Hirose, T., Direct Observations of In Situ Stress State in a 3 Kilometer Deep Borehole in the Upper Plate, Nankai Trough Subduction Zone: IODP Site C0002, JpGU-AGU joint meeting, 2017.

Rempe, M., Di Toro, G., Mitchell, T., Hirose, T., Smith, S., Renner, J., The effect of fluids on the frictional behavior of calcite gouge, AGU fall meeting, 2016.

Park, Y., Ree, J.H., Hirose, T., Frictional 'non-aging' of fault mirror surfaces?: Insight from friction experiments on Carrara marble, AGU fall meeting, 2016.

Kiramura, M., Hirose, T., Strength and mechanical behavior of the Nankai accretionary prism sediments from NanTroSEIZE Expedition 348, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.

Hirose, T., Hyodo, G., and Saito, S., Frictional property of rocks in the Izu forearc: implications for the Boso slow slip events, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.

Saffer, D., Tobin, H., Hirose, T., Castillo, D., In situ stress state within the inner accretionary prism in the Nankai Trough: Inferences from drilling observations during IODP Expedition 348, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：谷川 亘

ローマ字氏名：(TANIKAWA, Wataru)

研究協力者氏名：高橋 美紀

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, Miki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。