

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287135

研究課題名(和文)沈み込み帯の断層レオロジーとスロー地震の発生機構

研究課題名(英文) Rheology of faults in subduction zones and its implications for the generation of slow earthquakes

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・グループリーダー代理

研究者番号：40470124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000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には、水が深く関与していると考えられている。本研究では、水の圧力(間隙流体圧)の上昇がスロー地震の発生と密接に関わっているという仮説を、地震発生域の熱水環境を再現した摩擦実験によって検証した。熱水摩擦実験の結果、間隙水圧が大きくなるにつれて、断層の摩擦の速度依存特性が正から負に系統的に変化し、スロー地震が発生するポテンシャルが現れることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Slow earthquakes in subduction zones have been considered as the key phenomenon associated with megathrust earthquakes. Several mechanisms have been proposed, but the cause of slow earthquakes remains elusive. One possibility is that an increase in pressure of pore fluid promote slow slip in subduction faults, yet role of fluid pressure in mechanics of slow earthquakes is poorly understood. Therefore, we conducted friction experiments on blueschist fault rocks to investigate the influence of effective stress on frictional behavior. Our results show a transition from stable to unstable behavior with decreasing effective normal stress, which is mechanically equivalent to increasing fluid pressure. This transition is a prerequisite for generating slow earthquakes. Our results imply that high pore pressures are a key factor for nucleating slip leading to slow earthquakes.

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

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震後に地震観測網が大幅に整備され、沈み込む南海プレート沿いでは固着域の浅部と深部で、低周波微動やスロースリップなどの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では、地震波探査の解析から間隙流体の存在が指摘されている。(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、高い間隙流体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)。しかし、これまで地震が起こらないとされてきた非固着域で、間隙流体圧が上昇することによってスロー地震が起こるのかということとはよくわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、間隙流体圧の上昇がスロー地震の発生と密接に関わっているという仮説を、地震発生域の熱水環境を再現した摩擦実験によって検証することである。特に、「断層の摩擦特性が間隙流体圧の変動によってどのように変化するのか」ということを詳細に調べて、スロー地震の発生メカニズムを物質学的な視点から解明することを試みる。沈み込み帯で発生するスロー地震は、大地震が発生するプレート固着域を取り囲むように分布している。よって、スロー地震発生メカニズムの解明は、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事が期待される。

3. 研究の方法

本研究では、プレート運動速度から地震時の秒速数メートルの速度を再現できる回転式高速摩擦試験機に組み込むことができる熱水圧力容器を世界に先駆けて設計・作製して、スロー地震発生域に存在する物質の摩擦特性をスロー地震の変位速度と発生域温度を含む幅広い条件で調べる。特に、断層の摩擦構成則パラメータの間隙水圧依存性に着目して、高間隙水圧条件下においてスロー地震が起こるような摩擦特性(例えば、摩擦の速度依存性が正から負、もしくは負から正への変遷)が現れるのかを検証する。本研究では、世界に先駆けて高速せん断軸受け機構を組み込んだ熱水圧力容器の開発に挑戦する。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) 本研究期間中に、(株)東洋高压の技術者と共同で、回転式摩擦試験機に組み込むことが可能な熱水圧力容器を設計・作製し、水圧 100 MPa、温度 500 の地震発生域の熱水条件を再現することに成功した(図 1)。また、労働基準監督署から本圧力容器を第一種圧力容器として認可を受けることができた。今後、本圧力容器を、高速摩擦試験機に組み込むことによって、地震発生場の熱水環境における岩石の摩擦特性とそれを支配する物理化学現象の解明に繋げることが可能となった。

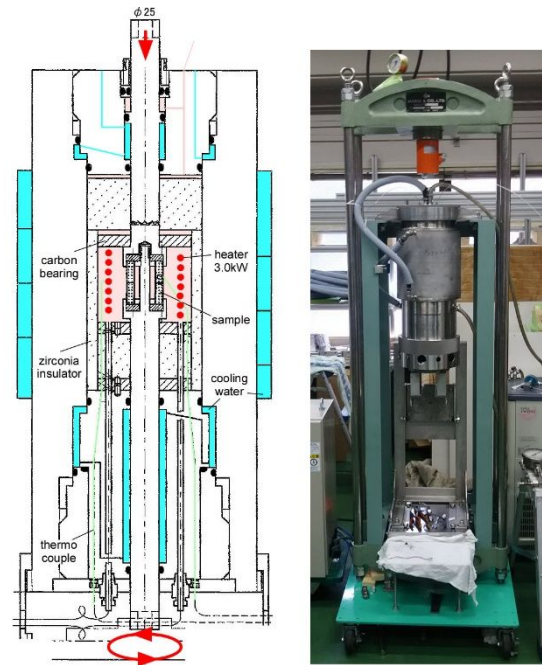


図 1 高速回転剪断軸受け機構を組み込んだ熱水圧力容器の図面(左)と本圧力容器を 50 トンプレスに組み込んだ全体像(右)。超臨界水とジルコニア断熱材および軸受け材との反応を抑えるため、断熱材は 2 mm 厚の低熱伝導率チタン合金 (Ti-6Al-4V) で覆い、軸受け材にはカーボン軸受けを作製した。また、高速回転軸シールが破れた場合、熱水蒸気が試験機外に放出されないよう、冷却水ラインに流れ込むような安全機構を組み込んでいる。

(2) 房総半島沖で発生しているスロー地震の発生メカニズムを探るために、関東に沈み込む伊豆マリアナ弧を構成する代表的な岩石 5 種類の高圧高温摩擦実験をおこなった。岩石は、国際深海掘削計画 (ODP) 第 125 航海で採取されたものである。実験は、地震発生場環境である温度 300、封圧 156 MPa、間隙流体圧 60 MPa において、すべり速度 0.13-1.3 $\mu\text{m/s}$ の範囲で速度急変実験をおこなった。実験の結果、従来スロー地震と深くかかわっていると考えられていた蛇紋岩類は速度強化の摩擦特性を示す一方、火山岩類ではスティックスリップ挙動が現れた(図 2)。このスティックスリップは、すべり時

間が数秒にも及ぶ、スロースティックスリップと呼ばれるすべり挙動であることがわかった。この挙動とスロー地震とのかわりを探るためには、試験機および地殻の剛性と摩擦構成則パラメータを考慮した解析が今後必要であるが、少なくとも房総沖のスロースリップの根源物質は蛇紋岩ではなく、火山岩類が深く関与している可能性が示された。

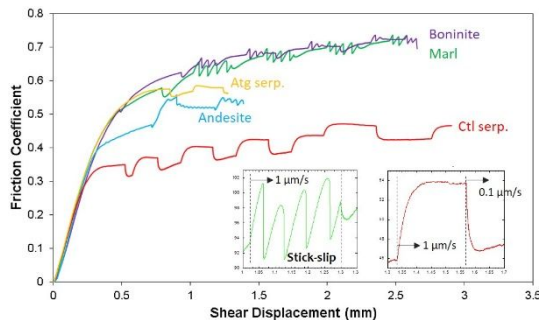


図2 火山岩類 (boninite, andesite) 石灰質堆積岩 (marl) および蛇紋岩類 (antigorite & chrysotile serpentinites) の高温高压下における摩擦すべり挙動。蛇紋岩の大きな凸凹挙動は、すべり急変時のすべりレスポンスであり、速度強化挙動を示した。一方、火山岩および石灰質堆積岩は、スロースティックスリップ挙動が現れた。

(3) 低温・高压型沈み込み帯の地震発生域に広く分布すると考えられる藍閃石片岩の粉砕物を用いて、有効圧 25~200 MPa、間隙水圧 25~200 MPa、温度 22~400、0.1~100 μm/s のすべり速度条件下で摩擦実験をおこなった。実験にはユトレヒト大学の回転式剪断試験機を使用し、特に、摩擦の速度依存性パラメータ (a-b) の有効圧依存性と温度依存性に着目して実験をおこなった。実験の結果、藍閃石片岩は温度 100~300 の間では摩擦の速度依存性パラメータ (a-b) が負となり、200 で最低値をとり、地震を引き起こすポテンシャルを持つことが明らかになった。また、(a-b) が正の温度条件においても、有効圧が小さくなるにつれて (a-b) が負に遷移する傾向が確認された (図3)。従来、(a-b) は温度圧力が一定であれば、定数として扱われてきたが、間隙水圧によっても変化することがはじめてわかった。またこの結果は、間隙水圧が上昇すると、(a-b) が正から負に変化する点でスロー地震が発生する条件が現れることを示唆しており、間隙流体圧の変動が大地震のみならずスロー地震の発生に深く関与していることが明らかとなった。今後、実験結果を基に、スロー地震から大地震までのすべり速度域における摩擦の温度・間隙水圧依存性を組み込んだ摩擦構成則を確立できれば、より現実的なプレート境界地震発生モデル構築の足掛かりになると期待される。

また、地震発生場における間隙流体圧の時系列変化の推定もしくはモニタリングが可能となれば、新たな地震切迫度指標をつくることできるかもしれない。

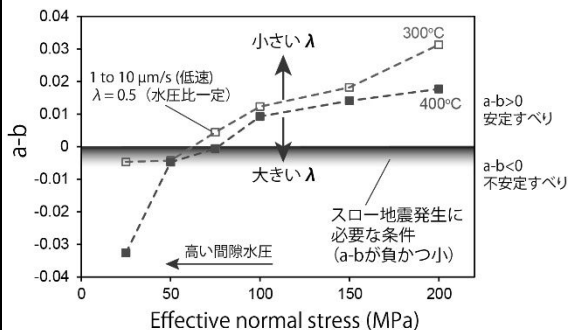


図3 地震震源域の温度条件における摩擦構成則パラメータ (a-b) の有効応力依存性。間隙流体圧の上昇に伴って、(a-b) が正から負に変化し、スロー地震が発生するポテンシャルが現れることが明らかとなった。

<引用文献>

Obara K., (2002), Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681.
 Kodaira S., Iidaka T., Kato A., Park J.-O., Iwasaki T., and Kaneda Y., (2004), High Pore Fluid Pressure May Cause Silent Slip in the Nankai Trough, *Science*, 304, 1295-1299.
 Ito Y., and Obara K., (2006), Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, *Geophysical Research Letters*, 33, L02311, doi:10.1029/2005GL025270.

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13件)

Sawai, M., A.R. Niemeijer, O. Plümper, T. Hirose and C.J. Spiers, Nucleation of frictional instability caused by fluid pressurization in subducted blueschist, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 43, 2016, doi:10.1002/2015GL067569.
 Lavallée, Y., T. Hirose, J.E. Kendrick, K.-U. Hess and D.B. Dingwell, Fault rheology beyond frictional melting, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 査読有, 112(30), 2015, 9276-9280. doi/10.1073/pnas.1413608112.
 Oohashi, K., T. Hirose, M. Takahashi,

and W. Tanikawa, Dynamic weakening of smectite-bearing faults at intermediate velocities: Implications for subduction zone earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 120, 2015, 1572-1586, doi:10.1002/2015JB011881.

Sawai, M., T. Hirose and J. Kameda, Frictional properties of incoming pelagic sediments at the Japan Trench: implications for large slip at a shallow plate boundary during the 2011 Tohoku earthquake, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 66, 2014, doi:10.1186/1880-5981-66-65.

Kendrick, J. E., Lavallée, Y., Hirose, T., Di Toro, G., Hornby, A.J., De Angelis, S. and Dingwell, D.B., Volcanic drumbeat seismicity caused by stick-slip motion and magmatic frictional melting, *Nature Geoscience*, 査読有, 7, 2014, 438-442, doi:10.1038/ngeo2146.

Han, R., T. Hirose, G. Y. Jeong, J.-I. Ando, and H. Mukoyoshi, Frictional melting of clayey gouge during seismic fault slip: Experimental observation and implications, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 41, 2014, 5457-5466, doi:10.1002/2014GL061246.

Tanikawa W., H. Mukoyoshi, W. Lin, T. Hirose, and A. Tsutsumi, Pressure dependence of fluid transport properties of shallow fault systems in the Nankai subduction zone, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 66, 2014, doi:10.1186/1880-5981-66-90.

Lavallee, Y., T. Hirose, J.E. Kendrick, S. DeAngelis, L. Petrakova, A.J. Hornby, and D.B. Dingwell, A frictional law for volcanic ash gouge, *Earth Planetary. Science Letters*, 査読有, 400, 2014, 177-183, doi:10.1016/j.epsl.2014.05.023.

北村真奈美、向吉秀樹、廣瀬丈洋、付加体内部に発達する断層の変位量と幅との相関関係、*地質学雑誌*、査読有、120(1)、2014、11-21。

Tanikawa, W., Hirose, T., Mukoyoshi, H., Tadai, O., & Lin, W., Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary fault in the Japan Trench, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 382, 2013, 150-160.

〔学会発表〕(計15件)

Hirose, T., Generation mechanisms of slow earthquakes: insights from recent friction experiments, Symposium on Subduction zone earthquakes in Nankai Trough & Japan Trench, 2016年2月12日, 東京大学地震研究所, 東京都, 文京区。

Sawai, M., A.R. Niemeijer, O. Plümper, T. Hirose and C.J. Spiers, Frictional properties of Blueschist under in-situ conditions and implications for fault motion, American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, 2015年12月16日, サンフランシスコ, アメリカ合衆国。

兵東玄威、高橋美紀、斎藤実篤、廣瀬丈洋、伊豆-ボニン-マリアナ弧を構成する岩石のすべり特性：高温摩擦実験と低～高速摩擦実験からの考察、日本地質学会第122年学術大会、2015年9月12日、信州大学、長野県、松本市。

澤井みち代、Niemeijer Andre、廣瀬丈洋、Plumper Oliver、Spiers Christopher、東北沖プレート境界物質の摩擦特性からみるスロー・スリップ・イベント、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年5月28日、幕張メッセ、千葉県、千葉市。大橋聖和、廣瀬丈洋、高橋美紀、谷川亘、準高速すべりに伴うスメクタイト質断層の動的強度弱化、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年5月25日、幕張メッセ、千葉県、千葉市。

北村真奈美、曾根大貴、北島弘子、廣瀬丈洋、南海付加体内部の粘弾性特性：掘削カッティングス試料を用いたインデントレーション試験による解析、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年5月24日、幕張メッセ、千葉県、千葉市。

Hirose, T. et al., Drilling into the deep interior of the Nankai accretionary prism: Preliminary results of IODP NanTroSEIZE Expedition 348, American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, 2014年12月19日, サンフランシスコ, アメリカ合衆国。

廣瀬丈洋ほか、超深度ライザー掘削によるカッティングス試料から何がわかるのか？-IODP第348次研究航海の経験をもとに、日本地質学会第121年学術大会、2014年9月14日、鹿児島大学、鹿児島県、鹿児島市。

〔その他〕

ホームページ等

http://www.ne.jp/asahi/hirose/geo/index_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 文洋 (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・グループリーダー代理
研究者番号：40470124

(2) 連携研究者

谷川 亘 (Tanikawa, Wataru)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知
コア研究所・主任研究員
研究者番号：70435840

高橋 美紀 (Takahashi, Miki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・活
断層・地震研究センター・主任研究員
研究者番号：40470033

(3) 研究協力者

澤井 みち代 (Sawai, Michiyo)
野田 洋二 (Noda, Yoji)