

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21907

研究課題名（和文）水が流れている環境下における固体接触物理・化学モデルの構築

研究課題名（英文）Strength recovery of solid contacts under fluid flow conditions

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・超先鋭研究開発部門（高知コア研究所）・研究所長

研究者番号：40470124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、「水の流れが断層の強度回復（断層シール効果）を抑制する」という仮説の検証を、流速環境を再現する摩擦実験システムによって検証することを試みた。すべり-固着-すべりを繰り返す実験手法（フロー-SHS試験）をまず確立し、その手法を用いた粉碎砂岩の実験から、（1）流速の上昇に伴って見かけの断層強度の回復は妨げられること、（2）有効垂直応力を考慮した有効摩擦強度の回復挙動は流速に依存しないことがわかった。自然界の水の流れがある環境での断層強度回復を予測するためには、間震期における断層帯の水理特性の変動把握が重要であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地殻内部の断層に沿って、水は普遍的に流れている。このような水の流れは、地球深部からの物質循環を考察する上で重要であり、地球化学・水理学的な研究が盛んになされている。一方、水圧が断層に及ぼす力学的作用については古くから研究があるが、動的な水の流れそのものが断層の力学に及ぼす影響は全く検討されてこなかった。本研究によって、水の流速変化が断層帯の間隙水圧を変動させ、断層の強度回復過程に影響を及ぼすことが明らかとなった。自然界の地震断層の強度回復プロセスを探るためには、今後、地震サイクルにおける断層帯水理特性の変遷を調べる必要がある。

研究成果の概要（英文）：This study attempted to test the hypothesis that “subsurface water flow inhibits fault strength recovery” by renovating our friction apparatus that enable to reproduce the flow environment in natural fault zone. We first established a new slide-hold-slide method under water flow conditions (flow SHS test) was first established, and then conducted the SHS tests on crushed sandstone. The experimental results showed that (1) the recovery of apparent fault strength is hindered as flow velocity increases, and (2) the recovery of effective fault strength, taking into account effective normal stress concept, is independent of flow velocity. This study implies that the variation in the hydraulic properties of fault zones during earthquake cycles is important for understanding the fault strength recovery of seismogenic faults in nature.

研究分野：岩石力学

キーワード：地震 断層 水 流速 強度回復

1. 研究開始当初の背景

1980年代以降、科学掘削調査船を用いてプレート境界断層のモニタリングおよび物質の採取をおこない、沈み込み帯地震発生メカニズムを探る研究が行われてきた。この掘削過程で、断層近傍での異常間隙水圧とそれに起因する水の流れが観察されている(図1)。また、沈み込み帯近傍の海底面では、泥火山や割れ目に沿った湧水が頻りに観察・報告されている。このような水の流れは、地球深部からの物質循環を考察する上で重要であり、地球化学・水理学的な研究が盛んになされている。一方、水圧が断層に及ぼす力学的作用については古くから研究があるが、動的な水の流れそのものが断層の力学に及ぼす影響は全く検討されてこなかった。

そこで本研究では“水の流れ”に着目し、新たに開発する実験手法で、「水の流速が断層の力学、特に断層の強度回復(および透水性)に及ぼす影響」を探ることを試みた。断層の強度回復速度は、地震のサイクルを規定する要素の一つである。これまでの、水の動きがない条件で決められてきた強度回復速度は、自然界の水の流れがある地震断層には適応できない可能性が高い。よって本研究は、より現実的な地震サイクル・モデリング研究に繋がる可能性がある。さらに、二酸化炭素や廃棄物の地層貯留、地熱エネルギーなどの物質移動評価や、構造物や地盤強度の安定性評価などが必要な土木・建築研究においても新たな研究進展をもたらすと考えられる。



図1. 室戸沖南海トラフのプレート境界直下から噴出してきた水の流れ。国際深海科学掘削計画(IODP)第370次航海中に撮影された動画のスナップショット。動画なので、流速を測定することが可能。

2. 研究の目的

地殻内部の断層に沿って、水は普遍的に流れている。この水と岩石の物理・化学相互作用によって、断層の強度と水理特性は時間とともに劇的に変化する。しかし、この水の流れそのもの(流速)が、これら断層物理特性にどのような影響を及ぼすかはよくわかっていない。そこで本研究では、「水の流れが断層の強度回復(断層シール効果)を抑制する」という仮説を、流速環境下での摩擦実験システムを新たに開発し、検証することを試みた。特に、「流速によって断層の強度回復速度がどのように変化するか」ということを詳細に調べて、流速と断層の強度回復速度(および透水係数)の相関関係を確立することを目指した。

3. 研究の方法

物質の強度が時間と共に大きくなる現象は、固体と固体の微小な接触域が圧力溶解などのメカノケミカル反応によって固着し、接触面積が増加することに起因する。本研究では、これまで実験が困難であった水の流れがある条件で「すべり-固着-すべり」を繰り返す実験(フロー-SHS試験)に挑戦した(図2)。そして、固着時に進行する接触域の微小変形による、摩擦強度回復の変化量を、下記の3つの実験研究ステップによって詳細に調べた。

(1) フロー透水剪断システムの構築

本研究で使用する海洋研究開発機構・高知コア研究所設置の回転式摩擦試験機に、2台のシリコンポンプを組み込み、様々な流速条件で1週間以上の摩擦実験ができるよう新しいフロー透水計測システムを構築する。

(2) フロー-SHS試験

断層内部での水の流れが静止、層流~乱流となるような流速で、フロー-SHS試験を試みる。実験では、固着時間を変化させながら固着後に再度すべりはじめる際の最大静止摩擦力を測定し、固着時間と最大静止摩擦力の相関関係を調べる。

(3) 固体接触域での物理化学プロセス解析

電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて、実験後の回収試料の組織観察と化学分析をおこない、固体接触域での変形素過程を把握する。そして、流速と強度回復速度との相関を説明する固体接触域の物理化学モデルの構築を試みた。

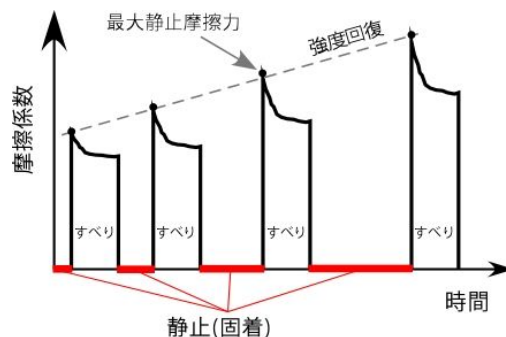


図2. すべり-固着-すべり実験(SHS試験)の概要図。流れが無い条件下では、固着時間とともに時間の対数に比例して最大静止摩擦力が増加していくことが知られている。

4. 研究成果

(1) フロー透水剪断システムの構築

摩擦試験機の圧力容器内部にある模擬断層試料に、連続で流体を送り込めるよう試験機およびシリジポンプを改良して様々な流速を出せる実験システムをあらたに構築した。このシステムによって、流体を流速 0.01~25cc/min の範囲で 1 週間以上模擬断層帯に送り込むことが可能となった。また、流速があることで変動する間隙水圧を捉えるために圧力容器から流体が出入りする位置に水圧計を設置し、流速とともに間隙水圧を正確に計測できる機構も組み込んだ。

このシステムを用いて、直径 0.03~1mm ガラスビーズ試料と球状ジルコニア試料、および 0.125~0.250 mm の粒径サイズに粉碎したインド産砂岩を用いた SHS 実験および回収試料の SEM 観察を行った。その結果、垂直応力が 1MPa 以上になるとガラスビーズ試料は著しく破壊され、強度回復の実験再現性が得られないことがわかった。ジルコニア試料では、垂直応力 5MPa においてもすべりに伴って破壊は進行しなかった。しかし、粒状物質が互いにのし上がるような挙動が断層帯内部で発生し、摩擦が大きく変動するため、ガラスビーズ試料と同様に実験の再現性が得られなかった。そこで、本研究では粉碎砂岩試料に焦点をあてた実験を行った(図3)。

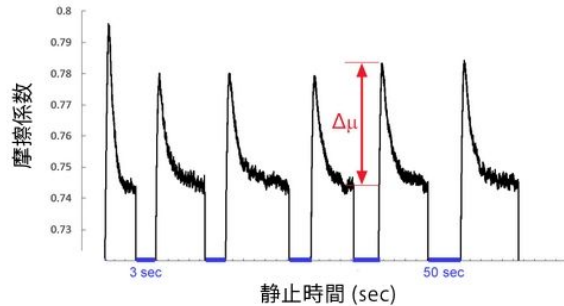


図3. 流速がない条件下における砂岩粒の強度回復。静止時間が長ければ長いほど、摩擦係数の増加($\Delta\mu$)が大きくなる(PHV446)。先行研究でおこなわれてきたSHS実験と調和的な結果を得ることができた。

(2) 流速下における模擬断層帯の変形

粉碎砂岩を用いたフロー-SHS 実験から、流速がはやい条件だけでなく 0.6cc/min 程度の比較的流速が遅い条件においても水圧が上昇することがわかった。その水圧変動を計測するために、新たに計測システムを構築したことで、すべりはじめに断層帯内部でダイレーション(膨張)が起こること、すべり停止とともに圧密が進むこと、そしてダイレーション・圧密に伴って水圧が系統的に減少・増加する傾向を捉えることができた(図4)。間隙水圧が断層帯内部の変形に伴って変化していることから、有効垂直応力(垂直応力から水圧を差し引いた応力)も SHS 実験中に変動しており、流速下における強度回復傾向を正確にとらえるには、有効垂直応力を考慮した有効摩擦係数(剪断応力/有効垂直応力)でデータを解析する必要があることがわかった。また、回収試料の微細構造の SEM 観察を行い、実験タイムスケールでは、岩石と間隙水の化学的反応が進行しないことも明らかとなった。

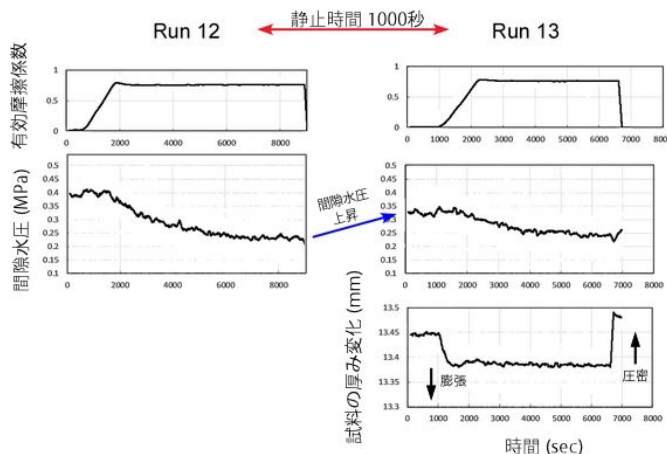


図4. 流速下における砂岩粒・模擬断層帯中の有効摩擦係数、間隙水圧と試料厚みの変化。断層が静止している間に間隙水圧が上昇し、すべり始めるとダイレーションが起こり間隙水圧が減少することがわかった(PHV448)。

(3) 流速下における模擬断層帯の強度回復

粉碎した砂岩を用いて、垂直応力 5MPa、すべり時の速度 0.01mm/s、静止時間 3~8600 秒、0~0.6cc/min の流速条件下でフロー-SHS をおこなった。その結果を図5に示す。流速がゼロの条件下では、時間の対数に比例して摩擦強度が増加する回復傾向が捉えられ、線形-対数プロットにおける傾きで $A=0.006$ という強度回復係数が得られた。この値は、従来から行われてきた粒状地質物質を用いた SHS 実験の結果と調和的である。また、流速が 0.6cc/min の条件で同様の解析を行うと強度回復係数は見かけ $A=0.0005$ となり、ほとんど強度回復しないことがわかった。一連の実験から SHS 実験中に間隙水圧が変動していることが明らかになっているので、微小水圧の

測定データを活用して断層の強度回復を有効摩擦係数（剪断応力を（垂直応力 水圧）で規格化した係数）で解析しなおした。そうすると有効摩擦の強度回復係数は $A=0.005$ となり、流速がない条件の強度回復係数とほぼ同じになることがわかった。また、流速がある場合に強度回復の絶対値（プロットのY軸切片）が減少する傾向は、流速の上昇に伴って増加する間隙水圧の効果（有効垂直応力の減少）によって説明できることが明らかとなった。一見すると流速の上昇に伴って断層の強度回復は妨げられているように見えていたが、これは流速の変化に伴う水圧の変動で説明できることが確認された。流速によってどの程度間隙水圧が上昇するかは、断層帯の水理特性（透水係数・ストレージキャパシティ）に依存する。より現実的な地震断層の強度回復プロセスを明らかにするためには、地震のサイクルでどのように断層帯の水理特性が変化するかを調べる必要がある。

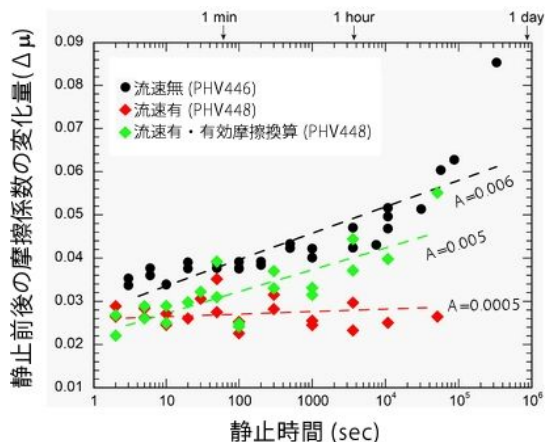


図5. 流速下では静止時間とともに見かけの強度回復がほぼ起こらなかったが（赤色、PHV448 0.6cc/min）、微小な間隙水圧の変動を計測し、有効応力を考慮して強度回復を探ると（黄緑）、流速無の条件下における強度回復（黒色、PHV446）の傾きとほぼ同じになることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Lin Weiren, Yamamoto Yuhji, Hirose Takehiro	4. 巻 601
2. 論文標題 Three-dimensional stress state above and below the plate boundary fault after the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117888 ~ 117888
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2022.117888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujioka Riho, Katayama Ikuo, Kitamura Manami, Okuda Hanaya, Hirose Takehiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Depth profile of frictional properties in the inner Nankai accretionary prism using cuttings from IODP Site C0002	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-022-00488-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirose, T., Hamada, Y., Tanikawa, W., Kamiya, N., Yamamoto, Y., Tsuji, T., Kinoshita, M., Heuer, V., Inagaki, F., Morono, Y., & Kubo, Y.	4. 巻 126 (6)
2. 論文標題 High Fluid Pressure Patches beneath the Decollement: A Potential Source of Slow Earthquakes in the Nankai Trough off Cape Muroto	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB021831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Park, Y., Hirose, T., & Ree, J.H.	4. 巻 48 (11)
2. 論文標題 Carbonate fault mirrors with extremely low frictional aging rates: A possible source of slow earthquakes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL093749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 廣瀬丈洋, 武藤潤	4. 巻 44 (1)
2. 論文標題 地震断層の動的すべり挙動の解明に向けた放射光・高速摩擦実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊地球	6. 最初と最後の頁 25-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rempe, M., Di Toro, G., Mitchell, T., Smith, S., Hirose, T., Renner, J.	4. 巻 125(11)
2. 論文標題 Influence of effective stress and pore-fluid pressure on fault strength and slip localization in calcite gouges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB019805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件(うち招待講演 1件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 廣瀬 丈洋、濱田 洋平、谷川 亘、神谷 奈々、山本 由弦、辻 健、木下 正高、Heuer Verena、稲垣 史生、諸野 祐樹、久保 雄介
2. 発表標題 室戸岬沖南海トラフのスロー地震震源域近傍に広がるパッチ状高圧間隙水帯
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱田 洋平、廣瀬 丈洋
2. 発表標題 Experimental Investigation of Strength Recovery Under Fluid Flow
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 John D Bedford、Takehiro Hirose、Yohei Hamada
2. 発表標題 Rapid fault healing after seismic slip: The role of adsorbed water in fault restrengthening
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬 丈洋、濱田 洋平、北島 弘子、Saffer Demian、Tobin Harold
2. 発表標題 南海トラフ地震歪蓄積域における応力状態：紀伊半島沖超深度ライザー孔C0002の解析
3. 学会等名 日本地質学会第129学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱田 洋平、廣瀬 丈洋、谷川 亘
2. 発表標題 Strength recovery of fault gouge under fluid flow condition
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬 丈洋、濱田 洋平、谷川 亘、神谷 奈々、山本 由弦、辻 健、木下 正高
2. 発表標題 南海トラフ・プレート境界先端に広がるパッチ状の高間隙水圧帯：室戸沖スロー地震の発生源？
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 John D Bedford, Takehiro Hirose, Yohei Hamada
2. 発表標題 The role of adsorbed water in frictional weakening and restrengthening during seismic slip
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirose Takehiro, Kono Yoshio
2. 発表標題 A consideration on friction experiments with synchrotron radiation towards unveiling earthquake generation processes
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirose Takehiro, Hamada Yohei, Tanikawa Wataru, Kamiya Nana, Yamamoto Yuzuru, Tsuji Takeshi, Kinoshita Masataka
2. 発表標題 High Fluid Pressure Patch beneath the Decollement as a Potential Source of Slow Earthquakes at the Nankai Trough
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hamada Yohei, Hirose Takehiro, Tanikawa Wataru
2. 発表標題 Experimental investigation of strength recovery under fluid flow
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬 文洋、木下 正高、木村 学、山口 飛鳥、金川 久一、Tobin Harold、Ikari Matt、北島 弘子、Saffer Demian、前田 玲奈、Toczko Sean、江口 暢久
2. 発表標題 南海トラフ地震発生帯掘削計画（IODP 358次航海）におけるプレート境界断層に向けた超深度ライザー掘削：達成と今後
3. 学会等名 地質学会第126年学術大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬 文洋、濱田 洋平、北村 真奈美、北島 弘子、曾根 大貴、Saffer Demian、Tobin Harold
2. 発表標題 南海トラフ地震歪蓄積域における岩石強度と応力状態: NanTroSEIZE Site C0002における解析
3. 学会等名 地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirose Takehiro, Tanikawa Wataru, Hamada Yohei, Okazaki Keishi
2. 発表標題 A new hydrothermal, low to high speed rotary-shearing apparatus: Reproduction of slow/megathrust earthquakes in laboratory
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanagawa Kyuichi, Nakanishi Tomoya, Kuwana Morito, Sawai Michiyo, Hirose Takehiro
2. 発表標題 Frictional properties of opal gouge at low-temperature hydrothermal conditions and their implications for seismogenic faulting along subduction-zone megathrusts
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱田 洋平、廣瀬 丈洋、谷川 亘
2. 発表標題 地震断層の強度回復過程に対する間隙水の流速が及ぼす影響
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	濱田 洋平 (HAMADA Yohei) (80736091)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・副主任研究員 (82706)	
研究協力者	谷川 亘 (TANIKAWA Wataru) (70435840)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------