

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05645

研究課題名(和文)断層焼結に伴う急速強度回復過程と地震サイクルへの影響

研究課題名(英文)Influence of rapid healing induced by fault sintering on Earthquake cycles

研究代表者

谷川 亘(TANIKAWA, Wataru)

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

研究者番号：70435840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地震性剪断変形にともなう焼結現象が断層の力学的挙動に及ぼす影響を評価するために、(1)流体飽和環境下での摩擦透水試験(2)瞬間高温加熱実験の2つの実験をベースに研究を実施した。その結果、流体飽和環境下で摩擦発熱が抑制されることにより焼結現象が発生しづらくなること、乾燥条件では1200℃以上で焼結が発生し、粉体同士が固着することがわかった。また、断層の透水係数は、すべり速度の増加とともに増加することがわかった。さらに、すべり後には初期の値に戻るため、急激な間隙水圧の減少が期待できないため、流体圧の増加を考慮した地震サイクルモデルに大きな影響を与えることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下深部に破壊震源がある地震は、地震時に断層内で発生する物理化学的な現象を直接観察することができない。そのため、本研究は地震現象を模擬した岩石実験を通して、深部の断層の内部物理的な素過程から地震発生プロセスの理解に努めた。本研究では特に、鋳造やセラミック加工など産業と関わりの深い「焼結」に焦点を当てたことにより、地震現象を生活に密接な現象の一部だと見立てて考える学問の幅を広げることができた。得られた知見は、将来、地震発生数値模擬実験で利用される物理モデルの一部に利用され、より現実的な地震の発生規模や発生頻度を推定につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the effects of sintering of fault rock by coseismic sliding on mechanical process, we carried out two experiments, such as (1) permeability tests during friction test under water saturated condition, and (2) very rapid heating test. Our result show that it was the frictional heating is suppressed in the fluid saturated environment, so that the sintering phenomenon does not easily occur. On the contrary, the sintering can occur at above 1200℃ under dry condition where the powder particles adhere to each other. It was also found that the water permeability of the fault increases with increasing slip velocity. In addition, it was found that since the permeability after slipping will recover to the initial value suddenly. Therefore, these effects can influence on the seismic cycle model that considers the increase in fluid pressure.

研究分野：岩石物性

キーワード：焼結 地震 透水性 断層

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水の摩擦特性は岩石の摩擦特性と同様に速度依存性と時間依存性があり、岩石の摩擦構成則で記述できる (Schulson and Fortt, 2012)。しかし、最近 Scourfield et al. (2015) は、比較的速い速度 (0.01m/s) で 2 つの氷のプレートを滑らせて、しばらく静置して再び氷を滑らせると、氷は 10 を超える非常に高い摩擦係数を示した (岩石の摩擦係数は平均 0.8)。これは氷が摩擦発熱により氷表面が融点に近い温度に到達して、焼結した影響だと考えられる (前野, 2004)。セラミックスの世界でも、『**焼結**』(微細粉末粒子が融点の 2/3 程度もしくはそれ以上の高温加熱により凝集・緻密化し、強度が上がる現象) という現象が知られているが、セラミックスと同じ原料である粘土・アルミナ・ケイ酸塩鉱物から構成される断層物質もまた、地震時に焼結現象が生じる可能性が高い。

断層焼結の研究例はとにかく少ない。古くは、野島地震断層物質を 1 軸圧密焼結実験により強度変化を観察した研究 (Enomoto et al., 2001) がある。また、1999 年台湾集集地震断層のすべり面に摩擦溶融物質 (シュードタキライト) とは異なる黒色物質の形成が報告されていたが、最近になって焼結の痕跡と結論づけられた (Hirono et al., 2006, 2014)。しかし、焼結過程が断層の岩石物理的性質と地震活動に与える影響を定量的に評価されることは無かった。2000 年代には高速摩擦試験装置の開発により、地震の化石とよばれるシュードタキライト (摩擦発熱により溶融・急冷した断層岩) の再現と摩擦力の定量評価に成功した (Hirose and Shimamoto, 2005)。以後、断層岩の高速すべり挙動に注目が集まり、多くの研究者は様々な岩石の高速すべり挙動の評価に邁進し、とりわけ高速すべりに伴い断層の急激な強度弱化が発生することが明らかとなった (Di toro et al., 2012)。また、断層内の間隙流体圧変動も急激な強度弱化へ寄与することから、応募者は、地震時の流体圧変動を支配する透水性変動を測定し、透水性の上昇・低下のメカニズムと摩擦係数との関係を考察した (Tanikawa et al., 2011, 2014)。

しかしその一方で、地震サイクル過程を理解する上で重要となる**地震運動後の断層岩の強度回復過程**について、摩擦焼結・摩擦溶融が発生する高速すべり・高温領域を対象とした研究例はない。また、断層焼結に伴う断層の水理学的性質の変化により、断層帯内外の流体圧変動・流体循環への影響が期待されるが、地震断層焼結と水理学的性質の変化を評価した例はない。

2. 研究の目的

地震時に発生する「断層焼結」は地震直後に断層の急激な強度回復を促し、地震サイクル過程に大きな影響を与えることが期待されるが、その実態は明らかではない。そこで、内陸地震断層と沈み込み帯プレート境界断層を対象として、地震にともなう「断層焼結」の物理素過程を理解し、地震サイクル機構への影響を評価する。断層焼結による断層面の「強度」「空隙率」「透水性」の変化を定量的に評価し、地震すべり後の断層の強度回復と流体圧変化への影響を明らかにする。天然断層と実験模擬断層の微細組織構造・結晶構造の比較を通して断層焼結の証拠・基準を明確にする。天然断層の分析から、地震性すべり挙動 (すべり履歴・速度・変位) の評価方法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 剪断変形に伴う断層面の「強度」「空隙率」「透水性」の変化を定量的に評価するために、流体を制御した環境下での摩擦実験により「摩擦係数_μ」「空隙率_ε」「透水係数_κ」を同時に測定できる実験システムの開発を行った。

(2) 開発した試験機を用いて、低速から高速のすべり速度で、かつ長いすべり変位量 (~1m) の剪断変形を模擬断層試料 (花崗岩とドレライト) に与えた際の透水係数と摩擦係数の変化を測定した。なお間隙流体として純水を用いて、垂直荷重は 2 MPa 与えた。

剪断変形中、および前後の断層を流れる水の流れやすさ (透水係数) を測定し、水の流れやすさに対するすべり速度、岩石の種類、摩擦係数、表面の凹凸特性の関係を評価した。実験試料は外径 40mm、内径 15mm の円筒形に加工した花崗岩とドレライトを用いた。また、一定速度で 1m 滑らせて、その後 20 分間の変化を計測する実験と、速度を 2~5 倍急変させる実験を行った。透水係数は岩石中を流れる流体差圧を一定に制御して、試料から排水される流量をもとに測定した。また、すべり面の凹凸測定は共焦点レーザー顕微鏡を用いた。

(3) 25mm 直径のドレライトと 0.2mm 径以下に粉碎したドレライトの粉末を用意した。粉末を円柱試料に挟んだ試料と挟まない試料を準備した。この試料を 800-1200 に予備加熱した電気炉へ設置した。加熱保持は、試料に埋め込んだ K 熱電対が各試験温度へ到達したのを確認した後、1 分間保持した。

4. 研究成果

(1) 回転式リング剪断摩擦試験装置をベースとして摩擦透水システムの開発を行った (図 1)。このシステムにより低速 (0.1 mm/s) から高速 (1 m/s) の範囲で試料に水が飽和した状態で、かつ、高速回転時でさえも水が外部に漏洩することなく透水係数を連続測定することができた。耐圧型・高応答性の流量計とレーザー変位計を用いることにより、透水係数と空隙率の変化をより精度よく測定することができた。

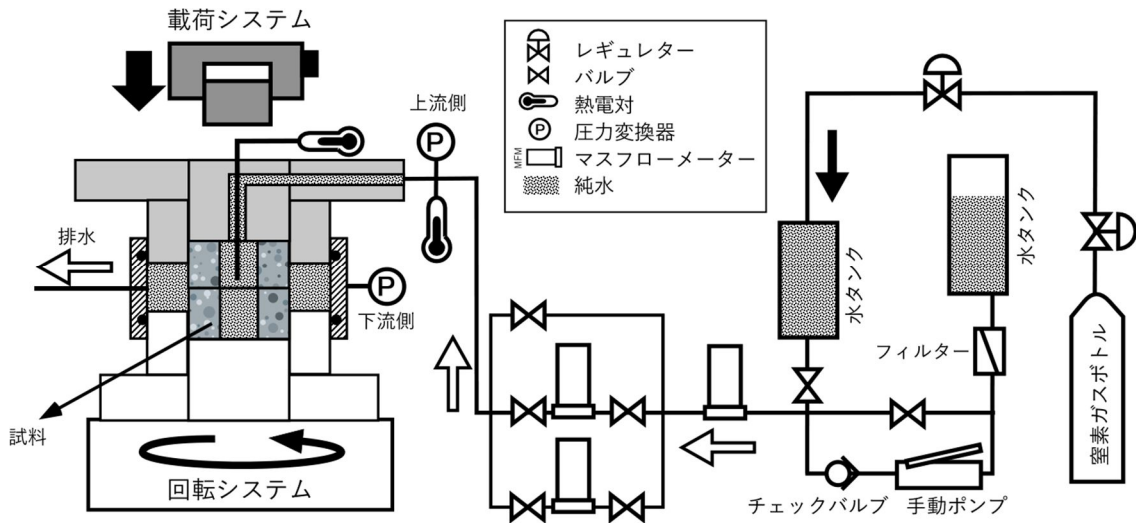


図1 .本研究で開発した摩擦透水システム .流量測定範囲の異なる流量計(マスフローメーター)を選択することで幅広い透水係数の測定を可能にする。

(2) いずれのすべり速度においても、すべり開始と同時に透水係数は急激に増加して、すぐに安定した値を示した。すべりが止まると透水係数は徐々に低下し、10分ほどで一定値になった(図2)。低速すべり実験では、透水係数はすべる前とほぼ同じ値まで回復し、高速すべり実験では、滑る前よりも透水係数が低下する傾向が認められた。摩擦係数は、速度の増加とともに低下する傾向が認められた(図3)。速度ステップ変化実験も一定すべり速度実験と同様に正のすべり速度依存性を示した。透水係数と摩擦係数のすべり速度依存性は、いずれも摩擦発熱に伴う間隙水圧の増加と熱膨張による水理学的開口幅の変動に起因しているものと考えられる。また、すべり後のゆっくりとした透水係数の回復過程は、摩擦発熱に伴う間隙水の粘性率の変化によるものと考えられる。花崗岩はドレライトに比べて低い動的透水係数と摩擦係数を示したが、石英含有量の違いを反映していると考えられる。石英は他の鉱物粒子と比較して強度が高く、剪断すべり時に他の鉱物粒子を摩滅するため、より平滑なすべり面を形成し開口幅と摩擦係数を低下させたと考えられる。

本研究結果は、透水係数の変動がゆっくりすべりから地震性高速破壊までの多様な地震のプロセスに影響を与えることを示唆している。地震性すべりに伴い断層の透水性が顕著に増加し、間隙水圧増加に伴う強度低下を押さえる働きをする。一方、ゆっくりすべりはわずかだけ透水係数の増加もたらすことから、過度な間隙水圧の減少は期待できないため、鉱物脈生成および地震サイクルモデルに影響を与える。

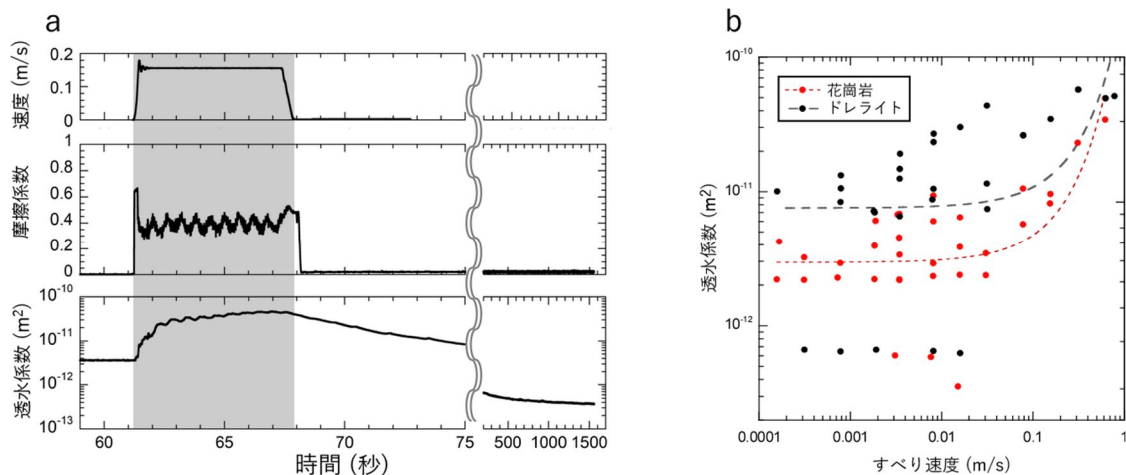


図2 .(a)すべり速度一定(0.16 m/s)で1 m滑らせたときの摩擦係数と透水係数の変化の例(b)すべり変形中の透水係数の平均値とすべり速度の関係

(3) 800 および 1000 では融着・焼結は見受けられず、上下の試料が分離した。1200 になると、融着・焼結が確認され、上下の試料が接着していた。接着した試料はいずれも試料表面から液相が滲み出ていたことから、以上の結果より、受領した岩石ブロックは 1200 付近から液を介した融着・焼結が始まると推定される。



図3．急速加熱実験前後の試料の写真

以上の結果を踏まえると、間隙流体が飽和した地下環境下では高速すべりに伴う断層焼結は発生しづらく、一方、乾燥条件下でも岩石の融点に近い温度まで上昇しないと焼結が発生しづらいことがわかった。また、今回、透水係数の地震時のすべり変形に伴う変動が焼結現象と同じように断層の強度回復過程および地震サイクルプロセスへ影響することがわかった。

<引用文献>

- Schulson EM, Fortt AL. 2012 Friction of ice on ice. *J. Geophys. Res.* 117.(doi:10.1029/2012JB009219)
- Scourfield S, Sammonds P, Lishman B, Marchenko A (eds). 2015 The effect of sea ice rubble in ice-ice sliding. In 23rd Int. Conf. on Port and Oceans Engineering under Arctic Conditions (POAC'15), 2015 June 14–18, Trondheim, Norway. Red Hook, NY: Curran & Associates.
- Maeno, N., Arakawa, M., 2003. Adhesion shear theory of ice friction at low sliding velocities, combined with ice sintering. *J. Appl. Phys.* 95, 134–139. <https://doi.org/10.1063/1.1633654>
- Enomoto, Y., Asuke, F., Zheng, Z., Ishigaki, H., 2001 Hardened foliated fault gouge from the Nojima fault zone at Hirabayashi: evidence for earthquake lightning accompanying the 1995 Kobe earthquake?, *The Island Arc*, **10**, 447–456
- Hirono, T., Ikehara, M., Otsuki, K., Mishima, T., Sakaguchi, M., Soh, W., Omori, M., Lin, W., Yeh, E.-C., Tanikawa, W., Wang, C.-Y., 2006. Evidence of frictional melting from disk-shaped black material, discovered within the Taiwan Chelungpu fault system. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL027329>
- Mineral assemblage anomalies in the slip zone of the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: Ultrafine particles preserved only in the latest slip zone, 1. Hirono, T., Kameda, J., Kanda, H., Tanikawa, W., and Ishikawa, T., *Geophysical Research Letters*, 2014年03月, 学術論文
- Hirose, T., Shimamoto, T., 2005. Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110, n/a--n/a. <https://doi.org/10.1029/2004JB003207>
- Di Toro, G., Han, R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M., Shimamoto, T., 2011. Fault lubrication during earthquakes. *Nature* 471, 494–498.
- Tanikawa, W., Mukoyoshi, H., Tadai, O., 2012. Experimental investigation of the influence of slip velocity and temperature on permeability during and after high-velocity fault slip. *J. Struct. Geol.* 38, 90–101. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2011.08.013>
- Tanikawa, W., Tadai, O., Mukoyoshi, H., 2014. Permeability changes in simulated granite faults during and after frictional sliding. *Geofluids* 14, 481–494. <https://doi.org/10.1111/gfl.12091>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanikawa Wataru, Tadaï Osamu	4. 巻 27
2. 論文標題 Data Report for quantitative analysis of mineral composition using powdered X-ray diffraction method and RockJock program	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JAMSTEC Report of Research and Development	6. 最初と最後の頁 57～67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5918/jamstecr.27.57	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 Tanikawa Wataru, Tadaï Osamu, Morono Yuki, Hinrichs Kai-Uwe, Inagaki Fumio	4. 巻 5
2. 論文標題 Geophysical constraints on microbial biomass in subseafloor sediments and coal seams down to 2.5 km off Shimokita Peninsula, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1186/s40645-018-0217-2	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Tanikawa Wataru, Hirose Takehiro, Hamada Yohei, Gupta Lallan P., Ahagon Naokazu, Masaki Yuka, Abe Natsue, Wu Hung Y., Sugihara Takamitsu, Nomura Shun, Lin Weiren, Kinoshita Masataka, Yamamoto Yuzuru, Yamada Yasuhiro	4. 巻 108
2. 論文標題 Porosity, permeability, and grain size of sediment cores from gas-hydrate-bearing sites and their implication for overpressure in shallow argillaceous formations: Results from the national gas hydrate program expedition 02, Krishna-Godavari Basin, India	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine and Petroleum Geology	6. 最初と最後の頁 332～347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.014	査読の有無 有
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 Tanikawa Wataru, Uramoto Go-ichiro, Hamada Yohei, Murayama Masafumi, Yamamoto Yuhji, Hirose Takehiro, Tadaï Osamu, Tanaka Kouki, Ozaki Hiromasa, Yoneda Minoru, Tokuyama Hidekazu	4. 巻 415
2. 論文標題 Provenance of submerged stone pillars in an earthquake and typhoon hazard zone, coastal Tosashimizu, southwest Japan: A multidisciplinary geological approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine Geology	6. 最初と最後の頁 105962～105962
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105962	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Wataru Tanikawa, Takehiro Hirose, Yohei Hamada, Lallan P. Gupta, Naokazu Ahagon, Yuka Masaki, Natsue Abe, Hung Y. Wu, Takamitsu Sugihara, Shun Nomura, Weiren Lin, Masataka Kinoshita, Yuzuru Yamamoto, Yasuhiro Yamada
2. 発表標題 Porosity, permeability, and grain size of sediment cores from gas-hydrate-bearing sites and their implication for overpressure in shallow formations: Results from NGHP-02, Krishna-Godavari Basin, India
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷川 亘、廣瀬 丈洋、濱田 洋平、Gupta Lallan、正木 裕香、林 為人、阿波根 直一、阿部 なつ江、呉 泓昱、杉原 孝充、野村 瞬、木下 正高、山田 泰広、NGHP Expedition 02 JAMSTEC Science Team
2. 発表標題 インド沿岸域ガスハイドレート層の高間隙率が示唆する高間隙水圧の発達
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷川 亘
2. 発表標題 中速すべり領域の断層運動に伴う模擬断層の透水性変動
3. 学会等名 JpGU-AGU 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Tanikawa
2. 発表標題 Dynamic permeability of simulated fault induced by intermediate velocity friction test
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷川 亘
2. 発表標題 Permeability changes of simulated low permeable fault rocks induced by intermediate velocity friction test
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 Wataru Taniakwa
2. 発表標題 Fault permeability changes by slow to fast frictional sliding
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019
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