

令和元年6月4日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02147

研究課題名(和文)粘土鉱物の摩擦特性に対する湿度・水溶液の効果

研究課題名(英文)Effect of humidity and fluid on frictional property of clay minerals

研究代表者

片山 郁夫 (Katayama, Ikuo)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：10448235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,300,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込みプレート境界での固着度の違いは物質による摩擦特性の違いにあるとの仮説をたて、粘土鉱物の摩擦に対する相対湿度の効果を検証する実験を行った。実験では湿度制御装置を摩擦試験機に導入し、粘土鉱物の摩擦係数が相対湿度の上昇によって系統的に増加することを明らかにした。また、粘土鉱物の水和構造に関する理論計算と実験結果を照合し、粘土鉱物の摩擦特性に関するミクロな物理モデルを提案した。これらの成果は、プレート境界面での固着度の違いは粘土鉱物の存在に加え、水の存在状態にも依存することを示唆しており、プレート境界面での物質や水の状態を調べることが地震発生プロセスを理解する上で重要であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震発生帯であるプレート境界面には沈み込むプレートから水が供給され、そのような間隙流体が有効圧を下げるなどして地震発生と関連していると考えられている。それに加えて、水は岩石と反応し粘土鉱物を生成するが、粘土鉱物は他の鉱物より摩擦係数が低いなどの特異な性質をもつ。本研究では、粘土鉱物の摩擦のミクロなプロセスを理解することで、沈み込みプレート境界で起きる地震の発生プロセスやその不均質性を理解することを試みた。

研究成果の概要(英文)：To investigate the effect of relative humidity (hydration state) and interlayer cation on frictional strength of clay minerals, we developed the humidity control system in biaxial friction testing machine. Our experimental results show that frictional strengths of both Na- and Ca-montmorillonite decrease systematically with increasing relative humidity, and the frictional strength of Na-montmorillonite are higher than that of Ca-montmorillonite at a given relative humidity. We also calculated the potential energy roughness of mica, which depends on the normal stress and sliding direction. The inferred molecular friction quantitatively explains experimentally observed macroscopic friction of mica. These results reveal frictional strength of clay minerals sensitive to hydration state and interlayer structures, suggesting that fault strengths containing these clay minerals depend on these physical and chemical environments.

研究分野：地球惑星物理学，岩石レオロジー

キーワード：地震発生プロセス プレート境界 摩擦特性 粘土鉱物 水和状態

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

1. 研究開始当初の背景

沈み込みプレート境界面には、プレート間同士がしっかり固着している領域(アスペリティ)と普段から安定的にすべる領域(非アスペリティ)が分布し、プレート間地震はおもに前者の固着域で発生する。では、プレート境界面での固着度の違いを生み出す原因はなんだろうか。沈み込み帯においてプレート間地震を発生させるアスペリティは空間的に不均質に分布するため、温度圧力などによる鉱物の相転移を想定することは難しく、これまでは海山などの沈み込みによるプレート面での凸凹が有力視されている(例えば Cloos 1992)。しかし、海山などの沈み込みが見られない地域や陸源性の堆積物によってプレート境界面が平滑にされている地域にも固着度の違いがみられ、その実体についてはいまだ不明な点が多い。その一方、最近のプレート境界掘削プロジェクト(JFAST など)では、プレート境界断層に粘土鉱物が広く認められ、粘土鉱物とプレート間地震の関連性が注目されていた(例えば Ujiie et al. 2014)。

2. 研究の目的

プレート境界など断層沿いに存在する流体は、岩石との変質反応によって粘土鉱物を形成する。そのような粘土鉱物は、他のケイ酸塩鉱物よりも摩擦係数が低いなど、特異な摩擦特性を持つことで知られている(Moore and Lockner 2004)。また、粘土鉱物は水の存在により物理化学性質が著しく変化するため、摩擦特性にもその影響がみられる。そこで、私たちはプレート境界面での固着度の違いは粘土鉱物の生成と分布にコントロールされるとの仮説をたて、本申請課題ではとくに粘土鉱物の摩擦特性に対する湿度と水溶液の効果を検証する実験ならびに理論計算を行い、上記の仮説を検証することを試みた。

3. 研究の方法

粘土鉱物の摩擦特性に対する湿度の効果を検証するため、湿度制御装置を二軸摩擦試験機に新たに導入した。このシステムは、内部に試料をセットする圧力容器ユニットと、圧力容器内に蒸気を送り込む蒸気生成ユニットの2つのユニットから成る。圧力容器内の温度と圧力容器に送り込む蒸気の温度を独立に制御することにより、飽和水蒸気圧を独立に制御し、試料周りの相対湿度を制御した。本研究では、相対湿度(RH)が10・30・50・70・90%の条件での摩擦実験を行った。なお、試料に関してはイオン交換して調整したNaモンモリロナイトとCaモンモリロナイトを主に用いた。また、理論計算については、密度汎関数理論にもとづく第一原理電子状態計算により鉱物界面での静電エネルギーを求め摩擦係数を推定した。

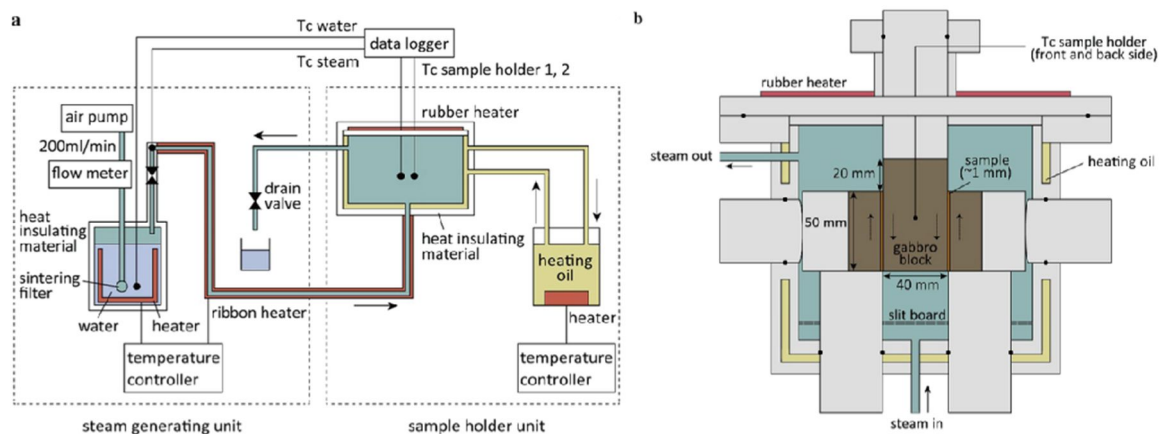


図1 摩擦試験機への湿度制御装置の導入 (Tetsuka et al. 2018)

4. 研究成果

NaモンモリロナイトとCaモンモリロナイトともに、相対湿度が増加するのに伴って摩擦係数が減少する傾向を示した。RH 10%ではNaモンモリロナイトが0.33、Caモンモリロナイトが0.25なのに対して、RH 90%ではNaモンモリロナイトが0.062、Caモンモリロナイトが0.037であった。また、同じ湿度では常に、CaモンモリロナイトよりもNaモンモリロナイトのほうが高い摩擦係数を示した。CaモンモリロナイトがNaモンモリロナイトよりも高い摩擦強度を示す傾向は、Behnsen and Faulkner (2013)と同様の傾向である。これは、水和エネルギーが小さいほど層間の距離が近く結合力が強まるため、Ca²⁺よりも水和エネルギーの小さいNa⁺を層間にもつNaモンモリロナイトのほうが高い摩擦強度を示すと考えられる。湿度の増加に伴って摩擦係数が下がる傾向は、水和状態を事前に变化させて行った先行研究とほぼ整合的である。水和に伴う摩擦係数の低下を説明する主なメカニズムとして、層間の膨潤に原因を求める説と粒子間の膨潤に原因を求める説がある。常圧でのXRDの結果によれば膨潤による層間距離の変化は湿度の増加に対

して不連続に起きている (Morodome and Kawamura, 2009) のに対して、層間や粒子間の含水量を含めたモンモリロナイト全体での含水量は、湿度の変化に対して連続的に増加している。つまり、粒子間の膨潤は湿度の増加に伴い連続的に生じる。本研究で得られた摩擦係数の値は湿度の増加に対して連続的に減少していることから、湿度の増加に伴うモンモリロナイトの摩擦係数の減少は、主に粒子間の膨潤に起因するものと解釈できる。本研究の結果から、水和状態と層間陽イオンの影響が摩擦強度に大きな影響を与えることが分かる。特に、CaモンモリロナイトよりもNaモンモリロナイトの摩擦強度が高いという結果が完全に水和した状態だけでなく (Behnsen and Faulkner, 2013) 乾燥状態のモンモリロナイトにおいても得られたことは、地下深部での摩擦強度を考える上でも重要であると考えられる。

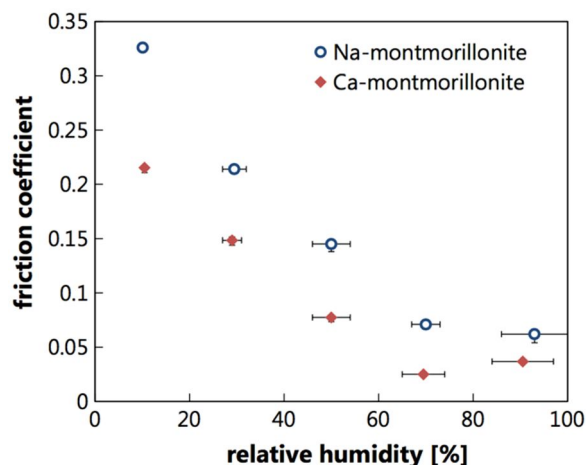


図2 モンモリロナイトの摩擦係数に対する相対湿度の効果 (Tetsuka et al. 2018)

理論計算については、結晶表面の作るポテンシャルエネルギー面を登るために必要な力を異なるパスごとに計算し、粘土鉱物層間のせん断応力を算出した。ポテンシャルエネルギーは分子状態の配置に影響を受けるため、結晶方位によって違うが、マクロな摩擦実験との比較のため、平均値を採用した。また、摩擦係数を求めるには、真実接触面積を求める必要があるため、ナノインデンテーション試験から粘土鉱物のインデンテーション硬さを計測した。現在のところ、結晶表面の構造がシンプルな白雲母を用いた計算を行ったところ、そのような理論積算からとまるミクロな摩擦係数は実験室でもとまるミリスケールのマクロな摩擦係数とほぼ一致した (Sakuma et al. 2018)。このことは、分子間力がマクロな摩擦力を支配する主たる要因であることを意味しており、今後は他の粘土鉱物や層状珪酸塩鉱物にも適応する予定である。

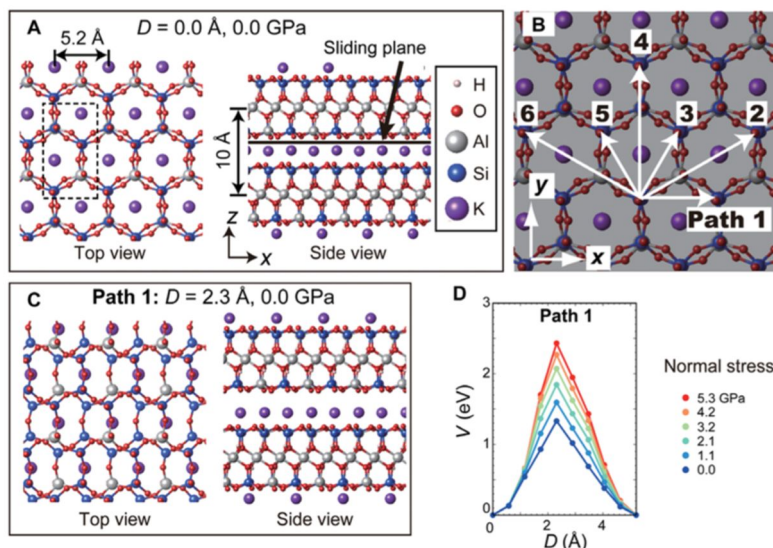


図3 白雲母の分子構造とすべり方向によるポテンシャルエネルギー (Sakuma et al. 2018)

上記のように、湿度を制御した摩擦実験ならびに理論計算により、粘土鉱物の摩擦を支配する因子がほぼわかりつつある。今後はモンモリロナイトや白雲母に加え、他の粘土鉱物などにも応用し、同じメカニズムが適応できるかどうかを検証する。また、一方でこれらの成果がプレート境界で起きる地震やその分布へ与える影響も検討していかなくてはならない。プレート境界面には沈み込むプレートから水が供給されるが、流体の移動はプレート境界面の形状や物質にも左右されるため、陸域の河川と同じように流体の分布は不均質であると予想される。水がプレート境界面を移動すると加水反応が進み、その周囲では粘土鉱物などの変質鉱物が形成され、結果としてプレート境界面において物質の不均質が生じる。今回の成果によると、同じ粘土鉱物であっても、乾燥した状態と水に飽和した環境では摩擦力が顕著に異なるため、粘土鉱物の分布だけでなく水の状態や分布もプレート間での固着度に影響していると予想される。また、そのような粘土鉱物や水の不均質な分布をどのように捉えるかも今後の課題といえる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

- (1) **Sakuma, H., Kawai, K., Katayama, I.** and Suehara, S. 2018. What is the origin of macroscopic friction? *Science Advances*, 4, doi:10.1126/sciadv.aav2268. (査読有)
- (2) Zaima, K., and **Katayama, I.** 2018. Evolution of elastic velocities and amplitudes during triaxial deformation of Aji granite under dry and water-saturated conditions. *Journal of Geophysical Research*, 123, 9601–9614, doi:10.1029/2018JB016377. (査読有)
- (3) Kawaguchi, K., and **Katayama, I.** 2018. Evolution of permeability and fluid pathway in the uppermost oceanic crust inferred from experimental measurements on basalt cores. *Journal of Petrological and Mineralogical Science*, 113, 268–272, doi.org/10.2465/jmps.180411. (査読有)
- (4) **Katayama, I.**, Nicolas, A. and Schubnel, A. 2018. Fluid-induced fracturing of initially damaged granites triggered by pore pressure buildup. *Geophysical Research Letters*, 45, 7488–7495, doi.org/10.1029/2018GL077815. (査読有)
- (5) Tetsuka, H., **Katayama, I., Sakuma, H.** and Tamura, K. 2018. Effects of humidity and interlayer cations on the frictional strength of montmorillonite. *Earth, Planet and Space*, 70, doi.org/10.1186/s40623-018-0829-1. (査読有)
- (6) **Sakuma, H.**, Tachi, Y., Yotsuji, K., Suehara, S., Arima, T., Fujii, N., Kawamura, K., and Honda, A. 2017. Stability of montmorillonite edge faces studied using first-principles calculations. *Clays and Clay Minerals*, 65, 252–272. doi: 10.1346/CCMN.2017.064062 (査読有)
- (7) Hatakeyama, K., **Katayama, I.**, Hirauchi, K. and Michibayashi, K. 2017. Mantle hydration along outer-rise faults inferred from serpentinite permeability. *Scientific Reports*, 7, doi:10.1038/s41598-017-14309. (査読有)
- (8) **片山郁夫**, 東真太郎 (2017) 岩石の変形特性に対する水の効果と大陸・海洋プレートのレオロジー構造, *地質学雑誌*, 123, 365-377. (査読有)
- (9) Azuma, S. and **Katayama, I.** 2017. Evolution of rheological structure of Mars. *Earth, Planet and Space*, 29, doi:10.1186/s40623-016-0593-z. (査読有)
- (10) **片山郁夫** (2016) 粘土鉱物の摩擦特性と沈み込みプレート境界地震の関連性, *粘土科学*, 3, 114-119. (査読無)
- (11) **片山郁夫** (2016) 沈み込み帯での水の循環様式, *火山*, 61, 69-77. (査読有)
- (12) **佐久間博** (2016) 断層に存在する雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数: 粒子形状と水の影響 *粘土科学*, 54, 120-125. (査読無)
- (13) **Sakuma, H.** 2015. Interlayer bonding energy of Mg-chlorite: A density functional theory study. *Journal of Computer Chemistry, Japan*, 14, 152-154. doi: 10.2477/jccj.2015-0008 (査読有)
- (14) **Katayama, I.**, Kubo, T., Sakuma, H. and Kawai, K. 2015. Can clay minerals account for the behavior of non-asperity on the subducting plate interface? *Progress in Earth and Planetary Science*, 2, doi:10.1186/s40645-015-0063-4. (査読有)
- (15) **Kawai, K., Sakuma, H., Katayama, I.** and Tamura, K. 2015. Frictional characteristics of single and polycrystalline muscovite and influence of fluid chemistry. *Journal of Geophysical Research*, 120, doi:10.1002/2015JB012286. (査読有)
- (16) Kubo, T. and **Katayama, I.** 2015. Effect of temperature on the frictional behavior of smectite and illite. *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, 110, 293-299. (査読有)

〔学会発表〕(計 20 件)

- (1) H. Okuda, **K. Kawai, H. Sakuma, I. Katayama**, First-Principles Investigation for Frictional Characteristics of Brucite and its Application for Macroscopic Frictional Characteristics of Sheet-Structure Minerals. International symposium of Crustal Dynamics (Uji, Japan), 2019/3/2
- (2) **H. Sakuma, K. Kawai, I. Katayama**, S. Suehara, The Origin of Macroscopic Friction between Single Crystal Mica Surfaces. International symposium of Crustal Dynamics (Uji, Japan), 2019/3/2
- (3) **片山郁夫** 岩石のミクロな破壊から地震のマクロな破壊まで 高圧討論会 (岡山), 年月: 2018/11/27 (招待講演)
- (4) **佐久間博, 河合研志, 片山郁夫** モンモリロナイトの摩擦強度: 配向度と吸着水の影響 2018 年地球惑星科学連合大会 (幕張), 年月: 2018/5/20
- (5) 奥田花也, **片山郁夫, 佐久間博, 河合研志** brucite ナノ粒子の velocity-weakening への寄与 2018 年地球惑星科学連合大会 (幕張), 年月: 2018/5/20
- (6) Noda, Y., **Katayama, I.** Frictional properties of hydrated clay minerals and its application to tsunami earthquake. Joint Workshop on Slow Earthquake (Matsuyama, Japan), 2017/9/19
- (7) Kubo, T., Namiki A., **Katayama, I.** Monitoring of elastic wave velocity and amplitude for the cracked granite during shear deformation. Joint Workshop on Slow Earthquake (Matsuyama, Japan), 2017/9/19
- (8) 野田雄太, **片山郁夫** 水和した粘土鉱物の摩擦特性の解析と津波地震への応用 2017 年地球惑星科学連合大会 (幕張), 年月: 2017/5/24
- (9) **佐久間博, 河合研志, 片山郁夫** モンモリロナイトの定方位度が摩擦強度に与える影響 2017 年地球惑星科学連合大会 (幕張), 年月: 2017/5/22

- (10) 手塚寛、片山郁夫、佐久間博、田村堅志 モンモリロナイトの摩擦強度における湿度及び層間陽イオンの影響 2017年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2017/5/22
- (11) T. Kubo, I. Katayama, Friction behavior for clay minerals during dehydration process: implication for unstable friction at shallow portion along subducting plate. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2016/12/13
- (12) H. Tetsuka, I. Katayama, H. Sakuma, K. Tamura, Effect of humidity and interlayer cation on frictional strength of montmorillonite. American Geophysical Union, Fall Meeting (Sanfrancisco, USA), 2016/12/13
- (13) I. Katayama, Frictional properties of clay minerals and its relation to slow earthquakes at subduction zone. Joint Workshop on Slow Earthquake, (Tokyo, Japan), 2016/9/14
- (14) I. Katayama, Frictional properties of clay minerals and implication to subduction zone seismicity. Gordon Research Conference, Rock Deformation, (Andover, USA), 2016/8/22 **Invited**
- (15) 久保達郎、片山郁夫 粘土鉱物の脱水反応による不安定すべりの実験的検証 2016年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2016/5/26
- (16) 佐久間博、河合研志、片山郁夫 白雲母劈開面の摩擦特性と摩擦メカニズムの考察 2016年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2016/5/23
- (17) 片山郁夫 粘土鉱物の摩擦特性と沈み込みプレート境界地震の関連性 粘土鉱物討論会(山口), 年月: 2015/9/3 (招待講演)
- (18) 片山郁夫 粘土鉱物の摩擦ヒーリング特性と沈み込みプレート境界での固着度 日本地質学会(長野), 年月: 2015/9/11 (招待講演)
- (19) 片山郁夫 アウターライズ断層での海洋リソスフェアの蛇紋岩化作用 2015年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2015/5/25
- (20) 手塚寛、片山郁夫 モンモリロナイトの摩擦ヒーリング効果における湿度の影響 2015年地球惑星科学連合大会(幕張), 年月: 2015/5/24

〔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

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/~geoenvi/link/katayamaG.html>

報道関連情報

- (1) 科学新聞「粘土鉱物の摩擦の起源は原子間に働く静電的な力」(2019/1/18)
- (2) ニュートン「6億年後の海は干上がっている!？」(2018/2/7)
- (3) 朝日新聞「6億年後 海消える?」(2018/2/8)
- (4) 日刊工業新聞「海水, 年23億トン減少, 岩盤含水モデル構築」(2017/10/25)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 佐久間 博

ローマ字氏名: Hiroshi Sakuma

所属研究機関名: 物質・材料研究機構

部局名: 機能性材料研究拠点 機能性粘土材料グループ

職名: 主任研究員

研究者番号(8桁): 20400426

研究分担者氏名: 河合 研志

ローマ字氏名: Kenji Kawai

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 理学系研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 20432007

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。