

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02007

研究課題名(和文) ナノスケール物質解析による断層の高速摩擦弱化機構の解明

研究課題名(英文) Experimental study of the high-velocity weakening of fault in quartz and its nano-scale deformation structures

研究代表者

堤 昭人 (Tsutsumi, Akito)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90324607

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)：人工水晶を用いた摩擦実験を、試料近傍の相対湿度条件を0-80%RHの範囲で制御した条件でおこない、定常摩擦係数の値や待機時間に依存した摩擦強度回復の性質が湿度条件に依存していることが明らかになった。また、石英試料中の極めて微量な含水量の差が乾燥状態での定常摩擦係数に影響を及ぼしている可能性も示された。微小押し込み試験機を用いた実験結果は、接触投影面積の保持時間増大による変化率が相対湿度に依存しないことを示している。断層表面に形成されたナノスケール積層構造をなす磨耗物表面の水架橋に起因した吸着力が摩擦に影響を及ぼしている可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

岩石の摩擦において、すべり開始前に摩擦面が押しつけられている時間が増加するほど摩擦が大きくなることが知られている。ヒーリングとも呼ばれるこの摩擦強度の時間的増大の性質は、地震時に低下した摩擦の回復過程のみならず、すべり時に摩擦強度が低下する性質を理解する上でも重要である。本研究では人工水晶を用いた実験を行い、断層表面に形成されたナノサイズの磨耗粒子表面に吸着した水が、摩擦の性質に大きく影響していることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We examined frictional properties of synthetic quartz at a constant normal stress of 1.5 MPa and at various slip velocities  $V$  of 0.005-105 mm/s under humidity conditions (0%-80%RH). It is revealed that the steady-state friction of quartz exhibits velocity-weakening behaviors at  $V > \sim 1$  mm/s, while steady-state values of friction at same slip velocity increase with humidity. Humidity dependence of frictional behavior of quartz was also observed in slide-hold-slide tests performed after slip-weakening of the samples at  $V = 105$  mm/s, in which amount of the frictional aging increases with humidity. Micro-structural observation of the fault zone under a TEM reveals that the fault-zone is composed of a number of stacked  $\sim 0.5$   $\mu\text{m}$ -thick ultra-thin layers of stacked amorphous silica grains. The observed humidity-dependent friction behavior may be resulted from the formation of capillary water bridges at asperity contacts between the ultrafine-sized amorphous silica grains.

研究分野：構造地質学

キーワード：岩石摩擦 石英岩 高速摩擦 速度弱化 摩擦ヒーリング

## 1. 研究開始当初の背景

断層すべりに伴い摩擦強度が低下する性質は、断層の不安定すべりを起こす要因となる。そのため、断層の摩擦強度弱化的機構を明らかにすることは、地震の発生過程や断層のすべり挙動をモデル化する上で極めて重要である。1990年代に、1 m/s 付近の高速条件で顕著な摩擦弱化的現象が見られることが実験的に明らかにされ(図1中の ), 摩擦の高速すべり特性を地震発生モデルに組み込むことの重要性が認識されるようになった。近年になり、石英質物質の摩擦について、より遅いすべり速度での弱化的挙動が明らかにされ(図1中の , Hayashi and Tsutsumi, 2020, Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004) さらに最近の我々の研究で、乾燥条件下での摩擦実験においては、石英質物質の摩擦挙動に、わずか 10 μm/s といった低速の条件において顕著な弱化的現象の現れることがわかってきた(図1中の , 堤, 2019)。このように、中～高速すべりにおいて岩石摩擦が示す多様な弱化的様子がわかりつつあるが、その全貌はいまだ未解明である。また比較的低速での弱化的機構は明らかになっておらず、地震発生物理学上の大きな課題となっている。

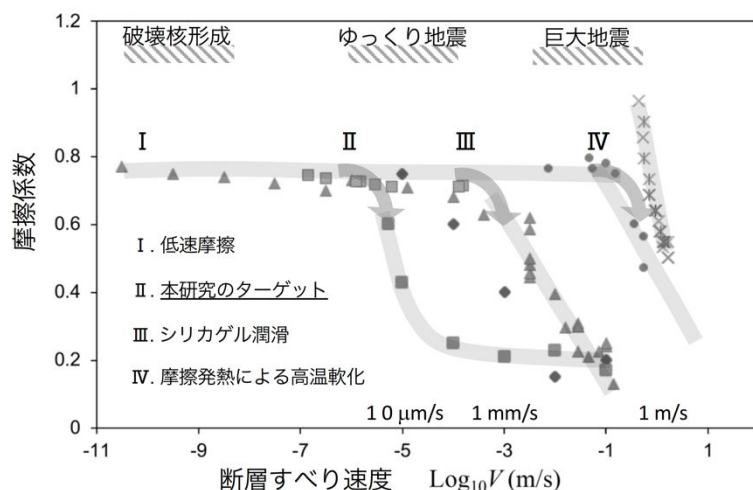


図1 様々な岩石の定常摩擦強度と断層すべり速度の関係

高速:  $v > \sim 0.1 \text{ m/s}$

中速:  $v > \sim 0.1 \text{ mm/s}$

## 2. 研究の目的

本研究では、(1) 石英質物質を用いた湿度条件制御条件下での摩擦実験により、幅広いすべり速度条件における摩擦強度の弱化的特性に及ぼす湿度の影響を解明し、(2) 摩擦面のナノスケール構造観察を実施することで変形構造の詳細を明らかにし、(3) これらの結果を統合することで、摩擦強度弱化的挙動の全貌と、挙動の湿度依存性発現の機構を解明することを目的として研究をすすめた。Si-セラミクスやDiamond-like carbon (DL), BNなど無機材料では、湿度条件の違いによる断層表面微小突起接触部の水架橋形成に起因する表面間引力や、界面吸着水と摩擦材料間の摩擦化学反応の過程が、摩耗物を介在する摩擦面の Quality を支配していることが良く知られている(Bocquet et al., 1998, Liu et al., 2014, Chen et al., 2018)。岩石摩擦の物理素過程理解を目的とした研究においても、環境湿度が、微細摩耗粒子形成過程と摩擦強度に及ぼす影響を評価することが不可欠である。

## 3. 研究の方法

本研究計画においては、珪質岩中に発達する断層ガウジの非晶質化・水和化の過程と、その変形プロセスが高速すべり時における強度弱化的過程に及ぼす効果を解明するために、主として人工水晶を用いた実験について以下の3つの項目について研究を実施した。

### (1) 摩擦特性解明のための湿度制御条件下での変形実験

人工水晶を用いた摩擦実験(垂直応力 1.5 MPa, すべり速度 0.005-105 mm/s)を、試料近傍の相対湿度条件を 0-80%RH の範囲で制御した条件下でおこない、人工水晶試料の定常摩擦係数の値に及ぼす相対湿度について調べた。

初年度に導入したナノインデント装置 (DUH-211S) を用いて、石英の微小領域変形に対する相対湿度の影響を調べた。人工水晶試料には a. の摩擦実験で使用したのと同じ水晶ブロックから切り出したものを利用した。圧子には、稜角 115° のベルコピッチ形ダイヤモンド圧子を用いた。実験の際、相対湿度条件を制御することのできる試料チャンバーを新たに設置し、実験中の試料近傍の相対湿度を一定に保持した。本研究では、特に 0-30%RH の低い相対湿度範囲において、設定試験力まで負荷を与え、一定時間の保持後に除荷を行う「圧子押し込み試験」を実施して、押し込み保持時間と変形量 (圧子接触投影面積) との関係性を調べた。

## (2) 摩擦面のナノスケール変形構造の解明 (プロダクト解析)

断層変形域の集束イオンビーム加工観察装置 (FIB-SEM) および TEM を利用した摩擦表面、摩擦生成物の切り出しと変形構造の観察をおこなった。FIB による観察用試料の切り出しの作業は、実験後の断層部を樹脂により固定し、断層面に直交する方向で作成した薄片上で行った。

石英中の水の含有量を二次イオン質量分析計 (SIMS) により測定・定量し、この結果と摩擦実験結果を比較することで、試料そのものの含水量が摩擦に及ぼす影響を検討することを試みた。SIMS を用いた水の定量では、133Cs+ のビームを利用し (加速電圧 14.5 KeV, 電流 10 nA, スポット径 40 μm) 二次イオン質量比 1H/30Si について標準試料物質 (玄武岩ガラス) を用いた校正を行うことで水の定量値を得た。

## 4. 研究成果

### (1) 摩擦特性解明のための湿度制御条件下での変形実験

#### 人工水晶を用いた摩擦実験

人工水晶を用いた摩擦実験 (垂直応力 1.5 MPa, すべり速度 0.005-105 mm/s) を、試料近傍の相対湿度条件を 0-80%RH の範囲で制御した条件でおこない、人工水晶試料の定常摩擦係数の値が相対湿度に大きく依存することが明らかになった (図 2 a)。また、すべり開始直前の摩擦係数に見られる待機時間に依存した強度回復の性質 (いわゆる  $\log(t)$  ヒーリング) が湿度条件に依存しており、乾燥条件では強度回復が生じないことも明らかになった (図 2 b)。

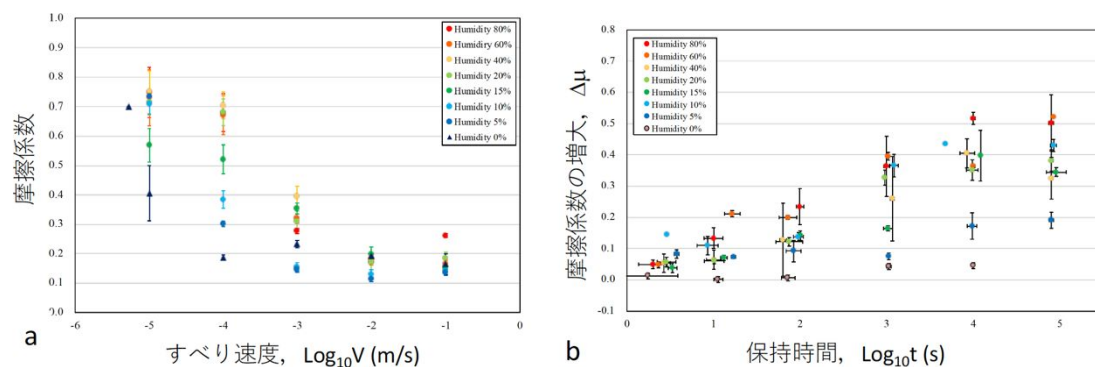


図2 人工水晶の摩擦に及ぼす湿度の影響。マークの色は湿度の違いを表す。暖色系の色ほど高湿度条件である。a. 一定すべり速度条件下での定常摩擦係数の速度依存性。b. すべり開始時の摩擦係数の保持期間依存性。

#### 石英を用いた微小領域押し込み試験

石英の微小領域変形に対する相対湿度の影響を調べた結果の概要を図 3 に示す。この実験により、(i) 接触投影面積の保持時間増大による変化率が、先行研究で報告されている値と同程度の値を示すこと、(ii) この面積変化率の値が、今回の実験条件においても相対湿度に依存しないことなど、連続合成測定手法を用いた動的測定結果を報告している先行研究 (Thom et al., 2018) の結果と同様の結果が得られた。一方で、人工水晶試料について、相対湿度が 0-30%RH の範囲での一定荷重下の圧子押し込み試験モードにおいて、最大荷重における負荷保持時間の経過と共

に、圧子押し込み深さのデータが不規則に変動する様子が認められる場合があり、温度変化に伴う装置剛性変化の影響が現れている可能性がある。この、水晶の微小領域押し込み実験データに関して、環境温度変化の影響を評価することを目的として、Liu et al., (2014)によって提案された高歪み速度载荷手法を取り入れることでその補正を試みたが、結果の改善は見られなかった。測定中の温度変化は $\pm 0.3$  以内に抑えられていることも考え合わせると、深さ出力の不規則変動は、温度以外の要素に起因する可能性があり、今後の課題となった。

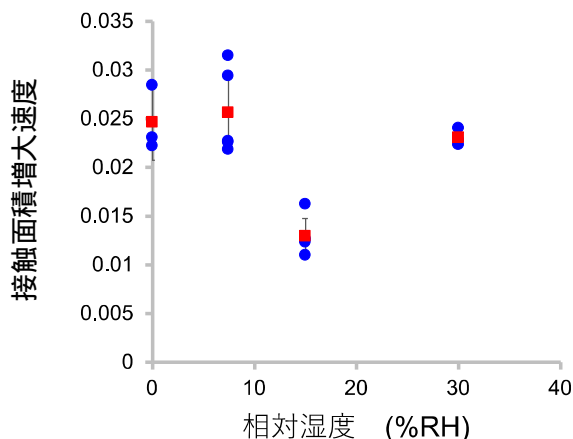


図3 ナノインデンテーション試験における圧子接触面積と相対湿度の関係

## (2) 摩擦面のナノスケール変形構造の解明(プロダクト解析)

### 断層表面構造のTEM観察

人工水晶を用いた摩擦実験後の摩擦面上に形成された断層物質の断面をFIBで切り出し、変形構造をTEMで観察することに成功した。これにより、断層のすべりとともに、静止摩擦係数の値から動摩擦係数の定常値へと摩擦が減少していく過程(すべり弱化)において、断層面上にはすでにガウジの薄層が形成されていることを見出した。

図4に、ナノスケールの摩耗物集合体で構成された代表的なガウジ薄層内部構造を示す。ここでは、垂直応力1.5 MPa、すべり速度 $V = 105$  mm/sで、すべり開始後0.9 mのすべり距離で実験を停止した状態の摩擦面を観察している。図に示すように、摩耗層の内部には、厚さ $< 200$  nmの薄層が幾重にも積み重なるナノスケール積層構造が発達すること、またこの積層構造の基質部はほぼ非晶質シリカから成り、稀に粒径 $d < 0.1$   $\mu\text{m}$ の石英粒子を含むことが明らかになった。

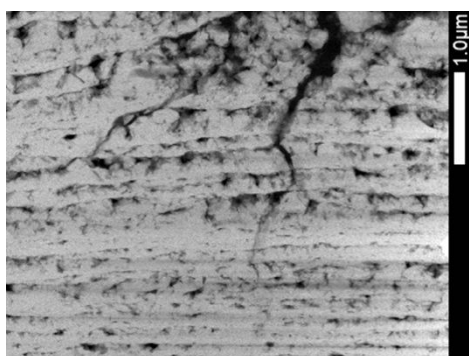


図4 断層ガウジ中のナノ積層構造  
スケールバーの長さ 1 ミクロン

### SIMSによる石英試料中の水の定量

今回の摩擦実験で用いた人工水晶試料と天然の単結晶石英(ブラジル水晶)についてそれぞれSIMSによる水含有量の定量を行った。その結果、人工水晶について $9.7 \pm 1.5$  ppm、ブラジル水晶について $17.9 \pm 6.2$  ppmの含水量の値が得られた。これらの水晶から作成した円柱状試料を用いて実施したすべり速度 $v = 100$   $\mu\text{m/s}$ での定常摩擦係数と水分量との関係を図5に示す。予察的ではあるが、極めて微量な含水量の違いが、水晶の定常摩擦係数の値に影響している可能性がある。今後、異なる水分量の水晶を準備してより詳細に検討する必要がある。



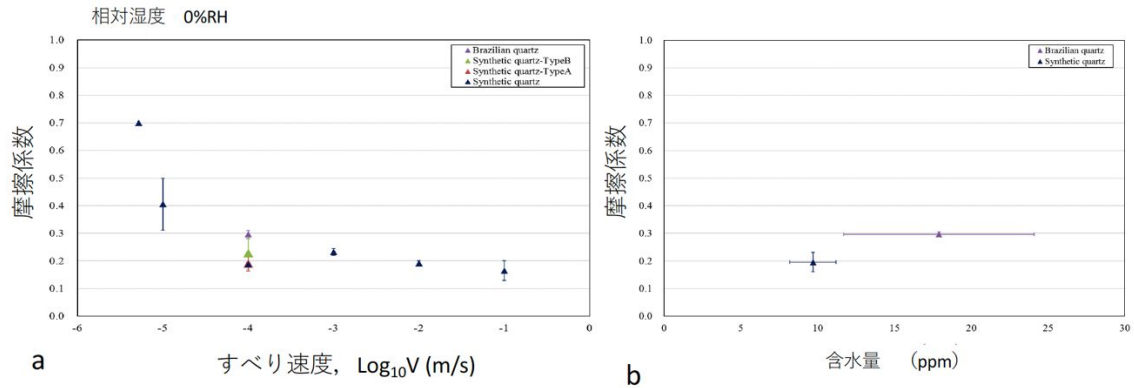


図5 乾燥条件下での人工水晶の摩擦特性におよぼす石英中の含水量の影響.  $v = 100 \mu\text{m/s}$  での定常摩擦係数の比較.

### (3) まとめ

石英質物質に特徴的にみられる定常摩擦係数の高速すべり条件での弱化挙動について、以下のことが明らかになった。

石英質物質の高速すべりにおいて、定常摩擦係数の値や待機時間に依存した摩擦強度回復（ヒーリング）の大きさは湿度条件に強く依存する。これらの摩擦の示す速度・時間依存性は、特に相対湿度が20%RHの範囲において顕著に現れる。

実験後の断層表面には微細な非晶質シリカガウジ粒子より構成されるナノスケール積層構造が形成している。定常摩擦係数の湿度依存性は、このナノスケール積層構造中の磨耗物表面に形成した水架橋に起因した吸着力によって説明することができる。

石英質物質の高速摩擦弱化特性は、湿度による強度増大効果を排除した乾燥条件下での摩擦弱化特性曲線を基準とする。任意の湿度条件について報告されているこれまでの実験結果は、乾燥条件下での基準摩擦特性に、湿度の影響による摩擦増大効果が加わったものを見ている可能性がある。

予察的段階であるが、乾燥状態での定常摩擦係数の値は、石英試料中の含水量によって異なる可能性がある。

Bocquet et al., (1998)は、微小突起接触部における水架橋形成の過程が熱活性過程でモデル化されることから、水架橋の体積が接触時間の対数と湿度の関数になることを理論的に示している。本研究で得られた上記(1)の、石英の摩擦挙動が示す湿度依存の結果は、ナノサイズのガウジ粒子接触部に形成した水架橋形成の示す湿度依存性に因るものであると考えることができる。Mizoguchi et al. (2006)は、細粒ガウジを伴う断層でのみ有効な、ガウジ粒子間への空気中の水分の吸着による摩擦の増加機構を提唱した。我々は、石英質岩の摩擦においても、同様の摩擦増加機構が機能している可能性を指摘していたが(堤, 2019), 本研究で得られた結果は、このモデルを支持するものである。

### <引用文献>

- Di Toro, G., Goldsby, D. L. and Tullis, T.E., Nature, 427, 2004, 436-439, doi:10.1038/nature02249.
- Goldsby, D. L. and Tullis, T. E., Geophys. Res. Lett., 29, 2002, 1844, doi:10.1029/2002GL015240.
- 堤 昭人, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 16K05575, 2019.
- Bocquet, L. Charlaix, E., Ciliberto, S. and Crassous, J., 1998, Nature 396, 735-737.
- Liu, Y., Hay, J. Wanga, H., Zhanga, X., 2014, Scripta Materialia, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.12.022>.
- Chen, Z., He, X., Xiao, C. and Kim, S. H., 2018, Lubricants 2018, 6, 74; doi:10.3390/lubricants6030074.
- Thom, C. A., Carpick, R. W., & Goldsby, D. L. 2018, Geophysical Research Letters, 45, 13, 306-13, 311. <https://doi.org/10.1029/2018GL080561>.
- Mizoguchi, K., et al., Geophys. Res. Lett., 33, 2006, L16319, doi:10.1029/2006GL026980, 2006.
- Hayashi, N. and Tsutsumi, A., Geophys. Res. Lett., 37, 2010, L12305, doi:10.1029/2010GL042943.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 尾上裕子、堤 昭人
2. 発表標題 合成石英ガウジを用いた中-高速度摩擦滑りにおける摩擦強度に及ぼす湿度の影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会 (JpGU-AGU Joint Meeting 2020), SSS15-11 (iPoster), virtual meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堤 昭人
2. 発表標題 石英質物質の摩擦に及ぼす湿度の影響について - 特に高速摩擦弱化学動に関連して
3. 学会等名 京都大学防災研究所地震・火山グループ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部 諒・堤 昭人
2. 発表標題 ナノインデンテーション法を用いた単結晶石英の微小領域変形に及ぼす湿度の影響評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堤 昭人
2. 発表標題 石英質物質の摩擦に及ぼす湿度の影響について - 特に高速摩擦弱化学動に関連して
3. 学会等名 京都大学防災研究所地震・火山グループ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. B. Mngadi, A. Tsutsumi, Y. Onoe, M.S.D. Manzi, R.J. Durrheim, Y. Yabe, H. Ogasawara and the DSeis team
2. 発表標題 The effect of a gouge layer on rupture propagation along brittle shear fracture
3. 学会等名 DEEP-2021 International Symposium on Deep Earth Exploration & Practices (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.B. Mngadi, M.S.D. Manzi, R. J. Durrheim, H. Ogasawara, Y. Yabe, A. Tsutsumi and the DSeis Team
2. 発表標題 Investigating factors controlling deep seismogenic zones in South African deep and high stress gold mine
3. 学会等名 2021 AGU fall meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堤 昭人、三宅 亮、尾上裕子
2. 発表標題 人工石英の高速摩擦弱化過程において形成された断層ガウジ層の変形構造
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

〔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
研究分担者	三宅 亮  (Miyake Akira)  (10324609)	京都大学・理学研究科・准教授    (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	伊藤 正一  (Itoh Shoichi)  (60397023)	京都大学・理学研究科・准教授     (14301)	

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