

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05575

研究課題名(和文)非晶質ガウジ層の形成過程における断層潤滑のメカニズム解明

研究課題名(英文) Experimental study on generation and frictional properties of amorphous fault gouge layer

研究代表者

堤 昭人 (Tsutsumi, Akito)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：90324607

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)：人工水晶を用いた摩擦実験によって、室内条件(相対湿度 22 - 74%)ではすべり速度  $v = 0.1$  mm/sの条件で定常摩擦の弱化(速度弱化)が始まるのに対し、乾燥雰囲気条件(相対湿度 <3%)では、より低速の  $v = 0.01$  mm/sの条件で速度弱化が始まることが分かった。これまで報告されていた、室内湿度条件下の高速摩擦実験において石英質岩石に特徴的に見られる摩擦強度の弱化現象は、ガウジ粒子表面における水分吸着の影響を見ている可能性がある。一方、乾燥条件において、より低速の条件で起こる摩擦強度弱化の原因は、水分吸着の影響では説明できない。今後の詳細な検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断層の地震時すべり挙動を理解するためには、断層がすべる際に、摩擦抵抗がどのように変化するのかを、様々な断層構成物質について明らかにする必要がある。近年、珪質な岩石の摩擦実験において、10 mm/s 程度の比較的ゆっくりとしたすべり速度条件で、摩擦係数が大きく減少する現象が見出され、そのメカニズムが国内外で議論されている。本研究では、人工水晶を用いた実験によって、断層物質表面の水分吸着の状態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)：To study the effect of moisture on the fault zone process in siliceous material, we have performed friction experiments on a synthetic quartz sample under two different humidity conditions: in room humidity (relative humidity RH = 20 to 75%) and in dry (RH < 3%) conditions. In room humidity conditions, steady state friction shows velocity weakening at  $v = 0.1$  mm/s, which is consistent to the previous studies. We find that steady-state friction values measured at the dry condition are almost constant at  $f = 0.2$  for slip velocities  $v = 0.01$  mm/s. Our results imply that the moisture-adsorption strengthening, which has been proposed to be an effective mechanism for time-dependent healing of high-velocity friction of gabbro (Mizoguchi et al. 2006) is an important underlying mechanism of the frictional weakening of quartz rocks observed in ambient humidity conditions.

研究分野：岩石力学、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

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

### 1. 研究開始当初の背景

断層の地震性すべりの挙動は、すべりに伴い断層の摩擦抵抗が弱化する過程に大きく支配される。そのため、地震時すべり挙動を理解するためには、断層の強度弱化の特性を明らかにする必要がある。さらに、断層帯の浅部は一般に断層ガウジを伴うことから、断層浅部域の強度弱化過程を明らかにする上では、特に断層ガウジ層が断層摩擦に及ぼす影響を解明することが重要である。近年、珩質岩石の摩擦実験において、摩擦溶融に代表されるような温度上昇に起因する断層強度弱化の始まるすべり速度より低速の、数 10 mm/s の速度条件で大きな強度低下（摩擦係数が 0.1 以下に減少）が起こることが報告され、温度上昇に依らない強度弱化現象として注目されている（Goldsby and Tullis, 2002; Di Toro et al., 2004）。珩質岩のすべりにおいてこのような強度弱化の起こる機構の詳細はまだ明らかではないが、すべり表面にゲル状物質が形成され、その生成物質が潤滑性を有することが珩質断層の強度弱化の要因であると考えられてきた（Di Toro et al., 2004）。珩質岩断層の強度弱化の要因をゲル状物質形成に求めるこの考えは、断層の「ゲル潤滑機構」として、学会発表や国際誌等でしばしばとりあげられている。しかしながら実験的な研究データが限られているため、珩質岩摩擦におけるガウジ形成の過程の詳細と強度弱化の機構との関連性は依然、未解明の状況にある。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景およびこれまでの我々の研究経過をもとに、本研究においては、断層ガウジの非晶質化・水和化とその変形プロセスが高速すべり時における断層強度弱化の過程に及ぼす効果の解明に研究目的の焦点を絞った。以下に、組成の単純な珩質岩中の断層を対象とした摩擦の素過程に関する研究成果の概要を述べる。

### 3. 研究の方法

本研究計画においては、珩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の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すすめた。

- (1) 摩擦特性解明のための変形実験
- (2) 断層物質の組織解析（プロダクト解析）
- (3) ガウジ摩擦における強度弱化機構の解明

### 4. 研究成果

#### (1) 摩擦特性解明のための変形実験 人工水晶の高速摩擦特性

珩質断層における断層物質（ガウジ層）の非晶質化・水和化とその変形プロセスが地震時の断層潤滑（強度弱化）の過程に及ぼす効果の解明を目的とし実験的研究をおこなった。本研究では、実験試料として人工水晶を主として用い、湿度条件（相対湿度 22 ~ 74%）と乾燥条件（N2 or dry air、相対湿度 < 3%）のそれぞれの雰囲気について摩擦実験を実施することで、空気中の水分吸着の摩擦への影響を調べた。摩擦実験には、京都大学の回転式中-高速摩擦試験機を使用した。

#### 実験結果

外径 25 mm、内径 5 mm の円筒状に加工した試料を用い、垂直応力 1.5 MPa、すべり速度  $v = 0.005 \text{ mm/s} - 105 \text{ mm/s}$  の条件で行った一定すべり速度実験および速度ステップ実験のどちらにおいても、水晶の摩擦について、以下の共通した特徴がみられることが明らかになった。

室内湿度条件における実験では、すべり速度  $v \geq 0.1 \text{ mm/s}$  の条件において定常摩擦係数が速度とともに急激に減少することを特徴とする顕著な速度弱化が見られる。

試料室に乾燥ガスを導入した条件における実験においては、より低速の、 $v \geq 0.01 \text{ mm/s}$  で定常摩擦係数について顕著な速度弱化挙動が見られる（図 1）。

の結果は、これまでに報告されていた先行研究の結果と同様のものである。一方、の結果は、乾燥雰囲気条件においても、珩質物質の高速摩擦における強度弱化が起こることを示している。この結果は、湿度環境についての珩質物質の実験で見られる摩擦強度弱化のメカニズムが、断層物質の水和化に依らないものである可能性を示唆する。今後、断層表面への水分吸着の状態を定量的に評価し、摩擦強度と吸着量の関連性などを詳細に検討することを目的とした実験を計画する必要がある。

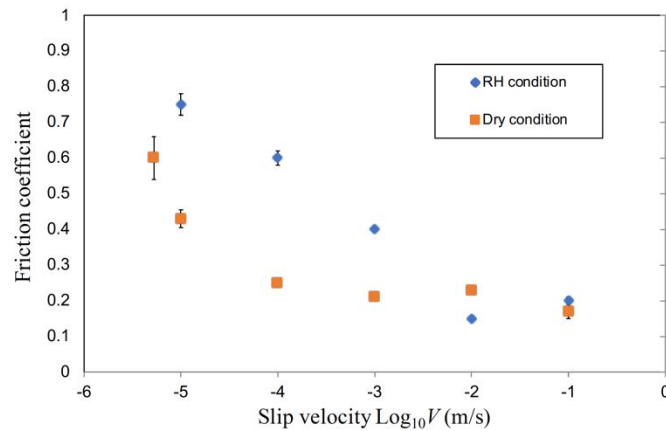


図1. 定常摩擦係数とすべり速度  $v$  との関係。

## (2) 断層物質の組織解析 (プロダクト解析)

(1) で示した実験の結果、乾燥雰囲気条件での石英物質の摩擦弱化的メカニズムを解明することこそが、珪質断層の高速摩擦低下の機構を理解する上で重要であることがわかった。そのため乾燥雰囲気条件を含む湿度制御条件での実験を行い、ナノスケールでの断層面の変形組織解析を行った。

### 観察結果

室内湿度条件下において、すべり弱化過程における様々なすべり量での試料を回収し、摩擦面の状態を SEM を用いて観察した結果、弱化の過程で 0.1 mm 程度の大きさの非対称ガウジ様組織が形成されること、弱化後の摩擦面に、0.1 - 0.3mm 程度の厚さの薄層が形成されていることなどが明らかになってきた。なお、すべり弱化終了直後の試料の構造観察の結果、Hayashi and Tsutsumi (2010) でチャートについて報告された構造と酷似した、極細粒層状の構造が形成していることも確認された (図2)。ラマン分光分析の結果、この細粒層状構造をなす部分は水和した非晶質シリカより成ることがわかった。一方、乾燥雰囲気 (DRY) 条件の実験後の試料について、SEM による観察をおこなった結果、すべり速度  $v = 0.01$  mm/s の条件でおこなった実験後の摩擦面上に、サブミクロンサイズの摩耗物が形成されていることが明らかになった。また、乾燥雰囲気条件の実験後後の摩擦表面に形成されているガウジについて FTIR 分析をおこなった結果、ガウジ表面の水和化と部分的な非晶質化が起こっていることを示す信号が得られた。

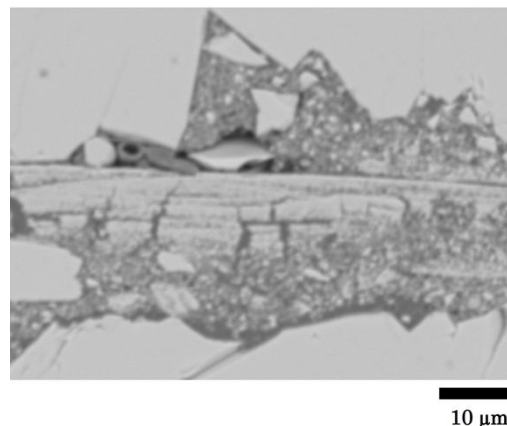


図2. 垂直応力 1.5 MPa、すべり速度 105 mm/s、総すべり量 0.9 m の実験後の断層変形構想の SEM 観察写真。スケールバーは 0.01 mm。

### (3) ガウジ摩擦における強度弱化機構の解明

雰囲気湿度に依存した摩擦強度変化の原因を探ることを目的として、すべり速度  $v = 0.005$  mm/s - 105 mm/s の条件において、滑り弱化後の定常摩擦に至った状態の試料に対して、すべり停止時間を与え、再びすべりを開始することで (Slide-Hold-Slide test, SHS) すべり再開時の摩擦強度の停止時間に対する依存性を調べた。

#### 実験結果

SHS test の結果、湿度条件では hold 時間に依存した初期摩擦の増加が確認されたが、乾燥条件では、そのような摩擦の増加は全く見られなかった (図3)。

このすべり速度域では、Mizoguchi et al. (2006) が指摘したように、ガウジ粒子間への空気中の水分の吸着が、摩擦の大きさを支配している可能性がある。一方で、乾燥条件であっても、すべり速度  $v$  が 0.1 mm/s より低速の条件については定常摩擦の速度弱化が確認された。今後、低速の条件で起こる摩擦強度弱化の原因についての詳細な研究が必要である。

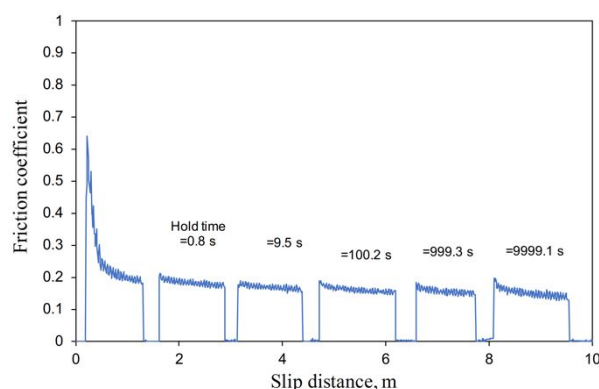


図3. Slide-hold-slide test における乾燥雰囲気条件での摩擦係数の変化の様子。

#### まとめ

本研究の結果、石英質岩の摩擦強度弱化は、室内湿度の条件では先行研究と同様に  $v \geq 0.1$  mm/s のすべり速度で起こること、一方乾燥雰囲気条件では、より低速条件である  $v \geq 0.01$  mm/s の滑り速度で摩擦弱化が起こることが分かった。室内湿度雰囲気の条件においてすべり速度  $v \geq 0.1$  mm/s で見られる石英質岩石の摩擦弱化は、形成された断層面上のガウジ粒子表面における水分吸着の影響を見ている可能性がある。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。石英質岩の摩擦においても、摩擦で形成された、断層面上の非晶質の細粒ガウジによる水分吸着が、摩擦の大きさを支配している可能性がある。一方で、乾燥雰囲気の条件で観察された、より低速のすべり速度で起こる摩擦強度弱化の原因は、水分吸着の影響では説明できない可能性がある。今後の詳細な検討が必要である。

#### <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.
- 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)

飯田大貴・堤 昭人、すべり弱化過程の石英質岩の断層表面における非対称構造の形成と弱化に伴う形状変化、日本地質学会第 123 年学術大会、2016

並木由香・堤 昭人、海洋プレーで採取された生物起源堆積物の剪断組織の発達家庭、日本地質学会第 123 年学術大会、2016

並木由香・堤 昭人、プレート沈み込み帯に持ち込まれる生物起源堆積物の摩擦強化に関連した剪断の局所化、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、2017

中野龍二・堤 昭人、高速条件下における RSF 則パラメターのすべり速度・温度に対する依存性、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、2017

飯田大貴・堤 昭人、中速すべりにおける石英質岩のすべり弱化過程で模擬断層表面に形成されるせん断組織、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、2017

堤 昭人・並木由香・比嘉咲希、プレート境界断層の摩擦速度依存性への影響因子：コストリカ沈み込み帯の例、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

中野龍二・堤 昭人、低-高速度域条件下における速度状態依存摩擦構成則のパラメターのすべり速度依存性、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：三宅 亮

ローマ字氏名：(MIYAKE, akira)

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：10324609

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：並木由香、飯田大貴、尾上裕子

ローマ字氏名：(NAMIKI, yuka)、(IIDA, hirotaka)、(ONOE, yuko)

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。