

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340104

研究課題名(和文) 中 高速域における断層の摩擦化学反応過程と断層強度弱化の機構解明

研究課題名(英文) Tribochemical reaction and the mechanism of fault weakening at intermediate- to high-velocities

研究代表者

堤 昭人 (Tsutsumi, Akito)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90324607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦化学反応に起因する、珪質岩石の強度弱化の機構を明らかにすることを目的として、丹波帯のチャートを用いた摩擦実験後の断層表面のナノスケール観察を行った。また、中米海溝コスタリカ沖に沈み込む珪質堆積物を用いた摩擦実験をおこなった。その結果、高速弱化を示すチャート中の断層表面が、数百ミクロン程度の水和化非晶質シリカの薄層で覆われていることが明らかになった。また、非晶質シリカを主体とする断層物質を含む断層の低速での摩擦速度依存性が負であることが分かった。これらの結果は、水和化非晶質シリカの存在が、断層の速度依存性と高速での強度低下の機構に重要な影響を及ぼしていることを意味している。

研究成果の概要(英文)：To get a better understanding of fault-weakening mechanism in silicic material, we have studied microstructure of the fault surface material in the samples derived from intermediate-velocity friction experiments on chert, and frictional properties of silicic sediments from the Cocos plate offshore the Osa Peninsula, Costa Rica. TEM observation reveals that the fault surfaces in chert after the experiments consist of several hundred-nm-thick amorphous silica layer. Wear rolls exist on the smooth fault surface. We find that rolls are also made of amorphous silica. Friction of the silicic sediments from the Costa Rica show velocity-weakening at velocities to 0.3 mm/s and neutral to velocity-strengthening behavior at velocities from 0.3 mm/s to 3 mm/s. At velocities higher than 30 mm/s, steady state friction values are as low as 0.1. These results imply the important influence of the generation and/or incorporation of amorphous silica on frictional behavior of silicic faults.

研究分野：構造地質学, 実験岩石力学

キーワード：断層摩擦 断層強度弱化 非晶質シリカ

1. 研究開始当初の背景

断層すべりに伴って断層の強度（剪断抵抗）が減少する場合、そのような断層強度弱体化（軟化とも言う）の性質は、剪断変形の局所化や断層の不安定すべりを引き起こす要因となりうる。したがって、断層の強度弱体化の機構を明らかにすることは、剪断帯の発達過程や断層のすべりをモデル化する上で重要である。

近年、珪質岩石の摩擦実験において、これまでに知られている強度弱体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、その摩擦強度弱体化の機構が注目されている（Goldsby and Tullis, 2002, Di Toro et al., 2004, 堤ほか, 2009, Hayashi and Tsutsumi, 2010）。珪質岩のすべりにおいてこのような強度弱体化の起こる機構の詳細はいまだ明らかではないが、すべり表面におけるシリカ 水相互反応の過程（摩擦化学反応）でシリカのゲル状物質（水和化非晶質シリカ）が形成され、その生成物質が可逆的弱体化の性質を示す事が、その摩擦強度弱体化の要因であると考えられている（Goldsby and Tullis, 2002, Di Toro et al., 2004, Hayashi and Tsutsumi, 2010）。このような、「水」存在下における珪質岩石中の断層の強度弱体化機構の解明は、例えばコスタリカ沖や日本海溝のように、遠洋性の珪質堆積物が大量に持ち込まれる沈み込み帯における、プレート間弱面（デコルマ）の形成・発達過程や、断層の地震時すべり挙動を理解する上で極めて重要である。しかしながら、「水」存在下で非晶質シリカを伴うような系における断層のレオロジーや断層摩擦の素過程は明らかになっていないのが現状である。

2. 研究の目的

「中 - 高速すべりにおける摩擦化学反応による物質変化に起因した断層強度弱体化の機構」を解明することを目的とした研究を行う。特に、近年その重要性が指摘されている、珪質断層における摩擦化学反応に起因した断層強度弱体化の現象をとりあげる。

3. 研究の方法

シリカ 水系の摩擦化学反応に起因する、珪質岩石の強度弱体化の機構を明らかにする。特に、非晶質シリカの摩擦・剪断過程への力学的影響を明らかにすることを目指す。このため、本研究では以下の大項目について研究をすすめた。

- (1) 珪質岩石や断層物質の中 高速摩擦特性やレオロジー特性解明のための変形実験
- (2) 実験後の模擬断層試料の摩擦表面の物

質解析（プロダクト解析）

4. 研究成果

(1) 珪質岩石や断層物質の中 高速摩擦特性やレオロジー特性解明のための変形実験

実験試料には、IODP の Exp. 334 「コスタリカ沖沈み込み浸食縁辺域における地震発生過程の解明」において、ココスプレート上の掘削サイト（Site-U1381A）で採取された珪質の生物起源堆積物からなる軟泥（siliceous to calcareous ooze, Unit ）を用いた。この試料は、非晶質シリカを骨格とする微化石を主体とする堆積物であることから、本研究目的での実験に適している。

摩擦実験では、垂直応力 5 MPa、すべり速度約 0.003, 0.03, 0.3, 3 mm/s、含水条件における摩擦の性質を調べ、摩擦強度とその速度依存性を検討した。

摩擦強度

実験の結果、低速から中速（すべり速度 0.003 mm/s から 3 mm/s）の条件では、粘土鉱物を含む堆積物と非晶質シリカ（含有量 40 wt%程度）を含み生物起源堆積物との間で、摩擦強度（摩擦係数の値）が大きく異なることが明らかになった。粘土鉱物を含む堆積物は、およそ 0.2 以下の非常に小さい摩擦係数を示すのに対し、生物起源堆積物からなる軟泥は、同様の条件で 0.75 程度と高い摩擦係数の値を示す（図 1）。

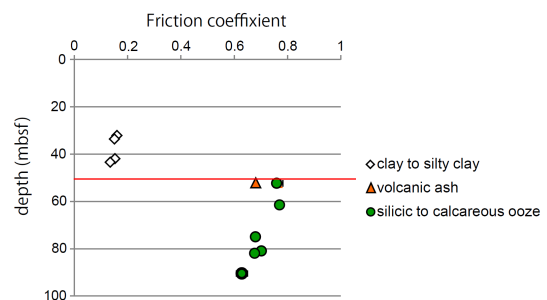


図 1. コスタリカ沈み込み帯に持ち込まれる珪質堆積物の摩擦強度。比較のためにシルト質粘土の摩擦強度も示す。

垂直応力 2 MPa、含水条件にて約 0.3, 1.3 m/s の一定すべり速度での摩擦変化を調べた結果、どちらのすべり速度においても、およそ 1 m のすべりに伴い摩擦強度が著しく弱体化することが明らかになった（すべり弱体化）。すべり弱体化後の定常摩擦係数の値は、どちらの速度においてもおよそ 0.1 程度になり、非常に低い値を示す。この結果は、チャートなどの珪質岩について報告されている高すべり速度条件下での摩擦強度の弱体化の様子と調和的である（Goldsby and Tullis, 2002, Di

Toro et al., 2004, Hayashi and Tsutsumi, 2010). コスタリカ沖で採取された珪質堆積物においても、これまでに珪質岩石について報告されていた実験と同様、珪質断層物質に特徴的な強度弱化的機構が働いている可能性がある。

摩擦の速度依存性

摩擦の速度依存性においてもこれら二種類の試料の示す摩擦特性は顕著に異なる。すなわち、粘土鉱物を含む堆積物試料の定常摩擦は、実験した速度範囲において常に正の速度依存性を示すのに対して、生物起源堆積物の摩擦は顕著な負の速度依存性を示すことで特徴付けられる(図2)。XRDによる分析結果によると、上記の Unit の堆積物と Unit の堆積物との間には、含有鉱物種に顕著な違いがみられる。堆積物中に、例えば粘土鉱物(おそらくスメクタイト)が含まれるかどうかといったことが、コスタリカ沖沈み込み帯の断層摩擦の性質を支配している可能性がある。地震時断層すべりにおいて、このような異なる摩擦特性を示す物質のどの部分に変形が集中するのかといった問題が、地震発生の素過程を明らかにする上で重要である。

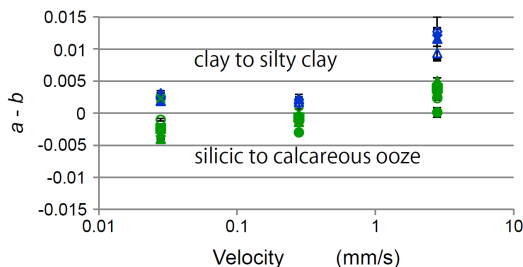


図2. コスタリカ沈み込み帯に持ち込まれる珪質堆積物の摩擦の速度依存性(a-b). 比較のためにシルト質粘土のデータも示す。

(2) 天然の断層変形解明のための観察・解析および高速摩擦せん断実験試料の採取

京都府美山地域に分布するジュラ紀の付加コンプレックスより採取したチャートを用いた摩擦実験において、チャートの摩擦は10 mm/s以上のすべり速度で、すべりに伴う強度低下(すべり弱化)を示すことが明らかになっている(Hayashi and Tsutsumi, 2010)。今回の解析においては、この美山産チャートを用いた実験後の試料を使用した。

摩擦強度の弱化を示す試料の摩擦表面は、一部鏡肌様の光沢を示し、その光沢面上には、10ミクロン程度の長さで特徴づけられるロッド状物質(rolls)がすべり方向に対して直交するように配列して存在する(Hayashi and Tsutsumi, 2010)。本研究では、チャー

ト中の摩擦面における変形素過程をより明らかにすることを目的として、ロッド状ナノサイズ摩擦物質を含む断層表面について、集束イオンビーム加工観察(FIB)装置を利用した断面切り出しをおこない(図3)、TEM下で断層表面の断面組織、構造などを観察することを試みた。観察には、垂直応力1.5 MPa、すべり速度104 mm/sの条件下での摩擦実験後のチャート試料を用いた。

観察の結果、(1)断層表面に、厚さ~数100 nm程度の非晶質シリカの薄層が形成されていること、(2)ロッド状の物質は、この非晶質シリカ薄層上に接して存在し、直下の薄層と同様に非晶質シリカから成ることが明らかになった。

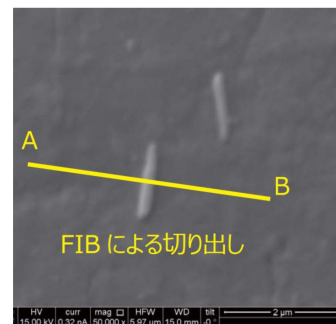


図3. 非晶質シリカの薄層上に配列するロッド状物質。

以上の観察結果を統合して判断すると、今回の実験条件下でのチャートの摩擦においては、以下のような過程により断層組織が形成されるものと考えられる。

- (1) 断層表面上に厚さ~数100 nmの非晶質シリカの薄層が形成される。
- (2) この非晶質シリカの薄層上に、直径数10~100 nm、長さ数ミクロン程度の大きさのロッド(rolls)がすべり方向に対して直交するように配列して生成する。
- (3) 非晶質シリカの薄層を含む断層表面部が剥離し、断層帯に取り込まれ断層ガウジが形成される。

本研究により、珪質断層の高速摩擦において、摩擦化学反応により断層面上に非晶質シリカの薄層が形成され、この層の剥ぎ取りによりrollを形成しながら断層ガウジが成長するという素過程が明らかになった。チャート摩擦表面上の非晶質シリカ薄層や、これを取り込むことで形成されるガウジ層の変形の性質を明らかにすることが、チャートの摩擦特性を明らかにする上で重要である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Namiki, Y., Tsutsumi, A., Ujii, K. and Kameda, J., 2014, Frictional properties of sediments entering the Costa Rica subduction zone offshore the Osa Peninsula: Implications for fault slip in shallow subduction zones, Earth, Planets and Space, Frontier Letter, 66:72.
doi:10.1186/1880-5981-66-72

[学会発表](計 10 件)

並木由香・堤 昭人, 2014, 非晶質シリカを含む断層の摩擦特性--模擬断層物質を用いた実験で得られた知見--, 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, 272-272, 2014 年 9 月 14 日, 鹿児島大学
堤 昭人・三宅 亮, 2014, チャートの中速摩擦実験で形成された断層表面物質の微細構造, 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, 121-121, 2014 年 9 月 13 日, 鹿児島大学

A. Tsutsumi, Y. Namiki, R. Nakano and T. Kawai, Velocity Weakening Behavior Observed for Friction of the Shallow Subduction Zone Fault Material: Implication for Slow Earthquakes, SE20-A028, AOGS 2014 meeting, 2014/Aug/1, Sapporo, 2014

Y. Namiki and A. Tsutsumi, Frictional Properties of Gouge Mixtures of Amorphous Silica and Calcite, SE20-A030, AOGS 2014 meeting, 2014/Aug/1, Sapporo, 2014

T. Kawai and A. Tsutsumi, Effects of Shear Displacement and Fault Zone Structure on the Frictional Behavior of Montmorillonite-Quartz Gouge, SE20-A031, AOGS 2014 meeting, 2014/Aug/1, Sapporo, 2014

R. Nakano, Y. Namiki and A. Tsutsumi, Estimation of friction constitutive parameters and apparent "stiffness" of the material from the Nankai and Costa Rica subduction zones by using rotary shear friction apparatus, SE20-A036, AOGS 2014 meeting, 2014/Aug/1, Sapporo, 2014

堤 昭人・並木 由香・中野 龍二・河合 智章, 沈み込み帯浅部における断層の摩擦速度依存性, SSS30-26, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜, 2014

並木 由香・堤 昭人, 非晶質シリカ及びカルサイトから成る断層模擬物質の摩擦特性, SSS30-27, 日本地球惑星科学連合

2012 年大会予稿集, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜, 2014

中野 龍二・並木 由香・堤 昭人, 回転式摩擦実験により推定した沈み込み帯浅部物質の摩擦特性, SSS30-P24, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜, 2014

河合 智章・堤 昭人, モンモリロナイト石英ガウジの摩擦挙動に及ぼす剪断変位と断層組織変化の影響, SSS30-P23, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, 2014 年 4 月 29 日, パシフィコ横浜, 2014

[その他]

ホームページ等

http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-tec/to/Henkei_web/Research_topics_jp.htm

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

下林 典正 (SHIMOBAYASHI NORIMASA)
京都大学理学研究科・教授
研究者番号: 70235688

三宅 亮 (MIYAKE AKIRA)
京都大学理学研究科・准教授
研究者番号: 10324609

(3) 連携研究者

亀田 純 (KAMEDA JUN)
北海道大学理学研究科・准教授
研究者番号: 40568713

(4) 研究協力者

並木 由香 (NAMIKI YUKA)
京都大学理学研究科・修士課程