

令和元年6月26日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04063

研究課題名(和文)断層面に発達する鏡肌の成因に関する総合研究

研究課題名(英文)Multidisciplinary study on generation process of slickenside

研究代表者

安東 淳一 (ANDO, Jun-ichi)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：50291480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：断層岩には様々な種類の岩石が存在するが、今回研究対象とした「鏡肌」は、断層面上に普遍的に認められる平滑で鏡のような光沢を持つ面として知られている。しかし鏡肌がどのような断層運動の結果生じたものか、またその形成過程も全く理解できていなかった。このことを理解する目的で、本研究では9つの岩石種に発達した鏡肌の微細組織の観察と、断層運動の模擬実験を通じて研究を進めた。その結果、鏡肌は断層面に沿う約50-100umの変形集中の結果生じたこと、また鏡肌が発達した断層面は地下深部では、大きな地震につながらない、ゆっくりとした地震活動に関係した可能性があること等が分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断層面に形成される鏡肌の成因を知ることが、地下に存在する多くの断層運動の発生過程や、断層運動のすべり特性を理解することにつながる。地震を発生させる断層は地下に存在するため、その実態を岩石の変形特性を通して研究することはなかなか難しい。本研究では、もともと地下に存在し、その後地表に現れた断層を対象に微細組織の観点から主に研究を行った。その結果、得られた鏡肌の成因等の解明は学術的な意義の高いものである。また断層運動や地震活動の研究につながる本研究は社会的意義も十分にある。

研究成果の概要(英文)：Slickenside is a glossy and smoothly surface developed on the fault slip plane. Although the slickenside is a common and well-known microstructure, its microstructural characterization and effect on the fault behaviour have not been fully studied, so far. To understand these issues, we studied the microstructures of natural samples including nine different rock species, and conducted the frictional experiments using limestone and gabbro samples. The recovery samples from the experiments were also studied for their microstructural characterization. One of the most important results is that the slickenside is caused by deformation concentration on the top surface of the fault within 50-100um thickness during faulting. And the other, considered from the frictional experiments using limestone is that the fault having slickenside probably reduces the chance of large earthquake, and instead augments the generation of smaller creep-related seismic activities.

研究分野：岩石鉱物変形学

キーワード：鏡肌 断層岩 形成過程 微細組織 ナノ粒子 高速回転摩擦試験機 二軸摩擦実験 摩擦係数

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 断層岩は断層運動によって形成された岩石であるため、断層運動の素過程を反映した微細組織を保持していることが知られている。例えば、現在では「地震性断層」の唯一の証拠となっている「シュードタキライト」という黒色脈状を呈する断層岩に対しては、微細組織のキャラクタリゼーションや再現実験などの多くの研究によって次のことが明らかとされている。1)断層すべり運動による摩擦発熱によって母岩が溶融することで形成される。2)この摩擦溶融によって断層面の摩擦係数が大きく下がり、地震性(高速すべり)断層を発生させる。

(2) 一方、今回申請者が対象とする「鏡肌」は、断層面上に普遍的に認められる平滑で鏡の様な光沢を持つ面として古くから知られているが、その研究例はほとんどない。その理由は、鏡肌は断層面(断層のすべり面)にのみ発達する非常に極微小でマイナーな存在であることによると考えられる。しかし近年の断層の再現実験では、断層面上で発生するミクロな素過程が、「摩擦係数」をはじめとする多くの断層運動のすべり特性に強く影響を与えることが理解されるようになってきている。

2. 研究の目的

鏡肌を研究対象として、鏡肌の微細組織のキャラクタリゼーションと、鏡肌を再現する断層運動の模擬実験を通じて、鏡肌の微細組織の特徴と成因、および②鏡肌が断層の力学特性に与える影響を解明すること、そして③鏡肌の微細組織から断層運動が生じた際の深度を見積もる方法を確立することを目的とする。と②の目的からは、鏡肌を伴う断層の形成過程(地震性が、非地震性かを含む成因)も明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 天然に露出する鏡肌と、以下の研究の方法(2)に示した実験で生成した鏡肌に対して微細組織のキャラクタリゼーションを行った。天然に露出する鏡肌には産出地が異なる、チャート(三重県秩父帯、愛知県秩父帯、山口県玖珂層群、サンフランシスコ市フランシスカン帯)石灰岩(高知県秩父帯、スイス Glarus 衝上断層、フランス Vauche 断層)角閃岩(愛知県御荷鈴帯)蛇紋岩(大分県佐志生断層近傍)クロム鉄鉱岩(トルコ Guleman 鉱山)炭質泥岩(岡山県成羽層群)砂岩(インド低ヒマラヤ帯)泥岩(インド低ヒマラヤ帯、高知県秩父帯)凝灰角礫岩(阿蘇カルデラ内)に発達する9つの岩石種(計15試料)の試料を用いた。また微細組織のキャラクタリゼーションには偏光顕微鏡と共に、高空間分解能機器として走査型電子顕微鏡(SEM)透過型電子顕微鏡(TEM)分析透過型電子顕微鏡(ATEM)原子間力顕微鏡(AFM)電子線後方散乱回折装置付き走査型電子顕微鏡(SEM-EBSD)放射光起源の軟X線照射によるXANES測定(全電子収量法と部分蛍光収量法)を用いて多角的な方法を使用した。

(2) 鏡肌を再現する断層運動の模擬実験では「高速回転摩擦試験機」と「二軸摩擦試験機」を用いて行った。実験試料には Carrara marble の「ブロック」と「粉末」の2種類を用いた。実験条件は、高速回転摩擦試験機と二軸摩擦試験機に対して各々、すべり速度 0.1 m/s、すべり変位量は最大 0.1 m - 5 m と、すべり速度 30 $\mu\text{m/s}$ 、すべり変位 1.1 mm - 111.5 mm とした。また実験中に試料が破壊しないように、試料に加える垂直応力(深度の指標)を高速回転摩擦試験機では 1.0 - 10.0 MPa、二軸摩擦試験機では 10 - 80 MPa と変化させた。

4. 研究成果

(1) 鏡肌の微細組織の特徴と成因

1-A: 鏡肌の形成メカニズム

鏡肌の形成メカニズムは「トライボフィルム」と似たプロセスを持つことが分かった(図1)。すなわち、(a)断層面上に存在する岩石の凹凸面が剪断変形を受ける。(b)その結果、岩石が「脆性変形」と「摩耗」を受ける。(c)そして重要なことは、この「脆性変形」と「摩耗」の集中が、断層運動の直後すぐに、断層面近傍(約50-100 μm)に集中するということである。このことにより鏡肌の実態は、断層面から幅約50-100 μm において、ナノサイズスケールの粒子(ナノ粒子)から構成されることになる(鏡肌の母岩側の両端には、脆性破壊された岩石粒子(カタクレースイト)が存在する)。

1-B: 鏡肌を構成するナノ粒子

チャートと石灰岩に発達する鏡肌を構成するナノ粒子に対して、TEM観察とXANES測定を行った。その結果、ナノ粒子は結晶質(すなわちチャートでは石英、石灰岩と大理石では方解石)であることが分かった。このことの例外として、山口県玖珂層群のチャート試料においては石英を主としながらも、鏡肌最表面から約15nmの幅において、わずかにアモルファス層が認められた。また Vauche 断層中の石灰岩試料では、方解石中にわずかに(約100nm \times 500nmの領域)において熱反応により生成された Lime (CaO) が確認された。この Vauche 断層中の Lime は、発熱反応(摩擦発熱を伴う地震性断層すべり)に起因した生成物と考えられる。しかし上記し

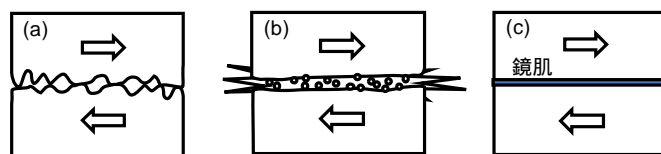


図1: 鏡肌の形成過程

たように、大部分のナノ粒子は結晶質であることを考えると、鏡肌の形成には、摩擦発熱を伴う「地震性断層すべり」は必要ではなく、「非地震性断層・クリープ性断層」運動の産物であると考えることができる。

1-C: 鏡肌を構成するナノ粒子の形態

AFM を用いてナノ粒子の測定を行った。その結果、ナノ粒子は非常に偏平した粒子で構成されており、ナノ粒子の高さ(h)と直径(d)の比(h/d)は試料毎に一定であることが分かった。天然試料の場合はh/d値は0.02 - 0.05である。実験試料のh/d値は(図2)0.05 - 0.25となり、かつ30MPa以上の垂直応力ではh/d値は一定しない。

(2) 鏡肌が断層の力学特性に与える影響

以下のことが明らかとなった。

- 1) 断層面に上に発達する鏡肌の形成率は、「垂直応力」と「すべり距離」が増大するにしたがって大きくなる。
- 2) 「摩擦係数」は「すべり距離」が増大すると低下し、約3mのすべり距離で定常な値を示すようになる。
- 3) 鏡肌が約10%以上形成された実験で「摩擦係数」の減少が認められる。
- 4) 低い垂直応力では鏡肌が形成されても摩擦係数は大きくは下がらないが、5MPaの垂直応力では摩擦係数は大きく減少する。
- 5) そして最も重要なことは、大理石ブロックのすべり面に「鏡面研磨」を施した実験では、実験直後に摩擦係数が約0.2程度となったことである。このことは、一旦鏡肌が生成された断層面は、クリープ性地震発生につながりえることを示唆する。

(3) 鏡肌の微細組織から断層運動が生じた際の深度を見積もる方法

実験から求めた「肌を構成するナノ粒子の高さ(h)と直径(d)の比(h/d)」と「その垂直応力(深度の指標)」との関係を占めす(図2)。この結果から、垂直応力が約10MPaの領域まではh/d値の系統的な変化が見てとれる。しかし、それ以上の垂直応力の場合、明確な関係はない。これには明確な理由がある。図2の20MPa以上の領域の値は、二軸摩擦試験機を用いた実験の回収試料のものである。二軸摩擦試験機の場合、剪断量が大きくとれず(今回の実験では約20mmの剪断量)鏡肌の発達が十分でなく、定常的なh/d値に達していない可能性が強い。今後、定常的なh/d値に達するような高い垂直応力化で、かつ剪断量を大きくとることができる装置(装置開発を含め)を用いた実験から、この研究を達成できると考えている。

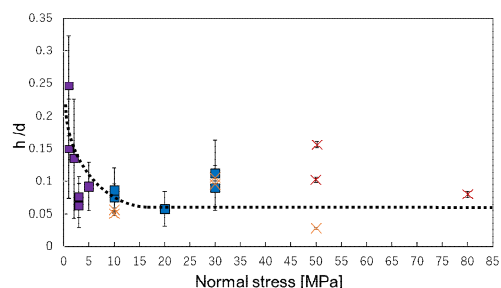


図2 垂直応力と鏡肌の形態の変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

Czertowicz, T., Takeshita, T., Arai, S., Yamamoto, T., Ando, J., Shigematsu, N. and Fujimoto, K., The architecture of long-lived fault zones: insights from microstructure and quartz lattice-preferred orientations in mylonites of the Median Tectonic Line, SW Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*. 査読有. DOI: 10.1186/s40645-019-0261-6. 2019

Ghosh, B., Das, P., Sarkar, D.P., Ghosh, G., Mukhopadhyay, J. and Ando, J., Coalescing microstructure and fabric transitions with AMS data in deformed limestone: implications on deformation kinematics. *Journal of Structural Geology*. 査読有. 114. 294-309. 2018

Yamamoto, T., Ando, J., Tomioka, N. and Kobayashi, T., Deformation history of Pinatubo peridotite xenoliths: constraints from microstructural observation and determination of olivine slip systems. *Physics and Chemistry of Minerals*. 査読有. 44. 247-262. 2017

Yamamoto, T., Ando, J., Tomioka, N., Das, K., Ghosh, G. and Bose, S., Microstructural observations of fracture-filling goethite vein along the Kerajang Fault Zone in the Rengali Province of eastern India. *Journal Mineralogy and Petrology Sciences*. 査読有. 112, 2, 102-107. 2017

Das, K., Tomioka, N., Bose, S., Ando, J. and Ohnishi, I., The occurrence of fluor-wagnerite in UHT granulites and its implications towards understanding fluid regimes in the evolution of deep crust: a case study from the Eastern Ghats Belt, India, *Mineralogy and Petrology*. 査読有. 111, 3, 417-429. 2017

Wada, J., Kanagawa, K., Kitajima, K., Takahashi, M., Inoue, A., Hirose, T., Ando, J. and Noda, H., Frictional strength of ground dolerite gouge at a wide range of slip rates. *Journal of Geophysical Research*. 査読有. 121. 2961-2979. 2016

〔学会発表〕(計5件)

安東淳一・長岡昂吉・富岡尚敬・鍵裕之、鏡肌を構成する物質の特徴、日本地質学会 2018年12月

長岡昂吉・安東淳一・廣瀬丈洋・鍵裕之・大藤弘明、鏡肌の微細組織の特徴とその形成過程、日本鉱物科会、2018年9月

長岡昂吉・安東淳一・西脇隆文・廣瀬丈洋・鍵裕之・大藤弘明、鏡肌の微細組織観察と再現実験から考える形成過程、日本鉱物科会、2017年9月

安東淳一・西脇隆文・長岡昂吉・廣瀬丈洋、鏡肌の摩擦特性、日本鉱物科会、2017年9月

安東淳一・西脇隆文・佐藤琢・長岡昂吉・廣瀬丈洋・鍵裕之・大藤弘明、鏡肌の形成過程、日本鉱物科会、2016年9月

〔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〕

<http://depss.hiroshima-u.ac.jp/UG/index.html>

<http://hiper.hiroshima-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：富岡 尚敬

ローマ字氏名：(TOMIOKA, naotaka)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：高知コア研究所

職名：主任技術研究員

研究者番号(8桁)：30335418

研究分担者氏名：廣瀬 丈洋

ローマ字氏名：(HIROSE, takehiro)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：高知コア研究所

職名：グループリーダー

研究者番号(8桁)：40470124

研究分担者氏名：鍵 裕之

ローマ字氏名：(KAGI, hiroyuki)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科(理学部)

職名：教授

研究者番号(8桁)：70233666

研究分担者氏名：大藤 弘明

ローマ字氏名：(OFUJI, hiroaki)

所属研究機関名：愛媛大学

部局名：地球深部ダイナミクス研究センター

職名：教授

研究者番号(8桁)：80403864

(2)研究協力者：なし

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。