

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610162

研究課題名(和文)鏡肌のナノレベル表面観察による断層における素反応解明への挑戦

研究課題名(英文) Nano structure of slickenside and its formation mechanism on faults

研究代表者

鍵 裕之(Kagi, Hiroyuki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70233666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：断層帯におけるすべり運動で生じる鏡肌と呼ばれる光沢のある岩石は、その生成過程がこれまで明らかではなかった。本研究では天然の鏡肌と実験室における摩擦実験で得られた岩石表面の組織を原子間力顕微鏡を用いて比較した。その結果、両方の試料共に扁平なナノ状粒子が岩石表面に生成していることが明らかになった。このことは、実験室での摩擦実験が鏡肌の生成を再現していることを示唆している。また、ナノ粒子のサイズが摩擦の際の垂直抗力に依存することもわかった。本研究により、鏡肌の生成過程に新たな光がもたらされた。

研究成果の概要(英文)：The formation mechanism of slickenside has been unclear for a long time. This study is aimed to observe the surface structure of natural slickenside and experimentally obtained rock sample using atomic force microscope. Our observation clarified that the natural slickenside and laboratory-made slickenside have similar nano particles. Moreover, the size of nanoparticle has a strong correlation with the pressure between the rocks. This study throws a new light on the formation mechanism of slickenside from surface observation.

研究分野：地球化学

キーワード：原子間力顕微鏡 断層 鏡肌 表面

### 1. 研究開始当初の背景

断層帯におけるすべり運動で生じる素過程は、地震発生のダイナミクスや岩石の破壊現象を理解するうえで重要な鍵を握るため、多くの研究者が着目しているホットな研究テーマである。近年の高速摩擦実験により、断層形成とすべり運動の素過程を把握するには、断層面で生じる物理化学現象を正確に理解する必要性が指摘されている。一方で、実際の断層運動中に断層面で起こる物理変化・化学反応を把握するためには天然に露出している断層岩の微細組織観察が重要になる。「鏡肌」は断層面上に発達する組織として古くから知られており、多くの断層で認められる。この鏡肌の成因には断層運動による母岩の熔融あるいは粉碎といった現象の関与が指摘されているが、その詳細を明らかにした研究はなかった。

### 2. 研究の目的

断層帯におけるすべり運動で生じる素過程を物質科学的に理解するためには、断層帯を



図1 ジュラ紀付加体中に発達する鏡肌

構成する岩石の微視的構造を精密に観察することが求められる。本研究では、断層表面に発達する鏡肌のナノメートルオーダーの表面構造を画像化し、その成因を解明することを研究の目的とする。これまで技術的なハードルから適用されることがなかった原子間力顕微鏡(AFM)を用い、独自のアイデアで鏡肌の観察に挑戦する。AFM観察と電子顕微鏡観察とを有機的に結びつけることにより、断層のすべり運動における素過程(例えば溶解再析出 or 熔融)の解明を試み、今後の断層の物質科学に新しい研究指針を与える。

### 3. 研究の方法

本研究は鏡肌の試料採集、AFMの測定条件の最適化、鏡肌の電子顕微鏡観察、鏡肌のAFM観察、鏡肌での素過程のモデル提案と言う流れで進められた。

世界各地のチャート岩体、石灰岩体などに発達する鏡肌試料に加えて、回転式高速せん断摩擦試験機を用いて人工的に作成した鏡肌を試料として準備した。鏡肌表面のナノ構造をAFMを用いて三次元的に観察するための手法を確立する。電子顕微鏡観察(SEM, TEM)と並行してAFMによる三次元的な画像観察を進める。

### 4. 研究成果

天然の鏡肌試料として、山口県東部に露出するジュラ紀付加体、愛知県渥美半島に露出するジュラ紀付加体、三重県南部に露出するジュラ紀付加体、San Francisco市に露出するジュラ紀-白亜紀付加体を用いた。さらに本研究計画によってスイスアルプス地方東部に露出するGlarus衝上断層を構成する断層岩を採集した。

本研究プロジェクトでの最大の成果は、鏡肌試料の表面形状をAFMを用いて観察することがルーチン測定で可能となったことである。岩石種にかかわらず鏡肌の表面はナノ粒子で覆われており、ナノ粒子は直径数十ナノメートルから百ナノメートル程度のサイズをもつ扁平な形状をもつことが明らかになった(図2を参照)。

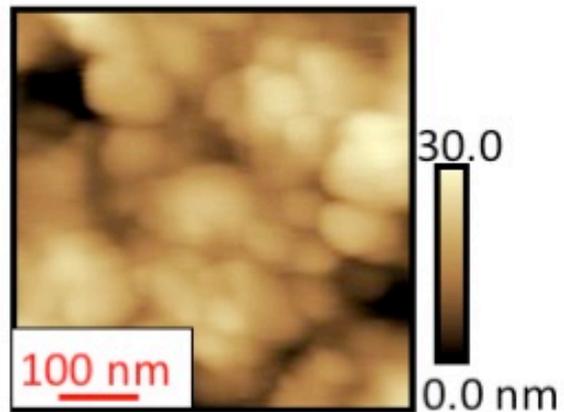


図2 天然の鏡肌試料のAFM写真

また、摩擦実験で人工的に作り出した鏡肌にも同様のナノ粒子からなる表面組織が見られることが明らかになった(図3参照)。天然試料と摩擦実験で得られた試料の表面組織の類似性から、両試料は同様なプロセスによって形成されたと考えることができる。

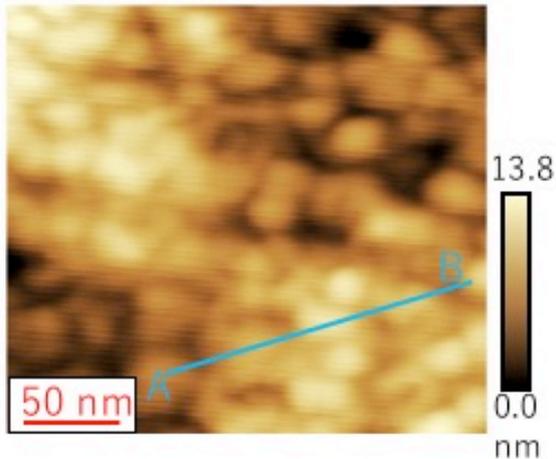


図3 人工的に作成した鏡肌試料の AFM 写真

さらにナノ粒子の直径とその厚みとの間には直線関係があること、摩擦実験の際の垂直応力の大きさが粒径と強い相関をもつことが明らかとなった。また、鏡肌の表面は非晶質物質で覆われていることが TEM の観察から明らかになったが、石灰岩の表面を覆っていると考えられる非晶質炭酸カルシウムは準安定な物質として知られている。特に湿潤環境、高圧・高温環境では非晶質炭酸カルシウムは短時間のうちに結晶化することが我々の研究で明らかになっている。つまり天然の大理石からなる鏡肌の表層が非晶質物質で形成されているとすれば、それがなぜ長年結晶化しなかったのか、というのは新たな疑問である。本研究では鏡肌の観察と関連して非晶質炭酸カルシウムの圧力下での挙動も明らかにした。

本研究で得られた鏡肌の表面組織は摩擦学におけるトライボフィルムときわめて類似した表面構造となっていることも明らかとなった。天然の鏡肌もトライボフィルムと同様の素過程で形成されていると考えられる。今後は鏡肌の形成過程における摩擦過程の詳細な理解へと研究を展開させていきたいと考えている。

#### 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 2 件)

1. Maruyama K., Kagi H., Inoue T., Ohfujii H. and Yoshino T. (2015) In situ observation of pressure-induced crystallization from amorphous calcium carbonate by

time-resolved X-ray diffraction. *Chemistry Letters*, **44**, 434-436. (Editor's choice) Doi 10.1246/cl.141062

2. Matsunuma S., Kagi H., Komatsu K., Maruyama K. and Yoshino T. (2014) Doping incompatible elements into calcite through amorphous calcium carbonate. *Crystal Growth & Design*, **14**, 5344-5348. Doi 10.1021/cg500953h

[学会発表] (計 5 件)

1. H. Kagi, D. Enomoto, S. Matsunuma, K. Maruyama, K. Komatsu and T. Yoshino, Strontium-doping into calcite through pressure-induced crystallization from amorphous calcium carbonate, American Chemical Society Meeting (San Diego, USA), March 13-17, 2016, *invited talk*.
2. 佐藤琢・安東淳一・鍵裕之・大藤弘明, 鏡肌表面の微細組織の圧力変化, 第56回高圧討論会, JMSアステールプラザ (広島県広島市), 2015年11月10日-12日
3. T. Sato, J. Ando, T. Nishiwaki, T. Hirose, H. Kagi and H. Ohfujii, Microstructure and influence of slickenside on faulting behavior developed in limestone. American Geophysical Union, Fall Meeting (San Francisco, USA), Dec 15-19, 2014.
4. 佐藤琢・西脇隆文・安東淳一・廣瀬丈洋・鍵裕之・大藤弘明, 石灰岩中の鏡肌の微細組織と断層運動に与える影響 日本鉱物科学会 2014 年年会, 熊本大学 (熊本県熊本市), 2014 年 9 月 17 日-19 日
5. 佐藤琢・安東淳一・鍵裕之・大藤弘明, 炭質層に発達する鏡肌の微細組織と地すべりの発生に与える影響, 日本地質学会第 122 年学術大会, 信州大学 (長野県長野市), 2015 年 9 月 11 日-13 日 (優秀ポスター賞)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鍵 裕之 (KAGI, Hiroyuki)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 70233666

(2) 研究分担者

安東 淳一 (ANDO, Jun-ichi)  
広島大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号： 50291480

吉野 徹 (YOSHINO, Toru)  
東京都立産業技術研究センター・開発本  
部・研究員  
研究者番号： 90614545