

ナノレベルで見た摩擦の秘密

—超高圧・超低速の摩擦を動画で可視化、地震やナノテクの理解へ—

1. 発表者：

石田 忠(東京大学生産技術研究所 協力研究員／東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教)

板村 賢明(成蹊大学理工学部 助教)

合田 圭介(東京大学大学院理学系研究科 教授)

佐々木 成朗(成蹊大学理工学部 教授／電気通信大学大学院 先進理工学専攻 教授)

藤田 博之(東京大学生産技術研究所 教授)

2. 発表のポイント：

- ◆2つの物体を超高圧かつ超低速でこすったときの物体表面の様子をナノスケール(注1)で観察しました。
- ◆超高圧かつ超低速で物体をこすると、こすれ合う2つの物体が融着し、その融着したところが通常では起こりえないほど大きな塑性変形(注2)することを発見しました。
- ◆地震などの自然現象や工学技術(マイクロマシン、ナノテクノロジーなど)における摩擦の根本的なメカニズムの解明につながります。

3. 発表概要：

摩擦は物と物が触れ合うところで発生する現象であり、目に見えない大きさから地球規模の大きさまでいろいろなところで日常的に起こっています。理科の教科書にも出てくるほどよく知られた現象ですが、実は摩擦は意外とよく理解できていません。中でも非常に高い圧力で押し合っ、気づかない程ゆっくりした摩擦(例えば大陸プレートと海洋プレートのこすれ合い(注3))は、実験室で実験ができず、その詳細はわかっていませんでした。

そこで東京大学生産技術研究所の石田忠協力研究員(東京工業大学助教)、成蹊大学の板村賢明助教、同佐々木成朗教授(当時)、東京大学大学院理学系研究科の合田圭介教授、同生産技術研究所の藤田博之教授らの研究グループは、マイクロマシン(注4)を使って前述のような非常に高い圧力かつゆっくりとした摩擦を実験的に再現し、その様子を電子顕微鏡で動画として観察できる装置、つまり大陸プレートと海洋プレートがこすれ合う様子を模擬実験できる装置を開発しました。この実験装置を用いて摩擦の実験を行ったところ、物と物が触れ合うところが融合し、水あめのように滑らかに変形することを発見しました。

本研究グループが開発した装置を使うことで、非常に高い圧力かつゆっくりした摩擦のメカニズムを根本的に解明できるようになります。そして、大きな災害をもたらした東日本大震災のような地震などのさらなる理解につながると期待できます。また、私たちの身の回りのいたるところにさまざまな摩擦があり、摩擦による損失をお金に計算すると日本国内で年間10兆円を超えていると言われています。摩擦を根本から理解することで、この損失を大きく減らすことに役立てられる可能性があります。さらには、将来、技術革新を起こすマイクロマシンやナノテクノロジーの飛躍的な発展に大いに役立つと期待されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

摩擦は目に見えないほど小さなナノメートル（注2）サイズから大陸と大陸がぶつかるキロメートルサイズまでさまざまな大きさで存在しています。このように身近な摩擦の研究は15世紀にレオナルド・ダ・ビンチによってはじめられ、その後アモンソンとクーロンによって解き明かされました。今では中学校の理科でも摩擦は学習するほど、基本的かつ十分理解された物理現象です。しかし、この多くの偉人たちが取り組み研究しつくされた摩擦に、まだわからないことがあります。それは超高压（1 GPa（ギガパスカル）以上）かつ超低速（0.1 nm/s 以下）の摩擦です。超高压では熱い氷ができたり、ガスが金属化したり、常温で超伝導を示したり、常識を覆すことが起こります。また私たちが感じられない程超低速でゆっくり物体は動きますが、その物体よりも原子（注5）のほうが速く動くようになる現象が起きます。この超高压かつ超低速の摩擦は、地震を起こす大陸の状態と非常に似ており、この摩擦の研究が進むことで地震のメカニズムを解き明かす一助となります。今まで超高压かつ超低速の摩擦の研究ができなかった背景には、このような条件で摩擦の実験を行い、同時にそのぶつかった所を観察する装置がなかったことが原因です。

② 研究内容

東京大学の石田忠研究員（東京工業大学助教）、成蹊大学の板村賢明助教、同佐々木成朗教授（当時）、東京大学大学院理学系研究科の合田圭介教授、同生産技術研究所の藤田博之教授らの研究グループは、最新のマイクロマシンを透過型電子顕微鏡の中で動かす装置を開発し（図1）、摩擦が起きた際にぶつかったところが水あめのように変形する様子を動画で観察することに成功しました。このマイクロマシンは静電気を使った非常にゆっくり滑らかに動くアクチュエータ（注6）を持っており、そのアクチュエータでナノメートルサイズのシリコン（注7）を超高压で押しつけ、超低速でこすります。このマイクロマシンを透過電子顕微鏡の中に入れて実験することで、超高压かつ超低速の摩擦の様子を長時間にわたり観察することが可能となりました。

研究グループは、この装置を用いて2つのナノメートルサイズのシリコンの超高压・超低速の摩擦の様子をナノスケールで観察しました（図1）。ナノメートルサイズのシリコン同士を押し付けると、ぶつかったところが32 GPaという超高压となり、結晶構造が壊れアモルファス（注8）状態の直径5 nm（ナノメートル）程度の接合（注9）ができました。その状態で一方のシリコンを秒速0.01 ナノメートルという超低速でこするように動かすと、接合が水あめのように変形し、超塑性変形（注1）ののちに破断することがわかりました。これを原子レベルの計算で再現したところ（図2）、水あめのように変形する理由は、接合部がアモルファス状態であることと、接合部に周囲からシリコンの原子が流れ込んでくる現象によるものであることがわかりました。

③ 社会的意義・今後の予定

地震を引き起こす大陸同士の摩擦を観察することはできませんが、研究グループは地震に似た状態の摩擦実験を行うことのできる装置が開発しました。本研究では、この装置を用いて、超高压かつ超低速の摩擦がどのようなものかを示しました。超高压かつ超低速での摩擦のメカニズムを根本的に明らかにできれば、大きな災害をもたらした東日本大震災のような地震の研究に役立つことが期待されます。また一方で、私たちの社会における摩擦による損失をお金に計算すると日本国内で年間10兆円を超えるとも言われており、摩擦の根本的なメカニズムを解明することは摩擦を上手に制御することにつながり、経済的にも大きな意味を持ちます。さら

に、ナノテクノロジー、特にマイクロマシンにおいて摩擦の問題は深刻であり、それを解消するためのヒントが得られれば、ナノテクノロジーにとっても重要な意味をもちます。

本研究成果は Nano Letters 誌において高く評価され、2015 年 3 月 11 日に発行される 2015 年 3 月号の表紙に選ばれました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nano Letters」

論文タイトル：Time-lapse nanoscopy of friction in the non-Amonton and non-Coulomb regime

著者：Tadashi Ishida^{1,2}, Takaaki Sato², Masatsugu Oguma³, Takahumi Ishikawa³, Noriaki Itamura³, Keisuke Goda⁴, Naruo Sasaki^{3*} and Hiroyuki Fujita²

¹ Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

² Institute of Industrial Science, University of Tokyo

³ Department of Materials and Life Science, Seikei University

⁴, Department of Chemistry, University of Tokyo

*Current affiliation: Department of Engineering Science, University of Electro-Communication

DOI 番号： <http://dx.doi.org/10.1021/nl5032502>

アブストラクト URL： <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl5032502>

6. 注意事項：

特になし

7. 問い合わせ先：

石田 忠 (いしだ ただし)

東京工業大学大学院総合理工学研究科助教 (東京大学生産技術研究所協力研究員兼務)

〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 G5-27

TEL 045-924-5468 E-mail: ishida.t.ai@m.titech.ac.jp

8. 用語解説：

注1 ナノメートル：10億分の1メートル。原子の大きさは0.1ナノメートルくらい。

注2 塑性変形：物体に力を加えて変形させた後に、力を除いても物体に残る変形。

注3 大陸プレートと海洋プレートの擦れ合い：プレートの移動速度は1-10 cm といわれており、これは0.3 - 3 nm/s に対応する。またプレートの圧力は深さ10-100 km のところで、およそ0.2-2 GPa と言われている。

注4 マイクロマシン：超小型機械。

注5 原子：物体を構成する最小単位の粒子。

注6 アクチュエータ：物体を動かす装置。

注7 シリコン：半導体などで用いられる岩などの主成分。地上で2番目に多い元素。

注8 アモルファス：原子が不規則に並んだ状態。原子が規則的に並んだ状態が結晶。

注9 接合：物体と物体が物理的に融合した部分。

9. 添付資料：

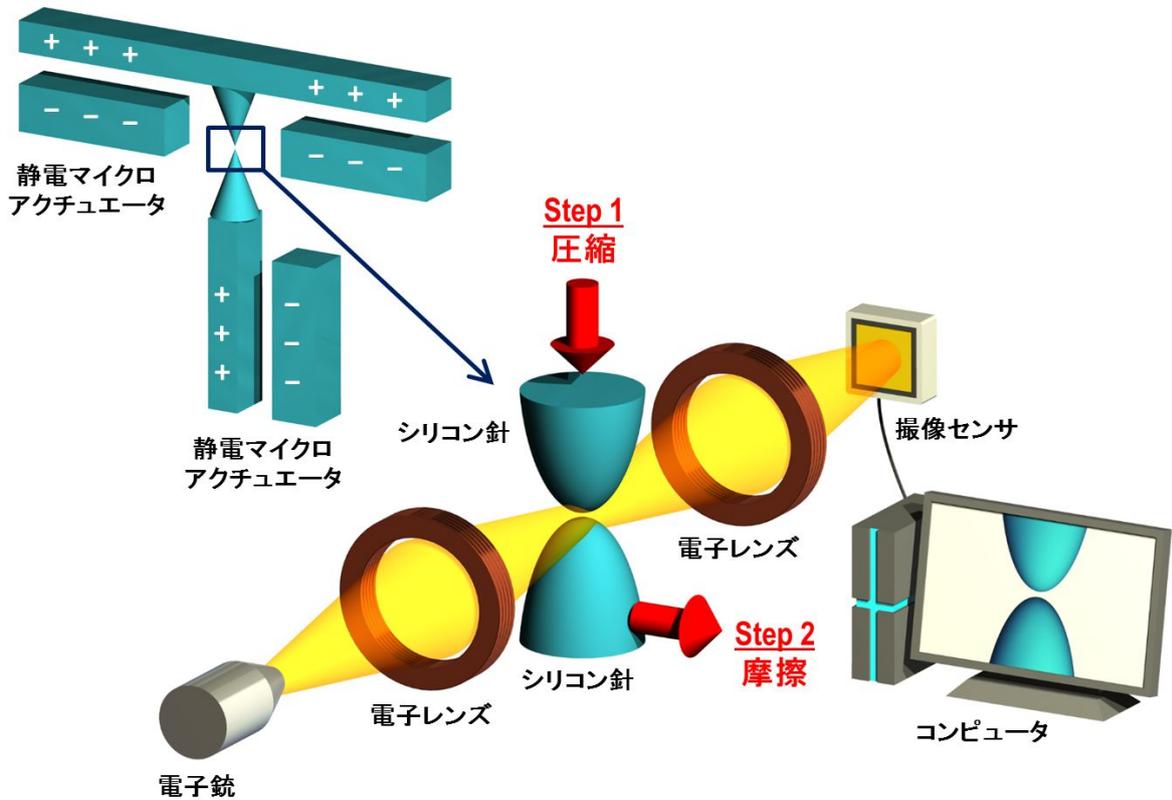


図1 電子顕微鏡とマイクロマシンを組合せた実験装置。超高圧かつ超低速で変形する接触部を長時間にわたってナノメートルレベルで観察可能。

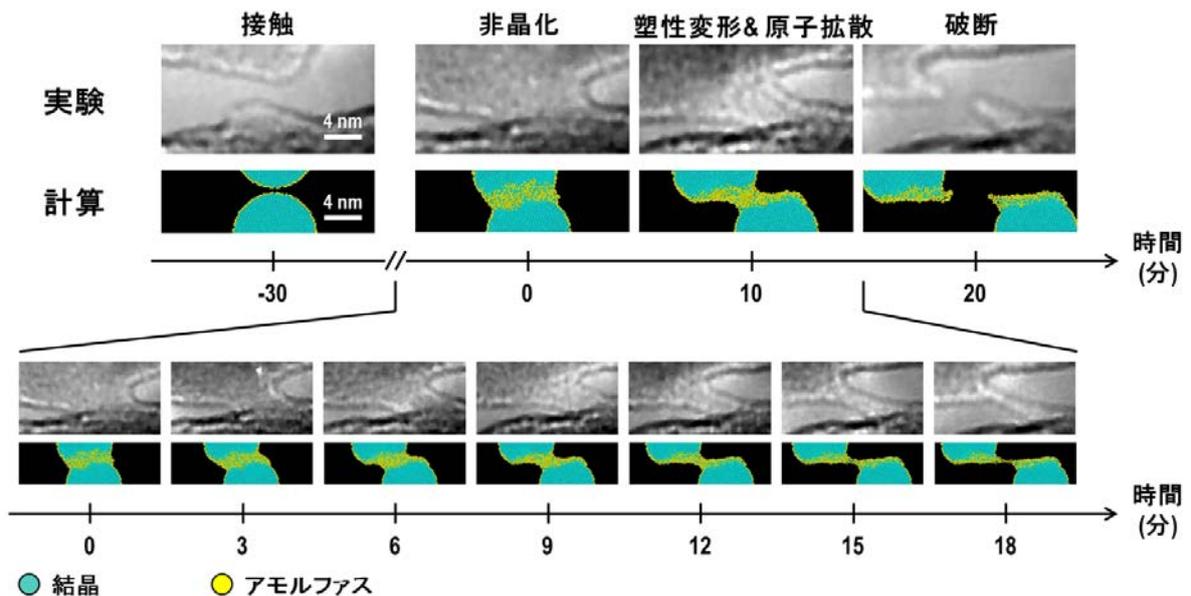


図2 超高圧かつ超低速のシリコンの摩擦。接触部が水あめのように変形することを確認した。実験と計算によりその変形が、アモルファスと原子の流入によるものであることを突き止めた。