

粘土鉱物の摩擦の起源を原子スケールから解明

～原子間の静電的な力が支配 断層運動の仕組み解明にむけた指針として期待～

配布日時：平成30年12月19日14時

解禁日時：平成30年12月22日4時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国立大学法人 東京大学大学院理学系研究科

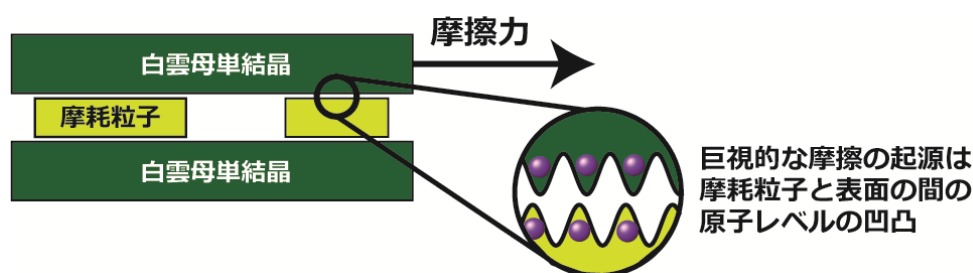
国立大学法人 広島大学

概要

1. NIMS は、東京大学大学院理学系研究科、広島大学と共同で、粘土鉱物の摩擦の起源が、接触面の原子間にはたらく静電的な力であることを、実験と理論から初めて明らかにしました。固体潤滑剤の材料設計や、地震発生の原因となる断層面のすべりの仕組み解明の指針となることが期待されます。

2. 粘土鉱物を含む層状結晶は一般的に摩擦力が低く、自然界では地滑りや断層運動の要因の1つと考えられています。また摩擦を低減する固体潤滑剤としての利用も検討されるなど、摩擦に関する研究が盛んに行なわれています。しかし粘土鉱物の摩擦の起源については、何らかの力で表面同士が接着することが原因だと考えられていますが、物質間にはたらく静電力や分子間力のほか、接触面同士の結晶方向の違い、表面の粗さや不純物の存在なども複合的に作用するため、詳細は分かっていませんでした。

3. 本研究チームは、原子レベルで平滑な表面を持つ層状粘土鉱物「白雲母」に注目しました。20x40 cm²の白雲母表面間に乾燥状態で高圧をかけて水分を排除し、表面をずらしながら摩擦力を測定しました。その結果、接触面が削れてできた摩耗粒子の影響で、結晶方位の影響が平均化されている可能性があることが分かりました。さらに量子力学に基づいて、接触面で原子間にはたらく静電的な力を計算し、結晶方位の影響を平均化して摩擦力を求めたところ、実験結果と非常によく一致することが分かりました。これらの結果から、粘土鉱物におけるセンチメートルサイズの摩擦が、原子スケールの静電的な力によって支配されていることを初めて明らかにしました。



4. 今後は白雲母以外の粘土鉱物全般の摩擦強度を理解する理論を構築して、地滑りや地震と摩擦の関係解明を目指します。また摩擦を低減する固体潤滑剤などの材料設計の指針を与えるものと期待されます。

5. 本研究は、物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点の佐久間博主任研究員、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA) 末原茂主幹研究員、東京大学大学院理学系研究科の河合研志准教授、広島大学大学院理学研究科の片山郁夫教授の研究チームによって行われました。また本研究は、文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究 「地殻ダイナミクス -東北沖地震後の内陸変動の統一的理解-」の公募研究 JP17H05320, JP15H01145 および、JSPS 科学研究費補助金 JP15H02147 の助成を受けたものです。

6. 本研究成果は、Science Advances 誌にて現地時間2018年12月21日14時 (日本時間12月22日4時) に掲載されます。

研究の背景

粘土鉱物を含む層状結晶は摩擦力の低いものが多く、自然界では地滑りや断層運動の一要因と考えられています。また摩擦を低減する固体潤滑剤としての利用も検討されています。粘土鉱物の摩擦のメカニズムはこれまで未解明であったため、滑り面で粘土鉱物が存在する場合に、どのような条件ですべりやすいのかを推定することが困難でした。また固体潤滑剤の材料開発においても、材料設計の指針が立ちません。

粘土鉱物は厚さ 0.7~1 nm の層が積層した層状結晶であり、この層間でのすべりが低摩擦と関連すると考えられています。従来、物質表面間の摩擦は真実接触点における接着（凝着）が原因と考えられてきましたが、本研究グループが粘土鉱物間の接着エネルギーを精密に導出した結果、摩擦と接着エネルギーの間に相関は認められず、粘土鉱物の低摩擦の原因は未解明となっていました。

なぜ粘土鉱物の摩擦強度は、他の鉱物と異なるのか？この基本的な問いに対する答えは無く、様々な環境における鉱物の摩擦を理解するための基礎が欠如していました。そこで本研究では、粘土鉱物の一つである白雲母を研究対象とし、摩擦のメカニズム解明を目指しました。

研究内容と成果

真実接触点⁽¹⁾での摩擦力の導出

どんなに平坦な摩擦面であっても、必ず凹凸があり、摩擦面の一部のみが接触しています（図1）。

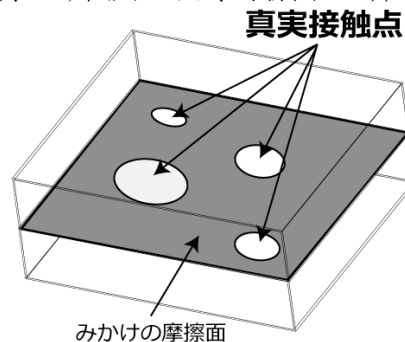
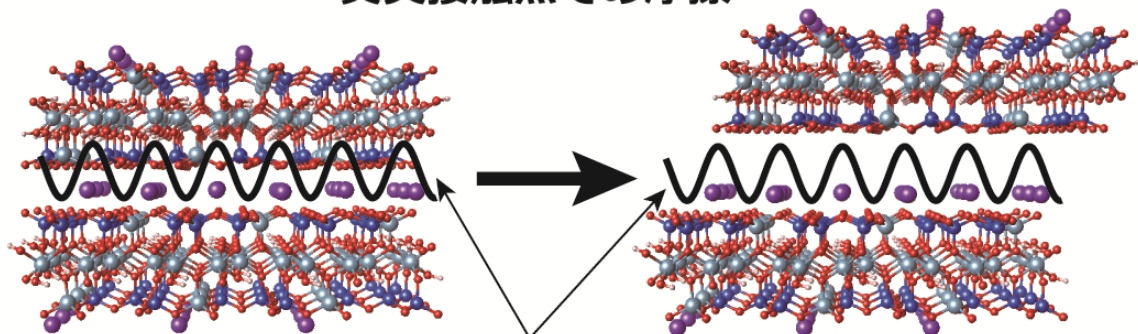


図1 みかけの摩擦面と真実接触点の概念図。

この真実接触点での摩擦はみかけの接触面の 1~0.01%以下の面積となります。本研究グループは、白雲母表面間における真実接触点での摩擦力を、量子力学に基づく電子状態計算から求めました。その結果、真実接触点での摩擦力には以下の特徴があることがわかりました。

- 摩擦力は白雲母表面間で原子間の引力・斥力によるポテンシャルエネルギー面⁽²⁾の凹凸を乗り越えるために必要な力である（図2）。
- 摩擦力はせん断方向によって異なり、30度ごとに増減する。

真実接触点での摩擦



原子間の引力・斥力による
ポテンシャルエネルギー面の凹凸

原子レベルの凹凸を乗り越えるための力 = 摩擦力

図2 白雲母表面間の摩擦力の起源

実験による摩擦力の導出

これらの真実接触点で理論的に導出した摩擦力が、現実的な摩擦現象をどの程度説明できるかを確かめるため、白雲母単結晶表面間の摩擦試験を行いました。理論計算で導出した摩擦力は真実接触点での荷重が数ギガパスカル³⁾に相当する条件での値なので、同様の条件を実験で達成するため、白雲母表面間に数10メガパスカル⁴⁾の荷重を加えました。こうすることで、真実接触点には数ギガパスカルの荷重がかかります。また真実接触点での摩擦力は結晶方位によって変化するため、 $\langle 010 \rangle$ ⁶⁾方向の摩擦力を測定しました。この実験結果を図3(左)に示します。結果として $\langle 010 \rangle$ 方向の摩擦力の予測値は実験結果とは合いませんでした。しかし、実験回収試料を観察すると、接触面で摩耗粒子が発生していることがわかりました(図3右)。摩耗粒子が存在すると摩擦の方向がランダムとなるため、摩擦力は元の結晶方位に依存せず、すべての結晶方位における摩擦力の平均値となることが予想されます。実際に理論計算の摩擦力の平均値をとると、実験結果と良い一致を示しました。

この結果は白雲母表面において、従来の接着(凝着)が摩擦の起源ではなく、原子レベルのポテンシャルエネルギー面の凹凸が摩擦の起源であることを示しています。過去に原子レベルからセンチメートルレベルの摩擦を解明した研究は例がなく、白雲母表面間を例として、本研究で初めて摩擦の起源を明らかにしました。

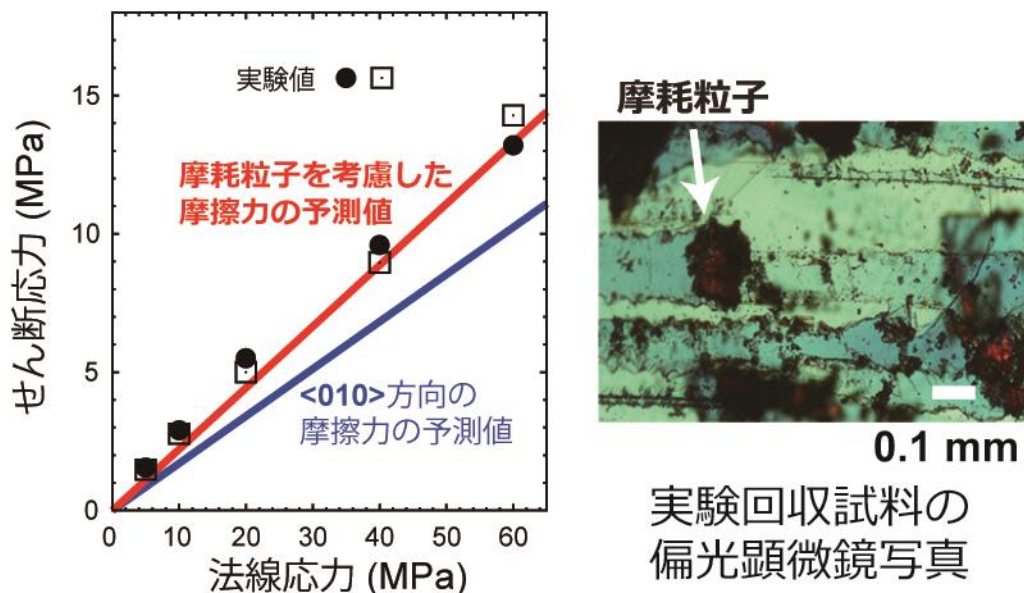


図3 摩擦実験と理論計算からの予測値の比較(左)と実験回収試料の顕微鏡写真(右)

今後の展開

これまで、粘土鉱物を含む岩石の摩擦力は、測定することでしか知ることができませんでした。本成果に基づけば、複雑と考えられていた粘土鉱物の摩擦力を理論的に解釈することが可能となります。世界中の断層では粘土鉱物を含むものが多く発見されており、断層運動の定量的な解釈を目指します。さらに本成果は、層状結晶全般に適用できる可能性があり、固体潤滑剤の材料設計に指針を与えることが期待できます。

掲載論文

題目: What is the origin of macroscopic friction?

著者: Hiroshi Sakuma, Kenji Kawai, Ikuo Katayama, Shigeru Suehara

雑誌: Science Advances

掲載日時: 2018年12月21日14時(日本時間22日4時)

用語解説

(1) 真実接触点

物質間を接触させると、表面は原子レベルで見ると凹凸しているため、すべての面が接触しているわけではなく、ごく一部のみが接触しています。この接触点を真実接触点と呼びます。

(2) ポテンシャルエネルギー面

高い位置にある物質は、重力によって低い位置に落ちる運動ができるため、高いエネルギーを持つと考えます。このエネルギーをポテンシャルエネルギーと呼びます。逆に低い位置にある物質を高い位置に持ち上げるには、力を与えてエネルギーを供給する必要があります。このエネルギーは重力によるものではなく、原子間にはたらく引力や斥力でも同様に考えることができ、せん断時に必要なポテンシャルエネルギーの分布をポテンシャルエネルギー面と呼びます。

(3) ギガパスカル

圧力の単位で1ギガパスカルは1万気圧に相当します。

(4) メガパスカル

圧力の単位で1メガパスカルは10気圧に相当します。

(5) <010>方向

結晶内の方向を表す指数で、結晶構造が決まると一義的に定義することができます。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 機能性粘土材料グループ
主任研究員 佐久間 博 (さくま ひろし)

E-mail: SAKUMA.Hiroshi@nims.go.jp

TEL: 029-860-4942

URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/sakuma_hiroshi

東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
准教授 河合 研志 (かわい けんじ)

E-mail: kenji@eps.s.u-tokyo.ac.jp

TEL: 03-5841-4310

URL: <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kenji>

広島大学大学院理学研究科 地球惑星システム学講座
教授 片山 郁夫 (かたやま いくお)

E-mail: katayama@hiroshima-u.ac.jp

TEL: 082-424-7468

URL: <https://home.hiroshima-u.ac.jp/geoenvi/link/katayamaG.html>

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA) ナノ計算材料科学グループ

主幹研究員 末原 茂 (すえはら しげる)

E-mail: SUEHARA.Shigeru@nims.go.jp

TEL: 029-860-4350

URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/suehara_shigeru

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp

東京大学 大学院理学系研究科・理学部広報室
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL: 03-5841-0654
E-mail: kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

広島大学 財務・総務室 広報部
〒739-8511 東広島市鏡山一丁目 3 番 2 号
TEL: 082-424-3749, FAX: 082-424-6040
E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp