

高温で速度に影響されない「理想の摩擦」を呈する挙動を観測

～摩擦の起源解明につながる新発見～

NIMS はアメリカ地質調査所・東京大学との共同研究で、従来“理想”とされながら現実には実現されていなかった「すべり速度に全く依存しない摩擦」を、潤滑材料としても用いられる層状酸化物マイカ（雲母）を 200℃に加熱することで初めて実験的に確認しました。さらにその理由が、高温下での結晶内部の欠陥消失にあることを明らかにしました。この発見は、これまで未解明だった摩擦の根本原理の解明に迫るとともに、省エネ型潤滑剤の設計・開発などへの発展が期待されます。本成果は 2026 年 7 月 20 日に Physical Review Letters オンライン版に掲載されました。

研究成果の概要

■従来の課題：物質間の動摩擦力のすべり速度に対する応答を予測する理論がない

乾燥状態の物質間において「動摩擦力（ものを動かしているときの摩擦力）」は、すべり速度（動くスピード）に関係なく、常に一定である」という法則（アモントン・クーロンの法則）があり、高校物理の教科書でも、摩擦の基本法則の一つとして説明されています。しかし実際には、多くの材料ですべり速度によって摩擦力がわずかに変化する（速度・状態依存摩擦則）ため、クーロン則の「完全にスピードに依存しない状態」は実証できていませんでした。動摩擦力のわずかな変化は、動力変動における振動や摩耗の発生、動力伝達の変動など機械の安定動作に大きく影響します。そのため、摩擦とすべり速度の関係を理解し予測することは、機械設計や潤滑材料の開発にとって重要な課題であり、この物理現象の解明が求められていました。

■成果のポイント：高温で動摩擦力のすべり速度依存性が消失し、結晶内部の欠陥も消失

今回、NIMS・アメリカ地質調査所・東京大学の研究チームは、層状酸化物の一つであるマイカ（ $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_2$ ）単結晶間の動摩擦力を室温から 200℃まで測定したところ、温度の上昇とともにすべり速度の変化への動摩擦力の応答が小さくなり、200℃ですべり速度に無関係になることを発見しました。この現象は従来の摩擦理論では全く説明できない現象で、理想的なクーロン摩擦を実現したと言えます。実験試料を電子顕微鏡で観察すると、マイカ結晶内のリプロケーションと呼ばれる波のような欠陥の有無とすべり速度依存性の関連が明らかとなり、複雑な摩擦現象の背景に結晶の欠陥が関係することを初めて示す成果です。

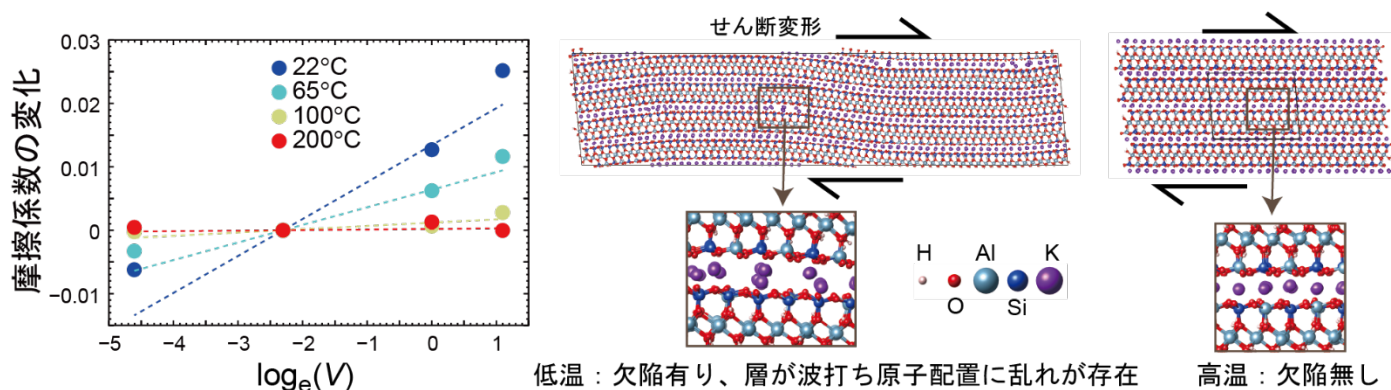


図 1：すべり速度（V）を変化させた際のマイカの摩擦係数の変化、低温では摩擦係数の変化が大きい、200℃の高温では摩擦係数がすべり速度変化と無関係になる。低温では摩擦面からやや離れた結晶内部に欠陥が存在し、この欠陥のすべり摩擦がすべり速度に依存するが、高温では欠陥が消失し摩擦係数がすべり速度と無関係となることを発見した。

■将来展望

今後は、摩擦実験を電子顕微鏡内で実施し、結晶内の欠陥の有無と動摩擦力のすべり速度依存性の関係をその場観察を用いて明らかにします。さらに研究対象をさまざまな層状材料に展開することで、すべり速度に対する新しい摩擦の法則の開発を目指します。将来的には、固体潤滑剤として使われる層状材料の設計につながり、さまざまなすべり速度で性質の変化しない使いやすいエネルギー損失を抑える潤滑剤の設計・開発が期待されます。

■その他

- 本研究は、NIMS 電子・光機能材料研究センター 資源循環材料グループの佐久間博主幹研究員、アメリカ地質調査所 (USGS) Rock Physics Laboratories の Diane E. Moore 博士、David A. Lockner 博士、東京大学大学院理学系研究科の小暮敏博名誉教授からなる研究チームによって行われました。
- 本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金（課題番号：JP24K00795, JP25H00688, JP20K04115）の支援を受けて実施されました。
- 本研究成果は、2026 年 7 月 20 日に Physical Review Letters オンライン版にて掲載されました。

研究の背景

車輪の軸受けなど摺動する部品においては、動摩擦力による摩擦熱の発生や部品の摩耗が発生するため、摩擦を低減する潤滑剤が必要とされます。低摩擦の固体潤滑剤として広く使われているマイカ¹を含む層状結晶²など、摩擦を制御する材料の開発においては、摩擦現象に対する理論構築が重要です。

乾燥状態の物質間の動摩擦力は、①垂直荷重に比例、②見かけの接触面積に無関係、③すべり速度にほとんど無関係という摩擦の法則（アモントン・クーロンの法則）に従うとされ、高校物理の教科書でも摩擦の基本法則として説明されています。本研究で注目する③の法則では、動摩擦力がすべり速さに“ほとんど”無関係とあります。これはクーロンが指摘しているように、実際の物質間の動摩擦力はすべり速さに無関係ではなく、多くの場合すべり速さに依存して動摩擦力が“わずかに変化する”ことを意味しています。動摩擦力の大小とともに、動摩擦力のすべり速度に対する変化は動摩擦力の安定性に大きな影響を与えます。例えば、すべり速度の増加に対して動摩擦力が減少する材料では、動摩擦力が振動するスティックスリップ³という現象が発生しやすく、機械部品の安定制御が困難となります。もし動摩擦力とすべり速度の関係を理論的に解明できれば、材料間の摩擦安定性を予測することが可能となり、固体潤滑剤の設計や耐久性の向上につながります。しかしながら、摩擦現象は複雑ですべり速度に対する動摩擦力の変化を説明する法則は実験結果を説明する経験的なものであり、動摩擦力とすべり速度の関係を科学的に解明することが求められていました。

研究内容と成果

NIMS、アメリカ地質調査所、東京大学の研究チームは、法線応力：100 MPa、温度：22℃から 200℃、すべり速度：0.01-3.0 マイクロメートル／秒、乾燥の条件で単結晶のマイカ（ $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_2$ ）表面間の摩擦試験を実施しました。22℃ではすべり速度の増加に伴い、動摩擦力が大きくなる応答を示しましたが、温度の増加とともにその応答が減少し、200℃ですべり速度の変化に動摩擦力が全く応答しない理想的なクーロン摩擦⁴を示すことを発見しました。

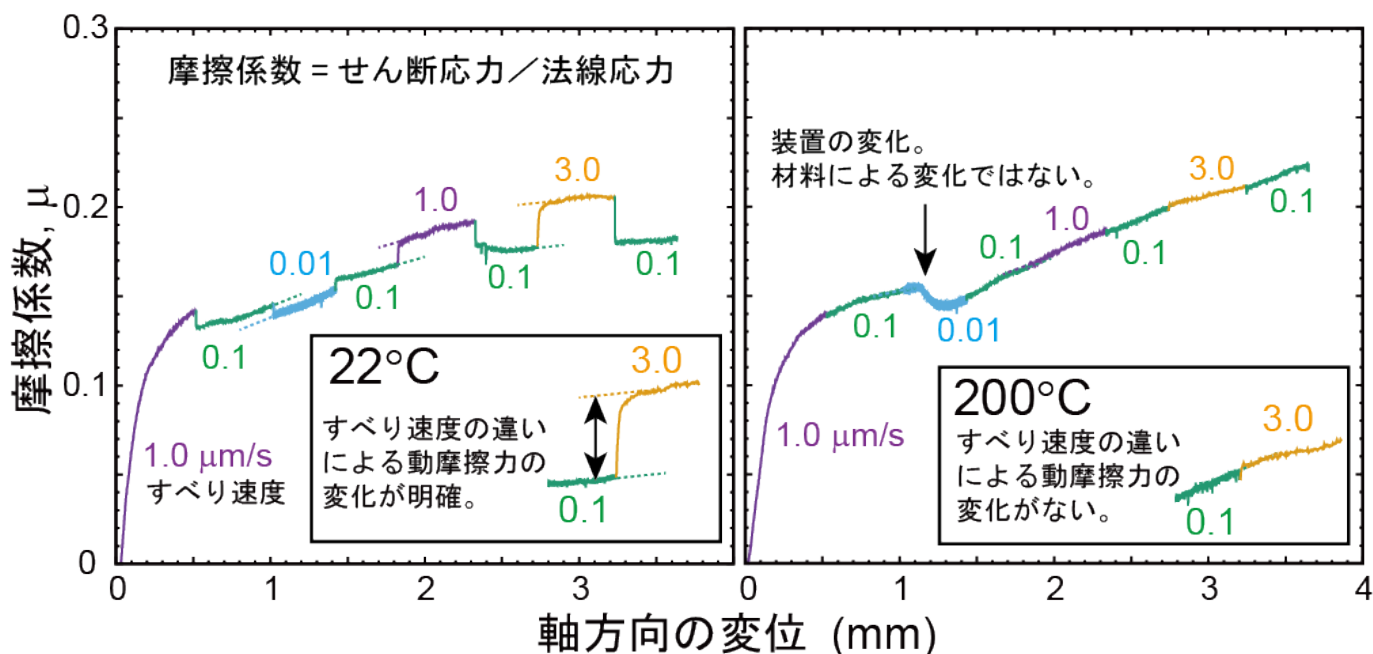


図 2 : すべり速度を変化させた際の摩擦係数の変化 (曲線近くの数値はすべり速度 $\mu\text{m/s}$)。左 : 22°C、右 : 200°Cでの実験結果。ここで摩擦係数の変化は動摩擦力の変化に対応している。22°Cの実験では動摩擦力がすべり速度の変化で大きく変化しているが、200°Cの実験ではすべり速度の変化に対して動摩擦力の変化はみられない。

このような温度の増加とともに動摩擦力のすべり速度に対する依存性が減少する現象は、現状の摩擦の速度・状態依存則で説明できない新しい現象です。そこで摩擦試験後の試料の表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察しました。摩擦試験後の表面には、さまざまな材料で一般的に見られる線状の摩擦痕が見られました。加えて、層状結晶に特有の変形と考えられる、せん断方向と垂直方向の割れが見られました。しかし、これらの表面形状に温度変化は見られず、すべり速さの温度依存性を説明しうる特徴は得られませんでした。そこで、回収試料の断面を集束イオンビーム装置 (FIB) により切り出し透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察しました。すると、低温の試料には層が折れ曲がったり、波打ったりするような欠陥 (リプロケーション⁵) が存在しましたが、200°Cの試料ではそのようなリプロケーションは観察されませんでした。

そこでこのリプロケーションの有無が動摩擦力のすべり速度に対する応答に影響していると考え、分子動力学法⁶によりせん断シミュレーションを行いました。その結果、リプロケーションが存在するとすべり速度に対して動摩擦力が変化すること、リプロケーションがない場合にはすべり速度と動摩擦力が無関係であること、が明らかとなりました。

本研究で見つかった現象は、我々の知る限り全く新しい摩擦現象であり、動摩擦力のすべり速度に対する応答が層状結晶特有のリプロケーションという欠陥の有無に関係していることを突き止めたことは、今後の予測性のある摩擦理論の発展に寄与する成果です。

今後の展開

今後は、摩擦実験を電子顕微鏡内で実施し、結晶内の欠陥の有無と動摩擦力のすべり速度依存性の関係をその場観察を用いて明らかにします。さらに研究対象をさまざまな層状材料に展開することで、すべり速度に対する予測性のある摩擦法則の確立を目指します。将来的には、固体潤滑材として使われる層状材料の設計につながり、さまざまなすべり速度で性質の変化しない使いやすくエネルギー損失を抑える潤滑材への応用が期待されます。

■掲載論文

題目	Velocity-independent dry friction on mica: Realization of ideal Amontons-Coulomb friction
----	---

著者	Hiroshi Sakuma, Diane E. Moore, David A. Lockner, Toshihiro Kogure
雑誌	Physical Review Letters
DOI	https://doi.org/10.1103/y3jy-nqcd
掲載日	2026 年 7 月 20 日（オンライン版）

■用語解説

[1] マイカ：本研究対象のマイカは層状結晶で、 $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH})_2$ の化学組成で記載される白雲母である。化学組成が均質で直径 10 cm以上の板状の単結晶が天然試料から得られる。へき開により原子スケールで平滑な表面を容易に得られることから、ナノテクノロジー向けの基板材料の一つとして使われている。

[2] 層状結晶：原子やイオンが結合によりがシート状（層状）構造をつくり、その層間同士が比較的弱い結合で積み重なった結晶のこと。

[3] スティックスリップ：固体表面間の摩擦で、すべりと停止を繰り返す間欠的すべり現象のこと。

[4] クーロン摩擦：乾燥状態ですべり速度に依存しない動摩擦力のことをクーロン摩擦と呼ぶ。クーロンの摩擦実験によって得られた経験則である。発見者のクーロンは電磁気学におけるクーロンの法則の発見者と同一人物である。

[5] リプロケーション：層状結晶に特有の欠陥で波様構造を表す Ripple と欠陥を表す Dislocation を組み合わせた造語である。2015 年に発見された欠陥である。

[6] 分子動力学法：原子同士にはたらく力を計算して、その運動の時間発展を追うことで、物質の物性を導出するシミュレーション手法。

本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	NIMS 電子・光機能材料研究センター 主幹研究員 佐久間 博 E-mail: SAKUMA.Hiroshi@nims.go.jp TEL: 029-860-4942 URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/sakuma_hiroshi
報道・広報について	NIMS 国際・広報部門 広報室 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。

エネルギー、環境、医療、インフラ、モビリティ——私たちの暮らしを支えるあらゆる技術は「物質」と「材料」で成り立っています。

NIMS はそれらの基礎・基盤研究だけでなく、成果の普及とその活用の促進まで総合的に行っています。

社会の発展は常に物質・材料科学の進歩とともにあり、いま、地球規模の環境・資源問題の解決に向けた力ギとして、その重要性はいっそう高まっています。

NIMS は「材料で、世界を変える」というビジョンのもと、持続可能で豊かな社会の実現を目指して、世界最先端の研究を続けています。

【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>