PRESS RELEASE

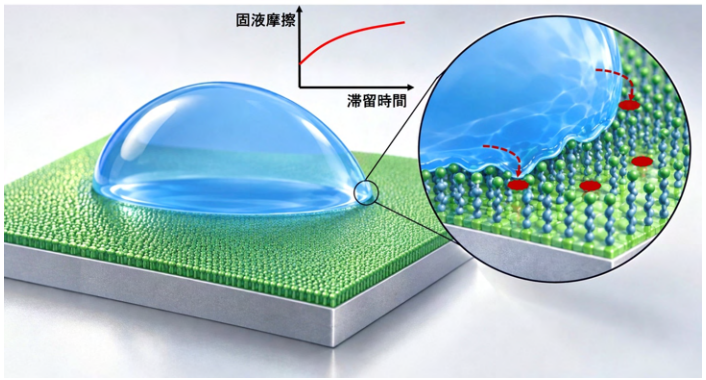
東京大学
金沢大学

# 固体表面の液滴は長く静止するほど動き出しにくく、速く滑るほど摩擦が減る

## ――ナノスケールの表面欠陥が生む「摩擦の記憶効果」を解明――

### 発表のポイント

- ◆ 単分子膜で被覆した固体表面上の液滴において、静止時間が長いほど動き始めに必要な力が増大し、特定の表面では低速域で滑り速度が増すほど動摩擦が減少することを確認しました。これらの現象を、過去の接触履歴が摩擦に影響する「記憶効果」に基づいて説明しました。
- ◆ 表面を構成する分子の鎖長を変えた実験と理論解析を組み合わせ、液滴の接触線が時間とともにナノスケールの表面欠陥に捕捉されることで、摩擦の記憶効果が生じるメカニズムを明らかにしました。
- ◆ 表面分子の構造のわずかな違いが、液滴の摩擦特性を定性的に変えることを示した本成果は、コーティング、印刷、マイクロ流体デバイスなどにおける液滴運動の制御への応用が期待されます。




**ナノスケールの表面欠陥による接触線のエイジングが生み出す液滴摩擦の履歴効果。拡大図は、静止時間とともに強まる接触線のピン止めを示す。**

### 概要

東京大学大学院工学系研究科の塩見 淳一郎 教授、Li Yuanzhe 特任助教、李 禮林 講師、Mouterde Timothée 准教授らと、金沢大学ナノ生命科学研究所（WPI-NanoLSI）の福間 剛士 所長／教授、宮田 一輝 准教授らの共同研究グループは、単分子膜で被覆した固体表面上の液滴について、静止時間が長いほど静摩擦（注 1）が増大する「摩擦の記憶効果」を実証しました。また、特定の表面では、低速域において滑り速度が増すほど動摩擦（注 1）が減少する現象（注 2）を確認し（図 1）、両者を統一的に説明する物理モデルを構築しました。従来の動的濡れ（注 3）理論では、液滴の摩擦力は一般に滑り速度とともに増加すると考えられてきました。しかし、特定の表面において、液滴の静摩擦が動摩擦を上回る現象や、滑り速度の増加に伴って摩擦力

が減少する現象は十分に説明できず、その微視的なメカニズムや接触履歴の役割は未解明でした。

本研究グループは、分子構造を制御した自己組織化単分子膜（注 4）上で液滴の摩擦力を精密に測定し、静摩擦が静止時間に対してほぼ対数的に増加することを確認しました。原子間力顕微鏡（AFM、注 5）による表面構造解析からは、分子配列の違いに伴うナノスケールの表面構造・欠陥（注 6）が摩擦特性に大きく影響することを示しました（図 2）。また、分子鎖の長さや温度を変えると、摩擦の記憶効果を抑制できることを明らかにしました。これらの結果に基づき、液滴の接触線（注 7）が時間とともに表面欠陥に捕捉され、摩擦が増大する「エイジング（Aging）」（注 8）のメカニズムを提案しました（図 3）。このエイジングと、滑り速度に依存するピン止め（注 9）の解除過程を組み合わせることで、静摩擦の時間依存性と動摩擦の速度依存性を統一的に説明しました。

本研究成果は、ナノスケールの表面構造が液滴全体の運動を左右する仕組みを示したものであり、動的濡れ現象の理解を深めるとともに、分子レベルの表面設計による液滴運動の制御や、コーティング、印刷、マイクロ流体デバイスなどへの応用が期待されます。

## 発表内容

### 〈研究の背景と経緯〉

窓ガラスを滑り落ちる雨粒から、コーティングやインクジェット印刷まで、液滴が固体表面上を移動する現象は、私たちの暮らしや産業のさまざまな場面で見られます。液滴がいつ動き始め、どのように滑り続けるのかを理解することは、液体の運動を精密に制御するうえで重要です。従来、液滴の運動は表面張力や接触角、粘性抵抗などに基づいて説明され、摩擦力は一般に滑り速度とともに増加すると考えられてきました。しかし、液滴を動かし始めるには滑り続けさせる場合よりも大きな力が必要になることや、滑り速度が増すと逆に摩擦力が減少する現象は、従来の理論では十分に説明できませんでした。これまでの研究では、液滴の静止時間が長いほど動き始めに必要な力が増大することが報告されており、過去の接触履歴が摩擦に影響する「記憶効果」が示唆されていました。しかし、その微視的なメカニズムや、滑走中の摩擦との関係は明らかになっていませんでした。特に、接触線における分子スケールの相互作用が、液滴の静摩擦と動摩擦をどのように支配するのかを解明することが課題となっていました。

### 〈研究の内容〉

本研究グループは、液滴の静止時間、滑り速度、表面分子構造が摩擦力に及ぼす影響を系統的に調べました。精密な摩擦力測定により、液滴が動き始める際に必要な力は、静止時間に対してほぼ対数的に増加することが分かりました。また、特定の表面では、低速域で滑り速度が増すほど摩擦力が減少する現象を確認しました。

このメカニズムを調べるため、AFM を用いて分子構造を制御した表面を解析しました。その結果、分子配列の違いがナノスケールの欠陥分布に影響し、不均一性の大きい表面ほどエイジングによる摩擦の増大が顕著になることが分かりました。一方、分子の流動性が高い液体的な表面では接触履歴への依存性が弱く、温度上昇による分子構造の変化によってもエイジングが抑制されることを示しました。

これらの結果に基づき、本研究グループは微視的なエイジングのメカニズムを提案しました。液滴が静止している間も、接触線の一部は熱揺らぎ（注 10）によって揺れ動き、周囲のナノスケールの表面欠陥に徐々に捕捉されていきます。これにより、液滴がピン止めされる箇所が増

え、摩擦力が強まります。一方、滑走中には、エイジングと、滑り速度に依存するピン止めの解除過程が競合します。これらを組み合わせることで、液滴の動き始めの摩擦力と低速域での滑走中の摩擦力を統一的かつ定量的に説明する物理モデルを構築しました。このモデルは、液滴の摩擦力が現在の滑り速度だけでなく、接触線と表面欠陥の相互作用の時間変化にも依存することを示しています。さらに、この摩擦挙動は、固体同士の摩擦に見られるエイジングや速度依存性と共通する特徴を持ち、液滴の摩擦と固体同士の摩擦に共通する物理原理の存在を示唆しています。

**〈今後の展開〉**

本研究成果は、ナノスケールの界面現象が液滴全体の運動を支配する仕組みを明らかにし、動的濡れ現象の基礎的な理解を深めるものです。特に、表面を構成する分子の配列や構造のわずかな違いが、液滴の摩擦特性を定性的に変えることを示しました。ナノスケールの表面欠陥や不均一性は実際の材料にも広く存在します。そのため、微視的なエイジングのメカニズムは系によって異なる可能性があるものの、本研究で提案した物理モデルは、さまざまな液体・固体界面に適用できる可能性があります。今後は、分子レベルの表面構造設計によって液滴の摩擦や運動を精密に制御することで、コーティング、印刷、マイクロ流体デバイスなどへの応用が期待されます。さらに、液滴の摩擦と固体同士の摩擦に共通する物理原理の理解を深め、界面摩擦や動的濡れに関する研究の展開につながると考えられます。

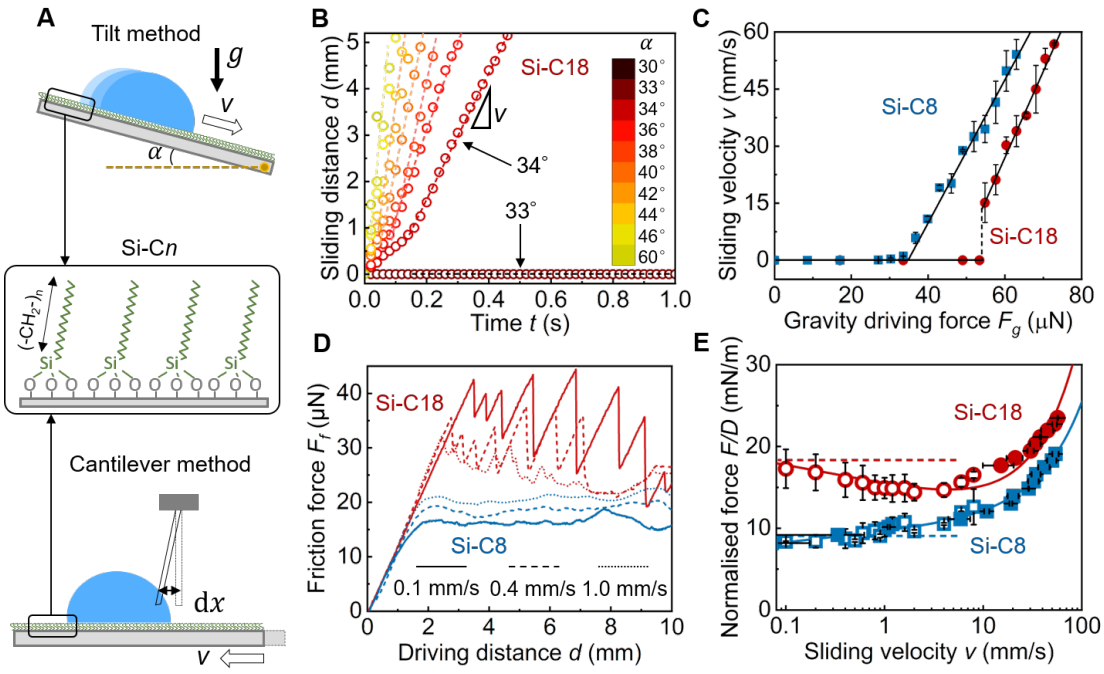



**図 1：液滴の摩擦力測定と滑り速度依存性**

（A）傾斜法と微小カンチレバー法による液滴の摩擦力の測定方法。（B、C）傾斜法による液滴の滑走挙動。（D、E）微小カンチレバー法による摩擦力測定と滑り速度依存性。特定の表面では、低速域で滑り速度が増すほど摩擦力が減少することが観察されました。

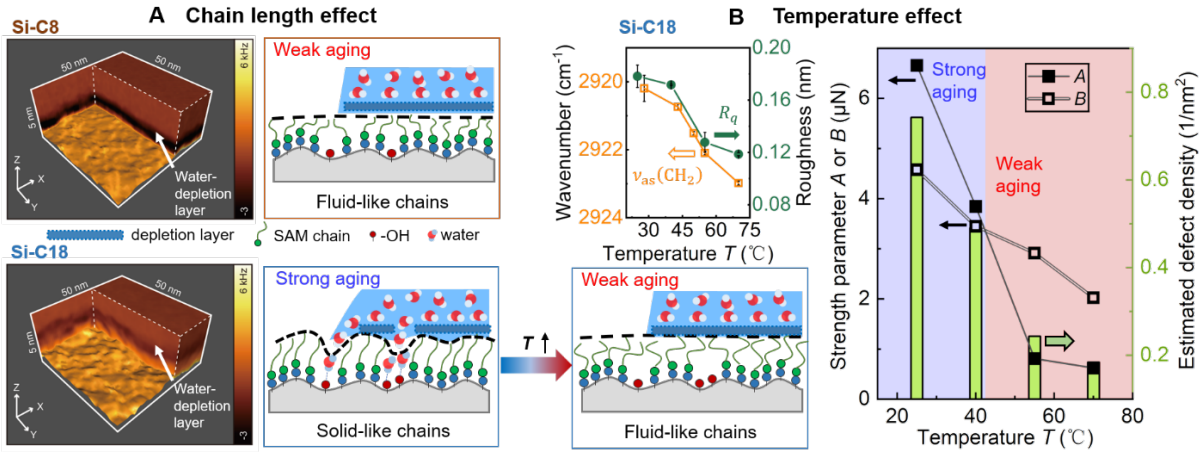



**図 2：表面分子構造による液滴の摩擦特性の制御**

（A）原子間力顕微鏡（AFM）による、分子構造の異なる表面のナノスケール界面構造の観察。（B）温度上昇に伴う表面分子構造と摩擦特性の変化。分子構造の変化によって表面欠陥の影響が弱まり、エイジングによる摩擦の増大が抑制されることを示しています。

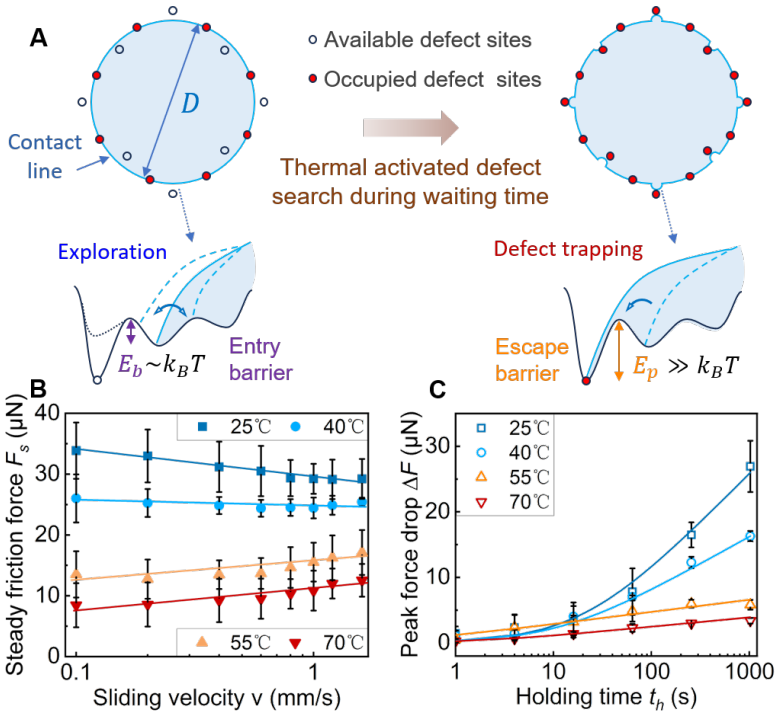



**図 3：接触線のエイジングのメカニズムと摩擦モデル**

（A）接触線が時間とともにナノスケールの表面欠陥に捕捉されるエイジング過程の模式図。（B、C）滑り速度および静止時間に対する摩擦力の変化。実験結果と理論モデルがよく一致することを示しています。

## 発表者・研究者等情報

東京大学
大学院工学系研究科 附属総合研究機構
Li Yuanzhe（リ　ユアンジェ）　特任助教
塩見　淳一郎　教授
兼：同研究科 機械工学専攻　教授

大学院工学系研究科 機械工学専攻
李　禮林　講師
Mouterde Timothée（ムテルドゥ　ティモテ）　准教授

大学院工学系研究科 応用化学専攻
劉　江洋　助教
細見　拓郎　准教授
柳田　剛　教授

金沢大学
大学院自然科学研究科 フロンティア工学専攻 博士前期課程
林　海斗

大学院新学術創成研究科 ナノ生命科学専攻 博士後期課程
Zhang Haohui

ナノ生命科学研究所（WPI-NanoLSI）
宮田　一輝　准教授
福間　剛士　所長／教授

## 論文情報

**雑誌名**：Proceedings of the National Academy of Sciences（PNAS）
**題　名**：History-Dependent Droplet Friction Driven by Contact-line Aging
**著者名**：Yuanzhe Li, Yaerim Lee, Kaito Hayashi, Haohui Zhang, Kazuki Miyata, Jiangyang Liu, Takuro Hosomi, Takeshi Yanagida, Takeshi Fukuma, Timothée Mouterde, Junichiro Shiomi*
**DOI**：10.1073/pnas.2619504123
**URL**：https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2619504123

## 研究助成

本研究の一部は、日本学術振興会（JSPS）の科学研究費助成事業（科研費）（課題番号：JP22H04950、JP26K17316）および文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の支援を受けて行われました。

## 用語解説

（注 1）静摩擦・動摩擦
静摩擦は静止している物体の動き出しを妨げる摩擦､動摩擦は物体が滑っている間に働く摩擦。本研究では、液滴が動き出す直前の最大静摩擦力と、滑走中の摩擦力をそれぞれ指す。

（注 2）滑り速度の増加に伴う摩擦力の減少
滑り速度が増すほど摩擦力が小さくなる現象。一般的な液滴の摩擦では速度とともに摩擦力が増加することが多いが、本研究では特定の表面の低速域で逆の傾向が見られた。

（注 3）動的濡れ
液体が固体表面上を広がったり移動したりする際に、液体と固体の接触状態が変化する現象。その挙動は表面張力、接触角、液体の粘性などに影響される。

（注 4）自己組織化単分子膜
分子が固体表面上に自発的に配列して形成する、分子一層程度の厚さを持つ薄膜。分子の種類や構造を変えることで、表面の濡れ性や分子の動きやすさなどを調整できる。

（注 5）原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy, AFM）
非常に細い探針と試料表面の間に働く微小な力を検出し、表面の形状や構造をナノメートル以下のスケールで計測・観察する顕微鏡。

（注 6）ナノスケールの表面構造・欠陥
ナノメートル程度の微小な表面構造や不均一な部分。本研究では、表面分子の配列の乱れや局所的な化学的性質の違いなどが、液滴の接触線を固定する原因となる。

（注 7）接触線
液体・固体・気体の三相が接する境界線。固体表面上の液滴では、液体と固体の接触領域を囲む線に相当する。

（注 8）エイジング（Aging）
接触している時間が長くなるにつれて摩擦が増大する現象。本研究では、接触線が時間とともに表面欠陥に捕捉され、動きにくくなる過程を指す。ここでいうエイジングは、材料そのものの劣化を意味しない。

（注 9）ピン止め
液滴の接触線が表面の微小な凹凸や化学的な不均一性に捕捉され、動きにくくなる現象。

（注 10）熱揺らぎ
熱エネルギーによって分子や微小な構造が不規則に動く現象。本研究では、この熱揺らぎによって接触線の一部が揺れ動き、周囲の表面欠陥に捕捉される過程を考えている。

## 問合せ先

〈研究内容について〉
東京大学大学院工学系研究科 附属総合研究機構／機械工学専攻
教授　塩見　淳一郎（しおみ　じゅんいちろう）

金沢大学ナノ生命科学研究所（WPI-NanoLSI）
所長／教授　福間　剛士（ふくま　たけし）

〈機関窓口〉
東京大学大学院工学系研究科 広報室

金沢大学ナノ生命科学研究所事務室