

界面化学 200 年の常識～濡れ方は一つに定まる～を覆す！

濡れ方が二状態に分岐する表面設計方法

PFAS フリーの撥水材料開発にも道。濡れ性制御の新たな設計指針を提示

NIMS は、一つの固体表面上で、液体が「付着する状態」と「弾かれる状態」が同時に存在する状態、つまり濡れ方が二状態に分岐する現象を発見しました。これは、平坦面では「どの液体をどの固体に接触させるかで濡れ方は一つに決まる」という、200 年以上信じられてきた界面化学の常識を覆す発見です。さらに、この現象を引き起こすための普遍的な表面設計原理も明らかにしました。本成果は、4月2日に *Advanced Materials Interfaces* 誌に掲載されました。

研究成果の概要

■従来の課題

水滴は固体に触れると、平らに広がる（付着する）こともあれば、玉のように弾かれることもあります。「濡れ」というこの現象は、自然現象から日常生活まであらゆる場面で見られ、その制御はインクジェットや塗装産業などあらゆる産業分野の基盤技術となっています。1805 年 Thomas Young は固体と液体の組み合わせごとに、濡れ方は常にただ一つの状態に定まる」という法則を発見しました。これは長らく界面科学の常識とされてきました。

■成果のポイント

今回研究チームは、同一基板において水滴が「付着する」／「弾かれる」という、相反する二つの状態で共存する現象を、油に沈めた平坦基板に水滴を接触する実験で発見しました。設計の鍵は、固体表面と油の中に、水素結合という特定の分子の「手」を用意し、その「手の数」を精密にコントロールすることです。その結果同じ基板と油の組み合わせにも関わらず、水滴接触および油に沈める操作の「順番」を変えるだけで、水滴の性質が「付着する」と「弾かれる」の二つの状態に分岐することが分かりました(図 1(a))。さらに、外部刺激によって付着状態から弾かれ状態に切り替え可能であることも示しました(図 1(b))。

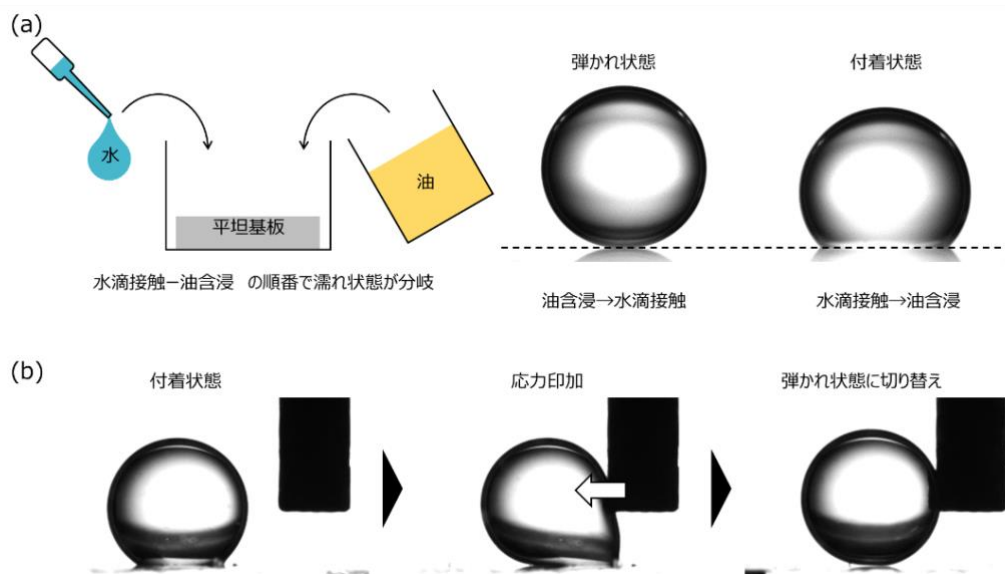


図 1 : (a) 同一平坦基板上において、弾かれ・付着状態の水滴が同時に観察されている。弾かれ状態は、基板を油に沈めた後に水滴を接触させた状態。付着状態は水滴を接触させた後に油に沈めることで形成できる。(b) 外部刺激による付着状態から弾かれ状態への切り替え。付着状態の水滴に対してテフロン針を用いて基板並行方向に応力を加えることで弾かれ状態に切り替えることができる。

■ 将来展望

提案した設計原理は新たな「濡れ性制御手法」として、機能性表面の開発に貢献できると考えます。液体を弾く状態を、本来液体が付着する組み合わせでも作れるということは、環境影響が懸念される PFAS（有機フッ素化合物）のような撥水性の高い材質に頼らずとも、撥水撥油性表面を形成できる可能性があるということです。また、本研究で用いた平坦な表面は、従来の微細凹凸構造に比べて機械耐久性が格段に高いため、傷がつきやすい環境下でも長期間性能を維持できる、新しい機能性表面の設計につながります。そして設計条件を満たすことができれば、特別な表面構造を形成しなくても平坦表面にただ油を垂らすだけで液体を弾く表面を形成できる可能性があります。さらに分岐可能条件においては、単に液体を弾く・付着させるにとどまらない、濡れ状態を切り替え可能なスマート表面としてマイクロ流体の操作プラットフォームとしての応用が期待できます。

■ その他

- 本研究は、NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センターの天神林 瑞樹 独立研究者、高分子・バイオ材料研究センターの荒井 俊人 独立研究者からなる研究チームによって行われました。
- 本研究成果は、2026 年 4 月 2 日に Advanced Materials Interfaces 誌のオンライン版にて掲載されました。

研究の背景

液体を固体表面に滴下すると、固体・液体表面が固液界面に置換される現象を「濡れ」といいます。固体や液体の組み合わせによってその濡れ方は多様に変化し、例えば付着状態や弾き状態などが異なります。この「濡れ」に関する最も基本的な法則は、1805 年に Thomas Young によって発見されました。それは、「平坦表面においては、固体と液体の材料の組み合わせが決まれば、その濡れ方は常にただ一つの状態に決まる」というものです。これは「Young の式」として知られ、以来 200 年以上にわたり、材料の濡れやすさを判断するための指針とされてきました。この法則は、空気中における濡れ方(空気—水—固体の 3 相の関係)や、水と混ざらない油中での濡れ方(油—水—固体の 3 相の関係)の判断に適用されます。

その後、1930~40 年代に Wenzel と Cassie らによって、表面に微細な凹凸構造を設けることで、この法則に変化をもたらせることが示されました。凹凸のある表面の上では、液体は二つの異なる状態で存在しえます。一つは、凹凸の隙間にまで液体が入り込んでべったりと付着する「Wenzel 状態」です。もう一つは、表面と液体の間に空気を閉じ込めることで、蓮の葉のように水をコロコロと弾く「Cassie 状態」です。つまり、これまでの界面科学における常識は、以下のように整理できます。

- 平坦な表面 → 濡れ方は 1 パターンしかない。
- 凹凸のある表面 → 「付着」と「弾き」の 2 パターンが可能になる。

しかし、蓮の葉などをモデルとした凹凸構造による撥水表面は、摩擦や衝撃によって微細な構造が壊れやすく、耐久性に大きな課題を抱えていました。そのため、産業界からは「傷に強く、かつ濡れ方を自在に制御できる、新しい原理に基づいた平坦な表面技術」が強く求められていたのです。

研究内容と成果

本研究チームは、これまでの常識を覆し、平坦な表面上で濡れの状態が 2 パターンに分岐する現象を初めて実証しました。実験では、油の中に置いた平坦な固体表面に水滴を接触させる系を構築しました。この設計の鍵は、固体表面と油の両方に「水素結合」を形成できる分子をあらかじめ導入しておくことです。水素結合は、分子同士が引き合う比較的に弱い力ですが、これが水と固体の相互作用を媒介します。研究チームは、油の HLB 値（親水性-疎水性バランス）を微調整することで、水滴—油—固体界面の水素結合分子の数を精密に制御しました。その結果、特定の HLB 値の領域において、同一基板上でありながら水滴が二つの全く異なる状態を取りうることを見出しました（図 2 参照）。

1. 弾き状態（準安定状態）：水滴が固体表面に直接接触せず、薄い油の膜を介して浮いたような状態。あたかも凹凸表面における「Cassie 状態」のように、水滴を弾きます。
2. 付着状態（安定状態）：水滴が油の膜を押し分け、固体表面に直接接触した状態。凹凸表面における「Wenzel 状

態]のように水滴が付着します。

さらに、この二つの状態は接触の順番によって作り分けられるという事実を突き止めました。

【弾き状態の作り方】 固体基板を先に油に浸し、その上から水滴を近づけると、水滴は基板に弾かれます。

【付着状態の作り方】 固体基板に先に水滴を置き、その全体を後から油に浸すと、水滴は基板にしっかりと付着します。

他の HLB 領域では、従来通り、接触プロセスの順序によらず、濡れ状態が 1 パターンに定まります。

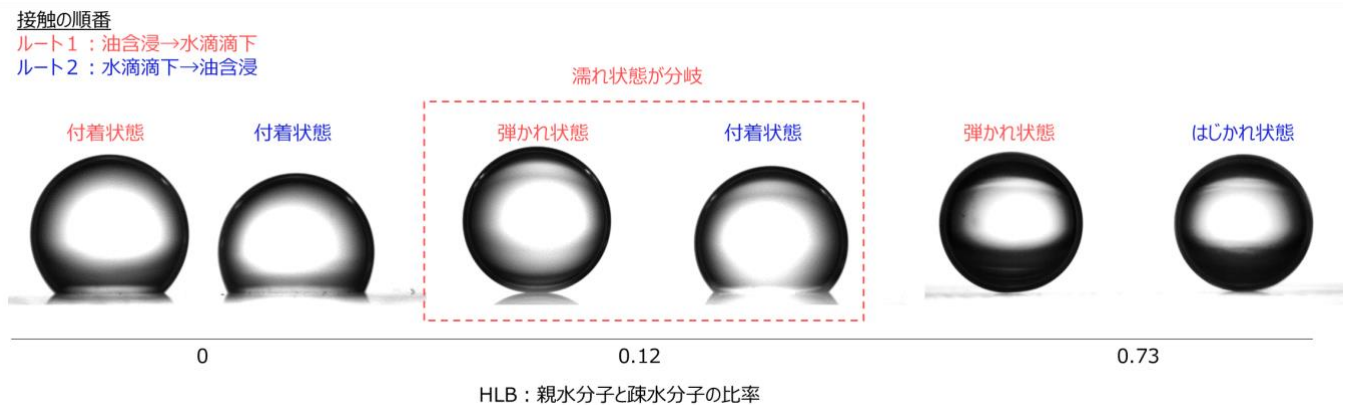


図 2：親水分子と疎水分子の比率 HLB を制御することで、接触の順番によって濡れ状態が 2 パターンに分岐する領域が現れる。それ以外の HLB 領域では、接触の順番によらず 1 パターンの状態を示す。

この現象が起こる領域を詳細に調べたところ、HLB 値が約 0.02 から 0.6 の間の狭い領域でのみ、濡れ方が分岐することが分かりました（図 3）。この領域内では、接触の順番を変えるだけで付着力がおよそ 100 倍も変化します。この分岐領域を決定づける二つの境界値のうち、上限値（約 0.6）は従来の界面エネルギーの考え方で説明可能でした。しかし、下限値（約 0.02）の存在は古典理論では予測できず、本研究が初めて明らかにしたものです。

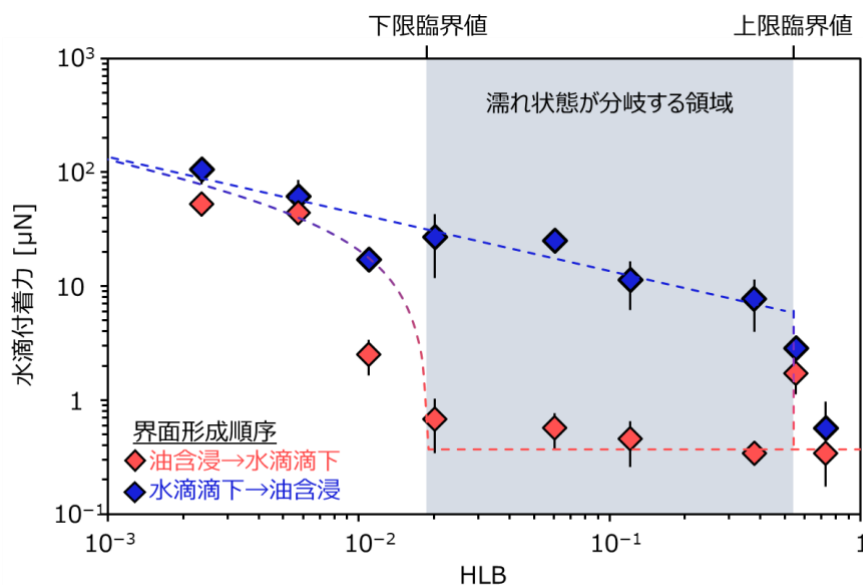


図 3：HLB および界面形成順序に対する水滴の付着力。濡れ性の分岐領域には上限・下限臨界値が存在。上限臨界値は古典理論の弾かれ・付着状態の境界値で説明可能。下限臨界値は古典理論では予測できない部分。

エネルギー計算を行ったところ、「付着状態」の方が熱力学的に安定であり、「弾き状態」は一時的に安定を保っている「準安定

状態」であることが理論的にも裏付けられました。これは、平坦な表面でありながらも弾き状態と付着状態を隔てるのに十分大きなエネルギー障壁が形成されていることを示唆するものであり、準安定な弾き状態は Young の式では説明ができない表面状態です。また Cassie 状態・Wenzel 状態を示す古典理論式において凹凸構造をあらわすパラメーターの項を除くと、同一の式に帰着することからも、平坦面では濡れ方が 1 通りに定まると考えられてきました。つまり、本発見は古典理論では説明不可能だった、平坦な表面における準安定な弾き状態の存在を初めて実証したと言えます。

そしてこの発見は、濡れ性制御における新たなパラメーター（HLB 値の精密制御）の重要性も示唆しています。研究チームは、この設計指針が特定の物質の組み合わせに限定されない普遍的なものであることも、油や固体基板の種類を系統的に変えることで確認しました。

今後の展開

本研究より、平坦面において分岐する濡れ状態が存在すること、そしてその状態を観察するためには従来の界面エネルギーに加えて親水・疎水分子の比率を枠組みとした材料設計が必要であると分かりました。濡れ性制御の未踏領域であるため、本成果を皮切りとして多大な基礎研究が必要と考えています。そして分子レベルでの親水・疎水比率の調整により未知の濡れ現象が開拓されることを期待しています。

提案した設計原理は、新たな濡れ性制御手法として、機能性表面の開発に貢献できると考えます。例えば液体を弾く準安定状態を、本来液体が付着する素材の組み合わせでも作れるということは、素材選択肢を広げることに繋がります。例えば環境影響が懸念される PFAS（有機フッ素化合物）のような撥水性の高い材質に頼らずとも、撥水撥油性表面を形成できる可能性があるということです。そして設計条件を満たすことができれば特別な表面改質を行わなくても平坦表面にただ油を垂らすだけで液体を弾く表面を形成できる可能性があります。さらに分岐可能条件においては付着状態から弾かれ状態への切り替えが可能であり、単に液体を弾く・付着させるにとどまらないスマート表面としてマイクロ流体の操作プラットフォームとしての応用が期待できます。

■ 掲載論文

題目	Bistable Wetting States on a Smooth Surface
著者	Mizuki Tenjimbayashi, Shunto Arai
雑誌	Advanced Materials Interfaces
DOI	https://doi.org/10.1002/admi.70495
掲載日	2026 年 4 月 2 日

■ 用語解説

HLB 値：物質の親水性（水に馴染みやすい性質）と親油性（油に馴染みやすい、または水と馴染みにくい性質）のバランスを表す値であり、0 に近いほど親油（疎水）性が高く、20 に近いほど親水性が高くなる。

本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	NIMS ナノアーキテクトニクス材料研究センター 独立研究者 天神林 瑞樹 E-mail: TENJIMBAYASHI.Mizuki@nims.go.jp
----------	---

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カギとして、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>