

C H E M I S T R Y

化学

JANUARY
2020
Vol.75



新春座談会 • Table talk

化学の総説集

『CSJカレントレビュー』

その役割と魅力とは?

解説 • Research article

新しい永久ヒューズの開発

研究物語 • Research story

二つの濡れ性を示す
表面をつくる!

二つの濡れ性を示す表面を創る！

—シロアリの翅の表面構造を模倣した材料

西村 涼¹・眞山博幸²・横島 智³・内田欣吾⁴

¹龍谷大学大学院理工学研究科・²旭川医科大学・³東京薬科大学
薬学教育推進センター・⁴龍谷大学理工学部物質化学科

自然にはまだまだ学ぶべきことがたくさんある。雨季に好んで飛翔するシロアリの翅の表面構造を光誘起結晶成長で再現したところ、二つの異なる濡れ性を示すことが明らかになった。水を「集めて」「はじく」新素材として応用も期待されている。

自然の創りだす機能性構造を模倣するモノづくり

自然界には、特殊な表面構造をもち、その構造が示すさまざまな機能によって厳しい環境でも生き延びている昆虫や植物が存在している。たとえば、ハスの葉やアメンボの足などが示すセルフクリーニング機能、ヤモリの足裏やタコの足などの機械的特性、クジャクやモルフォ蝶などが示す構造色、セミの翅や蛾の目の光学的特性など是有名な例である^{1~3)}。

これらの表面には進化の過程で最適化されてきた絶妙なマイクロ、もしくはナノ構造が形成されており、さまざまな機能を発現している。この自然の知恵を真似ることで、より豊かかつ低コストで環境にやさしいモノづくりを目指す、このような研究分野を「バイオミメティクス」という⁴⁾。これまで筆者らはゾウリムシの繊毛やハスの葉の表面などを模倣した機能性材料の開発を報告してきたが、次なる研究対象としてシロアリに目を向けた。名称に「アリ」とついているので紛

らわしいが、実はシロアリはアリの仲間ではなく、ゴキブリの仲間分類される(ゴキブリ目シロアリ科)。シロアリにも数多くの種類があるが、オーストラリアに生息しているテングシロアリ(*Nasutitermes*)の翅が特殊な濡れ性を示すことが報告されており^{5,6)}、そこに着目した。この種のシロアリは、棲んでいるコロニーを巣立って新しいコロニーをつくる時、天敵から身を守るためにあえて雨季に飛び立つという。したがって、翅が濡れて重くならないように雨粒を弾かなければならない。加えて、この種のシロアリの翅は胴体に比べて非常に大きいので、翅と水滴との接触面積をできるだけ減らす必要がある。このような濡れ性を実現するために、その翅の表面構造は特殊なものとなっている。

翅の表面構造に飛翔時期が関係？

図1(a, b)にテングシロアリの翅の表面構造の走査型電子顕微鏡(SEM)写真を示す^{5,6)}。この種のシロアリの翅は、マクロトリキア(刺毛, macrotrichia)と呼ばれる長さ約50 μm 、太さ約1 μm の毛と、ミクラスター(micraster)と呼ばれる高さ・太さがともに5~6 μm の星形の突起構造からなる。これら2種類の構造を使って、①雨粒サイズの比較的大きな水滴を毛で弾き、②霧のような小さなサイズの水滴は星形構造で吸着させたのち、表面張力によってそれらを徐々に合体・巨大化させて、あるサイズになると水滴が自発的に翅の

にしむら・りょう ● 龍谷大学大学院理工学研究科博士後期課程、日本学術振興会特別研究員(DC1)、<研究テーマ>フォトクロミック化合物を用いたバイオミメティクス材料の開発、<趣味>野球観戦、カメラ、ドライブ、釣り

まやま・ひろゆき ● 旭川医科大学化学教室准教授、1999年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)、<研究テーマ>濡れ現象、ソフトマター、非線形科学、<趣味>アウトドア

よこじま・さとし ● 東京薬科大学薬学部薬学教育推進センター教授、1995年度應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士(理学)、<研究テーマ>化学物理、生物物理

うちだ・きんご ● 龍谷大学理工学部物質化学科教授、1983年九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了、1996年博士(工学、九州大学)、<研究テーマ>光応答材料、<趣味>絵画鑑賞、陶芸、読書など

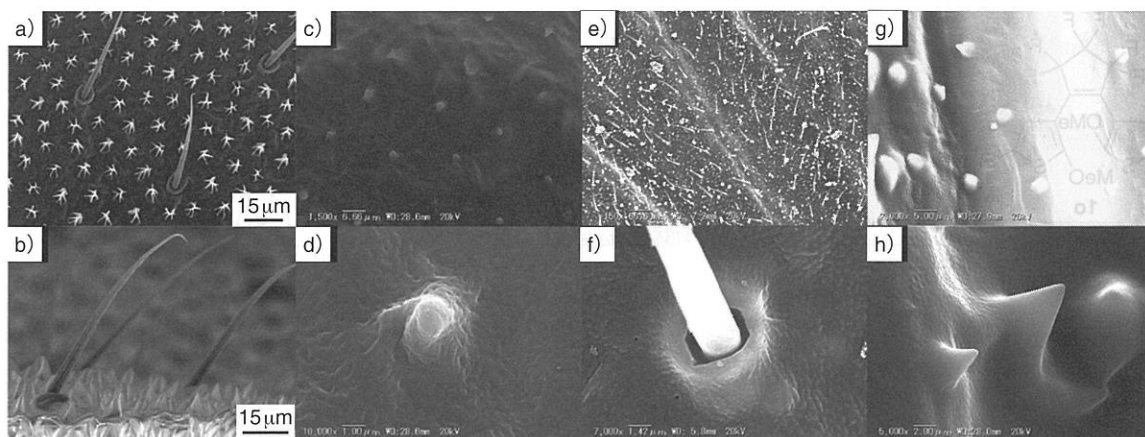


図1 各種シロアリの翅の表面のSEM画像

a, b) テングシロアリの翅, Reprinted with permission from G. S. Watson, B. W. Cribb, J. A. Watson, *ACS Nano*, **4**, 129 (2010). Copyright 2010 American Chemical Society. Reprinted by ref.6. doi:10.1371/journal.pone.0024368.g004. c, d) 梅雨の前に飛ぶヤマトシロアリの翅, e, f) 梅雨に飛ぶイエシロアリの翅, g, h) 梅雨のあとに飛ぶアメリカカンザイシロアリの翅.

表面から離脱させる, という特殊な濡れ性を実現していると考えられている.

詳細は後述するが, 筆者らはこの構造を模倣した表面を製作することで, テングシロアリの翅が示す特殊な濡れ性の再現に挑戦した. そうなると, まず実際に自分の目でシロアリの翅の表面構造を見てみたいと思うのが研究者の性である. しかし, 前述のようにテングシロアリはオーストラリアに生息しており, 日本で研究する筆者らに入手は困難であった. そこで, 大学の近隣のシロアリ駆除業者に出向いたり, 森林総合研究所(現森林研究・整備機構)の研究者などに問い合わせたりして, 日本に生息している3種類のシロアリを入手した. 提供していただいたサンプルは生きているシロアリのきれいな翅もあれば, 数年前に駆除されたままで小さなゴミが付着したシロアリの翅もあり, SEM観察する前にクリーニングするのにたいへん苦労した. このように入手した3種類のシロアリの翅の表面構造を電子顕微鏡で観察した結果を図1(c~h)に示すが, これらを見ると, 少しずつ異なるところはあるものの, それぞれのシロアリの性質と表面構造に法則性があることを見いだした. 入手した3種のシロアリは, 梅雨の前に飛ぶヤマトシロアリ種(図1c, d), 梅雨の期間に飛ぶイエシロアリ種(図1e, f), そして, 梅雨明けに飛ぶアメリカカンザイシロアリ種(図1g, h)であった. それらはどれも日本では家屋に被害を与えるシロアリの代表格であるが, 偶然にも飛ぶ時期が梅雨の前と梅雨の最中に種ごとに分かれていた. これらの観察やそれぞれの翅の濡れ性を調べたところ, 梅雨の前後に飛ぶヤマトシロアリ, アメリ

カンザイシロアリの翅には小さな突起があるだけで毛がなく, 撥水性を示さなかったが, 梅雨の最中に飛ぶイエシロアリの翅には突起は存在しないが毛があり, 超撥水性を示した. 結局, テングシロアリの翅のような二つの構造をもつシロアリの翅を入手することはできなかったが, シロアリがその種類によって飛翔する時期に適応した構造の翅をもっていることが明らかとなった.

シロアリの翅の表面構造を模倣する

筆者らはこれまでに, 光照射によって可逆的に色が変化するフォトクロミック化合物を使い, 結晶の表面形状を変化させる研究成果を報告してきた^{7,8)}. そのなかでフォトクロミック化合物であるジアリールエテン誘導体の開環体 **1o** (図2a左)の粒状の単結晶に紫外光を照射し, 30°C, 暗所下で24時間静置すると, 生成した閉環体 **1c**の針状結晶(図2a右)が **1o**の粒状の単結晶表面を覆うように成長すること, その表面に紫外線ではなく可視光を照射すると, 成長した針状結晶が融解して元の平坦な表面へともどることを見いだしている⁷⁾.

テングシロアリの翅の表面は図1(a, b)に示したように長い毛(マクロトリキア)と小さい突起状構造(ミクラスター)の二つが混在する構造であるため, それと同様の表面構造をつくるには, サイズの異なる2種類の結晶を光によって成長させる必要がある. そこで, これまでに報告してきたジアリールエテン誘導体のなかから, 針状結晶が成長し, かつ結晶サイズがマクロトリキア, ミクラスターそれぞれに比較的近くなる誘導体を選択し, それらを混合することで, 同一表面上

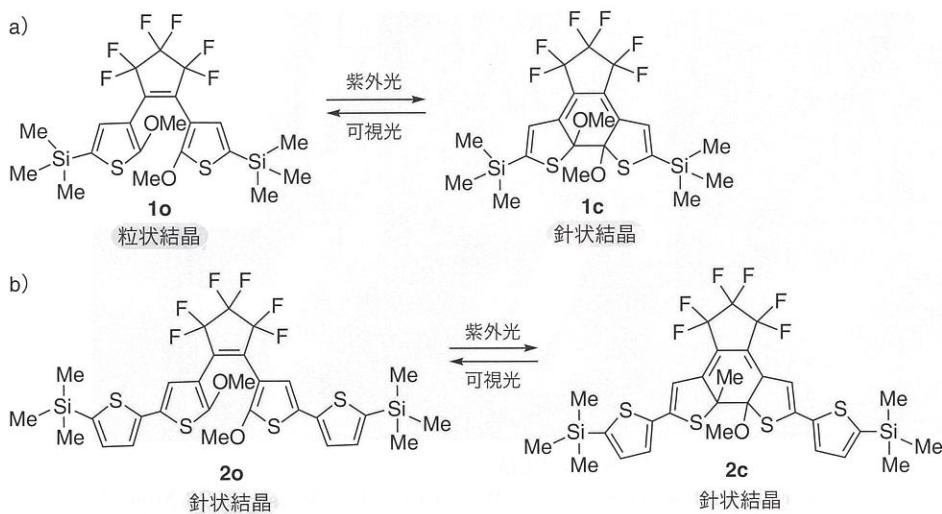


図2 今回用いたジアリールエテン誘導体の分子構造と光異性化
a) **1o** と **1c**, b) **2o** と **2c**.

異なるサイズの2種類の結晶を成長させるという構想を立てた。

筆者らはこれまでの研究でさまざまなジアリールエテン誘導体を見だしてきている。そのなかで先述の**1o**の微結晶膜に紫外光を照射し、30℃、暗所下で24時間静置すると、**1c**が高さ約10μm、幅約1~2μmの針状結晶に成長

し⁷⁾、また、ジアリールエテン誘導体**2o**の微結晶膜(図2b左)に同様に紫外光を照射し30℃、暗所下で9日間静置すると、**2c**が高さ約2.2~2.5μm、幅約0.2~0.3μmの針状結晶(図2b右)に成長することがわかっていた⁸⁾。そこで、この二つの誘導体を混合することで、テングシロアリの翅の表面構造を模倣することを試みた。

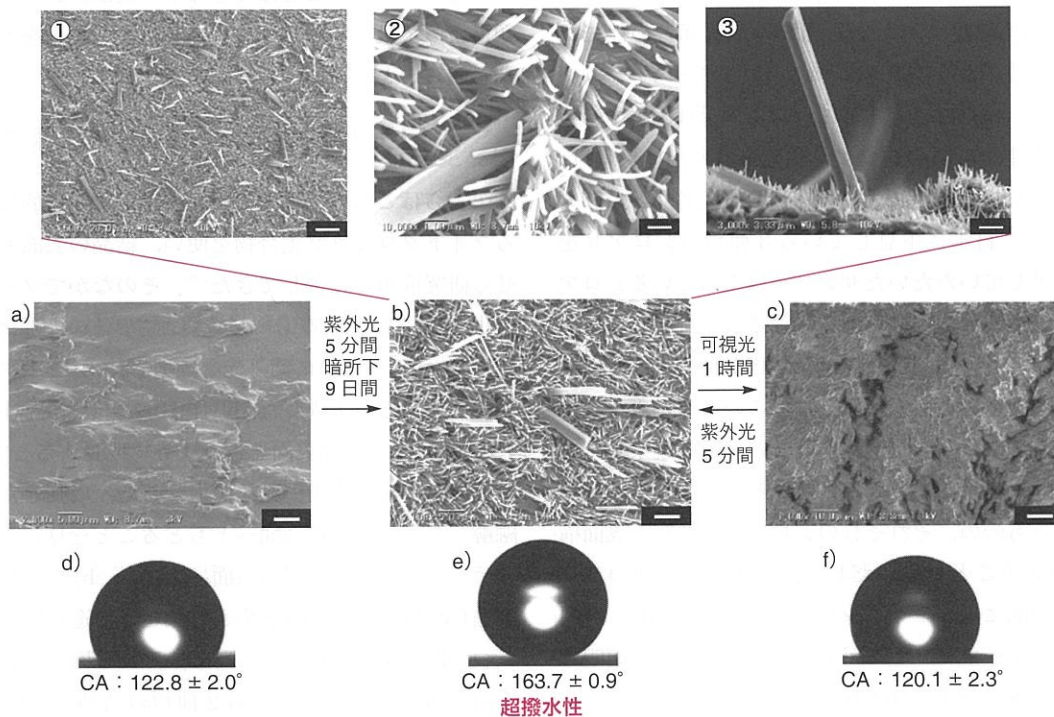


図3 シロアリの翅の表面構造を模倣した表面のSEM画像と濡れ性

1oと**2o**の混合微結晶薄膜の表面の、a)紫外光照射前、b)紫外光を5分間照射後、30℃、暗所下で9日間静置後、c) (b)に80℃下で可視光を1時間照射後のSEM画像。(a, b, c)のスケールバー:5μm, (b-①):20μm, (b-②):1.00μm, (b-③):3.33μm, d) (a)表面上, e) (b)表面上, f) (c)表面上, における水滴(1.5μL)の画像とそれぞれの場合の接触角。(b)は次頁の図4 (b, f, g)と同一のものである。

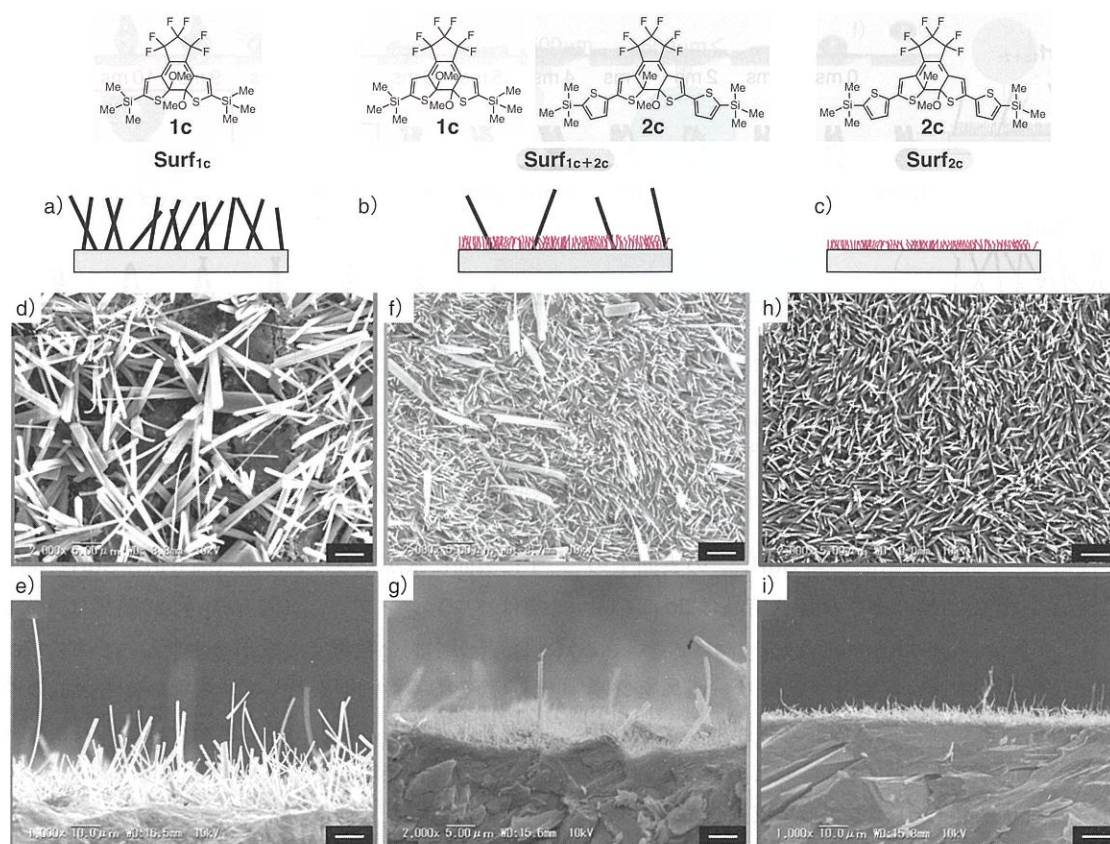


図4 各表面の模式図とSEM画像の比較

a) Surf_{1c} , b) Surf_{1c+2c} , c) Surf_{2c} の模式図. 基板の灰色部分はそれぞれのジアリールエテン誘導体の開環体の結晶に対応する. d, e) Surf_{1c} の表面, 断面のSEM画像. f, g) Surf_{1c+2c} の表面, 断面のSEM画像. h, i) Surf_{2c} の表面, 断面のSEM画像. (d, e, f, h) のスケールバー: $5\mu\text{m}$, (g, i): $10\mu\text{m}$.

光誘起結晶成長を用いた表面の作製

ジアリールエテン誘導体 **1o** と **2o** を等モル量計り取り、クロロホルムに溶解させてその溶液をガラス基板上に滴下し、溶媒を蒸発させることで、混合微結晶薄膜を作製した。この微結晶薄膜表面に紫外光、可視光を交互に照射し、それぞれ状態でSEM観察と水滴の接触角の測定を行った。その結果を図3に示す。**1o** と **2o** からなる微結晶薄膜(図3a)に紫外光を5分間照射し、 30°C 、暗所下で9日間静置したところ、結晶薄膜表面は二つの異なるサイズの針状結晶に覆われた(図3b, ①~③)。さらにそれを 80°C に保ち可視光を1時間照射すると、針状結晶は融解してなだらかな表面へもどった(図3c)。

濡れ性については、紫外線照射前の**1o** と **2o** からなる平坦な微結晶薄膜の表面では接触角(CA)は 123° であった(図3d)。図3(b)の状態の膜表面ではCAは 164° (図3e)となり、再び平坦な表面(図3c)にもどると、CAは 120° へと減少し

た(図3f)。この可逆的な結晶成長は3サイクル確認できた。続いて、図3(b)で得られた微結晶薄膜 Surf_{1c+2c} について、表面やその断面のSEM画像を観察し(図4b)、結晶サイズを詳しく調べた。 Surf_{1c+2c} に成長していた大きな針状結晶は、高さ約 $16\mu\text{m}$ 、幅約 $1.5\mu\text{m}$ であり、小さな針状結晶は高さ約 $1.9\mu\text{m}$ 、幅約 $0.2\mu\text{m}$ であった。同じ条件で**1c**と**2c**を単体で結晶成長させて同様にSEM画像を解析すると、**1o**の表面上には大きな針状結晶に近いサイズの**1c**結晶(図4a, Surf_{1c})が、**2o**の表面には小さな針状結晶に近いサイズの**2c**結晶(図4c, Surf_{2c})が成長していることが明らかに

用語解説

接触角(CA)：静止した液体の表面が固体表面に接する場所で、液面と固体面とのなす角 θ のこと。



接触角: CA

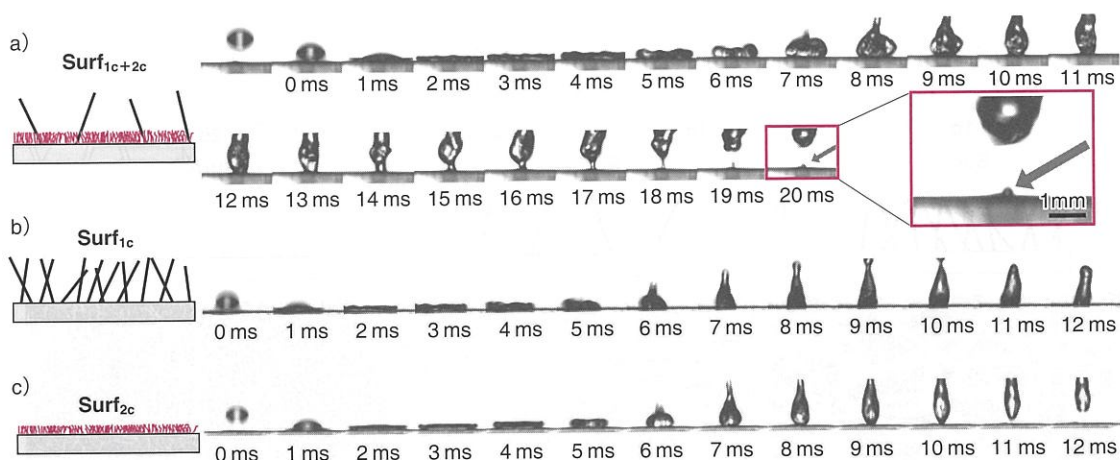


図5 a) Surf_{1c+2c} , b) Surf_{1c} , c) Surf_{2c} 表面上での水滴のバウンディング挙動

なった。これにより、混合微結晶薄膜 Surf_{1c+2c} の表面上の大きな針状結晶は $1c$ の結晶，小さな針状結晶は $2c$ の結晶であることが示唆された(図4b)。

このように、筆者らの狙いどおり、ジアリールエテン誘導体 $1o$ と $2o$ の混合微結晶薄膜への紫外線照射により、テングシロアリの表面構造(図1a, b)に似た、大きな針状結晶($1c$)と小さな針状結晶($2c$)が混ざって成長した表面構造 Surf_{1c+2c} を構築することができた。 Surf_{1c+2c} は水滴を静置したときのCAは 163° で超撥水性を示したので、雨粒に対してもテングシロアリの翅のような濡れ性を示すことが期待された。

水滴を弾く能力と吸着する能力をもつ表面

ここまでの観測結果を受けて、ジアリールエテン誘導体への紫外光照射によって二つの異なるサイズの結晶が成長した表面(Surf_{1c+2c})が、テングシロアリに匹敵する超撥水性をもっているのか調べることにした。超撥水性表面を評価する方法として、接触角実験のほかに、落下して表面にぶつかった水滴が跳ねるかどうかを調べる方法がある(水滴落下実験⁹⁾)。具体的には、ある高さから超撥水性表面に対して水滴を落下させ、水滴が表面と接触したあと水滴が跳ねるかどうかで濡れ性を評価する方法である。そこで筆者らは、 Surf_{1c+2c} に対して10cmの高さから $7.6\mu\text{L}$ の水滴を落下させ、ハイスピードカメラ(1000フレーム/秒)で表面と水滴の挙動を撮影した。すると、小さな水滴が残り、ほとんどの水滴は表面で跳ね返った(バウンディング, 図5a)。比較のために、 Surf_{1c} と Surf_{2c} 表面に対しても同様に水滴を10cmの高さから落下させると、 Surf_{1c} 表面上では水滴はバウンディングセ

ずに表面に水がくっついたが(図5b)、 Surf_{2c} 表面上では水滴はバウンディングした(図5c)。この結果は、大きな $1c$ 針状結晶が水滴を吸着する役割を果たし、小さな $2c$ 針状結晶が水滴を弾く役割を果たしているといえる。この二つの結晶を混在させることで、小さな水滴を残し、大きな水滴を弾く機能がうまく発現した。

霧を集めて雨を弾く？

以上の水滴の落下実験では、テングシロアリの翅を模倣した Surf_{1c+2c} が大きな雨粒を弾くことがわかったが、より小さな雨粒やもっと小さな霧を弾くかどうかについて十分に検討できたとはいえない。この点を検証できる実験方法について検討していたが、意外なところから問題解決の糸口を見いだした。それは、本研究テーマと同時に進めていた別のテーマの実験で使用していた霧吹きである。ある日、筆者(西村)は「霧吹きをこの実験にも使ったらどうなるのだろうか?」とふと思いつき、 Surf_{1c+2c} 表面に霧吹きで水滴を吹きかけてみた。すると、水滴が弾かれているのが目視でも確認できた。霧吹きから噴出される水滴は、図5の水滴落下実験に用いた水滴よりもはるかに小さかった。そこで、 Surf_{1c+2c} 、 Surf_{1c} 、 Surf_{2c} の3種類の表面に対して霧吹きで水滴を噴霧し、水滴が表面と接触する様子を先の水滴落下実験と同じハイスピードカメラで撮影した。すると、使用した霧吹き(100円均一のお店で購入)の規格が低かったため、大小さまざまなサイズの水滴が生成されたが、かえってそれが幸いして水滴のサイズによって表面に吸着されたり弾かれたりしている様子が観察された。そこで、水滴のサイズを粗く調整可能な霧吹き(ノズル1とノズル2)で水滴を噴霧しながら動画を各十数

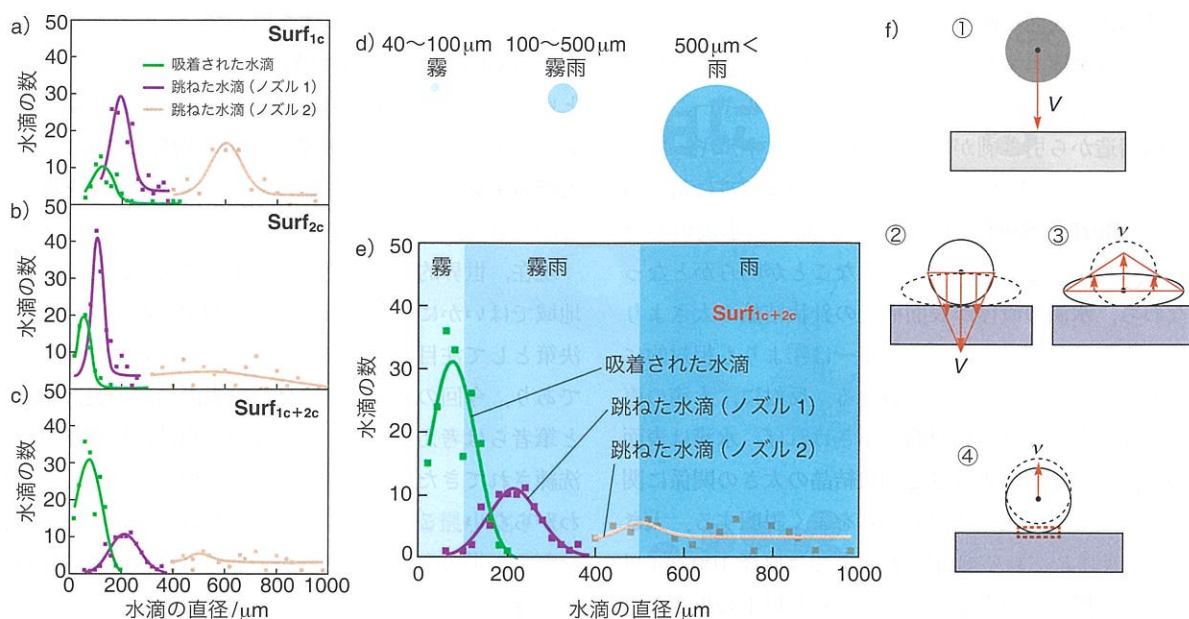


図6 霧吹きで水滴を噴霧したときの水滴のバウンス挙動における水滴のサイズ依存性

a) Surf_{1c} , b) Surf_{2c} , c) Surf_{1c+2c} 表面上での跳ねた水滴の分布. d) 水滴のサイズによる雨の分類. e) (c)と雨滴の分類を重ね合わせた図. f) 水滴のバウンスのモデル(模式図). ①衝突直前の水滴(衝突速度 V), ②水滴が表面に接してから水滴形状の変形が止まるまでの様子と粘性摩擦の大きさを決める水滴内の速度勾配と最終的に得られる反跳速度 v , ③形状の変形が回復して上向きに運動するときの様子と粘性摩擦の大きさを決める水滴内の速度勾配と最終的に得られる反跳速度 v , ④表面に付着した水滴(実線)を表面から引き剥がす際に必要なエネルギーの原因となる濡れ(赤枠内)と引き剥がしたあとの水滴(点線).

サンプルずつ撮影し、表面に吸着された水滴と表面から離れた水滴の直径を計測し、その分布図を作成した(図6a～c). ここでたいへんだったのが、各動画1000フレームずつの十数サンプル動画を一コマずつ確認し、それぞれの水滴の直径、終端速度などの測定をすべて手作業で行ったことである. また、像に映るのは約5mmの距離でピントの合った領域のみ、つまりそのピントのラインに接触した水滴のみが数えられるため、ボツになった動画は数多くあった. 指を変え左右の手を変えて延々とPCのカーソルキーを連打し、合計で約50,000フレームもの画像を送り続けた甲斐あって、吸着された水滴と跳ねた水滴の分布を作成することができた. その努力の結晶が図6(a)～(c)である. これを見ると、**1c**と**2c**のみでできている表面(Surf_{1c} と Surf_{2c})では、吸着した水滴とバウンスした水滴の分布の重なりが大きい(図6a, b), 二つを混ぜた表面(Surf_{1c+2c})では二つの分布の重なりが小さくなるという現象が顕著に現れていることがわかった(図6c). 具体的にいうと、直径約 $100\mu\text{m}$ よりも小さな水滴は Surf_{1c+2c} 表面に吸着され、それ以上の直径の水滴は跳ね返っていたのである.

ふとしたきっかけで手と目を酷使して得たデータであるが、実は最初はこのデータが何を意味して、この表面にどのよう

な有用性があるのかわかっていなかった. 議論を重ねるうちに、「実際の雨はどんなサイズなのか?」という議論になり調べたところ、雨滴は図6(d)のように水滴のサイズで分類されることがわかった^{10~12)}. 気象庁の情報や文献によると、雲や霧などの水滴は直径が約 $100\mu\text{m}$ 以下、雨として分類される霧雨は直径 $100\sim 500\mu\text{m}$ 、一般的な雨は直径 $500\mu\text{m}$ 以上とされていた. そして、この分類を図6(c)の分布に当てはめると、偶然にも Surf_{1c+2c} 表面が霧のサイズの水滴を集め、雨とされる水滴を弾いているということがわかった(図6e). 実際のテングシロアリも直径 $100\mu\text{m}$ 程度の水滴は翅の表面に集め、それより大きい水滴は弾き返すことが報告されていた^{5,6)}. すなわち、テングシロアリの翅の表面構造を模倣した構造を作製することで、その特殊な濡れ性の再現に成功したことがこの実験からわかったのである¹³⁾.

霧を集めて雨を弾くメカニズム

最後に、霧吹きを用いた水滴の噴霧の実験により得られた結果(図6a～c)を非常に単純なバウンスの物理モデル(図6f)で理解することを試みた. このとき重要なエネルギーは図6(f)の①～④に示す四つのエネルギーである. それぞれ説明すると、①は表面に衝突する直前の水滴の運動エネルギー

ギー, ②は水滴が表面に衝突したときに水の粘性によって水滴内で失われる摩擦エネルギー, ③は跳ね返るときに生じる摩擦エネルギーが差し引かれたあとの運動エネルギー, ④は水滴を表面構造から引き剥がすために必要なエネルギーである(キャプションではより詳しく説明). このモデルに基づいて Surf_{1c+2c} , Surf_{1c} , Surf_{2c} の3種類の表面での水滴のバウンシングを考察したところ, 次のようなことが明らかとなった. すなわち, 水滴の直径が表面構造の針状結晶の太さよりも相対的に大きければ, ③のエネルギーは④よりも相対的に大きくなり, 水滴は表面の上で跳ね返る. 反対に, 水滴の直径が針状結晶の太さよりも相対的に小さければ, 水滴は表面にくっつく. この水滴の大きさと針状結晶の太さの関係に関する考察は, 筆者らの実験結果(図6)をよく説明する. 大きな $1c$ 結晶が成長している Surf_{1c} 表面上では直径 $100\ \mu\text{m}$ 以上の水滴はよく跳ね返ったが(図6a), それ以下の小さな水滴は表面にくっついている. 一方, 小さな $2c$ 結晶が密に成長している Surf_{2c} 表面上では, $50\sim 200\ \mu\text{m}$ の水滴が跳ね返っており, Surf_{1c} 表面では跳ね返らなかった小さな水滴のバウンシングが観察された(図6b). それでは, Surf_{1c} 表面と Surf_{2c} 表面の性質を併せもつ Surf_{1c+2c} 表面上では水滴のバウンシングはどうなるのだろうか. 直径 $50\ \mu\text{m}$ 以下の水滴と直径 $100\ \mu\text{m}$ 以上の水滴の挙動は Surf_{1c} や Surf_{2c} と同様であったが, Surf_{2c} 表面上で跳ね返っていた直径 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ の水滴(霧に相当)が, 図6(c)では Surf_{1c+2c} にくっついている. したがって, 霧に相当する水滴をよくくっつける性質が Surf_{1c+2c} 表面の特性ということが出来る. この特性をバウンシングの物理モデルに基づいて考えると, 次のように理解できる. 直径 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ の水滴は Surf_{1c+2c} 表面上の $2c$ の小さな針状結晶に跳ね返るものの, その速度は衝突前よりも減少している. その後, 跳ね返った水滴は $1c$ の大きな針状結晶に衝突するが, さらに水滴の運動エネルギーは減少する. この点を考えると, $1c$ 針状結晶との衝突後の運動エネルギー(③)は, くっついた表面から水滴を引き剥がすためのエネルギー(④)よりも小さくなりやすい. その結果, 水滴は跳ね返らずに $1c$ の大きな針状結晶にくっついてしまい, Surf_{1c+2c} に吸着する分布として観測される. このように Surf_{1c+2c} 表面の特性が理解されるとともに, テングシロアリの翅が効率的に霧を吸着する性質も理解できる.


本稿で紹介してきたように, すでに見いだされていた二つ

のジアリールエテン誘導体を用いて, テングシロアリの翅がもつ効率的に霧を表面に吸着させて大きな水滴にして弾く, という特殊な濡れ性を再現し, それを用いた水滴のバウンシングの実験結果から, 非常に簡単な物理モデルに基づいて, 実際のテングシロアリの翅の特殊な濡れの性質を理解することができた.

現在, 世界的に水不足が深刻化しており, とくに乾燥した地域ではいかにして水を得るかが問題となっている. その解決策として注目を集めているのが, 霧から水を捕集する材料であり, 今回の成果はその材料の表面構造の設計指針となると筆者らは考えている. 自然界の生物は, 長い年月をかけて洗練されてきた構造をもつが, その理由は一見しただけではわからない. これからもそのような自然界の不思議を紐解きながら, 世の中の問題を解決できるような機能的な材料を提案できれば, これほど研究者冥利に尽きるものはない.


参考文献

- 1) F. Xia, L. Jiang, *Adv. Mater.*, **20**, 2842 (2008).
- 2) 下村政嗣, 『トコトンやさしいバイオミメティクスの本』, 高分子学会バイオミメティクス研究会 (2016).
- 3) 篠原現人, 野村周平, 『生物の形や能力を利用する学問バイオミメティクス』, 国立科学博物館叢書 (2016).
- 4) J. M. Harkness, *Phys. Perspect.*, **4**, 456 (2002).
- 5) G. S. Watson, B. W. Cribb, J. A. Watson, *ACS Nano*, **4**, 129 (2010).
- 6) G. S. Watson, B. W. Cribb, J. A. Watson, *Plos One*, **6**, e24368 (2011).
- 7) K. Uchida, N. Izumi, S. Sukata, Y. Kojima, S. Nakamura, M. Irie, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, 6470 (2006); *Angew. Chem.*, **118**, 6620 (2006).
- 8) N. Nishikawa, H. Kiyohara, S. Sakiyama, S. Yamazoe, H. Mayama, T. Tsujioka, Y. Kojima, S. Yokojima, S. Nakamura, K. Uchida, *Langmuir*, **28**, 17817 (2012).
- 9) R. Nishimura, K. Hyodo, H. Sawaguchi, Y. Yamamoto, Y. Nonomura, H. Mayama, S. Yokojima, S. Nakamura, K. Uchida, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 10299 (2016).
- 10) S. Glienke, A. Kostinski, J. Fugal, R. A. Shaw, S. Borrmann, J. Stith, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8002 (2017).
- 11) T. Takahashi, *Rev. Geophys.*, **11**, 903 (1973).
- 12) American Meteorological Society, Glossary of Meteorology, "Drizzle," (2016) (<http://glossary.ametsoc.org/wiki/Drizzle>).
- 13) R. Nishimura, K. Hyodo, H. Mayama, S. Yokojima, S. Nakamura, K. Uchida, *Commun. Chem.*, **2**, 90 (2019).



【CSJカレントレビュー28】
持続可能性社会を拓く
バイオミメティクス
 ——生物学と工学が築く材料科学
 日本化学会【編】
 B5判・188頁・本体4200円

生物学と工学を情報科学で繋ぐという視点から, 最先端研究や産業化の動向を解説する.



化学同人