

静電によって濡れ挙動を制御
～電圧を加えることにより固体表面のマイクロ構造の影響が消失～

1. 発表者：

二田 智史（東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 修士課程学生）
塩見 淳一郎（東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆液滴が固体表面上を濡らす際、電場を液滴に加えることで、個体表面の粗さによる液体の振る舞い（濡れが広がる速さ）の違いを消失させられることを発見した。
- ◆固液界面に加えられた電荷によって接触線摩擦（注1）が低減することを明らかにした。
- ◆印刷や微細構造作製に使われるインクジェット技術や、光制御や生化学分析に使われるエレクトロウェットティング技術などの制御性、信頼性、再現性の向上に貢献することが期待される。

3. 発表概要：

固体の表面を液体が濡らしていく現象は、自然や産業のあらゆるところで見られます。従来、固体の濡れ広がる速さは、表面の濡れ性（静的接触角、注2）によって決まるとされてきましたが、最近になって接触角が同等でも、表面のマイクロ構造の粗さによって濡れ広がる速さが大きく低減させられることがわかっています。実際の表面にはこのような粗さや静電（電荷やポテンシャル）が存在するため、その影響を理解し、制御することが課題となっています。

東京大学工学系研究科の塩見淳一郎准教授とスウェーデン王立工科大学のアンベリグスタフ教授らの共同研究グループは、液体と固体表面の間に電圧を加えることで、粗さによって濡れの速度が遅くなる効果を消失できることを発見しました。平滑面とマイクロ構造を施した表面上にそれぞれ液滴を滴下して高速度カメラで観察すると、通常の場合は液滴の形や濡れ広がる速さが大きく異なるのに対して、一定以上の電圧を加えると、全く変わらなくなることがわかりました。さらに、数値計算と組み合わせた解析によってその機構も明らかにしました。

今後、印刷や材料作製に使われるインクジェット技術や、光制御や生化学分析に使われるエレクトロウェットティング技術などの制御性、信頼性、再現性の向上に貢献することが期待されます。

4. 発表内容：

固体の表面に液体を滴下した際に高速で濡れていく現象は、物体が水に進入する際のしぶきや、生物が水や蒸気を吸収する過程など、自然界のあらゆるところで作用しています。また、インクジェットやスプレーなどの製造プロセスや、エレクトロウェットティングなどの操作技術のような、産業分野においても重要であり、濡れが広がる速さを制御することは、機器の機能性、生産性、信頼性の向上に繋がります。従来、固体の濡れ広がる速さは、表面の濡れ性（静的接触角）によって決まるとされてきましたが、最近の同研究グループの研究などによって、接触角が同等でも、表面のマイクロ構造（粗さ）によって濡れ広がる速さが大きく低減し得ることがわかってきています。実際の表面にはこのような粗さや静電（電荷やポテンシャル）が存在するため、その影響を理解し、制御することが課題となっていました。

本研究グループは、表面微細加工によって基板表面にマイクロメートル程度のピラー構造(注3)を形成し、直径が1mmの水滴を滴下して、高速度カメラで観察する実験を行いました(図1)。その際に、液滴と基板の間にいつでも電圧を加えられるようにすることで、電場の有無や強度の影響を検証しました。なお、表面は絶縁層で覆われており、絶縁層はその両面に電荷が蓄えられることでキャパシタ(注4)の働きをします。その結果、電圧を加えない場合は(図2上段)マイクロ構造表面上では平滑面上よりも大幅に濡れの進行が遅くなる(それにとまって液滴の影響も異なる)のに対し、一定以上の電圧を加えることで(図2下段)濡れ広がる速さや液滴の形状が全く変わらなくなることがわかりました。これはつまり、液体と固体表面の間に電圧を加えることで、マイクロ構造表面の粗さによって濡れが遅くなる効果を消失させられることを意味します。

さらに、この現象の機構を明らかにするために、実験と数値計算を組み合わせた解析を行いました。一般に濡れ広がる速さは、接触線を駆動する表面張力と、それに抵抗する慣性力、粘性力、摩擦力などの抵抗力のバランスによって決定されます。慣性力と粘性力は液滴の物性や大きさで決まりますが、摩擦力は界面物性によるため自明ではありません。そこで、実験と数値解析で得られる液滴の形状の時系列を比較することで、接触線が表面を移動する際の摩擦係数を評価しました。その結果、電圧を加えることによって摩擦係数が大きく低減し、電圧を加える前には摩擦力が支配的な抵抗力であったのが、加えた後は慣性力が支配的になることがわかりました。つまり、電圧を加えない状態では表面近傍の物性が重要な要因になるため、濡れ現象は表面構造の影響を受けますが、電圧を加えた状態では、濡れ現象は液体自体の物性で決まるため、表面構造の影響を受けなくなるのです。

また、粗さの度合いを定量化したパラメータ(粗さパラメータ)を用いて、平滑面上とマイクロ構造上の摩擦係数の関係を明らかにしました。これによって、平滑面上での濡れ挙動がわかれば、粗さパラメータを用いて、マイクロ構造上の特性が予想できるようになりました。

このように、同じ素材であっても、表面の粗さや電場によって濡れ広がりや遅くしたり速くしたりできることは、印刷や微細構造作製に使われるインクジェット技術やディスプレイなどにおける光制御、生化学分析に使われるエレクトロウェットング技術などの、制御性、信頼性、再現性の向上に貢献することが期待されます。この動的な濡れ挙動の制御はその他にも、コーティング、潤滑、半田付け、スプレー冷却、沸騰伝熱、焼結現象など多岐に渡る応用と関係する技術として注目されています。

謝辞：本研究は、日本学術振興会と Swedish Governmental Agency for Innovation Systems の二国間交流事業、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(CREST)、科学研究費助成事業(基盤研究B)の支援により実施したものです。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science Advances」(2017年2月24日：3, e1602202 (2017))

論文タイトル：Electrostatic cloaking of surface structure for dynamic wetting

著者：Satoshi Nita, Jiayu Wang, Minh Do-Quang, Yu-Chung Chen, Yuji Suzuki, Gustav Amberg, and Junichiro Shiomi*

6. 注意事項：

日本時間2月25日(土)午前4時(アメリカ東部標準時間：24日(金)午後2時)以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻
准教授 塩見 淳一郎（しおみ じゅんいちろう）

8. 用語解説：

（注1）接触線摩擦

液体、固体、気体が交わる境界線（液滴の場合は固体の表面に接触している円の周）を接触線と呼び、濡れが広がる際に接触線が固体表面の上を動くことによって生じる摩擦を接触線摩擦と呼ぶ。

（注2）静的接触角

平らな固体表面の上に液滴を設置して定常的（静的）な状態に至った後に、接触線において自由表面（液体と気体の界面）と固体表面が成す角度を静的接触角と呼び、濡れやすさ（濡れ難さ）の指標として広く用いられている。

（注3）ピラー構造

固体表面に柱が立っているような構造。本研究では、正方形の断面を有するものを用いている。

（注4）キャパシタ

静電容量により電荷やまたは電気エネルギーを蓄えるもの。

9. 添付資料：

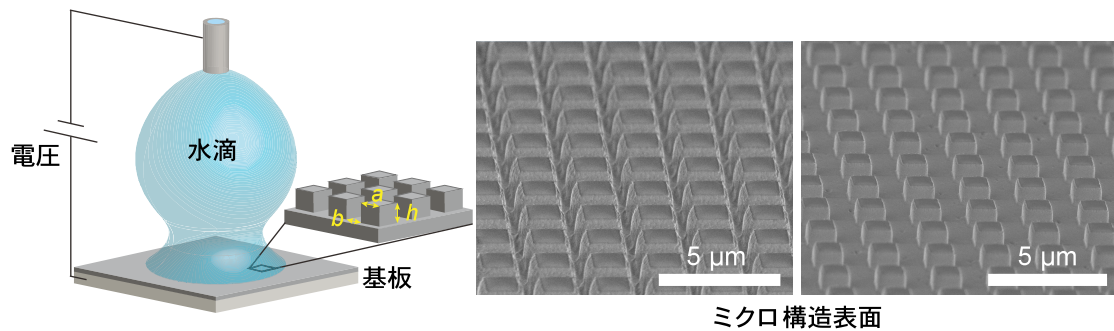


図1 左：濡れ実験の概要。基板と水滴の間に電圧を加えながら、水滴を滴下する。右：表面マイクロ構造の例。マイクロメートル程度のピラー構造で構成されている。

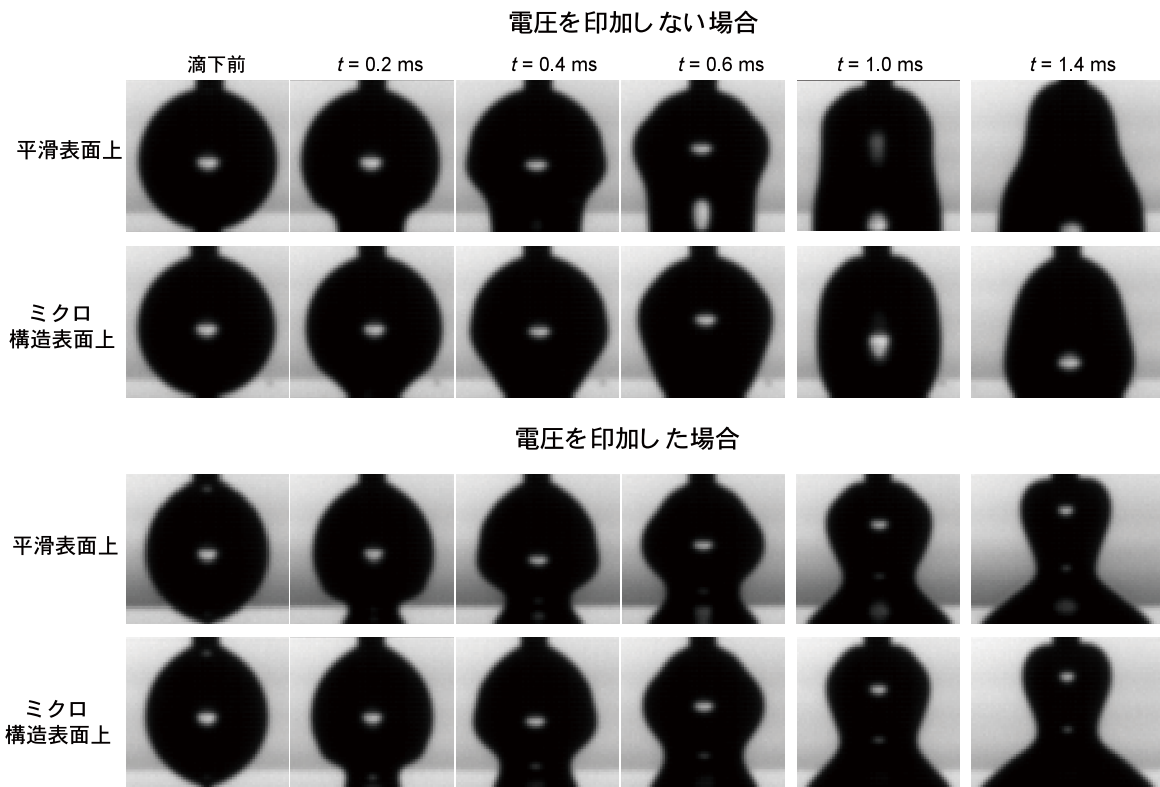


図2 水滴が基板表面を濡れていく際の液滴形状の時系列。上段：電圧を加えない場合の平滑表面とマイクロ構造表面の比較。下段：電圧を加えた場合の同様の比較。上段では平滑面とマイクロ構造表面で濡れの速さや液滴の形状が大きく異なるのに対して、下段では違いが全く見られない。