東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

2026 年 11 月 19 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

水滴の衝突・分裂による帯電メカニズムを解明
―超撥水性メッシュを利用した雨滴発電技術への展開に期待―

【発表のポイント】

- 超撥水性（注 1）メッシュへの水滴の衝突により、固液界面での電荷分離（注 2）を伴った帯電スプレー（注 3）が生成されることを明らかにしました。
- 水滴の衝突条件によって、衝突直後の噴出と液滴の収縮・反発時の噴出が異なり、その違いが帯電特性に影響することを明らかにしました。
- 開口サイズが小さく、ワイヤ径が細いメッシュほど、電荷対質量比（注 4）が高くなることを示しました。
- 雨エネルギー回収のためのパッシブシステム（注 5）への展開が期待されます。

【概要】

水滴が砕ける際に電気が生じる現象は、滝や水霧の帯電として以前から知られています。東北大学大学院工学研究科の戸田雅也教授らの研究グループは、マックス・プランク高分子研究所（ドイツ）の Hans-Jürgen Butt 教授と Rutvik Lathia 博士らと共同で、この自然現象を応用し、水滴を超撥水性メッシュに衝突させて効率的に電荷を取り出す新たなメカニズム（電荷分離モード）を特定しました。

本研究では、超撥水性のメッシュに水滴を衝突させた際の、メッシュの細孔への水の浸透と液滴の破砕過程に着目しました。電荷測定と高速度カメラによる撮影を組み合わせることで、電荷分離の挙動がウェーバー数（注 6）やスプレーの形成状態によってどのように変化するのかを明らかにしました。さらに、開口サイズやワイヤ径の異なるメッシュを用いた比較実験により、開口サイズおよびワイヤ径が小さいほど、生成されるスプレーの電荷対質量比が高くなることを実証しました。本成果は、超撥水性メッシュへの水滴の衝突・破砕に伴う電荷分離現象を効率的に利用するシステム設計指針を示すものであり、雨水を利用した環境発電（注 7）システムへの応用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 11 月 17 日（現地時間）に、学術誌 Physics of Fluids に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、傾斜した板の表面を滑り落ちる水滴や、毛細管内を流れる水を利用して電気エネルギーを生成できることが報告されており、摩擦発電型ナノジェネレーター（TENG）などの環境発電技術への応用が注目されています。これらの技術には、可動部品を必要としないという利点がある一方で、傾斜面を滑り落ちる水滴から回収できるエネルギーには限界があります。そこで、雨などの落下する水滴の運動エネルギーを利用して電気エネルギーに変換する新たな手法が期待されています。水滴の破砕や飛散に伴う帯電現象は、1892 年のレナードによる報告以来、古くから研究されてきました。これまでに、水滴の分裂によって生じる微小な液滴が、母液滴とは反対の極性に帯電する現象などが報告されています。一方、水滴がメッシュに高速で衝突すると、微小な液滴からなるスプレーが形成されることが知られています。本研究では、これらの知見を踏まえ、超撥水性メッシュへの水滴の衝突・破砕を利用して電荷分離を誘起し、帯電スプレーを生成する新たな手法に着目しました。

今回の取り組み

本研究では、スチール、銅、ポリプロピレンの 3 種類のメッシュを基材として使用しました。スチールおよび銅メッシュには、煤（すす）をテンプレートとして形成した多孔質シリカ被膜にシラン処理（表面の撥水化処理）を施し、超撥水性を付与しました。一方、ポリプロピレンメッシュには、プラズマ処理とシラン処理によって同様に超撥水性を付与しました。実験装置は、液滴供給用の針、超撥水性メッシュ、ファラデーカップ(注 8)、エレクトロメーター（電荷測定器）、高速度カメラで構成しました。ポンプを用いて 25μL の純水をメッシュに滴下し、メッシュ直下に設置したファラデーカップとエレクトロメーターにより、衝突・破砕によってメッシュを通り抜けた微小な液滴（二次液滴）の電荷を測定しました。また、メッシュの真横に設置した高速度カメラを用いて、水滴の衝突・破砕およびスプレー形成の動態を観察しました（図 1）。

その結果、液滴の衝突速度によって、メッシュを通過する液滴の分裂形態と帯電量が大きく変化することを明らかにしました。特に、液滴がメッシュに衝突した直後に発生する衝突噴出（インパクトジェット）と、液滴が収縮・反発する際に発生する反動噴出（リコイルジェット）では、帯電特性が異なることを見出しました。リコイルジェットによって生成される微小液滴は、単位質量当たりの帯電量が大きくなることを確認しています。また、メッシュの開口サイズとワイヤ径を小さくすることで帯電効率が向上することや、導電性メッシュを使用することで、繰り返しの液滴衝突においても安定した帯電特性が得られることを示しました（図 2）。これらの結果から、液滴の分裂挙動と固液界面における電荷分離との関係を明らかにし、水滴の運動エネルギーを利用した帯電制御の新たな設計指針を得ました。

今後の展開

本成果により、超撥水性メッシュの微細構造と液滴の衝突・分裂挙動を制御することで、生成される微小液滴の帯電特性を向上できることが示されました。今後は、メッシュ構造や表面材料の最適化に加え、繰り返しの液滴衝突に対する耐久性の向上や、分離した電荷を効率的に回収して電力に変換する技術の開発を進めます。これにより、雨滴などの自然界の水の運動エネルギーを利用した環境発電技術や、外部電源を必要としない自立型センシングシステムへの応用を目指します。

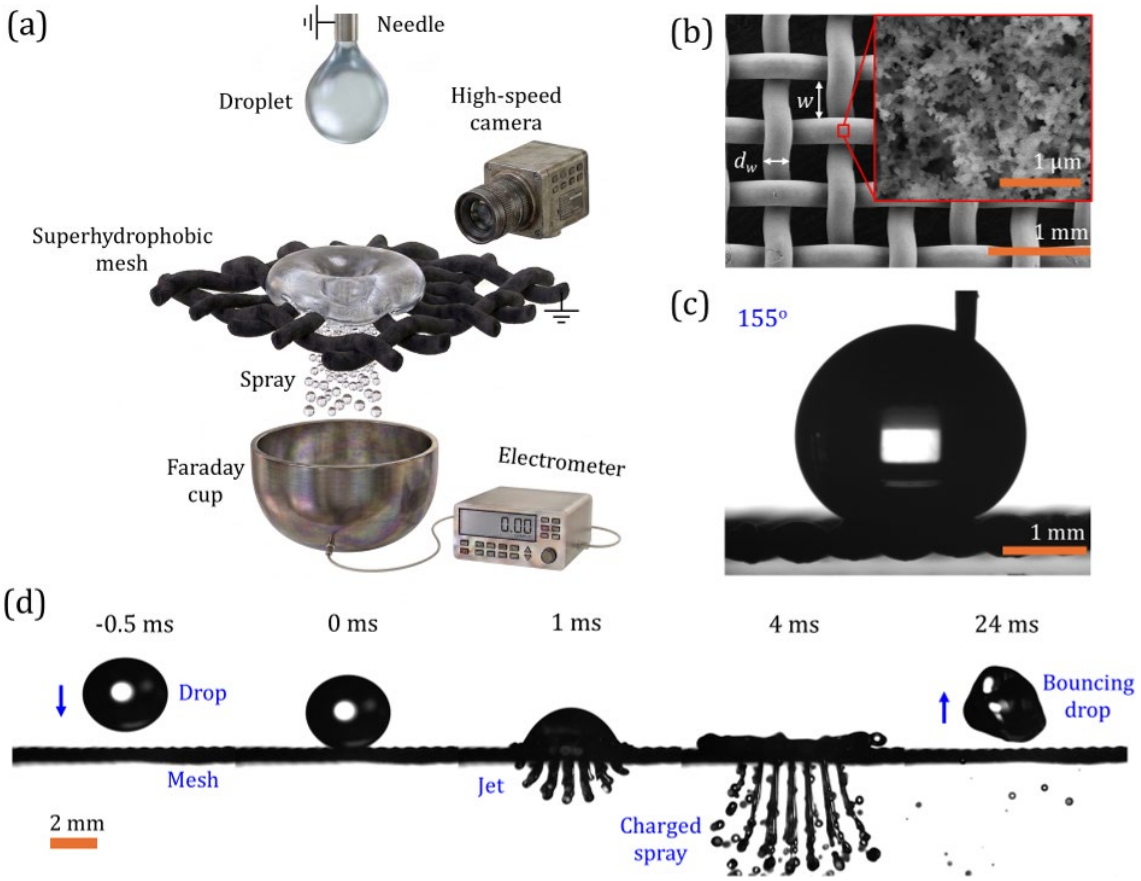


図 1. (a) 超撥水性メッシュへの液滴衝突およびスプレーからの電荷測定のための実験系、(b) 超撥水性コーティングを施したスチールメッシュの SEM 画像。挿入図：メッシュ上のマイクロ・ナノスケールの構造。(c) 超撥水性スチールメッシュの静的接触角測定。(d) We ≈ 100 の条件下で、スチールメッシュに 25 µl の液滴が衝突する様子の高速撮影画像。

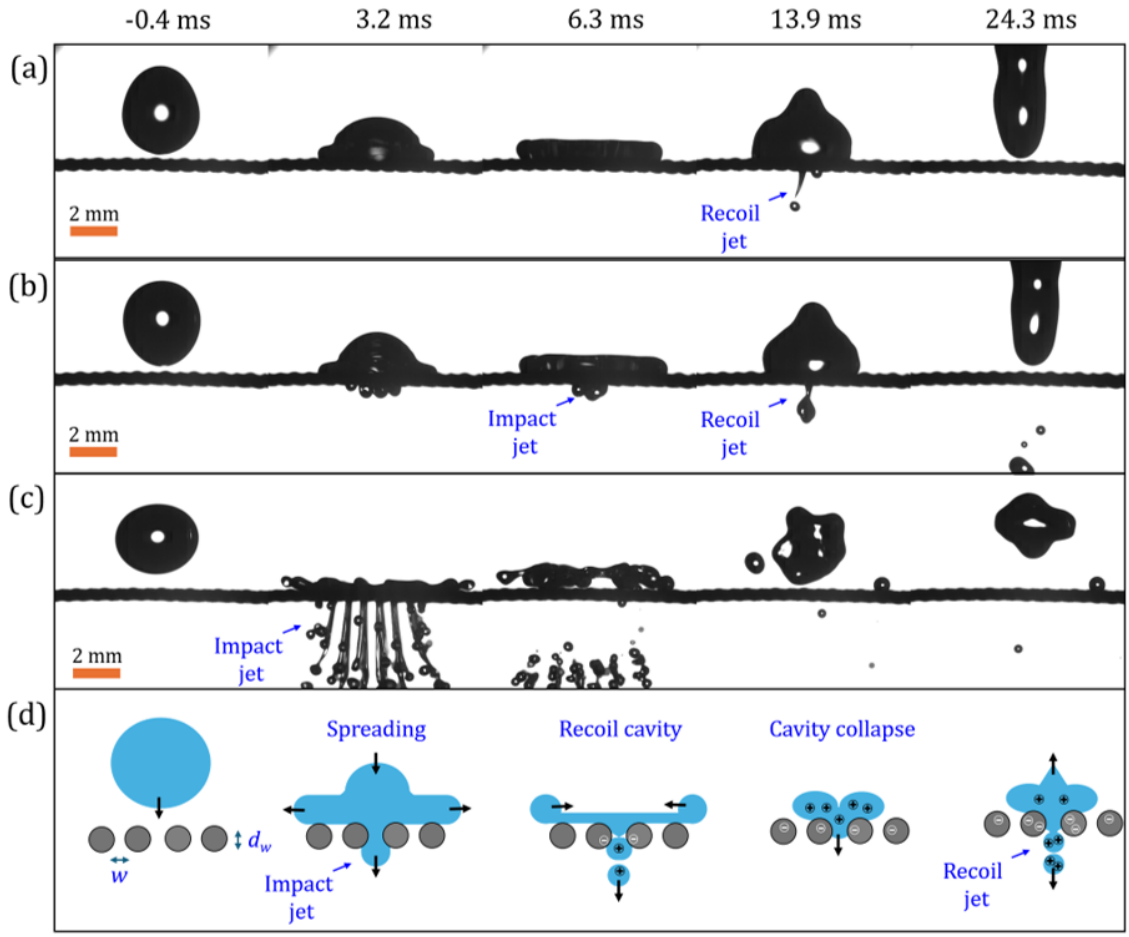


図 2. 25 μL の水滴がスチールメッシュに衝突する様子を撮影した高速度カメラ画像。(a) ウェーバー数 We ≈ 25 におけるリコイルジェット、(b) We ≈ 30 におけるインパクトジェットとリコイルジェットの共存、(c) We ≈ 150 におけるインパクトジェットのみの発生を示す。(d) 中間ウェーバー数領域において、インパクトジェットとリコイルジェットによって生じる帯電メカニズムの模式図。

【関連動画】

超撥水性メッシュに水滴が衝突した際の液滴の分裂挙動を、高速度カメラで撮影した動画を、論文のオンラインページにて公開しています。
https://pubs.aip.org/aip/pof/article/38/11/117417/3408881/Drop-spray-electrification#94624844-content

動画 S1：反動噴出（リコイルジェット）の発生（We ≈ 25）
動画 S2：衝突噴出（インパクトジェット）と反動噴出（リコイルジェット）の共存（We ≈ 30）
動画 S3：衝突噴出（インパクトジェット）のみの発生（We ≈ 150）

【謝辞】

本研究は、欧州連合（EU）の研究・イノベーションプログラム「Horizon

2020」の下、欧州研究会議（European Research Council：ERC）から助成（助成契約番号：883631、研究代表者：Hans-Jürgen Butt）を受けて実施されました。また、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（科研費、課題番号：JP24K00828、研究代表者：戸田雅也）による支援を受けました。

【用語説明】

注1.　超撥水性（Superhydrophobicity）：水を非常によくはじく表面の性質。一般に、水滴と表面との接触角が 150°以上となる状態を指す。表面に微細な凹凸構造を形成し、水との親和性を低くすることで実現される。

注2.　固液界面の電荷分離：固体と液体が接触し、その後分離する過程で、界面におけるイオンや電子の移動などによって、固体側と液体側に電荷が分かれる現象。本研究では、水滴がメッシュに接触・分離する過程で生じる電荷分離が、噴出した微小液滴の帯電に重要な役割を果たすと考えられる。

注3.　帯電スプレー：電荷（電気）を帯びた微小な液滴の集まりのこと。本研究では、水滴がメッシュに衝突して細かく砕ける過程でプラスとマイナスの電気が分離し、電気を帯びた状態のままスプレー状に噴出する現象を指す。

注4.　電荷対質量比（Charge-to-mass ratio）：帯電した液滴の電荷量をその質量で割った値。単位質量当たりにどれだけの電荷が蓄積されているかを示す指標であり、本研究ではpC/mg（ピコクーロン毎ミリグラム）で評価した。

注5.　パッシブシステム：外部からの動力や電源を必要とせず、自然界のエネルギー（本研究では雨滴の落下する運動エネルギー）のみを利用して稼働するシステム（受動型システム）のこと。モーターなどの可動部品を持たないため、メンテナンスが容易で長期間安定して動作することが期待できる。

注6.　ウェーバー数（Weber number、We）：流体の慣性力と表面張力の比を表す無次元数であり、液滴の衝突・変形・分裂挙動を評価する指標として用いられる。$We = \rho v^2 D/\gamma$（ρ：液体密度、v：衝突速度、D：液滴直径、γ：表面張力）で定義され、値が大きいほど表面張力に対して慣性力が支配的となり、液滴の変形や分裂が生じやすくなる。

注7.　環境発電（Energy harvesting）：光、熱、振動、水流など、身の回りに存在するエネルギーを回収して電気エネルギーに変換する技術。本研究では、落下する雨滴の運動エネルギーを利用した発電技術への応用を目指している。

注8.　ファラデーカップ（Faraday cup）：帯電した物体や粒子が持つ電荷を測定するための導電性容器。本研究では、メッシュを通過した微小液滴を容器内に回収し、エレクトロメーターを用いてその電荷量を測定した。

【論文情報】
タイトル：Drop Spray Electrification
著者：Riko Kazama, Masaya Toda, Hans-Jürgen Butt* and Rutvik Lathia*
*責任著者：Max Planck Institute for Polymer Research, Mainz, Germany Hans-Jürgen Butt, Rutvik Lathia
掲載誌：Physics of Fluids
DOI：10.1063/5.0355532
URL：https://doi.org/10.1063/5.0355532

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学大学院工学研究科　機械機能創成専攻
教授　戸田 雅也
TEL: 022-795-6974
Email: toda@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）
東北大学大学院工学研究科 情報広報室
担当　沼澤みどり
TEL: 022-795-5898
Email: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp