

プラズマと液体の3つの物理的反応から 液滴のナノサイズ化を紐解く

国立大学法人東京農工大学大学院工学府生体医用システム工学専攻の渡邊良輔氏(博士課程1年)、工学部生体医用システム工学科の菅田菜月氏(学部3年)、工学研究院先端物理工学部門の吉野大輔准教授(JST 創発研究者)は、プラズマと液体の相互作用を高速度カメラによって可視化し、プラズマによる液体微粒化のメカニズムを明らかにしました。

本研究成果は、Journal of Physics D: Applied Physics にオンライン公開されました(3月14日付)。
論文名: Micro-sized droplet formation by interaction between dielectric barrier discharge and liquid
DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad30af>

本論文に関連する先行研究(プラズマによるナノミストの作製)
論文名: Potential generation of nano-sized mist by passing a solution through dielectric barrier discharge
掲載誌: Scientific Reports, Vol. 12, 10526, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14670-4>
プレスリリース「液体を簡単にナノミストに! プラズマがもたらす新たな可能性」
https://www.tuat.ac.jp/outline/disclosure/pressrelease/2022/20220623_01.html

背景: ナノ粒子(注1)は極めて小さいサイズであることから特異な性質を持つことが知られています。そのため、半導体分野、製薬・バイオテクノロジー分野、ヘルスケア分野などをはじめとする様々な産業分野に応用されています。特に、液体をマイクロサイズやナノサイズのミストにする技術は液体微粒化技術と呼ばれ、我々の生活や産業に密接に関わる基本的かつ重要な技術の一つです。これまでも超音波や圧力を応用した様々な微粒化手法が開発されてきましたが、高粘度や高絶縁性の液体は微粒化が困難であるという課題がありました。また、従来の手法ではナノサイズのミストを作り出すためには複数の工程を必要とするため、装置が複雑化する問題もありました。吉野大輔准教授の研究グループはこれまでの研究で、誘電体バリア放電(注2)を用いた新しい液体微粒化技術である「プラズマナノミスト生成装置」(図1)を開発し、生成されるミストの動態および物理化学的特性について報告しました(Watanabe *et al.*, *Sci Rep* 2022)。本手法は、水性・油性などの種類や組成を問わず様々な液体を微粒化可能である点で優位性がある一方で、プラズマと液体がどのように影響しあってミストが生成されるのかについては明らかとなっていないままでした。

研究体制: 本研究はJST 創発的研究支援事業(JPMJFR222S)、JSPS 科研費(18K19894、21K19893)、日本科学協会笹川科学研究助成(2023-2027)による支援のもと、東京農工大学で実施されました。高速度撮影は株式会社ナックイメーજテクノロジーにご協力いただきました。

研究成果：通常の観察手法では、極めて短い時間で生成されるミストの生成過程を捉えることは困難です。そこで本研究では、高速度撮影装置を用いました。ピークピーク電圧 12.5 kV、周波数 10 kHz のパルス電圧を印加した噴霧ユニットにリン酸緩衝生理食塩水 (PBS) を毎分 50 μL (マイクロリットル、 μ は 100 万分の 1 を表す) で送液することでマイクロ・ナノサイズのみストを生成しました。噴霧ユニットから発生するミストの動態を毎秒 30,000~100,000 コマの高速度撮影を行った結果、(1) 液体ジェットの不安定性による微小液滴の分離、(2) プラズマストリーマ (注 3) の衝突による液滴の物理的破砕、(3) プラズマストリーマ噴出に伴う煙状ミストの発生と液滴表面の崩壊、の 3 つの物理的反応が複合的に起こることによってマイクロ・ナノサイズのみストが生成されることが明らかとなりました (図 2)。

反応 (1) は、印加電極 (金属ニードル) 通過時に過剰に荷電された PBS が、電荷を放出するために接地電極方向にクーロン力によって引き伸ばされ、幅 40 μm 程度の液体ジェットを形成し、プラトー・レイリーの不安定性 (注 4) に従って液滴 (直径 50 μm 程度) が分裂する現象です。反応 (2) は、噴霧ユニットのガラス管内壁に付着した液滴にプラズマストリーマが衝突し、物理的に破砕される現象であり、数十 μm 以下の粒子を含むミストを生成します。また、この反応 (2) は他の物理的反応と比較して高頻度で発生することを確認し、ナノサイズのみスト生成の大きく寄与していることがわかりました。反応 (3) は、金属ニードル下端に形成される PBS の液滴内部から、液滴表面を崩壊させながら煙状のみストを纏いプラズマストリーマが噴出する特異な現象です。誘電体バリア放電は液体中で発生させることは通常困難であるため、液体中をプラズマストリーマが放射状に伸展し、煙状のみストを纏いながら噴出する反応 (3) はこれまでに確認されることがない現象です。これらの 3 つの物理的反応が連鎖的かつ反復的に動作することで、ナノサイズのみストが生成できると考えられます。

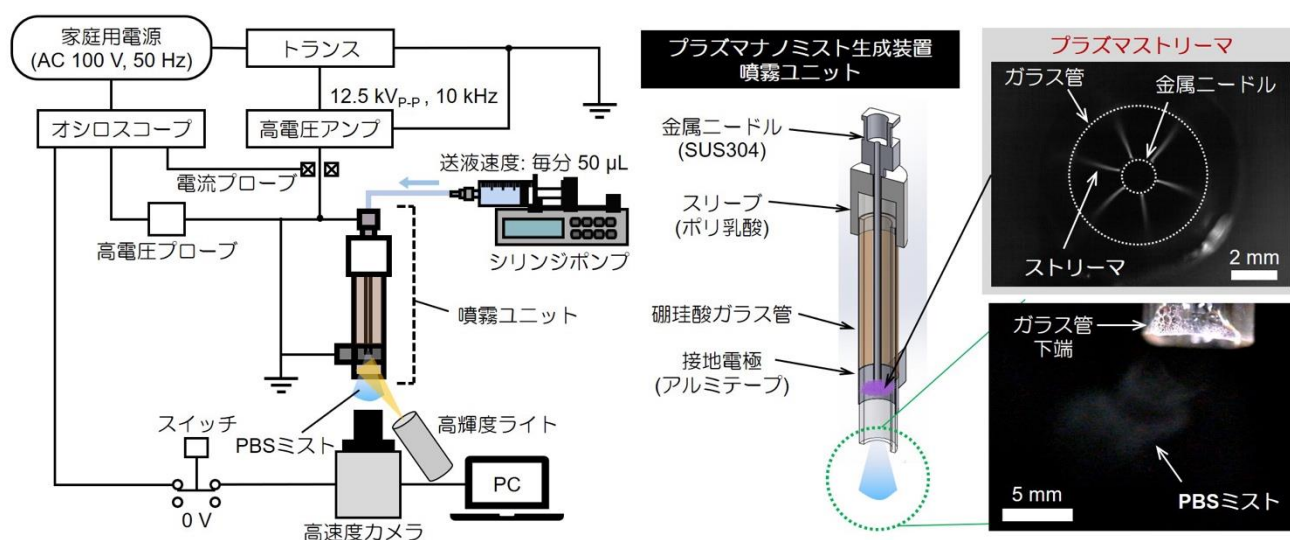
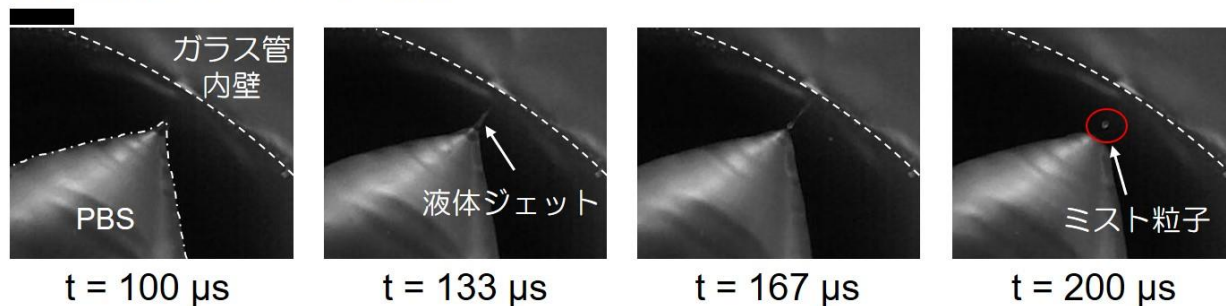
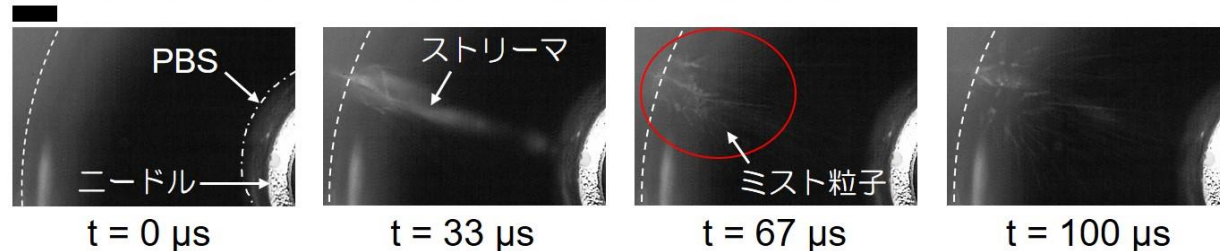


図 1：プラズマナノミスト生成装置と高速度撮影のセットアップ。

(1) 液体ジェット的不安定性



(2) プラズマストリーマの衝突による液滴の物理的破碎



(3) プラズマストリーマの噴出に伴う煙状ミストの発生と液滴表面の崩壊

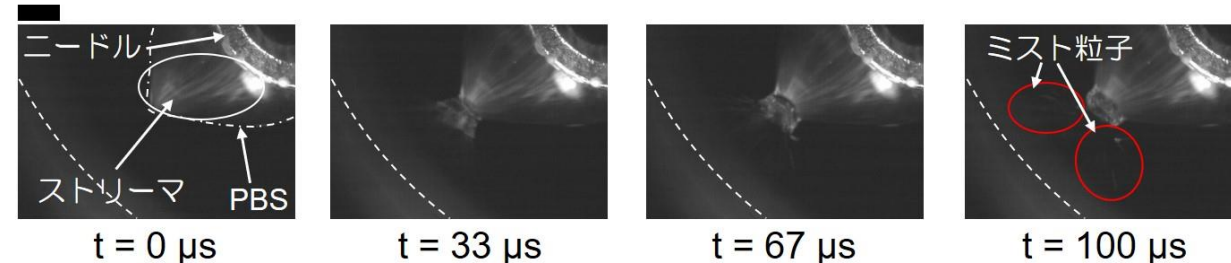


図2：プラズマナノミスト生成装置は3つの異なる物理的反応で液体を微粒化する。(1) 液体ジェット的不安定性による微小液滴の分離。(2) プラズマストリーマの衝突による液滴の物理的破碎。(3) プラズマストリーマ噴出に伴う煙状ミストの発生と液滴表面の崩壊。スケールバーは500 μ m。秒間30,000枚の速度で撮影。撮影開始時刻をt=0とした。 μ sはマイクロ秒(100万分の1秒)。図は(Ryosuke Watanabe *et al*, 2024. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 23LT01) を改変して吉野らにより作成。

今後の展開：プラズマによる液体微粒化技術は、従来の手法では困難であった「高粘度や高絶縁性の液体もその組成に依らずナノサイズに微粒化できる」という特徴があることに加え、高電圧による電氣的影響が液体やその内部に含まれる物質(分子)に様々な影響を与えることができます。今後は、液体中に含まれる分子へのプラズマの影響を明らかにしていくことで、新たな化学合成技術や分子状態の制御技術としての応用に貢献できると期待しています。

注1) ナノ粒子

直径がナノメートル(nm、1ナノメートルは10億分の1メートル)サイズの微小な粒子。ナノ粒子になると一般的な大きさの固体にはない特異な性質を示す。

注2) 誘電体バリア放電

誘電体(絶縁体)で覆われた電極に交流電圧を印加することでプラズマを発生させる放電形式。

注3) プラズマストリーマ

気体分子が電子と陽イオンに分裂した不安定な状態をプラズマという。プラズマストリーマは、電子・陽イオンが飛び交うプラズマ状の放電経路を指す。

注4) プラトー・レイリーの不安定性

液体ジェット（強い勢いで噴出する液体の流れ）がある条件を満たすと表面張力による収縮と慣性による拡張の間で競合が生じ、ジェットが不規則に分裂・細分化する現象。

◆研究に関する問い合わせ◆

東京農工大学大学院工学研究院
先端物理工学部門 准教授
吉野 大輔（よしの だいすけ）
TEL/FAX : 042-388-7113
E-mail : dyoshino@go.tuat.ac.jp