

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01207

研究課題名（和文）液滴を用いたプラズマ誘起液相反応利用のためのプラズマと液滴の相互作用の解明

研究課題名（英文）Study of plasma-droplet interaction for efficient plasma-induced liquid-phase reactions using droplets

研究代表者

朽久保 文嘉（Fumiyoshi, TOCHIKUBO）

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90244417

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000 円

研究成果の概要（和文）：プラズマと液滴の相互作用解明を目的とし、大気圧プラズマにおける液滴挙動・誘起される液滴内の反応、コロナ放電とエレクトロスプレーの相互作用、について取り組んだ。

大気圧プラズマ内の液滴を高速度カメラで観測し、液滴の帯電状態と液滴挙動を明らかにした。また、プラズマ中の単一液滴の帯電・プラズマ誘起液相反応に関するモデルを構築し、液滴内に誘起される反応の詳細を解析した。

コロナ放電を伴うエレクトロスプレーにおける微小液滴の放出過程を高速度カメラで観測し、コロナ放電に伴う円錐状液体形状（テイラーコーンと呼ばれる）先端の振動と曲率半径に起因した電界が放電と液滴放出の特性を決定することを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、液体と接するプラズマに誘起された液中反応が注目され、材料科学、環境、医療などの応用分野で研究されている。これらは、プラズマから入射した電子やイオン、ラジカルによる液面での反応を起点とするものであるため、効率化の観点から比表面積の大きな液滴の活用は有望である。本研究で解明したプラズマ内の液滴挙動、および、プラズマに誘起される液滴内反応やその時定数は、プラズマと液滴の相互作用を利用する上での基本的な考え方や設計指針を与えるものである。また、エレクトロスプレーではコロナ放電の発生を避けてきたが、コロナ放電と液滴放出の関係が分かったことにより、積極的に反応を利用したプロセス展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the interaction between plasma and droplet, we have studied the droplet behavior and the plasma-induced reactions in the droplet in dielectric barrier discharge, and the interaction between corona discharge and electrospray.

The droplets in the dielectric barrier discharge were observed by a high-speed camera, and the charging and the motion of the droplets were clarified. A model for the charging and plasma-induced liquid-phase reaction of a single droplet in a plasma was developed, and the details of the reaction induced in the droplet were analyzed.

The electric field caused by the oscillation of the Taylor cone tip and the change of the curvature radius during the corona discharge determines the characteristics of the discharge and the droplet emission, depending on various characteristics of the droplet.

研究分野：プラズマエレクトロニクス

キーワード：プラズマ液体相互作用 液滴 エレクトロスプレー コロナ放電 誘電体バリア放電 放電数値解析

1. 研究開始当初の背景

近年、液体と接するプラズマ(以降、気液界面プラズマと表記)に誘起された液中反応が注目されており、材料科学、環境、医療などの広い応用分野を対象として研究が進められている。これらは、原則として、プラズマから液面へ入射した電子やイオン、ラジカルが液相側気液界面層に濃縮され、ここを起点とした特異な液中化学反応を誘起するものである。これらは“面”における反応であり、効率化の観点で考えるならば、比表面積の大きな液滴の活用は有望である。

プラズマ中に液滴を導入した場合に起こりうる現象として、(i)プラズマ中で液滴は微粒子と同様に振る舞って負に帯電、(ii)プラズマ中のラジカル等の粒子が溶解することで液滴中に液相反応場を形成、(iii)液面への電子やイオンの入射に伴い液中反応形成に寄与、(iv)液滴が気化することでガス組成を変化、といったことが考えられる。したがって、応用に際しては、このような効果を吟味した上で、発現する機能を設計・制御する必要がある。

これまでもプラズマと液滴を用いた研究は行われている。我々は、プラズマによるガス状窒素酸化物の分解処理に対して、放電プラズマ中への液滴の導入をいち早く行った(S. Daito, F. Tochikubo, T. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, (2000) 4914)。また、山形大の南谷等は、水処理の手法として、ミスト化した処理対象水をパルス放電プラズマ中に導入し、その効果を検証している(Y. Minamitani *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, (2008) 2586)。材料分野に目を向けると、東大の伊藤等は、プラズマ支援インクジェット印刷法を開発し、ポリイミド上で良好な導電性の銀ライン形成に成功した(M. Tsumaki, K. Nitta, S. Jeon, K. Terashima, T. Ito, J. Phys. D **51** (2018) 30LT01)。これらの研究では、応用が先行して成果を上げているが、効果的に液滴を利用するためには、応用の基盤となる学理、即ち、プラズマと液滴の物理的・化学的な相互作用の解明が必須である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プラズマと液滴の物理的・化学的な相互作用を実験、及び、シミュレーションによって解明することである。特に、(i)誘電体バリア放電へ液滴を導入した系、(ii)コロナ放電を伴うエレクトロスプレーの系、の2種の系において、実験とモデリング・数値解析からプラズマと液滴の相互作用の解明を目的とする。前者では、均一なグロー放電様のプラズマ内に液滴を導入した際の液滴の挙動、プラズマによって液滴内に誘起される反応やその時定数を明らかにすることを目的とする。また、後者では、安定した液滴放出が可能であるエレクトロスプレーにおいて、エレクトロスプレーとコロナ放電の相互作用を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 誘電体バリア放電における液滴挙動と液滴内に誘起される化学反応 実験

Fig. 1 に示すように、大気圧 He 中で平行平板型の誘電体バリア放電を形成する。ここで、誘電体はアクリル、誘電体の厚みは 1 mm、電極間ギャップは 3 mm、電極半径は 20 mm または 10 mm とした。片側の電極を接地し、もう片側の電極に正弦波電圧(周波数 100 kHz, 10 kHz, 1 kHz)を印加して誘電体バリア放電を発生させた。放電時の電圧波形と電流波形は高圧プローブと電流プローブで計測し、オシロスコープ上でモニターした。時間平均した発光種と発光強度は小型分光器で計測した。

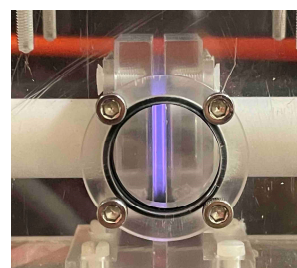


Fig. 1 大気圧 He 中に形成される誘電体バリア放電

Fig. 1 の誘電体バリア放電上部にインクジェットシステム(クラスターテクノロジー社製)を設置し、直径 100 μm 程度の水滴を電極間に射出する。このときの液滴の挙動を、ズームレンズ(VS TECHNOLOGY, VSZ-10100)を介して高速度カメラ(Photron, FASTCAM SA3)で観測した。

シミュレーション

Fig. 2 はプラズマ中の単一液滴におけるプラズマシミュレーションモデルである。大気圧 He 中の直流グロー放電、または誘電体バリア放電を想定し、その中に直径 8 μm の液滴を置く。プラズマ中では電子と He^+ について局所電界近似により密度連続式を、また、液滴中では溶液の種類に応じたイオン種、中性化学種とそれらの反応を考慮した密度連続式を計算し、全領域に対してポアソンの式で電位分布を計算した。境界条件として、プラズマから液滴へ入射した電子は直ちに水と

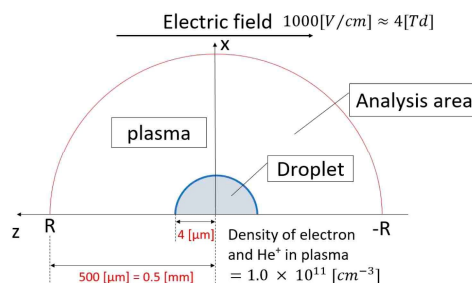


Fig. 2 プラズマ中の単一液滴におけるシミュレーションモデル

電子に変わり, He^+ は H_2O^+ への電荷交換衝突を経て H^+ と OH に変換されるものと仮定した。また, 液滴から十分に離れた位置 (Fig. 2 で原点から R の球面上) ではプラズマは液滴の影響を受けないものとして境界条件を設定した。このモデルにより, プラズマ中での液滴の帯電とこれに伴うデバイ遮蔽, プラズマにより誘起される液滴内の反応過程を調べることができる。液滴の水溶液として, NaCl 水溶液, AgNO_3 水溶液を想定した。

また, 液面に電子が入射した場合, どの程度の深さまで電子が浸透して水和電子に変換されるか, 入射電子によって電離や解離がどの程度起こるかを調べるために, モンテカルロ法を用いて電子の軌跡を追跡して評価した。

(2) コロナ放電とエレクトロスプレーの相互作用

実験

Fig. 3 に示すように, 液体を供給するための内径 0.5 mm, 外径 0.8 mm の SUS 製ノズル電極を接地し, このノズル電極の上方に設置した平板電極に直流電圧を印加する。このとき, 電界が集中するノズル電極側ではテイラーコーンが形成されて液滴が放出されるとともに, テイラーコーン先端部の電界がコロナ開始電界を超える場合は同時にコロナ放電 (トリチェルパルス放電) が形成される。電極間距離は 3 mm, 5 mm, 10 mm で変えた。液体として 1 wt% のドデシル硫酸ナトリウム (SDS) 溶液, エチレングリコール (EG) 溶液, および, 四ホウ酸ナトリウム十水和物で導電率調整した EG 溶液を用いた。これらの溶液を用いた理由は, 表 1 に示したように, 導電率, 表面張力, 粘度といったテイラーコーン形成に重要となるパラメータが大きく異なるためである。電極間の電圧は高圧プローブで, また, 放電電流はノズル電極側の抵抗の電圧降下より計測した。テイラーコーンの形状や液滴放出は放電電流と同期して高速度カメラ (Photron, Mini AX200) で観察した。更に, 532 nm のレーザー光を用いて, Mie 散乱による液滴の計測を行った。

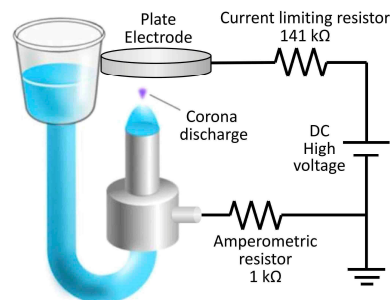


Fig. 3 コロナ放電を伴うエレクトロスプレーの実験装置概略

表 1 各溶液の特性

	1wt% SDS	EG	純水
導電率(mS/cm)	1.10	0.003	0.005
表面張力(mN/m)	35	48	72
粘度(mPa s)	0.9	16	0.89

シミュレーション

エレクトロスプレーを伴うコロナ放電の特性を定性的に理解するために, 同心球殻型電極間で形成されるトリチェルパルス放電の一次元数値解析を行った。支配方程式は電子, 負イオン, 正イオンに対する密度連続式とポアソンの式である。

4. 研究成果

(1) 誘電体バリア放電における液滴挙動と液滴内に誘起される化学反応

大気圧 He 中の誘電体バリア放電内の液滴挙動

Fig. 4 は Fig. 1 に示した大気圧 He 中の誘電体バリア放電 (100 kHz で駆動) 内に直径約 90 μm の水滴を導入した際の, 放電部下端における液滴挙動である。印加電圧の周波数が 100 kHz の場合は, 電極間でプラズマが維持されることがわかっている。液滴導入時の射出速度は 3.4 m/s 程度であるが, 水滴は速度や粒径の大きな変化を伴わずにプラズマ内を通過した。即ち, 低温プラズマ中で, 水滴はあまり蒸発を伴わずに導入可能であることを示唆する。Fig. 4(b) では, 水滴は電極下端部でトラップされているが, これは, プラズマ中で負極性に帯電した水滴が, 両極性拡散に伴う電界の影響を受けていると示唆される。

印加電圧の周波数を 10 kHz とした場合, 水滴は誘電体バリア放電内へ進入しにくくなり, また, 進入した水滴も電極方向へ加速されやすくなった。10 kHz の場合, 電子はパルス的に存在するために電極間では正イオンが支配的となることがわかっている。したがって, 水滴は主として正極性に帯電していることが示唆される。

以上, 誘電体バリア放電内の液滴挙動は, 放電構造に起因した液滴の帯電状態の影響を強く受けることが実験的に確認された。

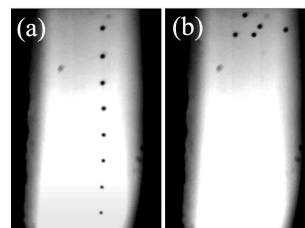


Fig. 4 大気圧 He 中の誘電体バリアコロナ放電内の液滴挙動。
(a) 放電なし, (b) 放電あり。

プラズマ中の液滴の帯電過程, および, プラズマに誘起される液滴内反応の数値解析

典型的な解析結果として, プラズマ密度 10^{11} cm^{-3} , プラズマ中の電界 1000 V/cm の条件下, 半径 4 μm , 濃度 10^{-2} mol/L の AgNO_3 水溶液の液滴を導入した際の帯電過程と液滴内反応について示す。Fig. 5 は液滴の帯電が定常に達した時点での液滴周りの電子と He^+ の密度分布, および,

電位分布である。帯電が定常状態に達する時間は $1 \mu\text{s}$ 以下であり、短時間で定常に達することが分かった。なお、この時間はプラズマ密度や液体の導電率にも強く依存することを確認している。液滴の周りはデバイ遮蔽によりシースが形成され、液滴自体は負に帯電する。

液滴内の Ag^+ 濃度分布の経時変化を Fig. 6 に示す。 Ag^+ は主にプラズマから液面へ入射した電子、 He^+ を起源とする水和電子や OH^- の反応するために、界面近傍から反応が進行する。 Ag^+ は

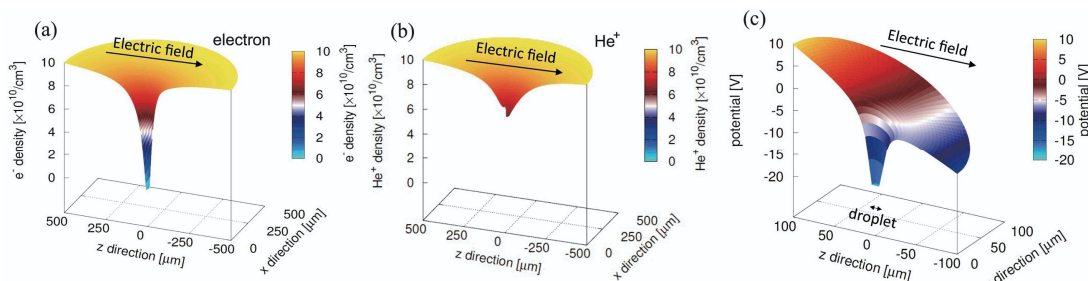


Fig. 5 液滴の帯電が定常に達した時点での(a)電子密度, (b) He^+ 密度, (c)電位分布.

10 ms 以下の時間で、酸化反応によって AgOH^+ や Ag^{2+} に、また、還元反応によって Ag , Ag_2 , Ag_2^+ , Ag_4^{2+} などへ変換されることが確認された。

以上、プラズマ中の液滴の帯電過程、プラズマに誘起される液滴内反応に関するモデルを構築し、数値解析によって液滴内の反応を詳細に予測することに成功した。ここでは大気圧直流グロ

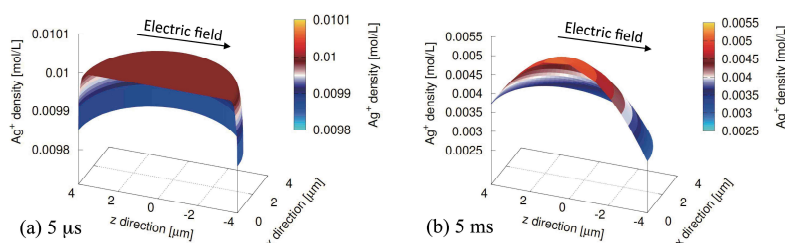


Fig. 6 液滴内の Ag^+ 濃度の密度分布.

ー放電中の液滴について示したが、誘電体バリア放電など、様々な放電形態に対して適用可能である。

(2) コロナ放電とエレクトロスプレーの相互作用

Fig. 7 は 1wt% SDS 溶液を用いたときの放電電流波形とテイラーコーン先端形状の関係を示したものである。電流波形はトリチェルパルス放電様の電流パルス群で構成され、その電流パルス数、電流パルス間の時間、および、電流パルス群が現れる周期は用いる溶液の特性（特に粘度）や印加電圧に依存する。高速度カメラでの観測結果より、電流パルス群の最初の電流パルス発生時 (Fig. 7(a) の $21 \mu\text{s}$ 付近) でテイラーコーン先端が最も伸長し、その後この先端部が千切れて放出される様子が確認された。コロナ放電を伴わないエレクトロスプレーでは、粒径、帯電量、表面張力で決定されるレイリー限界によって液滴が放出されるが、コロナ放電を伴う場合の液滴放出機構は異なることが明らかとなった。

コロナ放電の発生は電界強度に依存し、電界強度はテイラーコーン先端形状に依存するので、放電電流波形とテイラーコーン先端の曲率半径、位置の関係を高速度カメラの画像より詳細に調べた。Fig. 8 に示すように、テイラーコーン先端は電流パルス群の発生周期と同期して振動しており、先端部の曲率半径は電流パル

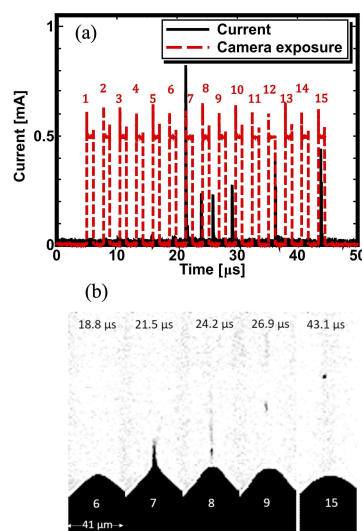


Fig. 7 SDS 溶液を用いたときの放電電流波形とテイラーコーン先端形状の関係。印加電圧は 5.5 kV、電極間距離は 10 mm.

ス群の最初の電流パルスが発生するときに最小となる，即ち，電界が最大となることが確認された。

本研究では，実験結果の考察を踏まえ，周期的に時間変化する曲率半径を導入して，負極性コロナ放電の数値解析を行ったところ，実験で得られている電流波形の再現に成功した。

以上により，コロナ放電を伴うエレクトロスプレーにおいて，テイラーコーン先端部の振動，これに伴う曲率半径との関係より，コロナ放電とエレクトロスプレーの相互作用を明らかにした。さらに，印加電圧として，直流電圧に交流電圧を重ねることにより，液滴の放出を制御可能であることも示した。

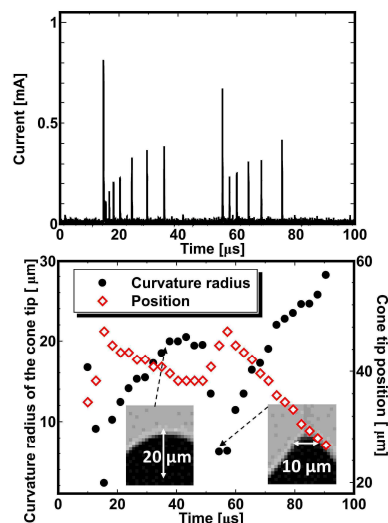


Fig. 8 SDS 溶液を用いたときの放電電流波形とテイラーコーン先端の曲率半径，位置の関係．実験条件は Fig. 7 と同じ．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Nakagawa, K. Nagao, F. Tochikubo	4. 巻 54
2. 論文標題 Interaction between Negative Corona Discharge and Droplet Emission from Liquid Taylor Cone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 305201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/abfce9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Akiyama, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo	4. 巻 129
2. 論文標題 Monte Carlo simulation of electrons injected from a low-temperature plasma into liquid water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 163304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0044024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 F. Tochikubo, K. Nagao, Y. Nakagawa, S. Uchida
2. 発表標題 Relationship between current waveform and Taylor cone tip vibration in Trichel-like pulse discharge from liquid-filled nozzle electrode
3. 学会等名 73rd Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 G. Yokota, Y. Nakagawa, I. Yagi, S. Uchida, F. Tochikubo
2. 発表標題 Numerical analysis of chemical reactions in a single droplet in atmospheric-pressure nonequilibrium plasma
3. 学会等名 73rd Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 テトラコーンを伴うトリチェルパルス様放電の電流特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田剛, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマ中の単一液滴中の化学反応の数値解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朽久保文嘉
2. 発表標題 直流グロー放電に誘起される液中反応のシミュレーション
3. 学会等名 静電気学会東北・関西・九州支部合同研究会/第 435 回生存圏シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朽久保文嘉
2. 発表標題 数値解析で推測するプラズマ誘起液中反応
3. 学会等名 第38回プラズマプロセッシング研究会 / 第33回プラズマ材料科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Most Tauhida Tabassum, Y. Nakagawa, F. Tochikubo
2. 発表標題 Controlling Electro spraying and Corona Discharge from Taylor Cone by AC Voltage Superimposed on DC Voltage
3. 学会等名 2021年度 静電気学会春期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島元葵, 中川雄介, 朽久保文嘉
2. 発表標題 エタノールを溶媒とした大気圧グロー放電におけるCuOナノ粒子の分散性の評価と原因の検討
3. 学会等名 2021年度静電気学会春期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田剛, 中川雄介, 朽久保文嘉
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマ内の単一液滴の帯電過程及び液相反応の数値解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島元葵, 中川雄介, 朽久保文嘉
2. 発表標題 エタノールを溶媒とした大気圧グロー放電におけるCuOナノ粒子の分散性の評価と原因の検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Nagao, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo
2 . 発表標題 Characteristics of droplet emission from Taylor cone synchronized with corona discharge current
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases/10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Akiyama, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo
2 . 発表標題 Track of plasma-originated electrons in liquid water for generation of hydrated electrons by Monte-Carlo simulation
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases/10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 G. Yokota, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo
2 . 発表標題 Modelling of charging and liquid-phase chemical reaction of water droplet in atmospheric-pressure plasma
3 . 学会等名 12th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Tochikubo, N. Shirai, Y. Nakagawa, S. Uchida
2 . 発表標題 Diagnostics and modelling of plasma and liquid interfacial phenomena
3 . 学会等名 24th International Symposium on Plasma Chemistry (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Nakashima, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo
2. 発表標題 Electrical and optical diagnostics of glow discharge electrolysis with ethanol
3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田剛, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマ中単一液滴の帯電および化学反応の数値解析
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 テイルコーン先端から発生するコロナ放電電流の特性評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山直輝, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 モンテカルロ法を用いたプラズマ由来電子による液中活性種生成の解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田剛, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマ中単一液滴の帯電及び化学反応の数値解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朽久保文嘉, 中川雄介, 内田諭
2. 発表標題 硝酸銀水溶液を用いた大気圧直流グロー放電電解の二次元数値解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Tochikubo, Y. Nakagawa, S. Uchida
2. 発表標題 Simulation of Atmospheric-Pressure Glow Discharge Electrolysis for Silver Nanoparticle Synthesis in Silver Nitrate Solution
3. 学会等名 16th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Tochikubo, K. Nagao, Y. Nakagawa, S. Uchida
2. 発表標題 Dynamics of mist emitted from Taylor cone with atmospheric corona discharge
3. 学会等名 71st Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kitakaze, Y. Nakagawa, S. Uchida, F. Tochikubo
2. 発表標題 Effect of liquid electrode flow rate on the synthesis of metal nanoparticles by atmospheric-pressure glow discharge
3. 学会等名 40th Int. Symp. on Dry Process (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Tochikubo, F. Murayama, Y. Nakagawa, S. Uchida
2. 発表標題 Simulation of Atmospheric-Pressure Glow Discharge in Helium with Particles
3. 学会等名 11th Int. Symp. on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/12th Int. Conf. on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 枡久保文嘉
2. 発表標題 テイラーコーンの挙動と液滴放出における印加電圧と極性の影響
3. 学会等名 第42回静電気学会 全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋山直輝, 中川雄介, 内田諭, 枡久保文嘉
2. 発表標題 プラズマから水面に入射した電子のモンテカルロシミュレーションによる挙動解析
3. 学会等名 第79回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 コロナ放電を伴うテイラーコーンより放出された液滴の動的特性
3. 学会等名 第79回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 テイラーコーンの挙動と液滴放出、放電電流の関連性
3. 学会等名 第36回プラズマプロセッシング研究会/第31回プラズマ材料科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山直輝, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 界面の密度変化を考慮した水面上にプラズマ中の電子を入射させたときのモンテカルロシミュレーションによる挙動解析
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾圭祐, 中川雄介, 内田諭, 朽久保文嘉
2. 発表標題 テイラーコーン先端の先鋭化に伴う液滴放出とコロナ放電電流の関係
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京都立大学・プラズマ応用研究室
<http://www.comp.tmu.ac.jp/gdpal/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中川 雄介 (Nakagawa Yusuke) (80805391)	東京都立大学・システムデザイン研究科・助教 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------