

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18613

研究課題名（和文）テスラ級強磁場によるプラズマ選択輸送とラジカル反応遅延を用いた新規細胞機能制御法

研究課題名（英文）Novel Cell Function Control Using Plasma Selective Transport and Radical Reaction Delay under Tesla-class Strong Magnetic Field

研究代表者

金子 俊郎（Kaneko, Toshiro）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：30312599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超電導マグネットの内部に設置可能な「プラズマ照射溶液合成装置」を製作し、10 Tまでの強磁場を印加した実験を実施した。その結果、印加磁場強度が6 T以上で、プラズマ照射溶液内でのOHラジカル生成能が増大するとともに、pHが低下することを初めて明らかにした。一方で、プラズマ照射溶液中の亜硝酸イオンと硝酸イオンの濃度やプラズマ生成における放電電力が印加磁場強度に依存していないことから、これらの現象は放電電力増加によるプラズマ密度や硝酸濃度の増加によるものではなく、磁場強度増大によるプラズマ中の荷電粒子の選択輸送が主要因であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、テスラ級の強磁場中での気液界面プラズマの挙動とプラズマ照射溶液中のラジカル生成・反応の新しい現象を発見したことは、物理的、化学的、生物学的な側面から新しい機序を見出すことに繋がり、「強磁場プラズマライフサイエンス」とも呼べる新しい学問領域の礎を築いたと言える。また、6 T以上の強磁場中で、細胞機能に作用し得るOHラジカルの生成能が増大することを明らかにした本研究成果は、プラズマ医療科学のみならず、いま発展を続けているプラズマ植物科学へも貢献することができ、その社会的意義は大きいものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, "plasma exposed solution synthesis device" that can be installed inside a superconducting magnet was fabricated, and experiments were conducted under high magnetic fields up to 10 T. As a result, it was found for the first time that the OH radical generation capability in the plasma-exposed solution increased and the pH decreased when the applied magnetic field strength was 6 T or higher. On the other hand, the concentrations of nitrite and nitrate ions in the plasma-exposed solution and the discharge power for plasma generation were independent of the applied magnetic field strength, suggesting that these phenomena were not caused by an increase in plasma density or nitrate concentration due to an increase in discharge power, but were mainly due to the selective transport of charged particles in the plasma by an increase in magnetic field strength.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：気液界面プラズマ テスラ級強磁場 プラズマ選択輸送 液相中ラジカル 細胞機能制御

1. 研究開始当初の背景

近年、大気圧プラズマによる生命科学との融合分野が急速に発展している。特に、気液界面プラズマによるがん治療や細胞内への薬剤・遺伝子導入等のプラズマ医療分野に於いては、プラズマを照射した溶液中に生成されるラジカルが重要な役割を果たしており、研究代表者らはプラズマを細胞懸濁溶液に直接照射することが有効であることを明らかにしてきた。一方で、がん等の病巣を精密に観測しながら治療を行う「診断と治療の融合 (Theranostics)」が未来の医療技術として期待されており、既に放射線治療と強磁場 MRI を組み合わせた「MRIdian」と呼ばれる装置等が開発されている。ここで研究代表者は、がん細胞に抗がん剤を高効率で導入する「プラズマ薬剤導入装置」を MRI 装置と組み合わせることによって、未来のがん治療機器として極めて有用であるとの着想に至った。

研究代表者らは、これまでにヘリウムを原料とした大気圧プラズマを生成し、プラズマ中に存在するイオン、電子、活性種、光 (光子) 等を緩衝生理食塩水に照射することで、液相中で化学反応を繰り返してラジカル (短寿命活性種) を生成し、さらに反応が進行して長寿命の活性種に辿り着くことを示し、それらの活性種の輸送、反応過程を明らかにしてきた。ここで研究代表者は、上述したプラズマ中の荷電粒子の挙動やラジカルを含む化学反応が、テスラ級の強磁場中では無磁場中とは大きく異なり、液相中で生成されるラジカルの種類や濃度が大きく変化するとともに、その結果として、細胞機能に作用する、ラジカルによって修飾された有機分子の合成を制御することで細胞膜輸送効果やがん治療効果を圧倒的に向上できる可能性があることに気が付いた。しかしながら、テスラ級の強磁場中でのプラズマ照射溶液中のラジカル生成・反応機構を詳細に調べた例は申請者の知る限りでは国内外で報告がない。

従って、テスラ級の強磁場中での気液界面プラズマの挙動と液中ラジカル反応を介した有機分子修飾の作用メカニズムを明らかにすることは、物理的、化学的、生物学的な側面から新しい法則・機序を見出すことになり、「強磁場プラズマライフサイエンス」とも呼べる新しい学問領域の芽生えの時期の挑戦的な研究課題であるといえる。強磁場中でのプラズマ照射溶液中のラジカル生成・反応機構が明らかになることで、プラズマ医療科学のみならず、いま発展を続けているプラズマ植物科学へも貢献することができる。

2. 研究の目的

本研究では、強磁場 MRI 装置により腫瘍 (がん) 細胞をリアルタイムに観察しながら高効率でプラズマ薬剤導入治療を行える装置を開発すべく、テスラ級強磁場中でのプラズマ照射による細胞膜輸送促進 (薬剤導入効率向上) の機序解明とその新しい細胞機能制御法の確立を目指している。現在使用されている MRI 装置の最大磁場強度は 3~7 T であり、そのような強磁場中では、“磁場を横切るプラズマ中の荷電粒子が選択的に輸送される効果”、及び抗がん剤等の薬剤分子の細胞膜輸送を引き起こす主要因であると考えられている“液中ラジカルが強磁場の効果により溶液中に長時間保持される効果”が顕在化すると考えられる。本研究では、液中ラジカル (OH ラジカル等の短寿命活性種) を高密度で生成できる、大気圧プラズマを液体に直接照射する「プラズマ照射溶液合成装置」を用いて、10 T までの強磁場を印加した環境下で上述の二つの効果を詳細に調べることを目的とする。

3. 研究の方法

第一に、溶液に照射されるプラズマ中のイオンによる酸化作用 (電子求引性) と電子による還元作用 (電子供与性) の競合により液相表面での液中ラジカルの生成・反応機構が大きく変化すると考えられるため、強磁場印加により磁場を横切る荷電粒子の挙動を解明する。第二に、不對電子を有するラジカルがテスラ級強磁場中で反応速度が遅延することが報告されているため、プラズマ照射溶液に生成される OH ラジカル等の種々のラジカル (短寿命活性種) の強磁場中での化学反応を解明し、一般的には反応性が高く短寿命であるラジカルを溶液中に多量に生成し、長時間保持できる条件を見出す。

実験は、図 1 に示す「プラズマ照射溶液合成装置」を東北大学金属材料研究所 強

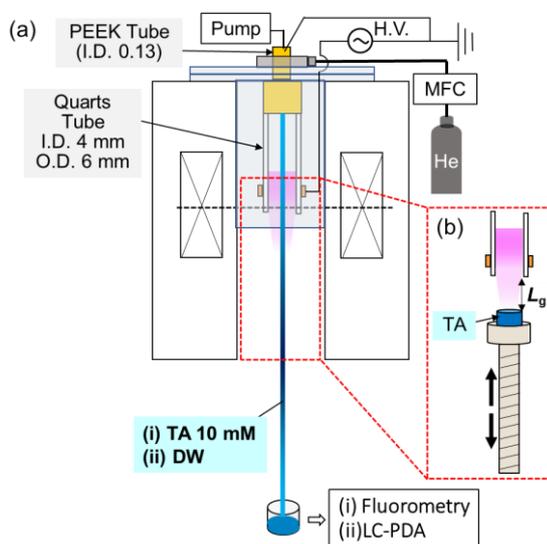


図 1: プラズマ照射溶液合成装置およびプラズマ照射液中の活性種計測手法。

磁場超伝導材料研究センターの超伝導マグネット（最大磁場強度：10 T，ボア径：100 mm）の内部に設置して行った。ヘリウムを石英管内に流しながら、その周囲に設けた円筒状電極に低周波高電圧を印加することでプラズマを生成した。

強磁場印加によるプラズマ照射液体でのラジカル生成能変化を評価するべく、図 1(a)のように石英管中心軸に沿って配置した内径 0.13 mm の PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂製の細管から高圧ポンプを用いて (i) OH ラジカル蛍光試薬（TA: Terephthalic Acid），もしくは(ii)純水を高速液柱流として導入した。プラズマ中を通過した液流は下流で採取され、(i)の場合は蛍光強度から OH ラジカル生成量を取得し、(ii)の場合は比色法およびフォトダイオードアレイ検出器付き高速液体クロマトグラフィ(LC-PDA)による過酸化水素(H₂O₂)，亜硝酸イオン(NO₂⁻)，硝酸イオン(NO₃⁻)濃度の取得に加えて、pH の測定を行った。

本実験系は、プラズマの軸方向に対して磁場を印加するため、プラズマプルームの進展長も磁場強度によって変化することが予測される。その影響を議論するべく図 1(b)のように石英管末端から TA 試薬液面までの距離 L_g を変化させることで、印加磁場強度によるプルーム進展長の変化を見積もった。

また、磁場を横切るプラズマ中の荷電粒子の挙動に影響を及ぼすと考えられる、プラズマ中の電位揺動を解析する目的で、図 2 に示すように石英管末端から距離 L_g だけ離れた位置に真鍮製円柱電極（静電プローブ）を設置し、高抵抗を介してオシロスコープでプラズマ中の浮遊電位の計測を行った。さらに、プラズマ生成における放電電力を Q-V リサーチ法によって計測した。

本実験においては、中心軸の高速液柱流に磁場を横切って輸送される荷電粒子の主な組成が、印加磁場強度の増大によって電子からイオンに変化していくと考えられるが、一方でプラズマ中の揺動励起による荷電粒子輸送の変化も想定されるため、その結果として液中に生じるラジカル（短寿命活性種）の生成の変化に注目して測定を行った。

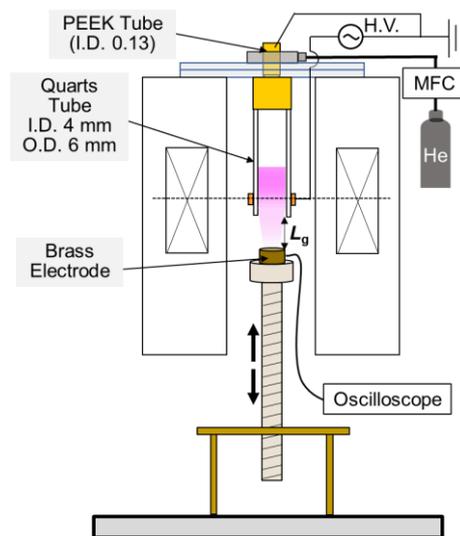


図 2: プラズマ照射溶液合成装置およびプラズマ中の電位揺動測定のための真鍮製円柱電極（静電プローブ）。

4. 研究成果

(1) 強磁場印加によるプラズマ照射液体中でのラジカル生成能変化の評価

- ① 図 1(b) の実験による、様々な印加磁場強度による軸方向 OH 生成能の距離 L_g 依存性を調べた。その結果、印加磁場強度が 6 T 以上で急激に OH 生成領域が 10mm 程度減少した。この結果は、プラズマプルームの軸方向進展長(L_p)が 10 mm 程度短くなったことが要因と考えられる。
- ② 図 1(a)の(i)TA 液柱流をプラズマ中へ導入することによる、径方向 OH 生成能(G_{HTA})を調べた。①の結果から、印加磁場強度によりプラズマプルーム長が変化し、TA 液柱流と作用するプラズマ領域が印加磁場強度によって変化してしまっているため、径方向 OH 生成能をプラズマプルーム長で規格化した。図 3 に示すように、プルーム長当たりの径方向 OH 生成能は、印加磁場強度が 6 T 程度までは磁場強度に対して単調増加し、7 T で急激に増加し、その後は飽和傾向になることが明らかとなった。
- ③ プラズマ照射高速液柱流中での反応過程を考察する目的で、図 1(a)の(ii)純水を用いた高速液流に対してプラズマ照射し、長寿命活性種である過酸化水素，亜硝酸イオン，硝酸イオン

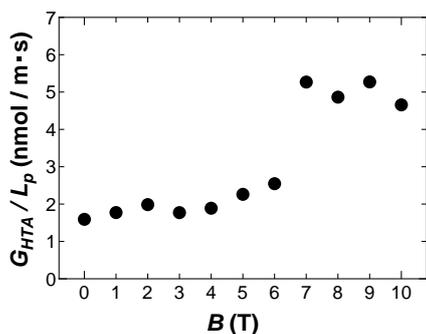


図 3: プルーム長当たりの径方向 OH 生成能の印加磁場強度依存性。

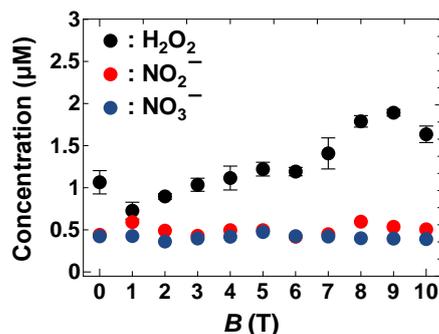


図 4: プラズマ照射純水中の過酸化水素，亜硝酸イオン，硝酸イオンの濃度の印加磁場強度依存性。

の濃度の印加磁場強度依存性を計測した. その結果, 図 4 に示すように過酸化水素濃度は OH 生成能と同様に 6 T 程度から増大しているが, 亜硝酸イオン濃度および硝酸イオン濃度は印加磁場強度に依存しないことが分かった.

- ④ ③と同様に図 1(a)の(ii)純水を用いた高速液流に対してプラズマ照射し, pH の印加磁場強度依存性を計測した. その結果, 図 5 に示すように, pH は 6 T 以上で低下することが分かった.

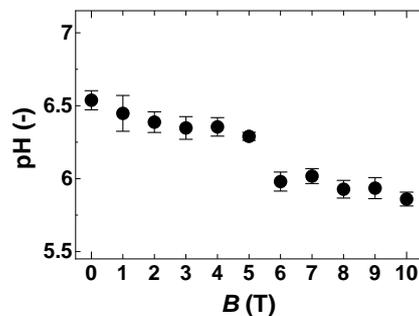


図 5: プラズマ照射純水中の pH の印加磁場強度依存性.

- (2) 強磁場印加によるプラズマ中の電位揺動変化の測定

印加磁場強度が 6 T 以上でプラズマ照射溶液中の OH 生成能が増大することが明らかとなり, また目視による観測で, プラズマブルーム形状が 6 T 以上で不安定化することが判明したため, その要因を解明すべく, プラズマ生成における放電電力および $L_g = 25$ mm の位置におけるプラズマ中の電位揺動を, 印加磁場強度を変化させて計測する実験を行った.

- ① プラズマ生成における放電電力の印加磁場強度依存性を計測したところ, 図 6 に示すように, 放電電力は 0.6 W 程度であり, 印加磁場強度に依存しないことが分かった.

- ② 印加磁場強度を一定速度で変化させながら, 静電プローブにより浮遊電位を計測した結果を図 7 に示す. この時の横軸は印加磁場強度の変化とともに時間変化も示している. 印加磁場強度が 6 T 程度以上で時間平均した浮遊電位が低下するとともに, 浮遊電位の揺動強度が増大する傾向が観測された.

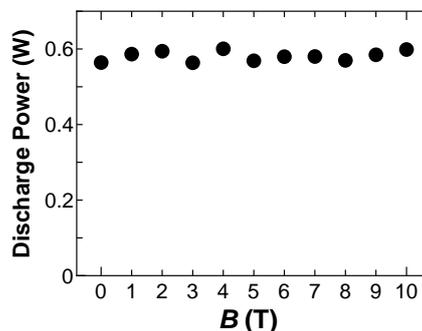


図 6: プラズマ生成放電電力の印加磁場強度依存性.

まとめ

本研究では, 超電導マグネットの内部に設置可能な「プラズマ照射溶液合成装置」を新規に製作し, 現有の超電導マグネットでは実現できなかった 4 T 以上の磁場を印加した実験を実施した.

その結果, 印加磁場強度が 6 T 以上でプラズマ照射溶液内に生成される OH ラジカルの生成能の増大を観測することに初めて成功した. さらに, プラズマ照射溶液中の pH が, 印加磁場強度 6 T 以上で低下することも明らかにした. 一方で, プラズマ照射溶液中の亜硝酸イオンや硝酸イオンの濃度が印加磁場強度によって変化していないことから, pH の変化が亜硝酸や硝酸の生成能向上によるものではないことを明らかにした. また, 印加磁場強度を変化させながらプラズマ特性 (放電電力, 浮遊電位揺動) を計測することで, 放電電力は印加磁場強度に依存せず, 浮遊電位は 6 T 以上で揺動強度が増大することを明らかにした.

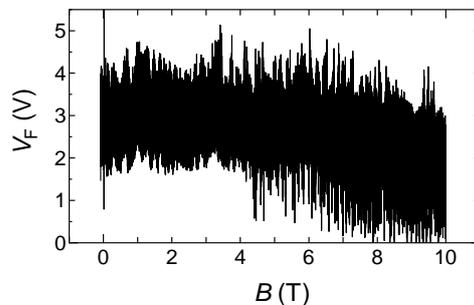


図 7: プラズマ中の浮遊電位揺動の印加磁場強度依存性.

以上の結果より, 印加磁場強度が 6 T 以上での径方向 OH ラジカル生成能の急激な増大および pH の低下は, 放電電力増加によるプラズマ密度の増加や硝酸濃度の増加によるものではないといえる. また, 荷電粒子の磁化の度合いを記述するホールパラメータ (サイクロトロン周波数と中性粒子との衝突周波数との比) が, 電子の場合に大気圧 (1 気圧) で 1 になる磁場強度が 7 T 程度であることから, これらの現象は, 印加磁場強度の増大によるプラズマ中の荷電粒子の選択輸送 (還元作用のある電子が磁化されることによる磁場を横切る輸送の減少) とプラズマ中の揺動励起による荷電粒子の輸送特性の変化 (酸化作用のあるイオンの輸送増大) 等が主要な要因であると考えている.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 T. Chida, K. Hiromori, N. Shibasaki-Kitakawa, S. Sasaki, T. Kaneko, and A. Takahashi	4. 巻 21
2. 論文標題 Application of nonthermal atmospheric-pressure plasma irradiation as a new method for noncatalytic liquid-phase selective oxidation of polyhydric alcohols	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 e2300163-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ppap.202300163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Yamanashi, S. Takeshi, S. Sasaki, K. Takashima, T. Kaneko, Y. Ishimaru, and N. Uozumi	4. 巻 114
2. 論文標題 Utilizing plasma-generated N2O5 gas from atmospheric air as a novel gaseous nitrogen source for plants	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Plant Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 12785-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11103-024-01438-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Sasaki, S. Osana, T. Kubota, M. Yamaya, H. Nishimura, R. Nagatomi, and T. Kaneko	4. 巻 55
2. 論文標題 Human coronavirus inactivation by atmospheric pressure helium plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 295203-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ac6a8c	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 K. Takeda, S. Sasaki, W. Luo, K. Takashima, and T. Kaneko	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental detection of liquid-phase OH radical decay originating from atmospheric-pressure plasma exposure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 056001-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abf80e	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 T. Kaneko, H. Kato, H. Yamada, M. Yamamoto, T. Yoshida, P. Attri, K. Koga, T. Murakami, K. Kuchitsu, S. Ando, Y. Nishikawa, K. Tomita, R. Ono, T. Ito, A. M. Ito, K. Eriguchi, T. Nozaki, T. Tsutsumi, and K. Ishikawa	4. 巻 61
2. 論文標題 Functional nitrogen science based on plasma processing: quantum devices, photocatalysts and activation of plant defense and immune systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0805-1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac25dc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計72件 (うち招待講演 32件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 K. Takeda, S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Evaluation of interfacial OH radical transport using plasmaexposed high-speed water jet
3. 学会等名 25th International Symposium on Plasma Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Takashima, R. Fujita, K. Muratomi, S.Sasaki, and T. Kaneko
2. 発表標題 Development of Atmospheric Pressure Plasma Source with Liquid Column Interface for Plasma-Liquid Interfacial Reactions in Spatio-Temporal Dynamics
3. 学会等名 25th International Symposium on Plasma Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko, S.Sasaki, and K.Takashima
2. 発表標題 Innovative technology for controlled synthesis of reactive species using gas-liquid interfacial plasmas and its applications
3. 学会等名 25th International Symposium on Plasma Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, K. Takashima, A. Higashitani, S. Ando, and H. Takahashi
2. 発表標題 Plasma Generated Dinitrogen Pentoxide Activating Plant Immunity
3. 学会等名 4th International Workshop on Plasma Agriculture (IWOPA4) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子 俊郎, 高島 圭介, 佐々木 渉太, 安藤 杉尋, 高橋 英樹, 東谷 篤志
2. 発表標題 大気圧空気プラズマ合成活性窒素種による植物免疫誘導
3. 学会等名 第40回日本植物バイオテクノロジー学会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ-液体界面における短寿命活性種の挙動解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko, K. Takeda, S. Sasaki, and K. Takashima
2. 発表標題 Analysis of short-lived reactive species in gas-liquid interfacial plasma with high-speed liquid column flow
3. 学会等名 The 76th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko , K. Taketa , S. Sasaki , and K. Takashima
2. 発表標題 Decaying Characteristics of Short-lived Reactive Nitrogen Species Generated by Gas-liquid Interfacial Plasma
3. 学会等名 the 13th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko , K.Takeda , S.Sasaki , and K.Takashima
2. 発表標題 Gas-liquid interfacial plasmas: Controlled generation of short-lived reactive species and its applications
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics and (AAPPS-DPP 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 渉太 , 高島 圭介 , 金子 俊郎
2. 発表標題 実験と数値計算によるプラズマ誘起液相化学反応の理解
3. 学会等名 第33回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木 渉太 , 丸子 高志 , 西牧 真木夫 , 河合 伸典 , 北川 清太郎 , 金子 俊郎
2. 発表標題 オゾン低排出型プラズマ活性ミスト源の開発
3. 学会等名 第40回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko , K.Takeda , S.Sasaki , and K.Takashima
2. 発表標題 Atmospheric pressure plasma with high-speed liquid flow: basic science and its application
3. 学会等名 97th IUVSTA Workshop on plasma-assisted conversion of gases for a sustainable future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ生成と電子温度・イオンエネルギー制御の基礎
3. 学会等名 グリーン・DXプラズマコンソーシアム 第1回講習会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kaneko , S. Sasaki , and K. Takashima
2. 発表標題 New Plasma Device for Selective Generation of Dinitrogen Pentoxide from Air and Its Applications
3. 学会等名 The 75th Gaseous Electronics Conference & 11th International Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kaneko , S. Sasaki , K. Takashima , A. Higashitani , S. Ando , and H. Takahashi
2. 発表標題 Synthesis of Dinitrogen Pentoxide Using Air Atmospheric Pressure Plasmas and Application for Biomaterial Processes
3. 学会等名 The 242nd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, K. Takashima, A. Higashitani, S. Ando, and H. Takahashi
2. 発表標題 Synthesis of Functional Nitrogen Using Air Atmospheric Pressure Plasmas for Agricultural Applications
3. 学会等名 The 20th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 渉太, 丸子 高志, 西牧 真木夫, 河合 伸典, 北川 清太郎, 金子 俊郎
2. 発表標題 過酸化亜硝酸を持続生成するプラズマ活性ミスト源の開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, and M. Kanzaki
2. 発表標題 TRP Channel as a Sensor for Reactive Species Generated by Atmospheric Pressure Plasma
3. 学会等名 8th International Conference on Plasma Medicine (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Honda, S. Sasaki, K. Takashima, M. Kanzaki, T. Sato, and T. Kaneko
2. 発表標題 Activation of Ion Channel and Uptake of Extracellular Dye Induced by In-liquid Plasma Treatment
3. 学会等名 8th International Conference on Plasma Medicine (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ接触移流システムを用いた液相OHラジカル減衰の実験的検出
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kaneko, H. Iwamoto, S. Sasaki, K. Takashima, and H. Takahashi
2. 発表標題 Selective Plasma Synthesis of Dinitrogen Pentoxide and Ozone for Sterilization and Virus Inactivation
3. 学会等名 The 74th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takeda, S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Experimental observation of liquid phase short-lived reactive species by advection system in contact with atmospheric pressure plasma
3. 学会等名 The 74th Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 俊郎
2. 発表標題 非平衡プラズマの生成と温度・エネルギー制御の基礎
3. 学会等名 第32回プラズマエレクトロニクス講習会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 高速活性種移流システムによるプラズマ生成液相OHラジカルの精密計測
3. 学会等名 第38回プラズマ核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関根崇文, 高島圭介, 金子俊郎
2. 発表標題 植物病原体防除のための低気相オゾン放出装置の開発
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラスマ-高速液流システムによる短寿命活性窒素種の実験検出
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子 俊郎, 高島 圭介
2. 発表標題 プラズマ液体スプレーにおけるプラズマ相互作用: 農業分野での応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 竜介, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 神崎 展, 佐藤 岳彦, 金子 俊郎
2. 発表標題 液中プラズマ・パルス電場複合法による細胞内高効率遺伝子導入
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関根 崇文, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 植物病害防除のためのプラズマ生成液相オゾン選択噴霧装置の開発
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学大学院工学研究科 金子・加藤研究室 https://www.ecei.tohoku.ac.jp/plasma/ 東北大学大学院工学研究科 非平衡プラズマ学際研究センター https://www.ecei.tohoku.ac.jp/plasma/IRCNP/

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	佐々木 渉太 (Sasaki Shota) (90823526)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	武田 一希 (Takeda Kazuki)		

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		
米国	The University of Minnesota		