

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01890

研究課題名（和文）過電圧生成一様電離波によるエネルギー遷移過程制御プラズマ窒素固定

研究課題名（英文）Energy Transient Process Control for Plasma Nitrogen Fixation with Ionization Wave Generated by Over Voltage Pulses

研究代表者

高島 圭介（Takashima, Keisuke）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：70733161

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高効率なプラズマ窒素固定の実現に重要な、効率的な振動励起窒素生成を目的に、申請者独自の過電圧生成電離波による非自己維持放電プラズマの生成法を研究した。その結果、0.1気圧での電界制御による振動励起窒素の効率的な選択生成法の実証と、窒素固定反応に直接関与すると期待される $v=13$ までの高振動励起窒素の生成と観測を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放電プラズマ窒素固定の研究は、無尽蔵原料と自然エネルギーで価値ある物質を創成できるため、化石燃料に依存しない分散可能な窒素固定技術であり、持続可能な社会の実現に寄与する。プラズマ窒素固定のエネルギー効率改善に向けた重要な過程と世界的に認識されている、振動励起窒素の選択生成および高振動励起窒素生成を本研究では先駆的に達成することができた。

研究成果の概要（英文）：Non-self-sustained discharge plasma generation with ionization waves with over-voltage pulses has been experimentally studied for efficient vibrational excitation of nitrogen molecule, a key for highly efficient plasma nitrogen fixation. This research demonstrated selective generation of vibrationally excited nitrogen by reduced electric field control at 0.1 atm. Furthermore, generation and observation of highly-excited nitrogen vibrational states up to $v = 13$ were experimentally achieved.

研究分野：プラズマ生成

キーワード：ナノ秒パルス放電 振動励起 窒素固定 非自己維持放電

1. 研究開始当初の背景

莫大なエネルギー資源消費に依存してきたアンモニアを原料とする現代の化学合成は、持続可能な開発目標 (SDGs) 達成に向け様々な困難が明らかとなっていた。一方、プラズマによる CO_2 の資源化や、空気中の窒素を一酸化窒素 (NO) やアンモニア (NH_3) 等の肥料や化学合成原料となる窒素化合物に変換するプラズマ窒素固定は、無尽蔵の原料を用い再生可能エネルギーで化学合成をするため、化石燃料依存型社会からの脱却に貢献できる可能性が示されていた。

プラズマ窒素固定は、分散的かつ非偏在的な窒素化合物生産が可能のため普遍的価値を有するが、合成効率の向上が重要な課題であった。この課題を克服するためには、反応物を選択的に反応活性化エネルギーの低い反応経路に誘導するために放電電力を利用することが必要である (図 1)。プラズマ窒素固定では活性化エネルギーが 1/3 程度になる振動励起窒素 ($\text{N}_2(v)$) と酸素の反応による一酸化窒素 (NO) 生成 (Zel'dovich 過程) の利用が提案されており、 $\text{N}_2(v)$ を高効率生成することでプラズマ窒素固定の効率向上が期待されてきた。低準位の振動励起窒素 $\text{N}_2(v_{low})$ の観測は数多く報告されてきたが、Zel'dovich 過程における窒素解離反応に直接関与するとされる高準位の振動励起窒素 $\text{N}_2(v_{high})$ は観測例が少ない。さらに、低損失に $\text{N}_2(v_{high})$ 生成が必要なプラズマ窒素固定で重要な、十分な放電体積を有するプラズマにおいて $\text{N}_2(v_{high})$ の生成とその反応過程の実験的評価がなされてこなかった。

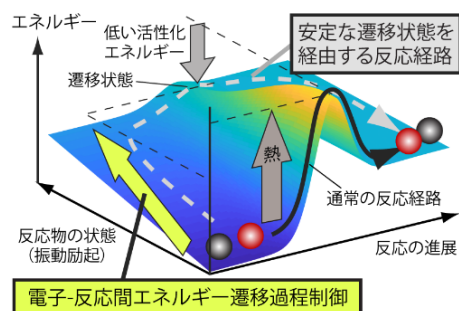


図 1: エネルギー遷移過程制御による反応活性化エネルギーの低減。

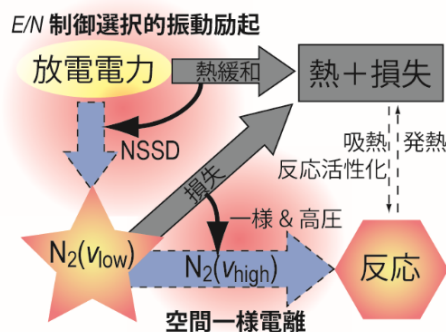


図 2: 高振動励起窒素生成と窒素解離反応の効率化。

2. 研究の目的

活性化エネルギー低下により反応の高い反応選択性を実現する高効率プラズマ窒素固定の実現には、上述のエネルギー遷移過程 (図 1, 2) を制御できるプラズマ生成の知見が不可欠であり、特に化学反応プロセスに利用可能な、十分な反応体積を有するプラズマ生成の基盤研究が必要と考えた。そこで本研究では、放電体積を確保できる同軸構造の放電における高効率振動励起窒素生成を研究目的とした。特に、高電圧ナノ秒パルスを用いた過電圧生成電離波の利用により、空間一様性向上と、ナノ秒パルスに重畳した直流電圧による換算電界 (E/N) 制御により、エネルギー選択的振動励起の実証を試み、さらに、 $\text{N}_2(v)$ の緩和 (V-V 緩和) 過程を解明し、高効率プラズマ窒素固定に貢献する $\text{N}_2(v_{high})$ の生成と直接観測が可能なる放電プラズマ生成を目指す。

3. 研究の方法

(1) E/N 制御による選択的振動励起

ナノ秒パルス電圧を印加することで生成される過電圧の電離波を利用し、電極間 4cm を二次電子放出に頼らず絶縁破壊しプラズマを生成する (図 3)。ナノ秒パルス電圧などを用いることで過電圧度合いが増し電離一様性が改善でき、同時にナノ秒パルス電圧に並列接続した直流電圧を制御することで体積平均的 E/N 制御を行う。この電離波が生成したプラズマに選択的振動励起が実現可能な E/N を印加して電流を誘導し、放電電力を放電体積内の窒素分子の振動エネルギーに変換する。この重畳した直流電圧では放電プラズマを維持できない、非自己維持放電 (NSSD) は、電離の空間的一様性を高めることで、体積平均的に選択的振動励起が実現され、放電電力から振動励起状態へのエネルギー変換効率を高めることが原理的に可能である。

圧力上昇に伴い、電離波は壁面に沿う伝搬をするため、放電体積中心での振動励起状態は電離一様性の影響を受けている。特に、放電体積中心付近での $\text{N}_2(v_{high})$ 生成は、壁などへの振動励起状態の損失が少ないことが欠かせない。

本研究では、ナノ秒パルス電圧の制限から、0.1 気圧を代表的実験条件として選

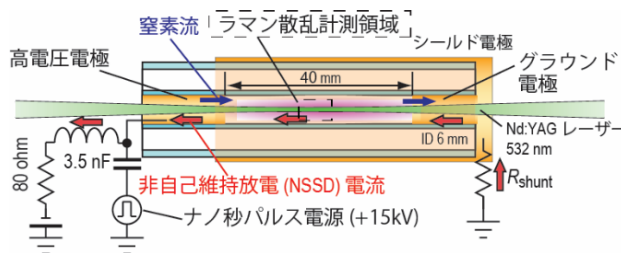


図 3: 非自己維持放電 (NSSD) プラズマ生成装置

んだ。振動励起状態は、Nd:YAG レーザーの二次高調波 (532nm) のラマン散乱の $\Delta v = +1$ のストークスバンド (607nm) を観測することで、基底状態窒素の回転温度と振動分布関数を得る。これにより、発光分光などの電子励起状態の振動分布関数測定では困難なエネルギー遷移過程が議論可能となるため、特に注力して観測系の構築を行う。

(2) 振動励起窒素の緩和過程の評価と高振動励起窒素生成

高振動励起窒素 ($N_2(v_{high})$) は Zel'dovich 過程における窒素解離反応 ($N_2(v_{high}) + O \rightarrow NO + N$) の反応物であるため $N_2(v_{high})$ の観測は本研究の重要な目的である。尚、 v_{high} は 10~12 以上とされることが多いため、本研究では $v > 12$ の実験的観測が可能なラマン分光観測系を構築する。E/N 制御は選択的振動励起生成に重要であるが、 $N_2(v)$ の損失が大きくなれば $N_2(v_{high})$ の生成と観測は見込めない (図 2)。

本研究では、ナノ秒パルス後の窒素の振動分布の時間発展を観測し、 $N_2(v_{high})$ を生成する振動緩和過程を実験的に評価する。さらに振動緩和モデルの構築と放電電力計測から振動分布関数の洞察を得ることにより、高圧・低温・空間一様性の相反的影響のバランスを図り、換算電界制御による選択的振動励起と、低損失 V-V 過程による $N_2(v_{high})$ 生成を試みる。

(3) 高圧・低温下での電界制御プラズマ生成

本研究では、空間一様性向上の目的で 0.1 気圧において電離波面の電位増加を申請時に提案した。ナノ秒パルスによる過電圧生成はナノ秒パルス電源の性能の制約を強く受けるため、大気圧等の高圧下でナノ秒パルス+直流のNSSDを用いて、高効率プラズマ窒素固定を実現することは難しい。そこで本研究では新たに、大気圧下での過電圧プラズマ生成を実現するため、高電圧電極近傍に第三の浮遊電極を設置した3電極構造を用いる。高電圧電極と浮遊電極の間で点火プラズマを生成することで、接地電極に向け二次電子放出に頼らない電離波を形成させる。また、高電圧を得ると同時に絶縁破壊後の放電電力を制限するために、60kHzの交流高周波電源とLCネットワークを用いた高周波3電極放電プラズマシステムを構築する(図4)。この新たな高周波3電極放電プラズマシステムの有効性を明らかにする。

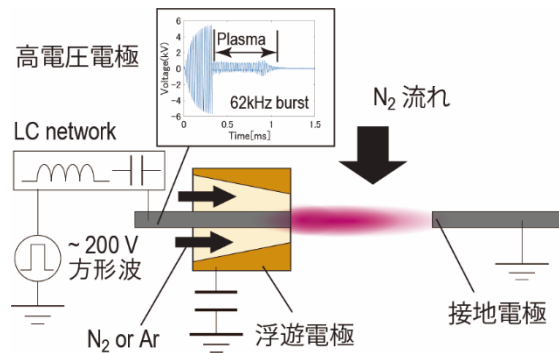


図 4：高周波 3 電極放電プラズマ。

4. 研究成果

(1) E/N 制御による選択的振動励起

本研究では、ナノ秒パルス電源の高周波フィルター内のバラスト容量と放電の繰り返し周波数を調整し、パルス放電電力を操作することで、比較的体積充填的な放電を得ることができた。ナノ秒パルス放電のピーク電力 (図 5(a)) に対し、非自己維持放電 (NSSD) 電力 (図 5(b)) は直流重畳により顕著に増加した。本研究ではナノ秒パルスに比べて時間的に長い NSSD 電力の占める割合は 20% 近くまで高めることができ、放電体積に有意なエネルギーを電界制御下で入力できた。

本放電をラマン散乱計測と同期するために、10Hz でバースト運転し、各バースト放電はそれぞれ 50 回のナノ秒パルス放電の繰り返しである。図 6 に、バースト中の各パルス放電から 100 μ s 後のラマン散乱計測から得られた窒素の回転温度と振動分布 $v=0$ と $v=1$ の傾きで定義される振動温度 T_{v01} を示す。直流重畳電圧上昇と共に、振動温度 T_{v01} が顕著に増加した一方で、回転温度は 1000K 以下で直流重畳による有意な温度上昇は観測されなかった。NSSD 時の見かけの E/N は 5Td に至っており、90% を超える NSSD 電力が振動励起に利用された可能性がある。このため、E/N 制御により選択的振動励起が実現できたと考えられる。

(2) 振動励起窒素の緩和過程の評価と高振動励起窒素生成

図 6 は放電後 100 μ s におけるラマン散乱計

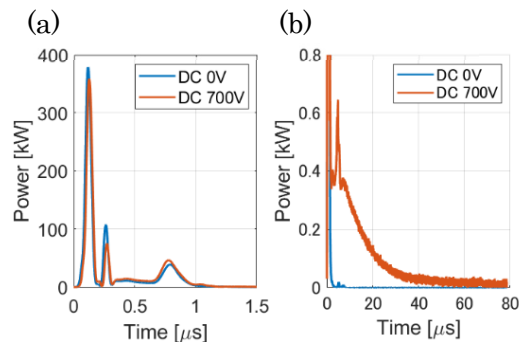


図 5：放電電力計測。(a)ナノ秒パルス放電、(b)NSSD。

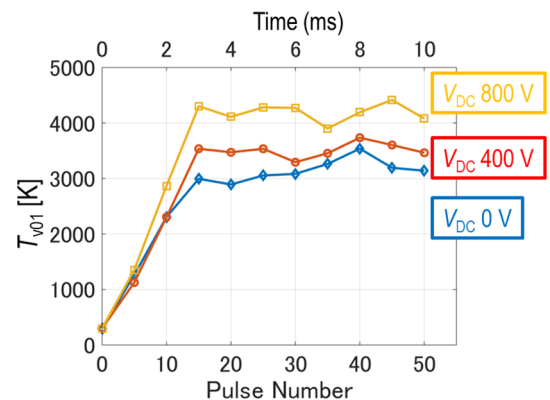


図 6：各パルス放電 100 μ s における基底状態窒素の振動温度

測結果であり、NSSD 放電電力がどのように振動緩和を経て観測されたかを理解する必要がある。そこで、ナノ秒パルス放電後の振動分布の緩和過程を、振動準位間 (V-V) の緩和と熱緩和を考慮した振動緩和モデルを構築した。この結果、図 6 で示すナノ秒パルス後 100 μ s での振動励起は、V-V 緩和が支配的に進行した結果であることが示唆された。この結果は、図 6 が放電エネルギー入力を反映した分布であることを示唆している。また、ラマン散乱から得られた振動分布関数とモデルで得られる振動分布関数が、損失を考慮しない本モデルと定性的に良い一致を示すことから、低損失な振動励起が実現できている可能性が示唆された。

また一方で、振動緩和モデルは 10ms 以上で熱緩和が顕著になることを示しているが、ラマン散乱計測は、1ms 程度で急激に減衰した振動状態の緩和モデルと一致しなかった。また、振動温度が 0.3ms 付近で、重畳 DC 電圧に依らず大きく変動した。この振動励起状態の急激な減衰と振動は、本研究で開発した非定常 1 次元熱流体モデルから、放電体積における流体の排除によるものと推定された。NSSD によるガス温度は 1000K 程度に抑制されているが、有意なガス加熱が流速を加速し (レイリー流れ)、流体の滞在時間に影響するためである。また、熱流体モデルは、放電部下流への振動励起窒素の輸送を示唆しており、振動励起窒素の反応炉設計に有用な示唆を与える結果となった。

振動分布関数は、一般に 2 温度分布で評価されることが多いが、各準位に線形な新たなラマン散乱光のフィッティングスキームを開発し、ラマン散乱スペクトルの振動分布への直接変換を実現した。本手法では、Q-branch に加え O, S-branch のラマン散乱断面積を考慮することで、良好なスペクトルフィッティングを得ることができた。またこの解析結果から、適切な放電電力制御と直流重畳による換算電界制御、さらにラマン散乱分光計測技術の向上を達成したことで、 $v = 13$ までの振動励起準位の実験的観測に成功した。これは、高効率プラズマ窒素固定の実現に向けた重要なマイルストーンと考えている。

(3) 大気圧下での電界制御プラズマ生成

ナノ秒パルスと直流重畳による NSSD は、過電圧電離波による二次電子放出に依存しない電離と、換算電界の制御を可能にする電流制限機構により、上述の高振動励起窒素生成を 0.1 気圧の窒素中で実現した。より高圧下での振動励起は、各緩和過程を高速化するため、より小さな体積でも高振動励起窒素を生成できるが、放電体積を大容積化することで、高効率で処理速度の高いプラズマ窒素固定が実現できる可能性がある。

大気圧下で二次電子放出に依存しない電界依存の放電であることを示すため、放電に直行する窒素流れや、窒素と液体の水の混相流を鉛直方向に導入した。いずれの場合でも放電が安定することを実験的に明らかとなり、10kHz 程度の交流とは異なる電離が実現できたと考えている (図 7(a))。また、高電圧電極とそれを覆う浮遊電極の間の電極軸流ガス (図 4) を窒素やアルゴンなど、各種ガスで運転できることを実験的に明らかにした。本放電により、窒素では 8 mm、アルゴンでは 15 mm までの放電を 15kV_{p-p} で実現することができた (図 7(b))。

(1) (2) (3) の研究成果は、本研究開始当初から国際的に急成長段階にあったプラズマ窒素固定研究において、エネルギー効率の根本的解決への先駆的な挑戦において重要な進展を示したと考えている。現在に至るまで国内外の窒素固定研究のほとんどは、高効率化のための化学反応プロセス研究に重点が置かれ、比較的良好に理解された放電プラズマを使用しているが、換算電界制御の重要性を指摘する研究も多く、その重要性は多くの研究者に認識されている。(1) の成果はその実証を与える成果であり、当該分野全体にインパクトを与え得ると同時に、非自己維持放電プラズマという本研究の特色を明確に示すことができた。さらに (2) の成果は、これまで達成できなかった窒素固定過程の詳細の解明に貢献できるだけでなく、触媒などの融合により高効率化が達成できる可能性があると考えられる。さらに (3) の成果は、大気圧下での本研究成果の知見を利用し得る新たな放電プラズマ装置の示唆を与えており、今後の更なる研究開発の進展に寄与する成果である。

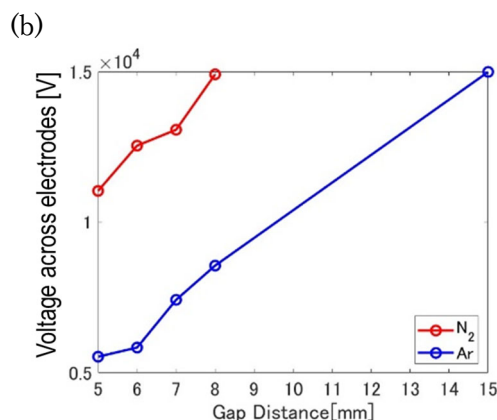
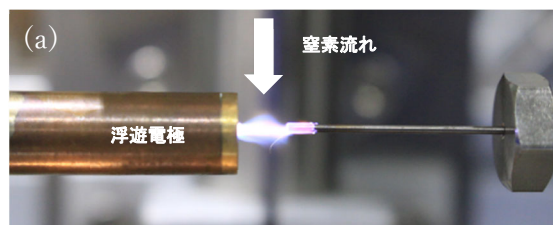


図 7: 高周波 3 電極放電プラズマ (a) 窒素供給時の放電プラズマ生成, (b) 放電開始電圧の電極間隔依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K. Takeda, S. Sasaki, W. Luo, K. Takashima, K. Toshiro	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 ~ 056001
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 D. Tsukidate, K. Takashima, S. Sasaki, S. Miyashita, T. Kaneko, H. Takahashi, and S. Ando	4. 巻 17
2. 論文標題 Activation of plant immunity by exposure to dinitrogen pentoxide gas generated from air using plasma technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0269863-0269863
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0269863	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. Kumagai, C. Nishigori, T. Takeuchi, P. Bruggeman, K. Takashima, H. Takahashi, T. Kaneko, E H Choi, K. Nakazato, M. Kambara, K. Ishikawa	4. 巻 61
2. 論文標題 Towards prevention and prediction of infectious diseases with virus sterilization using ultraviolet light and low-temperature plasma and bio-sensing devices for health and hygiene care	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA0808 ~ SA0808
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac1c3d	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 該当する
1. 著者名 K. Takashima, Y. Hu, T. Goto, S. Sasaki, and T. Kaneko	4. 巻 53
2. 論文標題 Liquid spray transport of air-plasma-generated reactive species toward plant disease management	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 354004-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab87bd	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 S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko	4. 巻 60(1)
2. 論文標題 Portable Plasma Device for Electric N2O5 Production from Air	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Industrial & Engineering Chemistry Research	6. 最初と最後の頁 798-801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.iecr.0c04915	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. Takashima, A.S. bin Ahmad Nor, S. Ando, H. Takahashi, and T. Kaneko	4. 巻 60(1)
2. 論文標題 Evaluation of plant stress due to plasma-generated reactive oxygen and nitrogen species using electrolyte leakage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 010504-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abcf5b	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80件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 33件)

1. 発表者名 Y. Kunishima, K. Takashima and T. Kaneko
2. 発表標題 Selective Vibrational Excitation of Nitrogen Molecule with Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source Aimed for Nitrogen Fixation
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, H. Iwamoto, K. Takashima, H. Takahashi
2. 発表標題 Selective N2O5 Synthesis Using Composite Air Plasma Reactors and Its Inactivation Effects on Bacteria and Virus
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Takeda , S. Sasaki , K. Takashima , T. Kaneko
2. 発表標題 Evaluation of Short-Lived Reactive Species Decay Using High-Speed Water Flow in Contact with Atmospheric Pressure Plasma
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Iwamoto , S. Sasaki , K. Takashima , A. Higashitani , M. Toyota , T. Kaneko
2. 発表標題 Calcium-based systemic activation of plant defense response by exposure to N2O5 gas synthesized in atmospheric-pressure plasma technology
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Oba , S. Sasaki , K. Takashima , T. Kaneko
2. 発表標題 Chemical Modification of Amino Acid Powder by Plasma-generated Dinitrogen Pentoxide Gas
3. 学会等名 2022年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大場 優人 , 佐々木 渉太 , 高島 圭介 , 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ合成五酸化二窒素によるチロシンの化学修飾
3. 学会等名 第16回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩本 拓仁, 大学 保一, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 東谷 篤志, 金子 俊郎
2. 発表標題 分裂酵母を用いたプラズマ合成五酸化二窒素の生物への作用機序探索
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 大気圧プラズマを用いた五酸化二窒素のその場合合成とその応用展開
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会 (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 K. Takashima, Y. Kunishima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Nitrogen Vibrational Excitation in a Non-Self-Sustaining Discharge Plasma toward Efficient Plasma Nitrogen Fixation
3. 学会等名 The 75th Gaseous Electronics Conference & 11th International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Kunishima , K. Takashima , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Selective Energy Input into Vibrational Energy of Nitrogen Molecule in Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source
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 Y. Oba , S. Sasaki , K. Takashima and T. Kaneko
2 . 発表標題 Investigation on Reaction of Plasma-generated Dinitrogen Pentoxide Gas with Amino Acids
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 R. Honda , S. Sasaki , K. Takashima , M. Kanzaki , T. Sato , T. Kaneko
2 . 発表標題 Development of Gene Transfection Method Using Combined Plasma and Pulsed Electric Field in Liquid
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 S. Takeshi , K. Takashima , S. Sasaki , A. Higashitani , T. Kaneko
2 . 発表標題 Nitrogen fertilization effects of Plasma Generated Dinitrogen Pentoxide
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 H. Iwamoto , S. Sasaki , K. Takashima , A. Higashitani , T. Kaneko
2 . 発表標題 Calcium Based Systemic Activation of Plant Defense by Exposure to Plasma-generated N2O5
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 R.Fujita , K. takashima , and T.Kaneko
2 . 発表標題 Atmospheric Pressure Plasma Generation at Liquid Interface for Nitrogen Fixation
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 K. Takeda , S. Sasaki , K. Takashima , T. Kaneko
2 . 発表標題 Atmospheric Pressure Plasma in Contact with High-speed Water Flow for Evaluating Liquid-phase OH Transport
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 , 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 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 五酸化二窒素のその場プラズマ合成装置開発とバイオ応用への展開
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会 年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, K. Takashima, A. Higashitani, S. Ando, 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 Y. Oba, S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 プラズマ生成五酸化二窒素ガスによるアミノ酸のその場修飾
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Fujita, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 水柱噴流による接触する大気圧プラズマ生成
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田 立樹, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 窒素 水気液界面反応のための混相流を横切る大気圧窒素プラズマ生成
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 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 築館 大輝, 安藤 杉尋, 高橋 英樹, 東谷 篤志, 豊田 正嗣, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ合成N2O5の短時間照射による植物免疫活性
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 武士 将熙, 高島 圭介, 佐々木 渉太, 東谷 篤志, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ生成五酸化二窒素による窒素施肥効果と傷害
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 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 高速水流を用いた液相短寿命活性窒素種減衰の実験的検出
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 村富 孝輔, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 液柱流の表面電荷生成と実験的評価法
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 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 H. Iwamoto, S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Investigation on the bactericidal effect of plasma-generated dinitrogen pentoxide
3. 学会等名 2021年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Fujita, K. Takashima and T. Kaneko
2. 発表標題 Atmospheric pressure plasma generation at liquid interface for nitrogen fixation
3. 学会等名 2021年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sasaki , K. Takashima , H. Takahashi and T. Kaneko
2. 発表標題 Selective synthesis of dinitrogen pentoxide using plasma and its biological effects
3. 学会等名 7th Global Plasma Forum (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 五酸化二窒素のプラズマ制御合成とその殺菌応用
3. 学会等名 第15回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田 立樹, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 窒素固定反応のための液面非熱プラズマ生成
3. 学会等名 第15回プラズマエレクトロニクスインキュベーションホール
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本 拓仁, 大学 保一, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 東谷 篤志, 金子 俊郎
2. 発表標題 分裂酵母に対するプラズマ合成五酸化二窒素の増殖抑制効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國嶋 友貴, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 非自己維持直流放電プラズマ中の窒素振動分布の時間発展
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 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 Y. Kunishima, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Nitrogen Vibrational Population Measurement in Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source
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 K. Takashima , Y. Kunishima , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source toward Selective Vibrational Excitation for Nitrogen Fixation
3 . 学会等名 The 8th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatics Technologies for Environmental Applications (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Kunishima , K. Takashima , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Measurement of nitrogen vibrational distribution in Non-Self-Sustaining DC discharge plasma source
3 . 学会等名 Japan-RUB Workshop 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Takashima , Y. Kunishima , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Plasma Generation and Chemistry of Reactive Nitrogen Species for Agricultural Applications
3 . 学会等名 Japan-RUB Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 俊郎, 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマを使って空気のみで合成する五酸化二窒素の新応用技術
3. 学会等名 第37回九州・山口プラズマ研究会 (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 佐々木 渉太, 高島 圭介, 高橋 英樹, 金子 俊郎
2. 発表標題 N2O5選択供給プラズマ源の開発とその応用展望
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 東谷 篤志, 豊田 正嗣, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ合成五酸化二窒素によるシロイヌナズナの全身防御応答の誘導
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 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 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 東谷 篤志, 豊田 正嗣, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ合成N2O5によるカルシウム系植物全身防御応答活性化
3. 学会等名 The 39-th Symposium on Plasma Processing/ The 34-th Symposium on Plasma Science for Materials
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Takashima, Y. Kunishima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Generation of Vibrationally Excited Nitrogen in a Non-Self-Sustaining DC Discharge toward Plasma Nitrogen Fixation
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國嶋 友貴, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 非自己維持直流放電による窒素振動励起プラズマの加熱過程
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 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-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 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

1. 発表者名 岩本 拓仁, 佐々木 渉太, 高島 圭介, 東谷 篤志, 豊田 正嗣, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ合成N2O5照射による植物全身防御応答の誘導機構
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 K. Takeda, S. Sasaki, R. Honda, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Elucidation on Temporal-Spatial Distribution of Liquid -phase OH Radical Using High-speed Liquid Flow Passing through Atmospheric-pressure Plasma
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sekine, Y. Hu, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Liquid Droplet Transport of Air Plasma-Generated Reactive Species for Plant Disease Control
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國嶋 友貴, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 非自己維持直流放電による窒素振動励起プラズマの温度観測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子 俊郎, 羅 文承, 高島 圭介, 佐々木 渉太
2. 発表標題 プラズマ-高速液流界面における短寿命活性種の輸送モデル
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020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 液相中プラズマを活用した中分子・遺伝子の高効率導入
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 武田 一希, 佐々木 渉太, 本田 竜介, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 高速液流導入大気圧プラズマが明らかにする液相OH の表面局在
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 高島 圭介, 佐々木 渉太, 金子 俊郎
2. 発表標題 高速液流-プラズマ界面における液相水酸基ラジカルの局在領域に関する積分量
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 Y. Kunishima, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Afterglow Measurement of Vibrationally Excited Nitrogen in an Apparent E/N Controlled Plasma by Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sasaki, M. Yanagisawa, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Roles of Plasma-generated Reactive Species in Amino Acids Modification
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kaneko, K. Takeda, K. Takashima, and S. Sasaki
2. 発表標題 Gas-liquid Interfacial Plasma Using High-speed Liquid Flow for Analyzing Short-lived Reactive Species Transport
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, and K. Takashima
2. 発表標題 Direct spray of solution containing short-lived reactive species for plant pathogen control
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 Chemical modification of amino acids using plasma device precisely controlling reactive nitrogen species
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020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 高効率な細胞内分子導入における液相中プラズマの活用
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子 俊郎, 武田 一希, 高島 圭介, 佐々木 渉太
2. 発表標題 プラズマ-高速液流界面を介した短寿命活性種の生成と輸送
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 本田 竜介, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 高速液流導入プラズマによる液相OHラジカル分布の推定
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田 一希, 佐々木 渉太, 本田 竜介, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 高速液流導入大気圧プラズマと反応拡散モデルの併用による液相OH分布の解明
3. 学会等名 The 38th Symposium on Plasma Processing / The 33rd Symposium on Plasma Science for Materials (国際学会)
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 植物病害防除のための空気プラズマ生成活性種輸送の改善
3. 学会等名 The 38th Symposium on Plasma Processing / The 33rd Symposium on Plasma Science for Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kaneko, K. Takashima, and S. Sasaki
2. 発表標題 Plant Pathogen Control Using Direct Spray of Solution Contacting Plasma or Plasma Effluent Gas
3. 学会等名 3rd International Workshop on Plasma Agriculture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sasaki, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Investigation on Interaction of N2O5-rich Plasma Effluent Gas with Tyrosine
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kaneko, S. Sasaki, and K. Takashima
2. 発表標題 Plasma Generated Functional Nitrogen for Material and Biological Applications
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kaneko, K. Takashima, S. Sasaki, S. Ando, H. Takahashi, S. Osana, and R. Nagatomi
2. 発表標題 Controlled Synthesis of Short-Lived Reactive Species Using Gas-Liquid Interfacial Plasmas for Sterilization and Virus Inactivation
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國嶋 友貴, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 窒素振動励起非自己維持直流放電プラズマ中の窒素分子加熱・緩和過程
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國嶋 友貴, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 非自己維持直流放電プラズマによる窒素振動励起
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 高島 圭介, 佐々木 渉太, 金子 俊郎
2. 発表標題 空気誘電体バリア放電プラズマによる五酸化二窒素の選択生成
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 佐々木 渉太, 高島 圭介, 金子 俊郎
2. 発表標題 空気プラズマを用いたアミノ酸改質における五酸化二窒素の役割
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 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 液相中プラズマを活用した遺伝子導入法開発に関する研究
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 五酸化二窒素生成装置および五酸化二窒素生成方法	発明者 金子 俊郎, 高島 圭介, 佐々木 渉太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-134560	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

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	金子 俊郎 (Toshiro Kaneko) (30312599)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

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
---------	---------