

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04817

研究課題名（和文）気液境界高振動温度窒素プラズマによる新概念窒素固定法の創成

研究課題名（英文）Development of a nitrogen fixation with vibrationally excited nitrogen plasma with gas-liquid interface

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） 19,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、持続的な窒素固定法の実現に向け、空気と水と再生可能エネルギーだけで、空気中の窒素を解離し有益な窒素化合物に効率よく変化する、放電プラズマ窒素固定法の実現に向けた実験的研究を行った。高効率化に重要と考えられる、随意的電界で放電を行う独自放電装置を開発し、その状態を計測・評価する方法を実現した。さらに、プラズマ-気液境界にて生成される窒素化合物の機序を実験的に理解するための手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高効率な窒素固定を幅広い放電電力で実現するための、新たな放電プラズマ生成機構を実現し、変動の大きな再生可能エネルギー等を用いた高効率プラズマ窒素固定に向けた進歩を示しており、本研究成果は社会的意義を有する。また、電界を制御したプラズマにおける窒素分子の内部状態の観測や、気液界面プラズマによる反応生成物の評価法を確立することで、放電プラズマによる化学反応の実験的理解を進展させた学術的意義も有する。

研究成果の概要（英文）：Feasibility on efficient discharge plasma nitrogen fixation is experimentally studied toward sustainable nitrogen fixation using air, water, and renewable energy sources. This research realizes a non-self-sustaining discharge plasma source, enabling electric field suitable for efficient nitrogen fixation processes. In addition, experimental measure for plasma gas-liquid interface characterization has been proposed.

研究分野：Discharge plasma

キーワード：気液界面プラズマ 振動励起 窒素固定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

食料生産において肥料として使用される,アンモニアや硝酸といった化合物窒素の4割は人工化合物窒素である.本研究開始当初だけでなく,天然ガス総産出量の3-5%と人類の総使用エネルギーの1-2%を費し Haber-Bosch 法により窒素固定が行われている.そこで,空気と水のみを原料とし,再生可能エネルギーを利用した持続可能な窒素固定法として,放電プラズマ窒素固定の研究開発が海外で活発化していた[B.S. Patil et al., *Catal. Today* 256 49 (2015)].

この放電プラズマ窒素固定法の課題は高効率化であり,低活性化エネルギーの窒素解離反応の利用(図1)が重要と考えられている.振動励起された窒素($N_2(v)$)と酸素原子により一酸化窒素

(NO)を生成する窒素解離反応(Zel'dovich機構)の利用が期待されている.このZel'dovich機構を用いた高効率プラズマ窒素固定の実現には,特に二つの課題が重要であると考えた.

- (1) 放電に消費するエネルギーの大半を,反応物である振動励起窒素 $N_2(v)$ の生成に利用できる放電プラズマ生成手法の開発とその機構解明
- (2) 高温でNOが N_2 に戻る逆反応を極力抑えるプラズマ生成原理の探求

このため,窒素固定での利用に適した大電力化に対応し得る放電プラズマにおいて,振動温度が高い一方で並進温度を低く維持した,高振動温度窒素プラズマ生成が特に重要であると考えた.また,逆反応を抑止するために水の利用が指摘されていた.そこで,水-プラズマ界面化学反応の窒素固定への寄与を探求することが必要であると考えた.

2. 研究の目的

(1) 本研究では特に,再生可能エネルギー利用に拡張し得る放電プラズマで,電子のエネルギーの大半を窒素の振動励起に利用できる可能性がある,換算電界が10~30 Td程度に制御された放電プラズマの実現を目指し,換算電界を制御したプラズマによる窒素の振動・回転温度への影響を解明することに注力する.具体的には,高繰返しナノ秒パルス放電により生成されたプラズマに,直流電界を重畳印加することで,自己維持放電電圧以下の随意的電圧をプラズマに印加できる,非自己維持放電プラズマを生成する.さらに,振動温度や回転温度を放電体積で分光計測することにより,換算電界を制御する効果が明らかにできる.

(2) 水雰囲気のアーク放電が過去に窒素固定研究で利用された経緯に着目し,水とプラズマ界面における窒素化合物生成反応の理解が重要であると考えた.一方で,液体とプラズマは常に相互に作用し,時間と共にそれぞれの空間分布も変化する複雑な系となるため,界面付近での化学反応に関して,実験的考察が困難であることも多い.そこで,気液界面反応の機構解明のために,定常と見なせる状態を作り出し,様々な計測を行える新たな気液界面プラズマ生成法の検討を目的とした.さらに,振動励起窒素と液体界面反応への寄与は未解明であり学術的意義も大きい.

3. 研究の方法

(1) 非自己維持放電プラズマ中の振動温度・回転温度を分光計測するために,従来の非自己維持放電プラズマで利用されてきた,複数の絶縁された電極や電源を用いる方法ではない新たな手法が必要であった.本研究では,ナノ秒パルスと直流を回路的に絶縁した,単一電極対のナノ秒パルス維持-非自己維持放電(NSSD)プラズマの生成を行った(図2(a)).この新たなNSSDプラズマ生成では,十分な電力入力と計測に必要な放電体積を得るため,誘電体表面を伝搬する電離波を利用する独自の放電プラズマ生成機構を用いた.これらにより,放電電力はナノ秒パルス放電のパルス回数で制御でき,一方で効率に直接影響する換算電界に重要な印加直流電圧が独立に制御でき,変動の大きな再生可能エネルギー利用において高効率化に有利と考えられる.このナノ秒パルス維持NSSDプラズマの内部にNd:YAGレーザー光を導入し,ラマン散乱から基

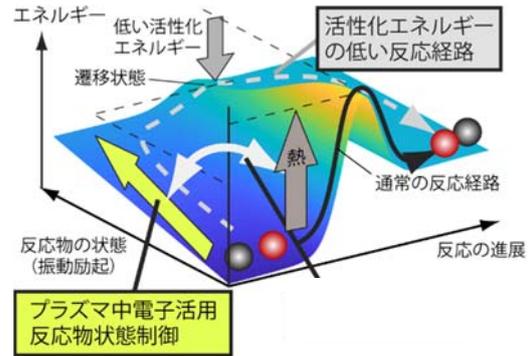


図1 低活性化エネルギー反応経路の発見

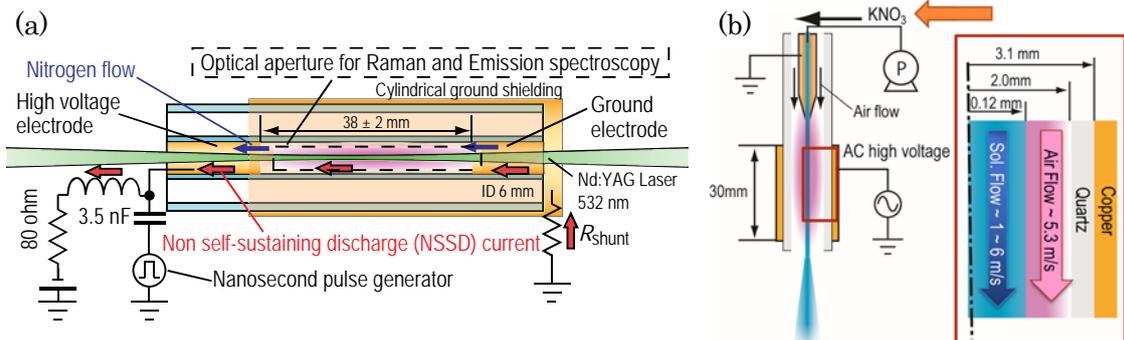


図2 (a)非自己維持放電プラズマ生成装置, (b)大気圧空気プラズマ-気液界面反応生成装置

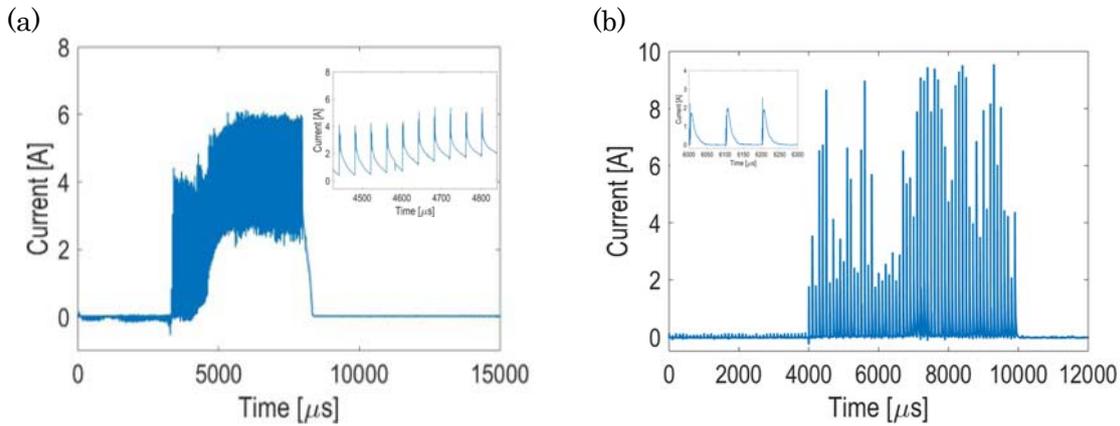


図3 ナノ秒パルスバースト時の、直流 480V 重畳時のナノ秒パルス維持-非自己維持直流放電電流波形。(a) 20 ns パルス幅 20kHz (パルスバースト区間 0~8000 μs), (b) 200 ns パルス幅 10 kHz (パルスバースト区間 0~10000 μs)

底状態窒素の振動励起状態 ($\text{N}_2(\text{X}, \text{v})$) を計測する。これにより、換算電界向上による振動温度の増減を議論することが可能となる。

(2) 高効率窒素固定に向けた、定常計測が可能な新たなプラズマ気液界面反応場の創成に向け、本研究では導電性液体を放電装置内に射出し、液体を電極とした誘電体バリア放電を生成する、本研究独自の大気圧空気プラズマ-気液界面反応生成装置を用いた(図 2(b))。これにより本研究では、プラズマ気液界面反応場により生成された活性種を、気相・液相共に定常的に議論できる。本研究では特に、気相中窒素化合物生成と、液相中の水酸基ラジカル (OH) を調査した。この OH は、気相窒素化合物の液相への取込に寄与できるため、液相界面付近での OH の局在を実験的に評価する手法の確立は特に重要であると考えた。

4. 研究成果

(1) 非自己維持放電による換算電界制御と振動励起窒素生成

図 2(a) に示す放電装置に印加する、ナノ秒パルス電圧・パルス印加繰返し周波数・ナノ秒パルス電圧のパルス幅・重畳直流電圧を変化させながら、非自己維持放電プラズマの生成実験を行った。ナノ秒単位での電離波の進展が発光により確認できた。図 3 に示す電流波形は、重畳直流電圧 480V の時(期待される電極間平均換算電界 $\sim 2.2 \text{ Td}$) の電流波形である。ナノ秒パルス電流はフィルタ処理により殆ど除去されており、図中の電流は主に重畳した直流電圧によるものである。図 3 では電圧は常に印加されているが、高繰返しパルス印加が終了する 8000 μs 程度で電流が流れなくなることが確認でき、本研究独自の非自己維持放電が生成できた。電流は各ナノ秒パルス印加後 4~6 A 程度流れ、その後減衰しているが、4500 μs 付近から電流が次パルス引き継がれる連続電流が流れている。連続電流に伴う放電電力は 1 kW 程度であり、放電電力密度が比較的高く、今後更なる大電力化が可能と考えられる。さらにこの放電時間は印加ナノ秒パルス回数で制御ができるため、時間平均的放電電力を供給電力に追従制御することが可能であると考えられ、持続可能なプラズマ窒素固定に有益な放電が実現できたと考えられる。

しかし、図 2(a) に示すバラスト抵抗により電極間には電圧降下が生じ、電極間の平均換算電界は 1.1 Td 程度まで低下することが明らかとなり、目標としている換算電界の 5 Td には遠く、振動励起効率率は 50% に満たないことが予想される。これは、放電電力密度の高さと関連があると考えた。図 4 に、重畳直流電圧 360V 時の、各パルス繰返し周波数における平均電極間電圧および対応する換算電界を記した。パルス繰返し周波数の増加と共に電流値が増大し、電極間電圧を低下させている。このため低繰返し周波数での非自己維持放電の生成が重要だが、繰返し周波数が 20 kHz 以下では非自己維持放電が生成できなかったため、換算電界の増加は困難であった。

この低繰返し時に非自己維持放電生成が困難である理由は、研究代表者が行ってきた論文 4 を含む基礎研究から、繰返し周波数の低下が電離波の進展速度減少を引き起こし、電極間の電離が不十分であったためと考えられた。そこで、ナノ秒パルス電圧のパルス幅を増やすことによる電離波進展距離の増大で補うことを考えた。図 3(b) は、ナノ秒パルス幅を 200 ns に広げた事により、非自己維持放電が生成できたことを示しており、平均換算電界は 2 Td 程度となり振動励起効率の改善が期待できる。このナノ秒パルス幅増大による換算電界の向上に関して論文 1 および国際会議にて報告している。

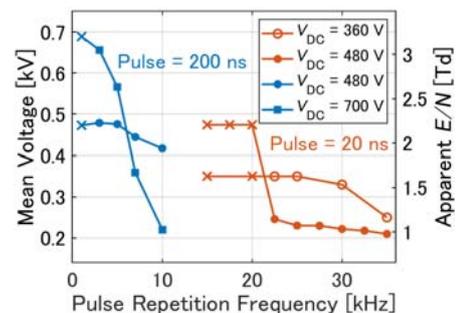


図 4 電極間平均電圧のパルス繰返し周波数依存性。200 ns パルスを青、20 ns パルスにおける特性を赤で示し、 \times はそれぞれ NSSD の生成有無を示す。

この換算電界の印加有無，電圧降下の有無による回転温度計測を行った。放電中の窒素の Second Positive システム ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$) の (v', v'') = (0,0) のバンドからの発光を用いて回転温度計測を行った。本研究の条件では，この回転温度はほぼ並進温度と同じと考えられる。重畳直流電圧が高い時，顕著に回転温度が上昇することが明らかになった (図 5)。図 5 はパルス幅 200 ns の場合であるが，パルス繰返し周波数 10 kHz・印加電圧 700 V では，図 4 で大きな電圧降下が生じている一方で，480 V では電圧降下は小さい。これは，電極間の平均換算電界が，回転温度上昇に与える影響が大きいことを示していると考えられる。図 5 の直流 500 V 印加の場合，ナノ秒パルス放電のみの回転温度より有意に回転温度は高くなり，放電電力の多くが振動励起に用いられた可能性があると考えている。

放電 2 ms 後に放電プラズマ体積にレーザー光を入射し， $N_2(X, v)$ の振動ラマン散乱 ($\Delta v = +1$) を観測した。図 6 は 0.1 気圧での典型的な振動ラマンスペクトルであり，明確に $v \geq 1$ の振動励起窒素 $N_2(X, v)$ が，NSSD 終了後 2 ms で観測できた。ボルツマン分布を仮定することで推定した振動ラマンスペクトルを，観測されたラマンスペクトルに対しフィッティングし，おおよその振動温度を見積もり図 7 に示した。換算電界の増加と共に振動温度が顕著に増加することが実験的に明らかとなった。今後の更なる換算電界増加により，振動励起効率が改善され，振動温度の向上が期待される。一方，4 Td 程度の換算電界で振動温度が飽和傾向を示す理由は完全には理解されていない。放電後の振動状態の緩和の速度が，電界増加に伴い変化している可能性があると考えられ，更なる換算電界の増加と同様に重要な課題と考えられ，更なる機構解明に向けた実験的研究を継続する。

(2) 大気圧空気プラズマ-気液界面反応生成装置と窒素化合物生成反応

図 2(b) に示す，導電性液体 (KNO_3 水溶液) を放電体積に射出し接地電極とする，新たな誘電体バリア放電装置を作製した。これにより，プラズマと液体が確実に接触し，全ての活性種が流れと共に移動する，定常的に運転・観測が可能な放電プラズマ生成が実現できた。

放電装置下流で気相中活性種密度を計測したところ，図 8 に示す NO は NO_2 といった気相窒素酸化物が 10^{15} cm^{-3} 程度で観測できた。一般的な同軸構造を有する誘電体バリア放電に，水を導入し，同様の活性種計測実験を行った (論文 2, 3, 6)。その結果，図 8 に示す NO と NO_2 の密度は，放電部が高温となる比較的電力密度の高い放電で，液体が完全に気化する少量の液体導入量 (図 8 の 1/10 以下) においてのみ観測できることが明らかとなった。

この比較的高密度の NO_x が生成できた原因として，以下の可能性が考えられた。導電性を与えるために添加した液中の安定な硝酸イオンが気相に NO_x として放出された。または，気液境界での気相 NO の急速冷却により NO が窒素分子に戻る逆反応が抑制された，或は液相界面にある他の活性種との反応が寄与した可能性が考えられる。

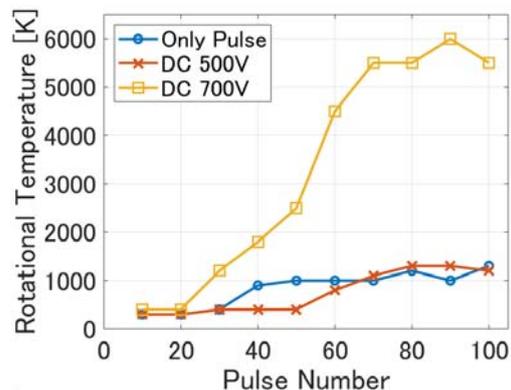


図 5 パルスバースト中の回転温度上昇。パルス幅 200 ns，繰返し周波数 10 kHz。

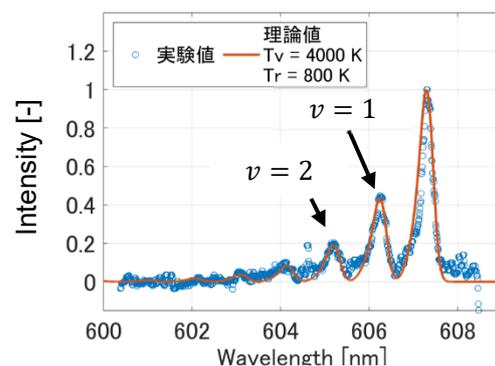


図 6 放電終了後 2 ms における振動ラマンスペクトル。

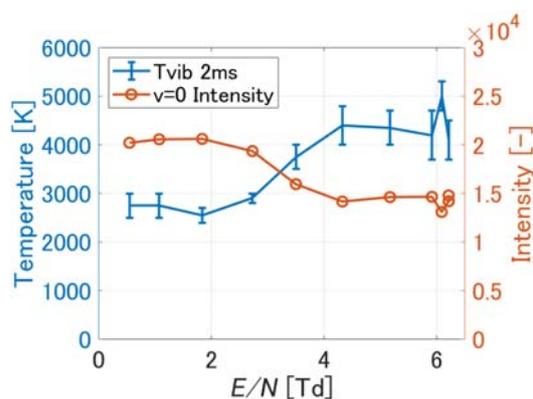


図 7 放電終了後 2 ms における振動温度と換算電界の関係。

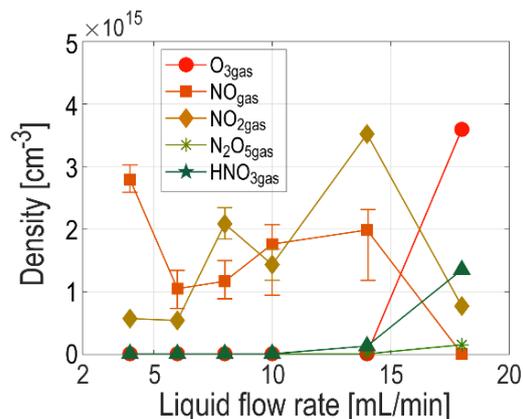


図 8 大気圧空気プラズマ-気液界面反応生成装置における気相活性種生成。

現在のところ原因は特定できていないが、気液境界付近の化学反応の関与があると考えている。

気液境界付近で液相 OH による NO や NO₂ の液相中への固定化反応が、プラズマ窒素固定において重要な可能性がある。この反応を議論するためには、NO や NO₂ が溶解しやすい液体表面付近での液相中 OH 濃度と、その局在体積を推定することが重要となる。しかし、現在まで有効な実験的評価法は無く、この液面近傍の OH 濃度とその代表厚さを表現する新たな実験的評価法の必要性が明らかとなった。そこで本研究では、液体にテレフタル酸 (TA) を混合し、液相中 OH との反応生成物であるヒドロキシテレフタル酸 (HTA) の体積平均濃度を用い、OH の空間局在を実験的に評価・観測する手法を検討した。

TA 濃度を変えながら HTA 濃度を計測することで、図 9 に示す飽和特性を示すことが明らかとなった。HTA 濃度は放電体積における OH の積算濃度であるにもかかわらず、飽和に至る TA 濃度が HTA より 1000 倍以上高かった。これは、HTA 生成反応より OH の自己反応が卓越する高濃度領域が、液面近傍の領域に局在している可能性を実験的に示唆していると解釈できる。

本研究では、この飽和曲線から局在領域を実験的に評価するための解析関係を新たに導出することを試みた。開発した大気圧空気プラズマ-気液界面反応生成装置特有の、流れのある系において反応拡散モデルを適用すると、HTA 生成を容易に数値的に解くことが可能となり、さらに妥当な過程を用いると、解析的飽和曲線式が新たに導出できた。導出した解析的に得られる HTA 濃度の飽和曲線は、図 9 に示す実験データに対し比較的良好一致を得ることができ、OH の気液界面反応の理解に向けた実験的評価を提案することができた。今後、この窒素固定反応にも関与できる OH の局在濃度と NO_x 生成の因果を明らかにし、新たな活性種計測系も導入することで、気液界面プラズマ窒素固定反応の更なる理解に貢献できると考えている。

(3) 研究成果の国内外の位置付け

プラズマ窒素固定研究は本研究開始当初、国際的に急成長段階であったが、国内での報告は数少なく、本研究は国内においては先駆的であった。また、現在に至るまで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、比較的よく理解された放電プラズマを使用している。一方で、放電プラズマ中換算電界制御の重要性を指摘する研究も多く、本研究が当初から目標としていた換算電界を制御することによる高効率化の重要性は、多くの研究者に認識されている。このため、本研究で提案し実現した独自の非自己維持放電プラズマ生成の意義は大きいと考えている。また、放電プラズマの内部状態を明らかにした窒素プラズマの研究成果は、現在相次いで報告されているが、本研究で行った振動温度計測はそれらと比べても十分な特色を有しており、今後さらに発展させていく予定である。

また、気液界面プラズマ研究は、国際的に長期間研究されており、化学反応プロセスへの応用が進展している分野である。近年、界面近傍での活性種分布の計測技術が進展している一方で、現在までほとんどの研究者はそれら先進計測技術にアクセスが難しい現状にある。さらに、複雑な空間分布とその時間変化により、それらが適用できる実験系も限られてきた。本研究で実施した、気液界面プラズマ反応を定常的に議論できる新たな実験系は、先進的計測の導入が可能と考えられる。また提案した比較的簡便な気液界面反応の実験的評価手法は、それら先進計測により妥当性評価が可能となり、多くの研究者により利用可能な手法に発展することが期待される。今後、更なる先進計測を導入した実験系の発展により、気液界面プラズマによる化学反応の理解に貢献できると考えている。

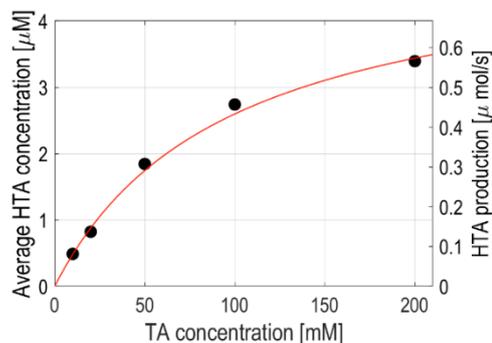


図 9 TA 濃度に対する HTA 生成量の飽和

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Kunishima, K. Takashima, and T. Kaneko	4. 巻 58
2. 論文標題 Apparent reduced electric field control with nanosecond pulse width in a DC discharge for nitrogen vibrational excitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060908-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1e58	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. Shimada, K. Takashima, Y. Kimura, K. Nihei, H. Konishi, and T. Kaneko	4. 巻 17
2. 論文標題 Humidification Effect of Air Plasma Effluent Gas on Suppressing Conidium Germination of a Plant Pathogenic Fungus in Liquid Phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Processes and Polymers	6. 最初と最後の頁 1900004-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ppap.201900004	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, Y. Hu, T. Goto, S. Sasaki, T. Kaneko	4. 巻 Accepted
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 1-11
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 B.-D. Huang, E. Carbone, K. Takashima, X.-M. Zhu, U. Czarnetzki, and Y.-K. Pu	4. 巻 51
2. 論文標題 The effect of the pulse repetition rate on the fast ionization wave discharge	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225202-1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aabf2d	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 A. Komuro, K. Takashima, K. Suzuki, S. Kanno, T. Nonomura, T. Kaneko, A. Ando, and K. Asai	4. 巻 27
2. 論文標題 Gas-heating phenomenon in a nanosecond pulse discharge in atmospheric-pressure air and its application for high-speed flow control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 104005-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aae23c	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 Y. Kimura, K. Takashima, S. Sasaki, and T. Kaneko	4. 巻 52
2. 論文標題 Investigation on dinitrogen pentoxide roles on air plasma effluent exposure to liquid water solution	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 064003-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aaf15a	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 and T. Kaneko	4. 巻 26
2. 論文標題 Ozone and dinitrogen monoxide production in atmospheric pressure air dielectric barrier discharge plasma effluent generated by nanosecond pulse superimposed alternating current voltage	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065018 ~ 065018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aa7082	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88件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 38件)

1. 発表者名 K. Takashima, S. Sasaki, Y. Kimura, and T. Kaneko
2. 発表標題 Reactive oxygen nitrogen species induced reactions at the gas-liquid interface by air plasma effluent gas
3. 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kunishima, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Development of Nitrogen Vibrational Excitation Plasma Source with Non-Self-Sustaining DC Discharge
3. 学会等名 The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 圭介, 佐々木 渉太, 金子 俊郎
2. 発表標題 プラズマ修飾反応前駆体の生成制御と生物応答
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kunishima, K. Takashima, and T. Kaneko
2. 発表標題 Rotational Temperature Evolution in Non-Self-Sustaining DC Discharge Plasma Source for Nitrogen Vibrational Excitation
3. 学会等名 The 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takashima, N. Kenji, and T. Kaneko
2. 発表標題 Air Plasma Generation with an Electrically Conductive Liquid Column Jet
3. 学会等名 The 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takashima, A. Shahir A. Nor, S. Sasaki, and T. Kaneko
2. 発表標題 Experimental Study on Biomolecule Derivatives and Primary Plant Responses to Plasma Effluent Gas Exposure
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島 圭介, 佐々木 渉太, 金子 俊郎
2. 発表標題 Analytical Evaluation of Localized Domain of Liquid Phase Reactive Species in High-speed Liquid Flow Passing through Atmospheric Pressure Plasma
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 K. Takashima, S. Sasaki, and T. Kaneko
2. 発表標題 Plasma-Liquid Interface Applications Spanning from Nano-Material Synthesis to Life Science
3. 学会等名 RUB-Japan Science Days 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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 DC Discharge Sustained by Repetitive Nanosecond Pulse
3. 学会等名 The 7th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Takashima , Y. Kimura , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Agricultural Application of Gas-liquid Interface Reaction of Dinitrogen Pentoxide Generated by Atmospheric Air Plasma
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Kunishima , K. Takashima , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Development of Nitrogen Vibrational Excitation Plasma Source with Repetitive Nanosecond Pulses
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Takashima , K. Shimada , Y. Kimura , K. Nihei , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Control of Reactive Species Transfer from Plasma Effluent Gas to Liquid Phase for Agricultural Applications
3 . 学会等名 The 4th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Takashima , Y. Kimura , K. Shimada , K. Nihei , and T. Kaneko
2 . 発表標題 Characterization of Reactive Species Generation in Liquid Phase by Air Plasma Effluent Exposure
3 . 学会等名 70th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Takashima and T. Kaneko
2. 発表標題 DC discharge sustained by repetitive nanosecond pulses in nitrogen with a single pair of electrodes
3. 学会等名 70th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高島圭介, 金子俊郎
2. 発表標題 大気圧放電プラズマアクチュエータの特性と制御機構
3. 学会等名 プラズマアクチュエータ研究会 第5回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Takashima, Y. Kimura, K. Nihei, and T. Kaneko
2. 発表標題 Characterization on Reactive Species Transfer from Atmospheric Pressure Air Plasma Effluent to Liquid Water
3. 学会等名 第27回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Kaneko, S. Sasaki, K. Takashima, M. Kanzaki, M. Tachikawa, H. Kanetaka, T. Sato, and M.G. Kong	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier Science	5. 総ページ数 458
3. 書名 Plasma Medical Science	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 活性種含有液噴射装置	発明者 金子 俊郎, 高島 圭介	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-156040	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 活性種含有液噴射装置および殺菌駆除方法	発明者 金子 俊郎, 高島 圭 介	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-029857	出願年 2019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
---------------------------	-----------------------	----