

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01205

研究課題名(和文) 活性窒素種ならび液中分布を考慮したプラズマ誘起液中化学反応の深化

研究課題名(英文) Deepening of plasma induced chemical reaction in liquid considering RNS and its distribution in liquid

研究代表者

北野 勝久 (KITANO, Katsuhisa)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20379118

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)：大気圧低温プラズマは生体へ熱損傷を与えずに多種の化学種を供給できるという点で様々な応用が期待できる。濡れ環境である生体への適用を考えた時にプラズマ誘起液中化学反応場というコンセプトが重要になってくる。供給された化学種が生体分子に化学修飾をすることが作用機序であるが、本研究では、短寿命な化学種は液中で濃度勾配を持ち、活性酸素種のみならず活性窒素種まで考慮に入れることで研究を進めた。プラズマ照射中の気液界面の極薄い領域でのみ活性窒素種の過硝酸が生成されていることがわかった。過硝酸のバイオ応用は世界初であり、その反応作用を評価するために、生体分子との化学修飾に関する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ誘起液中化学反応場は医療応用など様々な分野への適用が考えられるが、その作用機序の解明はこれまで十分とは言えなかった。本研究では、活性窒素種まで考慮した反応場、液中に化学種が時間的・空間的に分布しているというコンセプトに基づき、このような新規反応場の理解を進めた。このような研究を通じて、プラズマ処理水中に過硝酸という化学種が生成され、高い安全性と殺菌力を備えていることが分かった。この過硝酸という化学物質による殺菌は研究代表者らが世界で初めて発見した手法となるが、プラズマの研究を深化させることで、他分野への波及効果の高い研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Atmospheric pressure low temperature plasmas are expected to have various applications in that they can supply various chemical species to living organisms without causing thermal damage. The concept of a plasma-induced chemical reaction field in liquid becomes important when considering the application to living organisms in a wet environment. The mechanism of action is the chemical modification of biomolecules by supplied chemical species. In this study, short-lived chemical species have a concentration gradient in the liquid, and not only reactive oxygen species but also reactive nitrogen species are taken into account. It was found that Peroxynitric acid, an active nitrogen species, was produced only in the very thin region of the gas-liquid interface during plasma irradiation. This is the first bio-application of Peroxynitric acid in the world. In order to evaluate the reaction action of Peroxynitric acid, a study on its chemical modification with biomolecules was conducted.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：大気圧プラズマ プラズマ誘起液中化学反応場 プラズマ医療 プラズマ消毒 過硝酸 活性窒素種

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまでに、大気圧低温プラズマの一つである LF (Low Frequency) プラズマジェットの高電圧電極のみからなる単純な電極構造で、低温なプラズマを簡単に発生可能である。固体表面だけでなく液体そのものや溶質へのプロセスが可能であり、世界的にも様々な応用研究が進められている。しかしながら、プラズマを照射して、得られた結果に関する報告に留まる報告が多く、その作用機序に関する研究は少なく、その理解は十分とは言えない。それぞれの応用によって様々な異なる作用機序が想定出来るが、溶液中に化学種を供給し、その供給された二次的な化学種が反応を誘起するというプラズマ誘起液中化学反応場という共通コンセプトが重要である。溶液中の化学反応に関連する報告もあるものの、溶液中での拡散距離が数 μm オーダーの OH ラジカルが、液面下の数 mm にある細胞に対する作用因子であるというなど、論理的に矛盾した報告が多数である。このプラズマ誘起液中化学反応場をいかに理解して利用するのかというのが重要であり、これまで研究代表者はプラズマ誘起液中化学プロセスをバイオセンサー用金ナノ粒子の合成や、ドラッグデリバリーシステム用ナノミセル粒子の架橋、プラズマ止血、低 pH 法による液中微生物の効果的殺菌、アルツハイマー原因物質のアミロイドの不活化、分子シャペロンの活性向上、さらに歯科・外科消毒治療などの先駆的なプラズマバイオ研究を、多くの異分野の研究者との学際的共同研究により積極的に進めてきた。

2. 研究の目的

多分野に渡るプラズマ誘起液中化学反応場で最も興味深い応用の一つは生体との相互作用を利用したプラズマ医療応用である。低 pH 法による溶液中における殺菌の研究を進める中、プラズマと生体との相互作用として、気相中に生成された活性種が液相中に供給され、細胞内の生体高分子が酸化・ニトロ化などの化学的修飾を受ける作用機序が重要である事が明らかになった。特に低 pH 法では pH を中性から酸性にすることで D 値 (菌数を 1/10 にするのに必要な時間) が 1/100 という非常に高い殺菌力が得られるが、プラズマにより液中に生成されたスーパーオキシドアニオンラジカル ($\text{O}_2^{\cdot-}$) というイオンが、酸性条件下で酸解離平衡 (pK_a 4.8) によりヒドロペルオキシラジカル (HO_2^{\cdot}) という電気的に中性な種に変化することで膜透過性が増し、細胞内部への酸化ストレス応答による結果だと考察している。この様に単にプラズマを液体に照射するだけでなくその作用機序を考慮することで、様々な高い付加価値が得られる。さらに、プラズマを照射した水であるプラズマ処理水 (PTW: plasma-treated water) に関する研究も積極的に進め、プラズマ直接照射で有効な低 pH 法が PTW でも同様に有効であることを明らかにした。殺菌活性の半減時間は温度依存 (活性化エネルギー 110kJ/mol) が非常に高く、室温とは異なり半減時間が伸張する低温下で照射することで、過酸化水素 100% に相当する高殺菌力の PTW を実現した。PTW の分析を進めたところ、分子式が HOONO_2 で示される過硝酸 (PNA: Peroxynitric acid) が有効成分であることを明らかにした。過硝酸は活性窒素種 (RNS: Reactive Nitrogen Species) の一つであり、ラジカル解離を伴う平衡反応により活性酸素種 (ROS: Reactive Oxygen Species) である HO_2^{\cdot} が供給され、低 pH 法による殺菌が進行すると考えている。

このような研究成果から、プラズマ誘起液中化学反応の研究を深化させるためには、
ROS のみならず RNS まで含めた反応活性種
気液界面から深さ方向に分布する化学種・化学反応
をそれぞれ考慮することが重要であると考えに至った。

3. 研究の方法

RNS ならび液中化学反応の深さ方向の分布に着目してプラズマ誘起液中反応の研究を進めるのが本研究内容である。従来、液中反応化学種として OH^{\cdot} 、 O 、 O_3 、 $^1\text{O}_2$ 、 H_2O_2 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 HO_2^{\cdot} などの ROS を中心に研究が進められており、RNS としては HNO_2 、 HNO_3 の評価が一部で行われているが、単体では反応性も乏しいため真の意味での RNS とは言えず、学術的な価値は疑問である。一方、チェコの P. Lukes らはプラズマ照射後に PTW 中に残存する HNO_2 と H_2O_2 から生成されるペルオキシナイトライト (HOONO) に着目し、研究代表者らは過硝酸 (HOONO_2) に着目しているが、このような高い化学反応性を持つ真の RNS が関与する反応を考慮した研究はまだ始まったばかりである。過硝酸によるバイオ応用は、殺菌応用も含め研究代表者が世界に先駆けて行ったものであり、種々の特性を明らかにすることはプラズマ応用分野のみならず、他分野への影響も大きい。

濃度勾配を持たない一般的な化学反応と異なり、プラズマ誘起液中化学反応は複数の境界層を有する界面反応がいくつも関与しており、液中における活性種の分布ならびそれらの化学反応の分布まで踏み込んだ化学反応速度論に基づく研究は皆無に近く、世界に先駆けて研究を進める事は価値が高い。このような非常に複雑な反応を考慮することはチャレンジングな研究課題であるが、それ故に創造性の高いインパクトのある研究成果が得られる事が期待できる。

過硝酸は亜硝酸と過酸化水素が pH2 以下で反応する事で合成される事が知られているが、一般的な PTW では生成後に測定した pH は 3 以上である。気相から NO_x が供給され、液体界面で局

所的に pH が低い薄い層で PNA の合成反応が進んでいると考えており、空間的に分布を持つ化学種による化学反応を考慮する必要性を示唆している。

一般に、酸化剤系の化学殺菌薬（オゾン、過酸化水素、次亜塩素酸ナトリウム、過酢酸など）は細菌の細胞内に侵入し、細胞内の生体分子に対する化学修飾により生じる酸化ストレスにより細菌を不活化していると考えられている。過硝酸については、過硝酸の殺菌濃度指数に基づいた殺菌特性の反応速度論的な解析から、殺菌における過硝酸の作用機序は細胞内の生体高分子との化学反応によると示唆された。また、過硝酸の殺菌力は一般的な殺菌剤である次亜塩素酸ナトリウムや過酢酸と比べて高い殺菌力を有していることが明らかになっており、マクロな殺菌現象を理解するためにはミクロな殺菌過程の化学反応を解析することが重要である。細胞内の生体高分子の大部分は、酵素や構造タンパク質を始めとするタンパク質である。タンパク質はアミノ酸がペプチド結合により連なったポリマー（ポリペプチド）であり、紐状につながったアミノ酸の炭素骨格から突き出したアミノ酸残基によってタンパク質の立体構造や機能が決定される。これまで前述の殺菌剤をはじめとする様々な酸化剤とアミノ酸（アミノ酸残基）・タンパク質をはじめとする生体高分子の反応が解析されており、細胞内における過硝酸の挙動を推定する上でこれらの反応性を調べる必要がある。また、消毒薬の実用において問題となりうる有機物の混入による殺菌効果の低下を考えるにあたって、過硝酸とアミノ酸の反応を解析することは重要である。

4. 研究成果

まず、PTW 中に過硝酸が合成される点に関する研究を進めた。過硝酸は化学合成により生成されることが知られており、実験的なアプローチで合成効率に関する研究を進めた。化学合成時の pH を様々に調整して過硝酸の合成実験を行ったところ、pH2 以下で合成反応が進み始め、pH0 程度で合成効率がほぼ最大になることがわかった。過硝酸の合成には過酸化水素と亜硝酸が必要であるが、それぞれプラズマから液体に供給されるのは知られているが、一方で、プラズマ照射後の PTW の pH は 3~4 程度となっており、このような pH では過酸化水素と亜硝酸が供給されたとしても過硝酸の合成が進まない。しかしながら、プラズマ照射時における気液界面からの化学種の拡散を考慮した次元モデルによる液中化学反応をシミュレーションしたところ、気液界面のごく近傍においては、プラズマから供給された硝酸が高濃度に局在することにより、極端に pH が低い領域が構築されていることが示唆された。つまり、プラズマを照射している過渡的な気液界面の限定的な反応場においてのみ過硝酸は合成され、PTW の温度が十分に低く保っておけば合成された過硝酸が保存されるということになる。半減時間が照射時間よりも十分に長くなるように水温を下げることで、過硝酸の濃度が高く、殺菌力が高い PTW が得られる。しかしながら PTW の生成を室温で行うと、利用前に過硝酸が失活し、高い殺菌効果は得られない。既往研究の多くは PTW の生成時の温度調整を行っておらず室温での合成が主になっているため、過硝酸が合成されたとしても、殺菌実験で利用する前に失活（数分程度）していたために、研究代表者らの PTW と比べて何桁も低い殺菌力しか有していなかった理由であると考えられる。様々なプラズマ源を製作して PTW の生成を行い、生成された過硝酸の濃度を測定する実験を行ったが、濃度の大小があるが過硝酸は十分に合成されていることがわかった。

生体を構成する 20 種類のアミノ酸と過硝酸との反応性を評価した。過硝酸溶液とアミノ酸溶液を混合し、アミノ酸との反応によって減少する過硝酸の濃度変化を解析することで、反応速度定数を求めた。過硝酸に対してアミノ酸を過剰量添加し、反応によって消費される過硝酸が擬一次反応になるように実験条件を定めた。過硝酸は自己分解（一次反応）によっても減少するため、2 種類の一次反応によって過硝酸が減少する実験系とみなして解析した。まず、アミノ酸を添加しない実験系において、過硝酸の自己分解の速度定数を評価した。そして、アミノ酸を添加した実験系において得られた見かけの速度定数から自己分解の速度定数を引き、過硝酸とアミノ酸の反応（擬一次反応）の速度定数を算出した。また、過硝酸の濃度測定には発色試薬による比色定量法を用いたが、いくつかのアミノ酸においては測定に適さなかったため、それぞれに適した過硝酸濃度の測定方法を新たに開発した。

生体を構成する 20 種類のアミノ酸の反応性を評価した。その結果、アミノ酸を添加しなかった系と比べて、過硝酸の減少速度は 4 種類のアミノ酸（Met、Trp、Cys、and Tyr）を添加した系は明かに速く、3 種類のアミノ酸（Arg、His、and Lys）を添加した系ではわずかに速かった。他の 13 種類のアミノ酸はほとんど変わらなかった。ここで、生体を構成する 20 種類のアミノ酸の構造に着目すると、これら全てのアミノ酸は炭素原子に共通の官能基（アミノ基： $-NH_2$ 、カルボキシル基： $-COOH$ ）と固有のアミノ酸残基を持つ。一部のアミノ酸は過硝酸溶液に添加しても、過硝酸の減少速度が変わらなかったことから、過硝酸は各アミノ酸の共通構造であるアミノ基とカルボキシル基とはほとんど反応しないことが示唆された。過硝酸に対して反応性を示したアミノ酸の共通点に着目すると、大きな反応性を示した構造は S 原子を含むもの（Met、Cys）や芳香環をもつもの（Trp、Tyr）であった。一方で、Phe もアミノ酸残基に芳香環を持つが反応性はほとんど確認されなかった。これらについては、反応生成物の分析や量子化学計算に基づく反応部位の解析により、過硝酸とアミノ酸残基の反応について更なる理解が得られると考えられる。

本研究により過硝酸と 20 種類のアミノ酸の速度定数が初めて明らかになった。過硝酸は S 原子を含むアミノ酸（Met、Cys）と高い反応性を示したが、Met に対する反応性は Cys の 410 倍高

かった。過硝酸は芳香族アミノ酸 (Trp、Tyr、Phe、His) の中で Trp と Tyr に対して反応性を示した。それぞれの芳香族アミノ酸に対する過硝酸の反応性は大きく異なっており、反応メカニズムに関する更なる解析が必要である。次亜塩素酸 (HOCl) と過酢酸は一般的な殺菌剤として利用されている化学物質であり、オゾン、OH \cdot 、HOO \cdot 、O $_2\cdot$ は一般的な活性酸素種であり、これらと比較を行った。まず、各酸化剤と最も反応性の高いアミノ酸について比較した。過硝酸と Met の反応性は HOCl と Met、OH \cdot と Cys、オゾンと Trp の反応性と比べて極めて低かった (それぞれ 4.3×10^{-6} 、 4.8×10^{-9} 、 2.3×10^{-5} 倍低い)。一方で、過酢酸と Cys、HOO \cdot と Cys、O $_2\cdot$ と Trp の反応性とは同程度であった (それぞれ 2.8×10^{-1} 、 2.7×10^{-1} 倍低く、6.8 倍高い)。次に、各酸化剤がアミノ酸 20 種類の中で反応性の高いアミノ酸の数を比較した。過硝酸が特に反応性を示した 4 種類のアミノ酸 (Met, Trp, Cys, Tyr) を含む反応定数 1.0×10^{-1} [M $^{-1}$ s $^{-1}$] 以上に着目すると、過酢酸を除く他の酸化剤は 7 種類以上のアミノ酸と反応することがわかる。特に、オゾン、OH \cdot 、HOO \cdot 、O $_2\cdot$ は 16 種類以上のアミノ酸に対して反応性を示している。これらのことから、過硝酸は生体を構成するアミノ酸 20 種類に対して反応性を示すアミノ酸の種類が少なく、反応性スペクトルが極めて限定的であることが示された。また、各アミノ酸に対する反応特異性について比較した。Met に対する過硝酸の反応性は際立って高く、2 番目に反応性が高かった Trp と比較して 120 倍反応性が高かった。過酢酸を除く酸化剤は比較的反応特異性が低く、最も反応性の高いアミノ酸群には 2 種類以上のアミノ酸が属した。過酢酸は Cys に対して高い反応性を示した。Met に対して反応特異性を持つ酸化剤は過硝酸の他に報告されておらず、これは過硝酸のバイオ応用を考える上で非常に重要な特徴である。

ここで、過硝酸と次亜塩素酸の殺菌力と各々のアミノ酸に対する反応性について着目すると、アミノ酸に対する過硝酸の反応性は次亜塩素酸と比較して 10^6 倍低い。しかしながら、過硝酸のモル濃度あたりの殺菌力 (殺菌速度) は次亜塩素酸と比べて同程度であった。一般に殺菌剤の反応性と殺菌力は比例すると考えられることから、過硝酸と次亜塩素酸のこれらの物性のオーダーの不一致は大変興味深い結果である。この矛盾する実験結果を説明する仮説として、次の 3 つが考えられる。第一に、殺菌プロセスにおいて、殺菌剤による生体高分子の酸化とは異なる別のプロセスが殺菌速度の律速になっている可能性がある。例えば、殺菌剤が細胞膜を侵入するプロセスなどが挙げられる。第二に、細胞内に侵入した次亜塩素酸が生体高分子と殺菌に関与しない形で急激に反応して消費され、殺菌効率が大きく低下している可能性がある。第三に、過硝酸の殺菌経路が次亜塩素酸と異なる可能性がある。これがすなわち前述の過硝酸による細胞内タンパク質合成の阻害による殺菌の可能性である。細胞内におけるタンパク質合成を阻害する抗生物質としてテトラサイクリンが知られているが、Met と特異的に反応する殺菌薬は今まで報告されていない。仮に過硝酸による殺菌が細胞内のタンパク質の合成阻害によるものであったとすると、過硝酸は新規殺菌経路を有する非常に有用な殺菌剤になるであろう。

プラズマ誘起液中化学反応場では、プラズマから生成される様々な種類の化学種が反応に寄与する。多くの化学種は液中での半減時間が非常に短いため、mm オーダーの反応に直接的に寄与することはできない。しかしながら、一部の短寿命な活性種は別の長寿命な活性種に化学変化することで間接的に寄与することもある。供給された化学種と生体の相互作用を考えた場合、長寿命な化学種の影響の大半は、化学種ベースに話を落とし込むと既往研究に落とし込む事が可能な場合が多く、プラズマ医療分野で細胞応答を評価しているいくつかの実験結果は、過酸化水素と次亜塩素酸によるものである。プラズマからは同時に複数の活性種が供給されるため、相乗作用により新規の作用が生じる可能性もある。そのような反応経路の一つとして、過硝酸による反応系は既往のバイオ研究でも評価がされたことがなく、様々な新規の応用の可能性を秘めている。このような他分野へも波及効果の高い研究成果が得られたのは、プラズマを化学種供給ツールとしてだけでなく、新規現象を創発する研究ツールとして研究を遂行できたからであり、科学研究費を利用した基礎研究の成果ならではある。プラズマが誘起する反応場は複雑があるが故に理解に困難を極める側面もあるが、今後も新規の現象を発見するツールとして期待できると信じる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Yokoyama Takashi, Miyazaki Shinya, Akagi Hiroko, Ikawa Satoshi, Kitano Katsuhisa	4. 巻 87
2. 論文標題 Kinetics of Bacterial Inactivation by Peroxynitric Acid in the Presence of Organic Contaminants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied and Environmental Microbiology	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1128/aem.01860-20	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 Yokoyama Takashi, Miyazaki Shinya, Ikawa Satoshi, Nakashima Yoichi, Kitano Katsuhisa	4. 巻 33
2. 論文標題 Kinetics Analysis of the Reactions between Peroxynitric Acid and Amino Acids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Research in Toxicology	6. 最初と最後の頁 1633 ~ 1643
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.chemrestox.9b00408	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 Iwaki Tatsuya, Ohshima Tomoko, Tasaki Tatsuya, Momoi Yasuko, Ikawa Satoshi, Kitano Katsuhisa, Yamamoto Takatsugu	4. 巻 62
2. 論文標題 High microbicidal effect of peroxynitric acid on biofilm-infected dentin in a root carious tooth model and verification of tissue safety	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oral Biosciences	6. 最初と最後の頁 189 ~ 194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.job.2020.03.002	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 Yokoyama Takashi, Ikawa Satoshi, Kitano Katsuhisa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Plasma disinfection via the reduced-pH method using an ex vivo porcine contaminated skin model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab1740	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15件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Katsuhisa Kitano, Satoshi Ikawa, Yoichi Nakashima, Takashi Yokoyama, Atsushi Tani
2. 発表標題 Peroxynitric acid (HOON ₂) chemistry in plasma-treated water for effective and safety disinfection
3. 学会等名 AVS 66th International Symposium & Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhisa Kitano, Satoshi Ikawa, Yoichi Nakashima, Atsushi Tani
2. 発表標題 Identification of key chemical species in plasma-treated water for effective and safe disinfection
3. 学会等名 3rd International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences (IS-NPCS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitano, S. Ikawa, Y. Nakashima, T. Yokoyama, Y. Kawashima and A. Tani
2. 発表標題 Peroxynitric acid (HOON ₂) chemistry inside plasma-treated water (PTW) for effective and safety disinfection
3. 学会等名 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 24) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhisa Kitano, Satoshi Ikawa, Yoichi Nakashima, Atsushi Tani
2. 発表標題 Peroxynitric acid (HOON ₂) preserved in plasma-treated water for effective and safe disinfection
3. 学会等名 8th Central European Symposium on Plasma Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Aramaki, T. Hada, T. Ikeda, M. Yoshida, K. Shinada, K. Kitano
2. 発表標題 Observation of plasma bullet in impurity-controlled plasma jet
3. 学会等名 Laser aided plasma diagnostics 2019 (LAPD19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ohshima, H. Shima, T. Iwaki, Y. Momoi, S. Ikawa, K. Kitano, T. Yamamoto
2. 発表標題 Safety and Efficient Disinfection using Peroxynitric Acid against Biofilm-Infected Dentin
3. 学会等名 IADR/AADR/CADR General Session & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北野勝久、井川聡
2. 発表標題 バイオ応用におけるプラズマ誘起液中化学反応の反応素過程
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kitano, S. Ikawa, Y. Nakashima, T. Yokoyama, and A. Tani
2. 発表標題 Reaction kinetics of plasma-induced chemical reactions in liquid for biological application
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 北野勝久、井川聡、中島陽一、谷篤史
2. 発表標題 プラズマ処理水の有効成分である過硝酸による新規殺菌技術
3. 学会等名 日本学術振興会 先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会 令和元年度 第3回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhisa Kitano, Satoshi Ikawa, Yoichi Nakashima, Atsushi Tani
2. 発表標題 Peroxynitric acid (HOON ₂) is the most valuable chemical species in plasma-treated water for effective and safe disinfection
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Plasma Technologies (ICAPT-7) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kitano, S. Ikawa, Y. Nakashima, Y. Kawashima, T. Yokoyama, A. Tani
2. 発表標題 Chemical kinetics of the sterilization by peroxynitric acid (HOON ₂) in plasma-treated water
3. 学会等名 The 71st Gaseous Electronics Conference (GEC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kitano, S. Ikawa, Y. Nakashima, Y. Kawashima, A. Tani
2. 発表標題 Bactericidal property of peroxynitric acid (HOON ₂) in cryo-preserved plasma-treated water with the reduced-pH method for effective and safety disinfection
3. 学会等名 7th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-7) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yokoyama, S. Ikawa, K. Kitano
2. 発表標題 Effective and safe plasma disinfection on contaminated skin model using porcine skin tissue by the reduced-pH method
3. 学会等名 7th International Conference on Plasma Medicine (ICPM-7) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kitano, S. Ikawa Y. Nakashima, T. Ohshima, A. Tani
2. 発表標題 Application of peroxyntic acid in plasma-treated water for safe and effective disinfection
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北野勝久、井川聡、中島陽一、谷篤史
2. 発表標題 過硝酸溶液を利用した世界初の殺菌手法
3. 学会等名 日本防菌防黴学会 第45回年次大会 (平成30年度) (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 過硝酸の濃度検出方法および装置、並びに殺菌用過硝酸の生成装置	発明者 中島陽一、井川聡、 北野勝久	権利者 大阪産業技術研 究所、大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-225975	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

過硝酸応用研究開発コンソーシアム
<http://www.ppl.eng.osaka-u.ac.jp/pna/>

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	座古 保 (ZAKO Tamotsu) (50399440)	愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授 (16301)	
研究分担者	白木 賢太郎 (SHIRAKI Kentaro) (90334797)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	

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		
スロベニア	Jozef Stefan Institute		