

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00135

研究課題名(和文) プラズマと相互作用する液相界面現象の学理構築

研究課題名(英文) Understanding scientific principle of plasma-liquid interface

研究代表者

佐々木 浩一 (Sasaki, Koichi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：50235248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ・液体相互作用による反応プロセスの溶液化学と比較しての特異性は、プラズマと相互作用する液体界面の近傍領域に存在する短寿命活性粒子にあると考えられる。本研究では、ルミノールのケミルミネッセンスによるOHラジカルの検出、プラズマと相互作用する水の表面張力測定、プラズマと相互作用する水表面での電解反応の観察、および、レーザー誘起脱溶媒和による水和電子の検出により、プラズマと相互作用する水の界面近傍領域を実験的に調べることに成功し、これまでに報告されていない新しい現象を見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマと相互作用する液体界面の重要性は、多くの研究者によって認知されていたものの、実験技術の欠如のため、従来は実験研究が不可能な研究対象であった。本研究では、プラズマと相互作用する液体界面の近傍領域に存在するOHラジカルおよび水和電子を実験的に検出する方法を確立し、その反応過程の一部を明らかにした。また、液体界面の近傍領域に生成された化学的活性種の影響とみられる表面張力の変化を実測し、プラズマと接する水界面で生じる従来とは異なる酸化還元反応を明らかにした。これらはプラズマ・液体相互作用に関する従来の研究を質的に転換する成果である。

研究成果の概要(英文)：The uniqueness of plasma-liquid interaction, in comparison with conventional liquid-phase chemistry, originates in short-lived species located in the vicinity of the liquid surface. In this work, we succeeded in the experimental investigation of the vicinity of the plasma-water interface by detecting OH radicals using luminol chemiluminescence, by measuring the surface tension of water interacting with a plasma, by observing redox reactions at the water surface interacting with a plasma, and by detecting hydrated electrons at the plasma-liquid interface using laser-induced desolvation.

研究分野：プラズマ応用工学

キーワード：プラズマ・液体相互作用 界面近傍の液相 短寿命活性種 水ジェット レーザー誘起脱溶媒和 ルミノールケミルミネッセンス 表面張力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラズマと液体の相互作用に関する研究は、プラズマと固体表面の相互作用に関する研究と比較して遙かに歴史が浅い。従来、プラズマは、水の蒸気圧以下の圧力に減圧されたガスを用いて生成される場合がほとんどであったが、その中に水を入れれば沸騰し、液体水とプラズマを相互作用させることが難しいため、プラズマと凝縮相の相互作用に関する研究はプラズマと固体との相互作用に関する研究に限定されていた。比較的最近になって、水の蒸気圧より高いガス圧(特に大気圧)においてプラズマを生成するための様々な方法が発展し、プラズマと液体の相互作用に関する研究が始まる契機になった。

プラズマ・液体相互作用の応用には、医療や農業などの生命分野への応用や水処理などへの応用があるが、いずれの場合も処理対象は水そのものではなく、水の中に存在する細胞や菌などである。この場合、処理対象はプラズマと直接相互作用するのではなく、水を介してプラズマと相互作用する。プラズマが照射された水は「プラズマ処理水」と呼ばれることがあり、過酸化水素や硝酸などの化学物質を含み、処理対象はそれらと反応する。当然のことながら、これらの安定な化学物質からなる溶液は化学的方法によって容易に合成できる。したがって、プラズマを用いて「プラズマ処理水」を生成し、それを用いて反応プロセスを行うことに科学的な意義があるかどうかについては、慎重な検討が必要と考えられる。

従来のプラズマ・固体相互作用では、プラズマ中で生成したイオンやラジカルを固体表面に輸送し、反応させていた。これらの短寿命な化学的活性種は、試薬やガスとして入手することができないため、プラズマでしか実現できない反応プロセスが可能となる。プラズマ・液体相互作用においても、プラズマと液体の界面近傍のごく浅い領域は、プラズマ・固体相互作用の場合と同様に、プラズマから輸送される短寿命な化学的活性種が直接相互作用する領域であり、この領域では溶液化学の方法によって実現できないプラズマに特有な反応プロセスが生じていると考えられる。本研究の開始当初、プラズマと液体の界面近傍のごく浅い領域こそがプラズマにユニークな研究対象であるとの認識は研究コミュニティにおいて持たれていたが、それを研究するための実験手段が存在しないため、手出しできない研究対象となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、報告者らがオリジナリティを有する実験技術をプラズマ・液体相互作用に適用し、プラズマと液体の界面近傍の領域を実験的に調べることである。また、水との相互作用実験には大気圧プラズマが広く用いられているものの、大気圧プラズマはプラズマパラメータの測定が容易ではなく制御性もよくないことを考慮し、プラズマ・液体相互作用の新しい研究プラットフォームとして、低ガス圧プラズマと液体水を相互作用させることのできるプラズマ実験装置を構築することも目的とした。

3. 研究の方法

プラズマと相互作用する液体の界面近傍領域を実験的に調べるため、以下の項目を実施した。

(1) ルミノールのケミルミネッセンスを利用した活性種の検出

アルカリ性の溶液中でルミノールが酸化反応すると青色のケミルミネッセンスが発生することを利用し、液中のOHラジカルおよび水和電子の密度を測定することを試みた。気相から液相に輸送されるOHラジカル密度とケミルミネッセンス強度の相関を調べた。また、ケミルミネッセンスの絶対発光強度の測定からOHラジカル密度の絶対値を推定することを試みた。

(2) プラズマと相互作用する液体の表面張力測定

液体表面にキャピラリー波を励起し、その分散関係をレーザー回折法を用いて測定することにより、プラズマ照射による液体の表面張力変化を調べた。

(3) 低ガス圧プラズマ・水ジェット相互作用装置の構築と新規な電解反応の観察

低ガス圧誘導結合プラズマにジェット状の水を入射することのできる実験装置を構築した。この装置では、直径50-75 μm の小径水ジェット、大排気速度のターボ分子ポンプ、および、液体窒素温度の水蒸気トラップを用いることにより、水蒸気分圧を2 mTorrまで低減した。この装置を用いて、プラズマ・水界面における無電流での水の電解反応を調べた。

(4) レーザー誘起脱水和による水和電子の検出

プラズマ・液体界面に存在する水和電子を検出するための新しい方法として、レーザー誘起脱水和法を開発した。まず、水を陰極とする直流グロー放電に適用し、実際に水和電子を検出できることを示した。次に、電子が水に照射される場合の水和電子を調べるため、レーザー誘起脱水和を低ガス圧プラズマ・水ジェット相互作用装置に適用した。

4. 研究成果

(1) ルミノールのケミルミネッセンスを利用した活性種の検出

アルカリ性溶液を陰極として動作する大気圧直流ヘリウムグロー放電の気相側におけるOH密度の空間分布およびプラズマ停止後のアフターグローにおける時間変化をレーザー誘起蛍光法によって調べ、プラズマとの界面直下の液相で発生するルミノールのケミルミネッセンスの空

間分布および時間変化との相関を調べた。図 1 (a)は、ある放電条件における OH ラジカル密度の空間分布とケミルミネッセンスの発光パターンとの比較を示している。この放電条件では、プラズマ柱の中央に位置するヘリウム流のために OH ラジカル密度の空間分布はホロー状となっているが、このとき、ルミノールのケミルミネッセンスはリング状となり、ケミルミネッセンス部の外径は OH ラジカルが照射される領域の直径とほぼ一致した。図 1 (b)は、放電をパルス的に遮断した後のアフターグローにおけるルミノールの化学ルミネッセンス強度の時間変化と気相側で測定した OH 密度の時間変化との比較を示している。この時間変化において、放電停止直後におけるケミルミネッセンス強度の急激な低下は、水和電子密度の急激な低下に対応した変化であると考えられた。次に、その後に見られるケミルミネッセンス強度の一時的増加は、液中の OOH が OH と反応して O_2 が生成される反応によるものと考えられた。最後に、時刻 100 μs 以降で見られるケミルミネッセンス強度の緩やかな減少は、図に示したように気相側の OH 密度の時間変化と一致しており、液相における OH 密度の減衰をあらわすものと考えられた。

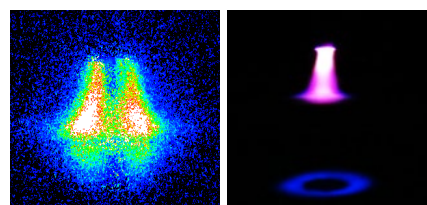
次に、タンダステンランプを用いて分光計測装置の絶対感度を校正し、ケミルミネッセンス強度の絶対値を求めた。ルミノールがケミルミネッセンスを発する反応過程および反応速度係数を文献調査し、簡易なレート方程式モデルを構築した。レート方程式モデルの解として出力されるケミルミネッセンス強度が実験結果と一致するようにモデルに含まれる OH 密度を調整することにより、プラズマとの界面直下の液相における OH 密度の絶対値を推定した。現在は、プラズマが誘起する液相化学反応に関するより詳細なモデルを構築している成蹊大学の村上教授との共同研究により、モデルの精度を高め、ケミルミネッセンスの絶対強度から OH 密度の絶対値を求めるための準備を進めている。

(2) プラズマと相互作用する液体の表面張力測定

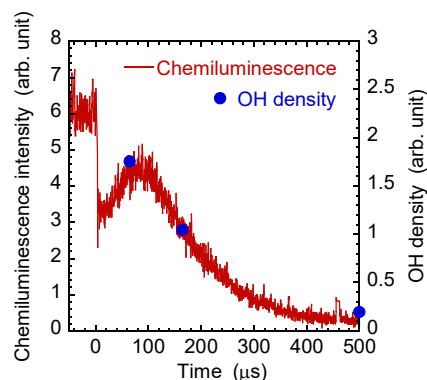
音響スピーカに取り付けた細い金属棒の先端を水面に接触させ、スピーカに音響周波数の正弦波を供給することにより、水面上にキャピラリー波を励起した。キャピラリー波は表面張力を復元力とする波動で、その分散関係は表面張力に依存する。水面に He-Ne レーザー光を斜入射すると、水面上の波動が回折格子のように働くため、水面による反射光に回折パターンが生じ、回折パターンからキャピラリー波の波長が求まる。この測定をいくつかの周波数で実施すれば、キャピラリー波の分散関係が求まり、それからプラズマ・液体界面の表面張力を求めることができる。プラズマ照射開始後の表面張力の時間変化を調べた結果を図 2 に示す。水面と接しているのは二つのノズル電極から吹き出し V 字型に交差するヘリウム流 (大気中) に沿って生成されるプラズマの空間アフターグロー部である。プラズマ照射前の表面張力は既知の値の 73 mN/m である。プラズマ照射開始後、表面張力は数分の特定数で緩やかに増加し、90 mN/m を越える値に増加した。プラズマ照射を停止すると、表面張力は一旦急激に 85 mN/m 程度まで低下した後、80 mN/m 程度まで緩やかに減少した。水以外の化学物質が水中に生成されるために表面張力が増加したものと考えられるが、観察された表面張力は高い表面張力を有する化学物質の代表である H_2O_2 (濃度 100%) の表面張力より高い。放電停止後に観察された表面張力の急激な減少は、寿命の短い化学物質が高い表面張力に寄与している可能性を示唆するが、放電開始後の緩やかな表面張力の増加は寿命の長い化学物質が水中に蓄積することが表面張力を徐々に増加させていることを示唆しており、現時点において、表面張力が図 2 のような時間変化を示すことのみメカニズムは理解できていない。

(3) 低ガス圧プラズマ・水ジェット相互作用装置の構築と新規な電解反応の観察

プラズマと水との相互作用に関する実験は、ほとんどの場合、大気圧プラズマを用いて行われている。大気圧では安定した液体水を得ることができ、また、プラズマ・液体相互作用の多くの応用においても大気圧プラズマが用いられている。しかしながら、大気圧プラズマの電



(a)



(b)

図 1 プラズマ中の OH 密度とルミノールのケミルミネッセンス強度の比較。(a)空間分布の比較、(b)時間変化の比較。

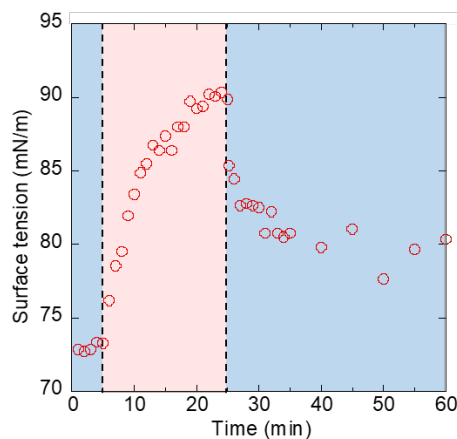


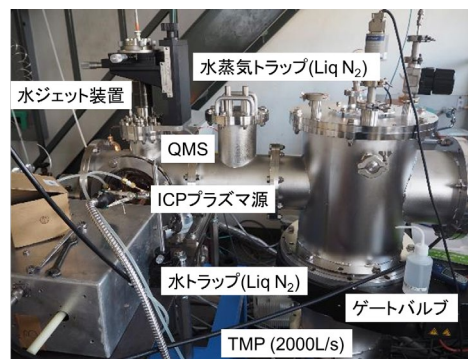
図 2 大気中で生成したプラズマの空間アフターグローと相互作用する水の表面張力の時間変化。

子密度および電子温度を測定することは容易ではなく、多くの実験ではこれらの基本的プラズマパラメータが未知のプラズマが用いられている点は問題である。低ガス圧プラズマを用いれば、ラングミュアプローブを用いて電子密度および電子温度を容易に測定することができるし、プラズマ中の分子等の密度測定も容易であるので、基礎研究に適している。本研究では、低ガス圧プラズマと水との相互作用に関する実験を可能とするため、図 3 (a) に示すプラズマ生成装置を構築した。真空容器は、プラズマ生成部、四重極質量分析器 (QMS) を設置した差動排気部、および、2000 L/s の排気速度のターボ分子ポンプを備えた排気部からなる。水ジェット装置はプラズマ生成部の上部に設置した。水ジェット装置は内径 50-75 μm のプラスチックノズルと無脈流ポンプからなり、大気中においた水をポンプで加圧してノズルに供給することにより、ノズルから液体水をジェット状に放出することができる。放出した水を液体窒素冷却したトラップにおいて凍った状態で保持することにより、水ジェット以外の部分からの水蒸気の放出を防いだ。また、プラズマ部と排気部の間にも液体窒素トラップを設置し、水蒸気に対して高い排気速度を実現した。さらに、ターボ分子ポンプとロータリーポンプの間にも液体窒素トラップを設置している。これらの効果により、プラズマ部に水ジェットを供給しても、プラズマ部の水蒸気圧力は 2 mTorr 程度となった。残留水蒸気に任意のガスを加え、プラズマ生成部に設置したパイレックスガラス管に巻いたスパイラルアンテナに周波数 13.56 MHz の高周波電力を印加することにより、プラズマを生成した。

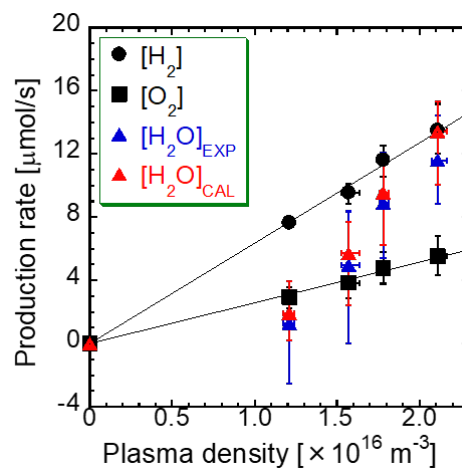
残留水蒸気にヘリウムを加え、全ガス圧を 12 mTorr としてプラズマを生成し、プラズマ中のガス組成を QMS によって測定したところ、水素および酸素の生成が観察された。この時、水ジェットは浮遊電位にあり、水ジェットにはイオンと電子が等しいフラックスで輸送され、プラズマと水ジェットに間に電流は流れていない。新たに考案した較正手法を用いて QMS の信号から水素および酸素の生成レートを求めた結果を図 3 (b) に示す。図の横軸はラングミュアプローブで測定したプラズマ密度である。水素および酸素の生成レートの比は 2.4:1 であり、プラズマ密度に比例することがわかった。図には、同時に測定した水蒸気の生成レート、および、プラズマ照射による水温の増加に起因する水蒸気の生成レートの計算値もプロットしてある。水蒸気の生成レートの実験値は水温の増加によって説明でき、このことから、水素および酸素の生成が気相の水蒸気からの転換ではないことがわかった。すなわち、プラズマと水ジェットのの間には電流が流れないものの、水ジェットとプラズマの界面において水の電解反応が生じていると解釈できる。水の代わりに硝酸銀水溶液を用いた時には、銀の微粒子が生成され、水素の生成レートが低下し、酸素の生成レートに変化はなかった。このことは、銀イオンと水の還元反応の間の競合として理解できる。従来、電解反応は、酸化反応と還元反応とが異なる場所 (陽極および陰極) において発生し、陽極と陰極の間に電流を流すための電源が存在する環境で実現されてきた。本研究により、プラズマと液体の界面では、プラズマから輸送されるイオンと電子により酸化反応と還元反応が同じ場所で同時に生じることが示された。

(4) レーザー誘起脱水和による水和電子の検出

水和電子は、従来のプラズマ・固体相互作用には登場しない、プラズマ・水相互作用に特有な活性粒子である。プラズマと相互作用する水界面に水和電子が存在することは 2015 年に報告されているが、その後は水和電子に関する実験研究の報告は皆無であり、重要性は誰もが認識するものの実験が不可能な研究対象となっていた。本研究では、レーザー誘起脱水和による水和電子の検出法を開発した。レーザー誘起脱水和は、レーザー光子のエネルギーが水和電子の水和エネルギーより高い時、水和電子が自由電子に変換され、気液界面に達した後、気相側に放出される現象である。まず、水が陰極として動作する大気圧直流グロー放電にレーザー誘起脱水和を適用した。プラズマ気相でのレーザー光脱離により負イオンから電子が生成されることを防ぐため、水側から全反射の配位でプラズマが照射されている水界面にパルスレーザー光を照射した。レーザーパルスが照射されたタイミングで、直流放電回路に流れる電流がパルス状に増加することが観察され、この電流がレーザ



(a)



(b)

図 3 (a)低ガス圧誘導結合プラズマと水ジェットを相互作用させるための実験装置, (b) 低ガス圧誘導結合プラズマと水ジェットとの相互作用による水素および酸素の生成レートのプラズマ密度に対する依存性。水ジェットの温度増加に起因する水蒸気の生成レートとその計算値もプロットしてある。

一誘起脱水和による電子放出をあらわすものと考えられた。レーザー光子のエネルギーを変化させ、光子1個あたりに放出される電子の数(相対値)を量子効率と定義してプロットすると、図4(a)に示す結果が得られた。図中の実線は、脱水和により発生した自由電子がプラズマとの界面まで輸送される過程をモンテカルロシミュレーションコード PHITS を用いて模擬することによって求めた量子効率の計算値(相対値)で、水和電子から自由電子に変換される位置を深さ方向に変えた場合の曲線をプロットしている。計算結果と実験結果との比較から、水に正イオンが照射される本実験の場合においてもプラズマと接する水界面には水和電子が存在すること、および、水和電子の存在位置は水面から9–15 nm 深さ方向に離れた領域であり、それよりも浅い領域には水和電子が存在しないことが示された。

レーザー誘起脱水和では、自由電子を気相に放出させて検出する必要があるため、水の電位がプラズマの電位より低い場合のみ実験が可能である。前段落で述べた直流放電の場合に電源の極性を反転させ、水界面に電子を輸送すると、レーザー誘起脱水和によって生成された自由電子は気相に輸送されないため、レーザー誘起脱水和の実験は不可能である。水界面に電子が輸送される場合の水和電子をレーザー誘起脱水和によって検出するため、(3)で述べた低ガス圧プラズマ源と水ジェット装置を用いた。低ガス圧プラズマでは、電子のエネルギー分布関数は電子温度に対応する広がりを持ち、水ジェットの電位が浮遊電位とプラズマ電位の間に設定されているときには、水ジェットにイオンと電子の両方が輸送されるものの、電子のフラックスはイオンのフラックスより大きい。それにもかかわらず水ジェットの電位はプラズマ電位より低いので、レーザー誘起脱水和によって生成された自由電子はプラズマに輸送され、水ジェットにパルス電流が流れる。図4(b)は、水ジェットにNaOH水溶液を用い、NaOH水溶液のリザーバーに直流電位(下の横軸の値)を印加したときに得られたパルス電流の振幅をプロットしている。

使用したレーザーはNd:YAGレーザーの4倍高調波で、波長とエネルギーは固定されているので、パルス電流の振幅は水和電子密度の相対値を与える。NaOH水溶液を用いた場合でも、小径の水ジェットでは電気抵抗が無視できず、水ジェットは軸方向に電位分布を持つ。図の上の縦軸は、レーザー照射部の水ジェット電位の推定値であり、プラズマ電位は約30 Vであるので、横軸のすべてにおいて水ジェットの電位はプラズマ電位より低い。図からわかるように、水ジェットを負にバイアスしてイオンを照射すると、水和電子密度はイオンエネルギーに対して増加した。それに対し、水ジェットを正にバイアスして電子を照射すると、水和電子密度は電子フラックス(横軸に対して単調に増加)に対してほとんど増加しないことがわかった。また、Nd:YAGレーザーの2倍高調波、3倍高調波、および、4倍高調波を用いて実験を行い、図4(a)と同じプロットを作成すると、水和電子が水界面から0.1 nmの位置で自由電子に変換されたとしても、モンテカルロシミュレーションの結果は実験結果を説明しないことがわかった。このことは、この実験条件で生成された水和電子が既知の水和電子より小さな水和エネルギーを持つことを示唆している。図4(a)の4 eV以下の光子エネルギーにおけるモンテカルロシミュレーションと実験結果とのずれも、同様に、既知の水和電子より小さい水和エネルギーを持つ水和電子による可能性がある。

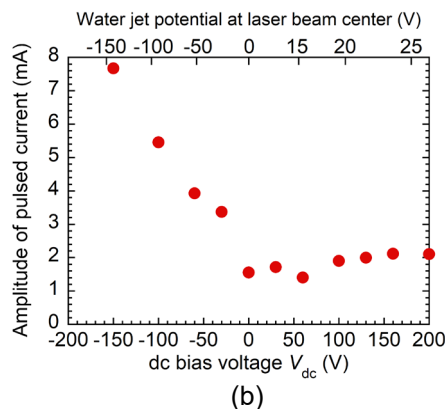
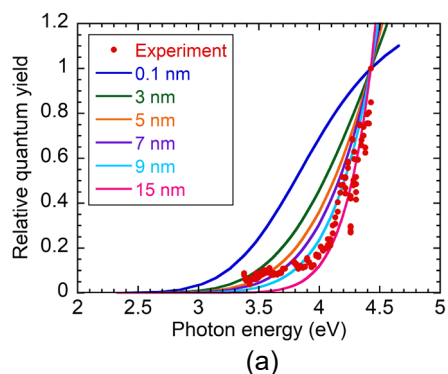


図4 (a)大気圧直流放電の陰極として働いている水界面にレーザー誘起脱水和を適用し、量子効率の光子エネルギーに対する依存性を調べた結果、(b)低ガス圧誘導結合プラズマに入射した水ジェットにレーザー誘起脱水和を適用し、水ジェットの電位に対する脱水和電流の変化を調べた結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7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 T. Ito, T. Sakka, and K. Sasaki | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Observation of currentless redox reactions on surface of water jet immersed in low-pressure plasma | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Sources. Sci. Technol. | 6. 最初と最後の頁 06LT02-1-6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6595/ac7745 | 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 白井 直機, 佐々木 浩一 | 4. 巻 45 |
| 2. 論文標題 ルミノール化学発光を用いた気液界面プラズマによって誘起される短寿命活性種の検出 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 静電気学会誌 | 6. 最初と最後の頁 144-149 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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. Shirai, H. Owada and K. Sasaki | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Efficient production and transport of OH radicals in spatial afterglow of atmospheric-pressure DC glow discharge using intersecting helium flows | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Sources Sci. Technol. | 6. 最初と最後の頁 125012-1-10 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6595/ac3340 | 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. Inagaki and K. Sasaki | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Reaction frequency of solvated electrons in water interacting with atmospheric-pressure helium plasma jet | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Jpn J. Appl. Phys. | 6. 最初と最後の頁 096001-1-5 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac17dc | 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. Shirai, T. Kaneko, Y. Takamura and K. Sasaki | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 Effect of atmospheric-pressure plasma irradiation on the surface tension of water | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys. D: Appl. Phys. | 6. 最初と最後の頁 15LT01-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac48ad | 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. Inagaki and K. Sasaki | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Detection of solvated electrons below interface between atmospheric-pressure plasma and water by laser-induced desolvation | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Sources. Sci. Technol. | 6. 最初と最後の頁 03LT02-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/ac4f08 | 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 J. Liu, N. Shirai and K. Sasaki | 4. 巻 54 |
| 2. 論文標題 Synthesis mechanism of cuprous oxide nanoparticles by atmospheric-pressure plasma electrolysis | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys. D: Appl. Phys. | 6. 最初と最後の頁 085012-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/abca2a | 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. Inagaki and K. Sasaki | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Detection of hydrated electrons in water-jet immersed in low-pressure plasma by laser-induced desolvation | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Plasma Sources. Sci. Technol. | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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32件(うち招待講演 8件/うち国際学会 11件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 N. Shirai, Y. Takamura, T. Kaneko, K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Change in surface tension of water in atmospheric pressure plasma-liquid interaction |
| 3. 学会等名 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Inagaki and K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Detection of pulsed current induced by laser-induced desolvation of hydrated electrons in water jet immersed in low-pressure plasma |
| 3. 学会等名 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Experimental investigation on solvated electrons in liquids interacting with plasmas |
| 3. 学会等名 International Online Plasma Seminar (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hamana, N. Shirai, and K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Ejection of droplets from liquid gallium by collapse of bubbles induced by plasma-liquid interaction |
| 3. 学会等名 7th International Symposium on Liquid Metals Applications for Fusion (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hamana, N. Shirai, K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Importance of supersaturated dissolution for ejection of droplets from liquid gallium interacting with inductively coupled plasma |
| 3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hamana, N. Shirai, and K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Droplet ejection from liquid gallium interacting with inductively coupled hydrogen, helium, and nitrogen plasmas |
| 3. 学会等名 US-Japan and International Workshop on Power and Particle Control in DEMO Fusion Reactor by Liquid Metal Plasma-Facing Components (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 白井 直機 |
| 2. 発表標題 プラズマ - 液体界面の非接触計測法 - ルミノール化学発光と表面張力変化計測の利用 - |
| 3. 学会等名 日本学術振興会プラズマ材料科学153委員会第158回研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 稲垣 慶修, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 水和電子のレーザー誘起脱溶媒和により生じる水ジェット/低ガス圧プラズマ間のパルス電流に対する印加電圧の影響 |
| 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 濱名 優輝, 白井 直機, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 誘導結合プラズマと液体ガリウムの相互作用における液滴放出メカニズムに対する溶存ガスの影響 |
| 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 高村 祐仁, 白井 直機, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 液体電極を用いた大気圧直流グロー放電における液体の物性値と液滴放出の関連性 |
| 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 植林 彰吾, 宮崎 俊明, 稲垣 慶修, 白井 直機, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 ルミノールケミルミネッセンスを用いた液中短寿命活性種の絶対密度推定の可能性 |
| 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 白井直機 |
| 2. 発表標題 プラズマ液体相互作用で生じる界面現象の計測技術 |
| 3. 学会等名 東北プラズマフォーラム (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 白井直機 |
| 2. 発表標題 プラズマ液体相互作用で生じる界面現象とその測定法 |
| 3. 学会等名 静電気学会 静電気・高電圧・放電・プラズマ若手研究委員会/応用物理学会 プラズマ若手チャプター合同研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 稲垣 慶修, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 レーザー誘起脱溶媒和信号の光子エネルギー依存性が示唆する“部分水和電子”の可能性 |
| 3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 濱名 優輝, 白井 直機, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 誘導結合プラズマと液体ガリウムの相互作用における液滴放出現象と溶解ガス量の関係性 |
| 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 N. Shirai, H. Owada, K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Efficient Generation of OH Radicals Using Atmospheric Pressure DC Glow Discharge with Two Intersecting Gas Flows |
| 3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Inagaki, K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Relationship between photon energy and current induced by photo-excited desolvation of hydrated electrons in atmospheric-pressure dc glow discharge |
| 3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y. Hamana, N. Shirai and K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Importance of solubility on droplet ejection from liquid gallium interacting with inductively coupled helium plasma |
| 3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Virtual Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 稲垣 慶修、佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 水和電子の光励起脱溶媒和によるヘリウム大気圧グロー放電の放電電流増加における光子エネルギー依存性 |
| 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 伊藤 健、作花 哲夫、佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 低ガス圧ヘリウムプラズマに入射した水ジェットにおける無電流酸化還元反応の可能性 : 水蒸気を起源とする反応との比較 |
| 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 白井 直機, 金子 拓真, 高村 佑仁, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 大気圧プラズマと相互作用する液体の表面張力変化 |
| 3. 学会等名 第39回プラズマプロセッシング研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高村 佑仁, 白井 直機, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 液体電極を用いた大気圧グロー放電における液体の表面張力と発光の関連性 |
| 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 稲垣 慶修, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 水和電子のレーザー誘起脱溶媒和による水ジェット/低ガス圧プラズマ間の電流変化 |
| 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 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 プラズマ・液体相互作用における溶媒和電子に関する実験研究 |
| 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 Y. Inagaki, K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Change in discharge current of atmospheric-pressure helium glow discharge by photo-excited desolvation of hydrated electrons |
| 3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Sasaki |
| 2. 発表標題 Diagnostics of liquid-side phenomena in plasma-liquid interaction |
| 3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 稲垣 慶修, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 水と電子の光励起脱溶媒和によるヘリウム大気圧グロー放電の放電電流変化 |
| 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 稲垣 慶修, 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 プラズマと相互作用する液体における溶媒和電子の検出と反応性 |
| 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 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 プラズマ・液体相互作用における液相側現象理解のための実験技術の開発 |
| 3. 学会等名 第38回プラズマプロセッシング研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 稲垣 慶修， 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 プラズマ液相界面における水和電子の光励起脱溶媒和による検出 |
| 3. 学会等名 第38回プラズマプロセッシング研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮崎 俊明， 白井 直機， 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 大気圧気液界面プラズマによって誘起される気相ラジカルと液中化学ルミネッセンスの相関 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会北海道地区研究連絡会第24回研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊藤 健 ， 作花 哲夫， 佐々木 浩一 |
| 2. 発表標題 低ガス圧ヘリウムプラズマに入射した水ジェットにおける無電流電解反応の可能性 |
| 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

〔産業財産権〕

〔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 | 白井 直機 (Shirai Naoki) (80552281) | 北海道大学・工学研究院・准教授 (10101) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|