

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K04998

研究課題名(和文) バイオプラズマ研究を加速する空気と水の境界面反応のモデリング

研究課題名(英文) Modelling on the air-water interface for advanced plasma-aided biology

研究代表者

村上 朝之 (MURAKAMI, TOMOYUKI)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：20323818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：バイオプラズマ研究を加速する空気と水の境界面反応のモデリングを行った。

1. 気液境界面におけるプラズマ放電ブレイクダウンはマイクロ秒スケールの現象であり、基底状態水素原子・水素分子・酸素原子・酸素分子・ヒドロキシラジカル分子・振動/回転励起水分子・正負クラスターイオンが豊富に生成される。励起状態粒子および荷電粒子は極めて短寿命であり放電終了後速やかに消失する。
2. 上述のブレイクダウンに続く準定常状態はミリ秒程度以上維持され、長寿命活性酸素種である過酸化水素分子が最も高密度に生成される。このことは、極めて短時間の放電(水媒体へのエネルギー投入)によっても高密度の活性種が生成可能であることを示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気と水、気相と液相、ミクロな化学反応とマクロな流体挙動を包括するハイブリットモデリングを確立し、トップクラスの実験研究者とのベンチマークを経て、極めて複雑な境界現象プロセス理解の深化に貢献した。本研究が貢献する分野の裾野は広く、医療・生物分野：プラズマ医療・医療機器殺菌・難分解性医療ガス処理、農業・食品分野：農作物生育促進・種子滅菌・運搬時食品鮮度維持、環境分野：水資源浄化・廃棄物処理・温暖化ガス処理、エネルギー分野：エネルギーキャリア製造・触媒支援などに大きなインパクトを与えることができ、広く科学研究費成果を実社会・産業界へ還元することができる。

研究成果の概要(英文)：Understanding the water vapor plasma is crucial for their potential applications of plasmas in biology. This study examines numerically the discharge dynamics and reacting chemistry of the gas-phase H₂O plasmas. The temporal- and spatial-evolutions of species concentrations activated by a pulsed dc voltage application in a thin water vapor layer of three hundred μm are described. In an initial lower-density plasma (sub-microseconds time-scale), a broad range of neutral and ionic species are produced. In particular, ground-state atomic oxygen O(3P), atomic hydrogen H(1s), ground-state molecular oxygen O₂(X), molecular hydrogen H₂(X), hydroxyl radical OH(X) and cluster ions, for example H₁₅₀₇⁺ and H₁₅₀₇⁻. After the pulse termination, all excited and charged species immediately disappear, whereas the densities of hydrogen peroxide H₂O₂, hydroperoxyl HO₂, ozone O₃ and molecular singlet delta oxygen metastable O₂(a¹D) are even enhanced for sub-second time-scale.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ化学 モデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、世界的にプラズマと生体分子/組織との相互作用が注目され、殺菌・滅菌・DNA治療・癌治療などに画期的な効果がみられている(例えば、新学術領域プラズマ医療(H24-28))。ここでは、「大気圧プラズマデバイスで生成した高活性粒子・荷電粒子が、空气中に噴射され、空気と水の境界面を乗り越え、液体内に浸透する。この結果として生体組織の反応が起きる。」という理解がなされている。ところが、未だ多くのケースで「どのプラズマ粒子種が、どのように液中のターゲットに届くのか」が特定できていない。これは、空气中で生成されるプラズマと本質的に水に覆われている生体組織とを隔てる“空気と水の境界面の反応”というブラックボックスを抱えているからである。

2. 研究の目的

本研究は、プラズマの生物・医療応用研究を格段に発展させるため「モデリングにより、空気と水の境界面の物理化学反応を解明する」ことを目的とする。湿潤気相におけるプラズマ粒子種を同定し、気液境界面における微視的な荷電粒子クラスタリング挙動、および巨視的な浸透・拡散反応を明らかにする。国際共同体制により実験研究と本モデルを統合し、理論・実験・計算の面から「どのプラズマ粒子が新たな粒子を生成しつつ液相に浸透・拡散していくか」を明らかにする。

3. 研究の方法

プラズマの生物・医療応用研究を格段に発展させるため数理モデリング・数値シミュレーション研究を行った。特に気相-液相境界面におけるプラズマ粒子のイオンクラスタリング現象に注目し、イオンクラスタ数密度・境界面への堆積挙動・気相から液相種への変化を明らかにした。ここでは数値流体力学のモデリングを新たに開発し、これまでの実績であるプラズマ化学反応計算とのハイブリッド方式を確立した。また、本研究で得られた知見に基づく英国大学機関との国際共同研究体制を構築し、実験研究と本モデルを統合することで理論・実験・計算の面から検討を行った。その結果、原著学術論文5編、解説論文3編、国際会議招待講演6件、国際会議講演20件、国内会議講演10件の業績を得た。

4. 研究成果

(1) 液中プラズマ放電実験装置

図1(a)にシミュレーション対象とする水中プラズマ放電装置概略図を示す(Schaper, 2011)。ガラス容器(底面60mm×40mm)に対し液面高さは50mm程度である。棒状の陰極電極(タングステン製ロッド・外径0.5mm・先端部0.5mm程度を残して石英で包む)を液中に挿入し、プレート状の接地電極(チタン製)をガラス容器底面に設置する。電極ロッドの先端(Tip)を15mm程度深さまで液に挿入する。電極ロッドに負のパルス直流電圧を印加する(最大500V程度、パルス幅10ms程度)。図1(b)に電極ロッド先端部分の概念図を示す。従来の実験的研究より、放電時には先端部が極めて薄い水蒸気膜に覆われることが示されている(Schaper, 2011)。すなわち気体・液体の相遷移挙動としては比較的安定な膜沸騰状態にあると考えられる。本研究においては、この知見を拠り所として「電極-水蒸気-水」にわたるシミュレーションを行う。図1(c)は、高速度カメラにより撮影した放電構造のスナップショットを示す。同図からわかるように、放電は局所的に生成される可能性がある。

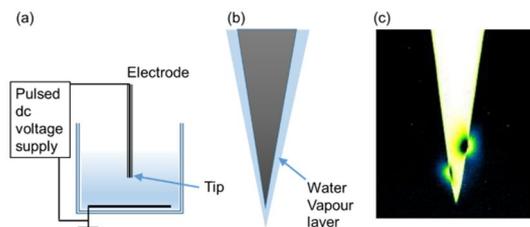


図1 (a)プラズマ放電装置概略図、(b)電極先端部概略図、(c)放電構造のスナップショット

(2) モデリング

図2に電極表面から水蒸気膜(気相)を経て周囲の水(液相)へと至る一次元空間モデルの概略図を示す。負電位にバイアスされた電極ロッド表面(0mm)と水を隔てた仮想的な接地電極(1.3mm)間を電氣的境界条件とする。また電極ロッド表面と水表面の間の水蒸気膜(幅300μm)をプラズマ放電領域とする。流れを考慮しない液相の水および気相の水(水蒸気)は不純物を含まず圧力一定(0.1MPa)・温度一定(100℃)と仮定する。また両者の相変化を考慮しない。定式化には流体近似を用い、電子系ドリフト拡散モデルと詳細化学反応モデルを組み合わせる。電極間電位差および水蒸気プラズマ表面反応を境界条件として、下記の電子系の質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、および重粒子系質量保存式をポアソン方程式と連立させて解く(状態方程式が成り立つと仮定)(Murakami, 2013a, 2013b, 2014)。

表 1 にシミュレーションにおいて考慮に入れる粒子種を示す。H₂O 分子（基底状態）に対し、1 つの電子励起状態 (*)、2 つの振動励起状態 (vib)、3 つの回転励起状態 (rot) を考慮する。水素原子 H(1s) に対し 3 つの電子励起状態を、水素分子 H₂(X) に対し各 3 つの振動・回転励起状態を考慮する。酸素原子 O(3P) には 6 つの電子励起状態、酸素分子 O₂(X) には 2 つの電子励起状態および各 4 つの振動・回転励起状態を考慮する。OH(X) 分子に対しては 1 つの電子励起状態を考慮する。また、オゾン O₃ 分子、H₂O₂ 分子および H₂O₂⁺ 分子を考慮に入れる。また、クラスターイオンを含む多くの荷電粒子を考慮に入れる。これらについて 800 化学反応を連立させた常微分方程式を解くことにより、粒子密度を得る (Murakami, 2013a, 2013b, 2014)。

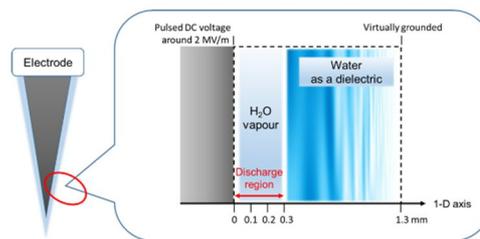


図 2 計算領域

表 1 シミュレーションにおいて考慮に入れる粒子種

Species	Ground state	Excited state
Water	H ₂ O(X)	H ₂ O*, H ₂ Ovib(0,1,0), H ₂ Ovib(1,0,1), H ₂ Orot(1-3)
Hydrogen	H(1s), H ₂ (X)	H(2p), H(3s), H(4s), H ₂ vib(1-3), H ₂ rot(1-3)
Oxygen	O(3P), O ₂ (X), O ₃	O(3p 3P), O(3p 5P), O(3s 3S0), O(3s 5S0), O(1D), O(1S), O ₂ (a1D), O ₂ (b1S), O ₂ vib(1-4), O ₂ rot(1-4)
Hydro-Oxygen	OH(X), HO ₂ , H ₂ O ₂	OH(A)
	Primaries	Clusters
Positive ions	H ₂ O ⁺ , H ⁺ , H ₂ ⁺ , H ₃ ⁺ , O ⁺ , O ₂ ⁺ , OH ⁺	H ₃ O ⁺ , H ₂ O ₃ ⁺ , H ₄ O ₂ ⁺ , H ₅ O ₂ ⁺ , H ₆ O ₃ ⁺ , H ₇ O ₃ ⁺ , H ₉ O ₄ ⁺ , H ₁₁ O ₅ ⁺ , H ₁₃ O ₆ ⁺ , H ₁₅ O ₇ ⁺
Negative ions	H ⁻ , O ⁻ , O ₂ ⁻ , OH ⁻	H ₂ O ₂ ⁻ , H ₂ O ₃ ⁻ , H ₃ O ₂ ⁻ , H ₄ O ₄ ⁻ , H ₅ O ₃ ⁻ , H ₆ O ₅ ⁻ , H ₇ O ₄ ⁻ , H ₉ O ₅ ⁻ , H ₁₁ O ₆ ⁻ , H ₁₃ O ₇ ⁻ , H ₁₅ O ₈ ⁻
Electrons	Electrons	

(3) 結果と考察

A. 荷電粒子の時空間分布

図 3 に計算開始より 5 μ s 後に得られた電子エネルギー、電子密度、負イオンクラスター密度、正イオンクラスター密度の時間（縦軸範囲 5 μ s）空間（横軸範囲 0.3mm）分布を示す。

電子エネルギーは電圧印加開始 (t=0s) より急峻に 3.5eV 程度まで上昇する。約 2 μ s 経過後、電子エネルギーは電極側(0mm)で 4eV 程度、水側(0.3mm)で 2.5eV 程度の分布を持つ。このとき電子密度が急峻に上昇し、放電開始(ブレイクダウン)に至る。これらのことから、水側での電離に費やされるエネルギー損失が一時的に大きくなったことがわかる。急激に上昇した電子密度に起因して、重粒子への電子衝突反応が頻繁になる。このため、電離が促進され正イオンが生成される。初期には H₂O⁺、OH⁺、H⁺等のプライマリ(1次)イオンが生成されるものの速やかに H⁺(あるいは H₃O⁺)、OH⁺イオンをコアとして H₂O 分子が凝集する。これらは、クラスターイオンと呼ばれ、価数は 1 価に留まるものの質量が大きく移動度は比較的小さい特徴をもつ。一方、酸素を含む分子は電子親和力強く、電子付着が生じ、負イオンの状態をとりやすい。本計算においても特に OH⁻をコアとして H₂O が 6 分子程度以上凝集した負クラスターイオンが多く生成された。また、これらの正クラスターイオンは負にバイアスされた電極側に、負クラスターイオンは正に帯電した水側に引き寄せられる傾向が示された。

荷電粒子密度の増減は急峻であり、電子および正負イオンの密度が著しく状況は、数 μ s 間のみ維持される。このように放電が途切れる現象は、直流電圧を印加した場合の誘電体バリア放電によくみられる。本計算で媒質として対象とした不純物を含まない H₂O は、極めて電気伝導度が低い (pH7 仮定に戻った理論限界値)。一方、その誘電率は 80 を仮定している。すなわち、直流電圧の印加とともに電気を通さない誘電体表面に電荷が蓄積し、放電を収縮させたと考えられる。

B. 中性粒子の挙動

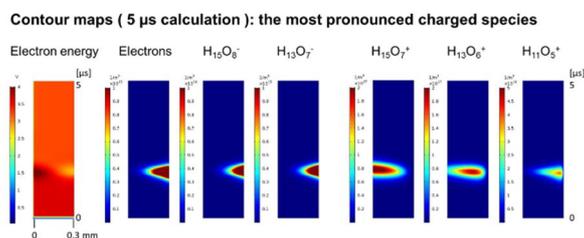


図 3 電子エネルギー、電子密度、正負イオンクラスター密度の時空間分布

図4に放電電極に印加した負電圧、放電領域中心において得られた電子エネルギー、電子および中性粒子密度の経時変化を示す。同図より水素分子 $H_2(X)$ 、酸素分子 $O_2(X)$ 、ヒドロキシラジカル $OH(X)$ の密度は電子エネルギーとともに極めて速い段階 ($t=$ 数 ns 程度) より上昇し始めることがわかる。これらのプライマリ粒子密度はブレイクダウン時 ($t=1\mu s$ 程度) にはほぼ定常に達しており、それらの密度は高く 10^{18} から $10^{20} m^{-3}$ 程度である。一方より複雑な構造を持つセカンドリ (2次) 粒子、 H_2O_2 、 H_2O_2 、 $O_2(a1D)$ 、 O_3 はブレイクダウン現象とともにその密度が上昇する。特に H_2O_2 、 H_2O_2 の密度は高く、これらの上昇に伴い OH 密度は低下する ($0.1ms$ 以降は H_2O_2 も減少に転じる)。また、オゾン O_3 、一重項酸素 $O_2(a1D)$ 密度は低い値にとどまることがわかる。

これらの中性粒子密度は、数 μs 間継続する放電の終了後、さらには $1ms$ の電圧印加終了後も比較的高く維持され続ける。この結果は、極めて短時間の放電であっても、これが化学反応の引き金となり、プライマリ粒子である $H_2(X)$ 、 $O_2(X)$ 分子のみならず、活性酸素種である H_2O_2 を大量に生成可能であることを示す。

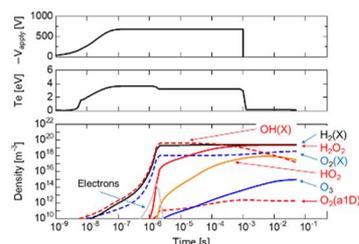


図4 電子エネルギー、電子密度、中性粒子密度の経時変化

C. ブレイクダウン時および準定常時の粒子密度分布

図5にブレイクダウン時 ($t=2\mu s$) の、図6に準定常状態 ($t=0.1s$) の粒子密度分布を示す。図5より、基底状態にある水素原子 $H(1s)$ 、水素分子 $H_2(X)$ 、酸素原子 $O(3P)$ 、酸素分子 $O_2(X)$ 、 $OH(X)$ ラジカルとともに、水分子の振動励起状態および回転励起状態 H_2O_{vib} 、 rot および正負クラスターイオン密度が高いことがわかる。

一方、図6からは、放電終了後長時間にわたり、 $H_2(X)$ 、 $O(3P)$ 、 $O_2(X)$ 、 $OH(X)$ に加えオゾン O_3 、超酸化水素 H_2O_2 、過酸化水素 H_2O_2 が多く生成されることがわかる。また、励起種およびイオン種の密度が極めて低い状態にあることがわかる。

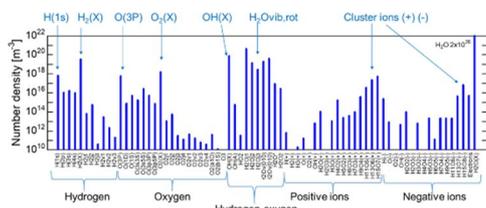


図5 ブレイクダウン時 ($t=2\mu s$) における粒子密度の分布

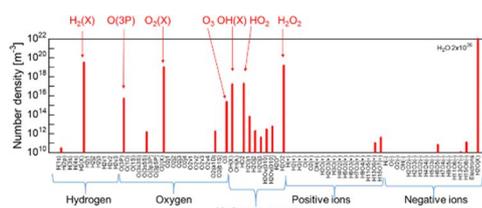


図6 準定常状態 ($t=0.1s$) における粒子密度の分布

(4) まとめ

本研究では、気相 (水蒸気) 液相 (水) の境界領域における極めて詳細なプラズマ物理化学数値シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- 放電ブレイクダウンは μs スケールの現象であり、ここでは基底状態にある水素原子 $H(1s)$ 、水素分子 $H_2(X)$ 、酸素原子 $O(3P)$ 、酸素分子 $O_2(X)$ 、およびヒドロキシルラジカル分子 $OH(X)$ 、振動・回転励起水分子 H_2O_{vib} 、 H_2O_{rot} 、正負クラスターイオンが豊富に生成される。本モデルのように電気伝導性の低い水を媒質とした場合、これらのうち励起状態粒子および荷電粒子は極めて短寿命であり、放電終了後速やかに消失する。
- 上述のブレイクダウン現象に続く準定常状態は、ミリ秒程度以上維持される現象である。ここでは長寿命活性酸素種である過酸化水素分子 H_2O_2 が最も高密度に生成される。このことは、極めて短時間の放電 (水媒体へのエネルギー投入) によっても高密度の活性種が生成可能であることを示す。

引用文献

- Schaper L. et al. 2011 "Vapour layer formation by electrical discharges through electrically conducting liquids modelling and experiment" Plasma Sources Sci. Technol. (20) 034003
- Murakami, T. et al. 2013b "Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure helium-oxygen plasmas with humid-air impurities" Plasma Sources Sci. Technol. (22) 015003
- 2013b "Interacting kinetics of neutral and ionic species in an atmospheric-pressure helium-oxygen plasma with humid air impurities" Plasma Sources Sci. Technol. (22) 045010
- 2014 "Afterglow chemistry of atmospheric-pressure helium-oxygen plasmas with humid air impurity" Plasma Sources Sci. Technol. (23) 025005

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Murakami	4. 巻 9
2. 論文標題 Numerical modelling of the effects of cold atmospheric plasma on mitochondrial redox homeostasis and energy metabolism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-53219-w	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 酒井道、村上朝之	4. 巻 43
2. 論文標題 放電プラズマ種の間反応ネットワーク解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 203-208
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 村上朝之、田中康規、田中 学、渡辺隆行	4. 巻 95
2. 論文標題 マテリアル工学およびエネルギー・環境工学を進展させる熱プラズマの生成と計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 11-12
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iuchi Katsuya, Morisada Yukina, Yoshino Yuri, Himuro Takahiro, Saito Yoji, Murakami Tomoyuki, Hisatomi Hisashi	4. 巻 654
2. 論文標題 Cold atmospheric-pressure nitrogen plasma induces the production of reactive nitrogen species and cell death by increasing intracellular calcium in HEK293T cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Archives of Biochemistry and Biophysics	6. 最初と最後の頁 136 ~ 145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.abb.2018.07.015	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 Akiyama T., Yoshimura S., Tomita K., Shirai N., Murakami T., Urabe K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Design of compact dispersion interferometer with a high efficiency nonlinear crystal and a low power CO2 laser	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C12028 ~ C12028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/C12028	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. Urabe, N. Shirai, K. Tomita, T. Akiyama and T. Murakami	4. 巻 25
2. 論文標題 Diagnostics of atmospheric-pressure pulsed-dc discharge with metal and liquid anodes cross-validated by multiple laser-aided methods	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 45004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/4/045004	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. Sakudo, Y. Toyokawa, Y. Imanishi and T. Murakami	4. 巻 74
2. 論文標題 Crucial roles of reactive chemical species in modification of respiratory syncytial virus by nitrogen gas plasma	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal: Materials Science & Engineering C	6. 最初と最後の頁 131-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2017.02.007	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 村上朝之	4. 巻 92
2. 論文標題 非平衡大気圧プラズマのシミュレーションの現状と展望/プラズマと気体の相互作用	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 688-692
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計30件(うち招待講演 5件/うち国際学会 25件)

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling the effects of plasma on intracellular metabolism
3. 学会等名 72nd Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling of complex chemical kinetics in atmospheric pressure plasmas
3. 学会等名 XXXIV ICPIG & ICRP-10 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modeling the influence of cold atmospheric plasmas on intracellular metabolism
3. 学会等名 10th International Workshop on Microplasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Okamoto, T. Murakami
2. 発表標題 Reactive nitrogen/oxygen species in cold atmospheric nitrogen-oxygen plasmas
3. 学会等名 10th International Workshop on Microplasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sakai, T. Murakami
2. 発表標題 Modeling of the plasma sterilization on inflammation
3. 学会等名 10th International Workshop on Microplasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling on intercellular metabolism network perturbed by cold atmospheric plasmas
3. 学会等名 JSPF2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Inoue, T. Murakami
2. 発表標題 Extraction of primary network in humid-air plasma reaction
3. 学会等名 JSPF2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Arai, Y. Okamoto, S. Kawaguchi, T. Murakami
2. 発表標題 Reactive fluid simulation of a cold atmospheric plasma jet
3. 学会等名 JSPF2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Iuchi, Y. Morisada, Y. Yoshino, T. Himuro, Y. Saito, T. Murakami and H. Hisatomi
2. 発表標題 Cold Atmospheric-pressure Nitrogen Plasma Induces Apoptotic Cell Death in HEK293T Cells
3. 学会等名 9th International Conference on Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Graham, L. Asimakoulas, T. Murakami and T. Field
2. 発表標題 Discharges in liquids: Experiment and Simulations of plasma kinetics
3. 学会等名 71st Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 O. Sakai, Y. Mizui, T. Kojima, M. Koshihara, A. Iwai, S. Miyagi and T. Murakami
2. 発表標題 Macroscopic visualization for statistics and microscopic identification of species roles in web-like plasma-enhanced chemical networks
3. 学会等名 71th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling biological systems perturbed by plasmas
3. 学会等名 71th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. Asimakoulas, Tom Field, T. Murakami, W. G. Graham
2. 発表標題 Discharges in liquids: Experiment and Simulations of plasma kinetics
3. 学会等名 ESCAMPIG XXIV (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T Murakami
2. 発表標題 Applying network analysis to plasma data; the analysis of relations through mathematical graphs
3. 学会等名 1st International Conference on Data-Driven Plasma Sciences (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T Murakami
2. 発表標題 Modelling Biological Systems for Plasma Medicine
3. 学会等名 7th International Conference on Plasma Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. Asimakoulas, T. Murakami, Tom Field, W. G. Graham
2. 発表標題 Gas phase discharges inside electrolyte solutions: Plasma imaging, kinetics and simulations
3. 学会等名 45th IOP Plasma Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling of plasma in a water vapour layer
3. 学会等名 10th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Kinetic and graph-theoretic approaches to model plasmas in liquids
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 T. Murakami
2. 発表標題 Kinetic and graph-theoretic approaches to model the plasma-liquid interface
3. 学会等名 9th International Workshop on Microplasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modelling on plasma production and chemistry in a water vapour layer
3. 学会等名 44th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上朝之
2. 発表標題 プラズマ液体境界のモデリング
3. 学会等名 PLASMA2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Modeling of atmospheric pressure plasmas reacting with air and water
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Murakami
2. 発表標題 Atmospheric-pressure plasma chemistry, Fundamental and application
3. 学会等名 QUB Workshop on Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 W.G. Graham, L. Hüwel, C. Baumgart, A. Young, T. J. Morgan and T. Murakami
2. 発表標題 Systemic characterisation of pulsed laser breakdown in water and its aftermath
3. 学会等名 International Conference on Plasmas with Liquids (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Murakami
2 . 発表標題 Reacting chemistry at the air-water interface
3 . 学会等名 69th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. L. Karim, B. Evans, L. Asimakoulas, K. R. Stalder, T.A. Field and W. G. Graham and T. Murakami
2 . 発表標題 Simulation of discharge production in a water vapour layer on an electrode
3 . 学会等名 69th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 K. Nobuto, Y. Mizui, S. Miyagi, O. Sakai and T. Murakami
2 . 発表標題 Network structural analysis using directed graph for chemical reaction analysis in weakly-ionized plasmas
3 . 学会等名 69th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 T. Murakami, T. J. Morgan, L. Hül;wel and W. G. Graham
2 . 発表標題 Modelling of Plasma Interaction with Gas-Liquid Interface
3 . 学会等名 6th International Conference on Plasma Medicine (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 W. G. Graham and T. Murakami
2. 発表標題 8.Surface, Liquid and Vapour Phenomena in Electrical Discharge Formation in Saline Solutions
3. 学会等名 43rd IOP Plasma Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. J. Morgan, L. Hül;wel, W. G. Graham and T. Murakami
2. 発表標題 Laser Plasma Effects in Water
3. 学会等名 43rd IOP Plasma Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>成蹊大学理工学部システムデザイン学科プラズマエネルギーデザイン研究室 http://www.sd.seikei.ac.jp/lab/pedl/</p>
--

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