

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04174

研究課題名（和文）光波マイクロホンCTスキャンによるプラズマジェット圧力波計測

研究課題名（英文）Optical wave microphone measurement of pressure waves emitted by plasma jet

研究代表者

光木 文秋（Mitsugi, Fumiaki）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：00398257

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：プラズマジェットから放出される圧力波を光波マイクロホンを用いて計測することに成功した。また、その圧力波の発生メカニズムについて明らかにした。ヨウ素デンブンをを用いた試薬により、プラズマジェットにより発生した活性酸素種を可視化した。溶液中に見られたプラズマ誘起流や表面における活性酸素種の分布は、圧力波の影響を受けていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療応用が期待されているプラズマジェットにおいて、活性酸素種の分布やブレイクダウン時に発生する圧力波の影響を把握することは非常に重要である。光波マイクロホン計測によりプラズマジェットから圧力波が放出されていること、また生成メカニズムがわかった。ヨウ素デンブンをを用いて活性酸素種の可視化を行ったときに観測されるプラズマ誘起流や試薬溶液表面での活性酸素種分布には、圧力波の存在が大きく影響していることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Measurement of the pressure waves emitted by plasma jet was successfully done via an optical wave microphone technique. The generation mechanism of the pressure waves was revealed using the optical wave microphone and burst mode usage of applying voltage. The visualization of the reactive oxygen species emitted by plasma jet was done with potassium iodide solution. Plasma induced flow and the distribution of the reactive oxygen species observed on the surface of the solution must be influenced by the pressure waves observed by the optical wave microphone.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：光波マイクロホン プラズマジェット 圧力波 活性酸素種 ヨウ素デンブンを反応

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、大気圧プラズマの生体・バイオ応用が注目されている。中でも、プラズマジェットは組織や微生物などのターゲットに熱的影響を与えず、プラズマ処理が可能な手法の一つである。これまで、応用研究では、組織へのダメージやバクテリアの不活性化について調査され、その効果が認められている。また、基礎研究では、活性酸素種などのラジカルの振る舞いの化学的可視化、プラズマビュレット観測、ジェット流の光学的可視化が行われている。特に、液体へのプラズマジェット照射において、ラジカルの特異的な振る舞いが観測され、この原因として、風圧や電界の影響が挙げられているが、申請者は、ジェット中にエネルギー密度の大きな指向性の強い圧力波 (Blast wave) が存在することを光波マイクロホン計測によって既に確認しており、圧力波が基礎研究面でも、また、実際の応用面においても重要な役割を果たしている可能性があると考えている。つまり、電界、イオン、ラジカル、風圧などといった従来よりターゲットへのストレス因子として考えられているものに加え、新たに圧力波の影響を考慮し、それらの相関関係について調べていく必要がある。特に、圧力波がターゲット表面における酸素ラジカル分布に影響を及ぼす場合、プラズマジェット照射領域以外に有効なラジカルが存在することも考えられ、医療分野へ応用する前に解決しておくべき課題である。

2. 研究の目的

申請者が開発を進めている光波マイクロホンは、気体(もしくは液体)の密度変化をフラウンホーファ回折による光学的フーリエ変換を用いて検出する手法であり、これまで、沿面放電に代表される比較的エネルギーの小さな個々のマイクロ放電から放出される衝撃波および超音波の計測や、プラズマジェット内の圧力波の強度分布計測に成功している。この結果を受けて、本研究では、この圧力波がターゲット表面や液中の活性酸素ラジカルの振る舞いにどのように影響を及ぼすのか、また、圧力波とプラズマビュレットとの時間的な関係性について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

プラズマジェットの進行方向に垂直に多チャンネル光波マイクロホンシステムのプローブレーザーを並べ CT スキャンを併用することで、プラズマジェット中の圧力波の減衰の様子をリアルタイムでモニタしたり、分布を3次元で可視化することが可能となる。これにより、プラズマジェットからの圧力波の全体像や進展速度を把握できる。

次に、光波マイクロホンと高速度カメラ撮影の同期計測システムを構築し、圧力波とプラズマビュレットの振る舞いに関する相互作用について検討する。特に、プラズマビュレットのターゲット液面着地時の高速度カメラ観測と液中での圧力波の振る舞いについて、次のような工夫を施し検討する。

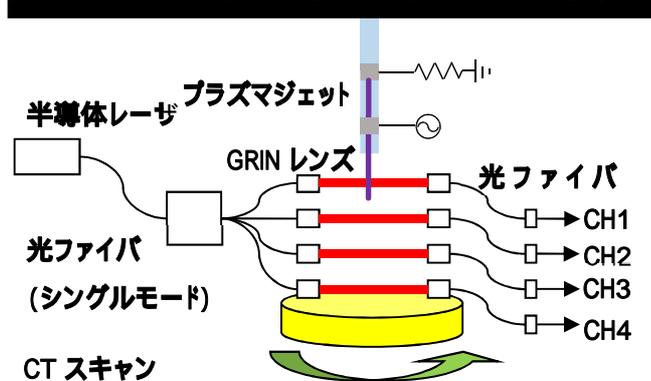
- ・時間分解した計測により、電圧

電流特性、光波マイクロホン、高速度カメラ、液体中の動きを外トリガより全て同期して撮影し、それらの相関関係に関して明らかにする。

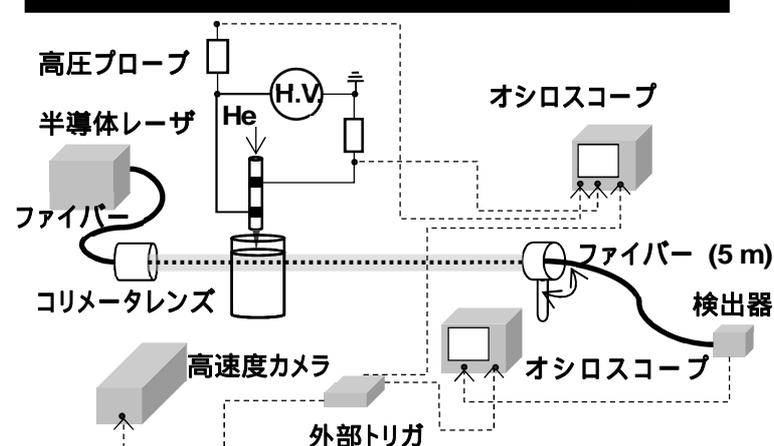
- ・液中あるいは寒天培地における酸素ラジカルの可視化には、ヨウ素デンプン反応による呈色反応を用いる。

- ・液中にマーカー粒子を分散させ、その動きを撮影後、PIVシステムにより分析を行い、ヨウ素

多チャンネル光波マイクロホン CT スキャン



光波マイクロホン 高速度カメラ撮影同期計



デンプン反応による呈色プロセスと比較することで液中での圧力波による影響を可視化する。

4. 研究成果

ここに、代表的な研究成果を報告する。光波マイクロホンをを用いてプラズマジェット面内における圧力波分布計測を行った結果を図1に示す。印加電圧は連続的な正弦波状の高電圧となっている。目視におけるプラズマジェットの直径は約1 mm程度であり、その範囲において、圧力波も観測され、中心において強度は最大値を示した。また、均一で連続的な圧力波が観測されているように見て取れるが、その発生メカニズムを調べるために、印加電圧をバーストモードとし、電圧印加の休止時間を変化させて光波マイクロホンによる圧力波計測を行った。

図2にその結果の一例を示す。高電圧(黒)が印加されると、電極間でブレークダウンが発生し(青)、それに伴い生じた衝撃波(Blast wave)が検出位置において音速による時間遅れとともに検出された(赤)。高速度カメラによる同期撮影の結果を見比べると、ガラス管内でブレークダウン時の発光が見られた後、プラズマがジェット状で管の外に飛び出してくる時間は、1周期においてほんの一瞬であった。それに対し、圧力波は終始観測されているため、ターゲットには常に影響が及んでいることとなる。印加電圧の休止時間が十分長い場合は、その様子が顕著に確認できたが、休止時間を短くするにつれ、先に走った圧力波のテールに次の印加電圧によるブレークダウンで生じた圧力波のヘッドが追い付く形でオーバーラップが見られた。圧力波の周波数特性をFFTにより調べたところ、印加電圧の周波数には依存しないことから、圧力波の生成は、印加電界による加速によるものではなく、局所加熱によるものだと考えられる。また、その周波数特性は印加電圧の周波数には関係なく、ブレークダウンで消費されたエネルギーに関係していると思われる。よって、圧力波のメイン周波数と同じ周波数の正弦波高電圧を印加し、その休止期間を短くしていくと、各々の圧力波が比較的きれいに重なり合うことで、連続的な正弦波高電圧印加時に、連続的で均一な圧力波が観測されるということが明らかになった。よって、観測された波形は一見通常の音波のように見えるが、実際は、衝撃音波あるいは衝撃爆風と呼ぶ方が適切である。つまり、通常の音波が気体の振動のみを伝達するのに対し、プラズマジェットからの圧力波は、気体分子の移動を伴うことから、ターゲットに運動エネルギーを与える可能性がある。

次に、ヨウ素デンプン反応を利用した酸素ラジカルの可視化を行った。ヘリウムプラズマジェットは周囲の空気存在により活性酸素種を生成する。プラズマジェットをヨウ素デンプン溶液に照射した際、溶液表面に到達した活性酸素種はヨウ素デンプン反応に使用され、その結果、青紫色に変色する。当初は、これにより、ターゲット表面における活性酸素種の分布を可視化できると考えていた。しかし、図3に示すように、プラズマジェット照射後、青紫色に変色した溶液は下方への強い流れとして観測された。これをプラズマ誘起流と呼ぶこととするが、プラズマ誘起流は、プラズマジェット照射後すぐに現れ、約30秒間観測された後に消失し、プラズマ直下には着色されていない円状のホールが観測された。プラズマジェットを切るとそのホールは消失したが、再度プラズマジェットを照射するとすぐに

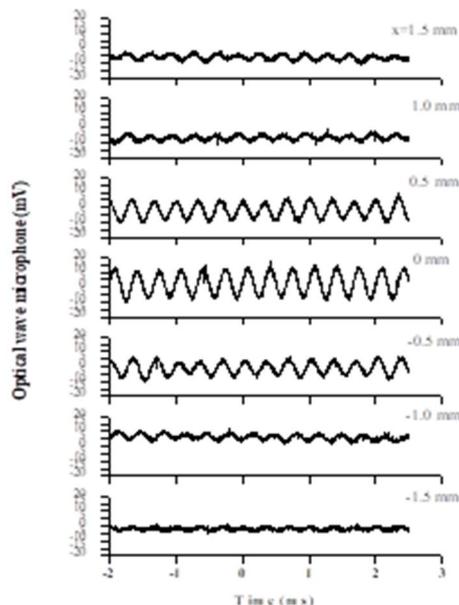


図1 圧力波分布計測

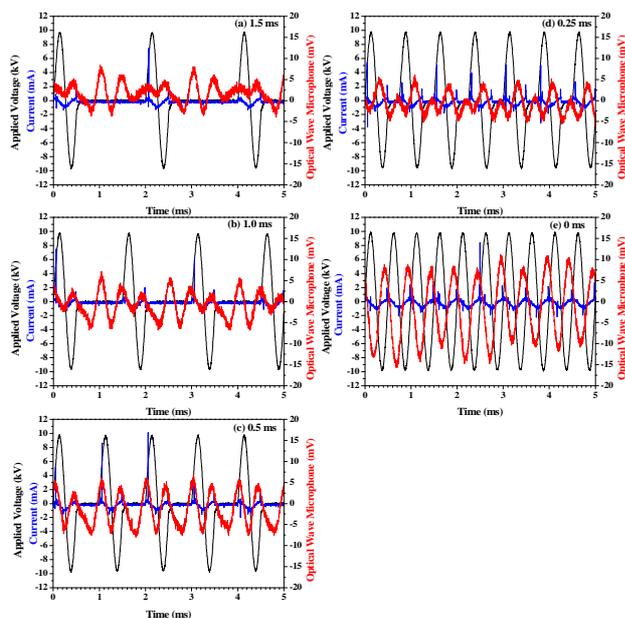


図2 バースト正弦波電圧印加時の光波マイクロホン計測
(黒:印加電圧、青:放電電流、赤:光波マイクロホン)

現れた。この現象には、さきほど述べた圧力波が影響していると考えられる。圧力波の存在は、プラズマジェットにより生成された活性酸素種のターゲット表面の分布に大きく影響を及ぼすだけでなく、ターゲットそのものへ直接作用することも考えられることから、今後の基礎計測や応用実験においても、引き続き着目していくべき重要なパラメータであると言える。

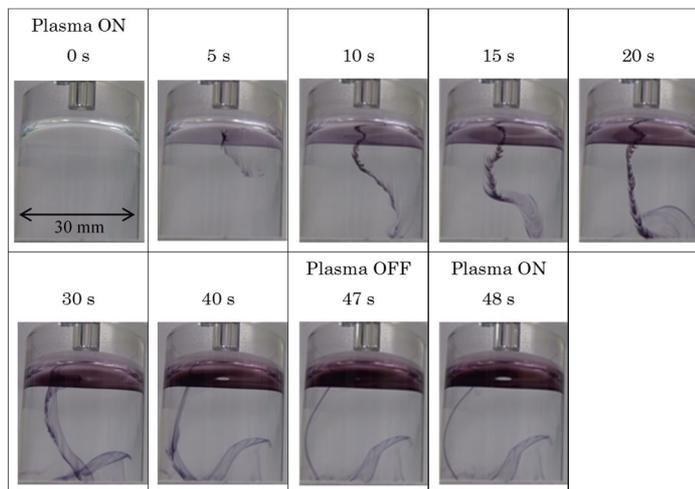


図 3 ヨウ素デンプン溶液による活性酸素種の可視化

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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mitsugi Fumiaki	4. 巻 47
2. 論文標題 Optical Wave Microphone Measurements for Understanding the Mechanism of Acoustic Emission From Atmospheric Plasma Jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 4781 ~ 4786
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2018.2890113	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 Kawasaki Toshiyuki、Mitsugi Fumiaki、Koga Kazunori、Shiratani Masaharu	4. 巻 125
2. 論文標題 Local supply of reactive oxygen species into a tissue model by atmospheric-pressure plasma-jet exposure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 213303 ~ 213303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5091740	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 Mitsugi Fumiaki、Kusumegi Shota、Kawasaki Toshiyuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Visualization of ROS Distribution Generated by Atmospheric Plasma Jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1057 ~ 1062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2018.2858807	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 Mitsugi Fumiaki、Kusumegi Shota、Nakamiya Toshiyuki、Sonoda Yoshito、Kawasaki Toshiyuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Distribution of Pressure Wave Generated by Atmospheric Plasma Jet Measured With Optical Wave Microphone	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1063 ~ 1070
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2018.2866261	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 Mitsugi Fumiaki, Kusumegi Shota, Kawasaki Toshiyuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Visualization of ROS Distribution Generated by Atmospheric Plasma Jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1057 ~ 1062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2018.2858807	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 Mitsugi Fumiaki, Kusumegi Shota, Nakamiya Toshiyuki, Sonoda Yoshito, Kawasaki Toshiyuki	4. 巻 47
2. 論文標題 Distribution of Pressure Wave Generated by Atmospheric Plasma Jet Measured With Optical Wave Microphone	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 1063 ~ 1070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2018.2866261	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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 T. Kawasaki, K. Nishida, M. Kawaguchi, Y. Hazama, G. Uchida, F. Mitsugi, N. Takeuchi, K. Takenaka, K. Koga, Y. Setsuhara, M. Shiratani
2. 発表標題 Effects of surrounding gas on plasma-induced liquid flow
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nishida, M. Kawaguchi, Y. Hazama, G. Uchida, F. Mitsugi, N. Takeuchi, K. Takenaka, K. Koga, Y. Setsuhara, M. Shiratani, T. Kawasaki
2. 発表標題 Effects of liquid properties on plasma-induced liquid flow
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kawasaki, K. Nishida, F. Mitsugi
2 . 発表標題 Relationship between plasma irradiation conditions and induced liquid flows
3 . 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nishida, S. Kusumegi, T. Kawasaki, F. Mitsugi
2 . 発表標題 Visualization of plasma induced liquid flow using KI-starch and PIV
3 . 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Fumiaki Mitsugi, and Toshiyuki Kawasaki
2 . 発表標題 Observation of reactive oxygen species emitted by plasma jets using KI-starch method
3 . 学会等名 16th High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Honda, R. Kikuchi, P. Victoria, T. Nakamiya, Y. Sonoda, F. Mitsugi
2 . 発表標題 Visualization of the sound pressure distribution of acoustic wave emitted by surface discharge using optical wave microphone CT scanning system
3 . 学会等名 11th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/12th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4 . 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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