様 式 C－１９、F－１９－１、Z－１９ （共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ８ 月　 ７ 日現在

機関番号：３２６４４
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2014～2016
課題番号：２６４２０３９５

研究課題名（和文）光波マイクロホンの高感度化と大気圧プラズマの放電音の空間分布計測への応用

研究課題名（英文）High sensitivity of the optical wave microphone and application to the spatial distribution measurement of the electric discharge sound of atmospheric pressure plasma

研究代表者
中宮　俊幸（Toshiyuki, Nakamiya）

東海大学・基盤工学部・教授

研究者番号：９０１５５８１２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,900,000円

研究成果の概要（和文）：　沿面放電やプラズマジェットの放電音の空間分布計測を行うために、ファイバー型光波マイクロホン装置を開発した。半導体レーザ光を、光ファイバーを用いて送り、コリメータレンズから放電音場に射出した。放電音により位相変調を受けて生じた極微弱回折光を含んだレーザ光を、それぞれのコリメータレンズで受けて検出器で電気信号に変換し、オシロスコープに記録した。ファイバー型光波マイクロホン装置は、従来型の光波マイクロホンより小型化でき、S/N比が向上して高感度化が実現できた。
　その結果、沿面放電で生じる圧力波は、超音波と衝撃波から構成されていること、プラズマジェットからも圧力波が生じていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：　The novel method, which we call the “Optical Wave Microphone (OWM)” technique, is based on a Fraunhofer diffraction effect between sound wave and laser beam. The light diffraction technique is an effective sensing method to detect the sound and is flexible for practical uses as it involves only a simple optical lens system. In this work, fibered OWM which is improved in signal-noise ratio of the conventional OWM, was developed. This new method could realize high accuracy measurement of slight density change of atmosphere. As a result, the fibered OWM could detect the pressure waves, which include acoustic waves and shock waves that were emitted from the surface-dielectric-barrier discharges. Pressure waves of Plasma Jets were also detectable by the fibered OWM.
　Moreover, fibered OWM can be applied for sound field visualization by computerized tomography (CT) because the ultra-small modulation by the sound field is integrated along the laser beam path.

研究分野：大気圧プラズマ計測

キーワード：光波マイクロホン　放電音　プラズマジェット　大気圧プラズマ　極微弱回折光　圧力波　衝撃波　大気圧密度勾配

1．研究開始当初の背景

光波マイクロホンは、フラウンホファ回折を応用した新しい音計測機器で、著者らが開発を進めてきている。プラズマ波動計測技術を拡張したもので、光が音波による位相変調を受けて生じる極微弱回折光を検出することで、音情報が得られる。振動膜を用いることなく、光から音情報を直接抽出することができる。光音相互作用については、古くから研究が行われており、光回折法やシュリーレン法等の技術が確立されている。しかし、光回折法は短波長の超音波を対象としており、長波長(可聴音)域では測定が困難とされている。シュリーレン法は、比較的強い音場の密度勾配が必要とされる。これに対し、光波マイクロホンは大気中において短波長の超音波から可聴音までの検出が可能で、シュリーレン法より高感度である。

これまで光波マイクロホンやコンデンサ・マイクロホン（周波数帯域：10Hz～100kHz）を用いて大気圧プラズマ中における放電音を計測し、周波数スペクトルや音響エネルギー強度を調べてきた。その結果、放電時には 20kHz 以上の超音波が発生することや、音響エネルギーを定量的に明らかにしてきた。さらに、Ｘ線ＣＴやＭＲＩなどで用いられているコンピュータ・トモグラフィーの技術を光波マイクロホンに適用し、２次元音場分布を計測し、雰囲気ガスや印加電圧、周波数によって、音場分布が異なる事を明らかにしてきた。しかし、現有の光学レールをベースにした光波マイクロホンの音検出感度は、コンデンサ・マイクロホンと比較すると感度が低くかった。

2．研究の目的

大気圧プラズマに関しては、その形態の分類やメカニズム解明等の学術的研究から環境浄化装置開発、プラズマアクチュエータ、表面改質やカーボンナノチューブなど新素材の作製等の応用研究に至るまで、幅広く研究が行われている。しかし、放電に伴う音については，雷鳴による放電点の推定や絶縁劣化に伴う部分放電などについて研究されているが、通常の放電装置における放電音の強度及び周波数成分の分析、さらにはその発生メカニズム解明等、学術的なことに関しては研究報告例が非常に少ない。光波マイクロホン技術を用いることで、放電場を乱すことなく、低い周波数（可聴音）から高い周波数（100kHz 以上）までの放電音を測定することが可能となる。

大気圧プラズマは、常温常圧で高活性な反応場を比較的簡便な装置で形成できるなど優れた特徴を有しており、従来の気相反応（オゾン合成、空気清浄など）から、さらに新素材（カーボンナノチューブなど）の作製まで幅広く応用研究が進められているが、気体分子が電離した状態で、どのようになっているのか、何があるのか、といった問題はほとんど分かっていないのが実情である。本テーマでは、光波マイクロホンの感度を向上させ、大気圧プラズマの生成に伴って発生する微弱な放電音の放電面に垂直な方向の音成分を取得し、印加電圧や放電電流と比較検討し、大気圧プラズマにおける音情報の有用性について、明らかにすることを目的としている。

3．研究の方法

（1）光ファイバーを用いた（ファイバー型）光波マイクロホンの製作

図１に示すように、半導体レーザ、ディバイダ、コリメータレンズ、シングルモードファイバ、検出器を用いて、4 チャンネルの光波マイクロホンを作製した。半導体レーザ光を、シングルモードの光ファイバーとディバイダを用いて分岐し、コリメータレンズから音場に射出した。CH1 のレーザ光の下 5㎜ の位置に設置した超音波素子(200kHz)の超音波により、位相変調を受けた極微弱回折光が生じる。その極微弱光を含んだレーザ光をコリメータレンズで受けて、検出器で電気信号に変換し、オシロスコープで記録した。各チャネルのレーザ光の間隔は 50㎜ とした。このような方法で、超音波音の空間分布（垂直方向）のリアルタイム計測が可能になった。

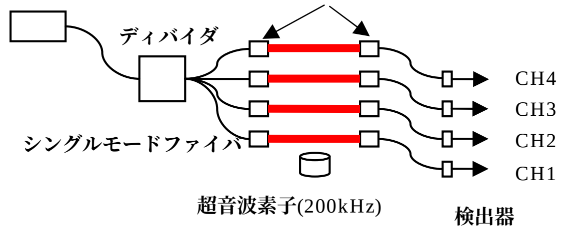

図１ ファイバー型光波マイクロホン

（2）表面誘電体バリア放電（沿面放電）の放電音測定

ファイバー型光波マイクロホンの CH1 を使用した、沿面放電の放電音の測定法を図２に示す。

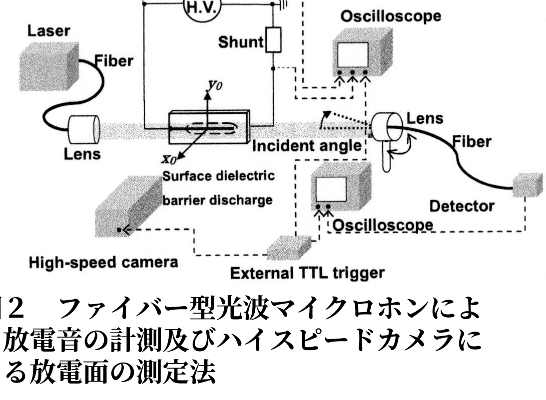

図２ ファイバー型光波マイクロホンによる放電音の計測及びハイスピードカメラによる放電面の測定法

放電素子とレーザ光の間隔は 10mm とした。同時に放電表面をハイスピードカメラ（100,000 frames/s）で観測することで、放電と放電音との関係を調べることができた。

（３）プラズマジェットの圧力波の測定

誘電体バリア放電により生じたプラズマジェットの圧力波の測定法を図３に示す。ガラス管（外径：8.0mm、内径：2.5mm）の表面に、幅 13mm の電極を 20mm 離して設けた。ガラス管には He ガスを流し、電極に高電圧を印加することでプラズマジェットを生成した。ジェットの様子をファイバー型光波マイクロホンやハイスピードカメラで観測した。

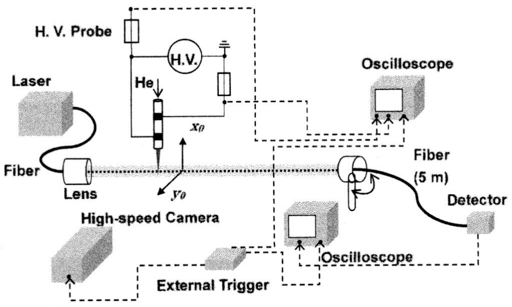

図３　ファイバー型光波マイクロホンによるプラズマジェットの圧力波の計測

４．研究成果

（１）ファイバー型光波マイクロホンによる超音波の計測

図１に示した光ファイバーを用いた光波マイクロホンにより測定した結果を図４に示す。

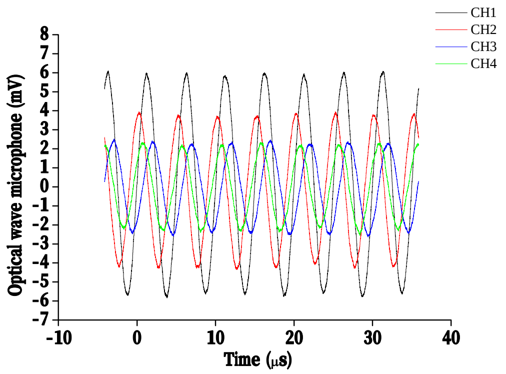

図４　ファイバー型光波マイクロホンによる超音波の音場（200kHz）測定例

音源に最も近い領域をレーザ光が通過する CH1 の信号が強く、ch2～ch4 と音源からレーザ光が離れるにしたがって、信号強度は低下している。

光ファイバーを用いた光波マイクロホンは、著者らがこれまで開発してきた光学レールを用いた光波マイクロホンと比較して、ノイズが減り、S/N 比を改善することができた。さらに、光波マイクロホンのサイズを大幅に小型化でき、携帯型も可能になった。

（２）沿面放電の放電音測定

図２に示すような構成で沿面放電素子に 5kHz の高電圧を印加し、電圧、電流及びファイバー型光波マイクロホンで沿面放電音を測定した結果を図５に示す。

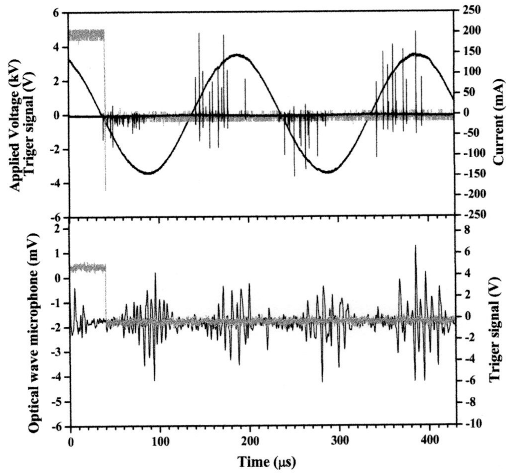

図５　放電素子の印加電圧、放電電流とファイバー型光波マイクロホンによる放電音の測定波形

素子表面電極に負電圧（20～140μs）が加わると、イオンや電子が放出され（マイクロ放電）、パルス状の放電電流が生じる。その後電極表面には、電子やイオンが帯電し、負電圧の残り半分では、マイクロ放電が停止する。表面電極に正電圧を印加した時にも、同様な現象が生じる。光波マイクロホンで計測した放電音を解析した結果、二種類の圧力波が検出することができた。一つは各々のマイクロ放電生成時に放出される衝撃波であり、もう一つは高圧電源周波数の倍波の成分からなる超音波である。前者は、マイクロ放電生成時の局所加熱による立ち上がりの急峻な単一圧力変動として電極近傍で観測される。ハイスピードカメラ画像および電流波形を同時に観測することにより、マイクロ放電と衝撃波の関係を調べることができた。後者は、生成イオンの印加電界による加速に起因する連続的な圧力波として、電極から比較的離れた位置でも観測することができた。

ファイバー型光波マイクロホンは、これまでの光波マイクロホンと比較して非常に小型化し、S/N 比も向上している。従って、これまで著者らが開発してきたコンピュータ・トモグラフィー技術とファイバー型光波マイクロホンを組み合わせることで、より高感度な２次元、３次元音場の可視化が可能になった。

（３）プラズマジェットの圧力波の測定

ガラス管に He ガスを７L/min の割合で流し、電極に 10 kV（2.7 kHz）の電圧を印加してプ

ラズマジェットを生成させた。その時の、電圧、電流波形及び圧力波の波形を図６に示す。詳細は論文投稿中のため省略する。

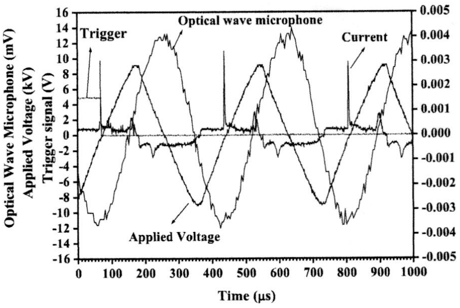

図６　プラズマジェット生成時の印加電圧、放電電流とファイバー型光波マイクロホンによる圧力波の測定波形

５．主な発表論文等
（研究代表者は下線）

〔雑誌論文〕（計　１３　件）

① Yoshito Sonoda, Toshiyuki Nakamiya, Fumiaki Mitsugi, Development of Optophone (Optical Wave Microphone) with No Diaphragm and Sonophone Using Optical Fiber Sensor, Proceedings of Ultrasonics,査読有, 2014, 82-82.

② Toshiyuki Nakamiya, Fumiaki Mitsugi, Yoshito Sonoda, Yoichiro Iwasaki, Tomoaki Ikegami, Ryoichi Tsuda, The new measurement methods of the acoustic fields of ultrasounds, Proceedings of Ultrasonics, 査読有,2014, 84-84.

③ Yoshito Sonoda, Toshiyuki Nakamiya, Direct Detection of Sound Wave by Light -Development of Optical Wave Microphone with No Diaphragm-, Proceedings of 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, 査読有,2014, 76-80.

④ Toshiyuki Nakamiya, Yoichiro Iwasaki, Ryoichi Tsuda, Yoshito Sonoda, Fumiaki Mitsugi, Tomoaki Ikegami, Visualization of sound field using Optical Wave Microphone coupled with Computerized Tomography, Proceedings of 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, 査読有,2014, 110-111.

⑤ Yoichiro Iwasaki, Masato Misumi, Toshiyuki Nakamiya, Robust Vehicle Detection under Various Environments to Realize Road Traffic Flow Surveillance Using an Infrared Thermal Camera, The Scientific World Journal, 査読有,2015, 11 pages.

⑥ Mitsugi Fumiaki, Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, Kawasaki Hitoharu, High-Speed Camera and Fibered Optical Wave Microphone Measurements on Surface-Dielectric-Barrier Discharges, 査読有, IEEE TRNSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 43, 2015, 2642 – 2648.

⑦ 園田　義人，中宮　俊幸，光木文秋，光波マイクロホンの開発とそのプラズマ計測への応用，プラズマ核融合学会誌，91巻，査読有,2015，641-647.

⑧ Yoichiro Iwasaki, Kodai Nagamura, Toshiyuki Nakamiya, Shojiro Iwamoto, Toshihiko Miyata, Toshimasa Kuramoto, Toshitaka Kitajima, Megumi Setoguchi, Proceedings of the 3rd Virtual Conference QUAESTI (QUAESTI-2015), 3巻，査読有，2015，253-256.

⑨ Shin-ichi Aoqui, Fumiaki Mitsugi, Yoshito Sonoda, Toshiyuki Nakamiya, Hiroharu Kawasaki, In situ Analysis of Discharge Sound and I-V Characteristic on Gliding Arc Discharge for Nano Particle Preparation, Physics Procedia, 85巻，査読有，2016，47-53.

⑩ Fumiaki Mitsugi, Shota Kusumegi, Toshiyuki Kawasaki, Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, Detection of Pressure Waves Emitted From Plasma Jets With Fibered Optical Wave Microphone in Gas and Liquid Phases, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 44巻，査読有，2016，3077 – 3082
DOI: 10.1109/TPS.2016.2585659.

⑪ Fumiaki Mitsugi, Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, Toshiyuki Kawasaki, Time-Resolved Observation of Plasma Jets Synchronized With Fibered Optical Wave Microphone Measurement, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 44巻，査読有，2016，2759 – 2765
DOI: 10.1109/TPS.2016.2580744

⑫ F.Mitsugi, S. Kusumegi, T. Kawasaki, Toshiyuki Nakamiya, Y.Sonoda, OPTICAL WAVE MICROPHONE MEASUREMENTS ON ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMAS,

Proceeding of HAKONE XV, 15巻, 査読有, 2016, 81-84.

⑬ Toshiyuki Nakamiya, F.Mitsugi, Yoichiro Iwasaki, T.Ikegami, Ryoichi Tsuda, Y. Sonoda, ACOUSTIC SPECTRA CHARACTERISTICS OF HGH PRESSURE PLASMA USING OPTICAL WAVE MICROPHONE, Proceeding of HAKONE XV, 15巻, 査読有, 2016, 85-88.

〔学会発表〕(計 8 件)

① Toshiyuki Nakamiya, Fumiaki Mitsugi, Yoshito Sonoda, Yoichiro Iwasaki, Tomoaki Ikegami, Ryoichi Tsuda, The new measurement methods of the acoustic field of ultrasound, 1st International Caparica Conference on Ultrasonic-based applications: from analysis to synthesis, 2014, Lisbon.

② Toshiyuki Nakamiya, Yoichiro Iwasaki, Ryoichi Tsuda, Yoshito Sonoda, FumiakiMitsugi, Tomoaki Ikegami, Visualization of sound field using Optical Wave Microphone coupled with Computerized Tomography, 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, 2014, Makuhari.

③ Toshiyuki Nakamiya, F.Mitsugi, Yoichiro Iwasaki, T.Ikegami, Ryoichi Tsuda,Yoshito Sonoda, Detection of compression wave generated by Dielectric Barrier Discharge, the APSPT / 28th SPSM, 2015, Nagasaki University.

④ Toshiyuki Nakamiya, F.Mitsugi, Yoichiro Iwasaki, T.Ikegami, Ryoichi Tsuda,Yoshito Sonoda, Investigation of Dielectric Barrier Discharge Sound in Atmospheric Pressure by Novel Method, The 3rd International Conference on Photocatalytic and Advanced Oxidation Technologies for the Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces (PAOT-3)(招待講演), 2015, Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland.

⑤ Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, F. Mitsugi, Yoichiro Iwasaki,T.Ikegami, Ryoichi Tsuda, The new measurement methods of acoustic field using Optical Wave Microphone, I SIMPOSIO DE APLICACOES DE OPTICA E LASERS(招待講演), 2015, Sao Jose dos Campos - SP - Brasil.

⑥ 岩崎 洋一郎, 永村 幸大, 中宮 俊幸, 岩本 祥二郎, 宮田 俊彦, 倉本 俊昌, 北島 俊孝, 瀬戸口 恵, 交通量調査の自動化を目的としたネットワークカメラを用いた交通流計測手法, 日本産業技術教育学会第28回九州支部大会, 2015, 佐賀大学.

⑦ 岩崎 洋一郎, 永村 幸大, 中宮 俊幸, 岩本 祥二郎, 宮田 俊彦, 倉本 俊昌, 北島 俊孝, 瀬戸口 恵, 交通量調査自動化のためのネットワークカメラを用いた交通流計測手法, 平成27年度電気・情報関係学会九州支部連合大会(第68回連合大会), 2015, 福岡大学.

⑧ Toshiyuki Nakamiya, Yoichiro Iwasaki, Fumiaki Mitsugi, Tomoaki Ikegami, Ryoichi Tsuda, Yoshito Sonoda, Measurement and Analysis of Discharge Sound in high pressure Plasma by Novel Method, The 22th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil(招待講演), 2016, Atlanta, Georgia, USA.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称:音波検出装置並びに音波検出装置を用いた音場可視化装置及びセンサ
発明者:中宮俊幸、園田 義人、光木 文秋
権利者:同上
種類:特許
番号:特開2016-24106
出願年月日:平成26年7月23日
国内外の別: 国内

○取得状況(計 1 件)

名称:光加熱による固体表面温度の計測装置及び計測方法
発明者:中宮俊幸、園田 義人、光木 文秋、池上 知顕
権利者:同上
種類: 特許
番号:特許第5889061号
出願年月日:平成24年3月16日
取得年月日:平成28年2月26日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

中宮 俊幸(NAKAMIYA, Toshiyuki)
東海大学・基盤工学部・教授
研究者番号:90155812

(2)研究協力者

① Dr. João Marcos S. Sakamoto , Instituto de Estudos Avacados – IEAv、Brazil.

② Prof. Henryka D. Stryczewska, Lublin University of Technology, Poland.

③ Dr. Joanna Pawlat, Lublin University of Technology, Poland.