

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560510

研究課題名(和文)光波マイクロホンによる大気圧プラズマの放電音の可視化と現象解明に関する研究

研究課題名(英文)Visualization of electrical discharge sound of the atmospheric pressure plasma with optical wave microphone on phenomenon clarification

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：放電電極に高電圧を印加して大気圧プラズマを発生させ、光波マイクロホンから得られた信号の周波数解析を行った。その結果、以下の事が明らかになった。

(1) 放電音には、印加電圧の周波数から、その20倍の高調波周波数成分まで幅広く含まれていた。(2) 雰囲気ガス(He, Ar, N₂)を変え、放電状態を変えることで、音波の周波数成分の変化や強度を調べた。雰囲気ガスの分子量が大きくなるほど、放電音が大きくなっていった。(3) 生成されたプラズマの2次元放電音場を、光波マイクロホンとCT(Computed Tomography)技術を組み合わせた装置(光波マイクロホンCT)で計測し、音場を可視化することができた。

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. This new method can realize high accuracy measurement of slight density change of atmosphere. In this work, coplanar dielectric barrier discharges in different gases was characterized via the OWM. The following results were obtained. (1) OWM picked up the ultrasonic wave, which condenser microphone could not detect, emitted from the discharge. (2) The change of the frequency components and intensity of discharge sound were investigated by the difference in atmosphere gas such as Air, Helium, Argon and Nitrogen. The intensity of discharge sound was increased as the molecular weight of atmosphere gas became large. (3) OWM could be applied for the visualization of sound field by Computerized Tomography (CT) method. Visualization of the two-dimensional sound field of the discharges showed quite different gas dependency.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：光波マイクロホン 放電音 大気圧プラズマ 音場の可視化

1. 研究開始当初の背景

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、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。コンデンサマイク自体が抱える問題点に由来すると考えられる。即ち、コンデンサマイクロホンは本体を測定点に近づける必要があり、音場を乱す、高電界、高磁界では測定が困難で電磁雑音の影響を受けやすい、音源の特定が難しい等といった欠点がある。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。

2. 研究の目的

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といわれている。本申請テーマでは、大気圧プラズマの生成に伴って発生する超音波の強度分布を可視化し、印加電圧、放電電流や電極温度を計測して比較検討し、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

大気圧非熱平衡プラズマを発生させる電極に高電圧を印加し、生成されたプラズマの2次元放電音場を、光波マイクロホンとCT (Computed Tomography) 技術を組み合わせた装置で計測する。電源電圧、周波数及び雰囲気ガス (He, Ar, N₂, O₂) を変えて、放電音の固有周波数成分や音場分布に対する影響を調べる。チャンバー内に乾燥空気を流しながら誘電体バリア放電を発生させるとオゾンが生成されるので、オゾン濃度計（現有）でオゾン濃度の時間変化を計測し、放電音との関係を明らかにする。さらに、赤外線カメラで電極表面温度を計測しながら、電源電圧や周波数を変えて放電状態を変え、放電音の周波数成分と表面温度との関係を調べる。放電音の定常時の周波数成分は高速フーリエ変換 (FFT) で、放電状態が突発的に変化する非定常時の放電音解析は、ウェーブレット変換や短時間フーリエ変換を用いて時間周波数解析を行う。

4. 研究成果

(1) 主にオゾン生成用として使用される放電電極に、高電圧を印加して大気圧プラズマを発生させた。図1に実験装置図を示す。

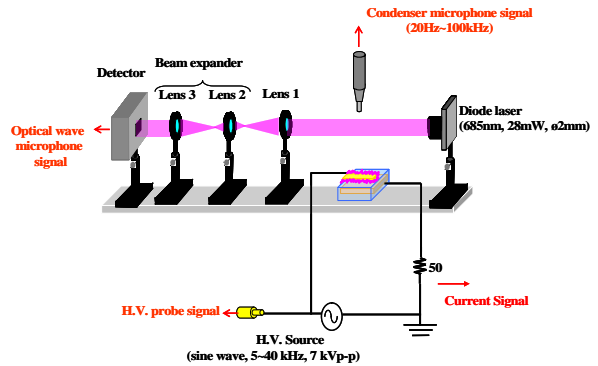
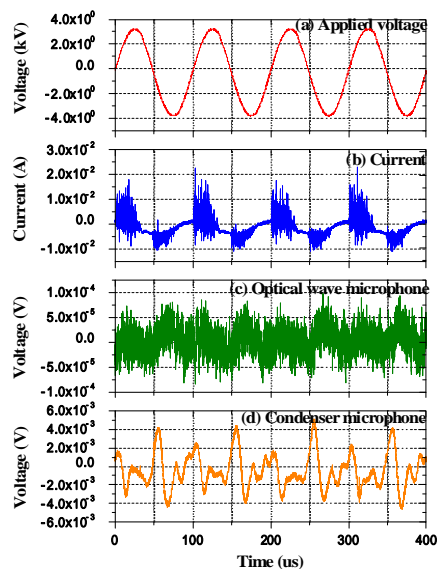


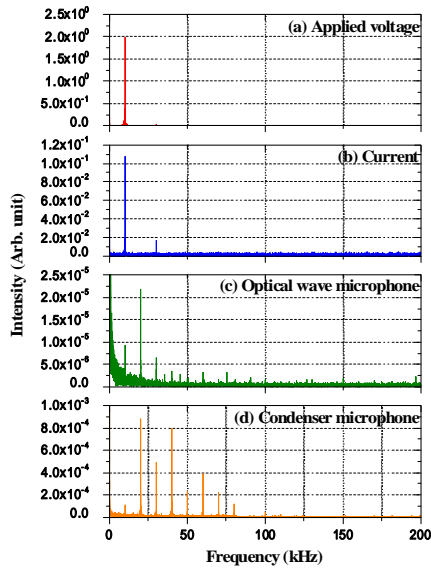
図1 実験装置図

大気中に電極を設置し、その真上に光波マイクロホンの半導体レーザービームを通した。回折像強度が最大となる位置に、光検出器を固定した。この検出器からの電気信号と、比較用の通常のコンデンサマイクロホン (RION UC-31、周波数帯域：10 Hz ~ 100 kHz) からの信号に加え、高圧プローブによる印加電圧波形と、シャント抵抗 (50 Ohm) から得られた放電電流波形をデジタル・オシロスコープ (Tektronix DP04104B、23年度購入設備) で測定した。4チャンネル (電圧電流波形及び両マイクロホンの信号波形) 同時に記録し、電源電圧値や周波数を変えて放電状態を変えることで、音波の周波数成分の変化や強度を調べた。

電極部に、正弦波 (7 kVpp、10 kHz) の電圧を印加して、発生した各波形をデジタル・オシロスコープで記録し、高速フーリエ変換 (FFT) 解析を行い、周波数成分を調べた結果を図2に示す。



(a)電圧、電流、音波 (光波マイクロホン、コンデンサマイクロホン) の信号波形

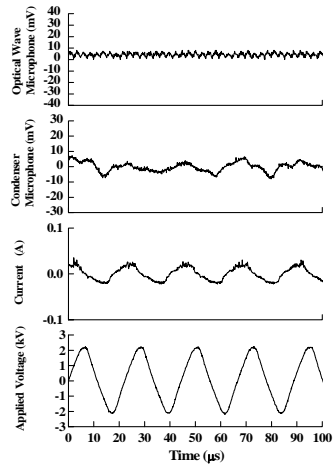


(b) F F T 解析結果

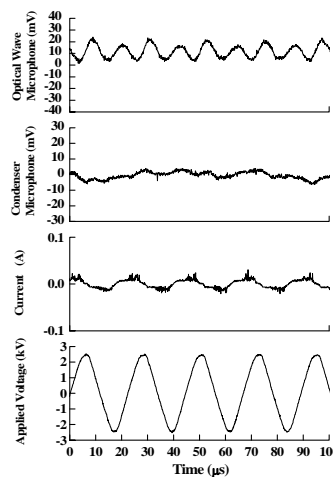
図2 電極部に、正弦波(7 kVpp、10 kHz)の電圧を印加した時の電圧、電流、音波(光波マイクロホン、コンデンサマイクロホン)の (a) 信号波形、(b) FFT 解析結果

電圧波形には、基本周波数(10 kHz)のみ、電流波形の周波数成分は、基本周波数と2倍の周波数成分(20 kHz)が含まれていた。光波マイクロホンで計測した放電音には基本周波数から、20倍の周波数成分(200 kHz)まで幅広く含まれ、2倍の周波数成分の強度が最も強かった。比較のために用いたコンデンサマイクロホンでも同様の傾向が見られたが、性能限界値の100 kHzまでしか検出されず、光波マイクロホンの優位性が確認できた。同一の電圧値で、電源周波数を30 kHzに上げて、計測した各信号波形のFFT解析を行った。放電音は、2倍の周波数成分(20 kHz)の強度が、他の周波数成分と比較してさらに強くなった。光波マイクロホンで計測した放電音は、基本周波数から、6倍の周波数成分(180 kHz)まで幅広く含まれていた。

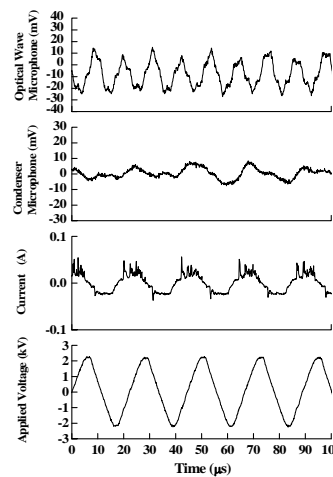
(2) 雰囲気ガスを変えて大気圧プラズマを発生させるために、オゾン生成用として使用されている放電電極をチャンバー内に設置し、高電圧を印加した。高圧プローブによる印加電圧波形と、シャント抵抗(50 Ohm)から得られた放電電流波形及び、光波マイクロホン、コンデンサマイクロホンによる音波波形をデジタル・オシロスコープ(Tektronix DPO4104B)で測定した。4チャンネル(電圧電流波形及び両マイクロホンの信号波形)同時に記録し、電源電圧値や周波数及び雰囲気ガス(He、Ar、N₂)を変え、放電状態を変えることで、音波の周波数成分の変化や強度を調べた。



(a) He, 4.02 g mol⁻¹



(b) N₂, 28.0134 g mol⁻¹



(c) Ar, 39.948 g mol⁻¹

図3 雰囲気ガス(He、N₂、Ar)を変えて、電極部に正弦波(5 kVpp、35 kHz)の電圧を印加した場合の電圧、電流、音波(光波マイクロホン、コンデンサマイクロホン)の各種波形

電極部に正弦波 (5 kVpp, 35 kHz) の電圧を印加して、雰囲気ガスを He (分子量: 4.02) N_2 (分子量: 28.0134) や Ar (分子量: 39.948) に変えた場合について、実験を行った結果を図3に示す。雰囲気ガスの分子量が大きくなるほど、放電音の強度が強くなった。コンデンサマイクロホンでは、放電音の信号が弱い検出することができなかった。

(3) 生成されたプラズマの2次元放電音場を、光波マイクロホンとCT (Computed Tomography) 技術を組み合わせた装置 (光波マイクロホン CT) で計測した。電源電圧、周波数及び雰囲気ガスを変えて、放電音の固有周波数成分や音場分布に対する影響を調べた。図4に実験装置図を示す。

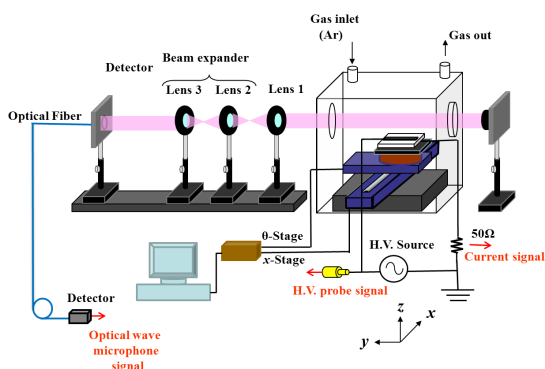


図4 光波マイクロホン CT装置

電極部に正弦波 (5 kVpp, 35 kHz) の電圧を印加した場合の音場分布を図5に示す。電極部は、 $x_0 = 0$ 上に重ねて表示している。強い音の領域は、どれも上部電極の周辺に位置しており、Ar 雰囲気の場合、 N_2 雰囲気中よりも強い音が発生している様子を可視化することができた。

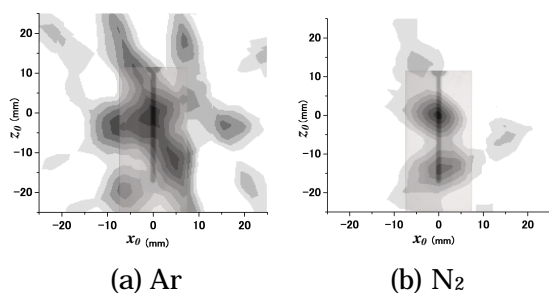


図5 雰囲気ガスを変えた場合の音場の分布

最終年度は、光波マイクロホンの小型化や安定性向上のために、光ファイバーを用いた光波マイクロホン・システムの開発を進め、音を検出することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18件)

Fumiaki Mitsugi, Tomoaki Ikegami, Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, Optical wave microphone measurements of laser ablation of copper in supercritical carbon dioxide, 査読有, Thin Solid Films, Vol. 547, 2013, 81-85, 10.1016/j.tsf.2011.03.031

Y. Iwasaki, M. Misumi, T. Nakamiya, Robust Vehicle Detection under Various Environmental Conditions Using an Infrared Thermal Camera and Its Application to Road Traffic Flow Monitoring, Sensors, 査読有, Vol. 13, Issue 6, 2013, 7756-7773, 10.3390/s130607756

Yoshito Sonoda, Toshiyuki Nakamiya, Proposal of Optical Wave Microphone and Physical Mechanism of Sound Detection, AES (Audio Engineering Society (USA)) 135th Convention Papers, 査読有, Vol. 8924, 2013, 1-8

Toshiyuki Nakamiya, F. Mitsugi, Y. Iwasaki, T. Ikegami, R. Tsuda, Y. Sonoda, Visualization of Dielectric Barrier Discharge Sound Field in Atmospheric Pressure by Novel Method, Proceedings of The 21st International Symposium on Plasma Chemistry (2013), 査読有, Vol. 306, 2013, 1-5

Toshiyuki Nakamiya, F. Mitsugi, Y. Iwasaki, T. Ikegami, R. Tsuda, Y. Sonoda, Real-time measurement of solid surface temperature irradiated by a pulsed laser, Proceeding of 19th International Vacuum Congress, 査読有, #SE/TF-P2-09, 2013, 1572-1573

F. Mitsugi, T. Ikegami, T. Nakamiya, Y. Sonoda, Surface Temperature Measurement using Fraunhofer Diffraction via Photoacoustic Waves for Laser Irradiation Process, Proceeding of 19th International Vacuum Congress, 査読有, #PST-P2-05, 2013, 1266-1267

Toshiyuki Nakamiya, F. Mitsugi, Y. Iwasaki, T. Ikegami, R. Tsuda, Y. Sonoda, Sound Field Visualization using Optical Wave Microphone Coupled with Computerized Tomography, AES (Audio Engineering Society (USA)) 135th Convention Papers, 査読有, Vol. 8923, 2013, 1-5

Toshiyuki Nakamiya, F. Mitsugi, Y. Iwasaki, T. Ikegami, R. Tsuda, Y. Sonoda, Real-time measurement of special distribution of coplanar DBD sound, Proceeding of 8th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma

(APSPT-8), 査読有, Vol.1, 2013, 183-183

Y.Sonoda, T.Samatsu, T.Nakamiya, Development of optical wave microphone measuring sound waves with no diaphragm, Proceedings of PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium)2013, 査読有, Vol.1, 2013, 359-363

T.Nakamiya, F.Mitsugi, Y.Iwasaki, T.Ikegami, R.Tsuda, Y.Sonoda, H. D. Stryczewsk, A Tomographic Visualization of Electric Discharge Sound Fields in Atmospheric Pressure Plasma using Laser Diffraction, The European Physical Journal - Applied Physics, 査読有, Vol.61, 2013, 24310-p1 p8, 10.1051/epjap/2012120416

T.Nakamiya, F.Mitsugi, Y.Iwasaki, T.Ikegami, R.Tsuda, Y.Sonoda, Visualization of Electric Discharge Sound Fields in Atmospheric Pressure Plasma using Fraunhofer Diffraction, Proceedings of PIERS (Progress In Electromagnetics Research Symposium) 2013, 査読有, Vol.1, 2013, 364-367

T.Samatsu, Y.Sonoda, R. Ide, T. Ikegami, F.Mitsugi, T.Nakamiya, Application of Optical Wave Microphone to Measurement of Sound Field Emitted from Parametric Speaker, ICIC Express Letters, 査読有, Vol.7, No.3, 2012, 699-703

T.Nakamiya, F.Mitsugi, Y.Iwasaki, T.Ikegami, R.Tsuda, Y.Sonoda, A TOMOGRAPHIC VISUALIZATION OF ELECTRIC DISCHARGE SOUND FIELDS IN ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA USING LASER DIFFRACTION, Proceeding of HAKONE XIII, 査読有, Vol.13, 2012, 210-214

F.Mitsugi, R.Ide, T.Ikegami, T.Nakamiya, Y.Sonoda, Optical wave microphone measurement during laser ablation of Si, Thin Solid Films, 査読有, Vol.521, 2012, 132-136, 10.1016/j.tsf.2012.02.028

Toshiyuki Nakamiya, Yoichiro Iwasaki, Fumiaki Mitsugi, Ryouzuke Kozai, Tomoaki Ikegami, Yoshito Sonoda, Ryoichi Tsuda, Investigation of Electric Discharge Sound in Atmospheric Pressure Plasma Using Optical Wave Microphone, Journal of Advanced Oxidation Technologies, 査読有, Vol.14, 2011, 63-70

Toshiyuki Nakamiya, Fumiaki Mitsugi, Shota Suyama, Tomoaki Ikegami,

Kenji Ebihara, Yoshito Sonoda, Yoichiro Iwasaki, Shin-ichi Aouki, Henryka Danuta Stryczewska, Joanna Pawlat, ACOUSTIC SPECTRA CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA USING OPTICAL WAVE MICROPHONE, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), 査読有, Vol.81, 2011, 249-253

Toshiyuki Nakamiya, Fumiaki Mitsugi, Ryota Idei, Tomoaki Ikegami, Yoichiro Iwasaki, Ryoichi Tsuda, Yoshito Sonoda, Tomographic Visualization of Discharge Sound Fields using Optical Wave Microphone, Proceedings of ELMECO-7, 査読有, Vol.7, 2011, 117-118

Fumiaki Mitsugi, Tomoaki Ikegami, Shin-ichi, Aouki, Yui Tashima, Hiroharu Kawasaki, Toshiyuki Nakamiya, Yoshito Sonoda, Henryka Danuta Stryczewska, Application of Optical Wave Microphone to Gliding Arc Discharge, Proceedings of ELMECO-7, 査読有, Vol.7, 2011, 113-114

[学会発表](計 4件)

T.Nakamiya, Investigation of Electric Discharge Sound in Atmospheric Pressure Plasma using Laser Diffraction, The 9th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2013), 2013年08月28日, Jeju city, Korea

T.Nakamiya, Measurements of atmospheric pressure non-equilibrium plasma using electrical discharge sound and application to ozone generation, The 18th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil (招待講演), 2012年11月12日, Jacksonville, Florida, USA

T.Nakamiya, Detection of Electric Discharge Sound in Atmospheric Pressure Plasma using Optical Wave Microphone, The 4th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology (ICMAP-2012), 2012年07月05日, Jeju city, Korea

Toshiyuki Nakamiya, Visualization of Electric Discharge Sound Field Using Optical Wave Microphone with Computerized Tomography Method, The 17th International Conference on Advanced Oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil (招待講演), 2011年11月8日, San Diego,

California, USA

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：光加熱による固体表面温度の計測装置

発明者：中宮俊幸、園田義人、池上知顯、
光木文秋

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2012-060750

出願年月日：24 年 3 月 6 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：9 0 1 5 5 8 1 2