

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820105

研究課題名(和文)二次元プラズマ分光法による電気絶縁ガス部分放電の気体加熱の微細構造

研究課題名(英文)Two-dimensional Measurement of Gas Temperature in Discharge Plasma using Spectroscopic Imaging

研究代表者

松本 宇生(Matsumoto, Takao)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：50632022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：電力系統や高電圧機器の保護ならびに電気絶縁材料やプラズマ応用機器の研究開発現場において、部分放電(コロナ放電)や反応性プラズマの物理特性を把握することは極めて重要である。それ故、コロナ放電のメカニズム解明に資するプラズマ診断技術の開発は不可欠である。

本研究課題は、放電プラズマ中の気体温度や電子温度の定量・分布計測を実現する新しいプラズマ診断技術の構築が目的であった。研究の成果として、分光画像法(二次元プラズマ分光法)を基に開発した手法により、現状では時間的に変化しない定在的(静的)な放電に限られるが、放電プラズマ中の窒素分子の回転温度(気体温度)および電子温度の定量・分布計測を実現した。

研究成果の概要(英文)：The plasma-chemical reaction in reactive plasma is strongly affected by the gas temperature and mean electron energy. Understanding the gas temperature in plasma is significantly important for the control of plasma-chemical reactions. In addition, gas heating in discharge plasma causes a degradation of electrodes and a breakdown of the insulation gas. Therefore, an advanced plasma diagnostic method is needed for the development of efficient plasma processing and reliable gaseous insulation technology.

In this research, an experimental method of determining a quantitative two-dimensional image of the gas temperature and mean electron energy in discharge plasma by spectroscopic imaging was developed. At the present time, our spectroscopic imaging got to be able to measure the quantitative distribution of gas temperature and mean electron energy in stationary non-thermal discharge plasma.

研究分野：放電

キーワード：プラズマ分光診断 イメージ分光 非熱平衡プラズマ 気体温度 電子温度 光学フィルタ ICCDカメラ

1. 研究開始当初の背景

電力系統や高電圧機器の保護および電気絶縁材料やプラズマ応用機器の研究開発現場において、コロナ放電(部分放電)や反応性プラズマの物理特性を把握することは極めて重要である。例えば、電気絶縁ガス中で発生する部分放電は、固体絶縁材や絶縁ガスの劣化、火花放電の発生と密接に関係する。それ故、部分放電のメカニズム解明に資するプラズマ診断技術の開発は不可欠である。また、プラズマ応用の分野では、反応性プラズマ中の化学反応を制御するためにプラズマ診断による各種パラメータの計測が必須である。中でも、プラズマ中の気体温度や電子温度はプラズマ化学反応に特に大きな影響を及ぼし、温度が2倍になるだけで反応速度は数十倍、数百倍になることも珍しくない。そのためプラズマの産業応用分野でも、より高性能なプラズマ計測技術の開発が期待されている。

現行のプラズマ診断は大別すると、プラズマ中に端子を直接挿入するプローブ法、プラズマにレーザー光を照射してその散乱・回折・干渉光を分析する方法、レーザーにより目標粒子を光励起して脱励起する際の発光を測定する能動的分光計測(レーザー誘起蛍光分光法)そして、プラズマには全く手を加えることなく、プラズマから発せられる原子・分子の脱励起光を純粋に測定する受動的分光計測法がある。上記のそれぞれの手法に長所短所があり、診断対象のプラズマ特性を考慮して使い分けが行われている。受動的分光計測法は、電界やプラズマに擾乱を与えることなく、かつ体積や密度勾配が小さい弱電離気体の計測も可能であることから、大気圧コロナ放電(大気圧非熱平衡プラズマ)の診断に重宝されている。本研究で著者らが用いる「二次元プラズマ分光法」は受動的分光計測に分類される。

しかしながら、現行の受動的分光計測は図1に示すように、集光レンズのフォーカスポイント(本研究室の仕様ではφ3.6mm)内の発光を空間平均的に測光して1つの解析値を導くスポット的な測定であるため、放電プラズマ中の各種パラメータの空間分布情報を明らかにすることはできない。そのため、大気圧コロナ放電プラズマ中の気体温度分布や電子温度分布の詳細は依然未解明な研究テーマとなっている。以上の背景から、著者らは各種プラズマ温度の定量・分布計測を実現する二次元プラズマ分光法の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、コロナ放電等で形成される弱電離プラズマ(非熱平衡プラズマ)中の「温度」分布を定量可視化する新しい計測技術の構築を目指すものである。ここで述べる非熱平衡プラズマ中の「温度」とは、プラズマを構成する原子もしくは分子の運動エネルギー

棒電極端の大気中正極性膜状コロナ放電

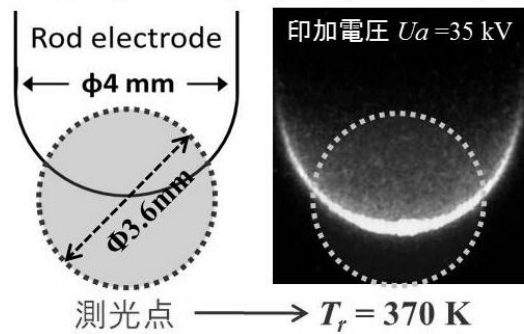


図1 スポット測光式の受動的分光計測例

(並進、回転、振動温度)および電子の運動エネルギー(電子温度)を意味する。本技術開発が実現すれば、高価で複雑な測定システムを必要とせず、プラズマ光を撮影するだけで熱・エネルギー分布の詳細が把握できる「非熱平衡プラズマ観測用の熱画像装置」の開発が可能となる。本研究では、特に「回転温度(気体温度)」および「電子温度」の測定を目指した。

3. 研究の方法

本手法は受動的分光計測であり、プラズマ中の窒素分子の発光スペクトル(脱励起光)を解析して気体温度および電子温度を見積もる。以下、気体温度測定の場合を例に本手法の説明を行う。具体的には、窒素分子の2nd Positive System Band (0-2) 回転スペクトル強度分布のheadとtailの発光強度比($2P_{tail} / 2P_{head}$) (図2参照)から回転温度 T_r を推定する。これは励起状態にある分子の回転エネルギーが複数回の分子間衝突を経て並進温度と平衡に達していれば、回転強度分布から導出される回転温度 T_r は気体温度 T_g と等価であるとみなせることによる。

また、本手法は分光画像法を基に開発した技術でもある。分光画像とは狭帯域バンドパスフィルタ等によって特定の波長のみを通して得られる画像であり、選定した波長の発光強度情報を画素毎に有する。本手法では、 $2P_{tail}$ と $2P_{head}$ の各波長域に対応した狭帯域バンドパスフィルタ(半値幅約1nm)を用

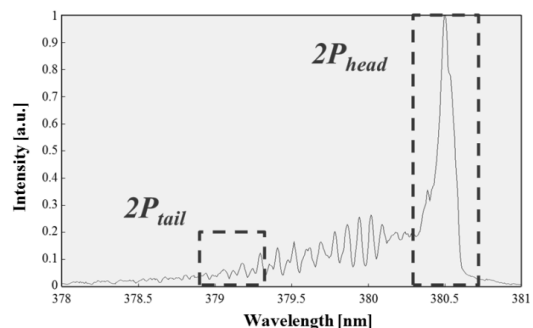


図2 窒素分子の2nd Positive System Band (0-2)

いて放電の分光画像を撮影し、各々の分光画像が有する発光強度分布情報から発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ の分布を計算する。このようにして得た $2P_{tail} / 2P_{head}$ 分布は、強度比値の大小で示される定性的な気体温度（窒素分子の回転温度）分布を表す。加えて、実測により取得した「発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ を絶対気体温度へと置換する校正データ」を用いて定性分布を定量化する。

同様に、非熱平衡プラズマ中の平均電子エネルギー（電子温度）は N_2^+ の 1st Negative System Band (0-0) の head と N_2 の 2nd Positive System Band (0-2) の head の発光強度比 ($1N_{head} / 2P_{head}$) から推定でき、 $1N_{head} / 2P_{head}$ 分布が定性的な電子温度分布となる。こちらも「発光強度比 $1N_{head} / 2P_{head}$ を絶対電子温度へと置換する校正データ」を用いて定量化する。

4. 研究成果

採択後の研究で、大気中の正極性膜状コロナ放電を観測対象として二次元プラズマ分光計測を試み、現状では放電が定在的な場合に限られるが、本手法が大気圧放電プラズマの計測にも適用可能であることを確認した。

以下にその実験例を紹介する。図 3 に二次元プラズマ分光計測で使用する放電観測装置の写真を示す。実験では、放電管内の電極間に発生させたコロナ放電プラズマを石英窓越しに観測した。電極構造は棒対平板でギャップ間隔は 20 mm、棒電極には先端を半球状に仕上げた ϕ 4 mm の真鍮棒を使用した。放電管内には合成空気 (N_2/O_2) を 293 K 換算で 101.3 kPa で封入した。電極間に正極性直流電圧を印加することにより、棒電極先端

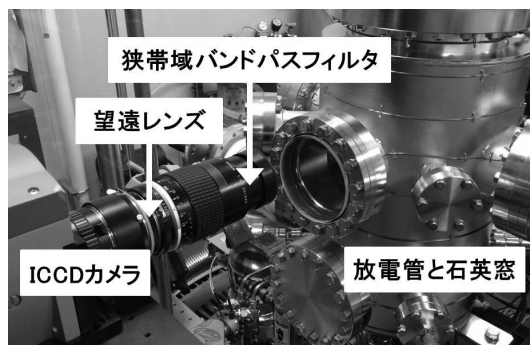


図 3 二次元プラズマ分光計測の実験装置

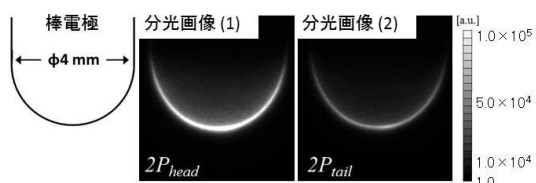


図 4 大気正極性膜状グローコロナ放電の分光画像

に図 1 のような膜状の定在グローコロナ放電が発生する。印加電圧の大きさ U_a を 25、30、35 kV と変化させて、コロナ放電プラズマ中の気体温度分布の印加電圧依存性を調査した。本実験条件での火花破壊電圧 U_s は 36 kV であった。放電の分光画像は、高速ゲート付 Intensified Charge-Coupled Device (ICCD) カメラ (Andor 社製、iStar 734) のレンズ先端に狭帯域バンドパスフィルタを装着して撮影を行うことで取得した。図 4 に $2P_{head}$ に対応するフィルタ 1 (Andover 社製、中心波長: 380.5 nm、半値幅: 1.07 nm) と $2P_{tail}$ に対応するフィルタ 2 (Andover 社製、中心波長: 379.2 nm、半値幅: 1.17 nm) を装着して撮影した分光画像を示す。図から $2P_{head}$ を透過させて得た分光画像の方が $2P_{tail}$ を透過させた分光画像よりも発光強度が高いことが分かる。それから、 $2P_{tail}$ と $2P_{head}$ の分光画像に含まれる発光強度分布情報を用いて、画素（ピクセル）毎の発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ を計算することで気体温度の定性的二次元分布を得た。図 5 に示しているように今回使用した電極は導電性 ITO 膜を 10 ~ 15 nm の厚さで塗布した石英ガラスを平板接地電極に使用している。これは波長 380 nm 付近の窒素分子の回転スペクトルを透過しつつ、かつ接地電極としての機能を持たせるためである（透明電極）。これにより棒電極の側面と正面の 2 方向からの観測が可能となった。

図 6 に印加電圧 U_a の変化に対する膜状コロナ放電プラズマ内の気体温度分布の変化を示す。図 6(a) に側面方向からの観測結果を示し、図 6(b) に正面方向からの観測結果を示している。図 6 中の青 - 赤の色相は気体温度の高低を定性的に表す。また参考のために、側面方向から撮影した放電発光写真（フィルタ無し）も併載している。また、図 7 に実測により取得した発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ と気体温度の関係（校正データ）を示す。この校正曲線を用いて定性的な発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ を絶対気体温度へと置換する。図 6 から、印加電圧の大きさ U_a の上昇に伴って膜状コロナ放電の体積が大きくなり温度分布領域が広がっていく様子がわかる。また、印加電圧の大きさ U_a の上昇に伴って棒電極先端付近の気体温度が局所的に上昇していく様子が確認できた。特に、火花破壊直前状態 ($U_a = 35$ kV) では、電極先端部は 500 K 近くまで局所的に加熱していることが明らかになった。図 1 に従来のスポット測光式の分光計測結果を示しているが、高温部は周囲の低温部と空間平均され、気体温度の測定結果は $T_r = 370$ K となる。従来のスポット測光式の分光計測では知り得なかった気体加熱の微細構造を二次元プラズマ分光法で明らかにすることができた。本稿で紹介した窒素分子の回転温度（気体温度）計測に加え、振動温度並びに電子温度の計測にもこれまでに取り組んでいる。これらについては発表文献を参照してほしい。

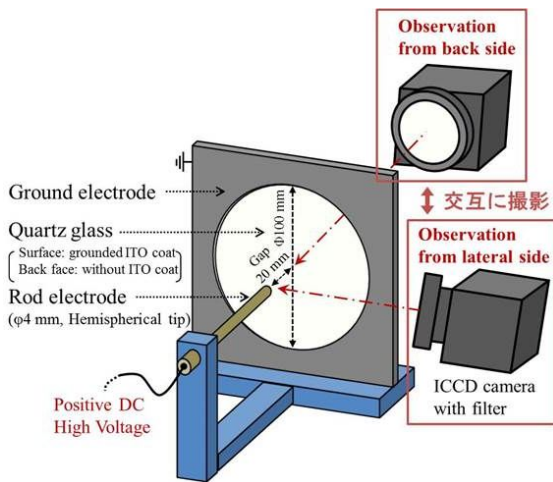


図5 電極構造と観測方向

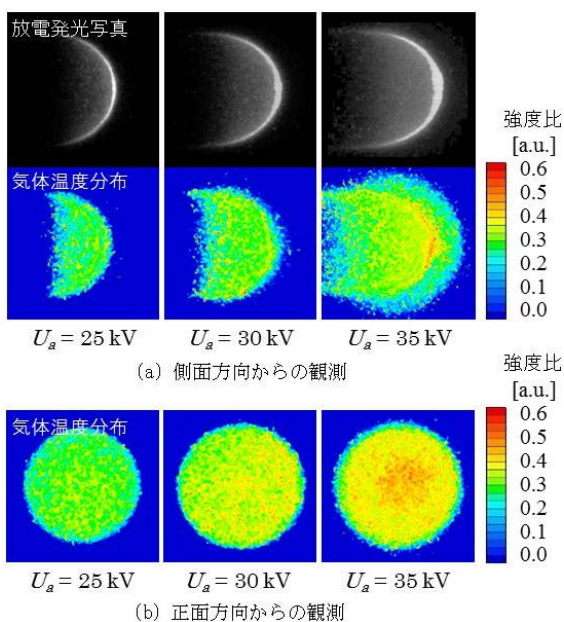


図6 印加電圧 U_a の変化に対する膜状コロナ放電プラズマ内の気体温度分布の変化

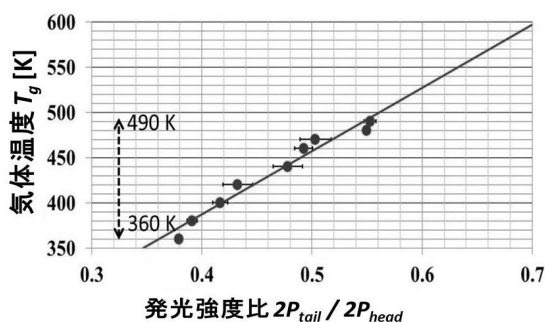


図7 発光強度比 $2P_{tail} / 2P_{head}$ と気体温度の関係

今後の研究展開について述べる。本診断法は高い実現可能性を有しているが、観測波長の切り替え（フィルタ交換）で生じる分光画像間の撮影時間差のため、現状ではその測定対象は本稿で紹介した膜状グローコロナのような静的な放電に限定されてしまう。非定

在（動的）な放電プラズマの診断に対応するためには、二波長の分光画像を同時に撮影できる ICCD カメラ 2 台を同期させたシステムを構築して問題の撮影時間差を解消することが不可欠である。加えて、発光強度比を定量化する校正データを更に拡充することが測定精度向上のために必要である。今後の研究で上記事項の解決・改善を行っていく。

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 2 件)

(1) 松本宇生、佐々本凌、折居英章、生澤泰二、西嶋喜代人、非熱平衡プラズマ観測用熱画像装置の開発～二次元プラズマ分光法による大気圧コロナ放電中の気体温度分布の定量可視～、電気評論、査読無、Vol.101、No.4、2016、79 - 82

(2) 松本宇生、稲田陽一、清水大輔、生澤泰二、西嶋喜代人、Qualitative gas temperature distribution in positive DC glow corona using spectral image processing in atmospheric air, Japanese Journal of Applied Physics、査読有、Vol.54、No.1S、2015、pp. 01AB07-1 - 01AB07-4
DOI: 10.7567/JJAP.54.01AB07

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.54.01AB07/pdf>

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 佐々本凌、松本宇生、折居英章、生澤泰二、西嶋喜代人、二波長分光画像から求めた定性的窒素分子回転温度分布の定量化、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月、東京工業大学（東京都・大岡山）

(2) 松本宇生、佐々本凌、折居英章、生澤泰二、西嶋喜代人、Two-dimensional Measurement of N_2 Rotational Temperature Distribution in Atmospheric Positive DC Glow Discharge using Spectroscopic Imaging、68th Annual Gaseous Electronics Conference / 9th International Conference on Reactive Plasmas / 33rd Symposium on Plasma Processing、2015 年 10 月、ホノルル（アメリカ）

(3) 佐々本凌、松本宇生、折居英章、生澤泰二、西嶋喜代人、Quantification Approach of Gas Temperature Distribution in Atmospheric Positive DC Glow Discharge Measured by Spectroscopic Imaging、68th Annual Gaseous Electronics Conference / 9th International Conference on Reactive Plasmas / 33rd Symposium on Plasma Processing、2015 年 10 月、ホノルル（アメ

リカ)

(4) 松本宇生、佐々本凌、清水大輔、生澤泰二、西嶋喜代人、二次元プラズマ分光法により測定した非熱平衡プラズマ中気体温度分布の定量化、2014 年放電学会年次大会、2014 年 12 月、東京電機大学(東京都・千住旭町)

(5) 佐々本凌、清水大輔、松本宇生、生澤泰二、西嶋喜代人、分光画像法による正極性膜状コロナ放電中の回転温度と振動温度の空間分布測定、2014 年放電学会年次大会、2014 年 12 月、東京電機大学(東京都・千住旭町)

(6) 清水大輔、佐々本凌、松本宇生、生澤泰二、西嶋喜代人、Spectroscopic Imaging and Quantification of Gas Temperature Distribution in Atmospheric Positive DC Glow Corona、17th Asian Conference on Electrical Discharge、2014 年 12 月、バンコク(タイ)

(7) 佐々本凌、清水大輔、松本宇生、生澤泰二、西嶋喜代人、コロナ放電プラズマの分光画像診断法による気体温度と平均電子エネルギーの空間分布測定、H26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、2014 年 9 月、鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市)

(8) 佐々本凌、松本宇生、生澤泰二、西嶋喜代人、Spatial Distribution Measurement of Plasma Parameters Using Spectral Image Processing、41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power particle Beams、2014 年 5 月、ワシントン DC(アメリカ)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://te.tec.fukuoka-u.ac.jp/nishijima/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松本 宇生(MATSUMOTO TAKAO)
福岡大学・工学部電気工学科・助教
研究者番号：50632022