

令和 4 年 5 月 7 日現在

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19H01867
研究課題名(和文)連続スペクトル位相分解分光計測による大気圧プラズマの電子エネルギー分布関数の診断

研究課題名(英文)Diagnostics of Electron Energy Distribution Function of Atmospheric-Pressure Plasmas with Phase-Resolved Optical Emission Spectroscopy Measurement of Continuum Spectrum

研究代表者
赤塚 洋 (Akatsuka, Hiroshi)
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：50231808
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：大気圧プラズマにおける発光分光測定から任意の電子エネルギー分布関数(EEDF)を決定するための新しい方法を導出した。電子制動放射の連続発光スペクトルを分析して、発光分光計測(OES)の有用性を精査した。EEDFは制動放射率方程式を解くことにより再構築された。反復的統計分析を通じ、提示された遺伝的アルゴリズムはEEDFを確実に特定できた。アルゴン誘電体バリア放電(DBD)OES測定の結果を示した。決定されたEEDFの電子エネルギー範囲と分解能についても詳細検討を行なった。単純なOES装置を使用しての、大気圧プラズマ中の任意のEEDFを正確に決定する可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気圧非平衡プラズマの放つ発光スペクトルから、電子温度・密度、更には電子エネルギー分布関数EEDFまでも求める方法論を確立することができた。低温プラズマの電子と放電母ガスとの相互作用による制動放射スペクトル解析から原理的にEEDFを求めることが可能であることが見出された。大気圧非平衡プラズマのEEDFの簡便な計測手段を物理的に確立させた。実験的原理実証、およびデータ処理における数理的手法の確立、並びに他方法との実験的クロスチェックまでを実施することができた。将来医療応用も期待されるプラズマ機器について、EEDF測定機器開発の基礎を与え、プラズマ医療の基礎を根本から押し上げることもできた。

研究成果の概要(英文)：A new method to determine the arbitrary electron energy distribution function (EEDF) from the optical emission spectroscopic measurement in atmospheric-pressure plasma is introduced. The optical emission spectroscopy (OES) continuum emission spectrum, dominated by electron-neutral bremsstrahlung radiation, is analyzed to inspect the usefulness of the conventional OES measurement range for EEDF determination. The EEDF is reconstructed from the OES continuum radiation spectrum by applying machine learning to solve the bremsstrahlung emissivity equation inversely. Through iterative statistical analysis, the presented genetic algorithm can locate the EEDF reliably. Preliminary experimental EEDF results of an argon dielectric barrier discharge (DBD) OES measurement are given. The electron energy range and resolution of the determined EEDF are discussed. The results showed potential for accurate determination of the arbitrary EEDF in atmospheric-pressure plasma using simple OES equipment.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：大気圧非平衡プラズマ 発光分光計測 電子エネルギー分布関数 連続スペクトル 制動放射 逆問題 不完全第1種ボルテラ積分方程式

1. 研究開始当初の背景

応用物理学会・電気学会を中心とする低温プラズマ研究界において、この10年程度、大気圧非平衡プラズマの各種応用に関する研究成果が盛んに講演されるようになってきた。特に、各種の活性酸素種や活性窒素種を中心とする反応性ラジカルが、安価な装置で容易に定常発生できることが特徴である。その応用範囲は、従来の応用範囲である材料・電子工学にとどまらない。照射対象に熱的損傷を与えないことから、農業や生物学・環境学、さらには医学歯学への応用研究も盛んに行われている。ドイツなどではすでに、皮膚科や手術時の止血用の外科応用にまで、臨床応用されつつあるのが現状である。

このように、応用が先行している大気圧非平衡プラズマ研究界ではあるが、プラズマを理解するためにもっとも重要なパラメーターである「電子温度」「電子密度」の計測方法について、なおも、決定的な方法が確立されていないのが、この分野の研究開始時の大きな問題点であった。従来の減圧プラズマならば、プローブにより簡便に電子温度・密度を計測可能だが、大気圧ではシース厚よりも電子の平均自由行程が短く、原理的に利用困難である。また減圧プラズマではある程度成立する「コロナ平衡」を利用した発光分光計測法も、大気圧では励起状態の失活過程として、輻射遷移よりも気体分子衝突脱励起すなわちクエンチングが支配的となってしまうため、適用が困難となる。レーザートムソン散乱などの方法を用いれば原理的には測定可能ではあるが、こうしたレーザー計測は複雑な装置と、装置運転やデータ解釈のために高度な技術を必要とし、現場の技術者が汎用的に使用するのには実際には困難である。特に医療現場などでは、機器の不調を見逃すと患者の人命に関わることとなる。これら応用面からも重要であるが、学術的な立場から、大気圧非平衡プラズマがこのように広く応用される以上、基盤としての確固たる計測法開発が必要不可欠である。非平衡性が際立つ体系で、電子エネルギー分布関数(Electron Energy Distribution Function; EEDF)までもが Maxwell 分布に従いにくいことも理解されていた。ラジカルの数密度を計算により推定する際にも、単に電子温度ばかりでなく、EEDF にまで及んだ知見が求められているのが当時の状況であった。

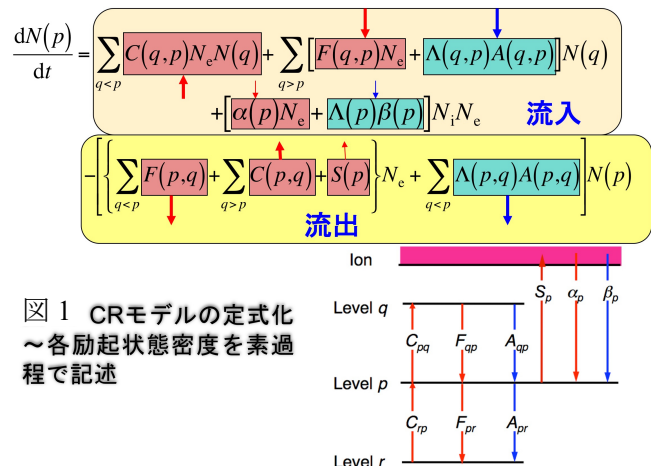
2. 研究の目的

上記の様に、医療・農業・材料・環境工学など、応用開発の著しい大気圧非平衡プラズマではあるが、電子温度・密度の測定方法が十分には確立していない。また、ラジカル密度の推定のために重要な EEDF にいたっては、測定手法開発も不十分である。本研究の目的は、大気圧非平衡プラズマの放つ発光スペクトルから、電子温度・密度、更には EEDF までも求める方法論を確立することである。低温プラズマの電子と放電母ガスとの相互作用により、十分に実測が可能な強度で制動放射が可視光領域に現れ、そのスペクトル解析から原理的に EEDF を求めることが可能であることが見出されたが、十分な実験的検証がなされていない。本研究ではその実験的な原理実証、およびデータ処理における数理的手法の確立、並びに他方法との実験的クロスチェックまでを実施する。まとめると、本研究の目的は、連続スペクトルの発光分光計測による大気圧非平衡プラズマの EEDF および電子密度の計測法開発、およびその実験・理論的検証にある。

3. 研究の方法

具体的な測定法としては、申請者に長い経験と実績のある発光分光計測法を利用した。減圧プラズマを対象とするならば、これは特に新しい手法ではない。しかし、大気圧プラズマへの適用例はほとんどない。この理由は以下である。発光線強度は即ち励起状態数密度に対応するが、その励起状態の生成消滅の素過程を議論する際に必要な衝突輻射モデル(Collisional Radiative Model; CR モデル; 図1に第 p 励起準位密度の時間変化記述を模式的に示す)に関する理解がプラズマ研究界では未だ不十分なようである。これに対し本申請者は CR モデルを利用したプラズマ計測で長く業績をあげており、特に大気圧でも対応可能な、原子衝突励起脱励起を含めたアルゴンプラズマ CR モデルを作成して基礎・応用計測研究を進めてきた。

しかし上に述べた線スペクトル発光分光計測法には、なお若干の問題点がある。すなわち、線スペクトル法計測のためには、各放電ガス種に応じてそれぞれ CR モデルが必要になってしまう。これでは作業性が良くなく、汎用性という点で疑問が残る。最大の問題点は CR モデルを運用する際、EEDF に何らかの仮定



～例えば Maxwell 分布～を設けねばモデル化が困難、という問題が付随し、モデルに依存した結果しか得られない。

そこで本研究の根幹となる方法が、大気圧プラズマの放つ連続スペクトルの解析から電子温度・密度はもちろん、任意形状の EEDF を求める計測法の開発である。大気圧の場合、制動放射による連続スペクトルが十分な強度で観測可能である。そのスペクトルの波長依存性は、理論的には放電ガス種の運動量移行断面積と電子のエネルギー分布関数によって定まる(図2)。この方法は、原理として提案されたばかりの段階にあり、実測例は極めて希少で、さらに他方法とのクロスチェックも報告例がない。また絶対校正を施せば強度から電子密度も求められる。この数学的基礎に基づき、連続スペクトルを取得し、EEDF および電子密度を計測してゆく。

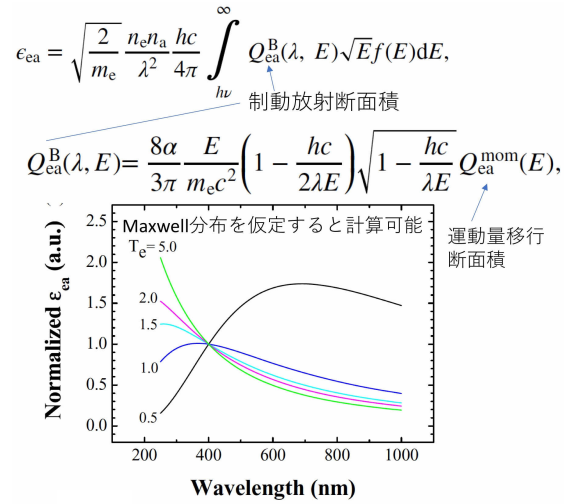


図2. 制動放射の分光放射率 ϵ_{ea}

4. 研究成果

図3のように、内側-外側の2重の石英管構造を有する放電装置を用意した[1]。内側のガラス管は左右に2つ配置してそのギャップ間隔を1mmとし、対向面は石英封じ切りとして、内部に冷却促進のため水に浸漬した形で放電電極をセットし、誘電体バリア放電を生じる構造とした。外側ガラス管と内側ガラス管の間は大気圧の放電気体の流路とし、常に新たな放電気体を供給し続けて不純物対策とした。誘電体(ここでは石英)で覆われた針対針電極を構成し、放電の生じる空間を1点に限定することで、発光分光計測が常に石英窓を通して実施できる様になります。大気圧の希ガスを流路に流し、7-9kVp-pの20kHz交流を印加すると、安定してギャップ間で大気圧非平衡プラズマが得られた。

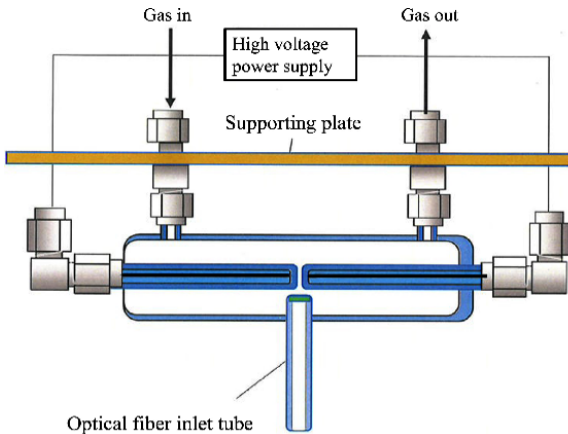


図3 本研究で利用した大気圧非平衡プラズマ生成装置[1]。© (2021) The Japan Society of Applied Physics.

【理論解析】 今回測定した制動放射による連続スペクトルの場合、分光放射率 ϵ_{ea} は理論的に求められており、次式で与えられる[2]。

$$\epsilon_{ea}(\lambda) = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \frac{N_e N_a}{\lambda^2} \frac{hc}{4\pi} \int_{h\nu}^{\infty} Q_{ea}^B(\lambda, \epsilon) \sqrt{\epsilon} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

ここに m_e は電子質量、 N_a は衝突対象原子密度、 λ は光子波長、 ν は対応する光子振動数、 ϵ は電子エネルギー、 h は Planck 定数、 c は光速、 f は電子エネルギー分布関数(EEDF)で $\int_0^{\infty} f(\epsilon) d\epsilon = 1$ と規格化、 Q_{ea}^B は電子原子制動放射断面積で運動量移行断面積 Q_{ea}^{mom} から式(2)のように求められる。

$$Q_{ea}^B(\lambda, \epsilon) = \frac{8\alpha}{3\pi} \frac{\epsilon}{m_e c^2} \left(1 - \frac{hc}{2\lambda\epsilon}\right) \sqrt{1 - \frac{hc}{2\epsilon}} Q_{ea}^{mom}(\epsilon) \quad (2)$$

連続スペクトルを、かなり幅広い波長範囲(300-900nm)で測定する必要があった。まずは平均値・代表値として電子温度 T_e の測定をおこなった。これにも波長の相対感度校正が必要で、特に電子密度 N_e まで求めるには、絶対感度校正も必要であった。これには、照度標準としてのハロゲン電球と、その照度標準を輝度標準に変換するための白色拡散反射版を用いた。実際のスペクトル測定例を図4(フィッティングも併載)に示す。この様に、大気圧ゆえに衝突対象の中性原子が多数存在することから、連続スペクトルとしての制動放射が十分な強度で計測可能である。この発光スペクトルを、制動放射の分光放射強度の理論曲線とフィッティングすることにより、 T_e 、 N_e を求めるのが、本実験の第1段階における戦略である。

α は微細構造定数である。要するに、放電に利用する気体の Q_{ea}^{mom} がわかっているならば、発光現象は電子衝突に関して線形であるから、異種の気体が混入された場合もそれぞれの Q_{ea}^{mom} を調べて式(1)の発光を足し合わせることで、式(1)から T_e 、 N_e の関数として連続スペクトルを計算することが可能となる。ただし、そのためには、式(1)中の EEDF が既知でなければならない。本研究では、Maxwell 分布と、Druyvesteyn 分布の2通りを仮定して、連続スペクトルを計算し、実験結果をフィッティングして電子温度・密度を決定する、という手法を採用した。

具体的手続きとしては、高次回折光の影響を減らしたいこともあり、まず300–450 nm 以下の短波長に着目し、その波長域の相対強度変化を、仮定した EEDF を用い、式(1)でのベストフィッティングにより、 T_e を決定した(図4)。

次に、その T_e を固定して、絶対発光強度をフィッティングし、 N_e を決定する、という手順を取った。図4には、Druyvesteyn EEDF を仮定してベストフィットした式(1)による連続スペクトルも、滑らかな“Theory”の曲線で示した。

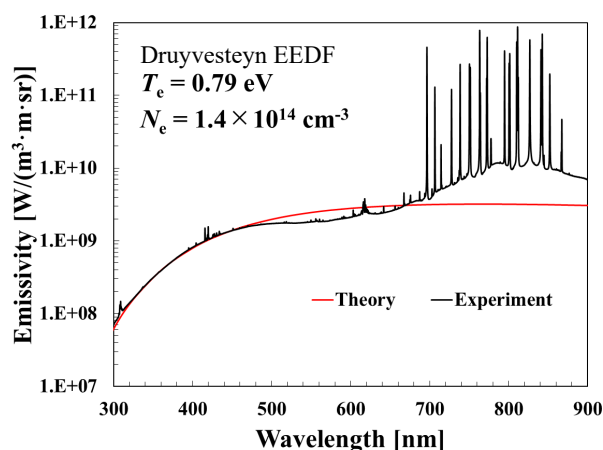


図4 大気圧非平衡アルゴンプラズマの連続スペクトルの OES 計測結果。“Theory”は式(1)による理論フィッティング[1]。© (2021) The Japan Society of Applied Physics.

【結果と考察】Ar プラズマの場合 500 nm 以上の長波長側では、一致はそれほど良くはなく、この程度がフィッティングの限界であった。600 nm を超えた長波長側では、様々にアルゴンの線スペクトルが混入するため連続スペクトルのベースが上昇することで良い一致を得にくくなること、あるいは高次回折光の混入の影響、さらには EEDF の関数形を Druyvesteyn と仮定したこと、等により、完全に現象を捉え切れていないため、このような不一致が生じたものと理解された。

今回の研究では、Maxwell EEDF を仮定すると、極めて低温・高密度な T_e 、 N_e が導出され、一方 Druyvesteyn EEDF を仮定した場合には、他の研究者からの報告例[3]とも一致するような範囲の、リーズナブルな T_e 、 N_e が導出された。それぞれの EEDF を用いて電子温度のフィッティングを行った結果を図5(a), 5(b)にそれぞれ示した。しかしこの段階のデータ処理においては、EEDF を Maxwell か Druyvesteyn かいずれか仮定せざるを得なかったことが問題点と言える。すなわち、今回の研究で得られた T_e 、 N_e が妥当であるかどうかについて、物理的に異なるメカニズムで検証して、初めて正しい結論を導くことが可能と言える。

そこで、本研究では、原子衝突励起脱励起過程も素過程として取り入れた Ar-CR モデルを用いた励起状態密度計算と、計測スペクトルに現れる線スペクトル強度とを比較し、それらの一致を確認することで、今回の連続スペクトル計測によって求めた T_e 、 N_e の妥当性を検証することとした。すなわち、仮定した EEDF と、連続スペクトル計測から導かれた T_e 、 N_e を入力として、我々のところで開発を重ねてきた大気圧放電にも適用可能な Ar-CR モデルによって計算を行うと、Ar 原子の各励起状態数密度を求めることができる[4]。この Ar 励起状態密度の計算値と、線スペクトル発光強度から求めた Ar 励起状態数密度との比較により、Druyvesteyn EEDF を仮定し

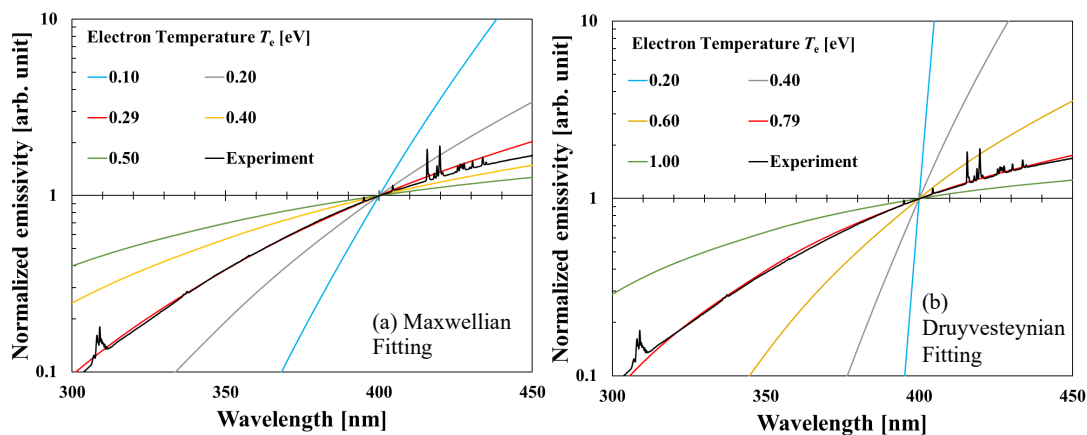


図5 大気圧非平衡 Ar プラズマの連続スペクトルの、式(1)によるフィッティング例。(a) Maxwell EEDF を仮定した場合、(b) Druyvesteyn EEDF を仮定した場合[1]。© (2021) The Japan Society of Applied Physics.

て求めた T_e 、 N_e の妥当性が確認された。また、Maxwell 分布を仮定した場合には桁違いに高い励起状態密度が得られてしまい、実験結果の線スペクトル強度を説明することはできない。これより、本研究の大気圧非平衡プラズマ装置による EEDF が、おおよそ Druyvesteyn 型の EEDF を有していることが検証された。

本論文内容をさらに発展させ、Ar-N₂ 混合気体の大気圧非平衡プラズマについても、本方法の妥当性を確認することができた[5]。

【任意の EEDF への発展性】

本研究の第 2 段階として、EEDF に関する仮定を排除し、式(1)を実際得られた連続スペクトルに適用することで、EEDF そのものが求められないかという問題にも、データ科学・機械学習の手法を駆使し取り組んだ[6]。すなわち、実験では式(1)の左辺 $\epsilon_{ea}(\lambda)$ が得られるが、我々が求めたいものは EEDF、即ち右辺の積分の中にある $f(\epsilon)$ である。理想的には、第 1 種 Volterra 積分方程式の解を求めることに

対応するが、実際に測定できる λ には上限・下限がある。従って問題は不完全な積分方程式となり、解としての $f(\epsilon)$ も有限の電子エネルギー範囲のみ求められる、というような興味深い結果が得られた。

実際の計算においては、遺伝的アルゴリズムを用いている。図 6 に計算手法の概略を示す。すなわち、(1)-(2)式においてカーネル関数 $R(\lambda, \epsilon)$ を(3)のように定義すると

$$R(\lambda, \epsilon) = \frac{hc}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{m_e} \frac{N_e N_a}{\lambda^2} Q_{ea}^B(\lambda, \epsilon) \sqrt{\epsilon}} \quad (3)$$

このとき(1)式は以下となる。

$$\epsilon_{ea}(\lambda) = \int_{hc/\lambda}^{\infty} R(\lambda, \epsilon) f(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

ところが、実際に測定可能な波長の限られることから、計算によって求められる分光放射率 $\epsilon_{ea}(\lambda)$ も、有限でなければならない。すなわち、実際の計算においては、計算放射率を

$$\epsilon_{calc} = \int_{h\nu}^{E_{max}} R(h\nu, E) \sqrt{E} f_G(E) dE. \quad (5)$$

として、これと実験で求めた放射率(4)との残差に着目して、フィットネスパラメータを次式のように決定する。

$$\mathcal{F} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{-\frac{|\epsilon_{ea} - \epsilon_{calc}|^2}{\sigma_k^2}} \quad (6)$$

実際の計算条件として、(6)式のフィットネスパラメータを最小とする様に(5)式右辺の積分内の未知関数 $f(\epsilon)$ を決定する。その結果、図 7 に示す様な EEDF を出力として得ることができた。このように、連続スペクトルから、エネルギー範囲に制限はつくものの、確かに電子エネルギー分布関数 EEDF を得ることができ、本研究の目的達成を確認した。

参考文献

- [1] H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka; JJAP **60** (2021) 026002.
- [2] S. Park, W. Choe, H. Kim, and J. Y. Park; Plasma Sources Sci. Technol. **24** (2015) 034003.
- [3] S. Hübner, J. S. Sousa, J. van der Mullen, and W. G. Graham; Plasma Sources Sci. Technol. **24** (2015) 054005.
- [4] H. Akatsuka; Adv Phys: X **4** (2019) 257 – 281.
- [5] 石塚良, 根津篤, 赤塚洋; 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 (2021) 10a-S301-3.
- [6] T. van der Gaag, H. Onishi, and H. Akatsuka; Phys. Plasmas **28** (2021) 033511.

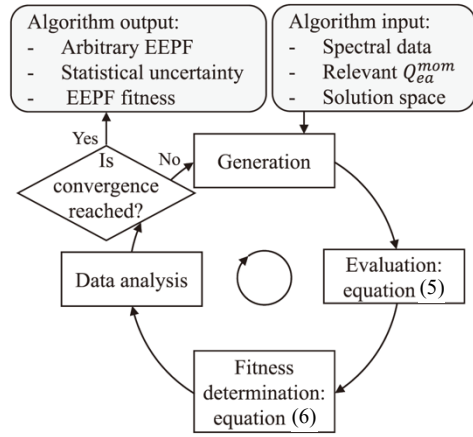


図 6 入力と出力を含む遺伝的アルゴリズム手順のフローチャート [6]. © (2021) American Institute of Physics.

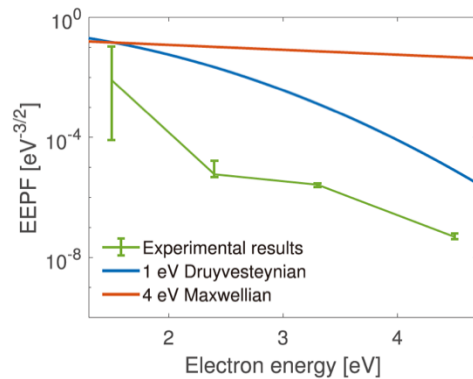


図 7 310 – 827 nm の連続スペクトルから機械学習手法により求めた EEPF $F(\epsilon) = f(\epsilon)/\sqrt{\epsilon}$ [6]. © (2021) American Institute of Physics.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroshi Onishi, Fuminori Yamazaki, Yoshiro Hakozaki, Masaki Takemura, Atsushi Nezu, and Hiroshi Akatsuka	4. 巻 60
2. 論文標題 Measurement of electron temperature and density of atmospheric-pressure non-equilibrium argon plasma examined with optical emission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 026002 ~ 026002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abd0c8	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 Thijs van der Gaag, Hiroshi Onishi, and Hiroshi Akatsuka	4. 巻 28
2. 論文標題 Arbitrary EEDF determination of atmospheric-pressure plasma by applying machine learning to OES measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 033511 ~ 033511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0023928	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20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 城井智弘、根津 篤、赤塚 洋
2. 発表標題 換算電界から求めた電子エネルギー分布関数による大気圧非平衡N2プラズマの連続スペクトル解析
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 Determination of arbitrary EEDF of atmospheric-pressure plasma by OES continuum emission spectrum analysis
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和泉田智也, 星見優天, 山家清之, 赤塚 洋
2. 発表標題 大気圧非熱平衡プラズマにおける連続スペクトル放射解析による電子温度及び密度
3. 学会等名 電気学会東京支部 支所研究発表会 新潟支所
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和泉田智也, 山家清之, 赤塚洋
2. 発表標題 大気圧非熱平衡プラズマの電流と発光スペクトラムにおける相関関係
3. 学会等名 2020年度日本物理学会新潟支部第49回支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 A machine learning scheme to determine arbitrary EEDF in atmospheric-pressure plasma from OES measurement
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-3) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石塚良, 根津篤, 赤塚洋
2. 発表標題 Ar・N ₂ 混合大気圧非平衡プラズマにおける発光分光法による電子温度・電子密度の計測
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉田智也, 山家清之, 赤塚洋
2. 発表標題 連続スペクトル放射解析による大気圧非熱平衡アルゴンプラズマとヘリウムプラズマの比較
3. 学会等名 電気学会 東京支部 新潟支所 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 Arbitrary electron energy distribution determination from the continuum emission spectrum for atmospheric-pressure plasma electron diagnostics
3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 Low-Temperature Plasma Measurement: Line Spectrum for Low-pressure Plasmas and Continuum Spectrum for Atmospheric-pressure Plasmas
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 A Machine Learning Approach to Determine Arbitrary EEDF of Atmospheric Pressure Plasma from OES Measurement
3. 学会等名 The 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2 . 発表標題 A Machine Learning Approach to Determine Arbitrary EEDF of Atmospheric Pressure Plasma from OES Continuum Spectrum Analysis
3 . 学会等名 The 11th Asia Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT11) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kiyoyuki Yambe, Naoya Kuramoto, Hiroshi Akatsuka
2 . 発表標題 Current reflection due to interaction between plasma and metal conductor in atmospheric pressure non-thermal equilibrium plasma
3 . 学会等名 The 11th Asia Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT11) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hiroshi Akatsuka, Hiroshi Onishi, Thijs van der Gaag, Atsushi Nezu
2 . 発表標題 Optical emission spectroscopic (OES) analysis of electron temperature and density in atmospheric-pressure non-equilibrium argon plasmas
3 . 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Onishi, Hiroshi Akatsuka
2 . 発表標題 Determination of the EEDF by Continuum Spectrum Analysis of Atmospheric Pressure Plasma using a Genetic Algorithm
3 . 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 Optical emission spectroscopic analysis for diagnostics of electron density and temperature in non-equilibrium plasmas
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤塚洋, 大西広, Thijs Van der Gaag, 根津篤
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマの連続スペクトル発光分光計測診断
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Akatsuka, Hiroshi Onishi, Fuminori Yamazaki, Atsushi Nezu
2. 発表標題 Electron Temperature Measurement of Atmospheric-pressure Non-equilibrium Ar Plasma by Line Intensities with CR Model and by Continuum Emissivity
3. 学会等名 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Thijs van der Gaag, Hiroshi Akatsuka
2. 発表標題 Genetic-algorithm-assisted reconstruction of arbitrary EEDF of atmospheric-pressure plasma using optical emission spectroscopic measurement
3. 学会等名 2nd Annual Gaseous Electronics Conference (GEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hugo Lavigne, 城井智弘, 根津 篤, 山家清之, 赤塚 洋
2. 発表標題 大気圧非平衡Ar-CO2プラズマの連続スペクトル発光分光測定による電子温度測定
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤塚 洋, 大西 広, Thijs van der Gaag, 根津 篤
2. 発表標題 大気圧非平衡プラズマの連続スペクトル発光分光計測による電子パラメータ診断
3. 学会等名 2019年度 公益社団法人 日本分光学会 年次講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究成果の一部を公表した論文 H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaiki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka; Japanese Journal of Applied Physics Vol. 60 (2021) 026002 により、第20回 プラズマエレクトロニクス賞（応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会）を受賞した。また、上記論文は、Japanese Journal of Applied Physicsの2021年度のSpotlights Articleの一つに選出され、同誌のWEBページ上で顕彰されている。
<https://iopscience.iop.org/journal/1347-4065/page/Spotlights>

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
研究 分 担 者	山家 清之	新潟大学・自然科学系・准教授	
	(Yambe Kiyoyuki) (90452474)	 (13101)	

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			
フランス	Telecom Physique Strasbourg	University of Strasbourg		