

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04424

研究課題名(和文) 新たなプラズマ温度計測手法の開発研究

研究課題名(英文) Development of novel measurement method for plasma temperature

研究代表者

山家 清之 (Yambe, Kiyoyuki)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90452474

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)：本研究では新たに提案する解析手法を用いて、実験によりプラズマの電子及びイオン温度をそれぞれ導出できることを試みた。プラズマを構成する電子とイオンの質量は大きく異なるため、電子とイオン温度は大きく異なる。プラズマが電子とイオンの二つの温度を有することを利用して解析的に電子とイオン温度を導出することを試みた。プラズマの発生周期に対して、観測される時間平均温度は線形比例する。その線形近似線の傾きは電子温度とイオン温度の差、切片はイオン温度を示す。実験結果より、プラズマの電子及びイオン温度を導出可能であることを示し、異なる解析から導出される電子温度と比較することにより、計測の妥当性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今まで、大気圧下で発生したプラズマにおけるイオン温度の計測手法は確立されていなかった。本研究により新たな解析手法が開発されたことにより、真空容器などの低圧下に限定されず電子及びイオン温度を計測することが可能となった。この解析手法では電子とイオンの衝突による物理現象に基づいているため、新たに粒子間の衝突現象を考察するための計測手法が開発されたことになる。この新たな電子及びイオン温度の導出手法により、プラズマの基礎及び応用研究への寄与が期待される。また、解析手法は数学的に解析されることから、プラズマだけにとどまらず他の物質における物理依存性に対しても応用が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the novel analysis method for electron and ion temperature was investigated by experiment in non-thermal equilibrium plasma. Since the masses of the electrons and ions in plasma are different, the electron temperature is different from the ion temperature with non-thermal equilibrium state. Utilizing the fact that the electron and ion temperatures are different, a method to analytically derive the electron and ion temperatures was investigated. The measured time average temperature is linearly proportional to the frequency of plasma generation. The slope of the line indicates the difference between the electron and ion temperatures, and the intercept indicates the ion temperature. From the experimental results, it was shown that the electron and ion temperatures of non-thermal equilibrium plasma can be derived, and the validity of the measurement was confirmed by comparison with other measurement.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ温度 プラズマ圧力 熱エネルギー伝搬 プラズマ発光 デューティ比

1. 研究開始当初の背景

プラズマとは固体、液体、気体に続く、物質の第四状態であり、雷、炎、オーロラ、太陽など物質が燃焼する状態、もしくは電流が流れる状態である。直流高電圧電源を用いることで、雷のように高温なアークプラズマを発生させることができ、金属切断などの工業利用が行われている。一方、真空容器内を減圧した低圧下において、気体に電圧を印加することにより、オーロラのように低温なグロープラズマを発生させることができ、プラズマは化学的反応性に富むことから、半導体加工のプラズマプロセスとして工業利用が行われている。近年、交流高電圧電源の開発が進み、大気圧状況下において容易にプラズマを発生させることが可能となってきた。交流高電圧電源を用いた場合、直流電源とは異なり、プラズマは間欠的に連続発生する。その結果、プラズマは手で触れることが可能な状態で発生するため、プラズマとの接触箇所には火傷が生じない。このような利点を活かして、プラズマによる医療応用の研究が進められている。例えば、生体の出血部にプラズマを当てることにより瞬時(数秒)に止血作用が生じる。現在の手術の現場において、手術に伴い発生する患部からの出血は自然に止まるまで待つか、出血部分を焼き固めるかの方法が主に採られている。つまり、前者の場合には出血多量による事故の危険性、後者の場合には火傷による病状悪化の危険性が生じる問題があり、手術における急速かつ安全に止血する方法の開発が待たれている。そこで、プラズマによる止血作用は極めて有効な手段として期待されている。しかしながら、プラズマとの接触箇所には火傷が生じないはずであると言われているが、実験条件やプラズマの状態によってはプラズマによる対象物への熱的ダメージ、すなわち火傷が生じることが確認されることから、プラズマ温度の明示化が必要不可欠な状況となっている。また、実験条件によって火傷の有無が生じることから、プラズマ温度がどのようなメカニズムによって決まるのか解明が必要である。プラズマは電子とイオンから構成されることから、プラズマの温度は電子温度もしくはイオン温度として示される。アークプラズマが金属を熔解させる程の温度を持つ一方、グロープラズマは人体に接しても火傷が生じないことは、それぞれのプラズマで温度が大きく異なることが予想されるが、実際に計測されたプラズマの電子温度は共に一万程度と極めて高温となる。一方、アークプラズマではイオン温度は電子温度と同程度、グロープラズマではイオン温度は室温より若干高い程度になることから、プラズマのイオン温度が対象物に与える熱的作用において大きく影響していると考えられている。このイオン温度が1万から室温まで実験条件によって大きく異なる原因を特定することが、プラズマ温度の決定メカニズムの解明の糸口になると考えられている。

プラズマ温度は電子温度とイオン温度から構成され、電子温度の計測手法は特定の実験環境下によらず、プラズマ分光計測やプローブ接触計測など様々な手法が既に確立されている。一方、イオン温度の計測手法は、イオン自体が動くことを前提に確立されたドップラーシフト計測による手法であるため、真空容器中のプラズマに対しては計測可能であるが、大気圧下でイオンが動かない場合には計測が不可能であり、その代替の計測手法は未だ確立されていない。従って、イオン温度においても特定の実験環境下によらず、計測可能な手法の開発が課題となっている。また同じグロープラズマを対象として計測しているにも関わらず、計測されるプラズマの温度が計測機器や観測者によって異なることが論文で報告されており、プラズマの温度が計測機器や観測者によって異なってしまう原因を明らかにする必要がある。プラズマの応用展開において、発生する効果を定量的に検証するためにはプラズマの温度が重要なキーパラメータとなる。またプラズマ温度の明示は、医療応用における安全性を検証するためにも必要となる。観測されるプラズマの温度がなぜ計測機器や観測者によって異なるのか、その原因を明らかにしない限り、プラズマの正確な温度を導出することは不可能であり、各実験装置において発生する効果の定量的評価も不可能である。従って、実験環境やプラズマの状態によらず正確なプラズマ温度を導出可能な計測手法を新たに開発する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では申請者が提案した解析手法を用いて、実験によりプラズマの温度から電子温度とイオン温度をそれぞれ導出できることを試みることを目的として行われた。通常、プラズマの温度は電子温度及びイオン温度の両方が含まれた温度として導出される。アークプラズマのように電子温度及びイオン温度が高温である場合には、電子とイオン間の熱エネルギーのやりとりが頻繁に発生することで電子温度とイオン温度が等しい熱平衡状態となるため、温度の導出上、それぞれの温度を分離し切り分ける必要は無く、プラズマ温度 電子温度 イオン温度となる。一方、グロープラズマの場合には電子温度とイオン温度は異なるため、それぞれの温度を分離して導出する必要があるが、観測されるプラズマの温度から電子温度とイオン温度を分離して導出する解析手法は確立されていない。そこで、プラズマの発生周期を変化させてプラズマの温度を計測することにより、その時間平均温度から電子温度とイオン温度を導出することを試みた。この解析手法が確立されれば、実験環境下によらずイオン温度を計測することが可能となり、プラズマ温度の視点からプラズマの応用研究を展開させることが可能になると考えられた。

3. 研究の方法

解析手法の上で、電子温度とイオン温度の導出は観測されるプラズマ温度の時間平均値がプラズマの発生周波数に線形依存する周波数領域で導出する必要がある。図1のように、二つの温度（電子温度 T_e 、イオン温度 T_i ）が決まった発生時間 t_g で異なる周期 f で発生する場合において、観測される時間平均された温度 $\langle T \rangle$ は、低い発生周期では時間平均温度は低く、高い発生周期では時間平均温度は高くなり、その結果、発生周期に対する時間平均温度の変化は次式で表される。

$$\langle T \rangle (f) = \frac{T_e t_g + T_i \left(\frac{1}{f} - t_g\right)}{1/f} = (T_e t_g - T_i t_g) f + T_i \quad (1)$$

従って、時間平均温度は発生周期に対して線形比例することになり、式から発生周期とプラズマの発生時間 (t_g) の比率が 100% (Duty = 100%) になる時に、電子温度が求まり、一方、Duty = 0% ではイオン温度が導出されることになる。また、解析可能な周波数領域は線形比例する領域に限定されることになるが、その線形比例する周波数領域を見つけることで、観測される時間平均温度から電子温度とイオン温度を導出することが可能となる。そこで、周波数を連続変化させることが可能な高周波高電圧電源を用いてプラズマの発生周期を変化させて、プラズマの時間平均温度を計測する。その観測される時間平均されたプラズマ温度の値がプラズマの発生周期に線形依存する周波数領域を特定することで解析を試みる。実験よりプラズマの温度から電子温度とイオン温度が導出可能であることを実証した。

4. 研究成果

プラズマは石英管にヘリウムガスを流し高電圧を印加させることにより発生させた。プラズマは電子とイオンから構成される。その電子は電磁圧力とガスの動圧力によってバランスし動くが、イオンは電磁圧力によって動くことができないためガスの流れに沿って動くことになる。石英管の側面からプラズマを観測する場合、観測領域において、電子は高速（数十 km/s）に流れていくのに対して、イオンは低速（数 m/s）に流れていくことになる。加えて、プラズマ密度の緩和時間は電子温度の緩和時間に比べて極めて長いことが知られている。したがって、プラズマが間欠的に発生する場合、プラズマが発生する期間では電子が存在するが、プラズマが発生しない期間ではイオンが観測されることになる。以上のことから、計測機器による観測時間（露光時間）において求まる時間平均された温度 $\langle T \rangle$ は、プラズマの発生時間 t_g 及び発生周期 f 、電子 T_e 及びイオン温度 T_i から、式(1)によって表される。したがって、電子及びイオン温度の占有比率によって時間平均温度は変化することになる。プラズマの発生時間は発生周期に対して変化するので、時間平均温度を発生時間で割り、発生周期に対する依存性を求めた結果を図2に示す。図中に示される線形比例線は $y = ax + b$ において、式(1)は次のように示される。

$$y = ax + b = (T_e t_g - T_i t_g) f + T_i \quad (2)$$

したがって、線形線の切片 b からボルツマン係数を考慮してイオン温度 T_i は 0.041 eV、線の傾き a から電子温度 T_e は 0.96 eV と導出される。導出された電子温度の妥当性を検討するために、異なる計測手法と比較検討を行った。異なる計測手法は分光法により連続スペクトラム解析によるものであり、発光スペクトラムのベースラインと電子温度及び密度から求める計算曲線を合わせることによって行われるものである。この連続スペクトラム解析結果と本研究による解析手法で求められた電子温度は一致したことから、本研究が提案する解析手法における妥当性が得られていると考えられる。

本研究によって、新たにイオン温度を計測する手法が開発された。このことにより、プラズマを構成する電子とイオンによる温度の視点から、定量的評価が可能となる。プラズマ応用において、プラズマと対象物の相互作用によって、プラズマ処理による効果が発生する。プラズマ処理効果はプラズマの温度や密度が重要なパラメータと言われているため、プラズマ処理効果に対してプラズマの温度及び密度の視点から定量的評価が可能である。また、本解析手法は、プラズマ発生の繰り返し周波数において、周波数 2, 3 点の範囲で振ることによって、温度を導出することが可能である。振れ幅が広ければ精度はより高まることになる。このため、対象となるプラズマを選ばずに、電源における繰り返し周波数を何ら手段により周波数変更を行うことによって、電子及びイオン温度を導出することが可能である。加えて本研究において開発さ

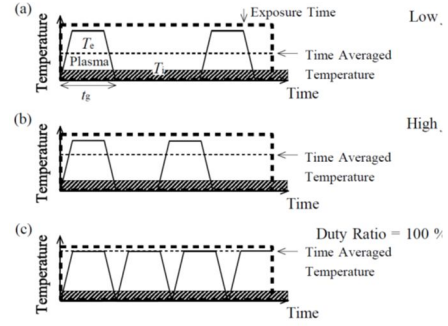


図1 二つの温度が異なる発生周期で観測される場合の時間平均温度の変化

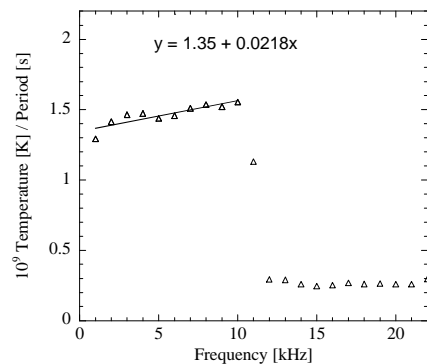


図2 時間平均温度の周波数依存性

れた解析手法は、プラズマを対象とするだけでなく、同一の物質内に二つの温度を有するような物質において、それぞれの温度を導出することが可能であるため、広く物性の物理を進展させる可能性があると考えられる。

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 3件）

1. 著者名 Yambe Kiyoyuki, Hoshimi Yuten, Kuramoto Naoya	4. 巻 90
2. 論文標題 The Effect of the Side Edge on the Plasma Current during Interactions between a Cold Plasma and a Metal Object	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084501 ~ 084501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.90.084501	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 Yambe Kiyoyuki, Kuramoto Naoya, Izumi Koichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Repeated plasma current induced by potential fluctuation in atmospheric pressure non-thermal-equilibrium plasma jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 055301 ~ 055301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039322	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 Yambe Kiyoyuki, Inamura Takuya	4. 巻 27
2. 論文標題 Plasma current regulated by balance between driving and restricting forces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042109 ~ 042109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5133442	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 Yambe Kiyoyuki, Kuramoto Naoya	4. 巻 28
2. 論文標題 Experimental conditions for generation of space-charge limitation in atmospheric pressure non-thermal-equilibrium argon plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 013511 ~ 013511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031256	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 Yambe Kiyoyuki, Kuramoto Naoya, Inagaki Yusuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Dependence of plasma current on object condition in atmospheric pressure non-thermal equilibrium argon plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 085202 ~ 085202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5116268	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 Yambe Kiyoyuki, Kondo Shoma	4. 巻 10
2. 論文標題 Change of plasma propagation state due to force balance with collision	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025210 ~ 025210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132380	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Shinji Ohtani, Kiyoyuki Yambe
2. 発表標題 Investigation of the Electron Mobility During Interactions Between Atmospheric Pressure Non Thermal Equilibrium Argon Plasma and Metal Object
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山家清之, 佐藤順樹
2. 発表標題 非熱平衡プラズマの発生時間の占有比率による電子及びイオン温度計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉本 尚哉, 山崎 寛人, 山家 清之
2. 発表標題 プラズマ照射時における空間電荷制限の発生
3. 学会等名 令和2年(第30回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会
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 令和2年(第30回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 順樹, 山家 清之
2. 発表標題 プラズマにおける発光時間と発生周期の占有比を考慮した電子及びイオン温度の導出
3. 学会等名 令和2年(第30回)電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山家清之, 松田隼風, 大谷真司
2. 発表標題 非熱平衡プラズマにおける電荷ドリフト速度計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
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 令和2年日本物理学会新潟支部第49回例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoyuki Yambe, Takuya Inamura
2. 発表標題 Determination of plasma current by force balance condition
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 10th International Conference on Reactive Plasmas, 37th Symposium on Plasma Processing, 32th Symposium on Plasma Science for Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoyuki Yambe, Hidetoshi Saito
2. 発表標題 Gas flow channel analysis by three-dimensional cylindrical coordinate system using plasma emission observation
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 10th International Conference on Reactive Plasmas, 37th Symposium on Plasma Processing, 32th Symposium on Plasma Science for Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoyuki Yambe
2. 発表標題 Change of Plasma Propagation with Force Balance
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Compact Tori 2019 Frontiers of Physics in High Performance Compact Tori (CT2019) (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 (APSPT-11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山家清之, 和泉田智也, 赤塚洋
2. 発表標題 大気圧非熱平衡アルゴンプラズマと金属体との相互作用における衝突輻射モデルを用いた電子密度及び温度評価
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
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
---------	---------