

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14896

研究課題名(和文) 大気圧プラズマジェット屈曲現象のメカニズム解明による荷電粒子密度情報取得への展開

研究課題名(英文) Investigation toward measuring density of charged particles by understanding of mechanism in bending phenomena in atmospheric pressure plasma jet

研究代表者

山田 大将 (Hiromasa, Yamada)

長野工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号：80825141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：大気圧プラズマジェットに対して外部電場を印加した際に生じるガス流の屈曲現象の作用機序の理解を進めることでプラズマの主要特性の一つである荷電粒子情報の取得を目指し、放電条件-放電現象の時間発展-外部電場印可時の屈曲現象の関係性を明らかにすることを目的として研究を進めた。放電条件として印加電圧波形の極性を変更した。外部電場はいずれの条件においてもプラズマジェットの流れに対して垂直に印加した。その結果、放電条件によってプラズマ特性や外部電場印加時のガス流挙動が変化し、印加電圧波形が負極性の場合には電場と逆方向に、正極性の場合には電場方向に屈曲することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、医療や農業等の様々な分野で応用が進められている大気圧プラズマジェットを対象に、そのガス流挙動に注目した研究を行い、プラズマを生成する条件によって外部電場存在下におけるガス流挙動が変化することを明らかにした。この結果は放電条件によってプラズマ中の荷電粒子の挙動が変化し、ガス流へと影響したことを示唆している。この成果は、今後のより詳細な解析により、荷電粒子密度情報の取得にもつなげることができ、さらに、ガス流挙動制御にも活用することが可能と考えている。これらが実現できれば大気圧プラズマジェットの様々な分野への応用を促進へとつながる。

研究成果の概要(英文)：This study had been aimed to acquire information on charged particles which are one of the main characteristics of the plasma. Because of that, it was required that mechanisms of the bending phenomena in working gas flow occurred by application of external electric field to atmospheric pressure plasma jet were understood. Therefore, this study was performed for the purpose of clarifying the relationships between discharge conditions, time development of discharge phenomena, and bending phenomena by the external electric field. As the experimental conditions, polarity of applied voltage waveform for discharge were changed. Moreover, the external electric field were vertically applied to the plasma jet.

As result, it was clarified that plasma characteristics and behavior of the working gas flow, when the external electric field was applied, were changed with discharge conditions.

研究分野：大気圧プラズマ

キーワード：大気圧プラズマジェット シュリーレン計測 荷電粒子

1. 研究開始当初の背景

(1) 大気圧プラズマジェット

単純構造で操作性が良い大気圧プラズマジェット (Atmospheric Pressure Plasma Jet “APPJ”) は、国内外の研究機関で応用に向けた研究が進められ、止血等の様々な効果を有していることが確認されている。図1に示すようにプラズマには様々な特性があり、これらが効果の重要因子となっている可能性があるが、未だ不明点も多い。応用研究の更なる促進やAPPJ 応用の学理形成を目指す際には、APPJ の特性を明らかにした上での作用機序の理解が必要である。

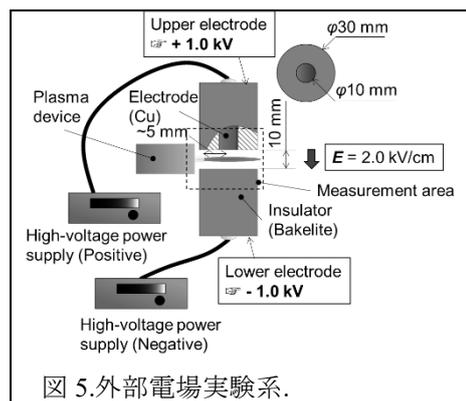
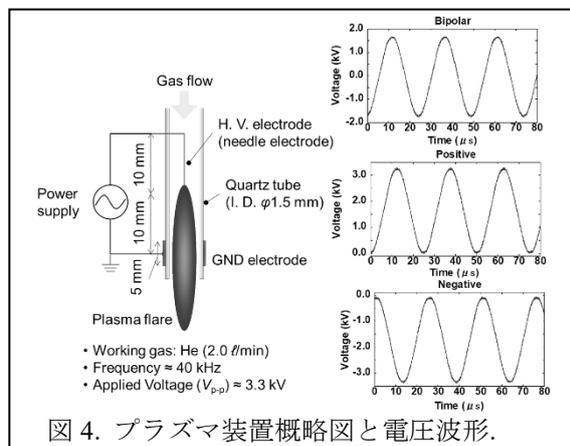
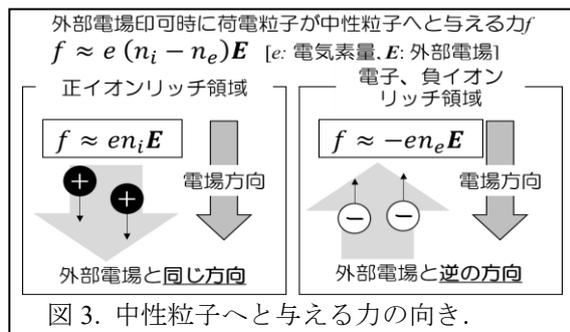
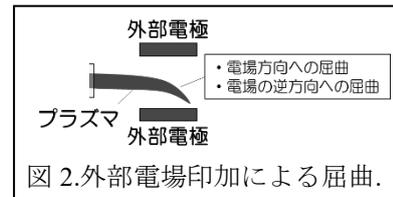
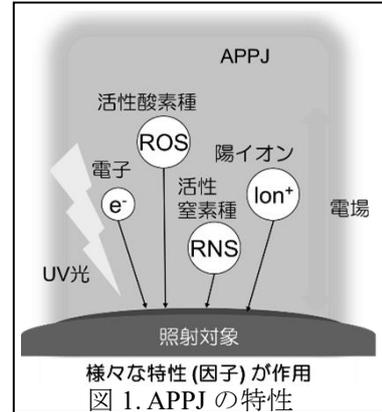
主要特性の一つである荷電粒子 (イオン、電子等) 密度は、低圧プラズマで用いられてきたプローブ計測が APPJ では適応できないことが多く、シュタルク拡がり法やマイクロ波干渉計等の高価な装置を用いる手法が必要であり、計測難易度が高い。そのため、簡易的な評価手法が求められている。

(2) ガス流屈曲現象

図2に示すように、APPJ に対して外部から電場を印加することでジェット状のプラズマ (発光部) が屈曲する現象が知られている。著者らは、シュリーレン法を用いたガスの可視化により、作動ガス流も屈曲していることを発見し、外部電場の印加は中性粒子が大部分を占めるガス流に対しても作用することを明らかにした。APPJ におけるプラズマはガス流に沿って生成されるため、プラズマの屈曲は作動ガス流が屈曲したことに起因していると考えられる。外部電場印加時に荷電粒子が中性粒子へと与える力 f は、図3の式で与えられることが知られており、筆者らは過剰正イオン密度を仮定した数値計算を行い、実験結果に符合する結果を得た。この屈曲量は過剰正イオン密度に伴って変化するため、屈曲量を評価し、数値計算結果と照らし合わせることで、荷電粒子密度に関する情報の取得が可能である。

2. 研究の目的

APPJ のガス流屈曲現象は、荷電粒子挙動が関与する現象であり、簡易的な荷電粒子密度評価に活用できる可能性がある。しかし、そのためには、過剰荷電粒子密度が、APPJ における「いつ」「どの状態」「どの領域」を示すのか特定する必要がある。そのためには、放電条件の相違の屈曲方向への影響を考慮した上で、外部電場印加時の放電現象から荷電粒子挙動を推測する研究が必要である。そこで、放電条件 - 放電現象の時間発展 - 外部電場印加時の屈曲現象の相関関係を明らかにすることを本研究の目的とした。放電条件が異なる APPJ を作り、その際の放電現象の相違と、発光及びガス流の屈曲方向、屈曲の大きさを明らかにする。これにより、過剰荷電粒子要因を検討する。



3. 研究の方法

(1) プラズマ装置・特性計測

本研究遂行のために開発したプラズマ装置の概略図と電圧波形を図4に示す。針電極を用いてプラズマを生成しており、作動ガスはヘリウムとした。放電条件として、印加電圧波形を両極性、正極性、負極性の3種類に変更を行った。

プラズマ特性は発光分光法により評価した。具体的には、3種類のプラズマについて、発光種の発光強度の比較、窒素励起分子の発光スペクトルを用いた振動・回転温度解析を実施した。

(2) 外部電場印加実験

外部電場印加実験系を図5に示す。外部電場を印加する電極は直径10 mmの円柱を使用し、そのギャップは10 mmに調節した。上部電極に+1.0 kV、下部電極に-1.0 kVの電圧を印加し、電場強度は2.0 kV/cmに設定した。

ガス流の評価は図6に示すシュリーレン光学系により行った。カメラは露光時間100 μ s、撮影速度10000 fpsに設定した。シュリーレン光学系では、空間中の気体の屈折率の差が明暗として現れる。この実験は空気中で行っており、空気とは屈折率が異なる作動ガスのヘリウムガスが可視化可能である。

4. 研究成果

(1) 発光分光計測結果

両極性正弦波の電圧を印加して生成した場合のAPPJについて、発光分光計測を行った結果を図7に示す。OHの発光や、窒素励起分子、窒素イオン分子の発光を確認することができた。これらの発光はどの条件でも確認できたが、それぞれの発光強度は異なっていた。図8で条件毎の各発光種の発光強度を比較した。OHの発光は正極性電圧を印加して生成したプラズマが最も発光が強く、負極性はその1/2程度、両極性は1/10の発光強度であった。窒素励起分子はいずれの条件でも強い発光が確認でき、その強度は両極性>正極性>負極性となっていた。窒素イオン分子の場合は、両極性が最も強い発光を示し、正極性はその半分程度であった。負極性の場合、窒素イオン分子の発光スペクトルは非常に微弱であり、今回の計測系では観察することができなかった。

(2) 外部電場印加実験結果

①印加電圧が両極性の場合

両極性正弦波を印加して生成したプラズマに外部電場を印加した場合のガス流挙動を図9に示す。プラズマを生成した状態で外部電場印加前の状態から、外部電場を印加した後の時間発展の様子を示している。外部電場を印加する前の状態では外部電極は上下どちらも接地状態である。この状態では、作動ガスはまっすぐ流れていることが分かるが、外部電場を印加することでガス流挙動には変化が現れる。外部電場印加直後は、作動ガス流全体が屈曲する様子は現れなかったが、ガス流下部から影が下方に伸びていく様子が観察できる。これは時間経過に伴い下部電極に到達し、1 s後に安定した状態となった。この元のガス流

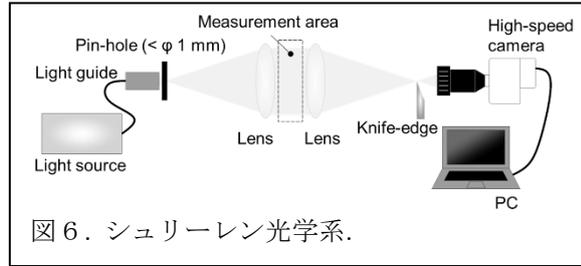


図6. シュリーレン光学系.

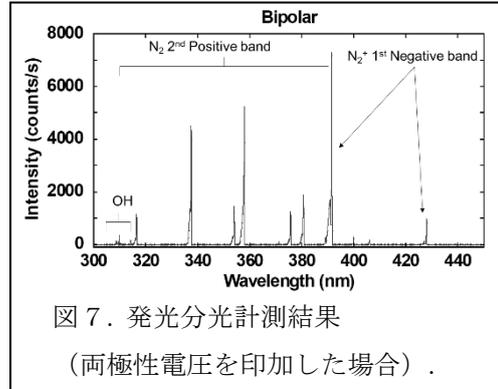


図7. 発光分光計測結果

(両極性電圧を印加した場合).

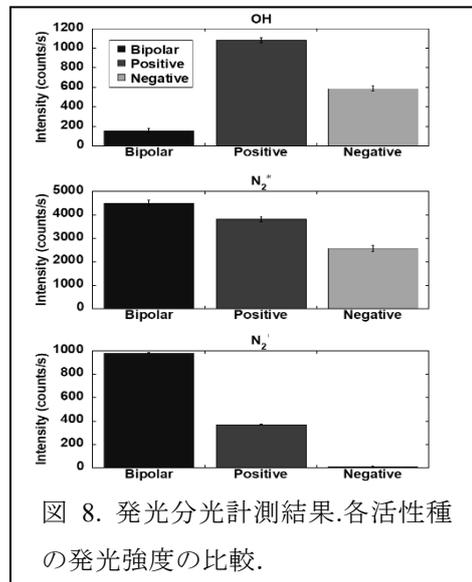


図8. 発光分光計測結果.各活性種の発光強度の比較.

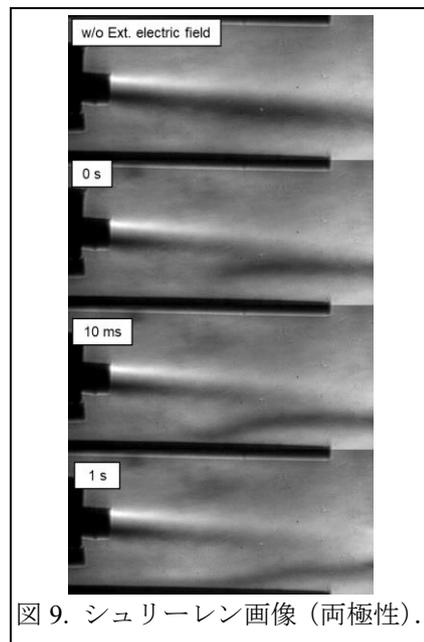


図9. シュリーレン画像 (両極性).

から分離して現れた影は、可視化されているため、ヘリウムガスあるいはプラズマによる加熱により空気に密度差が生じたことで可視化された可能性がある。また、負電圧が印加された下部電極側に動いていることから、正に帯電した物質と推測できる。

②印加電圧が正極性の場合

正極性の正弦波を印加して生成したプラズマに外部電場を印加した場合のシュリーレン画像を図10に示す。①で述べた両極性の場合とは異なり、外部電場印加までのガス流は上下電極に向かって分裂していた。これは周期的に正負が入れ替わる両極性の場合と異なり、プラズマ生成電極は常に正の状態であるため、プラズマと接地された上下電極の電場の方向は変化しないことが関係していると考えられる。また、外部電場印加後は、作動ガス流全体が下部電極側に屈曲する様子が現れた。このことから、正極性の電圧を印加して生成したプラズマの作動ガス流は正に帯電（正極性の荷電粒子が豊富）していると考えられることができる。

③印加電圧が負極性の場合

負極性の正弦波を印加して生成したプラズマに外部電場を印加した場合のシュリーレン画像を図11に示す。外部電場を印加していない状態では、作動ガス流は上下電極の方向に分裂していた。これは正極性のプラズマと同様の傾向であった。外部電場印加後は作動ガス流全体が上部電極側に屈曲する様子が現れた。したがって、印加電圧が負極性の場合、正極性の場合とは屈曲方向が異なっており、電荷は逆極性、すなわち負に帯電していることが予想できる。

(3) まとめ

以上のように、印加電圧波形を両極性・正極性・負極性の3種類に変更して実験を行った結果、明確な相関関係は得られなかったが、異なるプラズマ特性となり、外部電場印加時の作動ガス流挙動も変化する結果となった。プラズマ特性とこれまでの研究では、外部電場印加時の作動ガス流屈曲方向は、電場方向と電場と逆の方向の2種類が報告されていたが、プラズマの何が異なっているかは不明であった。本研究により、プラズマ生成時の印加電圧の極性が大きく影響することが明らかとなった。このことは、未だメカニズムが分かっていないガス流屈曲現象の作用機序の理解を進める知見である。正極性電圧を印加して生成した際のプラズマにおいては、正電荷を有した粒子が豊富な領域があることを示唆し、負極性電圧を印加したその逆で負電荷の粒子が豊富な領域があることを示唆する。これらに関係する因子として、正負のストリーマの前面（ストリーマヘッド）が考えられる。また、発光分光計測で大きな差として観察された生成イオンの相違がイオン風の挙動の相違につながった可能性もある。今後の研究により、これらを特定することができれば、荷電粒子密度情報を取得へとつなげることが可能である。加えて、ガス流挙動や活性種の生成制御、輸送制御への展開も考えられ、APPJの様々な応用への貢献も期待できる。

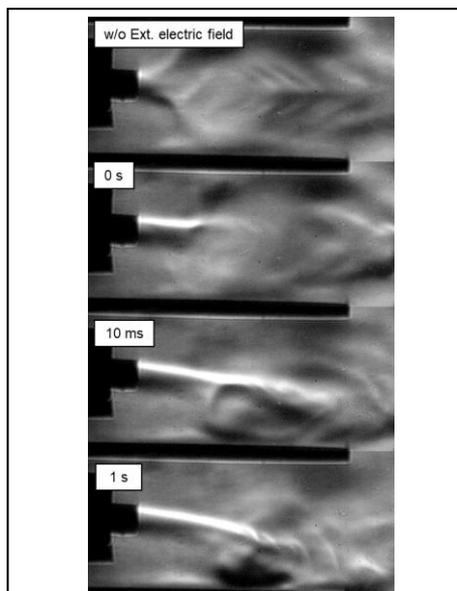


図10. シュリーレン画像（正極性）.

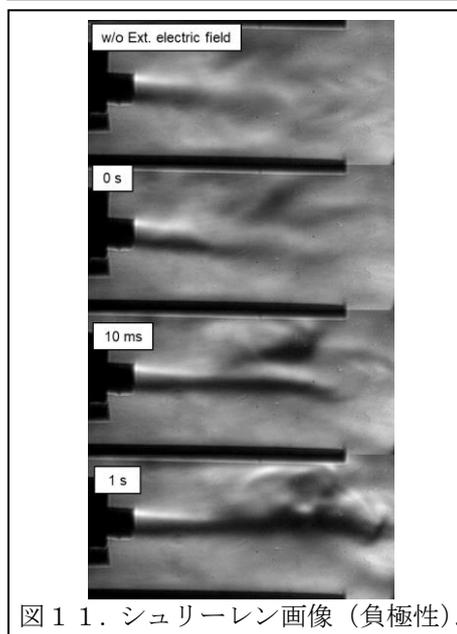


図11. シュリーレン画像（負極性）.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田大将、石原悠景、小出輝
2. 発表標題 外部電場印加時における大気圧プラズマジェットの特性計測
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田大将、石原悠景、小林龍人、東山侑太、横江美希
2. 発表標題 大気圧プラズマジェットの発光伝播現象計測
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田大将、石原悠景、小林龍人、東山侑太、横江美紀、田中秀登、小野伸幸
2. 発表標題 産業・バイオ応用に向けた低温大気圧プラズマの特性計測
3. 学会等名 2019年第36回 プラズマ・核融合学会 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
---------	---------