

高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用

Discharge induced in a high-energy electromagnetic beam and its engineering applications



課題番号：15H05770

小紫 公也 (KOMURASAKI KIMIYA)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究の概要 高エネルギーレーザー・ミリ波ビームにより気体中に誘起される爆轟波を純粋な1次元現象に帰し、多様な発振設備を用いて実験を実施した。その結果、レーザーとミリ波の双方において、特に放電閾値より低い電界強度で従来の放電電離モデルが計測された伝播速度を再現できないことがわかり、新しい電離モデルの発想に至った。今後は新モデルの組込、検証を経て、実スケールの現象に適用可能な計算コードの開発につなげる。

研究分野：総合工学

キーワード：航空宇宙工学、エネルギー全般、プラズマ、放電、レーザー

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー電磁ビームにより大気中に誘起される放電は爆轟波を駆動し、その過程で電磁エネルギーが効率的に圧力に変換される。これは工学的にも有用な現象である。図1にレーザー放電およびミリ波放電の先端構造を示す。ビーム波源に向かって超音速で伝播する電離波面のマクロな構造は相似であるが、ミリ波放電にはプラズマの微細な構造がみられ、長時間露光写真ではフィラメント状の放電痕が認められる。また電離波面伝播速度とビーム電力密度の比は、それぞれ1~2桁ほど異なり、従来の燃焼デトネーション理論では説明がつかない。

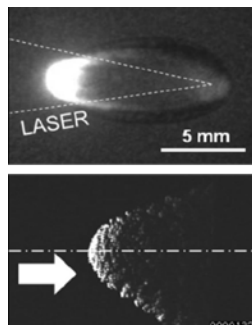


図1 レーザー放電(上)とミリ波放電(下)の高速度カメラ画像

ストリーマ放電との類似点・相違点を勘案しつつ、体系的な研究によって、この電力密度領域におけるプラズマ・放電物理モデルを構築・創出するとともに、応用面からは航空宇宙分野の例として、ミリ波ビームで遠隔に駆動されるロケットや、ギガワットの電力空

間無線送電など、将来の宇宙インフラ整備や先進的な宇宙プロジェクトの展開を担う基幹技術につながるものと期待する。

2. 研究の目的

高エネルギーのレーザーやミリ波ビームにより誘起される爆轟波を工夫された実験系により純粋な1次元現象に帰し、その計測結果の解析によってレーザーとミリ波の双方の放電・爆轟現象に内在する普遍的な物理モデルを構築することを目的とする。さらに得られた知見を将来の大電力伝送で想定される実スケールの現象に適用可能な3次元計算コードの開発につなげる。

3. 研究の方法

1) レーザー放電爆轟波の1次元伝播実験

1次元レーザー放電を超高速カメラで観測する。電離に関する重要なパラメータは雰囲気ガスの種類、圧力に敏感であるため、空気、酸素、窒素、アルゴンなどを用い、工学的応用を想定して圧力依存性を包括的かつ系統的に調べる。

2) ミリ波放電爆轟波の1次元伝播実験

筑波大学とQSTのジャイロトロン設備を用い、放電構造や伝播速度などを計測し、電界強度や電磁波周波数との相関を調べる。また、さらに微視的な観察のため、100 kW出力クラスの94GHz単パルスジャイロトロン製作・導入を試みる。

3) ミリ波・レーザー放電シミュレーションコードの開発と検証

研究分担者が開発したレーザー放電・ミリ

波放電コードについて、それぞれ実験結果を再現できるものに発展させる。双方同一の物理モデルのセット、同一のコードで計算することを目標に、モデルの選択、統合を行う。

4. これまでの成果

1) レーザー放電爆轟波の1次元伝播実験

1次元伝播を実現するにはビーム径の拡大が非常に有効であり、その際放電伝播速度がレーザー強度に対して一意に定まることを発見した。以降の全ての実験は十分なレーザー径を用いて行った。レーザー強度依存性(図2対数グラフ中でのプロットの勾配)はガス種によって大きく異なることが明らかとなった。(デトネーション理論では普遍)また発光分光計測も行い、中性粒子の励起温度、電子密度も取得し、計算シミュレーションで再現すべき貴重なデータが得られた。

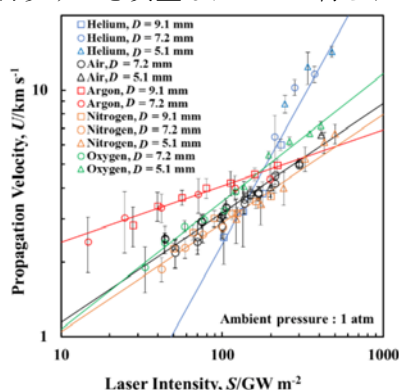


図2 様々なガス種における放電伝播速度のレーザー強度依存性

2) ミリ波放電爆轟波の1次元伝播実験

筑波大学の28 GHzジャイロトロンを用いた放電実験を行ない、放電閾値よりも数桁低いミリ波強度領域を世界で初めて探索した。図3に放電構造と実験条件との関係を示す。

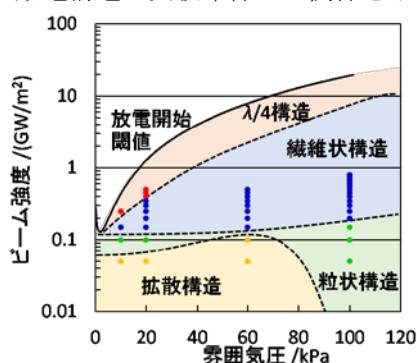


図3 亜臨界強度条件下でのミリ波放電構造

この強度領域で放電が維持される物理的メカニズムがまだ提案されていないが、現在は交流電場の中でのタウンゼント放電という考え方に代わって、電子衝突や逆制動放射によって励起された中性粒子が低い電界強度でタウンゼント放電を維持するという累積電離が候補である。それを議論する材料として、中

性粒子励起温度を測定することにも成功した。

3) ミリ波・レーザー放電シミュレーションコードの開発と検証

ミリ波放電二次元数値計算を行った結果(図4)、電界集中の値は小さく、2次元的な構造は伝播速度に影響しないことがわかった。さらに、意図的に高い電離周波数を仮定しないと計測された伝播速度を再現できなかった。

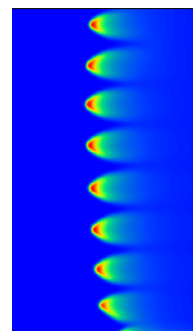


図4 ミリ波放電粒状構造計算結果

5. 今後の計画

レーザー・ミリ波放電に共通する課題として、絶縁破壊臨界を大きく下回る入射電界強度における伝播速度が実験を再現できていないことにあり、電離メカニズムが影響していることを突き止めた。一方で分光計測などから、低電界強度条件で中性粒子の励起温度がより高くなっていることが分かり、中性粒子が電子励起を経て電離へと至る積算電離が支配的となっている可能性を示唆している。今後はこの積算電離モデルを取り入れ、最終的には同じ電離モデルで両方の放電を定量的に再現したい。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) Discharge from a High Intensity Millimeter-Wave Beam and Its Application to Propulsion, Masayuki Takahashi, Kimiya KOMURASAKI, *Advances in Physics: X*, Vol. 3, No. 1, 1417744, pp. 113-144, 2018.
- (2) Rocket Propulsion Powered using a Gyrotron, Masafumi Fukunari, Kimiya Komurasaki, Yusuke Nakamura, Yasuhisa Oda, Keishi Sakamoto, *J. of Energy and Power Engineering*, 11, pp. 363-371, 2017.
- (3) Structural Change of Plasma at Various Ambient Pressures in 28 GHz Millimeter-Wave Discharges, Yuki HARADA, Yusuke NAKAMURA, Kimiya KOMURASAKI, Ryutaro... MINAMI, Tsuyoshi KARIYA, Tsuyoshi IMAI, Kohei SHIMAMURA and Masafumi FUKUNARI, *Frontier of Applied Plasma Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 7-10, 2017.
- (4) Laser-induced Discharge Propagation Velocity in Helium and Argon Gases, Toru SHIMANO, Joseph Ampadu OFOSU, Kohei MATSUI, Kimiya KOMURASAKI, and Hiroyuki KOIZUMI, *Transactions of JSASS*, Vol. 60 (6), pp. 378-381, 2017.
- (5) Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies, T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Sakamoto, Y. Oda, et al., *Nuclear Fusion*, Vol. 57, 066001, 2017.

原著学術論文 11 件、国際会議基調・招待講演 5 件、国際会議論文 11 件、受賞 2 件
ホームページ等

<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/kaken/seminar.html>