

# 高強度ビーム照射により誘起される大気圧放電における数値モデル概要

## Overview of Numerical Models in Atmospheric Discharge Induced by a High-Intensity Beam Irradiation

高橋聖幸<sup>1</sup>, 小紫公也<sup>2</sup>

Masayuki TAKAHASHI<sup>1</sup>, Kimiya KOMURASAKI<sup>2</sup>

東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻<sup>1</sup>

東京大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻<sup>2</sup>

### 1 緒言

近年、大電力のビーム源が開発され、ビーム照射時に生ずる放電・気体加熱現象を工学的機器に利用すべく、ビーム推進ロケットやビームによる燃料着火の研究が遂行されている [1]。大気圧下でのビーム照射による絶縁破壊によってプラズマが生成され、この電離波面は後続のビームエネルギーを吸収し、衝撃波を駆動しつつ超音速でビーム源へと伝播する。この現象を、入射ビーム周波数に応じて、レーザー支持デトネーション (LSD) 或はマイクロ波支持デトネーション (MSD) と呼ぶ。これまでの放電実験により、入射ビームの波長、ビーム強度や雰囲気圧力によって電離構造、電離波面の伝播速度や駆動衝撃波構造が変化する事が明らかとなり、それらの傾向を説明する為の数値モデルが提案されてきた。

本論文では、最近の数値計算により明らかとなったビーム誘起プラズマの詳細な構造と、それに伴う衝撃波伝播に関して紹介する。以下、マイクロ波照射時の放電現象に関して議論し、その後、レーザー照射により得られる現象について議論する。

### 2 マイクロ波照射時の電離構造

1980年代前半から 35 GHz 或は 85 GHz ジャイロトロンを使用した放電実験が遂行され、形成されるプラズマはビーム照射方向と垂直なフィラメント構造を持つ事が明らかとなった。近年、Hidaka らが 110 GHz, 10 GW/m<sup>2</sup> のジャイロトロンを使用した放電実験を行い、高速度カメラによる詳細な観測から、離散的構造の間隔は入射ビーム波長  $\lambda$  の 1/4 程度である事が判明した [2]。フィラメント構造形成の原因を探るべく、Nam や Boeuf らによって数値モデルが構築された [3, 4]。Boeuf らの 1 次元数値計算では、電子とイオンの反応移流拡散方程式及びポアソン方程式を解く drift-diffusion-poisson モデルにマクスウェル方程式を連成し、電流密度を介してプラズ

マと電磁波との相互作用を再現した。入射ビームに対する臨界密度  $n_c = \epsilon_0 m_e \omega^2 / e^2$  を超えたプラズマにより、電磁波が反射され、それが入射電磁波と重ね合わさる事で定在化し、定在波の腹で電場強度が強くなる。高密度の電離スポットから 2 eV 程度の温度を有する電子が自由拡散によって定在波の腹に達し、そこでの強電場により電離が促される事で離散的電離構造が形成される事が分かった。デバイ長  $\lambda_e$  が密度勾配のスケール長  $L$  よりも大きいプラズマ前縁では電子は自由拡散となるが、それ以外の領域では両極性拡散となる事が知られており、ポアソン方程式を解く事で拡散過程の変遷を捉える事が出来る。しかし多次元計算を行う際には、計算負荷の観点からより簡易なモデルが望ましい為、Boeuf らは  $\lambda_e$  と  $L$  との比で拡散係数を切り替える effective diffusion モデルを構築した。大気圧条件では effective diffusion モデルの解は、drift-diffusion-poisson モデルのそれと良く一致し、ポアソン方程式を解く手間が削減されて低計算負荷となった事から、2 次元及び 3 次元計算が行われて E 平面と H 平面における電離構造の違いが明らかとなった [5, 6]。低圧下での数値シミュレーションも行われ、離散的ピークが電子拡散によって鈍った結果、拡散的電離構造へと遷移する事が判明した [7]。また、電離波面伝播速度は自由拡散係数  $D_e$  と電離周波数  $\nu_i$  を用いて  $2\sqrt{D_e \nu_i}$  とモデル化され、それは Hidaka らの実験と良い一致を示す事から、電子の自由拡散と電子衝突電離によって電離波面伝播が維持される事が示唆された [4]。

また、小田らはビーム推進機開発の為に、170 GHz, 1 GW/m<sup>2</sup> のジャイロトロンを使用し、電離波面伝播を観測した [1]。この時の照射ビーム電場強度は電離閾値電場  $E_c$  を下回っており、Boeuf らのモデルでは電離波面伝播維持を説明出来ない。影山らは、ジュール加熱により駆動される衝撃波伝播と effective diffusion モデルを組み合わせ、亜臨界入射条件での電

離波面伝播の再現を試みた [8]. 電子が衝撃波面に先行して拡散する事で先行電離領域を形成し、そこでジュール加熱を生ずる事で膨張領域を形成する. 先行電離領域での局所的な膨張により、換算電場強度  $E/p$  が電離閾値換算電場強度  $(E/p)_c$  を超える事で電離が維持され、亜臨界照射条件での電離波面伝播維持を説明した (図 1).

### 3 レーザー照射時の電離構造

レーザー照射時に誘起されるプラズマや衝撃波の構造は、森ら、嶋村らや遠藤らによってシュリーレン法や自発光ストローク計測により評価されてきた [9–12]. レーザー強度が十分に高い場合は、衝撃波とレーザー吸収領域が同速度で伝播する LSD 構造となるが、葛山ら、城崎ら、白石らや荻野らによる数値シミュレーションによってその再現が試みられた [13–16]. 輻射による先行加熱を考慮し、Park の 2 温度モデルにより熱化学非平衡性を導入して Navier-Stokes 方程式を解く事で衝撃波伝播を数値的に再現した結果、レーザー照射強度が LSD 閾値よりも十分高い場合は、実験で得られた伝播速度と数値計算結果との一致が得られた [13, 16]. 衝撃波背後の高温プラズマから、衝撃波前方に向かって強い輻射が放射され、それにより衝撃波前方で電離を生ずる事で LSD 構造が維持される事が明らかとなった. しかし、LSD 閾値近くのレーザー強度においては、輻射による先行加熱を考慮するだけでは実験値を再現出来なかった. そこで葛山らは先行輻射加熱に加えて、ジュール加熱により生ずる高エネルギー電子と中性粒子との衝突電離による電子生成モデルを組み合わせ、実験で得られる伝播速度の説明を試みたが、輻射加熱に対して電子衝突電離レートは過小であり、LSD 維持に必要な電子生成を得られなかった [13]. 一方、MSD の数値シミュレーションにおいては、自由電子の拡散と電子衝突電離によって駆動される電離波面伝播速度は、実験結果と良く一致しており、LSD の数値計算結果と矛盾する. LSD の数値シミュレーションでは、レーザー吸収帯における電子の並進温度は 0.5 eV 程度と見積もられ、それは MSD の数値計算の電子温度に比べて低い. そのため、電子衝突電離レートと電子の拡散係数が過小評価されており、実験結果を再現出来ていない可能性がある. LSD の数値シミュレーションで用いられている Park の 2 温度モデルは、スペースシャトルの大気圏再突入時の極超音速流れを数値的に再現する為に構築されたモデルであり、緩和速度が十分に早い事を仮定し、自由電子の並進温度と分子の振動温度とを合わせて一つの温度として解く. LSD 閾値近くの弱レーザー強度では、緩和が不十分であり、その仮定が破綻している事から、自由電子の並進温度を正確に見積もれてい

ない可能性がある. 自由電子の並進温度を切り分ける 3 温度モデルを用い、電子の輸送係数をより正確に見積もる事で、実験で得られる LSD 伝播速度を説明出来る可能性がある.

### 4 結言

ビーム誘起プラズマと、それに付随して生ずる衝撃波伝播を再現する為の数値計算を紹介した. マイクロ波放電プラズマとレーザー誘起プラズマとで異なる数値モデルを用いて議論が行われており、両者間で食い違いを生じている. 両者を繋ぐ事の出来る統一的な数値モデルを構築し、整合性を保った議論を展開する事が今後必要であると思われる.

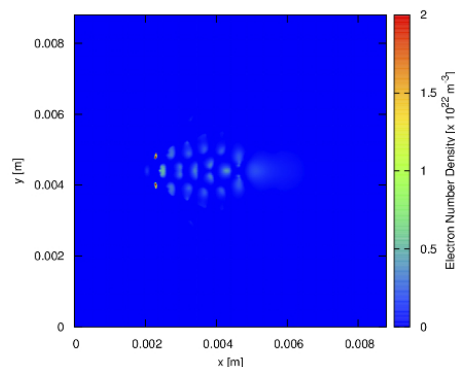


図 1. 亜臨界入射条件における電離波面

- [1] Y. Oda and K. Komurasaki, J. Appl. Phys. **100**, 113307 (2006).
- [2] Y. Hidaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 035003 (2008).
- [3] S. K. Nam and J. P. Verboncoeur, Phys. Rev. Lett. **103**, 055004 (2009).
- [4] J. P. Boeuf *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 015002 (2010).
- [5] B. Chaudhury *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 123505 (2010).
- [6] K. Kourtzanidis *et al.*, Phys. Plasmas **21**, 123513 (2014).
- [7] Q. Zhou and Z. Dong, Appl. Phys. Lett. **98**, 161504 (2011).
- [8] 影山賀昭, 大西直文, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集, STEP-2015-038 (2016).
- [9] 森浩一, 東京大学博士論文 (2003).
- [10] K. Mori *et al.*, J. Appl. Phys **92**, No. 10, pp. 5563–5667 (2002).
- [11] K. Shimamura *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **42**, pp. 3121–3128 (2014).
- [12] 遠藤琢磨, 恩田智久, J. Plasma Fusion Res. **86**, No. 10, pp. 598–603 (2010).
- [13] 葛山浩ら, 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集, STEP-2014-043 (2015).
- [14] 城崎ら, 1次元輻射シミュレーションによるレーザー駆動デトネーションの伝播特性解析, 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演論文集, JSASS-2015-S009 (2015).
- [15] 白石裕之ら, 日本航空宇宙学会論文集 **47**, No. 549, pp. 383–388 (1999).
- [16] Y. Ogino *et al.*, J. Phys. **454**, 012080 (2013).