

磁気ノズルスラスタにおけるエネルギー輸送と中性粒子が 推進性能に与える影響の解析

Investigation of energy transport and neutral effect on thruster performance
in magnetic nozzle thrusters

研究代表者：鷹尾 祥典（横浜国立大学）
takao@ynu.ac.jp

研究分担者：江本 一磨（横浜国立大学）
emoto-kazuma-vc@ynu.ac.jp

担当：数値計算コードの構築および実行と結果の解析、論文の執筆

研究目的 (Research Objective):

近年、宇宙機における電気推進機の利用が急激に拡大している。電気推進機はプラズマを高速で噴射することで宇宙機に推力を与えるシステムであり、高い比推力が特徴である。しかし、豊富な作動実績を持つ静電加速型電気推進機の多くはプラズマの生成と加速に電極を用いており、プラズマによる電極損耗が性能低下を引き起こしている。これに対し、電気推進機から電極を排除した磁気ノズルスラスタが提案されており、世界各国で活発な研究開発が進められている。

磁気ノズルスラスタでは、静磁石あるいはソレノイドコイルによってノズル形状の発散磁場を作り、磁力線に沿ってプラズマを加速することで推力を得る。多くの磁気ノズルスラスタはプラズマの生成に高周波放電を採用するため、プラズマの生成から加速に至るまで完全無電極で動作する構成となる。完全無電極という特徴から、電極損耗による課題を克服でき、電気推進機の長寿命化が期待されている。

これまでの実験において、強磁場条件では中心軸上の密度が下がるとともに、周辺部の密度が上がる **bimodal** な密度構造が観測されている。これに対し、プラズマ生成に寄与する高エネルギー電子は RF 加熱によって生じるため、RF アンテナ近傍かつ磁化した電子の移動経路となる磁力線上で電離が起こると予想されていた。しかし、実験で高エネルギー電子の挙動のみを観測することはできず、**bimodal** な密度構造形成と高エネルギー電子の輸送過程は十分に明らかにされていなかった。密度構造はプラズマ中のエネルギー輸送と推力生成につながるため、どのような物理で密度構造が決定されているかを明らかにすることが求められる。

本研究では、磁気ノズルスラスタを **particle-in-cell / Monte Carlo collisions (PIC-MCC)** 法で解析し、実験で観測されていた **bimodal** な密度構造を再現するとともに、密度構造形成に寄与する高エネルギー電子の挙動を明らかにすることを目的とした。

計算手法 (Computational Aspects):

Fig.1 に磁気ノズルスラスタの計算モデルを示す。RF アンテナ、誘電体壁、ソレノ

イドコイルの3点で構成され、RFによるICP放電でプラズマを生成する。ソレノイドコイルは磁気ノズルを形成し、プラズマを加速・排気する。計算コスト削減のために2次元モデルを採用し、 xy 軸に対して対称を仮定している。計算領域は $2.5\text{ cm} \times 0.56\text{ cm}$ の範囲である。Fig.1のカラーマップはソレノイド磁場の磁場強度、黒実線は磁力線を示している。

磁気ノズルスラストのPIC-MCC計算は、荷電粒子の軌道計算、粒子間衝突の計算、荷電粒子が作る静電場の算出、RF電磁場の更新で構成される。プラズマ中の荷電粒子として Xe^+ と e^- を扱い、その軌道をBoris法で求める。粒子間衝突として中性粒子-電子衝突を考慮し、MCC法を用いて計算する。荷電粒子の位置から電荷密度を算出し、高速Fourier変換を用いて静電場を得る。ソレノイドコイルが作る静磁場は計算開始前に高速Fourier変換で算出した。RFアンテナが作る誘導電磁場はMaxwell方程式から得た。

1セルを $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ とし、計算領域を 500×112 セルに分割した。中性粒子密度は $3 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ で時間・空間的に一定とした。イオンの時間刻みは 0.125 ns 、電子の時間刻みは 3.57 ps とした。RF周波数を 80 MHz とし、吸収電力が 3.5 W となるようにRF電流を制御した。

過去の論文において、密度構造は磁気ノズルを構成する磁場強度に依存することが示唆されていたため、ソレノイド電流として 0 kA 、 0.4 kA 、 2.0 kA の3条件を設定し、磁場強度に対する依存性を解析した。

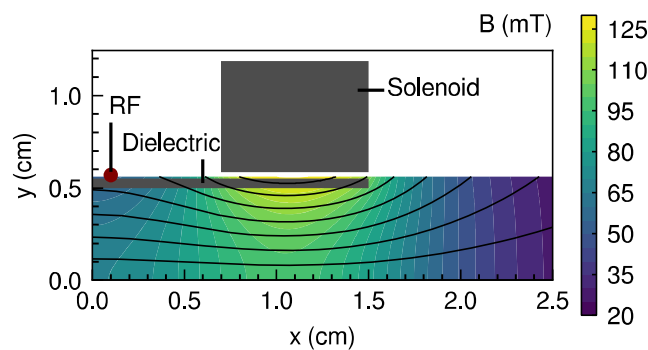


Fig.1 計算モデル. Reproduced from K. Emoto, et al., Phys. Plasmas **30**, 013509 (2023), with the permission of AIP Publishing.

研究成果 (Accomplishments) :

計算の結果、 0 kA と 0.4 kA の条件では中心軸上が最大密度となる密度構造になった一方、 2.0 kA の条件では中心軸上で密度が下がり、周辺部に最大密度点が現れるbimodalな密度構造となった。磁場強度によって密度構造が変化しており、実験結果を定性的に再現する計算結果となっている。

電子密度分布から高エネルギー電子のみを抽出し、 y 方向に最大密度・温度となる場所を抽出したものをFig.2に示す。Fig.2(a)–Fig.2(c)より、青実線で示す高温線と

橙破線で示す高エネルギー密度線は乖離することが分かる。高エネルギー電子は RF 加熱で生成されることが予想されることから、高温度線から高エネルギー密度線へと高エネルギー電子が輸送されていることが示唆される。

弾性衝突による最大輸送距離を $4r_L$ と見積もり、青線で示す高温度線から中心軸方向への輸送距離を緑領域で示す。Fig.2(a) と Fig.2(b) に示す 0 kA と 0.4 kA の条件では、 $y=0$ の中心軸上まで緑領域が達し、高エネルギー電子が弾性衝突によって輸送されることを意味する。一方で Fig.2(c) に示す 2.0 kA の条件では、 $y=0$ の中心軸上まで緑領域が達せず、高エネルギー電子が中心軸上まで輸送されないと言える。そのため、中心軸上では電離が起こりづらく、bimodal な密度構造が形成されたと考えられる。以上より、bimodal な密度形成は高エネルギー電子の生成場所と弾性衝突による粒子輸送によって決まることが明らかになった。

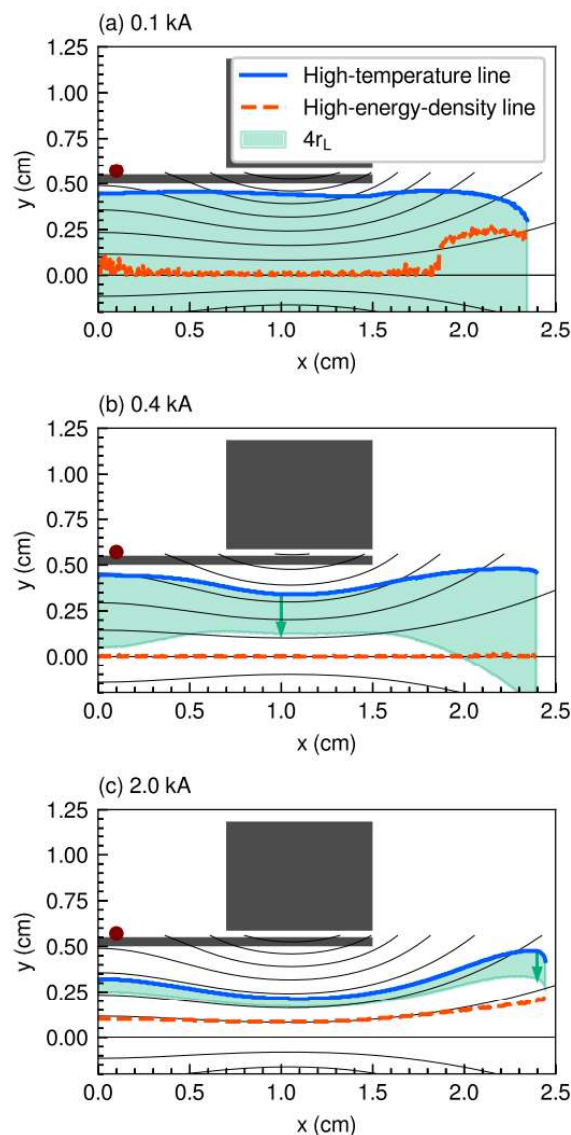


Fig.2 スラスタ内部の高温度線(青実線)と高エネルギー電子密度線(橙破線). Reproduced from K. Emoto, et al., Phys. Plasmas **30**, 013509 (2023), with the permission of AIP Publishing.

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. K. Emoto, K. Takahashi, and Y. Takao, Density profile transition and high-energy electron transport in a magnetically expanding radio frequency plasma, *Physics of Plasmas*, 30, p. 013509, January 2023, doi:10.1063/5.0126901.

(口頭)

1. Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao, Kinetic Analysis of Thrust Generation and Axial Momentum Gain in Magnetic Nozzle Acceleration, 37th International Electric Propulsion Conference, Boston, United States, June 2022.
2. Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao, Numerical investigation on plasma expansion and particle energy in a magnetic nozzle, The 75th Annual Gaseous Electronics Conference, Sendai, Japan, October 2022.
3. Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao, Numerical Investigation of Magnetic Nozzle Plasma Expansion Using Fully Kinetic Simulations, The 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, online, October 2022. [招待講演]
4. Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao, Particle analysis of electron cooling and ion acceleration in a magnetic nozzle thruster, The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Kanazawa, Japan, March 2023.
5. 江本 一磨, 磁気ノズル加速シミュレーションにおける下流境界条件とポリトロープ過程, 第 27 回 NEXT(数値トカマク)研究会, 京都, 2022 年 8 月.
6. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 磁気ノズルによるプラズマ膨張におけるエネルギー依存性の数値解析, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会, 熊本, 2022 年 11 月.
7. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, プラズマ粒子シミュレーションによる磁気ノズルプラズマ膨張の数値解析, 第 39 回プラズマ・核融合学会年会, 富山, 2022 年 11 月.
8. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 無電極推進機内部のエネルギー分布関数と温度構造に関する数値解析, 令和 4 年度 宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2023 年 1 月.
9. 江本 一磨, 磁気ノズル型推進機における密度構造形成の運動論的解析, 第 25 回若手科学者によるプラズマ研究会, 那珂, 2023 年 3 月.
10. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 磁気ノズルスラスタにおける密度構造形成と高エネルギー電子生成の解析, STE シミュレーション研究会・KDK シンポジウム合同研究会, 京都, 2023 年 3 月.