

# 磁気ノズルスラスト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（筑波大学）  
emoto@prc.tsukuba.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

## 研究目的 (Research Objective):

多くの宇宙機に電気推進機が採用されている。推進剤を電氣的に高速噴射することで推力を発生するシステムであり、高い比推力が特徴である。しかし、これまでの電気推進機では電極を用いたプラズマの生成・加速が多く、電極損耗とそれによる推進性能の低下が課題となっていた。これに対し、プラズマの生成・加速に電極を用いない磁気ノズルスラストが提案されており、国内外で活発な研究開発が進められている。

磁気ノズルスラストではノズル形状の発散磁場を配置し、磁力線に沿ったプラズマの輸送によって推力を発生させる。また、プラズマの生成には高周波放電が採用されることが多く、プラズマの生成から加速に至るまで完全無電極で行われる。ゆえに、電極損耗の課題を解決できることが期待されており、大電力化と長寿命化が見込まれる。

磁気ノズルにおけるプラズマ加速は、古典的なラバールノズルの理論と同様に、静圧から動圧への運動量変換によって説明される。この物理を熱力学的に捉えれば、電子密度  $n_e$  と電子温度  $T_e$  の間のポリトロプ関係  $n_e T_e^{-\gamma} = \text{const.}$  によって記述される。ここで、 $\gamma$  はポリトロプ指数である。 $\gamma = 5/3$  となる断熱過程が期待されるが、実験では  $\gamma = 1$  となる等温過程が観測されることが多い。その一方、磁気ノズル中の静電ポテンシャルを意図的に排除した実験では、 $\gamma = 5/3$  に近いプラズマ膨張が観測されている。これらの実験結果から、静電ポテンシャルによって閉じ込められる低エネルギー電子は  $\gamma = 1$  となり、静電ポテンシャルを乗り越える高エネルギー電子は  $\gamma = 5/3$  を示すのではないかと考えた。

本研究では磁気ノズルスラストの particle-in-cell and Monte Carlo collisions (PIC-MCC) シミュレーションを行い、磁気ノズル加速における  $\gamma$  の電子エネルギー依存性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トの計算モデルを示す。RF アンテナ、誘電体壁、ソレノ

イドの3点で構成される。RF アンテナから高周波電力を供給し、誘導結合プラズマを計算する。ソレノイドは磁気ノズルを形成し、磁力線に沿ってプラズマを加速・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ており、 $xy$  軸に対して対称である。計算領域は  $2.5\text{ cm} \times 0.56\text{ cm}$  の範囲である。

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計算、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  $\text{Xe}^+$  と  $e^-$  を扱い、その軌道を Boris 法で求める。粒子間衝突として電子-中性粒子衝突を考慮し、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 方程式から計算した。

1セルを  $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$  とし、計算領域を  $500 \times 112$  セルに分割した。計算収束時の Debye 長がセル長と同程度になるように設定している。中性粒子密度は  $3 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 、中性粒子温度は  $300\text{ K}$  で時間・空間的に一定とした。RF 周波数は  $80\text{ MHz}$  とし、吸収電力が  $3.5\text{ W}$  となるように RF 電流を制御した。イオンの時間刻みは  $0.125\text{ ns}$ 、電子の時間刻みは  $3.57\text{ ps}$  とした。ソレノイド電流は  $2.0\text{ kA}$  としており、ソレノイド直下で約  $100\text{ mT}$  の磁場が生成される。Fig.1 のカラーマップはソレノイド磁場の磁場強度、黒実線は磁力線である。

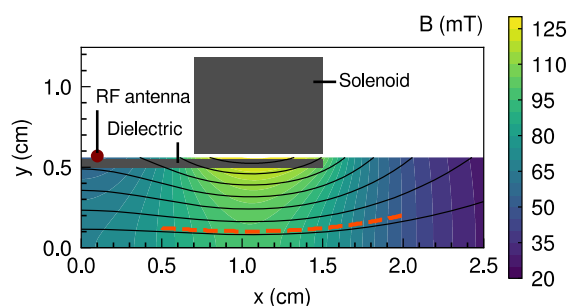


Fig.1 Calculation model. The thruster consists of a dielectric, RF antenna, and solenoid. A color map shows the magnetic field strength and solid black lines indicate the magnetic field lines. The polytropic index is analyzed on the dashed orange line, which is along a magnetic field line. (Reproduced from K. Emoto, et al., The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Kanazawa, March 2023)

## 研究成果 (Accomplishments) :

Fig.2(a)にポリトロプ関係を示す。なお、Fig.1 の橙破線上で電子密度  $n_e$  と電子温度  $T_e$  を取得しており、電子のエネルギー  $E$  によって4つの範囲に分けている。また、添え字0は  $x = 0.5\text{ cm}$  における値である。

Fig.2(a)より、 $n_e$  は常に減少していることが分かる。磁気ノズルによってプラズマが膨張するため、連続の式に従って密度が減少したと考えられる。一方で  $T_e$  は  $E$  の範囲によって挙動が異なる。

0–15 eV の低エネルギーの電子は  $T_e$  が変化せず、 $T_e/T_{e0} \sim 1$  となっている。ゆえに、等温膨張に近い現象だと考えられる。一方で 15–20 eV の高エネルギーの電子は  $T_e$  が減少している。ここで、Fig.2(a)の黒実線は  $n_e T_e^{\gamma-1} = \text{const.}$  を示す補助線であり、15–20 eV の電子は  $\gamma = 2-3$  の範囲にあることが分かる。本研究では 2 次元計算モデルを用いたために  $\gamma = 5/3$  を超えるが、断熱膨張に近い現象が示唆される。ゆえに、静電ポテンシャルを乗り越える高エネルギーの電子は断熱的な過程を経ており、熱的な損失の少ない運動量変換が行われていると考えられる。

Fig.2(b) に  $(x, y) = (2 \text{ cm}, 0.2 \text{ cm})$  における電子エネルギー分布関数を示す。電子エネルギー分布関数の傾きが  $E = 24 \text{ eV}$  で変化しており、 $E < 24 \text{ eV}$  では 3.1 eV、 $E > 24 \text{ eV}$  では 2.0 eV の温度となっている。Fig. 2(b)に示した 15–20 eV の温度減少と定性的に一致しており、電子エネルギー分布関数においても高エネルギー電子が減熱されていることが示された。

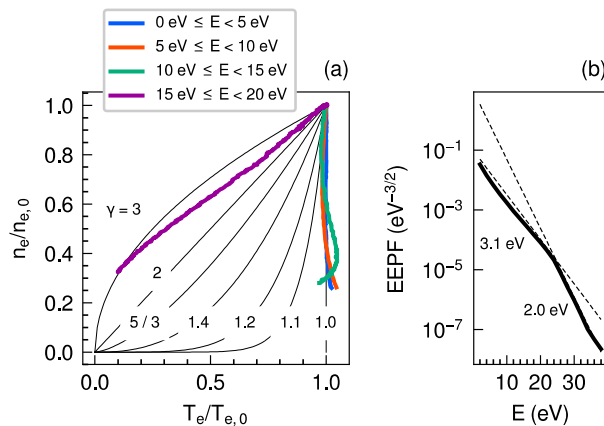


Fig.2 (a) The polytropic relation on the dashed orange line (see Fig. 1). Solid black lines are visual guides for the theoretical  $\gamma$ . (b) electron energy probability function at  $(x, y) = (2 \text{ cm}, 0.2 \text{ cm})$ . Dashed black lines are plotted using the least squares method. (Reproduced from K. Emoto, et al., The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Kanazawa, March 2023)

## 公表状況 (Publications) :

### (口頭)

1. 安部 亮佑, 西山 和孝, 鷹尾 祥典, マイクロ波放電式中和器を対象とした 2 次元 PIC コードの開発, 令和 5 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2024 年 1 月
2. 江本 一磨, 東郷 訓, 片沼 伊佐夫, 坂本 瑞樹, ミラー装置を対象とした particle-in-cell シミュレーションの開発と無電極推進との関連, 令和 5 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2024 年 1 月
3. 江本 一磨, 東郷 訓, 坂本 瑞樹, 開放端プラズマを対象とした準 1 次元 PIC 計算の初期検討, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 盛岡, 2023 年 11 月

4. K. Emoto, S. Togo, Y. Takao, K. Takahashi, and M. Sakamoto, Effects of high-energy electrons on the low- and high-temperature plasma expansion in the divergent magnetic fields, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Nagoya, November 2023
5. K. Emoto, S. Togo, Y. Takao, K. Takahashi, I. Katanuma, M. Sakamoto, A preliminary kinetic study on plasma flow in open magnetic systems using a quasi-one-dimensional particle-in-cell model, Global Plasma Forum, Aomori, October 2023
6. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 磁気ノズルスラストにおける高エネルギー電子輸送のPIC-MCC解析, 日本物理学会 第78回年次大会, 仙台, 2023年9月
7. K. Emoto, S. Togo, Y. Takao, K. Takahashi, and M. Sakamoto, Preliminary Kinetic Analyses of Open Magnetic Systems for Low- and High-Temperature Plasmas, The 2nd International Fusion and Plasma Conference & The 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma, Busan, August 2023
8. K. Emoto, K. Takahashi, and Y. Takao, Particle-in-Cell and Monte Carlo Collision Simulations of Laboratory Plasma and Analysis of Plasma Expansion in Magnetic Nozzles, 34th IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe, August 2023
9. 江本 一磨, 発散磁場構造を持つ RF プラズマ源における密度構造形成と高エネルギー電子輸送の運動論的解析, 第28回数値トカマク(NEXT)研究会, 宇治, 2023年8月