

磁気ノズルスラストにおける磁化プラズマとデタッチメントの運動論的解析

Fully kinetic analyses of magnetized plasmas and their detachment
in magnetic nozzle thrusters

研究代表者：鷹尾 祥典 (横浜国立大学)

研究分担者：江本 一磨 (核融合科学研究所)

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):

有人火星探査を始めとした大規模宇宙物資輸送を実現するため、大電力電気推進機の研究開発が進められている。その中でも、近年めざましい性能向上が進んでいる電気推進機が磁気ノズルスラストである。磁気ノズルスラストは高周波やマイクロ波を用いてプラズマを生成し、磁気ノズルと呼ばれるノズル形状の磁力線でプラズマを高速噴射する。プラズマの生成・加速を完全無電極で行うことから、大電力化における寿命の観点で有利とされる。

電気推進機の性能指標の一つに推進効率 η_T があり、 $\eta_T = P_b / P_{in}$ で定義される。ここで、 P_b はプラズマビームのエネルギー、 P_{in} は投入電力である。磁気ノズルスラストは完全無電極であることから、 P_{in} は基本的に高周波またはマイクロ波から供給される電力のみである。高周波またはマイクロ波によって投入される電力は大部分が電子の熱エネルギーとして吸収されるため、電子の熱エネルギーがいかにプラズマビームのエネルギーへと変換されるかが重要な物理となる。

2021 年には $\eta_T \sim 20\%$ ¹⁾、2022 年には $\eta_T \sim 30\%$ が実験的に示されており²⁾、近年の著しい性能向上が確認されている。一方、2021 年の数値シミュレーションでは $\eta_T \sim 40\%$ が示されており³⁾、さらなる推進効率の向上が期待される。

本研究は $\eta_T \sim 40\%$ が示された先行研究において、どのような原理で高い推進効率が生じたのかを明らかにすることを目的とする。先行研究の数値シミュレーションでは主にエネルギー収支と推進効率を議論していたが、本研究ではスラスト内部のイオン・電子によるエネルギーフラックス分布を解析し、磁気ノズル内部のエネルギー輸送を議論する。

計算手法 (Computational Aspects):

計算モデルは先行研究と同様のため³⁾、ここでは簡潔に述べる。計算領域は $2.5 \text{ cm} \times 0.56 \text{ cm}$ である。水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸とし、 x - y 平面のプラズマを解析する。また、 xy 軸に対して対称な計算モデルとし、1/4 領域のみを計算で扱う。

$y = 0.5 \text{ cm}$ に厚さ 0.05 cm 、長さ 1 cm の誘電体板を配置する。また、 $x = 0.1 \text{ cm}$ 、 $y =$

0.57 cm には高周波アンテナを配置する。ソレノイドコイルは誘電体の上部に配置し、紙面垂直方向のソレノイド電流で xy 平面の磁気ノズルを構成する。ここで、 $\eta_T \sim 40\%$ となったソレノイド電流 2 kA を計算条件とする。 $x = 2.5$ cm、 $y = 0.56$ cm の境界条件は電位 0 の金属壁とした。ガス種はキセノンである。

計算手法には particle-in-cell / Monte Carlo collisions (PIC-MCC) 法を用いる。イオン・電子は粒子として扱い、それぞれ運動方程式を解くことで時間発展する。粒子間衝突は中性粒子-電子間衝突を扱い、弾性・励起・電離衝突を MCC 法で解く。粒子の座標から電荷密度を算出し、Poisson 方程式から静電場を計算する。得られた静電場は運動方程式で使用される。高周波アンテナによって作られる高周波電磁場は Maxwell 方程式から計算する。また、磁気ノズルの静磁場は Maxwell 方程式から得る。

エネルギーフラックス p は $p = 2/3 mnu^3$ より計算する。各点の粒子情報からエネルギーフラックス p を計算することで、 p の空間分布が得られる。結果では推進効率に寄与する x 方向エネルギーフラックス p_x を議論する。

研究成果 (Accomplishments) :

Fig. 1 に x 方向イオンエネルギーフラックス $p_{i,x}$ と x 方向電子エネルギーフラックス $p_{e,x}$ の x - y 分布を示す。概ね $x > 1$ cm の磁気ノズルスロートより下流において、 $+x$ 方向のエネルギーフラックスがイオン・電子ともに確認できる。Larmor 半径の小さい電子は磁気ミラーによってトラップされるため、ロスコーンに入った電子が磁気ノズル下流へのエネルギーフラックスを生み出していると考えられる。一方、Larmor 半径の大きいイオンは磁気ミラーの影響がほとんどないと考えられ、電子が下流へと輸送されることに伴う両極性電場がイオンを加速していると推測される。

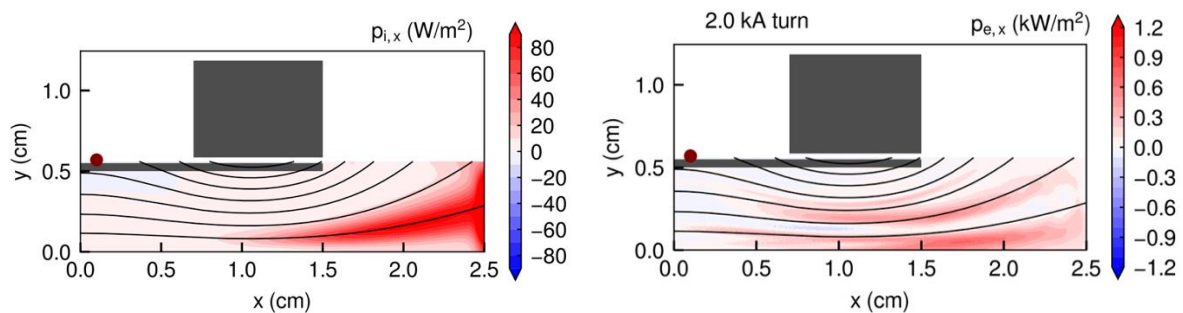


Fig. 1 x 方向イオンエネルギーフラックス $p_{i,x}$ と x 方向電子エネルギーフラックス $p_{e,x}$ の x - y 分布。 $x > 1$ cm の磁気ノズルスロートより下流において、 $+x$ 方向のエネルギーフラックスがイオン・電子ともに確認できる。

磁気ノズル下流における $+x$ 方向のエネルギーフラックスは、推進効率 η_T の分子 P_b に寄与する。ゆえに、イオン・電子ともに推進効率 η_T の向上に寄与していると言える。特に、イオンの x 方向エネルギーフラックス $p_{i,x}$ が数十 W/m^2 であるのに対し、電子の x 方向エネルギーフラックス $p_{e,x}$ は部分的に一桁大きい数百 W/m^2 を示している。ゆえに、 $\eta_T \sim 40\%$ を示す磁場強度

においては、電子の x 方向エネルギーフラックスが少なくとも部分的に卓越すると考えられる。従来の静電加速型の電気推進機ではイオンのエネルギーフラックスが支配的になることがよく知られているが、電磁加速型の磁気ノズルスラスタでは電子のエネルギーフラックスが支配的になることが新たに示唆された。今後は電子のエネルギーフラックスが支配的になる原理を解明するため、ロスコーンや両極性電場を含めた詳細な解析を進める予定である。

参考文献

- 1) K. Takahashi, Sci. Rep. **11**, 2768 (2021).
- 2) K. Takahashi, Sci. Rep. **12**, 18618 (2022).
- 3) K. Emoto, K. Takahashi, and Y. Takao, Front. Phys. **9**, 779204 (2021).

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. K. Emoto, Fully kinetic analyses of radiofrequency plasma sources in space propulsion and fusion science, Helicon Plasma Workshop, Kasuga, March 2026, invited.
2. 江本 一磨, 高周波プラズマ源の PIC-MCC 計算, 共同研究「水素負イオン源プラズマにおける同位体効果に関する研究」 研究会合, 横浜, 2026 年 3 月.
3. K. Emoto, Laboratory plasmas and their numerical simulations for space propulsion, 17th HOPE meeting, Tsukuba, March 2026.
4. 喜多内悠斗, 高橋和貴, 鷹尾祥典, 「磁気ノズルによるプラズマ流れと波動特性に関する 3 次元粒子計算」, 令和 7 年度 宇宙輸送シンポジウム, 2026 年 1 月 22-23 日, 宇宙科学研究所, STEP-2025-053.
5. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 磁気ノズル RF プラズマ推進機におけるエネルギー流れの運動論的解析, 令和 7 年度 宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2026 年 1 月.
6. K. Emoto, K. Takahashi, Y. Takao, Numerical Investigation of Energy Losses and Flows in Magnetic Nozzle Plasma Thrusters, The 14th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, Kaohsiung, December 2025.
7. 江本 一磨, 高橋 和貴, 鷹尾 祥典, 磁気ノズルプラズマ加速におけるエネルギー流れの数値解析, 第 42 回 プラズマ・核融合学会 年会, 京都, 2025 年 12 月.
8. K. Emoto, K. Takahashi, Y. Takao, Numerical Investigation of Energy Flows in a Magnetic Nozzle Radio-frequency Plasma Thruster, The 78th Annual Gaseous Electronics Conference, Tsukuba, October 2025.
9. K. Emoto, T. Seto, S. Togo, N. Ezumi, M. Sakamoto, 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Tsukuba, September 2025.
10. Yuto Kitauchi, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao, "Numerical Investigations on Plasma Acceleration and Wave-driven Transport in a Magnetic Nozzle," 35th International Symposium on Space Technology and Science, Jul. 12-18, 2025, ASTY Tokushima, 2025-b-11-3.
11. 江本 一磨, 電気推進機の運動論的解析と核融合科学との学際連携, 核融合科学研究所 研究部セミナー, 土岐, 2025 年 7 月.
12. K. Emoto, Fully kinetic modeling and simulations of low-temperature plasmas and magnetic nozzle plasma flow, 14th ITER International School, Aix-en-Provence, July 2025.