

# 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

## Numerical analysis of magnetic nozzle plasma expansion using plasma particle simulations

江本一磨<sup>1,2</sup>, 高橋和貴<sup>3</sup>, 鷹尾祥典<sup>1</sup>  
Kazuma Emoto<sup>1,2</sup>, Kazunori Takahashi<sup>3</sup>, Yoshinori Takao<sup>1</sup>

横国大<sup>1</sup>, 学振<sup>2</sup>, 東北大<sup>3</sup>  
YNU<sup>1</sup>, JSPS<sup>2</sup>, Tohoku Univ.<sup>3</sup>

### 1 本文

低温プラズマを高速で噴射し、人工衛星や宇宙探査機に推力を与えるプラズマ推進機の研究開発が活発に行われている [1]。代表的なプラズマ推進機としてはイオンスラスタやホールスラスタが挙げられ、これまでに多数の宇宙ミッションを成功させている [2]。一方でこれらのプラズマ推進機はプラズマの生成・加速に電極を使用しており、長時間の使用によって電極損耗の問題が生じる。一度打ち上げると修理や交換のできない宇宙ミッションにおいて、電極損耗はプラズマ推進機の性能低下をもたらす致命的な問題となる。

これに対し、完全無電極でプラズマの生成・加速を行う推進機の研究開発が近年進められており、中でも磁気ノズルと呼ばれるラバールノズル形状の磁力線でプラズマを加速する方式が注目を集めている [3]。ここで 1 次元流体モデルを適用すると、規格化された電子温度  $T_{e0}/T_e$  とイオンマッハ数  $M_i$  の関係は、

$$\frac{T_{e0}}{T_e} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_i^2, \quad (1)$$

と書ける。 $\gamma$  はポリトロップ指数である。すなわち、プラズマの膨張によって電子の熱エネルギーがイオンの流れエネルギーへと変換されていくプロセスを意味する。また同じ  $T_{e0}/T_e$  でも  $\gamma$  によって  $M_i$  は異なるため、 $\gamma$  は推進機の性能を決定する重要なパラメータとなる。本研究では、磁気ノズルによって加速されるプラズマはどのようなポリトロップ指数を取るか、どのような物理でプラズマ膨張のポリトロップ指数が決定されるか、という点に着目して数値的な解析を行った。

磁気ノズルによるプラズマ膨張は particle-in-cell / Monte Carlo collision (PIC-MCC) 法に基づく粒子シミュレーションで解析した [4]。Xe<sup>+</sup> と e<sup>-</sup> を対象とし、荷電粒子の運動を Boris 法で計算した。e<sup>-</sup> と中性粒子の衝突は MCC 法で計算し、弾性・励起・電

離衝突を扱った。粒子が持つ電荷が作る静電場は高速 Fourier 変換で解き、荷電粒子の運動に反映させる。プラズマ加熱には誘導結合モデルを適用し、RF によって誘起される電磁場を解いた。磁気ノズルを構成する静磁場は 2 kA のソレノイドコイルとし、計算開始前に解くことで固定とした。2 次元計算モデルを採用し、実験で用いられる推進機を約 1/6 にスケールダウンした計算モデルを構築した。計算結果は定常状態について議論する。

磁気ノズルの中心軸上における電子密度・温度の分布から  $\gamma$  を算出したところ、電子が持つエネルギーによって  $\gamma$  が異なる値を取ることが明らかになった。まず 0–10 eV の比較的低温の電子は  $\gamma \sim 1$  となり、等温的な膨張を示した。次に 10–15 eV の電子は  $\gamma \sim 1.1$ –1.4 となり、やや断熱的な膨張に変化した。最後に 15 eV 以上の電子は  $\gamma \sim 3$  となり、1 次元的な断熱膨張を示唆する結果となった。すなわち、大きなエネルギーを持つ電子ほど  $\gamma$  が大きく、電子温度がより顕著に低下するとともに、イオンマッハ数を増加させると言える。

本研究では磁気ノズルプラズマ膨張を粒子シミュレーションで数値的に解析し、電子が持つエネルギーによってポリトロップ指数が異なることを明らかにした。講演では磁気ノズル内部の密度・温度分布を交えて詳細を議論する。

### References

- [1] Stéphane Mazouffre. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 25(3):033002, 2016.
- [2] Dan Lev, Roger M Myers, Kristina M Lemmer, Jonathan Kolbeck, Hiroyuki Koizumi, and Kurt Polzin. The technological and commercial expansion of electric propulsion. *Acta Astronaut.*, 159:213–227, 2019.
- [3] Kazunori Takahashi. Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles. *Rev. Mod. Plasma Phys.*, 3(1):3, 2019.
- [4] Charles K Birdsall and A Bruce Langdon. *Plasma physics via computer simulation*. CRC press, 2018.