

## Numerical investigation of energy transportation in a magnetic nozzle plasma thruster

江本一磨<sup>1</sup>, 高橋和貴<sup>2</sup>, 鷹尾祥典<sup>1</sup>Kazuma Emoto<sup>1</sup>, Kazunori Takahashi<sup>2</sup>, Yoshinori Takao<sup>1</sup>横国大<sup>1</sup>, 東北大<sup>2</sup>YNU<sup>1</sup>, Tohoku Univ.<sup>2</sup>

### 本文

宇宙機の主推進として期待される磁気ノズルプラズマスラスタの研究開発が世界各国で行われている<sup>1)</sup>。磁気ノズルプラズマスラスタはrfアンテナからの電力供給によりプラズマを生成し、磁気ノズルを通して電磁的にプラズマを加速・噴射する。完全無電極で構成されることから電極損耗の心配がなく、宇宙空間における長寿命運転が期待される。しかし、スラスタの性能指標である推進効率は最大でも約18%にとどまっている<sup>1)</sup>。すでに実用化されているホールスラスタの推進効率は35-60%となっており<sup>2)</sup>、磁気ノズルプラズマスラスタは推進効率の低さが課題となっている。推進効率向上のためには、効率低下の原因となるエネルギー損失を明らかにする必要がある。しかし、個々のイオン・電子がどこでどのぐらいのエネルギーを損失しているかを実験的に評価することは難しい。そこで、particle-in-cell/Monte Carlo collisions (PIC/MCC)法を用いた数値計算を行うことで、磁気ノズルプラズマスラスタ内部のエネルギー輸送を計算した。

図1に計算領域を示す。rfアンテナから電力を供給することでプラズマを生成し、ソレノイドで磁気ノズルを構成する。PIC/MCC法を用いることで、イオン・電子の軌道および衝突を計算した。その際、rfアンテナから供給する電力 $P_{in}$ が一定になるように制御した。

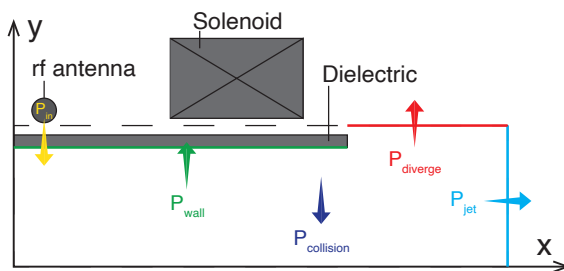


図1 計算領域およびエネルギー損失.

ICP加熱によってプラズマがエネルギーを得た後、プラズマ中のイオン・電子は壁面への損失、あるいは粒子間衝突でエネルギーを失う。この時失った運動エネルギーを積算することで、放電室壁面で損失したエネルギー $P_{wall}$ 、計算領域の境界で損失したエネルギー $P_{jet} \cdot P_{diverge}$ 、衝突で損失したエネルギー $P_{collision}$ を求めた。ここで、推進効率 $\eta$ は

$$\eta = \frac{P_{jet}}{P_{in}} \quad (1)$$

で定義される<sup>2)</sup>。ただし、 $P_{jet}$ は噴射されるビームのエネルギーである。本計算では、 $x$ 軸正方向の速度を持って計算領域から出たイオンのエネルギーを $P_{jet}$ として推進効率を計算した。

ソレノイド直下の磁場強度として $5 \cdot 20 \cdot 100$  mTの3種類で計算を行ったところ、推進効率はそれぞれ1.4, 21, 41%となった。磁気ノズルの磁場強度を上げることで、推進効率が大きく向上することが分かった。磁場強度の小さい5 mTの条件で推進効率が低い原因は、放電室壁面に損失するエネルギー $P_{wall}$ であった。磁気ノズルの磁場強度を向上させることで放電室壁面へのエネルギー損失を抑制し、推進効率が向上したと言える。

磁気ノズルプラズマスラスタを対象としたPIC/MCC計算を行い、スラスタ内部のエネルギー輸送を計算した。磁場強度を上げることで放電室壁面への損失を抑制し、推進効率が向上する結果が得られた。

### 参考文献

- 1) K. Takahashi, Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles, Rev. Mod. Plasma Phys. **3**, 3 (2019).
- 2) D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, Jew Jersey, 2008).