

# 無電極プラズマ推進における電磁加速の数値シミュレーション

## Numerical Simulation of Electromagnetic Acceleration in Electrodeless Plasma Thruster

大西直文, 内ヶ崎大

Naofumi Ohnishi, Dai Uchigasaki

東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

深宇宙探査を目指したより長寿命な電気推進技術確立するためには、既存の電気推進機が持つ電極損耗の問題を解決する必要がある [1]。この問題を克服するために、ヘリコン波プラズマを利用した、プラズマと電極とが直接接触しないという意味で無電極なプラズマの電磁加速法が提案されている [2]。加速方法にはいくつかのバリエーションがあるが、我々は回転磁場 (RMF) と拡散磁場ノズルを用いた無電極電磁加速方式を対象として研究を行っている。

Fig. 1 は RMF 加速方式における加速部の模式図である。加速装置はプラズマが通るガラス管の外側に配置された RMF を発生させるためのアンテナと永久磁石もしくはコイルによって発生させる磁気ノズルによって構成されている。アンテナはプラズマとガラス管によって仕切られているため、プラズマと接触する部分はガラス管だけである。この方式で無電極な電磁加速を実現することができれば、推進機の長寿命化が期待できる。Fig. 2 は加速部の噴出方向に垂直な面の模式図である。RMF の角周波数  $\omega$  を  $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$  とすれば、電子とイオンの慣性の違いによって、電子のみが RMF による  $\theta$  方向のローレンツ力に反応することができ、周方向電流  $J_\theta$  が生じる [3]。ここで、 $\omega_{ci}$  は回転磁場  $B_\omega$  に対するイオンのサイクロトロン角周波数、 $\omega_{ce}$  は  $B_\omega$  に対する電子のサイクロトロン角周波数である。回転磁場  $B_\omega$  によって軸方向電流  $J_z$  が生じるが、これは電子の運動によるものであるため、電子と中性粒子との衝突周波数  $\nu$  にしたがって  $B_\omega$  が生成する軸方向電場  $E_z$  との間に位相差  $\delta$  が生じる。RMF の周波数よりも衝突周波数が十分高いときは  $\delta = 0$  となり、 $\theta$  方向のローレンツ力  $F_\theta$  が正味の値を持つ。この正味の  $F_\theta$  が電子の回転電流  $J_\theta$  を生み出し、推力  $F$  が  $J_\theta$  と磁気ノズルの動径方向成分  $B_{mr}$  のローレンツ力として得られる。我々は、このような加速部断面における  $J_\theta$  の生成過程を詳細に解析するため、FDTD による電磁場計算を用いた二次元の PIC-MCC コードを開発し、それによる数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーションで得られた結果より、位相差  $\delta$  に対する中性粒子の衝突周波数  $\nu$  と回転磁場の周波数  $f = \omega/2\pi$  の比の影響を示したのが Fig. 3 である。凡例の数値は  $\nu/f$  のおよその値を示しており、実線は  $J_z$  の空間半周期分における平均値、破線は  $E_z$  の空間半周期分における平均値を示している。中性粒子との衝突が十分でない  $\nu/f = 0.1$  のときは  $\delta \sim \pi/2$  となっており、この場合は期待した  $J_\theta$  を得ることができないと予想される。一方、衝突が十分な  $\nu/f = 100$  のときは、完全に  $J_z$  と  $E_z$  の位相が一致することでオームの法則が成り立っており、 $\theta$  方向のローレンツ力による  $J_\theta$  の生成が期待できる。中性粒子数密度を実験系で予想される  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  と仮定した場合の衝突周波数は数十 MHz のオーダーとなるため、実験系においては  $\nu/f \sim 10$  となっており、その場合、 $\delta \sim 10^\circ$  程度の位相差が生じている可能性がある。

Fig. 4 は同じ 4 ケースの数値シミュレーションにおける  $J_\theta$  の時間履歴を示している。 $\nu/f = 0.1$  のとき、 $J_\theta$  は時間とともに減少しており、 $\nu/f = 1, 10$  の結果を下回っている。これは、前述のように、 $\nu/f = 0.1$  の場合衝突が不十分で  $\delta$  が大きい値となり、その結果、動径方向のローレンツ力  $F_r$  が強く生じてしまったためである。ここで、周方向電流の空間平均理論値は次の式ようになる。

$$\langle J_\theta \rangle = \frac{e\omega}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R n(r, \theta) r dr d\theta.$$

$F_r$  が強く生じると、プラズマが収縮され被積分関数である  $n(r, \theta)r$  が減少してしまうため、Fig. 4 の破線に示すように得られる理論値自体が減少してしまう。このような  $\delta \neq 0$  の影響は、 $J_\theta$  の増加を目指した強い

$B_\omega$  や高い  $f$  の RMF を印加した際に顕著に現れ，結果として  $J_\theta$  を減少させてしまう可能性がある．一方， $\nu/f = 1-100$  のときは，一定の  $J_\theta$  が得られるものの，中性粒子との衝突が頻繁になるにつれて抵抗力が増加するため， $\nu/f$  に対して  $J_\theta$  が単調減少となっている．したがって，期待した  $J_\theta$  を得るためには，適切な  $\nu/f$  になるようなパラメータ設定が必要であることがわかる．

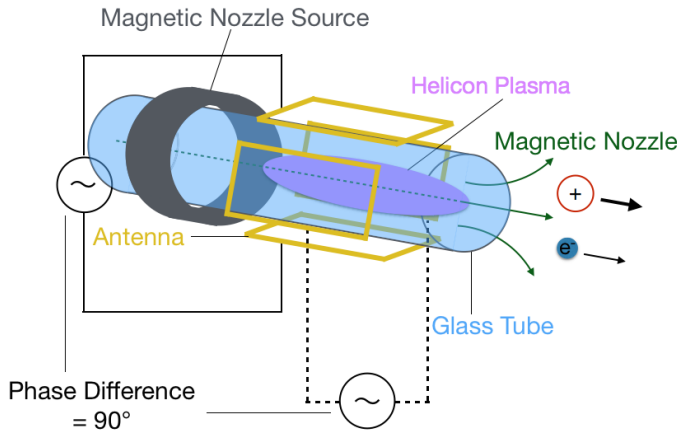


図 1: RMF 型プラズマ推進の概念図．

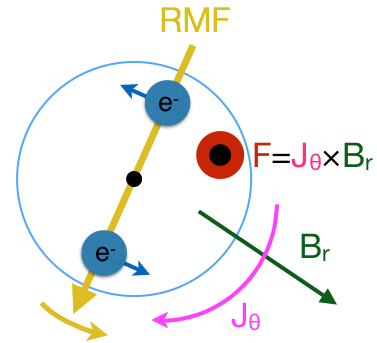


図 2: 加速部断面の概念図．

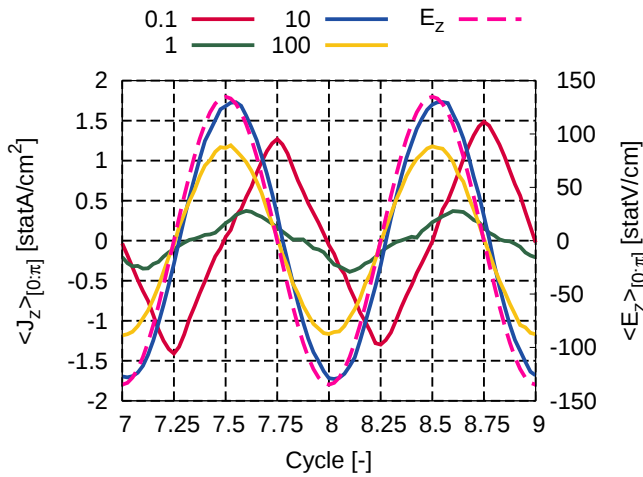


図 3: 位相差  $\delta$  と  $\nu/f$  の関係．

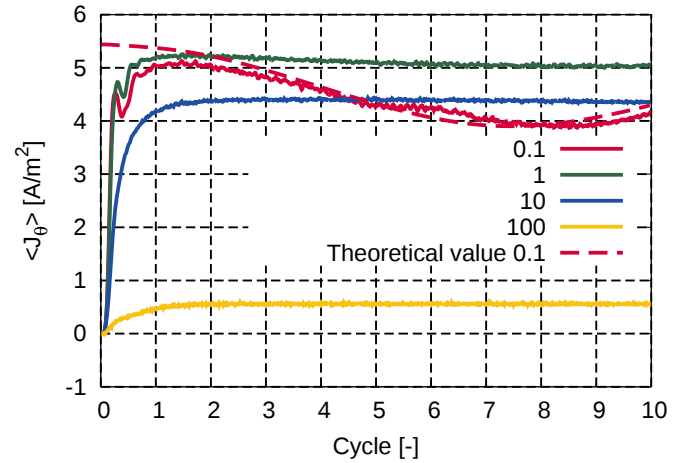


図 4: 周方向電流密度の空間平均値  $\langle J_\theta \rangle$  と  $\nu/f$  の関係．

- [1] H. Kuninaka et al., “Assessment of Plasma Interactions and Flight Status of the HAYABUSA Asteroid Explorer Propelled by Microwave Discharge Ion Engines,” IEEE Transactions on Plasma Science, 34, 2125 (2006).
- [2] S. Shinohara et al., “Development of Electrodeless Plasma Thrusters with High-Density Helicon Plasma Sources,” IEEE Transactions on Plasma Science, 42, 1245 (2014).
- [3] R. D. Milroy and H. Y. Guo, “Rotating Magnetic Quadrupole Current Drive for Field-Reversed Configurations,” Phys. Plasmas, 12, 072503 (2005).