

PIC法を用いた静磁場印加型マイクロ推進機の数値解析 PIC simulations for microthrusters with applied magnetic field

鷹尾 祥典
Yoshinori Takao

横浜国大
YNU

はじめに

プラズマスラスタにおいて磁場を用いたプラズマの制御は、プラズマ生成の効率化やプラズマ加速などに古くから利用され、先進的スラスタにおいても重要な技術の一つである。特に系が小さくなれば、表面積割合の増大から壁面でのプラズマの損失増大が避けられず、磁場による閉じ込め等がより重要になってくる。しかしながら、磁場を印加するとプラズマの挙動が複雑になり、個々の対象に応じて解析が必要となってくる。また、系が小さい場合には擾乱などの都合、実験的に計測することが難しく、数値解析が強力な手段の一つとなる。本稿ではその中でも、連続体近似が難しくなる低圧プラズマにおいて有効なPIC (Particle-in-Cell) 法を利用した例として、静磁場印加を行うマイクロ波放電式中和器と高周波無電極プラズマスラスタの2種類について紹介する。

数値計算法

本研究で用いる粒子計算法は上述の通りPIC法であり、荷電粒子と中性粒子との衝突をMonte Carlo collision (MCC) 法により考慮している。モデルの詳細は過去の文献に委ね^{1,2)}、ここでは簡単に述べるに留める。マイクロ波放電式中和器(図1に計算領域、図2に静磁場分布を示す)の解析にはアンテナの構造上3次元デカルト座標系を用いる一方、高周波無電極スラスタ(図4に計算領域、図5に静磁場分布と中心軸上の磁場分布を示す)の解析には2次元軸対称座標系を用いている。また、中性粒子分布に関しては中和器ではプラズマ源において300 Kのマクスウェル分布で、時間的・空間的に一様とする一方で、無電極スラスタにおいては中性粒子枯渇減少を擬似的に考慮するためにもモンテカルロ直接法(DSMC: Direct Simulation Monte-Carlo)を利用した解析を行っている。

解析例

まず、マイクロ波放電式中和器の解析例につ

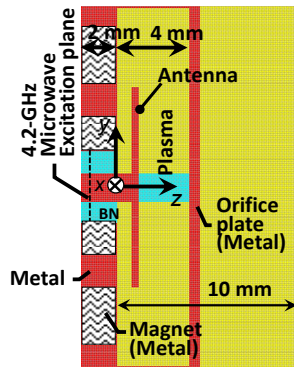
いて紹介する。これまでの研究により小型マイクロ波放電式中和器からの電子引き出しにおいて、プラズマ源内部の静電場が重要な役割を担っており、特にその電場と永久磁石の静磁場との $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが電子引き出しに大きな影響を与えていることが分かってきている¹⁾。図3にECR領域においてxy平面で切り取ったポテンシャル分布を示す。これはマイクロ波100周期分で平均した結果である。10 μs 程度の長い周期で平均した場合には見えなかった縞模様の特徴的な構造が見える。これらは時計回りに回転しているように見え、この分布により θ 方向の電場が形成され、結果として電子引き出しを行うオリフィス側へと電子が輸送されていると考えられる。

次に、高周波無電極スラスタの解析例について紹介する。これまでの研究で高密度プラズマ生成の結果生じるスラスタ下流での中性粒子枯渇現象およびそれに伴う壁面での運動量損失により推進性能が悪化することが分かってきた³⁾。この改善のために、スラスタ上流だけでなく下流からも推進剤ガスを導入したところ、プラズマ分布が軸方向に対称的な分布となることで、壁面での運動量損失の削減につながった。また、図5に示すソレノイドコイルの電流を上昇させ磁場強度を強くすると、上流側にピークを迎えていたプラズマ密度分布がソレノイド直下へと移動してくる傾向が、推進剤ガスの導入方法を上流からと下流からのいずれにしても見られることが分かった(図6)。これにより磁場印加を強めることも推進剤ガスの導入方法とならんで推進性能改善の鍵となっている。

参考文献

- 1) Takao, et al., Jpn. J. Appl. Phys., **55** (2016) 07LD09.
- 2) Takao and Takahashi, Phys. Plasmas, **22** (2015) 113509.
- 3) Takahashi et al., Phys. Rev. Lett., **114** (2015) 195001.

(a) z-y/x plane ($x/y = 0$ mm)



(b) x-y plane ($z = 1.0$ mm) : antenna

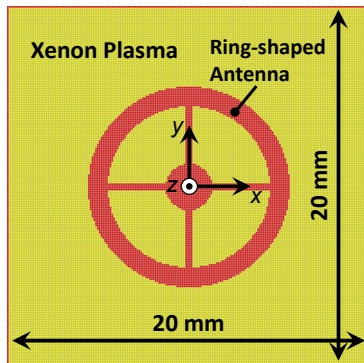


図 1 マイクロ波放電式中和器の計算領域

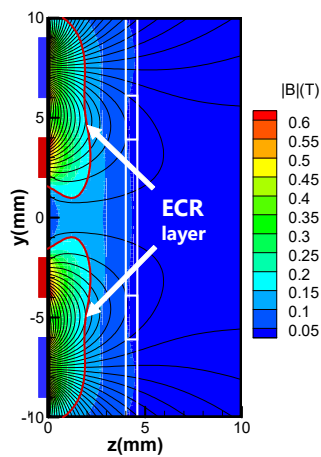


図 2 磁束密度と磁力線分布

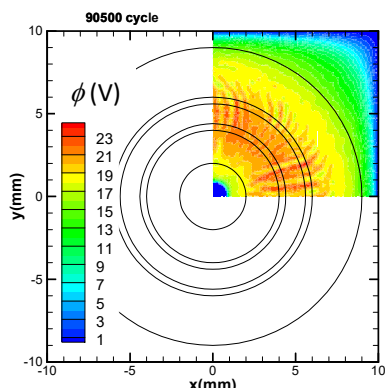


図 3 ポテンシャル分布図

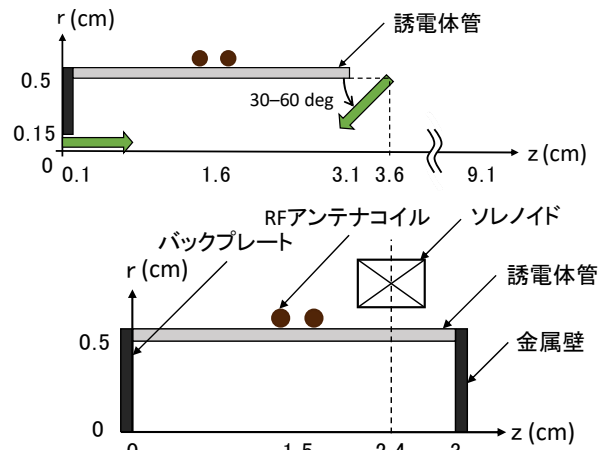


図 4 無電極プラズマスラストの計算領域
(上: DSMC、下: PIC)

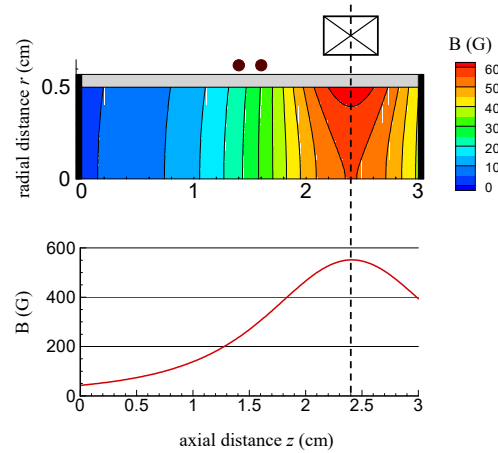


図 5 ソレノイドによるスラスト内の磁束密度分布 (上) と中心軸上における磁場分布 (下)

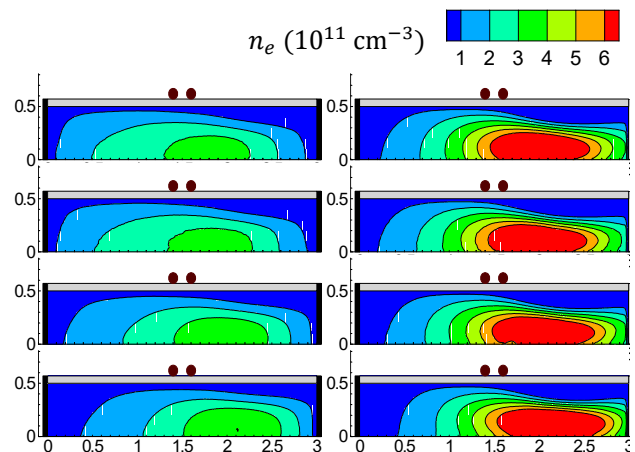


図 6 上から上流:下流の流量比が上流のみ, 20:1, 3:1, 1:1 および中心軸上最大磁場 100 G (左列), 300 G (右列) におけるプラズマ密度分布