

アノードレイヤ型スラスタにおけるマグネティックシールド ングのイオン損失低減メカニズム

学生証番号 47136045 氏名 赤木 将平
 (指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words : Space propulsion, Hall thruster, Anode layer type thruster, Magnetic shielding, Simulation.

1. 序論

近年の宇宙開発ミッションは、宇宙探査から宇宙太陽光発電 (SSPS) 建設計画まで多岐にわたっている。そして、それらにはより大出力、長寿命な宇宙推進機が必要となっている。そこで、注目されているものが電気推進機、ホールスラスタである。日本においてはホールスラスタの中でもアノードレイヤ型が注目されており、'RAIJINプロジェクト' としてオールジャパン体制で大出力、高効率のスラスタが研究開発されている。

また、近年のホールスラスタ開発において、長時間作動におけるスラスタ内部の損耗を抑制するマグネティックシールドングという設計がなされている。これは、プラズマが生成・加速されるチャンネルの壁面の形状とそこに付加される外部磁場の形状を適切なものにするすることで、イオンのチャンネル壁への衝突を抑えて、イオンビームの損失や壁面損耗を抑えるというものである。

東京大学は上記のRAIJINプロジェクトに従い、マグネティックシールドングを導入したアノードレイヤ型スラスタ、UT-58を開発した。本研究ではこのUT-58を解析対象とした数値解析を行い、マグネティックシールドングが与えるアノードレイヤ型ホールスラスタ内部におけるプラズマの物理を解析した。

2. マグネティックシールドング

図1にマグネティックシールドングの原理を示す¹。ホールスラスタ内の電子は磁場にトラップされているが、磁場に平行な方向の運動は自由であるため、磁場に垂直な方向に比べて抵抗は小さい。そのため電子温度の変化も磁場平行方向においては比較的小さく、この方向の電場は電子温度に比例する形となる。式に表すと

$$\nabla_{\parallel} T_e \approx 0 \quad (1)$$

$$E_{\parallel} \approx -T_e \nabla_{\parallel} \ln(n_e) \quad (2)$$

となる。

これを利用すると、チャンネル出口の壁面と磁場を沿わせて、その磁力線が電子温度の低いチャンネル上流まで伸ばすことで、チャンネル出口の壁面近傍でもアノードと同程度の電位を保つことができる。チャンネル壁面が絶縁体であれば、壁面の電位は浮遊しているので、プラズマ電位からシース分落ちた電位となっており、比較的高い電位を有する。これにより壁面に衝突するイオンはシースの電圧分のみエネルギーを持ち、イオンスパッタリングの閾値を超えない。これがマグネティックシールドングの原理である。

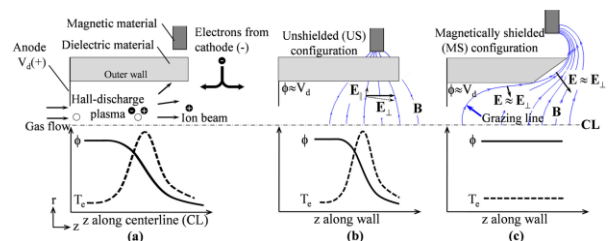


図1 マグネティックシールドングの原理

3. 解析結果と考察

図2に示すような磁場形状及びチャンネル形状を模擬した解析結果を示す。図3にガードリングへ流れるイオンの生成領域を、図4に電位分布を、図5に電子温度の分布図を示す。図3からガードリングへ流れるイオンはアノード前面の層で生成されることが分かる。図4から電位は磁力線と沿うような形にはなっておらず、ガードリングのシースと軸方向下流への電位勾配の2種類が支配的である。イオンは生成された位置の電位勾配によってガードリング電流となるか、推力となるかが決

¹ Mikellides, I. G., et al.: Magnetic Shielding of the Channel Walls in a Hall Plasma Accelerator, Physics of Plasma, Vol. 18-033501, 2011.

まる. 図5から磁力線上で電子が等温となっていないことが分かる. これらのことから, 式(1)及び式(2)が成り立たないことが分かる. そこで, 電子が磁力線上でポリトロプ変化をしていると仮定すると, シース領域外のアノード前面のチャンネル内ではポリトロプ指数が0.5と近似できる. この仮定から電場を電子の流体的な運動量保存則を用いて求めると, 式(3)が得られる.

$$E_{\parallel} \approx \nabla_{\parallel}(T_e) = -0.5n_e^{-0.5}\nabla_{\parallel}\ln(n_e) \quad (3)$$

式(2)と比べると, 電子温度の代わりに電子密度で表せるため, 電場は電子密度のみで記述できる. 従って磁場方向の電場は, プラズマ密度を高くすることで小さくすることができる.

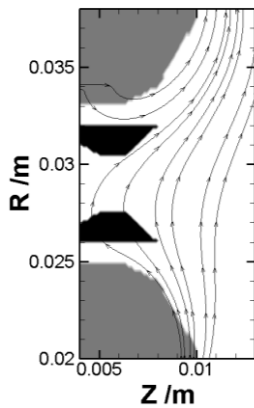


図2 磁場形状とチャンネル形状

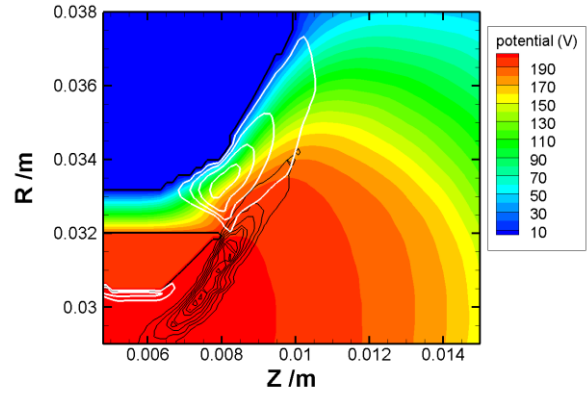


図4 電位分布 (等高線は黒: ガードリング電流源領域, 白: 電荷密度分布)

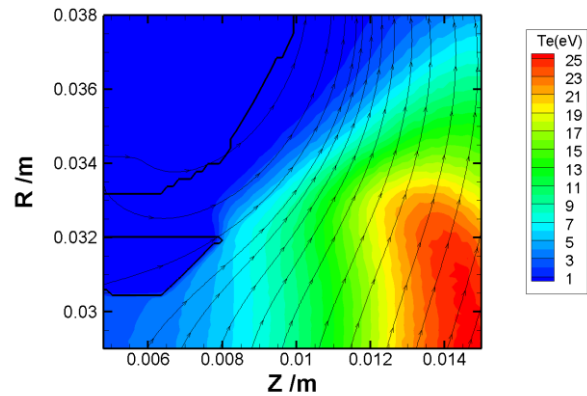


図5 電子温度 (流線は磁力線)

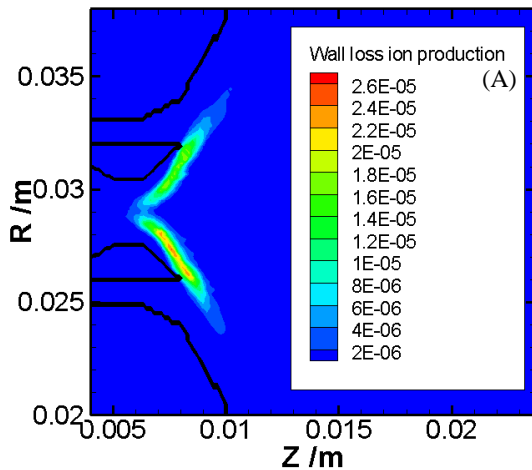


図3 ガードリング電流源領域

4. 結論

本研究ではマグネティックシールドリングを施したアノードレイヤ型スラスタ内のプラズマについて以下の知見を得られた。

- ・アノード前面の層で生成されたイオンがガードリングへ流れて損耗の原因となる。
- ・電子は磁場に沿って等温ではなく, シース領域外のチャンネル内においてはポリトロプ指数0.5のポリトロプ過程にある。
- ・磁場平行方向の電場はプラズマ密度の平方根に反比例する。

以上から, アノードレイヤにて等電位線と磁場を添わせるには, プラズマ密度を大きくする必要がある. この知見がアノードレイヤ型スラスタにおける最適なマグネティックシールドリングが設計指針となりうるものとする。