

菅 晃大, 安藤 晃

Kodai KAN and Akira ANDO

東北大院工

Dept. Electrical Eng., Tohoku Univ.

近年, 宇宙探査の発展に伴い, 将来的に有人火星探査が計画されている. そのために大推力及び高比推力の電気推進機が必要とされており, 有力な候補の一つが MPD スラスタである. その一方で MPD スラスタは投入電力に対する推進効率の低さが問題とされているが, 発散型磁場(磁気ノズル)を重畳することで放電を安定化させるとともに, 磁気ノズルの形状を適切に設定することでプラズマを効率的に加速させ, 推進性能を向上させることができる[1]. 最適な磁場形状に対する考察は未だ不十分であるが, 磁気ノズル形状を最適化することで MPD スラスタの実用化に繋がると共に, 他の将来の大型推進機にも応用可能であるため, 本研究では様々な磁場形状でのプラズマ加速効果について調査を行い, 磁場形状の最適化を目指すことを目的としている.

磁気ノズルによるプラズマ加速機構を明らかにするには, プラズマ内に誘起される周方向電流 j_θ の効果について検討を行う必要がある. 先行研究より MPD スラスタの電極近傍に磁気ノズルを印加(図 1(a))することで, 効果的に推進性能を向上できることが明らかになっている. しかし MPD スラスタの電極近傍では放電電流と自己誘起磁場による推力 $j_r B_\theta$, $j_z B_\theta$ が混在しており, 磁気ノズルによる推力 $j_\theta B_r$ を正しく評価できない. そこで本研究では磁気ノズルを形成する発散磁場コイルを同軸上に3つ並べることで, 磁場の発散部分をプラズマの下流側へ移動した(図 1(b)). これにより磁気ノズル領域が放電領域と分離され, 磁気ノズルによる推力 $j_\theta B_r$ の評価を可能にしている.

周方向電流 j_θ の二流体モデルによれば, この周方向電流は以下の4つの項により表される.

$$j_\theta = j_{D,e} + j_{D,i} + j_{inertia} - (1 - \alpha)j_{E \times B} \quad (1)$$

式(1)では推力に寄与する反磁性方向を正としている. ここで $j_{D,e}$, $j_{D,i}$ はそれぞれ電子, イオンの圧力勾配, $j_{E \times B}$ は $E \times B$ ドリフト, $j_{inertia}$ は慣性による電流である. α ($0 \leq \alpha \leq 1$)は電子の $j_{E \times B}$ に対するイオンの $j_{E \times B}$ の割合を示している. プラズマ中の電場が一

様である場合は $\alpha = 1$ となり, 電子とイオンの $j_{E \times B}$ が打ち消し合う. しかし実際プラズマ中の電場は非一様であり, その場合は有限ラーマー半径効果によりイオンの $j_{E \times B}$ の値が小さくなる(α が1より小さくなる)ことから, j_θ の減少が発生する. この現象は特に磁場強度が弱くなるプラズマ下流部で顕著に発生し, 抑制するためには軸方向の磁場を強める必要がある. そこで本研究では発散磁場に軸方向の様な磁場を重畳することで, 磁場の勾配や強度の任意変更を可能にし, それに対する周方向電流の変化について研究を行った.

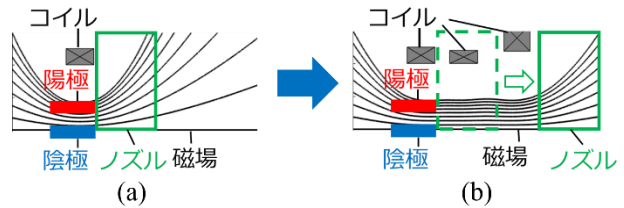


図 1. 磁気ノズル領域の分離

本研究にて用いた MPD スラスタでは, 円筒状陽極と棒状陰極の間に高電圧を印加することで, $\sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ の高密度プラズマを約 1 ms 間準定常に発生させる. 今回の実験において放電電圧は 91~122 V, 放電電流は 3.5~5.2 kA である.

今回の実験では MPD の放電電力, 磁場形状, 磁場強度をそれぞれ変化させ, 各パラメータ変化に対するプラズマ密度 n 及び周方向電流 j_θ の変化を測定した. その結果, 放電電力や磁場強度を増加させるとプラズマ密度 n は上昇するが, j_θ は磁場形状を変化させたときのみ大きく変化し, 他の2つの方法では値の変化がそれほど見られないという結果となった. この結果より, 磁場勾配が小さい場合の方が誘起される j_θ が大きくなり, 推進効率の向上に繋がると考えられる. 講演ではこれらの詳細について述べる.

References

- [1] Robert P. Hoyt et al., *IEEE Transactions on Plasma Science*, **23**, 3, (1995).