

磁力線からのプラズマ離脱現象

安藤 晃¹, 荒巻良介¹, 高橋直大¹, 橋間裕子¹, 田中のぞみ¹, 船木一幸²

¹ 東北大学工学研究科、²JAXA

1. はじめに

宇宙推進機に利用される化学推進機は推力が非常に大きい地球重力圏を突破するのに有用であるが、比推力が小さく長距離航行に適していない。一方、電気推進機は比推力が大きいため宇宙空間における長期ミッションに適している。現在の運用は無人によるものが主体であるが、将来の有人惑星間航行を考える場合、推力、比推力が共に大きな電気推進機の開発が必要不可欠である。

MPDA(Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet)は、放電電流とその電流により生じる誘起磁場との相互作用によりプラズマを噴出し、その反力で加速する電気推進機である。これまでに MPDA 出口近傍での流れ場を観測、外部磁場印加による効果について分光計測や磁場測定を行ってきた[1,2]。MPDA は比較的推力密度が大きく、加速システムに磁気ノズルを用いることでさらに推力の増大が期待される。

また、将来の大型の電気推進機では無電極イオン加速手法が有望な方法として期待され、比推力可変電気推進機 VASIMR エンジンなどの開発が進められている[3,4]。これらのシステムを実現するには磁気ノズルによるプラズマ流の加速と離脱に関する技術を確認することが必要である。磁気ノズルを用

いたプラズマ流の加速は非常に効果的なのだが、電気推進機に磁気ノズルを用いる際には「磁力線からのプラズマ離脱」という問題が存在する[5]。

プラズマ離脱問題とは、推進機から噴出したプラズマ流のうち電子のみが磁力線によって推進機に引き戻され、荷電分離が生じるためにプラズマ流が推進機から離脱できずに推力の低減が生じてしまう問題である。

発散型磁場に沿った荷電粒子の振る舞いを図1に示す。電子質量が小さいため最初は電子が磁力線に沿ってイオンより先に移動し、それを引き戻す方向、すなわちイオンを外側に加速する方向へ電場（両極性電場）が生じる（図1(a)）。磁場の発散に伴い磁場強度が減少するためイオンラーマ半径が大きくなり、イオンの軌道が磁力線から離脱をはじめ。一方で電子は磁力線に捕捉されるため、負電荷が推進機側に残り、イオンを引き戻す方向に電場が発生しイオンが離脱できない現象が生じると考えられる（図1(b), (c)）。

この問題を解決する手法として、プラズマが磁力線を伴って離脱する手法があり、そのためにアルヴェンマッハ数 M_A が1を超える超アルヴェン速プラズマ流の生成が必要と考えられている[2]。

ここでアルヴェンマッハ数 M_A とはイオンマッハ数 M_i と共にプラズマの流れを特徴づける重要なパラメータであり、それぞれ下式で表される。

$$M_i = \frac{U}{C_s} = \frac{U}{\sqrt{(\gamma_i T_i + \gamma_e T) / m_i}} \quad (1)$$

$$M_A = \frac{U}{V_A} = \frac{U}{B / \sqrt{\mu_0 n_i m_i}} \quad (2)$$

U はプラズマ流速、 C_s はイオン音速、 V_A はアルヴェン速度を表している。ここで、(2)式は(3)式のように変形でき、 M_A はプラズマ流のエネルギー(E)と

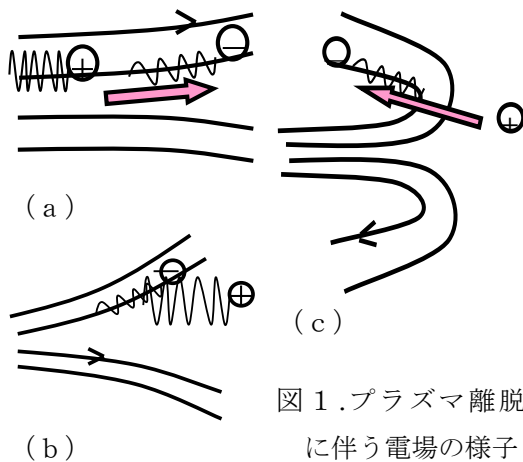


図1. プラズマ離脱に伴う電場の様子

磁気エネルギー(W_m)の比を表していると考えることが出来る。

$$M_A = \sqrt{\frac{n_i m_i U^2 / 2}{B^2 / 2\mu_0}} = \sqrt{\frac{E}{W_m}} \quad (3)$$

M_A が1を超える条件下では、プラズマの流れのエネルギーが磁気エネルギーよりも大きくなることを示す。すなわち、 M_A が1を超えるような超アルヴェン速プラズマ流を生成すれば、プラズマ流が磁力線を歪ませて移動し、推進機から離脱することが出来る。この際にプラズマ流が磁力線を引き伸ばし、大きな磁場変動が観測されると予測される。本研究では、宇宙科学研究所大型真空装置内での予備実験においてこの磁力線のゆがみを観測し、また東北大学の HITOP 装置にて実際に超アルヴェン速プラズマ流を生成し、この変動磁場に注目した研究を実施した。

2. 実験装置

本研究は主として HITOP 装置(High density TOhoku Plasma 装置)を用いて行われた。HITOP 装置本体の真空容器の周囲には大小 17 個の磁場コイルが設置され、最大0.1Tの磁場を形成可能である。図2に今回の研究で使用した外部磁場重畳型 MPDA の断面図を示す。MPDA 陽極外側には小型磁場コイルを設置している。この小型コイルの磁場と HITOP 外部にあるコイルの磁場を重畳することでMPDA 出口部に発散型磁気ノズルを形成できる。この小型磁場コイルの中心位置を変化させることで MPDA 出口部の磁気ノズル形状を発散型やラバール型に変更することや、磁気ノズルの絞りを変えることができる。 M_A 、 ΔB 、 M_i の測定はアルヴェンマッハプローブを用いて行った[6]。

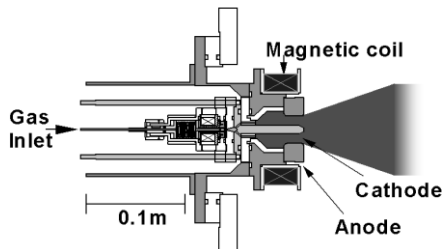


図2 外部磁場重畳型 MPDA

3. 実験結果

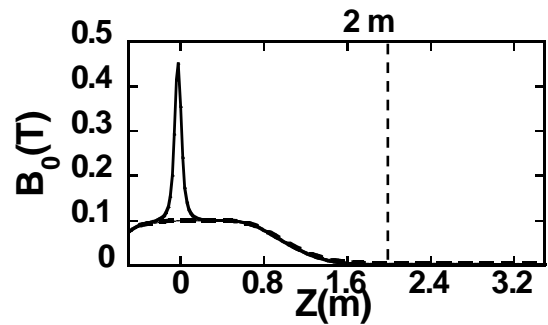


図3 実験条件(磁場配位)

今回の研究では主に2つの実験条件を用いて実験を行った。背景磁場が 100-2mT の発散型磁場、放電電流 $I_d=5.3kA$ の実験条件を「重畳磁場無しの実験条件」(図3点線部)、背景磁場が 100-2mT の発散型磁場に MPDA 部に 380mT の磁場を重畳し、放電電流 $I_d=7.1kA$ の実験条件を「重畳磁場有り」(図3実線部)として実験を行った。いずれの実験条件も作動ガスは Ne で、ガス流量は 0.2g/sec である。

それぞれの実験条件におけるアルヴェンマッハ数 M_A の測定結果を図4に示す。重畳磁場無しの実験条件では M_A は 1 より小さいが、重畳磁場有りの実験条件では下流において M_A が上昇し、最大で 1.6 程度になっており、超アルヴェン速プラズマ流の生成が確認できた。磁場を重畳することによって M_A が上昇したのは、重畳磁場(磁気ノズル)によってプラズマ流の加速と加熱が起きたからだと考えられる。

次に、それぞれの実験条件における軸方向の変動磁場 ΔB の測定結果を図5に示す。なお、 $\Delta B > 0$ (変動磁場が正方向)は流れの方向と同じ方向の変動磁場を、 $\Delta B < 0$ (変動磁場が負方向)は流れの方向に対して逆向きの変動磁場を表す。この結果から、重畳磁場無しの実験条件では変動磁場が常に負方向なのに対して、重畳磁場有りの実験条件においては $Z=1.7m$ で負方向から正方向に変化することが観測できた。

変動磁場が負方向となるのは電子とイオンのラーマ運動によるプラズマの反磁性効果が原因であると考えられ、この現象は通常のプラズマ流で生じる現象である。それに対して変動磁場が正方向となったのは今回の研究で初めてのことであり、プラズマ流が磁力線を引き伸ばすことによってこのような変動磁場が観測されたと考えられる。プラズマ流

によって磁力線が引き伸ばされたということはすなわち、電子、イオンが共に推進機から離脱すると考えられ、超アルヴェン速プラズマ流によるプラズマ離脱を実証する事ができると考えられる。

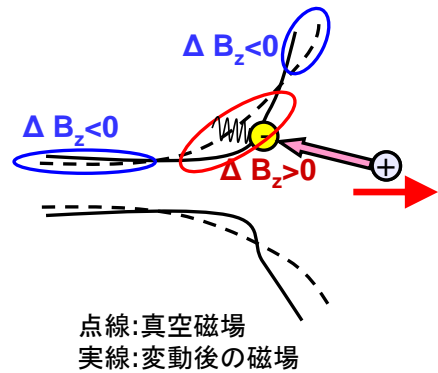


図7 プラズマ流に伴う変動磁場の様子

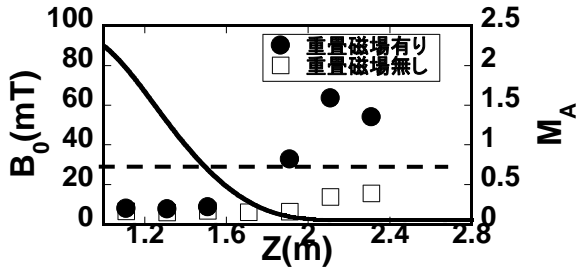


図4 アルヴェンマッハ数 M_A の測定結果

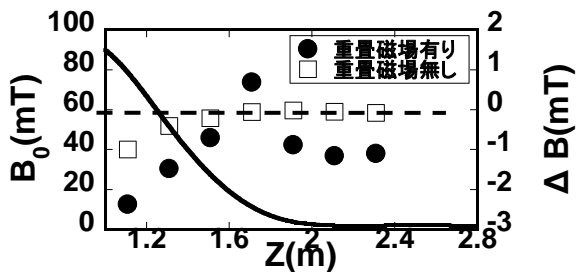


図5 軸方向変動磁場 ΔB の測定結果

この磁場変動の様子を調べるために、磁気プローブを用いて2次元空間分布を測定した。図6にその結果を示す。

図6で示されるように、この軸方向磁場成分の増加は $Z=1.6-1.7\text{m}$ 近傍で起こっていることが確認された。このような磁場変動が起こる理由を図7に示

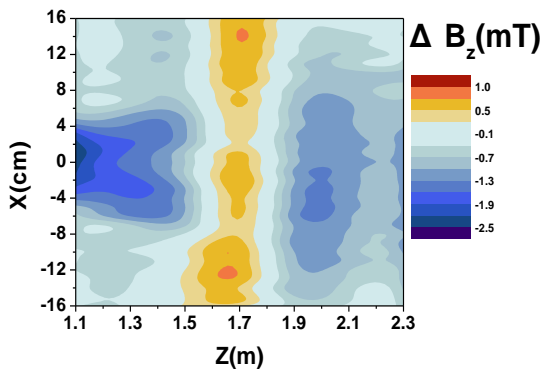


図6 軸方向変動磁場 ΔB の2次元空間分布

す。通常プラズマの反磁性効果により $\Delta B < 0$ とな

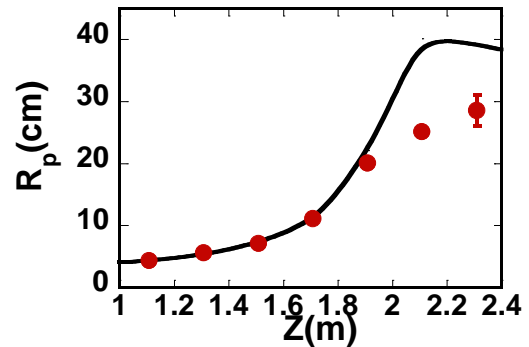


図8 プラズマ半径の軸方向分布

っているが、発散型磁場においてプラズマ流により磁場の引き伸ばし効果が発生した際は、図7に示すように磁場変動が強く起こった場所で $\Delta B > 0$ となる変化がみられる。

さらに、磁気プローブを用いたプラズマ内での電流分布計測の結果、この場所で周方向電流が強く発生していることも観測されている。

このような磁場変化に伴い、プラズマ流は磁力線からの離脱が起こり始めると考えられるが、実際のプラズマ半径（ガウス分布を仮定し、密度が中心値の $1/e$ となる半径）を計測した結果を図8に示す。ここで、図中の実線は磁力線に沿って変化した際の変化を示す。

この図からもわかるように実際のプラズマ半径は磁力線の変化で計算される値より小さく、離脱現象が起き始めていることが確認された。

今後はこの離脱を起こすためのプラズマ流条件と磁場形状との関係を詳しく調べていく必要がある。

4. まとめ

Neをガス種として外部磁場重畳型MPDAを用いることで、 M_A が1を超える超アルヴェン速プラズマ流の生成に成功した。また、超アルヴェン速プラズマ流中での軸方向変動磁場を計測したところ、変動磁場がプラズマ流に対して負方向(反磁性方向)から正方向に変化する現象を観測した。これは超アルヴェン速プラズマ流によって磁力線が引き伸ばされ、プラズマが離脱したことを示唆するもので、プラズマ半径の変化も磁力線に沿った変化に比べより少なくなっていることが確認された。

参考文献

- [1] H.Tobari, A.Ando, M.Inutake, K.Hattori, Physics of Plasmas, 14, 093507(2007).
- [2] M. Inutake, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 49, A121 (2007).
- [3] A. Ando, et al., Transaction of Fusion Science and Technology, 51, 72 (2007).
- [4] J.P. Squire, et al., Thin Solid Films, 506, 579 (2006).
- [5] E.B.Hooper, Journal of Propulsion and Power, 9, 757, (1993).
- [6] 條 真悟 他, 平成20年度宇宙輸送シンポジウム (2009).