

ラバール型磁気ノズル印加 MPD 推進機での電磁力評価

小林洋平, 鈴木清孝, 名浜弘晃, 小室淳史, 高橋和貴, 安藤晃 (東北大・工)

1. はじめに

MPD(Magneto-Plasma-Dynamic)推進機は、放電電流とその自己誘起磁場により生じる電磁力をプラズマ加速に利用した電気推進機である。電気推進機の中でも比較的推力密度が高く、大電力動作が実現できる可能性があり、簡素な構造であらゆる推進剤で動作可能という特徴を有するため、今後の有人惑星探査ミッションにおける有力な候補の一つである[1]。しかしながら、大電流のアーク放電により電極が損耗してしまうことや推進効率が電気推進機の中でも低いといった問題点が指摘されており、将来的な実用化に向けてこれらの課題をいかに克服するかが重要である。

現在、MPD 推進機に外部から発散型磁場を印加することで、印加した軸方向磁場により誘起される周方向電流と、軽方向磁場との相互作用によりスワール加速やホール加速といった新たな電磁加速機構が生じることが報告されている[2-5]。また、周方向電流により電極への電流集中が緩和され、電極損耗が大幅に軽減されることも確認されている[6]。MPD 推進機において外部印加磁場は、推進性能を決定する重要な要素の1つである。

これまで、外部印加磁場が MPD 推進機の推進性能やプラズマ流に与える影響に関して様々な研究が行われている[7-10]。本研究室では、図 1 に示すようなラバール型磁気ノズルに着目し、研究を行っている。スラストターゲットによる推力計測よりラバール型磁気ノズルを印加することで推力が増加し、推進性能が大幅に改善されることを明らかにしている[11]。また、分光計測では、ノズル下流部で軸方向流速が増加することが明らかになり、この流速の増加により推進性能が向上したと考えられる。しかしながら、ラバール型磁気ノズル中におけるプラズマ流の詳細な加速過程の理解には至っておらず、磁気ノズル強度や印加位置といったパラメータの最適化も課題となっている。そこで本

研究では MPD 推進機のさらなる性能向上を目指し、ラバールノズルスロート部の磁場強度を変えた際の軸方向流速と推力計測の結果より、ラバール型磁気ノズルの強度・磁場分布の最適化を進めている。また、ノズル中での加速機構の解明に向け、MPD 推進機の電磁加速機構に着目し、磁気プローブを用いたプラズマ中の変動磁場計測から電流分布を見積もり、その結果生じる電磁力を算出・評価したので報告する。

2. 実験装置・方法

2.1. 実験装置

本研究は、図 2 に示す東北大学 HITOP 装置(High density TOhoku Plasma 装置)を用いて行った。HITOP 装置は全長 3.4 m、内直径 0.8 m の真空容器、MPD 推進機、真空容器の周囲を取り囲む大小 17 個の磁場コイルから構成される。それらの磁場コイルに流す電流値を制御することで最大 0.1 T の一様磁場を形成することが可能である。ここで、MPD ス

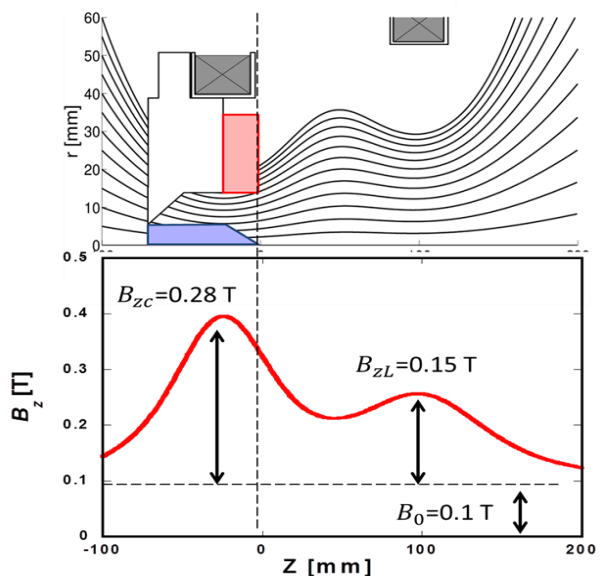


図 1 ラバール型磁気ノズルの磁力線と磁場強度分布

ラスタの陰極先端を原点として流れ方向に Z 軸の正方向を取り，鉛直上方を Y 軸正方向として右手系となるように座標軸を定義している。

真空容器の片端には MPD 推進機が設置されている。中心部の棒状陰極はタングステン製(外直径 1 cm)，環状の陽極はモリブデン製(内直径 3 cm)である。放電電流はパルス整形回路 (PFN : Pulse Forming Network)により供給され，最大で 10kA までの放電電流で約 1 msec の準定常動作が可能である。

MPD 推進機の陽極外側と下流部には発散型磁場コイルとラバールノズル用磁場コイルを設置している。これら 2 つのソレノイドコイルの磁場を真空容器の外部にあるコイル群で生成される一様磁場 (0.1 T) に重畳することで MPD 推進機出口近傍に図 1 のようなラバール型磁気ノズル配置を形成することができ，ラバールノズル用コイルに流す電流値を制御することで，スロート部の磁場強度を制御することが出来る。

2.2. 分光計測

本研究では MPD スラスタ出口近傍の窓に集光レンズを設置し，光ファイバ，分光器を通してプラズマの発光スペクトルを取得した。半径方向，および斜め方向からスペクトル計測を行い，それらのドップラーシフトから下記に示す方法で軸方向流速の計測を行った。今回は時間分解能が 0.1 msec.，波長分解能が 0.0081 nm/pixel の Czerny-Turner 型可視領域分光器を実験に用いた。測定波長は He II (468.575 nm)である。

次に，本研究で用いた発光分光法を用いた軸方向流速の導出方法について述べる。軸方向流速 U と

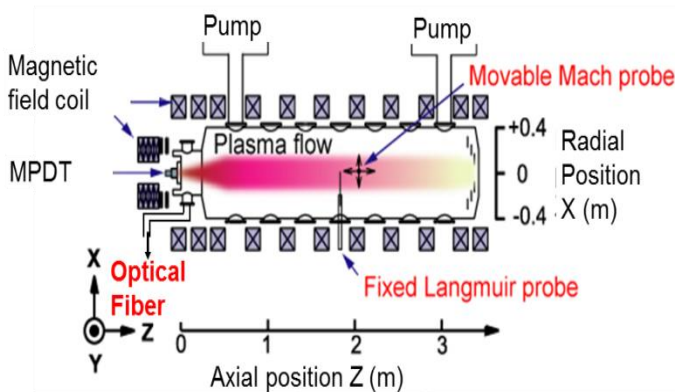


図 2 HITOP 装置

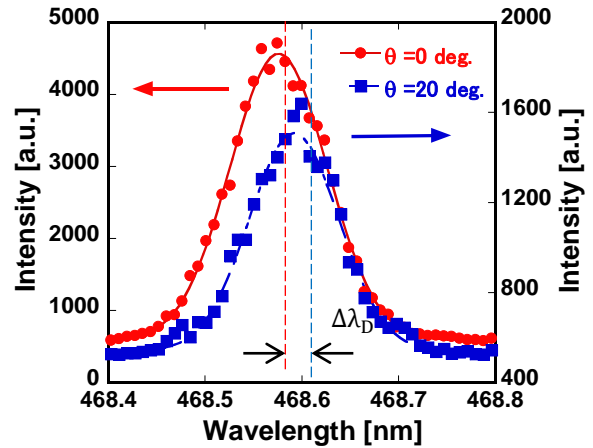


図 3 典型的なスペクトル波形とドップラー効果による波長ずれ

は式(1)のように表される。

$$U = \frac{\Delta\lambda_D}{\lambda_m \sin \varphi} c \quad (1)$$

ここで， $\Delta\lambda_D$ はドップラー効果による波長ずれ， λ_m は測定波長， φ はプラズマ流に対して垂直方向と斜め方向の直線がなす角度， c は真空中の光速である。なお測定スペクトルはドップラー拡がり为主导的であると仮定している。プラズマの発光スペクトルからドップラー効果によるずれと半値幅をそれぞれ測定することによって，軸方向流速，回転流速，イオン温度を求めることができる。

図 3 に典型的な測定スペクトルを示す。赤丸がプラズマ流に対して垂直方向から取得したスペクトルであり，青四角がその垂直方向に対して 20° だけ斜め方向から取得したスペクトルである。両スペクトルにはドップラー効果によって図 3 のように波長ずれ $\Delta\lambda_D$ が生じ，(1)式から流速 U が算出可能である。

2.3. 推力測定

本研究では，推力の測定に円筒形のスラストターゲットを用いた。スラストターゲットがプラズマ流から受けるインパルスビットを I_{bit} ，放電持続時間を Δt とすると，推力 F は式(2)で表される。

$$F = \frac{I_{bit}}{\Delta t} \quad (2)$$

レーザー変位計を用いてスラストターゲットの変位を計測することで，その変位からインパルスビット I_{bit} を導出することが出来る。典型的なレーザー変位計の信号を図 4 に示す。推力の算出には予め

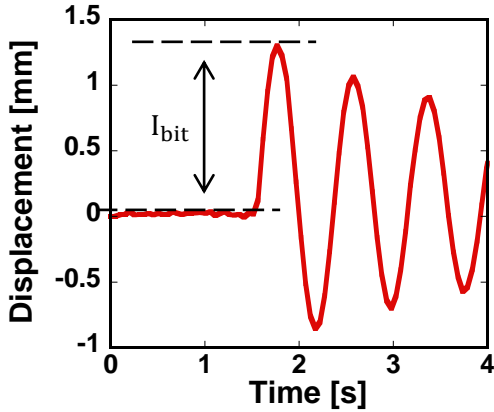


図 4 典型的なレーザー変位計の信号

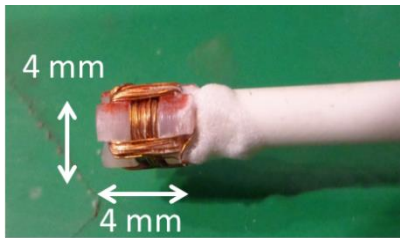


図 5 3軸磁気プローブ

得たインパルスビットとターゲット変位の較正係数を用いた。また、放電持続時間 Δt は放電電流波形から見積もった値 $\Delta t = 1.49 \text{ ms}$ を用いた。

2.4. 変動磁場計測

プラズマ中の変動磁場の計測には磁気プローブを使用した。本実験では一回の放電で X 方向, Y 方向, Z 方向の変動磁場を一度に計測するため、図 5 に示す 3 軸の磁気プローブを製作した。この 3 軸磁気プローブにより計測した変動磁場の分布からプラズマ中の電流密度および電磁力が算出できる。

2.5. 実験条件

本実験は全て推進剤に He を用い、質量流量 38 mg/s、放電電流 7.0 kA で行った。実験に用いた磁場配位を図 6 に示す。前述の通りに、ラバーノズル用磁場コイルに流す電流値を制御することでラバー型磁気ノズル強度 B_{zL} を変更することが出来る。本実験では $B_{zL} = 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 \text{ T}$ の 5 つの磁場配位で実験を行った。

3. 実験結果

3.1. 推力測定結果

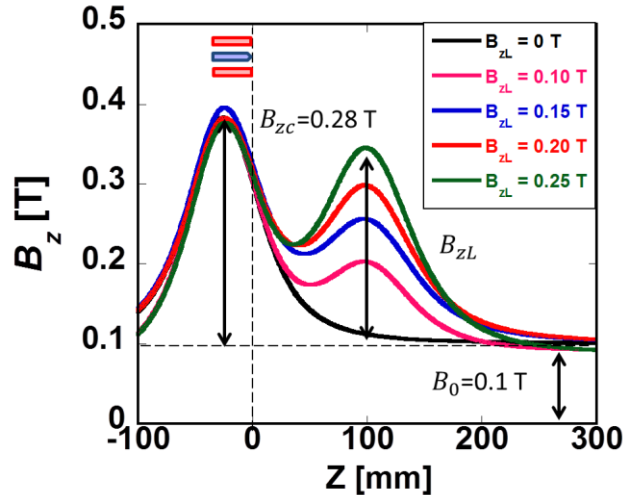


図 6 本実験で用いた磁場配位

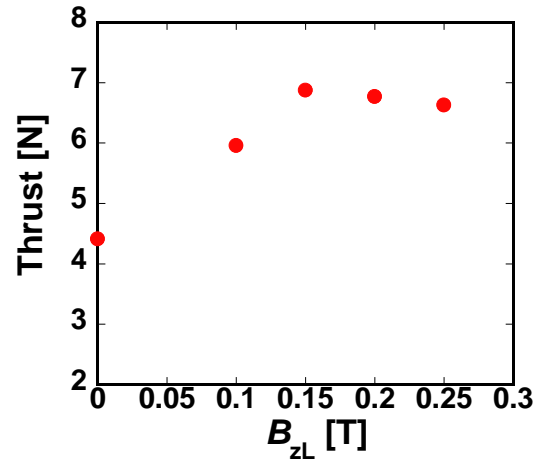


図 7 推力のラバー型磁気ノズル強度依存

スラストターゲットを用いてラバー型磁気ノズル強度 B_{zL} を変化させた際の推力を測定した。図 7 に推力のラバー型磁気ノズル強度依存を示す。図 7 を見ると、ラバー型磁気ノズル強度 $B_{zL} = 0.15 \text{ T}$ 以下ではノズル強度の増加に従い、推力が増加していることが分かる。しかしノズル強度 B_{zL} を 0.15 T 以上に強くしても、それ以上推力が増加せず、およそ 6.8 N で飽和する結果が得られた。また、図 8 に各条件における投入電力と推進効率のラバー型磁気ノズル強度依存を示す。この投入電力は放電電圧と放電電流から求められる放電電力に、各条磁場配位を生成する際にコイルで消費される電力を加味したものである。各コイルで消費される電力が放電電力に比べて小さいため、図 8 に示すようにラバー型磁気ノズル強度を変化させても、投入電力にはほぼ変化がない。得られた推力と投入電力が

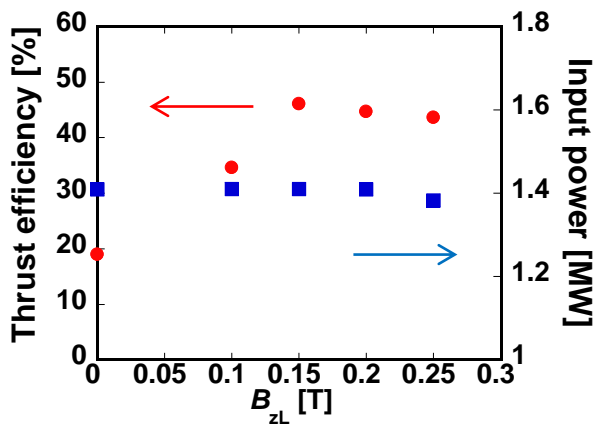


図8 推進効率および投入電力のラバール型磁気ノズル強度依存

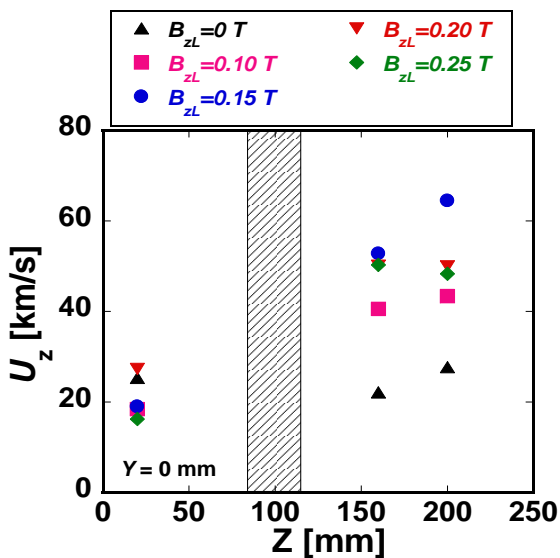


図9 プラズマ流の軸方向流速の軸方向分布

ら算出される推進効率も $B_{zL}=0.15$ T 以上では増加せず、推進効率 44 % で飽和する結果となった。

3.2. 分光計測結果

プラズマ流の軸方向流速の軸方向分布を図9に示す。ここで図中のハッチング部分はラバールノズル用磁場コイルが設置されているため、分光計測を行うことが出来ない領域である。図9を見ると、ラバール型磁気ノズル強度 $B_{zL}=0$ T ではノズル下流部で流速が変化しないのに対し、ラバール型磁気ノズル強度が $B_{zL}=0.10, 0.15$ T の場合には流速がノズル下流部で徐々に増加することが明らかになった。特に $B_{zL}=0.15$ T では $Z=200$ mm の位置で最大 64 km/s まで流速が増加している。ラバール型磁気ノズル印加による流速の増加により推力が増加したと考えられる。一方、ラバール型磁気ノズル強度を $B_{zL}=0.20$ T 以上にすると $Z=160, 200$

mm の位置で流速がおよそ 50 km/s で一定となり、プラズマ流がこれ以上加速されていないことが示された。

3.3. 電磁力計測結果

磁気プローブを用いてプラズマ中の変動磁場を計測し、(2)式に示すアンペールの公式からプラズマ中の電流密度を算出した。

$$\mu_0 \mathbf{j} = \text{rot} \mathbf{B} \quad (2)$$

算出した電流密度と外部印加磁場および変動磁場を用いて、(3)式より軸方向電磁力 F_z を算出した。

$$F_z = j_r B_\theta - j_\theta B_r \quad (3)$$

$B_{zL}=0, 0.15$ T における軸方向電磁力 F_z の2次元分布を図10に示す。この結果を見ると $B_{zL}=0$ T では上流部、 $B_{zL}=0.15$ T ではノズル下流部で強く正方向の電磁力が生じていることが確認できる。この正方向の電磁力によりプラズマ流が力を受け、加速されていると考えられる。また、この軸方向電磁力の反力で磁力線およびコイルが力を受け、推力の一部となるため、この軸方向電磁力をプラズマの体積で積分することで電磁力により発生される電磁推力 $F_{Lorentz}$ が算出できる。 $Z=60-200$ mm, $r=35$ mm のプラズマ円柱を仮

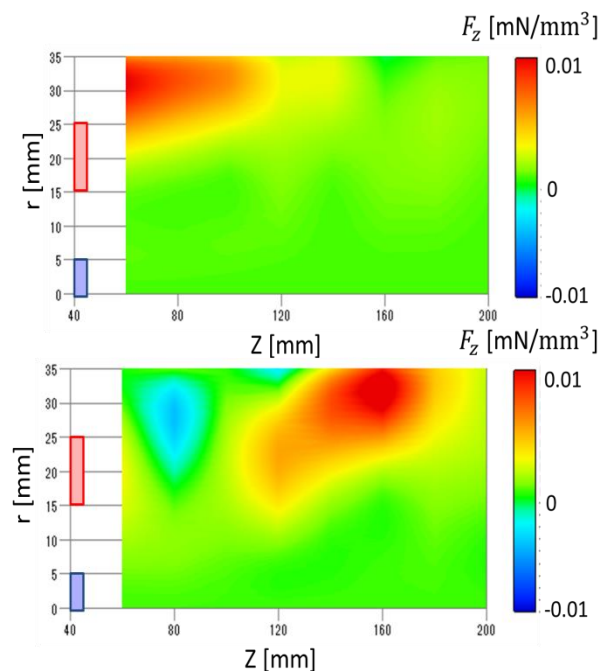


図10 軸方向電磁力の2次元分布 (a) $B_{zL}=0$ T, (b) $B_{zL}=0.15$ T

定し積分を行った結果, $B_{zL}=0$ T で $F_{Lorentz}=1.0$ N, $B_{zL}=0.15$ T で $F_{Lorentz}=1.1$ N となった. この結果より $B_{zL}=0$ T と $B_{zL}=0.15$ T では軸方向電磁力により生じる電磁推力の大きさは変化していない. 一方で, 図7の推力計測の結果を見ると $B_{zL}=0.15$ T における推力は, $B_{zL}=0$ T における推力と比較しておよそ 2.5 N ほど増加していることが分かる. 今回の電磁力計測の結果から考えると, このラバール型磁気ノズル印加による推力増加は, $B_{zL}=0$ T と 0.15 T で電磁推力の大きさが変わらないことから, プラズマ圧力により生じる気体力学的な推力が増加したのではないかと考えられる. そのため, 今後プラズマ密度とイオン温度の計測を行い, プラズマ圧力に関する考察を進める予定である.

4. まとめ

本論文ではラバール型磁気ノズルの最適化を行うため, 推力および軸方向流速のラバール型磁気ノズル強度依存を計測した. 加えて, 磁気ノズル中の加速機構を解明するため, MPD 推進機近傍の電磁加速機構を調査した.

ラバール型磁気ノズル強度を増加させるにつれ推力の向上, 軸方向流速の増加が確認された. しかしながら, ラバール型磁気ノズル強度を 0.15 T 以上にしても, 推力が飽和してしまい, 軸方向流速は $Z=160-200$ mm の位置では増加しないことが明らかになった. この結果より, 今回の実験条件ではラバール型磁気ノズル強度は 0.15 T が最適であると考えられる.

電磁力計測により, $B_{zL}=0$ T におけるノズル上流部, および $B_{zL}=0.15$ T におけるノズル下流部において, 正の軸方向電磁力が生じていることが実験的に確認された. この軸方向電磁力より, プラズマ流が加速されていると考えられる. またそこから算出された電磁推力の大きさは $B_{zL}=0$ T, 0.15 T では変化ないことが確認された.

そのため, ラバール型磁気ノズル印加による推力増加はプラズマ圧力による気体力学的な推力の増加によるものだと考えられる.

5. 参考文献

- [1] D. Nakata *et al.*, 29th Int. Electric Propulsion Conf, Paper IEPC-2005-163 (2005)
- [2] H. Tahara *et al.*, 22nd Int. Electric Propulsion Conf, Paper IEPC-91-073 (1991)
- [3] A. Sasoh, Phys. Plasmas **1**, 464 (1994)
- [4] Y. Izawa *et al.*, JPS Conf. Proc. **1**, 015046 (2014)
- [5] K. Kubota *et al.*, The 44th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2008-4836, (2008)
- [6] H. Tahara *et al.*, AIAA Paper, **28**, 2554 (1990)
- [7] M. Inutake *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **49** A121 (2007)
- [8] H. Tonari *et al.*, Phys. Plasmas **14**, 093507 (2007)
- [9] J. A. Walker *et al.*, 33rd Int. Electric Propulsion Conf, IEPC-2013-384, (2013)
- [10] R. Albertoni *et al.*, J. Propul. Power, **29**, 5, 1138-1145, (2013)
- [11] 鈴木 清孝 他, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム (2014)