カスプとダイバージェントノズル状の外部磁場をもつパルス作動型 電磁プラズマ加速アークジェット推進機の性能とプラズマ特性^{*1}

Performance and Plasma Characteristics of Pulsed Magnetoplasma-Dynamic Arcjet Thrusters with Cusp and Divergent-Nozzle Applied-Magnetic-Fields

田原 弘一^{*2}・森崎 裕之^{*2}・加賀谷 洋一^{*2}

Hirokazu TAHARA, Hiroyuki MORISAKI and Yoichi KAGAYA

Key Words: Space Propulsion, Magnetoplasma-Dynamic (MPD) Thruster, Cusp Magnetic Field, Divergent Magnetic Field, Thrust Performance, Plasma Characteristics

Abstract: A two-stage magnetic field with cusp and divergent shapes was applied in a magnetoplasma-dynamic (MPD) thruster discharge chamber. The thrust efficiency intensively increased with enhanced thrust and unchanged discharge voltage because of more effective ionization/heating and swirl acceleration due to the applied magnetic field. When the magnetic field became much stronger and the arc current became much higher, the thrust approached the self-magnetic thrust. As a result, an optimum magnetic field strength existed. The plasma flow was observed by a high-speed camera, and plasma density, temperature and velocity were measured with electrostatic probes. Through the magnetic nozzle the exhausted plasma rotated and spreaded radially-outward, and the plasma density decreased near the central axis. Accordingly, the plasma characteristics agreed with the measured thrust performance, considering intensive plasma heating due to Hall current and swirl acceleration, i.e. conversion from azimuthal kinetic energy to axial kinetic energy.

1. ま え が き

パルス作動型準定常電磁プラズマ加速 (Magnetoplasma-dynamic : MPD) アークジェット推進機は電気推進機の中では比較的大きな比推力, 推力密度を有するため, 深宇宙探査, 軌道間輸送用の推進機として研究開発が進められてきた。現在火星有人探査用としてさらなる推進性能の向上が望まれる中, その方法として外部磁場を印加する方法が注目されている¹⁻⁷⁾。外部磁場印加型 MPD スラスタの実用化を考えた場合, 軸方向磁場の印加用コイルは放電回路と直列に接続することにより電力源を増設することがなくコイル電力を得ることができるので, 重量の節約ができる。しかしこの方法では外部磁場強さが放電電流値に依存し, 任意の磁場強さを得ることができず地上実験用には不向きである。そこで大阪大学では外部磁場印加用に別電源を設けた。過去の研究においてダイバージェントノズル状磁場を印加した場合の性能特性が測定され, 推力増加は得られたが, 推進効率の向上はほとんど見られなかった^{6, 7)}。これは外部磁場の印加に伴う逆起電力が発生し放電電圧が高くなるためと推定される。

そこで本研究では, 放電室上流域にカスプ形状の外部磁場を印加し, 推進剤の電離・加熱を促進させることを考えた²⁻⁵⁾。外部磁場印加用コイルを 2 つ搭載することによりカスプ形状とダイバージェントノズル形状の磁場を同時に印加し, その性能への効果とプラズマ状態を調べた。

2. 実験装置と測定方法

2 つのコイルをもつ MPD 推進機は第 1 図に示すように, 陽極が銅製で, 先端は広がりノズル形状をしている。直線部分の内径は 25 mm, 長さ 38 mm である。広がりノズル部の長さは 86 mm で, 半頂角 20 度, 先端出口の直径は 95 mm である。陰極はトリウム入りタングステン製で, 直径 10 mm である。推進剤ガス・窒素の導入は推進機後方の高速電磁弁により行われる。MPD 推進機本体は第 2 図に示すように直径 0.6 m, 全長 4.9 m の真空チェンバ内に設置され, 実験時に約 1.0×10^{-2} Pa に減圧されている。推力測定には振り子方式を用いた。

外部磁場の印加は推進機外部に設置された 2 つの外部磁場印加用コイルによって行われる。第 3 図に示すように, 磁場は放電室上流部では軸方向を向いており, 陰極先端部で半径方向を向きその強度は小さくなっている。すなわちカスプ磁場を形成している。ノズル部では, その外部磁場の形状は, 中心では軸方向を向き, 陽極壁近傍ではそのノ

^{*1} © 2006 日本航空宇宙学会

平成 18 年 2 月 1 日原稿受理

^{*2} 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻

第1図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつ MPD 推進機の断面図

第2図 準定常 MPD 推進機の作動システム

ズルに沿った形状をしている。また、第4図のようにダイバージェントノズル形状磁場のみをもつ推進機も比較のために示す。

放電状態と噴出プラズマ特性を明らかにするために、高速度カメラ撮影と噴出プラズマの診断測定が行われた。静電ダブルプローブ法によるプラズマ数密度、電子温度、飛行時間法による軸方向プラズマ速度の測定がなされた。ノズル出口から下流 100 mm の軸方向位置で、径方向に計測が行われた。

3. 実験結果と検討

3.1 性能特性 測定された放電電圧と放電電流の関係を第5図に示す。図中で Nozzle と示してあるのはダイバージェントノズル状磁場のみの場合であり、磁場強度は陰極先端部の強さを代表値としてある。ノズル状磁場のみの場合放電電圧が著しく大きくなるが、カスプ状磁場とノズル状磁場を同時に印加した場合放電電圧の上昇が抑えられていることがわかる。これは、放電室上流域でのカスプ状磁場に起因するプラズマ加熱（ホール電流による加熱）が有効に働いていることによると推測される。

カスプ状磁場とダイバージェントノズル状磁場を同時にもつ推進機の推力、推進効率と磁場強度の関係を第6図に

(a) カスプ・ダイバージェントノズル状磁場の形状

(b) 中心軸上の軸方向磁場強度分布

(c) ノズル出口面での径方向磁場強度分布

第3図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場の形状と強さ

示す。また、ノズル状磁場のみの場合の推力特性を第7図に示す。第6図(a)より、放電電流値によらず、磁場強度の増加と共に推力は大きくなり、最大になった後低下していく。推力の増加はノズル状磁場に起因するスワール加速によるものと考えられる。こうして推力を最大にする外部磁場強度が存在することがわかる。推力の増加割合（最大推力と磁場を印加していないときの推力の比）は放電電流値が小さいほど大きい。第6図(b)の推進効率も同様の傾向を示している。すなわち放電電流が小さいほど外部磁場の効果が有効に働く。また、この推力特性は第7図より、ノズル状磁場のみの場合にも現れるが、その推力の増加割合はカスプ・ダイバージェントノズル状磁場の場合よりかなり小さい。

カスプ・ダイバージェントノズル状磁場の場合の推進効率と放電電流の関係を第8図に示す。破線は外部磁場を印加しない場合を表している。磁場強度が大きい場合(0.22 Tesla)、放電電流が大きくなると外部磁場を印加しない場合より推進効率は低下する。放電電流が小さいときは、外

(a) MPD 推進機の断面図

(b) ダイバージェントノズル状磁場の形状

(c) 中心軸上の軸方向磁場強度分布

(d) ノズル出口面での径方向磁場強度分布

第4図 ダイバージェントノズル状磁場のみをもつ MPD 推進機

第5図 放電電圧と放電電流の関係

ストレートダイバージェントとカスプダイバージェントとは、ダイバージェントノズル状磁場のみの場合とカスプ・ダイバージェントノズル状磁場の場合をそれぞれ表す。

(a) 推力と磁場強度の関係

(b) 推進効率と磁場強度の関係

第6図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつ MPD 推進機の性能特性

第7図 ダイバージェントノズル状磁場のみをもつMPD推進機の推進効率と磁場強度の関係

第8図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつMPD推進機の推進効率と放電電流の関係

部磁場の強度にかかわらず推進効率は外部磁場なしの場合より大きいことがわかる。

3.2 放電状態及びプラズマ特性 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場印加時の噴出プラズマ流の写真を第9図に示す。磁場なしの場合中心軸上の輝度が最も強く、いわゆる通常のプリューム状（羽状）をなしている。しかし磁場を印加すると、プラズマ流は径方向外側に大きく広がり、中心軸上の輝度は低下する。磁力線に沿って流れているように見える。

噴出流のプラズマ特性を第10図に示す。第10図(a)に示す電子数密度は、磁場を印加しない場合中心軸上で最も大きく、径方向外側に単調に減少していく。しかしながら磁場を印加すると、中心軸上の密度は低下し、磁場が強いほど密度の落ち込みは激しい。磁場が強くなると径方向外側の密度が大きくなり、径方向外側に平坦化される傾向にある。ただし、磁束密度が0.165 Teslaを超えると、半径30 mm付近で密度の最大点が現れるようになる。すなわち、

(a) 外部磁場を印加しない場合

(b) カスプ・ダイバージェントノズル状磁場を印加した場合

第9図 噴出プラズマ流の状態（側面からの放電写真）

磁場の印加によりプラズマが径方向外側に広がることが推測される。このとき、電子温度は第10図(b)より磁場の印加により若干中心軸上と径方向最も外周で大きくなっているが、中心軸上では低密度化による電子の選択的加熱、最外周ではホール電流による加熱などの原因が考えられる。また、イオンの軸方向速度は磁場を印加すると径方向の変化が小さくなり（絶対値はほとんど変わらない）、第10図(c)に示すように放電電流が大きいほどその傾向は強くなっていく。

ノズル正面から高速度カメラにより撮影された写真の一例を第11図に示す。外部磁場を印加すると、輝度の高いプラズマが旋回しているように観察される。回転速度は磁場が強くなるほど大きくなり、0.11 Teslaでは4000回転/秒、0.22 Teslaでは6000回転/秒になった。

こうして、ダイバージェントノズル状の外部磁場を印加することにより、その軸方向成分と放電電流の径方向成分によって周方向電磁力が誘起され、プラズマが回転するものと推測される。その旋回プラズマには遠心力が働き、プラズマは径方向外側に広がっていくと考えられる。外部磁場に起因する推力の増加は、この回転のエネルギーが磁気ノズルもしくは固体ノズルの助けで軸方向の運動エネルギーに変換される、スワール加速によると推定される。さらに、カスプ状の磁場は、放電室上流域にホール電流を発生させ、逆起電力による放電電圧の増加を抑えることが予想される。

(a) 電子数密度

(b) 電子温度

(c) 軸方向イオン速度

第10図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつMPD推進機におけるプラズマ物理量の径方向分布

以上のカスプ・ダイバージェント状外部磁場の効果は、測定された性能とプラズマ特性の結果を支持するものである。

0.4 Tesla at cathode tip (N_2 , 2.7g/s, 6 kA)

第11図 カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつMPD推進機放電室内のプラズマ回転運動の状態(正面からの放電写真)

4. ま と め

カスプ・ダイバージェントノズル状磁場をもつMPD推進機の性能特性とプラズマ状態が調べられた。

1) 放電電圧の上昇を抑え、推力のみを飛躍的に増加させることができた。それらの原因として、カスプ状磁場に起因するホール電流による加熱、ダイバージェントノズル状磁場に起因するスワール加速の効果が予想された。

2) 推力もしくは推進効率を最大にする最適な外部磁場強度が存在した。さらに放電電流が小さいほど磁場による性能改善の効果が大きくなった。

3) 外部磁場を印加するとプラズマは回転し、その遠心力により径方向外側に広がるのがわかった。径方向に均一なプラズマ流が形成された。

参 考 文 献

- 1) Sasoh, A. and Arakawa, Y.: Electromagnetic Effects in an Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster, J. Propul. Power, **8** (1992), pp. 98-102.
- 2) Tahara, H., Kagaya, Y. and Yoshikawa, T.: Quasisteady Magnetoplasmadynamic Thruster with Applied Magnetic Fields for Near-Earth Missions, J. Propul. Power, **5** (1989), pp. 713-717.
- 3) 田原弘一, 滝口 太, 加賀谷洋一, 吉川孝雄: 外部磁場をもつ準定常電磁プラズマジェットのパフォーマンスと放電機構, 高温学会誌, **17** (1991), pp. 231-243.
- 4) Tahara, H., Kagaya, Y. and Yoshikawa, T.: Effects of Applied Magnetic Fields on Performance of a Quasisteady Magnetoplasmadynamic Arcjet, J. Propul. Power, **11** (1995), pp. 337-342.
- 5) Tahara, H., Kagaya, Y. and Yoshikawa, T.: Performance and Acceleration Process of Quasisteady Magnetoplasmadynamic Arcjets with Applied Magnetic Fields, J. Propul. Power, **13** (1997), pp. 651-658.
- 6) Kagaya, Y., Tahara, H. and Yoshikawa, T.: Effects of Applied Magnetic Nozzle in a Quasi-Steady MPD Thruster, 28th Int. Electric Propulsion Conf., Toulouse, France, IEPC 03-031, 2003.
- 7) Morisaki, H., Kagaya, Y., Tahara, H. and Yoshikawa, T.: Exhaust Plasma Characteristics and Thrust Performance of an Applied-Magnetic-Nozzle MPD Thruster, Proc. 24th Int. Symp. Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, ISTS 2004-b-01, 2004, pp. 88-93.