

大電力自己誘起磁場型 MPD スラスタの推進性能及び内部物理現象に関する実験的研究

Experimental Study on Thruster Performance and Physical Phenomena of High-Power Self-Field MPD Thruster

田内 思担 (総研大・院)・大塩 裕哉 (龍谷大)・川崎 央 (名大)・船木 一幸 (JAXA)

Shitan Tauchi(SOKENDAI), Yuya Oshio(Ryukoku University), Akira Kawasaki(Nagoya University), and Ikkoh Funaki(JAXA)

1. はじめに

近年、火星以遠への深宇宙探査ミッションがいくつか検討されている。このような深宇宙探査の実現には、コストの増大につながるミッション期間を短縮可能な推進機の大推力化、そして高いペイロード比を達成可能な高比推力化が要求される。

Magnetoplasmadynamic (MPD)スラスタは、高い比推力を持つと同時に、イオンエンジンやホールスラスタなどの他の電気推進機と比較して高い推力密度を持つことから、深宇宙探査におけるメインエンジンとして期待されている。

MPD スラスタは、電極形状や磁場印加方法によりいくつかに分類されるが、本研究では自己誘起磁場型 MPD スラスタ (以下単に MPD スラスタと記す) を取り扱う。MPD スラスタは、第 1 図のように、通常、陰極と陽極が同軸上に配置される。推進剤は電極間に流され、電極間のアーク放電により推進剤を加熱して電離し、陰極周りに生成される自己誘起磁場と電流により電磁推力を発生するとともに、ジュール加熱によって気体力学的推力を発生する。

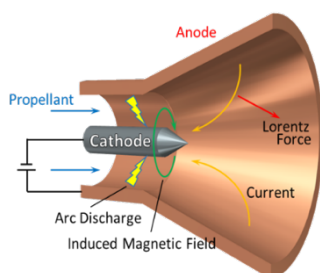
将来的な深宇宙探査において、MPD スラスタには、推進機一機当たりの投入電力 $P \geq 100 \text{ kW}$ 、推進効率 $\eta \geq 60\%$ 、比推力 $I_{sp} \geq 4000 \text{ s}$ 、そして寿命 1~3 年間の性能が要求されるが、本研究グループの調査において、60%以上の推進効率と十分な寿命を両立する設計を示した研究は報告されていない。従って、放電室内の電磁流体挙動を把握し、推進性能の向上と電極損耗の低減に資する方策を探索することは大きな意義を持つ。著者らの研究グループでは、将来の

大型有人惑星探査機の主推進機を担うことが可能な、世界最高出力の 100 N クラス MPD スラスタシステムについて、その基本的な設計を得ることを目的に研究を行ってきた。数値シミュレーションと実験とを協働することで、高い推進性能と熱負荷低減を両立する MPD スラスタの設計指針を求めようとしている。これまでに、数値シミュレーションによって熱的に妥当であるスラスタサイズスケールでは、従来提唱されていた設計指針^[1]とは異なり、ノズルのないストレート形状の陽極の方が高い性能を得られることが示唆される結果が得られている。^[2,3]

本研究は、数値シミュレーションにより熱的耐久性を考慮して設計されたスラスタに対して実験的に推進性能を取得すると同時に、スラスタ作動時に最も高温となる陰極を中心とした温度測定を行うことで、熱的耐久性を考慮したスラスタの臨界性能および作動点を明らかにすることを目的とした。また、同時にスラスタ内部のプラズマ計測を行うことで得られた結果についての考察を行う。

2. 実験装置

2.1 MPD スラスタと真空装置 実験には第 2 図に示す 2 つの実験室モデルの MPD スラスタを用いた。このスラスタは数値シミュレーションにより熱構造的に妥当であるように設計されており、リン青銅製の陽極と 2%La₂O₃-W 製の陰極で構成されている。陽極のサイズは先行研究^[1]に対して約 5 倍と大型化することで熱容量を増やし、定常作動時の熱負荷にも耐えられるとの見積もりで設計されている。電極間はボロンナイトライド製の絶縁材で絶縁されており、推進剤はこの絶縁材に取り付けられた 4 つのポートから高速電磁弁により供給される。実験は第 3 図に示すように、直径 2 m、長さ 3 m の真空チャンバーで行った。真空チャンバーはロータリーポンプ、メカニカルブースターポンプで粗引きされ、ターボ分子ポンプとクライオポンプを使用することで約 $7 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ の真空状態にすることができる。また本研究において、実験は準定常作動により行う。そこで約 1 ms の準定常電流を、キャパシターバンクとパルス成形回路 (Pulse Forming Network: PFN) を使用してスラスタ



第 1 図 MPD スラスタの作動原理

に供給する。

2.2 計測手法 スラスタの推進性能を取得するために、実験において推力は、第1式のようにMPDスラスタ放電時に取得した振り子式スラストスタンドの力積からコールドガスに起因する力積を差し引くことで評価した。

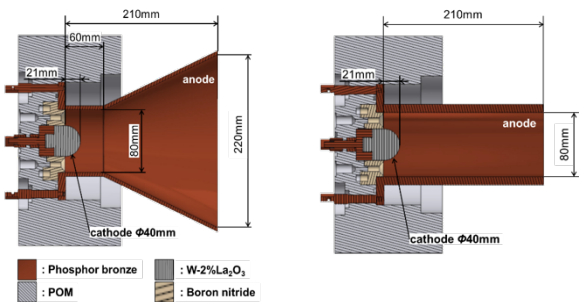
$$F_{dis} = \frac{I_{total} - F_{gas}(t_{gas} - t_{dis})}{t_{dis}} \quad (1)$$

また、2波長における輝度値の比を利用した二色法の原理を適用した二色温度計を開発し、プラズマ発光下での陰極温度計測を可能にした。

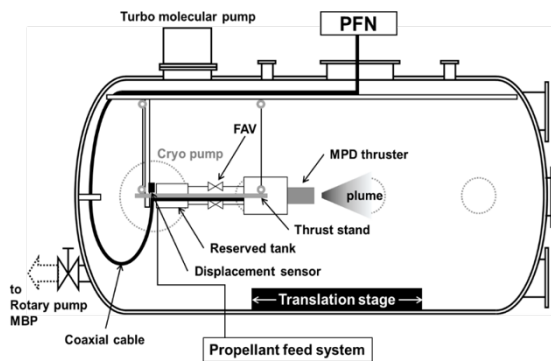
スラスタ内部のプラズマ計測は、ダブルプローブにより行なった。プローブは、長さ0.5mm、直径0.1mmの電極部がプラズマに対して露出しており、その電極間距離は1.5mmとなっている。プローブは、5本のプローブをスラスタ径方向に設置して、真空チャンバー内に設置された1軸ステージを使用することで、軸方向に移動できるようにセッティングされている。

3. 実験結果および考察

3.1 ストレート形状陽極の優位性および推進性能とプラズマとの関係^[4] 我々がこれまでに行なってきた数値シミュレーション結果により、臨界電流に近い大電流の条件では、フレア形状陽極よりもストレート形状陽極を使用したほうが推進効率の観点で優れていることが示唆された。この傾向は、水素のような分子性ガスを推進剤とする場合、電磁推力に加えて気体力学的推力を効果的に生成可能なフレア形状陽極にすべきとされてきたこれまでの先行研究の結果とは異なるものである。そこでこれまでに行われていた数値計算結果を基に第2図のようなMPDスラスタの実験室モデル



(a) フレア (FL) 形状 (b) ストレート (ST) 形状
第2図 MPDスラスタの実験室モデル



第3図 実験セットアップ

験モデルを製作し、実験的にその特性を取得し、数値計算結果で得られた推進効率の傾向を評価した。実験は水素とアルゴンを推進剤として行ったが、本稿では水素を推進剤とした場合のみの結果を示す。水素を推進剤とした場合の代表的な実験結果は参考文献^[4]を参照されたい。推進効率と比推力の関係^[4]からストレート形状陽極の場合、すべての作動領域でフレア形状陽極よりも推進効率が上回ったことがわかる。さらにその傾向は、作動した範囲の中間領域（この場合は放電電流9kA）で推進効率が極小値を持つというものとなった。この理由は、電流電圧・推力の特性^[4]および推力スケール^[4]から以下のように推察できる。すなわちストレート形状陽極の場合、推力の増加に比して放電電圧の増加が抑制されたため、結果としてフレア形状陽極の場合よりも推進効率が向上した。また、極小値よりも低電流の場合では、気体力学的推力が支配的であるため、いわゆるアークジェットのような動作となり、極小値付近では凍結流損失により推進効率が低下し、極小値より大きい放電電流領域では電磁推力が支配的となり、結果として推進効率が向上した。ストレート形状陽極の場合に放電電圧の増加が抑制された理由としては、空間電位分布^[4]からわかるように陽極壁面付近での電位勾配はそれほど大きくなく、等電位線はスラスタ中心軸に対して垂直に形成されたためであると考えられる。一方で、フレア形状陽極の場合では陽極壁面付近で推力に寄与しない電力の消費が生じていると推察されるが、フレア形状陽極でのプラズマ計測は今後の課題である。このように推進性能とプラズマ分布とは相関がみられ、特に電極付近のプラズマ挙動が推進性能へ影響を与えることがわかった。今後、電極壁面付近のプラズマ挙動と推進性能との相関を物理モデルとして定式化する。

3.4 陰極表面温度分布と推進性能・内部プラズマ流との関係^[5,6] 陰極はMPDスラスタの寿命律速要因というだけでなく、推進性能にも影響を与える可能性があるため、陰極現象の理解はMPDスラスタの高性能化と高寿命化には不可欠である。そこで本研究では、新たに開発した二色温度計を使用して陰極の2次元表面温度分布を計測し、陰極現象の理解と陰極現象と推進性能との関係を説明することを試みた。まず本節において主要な成果は、MPDスラスタの放電下で陰極表面温度部の2次元分布を初めて取得にした点である。これにより、陰極現象と推進性能、またプラズマとの相関を議論することが可能になった。水素を推進剤とした場合の陰極表面温度分布^[6]から、陰極先端で顕著に加熱されており、放電電流の増加に伴い陰極の高温部は先端から根元へ広がっていくことがわかる。この現象からは、放電電流の増加に伴い陰極表面からの熱電子放出領域が拡大していると推察できる。MPDスラスタの理論電磁推力は第2式のように陽極陰極半径比 r_a/r_c に依存する。

$$\frac{F_{th}}{J^2} = \frac{\mu}{4\pi} \left(\ln \frac{r_a}{r_c} + \alpha \right) \quad (2)$$

従って、低電流の場合では実効的な陽極陰極半径比が大きく、大電流の場合では実効的な陽極陰極半径比は理論値に

近くなると考えられる。これは放電室内部プラズマ計測の結果からも推察でき、陰極の高温部に対応した箇所的高温高密度プラズマが形成された。このように、陰極表面温度分布とプラズマ分布には相関がみられた。文献^[4]に示す推力特性では放電電流の増加に従い推力は理論値に漸近していく様子が見られるが、これは気体力学的推力に加えて陰極表面温度分布に起因する現象であると考えられる。今後は、取得した結果から陰極現象とその周辺プラズマとの相関を物理モデルとして定式化する。

4. ま と め と 今 後 の 課 題

本研究では、数値シミュレーションにより熱的耐久性を考慮して設計されたスラスタに対して実験的に推進性能を取得すると同時に、スラスタ作動時に最も高温となる陰極を中心とした温度測定を行うことで、熱的耐久性を考慮したスラスタの臨界性能および作動点を明らかにすることを目的とした。また、同時にスラスタ内部のプラズマ計測を行うことで得られた結果についての考察を行なった。この結果から、推進性能とプラズマの間には相関があり、特

に推進性能は電極壁面付近の電位分布に影響される可能性が示唆された。この領域では顕著なイオン加熱が生じている可能性があるため、今後はフレア形状陽極のプラズマ計測に加え、各スラスタ形状におけるイオン温度の求め、スラスタ内におけるイオンの挙動を明らかにする。また、陰極表面温度分布とプラズマとの間にも相関がみられることがわかっている。これらの結果を踏まえ、プラズマと推進性能、プラズマと陰極現象それぞれの相関に対してモデル化を試みる。

参 考 文 献

- [1] Funaki, I., *et al.*, *AIAA paper*, AIAA 2014-3418, 2014.
- [2] Tauchi, S., *et al.*, *Trans. JSASS, Aerospace Tech.*, Vol. 16, No. 3, pp. 274-279, 2018.
- [3] 田内思担, 他, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 67, No. 5, pp.159-166, 2019.
- [4] Tauchi, S., *et al.*, *AIAA paper*, AIAA 2020-0191, 2020.
- [5] Tauchi, S., *et al.*, *AIAA paper*, AIAA 2019-1241, 2019.
- [6] Tauchi, S., *et al.*, *Proc. IEPC*, IEPC-2019-551, 2019.