

2MW 級自己誘起磁場型 MPD スラスタの推進性能と熱特性に関する実験的研究

Experimental Study on the Thruster Performance and Thermal Characteristics of 2MW-Class Self-Field MPD Thrusters

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)

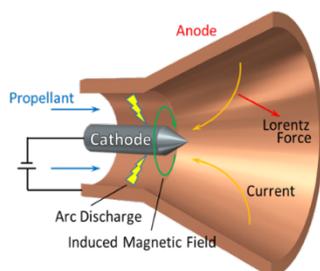
1. はじめに

近年、火星以遠への深宇宙探査ミッションが多数検討されており、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。

Magnetoplasmdynamic (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探査機の主推進機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た構造となっている。推進剤は電極間に供給され、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、高エンタルピ源の熱エネルギーの回収により気体力学的推力を発生する。

将来の深宇宙探査において、MPD スラスタには推進機一機当たり投入電力 $P \geq 100 \text{ kW}_e$ 、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。しかし本研究グループの調査の限り、上記性能と十分な耐久性を両立させた設計則は報告されていない。そこで本研究グループでは、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



第 1 図 MPD スラスタの作動原理

目的にモデルベース設計を基に研究を行ってきた。数値計算手法と実験手法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、数値計算によって従来のスラスタサイズ (放電室長) に対して約 4 倍のサイズスケールとすることで、2MW 級の投入電力の際に熱構造的に妥当であることが予測されている^[2]

本研究では、これまでに検討例がない、高い推進性能かつ熱構造的に妥当である 2 MW 級定常作動輻射冷却式 MPD スラスタの設計確立を最終目標に、MK-2 スラスタを研究対象として、下記の 3 点を研究目的とした。

- ① MK-2 スラスタの推進性能特性と、推進性能に対する放電室形状の影響を明らかにする。
- ② MK-2 スラスタにおいて陽極の高温化要因となる陽極端にける放電集中抑制に向けた指針を得る。
- ③ MK-2 スラスタの作動中において、陰極温度が耐熱温度を下回るか明らかにする。

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 MK-2 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 1% La_2O_3 -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 4 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 $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 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に供給する。

2.2 計測手法 MK-2 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。

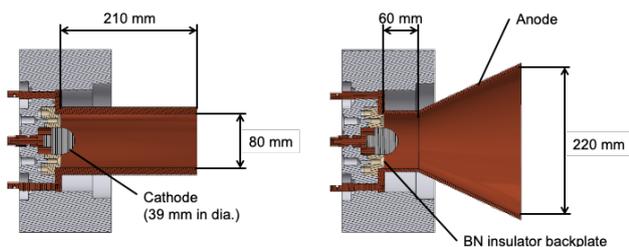
スラスタ内部のプラズマ計測は、ダブルプローブにより行なった。プローブは、長さ0.5mm、直径0.1mmの電極部がプラズマに対して曝されており、その電極間距離は1.5mmとなっている。プローブは、5本のプローブをスラスタ径方向に設置して、真空チャンバー内に設置された1軸ステージを使用することで、軸方向に移動できるようにセッティングされている。

また、スラスタ内部の放電電流経路分布は、磁気プローブにより磁束密度 B_θ の空間分布を取得して、第2式の流れ関数として放電電流経路を求めた。

$$\psi = |J_{enc}|, \quad J_{enc} = \frac{2\pi r B_\theta}{\mu_0} \quad (1)$$

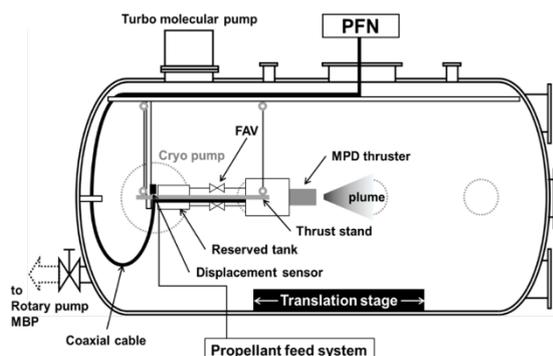
3. 実験結果および考察

3.1 MK-2 スラスタの推進性能特性^[3] 第2図に示すMK-2 スラスタの推進性能と放電室形状の影響を、放電電流電圧特性、推力特性、比推力・推進効率特性から評価した。本稿では特に水素を推進剤とした場合の結果を述べる。なお、3.1節に示す結果に関する図表は、文献[3]を参照さ



■ : Phosphor bronze ■ : W-1%La₂O₃ ■ : POM ■ : Boron nitride
(a) ストレート (ST) 形状 (b) フレア (FL) 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

れたい。放電電流電圧特性と推力特性に関して、Alfvén 臨界速度から求められる理論臨界電流付近を境に、放電室形状間で特性に差が生じた。具体的には、理論臨界電流に近づくにつれ、フレア形状陽極の場合に放電電圧と推力はストレート形状陽極の場合よりも増加する傾向が得られた。また推進効率と比推力の関係から、フレア形状陽極の方がストレート形状陽極の場合よりも推進効率が上回ることが明らかになった。推力電力比の観点からは、放電室形状間で特性に差が見られ、フレア形状陽極の場合は、放電電流の増加に従い推力電力比は単調減少する一方で、ストレート形状陽極の場合では、理論臨界電流以下の条件では、放電電流の増加に従い推力電力比が単調減少する傾向となったが、理論臨界電流以上では、放電電流の増加に従い推力電力比が一定となる傾向が得られた。これは3.2節で述べるように、陽極付近における電位降下が影響したと考えられる。

3.2 MK-2 スラスタ内部のプラズマ・放電分布^[3] MK-2 スラスタ内部のプラズマ・放電特性を明らかにするために、本研究ではダブルプローブと磁気プローブを使用して、電子温度・電子数密度・浮動電位・磁束密度の計測を行い、これらの結果から電子ホールパラメータや放電電流経路分布を求めた。この結果、MK-2 スラスタでは2MW級の投入電力下においても放電室形状によらず、陽極高温化要因となる陽極端への放電集中が抑制されることが明らかになった。この放電電流付着現象に関して、放電室内部における電子ホールパラメータ分布と、電子のラーマー半径と電極間距離との比から説明できることが明らかになった。すなわち、MK-2 スラスタにおいては、陽極端付近において電子ホールパラメータが1程度もしくは1以下に抑制されたため、陽極端への放電集中が緩和された。

3.3 MK-2 スラスタ作動中における陰極表面温度分布^[3] MK-2 スラスタの作動中において陰極温度が融点を下回るかを明らかにするために、二色温度計によりプラズマ発光下における陰極表面温度分布計測を行なった。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。その結果、推進剤種および放電室形状によらず、2MW級の電力を投入した場合に、陰極温度が融点を下回ることが明らかになった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、2MW級MK-2スラスタの推進性能特性、放電特性、また陰極熱特性を明らかにすることを目的として、推進性能取得実験・プラズマ計測・陰極温度計測を行なった。その結果、2MW級の投入電力において水素を推進剤とした場合、フレア形状陽極では2.45MWの投入電力の際に、推力26.2N、比推力8700秒、推進効率45.8%という性能が得られた。またこの時、陽極高温化要因となる陽極端への放電集中が緩和されること、陰極温度が融点を下回ることを実験的に明らかにした。すなわち、本研究によ

り 2MW 級の投入電力において、比較的高い推進性能と熱設計とが両立するスラスタ設計を明らかにすることができた。

次年度 (FY2021) は、MK-2 スラスタの臨界動作点の実験的探索と不安定性現象解明に向けた振動計測、また放電室内部流れ場の最適化のための流束場計測を行う。

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, 総合研究大学院大学 博士論文, 2021.