

# 大電力電気推進機 (MW 級自己誘起磁場型 MPD スラスタ) の推進性能取得実験

外岡 学志(総研大), 大塩 裕哉駿(農工大), 船木 一幸(JAXA/ISAS)

## 1. はじめに

近年, 太陽光発電システム (SSPS) 建造に伴う軌道間輸送ミッションや有人火星探査に付随する深宇宙探査ミッションに代表されるような大規模な輸送ミッションが数多く検討されている. 輸送系としては, ペイロード比増大のための高比推力および, ミッション期間短縮のための大推力を両立する性能を有する推進機が必要とされる. そこで, 期待されている推進機の有力候補が電気推進の 1 種である Magnetoplasmadynamic(MPD)スラスタである. MPD スラスタは, 100 kW 級の大電力作動によって, 各種推進システムに比べて 10 N 級の大推力および, 1,000 s 級の高比推力が達成可能であると知られている[1].

## 2. 研究目的

本研究の最終目標は, 高い推進効率と熱的成立性を両立する MPD スラスタの実用的な数値設計ツールを確立することである. 現在, 熱解析と MHD シミュレーションをシースモデルで連結させた設計ツールの開発を進めている. また, 数値解析から提案された実機モデルの放電試験による推進性能の取得と数値解析の校正を行ってきた.

本研究では, 1MW 定常作動時において, 電

極融溶解の生じないことが示唆されたスラスタヘッドについて,

- (1) 振り子式スラストスタンドを用いた推進性能の取得
  - (2) 陰極表面の温度分布の測定可能な手法の開発と陰極温度特性の取得
- の 2 つを目的とする.

## 3. MPD スラスタ

MPD スラスタの作動原理を図 1 に示す. MPD スラスタは, アーク放電により推進剤を電離するとともに, 加速・噴射することで推力が得られる. 推力は, 放電による Joule 加熱に起因する気体力学的加速および, アーク放電により誘起される磁場と放電電流の相互作用であるによる Lorentz 力に起因する電磁推力からなる[1]. MPD スラスタは, アーク放電により磁場を誘起する自己誘起磁場型および, 外部から磁場を重畳する外部磁場印加型に分けられるが, 本研究では, 自己誘起磁場型の MPD スラスタを研究対象とする.

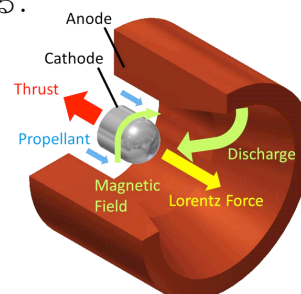


図 1 MPD スラスタの作動原理

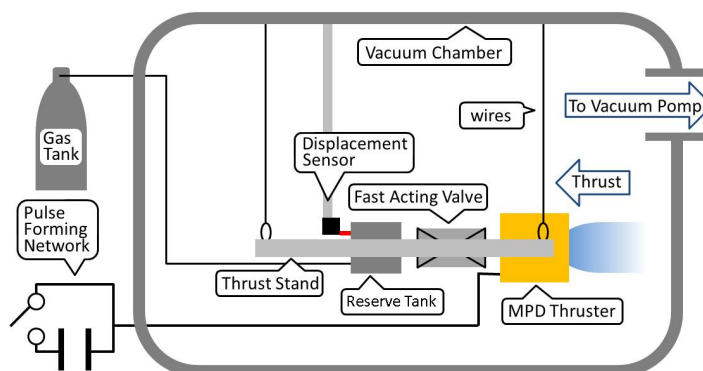


図 2 実験装置の概略図

## 4. 推進性能取得実験

### 4.1 実験装置・原理・実験条件

図 2 に実験装置の概略図を示す。本実験装置は、真空チャンバ、MPD スラスタおよび、計測装置から構成される。真空チャンバは、直径 2 m、全長 3 m であり、真空度  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa で実験を行った。次に、図 3 に MPD スラスタの概略を示す。MPD スラスタは、りん青銅製の Anode、1% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W 製の Cathode からなる。推進剤種は、H<sub>2</sub> ガス (0.4, 0.7 g/s)、Ar ガス (0.8, 1.8 g/s) を使用した。また、MPD スラスタの作動は、高電圧かつ大電流が必要であるため、Pulse Forming Network (PFN) を用いて、1.3 ms の準定常作動を行った。計測装置には、推力測定用スラストスタンド、放電写真撮影用 CCD カメラ、放電電流測定用ロゴスキーコイル、放電電圧測定用電流プローブを用いた。スラストスタンドでは、OMRON 製マイクロ変位センサ Z4D-F04A を用いて、大気中での鉄球によるキャリブレーション後、MPD スラスタの作動によるスラストスタンドの変位を測定する。

本研究の実験条件を整理し、表 1 に示す。

表 1 実験条件

推進剤種	Ar	H <sub>2</sub>
推進剤流量, g/s	0.8, 1.8	0.4, 0.7
放電電流, kA	5 ~ 15	
放電時間, ms	1.3	
チャンバ背圧, Pa	$1.0 \times 10^{-3}$	

本実験では、推力  $F_t$ 、比推力  $I_{sp}$ 、推進効率  $\eta_t$  を取得した。パラメーターは、それぞれ

$$F_t = \frac{I_{dis}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$I_{sp} = \frac{F_t}{\dot{m}g} \quad (2)$$

$$\eta_t = \frac{F_t^2}{2\dot{m}JV} \quad (3)$$

と求めることができる。この時、 $I_{dis}$  はスラストスタンドから取得した力積、 $\dot{m}$  は推進剤の質量流量、 $g$  は重力定数、 $J$  は放電電流、 $V$  は放電電圧である。

## 4. 2 実験結果

図 5 に式(1)を用いて得た推力-放電電流特性を示す。またこの図には数値計算[3,4]によって予測された値についても合わせてプロットしている。これより、測定した推力は、理論推力および、数値計算結果と同程度の推力であることを確認できる。

次に、図 6 に式(2), (3)を用いて得た推進効率-比推力特性を示す。代表的な推進性能としては、投入電力 1 MW, H<sub>2</sub> 推進剤を用いた際に、推進効率 ~30%, 比推力 ~4,000 s であった。

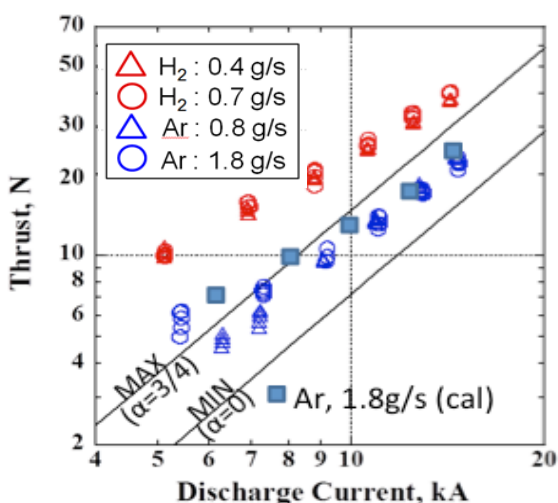


図 3 推力-放電電流特性

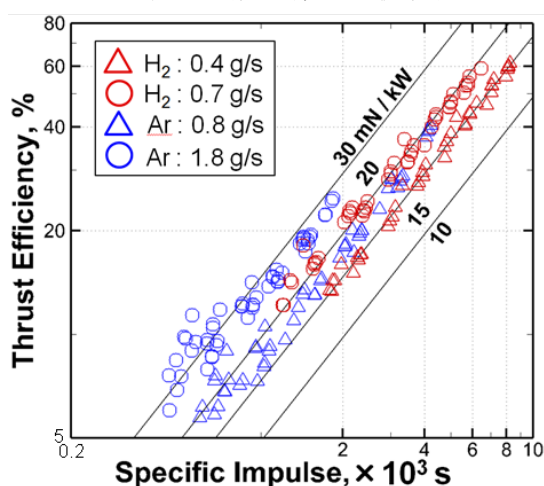


図 4 推進効率-比推力特性

## 5. 陰極温度取得実験

### 5.1 実験装置・原理・実験条件

物体からは温度に依存した連続スペクトルの放射が行われている。このスペクトルは温度に対して 1:1 で決まっているため、分光分布特性を取得することで温度を決定することができる。2 色輻射温度計はこのスペクトル中の 2 つの波長の輝度比を計測することで温度を取得する方法である。2 つの波長  $\lambda_1, \lambda_2$  についてプランク放射則の放射輝度の比をとると

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{1 - \exp(-C_b/\lambda_2 T)}{1 - \exp(-C_b/\lambda_1 T)} \quad (4)$$

ここで  $I$  は輝度、 $\varepsilon$  は分光放射率、 $C_b = 0.014388$  は定数、 $T$  は温度である。ここで、2 つの波長は十分近いとし、2 つの波長での放射率  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  は同じであると仮定する。(4)式に Wien の近似式を適応し、 $T$  について整理すると、

$$T = \frac{C_b(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{1}{\ln(I_1 \lambda_1^5 / I_2 \lambda_2^5)} \quad (5)$$

本実験で用いた 2 色輻射温度計の光学系概略を図 5 に示す。レンズ、ビームスプリッター、2 種のバンドパスフィルター、2 台のカメラから構成される。アーク放電からのプラズマ放射は 200-400 nm でピークをとり、赤外域で十分小さいことが報告されているため、本研究では 950 nm と 990 nm の波長を採用した。ハロゲン標準電球を用いて校正を行った。

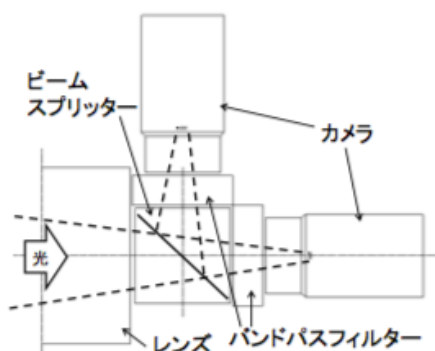


図 5 2 色輻射温度系の光学系

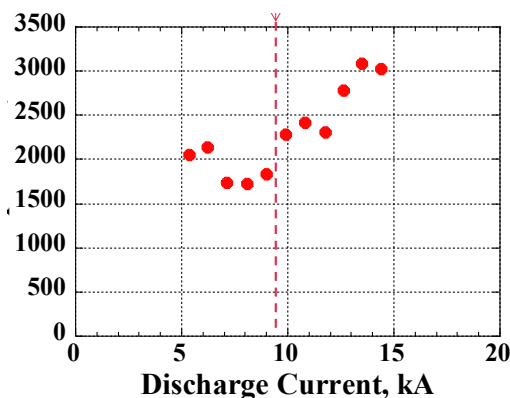


図 7 陰極先端温度の放電電流特性

表 2 実験条件

推進剤種	Ar
推進剤流量, g/s	0.8, 1.8
放電電流, kA	5 ~ 15
放電時間, ms	1.3
チャンバ背圧, Pa	$1.0 \times 10^{-3}$

### 5.1 実験結果

陰極付近の撮影画像を図 6 に示す。陰極先端として、図 6 中の赤い範囲における温度の取得を行った。放電電流に対する温度特性を図 7 に示す。図 7 から、放電電流 9kA 以上の領域で、放電電流の増加に伴って、陰極先端温度が上がっていくことがわかった。

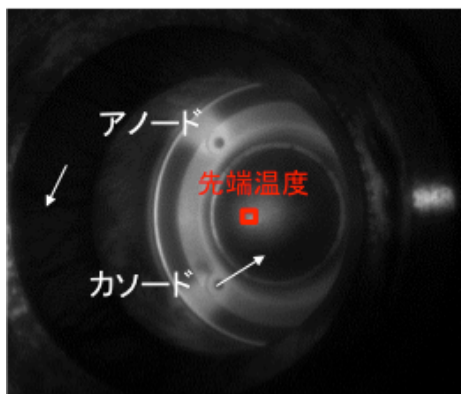


図 6 陰極付近の撮影画像

## 6. まとめと今後の展望

数値計算より予測された設計指針に基づき製作した MPD スラスタの推進性能特性および電極温度特性の取得・評価を行った。

取得した推進性能は、理論推力および、数値計算結果と同程度の推力であることを確認した。また、代表的な推進性能としては、投入電力 1 MW, H<sub>2</sub> 推進剤を用いた際に、推進効率 ~30%, 比推力 ~4,000 s であった。

今 2 色輻射温度計の原理を用いて、プラズマ放電時における電極温度を測定可能な手法を開発し、陰極先端温度の測定を行った。陰極先端温度の放電電流依存性を明らかにした。

今後は、異なるガス種および陰極径における温度特性を、今回確立した手法によって明らかにすることを目指す。

### 謝辞

本研究にご協力いただいた、農工大の大塩裕也特任助教、ならびに東京工業大学の川崎央氏、東海大学の宮崎兼治氏に深く感謝する。

### 参考文献

- [1] 栗木恭一, 荒川義博, “電気推進ロケット入門,” 東京大学出版会

- [2] Kenji Miyazaki, “Experimental Study of a 1-MW Class Quasi Steady State Self-Field MPD thruster , ” 29<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2013-s-10-b
- [3] 川崎央, 窪田健一, 船木一幸, 奥野善裕, “数値計算による自己誘起磁場型アルゴン MPD スラスタの熱設計,” 日本航空宇宙学会論文
- [4] Akira Kawasaki, “MHD Simulation and Thermal Design of an MPD Thruster,” 29<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2013-s-101-b