

# 仮想陰極を利用した MPD スラスタ

○沢田 尚輝・根岸 修平・山崎 純子・福井 健太・大倉 拓海・小泉 勇貴(筑波大・院)  
嶋村 耕平・横田 茂(筑波大)

○Naoki Sawada・Shuhei Negishi・Junko Yamasaki・Kenta Fukui・Takumi Okura・  
Yuki Koizumi (The Graduate School of Tsukuba)・Shimamura Kohei・Shigeru Yokota (The University of Tsukuba)

## Abstract

MPD thrusters are thrusters that can obtain a relatively high thrust density among electric propulsion, but it has been reported that long-term operation is difficult due to wear of the cathode during operation. Therefore, we made a prototype MPD thruster assuming that the vicinity of the central axis can be regarded as the cathode region by the hollow cathode and the magnetic field without using the rod cathode. In this paper, we have determined the region that can be regarded as a cathode from thrust measurement and plasma potential measurement, and report on it.

## 記号の説明

$F$ : 推力  
 $J$ : 放電電流  
 $B$ : 磁束密度  
 $R_a$ : アノード半径  
 $R_c$ : カソード半径

## 1. はじめに

通信衛星や気象衛星など、宇宙空間を利用した技術は我々の生活に必要な不可欠なものとなっている。深宇宙探査の分野では 2020 年に小惑星リュウグウから帰還したはやぶさ 2 のサンプルリターンミッションが記憶に新しい<sup>1)</sup>。地球から遠く離れた領域を目的地とする場合、機体には補給を受けられない宇宙空間で長期間の運用に耐えられる性能が求められる。このような長期間および長距離の宇宙空間の移動には電気推進機構が適している。

電気推進機のうち、推進剤の加速に磁場を利用する MPD スラスタの課題として、アノードとカソードが放電する際に電極の損耗が生じる点が挙げられる。電子供給源であるカソードに金属を採用した先行研究<sup>2-3)</sup>では、実験後にカソードが損耗することが報告され、MPD スラスタの寿命が制限される要因となっている。

本研究では電子供給源にホローカソードを採用し、電極の損耗を低減させた外部磁場印加型 MPD スラスタを設計した。このスラスタの推力測定と内部プラズマの電位測定を行い、その作動特性を得ることを研究目的とする。

## 2. 外部磁場印加型 MPD スラスタの推力測定

ホローカソードを採用した外部磁場印加型 MPD スラスタの推力測定を行い、実体金属を採用した MPD スラスタとの作動特性の比較を行う。

**2.1 ホローカソードを利用した MPD スラスタ** 本研究で使用した外部磁場印加型 MPD スラスタを図 1 に示す。ホローカソードとアノードで放電が行われ、搭載されたコイルによって推進剤を加速する機構となっている。中央に搭載されたホローカソードはキーパーインシュレータによって覆われ、放電室内に露出しないよう設計されている。

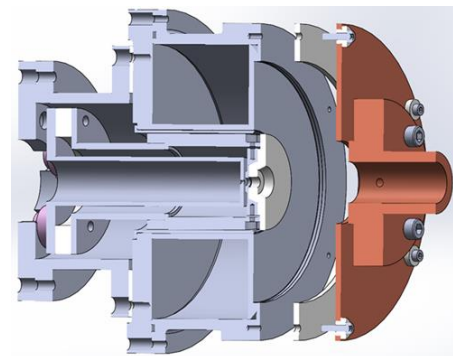


図 1 使用した MPD スラスタ

**2.2 ホローカソード** カソードの損耗を低減させるため、電子供給源にホローカソードを採用した。ホローカソードは図 2 に示すようにカソード本体、インサート、キーパーによって構成され、インサートを加熱することによって放出された熱電子をキーパーによって放電室内に放出す

る。放出された熱電子が供給される推進剤と衝突することでプラズマを生成するため、実体金属を採用した MPD スラスタと比べ稼働中の温度を低く抑えることが可能であり、損耗の低減が期待される。

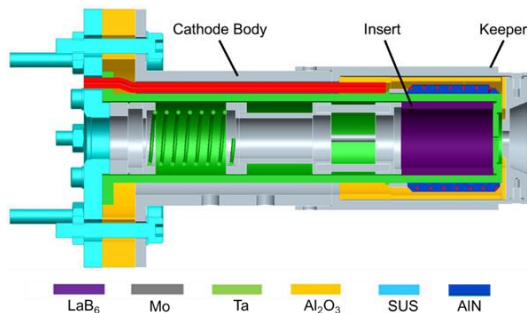


図2 100A級ホローカソード

**2.3 仮想陰極** 推進剤はホローカソードからプラズマとなって放出され、電子はアノードに引き寄せられ放電が起きる。このとき、スラスタに搭載されたコイルが誘起する外部印加磁場によって電子がトラップされ、放電室内には図3に示すような非実体の陰極領域が形成されると考えられる<sup>4)</sup>。この仮想陰極が実体陰極のようにふるまう。

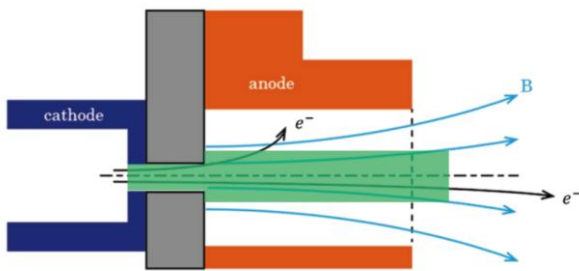


図3 仮想陰極

**2.4 推力測定系** 仮想陰極を利用した MPD スラスタについて、スラスタスタンドを用いて推力の測定を行う。スラスタを直径 1m、長さ 3m のチャンバー内に設置し、真空ポンプにより模擬的な宇宙空間を再現した。真空ポンプの仕様を表1に示す。

表1 真空ポンプ仕様

	排気速度[L/s]
ロータリーポンプ	1500
ターボ分子ポンプ	3100

MPD スラスタの作動条件を表2に示す。

表2 スラスタ作動条件

作動ガス	Ar
放電電流	20A
キーパー電流	1A
コイル印加電流	2A, 4A, 6A, 8A
アノード推進剤流量	21.3sccm
カソード推進剤流量	21.3sccm

**2.5 測定結果** MPD スラスタを稼働させ、スラスタスタンドより得られた推力測定結果を図4に示す。

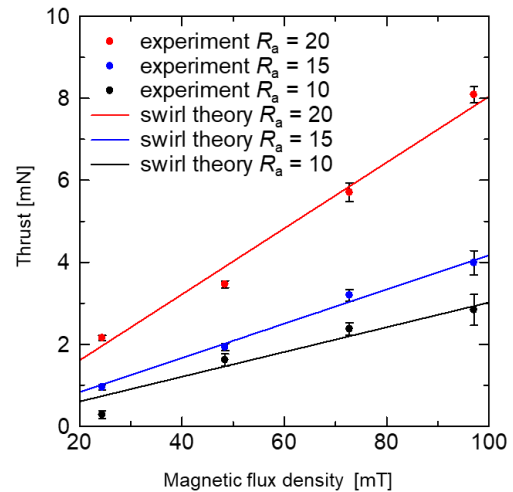


図4 印加磁場と推力の関係

横軸はコイル印加電流を変化させた場合に放電室内に生じる磁束密度、縦軸は推力である。グラフ内のプロットは測定された推力、直線は棒状陰極を利用した外部磁場印加型 MPD スラスタの推力理論式<sup>5)</sup>である。理論式を式(1)に示す。

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} J B R_a \left( 1 - \left( \frac{R_c}{R_a} \right)^2 / 1 + \left( \frac{R_c}{R_a} \right)^2 \right) \quad (1)$$

グラフから、磁束密度及びアノード半径  $R_a$  の増加に応じて推力が増加することが読み取れる。推力理論式においてカソード半径  $R_c$  を  $R_a$  に対する一意の値と仮定することで実験による測定結果とよく一致することが分かった。 $R_a$  と  $R_c$  の対応を表3に示す。

表3 アノード半径とカソード半径の関係

$R_a$ [mm]	$R_c$ [mm]
10	8
15	13
20	16

以上の結果から、ホローカソードを利用した MPD スラスタは稼働中の放電室内に仮想的な陰極として機能する領域が存在することが示唆された。また、その形状はアノード半径に対応して一定の半径をもつ円柱形状であると予想される。

### 3. 仮想陰極領域の調査

前述の仮想陰極について、エミッシブプローブを用いて放電室内部の電位を測定し、仮想陰極の範囲を特定する。

**3.1 エミッシブプローブ法** 仮想陰極領域を割り出すため、エミッシブプローブ法によりスラスタ内部の電位分布を測定した。エミッシブプローブは電極本体を加熱することにより熱電子を先端から放出し、シースによる電位降下を発生させることなくプラズマ電位の測定が可能である。

**3.2 電位測定系** スラスタ内部の電位分布を測定するため、アクチュエータにエミッシブプローブを取り付けて

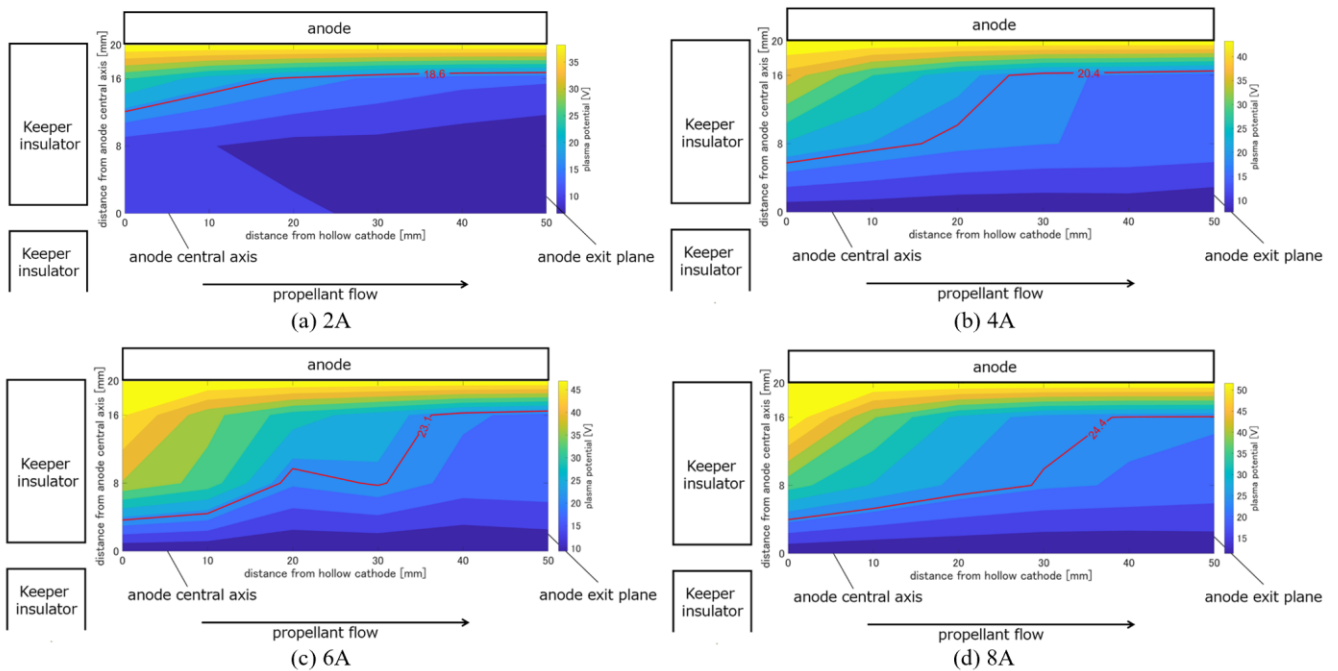


図 5 コイル印加電流に対するプラズマポテンシャル分布

複数座標のプラズマ電位計測を行った。図 6 に示すように、ホローカソードを覆うキーパーインシュレータ付近を原点とし、アノード排気面に向かって 50mm の地点までの地点を 10mm の間隔で計測した。

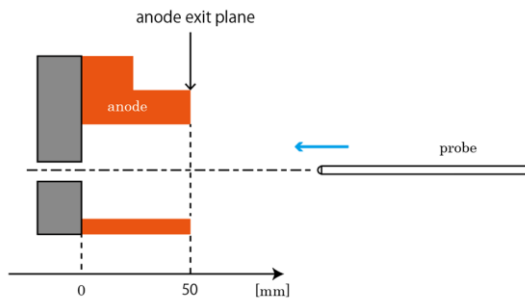


図 6 仮想陰極

上述した軸方向に加え、中心軸上、中心軸から半径方向に 8mm、16mm の地点についてもプラズマ電位計測を行った。エミシブプローブ本体が抵抗を持つため、得られたプラズマ電位は測定点からプローブ先端の間に数 V の電圧降下が生じる、得られたプラズマ電位に電圧降下分を加え、カソード電位を差し引くことで、各測定地点におけるカソードに対するプラズマ電位の値を算出した。以下、この値をプラズマポテンシャルと呼ぶ。

**3.3 測定結果** 図 5(a)~(d)は円柱形の放電室内部を、コイルに印加した電流を変化させたそれぞれの場合について中心軸を通るように切り取った断面を表している。各測定点から得られたプラズマポテンシャルをその座標における高さとしてプロットし、プラズマポテンシャルの分布を等高線グラフとして表した。カソードに対するアノード電圧

が放電電圧であるため、放電電圧をアノード壁におけるプラズマポテンシャルとみなし、測定点とアノード壁の間の勾配についても表示した。

横軸はスラスタ内部のホローカソードを保護するキーパーインシュレータからアノード排気面に向けた軸方向の距離を、縦軸はアノード中心軸からアノード壁面に向けた半径方向の距離を表している。等高線の色分けによってプラズマポテンシャルが表され、各色に対応する電位はグラフ右のカラーバーのとおりである。グラフ左端はキーパーインシュレータを、右端はアノード排気面を表している。上端はアノード壁面を、下端はアノード中心軸を表し、推進剤の流れは左から右となっている。それぞれのコイル印加電流におけるキーパー電圧と等しい値の等電位線をグラフ中の赤い線で、値をラベルによって示した。

プラズマポテンシャルはアノード中心軸上で最も低く、アノード壁面に向かうほど上昇する傾向にあることが分かった。また、プラズマポテンシャルが上昇する勾配は中心軸上から 16mm の地点までは緩やかであり、16mm 地点とアノード壁面がもつアノード電位の間には勾配が大きくなることが読み取れる。このことから、コイルによって印加された磁場が電子をトラップし、プラズマポテンシャルがカソード電位よりも高く、キーパー電圧よりも低く抑えられている領域が中心軸上からアノード壁面に向かって 16mm の距離まで形成されていると考えることが可能である。この領域を仮想陰極領域と定義する。

図 7 はコイル電流を印加した際に記録されたキーパー電圧の平均値とプラズマポテンシャルが等しくなる等電位線をコイル電流 2A, 4A, 6A, 8A の条件で重ねたものであり、横軸はホローカソードからアノード排気面への軸方向距離を、縦軸はアノード中心軸からアノード壁面への半径方向

距離を表している。コイル印加電流が大きくなるとホローカソード付近の仮想陰極半径は小さくなる傾向が読み取れる。また、アノード排気面付近ではコイル電流の値によらず等電位線のアノード中心軸からの距離は16mm程度になることが分かる。

プラズマポテンシャルがカソードよりも高くキーパーよりも低く、かつアノードへ電子を供給している領域を仮想陰極とすると、この領域は図における線よりも下側、アノード中心軸からキーパー電圧との等電位線までの領域をアノード中心軸上で一回転させた円柱形状であるといえる。

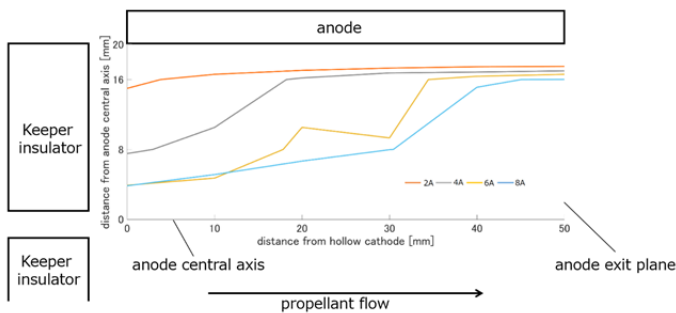


図7 コイル印加電流とキーパー等電位線の関係

ホローカソードから出た電子はコイルによって誘起される磁力線に沿ったまま移動するが、陽極の存在や推進剤との衝突により磁場に垂直な方向への電子の流れが誘起される。これらの効果による電子流束は印加磁場が小さい場合には大きくなる。電子は磁場の小さい領域を通ろうとするため、印加磁場が小さい場合には放電室上流側でも磁場が十分に小さく、上流側でも下流側でも変わらず陽極側に電子が流れていく。そのため電位構造は磁力線に沿うような形状となる。印加磁場が大きくなっていった場合には磁場が低い領域が下流部のみに限られるため、上流側では陽極が電子を引き付けるために電場が中心軸側まで存在するような構造、下流部分では他の印加磁場条件に近い電位構造となると考えられる。

#### 4. 結論

ホローカソードを採用し、カソードの損耗を低減させた外部磁場印加型MPDスラスタの推力測定及び内部電位分布の測定を行った。棒状陰極を利用したスラスタの推力理論式との比較から、ホローカソードにより仮想的な陰極として機能する領域が形成されることが分かった。エミッシブプローブによるプラズマ電位測定から、仮想陰極領域はコイルに印加する電流が変化するとスラスタ下流にのみ形成され、その半径はコイル電流の値によらず同等の大きさであった。

#### 参考文献

- 1) JAXA はやぶさ2プロジェクト, <https://www.hayabusa2.jaxa.jp/mission/goal/>
- 2) Yoshikazu Sugiyama, Norihide Koyama, Tomoya Suzuki, Hisao Sakoda, Hirokazu Tahara, "Thermal Characteristics of Radiation-cooled Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion", IEPC-2015-198
- 3) Tomoya Suzuki, Norihide Koyama, Yoshikazu Sugiyama, Hisao Sakoda, Hirokazu Tahara, "Performance Characteristics of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for Manned Mars Exploration", IEPC-2015-197
- 4) 根岸修平, "非実体陰極を仮定した外部磁場印加型MPDスラスタの作動特性", 2021, 筑波大学大学院修士論文
- 5) D. B. Fradkin, A. W. Blackstock, D. J. Roehling, T. F. Stratton, M. Williams, K. W. Liewer, "Experiments Using a 25kW Hollow Cathode Lithium Vapor MPD Arcjet", AIAA Journal, Vol.8, No.5, (1970)