

陰極を放電室下流部に持つ定常・外部磁場・矩形 MPD スラスタの推進性能

Performance of Steady-State, Applied-Field, Rectangular Magneto-Plasma-Dynamic Thruster Having Cathode at the Exit of the Discharge Channel

○片岡 久志, 鶴生 知輝, 市原 大輔 (名古屋大学大学院), 岩川 輝, 佐宗 章弘 (名古屋大学)
Hisashi Kataoka, Tomoki Uno, Daisuke Ichihara, Akira Iwakawa and Akihiro Sasoh (Nagoya University)

Abstract: The steady rectangular magneto-plasma-dynamic (MPD) thruster with its cathode placed near the exit of the acceleration channel was investigated. The performance of the thruster was measured by varying discharge current, mass flow rate and distance between anode and cathode. As results, the thrust was increased with the discharge current and the distance between anode and cathode, however the thrust did not changed with the mass flow rate. The ratio of measured thrust to ideal electromagnetic thrust was achieved from 50 to 70%.

Key Words: *Electric propulsion, MPD thruster, Hollow cathode, Current distribution*

Nomenclatures

\mathbf{B}	= applied magnetic field
\mathbf{f}	= Lorentz force per unit volume
F	= thrust
H	= inter-electrode distance
\mathbf{j}	= current density
J_d	= discharge current
J_k	= keeper current
\dot{m}_b	= mass flow rate from back plate
\dot{m}_c	= mass flow rate from hollow cathode
\dot{m}_t	= total mass flow rate
V_d	= discharge voltage
V_k	= keeper voltage

1. はじめに

Magneto-plasma-dynamics (MPD) スラスタは比較的構造が単純で推力密度が高く近い将来の大電力電気推進機の候補の一つとして考えられている。しかし、推力効率の低さや電極の激しい損耗という課題があり、推力効率の改善や作動時間の長時間化といった推進機性能の向上のための研究が行われている¹⁻³⁾。

1960年代より同軸形状MPDスラスタに関して推力発生メカニズムの解明や性能評価が数多く行われてきた⁴⁻⁷⁾。一方、矩形形状のMPDスラスタは1980年代から研究が行われており、同軸形状では観察することのできない放電室内部の状態を観察することを目的とした研究が取り組まれてきた⁸⁻⁹⁾。さらに、最近ではISAS/JAXAにおいて放電電流に対して外部磁場を直交に印加する

ことのできる矩形形状の加速部を有するMPDスラスタが考案された¹⁰⁾。矩形形状MPDスラスタは、放電電流と外部磁によって発生するローレンツ力を直接排気方向に向けることができるという利点を有する。矩形形状MPDスラスタの放電室において、単位体積当たり働く理想的なローレンツ力 \mathbf{f} は

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

と表される。ここでは \mathbf{j} 電流密度、 \mathbf{B} は外部磁場強度である。よって理想的な電磁推力 F は、放電電流を J_d 、電極間距離（放電距離）を H とすると、(1)式を放電室全域にわたり積分することで(2)式の様に表される。

$$F = \int_V (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{V} = J_d B H \quad (2)$$

本研究室においてもこれまでホローカソードを用いた矩形形状MPDスラスタを試作し、定常作動での性能評価を行ってきた。その中で矩形形状MPDスラスタにおいて放電を放電室下流部に分布させることで推力が向上することが確認されている¹¹⁾。そこで本研究ではこれまで陰極位置に制約をあたえていたホローカソードのキーパー電極を改良しホローカソードの小型化を行った。併せて上記のホローカソードを用いて陰極を放電室下流部に持つ定常・外部磁場印・矩形MPDスラスタを製作し、推力特性及び推進性能を取得したのでその結果を報告する。

2. スラスタ及び実験装置

2.1. スラスタ

本研究で用いた小型ホローカソードと外部磁場印加型 MPD スラスタを図 1, 図 2 に示す。

図 1 の小型ホローカソードはカソードチップ (LHC-03AE1-01, Kaufman Robinson, Inc) とタンタル製の矩形キーパー電極からなる。キーパー電極のオリフィス径は 3 mm であり、ホローカソードの中心軸は下流端面より 7.5 mm に位置している。

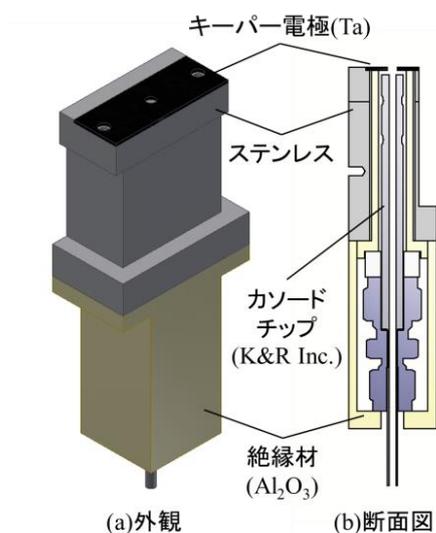


図 1 小型ホローカソード

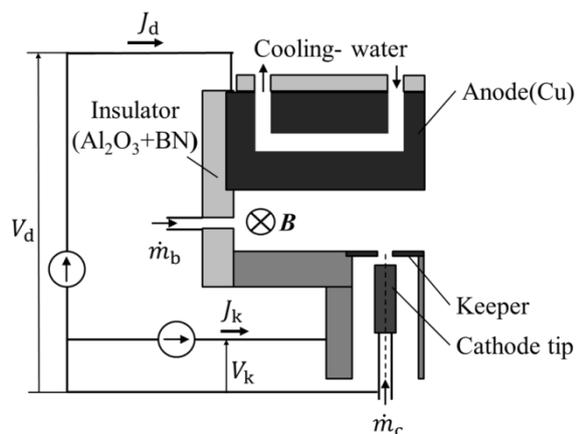


図 2 外部磁場印加型 MPD スラスタ

図 2 のスラスタの矩形経路は幅 20 mm, 奥行き 50 mm であり電極間距離は 10~20 mm の間で可変である。陰極には図 1 のホローカソードを用い、陽極には銅製で水冷式のものを採用した。またネオジウム磁石を用いて、放電室内部に 200 mT の磁場を印加した。図 2 に示す矩形形状 MPD スラスタは、推進剤をホローカソードと矩形経路上流の壁面の 2 経路から投入可能である。

2.2. 実験装置

本研究に用いた実験装置を図 3 に示す。装置は真空チャンバー、真空ポンプ、スラスタヘッド、スラストスタンド、フィードスルー、各種電源及び測定装置より構成される。真空チャンバーは直径 2 m, 長さ 4 m で、ターボ分子ポンプ (3200 L/s) 及びロータリーポンプ (33.3 L/s) によって排気される。真空度はピラニゲージ及び電離真空計によって測定され、スラスタ作動中のチャンバー内圧力は 8×10^{-2} Pa 以下に保たれていた。

推力は振り子式スラストスタンド¹²⁾によってスラスタの作動によって生じる振り子の微小変位をアームの先端に設置された差動変圧器によって測定し、振り子の微小変位から評価した。

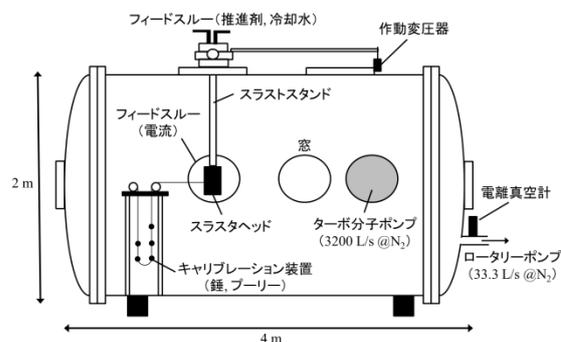


図 3 実験装置概観

3. 実験条件と結果及び考察

3.1. 実験条件

実験条件を表 1 に示す。推進剤にはアルゴン(純度 99.9999%)を使用した。本実験では 2 経路から放電室に推進剤を投入しており、全質量流量、推進剤流量比、放電電流及び電極間距離をパラメータとして用いた。

表 1 実験条件

Control parameter	Symbol	Value
Total mass flow rate [mg/s]	\dot{m}_t	1.25~2.50
Mass flow rate ratio [-]	\dot{m}_c/\dot{m}_t	0.5~1
Discharge current [A]	J_d	5,10,15
Keeper current [A]	J_k	2
Applied magnetic field [mT]	B	200
Inter-electrode distance [mm]	H	10, 15, 20

3.2. 推力特性

放電電流を 5 A で固定し、電極間距離を 10,15, 20 mm としたときの全推進剤流量に対する推力を図 4 に示す。推進剤流量の変化に対して推力は変化しないことが確認された。これは電磁加速が支配的な作動であることを示唆している。

次に推進剤流量、推進剤流量比を固定したときの放電電流に対する推力と電極間距離に対する推力を図 5, 図 6 に示す。推力は放電電流、電極間距離に対してほぼ線形に増加している。これは(2)式で示した傾向と一致している。

また理想的な電磁推力に対する測定した推力を図 7 に示す。推力は電極間距離に依らず理想的な電磁推力の 50~70%であることがわかる。

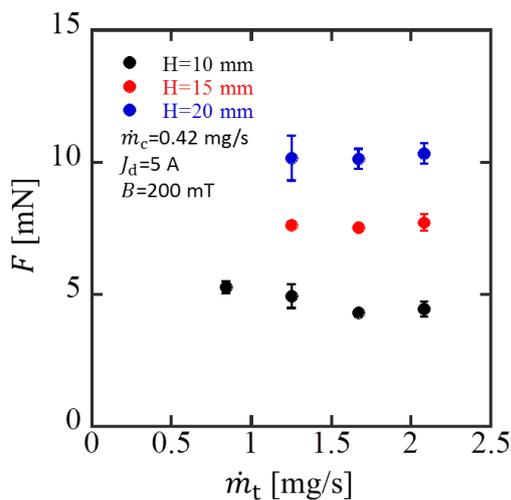


図 4 全推進剤質量流量に対する推力の変化

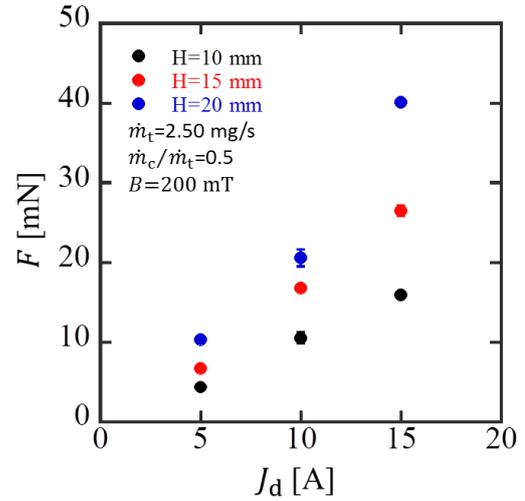


図 5 放電電流に対する推力の変化

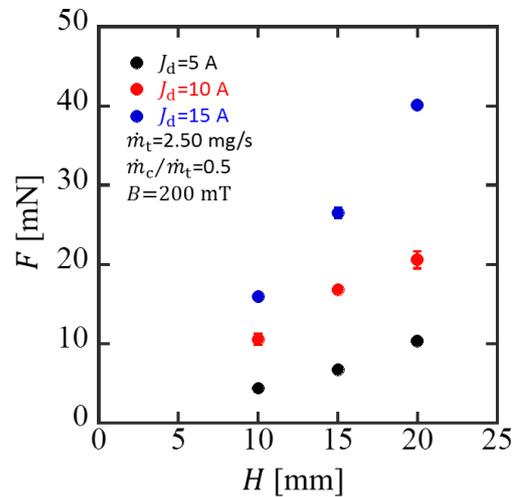


図 6 電極間距離に対する推力の変化

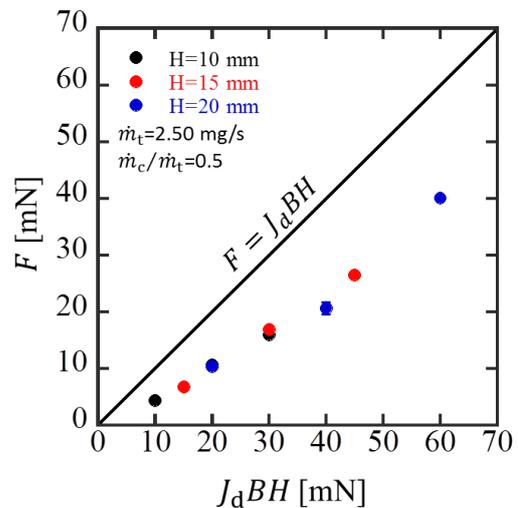


図 7 理想的な電磁推力に対する推力の変化

3.3. 推進性能

推力及び放電電圧の測定結果から算出した比推力及び推力効率を図 8 に示す。放電電流の増加に伴い、比推力及び推力効率は上昇している一方で、放電電流の増加に伴い、推力電力比は低下している。本研究においては比推力 1640 秒において最大推力効率 7.3% であった。

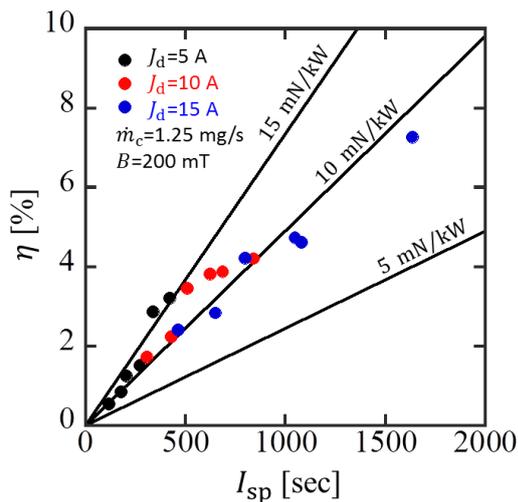


図 8 推進性能

3.4. 推力特性及び推進性能の比較

ここで本研究と市原らの研究¹¹⁾の結果を比較することで陰極の放電室下流部配置による影響を考える。なお本研究における陰極位置は放電室下流端から 7.5 mm であり、市原らの研究においては 30 mm である。

代表的な実験条件における理想的な電磁推力に対する推力の比較を図 9 に示す。陰極の下流部配置により約 20% の向上が見られる。また代表的な実験条件における推進性能の比較を図 10 に示す。最大で比推力は 50%，推力効率は 68% の向上が見られる。

これらの比較は陰極の放電室下流部配置により推力及び推進性能の向上を示唆していると考えられる。

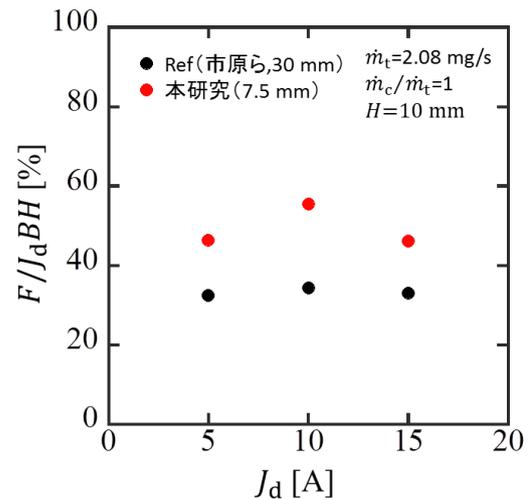


図 9 理想的な電磁推力に対する推力の比較

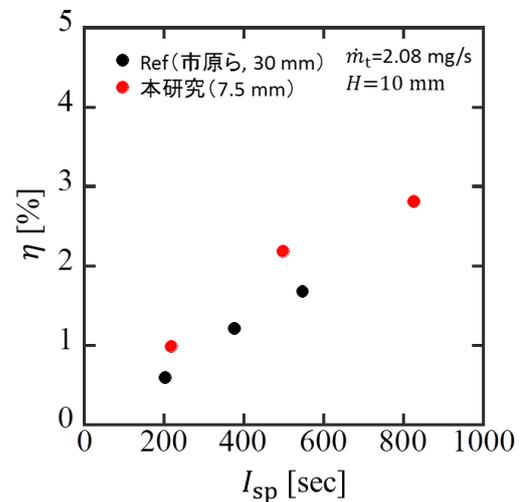


図 10 推進性能の比較

4. 結論

本研究では矩形キーパー電極を作成することでローカソードの小型化を行い、陰極を放電室下流部に持つ矩形 MPD スラスタを開発し、推力特性及び推進性能を取得した。その結果以下のことが示された。

- ・ 推力は推進剤流量に依存せず、放電電流、電極間距離に対して線形的に増加している。また理想的な電磁推力に対する推力の割合は 50~70% であった。
- ・ 比推力 1640 秒において最大推力効率 7.3% であった。
- ・ 先行研究と比較したところ、陰極の放電室下流部

配置による推力及び推進性能の向上が確認された。

5. 参考文献

- 1). K. Sankaran, L. Cassady, A. D. Kodys, and E. Y. Choueiri : A Survey of Propulsion Options for Cargo and Piloted Missions to Mars, ASTRODYNAMICS, SPACE MISSIONS, AND CHAOS, 1017, pp.450-467, 2004.
- 2). R. G. Jahn : Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill, New York, 1968.
- 3). G. Krulle, M. Auweter-Kurtz, and A. Sasoh : Technology and Application Aspects of Applied Field Magnetoplasma-dynamic Propulsion, Journal of Propulsion. & Power, Vol. 14, No. 5, pp. 754-763, 1998.
- 4). M. Auweter-Kurtz : Plasma thruster development program at the IRS, Acta Astronautica, 32, pp.377-391, 1994.
- 5). A. Sasoh, and Y. Arakawa : Electromagnetic Effects in an Applied-Field Magnetoplasma-dynamic Thruster, Journal of Propulsion and Power, 8, pp.98-102, 1992.
- 6). V. B. Tikhonov, N. N. Antropov, G. A. Dyakonov, V. A. Obukhov, F. Paganucci, P. Rossetti, M. Andrenucci : Investigation on a New Type of MPD Thruster, ECA, 24B, pp. 81-84, 2000.
- 7). M. R. LaPointe : High Power MPD Thruster Performance Measurement, AIAA Paper (2004)-3467, 2004.
- 8). K. Toki, M. Sumida, and K. Kuriki : Multi-Channel Two-Dimensional MPD Arcjet, 19th International Electric Propulsion Conference, 1987.
- 9). I. Funaki, K. Toki, and K. Kuriki : Electrode Configuration Effect on the Performance of a Two-Dimensional Magnetoplasma-dynamic Arcjet, Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 6, pp. 1043-1048, 1998.
- 10). A. Iwakawa, D. Nakata, H. Kuninaka : Experimental Study of a Two-Dimensional Applied-Field Magnetoplasma-dynamics Thruster, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 8, pp. Pb_13-Pb_17, 2010.
- 11). 市原大輔, 原田翔太, 横田茂, 佐宗章弘 : 定常・外部磁場印加型 MPD スラスタの高電圧作動特性, JSASS-2013-0030, 2013.
- 12). M. Yonemoto, A. Sasoh : Operation Characteristic of a Steady-State, Two-Dimensional MPD Thruster Using a Hollow Cathode, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN 10.ists28 (2012): Pb_7-Pb_12.