

定常作動同軸AF-MPDの電極形状が推進性能に及ぼす影響

○鶴生 知輝, 片岡 久志, 鄭 栽勲, 市原 大輔, 岩川 輝, 佐宗 章弘 (名古屋大学大学院)

Effect of Electrode Geometry on Steady-State Coaxial AF-MPD Thruster

Tomoki Uno, Hisashi Kataoka, Jaehun Jeong, Daisuke Ichihara, Akira Iwakawa and Akihiro Sasoh (Nagoya University)

Key Words: Electric propulsion, MPD thruster, Hollow cathode

Abstract

We have developed a steady-state applied-field coaxial magnetoplasma dynamic thruster with a hollow cathode. Using argon gas as a propellant, operation property was parametrically studied for several propellant mass flow rates, applied magnetic field strengths and discharge currents with changing anode radius. As results, the thrust increased with increasing the discharge current, applied magnetic field and anode radius. Discharge voltage is increased by the back electromotive force. The thrust and discharge voltage is consistent with the trend by swirl acceleration.

Nomenclatures

\dot{m}_t	= total mass flow rate
\dot{m}_c	= cathode mass flow rate
\dot{m}_b	= back plate mass flow rate
B	= applied magnetic field
J_d	= discharge current
V_d	= discharge voltage
J_k	= keeper current
V_k	= keeper voltage
F	= thrust
F_{swirl}	= thrust by swirl acceleration
I_{sp}	= specific impulse
η	= thrust efficiency
R_a	= anode radius
R_c	= cathode radius
$V_{\text{back emf}}$	= back electromotive force
V_0	= $V_d - V_{\text{back emf}}$

1. はじめに

Magnetoplasma dynamic(MPD)スラスタは、高い推力密度を有し、大電力作動が可能であることから、近い将来に必要とされる大電力電気推進機の有力な候補と考えられている¹⁻³⁾。しかし、低い推力効率や陰極の損耗といった課題があり、推進性能の向上や加速メカニズムの解明などの研究が数多く行われている⁴⁻⁷⁾。

MPDスラスタは磁場の印加方法により自己誘起磁場型(SF-MPD)と外部磁場印加型(AF-MPD)に分類できる。SF-MPDスラスタは放電電流と放電電流により誘起される自己誘起磁場によって加速するため、効率的な作動を行うには1~10 kA級の大電流が必要となる。しかし、大電流作動では、熱負荷や陰極の損耗

が課題となる。一方、AF-MPDスラスタは、永久磁石やコイルにより外部磁場を印加することで、スワール加速やホール加速といった加速機構により推力が生じる。特に強磁場を印加することで低電流作動においても高い推力が期待でき、熱負荷や陰極の損耗を低減できる。しかし、従来のAF-MPDスラスタの研究では1 kA級の大電流作動するものが多く研究されてきた⁸⁻¹⁰⁾。その要因として低電流作動ではジュール加熱が小さく陰極の熱電子放出が促されないため、タングステンなどの陰極棒では放電が維持できないことが挙げられる。

そこで本研究では、陰極にキーパー電極をもつ熱電子放出型のホローカソードを用いることで、低電流での定常作動が可能な同軸AF-MPDスラスタを開発した。陽極半径、放電電流、外部磁場強度、推進剤流量をパラメータとして作動を行い、作動特性、推進性能を取得した。さらにコントロールパラメータに対して、スワール加速を仮定したモデルから、スケーリングを行っ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

本研究では2種類のスラスタを用いて実験を行った。本研究で用いたホローカソードと2種類のAF-MPDスラスタの断面図をそれぞれ図 1, 図 2, 図 3に示す。

ホローカソードはカソードチップ(LHC-03AE1-01, Kaufman & Robinson, Inc.)とタンタル製のキーパー電極からなる。キーパー電極の外径は14 mmであり、オリフィス径は2 mmとなっている。また、推進剤をカソードチップ内部に加え、キーパー電極の背後、半径

11 mmの位置にある2箇所ポートから投入できる。

スラスタはどちらも同じ構成をしており、陽極は銅製の円筒形状で水冷している。陰極には図 1のホローカソードを用い、コイルの中心に配置した。また、水冷コイルを用いてコイル中心に最大265 mTの外部磁場を印加できる。両者の違いは陽極半径であり、小型スラスタでは陽極半径10, 15, 20 mm, 大型スラスタでは陽極半径40 mmにて実験を行った。

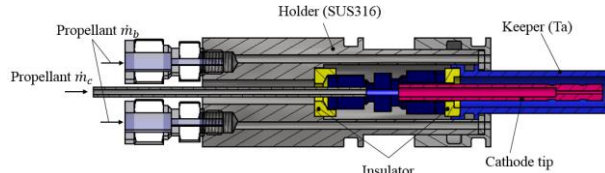


図 1 ホローカソード

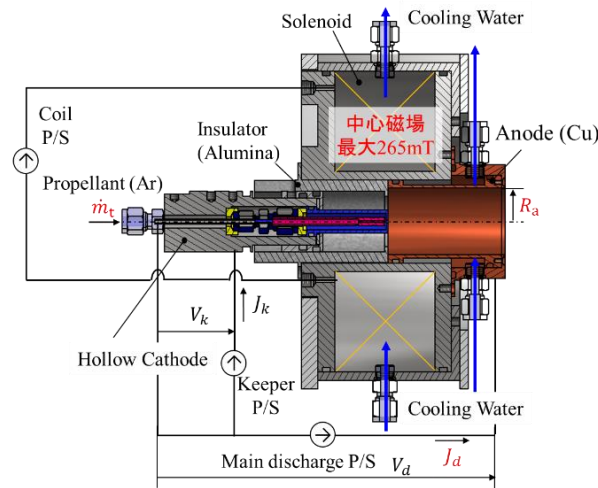


図 2 小型AF-MPDスラスタ

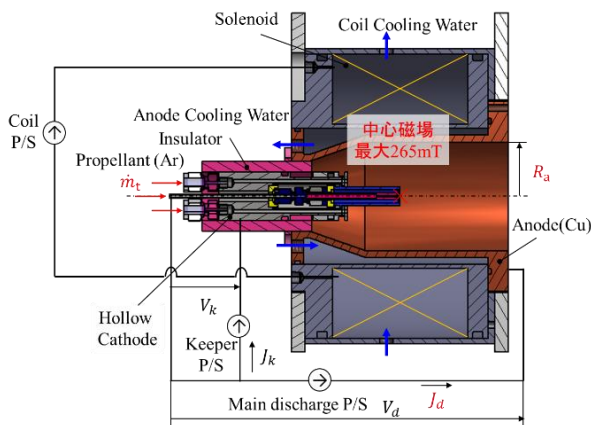


図 3 大型AF-MPDスラスタ

2.2. 実験装置

本研究で用いた実験装置を図 4に示す。装置は真空チャンバー、真空ポンプ、スラストスタンド、フィードスルー、電源装置、計測装置から構成される。真

空チャンバーは長さ4 m, 直径2 mでロータリーポンプとターボ分子ポンプにより排気される。真空度はピラニゲージと電離真空計により計測され、すべての実験条件において 7.0×10^{-2} Pa以下に保たれている。

推力は振り子式スラストスタンドを用いてスラスタの作動によって生じる微小変位をアームの先端に設置された作動変圧器によって計測し、推力を評価した。また、コイル作動時にTare forceが生じるため、スラスタ作動時に測定した値からTare forceの値を引いたものを推力として算出した。

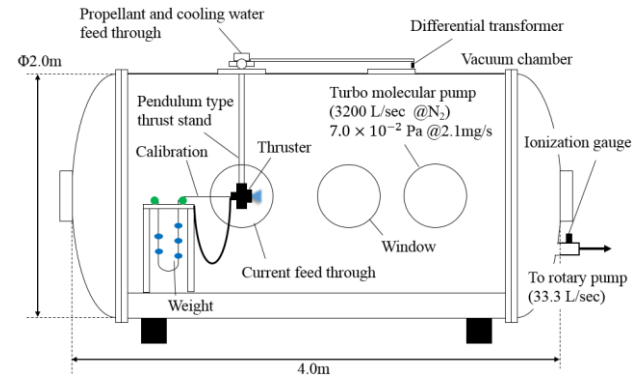


図 4 実験装置概要図

3. 実験条件, 実験結果

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%)を用いており、磁束密度はコイル中心での値を表している。

表 1 実験条件

Control parameter	Symbol	Value
Total mass flow rate [mg/s]	\dot{m}_t	0.21~2.08
Cathode mass flow rate [mg/s]	\dot{m}_c	0.21~2.08
Back plate mass flow rate [mg/s]	\dot{m}_b	0~1.67
Discharge current [A]	J_d	5~20
Applied magnetic field [mT]	B	114~265
Keeper current [A]	J_k	2
Anode radius [mm]	R_a	10, 15, 20, 40

3.2. 作動特性

図 4に小型スラスタの陽極半径に対する放電電圧、推力を示す。陽極半径が大きくなるに従い、放電電圧、推力ともに上昇している。放電電圧は陽極半径によらず推進剤流量の減少に伴い増加している。一方で推力は内径20 mmのとき、推進剤流量が増加するにつれ増加し、最大3倍の違いが見られるのに対し、内径が30, 40 mmのときは推進剤流量の変化に対して推力の変化は最大でも15%であり、推進剤流量に依存していない。つまり陽極半径が大きいときは電磁加速の

寄与が大きくなっていると考えられ、大きな陽極半径で低推進剤流量の作動を行うことで推進性能の向上が期待できる。

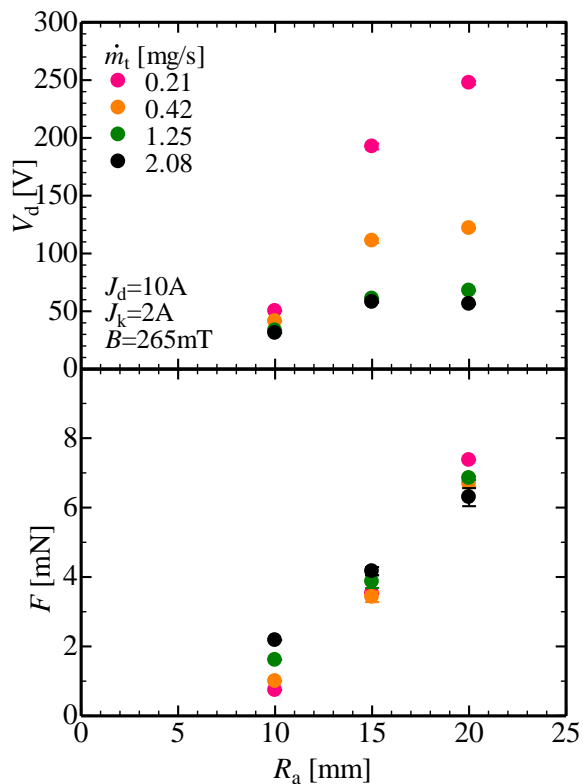


図 5 小型スラスタの放電電圧, 推力

大型スラスタの放電電流と外部磁場強度に対する放電電圧, 推力をそれぞれ図 6, 図 7に示す. 推力は放電電流, 外部磁場強度に対して線形に増加し, 推進剤流量に依存していない. 小型スラスタに比べ推力の向上が確認された. 一方で推進剤流量が小さい条件では, 放電電流が振動する不安定な作動となり, 計測が行えなかった. 放電電圧は推進剤流量が小さいほど増加し, 放電電流, 外部磁場強度に対して増加した.

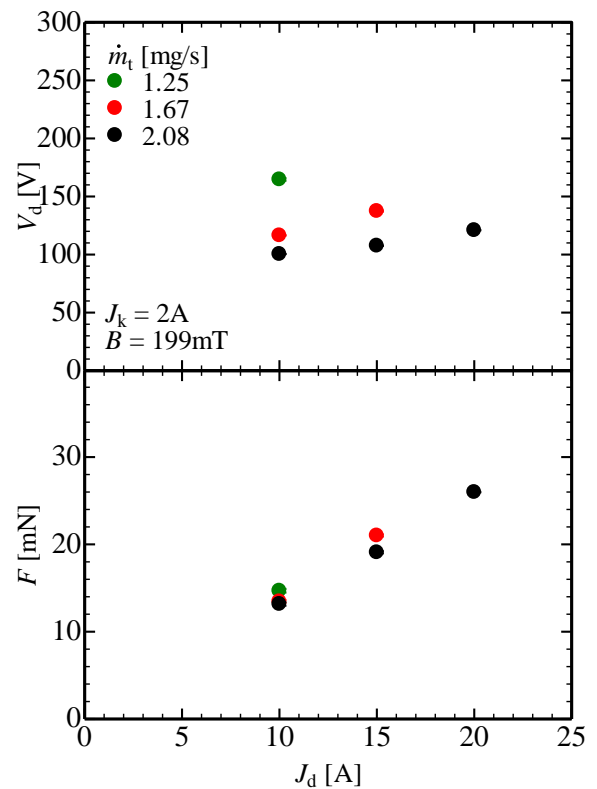


図 6 放電電流に対する放電電圧, 推力

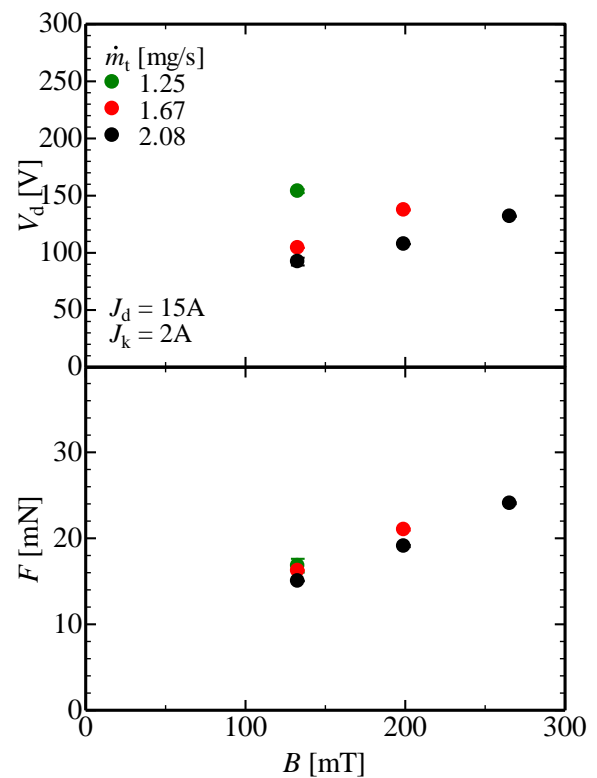


図 7 外部磁場強度に対する放電電圧, 推力

3.3. 推進性能

推力、放電電圧、キープ電圧の計測結果から、推進性能の評価を行った。代表的な推進性能を図 8 に示す。ただし比推力、推力効率の実験で設定した推進剤流量を基に算出しており、電極や壁面材料の損耗による実効的な推進剤流量の増加を考慮していない。また、コイルに用いた電力も将来的には永久磁石を適用することを考え考慮していない。

陽極を大径化することで推力効率、推力電力比の向上が確認できる。本研究では、陽極半径40mmの条件で、最大推力効率は13%をとり、そのときの比推力は2500秒であった。比推力に関しては、低推進剤流量でも安定作動が行えたことから陽極半径が小さいほうが大きくなった。

本研究ではホローカソードの作動範囲から放電電流が20Aまでの条件でしか作動をさせていない。放電電流を増加させることで、さらなる推進性能の向上が期待できる。

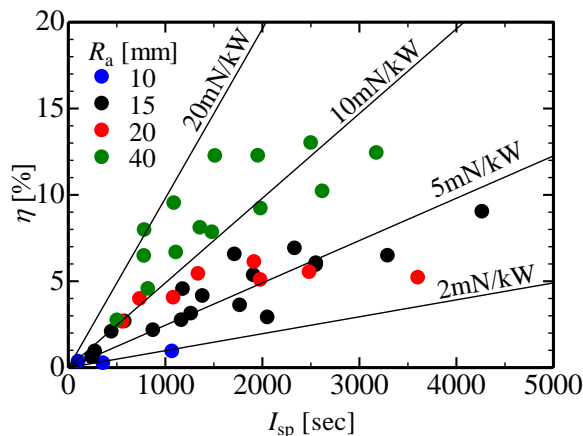


図 8 推進性能

4. スケーリング

2つのスラスタを用いた実験の結果から、陽極半径に対して推力、放電電圧の増加が確認された。そこで陽極半径と作動条件に対して推力、放電電圧の傾向を把握するためにスケーリングを行った。

4.1. モデル化

本研究では放電電流は最大でも20Aで投入電力も数kWと小さいことから、自己誘起磁場の影響や電熱加速の影響は小さいと考えられる。よって支配的な加速機構は外部磁場によるスワール加速、ホール加速であると考えられる。実験中の排気プルームを観察したところ、プルームの回転や磁場に沿った形状が観察されたことから、スワール加速が支配的と考えた。スワール加速による推力の理論式はFradkinらによって提唱されており¹¹⁾、角速度を一定とすると

推力は次の式で表される。

$$F_{\text{swirl}} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_d B_z R_a \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{R_c}{R_a} \right)^2 \right] \quad (1)$$

つまり、推力は放電電流、外部磁場強度、陽極半径に比例する。

放電電圧は逆起電力とシース電圧やプラズマ抵抗による電圧降下などの逆起電力以外の項に分けると次の式で表される。

$$V_d = V_0 + V_{\text{back emf}} \quad (2)$$

ここで逆起電力は θ 方向の旋回速度から次のように求められる。

$$V_{\text{back emf}} = \frac{J_d B_z^2 R_a^2}{2\dot{m}} \left[1 - 3 \left(\frac{R_c}{R_a} \right)^2 \right] \quad (3)$$

よって、放電電圧はある電圧 V_0 から放電電流、外部磁場強度の2乗、陽極半径の2乗に比例し、推進剤流量に反比例して増加する。式(1)、(3)より推力、放電電圧の傾向についてスワール加速を仮定し見積もった。

4.2. 推力、放電電圧の傾向

スワール加速による理想的な推力に対する推力値を図 9 に示す。外部磁場強度には、陽極出口での値を用いた。推力は線形に増加していることから、放電電流、外部磁場強度、陽極半径に比例して増加していることがわかる。一方で式(1)から導出される、理論値に対しては60%ほどの推力値となった。一致しない原因としては、壁面への損失や、角速度一定などの計算における仮定が実験においては成り立っていないことが考えられる。

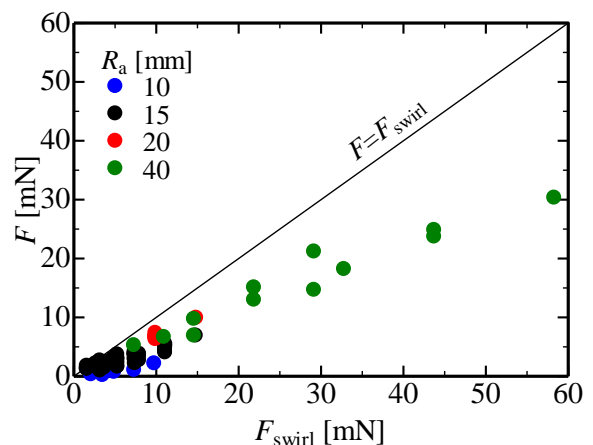


図 9 スワール加速による推力に対する推力値

放電電圧は $J_d B^2 R_a^2 / \dot{m}$ に比例すると考えられる。そこで、 $J_d B^2 R_a / \dot{m}$ に対する V_d / R_a を図 10 に示す。切片となる電圧 V_0 は陽極半径に比例している。また、陽極半径によらず $J_d B^2 R_a^2 / \dot{m}$ に対して放電電圧はほぼ同じ傾きで増加していることがわかる。つまり、逆起電

力により放電電圧が増加していると考えられる。

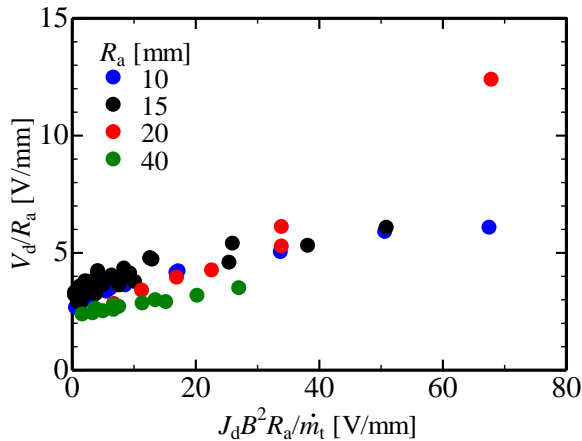


図 10 $J_d B^2 R_a / m_t$ に対する V_d / R_a

5. 結論

本研究ではホローカソードを用いた同軸AF-MPD スラスタを開発し、小流量低電流作動を行った。陽極内径を変更し作動特性、推進性能を取得した結果、以下のことが判明した。

- ・ 陽極を大径化することで、推力、推力効率、推力電力比の向上が確認された。一方で推進剤流量が小さい範囲では不安定作動となったため、比推力は低下した。
- ・ 陽極半径40 mmにおいて、比推力2500秒で最大推力効率13%を達成した。
- ・ 推力は放電電流、外部磁場強度、陽極半径に比例して増加した。スワール加速によるモデルと比較すると推力はその60%程度であった。
- ・ 放電電圧はある電圧 V_0 から逆起電力により増加した。

推力、放電電圧の傾向はスワール加速を仮定したときのモデルと一致した傾向が見られた。この詳細を調査するためにラングミュアプローブやホールプローブを用いた診断を行う予定である。

謝辞

本研究はJAXA-In-Space 27-DD9166の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1). K. Sankaran et al, "A Survey of Propulsion Options for Cargo and Piloted Missions to Mars", *ASTRODYNAMICS, SPACE MISSIONS, AND CHAOS*, 1017, pp.450-467, 2004
- 2). Jahn, R. G. "Physics of Electric Propulsion", McGraw-Hill, New York, 1968

- 3). Krulle, G. et al, "Technology and Application Aspects of Applied Field Magnetoplasmadynamic 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). Sasoh, A. et al, "Electromagnetic Effects in an Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster", *Journal of Propulsion and Power*, 8, pp.98-102, 1992.
- 6). V. B. Tikhonov et al, "Investigation on a New Type of MPD Thruster", *ECA*, 24B, pp. 81-84, 2000
- 7). Adam Boxberger et al, "Experimental Test Campaign of Gas-fed Steady State Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster SX3", *IEPC Paper 2013-251*, 2013
- 8). S. Bennett et al, "Experimental investigation of the MPD arcjet", *AIAA-66-239*, 1966
- 9). V. B. Tikhonov et al, "Performance of 130kW MPD thruster with an external magnetic field and Li as propellant", *IEPC-97-117*, 1997
- 10). Roger M. Myers, "Scaling of a 100-kW class applied-field MPD thruster", *AIAA-92-3462*, 1992
- 11). D. B. Fradkin et al, "Experiments Using a 25-kw Hollow Cathode Lithium Vapor MPD Arcjet", *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 5, 1970