

LaB₆ ホローカソードを用いた定常外部磁場 MPD スラスタ

Steady-State Applied-Field MPD Thruster using LaB₆ Hollow Cathode

○岩川 輝・鄭 栽勲・春日 勇人・市原 大輔・水谷 佳祐・佐宗 章弘(名古屋大)・
木村 竜也・小島 康平・川又 善博・安井 正明 (三菱重工業)

○Akira Iwakawa・Jaehun Jeong・Hayato Kasuga・Daisuke Ichihara・Keisuke Mizutani・
Akihiro Sasoh (Nagoya University)・Tatsuya Kimura・Kohei Kojima・Yoshihiro Kawamata・
Masaaki Yasui (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

Abstract (概要)

For improving the thrust performance of a steady-state applied-field magneto-plasma-dynamic thruster (AF-MPD thruster) with low current-strong magnetic field operation, a hollow cathode with LaB₆ emitter was developed. Using this cathode, the discharge current and the applied field of AF-MPD thruster were increased up to 45 A and 325 mT, respectively. The thrust, the thrust efficiency and the specific impulse were improved by AF-MPD thruster using LaB₆ hollow cathode. The thrust scaling assumed with the swirl acceleration mechanism was also conducted to the results obtained, and the obtained results agree well with the thrust scaling.

記号の説明

- B : 外部磁場強度
- F_{AF} : 外部磁場推力(式(2))
- F_{SF} : 自己誘起推力(式(1))
- I_{sp} : 比推力
- J_d : 放電電流
- \dot{m} : 推進剤流量
- R_a : 陽極半径
- V_d : 放電電圧
- α : 自己誘起推力と外部磁場推力の比(F_{AF}/F_{SF})
- η : 推力効率
- μ_0 : 真空の誘電率

1. はじめに

Magneto-plasma-dynamic(MPD)スラスタは、他の電気推進機と比較して高い推力密度を有し、大電力作動が可能であることから、将来に必要な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^{1,2)}が、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。³⁻⁵⁾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)に分類される。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推進剤を加速、推力を得るため、推力が放電電流の二乗に比例する。そのため、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が、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、自己誘起磁場による推力に加えて、外部磁場による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。このことから、低電流作動で自己誘起磁場による推力が小さい場合でも、強磁場を印加することで高い推力が得られ、熱負荷や陰極の損耗の低減が期待できる。しかし、従来の AF-MPD スラスタの研究で用いられてきたタングステンなどの陰極棒は、低電流作動ではジュール加熱が小さく、熱電子放出が促されないため、放電を維持するという点から1 kA 級の大電流作動するものが多く研究されてきた⁶⁻⁸⁾。

名古屋大学では、従来のスラスタよりも低電流での作動を行うため、陰極にキーパー電極をもつ熱電子放出型のホロー

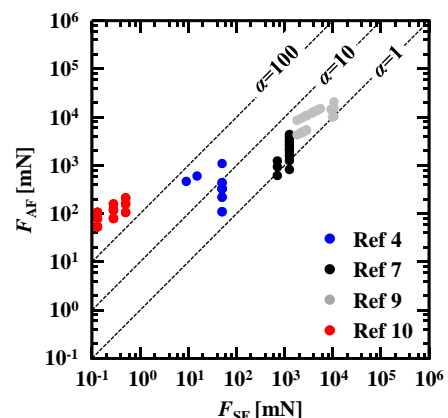


図1 AF-MPD スラスタの作動範囲^{4,7,9,10)}

カソードを用い、定常作動が可能な同軸 AF-MPD スラスタを開発し、その性能を評価してきた。AF-MPD スラスタの作動範囲を、自己誘起磁場推力とスワール加速による外部磁場推力の比 α を用いて整理し、従来の AF-MPD スラスタ^{4,7,9)}とホローカソードを用いた AF-MPD スラスタ¹⁰⁾をプロットした結果を図 1 に示す。図 1 中の F_{SF} 及び F_{AF} はそれぞれ、自己誘起磁場推力及び外部磁場推力であり、以下の式(1)及び式(2)で定義される。

$$F_{SF} = \mu_0 J_d^2 \quad (1)$$

$$F_{AF} = J_d B R_a \quad (2)$$

図 1 の結果から、開発した AF-MPD スラスタは $\alpha \geq 100$ の範囲で作動しており、従来の AF-MPD スラスタと比較して外部磁場を強調した作動となっている。

開発した AF-MPD スラスタは、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。これらの結果に対して、スワール加速を仮定したモデルによるスケールリング⁸⁾を行ったところ、推力、放電電圧ともにスワール加速モデルと一致する傾向が得られ、放電電流、外部磁場強度の増大に伴って性能が向上する結果が得られた。¹⁰⁾このことから、本スラスタの推進性能をさらに向上させるためには、外部磁場強度及び放電電流を増加させることが望ましいが、市販の熱電子放出型ホローカソード(LHC-03AE1-01, Kaufman & Robinson, Inc.)を用いていたため、ホローカソードの電流制限によって作動範囲を拡大させることができなかつた。そのため、熱電子放出材料に六ホウ化ランタン(LaB₆)を用いたホローカソードを新たに製作、AF-MPD スラスタの陰極に適用し、作動及び性能評価を行った。本稿ではそれらの結果について報告する。

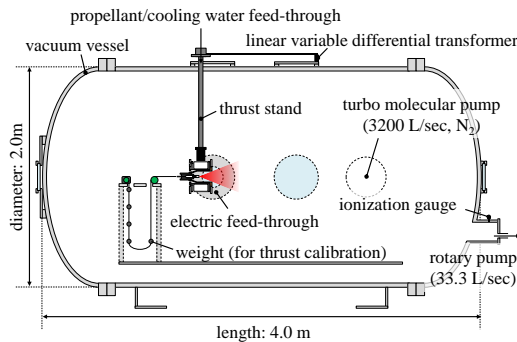


図 2 実験装置概要

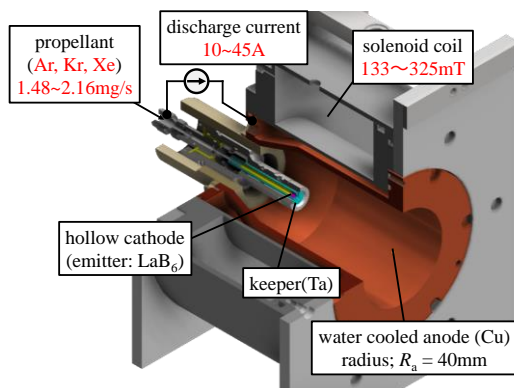


図 3 スラスタヘッド概要

2. 実験装置及びスラスタ

2.1 実験装置 本研究で用いた実験装置の概要を図 2 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、電源装置及び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、スラスタ作動時は 7.0×10^{-2} Pa 以下に維持されている。

スラスタは振り子式スラストスタンドに設置されており、スラスタ作動時の推力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、コイル作動時とコイル電流と放電電流の干渉により tare force が生じるため、予め tare force を評価しておき、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。

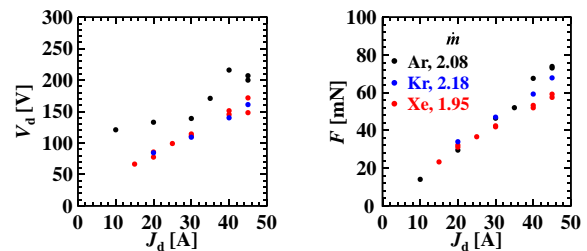
2.2 スラスタ 本研究で用いた AF-MPD スラスタの概要を図 3 に示す。スラスタは水冷ソレノイドコイル、半径 40 mm の銅製の水冷陽極及びホローカソードから構成され、水冷コイルを用いてコイル中心で最大 325 mT の外部磁場を印加することができる。ホローカソードは、タンタル製のキーパー電極と熱電子放出材料に LaB₆ を用いたカソードチップから構成され、キーパー電極の外径は 14 mm、オフィス径は 2 mm となっている。LaB₆ は内径 2 mm、外形 4 mm、長さ 6 mm の円筒形となっており、推進剤はカソードチップ内部を通して放電室に供給される。また、ホローカソードは、水冷陽極の出口から、105 mm 上流の位置にキーパー電極が位置するように設置されている。

3. 実験条件及び実験結果

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、クリプトン、キセノンを用い、推進剤は全てホローカソードを通して供給した。また、外部磁場強度はコイル中心での値を代表値とした。

表 1 実験条件

Control parameter	unit	Value
Propellant	-	Ar, Kr, Xe
\dot{m}	mg/s	1.48~2.18
J_d	A	5~45
B	mT	133~325



(a) 放電電圧特性

(b) 推力特性

図 4 $B = 265$ mT の条件における、異なる推進剤種(Ar, Kr, Xe)の場合の放電電流に対する放電電圧・推力特性

3.2 推進剤種への依存性 推進剤をアルゴン、クリプトン、キセノンとし、推進剤流量を 2.0 mg/s 程度とした場合の、放電電流に対する放電電圧及び推力の特性を図 4 に示す。図 4 (a)から、推進剤をアルゴンとした場合に他の推進剤種よりも放電電圧が高い傾向があるが、図 4 (b)から、推力は推進剤種に依らず、放電電流の増加関数となっていることがわかる。また、放電電流の大きい条件(40~45 A)では、推進剤種による違いが現れてきており、原子量の小さい推進剤を用いた方が、推力は大きくなる傾向がある。

3.3 推進剤流量への依存性 推進剤にアルゴンをを用い、外部磁場強度を 265 mT とし、異なる放電電流、推進剤流量に対する放電電圧及び推力の特性を図 5 に示す。図 5 (a)から、推進剤流量が小さい範囲(2 mg/s 以下)では、放電電圧は推進剤流量に依らず一定となっており、放電電流とともに増加する傾向がある。また、推進剤流量が大きい範囲(2.08 mg/s)では、他の流量と比較して低い電圧となっている。一方で、図 5 (b)の推力特性の図から、推力は推進剤流量に依らずほぼ一定の値となっている。

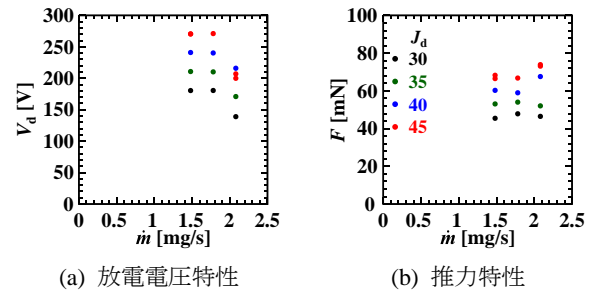
3.4 放電電流・外部磁場強度への依存性 推進剤にアルゴンをを用い、推進剤流量を 2.08 mg/s とした場合の、異なる放電電流、外部磁場強度に対する放電電圧及び推力の特性を図 6 に示す。図 6 (a)から、放電電圧は放電電流の増加とともに高くなり、また、外部磁場強度が強いほど高くなる傾向がある。しかし、外部磁場強度が 300 mT を超えるような範囲では、放電電圧は低くなる傾向が得られた。この原因についてはわかっていない。一方で、図 6 (b)から、推力は放電電流、外部磁場強度の増加とともに大きくなる傾向があり、推力の増大は外部磁場強度よりも放電電流に依存する傾向がある。また、推力は外部磁場強度に依らず、放電電流にほぼ線形となっている。

3.5 推進性能 今回作動した範囲における推進効率と比推力の関係を図 7 に示す。図 7 の白抜きで示した点は、市販品のホローカソードを用いた従来の結果¹⁰⁾であり、 $B=265$ mT, $J_d=20$ A の条件で、推進効率が最大となっていた。この作動条件における推力、比推力、推進効率は、それぞれ 32.6 mN, 1600 秒, 12.4%であった。一方、熱電子放出材料に LaB₆ を用いたホローカソードでは、 $B=325$ mT, $J_d=45$ A の条件で、推進効率、比推力ともに最大となり、この条件における推力、比推力、推進効率は、それぞれ 78.0 mN, 3830 秒, 19.8%となり、推進性能の向上が達成された。一方、推進性能が最大となる条件の推力電力比は、従来の MPD スラスタでは 18 mN/kW 程度であったものが、LaB₆ ホローカソードを用いた MPD スラスタでは 11 mN/kW 程度に留まっていることから、推力電力比の向上が今後の課題である。

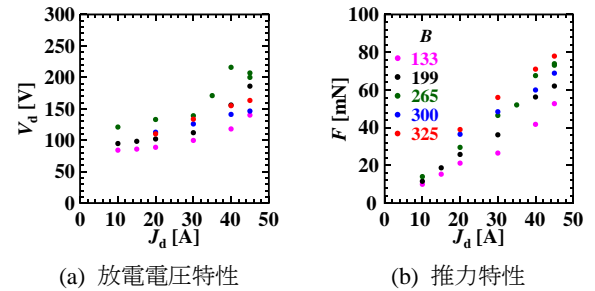
4. スケーリング

取得した作動特性、推進性能の結果に対して、スワール加速を仮定したモデルによるスケーリング⁸⁾を行った結果を図 8 に示す。図 8 中の灰色の範囲は従来の MPD スラスタの作動範囲を示す。

4.1 放電電圧 図 8 (a)に取得した放電電圧に対してスケ



(a) 放電電圧特性 (b) 推力特性
図 5 推進剤 Ar, $B=265$ mT の条件における、異なる推進剤流量、放電電流に対する放電電圧・推力特性



(a) 放電電圧特性 (b) 推力特性
図 6 推進剤 Ar, $m=2.08$ mg/s の条件における、異なる外部磁場、放電電流に対する放電電圧・推力特性

	\dot{m}	B				
		133	199	265	300	325
Ar	2.08	▼	◆	●	▲	■
Kr	2.18			●		
Xe	1.95			●	▲	■
Ref ⁽¹⁰⁾	2.08	▼	◆	○		

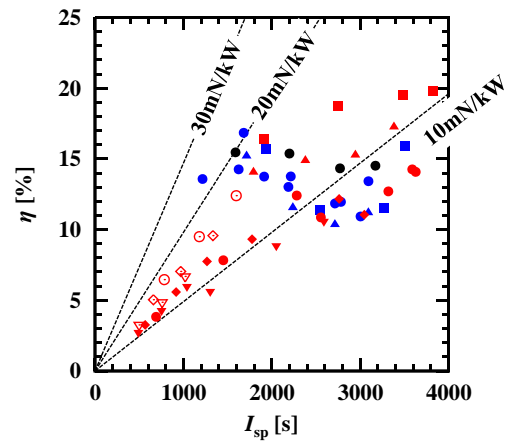


図 7 推進性能(推進効率に対する比推力特性)

ーリングを行った結果を示す。図中の白抜きは従来の結果であり、従来の結果では、放電電圧は $J_d B^2 R_a^2 / \dot{m}$ に比例して増大している。LaB₆ ホローカソードを用いた MPD スラスタで取得した実験結果は、いずれの条件においても、放電電圧は $J_d B^2 R_a^2 / \dot{m}$ に比例する傾向が確認でき、推進剤がクリプトンやキセノンの場合には、従来の結果と同様に、同一線上にプロットされる。しかし、推進剤がアルゴンの場合は、外部磁場強度によって傾きが異なり、外部磁場強度の強い条件($B \geq 300$ mT)では、従来の結果と同一の直線上にプロットされる

が、外部磁場強度の弱い条件($B \leq 265$ mT)では、より大きな傾きを有している。

4.2 推力 図 8(b)に取得した推力に対してスケーリングを行った結果を示す。図 8(a)同様に、白抜きは従来の結果である。図 8(b)から、従来の結果と LaB₆ホローカソードを用いた MPD スラスタで取得した結果は、いずれも $J_d B R_a$ と比例しており、その傾きは同一である。このことから、LaB₆ホローカソードを用いた MPD スラスタによって、スワール加速のモデルに従う推力生成モデルを維持したまま、作動範囲を拡大することができた。

5. 結 論

熱電子放出材料に LaB₆ を用いた定常外部磁場型 MPD スラスタを製作し、従来の市販のホローカソードを用いた場合には作動することのできなかった放電電流値、外部磁場強度において、作動特性及び推進性能を取得した。その結果、推力は推進剤種及び推進剤流量に依存せず、放電電流及び外部磁場強度の増大とともに増加する傾向が得られた。放電電流 45 A 以下及び外部磁場強度 325 mT 以下の作動範囲では、推力、推進効率、比推力はいずれも放電電流、外部磁場強度の増大とともに向上し、最大で 78.0 mN、3830 秒、19.8%を達成した。また、推進効率、比推力は放電電流、外部磁場強度とともに向上したが、推力電力比は低下する傾向があったため、推力電力比の向上が課題である。

LaB₆ ホローカソードを用いた MPD スラスタの作動特性に対して、スワール加速に仮定したスケーリングを行った結果は、従来の MPD スラスタと同様の傾向を示し、スワール加速モデルを維持したまま、その作動範囲を拡大した。

謝 辞

本研究で用いた六ホウ化ランタンは、名古屋大学工学系技術支援室の立花一志氏に加工いただいたため、ここに感謝の意を示す。

6. 参 考 文 献

- 1) Sankaran, K., Cassady, L., Kodys, A. D., and Choueiri, E. Y., "A survey of propulsion options for cargo and piloted missions to Mars," *International Conference on New Trends in Astrodynamics*, 2004, pp. 20–22.
- 2) Krulle, G., Auweter-Kurtz, M., and Sasoh, A., "Technology and application aspects of applied field magnetoplasmadynamic propulsion," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 14, 1998, pp. 754–763.
- 3) Auweter-kurtz, M., "Plasma Thruster Development Program at the IRS," *Acta Astronautica*, vol. 32, 1994, pp. 377–391.
- 4) Sasoh, A., and Arakawa, Y., "Electromagnetic effects in an applied-field magnetoplasmadynamic thruster," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 8, 1992, pp. 98–102.
- 5) Tikhonov, V. B., Antropov, N. N., Dyakonov, G. A., Obukhov, V. A., Paganucci, F., Rossetti, P., and Andrenucci, M., "Investigation on a New Type of MPD Thruster," *27th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics*, 2000.

	\dot{m}	B				
		133	199	265	300	325
Ar	2.08	▼	◆	●	▲	■
Kr	2.18			●		
Xe	1.95			●	▲	■
Ref ⁽¹⁰⁾	2.08	▼	◆	○		

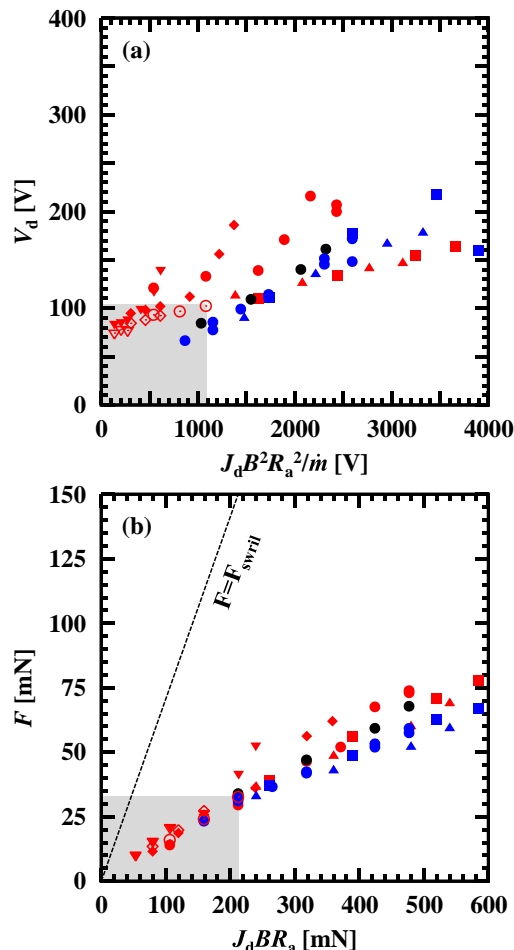


図 8 スケーリング結果

- 6) Tikhonov, V. B., Semenikhin, S. A., Brophy, J. R., and Polk, J. E., "Performance of 130kw mpd thruster with an external magnetic field and li as a propellant," *International Electric Propulsion Conference*, 1997, pp. 728–733.
- 7) Myers, R. M., "Geometric Scaling of Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 11, 1995, pp. 343–351.
- 8) Fradkin, D. B., Blackstock, A. W., Roehling, D. J., Stratton, T. F., Williams, M., and Liewer, K. W., "Experiments using a 25-kw hollow cathode lithium vapor mpd arcjet," *AIAA Journal*, vol. 8, 1970, pp. 886–894.
- 9) Tikhonov, V. B., Semenikhin, S. A., and Polk, J. E., "Own magnetic field impact on MPD thrusters performance with external magnetic field," *International Electric Propulsion Conference*, 1999, pp. 1017–1023.
- 10) 鶴生知輝, 片岡久志, 鄭裁勲, 市原大輔, 岩川輝, 佐宗章弘, "定常作動同軸 AF-MPD の電極形状が推進性能に及ぼす影響," 平成26年度宇宙輸送シンポジウム: 講演集録, 2014.