

小型 LaB₆ ホローカソードを用いた AF-MPD スラスタ

AF-MPD Thruster Using Small Size LaB₆ Hollow Cathode

○春日 勇人・鄭 栽勲・水谷 佳祐・市原 大輔(名大院)・岩川 輝・佐宗 章弘(名大)

○Hayato Kasuga・Jeohn Jeong・Keisuke Mizutani・Daisuke Ichihara・Akira Iwakawa・Akihiro Sasoh (Nagoya University)

Abstract

A lanthanum hexaboride (LaB₆) hollow cathode has been developed for high power electric propulsion system. Applied field MPD thruster using LaB₆ hollow cathode was manufactured at Nagoya university. The stable operation of this thruster is succeeded under magnetic field strength of 265 mT, discharge voltage of 180V, and discharge current of 60 A at maximum. Thrust increase with increasing magnetic field and discharge current and has no dependency of mass flow rate. Thrust and discharge voltage is greatly influenced by LaB₆ inside diameter. In this study, thrust efficiency is 25.5% for maximum.

記号の説明

B :	外部磁場強度
D_{LaB_6} :	LaB ₆ 内径
F :	推力
J_c :	コイル電流
J_d :	放電電流
J_k :	キーパー電流
\dot{m} :	推進剤流量
R_a :	アノード半径
R_c :	カソード半径
V_d :	放電電圧

1. はじめに

有人火星探査や惑星間輸送の実現に向け¹,大電力電気推進機の開発が進んでいる。高い推力密度を誇る Magneto-plasma-dynamics (MPD) スラスタは有力候補の一つである。

MPD スラスタの種類は2つに大別される。Self-Field MPD (SF-MPD) thruster は放電電流 J_d による自己誘起磁場を利用し、推力は J_d^2 に比例する。このタイプのスラスタは数 10 kA 以上の電流値においてのみ作動が可能となる。そのような大電流作動においてはカソードの損耗が主な問題となる²。Applied-Field MPD (AF-MPD) スラスタはソレノイドコイル、または永久磁石から印可された磁場を利用し、推力は $J_d B$ に比例する。小電流作動においても十分に強い磁場を印可することで、大推力が獲得できる。上記の背景から、我々は AF-MPD の推力性能を調査している。従来のタングステンを用いたロッドカソードでは 10 A 級の放電を維持することができない。一方、熱電子放出型ホローカソードは 10 A 級の作動が可能である。先行研究において、そのカソードを用いた

AF-MPD スラスタの 10 A 級の作動に成功し、放電電流の増加とともに推力性能の向上が見られた³。しかし、使用した市販のカソード(Kaufman Inc.)は、電流の上限値が 20 A と定められていた。電流の上限値は熱電子放出材の物質と表面積で決まる。高い電流密度を誇る六ホウ化ランタン(LaB₆)を用いて、最大で 250 A を流した報告がある⁴。先行研究⁵において製作したLaB₆ホローカソードを AF-MPD スラスタに搭載して作動特性を取得し、最大で放電電流 45 A の作動を行った。しかし高い放電電圧、そして電流の増加とともに不安定な作動が顕著になることから、これ以上の電流値での作動は危険だと判断した。

本研究では、再設計したLaB₆ホローカソードを AF-MPD スラスタに搭載し、放電電流の作動領域拡大を目指す。推進剤流量・放電電流・外部磁場強度・LaB₆内径を変化させた際の、推力と放電電圧の変化を計測する。

2. 実験装置

2.1 ホローカソード 本研究において新たに製作した熱電子放出型ホローカソードを図 1 に示す。熱電子放出材にはLaB₆を用い、内径はφ3 またはφ4、長さは 8 mm とした。LaB₆は内径φ9 のインサート管で固定されており、先端のオリフィス径はφ4 である。この管はキーパーに覆われており、オリフィス径はφ4 とした。

ホローカソードの種類は、LaB₆の加熱に加熱器を用いるか否かで、2つに大別できる。加熱器を用いないヒータレスカソードは、ヒータカソードと比較して着火手順が簡潔である。本研究では前者を用いている。インサート管・LaB₆内部に推進剤を供給し、電極間による絶縁破壊により初期電子を生成し、電離を促す。ポテンシャル差を利用して、電子は放出され、イオンはLaB₆に衝突し、その運動量を用いて熱を与

える。高温状態のLaB₆は電子を放出し、上記の行程が繰り返される。絶縁破壊の際は、11.4 mg/s のアルゴンを供給し、キープ電流は2 A 流している。絶縁破壊後、流量はAF-MPD 作動における値まで絞る。

先行研究と比較してLaB₆の内径を拡大(φ2 からφ3,4), 長さを延ばす(6 mm から 8 mm)ことで表面積を増大させた。熱電子放出を更に促し、大電流作動を目指す。また電流のパスを通しやすくするため、インサート管・キープのオリフィス径も拡大した(φ2 からφ4)。

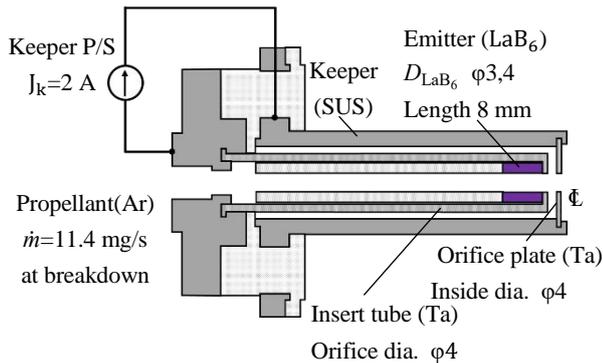


図 1 ホローカソード断面図

2.2 AF-MPDスラスタ 本研究では用いた同軸型AF-MPDスラスタを図 2 に示す。放電室は銅製の水冷式アノードとホローカソードで構成される。アノード半径R_aは 40 mm であり、カソードは中心軸上に位置する。推進剤はカソードを通して放電室内に供給される。磁場は水冷式ソレノイドコイルから印可され、スラスタの中心軸上で最大 265 mT となる。磁場強度分布はガウスメーター(GM-4000, Denshijiki Industry Co. Ltd.) を用いて計測した。

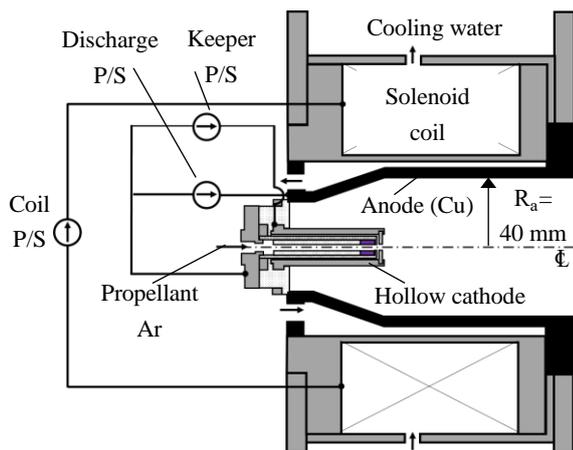


図 2 AF-MPD スラスタ断面図及び回路図

2.3 真空排気系 本実験において、図 3 で示す真空チャンバーを使用した。真空ポンプ、スラスタスタンド、フィードスルー、較正装置で構成される。チャンバーの半径は2 m, 長さは 4 m である。内部のガスはロータリーポンプとターボ分子ポンプによって排気される。背圧はピラニゲージと電離真空計を用いて計測し、スラスタ作動時は全実験条件におい

て 7.0×10^2 Pa を下回る。

較正装置の重りをステップ上に動かし、スラスタに掛かる質量の変動と作動変圧器の信号から推力較正を行った。スラスタ作動中におけるスタンドの連続的な変位を作動変圧器で計測し、拘泥結果を用いて推力値に変換した。また導線の干渉による風袋推力も加味している。計測にはオシロスコープ(YOKOGAWA Instruments), Labview(National Instruments)を用いた。

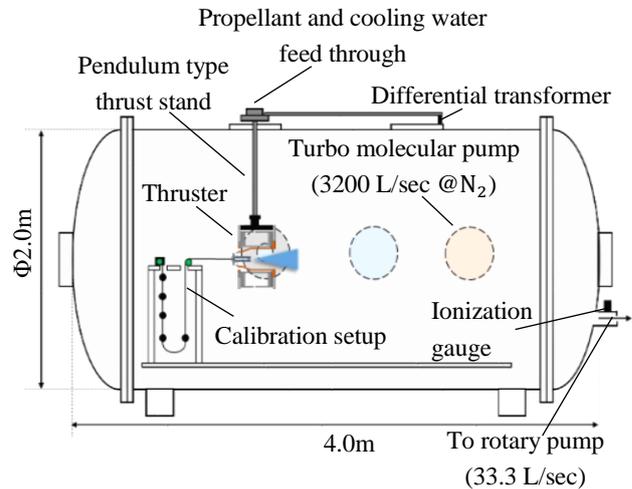


図 3 真空排気系

3. 実験結果

3.1 実験条件 表 1 に本実験の条件を示す。4 つのパラメータを変化させた際の、推力 F , 放電電圧 V_d の傾向を見た。

表 1 実験条件

Control parameter	Symbol	Value
LaB ₆ 内径	D_{LaB_6}	φ3 or φ4
放電電流, A	J_d	10-60
磁場強度, mT	B	133-265
推進剤流量, mg/s	\dot{m}	1.5-2.1

3.2 昨年度との比較 先行研究において、LaB₆ホローカソードを AF-MPD スラスタに用いて作動させた際の生信号を、図 4 に示す。 J_d は 45 A であり、この研究における最大値である。作動中も V_d の振動が大きく見られる。図 5 に本研究で得られた生信号を示す。実験条件は推進剤、流量、磁場強度は図 4 と同様であるが、 J_d は 60 A に定めている。先行研究より大きい電流値であるが、 V_d の振動が抑えられ、信号が安定している。

3.3 LaB₆内径の影響 図 5 に D_{LaB_6} を変化させた際の V_d , F の測定結果を示す。 D_{LaB_6} の拡大に伴い V_d , F は減少する。 V_d の減少は、LaB₆ の表面積増大による、熱電子放出の促進に起因する。本研究ではインサート管のオリフィス径はφ4 で固定している。プラズマの最終的な流路の幅(実効的なオリフィス径)は、 D_{LaB_6} によって決まる。今回の F の傾向はオリフィス径による変化とも考えることができるため、インサート管のオリフィス径が推力に及ぼす影響を今後見ていく必要がある。

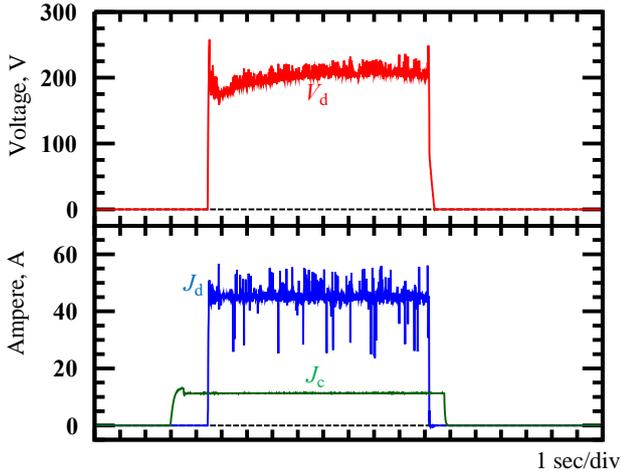


図 4 先行研究における主放電中の生信号 (Ar, $\dot{m}=2.1$ mg/s, $B=265$ mT, $J_d=45$ A.)

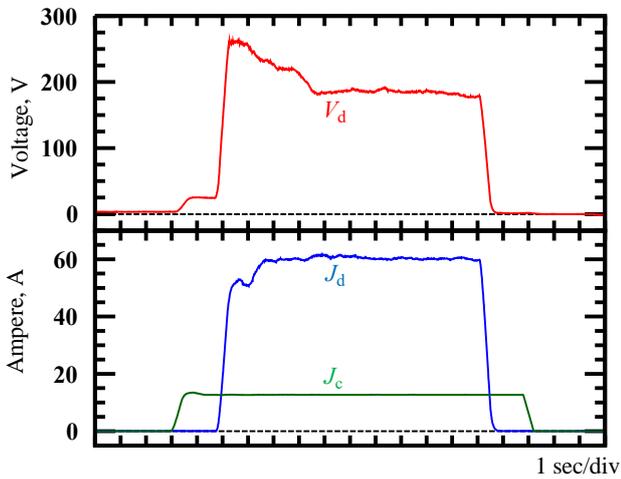


図 5 本研究における主放電中の生信号 (Ar, $\dot{m}=2.1$ mg/s, $B=265$ mT, $J_d=60$ A, $D_{LaB_6} = \phi 4$.)

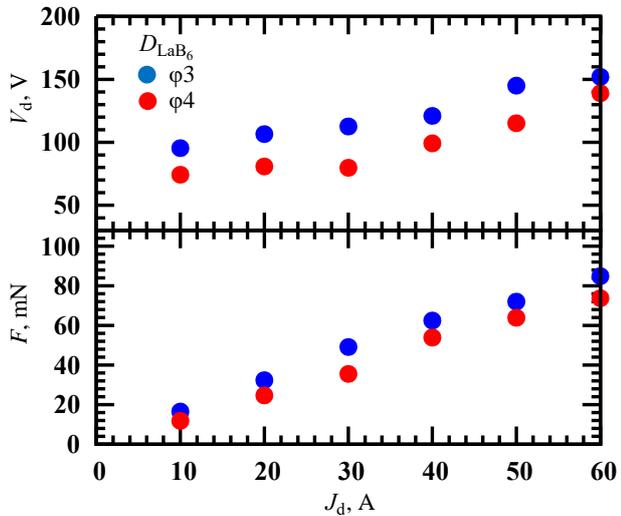


図 6 D_{LaB_6} に対する V_d, F の影響 (Ar, $\dot{m}=2.1$ mg/s, $B=199$ mT)

3.3 放電電流, 磁場強度の影響 図 7 に J_d, B を変化させた際の V_d, F の測定結果を示す. J_d, B の増加に伴い, V_d, F は増大した. V_d は $J_d=30$ A の条件を境に顕著に増加した. この傾向は磁場強度を可変にした際も観測された. 本研究のホールカソードにおいて, 十分な電離を促し電流を流すことが可能な条件が $J_d=30$ A であり, それ以上の電流値においては電子が不足により放電維持に大きな V_d が必要になると考えられる.

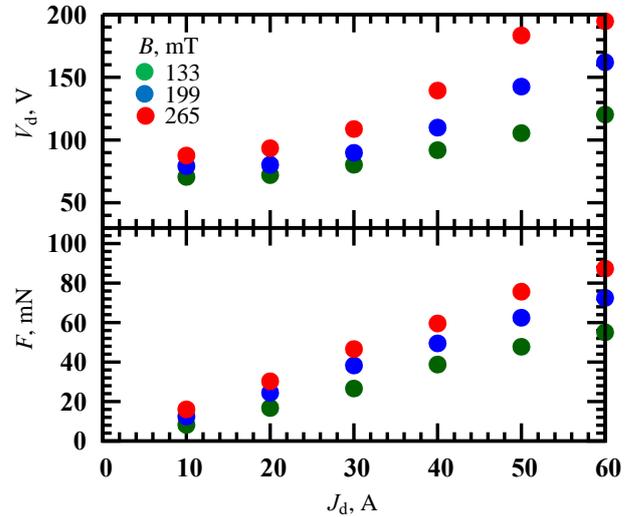


図 7 J_d, B に対する V_d, F の影響 (Ar, $\dot{m}=2.1$ mg/s, $B=199$ mT, $D_{LaB_6} = \phi 4$)

3.4 推進剤流量の影響 図 8 に \dot{m} を変化させた際の V_d, F の測定結果を示す. \dot{m} の減少に伴い V_d は増加する. 一方, F は \dot{m} の影響をほぼ受けない. これは電磁加速機において特徴的な傾向である.

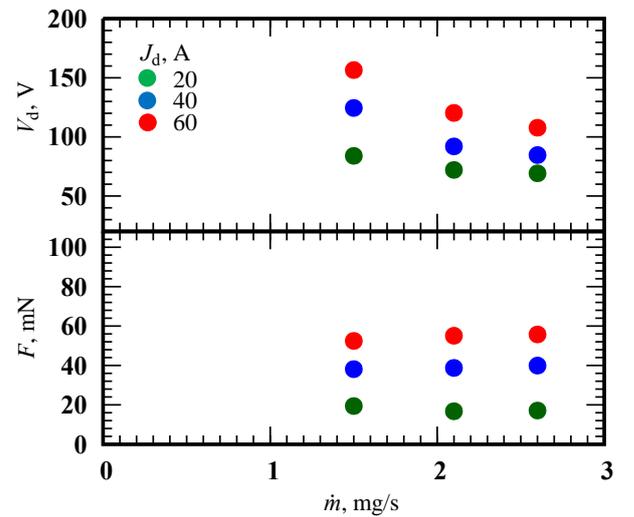


図 8 \dot{m} に対する V_d, F の影響 (Ar, $B=133$ mT, $D_{LaB_6} = \phi 4$)

3.4 スワール加速モデルの適用 それぞれの実験条件に対する V_d, F について議論してきた. この節では実験結果と理論値との比較を行う. 本研究の作動領域において自己誘起磁場による加速と電熱加速は無視できる. この場合, ホール加速かスワール加速が主な加速方法となる. AF-MPD スラス

タの排気ブルームは磁場に沿い、回転していることから、スワール加速が主だと言える。スワール推力の理論式⁶は、以下の式で表される。剛体プラズマの回転エネルギーが軸方向推力に変換されるとしている。

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

ここで R_c はカソード半径である。本研究では $R_c=2.0$ mmであり、 R_a と比べて1オーダー小さい。よって式(1)は以下のように近似できる。

$$F_{\text{swirl}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} J_d B R_a \quad (2)$$

図9に F とローレンツ力 $J_d B R_a$ の関係を示す。破線は式(2)で表した理論値を示している。 $J_d B R_a$ の増加に伴い F も増大する。本実験で計測した推力は理論値の30%程度となっている。この傾向から、プラズマの回転半径が小さく、アノード内径の30%程度であること、また異なる加速機構の存在が考えられる。

		D_{LaB_6}				
		$\phi 3$		$\phi 4$		
		\dot{m} , mg/s		\dot{m} , mg/s		
B , mT	133	◆	▲	◇	△	○
	199	◆	▲	◇	△	○
	265	◆	▲	◇	△	○

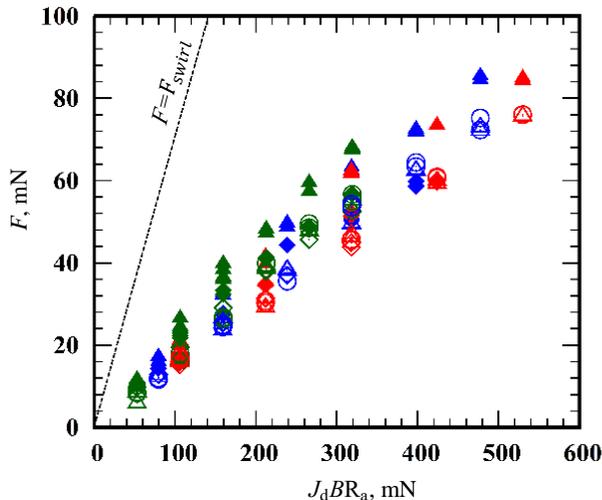


図9 スワール加速モデルの適用 (Ar)

3.5 推力性能 図9に推力効率に対する比推力の関係を示す。凡例は図8と同様であり、破線は対応する推力電力比を表している。効率は B の増加に伴い増大する。 B の増加に伴い F だけでなく V_d も増加するが、 F の増加が効率改善に大きく寄与する。一方、効率は D_{LaB_6} の増加に伴い低下する。 D_{LaB_6} の拡大により V_d だけでなく F も減少し、 F の減少が効率の低下に大きく影響している。

推力効率は最高点を境に横ばい、または減少する。その最高点はそれぞれの B 、 \dot{m} において $J_d=30$ Aの条件である。これは J_d に対する V_d の顕著な増加が始まる直前の条件である。これ以上の電流値では、投入電力が加速ではなく電離に大き

く使われると考えられる。電流値に対して LaB_6 の表面積に不十分であるため、電子の放出も不十分になり、電離に要する電力が大きく必要となると考えている。

本実験において、 $D_{\text{LaB}_6} = \phi 3$, Ar, $\dot{m}=2.08$ mg/s $B=265$ mT, $J_d=30$ Aの条件において最高推力効率25.5%を達成した。

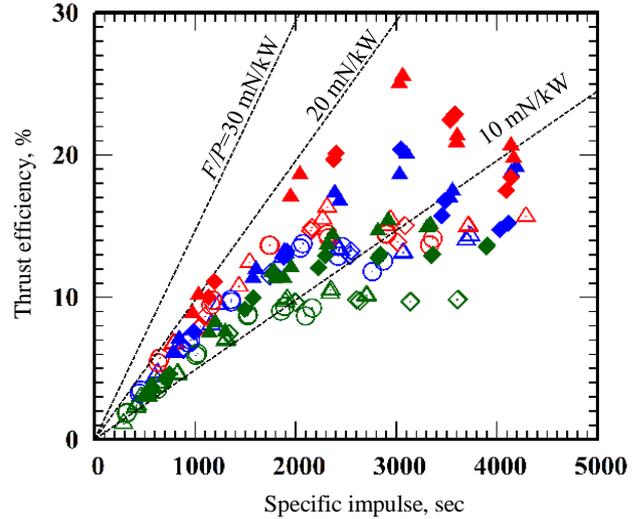


図10 推力性能と比推力の関係

4. 結論

本研究では LaB_6 ホローカソードを用いたAF-MPDスラスタの作動特性を観測した。

1. LaB_6 内径の拡大に伴い、放電電圧、推力が減少した。放電電圧の減少は、内径拡大により熱電子放出が促進されたことに起因すると考える。推力の減少は実効的なインサート管のオリフィス径が影響していると考えられる。
2. それぞれの推進剤流量、磁場強度に対して、放電電流が30 Aより大きい条件で、放電電圧が顕著に増加した。 LaB_6 内径が小さく、電子の放出が不十分なため、大電流の条件において放電維持に必要な放電電圧が大きくなると考える。

謝辞

本研究で使用した LaB_6 加工の依頼を受けて頂いた、名古屋大学技術部の立花一志氏に感謝申し上げます。

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," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1017, 2004, pp. 450–467.
- 2 Schrade, H. O., and Kurtzt, H. L., "Cathode Erosion Studies on MPD Thrusters," *AIAA Journal*, vol. 25, 1987, pp. 1105–1112.
- 3 Ichihara, D., Uno, T., Kataoka, H., Jeong, J., Iwakawa, A., and Sasoh, A., "Ten-Ampere-Level, Applied-Field-Dominant Operation in Magnetoplasmadynamic Thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, 2016, pp. 1–10.

- 4 Chu, E., and Goebel, D. M., "High-current lanthanum hexaboride hollow cathode for 10-to-50-kW hall thrusters," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, 2012, pp. 2133–2144.
- 5 Iwakawa, A., Jeong, J., Kasuga, H., Ichihara, D., Mizutani, K., Sasoh, A., Kimura, T., Kojima, K., Kawamata, Y., Yasui, M., and Industries, M. H., "Steady-State Applied-Field MPD Thruster using LaB6 Hollow Cathode," 2016, pp. 5–8.
- 6 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.