

## LaB6 熱陰極を用いた磁気ノズルの性能評価

萩原達将(京都大学 生存圏研究所), 梶村好宏(明石工業高等専門学校 電気情報工学科),  
大塩裕哉(東京農工大), 船木一幸(ISAS/JAXA), 山川宏(京都大学 生存圏研究所)

### 1. はじめに

月・惑星探査, また深宇宙探査に利用可能な, 大推力・高比推力を実現できる推進システムの開発は, ミッション期間の短縮, ペイロード比の増大などを実現するために必要不可欠である.

近年, これらの実現に向けて, 磁気ノズルが候補として注目されている. 図 1 に磁気ノズルの原理図を示す.

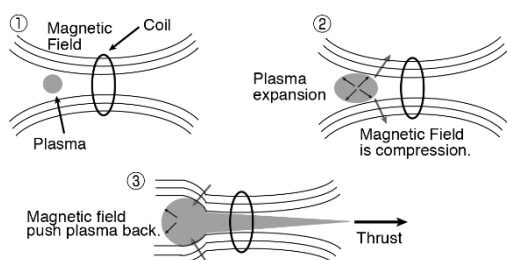


図 1 磁気ノズルの原理

磁気ノズルは, 放射状の磁場により形成されたノズル中に注入された熱プラズマを加速, 噴射させることにより推進力を得るシステムである. つまり, 熱エネルギーを運動エネルギーへと変化させることで推進力を得る. 加速原理としては, まず, 熱速度を持った熱プラズマをコイルの中心軸に沿わせ, 磁場ベクトルと平行方向に注入する. プラズマは荷電粒子であるため, 注入された熱プラズマが熱膨張することにより磁場が圧縮される. 圧縮された磁場によりプラズマが勢いよく噴射され, 作用反作用の法則を適用することにより

推進力を得る.

磁気ノズルは, 推進剤であるプラズマが物理的な固体壁でなく, 磁場壁と相互作用する. そのため, エネルギー損失が低減されるだけでなく, プラズマ放出部の損耗も防ぐことができるという特徴がある. したがって, 磁気ノズルは, 他の電気推進機と比較すると, 高い排出速度(比推力)と大きな比出力を同時に達成可能であるとされている. 世界的には, NASA の VASIMR<sup>1)</sup>, 国内では, 東北大学の HITOP<sup>2)</sup>や九州大学の LFR<sup>3)</sup>が磁気ノズルを用いた推進システムを提案し, 研究を実施している.

しかしながら, 磁気ノズル単体で大推力を得るためには, 強い磁場が必要となり, 必然的に大電力が必要となる. つまり, 10 年で太陽系を脱出する推進システムに利用する電力規模としては, 大きすぎると考えられている.

これまでに, MPD(Magneto Plasma Dynamic)アークジェットをプラズマ源として用いた磁気ノズルの推力測定<sup>4,5)</sup>を実施してきた. MPD によりプラズマを生成するためには, アーク放電を生じさせる必要がある. アーク放電には MW オーダの大電力が必要となり, この電力確保が実現に向けた大きな課題となっていた.

そこで, 本研究では, MPD よりも低電力(kW オーダ)で動作可能なプラズマ源を開発することを目的とする. プラズマ源には, 熱電子

放出源として広く利用されている LaB6(六ホウ化ランタン)熱陰極に注目する。LaB6 は、仕事関数が低いため、低いエネルギー(温度)で熱電子放出できるという特徴がある。LaB6 により製作したフィラメントを熱電子放出源として利用することにより、低電力で動作可能なプラズマ源を実現可能ではないかと考え、新たに LaB6 フィラメントを利用した熱プラズマ源を開発、製作した。

本研究では、新たに製作した LaB6 プラズマ源の性能評価として、LaB6 フィラメントの表面温度、生成されるプラズマの温度・密度分布測定を行う。また、磁気ノズル効果によりプラズマ温度・密度がどの程度変化するのかを明らかにすることを目的とする。さらに、磁気ノズルの推力測定を行い、推進システムとしての性能評価を行うことも目的とする。

## 2. 実験方法

図 2 に、平成 29 年度(平成 29 年 9 月及び平成 30 年 1 月)に実施した真空チェンバ実験の概要図を示す。実験装置は、図 2 に示すように、磁気ノズル磁場を模擬するためのコイル、磁場ベクトルと平行方向に向かってプラズマを噴射するためのプラズマ源をコイル中央に配置し、さらに、これらの駆動系、計測系から構成されている。

図 3 に、LaB6 フィラメントにより作成した熱プラズマ源の概要図を示す。

LaB6 フィラメントを利用した熱プラズマ源のプラズマ生成原理を以下に述べる。まず、LaB6 フィラメントに通電し、加熱することにより熱電子放出を起こす。放出された熱電子と中性ガスを衝突させ、衝突電離によりプラズマが生成される。そして、生成されたプラズマは、陽極に印加されている電圧に引き付

けられることにより放出される。

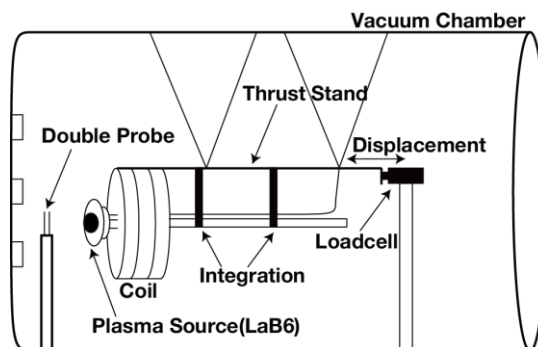


図 2 実験装置概要図

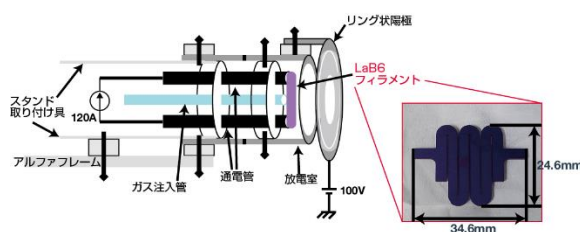


図 3 プラズマ源の概要図

LaB6 フィラメントの表面温度測定には、2色温度計を使用した。2色温度計は、互いに異なる 2 つの測定波長を利用し、それぞれの放射輝度の比を求めることにより温度を測定する。なお、本実験で利用した波長は、 $950 \mu\text{m}$  と  $990 \mu\text{m}$  である。

プラズマの温度・密度測定には、ダブルプローブ法を利用した。

磁気ノズル動作は、コイルとプラズマ源を同時に運用することにより実現している。本実験では、約 5 秒間、準定常的に磁気ノズル動作を行った。各動作時の推力は、ロードセルで測定する。

## 3. 実験結果

図 4 に LaB6 フィラメントの表面温度測定結果を示す。図 4 に示すように LaB6 フィラメントの表面温度は、 $1500 \text{ K}$  以上に加熱されて

いることが確認できる。図5に示すように温度-熱電子放出特性と比較するとプラズマ生成に必要な熱電子が十分に放出されていることが確認できる。

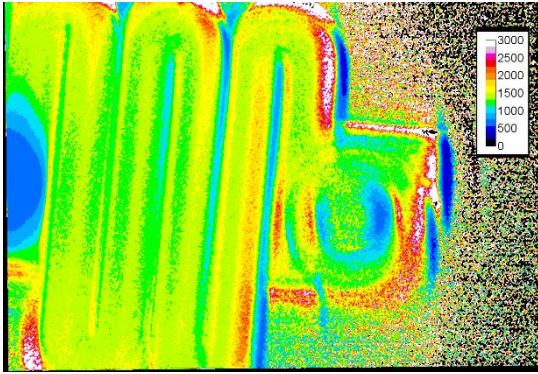


図4 LaB6フィラメントの表面温度測定結果

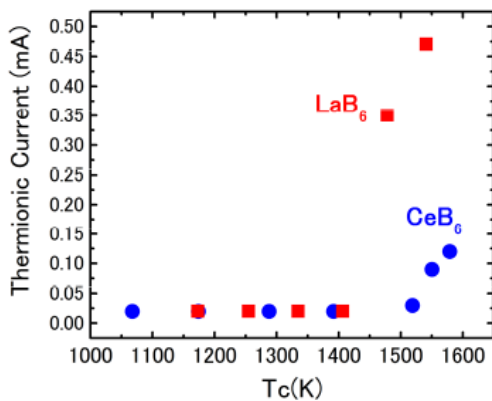
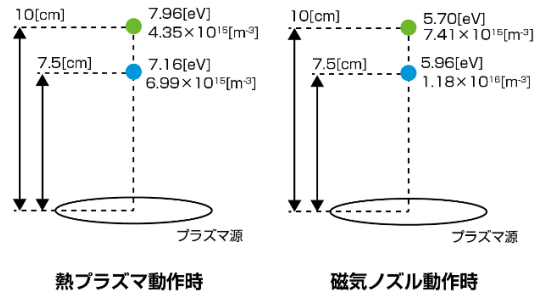


図5 LaB6 温度-熱電子放出特性<sup>6)</sup>

プラズマの温度・密度測定結果を図6に示す。図6に示すように、磁気ノズル動作を行うことで放出されるプラズマ温度が低くなることを確認できる。これは、磁気ノズル磁場に捕捉されるラーマ半径を持った特定の温度のプラズマがコイル中心部へと集められたためであると考えられる。また、コイル中心付近の密度は増加しており、生成されたプラズマがコイル中心付近へと集められていることを示す結果である。



熱プラズマ動作時 磁気ノズル動作時  
図6 コイル中心軸上における  
プラズマ温度密度測定結果

図7に熱プラズマ動作時、図8に磁気ノズル動作時の撮像結果を示す。図7に示すように、熱プラズマ動作時には、プラズマ源から噴射されたプラズマは、発光分布より等方的に噴射されていることが確認できる。次に、図7と図8を比較すると、磁気ノズル効果により、プラズマがコイル中央付近へと集められていることが確認できる。また、コイル中心付近の発光強度が強くなっている。なお、発光強度はプラズマの密度に対応している。ゆえに、図6の密度測定結果、発光強度の両観点から磁気ノズル効果によりプラズマがコイル中心付近へと集められていることが確認できる。

図9に示す推力測定結果より、磁気ノズル動作を行うことにより推力が増加することが確認できる。以上より、磁気ノズルにすることで、推進システムの性能が向上することが確認できた。

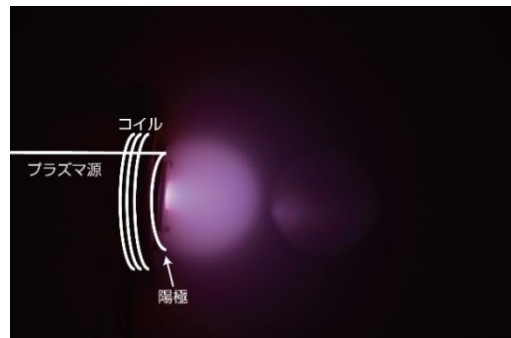


図7 熱プラズマの放出中の撮像結果

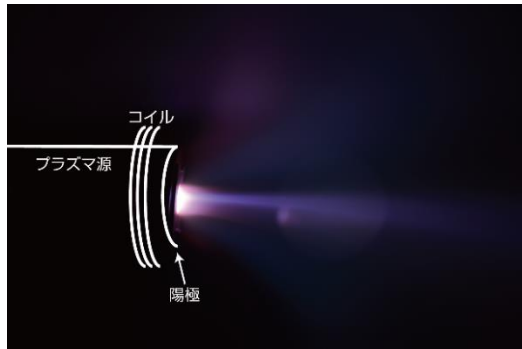


図8 磁気ノズル動作中の撮像結果  
(コイル+プラズマ源)

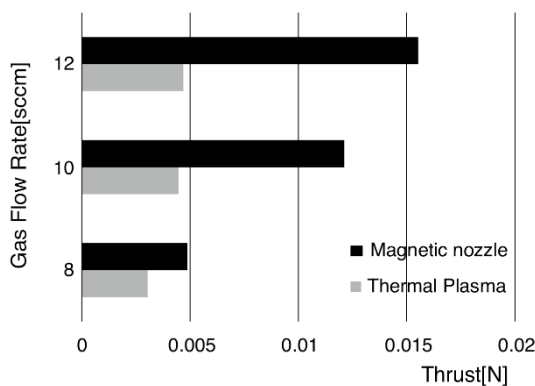


図9 推力測定結果

#### 4. まとめと今後の予定

LaB6 熱陰極を用いたプラズマ源を新たに提案し、プラズマ源としての性能評価を行い、プラズマ源としての有用性を確認した。さらに、磁気ノズル動作時の推力測定を行い、磁気ノズル OFF の場合と On の場合を比較して、最大で約 3.3 倍の増加を確認することができた。今後は、プラズマ源の高効率化と磁気ノズル型プラズマセイルの推力測定を実施する予定である。

#### 謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所スペースチェンバ共同利用の支援を受けて実施されました。ここに感謝の意を示します。本研究を実施するにあたり、宇宙航空研究開発機構の船

木一幸准教授、村山裕輝氏、田内思担氏、東京農工大の大塩裕哉特任助教には、実験準備及び実験のサポートにおいて大きな支援をいただきました。ここに感謝申し上げます。また、本研究に用いた LaB6 熱陰極の製作においては、名古屋大学の佐宗章宏教授、名古屋大学技術部様の多大なる支援をいただきました。感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Chang Diaz, F.R. : The VASIMR Rocket, Scientific American, 第 283 巻, 第 5 号, p.90, 2000.
- 2) Ando A, Inutake M, Hattori K, Shibata M, Kasashima Y : ICRF Heating and Plasma Acceleration with an Open Magnetic Field for the Advanced Space Thruster, Transaction of Fusion Science and Technology, 第 51 巻, 第 2T 号, pp.72-74, 2007.
- 3) Konstantin V. Vchikov, Hideki Nakashima, Fumihiro Ichikawa, Yuri P. Zakharov : Optimization of thrust efficiency in laser fusion rocket by using three-dimensional hybrid particle-in-cell code, Vacuum, 第 73 巻, Issues 3-4, pp.427-432, 2004.
- 4) Tatsumasa Hagiwara, Yoshihiro Kajimura, Yuya Oshio, Ikkoh Funaki : Thrust Measurement of Magneto Plasma Sail with Magnetic Nozzle by Using Thermal Plasma Injection, Joint Conference of 30<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, IEPC-2015-461/ISTS-2015-b-461, 2015.
- 5) Yoshihiro Kajimura, Tatsumasa Hagiwara, Yuya Oshio, Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa : Thrust Performance of Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle, Joint Conference of 30<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, IEPC-2015-329/ISTS-2015-b-329, 2015.
- 6) Kenichi Morita, Heishun Zen, Kai Masuda, Konstantin Torgasin, Sikhari Suphakul, Tsubasa Katsurayama, Hiroki Yamashita, Toshiteru Kii, Kazunobu Nagasaki, Hideaki Ohgaki : Dependence of LaB6 and CeB6 Photocathodes on Temperature and Incident Laser Wavelength, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASF2016 WEOM03, pp.204-207, 2016.