

平成27年度 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム  
 プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの推力測定実験

梶村好宏（明石工業高等専門学校 電気情報工学科）、萩原達将（明石高専）、丸喜可貴（明石高専）  
 大塩裕哉（東京農工大）、船木一幸（ISAS/JAXA）

1. はじめに

月・惑星探査、あるいは深宇宙探査の実現に向け、大推力・高比推力推進機の開発は、ミッション期間短縮、ペイロード比増大等を実現する為の必須事項である。これらの実現に向けて、近年、研究が進められてきた磁気プラズマセイルは、1990年に Zubrinらによって提案された磁気セイル<sup>1)</sup>を発展させた宇宙推進システムである。磁気セイルは、超音速のプラズマ流である太陽風を、超伝導コイルによって形成したダイポール磁場で受け止めることで推進力を得るシステムである。この磁気セイルが作る宇宙機周りのごく小規模な磁気圏を、プラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風を受け止める推進システムが磁気プラズマセイルである。既存の電気推進機と同等の推進剤消費効率かつ1ケタ高い推力を得ることができると予想され、太陽系を10年で脱出できる可能性がある<sup>2)</sup>と報告された<sup>3)</sup>。しかし、これまでに行われた地上実験や数値解析を用いた磁気プラズマセイルの推進性能の評価<sup>3-6)</sup>では、先の予測性能である250mN/kWを達成するためには、現在の磁気プラズマセイルの実証性能に対して、さらに1桁から2桁の推力増大を実現する必要があることがわかっている<sup>3)</sup>。

昨今、実用化に向けた研究が進められているのが磁気ノズルスラスタである。このスラスタの原理を図1に示す。

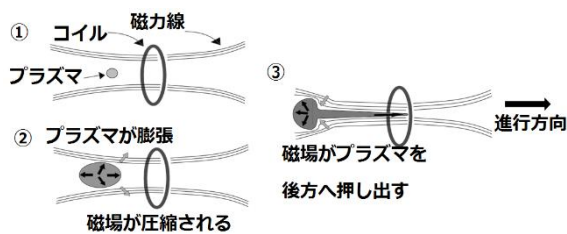


図1 磁気ノズルスラスタの原理

磁気ノズルスラスタでは、無電極で長寿命化が可能な高周波加熱（RF）等によって生成したプラズマを磁気ノズルにおいて推進方向とは逆向きに運動量を変換し、その反力で推進力を得るものである。特

徴は、推進剤であるプラズマが固体壁ではなく磁場壁と相互作用することで、エネルギー損失が低減される。従って、他の電気推進機と比較して、高い排出速度（即ち高い比推力）と大きな比出力を同時に達成可能である。世界的には、NASAのVASIMR<sup>7)</sup>、国内では、HITOP<sup>8)</sup>（東北大）やLFR<sup>9,10)</sup>（九州大）が磁気ノズルを用いた推進機を提案、研究を行っている。先に紹介した磁気プラズマセイルとこの磁気ノズルの両推進原理に共通しているのはコイル磁場を用いる点であり、太陽風プラズマの運動量を磁気帆で受けつつ、磁気ノズルから噴出されたプラズマを、推進力かつ磁気プラズマセイル用磁気帆の拡大にうまく利用することができれば、両者の性能を相補的に向上させることが期待される。本研究では、上記に示した磁気プラズマセイルと磁気ノズルスラスタを融合した推進システムを新たに提案し、その推進性能を評価することを目的とする。提案する推進システムの概念図を図2に示す。

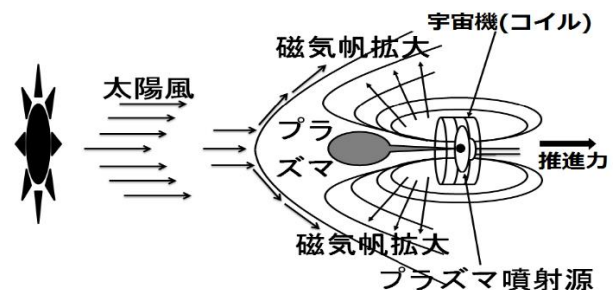


図2 プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの概要図

磁気ノズル中に噴出したプラズマが、磁気ノズルの作用によって反推力方向に押し出され、その際に生じる磁気ノズル磁場の変形が、太陽風を受け止める磁気帆の拡大効果にも貢献するのであれば、この原理で推力増大を実現できると考えられる。実験に先駆けて、得られる推力の最適化を数値解析によって実施した<sup>11)</sup>。その結果を踏まえ、真空チェンバー実験を行い、原理実証および推力の定量的評価を行う。これまでの実験では、磁気ノズル中のプラズマ生成源にMPDアークジェットを用い、プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの推力測定について

は成功し、原理の実証を行ってきた<sup>11,12)</sup>が、プラズマ生成に MW オーダーの大電力を必要とすることから、本実験では、磁気ノズル中に噴出するプラズマ生成源に kW オーダーで動作が可能な熱陰極を用いたプラズマ源を新たに製作した。熱陰極には、グロー放電を起こすための陰極として、LaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)を使用し、その動作確認、プラズマ生成および磁気ノズル動作の確認、さらにはプラズマセル併用型磁気ノズルスラスターの推力測定をロードセルを用いて実施することを目的として実験を行った。

## 2. 実験方法：真空チャンバーを用いた実験概要

図3および図4に、平成27年度(平成27年9月及び28年1月)に実施した真空チャンバー実験の概要図を示す。

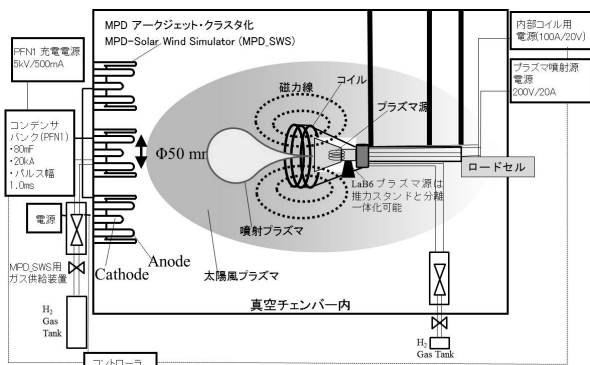


図3 実験概要図

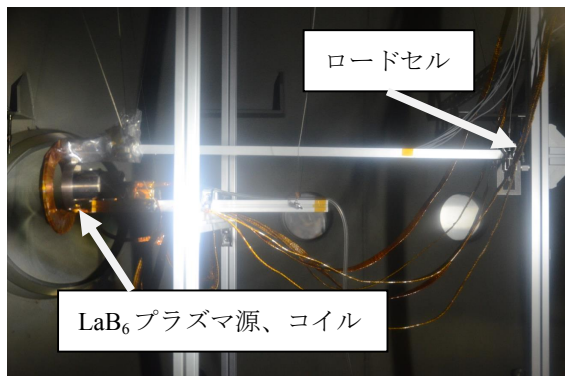


図4 実験装置の概要写真

実験装置は、図3に示されるように、太陽風プラズマ流を模擬する太陽風シミュレータ (MPD アークジェットシステム3基)、磁気帆および磁気ノズルを模擬するコイル (φ1.5mm のエナメル線を半径が0.059m のアルミポピンに20ターン巻いたもので、100A で中心磁束密度0.02Tの磁場を生成可能)、そしてコイル中央に向かってプラズマを噴射して推進力+磁気帆展開として用いるプラズマ噴射源 (熱陰極

プラズマ源として、LaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)を使用)と、これらの駆動系、計測系から構成される。図4に、LaB<sub>6</sub>熱陰極を用いたプラズマ源とコイル、推力を測定するためのロードセルの位置を示す。

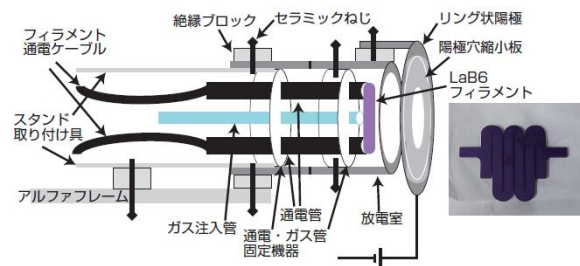


図5 熱陰極 LaB<sub>6</sub>を用いたプラズマ生成源の概要図 (写真は LaB<sub>6</sub> フィラメント)

図5に製作したプラズマ生成源の概要図を示す。プラズマ生成原理は、LaB<sub>6</sub> フィラメントに100Aを通電し、ジュール熱による加熱を行うことで熱電子放出を起こす。そこにArガスを注入し、電子と中性ガスの衝突電離によって、プラズマを生成する。プラズマの引き出しは、陽極に100Vの直流電圧をかけることで行う。コイルとプラズマ噴射源を同時に運転すると、約5sの間、準定常的に磁気ノズル動作が発生する。この磁気ノズル動作時の推力をロードセルを用いて検出・測定する。さらに、クラスタ化されたMPDアークジェットシステムを用いれば、太陽風プラズマとして、約1msの間、準定常的に模擬太陽風プラズマ流を作ることができ、この時、太陽風を磁気帆で受けた際の推力についてもロードセルで測定する。次章に、実験結果を示す。

## 3. 実験結果：熱プラズマ源、磁気ノズル動作、およびプラズマセル併用型磁気ノズルスラスターの動作確認

図6にLaB<sub>6</sub>に100Aを通電させた際の写真を示す。写真は、図4のLaB<sub>6</sub>プラズマ源を正面から見たときのものである。この時のLaB<sub>6</sub>両端の電圧はおよそ3Vであり、ジュール加熱による赤熱が生じていることが見て取れる。この時のLaB<sub>6</sub>温度はおよそ1500Kである。LaB<sub>6</sub>(六ホウ化ランタン)は、熱電子放出特性に優れた電導性セラミック結晶体を素材に用いた熱陰極であり、特徴として、仕事関数が2.7eVと小さいため使用温度が低く、蒸発による消耗を低く抑えることができる。また、他の熱陰極材料と比較して消費電力を小さくできるメリットがある。一方で、水分を含みやすいこと、均等加熱が難しく熱応力で

割れてしまうこと、脆性材料のため取り扱いに注意が必要なこと、酸化され易いため酸素分圧の低い状態で使用しなければならないなどのデメリットがある<sup>13)</sup>。

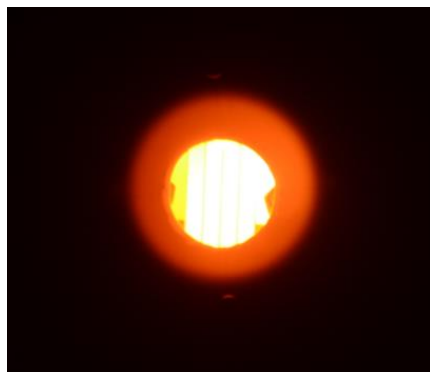


図6 LaB<sub>6</sub>通電中の様子



図7 LaB<sub>6</sub>熱陰極を用いたプラズマ生成の撮像

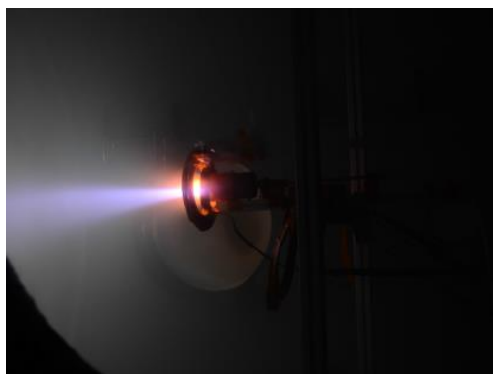


図8 磁気ノズル動作中の撮像

図7にプラズマ生成時の撮像を示す。図6に示したLaB<sub>6</sub>通電中に、Arガスを注入し、陽極に100Vの直流電圧をかけると、図7に示す撮像結果が得られた。定常的にプラズマの生成が確認でき、この時、磁気ノズル用のコイルに100Aを通電し、中心磁束密度が0.02Tの磁場を生成すると、図8に示すように、磁気ノズルによって、プラズマが中心に集められ、

磁気ノズル動作を確認することができた。図9に磁気ノズルおよび太陽風動作時の撮像を示す。太陽風プラズマの発光が強く、磁気ノズル動作中のプラズマは確認が難しいが、太陽風と磁気ノズルの同時動作は実施することができた。これら、それぞれの動作時の推力測定については、平成28年1月最終週に実施を完了しており、現在、推力の解析および評価を実施している。

Arガスの流量の変化によるプラズマ電流値およびプラズマ生成源と磁気ノズルの動作に必要な総電力の変化を測定した。図10に、Arガスの流量とプラズマ電流及び電力の関係を示す。プラズマ電流が23Aの時、約2.6kWの電力で、磁気ノズル動作ができることが分かった。この結果と推力の定量的評価によって、磁気ノズル併用型プラズマセルの推力電力比を評価する予定である。



図9 磁気ノズルおよび太陽風動作時の撮像

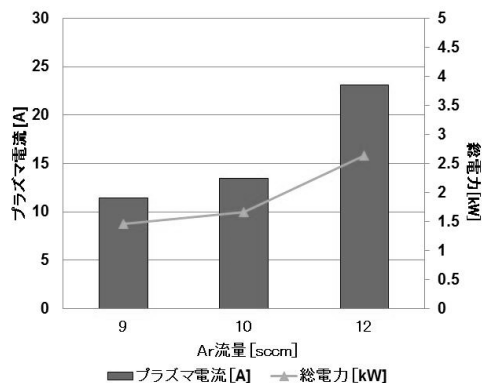


図10 Arガスの流量とプラズマ電流及び総電力の関係

#### 4. まとめ

本研究では、近年、実用化に向けた研究が進められている磁気ノズルスラスタと、太陽風から磁気帆を介して推進力を得るプラズマセルの推進技術

を融合した「プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタ」を提案し、推力および推進性能の評価を行うことを目的として実験を行った。実験は、スペースプラズマ共同利用による先進プラズマチェンバーを用いて実施した。実験では、新たに熱陰極 LaB<sub>6</sub> を用いたプラズマ源を設計、製作し、プラズマ源として、低電力かつ安定的にプラズマ生成が可能であることを確認した。同時に磁気ノズル動作の確認、太陽風を作用させたプラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの動作も確認し、推力の測定を行った。今後、推力の定量的な評価を行い、推進性能の評価を行う予定である。

### 謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所スペースチェンバー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当たり、宇宙航空研究開発機構の船木一幸准教授、大島真氏、古川裕介氏、東京農工大の大塩裕哉氏には、実験準備およ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 LaB<sub>6</sub> の製作にあたり、名古屋大学の佐宗章弘教授、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。また、本研究で実施した数値解析は、京都大学生存圏研究所 KDK システムを用いて実施されました。ここに感謝の意を示します。

### 参考文献

- 1) Zubrin, R. M., Andrews, D. G., "Magnetic Sails and Interplanetary Travel", *Journal of Spacecraft and Rockets*, **28**, 2, 1991, pp. 197-203.
- 2) Winglee, R. M. et al., "Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. A9, 2000, pp. 21,067-21,077.
- 3) Yoshihiro Kajimura et al., "Thrust Evaluation of Magneto Plasma Sail by Using Three-Dimensional Hybrid PIC Code," *Proc. of 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA 2010-6686, 2010.
- 4) Nishida, H., Funaki, I., Ogawa, H., Inatani, Y., "MHD Analysis on Propulsive Characteristics of Magneto Plasma Sail", *Proc. of the 30th International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2007-195, 2007.
- 5) Ueno, K., Funaki, I., Kimura, T., Horisawa, H., and Yamakawa, H., "Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram-Pendulum Method," *Journal of Propulsion and Power*, **Vol. 25**, No. 2, 2009, pp. 536-539.
- 6) Ikkoh Funaki, Yoshihiro Kajimura, Hiroyuki Nishida, Hiraku Arita, Yasumasa Ashida, Hiroshi Yamakawa, Yuya Oshio, Kazuma Ueno, Haruhito Yamamura, and Yoshiki Yamagiwa, *Magnetoplasma Sail with Equatorial Ring-current*, AIAA 2013-3878, 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Jose, July, 2013.
- 7) Chang Diaz, F. R., *The VASIMR Rocket*, *Scientific American*; 283 (5), 2000, P90.
- 8) Ando, A., Inutake, M., Hattori, K., Shibata, M., and Kasashima, Y., *ICRF Heating and Plasma Acceleration with an Open Magnetic Field for the Advanced Space Thruster*, *Transaction of Fusion Science and Technology*, Vol. 51, No. 2T, 2007, pp. 72-74.
- 9) Konstantin V. Vchivkov, 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*, 73, Issues 3-4, 2004, pp. 427-432.
- 10) Akihiro Maeno, Naoji Yamamoto, Shinsuke Fujioka, Yoshitaka Mori, Atsushi Sunahara, Tomoyuki Jhozaki, and Hideki Nakashima, "Analysis of Laser Wavelength and Energy Dependences of the Impulse in a Magnetic Thrust Chamber System for a Laser Fusion Rocket," *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES* 56, 2013, pp.170-172.
- 11) 梶村好宏, 熱プラズマ源を用いた磁気ノズル型プラズマセイルの推力測定実験, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2J17, 2014.
- 12) Yoshihiro Kajimura, Tatsumasa Hagiwara, Yuya Oshio, Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa, *Thrust Performance of Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle*, *Proceedings of 30th International Symposium on Space Technology and Science*, IEPC-2015-329 / ISTS-2015-b-329, 2015.
- 13) 福森 勉, 中西幸弘, 高木 誠, LaB<sub>6</sub> を用いた薄型電子銃の製作, 名古屋大学工学部・工学研究科技術部技報, Vol.5, 15, 2003.