

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、福井公貴（明石高専 専攻科）、岩本和樹、田中大貴（明石高専 電気情報工学科）、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¹⁾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²⁾と報告された²⁾。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³⁻⁶⁾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³⁾。

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。

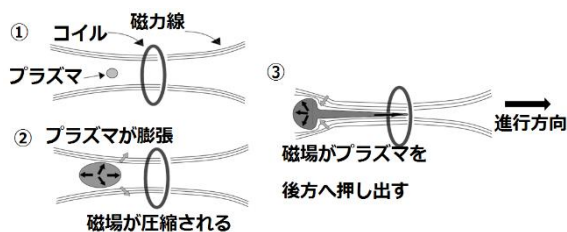


図1 磁気ノズルスラスタの原理

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VASIMR⁷⁾、国内では、HITOP⁸⁾（東北大）やLFR^{9,10)}（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。特に平成28年度の実験では、本推進システムに用いるプラズマ生成源を新たに設計、製作し、生成されたプラズマの密度や温度などの測定を中心に実験を実施した。提案する推進システムの概念図を図2に示す。

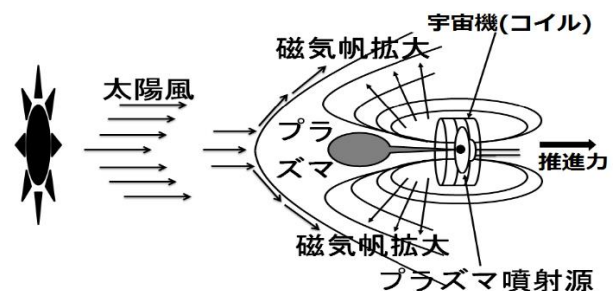


図2 プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの概要図

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¹¹⁾。その結果を踏まえ、真空チャンバ実験を行い、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ーの推力測定については成功し、原理の実証を行ってきた^{11,12)}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新たに設計、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、LaB₆(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イ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28年度(平成28年8月及び29年1月)に実施した真空チャンバー実験の概要図を示す。

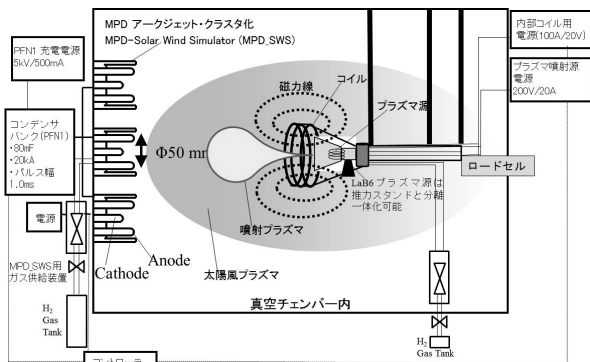


図3 実験概要図

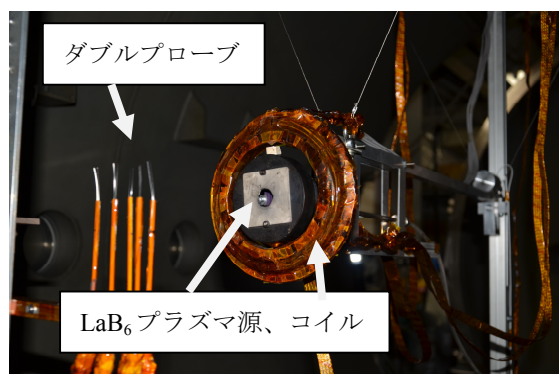


図4 実験装置の概要写真

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 (φ1.5 [m]のエナメル線を半径が0.059 [m]のアルミボビンに20ターン巻いたもので、

100 [A]で中心磁束密度0.02 [T]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、LaB₆(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、LaB₆ 熱陰極を用いたプラズマ源とコイル、プラズマパラメータの計測の為のダブルプローブを示す。

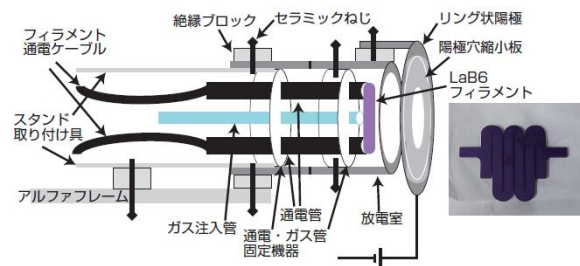


図5 熱陰極 LaB₆ を用いたプラズマ生成源の概要図 (写真は LaB₆ フィラメント)

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、LaB₆ フィラメントに120 [A]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。この時の電圧は4.6 [V]であった。この状態で、Ar ガスを放電室へ15.0 [sccm]の流量で注入し、熱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、図5のリング状陽極に100 [V]の直流電圧をかけることを行う。プラズマの生成を目視で確認した後、リング状陽極の端面から50 [mm]の位置、かつ円状の放出面の中心に設置したダブルプローブを用いて、プラズマの密度、温度の測定を行った。プローブの先端は直径が0.3 [mm]のタングステンワイヤーが28 [mm]突起した状態となっている。次章に、実験結果を示す。

3. 実験結果：熱プラズマ源の動作確認、密度、温度の測定

図6にプラズマ源の写真を示す。モリブデン製の通電棒に LaB₆ を取り付け、120 [A]を通電させる。LaB₆ 通電中、ジュール加熱による赤熱が生じている最中の温度測定結果について、図6の点線の領域の温度を図7に示す。温度測定は、2色式熱画像カメラを用いて行った。通電中の温度は、高いところで2000 [K]となっていることが見て取れる。LaB₆ 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2.7 [eV]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¹³⁾。

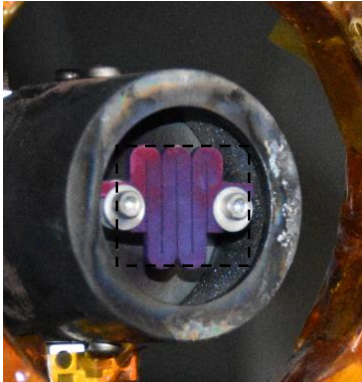


図6 LaB₆プラズマ源の写真

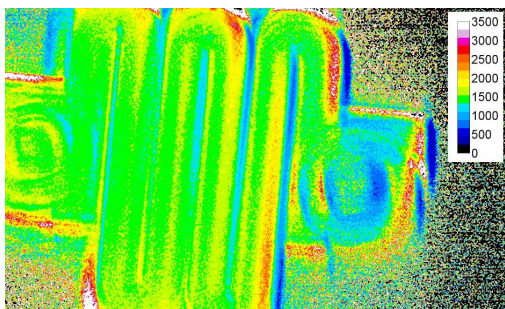


図7 LaB₆に110Aを通电させた際の温度分布

図8にプラズマ生成時の撮像を示す。図7に示したLaB₆通电中に、Arガスを注入し、陽極に100[V]の直流電圧をかけると、図8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30[A]を通电し、磁場を生成すると、図9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。今回の実験条件において、リング状陽極の端面から50[mm]の位置、かつ円状のプラズマ放出面の中心軸上に設置したダブルプローブを用いて、プラズマの密度及び温度を測定した結果を表1に示す。ダブルプローブには、スイープ電圧として、-60~60[V]を与えて測定を行った。磁気ノズルを動作させることにより、図9から見て取れるように、コイルの中心軸上にプラズマが集められ、その結果として、密度が約3倍上昇している結果が得られた。プラズマの温度については、磁気ノズルの

磁場に捕捉される程度のGyro半径を持ったプラズマが中心軸上に集められたことから、磁気ノズルを動作させない場合と比較して、温度が低くなったと考えられる。

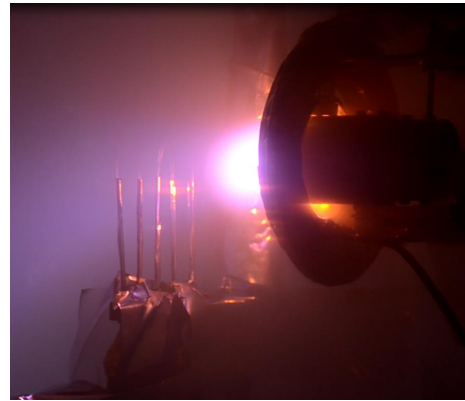


図8 LaB₆熱陰極を用いたプラズマ生成の撮像

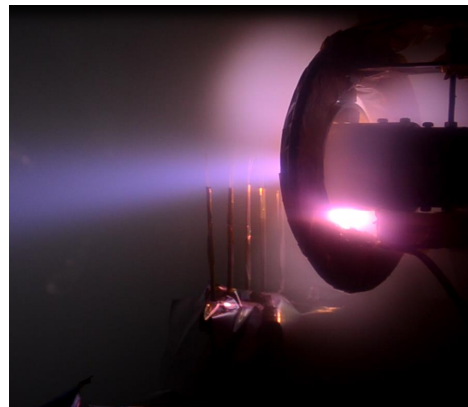


図9 磁気ノズル動作中の撮像

表1 プラズマの密度、温度の測定結果

	密度[$/m^3$]	温度[eV]
磁気ノズル OFF	1.1×10^{16}	9.5
磁気ノズル ON	2.8×10^{16}	6.4

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イ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。特に今年度の実験では、本推進システムに用いるプラズマ生成源を新たに設計、製作し、生成されたプラズマの密度や温度などの測定を中心に実施した。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、新たに製作した LaB₆ 熱陰極を用いたプラズマ源を動作させ、密度が $1.1 \times 10^{16}[\text{m}^{-3}]$ 、温度が $9.5[\text{eV}]$ のプラズマが生成されたことを確認した。この時のプラズマ生成に要した電力は約 1 [kW] と見積もっている。今後は、プラズマ生成時のパラメータとして、流量、LaB₆ への通電電流、陽極電圧、放電室形状などを変化させた際のプラズマパラメータの測定を行い、より効率の良い動作パラメータを把握したいと考えている。また、磁気ノズル動作時の推力測定、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確認と推力測定を行い、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あたり、宇宙航空研究開発機構の船木一幸准教授、大畠真氏、古川裕介氏、村山裕輝氏、田内思担氏、古川俊介氏、東京農工大の大塩裕哉特任助教には、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 LaB₆ の製作においては、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, LaB₆ 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.