

平成26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)、大塩裕哉 (ISAS/JAXA)、  
 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ため、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>2)</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>。

惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたイオンスラスタは1基で約10mNであり、空間電荷保存則から推力密度に限界があり、大推力化には大型化しかない。一方ホールスラスタにおいても、高推力密度化が難しく、大型化による重量増が問題となっている。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。

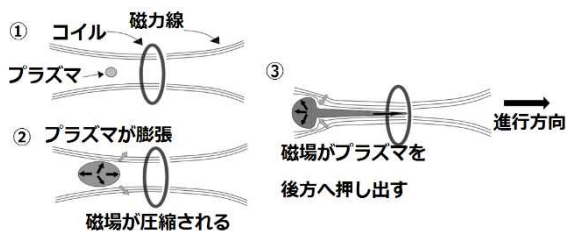


図1 磁気ノズルスラスタの原理

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)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。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。

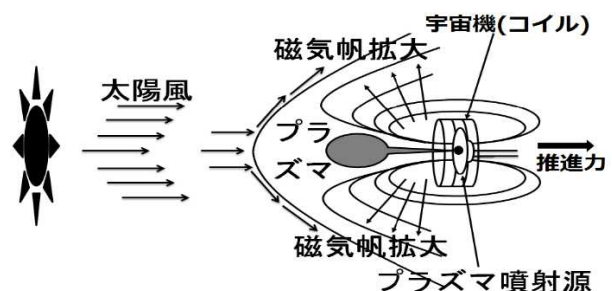


図2 プラズマセイル併用型磁気ノズルスラスタの概要図

磁気プラズマセイルは、太陽系内に吹く太陽風という外部エネルギーを利用可能であり、燃費は良いが推力は不十分である。また磁気ノズルは、無電極長寿命であるが、大推力を得るためには電力規模が大きすぎる。これらの推進システムを、うまく組み合わせ、最適なパラメータで動作させることにより、大推力、高比推力の推進システムが実現可能であるかどうかを数値解析および実験によって検討する。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

行い、その後、最適化パラメータを用いて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。

## 2. 数値解析による検討

実験に用いるプラズマパラメータの最適化には、イオンを粒子、電子を慣性を無視した流体として扱うハイブリッドコードを用いた<sup>11)</sup>。図3に解析モデルを示す。解析領域の中央に磁気ノズルを形成するコイルの中心を合わせて設置し、コイルが作る初期磁場を定義する。このコイルの半径や電流値は地上実験で想定される値と同じ値とした。詳細のパラメータは参考文献12を参照されたい。

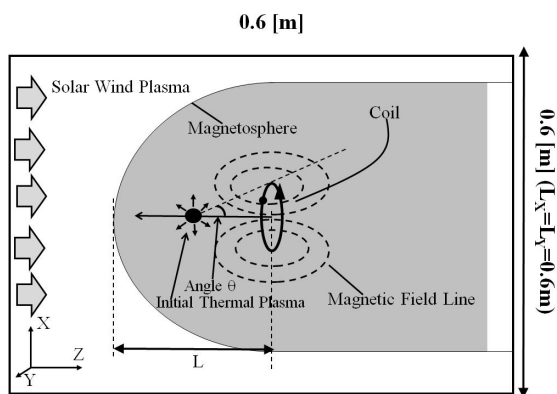


図3 解析モデル図

本数値解析結果に関して、噴射プラズマのパラメータを変化させた場合の結果について図4に示す。図4は、横軸に噴射位置における噴射プラズマの $\beta$ 値、縦軸に推力ゲインを取ったグラフである。推力ゲインの定義は、プラズマを噴射しない場合と噴射した場合のコイルの生じる推力の比である。プラズマを噴射しない場合、コイル磁場は磁気帆として太陽風から推力を得ることができ、これは磁気セイルとしての推力に相当する。これに対し、プラズマを噴射した場合は、磁気ノズルとして得ることができる推力に加え、磁気帆が拡大し、その磁場で太陽風から得ることができる磁気プラズマセイルとしての推力を計算した値を評価している。この比が大きい方が、性能が良いことを示している。図4の凡例の違いは、噴射した位置の磁場の大きさにおける噴射プラズマイオンのGyro半径 $r_{Linj}$ と、磁場勾配長 $L_B$ の比の違いを示している。この比が大きくなればなるほど、イオンはノズル磁場をすり抜けてしまう為、磁気ノズルとしての機能は低下し、得られる推力は小さくなる。実際、同じ噴射プラズマ $\beta$ 値における推力ゲインは、 $r_{Linj}/L_B$ が大きくなるほど小さくなっている。また、

同じ $r_{Linj}/L_B$ においては、噴射プラズマの $\beta$ 値が大きいほど、推力ゲインが大きくなっている。今回の解析においては、 $r_{Linj}/L_B=1$ で、 $\beta=2.0$ の場合が最も推力ゲインが大きく、噴射前後で24倍の推力ゲインとなっている。しかし地上実験に用いるプラズマ密度としては非現実的であるため、図の黒丸印に示したパラメータ( $r_{Linj}/L_B=3$ で、 $\beta=0.46$ の場合において推力ゲインが5)を用いて実証実験を行うこととした。

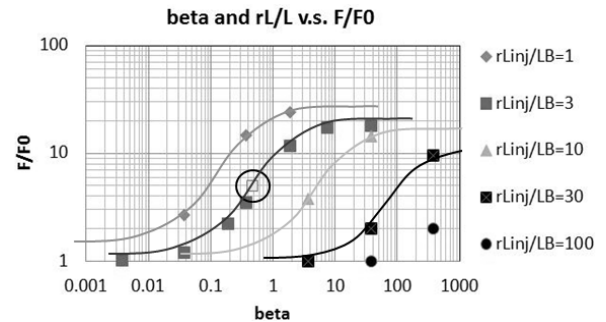


図4 パラメトリック解析結果（推力ゲインの噴射プラズマ $\beta$ 、 $r_{Linj}/L_B$ 依存性）

## 3. 真空チェンバー実験による検証

図5に、平成26年度（平成26年9月及び27年1月）に実施した真空チェンバー実験の概要図を示す。

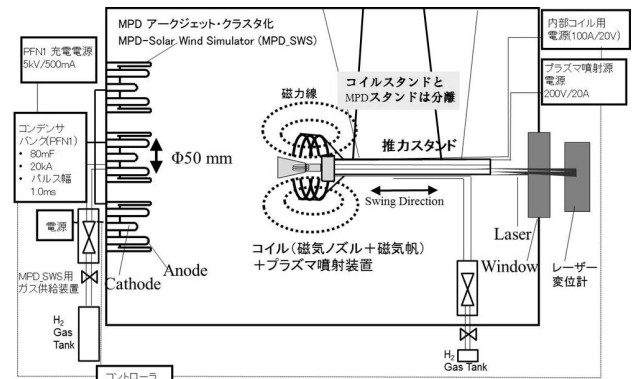


図5 実験概要図

実験装置は、図5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、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（MPDアークジェットシステムを使用）と、これらの駆動系、計測系から構成される。これらを同時に運用すると、約1msの間、準定常的に模擬太陽風プラズマ流と磁気ノズル、磁気帆拡大用のプラズマ噴射が干渉する。この干渉によって、コイルに作用する推力が発生する。この推力を振り子式

の推力計測スタンドを使ってインパルスとして検出・測定する。図 6 (a)~(d) に実験の撮像結果を示す。



図 6 (a) 磁気セイルモード (太陽風+コイル磁場)

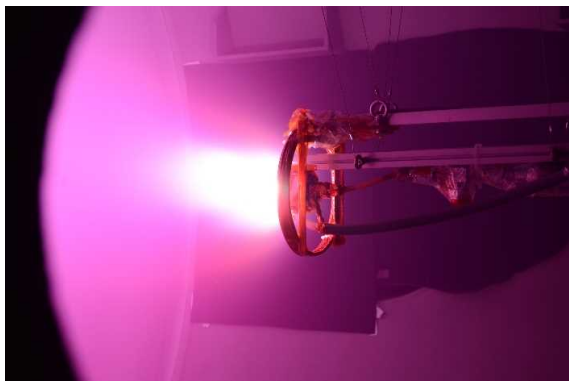


図 6 (b) 磁気ノズルモード (噴射プラズマ+コイル磁場)



図 6 (c) 磁気ノズル+磁気プラズマセイルモード (全系動作)

図 6 (a) は、太陽風プラズマとコイルのみを動作させた磁気セイルモードにおける撮像結果であり、太陽風プラズマが磁気カスプに集まり、コイル中央の発光が相対的に強くなっている。この発光強度と密度は対応している。図 6 (b)では、コイル磁場により形成された磁気ノズルにより、プラズマがコイル中央付近に集められていることが見て取れる。図 6 (c)では、図 6 (b)と比較して、MPD から噴射されたプラ

ズマがやや広がっている様子が観察できる。これは、コイル中央から噴出した MPD プラズマが、太陽風プラズマによって圧縮されていることを示すと共に、磁気帆が変形し、磁気ノズル形状が広がっているためであると考えられる。これらのそれぞれのケースにおいて、スラストスタンドによる変位から、推力の値を算出した。図 7 に各モードにおける推力結果を示す。

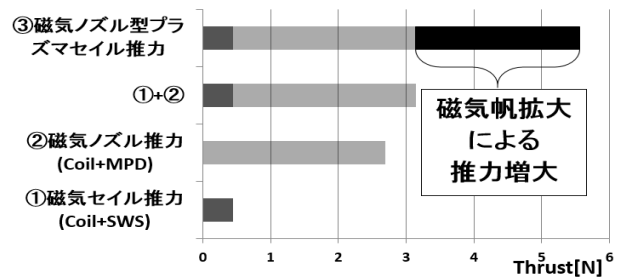


図 7 各モードにおける推力計測結果

①の磁気セイルモードの推力と②の磁気ノズルモードの推力を単純に加算した推力に対して、③のプラズマセイル併用型磁気ノズルスラストの推力は、単純な加算よりも大きくなっており、この増分が磁気圏拡大効果による推力増分であると考えられる。磁気セイルの推力は、約 0.47[N]であり、③の推力が 5.6[N]であることから、推力ゲインは約 12 となる。今回の実験結果 (推力ゲイン) は、先の数値解析結果で得られた推力ゲイン 5 倍とは整合しない結果となった。この要因について、プラズマの噴射速度の違いが考えられる。数値解析では、磁気ノズル中に噴出する MPD からのプラズマを約 30[km/s]の噴射速度を持つプラズマ流と想定して解析を行ったが、実験による計測では約 20 [km/s]にとどまっていた。また、その影響でコイル中心軸上のプラズマの密度分布についても、数値解析結果に対して実験の計測密度は高い密度を示していた。これらの要因から、磁気ノズル (②) およびプラズマセイル併用型磁気ノズルスラスト (③) の推力が数値解析では小さく評価されており、推力ゲインの違いの要因となったと考えられる。今後、条件を合わせて数値解析を再度実施する計画である。今回の実験では、磁気ノズルスラストのプラズマ噴射源に MPD アークジェットを用いたが、このプラズマ源は、それ自体に発生する推力が大きく、またコイルと電磁的に相互作用を起こしてしまい、ノイズの要因となるため、次回の実験計画では、熱プラズマ源として熱陰極プラズマ源を用いた装置の使用や、ヘリコンプラズマ源を用いた同様の実験を実施したいと考えている。また、ヘリコンプラズマ源は、MPD プラズマ源よりも

低電力での動作が可能なることから、仮に同程度の推力を出すことができるなら、推進システムとして、推力電力比の向上等の性能向上を図ることも期待できる。

#### 4. まとめ

本報告では、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、推進性能の評価に向けた数値解析結果および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た実験結果について述べた。提案した推進システムにおいて、噴射プラズマの位置や、噴射プラズマの密度、温度をパラメトリックに変更し、推力の最適化を3次元ハイブリッド粒子シミュレーションによって行った。実験では、数値解析によって最適化された噴射パラメータを用い、提案したスラスタの実推力をスラストスタンドを用いて直接計測した。その結果、磁気ノズルモードの推力に対し約12倍の推力増分を得ることができ、提案した推進原理の実証と、推力の定量的評価という研究目的を達成することができた。

#### 謝辞

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氏、大塩裕哉氏、池山氏、小泉氏には、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、本研究は、科学研究費助成事業(No.24760669)の支援を受けて実施されました。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) Harned, D., S.: Quasineutral Hybrid Simulation of Macroscopic Plasma Phenomena, *Journal of Computational Physics*, 47, 3, 1982, pp.452-462.
- 12) 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.