

# 平成 25 年度スペースプラズマ研究会 プラズマセイル融合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), 大塩裕哉 (ISAS/JAXA),  
上野一磨 (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>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、先の予測性能を達成するためには、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。

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。

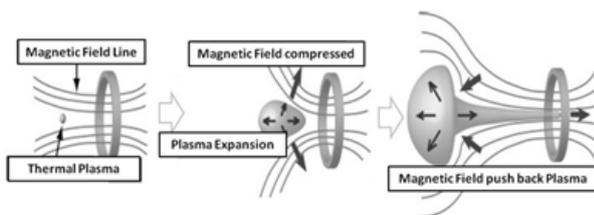


図 1 磁気ノズルスラスタの原理

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加速し、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)</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。しかしながら、このシステムは、投入電力の増加に伴い、プラズマの温度が高くなり、推力を担うイオンの Gyro 半径が増大し、損失を招き、磁気ノズルによる加速ができなくなる。よって、大推力を得るためには、強いノズル磁場が必要であり、必然的に大きな電力 (VASIMR : 200 kW で 6 N) を要する。この電力規模は、10年で太陽系を脱出するシステムには大きすぎると考えられる。さらに、未だこの手法で直接推力が測定されていないのが現状である。

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。

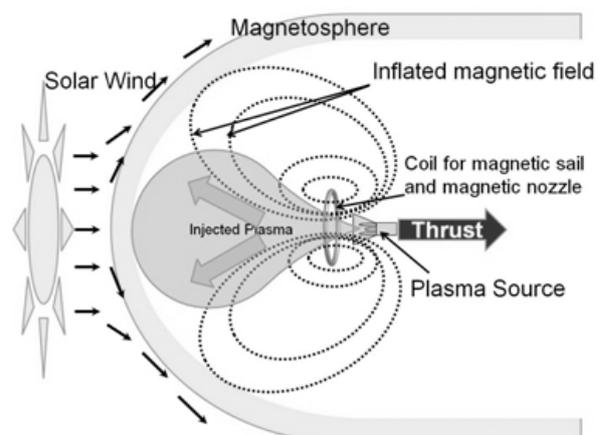


図 2 磁気プラズマセイル-磁気ノズル融合推進機の原理図

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検討する。本研究では、この検討を数値解析および地上真空チェンバー実験によって行う。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実験を行い、推力の実証を行う。

## 2. 数値解析結果

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>10)</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量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11を参照されたい。

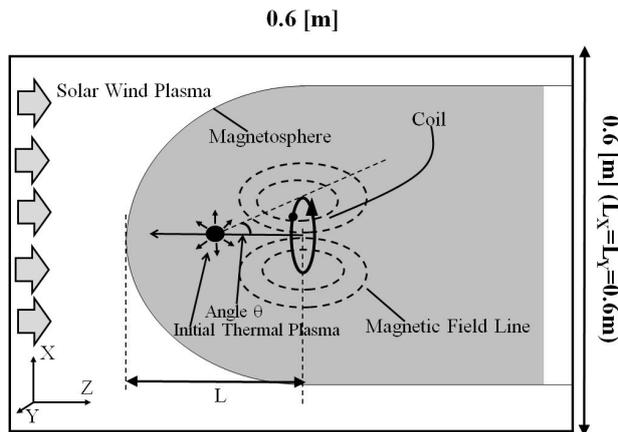


図3 解析モデル図

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。

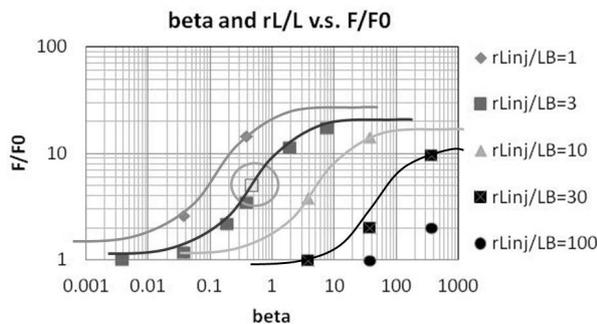


図4 パラメトリック解析結果 (推力ゲインの噴射プラズマ $\beta$ 、 $r_{Linj}/L_B$ 依存性)

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。

## 3. 実験結果

図5に、平成25年度(平成25年9月及び26年1月)に実施した真空チェンバー実験の概要図を示す。

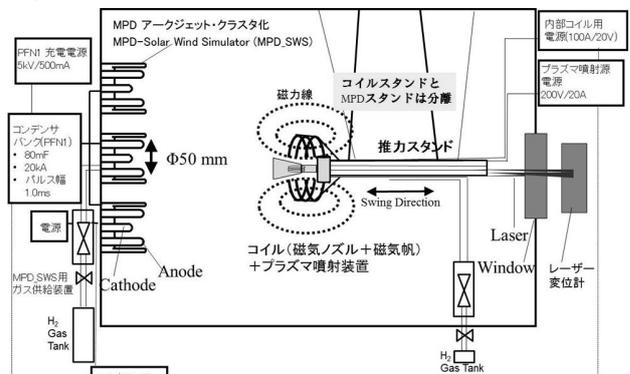


図5 実験概要図

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と、これらの駆動系、計測系から構成される。コイル、プラズマ噴射源と太陽風シミュレータ (MPD\_SWS) を同時に運用すると、約 1 ms 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) 磁気セイルモード (太陽風プラズマ+コイル磁場)

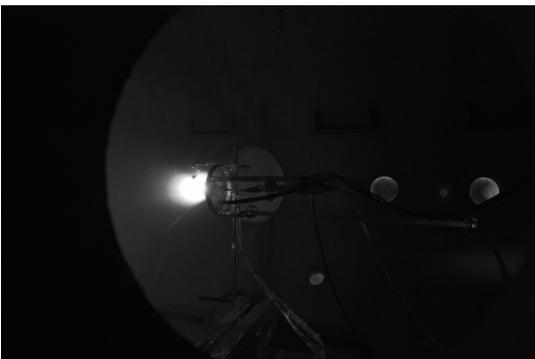


図 6 (b) 磁気ノズルモード (噴射プラズマ+コイル磁場)

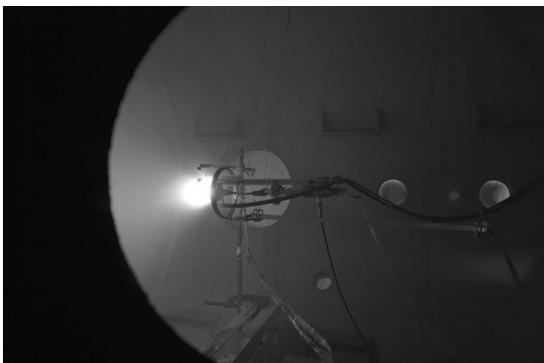


図 6 (c) 磁気ノズル+磁気プラズマセイルモード (全系動作)

実験の結果は、推力測定のほかにプラズマ流の可視化、密度や温度、磁場分布の測定なども行い、数値解析モデルの精度、妥当性検証にもつなげる計画である。図 6 (a)~(c) に実験の撮像結果を示す。

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る。カメラのシャッターを 1ms 開放して撮影した。図 6 (b) は、プラズマ噴射源である MPD アークジョット動作とコイルを同時に動作させた磁気ノズルモードである。図 6 (c) は、磁気セイルモードと磁気ノズルモードを合わせた全系動作である。これらのケースにおいてスラストスタンドによる変位から、推力の値を計算した。図 7 に各モードにおける推力結果を示す。

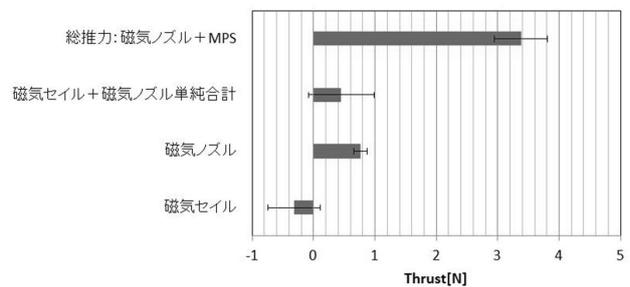


図 7 各モードにおける推力計測結果

図 7 において、磁気セイルモードの推力がマイナスになっている。推力の算出方法は、磁気セイルモードのスタンドの変位から、コイルのみに通電した場合の変位を差し引いた値を磁気セイルモードの推力とした。コイルに通電した場合の変位 (ノイズ) が大きく、そのノイズに磁気セイルの推力が埋もれてしまったことが要因である。本結果は、3 回の実験の平均値を示しており、図のエラーバーは 3 回の実験の標準偏差である。推力が正となるケースもあったが、平均値としては負の値となった。次に、磁気ノズルモードの推力については、約 0.8N となった。このモードにおいても、3 回の平均値である。磁気セイルモードと磁気ノズルモードの単純合計値をその上に示す。この値と比較して、磁気ノズル+磁気プラズマセイルモードの推力が大きければ、磁気ノズル動作によって磁気圏の拡大が生じ、その磁気圏拡大によって、太陽風からの推力が増大したことを意味している。今回の実験では、磁気セイル+磁気ノズルモードの単純合計に対して約 3 倍の推力が確認されたが、先の数値解析結果で得られた推力ゲイン 5 倍には至らなかった。この要因については、磁気ノズルからのプラズマ噴射密度の違いや、コイル磁場の分布の違いなどが想定されるが、今後詳細に調査を行い、違いの要因を明らかにしたい。今回の実験

では、磁気ノズルスラスタ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し、ノイズの要因となるため、今回の実験計画では、熱プラズマ源としてヘリコン波を用いたプラズマ源を用いて同様の実験を実施したい。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、推進システムとして、推力電力比の向上など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「プラズマセイル融合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3倍の推力増分を得ることができ、本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、磁気プラズマセイル研究グループの皆様方に多大なるご協力を頂き、深く感謝いたします。特に、宇宙航空研究開発機構の船木一幸氏、上野一磨氏、大塩裕哉氏、佐野達郎氏、堀江優之氏、武中駿氏、枝本雅史氏には、実験準備および数値解析の実施および評価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) Harned, D., S.: *Quasineutral Hybrid Simulation of Macroscopic Plasma Phenomena*, *Journal of Computational Physics*, 47, 3, (1982), pp.452-462.

11) 梶村好宏, プラズマセイルー磁気ノズル融合推進機の性能最適化と推力測定実験, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 1108, 2013.