

プラズマセイル

船木一幸*, 山川宏**, プラズマセイルワーキンググループ

Plasma Sail

By

Ikkoh FUNAKI*, Hiroshi YAMAKAWA ** and Plasma Sail Working Group

Abstract : Magnetic sail (MagSail) is a next-generation deep space propulsion system. To propel a spacecraft in the direction leaving the Sun, MagSail produces a large-scale magnetic field cavity to block the hypersonic solar wind plasma flow. Since the thrust of MagSail is proportional to the blocking area, a large-scale interaction between the artificial magnetic field and the solar wind is required to capture the energy of very low density solar wind flow. From our theoretical and experimental research on the thrust production mechanism of MagSail, it is scalable from 1 μ N class pure MagSail (150-kg satellite that has 2-m-diameter superconducting coil for the thrust production) to 1 N class magnetoplasma sail (MPS, 1,000 to 4,000 kg weight spacecraft that inflates the magnetic field produced by a 4-m-diameter superconducting coil by additional plasma jet from the spacecraft). In order to demonstrate the world's first MagSail/MPS in space, we are going to start a working group, in which 1) specific mission and spacecraft system will be designed; and 2) key components such as new high-temperature superconducting coil, a cryogenic system, and a navigation system are going to be developed for the first MagSail/MPS in space.

Key words : Magnetoplasma Sail, Magnetic Sail, Plasma Sail, MagSail, M2P2, Small Satellite

小惑星探査機「はやぶさ」や技術試験衛星 VIII 型「きく 8 号」などに搭載されたイオンエンジンは、太陽光発電で得られた電力を利用して推進エネルギーを発生する、いわゆる電気推進ロケットの一つであり、これは、太陽光の光エネルギーを電力へ、そして電力を推進エネルギーへと 2 段階にわたって変換するエネルギー変換装置であると解釈できる。一方、太陽エネルギーを直接推進エネルギーへ変換するのが、帆（セイル）推進である。セイル推進には、Fig.1 のように、太陽光を大きな鏡で反射して探査機を加速・推進するソーラーセイルと、宇宙機に搭載するコイルがつくる磁気圏が太陽風プラズマ流を受けて探査機を加速・推進する磁気セイル（マグセイル）がある。両者は推進剤を必要としない宇宙推進（Propellantless Space Propulsion）として古くから注目されているが、巨大な構造物（太陽光を反射するための大きな鏡、または、大きな磁気圏を構成するための超伝導コイル）が必要とされることから、実現が見送られていた。

こうしたセイル推進の欠点を補うには、セイル推進と電気推進機の融合をはかる必要がある。JAXA の川口教授らは、ソーラーセイル用の薄膜鏡表面に極薄の太陽電池を搭載して発電を行う、ソーラー電力セイルを提案している¹⁾。ソーラー電力セイルでは、太陽から 5.2 AU 離れた木星軌道では発電電力を探査機の維持に使うが、地球近傍軌道ではイオンエンジンを駆動するために用いる。一方、プラズマジェットを直接推進に用いるのではなく、マグセイル磁気圏の拡大に用いるのが、Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2) である²⁾。M2P2 では、Fig.2 のように、宇宙機に搭載したコイルがつくる磁場中にプラズマジェットが噴射される。この宇宙機周りのプラズマは、お互いの衝突が極めて少ない無衝突プラズマ流であり、磁場はプラズマ流に凍結 (frozen-in)

* ISAS/JAXA

** Kyoto University

して運ばれる性質を持つ。この性質を利用して磁場を遠くまで運んでマグセイルの磁気圏を拡大する磁気インフレーションのアイデアは、Winglee 博士によって提案されて脚光を浴びた。というのも、Winglee が初期に報告した M2P2 は、太陽系脱出さえも 10 年で可能であるなど、強烈な性能の推進システムだったからである。

Washington 大のグループでは、直径 10cm のソレノイドコイルと直径 3cm の小型ヘリコンプラズマ源を組み合わせた「M2P2 プロトタイプ」の実験を、2000 年から開始しており³⁾、M2P2 の開発は順調に見えた。しかし、その後スペースプラズマの専門家の中で大きな議論がおり、2003 年の Khazanov のペーパーでは、Winglee の M2P2 設計の誤りが指摘された。この Khazanov の報告が発表された 2003 年以降、Washington 大と NASA における M2P2 の研究開発はストップしてしまった。日本国内の大学研究者と JAXA の研究者が磁気プラズマセイル (MPS) 小研究会を結成して検討を開始した 2003 年は、Washington 大/NASA などの M2P2 研究が中断した時期にあたる^{4),5)}。MPS(MagnetgoPlasma Sail)の名称には、Winglee のセイルのアイデアを踏襲しつつ、プラズマ物理をより正確に捉えたいと、工学的最適化と実機の開発まで結びつけたい、という願いが込められている。

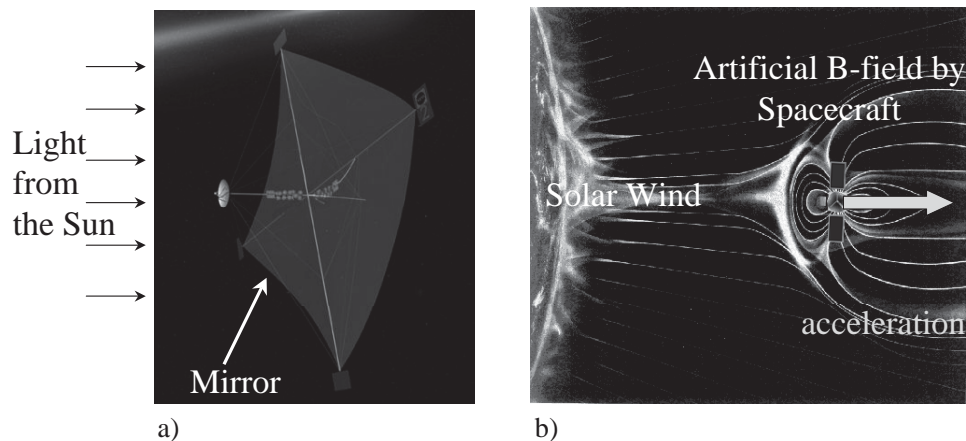


Fig.1 太陽エネルギーを利用したセイル推進 (a) ソーラーセイル、b) マグセイル) ⁶

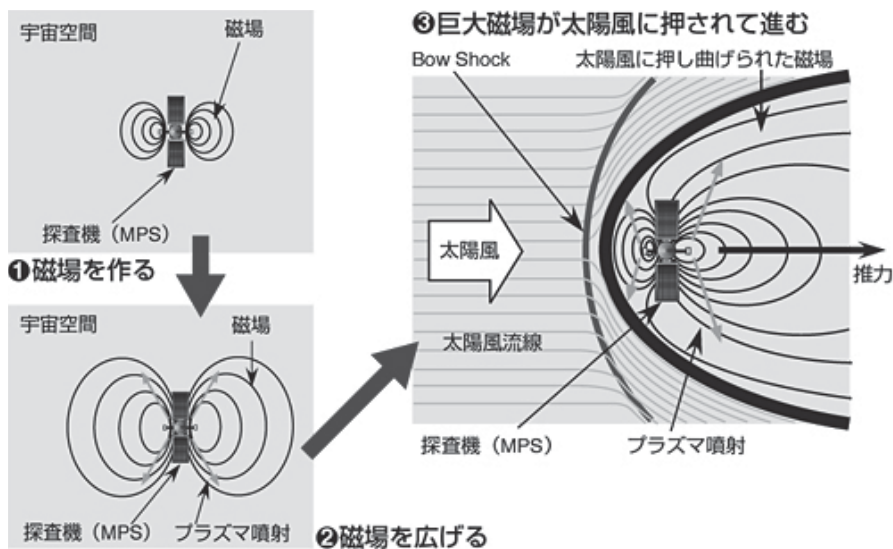


Fig.2 磁気プラズマセイルの原理

我々は、直径数十 km におよぶ人工的な磁気圏と太陽風との複雑な干渉を、数値シミュレーション^{7),8),9),10)}と

地上実験¹¹⁾から推定してきた。しかしながら、マグセイルの推力特性をこれらの技術のみで厳密に予測することは大変困難であると考えている。これは、地球磁気圏が現在でも多くの研究者によってその研究対象とされ、かつ、その探求のために多くの探査衛星が打ち上げられていることから明らかであろう。他の宇宙推進システムとは異なり、磁気セイル・磁気プラズマセイルは、宇宙空間でのみ検証することが可能である。このため、磁気セイル・磁気プラズマセイル工学実験衛星を実現するために磁気プラズマセイルワーキンググループを設立した。

JAXA と京大 RISH、九大、静岡大など、国内の宇宙工学研究者・宇宙プラズマ研究者が参加するワーキンググループでは、1) 世界的に見ても具体的な検討が手付かずの状態である、磁気プラズマセイルの中核技術である宇宙用超伝導磁石システムの開発^{12),13)}、2) 磁気セイル/磁気プラズマセイル実証のための小型宇宙機システムの設計と実証ミッション提案)、の2つを中心に開発や検討を進めている。小型宇宙機の設計は、これまで小研究会で実施してきた2つの基盤技術：スケールモデルによる地上試験設備と数値シミュレーション技術を駆使して進めたい。

小型宇宙機による実証は、2段階で行う。第1段階は、地球周回軌道上での磁気セイルシステムの検証、第2段階は惑星間空間上での磁気プラズマセイルシステムの検証である。磁気プラズマセイルがイオンスラスタなど既存の推進システムに対して優位であることを示すことができれば、効率よく軌道遷移を実現する手法として、太陽光を受け止めるソーラーセイルと共に、磁気プラズマセイルが今後の宇宙探査用推進システムの主流となる可能性もある。宇宙プラズマ環境利用の新しい形-宇宙推進への応用とこれによる太陽系探査領域と人類の活動領域の新たな拡大-を目指したワーキンググループの活動へ、多くの皆様の参加や支援をお願いしたい。

本原稿を執筆するにあたってご協力をいただいた磁気プラズマセイル小研究会のメンバー（特に、東大の西田浩之氏、京大の臼井英之氏・梶村好宏氏、静岡大の大津広敬氏、JAXA の篠原育氏・杉田寛之氏・小川博之氏・藤田和央氏）に深く感謝いたします。磁気プラズマセイルの研究は、科学研究費補助金（基盤研究(B)(No.18360411))、および、JAXA 宇宙科学研究本部戦略的基礎開発経費の支援を受けて実施しています。

参考文献

- ¹⁾ Kawaguchi, J.: A Solar Power Sail Mission for A Jovian Orbiter and Trojan Asteroid Flybys, 55th International Astronautical Congress, IAC-04-Q.2.A.03, Vancouver, Oct. 2004.
- ²⁾ Winglee, R.M., Slough, J., Ziemba, T., and Goodson, A.: Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, No.21, 2000, pp.21,067-21,078.
- ³⁾ Winglee, R.M., Ziemba, T., Euripides, P., and Slough, J.: Computer Modeling of the Laboratory Testing of Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion, International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-200, Oct. 2001.
- ⁴⁾ 船木一幸、山川宏、藤田和央、野中聡、磁気プラズマセイルによる深宇宙探査、*日本物理学会誌*, Vol.58, No.4, 2003, pp.266-269.
- ⁵⁾ Yamakawa, H., Funaki, I., Nakayama, Y., Fujita, K., Ogawa, H., Nonaka, S., Kuninaka, H., Sawai, S., Nishida, H., Asahi, R., Otsu, H., and Nakashima, H., Magneto Plasma Sail: An Engineering Satellite Concept and its Application for Outer Planet Missions, *Acta Astronautica*, Vol.59, 2006, pp.777-784.
- ⁶⁾ From <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030308.html>
- ⁷⁾ Nishida, H., Ogawa, H., Funaki, I., Fujita, K., Yamakawa, H., Nakayama, Y.: Two-dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of a Magnetic Sail, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.43, 2006, pp.667-672.
- ⁸⁾ Fujita, K., Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails, *The Journal of Space Technology and Science*, Vol.20, No.2, 2004, pp.26-31.
- ⁹⁾ Kajimura, Y., Noda, K., Nakashima, H., Funaki, I., Feasibility Study of Magneto Plasma Sail by Using Numerical Simulation and Experiment, AIAA-2007-587, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Jan., 2007.
- ¹⁰⁾ Nishida, H., Ogawa, H., Funaki, I., and Inatani, Y., MHD Analysis of Flow Fields Around Magneto Plasma Sail, AIAA-2007-585, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Jan. 2007.
- ¹¹⁾ I. Funaki, H. Kojima, H. Yamakawa, Y. Nakayama, and Y. Shimizu, Laboratory Experiment of Plasma Flow around Magnetic Sail, *Astrophysics and Space Science*, Vol.307, No.1-3, 2007, pp.63-68.
- ¹²⁾ 船木一幸、山川宏、磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦、*プラズマ核融合学会誌、新たな宇宙開発を拓く核融合技術*、Vol.83、No.3、2007、pp.281-284.
- ¹³⁾ 南祐一郎、佐々木大祐、山川宏、中村武恒、船木一幸、小嶋浩嗣、上田義勝、磁気プラズマセイル宇宙機のための超伝導コイルの基礎研究、第51回宇宙科学技術連合講演会、2007年10月、札幌。