

マグセイル・ワーキンググループについて

船 木 一 幸*, 山 川 宏**, 磁気プラズマセイル(MPS)研究会

Proposal of MagSail Working Group

By

Ikkoh FUNAKI *, Hiroshi YAMAKAWA ** and MPS Research 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 (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 a small but world's first MagSail in space, we are going to start a two-year 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 in space.

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

1. はじめに

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]。

* ISAS/JAXA

** Kyoto University

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) 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 10 cm のソレノイドコイルと直径 3 cm 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間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うえで、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。

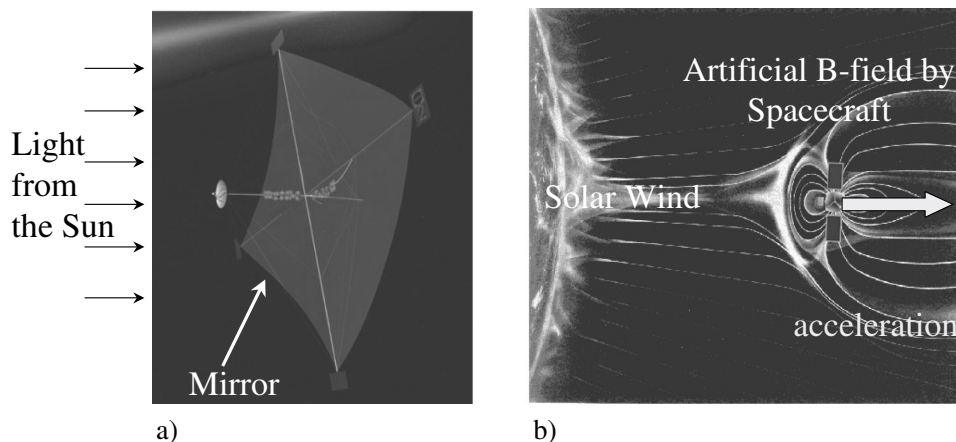


Fig.1 太陽エネルギーを利用したセイル推進 (a) ソーラーセイル, b) マグセイル) ⁶

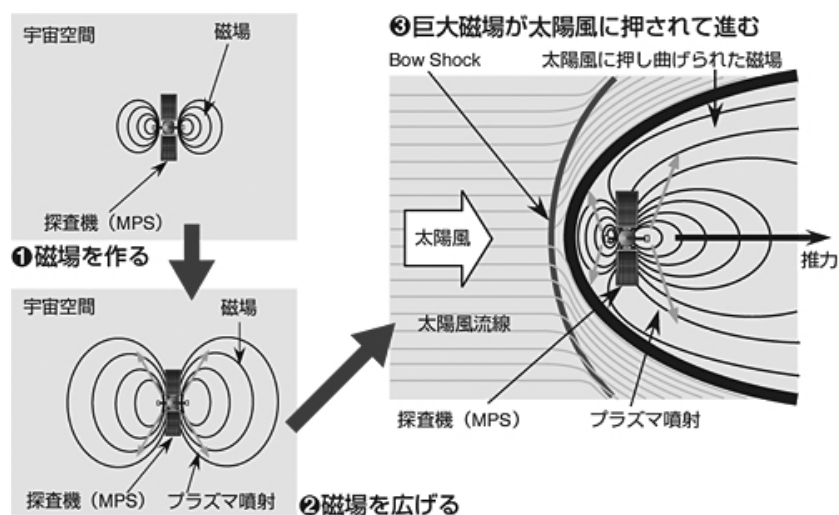


Fig.2 磁気プラズマセイルの原理

2. マグセイル・磁気プラズマセイル (MPS) 研究の現状

NASA Marshall の Khazanov は, Winglee の提唱した半径 (L) が高々 10 km の磁気圏を利用する M2P2 のデザインを非難している [7]. Khazanov は, この 10km スケールの磁気圏と太陽風との干渉では ion ラーマー半径 (r_{Li}) と代表長 L の比が大きい ($r_{Li}/L > 1$) ため ion kinetic effect を考慮する必要がある, Winglee が採用した MHD (流体) モデルは不適である, とし, M2P の設計点では太陽風と磁気圏磁場との干渉は弱く, 太陽風は磁気圏をすり抜けていくため, 推力は発生しない, と結論した.

Khazanov は有意な推力を生み出すには $L > 100$ km と巨大な磁気圏が必要と主張したが, これは本当なのだろうか? この疑問に答えるため, 我々はまず, 磁気圏大きさ $L < 100$ km (イオンスケール) の磁気セイルが受ける推力を見積もり, イオンスケールのマグセイルが可能かどうかを判断することにした [8],[9],[10]. Fig.3 には, 人工的なプラズマ噴射を伴わないマグセイル (ピュア・マグセイル) の推力特性予測を示してある. 小さい磁気圏では, ion kinetic effect によって磁気圏と太陽風との相互作用が弱まるが, それでも $L = 20$ km で 1.0 N のセイルが実現できる. これは, 総重量 1000 kg 程度の深宇宙機探査機を推進するには, 十分な推力であろう. ハイブリッド数値シミュレーションやスケールモデル実験では, こうした推力発生を裏付ける形で, 高速プラズマ流中にイオンスケールの磁気圏が形成されて, プラズマ流がブロックされる様子が捉えられている [9],[10],[11]. $L < 100$ km の磁気セイルは実現可能である, というのが我々の結論であり, 第一段階の磁気セイル衛星は, この点をフライト検証するのが目的である.

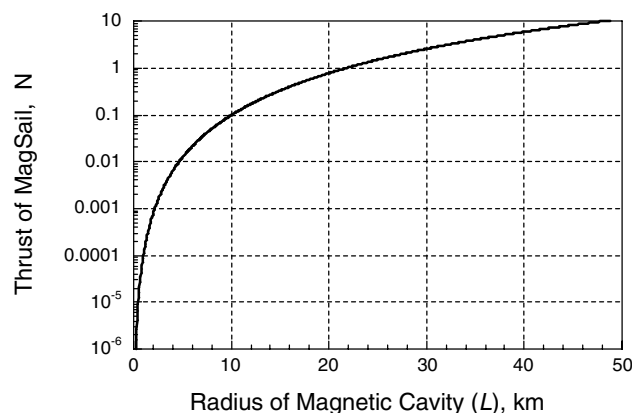


Fig.3 ピュア・マグセイルの推力予測

MPS の推力特性については, しかし, まだ我々のグループ内で議論が続いている. Winglee の計算 (Hall-MHD シミュレーション) は精密なものであったが, スケール則に対する配慮が不十分であり, 推力特性を過大評価してしまった. この点に注意して再評価を行ったところ, 「M2P2 プロトタイプ」として開発された直径 10 cm のソレノイドコイルでは磁気モーメントが不足しており, 有意な推力を得るには, 直径 10 m 級のコイルが必要であることが分かった [12]. 朝日は, 簡易モデルによって MPS に最低限必要な磁気モーメントを明らかにしたうえで, 推進機の性能 (推力, 比推力, および推力電力比) を向上させるには, 探査機からのプラズマ噴射パラメータ $\beta_0 = (\text{噴射プラズマ流の動圧}) / (\text{磁気圧}) = (0.5\rho u^2) / (B^2/2\mu_0)$ を小さく ($\beta_0 < 10^{-4}$ のように) 取るべきだと提案した. 低 β プラズマは, しかし, プラズマが磁場によって閉じ込められることを意味する. これを避けるため, MPS 探査機では磁力線に沿ってプラズマを噴射して, 遠方領域へプラズマを導入すればよいことが分かっている [13]. こうした予測を裏付ける形で, Fig.4 の MHD シミュレーション例では, $\beta_0 = 10^{-2}$ の低ベータプラズマ噴射ケースでも, 磁気圏を大きく拡大 (inflate) できている. 今後は, 研究会にて整備を進めてきた数値解析ツールを発展・拡張させて, ピュア・マグセイル小型衛星や, 将来のフルスケール磁気プラズマセイルの詳細な推力特性を把握する予定である. また, 地上実験は, 推力の直接計測データを用意してこれら解析との比較検討を可能にすると共に, 磁気インフレーションを取り入れた磁気プラズマセイルへの拡張を目標に, 現在も実施中である.

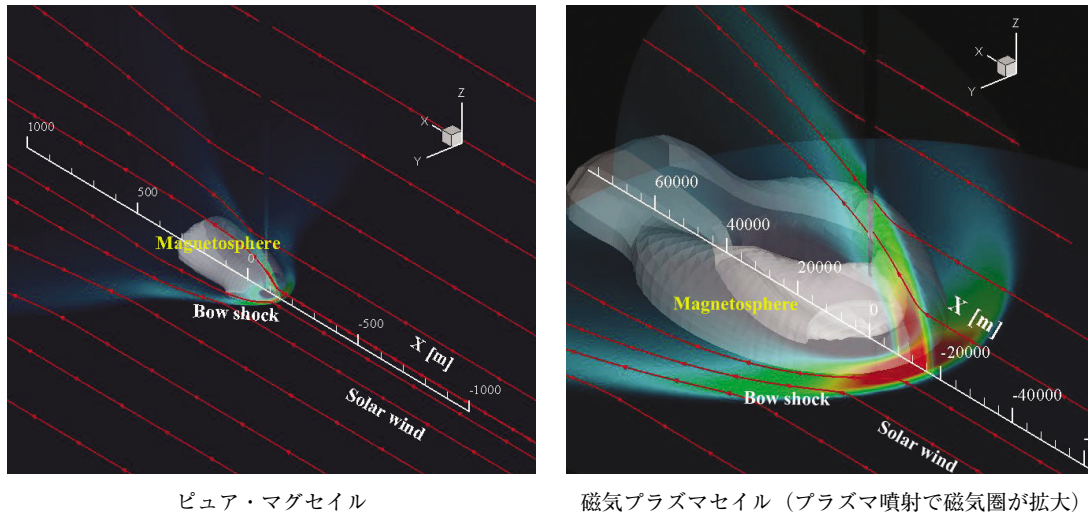


Fig.4 ピュア・マグセイルと磁気プラズマセイル周りの流れ場（MPS 噴射プラズマ $\beta_0 = 0.01$ ）[13]

3. ピュア・マグセイル実証衛星

ピュアマグセイル（直径数 m の超伝導コイルを搭載した衛星のつくる磁場と太陽風プラズマの干渉）で発生可能な推力は、これまでの理論的予測からも μN オーダーと非常に小さい。しかし、数 m クラスの超伝導コイルのシステムを開発し、太陽風プラズマによって宇宙推進する磁気セイルを実際に運用することは、これまでの我々の理論を裏付けるための大事な第一歩である。従って我々は、このピュア・マグセイルを世界で初めて飛行実証することを第一目標としている。そして、その次の段階は、磁気インフレーションを伴うことでより大きな推力を発生することが可能な、磁気プラズマセイルを、惑星間空間で飛行実証することになるだろう。ここでは、第 1 段階の目標である磁気セイル（pure Magsail）について記す。具体的には、以下に示すように磁気セイルに必須な新規技術の開発と磁気セイルの飛行性能評価を行い、将来磁気プラズマセイル開発に必要な技術の取得を目指す。

- 1) 磁気セイル工学試験衛星搭載用の 1T 級超伝導コイルシステムを開発する。このシステムは、軽量かつ高強度なコイルとその駆動電源、冷却系とから構成される。Table 1 に示した検討中の超伝導コイルシステムでは、予測値で $0.3 \mu\text{N}$ の推力を発生する事ができる。
- 2) 静止トランスファー軌道上（GTO）に投入される総重量 150 kg ～ 200 kg 程度の規模を想定して衛星開発を行う。Fig.5 のように太陽風を受けるべく地球磁気圏の外側の領域に試験衛星を配置するために、小型固体モータ（ $\Delta V = 500 \text{ m/s}$ 程度）により太陽側に遠地点がある $250 \text{ km} \times 20\text{Re}$ 軌道に投入する（地球磁気圏の magnetopause は太陽側に 10Re 程度、bow shock は 13Re 程度）。その後は地球磁気圏の外に達する遠地点付近でのみ磁気セイルを作動し、衛星軌道の変化から磁気セイルの推進性能を確認する。
- 3) 衛星ではプラズマ風観測装置により太陽風をモニタし、推力との相関を取得する。

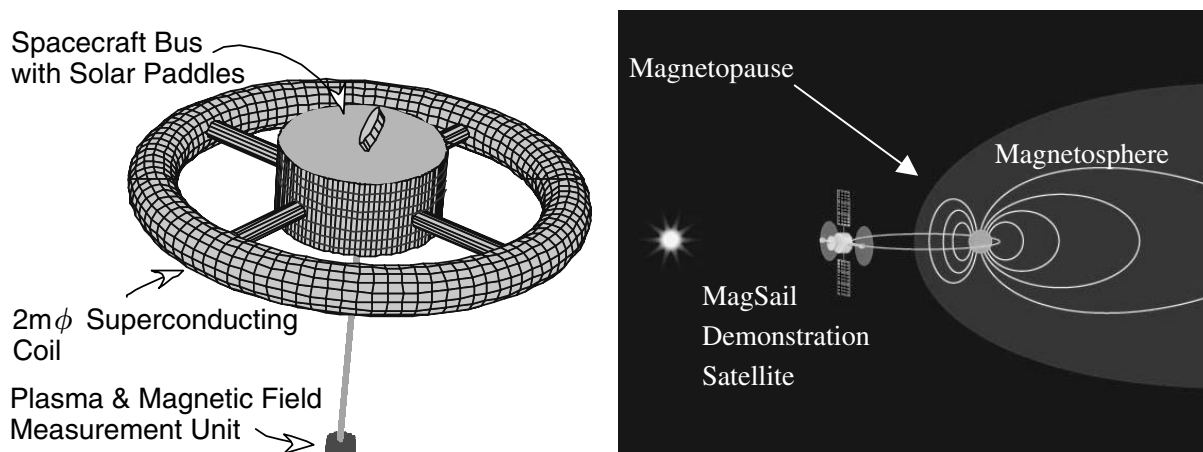


Fig.5 ピュアマグセイル工学実験衛星の概略と軌道

セイルの技術開発のポイントとなる超伝導コイルについては、Table 1 のように、4 K まで冷却する低温超伝導と、20 K 程度まで冷却する高温超伝導の 2 つについて、現在もトレードオフを続けている。

Table. 1 マグセイル用超伝導コイル線材の特性

	低温超伝導線材	高温超伝導線材
Coil Temperature	4 K	20 K
Coil diameter	$\phi 2$ m	$\phi 2$ m
Design magnetic field	1T	1T
Current	600 A	300 A
Turns	500	1000
Coil inductance	4 H	4 H
Power while starting-up	2 kW	2 kW
Battery requirement	200 Wh	200 Wh
LHe Capacity	30 ℓ	----
Cryostat Size	$\phi 0.2 \times 6.2$ m	----
Mass	30 kg	50 kg

低温超伝導は、電流値を大きく取れるが液体ヘリウムによる冷却が必要となり、コイルシステムの寿命がヘリウム冷媒の搭載量に左右される。これに対して、高温超伝導では、機械的な冷凍機が利用できると考えており、1 年以上のコイル運用が可能になるであろう。マグセイル用超伝導コイルのためには、軽量かつ大きな磁束密度を達成できるシステムを最適設計する必要がある、また、熱・構造・EMC など、宇宙機用コンポーネントに不可欠な各種評価試験を実施する必要がある。

4. マグセイルワーキンググループ

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と地上実験から推定してきた。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の設立を提案している。

このワーキンググループでは、設立後 2 年間で、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電磁石システムの開発、2) 磁気セイル／磁気プラズマセイル小型宇宙機システムの設計と実証ミッション提案，を中心に開発や検討を進める．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ト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などと共に，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．宇宙探査のための技術革新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．

謝 辞

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，九大の梶村好宏氏，静岡大の大津広敬氏，JAXA の小川博之・藤田和央の両氏）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開発研究費の支援を受けて実施している．

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] Khazanov, G., Delamere, P., Kabin, K., Linde, T. J.: Fundamentals of the Plasma Sail Concept: Magnetohydrodynamic and Kinetic Studies, Journal of Propulsion and Power, Vol.21, No.5, 2005, pp.853-861.
- [8] 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.
- [9] Fujita, K., Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails, The Journal of Space Technology and Science, Vol.20, No.2, 2004, pp.26-31.
- [10] 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.
- [11] 船木一幸，小嶋秀典，清水幸夫，都木恭一郎，中山宜典，山川宏，藤田和央，小川博之，篠原季次，磁気セイルシミュレータの開発，日本航空宇宙学会論文集，Vol.54, 2006, pp.501-509.
- [12] 朝日龍介，船木一幸，山川宏，藤田和央，磁気プラズマセイルの電磁流体解析および性能評価，ISAS Research Note No.789, 2005年3月.
- [13] 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.