

Design of the Experimental Simulator of Magnetic Sails

Ikkoh FUNAKI, Kazuhisa FUJITA, Hiroshi YAMAKAWA, Hiroyuki OGAWA, Satoshi NONAKA
 Japan Space Exploration Agency
 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, JAPAN
 funaki@pub.isas.ac.jp

Yoshinori NAKAYAMA
 National Defense Academy
 Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, JAPAN

Keywords: M2P2, Magnetic Sail, Magsail, Magneto Plasma Sail

Abstract

To realize magnetic sails, momentum of the solar wind should be efficiently transferred to a spacecraft via magnetic field, which is produced around a spacecraft. In this paper, two important physical processes are addressed: 1) diffusive processes caused by plasma turbulence at the magnetospheric boundary around the spacecraft; and 2) field aligned current loops that will electrically connect the magnetospheric boundary and the spacecraft. The idea of the magnetic sails will be demonstrated by an experimental simulator, in which a fast plasma beam will penetrate into a dipole magnetic field. For that purpose, the two important physical processes should be scaled down to a small laboratory experiment in a space chamber. From the scaling considerations, the interaction can be scaled down if high-speed and high-density (10^{19} m^{-3}) plasma jet is used with 1-T-class magnetic field.

Introduction

磁気セイル(Magnetic Sail ,Magsail)や Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2)といった、磁場と太陽風の相互干渉から抗力を得る宇宙推進の研究が盛んになってきた。Fig.1 に示したように、磁気セイルを搭載した宇宙機は直径数百 km もの大きなコイルで構成されており、このコイルが作る大規模な磁場で太陽風の流れをブロックする。Fig.1 のように、もしも磁場が太陽風に浸透すれば、イオンを直接減速させる電磁力が働くことが分かる。¹⁾ 一方、M2P2^{2),3)}や、日本で研究している磁気プラズマセイル(Magnetoplasma Sail, MPS)⁴⁾では、Fig.2 のように非常に小さな磁場をコイルで生成し、これを宇宙機から噴射するプラズマによって広範囲に磁場を展開する。磁場を 10~100km まで展開できれば、Magsail と同じように、太陽風と磁場との干渉から宇宙機を推進するだけの推力を発生できると期待されている。

これらのセイルでは、広範囲に展開した磁場と太陽風の干渉によって太陽から遠ざかる向きの推力を発生すると言われているが、どのようなメカニズムでどの程度の推力が発生するかについては、現在でも様々な議論が続けられている。^{5),6)}

そこで本研究では、ループコイルの作る磁場と太陽風との干渉といった、最も基本的な構成の Magsail に焦点を絞り、その推力発生機構について考察を行った。また、Magsail の推力発生を模擬できる地上実験シミュレータについて検討を行ったので、その概要について報告する。

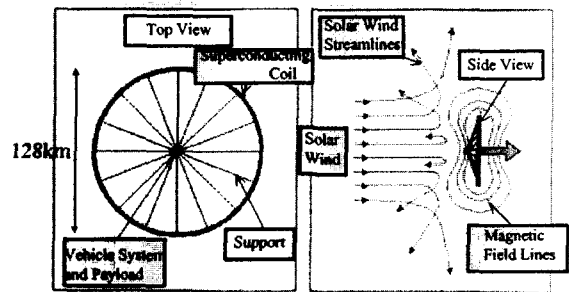


Fig.1 Principle of Magnetic Sail (Magsail).

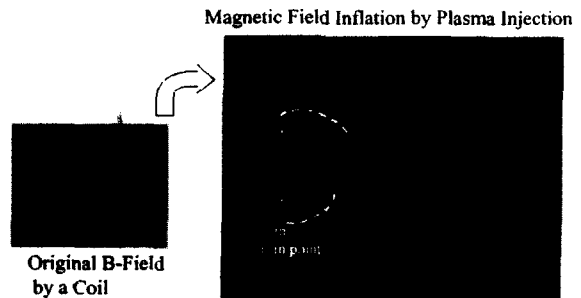


Fig.2 Process of Magnetic Field Inflation in Magnetoplasma Sail.

Technical Issues and Important Physical Processes of Magnetic Sails

Fig.3 および以下に示すように、Magsail にて推力が発生するためには、1)Magsail 磁気圏境界での散逸による運動量の磁場への浸透し、2)この浸透した運動量が宇宙機へ伝達する必要がある。

はじめに太陽風と宇宙機の作る磁場との干渉を、粘性や散逸を含まない理想的な電磁流体力学(MHD)で考える。理想的な MHD では磁場の運動と流体(太陽風)の運動が等価であるため、

太陽風と宇宙機のつくる磁場は、もし動かならば一緒に運動する。したがって、太陽風と磁場の干渉が定常になった段階で、磁場は太陽風に浸透することはできず、太陽風と磁場との間には明確な境界 (magnetospheric boundary) が存在して、ここで $\text{rot}\mathbf{B}$ に基づく誘導電流が流れる。こうした考え方は、粒子間の衝突が無視できる大規模干渉を考える限り妥当な近似である。磁場キャビティの形状は、周囲のプラズマ圧と磁場がつり合うよう決定されることから、滑らかな流線型となって太陽風プラズマは等エントロピー的に磁場をかすめて流れると予想される。

この理想 MHD モデルでは、流れの接線方向応力が存在しないため、基本的には抗力 (圧力抵抗) は存在しない。これは、例えば電磁場を含まない完全流体の流れを考えると容易に予想出来るであろう。圧力抵抗が発生するためには、粘性などの散逸現象によって、太陽風が磁場へ浸透する必要がある。これは宇宙機磁気圏境界で発生する、様々な不安定性によって可能となると予想しているが、今後実験や解析をとおして定量的に議論する必要がある。なお、超音速ジェットである太陽風が磁場に突入する際は、特殊な散逸過程を伴う bow shock が発生することが知られている。この shock での散逸現象は、いわゆる造波抵抗として抗力と成りうるが、宇宙機に作用する抗力となるためには、やはり磁気圏まで運動量が浸透する必要がある。

こうした運動量が磁場へ浸透するプロセスについては、Fig.4 に基づいて考える。磁気圏境界域での散逸によって太陽風が磁場中に浸透すると、Fig.4 のように磁場中に電場 $\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ が発生する。地球磁気圏では、Fig.4 のようにこの電場が2つの磁力線をブリッジし、磁場の方向には電流が自由に流れるため、この誘導電場が導電性プラズマから構成される地球電離圏に投影される。こうして電離圏に流れる電流 (沿磁力線電流) は、地磁場と干渉してローレンツ力でプラズマを加速するか、あるいは電気伝導度が小さければ、ジュール加熱によりプラズマを加熱する。いずれにせよ地球磁気圏へ浸透した太陽風の運動量が、電離圏へ伝達されることが分かる。一方 Magsail では、磁気圏内部にプラズマが一切存在しないため、同様のプロセスで運動量を宇宙機へ伝達する事ができない。この際宇宙機のつくる磁気圏境界では、発生した誘導磁場を相殺するよう散逸が強まり、プラズマを加熱すると予想される。Magsail で宇宙機が推力を得るためには、沿磁力線電流を宇宙機表面で流すよう導体でうけるか、あるいは、プラズマをコイル中に生成して沿磁力線電流を流し、ローレンツ力をうけて加速したプラズマから2次の

に運動量をうけるかの、2つの方法が考えられる。

以上の考察は全て流体的な描画に基づくが、実際の Magsail 周囲の流れは、Magsail の代表長 L と太陽風のイオン Larmor 半径 r_{Li} の関係が $0.1 \sim r_{Li}/L \sim 1$ であり、磁場中イオンの粒子的な運動も考慮した複雑な解析が必要である。

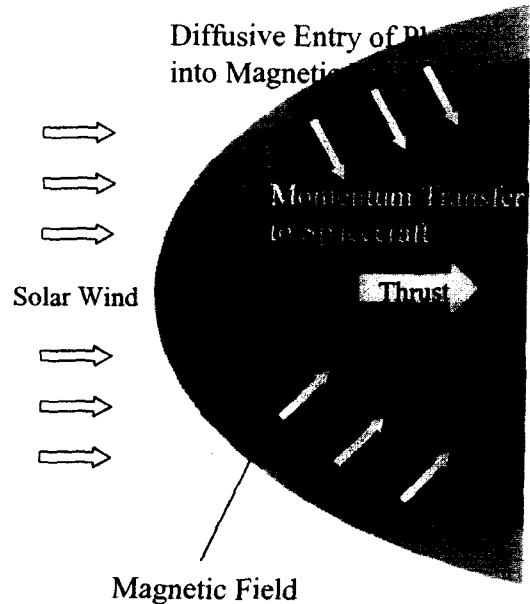


Fig.3 Important Physical Processes of Magnetic Sails.

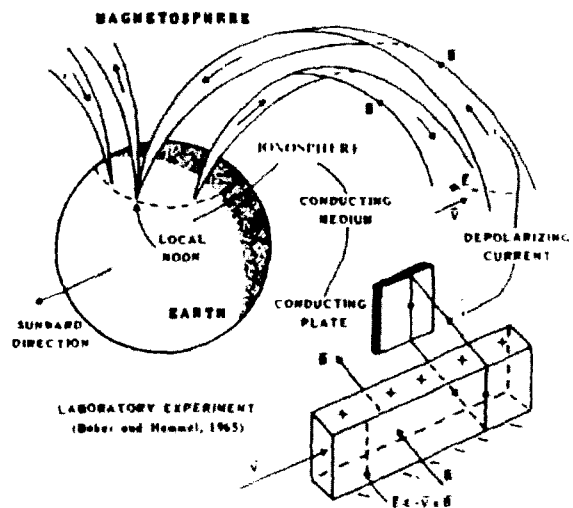


Fig.4 Momentum Transfer from the Solar Wind to Dipole Magnetic Field: Coupling between the Earth Magnetosphere and Ionosphere.⁷⁾

Design of Experimental Simulator of Magnetic Sails

流体的な干渉の場合でも粒子的な干渉の場合でも、宇宙機をつくる磁気圏（磁場キャビティ）境界面でのベータ値（kinetic β ）は $\beta \sim 1$ である。ここで kinetic β は、

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} \rho u^2}{\frac{B^2}{2\mu_0}} \quad (1)$$

のように定義した。ここで ρ は密度、 u は太陽風の速度、 B は境界域での磁束密度、 μ_0 は真空透磁率である。Magsail のスケーリングを説明するため、Fig.5 では、この $\beta \sim 1$ のラインとあわせて、Fig.5a 衝撃波の様子を示してある。 $\beta \sim 1$ の磁気圏境界では、その表面磁場の大きさにて r_{Li} が定義できることから、この境界域の磁場の大きさをもとに太陽風のイオン Larmor 半径が、 $r_{Li}=100\text{km}$ と計算できる。従って Magsail として展開しようとしている磁場の代表長 L と r_{Li} は同じオーダーであり、

$$0.1 < \frac{r_{Li}}{L} < 10 \quad (2)$$

のようになる。(1)と(2)を考慮して Fig.6 のようなシミュレータを設計する必要がある。

Fig.6 のように、限られた空間で磁場とプラズマビームの干渉を実現するためには、強い磁場を生成して小さな r_{Li} としなければならない。しかし、磁場を強くすることで $\beta \sim 1$ を達成するために必要なプラズマビームの動圧が決まってしまうことから、高密度のジェットが必須であることが予想される。一例としてシミュレータの設計例を Table 1 に示した。

ただし、地上シミュレータにはサイズの限界があり、完全に散逸の無い実験は作り出すことができない。これは磁場の散逸の程度をあらわす無次元パラメータである磁気レイノルズ数

$$Rm = \sigma \mu_0 u L \quad (3)$$

がシミュレートできないことを意味する。ここで σ は電気伝導度である。Rm の値はビームの電子温度を上げることで、Table 1 のパラメータでも $Rm=10$ 程度まで改善できるが、実機が経験する Rm の数桁小さい値になってしまう。

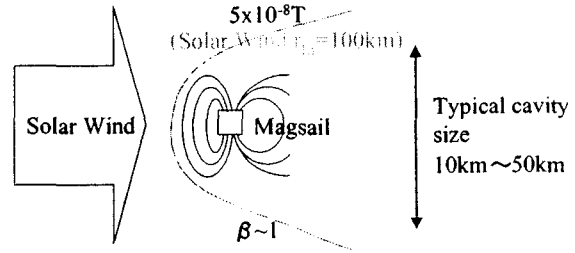


Fig. 5 Model for Magsail for Scaling Considerations.

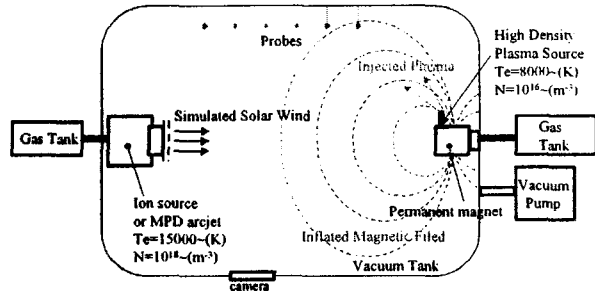


Fig. 6 Schematics of Experimental Setup.

Table 1 An Example of Experimental Parameters

$L (=r_{Li})$	0.2m
Coil Size	0.05m ϕ
Magnetic Flux Density at the Coil	0.15T
Plasma Density of the Beam	10^{19} m^{-3}
Velocity of the Beam	10km/s
Magnetic Reynolds Number (Rm)	2~5

Summary and Future Plans

最も単純な構成の磁気セイル(Magsail)について、その推力発生に必要な条件を考察し、この原理検証に必要な地上実験シミュレータのパラメータを検討した。太陽風と宇宙機を作る磁場との干渉の際、散逸過程の発生が発生して、太陽風の運動量が磁場に浸透しなければ、宇宙機には太陽風の方向の推力（抗力）は発生しない。また、磁場に浸透した太陽風の運動量が宇宙機へ伝わるためには、磁力線を介して宇宙機表面に直接電流を流してローレンツ力を発生させる必要があることが分かった。このような複雑な相互作用を実験するシミュレータの設計を行った結果、高密度プラズマジェットによって非常に小さな試験環境においても宇宙機の磁場と太陽風の干渉を模擬できることが分かった。ただし、真空チャンバの小さなサイズのため、散逸現象を決定するプラズマ不安定性など、どの程度模擬できるのか、今後理論解析を併用して検討する必要がある。

References

- 1) Zubrin, R.M., The Use of Magnetic Sails to Escape from Low Earth Orbit, *Journal of the British Interplanetary Society*, Vol.46, No.3, 1993.
- 2) R.M. Winglee, J. Slough, T. Ziemba, and A. Goodson: *J. Geophys. Res.* 105 (2000) 21067.
- 3) R.M. Winglee, T. Ziemba, P. Euripides, and J. Slough, Computer Modeling of the Laboratory Testing of Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion, *Proc. 27th Int.l Electric Propulsion Conf.*, Pasadena, 2001.
- 4) Yamakawa, H., Ogawa, H., Fujita, K., Nonaka, S., Sawai, S., Kuninaka, H., Funaki, I., and Otsu, H., Planetary Exploration by Magneto Plasma Sail, *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, April 2003 (in press, in Japanese).
- 5) Khazanov, G., Delamere, P., Kabin, K., Linde, T., and Krivorutsky, E., Fundamentals of the Plasma Sail Concept: MHD and Kinetic Studies, *AIAA-2003-5225*, 39th Joint Propulsion Conference & Exhibition, Huntsville, July 2003.
- 6) Karimabadi, H. and Omidi, N., Kinetic Simulation/Modeling of Plasma Sails, *AIAA-2003-5226*, 39th Joint Propulsion Conference & Exhibition, Huntsville, July 2003.
- 7) Nishida, A. ed., *Magnetospheric Plasma Physics, Development in Earth and Planetary Sciences*, Center for Academic Publications Japan, 1982.