

MPD アークジェットを用いた磁気セイルの 実験室シミュレーション

船木 一幸^{*1}, 小嶋 秀典^{*2}, 清水 幸夫^{*1}
山川 宏^{*1}, 篠原 季次^{*1}

Laboratory Experiment of Magnetic Sails Using an MPD Arcjet

by

Ikkoh Funaki^{*1}, Hidenori Kojima^{*2}, Yukio Shimizu^{*1},
Hiroshi Yamakawa^{*1} and Suetsugu Shinohara^{*1}

Abstract: A magnetic sail (MagSail) is a unique interplanetary propulsion system. To propel a spacecraft in the direction leaving the Sun, the MagSail produces a large-scale magnetic field to block the hypersonic solar wind plasma flow. In order to simulate the interaction between the solar wind and the artificially deployed magnetic field produced around a MagSail spacecraft, a laboratory simulator was designed and constructed inside the space science chamber at ISAS/JAXA. As a solar wind simulator, a high-power magnetoplasmadynamic arcjet is operated in a quasi-steady mode of ~ 0.8 ms duration. It can generate a simulated solar wind that is a high-speed (above 20 km/s), high-density (10^{18} m⁻³) hydrogen plasma plume of ~ 20 cm in diameter. A small coil (2 cm in diameter), which is to simulate a MagSail spacecraft and can obtain 1.9-T magnetic field strength at its center, was immersed inside the simulated solar wind. Using these devices, the formation of a magnetic cavity (~ 8 cm in radius) was observed around the coil.

Key words: Magnetic Sail, M2P2, Laboratory Simulation, Magnetoplasmadynamic Arcjet

概 要

磁気セイルの作る磁場と太陽風プラズマ流との干渉を模擬するための scale model 実験を、JAXA/ISAS の大型スペースサイエンスチャンバーにて実施した。模擬太陽風プラズマジェットを供給する準定常放電型 MPD アークジェットが噴射する速度 20 km/s 以上・密度 10^{18} m⁻³ の水素プラズマジェット中に、模擬磁気セイル（直径 18 mm・20 ターンで中心磁場 1.9T のコイル）を挿入して干渉実験を行なった所、直径 8 cm 程度の磁気圏が観測された。

1. はじめに

近年、太陽エネルギーを利用した深宇宙推進が注目を集めている。巨大な薄膜で太陽光を反射して推力を得る推進方法はソーラーセイルと呼ばれ、風を受けて海を走る帆船（セイル）のように、太陽光を受けて宇宙空間を航行する。ソーラーセ

* 1 JAXA/ISAS

* 2 University of Tsukuba

イルは未だ実現していないが、超軽量な薄膜素材を利用した実証機の開発が急ピッチで進んでいる [1] [2]. ソーラーセイルが利用する太陽光とともに、太陽から放射されているもう一つのエネルギー流束が、太陽風である。太陽風は主にプロトンと電子から構成され、地球磁気圏を離れた惑星間空間にて、強く吹き荒れていることが知られている。宇宙機はこの太陽風プラズマ流を受け止める事で推進力を得ることができるが、その力は $(5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2)$ 程度と非常に小さい。より大きな推進力を得るために、磁気セイルでは図1のような太陽風プラズマ流と探査機をつくる磁場との大規模干渉を利用する [3]. 宇宙機に搭載するコイルに電流を流すことで周囲に磁場が発生するが、太陽風プラズマは抵抗ゼロの理想的な導体として振る舞うため、プラズマ領域（太陽風）と磁場領域（磁気圏）は電流層を介して明確に分離する。この時超音速流である太陽風プラズマは磁気圏へ貫入できず、磁気圏を障害物としてみなすため、探査機前面（太陽に向けた側）では衝撃波が発生して太陽風の流れが減速・屈折する。磁気セイルでは、こうした太陽風の運動量変化が磁場を介して探査機へ伝達する事で宇宙機に働く抗力となり、太陽から遠ざかるための推進力に利用することができる。

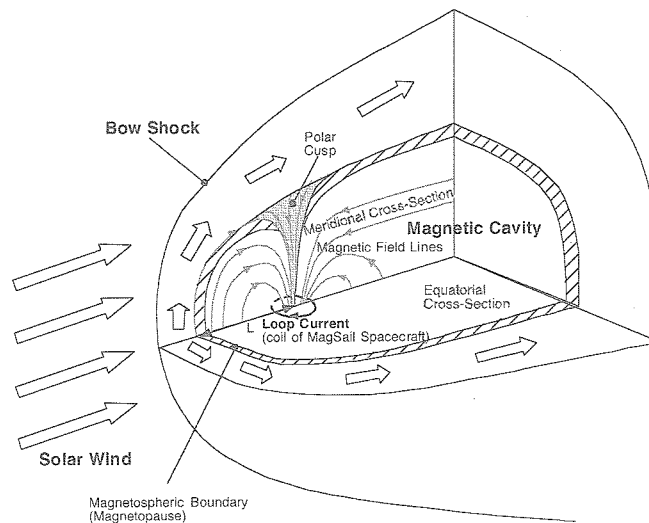


図1 磁気セイルの構造。

これまでの理論研究から、磁気セイルの推力は、太陽風流れをブロックする磁気圏の大きさに強く依存することが明らかになってきた [4]. 後述するように、太陽風プラズマと磁気圏の干渉では、磁気圏の大きさ (L) が非常に大きいときは流体スケールの相互作用が予想され [5][6], 逆に、磁気圏が小さいときはイオンまたは電子粒子スケールの相互作用が予想される [7][8]. こうした様々なスケールにおける磁気圏と太陽風プラズマとの複雑な相互作用を系統的に調べるためには、実験の評価が不可欠である。本論文では、磁気セイル周囲プラズマ流のスケール則を予測し、推力 1 N クラス磁気セイルの地上実験シミュレーターを設計・開発したので報告する。

2. 実験装置

2.1. 磁気セイルシミュレータの概要

図2に磁気セイルシミュレータの概要を示す。実験システムは、高速高密度プラズマジェットを噴射するための太陽風シミュレータと、磁気セイルシミュレータ（磁場発生用コイル）ならびに制御・測定装置から構成される。実験では、太陽風シミュレータから噴射されるプラズマ流とコイル磁場との干渉を撮影すると共に、磁場印加によるプラズマ流の変化をコイル後方に設置した静電プローブにより計測する。

2.2. 磁気セイルシミュレータの概要

磁気セイルの磁気圏大きさ（図1の L ）は、太陽風の動圧 $nm_i u^2$ とコイルのつくる磁気モーメント M とから次のように求められる [9].

$$L = \left(\frac{\mu_0 M^2}{8\pi^2 nm_i u^2} \right)^{1/6} \quad (1)$$

L は太陽風動圧と磁気圧がつりあう澱み点を表す。この澱み点位置における skin depth (δ) やイオン Larmor 半径 (r_{Li}) の代表長 L に対する比率が、磁気セイル周囲プラズマ流を特徴づけると予想している。表 1 にもまとめたように、磁気圏大きさ $L = 10 \sim 50 \text{ km}$ (推力で $0.1 \sim 1 \text{ N}$) の磁気セイル実機を考えた場合、(2) 式および (3) 式が成立する。

$$\delta / L \ll 1 \quad (2)$$

$$r_{Li} \approx L \quad (3)$$

両条件を満たすようにスケールモデルを構築する場合、最大の障害となるのが L の制約である。

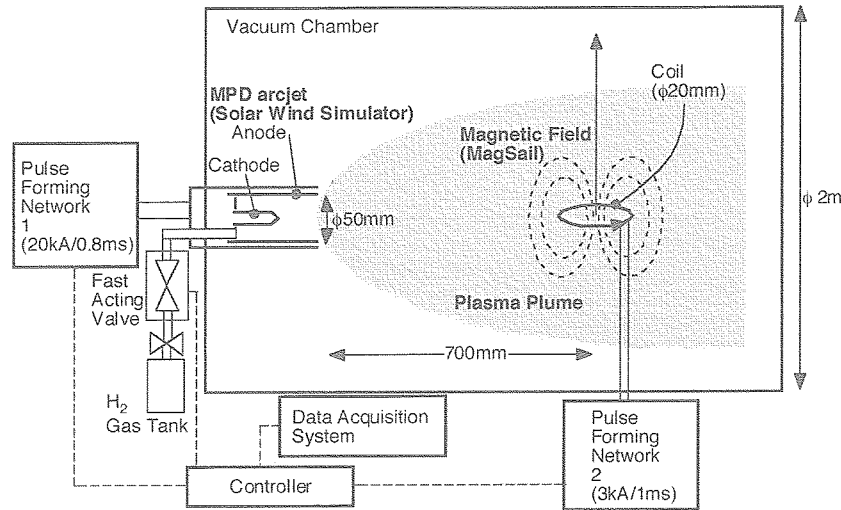


図 2 実験装置の概要。

表 1 磁気セイルの主な無次元パラメータ

	MagSail in space	Design Target of MagSail in our laboratory experiment
Size of magnetic cavity (standoff distance), L	10-50 km	< 0.1 m
Thrust	0.1-1 N	< 0.5 N
Ratio of ion Larmor radius to L , r_{Li}/L	1 to 10	1 to 10
Ratio of thickness of magnetopause to L , δ/L	< 0.1	< 0.3
Magnetic Reynolds number, Rm	> 10^5	3-15
Mach number	8	1-3

真空チャンバ内におけるスケールモデル実験では、太陽風を模擬するプラズマジェット径の直径にも限りがあることから、 $L \sim 0.1 \text{ m}$ とするのが妥当かつ限界であろう。そこで $L = 0.1 \text{ m}$ を (2) 式を意味する $\delta/L < 0.1$ へ代入すると、

$$3 \times 10^{17} < n_e \quad (4)$$

となる。同様に (3) 式を $L < r_{Li} < 10L$ のように用いて整理すると、水素イオンでは

$$2 \times 10^{17} < n_e < 1 \times 10^{19} \quad (5)$$

となり、これら 2 式はプラズマ密度に対する条件を与えることが分かる。両式のアンドを取ると、 $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 以上の数密度のプラズマジェットを生成すれば良いことがわかる。また、プラズマ流速 u と澱み点磁束密度 B_{mp} については、澱み点におけるプラズマ動圧と磁気圧のつりあいより

$$\frac{u}{B_{mp}} = \frac{2}{\sqrt{2\mu_0 m_i}} \frac{1}{\sqrt{n_e}} \quad (6)$$

であるから、例えば $n_e = 3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の時、

$$\frac{u}{B_{mp}} = 5.6 \times 10^7 \quad (7)$$

の関係が求められる。(7)式を見る限りは、 u と B_{mp} とが比例さえすれば良いように見える。しかし、 u は磁気レイノルズ数についての条件： $R_m \gg 1$ を満たすような大きな値を選ばなければいけない。 $\sigma = 2000/\Omega\text{m}$ 、 $L = 0.1\text{ m}$ の場合、 $u = 40\text{ km/s}$ 、 $B_{mp} = 0.7\text{ mT}$ にて $R_m = 10$ が達成可能である。

以上の議論から、太陽風シミュレータには速度 40 km/s 以上・数密度 10^{17} m^{-3} 以上の高密度高速プラズマジェットが、また、激み点($L = 0.1\text{ m}$)にて 0.7 mT 以上の磁束密度が要求されることが分かる。

2.3. 太陽風シミュレータ (SWS)

太陽風シミュレータ (Solar Wind Simulator, SWS) としては、直径 50 mm の電磁プラズマ力学 (MPD) アークジェットを採用した。MPD アークジェットはMWクラスの投入電力で $10^{18}\text{ m}^{-3} \cdot 20\text{ km/s}$ 以上の高密度高速プラズマジェットを容易に生成可能であるが、実験室にて定常的にこのような大電力を用いることは困難である。従って、準定常パルス作動とした。実験では、放電に先だって水素ガスをFAV (Fast Acting Valve) にて半値幅 8 msec の矩形パルスで放電室内へ導入する。ガス流量が一定値 (0.5 g/s) に保たれた状態でPFN (Pulse Forming Network) 回路のイグナイトロンにトリガをかけると、半値幅 0.8 ms の放電がスタートする。PFN回路は $200\text{ }\mu\text{F}$ のコンデンサ 12 個から構成され、最大で 5 kV まで充電される。このSWSは長さ 5 m 、直径 2.5 m の円筒形真空チャンバの1つのフランジに設置され、チャンバ内部の放電前の真空度は 1 mPa 以下に保たれた。

2.4. 磁気セイルシミュレータ (MSS)

磁気セイル実機では、コイルから遠く離れた位置に磁気圏界面を構成することから、地上実験においても磁気圏大きさ L に対してできるだけ小さなコイルを利用することが望ましい。本実験では $L \sim 0.1\text{ m}$ であるため、直径 18 mm の小型コイル (MMS) を製作した。このコイルは静電容量 $200\text{ }\mu\text{F}$ 、充電電圧 1.5 kV のケミカルコンデンサ 10 個から構成されるPFN回路 (によって給電され、半値幅 0.8 ms の準定常磁場を生成する。新規開発したPFN2とMMSでは、コイル中心磁場 1.9 T を実現した。図2のように、MSSはSWSの下流 0.7 m の位置 (チャンバーのほぼ中央) に設置された。

3. 実験結果

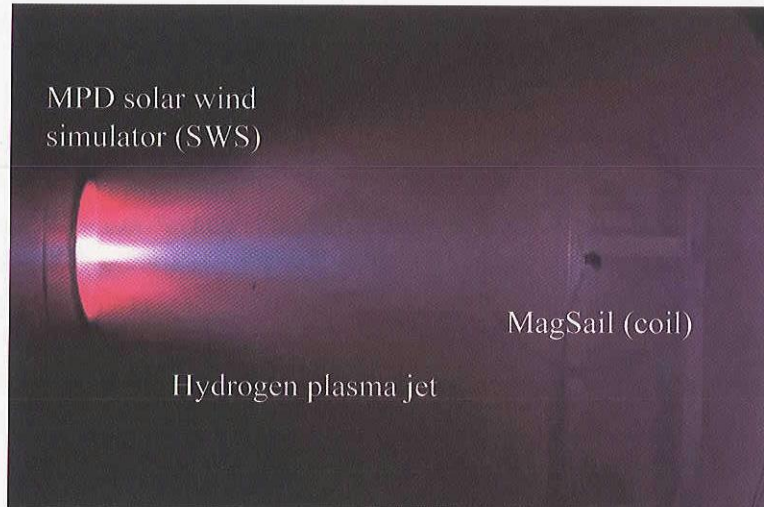
SWSとMMSを同時運用した時の様子を図3に示した。図の左側フランジの奥にSWS (MPDアークジェット) があり、そしてSWSから 0.7 m 離れた位置にMMSコイルが磁気ダイポール方向が図中上向きになるよう設置されている。SWSプラズマジェットのプラズマ特性を把握するため、干渉実験に先だってMSS位置にプローブを設置してプラズマ計測を行った。SWSプラズマジェットの診断結果を表2にまとめた。

表2 太陽風シミュレータ (SWS) と磁気セイルシミュレータ (MMS) の緒元

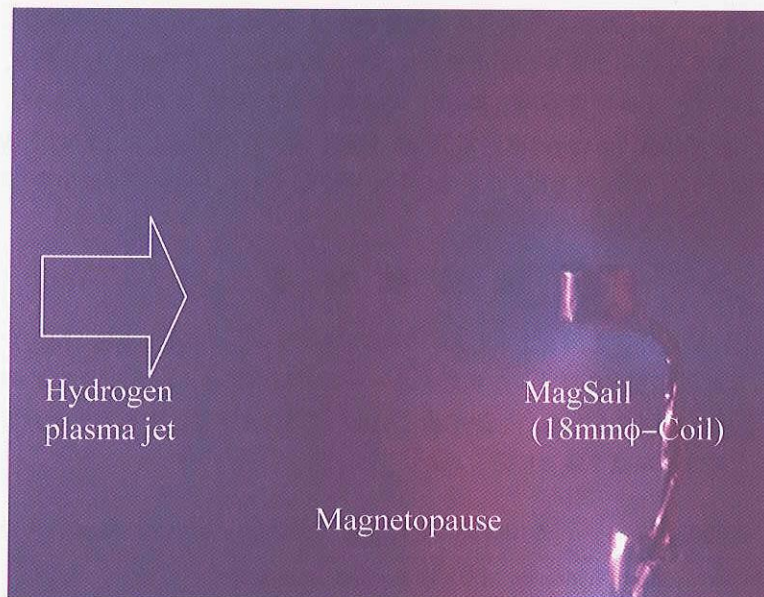
Plasma stream from hydrogen MPD solar wind simulator	
velocity	10-50 km/s
plasma density	10^{18} /m^3
electron temperature	10,000 K
radius of plasma stream	0.2 m
plasma duration	0.7 ms
Coil current simulating MagSail in operation	
radius of coil	18 mm
B-field at the center of coil	0-1.9 T
duration of exciting current	0.9 ms

プローブには直径 1 mm の平面プローブを用い、プローブ面がジェットに平行または垂直になるように設置した。それぞれを、平行プローブならびに垂直プローブと呼ぶことにする。電子温度およびプラズマ密度の同定には、平行プローブ (シングルプローブ) の電流電圧特性を利用した。MMSコイル周辺の拡大図を図3b) に示した。図の左側からは一様な模擬太陽風が入射しているが、コイル周辺では、強い磁場を印加した図3b) のケースにて、特徴的な構造が見られる。例えば、

コイルの直近左側では、磁力線に捉えられたと思われるプラズマの発光がみられ、磁力線が集まるカuspもはっきり見ることが出来る。コイルから離れて7～8 cmの面から内部では、外部に比べて発光が暗くなっており、これが図1などで議論した磁気圏境界面に相当すると考えられる。磁気圏境界面は入射するプラズマ流をブロックしていると予想されるが、磁気圏内部にはほぼ全域に弱い発光が残っている。



a) 全系（左が太陽風シミュレータ、右図円が磁気セイルシミュレータのコイル）



b) 拡大図（コイル磁場 1.9T）

図3 シミュレータ動作時の様子（水素ガス 0.5 g/s, PFN 充電電圧 4 kV）.

MSS動作時のプラズマ流の様子は、MSS後流に配置された垂直プローブ群を利用して測定した。各プローブは-18Vにバイアスされ、イオン飽和電流を測定する。SWSからのプラズマジェットがMSSのつくる磁場によってブロックされると、垂直プローブのイオン飽和電流出力が最大で50%減少するのが観測された。このようにMSS後流のプラズマ密度・速度分布を測定すると、磁場を印加した時としない時との運動量 ($nm_i u^2$) の変化から、プラズマジェットの運動量変化（すなわち、磁気セイルに作用する力）を推算することができる。図4はプラズマ流の動圧で無次元化した推力 (C_d) を、澱み点におけるイオンLarmor半径・代表長比 (r_{Li}/L) に対してプロットしたものである。図中のMHDは3次元MHDシミュレーションによる推力係数プロットしているが、電磁流体モデルによる解析はイオン有限Larmor半径効果を考慮していない。 r_{Li}/L が増加してイオン粒子の旋回半径が大きくなると、磁気セイルのつくる磁場との干渉が弱くなり、無次元化推力 C_d が減少している。こうした傾向はイオンhybridシミュレーション（図中ではPICと表示した）結果と似た傾向を示している。しかしながら、hybridシミュレーションは電荷分離したいわゆるMagnetopause（シース）が解析できないのが難

点であり、実験では装置の制約上電子衝突の影響が無視できず、磁気レイノルズ数 Rm が小さくなってしまふ欠点がある。現在はこうした影響も評価しながら、磁気セイルの推力特性評価を慎重に行なっている。

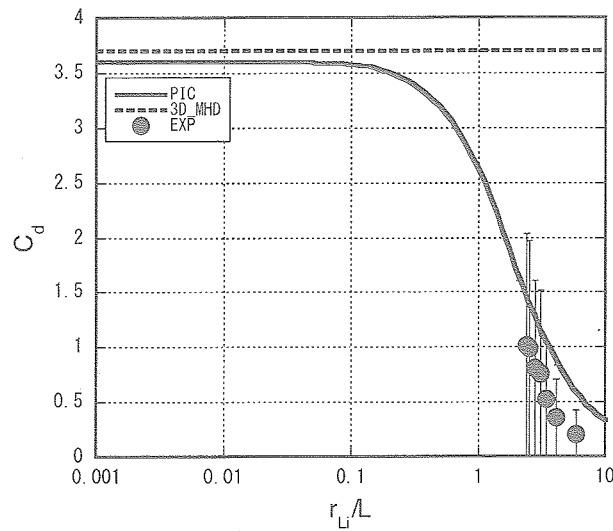


図4 無次元推力係数のイオン Larmor 半径・代表長比に対する依存性 (プロット点は本実験に基づく推算値を、3D_MHD は 3次元 MHD シミュレーション結果 [6] を、PIC は Hybrid シミュレーション結果 [7] をそれぞれ表す)。

4. まとめ

磁気セイルの作る磁場と太陽風プラズマ流との干渉を模擬するための scale model 実験を、JAXA/ISAS の大型スペースサイエンスチャンバーにて実施した。実験では準定常放電型 MPD アークジェットが噴射する速度 20 km/s 以上・密度 10^{18} m^{-3} の水素プラズマジェット中に磁気セイル (直径 18 mm・20 ターンで中心磁場 1.9 T のコイル) を挿入した。この時コイル後流に設置されたプローブへのイオン電流が約 50 % 減少すると共に、磁気セイルのつくる磁気圏に相当すると思われる発光パターンが観測された。MPD アークジェットプラズマ流の低電子温度および低い電離度のため、イオンが磁気圏へ深く侵入してしまうなど、プラズマ流排除量を正確に模擬するには未だ課題が残る。

今後は表 1 に示されたスケール則を十分に満たすよう MPD-SWS の特性チューニングをはかるとともに、衝撃波を含めた磁気セイル周囲プラズマの詳細な測定や、磁気セイルに作用する力の直接測定を行なう予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (No.15360453)・若手研究 (B) (No.15760594))、および、JAXA 宇宙科学研究本部 (宇宙工学委員会ならびにスペースプラズマ専門委員会) の支援を受けて、同本部内のスペースプラズマ共同設備にて実施した。

参 考 文 献

- [1] Montgomery, E.E., and Johnson, L. : The Development of Solar Sail Propulsion for NASA Science Missions to the Inner Solar System, AIAA-2004-1506, *45th Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, Apr., 2004.
- [2] 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.
- [3] Zubrin, R.M., and Andrews, D.G. : Magnetic Sails and Interplanetary Travel, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.28, pp.197-203, 1991.

- [4] Funaki, I. and Nakayama, Y.: Sail Propulsion Using the Solar Wind, *The Journal of Space Technology and Science*, Vol.20, No.2, 2004, pp.1-16.
- [5] 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* (in press).
- [6] Nishida, H., Ogawa, H., Funaki, I., Fujita, K., Yamakawa, H., and Inatani, Y. : Verification of Momentum Transfer Process on Magnetic Sail Using MHD Model, Paper AIAA-2005-4463, *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, July 2005.
- [7] Fujita, K.: Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails, *The Journal of Space Technology and Science*, Vol.20, No.2, 2004, pp.26-31.
- [8] Akita, D., and Suzuki, K.: Kinetic Analysis on Plasma Flow of Solar Wind Around Magnetic Sail, AIAA-2005-4791, *36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, June 2005.
- [9] Bachynski M. P. and Osborne F. J. F.: Laboratory Geophysics and Astrophysics, in *Advances in Plasma Dynamics* (Anderson, T. P. and Springer R. W. Eds), Northwestern University Press, 1965.