

## 磁気セイル探査機地上試験装置の開発

## Development of a solar wind simulator for MagSail experiments

宇宙科学研究本部 機器開発グループ 清水幸夫

ISAS/JAXA SHIMIZU Yukio

## Abstract

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is studying a new magnetic sail propulsion system, called MagSail, since 2002. A MagSail travels interplanetary space by capturing the energy of the solar wind<sup>[1]</sup>. A MagSail realizes analogous interactions between the solar wind and an artificial magnetic field produced around a spacecraft, to obtain a force in the direction of the solar wind<sup>[2]</sup>. In order to demonstrate the momentum transfer process of the magnetic sail, we have started a preliminary experiment. In the experimental studies, some strong interactions between the high-density ( $10^{19} \text{ m}^{-3}$ ) and high-velocity (17 km/s) plasma flow and an artificial magnetic field of about 1 T was observed<sup>[3]</sup>. Now, we are designing and manufacturing an experimental simulator of the magnetic sail propulsion system. Especially, development of a solar wind simulator will be a key issue for the MagSail experiments. We selected an MPD arcjet device to be the solar wind simulator. And a new twelve L-C ladder pulse forming network (PFN) is also now in manufacturing and testing. In this report, a development status of the MPD solar wind simulator for the MagSail experiment is described and some experimental results are reported.

## 1. はじめに

電気推進エンジンを含む従来の推進機よりも効率良く深宇宙探査ミッションを遂行するため、宇宙機推進力としてソーラーセイルや磁気セイルが考案され注目をあびている。宇宙科学研究本部ではソーラー電力セイルなどの研究・開発に着手し、昨年8月10日には小型ロケット(S-310-34号機)による薄膜展開実験に成功し、引き続き今年度冬期に打上げ予定のM-V-8号機・ASTRO-Fのサブペイロードとして半径20mの扇型薄膜展開実験を計画している。図1は成功した薄膜展開の様子である。また、これとは別に磁気プラズマセイル(以降広い意味で磁気セイルの仲間と見なし単に磁気セイルと言う)なる推進機構の研究も進められている<sup>[1]&[3]</sup>。ソーラーセイルは太陽光の輻射圧を利用した推進機であり、磁気セイルは探査機が作り出す広大な磁場によって太陽プラズマ粒子を受け止め推進力を得ようというものである。西暦2000年に米国ワシントン大学のウィングリーが、密度の薄い太陽風を効率良く受け止めることができる磁場機構もつM2P2(Mini-Magnetospheric

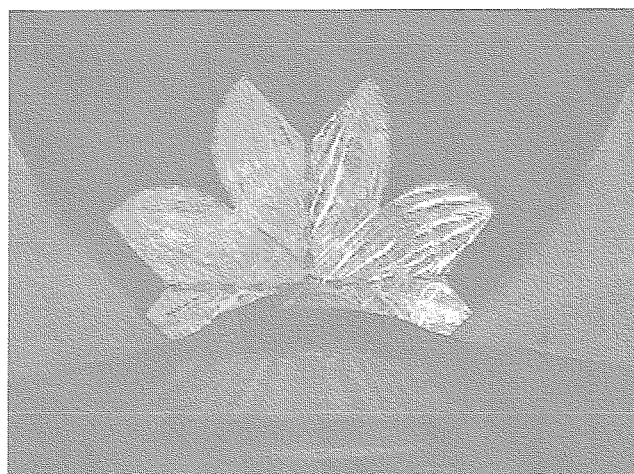


Figure 1. Extended solar sail membrane in space.

Plasma Propulsion) という推進機構を考案した<sup>[2]</sup>。これをきっかけに、従来巨大な磁場発生機構を必要とした磁気セイルにも注目が集まり、日本でも宇宙科学研究本部を中心に研究が盛んに行われるようになりつつある<sup>[4]&[5]</sup>。図2は磁気セイルの概念図である(日本物理学会提供)。太陽プラズマを大きなダイポール磁場で受け止めることができれば太陽風の運動エネルギーをもとに宇宙機の推進力を得ることができる。M2P2は、探査機が発生する磁場をプラズマ噴射によって磁場展開を実現しようとするものである。本技術発表会ではこの磁気セイルのシミュレーションに用いる模擬太陽プラズマ発生装置の研究・開発について発表する。

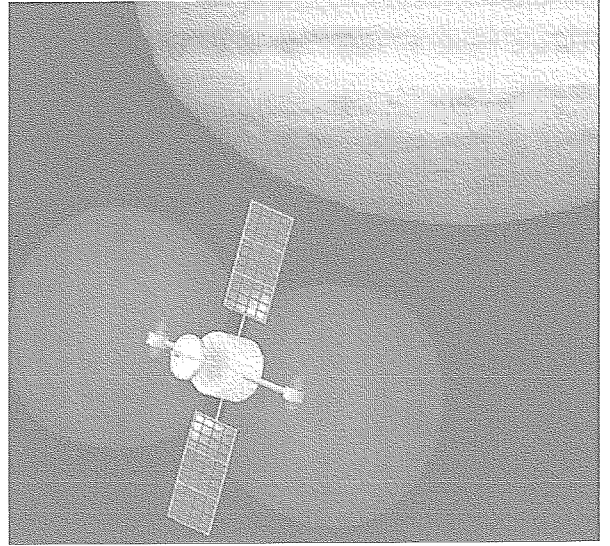


Figure 2. Artist's Concept of a Magnetic Sail.

## 2. 研究概要

### (1) 磁気セイル探査機地上試験装置

磁気セイル探査機地上試験装置は、次の装置等から構成されている。すなわち、真空チャンバー装置、模擬太陽プラズマ発生装置、模擬磁気セイル探査機、計測装置等である。本報告ではおもに模擬太陽プラズマ発生装置の研究・開発について記述する。試験に使用された真空チャンバー装置は、図3に示すように、宇宙科学研究本部が全国共同利用機関として機構内外にその利用を開放している直径2.5m、長さ5mのステンレス製チャンバー(スペースサイエンスチャンバーと称している)で、真空排気装置として2基のクライオポンプと1基のターボ分子ポンプにより $10^{-5}$ Paの真空度を達成している。また、電気推進研究部門が所有する直径80cm、長さ2mのステンレス製チャンバーも使用し基礎的な実験を行っている。このチャンバーは、油回転ポンプ、メカニカルブースターポンプおよび拡散油ポンプにより $10^{-4}$ Paの真空度に達する。

将来は磁気セイル探査機を模擬して磁界を発生するコイルを設置し、太陽プラズマと磁気セイルの実験的シミュレーションの研究を行う予定である。数々の計測装置については紙面の都合により説明を割愛する。

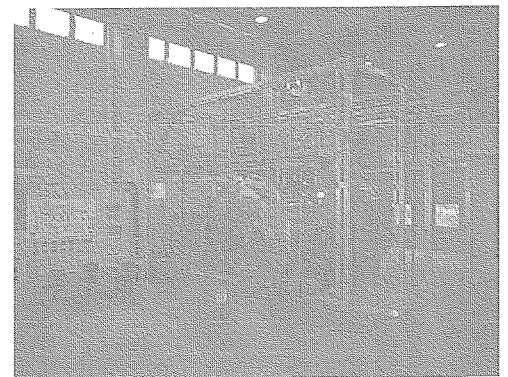


Figure 3. Space Science Chamber.

### (2) 模擬太陽プラズマ発生装置

筑波大学大学院生の南らの研究によれば、地球近傍の探査機に1N程度の推力を発生させる磁気セイルを仮定して無次元パラメタにより整理すると、地上で太陽プラズマを模擬するためのプ

ラズマ源には  $10^{18}$  個/立方メートル以上の数密度を発生させる性能が必要であるとしている<sup>[6]</sup>。電磁加速型の電気推進機である MPD アークジェットは大電流放電により単位面積あたりのプラズマ密度が高いこと、推進剤の種類や推進剤供給量、および放電電流を適当に選ぶことによりプラズマ密度やプラズマ速度を制御することが可能であるという特徴があり、本研究の模擬太陽プラズマ発生装置に MPD アークジェットが採用された。

宇宙飛行用の MPD アークジェットでは、電極の損耗を減らし耐久性を向上するため並びに電磁加速領域と空力加速領域の複合する領域で推力を効率良く得るために分割陽極が大変有利である<sup>[7]</sup>。本研究の MPD アークジェット放電部についても低電流領域における放電の安定性を確保し、高電流領域における電極損耗を押さえるため、宇宙飛行用と同様に分割陽極の設計思想が取り入れられ製作が行われた。本研究のために新しく設計・製作された MPD アークジェットの放電部を図4に示す。図は放電部が真空チャンバー壁に取り付けられている様子を示す。放電部の構造は、陰極、陽極、絶縁体、浮遊電極から構成されている。放電部の外周直径は 88 mm で、陰極は直径 16 mm 長さ 20 mm のモリブデン製、陽極は直径 8 mm 長さ 80 mm の Th-W 製、最外側の浮遊電極は SUS でできている。陰極を中心に同軸状に 8 本の陽極ロッドが均一に配置されている。推進供給に必要な高速電磁弁とその駆動電源は、従来電気推進工学部門で使用していたものをそのまま使用した。

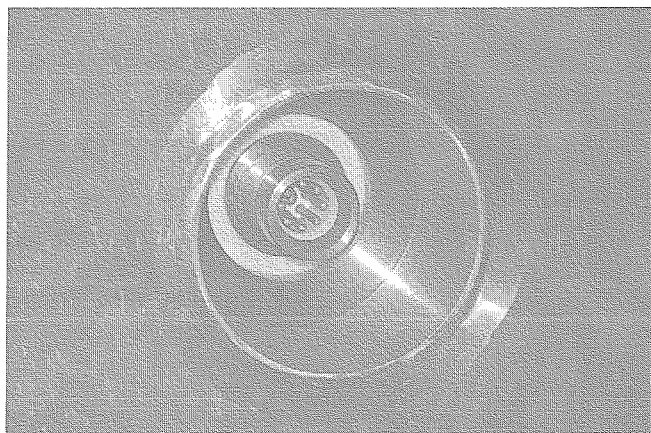


Figure 4. MPD Arcjet discharge head.

本研究では太陽プラズマを模擬するため大電流放電が必要とされるため、新たに電源の開発を行った。電源はいわゆるパルス整形回路 (PFN) で、コンデンサーバンクとコイル、スイッチング素子、調整抵抗などから構成されている。できるだけ大電流を放電室に供給するため、小型で容量が大きいオイルコンデンサーが選ばれた。本実験のために大容量小型オイルコンデンサ (米国マクセル社製) を調達したが、その組込み調整が間に合わないため、少々寸法が大きいが大容量のオイルコンデンサーを用いた。使用したコンデンサーは日本コンデンサー工業 (株) (現 (株) ニチコン) 社製の型式 NCBI-J38HGW、耐圧 5 kV で静電容量は  $200 \mu\text{F}$  である。コイルは直径 12 mm の撚り線を使って空心コイルとなるように自作した。スイッチング素子には米国 National Electric 社製の型式 NL-2888A のイグナイトロンを用いた。図5にパルス整形回路の模式図を示す。パルス整形回路は矩形波を得るため 1 2 段の L-C 梯子回路で組まれている。

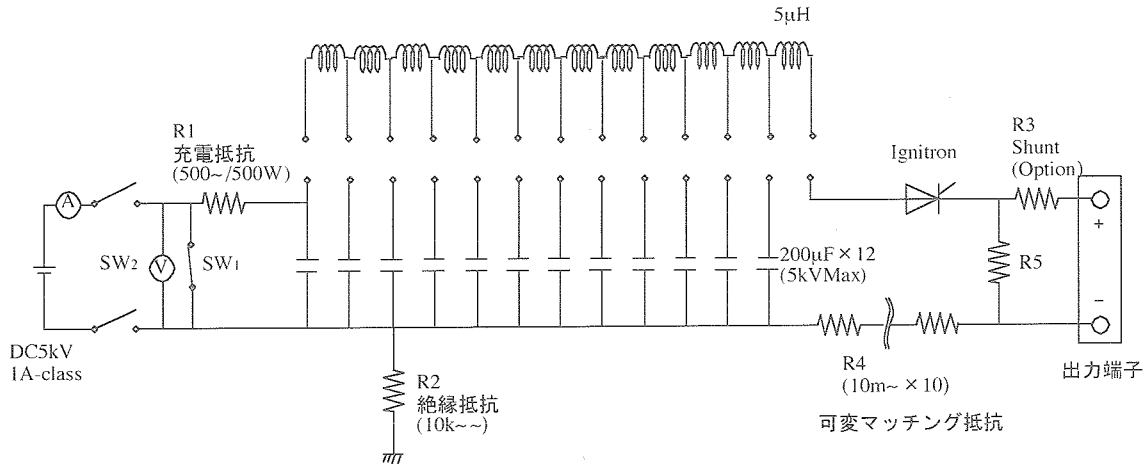


Figure 5. A Schematic Drawing of Pulse Forming Network, (PFN).

### 3. 成果概要

#### (1) MPD アークジェット放電部の製作

MPD アークジェット放電部の製作を完了し、放電部に高速電磁弁、高速電磁弁駆動用電源装置、推薬供給系などを組み込み真空チャンバーへ取り付けを完了した。図6に真空チャンバー壁（大気側）に取付けられた放電部の電力端子と放電部に推進剤ガスを供給する高速電磁弁が取付けられている様子を、図7には真空チャンバー内部の様子とチャンバーの左壁に取付けられた放電部に正対する静電プローブの設置の様子を示す。

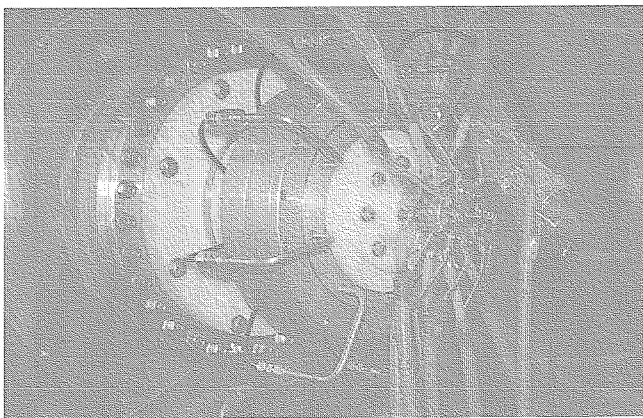


Figure 6. Fast Acting gas Valve (FAV).

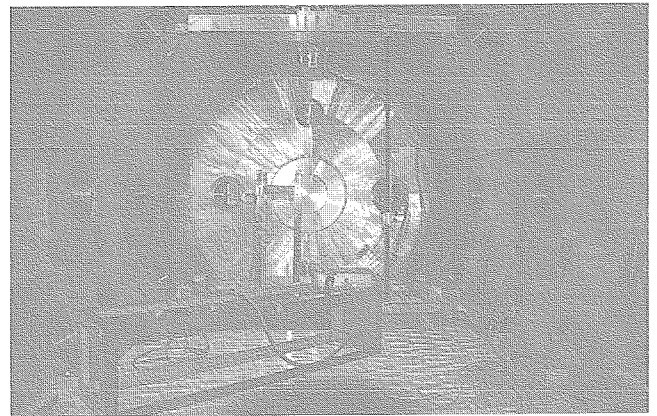


Figure 7. Configuration of Vacuum Chamber Set-up.

#### (2) パルス整形回路の製作

2. 研究概要に記述したように、大電流を得るためのパルス整形回路を設計しその製作を完了した。筐体に12段のコンデンサーとインダクタンスコイルおよびイグナイトロンなどが収納され、図8に示すような最高充電電圧5kVのPFNが組上げられた。高電圧直流電源およびトリガー回路などの周辺地上試験装置などの組上げも終了し、MPD アークジェット放電部との整合試験を

開始した。整合試験はまだ始まったばかりであるが、パルス形状については後述するようにより整形された矩形波にするため若干の調整が必要である。調整はインダクタンスコイルの調整とマッチング抵抗の調整による。総合インピーダンスが増加すると放電部への導入電流が制限されるため、本来太陽プラズマシミュレーターに要求される生成プラズマ量とのかねあいが難しくなる。今後、引き出せる性能と折り合いをつけながらパルス波形の調整を行う予定である。



Figure 8. Pulse Forming Network (PFN).

### (3) プラズマ噴射試験

パルス整形回路と MPD アークジェット放電部との整合試験を行い、図9のようにプラズマ噴射が正常に行われることが確認できた。図9は PFN に4kV で充電し、FAV 貯気槽に100kPa の圧力で推進薬にアルゴンを使ったときの放電電流波形である。パルス波形の準矩形部分の電流値はまだ計測系の校正を行っていないので正確に記述できないがおよそ12kA であろうと推察される。パルス放電時間はおよそ1msec である。また、その時得られた MPD アークジェット放電部のプラズマ噴射の様子を図10に示す。

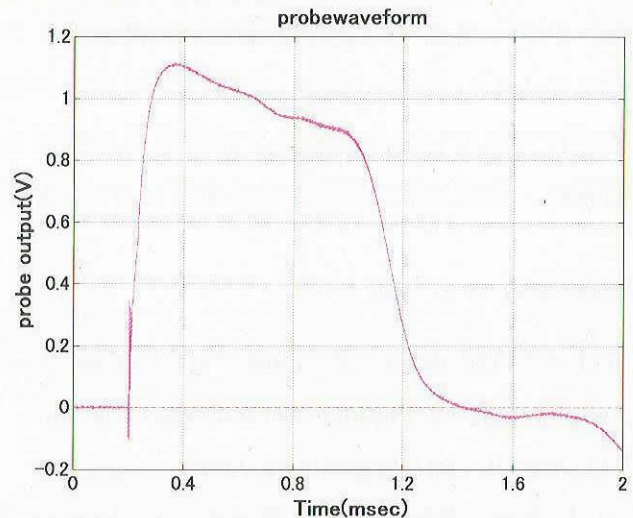


Figure 9. Discharge Waveform.

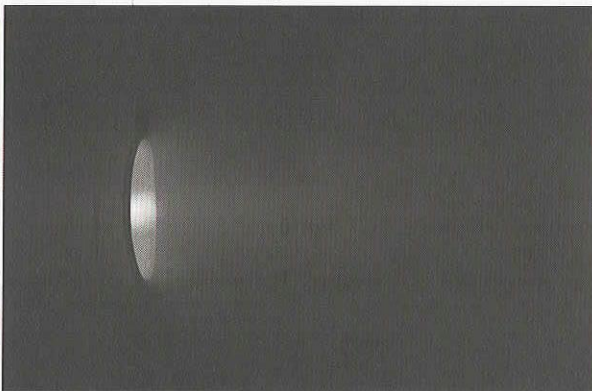


Figure 10. Plasma Plume from Discharge Head.

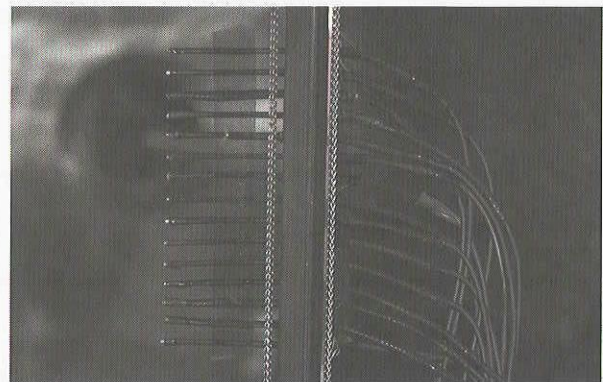


Figure 11. Plasma Probes.

計測項目としては、真空度、ガスパルス波形、放電電圧、放電電流、放電時間、プラズマ密度、プラズマ分布、プラズマ速度などを当面取得すべき項目とし、パラメタには推進剤ガス種類、推進剤ガス供給量、PFN 充電電圧とする。現在用いられている静電プローブを図 1 1 に示す。今後静電プローブの改良などを行い放電プラズマの数密度および速度などの計測を予定している。

#### 4. まとめ

磁気セイルの実験的研究に必要な模擬太陽プラズマ発生装置として MPD アークジェット放電部およびパルス整形回路の設計・製作を終了した。現在この装置の性能測定を開始したところで、今後、性能諸元を評価する予定である。評価を得て目標である太陽プラズマのシミュレーターとなるべき性能を確保する改良点があれば改修または対策などを行う予定である。今後の課題となる点は、MPD アークジェット放電部に関しては、頻度が少ないものの放電室内部での異常放電が観察されるので異常放電経路を根絶する改修が必要となろう。パルス整形回路については 10 kA を超える大電流放電であるため、電氣的ノイズによる誤動作が発生する場合が予想される。特にグラウンドアース周りの迷走電流や空中電磁ノイズの感受性を低減する回路設計・改修対策が必要になるかもしれない。また、今後はプラズマの物理計測を行い相似則が成り立つ領域のプラズマ生成が行われているかどうかを確認する必要がある。なお、本研究は宇宙科学研究本部の船木一幸助教授、筑波大学大学院小嶋秀典君との共同研究である。

#### 【参考文献】

- 【 1 】 H. Yamakawa, K. Fujita, H. Ogawa, S. Nonaka, H. Kuninaka and I. Funaki, “Planetary Exploration by Plasma Assisted Magnetic sail”, Proc. 12<sup>th</sup> Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 2002, Sagamihara, Japan.
- 【 2 】 R.M. Winglee, J. Slough, T. Xiamba and A. Goodson, “Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion”, J. of Geophysical Research, Vol. 105, No.A9, Sept. 2000.
- 【 3 】 H. Kojima, T. Minami, I. Funaki, H. Yamakawa, K. Fujita, H. Ogawa, H. Nishida and Y. Nakayama, “Experimental study of Magnetic Sails”, Spacecraft Charging Technology Conference, March 2005, Tsukuba, Japan.
- 【 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, pp266-pp269, 2003.
- 【 5 】 K. Kojima, T. Minami, I. Funaki, H. Yamakawa, K. Fujita, H. Ogawa, H. Nishida and Y. Nakayama, “Experimental Study of Magnetic Sails”, Spacecraft Charging Technology Conference, March 2005, Tsukuba, Japan.
- 【 6 】 南翼、船木一幸、山川宏、中山宣典。「磁気セイルの推進性能に関する実験的研究」、ISAS Research Note #790、2005年3月。
- 【 7 】 清水幸夫、「飛行用 MPD アークジェットの研究」、東京大学学位論文、平成 11 年 12 月。