

## MPD アークジェットを用いた磁気プラズマセイルのシミュレーション実験

大塩 裕哉(総研大), 上野 一磨(JAXA/ISAS), 矢守 章(JAXA/ISAS),  
船木 一幸(JAXA/ISAS), 堀澤 秀之(東海大), 山川 宏(京大)

### 1. 背景および目的

太陽からは太陽風と呼ばれる超音速のプラズマ流が絶えず噴出している。このプラズマ流と地球の地磁気との干渉により、プラズマ流が進入することができない領域、磁気圏が形成される。宇宙機に搭載したコイルによる人工磁場と太陽風との干渉により、人工の磁気圏を形成し、太陽風プラズマ流を受け止めることにより太陽風の運動量を宇宙機の運動量へ変換し推力を得る推進システムである磁気セイルが Zubrin らによって考案された[1]。磁気セイルの推力  $F$  は磁気圏サイズと太陽風動圧によって決まり、

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho_{sw} u_{sw}^2 (\pi L^2) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、抗力係数を  $C_D$ 、太陽風プラズマの密度を  $\rho_{sw}$ 、流速を  $u_{sw}$ 、磁気圏サイズを  $L$  (Fig.1 参照) とした。(1)式で示したように推力は磁気圏サイズ  $L$  の 2 乗に比例するため、推力を大きくするには大きな磁気圏を形成する必要がある。しかし、Zubrin らの見積りでは、20N の推力を得るためには、直径 64 km という非現実的なコイルが必要となり、推力 1 N クラスを仮定しても直径数 km のコイルが必要である。この問題を解決する方法として Washington 大の Winglee らがプラズマを宇宙機から噴出することで風船のように磁気圏を拡大させる Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2) を考案した[2]。M2P2 の研究は設計の誤りを指摘された後、中断されてしまった。しかし、日本において M2P2 のアイデアを踏襲しプラズマ物理を正確に捉えた上で、実機開発を目指した磁気プラズマセイル(MPS)の研究が進められている[3]。これまでに、数値解析・超電導コイル等の搭載機器の開発、そして実験室におけるスケールモデル実験が行われてきた。実験室実験では、上野らによって磁気セイルの推進特性評価が行われた[4]。しかし、

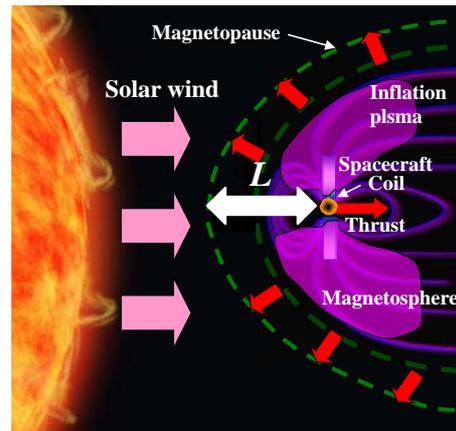


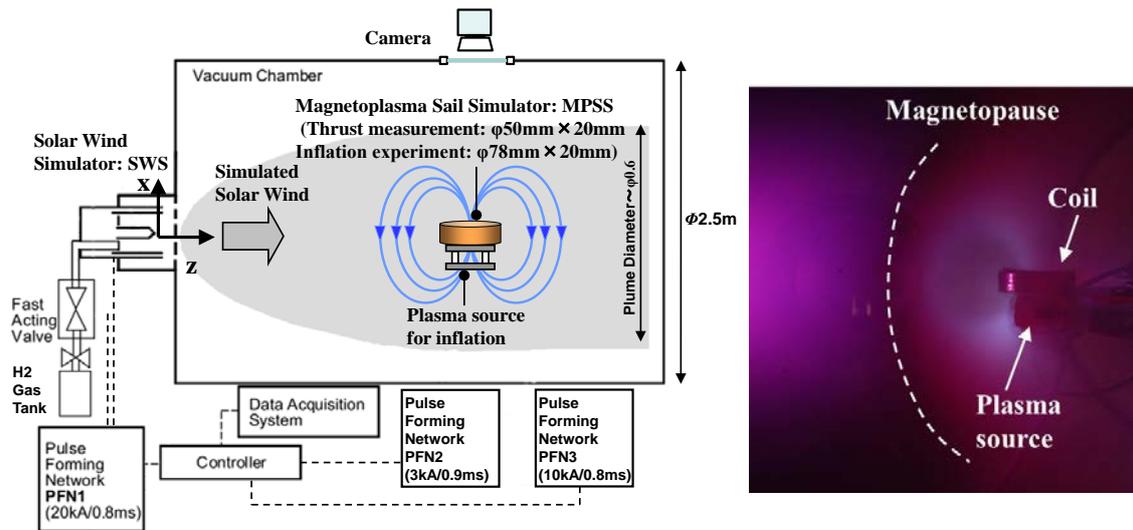
Fig. 1 Magnetoplasma Sail(MPS).

この計測は、宇宙機の姿勢を固定した計測であった。磁気プラズマセイルについてはプラズマ噴射により 7% の磁気圏拡大を達成し、磁気圏拡大が実験的に実現した[5]。

本報告では、様々な迎角に対する推力評価と磁気圏拡大の改善を行った結果について報告する。

### 2. 地上シミュレータ

本実験は JAXA 宇宙科学研究本部内にある Space Science Chamber ( $\phi 2.5$  m, 全長 5 m) においてチャンバ内圧力約  $5 \times 10^{-5}$  Pa の真空下において行った。地上シミュレータ (Fig. 2 (a)) は太陽風シミュレータ (Solar Wind Simulator: SWS) ・ MPS 宇宙機を模擬するソレノイドコイルと磁気圏拡大用のプラズマ源 (MPS Simulator: MPSS) から構成される。SWS として、1 ms の準定常動作の水素 MPD アークジェットを用いている。磁気圏拡大用のプラズマ源として、板状の電極を平行に配置した矩形型 MPD アークジェットを採用した。Figure.2(b)にプラズマ噴射なしの MPS の写真を示す。左側より太陽風模擬プラズマが流れて



(a) Schematic view of MPS Experiment. (b) Typical MPS Experiment w/o Plasma Injection.  
Fig. 2 Ground Simulator of MPS.

Table 1 Typical Parameter.

Solar wind simulator (SWS)	
Electron density	$4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
Electron temperature	$\sim 1 \text{ eV}$
Velocity	$22 \text{ km/s}$
Magnetoplasma sail simulator (MPSS)	
Coil	
Discharge current	$0.2 \text{ kA}$
Magnetic moment	$2 \times 10^{-5} \text{ Tm}^3$
Magnetic field at coil center	$\sim 0.1 \text{ T}$
Plasma source	
Electron density	$1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Electron temperature	$\sim 1 \text{ eV}$
Velocity	$15 \text{ km/s}$

きている。右側に設置されたコイルの作る磁場とプラズマ流との干渉の様子が見える。コイルの下には矩形型水素 MPD アークジェットが設置されている。各シミュレータの代表的パラメータを Table.1 に示す。

### 3. 磁気セイルの迎角と推力の関係

ダイポールの向きと太陽風プラズマ流との角度を迎角  $\alpha$  と定義する (Fig.3(a)参照)。この迎角の違いにより、異なる構造の磁気圏が形成される。磁気圏の構造や電流分布が異なることが過去の研究より実験的に調査されている [6]。そこで、本研究では迎角と推力の関係を明らかにすることを目的として推力計測を

行った。

Figure.3(a)に推力計測の実験装置概略図を示す。推力計測は、簡単のため磁気圏拡大を行わない磁気セイルの条件で実験を行った。MPSS は  $\phi 50 \text{ mm}$  のソレノイドコイルのみで構成され、SWS の下流  $750 \text{ mm}$  の位置に設置されている。磁気セイルの推力計測には、振り子式スラストスタンドを用いたインパルス計測から推力を求める方法を採用した。本実験装置は約  $1 \text{ ms}$  の準定常動作であり、測定したインパルス装置の動作時間で割ることで、生じた力が求まる。スラストスタンドは太陽風流れと同一方向にのみ揺れるよう、長さ  $1 \text{ m}$ 、幅  $20 \text{ mm}$  のアルミ材を使用し、真空チャンバーの天井から 4 本のステンレスワイヤーによって吊り下げ、スラストスタンドの変位は後方のガラスフランジを通してチャンバー外に設置したレーザー変位計によって計測を行った。スラストスタンドはシミュレータ動作時間よりも十分長い約  $1.5 \text{ s}$  の周期で振動し、加えられた力積に比例した振幅で揺れる。単振子を用いて既知の力積をスラストスタンドに与えることで校正を行い、スラストスタンドの最初の最大振幅を比較し、変位から力積を得る。コイルはスラストスタンドから前方に突き出す用に設置し、スラストスタンドによるコイル周囲への流れへの影響を抑えている。本研究では、Fig3(a)に示すよ

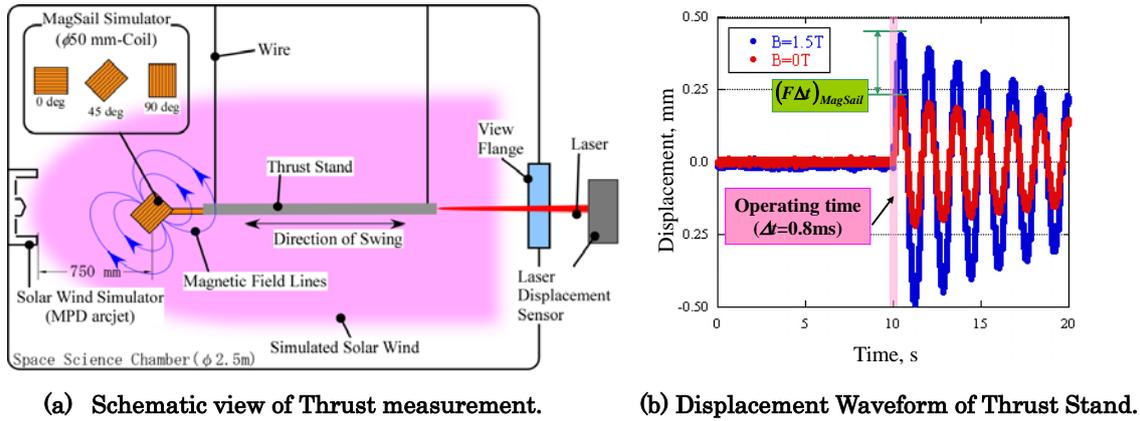


Fig. 3 Thrust Measurement of the Magsail.

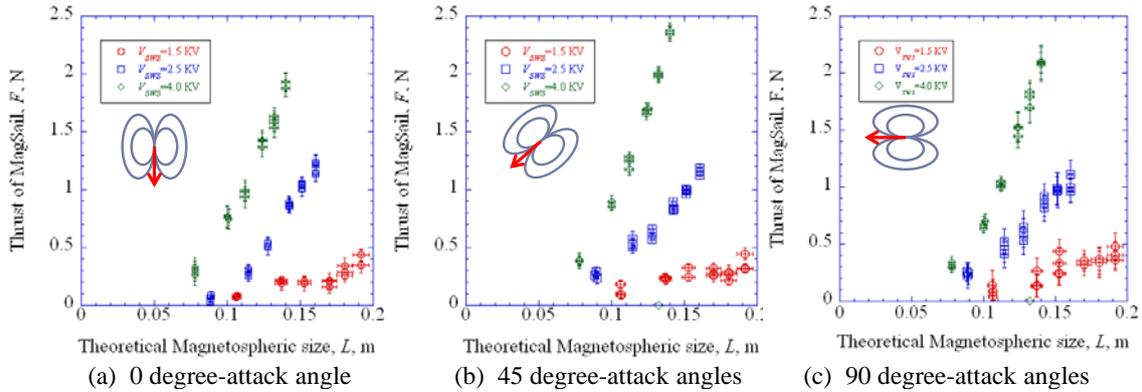


Fig. 4 Thrust of Magnetic Sail (Dynamic pressures of the solar wind:  $1.7 \text{ N/m}^2$  ( $V_{sws}=1.5 \text{ kV}$ ),  $4.7 \text{ N/m}^2$  ( $V_{sws}=2.5 \text{ kV}$ ),  $10.7 \text{ N/m}^2$  ( $V_{sws}=4.0 \text{ kV}$ ),  $J_{coil}= 100\text{-}2000 \text{ A}$ ).

うに、迎角  $\alpha$  が  $0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  の結果について報告する. コイルを搭載したスラストスタンドの太陽風流れに対する面積によって、コイル磁場を生成しなくても、太陽風の圧力によりスラストスタンドは揺れる. そのため、コイルに生じる電磁力による力のみを評価するために推力は以下のように求めた.

$$F_{Magsail} = \frac{(F\Delta t)_{Magsail}}{\Delta t} = \frac{(F\Delta t)_{total} - (F\Delta t)_{SWS}}{\Delta t} \quad (2)$$

$F_{Magsail}$  は推力,  $\Delta t$  は動作時間  $0.8 \text{ ms}$ ,  $(F\Delta t)_{Magsail}$  は磁気セイルの力積,  $(F\Delta t)_{total}$  は太陽風が磁場・コイル・スラストスタンドと干渉することによって生じる力積,  $(F\Delta t)_{SWS}$  は太陽風がコイルとスラストスタンドと干渉して生じる力積である. Figure 3(b)にスラストスタンドの変位波形の一例を示す. コイル磁場を生成していない状態で、太陽風のみがコイルとスラストスタンドに衝突した時の変位が、Fig.3(b)の赤い線であり、コイルに  $2\text{kA}$  の電流を流し磁気圏

を形成した場合の変位が青い線である. この両者の差分を動作時間で割ることで推力を算出している.

Figure.4 に推力計測結果を示す. (a)(b)(c)がそれぞれ、 $0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  の迎角での撮像より得られた磁気圏サイズと推力計測結果の関係を示している. 色の違う印は、それぞれ太陽風動圧を変化させたものであり、各太陽風動圧においてコイル電流を変化させることにより磁気圏サイズを変化させている. すべての条件において、磁気圏サイズが大きくなることで、推力が増加していることが分かる.  $V_{sws}=4.0 \text{ kV}$  の推力の最大値( $J_{coil}=2.0 \text{ kA}$ )を各迎角について比較すると、 $2\text{-}2.5 \text{ N}$ と約  $20\%$ の差が生じているが、他の条件での差は更に小さく迎角の違いによる推力の違いは小さく、推力は磁気圏サイズに強く依存していることを実験的に示した.

#### 4. 磁気圏拡大の改善

過去の研究では、MPD アークジェットを磁気圏拡大のプラズマ源として利用していた. しかし

し、その形状が原因となりダイポール磁場の極方向への噴射に限定されていた。本研究では、新たに矩形型の MPD アークジェットを磁気圏拡大用のプラズマ源として採用し、赤道方向への噴射を実現した。各シミュレータのパラメータは Table.1 に示す。Fig.5 にプラズマ噴射による磁気圏拡大の比較を示している。画面上側がプラズマ噴射あり、下側がプラズマ噴射なしの写真である。左側から太陽風模擬プラズマ流が流れてきており、右側に MPSS が設置されている。磁気圏境界に対応する円弧状の暗い部分がプラズマ噴射なしに比べて 20 mm ほどプラズマ流上流側へ拡大していることが分かる。

Fig.6 に元のコイル磁場で無次元化したプラズマ噴射ありの条件、なしの条件における磁場分布を示す。磁気圏内部では、太陽風により磁場が圧縮されるため、磁気圏の磁場は元のダイポール磁場より強くなり、磁気圏の外では弱くなるのが地球磁気圏等の観測結果より知られている。本研究では、無次元化された磁場が 1 となる位置を磁気圏境界と定義する。プラズマ噴射なしの条件では、磁気圏境界は 138 mm であるが、プラズマを噴射することにより、173 mm まで磁気圏境界が移動したことが分かる。これより、7%の磁気圏拡大から 23%の磁気圏拡大へと改善することができた。この磁気圏拡大は 1.5 倍の推力増加に相当する。

## 5. 結論

スペースプラズマ共同利用設備である大型スペースサイエンスチェンバに、MPD アークジェットをプラズマ源として用いた磁気プラズマセル地上実験システムを構築し、推力計測による磁気セルの迎角と推力の関係の調査と、新プラズマ源を用いた磁気圏拡大の改善の試験を行った。主な結果を以下に示す。

- ・  $0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  の 3 つの迎角の条件で推力計測を行った。どの迎角においても、磁気圏サイズが大きくなることで推力が増加することを示した。迎角による推力の大きさの違いは 20% 以下と小さいことが分かった。

- ・ 平行平板型の MPD アークジェットをプラズマ源として利用した磁気圏拡大試験を行った。これまでの 7%の磁気圏拡大から 1.5 倍の推力増分に相当する 23%の磁気圏拡大へと改善した。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(A) (No. 21246126)), 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。本研究にご協力いただいた, JAXA 宇宙科学研究所の山本育男氏に深く感謝する。

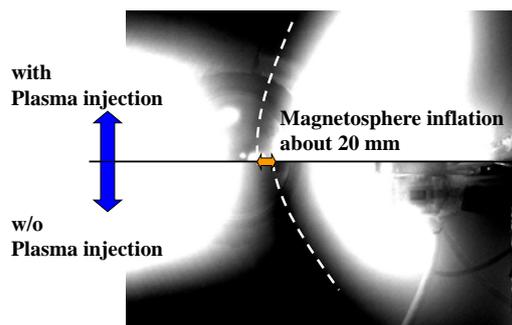


Fig. 5 Comparison of magnetospheric size between with and w/o plasma injection.

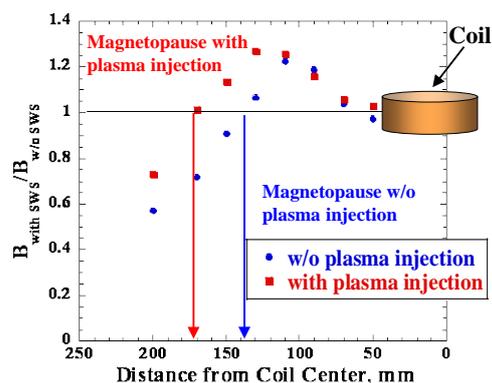


Fig. 6 Normalized magnetic field distribution.

## 参考文献

- [1] Zubrin, R., Andrews, D. "Magnetic Sail and interplanetary travel", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.28, No.2, pp.197-203, 1991.
- [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] 船木一幸, 山川 宏, 藤田和央, 野中 聡; "磁気プラズマセルによる深宇宙探査", *日本物理学会誌*, Vol.58, No. 4, pp. 266 - 269, 2003.
- [4] 上野 一磨, 大塩 裕哉, 船木 一幸, 山川 宏, 堀澤 秀之; "磁気セルの推力特性に関する実験研究", *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 59, 2011, pp.229-235 .
- [5] Oshio, Y., Ueno, K., and Funaki, I., "Experimental Investigation of Magnetoplasma Sail: Magnetosphere Inflation by Equatorial Ring Current," *32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-186*, 2011.
- [6] 上野 一磨, 大塩 裕哉, 矢守 章, 船木 一幸; "MPD アークジェットを利用した 磁気プラズマセルのスケールモデル実験", 平成 22 年度スペースプラズマ研究会