

大口径模擬太陽風と磁気プラズマセイルの実験

上野一磨 (ISAS/JAXA), 堀江優之 (長岡技術科学大学・院), 大塩裕哉 (ISAS/JAXA), 船木一幸 (ISAS/JAXA)

1. はじめに

磁気プラズマセイル (MPS, Magnetoplasma Sail) は、太陽風プラズマと磁場の大規模干渉を人工的に作りだし、推進力を得る。スペースプラズマ実験設備を用いた実験では、これまでに原理実証やコード検証などの成果を収めてきた[1-8]。今年度も、引き続き大型スペースサイエンスチャンバと、先端プラズマ推進実験用チャンバ併用し、磁気プラズマセイルと磁気セイルのシミュレーション実験を行った。今年度実施した、大口径模擬太陽風の改良、磁気プラズマセイルの推力評価、磁気セイル推力への表面状態の影響評価予備試験について報告する。

2. 磁気プラズマセイル/磁気セイル

太陽風と呼ばれる太陽起源のプラズマ流を磁場や電場により受け止めて推進するものは太陽風帆と呼ばれ、前者には磁気セイル/磁気プラズマセイル、そして後者には静電セイルなどがある。太陽風と人工磁場の干渉を利用した推進システムの中で最も単純なものとして、磁気セイル(MS, MagSail, Magnetic Sail)があるが、宇宙機に搭載した超伝導コイルにより生成する磁場で太陽風を受け止める磁気セイルでは、実用的な推力を得るには直径数十 km ものコイルを宇宙で広げる必要がある[9]。このような巨大なコイルの打ち上げ・展開は現在の技術では困難である。磁気プラズマセイルではこの磁気セイルの問題点を解決する手段として、プラズマアシストによる磁場展開を用いる[10]。これは小さなコイルで磁場を生成した後に、その内側からプラズマ噴射を行うことでその磁場を拡大展開するという手法であり、これにより比較的小型なコイルでも実現できる。

2.1. 推力 F とトルク T

磁気プラズマセイルをはじめ、太陽風と磁場の相互干渉を利用した推進システムの推力 F は以下の式で表すことができる。

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho u^2 S \quad (1)$$

ここで C_d は推力係数、 ρ と u は太陽風の密度と速度、 S は代表面積である。一般的に、 C_d は抗力係数を示すが、ここでは推力係数と呼ぶ。この式から太陽風動圧と代表面積の積で推力が決まり、太陽風動圧が一定だとすると、大推力を得るには代

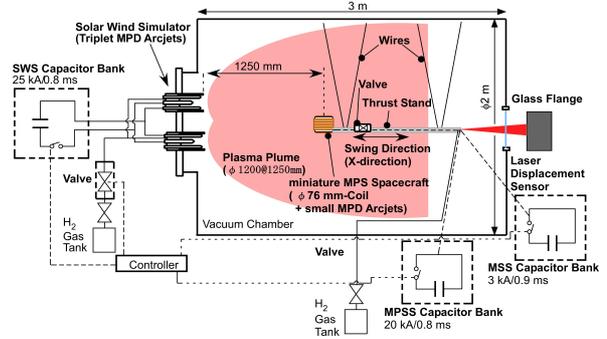


図1 磁気プラズマセイル地上シミュレータと推力計測時のセットアップ概要図 (PFN の構成は従来のもの)

表面積を大きくすればよいことが分かる。 C_d 値は、磁気圏境界面におけるイオンのラーマ半径と代表長の比 r_{Li}/L によって以下のように整理されることが分かっている[12]。

$$C_d = \frac{3.4}{(r_{Li}/L)} \exp\left(\frac{-0.22}{(r_{Li}/L)^2}\right) \quad (r_{Li}/L > 1)$$

$$C_d = 3.6 \exp\left(\frac{-0.28}{(r_{Li}/L)^2}\right) \quad (r_{Li}/L < 1) \quad (2)$$

この時の代表長は、太陽風動圧と磁気圧の釣り合いから求まる磁気圏サイズ L として

$$L = \left(\frac{M^2}{8\pi^2 \mu_0 \rho u^2}\right)^{1/6} \quad (3)$$

である。 M はコイルの磁気モーメントで、

$$M = \mu_0 n I S_{Coil} \quad (4)$$

である。

2.2. 磁場拡大 (磁気インフレーション)

本実験の磁気プラズマセイルでは、磁場の凍結現象を利用した磁場拡大 (磁気インフレーション) を用いて磁気圏を拡大する。磁場の凍結により、磁場がプラズマとともに動くことでより遠方に磁場を広げることができる。それには、ある位置において以下の条件を満たす必要がある。

$$r_{Li_inf}/L_{inf} < 1 \quad (5)$$

$$\beta_k = \frac{\rho_{inf} u_{inf}^2}{B_{inf}^2/\mu_0} \geq 1 \quad (6)$$

ここで、 L_{inf} はコイル中心からの距離、 r_{Li_inf} は L_{inf}

における磁場拡大用噴射プラズマのイオンラーマ半径, β_k は磁化プラズマの無次元量, $\rho_{inf} u_{inf}^2$ は噴射プラズマの動圧, B_{inf} は L_{inf} における磁場強度を表す.

また, 磁気圏拡大の条件として, 磁場の凍結が始まる位置は磁気圏内にあることが必要であり,

$$L_{inf} < L \quad (7)$$

となる. これらの条件と式, そして磁場の減衰率が磁場拡大によって 3 乗減衰が n 乗減衰になるとすると, 磁気圏の拡大率は 1 次元モデルを考えることで

$$\frac{L_{MPS}}{L_{MS}} = \left(2^{6/n-2} \left(\beta_k^{1/2} \left(\frac{\rho_{inf} u_{inf}^2}{\rho u^2} \right)^{3/n-1} \right) \right)^{1/6} \quad (8)$$

のように記述できる. ここで, L_{MPS} , L_{MS} はそれぞれ磁気プラズマセイルと磁気セイルの磁気圏サイズを表す.

3. 磁気プラズマセイル地上シミュレータと計測装置[12-15]

実験はスペースサイエンスチャンバおよび先端プラズマ推進実験用チャンバに構築した磁気プラズマセイル地上シミュレータを使用した (図 1). このシミュレータは, 太陽風シミュレータ (SWS) により模擬太陽風を供給し, そのプラズマ流中に磁場を形成する磁気セイルシミュレータ (MSS), 磁場拡大用プラズマを生成する磁気プラズマセイルシミュレータ (MPSS) の 3 つのシミュレータから成る. MPSS による噴射プラズマの有無により, 磁気セイルと磁気プラズマセイルの実験が可能である. 全てのシミュレータは, Pulse Forming Network (PFN) と呼ばれる LC 梯子回路を用いて電力が供給され, イグナイトロンによりスイッチングされる. 各シミュレータの駆動開始時間は遅延ジェネレータによって管理され, 基本的なシーケンスでは, ガス放出から 9.8ms 後に磁気セイルシミュレータによる磁場生成を開始, 10ms 後に磁気プラズマセイルシミュレータからの磁場拡大用プラズマを噴射, 同時に太陽風シミュレータからの模擬太陽風プラズマ流を生成することで磁気プラズマセイルを約 1ms の準定常で模擬する.

磁気セイルシミュレータは, 直径 76mm, 20 巻のソレノイドコイルを用い, 半値幅で 0.9ms の間, 磁場生成が可能である. 磁気プラズマセイルシミュレータは, 2 器の最小級 MPDarcjet をコイル内に配置し, コイルの極軸方向に上下に 0.8ms 間噴射することで磁場拡大制御を行う. 磁気セイルシミュレータと磁気プラズマセイルシミュレータを組み合わせることで, 本実験ではミニチュア磁気プラズマセイル宇宙機としている. 太陽風シミュ

表 1 太陽風シミュレータ用 PFN の構成

	従来構成	新構成
コンデンサ容量	200 μ F/段	400 μ F/段 (200 μ F \times 2)
インダクタンス	5 μ H	5.72 μ H
アノード電流分割抵抗	なし	0.062 Ω
カソード電流分割抵抗	なし	0.125 Ω
格子数	12 段	6 段
特性インピーダンス	0.166 Ω	0.12 Ω
動作時間	1 ms	0.5 ms

レータは, 3 器の MPDarcjet をチャンバフランジに設置し, チャンバ長手方向に模擬太陽風を生成する.

太陽風シミュレータに用いている MPDarcjet は, 安定したプラズマ生成を可能にするため, 分割陽極型を採用し, これにより大口径模擬太陽風が生成可能となっている. 本実験では, 太陽風プラズマ, 磁場拡大用プラズマともに水素を用いている.

推力測定装置は, 振り子式のスラストスタンドを採用している. スラストスタンドは, 4 本のステンレス製ワイヤによってつり下げられており, また, そのワイヤに角度を持たせることでスタンドが 1 軸方向にのみ振動するように制限している. このスタンドは, シミュレータの動作により磁気圏を生成する $\Delta t = 0.8ms$ の間生じる推力 F によってスラストスタンドに力積 $F\Delta t$ が生じ, スラストスタンドは減衰振動となる. この振動を, 真空チャンバ外に設置したレーザー変位計 (KEYENCE LK-G500) によって計測する. また, 既知の力積を単振り子によってスタンドに与えることで力積とスラストスタンドの最大振幅との較正を行っている. 最大振幅から得られた力積を用いて, 下記式より推力を算出した.

$$(F\Delta t)_{MagSail} = (F\Delta t)_{SWS+Coil} - (F\Delta t)_{SWS} - (F\Delta t)_{Coil} \quad (9)$$

$$(F\Delta t)_{MPS} = (F\Delta t)_{SWS+Coil+Inf} - (F\Delta t)_{SWS+Inf} - (F\Delta t)_{Coil} \quad (10)$$

$$F = \frac{(F\Delta t)}{\Delta t} \quad (11)$$

ここで, 添え字はそれぞれ $SWS+Coil$: 太陽風シミュレータとコイルのみを駆動, SWS : 太陽風シミュレータのみ駆動, $Coil$: コイルのみ駆動, $SWS+Coil+Inf$: 全てのシミュレータ駆動, $SWS+Inf$: 太陽風シミュレータと磁場拡大用プラズマ源のみを駆動を意味する.

4. 大口径模擬太陽風の改良

前項までに述べたように, 模擬太陽風は 3 器の MPDarcjet を PFN 電源によって駆動する. 使用する PFN 電源は, 一昨年度までのコンフィグレーションである 1 器の MPDarcjet を駆動するために設

計されたものであったため、今年度、動作時間を半分にすることで放電電流を増やし、動作レンジを広げる改良を行った(表1)。ただし、本報告内の磁気プラズマセイル/磁気セイル実験は、従来の構成で行っている。

構成変更後、PFN 充電電圧 4kV において放電電流 16.2kA (5.4kA/器) を達成し、下流 1250mm において、直径 1200mm、流速 28km/s、数密度 $3.34 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の一様な大口径模擬太陽風の生成を確認した。

5. 磁気プラズマセイルの推力評価

磁気プラズマセイルの推力評価は、太陽風と磁場拡大用プラズマの動作条件を太陽風流速 26 km/s、太陽風数密度 $3.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、磁場拡大用プラズマ流速 30 km/s 磁場拡大用プラズマ数密度 $5.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と固定し、磁場強度を 0.04, 0.62 T と変化させて行った。表 1 に実験条件をまとめる。

実験中の様子を CCD カメラ(シャッター開放で撮影) で捉えたものを図 2 に示す。写真奥に見える 3 つの MPDarcjet から太陽風が供給されている様子が分かる。また、写真の右側にスラストスタンドが見え、その先端に設置されたミニチュア磁気プラズマセイルから上下に磁場拡大用プラズマが噴射されているのが確認できる。

磁気セイルの条件 ($P_{inj}=0 \text{ Pa}$)、すなわち磁場拡大をしていないオリジナルのコイル磁場と太陽風の干渉によって生じた推力は、0.04 T のとき、8.5 mN であり、 $P_{inj}=39 \text{ Pa}$ のプラズマ噴射により、35 mN の推力が確認された。また、コイル磁場 0.62 T の条件では、 $P_{inj}=0 \text{ Pa}$ において 45 mN の推力であったのが、 $P_{inj}=39 \text{ Pa}$ のプラズマ噴射により 95 mN となり推力の増加が確認された。式(8)に示した L_{inj}/L_{mag} を算出すると約 0.24 と 0.4 となる。それぞれの条件での推力増加は 4.1 倍と 2.1 倍であることから、 L_{inj}/L_{mag} が小さいほど推力増加が大きいことが分かる。

6. 磁気セイル推力への表面状態の影響評価予備試験

従来の磁気セイル/磁気プラズマセイルの実験は、宇宙機表面とも言えるコイル表面はポリイミドフィルムに覆われた状態で行われてきた。本試験では、コイル表面を導電性材料で覆い、かつその表面材の電位を変え、表面状態による推力への影響を簡単に評価した。導電性材料として、アルミ薄膜を使用し、アルミ薄膜の電位をグラウンド電位とフローティング電位にした場合の推力を計測した。図 3 に実験時の磁気圏と流れ場の様子を示す。磁気圏と流れ場に大きな違いは見られない。アルミ薄膜あり、グラウンド電位での試験では、準定常コイル電流の影響によって薄膜が一部破損

表 1 推力計測実験条件.

模擬太陽風 (下流 1250 mm で計測)		
数密度, m^{-3}	3.0×10^{17}	
電子温度, eV	3.5	
流速, km/s	26	
動圧, Pa	0.34	
磁場拡大用噴射プラズマ (噴射口から 50 mm で計測)		
数密度, m^{-3}	5.4×10^{19}	
電子温度, eV	1.9	
流速, km/s	30	
動圧, Pa	39	
ソレノイドコイル		
線材直径, mm	2	
コイル半径, mm	36	
巻き数, turn	20	
コイル電流, kA	0.11	1.9
磁気モーメント, Tm^3	1.3×10^{-5}	2.2×10^{-5}
コイル中心磁場強度, T	0.04	0.62
無次元パラメータ		
$\beta_k (= \mu_0 \rho_{inj} u_{inj}^2 / B_{inj}^2)$	0.0026 - 0.79	
L_{inj}/L	0.24 - 0.4	

表 2 推力計測結果.

コイル電流, kA	推力, mN	
	$P_{inj}=0 \text{ Pa}$	$P_{inj}=39 \text{ Pa}$
0.11	8.5	35
1.9	45	95

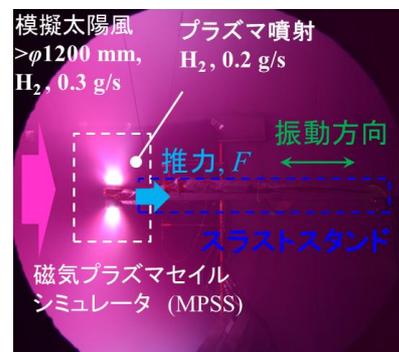
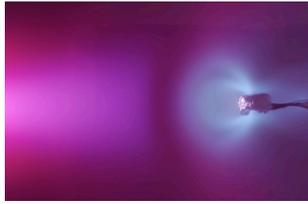


図 2 磁気プラズマセイル地上シミュレータ動作中の様子

した。今後はより強固なカバーに置き換えて実施する必要がある。推力計測の結果にも 10%程度の差が見られたが、今後より詳細に計測し評価していきたい。

7. まとめ

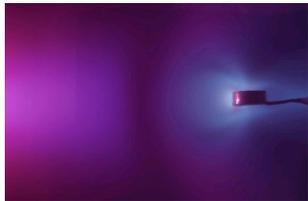
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用設備である先端プラズマ推進実験チャンバおよびスペースサイエンスチャンバにおいて、磁気プラズマセイル地上シミュレータによる磁気セイル/磁気プラズマセイルの実験研究を行った。今年度は、大口径模擬太陽風の改良、磁気プラズマセイルの推力評価、磁気セイル視力への表面状態の影響評価予備試験を実施した。模



a) アルミ薄膜あり，フローティング電位



b) アルミ薄膜あり（一部破損），グラウンド電位



c) アルミ薄膜なし，従来のコンフィギュレーション
 図3 磁気セイル周りの磁気圏と流れ場の様子
 (写真の縮尺は一定ではない， $I_{sws} = 9.8 \text{ kA}$ ， $\dot{m} = 0.4 \text{ g/s}$ ， $I_{coil} = 1.6 \text{ kA}$)

擬太陽風の改良により PFN 充電電圧 4kV において放電電流 16.2kA (5.4kA/器) を達成し，下流 1250mm において，直径 1200mm，流速 28km/s，数密度 $3.34 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の一様な大口径模擬太陽風の生成を確認した。磁気プラズマセイルの推力評価では，プラズマ噴射により最大 4.1 倍の推力増加を確認した。磁気セイル推力への表面状態の影響評価予備試験では，磁気圏や流れ場に影響はなかった。推力への影響は今後も継続して評価する。来年度は，複数コイルを用いた磁気セイル/磁気プラズマセイル実験や，宇宙機周囲にプラズマ電流を積極的に誘起するようなタイプの磁気プラズマセイルについて検討し，実験研究を進めて行く予定である。

謝辞

磁気プラズマセイル研究は，宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備にて実施した。

参考文献

1. 南翼，船木一幸，小嶋秀典，山川宏，中山宜典，小川博之，MPS 研究会，“磁気プラズマセイルの実験室シミュレーションの提案”，スペースプラズマ研究会 (2005)。
2. 船木一幸，上野一磨，木村俊之，綾部友洋，堀澤秀之，山川宏，“磁気プラズマセイルのスケールモデル実験”，宇宙関連プラズマ研究会 (2007)。

3. 船木一幸，上野一磨，木村俊之，綾部友洋，堀澤秀之，“MPD アークジェットを用いた磁気プラズマセイルの実験室実験”，スペースプラズマ研究会 (2008)。
4. 上野一磨，綾部友洋，大塩裕哉，船木一幸，堀澤秀之，“磁気プラズマセイルの実験室実験”，スペースプラズマ研究会 (2009)。
5. 上野一磨，大塩裕哉，船木一幸，“スペースサイエンスチャンバーを利用した磁気プラズマセイル実験”，スペースプラズマ研究会 (2010)。
6. 上野一磨，大塩裕哉，矢守章，船木一幸，磁気プラズマセイルのスケールモデル実験，スペースプラズマ研究会 (2011)。
7. 大塩裕哉，上野一磨，矢守章，船木一幸，堀澤秀之，山川 宏，“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”，スペースプラズマ研究会 (2012)。
8. 上野一磨，大塩裕哉，堀江優之，船木一幸，“磁気プラズマセイルおよび磁気セイルの実験室実験”，スペースプラズマ研究会 (2013)。
9. R. M. ZUBRIN and D. G. ANDREWS, “Magnetic Sails and Interplanetary Travel,” J. Spacecraft and Rockets, 28, 197 (1991).
10. R. M. WINGLEE, J. SLOUGH, T. ZIEMBA, and A. GOODSON, “Mini-magnetospheric plasma propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion,” J. Geophys. Res., 105, 20, 833 (2000).
11. K. FUJITA, “Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails” Journal of Space Technology and Science, 20, 2, 26-31 (2005).
12. I. FUNAKI, T. KIMURA, K. UENO, H. HORISAWA, H. YAMAKAWA, Y. KAJIMURA, H. NAKASHIMA and Y. SHIMIZU, “Laboratory Experiment of Magnetoplasma Sail, Part 2: Magnetic Field Inflation,” 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, IEPC-2007-94, Electric Rocket Propulsion Society (2007).
13. K. UENO, T. AYABE, I. FUNAKI, H. HORISAWA and H. YAMAKAWA, “Imaging of Plasma Flow around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment,” J. Plasma and Fusion Research SERIES, 8, 1585, Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (2009).
14. K. UENO, I. FUNAKI, T. KIMURA, H. HORISAWA and H. YAMAKAWA, “Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram-pendulum Method,” J. Propulsion and Power, 25, 2, 536 (2009).
15. 大塩裕哉，上野一磨，船木一幸，“大口径プラズマ流生成のための3台同時駆動準定常MPDアークジェットの開発”，第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，1D01 (2012)。
16. 堀江優之，上野一磨，大塩裕哉，江偉華，船木一幸，山川宏，“大口径模擬太陽風プラズマの高速・高密度化と磁気セイル実験”，平成25年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2013-003 (2012)。