

## 磁気セイル/磁気プラズマセイルに関する室内実験

上野一磨 (中京大学), 大島真 (東海大・工),  
大塩裕哉 (東京農工大学), 船木一幸 (ISAS/JAXA)

### 1. はじめに

地球周囲には磁気圏と呼ばれる地磁気が太陽風に閉じ込められた領域が形成されている。この磁気圏を宇宙機に搭載した超伝導コイルで人工的に生成すると、宇宙機は人工磁気圏の大きさに応じた推進力を得る。この太陽風と磁場の干渉を利用した推進システムは Zubrin によって提案された [9]。磁気セイルでは、超伝導コイル単体で磁気圏を形成するのでは宇宙機重量と展開方法が課題となり、現実的ではないことが分かっている。この課題について、宇宙機からのプラズマ噴射による磁気圏拡大 [10] によって解決しようというのが磁気プラズマセイルである。

本推進器の実験研究では、これまでに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チャンバおよびスペースサイエンスチャンバを利用して、推進原理の実証、推力特性評価、そして推進性能向上に関する研究を実施してきた [1-8]。本報告では、地上実験により形成された人工磁気圏について、磁気プラズマセイル及び磁気セイルに関する 3 軸磁気プローブを用いた 2 次元平面磁場計測について報告する。

### 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磁気セイル (MS, MagSail, Magnetic Sail) は、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 [9]。磁気プラズマセイルでは、プラズマ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実現できるというメリットがある。

#### 2.1. 推力 $F$

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、 $\rho$  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。

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。

### 3. 実験装置

#### 3.1. 磁気プラズマセイル地上シミュレータ [12-15]

実験は、先端プラズマ推進チャンバまたはスペースサイエンス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

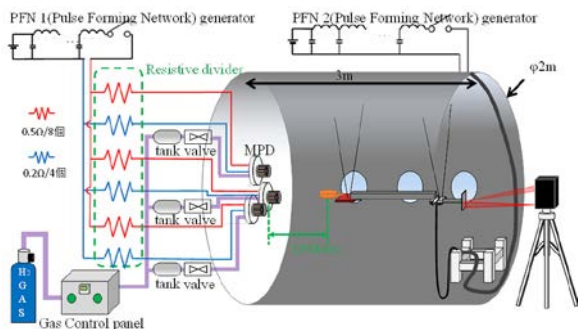


図 1 磁気プラズマセイル地上シミュレータと推力計測時のセットアップ概略図

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、基本的な動作シーケンスでは、ガス放出から 4.8 ms 後に磁気セイルシミュレータによる磁場生成を開始、磁場生成から 0.2 ms 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 0.5 ms 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。磁気プラズマセイル地上シミュレータ

### 3.2. 磁場計測装置

太陽風プラズマ流と磁場の干渉によって生じる磁場の変動を空間的・時間的に捉えるため、磁場の測定によく用いられる磁気プローブ法によって磁場を測定した。

磁気プローブ法はコイルに誘起される起電力が、そのコイルと鎖交する磁束の時間変化に等しく、磁束を打ち消す向きであるというファラデーの電磁誘導の法則に基づくものである。磁束密度の空間的変動に比べて十分小さいコイルであれば、そのコイルが囲む面積を  $S$ 、巻き数を  $N$ 、磁束密度を  $B$  として、誘起される電圧  $V$  は次の式で表される。

$$V = -NS \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

この電圧を積分回路で時間積分して磁束密度を求める。

$$B = -\frac{1}{NS} \int_0^t V dt \quad (6)$$

実験で模擬する太陽風と磁場の干渉スケール (~100mm) に対しプローブのサイズが小さい必要があるため。今回の磁場計測では、直径 10mm 程度のコイルを 3 軸巻いたサーチコイルを製作し (図 2)、3つのサーチコイルを用いて空間分解測定を実施した。ただし、小型の磁気プローブだけでは出力が小さく、磁場変化を明確に捉えることが難しいため、計測抵抗の電圧を差動増幅器と一般的な増幅器により 100 倍に増幅し、アナログの積分回路を通してから記録した。

積分器を通した後の磁気プローブ出力は電圧としてオシロスコープによって記録されるため、機器の校正を行う必要がある。校正にはφ100mm のケーブルを 1 層 2 巻にしたものを較正用コイルとし、MSS 用 PFN から電源を供給することで既知の準定常パルス磁場を生成、そのコイル中心磁場の理論計算値を磁気プローブ出力と比較することで行った。



図 2 サーチコイル

(測定時には絶縁シートにより覆われ保護される)

### 3.3. 実験条件

本実験では、磁場生成用コイルに直径 75mm のソレノイドコイルを使用し、コイル中心部に配置した 2 基の MPDarcjet により磁気圏拡大用プラズマを噴射した。コイル電流を 2kA とした際の噴射点における  $\beta$  値は 0.0026 となる。本条件では、拡大後の理論磁気圏サイズは 0.335m である。表 1 に実験場をまとめる。

磁場の計測点は、コイル磁気モーメント方向に 2 次元平面(X, Y)をとり、コイル中心を(0 mm, 0 mm)とした。この時、太陽風の中心は Y=0 mm の線上となる。計測位置は、X=70~330 mm を 30 mm 毎、Y=-120~120 mm を 60 mm 毎とした。

表 1 実験条件

コイル電流	2 kA
模擬太陽風電流	12 kA
拡大用 MPD 電流	12 kA
$\beta$ 値	0.0026
太陽風動圧	0.34 Pa
噴射点動圧	39.2 Pa
理論磁気圏サイズ	0.335 m

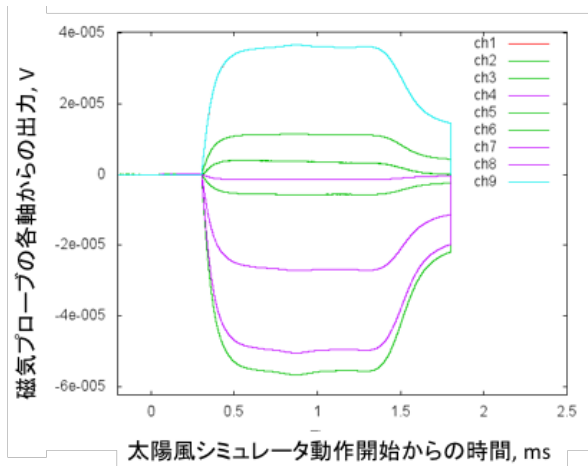
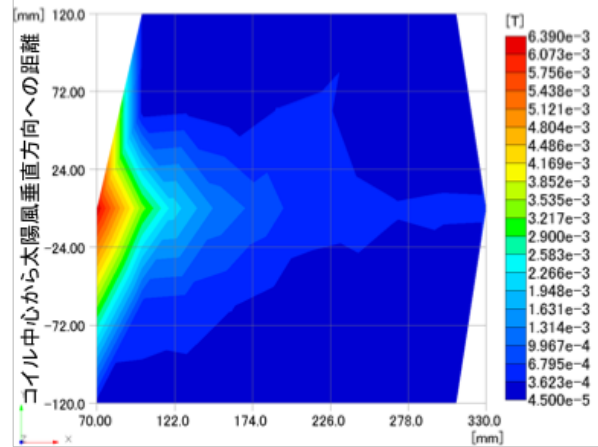


図 3 典型的な磁気プローブ出力波形  
(磁場のみ生成時, ch1~9 は 3 つの磁気プローブの各 3 軸の出力.)

#### 4. 実験結果

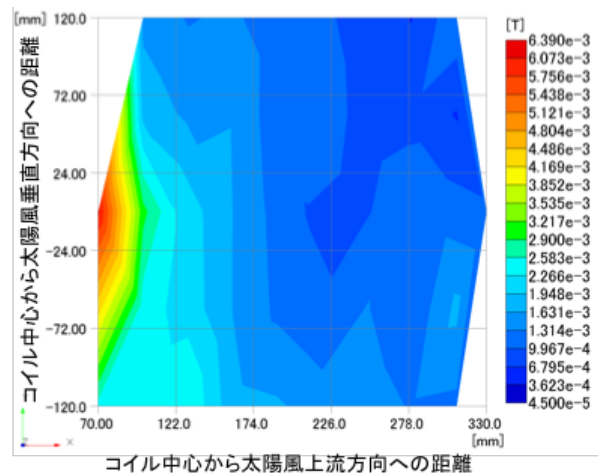
図 3 に磁場生成時の磁気プローブ出力波形の一例を示す。波形より、太陽風シミュレータ動作開始後 0.4ms から磁場生成が開始され 0.5ms-1.3ms 間の約 1ms において、定常な磁場が計測されていることが分かる。なお、計測器の設定の都合上、1.8ms においてプローブ出力が急激に 0V となっているように見えるが、実際は 1.8ms 以降はなだらかに 0V へ向かっている。磁気セル、および磁気プラズマセルの動作条件の下、各測定位置において、磁場計測を行い定常な部分の磁場強度の時間平均を磁場強度分布として図 4 および図 5 に示す。この時、磁場強度は、3 軸分の磁場強度から求めている。

磁気セルの磁場強度分布 (図 4) において、 $X=70\text{mm}$  での磁場強度が最大となり、太陽風上流方向に減衰している様子が確認できる。また、磁気プラズマセルの磁場強度分布 (図 5) でも同様のことが確認できる。磁気セルと磁気プラズマセルの磁場強度分布を比較すると、磁気プラズマセルの磁場強度が計測範囲全体に渡り磁気セルよりも強いことが分かる。これは、磁気セルの磁場がコイル中心からのプラズマ噴射によ



コイル中心から太陽風上流方向への距離

図 4 磁気セルの磁場強度分布  
(コイル中心(0.0))



コイル中心から太陽風上流方向への距離

図 5 磁気プラズマセルの磁場強度分布  
(コイル中心(0.0))

る磁場拡大によって広げられているためであり、結果から磁気圏拡大の影響を確認することができる。ただし、磁気圏拡大の評価では、各位置において軸毎に強度を比較しその強度変化から磁気圏の拡大を確認する必要があるため、現在、詳細な解析を実施中である。

#### 5. 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、磁気プラズマセル地上シミュレータによる磁気セル/磁気プラズマセルの実験研究を行った。今年度は、磁気セルおよび磁気プラズマセルが形成する磁気圏の磁場分布について、3 軸磁気プローブによる 2 次元磁場計測を行った。[29]. 来年度は複数コイルを用いた磁場を利用した

推力/推力ゲイン向上手法の実験をはじめ、推力向上策の試行を行っていく。

#### 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).
17. Y. Oshio, K. Ueno, I. Funaki, H. Yamakawa, Thrust Measurement of Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12, No. ists29 p. Pb\_45-Pb\_51 (2014).
18. Y. Oshio, I. Funaki, K. Ueno, H. Yamakawa, Experimental Investigation of Magnetoplasma Sail with High Beta Plasma Jet, AIAA-2014-3959, AIAA Propulsion and Energy (2014).
19. 上野一磨, 大塩裕哉, 船木一幸, 山川宏, 太陽系内高速飛翔を目指した磁気プラズマセイル推進機の研究, Plasma Conference 2014, 19aD2-2 (2014).
20. 大塩裕哉, 上野一磨, 船木一幸, 磁気プラズマセイルの噴射プラズマのプラズマ平衡解析, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2J16 (2014).
21. 大塩裕哉, 上野一磨, 堀江優之, 船木一幸, MPDアークジェットを用いたプラズマ風洞のプラズマ流計測, 第46回流体力学講演会/第32回航空宇宙シミュレーション技術シンポジウム, 2E15 (2014).
22. 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 (2014).
23. 大塩裕哉, 上野一磨, 船木一幸, 山川宏, プラズマ噴射による磁気プラズマセイルの推力増加の実験的研, 平成25年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-004 (2014).
24. Y. Oshio, K. Ueno, T. Sano, I. Funaki, Experimental and Numerical Investigation of Magnetosphere Inflation of Magnetoplasma Sail, The 33rd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2015-330 (2015).
25. 佐野達郎, 宇宙機からのプラズマ噴射を含んだ磁気プラズマセイルの3次元電磁流体全系解析, 静岡大学修士論文(2015).
26. 堀江優之, 大口径模擬太陽風を用いた磁気セイルの推進特性に関する実験的研究, 長岡科学技術大学修士論文 (2015).
27. 上野一磨, 大塩裕哉, 堀江優之, 佐野達郎, 船木一幸, 先端プラズマ推進チャンバおよびスペースチャンバを利用した磁気プラズマセイル実験 (2015)
28. Y. Oshio, I. Funaki, K. Ueno, H. Yamakawa, Laboratory Experiment on a Magnetoplasma Sail with High- $\beta$  Plasma Jet, Journal of Propulsion Power, Submitted (2015).
29. 大島真, 大塩裕哉, 船木一幸, 堀澤秀之, 磁気プラズマセイルの3次元磁気圏構造に関する実験的研究, 平成27年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2015-025 (2016).