

磁気プラズマセイルの推進性能向上に関する実験室実験

上野一磨 (中京大学), 村山裕輝 (東海大・工), 大塩裕哉 (東京農工大学), 船木一幸 (JAXA)

1. 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ことで推進力を得る. 磁気プラズマセイルは, プラズマによる磁場展開を用いて太陽風との大規模干渉を実現する. 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. 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. 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]. 本論文では, 複数のコイルで磁場生成した際の磁気圏形成に着目し, 磁気圏を拡大する前のコイル磁場での磁気圏サイズの同定に向けた基礎実験について報告する.

2. 磁気圏と評価手法

太陽風が磁場によって曲げられることで, 宇宙空間には磁気圏と呼ばれる磁場領域が形成される. 磁気圏は, 太陽風動圧と磁気圧の釣り合う位置にその境界が形成される. したがって, 太陽風動圧と宇宙機に搭載したコイルの磁気圧をそれぞれ P_{SW} , P_{Coil} とすると, 釣り合い式は以下のように表される.

$$P_{SW} = P_{Coil} \quad (1)$$

磁場強度, 太陽風密度, 太陽風流速を B_{mp} , ρ_{SW} , V_{SW} とし, (1) 式は,

$$\frac{B_{mp}^2}{2\mu_0} = 2m_i\rho_{SW}V_{SW}^2 \cos^2\theta \quad (2)$$

と表される. ここで, m_i は, μ_0 は真空の透磁率, とし, θ はコイル赤道面からの角度を示す. 例えば, コイル磁場が磁気モーメント M のダイポール

近似で表される場合, コイル中心から磁気圏境界面までの距離, すなわち磁気圏の大きさ L は(2)式の B_{mp} に以下の式を代入することで求めることができる.

$$B_{mp} = \frac{\mu_0}{4\pi L^3} \quad (3)$$

従って, ダイポール近似が成り立つ系では, コイル磁気モーメントによって磁気圏の位置が決まるが, 成り立たない条件において磁気圏の位置を推定するには, 正確に磁場を見積もる必要がある. 複数コイルで生成された磁場の場合, 正確な磁場の見積りには3次元での解析が必須である.

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

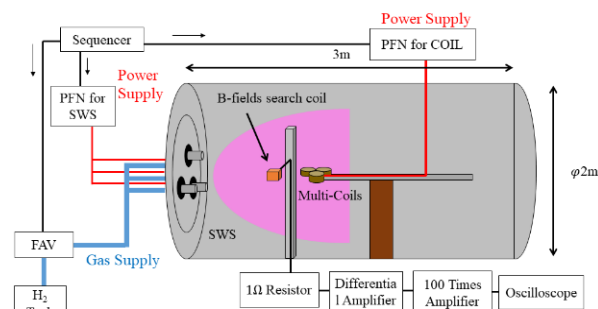


図1 先端プラズマ推進チャンバに構築した実験セットアップの概略図

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，半値幅で 0.9ms の間，磁場生成が可能である。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。

本実験では，3つのコイルで形成された磁気セイルを用いて磁場生成を行った。

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。

$$V = -NS \cdot \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

この電圧を積分回路で時間積分して磁束密度を求める。

$$B = -\frac{1}{NS} \int_0^t V dt \quad (5)$$

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 倍に増幅しデータを記録し，後にデジタル積分をすることでデータを得た。

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 $\phi 100\text{mm}$ のケーブルを 1 層 2 巻にしたものを校正用コイルとし，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。

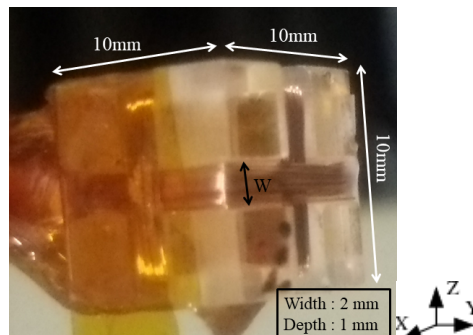


図 2 サーチコイル

(測定時には絶縁シートにより覆われ保護される)

3.3. 実験条件および計測点

磁場生成用コイルへの通電電流を 1.8 kA とし，模擬太陽風の密度および速度は， $7.2 \times 10^{18} / \text{m}^3$ ，24 km/s である。表 1 に実験条件を示す。

磁場の計測点は，コイル中心を 0 mm，太陽風シミュレータの方向を X 方向とし， $X=100\text{--}400\text{mm}$ までを 50mm 間隔とした。

表 1 磁場計測時の試験条件

コイル電流	1.8 kA
模擬太陽風密度	$7.2 \times 10^{18} / \text{m}^3$
模擬太陽風速度	24 km/s

4. 実験結果および考察

図 3 に計測された X 方向磁場分布を示す。計測は，コイルだけに通電した際の磁場 (コイル磁場 B_{coil})，太陽風とコイル磁場の生成により磁気圏が形成されている際の磁場 (磁気セイル磁場 B_{magsail}) と太陽風のみを生成した際の磁場 (太陽風磁場 B_{sws}) の 3つの条件で行った。

コイル磁場と磁気セイル磁場は，コイル中心からの距離に応じて減衰している。また，太陽風磁場は，計測範囲において，比較的一様な磁場となっていることが分かる。計測結果から，磁気セイル磁場には，コイル磁場と太陽風磁場と干渉による変化分が含まれているため，太陽風磁場との差分をとり，コイル磁場からの変化として評価を行った。図 4 に評価結果をしめす。磁場は，コイル近傍から上昇し，250mm をピークとして減少に転じている。また，330mm 付近を境にコイル側では磁場の変化率が 1 を越え，太陽風側では 1 を下回

っている。これは、330mmよりコイル側では磁場が強められ、太陽風側では弱められているということであり、プラズマとの干渉によって330mmに誘導電流が流れていることを示唆している。また、その誘導電流の位置が磁気圏境界であることがこれまでに示されており、本結果から磁気圏がコイル中心から330mmの位置に形成されていることが分かる。これは、太陽風流速と磁気圏磁場強度から求まる磁気圏境界面におけるイオンラマ半径と磁気圏サイズの比を取ったスケーリングパラメータを用いると、実際の宇宙空間において1.6kmの磁気圏を形成したことに相当し、その際の理論計算上の推力は0.6Nほどである。

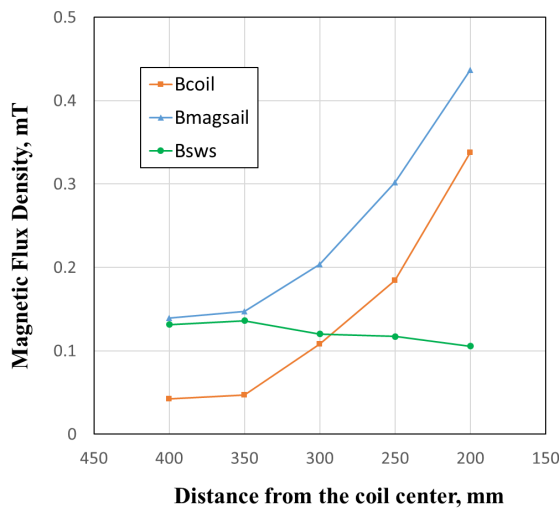


図3 コイル中心-太陽風中心軸上におけるコイル磁場、磁気セイル磁場、太陽風磁場の計測結果(コイル電流:1.8kA, 太陽風密度: $7.2 \times 10^{18}/\text{m}^3$, 太陽風速度:24km/s)

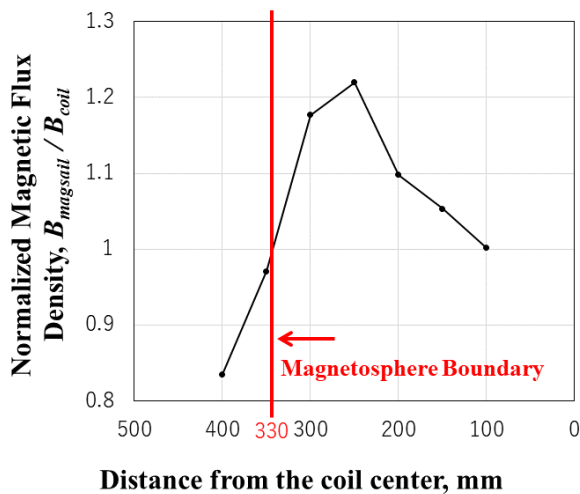


図4 コイル中心-太陽風中心軸上における磁場の変化率(コイル電流:1.8kA, 太陽風密度: $7.2 \times 10^{18}/\text{m}^3$, 太陽風速度:24km/s)

5. まとめ

JAXA 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複数コイルで構成された磁気セイルの磁気圏境界位置評価を行った。実験結果から磁気圏位置はコイル中心から330mmの位置であり、複数コイルによって形成される磁気圏を従来の磁場計測および評価手法によって確認できることがわかった。今後は、磁場計測精度を向上させ、磁気圏構造の詳細を明らかにし、磁場拡大制御と合わせ磁気プラズマセイル推進性能向上に向けた指針を得る予定である。

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。支援に深く感謝いたします。

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- β 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).