

先端プラズマ推進チャンバを利用した磁気プラズマセイル実験

上野一磨（中京大学）、大畠真（東海大・工）、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、過去に推力増大が得られた実験条件での磁場計測を行い、磁気プラズマセイル磁気圏の評価を行った。

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。

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

本実験では、磁場拡大前後の磁気圏形状について、事前に計測した太陽風動圧と実験時の磁場強度を用い、上記の釣り合い式から磁気圏の位置を評価した。

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

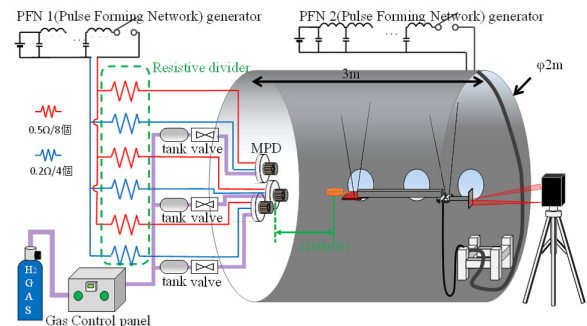


図1 先端プラズマ推進チャンバに構築した磁気プラズマセイル地上シミュレータの概略図

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，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。

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。

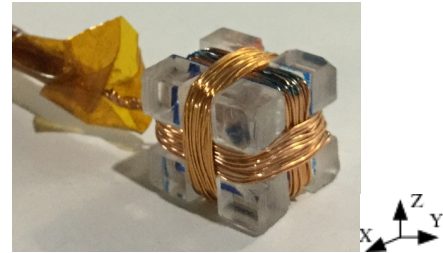


図 2 サーチコイル

(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 0.24kA とした際の噴射点における β 値は 0.0026 であり，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 に実験条件を示す。

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=70~350 mm を 30 mm 毎，Z=-210~210 mm を 75 mm 毎とした。

表 1 磁場計測時の試験条件

コイル電流	0.24 kA
模擬太陽風電流	12 kA
拡大用 MPD 電流	18 kA
β 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	335 mm

4. 実験結果および考察

図 3 に実験時における各装置の放電波形を示す。0sec においてコイル電流 (Coil) および磁場拡大用プラズマ源への通電開始され拡大磁場が形成される。その後，太陽風シミュレータ (SWS-ALL) による放電により太陽風プラズマが生成され，拡大磁場に到来し干渉により磁気圏が形成される。図 4 にコイル磁場のみ (拡大用プラズマなし) で

形成した磁気圏内における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 0ms から磁場生成が開始され、1ms 弱の間、定常な磁場が計測されていることが分かる。また、0.6ms 付近において、太陽風が到来し磁場を押し込むことによる磁束密度の上昇が捉えられている（向きによっては減少する）。太陽風プラズマは、初期放電時に定常状態よりも高い動圧のプラズマが生成されるため、定常に至るまでにこのような特徴的な磁場変動が見られる。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。

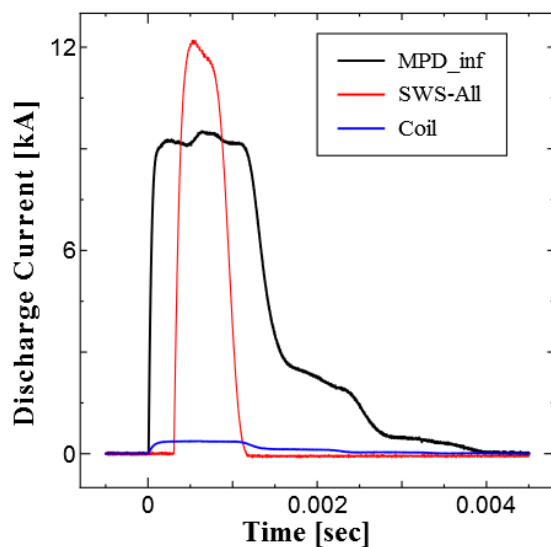


図3 各装置動作時の放電電流波形
(0[sec]は磁場拡大用 MPD およびコイルへの通電開始時刻)

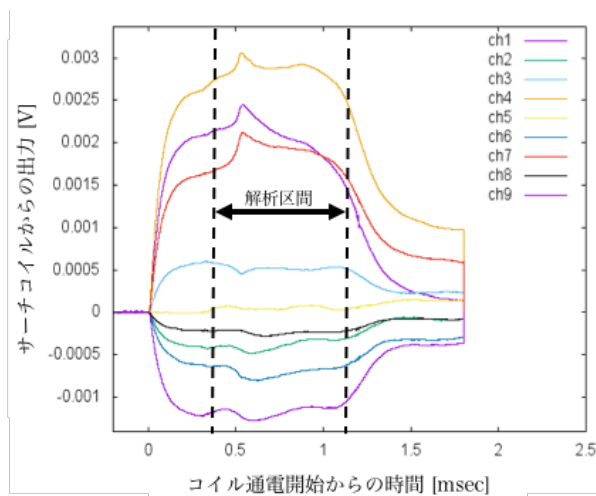


図4 典型的な磁気プローブ出力波形
(コイル磁場と太陽風の干渉時、ch1~9 は 3 つの磁気プローブの各 3 軸の出力。)

磁気セイル、および磁気プラズマセイルの動作条件の下、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5および図6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。本解析では、解析区間をコイル磁場が定常になっている区間の平均値とし、図4に示す区間を解析区間とした。

磁気セイルの磁場強度分布(図5)と磁気プラズマセイルの磁場強度分布(図6)を比較すると、磁場強度分布には大きな差異は見られないものの、磁力線の形状には変化が見られる。特にコイル赤道面($Z=0$ の軸上)付近の磁力線に差異が見られ、

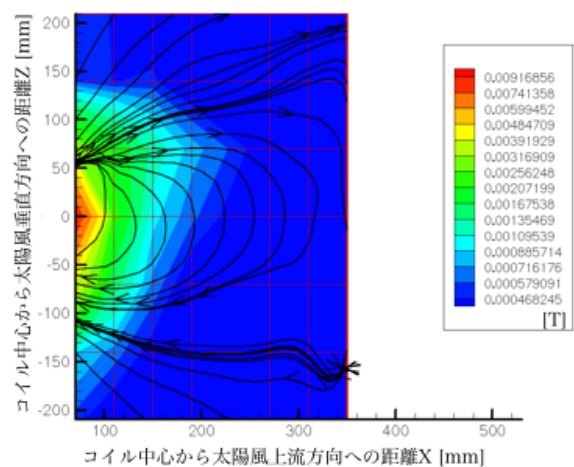


図5 磁気セイルの磁場強度分布
(コイル磁場+太陽風, コイル中心(0.0))

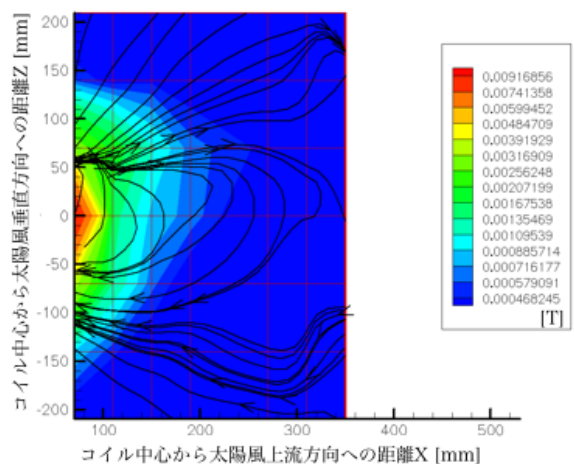


図6 磁気プラズマセイルの磁場強度分布
(コイル磁場+拡大用プラズマ+太陽風, コイル中心(0.0))

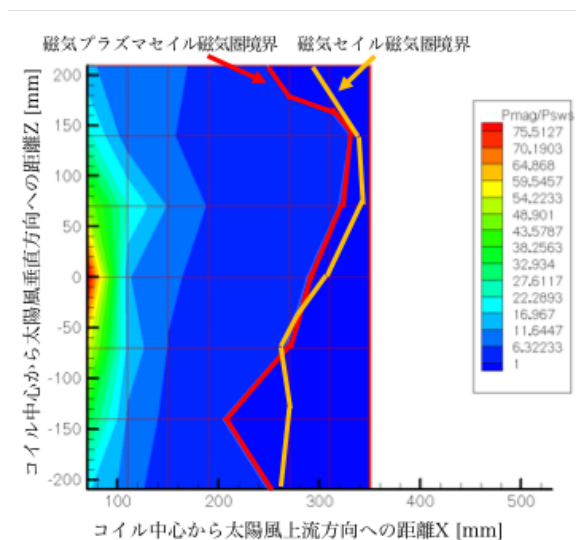


図7 磁気セイルおよび磁気プラズマセイルの磁気圏境界位置 (コイル中心(0.0))

磁気プラズマセイルの磁力線がいびつな形状になっている。これは、磁気セイルが外側から太陽風動圧のみを受けてコイル磁場が変形しているのに対して、磁気プラズマセイルでは磁気圏内側に磁場拡大用プラズマによる圧力が加わっていることに起因すると考えられる。

得られた磁場強度から磁気圧を算出し、太陽風動圧との釣り合いから磁気圏境界位置を求めた。結果を磁気セイル磁気圧 P_{mag} と太陽風動圧 P_{sws} の比を示したコンター図に重ねて図7に示す。磁気セイル、磁気プラズマセイルそれぞれの境界位置は磁気圧と太陽風動圧の比が1となる位置である。本結果から、本計測範囲において太陽風上流方向 (X 方向) の磁気圏境界位置は磁気セイルと磁気プラズマセイルではほぼ変わらないことが分かった。しかしながら、本条件は推力向上、つまり磁気圏拡大が見られた条件であることから、磁気圏は太陽風流れに垂直な方向 (Z 方向) に拡大していることが考えられる。

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磁気セイル/磁気プラズマセイルの磁気圏境界位置評価を行った。実験結果から推力増大が得られた条件において、太陽風上流方向の磁気圏位置は、磁気セイルと磁気プラズマセイルで大きな差異は見られなかった。今後はより太陽風流れに垂直な方向についてより広範囲に磁場計測を実施し、推力増大との関係をより詳細に評価していく必要がある。

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。また、本研究の一部は、中京大学特定研究助成の支援を受け実施した。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. 大畠真, 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).