

模擬太陽風プラズマ源の再構築と多磁極磁気プラズマセイル実験

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

Reconstruction of Simulated Solar Wind Plasma Source and Multipole Magnetoplasma Sail Experiment

Yuki Murayama (Tokai University),

Kazuma Ueno (Chukyo University), Yuya Oshio (Tokyo University of Agriculture and Technology),

Hideyuki Horisawa (Tokai University) and Ikkoh Funaki (ISAS/JAXA)

1. 研究背景

磁気セイル（マグセイル）とは，太陽風と呼ばれる惑星間空間に絶えず噴出するプラズマ流と衛星に搭載されたコイルによって発生させた人工磁場の相互干渉作用を利用した宇宙機の推進方法である。^[1]磁気セイルの推進原理を図 1 に示す．人工的に発生させた磁場による磁気圏が太陽風中のイオン粒子を受け止めることで推力を得る．発生推力 F は以下の式で表される．

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho_{sw} u_{sw}^2 S \quad (1)$$

ただし， C_d は推力係数， $\rho_{sw} u_{sw}^2$ は太陽風の動圧， S は磁気圏が太陽風を受け止める面積である．この式から磁気セイルは磁気圏が太陽風を受け止める面積に比例して推力が大きくなることが分かる．

また，式(1)における推力係数 C_d は磁気セイルの推力のスケール則に関わる係数であり， r_{Li}/L によって決定される．ここで， r_{Li} は太陽風中のイオンのラーマ半径， L は人工磁気圏境界面の代表長である． $r_{Li}/L \ll 1$ のスケールのとき，イオンは磁気圏内部に侵入することはできないので，磁気圏内部の磁場構造は推力に影響を与えない．また，イオンの粒子的な運動は無視でき，太陽風をMHD近似できる．この条件下ならば，磁気セイルは大推力（0.5 N 以上）を発生させる。^[2]しかし， r_{Li} は太陽風の動圧によって決まる．太陽から 1 AU の位置である地球近傍では約 72 km でほぼ一定であり， $r_{Li}/L \ll 1$ の条件を満たすには代表長 L を大きくしなければならない．しかし，その代表長 L は数十 km から数百 km 以上という大きさであり，このサイズの磁気圏を作るためにはそれに応じたサ

イズのコイルや電源が必要であり，搭載重量や容積の限られる衛星や探査機にそれらを搭載することは技術的に難しい．よって，実際の磁気セイルでは $r_{Li}/L > 1$ の条件での運用が想定される．この条件では，太陽風中のイオンが磁気圏内部へ侵入してしまうため，イオンの粒子的な運動を無視することができない．したがって，磁気圏内部の磁場構造が推力に影響を及ぼすことが考えられる．^[3,4] 先行研究^[9,10]において，単フープコイルの磁気セイルの実験モデルではなく，3つのコイルが連結されたマルチコイル型磁気セイルによる推力計測が行われた．その実験結果は通常の単フープコイルの磁気セイルとは異なるものであった．その原因として，単フープのコイルで発生する磁場のダイポール近似が成り立つが，マルチコイル型磁気セイルの発生磁場ではダイポール近似は成り立たないため，2種のタイプの違うコイルで発生する磁場の磁気圏内部構造が異なることが考えられる．

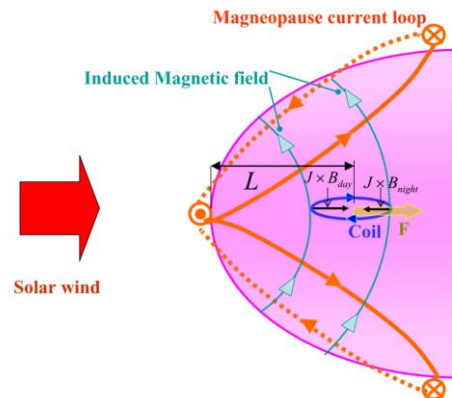


図 1. 磁気セイルの原理

2. 研究目的

2.1. 模擬太陽風プラズマの再構築

従来は推力発生原理や磁気圏の観測など磁気セイルの根本的な動作の再現を目的としていたが、今後は同じ実験コンフィギュレーションで多くの粒子効果のパラメータを変えて実験できるようにする必要がある。そのため、チャンバ内壁にマウントされた SWS を構成する 3 基の MPD アークジェットを真空チャンバ内に稼働できるように設置する必要がある。

2.2. マルチコイル型磁気セイル実験

マルチポール型磁気セイルの磁気圏がどのような構造になっているか、また、推力増大の理由は明らかになっていないので、磁気圏構造と推力の関係を明らかにする。

3. 実験方法

3.1. 太陽風シミュレータ

太陽風シミュレータ(Solar Wind Simulator, SWS)は、ISAS の先端プラズマ推進チャンバ(φ2×3m)の長手方向の内壁面に設置されている、3 基の MPD アークジェットで構成される大口径プラズマ源である。このプラズマ源は真空チャンバ内の直径 1200 mm の範囲に一樣な密度と流速の水素プラズマ流を生成できる。^[5] SWS の動作には 6-9 kA 程度の大電流を必要とするため、コンデンサを組み合わせたキャパシタバンク(PFN 電源)を作成し、約 0.8ms の準定常動作を行う。作動ガスとして水素を用い、小型高速電磁弁により作動時間のみガスが供給される。^[6]

SWS はチャンバ内壁にマウントされている。(図 2) そのため、SWS と磁気セイルや MPS の実験モデルの距離は一定であり、MPS 側の再設置を行わなくては SWS-MPS 間距離を変更することはできない。^[7,8] そこで、SWS のプラズマ源である 3 基の MPD アークジェットを真空チャンバ内部に製作した。(図 3) 長手方向に稼働できるように車輪を備えたアルミ性の槽にマウントした。また、真空チャンバ長手方向に軌条を設置した。これにより、MPS 側の実験モデル再設置を行わずに SWS-MPS 間距離を変更できるように改装した。この改装に伴い、真空チャンバ内部に水素ガスの二次ポンプと小型高速電磁弁を設置することとなった。これらは MPS 実験モデルで採用実績のあるものを利用した。

改装後の SWS の性能を評価試験のために、正面及び側面からの写真撮影(シャッター開放)とダブルプローブによるプラズマ密度計測を行った。



図 2. チャンバ内壁にマウントされた SWS を構成する 3 基の MPD アークジェット



図 3. チャンバ内部に設置された SWS を構成する 3 基の MPD アークジェット

3.2. マルチコイル型磁気セイル

太陽風シミュレータとマルチコイル型磁気セイルの実験概略図を図 4 に示す。マルチコイル型磁気セイルは、直径 2 mm の銅線を 20 巻きのコイル(外径 30 mm, 内径 22 mm, 高さ 20 mm)を 3 つ結合させて制作した。(図 5) 各コイルはコイル電流がコイル上部から見て右回りに流れるように直列に接続した。このような形状のコイルの磁場は、外縁部のコイル電流が作る磁場の影響を大きく受けた磁場形状となるが、3 つのコイルが近接する中央部では各コイル電流による磁場が互いに打ち消される特徴的な磁場となる。コイルに強い磁場を発生させるためには、コイルに大電流を流す必要があるため、SWS と同様にコイル用キャパシタバンクを制作し、約 1 ms の間、最大 1.8 kA の大電流を流せるようにした。また、このコイル高速高密度プラズマ流中に晒されるため絶縁シートにより保護されている。^[9-13]

3.3. 磁場計測装置

磁場計測は、互いに直交する3方向に巻かれたサーチコイルからなる磁気プローブを用いた。この磁気プローブは、各辺が10mmの亚克力製の直方体に直径0.2mmのホルマル線を各軸20回巻いて作成した。実際の信号は微弱なので、測定された信号を差動アンプ、100倍ゲインアンプを通したものを取得し、これに数値積分処理を行い、磁気プローブに流れる微小電流から磁場を算出した。この磁場を3方向の二乗平均をとり、磁場強度とした。なお、プローブは可動ステージ上に設置され、チャンバの長手方向(太陽風の向き)と水平方向に対して移動できるようにされている。また、プラズマとプローブの信号線が直接接触れないようにプローブ先端は絶縁シートやテープで保護されている。

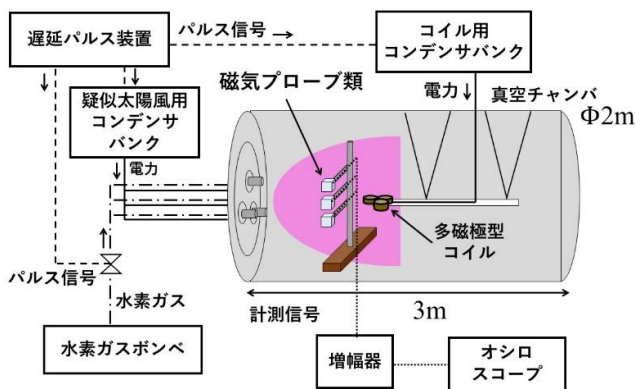


図4. 実験装置概略図

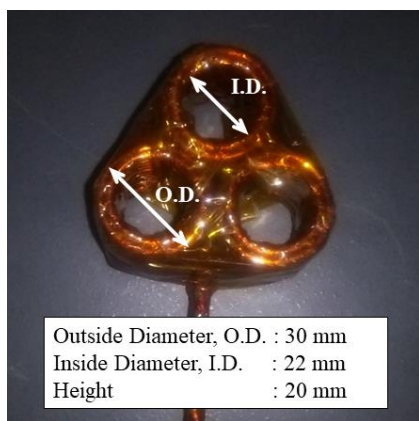


図5. マルチコイル型磁気セルの外観

4. 実験結果と考察

4.1. 太陽風シミュレータの再構築

改装後のSWS用のMPDアークジェットの前及び側面の放電写真を図6に示す。この写真は5秒間のシャッター開放にて撮影した。作動条件は図中に示した。また、ダブルプローブで計測したSWSのノズル先端より1000mmの位置で計測したプラズマ密度を表1に示した。

太陽風シミュレータの大口径プラズマ源を改修した。真空チャンバ内に設置された状態でもMPDの放電に成功し、貯気槽圧力100 Pa G、このときのガス流量は5.3 g/sで2.0 kVから4.0 kV、3基合計の放電電流として10.8 kAから17.6 kAの放電電流の範囲で安定した放電を確認した。2.5 kV充電の条件で貯気槽圧を20 Pa G、このときのガス流量は3.2 g/sまでガス流量を絞った条件でも安定した放電をしていることが確認できた。さらに、プローブ計測より2.5 kV、3.0 kV、3.5 kV (100 Pa G)においてテストセクションとなる位置において十分な大きさのプラズマ密度を達成した。

	正面	側面
コンデンサ充電電圧 : 4.0 kV (電流: 17.6 kA) ガス : 100 Pa G (5.3 g/s)		
コンデンサ充電電圧 : 2.5 kV (電流: 10.8 kA) ガス : 100 Pa G (5.3 g/s)		
コンデンサ充電電圧 : 2.5 kV (電流: 10.8 kA) ガス : 20 Pa G (3.2 g/s)		

図6. 各条件における正面及び側面からのSWSの放電

表1. 各コンデンサ充電電圧におけるプラズマ密度 (ガス流量5.3 g/s, ノズルから1000mmの位置)

コンデンサ充電電圧, kV	プラズマ密度, m^{-3}
2.5	3.67×10^{18}
3.0	7.35×10^{18}
3.5	9.44×10^{18}

4.2. マルチコイル型磁気セイル実験

マルチポール型磁気セイルにおける磁気圏計測を磁場プローブで行い、ソレノイドコイルを用いた磁気セイル実験での太陽風方向 220mm, 太陽風垂直方向 135mm に対し、マルチコイルでは太陽風方向 260mm, 太陽風垂直方向 170mm と磁気圏の拡大を確認した。[12,13]マルチポール型磁気セイルの磁気圏計測結果から磁気圏サイズと形状を推定し、さらに、推力の大きさを見積もったところ、その値は上野らの行った推力の直接計測^{9,10}と定量的に一致した。[13]

5. まとめと今後の予定

太陽風シミュレータ(SWS)の改装を行い、長手方向に稼働できるようになった。また、改装後のSWSでも複数の放電電流、ガス流量の下で安定した放電をすることを確認した。これにより、MPS側の再設置を行わずに、SWS-MPS間距離を変更することができるようになったので、複数のプラズマ密度を変えた条件で磁気セイル(MPS)実験が行えるようになった。

マルチコイル磁気セイルの磁場計測実験を行い、磁気圏サイズを推定したところ、通常のソレノイドコイルを用いた実験よりも大きな磁気圏が計測されていたが、そのマルチコイル型磁気セイルの磁気圏のサイズ及び磁気圏形状から算出した推力が、先行研究の推力計測結果と定量的に一致することを確認した。

今後は、さらに詳細な磁気圏構造を計測し、マルチコイル型磁気セイルの推進特性評価を行う。また、コイル配置など複数のコイルによる磁気帆拡大手法の実証やマルチポールによる磁気セイル搭載宇宙機の姿勢制御技術実証のための実験を行う。

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。旧MPSワーキンググループの様々な助言とご支援に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Zubrin, R. M., Andrews, D. G., “Magnetic Sails and Interplanetary Travel”, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 28, No. 2, 1991, pp. 197-203.
- 2) Khazanov, G., Delamere, P. and Kabin, K.: “Fundamental of the Plasma Sail Concept: MHD and Kinetic Studies”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 5, 2005, pp. 853-861.

- 3) Fujita, K.: “Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails”, *Journal of Space Technology and Science*, Vol. 20, No. 2, 2004, pp. 26-31.
- 4) Nishida, H., Ogawa, H., Funaki, I., Fujita, K., Yamakawa, H. and Inatani, Y.: “Verification of Momentum Transfer Process on Magnetic Sail using MHD Model”, *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA-2005-4463, 2005.
- 5) 船木一幸, 小嶋秀典, 山川宏, 清水幸夫, 都木恭一郎, 中山宣典, 藤田和央, 小川博之, 篠原季次, 磁気セイルシミュレータの開発, 日本航空宇宙学会論文集, vol. 54, No. 634, pp. 501-509, 2006.
- 6) 堀江優之, 上野一磨, 大塩裕哉, 河偉華, 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年1月16-17日, 相模原.
- 7) Ueno, K., Kimura, T., Ayabe, T., Funaki, I., Yamakawa, H., and Horisawa, H.: “Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail”, *Trans. JSASS Space Tech, Japan*, vol. 7, No. ists26, pp. Pb_65-Pb_69, 2009.
- 8) 上野一磨, 大塩裕哉, 船木一幸, 山川宏, 堀澤秀之, 磁気セイ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, No. 692, pp. 229-235, 2011.
- 9) 上野一磨, 堀江優之, 大塩裕哉, 船木一幸, 複数コイル型磁気セイルの推力計測, 第60回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4653, 2016年9月6日-9日, 函館.
- 10) Ueno, K., Oshio, Y., Funaki, I. and Yamakawa, H.: “Multi-Coil Magnetic Sail Experiment in Laboratory”, *31st International Symposium on Space Technology and Science*, 2017-b-39, 2017.
- 11) 村山裕輝, 上野一磨, 大塩裕哉, 堀澤秀之, 船木一幸, 山川宏, 複数コイル型磁気セイルの磁気圏境界面磁場計測, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 3E09, 2017年10月25日-27日, 新潟.
- 12) Murayama, Y., Ueno, K, Oshio, Y., Horisawa, H. and Funaki, I.: “Preliminary Result of Magnetic Field Measurements on Multi-coil Magnetic Sail in Laboratory Experiment”, *Vacuum*, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.004>, 2018.
- 13) 村山裕輝, マルチポール型磁気セイルの磁気圏構造に関する実験的研究, 東海大学2018年度修士論文, 東海大学工学研究科機械工学専攻, 2019.