

# MPD アークジェットを利用した 磁気プラズマセイルのスケールモデル実験

総研大・院 上野一磨  
 総研大・院 大塩裕哉  
 ISAS/JAXA 矢守 章  
 ISAS/JAXA 船木一幸

太陽系内を効率的に、かつ、高速に移動できる推進手段の獲得は、探査ミッション期間の短縮やそれによる新たな探査手法の提案、そして、ミッションコストの低減など様々な面でメリットが挙げられる。また、探査計画のスタートから短期間で成果へと繋げることができる。既存の推進システムでは推進剤と電力の限界から短期惑星間航行は困難である。そのため、現在主流となっている電気推進のように、太陽エネルギーを電気に変換してから推進力に再び変換するのではなく、太陽エネルギーを直接、推進力へと変換する推進システムが注目されている。我々の研究グループでは太陽起源の太陽風と呼ばれる高速プラズマ流に着目し、太陽風を磁場の帆によって受け止めて推進力を得る磁気プラズマセイル (図1) について、実証衛星の打ち上げを目指し研究を行っている。太陽風を利用した推進システムは、太陽風を大きな磁場で受け止めることでより大きな推進力を得ることが可能であり、効率的に、かつ、巨大な磁場を展開する手法を構築することが重要となる。

太陽風と磁場の干渉を利用した推進システムは Zubrin 等[1]によって超伝導コイルを用いた磁気セイルとして提案された。しかし、十分な推進力を得るには直径数十キロメートルのコイルが必要となるため実現は困難であった。

その後、Winglee 等[2]によって磁場展開をプラズマ噴射によってアシストするという方法を用いた M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) が提案され、検討が行われた。日本の研究グループでは M2P2 のコンセプトを踏襲しつつも設計を見直し、新たに磁気プラズマセイル(MPS)と名付け、国内の研究機関と大学が連携して研究を行っている[3]。本報告では、磁気プラズマセイルへの適用を目指し、磁気セイルの姿勢安定評価へ向けた推力ベクトルの検討について報告する。

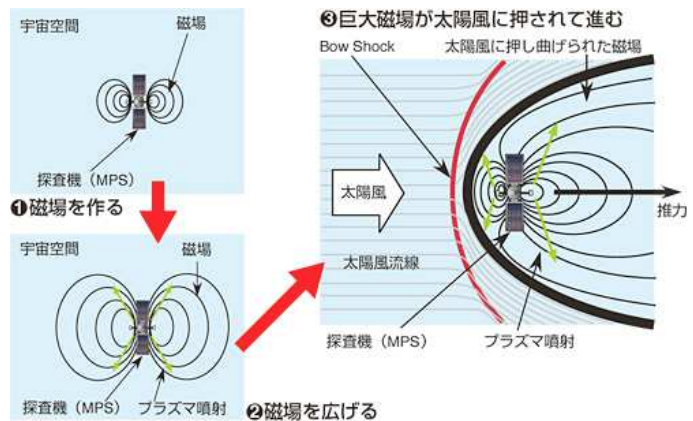


図1 磁気プラズマセイル推進原理

## 1. 実験装置

本実験はJAXA 宇宙科学研究本部内にある Space Science Chamber ( $\phi 2.5$  m, 全長 5 m) においてチャンバ内圧力約  $5 \times 10^{-5}$  Pa の真空中において行った。太陽風を模擬するためにチャンバ内壁に水素を作動ガス (流量: 0.4 g/s) とした電磁流体力学アークジェット (MPD arcjet) を取り付け、模擬太陽風プラズマを供給する。これを太陽風シミュレータ (Solar wind Simulator, SWS) と呼ぶ。この模擬太陽風内に磁気セイルスケールモデルとして直径 2 mm のホルマル線を半径 25 mm で 20 巻したソレノイドコイルを設置し、磁気セイルシミュレータ (MagSail Simulator, MSS) とした。実験装置の概略を図2に示す。

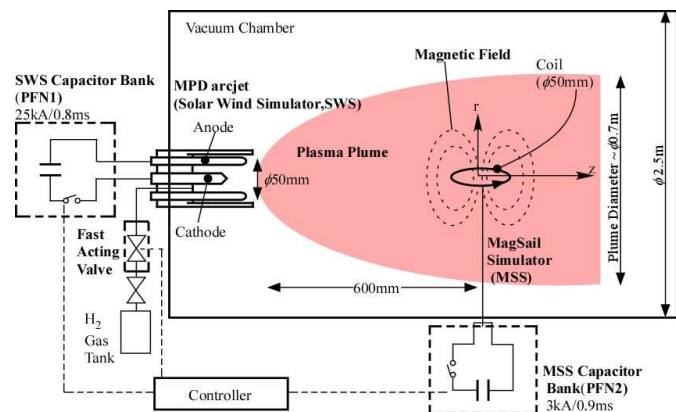


図2 磁気セイルシミュレータ概略図

## 2. 誘導電流と輝度値の分布

磁気セイル磁場（コイル磁場）と模擬太陽風（プラズマ流）の干渉により磁気セイル周囲の流れ場には、図3に示すような明暗が生じる。また、磁気セイル中心から90mmの位置に円を描くように磁力線に沿った発光も見られ、磁場とプラズマの干渉を確認することができる。この発光分布を理解するため、誘導電流を計測し、流れ場の輝度分布と比較した。

計測には、シャッターカメラおよび電流計測プローブを用い、比較には装置運転開始から0.5ms後の模擬太陽風が準定常状態となった状態での撮像結果および電流値を用いた。電流計測プローブは外径28mm、内径16mmのリング状フェライトに、40turn巻線したものを使用し、既知の電流を流すことで校正を行った。

磁気セイル中心から太陽風上流方向へX軸をとった場合の分布を図4に示す。誘導電流は紙面に垂直手前から奥への方向を正としている。誘導電流の極小値（X=150mm）や極大値（X=100mm）の位置が輝度の極小、極大とほぼ一致していることが図より分かる。

また、輝度の極小値であるX=130mmをゼロとし、太陽風流れに垂直な方向（図3に図示）にY軸を定義し、その軸上での誘導電流も計測を行った。図5に誘導電流と輝度の分布を示す。X軸上において誘導電流は最大であり、X軸から離れるに従って誘導電流は小さくなっている。輝度分布も誘導電流分布との間に相関があることが分かる。これらの結果から、計測した誘導電流は磁気圏境界面を流れる境界面電流であると言える。

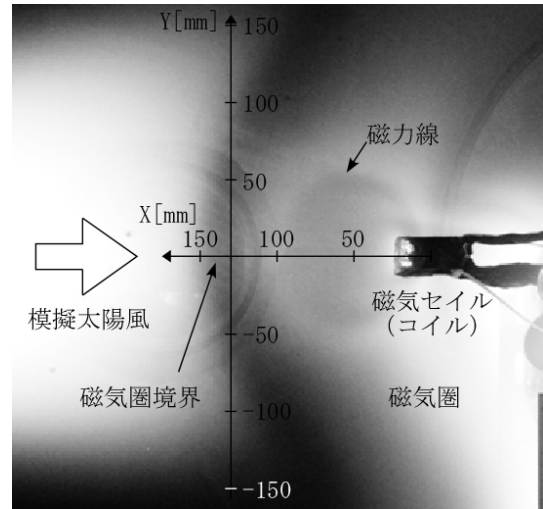


図3 磁気セイル周りの流れ場  
(模擬太陽風：流速28km/s, 密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,  
コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ )

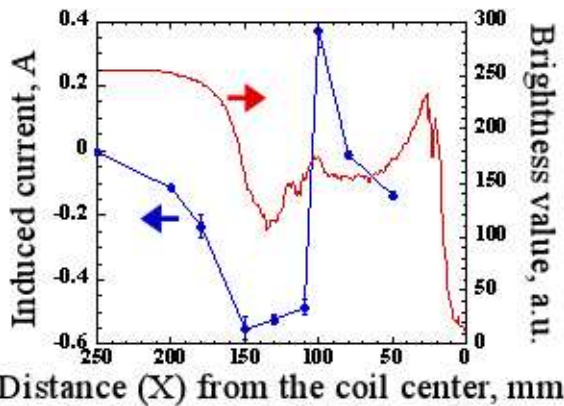


図4 X軸上で計測した誘導電流と撮像結果の輝度値の分布

(模擬太陽風：流速28km/s, 密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ , X軸は図3に図示)

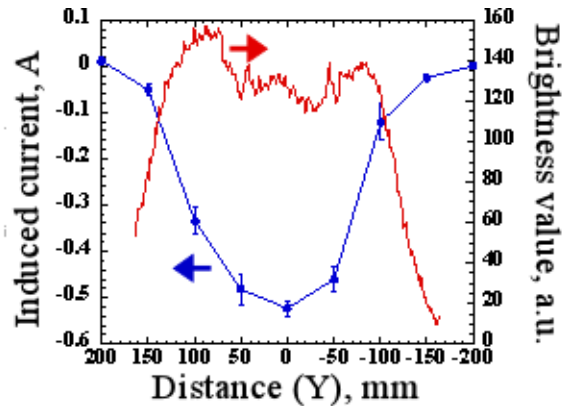


図5 Y軸上で計測した誘導電流と撮像結果の輝度値の分布

(模擬太陽風：流速28km/s, 密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ , Y軸は図3に図示)

## 3. 磁気セイル（コイル）に生じる力

誘導電流と流れ場の可視化により、境界面電流の構造の一部を理解できた。ここでは、それらの結果から、磁気セイル（コイル）に生じる力について考察する。

図6に可視化画像上に先ほど得られた誘導電流分布をコンターとして重ねたものを示す。この条件を迎角0度とする。このとき、境界面電流は図中に示すようにループ状に流れることが知られている[大林]。つまり、磁気セイル付近ではY軸の正方向に誘導磁場 $B$ が生じる。この誘導磁場 $B$ とコイル電流 $J$ との間に生じるローレンツ力の足し合わせにより推力 $F$ は、太陽風流れの方向に生じる。同様に、図7, 8にそれぞれ迎角が90度および45度の場合の可視化画像と誘導電流分布を示す。迎角90度では、誘導電流は磁気セイル前方でループを描くように流れる[西田]。このとき、磁気セイルに生じる力は、コイル径方向の力は打ち消しあい、結局、太陽風流

れの方のみが生じる。これまでの迎角 0 度、および 45 度では X 軸に対して対称に電流が流れているが、迎角 45 度では、その対称性が崩れており、Y 軸正の領域に全体的に傾いたような分布となっている。よって、電流ループは、迎角 90 度で生じた電流ループを傾けたようなループが生じていると予想される。この電流ループの対称性の崩れは、磁気セイルのコイル電流に生じるローレンツ力に非対称を生じさせ、結果として XY 平面上にトルクが発生することが予想される。また、発生するトルクの向きは迎角 0 度方向へ磁気セイルを回転させる方向である。このことから、一様流中では磁気セイルの姿勢安定が迎角 0 度であると言える。

今回の結果から、磁気セイルの迎角が 0 度および 90 度の場合には誘導電流の対称性から、トルクは発生せず、それ以外の迎角の場合、迎角が 0 度になる方向に機体を回転させるトルクが発生すると予想される。来年度は、この磁気セイルに生じるトルクを実験的に計測することを予定している。

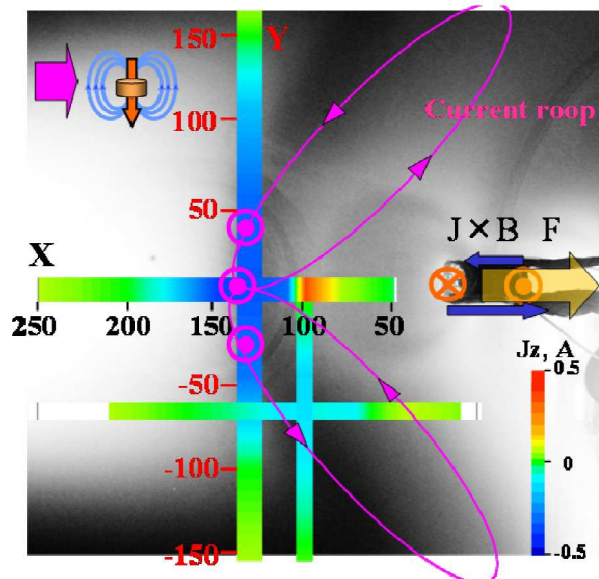


図6 迎角 0 度における流れ場と XY 平面上での Z 方向誘導電流分布  
(模擬太陽風：流速 28km/s, 密度  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20 巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ )

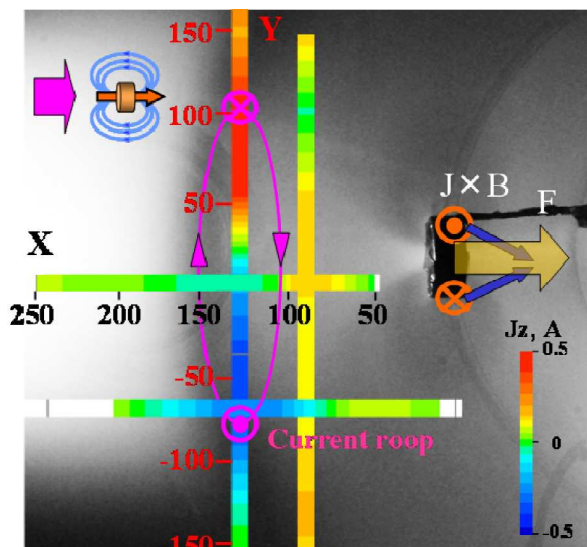


図7 迎角 90 度における流れ場と XY 平面上での Z 方向誘導電流分布  
(模擬太陽風：流速 28km/s, 密度  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20 巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ )

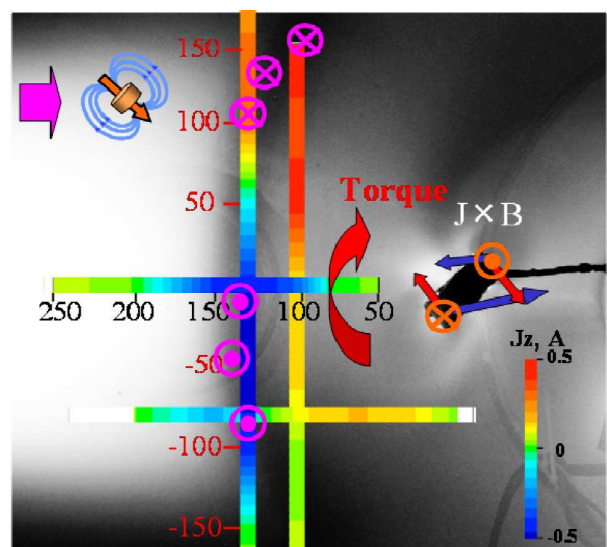


図8 迎角 45 度における流れ場と XY 平面上での Z 方向誘導電流分布  
(模擬太陽風：流速 28km/s, 密度  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , コイル： $\phi 50\text{mm}$ , 20 巻,  $I_{\text{coil}}=2\text{kA}$ )

#### 4. まとめ

スペースプラズマ共同利用設備である大型スペースサイエンスチャンバに、MPD アークジェットをプラズマ源として用いた磁気プラズマセイル地上実験システムを構築し、磁気セイルの姿勢安定評価の準備実験として、磁気圏周りの誘導電流計測を行った。実験は一樣な太陽風流中に迎角を 0, 45, 90 度とした磁気セイル (コイル) を設置して行った。可視化画像と誘導電流分布の比較から、迎角 0, 90 度の条件では太陽風流れの方向に対して対称な電流分布となり、迎角 45 度では非対称な電流分布となった。この誘導電流の非対称性は、誘導電流がつくる磁場とコイル電流によってコイルに生じるローレンツ力の非対称性の原因となり、結果としてコイルにトルクを生じさせる。そのトルクの方向は迎角 0 度の方向であると予想される。来年度はこのコイルに生じるトルクを計測し、磁気セイル姿勢安定点を実験的に明らかにする。

#### 謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究(A)(No.21246126)), および、JAXA 宇宙科学研究所 (宇宙工学委員会ならびにスペースプラズマ専門委員会) の支援を受けて、同所内のスペースプラズマ共同設備にて実施した。本研究にご協力いただいた、JAXA 宇宙科学研究所の山本育男氏ならびに篠原育先生に深く感謝する。

#### 参考文献

- [1] Zubrin, R.M., and Andrews, D.G. : Magnetic Sails and Interplanetary Travel, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.28, pp.197-203, 1991.
- [2] Winglee, R.M., Slough, J., Ziemba, T., and Goodson, A., "Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion," *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, No.21, 2000, pp.21, 067-21, 078.
- [3] 船木一幸, 山川 宏, 藤田和央, 野中 聡; "磁気プラズマセイルによる深宇宙探査", *日本物理学会誌*, Vol.58, No. 4, pp. 266 - 269, 2003.
- [4] 大林辰蔵, *宇宙空間物理学*, 裳華房.
- [5] 西田浩之, 小川博之, 船木一幸, 稲谷芳文: "磁気セイルにおける推進特性の3次元電磁流体解析", *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 55 (2007), pp.453-457