

磁気プラズマセイルおよび磁気セイルの実験室実験

上野一磨 (ISAS/JAXA), 大塩裕哉 (総研大・院), 堀江優之 (長岡技術科学大学・学),
船木一幸 (ISAS/JAXA), 山川宏 (京大)

1. はじめに

深宇宙探査用推進システムである磁気プラズマセイルおよび磁気セイルの実験室実験は、磁気プラズマセイルの宇宙実証を目指し、数値シミュレーション、そして技術開発を含めた 3 つの主要な研究開発の 1 つとして、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所にあるスペースプラズマ実験設備を用いて、これまでに原理実証やコード検証などの成果を収めてきた[1-7]。今年度も、いただき、大型スペースサイエンスチャンバと、来年度から先端プラズマ推進チャンバとして共同利用設備となる中型チャンバを併用し、磁気プラズマセイルと磁気セイルのシミュレーション実験を行っている。今年度実施した、磁気セイルのトルク計測、大口径太陽風を用いた磁気プラズマセイルの推力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を磁場や電場により受け止めて推進するものは太陽風帆と呼ばれ、前者には磁気セイル/磁気プラズマセイル、そして後者には静電セイルなどがある。太陽風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ものとして、磁気セイル(MagSail)があるが、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磁気セイルでは、実用的な推力を得るには直径数十 km ものコイルを宇宙で広げる必要がある[8]。このような巨大なコイルの打ち上げ・展開は現在の技術では困難である。磁気プラズマセイル(MPS)ではこの磁気セイルの問題点を解決する手段として、プラズマアシストによる磁場展開を用いる[9]。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も実現できるため実現への期待が高まっている。

3. 磁気プラズマセイル

2.1. 推力 F とトルク T

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、 ρ 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る必要があることが分かる。 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[10]。

$$C_d = \frac{3.4}{(r_{Li}/L)} \exp\left(\frac{-0.22}{(r_{Li}/L)^2}\right) \quad (r_{Li}/L > 1)$$

$$C_d = 3.6 \exp\left(\frac{-0.28}{(r_{Li}/L)^2}\right) \quad (r_{Li}/L < 1) \quad (2)$$

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。ここで、コイルの巻き数 n 、コイル電流 I 、コイル半径 r_{Coil} のコイルが囲む面積 $S_{Coil} = \pi r_{Coil}^2$ である。また、その際に発生するトルク T は

$$T = C_m \frac{1}{2} \rho u^2 S \quad (5)$$

で表され、推力を表す式(1)内の推力係数 C_d がピッチングモーメント係数 C_m となっただけあり、推力 F 同様に磁気圏サイズ L が大きいほど大きなトルクが発生することが分かる。

超伝導コイル磁場のみで磁気圏を形成する磁気セイルは、上記の式で推進性能が整理される。

2.2. 磁場拡大 (磁気インフレーション)

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。磁場の凍結により、磁場がプラズマとともに動くことでより遠方に磁場を広げることができる。それには、ある位置において以下の条件を満たす必要がある。

$$r_{Li_inf}/L_{inf} < 1 \quad (5)$$

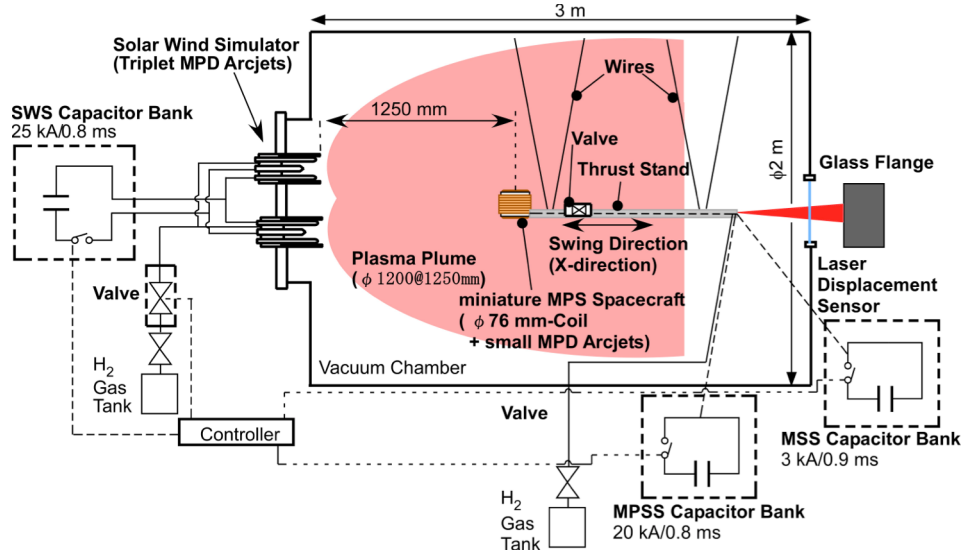


図1 磁気プラズマセイル地上シミュレータと推力計測時のセットアップ概要図

$$\beta_k = \frac{\rho_{\text{inf}} u_{\text{inf}}^2}{B_{\text{inf}}^2 / \mu_0} \geq 1 \quad (6)$$

ここで、 L_{inf} は宇宙機中心からの距離、 r_{Li_inf} は L_{inf} における磁場拡大用噴射プラズマのイオンラマ半径、 β_k は磁化プラズマの無次元量、 $\rho_{\text{inf}} u_{\text{inf}}^2$ は噴射プラズマの動圧、 B_{inf} は L_{inf} における磁場強度を表す。

また、磁気圏拡大の条件として、磁場の凍結が始まる位置は磁気圏内にあることが必要であり、

$$L_{\text{inf}} < L \quad (7)$$

となる。これらの条件と式、そして磁場の減衰率が磁場拡大によって3乗減衰がn乗減衰になるとすると、磁気圏の拡大率は1次元モデルを考えると

$$\frac{L_{\text{MPS}}}{L_{\text{MS}}} = \left(2^{6/n-2} \left(\beta_k^{1/2} \left(\frac{\rho_{\text{inf}} u_{\text{inf}}^2}{\rho u^2} \right)^{3/n-1} \right) \right)^{1/6} \quad (8)$$

のように記述できる。ここで、 L_{MPS} 、 L_{MS} はそれぞれ磁気プラズマセイルと磁気セイルの磁気圏サイズを表す。

4. 磁気プラズマセイル地上シミュレータと推力およびトルク計測装置[11-14]

実験は直径 2m の真空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なる。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、ガス放出から 9.8ms 後に磁気セイルシミュレータによる磁場生成を開始、10ms 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 1ms 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プラズマを用いている。

推力測定装置は、振り子式のスラストスタンドを採用している。スラストスタンドは 4 本のステンレス製ワイヤによってつり下げられており、ま

た、ワイヤに角度を持たせることでスタンドが 1 軸方向にのみ揺れるように制限している．このスタンドは、シミュレータの動作により磁気圏を生成する $\Delta t=0.8\text{ms}$ の間生じる推力 F によってスラストスタンドに力積 $F\Delta t$ が生じ、スラストスタンドは減衰振動となる．この振動を、真空チャンバ外に設置したレーザー変位計（KEYENCE LK-G500）によって計測する．また、既知の力積を単振り子によってスタンドに与えることで力積とスラストスタンドの最大振幅との較正を行っている．最大振幅から得られた力積を用いて、下記式より推力を算出した．

$$(F\Delta t)_{\text{MagSail}} = (F\Delta t)_{\text{SWS+Coil}} - (F\Delta t)_{\text{SWS}} - (F\Delta t)_{\text{Coil}} \quad (9)$$

$$(F\Delta t)_{\text{MPS}} = (F\Delta t)_{\text{SWS+Coil+Inf}} - (F\Delta t)_{\text{SWS+Inf}} - (F\Delta t)_{\text{Coil}} \quad (10)$$

$$F = \frac{(F\Delta t)}{\Delta t} \quad (11)$$

ここで、添え字はそれぞれ SWS+Coil：太陽風シミュレータとコイルのみを駆動、SWS：太陽風シミュレータのみ駆動、Coil：コイルのみ駆動、SWS+Coil+Inf：全てのシミュレータ駆動、SWS+Inf：太陽風シミュレータと磁場拡大用プラズマ源のみを駆動を意味する．

またトルク計測装置は、磁気セイルを模擬したコイルをアルミ製の丸棒（直径 5 mm）によって支持し、その丸棒に貼り付けた歪みゲージにより計測した．キャリブレーションは、既知のトルクが発生可能であるトルクドライバーを用いてコイルを装着した状態で行った．

5. 推力およびトルク測定結果

推力測定は、太陽風と磁場拡大用プラズマの動作条件を太陽風流速 38 km/s、太陽風数密度 $1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、磁場拡大用プラズマ流速 30 km/s 磁場拡大用プラズマ数密度 $5.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と固定し、磁場強度のみを 0.2 T として行った．表 1 に実験条件をまとめる．

実験中の様子を CCD カメラ（シャッター開放で撮影）で捉えたものを図 2 に示す．写真奥に見える 3 つの MPDarcjet から太陽風が供給されている様子が分かる．また、写真の右側にスラストスタンドが見え、その先端に設置されたミニチュア磁気プラズマセイルから上下に磁場拡大用プラズマが噴射されているのが確認できる．

磁気セイル、すなわち磁場拡大をしていないオリジナルのコイル磁場と太陽風の干渉によって生じた推力は、0.6 kA 通電のとき、0.09N の推力が得られた．これは通電電流により式(4)で示した磁気モーメント M が発生し、式(3)で示した磁気圏サ

表 1 実験条件（太陽風，噴射プラズマともに水素，ソレノイドコイルは直径 76mm，20 巻）

模擬太陽風		
数密度, m^{-3}	電子温度, eV	速度, km/s
1.2×10^{18}	5.1	38.0
磁気圏拡大用プラズマ源		
数密度, m^{-3}	電子温度, eV	速度, km/s
5.3×10^{19}	1.9	30.0
ソレノイドコイル		
放電電流, kA	磁気モーメント, Tm^3	中心磁場, T
0.61	2.2×10^5	0.20
噴射点の無次元パラメータ		
放電電流, kA	β	r_L/L
0.61	0.04	0.024

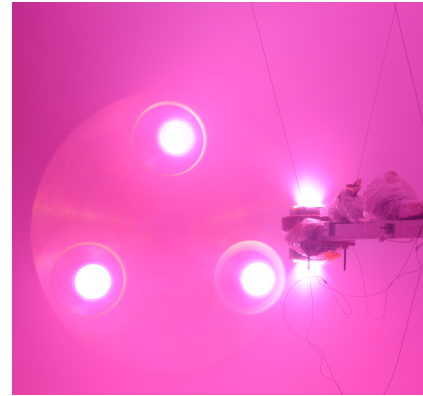


図 2 斜め後方からの磁気プラズマセイル地上シミュレータ動作中の様子（太陽風： $u=38 \text{ km/s}$, $n=1.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ，噴射プラズマ： $u_{\text{inf}}=30 \text{ km/s}$, $n_{\text{inf}}=5.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ，コイル：0.2 T）

イズ L の磁気圏が形成された結果として式(1)の推力 F が発生したためである．この結果は、太陽風と磁場の干渉による推力発生を意味している．

次に、磁気プラズマセイルの推力は、コイル磁場をプラズマ噴射によって拡大した磁場を用いた場合に生じた推力である．先に述べたように、磁場拡大用プラズマは固定している．コイル通電電流が 0.6 kA の時、推力 0.17 N が得られた．これは同じ 0.6 kA 通電の磁気セイル推力 0.09 N に比べ 1.9 倍となっている．これらの結果は、磁気圏拡大によって推力が増大していると考えられる．今後は様々なパラメータでの推力計測を行いより高い推力増大率が得られる条件を調査する．

トルク測定は、磁気セイルの推力計測で磁気圏サイズ $L=150 \text{ mm}$ 、推力 $F=1.5 \text{ N}$ の最大推力が得られた条件、 $n_{\text{sw}}=1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $u_{\text{sw}}=30 \text{ km/s}$ の太陽風およびコイル中心磁束密度 1.8 T の条件で行った．

磁気セイル条件（太陽風シミュレータとコイル

を駆動)でコイルに生じたトルクは、時間平均値で約 2.8 Nm であった。それに対し、太陽風のみ条件、すなわち、太陽風プラズマと中性粒子が直接コイルに衝突することで生じたトルクは、時間平均値で約 2.3 Nm であった。それらの差分である 0.5 Nm に対して、磁場生成によって生じるノイズは、時間平均値で約 0.06 Nm と十分に小さかったため、その差分は太陽風と磁場の干渉によって生じたトルクといえる。また、本来は差し引かれるべき太陽風プラズマの衝突分も太陽風のみで生じる 2.3 Nm に含まれていることから、この増分は過小評価した値である。しかし、本条件での理論計算値は、 $C_m=1$ として式(5)から $M=80$ mNm であり、本計測では理論値より大きく計測されている。理論的にトルクが発生しない条件では差分が生じないため、本計測結果はトルクまたはトルクに応じた何らかの歪みが計測されていると考えるのが妥当であろう。今後は、定量的な議論ができるように装置を改善し、ピッチングモーメント係数 C_m 評価を行っていく。

6. まとめ

磁気プラズマセイル地上シミュレータを用いて、実験室内で磁気プラズマセイルを模擬し、推力の計測を行った。推力計測には振り子式のスラストスタンドを用いた。流速 $u=38$ km/s、数密度 $n=1.2 \times 10^{18}$ m⁻³ の太陽風内に、コイルとプラズマ噴射源からなるミニチュア磁気プラズマセイルをスラストスタンドに載せて設置し、 $u_{inj}=30$ km/s、 $n_{inj}=5.3 \times 10^{19}$ m⁻³ の磁場拡大用噴射プラズマと 3 通りのコイル電流の条件で計測を行った。計測の結果、磁気セイル推力 0.09 N (コイル電流 0.6 kA) から磁場拡大用プラズマ噴射により磁気プラズマセイル推力 0.17 N と 1.9 倍の推力増を得た。

また、磁気セイルのトルク計測では、磁気セイルコイルをアルミ製の丸棒に固定し、丸棒の歪みを歪みゲージで計測する手法を用いてトルクの計測を行い、時間平均値で 0.5 Nm のトルクを計測した。今後は、磁場とプラズマの詳細な計測や、高推力増大率の獲得へ向けた研究、トルクの定量評価へ向けた実験を進める。

謝 辞

磁気プラズマセイル研究は、科学研究費補助金(基盤研究(A) No.21246126)、および、JAXA 宇宙科学研究所戦略的基礎開発経費の支援を受けて、同所内のスペースプラズマ共同設備にて実施した。

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. R. M. ZUBRIN and D. G. ANDREWS, “Magnetic Sails and Interplanetary Travel,” J. Spacecraft and Rockets, 28, 197 (1991).
9. 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).
10. K. FUJITA, “Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails” Journal of Space Technology and Science, 20, 2, 26-31 (2005).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).