磁気セイルの推力特性に関する実験研究^{*1}

Thrust Evaluation of Magnetic Sail in Laboratory

上 野 一 磨^{*2,*3}・大 塩 裕 哉^{*2}・船 木 一 幸^{*4}・山 川 宏^{*5}・堀 澤 秀 之^{*6}

Kazuma UENO, Yuya OSHIO, Ikkoh FUNAKI, Hiroshi YAMAKAWA and Hideyuki HORISAWA

Key Words: Spacecraft Propulsion, Magnetic Sail, Thrust Measurement, Magnetosphere, Scale Model Experiment

Abstract: Magnetic Sail is one of in-space propulsion systems using the interaction between the solar wind and an artificial magnetic field. In order to reveal thrust performance of Magnetic Sail which has feasible scale of magnetosphere, scale model experiment of Magnetic Sail was conducted in laboratory using Magnetic Sail ground simulator which was arranged in the space science chamber at JAXA. Magnetic Sail scale model obtains magnetospheric size of $L = 0.07$ m, and 0.47 N-thrust in laboratory. Also, thrust is increased by increasing of the magnetic moment of a coil. The scale model corresponds to 30-N-class magnetic-sail which produces 80 km-size magnetosphere in space.

記 号 の 説 明

B : 磁束密度 [T]
 C_d : 推力係数 [—]
 F : 推力 [N]
 I : 放電電流 [A]
 k : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)
 L : 磁気圏サイズ [m]
 M : 磁気モーメント [Tm^3]
 M_i : イオン Mach 数 [—]
 N : コイル巻数 [巻]
 $\dot{m}$: 質量流量 [g/s]
 m_i : プロトン質量 (1.67×10^{-27} kg)
 m_e : 電子質量 (9.11×10^{-31} kg)
 n : 数密度 [m^{-3}]
 r_{Li} : イオン Larmor 半径 [m]
 S : 磁気圏代表面積 [m^2]
 u : 流速 [m/s]

1. は じ め に

ソーラーセイルに代表される太陽エネルギーを電力に変換することなく推力を得る推進システムは、既存の電気推進システムに比べ、探査機への推進剤積載量を低減できることから、推力重量比において優位であり、木星以遠深宇宙探査用推進システムとして注目されている。ソーラーセイルが利用する太陽光の他に、宇宙推進に利用可能な太陽エネルギーとして太陽風が挙げられる。太陽風は太陽由来の

高速プラズマ流であり、太陽から 1AU において 400 km/s もの速度で吹いていることが知られている。この太陽風を受け止めることでヨットのよう風に吹かれて推進するのが磁気セイル (Magnetic Sail, MagSail) である。

磁気セイルは宇宙機に搭載した超伝導コイルによって宇宙機周りに磁場を展開する。太陽風プラズマは展開されたコイル磁場と干渉し、磁気圏と呼ばれる磁場領域を形成する (第 1 図)。磁気圏としてよく知られているものには、地球磁場と太陽風との干渉によって生じる地球磁気圏があるが、磁気セイルでは、宇宙機周りに形成した人工磁気圏によって太陽風を受け止め、推進力を得る。本コンセプトは 1990 年にアメリカの Zubrin らによって提案され、注目を集めた¹⁻³⁾。しかし、十分な推力を得るには直径数十 km ものコイルが必要であることから、実用化には至らなかった。その後、プラズマ噴射による磁場展開をアシストする手法が Winglee らによって提案され、mini-magnetospheric plasma propulsion (M2P2) と名付けられた⁴⁾。現在は日本の JAXA を中心とした研究グループが磁気プラズマセイル (MPS) として研究を行っている。数値解析によるアプローチでは、磁気セイルの推進性能は明らかにされ⁵⁻⁷⁾、現在はプラズマ噴射による磁場展開のアシストについての研究が盛んに行われている^{8,9)}。しかし、複雑な物理現象のため、磁気プラズマセイルは現在も明確な設計指針が得られていない。

実験によるアプローチでは Winglee らによって M2P2 の実験室実験が行われたが^{8,10)}、推力評価には至っていない。我々は磁気プラズマセイルの推力評価を行うことを前提として、最もシンプルな磁気セイルについて実験による推力評価を行っている¹¹⁻¹⁵⁾。磁気セイル磁気圏サイズに対する理論推力を第 2 図に示す。これまでに磁気圏サイズ 720 km 程度の比較的大きな磁気圏について推力評価を行い、その性能を明らかにした^{14,15)}。本研究では深宇宙探査機として磁気プラズマセイルが目標とする 1 N クラスの推進性能を持つ磁気セイル (磁気圏サイズ $L = \sim 20$ km) の推進性能

^{*1} © 2011 日本航空宇宙学会

平成 22 年 8 月 3 日原稿受付

^{*2} 総合研究大学院大学物理科学研究科

^{*3} 現 宇宙航空研究開発機構

^{*4} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

^{*5} 京都大学生存圏研究所

^{*6} 東海大学工学部

第 1 図 磁気セイル周りのプラズマ流れと磁場構造の想像図

第 2 図 推力と磁気圏サイズの関係

を評価するため、磁気圏サイズ $20 \text{ km} < L < 100 \text{ km}$ のスケールモデル実験を行い、推力の直接計測を行った。

2. 磁気セイルの推力

太陽風は太陽の重力を振り切って噴出した荷電粒子（イオン・電子）で構成される。荷電粒子は宇宙機に搭載した超伝導コイルが生成する磁場と干渉し、 $u \times B$ のローレンツ力によって、太陽風プラズマの流れは妨げられ、太陽風は運動量を失う。太陽風が失った運動量は電磁気的な伝達によってコイルに伝わることで推進力が発生する。このときコイルに伝わる力 F は物体が一樣流中で受ける抗力と同様に以下の式で表すことができる。

$$F = C_d \frac{1}{2} n m_i u_{sw}^2 \pi L^2 \quad (1)$$

ここで、 $n m_i u_{sw}^2 / 2$ は太陽風の動圧を、 πL^2 は太陽風を受け止める代表面積を表し、一般的に抗力係数として用いる C_d を本研究では推力係数として用いる¹¹⁾。本研究では磁気圏サイズを宇宙機（コイル）中心から太陽風上流方向の磁気圏の端までの距離で定義し、これを代表長 L とする。コイル磁場をダイポール磁場で近似した場合、この代表長 L は磁気圏の位置が太陽風動圧とコイルの作る磁気圧の釣り合う位置として以下の式で表すことができる。

$$L = \left(\frac{M^2}{8 \mu_0 \pi^2 n m_i u_{sw}^2} \right)^{1/6} \quad (2)$$

第 3 図 磁気圏境界面における荷電粒子の挙動

ここで M はコイル磁気モーメント、 μ_0 は真空の透磁率を表す。式 (2) では、太陽風の動圧が静圧に比べ圧倒的に大きいこと、また、荷電粒子が磁場によって 180° 方向を変えられるような完全弾性衝突の場合、動圧 $\varepsilon n m_i u_{sw}^2 / 2$ における運動量交換の係数が $\varepsilon = 2$ であることを用いた¹⁶⁾。

この式からわかるように磁気圏サイズ L は太陽風動圧が与えられる量であることから、磁気モーメント M のみで決まる。つまり、コイルの巻数 N 、コイルに流す電流値 I_{coil} 、コイルの面積 S_{coil} で決まる磁気モーメント $M = \mu_0 N I_{coil} S_{coil}$ に対して磁気サイズ L は $L \propto M^{1/3}$ であり、推力に比例する磁気圏代表面積 S には $S \propto M^{2/3}$ となる。

磁気セイルの推力 F を制御するためには、磁気圏代表面積 S と推力係数 C_d の関係を明らかにする必要がある。これまでの研究によって推力係数 C_d は磁気圏代表面積を決める磁気圏サイズ L と磁気圏境界面におけるイオンの Larmor 半径 r_{Li} との比によって決まることが数値解析によって示されている⁶⁾。第 3 図に磁気圏境界面の構造と磁気圏サイズ L の関係を示す。磁気セイルがプラズマをブロックするために物理的な壁ではなく、磁場との干渉を利用しているため、磁気圏に侵入してきたイオン粒子は Larmor 半径で曲げられる。このとき、電子はイオンより軽いため、より小さな半径でイオンとは逆向きに曲げられる。これにより、磁気圏境界面には境界面電流が誘起される。磁気セイルの推力はこの境界面電流が作る磁場とコイル電流の間に生じるローレンツ力によって生じるともいえる。

この磁気圏境界面におけるイオン Larmor 半径 r_{Li} と磁気圏サイズ L との比が $r_{Li}/L \ll 1$ である場合、その境界層厚さは無視することができ、太陽風にとって磁気圏は壁のように振る舞う。結果として、効率よくプラズマを受け止められるため、 C_d も大きくなる。それに対し、 $r_{Li}/L > 1$ である場合、太陽風荷電粒子は磁気圏サイズ L よりも大きい半径で曲げられるため、太陽風は磁場の影響をほとんど受けずに通過する。故に C_d は小さくなる。太陽からの距離が 1 AU（太陽から地球までの距離）における太陽風パラメータから磁気圏境界面におけるイオン Larmor 半径は $r_{Li} = 72 \text{ km}$ であり、効率的に太陽風を受け止めるためには数十 km 以上の磁気圏サイズを実現することが必要となる。

こうしたことから、磁気セイルの推力は式 (1) から磁気

圈サイズ L を大きくすることで太陽風を効率的に受けて推力が大きくなるということがわかる。

3. 磁気セイル地上シミュレータ

太陽風の特性を第1表にまとめた。太陽風は超高速、かつ希薄なプラズマ流であり、太陽風を受け止めて得られる力は太陽から1 AUにおいて $7 \times 10^{-10} \text{ N/m}^2$ 程度となる。実際の太陽風と同一のプラズマを実験室内で生成した場合、推力の計測が可能な力を発生させるには 10^{-6} N 以上は必要であることから、大径の模擬太陽風とそれに対して十分大きな真空チャンバーが必要となる。そこで、本実験では高速、高密度のプラズマ流を太陽風とすることで、実験室サイズでの実験（スケールモデル実験）を可能とする磁気セイル地上シミュレータを構築している。

3.1 スケール則 直径2.5 mの真空チャンバー内において、チャンバー壁面との干渉を無視できる太陽風プラズマ流のサイズは直径1 m程度が限界である。このとき、磁気圏の大きさ L に比べて十分に太陽風の径が大きい必要があることから、磁気圏の大きさは0.1 m程度として、以下のスケール則により太陽風パラメータを決定した。

太陽風プラズマと磁場の干渉により、荷電粒子は $u \times B$ のローレンツ力によってイオン・電子それぞれ逆の方向に曲げられ第3図に示すような磁気圏境界面電流が流れる領域を形成する。この電流が流れている領域は、理想的には電磁波の遮へい距離を意味する skin depth

$$\delta = \frac{c}{\omega_{pe}} \quad (3)$$

程度の厚さを持つとされる。 c は光速、 ω_{pe} は電子プラズマ周波数である。実際には、地球磁気圏境界面の観測で指摘されているように、磁気圏境界面は skin depth δ よりも大きく広がっている可能性がある。磁気圏境界面に侵入した太陽風イオンと電子は電子に比べ質量の大きいイオンが電子よりも深く磁気圏に侵入することで、荷電分離が生じ外向きの電場を生成する。このような電子がイオンよりも少ない部分をシースと呼び、シースの厚さは磁気圏境界面におけるイオン Larmor 半径

$$r_{Li} = \frac{m_i u_{sw}}{e \cdot 2B_{mp}} \quad (4)$$

程度まで広がると予想されている。 e は電気素量、 B_{mp} は磁気圏境界面における磁場強度である。第1表にまとめた太陽風パラメータから宇宙空間での r_{Li} は72 kmとなる。太陽風動圧とコイル磁気圧の釣り合い式から B_{mp} は以下のように求まる。

$$B_{mp} = \sqrt{2\mu_0 n m_i u_{sw}^2} \quad (5)$$

磁気圏によるプラズマの反射を十分活用するためにはこれら skin depth とイオン Larmor 半径が磁気圏の大きさに比べて十分小さく、

$$\frac{\delta}{L} \ll 1 \quad (6)$$

$$\frac{r_{Li}}{L} \ll 1 \quad (7)$$

第1表 太陽風の特性

速度	300 ~ 500 km/s
流速	$2 \sim 5 \times 10^6 / \text{m}^3$
温度	20 eV
マッハ数	4 ~ 7
磁気レイノルズ数	10^{15}

第2表 磁気セイルのスケーリング

	磁気セイル 実機	実験室モデル 設計値
磁気圏サイズ (代表長), L	20 ~ 100 km	< 0.1 m
推力, F	1 ~ 40 N	< 1 N
Larmor 半径代表長比, r_{Li}/L	$0.1 < r_{Li}/L < 3$	$0.1 < r_{Li}/L < 3$
磁気圏厚さ代表長比, δ/L	< 0.1	< 0.3
磁気レイノルズ数, R_m	> 10^8	3 ~ 15
イオンマッハ数, M_i	8	1 ~ 5

であることが望ましい。1 Nの推力を発生する磁気圏の大きさ $L = 20 \text{ km}$ に対して、太陽風プラズマでは $\delta \sim 1 \text{ km}$ であるから、(6) 式が成立する。しかし、 $r_{Li} = 72 \text{ km}$ であることから

$$\frac{r_{Li}}{L} \sim 3.1 \quad (8)$$

となる。つまり、 $r_{Li}/L \ll 1$ の条件とはならないため、 $L = 20 \text{ km}$ 程度の磁気圏サイズでは磁気圏内にイオンが深く侵入してくることによって太陽風の運動量の推力への変換効率が下がることが予想される。

この他の無次元数として、磁気レイノルズ数とマッハ数

$$R_m = \sigma \mu_0 u_{sw} L \quad (9)$$

$$M_i = \frac{u_{sw}}{\sqrt{\gamma RT_{sw}}} \quad (10)$$

を表す。本実験では、 $L = 20 \sim 100 \text{ km}$ の磁気セイルを想定し、 $0.1 < r_{Li}/L < 3$ の条件とした。実機と実験室モデルのスケーリングを第2表にまとめた。磁気レイノルズ数 R_m のみ大きく異なる。 R_m は誘導電流の流れやすさを表すことから、磁気セイル実験においては推力を低下させる方向に寄与すると予想されるが、 R_m をどの程度まで大きくする必要があるかについては今後追求する必要がある。

3.2 磁気セイル地上シミュレータ 実験室サイズでの実験を行うため、直径2.5 mのスペースチャンバーに、太陽風シミュレータ (Solar Wind Simulator, SWS)、磁気セイルシミュレータ (Magnetic Sail Simulator, MSS) からなる磁気セイル地上シミュレータを構築した。SWSには作動ガスを水素としたMPD (Magneto-Plasma-Dynamic) アークジェットを用いた。MSSは $\phi 50 \text{ mm}$ 、20 ターンのソレノイドコイルである (第4図)。これらの装置は2台のPulse Forming Network (PFN) 電源によって電力が供給され、コントロール信号による同期により準定常動作を行う。各装置の通電波形 (第5図) からわかるように、半値幅0.8 msの定常動作である。本実験での模擬太陽風プラズマは流速 $38 \pm 7 \text{ km/s}$ 、数密度 $1.2 \times 10^{19} \pm 4.7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であり、電離度0.3程度である。MSSはプラズマブルームが一樣になるSWS出口から600 mm下流に設置し、その位

第 4 図 実験で用いた磁気セイル実験室モデル
(半径 25 mm-20 巻ソレノイドコイル)

第 5 図 各シミュレータの通電電流波形 (SWS 充電電圧: 4.0 kV, MSS 充電電圧: 1.5 kV)

第 3 表 模擬太陽風と磁気セイルコイルの特性

模擬太陽風	
作動ガス	水素
放電電流	11 kA (充電電圧 4 kV)
プラズマ速度	38 ± 7 km/s
プラズマ数密度	$1.2 \times 10^{19} \pm 4.7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$
電子温度	0.9 eV
作動時間	0.8 ms
磁気セイルコイル	
半径	25 mm, 20 巻
コイル電流 (充電電圧)	0.3 kA (0.25 kV), 0.016 mTm ³
磁気モーメント	0.7 kA (0.50 kV), 0.033 mTm ³
	1.0 kA (0.75 kV), 0.050 mTm ³
	1.3 kA (1.00 kV), 0.066 mTm ³
	1.7 kA (1.25 kV), 0.082 mTm ³
	2.0 kA (1.50 kV), 0.099 mTm ³
作動時間	0.9 ms

置でのブルーム径は半値幅で直径 0.7 m である。各装置の特性を第 3 表にまとめる。

スペースチャンバーは 1 基のターボ分子ポンプと 2 基のクライオポンプによって真空排気され、SWS 動作前の真空度は 5×10^{-3} Pa 以下に保たれた。

4. 推力測定方法

磁気セイルの推力計測には、振り子式スラストスタンドを用いたインパルス計測から推力を求める方法を採用した。本実験装置は約 1 ms の準定常動作であり、測定したインパルスを装置の動作時間で割ることで、生じた力が求まる。

実験装置の概略図を第 6 図に示す。スラストスタンドは太陽風流れと同一方向にのみ揺れるよう、長さ 1 m、幅 20 mm

第 6 図 実験装置概要図

のアルミ材を使用し、真空チャンバーの天井から 4 本のステンレスワイヤーによって吊り下げ、スラストスタンドの変位は後方のガラスフランジを通してチャンバー外に設置したレーザー変位計によって計測を行った。スラストスタンドはシミュレータ動作時間よりも長い約 1.5 s の周期で振動し、加えられた力積に比例した振幅で揺れる。単振り子を用いて既知の力積をスラストスタンドに与えることで校正を行い、スラストスタンドの最初の最大振幅を比較し、変位から力積を得る。コイルはスラストスタンドから前方に突き出すように設置し、スラストスタンドによるコイル周囲の流れへの影響を抑えている。

本スラストスタンドに生じる力には、推力であるコイルに生じる電磁力以外に、太陽風プラズマの衝突によるもの、そして、太陽風とともに到来する中性粒子の衝突によるものがある。そのため、コイルに生じる電磁力による力のみを評価するために推力は以下のように求めた。

$$F_{\text{Magsail}} = \frac{(F\Delta t)_{\text{Magsail}}}{\Delta t} = \frac{(F\Delta t)_{\text{total}} - (F\Delta t)_{\text{SWS}}}{\Delta t} \quad (11)$$

ここで F_{Magsail} は推力 (電磁力)、 Δt はシミュレータ動作時間 0.8 ms、 $(F\Delta t)_{\text{Magsail}}$ は磁気セイルの力積、 $(F\Delta t)_{\text{total}}$ は太陽風・中性粒子と磁場・コイル・スラストスタンドとの干涉による力積、 $(F\Delta t)_{\text{SWS}}$ は磁場非生成時に太陽風・中性粒子がコイルとスラストスタンドと干涉して生じる力積である。計測される $(F\Delta t)_{\text{SWS}}$ には、太陽風プラズマのコイルへの衝突による寄与が含まれているのに対し、 $(F\Delta t)_{\text{total}}$ では、磁気圏形成によりプラズマのコイルへの衝突は減少している。そのため、式 (11) を用いて得た推力は実際の推力を過小評価している。

各シミュレータ動作時のスラストスタンドの振動の様子を図に示す。第 7 図において 0.6 mm の最大振幅を示しているのが太陽風-磁場干涉によって生じた力を含む場合の変位波形である。次に 0.2 mm の振幅を示しているのがコイルとスラストスタンドに生じる太陽風の圧力による力積で生じた変位を、そして振動が遅れて始まっている波形がコイルに通電することで生じる振動である。このコイル通電

第7図 各シミュレータ動作時のスラストスタンド変位波形（SWS 充電電圧：4.0 kV，MSS 通電電流（コイル電流）：2.0 kA）

第8図 各コイル通電電流値により生じるスラストスタンドの変位

時に生じる振動は電力供給ケーブルを流れる電流の往還によって生じるものであり、第8図に示すように通電電流値が大きくなるほど振動が顕著に現れる。この振動は計測時におけるゼロ点のエラーとして、エラーバーに含めた。

5. 実験結果と考察

5.1 磁気セイル周囲の可視化 シャッターカメラによる撮像結果を第9図に示す。(a)はコイル電流0 kAの流れ場の様子を示すが、コイル前面にわずかに発光が見られる程度である。コイル電流を1.0, 1.7, 2.5 kAと変化させることで、コイル前方に弓状の暗部が観測された。コイル電流を流さない(a)の場合ではこのような流れ場が観測されないことから、これはコイル電流が作る磁場と太陽風プラズマとの干渉によって生じたと考えられる。次に、コイル中心から暗部中心までの距離を計測すると、96, 119, 136 mmとコイル電流の増加、すなわちコイル磁場の増大に合わせて距離が拡大していることがわかる。よって、観測されたコイル周囲の流れ場の変化は、コイル磁場と太陽風流れの干渉の大きさを示していることがわかる。

5.2 コイル周囲の磁場変化 磁気プローブによるコイル中心から太陽風上流方向へのコイルダイポール磁場 B_0 の分布と、太陽風と干渉時の磁場 B' の分布を第10図(a)に示す。この B' を B_0 で規格化した各電流値における磁場分布を第10図(b)に示す。各コイル電流値において、コイル

(a) コイル電流 0 kA

(b) コイル電流 1.0 kA（暗部中心までの距離：96 mm）

(c) コイル電流 1.7 kA（暗部中心までの距離：119 mm）

(d) コイル電流 2.5 kA（暗部中心までの距離：136 mm）

第9図 磁気セイル周りの流れ（MSS：太陽風噴射口から 600 mm，コイル電流 1.0, 1.7, 2.5 kA）

近傍は磁束密度が増加し、その後急激に減少している。これはコイル磁場による磁気圧と太陽風動圧が釣り合う位置において、イオンと電子の Larmor 運動の方向が異なるために生じる境界面電流によって磁場が誘起され、その磁場が境界面より内側ではコイル磁場を強める向きに、外側では弱める向きに作用するためである。地球磁気圏の観測ではこの誘導磁場によって地磁気の2倍程度まで磁気圏境界面内側で磁場強度が増大していることが知られており、本実験でも1.4倍までの増大が確認できる。このように地球磁気圏と同様の構造が観測されたことから、磁気圏境界面の位置は境界面電流の流れる位置、すなわち、元のコイル磁場と同強度の磁場が観測された位置となる。計測結果から、0.1, 0.12, 0.13 mの位置が磁気圏境界であり、コイル電流を増大し、磁気モーメントを制御することで、磁気圏サイズの制御が可能であることが明らかになった。

5.3 インパルス計測結果と推力 インパルス計測の結果を第11図に示す。コイル磁場を生成していない状態で、太陽風のみがコイルとスラストスタンドに衝突したとき、スラストスタンドには0.59 mNsのインパルスが発生した。次に0.32 kAの電流を流し、0.02 mTm³の磁気モーメントのコイル磁場に対して太陽風を供給した場合、スタンドに生じるインパルスは0.77 mNsとなった。この差分0.18 mNsが磁場セイルの推力としてコイルに生じたインパルスである。よって、太陽風が供給されている時間 ($\Delta t = 0.8$ ms) で割ることで磁気セイル推力は $F = 0.47$ Nであることがわかる。このとき、コイルに電流を流すだけでもスラスト

(a) 太陽風の干渉前後の磁場分布 (MSS: 太陽風噴射口から 600 mm, コイル電流 1.7 kA, コイル表面は 50 mm の位置)

(b) 干渉前の磁場 (コイル磁場) で規格化した干渉後の磁場分布 (MSS: 太陽風噴射口から 600 mm, コイル電流 1.0, 1.7, 2.5 kA)

第 10 図 太陽風-コイル線上におけるコイルダイポール方向磁場

第 11 図 各磁気モーメントにおいてスラストスタンドで計測されたインパルス (MSS: 太陽風噴射口から 600 mm, コイル電流 0 ~ 2.0 kA)

スタンドにインパルスが生じる。これを通電ノイズとして推力値のエラーに含めた。推力計測結果を第 12 図に示す。磁気モーメントが 0.1 mTm^3 のとき、最大推力 1.9 N が得られた。コイル電流を増加し、磁気モーメントを増大させることで、推力が増加していることがわかる。これは撮像と磁場計測結果からわかるように、コイル電流を増大させ、

第 12 図 磁気モーメントと磁気セイル推力の関係 (MSS: 太陽風噴射口から 600 mm, コイル電流 0.3 ~ 2.0 kA)

第 13 図 推力係数の実験値と理論計算値、および衝突を考慮した計算結果との比較^{6), 17)}

磁気モーメントを変化させることで、磁気圏が拡大し、より大きな推力が得られることを示している。第 12 図中に示した点線は式 (1) および (2) から推力が磁気モーメントの $2/3$ 乗に比例することから引いた線である。点線が実験値がよく一致しており、本結果が磁気モーメントを増加させることで磁気圏サイズ L が大きくなることを示している。

5.4 推力の評価 本実験結果の実機スケールとの相関について考える。本実験でのイオン Larmor 半径は $r_{\text{Li}} = 0.06 \text{ m}$ である。磁気モーメント 0.05 mTm^3 のとき、磁場計測から磁気圏サイズ $L = 0.09 \text{ m}$ であり、イオン Larmor 半径代表長比は $r_{\text{Li}}/L = 0.7$ となる。実際の宇宙空間を模擬した計算から、イオン Larmor 半径代表長比が 0.1 より大きいスケールの磁気セイルでは、太陽風が磁気圏内深く侵入するため、推力係数が小さくなる⁶⁾。比較のために本実験結果の推力係数を第 13 図に示す。

推力係数の実験値がハイブリッド粒子モデル (イオン粒子/電子流体) による数値解析による予測値より小さい値であるのは、数値解析による予測値は実際の宇宙空間での磁気セイルを模擬しているため、太陽風を無衝突プラズマとして扱っているのに対し、実験では電離度の影響で中性粒

子との衝突の影響が含まれていること、そして、推力評価を行う際に、推力を過小評価するような評価式（式 (11)）を用いているためである。衝突を考慮した条件での実験室実験を模擬した数値解析では電離度 0.3 で $C_d = 1.8$ となることが明らかにされている¹⁷⁾。本実験での電離度も 0.3 程度であり、エラーバーが大きいものの、理論計算や衝突を考慮した数値シミュレーションに近い C_d 値を示しているのは妥当であろう。

本結果を考慮して $r_{Li}/L \sim 1$ での実機性能を予測する。太陽から 1 AU において、磁気圏境界でのイオン Larmor 半径は約 72 km であり、本実験が模擬したイオン Larmor 半径代表長比 $r_{Li}/L = 0.86$ のとき、実機スケールでは磁気圏サイズ $L = 84$ km の人工磁気圏を宇宙機周りに形成していることになる。この磁気圏を形成するために必要な磁気モーメントは式 (2) から $2 \times 10^8 \text{ Tm}^3$ であり、H-IIB ロケットで打ち上げ可能な直径 4 m のコイルを想定した場合、 $1 \times 10^{13} \text{ AT}$ の起磁力が必要となる。実証機での利用を考えている高温超伝導線材を用いた場合、通電電流は 200 A 程度であることから、 7×10^{10} 巻ものコイルが必要となる。コイル線材の重量を 1 g/m としても 900 トンとなるため、実現は難しい。しかしながら、磁気セイルの磁場をプラズマ噴射で拡大する磁気プラズマセイルによって本実験が明らかにしたサイズの磁気圏を形成できれば 30 N もの推力が得られるはずであり、磁気プラズマセイルによってどの程度磁場を拡大できるかが鍵となる。

6. ま と め

太陽風とコイル磁場の干渉を利用して推力を得る磁気セイルの推力特性を明らかにするために、JAXA 宇宙科学研究所のスペースサイエンスチャンバーに構築した磁気セイル地上シミュレータを用いたスケールモデル実験を行った。

磁気セイル周りの流れの可視化と磁場計測から、コイル磁気モーメントを変化させることで、磁気圏サイズが変化することを明らかにし、また、推力計測の結果から磁気圏サイズに応じた推力が生じることを明らかにした。磁気モーメント 0.013 mTm^3 において、磁気圏サイズが 0.07 m、そのときの推力は 0.47 N であった。実験結果から得られた推力係数を介して、宇宙空間における磁気セイル実機の性能に換算すると、84 km の磁気圏サイズを形成し、30 N の推力を得ることが可能である。磁気セイル単体では、搭載用コイル重量が非常に大きくなってしまふことから現実的ではない。このため、今後は磁気セイル磁気圏をプラズマ噴射によって拡大する磁気プラズマセイルによって、同サイズの磁気圏をより小さな磁気モーメントのコイルで達成する技術の開発が望まれる。

本研究にご協力いただいた磁気プラズマセイルワーキンググループのメンバー、特に計算データを提供していただいた梶村好宏先生に深く感謝いたします。本研究は科学研究費補助金（基盤研究 (A) (No. 21246126)）、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）、科学技術振興機構（戦略的創造推進事業）の支援を受けて、JAXA 宇宙科学研究所内のスペースプラズマ研究設備にて実施した。

参 考 文 献

- 1) Andrews, D. G. and Zubrin, R. M.: Magnetic Sails and Interstellar Travel, *J. Br. Interplanetary Soc.*, **43** (1990), pp. 265–272.
- 2) Zubrin, R. M. and Andrews, D. G.: Magnetic Sails and Interplanetary Travel, *J. Spacecraft Rockets*, **28** (1991), pp. 197–203.
- 3) Zubrin, R. M.: The Use of Magnetic Sails to Escape from Low Earth Orbit, *J. Br. Interplanetary Soc.*, **46** (1993), pp. 3–10.
- 4) Winglee, R. M., Slough, J., Ziemba, T. and Goodson, A.: Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **105** (2010), pp. 21067–21077.
- 5) Akita, D. and Suzuki, K.: Kinetic Analysis on Plasma Flow of Solar Wind around Magnetic Sail, *AIAA Paper 2005-4791*, 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2005.
- 6) Fujita, K.: Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails, *J. Space Technol. Sci.*, **20** (2004), pp. 26–31.
- 7) Nishida, H., Ogawa, H., Funaki, I., Fujita, K., Yamakawa, H. and Nakayama, Y.: Two-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of a Magnetic Sail, *J. Spacecraft Rockets*, **43** (2006), pp. 667–672.
- 8) Kajimura, Y., Funaki, I., Shinohara, I., Usui, H. and Yamakawa, H.: Thrust Evaluation of Magneto Plasma Sail by Using Three-Dimensional Hybrid PIC Code, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010.
- 9) Usui, H., Kajimura, Y., Nunami, M., Funaki, I., Shinohara, I., Yamakawa, H., Nakamura, M., Akita, D. and Ueda, H. O.: Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, *J. Plasma Fusion Res.*, **8** (2009), pp. 1569–1573.
- 10) Winglee, R. M., Euripides, P., Ziemba, T., Slough, J. and Giersch, L.: Simulation of Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2) Interacting with an External Plasma Wind, *AIAA Paper 2003-5224*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2003.
- 11) 船木一幸, 小嶋秀典, 山川 宏, 清水幸夫, 都木恭一郎, 中山宜典, 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*, **54** (2006), pp. 501–509.
- 12) Funaki, I., Yamakawa, H., Shimizu, Y., Nakayama, Y., Horisawa, H., Ueno, K. and Kimura, T.: Experimental Simulation of Magnetic Sails, *AIAA Paper 2006-5227*, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
- 13) Funaki, I., Kojima, H., Yamakawa, H., Nakayama, Y. and Shimizu, Y.: Laboratory Experiment of Plasma Flow around Magnetic Sail, *Astrophys. Space Sci.*, **307** (2007), pp. 63–68.
- 14) Ueno, K., Kimura, T., Ayabe, T., Funaki, I., Yamakawa, H. and Horisawa, H.: Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, *Trans. JSASS Space Tech. Japan*, **7** (2009), pp. Pb65–Pb69.
- 15) Ueno, K., Funaki, I., Kimura, T., Horisawa, H. and Yamakawa, H.: Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail Using Parallelogram-Pendulum Method, *J. Propul. Power*, **25** (2009), pp. 536–539.
- 16) 大林辰蔵: 宇宙空間物理学, 裳華房, 東京, 1970, pp. 181–182.
- 17) Kajimura, Y., Usui, H., Funaki, I., Ueno, K., Nunami, M., Shinohara, I., Nakamura, M. and Yamakawa, H.: Hybrid Particle-in-Cell Simulations of Magnetic Sail in Laboratory Experiment, *J. Propul. Power*, **26** (2010), pp. 159–166.