

研究種目：基盤研究（B）  
研究期間：2006～2008  
課題番号：18360411  
研究課題名（和文） 外惑星への超高速航行を可能とする磁気プラズマセイル推進の地上実証実験  
研究課題名（英文） Laboratory Experiment of Magnetoplasma Sail for Rapid Deep Space Explorations  
研究代表者  
船木 一幸（FUNAKI IKKOH）  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授  
研究者番号：50311171

## 研究成果の概要：

磁気プラズマセイル（Magnetoplasma Sail, MPS）は、太陽風プラズマ流を宇宙機をつくる磁気圏で受け止めて推進する新しいタイプの宇宙機推進システムである。MPSの宇宙での動作状況を予測するため、数値シミュレーションならびにスケールモデル実験を実施した。軌道上で300kmの磁気圏サイズ（推力で100Nに相当）の磁気セイルのスケールモデル実験ならびに直接推力測定に成功すると共に、MPSの磁気圏展開メカニズムの実証に成功した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
19年度	2,000,000	600,000	2,600,000
20年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	7,900,000	2,370,000	10,270,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学，惑星探査，プラズマ推進，電気推進

## 1. 研究開始当初の背景

地球磁場を逃れて惑星間空間に出ると、強い太陽風が吹き荒れている事が知られている。もしもこの太陽風プラズマを宇宙機がつくる磁場で受け止めることが出来れば、太陽風の運動エネルギーを利用した宇宙推進（磁気セイル推進）が可能になる。だが、1990年代に Zubrin らによって行われた検討によると、宇宙機を動かす程の大きな推力を得るためには、直径100kmにもおよぶ非常に大きなコイルに電流を流して磁場を生成することが必要だとされ、このような大規模構造物を必要とする磁気セイルは実現不可能とされていた。しかしながら、図1のように、宇宙機まわりのごく小規模な磁場を人工的なプラズマ噴射により広範囲に展開させて太陽風を受け止める、「磁気プラズマセイル」とい

う手法がワシントン大の Winglee らによって提案され、注目されている。なぜなら、彼らの解析は、小規模の探査機に磁気プラズマセイル技術を適用することで、太陽系の外惑星（木星等）に飛行時間2～3年という短期間で直接移達できるという驚くべき性能を示したからである。この解析の際、彼らは、磁気プラズマセイルが太陽風の運動エネルギーを得ることにより、電気推進ロケットと同等の高い推進剤消費効率かつ1桁程度大きな推力が得られると想定した。しかしながら、彼らの検討では、磁気プラズマセイルの推進原理に関する2つの疑問：「太陽風を受け止めるための磁気プラズマセイル磁気圏を安定に保持できるのか？」、そして、「太陽風の運動量変化分がどのような条件下で、そして、どのようなプロセスで宇宙機搭載コイルに

伝達して推進となるのか?」、に対する回答が示されていない。このため、磁気プラズマセイルによる高速な宇宙航行が本当に有望なのかどうかは、明らかになっていない。従って、磁気プラズマセイルの推進原理と推進性能について、物理学・工学の双方の視点から正確な評価が求められている。

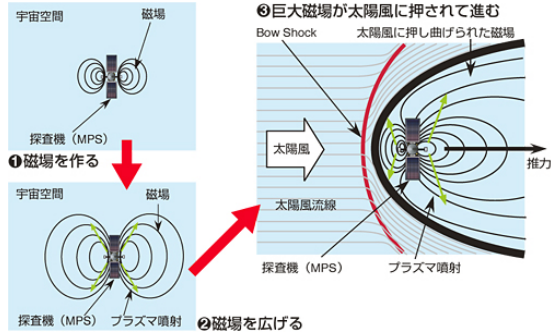


図1 磁気プラズマセイルの動作原理

## 2. 研究の目的

本研究では「宇宙機に搭載したコイルのつくる静磁場と、この磁場のプラズマ噴射による展開を利用した推進システム (磁気プラズマセイル)」の物理的・工学的可能性を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

- 1)磁気プラズマセイル宇宙機の動作を模擬する「磁気プラズマセイル実験室シミュレータ」を開発する。
- 2)上記実験室シミュレータにて、磁気セイルの磁気圏サイズと推力との関係を取得する。また、磁気圏を拡大する磁気プラズマセイルの原理実証を行う。
- 3)宇宙空間における磁気セイル/磁気プラズマセイルと地上実験の相似性を確認し、軌道上で発生可能な推力を推定する。
- 4)軌道上および実験室における磁気プラズマセイルの評価のため、電磁流体モデルによる数値解析コードを開発する。
- 5)磁気プラズマセイル宇宙機のシステムを検討して、工学的な観点から磁気プラズマセイルの実現可能性を検討する。

## 4. 研究成果

- 1)磁気プラズマセイル実験室シミュレータ  
実験室シミュレータでは、太陽風を模擬した高速プラズマ流とダイポール磁場との干渉を真空チャンバ中に実現する。真空チャンバとしては、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部所有の直径 2.5m 長さ 5m の大型スペースサイエンスチャンバを利用した。太陽風プラズマ流を模擬する太陽風シミュレータ (SWS)は、図2のようにスペースチャンバ左端に設置され、直径およそ 0.7m のプラズマジェットが真空チャンバ中央に設置された

コイルに向けて導入される。

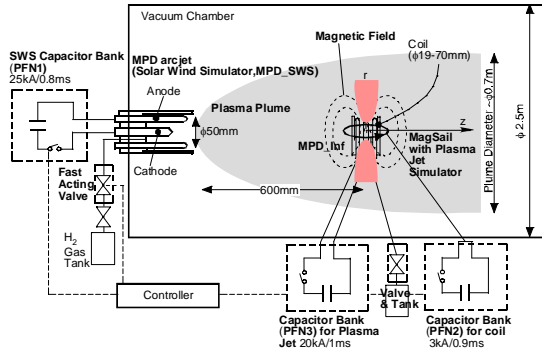


図2 磁気プラズマセイル実験室シミュレータ

高速高密度プラズマジェットを生成するため、太陽風シミュレータと磁場拡大用のプラズマ源を自己誘起磁場型電磁プラズマ力学アークジェット (MPD)方式で運用した。SWSと磁気セイルを模擬するコイルを同期させて運用すると、約 0.8ms の間準定常的なプラズマ流と磁場との干渉が継続する。その干渉の様子を図3に掲載した。コイルに電流を流すことで周囲に磁場が発生するが、太陽風模擬プラズマは抵抗ゼロの理想的な導体として振る舞うため、プラズマ領域 (太陽風)と磁場領域 (磁気圏)は電流層を介して分離する。この時超音速流である太陽風プラズマは磁気圏へ貫入できず、磁気圏を障害物としてみなすため、探査機前面 (太陽に向けた側)では衝撃波が発生して太陽風の流れが減速・屈折する。磁気セイルでは、こうした太陽風の運動量変化が磁場を介して探査機へ伝達する事で宇宙機に働く抗力となり、太陽から遠ざかるための推進力に利用することができる。

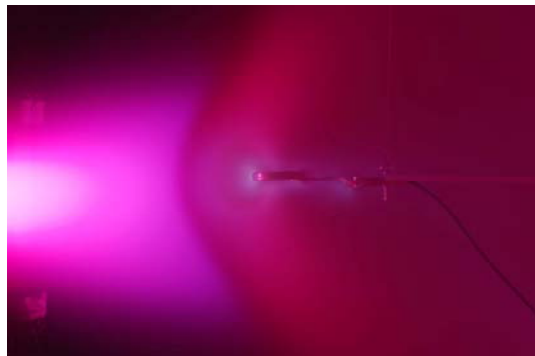


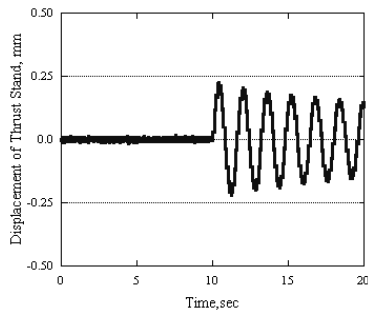
図3 磁気セイル動作のスナップショット  
(45km/s,  $10^{19}m^{-3}$  のプラズマジェットを直径 5cm/20 ターンのコイルがつくる磁場へ照射)

図3のケースでは、コイル中央から磁気圏界面 (よどみ点)位置までの距離は、およそ 10cm であった。実験では、プローブに測定によってコイル周囲の磁場分布・電流分布が得られており、模擬太陽風に圧縮されて強度

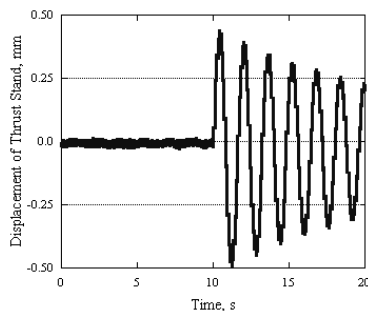
を増した磁気圏内部の磁場分布や、強い電流が流れる磁気圏界面の存在など、磁気セイル特有の磁気圏構造を把握することに成功した。

## 2) 磁気プラズマセイルの原理実証試験

模擬太陽風プラズマ流とコイルの作る磁場が干渉すると、コイルに力が作用する。この推力を、振り子式の推力計測スタンドにて測定した。磁気セイル（コイル）は搭載した推力スタンドは、 $1\text{m} \times 1\text{m}$  のアルミフレームで構成され、4本の平行なワイヤで真空チャンバ天井から下り下げられた。その上でレーザー変位計によってスタンドの変位を測定する。この推力スタンドが模擬太陽風を受けると図4 a)のように低周期で振動する。磁気セイルのインパルスは、コイル非通電時（図4 a)）と通電時（図4 b)）との変位差から得られる。SWS とコイルは時間半値幅  $0.8\text{ms}$  の準定常パルス作動であることから、インパルスを放電時間( $0.8\text{ms}$ )で割ることで平均推力が計算できる。推力は、コイル通電電流の増加と共に増大することが示され、磁気セイルに作用する推力を初めて直接計測することに成功した。磁気圏サイズを磁気圏界面（よどみ点）とコイル中心間との距離とすると、磁気圏サイズ  $L$  はコイル電流の増加と共に増加した。従って、磁気セイルの推力は磁気圏サイズの増加と共に増大することが明らかになった。



a) 磁気セイル非動作時

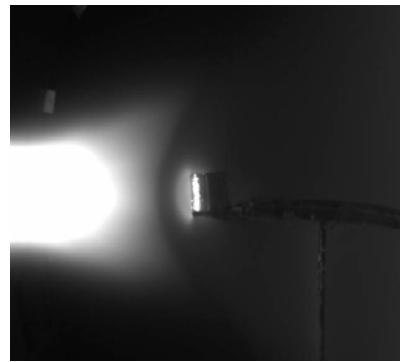


b) 磁気セイル動作時

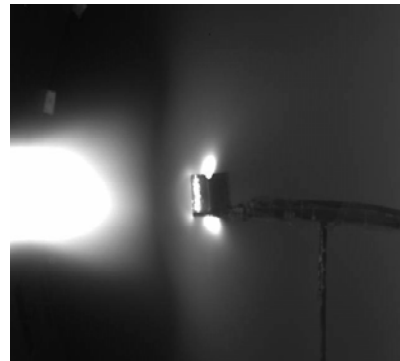
図4 磁気セイル推力スタンドの応答例

次に、コイル中心部に放電室直径  $2\text{cm}$  の小型MPD アークジェットを設置して、磁気プラズマセイル運転を実施した。コイルのみを動作

させた磁気セイル動作時（図5 a)）と比べて、図5 b) ではプラズマ噴射によって磁気圏サイズが拡大した。こうして、プラズマ噴射による磁気圏拡大の可能性を初めて実験的に示した。しかしながら、 $L$  の拡大率は  $10\%$  程度に留まっており、磁気プラズマセイル動作による推力の増大効果を検出するには至っていない。その主な原因は、 $L$  が  $10\%$  増加する際の推力増分が  $1\%$  程度と小さいことが原因である。このため、今後は、更に磁気圏を大きく拡大するための動作最適化と推力計測精度の改善を並行して実施する必要がある。



a) 磁気セイル



b) 磁気プラズマセイル

図5 磁気セイルと磁気プラズマセイルの地上実験の様子 ( $45\text{km/s}$ ,  $10^{19}\text{m}^{-3}$  のプラズマジェットを直径  $5\text{cm}/20$  ターンのコイルへ照射。コイル内部（中心磁場  $0.04\text{T}$ ）では  $\phi 2\text{cm}$  の小型MPD アークジェットを  $0.04\text{g/s}$ ,  $3.5\text{kA}$  で動作させた）

## 3) 地上実験と宇宙運用の関係

実験室実験は、磁気セイル/磁気プラズマセイルのプラズマ流が、宇宙空間における磁気セイル/磁気プラズマセイル実機周囲のプラズマ流と相似になるよう設計されている。太陽風を構成するイオンや電子が磁気圏に飛び込むと、磁場と干渉して回転運動（ラーマー運動）を行うが、イオンラーマー運動の代表長 ( $r_{Li}$ ) が磁気圏サイズ  $L$  よりも小さい場合は、磁気圏界面付近で太陽風イオンが反射される。逆に  $r_{Li} > L$  の時は、イオンはコイルの作る磁場とは干渉せずに通り抜けるのである

う。従って、磁気セイルによって十分な推力を発生させるためには、 $r_L/L$ をある程度小さくとる必要がある。こうした磁気セイルの推力特性は、図6の実線のように予想されている。本実験では  $r_L/L \sim 1$  が実現されており、宇宙における 100-300N クラス磁気セイルが初めて地上実験で検証された。

ところで、図6を見ると、地上実験による推力特性は、理論予測より小さい値を示している。こうした差異は、実験室実験が惑星間軌道上でのプラズマセイル動作を完全には模擬できないため生じる。もしも実験室にて模擬太陽風プラズマ流中のイオンや電子が中性粒子と衝突すると、模擬太陽風プラズマ運動量がコイルに作用せずに減衰する。このため、実験室磁気圏では宇宙空間を想定した解析値よりも推力が過小評価される傾向にある。一方、宇宙空間では衝突がほとんど生じない無衝突プラズマとしての性質が強く現われると考えられる。図6にて理論推力と実験値が異なるのは、このような衝突効果が原因である。

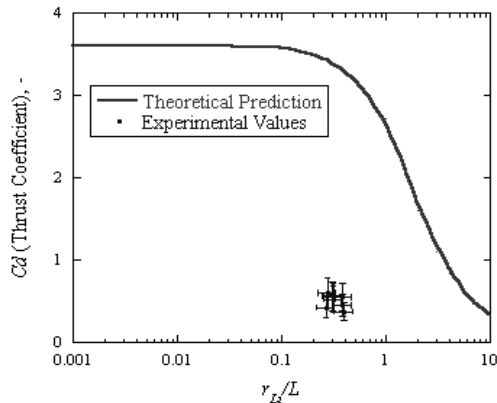


図6 磁気セイル推力特性 ( $C_d$  (推力係数) は太陽風の動圧で無次元化した推力)

#### 4) 数値シミュレーション

衝突効果が残る実験室実験では、宇宙における磁気プラズマセイル動作を完全には模擬出来ない。このため、宇宙に置く磁気セイル/磁気プラズマセイルの推進性能評価には、プラズマ数値解析技術が不可欠となる。信頼性の高い予測を行うためには、まず、地上実験との比較を通して数値シミュレーションコードを検証し、検証されたコードにて宇宙運用を予測する、という2段階のプロセスが必要である。本研究では、磁気プラズマセイルの太陽風プラズマ流と人工磁気圏の干渉を解析可能なモデルの検討、ならびに、数値シミュレーションコードの開発を行った。

$r_L/L \ll 1$  の領域では、流体モデルが適用可能である。この領域で適用可能な理想電磁流体モデル、ならびに、Hall-MHD モデルに基づく磁気プラズマセイルの解析を行った。理想電磁流体モデルによる解析では、宇宙機を取

り囲む球面状の内側境界を仮定して、ダイポール磁場を初期条件としてプラズマ流とこのダイポール磁場の干渉を解析した。宇宙機からのプラズマ噴射量を増やすと、磁気圏が徐々に膨らんで行くが、磁気圏サイズを増やしても、推力特性は必ずしも増加しなかった。このため、最適なプラズマ噴射条件が存在することが明らかになった。こうした理想MHDモデルによる解析は、磁気プラズマセイルの推力発生原理の解明に力を発揮した。

#### 5) 磁気プラズマセイルのシステム検討

高速な宇宙航行を実現するには、大きな加速度が必要である。このため、磁気プラズマセイル実機には、a) 軽量のコイルシステムの開発と、b) 大きな推力重量化、の2つが求められる。コイルとしては超電導コイルがシステムの軽量化と低電力化の面から優れており、輻射冷却を採用する事で最も磁気モーメント/重量比が得られることが分かった。例えば、外径 4m で数百 kg から 1,000kg の超電導コイルにて、数 MAT (メガ・アンペアターン) の磁気モーメントが達成可能である。しかし、設計された磁気圏を拡大するためのプラズマジェットについては、イオンのラーマー運動と代表長が同程度 ( $r_L \sim L$ ) となっており、このプラズマジェットの解析には  $r_L \ll L$  の極限でのみ成立する MHD モデルは適用できない。このため、磁気プラズマセイルの性能評価には、実機ホール効果やイオンの粒子的効果を考慮した数値解析が必要である。このように、イオンスケール磁気プラズマセイルの特性把握が今後の課題である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① K. Ueno, I. Funaki, T. Kimura, H. Horisawa, and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram-pendulum Method, Journal of Propulsion and Power, Vol.25, No.2, 2009, pp.536-539, 査読有。
- ② Y. Minami, I. Funaki, H. Yamakawa, T. Nakamura, H. Nishida, D. Sasaki, H. Yonekura, H. Kojima, and Y. Ueda, Thrust Characteristics of Magnetic Sail Spacecraft Using Superconducting Coils, AIP Conference Proceedings, Vol.1084, 2009, pp.721-727, 査読有。
- ③ I. Funaki, K. Ueno, Y. Oshio, T. Ayabe, H. Horisawa, and H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Solar Wind Sails, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol.1084, 2009, pp.754-759, 査読有。
- ④ D. Sasaki, I. Funaki, H. Yamakawa, H. Usui, and H. Kojima, Numerical Analysis

- of Magnetic Sail Spacecraft, AIP Conference Proceedings, Vol.1084, 2009, pp.784-792, 査読有.
- ⑤. I. Funaki, H. Yamakawa, K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, and H. Horisawa, Scale-model Experiment of Magnetoplasma Sail for Future Deep Space Missions, AIP Conference Proceedings, Vol.997, 2008, pp.553-560, 査読無.
  - ⑥. 西田浩之,小川博之,船木一幸,稲田芳文,磁気セイルの推進性能評価に関する3次元電磁流体解析,日本航空宇宙学会論文集, Vo.55, No.644, 2007, pp.453-457, 査読有.
  - ⑦. 船木一幸,山川宏,磁気プラズマセイルの研究と深宇宙探査への挑戦,プラズマ核融合学会誌,新たな宇宙開発を拓く核融合技術, Vol.83, No.3, 2007, pp.281-284, 査読有.
  - ⑧. I.Funaki, K.Ueno, H.Yamakawa, Y. Nakayama, T. Kimura, and H. Horisawa, Interaction between Plasma Flow and Magnetic Field in scale model experiment of Magnetic Sail, Fusion Science and Technology, Vol.51, No.2T, 2007, pp.226-228, 査読有.
  - ⑨. I. Funaki, H. Kojima, H. Yamakawa, Y. Nakayama, and Y. Shimizu, Laboratory Experiment of Plasma Flow around Magnetic Sail, Astrophysics and Space Science, Vol.307, No.1-3, 2007, pp.63-68, 査読有.
  - ⑩. 船木一幸,小嶋秀典,清水幸夫,都木恭一郎,中山宜典,山川宏,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.54,2006, pp.501-509, 査読有.
  - ⑪. H. Yamakawa, I. Funaki, Y. Nakayama, K. Fujita, H. Ogawa, S. Nonaka, H. Kunitaka, S. Sawai, H. Nishida, R. Asahi, H. Otsu, and H. Nakashima, Magneto Plasma Sail: An Engineering Satellite Concept and its Application for Outer Planet Missions, Acta Astronautica, Vol.59, 2006, pp.777-784, 査読有.
  - ⑫. H. Yamakawa, Dynamics of Radially Accelerated Trajectories, Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.49, No.164, pp.77-80, 2006, 査読有.
  - ⑬. H. Nishida, H. Ogawa, I. Funaki, K. Fujita, H. Yamakawa, Y. Nakayama, Two-dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of a Magnetic Sail, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.43, 2006, pp.667-672, 査読有.
  - ⑭. H. Nishida, H. Ogawa, I. Funaki, and Y. Inatani, MHD Analysis of Magnetosphere around Magneto Plasma Sail, Proceedings of the 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006-b-47, pp.304-309, 査読有.
- [学会発表] (計 18 件)
- ①. T. Fujimoto, H. Otsu, I. Funaki, Y. Yamagiwa, Non- Ideal MHD Effect in the Flow Field of Magneto Plasma Sail, AIAA-2009-250, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando World Center Marriott, Florida, USA., Jan. 5-8, 2009.
  - ②. D. Sasaki, I. Funaki, H. Yamakawa, H. Usui, and H. Kojima, Thrust Production Mechanism of Magnetic Sail Spacecraft with Superconducting Coils, The 59th International Astronautical Congress, IAC-08-C4.6.9, Glasgow, UK, September 29-October 3, 2008.
  - ③. H. Nishida, I. Funaki, Y. Inatani, and K. Kusano, MHD Flow Field and Momentum Transfer Process of Magneto-Plasma Sail, EPR-P3-203, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept.11, 2008.
  - ④. I. Funaki, and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind, EPR-P3-204, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept.11, 2008.
  - ⑤. K. Ueno, T. Ayabe, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Imaging of Plasma Flow around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, EPR-P3-206, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Sept.11, 2008.
  - ⑥. K. Ueno, I. Funaki, T. Kimura, T. Ayabe, H. Yamakawa, and H. Horisawa, Laboratory Simulation of Magnetoplasma Sail, AIAA-2008-4820, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Hartford, July 22, 2008.
  - ⑦. K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki, H. Yamakawa, and H. Horisawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 2008-b-05, June 2008.
  - ⑧. I. Funaki, and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind, Asian Joint Conferences on Propulsion and Power (AJCPP), C-6-2, March 7, 2008.
  - ⑨. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, H. Nakashima, Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field by

- Injecting Plasma with Different Beta, Asian Joint Conferences on Propulsion and Power (AJCPP), C-4-3, March 7, 2008.
- ⑩. 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, IEPC-2007-94, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Sept.20, 2007.
- ⑪. K. Ueno, T. Kimura, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Laboratory Experiment of Magnetoplasma Sail, Part 1: Pure Magnetic Sail, IEPC-2007-61, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Sept.20, 2007.
- ⑫. H. Nishida, I. Funaki, H. Ogawa and Y. Inatani, MHD Analysis on Propulsive Characteristics of Magneto Plasma Sail, IEPC-2007-195, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Sept.20, 2007.
- ⑬. I. Funaki, K. Ueno, T. Kimura, H. Horisawa, and H. Yamakawa, Scale- Model Experiment of Magnetoplasma Sail: Preliminary Results, AIAA-2007-5857, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 11, 2007, Cincinnati.
- ⑭. H. Nishida, H. Ogawa, I. Funaki and Y. Inatani, The Mechanism and Efficiency of Magnetic Field Inflating by Plasma Jets, AIAA-2007-4103, 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Miami, June 26, 2007.
- ⑮. H. Nishida, H. Ogawa, I. Funaki and Y. Inatani, MHD Analysis of Flow Fields Around Magneto Plasma Sail, AIAA-2007-585, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan.8-11, 2007.
- ⑯. Y. Kajimura, K. Noda, H. Nakashima, and I. Funaki, Feasibility Study of Magneto Plasma Sail by Using Numerical Simulation and Experiment, AIAA-2007-587, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, Jan.8-11, 2007.
- ⑰. I. Funaki and H. Yamakawa, Overview of Magnetic Plasma Sail (MPS) project and the Current Status of Plasma Simulations (MHD & Hybrid), JAXA/JEDI Workshop on Numerical Plasma Simulation for Space Environment, Tokyo, Oct., 2006.
- ⑱. I. Funaki, H. Yamakawa, Y. Shimizu, Y. Nakayama, H. Horisawa, K. Ueno, and T. Kimura, Experimental Simulation of

Magnetic Sails, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, AIAA-2006-5227, July 12, 2006.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 一幸 (FUNAKI IKKOH)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号：50311171

(2) 研究分担者

山川 宏 (YAMAKAWA HIROSHI)

京都大学・生存圏研究所・生存圏開発創成研究系・教授

研究者番号：50260013

大津 広敬 (OTSU HIROTAKA)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：20313934

堀澤 秀之 (HORISAWA HIDEYUKI)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：30256169

(3) 連携研究者

藤田 和央 (FUJITA KAZUHISA)

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・空気力学研究グループ・主任研究員

研究者番号：90281584

小川 博之 (OGAWA HIROYUKI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・宇宙航行システム研究系・准教授

研究者番号：60311172

安部 隆士 (ABE TAKASHI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・宇宙輸送工学研究系・教授

研究者番号：60114849

中島 秀紀 (NAKAJIMA HIDEKI)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：60112306

(3) 研究協力者

西田浩之 (NISHIDA HIROYUKI)

東京大学大学院工学系研究科・大学院生

上野一磨 (UENO KAZUMA)

総合研究大学院大学・大学院生

木村俊之 (KIMURA TOSHIYUKI)

東海大学大学院工学研究科・大学院生

綾部友洋 (AYABE TOMOHIRO)

東海大学大学院工学研究科・大学院生

藤本智也 (FUJIMOTO TOMOYA)

静岡大学大学院工学研究科・大学院生

大塩裕哉 (OSHIO YUYA)

総合研究大学院大学・大学院生

南祐一郎 (MINAMI YUICHIRO)

京都大学大学院工学研究科・大学院生

佐々木大祐 (SASAKI DAISUKE)

京都大学大学院工学研究科・大学院生