

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年8月21日現在

機関番号：82645
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：平成21年度～平成24年度
 課題番号：21246126
 研究課題名（和文） 磁気プラズマセイルの推進性能評価と最適化
 研究課題名（英文） Performance Evaluation of Magnetoplasma Sail
 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・宇宙科学研究所・准教授
 研究者番号：50311171

研究成果の概要（和文）：

超伝導コイルによる磁場をプラズマ噴射により広く展開して太陽風を受け止める事で推進力を得る宇宙機を磁気プラズマセイル宇宙機と呼ぶ。磁気プラズマセイルは、太陽系内を移動するための新しい深宇宙推進システムとして注目されていたが、その推進原理が本当に成立するかどうかについては賛否両論があった。本研究では、磁気プラズマセイルによる推力生成を数値実験ならびに地上実験で模擬することに成功するなど、磁気プラズマセイルが物理的に可能であることを初めて示した。

研究成果の概要（英文）：

Magnetoplasma sail (MPS) is an advanced in-space propulsion concept to accelerate a spacecraft in the direction leaving the sun by receiving the solar wind momentum with an artificially produced magnetosphere around a spacecraft. The concept relies on magnetosphere inflation process, in which artificially emitted plasma from a spacecraft is used to increase the magnetospheric size, but whether the process is effective to increase MPS's thrust level or not was a controversial issue. This study demonstrated the validity of MPS, showing thrust enhancement by numerical simulations as well as scale-model experiment in a vacuum chamber

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	22,500,000	6,750,000	29,250,000
2010年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	36,000,000	10,800,000	46,800,000

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, マグセイル

1. 研究開始当初の背景

地球磁場を逃れて惑星間軌道にでると、強い太陽風が吹いている事が知られている。もしこの太陽風プラズマを宇宙機をつくる人工的な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。1990年代に Zubrin らによって行われた検討によると、磁気セイルが宇宙機を動かす程の推力を得るためには、直径 100km にもおよぶ巨大なコ

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、その巨大さゆえに磁気セイルは実現不可能とされていた。その後、2000年には、宇宙機まわりのごく小規模な磁場をプラズマ噴射にて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（Fig.1）がワシントン大の Winglee らによって提案され、注目を集めた。なぜなら、彼らの解析は、太陽風の運動エネルギーを得ることにより、電気推進機関と同等の高い推

進剤消費効率かつ1桁程度大きい推力を得ることができ、このため、小規模の探査機であっても太陽系の外惑星（木星等）に直接移行し飛行時間1〜2年という短期間で到達できるという、驚くべき性能を予測していたからである。そして彼らは、わずか10年足らずで太陽系脱出が可能であると報告した。このような推進システムが本当に有望なのかどうか？ Winglee の提案に対して、国内外で大きな論争がわき起こったが、磁気プラズマセイルの提案を裏付けるための実験や数値シミュレーションがなされていなかった。そこで我々のグループでは、磁気プラズマセイルの推力特性を評価可能な数値シミュレーションツールを開発すると共に、磁気プラズマセイルの相似則を考慮したスケールモデル実験システムを構築した。そして、純粋な磁気セイル（プラズマ噴射による磁場拡大を伴わないもの）のスケールモデル実験に世界で初めて成功した。その後、この地上実験技術をベースに、磁気プラズマセイルの実験的検証にも取り組んだが、磁気プラズマセイル動作時の推力増大効果は、検出できていなかった。

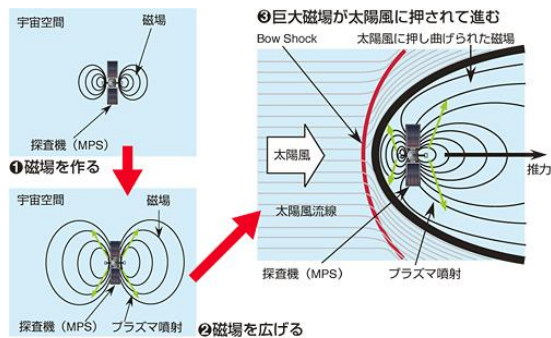


Fig.1 磁気プラズマセイルの推進原理

2. 研究の目的

本研究では、惑星間を航行する磁気プラズマセイル宇宙機の推力特性を実験的理論的手法により解明することを目的とする。磁気プラズマセイル推進の概念の有効性を実験ならびに数値解析にて確認し、その上で、磁気プラズマセイルの推力特性を最適化する。また、磁気プラズマセイルによる深宇宙探査の可能性についても検討する。

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」を開発し、原理検証実験を実施する。

2) プラズマ数値シミュレーションにより磁気プラズマセイルの推力特性を解明する。特に、コイルのみを動作させた推力（磁気セイルとしての推力）を F_{mag} 、磁気プラズマセイル動作に移行した時の推力を F_{MPS} とした時

の、推力増幅率 (F_{MPS}/F_{mag}) を最大化する。なお、 F_{MPS}/F_{mag} を推力ゲインと呼ぶ。

3) 磁気プラズマセイル宇宙機システム の概念検討を実施して、磁気プラズマセイルによる深宇宙探査の可能性について検討する。

4. 研究成果

1) 磁気プラズマセイルの推力発生原理を検証するためのスケールモデル実験を実施した。試験装置の概略を Fig.2 に示す。

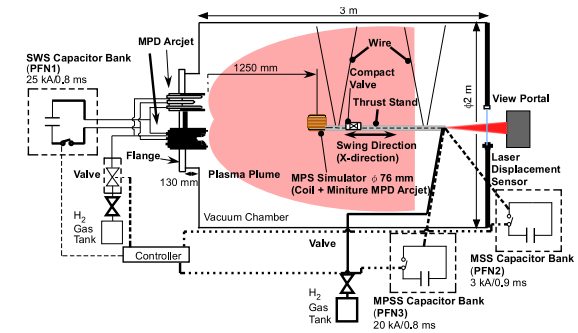


Fig.2 磁気プラズマセイル実験装置

本装置は、直径2m長さ3mの真空チャンバ内に太陽風模擬プラズマ流と磁気プラズマセイル宇宙機がつくる磁気圏との干渉を模擬するが、太陽風シミュレータと駆動用電源系、パルス制御系、ならびに、電流・推力等の計測系から構築される。太陽風シミュレータについては、放電室内直径50mmの電磁プラズマ力学(MPD)アークジェットを3台用いることで直径1mの大口徑プラズマジェットを実現した。磁気プラズマセイル宇宙機を模擬するMPSシミュレータには、直径76mm・20ターンのソレノイドコイルの内側に2台の小型MPDアークジェットが設置されており、コイル軸方向にプラズマジェットを噴射する。各MPDアークジェットは、コンデンサに接続されたPulse Forming Network回路にて約0.8ms間の準定常作動を行う。Fig.3には、その動作の様子を示した。

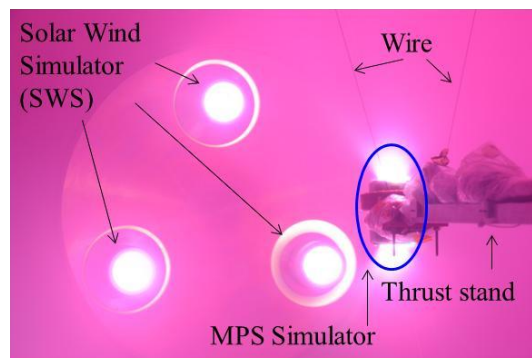


Fig.3 磁気プラズマセイル実験の様子 ($1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、40km/sの太陽風模擬プラズマジェット中に、MPSシミュレータを挿入)

Fig. 3 の左側には太陽風シミュレータである 3 台の MPD アークジェットが、また、同図の右側には磁気プラズマセイル宇宙機を模擬したコイルと 2 方向にプラズマを噴射する MPD アークジェットが動作の様子が示されており、MPS シミュレータはワイヤーにて支持されたスラストスタンドへ搭載されている。以上の装置にて、磁気プラズマセイルのスケールモデル実験と推力の直接測定を実施し、最大推力ゲイン 1.9 を得るなど、磁気プラズマセイルの原理検証実験に世界で初めて成功した。

2) 磁気プラズマセイルは、太陽風の運動量変化を宇宙機の推力へと変換する。太陽風の運動量変化に相当する力は、磁気圏界面に誘起された電流とコイル電流とが相互作用することで宇宙機 (コイル) へ作用するが、その際、磁気圏界面電流が作る誘導磁場は、コイル電流ならびにコイル周辺のプラズマ電流と相互作用する。その際、磁気圏内を流れるプラズマは、ローレンツ力により加速して下流側 (太陽風の方向) へ吹き流される傾向にある。数値計算によると、磁気セイルから磁気インフレーションを行って磁気プラズマセイル動作へ移行しても、磁気圏サイズは増大するものの、推力アップはほとんど期待できないことが明らかになった。こうした課題を克服するため、本研究では、磁気圏中心付近の強磁場領域にトラップされた荷電粒子を利用するタイプの磁気プラズマセイルを検討した。Fig. 4b のように地球と同じ南向きの磁気ダイポールの場合、正電荷のイオンは東向きに、負電荷の電子は西向きにドリフト運動することから、コイル電流と同じ東向きの同心円状のプラズマ電流 (リング状電流) が形成される。このプラズマは、磁気圏の磁場に閉じ込められていることから、Fig. 4a のタイプの磁気圏周辺部プラズマ電流とは異なり、下流側へ吹き流される心配が無い。従って、リング状電流にて磁気モーメントを高めることによって推力が増加すると期待される。このアイデアを検証するために実施した Fig. 5 のテストシミュレーションでは、リング状電流を活性化することで内部磁気圏にトラップされた電流系が構築され、磁気圏サイズと推力が増加した。リング状電流の安定性を考慮しつつパラメータサーベイを実施したところ、電磁流体シミュレーションに基づく磁気プラズマセイルでは、最大推力ゲイン 3 が得られた。イオンの粒子運動効果を考慮できるイオンハイブリッドシミュレーションでも同様の結果が得られており、イオンハイブリッドシミュレーションや全粒子シミュレーションでは最大 10 の推力ゲインが、イオン単一粒子と背景中和電子を仮定したモデルでは最大 40 の推力ゲインが得られている。このように、数値解析においても

磁気プラズマセイルの可能性を世界で初めて示すことができた。

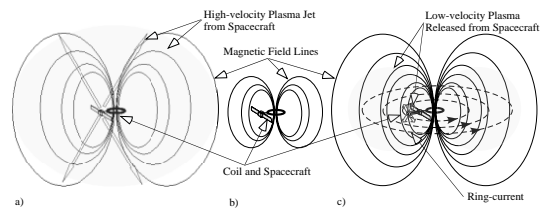


Fig. 4 磁気プラズマセイルの磁気インフレーション方式 a) M2P2 方式、b) コイルのみの場合、c) ring-current 方式

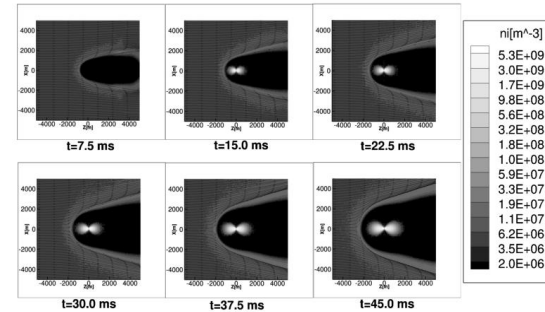


Fig. 5 磁気プラズマセイルの 2 次元全粒子数値シミュレーション (イオン数密度 $[m^{-3}]$ 分布) : マグセイル状態から磁気圏内へ低速プラズマを注入し続けると、経過時間と共にリング状電流が発展し磁気圏サイズが拡大した。t=45ms では t=7.5ms に比べて磁気圏サイズが約 3 倍、推力が約 5 倍となった。

3) 超伝導コイルを搭載した磁気セイルならびに磁気プラズマセイル宇宙機の概念設計を実施した。まず、磁気セイル小型試験機として総重量 150kg の小型磁気セイルが地球周回長楕円軌道に投入されるケースを検討し、磁気圏外を飛行するごく短い期間中に太陽風を受けて磁気セイルの推力生成を検証する計画を立案した。しかし、磁気セイル単独での推力は惑星間の軌道変換をするには小さすぎることから、本格的な深宇宙推進へ応用するためには、磁気プラズマセイルにて推力を増強する必要がある。そこで、超伝導コイルを搭載した木星フライバイ宇宙機として、総重量 860kg・磁気プラズマセイル推進系として 300mN/260kg のシステム検討を実施した (Fig. 6)。

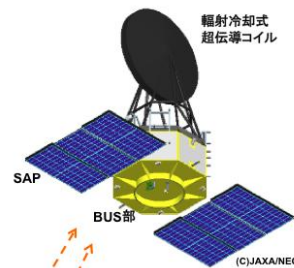


Fig. 6 磁気プラズマセイル木星探査機

輻射冷却式超伝導コイルについては、直径 3.5m、 10^6 AT (アンペアターン)、重量 200kg の高温超伝導コイルを想定しており、コイルを 20K まで輻射冷却して通電可能であることを確認している。更には、1/30 サブスケールモデルコイルの製作を行い、小型電源と共に 30 時間を超える通電試験も成功した。しかし、磁気プラズマセイルによる深宇宙推進が他の推進システムを凌駕するためには、現状想定しているよりも更に大きな推力重量比が必要であり、軽量かつ高磁気モーメントな超伝導コイルの開発や、推力ゲインの更なる向上が今後の課題として残った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

1. Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, and H. Yamakawa, Conceptual Design of YBCO Coil with Large magnetic Moment for Magnetic Sail Spacecraft, IEEE Trans. Applied Supercond., in press.
2. I. Funaki, Y. Kajimura, Y. Ashida, H. Nishida, Y. Oshio, I. Shinohara and H. Yamakawa, The Use of Dipole Plasma Equilibrium for Magnetic Sail Spacecraft, Trans. Fusion Sci. Technol., in press.
3. K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Magnetic Sail for Various Tilt Angles, Trans. JSASS, Aerospace Technol. Jpn., 10 (2012), pp.Tb_13-Tb_16, doi:10.2322/tastj.10.Tb_13.
4. 長崎陽, 中村武恒, 船木一幸, 芦田康将, 山川宏, 伝導冷却マグネットを指向したビスマスならびにイットリウム系高温超電導テープ導体の伝熱特性, 低温工学, 47 (2012), pp.597-604, doi:10.2221/jcsj.47.597.
5. M. Matsumoto, Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki and I. Shinohara, Application of a Total Variation Diminishing Scheme to Electromagnetic Hybrid Particle-in-cell Plasma Simulation, Comp. Phy. Comm., 183 (2012), pp.2027-2034, doi: 10.1016/j.cpc.2012.04.021
6. M. Matsumoto, Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki and I. Shinohara, Two-Dimensional Hybrid Particle-In-Cell Simulation of Solar Wind Plasma Flow around Magnetic Sail, Trans. JSASS, Aerospace Technol. Jpn, 10 (2012), pp.Pb_43-Pb_50, doi:10.2322/tastj.10.Pb_43.
7. Y. Kajimura, I. Funaki, M. Matsumoto, I. Shinohara, H. Usui, K. Ueno, Y. Oshio and H. Yamakawa, 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail on Ion Inertial Scale in Laboratory, Trans. JSASS, Aerospace Technol. Jpn., 10 (2012), pp.Pb_19-Pb_25, doi:10.2322/tastj.10.Pb_51.
8. Y. Ashida, I. Funaki, H. Yamakawa, Y. Kajimura and H. Kojima, Thrust Evaluation of a Magnetic Sail by Flux-Tube Model, J. Propul. Power, 28 (2012), pp.642-651, doi:10.2514/1.B34332.
9. H. Nishida and I. Funaki, Analysis of Thrust Characteristics of a Magnetic Sail in a Magnetized Solar Wind, J. Propul. Power, 28 (2012), pp.636-641, doi:10.2514/1.B34260.
10. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, M. Matsumoto and H. Yamakawa, Thrust and Attitude Evaluation of Magnetic Sail by Three-Dimensional Hybrid Particle-in-Cell Code, J. Propul. Power, 28 (2012), pp.652-663, doi:10.2514/1.B34334.
11. 松本正晴, 梶村好宏, 臼井英之, 船木一幸, 篠原育, 惑星間磁場を考慮した磁気セイルの 2 次元 Hybrid-PIC シミュレーション, 日本航空宇宙学会論文集, 60 (2012), pp.31-39, doi:10.2322/jjsass.60.31.
12. Y. Kajimura, I. Funaki, H. Nishida, H. Usui, I. Shinohara, H. Yamakawa and H. Nakashima, Quantitative Evaluation of Ion Kinetic Effect in Magnetic Field Inflation by the Injection of a Plasma Jet, Trans. JSASS, 54 (2011), pp.90-97, doi:10.2322/tjsass.54.90.
13. H. Nishida, I. Funaki, Y. Inatani and K. Kusano, Discussion on Momentum Transfer Process of a Magneto-Plasma Sail, J. Propul. Power, 27 (2011), pp.1149-1153, doi: 10.2514/1.B34141.
14. 芦田康将, 船木一幸, 山川宏, 梶村好宏, 小嶋浩嗣, 磁気セイル推力解析のための簡易モデルの検討, 日本航空宇宙学会論文集, 59 (2011), pp.126-131, doi:10.2322/jjsass.59.126.
15. Y. Kajimura, K. Ueno, I. Funaki, H. Usui, M. Nunami, I. Shinohara, M. Nakamura and H. Yamakawa, 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail Including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory, Trans. JSASS, Aerospace Technol. Jpn., 8 (2010) pp.Pb_19-Pb_25, doi:10.2322/tastj.8.Pb_19.
16. T. Fujimoto, H. Otsu, I. Funaki and Y. Yamagiwa, MHD Analysis of the Magnetic Diffusion Effect on Magneto Plasma Sail, Trans. JSASS, 53 (2010), pp.84-90, doi:10.2322/tjsass.53.84.
17. Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki, K. Ueno, M. Nunami, I. Shinohara, M. Nakamura and H. Yamakawa, Hybrid Particle-in-Cell Simulations of Magnetic Sail in Laboratory Experiment, J. Propul. Power, 26 (2010), pp.159-166, DOI: 10.2514/1.45096.
18. K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, Trans. JSASS, Space Technol. Jpn., 7 (2009), pp.Pb_65-Pb_69, doi:10.2322/tstj.7.Pb_65.
19. H. Usui, Y. Kajimura, M. Nunami, I. Funaki, I. Shinohara, H. Yamakawa, M. Nakamura, D. Akita and H.O. Ueda,

- Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, *J. Plasma & Fusion Res. SERIES*, 8 (2009), pp.1569-1573.
20. H. Nishida, I. Funaki, Y. Inatani and K. Kusano, MHD Flow Field and Momentum Transfer Process of Magneto-Plasma Sail, *J. Plasma & Fusion Res. SERIES*, 8 (2009), pp.1574-1579.
 21. I. Funaki and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion Using the Solar Wind, *J. Plasma & Fusion Res. SERIES*, 8 (2009), pp.1580-1584.
 22. K. Ueno, T. Ayabe, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Imaging of Plasma Flow around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, *J. Plasma & Fusion Res.*, *SERIES*, 8 (2009), pp.1585-1589.
 23. Y. Kajimura, H. Usui, M Nunami, I. Funaki, I. Shinohara and H. Nakashima, Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field in Space by Plasma Jet Injection, *J. Plasma & Fusion Res. SERIES*, 8 (2009), pp.1616-1621.
 24. K. Ueno, I. Funaki, T. Kimura, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram-pendulum Method, *J. Propul. Power*, 25 (2009), pp.536-539, doi: 10.2514/1.39211.
- [学会発表] (計 28 件)
1. Y. Ashida, I. Funaki, H. Yamakawa and Y. Kajimura, Two- and Three-dimensional Particle-in-cell Simulation of Magneto Plasma Sail, 63rd IAC, IAC-12,C4,8,11,x13824, Naples, Oct. 2012.
 2. Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Kojima and H. Yamakawa, Conceptual Design of Conduction-Cooled Superconducting Magnets for Space Application, App. Superconductivity Conf. 2012, Oregon, 1LA-07, Oct. 2012.
 3. Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Kojima and H. Yamakawa, Numerical Investigation on Conduction-cooled Superconducting Magnets in Space, 63rd IAC, C.2.4.20, Naples, Oct. 2012.
 4. K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki and H. Yamakawa, Experimental Simulation of Magnetoplasma Sail for Thrust Measurement, Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, P-58, Tsukuba, Aug., 2012.
 5. I. Funaki, Y. Kajimura, Y. Ashida, H. Nishida, Y. Oshio, I. Shinohara, H. Yamakawa, The Use of Dipole Plasma Equilibrium for Magnetic Sail Spacecraft, Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, O-15, Tsukuba, Aug. 2012.
 6. I. Funaki, Y. Kajimura, H. Nishida, Y. Ashida, H. Yamakawa, I. Shinohara, and Y. Yamagiwa, Progress in MHD and Particle Simulations of Magnetoplasma Sail, 48th Joint Propulsion Conf. (JPC), AIAA-2012-4300, Atlanta, 2012,.
 7. Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, H. Kojima and H. Yamakawa, Cooling Characteristics of Conduction-Cooled HTS Coil Aiming at Magnetic Sail for Space Mission, 24th Int. Cryogenic Engineering Conf., 17B-OR4-01, Fukuoka, May 2012.
 8. Y. Ashida, I. Funaki, H. Yamakawa and Y. Kajimura, Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Magnetic Sails, 32nd Int. Electric Propulsion Conf. (IEPC), IEPC-2011-180, Wiesbaden, Sept. 2011.
 9. Y. Oshio, K. Ueno and I. Funaki, Experimental Investigation of Magnetoplasma Sail: Magnetosphere Inflation by Equatorial Ring Current, 32nd IEPC, IEPC-2011-186, Wiesbaden, Sept. 2011.
 10. K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki, and H. Yamakawa, Thrust Characteristics of Pure Magnetic Sail for Various Attack Angles in Laboratory Experiment, 32nd IEPC, IEPC-2011-296, Wiesbaden, Sept. 2011.
 11. Y. Oshio, K. Ueno, and I. Funaki, The Dynamic Behavior of Magnetic Sails in Laboratory, 47th JPC, San Diego, July-Aug. 2011.
 12. Y. Ashida, I. Funaki, H. Yamakawa and Y. Kajimura, Numerical Model for Pure Magnetic Sail, 28th ISTS, 2011-b-53, Okinawa, June 2011.
 13. M. Matsumoto, Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki and I. Shinohara, Two-Dimensional Hybrid PIC Simulation on the Performance of a Magnetic Sail, 28th ISTS, 2011-b-54, Okinawa, June 2011.
 14. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, K. Ueno, Y. Oshio, M. Matsumoto and H. Yamakawa, 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail in the Ion Inertial Scale in Laboratory, 28th ISTS, 2011-b-55, Okinawa, June 2011.
 15. K. Ueno, Y. Oshio, I. Funaki, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Magnetic Sail for Various Tilt Angles, 28th ISTS, 2011-b-56, Okinawa, June 2011.
 16. N. Yamamoto, M. Matsumoto, I. Funaki and Y. Yamagiwa, Magnetohydrodynamic Numerical Analysis of Magnetic Plasma Sail Including the Effect of Interplanetary Magnetic Field, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA-2011-1073, Orlando, Jan. 2011.
 17. H. Nishida and I. Funaki, Aerodynamic Characteristics of Magnetic Sail in

- Magnetized Solar Wind, 61st IAC, IAC-10.C4.8.5, Prague, Sept.-Oct. 2010.
18. T. Koyama, I. Funaki, T. Nakamura, H. Kojima and H. Yamakawa, Thrust Control System for Magnetic Sail Spacecraft under Variable Solar Wind Environment, 61st IAC, IAC-10.C4.8.6, Prague, Sept.-Oct. 2010.
 19. I. Funaki, H. Yamakawa, Y. Kajimura, K. Ueno, Y. Oshio, H. Nishida, H. Usui, M. Matsumoto and I. Shinohara, Experimental and Numerical Investigations on the Thrust Production Process of Magnetoplasma Sail, AIAA-2010-6773, 46th JPC, Nashville, July 2010.
 20. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui and H. Yamakawa, Thrust Evaluation of Magneto Plasma Sail by Using Three-Dimensional Hybrid PIC Code, AIAA-2010-6686, 46th JPC, Nashville, July 2010.
 21. I. Funaki, K. Ueno, Y. Oshio, H. Horisawa and H. Yamakawa, Plasma Wind Tunnel for Plasma Sail Experiments, AJCPP2010-135, Miyazaki, Mar. 2010.
 22. Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki, I. Shinohara, and H. Yamakawa, Numerical Study of an Inflation of a Dipolar Magnetic Field by Plasma Jet Injection in Magneto Plasma Sail, 7th Int. Symp. Appl. Plasma Sci. (ISAPS), Hamburg, Aug.-Sept. 2009.
 23. K. Ueno, I. Funaki, T. Ayabe, Y. Oshio, H. Horisawa, Evaluation of Magnetic Field Interacted with Plasma Flow in Pure Magnetic Sail Scale Model, 7th ISAPS, Hamburg, Aug.-Sept. 2009.
 24. I. Funaki, H. Yamakawa, Research Status of Magnetoplasma Sail, 31st IEPC, IEPC-2009-03, Ann Arbor, Sept. 2009.
 25. Y. Oshio, K. Ueno and I. Funaki, Fluctuation of Magnetosphere in Scale-model Experiment of Magnetic Sail, 31st IEPC, IEPC-2009-09, Ann Arbor, Sept. 2009.
 26. K. Ueno, I. Funaki and Y. Oshio, H. Horisawa, and H. Yamakawa, Thrust Characteristics of Pure Magnetic Sail in Laboratory Experiment, 31st IEPC, IEPC-2009-11, Ann Arbor, Sept. 2009.
 27. I. Funaki and H. Yamakawa, Magnetoplasma Sail : New Spacecraft Propulsion using the Solar Wind, 17th Int. Conf. MHD Energy Conversion, K2-1, Shonan, Sept. 2009.
 28. I. Funaki, K. Ueno and Y. Oshio, T. Ayabe H. Horisawa and H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Magnetoplasma Sail, 45th JPC, AIAA 2009-5451, Denver, Aug. 2009.
- [図書] (計 1 件)
1. I. Funaki and H. Yamakawa, Solar Wind Sails, in Exploring the Solar

Wind, Marian Lazar, ed., In-Tech., Mar. 2012, pp.439-462.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 一幸 (FUNAKI Ikkoh)
宇宙航空研究開発機構・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・教授
研究者番号：50260013
堀澤 秀之 (HORISAWA Hideyuki)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：30256169
山極 芳樹 (YAMAGIWA Yoshiki)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号：30220255
大津 広敬 (OTSU Hiroataka)
龍谷大学・理工学部・准教授
研究者番号：20313934

(3) 連携研究者

篠原 育 (SHINOHARA Iku)
宇宙航空研究開発機構・准教授
研究者番号：20301723
西田 浩之 (NISHIDA Hiroyuki)
東京農工大学・准教授
研究者番号：60545945
坪井 伸幸 (TSUBOI Nobuyuki)
九州工業大学・准教授
研究者番号：40342620

(4) 研究協力者

梶村 好宏 (KAJIMURA Yoshihiro)
明石工業高等専門学校・講師
上野 一磨 (UENO Kazuma)
宇宙航空研究開発機構・研究員
大塩 裕哉 (OSHIO Yuya)
総合研究大学院大学・大学院生
芦田 康将 (ASHIDA Yasumasa)
京都大学大学院工学研究科・大学院生
長崎 陽 (NAGASAKI Yoh)
京都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
山本 直樹 (YAMAMOTO Naoki)
静岡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
小山 友一 (KOYAMA Tomokazu)
京都大学大学院工学研究科・大学院生
向井 祐利 (MUKAI Yuri)
京都大学大学院工学研究科・大学院生