

氏 名 大塩 裕哉

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1582 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 太陽風を利用した磁気プラズマセイル推進の推進特性
に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 臼井 英之 神戸大学
准教授 船木 一幸
准教授 篠原 育
准教授 清水 敏文
教授 山川 宏 京都大学
研究員 藤田 和央

宇宙航空研究開発機構

論文内容の要旨

低コストかつ短期間での太陽系探査を実現するための推進機の開発が進められており、いくつかの推進システムが提案されている。その1つの候補が太陽起源の超音速のプラズマ流である太陽風を、宇宙機に搭載したコイルの作る磁場とプラズマ流との干渉によって形成される磁気圏で受け止めることにより推進力を得る磁気プラズマセイル (MagnetoPlasma Sail: MPS) である。しかし、コイルの作る磁場だけで十分な推力を得るためには数 km という大きさのコイルが必要となり非現実的である。そこで、宇宙機からプラズマを噴射することにより磁気圏を拡大し、小さなコイルで大きな磁気圏を形成するアイデアが提案され、その研究が進められている。本研究では、MPS の実験的研究を行った。

MPS の実験室実験はスケーリング則に基づいたスケールモデル実験を真空チャンバ内で実施するものであり、太陽風シミュレータと宇宙機を模擬したソレノイドコイル、磁気圏拡大用プラズマ源から構成される。太陽風シミュレータとして電磁プラズマ力学アークジェット (MPD-Arcjet: Magneto-Plasma Dynamic Arcjet) を採用するが、MPD アークジェットはこれまで推進機としての研究が主であり太陽風シミュレータのようなプラズマ風洞としての特性評価は行われていなかった。また、磁気圏拡大した MPS の全系試験を行うためにはこれまでより大口径のプラズマ流が要求され、非定常な推進特性や磁気圏拡大を行った場合の推力計測実験は未実施であった。磁気プラズマセイル研究の最終目標は MPS の実用化であるが、その目標に向けて本研究では 1) 太陽風シミュレータのプラズマ風洞としての特性評価と大口径化、2) 磁気セイルの非定常推進特性の解明、ならびに、3) 磁気プラズマセイルの磁気圏拡大の改善と推力特性評価の 3 つを目的とした研究を実施した。

本論文は 10 章から構成され、各章は以下のように要約される。第 1 章は序論であり、本研究の背景として深宇宙探査の現状と過去の磁気プラズマセイルの研究を紹介している。第 2 章は磁気プラズマセイルの基礎物理とスケーリング則について述べており、スケールモデル実験のパラメータ設計について述べている。第 3 章は実験装置と計測システムについて記述し、各装置の特性を示している。

第 4 章では、単体動作の太陽風シミュレータのプラズマ風洞としての特性評価を記述している。ダブルプローブを用いて放電室近傍から遠方域までの広い領域でのプラズマ計測を実施してプラズマ流の構造を明らかにした。放電室近傍では $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、放電室から 1250 mm の位置では $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の数密度となり、放電室からの距離に対して⁻²乗で減衰していた。また、放電室から 500 mm の位置までには中心軸上に高温・高密度のカソードジェットと呼ばれる領域が存在するが、下流に行くに従い散逸していくプラズマ流の構造を明らかにした。放電室から 750 mm 以上の下流域では $\phi 600 \text{ mm}$ 以上の一様なプラ

ズマ流となっているなど、磁気プラズマセイル用のプラズマ風洞としての要求性能を満たしていることを確認した。また、非定常特性として、プラズマ流の変動の原因についての議論を行った。

第 5 章は磁気セイル実験の非定常特性について述べている。宇宙空間では太陽風は常に変動していることが知られており、太陽風を受けて進む MPS の非定常特性を把握することは不可欠である。磁場分布ならびに誘導電流分布の計測から磁気圏構造を調査し撮像結果との対応を明らかにした。その上で、磁気圏の変動は高速度カメラの撮像により得られた磁気圏の高速度動画より、磁気圏サイズの変動として評価した。本研究の実験条件では磁気圏サイズの変動は 60 kHz の振動が支配的であるという結果が得られた。この振動数は、Alfvén 波が磁気圏を伝わる時間に対応していることを明らかにした。以上の結果から、実機における推進性能の非定常特性を予測した。

6 章では、磁気圏拡大試験を実施した。プラズマをコイル磁場の極方向、赤道方向にそれぞれ噴射しその時の磁気圏サイズを磁場計測によって同定した。結果として、極方向噴射では太陽風上流側へは明確な磁気圏拡大は計測されなかったが、極方向には 150 mm から 250 mm 以上へ大きく拡大していることが分かった。また、赤道方向噴射では太陽風上流方向に 1.5 倍の推力増分に相当する磁気圏拡大を達成し、初めて明確な磁気圏拡大を実験的に示した。

第 7 章では、磁気圏拡大させた MPS をプラズマ流中に収めるために模擬太陽風の大口径化を実施し、3 台の MPD アークジェットを同時動作させる新型の太陽風シミュレータの開発とその特性評価について記述している。放電室から 750 mm までは、プラズマ流が非均一であるが、1000 mm 以上の下流域ではプラズマ流は $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の数密度で一様になっており、これまでの $\phi 600 \text{ mm}$ から $\phi 1200 \text{ mm}$ 以上のプラズマ流径への大口径化を達成した。また、クラスター化した MPD アークジェットがプラズマ風洞としての要求条件を満たしていることを示した。

第 8 章では、第 7 章で開発した 3 台同時駆動太陽風シミュレータを用いて磁気プラズマセイルの推力計測を実施した。振り子式のスラストスタンドを用いて推力計測を行い、磁気圏拡大前に約 0.09 N、磁気圏拡大後に約 0.17 N の推力が計測され、最大 1.9 倍の推力増分が得られた。この結果より、初めて磁気プラズマセイルの推力の増加が実証された。

第 9 章ではこれまでの章の結果について考察を行い、磁気プラズマセイルの推力特性評価ならびに今後の改善案について述べている。第 10 章は結言として、本研究で得られた新しい結果を要約している。

博士論文の審査結果の要旨

地球を遠く離れた深宇宙を効率よく航行するための推進機としては、小惑星探査機「はやぶさ」のイオンエンジンが知られているが、より遠くの天体へ短期間の航行を実現するためには、更に革新的な宇宙機推進の開発が不可欠である。本論文は、そのような次世代型宇宙機推進の1つとして注目される「磁気セイル」「磁気プラズマセイル」に関する実験研究成果がまとめられている。磁気セイルは、宇宙機周囲に磁場を展開しその磁場を帆（セイル）として太陽風プラズマを受け止めて推進する新しい宇宙機システムとして、Zubrin 博士によって 1990 年に提案されたが、宇宙機を加速させるための推力特性が不十分であるため、実フライトには至らなかった。その後、人工的な磁気圏を拡大することで磁気セイルの推力増大をはかる「磁気プラズマセイル」が 2000 年に Winglee 博士によって提案され、宇宙機を効率良く加速させる手段として注目を集めた。しかしながら、磁気プラズマセイルの推進原理については未解明な部分が多く、宇宙実証はもとより、実験室実験による推進原理実証すらなされていなかった。出願者は、磁気プラズマセイル地上実験システムの特長評価と大口径化に取り組んだ上で、宇宙空間における磁気プラズマセイル動作を真空チャンバ中で模擬し、磁気プラズマセイルの原理検証実験を実施した。原理検証実験では、磁気プラズマセイルのスケールモデル実験によって推力特性等の評価を行い、磁気圏サイズ 70km/推力 10N クラスの磁気プラズマセイルの推進特性を明らかにするなど、磁気プラズマセイルの世界初の原理実証実験に成功した。

本論文では、第 1 章にて磁気セイル・磁気プラズマセイル研究の現状と研究目的を述べた後、第 2 章および 3 章では、磁気プラズマセイルの基礎物理とスケーリング則を基に構築したスケールモデル実験システムの設計と機器の構成について、そして第 4 章では、太陽風を模擬するためのプラズマ風洞の特性評価について述べている。直径 2m×奥行 3m の大型スペースチャンバ内に構築した地上実験システムでは、太陽風シミュレータとして水素ガスを作動ガスとした MPD アークジェットを採用し、放電室出口から下流 750mm の位置では、流速 26km/s、数密度 $>10^{18}\text{m}^{-3}$ で直径 600mm の一様な準定常模擬太陽風プラズマ流を実現した。こうした地上実験システムを用いた磁気セイル磁気圏の観測結果が、本論文の 5 章に記載されている。磁気セイルのスケールモデル実験は、 $\phi 2\text{mm}$ のホルマル線を巻いたコイルへ最大で 2kA の通電を行って磁場を生成し、これをプラズマ風洞中で動作させることで実施した。磁気セイル磁気圏の形成は、磁気圏境界面を流れる電流分布と流れ場の可視化の双方から確認され、磁気圏の収縮に伴う非定常特性について新しい知見が得られた。

第 6 章以降では、磁気プラズマセイルのスケールモデル実験について記載されている。磁気プラズマセイルは、コイルの作る磁気圏を宇宙機から噴射したプラズマによ

て増大化し、増大化した磁気圏で太陽風を受け止める事で大推力化をはかる。宇宙機から磁気圏へのプラズマ噴射を模擬するため、内径 24mm の小型 MPD アークジェットをコイル直近に配置した。小型MPDアークジェットを水素ガスで動作させる事で、流速 30km/s、数密度 10^{19}m^{-3} のプラズマジェットが生成可能となり、深宇宙を航行する磁気プラズマセイルの相似性を考慮したスケールモデル実験が可能となった。第 6 章では、プラズマをコイル磁場の赤道方向に噴射したところ、太陽風上流方向に 1.5 倍の推力増分に相当する磁気圏拡大を達成し、明確な磁気圏拡大を初めて実験的に示した。第 7 章および 8 章では、模擬太陽風の口径を $\phi 1200\text{mm}$ と大口径化した上で実施した世界初の磁気プラズマセイル推力の直接計測実験を実施し、磁気圏拡大前に約 0.09 N、磁気圏拡大後に約 0.17 N の推力が計測され、最大 1.9 倍の推力増分が得られた。この結果より、磁気プラズマセイルの推力の増加が世界で初めて実験的に確認された。第 9 章に記されたとおり、これは、深宇宙空間における直径 70km/推力 10 N クラスの磁気プラズマセイルに相当する。

最後の第 10 章には、本論文の結論が記されている。

以上の成果は、磁気プラズマセイルに関する初めてのスケールモデル実験であることから、極めて独創性が高く、かつ、将来の磁気プラズマセイル実現に向けて有益な結論が得られている。更に、本論文の主な部分は、査読付き学術雑誌 6 篇（うち筆頭著者 2 篇）として掲載済である。以上の結果を踏まえ、本論文は、博士論文として十分な学術水準に達していると判定した。