

氏 名 上野 一磨

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1414 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 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 太陽風と磁場の干渉を利用した磁気プラズマセイル推進に
関する実験的研究

論文審査委員 主 査 主幹研究員 藤田 和央
宇宙航空研究開発機構
教授 佐々木 進
准教授 篠原 育
准教授 船木 一幸
教授 山川 宏 京都大学

論文内容の要旨

太陽系内を効率的に、かつ、高速に移動できる推進手段の獲得は、探査ミッション期間の短縮やそれによる新たな探査手法の提案、そして、ミッションコストの低減など様々な面でメリットが挙げられる。また、探査計画のスタートから短期間で成果へと繋げることができる。既存の推進システムでは推進剤と電力の限界から短期惑星間航行は困難である。そのため、太陽エネルギーを、電気推進のように電気に変換してから推進力に再び変換するのではなく、太陽エネルギーを直接、推進力へと変換する推進システムが注目されている。本研究では太陽起源の太陽風と呼ばれる高速プラズマ流に着目し、太陽風を磁場の帆によって受け止めて推進力を得る磁気プラズマセイルについて、推力発生の実証という観点から研究を行った。

太陽風を利用した推進システムは、太陽風を大きな磁場で受け止めることでより大きな推力を得ることが可能であり、効率的に、かつ、巨大な磁場を展開する手法を構築することが重要となる。太陽風と磁場の干渉を利用した推進システムは Zubrin 等によって超伝導コイルを用いた磁気セイルとして提案された。しかし、十分な推力を得るには直径数十キロメートルのコイルが必要となるため実現は困難であった。その後、Winglee 等によって磁場展開をプラズマ噴射によってアシストするという方法を用いた M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) が提案され、検討が行われているが、推力発生の実証には至っていない。我々は M2P2 のコンセプトを踏襲しつつ、現実的な大きさに設計を見直し、磁気プラズマセイルと名づけ研究を行っている。磁気プラズマセイルは、太陽風プラズマと磁場の干渉のスケールが注目する空間によって異なることから実際の宇宙でのみ実証が可能である。そのため実機スケールでの数値解析と実験室サイズのスケールモデル実験を比較することで実機性能の予測を行う。本論文では実験室サイズでの推力実証を目的とし、コイル磁場のみで推力を得る磁気セイル、そしてプラズマによる磁場拡大を行う磁気プラズマセイルの順で実験研究を行った。

磁気セイルや磁気プラズマセイルが推進力を得るために利用する太陽風は、希薄 ($10^6/\text{m}^3$) かつ高速 (400km/s) なプラズマ流であり、実用的な推力を得るには直径数十 km もの磁場を展開する必要がある。地上では真空チャンバのサイズ (直径 2500mm) による制限から直径 200mm 程度の磁場を想定し、スケール則を構築、太陽風シミュレータ (MPD アークジェットを用いた模擬太陽風発生装置、作動ガスは水素) と磁気セイルシミュレータ (ソレノイドコイル)、磁気プラズマセイルシミュレータ (磁場拡大用プラズマ源) から成る地上実験システムを製作し、スケールモデル実験を行った。装置の動作シーケンスはコイル磁場展開および磁場拡大用プラズマ噴射の後、0.2ms 後に太陽風が供給され、動作時間は電力の制限などから約 1ms の準定常状態が達成される。本実験での代表的な実験条件ではコイル位置で直径 200mm の磁場に対し直径 800mm の太陽風が供給され

る。直径 200mm の磁場は実際の宇宙空間では直径 400km の磁場に相当する。

はじめに、コイル磁場と模擬太陽風プラズマとの干渉による力の発生を確認するため、磁気セイルの推力計測実験を行った。模擬太陽風とコイル磁場の干渉時にコイルに生じる力の計測には振り子式スラストスタンドを用いた。スラストスタンドはアルミ製の角棒 (15mmx15mmx1000mm) で、太陽風流れの方向のみに振れるよう 4 本のステンレスワイヤによって天井から吊るした。コイルおよび、拡大用プラズマ源はスラストスタンド前方に突き出すように設置し、太陽風と磁場の干渉時にコイルに生じる力は、スタンドの振幅として、チャンバ外に設置したレーザ変位計によって計測した。実験終了後に、スラストスタンドを校正し、振幅を力積に変換する。得られた力積を装置の動作時間で割ることでコイルに生じた力を計算した。計測により、電流を制御し、磁気モーメントを 0.12mTm^3 から 0.35mTm^3 へと変化させたとき、磁気モーメントに応じて推力は増加し、 0.35mTm^3 のとき最大推力 1.2N が得られた。これによって磁気セイルの推力発生を確認した。本計測によって太陽風と磁場の干渉による推力は磁場の大きさに比例することが実証された。

磁気プラズマセイルではコイル磁場内部からのプラズマ噴射によって小型コイルの磁場を大きな磁場へと拡大し、大推力を得るため、磁場拡大を実験的に確かめる必要がある。本研究では、磁場拡大用プラズマ源に密度 $10^{19}/\text{m}^3$ 、速度 23km/s を達成可能な MPD アークジェットを用いて磁場拡大の確認実験を行った。確認には手巻きした小型コイル磁気プローブを用いた磁場計測と、磁気プラズマセイルモデル周りの流れ場の可視化によって行った。結果として 147mm の磁気圏サイズをプラズマ噴射によって 10mm 拡大することに成功した。

本実験結果をもとに実機を考えた場合、実験で得られた推力係数 0.5 を用いて、磁気圏サイズ 35km において推力 0.5N の磁気プラズマセイルを模擬していることとなる。これを実現するために必要なコイルを検討すると、1 巻きの超電導コイルに流すことのできる電流は既存の技術で 200 A であることから、打ち上げ可能な直径 4m のコイルを考えた場合、 10^{14} 巻のコイルが必要となり、成立しないことがわかる。磁気プラズマセイルの実現にはより大きな磁場拡大が必要となる。改善策として、より大きな磁場拡大を起こすためにプラズマ密度 $10^{21}/\text{m}^3$ 以上の高密度プラズマを噴射する、または比較的低密度なプラズマの継続的な噴射によって、コイル近傍に高密度プラズマ領域を作り出すことが必要である。

本論文は、太陽風プラズマ流を受け止めて深宇宙を航行する宇宙機用推進システム「磁気セイル」「磁気プラズマセイル」に関する世界初の実験研究成果報告である。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、その推進原理については未知な部分が多く、実験的検証はなされていなかった。出願者は、出願者自らが設計・開発した磁気プラズマセイル地上実験システムを用いて、宇宙空間における磁気セイル動作を実験室サイズで模擬し、磁気セイル磁気圏の確認および磁気セイル推力の直接計測等を実施し、これらの結果から、磁気圏サイズ10km~100km・推力が1~50Nクラスの磁気セイル・磁気プラズマセイルの推力特性を評価した。

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章にて、実験システムの設計と機器の構成を、そして第4章にて実験システムの特長評価結果について述べている。直径2.5m×奥行5m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、流速20~40km/s、数密度 $10^{17} \sim 10^{20} \text{m}^{-3}$ の準定常模擬太陽風プラズマを実現した。また、磁気セイルシミュレータとして $\phi 2\text{mm}$ のホルマル線を巻いたコイルを採用し、最大通電電流2kAでの磁場生成を可能とした。磁気プラズマセイルシミュレータには $\phi 50\text{mm}$ の小型MPDアークジェットを1対(2基)用い、水素ガスを作動ガスとして放電室出口から50mmの位置で流速25km/s、数密度 10^{19}m^{-3} をそれぞれ達成可能とした。これらのプラズマジェットを用いることで、深宇宙を航行する磁気セイル・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る。

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は、本論文の5章に記載されている、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た。また、磁場分布と流れ場の相関から、磁気モーメントを大きくすることで大きな磁気圏が形成されることを明らかにした。第6章では、スラストスタンドによる世界初の磁気セイル推力の直接計測結果が述べられており、磁気圏サイズLを大きくすることで推力が増加し、最大磁気モーメント 0.1mTm^3 において磁気圏サイズ $L=0.12\text{m}$ 、 $F=1.6\text{N}$ が得られた。

第7章では、以上の地上実験システムを用いた、磁気インフレーションによる磁気圏拡大実験の結果について報告してある。コイル磁場のダイポール方向への流速20km/s、数密度 10^{19}m^{-3} のプラズマ噴射によってコイル中心から150mm以遠において最大1.2倍の磁気圏拡大を実証した。第8章では、磁気セイル、磁気プラズマセイルの推力特性を表す推力係数Cdを実験的に算出し、結果は、過去の理論解析結果の傾向と一致していた。

第8章では、H-IIB ロケットを用いた磁気プラズマセイル実機についての提案もなされている。最後の第9章には、本論文の結論が記されている。

以上の成果は、磁気セイルおよび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、将来の磁気セイル・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5篇（筆頭著者3篇）として掲載済みであり、更に、2篇（筆頭著者1篇）が投稿中である。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。