



TITLE:

Study on Propulsive Characteristics of
Magnetic Sail and Magneto Plasma Sail by
Plasma Particle Simulations(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Ashida, Yasumasa

CITATION:

Ashida, Yasumasa. Study on Propulsive Characteristics of Magnetic Sail and Magneto Plasma Sail by Plasma Particle Simulations. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k17984>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	芦田 康将
論文題目	Study on Propulsive Characteristics of Magnetic Sail and Magneto Plasma Sail by Plasma Particle Simulations (粒子シミュレーションによる磁気セイル・磁気プラズマセイルの推力特性に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、次世代の宇宙推進システムである磁気セイル・磁気プラズマセイルについて、数値シミュレーションによって推力特性を評価し、推力モデルの構築により実現可能性の検討を行ったものであって、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景となる深宇宙探査とそれを支える深宇宙探査技術について述べている。また先行研究を総括し、磁気セイル・磁気プラズマセイルの実現に向けた課題を明らかにすることで、本論文の目的である小型実証機の実現に向けた推力特性の解明の必要性を述べている。</p> <p>第2章では、本論文で利用されるプラズマ粒子シミュレーション手法であるFlux-Tube法、Full-PIC法の定式化と開発について述べている。Flux-Tube法はプラズマ流の定常状態のみを考慮するモデルで、本論文で初めて磁場の変化が考慮された。また、大型計算機利用に向けた計算手法の高度化を提案、実施し、理化学研究所京コンピュータ、京大メディアセンターのスーパーコンピュータの利用により高速なプラズマ現象の解析を実現している。</p> <p>第3章では、Flux-Tube法を用いた磁気セイルの推力解析の実施と推力特性モデルの構築について述べている。イオンスケール（~100km）と呼ばれる大型の磁気セイルの推力解析に用いられてきた既存手法は多くの計算資源を必要とするため、推力モデルの構築が困難であった。本論文ではプラズマ流の定常状態のみを扱う手法（Flux-Tube法）の開発により1/8以下の計算資源で誤差5%以下の精度の推力解析を可能とした。これにより様々なパラメータでの推力解析が可能となり、磁気圏サイズ、太陽風の仰角、有限なコイルサイズを考慮したシミュレーションを実施し、イオンスケールの磁気セイルに関する推力モデルの構築に成功した。</p> <p>第4章では、Full-PIC法を用いた磁気セイル周りの磁気圏構造の解析を行い、太陽風-磁場相互作用と推力発生への影響について述べている。イオンスケールから電子スケール（~1km）の中間スケールでの太陽風プラズマの挙動の変化をイオン・電子両方の粒子性を考慮したFull-PIC法によって解析することに成功している。解析によりプラズマ粒子の有限ラーマー半径によって、電子スケールの磁気圏サイズは流体近似モデルに比べて小さくなることが明らかとなった。特に、中間スケールにおいて磁気圏境界面付近で種々のプラズマ不安定性により電子が加熱され磁気圏境界面電流を誘起し、推力発生に寄与することを明らかにした。また、惑星間磁場と呼ばれる太陽由来の惑星間磁場が磁気セイル推力に与える影響が小さく無視することができることも本論文で初めて指摘された。</p> <p>第5章では、第4章での結果を踏まえて行われたFull-PIC法による電子スケールの磁気セイルの推力特性の解明について述べている。2次元、および3次元の解析を実施し、発生する推力が宇宙機に搭載されるコイルの磁気モーメントに比例することを明らかにした。また、太陽風の状態（プラズマ密度や流速）に対する推力の依存性もほぼ比例関係にあること、コイル半径によって推力ベクトルの制御範囲が変化することを明らかにした。さらに、トルク特性の検討を行い衛星の姿勢安定性に関する検討</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	芦田 康将
<p>を行い、惑星間磁場がない場合には太陽風流れと磁気モーメント方向が垂直な場合に姿勢安定となること、惑星間磁場がある場合には惑星間磁場の方向と磁気モーメント方向が一致するように姿勢安定となることを明らかにした。これらのシミュレーション結果より得られた推力特性は、プラズマの粒子運動を考慮した理論モデルの構築によっても検証され妥当性が確認されている。</p> <p>第6章では、推力増加を目的とした磁気プラズマセイルの推力特性についてFull-PIC法によって解析された結果が述べられている。まず、宇宙機からのプラズマ噴射により推力増加をはかる磁気プラズマセイルについて、理論的な考察により推力増加の4つの支配パラメータが検討された。また、プラズマ噴射パラメータ（噴射流量や速度など）を様々に変化させた大規模なパラメータ探索を実施し、支配パラメータの1つであるβ（プラズマエネルギー／磁場エネルギー）が低い場合において大きな推力増加が得られることを明らかにした。さらに、最適なプラズマ噴射パラメータが存在し、最大で磁気セイルに対して97倍の推力増加が得られることを明らかにしている。</p> <p>第7章では、3章から6章までの推力特性を総括し、磁気セイル・磁気プラズマセイルの推力モデルを構築している。推力モデルは衛星の設計、ミッションの提案に必要な情報を含んでおり、電子スケールからイオンスケールまでの幅広い範囲で適用可能となっている。また、既存の推進システムとの比較のために比推力、推力質量比、推力電力比といった推進性能が明らかにされ、磁気プラズマセイルが高い比推力を有することが示された。さらに、構築された推力モデルを用いて、ミッションの観点から磁気セイル・磁気プラズマセイルの実現可能性を検討し、既存の技術において、内惑星探査や太陽-地球系のラグランジュ点周りでの大規模宇宙構造物の構成ミッションなどが可能となると述べている。また、将来的な超伝導技術や衛星設計の技術革新によって、深宇宙探査において既存推進システムよりも優位性があることを明らかにした。</p> <p>第8章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、宇宙環境を利用した宇宙推進システムである磁気セイル・磁気プラズマセイルの推力特性について数値解析を行った研究成果についてまとめられたものである。具体的には高速なプラズマ流である太陽風と宇宙機搭載のコイルとの相互作用によって発生する推力を、スケール毎に開発されたシミュレーション手法によって解析し、推力モデルの構築を行っている。本論文で得られた成果は以下のとおりである。

1. イオンスケール (~100km) の磁気セイルの推力解析に用いられている既存手法は多くの計算資源を必要とするため、推力モデルの構築が困難であった。本論文ではプラズマ流の定常状態のみを扱う手法 (Flux-Tube 法) の開発により 1/8 以下の計算資源で誤差 5% 以下の精度の推力解析を可能とした。これによりイオンスケールの磁気セイル推力モデルの構築に成功した。

2. 電子スケール (~1km) の磁気セイルは小型宇宙実証機で想定されるにもかかわらず、推力発生の物理過程が不明であったため具体的な推力の解析は行われてこなかった。本論文では、プラズマの第一原理に基づいた Full-PIC 法による解析によって、磁気セイルの推力発生にイオン・電子の有限ラーマー半径、電荷分離の影響が現れることを解明した。また理論的な考察によって解析結果の妥当性を検証している。

3. 衛星からのプラズマ噴射によって磁気セイルの推力増加を図る磁気プラズマセイルは、パラメータの多さと計算資源の制約から解析が困難であった。本論文では、理論的な考察によるパラメータの絞込と大型計算機 (京コンピュータ) の利用によってこの問題を解決し、プラズマ噴射条件の最適化を行った。解析により推力増加の噴射パラメータ依存性を明らかにするとともに、最大で 9.7 倍の推力増加が可能であることを示した。

4. 解析結果より構築した推力モデルを元にして、磁気セイル・磁気プラズマセイルの推進特性を明らかにし、既存の推進システムとの比較を行った。また、既存技術の応用により開発できる磁気セイル・磁気プラズマセイルを用いた具体的なミッションを提案し、磁気プラズマセイル実用化の可能性を示した。

以上要するに本論文は、宇宙探査にむけた新たな推進システムについて推力モデルを構築し、既存推進システムとの比較検討や新規ミッション立案により宇宙利用・科学技術の発展において新たな知見をもたらす可能性を示すものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 25 年 12 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。