

論文審査の結果の要旨

氏名 秋田 大輔

本論文は、「太陽風を利用した深宇宙探査用磁気セイルの推進性能および技術実証衛星システム(Magnetic Sail in Solar Wind for Deep Space Exploration: Thrust Performance and Spacecraft System for Technology Demonstration)」と題し、5章より構成されている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。衛星が作る印加磁場により太陽風プラズマ粒子の軌道を変え、その反作用で推進力を得る磁気セイルは、推進剤不要で無限大の比推力が得られるため、外惑星や太陽系外縁への深宇宙探査に適している。しかし、従来の研究では、希薄な太陽風から十分な推進力を得るため直径数十 km の超伝導コイルといった非現実的規模の機体が想定されていたため、その実現性が評価できなかった。上記を踏まえ、現在の技術レベルで実現可能な直径数 m のコイル電流を用いた磁気セイルを対象とする研究の必要性を強調し、本研究の意義を明らかにしている。

第2章は「磁気セイル推進に関する現象のスケール評価と解析モデルの選択」と題し、数値解析用の参照モデルの設定と、現象のスケール評価にもとづく解析手法の選定について述べている。まず、太陽風動圧と印加磁気圧が釣り合う磁気境界面を磁気セイルの実効的な帆であると考え、簡易推算法により、コイル半径と推力の関係を見積っている。つぎに、地球公転軌道上を想定し、そこでの太陽風粒子（電子、陽子）と電磁場との各種干渉に関する時間と空間のスケールを評価している。その結果、打ち上げロケットへの搭載を考え、コイル直径を 4m とし、中心に 0.06T の磁場を発生させる参照モデルを設定した場合、機体と磁気境界面で考えた巨視的な干渉スケールは、長さ、時間ともに電子のサイクロトロン運動のスケールより小さく、連続流体や電気的中性が仮定できないことを明らかにしている。従って、磁気セイルまわりの太陽風プラズマ流れの数値解析にはイオン、電子ともに粒子として扱う完全粒子法 (Full PIC 法) が必要であると述べ、適切な時間と空間の解像度を算出している。

第3章は「磁気セイルまわりの太陽風流れの基本特性と推進性能の評価」と題し、計算法と設定条件を説明した後に、数値解析結果の詳細な検討を行い、コイルの姿勢や太陽風速度など各種パラメータが推進性能に及ぼす影響について述べている。イオンの流れ場と電子の流れ場を比較し、印加磁場による影響領域は後者が前者より 1桁程度大きいこと、その結果、電荷分離が生じ静電ポテンシャル場が形成されること、また、磁気セイル近傍では太陽風粒子の速度分布関数がマクスウェル分布から大きく逸脱すること、などを見出している。つぎに、粒子の運動量変化から磁気セイルに働く力を評価している。コイルの姿勢や太陽風条件の影響について詳細に調べ、コイルの姿勢によっては軌道面外を向く力が作用すること、コイルの軸を軌道面に垂直とすることで静安定な姿勢となること、太陽風動圧に対する推進効率も太陽に近いほど上がること、など次章で磁気セイル衛星のシステムを検討する上で重要な知見を得ている。

第4章は「磁気セイル推進技術を実証するための衛星システムとミッションの検討」と題し、人工衛星を用いた磁気セイル推進性能実証ミッションを検討している。衛星は、母船と磁気セイル機の2機で構成され、地球公転軌道に投入される。前者が太陽風計測と後者の軌道追跡を行う。磁気セイルの諸元は上記参照モデルと同じとし、コイルの超伝導材の選択などセイル機の構成が具体的に検討されている。その結果、コイルは姿勢静安定が得られるよう軸を公転面に垂直とし、内側と外側に円筒状の熱シールドを設ければ能動的冷却なしに超伝導状態が保てること、コイルは電流の有無にかかわらず十分な強度を持つこと、100日程度の飛行で十分計測可能な軌道のずれが起こり、磁気セイルに働く推力の逆算が可能であること、が示されている。以上から、磁気セイルによる宇宙推進は現状の技術で実証可能な段階にあると述べている。

第5章は結論であり、本論文の研究成果をまとめている。

以上要するに、本論文は磁気セイルまわりの太陽風流れの基本特性を粒子法による数値解析で明らかにするとともに、機体に働く力と各種パラメータの影響を解明し、それにもとづき技術実証衛星を提案するものであり、これらの結果は、先端エネルギー工学、特に宇宙工学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第2章から第4章は、鈴木宏二郎氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。