

## 審査の結果の要旨

氏名 西田 浩之

修士（工学）西田浩之提出の論文は，“Characterization on Momentum Transfer Process of Magneto-Plasma Sail by MHD Analysis”（「磁気プラズマセイルにおける推力発生機構の電磁流体解析」）と題されており、本文8章から構成されている。

磁気プラズマセイルとは太陽風を利用する宇宙推進システムであり、将来型の深宇宙探査用推進システムとして期待されている。この推進機は超伝導コイルにより形成した磁場をプラズマ噴射により膨張させ（磁場インフレーション）、その磁場で太陽風のエネルギーを受け止めるというアイデアに基づいたものである。しかしながら、推力を発生させるプロセスが複雑な故にその推進性能が定量化されていない。特に、もっとも単純なモデルである理想電磁流体モデルにおいても磁気プラズマセイルの推力発生機構は未だに十分に理解されているとは言えず、近年では推進機としての成立性自体が疑問視されるなど論争的な状況にある。

それを受けて筆者はこの問題を解決すべく、理想電磁流体力学に基づいて磁気プラズマセイル周りの流れの理解を深めた上で、推進性能の定量化、およびこれを支配するパラメータの抽出を目的として、太陽風の運動量が宇宙機へ伝達するプロセスについて解析を行った。

第1章は序論であり、太陽風を利用した推進システムの概念と過去に行われた研究について概説し、磁気プラズマセイルに関する課題を明確にしている。その上で本論文の目的とその意義について述べている。

第2章では本論文における運動量伝達機構の議論に用いた理想電磁流体力学について述べられている。方程式の導出と理想電磁流体近似の適用範囲について説明され、本研究において重要となる理想電磁流体方程式の特性、磁場のプラズマ流への凍結と3種類の特性波（MHD波）、について述べられている。また、準一次元解析により、以降の研究結果を理解するうえで助けとなる Force-Free 条件下（流体に加わる電磁力が流体の動圧よりも十分に小さい場合）における電磁流体の振る舞いについて説明がなされている。

第3章においては数値解析手法について記述されている。支配方程式である理想電磁流体方程式の解法と、解法を選択した根拠などについて述べられており、テスト問題により作成した計算コードの検証が行われている。

第4章では宇宙機単独で、磁場を宇宙機からのプラズマ噴射により膨張させる過程、すなわち磁場インフレーションのシミュレーションについて記述されている。過去の研究における問題設定上の不適切な点について指摘がなされた後、これを解消した条件の設定とシミュレーション結果について述べられており、結果から太陽近傍における流れ場と良く似た流れ場が磁場インフレーションにより形成されることが示されている。これは磁気プラズマセイルが形成する人工的な流れ場が、宇宙において一般に存在するプラズマの流れ

場と良く似ていることを示す興味深い結果である。

第5章では、太陽風との干渉を考慮にいたれた全流れ場のシミュレーションと太陽風から宇宙機への運動量伝達プロセスを理解するための解析が体系的に行われている。流れ場を噴射プラズマ流のMHD波に対するマッハ数により特徴づけ、磁気プラズマセイルの推力と関連づけて説明することで、運動量伝達においてMHD波が重要な役割を担うことを示すことに成功している。具体的には、推力を発生させる為には太陽風の情報を伝えるMHD波が宇宙機まで伝播しなければならず、宇宙機の周囲にMHD波の伝播速度よりも遅い流れの領域を形成する必要があることが示された。また、プラズマ流の運動量変化とLorentz力の釣り合いを検証することで、太陽風の運動量変化が誘導磁場を介したLorentz力により宇宙機まで伝わるということが明らかにされた。これにより磁気プラズマセイルの推力発生に関する大きな問題の一つが解決されたと言える。

第6章においては磁気プラズマセイルの推進性能とその改善についての議論がなされている。推進性能を評価するため、太陽風運動量の推力への変換効率と推力のプラズマジェットの運動量に対する比率という2つの係数を導入している。また、第5章において得た運動量伝達機構の知見から考察することで推進性能を改善するアイデアを提案し、その有効性をシミュレーションにより検証している。これは今後更に推進性能を改善してゆく指針を示す重要な知見である。

第7章はこれまでの各章における解析に用いた理想電磁流体近似の適用可能範囲についての議論である。この近似では考慮されていない非理想電磁流体効果のうち、特にプラズマイオン粒子の運動論効果、電気抵抗効果およびHall効果について議論がなされ、理想電磁流体モデルにおいて行われた本研究が明らかにした結果の有効な範囲が示されている。

以上まとめると、本論文は磁気プラズマセイルの運動量伝達メカニズムを理解することによって推力発生機構に関する論争的な課題の一つを解決することに成功しており、その適用範囲や将来実用化する上で必要となる推進性能改善のための指針を示すことも含め、重要な知見を多く得たものであり、航空宇宙工学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。