

推進システムの長寿命化を目的とした磁場構造制御による推力方向制御手法の実証

枝本, 雅史

<https://hdl.handle.net/2324/4784666>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 枝本 雅史

Name

論 文 名 : 推進システムの長寿命化を目的とした磁場構造制御による推力方向制御手法の実証

Title

区 分 : 甲

Category

論 文 内 容 の 要 旨

Thesis Summary

将来的な宇宙探査計画として、火星有人探査や宇宙資源探査のような大規模宇宙探査計画が活発化しており、ルクセンブルクやアメリカでは宇宙資源探査利用法が成立した。近い将来、科学探査のみならず、経済活動としての資源探査を含む大規模・長距離宇宙輸送の需要が増大すると考えられる。それに応えるためには、輸送量を最大化しつつ輸送時間と燃料消費量を最小化できる、大推力のプラズマ推進機が必要である。プラズマ推進機は放電や電磁波の照射などによってプラズマを生成し、加速・排出して推力を得る推進機である。化学反応を利用する化学推進機に比べて、単位質量あたりに大きなエネルギーを投入でき推進剤を高速で排出できるため、低燃費となる。プラズマ推進機の実用化のためには、プラズマを排出した反作用として得られる推力ベクトルの制御が重要となる。

非電離流体の場合には流体は固体壁のノズルによって制御されるが、プラズマのような電離流体の場合には磁場による制御が可能となり、磁気ノズルと呼ばれる。しかし、従来のプラズマ推進機では、磁気ノズルは推力増強のみに使われており、推力方向制御についてはジンバル機構やロボットアームのような機械的要素によって推進機全体を傾けることにより実現されてきた。機械的動作部を持つ場合、接触部の潤滑は必須となる。しかし、温度変化が大きく、真空であるという宇宙環境において、潤滑剤の蒸発による摩擦の増大に伴う機器の劣化や、アウトガスによる機器の汚染が問題となる。これは運用期間が長期化するほど深刻な問題となり、大規模輸送において制約条件となり得る。

本研究では長期往還ミッションに搭載する宇宙推進機に適用可能な推力方向制御手法に関する要素技術を開発した。複数コイルによって磁場構造を制御し推力方向を制御する手法について、従来は数値計算のみであったものを実験により実証した。本論文においては、提案するプラズマ流方向制御手法の概念実証を目的とし、実験室内でレーザー生成プラズマと磁場発生装置を用いた実験により手法の有効性を実証した。これは制御手法の最適化を行う前段階として位置づけられ、推力制御手法に新たな可能性を示すものである。このシステムが確立した場合、プラズマ推進機について広範に適用可能と考えられ、ジンバルに代表される従来の推力方向制御手法を置き換える、もしくは補助することが可能となる。推力制御角の設計目標としては、現在の宇宙機において推進機用ジンバルとして用いられているものと同等の性能を達成することとした。小惑星探査機「はやぶさ」で用いられたジンバルを参考とし、5 deg.の推力方向制御性能を目標とした。

数値解析による検証により、空間的に不均一な磁場を生成することでプラズマ流の方向を制御することが可能であることを示した。本研究で解析した条件においては、最大で 14 deg.程度の方向制御が可能であり、目標性能を上回る結果となった。数値解析による結果を実験的に実証するため、実験機材として、高強度レーザーによるノイズ環境下で安定動作する MW 級電源装置、独立制御可能な複数のコイルを組み合わせるマルチコイル、タングステンワイヤを用いた多チャンネルイオンコレクタを開発した。いずれも高強度レーザー実験において正常に機能した。レーザー生成プラズマを用いた実証実験においては、磁場構造制御によるプラズマ流方向制御が可能であることをイオン電流計測によって実験的に実証した。正確な方向制御角を求めるには至らなかったものの、磁場構造制御によってプラズマ流の方向が制御されたことは明らかであり、本手法の有効

性が実証された。

これらのことより、本研究で目標とした、磁場を用いたプラズマ推進機の推力方向制御手法の実証は十分に達成されたと考えられる。

本論文は以下の6章から構成される。

第1章では、これまでの宇宙開発・宇宙輸送の歴史および将来の展望を紹介するとともに、実用化されている推進方式について解説した。推進システムとして成立させるためには推力方向の制御も重要であることを示し、先行研究で提案された複数の手法について評価した。これらを踏まえ、本研究の目的および意義、位置づけを述べた。

第2章では、推力方向制御の可能性検証を行うために必要となる数値解析コードについて、改良および妥当性検証を行った。従来の手法では無視されていた低密度プラズマに着目し、その重要性を明らかにした。その後、実験結果との比較により、数値解析の妥当性を検証した。

第3章では、数値計算と実験によって推力方向制御の実現性を検証した。同じ初期プラズマを用いて、異なる磁場構造内部でのプラズマ挙動を数値解析した結果、磁場強度が弱い方向へ偏ってイオンが排出されることが確認された。

第4章では、実証実験に向けた実験装置開発について述べた。大型レーザー施設での使用を想定して、可搬性・安定性・電磁ノイズへのロバスト性に優れた、MW級パルス電源装置を開発した。

第5章では、第3章で述べた数値計算結果をもとに、第4章で開発した実験装置を用いて推力方向制御の実証実験を行った。実験にはマルチコイルとレーザーアブレーションプラズマを用いた。イオンコレクタによる計測で、数値解析と同様に磁場強度が弱い方向へ偏ってイオンが排出されたことが確認された。

第6章では、本論文を総括し結論を述べるとともに、本研究結果を受けて今後の開発方針を提案した。