

論文の内容の要旨

Thesis Summary

論文題目:

高周波プラズマを用いた無電極推進機のための電磁誘導加速に関する研究 Experimental Study on Electromagnetic Inductive Acceleration of RF plasma for Electrodeless Propulsion System

氏 名: 柳沼 和也

Name of Author: Yaginuma Kazuya

将来的に計画されている有人の深宇宙探査ミッションや月-地球間の大規模宇宙輸送ミッションにおいては、100 kW級の大電力電気推進の実現が必要とされている。本研究では、100 kW級の大電力電気推進の実現に向けた「高周波プラズマをプラズマ源としながら、時間変動する磁場を外部から印加し誘導電流を誘起し、電磁加速によるプラズマ加速を行う電気推進」を提案し、その推進機の推力性能評価を2 kW級の装置を用いることによって実験的に行った。さらに、提案する推進機のプラズマ加速モデルを構築と加速モデルにおける推力と物理パラメータの関係を解析的に求め、実験的に得られた推力性能特性との比較を行った。その結果、提案した推進機のプラズマ加速では、推力電力比を最大にする加速周波数があることを突き止め、さらに、大口径で短軸の低アスペクト比の推進機形状が推力電力比へ大きく寄与することを明らかにした。本論文は6章から成り、構成は以下のようになっている。

第1章では、電気推進を3つの加速原理(静電加速、電熱加速、電磁加速)に分類し、静電加速と電熱加速について大電力化に向けた課題を述べた。静電加速を用いた推進機は、静電場を生成するための電極における電極損耗と電子源(中和器)の大電流化が課題であり、電熱加速は凍結流損失があることが課題であると述べた。一方で電磁加速は作動方式を選べばこれら3つ課題を解決できる加速原理であると述べた。電磁加速は無衝突プラズマに近づけることにより高効率化が期待できる加速原理であり、電熱加速を用いた推進機における凍結流損失の課題を解決できる。また、電磁加速は中性プラズマを加速するため中和器が不要であり、静電加速を用いた推進機における中和器の大電流化の課題を解決できる。加えて、電極を使用しない電磁加速では、静電加速を用いた推進機における電極損耗の課題を解決できる。

加えて、1.3 節では、電磁加速を用いた推進機を利用している電流や磁場ごとに分類し、

大電力化に向けた課題を述べた。電極を用いた外部印加電流を用いる推進機では電極損耗が大きな課題であり、静磁場を用いる推進機では、プラズマの磁場からのデタッチメントの検証が課題であると述べた。加えて、時間変動する外部磁場とその外部磁場をプラズマに印加することによって生じる時間変動する誘導電流によるローレンツ力を用いた推進機は、誘導電流を用いるため電極が不要で、外部印加電流を用いた推進機における電極損耗の課題を解決できる。さらに、時間変動する磁場を用いることで、プラズマの磁場からのデタッチメントの課題に対して有利に働くことができる述べた。

次に1.3.4 節では、時間変動する磁場と誘導電流によるローレンツ力を用いた推進機をプラズマ源におけるプラズマ生成方法と時間変動する磁場の印加方法(パルス的かあるいは正弦波的か)について分類を行った。その中でも、パルス加速をしない(キャパシタを用いない)、つまり定常加速を行い、プラズマ源の生成に電極を用いない、つまり高周波プラズマをプラズマ源として用いることで、ここまで挙げてきた100kW級の大電力電気推進の実現に向けた課題を解決できると述べた。

第2章では、提案した推進機の作動原理について述べている。提案する推進機は円筒形状のガラス管の周りに2種類の異なる周波数の高周波コイルが配置されており、それぞれプラズマ生成用コイル(周波数: 13.56 MHz)とプラズマ加速用コイル(周波数: 50 kHz – 1 MHz)と呼ぶ。プラズマ生成用コイルによってガラス管内にプラズマ源を生成し、プラズマ加速用コイルによって時間変動する磁場をプラズマに印加し、誘起した誘導電流とのローレンツ力を用いてプラズマを加速し推進機から排出する。

加えて、2.2節では電磁加速型推進機の推力に関する一般的な表現を示し、特に軸対称な変動磁場が印加された場合に関して、推力の各項のオーダー見積もりについて述べている。

第3章から第5章にかけて本研究で行った実験について述べている。本研究においてはプラズマ加速実験とプラズマ2次元分布測定実験を行った。プラズマ加速実験では特に加速コイル周波数が300 kHz以下ではパルス加速実験を行い、300 kHz以上では定常加速実験を行った。パルス加速実験と定常加速実験ではそれぞれターゲットを用いてインパルスあるいは推力を測定した。また、プラズマ2次元分布測定実験では、プラズマ生成コイルによって生成されたプラズマ源の密度及び電子温度の分布測定を、ダブルプローブを用いて行った。

本研究行ったプラズマ2次元分布測定実験、パルス加速実験および定常加速実験のそれぞれの実験に関して、第3章では実験装置について、第4章では実験方法と手順及び測定方法について、第5章では、実験結果について述べている。

プラズマ2次元分布測定実験では、内径160 mmと 80 mmの2種類のガラス管を用いてプラズマ生成を行った。プラズマ生成コイルへ最大400 Wの電力印加し分布測定を行った。内径160 mmのガラス管に推進剤(キセノン)を1.37 mg/sに流した条件では、プラズマ生成コイル投入電力を200 Wから400 Wに変化させたときに、プラズマ密度の最大値が $4.5 \times 10^{15} \text{ 1/m}^3$ -

$1.5 \times 10^{16} \text{ 1/m}^3$ の範囲で変化した。また、内径80 mmのガラス管に推進剤(キセノン)を 1.37 mg/s に流した条件では、プラズマ生成コイル投入電力を200 Wから400 Wに変化させたときに、プラズマ密度の最大値が $1.8 \times 10^{17} \text{ 1/m}^3 - 5.3 \times 10^{17} \text{ 1/m}^3$ の範囲で変化した。このような密度範囲でプラズマ源を用いてプラズマ加速実験を行った。

プラズマ加速実験では、パルス加速実験と定常加速実験で得られる結果を等価であるとみなして実験結果の比較を行った。プラズマ加速実験では、加速コイル周波数、放電室形状、プラズマ源のプラズマ密度を変化させた際の推力電力比の依存性を評価した。その結果、加速コイル周波数に対する推力電力比の依存性では、ある加速コイル周波数で推力電力比がピークを持つ結果が得られた。放電室形状に対する推力電力比の依存性では放電室形状が低アスペクト比形状であれば、推力電力比が増加する傾向が得られた。また、プラズマ源のプラズマ密度を変化させた際の推力電力比の変化は小さいという結果が得られた。これらの推力電力比に対する各条件の依存性に関する考察は6.2節で述べている。

第6章では、提案する推進機のプラズマ加速のモデル化と、モデルのパラメータ解析とその解析結果と実験結果の比較を行った。

6.3.1節ではプラズマ加速のモデル化について述べている。プラズマを複数の電流ループの集合として捉える、すなわち閉回路ループが発生する磁場によって閉回路同士が結合していると考える等価回路モデルを6.1節で導出している。等価回路モデルを導出にあたって次の4つの仮定をおいた。

- ・微分項における速度の空間勾配が小さい
- ・圧力勾配による流れ及び電流の発生を無視する
- ・電流ループは z 方向にのみ動く
- ・プラズマはループ形状で離散的に存在する

これらの仮定をおきながら、電流ループ上でプラズマの運動方程式とオームの法則の式を体積積分することによって等価回路モデルの基礎式（電流ループの運動方程式と電流ループ上の電流の式）を導出した。

6.3.1節で導出した等価回路モデルにプラズマ中で衝突が優勢の仮定をさらに加えた等価回路モデルのパラメータ解析について述べたのが6.2.2節であり、無衝突プラズマの仮定を加えたパラメータ解析について述べたのが6.2.3節である。

パラメータ解析では、等価回路モデルにおけるパラメータ（加速コイル周波数、プラズマ密度、電流ループの自己インダクタンス）を変化させながら、推進機内で発生した電流ループが推進機から排出されることによる推力や、電流ループ内の抵抗や加速によって消費される電力を数値的に計算した。

6.3.5節では、6.3.1節で行ったパラメータ解析結果と5章でまとめたプラズマ加速実験結果の比較について述べている。等価回路モデルのパラメータ解析では、自己インダクタンスとプラズマ密度が一定の条件において、ある加速コイル周波数で推力電力比がピークを持つ

という解析結果が得られた。これは5章でまとめた加速コイル周波数に対する推力電力比への依存性の実験結果と定性的に一致する。また、放電室形状に対する推力電力比の依存性に関しては、放電室径の増加に伴い自己インダクタンスが増加すれば実験結果における放電室形状に対する推力電力比の依存性が説明できると述べた。加えて、プラズマ源のプラズマ密度に対する依存性に関しては、パラメータ解析では、自己インダクタンスと加速コイル周波数が一定の条件において、推力電力比はプラズマ密度に対して単調増加するという結果が得られたが、プラズマ密度の増加に伴いプラズマの自己インダクタンスが減少すれば、5章で得られた実験結果を説明可能であると述べた。