

氏 名 佐藤 博紀

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1583 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 水素 MPD スラスタ内部における電磁流体のモデリングと
数値シミュレーション

論文審査委員 主 査 准教授 宮坂 武志 岐阜大学
准教授 船木 一幸
准教授 西山 和孝
准教授 篠原 育
教授 奥野 喜裕 東京工業大学

論文内容の要旨

電磁力学プラズマ (MPD) スラスタ (自己誘起磁場型) は電磁加速型の宇宙機用電気推進機で、高比推力、高推力密度、構造がシンプルという特長を持ち、将来の大型宇宙機のメインエンジンとして期待されている。MPD スラスタは、電力を無駄なく使い冷却パネルをコンパクト化するために推進効率 (電力から取り出せる推進パワーの割合) を向上する必要がある。推進効率向上の方法の一つとして水素推進剤の利用が挙げられ、水素推進剤を用いた MPD スラスタ (水素 MPD スラスタ) の実用化が重要である。しかしながら、設計や最適化を実験で行うことは容易ではない。そこで、それらの作業を支援するために、水素 MPD スラスタの流れ場や推進性能を予測する数値シミュレーションが必要不可欠である。本研究は、水素 MPD スラスタの推進性能や流れ場を模擬する数値計算ツールの予測精度向上を目的として、3 温度非平衡モデルやイオンスリップモデルといった新たなモデルの導入と数値計算を実施し、過去の実験結果 (電流経路、推進性能) と比較を行った。各モデルを導入した数値計算では、それぞれのモデルに関連した温度非平衡特性やイオンスリップなどの現象についても詳しく調べた。また、実験によってスラスタ近傍のプラズマパラメータ (電子数密度、電子温度) と放電電圧を測定し、過去の実験結果も含めて数値計算との比較を行い、数値計算の課題を明らかにした。

第 1 章では、MPD スラスタの研究背景を述べ、本研究の目的について説明する。特に、過去の水素 MPD スラスタの数値計算について述べ、それらの数値計算に含まれていなかった 3 温度非平衡モデル、イオンスリップモデルの必要性について述べている。

第 2 章では、各モデルと基礎方程式、数値計算手法について説明した。本研究では、水素 MPD スラスタ内部の水素プラズマ流を電磁流体として扱い、それに含まれる化学種は水素分子、水素原子、水素イオン、電子の 4 種を考慮した。基礎方程式は、2次元の圧縮性ナビエーストークス方程式に電磁力を考慮した方程式系に磁場の誘導方程式を加えたものを用いた。また、実在気体効果として、解離・電離反応、ホール効果に加え、3 温度非平衡 (重粒子並進、振動、電子温度)、イオンスリップ (中性粒子とイオンの速度非平衡) をモデル化した。数値計算は、有限体積法と時間発展法によって行った。

第 3 章では、同軸形状 MPD スラスタ (MY-I) を対象とした、3 温度非平衡モデルを考慮した数値計算結果 (イオンスリップ未考慮) について述べている。本数値計算では、理論臨界電流よりも低い放電電流 $J_{dis}=5\text{kA}$ 、流量 0.4g/s のとき、壁面に制限等温度条件を課すことで実験によるアノード付近の電流分布を比較的よく再現できた。また、同条件下のスラスタ内部において 3 温度非平衡な領域があり、代表的な値は $T_e=2.4\text{eV}$ 、 $T_{vib}=2.2\text{eV}$ 、 $T_{ir}=0.62\text{eV}$ ($z=60\text{mm}$ 、 $r=15\text{mm}$ 、スラスタ出口は $z=75\text{mm}$) であった。このことから、3 温度非平衡モデルが有効であることを明らかにした。

第 4 章は、3 温度非平衡とイオンスリップモデルを考慮した数値計算結果 (MY-I スラス

夕)について述べている。計算条件は、3章より放電電流を増加させ、推進剤流量 0.4g/s、放電電流 $J_{dis}=10\text{kA}$ とした。本数値計算結果と実験結果を比較したところ、数値計算(断熱条件)は実験により観測されたアノード付近の電流経路をよく模擬できていた。同条件下で、イオンスリップの評価を行ったところ、特にスラスト入口付近で、7.0km/s のイオンスリップが発生していることが分かった。

第5章では、 $J_{dis}=5\text{--}10\text{kA}$ 、推進剤流量 0.4g/s の条件下(断熱条件、制限等温条件)で、3温度非平衡考慮の下、イオンスリップ考慮と未考慮の数値計算による推力特性を比較した。その結果、理論臨界電流 $J_c=10\text{kA}$ に近い大電流条件において、イオンスリップを考慮することによって推力と放電電圧の予測精度を向上できることを明らかにした。しかしながら、数値計算の放電電圧は、40V と仮定したシース電圧を加えても、実験結果より低かった。この理由は第6章で調べた。各モデルによる放電電流経路を比較したところ、 $J_{dis}=5\text{kA}$ において、イオンスリップの影響は小さく、イオンスリップ考慮・未考慮の数値計算による放電電流経路に大きな差は見られなかった。一方、 $J_{dis}=10\text{kA}$ のとき、イオンスリップを考慮した数値計算(断熱条件)は、イオンスリップを考慮しない数値計算に比べて、実験結果のアノード付近の放電電流経路をよく模擬できた。

第6章では、本研究で実施した準定常実験(フレア形状のFLスラスト使用、水素推進剤 0.9g/s)と過去の実験によるプラズマパラメータ、放電電圧特性の測定結果と数値計算との比較結果について述べている。 $J_{dis}=4.6\text{kA}$ 9.5kA において、数値計算の放電電圧は40V と仮定したシース電圧を加えた場合でも実験結果より低かった。さらに、 $J_{dis}=7\text{kA}$ のスラスト付近において、数値計算による電子数密度は実験結果より高く、電子温度は実験結果より低かった。これらのことから、本数値計算がジュール加熱を実験より低く見積もっており、シース電圧以外のバルク電圧を低めに予測している可能性を示した。過去の実験との比較では、本数値計算の $J_{dis}=12\text{kA}$ の重粒子並進・電子温度比は実験結果よりも低く、数値計算のイオンスリップパラメータ S_{ion} (イオンスリップの強さを表す指標)が実験より低い可能性を示した。また、イオンと中性粒子の衝突断面積 Q_{in} を減少させることで S_{ion} を高め、重粒子並進・電子温度比と放電電圧を実験結果に近づけられることが分かった。これらの比較結果を踏まえて、数値計算による放電電圧の予測精度向上に向けた今後の課題を示した。

第7章では本研究の結論と今後の課題についてまとめた。本研究の主な成果は、数値計算への3温度非平衡モデルおよびイオンスリップモデルの導入を行い、数値計算による推力や投入電力の予測精度向上とアノード近傍の電流分布を比較的良好に模擬できた点である。また、MY-I スラスト(流量 0.4g/s、 $J_c=10\text{kA}$)を計算対象とした場合、 $J_{dis}=5\text{kA}$ において、3温度非平衡性が見られることや、 $J_{dis}=10\text{kA}$ でのイオンスリップの発生について知見を得た。

博士論文の審査結果の要旨

本博士論文は、宇宙機用電気推進の一種である電磁プラズマ力学アークジェット (MPD) スラスタの数値解析研究に関する論文である。MPD スラスタは、有人火星探査など将来の大型宇宙ミッションでの利用が期待される大電力・大推力スラスタであり、大電流アーク放電により高速・高密度なプラズマジェットを生成・噴射することで推力を得る。出願者は、MPD スラスタ内で生じる2種類の非平衡性 (温度非平衡性ならびに速度非平衡性) に着目した水素 MPD スラスタの物理モデリングと数値シミュレーションに世界で初めて成功し、これらの非平衡現象が MPD スラスタの推力等の特性を決定する上で重要であることを明らかにした。本研究で得られた新しい解析モデルと新モデルに基づく数値解析結果は、今後 MPD スラスタの推進性能を実用レベルまで高める最適設計を進めるうえで重要な役割を果たすであろう。

本論文では、第1章にて MPD スラスタ研究の現状と研究目的を述べた後、第2章では、水素 MPD スラスタ内部現象を解析するための物理モデルについて記されている。基礎方程式としては、軸対象2次元の圧縮性ナビエストークス方程式に磁場の誘導方程式を加えた電磁流体方程式を用い、解離・電離反応、ホール効果、重粒子並進温度・振動温度・電子温度の3温度間の非平衡性、ならびに、イオンスリップ (中性粒子とイオンの速度差) を考慮した定式化を行った。その上で、有限体積法と TVD (Total Variation Diminishing) スキームに基づく数値シミュレーションコードを作成して数値シミュレーションを実施した。第3章ならびに第4章で示された1 MW (メガワット) 級 MPD スラスタの数値解析結果では、スラスタ内部において電子温度と振動温度が2eV程度であるのに対して重粒子並進温度が0.6eV程度と低く、また、イオンと中性粒子間で最大30%の速度差があることが示された。次の第5章では、このような温度非平衡性や速度非平衡性が推進特性等の評価に与える影響について議論されている。放電電流が5kAから10 kAまでの広い作動領域にて、1) 温度非平衡性を考慮した場合、2) 速度非平衡性を考慮した場合、3) 温度非平衡性と速度非平衡性の双方を考慮した場合、4) これら非平衡性を無視した場合、のそれぞれ場合の数値シミュレーション結果と実験結果を比較したところ、温度ならびに速度の平衡性の双方を考慮した数値シミュレーションが、推力・放電電圧等の実験値を最も良く再現できた。従って、本研究で新たに取り入れた温度非平衡性と速度非平衡性を考慮した数値シミュレーションによって、水素 MPD スラスタの推力・放電電圧等の推進機特性の予測精度を従来モデルに比べて向上させることが可能となった。次の第6章では、水素 MPD スラスタの推進特性等の数値予測精度を更に改善するための試みとして、推進機壁面付近のシースや衝突モデル・電気伝導度モデル等の高精度化について検討がなされ、MPD の数値解析研究についての将来展望がまとめられている。

最後の第7章には、本論文の結論が記されている。

以上の成果は、水素を推進剤としたMPDスラスタに関する初の実用的な数値シミュレーション研究であり、将来のMPDスラスタの実現に向けて工学的に有益な知見が得られている。また、本論文の主要な部分は、査読付き学術雑誌1篇ならびに解説記事1篇として掲載済みであり、査読付き学術雑誌1篇を投稿中である。以上の結果を踏まえ、本論文は、博士（工学）を授与するに十分な学術水準に達していると判定した。