

氏 名 田内 思担

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2226 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 実機スケールにおける自己誘起磁場型 MPD スラスタの性能
特性と陰極現象

論文審査委員 主 査 宮坂 武志
岐阜大学 工学部 教授
佐藤 毅彦
宇宙科学専攻 教授
阿部 琢美
宇宙科学専攻 准教授
船木 一幸
宇宙科学専攻 教授
奥野 喜裕
東京工業大学 工学院 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 田内 思担

論文題目 実機スケールにおける自己誘起磁場型 MPD スラスタの性能特性と陰極現象

宇宙開発の発展に伴い、宇宙探査の範囲は、地球軌道以遠への深宇宙へと拡大しつつある。このような深宇宙探査の実現には、高い速度増分を持ち、コストの増大につながるミッション期間の短縮が可能、かつ高いペイロード比の確保が可能な推進システムが必要である。すなわち、十分な速度増分に達するまでの時間を短縮可能な高い推力と、高い比推力を併せ持つ宇宙用推進機が要求される。その一つの候補として自己誘起磁場型 Magnetoplasmadynamic (MPD) スラスタが挙げられる。MPD スラスタは電磁加速型の電気推進機であり、高い比推力を持つと同時に、イオンエンジンやホールスラスタ等の電気推進機と比較して高い推力密度を達成可能であることから、将来の深宇宙探査におけるメインエンジンとして期待されている。

MPD スラスタは上記した利点を有するが、推進効率の低さや熱設計の難しさから、高い推進性能と熱設計とを両立可能な設計則の確立には至っていない。高い推進性能と熱設計とが両立可能な設計の一つの解決策として、電極形状の大型化（実機スケール化）が挙げられる。そこで著者が所属している研究グループでは 2 MW 級の電力を投入した際に、高い推進性能と熱設計とが両立可能なスラスタ（MK-2 スラスタ）の数値設計を行った。しかし、MK-2 スラスタの性能特性や、プラズマの生成・加速機構、また陰極現象は、いまだ明らかにされていない。

そこで本研究では、これまでに検討例がない、高い推進性能かつ熱構造的に妥当である 2 MW 級定常作動輻射冷却式 MPD スラスタの設計確立を最終目標に、本研究では MK-2 スラスタを研究対象として、下記の 3 点を研究目的とした。

- (1) MK-2 スラスタの推進性能特性と、推進性能に対する放電室形状の影響を明らかにする。
- (2) MK-2 スラスタにおいて陽極の高温化要因となる陽極端における放電集中抑制に向けた指針を得る。
- (3) MK-2 スラスタの作動中において、陰極温度が耐熱温度を下回っているか明らかにする。

本論文は 8 章から構成されており、各章の要旨を以下に記述する。

第 1 章は序論であり、本研究の背景として、宇宙開発の現状や MPD スラスタの動作原理や物理を紹介し、課題整理を行った上で、本研究の位置づけと目的を記述している。

第 2 章では、本研究で使用した数値シミュレーションのモデルと手法を記述している。特に本数値シミュレーションではイオンスリップ等の実在気体効果を考慮しているため、それぞれの物理的背景も説明している。

第 3 章では、実験装置と計測システムについて記述している。実験装置については、設計の背景についても記述し、計測システムについては、計測理論についても示している。

第4章では、MK-2 スラスタの推進性能特性と、MK-2 スラスタにおいて放電室形状が推進性能とプラズマ構造に与える影響を、数値シミュレーションにより議論している。特に本章では、高い推進性能を発揮可能な水素を推進剤として検討した。その結果、MK-2 スラスタにおいては、電極壁面における摩擦力が気体力学的推力を打ち消すほど顕著に生じ、その結果として全推力の増加が抑制しうる可能性を示した。また、放電室形状が推進性能へ与える影響については、本数値計算の条件においては、フレア陽極の方がストレート陽極よりも推進効率が上回る傾向が見られた。放電室形状がプラズマ構造へ与える影響については、フレア用協の場合、放電電流の増加に従い、特に陽極壁面付近を中心として放電室の大部分の領域で、イオンスリップパラメータが1以上となった。すなわち、この領域では、イオンのみが選択的に加速された。また投入電力の観点からは、特にフレア形状陽極の場合、全投入電力の50%以上がイオンスリップ加熱として消費される。また、ストレート陽極の場合についても、放電電流の増加に従い、イオンスリップ加熱が増加する傾向が見られた。このように数値シミュレーションの結果、MK-2 スラスタにおいてはイオンスリップの影響が顕著に生じる可能性を示し、この抑制が重要であることを明らかにした。

第5章では、数値計算の妥当性検証、MK-2 スラスタにおける推進性能特性の実験的評価、また放電室内部におけるプラズマ構造と放電構造を実験的に明らかにして、陽極高温化の要因となる陽極端における放電集中抑制に向けた指針を得ることを目的とした。推進性能はスラストスタンドにより推力測定を行うことで取得して、内部プラズマ・放電構造はダブルプローブと磁気プローブを使用して、スラスタ内部の r - z 平面においてプラズマパラメータと磁束密度を取得した。推進剤としては水素とアルゴンを使用した。結果として、フレア陽極の方がストレート陽極よりもすべての条件で推進効率が上回った。その一方で、数値計算で示唆されたようなフレア形状陽極の場合において、放電電流の増加に従い推進効率が低下傾向に転じるような傾向は見られなかった。放電集中の観点からは、MK-2 スラスタでは、臨界電流以上の放電電流においても、放電室形状によらず、陽極の高温化要因となるような陽極端における顕著な放電集中が生じないことを実験的に明らかにした。また放電室形状間における放電の差として、フレア陽極では、陽極端付近に放電電流が付着する傾向がある一方で、ストレート陽極では陽極壁面に一様に分布することを実験的に明らかにした。またこのような放電構造を、電子ホールパラメータと、電子のラーマー半径と電極間距離との比から説明した。

第6章では、MK-2 スラスタの作動中において、陰極表面温度が耐熱温度以下とされているか実験的に明らかにすることを主な目的として、陰極表面温度分布とプラズマとの関係を議論している。陰極表面温度分布は、新たに開発した二色温度計を使用して計測した。これにより、初めてプラズマ発光下における陰極表面温度の2次元分布を示した。その結果、MK-2 スラスタにおいて、本研究におけるスラスタの作動範囲では、臨界電流以上の放電電流においても、推進剤種や放電室形状によらず、陰極温度が耐熱温度を下回ることを実験的に明らかにした。また、陰極の加熱構造とプラズマ電流密度分布との間には相関が見られた。この結果は、陰極表面温度分布と電流付着部位には相関が有り、陰極表面温度分布から、陰極表面における放電構造を説明できる可能性を示している。

第7章では、第4章から第6章までの結果を総合的に考察した。具体的には、具体的には、数値計算と実験との比較、MK-2 スラスタの特性の説明、推進性能に対する陰極表面

における電流付着構造の影響，最後に MK-2 スラスタにおいては，どのような設計とすべきかその設計を考察し，設計則を提案した．

第 8 章は結論として，本研究で得られた結果をまとめると同時に，MK-2 スラスタの高性能化に向けた設計指針を示している．特に水素を推進剤とした場合の MK-2 スラスタの放電室設計としては，軸方向ローレンツ力を増加できるような程度電流経路を張り出すことが可能であり，電極近傍における推力に寄与しない電力消費を抑制可能かつ，放電集中を抑制可能である，ノズル開き角をわずかに設けた陽極形状とすべきである．また陽極壁面におけるプラズマの枯渇抑制のため，バックプレートに加えて陽極壁面からも推進剤を供給すべきである．

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 田内 思担

論文題目 実機スケールにおける自己誘起磁場型 MPD スラスタの性能特性と陰極現象

小惑星探査機「はやぶさ」は、地球を遠く離れた深宇宙空間を効率良く航行するためにイオンエンジンを採用している。「はやぶさ」は小型の宇宙機であり、搭載されたイオンエンジンも 10mN (ミリニュートン) と小型であったが、今後想定される月・火星の本格探査ではミッション規模と宇宙機サイズが大型化することから、イオンエンジンのように燃費に優れ、かつ、大推力の電気推進が求められる。そこで本研究では 10N (ニュートン)・2MW (メガワット) と従来よりも大幅に大型化した推進機として自己誘起磁場型電磁プラズマ力学アークジェット (MPD) スラスタを対象とし、MPD スラスタの実現と将来本格探査への適用を目指した実験ならびに数値解析研究を実施した。

MW 級の MPD スラスタでは直径 10cm 程度の小型放電室内に推進剤を導入し、これを 10kA の放電電流により電離させる。電離した推進剤は放電電流と自己誘起磁場との相互作用から発生するローレンツ力にて高速まで加速可能である。MPD スラスタでは高温高密度プラズマをローレンツ力で加速することで高い推力密度とコンパクトな推進機が可能になる一方、高温プラズマが放電室壁面と直接接することから熱負荷が厳しく、放電電流を増やしてとローレンツ力と推進性能の向上を図ると、耐熱設計がより難しくなるなど、推進性能と耐熱性とを両立させることが困難であった。そこで本研究では、電極の大型化 (実機スケール化) により熱負荷の分散を図ることで、高い推進性能を維持しつつ、かつ、電極温度の上昇を電極材の融点以下に抑えることを目指した。

本論文では、まず第 1 章にて宇宙機用推進機と MPD スラスタ研究の現状と研究目的を述べた後、第 2 章および第 3 章では、電磁流体シミュレーション手法と真空チャンバーにおける推進性能評価ならびにプラズマ諸量と電極温度の計測について記述している。実験装置については、想定した設計則に基づき陽極直径 80mm・陰極直径 40mm・軸方向長さ 210mm の 2MW 級 MPD スラスタ (MK-2 スラスタ) を設計製作し、陽極についてはストレート形状とフレア形状の 2 形状について評価を実施した。フレア形状については開き角 25 度とした。第 4 章では、MK-2 スラスタにおける推進性能とプラズマ構造の相関を数値シミュレーションにより評価した。水素を推進剤とすることでローレンツ力に気体力学的推力が伴うことで大推力が得られる反面、電極壁面における摩擦力が顕著に生じ、また、陽極壁面付近におけるホールパラメータとイオンスリップパラメータが大きくなる。これらの結果、放電室における中性粒子の加速が抑制され、気体力学的推力の割合は限定的となる。投入電力の観点からは、高効率を特徴とするフレア形状陽極の場合に着目すると、

全投入電力の 50%以上がイオンスリップ加熱として消費されていた。このイオンスリップ加熱は亜音速領域に加えて超音速領域においても生じ、超音速加熱は推力増へは寄与しない。以上のように MK-2 スラスタではイオンスリップ効果が顕著に生じることから、その影響を最小限に抑えることが重要である。

第 5 章以降では、MK-2 スラスタの推進性能特性と内部プラズマ構造、そして陰極部位の温度分布を実験的に評価した。フレア陽極では陽極フレア部近傍領域のほぼ全域で電子ホールパラメータが 1 を超え陽極端付近に放電電流が付着する傾向があるが、極端な放電集中は無く、拡散した放電分布が実現している。次の第 6 章では、MK-2 スラスタの陰極表面温度分布とプラズマ分布との関係を議論しており、陰極表面温度分布は推進剤種や放電室形状に依存するが、2MW 級までのスラスタ動作範囲内において、陰極温度が耐熱温度を下回ることが確認された。新たに開発した二色温度計により、プラズマ発光下における陰極表面温度の 2 次元分布を取得することが可能になったが、MK-2 スラスタが推進性能に優れるだけでなく、動作温度が許容可能な範囲にあることを検証した。第 7 章では、数値計算と実験との比較により MPD スラスタ特性を解析評価する際の将来課題をまとめ、また、MPD スラスタの設計則を再確認した。第 8 章では本研究で得られた結論がまとめられている。

以上の成果は、MPD スラスタにて電極形状の大型化（実機スケール化）を図り、推進性能と熱特性の双方の観点から設計の妥当性を示した初めての成果であることから、独創性が高く、かつ、将来の大型宇宙探査とそのための電気推進の実現に向けて有益な結論が得られている。更に、数値解析部分については査読付き学術雑誌 2 篇として掲載済みであり、実験的成果についても投稿準備を進めている。以上の結果を踏まえ、本論文は、博士論文として十分な学術水準に達していると判定した。