

博士論文の要約

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るべきである．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．