

審査の結果の要旨

氏名 中川 悠一

修士(工学) 中川 悠一 提出の論文「水を推進剤とする電子共鳴加熱式超小型イオンスラスタ Water-fueled Miniature Ion Thruster Using Electron Cyclotron Resonance」では、イオンスラスタ内部のプラズマモデルを構築、及び水イオンスラスタの性能特性について実験的に明らかにした上で、スラスタシステムとしての性能解析を実施し、水イオンスラスタのキューブサットへの適用可能性及び有用性を示した。現在、超小型衛星やキューブサットの打ち上げ数は増加し、ミッションは多様化、複雑化してきている。これらの要求にこたえるため、小型推進機の研究開発が行われている。小型推進機への要求は安全性、推進剤搭載性、運用性、高推力と高比推力の両立などに整理され、これらの要求を高い次元で満たす推進機として、水を用いた推進機が提案されている。水は、有人探査との親和性、深宇宙探査への応用などの点でも利点があり、有望な推進剤であるといえる。一方、比熱や潜熱が大きいこと、分子量が小さいことなどが推進剤としての特徴であり、一部推進機では効率低下の要因となる。水を推進剤とする推進機としては、レジストジェットや電気分解式といった高い推力電力比と比較的低い比推力を持つ推進機の開発が進んでおり、すでにフライトモデルの開発が実施されている。一方で、高比推力を実現しうるプラズマを利用した推進機分野では、研究開発が進んでおらず効率が低いこと、コンポーネントとしての技術的成熟度が低いことが問題になっている。本論文では、電力の点ですでに小型での作動が実証されている水イオンスラスタを対象として、その性能をモデルおよび実験を持って明らかにし、その特性や性能向上に向けた知見を明らかにした。さらにそれらの知見をもとに、キューブサットへの適用可能性および有用性を示した。本論文は7章構成となっており、それぞれ以下の事項が述べられている。

第1章では、超小型衛星やキューブサットの現状と小型推進機に関する研究の現状を述べた後、小型推進機への要求を安全性、推進剤搭載性、運用性、高推力と高比推力の両立の観点から整理している。さらに、それらの観点に基づいて推進剤としての水の優位性および特徴を述べて、水を推進剤とする推進機の研究について、網羅的に記述している。その上で、提案する水イオンスラスタの特

徴を述べ、研究目的を水イオンスラスタのキューブサットへの適用可能性及び有用性を示すことと定めた上で、それを示すための論文の内容および構成について述べている。

第2章では、イオンスラスタのプラズマの状態について、電子共鳴加熱およびRFプラズマで広く用いられるグローバルモデルを適用したモデル化、およびその計算結果について述べている。幾何条件と温度条件を同一とした水およびキセノンのプラズマに対して、生じうる種々の反応およびその衝突断面積を定義したプラズマモデルを用いて、スラスタ性能評価の方法を定義し、両者に対しての計算結果および主要なパラメータの分布が示されている。特に水の反応については、133種の反応から主要粒子種とレートコンスタントにより抜き出した27種の反応を考慮したモデルを構築している。これにより、実験では得ることの難しい内部パラメータをモデル化し、現象の物理的な背景に迫るための準備が行われている。

第3章では、論文中で扱った4つの実験に関する実験方法が述べられている。これらの実験は、電力及び流量依存性、周波数変更、壁面電位変更、イオン種測定からなり、これらに関しての実験装置、実験ごとの装置構成および誤差評価方法、そして実験手順・条件が記されている。

第4章では第3章の方法に基づいて実施された実験の結果が述べられている。電力及び流量依存性はイオンスラスタの基本的な特性で、キセノンの結果と比較することで水イオンスラスタ特有の特性を示している。周波数および壁面電位に対する依存性は電子共鳴加熱式超小型イオンスラスタ特有のもので、性能向上への知見が示されている。イオン種測定は、解離性イオンが発生する水プラズマ特有の特性を明らかにしている。

第5章では、第2章のモデルと第4章の実験結果を踏まえて、モデルの妥当性評価、モデルと実験の比較によるモデルの補正について、および実験結果から示唆される現象の物理的背景が論じられている。モデルと実験の比較においては、モデルと実験結果の比較によって、キセノンの実験結果を考慮したモデルから水の実験結果をある程度再現することが確認されている。また、種々の依存性に対する物理的背景がモデルを考慮しつつ述べられ、性能向上に対する知見および今後の課題が述べられている。

第6章では、第5章までで論じた水イオンスラスタの性能特性をもとに、キューブサットへの適用可能性および有用性が、システムとしての性能を検討することで示されている。実際の開発実績に基づきシステム評価が定量的に行われ、水を用いる優位性やシステムとしての特徴がまとめられている。また、モデルミッションを定義しての解析が実施され、水イオンスラスタを用いた衛星のミッション遂行に関する有用性が示されている。

第7章では、すべての章の統括として、第1章で設定された目的に対して結論を項目別に記し、水イオンスラスタのキューブサットへの適用可能性および有用性を結論づけている。

以上を要約すると、本論文では、今後の小型宇宙機の発展に大きく貢献する電子共鳴加熱式超小型水イオンスラスタを提案し、その物理現象のモデル化、実験的特性評価、性能向上への知見の取得を達成している。また、それらをもとに、キューブサットへの適用可能性および有用性が示されている。これらの成果は、小型推進機への要求を満たしつつ高い速度増分を実現できる推進機を実現するだけでなく、小型宇宙機の低軌道での実利用や深宇宙探査へ大きく貢献することが期待される。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。