

## 審査の結果の要旨

氏名 山下 裕介

修士（工学）山下 裕介提出の論文は「Investigation of plasma mode-transition by two-photon absorption laser-induced fluorescence and particle simulation in microwave discharge ion thruster (2光子レーザー誘起蛍光法と粒子計算によるマイクロ波放電型イオンスラスタのプラズマモード遷移の研究)」と題し、マイクロ波放電型イオンスラスタのプラズマモード遷移の現象解明をレーザー実験・粒子計算の両方を用いて行った。本論文が取り扱う装置は、永久磁石によるミラー型磁場とマイクロ波による電子サイクロトロン共鳴現象（ECR）を組み合わせた装置である。電子はミラー磁場中で往復運動し、その間に連続的に ECR 加熱をすることで、電子が中性粒子を衝突電離させ、プラズマを生成する。このミラー磁場領域を本論文では、磁場閉じ込め領域と呼称する。推力は、投入マイクロ波電力を固定し、推進剤流量を変更し、調整する。しかし、この推進機では、ある流量を超えると、急激に推力が低下する現象が発生し、推進機のプラズマ発光もこの流量限界前後で大きく変化している。これらの現象は他の ECR プラズマ装置にもみられ、プラズマモード遷移と呼称されている。この流量限界が最大推力を律速することから、流量限界の物理解明が本推進機で最も重要な課題である。先行研究から、流量を増加させると、磁場閉じ込め領域外で、電離・励起が行われ、生成されたプラズマによって、マイクロ波伝搬が妨げられることが示唆されているが、流量を増加させると、なぜ磁場閉じ込め領域外で電離・励起が発生するのかという点は未解明であった。そこで、本研究では、この磁場閉じ込め領域外の電離・励起過程の解明を目標とする。実験的には、2光子吸収レーザー誘起蛍光法による基底中性粒子密度と励起自然発光の同時計測という手法を新たに提案する。また、本研究・先行研究の実験結果に基づいて、中性粒子とマイクロ波電界の計算を実行することで、電離・励起分布の流量依存性を同定する。本論文は4章から成り、構成は以下となっている。

第1章では、序論として電気推進の歴史、およびイオンスラスタの各種放電方式を説明している。次に、本論文で取り扱うプラズマの物理、化学、診断法の基礎事項を紹介している。これらの基礎事項を踏まえ、本推進機での問題提起・先行研究の計測を紹介し、解明すべき課題とその解決策について説明している。

第2章では、2光子吸収レーザ誘起蛍光法による基底中性粒子密度と励起自然発光の同時計測の手法、理論、実験結果、考察を紹介している。この手法は、励起自然発光が基底中性粒子密度に比例することから、励起過程を実験的に分析している。また、励起と電離の過程には、強い相関を持つことから、励起過程の結果から、電離過程を分析する。励起・電離過程を測定するには推進機内部での計測が必要となり、内部での計測を実現するための方法についても説明している。本論文では、計4種類の若干異なる形態の推進機にこの計測を適用し、その結果、どの推進機でも励起発光が流量限界直前で急激に増加し、この増加は基底中性粒子からの直接励起だけでは説明できないことが示唆された。過去の電子温度計測、共鳴・準安定準位の中性粒子密度の結果を基に、励起過程を分析することで、準安定準位からの間接電離・励起がこの励起発光の急激な増加の主な原因であり、準安定準位からの間接電離が磁場閉じ込め領域外での電離生成原因であることを示唆している。

第3章では、基底・準安定の粒子計算とマイクロ波電界の数値計算を行っている。粒子計算では、複数の電離・励起分布を仮定し、粒子の運動を計算し、得られた密度分布を実験と比較することで、電離・励起分布を同定している。また、実験で得られた準安定と基底準位の密度を基に、プラズマ密度分布を推測し、その存在下でのマイクロ波電界を計算し、実験結果と比較した。粒子計算から、流量増加に伴い電離・励起生成分布は磁場閉じ込め領域外にも徐々に広がるが、この広がる要因は磁場閉じ込め領域で発生した準安定中性粒子が領域外へ拡散するためであると分かった。また、マイクロ波電界の数値計算から、拡散した準安定中性粒子の間接電離がマイクロ波伝搬を妨げる主な原因であると分かった。これらの数値計算は、先行研究・本研究で測定された複数の実験パラメータ間の関係性を明らかにし、モード遷移の原因が準安定準位からの間接電離であるという主張の信頼性を向上させるものである。

第4章では、本研究の成果をまとめている。磁場閉じ込め領域で発生した準安定中性粒子が領域外に拡散し、その拡散した粒子によって間接電離が発生し、磁場閉じ込め領域外でプラズマが発生する。最終的に、磁場閉じ込め領域外のプラズマ密度が増加し、マイクロ波の伝搬がそのプラズマによって妨げられ、プラズマモード遷移に至ると結論付けている。

以上要するに、本論文は、2光子吸収レーザ誘起蛍光法による基底中性粒子密度と励起発光の同時計測と粒子計算を実行することにより、マイクロ波放電型イオンスラスタの推力上限を支配するプラズマモード遷移の物理現象の理解を深めたものであり、航空宇宙工学分野、特に電気推進分野に貢献するところが大きい。

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。