

## 論文の内容の要旨

論文題目 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)

氏名 山下 裕介

本論文では、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と呼ばれる物理現象に着目した。マイクロ波放電型イオンスラスタは、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) を組み合わせた推進機である。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。

本推進機の推力は、投入マイクロ波電力を固定し、推進剤流量を変更し、調整される。しかし、ある流量を超えると、急激に推力が低下する現象が見られ、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。類似の現象は他の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。この流量制限が最大推力を律速することから、流量制限の物理解明が本推進機で最も重要な課題である。先行研究の励起準位の密度・マイクロ波電界の計測から、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て、モード遷移に至ることが示唆されている。しかし、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、磁場閉じ込め領域外の局所的な電離・励起過程評価を実験的・数値的アプローチを用いて行い、プラズマモード遷移の物理現象を解明することを目標としている。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た。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た。これらの基礎事項を踏まえ、本推進機での流量制限に関する問題提起を行い、先行研究の内部計測では、磁場閉じ込め領域外の電離・励起生成過程が明らかになっていないことを説明している。この問題を解決するにあたって、電離・励起生成の評価が以下の3つの観点からチャレンジングな課題である

ことを言及している。

- (1) 電離・励起生成量は直接測定することができない。
- (2) 間接的には電離・励起生成量は、電子速度分布関数と中性粒子密度から求めることが可能である。しかし、マイクロ波放電型イオンスラストの電子速度分布関数計測は低密度のため、測定技術的に正確な電子速度分布関数を得ることが難しい。
- (3) マイクロ波放電型イオンスラストのプラズマは、低温度プラズマに分類され、一般的に低温度プラズマでは、基底準位の中性粒子からの直接電離・励起だけではなく、励起準位の中性粒子からの間接電離・励起が無視できない。

これら3つの観点を踏まえ、本論文では、電離・励起過程を評価するために、実験的・数値的アプローチをそれぞれ提案した。実験的には、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という手法を提案した。励起自然発光自体を測定するのは容易であり、その発光は直接励起だけでなく、間接励起も含まれている。直接励起は、基底中性粒子密度の測定結果から評価でき、間接励起が発生しているかどうかを分析することができる。また、励起過程と電離過程には、強い相関があり、励起過程から電離過程を分析できる。数値的には、電離・励起生成分布、プラズマ密度分布を仮定し、基底・準安定準位の密度分布・マイクロ波電界分布を計算し、得られた計算結果と実験結果を比較することで、電離・励起生成分布を同定するという方法を提案している。

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、考察を紹介した。この測定では、2光子吸収と電子衝突による励起過程が同一波長で行われるという特徴から、レーザON/OFFのみで、基底中性粒子密度と励起自然発光強度を同じ実験セットアップで測定できるという利点を新たに見出している。また、以下の3つの観点から、最適な励起過程(波長)を提案している。

- (i) 基底中性粒子密度計測を高いS/N比で測定できる点
- (ii) 電離と励起のエネルギーの差が小さいこと(電離・励起を発生する電子の母集団の違いを小さくするため)
- (iii) 励起過程の下準位が共鳴準位であること(光学的に薄いという条件が成立させるため)

更に、この計測を実現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実験方法についても説明した。

本論文では、計4種類の推進機にこの計測を適用した。その結果、どの推進機でも励起発光が流量限界直前で流量増に伴い急激に増加し、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・励起がこの励起自然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

あることを示唆された。

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た。それぞれは、以下の内容となっている。

(a) 基底・準安定中性粒子の粒子計算

複数の電離・励起分布を仮定し、数10万程度のサンプル粒子の軌跡を直接計算することで密度分布を計算している。ここで、脱励起、壁面反射はモンテカルロ法を用いて計算している。得られた密度分布を実験と比較することで、電離・励起分布を同定した。

(b) マイクロ波電界の数値計算

マイクロ波の電解のみを解析するために、ヘルムホルツ方程式を用いた。更に、単純化のために、導波管の伝搬モードを用いて、軸方向以外の空間微分をモデル化し、マイクロ波の伝搬方向のみの準1次元的なヘルムホルツ方程式を提案した。更に、実験で得られた準安定と基底準位の密度を基に、プラズマの拡散方程式を解くことで、プラズマ密度分布を推測している。そして、間接電離と直接電離の比率に応じたマイクロ波電界を計算し、実験結果と比較することで、間接電離の影響について考察した。

(a)の計算から、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り、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ことと分かった。また、(b)の数値計算から、拡散した準安定からの間接電離が最適流量近傍のプラズマ密度上昇に重要な役割を果たし、生成されたプラズマがマイクロ波伝搬を妨げることが分かった。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た。

第4章では、本研究の成果をまとめた。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物理現象を解明することを目的に、実験的アプローチとして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、数値的アプローチとして基底・準安定の中性粒子の粒子計算、マイクロ波電界の数値計算を実行した。これらの結果、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、その拡散した粒子が間接電離を引き起こすことで、磁場閉じ込め領域外に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た。本研究によって得られたプラズマモード遷移の物理メカニズムは、これまでのスラスタの性能の差を説明するものあり、今後推進性能を向上させるための設計を行うための手がかりになることが期待できる。また、電離・励起過程を評価するためのレーザ計測は新しく、他の推進機、プラズマ装置への応用が期待できる。