

氏 名 土屋隼人

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1125 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 大型ヘリカル装置における周辺プラズマの 2 次元密度分布  
及び揺動計測

論文審査委員	主査	教授	大藪	修義
		教授	小森	影夫
		教授	金子	修
		教授	田中	雅慶（九州大学）
		准教授	大野	哲靖（名古屋大学）

## 論文内容の要旨

核融合炉実現のためには、高温高密度の主プラズマを一定時間以上閉じ込めておく必要がある。従って主プラズマの安定保持が核融合研究の最重要課題であるが、その境界条件を決定する周辺プラズマの輸送・安定性の研究も重要である。近年、トカマクプラズマや直線プラズマの周辺領域において、周辺局在化モード (ELM)、プラズマ塊 (ブロッブ) の吐き出し現象等、局所的・突発現象が観測されており、その物理機構や輸送への影響に興味が集まっている。このような現象では、磁力線を横切る方向に一気に大量の粒子が輸送されることから、プラズマ対向壁における不純物の発生などへ悪影響が懸念されている。

ELM やプラズマ塊の物理機構を解明するためには精度の高い計測が要求されるが、従来のピンポイント計測や1次元の計測では現象を正確に捉えることは困難である。そこで本研究では、プラズマ周辺部において密度の2次元計測が可能な、「シート状サーマルリチウムビームプローブ (2D-LiBP)」を開発し、複雑な3次元磁場構造を持つ大型ヘリカル装置 (LHD) の周辺部における輸送現象を解明することを目的としている。従来 LiBP ではペンシル状のビームが用いられていたが、2次元計測を可能にするためにビーム形状に工夫を施した。具体的には、複数のスリットによりシート状に整形されたビームをプラズマに入射し、ポロイダル断面上に観測される発光分布を再構成することで密度の2次元分布を可視化することが可能となった。ビーム入射装置の開発では、ビームの高収束性と高輝度化を目指し、種々の最適化を行った。まずビーム形状 (収束性) とビーム束 (輝度) を予測するモンテカルロ手法を用いたシミュレーションコードを開発し、その妥当性を確かめるためにテストベンチにおいて検証実験を行った。その結果、両者はよく一致していることが示されたため、このコードを用いてノズル形状およびスリット配置を決定し、システムを製作した。

リチウムビームプローブは電子密度の絶対値算出が可能であることが特徴の一つに挙げられているが、高速現象を扱う際には誤差が生じることが予測されている。そこで実験に先立って、周辺プラズマ中を高速で飛行するプラズマ塊を想定したシミュレーションを行い、高速現象への適用可能性を検討した。その結果、ビーム粒子の速度と高速現象のタイムスケールが同等かビーム粒子速度の方が遅い場合、再構成された2次元密度分布にゴーストが生じ、プラズマ塊の密度が低く算出されることが明らかになった。しかしこの誤差を含んだ結果は、シミュレーションで算出される補正値を用いることにより修正可能であることも判明した。さらに誤差はサンプリング周波数が低いほど顕著になることも明らかになったことから、実際に用いる検出器には2次元計測でしばしば用いられる電荷結合素子カメラ (CCD カメラ) とともに、サンプリング周波数の高い光電子増倍管 (PMT) を、2次元マトリックス状に配置した光ファイバー・アレイとともに使用することにした。

上述のシステムを用いて主に ECH で生成された比較的低密度の放電で実験を行い、2次元密度分布およびその揺動、またプラズマ塊の吐き出しと推測される高速現象を捉えることに成功した。密度計測では磁気面に沿って等密度面が分布している様子が可視化され、密度の上昇とともにダイバータレッグ構造も観測された。

プラズマ塊は正の密度スパイク（突発的な密度増大）としてPMTによって捉えられた。確率密度分布関数を用いた歪み度解析から、コアプラズマに近い領域の揺動は「乱流的」であるが、外側に行くにつれてプラズマ塊を示唆する正のスパイクが支配的になることが明らかになった。2次元計測のメリットを生かしたウェーブレット解析からはプラズマ塊の運動方向も求められた。総じて中心部から周辺部に向けて飛行しているが、その速度や向きは複雑で、トカマクなどにおける描像とは異なっている。密度の異なる放電で比較したところ、高密度時に歪み度が小さくなり速度ベクトルが様々な方向を向くことが分かった。この結果は衝突頻度の増大がプラズマ塊の寿命や飛行の向きに影響を与えること示唆している。また、観測領域がエルゴディック層中であることから、ヘリオトロン配位特有の複雑な磁場構造がプラズマ塊の動きに影響することも考えられたため、観測領域の詳細な磁場構造解析を行いプラズマ塊の性質との関連性を調べた。その結果、磁場の接続長と歪み度の間に相関が見られ、プラズマ塊は磁場構造の影響を受けることが明らかになった。

本研究では周辺密度分布が計測可能なリチウムビームプローブを開発し、ヘリカル装置でプラズマ塊が発生することを見出し、プラズマ塊の振る舞いを詳細に観測することに成功した。これまでプラズマ塊は真空容器壁付近に設置されたプローブで観測されていたが、本研究でプラズマ塊の空間的振る舞いを世界で初めて観測し、位置によってその振る舞いが大きく異なることを示した。また、磁場構造に大きく影響されること等も明らかにした。今後、本研究の成果を基に、周辺プラズマにおける輸送現象と安定性に関する理解がより深まるものと期待される。

## 論文の審査結果の要旨

出願者の論文は、トーラス装置において、主プラズマの閉じ込めに大きな影響を与えると考えられている「周辺プラズマ揺動」に関する研究成果についてまとめたものである。トーラスプラズマの周辺部に励起される揺動は、磁力線を横切って、閉じ込め領域から逃げて行くプラズマの粒子輸送を増長させることが知られている。周辺揺動に関してこれまで多くの研究がなされてきたが、最近の研究で、これまで対象としてきた広域的・周期的な揺動に加え、周辺局在化モード (ELM) やプラズマ塊 (ブロッブ) の吐き出し現象のような、局所的・間欠的揺動が径方向輸送に大きく寄与していることが分かってきた。このため周辺プラズマの安定性や輸送現象に対する関心が、近年特に高まってきている。

このような現象の理解には精度の高い計測が必要不可欠であるが、従来の周辺プラズマ計測では、ラングミュアプローブに代表されるピンポイントもしくは1次元計測が主流であった。しかしこのような計測器では上述の局所的・間欠的な現象を捉えることは困難である。特にヘリカル装置においては閉じ込め磁場形状の複雑さから、軸対称性のあるトカマク装置で一般的に行われている計測手法の踏襲は通用しない。このため出願者は、精度の高い2次元計測が可能な機器を自身で開発し、揺動の研究を行った。即ち、出願者が行った研究は、複雑な3次元磁場構造 (エルゴディック層) を有するヘリカル装置の周辺プラズマにおける輸送現象を理解するために、“可視化 (イメージング)” の手法を適用するという先進的なものである。イメージング計測器としては、新開発のシート状リチウムビームプローブ (2D-LiBP) を用いた。出願者は本計測システムを開発するにあたり、数値実験やテストベンチにおける予備実験に基づいた最適化研究を経て、収束性の高いビーム入射装置を完成させた。並行してシミュレーションによる計測誤差の評価も行い、プラズマ塊の速度が計測ビームの速度に比べて速い場合、密度は過小評価されることを示した。

上に述べた準備研究の後、出願者は2D-LiBPを大型ヘリカル装置 (LHD) の周辺プラズマ計測に適用した。CCD検出器による密度の2次元分布計測では本計測の特徴を最大限に発揮し、ダイバータレッグを含め密度分布が磁気面構造とよく一致することを明確に示した。また、光電子増倍管を用いた揺動計測と、確率密度分布関数を用いた歪度解析から、LHDの周辺揺動は、主プラズマに近い高密度領域では乱流的であるが、外側に行くにつれプラズマ塊の吐き出しを示唆する間欠的揺動が支配的になることを示した。プラズマ塊の運動方向も2次元測定結果を基に解析された。その結果、低密度時には外向きであった運動方向は、平均密度の上昇とともに複雑に変化し、乱流的になっていくことが明らかになった。これはトカマク周辺部におけるプラズマ塊の挙動と大きく異なる点で、LHDにおける2次元計測で初めて明らかになったヘリカル系プラズマの特徴である可能性が高い。この現象は、密度上昇による衝突頻度の増大に加えて、ヘリオトロン配位特有の複雑な磁場構造 (エルゴディック層) に起因する、電場の局所的な変化に関係していると考えられることが、出願者の詳細な磁場構造解析から明らかになった。これらの結果は、今後プラズマ塊の発生機構や挙動を解明する上で重要な知見であり、当該分野の研究を牽引していく

ものと思われる。

審査では提出された論文をもとに内容の正確さや新規性，学術的な価値を吟味した。その結果，上述の研究成果はオリジナリティの極めて高いものであり，博士論文としてふさわしい内容であると評価され，審査員全員一致で「合格」と判定した。