

審査の結果の要旨

氏名 四竈 泰一

磁場閉じ込め型のプラズマ核融合実験炉では、最外殻磁気面より外側の境界層プラズマが、炉心プラズマの閉じ込め特性と大きく関係していることが知られている。拡散により炉心から漏れ出たプラズマは、スクレイプオフ層を横切り、原子や分子などの中性粒子との複雑な相互作用を伴いながらダイバータ板へと輸送される。このため、境界層におけるイオン及び中性粒子の流れを統合的に理解することが、炉心及び境界層双方の物理現象を解明する上で重要となる。イオンの計測手法である Mach プロブ法は、高い空間及び時間分解能で流れを計測することが可能である。しかし、実用的な観点から、計測値への擾乱や弱磁化条件下への適用に関して曖昧な点が残されており、これらの解明がさらなる計測精度の向上へとつながる。一方、中性粒子の局所計測を行うためには、通常、観測視線の特殊な配置やレーザーの入射が必要となるが、Zeeman 効果の計測と組み合わせた分光法を用いることで、単一の観測視線により受動的な発光分光法単独で局所計測を行うことが可能となる。近年、原子に対するこの手法の原理実証がなされたが、プラズマの動的な現象への適用には至っていなかった。本論文は、イオン及び中性粒子の流れを統合的に計測するために、Mach プロブ法及び Zeeman 効果を利用した分光法の研究を行い、流れによって引き起こされる境界層の物理過程に関する考察をおこなったものである。

本論文は 4 章から構成される。

第 1 章は序論であり、研究背景として核融合境界層における流れ計測の意義、流れの計測法としての Mach プロブ法及び Zeeman 効果を利用した分光法の位置付けが述べられている。

第 2 章ではダイバータ・境界層プラズマ模擬装置 MAP(material and plasma)-II を用いた Mach プロブ法に関する研究結果が述べられている。計測精度向上のための開発項目である (1)高エネルギー電子による計測値への擾乱、及び(2)弱磁化プラズマに適用可能なモデル式の確立、という二つの点に関して評価が行われている。(1)に関して、電子ビーム成分のエネルギーに対してプローブのバイアスが十分ではない場合に、電子が飛来する方向でイオン電流が減少してしまうことが指摘されている。(2)に関して、既存の信頼性の高い非磁化モデルを拡張した非磁化条件下に適用可能なモデル式が提案されている。提案されたモデル式の実験的検証として、異なる形状を持つ Mach プロブによる計測結果の比較が行われ、その結果、プローブ形状に依らない一意な Mach 数を計測可能であることが示

されている。プラズマパラメータの空間分布から計算されるドリフト速度との比較から、流速値として妥当な Mach 数が得られることも検証されている。

第 3 章では九州大学応用力学研究所 TRIAM-1M トカマクを用いた Zeeman 効果を利用した分光法に関する研究結果が述べられている。磁場中での発光スペクトル形状が、縮退のある場合の摂動論により計算されている。ポロイダル断面上の水素原子 $H\alpha$ 線発光に対して 3 温度成分を仮定したフィッティングが行われ、最外殻磁気面外側に存在する発光位置が特定されている。ヘリウム原子からの発光線に対しても同様の結果が得られている。分離したトラス内側及び外側からの発光線の Doppler シフトを利用することで、真空容器壁から炉心方向へと向かう径方向の原子流れが観測されている。原子流体方程式を用いた解析により、この流れは原子の圧力勾配による力で駆動されていると結論付けられている。最外殻磁気面位置を動かした際の流速の経時変化から、炉内構造物であるダイバータ板からのリサイクリングフラックスと流速が関係していることも指摘されている。さらに、本手法をより一般化し、分子やイオンへ適用した結果にも言及されている。水素分子に対しては、リミター表面からの Fulcher- α 帯発光が観測され、プラズマとリミターとの接触位置近傍に発光位置が存在することが確認されている。観測された回転温度の上昇から、リミター表面温度の上昇が示唆されている。

第 4 章は総括であり、結論と今後の展望が述べられている。

以上要するに、本論文では、核融合炉心プラズマの閉じ込め特性及びプラズマ対向壁近傍の熱・粒子制御に重要な、境界層におけるイオンや中性粒子の流れ計測の信頼度の向上および、計測結果からわかる物理現象の考察がなされたものである。これらはシステム量子工学、特に境界層プラズマにおけるイオンや中性粒子の動的挙動の解明に寄与するところが少なくない。

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。