

氏名(本籍)	ひがし その ゆう た 東 園 雄 太 (鹿児島県)		
学位の種類	博 士 (理 学)		
学位記番号	博 甲 第 4561 号		
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	Study of Neutral Transport Based on Visible-Light Measurement and 3-Dimensional Simulation in Plasma Confinement Devices (プラズマ閉じ込め装置における可視光計測及び3次元シミュレーションに基づく中性粒子輸送の研究)		
主査	筑波大学教授	工学博士	今 井 剛
副査	筑波大学教授	博士(理学)	受 川 史 彦
副査	筑波大学准教授	工学博士	中 嶋 洋 輔
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	吉 川 正 志

論 文 の 内 容 の 要 旨

<研究の背景・目的>

プラズマ閉じ込め装置において、中性粒子の挙動を空間的に理解することが、最適な粒子供給やプラズマの閉じ込め、プラズマ性能向上を考える上で非常に重要であり、真空容器内の複雑な形状や中性粒子源からの特徴的なスケール長を議論する上で、3次元的な計測とシミュレーションを組み合わせた解析方法が必要である。そこで、多チャンネルの H_{α} 線検出器や高速カメラなどの2次元結果を得ることのできる計測に加えて、完全な3次元形状を組み込んだモンテカルロシミュレーションコード(DEGAS)を新しく導入し、より詳細な中性粒子輸送解析の研究を行なった。本研究の目的は、詳細な中也粒子輸送解析から異なったプラズマ閉じ込め方式(ミラー、トカマク、ヘリカル)において、プラズマや周辺部パラメータの依存性、真空容器形状などの幾何学的な要因を考察し、中性粒子の減衰長や周辺プラズマパラメータと中性粒子輸送の関係について、装置や磁場配位に依らない普遍的な物理の解明を行なうことである。

< GAMMA 10 での中性粒子輸送解析 >

セントラル・アンカー部両真空容器において、真空容器内部の構造物のモデリング、NBI などの高速中性粒子を模擬したシミュレーションを行うことに成功した。セントラル部中心付近のガスパフを模擬した計算では、3次元のガスパフ形状を模擬した計算から得た H_{α} 線の2次元画像は高速カメラの局所的な発光分布を持った2次元画像を再現した。この結果を基に、プラズマ内部の発光分布まで、3次元的な H_{α} 線分布を確認した。NBI を模擬したビーム状の粒子源計算を行い、その結果から NBI 中の中性粒子の局在化はビーム粒子が大きく影響を与えていることが明らかとなった。さらに、セントラル部の Central-limiter (CL)、Iris-limiter (IL) に粒子源を与え、計算を行なうことにより、以前から明らかになっていた径方向に可動式の IL の径を調整することによる、プラズマパフォーマンスの向上には、両リミターでの発光のバランスが重要であることを示した。

< Heliotron J における中性粒子輸送解析 >

京都大学の環状ヘリカル型装置 Heliotron J において、プラズマ中に挿入されるカーボンターゲットに起因する中性粒子輸送の解明するために、ターゲットをシミュレーションモデル内に組み込み、ターゲット上の複雑な分布を持った粒子源に対して、高速カメラ画像の発光強度分布に対応するような中性粒子の分布をメッシュモデルに与えて計算を行なうことに成功した。高速カメラの画像、及び発光分布を再現した粒子源のシミュレーション結果から、ターゲット挿入とともに発光強度が上昇する結果を確認し、トロイダル方向の $D\alpha$ 線強度分布では、ヘリカル磁場配位に特徴的な特性を示すことができた。

< TRIAM-1M における中性粒子輸送解析 >

九州大学 TRIAM-1M 装置において、高密度・低密度プラズマに起因する中性粒子の振る舞いを調べるために、ポロイダル・トロイダル方向において、2次元の中性粒子シミュレーションモデルを作成した。実験では、トロイダル方向において、 $H\alpha$ 線分布は約 1.5-2 倍程度、低密度プラズマで減衰長の長い分布を得る結果を確認した。円筒モデルを用いたシミュレーションでは、両実験のシミュレーションを行ったところ、シミュレーション結果でも 1.6 倍程度の差となり、実験結果に近い値を得ることができた。

< 3 種類のプラズマ閉じ込め装置にわたる中性粒子挙動に関する考察 >

TRIAM-1M の高密度・低密度プラズマのプラズマパラメータを代入して得られる原子の平均自由行程と、 $H\alpha$ 線のトロイダル方向分布の減衰長を比較すると、実験結果の差異は原子平均自由行程に比べて明らかに少ない。その物理的な要因を調べ、その結果を基に、GAMMA 10, Heliotron J において、 $H\alpha$ 線減衰長とその分布について形状やプラズマ・周辺パラメータの依存性を調べた。

TRIAM の高密度・低密度プラズマにおいて、低密度では分子解離起源の $H\alpha$ 発光が多く、高密度では高エネルギーイオンが存在することがわかった。この違いは、両プラズマでの減衰長の違いを減少させる要因になっていると考えられる。さらに、プラズマ外側 (SOL) 部のプラズマ密度や径方向の幅の依存性を調べたところ、 $H\alpha$ 線減衰長は大きく影響を受けることがわかった。低密度では SOL 幅による影響が強く、また両プラズマともに $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ を超えると減衰長への影響が強いこともわかった。

GAMMA 10 において、4つの粒子源 (Central-limiter, ガスパフ #3, ガスパフ #7, NBI) において $H\alpha$ 線減衰長を調べた。その結果、GAMMA 10 では比較的長い $H\alpha$ 線減衰長を持つことがわかった。この要因として、GAMMA 10 のセントラル部では、他の装置に比べて SOL 幅が大きいことが考えられる。しかし、内部に構造物が存在する領域では、中性粒子輸送が大きく減衰することが明らかとなった。この解析から、内部構造物位置を挟んで、中性粒子輸送は、ほぼ独立した分布を形成することが明らかとなった。

Heliotron J においては、ターゲットをプラズマ直近、または内部まで挿入すると、プラズマに近接したターゲットからの粒子源によって、 $H\alpha$ 線減衰長は 2 成分 Exponential 分布を持つ局在した形状になり、カーボンターゲットを離していくと分布は壁からの粒子源に近づくことがわかった。また、径方向・ポロイダル方向で $H\alpha$ 線分布を調べると、非軸対称なヘリカル構造の効果によって、 $D\alpha$ 線径方向分布は、トロイダル方向時計回りでプラズマコアにピークを持った分布になった。ポロイダル方向では、ねじれの影響によるポロイダル方向の SOL の大きな領域へ $D\alpha$ 線分布が偏る現象も確認した。

< 結論 >

本研究では、可視光の計測結果と詳細な中性粒子シミュレーションを用いて、プラズマ閉じ込め装置内における 3 次元の詳細な中性粒子輸送の解析方法を確立した。TRIAM-1M 装置における高密度・低密度プラズマでの解析結果から、 $H\alpha$ 線減衰長の実験結果と原子の平均自由行程の差異は、低密度での分子解離起源の $H\alpha$ 発光の増大、高密度での高エネルギーイオンの存在などの中性粒子のパラメータによる影響の可能性が考えられる。また、SOL の構造・密度が、大きく中性粒子の輸送を左右する結果を得た。

GAMMA 10 装置においては、SOL 幅が他の装置に比べて大きいことから、構造物のない領域で中性粒子

は長い減衰幅を持ち、構造物のある領域では SOL 部に置かれた構造物によって、中性粒子の輸送は妨げられる。また、GAMMA 10 装置、Heliotron J 装置において、異なった粒子源形状、プラズマに近接した粒子源を持つシミュレーション結果から、プラズマに近接した粒子源では、中性粒子は強い局在化を確認した。これは、中性粒子が SOL 部を通らず、直接プラズマ内部に放出されたため、急激な減衰したものと考えられる。これらのような SOL 領域の構造物や Heliotron J のヘリカル構造の依存性は、中性粒子の拡散が SOL 領域に依存していることを実証する結果であると考えられる。

以上の 3 種類のプラズマ閉じ込め装置において、プラズマ・SOL パラメータや、粒子源・構造物等の形状などプラズマ閉じ込め方式に依存しない物理機構が中性粒子挙動に及ぼす効果について、詳細な 3 次元中性粒子輸送を解明することができた。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、プラズマからの可視光計測及び 3 次元モンテカルロシミュレーション解析に基づいて、ミラー、トカマク、ヘリカルの 3 種類のプラズマ閉じ込め方式における中性粒子輸送について、装置や磁場配位に依らない普遍的な物理機構の解明にまで踏み込んだ議論を初めて行ったものである。これまで、トカマクなどのトラス型閉じ込め装置では、トロイダル方向の一様性を仮定した 2 次元の中性粒子輸送解析が行われてきたが、真空容器の複雑な形状や局所的な中性粒子源からの粒子供給を議論する上で、3 次元計測とシミュレーションを組み合わせた解析が必須条件となる。本研究によって、多チャンネルの H α 線検出器や高速カメラによる 2 次元計測に加え、完全 3 次元形状をモデリングしたメッシュ構造を構築し、モンテカルロシミュレーションコードに適用することによって、より詳細な中性粒子輸送解析に初めて成功した。論文では、上記 3 種類のプラズマ閉じ込め装置で得られた結果を基に、装置間で共通する物理機構を解明することを目的として、H α /D α 線強度の減衰長を評価対象とした考察を行い、真空容器と主プラズマの間に存在するスクレイプオフ層 SOL の形状、及びそのプラズマが中性粒子輸送に強い影響を及ぼすことを明らかにしている。この成果は、可視光計測と 3 次元モンテカルロコードを用いることにより、各種閉じ込め装置における 3 次元中性粒子輸送シミュレーション手法を確立し、多岐に亘るシミュレーション解析結果を基に、中性粒子輸送に関する閉じ込め装置や磁場配位に依らない普遍的な特性を見いだした極めて重要な知見を与える研究であり、博士論文として十分価値のあるものである。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。