

氏 名	かわむらがくし 河 村 学 患
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2921 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学位論文題目	Gyrokinetic Theory for Peripheral Plasmas and its Application to Plasma Sheath (周辺プラズマのためのジャイロ運動論とプラズマシースへの応用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 福 山 淳 教 授 山 本 克 治 教 授 岸 本 泰 明

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマク型磁気閉じ込め核融合装置における周辺プラズマの輸送現象を解明するために、プラズマの低周波応答を記述するジャイロ運動論を強い静電場が存在するプラズマに拡張すると共に、その拡張されたジャイロ運動論を磁化プラズマシースに適用して理論的および数値的解析を行った研究成果をまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、核融合エネルギーの実用化を目指した磁気閉じ込め核融合研究における乱流輸送現象の位置付け、ジャイロ運動論シミュレーションの役割、周辺プラズマ現象の重要性等について述べている。

第2章では、プラズマにおける輸送現象を記述するジャイロ運動論の基礎方程式を導出している。まず、粒子位置座標から案内中心座標を經由して旋回中心座標に座標変換を行い、リー変換によって運動方程式からジャイロ旋回位相を消去することにより、旋回中心分布関数の時間発展を記述するジャイロ運動論方程式を導いている。次に旋回中心分布関数の速度モーメントから電荷密度と電流密度を求め、マクスウェル方程式と結びつけることにより、プラズマ中の電磁場を記述する方程式系を導いている。

第3章では、周辺プラズマのように強い静電場が存在するプラズマを記述するためのジャイロ運動論の拡張について記述している。まず、静電場による平衡ドリフト運動を含めた座標変換により、案内中心座標における粒子運動が単純な円運動として近似できるための条件を論じている。そして、案内中心運動にドリフト運動を取り入れない従来のジャイロ運動論や Qin 他が提案している線形E×Bドリフト運動だけを取り入れた改良ジャイロ運動論に比べて、より高い精度で磁気モーメントを保存する、E×Bドリフト運動の非線形効果まで取り入れた新しい平衡ドリフト速度場の表式を提案している。そして、この平衡ドリフト速度場を取り入れたジャイロ運動論的運動方程式を導出し、その数値計算によって従来の解析手法との定量的比較を行っている。まず、旋回中心座標で記述された粒子エネルギーの保存性を確認し、E×Bドリフト速度が熱速度と同程度となる強い静電場の下でも、高い精度で保存されることを示している。さらに、旋回中心位置の精度においても、従来の手法に比べて精度が大幅に改善されることを確かめている。

第4章では、壁との接触面近傍に強い静電場が形成される磁化プラズマシースのジャイロ運動論によるモデル化を記述している。まず、磁化プラズマシースの解析にジャイロ運動論方程式を初めて適用し、イオンの旋回半径がデバイ長よりも短い、強く磁化されたプラズマにおいて、静電ポテンシャルの空間分布を記述する方程式を導いている。そして、シースが安定に形成される条件である一般化ボーム条件について考察し、磁化プラズマに対する表式を初めて厳密に導出するとともに、シース電場の影響を取り入れたボーム条件を初めて導いている。次に、磁化プラズマシース中の静電ポテンシャル分布を求めるために、粒子の壁との衝突を正確に取り扱うアルゴリズムを考案するとともに、前章で導入した平衡ドリフト速度場を取り入れた数値計算を行い、より正確な粒子シミュレーションによる計算結果と比較している。その結果、強く磁化されたプラズマでは、ジャイロ運動論に基づく数値計算は粒子シミュレーションの結果を少ない計算量で再現することを示すとともに、静電ポテンシャル分布の振る舞いと壁前面における電界強度が、磁化プラズマの分極効果と粒子と壁との衝突効果に

よって決定されていることを明らかにしている。最後に今回のモデル化の妥当性と適用範囲について議論している。

第5章では、イオンの壁への入射に際してスパッタリング等の相互作用に大きな影響を与える入射角分布について記述している。前章で求められた磁化プラズマシース中の電界を用いてイオンの運動を解析し、電界によって加速されつつ壁に入射するイオンのエネルギーと入射角の分布のパラメータ依存性を明らかにしている。入射角分布に大きな影響を与える、磁力線と壁がなす角度に対する依存性を詳しく調べるとともに、非磁化プラズマシースに対して提案されている入射角分布近似式の評価も行っている。最後に、平均入射角の磁力線角度依存性をイオン旋回半径とデバイ長の比の広い範囲にわたって粒子シミュレーションにより調べ、その物理機構を明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について記述している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、トカマク型磁気閉じ込め核融合装置における周辺プラズマの輸送現象を解明するために、磁場に垂直な強い電場が存在するプラズマに適用できるようにジャイロ運動論を拡張すると共に、その拡張されたジャイロ運動論を磁化プラズマシースに適用して解析を行った研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 磁化プラズマ中の乱流現象を記述するジャイロ運動論を、磁場に垂直な強い電場勾配とそれに伴うドリフト速度シアが存在するプラズマに適用できるように拡張した。0次の粒子ドリフト運動に基づく平衡速度場を新たな表式で導入することにより、従来の表式に比べて、より高い精度で磁気モーメントが保存されることを示した。
2. 新たに提案した平衡速度場を用いたジャイロ運動論では、従来のジャイロ運動論に比べて、粒子のエネルギーがより高い精度で保存されることを数値計算によって確かめた。
3. 磁化プラズマにおけるシース形成の解析にジャイロ運動論を初めて適用し、粒子と壁との衝突の効果を取り入れてポテンシャル分布を記述する方程式系を導くと共に、その数値解を粒子シミュレーション結果と比較することによって、方程式系の妥当性を検証した。
4. シースの安定形成条件であるボーム条件を磁化プラズマに拡張して厳密に求めるとともに、シース電場の影響を取り入れたボーム条件を初めて導いた。
5. シース電場の磁場強度と磁場角度に対する依存性をジャイロ運動論と粒子シミュレーションにより解析し、両者の解析結果を比較するとともに、磁場角度依存性が磁化プラズマの分極効果と粒子と壁との衝突の効果に由来することを初めて明らかにした。
6. 壁でのスパッタリングの評価に重要な役割を果たす壁入射粒子分布の入射エネルギーおよび入射角依存性を定量的に明らかにした。

以上のように、本論文は磁化プラズマを記述するジャイロ運動論を強い電場勾配とそれに伴うドリフト速度シアが存在する場合に拡張すると共に、磁化プラズマシースに適用してシース電場や壁入射粒子のパラメータ依存性を定量的に評価しており、現実の周辺プラズマにおける輸送現象の機構解明ならびに定量的予測に大きく貢献するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。