

京都大学	博士 (工学)	氏名	奴 賀 秀 男
論文題目	Kinetic modeling of the heating processes in tokamak plasmas (トカマクプラズマにおける加熱過程の運動論的モデリング)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合エネルギーの利用を目指した磁気プラズマ閉じ込め装置トカマクにおけるプラズマ加熱過程を記述するため、新たに開発された運動論的モデリングについて論じた結果をまとめたものであって、7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、核融合エネルギー利用の意義、磁気プラズマ閉じ込め装置トカマクの構成、プラズマ加熱手法およびこれまでの運動論的解析結果を概説し、本研究の目的と構成について述べている。</p> <p>第2章では、トカマクプラズマの時間発展を記述するために開発されている統合コード TASK について説明し、本研究において使用する電磁流体的平衡解析および波動光学的伝播解析の概要を述べるとともに、輸送現象のモデリング手法を比較している。</p> <p>第3章では、プラズマ加熱過程の運動論的モデリングの中核をなす運動量分布関数に対する時間発展方程式の定式化について述べている。まず、6次元位相空間がサイクロトロン旋回運動に関する平均、トカマクプラズマの軸対称性および旋回中心の軌道運動に関する平均をとることによって、運動量、ピッチ角、プラズマ小半径からなる3次元位相空間に帰着でき、プラズマを構成する各粒子種の位相空間分布関数の時間発展が3次元フォッカープランク方程式によって記述されることを示している。ついで、各粒子に働く力の影響、すなわち、直流電界による加速、クーロン衝突による緩和、波動との相互作用、空間拡散を順に考察している。クーロン衝突の寄与として、電子について重要となる相対論効果を取り入れるとともに、背景分布関数への反作用を含めた非線形衝突演算子を用いている。特に、粒子数と運動量の保存のみを満たす従来の衝突モデルを拡張し、エネルギーの保存を満たす衝突演算子を新たに開発することによって、エネルギー閉じ込め時間よりも長い時間スケールの現象を矛盾なく解析できるようにしている。波動との相互作用については、波動伝播解析によって得られた波動電界を用いて準線形運動量拡散係数を評価している。空間拡散については、短波長ドリフト波による乱流拡散現象を模擬して小半径方向の拡散を取り入れ、実験において観測されている小半径方向依存性と有限サイクロトロン半径効果による空間拡散係数の運動量依存性を取り入れている。さらに粒子源として、中性粒子ビーム入射と核融合反応による高速イオンの生成を含めている。特に高速イオンの寄与が重要となる核融合反応率の評価においては、任意の運動量分布関数に対して反応率を計算することを可能にしている。これらの外力の影響および粒子源は一般にポロイダル角依存性をもつため、旋回中心軌道平均をとることにより、3次元フォッカープランク方程式の拡散項および摩擦項として考慮している。最後に、以上の定式化に基づいて作成された運動論的輸送コード TASK/FP の数値解析手法について説明している。有限差分法により離散化された時間発展方程式を完全陰解法により解き、得られた行列方程式の解法を並列演算ライブラリ PETSc によって大幅に高速化している。</p> <p>第4章では、運動論的輸送コードの検証結果が示されている。まず、核融合反応率の評価を行い、中性粒子ビーム入射および核融合反応によって生成された高速イオン</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	奴 賀 秀 男
<p>が核融合反応率の増大に寄与し，その効果は背景プラズマの温度が低いほど大きいことを確かめている．次にイオンサイクロトロン加熱によって高速イオンが生成され，イオンサイクロトロン共鳴面近傍に長く滞在する共鳴粒子が強く加速され，分布関数に特徴的な2つのテールが現れることを確認している．さらに，直流電界によって駆動される電流から電気伝導率を評価し，解析的な理論値とよく一致することを確認している．</p> <p>第5章では，ITER（国際熱核融合実験炉）プラズマにおける複合加熱の解析にTASK/FPコードを適用した結果について述べている．代表的なITERプラズマのパラメータに対し，電子サイクロトロン波電流駆動，イオンサイクロトロン波加熱，中性粒子ビーム入射加熱および核融合反応により生成された高速イオンによる加熱を行い，電子，重水素イオン，三重水素イオンおよびアルファ粒子それぞれの分布関数の時間発展を解析している．電子は，電子サイクロトロン波およびイオンサイクロトロン波との相互作用およびイオンとの衝突緩和によって加熱されているが，電子の衝突緩和時間が短いため，等方的なマクスウェル分布からのずれは小さい．重水素イオンについては，中性粒子ビーム入射によって高速イオンが生成され，主に電子との衝突による減速とイオンとの衝突によるピッチ角散乱が生じている．三重水素イオンは，イオンサイクロトロン2倍高調波共鳴によって高速イオンが生成されるとともに，重水素-重水素核融合反応によって1 MeVの高速イオンも生成されているが，その加熱パワーは小さい．アルファ粒子は，重水素-三重水素核融合反応によって3.5MeVのエネルギーで等方的に生成され，主に電子との衝突緩和によって減速分布関数が得られている．このような多成分プラズマの複合加熱の運動論的解析は世界で初めてであり，各粒子間のパワーバランスおよびその空間依存性が定量的に示された．</p> <p>第6章では，空間輸送の効果を取り入れたシミュレーション結果が示されている．損失項がない複合加熱のシミュレーションではプラズマの温度が増加し続けるが，現実的な損失項として空間拡散の効果を取り入れると，高速イオンの拡散によって加熱分布が滑らかになり，ほぼ定常状態に達する．得られた温度分布も滑らかであり，実験で観測される分布に近づくことが示された．さらに空間拡散係数の運動量依存性を取り入れると，高速イオンの拡散が抑制されるため，温度分布は滑らかであるが，より中心にピークすることが示された．これらの結果は，より現実的な加熱シミュレーションを実現する上で，重要な指針となるものである．</p> <p>第7章は結論であり，本論文で得られた成果について要約している．</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合エネルギーの利用を目指した磁気閉じ込め装置トカマクにおけるプラズマ加熱過程をより正確に記述するために開発された、プラズマ構成粒子の運動量分布関数を用いた運動論的モデリングに関する研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 核燃焼プラズマにおいては、核融合反応や外部からの加熱によって、プラズマを構成する各粒子種の運動量分布関数がマクスウェル分布から大きく変形し、加熱過程や輸送過程、さらにはプラズマのさまざまな安定性に影響を与える。本論文では、運動量分布関数を用いてプラズマの振る舞いを記述する運動論的モデリングを導入し、分布関数の時間発展をフォッカープランク方程式により記述する運動論的輸送コードを開発した。
2. 相対論効果を含めた非線形クーロン衝突項を粒子数および運動量だけでなくエネルギーも保存するように拡張し、エネルギー閉じ込め時間よりも長い時間スケールの現象を記述できるようになった。
3. 高エネルギーイオンの寄与が大きい核融合反応率を正確に評価するため、従来の解析のようにマクスウェル分布を仮定するのではなく、加熱によって変形した運動量分布関数を用いて核融合反応率を計算することが可能になり、核融合出力の評価がより正確になった。
4. 乱流現象に伴う空間輸送を模擬した径方向拡散項を導入し、高速イオンの輸送が加熱分布に与える影響を定量的に解析することが可能になった。
5. ITER プラズマにおける電子サイクロトロン波電流駆動、イオンサイクロトロン波加熱、中性粒子ビーム入射加熱および核融合反応により生成された高速イオンによる加熱を含めた複合加熱のシミュレーションを世界に先駆けて実施し、電子、重水素イオン、三重水素イオンおよびアルファ粒子それぞれの運動量分布関数の径方向分布とその時間発展を明らかにした。

以上のように、本論文は核燃焼トカマクプラズマにおける加熱過程を運動論的取扱により定量的に解析する手法を提案し、数値シミュレーションによりその有効性を確認するとともに、トカマクプラズマの加熱及び輸送現象の理解に大きく貢献しており、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23年6月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。