

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	松山 顕之
論文題目	Study on Monte-Carlo Calculation of Neoclassical Transport Matrix in Nonaxisymmetric Toroidal Plasmas (非軸対称トロイダルプラズマにおける新古典輸送行列のモンテカルロ計算に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、非軸対称トロイダルプラズマ閉じ込め装置における新古典輸送理論に基づく電流およびフローの数値計算法のうち、複数の粒子種間の巨視的な運動量保存則の取扱いが困難であり、かつ実験的に観測される輸送フラックスの予測に不十分である、という従来の解法の問題点に着目し、巨視的モーメント方程式による輸送フラックスの解析的記述と、ピッチ角散乱衝突モデルに基づく新古典拡散・粘性係数のモンテカルロ計算法を組み合わせる複合手法を提案し、同手法に関する理論検討と数値実証を論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。 第1章は序論で、非軸対称トロイダル配位における輸送現象の研究の基礎となる新古典輸送理論の位置づけを述べた後、磁力線に沿った輸送の実験観測データとの定量的比較において不純物を含む多粒子種モデル構築の重要性を述べ、ピッチ角散乱近似を用いた新古典輸送の計算法の現状と問題点を分析している。有望な解決策として、モンテカルロ法とモーメント法を階層的に併用する複合計算法の可能性を指摘し、この手法に必要とされる研究課題をあげて各章の位置づけがなされている。 第2章では、従来のデルタエフ・モンテカルロ法によるブートストラップ電流計算の問題点を説明した後に、これを解決する手段としてピッチ角散乱衝突モデルに基づく数値計算とモーメント法を組み合わせたブートストラップ電流の定量評価法を論じている。特に、この評価法に必要な新古典電気伝導度のデルタエフ法に基づく計算手法を新たに示し、電流の駆動に支配的な平行粘性係数を計算して従来の変分原理の計算結果との比較によって検証している。 第3章では、新古典輸送理論の基礎方程式である線形化ドリフト運動論的方程式を解くモンテカルロ法の定式化について述べた後に、軸対称に近いモデル配位を対象に、3種類の異なる方程式系の数値解を比較しその差異を調べている。完全な軸対称系での輸送行列の縮退を保証するためには、輸送行列の非対角項に寄与しないフィルシュ・シュルター拡散やスピッツァー抵抗を解析的に除いた方程式系が数値シミュレーションにおいて有効であることを明らかにしている。 第4章では、新古典輸送行列の全成分の新しい計算法として、線形応答理論に基づき、アインシュタイン・ヘルファンド関係式およびグリーン・久保公式を導入している。非軸対称モデル磁場に対する新古典輸送行列の数値シミュレーション結果を示し、フィルシュ・シュルター領域およびバナナ領域におけるグリーン・久保公式の時間相関関数の振る舞いや、アインシュタイン・ヘルファンド関係式の統計的な解釈を論じている。また、アインシュタイン・ヘルファンド関係式による計算が変分原理の計算結果と照合され、良い一致が得られることを述べている。系のエントロピー生成およびエルゴード定理の観点からアインシュタイン・ヘルファンド関係式とデルタエ			

フ法の相互関係を論じ、特に非ハミルトニアン系に適用する際にデルタエフ法において原理的な困難を引き起こす問題である重み関数の広がり、アインシュタイン・ヘルファンド関係式を用いて回避できることを指摘している。

第5章では、アインシュタイン・ヘルファンド関係式に基づく新しいモンテカルロ計算コードを応用した粘性とプラズマフローの計算について定式化している。非軸対称プラズマの輸送現象に重要な粘性とフローの関係について論じた後、モンテカルロ法を用いた電子・イオン・不純物を含む3流体モデルに対する新古典輸送行列、回転、径電場の計算法を与えている。新古典拡散・粘性係数のモンテカルロ計算法が非圧縮性電場ドリフトの効果を含むよう拡張され、非軸対称モデル磁場に対する変分原理と解析公式との比較によって、計算結果の妥当性を検証している。また、これらの計算手法の大型ヘリカル装置に対する応用とその意義が述べられている。

第6章は結論であり、本研究の成果をまとめるとともに今後の発展について論じている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、非軸対称磁場の新古典輸送の計算に用いられてきたモンテカルロ法を非対角項を含む輸送行列の全成分の計算へ拡張し、軸対称新古典輸送の標準的解法であるモーメント法と併用することによる多粒子種プラズマに適用可能な新古典電流、径電場、平行粘性などの新古典輸送フラックスの非軸対称磁場における新しい計算手法を研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 平行粘性を求めるデルタエフ法を開発し、計算結果を巨視的モーメント方程式のクロージャーとして用いることで、実験データと比較可能な正味のブートストラップ電流が評価できることを示した。

2. フィルシュ・シュルター拡散とスピッツァー抵抗が輸送行列の非対角項に寄与せず、数値誤差を増大させることを示し、これらを解析的に除いた線形化ドリフト運動論的方程式を解くことで、対称性を持つ配位の輸送特性を陽に保証したモンテカルロ・シミュレーションが可能であることを示した。

3. アインシュタイン・ヘルファンド関係式を用いた新古典輸送行列の全成分の計算法を提案し、デルタエフ法に比べてのノイズの低減およびオンサーガ相反性の保証を示し、この計算法の有用性を明らかにした。

4. 非軸対称磁場に対する新古典粘性・拡散係数の新しいモンテカルロ・コードによる計算結果を変分原理による既知の結果と比較してその妥当性を検証するとともに、不純物を含むプラズマに対する輸送行列の計算法を示した。

以上要するに、本論文はヘリカル型プラズマ閉じ込め装置の輸送現象に重要な新古典輸送行列の系統的解析を目的とした新しいモンテカルロ法を確立したものであり、その知見は学術上、応用上、寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年1月28日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 2010年 9 月 1日以降