

氏 名 佐 竹 真 介

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第672号

学位授与の日付 平成15年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Neoclassical Transport Theory for the Near-Axis

Region of Tokamaks

論 文 審 査 委 員 主 査 助 教 授 洲 鎌 英 雄
教 授 岡 村 昇 一
教 授 岡 本 正 雄
助 教 授 藤 堂 泰
主 任 研 究 員 岸 本 泰 明 (日 本 原 子 力 研 究 所)

論文内容の要旨

磁場閉じ込めプラズマの輸送現象を解析する上で、新古典輸送理論 (Neoclassical transport theory) はトーラス状の磁場配位における荷電粒子の衝突拡散による輸送現象を記述する重要な理論である。トカマクにおける新古典輸送理論はその研究の初期から詳細な研究がなされ、ほぼ完成されたものとして考えられていたが、近年になって従来の新古典輸送理論が適用できないようなパラメータ領域での実験が行われるようになり、理論の拡張の必要性が求められている。

特に、負磁気シア配位放電に伴う閉じ込め改善モードでは、プラズマ中心の磁気軸近傍で高イオン温度、かつ安全係数 q 値の高いプラズマが維持できるようになったが、この場合プラズマ中のイオン粒子軌道の小半径方向の軌道幅は大きく広がる。従来の新古典理論は軌道幅を無視した粒子軌道をもとに解析した局所輸送解析であり、軌道幅が大きくなる磁気軸近傍では理論の前提条件が破られる。実際、いくつかの負磁気シア配位の実験において観測されるイオン熱伝導率は、プラズマにおける最低レベルの輸送を記述する新古典輸送の理論値よりも磁気軸近傍で低くなっている。

本研究では、磁気軸近傍の粒子軌道幅の有限性を正しく反映させた新古典輸送理論を従来とは異なるアプローチで構築し、これを応用してイオン熱伝導率の数値計算を行った。研究内容は大きく次の3つに分かれる。

1. 輸送解析の基礎となる、磁気軸近傍の粒子軌道について詳細な解析を行った。この領域では、従来の Banana 軌道、Passing 軌道という単純な2分類では記述できない、比較駒軌道幅の大きい特徴的な粒子軌道 (いわゆる Potato 軌道) が現れる。それらの粒子の存在を考慮すると磁気軸近傍の新古典輸送理論は大きく修正されるであろうことが示された。
2. 1. で調べた特徴的な粒子軌道の効果を輸送理論に取り込むために、従来の Euler 的記述とは異なる、Lagrange 的記述に基づく輸送理論を磁気軸近傍へ適用した。この手法は無衝突極限における粒子軌道に沿っての3つの運動の恒量 (エネルギー ε 、磁気モーメント μ 、平均磁気面位置 $\langle \psi \rangle$) で記述されたドリフト運動論方程式を基に輸送方程式を導出する。最終的に輸送係数は個々の粒子の軌道に沿っての平均値を積分する形で求められるので、有限軌道幅の効果を正しく含んだ定式化になっている。
3. Lagrange 的新古典輸送理論を用い、磁気軸近傍の新古典イオン熱伝導率を数値シミュレーションによって計算した。計算においては、1. で調べた磁気軸近傍の粒子軌道を正しく反映させた。その結果、磁気軸近傍の Potato 軌道の現れる領域では、熱伝導率は従来の理論値よりも低くなり、実験で観測される傾向を説明できることが分かった。また、計算においては MPI (Message Passing Interface) を用いた並列計算を行うという先駆的な計算技法を用いた。

本研究の新しい点は、有限軌道幅効果を含めた定式化に有効であると考えられていた

Lagrange的記述に基づく輸送理論を、初めて具体的計算に用いることができる形に発展させたことである。具体的にはまず、解析的に扱いやすかつ輸送現象を考える上で本質的な、運動量保存性を保証するモデル衝突項を導入した。これによって、ローレンツ近似を用いた以前のLagrange的輸送理論では不十分だった同種粒子衝突による輸送が正しく評価できるようになった。また、数値計算する上で必須となる運動の恒量の空間($\varepsilon, \mu, \langle \psi \rangle$)のヤコビアンを初めて導出し、解析的に積分範囲を表現できない速度空間(ε, μ)内での積分を、モンテカルロ積分法を用いて正しく評価するなど、単に理論解析にとどまらずその具体的な応用方法まで示した。

本研究のLagrange的定式化は磁気軸から離れたところでは従来のEuler的な新古典輸送理論を再現する形になっており、磁気軸に近づくにつれどのように有限軌道幅効果が新古典輸送に影響するか、定量的に調べることが可能である。その結果イオン熱伝導率の磁気軸近傍での減少が、負磁気シアー配位によってポテト軌道幅が広がるのにつれてより広範囲で見られるという依存性を発見することに成功した。従って、近年注目されている負磁気シアー配位における新古典輸送を考える上では、本研究のように有限軌道幅を考慮した取り扱いが非常に重要であることが示された。

また、Lagrange的記述に基づく輸送理論の有効性を初めて実証したことで、今後この手法がプラズマ中の非局所的な輸送現象の解析にさらに応用され得る道筋を開いたという点において、非常にインパクトのある研究成果になったと言える。

論文の審査結果の要旨

新古典輸送理論は荷電粒子のクーロン衝突に基づきトーラスプラズマの輸送現象を記述するものである。近年、負磁気シア配位トカマク実験において磁気軸近傍におけるイオン熱輸送係数が従来の新古典輸送理論の予測より下回ることが確認され、より正確な新古典輸送理論の構築が求められている。磁気軸近傍では捕捉粒子のバナナ軌道幅が広がり、軌道幅が小さいと仮定する従来の新古典輸送理論を適用することが困難になる。本論文は、その困難を解決するため、I. B. Bernstein 等により始められたラグランジュ的新古典輸送理論を発展させることにより、トカマクの磁気軸近傍における有限粒子軌道幅を正確に取り入れた新古典イオン熱輸送係数を求めることに成功した。

この拡張されたラグランジュ的新古典輸送理論では、粒子の位相空間の独立変数として、無衝突粒子軌道の恒量、即ち粒子のエネルギー、磁気モーメント、及び軌道の平均小半径位置を用いることにより、様々な形状や大きさを持つ粒子軌道によりもたらされる輸送過程の非局所的効果を取り入れることが可能となった。局所的な位置座標を独立変数として用いる従来のオイラー的新古典輸送理論ではパッシング軌道とバナナ軌道の二種類の粒子軌道のみしか考慮されなかったが、本研究では粒子の磁力線方向速度とポロイダル角速度のそれぞれの符号を区別し、それぞれの反転回数を数えることにより、磁気軸近傍の粒子軌道の型の分類が厳密に行われ、パッシング、バナナやポテト等の全ての粒子軌道の効果を含めた新古典輸送係数の計算方法が示された。また、I. B. Bernstein 等は衝突項としてピッチ角散乱項を用いたが、ここでは新たに運動量保存項を付加することにより、小軌道幅極限におけるイオン・イオン衝突による両極性拡散が再現され、物理的に正しい結果が与えられる。

このように精緻に定式化されたラグランジュ的輸送理論が、本論文において初めてトカマク磁場配位における有限軌道幅を考慮した新古典輸送係数の具体的な数値計算に応用された。そこでは、パッシング、バナナやポテト等の全ての粒子軌道効果を含めた速度空間積分を行うためにモンテカルロ積分法が適用され、MPI(Message Passing Interface)を用いた並列計算を実行することによって正確かつ高速な数値解法が実現された。得られた新古典イオン熱輸送係数は磁気軸からポテト軌道幅程度の近傍内において従来の小軌道幅近似に基づく理論予測値に比べ極めて小さくなることが定量的に示された。そして、この結果を他のトカマク実験や粒子シミュレーション等の結果と綿密に比較し、ポテト軌道幅程度の磁気軸近傍内での新古典イオン熱輸送係数の減少傾向が一致することを確認した。特に、優れた核融合プラズマ閉じ込めを実現するものとして近年注目されている負磁気シアートカマク配位では、ポテト軌道幅が増大し新古典イオン熱輸送係数の減少領域が拡大することになり、本研究で示された有限軌道幅効果の取り扱いがより重要となることが明らかにされた。

以上のように、本論文は、現在の核融合研究において中心課題の一つであるトカマク磁気軸近傍における新古典輸送に関して、高度な輸送理論の定式化と先端的な数値計算技法を駆使することにより精密な解析を行い、その物理的理解を深めた。よって、博士論文としての価値を十分に有し、合格であると判断する。