（ 続紙 1 ）

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	今寺　賢志
論文題目	Kinetic Analysis based on Lie Perturbation Theory for Relativistic Electron Beam and Global Turbulent Plasma Transport （Lie摂動論に基づいた相対論的電子ビームと大域的な乱流プラズマ輸送に関する運動論的解析）		

（論文内容の要旨）

本論文は、ビームプラズマや核融合プラズマの挙動を解析する際に重要な役割を果たすLie変換による非正準摂動法を用いて行った、自由電子レーザー（FEL）中での相対論的電子ビームの軌道解析、ジャイロ運動論モデルに基づくVlasovコードの開発、および、核融合プラズマの大域的な乱流輸送過程に関する研究成果をまとめたものであり、６章からなっている。

第１章は序論であり、磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め性能を左右する乱流輸送現象と、それを解析するためのジャイロ運動論モデルの理論・シミュレーション研究の現状について概説している。これらに基づいて、本論文の研究課題であるLie摂動法によるFEL中の相対的電子ビームの軌道解析、Vlasovコードの開発、および、大域的な温度緩和を伴った核融合プラズマの乱流輸送過程に関する研究の目的と意義を論じている。

第２章では、本論文の基礎となる非正準Lie摂動論の概要について議論するとともに、これまで行われてきた磁場核融合プラズマ中での乱流輸送現象を記述するジャイロ運動論モデル、および、FEL中での相対論的電子ビームの軌道を記述するモデルについて論じている。

第３章では、非正準Lie摂動論に基づいた、収束型ウィグラー磁場と軸方向ガイド磁場の二つの収束磁場が共存したFEL中での相対論的電子ビームの軌道解析の方法論とそれに基づく解析結果を、非共鳴領域（3.2節）と共鳴領域（3.3節）の双方について論じている。非共鳴領域では、高次の長周期運動である$\nabla\mathbf{B}\times\mathbf{B}$力によるベータトロン振動を含んだ解析解が求められるとともに、その振動のオーダーまでの軸方行速度は一定に保たれ、レーザー発振に影響を与えないこと、ビームを安定に伝搬させるための電流強度の閾値が（ガイド磁場強度/ウィグラー磁場強度）の2乗に比例することが明らかにされ、軸方向ガイド磁場の導入の有効性が理論的に示されている。共鳴領域においても解析解が求められ、初期に共鳴状態にあった場合でも、高次の軌道変位による共鳴条件の破れを通して電子ビームは有限領域に留まり、軌道の安定性が確保されることが明らかにされている。

第４章では、流体分野で開発された保存型IDO（Interpolated Differential Operator）法を用いたEuler法的アプローチによるVlasov-Poisson方程式のシミュレーションモデルの提案と、従来の手法との比較・検討がなされている。4.2節では、保存型IDO法の離散化手法とその精度および計算コストが他の有限差分法と比較して議論されている。4.3節と4.4節では、位相空間2次元および4次元（実空間2次元・速度空間2次元、および実空間3次元・速度空間1次元）におけるVlasov-Poisson方程式の数値シ

ミュレーションに対して、保存型IDO法を適用した場合の有効性が論じられている。計算精度の指標としてBoltzmannエントロピーを導入し、本手法が従来のSpline法やCIP法などの離散化手法と比べてエネルギーの保存性が約2桁、分布関数の正値性が約1/4改善されることが示されている。また、4.5節では並列化手法について言及されており、1024個のCPUに対して49.8%の並列化効率が達成されたことが示されている。

第５章では、第４章で開発した保存型IDO法に基づいて、ミクロスケールの乱流と帯状流に代表されるメゾスケールの揺らぎ、および、マクロスケールの大域的な温度分布緩和過程の相互作用を解析する位相空間4次元のジャイロ運動論モデルに基づくシミュレーションを行い、その結果について論じている。5.2節では、上述の三者を関係付ける指標関数としてBoltzmannエントロピーを導入することにより、エントロピーの空間伝播を記述するエントロピーバランス方程式と大域的な温度緩和の関係が論じられている。イオン温度勾配（ITG）乱流では、帯状流に起因した揺動エントロピーが支配的になって局所的な熱輸送が生じ、その結果、階段状の温度分布が形成されるのに対して（5.3.1節）、帯状流の効果が弱い電子温度勾配（ETG）乱流では、温度分布の大域的な緩和が起きることが示された（5.3.2節）。

第６章では、本論文の主要な成果と今後の課題について述べられている。

（続紙 2 ）

（論文審査の結果の要旨）

本論文は、Lie変換による非正準摂動法を用いて、自由電子レーザー（FEL）中での相対論的電子ビームの軌道解析、ジャイロ運動論モデルに基づくVlasovコードの開発、および、それによる磁場プラズマの大域的な乱流輸送過程についての研究の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）非正準 Lie 摂動論に基づいて、収束型ウィグラー磁場と軸方向のガイド磁場が共存する FEL 中での相対論的電子ビームの軌道解析の方法論を開発し、らせん状のベータトロン振動によって記述される軌道の解析解を求めることに成功した。その結果、そのような複雑な収束磁場の下でも軸方向速度は一定に保たれ、レーザー発振に影響しないこと、ビームが安定に伝搬するための電流強度閾値がガイド磁場強度の 2 乗に比例することを明らかにし、ガイド磁場導入の有効性を示した。

2）磁場核融合プラズマの乱流輸送を高精度で解析することを目的に、近年、流体分野で開発された保存型 IDO（Interpolated Differential Operator）法を位相空間 2 次元の Vlasov-Poisson 方程式系に初めて適用した。また、速度分布関数に関する積分量を補間関数で評価する手法を考案し、各種物理量の保存性を向上させた。計算精度の指標として Boltzmann エントロピーを導入し、本手法が従来の Spline 法や CIP 法と比べてエネルギーの保存性が約 2 桁、速度分布関数の正値性が約 1/4 に改善されることを示した。

3）上記 2)で開発した手法に基づいて、位相空間 4 次元のジャイロ運動論モデルによる Vlasov-Poisson 方程式を高精度で解くコードを開発し、核融合プラズマの閉じ込め性能を支配する大域的な温度分布下でのイオン温度勾配（ITG）による乱流と帯状流、および、温度分布緩和過程のシミュレーションを行った。その結果、不安定性が強い場合は、ITG 乱流によりエントロピーが生成され、その伝播によって雪崩的な温度緩和がもたらされること、不安定性が弱い場合は、帯状流によって熱流束が径方向に分断され、大域的な温度緩和が局所的なものに遷移することを示した。

以上の研究は、プラズマの運動論的なダイナミックスを明らかにするための理論・シミュレーションの方法論を発展させるとともに、当該分野における非線形物理現象の理論的理解の進展に貢献するものである。

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6月17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：　　年　　月　　日以降