

京都大学大学院エネルギー科学研究科基礎科学専攻 プラズマ・核融合基礎学分野
学位論文情報（今寺賢志）

著者名： 今寺 賢志（Kenji Imadera）

京都大学学術情報リポジトリ：

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/123350>

研究科・専攻： 京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

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

学位授与年月日：平成 22 年（2010 年）7 月 23 日

取得分野：博士（エネルギー科学）

学位記番号：エネ博第 222 号

論文調査委員：

主査： 岸本泰明（京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授）

前川 孝（京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授）

福山 淳（京都大学大学院工学研究科・教授）

学位論文の要旨：

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、速度分布関数の正值性が約 1/4 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。

学位対象論文：

- 1) Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Daisuke Saito, Jiquan Li and Takayuki Utsumi
A numerical method for solving the Vlasov-Poisson equation based on the conservative IDO scheme”
Journal of Computational Physics **228**, 8919-8943 (2009)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999109004938>
- 2) Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Jiquan Li and Takayuki Utsumi
Gyrokinetic study of the local_entropy dynamics in turbulent plasmas with zonal flow
Plasma and Fusion Research: Regular Articles, **Vol.5**, S2050 (1-4) (2010).
http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2010/pfr2010_05-038.html
- 3) Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto and Jiquan Li
Global profile relaxation and local entropy dynamics in turbulent transport
Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, **vol.5**, 019 (1-3) (2010)
http://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/5/0/5_019/article/-char/ja/
- 4) Natsumi Iwata, Kenji Imadera and Yasuaki Kishimoto
Relativistic particle orbit analysis in a transversely focused high power laser field using non-canonical Lie perturbation method
Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, **vol.5**, 028 (1-3) (2010).
http://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/5/0/5_028/article/-char/ja/
- 5) Kenji Imadera and Yasuaki Kishimoto
Stability analysis of relativistic electron based on Lie perturbation theory in a wiggler with

harmonic gyro-resonance

Journal of Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, **vol. 6**, 1201004 (1-3) (2011)

http://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/6/0/6_1201004/article/-char/ja/

学位論文の概要：

本研究は、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 中の相対論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向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、分布関数の正值性が約 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。

連絡先：

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 プラズマ・核融合基礎学分野
岸本泰明 (教授)

TEL : 0774-38-4430 FAX : 0774-32-9397

e-mail : kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp