

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760660

研究課題名(和文) 3次元平衡配位における定量的なジャイロ運動論的乱流シミュレーション研究

研究課題名(英文) Quantitative Study on gyrokinetic plasma turbulent transport simulation in three-dimensional magnetic field

研究代表者

沼波 政倫 (Nunami, Masanori)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：40397203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置(LHD)に代表される複雑な3次元構造を持つ磁場閉じ込めプラズマの乱流輸送に対して、定量的な理解を深めるため、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション研究を進めた。複雑な磁場の幾何情報を正確に導入したGKV-Xコードを開発し、LHD高イオン温度プラズマに適用した。実験で観測された揺動分布とイオン温度勾配不安定性との関係を明らかにし、乱流輸送レベルや揺動スペクトルを非線形乱流シミュレーションにより再現することが出来た。さらに、線形解析に基づいた新しい簡約輸送モデルの構築も行った。

研究成果の概要(英文)：In order to study the turbulent transport phenomena in three-dimensional magnetic confined plasmas such as Large Helical Device (LHD), we performed gyrokinetic turbulent transport simulations. A new gyrokinetic code, GKV-X, which includes geometry of three dimensional field, were developed. Using the GKV-X, we performed the ion temperature gradient (ITG) turbulence simulations in high-ion temperature LHD plasmas. The GKV-X simulations reproduced the transport levels and turbulent fluctuation spectra observed in the experiment. Furthermore, based on the simulations, a new reduced model for ITG turbulent transport in helical plasmas were constructed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合 ジャイロ運動論的シミュレーション 乱流輸送 ゾーナルフロー

1. 研究開始当初の背景

ほぼ全ての磁場閉じ込めプラズマ実験で観測されている熱・粒子の異常輸送現象の解明は、核融合研究の中心的課題の一つである。この異常輸送は、プラズマ中の微視的不安定性による乱流に起因するものと考えられている。有限ジャイロ半径効果等の運動論的效果が重要になる異常輸送の解析には、ジャイロ運動論的方程式に基づく乱流シミュレーションが有効であり、近年の急速な計算機性能向上に即して、大規模なシミュレーション研究が最近の世界的な趨勢となっている。しかし、コード間ベンチマークや実験結果との比較検証など、途上の課題も多く存在し、特に複雑な磁場構造を有する3次元系配位におけるジャイロ運動論的乱流シミュレーションは、定性的な解析に留まっている。実験的観点からは、観測される粒子や熱の異常輸送を定性的のみならず定量的にも正確に再現、或いは予測することを強く求められている。

2. 研究の目的

3次元系プラズマの異常輸送現象に対して、ジャイロ運動論的シミュレーションによる更なる理解を進めるためには、プラズマ実験で実際に用いられる現実的な平衡磁場配位や温度・密度分布を用いた定量的なシミュレーションを行い、実験結果との直接比較や再現、予測を行っていく必要がある。それに加えて、上で述べたように、様々なコード間で、ベンチマークや数値精度などの相互比較を行うことで、ジャイロ運動論的乱流シミュレーション研究が、より高い信頼性を持って核融合研究における重要な役割を果たしていくことができる。本研究課題は、上述の数値解析を実現する新たなシミュレーション・コードを開発した上で、大型ヘリカル装置(LHD)等の放電配位に適用し、現実的な条件下での乱流輸送シミュレーションを実行する。そして、異常輸送現象に対する定量的な理解を目指すことが目的である。

3. 研究の方法

3次元系の磁場配位をシミュレーションに反映させるため、実験ショット毎の平衡磁場配位を3次元平衡コードから求め、そこから得られる磁場成分や磁気面形状効果を正確に取り扱える新しいジャイロ運動論的シミュレーション・コード「GKV-X」(M. Nunami, et al., Plasma Fusion Res. (2010))を開発した。このコードを、まず、LHD 高イオン放電でのイオン温度勾配不安定性(ITG モード)の線形解析に適用する。当該の実験では、2次元位相コントラストイメージング(2D-PCI)による詳細な乱流揺動分布計測が得られており、その観測結果との比較により、観測された乱流揺動と ITG モードとの

関係を明らかにする。次に、GKV-X によるシミュレーション解析を大規模な非線形乱流計算に拡張し、実際に LHD 実験で観測された輸送係数や揺動スペクトルとの詳細な比較検証を行い、シミュレーションによる定量的な乱流輸送評価を実現する。さらに、高い計算コストを要する大規模乱流シミュレーションだけでなく、より簡便な手法による輸送評価の可能性も探る。

4. 研究成果

(1)GKV-X コードの開発

実験観測との直接的な比較解析を行えるよう、複雑に歪んだ磁場構造を有する3次元プラズマの幾何効果を正確に扱えるジャイロ運動論的コード「GKV-X」を新たに開発した。このコードにより、LHD 等での実際の放電を模擬した現実的な3次元平衡配位における微視的不安定性やゾーナルフロー、乱流輸送に関する解析が可能になった。本コードによる解析で、磁気面形状効果は主に高波数領域において有限ジャイロ半径効果を介して不安定性成長に影響を及ぼすことが分かった。

(2)LHD プラズマでの ITG モードの解析

LHD 高イオン温度放電(#88343)において 2D-PCI で観測された揺動は、温度勾配が急峻な場所で振幅が増大し、イオン反磁性方向に進行するという、ITG モードの特徴を有している。ここでは GKV-X を用いて、当該放電における ITG モードの線形解析を進めた。実験で観測された揺動ピークで ITG モードは最も不安定になっており(図 1)、この揺動が ITG 不安定性に起因している可能性を強く示唆する結果を得た。また、高温フェーズでは臨界温度勾配が上昇していることが分かり、閉じ込め性能向上に寄与する新しい知見が得られた。ゾーナルフローの残存レベルが径方向波数の増加に応じて上昇することも明らかになった。

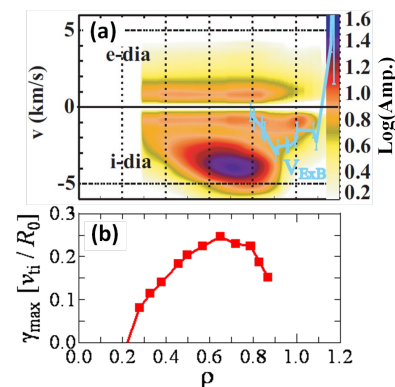


図 1: LHD において観測された密度揺動分布(上)と、GKV-X によって得られた ITG モード成長率の径方向分布(下)。

(3)LHD 高イオン温度放電での ITG 乱流シミュレーション

(2)で対象とした LHD 実験において、GKV-X を用いた大規模な非線形 ITG 乱流輸送シミュレーション解析を進めた。シミュレーションでは、径方向の複数の位置において、乱流のイオン熱流束が実験での観測結果を定量的に再現することが確かめられた。2D-PCI 計測による揺動スペクトルも再現され、当該の放電において観測された揺動が ITG 乱流によるものであることが裏付けられた。乱流輸送は、長波長モードとその成長に応じて生成されたゾナルフローとの相関によって実現されており、そのスペクトル構造も明らかになった。さらに、乱流と観測揺動のスペクトル構造の類似性や、乱流と帯状流、それらの競合により実現されるプラズマ輸送との間における相関関係に対して定量的な知見を得た。

(4)簡約乱流輸送モデルの構築

より広範囲な条件(磁場配位、温度・密度勾配長、磁気シア等)を対象にした乱流シミュレーションの結果から、イオン熱輸送係数が乱

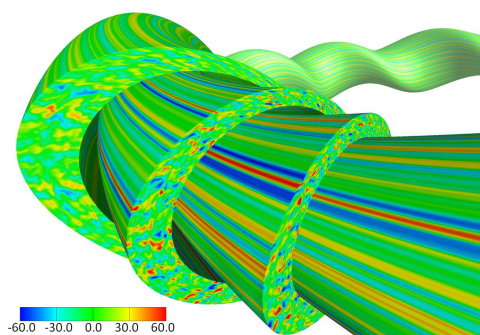


図 2: LHD 高イオン温度放電プラズマにおける GKV-X 乱流シミュレーションで得られた静電ポテンシャル。

流揺動ポテンシャルとゾナルフロー振幅による簡潔な関数形で表現できることを突き止めた。そして、線形解析から得られる不安定性成長率やゾナルフロー・ポテンシャルの線形応答関数との相関を調べた結果、乱流揺動ポテンシャルは混合長評価から類推されるように線形 ITG モード成長率との強い相関が発見され、ゾナルフロー振幅においても、ゾナルフロー・ポテンシャルの線形応答関数から求められるゾナルフロー減衰時間によって記述できることが明らかになった。これらの相関関係と上述の関数形から、ヘリカル・プラズマの ITG 乱流輸送に対する、再現性の高い新しい簡約モデルの構築に成功した。

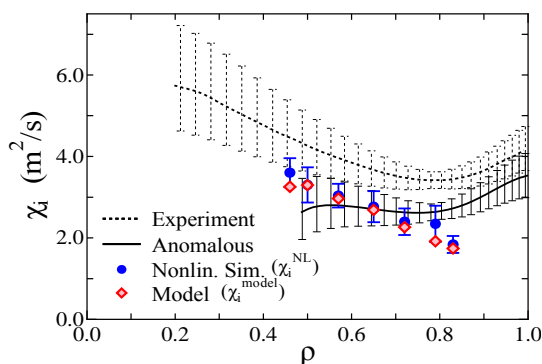


図 3: イオン熱輸送係数に対する簡約モデルによる予測(赤点)とGKV-Xによるシミュレーション結果(青点)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- 1) H. Sugama, T.-H. Watanabe and M. Nunami, *Extended gyrokinetic field theory for time-dependent magnetic confinement fields*, Physics of Plasmas, Vol. 21 (2014), 012515-1 - 15, 査読有, DOI: 10.1063/1.4863426
- 2) Masanori Nunami, Tomo-Hiko Watanabe, and Hideo Sugama, *A Reduced Model for Ion Temperature Gradient Turbulent Transport in Helical Plasmas*, Physics of Plasmas, Vol. 20 (2013), 092307-1 - 6, 査読有, DOI: 10.1063/1.4822337
- 3) Hideo Sugama, Tomo-Hiko Watanabe, and Masanori Nunami, *Conservation of energy and momentum in nonrelativistic plasmas*, Physics of Plasmas, Vol. 20 (2013), 024503-1 - 4, 査読有, DOI: 10.1063/1.4789869
- 4) Masanori Nunami, Tomo-Hiko Watanabe, and Hideo Sugama, *Relation among ITG Turbulence, Zonal Flows, and Transport in Helical Plasmas*, Plasma and Fusion Research, Vol. 8 (2013), 1203019-1 - 3, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.8.1203019
- 5) T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka and M. Nakata, *Gyrokinetic simulations of entropy transfer in high ion temperature LHD plasmas*, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 55 (2013), 014017-1 - 6, 査読有, DOI: 10.1088/0741-3335/55/1/014017
- 6) Hideo SUGAMA, Tomohiko WATANABE, Masanori NUNAMI, Shinsuke SATAKE, Seikichi MATSUOKA and Kenji TANAKA, *Kinetic Simulations of Neoclassical and Anomalous Transport Processes in Helical Systems*, Plasma and Fusion Research, Vol. 7 (2012), 2403094-1 - 9, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2403094

- 7) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, *Gyrokinetic turbulent transport simulation of a high ion temperature plasma in large helical device experiment*, Physics of Plasmas, Vol. 19 (2012), 042504-1 - 7, 査読有, DOI: 10.1063/1.4704568
- 8) H. Sugama, T.-H. Watanabe, M. Nunami, S. Nishimura, Quasisymmetric toroidal plasmas with large mean flows, Physics of Plasmas, Vol. 18 (2011), 082505-1 - 11, 査読有, DOI: 10.1063/1.3624483
- 9) T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, Effects of Equilibrium-Scale Radial Electric Fields on Zonal Flows and Turbulence in Helical Configurations, Nuclear Fusion, Vol. 51 (2011), 123003-1 - 10, 査読有, DOI:10.1088/0029-5515/51/12/123003
- 10) M. NUNAMI, T.-H. WATANABE, H. SUGAMA, K. TANAKA, *Linear Gyrokinetic Analyses of ITG Modes and Zonal Flows in LHD with High Ion Temperature*, Plasma and Fusion Research, Vol. 6 (2011), 1403001-1 - 8, 査読有, DOI:10.1585/pfr.6.1403001

〔学会発表〕(計7件)

- 1) M. Nunami, *Modeling for ITG Turbulent Transport in Helical Plasmas*, Joint 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop, 2013年9月18日, イタリア・パドヴァ
- 2) 沼波政倫, 渡邊智彦, 洲鎌英雄, ヘリカル・プラズマにおけるイオン温度勾配乱流輸送(招待講演), プラズマ・核融合学会第29回年会, 2012年11月29日, 福岡県・春日市
- 3) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama and K. Tanaka, *Nonlinear Gyrokinetic Simulation for ITG Turbulent Transport in LHD Discharge*, 18th International Stellarator / Heliotron Workshop, 2012年2月2日, オーストラリア・キャンベラ
- 4) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama and K. Tanaka, Gyrokinetic simulation study on ITG turbulent transport in LHD experiment (招待講演), Plasma Conference 2011, 2011年11月25日, 石川県・金沢市
- 5) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama and K. Tanaka, *Gyrokinetic flux-tube code for comparison with experiment in non-axisymmetric systems and application to LHD discharge*, 22nd International Conference on Numerical Simulation of Plasmas, 2011年9月8日, アメリカ・ロングビーチ
- 6) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, *Gyrokinetic simulation study on ion temperature gradient modes and zonal flows in Large Helical Device*

- experiments*, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2010年11月9日, アメリカ・シカゴ
- 7) M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, Effects of Three-Dimensional Geometry and Collisions on Zonal Flows and Ion Temperature Gradient Modes in Helical Systems, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010年10月13日, 韓国・大田

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼波政倫 (NUNAMI MASANORI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 40397203