

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561030

研究課題名(和文) ジャイロ運動論的シミュレーションによる非軸対称配位での異常輸送解析

研究課題名(英文) Anomalous transport analysis in non-axisymmetric configurations by means of gyrokinetic simulation

研究代表者

渡邊 智彦 (Watanabe, Tomo-Hiko)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30260053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：非軸対称配位を持つ大型ヘリカル装置におけるプラズマ乱流の定量的解析を通じて、乱流輸送機構の解明と輸送特性の予測を目指し、ジャイロ運動論的シミュレーション研究基盤の拡充を行った。本研究課題をもとに開発が進められたGKVコードは、現在、複数粒子種からなる非軸対称プラズマの電磁乱流シミュレーションへと適用されている。本研究課題では、非軸対称配位でのエントロピー揺動伝達解析、フラックス・チューブ連結モデルの開発なども合わせて進め、非軸対称プラズマ乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーション研究の進展に寄与する成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：For deeper understandings on turbulent transport mechanism and prediction of transport properties, through quantitative analyses of plasma turbulence in Large Helical Device with non-axisymmetry, we have enhanced a research basis for the gyrokinetic simulation. The GKV code, which has been continuously extended from the present study, is currently applied to electromagnetic turbulence simulations for multi-species plasma with non-axisymmetry. In this study, we also promoted the entropy transfer analysis in non-axisymmetric configurations, and developed a flux tube train model. The obtained results contribute to advances of the gyrokinetic simulation studies of turbulent transport in non-axisymmetric plasmas.

研究分野：プラズマ物理学、核融合学

キーワード：プラズマ 乱流 シミュレーション 核融合 輸送

### 1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉の実現には、十分な閉じ込め時間とともに高い密度・温度の達成が欠かせない。そのためには、プラズマ閉じ込め性能の劣化をもたらす乱流輸送機構の解明が重要な課題である。

非軸対称トーラス型磁場閉じ込め装置は、我が国において大型ヘリカル装置(LHD)実験が順調に進展し、欧州ではW7X装置が稼働直前にある。一方、非軸対称配位での乱流輸送の研究は、その磁場形状の複雑さのため、トカマク型装置に代表される軸対称配位の研究に比べより困難なものであった。

これまでに研究代表者等は、世界に先駆け、非軸対称配位における乱流輸送の直接数値シミュレーションに取り組んできた。本研究開始当初においては、LHD実験に対応した磁場形状下において、静電的乱流によるイオン熱輸送のシミュレーション解析に成功し、実験結果との対比を可能とするレベルまで研究は進展してきた。下図はそのシミュレーション結果の一例であり、イオン熱輸送をもたらす乱流渦の分布を示している。

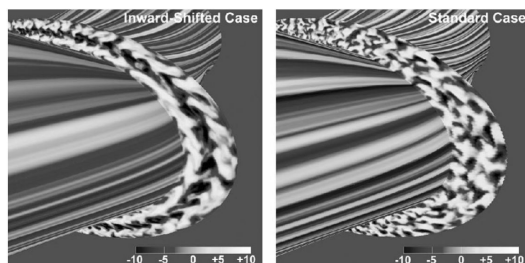


図1：従来行われていたヘリカル型プラズマの乱流輸送シミュレーション例 [T.-H. Watanabe et al., Phys. Rev. Lett. (2008)].

一方、実験結果のより定量的な理解には、電子熱輸送とともに粒子輸送の解析を可能とし、かつ、電磁揺動効果、多種イオン効果などを取り入れたシミュレーション・モデルと手法の拡張が喫緊の課題であった。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、非軸対称トーラスプラズマにおいて、イオン熱輸送とともに粒子輸送および電子熱輸送の定量的評価を可能とするため、シミュレーション・モデルおよびコードの開発を進めることが本研究課題の目的である。より具体的には、以下の3つの目標を設定した。

- (1) 非軸対称配位における電子の運動論的效果を取り入れたジャイロ運動論的シミュレーション・コードを開発し、LHDプラズマの乱流輸送問題に適用する。
- (2) LHDプラズマの乱流輸送シミュレーションにより輸送の実験条件(磁場形状等)依存性を明らかにする。
- (3) LHD実験との比較を通じ、乱流輸送機構の解明に迫り、乱流輸送シミュレーションの予測性能向上に資する。

### 3. 研究の方法

本研究では、粒子運動論効果を含む低周波数の磁化プラズマ乱流とそれによる輸送現象を扱うため、ジャイロ運動論的方程式を数値的に解く、GKVコードを用いた。GKVは、研究代表者が中心となり2004年から開発を進めて来たコードであり、5次元位相空間上での粒子の1体速度分布関数の時間発展を電場揺動とともに求めることができる。本研究では、これまでに開発したGKVコードに種々の拡張を加えることで、その適用範囲を拡大し、より現実的な条件化での非軸対称プラズマの乱流輸送解析を可能とする。

本研究では5次元位相空間を扱うため、大規模な計算機資源を必要とする。このため実際のシミュレーションには、核融合科学研究所に設置されたプラズマ・シミュレータや国際核融合エネルギー研究センターのスーパーコンピュータを利用した。

### 4. 研究成果

本研究課題では、LHDに代表される非軸対称トーラス配位をもつ磁場閉じ込めプラズマにおける乱流輸送過程を定量的に解析し、トーラスプラズマにおける輸送の普遍的理解に資することを目指して、ジャイロ運動論的シミュレーション研究を進めた。その主な研究成果を以下にまとめる。

- (1) 多種イオン・電子を取り扱えるように拡張されたGKVコードについて、さらに実験に対応した平衡磁場配位を導入できるよう拡張を行った。これを、LHD磁場形状下での捕捉電子による効果を検証するために適用した。本課題の成果は、共同研究者によって磁場揺動効果の導入と組み合わせられ、有限圧力をもつLHDプラズマのイオン温度勾配(ITG)乱流および運動論的バルーニングモードの解析に適用された。これらは、平成26年度「京」一般利用課題として採択され、非軸対称配位において電子の運動論的效果を導入した電磁的ジャイロ運動論的シミュレーションという最先端研究として結実した。本課題の成果は、その基盤を与えるものとして位置づけられる。
- (2) LHDでの乱流とそれが作り出すシア流(帯状流)の非線形相互作用について、シミュレーション結果を用いたエントロピー伝達解析を行った。揺動分布関数の2乗を背景分布関数で除したものの積分は、エントロピー揺動として定義され、ほぼ無衝突のプラズマに発達する位相空間上の揺らぎを特徴づける指標となる。トカマクに比べて帯状流の応答関数振幅が小さいにも関わらず、非軸対称配位においても帯状流を介した連鎖的なエントロピー伝達機構が働き、乱流輸送が抑制されることを確認した。図2は

シミュレーション解析で得られたエントロピー伝達過程の一部を可視化したものである。乱流成分（赤矢印）と帯状流（緑矢印）との相互作用により、青矢印で示されているようにより波数の高い（ $q_x$ の大きな）領域へエントロピー揺動が運ばれることが分かる。

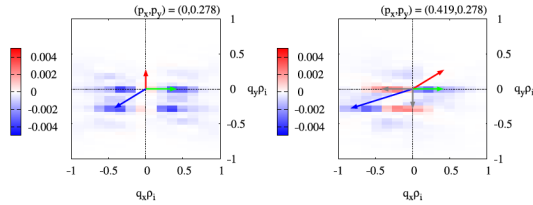


図 2 : 非軸対称プラズマ中の乱流にともなうエントロピー伝達解析の一例 [T.-H. Watanabe et al., Plasma Phys. Control. Fusion (2013)].

- (3) 非軸対称配位における平衡径電場が乱流輸送に及ぼす影響を解析するため、複数のシミュレーション領域を束ねて同時に乱流計算を行う新しいシミュレーション手法を考案し、その動作および効果を検証した。非軸対称配位では粒子間衝突による新古典輸送が装置サイズ規模の径方向電場をつくることが知られている。この平衡径電場の存在により非軸対称磁場に捕捉される粒子軌道が改善され、その結果、帯状流の応答関数振幅が増大することが研究代表者等の線形解析で知られていた。本課題で新たに適用したシミュレーション手法により、平衡電場によりプラズマが回転すると ITG 乱流による帯状流生成が比較的容易になり得ることが示され（図 3）、その成果は国際原子力機関主催の 2012 年核融合エネルギー会議で口頭発表された。

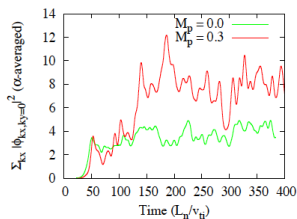


図 3 : 巨視的径電場による帯状流生成への影響を表す ITG 乱流のシミュレーション例 [T.-H. Watanabe et al., IAEA Fusion Energy Conf. (2012)].

- (4) 磁力線方向に長く伸びた乱流揺動を効率的に扱うことのできる新しいシミュレーション手法を開発し、その有効性を確認した。トーラス型核融合装置ではプラズマを安定に閉じ込めるため磁場に径方向のシアを与えるが、この磁気シアが弱い場合、または、不安定性が弱い場合等に、乱流揺動が磁力線に沿って長く伸びることがある。こうした状況におい

ても、正確なシミュレーションを効率的に行えるように、シミュレーション領域を縦列接続したフラックス・チューブ連結モデルを考案し、その有効性を ITG 乱流シミュレーションに対して確認した。図 4 は乱流中の静電ポテンシャル揺動の平均強度を磁力線に沿った座標  $z$  と径方向の波数  $k_x$  からなる空間上に表示したものである。従来の単一シミュレーション領域を用いた場合（図 4 上）、揺動の特徴的な  $k_x$  は  $z$  にほぼ比例して増大するため、数値解像度の維持やバレーニング対称性の破れなどの数値的困難がある。一方、フラックス・チューブ連結モデルでは、これらの問題を回避し、効率的なシミュレーションが可能となることが分かる（図 4 下）。

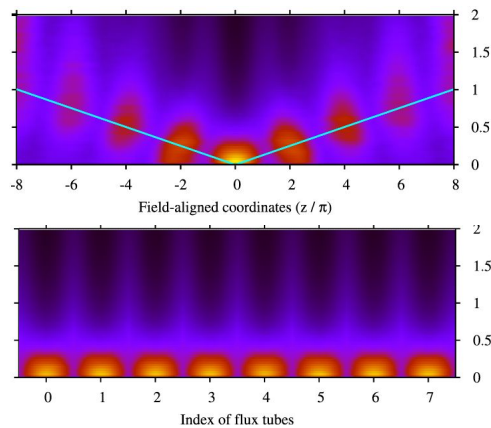


図 4 : 従来のモデルとフラックス・チューブ連結モデルを用いた場合の比較 [T.-H. Watanabe et al., Phys. Plasmas (2015)].

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

T.-H. Watanabe, H. Sugama, A. Ishizawa, and M. Nunami, “Flux tube train model for local turbulence simulation of toroidal plasmas”, Phys. Plasmas 22, 022507 (2015); doi: 10.1063/1.4907793 【査読あり】

T.-H. Watanabe, Y. Idomura, S. Maeyama, M. Nakata, H. Sugama, M. Nunami, and A. Ishizawa, “Exploring phase space turbulence in magnetic fusion plasmas”, Journal of Physics: Conference Series 510 (2014) 012045;

doi:10.1088/1742-6596/510/1/012045

【査読あり】

T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, and M. Nakata, “Gyrokinetic simulations of entropy transfer in high ion temperature LHD plasmas”, Plasma Phys. Control. Fusion 55, 014017 (2013); doi: 10.1088/0741-3335/55/1/014017 【査読

あり】  
T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, and M. Nakata, “Gyrokinetic simulation studies for non-axisymmetric plasma confinement: turbulent transport and entropy transfer”, *Journal of Physics: Conference Series* **399**, 012020 (2013); doi: 10.1088/1742-6596/399/1/012020  
【査読あり】

田中 謙治 (TANAKA, Kenji)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：50260047

洲鎌 英雄 (SUGAMA, Hideo)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：80202125

〔学会発表〕(計 17 件)

渡邊智彦, 「ジャイロ運動論的シミュレーションによるトーラスプラズマ乱流輸送研究の進展」, *Plasma Conference 2014*, 2014年11月18日-21日(朱鷺メッセ, 新潟県・新潟市)【招待講演】  
T.-H. Watanabe, “Exploring phase space turbulence in magnetic fusion plasmas”, *IUPAP Conference on Computational Physics*, 20-24 August 2013 (Moscow, Russia) 【基調講演】  
T.-H. Watanabe, “Transport, flows and vortex structures in drift wave turbulence simulation”, *Workshop on Turbulence, Transport and Structures in Magnetized Plasmas*, 3-6 June 2013 (Marseille, France) 【招待講演】  
T.-H. Watanabe, M. Nunami, H. Sugama, S. Satake, S. Matsuoka, A. Ishizawa, S. Maeyama, and K. Tanaka, *24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference*, 8-13 October 2012 (San Diego, USA).  
【選考による口頭発表】

T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, and A. Ishizawa, “Kinetic Transport Simulation Studies for Non-Axisymmetric Plasma Confinement”, *26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases*, 27-31 August 2012 (Zrenjanin, Serbia) 【招待講演】

T.-H. Watanabe, “Overview on recent progress in 3D effects on transport”, *2<sup>nd</sup> Asia Pacific Transport Working Group Meeting*, 15-18 May 2012 (Chengdu, China) 【招待講演】

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 智彦 (WATANABE, Tomo-Hiko)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：30260053

### (2) 研究分担者

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