

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820398

研究課題名(和文) ジャイロ運動論的シミュレーションに基づく3次元プラズマ乱流輸送の定量的予測

研究課題名(英文) Quantitative prediction of turbulent transport in three-dimensional plasmas based on gyrokinetic simulations

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・准教授

研究者番号：40397203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置(以下、LHD)に代表される3次元磁場閉じ込め装置や、磁場の3次元構造を考慮したトカマク装置におけるプラズマの異常輸送現象を定量的に理解し、輸送予測に繋げることを目指し、ジャイロ運動論に基づく大規模シミュレーション研究を実施した。複数粒子種間衝突オペレーターなど多粒子種から構成される現実的なプラズマに対してジャイロ運動論的シミュレーションを実施し、構成粒子種によるプラズマ不安定性の差異が実験結果と無矛盾であることを確認した他、多数のイオン温度勾配パラメータを用いた乱流シミュレーションにより、プラズマ温度勾配分布の定量的な予測も実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the anomalous transport of plasmas in Large Helical Device (LHD) and tokamaks including three-dimensional effects, and to achieve the quantitative predictions of the transport, the gyrokinetic simulation studies have been done. Using the collision operator between different particle species of the plasmas, the simulations for the practical cases with multi-species plasmas were performed. The simulations for the micro instabilities are agree with the experimental results which is affected by the differences of particle species compositions. And the quantitative predictions for the profiles of plasma temperature gradients have been realized based on the simulations with a variety of ion temperature gradients.

研究分野：プラズマ物理学

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

1. 研究開始当初の背景

プラズマの熱・粒子の異常輸送の理解と定量的な予測は、磁場閉じ込め核融合研究の中心課題の一つである。密度・温度勾配駆動の微視的不安定性による乱流が主な要因であるこの輸送現象の解析には、有限ジャイロ半径効果等の運動論的效果を正しく記述できるジャイロ運動論に基づいた数値シミュレーションが必須である。近年の計算機性能の向上に即して、5次元位相空間上の大規模計算が国内外で活発に進められ、乱流・帯状流の相互作用等、異常輸送の物理機構に関する様々な成果が報告されている。しかし、実験との比較やコード間ベンチマークの不足など、課題も多い。特にこれまでの対象は2次元トカマク系が中心で、3次元配位については模擬配位での解析が行われていた程度であり、実験と直接比較を行った定量的な解析は、応募者が実施してきた大型ヘリカル装置(LHD)におけるイオン温度勾配乱流の研究の他には殆どなかった。近年ではトカマクにおいても、共鳴摂動磁場や外部モジュールコイルによるリップル磁場により配位構造が3次元的になり、3次元プラズマを正確に取り扱う重要性は増していた。一方、3次元系での乱流シミュレーションは、複雑な磁場構造をカバーするためにトカマクと比して非常に高い解像度が要求され、最高性能の計算機でも解析対象が制限される。そのため、異常輸送の定量予測には非線形計算だけでなく、簡約輸送モデルのように効率的な解析手法も重要である。トカマクにおいては、いくつかのモデルが提案されていたが、3次元配位での定量的な解析は進んでおらず、非線形計算を再現し得る異常輸送モデルや、乱流や帯状流の相互作用を通じた系統的・定量的理解に及んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究では、LHDに代表される非軸対称装置や、配位の3次元性の重要性が増しているトカマク装置等、3次元構造を伴う磁場閉じ込めプラズマにおける熱・粒子の乱流輸送現象の定量的な理解を目指す。実験データや放電シナリオに基づく幅広い条件下での現実的な乱流輸送シミュレーションを実行し、3次元プラズマの輸送に対する、磁場構造や温度・密度分布、粒子衝突等の効果を明確にし、輸送レベルを大きく左右する乱流・帯状流の影響を系統的・定量的に評価する。そして、高精度シミュレーションと実験との比較解析に裏打ちされた確度の高い定量的な乱流輸送予測を実現することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

これまで利用してきたジャイロ運動論的シミュレーション・コードを、LHDにおいて複数粒子種から構成された、より現実的なプラズマに対応させるために粒子種間衝突

効果を正確に取り入れたコードに拡張・開発する。このシミュレーション・コードを用いて、実際の実験ショットに対して不安定性解析および乱流シミュレーションを実施する。放電配位の依存性のみならず、温度勾配依存性を含めて解析を進め、周辺領域で実験結果との差異が指摘されていた従来のシミュレーション研究における課題についても、その原因を探る。数値計算には核融合研の「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(IFERC)の「Helios」、理化学研究所の「京」などを利用する。広範な条件・対象において得られる多くの計算データを元に、詳細な実験比較と乱流輸送解析を行い、ヘリカル・プラズマの異常輸送に対する普遍的な物理機構の解明に繋げる。

4. 研究成果

(1) 複数粒子種間衝突効果を取り込んだジャイロ運動論的コードの開発

異なる粒子種が混在するプラズマにおける粒子衝突を考慮するには、系として粒子や運動量、エネルギーの各保存則を満足する必要がある。そこで、これまでのジャイロ運動論的シミュレーション・コード「GKV-X」および「GKV+」に対して、各保存則を満たすように構成された衝突オペレータを開発し、コードへの実装を行なった。この衝突オペレータを用いたゾーナルフローの線形応答計算では、複数の粒子種プラズマでの応答関数が単一粒子種の場合と比較して、その残存レベルも含めて明らかな差違が現れていることを確認した(図1)。

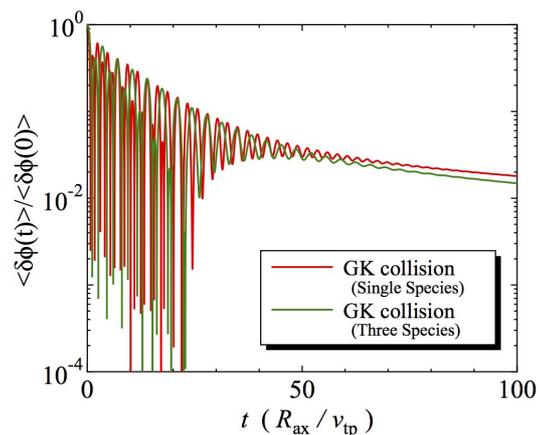


図1: 衝突オペレータを用いたゾーナルフロー線形応答に対する単一粒子種(赤)および複数粒子種(3種、緑)プラズマでの違い。

(2) 乱流シミュレーションに基づく温度勾配分布の予測

幅広い条件下で実施したLHD配位におけるイオン温度勾配(ITG)乱流輸送シミュレーション解析について、乱流輸送レベルに対する最も敏感なパラメータであるイオン温

度勾配長についてデータをまとめ直し、輸送フラックスの温度勾配依存性を様々な径方向位置で調べた。加えて、LHD 実験での温度分布データの計測誤差情報を基に、そこから許容される温度勾配長の誤差幅を統計的に見積もり、得られた温度勾配の誤差範囲内で許容される輸送フラックスの変化量を特定した。一方、周辺領域におけるシミュレーションと実験結果との差異の問題に関しては、実験での温度分布の計測誤差に伴う温度勾配の誤差幅の範囲内で解決し得るとの議論がある一方、今回の LHD での解析では温度勾配の誤差幅自体が大きくないことが明らかになり、輸送フラックスの再現には他の不定性も考慮する必要があることが示唆された。ここでの解析から、輸送フラックスの実験値をシミュレーションの入力値とすることで、温度勾配長を予測することが可能になったと解釈することができ、実際に様々な温度勾配長での計算結果に基づいたイオン温度勾配長の分布予測を行うことができた(図 2)。

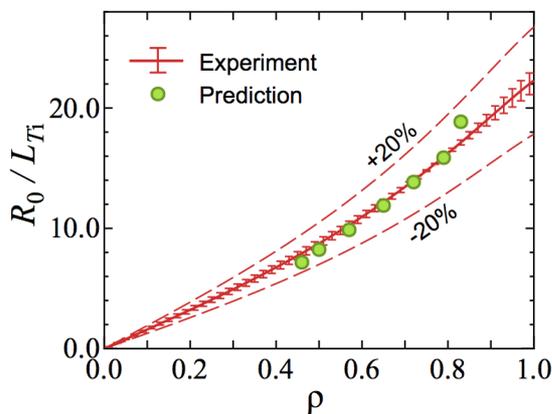


図 2: 乱流シミュレーションの結果に基づき得られたイオン温度勾配分布の予測。実験観測から見積もられる温度勾配(赤線)とその誤差幅に対して、予測値(緑点)は、良い一致を確認できる。

(3) ヘリカル系における複数イオン種プラズマの微視的不安定性解析

ヘリカル型プラズマにおいて、異なるイオン種の効果を詳細に検証するため、ジャイロ運動論的シミュレーションを用いて、LHD 実験での複数イオン種を含むプラズマの微視的不安定性解析を実施した。この解析で対象にしたのは、3種のイオン(水素、ヘリウム、炭素)と電子から構成される4粒子種プラズマであり、特にヘリウム・イオンが構成イオンの多数を占めるプラズマと、水素が多数を占めるプラズマに対して詳細に解析を行った。ヘリウムが支配的なプラズマの場合、実験では、水素が支配的な場合と比較して、高いイオン温度と低い熱輸送フラックスを実現していることが分かっている。該当の2

つの実験ショットに対する不安定性解析では、双方ともに、主に ITG 不安定性が支配的であり、ヘリウムが支配的なケースでは、その不安定性成長率が、水素が支配的な場合と比べて減少していることが分かった。また、混合長の解析から換算される熱輸送フラックスについても、同様にヘリウムが支配的なケースの方が減少している(図 3)。双方の間では、磁場配位だけでなく、イオン温度も大きく異なるため、閉じ込め性能自体の改善については、慎重に調査する必要がある。ITG 不安定性が支配的である今回のケースでは、イオン温度勾配長が輸送フラックスに強く影響する。そこで、イオン温度勾配に対する熱輸送フラックスの依存性を詳細に調査した結果、図 3 が示すように、ヘリウムが支配的な場合では、水素が支配的な場合と比較して、イオン温度勾配に対する依存性が鈍化しており、輸送フラックスも低減する。また、電子・イオン間の温度比を人為的に両者で揃えた場合では、温度勾配が急峻である場合は両者での差異は比較的大きく維持される一方、臨界温度勾配付近では差異が見られるなくなるということが明らかになった。

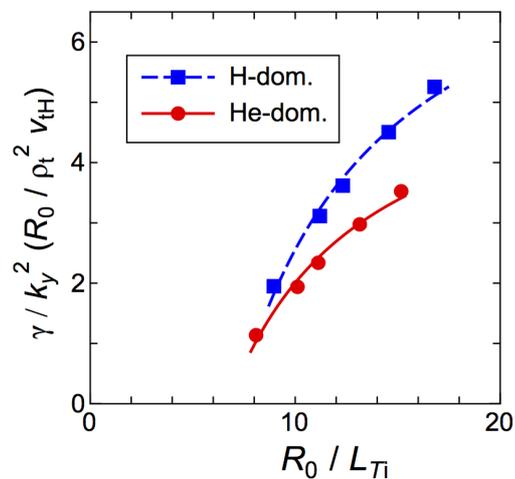


図 3: 混合長評価から計算された各ケースにおける熱輸送係数のイオン温度勾配依存性。水素が支配的な場合(緑)に比べて、ヘリウムのケースでは依存性が緩和されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

- 1) M. Nunami, M. Nakata, H. Sugama, K. Tanaka, and S. Toda, *Microinstabilities in hydrogen- and helium-dominated multi-ion-species plasmas in LHD*, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 59 (2017), 012515-1 - 8, 査読有, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5aa6>
- 2) M. Nakata, M. Nunami, H. Sugama, and T.-H. Watanabe,

- Isotope Effects on Trapped-Electron-Mode Driven Turbulence and Zonal Flows in Helical and Tokamak Plasmas*, Physical Review Letter, Vol.118 (2017), 165002-1 - 6, 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.165002
- 3) H. Sugama, M. Nunami, M. Nakata, and T.-H. Watanabe, *Conservation laws for collisional and turbulent transport processes in toroidal plasmas with large mean flows*, Physics of Plasmas, Vol. 24 (2017), 020701-1 - 5, 査読有,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4975075>
 - 4) M. Nakata, M. Nunami, H. Sugama, T.-H. Watanabe, *Impact of hydrogen isotope species on microinstabilities in helical plasmas*, Plasma Physics Controlled Fusion, Vol.58 (2016) 074008-1 - 8, 査読有,
doi:10.1088/0741-3335/58/7/074008
 - 5) M. Nakata, M. Nunami, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, *Improved collision operator for plasma kinetic simulations with multi-species ions and electrons*, Computer Physics Communications, Vol.197 (2015), 61 - 72, 査読有,
<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.08.007>
 - 6) S. Maeyama, T.-H. Watanabe, Y. Idomura, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, *Improved strong scaling of a spectral/finite difference gyrokinetic code for multi-scale plasma turbulence*, Parallel Computing, Vol.49 (2015), 1 - 9, 査読有,
<https://doi.org/10.1016/j.parco.2015.06.001>
 - 7) H. Sugama, T.-H. Watanabe, and M. Nunami, *Effects of collisions on conservation laws in gyrokinetic field theory*, Physics of Plasmas, Vol.22 (2015), 082306 -1 - 19, 査読有,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4928378>
 - 8) S. Maeyama, Y. Idomura, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Yagi, N. Miyato, A. Ishizawa, and M. Nunami, *Cross-Scale Interactions between Electron and Ion Scale Turbulence in a Tokamak Plasma*, Physical Review Letter, Vol.114 (2015), 255002-1 - 5, 査読有,
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.255002>
 - 9) A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama, M. Nunami, K. Tanaka, S. Maeyama, and N. Nakajima, *Turbulent transport of heat and particles in a high ion temperature discharge of the Large Helical Device*, Nuclear Fusion, Vol.55 (2015) 043024-1-8,
doi:10.1088/0029-5515/55/4/043024
 - 10) M. Nunami, M. Nakata, T.-H. Watanabe, and H. Sugama, *Development of Linearized Collision Operator for Multiple Ion Species in Gyrokinetic Flux-Tube Simulations*, Plasma and Fusion Research, Vol.10 (2015), 1403058-1 - 9,
DOI:10.1585/pfr.10.1403058
 - 11) T.-H. Watanabe, H. Sugama, A. Ishizawa, M. Nunami, *Flux tube train model for local turbulence simulation of toroidal plasmas*, Physics of Plasmas, Vol.22 (2015), 022507-1-7,
doi:10.1063/1.4907793
 - 12) D.R. Mikkelsen, M. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, and K. Tanaka, *Verification of gyrokinetic microstability codes with an LHD configuration*, Physics of Plasmas, Vol. 21 (2014), 112305-1 - 8, 査読有,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4902124>
 - 13) 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, Vol.510 (2014), 012045-1 - 11,
doi:10.1088/1742-6596/510/1/012045
 - 14) M. Nakata, A. Matsuyama, N. Aiba, S. Maeyama, M. Nunami, and T.-H. Watanabe, *Local Gyrokinetic Vlasov Simulations with Realistic Tokamak MHD Equilibria*, Plasma and Fusion Research, Vol.9 (2014), 1403029-1 - 12,
DOI:10.1585/pfr.9.1403029
- [学会発表](計8件)
- 1) M. Nunami, *Validation of turbulence simulation and evaluation of temperature gradient*, 17th Transport and Confinement Topical Group Meeting, 2016年10月24日-26日, 那珂核融合研究所, 茨城県・那珂市
 - 2) M. Nunami, M. Nakata, H. Sugama, M. Sato, J.L. Velasco, S. Satake, M. Yokoyama, *Anomalous and Neoclassical Transport of Hydrogen Isotope and Impurity Ions in LHD Plasmas*, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日-22日, 国立京都国際会館, 京都府・京都市
 - 3) M. Nunami, *Simulation studies on turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems* (招待講演), Joint Varenna-Lausanne International Workshop "Theory of Fusion Plasmas", 2016年8月29日-9月2日, イタリア・

- ヴァレンナ
- 4) M. Nunami, *Progress of Gyrokinetic Turbulence Simulation in Helical Plasmas* (招待講演),
25th International Toki Conference,
2015年11月3日-6日, セラトピア土岐,
岐阜県・土岐市
 - 5) M. Nunami, M. Nakata, A. Ishizawa, S. Toda, H. Sugama, and T.-H. Watanabe,
Profile sensitivity of turbulent transport in LHD plasmas,
20th International Stellarator / Heliotron Workshop,
2015年10月5日-9日, ドイツ・グライ
フスバルト
 - 6) M. Nunami, *Gyrokinetic simulation study on turbulent transport in helical plasmas* (招待講演),
9th International West Lake Symposium,
2015年5月18日-21日, 中国・杭州市
 - 7) M. Nunami, *Development of linearized collision operator for multiple ion species in gyrokinetic simulation*,
Plasma Conference 2014,
2014年11月18日-21日, 朱鷺メッセ,
新潟県・新潟市
 - 8) M. Nunami, *Reduced Model for Gyrokinetic Turbulent Transport in Helical Plasmas*,
25th IAEA Fusion Energy Conference,
2014年10月13日-18日, ロシア・サン
クトペテルブルク

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

学術表彰

- 1) 沼波政倫, *3次元プラズマ乱流輸送の大規模シミュレーションと定量的な予測に関する研究*,
第10回(2016年)日本物理学会若手奨励賞(2016年3月),
<http://www.jps.or.jp/activities/awards/jusyosya/wakate2016.php>

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・准教授

研究者番号: 40397203