

研究課題：プラズマ乱流輸送の不純物および電子スケール効果に関する研究

研究代表者：前山伸也（自然科学研究機構核融合科学研究所メタ階層ダイナミクスユニット）

量研機構担当者：相羽信行

研究協力者：渡邊智彦、Shaokang Xu（名古屋大学大学院理学研究科）、本多充、成田絵美（京都大学大学院工学研究科）、石澤明宏（京都大学大学院エネルギー科学研究科）、沼波政倫、仲田資季（自然科学研究機構核融合科学研究所メタ階層ダイナミクスユニット）、朝比祐一（日本原子力研究開発機構システム計算科学センター）

研究期間：令和3年度-令和5年度

1. 研究目的・意義

本研究では、電子および多種イオンで構成される核融合プラズマにおいて、これまで中心的に解析されてきた主イオンの乱流輸送のみならず、不純物粒子輸送や電子スケール乱流の影響を数値シミュレーションに基づいて調べた。解析に用いるジャイロ運動論的シミュレーションコード **GKV** は多種イオンマルチスケール乱流解析に要する高精度かつ高並列性能を実現する世界的にも数少ないコードである。これを活用し、核燃焼プラズマを見据えた、**JT-60U** を対象とした高電子加熱領域での不純物を含むマルチスケール乱流シミュレーションを新たに実施した。本共同研究の枠組みを利用し、不純物・電子スケール効果の **JT-60SA** 実験での実証を見据えた理論研究を展開するとともに、それらの核燃焼プラズマへの外挿性を議論した。

2. 研究成果

2.1. 多種イオンシミュレーションおよび重イオン漸近展開理論による不純物粒子ピンチの研究

高原子番号不純物はその放射損失によりプラズマ性能を著しく低下させるため、例えばタングステンの場合は背景電子密度に比べて **0.01%** 以下程度の密度に抑えられる必要があり、その粒子輸送特性の理解は重要な研究課題である。本研究により得られた成果を以下に記す。

- (i) 密度が十分に低い不純物はトレース粒子として近似できるため、非線形解析においても、不純物粒子輸送束が不純物密度勾配に対して線形の依存性を持つことを示した。また、線形解析に比べて非線形解析は粒子輸送束における拡散係数および対流項が小さくなっていることが示され、線形安定な短波長モードの非線形励起に起因することを明らかにした[8]。
- (ii) 不純物の炉心への蓄積過程と密接に関与する粒子ピンチ（密度勾配・温度勾配が無い場合でも励起される粒子輸送束）機構に焦点を当ててさらに解析を進めた。磁力線平行方向の空間依存性を考慮した非局所解析手法を開発し、従来の局所解析では無視されていた平行圧縮性による粒子ピンチ効果が有意に残ることを明らかにした。さらに、高価数・重イオン不純物の熱速度・ドリフト運動の時間スケールと乱流揺動の時間スケールの比を微小パラメータとした漸近展開理論を構築し、磁場ドリフト項と平行圧縮性項による粒子ピンチ効果への影響を明らかにした[7]。
- (iii) 特に平行圧縮性による粒子ピンチは揺動の空間構造により内向き・外向きに変化することを示した。その符号の変化が粒子速度空間における磁力線平行方向ドリフト周波数の符号反転に起因することを理論・シミュレーションの両面から示し（図 1）、不純物粒子ピンチの向きを決定する物理機構を明らかにした[1]。

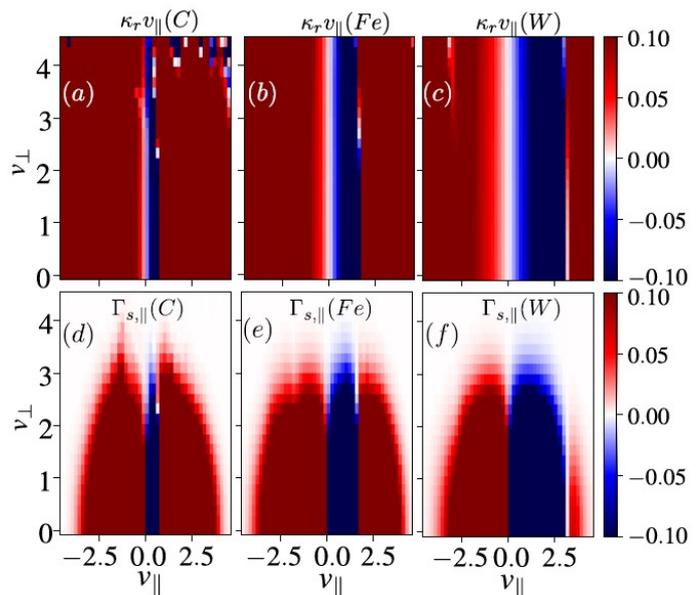


図 1. C, Fe, W 不純物における磁力線平行方向ドリフト周波数 $\kappa_{r,v_{||}}$ の粒子速度依存性（上段）と平行圧縮性項による粒子ピンチ $\Gamma_{||}$ （下段） [1]。

2.2. 核燃焼プラズマおよび JT-60U を対象としたマルチスケール乱流シミュレーションによる電子スケール効果の解析と実効散逸モデルの開発

乱流輸送における電子スケール効果は、近年の大規模数値シミュレーション研究により、大きく理解が進展してきている。本研究により得られた成果を以下に示す。

- (i) 核燃焼を想定した高電子温度・多粒子種混合プラズマのマルチスケール乱流シミュレーションを実施し、高電子温度領域でも電子スケール効果が輸送に影響しうること、電子のみならず燃料種イオンや He 灰の輸送も影響を受けること、電子スケール乱流による捕捉電子モードの安定化により乱流輸送が抑えられる状況があり得ること (図 2) を新たに発見した[5]。
- (ii) 電子スケール揺動とイオンスケール揺動を分離した準線形理論により、電子スケール効果をイオンスケール揺動に対する非等方拡散項としてモデル化する実効散逸モデルを定式化した。電子スケール乱流存在下での捕捉電子モードの成長率の減少について、理論とマルチスケール乱流シミュレーションとの定量的な一致を確認し、理論モデルの有効性を示した[4]。
- (iii) 先行研究でイオンスケール乱流解析が行われていた JT-60U 実験における L モード放電 #E45072 の平衡配位を用いたマルチスケール乱流シミュレーションを実施した。その結果、モデル磁場配位での核燃焼プラズマ解析で得られていた成果(i)と同様の、電子スケール乱流との相互作用による輸送低減が実平衡配位においても起こることを示した。また、電子スケール効果を実効散逸モデルとして取り入れたイオンスケール解析を試行し、マルチスケール相互作用を記述する指針となり得る初期的な結果を得た[2]。

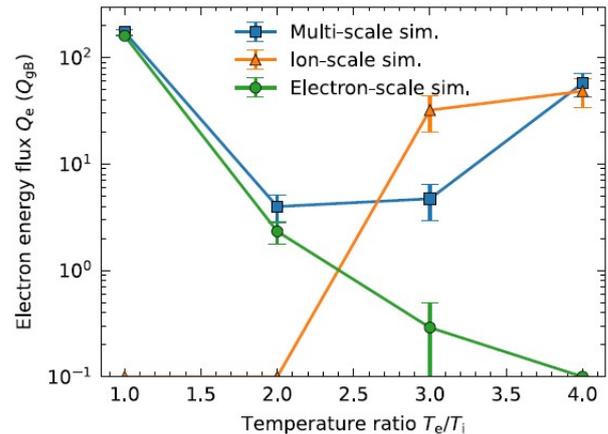


図 2. 電子熱輸送束 Q_e の電子温度依存性。マルチスケール解析(青)を電子スケール(緑)またはイオンスケール(橙)単一解析と比較[5]。

3. まとめ

不純物輸送に関しては、重イオン不純物に対して適用可能な漸近展開理論を開発した。また、新たに提案した磁力線平行方向非局所解析により、平行圧縮性項が粒子ピンチに寄与すること、粒子速度空間における磁力線平行方向ドリフト周波数の符号反転により輸送の向きが変わることといった、不純物粒子ピンチの物理機構を明らかにした。

電子スケール効果に関しては、マルチスケール相互作用による輸送抑制効果を発見し、核燃焼プラズマにおける特定温度領域での輸送低減の可能性を示した。JT-60U 実平衡配位での解析でも同様の機構が生じることを示した。また、電子スケール効果の実効散逸モデルを新たに提案した。

本研究課題の成果は、Nature Communications 誌、Physical Review Letters 誌といったトップジャーナルを始め、8 編の査読付き学術論文として結実した。また、国際原子力機関(IAEA)核融合エネルギー会議におけるオーバービュー講演や複数の招待講演にみられるように、本研究は国内外で高く評価されており、アジア太平洋物理学会連合プラズマ物理分科会(AAPPS-DPP)の Young Researcher Award (U40)、および、文部科学大臣表彰若手科学者賞の受賞へもつながった。

4. 今後の課題・予定

不純物輸送に関しては、影響する磁力線平行方向ドリフト周波数の符号反転を引き起こす機構が多様にあり得ることから、プラズマパラメータによる粒子ピンチの向きの制御の可能性が提起された。電子スケール効果については、統計的時系列データ解析を用いた一般化 Langevin モデリングや、輸送コードへの適用と核燃焼プラズマへの外挿を見据えたマルチフィデリティ乱流輸送モデリングといった、新たな問題提起と着想が得られており、今後さらなる研究の発展が期待される。

5. 成果リスト

査読付き学術論文 — 8 編

- [1] Shaokang Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, and Ö.D. Gürçan, “Reversal of the parallel drift frequency in anomalous transport of impurity ions”, Phys. Rev. Lett., accepted (2024).
- [2] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Multi-scale gyrokinetic simulations of JT-60U L-mode plasma: reduction of the ion scale energy loss due to the nonlinear coupling with the electron scale turbulence”, Nucl. Fusion **64**, 036014 (2024). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad1f0c>
- [3] M. Honda, E. Narita, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, “Multimodal convolutional neural networks for predicting evolution of gyrokinetic simulations”, Contrib. Plasma Phys. **63**, e202200137 (2023). <https://doi.org/10.1002/ctpp.202200137>
- [4] T.-H. Watanabe, S. Maeyama, and M. Nakata, “Stabilization of trapped electron mode through effective diffusion in electron temperature gradient turbulence”, Nucl. Fusion **63**, 054001 (2023). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/acc192>
- [5] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, and A. Ishizawa, “Multi-scale turbulence simulation suggesting improvement of electron heated plasma confinement”, Nat. Commun. **13**, 3166 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30852-0>
- [6] J. Citrin, S. Maeyama, C. Angioni, N. Bonanomi, C. Bourdelle, F. Casson, E. Fable, T. Görler, P. Mantica, A. Mariani, M. Sertoli, G. Staebler, T.-H. Watanabe, “Integrated modelling and multiscale gyrokinetic validation study of ETG turbulence in a JET hybrid H-mode scenario”, Nucl. Fusion **62**, 086025 (2022). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac7535>
- [7] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Existence of finite and anisotropic heavy ion parallel compressibility pinch in the gyrokinetic turbulence”, Phys. Rev. Res. **4**, 043156 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.043156>
- [8] Shaokang Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, Nucl. Fusion **62**, 064003 (2022). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac4557>

招待講演 — 国際 5 件, 国内 2 件

- [9] S. Maeyama, “Cross-scale interactions between trapped electron mode and electron-temperature-gradient driven turbulence”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2023), Nagoya, Japan, November 16, 2023.
- [10] S. Maeyama, N.T. Howard, J. Citrin, T.-H. Watanabe, T. Tokuzawa, “Overview of multi-scale turbulence studies covering ion to electron scales in magnetically confined fusion plasma”, 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2023), London, UK, October 17, 2023.
- [11] 前山伸也, “核燃焼プラズマにおけるマルチスケール乱流相互作用”, プラズマシミュレーションポジウム 2023, 核融合研, 2023 年 9 月 27 日.
- [12] 前山伸也, “核融合プラズママルチスケール乱流の 5 次元ジャイロ運動論シミュレーション”, 第 2 回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会「富岳百景」, オンライン, 2023 年 3 月 8 日.
- [13] S. Maeyama, “Multi-scale plasma turbulence simulations with the gyrokinetic simulation code GKV”, The Platform for Advanced Scientific Computing Conference 2022 (PASC22), Basel, Switzerland, June 27-29, 2022.
- [14] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, A. Ishizawa, “Gyrokinetic Simulations of Cross-Scale Interactions between Electron Temperature Gradient and Trapped Electron Modes on the Supercomputer Fugaku”, 30th International Toki Conference (ITC30), virtual, November 17, 2021.
- [15] S. Maeyama, “Exploring multi-scale turbulent interactions in high electron temperature burning plasma”, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), e-conference, September 28, 2021.

口頭発表・ポスター発表 — 国際 9 件, 国内 11 件

- [16] 前山伸也, “非線形自己回帰ガウス過程回帰を用いたプラズマ乱流輸送モデリング”, 情報・システム研究機構 (ROIS) 戦略的研究プログラム 2023 年度シンポジウム, 統計数理研究所, 2024

年 1 月 30 日.

- [17] 前山伸也, “原型炉級プラズマにおけるマルチスケール乱流輸送シミュレーション”, 第 40 回プラズマ・核融合学会年会, 岩手, 2023 年 11 月 27 日.
- [18] 前山伸也, 本多充, 成田絵美, “非線形自己回帰 Gauss 過程回帰の乱流輸送モデリングへの応用”, 日本物理学会第 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16 日.
- [19] 前山伸也, 渡邊智彦, “電子温度勾配不安定性に対するイオン Bernstein 波の影響の検討”, 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日.
- [20] 前山伸也, “核融合プラズママルチスケール乱流の 5 次元ジャイロ運動論シミュレーション”, 第 2 回富岳成果創出加速プログラム研究交流会「富岳百景」, オンライン, 2023 年 3 月 8 日.
- [21] 前山伸也, “マルチスケール乱流相互作用による電子加熱プラズマの閉じ込め改善”, 核融合フォーラムシミュレーションクラスターサブクラスター合同会合, オンライン, 2022 年 12 月 28 日.
- [22] 前山伸也, 渡邊智彦, “電子・イオン系マルチスケール乱流シミュレーション”, 第 39 回プラズマ・核融合学会年会, 富山, 2022 年 11 月 25 日.
- [23] Shaokang Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, "Multiscale simulation of JT-60U L-mode plasma", Japan-Korea Workshop on Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, virtual, November 17 (2022).
- [24] Shaokang Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, "Coexistence of heavy ion parallel and perpendicular compressibility pinch in gyrokinetic turbulence", 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP), virtual, October 13 (2022).
- [25] S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “New algorithm for solving sheared flows in local flux-tube gyrokinetic simulations”, 27th International Conference on Numerical Simulations of Plasmas (ICNSP2022), virtual, August 30-September 2 (2022).
- [26] Shaokang Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, "Existence of finite and anisotropic heavy ion parallel compressibility pinch in gyrokinetic turbulence", 第 27 回 NEXT 研究会, 京都大学, 2022 年 8 月 9 日.
- [27] 前山伸也, “核燃焼プラズマに向けたマルチスケール乱流輸送現象の外挿性”, 第 27 回 NEXT 研究会, 京都大学, 2022 年 8 月 9 日.
- [28] S. Maeyama, “Cross-scale interactions between ion and electron-scale turbulence in magnetized plasmas”, JPP Frontiers of Plasma Physics Colloquium, virtual, May 26 (2022).
- [29] S. Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, “Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear”, 第 19 回核燃焼プラズマ統合コード研究会, オンライン開催, 2022 年 1 月 6 日.
- [30] S. Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, 30th International Toki Conference (ITC30), virtual, November 18, 2021.
- [31] 前山伸也, 渡邊智彦, “スーパーコンピュータ「富岳」を用いた補足電子モードと電子温度勾配モードのマルチスケール乱流シミュレーション”, 日本物理学会 2021 年秋季大会, オンライン開催, 2021 年 9 月 22 日.
- [32] S. Xu, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, Japan-Korea Workshop on Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasma, virtual, August 27, 2021.
- [33] S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Multi-scale simulations of trapped electron mode and electron temperature gradient mode turbulence on the supercomputer Fugaku”, Joint workshop of Asia-Pacific Transport Working Group and US-EU Transport Task Force 2021, virtual, July 7, 2021.
- [34] S. Maeyama, “Gyrokinetic simulations of multi scale turbulence on the supercomputer Fugaku”, IFERC Workshop on GPU Programming 2021, virtual, June 14, 2021.
- [35] S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Cross-Scale Interactions Between Trapped-Electron-Mode and Electron-Temperature-Gradient-Mode Turbulence”, 28th IAEA Fusion Energy Conference, virtual, May 14, 2021.