

電子・イオン系マルチスケール乱流シミュレーション Multi-scale simulations of electron and ion-scale turbulence

前山伸也
MAEYAMA Shinya

名大理
Nagoya Univ.

1. はじめに

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける粒子・熱の閉じ込めを議論するために、ジャイロ運動論に基づくプラズマ乱流シミュレーションが日常的に行われるようになって久しい。実験結果の解析に用いる場合、実験結果に基づく平衡配位を仮定し、そこで生じる微視的乱流を局所フラックスチューブモデルの下でシミュレーションを行う。こうした局所的アプローチは、輸送モデルを構築し、統合コードにおける輸送シミュレーションを行うことで分布の予測に利用しようという炉設計活動とも親和性が高い。

上記のような研究活動において、イオンLarmor半径程度で生じる微視的不安定性を対象としたジャイロ運動論的シミュレーションが主に行われてきたが、我々の研究を含む2015年頃の大規模数値シミュレーションにより、より微細な電子Larmor半径スケールの微視的不安定性が、イオンスケールの乱流とのマルチスケール相互作用を介して乱流輸送に影響を与えることが示唆された。以降、電子スケール効果に関して、数値シミュレーション研究、実験との比較研究がなされ、徐々にその普遍的理解が見えつつある。本講演では、シンポジウム”環状プラズマシミュレーションの現状と展望”の趣旨に鑑み、電子・イオン系マルチスケール乱流シミュレーションのこれまでの理解と最近の進展、今後の課題について述べる。

2. 高性能計算(HPC)アプリケーションとしてのジャイロ運動論的シミュレーション

高い時空間分解能を必要とするマルチスケール乱流シミュレーションを実現するには、スーパーコンピュータの性能向上のみでは不十分であり、演算性能を最大限に引き出すシミュレーションコードの開発が不可欠である。

名古屋大学・核融合科学研究所・京都大学が中心となり開発を進めているジャイロ運動論

的シミュレーションコードGKV[1,2]は、局所フラックスチューブ配位における分布関数および電磁揺動の時間発展を摂動ジャイロ運動論方程式に基づいて記述する。スペクトル法および差分法により5次元位相空間を格子状に分割するEuler型解法を採用し、MPIとOpenMPによりハイブリッド並列化されている。

GKVでは計算のボトルネックとなるノード間通信を最小化するために、区分化プロセス配置、通信・演算オーバーラップなどの工夫を施すことで、「京」コンピュータでの高い並列性能を達成した[2]。これに加えて、さらにノード間バンド幅対CPU演算性能比が低下する「富岳」に向けて、並列スペクトル計算の通信最適化[3]およびMPI通信フリー反復法による衝突項陰解法[4]を開発し演算密度を向上させた。これにより、富岳36,864ノード(1,769,472コア)に対し、7.6 PFLOPS、理論ピーク演算性能比6.1%、並列効率68.3%の良好なスケーリングを実現した。「富岳」を活用することで、「京」時代よりもさらに計算コストが高い多粒子種マルチスケール乱流の研究が可能となった。

3. 電子・イオン系マルチスケール乱流輸送

3.1 これまでの研究に関するレビュー

本節では、電子・イオン系マルチスケール乱流相互作用に関する一連の研究成果を振り返ってみよう。

第1の物理機構は、長波長のイオン温度勾配(ITG)駆動乱流による短波長の電子温度勾配(ETG)駆動乱流の抑制である。これは電磁的ITGモードにおいても[5]、Alcator C-Mod[6]、DIII-D[7,8]、JET[9]などの多くの実験配位解析でも観測されており、基本的なマルチスケール相互作用機構であるといえる。一方、ITGモードの成長率が安定限界に近い場合、第2の物理機構として、ETG乱流による帯状流シアの減少とそれによるITG乱流輸送の増大が報告されている[5,6]。さらに、ITGモード以外のイオンスケール

ル不安定性に対する研究も展開されている。ASDEXコア部様パラメータを用いた研究では、第3の物理として、ETG乱流による微視的ティアリングモード(MTM)の抑制が報告されている[10]。一方、ペDESTAL部パラメータでの解析ではMTMとETGが共存しうるとの報告もある[11]。類似の機構の第4の物理として、ETG乱流が捕捉電子モード(TEM)の抑制に働くという結果が得られている[12]。これらに共通する物理描像として、あるスケールの乱流が別のスケールの乱流・流れ構造を典型的に減衰させるように働く、相互阻害性を持つという普遍的描像が見えつつある。

マルチスケール乱流は、実験的に観測される熱輸送の説明という観点からも重要と考えられており、Alcator C-ModのLモード放電[6]、Hモード放電[13]、DIII-DのITERベースライン放電[7,14]、JET[9]などの解析でマルチスケール相互作用の重要性が指摘されている。また、TCV, ASDEX Upgrade, JETの装置間比較研究からは、電子温度勾配が高い場合のstiffな電子熱輸送の原因としてETGが候補とされており、電子スケール効果を含むマルチスケール乱流シミュレーションによってそのトレンドが説明でき得る[15]。

マルチスケール相互作用、特に、電子スケール効果がいつ重要になるかという判別条件は、未だ十分に確立されていない。経験則や帯状流混合モデル[16]、ExB速度の磁力線平行方向シアモデル[17]などからは、ETGモード成長率(γ_{ETG})がITGモード成長率(γ_{ITG})より大きく、波数 k_y 依存性も考慮して、 $\max(\gamma_{ETG}/k_y) > \max(\gamma_{ITG}/k_y)$ の場合にETG乱流の影響が無視できないと見積もられる。しかし、この判別条件が十分に満たされていても、ETGが強く抑制するケースも報告されており[8,18]、更なる理解の進展が望まれる。

3.2 最近の進展: マルチスケール乱流輸送現象の核燃焼プラズマに対する外挿性

実験との比較研究によってマルチスケール相互作用を検証しようという機運が世界的に高まる一方で、核燃焼プラズマは、電子、重水素・三重水素燃料イオン、ヘリウム核燃焼灰などから成る多粒子種混合プラズマであること、 α 粒子による電子加熱が支配的な高電子温度プラズマであることといった、既存実験装置とは異なるプラズマパラメータで特徴づけられる。将来の核燃焼プラズマにおいてもマルチスケール相互作用が働きうるか否かを明らかに

することは、プラズマ閉じ込め性能の外挿性・予測性を議論していくうえで重要な物理課題である。我々の最近の研究では「富岳」を活用して、高電子温度・多粒子種混合プラズマにおけるマルチスケール乱流シミュレーションを実施することで、電子・イオン温度比1を超える高電子温度領域でもETG乱流が影響を与えること、ETG乱流がTEM乱流を抑制することで乱流輸送が低減される温度領域が存在することなどが示された[12]。

4. まとめと今後の課題

電子・イオン系マルチスケール乱流に関する一連の研究から、その物理的理解が深まってきた。プラズマ物理学の観点からは、電子スケール効果が重要となる場合の判別条件やマルチスケール相互作用のモデル化といった課題が、核融合炉開発の観点からは、JT-60SAやITERでのマルチスケール相互作用の評価や、マルチスケール相互作用による閉じ込め改善領域を装置設計に活かせるかといった課題がある。理論的理解を進める上でも、装置設計への応用上もさらなるシミュレーション研究の進展が期待される。

References

1. T.-H. Watanabe, et al., Nucl. Fusion 46, 24 (2006).
2. S. Maeyama, et al., Parallel Comput. 49, 1 (2015).
3. Y. Asahi, et al., Concurr. Comput. Pract. Exp. CCPE 32, e5551 (2019).
4. S. Maeyama, et al., Comput. Phys. Commun. 235, 9 (2019).
5. S. Maeyama, et al., Phys. Rev. Lett. 114, 255002 (2015).
6. N. T. Howard, et al., Nucl. Fusion 56, 014004 (2016).
7. C. Holland, et al., Nucl. Fusion 57, 066043 (2017).
8. T. F. Neiser, T. F. et al., Phys. Plasmas 26, 092510 (2019).
9. N. Bonanomi, et al., Nucl. Fusion 58, 124003 (2018).
10. S. Maeyama, et al., Phys. Rev. Lett. 119, 195002 (2017).
11. M.J. Pueschel, et al., Nucl. Fusion 60, 124005 (2020).
12. S. Maeyama, et al., Nature Commun. 13, 3166 (2022).
13. N. T. Howard, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 60, 014034 (2018).
14. N. T. Howard, et al., Nucl. Fusion 61, 106002 (2021).
15. A. Mariani, et al., Nucl. Fusion 61, 116071 (2021).
16. G. M. Staebler, et al., Phys. Plasmas 23, 062518 (2016).
17. M. R. Hardman, et al., J. Plasma Phys. 86, 905860601 (2020).
18. J. Citrin, et al., Nucl. Fusion 62, 086025 (2022).