

電磁的ジャイロ運動論に基づく高ベータプラズマ乱流シミュレーション High- β Plasma Turbulence Simulation based on Electromagnetic Gyrokinetics

前山伸也, 石澤明宏¹, 渡邊智彦¹, 仲田資季, 宮戸直亮, 井戸村泰宏
Shinya MAEYAMA, Akihiro ISHIZAWA¹, Tomohiko WATANABE¹,
Motoki NAKATA, Naoaki MIYATO, Yasuhiro IDOMURA

原子力機構, 核融合研¹
JAEA, NIFS¹

1. はじめに

JT-60SAや原型炉のような次世代核融合装置では、核融合反応率の向上や閉じ込め磁場の自発形成などの観点から、既存装置よりも高いベータ値での運転が望ましい。高ベータプラズマでは、ドリフト波とアルヴェン波の結合、乱れた磁場構造による粒子・熱輸送、揺動磁場中でのゾーナルフロー減衰などが想定されるため、乱流輸送においても磁場揺動が重要な役割を果たすと考えられる。そのため、静電揺動と磁場揺動を伴う電磁的乱流の物理を理解することは、高ベータプラズマにおける乱流輸送の予測・制御のために必要不可欠である。

微視的不安定性や乱流輸送を記述する第一原理的方程式であるジャイロ運動論に基づいた輸送解析の多くは、これまで低ベータ極限で有効な電子断熱応答モデルを用いて行われてきた。一方、高ベータ領域における電磁的乱流シミュレーションの先行研究によれば、長時間定常乱流状態をシミュレーションしようとするると輸送フラックスの急激な増大が観測されており[1]、この現象が物理に由来するものなのかあるいは数値的問題なのか決着していない等、解決すべき研究課題は多く存在している。

発表者らは電磁的乱流輸送の解析を行うべく、ジャイロ運動論的シミュレーションコードGKV[2]の拡張を進めてきた。電磁的ジャイロ運動論シミュレーションにおける低散逸数値計算手法[3]を開発し、運動論的電子や磁場揺動を含んだ系においても、乱流計算における理論的指標であるエントロピーバランスを高精度で保証する計算が初めて可能となった。また、並行して開発を進めていたペタスケールスーパーコンピュータにおける超並列計算手法[4]を用いることにより、計算コストの高い運動論的電子を含む計算の高速化も実現した。

本研究では、多粒子種・電磁モデルへと拡張

されたGKVコードを用いて、高ベータプラズマにおける電磁的乱流に関するシミュレーション研究を行った。特に、電磁的乱流と静電的乱流の定性的違いを明らかにするために、運動論的バルーニングモード駆動(KBM)乱流(高ベータ、電磁的)について、同程度の成長率を持ったイオン温度勾配不安定性駆動(ITG)乱流(低ベータ、静電的)との比較という観点から詳細な解析を行った。

2. 揺動の内積、ノルム、位相と輸送フラックス

乱流揺動による輸送は揺動場と流体モーメントの積によって評価できる。例えば、径方向への $E \times B$ 流 $\tilde{v}_{Ex} = \tilde{v}_E \cdot \nabla x$ によるエネルギー輸送フラックス Q_E は以下の様に表される。

$$Q_E = \langle \tilde{v}_{Ex}, \tilde{p} \rangle = \sum_{\mathbf{k}} \frac{k_y}{B_0} \|\tilde{\phi}_{\mathbf{k}}\| \|\tilde{p}_{\mathbf{k}}\| \text{Im}[P(\tilde{\phi}_{\mathbf{k}}, \tilde{p}_{\mathbf{k}})] \quad (1)$$

ここで、揺動量の内積、ノルム、位相係数をそれぞれ $\langle \tilde{f}, \tilde{g} \rangle \equiv \int \tilde{f} \tilde{g}^* dx^3 / V$, $\|\tilde{f}\| \equiv \langle \tilde{f}, \tilde{f} \rangle^{1/2}$, $P(\tilde{f}, \tilde{g}) \equiv \langle \tilde{f}, \tilde{g} \rangle / (\|\tilde{f}\| \|\tilde{g}\|)$ と定義した。また、(1)式下段では、 $\tilde{v}_{Exk} = -ik_y \tilde{\phi}_{\mathbf{k}} / B_0$ を用いて、静電ポテンシャル揺動 $\tilde{\phi}_{\mathbf{k}}$ と圧力揺動 $\tilde{p}_{\mathbf{k}}$ のスペクトルとして表した。この様に三次元空間における揺動量の内積として表現することで、熱輸送フラックスにおける揺動振幅の寄与と位相係数の寄与を区別して評価できる。

上記の解析をITG乱流とKBM乱流に適用した結果を図1に示す。(1) KBM乱流による輸送はITG乱流によるものに比べて小さく $[Q_{iE} R_0^2 / \rho_{ti}^2 n_0 T_i v_{ti} = 104.64(\text{KBM}), 15.47(\text{ITG})]$ 、混合長理論に基づき最大成長率とそれを与える波数から評価した輸送係数からは説明困難なこと、(2) ITG乱流に比べてKBM乱流では揺動振幅スペクトルの広がり狭く、かつ、支配的なモードにおける位相係数が小さいことが輸送低減の原因であることが明らかになった。

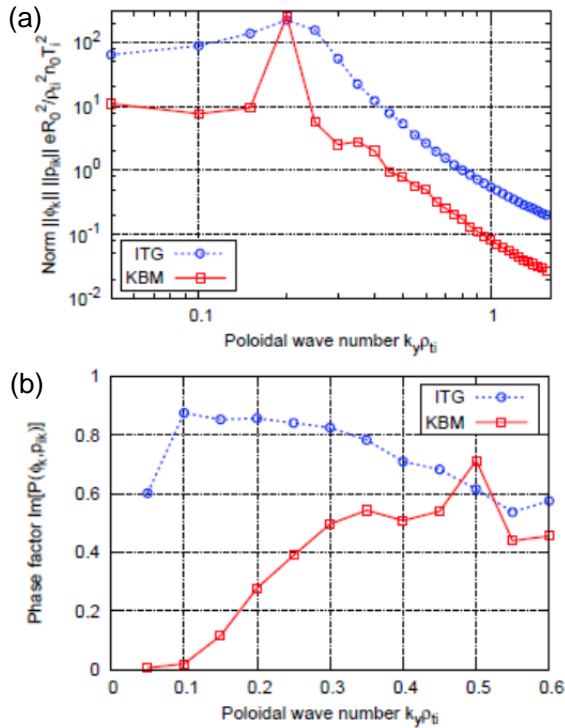


図1. イオンエネルギー輸送フラックスにおける(a)揺動振幅と(b)位相係数の寄与。

3. 粒子と揺動場の相互作用を介したエントロピー伝達

KBM乱流における飽和機構を調べるために、以下に示す揺動エントロピー S_s と電磁エネルギー W の生成と散逸の釣り合いというエントロピーバランスの観点から解析を行った。

$$\frac{dS_s}{dt} = \theta_s + D_s + R_s, \quad \frac{dW}{dt} = - \sum_s R_s \quad (2)$$

ここで、 θ_s は圧力勾配による駆動、 D_s は衝突散逸、 R_s は粒子・場相互作用、添え字の $s = i, e$ は粒子種を表す。特に、定常状態($d/dt \sim 0$)では、 R_s は揺動場を介した粒子種間のエントロピー伝達を表す。

解析結果を図2に示す。ITG乱流では、これまで知られていたように、駆動項による低波数のイオンのエントロピー生成が起こり、 $E \times B$ 流の非線形性により広範な波数領域に伝達され、それらがイオンの衝突散逸と釣り合うことで飽和に至ることが確認された。一方、KBM乱流では、ITG乱流と同様のイオンのエントロピー生成・伝達・散逸過程が起こると同時に、粒子・場相互作用を介したイオンから電子へのエントロピー伝達が起こり、揺動磁場に関する非線形移流により広範な波数領域へと伝達され、それらが電子の衝突散逸と釣り合うという過程が重要であるということが発見された。

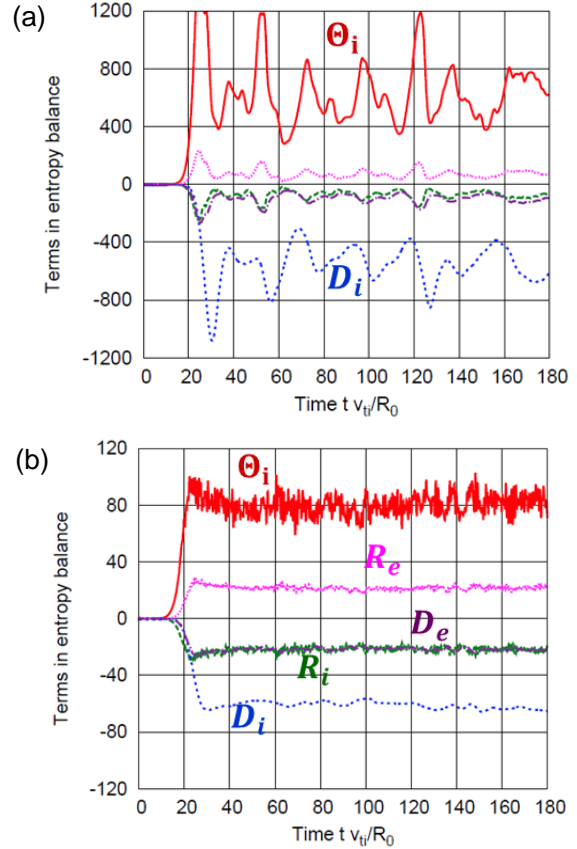


図2. (a) ITG乱流と(b) KBM乱流におけるエントロピーバランスの各項の時間発展。

4. まとめ

本研究では、高ベータプラズマでのKBM乱流の解析を行い、揺動の位相差による輸送低減、場を介した粒子種間エントロピー伝達といったITG乱流とは異なる振る舞いを明らかにした。

謝辞

本研究の一部はHPCI戦略プログラム分野4「次世代ものづくり」の補助を受けた。本研究の計算は東京大学のFX10、国際核融合エネルギー研究センターのHELIOSにおいて行われた。

参考文献

- [1] M. J. Pueschel, P. W. Terry, F. Jenko, D. R. Hatch, W. M. Nevins, T. Görler, D. Told, Phys. Rev. Lett. **110**, 155005 (2013).
- [2] T.-H. Watanabe, H. Sugama, Nucl. Fusion **46**, 24 (2006).
- [3] S. Maeyama, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, N. Nakajima, S. Tsuji-Iio, H. Tsutsui, Comput. Phys. Commun. **184**, 2462 (2013).
- [4] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, Y. Idomura, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, Plasma Fusion Res., in press.