

電子乱流スペクトルのジャイロ運動論的シミュレーション Gyrokinetic simulation of electron turbulence spectrum

河合智賀^{1,2}, 井戸村泰宏², 前山伸也³, 小川雄一¹

Chika KAWAI^{1,2}, Yasuhiro IDOMURA², Shinya MAEYAMA³, Yuuichi OGAWA¹

東大新領域¹, 原子力機構², 名大理³

GSFS, Univ. of Tokyo¹, JAEA², Dept. Sci, Nagoya Univ³

磁化プラズマ乱流は強い閉じ込め磁場の効果により準2次元的な構造を持つ。このような系について、流体近似である Hasegawa-Mima(H-M) 方程式に対する考察からエネルギーの逆カスケードによる長波長の構造、特に帯状流のような非等方な流れが自己組織化によって形成されること、またその特性長や非等方な構造が Rhines スケールによって説明されることが知られている。本研究では、運動論的な効果を含む系におけるこのような物理過程と流れの構造形成の関連を検討するため、電子乱流のエネルギースペクトル構造をジャイロ運動論的シミュレーションによって評価した。

Rhines スケールは、線形モードの実周波数 ω_r と乱流振幅に比例する渦の回転時間 ω_t が競合する波と乱流の境界として与えられる。 ω_r は H-M 方程式ではドリフト波の分散で与えられるが、電子温度勾配駆動 (ETG) モードの場合、H-M 方程式への近似を取る際に無視した温度勾配や磁力線方向の波数などによっても変化を受ける。

これらの効果を検討するため、シングルヘリシティ ($k_{||}/k_y = \text{const.}$) のスラブ配位でのジャイロ運動論 (GK) モデルについて、有限の温度勾配を与えて ETG モードの不安定性を励起した ETG 乱流のシミュレーションを G5D コードを用いて行った。ここで、乱流場の非等方性の度合いを表すパラメータ c_y を次のように定める：

$$c_y = \left\langle \left| \frac{c}{B_0} \hat{\mathbf{y}} \cdot (\hat{\mathbf{z}} \times \nabla \phi) \right|^2 \right\rangle / \left\langle \left| \frac{c}{B_0} (\hat{\mathbf{z}} \times \nabla \phi) \right|^2 \right\rangle \quad (1)$$

ただし $\langle \cdot \rangle$ は体積平均である。 c_y の時間発展について、温度勾配スキャンを行った (図 1)。乱流の振幅が小さい時は、図 2(a) のようにスペクトル平面上の大部分で波の線形分散 (ω_r) が支配的となる。この領域を避けてエネルギーの逆カスケードが進むため、流れの構造が y 方向に細長く伸びた帯状流となり $c_y \sim 1$ に漸近する。急峻な温度勾配による ETG モードの強い不安定性によって乱流の飽和振幅が大きくなると、図 2(b) に示すようにスペクトル空間の全域で乱流 (ω_t) が卓越するため、波の線形分散による非等方な構造の形成が崩れて $c_y = 0.5$ の等方的な構造に遷移することが明らかとなった。

これらの結果から、準定常乱流の構造、特にその非等方性が図 2 で表わされるような波と乱流の競合によって大きな変化を受けると考えられる。

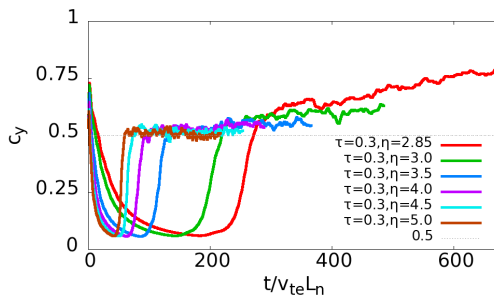


図 1: $c_y(t)$, for several temperature gradient $\eta_e \equiv d \ln n_e(x) / d \ln T_e(x)$.

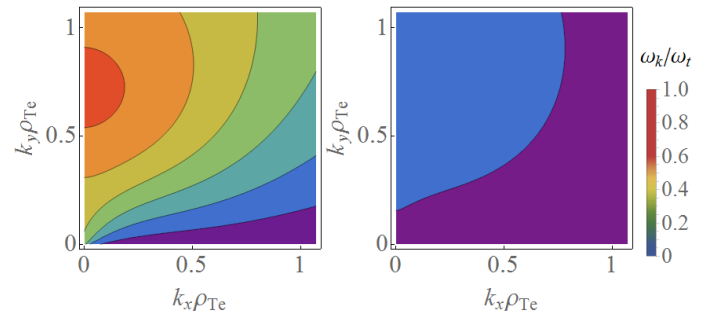


図 2: ω_r/ω_t on (k_x, k_y) plane for GK, a): weak turbulence, b): strong turbulence

[1] A. Hasegawa, Adv. Phys. **34**, 1 (1985).

[2] R. H. Rhines, J. Fluid. Mech. **69**, 417 (1975).

[3] G. K. Vallis, M. E. Maltrud, J. Phys. Oceanogr., **23**, 1346(1993)