

# 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

学生証番号 47-136053 氏名 河合 智賀  
 (指導教員 小川 雄一 教授)

Key Words : Plasma turbulence, Self-organization, Vlasov simulation, Gyrokinetics

磁場閉じ込めプラズマ乱流における帯状流などの構造形成の過程について、準2次元乱流における自己組織化との関連が指摘されている[1]。本研究では、電子スケール乱流のジャイロ運動論的Vlasovシミュレーションを行い、自己組織化による流れの構造形成とエネルギースペクトルの関連性をプラズマ乱流の流体近似であるHasegawa-Mima(H-M)方程式との関連から検討した。

本研究では背景磁場のシアと曲率を無視したシアレスラブ配位において、磁場揺動を無視した静電近似と長波長近似 $k_{\perp} \rho_{te} < 1$ 、さらにイオン密度の断熱近似を仮定したVlasov-Poisson方程式系を解析に用いた。

Vlasov-Poisson系にて磁力線方向の運動と有限Larmor半径効果を無視した極限を取ると、2次元回転流体乱流を記述するH-M方程式を得る。 $\partial_t(\tau\phi - \rho_s^2 \nabla_{\perp}^2 \phi) + (\mathbf{b} \times \nabla \phi) \cdot \nabla(\rho_s^2 \nabla_{\perp}^2 \phi - \ln n_0) = 0$  (1) ( $\tau \equiv T_e/T_i$ ;  $\rho_s^2 = 1 + \lambda_{De}^2/\rho_{te}^2$ )

H-M系はエネルギー $-\frac{1}{2} \int (\tau\phi^2 + \rho_s^2 |\nabla\phi|^2) dV$  とエンストロフィー $-\frac{1}{2} \int (\tau|\nabla\phi|^2 + \rho_s^2 |\nabla^2\phi|^2) dV$  という2つの保存量を持つ。このため3次元流体乱流と異なり2次元流体乱流では、エネルギースペクトルにおいてそれぞれ異なる冪乗則に従う2つの慣性領域が見られる[2]。  $E(k_{\perp}) \propto k_{\perp}^{-5/3}$  for  $k < k_s$ ,  $\propto k_{\perp}^{-3}$  for  $k > k_s$  (2),  $k_s$ はエネルギーソースの存在する波数領域である

ドリフト波の線形分散と渦の回転時間の釣り合いから、エネルギーの逆カスケードが留まり乱流スペクトルにピークを作る波長(Rhinesスケール)が求められる[3]。  $k_{c,x} = (\beta/U)^{1/2} \cos\theta \sin^{1/2}\theta$ ,  $k_{c,y} = (\beta/U)^{1/2} \sin^{3/2}\theta$  (3)  $\beta \equiv |\nabla \ln n_0|$  ( $\equiv L_n^{-1}$ ):密度勾配長,  $U = \epsilon^{1/2}$  は乱流場の平均速度である。

計算は日本原子力研究開発機構で開発されたジャイロ運動論的VlasovコードであるG5Dを用いた[4]。

初期条件として与えた擾乱がLandau減衰するシミュレーションにおいて、式(1)に現れる2つのパラメータ $\tau, \rho_s$ を変化させるとRhinesスケールの波数近傍での線形分散の強さが変わり、自己組織化によって長波長の構造が現れた時の構造が変化することが見出された。図1(b)はRhinesスケール $k_c$ 付近での線形分散が強くと式(3)に従った非等方なエネルギースペクトルの構造が発達しているが、線形分散を小さくした設定での図.1(a,c)は等方的な乱流構造が得られた。

ETG乱流の飽和振幅の異なる2ケースについて、非線形飽和段階でのスペクトルを図2に示す。図2(b)に示す飽和振幅の大きなケースでは、エネルギーとエンストロフィーのデュアルカスケードによる慣性領域が明らかとなり、H-M方程式の持つ性質との一致が確認された。一方、図2(a)に示す飽和振幅の小さいケースではRhinesスケールが短波長側にシフトするため、エネルギーの逆カスケードによる慣性領域が明確でない。また線形不安定なモードとの直接相互作用によると思われる帯状流の形成が確認された。

本研究では磁化プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーションによって減衰乱流とETG乱流におけるエネルギースペクトルの詳細な解析を実施し、

- 2次元エネルギースペクトルの長波長領域において、H-M方程式の理論解析で得られたものと同様なダンベル型の非等方な構造がエネルギーの逆カスケードによって形成されたこと
- 電子とイオンの温度比、Debye長とジャイロ半径の比(～プラズマ密度)、乱流場の飽和振幅を変えた時にスペクトルの非等方性をもたらす自己組織化現象が大きく変化すること

を確認した。

参考文献

- [1]: A. Hasegawa: Adv. Physics. **96**,1(1985)  
 [2]: R. H. Kraichnann, Phys. Fluids, **10**, 1417(1967)  
 [3]: P. B. Rhines: J. Fluid Mech. **69**, 417(1975).  
 [4]: Y. Idomura, et al., J. Compt. Phys. **226** 244(2007)

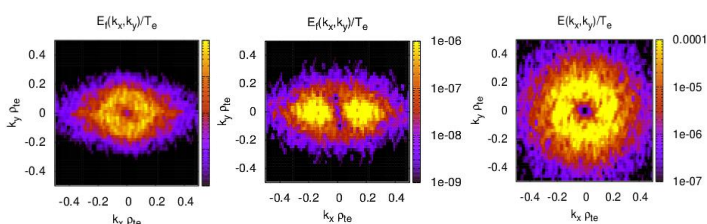


図.1 2次元エネルギースペクトル $E(k_x, k_y) \equiv (\tau + \rho_s^2 k^2)\phi_k$ , 準定常状態  
 (a).  $\tau = 1, \rho_s^2 = 11$  (b).  $\tau = 0.3, \rho_s^2 = 11$  (c).  $\tau = 0.3, \rho_s^2 = 2$

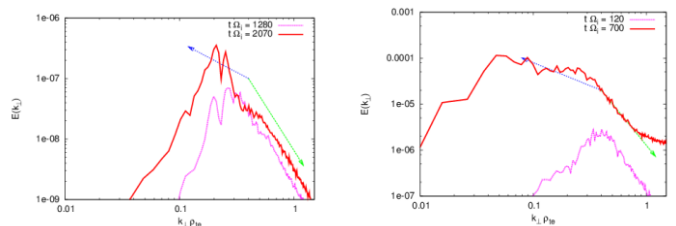


図 2. 1次元エネルギースペクトル:ETG 乱流  
 左;  $\frac{q_{el}\phi}{T_e} \sim 0.2\%$ , 右  $\frac{q_{el}\phi}{T_e} \sim 5\%$