

## 論文の内容の要旨

論文題目：自己組織化によって磁化 プラズマ乱流に生じる構造形成の機構  
(The mechanism of structure formation through self-organization in magnetized plasma turbulence)

氏 名 河合智賀

### はじめに

プラズマ核融合の実現のためには高温プラズマを炉内に閉じ込めて維持する必要があり、熱/粒子輸送による損失をいかに低減させるかが重要な課題である。核融合プラズマにおける輸送現象の最も基礎的な過程はプラズマ中の荷電粒子同士のCoulomb散乱によるランダムウォーク型の拡散によるもので、古典輸送理論として知られている。しかしながら、ほとんど全ての磁場閉じ込めプラズマ実験で古典輸送から予測されるものを上回る輸送係数(異常輸送)が観測されている。この高い輸送係数はプラズマ中に励起される様々な微視的不安定性によって駆動される乱流が促進しているものと考えられており、「乱流輸送」と呼ばれている。

トカマクなどのトラス型装置ではイオン/電子温度勾配不安定性(ITG/ETG)駆動乱流がイオン/電子熱輸送に大きな影響を与えられている。ITG/ETGモードは温度勾配によって不安定化されるドリフト波のモードで、閉じ込め磁場の構造(磁気シアや曲率の違い)からスラブ/トロイダルモードという異なる分散のモードが存在する。ITGモードを記述する方程式において時空間スケールの規格化をイオンLarmor半径、イオンサイクロトロン周波数から電子Larmor半径、電子サイクロトロン周波数に置き換えると電子熱輸送の原因となるETGモードが得られる。

一方、磁化プラズマの実験で特定の放電条件においてイオンの輸送係数が低減される現象が発見されており、輸送の低減に伴う急峻な温度勾配がプラズマ周辺部において形成されるH-mode[1]や、より炉心領域に近い場所で形成される内部輸送障壁(ITB) [2]が観測された。これらの現象について、トラス形状のポロイダル/トロイダル方向に一様な流れの構造である帯状流(ZF)の形成との関連が議論されてきた[3]。帯状流は乱流の渦構造をポロイダル方向に細長く引き伸ばし、これらの渦の径方向への相関を断ち切ることで輸送の低減に寄与する。イオン熱/粒子輸送についてはITB領域での輸送の低減が顕著に観測されるが、電子系ではイオン系と比べて輸送低減の程度は弱い。特にトロイダルETG乱流では径方向に細長く伸びたストリーマ構造が形成され輸送係数を増大させる、という過程が指摘された[4]。この原因として、ITG/ETGモードの線形分散においてZFモードに対する応答が異なるため電子系でZFが形成されにくいという点が挙げられる。一方、弱/負磁気シア領域のようにスラブETGモードが励起される領域においてはITGと同様なZFが形成され輸送が低減する、という指摘がある[5]。

電子スケール帯状流のような構造が磁場閉じ込めプラズマ中に形成される機構として考えられる過程の一つが自己組織化現象である。2次元系乱流は3次元系と異なり乱流を駆動する波長スケールから系に注入されたエネルギーがより長波長の構造へと輸送される逆カスケードが存

在する[7]。これにより大域的な構造が自発的に形成される現象を自己組織化という[6]。

自己組織化によるZF形成は2次元回転乱流系における線形分散であるRossby波の影響が関連していると考えられている。しかしながらこのような線形分散が無い系でも、磁化プラズマ中のドリフト波乱流を記述する流体モデルであるHasegawa-Mima方程式系(H-Mモデル)で断熱応答項に由来する渦構造の結晶化のような過程も存在する[7]。本研究では磁化プラズマ電子乱流でのZFの構造形成についてジャイロ運動論的Vlasov方程式(GKモデル)[8]に基づく高解像度の乱流シミュレーションによるスペクトル構造の解析を行い、スラブ/トロイダルETG乱流における自己組織化現象を明らかにした。

### 臨界パラメータ $k_c/k_\lambda$ : 2つの自己組織化過程の競合

スラブ配位におけるジャイロ中心電子分布関数  $F(\mathbf{R}, \mathbf{v}_\parallel, \mu; t)$  が従うジャイロ運動論的Vlasov-Poisson方程式系にて静電近似(磁場揺動は十分小さく無視)、揺動成分について長波長近似 ( $k_\perp^2 \rho_{Te}^2 \ll 1$ )、イオン密度揺動について断熱応答 ( $\delta n_i = n_0 e \phi / T_e$ ) として得た系

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left( \mathbf{v}_\parallel \mathbf{b} + \frac{c}{B_0} \mathbf{b} \times \nabla \times \langle \phi \rangle_\alpha \right) \cdot \nabla F - \frac{q_e}{m_e} \mathbf{b} \cdot \nabla \langle \phi \rangle_\alpha \frac{\partial F}{\partial v_\parallel} = C(F) \quad (1)$$

$$- \left( \nabla^2 + \nabla_\perp \cdot \left( \frac{\rho_{Te}^2}{\lambda_{De}^2} \nabla_\perp \phi + \frac{1}{\lambda_{Di}^2} \phi \right) \right) = 4\pi e \left( \int F \delta[(R + \rho) - x] d^6 Z - n_0 \right) \quad (2)$$

について、これを流体近似したHM方程式(を規格化した表式)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s^2 \nabla_\perp^2 \phi - \tau \phi) + (\mathbf{b} \times \nabla \phi) \cdot \nabla (\rho_s^2 \nabla^2 \phi - \ln n_0) = 0 \quad (3)$$

は断熱スケール  $k_\lambda \rho_s = \tau^{-1/2}$  を境として特徴が変化する。  $k \gg k_\lambda$  でのドリフト波線形分散  $\omega_r = (L_n^{-1} k_y) / k_\perp^2 \rho_s^2$  と、非線型相関周波数を乱流渦の回転周波数  $\omega_t = U k_\perp$  (ただし  $U$  は乱流場の平均速度) の釣り合いをとると、逆カスケードの過程が線形分散によって阻害されることによりエネルギーが波数空間上において集中する波数領域としてRhinesスケール  $k_c \rho_s = L_n^{-1/2} U^{-1/2}$  を得る。このとき  $k_c$  の波数空間上の非等方性によりZFが励起される。一方、  $k \ll k_\lambda$  の長波長では慣性項  $\partial_t (\rho_s^2 \nabla_\perp^2 \phi - \tau \phi) \rightarrow \partial_t (-\tau \phi)$  と変化し、  $k_\lambda \rho_s = \tau^{-1/2}$  よりも長波長へのエネルギー逆カスケードが遅延することで渦構造が結晶化する。この場合は  $k_\lambda$  の等方的な構造に従い等方的な渦構造が維持される。両者の競合から臨界パラメータ

$$k_c/k_\lambda = L_n^{-1/2} U^{-1/2} \tau^{-1/2} \quad (4)$$

によってプラズマ乱流における自己組織化現象が決定されることが考えられる。

### スラブ ETG 乱流の自己組織化

はじめに GK モデルで ETG モードが線形安定となるプラズマ平衡パラメータのもとで一様等方な乱流初期擾乱が緩和する減衰乱流シミュレーションを実施し、H-M モデルにおける減衰乱流と比較して同様な ZF の自己組織化がおきることが分かった。次に GK モデルにおいて初期擾乱を変化させる計算を行い、乱流場の振幅によって ZF が形成されるか等方的な渦構造が維持される

かが増加することが明らかとなった。このとき以下のような関係性を見出した。

- 小振幅ケース：ZF が形成され、その波数は Rhines スケール  $k_c$  に対応する。
- 大振幅ケース：等方的な渦構造が形成され、平均波数が従う時間依存性のべき乗則は断熱スケール  $k_\lambda$  による自己組織化と対応する。

以上より磁化プラズマ電子乱流における自己組織化現象の存在を示した。

次に GK モデルで ETG 乱流シミュレーションを実施し、その構造形成機構を明らかにした。初期擾乱の線形 ETG 不安定性による成長は十分振幅が大きくなった時点で非線型相互作用によって飽和するが、その過程の初期段階において線形モードの持つストリーマ構造が変調不安定性によって破壊され、ZF が励起されることにより飽和することを示した。一方、この乱流が長時間にわたって非線型発展したときの準定常な構造はプラズマ平衡パラメータに応じて変化し、ETG モードの不安定性の大小に応じて

- 弱い ETG 乱流：ZF が形成され、電子熱輸送がクエンチする
  - 強い ETG 乱流：等方的な渦構造が形成され、電子熱輸送は高いレベルで維持される
- という違いが生じた。この変化は Rhines スケール  $k_c$  と断熱スケール  $k_\lambda$  の比で定義される臨界パラメータ  $k_c/k_\lambda = L_n^{-1/2} U^{-1/2} \tau^{-1/2}$  によって説明できることが分かった。

### トロイダル ETG 乱流の自己組織化

これまで構造形成の機構が十分に明らかにされてこなかったトロイダル ETG 乱流について、スラブ配位について得られた知見を元に帯状流の形成機構を解析した。順磁気シア配位のトロイダル ETG 乱流では径方向に細長く伸びたストリーマ構造が卓越する一方、弱/逆磁気シア配位では電子スケールの ZF が形成されるとこれまでに報告されてきた。本研究ではトロイダル系の負磁気シア配位におけるゼロ磁気シア領域を模した系について乱流の構造形成を自己組織化の観点から検討した。

はじめにトロイダル ETG モードの線形解析を行い、局所解析と異なり大域的な解析ではモードが励起される径方向位置が増加する影響により線形分散が生じることを発見した。この効果のため、スラブ ETG 乱流と同様の ZF 形成が期待されることを議論した。これを元に大アスペクト比  $R_0/a_0 = 100$  の準スラブモデルと  $R_0/a_0 = 2.8$  のトロイダルモデルを比較し、減衰乱流計算と小振幅のトロイダル ETG 乱流計算においてトロイダルモデルでも準定常の発達した乱流において ZF が形成されることを見出した。

トロイダルモデルにおいて自己組織化現象が乱流構造の自己組織化に与える影響を議論するため、プラズマ平衡パラメータ (乱流振幅、イオンと電子の温度比  $\tau = T_e/T_i$ ) を変化させる ETG 乱流計算を実施し、次のような関係性を発見した。

- 振幅スキャン
    - 低  $\tau$  の場合、乱流振幅の変化に応じて
      - 小振幅ケース：ZF 形成
      - 大振幅ケース：等方的乱流渦の形成
- となることを示した。これはスラブ ETG 乱流での振幅スキャンと同様の結果である。

- 温度比スキャン

乱流振幅が小振幅の場合、温度比 $\tau$ の変化に応じて

- 低 $\tau$ ケース：ZF 形成
- 高 $\tau$ ケース：等方的乱流渦の形成

という傾向を得た。また小振幅/大振幅ケースの双方において渦構造の平均波数 $k_E$ が

- 低 $\tau$ ケース： $k_E$ が小さい長波長構造
  - 高 $\tau$ ケース： $k_E$ が大きい短波長構造
- となることを示した。

このような乱流構造の形成について、乱流構造が ZF を形成するか等方的な渦構造を形成するかが臨界パラメータ $k_c/k_\lambda$  によって説明されることを示した。

以上のスラブ/トロイダル ETG 乱流の考察から、これらの乱流構造における自己組織化の存在と ZF の構造形成を決定する臨界パラメータ $k_c/k_\lambda$  の影響を明らかにした。

参考文献：

- [1]: F. Wagner, et. al., Phys. Rev. Lett. 49, 1408 (1982).
- [2]: H. Shirai, et. al., Nucl. Fusion 39, 1713 (1999).
- [3]: P. H. Diamond, et. al., Plasma Phys. Control. Fusion 47, R35 (2005).
- [4]: F. Jenko, et. al., Phys. Plasmas 7, 1904 (2000).
- [5]: Y. Idomura, S. Tokuda, and Y. Kishimoto, Nucl. Fusion 45, 1571 (2005).
- [6]: A. Hasegawa, Advances in Physics 34, 1 (1985).
- [7]: M. Ottaviani and J. A. Krommes, Physical Review Letters 69, 4 (1992).
- [8]: A. J. Brizard and T. S. Hahm, Rev. Mod. Phys. 79, 421 (2007).

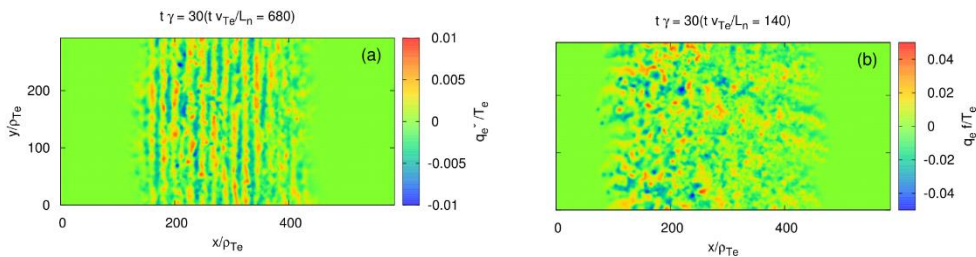


図 1. スラブ ETG 乱流計算：乱流振幅の異なる 2 ケースにおける静電ポテンシャル $q_e\phi/T_e$  実空間構造

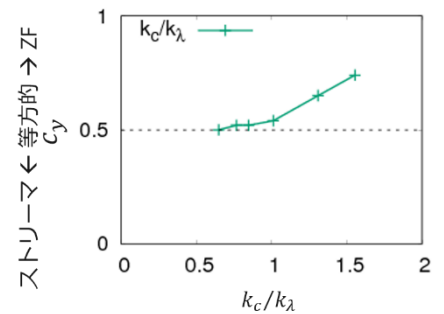
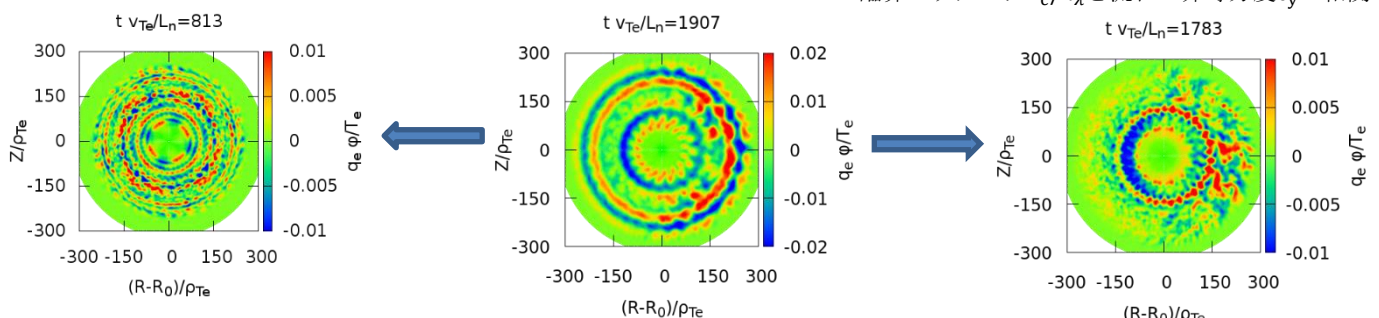


図 3. スラブ ETG 乱流 振幅スキャン 臨界パラメータ $k_c/k_\lambda$  と流れの非等方度 $c_y$ の相関



(a) : 準スラブ配位 アスペクト比 $R_0/a_0 = 100$ , (b) : アスペクト比 $R_0/a_0 = 2.8$ , 温度比 $\tau \equiv T_e/T_i = 0.3$  (c) : 温度比スキャン, 温度比 $\tau = 3.0$

図 3. トロイダル ETG 乱流計算：乱流振幅の異なる 2 ケースにおける静電ポテンシャル $q_e\phi/T_e$  実空間構造