

簡約化 MHD コードを用いた乱流粒子流束解析 Analysis of turbulent particle flux by using reduced MHD code

轟晴彦¹, 糟谷直宏^{1,2}, 矢木雅敏³
TODOROKI Haruhiko¹, KASUYA Naohiro^{1,2}, YAGI Masatoshi³

¹九大総理工, ²九大応力研, ³量研機構
¹IGSES, Kyushu Univ., ²RIAM, Kyushu Univ., ³QST

核融合プラズマにおいて、高密度プラズマを維持する目的でペレットによる粒子供給が行われている。炉心プラズマ中心近傍にまで粒子を供給するには、有効な粒子ピンチ効果の機構を理解することが必要である。イオン温度勾配不安定性が粒子ピンチ効果を持つことが理論的に知られている[1]。さらに密度勾配を反転させると電子系の不安定性も内向き粒子ピンチを励起可能であることが指摘されている[2]。局所モデルに限定されることなく、グローバルモデルにおいても有効な輸送機構が必要である。そこで、5 場簡約化磁気流体モデルを用いたグローバルシミュレーションで乱流粒子流束の評価を行っている。ここではペレット入射直後のプラズマ端近傍に密度こぶ状分布がある状態のシミュレーションを行い、密度勾配が反転した領域での粒子対流輸送の向きと大きさを評価する。

シミュレーションには簡約 MHD コード R5F を使用する。電位、ベクトルポテンシャル、磁力線方向流速、密度、電子温度の 5 場を、渦度方程式、オームの法則、磁力線方向のイオン運動方程式、連続の式、電子温度の発展方程式を用いて空間 3 次的に時間発展を解く[3]。モデル方程式は長さを小半径、時間をポロイダルアルフベン時間で規格化している。トカマクプラズマ計算パラメータは以下のものを使用する：大半径 $R = 1.5 m$ 、小半径 $a = 0.5 m$ 、プラズマベータ $\beta = 10^{-2}$ 、逆アスペクト比 $\varepsilon = 0.33$ 、規格化されたイオンのスキン長 $\delta = 10^{-2}$ 、抵抗率 $\eta_{\perp} = 10^{-3}$ 、 $\eta_{\parallel} = 10^{-5}$ 、熱拡散係数 $\chi_{e\perp} = 10^{-5}$ 、 $\chi_{e\parallel} = 10.0$ 、新古典粘性係数 $\mu_e = 1.39 \times 10^{-3}$ 、 $\mu_i = 4.65 \times 10^{-5}$ 、 $\alpha_T = 0.71$ 。径方向位置 $r = r_s$ に密度ソースピーク(密度強度 S_{amp})を初期状態に導入したシミュレーションを行う(図 1)。 $r = r_s$ 近傍の径方向内側に密度勾配が正の領域が存在する。ここではこの領域を反転勾配と呼ぶ。対して通常の密度勾配負の領域を通常勾配と呼ぶ。R5F コードを用いて電子ドリフト波不安定性の時間発展を計算する。安全係数分布に対応して $r_s = 0.8$ の時、通常、反転勾配領域で共鳴するモードとしてそれぞれ例えば $(m, n) = (-$

25,8), (-36,14)がある(図 1)。ここで m, n はそれぞれポロイダル、トロイダルモード数である。弱磁場側に局在するバルーニング構造を持つ線形不安定性が励起される。

線形段階におけるモード構造から不安定性が誘起する粒子ピンチの強さと径方向範囲を評価した(図 2)。通常勾配領域で強く励起される $n = 8$ モードが全体として支配的であり、その駆動する外向きの粒子流束が卓越している。一方で反転勾配領域では小さいながらも内向きの粒子流束が生じている。

初期密度分布の勾配強度を $S_{amp} = 1.0$ 及び 1.5 、勾配位置を $r_s = 0.7$ 及び 0.8 とした場合の比較を行った。密度強度が大きい場合、反転勾配領域でモードが不安定化し、そして内向きの粒子流束割合が増大していることが確認された(図 2)。講演では非線形状態における粒子流束解析結果についても報告する。

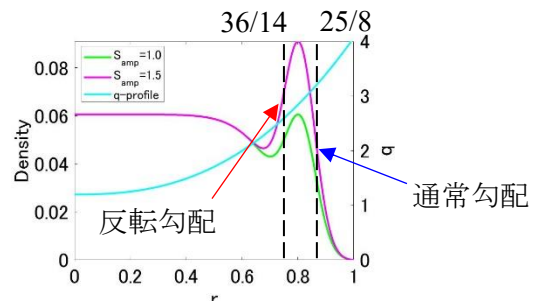


図 1 初期密度分布. $S_{amp} = 1.0$ 及び 1.5 の場合と安全係数分布を示す。

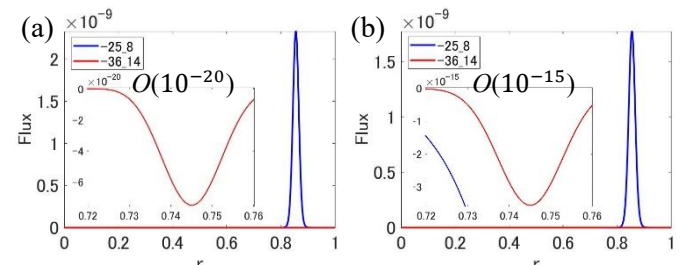


図 2 $S_{amp} = (a)1.0$ 及び $(b)1.5$ の場合の径方向粒子流束分布。線形段階のもので、正の値が径方向外向きに対応する。

- [1] B. Coppi and C. Spight, Phys. Rev. Lett. **41**, 551 (1978).
[2] M. Yagi, et al, Proc. BPSI Meeting (2018) 2-1.
[3] C. T. Hsu, et al, Phys. Fluids, **29**, 1480 (1986).