

磁力線方向の電子応答の違いに着目した核融合周辺プラズマ乱流の揺動特性の分類

Classification of fluctuation characteristics of edge plasma turbulence based on the difference in electrons response along the magnetic field lines

新井慎平¹, 小菅佑輔²

ARAI Shimpei¹, KOSUGA Yusuke²

九大総理工¹, 九大応力研²

IGSES, Kyushu Univ.¹, RIAM, Kyushu Univ.²

核融合発電の実現に向けて周辺プラズマの研究が進められている。中でも核融合炉の設計における重要な課題として位置づけられているのがダイバータ板への熱負荷制御の問題である。具体的に ITER や JT-60U を対象に単位面積当たりの熱負荷を評価した際、 $60\text{MW}/\text{m}^2$ に達する事が報告されている。これを少なくとも工学的に耐えうる $20\text{MW}/\text{m}^2$ まで抑制することが求められる [1]。この課題解決に向けて乱流輸送による SOL の幅の制御に着目した研究が進展している [2]。乱流輸送という言葉に焦点を当てると、これまでの研究により、プラズマ乱流は種類によってそれぞれ異なる輸送特性を持っており、その種類と性質によって粒子、温度、運動量についてそれぞれ異なる強度や方向の輸送を起こすことが報告されている [3]。以上を踏まえると、SOL 幅の予測には複数の物理量の輸送束（例えば密度と温度の同時評価）、そしてそれぞれの揺動強度とポテンシャルとの位相差を乱流の特性に応じて評価する必要がある。

本研究では磁化プラズマ中の乱流を記述した Hasegawa-Wakatani 方程式に温度揺らぎを組み込んだモデルに基づく解析を行った。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\tilde{n}_e}{n_0} + v_{*e} \frac{\partial}{\partial y} \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} &= D_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 \left(\frac{\tilde{n}_e}{n_0} - \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} + (1 + \alpha_T) \frac{\tilde{T}_e}{T_{e0}} \right), \\ \frac{d}{dt} \rho_s^2 \nabla_{\perp}^2 \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} &= D_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 \left(\frac{\tilde{n}_e}{n_0} - \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} + (1 + \alpha_T) \frac{\tilde{T}_e}{T_{e0}} \right), \\ &\quad \frac{3}{2} \frac{d}{dt} \frac{\tilde{T}_e}{T_{e0}} + \frac{3}{2} \eta_e v_{*e} \frac{\partial}{\partial y} \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} - \chi_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} \\ &= (1 + \alpha_T) D_{\parallel} \nabla_{\parallel}^2 \left(\frac{\tilde{n}_e}{n_0} - \frac{e\tilde{\phi}}{T_{e0}} + (1 + \alpha_T) \frac{\tilde{T}_e}{T_{e0}} \right). \end{aligned}$$

解析を進めるにあたり、トカマクの SOL にあたる電子温度-密度帯を調査すると、電子が断熱的なドリフト波 ($\omega_{*e} \ll D_{\parallel} k_{\parallel}^2$) と共に運動の時間スケールが長い微視的対流胞 ($\omega_{*e} \gg D_{\parallel} k_{\parallel}^2$) について考える必

表. 1 密度応答

モード	Amplitude	Phase relation
DW	$\hat{n} \sim \hat{\phi}$	$\hat{n} \sim e^{-i\delta_n} \hat{\phi}$
HD	$\hat{n} \gg \hat{\phi}$	$\hat{n} \sim e^{-i\frac{\pi}{4}} \hat{\phi}$

表. 2 温度応答

モード	Amplitude	Phase relation
DW	$\hat{T} \ll \hat{\phi}$	$\hat{T} \sim \begin{cases} e^{i\frac{\pi}{2}} \hat{\phi} & (A > 0) \\ e^{-i\frac{\pi}{2}} \hat{\phi} & (A < 0) \end{cases}$
HD	$\hat{T} \gg \hat{\phi}$	$\hat{T} \sim e^{-i\frac{\pi}{4}} \hat{\phi}$

要がある事を確認した。 $\omega_{*e}/D_{\parallel} k_{\parallel}^2$ をキーパラメータに差別化を図り、それぞれの密度応答および温度応答の強度とポテンシャルとの位相差の関係を表 1、表 2 にまとめた。ドリフト波では密度輸送は外向きに働き、温度はポテンシャルに対して $\pi/2$ の位相差があり、 $A = \frac{\rho_s^2 k_{\perp}^2}{1 + \rho_s^2 k_{\perp}^2} - \frac{3}{2} \frac{\eta_e}{1 + \alpha_T}$ として $A > 0$ の時は内向きに、 $A < 0$ の時は外向きに輸送が働く事を確認した。この場合分けは抵抗率 η_e に依存する。一方、微視的対流胞では密度・温度共にポテンシャルに対して $\pi/4$ の位相差があり、外向きに輸送が働く事を確認した。また、差別化した 2 種類の不安定性の揺動強度に注目すると密度・温度共に微視的対流胞が明らかに大きくなる。SOL の幅という観点において、微視的対流胞は熱負荷制御に有効な効果をもたらすことが分かった。

参考文献

- [1] 清水勝宏, 瀧塚知典 ' 周辺プラズマ物理入門' J. Plasma Fusion Res. Vol.80, No.3 (2004) 183-189
- [2] P. C. Stangeby, The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices (Institute of Physics, Bristol, 2000)
- [3] 伊藤早苗, 小菅佑輔, 小林達哉, 佐々木真, 伊藤公孝 ' 非平衡プラズマの強相関乱流' J. Plasma Fusion Res. Vol.96, No.5 (2020) 225-261