

JFT-2MにおけるHモード遷移リミットサイクル時の電場, 勾配, 乱流の時空間発展 Spatiotemporal evolution of electric field, gradient and turbulence during limit-cycle oscillation in the JFT-2M tokamak

小林達哉,¹ 伊藤公孝,^{1,2} 井戸毅,¹ 神谷健作,³ 伊藤早苗,^{2,4} 三浦幸俊,³

永島芳彦,^{2,4} 藤澤彰英,^{2,4} 稲垣滋,^{2,4} 居田克巳,^{1,2} 星野克道,³

T. Kobayashi,¹ K. Itoh,^{1,2} T. Ido,¹ K. Kamiya,³ S.-I. Itoh,^{2,4} Y. Miura,³

Y. Nagashima,^{2,4} A. Fujisawa,^{2,4} S. Inagaki,^{2,4} K. Ida,^{1,2} and K. Hoshino³

核融合研,¹ 極限プラズマ研究連携セ,² 原子力機構,³ 九大応力研⁴

NIFS,¹ Research Center for Plasma Turbulence Kyushu Univ.², JAEA³, and RIAM Kyushu Univ.⁴

核融合炉実現のため、プラズマ乱流輸送の理解とその制御法の確立が強く望まれている。このための鍵となっているのが、突発的な閉じ込め改善現象である、“L-H 遷移”現象である。現在建設中の国際熱核融合実験炉 ITER に於いても H モードは標準運転シナリオとされており、その有用性は広く認められているが、遷移を説明する物理機構は未だ解明されていない。多くの理論・実験研究の結果、プラズマエッジにおける半径方向電場の重要性が明らかにされている (e.g., [2])。これらに加え、L-H 遷移直前に、L と H の 2 つの状態を周期的に行き来する、“Limit-Cycle Oscillation (LCO)” という現象が観測されている。近年のプラズマ計測技術の発展も相まって、LCO の観測を通して L-H 遷移の物理機構を解明するという世界的研究潮流が生まれている。LCO を説明する理論モデルには、プラズマの巨視的プロファイルと流れ場 (径電場) 及び、乱流輸送の分岐に基づくもの [3] や、帯状流と乱流のプレダ・プレイモデル [4] などがあり、数多くの実験観測との比較がなされている (e.g., [5])。多くの進展は見られているが、未だ LCO 現象及び L-H 遷移現象の包括的理解は得られていない。

JFT-2M トカマクにおいて、L-H 遷移の境界パラメタ領域で LCO が観測されている。重イオンビームプローブ (Heavy Ion Beam Probe, HIBP) を用いて、揺動の同時多点計測を行い、LCO の詳細構造及びダイナミクスを明らかにした [6]。計測は、1 放電で 4 箇所同時に行われ、静電ポテンシャル及び密度信号が $1 \mu\text{s}$ の時間分解能で得られる。図 1 はダイバータ領域の D_α 信号の時間発展を表している。 $t \sim 0.738 \text{ s}$ 付近で D_α の減少が見られており、プラズマが H-mode に遷移したことが示されている。 $t \sim 0.728 \text{ s}$ 付近から、 $f \sim 4.5 \text{ kHz}$ を中心とした低周波コヒーレント揺動 (LCO) が観測されている。この揺動は静電ポテンシャル、径電場、密度、乱流振幅などにも見られている。

プラズマエッジ ($-5 \text{ cm} < r - a < 0 \text{ cm}$, r は観測半径位置, a はプラズマ小半径) における LCO の時空間構造を重イオンビームプローブ Shot-to-shot 計測位置スキャン実験で計測した。図 2 は、静電ポテンシャル、径電場、密度 (平均値で規格化) 及び乱流振幅モジュレーションの平均振幅と静電ポテンシャル及び密度モジュレーション位相のプロ

ファイルである。静電ポテンシャルは径方向にほぼ一様の振幅プロファイルを持ち、位相から求められる平均的径方向波数は、 $k_r \sim 0 \text{ m}^{-1}$ である。このことから、観測されているポテンシャル揺動は帯状流によるものではないことがわかる。径方向電場は、 $r - a \sim -1 \text{ cm}$ に最大振幅 $E_r \sim -600 \text{ V/m}$ を持つ。これは、H-mode 遷移後にエッジに形成される平均電場と比較し、 $1/50$ 程度の小さいものである。密度は最外殻周辺に最大振

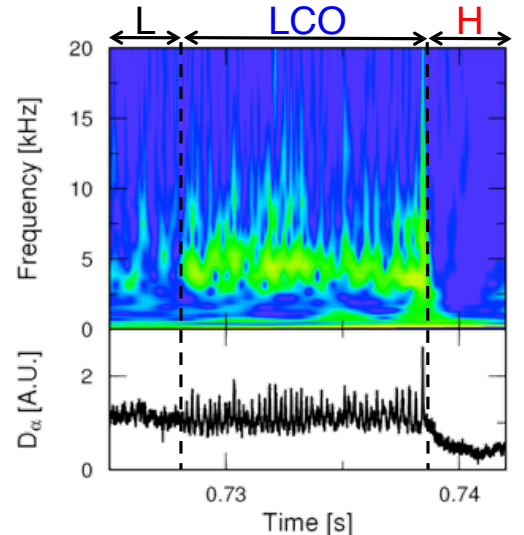


図 1: D_α 信号の時間発展とそのスペクトル (#90054)

幅を持ち、電場振幅が最大になる点 ($r - a \sim -1$ cm) で位相が反転している。このことは、 $r - a \sim -1$ cm の点での密度勾配の増減、即ち、小規模な輸送障壁の、LCO 周期での生成・消滅を表している。乱流振幅モジュレーションの振幅は、電場振幅が最大となる点で最も大きくなる。

電場の励起機構を推定するため、レイノルズ応力 $\Pi_{r\theta}$ を乱流揺動計測から評価した。慣性項とレイノルズ応力項よりなる運動方程式

$$\epsilon_{\perp} \partial V_{\text{ExB}} / \partial t = \partial \Pi_{r\theta} / \partial r \quad (1)$$

(ここで $\epsilon_{\perp} \sim 20 - 30$ はトロイダルプラズマにおける比誘電率係数の慣性増大ファクターを示す) より、レイノルズ応力が駆動する流れ場を見積もった。その結果レイノルズ応力による流れの駆動は、 ~ 15 m/s 程度となり、観測されている流れ場のモジュレーション $E_r/B \sim 500$ m/s を説明できないことが分かった。

電場、密度勾配、及び乱流振幅の因果関係を観察するため、電場振幅が最大値をとる位置でリサーチを描き、位相関係を調べた。3 者のやり取りは、次のようになった。(i) 電場の絶対値の成長は乱流振幅を抑制すると同時に密度勾配を増加させる。(ii) 勾配の増加により乱流が成長し、電場は減少へと転じる。(iii) 乱流輸送の増加により勾配が減少する。その後、電場が増加へ転じ、再び (i) へと戻る。

以上 3 つの実験事実 (帯状流が観測されない点、レイノルズ応力が小さい点、リサーチで電場の増加が乱流の増加に先行する点) より、LCO は帯状流を介在とするプレデタ・プレイモデルではなく、[3] の電場分岐モデルにより説明されると結論付けられた。

これらに加え、LCO による密度勾配のモジュレーションがプラズマ内部に高速伝播する現象、及びこれに同期して乱流パケットが伝播する現象を観測した。平均の乱流振幅プロファイルでは、密度勾配の大きいプラズマエッジに於いて乱流が強く励起されている。位相伝搬の速度は 900 m/s で、電子反磁性ドリフト速度の ~ 20 % 程度に相当する。観測より、密度勾配と乱流パケットの位相差は $\sim 0.2\pi$ 程度となった。このような伝播は古典的な拡散では説明されない。一方、計測誤差の範囲内ではあるが、乱流拡散理論 [7] で予測される現象と本観測は矛盾なく一致する。

本研究の一部は JSPS 科学研究費 (15H02155, 23244113, 26887047)、トカマク国内重点化装置共同研究 (JAEA)、応用力学研究所共同研究 (九州大学)、及び浅田榮一研究奨励金によった。

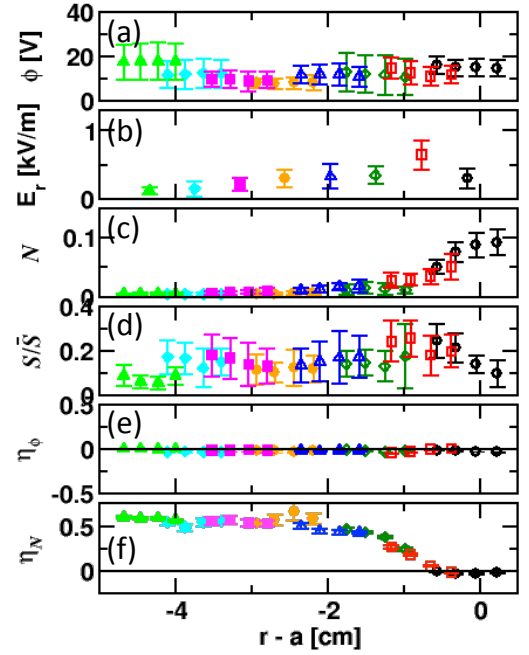


図 2: (a) 静電ポテンシャル ϕ , (b) 径方向電場 E_r , (c) 平均値で規格化された密度 N , (d) 平均値で規格化された乱流振幅モジュレーション $S/\bar{S}$ の LCO 振幅, (e) 静電ポテンシャル及び (f) 密度の LCO 位相プロファイル。

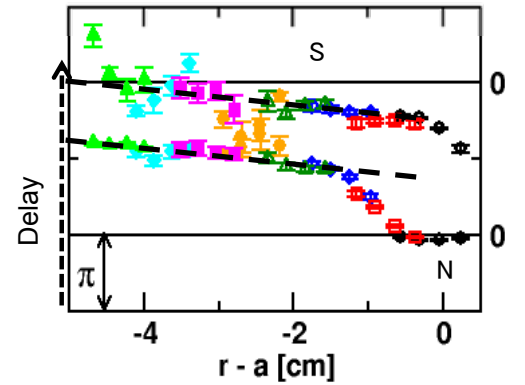


図 3: 乱流振幅と密度の位相プロファイル

- [1] F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982).
- [2] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. **60**, 2276 (1988).
- [3] S.-I. Itoh, K. Itoh, A. Fukuyama, Y. Miura, and JFT-2M Group, Phys. Rev. Lett. **67**, 2485 (1991).
- [4] Eun-jin Kim and P. H. Diamond, Phys. Rev. Lett. **90**, 185006 (2003).
- [5] T. Estrada et al., Europhys. Lett. **92**, 35001 (2010).
- [6] T. Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 035002 (2013).
- [7] T. S. Hahm et al., Plasma Phys. Control. Fusion **46**, A323 (2004).