

研究課題：乱流、電場の多点同時計測データの解析による L-H 遷移物理機構の解明

研究代表者：井戸 毅（核融合科学研究所）

原子力機構担当者：神谷健作

研究協力者：小林達哉（核融合科学研究所）、伊藤公孝（核融合科学研究所）、伊藤早苗（九州大学）、三浦幸俊（原子力機構）、稲垣滋（九州大学）、永島芳彦（九州大学）、藤澤彰英（九州大学）、居田克巳（核融合科学研究所）

研究期間：平成 25 年度-27 年度

研究の目的・意義

本研究の目的は、H-モード遷移の物理機構に関する理論予測を、実験的に検証することである。

熱核融合炉の実現へ向け、核燃焼が可能な高性能プラズマの生成・制御の研究が世界各国で進められている。H-モードは核融合炉の標準運転モードの有力な候補であるが、遷移の機構や、遷移直後のプラズマ全体に及ぶ輸送係数の急速な変動等、核融合炉の展望に大きな影響をもちうる事柄が未解明である。近年の計測器の発展により、径電場や乱流強度の高時空間分解能での計測が可能となり、1990 年代より提案されてきた理論モデルの実験検証が世界的に進められている。JFT-2M においては、重イオンビームプローブ(以下、HIBP)により、L-H 遷移時における電位及びその揺動、密度揺動が複数の空間位置で同時に計測されている。これらのデータは、近年発展したドップラー反射計などをもってしても得ることのできない貴重なものである。HIBP で計測されたデータを詳細に解析し、L-H 遷移の物理基礎過程を明らかにすることは、近年の世界的研究潮流からみてもインパクトが有ると考えられる。L-H 遷移メカニズムの解明は、ITER 計画及び核融合原型炉開発にとって極めて重要な課題であり、本研究を通じてその解決に貢献できる。

研究成果

(1) リミットサイクル振動 (LCO) の物理機構の解明

LモードからHモードに遷移する際にリミットサイクル振動 (LCO) が発生することが様々な装置で観測されている。他装置での実験では、この LCO は Kim-Diamond が提唱した帯状流と乱流の捕食者-被捕食者モデル(E.-J. Kim, and P. H. Diamond, **90**, 185006 (2003)) で説明できると報告されている。しかしながら、本研究で多チャンネル HIBP によって得られた電位揺動からレイノルズ応力を評価した結果、L-H 遷移時に見られる LCO に対して帯状流の寄与は小さいことが明らかになった。また、電場、乱流、密度勾配の関係を調べると、それらの間の因果関係は Kim-Diamond モデルと逆であることが分かった。このことから、LCO においては平均電場が形成されることが本質的であり、輸送遷移モデルによって説明できる可能性があることを示した。

(2) L-H 遷移時における電場形成のメカニズム

放電ごとに HIBP の計測点を半径方向にスキャンし、高時空間分解能で取得した電場、勾配、乱流の時間発展を解析することにより、電場形成と、その形成機構の候補の一つであるレイノルズ応力、乱流挙動の変化の関係を調べた。その結果、電場構造の励起を説明できるような大規模なレイノルズ応力 (乱流強度の自乗に比例) の増加は遷移前に観測されることがわかった。このことは、レイノルズ応力によって駆動される帯状流は L-H 遷移には大きな寄与をしていないことを示している。

そこで、電場遷移モデル (Itoh S.-I. and Itoh K. 1988 Phys. Rev. Lett. 60 2276, Shaing K.C. et al 1989 Phys. Rev. Lett. 63 2369) に基づき、電場形成機構の検証を進めた。

電場の時間発展は、ポアソン方程式より、径方向電流を用いて

$$\epsilon_{\perp} \epsilon_0 \partial E_r / \partial t = -J_r, \quad (1)$$

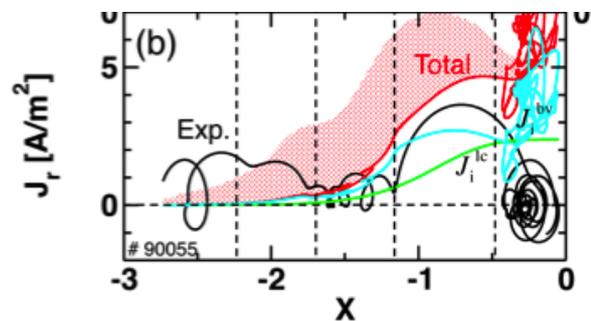


図1 径電場の規格化電場 X ($X \equiv \rho_p e E_r / T$) 依存性。(成果リスト[11]より)

と表すことが出来る。ここで $\varepsilon_{\perp} \varepsilon_0$ はトロイダルプラズマの垂直誘電率係数を表す。一方、径電流は物理過程より幾つかのモデリングがなされている。即ち、

$$J_r = J_i^c + J_i^{bv} + J_i^{v\nabla v} - J_{e-i}^{wave} + J_i^{CX} + \text{others}, \quad (2)$$

となり、左辺はそれぞれ、イオン損失項、新古典バルク粘性項、レイノルズ応力項、波動効果項、荷電交換衝突項を表し、これらの項は、電場の非線形項となることが知られている。計測した電場と勾配から第1項から第3項までを評価し、電場励起を担っている項を実験的に同定した。

図1は、得られた径電流項を径電場に関してプロットしたものである。上記式(1)より実験値が求められ、上記式(2)より理論予測値が求められる(各項の具体的表記は[K. Itoh and S.-I. Itoh, 1996 Plasma Phys. Control. Fusion 38 1]参照)。理論値の評価にはイオン温度の時間発展が必要であるが、本実験ではこれらの計測が行われなかったため、代わりに電子温度を用いて評価を行った。この際に現れると予測される計測値の不確定性の範囲は図(2)の赤線の帯で表される。この結果、径電場形成には新古典バルク粘性項とイオン軌道損失項が本質的であることが示された。

また、多チャンネル HIBP により計測された電位揺動、ポロイダル波数、径方向波数を用いて求めたレイノルズ応力項は -0.8 A/m^2 程度となり、図1に示す実験値より十分小さく、JFT-2M の L-H 遷移におけるレイノルズ応力項の寄与が小さいことが実験的に示された。

(3) L-H 遷移時の乱流の動的挙動の観測

また、乱流の時空間構造を調べた結果、L-H 遷移の瞬間に乱流抑制界面が拡散予測を超えるスピードで内側に伝播する現象が世界で初めて観測された。これは L-H 遷移の際に観測されるグローバルな閉じ込め改善現象に関係している可能性がある。

まとめ

JFT-2M において多チャンネル HIBP によって得られた電位、密度揺動のデータを解析し、L-H 遷移の際に励起される電場の励起機構のモデルの妥当性を評価した。JFT-2M においては、新古典バルク粘性項とイオン軌道損失項が支配的となり、レイノルズ応力項は、これらの項に比べ寄与が小さいことが示された。また、L-H 遷移時の乱流抑制界面の径方向内向きの伝播現象を本研究で初めて明らかにした。この現象は、L-H 遷移の際に観測されるグローバルな閉じ込め改善現象を説明する現象である可能性がある、重要な発見であると考えられる。

成果リスト

1. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S. -I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Phys. Rev. Lett., 111, 035002 (2013)
2. K. Itoh, 3rd Asia-Pacific Transport Working Group meeting, AOV(overview), Cheju, Korea, (2013)
3. T. Kobayashi, et al., 3rd Asia-Pacific Transport Working Group meeting, CO3(oral), Cheju, Korea (2013)

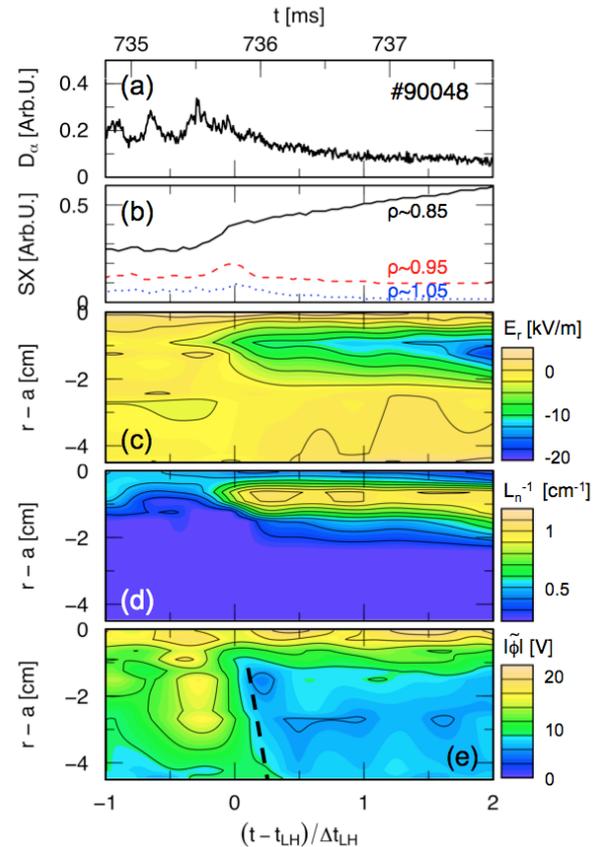


図2 L-H 遷移時の(a) D_{α} 、(b)軟 X 線強度、(c)電場分布、(d) 密度勾配分布、(e)乱流強度分布の時間発展 (成果リスト[10]より)

4. 小林達哉, “L-LCO-H に伴う揺動の動的応答”, 日本物理学会秋季大会 シンポジウム「乱流揺動実験の新展開」, 26pKC-3 (2013)
5. T. Kobayashi, 14th International workshop on H-mode physics and transport barriers, Kyushu, Japan (2013)
6. K. Itoh, S.-I. Itoh, A. Fujisawa: An assessment of limit cycle oscillation dynamics prior to L-H transition (review), Plasma Fusion Research (2013) Volume 8, 1102168
7. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, N. Kasuya and K. Hoshino, Dynamics of edge limit cycle oscillation in JFT-2M tokamak, Nuclear Fusion 54 (2014) 073017
8. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Observation of causal relation of electrostatic potential and turbulence intensity in Limit Cycle Oscillation in the JFT-2M tokamak, Workshop on Electric Fields, Structures and Self-Organisation in Magnetized Plasmas 2014 (EPS satellite meeting), Berlin, Germany, July, 2014, 招待講演
9. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Dynamical response of turbulence during limit-cycle oscillation in JFT-2M Tokamak, 19th Joint EU-US Transport Task Force Meeting, Culham, Britain, September, 2014, LO2.4, 招待講演
10. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Edge plasma dynamics during L-H transition in the JFT-2M tokamak, IAEA Fusion Energy Conference 2014, St Petersburg, Russian Federation, October, 2014
11. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida and K. Hoshino, Edge plasma dynamics during L-H transition in the JFT-2M tokamak, Nuclear Fusion 55 (2015) 063009
12. K. Itoh, T. Kobayashi, T. Ido, S.-I. Itoh, and K. Kamiya, On Contribution of Geodesic Acoustic Modes in the Limit Cycle Oscillation near H-mode Transition in JFT-2M Plasmas, Plasma Phys. Contr. Fusion 57 (2015) 092001
13. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Radial electric field excitation mechanism during LH transition in the JFT-2M tokamak, 5th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) Workshop, Dalian, China, June, 2015, 招待講演
14. 小林達哉, 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, 第32回プラズマ・核融合学会年大, S6-2, 名古屋大学, 2015年11月
15. 小林達哉, 伊藤公孝, 井戸毅, 神谷健作, 伊藤早苗, 三浦幸俊, 永島芳彦, 藤澤彰英, 稲垣滋, 居田克巳, 星野克道, "JFT-2M トカマクにおけるリミットサイクル揺動の物理機構", 第71回日本物理学会年次大会, 20pAE-8, 東北学院大学, 2016年3月
16. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Experimental Identification of Electric Field Excitation Mechanisms in a Structural Transition of Tokamak Plasmas, Sci. Rep. in press (2016)
17. T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Spatio-temporal dynamics of L-H transition - An advanced data analysis, 18th International Congress on Plasma Physics ICPP2016, Taiwan, June, 2016, 招待講演