## 閉じ込め改善プラズマの大域性 Global nature of confinement improved plasma

小林達哉<sup>1,2,3</sup> T. Kobayashi<sup>1,2,3</sup>

## <sup>1</sup>核融合研,<sup>2</sup>総研大,<sup>3</sup>九大 <sup>1</sup>NIFS,<sup>2</sup>SOKENDAI,<sup>3</sup>Kyushu Univ.

プラズマ核融合エネルギー実用化のため、磁場 閉じ込めプラズマにおける熱や粒子の閉じ込め 特性の研究が進められている。自己燃焼プラズマ の定常維持のためには、プラズマ輸送により流出 するエネルギーをアルファ加熱で補い、外部加熱 を遮断した運転を継続する必要がある。ここでは 特に、前者の物理プロセスに着目し、これを最小 化することで、定常・自己燃焼プラズマの実現を 目指す立場をとる。プラズマ乱流輸送には非線形 性や非局所性が強く現れるため、局所的な準線 形・混合長仮定による拡散的輸送モデルでは分布 飽和機構を記述することが困難である。その代わ りに、"臨界勾配"で駆動される不安定性により分 布が大域的に一定となる、臨界輸送モデルがよく 用いられる[1]。プラズマ温度分布が臨界勾配に収 束する様子は実験においてもよく観測されてお り、勾配によって駆動される乱流が輸送を駆動し 分布発展を制限する、という考え方は広く認めら れるものとなっている。一方で、炉心プラズマの

安定性や制御性を予見するためには、臨界勾配付 近のプラズマの動的振る舞いを理解する必要が ある。また磁場構造が多様なステラレータ装置に おけるケーススタディを行い、臨界輸送のより一 般的な定式化を進めていくことが望まれている。 本講演では、DIII-D および LHD の閉じ込め遷移 プラズマを対象に、分布決定機構を考察した。

DIII-D トカマクの L-H 遷移実験において、遷 移後の電子温度分布の時間発展を観測した(図 1)。 加熱パワーが遷移閾値に到達すると、L-H 遷移の 特徴である H<sub>a</sub>発光強度の減少、閉じ込め時間の増 加、電子温度の増加、フィードバックガスパフの 停止および密度の増加が観測される。臨界輸送に よって支配されている L モードから H モードへ とプラズマが遷移する際の輸送分布を観測する ことで、分布決定の物理機構を議論した。電子熱 輸送フラックス  $q_e$  はエネルギー保存方程式から、

$$q_e(\rho, t) = \frac{1}{S} \int_0^{\rho} dV \left( -1.5 \frac{\partial n_e T_e}{\partial t} + P(\rho, t) \right)$$



**S4-2** 

として求めることができる。ここでSとVは規格 化半径ρでのプラズマ表面積と体積を、Pは加熱分 布を表す。これらはL-H 遷移時に時間変化しない ので、neとTeの時間的増加は輸送の減少に対応す る。図 1(c)、(d)に、電子温度分布とその時間微分 の時間発展を示す。ここで neの時間変化による輸 送の減少は別途見積もられ、Teの寄与と同程度で あることがわかっている。Teの時間微分は、電場 シア構造が形成されるp>0.85のプラズマ周辺でま ず増加する(輸送が減少する)。その後、輸送減少領 域は周辺から中心へ、フロントを伴って拡大する 様子が見られる。図 1(e)にp~0.74 の熱流束-勾配関 係図を示す。観測位置より外側の温度が H モード遷 移により先に上昇し、観測位置の勾配が平坦化する ことで輸送が急激に減少する。これにより観測位置 で温度が上昇し、さらに内側の勾配が平坦化する。 L モードプラズマでは臨界輸送で分布が硬直化して いたことを考えると、輸送減少フロントの内向き伝 播は分布平坦化の連鎖だと捉えることができる。輸 送そのものが局所的に決定されていたとしても、臨 界輸送により大域的に分布飽和が決定される[2]。

閉じ込め磁場形状の異なるステラレータ LHD で は、この描像は大きく異なる。臨界輸送モデルによ り輸送が説明されるトカマクのケースでは、広い領 域で一定の臨界逆勾配長(L<sup>-</sup>=T<sup>-</sup>)∂T/∂r)を持つ分布が



図 2. (a)LHD の L モード(□)および ITB(●)プラズ マにおけるイオン温度分布と、χ∝T<sup>-1</sup>を満たす温 度分布(点線)および(b)異なる磁場配位における周 辺側(ρ~0.8)と中心側(ρ~0.4)の逆勾配長発展。

形成される[3]。一方 LHD の L モードプラズマでは、 温度上昇に伴い輸送が増大する傾向があり、コア部 に近づくほど勾配が平坦化する、"ドーム型"の分布 となる。この際、輸送の温度依存性は経験的に拡散 係数χ∝T<sup>-1</sup>で表すことができ、この拡散係数と実際 の加熱分布を用いて定常温度分布をフィットするこ とが可能となる[4]。図 2(a)に典型的なイオン温度分 布を示す。L モードの温度分布とχ∝T-1を満たす曲 線がよく一致することが示されている。このことは、 トカマクプラズマの分布飽和とは異なる機構で大域 的な分布決定がなされていることを示唆する。イオ ン温度内部輸送障壁(ITB)が形成されると、プラズマ 全域でイオン温度勾配が上昇する。ITB プラズマの 分布飽和を考察するため、図2(b)にプラズマ周辺側 (ρ~0.8)と中心側(ρ~0.4)の逆勾配長 L<sub>T</sub> をプロット した。現象の一般性を議論するため、異なる磁場配 位(真空磁気軸位置 Rax = 3.6 m および 3.55 m)での結 果を示す。L モードプラズマではχ*∝T* <sup>-1</sup>を満たすた め L<sub>T-1</sub>(0.8)>L<sub>T-1</sub>(0.4)であるが、ITB が形成されると  $L_{T_1}(0.8) \sim L_{T_1}(0.4)$ となり、広域で逆勾配長が一定と なる際に分布発展が飽和する。ITB 形成時の分布飽 和機構は、トカマクプラズマの場合と類似の臨界輸 送によると考察される[5]。ジャイロ運動論シミュレ ーションを行うと、ITB 形成時にのみイオン温度勾 配駆動モードが不安定化するという上記解釈と矛盾 しない結果を得る[6]。

臨界勾配においては、流体的乱流は安定限界となるため、波動粒子相互作用など運動論的な特徴を持つ輸送が重要になると予測されている[7]。このため、 位相空間乱流の輸送への寄与を実験的に明らかにすることが望まれている。近年の揺動計測器[8]および データ解析手法[9]の発展で、位相空間計測の高分解 能化が進められている。高温プラズマ、基礎プラズ マ、運動論シミュレーションの相補的アプローチに よる研究が進展している[10]。

[1] 岸本泰明、プラズマ・核融合学会誌 **76**、1280 (2000)

[2] T. Kobayashi, et al., Phys. Plasmas **30**, 032301 (2023)

[3] R C Wolf, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **45**, 1757 (2003)

[4] T. Kobayashi et al., Plasma Phys. Control. Fusion **61**, 085005 (2019)

[5] T. Kobayashi et al., Sci. Rep. 9, 15913 (2019)
[6] T. Kobayashi et al., Nucl. Fusion 61, 126013 (2022)

[7] Y. Kishimoto, et al, Physics of Plasmas 3, 1289 (1996)

[8] 吉沼幹朗他、本学会招待講演(2023)

[9] T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas **30**, 052303 (2023)

[10] T. Kobayashi et al., Plasma Fusion Res. **18**, 2402059 (2023)