

LHD プラズマにおけるホロー電子温度分布形成時の
非拡散的・非局所的な電子熱輸送の直接観測

Direct observation of the non-locality of non-diffusive electron
thermal transport during the formation of hollow
electron-temperature profiles in LHD

辻村 亨¹, 小林 達哉^{1,2}, 田中 謙治^{1,3}, 居田 克巳^{1,2}, 永岡 賢一¹, 吉沼 幹朗¹, 山田 一博¹,
舟場 久芳¹, 木下 稔基³, 徳澤 季彦^{1,2}, 釘持 尚輝¹, 伊神 弘恵¹, 向井 清史¹
TSUJIMURA I. Toru¹, KOBAYASHI Tatsuya^{1,2}, TANAKA Kenji^{1,3}, IDA Katsumi^{1,2},
NAGAOKA Kenichi¹, YOSHINUMA Mikirou¹, YAMADA Ichihiro¹,
FUNABA Hisamichi¹, KINOSHITA Toshiki³, TOKUZAWA Tokihiko^{1,2},
KENMOCHI Naoki¹, IGAMI Hiroe¹, MUKAI Kiyofumi¹

核融合研¹, 総研大², 九大³
NIFS¹, SOKENDAI², Kyushu Univ.³

トカマクでは、局所的な off-axis 電子サイクロトロン加熱 (ECH) の際に、中心加熱源が無い場合でも、定常的にピークした電子温度分布を説明するためには、内向きの電子熱対流が必要であるという実験結果が報告されている。一方、電子温度分布が著しくホローになる RTP トカマクでの off-axis ECH の場合、強い正の温度勾配の維持は外向きの熱対流の存在で説明できる [1]。同様に、大型ヘリカル装置 (LHD) のプラズマでは、off-axis ECH を用いた加熱源のみで、電子温度分布が定常的にホローになるプラズマが生成されることが観測された。この定常分布の明確な生成は、エネルギー保存則を用いて電子の熱流束を記述する簡単なモデルとして、拡散項に外向きの熱対流項を加えることで説明できる。しかし、いくつかの実験的観測により、電子熱輸送の過渡的な応答は、非拡散的・非局所的特性によって説明できることが既に明らかになっている [2]。内向き・外向きの電子熱対流は、いくつかの定常状態の電子温度分布を記述することができるが、特定の輸送モデルを仮定することなく、過渡的な輸送特性を研究するためには、電子熱流束と温度勾配の関係を直接観測する必要がある。

本研究 [3] では、Fig. 1 の概念図に示すように、LHD において off-axis ECH で維持されたプラズマに on-axis ECH をパワー変調入射 (MECH) し、正の温度勾配を含む領域でも電子熱流束を評価したところ、過渡的な電子熱輸送における非拡散項 (対流項) の非局所性を直接観測することができた。ここで、温度勾配がゼロであっても正の熱流束をもたらすものを非拡散項

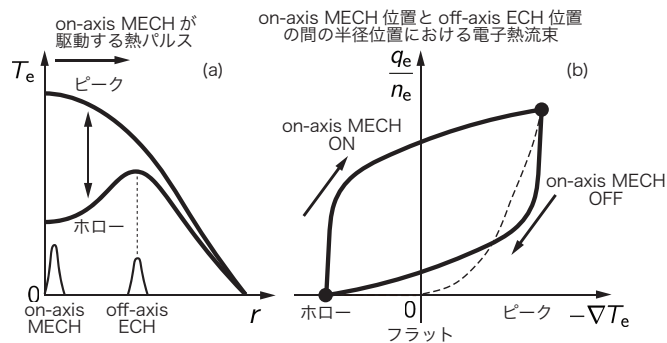


Fig. 1: (a) 電子温度分布と (b) 熱流束・温度勾配の関
係の概念図

とする。次に、電子熱流束の時間発展を計算し、流束と勾配の関係を議論した。電子温度分布は MECH の ON フェーズでピークし、MECH の OFF フェーズでホローになることが分かった。実験的に評価された流束と勾配の関係は輸送ヒステリシス現象において、正の温度勾配領域と負の温度勾配領域を行き来することで、ゼロの温度勾配における電子の熱流束が2つの異なる正の値を示す。この新しい輸送ヒステリシス現象は電子熱流束における非拡散項の非局所性を示すものである。また電子熱流束の急激な変化、すなわちヒステリシス幅は、on-axis MECH が ON になった時と OFF になった時のタイミングで非対称であることを示している。この結果を、密度揺動振幅の加熱に対する直接応答を記述する理論モデル [4] や、密度揺動の計測結果と比較する。

- [1] P. Mantica *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 185002 (2005).
[2] T. Kobayashi *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 126031 (2018).
[3] T. I. Tsujimura *et al.*, submitted to Phys. Plasmas
[4] S.-I. Itoh and K. Itoh, Sci. Rep. **2**, 860 (2012).