

研究課題：ダイナミック輸送解析によるトロイダルプラズマの輸送研究

研究代表者：居田克巳（核融合科学研究所）

原子力機構担当者：坂本宜照

研究協力者：吉沼幹朗（核融合科学研究所）、稲垣滋（九州大学応用力学研究所）、
小淵隆（核融合科学研究所）

研究期間：平成18年度-20年度

「研究目的・意義」

熱輸送においては、準定常状態の温度分布から出した温度勾配と加熱分布から算出した熱流束の比、すなわち熱拡散係数の空間分布を求めて輸送の特性を議論するというアプローチ（パワーバランス輸送解析）が長年行われてきた。しかしながら乱流輸送においては、熱流束が温度勾配に比例せず、非線形性・非局所性・非対角項を持つ為に、このような定常状態のパワーバランスを基にした研究だけでは、乱流輸送を解明するには充分ではない事が解ってきた。本研究ではプラズマの熱流束に大きな摂動を与えたり、プラズマが自ら起こす遷移を利用して、時間的に変化している温度分布を解析（ダイナミック輸送解析）して乱流輸送を調べる事を目的としている。

「研究成果（全研究期間中）」

平成18年度より核融合科学研究所と日本原子力研究開発機構との共同でモジュレーション荷電交換分光システムを開発し、空間点300点にも及ぶ高精度イオン温度計測を可能にした。（Rev. Sci. Instrum. に出版済み）

平成19年度には設置されたポロイダル系・トロイダル系高速荷電交換分光システムで得られたデータを解析しITB物理の研究を行った。その研究のなかで「曲率の異なる2つの内部輸送障壁（Internal Transport Barrier：ITB）間の遷移（Concave-Convex ITB transition）」を発見した。（図1）

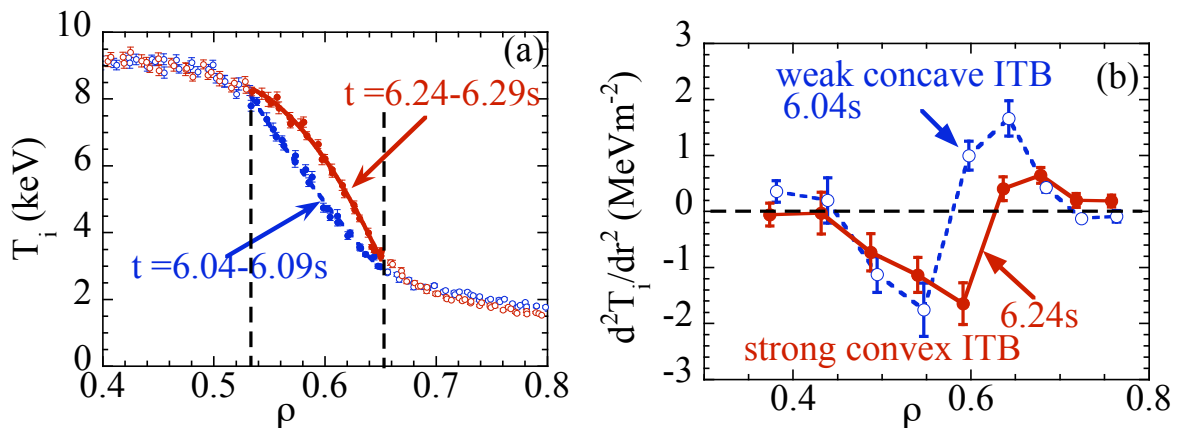


図1 ITB間遷移時のイオン温度分布と温度の2階微分（曲率）分布

ITB間遷移の前後で、イオン温度の輸送障壁の領域（ $r/a=0.53-0.65$ ）には変化は見られないが、イオン温度の2階微分（曲率）の空間分布には大きな差が見られている。イオン温度分布が凹型（ $t=6.04s$ ）の時には2階微分値が正の領域が増え、凸分布の時（ $t=6.24s$ ）には、2階微分が負の領域が増える。この凹型ITBと凸型ITBの間をプラズマが自発遷移/逆遷移する現象は、乱流の空間相互作用の為に輸送の悪化と改善がプラズマの異なる場所で同時に起こっているのが原因で起こると考えられる。（Phys. Rev. Lett. に出版済）

平成20年度はITB形成時のイオン温度の空間構造の変化に注目して実験を行いITBの形成過程を研究した。正磁気シアと負磁気シアのプラズマに対してイオン温度の勾配の時間変化を解析し、ITB形成時にイオンのITB領域（イオン温度勾配が最大の位置）が q 分布とは無関係に移動していく様子が観測された。（図2）

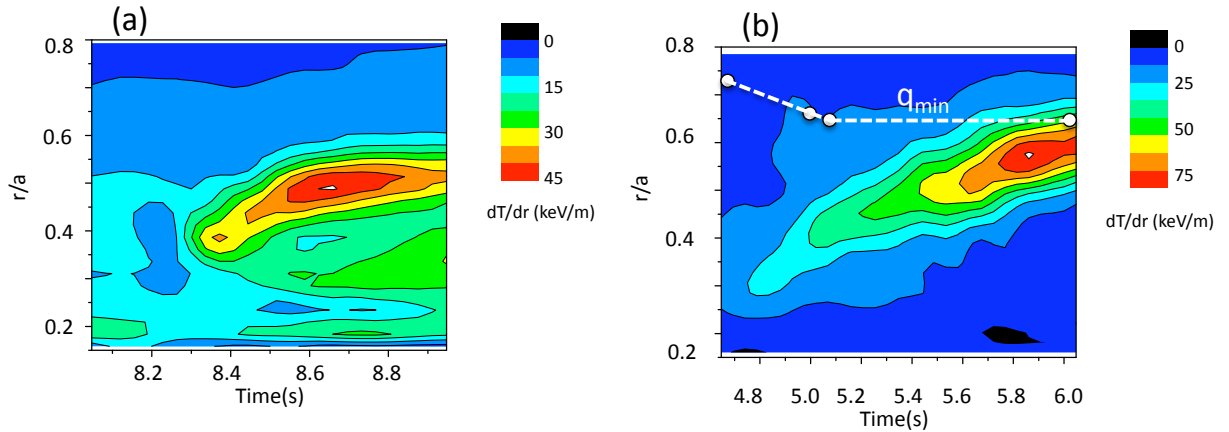


図2 ITB形成時におけるイオン温度勾配分布の時間変化

正磁気シアの場合には q 分布が一定であるにも関わらず、ITB 領域が $r/a=0.4$ で発生した後に ($q=4$ 付近まで) 外側に移動すると共に、ITB 領域が広がっていく様子 (ITB 領域の拡大化) が観測されている。負磁気シアの場合には q_{\min} (q 値の最小値) の位置がプラズマの外側 ($r/a=0.73$) から内側 ($r/a=0.64$) に移動している。一方 ITB 領域についてはプラズマの内側 ($r/a=0.4$) で発生した後に q_{\min} の位置まで移動すると共に、ITB 領域が狭くなっていく様子 (ITB 領域の局在化) が観測された。 q 分布が「ITB の発生位置」を決めている訳ではないが、「ITB の最終的な空間構造」を決定しているのではないかという作業仮説を示唆するものである。(Nucl. Fusion に出版済み)

「まとめ」

これらの実験結果は「曲率の遷移」、「ITB の局在化」、「ITB 位置の移動」を引き起こしている物理機構として「乱流の空間相互作用」が考えられ、プラズマ輸送に強い非局所性が存在する事を示唆している。

「今後の課題・予定」

ダイナミック輸送解析の研究は平成 20 年度で終了し、今後は新たな研究テーマに移る。しかしながら、モジュレーション荷電交換分光システムの導入で、いままで観測できなかったイオン温度の微細空間構造が明らかになってきた。その例として磁気島内部において、ピークしたイオン温度分布が観測されている。今後は、モジュレーション荷電交換分光システムで得られた高空間分解イオン温度分布データをもとに、磁気島内部のイオンの熱輸送に関する研究を行う予定である。

全研究期間中の成果リスト (口頭発表含む) を付けて下さい。

論文

- 1) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., “Measurement of derivative of ion temperature using high spatial resolution charge exchange spectroscopy with space modulation optics”, Rev. Sci. Instrum. 79 (2008) 053506.
- 2) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., “Transition between Internal Transport Barriers with Different Temperature-Profile Curvatures in JT-60U Tokamak Plasmas”, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 055003.
- 3) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., “Dynamic transport study of the plasmas with transport improvement in LHD and JT-60U”, Nucl. Fusion 49 (2009) 015005.
- 4) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., “Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas”, Nucl Fusion 49 (2009) 095024.

口頭発表

- 1) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., Dynamic Transport Study of the Plasmas with Transport Improvement in LHD and JT-60U、21st IAEA Fusion Energy Conference
- 2) K.Ida, Y.Sakamoto, et. al., Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas、22nd IAEA Fusion Energy Conference
- 3) 居田克巳、坂本宜照、ヘリカルとトカマクプラズマにおけるイオンの内部輸送障壁のダイナミクス、日本物理学会 2009 年秋季大会