

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目： 基盤研究 (A)
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18206094
 研究課題名 (和文) 高速荷電交換分光によるイオンの動的熱輸送解析
 研究課題名 (英文) Dynamic Transport of ion with fast charge exchange spectroscopy
 研究代表者
 居田 克巳 (IDA KATSUMI)
 核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 教授
 研究者番号： 00184599

研究成果の概要 (和文)：プラズマの粒子束や熱流束に大きな摂動を与え、プラズマの密度・電子・イオン温度の応答を解析することで、粒子輸送・熱輸送を明らかにしようというアプローチ (動的熱輸送解析) を行い以下の研究成果を得た。1) 輸送ブランチの発見、2) ITB 形成時の ITB 領域の移動の観測、3) ITB 曲率遷移現象の発見、4) 自発トロイダル回転の観測、5) 不純物ホールの発見。これらの発見と観測により輸送の非拡散性と非局所性を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Dynamic transport analysis, where the response of density and temperature of plasma to the large perturbation of particle and heat fluxes, has been carried out in order to investigate the particle and heat transport in plasmas. With this analysis, the following results are obtained; 1) discovery of transport branch, 2) observation of movement of internal transport barrier (ITB) region, 3) discovery of curvature transition of ITB, 4) observation of spontaneous rotation, 5) discovery of impurity hole. Through these discoveries and observations, non-diffusivity and non-locality of transport have been investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
19年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
20年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
21年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ核融合、原子分子物理、分光学、輸送解析

1. 研究開始当初の背景

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、このようなパワーバランスを基にした研究では、乱流輸送を解明するには

充分ではない事が解ってきた。

2. 研究の目的

本研究ではプラズマの粒子束や熱流束に大きな摂動を与え、プラズマの密度・電子・イオン温度の応答を解析することで、粒子輸送・熱輸送を明らかにしようというアプローチ（ダイナミック輸送解析）で輸送を調べる事を目的としている。

3. 研究の方法

ダイナミック輸送解析に必要な摂動を与える手段として、ペレットによる密度摂動、ECH による電子温度摂動、NBI によるイオン温度摂動等が考えられる。大型ヘリカル装置（LHD）においては、連続入射水素ペレットと不純物トレーサー内包ペレット（Tracer Encapsulated Solid PELlet: TESPEL）があり、それぞれをプラズマに入射してプラズマの温度に対する応答を調べることができる。それに対して、JT-60U トカマクではECHによる電子温度への摂動、又は内部輸送障壁形成および遷移現象に伴う温度勾配と熱流束の時間的变化を利用するのが有効な手段である。また、イオン温度勾配の変化に伴うトロイダル回転速度、不純物密度の応答を調べることにより、熱輸送と粒子輸送（不純物輸送）・熱輸送と運動量輸送の非対角項を研究することができる。

電子系の動的熱輸送の研究には電子サイクロトロン輻射（ECE）による温度勾配の高時間分解能計測が可能であるが、イオン系の動的熱輸送・運動量輸送・不純物輸送の研究には高時間空間分解能でイオン温度勾配の計測ができる高速荷電交換分光システムが必要である。高速の荷電交換分光システムを開発するためには、高速の検出器と明るい光学系（低F値）の開発が必須である。電子増幅機能付の冷却 CCD 検出器（EMCCD）の採用で検出器の高速化をはかり、F=2.8 のレンズを使ったレンズ分光器の開発で明るい光学系のシステムを制作した。

4. 研究成果

1) 電子系の動的熱輸送解析(予備実験) -輸送ブランチの発見-

従来はプラズマのパラメータをわずかに変化させて輸送のパラメータ依存性を研究する摂動実験が主流であったが、本実験では大きな摂動を与えてプラズマの応答を調べる動的熱輸送解析を行った。図1はプラズマ中に連続ペレットをプラ

ズマに入射した時の電子密度と電子温度の時間変化であるが、ペレット入射に伴い、密度が上昇、温度が低下して、その後回復している様子が解る。ペレット入射のターゲット密度を上げて行く事で、異なったパラメータ領域での応答が観測された。図2はこの実験における温度勾配と規格化熱流束との関係を示したものであるが、PhaseIIでは弱い温度依存性を示す輸送ブランチが観測され、PhaseIVでは強い温度依存性を示す輸送ブランチが観測された。2つのフェーズの間のPhaseIIIが遷移状態を示している。この2つのブランチの存在は、この動的熱輸送解析で初めて明らかになったものであり、輸送改善の物理機構として重要な発見である。

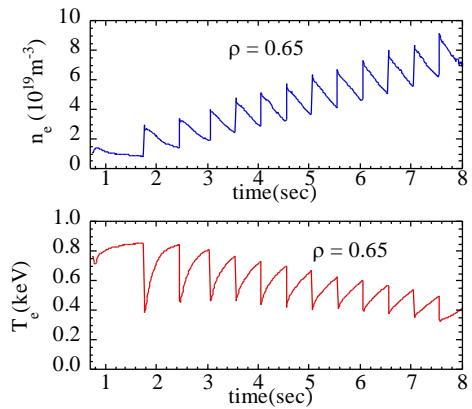


図1 摂動実験における (a) 電子温度と (b) 電子密度の時間変化

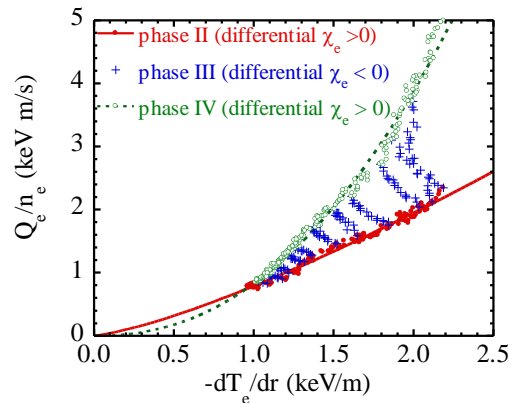


図2 温度勾配と規格化熱流束の関係

2) ITB形成時のイオン系動的熱輸送解析 -ITB領域の移動の観測-

イオンの内部輸送障壁の形成過程において、イオン温度勾配が強い領域(ITB領域)がどのように伝搬、拡大又は局在化していくかを調べた。図3は温度勾配

の空間分布の時間変化であるが、ヘリカルプラズマでは ITB 領域（温度勾配が大きい領域）が拡大しながら内側に伝搬していくのに対し、トカマクプラズマでは ITB 領域が拡大せずむしろ局在化しながら外側に伝搬するのが解った。

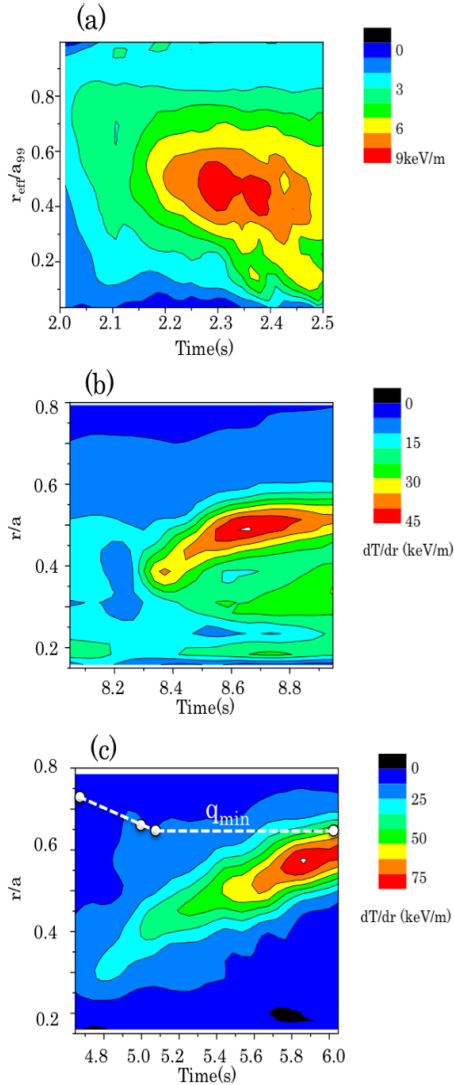


図3 (a)ヘリカルプラズマ及び、(b)正磁気シア(c)負磁気シアのトカマクプラズマにおけるイオン温度勾配の空間分布の時間変化

3) 遷移時のイオン系の動的熱輸送解 -曲率遷移現象の発見-

イオンの内部輸送障壁 (ITB) のプラズマにおいて、ITB領域のイオン温度の曲率（空間2階微分）が遷移する現象が観測された。遷移時のイオン温度分布、電子密度分布とイオン温度勾配、規格化熱流束、熱伝導係数の時間変化を図4に示す。密度分布には大きな変化は見られないが、

ITB領域におけるイオン温度分布の曲率が弱い凹型 (concave) から強い凸型 (convex) に変化しているのが解る。この実験はプラズマの温度勾配にLモードとITBの2状態があるだけでなく、温度の曲率にもconcaveとconvexの2状態がある事を初めて明らかにした実験として重要である。

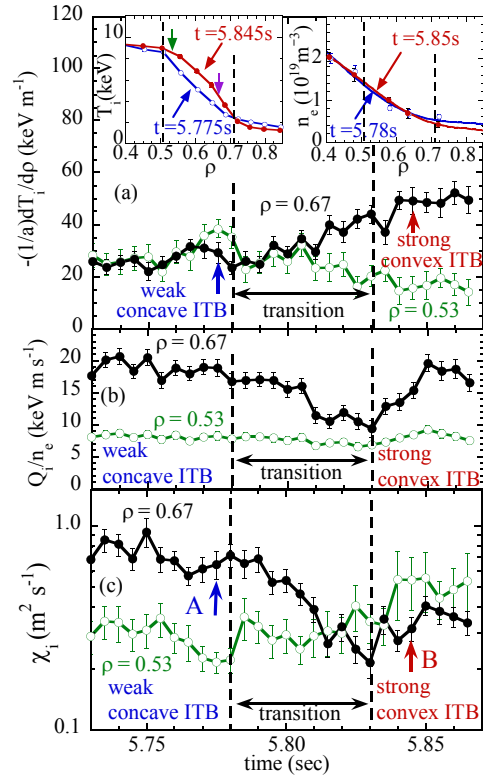


図4 ITB曲率遷移現象におけるイオン (a)温度勾配、(b)規格化熱流束、(c)熱伝導係数の時間変化

4) 熱輸送と運動量輸送の非対角項の研究 -自発回転の観測-

トロイダル回転速度計測の時間分解が上昇したことに伴い、プラズマのイオン温度勾配によって生じる自発トロイダル回転（非拡散輸送）について研究ができるようになった。図5はco方向入射とctr方向入射の場合のトロイダル回転、イオン温度、入射トルクの空間分布である。トルクの大きさは同程度であるが、co回転速度はctr回転速度に比べかなり大きく、co方向の自発回転速度がある事が解る。この自発回転は、ある程度イオン温度の勾配が大きくなってから生じることが図6に示されている。自発回転による正の速度勾配はイオン温度勾配が大

きい規格化プラズマ半径0.47付近で特に顕著である。

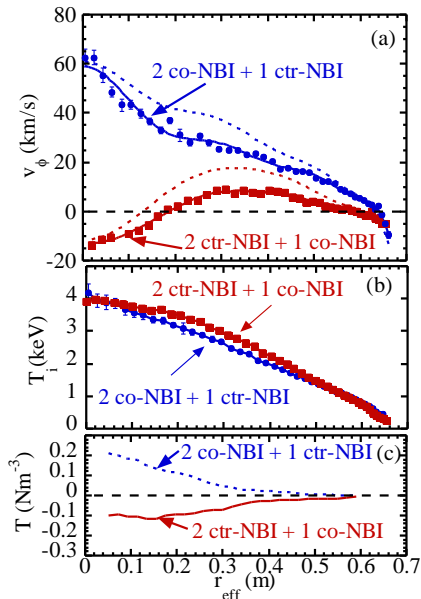


図5 (a)トロイダル回転速度、(b)イオン温度、(c)入射トルクの空間分布

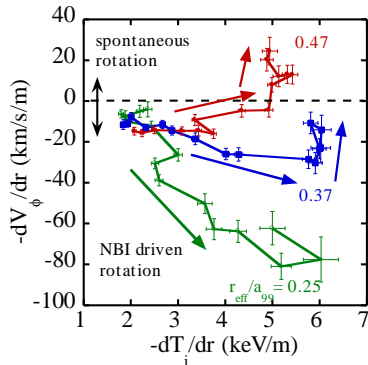


図6 イオン温度勾配とトロイダル回転速度勾配との関係

5) 熱輸送と不純物輸送の非対角項の研究 -不純物ホールの発見-

イオン温度勾配の増加に伴い、プラズマ中の不純物が吐き出されて、不純物密度の分布が極端なホー分布になる現象（不純物ホール）が観測された。図7に示されるように、中心不純物密度の急激な減少は電子温度勾配よりもむしろイオン温度勾配が大きく変化する時に観測される。不純物の吐き出しはイオン温度勾配によって、外向きの対流速度が生じる為に起こると考えられる。図8に不純物ホール形成時の炭素密度の勾配と粒子束との関係を示す。両者の関係の傾きとオフセットから拡散係数と対流速度が求められる。対流速度の空間分布に示されるように、プラズマのコア

部では対流速度が正（外向き）となっている。一方、新古典理論(NC)では対流速度は負（内向き）となっており、この対流速度は乱流によって駆動されていると考えられる。この外向きの対流速度の発見は炉心プラズマの純度に関する展望を与えるもので、学術的意義、核融合研究へのインパクトが大きい。

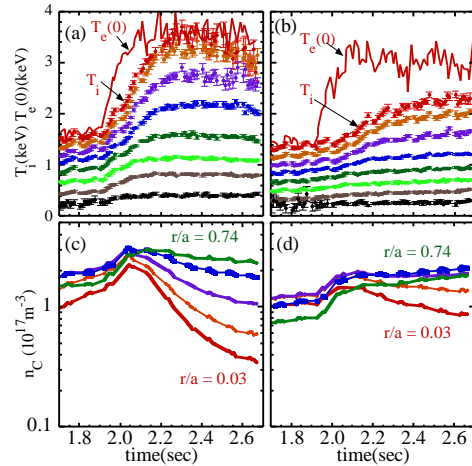


図7 イオン系ITBプラズマ(a)(c)とLモードプラズマ(b)(d)における電子・イオン温度と炭素密度の時間変化

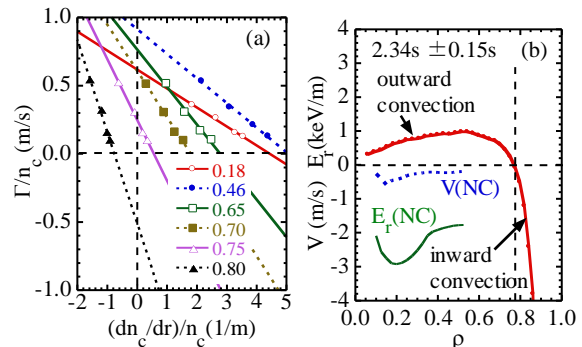


図8 (a)炭素不純物の規格化粒子束と密度勾配の関係と(b)対流速度の空間分布

6) まとめ

非定常状態で動的熱輸送解析を行う事で、従来の定常状態における輸送解析では解らなかった輸送メカニズムを明らかにすることができた。自発トロイダル回転や不純物対流速度として現れる輸送における非拡散項（非対角項）の存在、また ITB 領域の移動や曲率遷移現象に代表される非局所輸送の存在が明らかになった。今後、これらの輸送の原因となっている長距離相関を持つ乱流研究への発展が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① 居田克巳、高温トロイダルプラズマで生じる回転、パリティ、査読無、Vol. 25 (2010) 29
- ② 居田克巳、大型ヘリカル装置で切り拓くプラズマ物理の世界-プラズマの流れと温度の遷移現象、日本物理学会誌、査読無、Vol. 46 (2009) 666
- ③ K.Ida et. al., “Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.49 (2009) 095024
- ④ M.Yoshinuma et. al., “Observations of spontaneous toroidal flow in the LHD”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.49 (2009) 075036
- ⑤ M.Yoshinuma et. al., “Observation of an impurity hole in the Large Helical Device”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.49 (2009) 062002
- ⑥ K.Ida et. al., “Observation of an impurity hole in a plasma with an ion internal transport barrier in the Large Helical Device”, Physics of Plasmas, 査読有 Vol.16 (2009) 056111
- ⑦ K.Ida et. al., “Dynamic Transport Study of the Plasmas with Transport Improvement in LHD and JT-60U”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.49 (2009) 015005
- ⑧ N.Tamura et. al., “Core electron temperature rise due to Ar gas-puff in EC-heated LHD plasmas”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有 Vol.123 (2008) 012023
- ⑨ K.Ida et. al., “Inter-linkage of transports and its bridging mechanism”, Plasma and Fusion Research, 査読有 Vol.3 (2008) S1003
- ⑩ K.Ida et. al., “Bifurcation of heat transport in high temperature plasma”, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有 Vol.77 (2008) 124501
- ⑪ K.Ida et. al., “Transition between internal transport barriers with different curvatures of temperature profiles in JT-60U tokamak plasmas”, Physical Review Letters, 査読有 Vol.101 (2008) 055003
- ⑫ K.Ida, et. al., “Measurement of derivative of ion temperature using high spatial resolution charge exchange spectroscopy with space modulation”, Review of Scientific Instruments, 査読有 Vol.79

(2008) 053506

- ⑬ K.Ida, et.al., “Bifurcation phenomena of a magnetic island at a rational surface in a magnetic shear control experiment”, Physical Review Letters, 査読有 Vol.100 (2008) 045003
- ⑭ N.Tamura, et. al., “Impact of nonlocal electron heat transport on the high temperature plasmas of LHD”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.47 (2007) 449
- ⑮ R.Sakamoto, et. al., “Pellet Injection and Internal Diffusion Barrier Formation in Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research, 査読有 Vol.2 (2007) 047
- ⑯ S.Inagaki, N.Tamura, et. al., “Abrupt reduction of core electron heat transport in response to edge cooling on the Large Helical Device”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有 Vol.48 (2006) A251
- ⑰ R.Sakamoto, et. al., “Repetitive Pellet Fueling for High-Density/Steady-State Operation on LHD”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.46 (2006) 884
- ⑱ K.Ida, et. al., “Slow Transition of Energy Transport in High Temperature Plasma ”Physical Review Letters, 査読有 Vol.96 (2006) 125006

[学会発表] (計 12 件)

- ① 居田克巳他、**運動量輸送における非対角項の観測**、日本物理学会、2010年3月21日、岡山大学
- ② 居田克巳他、Ion internal transport barrier in Large Helical Device, ステラレーターワークショップ、2009年10月12-16日、プリンストン、アメリカ
- ③ 居田克巳他、Spontaneous Toroidal Rotation Driven by the Off-diagonal Term of Momentum and Heat Transport in the Plasma with Ion Internal Transport Barrier in LHD, Hモードワークショップ、2009年9月30-10月3日、プリンストン、アメリカ
- ④ 居田克巳他、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9月27日、熊本大学
- ⑤ 居田克巳他、Non-diffusive and non-local transport in toroidal plasmas, 輸送タスクフォーラム、2009年4月28日-5月1日、サンディエゴ、アメリカ
- ⑥ 居田克巳他、LHDにおける不純物ホール現象、日本物理学会、2009年3月30日、立教大学

- ⑦ 居田克巳他、Observation of an impurity hole in a plasma with an ion internal transport barrier in the Large Helical Device、アメリカ物理学会、2008年11月17-21日、ダラス、アメリカ
- ⑧ 居田克巳他、Dynamics of ion internal transport barrier in LHD heliotron and JT-60U tokamak plasmas、第22回IAEA核融合エネルギー会議、2008年10月17日、ジュネーブ、スイス
- ⑨ 居田克巳他、ビームプラズマ分光法、日本物理学会、2008年9月22日、岩手大学
- ⑩ 居田克巳他 Charge exchange spectroscopy (CXs) and Motional Stark Effect (MSE) spectroscopy in toroidal plasmas、第4回プラズマ計測に関する日韓セミナー、2008年8月25-27日、浦項、韓国
- ⑪ 居田克巳他、磁場閉じ込めプラズマの熱輸送の2次遷移現象、日本物理学会、2008年3月23日、近畿大学
- ⑫ 居田克巳他、磁場閉じ込めプラズマ中の電場と温度分布の構造形成(チュートリアル)、日本物理学会、2007年3月23日、鹿児島大学

○取得状況(計2件)

名称：分光器
 発明者：居田克巳、池田壮
 権利者：核融合科学研究所
 種類：EPC特許
 番号：EP 1 674 844 B1
 取得年月日：平成21年2月4日
 国内外の別：国外

名称：分光器
 発明者：居田克巳、池田壮
 権利者：核融合科学研究所
 種類：米国特許
 番号：7 436 512 B2
 取得年月日：平成20年10月14日
 国内外の別：国外

[その他]

ホームページ等

<http://article.nifs.ac.jp/article/mylist?pid=2>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

居田 克巳 (IDA KATSUMI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
 研究者番号：00184599

(2) 研究分担者

吉沼 幹朗 (YOSHINUMA MIKIROU)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
 研究者番号：20323058

田村 直樹 (TAMURA NAOKI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
 研究者番号：80390631

稲垣 滋 (INAGAI SHIGERU)
 九州大学応用力学研究所・プラズマ材料力学部門・准教授
 (平成18,19年度)
 研究者番号：60300729

坂本 隆一 (SAKAMOTO RYUICHI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授(平成18,19年度)
 研究者番号：10290917

成嶋 吉朗 (NARUSHIMA YOSHIROU)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教(平成18,19年度)
 研究者番号：40332184

笠原 寛史 (KASAHARA HIROSHI)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教(平成20,21年度)
 研究者番号：50435517

鈴木 千尋 (SUZUKI CHIHIRO)
 核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教(平成20,21年度)
 研究者番号：30321615

坂本 宜照 (SAKAMOTO YOSHITERU)
 日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
 (平成20,21年度)
 研究者番号：30354583

大石 鉄太郎 (OISHI TETSUTAROU)
 名古屋大学大学院・工学研究科・助教(平成20,21年度)
 研究者番号：80442523