

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560834  
 研究課題名（和文） 内部及び周辺輸送障壁間の連関ダイナミクスの研究  
 研究課題名（英文） Study on the dynamics of correlations  
 between internal and edge transport barriers  
 研究代表者  
 鎌田 裕 (KAMADA YUTAKA)  
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主席  
 研究者番号：30354567

## 研究成果の概要：

日本原子力研究機構の JT-60 装置で実験を行い、先進トカマクプラズマにおける圧力分布を決定する周辺輸送障壁と内部輸送障壁の相関を研究し、ELM の存在が両者の関係を決定し、それによって、両輸送障壁が支えるプラズマ熱エネルギーのバランス及びプラズマ圧力と回転の空間分布が決定されることを初めて明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2008 年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |

## 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：核融合プラズマ、トカマク、周辺輸送障壁、内部輸送障壁、ELM

## 1. 研究開始当初の背景

トカマク型定常核融合炉や、国際熱核融合実験炉 (ITER) の定常運転では、内部輸送障壁と周辺輸送障壁を合わせ持つ先進運転モード (弱磁気シアモード、負磁気シアモード) を基本的な運転モードとして想定している。これまで、各々の輸送障壁の性質が研究され、これらの制御にはプラズマ電流分布や回転分布が重要であることが分かってきた。また、輸送障壁の形成条件や擾乱に対する空

間構造の応答から、輸送障壁が非局所的 (あるいはセミグローバルな) 自律現象であることが分かってきた。しかし、このような非局所的な空間構造を持つ輸送障壁が同時に存在する場合に、各々を独立に制御できるのか、そのためにはどの程度の局所制御性が必要なのかは未だ明らかになっていない。一方、周辺輸送障壁部には、通常その部分の圧力勾配を駆動源とする ELM と呼ばれる電磁流体力

学的不安定性が周期的に発生し、プラズマの外にエネルギーを放出する（図1）。このELM崩壊の固有関数は周辺輸送障壁部よりプラズマ内部に侵入し、内部輸送障壁位置まで達してこれを劣化させる場合がある。ELMの侵入深さがどのように決まり、どのような影響を内部輸送障壁に与えるのかは、内部輸送障壁と周辺輸送障壁の両立性を決定する本質的な要素であるが、このような研究は未だ端緒についたばかりである。

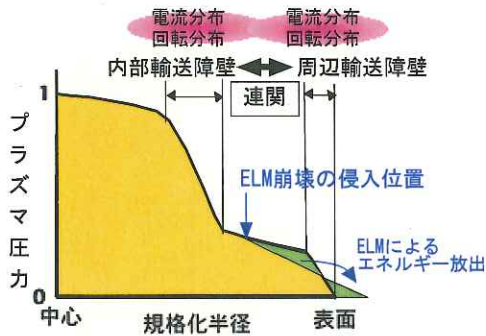


図1：プラズマ圧力の空間分布概念図。  
(内部輸送障壁及び周辺輸送障壁、及びELM崩壊の侵入。)

特に、各国で進められている定常核融合炉を目指す炉心プラズマの研究開発においては、このような内部輸送障壁と周辺輸送障壁を合わせ持つプラズマの理解と開発は最も重要な課題となっている。その中で、このようなプラズマの制御性及びELMが存在する場合の2輸送障壁の両立性に関する研究の重要性が強く認識されるようになり、国際トカマク物理活動の複数のグループで最も重要な研究課題の一つに挙げられるようになった。しかしながら、これまで極断片的な観測しか報告されていない。研究代表者等は、それまで、ELMの研究、内部及び周辺輸送障壁を合わせ持つプラズマのエネルギー閉じ込め性能やプラズマ圧力限界の研究を重ねて来た。そして、ELM崩壊が内部輸送障壁により遮蔽される場合と、内部輸送障壁を崩す場合があることを発見した。本研究は、この発見を端緒として、「非局所的構造形成を伴う自律現象」がプラズマ内部と周辺部に同時に2つ存在する系のダイナミクスに研究を拡張するものであ

る。

## 2. 研究の目的

本研究は、核融合プラズマの内部及び周辺部に自己形成される輸送障壁間の連関とそのダイナミクスを、輸送及び電磁流体力学的安定性の観点から実験的に解明することを目的とする。これは、これまでになされていない、新たな試みである。輸送障壁の形成条件は、回転分布や電流分布の空間構造で決まる一方、輸送障壁自体の成長につれて回転や電流の分布が比較的大きな特性長で変化する。さらに、輸送障壁は、「空間構造」として振る舞い、局所量の変化が構造全体を変化させる。このような「非局所的構造形成を伴う自律現象」がプラズマ内部と周辺部に同時に2つ存在する系を対象とする（図1）。その動特性の理解のため、自発的な擾乱であるELMや2輸送障壁の間の領域への局所的加熱・回転・電流駆動等の印加を用いる。さらに、ELMの存在下で内部及び周辺部輸送障壁を合わせ持つプラズマの定常状態とその決定要素を明らかにする。

## 3. 研究の方法

日本原子力研究開発機構の臨界プラズマ試験装置(JT-60)における実験研究を中心に、以下のように進める。

### (1) 計測機器の調整

荷電交換分光測定装置、及び電子サイクロトロン放射測定装置、トムソン散乱計測のデータに関し、通常に比べてより高空間・時間分解のデータ取得が必要であるため、データ誤差評価、同時性確保、解析用データ処理機能の改良を行う。

### (2) 広範なパラメータ領域における内部輸送障壁及び周辺輸送障壁が支えるプラズマ圧力間の相関の解析

JT-60装置において、プラズマ電流、電子密度、加熱パワーをスキャンした実験を行う。

### (3) ELM崩壊時の内部輸送障壁動特性の解析

周辺現象であるELM崩壊のプラズマ内部への影響(ELM侵入)を電子系及びイオン系各々に関して解析する。さらに、内部輸送障壁へ

のELM侵入の影響を調べる。

(4) ELM崩壊及びLH遷移時のプラズマ回転変化の空間構造解析

ELM崩壊及びLH遷移時のプラズマ回転分布の時間発展を詳細に解析し、内部輸送障壁構造の応答を評価する。

4. 研究成果

内部輸送障壁 (ITB) と周辺輸送障壁 (ETB) は、各々、電流分布、圧力分布及び回転分布が相関してその空間構造とダイナミクスを決定する自律系を成している。この内部輸送障壁と周辺輸送障壁の相関として考えられるのは、図2に示すように、i) 内部輸送障

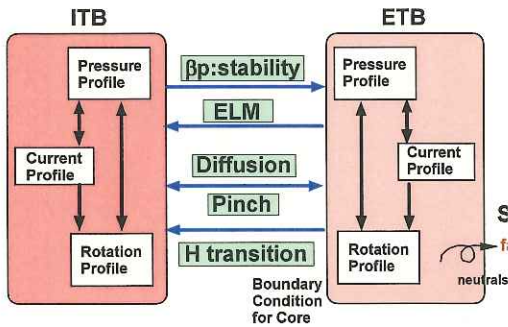


図2：本研究で着目した、内部輸送障壁 (ITB) と周辺輸送障壁 (ETB) の相関

壁の成長とともに全ポロイダルベータ ( $\beta_{p-tot}$ : プラズマ圧力の指標) が上昇し、それによるシャフラノフシフトの上昇によって周辺輸送障壁の圧力限界を決めるMHD安定性 (ELM安定性) を改善すること、ii) 周辺部MHD不安定性であるELM崩壊が内部輸送障壁に影響を与えること、iii) 内部輸送障壁及び周辺輸送障壁で形成される温度、密度、回転等の空間分布が、輸送 (拡散及び対流) によって相関すること、iv) 周辺部でのLH遷移が内部輸送障壁に影響すること、等である。これらに着目し、実験研究を進め、以下の成果を得た。

成果1：全プラズマ圧力とともに上昇するペデスタル圧力

これまで、同じプラズマ電流・トロイダル磁場・プラズマ形状では、ELMのあるHモードの周辺ペデスタル圧力は一定であると考えられており、ITER等への予測もこれに基づいていた。しかし、研究代表者らは、これまでの研究で、初めてペデスタル圧力が全プラズマ圧力とともに上昇することを発見した。これは、プラズマ加熱パワーとともにペデスタル圧力が上昇し得ることを意味している。「ペデスタル部」とは、周辺輸送障壁で支えられた高圧力勾配を持つプラズマ周辺部を指す。研究代表者らを含む国際トカマク物理活動では、これに基づき、各国トカマク装置でのデータ収集を行い、研究代表者らの見いだした関係が他装置においても成り立つことを確認した。これを受け、本研究では、これまでよりも広いプラズマ電流領域 (1MA - 1.8MA) でこの関係が成り立つことを確認し、「周辺ペデスタル部のポロイダルベータ値 ( $\beta_{p-ped}$ ) は、全ポロイダルベータ ( $\beta_{p-tot}$ ) とともにほぼ直線的に上昇する」ことを結論した (図3 (a))。このとき、プラズマ断面形状の三角度とともにこの相関が強まることを初めて示した (図3 (b))。

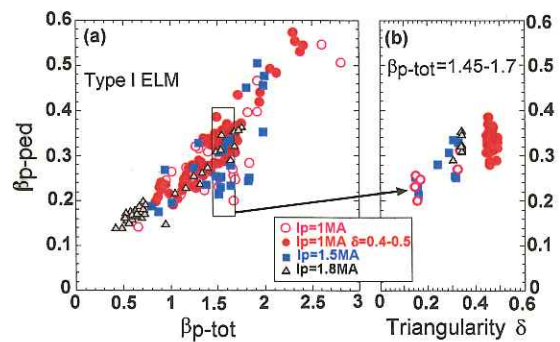


図3：(a) 全ポロイダルベータ値 ( $\beta_{p-tot}$ ) と周辺ペデスタル部ポロイダルベータ値 ( $\beta_{p-ped}$ ) の関係。(b)  $\beta_{p-tot}$ 一定での、 $\beta_{p-ped}$ とプラズマ断面三角度 (Triangularity) の関係。

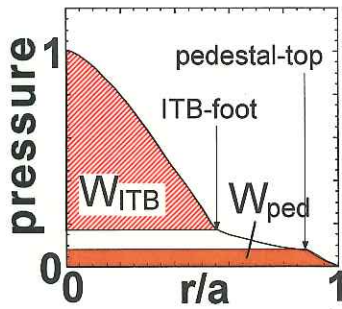


図4：内部輸送障壁が支えるプラズマ蓄積エネルギー ( $W_{ITB}$ )、周辺輸送障壁が支える蓄積エネルギー ( $W_{ped}$ ) の定義

成果2：内部輸送障壁及び周辺輸送障壁が支えるプラズマ圧力のバランス

上記成果1の関係より、内部輸送障壁で支えられる蓄積エネルギー ( $W_{ITB}$ : 図4参照) の増加により、全熱化蓄積エネルギー ( $W_{th}$ ) が上昇し、その結果、ペDESTAL蓄積エネルギー ( $W_{ped}$ ) が上昇する (図5 (a))。このとき、成果1に示すように、 $W_{ped}$  と  $W_{th}$  の比は内部輸送障壁の状態 ( $W_{ITB}$ ) によらず、一定である。一方、 $W_{ITB}$  と  $W_{th}$  の比は、はじめ、 $W_{ITB}$  の上昇とともに増加するが、次第に飽和する。この結果、最終的に  $W_{th}$ 、 $W_{ped}$  及び  $W_{ITB}$  の3者の比率が一定となることを見いだした。

成果3：内部輸送障壁の成長を妨げる ELM

成果2に示したように、内部輸送障壁が支える蓄積エネルギーが上昇すると、ペDESTAL蓄積エネルギー ( $W_{ped}$ ) が増加する。一方、そのペDESTAL蓄積エネルギー ( $W_{ped}$ ) の上昇とともに ELM のプラズマ中への侵入距離が深くなり、最終的に内部輸送障壁に達する (図6：時刻5.8秒以降)。この状態になると、内部輸送障壁位置 (半径) はそれ以上広がることができなくなり、また、その障壁は弱くなる。このようにして、全熱化蓄積エネルギー ( $W_{th}$ ) に対する内部輸送障壁内での蓄積エネルギー ( $W_{ITB}$ ) 及びペDESTAL蓄積エネルギー ( $W_{ped}$ ) が一定となる。即ち、成果2の「 $W_{th}$ 、 $W_{ped}$  及び  $W_{ITB}$  の3者の比率が一定となる」理由は、成果1の関係に加えて、ELMによる内部輸送障壁の成長抑制にあることを明らかにした。

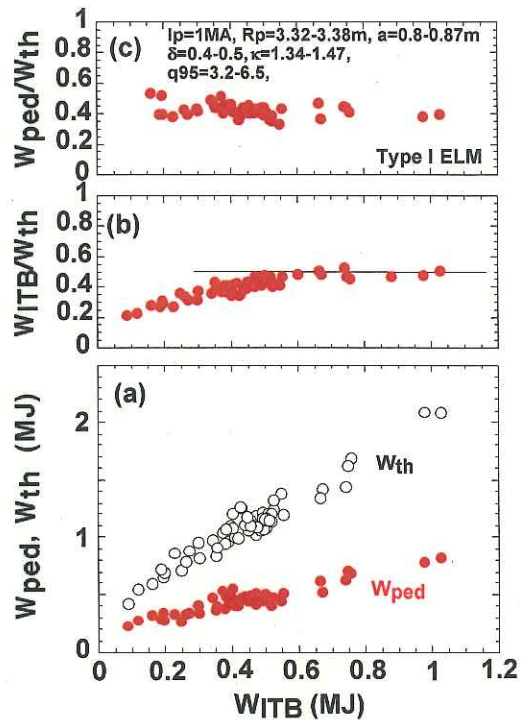


図5： $W_{ITB}$  の上昇によらず、 $W_{ped}/W_{th}$  は一定であるが、 $W_{ITB}/W_{th}$  は、はじめ上昇し、飽和する。最終的に  $W_{th}$ 、 $W_{ped}$  及び  $W_{ITB}$  の3者の比率は一定となる。

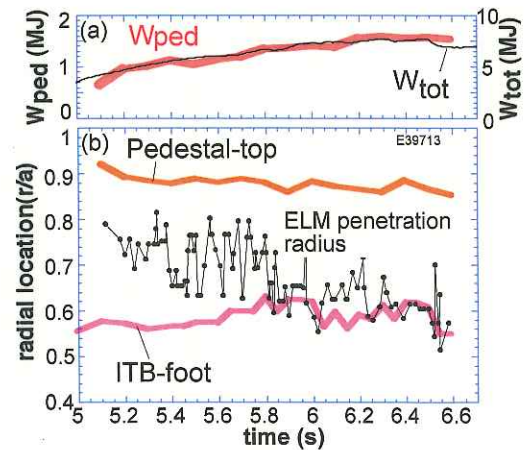


図6：プラズマ電流1.8MAの放電時間発展。(a)ペDESTAL蓄積エネルギー  $W_{ped}$  と全蓄積エネルギー ( $W_{tot}$ ) が比率一定で時間発展する。(b)ペDESTAL頂部 (Pedestal-top) の半径位置がプラズマ内部に広がるとともに ELM侵入位置 (ELM penetration radius) が深くなり、内部輸送障壁位置 (ITB-foot) に達する。

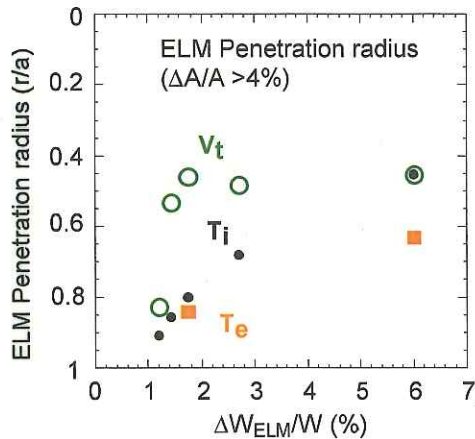


図7: ELM の大きさ (ELM 崩壊時の蓄積エネルギーの減少率:  $\Delta W_{ELM}/W$ ) と ELM によって 5ms 以内に変化が発生する半径方向位置の関係。変化が生じる位置は、プラズマ回転 ( $V_t$ )、イオン温度 ( $T_i$ )、電子温度 ( $T_e$ ) の順に深い。

#### 成果4: ELM 崩壊及び LH 遷移のプラズマ内部への影響

ELM 崩壊及び LH 遷移によるプラズマの応答は、熱エネルギーに比べて運動量 (あるいは回転) に顕著であることを発見した。即ち、i) ELM による周辺部のトロイダル運動量の減少は、熱エネルギーの減少に比べて大きいこと、ii) さらに、ELM 侵入距離はトロイダル回転の方がイオン温度よりも深く (図7)、内部輸送障壁内部に達することを見いだした。また、LモードからHモードへの遷移 (LH 遷移) 時に、まずプラズマに自発的な回転が誘起され、その後、周辺イオン温度と回転が同じ時間スケールで発展することを見いだした (図8)。

以上より、ELM のある状態において、内部輸送障壁の成長は、周辺輸送障壁の成長をもたらさず (成果1) が、この周辺輸送障壁の成長は、ELM を大型化し、この大型化した ELM が内部輸送障壁の成長を妨げ (成果3)、この結果、最終的に  $W_{th}$ 、 $W_{ped}$  及び  $W_{ITB}$  の3者の比率が一定となり、内部輸送障壁及び周辺輸送障壁を包含するプラズマ中心部から周辺部までの全圧力バランスが決定される (成果2)。このとき、周辺現象である ELM によ

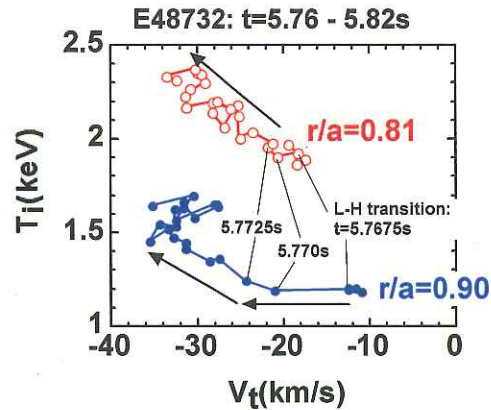


図8: LH 遷移後のプラズマ回転 ( $V_t$ ) とイオン温度 ( $T_i$ ) の時間変化 (青: プラズマ半径の 0.9 の位置及び赤: 0.81 の位置)。LH 遷移後、プラズマ表面近傍 ( $r/a=0.9$ ) では、イオン温度一定のまま、まず回転が変化する。

て中心部まで最も大きな影響を受けるのはプラズマ回転であることが分った。このプラズマ回転の変化が、ELM による内部輸送障壁の劣化 (あるいは成長の抑制) に重要な役割を果たしているかもしれない。

#### 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1件)

- ① 「Balance of the Stored Energies Sustained by the Internal and Edge Transport Barriers and Effects of ELMs and L-H transitions in JT-60U」  
Nuclear Fusion (投稿中)  
Y. Kamada, M. Yoshida, Y. Sakamoto, Y. Koide, N. Oyama, H. Urano, K. Kamiya, T. Suzuki, A. Isayama, and the JT-60 Team

[学会発表] (計4件)

- ① 「JT-60U プラズマにおける運動量輸送物理の研究と今後の展望」  
鎌田 裕  
招待講演  
日本物理学会第64回年次大会、  
2009年3月27日、立教大学

- ② 「Correlation between the edge and the internal transport barriers in JT-60U」  
Y. Kamada, M. Yoshida, Y. Sakamoto, Y. Koide, N. Oyama, H. Urano, K. Kamiya, T. Suzuki, A. Isayama, and the JT-60 Team  
IAEA主催第23回国際核融合エネルギー会議、  
2008年10月23日、スイス/ジュネーブ
- ③ 「Plasma Rotation Research for Advanced Tokamak Plasma Control in JT-60U」  
招待講演  
Y. Kamada and the JT-60 Team  
第49回アメリカ物理学会  
2007年11月16日、米国オーランド
- ④ 「Real time control of plasma performance and response of plasma parameters to external drives in JT-60U」  
Y. Kamada and the JT-60 Team  
第6回 IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research  
2007年7月6日、犬山市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鎌田 裕 (KAMADA YUTAKA)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主席  
研究者番号: 30354567

### (2) 研究分担者

大山 直幸 (OYAMA NAOYUKI)  
独立行政法人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  
研究者番号: 80354596  
坂本 宜照 (SAKAMOTO YOSHITERU)  
独立行政法人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  
研究者番号: 30354583

吉田 麻衣子 (YOSHIDA MAIKO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職  
研究者番号: 20391261  
浦野 創 (URANO HAJIME)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職  
研究者番号: 70391258  
諫山 明彦 (ISAYAMA AKIHIKO)  
独立行政法人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  
研究者番号: 90354597

### (3) 連携研究者

なし