

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：63902

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860064

 研究課題名（和文）ヘリカル装置周辺領域におけるプラズマブロップ輸送の
3 次元の定量評価

 研究課題名（英文）Three dimensional quantitative estimation of blobby plasma transport
in the edge region of the helical device

研究代表者

田中 宏彦 (TANAKA HIROHIKO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60609981

研究成果の概要（和文）：大型ヘリカル装置 LHD の周辺領域で発生する Plasma Blob 輸送ならびに類似する間欠的輸送現象を計測・解析した。2 芯高速掃引プローブで同時計測したイオン飽和電流に対して相互相関解析および磁場構造解析を行うことで、仮定をおいた上での Plasma Blob 輸送速度およびサイズを定量的に評価した。複数位置に設置されたダイバータ板上での多地点同時計測を行うことで、特に共鳴摂動磁場を印加した非接触ダイバータ状態時において揺動伝搬特性に明瞭なトロイダル異方性が観測された。

研究成果の概要（英文）：We have investigated intermittent plasma transport such as the blobby plasma transport in the edge region of the Large Helical Device (LHD). From analyses of two ion saturation current signals and magnetic geometry, we quantitatively estimated blob propagation velocity and size on a theoretical assumption. During resonant magnetic perturbation assisted detached operation, strong toroidal asymmetry was found in the propagation characteristics by multi-point measurement on several divertor plates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
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：Blob・静電揺動・ヘリカル・ダイバータ・統計的解析・非拡散的輸送・非接触プラズマ・共鳴摂動磁場

1. 研究開始当初の背景

熱核融合装置の高性能プラズマを安定に維持し支えるためには、プラズマ閉じ込め領域の外側に存在する“周辺プラズマ”の制御が必須となる。近年、トカマク装置の周辺プラズマ中において、磁場を横切る間欠的な対流輸送現象 (Plasma Blob 輸送) が発見され、同領域中の密度分布やプラズマ流の方向を規定するなど特に重要な現象であることが示されている。研究代表者らはこれまでの一

連の研究で、3 次元的で複雑な磁場構造をもつヘリカル装置においても Plasma Blob の存在を確認しているが、その詳細な特性（輸送速度、サイズなど）は明らかでなく、輸送の 3 次元的な振る舞いも未知である。

加えて、“非接触ダイバータ”と呼ばれる中性ガス圧を増加させた実験条件においては、間欠的に輸送される粒子束の増大を示唆する結果がヘリカル装置ならびに直線型装置において得られている。このような磁場を

横切る輸送は、ダイバータ板に局所的に流入する熱・粒子束を広域化させ、プラズマ負荷を低減させる効果が期待できることから、材料保護の点で好ましい現象と捉えることができる。

したがって、同輸送特性を定量的に把握し、周辺プラズマ中の全輸送への寄与や影響を評価することは極めて重要であるが、これまで十分に明らかとなっていない。さらに、輸送増大に寄与する条件が明瞭なものとなれば、将来的に輸送発生量を制御できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は大型ヘリカル装置 LHD で発生する Plasma Blob 輸送が周辺領域に与える影響を明らかにする。具体的には、局所における Plasma Blob の輸送速度、大きさ、ならびに運ばれる粒子束割合の定量評価を試み、加えてトロイダル方向・ポロイダル方向の3次元的な輸送特性の異方性を調査する。局所的な定量的計測と広域的な定性的計測を組み合わせることで、ヘリカル装置全域における輸送特性を外挿評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) LHD の主な磁場は一对のヘリカルコイルにより形成されるため、磁場勾配方向とプラズマの圧力勾配方向は空間的にトカマク装置と異なる関係となる (図1 参照)。Plasma Blob はその輸送理論から、磁場勾配・圧力勾配それぞれが同方向を向く領域で顕著に発生することが予想され、LHD ではエルゴディック領域の一部とダイバータレッグプライベート領域間が同条件と合致する。

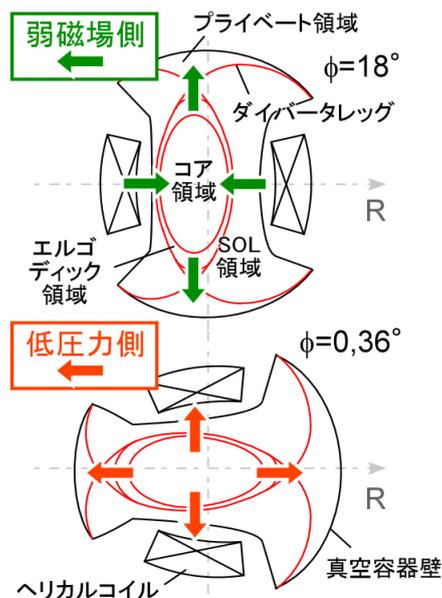


図1 (a)弱磁場方向および(b)低プラズマ圧力方向の空間的な分布

Plasma Blob の存在は、電気的な揺動 (静電揺動) 中に間欠的なスパイク成分として確認される。そこで本研究ではダイバータレッグプライベート領域間を横断して計測可能な高速掃引型の静電プローブを使用して (図2 参照)、電子密度揺動と相関の強いイオン飽和電流 I_{sat} 揺動を高時間分解能計測する。得られた揺動に流体分野で開発された各種統計的解析手法 (確率密度関数、Skewness、揺動レベル、フーリエ解析、ウェーブレット解析、相関解析、条件付き平均など) を適用することで、トカマク装置で観測される Plasma Blob 輸送との共通点、相違点を明らかにするとともに、定量的な輸送特性を評価する。

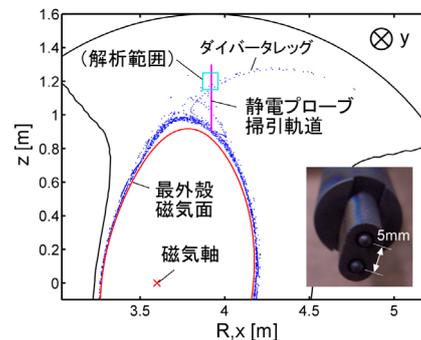


図2 高速掃引プローブの掃引軌道と磁力線貫通パターン、およびプローブヘッド写真

(2) 間欠的輸送により磁場を横切り運ばれる粒子束割合を評価するためには、 I_{sat} 揺動とともに、浮遊電位揺動を2点同時計測することで電場揺動を取得する必要がある。これを達成するため、過去にトカマク装置では Plasma Blob 飛行方向と垂直な面上に3芯以上の電極を並べた多芯プローブ計測が行われている。LHD においても同様の計測が可能な静電プローブヘッドを磁場構造解析の後設計・製作し、粒子束割合評価を試みる。

(3) LHD ではダイバータ部での効率的な中性粒子圧縮とその排気を目的として、ダイバータ板を炉心に対して立たせた構造とする“閉構造化”工事が進行中である。これに伴いトロイダル・ポロイダル角位置の異なるダイバータ板上に静電プローブ電極が計約300箇所埋め込まれる。本研究ではこのようなダイバータプローブに高時間分解能計測器を配備し、 I_{sat} 揺動を同時計測・解析する。特に、LHD では $m/n=1/1$ (m, n はそれぞれポロイダルおよびトロイダルモード数) の共鳴摂動磁場を印加した際に非接触ダイバータ状態が安定に維持されることが分かっている。同条件における揺動伝搬特性の広域的な異方性の有無を同定するとともに、高速掃引プローブによりダイバータ板上流部の静電揺動信号を取得する。

4. 研究成果

(1) 図2の挿入写真に示す2芯静電プローブヘッドにより計測した I_{sat} 揺動を解析した。ここで各電極は直径 2 mm の炭素材料で構成され、同図の x - y 平面上、磁場とおおよそ垂直となる方向に 5 mm 離れている。

図3 (a)に赤道面からの高さ z に対する I_{sat} の分布を示す。ここで各電極は z の大きな側（プライベート領域）から挿入されており、ダイバータレッグに侵入したところで I_{sat} の値が大きくなっている（図2記載の解析範囲に対応）。各電極間ではダイバータレッグへの侵入高さにズレがあるが、これはダイバータレッグが図2の紙面垂直方向にも傾いた3次元構造を有することに起因する。図3 (b)より Plasma Blob 輸送発生時の典型的な特徴である $\text{Skewness} > 0$ がダイバータレッグのプライベート領域側側面で見られている。ダイバータレッグ内には $\text{Skewness} < 0$ の領域もあり、トカマク装置の最外殻磁気面近傍で観測される Hole 発生領域の特徴と一致する。ただし揺動の大きさを規格化した指標である揺動レベルはトカマク装置のそれと比べて小さく、相違する特徴である。揺動の伝搬速度を求めるため、相互相関解析を行った結果を図3 (d)に示す。これより、Plasma Blob 輸送が発生していると予想される領域での揺動の時間遅れは約 3.5 μs と見積もられた。

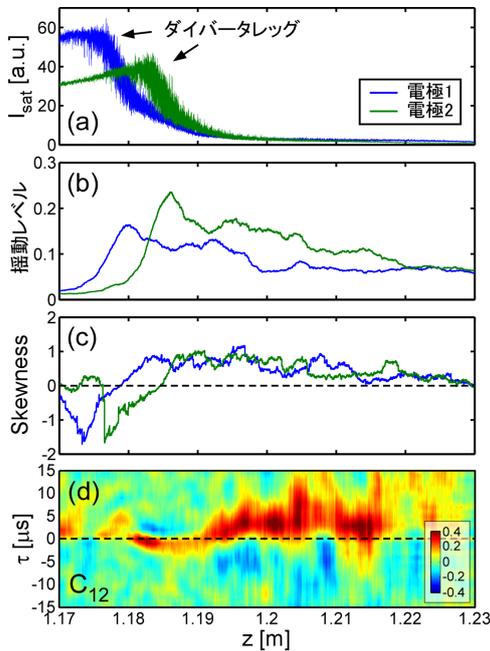


図3 (a) 2芯電極で計測された I_{sat} の z 方向分布、(b) バンドパスフィルタ信号の揺動レベル、(c) Skewness、(d) 相互相関係数

図4にダイバータレッグ近傍の3次元的な磁場構造を電極掃引軌道とともに示す。図中、磁力線接続長 L_c の長い領域がダイバータレ

ッグに相当する。Plasma Blob は理論的に弱磁場方向に輸送されると予想されており、同図より弱磁場方向がプローブ電極の並ぶ x - y 平面に対し有限の角度をもっていることがわかる。この角度を求め、加えて相互相関解析から得られた時間遅れを用いることで、Plasma Blob が弱磁場方向に輸送されているとした仮定上での輸送速度およびサイズを定量的に評価した（ ~ 530 m/s、 ~ 5.3 mm）。これらはトカマク装置で得られるパラメータと同程度である。

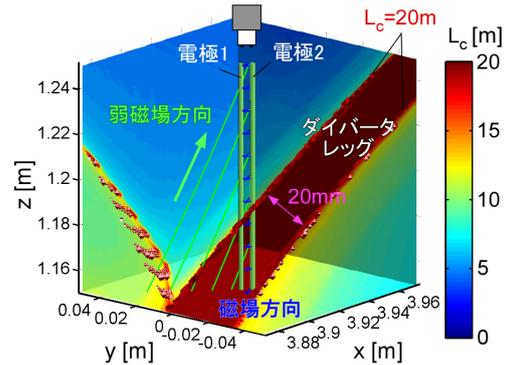


図4 ダイバータレッグ近傍の電極の掃引軌道および3次元的な磁場構造

(2) 図4の磁場構造解析結果をもとに、弱磁場方向に対して対面する構造をもった3芯プローブヘッドを新規に設計・製作した。実験では電気的な問題のために研究期間内の運用に至らなかったため、次年度以降に使用する予定である。



図5 新規製作した3芯プローブヘッド

(3) 2012年度増設分の閉構造ダイバータ板上に埋め込まれたトロイダル方向 240 チャンネルの静電プローブ電極に対して高時間分解能計測系を整備した。計 12 枚（1 枚につき 20 チャンネル）の閉構造化されたダイバータ板上において I_{sat} 揺動を計測・解析したところ、特に共鳴摂動磁場を印加した非接触ダイバータ状態において、揺動伝搬特性に明瞭なトロイダル異方性が観測された。図6に特徴的な3枚のダイバータ板上での I_{sat} 揺動を示す。5.2 秒付近から非接触ダイバータ状態となっており、図(a)のタイトル上ではプライベ

ート領域方向への揺動伝搬が顕著に見られ、図(b)のタイトル上では SOL 側への揺動伝搬、図(c)では揺動伝搬が生じていない。このような異方性はダイバータレッグからの Plasma Blob 輸送のみでは説明できず、より上流位置のエルゴディック層近傍で生じた間欠的輸送がダイバータ板上で検出されたものと考えられる。高速掃引プローブによる計測結果も含めて、間欠的輸送発生位置は磁気島構造位置と密接な関係を有することが示唆されている。

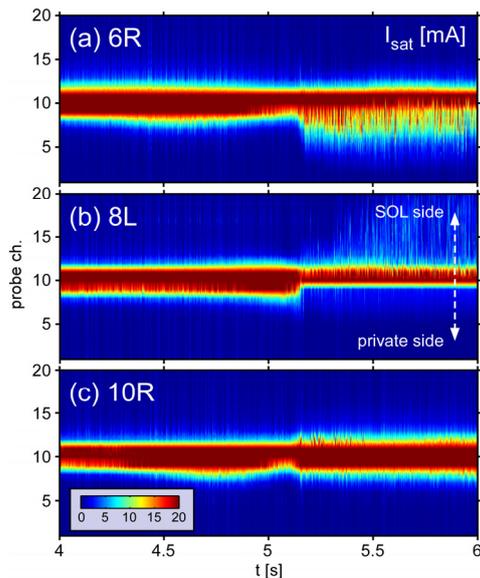


図6 異なるダイバータタイトル上で計測された I_{sat} の時間発展

(4)本研究は揺動の統計的解析に数値解析ソフトウェア MATLAB を用いており、作成した汎用解析プログラム群はホームページ上で以前より公開している。統計的手法は有用な解析ツールの一種であり、どのような分野でも適用できるものである。プラズマ分野に限らず様々な研究領域への波及を期待して、プログラムの更新を行った。

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2件)

- ① H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, T. Morisaki, Y. Tsuji, and the LHD Experiment Group, “Intermittent Transport in Edge Plasma with a 3-D Magnetic Geometry in the Large Helical Device”, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 2013 (In press). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.117
- ② H. Tanaka, N. Ohno, Y. Tsuji, S. Kajita, S. Masuzaki, M. Kobayashi, T. Morisaki,

A. Komori, and the LHD Experimental Group, “Blob/Hole Generation in the Divertor Leg of the Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research, 査読有, 7巻, 2012, 1402152. DOI: 10.1585/pfr.7.1402152

[学会発表] (計6件)

- ① 田中宏彦, 増崎貴, 大野哲靖, 森崎友宏, 小林政弘, 辻義之, LHD 実験グループ, “LHD 周辺領域における多点静電揺動計測”, 第29回プラズマ・核融合学会年会, 2012年11月27-30日, クローバープラザ, 福岡.
- ② H. Tanaka, N. Ohno, S. Masuzaki, T. Akiyama, M. Kobayashi, Y. Tsuji, and LHD Experiment Group, “Non-Diffusive Cross-Field Transport in the LHD Detached Divertor Plasma”, 22nd International Toki Conference, November 19-22, 2012, Toki, Japan.
- ③ H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, T. Morisaki, Y. Tsuji, and the LHD Experimental Group, “Intermittent Transport in the Edge Plasma with a 3-D Magnetic Geometry on the Large Helical Device”, May 21-25, 2012, Aachen, Germany.
- ④ 田中宏彦, 増崎貴, 大野哲靖, 森崎友宏, 辻義之, LHD 実験グループ, “LHD 諸条件における周辺プラズマ揺動の統計的解析”, 日本物理学会 2012 年年次大会, 2012年3月24-27日, 関西学院大学, 兵庫.
- ⑤ 田中宏彦, 増崎貴, 大野哲靖, 森崎友宏, 小林政弘, 辻義之, 林祐貴, 江角直道, LHD 実験グループ, “LHD 周辺領域で発生する間欠的プラズマ輸送現象の研究”, Plasma Conference 2011, 2011年11月22-25日, 石川県立音楽堂, 金沢.
- ⑥ H. Tanaka, N. Ohno, Y. Tsuji, S. Kajita, S. Masuzaki, M. Kobayashi, T. Morisaki, and A. Komori, “Blob/hole generation near the divertor leg in LHD”, 1st Asia Pacific Transport Working Group International Conference, June 14-17, 2011, NIFS, Japan.

[その他]

- ① MATLAB/Octave プログラム公開ページ: <http://www.ees.nagoya-u.ac.jp/~koukai/purakaku85/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 宏彦 (TANAKA HIROHIKO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 60609981