

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760701

研究課題名(和文) 熱輸送伝搬を利用した磁場構造研究

研究課題名(英文) Study of magnetic structure using heat pulse propagation

研究代表者

土屋 隼人(Tsuchiya, Hayato)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90509522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリカルプラズマの周辺領域に存在するストキャスティック磁場領域と閉じた磁気面の境界面を実験的に評価する手法としてヒートパルス伝搬手法を検証した。最外磁気面近傍でのヒートパルス伝搬の様相を調べ、ストキャスティック領域が拡大していることが分かった。ヒートパルス伝搬を測定する電子サイクロトロン放射計測(ECE)について従来より空間分解能を向上させる手法を開発しプラズマ実験において実証した。

研究成果の概要(英文)：The heat pulse propagation method was experimentally verified as an estimation method of the boundary surface between closed surface and stochastic magnetic field region in surrounding area of helical plasma. The aspect of the propagation of heat pulse around last closed surface was investigated, and it is found that the stochastic magnetic field region was expanded. The new technique of electron cyclotron emission measurement, which is used for the measurement of heat pulse propagation, has been developed and was demonstrated in a plasma experiment.

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：ストキャスティック磁場 電子サイクロトロン放射計測 ヘリカルプラズマ 大型ヘリカル装置 ギガヘルツサンプリング

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合プラズマと磁場構造

熱核融合研究における最重要テーマは、高温高密度プラズマの長時間安定閉じ込めである。近年、コアプラズマの閉じ込めの改善を伴う内部輸送障壁の形成、電場シアによる帯状流の形成など閉じ込め改善につながる現象が発見され、核融合プラズマパラメータ達成にはこれらの現象の理解と制御が不可欠であることが広く認識されている。その一方、磁力線の繋ぎ変えに起因するグローバルな異常損失など解決すべき課題も残されている。プラズマは磁力線に巻き付く性質を持つため、磁場構造はプラズマ閉じ込めを決める最も基本的な条件である。核融合プラズマ実験装置の多くはトーラス状の形状をしているのも、磁力線に巻き付いたプラズマを周回させて閉じ込めるためである。しかし、放電中はコイルが形成する磁場とプラズマ中に流れる電流で形成する磁場が重なり合うための磁場構造は複雑に変化することがある。プラズマ中の磁場構造を知ることが核融合研究に非常に重要である。

(2) ストキャスティック磁場と測定

外部コイルで形成された磁場は層構造を成しているが、不正磁場やプラズマ電流により乱れた磁力線構造(ストキャスティック磁場)をもつ。ヘリカル型の装置の場合、周辺領域はストキャスティック磁場が存在することが真空中の磁力線追跡計算の結果知られている。プラズマの総体積を定義することなどから放電中のストキャスティック磁場と閉じた磁気面の境界面(最外殻磁気面)を規定する必要があるが、プラズマの磁場を直接測定することは難しい。また、周辺領域のストキャスティック磁場の磁力線は壁につながっているため、プラズマは無限にはトーラスを周回できないが、有意な密度と温度を持ったプラズマは存在する。そこでプラズマに動的な摂動を与えてその応答を観測することで磁力線のつながり方を類推できる。この手法は閉じた磁気面中では例があるが、周辺領域では未だ試されていない。

(3) 微細構造の測定手法の開発

本研究では電子サイクロトロン放射計測を用いて電子温度の摂動を観測するが、同計測を用いてプラズマ中の乱流的な揺動を測定する手法も試みられた。プラズマ中の乱流は閉じた磁気面領域、ストキャスティック磁場領域ともに密度や温度の勾配が急峻な所に発生すると考えられている。実験的には、計測手法の乏しさから大型装置での議論が進んでいない。微細構造の計測は複雑に変化するストキャスティック磁場中のプラズマ応答の測定にも活用できる。

2. 研究の目的

(1) 周辺プラズマにおいてストキャスティック磁場を測定する手法の妥当性の検証

後述 3.(2)で述べるヒートパルス伝搬を用いて磁場構造を特定する手法を用いるが、ヒートパルス伝搬は従来プラズマ中心領域で発生させており、周辺領域では観測手段がないために行われてこなかった。本研究では新たに低電子温度が予測される周辺領域において視野をもつ ECE 計測を導入し、実験計測を行う。低電子温度領域でヒートパルス伝搬の計測実証と計測結果と予測されるヒートパルス伝搬の様相との比較を行い、手法の妥当性を検証する。

(2) 最外殻磁気面の検証

最外殻磁気面の位置を同定する。電子温度分布や電子密度分布に反映された最外殻磁気面とヒートパルス伝搬で検証される最外殻磁気面の比較や、最外殻磁気面近傍のヒートパルス伝搬の様相を検証する。

(3) 微細構造を特定する電子サイクロトロン放射計測手法の開発

周辺磁場の微細構造に対応した電子揺らぎの応答や、乱流などのプラズマの微細構造を計測するために、空間分解能を向上させうる新たな手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 使用実験装置

本研究は実験的研究である。国内最大級のトーラスプラズマ装置である大型ヘリカル装置(LHD:Large Helical Device)(自然科学研究機構・核融合科学研究所)にて行う。ヘリカル型はトカマク型に比べ周辺領域のストキャスティック層が潜在的に広く本研究の趣旨に適している。

(2) 実験手法

磁場の構造を類推するために、能動的にプラズマに摂動を与える手法をとる。電子サイクロトロン加熱(ECH)より局所的にプラズマを加熱し、そのパワー変調により中心領域から周辺領域へと伝搬するヒートパルスを発生させ、その伝搬の時間遅れを観測することで磁場構造を類推することができる。

図1にヒートパルス伝搬実験の予測される典型的な結果をモデル図で示す。上図は、ECHのパワー波形とプラズマ中の代表点(R0~3)の電子温度波形であり、下図は真空中で計算された磁力線のポアンカレ図(LHDの横長断面のトーラス外側領域のみ表示)と予想されるヒートパルスが到達する遅れ時間である。ポアンカレ図の層状の中心部は層構造の閉じた磁気面を表しており周辺領域

のまだらな部分がストキャスティック領域である。R0 にECHの加熱領域を設定した場合、R0の電子温度($T_e@R=R_0$)はECHのパワー変調に同期した応答を示す。R1からR2には磁力線に垂直方向にヒートパルスが伝搬するため時間遅れを生じた波形を観測する。一方、ストキャスティック領域にあるR2とR3では、同じ磁力線がポロイダル断面の異なる半径位置を入り乱れて通過するために、R2とR3を通過する磁力線はトーラスを周回してつながっている。そのため、プラズマ中の熱もプラズマの磁力線に沿う運動とともに早くつたわる。従ってR2とR3の波形の時間遅れは、R1とR2のそれと比べ非常に小さい値になる。

このように、ECHによりヒートパルスを発生させ、その応答を観測することで、ストキャスティック領域と閉じた磁気面の境目を推し量ることができると考えられる。また、磁気島が存在する場合は時間遅れが部分的に逆転する現象が観測されるため、磁気島の存在も確認することができる。

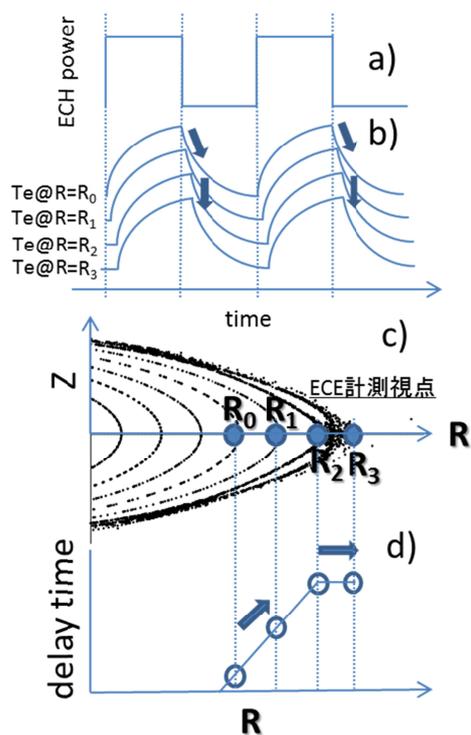


図 1 磁場構造の違いによるヒートパルス伝搬の違い

(3) 計測装置

ヒートパルスは電子温度の変動として計測するため、本研究では電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測を用いた。本研究で着眼している周辺領域は本来温度が低く ECE 計測には不向きであるが、本研究では能動的に発生させるヒートパルスを測定するため、温度の揺らぎを観測しやすくノイズ比はあま

り問題にならない。そこで、周辺領域に視野をもつ ECE 計測を新規に設置し実験観測を行った。また、微細構造測定のために、100ギガヘルツの ECE をダウンコンバートした中間周波数帯 (IF) の波形を直接サンプリングすることで、空間分解能と時間分解能の自由度が大きくなる新手法を導入した。

4. 研究成果

(1) ヒートパルス伝搬実験

LHD において中性粒子入射加熱で生成したプラズマを用いて実験を行った。プラズマ電流による磁場の変動が小さくなるようにプラズマ電流をなるべく小さくする条件を選び、36ヘルツでパワー変調されたECH加熱を印加しヒートパルスを発生させた。

図2に代表的な実験結果としてECE計測点と計測された電子温度の変動の波形を示す。左図中の一番左側の赤点の付近から発生したヒートパルスが周辺部に伝搬した所を右図のようにパワー変調の周波数に同期した温度変動として観測することができた。示した3点は最外核磁気面近傍と予測される領域の計測点である。波形解析をした結果が図3である。図中の塗りつぶし点は図2で示した3点の波形と対応している。左図はヒートパルスの振幅を示し、右図は遅れ時間を示したものである。有意な時間遅れが観測されず、ストキャスティック領域が広がっていることが示唆された。また、振幅の分布については予想される最外核磁気面で急激な減少が見られることが分かった。この急激な減少が見られる点は電子温度分布にも反映されており、ヒートパルスの振幅も磁場構造測定の判断材料になることを示唆している。振幅と遅れ時間にあわれる特徴の違いはストキャスティックの度合いの違いによるもの考えている。

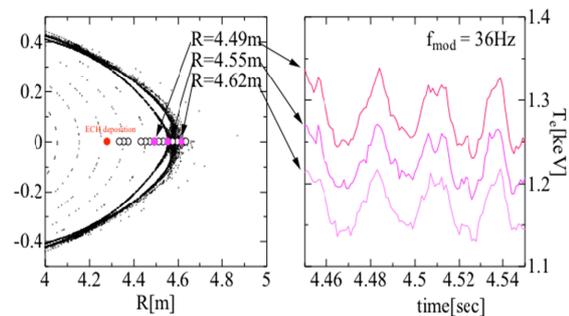


図 2 ヒートパルス伝搬の様子

(2) デジタルコリレーション ECE

従来は中間周波数帯 (数ギガヘルツ) にダウンコンバートした ECE をパワー検波して計測を行っていたが、近年のデータ収集技術の発展により直接中間周波数帯の波形をサンプ

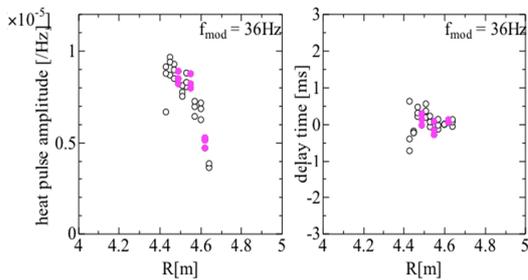


図 3 ヒートパルス波形解析結果

リングできるようになった。そこで、この技術をプラズマ計測に応用した(図4)。相関解析を活用することで従来より高い空間分解能を実現できるデジタルコリレーション ECE を提案し、プラズマからの ECE を計測解析できることを示した。ギガヘルツサンプリングは高速収集のためデータ量が従来の多チャンネル計測より遥かに上回るため、には高速の並列計算機が必要となるが、この手法の最大の特徴は、実験終了後の解析の段階で空間分解能と時間分解能が選択できるため、未知の現象の詳細解析に有効であることを示した。

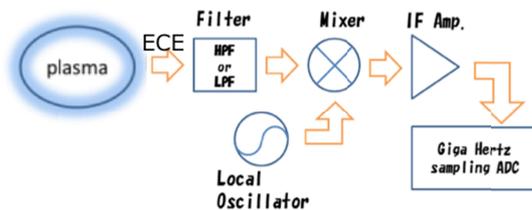


図 4 DCECE システム図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hayato Tsuchiya, Sigeru Inagaki, Tokihiko Tokuzawa, Naoki Tamura and Yoshio Nagayama

“Digital Correlation ECE Measurement Technique with a Gigahertz Sampling Digitizer”

Plasma Fusion Research, Volume 9, 3402021 (2014)

査読あり

DOI: 10.1585/pfr.9.3402021

〔学会発表〕(計 4 件)

土屋隼人

“ストキャスティゼーションによるコア温度平坦化現象”

プラズマ・核融合学会 第30回年会

2013年12月3日～6日

東京工業大学(東京都)

Hayato Tsuchiya, et.al.

“Digital Correlation EE Measurement Technique with a Gigahertz Sampling Digitizer”

23rd International Toki Conference

2013年11月18日～21日

セラトピア土岐(岐阜県土岐市)

H. Tsuchiya, et.al.

“Core Temperature Flattening by stochastization on ITB plasma in LHD”

The 19th ISHW and 16th RFP workshop

2013年9月16日～20日

パドバ(イタリア)

土屋隼人

“高イオン温度プラズマにおけるECHモジュレーションを用いた輸送特性”

プラズマ・核融合学会 第29回年会

2012年11月27日～30日

クローバープラザ(福岡県春日市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

土屋 隼人(Tsuchiya, Hayato)

核融合科学研究所

ヘリカル研究部 助教

研究者番号: 90509522