

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686134

研究課題名(和文)電子温度揺動の多スケール間結合に着目したプラズマ乱流熱輸送の非局所性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the non-locality of plasma turbulent heat transport based on the multi-scale couplings in electron temperature fluctuations

研究代表者

田村 直樹 (Tamura, Naoki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：80390631

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円、(間接経費) 3,720,000円

研究成果の概要(和文)：核融合科学研究所のLHDにおいて相関型電子サイクロトロン放射計測による電子温度揺動の多点同時計測システムを構築した。局発周波数を変更可能とすることで、プラズマ中の計測領域を任意に選択することができる点が、本システムの特徴である。予備実験の結果、信号のDC成分(電子温度)は既存のECE計測と良く一致したことから、電子サイクロトロン放射自体を検出することには成功した。次に、相関解析を行ったが、有意な電子温度揺動は得られなかった。様々な改造や検討を重ねた結果、電子温度揺動を計測するための抜本的対策として、大口径の受信アンテナを有する専用の受信系を構築することが最善であるとの結論に至った。

研究成果の概要(英文)：Simultaneous multi-point measurement system for the electron temperature fluctuation has been built on Large Helical Device (LHD) of the National Institute for Fusion Science based on a correlation electron cyclotron emission diagnostic technique. One of the unique characteristics of this system is that the measurable area in a LHD plasma can be selected by changing the frequency of the local oscillator. The results of the preliminary experiment with this system show that 1) the DC component of the signal acquired by this system is in good agreement with that of the signal by the conventional ECE diagnostics, which means this system can measure the ECE successfully and that 2) a significant electron temperature fluctuation cannot be measured. After various improvements and reviews have been done, it is finally concluded that the fundamental measure for measuring the electron temperature fluctuations in LHD is to establish a dedicated ECE detection system with a large receiving antenna.

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：乱流熱輸送 非局所性 相関ECE計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 国際熱核融合実験炉 (ITER) で実現する核燃焼プラズマは高い自律性を持つため、同プラズマに対する外部制御パラメータは非常に限られている。したがって、核燃焼プラズマに対する外部制御精度を向上させるためには、乱流に支配されている同プラズマの熱輸送が持つ外的摂動に対する応答機構について確実に理解しておく必要がある。しかし、残念ながら現状、プラズマ乱流熱輸送における動的応答に関する理解は不足していると言わざるを得ない。その顕著な例として、周辺摂動に対して中心部の電子温度が拡散的な時間スケールよりも遥かに短い時間で応答する現象、いわゆる非局所輸送現象が挙げられる。この現象は、K.W. Gentleらにより米国の TEXT トカマクにおいて初めて見出され、ヘリカルプラズマでは研究代表者らにより核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD) において見出された。非局所輸送現象が10年以上前に発見されて以来、その発現機構を解明しようとする理論的、実験的研究が現在も世界中で精力的に行われている。研究代表者らは最近、非局所輸送現象が発現するプラズマにおいて、プラズマ小半径に匹敵する程の長い相関長を持つ数キロヘルツの低周波電子温度揺動が存在していることを明らかにした他、同プラズマの周辺部と中心部それぞれの電子熱輸送において、マイクロスケール(数ミリメートル)の乱流より大きな空間スケール(10センチメートル程度)を持つ構造が存在しており、それらの結合により非局所輸送現象が発現していると考えられることを指摘し、非局所輸送現象に関する研究を着実に進展させた。現在の課題は、同現象発現時における長距離相関を有する低周波電子温度揺動と乱流熱輸送の決定的要因であるマイクロ乱流との連関の解明である。

(2) ミクロ乱流によって駆動される異常輸送に関するこれまでの研究では、測定が比較的容易な電子密度揺動の寄与が主に調べられてきた。非局所輸送現象に対する寄与も既に調べられているが、現象発現前後で電子密度揺動の強度が顕著に変化したという報告はこれまでのところない。異常輸送に対して電子密度揺動と等しい寄与を与える可能性のある電子温度揺動については、2000年代中盤になって高周波デバイスの性能向上等により高周波領域(～数百キロヘルツ)までの計測が可能になったことを受けて、国外においてその研究がようやく進展し始めた。例えば、米国の DIII-D トカマクでは、低閉じ込めモード(Lモード)から高閉じ込めモード(Hモード)への遷移時の電子熱輸送係数の低減が主に電子温度揺動の低減によることが明らかにされたが、この成果により、磁場閉じ込め環状プラズマの異常輸送に関する研究における電子温度揺動の重要性が再認識されることとなった。

2. 研究の目的

これまでの研究において、閉じ込め方式を問わず、磁場閉じ込め環状プラズマの周辺部を冷

却すると同時に中心部の電子温度が上昇する現象(非局所輸送現象)が発現すること、すなわち、同プラズマの熱輸送に「非局所性(ある場所の熱流束が遠く離れた場所の温度勾配に依存する性質)」が現れることを見出した。また最近の研究により、同現象の本質的要因はマイクロスケールの乱流とメゾ・マクロスケールの乱流構造との相互作用にあることを指摘しているが、その決定的証拠はまだ得られていない。そこで、本研究の具体的な目的は、プラズマ乱流熱輸送に現れる非局所性における様々なスケールの乱流揺動、特に電子温度揺動の時空間構造を明らかにし、その相互作用を解明することである。

3. 研究の方法

研究代表者が非局所輸送現象に関する実験を主として行っている核融合科学研究所のLHDにおいて、数百キロヘルツまでの電子温度揺動を多点同時に計測できるシステムを構築し、LHDにおいて電子温度揺動の多スケール相関解析が実施できる環境を整備する。電子温度揺動計測手法には幾つかあるが、ここでは他の実験装置で多く採用されている相関型電子サイクロトロン放射 (correlation Electron Cyclotron Emission: cECE) 計測法を採用する。構築した計測システムを駆使して、非局所輸送現象の発現前後における電子温度揺動の強度及び相関長等の時空間構造の変化を調べる。この時、幅広い考察が可能となるように、できる限り異なる実験条件下で実験データを収集しておく。得られた実験結果に対する考察や蓄積された実験データから必要な情報を抽出して理論やモデルとの比較を行うことにより、非局所輸送現象に対して様々なスケール長の電子温度揺動の時空間構造及びその相互作用が果たす役割について明らかにする。

4. 研究成果

(1) 核融合科学研究所のLHDにおいて相関型電子サイクロトロン放射計測による電子温度揺動の多点同時計測システムを構築した。システムを効率的に構築するために、プラズマから電子サイクロトロン放射 (ECE) を受けるアンテナや計測機器を設置する部屋までの伝送系は、既存の電子温度分布計測システムのそれらと共用とした。図1に構築したcECE計測のシステムブロック図を示す。局発周波数を変更可能とすることで、プラ

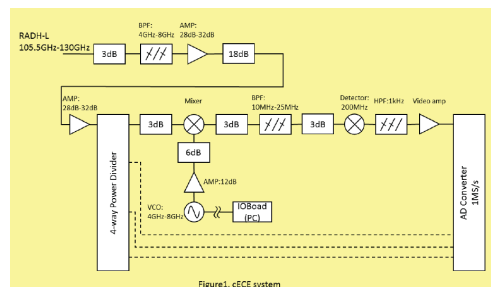


図1. 本研究で構築した相関型電子サイクロトロン放射 (correlation Electron Cyclotron Emission: cECE) 計測システムのブロック図

ズマ中の計測領域を任意に選択することができる点が、本システムの特徴である。

(2) 予備実験を実施したところ、信号のDC成分(電子温度)は既存のECE計測と良く一致した。これにより、電子サイクロトロン放射自体は問題なく検出できていることがわかった。次に、相関解析を行ったが、有意な電子温度揺動を得ることはできなかった。そこで、雑音に埋もれた揺動信号を抽出できる条件を確認するために簡易的な模擬解析を行った。具体的には、ランダムノイズとランダムもしくはコヒーレントな揺動が重畳された信号を人工的に生成し、これに対して相互相関解析を行った。その結果、SN比0.1の信号を抽出するためには、解析点が10の5乗点(実験では0.1秒間に相当)必要なことが分かった。しかしながら、解析点を10の5乗点用いても有意な電子温度揺動は得られていないことから、測定データのSN比が非常に小さいことが主な原因として考えられる。実際、現在測定されている雑音強度は理論予想より3倍程度大きいことがわかっている。

(3) 測定データのSN比改善のために、低雑音化などの改良に取り組むと共に、同システム内での信号分岐の影響を調べた。一時的にチャンネル数を16から4に減らしたが、依然として強いノイズ成分しか検出されなかった。LHDプラズマからのECEは、cECE計測システムに伝送される以前に既に既存のECE計測システムにも伝送されている。既存のECE計測システムでかろうじて観測されているMHD的な温度揺動成分がcECE計測システムでも見られるかどうか相互相関解析を実施したところ、同様な温度揺動を抽出することができなかった。このことは、cECE計測システムにECE信号を分岐した時点で既にSN比が非常に小さくなっていることを示唆している。そこで、cECE計測システムにおけるSN比が既存のECE計測システムと比較してどの程度劣化しているか調べたところ、約1/70であることが分かった。乱流に起因する電子温度揺動の強度はMHD的な電子温度揺動のそれと比較して、1桁程度小さいことが予想されている。このことから、抜本的対策として、大口径の受信アンテナを有する専用の受信系を構築することが最善であるとの結論に至った。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 14 件)

田村直樹, Study of Impurity Transport Characteristics Depending on the Source Location in LHD, 13th Coordinated Working Group Meeting (CWGM), 2014年2月26日, 京都大学(京都府)

田村直樹, A short-lived metastable state of electron heat transport in edge-perturbed

LHD plasmas, 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2013年10月2日, 九州大学(福岡県)

田村直樹, LHDの非局所輸送現象における電子熱輸送の巨視的空間応答特性, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月27日, 徳島大学(徳島県)

田村直樹, Latent spatial structure in electron heat transport of magnetically confined toroidal plasmas, 第12回アジア太平洋物理会議, 2013年7月18日, 幕張メッセ(千葉県)

田村直樹, 磁場閉じ込めトロイダルプラズマにおける輸送の非局所応答, 第16回若手科学者によるプラズマ研究会(招待講演), 2013年3月5日, 日本原子力研究機構那珂核融合研究所(茨城県)

田村直樹, Tracer-encapsulated solid pellet injection as a plasma diagnostics, Workshop on QUEST and Related ST RF Startup and Sustainment Plasma Research, 2013年2月27日, 九州大学(福岡県)

田村直樹, Cross-comparison of nonlocal transport phenomenon in LHD heliotron with that in HL-2A tokamak, 22nd International Toki Conference, 2012年11月21日, セルトピア土岐(岐阜県)

田村直樹, 確率統計論的解析に基づく非局所輸送現象の装置間比較, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大学(神奈川県)

田村直樹, Approach to understanding the transient manner on the nonlocal transport phenomenon, 2nd Asia-Pacific Transport Working Group Meeting(招待講演), 2012年5月17日, 西南物理研究所(成都, 中国)

田村直樹, 非局所輸送をもたらす電子熱輸送の空間構造, 平成23年度核融合科学研究所研究会「燃焼プラズマでの輸送特性の理解と予測の高精度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する体系的研究」及び「閉じ込め・輸送サブクラスター会合」, 2012年1月13日, 核融合科学研究所(岐阜県)

田村直樹, 大規模輸送現象により見いだされた電子熱輸送の潜在的構造, Plasma Conference 2011, 2011年11月25日, 石川県立音楽堂(石川県)

田村直樹, Finding the Latent Structure in Non-local Electron Heat Transport Event, 53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics(招待講演), 2011年11月17日, ソルトパレスコンベンションセンター(ソルトレイクシティ・アメリカ)

田村直樹, Nonlocal Electron Heat Transport Event in Magnetically-Confining Toroidal Plasmas, JIFT Workshop “Hierarchical Self-Organization of Turbulence and Flows in Plasmas, Oceans and Atmospheres”, 2011年10月25日, 京都大学(京都府)

田村直樹, Spatial Structure of Electron Heat Transport Revealed by a Nonlocal Transport Phenomenon in Large Helical Device, 1st Asia-Pacific Transport Working Group Meeting, 2011年6月16日、核融合科学研究所(岐阜県)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：