

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 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：2014～2015

課題番号：26887047

研究課題名(和文)直線プラズマPANTAにおけるヘリウムビーム分光システムの開発

研究課題名(英文)Development of Helium Beam Emission Spectroscopy System in Linear Magnetized Plasma PANTA

研究代表者

小林 達哉 (Kobayashi, Tatsuya)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30733703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、乱流駆動熱流束の、非線形性、非局所性、非対角性を観測し、その物理機構を解明することであった。そこで、(1)直線プラズマ装置に於いて、熱流束を実験的に求めるためのヘリウムビーム分光システムの開発を行った。また、(2)手法を応用し、大型装置での熱パルス輸送の解析を行った。本研究により、(1)ヘリウムビーム分光システムのヘリウム入射部の完成、及び(2)大型装置における輸送の非線形・非局所性の具体例の提示を行った。また、(3)熱パルス輸送解析のためのトムソン散乱計測の高時間分解能再構成手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to clarify the physical mechanism of the nonlinearity and nonlocality of the heat pulse propagation in magnetically confined plasmas. Here, we performed (1) development of the helium beam emission spectroscopy system in a linear magnetized plasma and (2) data analysis of the heat pulse propagation experiment in large fusion devices. Within the project, we achieved (1) setup of the helium supersonic molecular beam injection system for the helium beam emission spectroscopy system, (2) exemplifying of the nonlinearity and nonlocality of the heat pulse propagation and (3) proposing of an analysis method for reconstructing the data of the Thomson scattering system with a high time resolution.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：ビーム放射分光 プラズマ熱輸送 プラズマ乱流

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマ核融合を実現するため、1億度を超える高温プラズマを安定的に維持・制御することが必要である。高温の磁場閉じ込めプラズマは、熱的・力学的に挙動が複雑な乱流状態にある。乱流が駆動する熱流束の物理を理解することが、核融合成功への喫緊の課題とされている。一般的に乱流駆動熱流束は、非線形性、非局所性、非対角性などの特徴を持つため、物理機構の理解は困難なものとしていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、核融合プラズマにおける乱流輸送の非線形性、非局所性、非対角性を理解するための基礎実験研究を行うことである。具体的には(1)九州大学の直線プラズマ装置 PANTA 装置に於いて、電子温度揺動計測のためのヘリウムビーム分光システム (He-BES ; Helium Beam Emission Spectroscopy) の開発を行い、プローブ計測と組み合わせて熱流束を実験的に求める。また、(2)得られた成果を応用し、大型装置での観測結果の解析をすすめる。

3. 研究の方法

(1) He-BES はプラズマ中にヘリウムガスを高速入射し、発光を分光計測することで、電子温度と密度を観測する手法である。高速入射されたヘリウムガスはプラズマ中の電子と衝突し発光する。この光の強度は電子温度と密度の関数となることが知られており、特に 4 つの線スペクトル ($\lambda=471.3, 492.2, 501.6, 504.8$ nm) の強度比から電子温度と密度を得る手法が広く用いられている。特に、 492.2 nm/ 504.8 nm の強度比から電子密度を、 504.8 nm/ 471.3 nm の強度比と得られた電子密度から電子温度をそれぞれ求める計測器の開発を行った。

実験は九州大学の小型・基礎プラズマ装置 PANTA を用いて行った。計測システムは大きく 2 つのセクション、He 入射部及び受光部、で構成される。He ボンベはバッファを介して電磁弁に接続されており、電磁弁に TTL トリガを入力することで He ビームがプラズマに入射される。受光では分光器を用いてスペクトルを得、受光素子 (CCD カメラ/APD 素子) を用いてデータを取得する。

(2) 大型装置に於けるデータ解析では、プラズマ中心部に於けるモジュレーション局所加熱を行い、熱パルス伝播より熱輸送特性を求めた。従来の手法とは異なり、基本周波数だけでなく高調波も解析し、熱輸送係数の周波数依存性を求めた。

4. 研究成果

(1) 直線プラズマ装置 PANTA に於ける He-BES の開発では、中性 He 入射用の超音速中性粒子ビーム入射装置 (SMBI; Supersonic

Molecular Beam Injection) の開発を行った。電磁弁用のトリガ装置を作成し、実験シーケンスと同期した He-SMBI コントロールを実現した。ガス圧力及び電磁弁開時間のパラメータスキャンを行い、プラズマに与える影響と発光量を調査した。今回の実験観測で、He-SMBI は計測ビームとしてだけでなく、プラズマプロファイルコントロールに使用できることが判明した。分光器と CCD カメラシステムをセットアップし、He I の発光の検出に成功した。ただし、計測器として使用するためのスペクトル、 $\lambda=471.3, 492.2, 501.6, 504.8$ nm の発光は弱く、今後 SIBM システムの改良や光量を増加させる工夫を進めていく必要がある。

(2) 大型装置におけるプラズマ電子熱輸送の非線形性・非局所性の研究のため、局所加熱ソースのモジュレーション実験 (MECH, Modulation Electron Cyclotron Resonance Heating) の解析を行った。計測された電子温度摂動のフーリエ解析を行い、モジュレーション周波数及びその奇数次高調波の振幅ディケイと位相差を観測した結果、拡散モデルで予測されるプロファイルと大きく異なることが判明した。特に高調波成分の振幅ディケイは拡散モデルで予測されるプロファイルと大きく異なることが判明した (拡散モデルで予測されるものに比べ極端に緩やかであった。)。すなわち、熱輸送係数に周波数依存性が存在することが示された。更に、モジュレーションの開始位置をプラズマの中心と周辺に設定した実験を行い、外向き・内向きに伝わるパルスの解析を行った。その結果、得られた熱輸送係数はパルス向きの依存性を持つことが判明した。これらのことから、高温プラズマ中の熱輸送は拡散モデルで表せないことが示された。更に、観測の一般性を議論するため、様々な実験装置 (核融合科学研究所の Large Helical Device, スペイン, CIMAT の TJ-II 装置, 韓国, NFRI の KSTAR 装置, 及び米国, General Atomics の DIII-D トカマク装置) に於いて本解析を行った。どの装置に於いても熱輸送係数の周波数及びパルス伝播方向の依存性が確認され、拡散モデルの予測が観測を表さないことは普遍的であることが示された。

(3) 熱パルス伝播の解析のための電子温度データ取得には、通常電子サイクロトロン (ECE; Electron Cyclotron Emission) 計測器が使用される。しかし、ECE 計測器の使用は、ある実験領域 (電子密度及び磁場強度) に限られている。また、高加熱パワーを用いた実験の際には、non-thermal 電子の影響を受け正しい電子温度を得ることができなくなってしまう。従って、このような状況で代替として使用できる、高い時間分解能を有する電子温度計測が望まれている。本研究ではトムソン散乱システムを条件付き平均法を

用いることで、モジュレーション実験時に高時間分解化する手法を提案した。ここでは、「サンプリングスコープ」のコンセプトをMECH実験に適応した。

具体的な手法を以下に述べる。トムソン散乱システムの計測周波数を f_{TS} 、モジュレーション周波数を f_{MECH} とする。ここでそれぞれの周波数を、倍数でない値に取れば、トムソン散乱システムは時間の経過とともにモジュレーション周期の様々な位相を計測することになる。計測された電子温度プロファイルを、計測時間に対応するモジュレーション位相の関数として取ることで、モジュレーション波形が再構成される。再構成に必要な時間は、 $T=[G.C.D.(f_{TS}, f_{MECH})]^{-1}$ として与えられる。ここで G.C.D. は、最大公約数を表し、周波数 f_{TS} 及び f_{MECH} は整数で与えられているものとする。また、モジュレーションの一周期は、 $N=T f_{TS}$ 点で再構成される。即ち、 f_{TS} と f_{MECH} を互いに素である様に取れば、 $T=1$ s となり、再構成した際の実効的な時間分解能を向上させることができる。

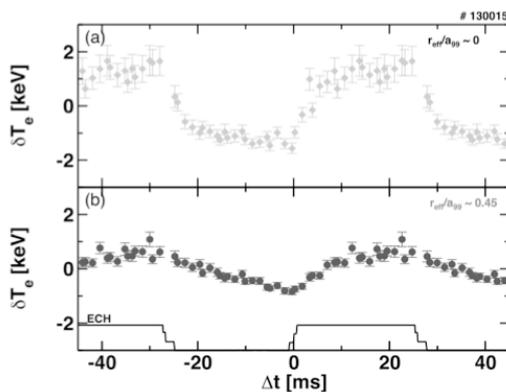


図 1: トムソン散乱システム計測によって計測された電子温度モジュレーションの再構成結果。(a)はプラズマ中心位置、(b)はミッドラディウス位置を表す。

図 1 は核融合科学研究所の Large Helical Device (LHD) に於いて再構成を行った例である。ここでは $f_{TS} = 30$ Hz, $f_{MECH} = 19$ Hz としており、 $T=[G.C.D.(f_{TS}, f_{MECH})]^{-1} = 1$ s となっている。即ち、 $N = f_{TS} = 30$ 点でデータの再構成を行っている。本手法により、トムソン散乱システムを用いた、連続的な電子温度時間発展データの再構成が可能となることが示されている。プラズマ中心部のデータとミッドラディウスのデータを比較すると、波形の差がはっきりと示されている。即ち、プラズマ中心部では電子温度の応答が高速であるのに対し、ミッドラディウスでは応答が緩やかである。また、両データの位相差を検出することも可能となった。即ち、再構成されたデータセットは、ヒートパルス輸送係数を

議論するためのフーリエ解析にも使用可能であることが示されている。

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 5 件)

① T. Kobayashi, K. Ida, K. Itoh, M. Yoshinuma, C. Moon, S. Inagaki, I. Yamada, H. Funaba, R. Yasuhara, H. Tsuchiya, S. Ohdachi, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Shimozuma, S. Kubo and T. I. Tsujimura, “Reconstruction of high temporal resolution Thomson scattering data during a modulated electron cyclotron resonance heating using conditional averaging”, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 043505 (2016). 査読あり. doi: 10.1063/1.4945258

② T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Edge plasma dynamics during L-H transition in the JFT-2M tokamak, *Nuclear Fusion* **55** (2015) 063009. 査読あり. doi:10.1088/0029-5515/55/6/063009

③ T. Kobayashi, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Kosuga, H. Arakawa, T. Yamada, Y. Nagashima, Y. Miwa, N. Kasuya, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, and K. Itoh, “Azimuthal inhomogeneity of turbulence structure and its impact on intermittent particle transport in linear magnetized plasmas”, *Phys. Plasmas* **22**, 112301 (2015). 査読あり. doi: 10.1063/1.4934537

④ T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, N. Kasuya and K. Hoshino, Dynamics of edge limit cycle oscillation in JFT-2M tokamak, *Nuclear Fusion* **54** (2014) 073017. 査読あり. doi:10.1088/0029-5515/54/7/073017

⑤ T. Kobayashi, G. Birkenmeier, E. Wolfrum, F. M. Laggner, M. Willensdorfer, U. Stroth, S. Inagaki, S.-I. Itoh, and K. Itoh, Method for estimating the propagation direction of a coherent plasma structure using a one-dimensional diagnostic array, *Review of Scientific Instrument* **85** (2014) 083507. 査読あり. doi: 10.1063/1.4893482

[学会発表] (計 10 件)

① 小林達哉, 伊藤公孝, 井戸毅, 神谷健作, 伊藤早苗, 三浦幸俊, 永島芳彦, 藤澤彰英, 稲垣滋, 居田克巳, 星野克道, "JFT-2M トカ

マクにおけるリミットサイクル揺動の物理機構", 第 71 回日本物理学会年次大会, 20pAE-8, 東北学院大学, 2016 年 3 月

② T. Kobayashi, K. Ida, G. H. Choe, G. S. Yun, H. K. Park, W. H. Ko, S. Inagaki, C. Moon, S.-I. Itoh and K. Itoh, Heat pulse propagation experiments with a two-dimensional electron cyclotron emission diagnostic in KSTAR, KSTAR conference 2016, Daejeon, Korea, February 2016, 口頭発表(招待講演)

③ 小林達哉, "JFT-2M における H モード遷移リミットサイクル時の電場, 勾配, 乱流の時間空間発展", 第 32 回プラズマ・核融合学会年次大会, S6-2, 名古屋大学, 2015 年 11 月

④ 小林達哉, 居田克巳, 伊藤公孝, 吉沼幹朗, 文贊鎬, 山田一博, 舟場久芳, 安原亮, 土屋隼人, 吉村泰夫, 伊神弘恵, 下妻隆, 久保伸, 辻村亨, 稲垣滋, 伊藤早苗, LHD 実験グループ, "LHD における内部輸送障壁形成時の電子温度勾配及び熱輸送の解析", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 17aCN-9, 関西大学, 2015 年 9 月

⑤ T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Radial electric field bifurcation mechanisms during L-H transition in the JFT-2M tokamak, The 5th Asia-Pacific Transport Working Group International Conference (APTWG 2015), Dalian, China, June 2015, AI2, 口頭発表(招待講演)・ポスター発表

⑥ 小林達哉, 吉沼幹朗, 中野治久, 大野誠, 文贊鎬, 居田克巳, "LHD におけるビーム放射分光法を用いた密度乱流揺動の計測", 第 70 回日本物理学会年次大会, 24pAP-5, 早稲田大学, 2015 年 3 月

⑦ T. Kobayashi, K. Ida, K. Itoh, H. Tsuchiya, T. Tokuzawa, M. Yoshinuma, C. Moon, H. Yamada, K. Tanaka, T. Shimoizuma, S. Kubo, T. Ii, S. Inagaki, S.-I. Itoh and LHD Experiment Group, Internal transport barrier formation with modulation heating power input in LHD, 24th International Toki Conference, Gifu, Japan, December 2014, P4-18, ポスター発表

⑧ 小林達哉, 居田克巳, 伊藤公孝, 土屋隼人, 徳沢季彦, 吉沼幹朗, 文贊鎬, 山田弘司, 田中謙治, 下妻隆, 久保伸, 伊井亨, 稲垣滋, 伊藤早苗, "LHD における内部輸送障壁形成

のダイナミクス", Plasma conference 2014, 18pA2-6, 朱鷺メッセ, 2014 年 11 月

⑨ T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Edge plasma dynamics during L-H transition in the JFT-2M tokamak, IAEA Fusion Energy Conference 2014, St Petersburg, Russian Federation, October, 2014, ポスター発表

⑩ T. Kobayashi, K. Itoh, T. Ido, K. Kamiya, S.-I. Itoh, Y. Miura, Y. Nagashima, A. Fujisawa, S. Inagaki, K. Ida, and K. Hoshino, Dynamical response of turbulence during limit-cycle oscillation in JFT-2M Tokamak, 19th Joint EU-US Transport Task Force Meeting, Culham, Britain, September, 2014, LO2.4, 口頭発表(招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 達哉 (Kobayashi Tatsuya)
核融合科学研究所 へリカル研究部 助教

研究者番号 : 30733703

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし