

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246164

研究課題名(和文) 指向性をもつビーム放射分光法によるメゾスケール乱流の二次元空間構造の研究

研究課題名(英文) Study of two dimensional structure of meso-scale turbulence with directional beam emission spectroscopy

研究代表者

居田 克巳 (Ida, Katsumi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00184599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,700,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置(LHD)でビーム放射分光を使い、プラズマ密度揺動の2次元構造を明らかにした。観測領域をスリット状にすることで、径方向又はポロイダル方向の「指向性感度」を上げた密度揺動計測を行うことができた。LHDの高ベータプラズマ実験において、磁気プローブ信号をリファレンスとして観測された密度揺動との時空間相関を取った結果1.5kHzと3kHzの揺動に時空間相関が観測された。ポロイダル方向にはExB回転方向の揺動の伝播が観測され、この揺動は周辺高調波振動(Edge Harmonic Oscillation：EHO)であることが検証された。

研究成果の概要(英文)：Two dimensional structure of plasma density fluctuations was studied using the beam emission spectroscopy in Large Helical Device (LHD). By making the observation volume slit, the directional sensitivity for radial or poloidal direction has been improved. The time-space correlation between density and magnetic fluctuations shows clear peaks with the frequency peak of 1.5kHz and 3kHz in the high-beta discharge in LHD. In poloidal direction, the fluctuations propagate in the direction of ExB rotation and this fluctuations was identified to be Edge Harmonic Oscillation (EHO).

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ物理 乱流計測 ビーム分光

1. 研究開始当初の背景

ビーム放射分光法は 1980 年代に プリンストンプラズマ物理研究所のFonck 博士 によって提唱され、1989 年にプリンストン大学の PBX-Mトカマクにおける実験で計測法として確立された後、TFTR及びDIII-Dトカマクに適用され、密度揺動レベルの径方向分布や閉じ込め時間と密度揺動レベルの相関など長波長揺動の性質についての研究が行われている。以後 ビーム分光法は内部輸送障壁形成時や L-H 遷移時の密度揺動の現象など、密度揺動と閉じ込め性能との相関を調べる研究に広く使われている。

2. 研究の目的

本研究ではビーム放射分光を使い、プラズマ密度揺動の 2 次元構造を明らかにすることである。本研究の独創的な点は、観測領域をスリット状にすることで径方向又はポロイダル方向の「指向性」を上げていることである。

3. 研究の方法

(1) ビーム放射分光計測に用いる光学系を図 1 に示す。焦点距離 300 mmの対物レンズを計測ポートに設置し、ポロイダル断面中の領域の揺動を観測した。コア直径 400マイクロン、クラッド直径 420マイクロンの光ファイバ1500本を 2 次元に配列してプラズマのイメージを計測した。1 本のファイバのプラズマ上でのスポットサイズは直径約 10 mmの円となっている。

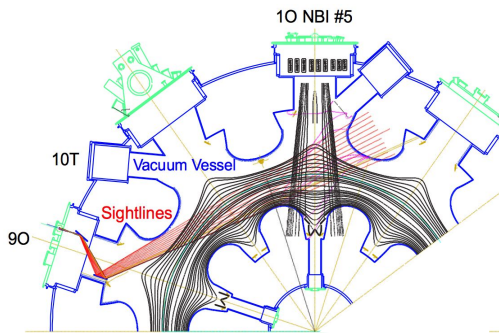


図 1 NBI ビームと観測視線の配置

(2) 次に観測視線ファイバの配列を図 2 に示す。縦（ポロイダル方向）又は横（径方向）に光ファイバ7本を束ねることで、径方向又はポロイダル方向の「指向性」を上げることができた。この光ファイバで集光した光は分光器システムへ伝送し、ビーム放射光を背景光から分離した。ビーム放射光はアバランシェフォトダイオード (APD) アレイ (4x8) で検出し、32 チャンネルの信号を同時に計測した。

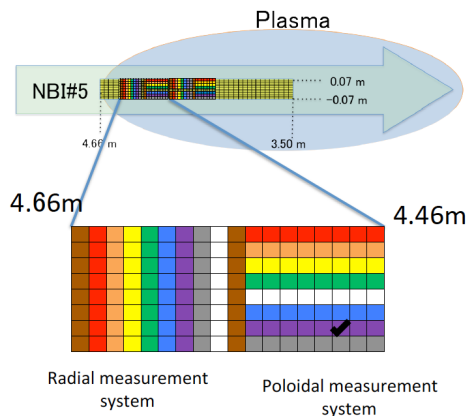


図 2 観測視線ファイバの配列

(3) 図 3 で示されるように、ビーム放射分光システム分光器は 2160/mm のグレーティングと焦点距離 200 mm, F2.8 のレンズからなる。分光器には 2 つのカメラレンズが取り付けられており、一つは入射光の集光に、もう一つは回折光を集光するために用いる。このレンズを用いた分光器は一般的な凹面鏡を用いた分光器に比べて F 値が小さくできるというメリットを有しており、高時間分解能が要求される揺動計測に適している。

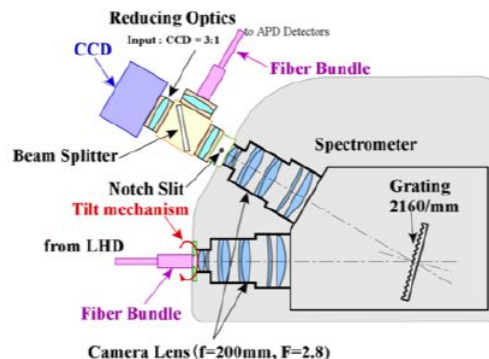


図 3 ビーム放射分光システム

4. 研究成果

(1) ビーム放射光の背景光からの分離

図4は開発したビーム放射分光システムで得られた、ビーム放射光のスペクトラムである。中性粒子ビーム入射(NBI)が行われている時には、プラズマの周辺部から輻射される強いHアルファ光の近傍に、中性粒子ビームによって励起されたビーム放射光が観測されている。このビームによる励起光はNBIがオフになると消えてしまう。この分光システムでは、斜線で示した波長領域を切り出して、32チャンネルアバランシェフォトダイオードでビーム放射光の強度変化を検出した。

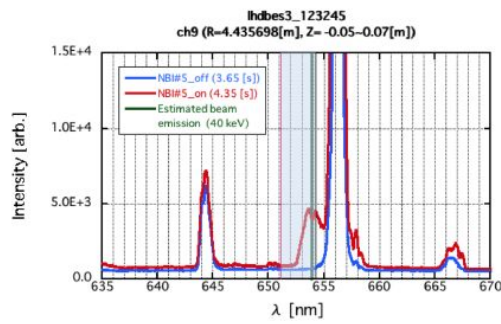


図4 ビーム放射光のスペクトラム

従って、放電中に中性粒子ビームのオン・オフのモジュレーションを行うと、アバランシェフォトダイオードで観測したビーム放射光の強度も、同様のモジュレーションを示す。これを示したものが図5である。プラズマ放電中で中性粒子ビームが入射していない時間でのビーム放射光の信号の平均値は、オフセットより高い値となっている。これは分光器で分離してアバランシェフォトダイオードへ入力させている光の波長域に、プラズマのHアルファ背景光スペクトルの裾の部分が含まれているためである。

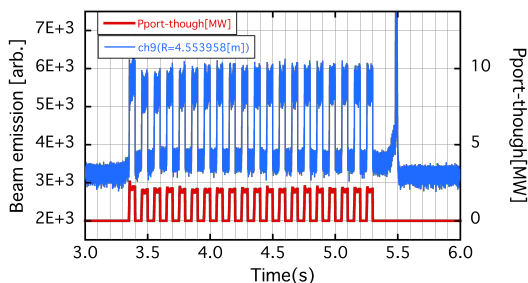


図5 NBIパワーと信号強度の時間変化

(2) 周辺高調波密度振動の観測

図6は $R=4.459 - 4.542$ [m] ($Z=1$ cm) から集光したビーム放射光の揺動スペクトルと磁気プローブで計測した磁場揺動スペクトルである。ビーム放射光の $\Delta T = 800$ [ms] のデータから 10 [ms] 毎にフーリエ変換を行い、80個のデータから求めたスペクトルをアンサンブル平均したものである。1.5 kHz 付近に幅約 0.5 kHz でノイズレベルの3倍程度のピークが見られた。またその倍の周波数(約 3 kHz)で基本波と同程度の強度のピークが確認できた。磁気プローブ計測による磁場揺動スペクトルでも同じ周波数帯でピークが見られた。

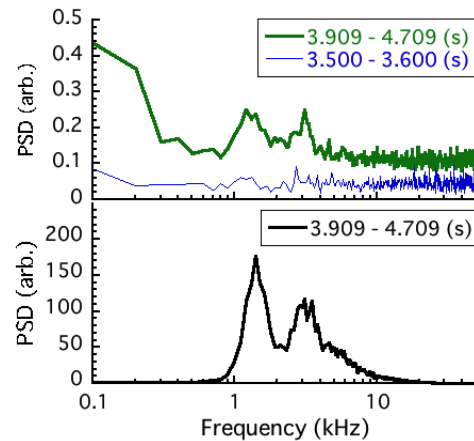


図6 ビーム放射光強度と磁気プローブ信号の周波数スペクトラム

図7はビーム放射分光から求めた密度揺動とプローブから求めた磁場揺動との相関スペクトルであるが、基本波(約 1.5 kHz)に 0.7 程度の、また倍波(約 3 kHz)に 0.4 程度のコヒーレンスがあることがわかる。

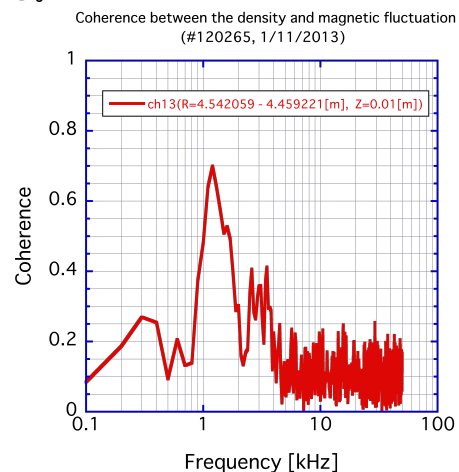


図7 ビーム放射光の揺動と磁場揺動の相関の周波数スペクトラム

(3) 周辺高調波振動の時空間相関

揺動の時間-空間的構造は、異なる $R(Z)$ 位置の2点間の、異なる時間での相関から調べることができる。図8、図9では磁気プローブで検知された揺動を基準として、各位置でのビーム放射光の揺動の構造を求めたものである。ビーム放射分光及び磁気プローブの揺動データから、コヒーレンスの高い周波数帯を基本波と倍波に対してバンドパスフィルターで抽出し(0.9 - 1.9 kHz, 2.2 - 3.5 kHz), 各 $R(Z)$ 位置でのビーム放射光と磁場の相互相関関数を算出し等高線図とした。ここでは横軸の全幅を1msにしている。相関関数の時間方向の強弱の変動を見ると、基本波に関しては1回半, 第2高調波に関しては3回程度の相関係数の正負の振動が見られ、フィルターで取り出した周波数が反映されていることが分かる。径方向の空間分布を見ると、プラズマ周辺部($R > 4.4\text{m}$)において強い揺動が観測されており、プラズマのコア部ではこの揺動が観測されなかった。

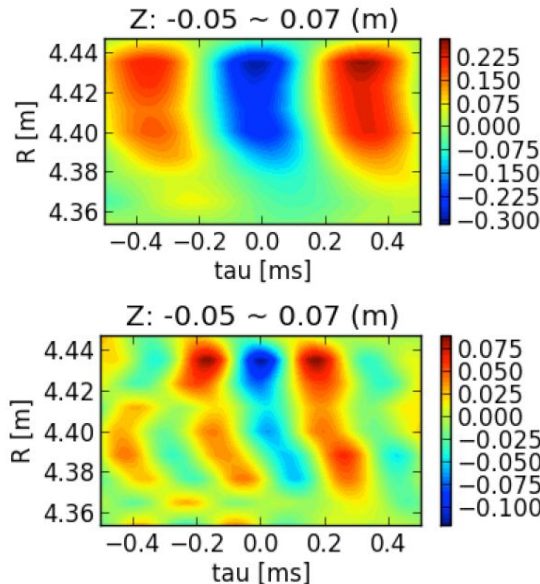


図8 基本波、第2高調波の径方向の時空間相関

図9は基本波、第2高調波のポロイダル方向の時空間相関を示したものである。この図ではポロイダル方向に $0.05[\text{m}] < Z < 0.07[\text{m}]$ で $0.1[\text{ms}]$ 程度の遅れがあることから、位相速度約 1.2 km/s で Z 方向の正からの向き(電子反磁性ドリフトの向き)へ伝搬していることが示された。この密度揺動の伝搬の向きは、荷電交換分光計測によるプラズマ回転の向きと同じであることが観測された。

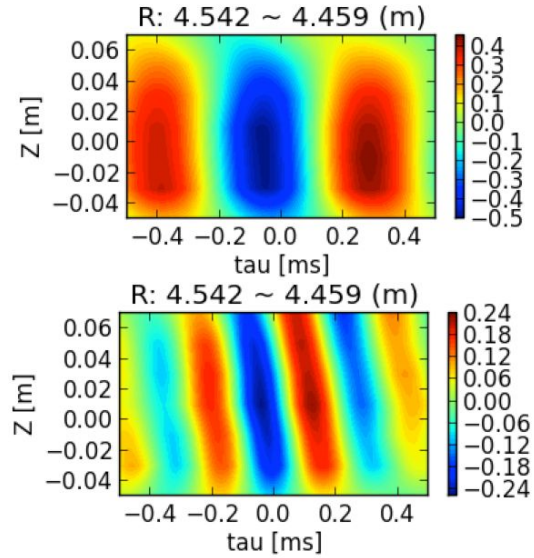


図9 基本波、第2高調波のポロイダル方向の時空間相関

(4) まとめ

本研究では、大型ヘリカル装置においてビーム放射分光計測を用い、密度揺動の計測及びポロイダル断面上で径方向及びポロイダル方向の揺動相関計測を行った。放射分光から得た密度揺動データを時間方向に周波数解析し、これまでのところ数kHzの周波数を持つ密度揺動を観測した。約2cm間隔の観測点で計測した揺動データから時空間相関関数を求め、揺動の時間及び空間構造を解析した。これまで解析した結果から、高いベータ値を持つプラズマにおいて、ポロイダル方向に伝搬する構造を持つ低周波揺動が存在することが明らかになった。

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12件)

K.Ida, "New Concepts of Transport Physics in Toroidal Plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有 Vol.57 (2015) 044007

K.Ida, 他9名 (10名中1番目), "Flow damping due to stochastization of the magnetic field", Nature Communications, 査読有 Vol.6 (2015) 5816

K.Ida, 他6名, (7名中1番目), "The 4th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) Meeting", Nuclear Fusion, 査読有 Vol.55 (2015) 017001

K.Ida, 他28名, (29名中1番目),

“Towards an Emerging Understanding of Non-locality Phenomena and Non-local Transport”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.55 (2015) 013022
K.Ida 他11名, (12名中1番目), “Topology bifurcation of a magnetic flux surface in toroidal plasmas”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有 Vol.57 (2015) 014036
K.Ida and J.Rice “Rotation and momentum transport in tokamaks and helical systems”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.54 (2014) 045001
T.Kobayashi, 他8名, (9名中1番目) "Method for estimating the propagation direction of a coherent plasma structure using a one-dimensional diagnostic array" □ □ Review of Scientific Instruments 査読有 Vol.85 (2014) 083507
T.Kobayashi, 他11名, (12名中1番目), "Dynamics of edge limit cycle oscillation in the JFT-2M Tokamak" □

Nuclear Fusion 査読有 Vol.54 (2014) 073017-

K.Ida, 他8名, (9名中1番目), "Reversal of Intrinsic Torque Associated with the Formation of an Internal Transport Barrier" □ Physical Review Letters 査読有 Vol.111 (2013) 055001

K.Ida 他12名, (13名中1番目), “Topology bifurcation of magnetic flux surface in plasmas”, New Journal of Physics, 査読有 Vol.15 (2013) 013061

K.Ida 他3名, (4名中1番目), "Reduction of Ion Thermal Diffusivity Inside a Magnetic Island in JT-60U Tokamak Plasma " □ Physical Review Letters 査読有 Vol.109 (2012) 065001

K.Ida, 他4名, (5名中1番目), “The 1st Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) Meeting”, Nuclear Fusion, 査読有 Vol.52 (2012) 027001

[学会発表] (計 27 件)

居田克巳他、DIII-D トカマクにおける磁気島のトポロジーと輸送の自励振動、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日-24 日、早稲田大学、東京

居田克巳他、輸送の安定性:新たな見方、原型炉の運転制御第 2 回シンポ

ジウム、2015 年 3 月 13 日、核融合科学研究所、岐阜県、土岐市

居田克巳他、Observation of transitions between nested and stochastic magnetic islands in DIII-D and LHD、第 56 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会 (招待講演)、2014 年 10 月 27 日-31 日、ニューオリンズ、アメリカ

居田克巳他、Overview of transport and MHD stability study and impact of magnetic field topology in the Large Helical Device、第 25 回国際原子力エネルギー機関主催核融合エネルギー会議、2014 年 10 月 13 日-18 日、サンクトペテルスブルグ、ロシア

居田克巳、Experimental progress of transport physics in toroidal plasmas、第 17 回プラズマ物理国際会議 (ICPP) (招待講演)、2014 年 9 月 5 日-19 日、リスボン、ポルトガル

居田克巳、Beam spectroscopy in plasmas、日韓計測セミナー (招待講演)、2014 年 8 月 17 日-20 日、京都

居田克巳、Impurity transport in LHD、ヴェンデルシュタインセミナー (招待講演)、2014 年 7 月 2 日、グライスバルド、ドイツ

居田克巳他、Beam Spectroscopy in Plasmas、W7-X/LHD 共同ワークショップ、2014 年 7 月 1 日-3 日、グライスバルド、ドイツ

居田克巳他、Diagnostics in LHD、W7-X/LHD 共同ワークショップ、2014 年 7 月 1 日-3 日、グライスバルド、ドイツ

居田克巳他、Topology bifurcation of a magnetic flux surface in toroidal plasmas、第 41 回ヨーロッパ物理学会 (招待講演) 2014 年 6 月 23 日-27 日、ベルリン、ドイツ

居田克巳他、Reversal of intrinsic rotation and torque in LHD plasmas、第 4 回アジア太平洋輸送ワークショップ、2014 年 6 月 10 日-13 日、九州大学、福岡県、福岡市

居田克巳、RMP issue – present understanding and prospect ~ How to identify magnetic topology and its effect on transport ?, 日米 MHD ワークショップ、2014 年 3 月 11 日、核融合科学研究所、岐阜県、土岐市

居田克巳、「システムの維持と揺らぎ」NINS コロキウム、2013 年 12 月 16 日-18 日、ヤマハリゾート「つま恋」、静岡県、掛川市

居田克巳、「LHD 重水素実験に向けた閉じ込め研究の進展と計測計画」、第 30

回プラズマ核融合学会年会、2013年12月3日-6日、東京工業大、東京都
居田克巳他、Identification of magnetic topology with heat pulse propagation in DIII-D and comparison with LHD results、国際トカマク物理活動、2013年10月7日-9日、九州大学、福岡県、福岡市

居田克巳他、Radial Propagation of Internal Transport Barrier and Flip of Intrinsic Torque、第14回Hモードと輸送障壁に関する国際ワークショップ、2013年10月2日-4日、九州大学、福岡県、福岡市

居田克巳他、Topology bifurcation of a magnetic flux surface in LHD plasmas、第19回国際ステラレータヘリオトロンワークショップ(招待講演)、2013年9月16日-20日、パドワ、イタリア

居田克巳他、Summary of heat pulse propagation experiment, DIII-D 科学セミナー、2013年8月30日、サンディエゴ、アメリカ

居田克巳他、Topology Bifurcation of a Magnetic Flux Surface in Magnetized Plasmas、第12回アジア太平洋物理会議(招待講演)、2013年7月14日-19日、幕張メッセ、千葉県、千葉市

居田克巳他、Angular momentum transport and intrinsic rotation in laboratory plasma、第3回東アジア夏の学校とワークショップ太平洋物理会議(招待講演)、2013年7月8日-12日、代々木オリンピックセンター、東京都

⑲ 居田克巳他、Violation of local transport closure、第3回アジア太平洋輸送ワークショップ(招待講演)、2013年5月21日-24日、済州島、韓国

⑳ 居田克巳他、Overview of Experimental results from Stellarator、531番目のヴィルヘルム・ウントエルスヘレウスセミナー-高温プラズマの三次元と二次元性-(招待講演)、2013年4月30日-5月2日、バートホンネフ、ドイツ

㉑ 居田克巳他、Multi-scale turbulence and non-local transport in toroidal plasmas、セミナー、2013年4月9日-12日、ユーリッヒ、ドイツ

㉒ 居田克巳他、Multi-scale turbulence and its effect on transport in helical plasmas、欧米輸送タスクフォース会議(招待講演)、2013年4月9日-12日、サンタローザ、アメリカ

㉓ 居田克巳他、Observations of fast response of turbulence in the LHD and linkage to nonlocal transport phenomena、欧米輸送タスクフォース会議(招待講演)、2013年4月9日-12日、サンタローザ、アメリカ

㉔ 居田克巳他、Overview on heat and momentum transport in the stochastic regions in LHD (Identification of stochastic region by Heat pulse propagation and flow damping)、核融合プラズマにおけるストキャスティックワークショップ(招待講演)、2013年3月18日-20日、ユーリッヒ、ドイツ

㉕ 居田克巳、フロー・粘性研究の最新動向、フロー・粘性作業会合、2013年2月25日、京都大学宇治キャンパス、京都府、宇治市

〔その他〕

ホームページ等

<http://article.nifs.ac.jp/article/mylist?id=2>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

居田 克巳 (IDA KATSUMI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
教授
研究者番号：00184599

(2) 研究分担者

吉沼 幹朗 (YOSHINUMA MIKIROU)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：20323058

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

文 贊鎬 (MOON CHANHO)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
COE 研究員
研究者番号：50734753

(3) 連携研究者

高橋裕己 (TAKAHASHI HIROMI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：00462193

(4) 研究協力者

大野誠 (ONO MAKOTO)
総合研究大学院大学・物理科学研究科
・博士課程1年