

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420852

研究課題名(和文) 条件付き平滑化によるプラズマ乱流の大偏差統計解析

研究課題名(英文) Large Deviation Statistical Analysis on Plasma Turbulence based on Conditional Averaging

研究代表者

永島 芳彦 (Nagashima, Yoshihiko)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：90390632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、プラズマ時系列データの確率密度関数などを基準にして条件付平滑化を行い、周期的変動のみならず非周期的なパワースペクトル等の変動の実態を明らかにすることを目的とする。JFT-2Mトカマクの実験データ解析では、大域的な鋸歯状振動のパルスの波形を分解した各フェーズごとに揺動のパワースペクトルを求め、鋸歯状振動中の帯状流やドリフト波乱流の振幅の変動を明らかにした。また、直線装置PANTAのデータ解析では、ポロイダルブローアレイの各チャンネルとの相関法に基づき2次元波数パターンを導出し、電圧バイアス前後の条件付平滑化により揺動状態の変動を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study aims at clarifying periodic and non-periodic changes in fluctuation power spectrum by using a conditional averaging based on probability density functions and so on. In analysis on JFT-2M tokamak data, power spectra at plasma edge region are calculated based on each phase of decomposed global Sawtooth pulse, and changes of amplitudes of oscillatory zonal flows and drift-wave turbulence during the Sawtooth was clarified. In analysis on linear plasma device PANTA data, two-dimensional wavenumber structures are reconstructed by correlation analysis, and conditional averaging over phases with and w/o electric biasing clarifies changes in the wavenumber structures during the biasing.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：条件付平滑化 プラズマ乱流 大偏差統計解析

1. 研究開始当初の背景

核融合研究における乱流輸送研究

核融合実験装置では、エネルギーの元となるプラズマの損失は乱流輸送で支配されており、その正確な理解と制御法の確立は最重要課題の内の一つである。プラズマの乱流はしばしば定常的ではなく、プラズマの巨視的状态自体が周期的・確率的に分岐することが、プラズマ乱流輸送の全体像の理解を困難にしている。例えば、磁場閉じ込め核融合研究においてその成否に關与する最も重要な分岐現象の一つとして、高閉じ込めモード(H-mode)が挙げられる。その分岐プロセスは多岐にわたり、プラズマ境界に高エネルギーイオンが供給されることでトリガーされる場合、帯状流と呼ばれる巨視的な流れ場が關与する場合、リミットサイクルのような周期的振動を伴う場合、L-mode と H-mode の確率的な遷移を繰り返す場合などがあるが、分岐を駆動するメカニズムに対する統一的な見解は得られていない。プラズマの構造を決定する要素として輸送現象はその根幹にあり、プラズマ中の分岐現象を解明する上で乱流輸送のより深い探査が必要とされている。

大偏差統計の重要性

分岐現象にはしばしば閾値を伴うことが知られている。例えば H-mode では、プラズマに対する加熱入力に閾値を超えた場合に発現する。プラズマ中の分岐現象をトリガーする機構を知る手法として、大偏差統計がその大きな候補となり得る。大偏差統計解析は確率密度関数のモーメント解析でも露わでない、閾値を超えるような大強度変動を検出するほぼ唯一の手段であり、これまでプラズマ乱流で取り上げられてきた例は少ない。H-mode 遷移については、電場の確率密度関数について理論的論文があり、また帯状流を伴う乱流場の大偏差統計に関する理論・実験的プラズマ・材料相互作用では、スクレイブオフ層においてブロップと呼ばれる間欠的事象が存在する。ブロップの確率密度関数が長いテールを引く場合は、壁に対する熱負荷が増大し、壁損傷の閾値を超える可能性がある。その機構を明らかにするには、揺動の高次モーメントのみならず、大偏差統計の分析が必須と考えられる。

乱流解析のための条件付き平滑化・サンプリング法

条件付き平滑化・サンプリングとは、複数の状態が混在する系のデータを分類し、それぞれの状態における統計量を抽出する手法の一つである。例えば、乱流中に周期的事象・閾値を超える突発事象が再現的に観測される場合、その周期の位相や閾値を超える毎にデータを抽出してデータ集合を分類し、各々の集合内で平滑化処理し統計量を得る手法である。条件付き平滑化を用いることで各状態の乱流統計量(スペクトルなど)の抽出に成功している。例えば、H-mode 遷移時のリミットサイクル振動では、D 線輻射を利用

した条件付き平滑化によってその振動の1周期における乱流運動量輸送・電場形成の位相関係を明らかにした。しかし、より一般的な確率的事象に対してはデータ解析法が未開拓の状態である。確率的に分岐を繰り返す事象は、準定常乱流中で縮退した状態で観測されていると推定され、その頻度は相対的にばらつきがあり、有意な統計量を得るには必然的に何らかの条件付き平滑化・サンプリングを必要とする。

2. 研究の目的

本研究は、基礎実験や核融合プラズマ実験など広範な規模の実験のデータ、および数値プラズマデータに適用可能な、プラズマ乱流中における局所乱流統計量の大規模構造との相關に関する知見を得るための、乱流プラズマのデータ解析法の開発を目的とする。本研究の骨子は、網羅する空間スケールの異なる複数の揺動データを組み合わせ、片方のデータの確率密度関数に従ってもう一方のデータを条件付き平滑化・サンプリングし、乱流状態(スペクトル、確率密度関数、特に大偏差統計など)の規則・不規則な変動を明らかにする。本解析法の開発により、異なる統計則に支配される複数の乱流が周期的現象・突発現象や確率過程で遷移を繰り返す状態、すなわち乱流の準定常状態などの実態解明に道を拓く手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の方法は、網羅する空間スケールの異なる複数の揺動データを組み合わせ、片方のデータの確率密度関数に従ってもう一方のデータを条件付き仕分けする、いわば条件付き平滑化・サンプリングの一般化である。基礎直線装置の多チャンネルプローブデータを用いて一般化された条件付き平滑化法を試験し、大型閉じ込め装置に対して一般化された条件付き平滑化を適用して、手法の普遍性を検証する。用いる揺動データは、高時間分解能をもち、網羅する空間スケールの異なる複数の観測器(例えば線積分全体計測と局所計測の2種)のデータである。局所計測は、非ガウス性の抽出のため、近接した2点以上の観測点を必要とする。

4. 研究成果

JFT-2M トカマクの実験データ解析では、大域的な鋸歯状振動のパルスの波形を分解した各フェーズに揺動のパワースペクトルを求め、鋸歯状振動中の帯状流やドリフト波乱流の振幅の変動を明らかにした。また、直線装置 PANTA のデータ解析では、ポロイダルプローブアレイの各チャンネルとの相關法に基づき2次元波数パターンを導出し、電圧バイアス前後の条件付平滑化により揺動状態の変動を明らかにした。

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 3件)

Tomotsugu KANZAKI, Yoshihiko NAGASHIMA, Shigeru INAGAKI, Fumiyoshi KIN, Yudai MIWA, Makoto SASAKI, Takuma YAMADA, Akihide FUJISAWA, Tatsuya KOBAYASHI, Naohiro KASUYA, Yusuke KOSUGA, Sanae-I. ITOH and Kimitaka ITOH, Improvement of the Reynolds Stress Probe for End-Plate Biasing Experiments in a Cylindrical Laboratory Plasma, Plasma and Fusion Research, 11, 1201091, (2016) 査読有,

<http://doi.org/10.1585/pfr.11.1201091>

Yoshihiko Nagashima, Kimitaka Itoh, Sanae-I. Itoh, Akihide Fujisawa, Katsumichi Hoshino, Change in Edge Fluctuations Synchronized with Heat Pulse in the JFT-2M Tokamak, Journal of the Physical Society of Japan, 85, 063501, (2016) 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.063501>

Yoshihiko Nagashima, Shigeru Inagaki, Akihide Fujisawa, Hiroyuki Arakawa, Takuma Yamada, Yudai Miwa, Tatsuya Kobayashi, Sanae-I. Itoh, and Kimitaka Itoh, Observation of Parallel Force Balance for Drift Wave Fluctuation by a Fast Voltage Sweeping Method in a Linear Plasma, Journal of the Physical Society of Japan, 84, 063501, (2015) 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.063501>

[学会発表](計 13件)

永島芳彦, 藤澤彰英, 稲垣滋, 神崎智継, 金史良, 荒川弘之, 小林達哉, 山田琢磨, 山崎広太郎, 福田郁未, 狭間田一誠, 小菅佑輔, 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤早苗, 伊藤公孝, エンドプレートバイアス時の多チャンネルプローブ計測, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市), 2017年03月18日

永島芳彦, 藤澤彰英, 稲垣 滋, 山崎広太郎, 江藤健太, 多和航希, 元吉喬望, 上原 耀, 神崎智継, 金 史良, 山田琢磨, 小林達哉, 荒川弘之, 小菅佑輔, 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤早苗, 伊藤公孝, 直線プラズマにおける乱流トモグラフィデータとラングミュアプローブデータの比較, 第33回プラズマ・核融合学会 年会, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県仙台市), 2016年12月02日

神崎智継, 永島芳彦, 稲垣 滋, 山田琢磨, 金 史良, 山崎広太郎, 藤澤彰英, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 佐々木真, 荒川弘之, 小林達哉, 垂水智哉, 狭間田一誠, 湊 良祐, 伊藤早苗, 伊藤公孝, 直線プラズマ装置

における電位揺動計測のための静電シールド付きプローブの開発, 第33回プラズマ・核融合学会 年会, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県仙台市), 2016年12月01日

福田郁未, 稲垣 滋, 小菅佑輔, 佐々木真, 永島芳彦, 山田琢磨, 藤澤彰英, 糟谷直宏, 荒川弘之, 山崎広太郎, 金良史, 伊藤早苗, 伊藤公孝, 直線磁化プラズマにおける軸方向不均一性の観測, 第33回プラズマ・核融合学会 年会, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県仙台市), 2016年12月01日

Yoshihiko NAGASHIMA, Data analysis of plasma turbulence in a linear device and its application to Heliotron-J, The 7th International Symposium of Advanced Energy Science - Frontiers of Zero Emission Energy - (招待講演)(国際学会)百周年時計台記念館, 京都大学吉田キャンパス(京都府京都市), 2016年9月5日

永島芳彦, 神崎智継, 金良史, 稲垣滋, 山田琢磨, 荒川弘之, 小林達也, 佐々木真, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤早苗, 伊藤公孝, エンドプレートバイアス実験時のレイノルズ応力の動的応答, 核融合エネルギー連合講演会, 九州大学伊都キャンパス椎木講堂(福岡県福岡市), 2016年07月14日

神崎智継, 永島芳彦, 稲垣滋, 山田琢磨, 三輪祐大, 金良史, 藤澤彰英, 小菅佑輔, 糟谷直宏, 佐々木真, 伊藤早苗, 伊藤公孝, 直線プラズマ装置におけるエンドプレートバイアス時のレイノルズストレスの計測, 核融合エネルギー連合講演会九州大学伊都キャンパス椎木講堂(福岡県福岡市), 2016年07月14日

T. Kanzaki, Y. Nagashima, et al. Measurement of Reynolds Stress induced by end-plate biasing in a cylindrical laboratory plasma, プラズマ・核融合学会九州・山口・沖縄支部大会, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本県熊本市), 2015年12月19日~2015年12月20日

T. Kanzaki, Y. Nagashima, et al., Measurement of Reynolds Stress in end-plate biasing experiment in PANTA, 17th Cross Straits Symposium on Materials, Energy and Environmental Sciences (国際学会), 九州大学筑紫キャンパス(福岡県春日市), 2015年12月02日~2015年12月03日

F. Kin, Y. Nagashima et al., Reconstruction of Cross-Sectional Structure of Reynolds Stress in End-Plate Biasing Experiment in PANTA, International Toki Conference 25 (国際学会), セラトピア土岐(岐阜県土岐市), 2015年11月03日~2015年11月06日

T. Kanzaki, Y. Nagashima et al., Change in Reynolds stress induced by end-plate biasing in a cylindrical

laboratory plasma, International Toki Conference 25 (国際学会), セラトピア土岐(岐阜県土岐市), 2015年11月03日~2015年11月06日

永島芳彦, 伊藤早苗, 藤澤彰英, 稲垣 滋, 小林達哉, 山田琢磨, 荒川弘之, 糟谷直宏, 佐々木真, M. Lesur, 小菅佑輔, 伊藤公孝, 非平衡極限 - 直線プラズマにおける乱流遷移の確率過程の観測, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2014年11月18日~2014年11月21日

Y. Nagashima, A. Fujisawa, K. Takahashi, K. Taketsugu, S. Ohno, F. Fukunaga, N. Hamamoto, R. Shibata, S. Inagaki, T. Yamada, H. Arakawae, T. Kobayashi, Y. Miwa, M. Sasaki, Y. Kosuga, M. Lesur, N. Kasuya, S. -I. Itoh and K. Itoh Comparison between fluctuation data measured with multi-channel spectroscopic system and that measured with Langmuir probe in PANTA, 24th International Toki Conference (国際学会), セラトピア土岐(岐阜県土岐市), 2014年11月4日~2014年11月7日

〔その他〕

ホームページ等

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K004384/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永島 芳彦 (NAGASHIMA, Yoshihiko)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：90390632