

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14443

研究課題名（和文）磁力線方向流れがもたらす磁化プラズマ乱流構造形成を3次元非接触計測で解き明かす

研究課題名（英文）Elucidating magnetized plasma turbulence due to axial flow using 3D non-intrusive measurement

研究代表者

山崎 広太郎（Yamasaki, Kotaro）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・助教

研究者番号：00782468

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め型核融合発電を実現する上で、磁化プラズマ中で生じる乱流により引き起こされる輸送の原理を理解することは核融合発電の成否を決める重要な課題の一つである。本研究では磁化プラズマ乱流の突発性や大域性を実験的に明らかにすることを目的として乱流計測トモグラフィの空間分解能を定量的に評価する手法および乱流二次元データ解析手法を確立した。そのトモグラフィを用いて直線磁化プラズマ装置PANTAで生じる乱流の観測を行うことで揺動同士の間非線形結合が揺動振幅の伝搬に伴って生じていることを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め核融合プラズマでは高温高密度状態を維持する必要がある。そのため乱流など非線形現象で生じる熱および粒子輸送を理解することが核融合発電の成功に重要な課題として認識されている。乱流を含む非線形現象は突発的に生じることが確認されており、その引き金となる現象を理解するためには時間的・空間的に広い範囲で観測する必要がある。本研究で開発したトモグラフィ計測システムの分解能評価手法および非線形結合の時空間構造解析手法を用いることで非線形現象の時空間的な発展を定量的に評価することが可能になった。本研究で得られた結果は磁化プラズマ中で生じる輸送の突発的な変化に関して重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：Understanding the principle of transport caused by turbulence in magnetized plasmas is one of the most important issues for the realization of the fusion power plant. In this study, we developed a method to quantitatively evaluate the spatial resolution of tomography for turbulence observation, and a method to analyze two-dimensional reconstruction data in order to experimentally elucidate the abrupt phenomena and multiscale nature of turbulence in magnetized plasmas. By using the tomography to observe turbulence in a linearly magnetized plasma system PANTA, we succeeded in clarifying that nonlinear coupling between oscillations occurs along with the propagation of fluctuation amplitude.

研究分野：核融合

キーワード：磁化プラズマ乱流 トモグラフィ計測 流速シア

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め型核融合発電を実現する上で、磁化プラズマ中で生じる乱流により引き起こされる輸送の原理を理解することは核融合発電の成否を決める重要な課題の一つである。磁化プラズマ中では密度や温度の勾配、さらにプラズマの流速分布に見られる空間的な変化(流速シア)を駆動力とした乱流が生じる。特に磁力線垂直方向に生じる密度勾配によって駆動されるドリフト波は粒子や熱をプラズマ外に排出する方向に輸送を助長することが知られている。一方で磁力線方向のプラズマ流速のシアが駆動する乱流は密度勾配が駆動する乱流とは逆向きの輸送特性を示すことが理論・実験研究から明らかになっている(Y. Kosuga, PFR (2017), S. Inagaki, Sci. Rep. (2016))。また、近年行われた理論研究では磁力線方向の流速シアが乱流輸送を低減・助長するメソスケール構造(ゾーナルフロー, ストリーマ)へのエネルギー移送割合に影響することが示されている(Y. Kosuga, PoP (2017))。さらに、近年のシミュレーション研究から種類の異なる乱流が径方向位置の異なる場所で同時に生じ得ること(M. Sasaki, PoP (2017))や、流速シアに駆動された乱流が突発的にプラズマ中心部から周辺部に伝搬し得ること(M. Sasaki, PoP (2019))が報告されている。これらの先行研究は、磁化プラズマ中で生じる乱流の特性を包括的に理解する上でプラズマ半径方向各位置において乱流の種類を同定することの重要性を示唆している。

## 2. 研究の目的

本研究ではトモグラフィを用いた非接触計測を用いて乱流の空間構造およびその径方向分布を抽出し、乱流空間構造の時間的な変化および乱流同士の非線形結合の時空間構造を明らかにする手法を確立する。そのためには乱流の二次元空間構造を正確に再構成できるトモグラフィシステムを構築し、乱流の情報を定量的に抽出する必要がある。そこで本研究では(i) プラズマ乱流計測トモグラフィシステムの感度較正方法の確立, (ii) トモグラフィシステムで観測できる空間構造の分解能を定量的に評価する手法の確立, (iii) 得られたトモグラフィデータから揺動の空間構造や非線形結合が示す時空間発展を抽出する手法の確立 を行った。本研究を通して確立した磁化プラズマ乱流の時空間構造解析手法を直線磁化プラズマ装置 PANTA で見られる準周期的現象に適用し、乱流が示す突発的な現象の解明を行った。

## 3. 研究の方法

### (i) プラズマ乱流計測トモグラフィシステムの感度較正方法の確立

トモグラフィ計測はプラズマ周囲に配置した計測器で得られたプラズマ発光量の視線積分データを用いて発光量の二次元分布を再構成する。発光量を再構成するためには投影行列と呼ばれる発光量二次元分布と視線積分データの対応関係を表す行列データが必要である。正確な発光量分布の空間構造を取得するためには各計測器の感度や設置誤差などの影響を反映した投影行列を取得することが重要である。そこで、直径 4 mm の冷陰極管を観測領域に挿入し投影行列を実験的に取得する手法を実施した(図 1)。アクチュエータを用いて高い位置精度で冷陰極管の位置を決定し、観測領域内の各位置において冷陰極管の発光をトモグラフィ計測システムで観測することで計測器の相対感度や接地誤差を考慮した投影行列の取得に成功した。

### (ii) トモグラフィシステムで観測できる空間構造の分解能を定量的に評価する手法の確立

トモグラフィ計測は視線積分発光量データから発光量二次元分布を推定する逆問題を解くことで発光量二次元分布を取得している。そのため観測できる空間構造は、発光量二次元分布と視線積分発光量データの対応関係を表す投影行列の写像の性質で決定されると考えられる。トモグラフィで得られる再構成画像を表現する基底の数は投影行列が表す写像の像空間の次元と一致すると考え、Bi-Cross validation を用いて投影行列のランクを推定した。また弁別できる空間構造を判定するために二次元空間構造の基底を視線積分データ空間に写像して得られるベクトル同士の直交性を用いて空間分解能を評価する手法を考案した。

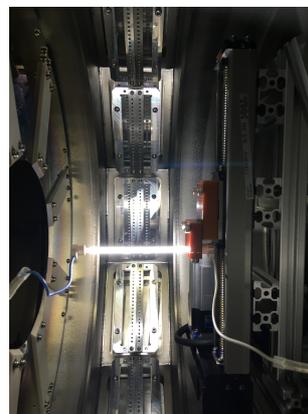


図 1 投影行列を実測する装置の外観と実際に使用している最中の写真

(iii) トモグラフィデータから揺動の空間構造や非線形結合が示す時空間発展を抽出する手法の確立

トモグラフィで観測された揺動の空間構造の安定性および非線形結合の時空間構造を定量的に評価することを目的として、structure function および modal coupling function と呼ぶ解析手法を開発した。これらの解析手法は周方向にフーリエ級数を用いた基底関数の係数を利用した解析手法である。Structure function は径方向および時間的に離れた位置において特定の周波数と周方向モード数を持つ揺動のコヒーレンスを評価する手法である。一方、modal coupling function は周波数および周方向モード数のマッチング条件を満たした揺動間で生じる非線形結合の時空間分布を評価する手法である。

#### 4. 研究成果

実験的に取得した投影行列を用いて発光分布を再構成した例を図 2 に示す。相対感度や設置誤差を考慮した投影行列が得られたことで、計測器の幾何形状から作成した投影行列に比べて滑らかな再構成画像を取得することに成功した。得られた投影行列に Bi-Cross validation を適用した結果、投影行列は 30 程度のランクを持つことが判明した。この結果を用いて、1つのピクセルにのみ光源があるような基底および Fourier-Rectangular function (FRF) 基底を視線積分データ空間に写像したときにおける各基底の直交性から、ピクセル同士の分解能および各半径位置における周方向モード数の分解能を評価した。1つのピクセルにのみ光源があるような基底の直交性から、ピクセル同士の分解能を評価した結果、観測領域全体で平均して 0.9 cm 程度の空間分解能を有することが判明した。またこの解析結果から、計測視線から離れた位置において空間分解能が低下する傾向が定量的に明らかになった。FRF 基底を用いた空間分解能解析を行った結果、 $r > 1$  cm の範囲で  $m=4$  の構造が観測でき、 $r > 3$  cm の領域では  $m=5$  の空間構造まで観測できることを示唆する結果が得られた。この解析結果から、トモグラフィを用いてプラズマ半径方向の広い範囲にわたって  $m=4$  までの空間構造の時間発展を同時に観測することが可能であることが定量的に示された。

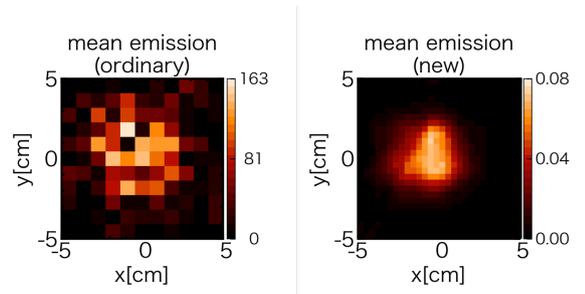


図 2 (左)従来の投影行列を用いて再構成した発光強度分布(右)実測した投影行列を用いて再構成した発光強度分布

直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場 1300 G、放電パワー 6 kW の条件下で周方向モード数  $m=1$  と  $m=4$  の構造を持つ揺動が非線形結合している現象が観測された。この非線形結合により  $m=4$  揺動のサイドバンドモード ( $m=3, 5$ ) が形成されている。上記の放電条件において行ったトモグラフィ再構成データを解析したところ、 $m=3, 4, 5$  の揺動は時間的に一定の空間構造を示しているが  $m=1$  揺動は時間的に振幅が増減したりねじれたりする変化を示していることが明らかになった。また  $m=1$  揺動の振幅はプラズマ中心部から周辺部に伝搬している様子や、それに伴い  $m=4$  揺動の振幅が減少する様子も確認できた。

トモグラフィで観測された  $m=1, 3, 4, 5$  揺動の空間構造の安定性および非線形結合の時空間構造を定量的に評価することを目的として、structure function および modal coupling function と呼ぶ解析手法を開発した。Structure function は径方向および時間的に離れた位置において特定の周波数と周方向モード数を持つ揺動のコヒーレンスを評価する手法である。一方 modal coupling function は周波数および周方向モード数のマッチング条件を満たした揺動間で生じる非線形結合の時空間分布を評価する手法である。Structure function を用いて各揺動の空間構造安定性を解析したところ、 $m=3, 4, 5$  の揺動はプラズマ中心部から周辺部にかけて構造が安定していることが明らかになった。一方で  $m=1$  揺動は  $r=2$  cm 付近を境にコヒーレンスが急激に低下する傾向があることが明らかになった。この結果は、 $m=1$  揺動と  $m=3, 4, 5$  揺動が示す空間構造の時間発展が大きく異なることを定量的に示している。また modal coupling function も  $r=2$  cm 付近で低下していることが判明した。これらの結果は、プラズマ中心部と周辺部で揺動同士が示す非線形結合現象が  $m=1$  揺動の時空間発展に支配されていることを示唆している。

$m=1$  揺動の時空間発展と非線形結合の変化の関係性を明らかにするために、 $m=1$  揺動の振幅変化が  $r=2$  cm に到達する時間を基準として structure function および modal coupling function の時空間発展を計算した。解析の結果、 $m=1$  揺動の振幅が強い領域が径方向に伝搬する時間帯に合わせて  $m=1$  揺動の空間構造の安定性が増加し、さらに非線形結合が強い領域が径方向に伝播していることが明らかになった。上記の結果は磁化プラズマ中で生じる輸送の突発的な変化に関して重要な知見を与えるものであると考え、現在論文投稿の準備を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 NISHIMURA Daiki, FUJISAWA Akihideo, NAGASHIMA Yoshihiko, MOON Chanho, YAMASAKI Kotaro, KOBAYASHI Taiki, INAGAKI Shigeru	4. 巻 16
2. 論文標題 Fourier-Rectangular Function Analysis of Spatiotemporal Structure of Bursting Phenomenon in a Cylindrical Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201075 ~ 1201075
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.16.1201075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nishimura D., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Yamasaki K., Kobayashi T.-K., Inagaki S., Yamada T., Kawachi Y., Kasuya N., Kosuga Y., Sasaki M.	4. 巻 129
2. 論文標題 Modal polarization analysis using Fourier-rectangular function transform in a cylindrical plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 093301 ~ 093301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0037352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Moon Chanho, Yamasaki Kotaro, Nagashima Yoshihiko, Inagaki Shigeru, Ido Takeshi, Yamada Takuma, Kasuya Naohiro, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Kawachi Yuichi, Nishimura Daiki, Kobayashi Taiki, Fujisawa Akihideo	4. 巻 11
2. 論文標題 The first observation of 4D tomography measurement of plasma structures and fluctuations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-83191-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Yamasaki, A. Fujisawa, Y. Nagashima, C. Moon, Y. Kawachi, D. Nishimura, T.-K. Kobayashi, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Kosuga, T. Yamada, N. Kasuya
2. 発表標題 Basis function analysis technique for the two-dimensional structure of fluctuation in magnetized plasma
3. 学会等名 Global Plasma Forum in Aomori（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎 広太郎
2. 発表標題 トモグラフィを用いた磁化プラズマ乱流の空間構造計測
3. 学会等名 RIAMフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Yamasaki, A. Fujisawa, Y. Nagashima, C. Moon, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Kosuga, T. Yamada, N. Kasuya
2. 発表標題 Two-dimensional structure of fluctuations and their modal coupling in linear magnetized plasma
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamasaki, A. Fujisawa, Y. Nagashima, C. Moon, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Kosuga, T. Yamada, N. Kasuya
2. 発表標題 Three-dimensional measurement using tomography systems in a magnetized plasma in linear cylindrical geometry
3. 学会等名 47th EPS Plasma Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林 大輝, 藤澤 彰英, 永島 芳彦, 文 贊鎬, 稲垣 滋, 山田 琢磨, 小菅 佑輔, 山崎 広太郎, 西村 大輝
2. 発表標題 直線プラズマにおける背景構造の非対称性による孤立波振動への影響の探究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村大輝, 藤澤彰英, 永島芳彦, 文贊鎬, 稲垣滋, 山田琢磨, 小菅佑輔, 山崎広太郎, 小林大輝
2. 発表標題 乱流トモグラフィのための局所速度場推定法の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳田悟, 河内裕一, 佐々木真, 荒川弘之, 山崎広太郎, 寺坂 健一郎, 稲垣滋
2. 発表標題 磁化プラズマにおけるイオン速度分布関数のベイズ推定
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村大輝, 藤澤彰英, 永島芳彦, 文贊鎬, 稲垣滋, 山田琢磨, 小菅佑輔, 山崎広太郎, 小林大輝
2. 発表標題 トモグラフィを用いた局所速度場の推定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 大輝, 藤澤 彰英, 永島 芳彦, 文 贊鎬, 稲垣 滋, 山田 琢磨, 小菅 佑輔, 山崎 広太郎, 西村 大輝
2. 発表標題 プラズマ背景構造の非対称性と 孤立波振動現象の関係
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎 広太郎, 藤澤 彰英, 永島 芳彦, 文 贊鎬, 稲垣 滋, 佐々木 真, 小菅 佑輔, 山田 琢磨, 糟谷 直宏, 井戸 毅, 河内 裕一, 赤司 智宏, 小林 大輝, 西村 大輝
2. 発表標題 PANTAプラズマにおけるモード間結合ダイナミクスの解析
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文贊鎬, 稲垣滋, 永島芳彦, 山崎広太郎, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 佐々木真, 井戸毅, 山田琢磨, 赤司智宏, 小林大輝, 西村大輝, 藤澤彰英
2. 発表標題 直線型磁化プラズマPANTAにおける揺動の3次元ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2020年 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村大輝, 藤澤彰英, 永島芳彦, 文贊鎬, 山崎広太郎, 稲垣滋, 佐々木真, 小菅佑輔, 山田琢磨, 糟屋直宏, 井戸毅, 河内裕一, 赤司智宏, 小林大輝
2. 発表標題 トモグラフィを用いた PANTA プラズマにおける突発的揺動の研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文 贊鎬, 稲垣 滋, 永島 芳彦, 山崎 広太郎, 糟谷 直宏, 小菅 佑輔, 佐々木 真, 井戸 毅, 山田 琢磨, 赤司 智宏, 小林 大輝, 西村 大輝, 藤澤 彰英
2. 発表標題 トモグラフィを用いた直線磁化プラズマの3次元構造解析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------