### 磁化プラズマ中での乱流・非線形揺動のローカルトモグラフィを用いた詳細計測

九州大学 応用力学研究所 山﨑 広太郎

磁化プラズマ中で生じる乱流・非線形揺動の時空間構造をより詳細に観測し解析すること を目的として、トモグラフィを用いた揺動の二次元計測手法の開発を進めている.本研究で は、現在開発しているトモグラフィ計測システムのプラズマ中心部での分解能を更に向上さ せることを目的として、ローカルトモグラフィ導入の検討を行った.ローカルトモグラフィ 導入の検討を行うために、トモグラフィ計測により得られたデータから空間構造の特徴量を 抽出する解析手法の開発と、視線配置を変えた場合に得られる再構成画像の空間分解能の比 較を行った.トモグラフィ計測データから乱流・非線形揺動の時空間構造を定量的に評価す ることを目的として Fourier-Bessel 級数フィッティングを用いた揺動の空間分解能の大域的 な特徴量の抽出と、径方向に矩形関数を用いることによる揺動の局所的な振幅・回転速度お よびねじれの定量的な評価方法を考案した.また、これまで用いてきたトモグラフィ計測器 とほぼ同じ本数の計測視線をプラズマ周方向6点に分配し、観測領域での視線密度を向上さ せた場合におけるトモグラフィ計測の空間分解能の変化を検証した.同じ観測視線数でも周 方向に視線を分配した方がより高い空間分解能を実現できることが判明したため、ローカル トモグラフィを行うためには従来の視線と反平行な視線ではなく異なる周方向角度からの観 測視線の追加を行う方が分解能向上に効果があることを示唆する結果が得られた.

# ·研究目的 (i) 二次元データから空間構造の特徴量抽出 (ii) 視線密度向上によるト モグラフィ計測の空間分解能比較

本研究の目的は、ローカルトモグラフィを用いることによる磁化プラズマ乱流現象の詳細 な計測・解析である.トモグラフィを用いた乱流揺動計測の初期結果は出ていたため、計測に より得られた二次元再構成画像の時系列データから乱流揺動を解析する上で重要な物理量を 抽出する手法を確立する必要がある.また、この解析手法を用いることで、トモグラフィ視 線の改良を行った際に得られる解像度の評価を行う.そのため本研究では(1)Fourier-Bessel 級数フィッティングおよび矩形関数を用いた空間構造解析手法の開発(2)トモグラフィ計測 視線の視線密度を向上したトモグラフィ計測の実施および既存のトモグラフィ計測器との解 像度比較を行った.

#### (i) トモグラフィ再構成画像から空間構造の特徴を抽出する手法の開発

トモグラフィ計測により得られた再構成画像からプラズマの二次元空間構造を定量的に評価することを目的として,再構成画像にFourier-Bessel 級数をフィッティングする手法がこれまで用いられてきた.しかし Fourier-Bessel 級数は基底関数が無限個存在するため,空間構造を解析する上で必要な基底関数のみを選択する方法が必要になる.そこで Fourier-Bessel 級数フィッティングを行う前に適切な基底関数の組を選択する手法を考案した.この手法では以下の手順で基底関数を選択する.

- (1) 候補となる基底関数と再構成画像の内積を計算し,内積の値が大きい順に基底関数を 選定する.
- (2) フィッティングに用いる基底関数の数を (1) で選んだ順番に増やしていき,その都度 赤池情報量基準 (AIC) を計算する.ここで AIC はフィッティング誤差 χ<sup>2</sup>,再構成画 像のピクセル数 N とフィッティングに使用した基底関数の数 M を用いて以下のよう に定義した.

$$\xi(M) = N\log(\chi^2) + M$$

(3) AIC 最小となる位置での基底関数の組を採用する.

再構成画像の時系列データに対してフィッティン グを行う前にこの操作を行うことで,不必要な基底 関数を用いることなく空間構造の定量化を行うこ とが可能になった.再構成画像の時系列データに 対して Fourier-Bessel 級数フィッティングを行うこ とで,発光量分布の対称・非対称構造の抽出や揺動 がプラズマ断面全体で示す平均的な周方向モード 数 (m)の抽出など,揺動が示す大域的な特徴を抽 出・定量化することが可能になった.トモグラフィ により得られた揺動の二次元構造の時系列データ (図1(a1-3))から抽出した (m)の時間発展を図1(b) に示す.この手法についてまとめた論文は Review of Scientific Instruments に投稿し受理されている (成果報告 論文1).





図 1: (a1-3) トモグラフィ計測で得 られた揺動の空間構造の時間変化. (b) 平均的な周方向モード ⟨m⟩ およ び (c)m=1 揺動のねじれ ΔΘ の時間 発展

矩形関数  $h_n(r)$  を採用した基底関数  $h_n(r)\cos(m\theta)$  を用いた解析手法を考案した.この手法 では再構成画像  $\varepsilon(r,\theta)$  を  $\varepsilon(r,\theta) = \sum_{m,n} (a_{m,n}\cos(m\theta) + b_{m,n}\sin(m))$ のように展開し係数  $a_{m,n}, b_{m,n}$ を用いることで,ある径方向位置 n における揺動の回転角  $\Theta$  を以下のように定義 できる

$$\Theta_{m,n} = \frac{1}{m} \arctan(\frac{b_{m,n}}{a_{m,n}}).$$
(1)

再構成画像の時系列データに対してこの展開を行えば回転角 $\Theta_{m,n}$ の時系列データが得られるので、 $\Theta_{m,n}$ の時間微分をすることで揺動の角速度 $\omega_{m,n}$ を得ることができる.また、異なる径方向位置での回転角の差を計算することで揺動が示す空間構造のねじれを定量化することが可能になる.m=1揺動の空間構造のねじれを評価したものを図1(c)に示す.この手法についてまとめた論文を Plasma Physics and Controlled Fusion に投稿するために現在執筆を進めている.

これらの手法を用いることで,磁化プラズマ中で生じる揺動の空間構造が示す大域的.局 所的な特徴をトモグラフィ計測データから定量化することが可能になった.

#### (ii) 視線密度を向上したトモグラフィ計測器を用いた乱流揺動計測

本研究の目的はローカルトモグラフィを用いることによりプラズマ中心部での現象をよ り詳細に観測することである.これまでの計測器では発光量の視線積分量を観測する直径 3mmのコリメータを既に5mm間隔で配置しており,これ以上コリメータの密度を高める ことは困難である.そこで,これ以上コリメータを密に配置するのではなく周方向に観測 視線を分配することで分解能を高める方針を採用し検討を行った.検討を行うために既存 のトモグラフィ計測器 (図 2(a))と同程度の視線数を周方向6点に配置することで観測領域 での視線密度を高めたトモグラフィ計測器 (図 2(b))を新たに導入し,これまで用いてきた トモグラフィ計測と同時に計測を行うことでプラズマ部分で観測される揺動の空間構造の 比較を行った.同じ時間における発光量分布の揺動成分を従来のトモグラフィと新たに導 入したトモグラフィで比較した例を図3に示す.新たに導入したトモグラフィ計測器でも これまで用いてきたトモグラフィ計測器でも同様の揺動空間構造が観測されることが確認



図 2: (左) これまで用いてきたトモグ ラフィ計測器 (右) 新たに導入したトモ グラフィ計測器の視線配置



図 3: (a) これまで用いてきたトモグラフィ計測 器を用いて得られた揺動の空間構造 (b) 新たに導 入したトモグラフィ計測器を用いて得られた揺動 の空間構造

できた.また,(i) で紹介した矩形関数を用いた画像解析法を用いて r=4cm における揺動の 周方向スペクトルを抽出したものを図4に示す.これまで用いてきたトモグラフィ計測器 でも新たに導入したトモグラフィ計測器でも同じ周方向スペクトルが得られていることか ら,これら2つのトモグラフィ計測器で同じ現象が観測されいることが分かる.また,新 たに導入したトモグラフィ計測器ではこれまで用いてきたトモグラフィ計測器に比べてプ ラズマ中心部により多くのピクセルを配置し再構成できていることから,新たに導入した トモグラフィではより詳細に揺動の空間構造を観測することが可能であることが判明した.

### ·考察

今回行った再構成画像の比較および周方向スペ クトルの比較により,観測視線を周方向に分配し観 測領域における視線密度を向上させることでトモ グラフィの空間分解能が向上することが判明した. この結果は,ローカルトモグラフィを行うために はこれまで用いてきた視線の反対側から反平行な 計測視線を導入するのではなく,反対側の視線と 並行にならない観測視線を導入する必要があるこ とを示唆している.

## · その他成果

これまで発光量分布再構成には MLEM 法と呼ば れる反復法を用いてきた.アルゴリズムの性質上, この手法を用いてプラズマ発光分布の時系列デー タを生成するには長い計算時間が必要になる.そ こで,重み関数を用いたマトリックス法と呼ばれる 再構成手法を用いることで MLEM 法により生成し た再構成画像に近い画像を出力する方法を考案し た.この内容をまとめた論文を Plasma and Fusion Research に投稿し受理されている (成果報告 論文 2).



図 4: (a) これまで用いてきたトモ グラフィ計測で得られた r=4cm にお ける周方向スペクトル (b) 新たに導 入したトモグラフィ計測で得られた r=4cm における周方向スペクトル

また,新しいトモグラフィ計測器の導入して解像度比較実験を行った際に,直線プラズマの軸方向3箇所で同時にトモグラフィ計測を行い揺動の三次元空間構造計測も行った. 揺動

の三次元空間構造計測に関する結果についても論文投稿準備を進めている. ・成果報告 論文

- <u>K. Yamasaki</u>, A. Fujisawa, and Y. Nagashima "A proposal of Fourier-Bessel expansion with optimized ensembles of bases to analyse two dimensional image", Review of Scientific Instruments 88, 093507 (2017), doi: 10.1063/1.5000744 (査読あり)
- 2. <u>Kotaro YAMASAKI</u>, Akihide FUJISAWA, Yoshihiko NAGASHIMA, and Shigeru INAGAKI, "Fast Algorithm for Tomographic Reconstruction for Plasma Emission", Plasma and Fusion Research, **12**, 1201045 (2017), doi: 10.1585/pfr.12.1201045 (査読あり)

発表

- 1. <u>山﨑 広太郎</u>, 藤澤 彰英, 永島 芳彦, "トモグラフィによるプラズマ乱流の空間構の観 測-Fourier-Bessel 関数フィッティングを用いた画像解析-", 画像研究会, 核融合科学研 究所, 岐阜県土岐市, 2017 年 9 月 21-22 日, (口頭発表, 査読なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔, 荒川 弘 之,山田 琢磨,金 史良,狹間田 一誠,多和 航希,元吉 喬望,松尾 士,上原 耀,"トモグ ラフィを用いた磁化プラズマ乱流の三次元空間構造観測", Plasma Conference 2017, 21P-37, 姫路商工会議所,兵庫県姫路市,2017 年 11 月 20-24 日 (ポスター発表,査読 なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔,荒川 弘 之,山田 琢磨,金 史良, Zhang Boyu,挾間田 一誠,松尾 士,上原 耀,荒木 健,丸井 一 生,星野 智, "PANTA における構造非対称性と孤立波振動との相互作用の二次元観測" 第 35 回プラズマ・核融合学会 年会, 3p-21,大阪大学吹田キャンパス コンベンション センター,大阪府吹田市, 2018 年 12 月 3-6 日, (ポスター発表,査読なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔,荒川 弘之,山田 琢磨,金 史良, Zhang Boyu,挾間田 一誠,松尾 士,上原 耀,荒木 健,丸井 一生,星野 智,"直線磁化プラズマにおける構造非対称性と孤立波振動の二次元観測", 日本物理学会 第74回年次大会,17aK310-6,九州大学 伊都キャンパス,福岡県福岡市, 2019年3月14-17日,(口頭発表,査読なし)