

トモグラフィを用いた乱流の時空間構造解析

Analysis on turbulence mode structure using tomographic reconstruction

山崎広太郎^a, 藤澤彰英^{a,c}, 永島芳彦^{a,c}, 稲垣滋^{a,c}, 糟谷直宏^{a,c}, 小菅佑輔^{a,c}, 山田琢磨^{c,d},
佐々木真^{b,c}, 小林達哉^e, 金史良^b, 江藤健太^b, 多和航希^b, 元吉喬望^b,
神崎智継^b, 挾間田一誠^b, 湊良祐^b, 垂水智哉^b, 伊藤公孝^{c,e}, 伊藤早苗^{a,c}

K. Yamasaki^a, A. Fujisawa^{a,c}, Y. Nagashima^{a,c}, S. Inagaki^{a,c}, N. Kasuya^{a,c}, et. al.

^a九州大学応用力学研究所, ^b九州大学大学院総合理工学府,
^c九大極限プラズマ研究連携センター, ^d九州大学基幹教育院, ^e核融合研究所

^aResearch Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan
^bInterdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan
^cResearch Center for Plasma Turbulence, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan
^dFaculty of Arts and Science, Kyushu University, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan
^eNational Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

e-mail : yamasaki@triam.kyushu-u.ac.jp

乱流は天体プラズマや核融合プラズマにおいて熱・粒子輸送を担う重要な現象である。近年、直線プラズマ装置PANTAにおいて、ドリフト波乱流による粒子輸送が非軸対称に生じていることが確認されている[1]。この事例は乱流現象が二次元非対称に生じることを示しており、乱流現象を解明する上で揺動の二次元計測が必須であることを示唆している。

PANTAではプラズマの揺動を二次元で観測することを目的としたトモグラフィ計測の開発を行っている[2]。アルゴンプラズマを4方向からArI (810nm±13nm)及びArII (476nm±30nm)について観測し、1μsごとに得た総数128視線の視線積分データから発光分布再構成を行う。急峻な空間変化も再現するために、再構成には基底関数を仮定しないMaximum Likelihood- expectation Maximization (ML-EM)法を用いる。この手法により、観測する16cm四方の領域を11x11のグリッドに分割しその発光値を逐次近似によって推定する。ML-EM法で得られた発光分布の一例を図1(a)に示す。

得られた発光分布の空間構造（あるいはモード構造）を定量的に解析するために、以下で定義されるFourier-Bessel関数級数

$$f(x) = \sum_{v,n} \{a_{v,n} J_v(r_{v,n} r) \cos(v\theta) + b_{v,n} J_v(r_{v,n} r) \sin(v\theta)\}$$

でフィッティングする (F-B展開)。ここで $r_{v,n}$ はBessel関数 J_v の n 番目の零点である。フィッティングにより得られた各基底関数の係数 $a_{v,n}$, $b_{v,n}$ を用いて発光分布を再構成したものが図1(b)である。さらに、得られたF-B展開を10μsごとに行い、得られた係数の時系列データをスペクトル解析することで空間構造の時間発展が得られる。図2は係数 a_{10} と b_{10} の時間発展とスペクトル解析した例である。どちらの係数にも同じ周波数に鋭いピーク、すなわちコヒーレントな揺動が存在することが分かる。また、これらの揺動の位相差を調べるとほぼ+90°で一定であり、これらの $m=1$ の揺動が電子反磁性方向に回転している

ことが判別できる。

ここでは $m=0$ から6まで総計83のF-B基底の組み合わせを用いてフィッティングを行なった。しかし、現在、より適切な基底の組み合わせ、あるいはフィッティングに必要な基底関数の数を最小化するための工夫として、発光分布とベクトル化したF-B基底の内積を用い、再構成画像に含まれる成分が大きいと推定される基底関数から順に利用する手法を試行している。初期的結果からはこの方法により、より少数の基底を用いた場合でも残差が低減する効果が確認されている。本発表では、F-B展開を発光画像のテストデータや実験データに適用し得た時空間構造解析の結果について報告する。

本研究は科学研究費補助金(16K13921, 21224014, 23246162, 26420852, 15H02335)の支援を受けた。

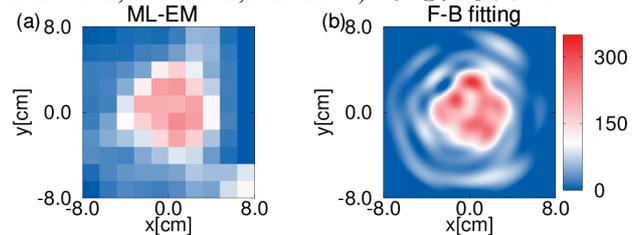


図 1 ML-EM 法を用いた再構成画像(左)と Fourier-Bessel 関数フィッティングにより得られた発光分布(右)。

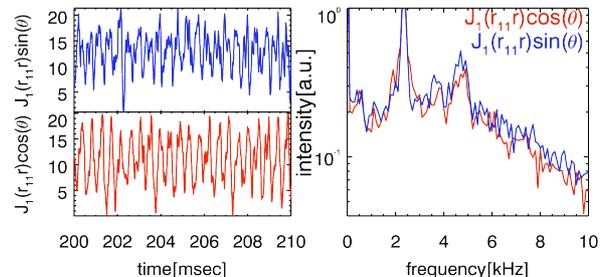


図 2 Fourier-Bessel 関数フィッティングで得られた $m=1$ 揺動の \cos , \sin 成分の時間発展(左)とそのスペクトル(右)

--参考文献--

- [1] T. Kobayashi, et al., Physics of Plasmas, **22**, 112301 (2015)
[2] A. Fujisawa, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **58**, 025005 (2016)