

## 乱流揺動の非線形飽和過程の可視化と特徴抽出

## Visualization and feature extraction of nonlinear-saturation processes of turbulent fluctuations

成田絵美<sup>1</sup>, 本多充<sup>1</sup>, 前山伸也<sup>2</sup>, 渡邊智彦<sup>2</sup>NARITA Emi<sup>1</sup>, HONDA Mitsuru<sup>1</sup>, MAEYAMA Shinya<sup>2</sup>, WATANABE Tomo-Hiko<sup>2</sup>量研那珂<sup>1</sup>, 名大理<sup>2</sup>QST Naka<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>

第一原理に基づくジャイロ運動論コードは、核融合プラズマにおける乱流流束の定量予測や不安定性の同定に不可欠である。ジャイロ運動論コードは5次元空間で速度分布関数の揺動成分  $f$  の時間発展を解く大規模計算を行うが（一ケースあたり  $10^6$  コア時間程度を消費）、一度の計算で多量の結果が生成されるため、その全てを解析対象にはできず、研究者の経験や興味に基づいて解析が行われていた。流束の定量予測には非線形飽和状態が用いられるが、その状態に至るまでに、異なる波数を持つ複数の不安定性が成長し、これらの不安定性と帯状流とのエネルギー授受が行われる。この乱流の非線形飽和過程にはこれまで目を向けられていなかった。本研究では、 $f$  を2次元画像データの組み合わせとして考えることで、飽和過程を視覚的に明らかにし、さらに、機械学習の手法を用いて画像データから乱流状態の特徴抽出を行った。

ここでは JT-60U L モードプラズマ #45072 を対象としたジャイロ運動論コード GKV[1] による計算を行った。GKV はこの実験結果と一致する熱流束を予測できている [2]。規格化小半径  $\rho = 0.76$  での線形成長率は規格化ポロイダル波数  $k_y \rho_p \sim 0.5, 1.6$  で大きく、イオン温度勾配モード/捕捉電子モードが支配的である (図 1(a))。非線形計算から得られるイオンの熱流束は、図 1(b) に示すように、初期段階で大きく成長した後、規格化時間  $\bar{t} \sim 16$  から減少し、飽和に至る。この過程での  $f$  をポロイダル・半径方向波数の2次元空間で見たとき、初期段階では、線形成長率が高い  $k_y \rho_p$  近傍で  $f$  の強度が大きくなるが (図 1(c))、徐々に最大の  $f$  の強度を持つ波数が低下し (図 1(d))、飽和状態となる (図 1(e)) ことが明らかになった。

次に、飽和に至るまでの過程を学習し、図 1(c)–(e) のような  $f$  の強度パターンから成長/飽和段階を識別する畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を構築した。ここでは近年開発された、比較的小きなモデルながらも画像認識能力に優れる EfficientNet[3] を用い

る。EfficientNet は膨大な画像群で学習済みであり、人間に喩えれば脳の視覚野と前頭葉の働きをすと言える。EfficientNet の転移学習により、成長/飽和段階の識別に適した CNN を構築し、テストデータに対して 99.9% の正答率を達成した。CNN の注視領域の可視化も行い、例えば、飽和状態では低  $k_y \rho_p$  領域にその特徴があることを捉えていることが分かった (図 1(f))。飽和過程の特徴を理解することで、成長段階に要する時間を短縮できる初期条件の提案、さらには成長段階からの飽和状態の推定に繋がると考えている。

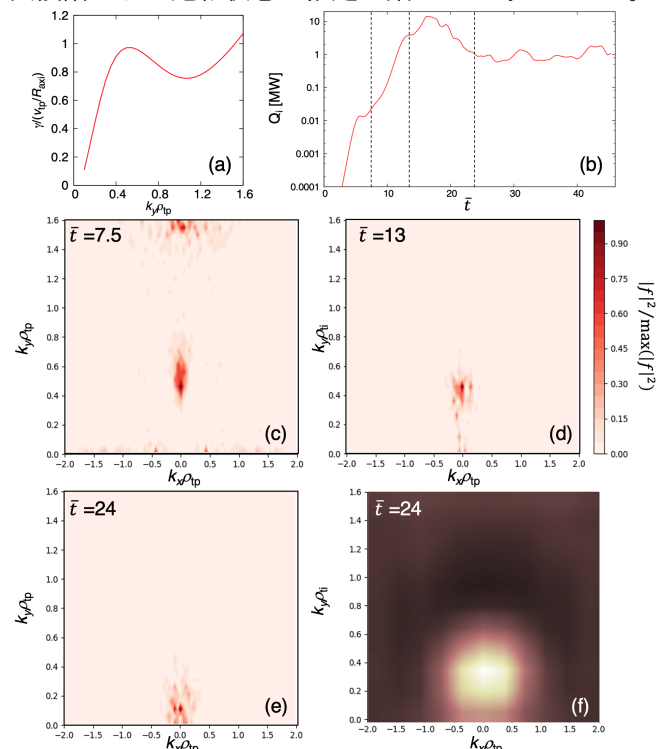


図 1: (a) 線形成長率の波数スペクトルと (b) イオンの非線形熱流束の時間発展。(b) の波線で示す時刻 (c)  $\bar{t} = 7.5$ , (d)  $\bar{t} = 13$ , (e)  $\bar{t} = 24$ , での波数空間における速度分布関数の強度。(f) CNN が乱流の成長/飽和段階を予測するときの注視領域のヒートマップ。

- [1] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion **46** 24 (2006).
- [2] M. Nakata *et al.*, Nucl. Fusion **56** 086010 (2016).
- [3] M. Tan and Q.V. Le, *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, PMLR 97 (2019). <https://arxiv.org/abs/1905.11946>.