

乱流プラズマ中モード間エネルギー輸送の可視化 Visualization of Intermode Energy Transfer in Turbulent Plasma

藤井恵介¹, 前山伸也², 小渕智之³, 大館暁⁴, 稲垣滋⁵

K. Fujii¹, S. Maeyama², T. Obuchi³, S. Ohdachi⁴, and S. Inagaki⁵

京大院工¹, 名大院理², 東工大情報理工学院³, 核融合研⁴, 九大応力研⁵

Kyoto univ¹, Nagoya univ², Tokyo Tech³, NIFS⁴, RIAM Kyushu Univ⁵

プラズマ乱流間の非線形結合を通じた自己組織化が、Hモードや内部輸送障壁など、核融合プラズマのマクロスケール構造形成を理解するために重要である。実験的に観測された揺動信号から非線形結合の様子を知るために、これまでは主にバイスペクトル解析が用いられてきた。しかし、計測チャンネル数 N に対してバイスペクトル解析は N^3 の結果を出力することになるため、大量のデータから重要な関係を抽出することが必要であった。また、エネルギー授受関係は検出できるものの、その輸送方向を求めることができないという課題もあった。

本研究では、九州大学の直線プラズマ実験装置 PANTA において周 (θ) 方向 64 チャンネルプローブで計測された浮遊電位の時系列データ (図 1(a)) に対し、動的モード分解を用いることで観測データの低ランク表現を求め、重要な構造の抽出を試みた。

具体的には、観測データ $y(\theta, t)$ を $y(\theta, t) = \sum_k \phi_k(t) f_k(\theta)$ と分解するもののうち、時系列成分 $\phi_k(t)$ 間の相関を最も小さくする基底関数 $f_k(\theta)$ を求めた。各モードの基底関数を図 1(b) に示す。周方向モード数がおおよそ 1 であるモード (mode 0, 2)、おおよそ 2 であるモード (mode 4)、おおよそ 3 であるモード (mode 6–12) が支配的であると得られた。

得られた係数 $\phi_k(t)$ に対して、二次の非線形方程式

$$\frac{d\phi_k(t)}{dt} \approx \lambda_k \phi_k(t) + \sum_{p,q} c_{pq}^k \phi_p^*(t) \phi_q^*(t) \quad (1)$$

をフィットすることで、線形成長率 λ_k および非線形相互作用係数 c_{pq}^k を実験データから導出した。なお、 $\phi_q^*(t)$ は、 $\phi_q(t)$ の複素共役を表す。

得られた c_{pq}^k および $\phi_k(t)$ を用いることで、各モード k のエネルギーの時間変化を、以下のように記述できる。

$$\frac{d|\phi_k(t)|^2}{dt} \approx \text{Re}[\lambda_k] |\phi_k(t)|^2 + \sum_{p,q} \text{Re}[c_{pq}^k \phi_p^*(t) \phi_q^*(t) \phi_k^*(t)] \quad (2)$$

このようなエネルギー授受関係を有向グラフにより表現した結果を図 2 に示す。主に mode 10 から mode

2 へのエネルギー輸送が支配的であること、mode 6, 10, 12 の間でのエネルギーの循環があることなどがわかる。このように、多チャンネル時系列データに潜むの非線形相互作用をシンプルに表現することが可能になった。

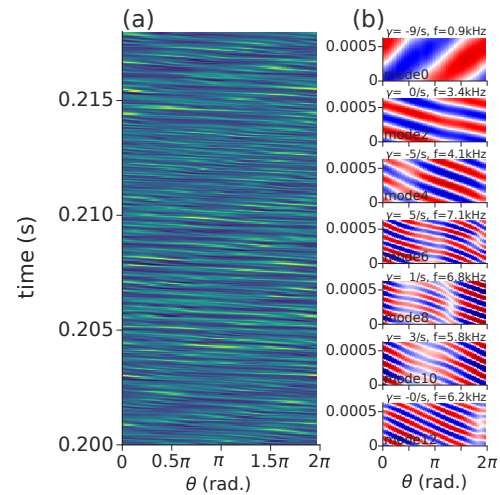


Fig. 1: (a) 周方向プローブにより得られた浮遊電位の時間変化 (b) 動的モード分解により得られた各モードの基底関数

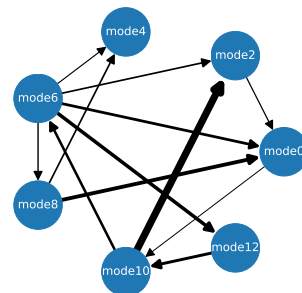


Fig. 2: 本研究により求めた、各モード間のエネルギー輸送。矢印の向きでエネルギー輸送の方向を、太さでその大きさを表す。