

(2) 大規模核融合プラズマ乱流シミュレーションデータの主成分分析

(2) Pattern extraction from large scale plasma turbulence simulation data with Principal Component Analysis

*朝比 祐一¹¹ 日本原子力研究開発機構

磁場閉じ込め核融合装置の炉心プラズマの閉じ込め性能は乱流輸送によって支配される。高温の炉心プラズマは無衝突性を有するため、非 Maxwell 的な速度分布を示す。そのため、乱流輸送の予測には、第一原理的シミュレーションであるジャイロ運動論的シミュレーションが実験、理論解析問わず幅広く利用される。計算は空間 3 次元、速度 2 次元、時間 1 次元の合計 6 次元空間内で行われ、膨大なシミュレーションデータが生成される。従来研究では、3 次元空間の流体モーメントなどにおけるパターン形成と乱流輸送との関連性が議論されて来たが、高速粒子研究などからは位相空間内で形成されるパターンと突発的な輸送現象との関連性が示唆されている。しかし 5 次元乱流シミュレーションにおいては、データの大规模性かつ高次元性ゆえどのようなパターンが輸送へ寄与しているか調べるのは困難であった。

本研究では、主成分分析 (PCA) による次元削減によって頻出する位相空間内構造の抽出を行った。図 1 は、PCA によって空間 3 次元 (径方向 r 、ポロイダル方向 θ 、トロイダル方向 φ)、速度 2 次元 (v_{\parallel}, w) それぞれ磁力線平行方向、垂直方向速度と対応)、時間 1 次元の合計 6 次元の揺動分布関数時系列データから抽出した位相空間 ($\varphi, v_{\parallel}, w$) 3 次元の基底の $w = 0$ 断面を 16 主成分まで示す。成分 1, 2, 13, 14, 15 などは φ 方向に有限の波数を持ち、 v_{\parallel} 方向に対称なバルーニングモードと呼ばれる成分であるとわかった。これらと対応する空間係数 (空間 2 次元、時間 1 次元) は、磁場強度分布やバルーニングモードなどプラズマ物理でよく知られた構造と対応していることが明らかとなった。本手法では、可視化困難であった 5 次元の時系列データが、各主成分について 3 次元位相空間構造と 3 次元時空間 (空間 2 次元、時間 1 次元) 構造が同時に得られていることに注意されたい。

講演では、この手法により 10^{12} 程度から 3×10^9 程度まで自由度を削減しつつ、データの分散を 83% 程度表現できることを示す。また、圧縮したデータから主成分ごとの熱輸送を計算し、どの主成分 (つまり位相空間構造) が突発的な熱輸送へ寄与しているかを示す。

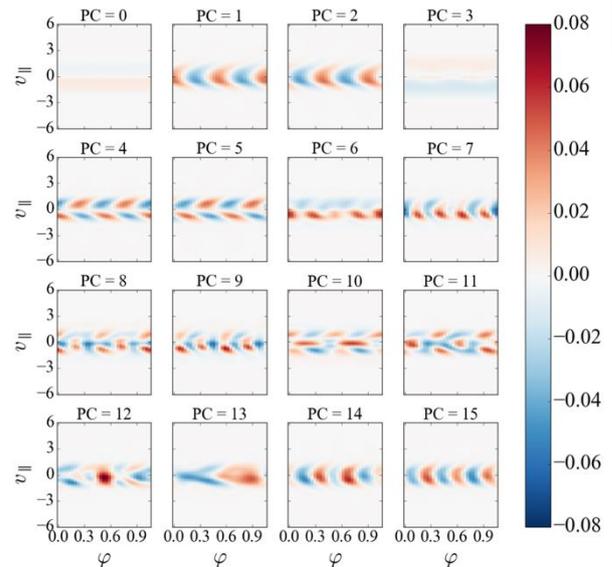


図 1 : 3 次元位相空間基底の $w = 0$ 断面。横軸はトロイダル方向 φ 、縦軸は磁力線平行速度方向 v_{\parallel} となる。図上の数字は何番目の主成分かを示す。

*Yuuichi Asahi¹¹Japan Atomic Energy Agency