

炉物理実験手法に対する Dynamic Mode Decomposition の応用

原子核エネルギー制御工学グループ 山本研究室 西岡楓賀

1. 緒言: 長寿命放射性核種の核変換を目的とした加速器駆動システムの開発や、1F 燃料デブリの安全な取り出しに向けて、万が一の反応度事故に備えるため体系の未臨界度を監視可能な技術が求められている。未臨界度を測定するためには、体系内の中性子集団の振る舞いに対して最も支配的な基本モード成分を抽出する必要がある。しかし、これまで提案されてきた未臨界度測定手法では基本モード成分のみを抽出することが難しく、いずれの手法も未臨界度測定結果に高次モード成分による系統誤差が生じるといった課題があった。そこで本研究では、従来の様々な未臨界度測定手法に Dynamic Mode Decomposition (DMD) と呼ばれる解析手法を応用することで、従来法の課題を解決することが可能か検討を実施した[1],[2],[3]。得られた研究成果のうち、本発表では、面積比法と呼ばれる未臨界度測定手法に対して DMD を適用した結果について報告する。

2. 提案手法: 面積比法とは、パルス中性子(PNS)法測定結果における①即発中性子減衰成分の総計数(即発中性子成分面積 A_p)と②遅発中性子による定常成分の総計数(遅発中性子成分面積 A_d)の比 A_p/A_d を求めることで、ドル単位の未臨界度を推定する手法である。ここで、 m 個の検出器を用いて、PNS 法の中性子計数率を時間幅 Δt 毎に n ステップ測定したとする。PNS 法測定結果を m 行 n 列の行列 \mathbf{X} に整理し、定常成分を抽出するため全時間ステップに亘って 1 となる定常信号も \mathbf{X} に追加する。 \mathbf{X} から 1 列目 $\sim(n-1)$ 列目までのデータ列を取り出した行列を $\mathbf{X}_{1:n-1}$ 、2 列目 $\sim n$ 列目を取り出した行列を $\mathbf{X}_{2:n}$ と定義する。DMD では、 $\mathbf{A}\mathbf{X}_{1:n-1} = \mathbf{X}_{2:n}$ となる時間発展行列 \mathbf{A} を、 $\mathbf{X}_{1:n-1}$ の擬似逆行列を用いて推定する。 \mathbf{A} を固有値分解することで、各モードの固有値 λ_i と固有ベクトル $\vec{\phi}_i$ を得る。固有値 λ_i は $\omega_i = \ln(\lambda_i)/\Delta t$ より各モードの時定数 ω_i に変換できる。DMD では測定データを $\vec{x}(t) = \sum_{i=1}^{m+1} C_i \vec{\phi}_i e^{\omega_i t}$ と展開できる(C_i : i 次モード展開係数)。高次モード成分を除去するため、定常成分に対応する 1 番目モード $C_1 \vec{\phi}_1 e^{\omega_1 t}$ ($\omega_1 \approx 0$)と、基本モード成分に対応する 2 番目モード $C_2 \vec{\phi}_2 e^{\omega_2 t}$ のみを抽出し、 $x(t) = C_2 \vec{\phi}_2 e^{\omega_2 t} + C_1 \vec{\phi}_1$ とする。 $x(t)$ の第 1 項 $C_2 \vec{\phi}_2 e^{\omega_2 t}$ と第 2 項 $C_1 \vec{\phi}_1$ をそれぞれ $0 \leq t \leq \tau$ (τ : PNS 打ち込み周期)で時間積分することで A_p と A_d を計算し、面積比 A_p/A_d を求めることでドル単位未臨界度を推定する。なお、ランダムサンプリング法を活用して面積比の統計誤差も評価した。

3. 適用結果: 全ての制御棒・安全棒を全挿入した状態の KUCA-A 架台で PNS 法による未臨界度測定実験を行った。合計 10 個の検出器を用いて、30 Hz の PNS 打ち込み周期で中性子計数率を 1,000 秒間測定した。マスクング時間(PNS 打ち込み直後の測定結果を除外する時間)を変化させて、従来法と DMD により面積比を推定した。従来法による面積比(図 1)は、マスクング時間に対して値が変化し、検出器毎に推定結果が大きく異なった。一方、DMD による面積比(図 2)は、制御棒価値・余剰反応度測定結果から算出した未臨界度とマスクング時間に依らず統計誤差の範囲内で概ね一致した。さらに、DMD では面積比の統計誤差が最小となる結果を選ぶことで、複数の検出器結果から面積比推定結果を一意に得ることができた。以上の検討により、DMD を適用した面積比法の有効性を確認できた。

公刊論文および口頭発表

- [1] F. Nishioka, T. Endo, A. Yamamoto *et al.*, *Proc. M&C2021*, Oct. 3–7 (2021).
- [2] F. Nishioka, T. Endo, A. Yamamoto *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **196**(2), pp. 133–143 (2021).
- [3] 西岡楓賀, 遠藤知弘, 山本章夫 他, 日本原子力学会秋の大会, 9月 8 日–10 日 (2021).

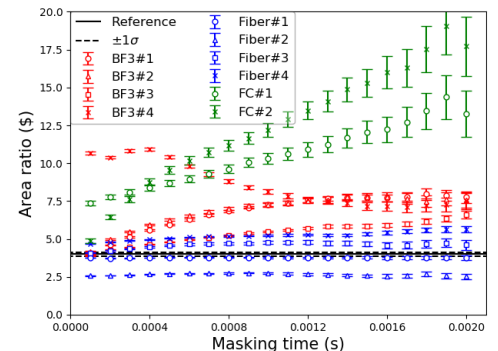


図 1: 従来法による面積比推定結果

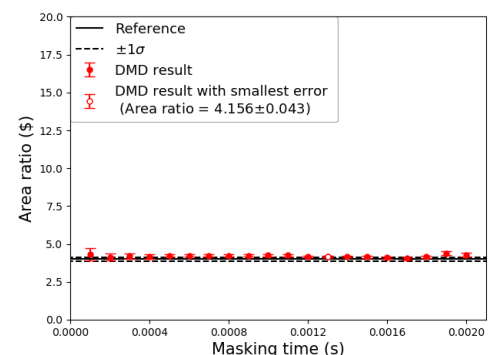


図 2: DMD による面積比推定結果