

# 燃料デブリ取出時の未臨界度測定に向けた自己相関法に関する検討

名古屋大学工学部エネルギー理工学科 山本研究室 廣田諒我

**1. 緒言** 東京電力福島第一原子力発電所(1F)の燃料デブリ取出を安全かつ確実に遂行するためには、未臨界度と呼ばれる、体系がどれだけ臨界未満かを表す量の測定が重要となる。デブリ取出作業前の未臨界度測定法として、本研究では自己相関法に注目している。自己相関法では、炉雑音と呼ばれる、未臨界定常状態の中性子計数時系列データから、ある時点の中性子計数とその時点から $\tau$ 秒後の計数間での相関(自己相関関数 $r(\tau)$ )を調べ、 $\tau$ に対する $r(\tau)$ の減少率から核分裂連鎖反応の時間的減衰率(即発中性子減衰定数 $\alpha$ )を求めることで未臨界度を推定する。ここで、未臨界度の推定には基本モード成分の $\alpha$ を適切に抽出する必要があるが、最小二乗フィッティング法に基づく従来法の場合には、解析者自身が $r(\tau)$ の減衰形状に合わせた適切なフィッティング式を選定した上で、複数のフィッティングパラメータについて初期値を設定しなければならないという課題があった。しかし、1F燃料デブリ体系では未知な情報が多いため、解析者の知見に依存することなく、測定データのみから $\alpha$ を推定可能な手法の開発が強く望まれる。以上の課題を解決するために、本研究では、自己相関法に対して動的モード分解(DMD)[1]を応用することで、測定データのみから基本モード成分の $\alpha$ を推定する手法を新たに考案し、提案手法の妥当性を確認することを目的とした。

**2. 提案手法** まず、1個の検出器より時間幅 $\Delta t$ 毎に中性子を計数した炉雑音を $M$ 個用意し、各炉雑音に対して $k$ 番目ステップの時間ラグ $\tau = k\Delta t$ で自己相関関数 $r(\tau)$ を計算する( $M < N, 1 \leq k \leq N$ )。  $r(\tau)$ 分析結果を $M$ 行 $N$ 列の行列 $\mathbf{X}$ に整理し、定常成分を抽出するため全ステップ1となる定常信号も行列 $\mathbf{X}$ 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 $\mathbf{X}_{1:N-1}$ 、2列目から $N$ 列目までのデータ列を取り出した行列 $\mathbf{X}_{2:N}$ と定義する。これらの行列に対して、 $\mathbf{A}\mathbf{X}_{1:N-1} = \mathbf{X}_{2:N}$ の関係を満たす時間発展行列 $\mathbf{A}$ を、 $\mathbf{X}_{1:N-1}$ の擬似逆行列を用いて $\mathbf{A} = \mathbf{X}_{2:N}\mathbf{X}_{1:N-1}^\dagger$ により推定する。DMDでは、測定データを $\vec{r}(\tau) = \sum_{i=1}^{M+1} C_i \vec{\phi}_i \exp(\omega_i \tau) \dots (1)$ のように $(M+1)$ 個の指数関数の和に展開でき、各指数関数の増幅率 $\omega_i$ と固有ベクトル $\vec{\phi}_i$ は、 $\mathbf{A}$ を固有値分解することでそれぞれ求めることができる。ここで、 $r(\tau)$ の定常成分は1次DMDモードの増幅率 $\omega_1 = 0$ に対応するため、基本モード成分の $\alpha$ は、 $\omega_i$ のうち2番目にゼロに近い2次DMDモードの増幅率 $\omega_2$ を選ぶことで抽出することができる。

**3. 妥当性確認結果** 炉停止状態の近畿大学原子炉において10分単位の炉雑音測定を100回試行した結果を利用することで、提案手法の妥当性確認を行った。10個の $r(\tau)$ 分析結果と定常信号を纏めた11行200列の行列 $\mathbf{X}$ に対して提案手法を適用することで $\alpha$ の推定を行った。DMDによる $r(\tau)$ のモード分解結果を図1に示す。図1より、DMDで求めた定常成分と基本モード成分の $\alpha$ に対応する指数関数の和で、 $r(\tau)$ が分解できることが分かる。また提案手法による $\alpha$ 推定値 $145 \pm 4 \text{ s}^{-1}$ は、従来フィッティング法で10分 $\times$ 100回の平均より求めた参照値 $\alpha_{\text{ref}} = 148.4 \pm 0.6 \text{ s}^{-1}$ を概ね $1\sigma$ 範囲内に含む結果であり、本研究で新たに考案した手法による $\alpha$ 推定結果の妥当性が確認できた。

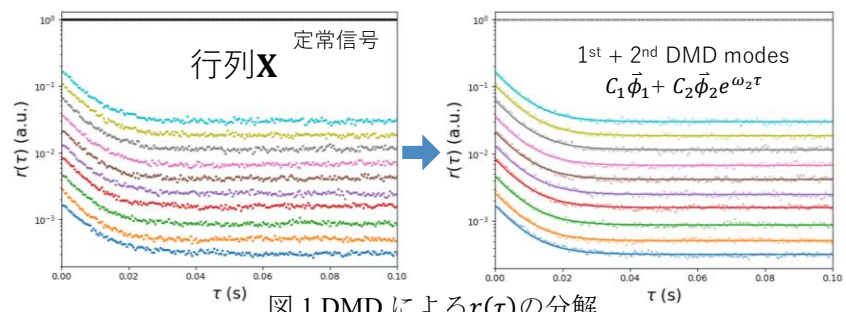


図1 DMDによる $r(\tau)$ の分解

参考文献：[1] Peter J. Schmid, *J. Fluid Mech.*, **656**, pp.5–28 (2010).

口頭発表：1. 廣田諒我, 他, 第55回日本原子力学会中部支部研究発表会, 12月14–15日 (2023); 2. 廣田諒我, 他, 日本原子力学会2024春の年会, 1L13, 3月26–28日 (2024). (発表予定); 3. R. Hirota *et al.*, *PHYSOR2024*, April 21–24 (2024) (accepted).