

動的モード分解収束加速法を適用した 即発中性子減衰定数 α の固有値計算手法の開発

名古屋大学工学部エネルギー理工学科 山本研究室 山口響

1. 緒言 即発中性子減衰定数 α とは、体系内に存在する中性子数が $1/e$ に減少するまでの時定数であり、非増倍体系でも測定可能な量である。国産評価済み核データライブラリ JENDL-5[1,2]では、軽水炉の数値解析において重要なデータとされる水分子の ^1H 等の熱中性子散乱則データが、分子動力学計算に基づく手法で更新された。このようなデータの妥当性確認のために、即発中性子減衰定数 α の測定結果と数値解を活用することが提案されている。即発中性子減衰定数 α の数値計算手法について、先行研究[3]で試作された α 固有値計算コードでは逆べき乗法と呼ばれる反復解法を用いており、収束解を得るために多くの反復回数を要していた。そこで本研究では、べき乗法による実効増倍率 k_{eff} の固有値計算の収束加速に用いられた例[4]もある動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)[5]に注目し、DMDによる収束加速法を適用した α 固有値計算コードを新たに開発するとともに、その有効性について検証することを目的とした。

2. DMDによる収束加速法 DMDとは、ある動的な系の時系列データから時空間的な特徴構造を抽出することができる次元圧縮アルゴリズムである。また、系を記述する支配方程式によらず用いることができるデータ駆動型のアルゴリズムでもある。固有値問題 $\mathbf{A}\vec{\phi} = \alpha\mathbf{B}\vec{\phi}$ に対して、逆べき乗法による外部反復を n 回繰り返すことで $\vec{\phi}^{(n)} = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \vec{\psi}_k (\alpha_0/\alpha_k)^n$ に従って高次モードが減衰する(c_k は展開係数、 $\vec{\psi}_k, \alpha_k$ は k 次モードの固有ベクトルと固有値、 $\alpha_0 < \alpha_k$)。本手法では、このような外部反復ごとの中性子束 $\vec{\phi}^{(n)}$ の変化を時間的な変化とみなし、連続する m 回の外部反復の中性子束を m 列に並べた行列 $\mathbf{X} = (\vec{\phi}^{(l)}, \vec{\phi}^{(l+1)}, \dots, \vec{\phi}^{(l+m-1)})$ に対してDMDを適用する。これにより、 m 個の展開係数 d_i と時定数 ω_i 、固有ベクトル \vec{v}_i を用いて $\vec{\phi}^{(n)} \approx \sum_{i=0}^{m-1} d_i \vec{v}_i \exp(\omega_i n)$ の形に展開することができる。このようにDMDで推定した $\vec{\phi}^{(n)}$ の展開形に基づくことで、外部反復回数 $n \rightarrow \infty$ の極限における基本モードに対応する $\vec{\psi}_0$ を \vec{v}_0 により近似的に予測し、それを次の外部反復に用いることで逆べき乗法の収束を加速させることができる。

3. 計算結果 検証のため、過去実験[6]の水槽体系について、JENDL-5[1,2]を用いて α 固有値計算を実施した。①逆べき乗法のみ(加速法なし)、②別のデータ駆動型収束加速法の一つである外挿法(加速因子 $\omega = 1.5$)、③DMDによる収束加速法(外部反復 $m = 15$ 回毎に加速)の3ケースについて、外部反復回数に対する α の参照解(通常逆べき乗法による収束解)との相対差異の変化を調べた(図1)。図1より、DMDを用いることで外挿法と比較して収束に必要な反復回数を大幅に削減できることを確認した。また、どのケースでも同じ解に収束し、実験値[6]とよく一致したことから、DMD収束加速法を適用した自作計算コードの妥当性についても確認することができた。

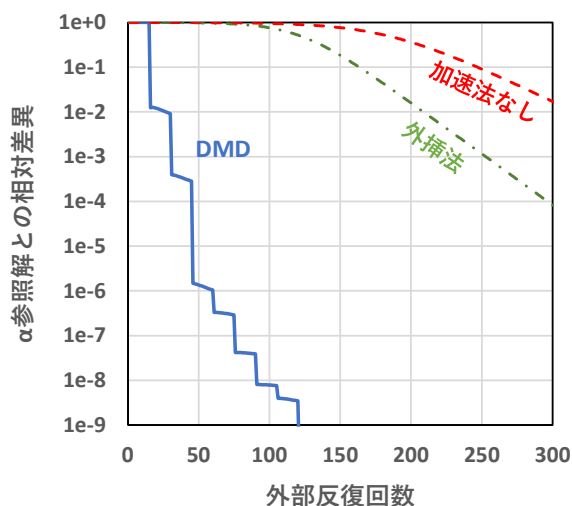


図1 提案手法と従来手法の比較

参考文献 : [1] JENDL-5, https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html; [2] O. Iwamoto et al., *EPJ Web Conf.*, **239**, 09002 (2020); [3] T. Endo et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **124**, pp. 184–187 (2021); [4] J. A. Roberts et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **193**(12), pp. 1371–1378 (2019); [5] P. J. Schmid, *J. Fluid. Mech.*, **656**, pp.5–28 (2010); [6] K. Kobayashi et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **3**(7), pp. 275–288 (1966).

口頭発表 : [1] 山口響, 遠藤知弘, 山本章夫, 第53回日本原子力学会中部支部研究発表会, オンライン, 12月17日, (2021). [2] 山口響, 遠藤知弘, 山本章夫 他, 日本原子力学会 2022 春の年会, 2D10, オンライン, 3月16–18日 (2022). (発表予定)