

## 多次元非均質体系に適用可能なデータ駆動型 POD 輸送計算手法の開発

原子核エネルギー制御工学グループ 山本章夫研究室 寺谷俊哉

**1. 緒言** 炉心解析コストの低減手法として、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)が注目されている。POD では、全中性子束を少数の POD 基底で展開することで計算コストを低減することが可能である。中性子の飛行方向を近似している拡散計算では、全中性子束が未知数である行列形式の方程式に対して POD 基底で左右から挟み込む Sandwich 法を利用して解くべき未知数の総数を削減可能である。しかし、飛行方向を厳密に取り扱う輸送計算では行列演算を用いずに全中性子束を評価するため、POD の適用が困難であった。上記の課題を解決するために、卒業研究ではデータ駆動型 POD 計算理論を考案し、1 次元平板均質体系で本理論の妥当性を確認した。修士研究では、多次元非均質体系に適用可能なデータ駆動型 POD 輸送計算手法を開発することを目的とし、輸送方程式に基づいた  $k_{\text{eff}}$  固有値計算と動特性計算に対する POD の適用方法を考案した。本発表では、動特性計算に POD を適用した「データ駆動型 POD 動特性計算手法」について述べる。

**2. 提案手法** ①粗い時間ステップの詳細メッシュ動特性計算を実施し、中性子束・中性子源・生成反応率に関する教師データをそれぞれ準備する。②教師データを特異値分解することにより中性子束・中性子源・生成反応率に対する POD 基底を評価する。③粗い時間ステップの代表点において、外部中性子源として各次数の中性子源 POD 基底を与えた定常状態の固定源計算を実施する。④得られた中性子源、中性子束の展開係数行列を計算し、中性子束展開係数行列の一般化逆行列をとることで各代表点における漏洩項圧縮係数行列を推定し、時間変数に対して予めテーブル化する。⑤動特性計算で必要となる漏洩項以外の係数行列についても、Sandwich 法より予めテーブル化する。⑥時間離散化誤差を低減するため、詳細時間ステップの POD 動特性計算を実施する。ここで、テーブル化された圧縮係数行列を線形内挿することで、POD 動特性計算時に必要となる圧縮係数行列を効率良く推定する。⑦得られた中性子束の POD 展開係数と POD 基底から詳細メッシュ単位の中性子束を再構成する。

**3. 検証計算** 燃料棒-減速材の非均質性を取り扱った C5G7-TD ベンチマーク問題を対象として、提案手法の有効性を検証した。解析時間範囲のうち  $t = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 6.5, 10.0$  s の合計 8 点について、粗い時間ステップの詳細メッシュ動特性計算を実施し、教師データを準備した。低ランク近似により POD 動特性計算時に使用した POD 基底数は 4 つとした。参照解(MOC 輸送計算、完全陰解法)と同じ詳細時間ステップ( $t = 0.01$  s)で POD 動特性計算を実施し、参照解との差異を調べた。炉心全出力相対差異の時間変化を図 1 に示す。あわせて、炉心全出力相対差異の絶対値が最大となった  $t = 0.15$  s における出力分布の相対差異を図 2 に示す。図 1, 2 より、炉心全出力相対差異、出力分布の相対差異は 0.1% 未満であり、提案手法により高精度で計算できることを確認した。さらに、提案手法の場合、前準備(粗いタイムステップの動特性計算)も含めた上で、参照解の計算時間 16.8 h と比べて計算時間を 0.6 h まで約 27 倍高速化できた。以上より本研究の成果として、多次元非均質体系において高速かつ高精度なデータ駆動型 POD 輸送計算手法を開発することができた。

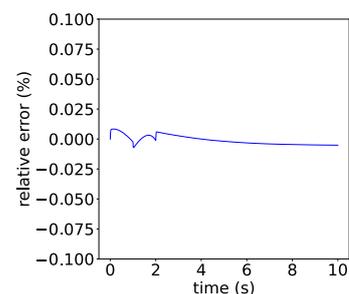


図 1 炉心全出力相対差異(%)の時間変化

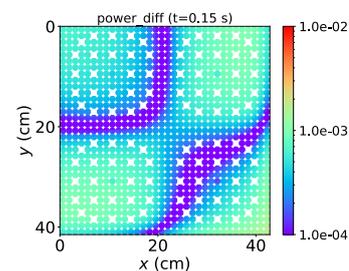


図 2  $t = 0.15$  s における出力分布の相対差異(%)

**口頭発表** : [1] S. Teratani et al., M&C2023, Tu3T1, Aug. 13–17, (2023); [2] 寺谷俊哉 他, 日本原子力学会 2024 春の年会, 1L09, 3 月 26–28 日 (2024); [3] 寺谷俊哉 他, 日本原子力学会 2024 秋の大会, 1D13, 9 月 11–13 日 (2024); [4] 寺谷俊哉 他, 日本原子力学会 2025 春の年会, 3 月 12–15 日 (2025) (発表予定)