

炉外検出器信号に基づく POD 炉内出力分布再構成法の改良と高温ガス炉への適用性検討

原子核エネルギー制御工学グループ 山本研究室 浦瀬勇希

1. 緒言 冷却材の漏洩リスク低減のため、炉外検出器のみで炉内の出力分布を測定することが望まれている。卒業研究において、炉外検出器によって炉内出力分布を再構成する方法として、少数の基底と展開係数により解を表し、解の自由度を大幅に減少させることが可能な固有直交分解(POD)に基づく手法を提案した。しかし、計算条件によって大きく精度が低下する点など、課題がいくつか残った。それらの課題を解決するため、本研究では POD 炉内出力分布再構成法を改良することを目的とする。また、解析の対象として高温ガス炉に着目する。高温ガス炉は、原子炉内が非常に高温になる特徴があり、炉外に検出器を設置して出力分布を測定することの利点が特に大きい。本研究では、解析の対象として高温ガス炉の研究炉である高温工学試験研究炉(HTR)を用いることで、高温ガス炉への適用性検討を行う。

2. 改良した POD 炉内出力分布再構成法 本手法の主な改良点は、2点である。1点目は、再構成精度の向上を目的として、線形回帰により展開係数を計算している点である。2点目は、出力分布を POD で展開することで、実際に測定可能な中性子計数値を用いて中性子束分布を介さずに出力分布を直接再構成可能である点である。従来手法では、検討の初期段階として手法の基本特性を把握するため、実際には測定できない仮想的な計数値を測定データとして与えて計算を行った。以上の改良点を取り込んだ計算手法について説明する。まず、出力分布を $\vec{p} = \mathbf{U}\vec{f} \dots (1)$ のように基底と展開係数を用いて展開する(\vec{p} は出力ベクトル、 \mathbf{U} は POD 基底行列、 \vec{f} は POD 展開係数ベクトル)。次に、線形回帰を用いて POD 展開係数ベクトルと検出器計数値ベクトルの関係を定義する $\vec{f} = \mathbf{B}\vec{c} \dots (2)$ (\vec{f} は POD 展開係数ベクトル、 \mathbf{B} は回帰係数行列、 \vec{c} は検出器計数値ベクトル)。様々な条件下で \vec{f}, \vec{c} の関係を求め、式(2)を行列形式に並べると $\mathbf{F} = \mathbf{B}\mathbf{C} \dots (3)$ が得られる(\mathbf{F} は POD 展開係数行列、 \mathbf{C} は検出器計数値行列)。式(3)の両辺に \mathbf{C} の一般化逆行列 \mathbf{C}^\dagger を乗じることで $\mathbf{B} = \mathbf{F}\mathbf{C}^\dagger \dots (4)$ と推定できる。式(4)を式(2)に代入することで、 $\vec{f} = \mathbf{F}\mathbf{C}^\dagger \vec{c} \dots (5)$ が導出でき、検出器計数値 \vec{c} から未知数である展開係数 \vec{f} を求めることができる。再び式(1)を用いれば、POD 基底 \mathbf{U} と検出器計数値から得られた展開係数 \vec{f} を用いて、出力分布 \vec{p} を再構成できる。

3. 高温ガス炉への適用結果 HTR を模擬した二次元炉心を計算体系として用いた。出力分布はエネルギー9群の二次元固有値計算により計算した。炉心を構成する燃料要素ごとに断面積を摂動して得られた30個の出力分布を教師データとして特異値分解し、POD 基底を作成した。炉外検出器数は6として、炉内出力分布を再構成した。出力摂動量の参照値と再構成結果を比較した結果の一例を図1に示す。図1より参照値となる出力変動を概ね再構成可能であることを確認した。また、再構成精度として二乗平均平方根誤差(RMSE)1.0%以内の精度で再構成できていることを確認した。これらの結果から、改良した POD 炉内出力分布再構成法の提案により、本手法の高温ガス炉への実用化の可能性が示された。

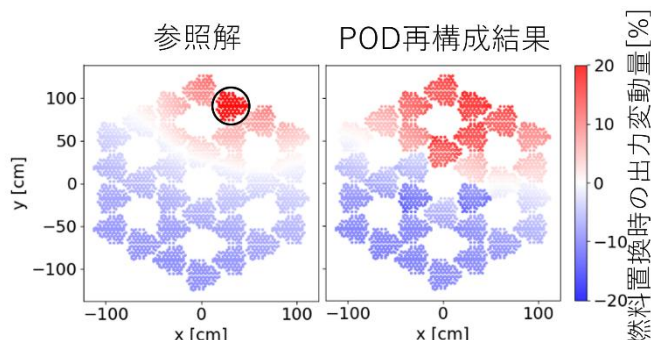


図1 出力摂動量の参照値と POD 再構成結果の比較
(検出器を6個設置/左図丸枠内の燃料を摂動)

公刊論文および口頭発表

[1]浦瀬勇希, 他, 日本原子力学会 2025 年春の年会, 1C08, 3月12-14日 (2025). [2] Y. Urase, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, doi: 10.1080/00223131.2025.2533530 (2025). [3]浦瀬勇希, 他, 日本原子力学会 2025 年秋の大会, 3N07, 9月10-12日 (2025).