

固有直交分解を用いた local/global 反復法に基づく SP3 輸送計算手法の開発

(研究実施時) 名古屋大学大学院 工学研究科

(現) 株式会社原子力エンジニアリング

伊藤 雅人

1. はじめに

この度は炉物理部会奨励賞をいただきまして、大変光栄に思います。本研究は、名古屋大学の修士課程在籍時に取り組んだ内容です。指導教官である山本章夫教授ならびに遠藤知弘准教授より多大なるご指導を賜りました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

本稿では、本研究の肝である「固有直交分解 (POD) を用いた local/global 反復手法」を中心に説明いたします。計算理論の詳細については、参考文献をご参照ください。

2. 研究概要

本研究の目的は、燃料装荷パターンサーベイへの応用を見据えた炉心解析手法の高度化です。燃料装荷パターンサーベイでは、安全な燃料配置を探索するため、多数の装荷パターンで炉心解析を実施する必要があります。しかし、炉心という巨大なシステムに対してボルツマン輸送方程式を直接解く場合、計算コストは極めて大きくなります。そこで現実的な時間で炉心計算を実施するために、拡散近似や空間均質化、エネルギー多群化といった種々の近似が用いられています。こうした近似手法では、計算コストと計算精度の間にはトレードオフの関係があります。この制約を踏まえ、炉心計算手法の更なる発展のためには、計算精度を維持しつつ計算コストを低減可能な新たな計算手法が求められます。特に燃料装荷パターンサーベイにおいて、炉心の安全性をより正確に評価するために、燃料棒単位の出力分布を高精度かつ高速に評価可能な輸送計算手法の確立が重要な課題です。

この課題に対し、本研究では固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition : POD) [1]-[3] に着目しました。POD は、特異値分解及び低ランク近似に基づいて、様々な条件下で得られた中性子束分布から支配的なモード (POD 基底) を抽出する手法です。中性子束分布を少数の POD 基底で高精度に表現できれば、数値計算で求めるべき未知数を大幅に削減できます。先行研究では、行列形式の方程式を POD 基底数まで圧縮することで、計算精度を維持したまま、計算コストの大幅な低減が可能であることが報告されています[1]-[3]。しかし、パターンサーベイでは、燃料配置が異なる多数の条件に対して、燃料棒単位の詳細な中性子束分布を精度よく再現する必要があります。その結果、高精度に再現するために必要な POD 基底数が増加し、十分な高速化が困難な可能性があります。

そこで本研究では、POD を有効に機能させる枠組みとして、local/global 反復法[4]-[6]に注目しました。local/global 反復法は、①詳細メッシュ単一集合体計算 (local 計算) と②粗メッシュ全炉心計算 (global 計算) を反復的に実施することで、最終的に炉心全体の詳細な中性子束分布を求める手法です。単一集合体は炉心と比較して小規模であり、燃料配置交換に起

因する集合体内部の中性子束分布の変化は、炉心全体の中性子束分布と比較して相対的に小さいと考えられます。この炉心構造を踏まえ、本研究では local 計算である集合体計算に POD を適用し、global 計算と反復させる新たな計算手法を考案しました。ここで用いる集合体計算には、拡散近似よりも高い精度で燃料棒単位の中性子束分布を評価可能であり、かつ解くべき方程式が行列形式で記述されるため、POD を比較的容易に適用できる SP3 計算手法を採用しました。

本研究では、燃料棒単位の 2 次元 UO₂-MOX 炉心において提案手法を検証しました。UO₂ 集合体と MOX 集合体それぞれについて POD 基底を事前に構築し、その基底を用いて複数の燃料配置パターンに対する炉心計算を実施しました。その結果、提案手法により、詳細メッシュ全炉心 SP3 計算と同精度の計算精度を維持しつつ、計算時間を約 20~30 倍高速化できることを明らかとしました。

3. おわりに

本研究では、計算理論の発展と計算コード開発を実施しました。研究を通じて、計算理論の理解に加え、大規模数値計算コードの実装や高速化について多くを学ぶことができました。また、全炉心計算コードの完成とともに得られた中性子束分布は、本研究の成果を実感させるものでした。本研究を進めるにあたり、指導教員の先生方や研究室の先輩・同期に、計算理論や計算コードの実装に至るまで多くの助言をいただきました。ここに改めて深く感謝申し上げます。今後は原子力分野の発展に貢献できるよう、技術者として研鑽を積んでまいります。引き続きどうぞよろしくお願いたします。

参考文献

- [1] R. Elzohery and J. Roberts, “Modeling neutronic transients with Galerkin projection onto a greedy-sampled, POD subspace,” *Ann. Nucl. Energy*, **162**, 108487 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108487>.
- [2] K. Tsujita, T. Endo, and A. Yamamoto, “Fast reproduction of time-dependent diffusion calculations using the reduced order model based on the proper orthogonal and singular value decompositions,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **58**(2), pp.173–183 (2021); <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1814891>.
- [3] K. Tsujita, T. Endo, and A. Yamamoto, “Efficient reduced order model based on the proper orthogonal decomposition for time-dependent MOC calculations,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **60**(3), pp. 343–357 (2023); <https://doi.org/10.1080/00223131.2022.2097963>.
- [4] S. Yuk and N. Z. Cho, “Whole-core transport solutions with 2-D/1-D fusion kernel via p-CMFD acceleration and p-CMFD embedding of nonoverlapping local/global iterations,” *Nucl. Sci. Eng.*, **181**(1), pp.1–16 (2015); <https://doi.org/10.13182/NSE14-88>.
- [5] B. Cho and N. Z. Cho, “A nonoverlapping local/global iterative method with 2-D/1-D fusion

- transport kernel and p-CMFD wrapper for transient reactor analysis,” *Ann. Nucl. Energy*, **85**, pp.937–957 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.07.012>.
- [6] B. Cho and N. Z. Cho, “Nonoverlapping local/global iterations with 2-D/1-D fusion transport kernel and p-CMFD wrapper for transient reactor analysis—II: parallelization and predictor–corrector quasi-static method application,” *Ann. Nucl. Energy*, **90**, pp.284–302 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.12.018>.