

<炉物理部会賞受賞記念寄稿>

Reduced Order Modeling(ROM)に基づいた効率的な感度係数評価手法の開発

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

方野 量太

1. はじめに

この度は2018年度の炉物理部会賞奨励賞をいただき、誠にありがとうございます。受賞対象となった本研究は、私が修士の時、名古屋大学の山本章夫先生の下で取り組んでいたものであり、(多分)名大・山本研では初めて”Reduced Order Modeling”(以下ROM)という名前を冠した研究です。受賞タイトルからはわかりませんが、本研究はPWR炉心解析における核特性の核反応断面積に対する感度係数評価に対し、ROMを適用して効率化を図るというものです。本研究テーマを通じて、発表のために初めて海外へ行ったり、また初めて研究者として論文[1]を執筆したりと、様々な経験することができ、指導者であった山本先生や遠藤先生には頭が上がりません。

さて、部会賞受賞記念寄稿とのことで例年通り受賞対象となった研究について述べたいと思いますが、難しい数式や計算結果については文献[1-3]等を参考にさせていただき、本稿は概要について簡単に述べたいと思います。

2. 研究概要

本研究は、軽水炉炉心核特性の感度係数評価の効率化を目的としております。軽水炉炉心解析は、「核計算 \leftrightarrow 熱水力計算」の反復計算や「集合体計算 \rightarrow 炉心計算」の多段計算といった複雑な解析フローを有しており、高速炉の分野でよく用いられる摂動論の適用は困難です。しかし、断面積1つずつに摂動を与えたForward計算を繰り返し行う直接法も、解析システムに特に大きな変更を伴うことなく実行できますが、膨大な数の微視的多群断面積に対して非常に非効率です。そこで、摂動論を用いないForward計算のみを用いるかつ計算コストを削減された手法が望まれ、本研究ではROMに着目しました。

ROMは一般的に「高次モデル(自由度大)の解を、何らかの基底関数で展開して、自由度が展開係数の数だけに削減された低次モデルを解く」というものです。ROMにおいて基底関数はあらかじめ何らかの方法で得られているデータ列に特異値分解(SVD)といった数学的操作を加えて得ます。解きたい問題の解が、このデータ列とそうかけ離れていない、もう少し数学的に言えばROMによって得られる基底と直交する成分が少ない場合、精度を保ったまま自由度を大幅に削減した低次元モデルを構築することができます。本研究では、摂動論を用いずForward計算のみで感度係数評価を効率化する基底が得られるかが課題でした。

求めたい炉心核特性の感度係数を並べた感度係数行列にSVDを適用することで、必要なForward計算の回数は断面積数から展開次数に削減することができます。しかしこれは、「求めたい感度係数から、その感度係数を求めるのに都合の良い基底を得る」という状況であり、

全く意味がありません。そこで、本研究では軽水炉炉心解析が「集合体計算→炉心計算」という多段計算であることを、ある意味逆手に取ることを考えました。このような多段計算を行う場合、求めたい炉心核特性の感度係数行列を、微分のチェーンルールに基づき、集合体核特性の感度係数行列によって分解することができます。本研究では、この集合体核特性の感度係数行列を特異値分解することで、ROMの基底が得られることを数式的に示しました[1,2]。直感的に言えば、ある断面積に変化を与えて炉心核特性が大きく変化していれば当然集合体核特性も変化しているはずであるので、集合体核特性の変化をよく捉える基底だけ考えればよい、ということになると思います。本研究で取り扱った断面積の数は5040個でしたが、数十次まで考慮すれば直接法の感度係数をほぼ再現することがわかり、炉心計算の回数を約100分の1にまで劇的に減らせることがわかりました。

しかし本研究はこれだけでは終われません。集合体計算では、燃焼度、温度、ホウ素濃度、制御棒の挿入・引抜など様々な条件を考慮して断面積テーブルを作成するため、一般的な軽水炉解析における集合体計算に要するコストは大きいです。本研究はForward計算のみを行うことを考えておりますので、このままではコストの大きい集合体計算を多数繰り返して集合体核特性の感度係数行列を得る必要があります。全体として効率化を図るためには、炉心計算回数の削減だけでなく、基底作成の計算コストの削減も必要となります。

そこで集合体計算を詳細に行う代わりに、燃焼度点を粗くとった近似集合体計算を利用することを考えました。集合体核特性自体を精度よく評価するためには、燃焼に伴う核種組成を精度よく評価する必要があります。しかし、本研究は集合体の感度係数、もう少し言えば基底がわかれば良く、近似集合体核特性の感度係数は詳細集合体の核特性の感度係数を再現すれば、近似集合体核特性の感度係数行列から基底を得ることができると言えます。燃焼度点だけでなく、輸送計算の反復回数を減らしてもおおよその感度係数を再現することは[3]で示しており、論文[1]では示しておりませんが、修論での検討では詳細集合体計算から得られた基底と同等の性能を有していることを確認しました。

言葉だけでざっと説明したため、わかりにくい箇所も多々あると思いますが、本研究の内容は文献[1-3]を参考にさせていただけたらと思います。また、第50回炉物理夏期セミナーにおいて名大・山本先生によるROMの解説がなされましたのでそちらも大変参考になると思います[4]。

3. さいごに

本研究では、軽水炉炉心核特性の感度係数評価の効率化を目的として、ROMに着目しておりました。上述の通り（私の文章力で伝わったか不安ですが）、ROMは非常に問題依存、具体的な方法というより考え方のようなものであり、本研究におけるROMを他の問題にそのまま利用できるとは限りません。また本研究は、あまり炉物理的でなく、実際にやったことと言えば繰り返し炉心計算を行うシェルを書き、C++で行列演算を行うコードを作り、といったことでした。それでも本稿を読んだ炉物理の専門家の皆様方にとって、何かの参考

になれば幸いです。

参考文献

- [1] R. Katano, T. Endo, A. Yamamoto, et al, “Estimation of sensitivity coefficients of core characteristics based on reduced-order modeling using sensitivity matrix of assembly characteristics,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 637-647, (2017).
- [2] R. Katano, A. Yamamoto, T. Endo, “Development of core sensitivity analysis based on reduced-order modeling using assembly calculations,” *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **112**, 715-718, (2015).
- [3] R. Katano, A. Yamamoto, T. Endo, “Application of partially-converged solution of assembly calculation for core sensitivity analysis based on reduced order modeling,” *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **113**, 1161-1164, (2015).
- [4] 山本 章夫, *Reduced Order Model とシミュレーション計算*, 第 50 回炉物理夏期セミナーテキスト(2018).
- [5] C. Kennedy, C. Rabit, H. A. Khalik, “Generalized perturbation theory-free sensitivity analysis for eigenvalue problem,” *Nucl. Technol.*, **179**, 169-179, (2012).
- [6] K. Yokoi, T. Endo, A. Yamamoto, et al, “Development of the uncertainty quantification method of activation in reactor structures using reduced-order modeling,” *Proc. PHYSOR2018*, Cncun, Mexico, Apr. 22-Apr. 26, 2018, (2018).
- [7] 平, *固有直交分解による流体解析:1.基礎*, *ながれ* 30, pp.115-123, (2011).