

POD を利用した三次元モンテカルロ遮蔽計算手法の高度化

原子核エネルギー制御工学グループ 山本研究室 森海斗

1. 緒言 遮蔽計算とは、原子炉から漏れ出る放射線量を求めることであり、これは原子炉の安全性を確保する上で不可欠である。遮蔽計算は、中性子輸送方程式を解くことで行われるが、これを解析的に解くことは不可能であり、モンテカルロ(MC)法や決定論的手法を用いて数値的に解かれる。しかし、中性子束が数桁程度低下する原子炉周りの遮蔽計算などでは、乱数を用いる MC 法は大きな統計誤差を伴う。一方で、決定論的手法は空間・エネルギー・角度の離散化を行う必要があり、この離散化によって系統誤差を伴う。そこで本研究では、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)と MC 法を組み合わせた遮蔽計算手法を開発し、系統誤差と統計誤差の低減を図った。三次元多群体系に本手法を適用し、展開係数と直交基底を用いて再構成した中性子束から、系統誤差と統計誤差が低減可能か検証した。

2. 系統誤差を考慮した基底の作成と展開係数計算 POD を用いることで、中性子束 $\vec{\phi}$ は基底 \vec{f}_i と展開係数 a_i を用いて、 $\vec{\phi} = \sum_i a_i \vec{f}_i \dots$ ①と表される。式①の左辺を MC 法で求めた中性子束分布 $\vec{\phi}_{MC}$ に置き換え、右辺と左辺の差の自乗和を最小化するように展開係数 a_i を求め、中性子束を再構成する。基底 \vec{f}_i は複数の計算条件で求めた中性子束分布を並べた教師データ行列を特異値分解することで作成できる。ただし、式①のように中性子束分布を基底で展開するためには、教師データの線形結合により $\vec{\phi}$ が表現できるように教師データの作成方法を工夫する必要がある。そこで本研究では、断面積やメッシュ幅を変更した計算条件を与えて、決定論的手法により教師データを作成することで、エネルギー・空間離散化誤差を低減可能な基底の作成を試みた。

3. 基底と展開係数の高精度化 遮蔽計算ではエネルギー離散化誤差の影響が大きく、この誤差は実効断面積に起因している。そこで本研究の初期検討では、断面積のみを変化させて教師データを作成し、POD 基底を作成していた。しかしエネルギー離散化誤差は低減できたものの、空間離散化誤差は低減できず正確に MC 法の結果を再現できなかった。この課題を解決するため、メッシュ幅を変化させた結果を教師データとすることで、空間離散化誤差低減を試みた。さらに、エネルギー離散化誤差の更なる低減のため、エネルギー群を複数グループに分け、エネルギー群のグループごとに展開係数を計算する方法も新たに考案した。

4. 三次元多群体系への適用結果 鉄と空気を用いた三次元遮蔽ベンチマーク問題を対象として、中性子エネルギー 199 群とした条件で提案手法の検証を行った。鉄の共鳴断面積に該当するエネルギー第 83 群(約 0.3 MeV)の、体系外周部でダクトを通る軸上の中性子束分布を図 1 に示す。決定論的手法で求めた中性子束(赤)と比較し、再構成した中性子束(青)は参照解(黒)に近い結果を得られた。展開係数計算に用いた MC 法の中性子束と再構成した中性子束のメッシュ・エネルギー群ごとの相対標準偏差を表 1 に示す。相対標準偏差の最大値は約 20 分の 1 に、平均値は約 60 分の 1 となった。以上より、提案手法により系統誤差と統計誤差の低減を実現した。

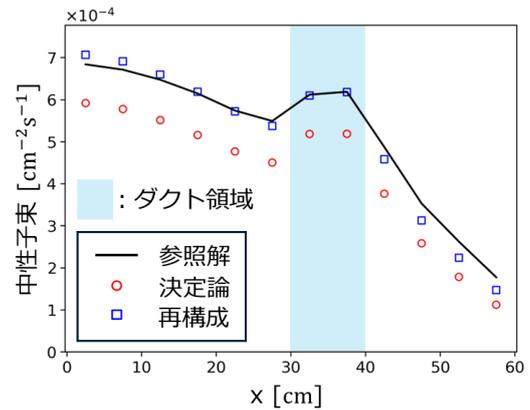


図 1 再構成した中性子束分布(約 0.3 MeV)

表 1 中性子束の相対標準偏差

	最大値	平均値
MC 法(10^7)	10	0.51
再構成	0.42	0.0079

口頭発表 [1] [Kaito Mori et al., M&C2023, We1T2-3, August 13–17 \(2023\)](#). [2] [森海斗, 他, 日本原子力学会 2024 年春の年会, IL11, 3月26–28日 \(2024\)](#). [3] [森海斗, 他, 日本原子力学会 2025 年春の年会, 3月12–14日 \(2025\) \(発表予定\)](#).