

## POD とモンテカルロ法を組み合わせた深層透過計算

エネルギー理工学科 山本章夫研究室 森 海斗

**1. 緒言** 原子炉周りの遮蔽計算など、中性子束が数桁程度低下する深層透過計算では、モンテカルロ法は大きな統計誤差を伴う。しかし、統計誤差低減のためのヒストリー数の増加は計算コストの増加を招き、インポートランスの設定は計算手順の複雑化を招く。一方で決定論的手法を用いると統計誤差は発生しないが、空間・角度・エネルギーの離散化に起因する系統的な誤差が発生する。そこで本研究では、離散化などによる決定論的手法の中性子束の不確かさを包絡するように固有直交分解 (POD) を用いて直交基底を作成し、モンテカルロ法を用いて直交基底の展開係数を計算する。POD とは、計算条件を変化させた多数の計算結果に基づき、これらの計算結果を再現する少数の基底を抜き出す手法である。基底の線形結合によって計算結果を再現可能であり、自由度を大幅に下げることが可能である。展開係数と基底によって再構成した中性子束から、本手法の妥当性を検証した。

**2. POD とモンテカルロ法の結果による展開係数の計算** 初めに基準となる断面積に対して摂動させた断面積を複数用意し、それらを入力として決定論的手法により深層透過計算を実施する。得られた中性子束を並べた行列に特異値分解を施すことで、中性子束の直交基底  $f_i(x_j)$  を得る。次にモンテカルロ計算コード MCNP で中性子束  $\phi_{\text{MCNP}}(x_j)$  を計算し、基底に対する展開係数  $a_i$  を式(1)により求める。その後、得られた展開係数と基底から中性子束を再構成する。

$$a_i = \sum_j \phi_{\text{MCNP}}(x_j) f_i(x_j) \quad (1)$$

**3. 一次元平板体系への適用結果** 厚さ 100 cm の一次元平板遮蔽体を想定して、提案手法の検証を行った。17.3~19.6 MeV の中性子が 0~2 cm の領域から等方に発生するものとした。Tally の幅は 1 cm、両端真空、遮蔽体は鉄とした。鉄の 199 群微視的断面積を FRENDDY で計算し、原子数密度を 10% ずつ変えた 10 個の断面積を用意した。各断面積において、決定論的手法である輸送計算コード GENESIS による深層透過計算で得られた中性子束を群ごとに並べ、特異値分解を施すことで基底を 10 個を作成した。また、中性子束の対数をとった場合も同様の方法で基底を作成した。4 つの基底で再構成した中性子束空間分布を図 1、2 に示す。MCNP のヒストリー数は  $10^7$ 、連続エネルギー断面積を使用した。図 1 より、線形の基底を使用した際にはうまく再構成ができていないが、対数の基底を使用した際には 100 cm 付近に見られる MCNP の統計誤差を低減できている。また、図 2 より、GENESIS で計算した中性子束はエネルギーの離散化による系統誤差が見られるが、線形と対数の基底のどちらを使用した場合においても、誤差を低減できている。以上から、本手法を用いることで系統誤差と統計誤差を低減可能であることを確認した。

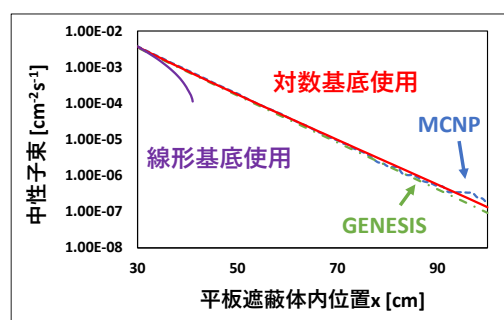


図 1 再構成した中性子束分布  
( $1.96 \times 10^1$  MeV)

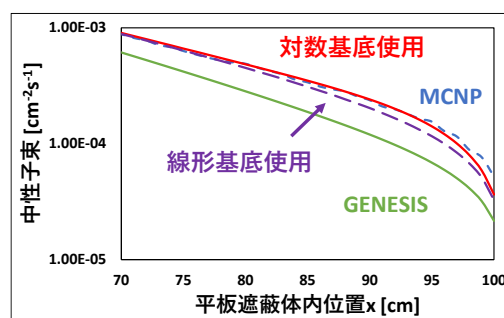


図 2 再構成した中性子束分布  
( $4.08 \times 10^{-1}$  MeV)

### 公刊論文および口頭発表

- [1] 森海斗, 山本章夫, 遠藤知弘, 日本原子力学会 2022 年中部支部, R02, 12 月 15 日-16 日 (2022).
- [2] 森海斗, 山本章夫, 遠藤知弘, 日本原子力学会 2023 年春の年会, 1K06, 3 月 13 日-15 日 (2023).(発表予定)
- [3] K. Mori, A. Yamamoto, and T. Endo, *Proc. M&C 2023*, August 13-17, 2023 (2023).(submitted)