

Circular block bootstrap 法を用いた固有直交分解による 中性子束分布タリーに対する統計的不確かさ評価

Statistical uncertainty estimation by circular block bootstrap method
for flux distribution tallies using proper orthogonal decomposition

*近藤 諒一¹, 山本 章夫², 遠藤 知弘²

¹JAEA, ²名大

分布量に対する次元削減を目的として、固有直交分解を用いた中性子束分布タリー手法を開発している。本研究では、モンテカルロ固有値計算における世代間の相関を考慮した中性子束分布の統計的不確かさを評価するため、circular block bootstrap 法を適用した。一次元平板体系の検証計算を通じて、提案手法の有効性について検証した。

キーワード：circular block bootstrap 法, 統計的不確かさ評価, 固有直交分解, 分布タリー, モンテカルロ法

1. 緒言 モンテカルロ固有値計算ではべき乗法に起因して世代間に相関が生じるため、これを適切に取り扱うことが統計的不確かさ評価の観点から重要である。そこで本研究では、時系列データに対する不偏推定法である circular block bootstrap(CBB)法[1]をべき乗法で得られる各世代の値に適用することで世代間の相関を考慮することを目的とした。さらに、分布量計算手法として開発している固有直交分解(POD)を用いた中性子束分布タリー手法[2]に CBB 法を適用し、中性子束分布の統計的不確かさを推定することも目的とした。

2. 計算手法 POD を用いた中性子束分布タリー手法では、 N 次で展開される中性子束の空間分布 $\vec{\phi} \in \mathbb{R}^{R \times 1}$ は直交基底ベクトル $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{R \times N}$ と展開係数 $\vec{a} = (a_1 \dots a_N)^T$ で表される: $\vec{\phi} = \mathbf{U}\vec{a}$ 。中性子束分布の平均値に対する共分散行列は直交基底ベクトルと展開係数の平均値に対する共分散行列から再構成される: $\text{cov}(\vec{\phi}, \vec{\phi}) = \mathbf{U}\text{cov}(\vec{a}, \vec{a})\mathbf{U}^T \dots (1)$ 。核分裂源分布の収束後にべき乗法で L 世代だけ計算する場合、次数 n の展開係数を世代ごとに並べた $\vec{A}_n = (a_{1,n} \dots a_{L,n})$ を時系列データとみなし CBB 法を適用する ($1 \leq n \leq N$)。再標本化によって B 個の展開係数データ $\vec{A}_n^{*b} = (a_{1,n}^{*b} \dots a_{L,n}^{*b})$ を作成する ($1 \leq b \leq B$)。べき乗法で得られる展開係数の平均値の bootstrap 標本は $\bar{a}_n^{*b} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L a_{l,n}^{*b}$ となる。この bootstrap 標本からべき乗法による世代間の相関を考慮した展開係数の平均値に対する共分散を算出し、式(1)から中性子束分布の平均値に対する共分散を再構成できる。

3. 計算結果 一群モンテカルロ固有値計算において POD を用いた中性子束分布タリーを行った。計算体系は 3.1 wt% UO_2 、 B_4C 、3.6 wt% UO_2 がそれぞれ 3 cm、3 cm、4 cm と順に並ぶ 10 cm の一次元平板体系である。展開次数は 7 次、メッシュ幅は 0.1 cm である。バッチあたりのヒストリー数 10,000、有効バッチ数 10,000、スキップバッチ数 200 とした。独立な 100 回のモンテカルロ計算ごとに、中心極限定理に基づく従来手法または CBB 法を用いて展開係数の共分散を計算し、中性子束分布の共分散を再構成した。CBB 法ではブロックサイズ 20、再標本化数 1,000 とした。独立な 100 個の展開係数の平均値で算出した共分散から再構成した中性子束の共分散を参照解とした。中性子束分布の共分散から得た標準偏差について参照値との比を計算した(図 1)。CBB 法では参照値との比が 1 に近く、統計的不確かさが推定できていることを確認できた。

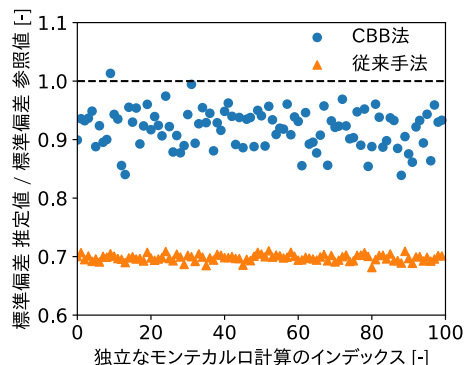


図 1 メッシュ 1.4–1.5 cm における
平均中性子束の標準偏差比

参考文献 [1] D. N. POLITIS and J. P. ROMANO, *In Exploring the Limits of*

Bootstrap, p. 263–270 (1992). [2] R. KONDO et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* (2024); <https://doi.org/10.1080/00223131.2024.2365445>.

*Ryoichi Kondo¹, Akio Yamamoto² and Tomohiro Endo²

¹JAEA, ²Nagoya Univ.