

緒言 モンテカルロ法による固有値計算では、核分裂連鎖反応を模擬し、前世代の核分裂で発生した中性子を追跡して次世代の核分裂中性子発生点を求めることで、実効増倍率（世代間の中性子数の比）や核分裂率の空間分布などを推定している。世代数 N を十分大きくとるほど統計精度の良い解が得られるが、計算時間は限られるため統計誤差の推定が重要となる。計算結果の統計誤差の推定には、一般的に中心極限定理に基づいた標準誤差 σ/\sqrt{N} が用いられるが、核分裂連鎖反応を介した世代間の相関を無視して推定するため、真の統計誤差と比べて誤差を過小評価する場合がある。過去の研究では、固有関数展開と Autoregressive model (AR モデル) に基づき統計誤差過小評価の度合いを予測する手法を提案し、エネルギー1群・1次元均質体系において妥当性を確認した。本研究では、解析解が得られない複雑な体系に対しても提案手法を適用するために、統計誤差過小評価割合の計算に必要となるパラメータ（ノイズ項の分散）を求める手法を開発した。

パラメータの計算手法 先行研究において、統計誤差過小評価割合 r （真の統計誤差と過小評価された統計誤差の比）は(1)式のように導出された。 r の計算には中性子束の領域積分値 $w_{n,v} \equiv \int_v \phi(\vec{r})dV$ 、固有値比 $\rho_n \equiv k_0/k_n$ 、ノイズ項の分散 σ_{dn}^2 の3つのパラメータが必要となる。 $w_{n,v}$ 、 ρ_n は体系の固有値・固有関数から計算することができるが、 σ_{dn}^2 を定量的に評価する手法が無かったため、先行研究では σ_{dn}^2 が次数に依存しない（全ての次数で等しい）と近似することで、簡便に r を評価していた。しかし、一般的に σ_{dn}^2 は次数依存性を持つため、この手法で計算した r には誤差が生じる。そこで、本研究ではノイズ項 d_n を理論的に導出し、 σ_{dn}^2 を(2)式のように評価する手法を考案した。

$$r \approx \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{w_{n,v}^2 \sigma_{dn}^2}{1 - \rho_n^2}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{w_{n,v}^2 \sigma_{dn}^2}{1 - \rho_n^2} \left(\frac{1 + \rho_n}{1 - \rho_n} \right)} \quad (1)$$

$$\sigma_{dn}^2 \propto \frac{\langle \psi_n^\dagger \mathbf{T} \psi_n \rangle^2}{\langle \psi_n^\dagger \mathbf{A} \psi_n \rangle} \quad (2)$$

検証計算 計算体系は $\text{UO}_2\text{-MOX}2 \times 2$ 集合体（図1）とし、対象とする統計量は全エネルギー積分した中性子束とした。図中の数字は領域番号を示している。高次モード固有値・固有関数は拡散計算コードにより求め、断面積や拡散係数は非均質輸送計算コード AEGIS の結果を用いて体系全体で均質化した7群断面積を使用した。 r の参照値は初期乱数を変えた1000回の多群モンテカルロコード GMVP の結果を統計処理して算出した。 r の統計誤差は Jack-knife 法により推定した。また、 σ_{dn}^2 の次数依存性の影響を調べるため、 σ_{dn}^2 が次数に依存しないと仮定した場合の r を計算し、(2)式により σ_{dn}^2 の次数依存性を考慮した場合の結果と比較した。

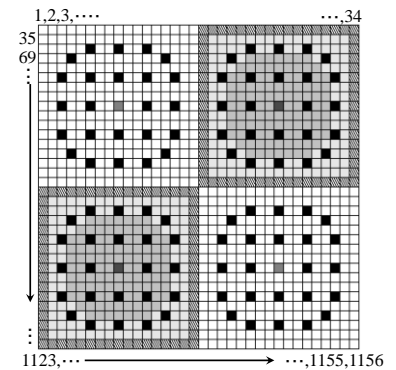


図1 $\text{UO}_2\text{-MOX}2 \times 2$ 集合体体系（図中の数字は Region number に対応）

結果 σ_{dn}^2 を考慮した場合の予測値と考慮しなかった場合の予測値、そして GMVP により算出した参照値を比較した結果を図2に示す。 σ_{dn}^2 を考慮しなかった場合、予測値は全ての領域でほぼ1となり、参照値を全く再現することはできなかったが、 σ_{dn}^2 を考慮した結果、体系端で過小評価割合の値に0.1~0.25程度の差がみられるものの、相対的な空間分布を再現することができ、提案手法の妥当性を確認することができた。体系端で差異が生じる原因は、固有値・固有関数を計算する際の拡散近似に起因する誤差が考えられるため、その定量的な評価が今後の課題となる。

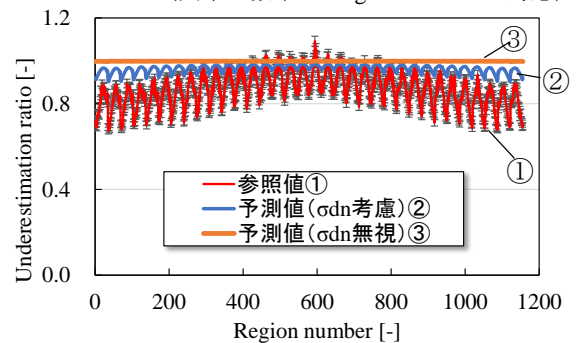


図2 統計誤差過小評価割合

公刊論文

- [1] 林 幸司, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 日本原子力学会 2015 秋の大会, 静岡大学, 9月 7-9 日 (2015).
- [2] K. Hayashi, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **113**, pp. 1153-1157 (2015).
- [3] 林 幸司, 遠藤 知弘, 山本 章夫, 日本原子力学会 2016 秋の大会, 久留米シティプラザ, 9月 7-9 日 (2016).
- [4] K. Hayashi, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **115**, pp. 1213-1216 (2016).