

モンテカルロ臨界計算における一般化極値統計の効用

Utility value of generalized extreme value statistics in Monte Carlo criticality calculation

*植木 太郎¹¹ 日本原子力研究開発機構

モンテカルロ法による弱結合体系の臨界計算においては、核分裂源からの中性子サンプリングが非常に偏り、中性子集団の定常核分裂源分布への収束及びその維持に不具合が起き、中性子実効増倍率(k_{eff})の評価値にバイアスが生じることがある。この不具合検出に関して、一般化極値統計が有効であることを報告する。

キーワード：モンテカルロ法、弱結合体系、臨界計算、一般化極値統計、中性子集団、定常核分裂源分布

1. 緒言 準定常で不安定な核分裂源の不具合検出法の確立がモンテカルロ法コードにとって重要である。

2. 弱結合体系の例題 定常な核分裂源分布状態への収束に不具合が起きる現象は米国のWhitesides氏による世界の実効増倍率問題として知られている。この問題は、スウェーデンのMennerdahl氏により、 ^{240}Pu 臨界球と未臨界 ^{235}U 平板が遠距離に配置されている、現在の計算機能力の下でもチャレンジングな問題にアップグレードされている。本予稿においては、 ^{240}Pu 臨界球を国際臨界安全ベンチマーク実験プロジェクト (ICSBEP) のTopsy臨界球 (HEU-MET-FAST-002) に置換した例題[1]の k_{eff} 計算に、極値統計を適用する。

3. 一般化極値統計の適用 X_1, X_2, \dots, X_n を同一分布から得られる時系列値とする。極値統計では、 $Z_n \equiv \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ を分析の対象とする。スケールと位置に関する規格化定数 a_n と b_n を適切に選ぶと Z_n の累積分布関数は、 $n \rightarrow \infty$ で、極値指数 ξ の一般化極値分布 G_ξ に収束する[2]。 $P((Z_n - b_n)/a_n \leq z) \rightarrow G_\xi(z) = \exp[-(1 + \xi z)_+^{-1/\xi}]$ (添え字の + は丸括弧内が負の時に0となることを示す。) $\xi > 0$ はFréchet分布、 $\xi = 0$ はGumbel分布、 $\xi < 0$ はWeibull分布に相当する。極値統計がFréchet, Gumbel, Weibull分布となる代表的な確率分布は、順に、パレート、正規、ベータ分布である。統計ソフトRに極値統計パッケージismevをインストールすることにより[2]、最尤法に基づいて、「 k_{eff} の最大値」と「 $2-(k_{\text{eff}}$ の最小値)」の極値指数 ξ を評価できる。図1にサイクル毎の中性子数が10000の場合の k_{eff} を示す。初期の定常状態から最終的な定常状態への遷移が2000-5000サイクルで起きていることがわかる。図2に、サイクル数が250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000の各時点において、その時点までの全サイクル (n) を25ブロックに分け、「 k_{eff} の最大値」及び「 $2-(k_{\text{eff}}$ の最小値)」を各ブロックから得て、25個の $Z_{n/25}$ から ξ を評

価した結果を示す。前述の遷移終了後に ξ の値が剥離し、定常な核分裂源分布状態への収束の際に取るべきGumbel分布の極値指数値($\xi = 0$)から大幅

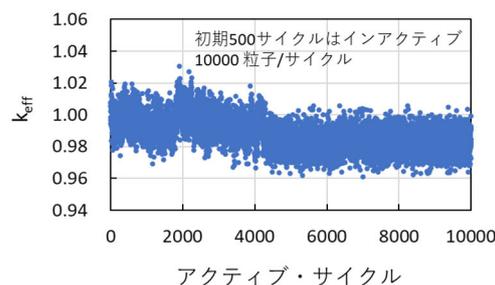


図1 中性子実効増倍率 (k_{eff}) のサイクル毎の評価値

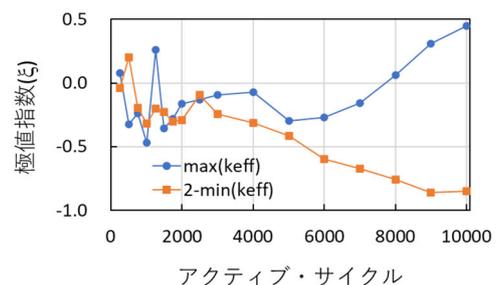


図2 中性子実効増倍率 (k_{eff}) の累積極値指数

に離れている。収束状態の不具合の検出が、 k_{eff} プロットのチェックなしで可能であることが示されている。

4. 今後の研究 サイクルのブロック数に関する最適化及び3次元全炉心出力分布への適用が考えられる。

参考文献 [1] T. Ueki, Nuclear Science and Engineering, 194, 6, 2020, <https://doi.org/10.1080/00295639.2019.1710418>.

[2] 高橋倫也・志村隆影 極値統計学 近代科学社 2016. [3] R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

*Taro Ueki

¹Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Safety Research Center, Criticality Safety Research Group