

# ブートストラップ法を利用した PHITS における系統的な不確かさの評価

Estimation of systematic uncertainty in PHITS using bootstrap method

\*橋本 慎太郎<sup>1</sup>, 佐藤 達彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>原子力機構

粒子輸送計算コード PHITS による計算結果の系統的な不確かさの評価法を確立するために、非正規分布となった不確かさを統計学的手法の 1 つであるブートストラップ法を用いて評価した。得られた 95%信頼区間は正規分布を仮定した場合より適切な範囲となったが、区間幅が狭くなる傾向を示すことがわかった。

**キーワード** : PHITS、粒子輸送計算コード、系統的な不確かさ、ブートストラップ法

## 1. 緒言

放射線の挙動を模擬する粒子輸送計算コード PHITS[1]は、遮蔽計算等の様々な分野で利用されている。我々は、計算結果の信頼性を系統的な不確かさとして評価するための開発を進めており、正規分布を仮定する分散分析に基づいた評価方法を提案した[2]。一方、核反応モデルの不定性を起源とする系統的な不確かさを評価する際、モデルの不定性が偏った分布を持つ場合があり、その影響を受けて評価される系統的な不確かさが非正規分布となる可能性もある。このような場合、95%信頼区間などの別の評価量が必要となる。

## 2. 計算手法

信頼区間は要求される信頼度により幅が変化し、例えば 95%信頼区間は「20 回の結果を求めたら 19 回はその区間に入る」ことを意味する。正規分布の場合、平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  により  $[\mu-1.96\sigma, \mu+1.96\sigma]$  が 95%信頼区間となる。しかし、非正規分布の場合は平均値と最頻値が違っているため、別の推定方法が必要となる。本研究では、信頼区間の推定方法として、ブートストラップ法に基づいた手法を適用した。ブートストラップ法は、得られた  $N$  個の計算結果  $x_i (i=1, \dots, N)$  から重複を許してリサンプリングすることで、 $N$  が不十分な場合にも各種統計量を推定する。ここでは、 $x_i$  から  $N$  個の値をサンプリングしてその平均値  $\mu^*$  と標準偏差  $\sigma^*$  を計算し、同様のサンプリング計算を  $B$  回繰り返した。得られた  $\mu_b^*$  と  $\sigma_b^*$  ( $b=1, \dots, B$ ) 毎に  $\mu$  からのずれを表す  $t$  値が得られるため、 $B$  個の  $t$  値の大小関係を整理し、それぞれ 2.5% と 97.5% に対応する  $0.025B$  と  $0.975B$  番目の値を使って、信頼区間の下限と上限を推定した。

## 3. 結果・考察

図 1 に、100MeV 中性子を鉛材に照射した際の 10cm 深さにおける実効線量を PHITS で計算した場合の頻度分布を示す。分布は中性子断面積の不定性の影響を表現し、ここでは不定性に偏った分布を持たせた。黒線は計算結果が  $N=20$  個の場合の頻度分布、青線は正規分布を仮定した場合の 95%信頼区間の上限と下限、赤線はブートストラップ法による非正規分布の区間を表す。黒線の分布がもつ最頻値は平均値とは差があり、正規分布を仮定した青線の区間は下限側を適切に評価できていない。一方、赤の区間は上限・下限共に黒の分布の範囲内で適切に推定できているが、黒線の分布と比較すると上限値を過小評価し、幅が狭くなる傾向を示すことがわかった。

\*本研究は JSPS 科研費 17K14917 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol., 55, 684-690 (2018).  
 [2] S. Hashimoto and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol., 56, 345-354 (2019).

\*Shintaro Hashimoto<sup>1</sup> and Tatsuhiko Sato<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAEA

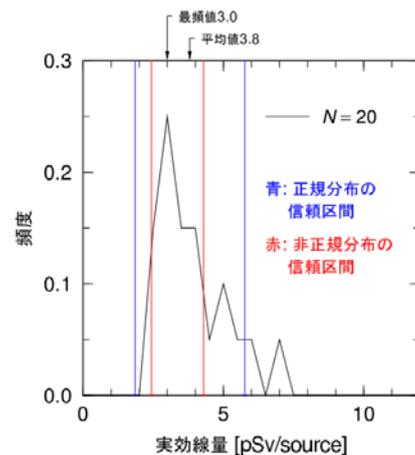


図 1. 中性子の遮蔽計算における系統的な不確かさの分布。