# マルチレベルモンテカルロ法を用いたランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価の計算コスト低減に関する研究 （1）燃料集合体体系への適用性

Study on Calculatoin Cost Reduction for Random-Sampling-Based Uncertainty Quantification Using Multi-Level Monte Carlo Method
(1) Applicability to Fuel Assembly Geometries

*藤田 達也[1]，酒井 友宏[1]
[1]原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

軽水炉体系における核データ起因の不確かさ評価の計算コスト低減を目的として、マルチレベルモンテカルロ法の導入を検討した。燃料集合体体系に適用した際の計算コスト低減の可能性について報告する。

**キーワード**：ランダムサンプリング法，不確かさ評価，マルチレベルモンテカルロ法，CASMO5，JENDL-4.0

**1. 序論**　ランダムサンプリング法では核反応断面積等の核データを摂動させて多数回の計算を行う必要があることから、1 回当たりの計算コストが大きい炉心計算などを今後取り扱うに当たっては、より少ない計算コストで不確かさを評価することが求められる。既往研究においては、ラテン超方格サンプリング法[1]、リバースサンプリング法（RS 法）[2]、制御変量法（CV 法）[3]等が用いられ、計算コスト低減の性能が確認されている。本稿では、過去に検討されたマルチレベルモンテカルロ法（MLMC 法）の適用方法[4,5]を見直し、燃料集合体体系に適用するとともに、その際の計算コスト低減の可能性について報告する。

**2. MLMC 法の適用**　MLMC 法[6]は、式(1)に示すとおり、対象パラメータ$X_L$の期待値$E(X_L)$を、類似パラメータ$X_0, X_1, \dots, X_{L-1}$を用いて評価する。類似パラメータの個数$L$並びに対象パラメータ又は類似パラメータのサンプル数$N_l$ $(l = 0,1,\cdots,L)$は任意である。なお、$L = 1$において$N_0$が十分に大きい場合、CV 法と同等となる。各パラメータの計算コストが$C_l$ $(l = 0,1,\cdots,L)$とすると、全体の計算コストは式(2)のとおりとなる。過去の検討[4,5]では$L = 2$として 2 つの類似パラメータの平均値を使用していたが、本稿では 2 つの類似パラメータを独立に取り扱うことで自由度を大きくした。

$$E(X_L) = \frac{1}{N_0}\sum_{n=1}^{N_0} X_0 + \sum_{l=1}^{L}\left\{\frac{1}{N_l}\sum_{n=1}^{N_l}(X_l - X_{l-1})\right\} \quad (1)$$

$$Total\ Cost = \sum_{l=1}^{L}(N_l C_l) \quad (2)$$

既往研究においては、平均値に対する RS 法の高速な収束性[7]が、CV 法で用いる類似パラメータの設定に対して対象パラメータに係る感度係数を用いることの有効性[8]が、それぞれ報告されている。そのため、本稿では上記の委託研究成果を参考に、RS 法を併用した。また、過去の検討[4,5]では類似パラメータを燃料セル体系における計算結果としたが、表 1 に示す感度係数が概ね同等であると考えられる同一の燃料集合体体系において輸送計算条件を簡素化した場合の計算結果を採用した。

**3. 燃料集合体体系への適用**　計算コスト低減の可能性を確認するため、UAM ベンチマーク問題 Phase I [9]における燃料集合体体系に適用した。本稿で比較する計算ケースにおけるサンプル数$N_l$ $(l = 0,1,\cdots,L)$の設定は表 2 のとおりであり、表 1 の相対計算コストに基づいて相対計算コストの積算値を式(2)で評価した。計算結果の一例として、図 1 に Peach Bottom 2 号機の燃料集合体体系における未燃焼時の集合体無限増倍率の相対標準偏差の変化を示す。MLMC 法を導入したケース No.3 及び 4 では、対象パラメータを 10000 回実施した場合の計算結果（ケース No.1、相対計算コストの積算値は 10000）を、より少ない計算コスト（2000 以下）で評価可能であることを確認した。

**4. 結論**　ランダムサンプリング法に基づく不確かさ評価に RS 法を併用した MLMC 法を適用し、燃料集合体体系の集合体無限増倍率に対しては、その相対標準偏差の評価に係る計算コストを 1/5 以下に低減可能であることを確認した。今後は、1 回当たりの計算コストが大きい炉心計算などを対象とした適用性を確認する予定である。

表1　対象ﾊﾟﾗﾒｰﾀ及び類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀの輸送計算条件

| | 対象ﾊﾟﾗﾒｰﾀ | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ① | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ② | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ③ |
|---|---|---|---|---|
| 中性子ｴﾈﾙｷﾞｰ群数 | 95 | 2 | 8 | 35 |
| 方位角分点数(0～2π) | 128 | 32 | 48 | 64 |
| 極角分点数(0～π/2) | 3 | 1 | 2 | 2 |
| ﾚｲﾄﾚｰｽ幅[cm] | 0.025 | 0.100 | 0.075 | 0.050 |
| 相対計算ｺｽﾄ | 1.000 | 0.041 | 0.049 | 0.100 |

表2　計算ケースの設定（網掛けは固定値）

| ケースNo. | サンプル数 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 対象ﾊﾟﾗﾒｰﾀ | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ① | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ② | 類似ﾊﾟﾗﾒｰﾀ③ |
| 1 | 10000 | --- | --- | --- |
| 2 | 5000 | 10000 | --- | --- |
| 3 | 2500 | 10000 | 5000 | --- |
| 4 | 1250 | 10000 | 5000 | 2500 |

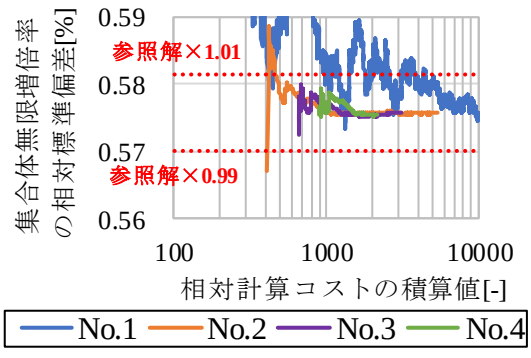


図1　集合体無限増倍率の計算結果

**参考文献**　[1] A. Yamamoto et al., *Nucl. Sci, Eng.*,**181**, pp.160-174, (2015).　[2] G. Chiba et al., *Ann. Nucl. Energy*, **75**, pp.395-403, (2015).　[3] S. Nihira et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, pp.971-980, (2019).　[4] 柴他，日本原子力学会 2018 年春の年会, 1F17, (2018).　[5] 岩橋他，日本原子力学会 2018 年春の年会, 1F18, (2018).　[6] M. B. Giles, *Operations Research*, **56**, pp.607-617, (2008).　[7] 北海道大学, *燃焼感度解析に関する研究*, 平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書, (2018).　[8] 北海道大学, *燃焼感度解析に関する研究*, 平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書, (2020).　[9] NEA/NSC/DOC(2013)7, (2013).

*Tatsuya Fujita[1] and Tomohiro Sakai[1]
[1]Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)