

Solomon コードにおける測定データ対応の乱雑化臨界計算

Solomon’s Capability of Random Media Criticality Calculation for Measured Data

*植木 太郎¹

¹JAEA

燃料デブリ臨界管理手法整備において開発中のモンテカルロ法ソルバーSolomonは、逆冪乗則パワースペクトルの乱雑化レプリカを生成し、質量偏差評価とデルタ追跡法による臨界計算を実施する機能を備えている。本予稿では、測定データの画像解析結果を入力として利用可能な乱雑化手法の現時点での活用例を報告する。

キーワード： Solomon、乱雑化、質量偏差、パワースペクトル、測定データ、臨界計算、モンテカルロ法

1. 緒言 燃料デブリ生成実験に関する限られた情報源からの詳細画像は、図 1 に示すように、パワースペクトルが、低波数領域において逆冪乗則から離れてフラットなホワイトノイズに近づくことを示唆している。このような任意形状のパワースペクトルを直接に入力できる乱雑化臨界計算手法が望まれている。

2. テーブル形式入力の乱雑化機能と臨界計算 Solomon に実装済の乱雑化関数[1]と類似の関数を考える。 $Z(x) = \sigma \sum_{j=m_1}^{m_2} B_j f(j\Delta k) \sin((j\Delta k)x + A_j)$ 、 σ ：振幅調整因子、 m_1 & m_2 ：整数、 B_j ：期待値 0 で分散 1 の独立な確率変数、 A_j ： $(0, 2\pi)$ において一様で独立な確率変数、 f ：実数を変数とする実数値関数、 Δk ：波数の差分。関数 $Z(x)$ の共分散は $E[Z(x)Z(x+u)] = 0.5\sigma^2 \sum_{j=m_1}^{m_2} (f(j\Delta k))^2 \cos((j\Delta k)u)$ と計算され、Wiener-Khinchin の定理により、 $Z(x)$ のパワースペクトルとして $0.5\pi\sigma^2 \sum_{j=m_1}^{m_2} (f(j\Delta k))^2 [\delta(k-j\Delta k) + \delta(k+j\Delta k)]$ を得る。この式は、波数 $j\Delta k$ でのスペクトル密度が $(f(j\Delta k))^2$ であるパワースペクトルの離散表現である。係数 $f(j\Delta k)$ の非整数型確率的乱雑化フーリエ級数が $(f(j\Delta k))^2$ のパワースペクトルを示すとも解釈される。関数 f は任意に選べるので、測定データの画像解析結果を線形テーブル形式入力として利用可能である。一方、Solomon に実装済の乱雑化関数においても、係数・位相等の関数データをテーブル化するクラスが用意されている。このため、関数 $Z(x)$ の Solomon への実装は容易で、図 1 に示されている低波数領域でのスペクトルフラット化の効果を調査することができる。本予稿では、スペクトル範囲が $0 < k \leq 2$ （単位： cm^{-1} ）で波数差分を $\Delta k = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ とし、ベースケースを逆 2 乗則、追加 3 ケースとして $0 < k \leq k_{fl}$ 、 $k_{fl} = 0.1, 0.2, 0.3$ （単位： cm^{-1} ）においてフラットで $k_{fl} < k \leq 2\text{cm}^{-1}$ で逆 2 乗則の場合の全 4 ケースを報告する。各ケースにおいては、100 レプリカの臨界計算を、200 インアクティブ・サイクル、5000 アクティブ・サイクル、サイクル当たり粒子数 50000 の条件で Solomon により実施し、実効増倍率と質量偏差[2]を評価した。図 2 に示すように、低波数領域のスペクトルをフラット化すると実効増倍率の揺らぎと平均質量偏差の両方が減少することがわかった。

参考文献 [1] T. Ueki, Progress in Nuclear Energy, 144 February 2022. [2] 日本原子力研究開発機構 令和 5 年度原子力規制庁委託成果報告書 東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界評価手法の整備 令和 6 年 3 月 31 日提出。

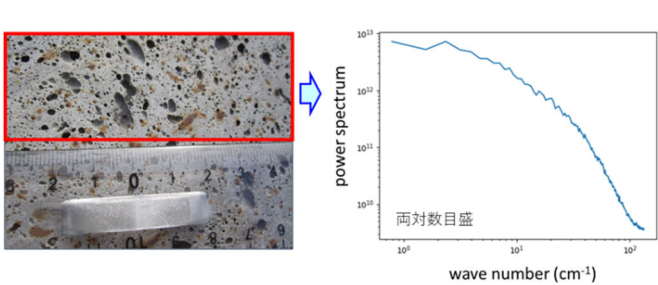


図 1 デブリ模擬体の画像解析によるパワースペクトル（フォト、OpenCV & Python3、令和4年度原子力規制庁委託成果報告書より）

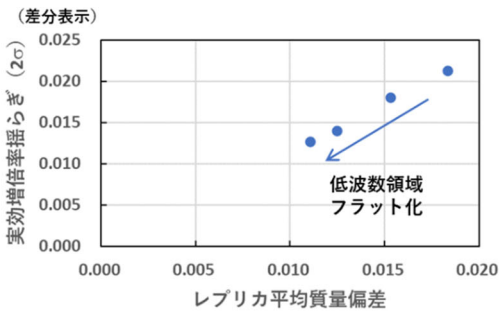


図 2 パワースペクトル低波数領域フラット化の影響

*Taro Ueki

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