炉雑音解析手法への動的モード分解の適用：(2) bootstrap 法を用いた統計的不確かさ評価

Application of Dynamic Mode Decomposition to Reactor Noise Analysis Method:
(2) Statistical Uncertainty Quantification Using Bootstrap Method

*遠藤 知弘[1], 西岡 楓賀[1], 山本 章夫[1], 渡辺 賢一[2], 卞 哲浩[3]
[1]名古屋大学, [2]九州大学, [3]京都大学複合原子力科学研究所

計数率が高い条件あるいは長時間測定した大容量の炉雑音測定結果を処理できるよう、検出時刻情報を分割したバイナリファイルを bootstrap 法により復元抽出することで、動的モード分解を適用した Rossi-α法による即発中性子減衰定数αおよび統計的不確かさを評価する実用的な手法について検討した。

キーワード：炉雑音解析、動的モード分解、即発中性子減衰定数、bootstrap 法、不確かさ評価

1. 緒言 中性子計数率が高くなる、あるいは測定時間が長くなるにつれ、検出時刻情報のデータ数は膨大となる。従って、全検出時刻情報データを一度に読み込んで従来の炉雑音解析手法を適用したり、その分析結果の統計誤差評価を実施することが困難となる。この課題を解決するため、検出時刻情報を分割した小容量バイナリファイルに対して、bootstrap 法により分割ファイルを復元抽出することで、動的モード分解を適用した Rossi-α法による即発中性子減衰定数αおよび統計的不確かさを評価する実用的な手法について検討した。

2. 手順 ①M個の検出器を用いて測定された中性子性子検出時刻のリストモードデータを小容量単位(例えば$T = 1$ min単位)で分割し、検出器 ch 番号と検出時刻情報のペアが収録されたN個のバイナリファイルを準備する。②$1 \le i \le N$の一様乱数を用いてバイナリファイル番号iをサンプリングし、連続する 2 つのi, $i+1$番目ファイルを連結して時刻範囲$0 \le t \le 2T$のデータとした上で、$0 \le \xi \le T$の一様乱数により時刻範囲$\xi \le t \le (\xi + T)$の時系列データを再抽出する。③再抽出した時系列データに対して各検出器の検出時間幅情報τの頻度を分析し累積和をとる。④手順②～③をN回繰り返し、各検出器($1 \le m \le M$)で得られた Rossi-α法の頻度分布$R_m^b(\tau)$に対して動的モード分解を適用し基本モード成分のα^bを求める。⑤手順②～④をB回繰り返すことで、$R_m^b(\tau)$とα^bのブートストラップ標本を得る($1 \le b \le B$)。⑥ブートストラップ標本を統計処理することで、頻度分布$R_m^b(\tau)$に関する共分散行列(異なる検出時間幅τの間の共分散、異なる検出器間の共分散)や、動的モード分解で求めた基本モード成分のαについて統計的不確かさ(95%ブートストラップ信頼区間)を推定する。

3. 適用結果 臨界状態の KUCA-A 架台(A1/8”p60EUEU(3)+1/8”Pb40p20EUEU 炉心)において、4 個の ^{3}He 検出器を用いて 1 分間の炉雑音測定(計数率が数万 cps)を実施し、提案手法を利用することで基本モードのαおよび 95%ブートストラップ信頼区間を推定した。以上の測定および分析を 75 セット試行することにより、提案手法によって推定された区間内に 75 セットのαの平均値$\bar{\alpha}$が含まれる割合を調べた(図 1)。結果として、推定した信頼区間内に$\bar{\alpha}$が含まれる被覆確率(青色誤差バーの割合)は 97%であり 95%に近いことから、提案手法による統計的不確かさ評価の妥当性を確認した。

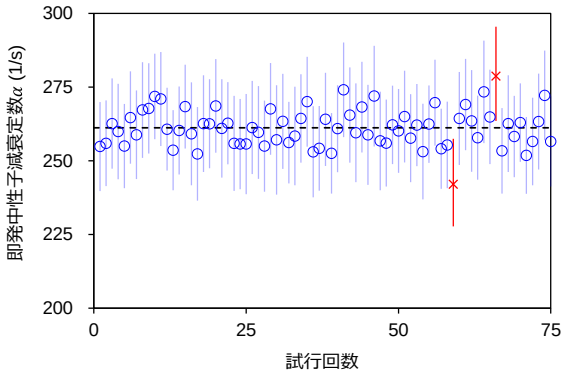

図 1 動的モード分解による基本モードαの推定結果(誤差バーは 95%信頼区間)

謝辞 本研究は KUCA 共同利用研究(R2CA01)の成果であり、JSPS 科研費(19K05328)の助成による。

*Tomohiro Endo[1], Fuga Nishioka[1], Akio Yamamoto[1], Kenichi Watanabe[2], Cheol Ho Pyeon[3]
[1]Nagoya University, [2]Kyushu University, [3]Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University