

# 特異値分解法を用いた安全解析コードの低次元化モデルの開発

原子核エネルギー制御工学グループ 山本章夫研究室

松下 柁輝

**1. 緒言** 福島第一原子力発電所の事故を受け、我が国における原子力の安全性に対して、疑問が投げかけられた。二度と大規模な事故を起こさないためにも、原子力発電所の安全性は高い水準で要求される。近年、安全解析の分野では、事故時の物理現象を高い精度で推定する最適評価コード（以下、安全解析コード）による解析を多数回実施することで、統計的な評価値を算出する手法が注目されてきている。しかしながら、安全解析コードによる1回あたりの計算コストは非常に高く、多数の解析結果を取得することは困難である。そこで、卒業研究[1]では、安全解析コードの代わりに解析結果を高速に計算するモデル（ROM：Reduced Order Modeling）を特異値分解法によって開発した。修士研究では、特異値分解法を用いたROMの統計的手法に基づく安全評価への適用性に関する知見を得ることを目的とした。本予稿では、統計的安全評価への適用結果の一例について示す。

**2. 解析条件** 想定する事故シナリオは、BWRにおける中破断LOCA時安全注入及び自動減圧系（ADS）機能喪失とした。図1に当該事故シナリオにおいて使用することができる機器を示す。不確かさを考慮する入力パラメータは、逃がし安全弁（SRV）の開操作時間および崩壊熱の不確かさとした。安全評価パラメータは、燃料被覆管最高温度の最大値（MPCT）とした。

**3. ROMの統計的安全評価への適用性** ROMと安全解析コードのRELAPで算出した各1000個のMPCTに基づいて、Bootstrap法で10万回の再抽出を実施したMPCTの95%累積確率点の比較結果を図2に示す。図2において、水色の頻度分布はROMで推定されるMPCTの95%累積確率点におけるBootstrap標本を示している。この時、赤色の破線はROMで推定される95%累積確率点の95%信頼区間を示している。また、実線はROM（赤色）とRELAP（黒色）で推定される95%累積確率点の中央値を示している。統計的安全評価の目的は、入力データの不確かさを考慮した安全評価値を推定することである。ROMはRELAPと同等の精度で安全評価値に対応する95%累積確率点を推定することができ、ROMの統計的安全評価への適用性が確認できた。なお、ROMの訓練データは15個であるが、直接解析した1000個と同等の精度であることから、ROMを使用することで約98%以上の計算コストが削減できた。

**4. ROMの学習効率の向上** ROMの精度は訓練データによっても変動するので、質の高い訓練データを選定することが望ましい。そこで、統計的安全評価で提案されているROMの学習アルゴリズム法（従来手法：図2に使用）よりも学習効率の高い学習アルゴリズム法（改良手法）を開発した。改良点として、ROMが既に学習した訓練データとの非類似度を評価し、最も類似していない訓練データを学習させる操作を追加した。従来手法と改良手法におけるMPCTの95%累積確率点の収束性を図3に示す。図3では、アルゴリズムの反復ごとに訓練データを1点ずつ追加している。図3を見ると、従来手法よりも改良手法の方が、同じ訓練データ数であっても効率よくROMの精度を向上させることが可能である。

## 参考文献

[1] 松下柁輝, “確率的安全余裕評価に向けた過酷事故解析コードの低次元化モデルの開発,” 卒業論文, 名古屋大学, (2018).

## 公刊論文および口頭発表

- [1] M. Matsushita, T. Endo, A. Yamamoto, *J. Nucl. Sci. Technol.*, DOI: 10.1080/00223131.2019.1699190, (2020).
- [2] M. Matsushita, T. Endo, A. Yamamoto, T. Kitao, *Proc. PHYSOR2018*, Cancun, Apr. 22-26, 2018, (2018).
- [3] M. Matsushita, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **119**, pp.900-903, (2018).
- [4] 松下柁輝, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会春の年会, 茨城大学, 3月20日-22日, (2019).
- [5] 松下柁輝, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会春の年会, 富山大学, 9月11日-13日, (2019).
- [6] M. Matsushita, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **121**, pp.979-982, (2019).
- [7] M. Matsushita, T. Endo, A. Yamamoto, *Proc. RPHA19*, Osaka, Dec. 2-3, 2019, (2019).

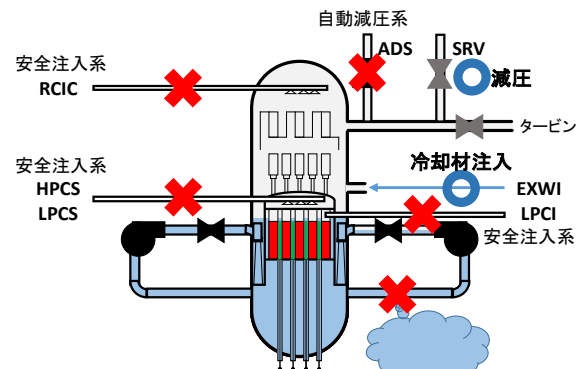


図1：想定する事故シナリオ

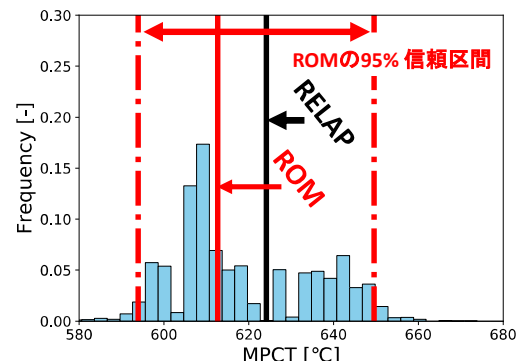


図2：MPCTの95%累積確率点におけるROMとRELAPの比較（従来手法）

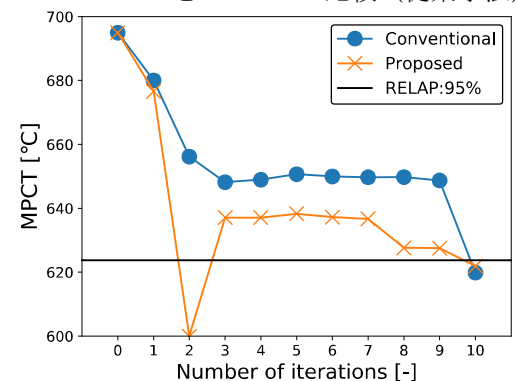


図3：アルゴリズム反復ごとの従来手法と改良手法における95%累積確率点の比較