

1. 緒言 原子炉の核特性を評価するための炉心解析では、核反応断面積等の入力パラメータの不確かさが核特性へ伝播することにより、炉心核特性評価値には入力パラメータ起因の不確かさが存在する。入力パラメータの微小変化量に対する炉心核特性の変化量の比（感度係数）を用いて入力パラメータの不確かさを伝播させることで、炉心核特性の不確かさの定量評価が可能となる。また、断面積調整法と呼ばれる断面積起因の不確かさを低減する手法の基礎式中にも感度係数が現れる。したがって、入力パラメータ起因の不確かさの定量評価・低減の観点から、感度係数評価は非常に重要である。しかし、軽水炉炉心解析では、その解析フローの複雑さや入力となる断面積数の膨大さにより、従来の感度係数評価手法の適用は困難であった。そこで、本研究では入力パラメータの摂動を、感度を有する部分空間（Active Subspace: AS）基底を用いて展開することで自由度を削減し、感度係数評価に必要な炉心解析の計算コストを削減する手法を提案した。その軽水炉炉心解析への適用性の評価を行った。

2. 理論 本手法では、炉心核特性感度係数が集合体核特性感度係数を用いて(1)式のように分解できると仮定する。ここで、 σ , R_c , R_a はそれぞれ入力パラメータ、炉心核特性、集合体核特性であり、 $\mathbf{G}(R_c \leftarrow \sigma)$, $\mathbf{G}(R_c \leftarrow R_a)$, $\mathbf{G}(R_a \leftarrow \sigma)$ はそれぞれ入力パラメータに対する炉心核特性の感度係数行列、集合体核特性に対する炉心核特性の感度係数行列、入力パラメータに対する集合体核特性の感度係数行列である。次に、集合体核特性感度係数行列 $\mathbf{G}(R_a \leftarrow \sigma)$ を(2)式のように特異値分解する。得られた右特異ベクトルの大きい特異値に対応する r 本(r は入力パラメータ数より小さい)からなる行列 \mathbf{V}_r が AS 基底となる。次に、入力パラメータの摂動 $\Delta\sigma$ を(3)式のように展開し、展開係数 $\Delta\bar{\alpha}$ に対する炉心核特性の感度係数行列 $\mathbf{G}(R_c \leftarrow \alpha)$ を評価する。最後に(4)式により、炉心感度係数行列を求める。 $\mathbf{G}(R_c \leftarrow \alpha)$ は、入力パラメータの自由度が AS の次元数 r まで削減されているため、 r 回の炉心計算で得ることが可能であり、感度解析に必要な炉心計算回数が r 回まで低減される。さらに基底構築の計算コストを低減するために、集合体感度係数行列 $\mathbf{G}(R_c \leftarrow \alpha)$ の代わりに、粗計算点における近似集合体計算で得られる近似集合体核特性 \tilde{R}_a に対する感度係数行列 $\mathbf{G}(\tilde{R}_a \leftarrow \sigma)$ を用いる。また、感度係数行列の行ベクトルについて、直接法で得られる結果を参照値として、相対差異ノルムを評価した。

$$\mathbf{G}(R_c \leftarrow \sigma) = \mathbf{G}(R_c \leftarrow R_a) \mathbf{G}(R_a \leftarrow \sigma) \quad (1)$$

$$\mathbf{G}(R_a \leftarrow \sigma) = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \quad (2)$$

$$\Delta\sigma = \mathbf{V}_r \Delta\bar{\alpha} \quad (3)$$

$$\mathbf{G}(R_c \leftarrow \sigma) \approx \mathbf{G}(R_c \leftarrow \alpha) \mathbf{V}_r^T \quad (4)$$

3. 検証計算 典型的な 4 ループ PWR 炉心を対象として、本手法の適用性を確認した。入力パラメータ数は 18 の重核種の微視的多群断面積計 5040 個とした。6 種類の集合体体系について、粗計算点の近似集合体計算を 5040 回ずつ行い、近似集合体核特性の感度係数行列を評価した。考慮した近似集合体核特性は、各粗計算点における 2 群均質化断面積の計 3460 種類とした。得られた近似集合体核特性の感度係数行列（3460 行 5040 列）を特異値分解して AS 基底を構築した。AS 次元数を 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200 と変化させ、提案手法により炉心核特性の相対感度係数を評価した。サイクル末期ホウ素濃度の相対感度係数について、10% 摂動の直接法により得られる相対感度係数を参照値とし、相対差異ノルムの次元依存性を評価した（図 1）。図 1 より、50 次元で相対差異ノルムは数%にまで減少しており、本手法により感度係数評価に必要な炉心計算回数を大幅に低減(5040→50)できる可能性を示している。ただし、50 次元以上で相対差異ノルムは低減していない。これは展開係数に対する感度係数評価に差分近似を利用しているためであり、展開係数に対する感度係数評価において適切な摂動量を設定する必要がある。

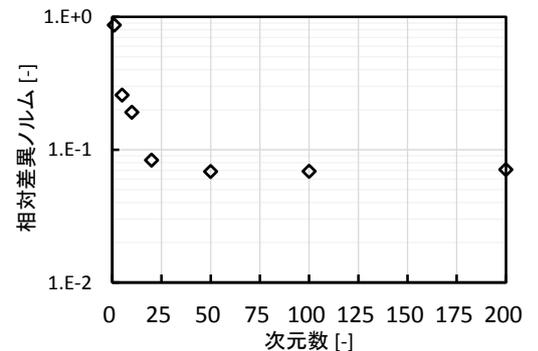


図 1 相対差異ノルムの次元依存性

公刊論文および口頭発表

- 1) R. Katano, T. Endo, A. Yamamoto, et. al., *Proc. PHYSOR2014*, Kyoto, Japan, Sep. 28-Oct. 3, 2014, (2014).
- 2) 方野量太, 遠藤知弘, 山本章夫, *KURRI-KR(CD)*, **50**, pp. 86-96, (2014).
- 3) 方野量太, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 茨城大学, 3 月 20-22 日, 2015, J38 (2015).
- 4) R. Katano, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **112**, pp. 715-718 (2015).
- 5) 方野量太, 遠藤知弘, 山本章夫, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 静岡大学, 9 月 9-11 日, 2015, A46 (2015).
- 6) R. Katano, T. Endo, A. Yamamoto, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **113**, pp. 1161-1164 (2015).