統計的安全評価における代替統計モデルの適用
(7) 実機条件に対する不確かさのベイズ推定

Application of Surrogate Models for Statistical Safety Evaluation

(7) Bayesian modeling and inference for uncertainty analysis of PWRs

*木下 郁男

原子力安全システム研究所

RELAP5 コードによる燃料被覆管最高温度の統計的安全評価に対して、代替統計モデルの適用性を検討している。本報では、PWR プラントにおける小破断 LOCA 時高圧注入系不作動事象のアクシデントマネジメント策を対象に、代替統計モデルによる不確かさ解析のベイズ推定を行い、95%累積確率値の予測区間を算出した。

キーワード：統計的安全評価，代替統計モデル，ベイズ推定，Stan，RELAP5

1. 緒言　代替統計モデルは、解析コードの入力と計算結果との関係を近似するように少数の解析結果から学習されたモデルである。代替統計モデルを統計的安全評価に適用するにあたっては、学習データ以外のデータに対する予測精度の確認が必要である。本報では、PWR プラントにおける小破断 LOCA 事象を対象に、RELAP5 による不確かさ解析のベイズ推定を行い、95%累積確率値(95%値)の予測区間を算出した。

2. 解析方法　解析対象は PWR プラントの小破断 LOCA 時高圧注入系不作動事象(3 インチ破断)とした。本事象のアクシデントマネジメント策に対し、RELAP5 コードの計算モデルの不確かさ(10 パラメータ)を変化させた統計解析(1024 サンプル)を行い、被覆管最高温度(PCT)の不確かさを評価した。本研究では、確率的プログラミング言語 Stan [1]を用いて、代替統計モデルによる不確かさ解析のベイズ推定を行った。線形 2 次回帰と RELAP5 計算との誤差をガウス過程回帰で評価し、これらの回帰モデルの和として予測モデルを定義した。

3. 解析結果　図 1 に、学習データ数 93 の代替統計モデルに対して、Stan により計算した PCT の累積確率分布と 90%ベイズ予測区間を示す。破線は各データに対するベイズ推定による 5%点および 95%点の累積確率分布である。93 サンプルでは、RELAP5 計算と比較して 95%値を過大評価している。

図 2 に、95%値を目標値とした適応的サンプリング[2]を繰り返して更新した学習データ数 113 の代替統計モデルに対して、Stan により計算した PCT の累積確率分布と 90%ベイズ予測区間を示す。適応的サンプリングにより、95%値の評価精度が向上していることが分かる。

表 1 に、代替統計モデル(113 サンプル)による PCT の不確かさ解析の統計量を示す。ベイズ推定による 95%点の 95%累積確率値(1441.2K)は、順序統計法(93 サンプル)による評価における最大値(1460.0K)と 2 番目に大きい値(1382.5K)の間の値となった。ベイズ推定と順序統計法との比較には、学習データのサンプリングを変化させた統計的な検討が必要である。

参考文献 [1] Stan Development Team, Stan User's Guide, Ver. 2.28, https://mc-stan.org. [2] 木下郁男，2019 年春の年会, 2K08.

*Ikuo Kinoshita, INSS

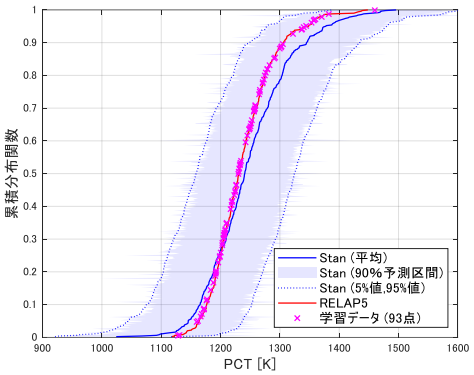

図 1　PCT の累積分布関数（学習データ数 93）

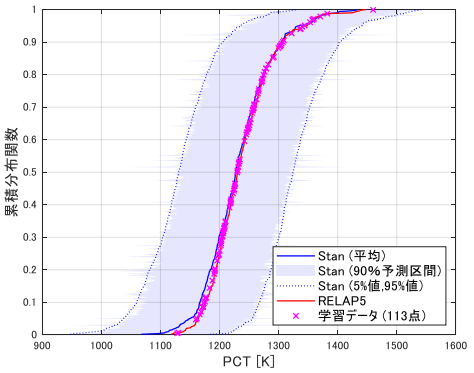

図 2　PCT の累積分布関数（学習データ数 113）

表 1　PCT の不確かさ解析の統計量

評価法	統計量	PCT [K]
代替統計モデル（ベイズ推定）	95%値	1337.0
	95%/95%値	1441.2
順序統計法（93 サンプル）	最大値	1460.0
	2 番目に大きい値	1382.5
RELAP5	95%値	1342.4