統計的安全評価における代替統計モデルの適用
(6) Stan による不確かさのベイズ推定

Application of Surrogate Models for Statistical Safety Evaluation

(6) Bayesian modeling and inference for uncertainty analysis using Stan

*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、確率的プログラミング言語 Stan 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サンプル(学習データ)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。本研究では、確率的プログラミング言語 Stan [1]を用いて、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。

2. 解析方法　解析対象は、ROSA/LSTF の低温側配管 1.0%破断実験とした。本実験を対象に、RELAP5 コードによりモデル不確かさ(7 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 [2]。

本研究では、この不確かさ解析を対象に、93 サンプルを学習データとして、Stan により不確かさ解析のベイズ推定を行った。不確かさ解析の統計モデルは 7 変数 2 次多項式で定義し、ノイズを正規分布で与えた。各パラメータの事前分布は無情報事前分布で与え、事後分布の平均値を用いて、不確かさ解析の予測モデルを構築した。また、PCT の事後予測分布により、不確かさ解析の 95%ベイズ予測区間を算出した。

3. 解析結果　図 1 に、PCT の 95%ベイズ予測区間を示す。学習データ(93 サンプル)は赤丸で示されている。学習データ以外のデータに対するベイズ予測区間は、学習データに対するベイズ予測区間よりも大きい。少数の例外を除き RELAP5 による PCT 計算値はベイズ予測区間に含まれており、本研究のモデルによるベイズ推定は適切であると言える。

図 2 に、PCT の累積確率分布を 95%ベイズ予測区間と合わせて示す。破線は、各データのベイズ推定における 5%点および 95%点についての累積確率分布を示している。

表 1 に、PCT の不確かさに係る統計量の評価を示す。ベイズ推定による 95%値は 883.29K であり、RELAP5 計算による 95%値の 885.30K とよく一致する結果が得られた。また、ベイズ推定による 95%点の 95%累積確率値は 906.98K であり、順序統計法による評価値の 908.80K とよく一致する結果が得られた。

参考文献 [1] Stan Development Team, Stan User's Guide, Ver. 2.28, https://mc-stan.org. [2] I. Kinoshita, et al., IMECE2016-66638 (2016).

*Ikuo Kinoshita, INSS

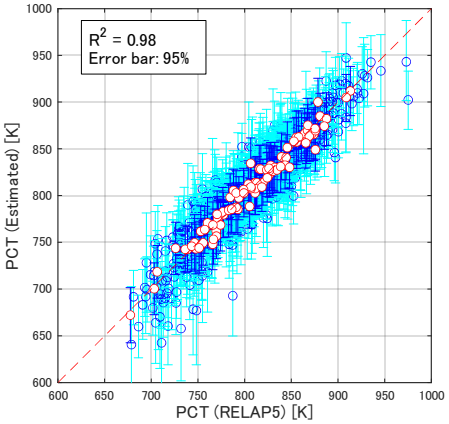

図 1　PCT の 95%ベイズ予測区間

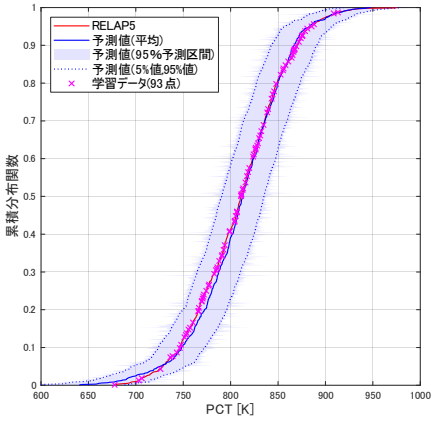

図 2　PCT の累積分布関数

表 1　PCT の不確かさに係る統計量の評価

評価法	統計量	PCT [K]
代替統計モデル (ベイズ推定)	95%値	883.29
	95%/95%値	906.98
順序統計法 (93 サンプル)	最大値	913.14
	2 番目に大きい値	908.80
RELAP5	95%値	885.30