

階層ベイズモデルを用いたデマンド故障確率推定のための 事前分布選択指針の確立

背 景

近年我が国では、PSA から得られたリスク情報を原子力プラントの安全規制に活用する試みが活発になりつつある。リスク情報活用のためには、電気事業者による PSA 入力用信頼性パラメータ(機器故障率など)整備とその手法の標準化・高度化が重要である。欧米諸国では近年、階層ベイズ手法(図1)と呼ばれる先進的な信頼性パラメータ推定手法が原子力発電所の PSA に積極的に適用されている。この手法は、故障件数データが少ない場合でもデータ以外の情報を事前確率分布として扱うことによりパラメータの推定ができるという大きな利点がある。しかし、事前分布の関数形は推定結果である事後分布に大きな影響を与えるので、推定の妥当性を確保するための適切な事前分布選択の方法を確立することが必要である。ポアソン過程に従う時間故障率の事前分布選択指針はよく研究されている一方で、二項過程に従うデマンド故障確率の事前分布選択指針はほとんど研究がなされていない。

目 的

階層ベイズ手法を用いたデマンド故障確率推定における事前分布の選択指針を確立する。

主な成果

1. デマンド故障確率推定式の解析的性質の理解

二項過程に従うデマンド故障確率の推定について、事後分布推定式の解析的性質を調べた。とりわけ、推定式に現れる多重積分中の被積分関数の特徴を調べ、その特徴が故障確率推定に及ぼす影響を検討した。考察の結果、ベータ事前分布([注1]参照)の場合には、事後分布の広がり超事前分布(図1の説明参照)の影響を受けやすく、ロジスティック正規事前分布([注2]参照)とした場合には、事後分布の広がり超事前分布の影響を受けにくい特性があることを明らかにした。

2. 数値シミュレーションによる解析的考察の妥当性の検証と事前分布選択指針の確立

米国68プラントにおける補助注水系起動失敗データを用い、事前分布と超事前分布の形を種々に変えて、この系の起動失敗確率を数値計算し結果を比較することにより、ベータ事前分布を選ぶ場合では事後分布の広がり超事前分布の影響を受けやすく、ロジスティック正規事前分布を選ぶ場合ではその影響は小さいことを定量的に示し(図2)、1. で示された特性の妥当性を検証した。以上の検討により、超事前分布の影響を抑えて観測データの影響をより強く出すためには、ベータ事前分布よりもロジスティック正規事前分布を選択することを推奨する(表1)。

今後の展開

超事前分布の選択指針を確立する。さらに、本研究で得られた指針に基づき、国内原子力プラントの運転実績データを用いて、階層ベイズ手法による信頼性パラメータの試評価を行う。

主 担 当 者 原子力技術研究所 発電基盤技術領域 主任研究員 中村 誠、 上席研究員 吉田 智朗

関連報告書 「階層ベイズモデルを用いたデマンド故障率推定のための事前分布選択指針」 電力中央研究所報告: L07005 (2008年3月)

「ベイズ統計による原子力発電所の信頼性パラメータ評価手法—機器時間故障率・デマンド故障確率のベイズ更新」 電力中央研究所報告: L05019 (2006年7月)

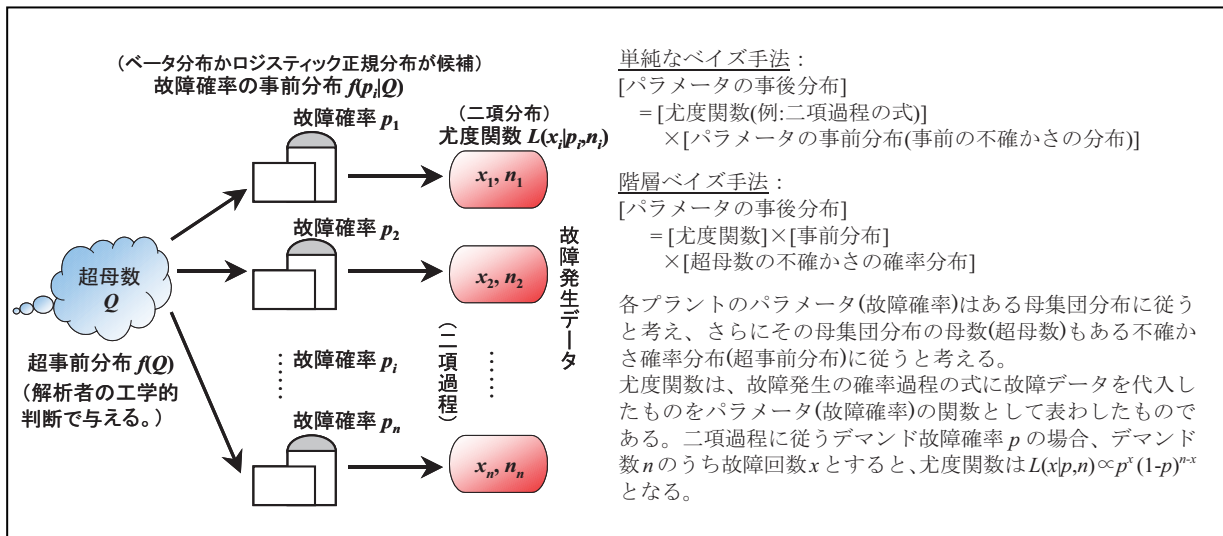


図1 ベイズ手法の説明

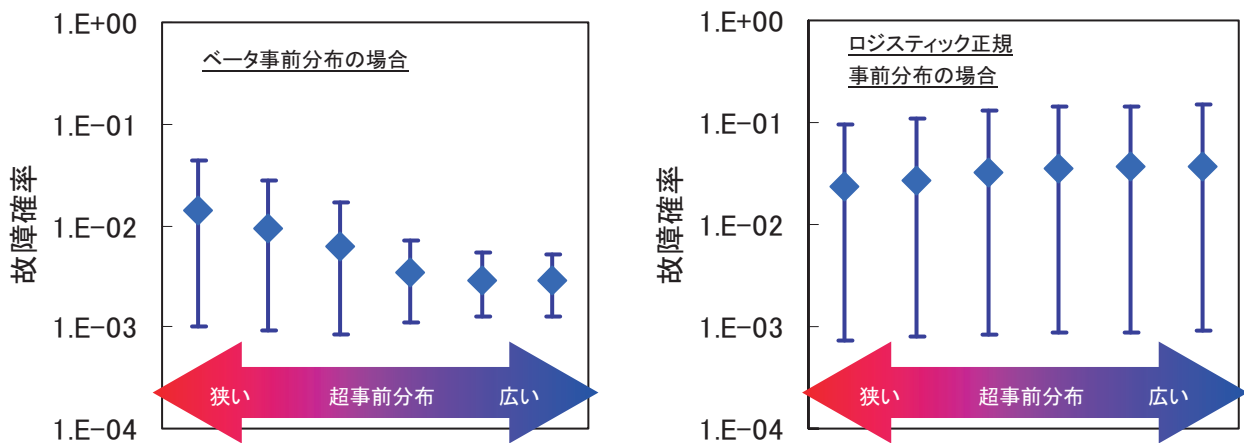


図2 様々な超事前分布を与えたときの

ベータ事前分布^[注1]、ロジスティック正規事前分布^[注2]によるデマンド故障確率推定

ベータ分布を事前分布として選択する場合(左図)、超事前分布の選び方によって、故障確率 p の事後分布の平均値、5%点、95%点のばらつきが大きいことが分かる。一方、ロジスティック正規分布を事前分布として選択する場合(右図)、ばらつきは比較的小さい。

表1 階層ベイズ手法を用いた信頼性パラメータ推定のための事前分布選択指針

	推定対象	推奨	非推奨
今回の研究で明らかにしたこと	デマンド故障確率	ロジスティック正規分布	ベータ分布
既に分かっていること	時間故障率・起因事象発生頻度	対数正規分布	ガンマ分布

[注1] ベータ事前分布: $f_{\text{beta}}(p|\alpha, \beta) \propto p^{\alpha-1}(1-p)^{\beta-1}$. このときの超事前分布: $f(\alpha, \beta|a, b, c, d) \propto 1/(b-a)(d-c)$.

[注2] ロジスティック正規事前分布: $f_{\text{ln}}(p|\mu, \sigma) \propto p^{-1}(1-p)^{-1} \exp[-\{\ln(1/(1-p)) - \mu\}^2 / 2\sigma^2]$.

このときの超事前分布: $f(\mu, \sigma|a, b, c, d) \propto 1/(b-a)(d-c)$.