

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560775

研究課題名(和文) 稀有事象分析に対する階層ベイズモデルと情報量規準の応用

研究課題名(英文) Layered Bayes Model and Information Criteria for Rare Event Risk Analysis

研究代表者

山口 彰 (YAMAGUCHI AKIRA)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：10403156

研究成果の概要(和文)：

原子力施設の地震PSAでは地震動による機器・システムのフラジリティ評価が必要である。しかし、地震動による損傷のメカニズムは複雑でデータも不十分なためフラジリティの予測には不確かさが伴う。そこで、ベイジアンモデルを用いて、外部事象による共通原因故障の定量化手法を提案し、少ない知見・データからフラジリティ予測の不確かさを低減できる手法を確立した。不確かさの指標としては情報量基準を用いている。本手法は稀に発生する大規模地震に伴うリスク評価とリスク管理に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：

In the seismic PSA of nuclear facilities, seismic fragilities of equipment and systems are to be evaluated. However, the fragilities involve uncertainties since the seismically-induced failure mechanism is not sufficiently known and a failure event is rare. In the present study, a new methodology for quantifying the common mode failure caused by external events and for reducing fragility uncertainty using very limited information. The information criterion is selected as the index for the uncertainty. It has been found that the present work is useful for the risk assessment and management of rare earthquake hazard.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 2010年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：確率論的安全評価、耐震安全性、フラジリティ、情報エントロピー、ベイズ推定、情報量基準、原子力プラント

## 1. 研究開始当初の背景

原子力施設の地震に対する安全性が注目を浴びている。2007年7月に発生した中越沖地震では、設計基準地震の約2.5倍の加速度

が観測された。しかしながら、耐震重要度の低い機器や施設には被害が生じたものの、重要度の高い機器の健全性は保たれ、原子力安全は維持されたと評価される。また、2006年

には、耐震設計指針が改訂され、「残余のリスク」の考え方が導入され、それを小さくするための努力を払うべきとしている。

## 2. 研究の目的

残余のリスクを評価し、地震に対する原子力施設の安全尤度を知るため、確率論的安全評価 (PSA) 技術が利用される。そして確率論的安全評価を実施するにあたり、手法とデータが必須であるが、現実には発生する規模の地震では重要機器やシステムが損傷することは稀であり、地震による損傷を予測することは我々の経験に基づく推定の域を超えている。本研究では、統計科学的方法により、我々のもつ知識に基づいて地震時の損傷に関するデータモデルを構築し、その実効性を検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震では原子力発電所の安全性が損なわれる可能性のあるほどの大きな地震動が観測されたが、原子力発電所の安全は維持できていた。これは原子力発電所に安全裕度が存在していたからだと考えられている。また、2006年に耐震設計審査指針1)が改訂された。新指針では残余のリスクの考え方を提起し、それを可能な限り小さくすることが求められている。残余のリスクを評価し、地震に対する原子力施設の安全裕度を知るために、地震 PSA (Seismic Probability Safety Assessment: 地震に対する確率論的安全評価) 技術を用いることが提案されている。地震 PSA では地震動による原子力施設の機器の損傷確率 (フラジリティ) の評価が必要である。地震動による損傷のメカニズムは複雑でデータも不十分なため、評価モデルに大きな不確かさが存在する。モデルの不確かさを低減するには新規データの追加が必要である。そこで本研究はカルバック・ライブラー (K-L) 情報量規準によるフラジリティモデルの作成方法を提案し、新規データを用いたベイズ更新後の事後分布評価に適用した。また、データの重要性を情報エントロピーとして数値化することで、モデルの不確かさが最も低減する試験条件に関する検討を行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 地震 PSA のフラジリティモデル

フラジリティは地震動の強さの関数として機器の損傷を確率で表す概念である。機器損傷確率  $F(\cdot)$  は式(1)の累積分布関数で表される。 $F(\cdot)$  はピーク基盤加速度 (PGA: peak ground acceleration)  $\cdot$  と機器の耐力  $C$  によって決まる。 $\cdot R$  は地震動のランダムな特性を表す。機器の耐力  $C$  もまた不確かさ  $\cdot U$  を持つ確率密度関数で表される。(式(2)参照)  $A_m$  は  $f(C)$  の中央値を表す。したがって  $F(\cdot)$  は図1に示すように機器の耐力による不確かさを含む。(図中ハッチング部分、な

お図では  $C$  の 5%、95% 信頼区間とした。) このことより、 $\cdot U$  値の減少は  $C$  の推定に関わる不確かさが小さくなることである。

$$F(\alpha) = \Phi\left[n(\alpha/C)/\beta_R\right] \quad (1)$$

$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_U C} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(C/A_m)}{\beta_U}\right\}^2\right] \quad (2)$$

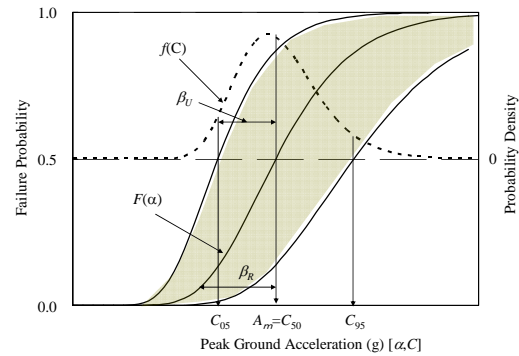


図1 フラジリティモデル

### 4.2 フラジリティモデルの作成方法

データからフラジリティモデルを作成するために、カルバック・ライブラー (K-L) 情報量規準によるモデルの評価手法を開発した。K-L 情報量規準は真のモデル  $Q$  とモデル  $P$  の距離を表し、式(3)で表される。 $EQ[\ln\{q(y)\}]$  は真のモデル  $Q$  に依存する定数なので  $EQ[\ln\{p(y)\}]$  を最大にする  $P$  が最も真に近いモデルを与える。 $p(y)$  は  $y$  が観測される尤度関数であることから、平均対数尤度を最大にするモデルが最善のモデルである。図2に評価例として真のモデルから抽出したデータによる分布と model A、model B、model C の分布を比較したものを示す。model A ではデータ分布の  $C_{05}$  と  $A_m$  から、model B では  $C_{05}$  と  $C_{95}$  から、model C では最尤法を用い式(2)にフィッティングした。図2のように平均対数尤度を最小にするモデルは model C であり、最尤法によるモデルが3つのモデルの中で最善のモデルであると判断できる。

$$KL[Q(y):P(Y)] = \int q(y) \ln\{q(y)/P(y)\} dy \\ = E_Q[\ln\{q(y)\}] - E_Q[\ln\{p(y)\}]$$

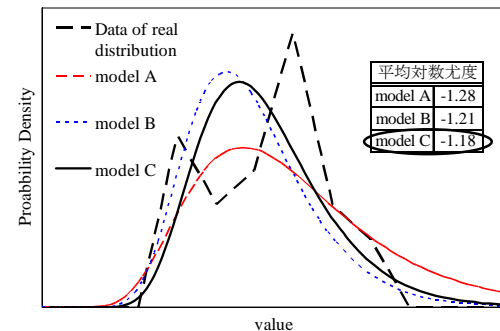


図2 真の分布によるデータとモデル分布

#### 4.3 フラジリティの更新と最適情報

あるPGAレベルで得た加震試験結果を新規情報として用いてベイズ推定 2) を行うことにより、より不確かさが低減されたモデルに更新することができる。図3に  $f(C)$  について事前分布と事後分布のパラメータ・ $U$  の期待値を示す。・ $U$  期待値は事前分布の  $A_m$  での試験を行うとき最も小さくなった。またデータの重要性を情報エントロピーで表し、 $f(C)$  による期待値を評価することで試験条件を評価した。図3によると、・ $U$  期待値の事前分布からの減少量と情報エントロピー期待値が相関を持っていることが判明し、情報エントロピー期待値が最大になる条件で情報を得るとき、事後分布の・ $U$  の期待値が最小となることが判明した。

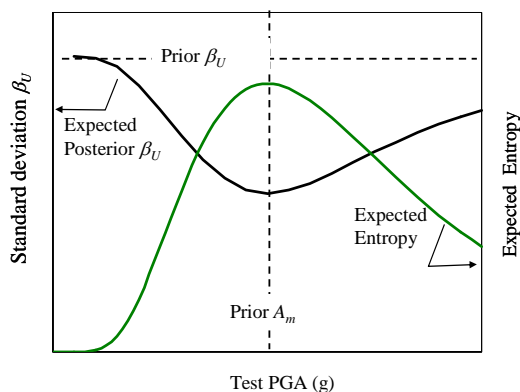


図3 エントロピーと不確かさの低減

#### 4.4 まとめ

K-L 情報量規準によるモデル評価を行い、最尤法によるパラメータ設定によりよいモデルを作成できることが判明した。

モデルの不確かさを表すパラメータのベイズ更新による減少量と情報エントロピーの期待値は相関があり、情報エントロピーの期待値が大きい試験条件が不確かさ低減の観点から効果的である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 山口彰、地震 PSA における安全裕度と不確かさ、保全学会誌、査読無、Vol.7, No.4 (2009)、16-22

[学会発表] (計5件)

- ① Akira Yamaguchi, Masa-aki Kato, and Takashi Takata, Epistemic Uncertainty Reduction in the PSA of Nuclear Power Plant using Bayesian Approach and Information Entropy, 10<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment & Management (PSAM10),

2010年6月7～11日、米国シアトル市ルネサンスシアトルホテル

- ② Akira Yamaguchi, Takashi Takata, Usage of Information Criterion for Reducing Modeling Uncertainty in Reactor Safety, 10<sup>th</sup> Korea-Japan Joint Workshop on PSA - For Asian PSA Network, 2009年5月18～20日、韓国済州島ヘヴィホテル&リゾート

- ③ 加藤 雅章、山口 彰、高田 孝、情報量規準に基づくモデル選択とモデルパラメータの不確かさ低減、日本原子力学会「2009年秋の大会」、2009年9月16～18日、宮城県仙台市 東北大学 青葉山キャンパス

- ④ Akira Yamaguchi, Takashi Takata, Updating uncertainty of rare event occurrence probability based on Bayesian approach, International Conference on Probabilistic Safety Assessment & Management (PSAM9), 2008年5月18日～23日、Hong Kong, China

- ④ Akira Yamaguchi, Masa-aki Kato, and Takashi Takata, Effective updating process of seismic fragilities using Bayesian method and information entropy, 2008年11月24日～27日、Okinawa, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqe/seeqe/homepage/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山口 彰 (YAMAGUCHI AKIRA)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号：10403156

##### (2) 研究分担者

高田 孝 (TAKATA TAKASHI)  
大阪大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：40423206