

地点固有のリスク評価のための階層ベイズを用いた 地震動予測の構築

Development of site-specific attenuation relationship for PSHA
based on Hierarchical Bayesian model

東京大学	濱田 隆成	Takanari HAMADA	Non-member
東京大学	糸井 達哉	Tatsuya ITOI	Non-member
東京大学	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Non-member

Abstract

From the view of continuous improvement of nuclear facilities, it is necessary to analyze seismic risks that should consider the following three viewpoints: 1) Recognition of uncertainty, 2) Updating based on new data obtained, 3) Plant specific data utilizing both plant specific and other plant data. In probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), an attenuation relationship, i.e., a ground motion prediction equation, is conventionally used to predict ground motion intensity measure. A Bayesian approach is considered efficient for constructing a site-specific attenuation relationship, is also regarded as appropriate tool considering the lack of data. This study proposes a methodology to develop a site-specific attenuation relationship by employing a hierarchical Bayesian model. And then, comparison between previous site-amplification factors and our proposed ones is considered.

Keywords: PSHA, Ground motion, Attenuation relationship, Hierarchical Bayesian model, site-specific terms

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故を経験して、原子力施設等における継続的安全性向上における外的ハザードの評価の重要度が増している。将来発生する可能性のある事象をモデル化する際には、過去のデータに基づかざるを得ないが、その予測には不可避免的に不確実性を内包する。不確実性を考慮すると同時に、評価対象の特性を踏まえた固有の評価を行い、新たなデータを継続的に取り入れ更新する必要がある。その際、評価対象固有データと関連データの組み合わせが重要である。

確率論的地震ハザード解析(PSHA)は、対象地点において、将来見舞われる可能性がある地震の揺れの大きさとその発生頻度を求めるもので、対象地点周辺の地震の発生確率評価とその地震発生時の地震動予測からなる。地震動予測手法としては、観測記録に基づく統計式(距離減衰式)が用いられることが一般的である。距離減衰式は、揺れの中央値、確率分布(偶然的な不確実さ)を予測する。地震動を予測する際には、地点ごとの特性を反映した地点固有の予測とすることが望ましいが、同一地点で多数の地震動を観測できることが限られているため、そのような予測式を構築することは一般には難しい。

そのため、同一地点の複数地震の地震動の特性と、同一所で、地震の複数地点における地震動の特性が等しいと仮定(エルゴード仮定)することで予測式を構築することが一般的である。このエルゴード仮定は、地点固有の地震動予測において、中央値の予測にバイアスを生じさせるとともに、不確実さの大きさ(標準偏差)を過大評価する可能性が指摘されている¹⁾。

そこで、本研究では、ベイズ統計の一手法である階層ベイズモデルを用いることで、回帰係数自体の不確実性と地点固有の増幅特性項を示すことのできる距離減衰式の構築を目的とする。さらに、従来の予測手法と比較することでエルゴード性の仮定が地震動予測に与える影響について考察する。

2. 予測モデルと観測データ

わが国で1997年から2011年の間に発生したモーメントマグニチュード(M_w) 5.1以上6.9以下の44の地殻内地震におけるK-NETでの観測記録(断層最短距離100km以下の1703記録)を用いる²⁾。地震動観測記録(水平2成分・上下成分)から計測震度(相当値)を計算する。

モーメントマグニチュード、断層最短距離を説明変数と

連絡先: 濱田隆成、〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1、
東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻修士課程
2年、
E-mail: hamada@safety.n.t.u-tokyo.ac.jp

し、計測震度を予測する統計式を構築する。

$$I = aM_W - 2 \log(X + b \cdot 10^{0.5M_W}) - cX + d + f_s + \sigma \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 \log は常用対数である。 M_W 、 X は、モーメントマグニチュードと断層最短距離(km)である。 a 、 b 、 c 、 d は係数、 f_s は地点の地盤増幅特性を表す項である。また、 $\sigma \varepsilon$ は偶然的な不確かさを表す確率変数で正規分布に従うと仮定する。

3. 階層ベイズモデルによる距離減衰式構築手法の概要

ベイズ更新を用いた距離減衰式の更新については、文献³⁾等で検討されているが、ここでは、地点ごとに個別にベイズ更新が検討されている。本稿では、より体系的に地震動記録を取り扱うことができる階層ベイズ手法⁴⁾を用いる。

モデルでは、地盤増幅特性 f_s に地点ごとの差があると仮定する。 f_s の事前分布は正規分布に従うと仮定し、その分散に超事前分布としてより客観性を保つために逆ガンマ分布(平均1、分散 10^5)を設定する。また、距離減衰式の係数 a 、 b 、 c 、 d は、単純のため、地点ごと・地震ごとの差がないと仮定し、無情報事前分布として正規分布(平均0、分散 10^6)を仮定する。偶然的な不確かさ E の標準偏差 σ_E も、地点ごと・地震ごとに違いがないと仮定し、分散の超事前分布を逆ガンマ分布(平均1、分散 10^5)とする。以上のパラメータについて、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)の階層ベイズ手法と相性が良いとされるギブスサンプリングを用いて、一斉に推定する。

4. 結果と概要

4.1 最小二乗法による距離減衰式

まず、計測震度 I の距離減衰式を、最小二乗法で求める。はじめに、断層最短距離 X の項に関連する係数を求め、次にマグニチュード M_W の項の係数を求める2段階回帰⁵⁾エラー! 参照元が見つかりません。とする。また、求めた予測式と観測記録との差を30m平均S波速度 V_{S30} の関数として回帰することで、地盤増幅特性項 f_s を求める。求めた結果をエラー! 参照元が見つかりません。式に示す。

$$I = 1.36M_W - 2 \log(X + 0.00550 \cdot 10^{0.5M_W}) - 0.00670X - 1.63 \log V_{S30} + 3.30 \quad (2)$$

ここで、 M_W 、 X 、 V_{S30} は、それぞれモーメントマグニチュード、断層最短距離(km)、30m平均S波速度(m/s)

である。偶然的な不確かさの標準偏差を、観測記録と予測値との差の標準偏差として求めると、0.608となる。図2には予測式と観測記録の比較を示す。予測式は $M_W 6.0$ 、 $V_{S30} 400\text{m/s}$ に対するもので、観測記録についても同様に、エラー! 参照元が見つかりません。式で全記録を $M_W 6.0$ 、 $V_{S30} 400\text{m/s}$ 相当の記録に換算している。

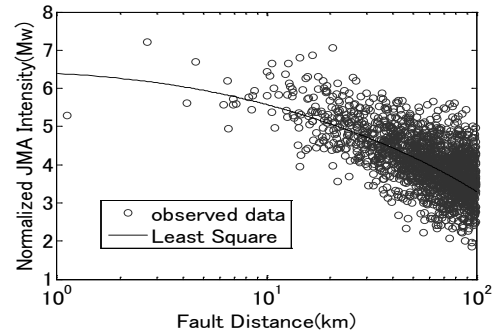


図1 観測記録と最小二乗法による予測式の比較
($M_W 6.0$ 、 $V_{S30} 400\text{m/s}$ に換算)

4.2 階層ベイズモデルによる地点固有の距離減衰式

次に、3章で示した階層ベイズモデルにより、距離減衰式を求める。結果をエラー! 参照元が見つかりません。式に示す。

$$I = 1.32M_W - 2 \log(X + 0.00494 \cdot 10^{0.5M_W}) - 0.00430X - 0.792 + f_s \quad (3)$$

図3に求めた地点ごとの地盤増幅項 f_s を示す。図では30m平均S波速度 V_{S30} との関係を示している。図から、 V_{S30} が大きくなるほど f_s が小さくなるという最小二乗法の結果と同様の傾向が見られる。一方で、階層ベイズで求めた地点ごとの地盤増幅項 f_s には、30m平均S波速度 V_{S30} とでは説明しきれない部分も多く、最大で±1程度の差が見られる。階層ベイズモデルで求まる偶然的な不確かさ E の標準偏差 σ_E は、0.465となり、最小二乗法よりも標準偏差が3/4程度に減少している。これは、階層ベイズモデルにおいて、地盤増幅特性項 f_s を30m平均S波速度 V_{S30} の関数ではなく、地点ごとに項を設定したことによるものと考えられる。

図4には、図2と同様に、予測式と観測記録の比較を示す。予測式は $M_W 6.0$ の平均的地盤に対するもので、

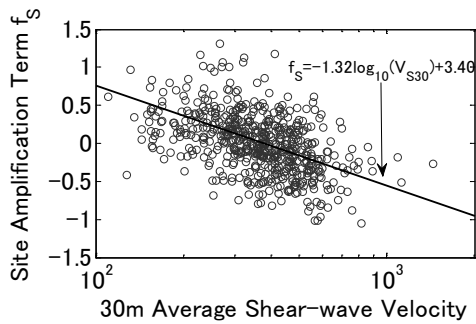


図 2 地点の地盤増幅特性項 f_s と V_{s30} の関係

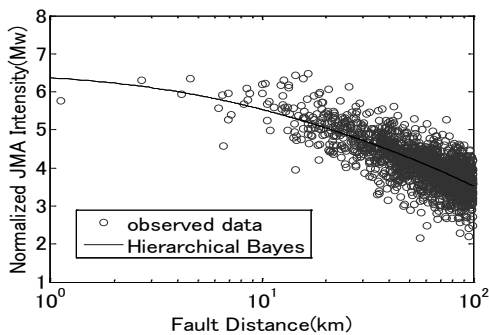
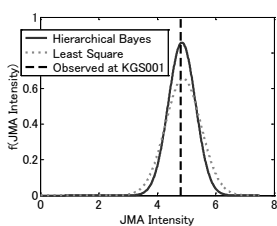


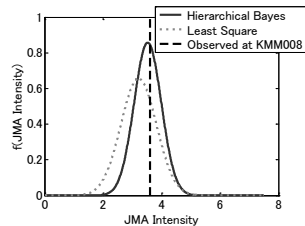
図 3 観測記録と階層ベイズ手法による予測式の比較

(M_w 6.0、平均的地盤条件に換算)

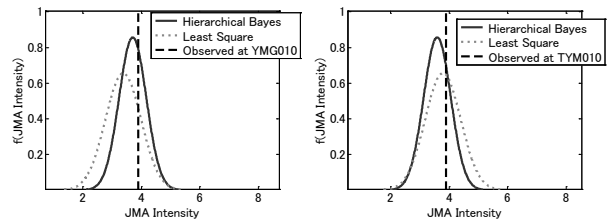
観測記録も同様に換算している。標準偏差の減少にともなう、図 2 と比較して観測記録のばらつきが小さくなっていることがわかる。つまり、距離減衰式構築の際に、エルゴード性の仮定が成立しない一つの要因が地盤増幅特性項 f_s の多様性にあること、階層ベイズモデルによりエルゴード性の仮定を小さくすることにより、最小二乗法で見られる中央値の予測のバイアスを小さくできること、一方で、偶然的不確実さの標準偏差が小さくなること示唆される。図 5 には最小二乗法と階層ベイズで得られた結果と観測された計測震度と比較した例を示している。階層ベイズでは、最小二乗法に比べて、計測震度に近いことが理解できる。



(a) KGS001, 鹿児島県東市 1999 年 3 月 26 日 (M_w 6.1)



(b) KMM008, 熊本県宇土市 1997 年 5 月 13 日 (M_w 6.0)



(c) YMG010, 宮城県美川市 1997 年 6 月 25 日 (M_w 5.8) (b) TYM010, 富山県福光市 2007 年 3 月 25 日 (M_w 6.7)

図 4 最小二乗法と階層ベイズの比較例

4. まとめ

本研究では、ベイズ統計の一手法である階層ベイズ手法を用いることで、計測震度を対象に、地点固有の観測記録と周辺の観測記録を組み合わせることで地点固有の距離減衰式を構築した。また、エルゴード性の仮定が地震動予測、特に地点ごとの地盤増幅特性の予測に与える影響について、最小二乗法と階層ベイズモデルの結果と比較し、従来の距離減衰式は計測震度の中央値で最大 ± 1 程度のバイアス、偶然的不確実さの大きさについては、4/3 倍程度の過大評価になっていることを指摘した。今後の研究課題として、新しいデータが得られた際の地点固有項の変化について考察し、確率論的地震ハザード評価の高精度化に寄与していきたい。

参考文献

- [1] Anderson, J.G. and Brune, J.N.: Probabilistic Seismic Hazard Analysis without the Ergodic Assumption, *Seismological Research Letters*, 70(1), 19-28, 1991.
- [2] 糸井達哉・村上誠樹・関村直人：空間上に分布する複数施設を対象とする地震リスク評価のための地殻内地震の経験的地震動予測手法, *日本地震工学会論文集*, 15 (6), 6_126-6_141, 2015.
- [3] Wang, M and Takada, T.: A Bayesian Framework for Prediction of Seismic Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4), 2348-2364, 2009.
- [4] Lunn, D. et al.: *The BUGS Book: A Practical Introduction to Bayesian Analysis*, 2012.
- [5] Fukushima, Y., and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), 1990