

# 確率論的想定地震の貢献度を用いたハザードマップ

中島正人<sup>1</sup>・石川 裕<sup>2</sup>・奥村俊彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工修 財団法人電力中央研究所 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup> 正会員 博士 (工学) 清水建設株式会社 技術研究所 (〒 135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>3</sup> 正会員 工修 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒 100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2)

本論文では、亀田・石川により提案されている「確率論的想定地震」の概念のうち「地震活動域の貢献度」という独自の指標を用いて作成した二種類のハザードマップを示す。加えて、マップ作成時の計算格子大きさがマップの精度に与える影響について検討した結果を示す。活断層が密に存在する地域に対して計算したケーススタディーより、著者らが提案するハザードマップと地震動強度の再現期待値分布図を用いることで、地震動強度の再現期待値が等しいサイトでも、地震動周期、ハザードレベルにより支配的な地震が複雑に変化する様子およびその順位が定量的に表現、把握できることが分った。

**Key Words:** Seismic hazard map, probabilistic scenario earthquake, contribution factor of seismic sources, active fault data

## 1. はじめに

広域の地震ハザードを評価する場合、従来最大加速度や最大速度の再現期待値を用いたハザードマップが提案、用いられてきた (例えば河角マップ<sup>1)</sup>)。地震動の最大強度を指標とするハザードマップは地図が与える情報、意味が明瞭であり、耐震設計における地震荷重設定などで有用であるため、地震工学・地震学に関する最新の知見、情報を反映したマップ (例えば文献<sup>2)</sup>) が作成、更新されてきた。亀田・石川による「確率論的想定地震 (Probabilistic Scenario Earthquake: 以下 PSE と略)<sup>3)</sup>」の方法論は、確率論的地震ハザード解析と想定地震という従来別個の地震荷重評価法を統合したものであり、地震動強度のハザードレベルに対応してマグニチュード等の地震の諸元を算出できる。更にこの手法は「貢献度」という新しいパラメータを導入することで、サイトに対する各地震活動域の影響を定量的に示した形で複数の想定地震を設定できるという特徴を有する。

著者らは PSE を用いた地震ハザードマップの概念及び作成例を、文献<sup>3),4)</sup> で既に発表済みであり、サイトに影響を及ぼす地震像が地理的に変化していく様子、またその変化は地震動の周期帯域や注目ハザードレベルによる異なる様子をマップという形で直接捉えられることを独自に示している。なお米国でも、PSE と似た "Deaggregation (Disaggregation) of seismic hazard" (地震ハザード再分解) の概念<sup>5)</sup> をハザードマップ<sup>6)</sup> に応用する例が見られる。本論文では、マップ作成時の計

算格子の大きさがマップに与える影響評価、貢献度の順位別の地震活動域分布図を示すことで、PSE の貢献度を用いたマップの方法論について更に進めた検討を行う。

## 2. 確率論的想定地震のハザードマップの意義

前述の通り地震動強度を指標とするハザードマップは工学的に実用的であるが、地図上の各点で表現される値は、複数の地震からの影響が重畳された計算結果であるため、利用者は地図上から読み取れる値の地震動強度を与える地震の情報は入手し難い。

著者らは「注目地点に影響を及ぼす地震像及びその影響範囲を示すマップ」もハザードマップの一種と定義し、PSE の概念のうち、「貢献度」も地震ハザードを再分解した地理的分布表現の指標として有用と考えマップへの適用を図ってきた<sup>3),4)</sup>。あるハザードレベル  $p_0$  における、地震活動域  $k$  の貢献度  $C_k(p_0)$  は、その地震動が地震活動域  $k$  で発生したかを示す条件付確率で定義され、次式で計算される。

$$C_k(p_0) = \frac{w_k(p_0)}{\sum_k w_k(p_0)} \quad (1)$$

ここで  $w_k(p_0)$  は、地震活動域  $k$  で発生する地震の中で注目地点に  $y(p_0)$  以上の地震動をもたらす地震の年発生率を示す。

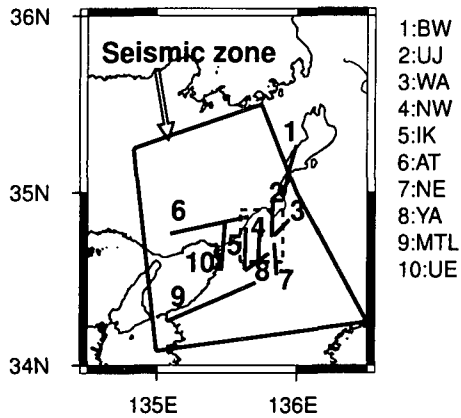


図1 主要な地震活動域と対象領域

### 3. 確率論的想定地震のハザードマップの作成条件

ここでは、PSEの貢献度を用いたハザードマップ作成条件について示す。なお作成条件の詳細については、文献<sup>4)</sup>の通りである。

#### (1) 地震ハザード解析手法

本解析ではマップ作成の方法論の検討を目的としているため、地震ハザード解析手法は、全ての地震の発生時系列は定常ポアソン過程に従うと仮定したポアソン型モデルを用いている。

#### (2) 地震活動域のモデル化

ここでは、各域内での地震の規模別発生頻度はGutenberg-Richter式に従い、発生位置が一様ランダムに分布すると仮定した複数の多角形地震域モデル、駿河・南海トラフを震源とする固有規模の東海地震モデルと南海地震モデル、松田により整理された「起震断層<sup>7)</sup>」を基に、近畿、中部、四国の活断層に大阪の上町断層帯を加えた活断層データよりモデル化した活断層モデルの3種類の地震活動域モデルを用いた。今回の対象領域は、その多角形地震域のうち最大マグニチュード $M_u=7.5$ の地震域(以下、地震域)内に位置する。対象領域および近傍の主要な活断層、地震域の位置関係を図1に示す。

#### (3) 地震動距離減衰式

地震動の距離減衰式は、安中らによる加速度応答スペクトルについての式<sup>8)</sup>を用いた。ここでは代表的な周期として0.1, 1.0secの2ケースについて検討を行う。

#### (4) 対象地域・対象ハザードレベル

マップ作成のための対象範囲は、活断層の影響を検討するために比較的狭い領域に限定し、東経135.6°~135.9°、北緯34.6°~34.9°(大きさ:0.3°×0.3°)とした(図1内の点線で囲んだ領域)。マップは領域内の各サイトにおいて計算された地震ハザード解析結果より、

表1 計算格子の大きさ

	格子大きさ (km 換算)	計算点数
ケース1	0.006° (0.6km×0.7km)	51 <sup>2</sup>
ケース2	0.012° (1.1km×1.3km)	26 <sup>2</sup>
ケース3	0.024° (2.2km×2.7km)	13 <sup>2</sup>
ケース4	0.048° (4.5km×5.3km)	7 <sup>2</sup>
ケース5	0.096° (8.9km×10.6km)	4 <sup>2</sup>

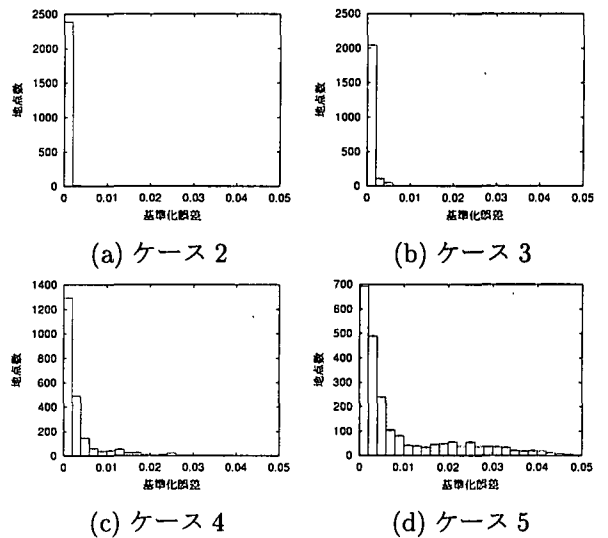


図2 ケース1の値で標準化された誤差の頻度分布

任意のハザードレベルにおいて作成可能であるが、本論文では主にハザードレベルが再現期間1000年(年超過確率 $p_0 = 10^{-3}$ )について議論することとする。

## 4. 計算結果

### (1) 計算格子大きさの検討

ハザードマップ作成のための適切な計算格子大きさを探索するため、格子大きさがマップの精度に与える影響を定量的に評価する。

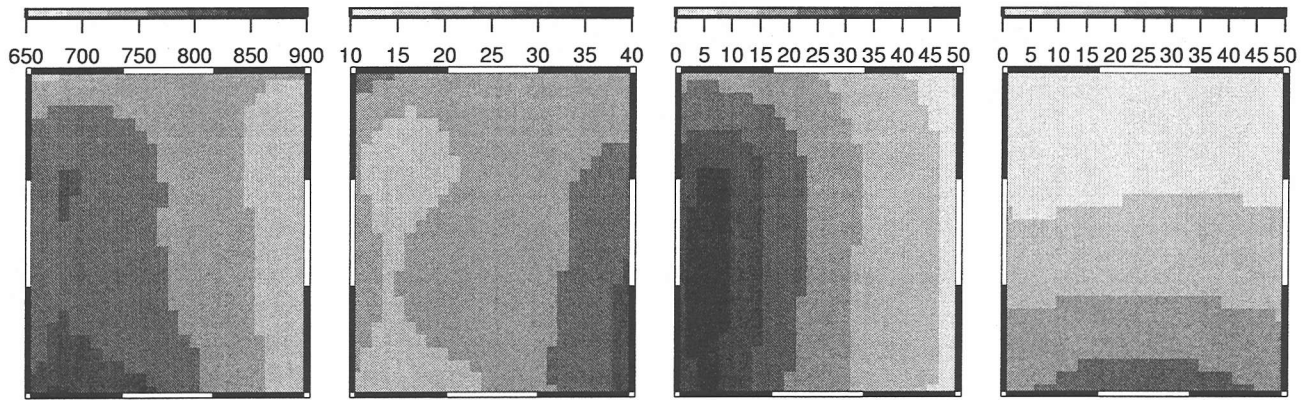
#### a) 評価手順

STEP1:格子大きさは表1に示す5ケースを想定する。表1におけるケース $k$ におけるマップ上各点 $(i, j)$ の応答加速度期待値を $z^k(i, j)$ ( $k=1, \dots, 5$ )と表す。格子大きさ0.006°での応答加速度期待値の値 $z^1(i, j)$ を基準値とする

STEP2:ケース2~5毎に、ケース1では計算されているが、その他のケースでは求められていない点の応答加速度期待値を双3次スプライン法で0.006°毎に補間推定する。ケース $k$ で点 $(i, j)$ に対して求められた推定値を $\hat{z}^k(i, j)$ と表す

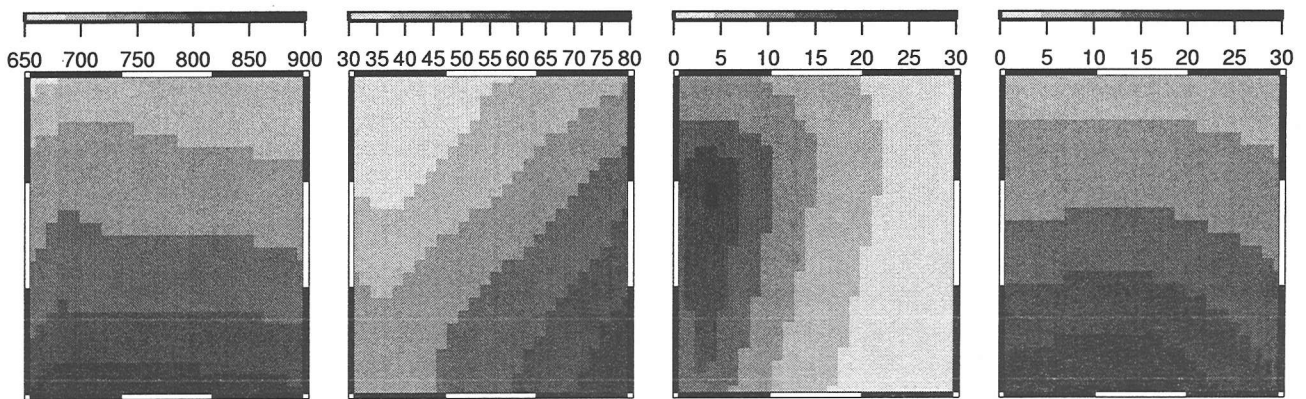
STEP3:一つのサイトあたりの誤差 $X_k(i, j)$ を以下のよう定義し、各ケース毎に計算する

$$X_k(i, j) = |z^1(i, j) - \hat{z}^k(i, j)| \quad (2)$$



(a) 応答加速度期待値分布 (b) ランダム地震域 (c) 生駒断層帯 (d) MTL 和泉-金剛断層帯

図4 応答加速度期待値分布図(a)[単位:Gal]と貢献度分布図(b)(c)(d)[単位:%] (周期:0.1sec, 再現期間:1000年)



(a) 応答加速度期待値分布 (b) 東海・南海地震 (c) 生駒断層帯 (d) MTL 和泉-金剛断層帯

図5 応答加速度期待値分布図(a)[単位:Gal]と貢献度分布図(b)(c)(d)[単位:%] (周期:1.0sec, 再現期間:1000年)

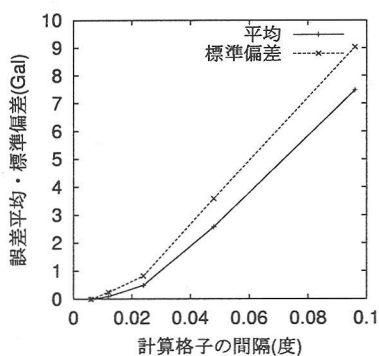


図3 誤差評価結果

## b) 検討結果

図2は領域内での  $X_k(i, j)$  を  $z^1(i, j)$  で基準化した値の頻度分布を、図3は  $X_k(i, j)$  の平均と標準偏差をそれぞれ描いたものである。なお、補間精度が保たれる領域での比較を行うため、ケースごとに対象点数は異なっている。検討結果より、誤差は格子が大きくなると共に単調に増加することが分かるが、ケース2と3までは誤差平均は比較的小さいこと、ケース2は誤差平均値・標

準偏差、基準化した誤差頻度分布からケース1と極めて近い結果とみなせることより、本解析ではケース2の格子大きさ  $0.012^\circ \times 0.012^\circ$  (約  $1.1\text{km} \times 1.3\text{km}$ ) で計算する。

## (2) 地震動強度期待値マップ

図4(a)、図5(a)に再現期間1000年の場合の応答加速度期待値分布図を示す。周期0.1secの場合(図4(a))、領域の北西、南西位置において期待値が高い。応答加速度は東側に移ると共に小さくなり、西側領域内ではサイト位置に依り応答加速度期待値も複雑に変化している様子がわかる。周期1.0secの場合(図5(a))、期待値は領域の北側で小さく南のサイトになるにつれて大きくなる。同じハザードレベルでも対象周期が違うと、マップ上の値の分布形が異なることがわかる。

## (3) 地震活動域の貢献度分布マップ

図4(b)~(d)に周期0.1secにおける地震域、生駒断層帯、MTL和泉-金剛断層帯の貢献度の分布図を示す。周期0.1secでは、地震域の貢献度が領域内全体で比較的大きいが、生駒断層帯など一部の活断層も自らの近

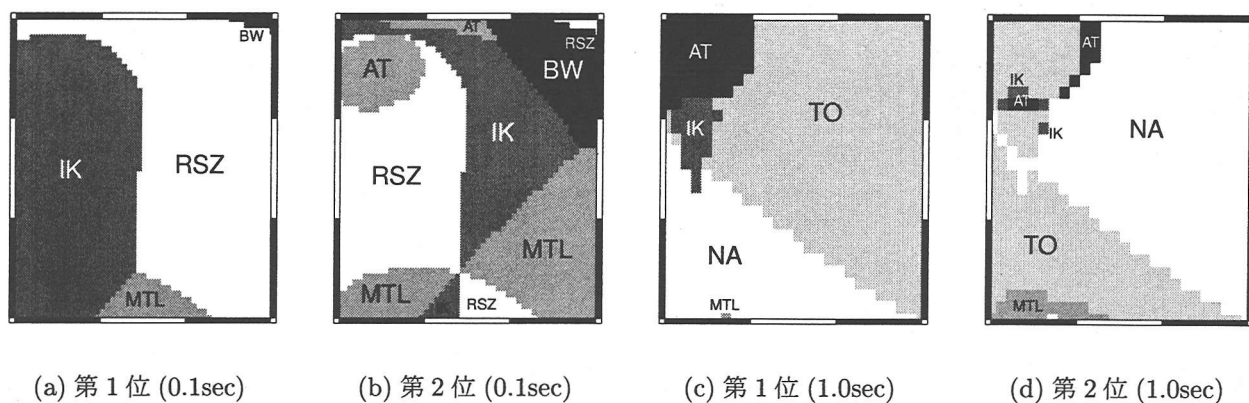


図6 貢献度順位別の地震活動域分布図（再現期間 1000 年）

傍では地震域の貢献度よりも大きく支配的であることがわかる。図5(b)~(d)に周期1.0secにおける南海・東海地震、生駒断層帯、MTL和泉-金剛断層帯の貢献度の分布図を示す。周期1.0secでは、マグニチュードが大きい南海・東海地震、MTL和泉-金剛断層帯が支配的である。地震動期待値マップからは周期により期待値の分布形が異なる様子が把握されたが、この原因は、地震ハザード解析の結果としての期待値は同じでも支配的な地震が異なるためであり、サイト毎に支配的な地震の分布を理解するのに貢献度分布マップが有用であることを示している。

#### (4) 貢献度の順位別の地震活動域分布マップ

ハザードレベルが再現期間1000年で、貢献度値が第1位、第2位となる地震活動域の分布を図6に示す。周期0.1secの場合、地震域(RSZ)、生駒断層帯(IK)、MTL和泉-金剛断層帯(MTL)、琵琶湖西岸断層帯(BW)、有馬-高槻断層帯(AT)が支配的であり、特に第2位となる地震活動域はサイト位置により複雑に変化している。周期1.0secの場合、対象地域内の大部分のサイトで東海地震(TO)・南海地震(NA)が貢献度値第1位、第2位の組となり、北西部で、生駒断層帯、有馬-高槻断層帯、南西部でMTL和泉-金剛断層帯が支配的な小領域が点在することがわかる。

#### 5. おわりに

本論文では、PSEの貢献度を大縮尺のハザードマップの指標として応用する方法論についての検討結果を示した。作成例より、活断層が密に存在する地域の地震ハザードも、適切な大きさの格子で計算することで、PSEの貢献度を用いてマップの形で評価可能であること、地震動期待値マップと二種類の地震活動域貢献度マップを併用することで、再現期待値をもたらす地震活動域の貢献度の値及び順位がサイト位置により異なる様子を示せる特徴があることを示した。今後、活断層調査等より活動間隔など不確実性が大きいパラメータの信頼性を

高めることと同時に、地震ハザードモデルのパラメータ等が提案するマップに及ぼす影響について更に詳細な検討が重要と考えられる。

謝辞：本研究の方法論は、京都大学と清水建設株式会社の共同研究から得られ、本論文の内容は財団法人電力中央研究所と清水建設株式会社の共同研究で発展させたものである。本研究の遂行にあたり、京都大学防災研究所 亀田弘行教授には多大なご指導を頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)Kawasumi,H.: Measures of Earthquakes Danger and Expectancy of Maximum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity, *Bull.Earth.Res.Inst.*, Univ of Tokyo, Vol.29, pp.469-482, 1951.
- 2) 損害保険料率算定会：活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度評価の研究～地震ハザードマップの提案～，地震保険調査研究 47, 2000.
- 3) 亀田弘行・石川 裕・奥村俊彦・中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集 No.577/I-41,pp.75-87, 1997.
- 4)Nakajima,M, H.Kameda, Y.Ishikawa and T.Okumura: Seismic Hazard Map Using Contribution Factors of Seismic Sources, No.1905 *Proc.of 12th WCEE*, 2000.
- 5)McGuire, R.K.: Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995.
- 6)Harmsen, S., D.Perkins and A.Frankel: Deaggregation of Probabilistic Ground Motions in the Central and Eastern United States, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.89, No.1, pp.1-13, 1999.
- 7) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図，地震研究所彙報, Vol.65, pp.290-319, 1990.
- 8) 安中 正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大加速度及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演概要集, pp.161-164, 1997.