

地震観測記録に基づく地点特性を考慮した 日本列島の地表面地震ハザードマップ

安中正¹・大金義明²

¹東電設計株式会社技術開発本部地震・地震動解析専門職
(〒110-0015東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail: annaka@tepsco.co.jp

²東京海上リスクコンサルティング株式会社研究開発グループ主任研究員
(〒100-0005東京都千代田区丸の内1-2-1)

E-mail: y.oogane@tokiorisk.co.jp

地表面地震ハザードマップの作成において地点特性の評価は非常に重要である。地点特性には表層地盤の特性だけでなく深部地下構造の特性も影響している。K-NETなど日本の密な観測網で得られている地震観測記録を用い、震源特性を考慮して、減衰5%の加速度応答スペクトルに対する地点特性を決定した。その結果から、代表的な周期（0.2秒と1.0秒）の応答スペクトルに対する地点特性の全国的な分布図（コンター図）を作成した。そして、確率論的地震ハザード解析用地震発生モデルを用い、地震観測記録に基づく地点特性を考慮して、日本列島の地表面における地震ハザードマップ（再現期間50年と1000年）を作成した。得られたマップは地盤を線形とした場合の結果である。

Key Words : Seismic hazard map, site effect, response spectrum, seismic source zone model

1. まえがき

確率論的地震ハザード解析は、発生する地震の位置、規模、時期及び地震が発生した場合に生じる地震動特性に関する確率モデルを統合して、特定の地点で特定の期間に特定の地震動特性が生じる確率を決定するための方法である。地震ハザード解析の結果は、1地点では地震ハザード曲線として、面的には各種のハザードマップとして表示される。ハザードマップは、地震工学的基盤など共通の仮想的な地盤に対して表示される例が多いが、より実用的には地表面でのマップとして表示されることが望ましいと考えられる。

地表面でのハザード評価において地点特性（地点下の地盤条件による揺れやすさの違い）の評価は非常に重要である。地点特性には表層地盤の特性だけでなく深部地下構造の特性も影響する。

地震調査委員会¹⁾は、微地形区分に基づく表層地盤による最大速度の増幅率を考慮することにより地表面のハザードマップを作成している。微地形区分による評価は、最大速度のように比較的長周期側の指標に関してはかなり有効であるが、最大加速度などのようなより短周期側の指標に対しての適用性には限界があると考えられる。

より直接的に地点特性を評価する方法として、地

震観測記録を用い基準となる推定式からの偏りを評価する方法^{2) 3)}があり、浅い地盤構造の影響と深い地盤構造の影響を合わせた地点特性を簡便に精度良く求めることができる。1995年兵庫県南部地震以後に防災科学技術研究所により設置された高密度の強震観測網（強震ネット(K-NET)⁴⁾と基盤強震観測網(KiK-NET))はこうした検討を日本全国で行うことを可能にした。

本研究では、日本列島の地表面における地震ハザードマップの作成を目的として、日本列島の高密度な強震観測網を用い、減衰5%の加速度応答スペクトルに対する地点特性を決定し、代表的な周期（1.0秒と0.2秒）の応答スペクトルに対する地点特性の全国的な分布図（コンター図）を作成した。そして、その結果を用いて再現期間50年と1000年の地表面における地震ハザードマップを作成した。

2. 地点特性の評価

(1) データ

K-NETとKiK-NET、気象庁95型震度計による1996年6月から2002年12月までのマグニチュード(M_J)5.0以上震源深さ200km以下の地震に対する記録と2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震(M_J

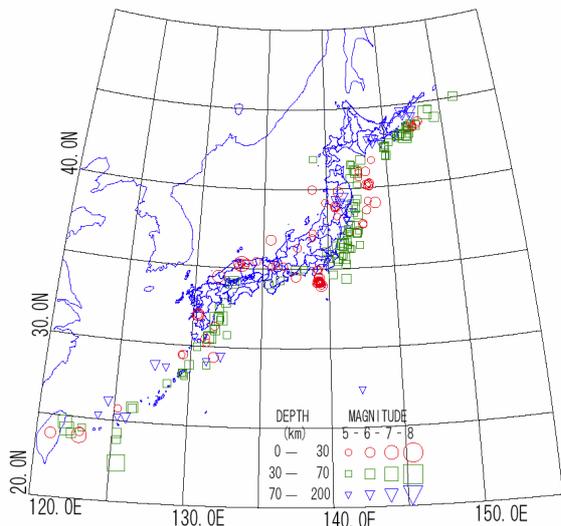


図-1 記録を整理した地震の震央分布

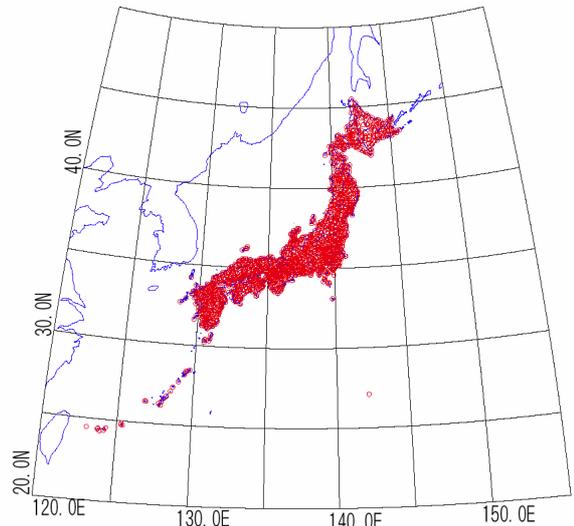


図-2 記録を整理した観測点の分布

7.0) に対する記録を収集・整理した。

全体で、2018地点 (K-NETが1034地点, KiK-NETが658地点, JMAが326地点) に対し、251地震24,655組の記録が得られている。251地震の中で、マグニチュードの比較的大きな17個の地震 (M_j 6.5程度以上を目安) に対しては、遠地実体波による解析⁵⁾や余震分布、既往の研究結果等に基づき地震断層面を設定し、最短距離を評価した。残りの地震は点震源とした。地震の分布を図-1に、観測点の分布を図-2に、最短距離と最大加速度 (水平2成分の平均) に対するデータの分布を図-3に示す。観測波形から減衰5%の加速度応答スペクトルを計算し、水平2成分の平均をデータとした。KiK-NETの観測点については地表の記録のみを用いた。

(2) 地点特性の評価方法

地点特性を簡便に評価する手法として、観測記録の応答スペクトルと経験式による応答スペクトルの幾何平均を用いる方法²⁾があるが、より正確に評価するためには震源特性の違いも併せて考慮する必要がある³⁾と考えられる。

基準とする経験式として気象庁 87 型強震計記録に基づく最短距離式⁹⁾を用いた。減衰 5%の加速度応答スペクトル推定式の形は次の通りである。

$$\log SA(T) = Cm(T)M + Ch(T)H_c - Cd(T)\log(R + 0.334 \exp(0.653M)) + Co(T) \quad (1)$$

ここで、 T は周期、 $SA(T)$ は水平 2 成分の平均応答スペクトル、 M は気象庁マグニチュード、 $H_c = H$ ($H \leq 100\text{km}$) で $H_c = 100$ ($100\text{km} < H < 200\text{km}$)、 H は断層面中心の深さ、 R は断層面までの最短距離である。定数 Co は S 波速度が 400 m/s 程度の工学的基盤の平均的な値として設定されている。検討に用いられたデータの範囲は、マグニチュード 5.0 以上、震源深さ 200km 以下、最短距離 500km 以下であり、1988 年 8 月から 1996 年 3 月までの 388 地震 77 地点 2085 記録が用いられている。

震源特性を考慮しない方法では、地点特性 (地点補正係数 β) は次の式により評価される。

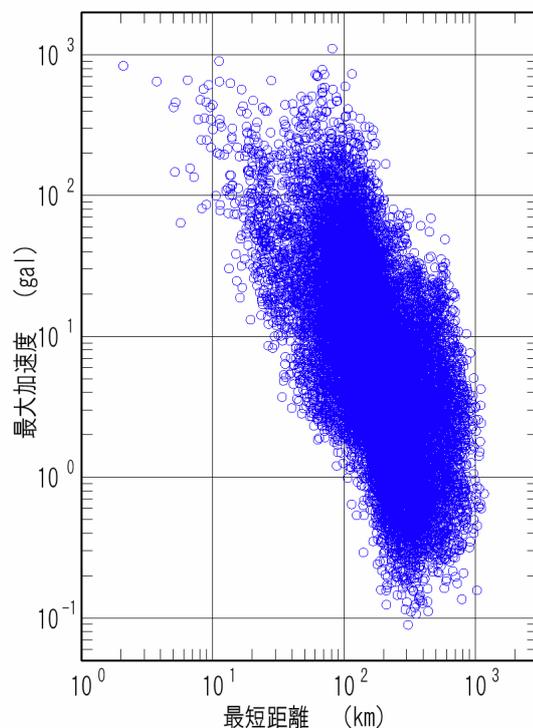


図-3 最大加速度と最短距離に関するデータの分布

$$\beta_j(T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log(O_{ij}(T) / C_{ij}(T))) \quad (2)$$

ここで、 $O_{ij}(T)$ と $C_{ij}(T)$ は地震 i 、地点 j における観測記録による応答スペクトルと経験式による応答スペクトルである。

震源特性を考慮する方法では、式(2)の代わりに次の式が用いられる。

$$\alpha_i(T) + \beta_j(T) = \log(O_{ij}(T) / C_{ij}(T)) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_i(T)$ は地震 i の震源特性 (震源補正係数) である。震源特性を考慮することは、平均的な地震により生じる地震動強さに対する個々の地震の地震動強さの全般的な偏りの影響を除去して地点特性を評価することである。特異値分解法を用いた最小 2 乗法でこの式を解く際に

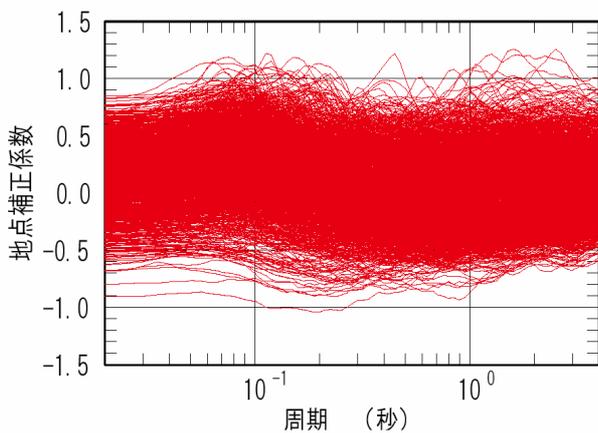


図-4 地点特性（地点補正係数 β ）の分布

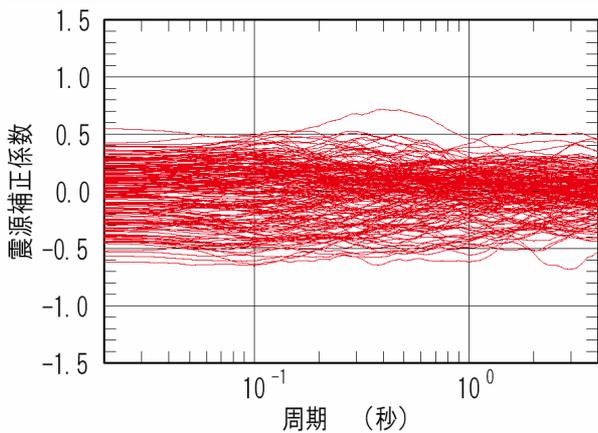


図-5 震源特性（震源補正係数 α ）の分布

$$\sum_{i=1}^{N_{eq}} \alpha_i(T) = 0 \quad (4)$$

を拘束条件とした。 N_{eq} は考慮する地震数である。

(3) 評価結果

震源特性を考慮する方法を用い、3個以上の地震に対して記録が得られている1660地点の地点特性とそれらの地点で記録が得られている250地震の震源特性を決定した。解析には最短距離が500km以下の観測記録22,897組を用いた。また、式(4)の拘束条件では20地点以上で記録が得られている179地震を用いた。比較のために、震源特性を考慮しない方法でも1660地点の地点特性を決定した。

1660地点の地点特性の重ねがきを図-4に、拘束条件で用いた179地震の震源特性の重ねがきを図-5に示す。地点特性は-0.7から+0.9程度の範囲に、震源特性は-0.5から+0.5程度の範囲に分布している。

周期1.0秒の応答スペクトルの場合に対して、震源特性を考慮した場合と考慮しない場合の地点特性の比較を図-6に示す。大きく違っているのはすべて琉球列島の観測点であり、地点特性と震源特性の分離がうまくいっていない可能性がある。それらを除くと両者の違いはあまり小さくなく、 ± 0.2 程度の範囲にほぼおさまっている。

震源特性を考慮した場合と考慮しない場合の地点特性のばらつき（対数標準偏差）の分布の違いを図-7に示す。15個以上の地震に対して記録が得られ

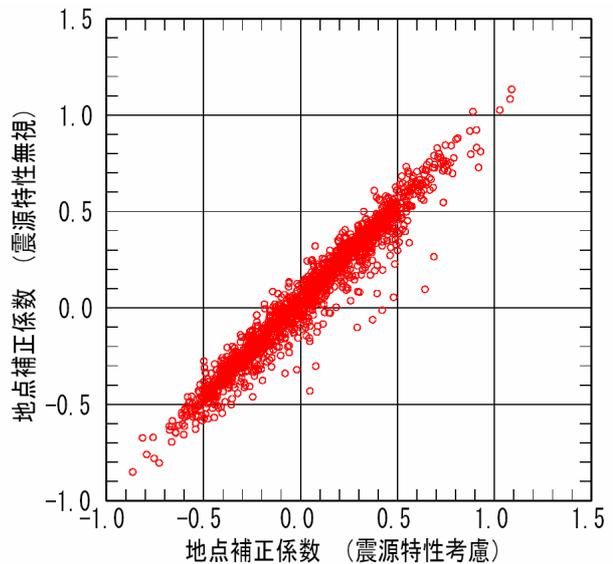


図-6 周期1.0秒に対する地点特性の比較

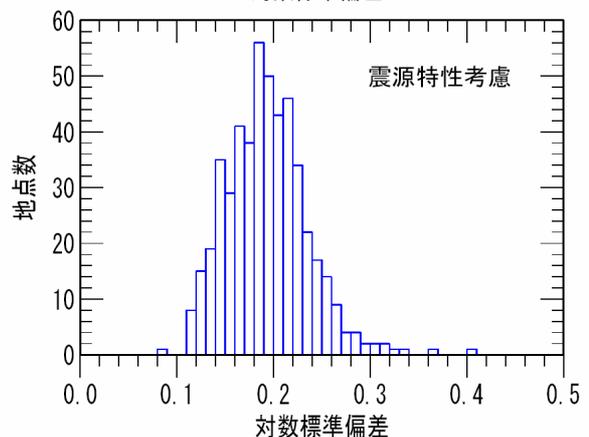
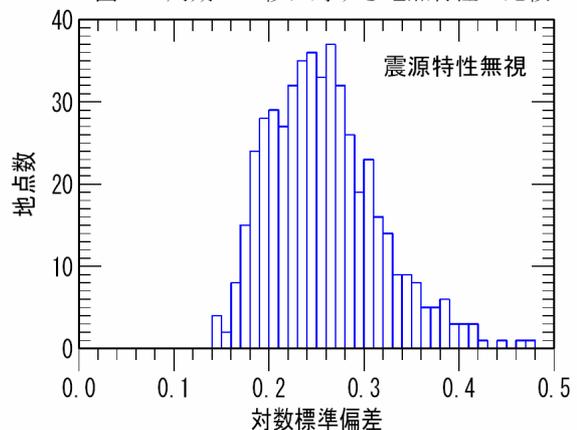


図-7 周期1.0秒に対する地点特性のばらつきの比較

ている479地点のばらつきの頻度分布を比較している。震源特性を考慮した場合のばらつきが0.2程度を中心に分布しているのに対し、震源特性を考慮しない場合は全般に大きくなり0.27程度を中心に分布している。

以上の結果は、震源特性を考慮することにより地点特性のばらつきはかなり小さくなるが、地点特性の値自体はあまり代わらないことを示している。

図-4の結果から代表的な周期として1.0秒と0.2秒を選び、地点特性の地理的分布図を作成した。周期1.0秒は長周期側の応答スペクトルの大きさを代表

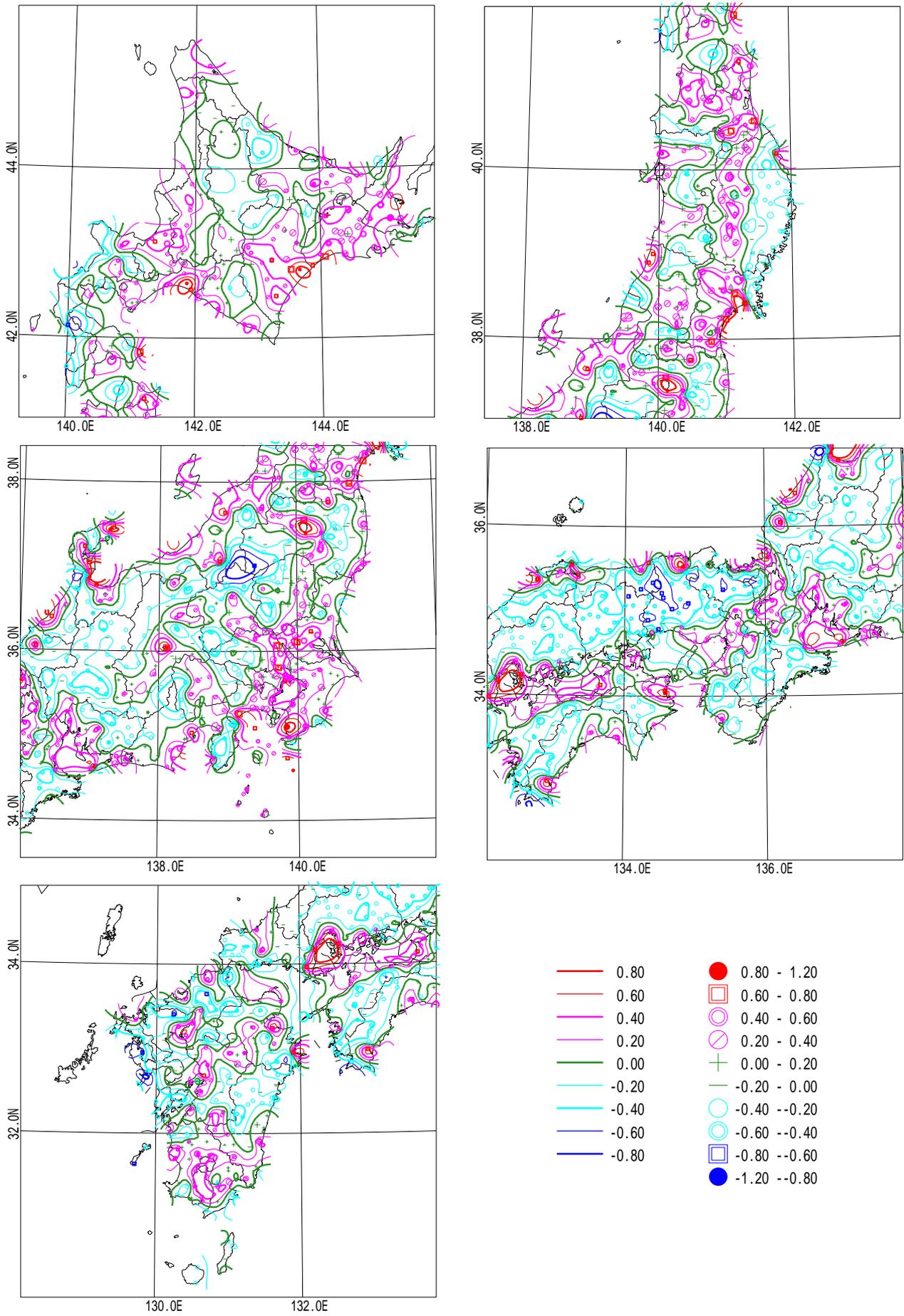


図-8 周期 1.0 秒の応答スペクトルに対する地点特性 (β) の分布とコンター

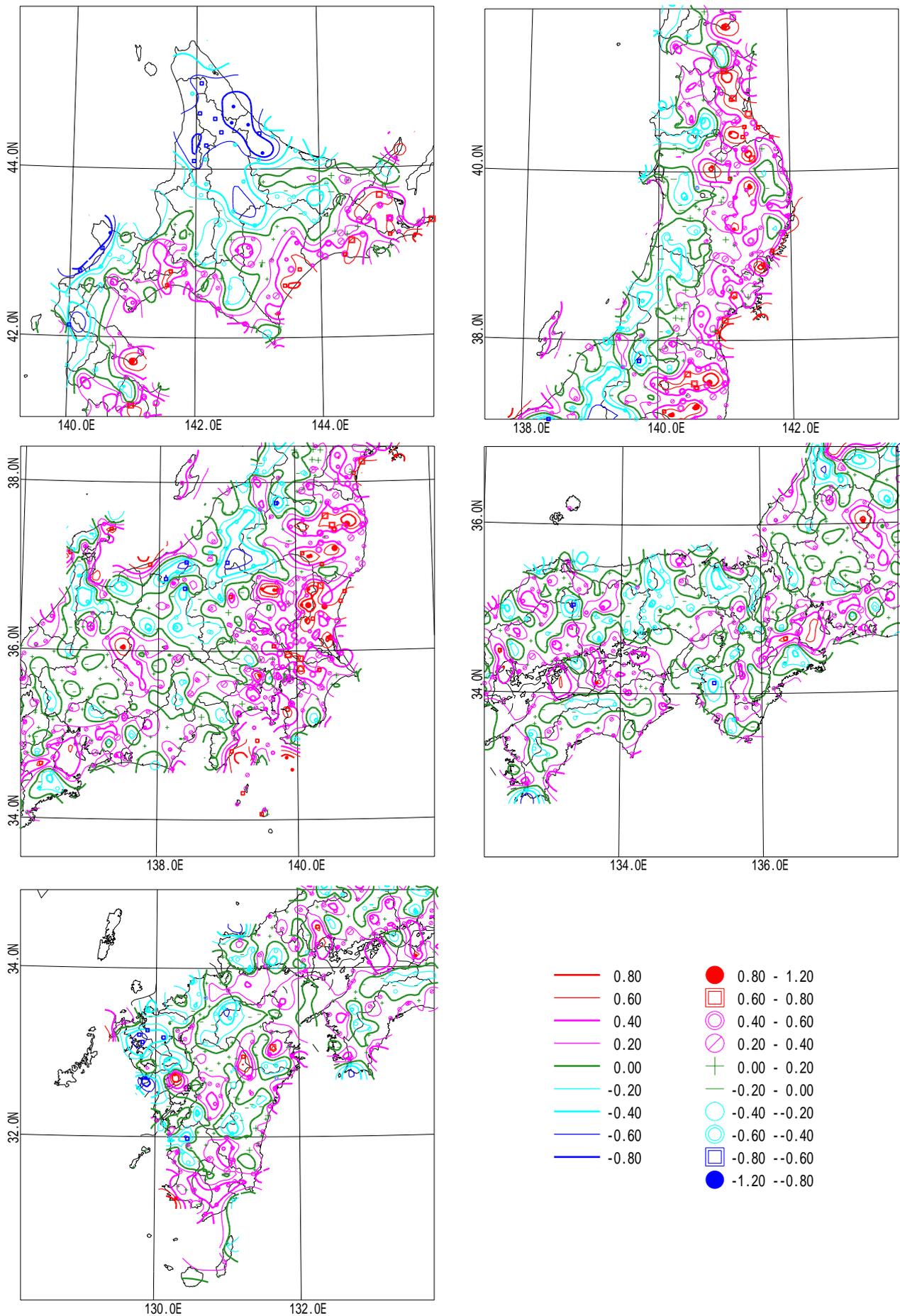


図-9 周期 0.2 秒の応答スペクトルに対する地点特性 (β) の分布とコンター

する周期として選択した。地震被害は周期1.0秒程度の地震動の強さと密接に関連していると考えられている⁷⁾。また、周期0.2秒は加速度応答スペクトルが最も大きくなる周期帯を代表する周期として選択した。結果を図-8（周期1.0秒）及び図-9（周期0.2秒）に示す。各地点の地点特性を範囲により記号を分けて表示するとともに、それらを平滑化してコンター化した線を示している。平滑化では、格子間隔5kmの格子点における値を周辺地点の地点特性からペナルティ法により推定した。コンターにより各地点の地点特性はほぼ表現できている。

周期1.0秒（図-8）では、地点特性（ β ）と地形との対応が明瞭に見られ、山地では β が小さく、平野部や盆地で β が大きい傾向がある。例えば、北海道では中央の北見山地や石狩山地、日高山脈などに β の小さい領域があり、十勝平野や石狩平野などに β の大きい領域がある。東北でも、北上高地や奥羽山脈などに β の小さい領域があり、仙台平野や北上盆地などに β の大きい領域がある。関東・中部でも、越後山脈や関東山地、飛騨山脈などに β の小さい領域があり、関東平野や濃尾平野などに β の大きい領域がある。近畿・中国・四国でも、紀伊山地や丹波山地、中国山地、四国山地などに β の小さい領域があり、大阪平野や瀬戸内海沿岸沿いなどに β の大きい領域がある。九州でも、筑紫山地や九州山地に β の小さい領域があり、筑紫平野や熊本平野などに β の大きい領域がある。

以上のように周期1.0秒では地点特性と地形との対応が明瞭であるが、周期0.2秒（図-9）の地点特性の傾向は周期1.0秒とはかなり違っている。例えば、北海道、東北、関東では全般的に太平洋側の地域で β が大きく、日本海側の地域で β が小さい傾向が見られる。中部・近畿・中国では、周期1.0秒で β が小さい山地の領域の中にも、 β が大きい領域が見られる。また、全般に周期1.0秒よりも周期0.2秒の方が地点特性の変化の波長が短いように見える。周期1.0秒と0.2秒の傾向の違いは、周期1.0秒の地点特性が主に深部地下構造の特性に支配されているのに対し、周期0.2秒の地点特性が表層地盤と深部地下構造の両方の影響を受けているためではないかと考えられる。

本研究で得られた地点特性の分布図は地震観測記録から直接得られたものであり、微地形区分のような間接的な方法よりも精度が高いと考えられる。また、微地形区分のような方法が適用しにくい周期帯に対しても適用可能である。

3. 地表面地震ハザードマップの作成

(1) 地震発生モデル

地震ハザードの計算には、安中・矢代⁸⁾⁹⁾による日本列島全体の地震発生モデルに基づき、その後の地震調査推進本部地震調査委員会による内陸活断層の評価¹⁰⁾を考慮して一部改訂したモデルを用いた。

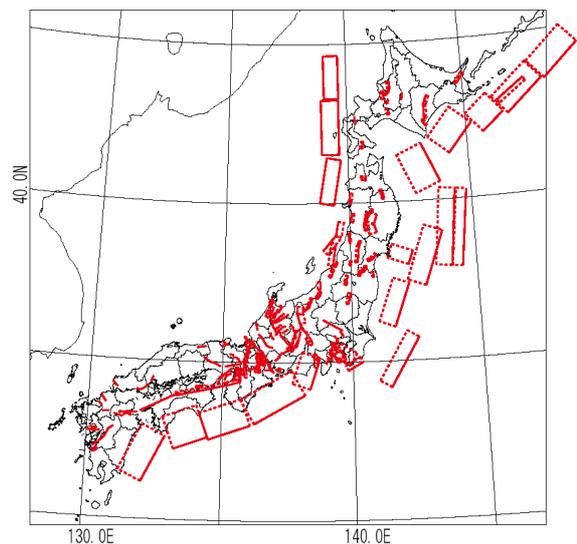


図-10 大地震発生活動域の分布（改訂モデル）

地震活動のモデル化では、2つのタイプの活動域を用いている。1つは大地震（固有地震）を発生する活動域（大地震発生活動域）、もう1つは残りの中小地震を発生する活動域（背景的地震発生活動域）である。2つのタイプの活動域は、地震調査委員会¹⁾による「震源断層を特定した地震」と「震源断層を予め特定しにくい地震」に対応している。

大地震発生活動域は歴史地震データと活断層データに基づき設定されており、活動域の位置と形状、発生する地震のマグニチュード、発生頻度がモデル化されている。近年の評価を考慮して一部改訂したモデルの大地震発生活動域の分布を図-10に示す。以前のモデルとの大きな違いは、内陸活断層に対応した活動域において、地震調査委員会により評価された傾斜角を考慮していることである。また、複数のセグメントから構成されていて地震毎に連動するセグメントの組み合わせが変化するモデル（カスケードモデル（直列モデル））を、以前のモデルでは南海トラフ沿いの地震だけに適用していたのを、適用対象を広げ、宮城県沖の地震や相模トラフ沿いの地震、糸魚川—静岡構造線断層帯（中部・北部）の地震などにも適用した。

背景的地震発生活動域は、太平洋プレートの上面、太平洋プレートの二重深発地震面の下面、フィリピン海プレート上面、陸側プレート内の地震発生層に沿って連続的に設定されており、地震活動度の違いに基づき区分されている。区分された各活動域では、Gutenberg-Richterの関係式に基づき、地震活動度（年地震発生数とb値）、最大マグニチュードが設定されている。背景的地震発生活動域については安中・矢代⁸⁾⁹⁾によるモデルをそのまま用いた。

(2) 地表面地震ハザードマップ

日本列島（琉球列島を除く）を経度方向に15分間隔、緯度方向に10分間隔で分割した1183格子について地震観測記録に基づく地点特性を考慮して周期1.0秒と0.2秒の応答スペクトル加速度に対する地震

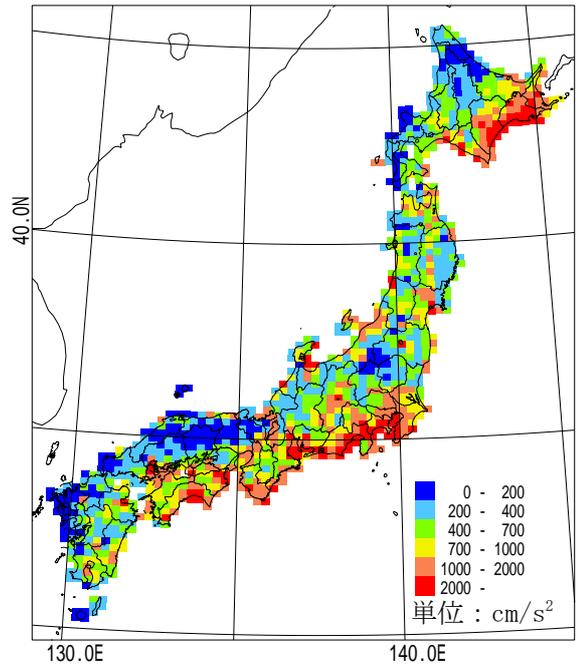
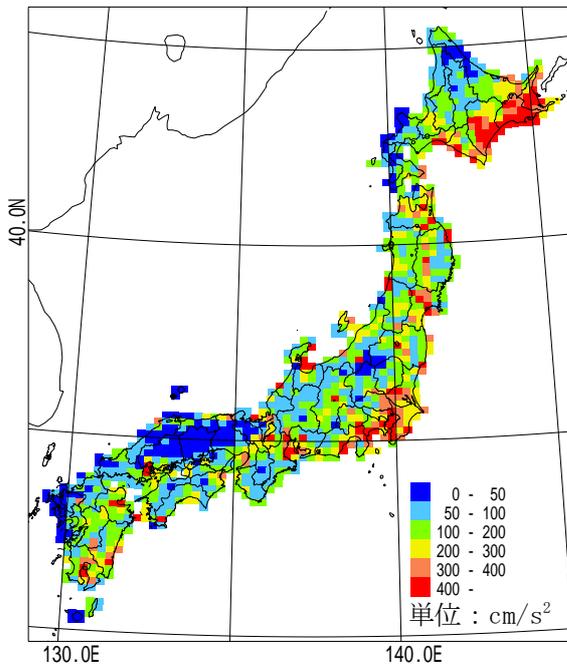


図-11 周期1.0秒の応答スペクトルに対する地表面ハザードマップ（左：再現期間50年，右：再現期間1000年）

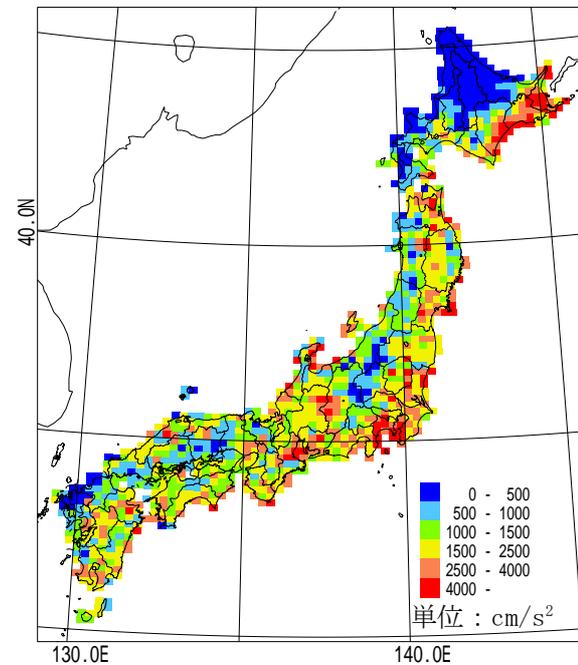
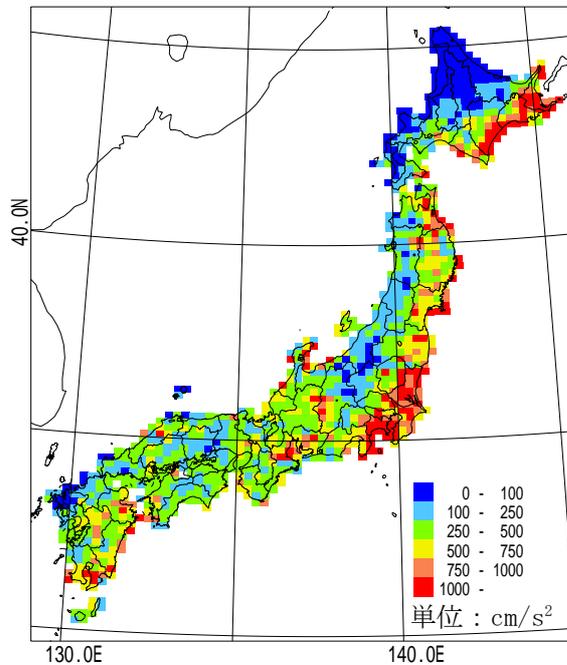


図-12 周期0.2秒の応答スペクトルに対する地表面ハザードマップ（左：再現期間50年，右：再現期間1000年）

ハザード曲線を計算した。

地震発生モデルはポアソン（長期間の平均）とした。応答スペクトル推定式は、式(1)に各格子中央点での地点補正を考慮して格子毎に設定した。各格子中央点での地点補正は図-8と図-9のコンターから補完した。地点補正は空間的にある程度滑らかに変化しているのでこのような方法により各地域の平均的な特性は評価できると考えられる。中央値に対するばらつきは推定式作成時の値⁶⁾をそのまま用いた。

各計算地点の地震ハザード曲線から再現期間50年と1000年の応答スペクトル加速度を求め、地表面地震ハザードマップを作成した結果を図-11（周期1.0秒）及び図-12（周期0.2秒）に示す。50年と1000年の再現期間は、コンクリート標準示方書¹¹⁾において、

レベル1地震動は再現期間50年程度、レベル2地震動は再現期間1000年程度としていることを考慮して選定した。周期1.0秒（図-11）では、再現期間50年で400cm/s²程度以上、再現期間1000年で2000cm/s²程度以上が全国的に見て高い領域となっている。平均的な値（中央値）は再現期間50年で150cm/s²程度、再現期間1000年で500cm/s²程度である。

周期0.2秒（図-12）では、再現期間50年で1000cm/s²程度以上、再現期間1000年で4000cm/s²程度以上が全国的に見て高い領域となっている。平均的な値（中央値）は再現期間50年で400cm/s²程度、再現期間1000年で1500cm/s²程度である。

周期1.0秒でも周期0.2秒でも、ハザードマップには、地震活動の影響だけでなく地点特性の影響もか

なり強く反映されている。

図-11及び図-12のマップで注意する必要があるのは、これらの結果が地盤を線形と仮定して得られたものであるということであり、表層地盤の非線形性の影響を別に考慮する必要があるということである。これは、地点特性の評価に用いた地震動のレベルが、一部を除いて、それほど高くないためであり、観測記録から得られた地点特性は地盤の非線形性が顕著でない状態のものと考えられるからである。図-11及び図-12のマップを特定地点で使用する場合には、地盤の非線形性を考慮する必要がある深さ（工学的基盤）まで地盤をモデル化し、線形地盤モデルを用いて地表面での結果を工学的基盤面まで引き戻し、引き戻した結果を用いて非線形地盤モデルにより応答計算を行うことにより、地盤非線形性の影響を評価することが必要である。

4. あとがき

地表面での地震ハザードマップの作成を目的として、K-NETなど日本の密な観測網で得られている地震観測記録を用い、震源特性を考慮して、減衰5%の加速度応答スペクトルに対する日本全国1660地点の地点特性を決定した。地点特性には表層地盤の特性だけでなく深部地下構造の特性も含まれている。得られた結果から、代表的な周期（0.2秒と1.0秒）の応答スペクトルに対する地点特性の全国的な分布図（コンター図）を作成した。そして、地震発生モデルを用い、地震観測記録に基づく地点特性を考慮して、日本列島の地表面における周期1.0秒と0.2秒の応答スペクトル加速度に対する地震ハザードマップ（再現期間50年と1000年）を作成した。得られたマップは地盤を線形とした場合の結果である。

本研究では、地震観測記録に基づく応答スペクトルに対する地点特性の全国的な分布図（コンター図）を初めて提示したが、部分的には特異な地点の特性に影響されている領域が存在する可能性が残されている。また、減衰構造の不均質性が影響している可能性も考えられる。今後、より詳細に分布傾向の妥当性の検討や微地形区分などとの関係の検討を行う必要がある。また、今回は評価しただけになっ

ている震源特性の地域性の検討、それを考慮した地震ハザード解析手法の高精度化についてもさらに検討する必要があると考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETとKiK-NETの記録、気象庁のJMA95型震度計の記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 地震調査推進本部地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会：確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定—北日本）, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>.
- 2) Kurita, T., M. Kawahara, T. Annaka, and S. Takahashi: Evaluation of local site effects in the Kanto district based on observation records, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Paper no.224, 2000.
- 3) Annaka, T.: Characteristics of the source and site effects on acceleration spectra in Japan, Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, Paper no.187, 2002.
- 4) Kinoshita, S.: Kyoshin-Net (K-NET), Seismological Research Letters, 69(4), 309-332, 1998.
- 5) 東大地震研情報センター：EIC地震学ノート, http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/index.html.
- 6) 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地動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論文集, 161-164, 1997.
- 7) 林康裕, 川瀬博：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 481, 37-46, 1996.
- 8) 安中正, 矢代晴実：大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム, 489-494, 1998.
- 9) Annaka, T. and H. Yashiro: Temporal dependence of seismic hazard in Japan Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Paper no.316, 2000.
- 10) 地震調査推進本部地震調査委員会：活断層の評価, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html>.
- 11) 土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[耐震性能照査編], 2002.

(2003. 6. 30 受付)

PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD MAPS AT GROUND SURFACE IN JAPAN BASED ON SITE EFFECTS ESTIMATED FROM OBSERVED RECORDS

Tadashi ANNAKA and Yoshiaki OGANE

Site effect is very important for evaluating seismic hazard at ground surface. Deep soil structure as well as shallow soil structure affects site effect. Site and source effects on 5 % damped acceleration response spectra were simultaneously determined for a reference empirical attenuation equation by the regression analysis using the records obtained by dense observation networks in Japan. The distributions of site effects are represented by contour maps. Using the obtained results we produced seismic hazard maps at ground surface for 1.0 sec and 0.2 sec spectral accelerations at 63.2 % probabilities of exceedance in 50 and 1000 years.