

地表面の地震ハザード評価に関する検討

龍神 弘明・嶋 登志夫*¹・森島 千瑞子*²・小野 一明*³・水谷 守*³

Study of the Seismic Hazard Estimation on the Ground Surface

Hiroaki RYUJIN, Toshio SHIMA, Chizuko MORISHIMA, Kazuaki ONO, Mamoru MIZUTANI

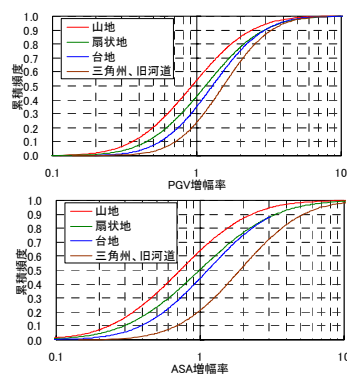


図-1 地形分類による増幅率の確率分布比較
(上段：PGV, 下段 ASA)

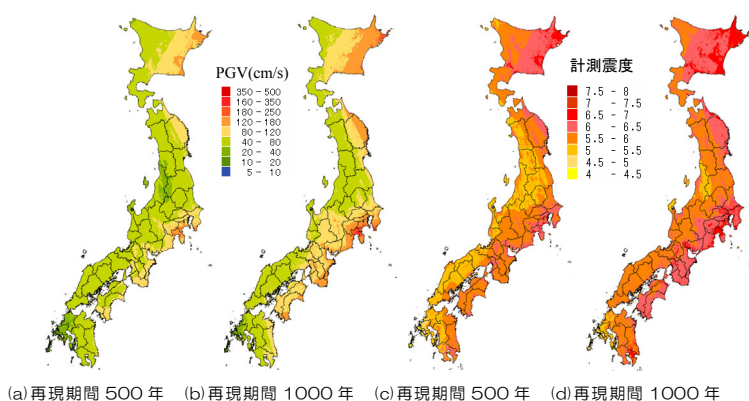


図-2 地震ハザードマップ
(a)(b)：PGV, (c)(d)：計測震度)

研究の目的

建物の被害想定においては、一般に地表面での地震動の大きさを参照する。工学的基盤に対する地震動推定法としては経験式（以下、距離減衰式）が幾つか提案されているが、地表面の地震動評価では、距離減衰式の値に表層地盤の増幅率を乗じて評価するのが一般的である。本研究では、既往の距離減衰式と観測値から統計的手法を用いて、地形分類ごとの表層地盤の増幅率特性を算定し、これまでに開発した工学的基盤での地震ハザード評価システムに組み込むことで増幅率の不確定性を加味した地表面での地震ハザード評価を行うことを目的とする。

技術の説明

地震源を離散化地震源群として設定し、複数の評価地点に対する確率論的地震ハザード解析を同時に行うシステムである。このシステムを利用すれば、任意地点の地震ハザード評価はもちろん、単一震源に対する地震動の空間的分布や、任意の地震源に対する様々な地震ハザードマップを評価することが可能である。

主な結論

本論では、まず地表面での地震動評価を行うために、既往の距離減衰式と実際に観測された地震動を利用して、地形分類ごとに表層地盤の増幅率特性の統計的評価を行った。現状では観測データが量的に十分とはいえないが、最大速度(PGV)、平均応答加速度(ASA)において、地形分類ごとに増幅率特性を評価する有意性が示せた(図-1)。また、推定地震動の大きさなどのパラメータに対する増幅率特性の依存性について検討を実施し、その傾向を把握した。これらの依存性には使用した距離減衰式の特性が含まれていることに留意する必要がある。さらに、算定した増幅率特性を用いて地表面の地震ハザード評価を行い、500mメッシュで日本全土を対象としたハザードマップを作成した(図-2)。利用したシナリオ震源数は26634であり、日本全国500mメッシュの評価点はおおよそ150万点である。8種類のマップを同時に作成したが、その算定には14日間程度(CPU: Intel Xeon, メモリ: 4Gbyte)の計算が必要であった。

*1 本店 建築本部 リニューアル事業部

*2 カテナ株式会社

*3 株式会社モダンエンジニアリングアンドデザイン

地表面の地震ハザード評価に関する検討

龍神 弘明 嶋 登志夫^{*1}

森島 千瑞子^{*2} 小野 一明^{*3}

水谷 守^{*3}

要 旨

建物被害想定などに利用される地表面での地震動評価では、工学的基盤での地震動推定法として提案されている経験式（距離減衰式）の値に表層地盤の増幅率を乗じて評価するのが一般的である。本論では、既往の距離減衰式と観測記録から統計的手法を用いて地形分類ごとに表層地盤の増幅率特性を算定した。現状では観測データが量的に十分とはいえないが、最大速度（PGV）、平均応答加速度（ASA）において、地形分類ごとに増幅率特性を評価する有意性が示せた。また、推定地震動の大きさなどのパラメータに対する依存性についての検討を実施し、その傾向を把握した。これらの依存性には使用した距離減衰式の特徴が含まれていることに留意する必要がある。さらに、算定した増幅率特性を、これまで開発した工学的基盤上での地震ハザード評価システムに組み込むことで、26634シナリオ震源、500mメッシュの評価点（約150万点）で地表面の地震ハザード評価を行い、日本全土を対象としたハザードマップを作成した。

キーワード 地震ハザード／増幅率特性／統計解析／K-NET／地形分類／確率分布／PGV／計測震度

目 次

- | | |
|------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 地震動評価手順 |
| 2. 増幅率評価方法 | 5. 地震動評価結果 |
| 3. 増幅率評価結果 | 6. おわりに |

STUDY OF THE SEISMIC HAZARD ESTIMATION ON THE GROUND SURFACE

Hiroaki RYUJIN Toshio SHIMA
Chizuko MORISHIMA Kazuaki ONO
Mamoru MIZUTANI

Synopsis:

The ground motions to be used for seismic damages estimation of buildings are in general estimated by the following procedures: 1) Selection of the seismic source location and magnitude, 2) Calculation of ground motion on the bed rock surface by applying an attenuation relationship then 3) modification the ground motion on the bed rock to that on ground surface by multiplying amplification factors representing response characteristics of surface layers. In this paper, the amplification factors due to surface layers are evaluated statistically using seismograph data at K-Net sites and the reference attenuation relationship. The number of the data used for is 3158. The amplification factor is evaluated in the form of probability distribution for each geomorphologic land classification. It is resulted that the number of records are not enough, however, there is clear difference in the amplification factor of each geomorphologic land classification. Using the obtained amplification factors, the seismic hazard map on the ground surface of entire Japan is depicted.

* 1 本店 建築本部 リニューアル事業部 * 2 カテナ(株) * 3 (株)モダンエンジニアリングアンドデザイン

1. はじめに

建物の被害想定においては、一般に地表面での地震動の大きさを参照する。地表面の地震動評価では、工学的基盤での地震動推定法として提案されている経験式（以下、距離減衰式^{例えは 1) 2)}）の値に表層地盤の増幅率を乗じて評価するのが一般的である。

表層地盤増幅率（以下、増幅率）評価には、幾つかの簡易な推定方法^{例えは 3)}が提案されているが、大井ら⁴⁾は K-NET⁵⁾の観測記録を用いて地形分類のみで距離減衰式から評価している。経験式である距離減衰式にはばらつきが付随するが、距離減衰式による工学的基盤地震動に基づいた増幅率特性も当然ばらつきを持ったものとなる。

本論では、まず大井らの手法に準じ、既往の距離減衰式と観測記録から統計的手法を用いて増幅率特性を算定する。さらに、その算定結果を著者らがこれまでに開発した地震ハザード評価システム⁶⁾に組み込み、増幅率の不確定性を加味した地表面の地震動評価を行う。

2. 増幅率評価方法

増幅率は地震動指標に対して、地表面地震動（観測値）の大きさを、工学的基盤地震動（距離減衰式）の大きさを除いたものとして、各記録波に対して算出し、その結果を統計処理する。その際、防災科学技術研究所ホームページで公開されている「500m メッシュ地形分類データ」⁷⁾に基づいた地形分類ごとの増幅率特性を評価する。

2.1 観測記録の選定

(1) 地震の選定

図-1 に地震および観測記録の選定手順を、図-2 に選定された地震の分布を、それぞれ示す。K-NET で観測された地震（1996 年 1 月～2005 年 4 月 20 日）に対して震源深さ 100km 以浅かつ比較的規模の大きい（M5.4 以上）91 地震を選定した。震源モデルは、基本的に EIC 地震学ノート⁸⁾で公開されているものを使用し、公開されていない震源に関しては、表-1 に示す通り、地震規模により点震源あるいは円震源にモデル化した。

(2) 観測記録の選定

図-3 に観測点およびその点で観測された地震波数の分布を示す。まず、バックグラウンドノイズの影響を極力排除するために、選定した 91 地震の震源から距離減衰式（安中 1988）で評価した加速度推定値が 10cm/s^2 以上の観測点の記録波を選定した。これは推定値で記録波を選定することにより、小さな増幅率を示す記録を偏って削除することを避けるためである。

大井らは、観測記録で最大加速度 20cm/s^2 以上のデータを採用し、観測記録の小さい地震を除外しているが、図-4 に示すように観測値（縦軸）を目安にデータを取り除くと、増幅率が小さい方にばらついた記録を除外している

可能性がある。本論では上記の可能性を排除するため、推定値（横軸）が小さいものを除外することにした。

選定した加速度記録の水平 2 成分を収集し、観測記録ごとに、最小自乗近似で基線補正を行った上で、時刻歴の水平ベクトル振幅を合成して、加速度時刻歴波形を作成した。その時刻歴波形に基づいて、最大加速度および最大速度を算出した。ただし、加速度波形を線形加速度法で積分して求めた速度波形の最大値にドリフトの影響が強いと思われるものは除外した。このようにして選定された観測点は 964 箇所であり、対象とされる記録地震波は 3158 となった。

表-1 震源モデル

地震規模	断層モデル
$5.4 \leq M \leq 5.8$	点震源
$5.9 \leq M \leq 6.2$	円震源（直径 7km）
$6.3 \leq M$	矩形モデル

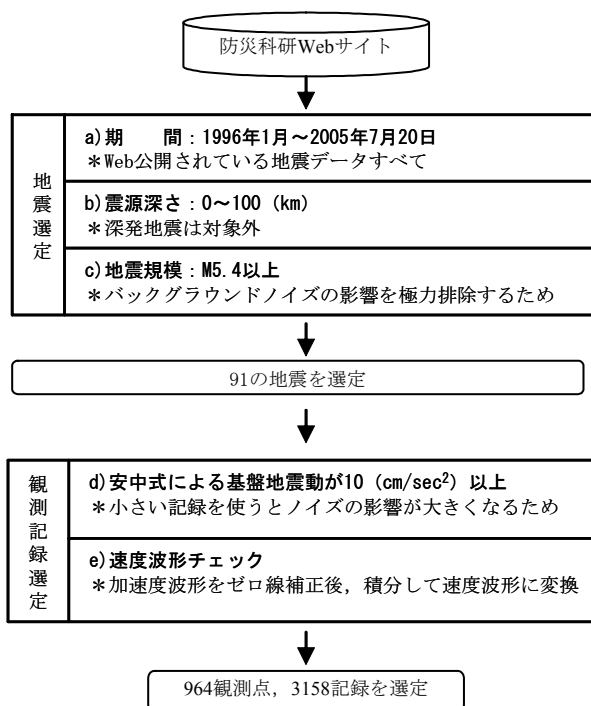


図-1 地震および地震記録の選定方法

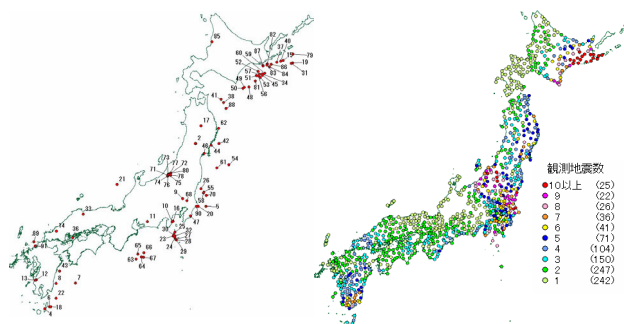


図-2 選定地震分布図

図-3 対象観測点分布

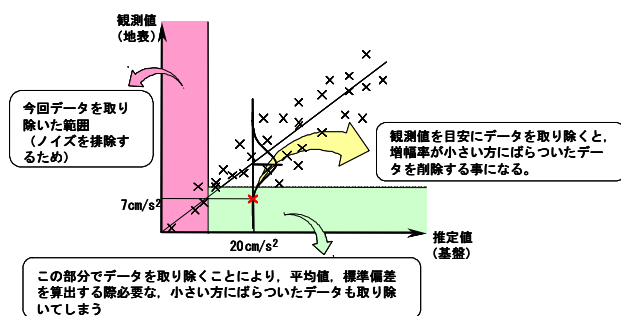


図-4 データ取り除きの概念

2.2 地震動指標

表層地盤の増幅率の基準とする工学的基盤推定地震動は、安中ら¹⁾の提案する最大速度（以下、PGV）および平均応答加速度⁹⁾（以下、ASA）を利用する。平均応答加速度とは、一定周期帯における加速度応答スペクトル値を平均したものであるが、ここでは、計測震度と関連の深い周期帯として 0.75～0.95 秒⁹⁾を用いた。

$$\log V = 0.795M + 0.0055H - 2.065 \log(R + 0.35 \exp(0.65M)) - 0.607 \quad [1]$$

$$\log S_a(k) = C1(k)M + C2(k)H - C3(k) \log(R + 0.35 \exp(0.65M)) + C4(k) \quad [2]$$

ここで、V：工学基盤表面最大速度、M：気象庁マグニチュード、

H：震源深さ(km)、R：最短距離(km)

Sa：周期 T(k)での平均加速度応答スペクトル、

C1～C4：周期 T(k)でのパラメータ値、

2.3 地形分類

地形分類は防災科学技術研究所ホームページで公開されている 500m メッシュ地形分類データに基づく。図-6 に地形分類を示す。500m メッシュの地形分類は 9 分類（山地、台地、扇状地、自然堤防、砂州、谷底平野、三角州・旧河道、埋立地、その他）されているが、2.1 節の手順で選定したデータに地形分類が砂州の観測点のデータは含まれていない。よって砂州と地形分類が不明なその他を除いた 7 種の地形分類について増幅率特性の検討を行った。

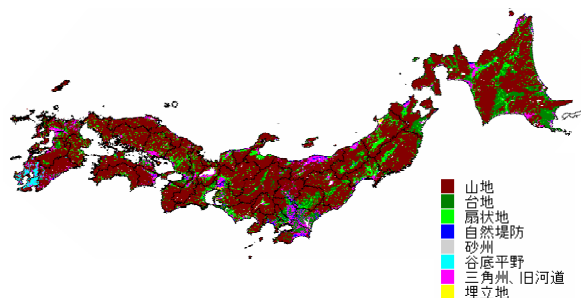


図-6 地形分類

3. 増幅率評価結果

地形分類ごとに増幅率特性（中央値、対数標準偏差）を算定し、地形分類ごとに増幅率を定義する有意性を示す。また本論では、設定の際に利用するパラメータ、例えば、推定地震動の大きさ、震源距離などに増幅率特性は依存しないという仮定のもと、地形分類ごとに中央値および対数標準偏差を設定し、評価システムに組み込んでいる。この仮定を確認するために各種パラメータによる依存性について検討する。

3.1 増幅率分布の確率特性値

表-2 に PGV 増幅率、表-3 に ASA 増幅率の確率分布の特性値を、それぞれ示す。また、図-7、図-8 に全種地盤（図（a））および各種地形分類（図（b）～図（h））ごとに増幅率の累積分布のプロットとそれを対数正規分布で近似したラインを示す。なお、図中右下には統計処理に用いたデータ（記録地震波）数を示す。これより増幅率は対数正規分布で良く近似できていることが分かる。

図-9、図-10 に比較的多くのデータが得られた山地、扇状地、台地、三角州・旧河道について対数正規分布で近似した確率分布（図-7、図-8）を比較する。近似線の勾配が緩やかなほど増幅率のばらつきが大きく、また間隔が広いほど地形分類による増幅率の違いが明確であることを示す。

PGV および ASA とも山地<扇状地<台地<三角州・旧河道の関係が成立しており、地形分類ごとに増幅率を設定することの有意性がわかる。この関係は ASA の場合により顕著に表れている。

3.2 増幅率の依存性

検討するパラメータは、(1)推定地震動の大きさ（図-12、図-13）、(2)震源距離（図-14、図-15）、(3)マグニチュードの大きさ（図-16～図-17）とする。

図-12～図-17 は、横軸にパラメータを、縦軸に観測記録ごとに増幅率（左図）およびばらつき（右図）をプロットしている。ここで、増幅率は推定値に対する観測値の比の対数値を、ばらつき（ e^2 ）は、図-11 のように増幅率の対数値が 0 からの二乗誤差としている。

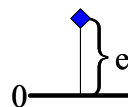


図-11 ばらつきの定義

(1) 推定地震動による依存性

図-12、図-13 に推定地震動値（距離減衰式による値）に対する依存性を示す。本来、地震被害推定に利用する増幅率を検討するには、建物に被害を与える大きさの地震動で依存性を検討する必要があるが、現実にはそのような大きな地震データが少ないため、本検討は小さい地震

表-2 地形分類毎の増幅率分布の確率特性値 (PGV)

	全地盤	山地	台地	扇状地	自然堤防	谷底平野	三角洲旧河道	埋立地
中央値	1.216	0.925	1.282	1.145	1.416	1.537	1.527	1.818
対数標準偏差	0.707	0.746	0.654	0.735	0.586	0.573	0.600	0.642
観測数	3158	770	785	613	154	37	540	40

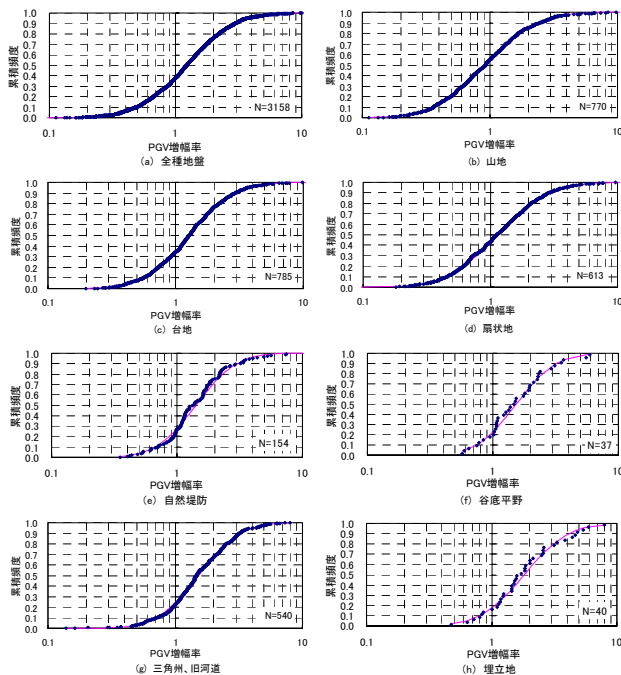


図-7 PGV 増幅率の確率分布

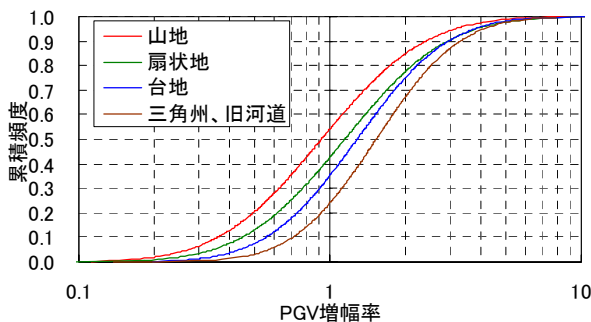


図-9 PGV 増幅率の確率分布比較

動（推定地震動（安中式）で基盤加速度 10cm/s^2 以上）も含めて検討している。

増幅率は、推定地震動が大きくなるにつれ PGV および ASA では減少傾向（図-12、図-13）に、ばらつきは、推定地震動が大きくなるにつれ PGV では小さく（図-12）、ASA ではほとんど依存性が無かった（図-13）。

(2) 震源距離による依存性

図-14～図-15 に震源距離（以下、最短距離）に対する依存性を示す。本来、地震被害推定に利用する増幅率を検討するには、建物に被害を与える震源距離（例えば 200km ）以内で依存性を検討することも考えられるが、データ数を増やすことを目的とし、選定した地震すべてを使用して検討している。

表-3 地形分類毎の増幅率分布の確率特性値 (ASA)

	全地盤	山地	台地	扇状地	自然堤防	谷底平野	三角洲旧河道	埋立地
中央値	1.123	0.729	1.133	0.994	1.488	1.848	1.892	2.040
対数標準偏差	0.921	0.890	0.837	0.948	0.689	0.854	0.792	0.744
観測数	3158	770	785	613	154	37	540	40

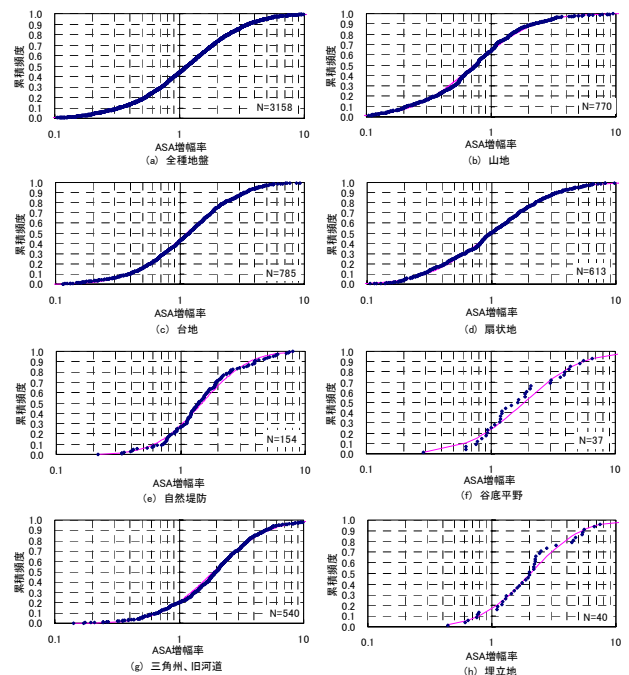


図-8 ASA 増幅率の確率分布

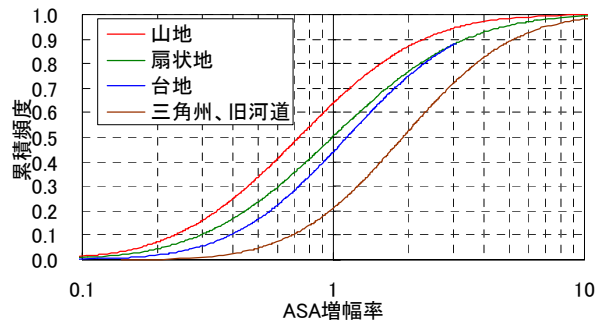


図-10 ASA 増幅率の確率分布比較

増幅率は、PGV ではほとんど依存性が無く（図-14）、ASA では最短距離が大きくなるにつれ減少傾向（図-15）にある。ばらつきは、PGV ではほとんど最短距離による依存性は見られず（図-14）、ASA では増加傾向若干見られた（図-15）。

(3) マグニチュードの大きさによる依存性

図-16～図-17 にマグニチュードの大きさに対する依存性を示す。

増幅率は、PGV ではほとんど依存性が無く（図-16）、ASA では最短距離が大きくなるにつれ減少傾向（図-17）にある。ばらつきは、PGV ではほとんど依存傾向が見られなく（図-16）、ASA では若干増大傾向（図-17）が見られる。

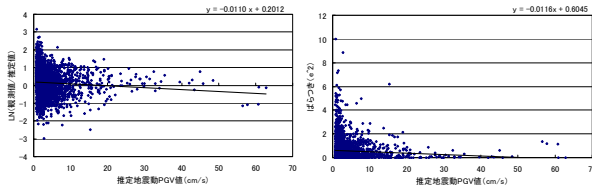


図-12 推定地震動による依存性 (PGV)

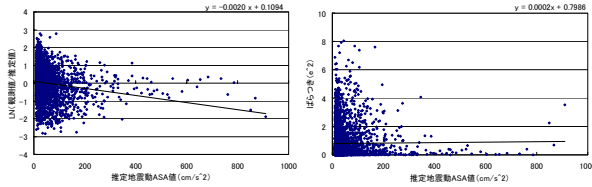


図-13 推定地震動による依存性 (ASA)

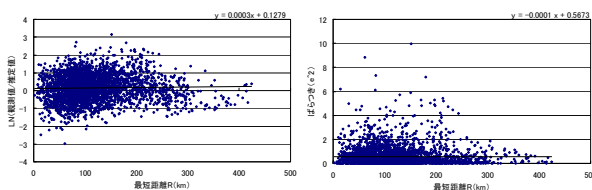


図-14 最短距離による依存性 (安中 PGV)

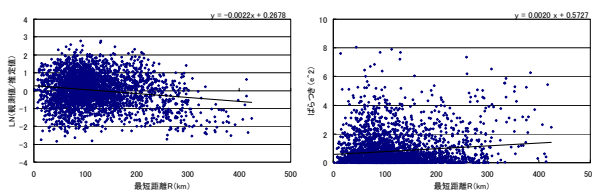


図-15 最短距離による依存性 (安中 ASA)

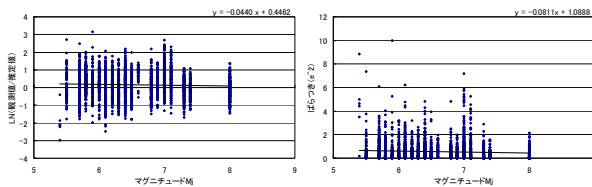


図-16 マグニチュードによる依存性 (PGV)

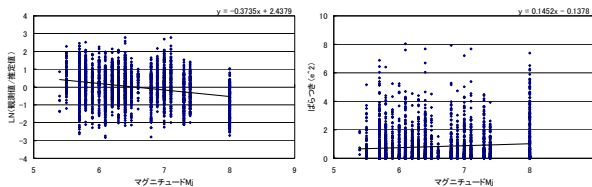


図-17 マグニチュードによる依存性 (ASA)

4. 地震動評価手順

前章の検討において依存性が見られるものもあったが、もし依存性があるとすると選定したデータが一つの母集団として扱うことができない。また、現時点ではデータ数が少なく依存性があるという明確な根拠が無い。よっ

て本論では依存性は考慮せずに、選定したデータを一つの同じ母集団として算定した地形分類ごとの増幅率およびばらつきを地震ハザード評価システムに組込む。

図-18に地震ハザード評価システムのフローを示す。まず地震発生の時系列モデル⁶⁾や使用する距離減衰式などの計算条件を設定する。次に、マグニチュードによって大きさが変化する地震断層面を配置した震源DB⁶⁾から震源(i)を読み込み、サイト(j)からの最短距離を計算し、距離減衰式から基盤面の地震動(α_b)を算定する。さらに地形分類DBよりサイト(j)の地盤種別(k_j)が決まり、増幅率中央値(a_{kj})と対数標準偏差(β_{kj})を用いて地表面地震動の推定を行うものである。

対象地点における地表面地震動の強さが α_s を超える年間平均超過確率は、定常ポアソン過程と仮定し、式〔3〕～〔5〕で求めることができる。

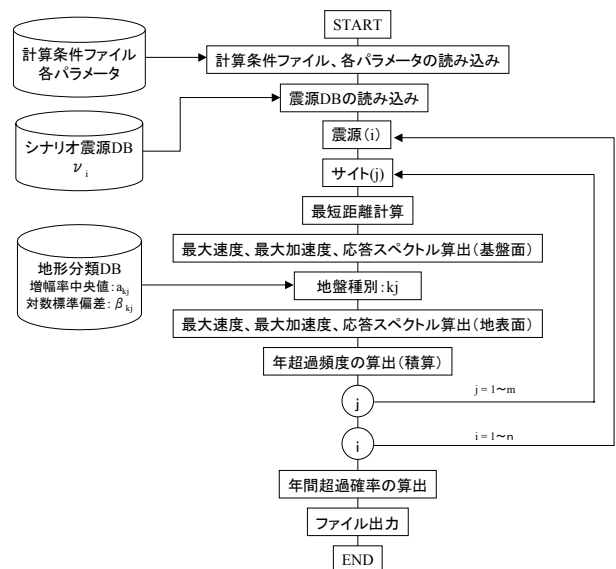


図-18 評価システムのフロー図

$$P(\alpha_s) = 1 - \exp(-N(\alpha_s)) \quad [3]$$

$$N(\alpha_s) = \sum v_i F(\alpha_s)_i \quad [4]$$

$$F(\alpha_s)_i = \int_{\alpha_s} f_A(a_s | m_i, x_i) da \quad [5]$$

$P(\alpha_s)$: 地震動の強さが α_s を超える年間平均超過確率

$N(\alpha_s)$: 地震動の強さが α_s を超える年間平均発生頻度

v_i : シナリオ地震 i の年間平均発生頻度

α_s : 地表面地震動 ($=\alpha_b \cdot a_{kj}$)

α_b : 工学的基盤地震動

a_{kj} : サイト j (地形分類 k) の増幅率中央値

$F(\alpha_s)_i$: $M=m_i$, $X=x_i$ の条件での地震動の強さが α_s を超える条件付き確率

$f_A(a_s | m_i, x_i)$: $M=m_i$, $X=x_i$ の条件での地震動の強さの確率密度関数: 対数正規分布

5. 地震動評価結果

図-19、図-20 に本システムで評価した PGV ハザードマップおよび計測震度のハザードマップをそれぞれ示す。各図には再現期間 500 年、1000 年のハザードマップを示す。なお、計測震度 I は ASA より下式⁹⁾によって算定した。

$$I=0.85\ln(\text{ASA})-0.12 \quad [6]$$

本システムでは、前回の活動時期が推定できるプレート境界地震や活断層では、平均活動間隔と最新活動時期を考慮できる再生過程で評価することもできるが⁶⁾、今回利用した地震発生モデルは定常ポアソン過程としているため南海地震など、発生頻度が高まっているとされる地震源の影響は顕著に現れていない。

6. おわりに

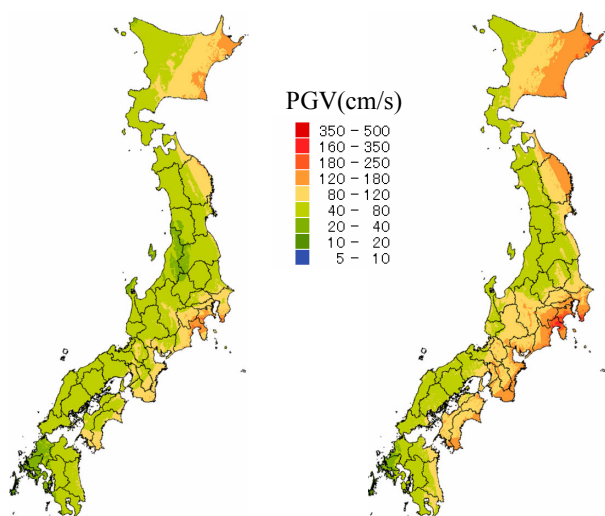
本論では、まず地表面での地震動評価を行うために、実際に観測された地震動を利用して、地形分類ごとに表層地盤の増幅率特性の統計的評価を行った。現状では観測データが量的に十分とはいえないが、PGV、ASA において、地形分類ごとに評価する有意性が示せた。また、推定地震動の大きさなどのパラメータに対する依存性についての検討を実施した。今回の地震動評価には依存性は考慮していないが、これらの依存性には距離減衰式の特徴が含まれていることに留意する必要がある。

さらに、算定した増幅率特性から地表面の地震ハザード評価を行い、500m メッシュで日本全土を対象としたハザードマップを作成した。利用したシナリオ震源数は 26634 であり、日本全国 500m メッシュはおおよそ 150 万点である。8 種類のマップを同時に作成したが、その算定にはおおよそ 14 日間 (CPU :Intel Xeon, メモリ :4Gbyte) の計算が必要であった。

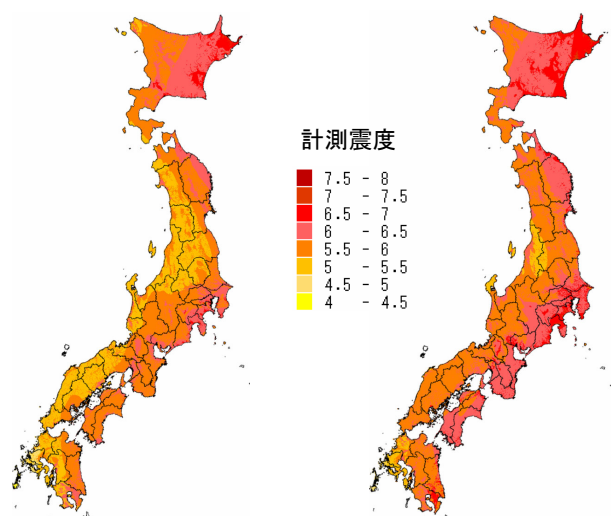
謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の K-NET、500m メッシュ地形分類データ（国土庁の都道府県別土地分類図（地形分類図）を使用）および EIC 地震学ノートの震源データを利用させて頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Annaka, T. and Y. Nozawa, A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district: Proc. 9th WCEE, II-107-II-112, 1988.
- 2) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No. 523, pp. 63-70, 1999.
- 3) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第 3 巻, 第 3 号, 2003.
- 4) 太井昌弘, 水谷守, 藤原広行: 表層地盤の増幅特性に関する検討, 日本地震学会 2004 秋季大会, P141.
- 5) 独立行政法人防災科学技術研究所: 強震ネットワーク, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 6) 龍神弘明, 斉藤芳人, 嶋登志夫, 水谷守, 小野一明, 矢尾板啓: 確率論的地震ハザードマップの検討, 前田建設技術研究所報 VOL.45, pp.79-86, 2004.
- 7) 独立行政法人防災科学技術研究所: 500m メッシュ地形分類データのダウンロード, http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/500m_dl/
- 8) 東京大学地震研究所: EIC 地震学ノート, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/.
- 9) 水谷守, 川瀬喜雄, 宮本英治: 地震動指標の相互関係に関する統計的分析 (第一次), 土木学会地震工学委員会第 24 回地震工学研究会講演論文集, 第 1 分冊, pp.217-220, 1997.



(a) 再現期間 500 年 (b) 再現期間 1000 年
図-19 地震ハザードマップ (PGV)



(a) 再現期間 500 年 (b) 再現期間 1000 年
図-20 地震ハザードマップ (計測震度)