

GIS を利用した広域における地震動と地震被害予測システムの構築

奈良岡 浩 二

(技術研究所)

南 部 世 紀 夫

(技術研究所)

渡 辺 基 史

(技術研究所)

松 島 信 一

(技術研究所)

福 島 美 光

(技術研究所)

奥 村 俊 彦

(技術研究所)

渡 辺 孝 英

(技術研究所)

§ 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として地震防災への関心が高まっており、自治体を中心として地震被害想定が行われている。また、広域における地震動と地震被害を予測することは、広域に分布する建築群の総合的な地震防災計画の立案や、新規事業所の建設計画における用地選定などの際にも有用と考えられる。広域における地震動を適切に評価するためには、堆積地盤構造による影響を考慮する必要があるが、地盤構造は不明の場合が多い。このため、表層地盤が地震動に与える影響を簡易的に評価するために、国土数値情報による地質年代・地形区分・表層地質・標高などのデータを利用して地表面における最大速度振幅を推定する研究が松岡・翠川により行われている¹⁾。

本報告では、まず広域における地震動の最大加速度振幅を観測地点の地質年代や地形区分および地盤の非線形性を考慮して簡易的に評価する手法を確立することを目的として、1995年兵庫県南部地震の強震観測記録を用いて、福島・田中による最大加速度の距離減衰式²⁾による推定値に対する観測記録の最大加速度の振幅比を求め、この振幅比と国土数値情報による地質年代・地形区分との定量的関係を調べる。また、このような関係は地震動の最大加速度に依存する傾向があるため、地盤の非線形性による影響についても分析を行う。

次に、上記の分析から得られた加速度振幅比と地形区分との定量的な関係を用いて、広域における地震動および地震被害予測システムを地理情報システム(GIS)を利用して構築した。また、広域における地表面最大加速度分布の推定手法の有効性を調べるために、1995年兵庫県南部地震と他の内陸浅発地震である1894年濃尾地震、1948年福井地震を検討対象として地表面最大加速度分布の推定を行い、建

物の実被害分布や松岡・翠川手法¹⁾による推定地表面最大速度分布との比較を行う。

§ 2. 国土数値情報で分類した兵庫県南部地震の最大加速度振幅の特性

兵庫県南部地震においては数多くの強震記録が得られているが、Fukushima *et al.* は、最大加速度の福島・田中式²⁾による推定値と観測値との関係を調べ、推定値に対する観測値の比と断層からの最短距離との関係を地質区分により観測記録を分類して調べている³⁾。ここでは、同じように兵庫県南部地震の加速度記録を対象として、福島・田中式による最大加速度の推定値に対する観測値の振幅比を算定し、この振幅比と国土数値情報の3次メッシュデータによる地質年代・地形区分との関係を調べる。なお、3次メッシュは約1km四方である。検討対象とする強震記録の観測点位置を図-1に示す。断層からの最短距離は約2~220kmであり、観測点の総数は141である。

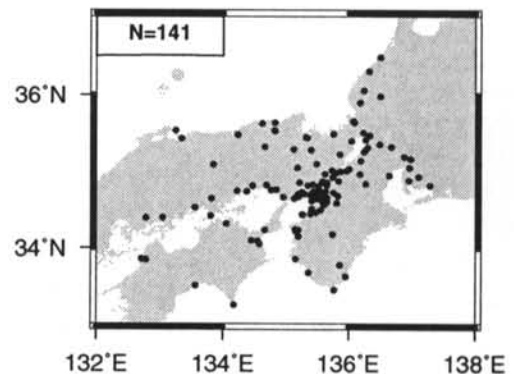


図-1 検討対象とした強震記録の観測点位置

2.1 観測記録の最大加速度と推定値との関係

式(1)に示す福島・田中式²⁾による最大加速度の推定値に対する観測記録の最大加速度の比($oPHA/pPHA$)と推定最大加速度 $pPHA$ との関係を図-2に示す。なお、観測記録の最大加速度については、水平2成分が観測されている場合は2成分の最大加速度の相加平均 $oPHA$ を用いている。また、 $M_w = 6.9$ 、断層長さは 45km^3 、断層上端深さは 2km としている。

$$\log pPHA = 0.42M_w - \log(R + 0.025 * 10^{0.42M_w}) - 0.0033R + 1.22 \quad (1)$$

ここに、 $pPHA$ は最大加速度 (cm/sec^2)、 M_w はモーメントマグニチュード、 R は断層からの最短距離 (km) である。

推定最大加速度が約 $100\text{cm}/\text{sec}^2$ 以下の観測点では観測値/推定値($oPHA/pPHA$)が1を上回る記録が多く、推定最大加速度が約 $100\text{cm}/\text{sec}^2$ を超える観測点では観測値/推定値が1を下回る記録が多くなっており、観測値/推定値が推定最大加速度の大きさに依存している傾向が見られる。

次に、最大加速度の観測値/推定値と断層からの最短距離との関係を図-3に示す。断層からの最短距離が約 100km を越える観測点では観測値/推定値が大きくなり、約 100km 以下の観測点では逆に観測値/推定値が1を下回る観測点が多い傾向にある。

2.2 最大加速度の観測値/推定値と地質年代との関係

古生代・中生代、第三紀、洪積世、沖積世毎に最大加速度の観測値/推定値($oPHA/pPHA$)と推定最大加速度 $pPHA$ との関係調べた結果を図-4に示す。なお、これらの地質年代データは国土数値情報の3次メッシュデータによるものであり、主として京都府内における観測点の地質年代が国土数値情報では不明となっているため、これらのデータは含まれていない。

古生代・中生代におけるデータの大半は観測値/推定値が1より小さくなっている。第三紀におけるデータの観測値/推定値は1と同程度かやや小さめである。洪積世におけるデータの観測値/推定値の平均はほぼ1程度である。沖積世における観測値/推定値には推定最大加速度に対する依存性が見られる。推定最大加速度が大きくなるにつれ、観測値/推定値が小さくなる傾向が見られる。これは、地盤

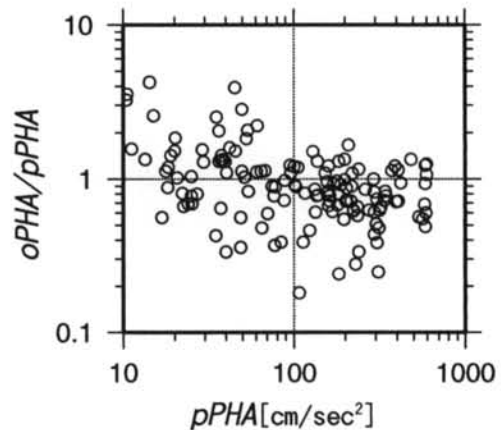


図-2 最大加速度の観測値/推定値と推定最大加速度との関係

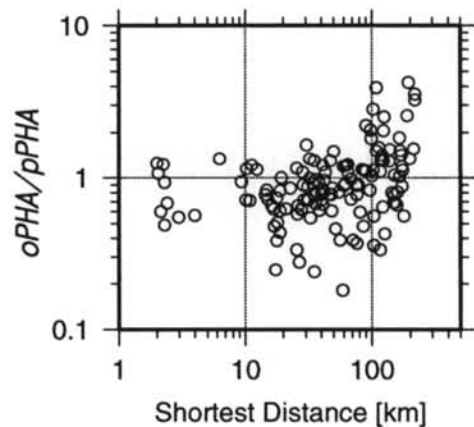
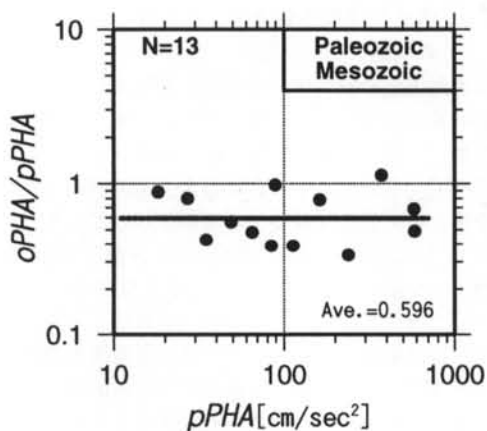
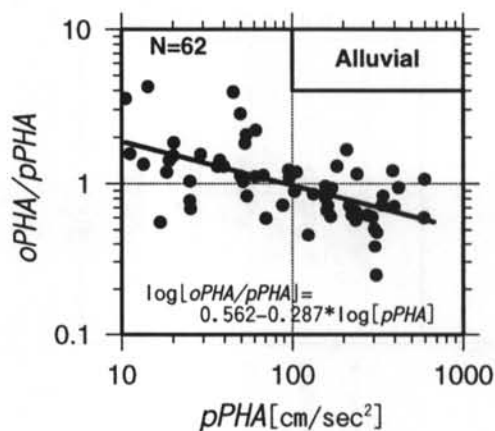


図-3 最大加速度の観測値/推定値と断層からの最短距離との関係

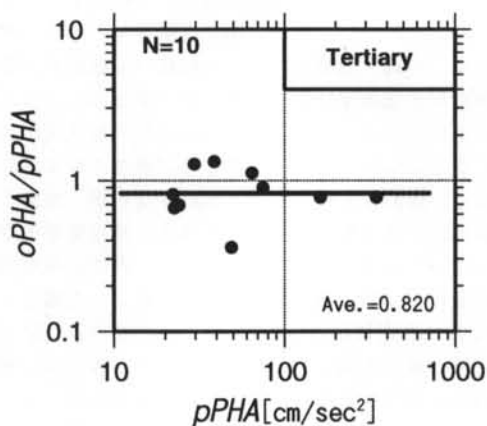
の非線形性による影響と考えられる。図中の太い実線は、最大加速度の観測値/推定値の平均を示している。沖積世のデータについては、観測値/推定値が加速度振幅の大きさに依存しているため、観測値/推定値($oPHA/pPHA$)と推定最大加速度 $pPHA$ との平均的な関係を最小2乗法により求めている。(e)は、観測値/推定値のデータとこれらの平均、平均±標準偏差、(f)は、各地質年代毎に太い実線で示された補正係数を福島・田中式による推定値 $pPHA$ に乗じて修正した推定最大加速度 $pPHA'$ に対する比とその平均および平均±標準偏差を示している。図中に示されている数値は、平均と常用対数標準偏差である。地質年代に応じて加速度振幅を補正して



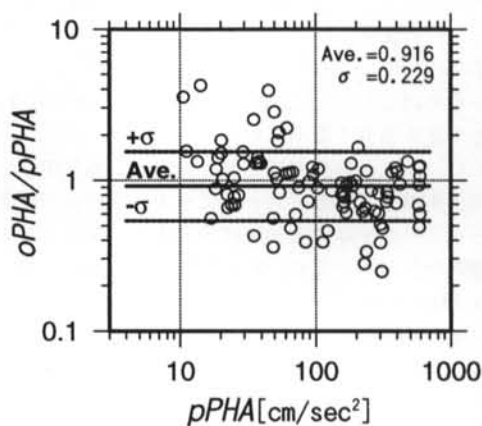
(a) 古生代・中世代



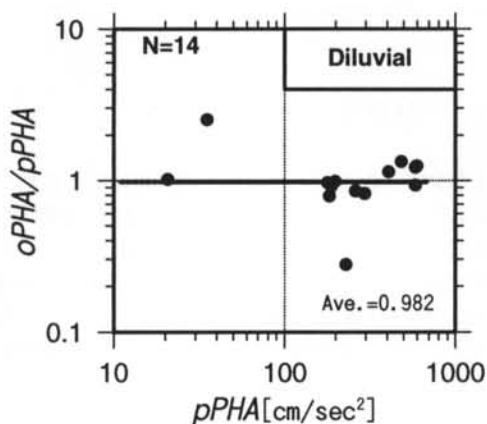
(d) 沖積世



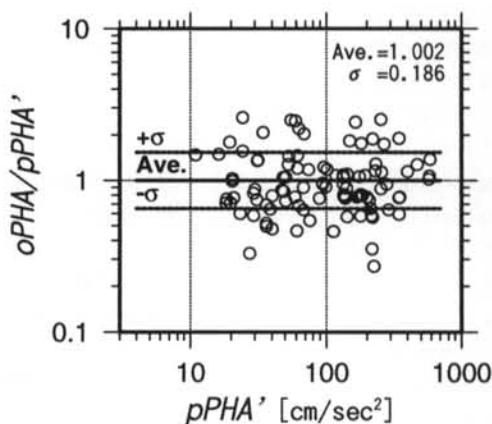
(b) 第三紀



(e) 最大加速度振幅補正前の観測値/推定値

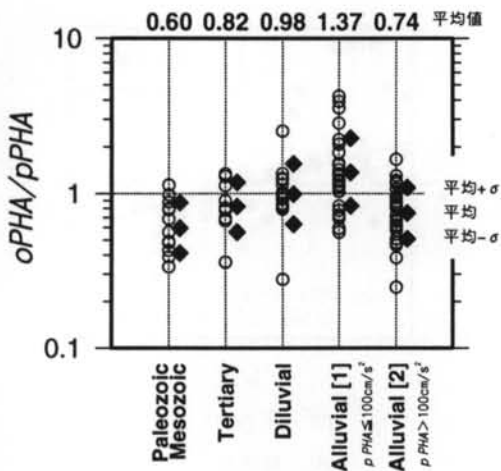


(c) 洪積世



(f) 最大加速度振幅補正後の観測値/推定値

図一四 各地質年代における最大加速度の観測値/推定値と推定最大加速度との関係



図一五 最大加速度の観測値／推定値と地質年代との関係

いるため、観測値／推定値の平均が1となっており、ばらつきも小さくなっている。

次に、最大加速度の観測値／推定値と地質年代との関係を調べた結果を図一5に示す。沖積世の観測データについては最大加速度の大きさに依存している傾向が見られたため、推定最大加速度 100 cm/sec^2 以下 (Alluvial [1]) と 100 cm/sec^2 を超えるもの (Alluvial [2]) に分けて表示している。図中には各地質年代における観測値／推定値の平均値、および平均と平均±標準偏差を◆印で示している。平均的には、古生代・中生代、第三紀、洪積世、沖積世と地質年代が新しくなるにつれ、観測値／推定値が大きくなる傾向にあり、観測値／推定値の平均は、古生代・中生代で0.60、第三紀で0.82、洪積世で0.98、沖積世では推定最大加速度 100 cm/sec^2 以下で1.37、 100 cm/sec^2 を超える記録で0.74となっている。

これらの結果と既往の検討結果を比較すると、Fukushima and Tanakaは、地質をRock, Hard, Medium, Soft-Soilに分類して、最大加速度の観測値／推定値の平均をそれぞれ0.60, 1.07, 0.87, 1.39と求めている⁴⁾。Rockは主として第三紀以前の岩盤、Hardは主として洪積層、Mediumは沖積層厚が25m未満でかつ軟弱層厚が5m未満、Soft-Soilはこれら以外の軟弱層と分類している。これらの地質分類と今回の結果を対比すると、岩盤、洪積層についてはほぼ値が一致している。沖積層については、加速度振幅の大きさによって地盤の非線形性が異なるために傾向が異なっている。

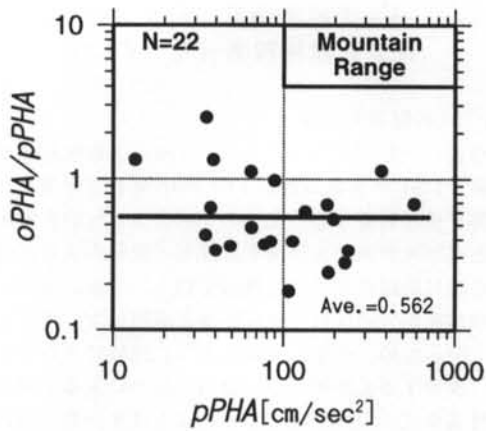
2.3 最大加速度の観測値／推定値と地形区分との関係

最大加速度の観測値／推定値と地形区分との関係を図一6に示す。地形区分として、山地、丘陵地、扇状地、三角州、自然堤防・砂州および埋め立て地に分けて、各地形分類ごとに最大加速度の観測値／推定値と推定最大加速度との関係を示している。図中に示している太い実線は、観測値／推定値 (oPHA/pPHA) の平均であり、山地と丘陵地においては一定値として算定している。扇状地、三角州、砂州・自然堤防・埋め立て地では、推定最大加速度をパラメータとして最小2乗法により観測値／推定値と推定最大加速度との平均的な関係を求めている。山地では観測値／推定値が全般的に小さめであり、丘陵地においても観測値／推定値の平均が1以下となっている。扇状地・三角州・自然堤防・砂州のデータは、山地・丘陵地のデータに比べて観測値／推定値が最大加速度に依存している。すなわち、地盤の非線形性による影響のために推定最大加速度が大きくなるにつれ、観測値／推定値が小さくなる傾向にある。埋め立て地のデータ数は少ないが、地盤の非線形性による影響のために観測値／推定値が小さめになっている。(f)は、福島・田中式による最大加速度の推定値を地形区分に応じて補正した場合の観測値／推定値 (oPHA/pPHA') を示している。最大加速度の振幅の補正を行っているため、観測値／推定値の平均が1となっている。また、観測値／推定値のばらつきについては、地形区分によって補正した場合の方が地質年代による補正の場合に比べて少し小さい結果となっている。

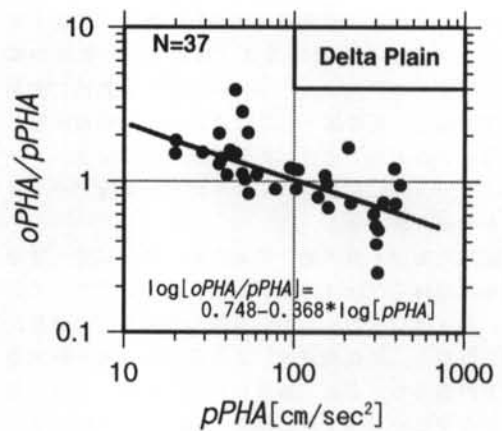
§ 3. 地震動と地震被害予測システム

地震被害予測システムは、広域における地震動と地震被害を迅速に予測できるように、地震・活断層・地盤情報と地震動および地震被害予測プログラムを地理情報システムの市販ソフト (Arcview) を利用して総合化したものである。これらのデータは、日本全国にわたって整備されているため、日本全国に対して適用可能である。

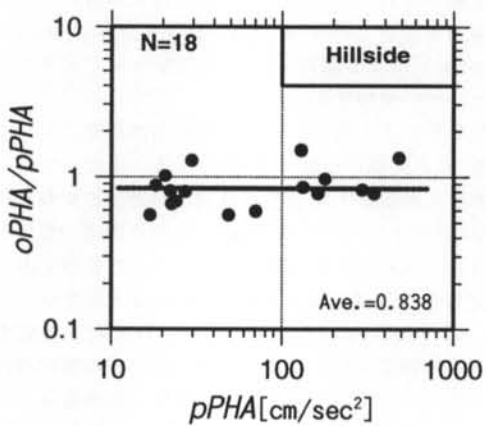
システムの機能としては、地震動・地震被害予測の他にデータベースの選択・表示がある。また、震源情報は点、線震源に加えて面的に設定することができる。各震源に対しては、過去の主な地震として



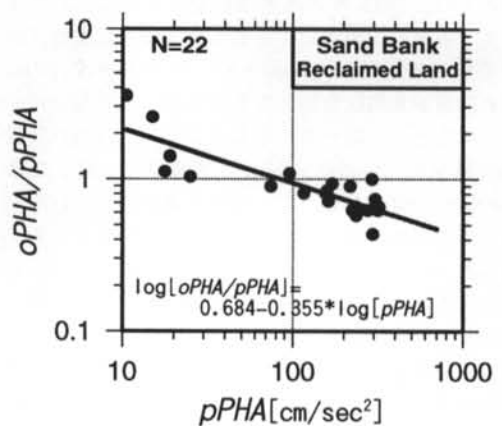
(a) 山地



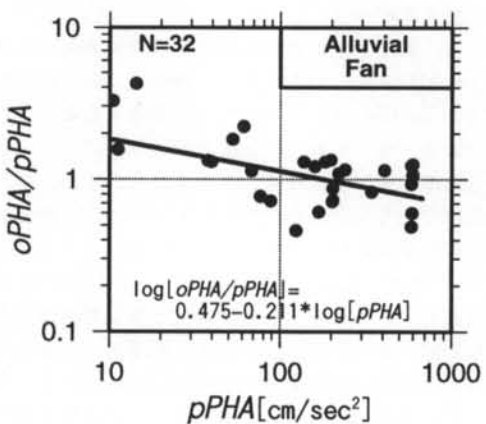
(d) 三角洲



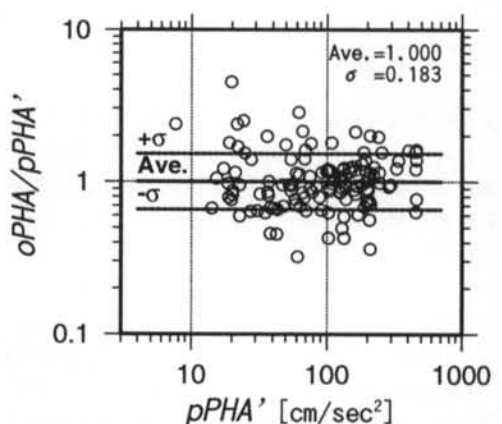
(b) 丘陵地



(e) 砂州・自然堤防・埋め立て地



(c) 扇状地



(f) 最大加速度振幅補正後の観測値/推定値

図-6 各地形区分における最大加速度の観測値/推定値と推定最大加速度との関係

登録されているデータベースからの選択、画面上でのマウスによる位置の指定、画面上での震源の緯度・経度・マグニチュード・震源深さの数値入力が可能である。活断層としては松田による起震断層、断層モデルとしては日本の地震断層パラメータ・ハンドブック⁵⁾に記載されている巨視的断層パラメータが登録されている。

広域における地震動の最大振幅の推定は国土数値情報における3次メッシュ単位(約1km四方)で行う。各メッシュの中心から震源や断層までの最短距離を計算し、距離減衰式により最大加速度と最大速度を計算する。なお、地震動の最大振幅は表層地盤に依存するが、国土数値情報を利用して地盤による地震動の最大振幅の違いを考慮する。最大加速度については、1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いて、福島・田中式による最大加速度の推定値に対する観測値の比($\alpha PHA/pPHA$)と推定加速度 $pPHA$ との関係を地形区分毎に定量的に調べた結果を用いる。すなわち、図-6に示したように、各地形区分毎に算出した($\alpha PHA/pPHA$)の平均特性を補正係数($pPHA'/pPHA$)とし、この補正係数を福島・田中式による推定値に乗じて推定最大加速度を算定する。具体的には、山地と丘陵地では福島・田中式による推定値をそれぞれ0.562倍と0.838倍し、扇状地、三角州、および砂州・自然堤防・埋め立て地では地盤の非線形性による補正係数の違いを考慮して、それぞれ式(2)~(4)に示した補正係数($pPHA'/pPHA$)を用いる。

$$\log[pPHA'/pPHA] = 0.475 - 0.211 * \log[pPHA] \quad (2)$$

$$\log[pPHA'/pPHA] = 0.748 - 0.368 * \log[pPHA] \quad (3)$$

$$\log[pPHA'/pPHA] = 0.684 - 0.355 * \log[pPHA] \quad (4)$$

また、最大速度については、国土数値情報に基づいて表層30mの平均S波速度を推定し、この平均S波速度から工学的基盤に対する地表の増幅率を評価する松岡・翠川手法を用いる^{1), 6)}。

建物の被害予測においては、宮腰・他が兵庫県南部地震の建物被災データを分析して算定した建物被害関数を用いる⁷⁾。

以下の検討では、地震被害予測システム(Earthquake Damage Estimation System, イーデス)を用いて、過去の被害地震に対して地震動の推定を行い、建物の実被害分布との対応関係を調べ、地震被害予測手法の適用性について検討を行う。

§ 4. 過去の被害地震に対する地震動の推定と建物被害分布との比較

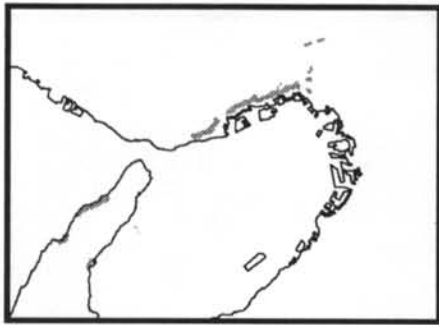
4.1 内陸浅発地震

過去の内陸浅発地震として、1995年兵庫県南部地震、1891年濃尾地震および1948年福井地震の3地震を検討対象とし、上記の手法により地表面最大加速度と地表面最大速度を計算し、建物の実被害分布との対応関係について検討を行う。なお、家屋の全壊の判定方法は被害地震や調査機関によって異なっているため、必ずしも同じように比較できないことに注意する必要がある。福島・田中による加速度距離減衰式²⁾とMidorikawaによる速度距離減衰式⁶⁾は、モーメントマグニチュードと断層面までの最短距離が変数となっているため、対象地震に対して断層面を設定し^{3), 5)}、地震モーメントからHanks and Kanamoriによる関係式⁸⁾によりモーメントマグニチュードへ変換する。

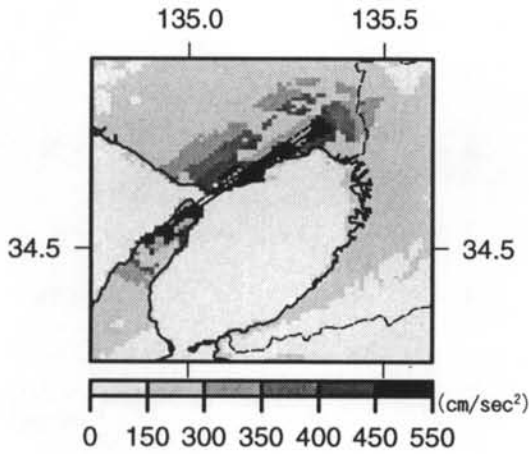
気象庁により発表された兵庫県南部地震における震度VIIの領域を図-7(a)に示す。また、地表面における推定最大加速度と推定最大速度の分布を図-7(b), 7(c)に示す。震度VIIの領域は、現地調査を基に決められた全壊率が30%以上の領域であり、推定平均加速度の最大は約500cm/sec²となっている。図-6(f)に示したように地形区分による最大加速度の補正を行った後の福島・田中式の常用対数標準偏差は0.183であるため、平均+標準偏差のレベルでは約750cm/sec²と推定される。海岸線近くや大阪平野では、地盤の非線形性の影響により推定最大加速度が小さくなっている。

また、震度VIIの領域における推定地表面最大速度は約100cm/sec以上であり、断層近くの海岸側では125cm/sec以上となっている領域もある。これらの値は、林・川瀬⁹⁾が2次元FEM解析によって推定した値と調和する結果となっている。また、神戸側だけでなく、淡路島側でも震度VIIとなった地域では推定最大速度が大きくなっている。

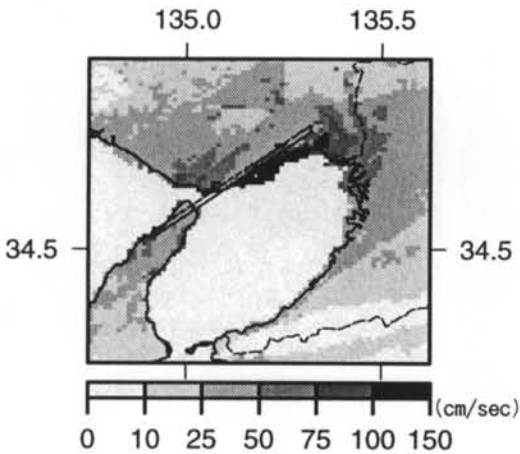
1891年濃尾地震における家屋全半壊率の分布¹⁰⁾と地表面における推定最大加速度と推定最大速度の分布を図-8(a)~8(c)に示す。断層近くにおいては推定平均加速度の最大は約500cm/sec²となっているが、地盤の非線形性による影響のために扇状地や三角州などにおいては推定平均加速度が約350cm/sec²前後と小さくなっている。また、全半壊率が60%以上の領域の地表面最大速度は、約100cm/



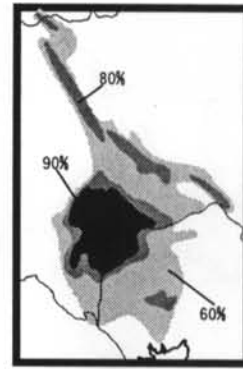
(a) 震度 VII の領域



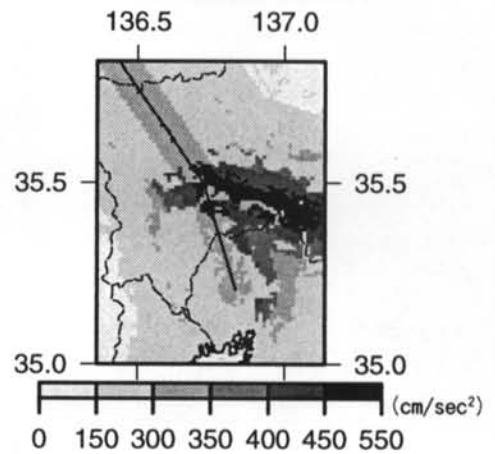
(b) 地表面における推定最大加速度分布



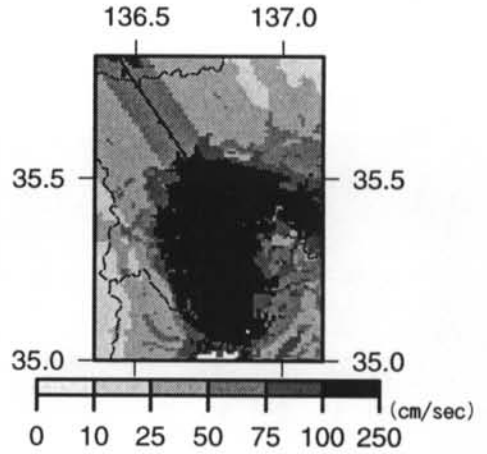
(c) 地表面における推定最大速度分布



(a) 住家全半壊率分布¹⁰⁾



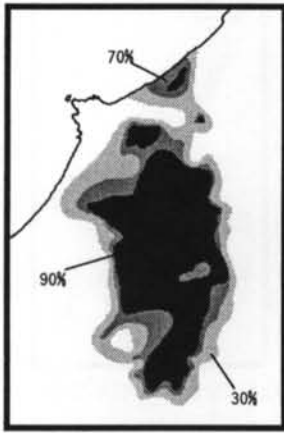
(b) 地表面における推定最大加速度分布



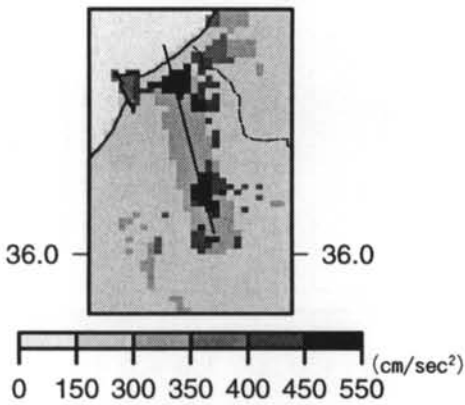
(c) 地表面における推定最大速度分布

図一七 1995年兵庫県南部地震に対する推定結果

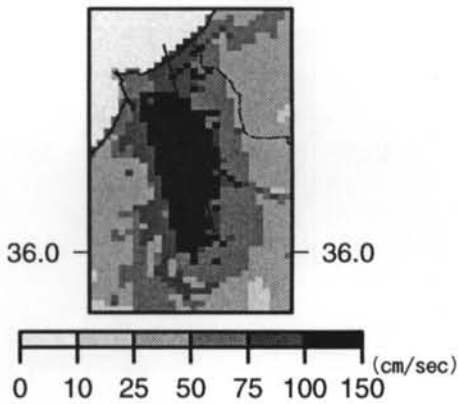
図一八 1894年濃尾地震に対する推定結果



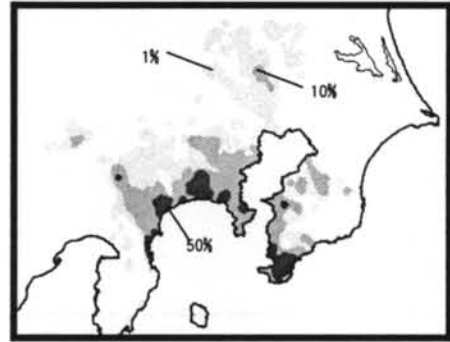
(a) 家屋全壊率分布¹⁰⁾



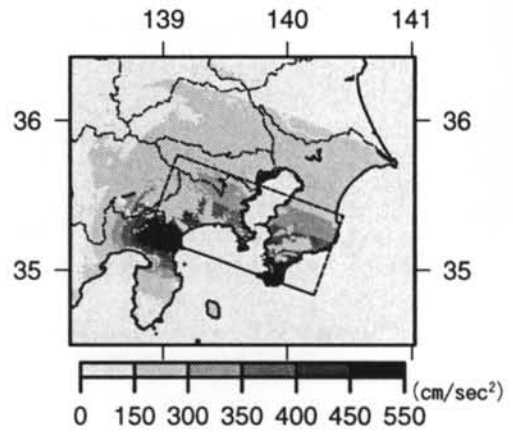
(b) 地表面における推定最大加速度分布



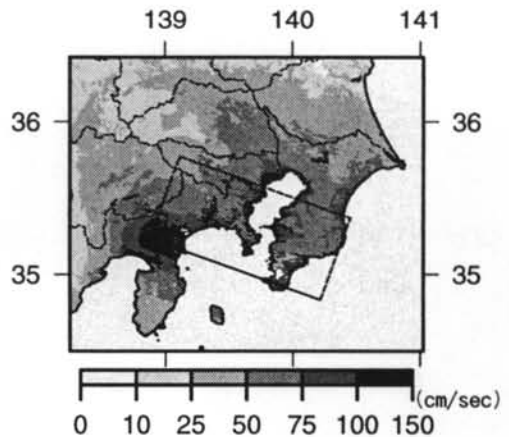
(c) 地表面における推定最大速度分布



(a) 木造家屋全壊率分布¹⁰⁾



(b) 地表面における推定最大加速度分布



(c) 地表面における推定最大速度分布

図一 9 1948年福井地震に対する推定結果

図一 10 1923年関東地震に対する推定結果

sec 以上となっている。

1948年福井地震における家屋全壊率の分布¹⁰⁾と地表面における推定最大加速度と推定最大速度の分布を図-9(a)~9(c)に示す。全壊率が30%以上の範囲は福井平野全体に広がっており、全壊率が30%以上の領域の推定地表面最大速度は、約75cm/sec以上となっている。また、断層近くの地表面における推定最大加速度は、地盤の非線形性により約300~500cm/sec²となっている。

4.2 海洋性巨大地震

海洋性巨大地震として、1923年関東地震を対象とし、家屋の被害分布と推定地表面最大加速度および推定地表面最大速度との比較を行う。なお、最大速度の距離減衰式としては、チリ地震の観測記録を基にして決められた距離減衰式¹¹⁾を用いる。1923年関東地震における木造家屋の全壊率の分布¹⁰⁾を図-10(a)に示す。次に、地表面における推定最大加速度と推定最大速度分布を図-10(b)、10(c)に示す。

断層面からの距離が短い房総半島南部や小田原・鎌倉付近で特に被害が大きくなる様子が再現されている。また、断層面からの距離が遠くても荒川・中川沿いの低地では表層地盤の影響により被害が大きくなる様子も再現されている。さらに、山梨県の甲府市においても被害が生じる傾向が再現されている。実被害と推定地表面最大速度を比較すると、全壊率が50%以上となっている領域の地表面における推定最大加速度は約300~500cm/sec²以上、推定最大速度は約75cm/sec以上となっており、被害が大きな領域と推定地表面最大速度が比較的対応している。

§5. まとめ

1995年兵庫県南部地震の強震観測記録を用いて、最大加速度の観測地点の地盤に対する依存性について国土数値情報を利用した分析を行った。

また、過去に震度VII相当の大きな被害が生じた内陸浅発地震と海洋性巨大地震の1923年関東地震を対象として、実被害と広域における推定地表面最

大加速度および地表面最大速度との比較を行った。主な結論を以下に箇条書きにして示す。

- ① 1995年兵庫県南部地震の観測記録の最大加速度は、観測地点の地質年代や地形区分に依存しており、地質年代が新しくなるにつれ観測記録の最大加速度は福島・田中式による推定値よりも大きくなる傾向にある。
- ② 地質年代の分類における沖積世や地形区分の分類における扇状地、三角州、および砂州・自然堤防・埋め立て地では、最大加速度が大きくなるにつれ、地盤の非線形性の影響により観測記録の最大加速度が推定値よりも小さくなる傾向が見られた。
- ③ 上記の影響を考慮するために、福島・田中式による最大加速度の推定値に地形区分に応じた補正係数を乗じて広域における地表面最大加速度分布を評価する手法を提案した。
- ④ 過去の内陸浅発地震による被害には、表層地質や地形が大きく影響しており、この影響を考慮した簡易的な評価方法によっても過去の地震被害の分布をかなり良好に説明できる。このため、深部地盤構造が判明していない場合の有効な地震被害予測手法と考えられる。
- ⑤ 過去の被害地震において、家屋全壊率が30%以上となった震度VII相当の地域における推定地表面最大速度は約75~100cm/sec以上であり、兵庫県南部地震に対して2次元FEM解析によって推定された値と同程度の値となっている。また、断層近くにおける推定最大加速度は約500cm/sec²程度であり、平均±標準偏差のレベルでは約750cm/sec²程度となっている。
- ⑥ 海洋性巨大地震においても、地震被害分布には表層地盤が大きく影響しており、地震被害が大きな地域と地形区分や表層地質との相関が高い。
- ⑦ 震度VII相当の領域における推定地表面最大速度は約75~100cm/sec以上であるため、被害関数がこの範囲において外挿となる場合は被害を適切に評価できない可能性があるため注意が必要である。

<参考文献>

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: "国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定", 日本建築学会構造系論文報告集, No. 443, 1993年1月, pp. 65~71.
- 2) 福島美光, 田中貞二: "新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂", 地震学会講演予稿集, No. 2, 1992, p. 116.
- 3) Fukushima, Y., T. Watanabe, T. Uetake and H. Matsumoto: "Attenuation characteristics of observed peak amplitude from 1995 Hyogo-ken Nanbu event", *Trans. 14th SMiRT*, K2/5, 1997, pp. 83~90.
- 4) Fukushima, Y. and T. Tanaka: "A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 4, 1990, pp. 747~783.
- 5) 佐藤良輔・編: "日本の地震断層パラメーター・ハンドブック", 鹿島出版会, 1989.
- 6) Midorikawa, S.: "Preliminary Analysis for Attenuation of Peak Ground Velocity on Stiff Site", *Proceedings of the International Workshop on Strong Motion Data*, Vol. 2, 1993, pp. 39~48.
- 7) 宮腰淳一, 林康裕, 渡辺宏一, 田村和夫: "1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価", 構造工学論文集, Vol. 43B, 1997年3月, pp. 269~276.
- 8) Hanks, T. C. and H. Kanamori: "A moment magnitude scale", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, 1979, pp. 2348~2350.
- 9) 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, No. 481, 1996年3月, pp. 37~46.
- 10) 宇佐美龍夫: "新編日本被害地震総覧[増補改訂版 416-1995]", 東京大学出版会, 1996.
- 11) 翠川三郎: "1985年チリ地震及び1983年日本海中部地震の地震動最大加速度・最大速度振幅の距離減衰", 日本建築学会論文報告集, No. 422, 1991年4月, pp. 37~44.