

鳥取県西部地震及び芸予地震の計測震度の空間分布推定
ESTIMATION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF JMA SEISMIC INTENSITY
FOR THE 2000 TOTTORI-KEN SEIBU AND 2001 GEIYO EARTHQUAKES

齋田淳¹, Khosrow T. Shabestari², 松岡昌志³, 山崎文雄⁴

¹ 株式会社システムアンドデータリサーチ

Jun Saita, System and Data Research, jun@sdr.co.jp

² 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター, Ph.D.

Khosrow T. Shabestari, Earthquake Disaster Mitigation Research Center (EDM), NIED, khosrow@edm.bosai.go.jp

³ 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター, 博(工)

Masashi Matsuoka, Earthquake Disaster Mitigation Research Center (EDM), NIED, matsuoka@edm.bosai.go.jp

⁴ 東京大学 生産技術研究所, 工博

Fumio Yamazaki, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, yamazaki@iis.u-tokyo.ac.jp

SUMMARY

Strong motion indices such as the instrumental JMA seismic intensity provide important information in earthquake emergency management. Because observed seismic motion is strongly affected by site response characteristics, some estimation procedures are necessary to obtain the spatial distributions of these indices. In this study the applicability of the nationwide proposed GIS-based soil amplification ratios have been examined for the October 6, 2000 Tottori-ken Seibu and the March 24, 2001 Geiyo earthquakes. For the two events a relatively good correlation between the observed and estimated ground motion indices are observed.

キーワード: 計測震度, 距離減衰式, 空間分布, クリッキング, 2000年鳥取県西部地震, 2001年芸予地震

Key words: JMA Seismic Intensity, Attenuation relationship, Spatial distribution, Kriging, 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, 2001 Geiyo Earthquake

1 はじめに

最近の被害地震を鑑みると、震災軽減のために早期被害評価をすることの重要性があらためて感じられる。地震直後に得られるマグニチュードと震源位置の情報のみで複雑な被害状況を推定することは難しく、広範囲または高密度の強震観測網から得られる詳細な震度分布情報によって被災地域の絞り込みや適切な意志決定が可能となる。そして、地震発生直後に最大加速度(PGA), 最大速度(PGV), SI 値, 計測震度のような地震動指標の空間分布をほぼリアルタイムに把握することができれば、救助活動や緊急対応に対して非常に効果的である。しかし、地表面における地震動指標の値は地盤特性に非常に強く影響されるため、その影響を地震動分布において適切に取り入れる必要がある。地震動強度は一般に震源・伝播経路・地盤特性に関する項を含む距離減衰式によって評価することができる。このうち地盤特性については、地震のコーダ波の解析、微

動観測、核実験での弱震動などを用いて多くの推定手法が経験的に提案されている。例えば Tinsley and Fumal¹⁾はロサンゼルス盆地において第四紀層の分布と地震動との関連を検討している。Borcherdt²⁾, Anderson ら³⁾はカリフォルニア南部の表層地質構造から地震動増幅に関する定量的な検討を行っている。Wills ら⁴⁾はカリフォルニアの地域的な地震危険度評価の方法として、類似したS波速度構造をもつ地質ごとにグルーピングした地盤条件図を提案している。日本では、松岡・翠川⁵⁾は関東地方に対して地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度AVS30と国土数値情報の相関関係を用いてPGVに対する地盤増幅率を算出した。福和ら⁶⁾は愛知県および名古屋市の地震被害想定で得られた地震動予測結果を利用して、国土数値情報の標高・地形・表層地質からPGAとPGVの増幅倍率を推定している。また大西ら⁷⁾は気象庁の観測点の地形地質を国土数値情報をもとに分類し、これと強震記録の距離減衰式の地点(補正)係数との関係を比較することで、日本全国

で用いることのできる増幅倍率を提案している。

距離減衰式と地盤増幅度を組み合わせることで、山崎⁸⁾は観測値を用いて地震ごとの距離減衰式を構築し、さらに空間補間を用いて精度良く地震動指標を推定する方法を提案している。本研究ではこの手法を2000年10月30日に発生した鳥取県西部地震($M_{JMA} = 7.3$, 北緯35.3度, 東経133.4度, 深さ11km)と、2001年3月24日に発生した芸予地震($M_{JMA} = 6.7$, 北緯34.1度, 東経132.7度, 深さ60km)に適用し、ほぼ同じエリアにおける推定結果が地震によってどのように異なるのかを検討する。対象とする地震強度指標として、ここでは地震発生後に様々な判断基準として用いられることの多い計測震度を取り上げる。

2 地震動指標の空間分布の推定方法

以下の検討では鳥取県西部地震と芸予地震の際に強震ネット(K-NET)および基盤強震観測網(KiK-net)により観測された強震記録を用いて推定を行う。K-NETおよびKiK-net(地表)の記録から水平成分の最大値が 1 cm/s^2 以上の記録を選択したところ、解析に用いる観測波形のデータセットはそれぞれ329組および454組となった。またこの手法の精度を確認するために、気象庁による両地震の観測記録も用いた。またYagi and Kikuchiの断層モデル^{9), 10)}を参考にして鳥取県西部地震は長さ20km幅10kmの左ずれ正断層、芸予地震は長さ25km幅10kmの正断層によるものとし、これらの断層面から観測点までの断層最短距離 r を求めた。

2.1 地震動指標の距離減衰

大西⁷⁾は、国土数値情報を用いて全国をほぼ一律の基準に従って地形地質分類し、各分類に対する地点係数の平均値により地震動強度指標値の増幅度を推定する方法を提案している。地点係数はMoras and Yamazaki¹¹⁾の距離減衰式の補正項として導入された地点ごとの揺れやすさを表す係数で、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる。これを各地形地質分類ごとに平均したものが平均地点係数である。以下の検討では「山地」に対する計測震度の平均地点係数の差を地盤増幅度とみなす。

地表面において計測震度の観測値が得られると地形地質分類ごとの地盤増幅度を差し引いて基盤面における計測震度 I_{BASE} を算出する。この分類は観測点が含まれる国土数値情報の1km四方メッシュのものであり、必ずしも観測点そのものの分類を表しているわけではない。次に、地震ごとに観測値に基づいて、以下の関数形で表される基盤面における距離減衰式を構築する。

$$I_{BASE} = b_0 + b_1 r + b_2 \log_{10}(r + d) + e \quad (1)$$

ただし r は断層最短距離(km)、 b_0 、 b_1 、 b_2 は回帰により求める係数である。 $b_1 r$ と $b_2 \log_{10}(r + d)$ の項は非弾性減衰と

Table 1 Results of the regression analyses for the JMA Seismic Intensity at the base outcrop level.

	b_0	b_1	b_2	d (km)	e
Tottori EQ	7.527	-0.00416	-1.89	5.0	0.496
Geiyo EQ	8.695	-0.00956	-1.89	0.0	0.526

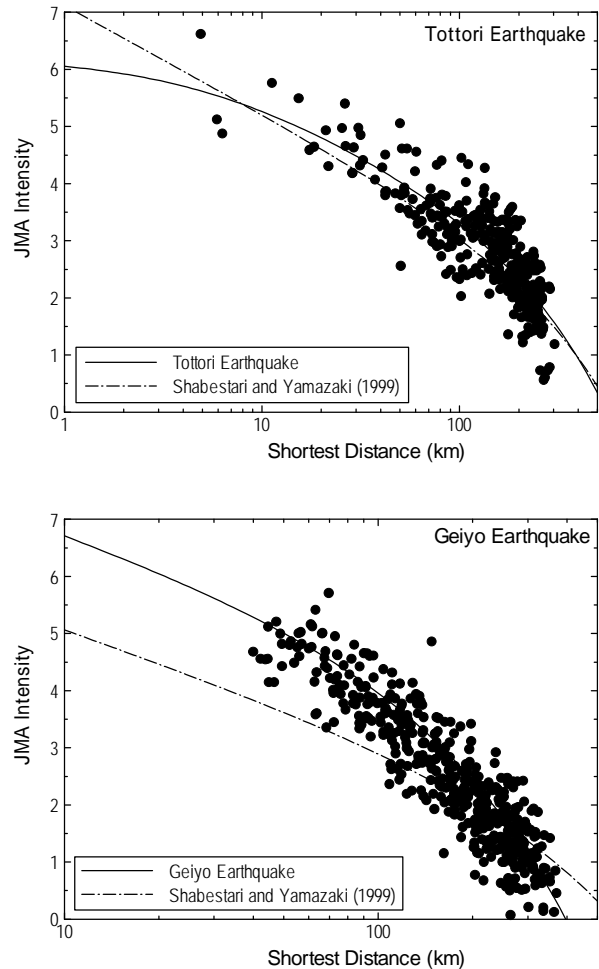


Fig. 1 Mean predicted I_{JMA} by the attenuation relationships and converted observed I_{JMA} at the rock outcrop level.

幾何学的減衰をそれぞれ示しており、ここでは b_2 は童・山崎¹²⁾に従って-1.89とした。さらに d は震源近傍で地震動強度が飽和する影響を、 e は誤差をそれぞれ表している。震源近傍で地震動強度が飽和する影響は、幾何学的減衰の項にのみ適用したが、これは幾何学的減衰と比較して震源近傍では非弾性減衰が無視できるためである。鳥取県西部地震ではこの項が一定の値をとるものと仮定し、非線形の最小自乗法を誤差の和が最小になるまで繰り返して用いた。ただし、芸予地震の場合は断層面からの最短距離が

40km以上の記録のみであったため震源近傍の頭打ちを確認することができず、この項を無視した。

鳥取県西部地震および芸予地震の基盤面における計測震度 I_{BASE} に対する回帰分析の結果を Table 1 に示す。また、距離減衰式と基盤面相当の計測震度の関係を Fig. 1 に示す。ここでは、距離減衰式を各地震に対して構築したが、Shabestari and Yamazaki¹³⁾は K-NET の 823 観測点で得られた強震記録を用いて PGA, PGV, 計測震度について距離減衰式を構築した。計測震度 I_{JMA} に対する距離減衰式を式(2)に示す。

$$I_{JMA} = 1.346 + 0.855M_{JMA} - 0.00313r - 1.89 \log_{10} r + 0.00774h + c_i \quad (2)$$

ここで、 M_{JMA} は気象庁マグニチュード、 h は震源深さ、 c_i は地点係数である。

Fig. 1 には式(1)を実線、式(2)で c_i に「山地」の平均地点係数を与えたものを一点鎖線で表している。鳥取県西部地震の場合、式(2)は震源近傍の頭打ちを考慮していないため、最短断層距離が 10 km 以下で式(1)に対して乖離が見られるが、それ以外では比較的類似した値となっている。このため基盤相当の計測震度は式(1)と式(2)で比較的良好な対応を見せている。これに対して芸予地震の場合は、式(2)は式(1)と大きく乖離しており、基盤相当の計測震度の対応もよくない。このため、芸予地震に対して式(2)を用いると推定誤差が大きくなると考えられる。

以上により、多くの地震記録を用いて構築した距離減衰式は地震により推定精度が異なるが、観測値から地震ごとの距離減衰式を構築することで、地震動強度をより正確に把握できることがわかった。

2.2 空間補間

各地震ごとに距離減衰式を構築し、国土数値情報の各メッシュに対する地盤増幅度を加えることで精度良く計測震度の地表面分布を推定することができるが、さらに観測値を用いて空間的に補間することでより推定精度が向上することが期待される。

山崎ら⁸⁾は、平均値(トレンド成分)と共分散を既知とする Simple Kriging 法¹⁴⁾を用いて空間補間を行うことを提案している。この方法を兵庫県南部地震に対して適用したところ、PGV の分布と高速道路の高架橋の被害がよく対応していることを示している⁸⁾。この方法では、基盤面における距離減衰式をトレンド成分、距離減衰式の値と観測値から地盤増幅度を差し引いて求めた基盤相当の値の残差をランダム成分として空間補間を行う。また共分散関数は距離に比例する指数関数型とした。最終的には基盤面における値に空間補間した残差を加え、さらに地盤増幅度を加えることで計測震度の地表面分布を推定することができる。この空間分布は観測点では推定値が観測値と等しくなり、そこから離れるにしたがって基盤における距離減衰式に地盤増幅度を加えた推定値に近づく。

3 推定結果

鳥取県西部地震および芸予地震における計測震度の空間分布を推定した。ここでは、観測点の影響を表す相関距離を山崎ら⁸⁾に従い 5.0 km とした。また、Kriging 法を用いた空間補間を行うにあたり、狭い範囲に複数の地震計があり、かつその値に大きな差があると補間が困難になる場合が生じる。そこで、10 km の範囲内に複数の観測点が含まれている場合は、その中で計測震度が最大の地点のみを選択した。Fig. 2 は以上により得られた空間分布を示している。両地震とも推定値は地震計設置点で観測点と等しくなっており自然な分布が得られている。ただし、相関距離の決め方や、狭い範囲に多くの観測点がある場合の扱いについては今後も検討が必要である。とくにここでは狭い範囲の中で計測震度が最大のものを選択したが、このようにするとその周辺の推定値が大きくなる恐れがある。

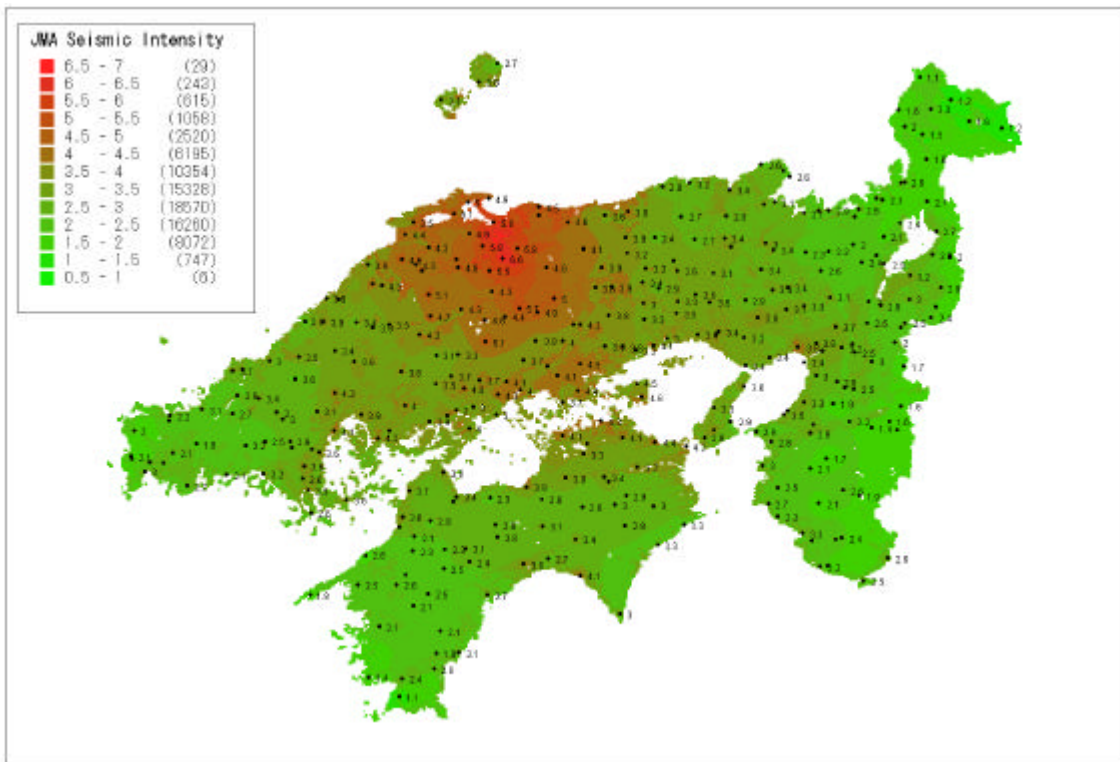
Fig. 3 は各 K-NET, KiK-net の観測点における観測値と推定値の関係を示している。空間補間を行った場合の方が空間補間を用いていない推定値よりもバラツキが小さくなっている。なお、前述のように空間補間に用いた観測点では推定値と観測値が等しくなっている。

つぎに K-NET, KiK-net の観測記録を用いた推定値と他の機関による観測値との対応を確認した。Fig. 4 は気象庁の強震観測点の計測震度と、地震ごとの距離減衰式と地盤増幅を用いた推定結果を空間補間して得られた値(印)とを比較したものであるが、両地震とも良好な対応を見せている。またこの図には Shabestari and Yamazaki¹²⁾による距離減衰式によって推定した結果を + 印で示している。Fig. 1 で得られたのと同じように、鳥取県西部地震の場合はこの推定方法でも比較的精度良く推定できているのに対して、芸予地震の場合は観測値と推定値の乖離が大きい。このことから観測記録を用いて各地震に固有の距離減衰式を構築し、さらに空間補間をおこなうことで、高い精度で計測震度の空間分布が推定できることがわかる。

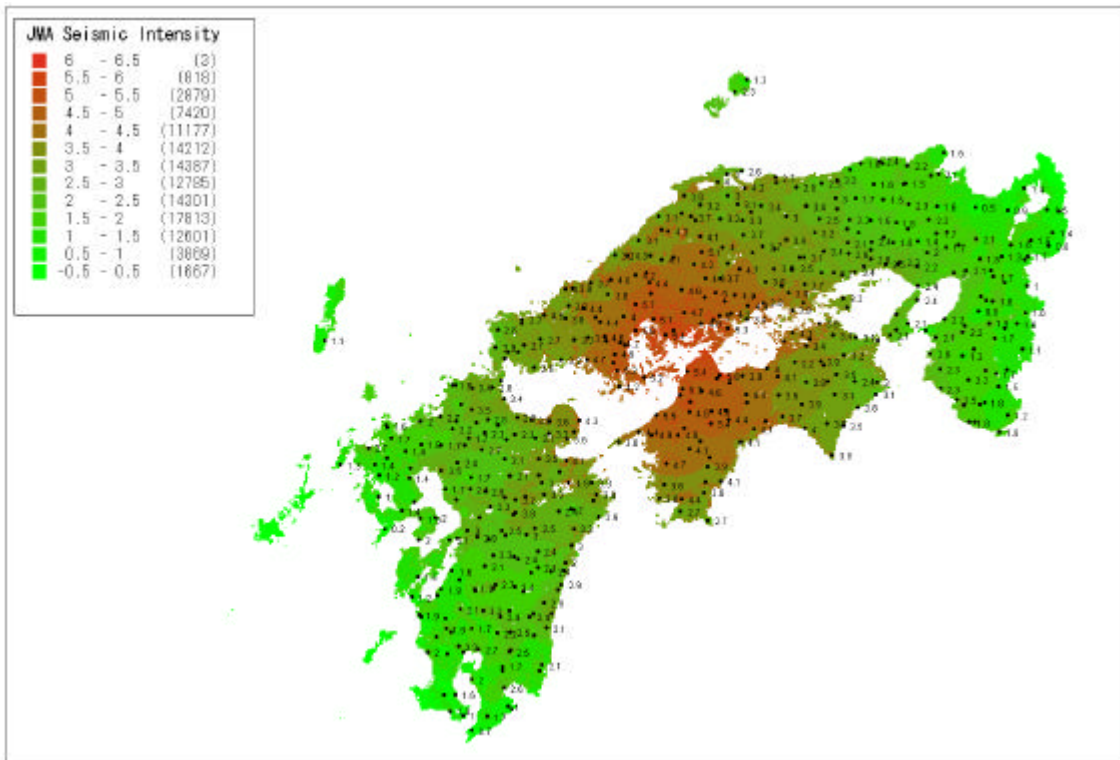
4 まとめ

本研究では、各地震ごとに距離減衰式を構築して観測値を用いた空間補間により計測震度を推定する方法を鳥取県西部地震及び芸予地震に適用し、その精度を確認した。この方法は、地盤特性の影響を除去するために基盤における距離減衰式を構築し、それをトレンド成分とする Kriging 法を適用したものに国土数値情報の各メッシュごとに与えられる地盤増幅度を加えて地表面における計測震度の分布を得るものである。

まず距離減衰式について多くの地震記録によるものと各地震ごとに構築したものを比較したところ、鳥取県西部地震の場合は両距離減衰式がほぼ同じ推定結果を与えるのに対して、芸予地震の場合は両者で大きな乖離が見られた。地震直後に観測値が得られるといった条件下では、距



(a) Tottori Earthquake



(b) Geiyo Earthquake

Fig. 2 Spatial distribution for the I_{JMA}

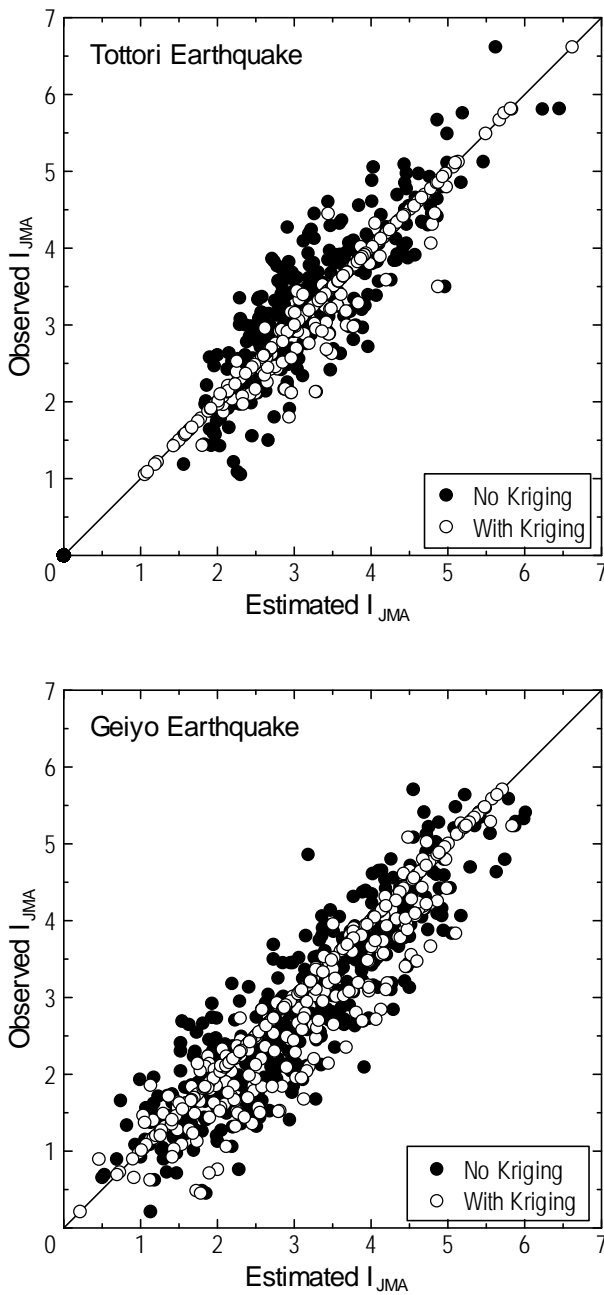


Fig. 3 Relationship between the observed and estimated I_{JMA}

離減衰式を構築した方がより高い精度が得られるといえよう。

つぎに K-NET および KiK-net の観測値を用いて推定した結果を気象庁の観測値と比較したところ、両地震とも比較的良い推定結果を示した。観測値の空間補間により計測震度分布を推定する方法は、各地震ごとに距離減衰式を構築することで地震ごとの変動を除去できること、空間補間をすることで観測点で推定値が観測値を再現する自然な空間分布が得られることという利点があり、検討を行った二地震に対して精度良い推定結果が得られた。

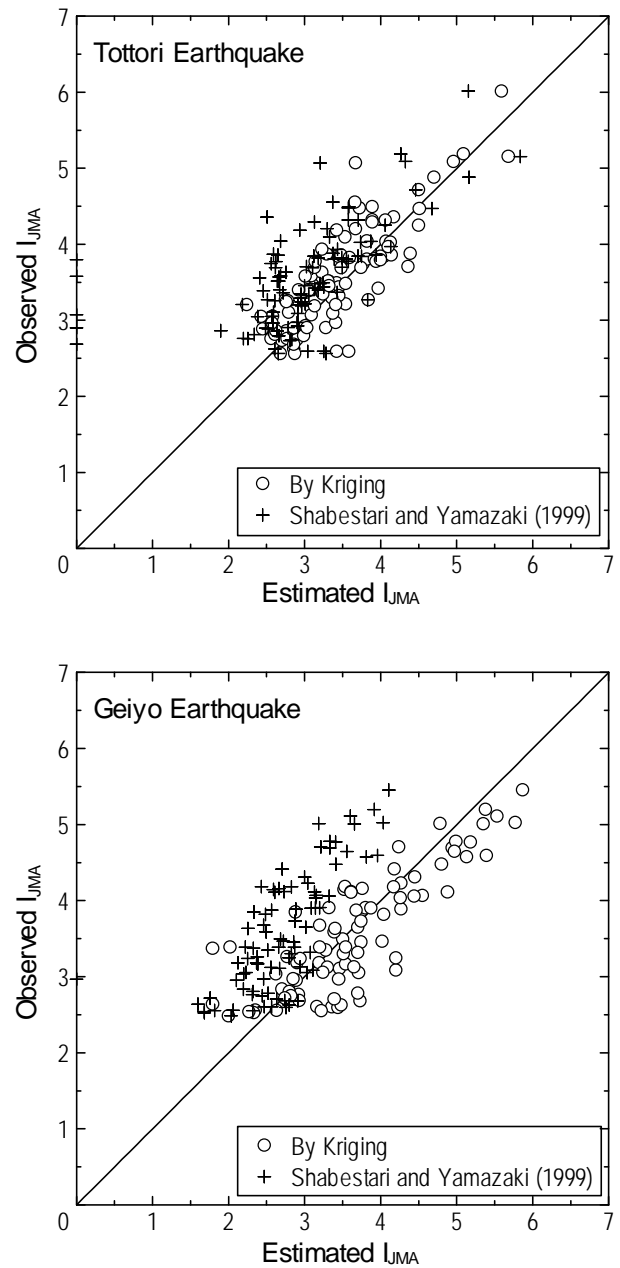


Fig. 4 Comparison of the observed I_{JMA} by the JMA seismic network and the estimated values

参考文献

- 1) Tinsley, J.C., and T.E. Fumal: Mapping quaternary sedimentary deposits for areal variations in shaking response, evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region, an earth science perspective, *J.I. Ziony, U.S. Geological Survey Professional papers*, No. 1360, pp. 101-125, 1985.

- 2) Borchardt, R.D.: Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 60, pp. 29-61, 1970.
- 3) Anderson, J.G., Y. Lee, Y. Zeng, and S. Day: Control of strong motion by the upper 30 meters, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 6, pp. 1749-1759, 1996.
- 4) Wills, C.J., M. Petersen, W.A. Bryant, M. Reichle, G.J. Saucedo, S. Tan, G. Taylor, and J. Treiman: A site-conditions map for California based on geology and shear-wave velocity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 6B, pp. S187-S208, 2000.
- 5) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 447, pp. 51-56, 1993.
- 6) 福和伸夫, 荒川政知, 西阪理永: 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, Vol.44B, pp. 77-84, 1998.
- 7) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁記録の距離減衰式に基づく地盤増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 79-91, 1999.
- 8) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3491-3496, 1998.
- 9) Yagi, Y., and M. Kikuchi: Source rupture process of the October 6, 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, <http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottori/2000>.
- 10) Yagi, Y., and M. Kikuchi: Source rupture process of the March 24, 2001 Geiyo earthquake, <http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/Aki-nada/2001>.
- 11) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, pp. 1343-1358, 1995.
- 12) 董華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, Vol.48, No.11, pp.547-550, 1996.
- 13) Shabestari, T.K., and F. Yamazaki: Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 137-140, 1999.
- 14) 野田茂, 星谷勝: 条件付き確率場の補間法に関する一提案, 鳥取大学工学部研究報告, 28, pp. 175-197, 1997.