

全国地形分類図による表層地盤特性のデータベースを用いた早期地震動推定
Real-Time Strong Motion Estimations using Digital Maps of Sub-Surface Amplification Factors in
Japan

久保智弘¹, 久田嘉章², 柴山明寛¹

大井昌弘³, 石田瑞穂³, 藤原広行³, 中山圭子⁴

¹ 工学院大学大学院工学研究科建築学専攻,

Tomohiro Kubo, Graduate School of Engineering, Kogakuin University, dm01021@ccs.kogakuin.ac.jp

² 工学院大学建築学科, 助教授 工博

Yoshiaki Hisada, Dept. of Architectural Engineering, Kogakuin University, hisada@cc.kogakuin.ac.jp

³ 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

⁴ ジオ・システム・ソリューション

Keiko Nakayama, Geo System Solution, Inc.

SUMMARY

We estimated the strong motion for real-time purposes using digital maps of the soil-type classifications and the amplification factors in Japan. We evaluated their accuracies by comparing the strong ground motions between the estimations and the records of K-Net for recent earthquakes in Japan. We estimated the strong motions using the amplification factors and the two methods: the attenuation relation (Si and Midorikawa, 1999), and an interpolation method using the records. We found that the second method gave more reliable results than the first method, because the first method strongly depended on accuracies of the source and path effects. However, since we may not be able to obtain quickly the strong motion records near highly damaged areas, it would be efficient to evaluate the strong motions using the first method immediately after an earthquake, then to replace them by the second method after getting the records. Finally, we compared the site amplification factors evaluated by the two methods. The first is based on the average of shear wave velocities from the free surface to the 30m depths using boring data. The second is the above-mentioned method based on the soil-type classifications. The comparisons showed that the first method was more accurate and reliable. Therefore, it may be necessary to replace the digital maps of the site amplifications by those using the first method, when we obtain boring data

キーワード: 地形分類図, ボーリングデータ, 増幅率, 早期地震動推定, 距離減衰式, K-Net

Key words: soil-type classification, boring data, amplification factor, real-time strong motion estimation, attenuation relations, K-Net

1 はじめに

1995年に起きた阪神・淡路大震災では、国や自治体における地震防災対策の様々な問題点が浮き彫りになった。すなわち、事前準備として適切な震源及び地盤情報を考慮した地震被害想定の不備が明らかになり、その結果、地震被害想定の大規模な見直しが行われた。また直後対応としては

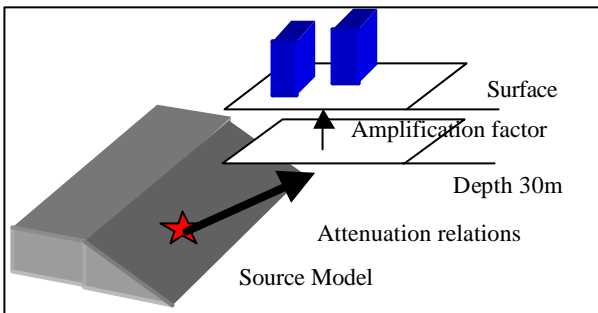
適切な地震災害情報の把握と、それに基づいた初動体制の遅れという問題も浮き彫りにされた。その結果、国や自治体独自で地震被害想定や地震情報伝達システムの構築がなされてきた。そういった社会情勢を受け、文部科学省防災科学技術研究所ではリアルタイム地震情報伝達システム(ROSE)¹⁾を構築した。著者らは、現在投稿中の論文²⁾で早期地震動推定システムであるROSEの基礎となる全国の

地盤増幅特性マップの整備と、距離減衰式及び強震記録を元にした地震動推定の精度のチェックを行った。本研究の目的はそこで作成した全国規模の表層地盤特性のデータベースを用いた早期地震動推定を様々な地震へ適応させることである。検討方法は近年、発生した地震を対象として、地震被害想定支援マニュアル³⁾をもとに距離減衰式とK-Net⁴⁾による強震動記録を用いた面的な地震動推定を用い、実際に観測された強震記録の結果と比較し、精度の検討を行う。その際、地盤増幅特性の評価は地形分類と標高データをもとにした手法⁵⁾(地形分類図による増幅率)と、ポーリングデータをもとにした手法⁶⁾(ポーリングデータによる増幅率)の比較検討も行う。

2 地震動推定方法

地震動推定には地震被害想定支援マニュアルをもとに2つの推定方法を用いる。ひとつは震源データから距離減衰式を用いて地震動推定を行う方法である。Fig.1a に示すように、まず工学基盤上の最大速度を求め、その点における地盤増幅率を乗じて地表面における最大速度を求める。距離減衰式として、ここでは司・翠川式⁷⁾を用いる。もうひとつの地震動推定方法は、強震観測データを補間して任意点における地震動を求める方法である。Fig.1b に示すように、この方法では、まず観測された各点における強震観測データの最大速度値から、それぞれの地盤増幅率を除いて工学基盤上での速度値を求める。そして求めたい任意点から最大50km 以内かつ最大5点の観測値を用いて、次式による距離の重み付けを行い、任意点における最大速度を

(a) Estimation of Vmax using the attenuation relation



(b) Estimation of Vmax using strong ground motion records

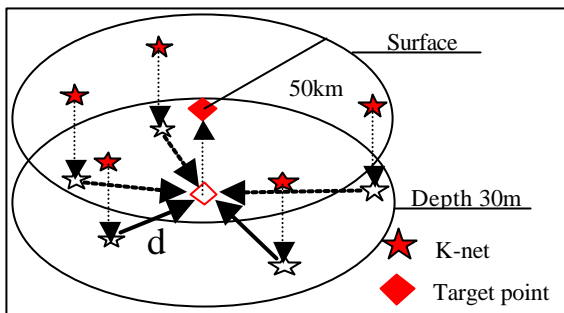


Fig.1 The methodologies for estimating the peak ground velocities using (a) the attenuation relations, and (b) the strong motion records.

算出し、その任意点における増幅率を乗じて地表面における推定値を求める。

$$V_b = \frac{\sum_{i=1}^s V_{bi}}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i}} \quad (1)$$

ここで、 V_b と V_{bi} は任意点と i 観測点における工学基盤面での速度値、 d_i は任意点と i 観測点における距離を表す。この補間推定方法は、最大 50km 以内かつ 5 点の観測値などの条件設定により観測値の抽出が機械的に行えるため、速やかな計算を可能である。従って即時的な地震動推定に適している。

震度 I は、地震被害想定支援マニュアルにより最大速度値 V から次式を用いて推定する。

$$I = 2.02 * \log V + 2.4 \quad (2)$$

3 表層地盤特性と地震動推定法の検討

3.1 対象とする地震と強震観測データ

上記に示した表層地盤特性データと地震動評価法を用いて求めた推定値と、実際に観測された強震記録を比較し、手法の妥当性を検討する。今回、近年発生した M_w が 6 以上のものを選び、Table.1 に検討した地震情報を示す。表の震源パラメータは、防災科学技術研究所の Freesia⁸⁾ による値を用いた。また使用する強震観測データは K-Net を使用し、震源から 150km 以内のデータを使用した。

一方、本研究での地震動推定の比較は、最も簡便な強震動の尺度である観測震度と推定震度で行う。観測震度は K-NET により観測された加速度波形から定義通り⁹⁾ に計算した計測震度を用い、推定震度は推定した地表最大速度から(2)式により算出した震度を用いる。また、ポーリングデータによる増幅率は本来、深さ 30m までの平均 S 波速度を使うのに対し、K-Net の観測点では深さ 20m までのデータしか使用できないため、既往の論文⁷⁾ に従い最下層の値を深さ 30m まで引き伸ばして使用した。

Table.1 Catalog of the three earthquakes used in this study

Earthquake	Date	Longitude	Latitude	Depth(km)	Mw	Mima
Kagoshima Pref. Northwestern	1997/3/26	130.4	32	8	6.1	6.5
Kagoshima Pref. Northwestern	1997/5/13	130.3	31.9	11	6	6.3
Chiba Northeastern	2000/6/3	140.8	35.7	50	6.1	5.8
Tottri Pref. Western	2000/10/3	133.4	35.3	11	6.6	7.1
Geiyo	2001/3/24	132.7	34.1	50	6.8	6.4
Iwate Pref. Southern	2001/12/2	141.3	39.4	119	6.5	6.3

3.2 鹿児島県北東部地震の推定結果

この地震は 3 月 26 日と 5 月 13 日に発生した。ここでは 3 月 26 日に発生した地震を取り上げ、検討する。震源深さが 8km と浅いため、距離減衰式の断層タイプを地殻内とした。Fig.2 は震源及び使用した K-Net のデータである。Fig.3 は縦軸に観測された計測震度ととり、横軸に距離減

衰式から推定した震度をとった観測値と推定値の散布図である。図中、地形分類図による増幅率を使用した結果(soil-type)を黒印で、最小二乗法による近似線を細い線で示し、一方、ボーリングデータによる増幅率を使用した結果(boring)を白印で、近似線を太い線で示している。Table.2はFig.3にある、推定震度と観測震度の相関係数及び、推定震度から観測震度を引いた誤差の平均値を示す。Fig.3aは距離減衰式による推定結果で、この図中の回帰直線を見ると、地形分類図による増幅率よりもボーリングデータによる増幅率を使用したほうが正解値である対角線(破線)に近い結果となっている。Fig.3bは強震観測データによる推定結果で、この図から地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率の回帰直線が対角線に近いことから、強震観測データによる推定方法では地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率ではあまり違いが見られず、増幅率にあまり依存しない推定結果が得られた。次にTable.2の相関係数については両者の推定方法で地形分類図による増幅率よりボーリングデータによる増幅率を用いたものの方が高くなる傾向が見られ、誤差の平均値も低くなることからボーリングデータによる増幅率を用いることで推定結果の精度をよく出来ることがわかった。最後に推定方法について、Fig.3aと3bを比較すると、距離減衰式による推定方法よりも強震観測データによる推定方法が対角線に近いが、Table.2から距離減衰式による推定方法が強震観測データによる推定方法よりも、推定結果のばらつきが小さいため、相関係数と誤差の平均でよい結果が得られた。



Fig.2 The locations of the epicenters and the K-Net stations.

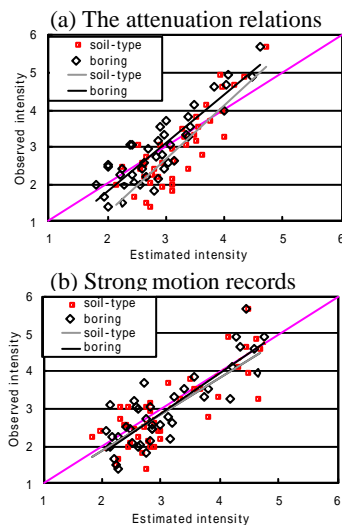


Fig.3 The comparisons of intensities between the observations and the estimations using the attenuation relation, for the (a) using the attenuation relation (b) using strong ground motion records.

Table.2 The correlation coefficients from Fig.3, the average errors of the estimated intensities.

	attenuation relations		strong ground motion	
	soil-type	boring	soil-type	boring
Correlation coefficient	0.849	0.888	0.805	0.843
Average of error	0.215	-0.052	0.141	0.105

3.3 千葉県北東部地震の推定結果

この地震の震源深さは50kmであり、関東平野下のプレート構造では、地殻内、プレート間地震、プレート内地震のいずれの可能性もあるが、ここでは推定値が安全側に大きめに評価されるようにプレート内地震とした。この地震については投稿中の論文でも取り上げたが、今回、関東平野における代表的な地震として取り扱った。Fig.4は震源及び使用したK-Netのデータである。Fig.5はFig.3と同様、縦軸に観測された計測震度を取り、横軸に距離減衰式から推定した震度をとった観測値と推定値の散布図である。Table.3はTable.2と同様にFig.5にある、推定震度と観測震度の相関係数及び、推定震度から観測震度を引いた誤差の平均値を示す。Fig.5aは距離減衰式による推定結果で、この図から推定結果が全体的に対角線よりも右側に分布しているため過大評価となっていることがわかる。増幅率については地形分類図による増幅率よりボーリングデータによる増幅率を用いたほうが推定結果が正解値に近づいた結果となった。Fig.5bは強震観測データによる推定結果で、地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率の回帰直線が対角線に近いことから、どちらの増幅率を用いても安定した結果が得られることがわかる。次にTable.3の相関係数については両者の推定方法において地形分類図による増幅率よりボーリングデータによる増幅率を用いた方が高くなる傾向が見られ、誤差の平均値も低くなることからボーリングデータによる増幅率を用いることで推定結果の精度をよく出来ることがわかった。最後に推定方法を比較すると、Fig.5a,5bより、距離減衰式による推定方法よりも強震観測データによる推定方法のほうが対角線に近く、Table.3増幅率については地形分類図による増幅率より、ボーリングデータによる増幅率のほうが相関係数と誤差が小さいことから精度のよい結果が得られることがわかった。

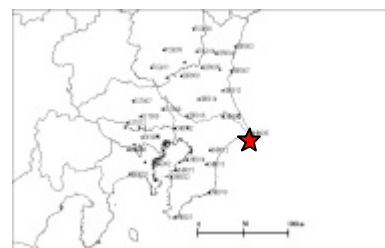


Fig.4 The locations of the epicenters and the K-Net stations.

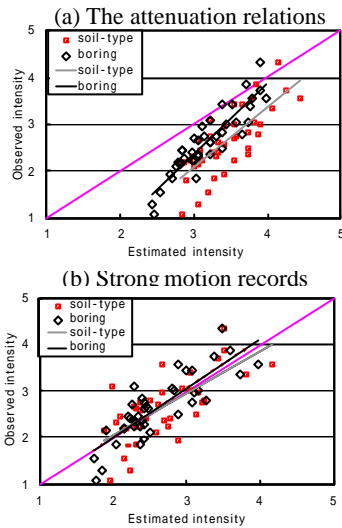


Fig.5 The comparisons of intensities between the observations and the estimations using the attenuation relation, for the (a) using the attenuation relation (b) using strong ground motion records.

Table.3 The correlation coefficients from Fig.5, the average errors of the estimated intensities.

	attenuation relations		strong ground motion	
	soil-type	boring	soil-type	boring
Correlation coefficient	0.769	0.909	0.709	0.842
Average of error	0.801	0.548	0.0031	-0.027

3.4 鳥取県西部地震の推定結果

この地震の震源深さは11kmであったことから地殻内地震とした。Fig.6は震源及び使用したK-Netのデータである。Fig.7はFig.3と同様、縦軸に観測された計測震度を取り、横軸に距離減衰式から推定した震度をとった、観測値と推定値の散布図である。Table.4はTable.2と同様にFig.7にある、推定震度と観測震度の相関係数及び、推定震度から観測震度を引いた誤差の平均値を示す。Fig.7aは距離減衰式による推定結果で、ボーリングデータによる増幅率の回帰直線と地形分類図による増幅率の回帰直線の傾きがほぼ等しく、ボーリングデータによる増幅率のほうが過小評価となっていて、地形分類図による増幅率のほうが対角線に近いことから、地形分類図による増幅率のほうがボーリングデータによる増幅率のほうよりも増幅率を大きめに評価することがわかった。Fig.7bは強震観測データによる推定結果で、回帰直線を見ると地形分類図による増幅率よりもボーリングデータによる増幅率を用いたほうが対角線に近い結果が得られた。また相関係数でも地形分類図によるものよりボーリングデータによるものほうが高い値を示した。次にTable.4の相関係数については両者の推定方法において地形分類図による増幅率よりもボーリングデータによる増幅率を用いた方が高くなる傾向が見られた。誤差の平均値については、距離減衰式による推定方法ではボーリングによる増幅率を用いると大きくなったが、強震観測データによる推定方法ではボーリングによる増幅率を用いると低くなる傾向が見られた。最後



Fig.6 The locations of the epicenters and the K-Net stations.

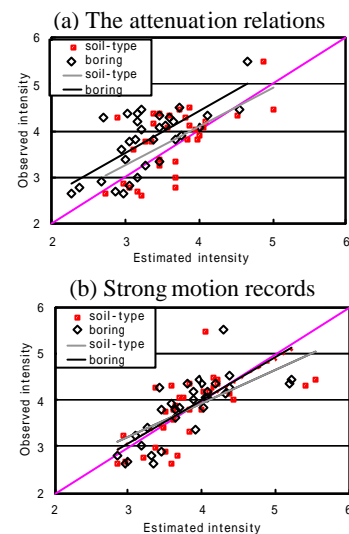


Fig.7 The comparisons of intensities between the observations and the estimations using the attenuation relation, for the (a) using the attenuation relation (b) using strong ground motion records.

Table.4 The correlation coefficients from Fig.7, the average errors of the estimated intensities.

	attenuation relations		strong ground motion	
	soil-type	boring	soil-type	boring
Correlation coefficient	0.631	0.702	0.626	0.759
Average of error	-0.157	-0.473	0.025	0.003

3.5 芸予地震の推定結果

この地震の震源深さは50kmであり、参考文献¹⁰⁾よりフィリピン海プレート内地震とした。Fig.8は震源及び使用したK-netのデータである。Fig.9はFig.6と同様、縦軸に観測された計測震度を取り、横軸に距離減衰式から推定した震度をとった観測値と推定値の散布図である。Table.5はTable.2と同様にFig.9にある、推定震度と観測震度の相関係数及び、推定震度から観測震度を引いた誤差の平均値を示す。Fig.9aは距離減衰式による推定結果で、地形

分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率を見ると推定結果は正解値である対角線近くに分布しているが、回帰直線を見ると対角線よりも傾き、大きいことから、精度のよい結果は得られなかった。また、鳥取県西部地震のときと同様にボーリングデータによる増幅率の回帰直線と地形分類図による増幅率の回帰直線から地形分類図による増幅率がボーリングデータによる増幅率よりも大きめに評価していることがわかる。Fig.9bは強震観測データによる推定結果で、推定結果が地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率で大きくばらついた結果となっており、距離減衰式による推定と同様、精度のよい結果が得られなかった。次に、Table.5の相関係数で比較すると地形分類図によるものよりもボーリングデータによるもののほうが高いことからボーリングデータによる増幅率を用いたほうが精度のよい結果となっているが、誤差の平均では強震観測データによる推定方法で誤差の平均が大きくなった。最後に推定方法を比較すると、Fig.9a、9bより、強震観測データによる推定方法よりも距離減衰式による推定方法のほうが推定結果のばらつきがあまり大きくなく、Table.5の相関係数、誤差の平均からも相関係数が高く、誤差の平均も小さいことから精度のよい結果が得られたといえる。



Fig.8 The locations of the epicenters and the K-Net stations.

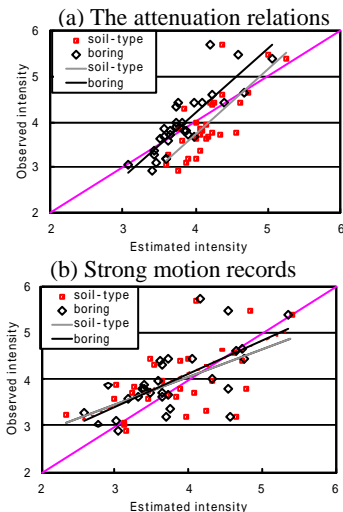


Fig.9 The comparisons of intensities between the observations and the estimations using the attenuation relation, for the (a) using the attenuation relation (b) using strong ground motion records.

Table.5 The correlation coefficients from Fig.9, the average errors of the estimated intensities.

	attenuation relations		strong ground motion	
	soil-type	boring	soil-type	boring
Correlation coefficient	0.631	0.702	0.57	0.66
Average of error	0.207	-0.124	-0.119	-0.183

3.6 岩手県南部内陸地震の推定結果

この地震の震源深さは 119km であり、震源深さが深いため、プレート内地震とした。Fig.10は震源及び使用した K-net のデータである。Fig.11はFig.3と同様、縦軸に観測された計測震度を取り、横軸に距離減衰式から推定した震度をとった観測値と推定値の散布図である。Table.6はTable.2と同様にFig.11にある、推定震度と観測震度の相関係数及び、推定震度から観測震度を引いた誤差の平均値を示す。Fig.11aは、距離減衰式による推定結果で、地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率とも推定結果が対角線よりも右側に分布していることから、推定結果が過大評価となっていることがわかる。Fig.11bは強震観測データによる推定結果で、地形分類図による増幅率とボーリングデータによる増幅率ではボーリングデータによる増幅率よりも地形分類図による増幅率のほうが対角線に近い値となっている。次に、Table.6の相関係数で比較すると地形分類図によるものよりもボーリングデータによるもののほうが精度のよい結果が得られたが、誤差の平均では強震観測データによる推定において、誤差が大きくなった。最後に推定方法を比較すると、Fig.11a、11bより、推定結果の回帰直線が距離減衰式による推定結果よりも強震観測データによる推定結果のほうが対角線に近い値が得られ、かつTable.6の相関係数も高く、誤差の平均も小さいことから精度のよい結果が得られたことがわかった。



Fig.10 The locations of the epicenters and the K-Net stations.

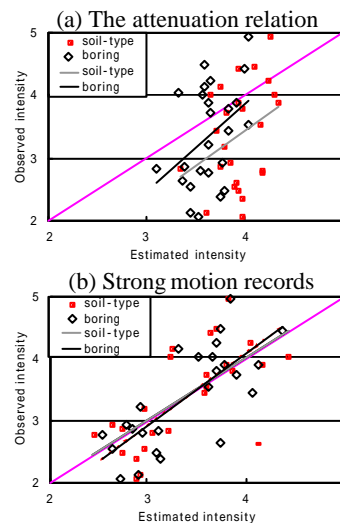


Fig.11 The comparisons of intensities between the observations and the estimations using the attenuation relation, for the (a) using the attenuation relation (b) using strong ground motion records.

Table.6 The correlation coefficients from Fig.11, the average errors of the estimated intensities.

	attenuation relations		strong ground motion	
	soil-type	boring	soil-type	boring
Correlation coefficient	0.335	0.413	0.668	0.748
Average of error	0.569	0.272	0.003	0.024

4. 議論及びまとめ

本研究では投稿中の論文で作成した表層地盤特性のデータベースを用いた全国規模の早期地震動推定への適応を近年発生し、かつモーメントマグニチュードが6以上の地震を対象として、検討した。推定方法は広域な地域を対象に、地震直後の即時地震動推定を行うことを前提として、距離減衰式及び強震観測データによる補間法を使用して地震動（震度）の推定を行い、実際に観測された強震記録による計測震度との比較から精度を検討した。その際、地盤増幅特性の評価は地形分類と標高データをもとにした手法と、ボーリングデータをもとにした手法の比較検討も行った。その結果、強震観測データによる推定結果は、距離減衰式のように震源データや伝播特性の精度に依存しないため、安定かつ良好な結果を示すことが確認された。従って地震直後の即時地震動推定を行う場合、まず震源情報を得られた段階で距離減衰式による暫定的な地震動推定を行い、強震動データが得られた段階で順次強震データによる推定結果に置き換えて行くことが有効であると考えられる。特に地震発生後しばらくは、被害の甚大な地域からは強震動データが入手できない可能性があるため、距離減衰式による推定結果も有効に活用すべきである。表層地盤特性の評価については、検討した2つの地震動推定法において、地形分類図による増幅率よりもボーリングデータによる増幅率のほうがよい推定結果が得られた。また、中国・四国地方で発生した地震として取り上げた鳥取県西部地震と芸予地震において、距離減衰式による推定結果に着目すると、ボーリングデータによる増幅率よりも地形分類図による増幅率のほうは推定結果が過大となる傾向が見られた。これはボーリングデータによる増幅率よりも地形分類図による増幅率が表層地盤特性を大きめ評価していることから過大評価になってしまうと考えられ、このことは既往の論文¹¹⁾でも述べられており、本研究でもそのことが確認できた。このことから、投稿中の論文で作成した表層地盤特性のデータベースを今後、ボーリングデータが得られ次第置き換え、改善していく必要があることが確認できた。

謝辞

本研究は強震記録として K-NET のデータと震源情報として Freesia を使用させて頂きました。また、建設との共同研究「GISを用いた地震被害予測システムの構築（平成 11 年度）」、

防災科学技術研究所との共同研究「地震素過程と地球内部構造の解明に関する総合研究（平成 10～12 年度）」、及び「強震動・震災被害予測システムに関する研究（平成 13 年度）」、文部科学省による学術フロンティア事業である「工学院大学 地震防災・環境研究センター」による研究助成によって行われました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大井昌弘：地震情報伝達システム(ROSE)、強震観測ネットワークに関するシンポジウム 21 世紀の強震観測ネットワークとそのデータ流通をデザインする - 鳥取県西部地震・芸予地震の経験を踏まえて - , 日本地震学会主催, pp.21-24, 2001
- 2) 久保智弘, 久田嘉章, 柴山明寛, 大井昌弘, 石田瑞穂, 藤原広行, 中山圭子：全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化及び、面的な早期地震動推定法への適応, 日本地震学会「地震」へ投稿, 2002 年 3 月 30 日
- 3) 内閣府：内閣府地震被害想定支援マニュアル（2001 改訂版）, 2001
- 4) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク(K-Net), <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 5) 翠川三郎, 松岡昌志：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査 Vol.48, No.6, pp. 519-529, 1995
- 6) 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, 第 443 号, pp. 65-71, 1993
- 7) 司 宏俊, 翠川三郎：断層タイプ及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報告集, 第 523 号, pp 63-70, 1999
- 8) 防災科学技術研究所：Freesia Network, <http://argent.geo.bosai.go.jp/freesia/index.html>
- 9) 気象庁：震度の算出方法, 震度を知る - 基礎知識とその応用 - , 1996
- 10) 日本建築学会：平成 13 年芸予地震被害調査速報会資料
- 11) 藤本一雄, 翠川三郎：1995 年兵庫県南部地震の東播磨地域での地震動評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B-2, pp.205-206, 1999 年 9 月