

計測震度と最大加速度および最大速度に関する一考察

宮崎 雅徳¹・尻無濱 昭三²・秋吉 卓³

¹正会員 工博 九州東海大学教授 工学部建築学科 (〒862-8652 熊本市渡鹿9丁目 1-1)

²正会員 工修 鉄建建設株式会社 技術研究所 (〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1)

³正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目 39-1)

1996年に改訂された気象庁震度(計測震度)と物理量の関係について科学技術庁防災科学研究所の強震ネット(K-NET)の強震記録を用いて検討する。対象とする地震は1996年10月から1998年12月までに九州および周辺地域で観測された159地震、3167記録(マグニチュードM:3.2~6.6、震度I:0.0~5.9)を、物理量としては最大加速度および最大速度を用いた。物理量をマグニチュード別に分類して回帰分析を行うことで、中小規模の地震まで適応可能な新たな計測震度と最大加速度および最大速度の関係を提案した。

Key Words : *measured seismic intensity, peak ground acceleration, peak ground velocity, empirical equation*

1. はじめに

気象庁は、地震発生直後に、地表面地震動の強さや被害の程度を示す一般的な尺度として気象庁震度を発表してきた。この震度は地表面地震動に対する人間あるいは建物の応答を反映したもので、観測者の体感および周囲の震動現象や被害状況から判定した体感震度で、地震計のなかった歴史的に古い時代の被害地震の諸元や地震動強さなどの解明あるいは地震計が設置されていない地域での地震動強さを示す便利でかつ重要な指標として使用され、1884年以来4回にわたる追加修正を加えながら約100年以上の歴史を持っている。従って、地震防災における震度の予測は被害を推定する上で重要な役割を果たしている。しかしながら、観測データに客観性や速報性に劣るなどの側面も有している。

これらの点を改善するため、気象庁は従来の観測者の判断による震度から震度計による器械観測への移行を1990年より進め、震度7まで自動的に計測できる有効数字2桁の計測震度(以後 I_K と称す)を1996年2月15日に正式に決定した¹⁾。

計測震度(I_K)の採用にあたっては、震度と最大加速度との関係を示す河角(1943)²⁾の経験式を適用しており、従来の気象庁震度(以後 I と称す)との継続性を考慮した震度であると評価できる。また、震度算定のアルゴリズムやその物理的背景から、ある周波数成分が強調されるが、基本的には加速度と速度の間に位置づけられる。

本研究では、1996年10月から1998年12月までに

九州・周辺地域で観測され、計測震度が発表された強震記録データを用いて、震度と最大加速度および最大速度など物理量との対応関係について検討し、両者の関係を示す経験式を導入した。このような検討は工学的に実用性があり、計測震度について考察する上で重要である。

2. 地震動データベース

1996年の計測震度への改正により、気象庁および科学技術庁防災科学研究所強震ネット(k-net)(全国1003カ所)³⁾他により数多くの地震計が設置され、インターネット上で強震データが公表されるようになった。その結果、大規模地震だけではなく、中小規模の地震に対するデータまで扱えるようになった。

本研究で構築した地震動データベースは、1996年10月から1998年12月まで、科学技術庁防災科学研究所強震ネット(k-net)で観測された九州・周辺地域の内陸部および日向灘沖で発生した地震である。解析に用いた地震動データは、159地震(M=3.2~6.6; 気象庁発表)、3167記録波形(I_K =0.0~5.9)である。地震のメカニズムはさまざまであり、震源の深さは $H=5\sim100\text{km}$ の広範囲に分布しているが、60km未満のものが殆どである。特に、内陸部の地震は主にマグニチュードM6程度以下、震源深さ50km以下の地震であることが指摘できる。震央分布、震源深さの分布、マグニチュードの頻度分布および震度の頻度分布を図-1、図-2、図-3および図-4に示す。

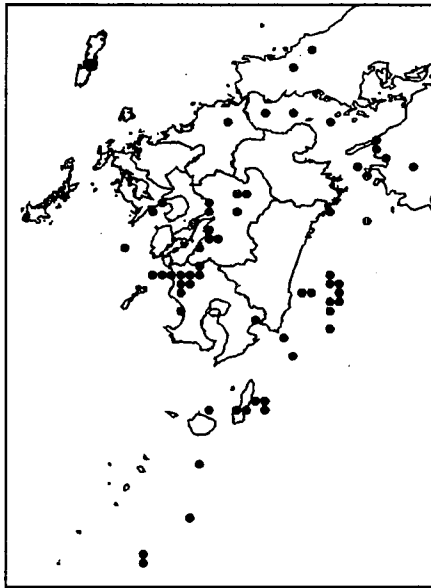


図-1 震央分布

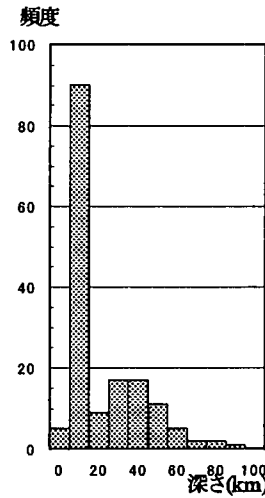


図-2 震源深さの分布

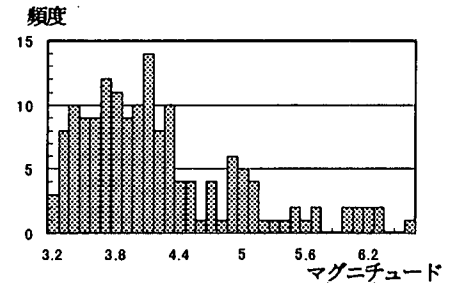


図-3 マグニチュードの頻度分布

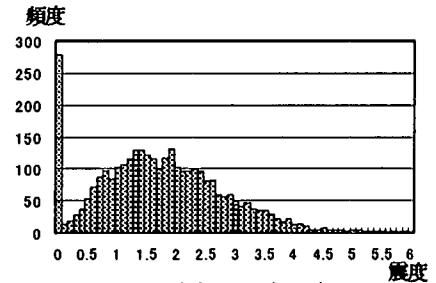


図-4 震度の頻度分布

3. 震度と物理量を示す従来の経験式

広域での地震防災・軽減を目的とする被害予測あるいは実際の土木・建築分野での耐震設計においては、地震動強さとして最大加速度や最大速度あるいは応答スペクトルなどの物理量が広く一般に使用されている。他方、地震動強さの分布や地震被害の説明および理解には震度が有効である。このような目的のため、これまでに、以下に示す河角(1943)²⁾、翠川他(1982)⁴⁾、童・山崎(1996)⁵⁾および村松(1967)⁶⁾、他多くの研究者によって最大加速度などの物理量と震度との関係式が多く提案されてきた。

$$I = 2 \cdot \log(A) + 0.7 \quad (\text{河角 1943}) \quad (1)$$

$$I = \{\log(A) + 0.27\} / 0.54 \quad (\text{翠川他 1982}) \quad (2)$$

$$I_k = 1.89 \cdot \log(A) + 0.59 \quad (\text{童・山崎 1996}) \quad (3)$$

あるいは

$$I = 2 \cdot \log(V) + 2.8 \quad (\text{村松 1967}) \quad (4)$$

$$I = \{\log(V) + 1.14\} / 0.49 \quad (\text{翠川他 1982}) \quad (5)$$

$$I_k = 2.01 \cdot \log(V) + 2.30 \quad (\text{童・山崎 1996}) \quad (6)$$

ここで I は従来の気象庁震度(体感)、 A は最大加速度(gal)、 V は最大速度(kine)である。なお、童・山崎の経験式(3)、(6)は計測震度 I_k を対象とした経験式である。いずれも

$$I = a \cdot \log(A \text{ あるいは } V) + b \quad (7)$$

の形式を持つ経験式であることが確認できる。

なお、これらの経験式は 1968 年の十勝沖地震($M=7.9$)あるいは 1993 年釧路沖地震($M=7.8$)などマグニチュード $M6 \sim 7.9$ 程度の大規模地震のデータを基にして導かれたものである。

4. 計測震度と最大加速度の関係

本研究では、「2. 地震動データベース」で示した 159

地震($M=3.2 \sim 6.6$; 気象庁発表)、3167 記録波形($I_k=0.0 \sim 5.9$)から各々最大加速度および最大速度(数値積分による)を算出した。これより、水平 2 成分の内大きい方の値を最大値として、計測震度と最大加速度の関係を求め、図-5 に全地震を対象に、図-6 にマグニチュード毎に示す。図-5 より震度に対する最大加速度にかなりのばらつきが見られ、同じ震度に対する最大加速度に約 10 倍程度の差が見受けられる。しかし、マグニチュード毎に検討してみると両者の相関は比較的良いことが確認できる。そこで、震度を目的変数、最大加速度を説明変数とした(7)式を用いてマグニチュード別に回帰分析を行った。これより得られた、係数 a_a 、 b_a とマグニチュードとの関係を図-7 に示す。係数 a_a 、 b_a のマグニチュード M に関する回帰式は

$$a_a = 0.11M + 1.22 \quad (8)$$

$$b_a = 0.28M - 1.30 \quad (9)$$

となり、係数 a_a 、 b_a 共にマグニチュードの変化に対する影響を確認できる。特に b_a 値は a_a 値に比べ 2 倍以上大きくなり、マグニチュード M の変化に対し、震度は b_a 値により相対的に大きな変動を示すことになる。そこで、係数 a_a 、 b_a を(7)式に代入し、マグニチュード M の変化を介した、計測震度と最大加速度との関係式を求め、(10)式に示す。

$$I_k = (0.11M + 1.22) \log(A) + 0.28M - 1.30 \quad (10)$$

ここで、 I_k は計測震度、 A は水平 2 成分の内の最大加速度(gal)、 M は気象庁マグニチュードである。

図-6 にマグニチュード毎の計測震度と最大加速度との関係と併せて(10)式を実線で示す。また、既存の経験式との比較のため、代表例として童・山崎(1996)⁹⁾の(3)式も併せて点線で示す。これより、同じ加速度であってもマグニチュードが大きいほど計測震度も大きく評価されることが確認できる。

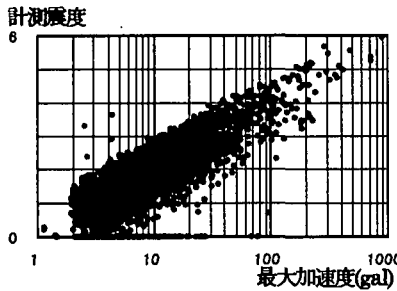


図-5 計測震度と最大加速度

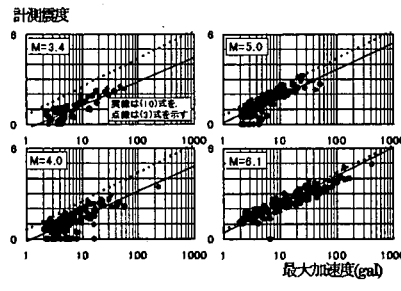


図-6 M別の計測震度と最大加速度

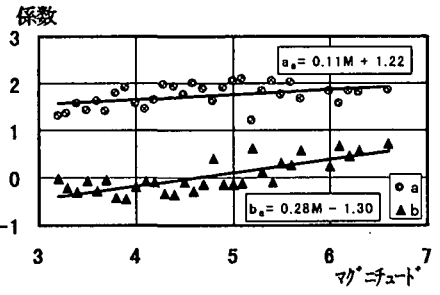


図-7 マグニチュードと係数 (最大加速度)

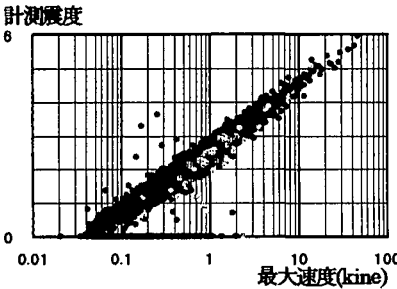


図-8 計測震度と最大速度

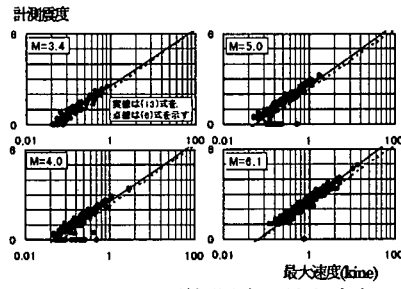


図-9 M別の計測震度と最大速度

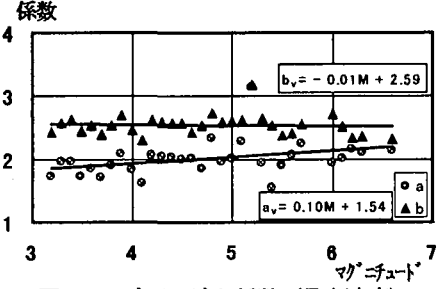


図-10 マグニチュードと係数 (最大速度)

5. 計測震度と最大速度の関係

加速度の場合と同様、計測震度と最大速度との関係を図-8(全地震)、図-9(マグニチュード毎)に示す。これより、最大加速度に比較して同じ震度に対する最大速度のばらつきが小さく約3倍程度であり、計測震度との相関は極めて良いことが確認できる。また、マグニチュードの変化による影響がそれほど見受けられない。しかし最大加速度の場合と同様、最大速度のマグニチュードに対する影響を検討するため、(7)式を用いて回帰分析を行った。係数 a_v 、 b_v とマグニチュードとの関係を図-10に示す。係数 a_v 、 b_v のマグニチュード M に関する回帰式は、

$$a_v = 0.10M + 1.54 \quad (11)$$

$$b_v = -0.01M + 2.59 \quad (12)$$

となり、係数 a_v 、 b_v 共にマグニチュードの変化に対する影響は小さいが震度に反映することは確認できる。しかし、 b_v 値に比較して a_v 値による影響が大きく、最大加速度の場合と逆の関係が見受けられ、計測震度との関係については最大加速度に比較してより安定していることが確認できる。そこで、4章と同様、係数 a_v 、 b_v を(7)式に代入し、マグニチュードの変化を介した計測震度と最大速度との関係式を求め、(13)式に示す。

$$I_K = (0.10M + 1.54) \log(V) - 0.01M + 2.59 \quad (13)$$

ここで、 I_K は計測震度、 V は水平2成分内の最大速度(kine)、 M は気象庁マグニチュードである。

図-9にマグニチュード毎の計測震度と最大速度との関係と併せて(13)式を実線で示す。また、既存の経験式との比較のため、代表例として童・山崎(1996)⁵⁾の(6)式も併せて点線で示す。これより、計測震度はマグニ

チュードによる影響が極めて少なく、最大速度によりほぼ一義的に評価できることが確認できる。

6. 既存の経験式および提案した経験式の評価

既存の経験式と提案した経験式の比較検討を行った。そのため、マグニチュード毎に各々の経験式から計算される震度と計測震度との震度差を求め、その平均値(m_a 、 m_v)とマグニチュード M との関係、表-1、表-2および図-11、図-12に示す。これより、最大加速度を説明変数とした場合、本研究で提案した経験式は $m_a \approx 0$ で、ばらつきも少ないことが確認できる。他方、既存の経験式ではマグニチュードが小さくなるにつれて m_a の絶対値が大きくなり、マグニチュード M が6以上になると m_a は暫時0に近似してくることが分かる。これは、中小規模の地震($M \leq 6$)の場合、既存の経験式は震度を大きく与えすぎていることになり、本研究で提案した経験式は中小規模の地震においても震度差が少なく、既存の経験式よりもよく計測震度を評価している。最大速度を説明変数とした場合は、既存のあるいは本研究で提案した各経験式いずれも、 m_v のマグニチュード M の違いによる影響は小さく、そのばらつきも極めて少ないことが確認できる。

本研究で提案した経験式より計算される震度と実測された計測震度との関係を図-13、図-14に示す。また、両者の相関性を検討するため、各マグニチュード毎に相関係数および相関係数だけでは表しきれない非相関成分を評価する誤差の標準偏差を示す指標値 ν ((14)式参照)を求め、表-3に示す。

$$\nu = \sigma_I \cdot \sqrt{1 - r^2} \quad (14)$$

(σ_I : 計測震度の標準偏差 r : 相関係数)

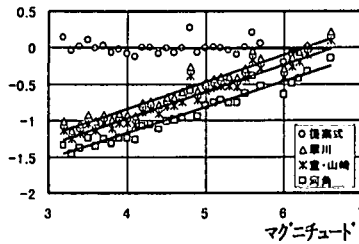
表-1 M 毎の震度差の平均値 (m_s)

M_{JMA}	河角	翠川	童・山崎	提案式
	m_s	分散	m_s	分散
3.2	-1.34	0.18	-1.01	0.15
3.3	-1.46	0.19	-1.14	0.17
3.4	-1.38	0.17	-1.05	0.16
3.5	-1.24	0.22	-0.92	0.20
3.6	-1.35	0.22	-1.02	0.20
3.7	-1.25	0.23	-0.92	0.20
3.8	-1.31	0.21	-0.99	0.21
3.9	-1.24	0.20	-0.91	0.20
4.0	-1.24	0.29	-0.92	0.28
4.1	-1.26	0.44	-0.93	0.42
4.2	-1.08	0.29	-0.76	0.27
4.3	-1.05	0.28	-0.73	0.26
4.4	-1.13	0.32	-0.79	0.32
4.5	-1.02	0.33	-0.67	0.32
4.6	-0.98	0.45	-0.67	0.46
4.7	-0.96	0.27	-0.61	0.27
4.8	-0.58	0.33	-0.28	0.32
4.9	-0.84	0.23	-0.60	0.23
5.0	-0.79	0.19	-0.47	0.19
5.1	-0.75	0.28	-0.43	0.29
5.2	-0.72	0.37	-0.40	0.34
5.3	-0.76	0.14	-0.40	0.13
5.4	-0.75	0.08	-0.42	0.08
5.5	-0.63	0.53	-0.29	0.52
5.6	-0.39	0.22	-0.04	0.23
5.7	-0.52	0.21	-0.15	0.18
6.0	-0.65	0.13	-0.28	0.13
6.1	-0.49	0.15	-0.13	0.12
6.2	-0.43	0.32	-0.06	0.31
6.3	-0.33	0.25	0.03	0.24
6.6	-0.15	0.12	0.22	0.11

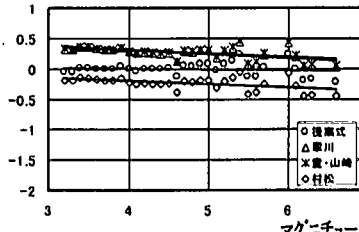
表-2 M 毎の震度差の平均値 (m_s)

M_{JMA}	村松	翠川	童・山崎	提案式
	m_s	分散	m_s	分散
3.2	-0.18	0.05	0.32	0.08
3.3	-0.19	0.05	0.32	0.05
3.4	-0.14	0.04	0.38	0.05
3.5	-0.15	0.10	0.35	0.10
3.6	-0.17	0.06	0.33	0.08
3.7	-0.19	0.11	0.31	0.11
3.8	-0.19	0.08	0.32	0.09
3.9	-0.16	0.07	0.34	0.07
4.0	-0.22	0.18	0.29	0.18
4.1	-0.25	0.32	0.25	0.32
4.2	-0.23	0.16	0.27	0.16
4.3	-0.24	0.16	0.26	0.16
4.4	-0.25	0.26	0.24	0.26
4.5	-0.23	0.23	0.26	0.23
4.6	-0.38	0.36	0.12	0.36
4.7	-0.20	0.19	0.29	0.20
4.8	-0.22	0.14	0.27	0.14
4.9	-0.19	0.17	0.30	0.18
5.0	-0.19	0.14	0.30	0.14
5.1	-0.31	0.30	0.18	0.29
5.2	-0.20	0.12	0.29	0.12
5.3	-0.15	0.04	0.34	0.04
5.4	-0.08	0.01	0.43	0.02
5.5	-0.41	0.45	0.07	0.46
5.6	-0.39	0.18	0.09	0.18
5.7	-0.25	0.10	0.22	0.10
6.0	-0.07	0.03	0.42	0.03
6.1	-0.28	0.07	0.19	0.07
6.2	-0.45	0.30	0.02	0.29
6.3	-0.43	0.20	0.04	0.20
6.6	-0.44	0.13	0.02	0.13

平均値

図-11 m_s とマグニチュードの関係

平均値

図-12 m_s とマグニチュードの関係

計測震度

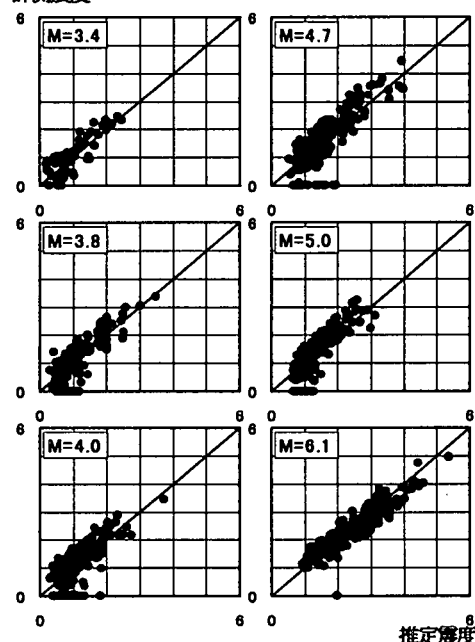


図-13 計測震度と(10)式による震度の関係

計測震度

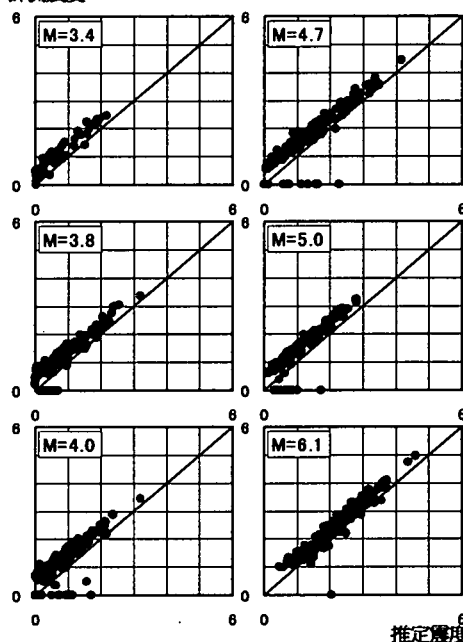


図-14 計測震度と(13)式による震度の関係

表-3 (10)、(13)式による震度と計測震度の γ 、 ν

M_{JMA}	最大加速度 相関係数	指標値 γ	最大速度 相関係数	指標値 ν
3.2	0.85	0.33	0.94	0.22
3.3	0.72	0.38	0.82	0.22
3.4	0.84	0.38	0.95	0.21
3.5	0.80	0.42	0.91	0.30
3.6	0.81	0.44	0.95	0.25
3.7	0.80	0.41	0.89	0.31
3.8	0.81	0.45	0.93	0.28
3.9	0.85	0.44	0.95	0.26
4.0	0.72	0.52	0.83	0.42
4.1	0.88	0.63	0.78	0.54
4.2	0.77	0.52	0.87	0.40
4.3	0.78	0.51	0.87	0.40
4.4	0.83	0.57	0.86	0.51
4.5	0.80	0.57	0.86	0.48
4.6	0.85	0.67	0.73	0.60
4.7	0.83	0.51	0.88	0.44
4.8	0.80	0.56	0.88	0.36
4.9	0.88	0.48	0.91	0.42
5.0	0.84	0.44	0.89	0.37
5.1	0.85	0.53	0.84	0.53
5.2	0.69	0.52	0.83	0.25
5.3	0.90	0.36	0.97	0.20
5.4	0.71	0.29	1.00	0.00
5.5	0.74	0.72	0.78	0.67
5.6	0.90	0.47	0.92	0.42
5.7	0.93	0.40	0.86	0.30
6.0	0.87	0.36	0.98	0.16
6.1	0.92	0.32	0.95	0.26
6.2	0.88	0.56	0.89	0.54
6.3	0.89	0.49	0.91	0.44
6.6	0.93	0.34	0.92	0.36

本研究で提案した経験式は共に、概ね相関係数は 0.8 以上、指標値 ν は 0.5 以下であり、既存の経験式に比較して、より精度の高い経験式であることが確認できる。

7. まとめ

計測震度と最大加速度および最大速度との関係を検討した。計測震度と最大加速度との関係はマグニチュードによる影響が比較的大きく、最大速度との関係はマグニチュードによる影響が少ないことを確認した。これより、既存の経験式に比較して、比較的精度の高いマグニチュードを介した経験式を提案した。特に、計測震度と最大速度との関係は最大加速度との関係に比較してより安定していることを確認した。

謝辞：本研究に用いた強震記録は科学技術庁防災科学研究所強震ネット(k-net)より提供していただきました。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 震度を知る：気象庁監修，ぎょうせい，p.10, 1996.9
- 2) 震度を知る：気象庁監修，ぎょうせい，p.22, 1996.9
- 3) 科学技術庁防災科学研究所強震ネット(k-net)：
<http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 4) 翠川三郎・福岡知久：気象庁震度階と地震動強さの関係，地震第2輯，第41巻，pp.223-233, 1988
- 5) 童・山崎他：計測震度と従来の地震動強さ指標の対応関係，土木学会第51回年次学術講演会，I-B229, pp.458-459, 1996.9
- 6) 村松郁栄：地震危険度，地震第2輯，第20巻，pp.281-290, 1967