



マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式

藤本一雄¹⁾、翠川三郎²⁾

1) 正会員 千葉科学大学危機管理システム学科、講師 博士 (工学)

e-mail : kfujimoto@cis.ac.jp

2) 正会員 東京工業大学人間環境システム専攻、教授 工博

e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

要約

地震動強さ指標(PGA , PGV , $PGA \times PGV$)から計測震度をより精度良く推定することを目的として、1995年兵庫県南部地震以降に震度5強以上を観測した国内の20地震での記録を用いて、地震動強さ指標と計測震度に対するマグニチュードの影響について検討した。さらに、高震度域での地震動強さ指標と計測震度に対する回帰式として、1次式と2次式のどちらの適合度が高いかについて、 AIC (赤池情報量規準)に基づいて検討した。これらの結果を踏まえて、各種の地震動強さ指標とマグニチュードを用いて計測震度を推定する関係式を提案した。

キーワード : 計測震度、最大加速度、最大速度、マグニチュード、 AIC

1. はじめに

震度は地震動強さの代表的な指標であり、行政機関における地震発生時の初動対応(災害対策本部の設置、職員参集など)のための基準や、国・地方自治体などにより作成される地震ハザードマップ¹⁾⁻³⁾での揺れの強さなどとして、地震防災上広く利用されている。地震ハザードマップを作成する際には、理論的手法や経験的手法などから各地で推定された最大加速度や最大速度などの地震動強さを、関係式を用いて計測震度に変換するといった手順を踏む場合が多い。

著者等は、これらの地震動強さから計測震度を推定するために、翠川・他⁴⁾では、1968年十勝沖地震から1995年兵庫県南部地震までの強震記録を用いて、各種の地震動強さ指標から計測震度を推定する関係式を作成した。その後、藤本・翠川⁵⁾では、翠川・他⁴⁾の記録に、2000年鳥取県西部地震から2005年福岡県西方沖地震までの強震記録を加えて、計測震度を推定する関係式を求めた。

そもそも震度は、最大加速度などの単独の指標と対応付けることは難しく、加速度と周期を組み合わせることで評価することが適当であると報告されている⁶⁾。そこで、現行の計測震度を算出する際には、周期の影響を考慮するため、フィルター処理をした加速度波形が用いられている⁷⁾。震度を推定する関係式についても、周期の影響を取り入れるため、 PGA と PGV の比が地震動の卓越周期と相関があることを利用して、 PGA と PGV の2つを説明変数とする関係式が求められている⁵⁾。しかしながら、 PGA と PGV を同時に精度良く推定するためには、地盤特性の評価も含め詳細な検討が必要であり、より簡便に PGA ないし PGV などのひとつの指標が推定された場合に、これがどの程度の震度に相当するのかを推定することも実用上求められている。

そこで、地震動強さ指標以外の説明変数を加えて、周期の影響を間接的に考慮することには意味があるものと考えられる。地震記録の周期特性に影響を与える要因としては、震源特性、伝播特性、地盤特性が考えられる。これらのうち、伝播特性および地盤特性は観測点毎に異なり、これらの情報を説明変数に取り入れることは実用的ではない。そこで、震源特性に着目すると、一般的には M が大きくなるほど長周期の成分が卓越しやすくなることから、 M の大きさが地震記録の周期特性に大きく影響すると考えられる。したがって、従来の関係式において M の違いを考慮することは、間接的に地震記録の周期特性の影響を考慮することを意味すると考えられる。

このような考えから、地震のマグニチュード(M)の影響を考慮した震度の推定式が既に、Karim and Yamazaki⁸⁾、Atkinson and Kaka⁹⁾、Tselentis and Danciu¹⁰⁾によって提案されている。これらのうち、Atkinson and Kaka⁹⁾と Tselentis and Danciu¹⁰⁾の式は修正メルカリ震度階を求めるものであり、Karim and Yamazaki⁸⁾の式はわが国の計測震度を求めるものである。それによると、同一の最大加速度(PGA)では M が大きいほど計測震度は高くなり、同一の最大速度(PGV)では M が大きくなると計測震度は低くなり、最大加速度と最大速度の積($PGA \times PGV$)については M 依存性が強くないとの結果が得られている。ただし、Karim and Yamazaki⁸⁾の式は、1987 年から 1999 年までの 9 地震の記録から求められており、これら 9 地震の内には観測記録が少ないものも含まれていることから、近年の多数の強震記録を用いて再検討することも必要と考えられる。

以上を踏まえて、本研究では、1995 年兵庫県南部地震以降に震度 5 強以上を観測した 20 地震を対象として、Karim and Yamazaki⁸⁾に比べて多数の強震記録を用いて、地震動強さ指標と計測震度の関係に対する M の影響について検討する。あわせて、地震動強さ指標と計測震度の関係に対する 2 次式の回帰式を導入する必要性について、藤本・翠川⁵⁾に比べてより定量的な検討を行い、これらの結果を踏まえて、より精度良く計測震度を推定する関係式を求めることを目的とする。

2. 使用した地震記録

本研究では、1995 年兵庫県南部地震から 2008 年岩手・宮城内陸地震までの期間に、震度 5 強以上を観測した計 20 個の地震を対象とした。表 1 に 20 地震それぞれの震度ごとの記録数を示す。ただし、2000 年 7~8 月に発生した三宅島近海および新島・神津島近海を震源とする地震に関しては、火山活動に伴って発生したやや特殊な地震であると判断されるため、対象からは除外した。対象とした地震のモーメントマグニチュード(M_w)は 5.6~7.9 であり、その値は防災科学技術研究所 F-net が決定した地震のメカニズム解によるものである。観測機関は、主として、気象庁、防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net であり、その他に、地方自治体、港湾地域強震観測、北海道開発土木研究所 WISE などの記録も使用している。なお、1995 年兵庫県南部地震については、司・翠川¹¹⁾を参考にして、気象庁、建設省土木技術研究所、運輸省港湾技術研究所、鉄道総合技術研究所、関西電力、大阪ガス、関西地震観測研究協議会の記録を用いている。表 1 より、各地震の記録数は、65 記録(1995 年兵庫県南部地震)から 1,075 記録(2005 年宮城県沖の地震)までで、記録数の合計は 11,344 記録であり、藤本・翠川⁵⁾で使用した記録数(5,366 記録)の約 2 倍である。また、震度 6 弱以上の記録を 133 個含んでおり、これは藤本・翠川⁵⁾で使用した 81 記録の約 1.6 倍である。

本研究で対象とした地震動強さ指標は、藤本・翠川⁵⁾と同様に、 PGA 、 PGV 、 $PGA \times PGV$ である。なお、Karim and Yamazaki⁸⁾ではその他に SI 値も対象としている。なお、速度波形としては、加速度波形にローカットフィルタ(カットオフ周波数 0.05Hz)を施して積分したものを使用している。本研究では、距離減衰式からの最大振幅を震度に変換する経験式を提案することを主たる目的としているため、最大値として既往の距離減衰式でよく利用されている水平 2 成分のうち大きい方の値を用いることとした。また、計測震度については、3 成分の加速度波形を用いて算出している。ただし、1995 年兵庫県南部地震での大阪ガスの記録(6 地点)については、上下動成分が含まれていないが、計測震度値に及ぼす上下動成分の影響は一般に小さい^{12),13)}ことから、これらの記録については水平動 2 成分のみから計測震度を計算した。

表 1 地震別・震度別の地震記録数

地震名	(M _w)	震度										計
		0	1	2	3	4	5弱	5強	6弱	6強	7	
1995兵庫県南部(1/17)	(6.9)	0	0	0	4	10	22	15	8	6	0	65
1997愛知県東部(3/16)	(5.6)	0	28	86	69	24	3	2	0	0	0	212
1997鹿児島県北西部(3/26)	(6.1)	0	18	42	36	26	7	5	2	0	0	136
1997鹿児島県北西部(5/13)	(6.0)	0	16	41	41	24	7	4	2	0	0	135
1998岩手県内陸北部(9/3)	(5.9)	1	9	42	17	4	0	0	1	0	0	74
2000鳥取県西部(10/6)	(6.6)	13	84	157	221	138	20	9	5	1	1	649
2001芸予(3/24)	(6.8)	24	86	180	162	136	32	29	3	0	0	652
2003宮城県沖(5/26)	(7.0)	35	113	248	276	146	50	34	7	1	0	910
2003宮城県北部(7/26)	(6.1)	25	53	160	147	41	6	4	1	0	0	437
2003十勝沖(9/26)[04:50]	(7.9)	33	75	244	190	177	55	67	31	5	0	877
2003十勝沖(9/26)[06:08]	(7.3)	22	104	189	157	103	23	2	1	0	0	601
2004新潟県中越(10/23)	(6.6)	35	127	226	243	91	36	20	11	10	3	802
2004釧路沖(11/29)	(7.0)	21	129	154	107	55	19	14	2	0	0	501
2005釧路沖(1/18)	(6.2)	42	116	108	52	36	6	1	0	0	0	361
2005福岡県西方沖(3/20)	(6.6)	40	160	250	139	132	33	12	2	0	0	768
2005千葉県北東部(4/11)	(6.0)	42	110	157	98	12	1	1	0	0	0	421
2005宮城県沖(8/16)	(7.1)	37	164	359	302	166	40	7	0	0	0	1075
2007能登半島(3/25)	(6.7)	90	339	320	116	53	8	5	5	2	0	938
2007新潟県中越沖(7/16)	(6.6)	29	136	327	267	80	37	28	10	6	0	920
2008岩手・宮城内陸(6/14)	(6.9)	59	170	224	201	96	36	17	4	3	0	810
計		548	2037	3514	2845	1550	441	276	95	34	4	11344

3. 計測震度と地震動強さ指標の関係

3.1 計測震度と地震動強さ指標の関係に対するマグニチュードの影響

表 1 の 11,344 記録による計測震度と地震動強さ指標の関係を図 1 に灰色の○印で示す。比較のため、藤本・翠川⁵⁾による関係式を図 1 に実線で示しておく。図 1 をみると、震度 5 強と 6 弱の境界(計測震度 5.5)に対応する *PGA* および *PGV* はそれぞれ約 400cm/s² および 40cm/s 程度であり、震度 6 強と 7 の境界(計測震度 6.5)に対応する値はそれぞれ 1000cm/s² および 120cm/s 程度である。

これらの関係に対する *M_w* の影響を視覚的に確認するため、*M_w* の大きさごとにシンボルを変えて図 1 に重ねて表示する。具体的には、20 地震を *M_w* の大きさによって、*M_w*=5.6~6.2(7 地震)、*M_w*=6.6~6.7(5 地震)、*M_w*=6.8~7.1(6 地震)、*M_w*=7.3, 7.9(2 地震)の 4 つに区分し、各区分の記録から計測震度 0.5 刻みで地震動強さ指標の平均を算出し、それと計測震度との関係を求めたものを×印、△印、□印、○印でそれぞれ示す。図 1 より、同一の *PGA* での計測震度は、*M_w* が大きいほどやや高めの値を示し、反対に、同一の *PGV* での計測震度は、*M_w* が小さいほど高めの値を示している。これに対して、*PGA* × *PGV* は、*M_w* によらず同程度の値となっている。また、図 1 をみると、計測震度 1.0 程度以下において、藤本・翠川⁵⁾の関係式に対して、やや高めの *PGV* を示す記録がある。そこで、観測記録の加速度波形を確認したところ、計測震度 1.0 程度未満の記録の中には、S/N 比が悪いと思われる記録がみられた。そこで、ノイズの影響を避けるため、以下の解析では、計測震度 1.0 以上の記録(10,034 記録)を対象とすることとした。

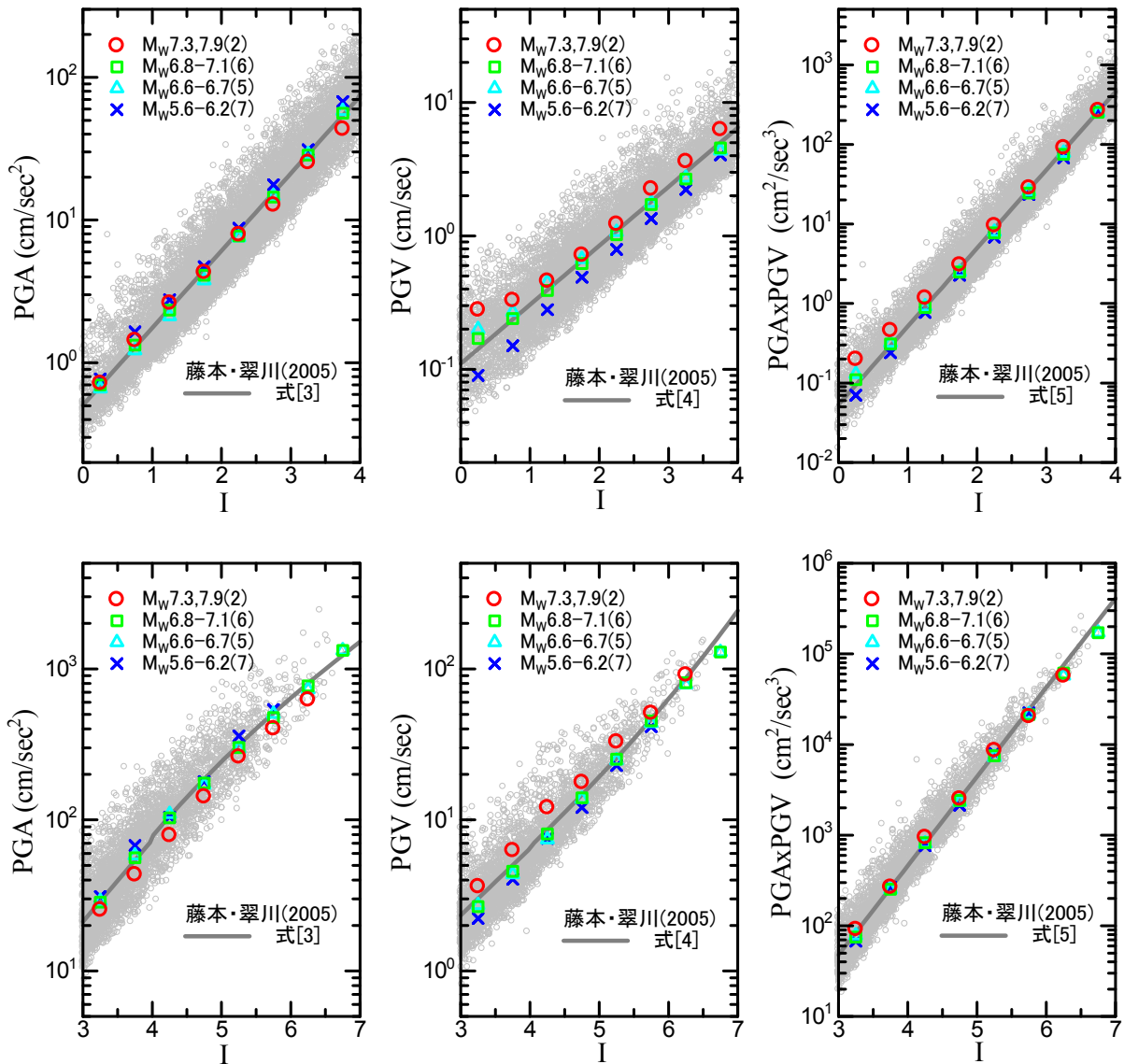


図1 計測震度と地震動強さ指標の関係

(左: PGA 、中央: PGV 、右: $PGA \times PGV$ 、上段: 計測震度 4.0 以下、下段: 計測震度 3.0 以上)

つぎに、地震動強さ指標と計測震度の関係に対する M_w の影響を定量的に検討するため、20 地震それぞれの記録に対して、目的変数を計測震度(I)、説明変数を地震動強さ指標(P)とする 1 次式(式(1))に基づいて回帰分析を行った。

$$I = a + b \cdot \log(P) \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は回帰係数である。図 2 は、各地震の M_w と回帰係数の関係であり、回帰係数 a (切片) は ●印、回帰係数 b (勾配) は □印で示してある。参考のため、20 地震すべての記録から求めた回帰係数として、 a については実線で、 b については破線で、それぞれ示す。図 2 をみると、勾配 b (□印) は、地震によって多少のばらつきはあるものの、平均的には、 PGA は約 1.8、 PGV は約 2.2、 $PGA \times PGV$ は約 1.0 の値を示している。これに対して、 PGV の切片 a (図 2 中央の ●印) は、 M_w が大きくなるにつれて低下しているようにみえる。これらのことから、 M_w の大きさの違いは、勾配 b に対して大きな変化を生じさせることはなく、切片 a のみに影響するものと推測される。

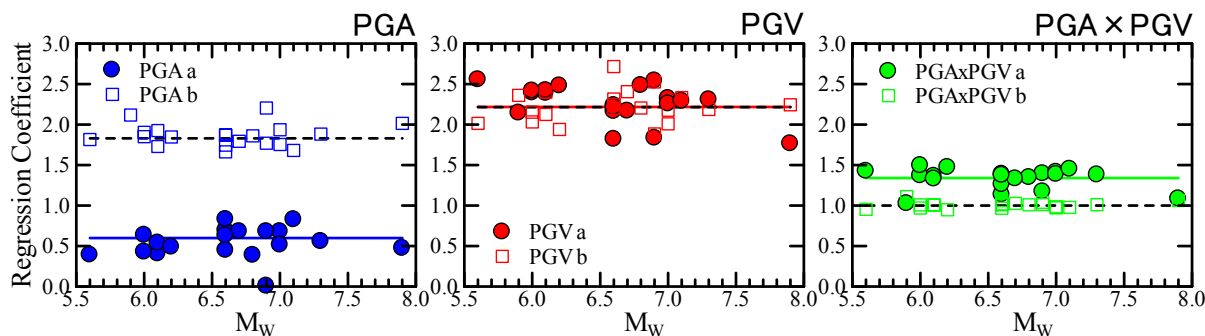


図2 M_w と回帰係数の関係(左:PGA、中央:PGV、右:PGA×PGV)

そこで、 M_w の違いが切片 a に与える影響を検討するため、翠川・他⁴⁾を参考にして、勾配 b の値をPGAは $b=1.8$ 、PGVは $b=2.2$ 、PGA×PGVは $b=1.0$ に固定して回帰式を求め、そのときの切片 a と M_w の関係を図3に示す。同図には、参考のため、これらの関係から求めた回帰直線も破線で示しておく。図3より、PGVの切片 a は、 M_w が大きくなるにつれて顕著に低下しているのに対して、PGAの切片 a は M_w の増加とともにやや大きくなり、PGA×PGVの切片 a は M_w の大小によらず、ほぼ一定の値を示している。このようなM依存性(M_w とともに切片 a が変化する傾向)が統計的に有意であるかを確認するため、図3の回帰直線(破線)の勾配(b')がゼロであるかどうかについて有意水準5%での統計的仮説検定を行った。その結果、PGAとPGVについては“帰無仮説 $H_0: b'=0$ ”が棄却され“対立仮説 $H_1: b' \neq 0$ ”の方が支持されたが、PGA×PGVは帰無仮説が棄却されなかった。以上の結果をまとめると、計測震度と地震動強さ指標の関係におけるM依存性は、PGVやPGAでは顕著に現れるが、PGA×PGVではほぼみられないものと判断され、これらの傾向は、Karim and Yamazaki⁸⁾の結果とも調和的である。

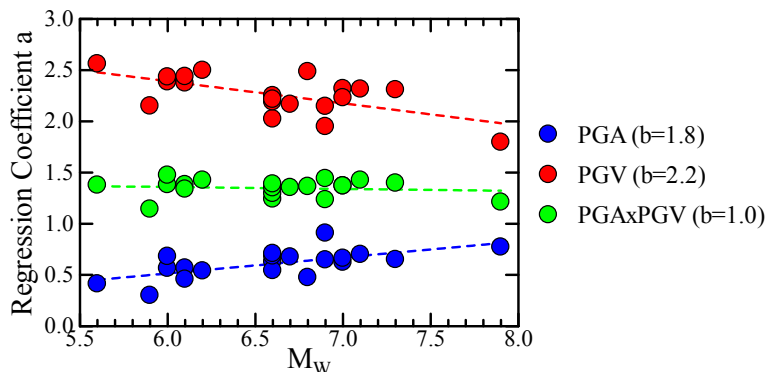


図3 M_w と回帰係数 a (b を固定した場合)の関係

3.2 高震度域での計測震度と地震動強さ指標の関係

藤本・翠川⁵⁾では、高震度域において地震動強さが大きくなるにつれて式(1)の回帰係数 b (勾配)が徐々に変化する傾向が確認されたため、地震動強さ指標(P)の2乗値を変数に加えた2次式(式(2))に基づいて回帰式を求めている。

$$I = a + b_{p1} \cdot \log(P) + b_{p2} \cdot \log(P)^2 \quad (2)$$

ここで、 a 、 b_{p1} 、 b_{p2} は回帰係数である。しかし、回帰式を求める際に使用したデータの分布に偏りがある場合(例えば、高震度域のデータの多くが M の大きな地震の記録である場合)、M依存性を見かけ上の勾配の変化として捉えてしまっていた可能性が考えられる。そこで、個々の地震における高震度域

での関係を視覚的に確認するため、20 地震の中では高震度(震度 6 弱以上)のデータが相対的に多く得られている 6 地震での計測震度と地震動強さ指標の関係を図 4 に示す。図 4 のデータは、計測震度 0.5 刻みで地震動強さ指標の平均を求めたものである。また、比較のため、藤本・翠川⁵⁾の関係式のうち、 $I \leq 4$ のデータから求めた関係式(1 次式)を、適用範囲外の $I > 4$ まで延長して表示しておく。

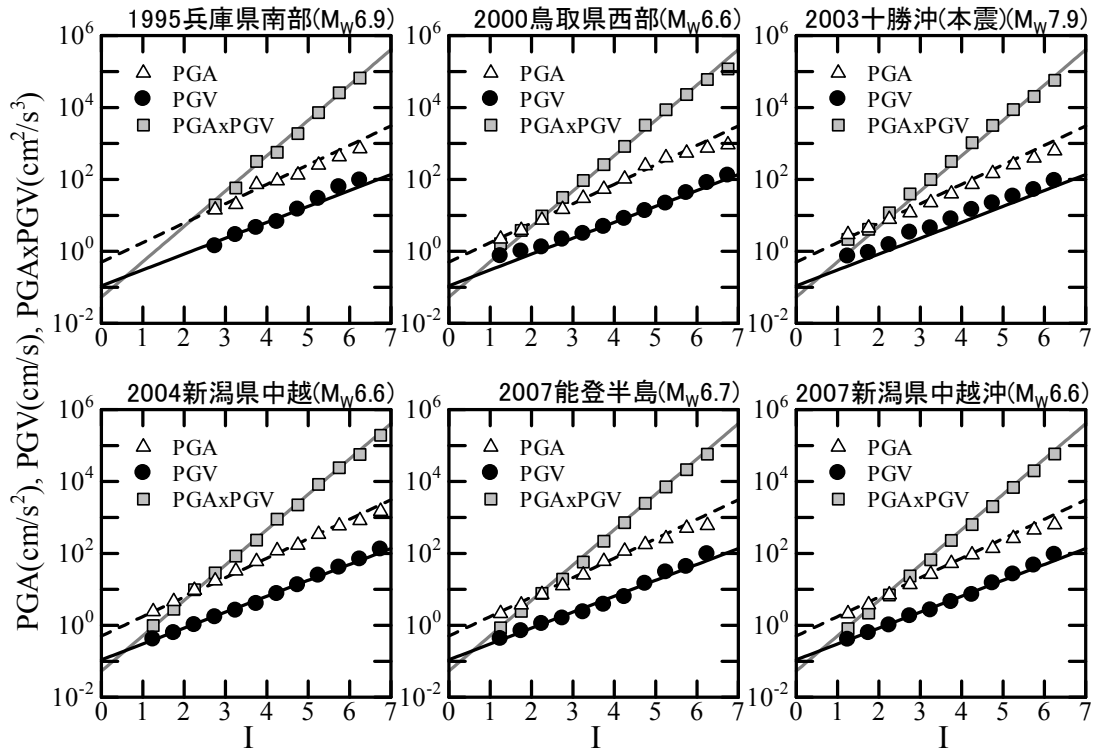


図 4 高震度データを含む 6 地震での計測震度と地震動強さ指標の関係

図 4 をみると、 PGA (Δ 印)は、 $I=4\sim 5$ 程度までは線形的に増加しているが、それ以上では PGA の増加する割合が低下している。一方、 PGV (\bullet 印)は、 $I=4\sim 5$ 程度までは線形的に増加するという傾向は PGA の場合と同様であるが、それ以上では PGV の増加する割合は逆に大きくなっている場合がある。これらに対して、 $PGA \times PGV$ (\blacksquare 印)は、 I の大小にかかわらず、ほぼ線形的に増加している。これらの傾向は、いずれの地震においてもほぼ共通して確認することができ、その理由は、計測震度が加速度と速度の中間的な性質を持つフィルター時刻歴によって定義される⁷⁾ためと考えられる。

高震度域で勾配が変化するという傾向を定量的に確認するため、各地震での計測震度と地震動強さ指標の関係に対する回帰モデルとして、1 次式(式(1))と 2 次式(式(2))のどちらが相応しいのかを、以下の式¹⁴⁾に基づいて判定することとした。

$$AIC(m) = n \cdot \log 2\pi + n \cdot \log d(m) + n + 2(m+2) \quad (3)$$

ここで、 AIC は赤池情報量規準、 n はデータ数、 $d(m)$ は m 次回帰での残差分散(残差平方和)である。したがって、式(3)を用いて各地震での記録から算出した $AIC(1)$ と $AIC(2)$ の値を比較して、 AIC 値が小さい方のモデルがより適合度の高いモデルと判断することができる。なお、 AIC を算出する際、図 4 に示したような計測震度 0.5 刻みで算出した地震動強さ指標の平均値に基づくデータ(以下、平均データ)を使用することとした。平均データを用いた理由は、Atkinson and Kaka⁹⁾を参考にして、各震度レベルで安定した回帰結果を得るためである。

表 2 は、地震ごとに算出した各地震動強さ指標の $AIC(1)$ と $AIC(2)$ の一覧であり、 AIC 値が小さかつ

た方は赤字で示されている。表 2 をみると、PGA と PGV とともに AIC(2)の方が小さい地震は、2000 年鳥取県西部地震(最大震度：7)、2004 年新潟県中越地震(最大震度：7)、2007 年能登半島地震(最大震度：6 強)、2007 年新潟県中越沖地震(最大震度：6 強)など最大震度の高い地震が多い。また、図 4 において、計測震度と地震動強さ指標の関係で勾配に変化が現れるのは高震度域(計測震度で 4~5 程度以上)においてであった。これらのことを踏まえると、高震度の記録を含む地震では 2 次式との適合度が高く(AIC(2)の方が小さい)、高震度の記録を含まない地震は 1 次式との適合度が高い(AIC(1)の方が小さい)ことが予想される。

表 2 地震ごとの AIC の比較

地震名	最大震度	PGA		PGV		PGA×PGV	
		AIC(1)	AIC(2)	AIC(1)	AIC(2)	AIC(1)	AIC(2)
1995兵庫県南部(1/17)	6強	8.17	8.88	4.02	5.33	2.61	4.54
1997愛知県東部(3/16)	5強	4.86	6.86	-3.09	-2.03	0.81	2.81
1997鹿児島県北西部(3/26)	6弱	8.71	10.61	2.24	2.11	3.12	4.73
1997鹿児島県北西部(5/13)	6弱	-1.87	-0.40	2.37	1.89	-0.58	-1.01
1998岩手県内陸北部(9/3)	6弱	8.10	8.45	11.49	13.27	4.76	5.44
2000鳥取県西部(10/6)	7	11.85	11.10	9.77	1.70	1.40	3.13
2001芸予(3/24)	6弱	3.33	2.32	-1.39	-3.23	-4.88	-4.02
2003宮城県沖(5/26)	6強	2.49	4.49	0.64	1.07	0.20	1.82
2003宮城県北部(7/26)	6弱	5.60	3.14	7.08	-1.98	-6.48	-4.99
2003十勝沖(9/26)[04:50]	6強	1.69	3.48	3.91	5.60	-0.49	1.51
2003十勝沖(9/26)[06:08]	6弱	1.14	2.97	6.34	7.44	0.70	2.42
2004新潟県中越(10/23)	7	4.42	-0.70	2.58	-2.39	-5.76	-4.31
2004釧路沖(11/29)	6弱	3.94	3.31	6.39	6.15	-1.87	0.13
2005釧路沖(1/18)	5強	6.18	7.97	-1.70	0.10	2.33	4.26
2005福岡県西方沖(3/20)	6弱	10.89	10.34	6.49	-1.47	0.42	-0.59
2005千葉県北東部(4/11)	5強	6.87	8.83	5.68	7.07	6.15	7.88
2005宮城県沖(8/16)	5強	1.47	3.47	-1.70	-0.11	-1.90	-0.11
2007能登半島(3/25)	6強	8.44	7.89	9.61	5.32	-3.11	-1.30
2007新潟県中越沖(7/16)	6強	3.99	0.95	4.43	-1.11	-10.12	-8.12
2008岩手・宮城内陸(6/14)	6強	8.29	10.29	6.13	5.65	-0.49	1.07

そこで、各地震の最大震度(5 強、6 弱、6 強・7)ごとに、AIC(1)と AIC(2)のうち AIC 値が小さかった方の地震の個数を調べ、その割合の分布を図 5 に示す。図 5 をみると、いずれの地震動強さ指標においても、最大震度が 5 強(4 地震)では、すべての地震で AIC(1)が優勢である。これに対して、最大震度が 6 弱(8 地震)や 6 強・7(8 地震)では、AIC(2)の割合が優勢となっている。ただし、このような傾向は、PGV や PGA において顕著であるが、PGA×PGV ではほぼみられない。以上の結果をまとめると、震度 5 強程度までは、いずれの地震動強さ指標も 1 次式との適合度が高いが、それよりも高震度域では 2 次式との適合度が高くなる傾向を示し、その傾向は PGV や PGA において顕著に現れるものと判断される。

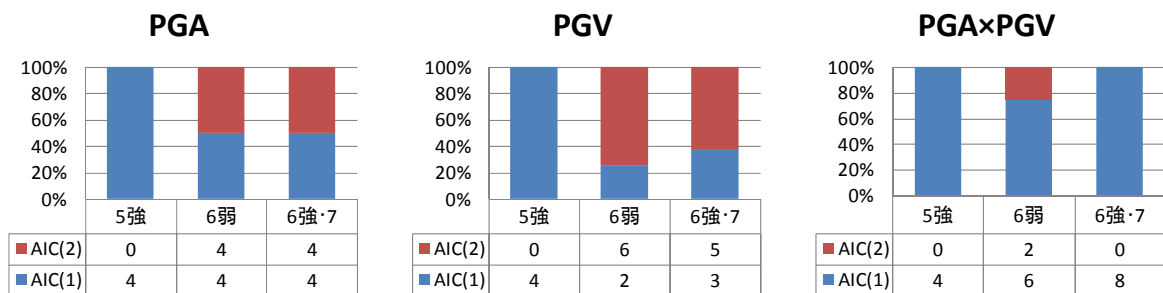


図 5 各地震での最大震度と AIC の関係

4. マグニチュードの影響を考慮した計測震度推定式の提案

前節までの結果を踏まえて、計測震度をより精度良く推定するため、計測震度(I)を目的変数、地震動強さ指標($\log(P)$)、地震動強さ指標の2乗値($\log(P)^2$)、マグニチュード(M_W)を説明変数とする式(4)に基づいて重回帰分析を行うこととした。

$$I = a + b_M \cdot M_W + b_{P1} \cdot \log(P) + b_{P2} \cdot \log(P)^2 \quad (4)$$

ここで、 a , b_M , b_{P1} , b_{P2} は回帰係数である。なお、重回帰分析に用いた記録は、前節と同様の理由から、平均データである。また、変数の選択には、有意水準を5%に設定したステップワイズ法を用いた。その結果、 PGA および PGV に関しては、 $\log(P)$ 、 $\log(P)^2$ 、 M_W を説明変数とする重回帰式(式(5-1)および式(5-2))が得られた。一方、 $PGA \times PGV$ については、 $\log(P)^2$ と M_W が除外され、 $\log(P)$ のみを説明変数とする回帰式(式(5-3))が得られた。

$$I = -0.122 + 0.114 \cdot M_W + 1.682 \cdot \log(PGA) + 0.069 \cdot \log(PGA)^2 \quad (\sigma = 0.336) \quad (5-1)$$

$$I = 3.383 - 0.165 \cdot M_W + 2.254 \cdot \log(PGV) - 0.082 \cdot \log(PGV)^2 \quad (\sigma = 0.286) \quad (5-2)$$

$$I = 1.324 + 1.019 \cdot \log(PGA \times PGV) \quad (\sigma = 0.172) \quad (5-3)$$

図6に、本研究による $M_W=6.0, 7.0, 8.0$ のときの関係式(式(5))を破線で示す。比較のため、藤本・翠川⁵⁾の関係式のうち、 $I \geq 4$ のデータから求めた関係式(灰色の実線)を示しておく。図6より、 PGA は数百 cm/s^2 以上で、 PGV は数十 cm/s 以上において、 $\log(P)^2$ の項の影響により、勾配が徐々に変化している。また、藤本・翠川⁵⁾の関係式(灰色の実線)と比較すると、本研究の $M_W=7.0$ 程度の際の関係式にほぼ対応していることがわかる。 M_W の係数は PGA が 0.11 、 PGV が -0.17 であり、Karim and Yamazaki⁸⁾の結果(PGA が 0.18 、 PGV が -0.13)と比べると、 PGA の係数は正の値で、 PGV の係数が負の値であることは両者で共通している。ただし、Karim and Yamazaki⁸⁾では PGA の M 依存性の方が強い(係数の絶対値が大きい)のに対して、本研究では PGV の M 依存性の方が強いというやや異なる結果となっている。

式(5)の括弧内の数値は、本研究で使用したデータの中で $I \geq 4$ のデータ(1,457 記録)から計算した標準偏差(σ)である。同じデータを用いて藤本・翠川⁵⁾の関係式から σ を計算すると、 PGA が 0.363 、 PGV が 0.316 、 $PGA \times PGV$ が 0.172 であった。両者の σ を比較すると、 $PGA \times PGV$ の関係式による σ は両者でほぼ同じであるが、 PGA および PGV の関係式による σ は本研究の方が小さい。このことから、 M の影響を考慮することにより、 PGA ないし PGV から計測震度への推定精度が向上したものと考えられる。

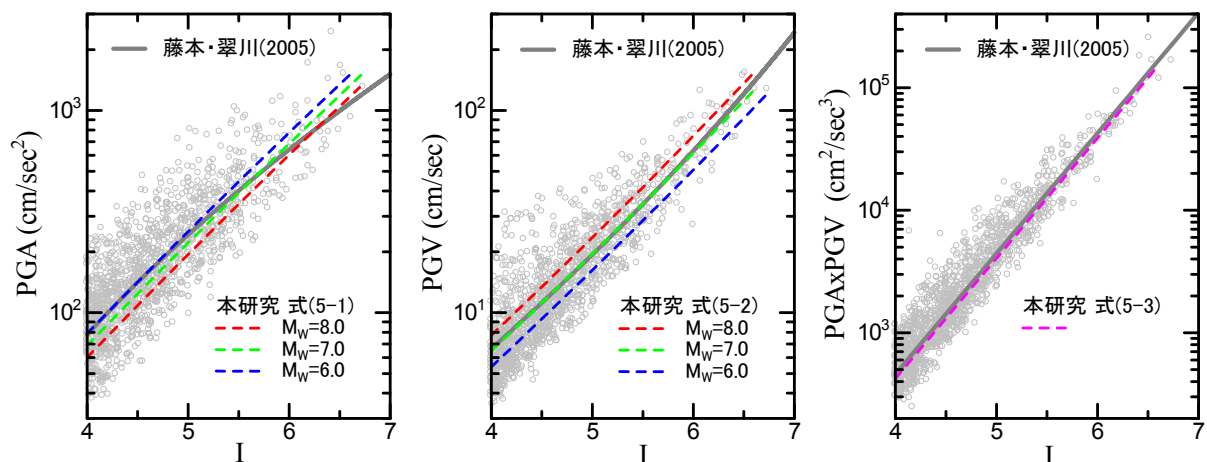


図6 計測震度と地震動強さ指標の関係式の比較(破線：本研究、実線：藤本・翠川⁵⁾)

本研究の関係式は M_w が 5.6~7.9 の範囲の地震記録に基づくものであるが、 M_w が 7.5 程度以上の記録は 2003 年十勝沖地震(本震)の 1 地震のみである。そこで、本研究の関係式の $M8$ 程度の記録に対する妥当性を確認するため、翠川・他⁴⁾で使用した 1995 年兵庫県南部地震以前の $M8$ 前後の 4 地震の記録と比較した。なお、これらの地震記録は、1 地震あたりの記録数が少ないこともあり、本研究での関係式を求める際には使用しなかったものである。図 7 は、これらの 4 地震($M_w=7.6\sim 8.2$)での計測震度の実測値(横軸)と本研究の関係式(式(5))による推定値(縦軸)との関係である。いずれの地震動強さ指標についても、計測震度の実測値と推定値はほぼ 1 対 1 に対応していることが確認できる。

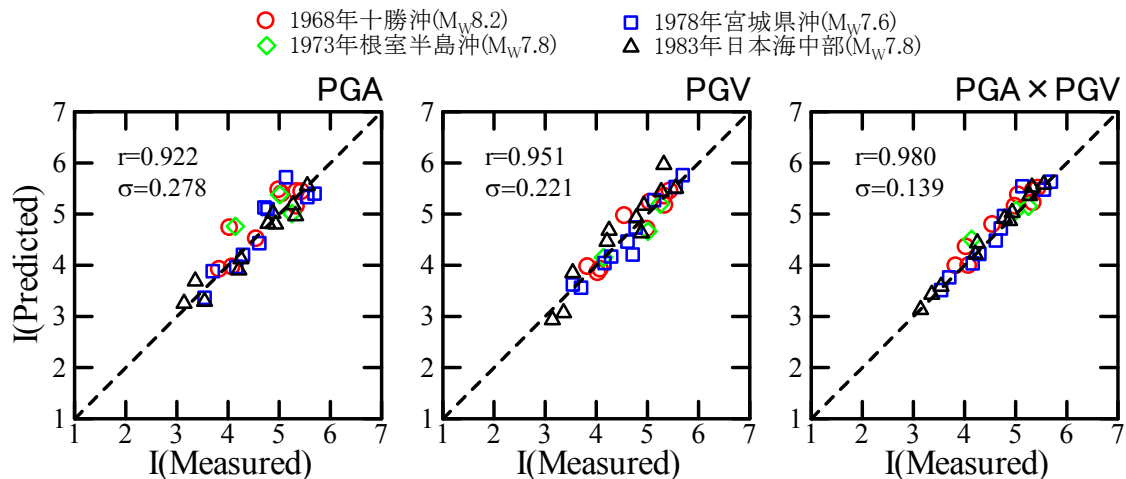


図 7 過去の大地震における計測震度の実測値(横軸)と推定値(縦軸)の比較

以上をまとめると、本研究で提案した関係式を用いた場合、 PGA からは ± 0.3 強の精度で、 PGV からは ± 0.3 弱の精度で、 $PGA \times PGV$ からは ± 0.2 程度の精度で、計測震度を推定できるものと考えられる。また、本研究の関係式の M_w に関する適用範囲は、 M_w で 5.5~8.0 程度であると考えられる。なお、藤本・翠川⁵⁾では、 $I=4.0$ を境として、それより高震度域と低震度域のデータに対して、それぞれ関係式を求めていたため、 $I=4.0$ 付近で関係式にわずかな不連続が生じていたが、本研究では、そのような不連続は解消されている。

5. 結論

1995 年兵庫県南部地震から 2008 年岩手・宮城内陸地震までの期間に国内で震度 5 強以上を観測した 20 地震での強震記録に基づいて、計測震度と地震動強さ指標(PGA , PGV , $PGA \times PGV$)の関係に対する M の影響および高震度域において 2 次式の回帰式を導入する必要性について検討し、以下の結果が得られた。

- 1) 計測震度と地震動強さ指標の関係に対する M の影響について検討した。その結果、計測震度と地震動強さ指標の関係における M 依存性は、 PGV や PGA では顕著に現れるが、 $PGA \times PGV$ ではほぼみられないことを確認できた。これらの傾向は、Karim and Yamazaki⁸⁾の結果とも調和的である。
- 2) 高震度域における計測震度と地震動強さ指標の関係に対する回帰式として、1 次式と 2 次式のどちらがより適切であるかを検討した。その結果、震度 5 強程度までは、いずれの地震動強さ指標も 1 次式との適合度が高いが、それよりも高震度域では 2 次式との適合度が高くなり、その傾向は PGV および PGA において顕著に現れることを確認できた。

- 3) 計測震度と地震動強さ指標の関係に対する M の影響および高震度域での 2 次式との適合性を考慮して、各種の地震動強さ指標と M から計測震度を推定する関係式を求めた。その結果、本研究で提案した関係式を用いた場合、 PGA からは ± 0.3 強の精度で、 PGV からは ± 0.3 弱の精度で、 $PGA \times PGV$ からは ± 0.2 程度の精度で、計測震度を推定できることを示した。

謝 辞

本研究では、気象庁、地方自治体、防災科学技術研究所、港湾地域強震観測、北海道開発土木研究所、国土交通省、JR、JH、三菱地所設計、建設省土木技術研究所、運輸省港湾技術研究所、鉄道総合技術研究所、関西電力、大阪ガス、関西地震観測研究協議会の強震記録を使用させて頂いた。構造計画研究所の司宏俊博士には、兵庫県南部地震の強震記録についてご教示いただいた。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書(平成 17 年 3 月 23 日公表)、2005.
- 2) 千葉県：平成 19 年度千葉県地震被害想定調査報告書、2008.
- 3) 内閣府(防災担当)：地震防災マップ作成技術資料、2005.
- 4) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係、地域安全学会論文集、No.1、1999、pp.51-56.
- 5) 藤本一雄・翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、No.7、2005、pp.241-246.
- 6) 震度観測検討委員会、震度観測検討委員会報告書、1988.
- 7) 気象庁：震度を知る—基礎知識とその活用—、ぎょうせい、1996、pp.49-53.
- 8) Karim, K.R. and F. Yamazaki: Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, 2002, pp.1191-1212.
- 9) Atkinson, G.M. and S.I. Kaka: Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.97, No.2, 2007, pp.497-510.
- 10) G-Akis Tselentis and Laurentiu Danciu: Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Engineering Ground-Motion Parameters in Greece, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.98, No.4, 2008, pp.1863-1875.
- 11) 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集、No.523、1999、p.68.
- 12) 金刺靖一・金子史夫：計測震度と物理量の関係について、応用地質技術年報 兵庫県南部地震特集号、1997、pp.85-96.
- 13) 野津 厚：経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例、海溝型巨大地震を考える—広帯域強震動の予測—シンポジウム論文集、土木学会・日本建築学会、2005、pp.99-106.
- 14) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎：情報量統計学、共立出版株式会社、1983、pp.128-138.

(受理：2009 年 11 月 20 日)
(掲載決定：2010 年 2 月 5 日)

Empirical Relationship between JMA Instrumental Seismic Intensity and Ground Motion Parameters Considering the Effect of Earthquake Magnitude

FUJIMOTO Kazuo¹⁾ and MIDORIKAWA Saburoh²⁾

- 1) Lecturer, Department of Risk and Crisis Management System, Chiba Institute of Science, Dr. Eng.
- 2) Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to propose an empirical relationship for estimating Japan Meteorological Agency instrumental seismic intensity from ground motion parameters such as *PGA*, *PGV* and the product of *PGA* and *PGV*. Using the strong ground-motion records during recent major earthquakes from the Hyogo-ken Nanbu Earthquake in 1995 to the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, we examine the effect of earthquake magnitudes on the relationship. We also compare two regression models, i.e., simple liner regression model and second-order polynominal regression model, to determine which of the models is fitted the actual relationship better in the higher intensity range such as intensity 5 upper or more by using the Akaike's Information Criterion (*AIC*). Considering these results, we develop the empirical relationship for estimating instrumental seismic intensity from ground motion parameters and earthquake magnitude.

Key Words: Instrumental Seismic Intensity, Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, Magnitude, AIC