

応答スペクトルを用いて改正メルカリ震度階を計算する方法の素案

Proposal of the Method of Calculating Modified Mercalli Intensity Using the Response Spectra (Draft)

境有紀・汐満将史⁽¹⁾・中澤駿佑⁽²⁾

Yuki SAKAI, Masashi SHIOMITSU⁽¹⁾ and Shunsuke NAKAZAWA⁽²⁾

(1) 山形大学工学部

(2) 宇都宮大学地域デザイン科学部

(1) Faculty of Engineering, Yamagata University, Japan

(2) School of Regional Design, Utsunomiya University, Japan

Synopsis

A method of calculating Modified Mercalli (MM) intensity using the response spectra was proposed. The method was based on the previously proposed method modifying the Japan Meteorological Agency (JMA) seismic intensity by authors and the relationship between the JMA seismic intensity and the MM intensity. The characteristics of this method are that the period region of strong ground motions is changed for high and low intensity, by which this method successfully reproduces the actual heavy structural damage causing loss of life in the high-intensity region.

キーワード: 改正メルカリ震度階, 応答スペクトル, 計測震度, 1-1.5秒震度

Keywords: Modified Mercalli (MM) intensity, response spectra, JMA seismic intensity, 1-1.5sec. seismic intensity

1. はじめに

日本における震度や改正メルカリ震度階（以下、MM震度階）は、地震発生直後、あるいは、将来発生する大地震の被害予測の際に地震動強さの面的分布として与えるなど、地震防災上大きな役割を果たす。震度は、1996年より地震波形から計算する計測震度となったが、それ以前は、震度階級説明文（以下、説明文。気象庁、1996）に基づいて判定されており、これを基に過去の多くの歴史地震で被害から推定された震度分布が残されていて非常に貴重な資料となっていて、それは、MM震度階も同様である。

一方で、説明文による判定は、判定する人によるばらつきがあり、近年、地震観測網が整備されてきたことと、地震発生直後の対応の迅速性を考慮に入

れて、震度は、1996年から波形から計算できる計測震度となった。MM震度階も地動最大加速度（以下、PGA）、地動最大速度（以下、PGV）による算定式が提案されている（Wald et al., 1999）。

ただ、計測震度は、高震度において実際の被害と対応しない場合が多く、説明文との連続性に問題があるという指摘があり、これを解消するために、1から2秒、あるいは、1から1.5秒における応答スペクトルの平均値（以下、それぞれ1-2秒応答、1-1.5秒応答）が建物の大きな被害と対応することを強震記録と観測点周辺の被害データから導き、1-2秒応答、1-1.5秒応答が大部分を占める中低層建物が大きな被害を受けるときの等価周期に対応することを示して、これを基にした震度算定法が提案されている（境ら、2002；境ら、2004；境、2013；中澤ら、2016）。PGA

とPGVによるMM震度階の算定は、カリフォルニアで発生した8つの地震を基にしているが、日本では、強震観測網が整備されて以降、大地震が頻発し、数多くの強震記録と定量的な被害データが収集・蓄積されていて（例えば、汐満ら，2018），これらを活用することで、より正確に被害と対応させることができる。

また、PGAは非常に短い周期（0.1秒以下）、PGVは非常に長い周期（10秒以上）と対応しており（渡部ら，1985），この2つの指標では、被害と対応した1-2秒、あるいは、1-1.5秒を表現することは難しいという問題がある。具体的には、5秒以上の長周期地震動が発生すると、PGVは非常に大きくなるが、高層、免震建物以外のほとんどの建物に被害が生じないことを再現できない（Sakai et al., 2021）。また、PGAは、非常に敏感な指標で、たびたび非常に大きなPGAを記録したにも関わらず、その周辺でほとんど被害がないことが頻発しており（例えば、中澤ら，2019），一方、PGVは、加速度波形から積分して求める際に基線補正が必要で、フーリエ変換を行って、バンドパスフィルタをかけ、逆フーリエ変換で元の波形に戻すことが多いが、その際、特に長周期地震動で、PGVがフィルタによって大きく異なってくるという問題がある。

以上のことから、本論文では、応答スペクトルを用いたMM震度階を算定する方法の提案を行う。応答スペクトルを用いることで、建物の大きな被害と対応した1-2秒応答、あるいは、1-1.5秒応答を直接用いることができ、減衰をかけることでPGAのように敏感ではなく、PGVを求める際の基線補正も必要がない。

また、建物が被害を受けると周期が伸びるとともに等価減衰が大きくなることが知られており、減衰を考慮できることも応答スペクトルを用いる優位点としてあげられる。

2. 日本の震度算定フローの修正

応答スペクトルを用いた震度算定法は、日本の震度については、既に提案されているものがあるので、これをMM震度階に拡張させることにより、その算定法を導く。ただし、既に提案されているものは、現行の計測震度と対応する0.1-1秒応答と1-2秒応答を基にしたもの（境ら，2002），より細かく、0.1-1秒応答、0.5-1秒応答と1-2秒応答を基にしたもの（境ら，2004a）があるが、ここでは、簡便さを勘案して、これらに修正を加え、0.1-1秒応答と1-1.5秒応答を組み合わせたものとする。

2つの周期帯を組み合わせる背景としては、震度お

よびMM震度階の説明文（Richter, 1958）を見ると、低震度（震度はV以下、MM震度階はVIII以下）では、人体感覚、物品の動きと中小被害、高震度（震度はVI以上、MM震度階はVIII以上）では、人命の損失に繋がる建物などの構造物の大きな被害によって表現されており、高震度で、人命の損傷に繋がる構造物の被害と正確に対応することが、地震防災上、重要ということがある。ここで、注意すべきこととして、人体感覚、物品の動きと中小被害などの前者と建物などの構造物の被害が対応する地震動の周期帯は、異なっていて、人体感覚は、0.1-1秒（岡田，2001），室内物品の動きは0.5秒（翠川ら，1988），中小被害は0.5-1秒（境ら，2004）なのに対して、建物の大きな被害は、1-2秒、範囲を絞って1-1.5秒であることが日本で発生した数多くの大地震における強震記録とその周辺の被害データを基に示されている（境ら，2004；境，2013）。このことは、日本のみならず、1994年ノースリッジ地震、1999年台湾集集地震、2011年ニュージーランドクライストチャーチ地震の分析でも確認されている（境ら，2001；境ら，2004b；Iizuka et al., 2011）。

そして、1-1.5秒応答を基に震度6弱の下限（5.5）で、木造建物の全壊が生じ始め、震度7の下限（6.5）で、木造建物の全壊率が30%になるように1-1.5秒震度という形で定式化されている（中澤ら，2016）。つまり、低震度では、人体感覚、室内物品の動き、中小被害に対応した0.1-1秒応答に基づく0.1-1秒震度（境ら，2002），高震度では、1-1.5秒応答に基づく1-1.5秒震度を用いることで、説明文の再現を目指すことになる。0.1-1秒震度、1-1.5秒震度を求める式を以下に示す。

$$I_{0.1-1} = 1.97 * A_{0.1-1} - 0.24 \quad (1)$$

$$I_{1-1.5} = 1.58 * A_{1-1.5} + 1.45 \quad (2)$$

ここで、 $I_{0.1-1}$: 0.1-1秒震度、 $A_{0.1-1}$: 0.1-1秒平均加速度応答（3方向ベクトル和の最大値、減衰定数0.05）、 $I_{1-1.5}$: 1-1.5秒震度、 $A_{1-1.5}$: 1-1.5秒平均加速度応答（水平2方向ベクトル和の最大値、減衰定数0.2）である。

なお、現行の計測震度は、0.1-1秒応答と相関があり（境ら，2002），0.1-1秒震度は、計測震度とほぼ対応していることになるが、このことが高震度において建物の大きな被害と対応していない一因と考えられる。

0.1-1秒震度は、計測震度と対応させるために減衰5%としているが、1-1.5秒震度は、建物被害によって減衰が増大することを考慮に入れて減衰20%となっている（境，2013）。また、強震記録は、NS、EW、UD成分という形で供給されることが多いが、地震計がどの向きに置かれたかで振幅が異なる偶然性を排除するために0.1-1秒応答は、人体感覚を考慮に入れて、

計測震度と同様に、3方向ベクトル和の最大値、1-1.5秒応答は、水平2成分のベクトル和の最大値を用いている。

まず、日本の震度算定法としては、境ら、2002の1-2秒応答を1-1.5秒応答に置き換えてFig.1のフローに従って算定する。具体的には、以下ようになる。

- (1) 減衰20%の1-1.5秒の応答スペクトルを計算し、1-1.5震度を求める。これが震度6弱以上(5.5以上)になれば、この値を採用する
 - (2) 1-1.5震度が震度5強以下(5.5未満)の場合、減衰5%の0.1-1秒の応答スペクトルを計算し、0.1-1秒震度を求める。これが震度5強以下(5.5未満)になれば、この値を採用する
 - (3) 1-1.5震度が震度6弱未満(5.5未満)、0.1-1秒震度が震度6弱以上(5.5以上)のときは、1-1.5秒震度と0.1-1秒震度の平均とする
- 過去の様々な強震記録による本算定法による震度

(以下、提案震度)をTable 1に示す。PGAや計測震度が高いものの観測点周辺で建物の大きな被害がなかったもの(1993年釧路沖地震のJMA釧路や2003年十勝沖地震のK-NET広尾など)が提案震度では、小さくなった一方、観測点周辺で建物の大きな被害が数多く見られたもの(1995年兵庫県南部地震のJR鷹取、大阪ガス葺合、2004年新潟県中越地震の川口町震度計など)は、提案震度は大きな値となっていて、実際の被害を再現できていることがわかる。

3. MM震度階算定のフロー

次に、日本の震度とMM震度階の説明文を対応付けることで、提案震度からMM震度階の算定を行う。日本の震度とMM震度階の対応関係については、様々な検討があるが、功刀,2000にまとめられている。そして、功刀,2000は、K-NETの記録を用いて、計測

Table 1 Comparison of proposed seismic intensity scales

Earthquake	Station name	PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	I _{JMA}	I _{0.1-1}	I _{1-1.5}	I _p	I _{MM0.1-1}	I _{MM1-1.5}	I _{MM}	I _{MM*}	d[%]
1993 Kushiro-oki	Kushiro(JMA)	752.5	42.5	5.95	6.00	5.35	5.67	8.39	8.21	8.39	7.98	0.0
	Takatori(JR)	742.7	155.2	6.48	6.16	6.33	6.33	8.68	10.16	10.16	9.62	34.9
1995 Hyogo-ken Nanbu	Fukiai(Osaka Gas)	834.0	129.3	6.49	6.10	6.25	6.25	8.58	10.01	10.01	9.61	15.3
	Kobe(JMA)	848.0	105.7	6.44	6.28	5.98	5.98	8.91	9.46	9.46	9.14	2.5
2000 Tottori-ken Seibu	Sakaiminato (Meteorological observatory)	762.8	85.4	6.01	5.88	5.59	5.59	8.18	8.68	8.68	8.98	1.1
2003 Tokachi-oki	Shibetsu(K-NET)	602.9	66.3	5.92	5.82	5.72	5.72	8.07	8.94	8.94	8.47	1.1
	Hiroo(K-NET)	985.6	48.9	6.07	6.02	4.93	5.48	8.44	7.35	8.44	8.05	0.0
2003 Miyagi-ken-oki	Ofunato(JMA)	1106.9	35.4	5.85	5.77	4.91	5.34	8.00	7.32	8.00	7.68	0.0
2004 Niigata-ken Chuetsu	Kawaguchi (Shindokei)	1677.9	150.2	6.52	6.20	6.25	6.25	8.77	10.01	10.01	9.87	18.0
	Ojiya(JMA)	974.0	93.6	6.34	6.34	5.86	5.86	9.01	9.21	9.21	8.99	1.2
	Tokamach i(Shindokei)	1337.1	56.5	5.93	5.99	5.32	5.66	8.39	8.14	8.39	8.25	0.0
2007 Noto-Hanto	Anamizu(K-NET)	883.8	102.4	6.33	5.98	6.12	6.12	8.37	9.74	9.74	9.25	18.0
	Wajima(JMA)	472.2	98.7	6.15	5.72	5.94	5.94	7.89	9.39	9.39	9.19	4.6
	Noto(K-NET)	642.5	25.2	5.55	5.54	5.07	5.30	7.58	7.63	7.58	7.21	0.0
2007 Niigata-ken Chuetsu-oki	Kashiwazaki (K-NET)	812.0	127.0	6.37	5.86	6.00	6.00	8.15	9.50	9.50	9.41	4.2
	Kashiwazaki (Shindokei)	793.5	125.6	6.33	5.77	5.97	5.97	7.98	9.44	9.44	9.24	5.7
	Nagaoka (Shindokei)	692.6	83.2	6.17	6.11	5.59	5.59	8.59	8.68	8.68	8.86	0/42
2011 Tohoku-chiho Taiheiyō-oki	Tsukidate(K-NET)	2765.2	100.9	6.67	6.63	5.43	6.03	9.53	8.37	8.95	9.41	0/58
	Shiogama(K-NET)	1951.4	68.5	6.02	6.09	5.39	5.74	8.55	8.27	8.41	8.65	0.0
	Mashiki(KiK-net)	1313.8	138.4	6.50	6.50	6.21	6.21	9.30	9.93	9.93	9.73	6.2
2016 Kumamoto(4/16)	Nishiharamura Komori(Shindokei)	866.4	262.1	6.62	6.49	6.20	6.20	9.29	9.91	9.91	10.51	0/57
	Kumamoto(K-NET)	843.2	95.2	6.09	6.17	5.83	5.83	8.71	9.16	9.16	9.05	0.0
	Santa monica city hall	866.8	41.6	5.41	5.64	5.13	5.39	7.75	7.76	7.75	7.97	1/23
1994 Northridge	Tarzana cedar hill nursey	1966.5	109.9	6.55	6.57	5.81	5.81	9.42	9.12	9.12	9.46	0/10
	LA county fire station	731.8	119.5	6.34	6.23	6.01	6.01	8.80	9.51	9.51	9.17	2/27
	068	530.9	300.1	6.04	5.76	5.80	5.80	7.97	9.10	9.10	9.87	*2.8
1999 Taiwan chi-chi	072	464.5	72.8	5.85	5.87	5.59	5.59	8.17	8.68	8.68	8.70	*9.7
	074	608.4	79.0	6.04	5.97	5.79	5.79	8.35	9.09	9.09	8.78	*8.7
	129	992.6	69.1	5.98	5.97	5.52	5.52	8.34	8.54	8.54	8.18	*0.0
2011 Christchurch	REHS	723.8	99.8	6.21	5.89	6.04	6.04	8.20	9.57	9.57	9.04	15/98
	CCCC	472.4	68.8	5.99	5.75	5.91	5.91	7.95	9.32	9.32	8.73	2/23
	HVSC	1708.2	101.7	6.45	6.56	5.75	5.75	9.40	8.99	8.99	9.27	2/21
	PRPC	737.1	123.1	6.11	6.09	5.91	5.91	8.56	9.32	9.32	9.18	0.0
2023 Southern Turkey	3129	1615.0	172.2	6.47	6.57	6.19	6.19	9.41	9.88	9.88	10.09	**3/83
	3141	975.0	124.6	6.25	6.22	5.83	5.83	8.79	9.16	9.16	9.64	**1/27
	4615	643.3	152.8	6.20	5.98	5.81	5.81	8.36	9.12	9.12	9.67	**0/55

PGA: Peak ground acceleration (Vector sum of two horizontal directions)

PGV: Peak ground velocity (Vector sum in the two horizontal directions, obtained by applying a bandpass filter of 0.1-10Hz to the acceleration and integrating it)

I_{JMA}: JMA seismic intensity, I_{0.1-1}:0.1-1 sec seismic intensity, I_{1-1.5}:1-1.5sec seismic intensity, I_p: Proposed seismic intensity

I_{MM0.1-1}:0.1-1 sec Seismic intensity on MM seismic intensity, I_{MM1-1.5}:1-1.5 sec seismic intensity on MM seismic intensity,

I_{MM*}: Calculated MM seismic intensity by Wald (1999) from PGA and PGV using the method described in Kunugi (2000)

d: Ratio of heavily damaged buildings within 200m of the station

(*: Ratio of collapsed buildings estimated from the degree of damage around the station (Sakai et al., 2001),

**): Ratio of collapsed buildings investigated within 200 meters of seismic station using satellite images,

The fraction indicates "number of damaged buildings / number of total buildings" if there are fewer than 100 surrounding buildings

震度とWald et al., 1999によるPGAとPGVを用いたMM震度階の対応関係を示している。

まず、1-1.5秒震度とMM震度階の対応については、両説明文の記述を比較して、建物の大きな被害が生じる高震度までその関係を示しているTrifunac and Brady, 1975によるものを定式化して用いた。

$$\begin{aligned}
 I_{MM1-1.5} &= 1 & (I_{1-1.5} < 2/3) \\
 &= 3 * I_{1-1.5} - 1 & (2/3 \leq I_{1-1.5} < 1.5) \\
 &= I_{1-1.5} + 2 & (1.5 \leq I_{1-1.5} < 4.5) \\
 &= 2 * I_{1-1.5} - 2.5 & (4.5 \leq I_{1-1.5})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ここで、 $I_{MM1-1.5}$: 1-1.5秒MM震度階、 $I_{1-1.5}$: 1-1.5秒震度である。

一方、計測震度と対応した0.1-1秒震度とMM震度階の関係は、功刀, 2000のものを用いた。ただし、範囲外の場合は、外挿して用いた(式(4))。

$$\begin{aligned}
 I_{MM0.1-1} &= 1.25 * I_{0.1-1} + 0.59 & (I_{0.1-1} \leq 2.58) \\
 &= 1.07 * I_{0.1-1} + 1.04 & (2.18 < I_{0.1-1} \leq 3.69) \\
 &= 1.13 * I_{0.1-1} + 0.82 & (3.69 < I_{0.1-1} \leq 4.81) \\
 &= 1.79 * I_{0.1-1} - 2.34 & (4.81 < I_{0.1-1})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

ここで、 $I_{MM0.1-1}$: 0.1-1秒MM震度階、 $I_{0.1-1}$: 0.1-1秒震度である。

日本の震度算定のフローと同様に、低震度と高震度を切り換える震度6の下限5.5に対応するMM震度階は、建物の大きな被害が生じ始めるMM震度階のIXの下限8.5とし、これは、式(3)とも対応している。

よって、MM震度階を求めるフローは、日本の震度と同様に、以下ようになる(Fig. 2)

- (1) 減衰20%の1-1.5秒の応答スペクトルを計算し、1-1.5秒震度を求め、式(3)からこれに対応したMM震度階を求める(以下、1-1.5秒MM震度階)。そして、これが8.5を超えれば、これをMM震度階とする。
- (2) 1-1.5秒MM震度階が8.5未満となった場合は、減衰5%の0.1-1秒の応答スペクトルを計算して計測震度と対応した0.1-1秒震度を求め、功刀, 2000による関係式(式(4))を用いてMM震度階を求める(以下、0.1-1秒MM震度階)。これが8.5未満となれば、これをMM震度階とする。
- (3) 1-1.5秒MM震度階が8.5未満で、0.1-1秒MM震度階が8.5を超えた時は、0.1-1秒MM震度階と1-1.5秒MM震度階の平均をMM震度階とする。

このようにして求めたMM震度階をTable 1に示している。日本の震度を対象とした提案震度と対応する形で設定されているので、傾向は変わらないが、日本以外の強震記録の破壊力の大きさをMM震度階という国際的基準で見ることができる。例えば、周辺で大きな被害が見られた1999年台湾集集地震の埔里(074)や2023年トルコ南部の地震の3129は、MM震度階も大きくなっていて、大きな破壊力を有してい

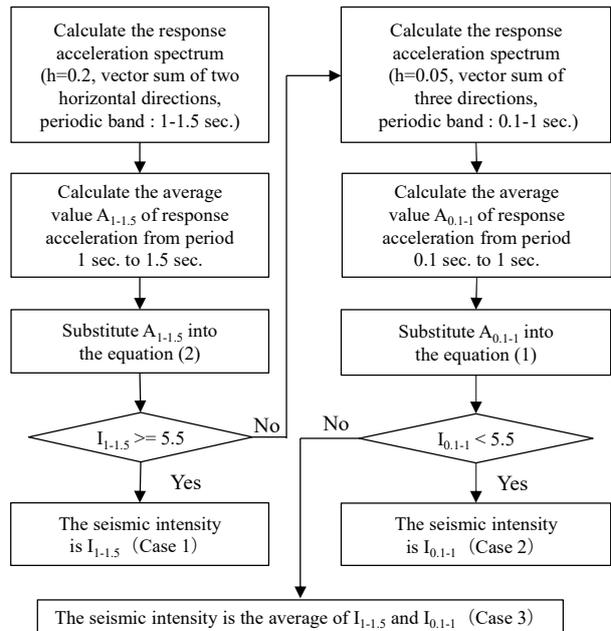


Fig.1 Flowchart of the modified proposed seismic intensity calculation method

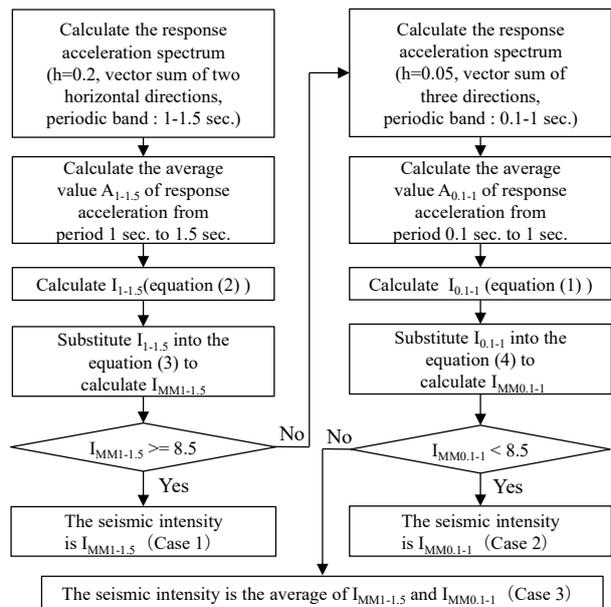


Fig.2 Flowchart of the proposed MM intensity calculation method

たことがわかる。

また、PGA, PGVを用いる算定法は、甚大な被害を引き起こしたJR鷹取で10以下となっている一方、長周期成分が多く含まれてPGVは非常に大きくなったが周辺で建物の大きな被害がなかった2016年熊本地震の西原村震度計を過大に評価していることがわかる。

Fortranで記述した計算プログラムを付録で記したURLで公開している。計算は、Windows11を登載した一般的なPCで可能で、計算時間は、一記録あたり0.1秒程度で、応答スペクトルを求める際の周期の刻

みを0.05秒程度とすれば（公開したプログラムは、0.01秒刻みだが、これを0.05秒としても結果はほとんど変わらない）、フーリエ変換を用いる計測震度やPGA、PGVからMM震度階を求めるプログラムと同程度となっている。また、線形の運動方程式を解くだけなので、プログラムも非常に短くて済むというメリットもある。

4. まとめと今後の課題

応答スペクトルを用いてMM震度階を波形から計算する方法の提案を行った。まず、日本の震度で定式化を行い、震度とMM震度階の説明文の対応からMM震度階を求めた。その際、低震度では、0.1-1秒、高震度では、1-1.5秒と算定の基になる地震動の周期帯を変えることで、地震防災上重要な高震度における説明文の人命の損失に繋がる建物の大きな被害の記述を再現できるようにした。

今回提案したものは、暫定版であり、今後の課題として、以下のことがあげられる。

まず、応答スペクトルを用いたMM震度階の算定法は、日本の建物被害データに基づいているため、海外の地震にも適用できるかどうかの検証が必要である。これは、即ち、日本の震度とMM震度階の対応関係の再検討ということになるが、両説明文を照らし合わせるだけではなく、日本と海外の建物をベースシア係数などの具体的な耐震性能で物理的に比較して、震度やMM震度階を定量的に定義することが必要である。

説明文からの連続性を維持して、歴史地震資料を活用するためには、国内外の建物の違いに加えて、年代による違いも考慮に入れなければならない。具体的には、現行の提案する震度算定法は、主に1995年兵庫県南部地震以降の30近くの大地震の強震観測点回りの被害データと強震記録を基にしていて、過去数百年に渡る歴史地震データにおける建物性能とは異なると考えられる。この点に関しても、国内外の建物の違いと同様に、ベースシア係数などの物理的、かつ、定量的な建物性能を把握することで、時代や国や地域に依存しない汎用的な震度階の算定方法について検討して行く。

謝 辞

強震記録は、気象庁、防災科学技術研究所、自治体、震災予防協会、鉄道総合技術研究所、大阪ガス、台湾交通部中央気象局、ニュージーランドGeoNet、AFAD（トルコ防災危機管理庁）に提供していただきました。1994年ノースリッジ地震の強震記録は、

ATC-38 Report (2001)のものを使用させていただきました。

参考文献

- 岡田成幸（2001）：防災学に必要な地震動入力尺度について考える～震度のフィルタ特性の検証を通して～、第26回地震工学研究発表会パネルディスカッション, pp.13-19.
- 気象庁（1996）：震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい.
- 功刀卓（2000）：K-NET強震計記録に基づく気象庁計測震度と計測改正メルカリ震度の関係, 地震, 第2輯, 第53巻, pp.89-93.
- 境有紀・吉岡伸悟・額綱一起・壁谷澤寿海（2001）：1999年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第549号, pp.43-50
- 境有紀・神野達夫・額綱一起（2002）：建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM.
- 境有紀・神野達夫・額綱一起（2004a）：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第585号, pp.71-76
- 境有紀・中村友紀子（2004b）：1994年ノースリッジ地震の建物被害データと強震記録を用いた地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第584号, pp.59-63
- 境有紀（2013）：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性－建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標－, 日本建築学会構造系論文集, 第683号, pp.35-40
- 汐満将史・境有紀・神野達夫・中尾隆・白井周・中澤駿佑・太田圭祐（2018）：2016年熊本地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性－益城町－, 日本地震工学会論文集, Vol.18, No.5, pp.108-120.
- 中澤駿佑・境有紀（2016）：深部地盤構造が建物被害に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.1161-1162.
- 中澤駿佑・境有紀・汐満将史・三木彩加・新井蒼太（2019）：2018年北海道胆振東部地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.7, pp.67-104
- 翠川三郎・福岡知久（1988）：気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係, 地震2, 第41巻, pp.223-233.
- 渡部丹・大橋雄二・長谷部廣行（1985）：高層建築

- 物の耐震設計用入力地震動について（その1）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B構造 I, pp.135-136.
- ATC-38 Report (2001): Database on the Performance of Structures Near Strong-Motion Recordings, 1994 Northridge, California, Earthquake.
- Iizuka, H., Sakai, Y. and Koketsu, K. (2011): Strong Ground Motions and Damage Conditions Associated With Seismic Stations in the February 2011 Christchurch, New Zealand, Earthquake, Seismological Research Letters, Volume 82, Number 6.
- Richter, C. F. (1958): Elementary Seismology, Freeman, p.768.
- Sakai, Y. and Matsui, T. (2021): Indices Representing Destructive Power of Strong Ground Motions to Estimate Building Damage, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. (1975): On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 65, pp.139-162.
- Wald, D. J., Quintro, V., Heaton, T. H. and Kanamori, H. (1999): Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and Modified Mercalli Intensity in California, Earthquake Spectra, 15, pp.557-564.

付 録

提案する震度, および, MM震度階の計算プログラムを<http://sakaiy.main.jp/mm.htm>に公開する.

(論文受理日 : 2023年8月31日)