

### 3. 3. 2 震度・史料データに基づくモデル化

#### 3. 3. 2. 1 研究課題全体の成果

都司嘉宣（東大地震研）  
瀨瀬一起（東大地震研）  
武村雅之（鹿島小堀研）  
神田克久（鹿島小堀研）  
境 有紀（筑波大機能工学）

##### (1) 研究の背景と目的

地震は低頻度の自然現象であり、比較的頻繁なプレート間地震でもその繰り返し周期は数十年以上になっている。そのため、ある震源域の特性を調べるために過去の地震を遡ろうとしても、地震計の記録がまったく得られないか、得られても遡れるのは直近の一地震だけという場合がほとんどである。直近を越えてさらに過去の地震へ遡るとなると、震度の情報が唯一のデータとならざるを得ない。その震度データも明治・大正時代ならば中央气象台などから発表されたものが存在する可能性があるが、それ以前では古文書などから被害の情報を抽出し、それを震度データに変換することになる（たとえば宇佐美，1986、1996）。

こうした過去の地震を解析するには、唯一のデータである震度データを活用する道しか残されていない。本研究ではその活用方法を開発して、地震計記録のない時代の地震から震源の情報を引き出し、強震動予測における震源モデル化の精度向上を図ることを目的とする。ひとつでも多くの地震を遡ることができればそれだけ情報量が増し、たとえばプレート間地震におけるアスペリティの繰り返し仮説（3. 3. 1 節参照）などを、より高い確度で検証することができる。検証の確度が上がれば、アスペリティモデルの精度が上がることは言うまでもない。

##### (2) 宮城県沖地震群・元禄地震の震度分布

手法開発のためには、同一震源域で繰り返し起こっているプレート間地震の震度データを蓄積することが重要である。なかでも宮城県沖では、比較的短い間隔でマグニチュード7クラスの地震が繰り返し起こっており、その震度データは手法の検証用データセットとして最適なものである。都司（2003）は一連の宮城県沖地震について、古文書などの史料における被害記述から震度データを得た。さらにそれらを地図上にプロットして比較することにより、一連のものうち江戸時代では享保2年（1717年）、寛政5年（1793年）、天保6年（1835年）および文久元年（1861年）の四地震が宮城県沖で発生したものとした。

本研究ではこれら震度データをデータベース化し、さらに震源の解析に利用するため、震度観測地点（被害記述地点）の緯度・経度を、地名などを頼りに地図から読み取った。図1はこれら緯度・経度を元に、文久・天保・寛政の地震の震度データをプロットしたものである。このほか、首都圏における歴史地震を解析するため、元禄地震（元禄16年、1703

年)の震度データのデータベース化と、緯度・経度読取を開始した。その一部を図2に示す。

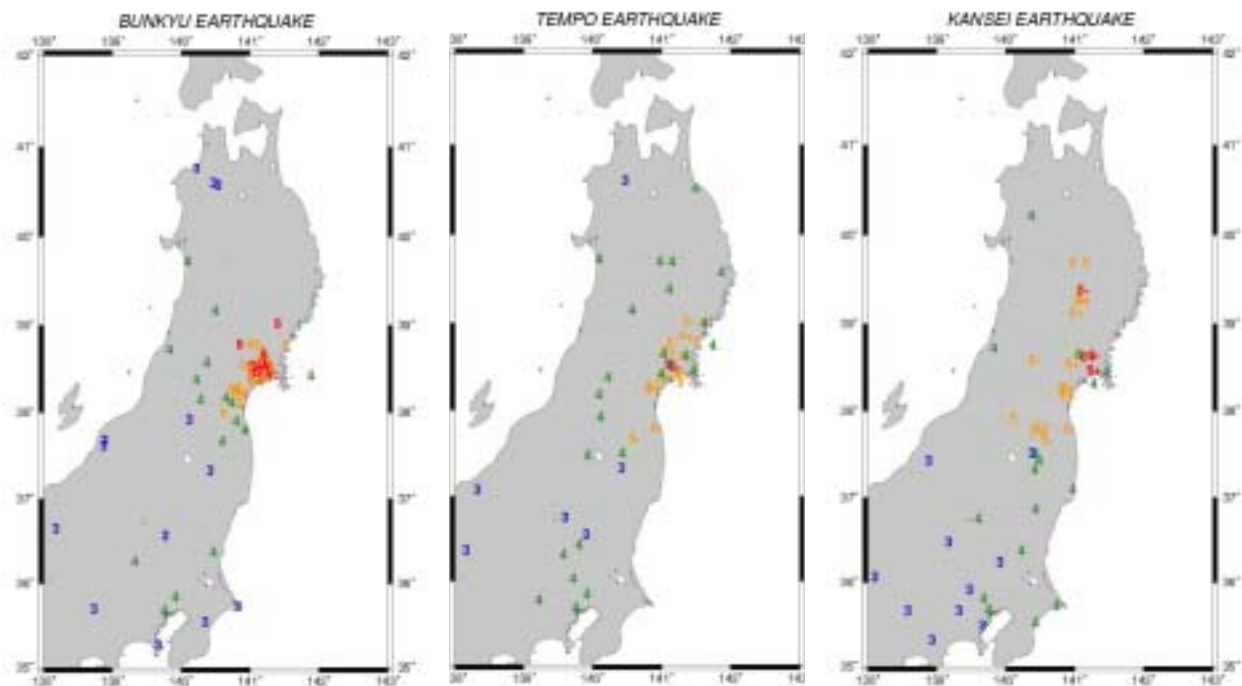


図1 文久(左)・天保(中)・寛政(右)の宮城県沖地震の震度分布

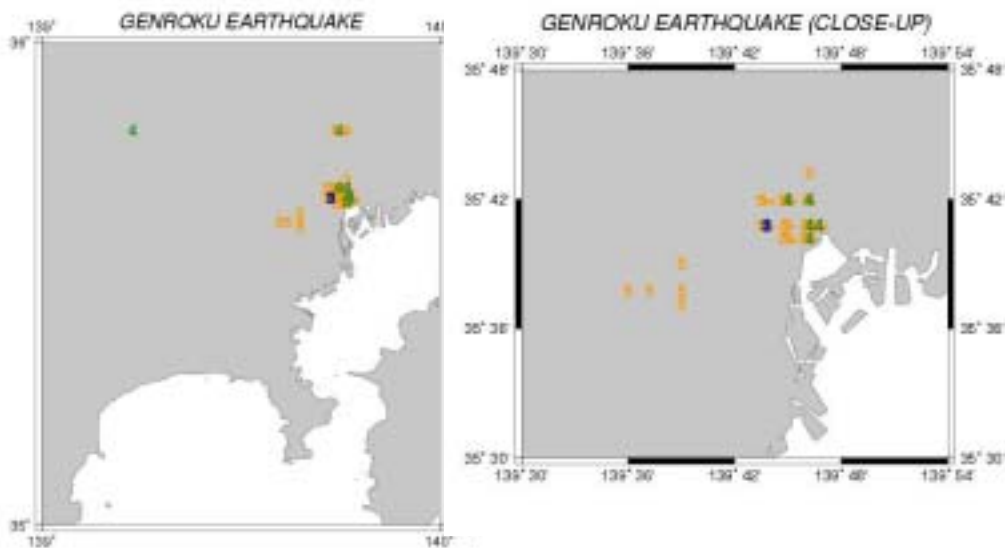


図2 元禄地震の震度分布 (一部)

### (3) 震度データによるエネルギー分布インバージョン

南海トラフの巨大地震をターゲットとして、震度データを用いた震源解析の手法開発を行った。過去の地震のうち、1944年昭和東南海地震および1946年昭和南海地震については、津波や地殻変動データを用いて推定した震源のすべり分布が報告されているが、来るべき地震の予測の精度を上げるためには、昭和以前の歴史地震についても検討する必要がある。

あると考えられる。津波や地殻変動の詳細なデータが残されていない古い地震の震源特性を推定するために、地震被害に基づいて調査された各地の震度データ（図3）を用いて、最小自乗法により震源のエネルギー分布を推定する手法を開発し（神田・他, 2002）、検討を行った。震度は地震動の周期 0.5 秒から 1 秒程度との相関が強く、得られた放出エネルギー分布は短周期地震波の発生域を示す。この手法により、昭和東南海・昭和南海地震、1854 年安政東海・南海地震および 1707 年宝永地震の放出エネルギー分布を求め、津波インバージョンや地殻構造などと比較した（図4）。

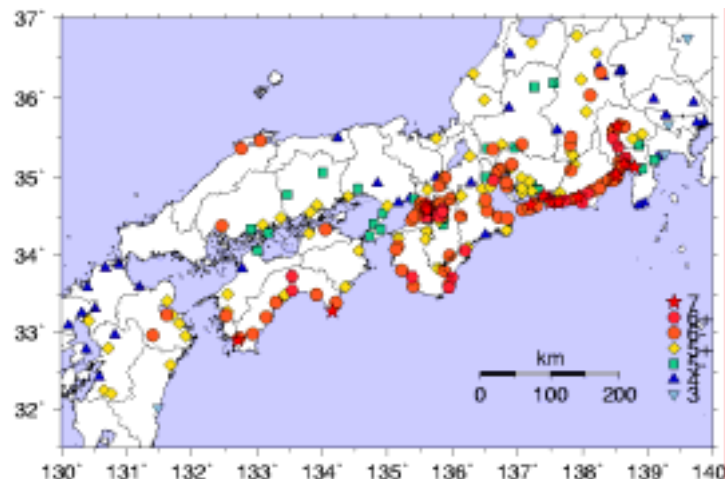


図3 宝永地震（1707年）の震度分布

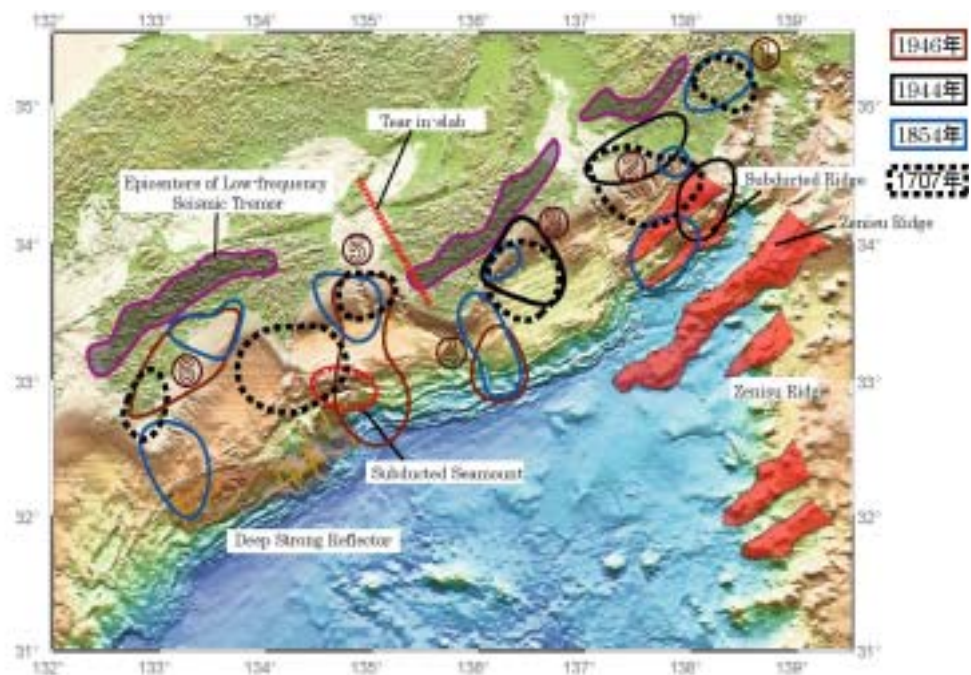


図4 昭和東南海・昭和南海地震、1854 年安政東海・南海地震および 1707 年宝永地震の放出エネルギー分布

#### (4) 建物被害に基づく震度評価

被害情報から震度が推定できるということは、震度が実際の被害とよい相関で対応する

必要がある、ということの意味する。気象庁の定義する震度は 1996 年に時刻歴データから計算する計測震度となったが、2000 年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001 年芸予地震では震度 6 弱あるいは 6 強を記録したにもかかわらず被害はさほどでもなく、その一方で建物の耐震性能はやや異なるが、1999 年台湾集集地震では震度 6 弱でも甚大な被害をもたらした地点もあるなど（境・他, 2001）、同じ震度でも被害程度が大きく異なる事例が見られ、現行の計測震度は高震度において実際の建物被害との対応性から再検討が必要と考えられる。そこでここではまず、現行の計測震度と実際の建物被害との対応性について検討し、高震度において実際の建物被害と対応していないことを定量的に示した（図 5）。次に、対応しない原因について応答スペクトルに基づいた解析によって検討し、計測震度が対象とする周期帯 0.1～1 秒よりも、やや長周期の 1～2 秒が建物被害と相関が良いことを示した（図 6）。最後にこれら検討結果から、現行の計測震度に代わる実際の建物被害と対応した震度算定法の提案を行った。

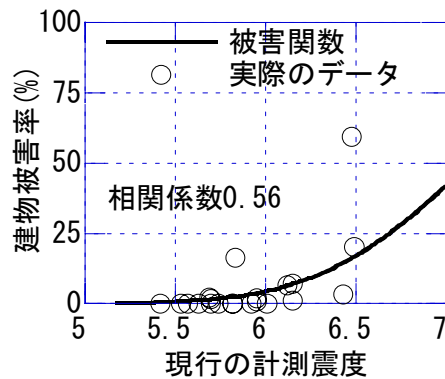


図 5 計測震度と建物被害率の対応性

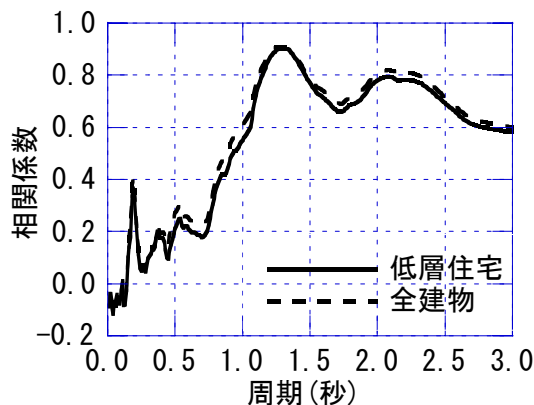


図 6 弾性速度応答の周期と建物被害率の相関係数の関係

#### (5) 平成 15 年度の研究計画

(2) の歴史地震震度データについては、平成 15 年度において元禄地震のデータベース化と緯度・経度の読み取りを進め、試験的な解析によるデータの検証を行う予定である。また、(3) のエネルギー分布インバージョンでは、(2) の宮城県沖地震群の震度データを用い

た手法の検証を行うとともに、1923年関東地震の震度データを解析して、その結果と波形記録や地殻変動データの解析結果との比較などを行う予定である。

(4)で提案した震度算定法は、低震度で現行の計測震度、高震度で大きな建物被害を考慮に入れたものであるが、この他に考慮すべき要因として、建物の中小被害、人体感覚と室内物品の動きの区別、建物の耐震性能の地方性、建物建設年の影響、歴史地震の被害記述との対応など様々なものがある。平成15年度はこれらを考慮に入れた詳細な検討を行っていく予定である。

#### 引用文献

- 1) 宇佐美龍夫：「歴史地震事始」，私家版，185pp.，1986.
- 2) 宇佐美龍夫：「新編 日本被害地震総覧」，増補改訂版，東京大学出版会，493pp.，1996.
- 3) 都司嘉宣：江戸時代に起きた宮城県沖地震，地震2，投稿中，2003.
- 4) 神田克久，武村雅之，宇佐美龍夫：震度データを用いた東海・南海地震の震源特性の推定、第11回地震工学シンポジウム，28，139-144，2002.
- 5) 境有紀，吉岡伸悟，額額一起，壁谷澤寿海：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，No.549，pp.43-50，2001.

#### 成果の論文発表・口頭発表等

##### 1) 論文発表

都司嘉宣	元禄関東地震(1703)による江戸市中の被害・震度の詳細分布	歴史地震，第18号	2002年
神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫	震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析	地震2	印刷中
境有紀・神野達夫・額額一起	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	平成14年11月20-22日

##### 2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫	波形合成結果を用いた震度データによる震源特性のインバージョン解析法の検証	日本地震学会 2002年秋季大会	2002年11月11日

武村雅之・ 神田克久	強震動予測に向けたフィリピン海プレートの潜り込みに伴う巨大地震のアスペリティ評価と歴史地震研究の重要性	京都大学防災研究所研究集会	2003年2 月
---------------	---	---------------	-------------

### 3. 3. 2. 2 震度データによるエネルギー分布インバージョン

神田克久（鹿島小堀研）

武村雅之（鹿島小堀研）

#### (1) 研究の背景と目的

東海・東南海・南海地震については、近い将来発生し極めて広範囲に地震被害が生じることが想定されている。1944年昭和東南海地震および1946年昭和南海地震については、津波や地殻変動データを用いて推定した震源のすべり分布が報告されているが、来るべき地震の予測の精度を上げるためには、昭和以前の歴史地震についても検討する必要があると考えられる。津波や地殻変動の詳細なデータが残されていない古い地震の震源特性を推定するために、地震被害に基づいて調査された各地の震度データを用いて、最小自乗法により震源のエネルギー分布を推定する手法を開発し、検討を行った。震度は地震動の周期0.5秒から1秒程度との相関が強く、得られた放出エネルギー分布は短周期地震波の発生域を示す。この手法により、昭和東南海・昭和南海地震、1854年安政東海・南海地震および1707年宝永地震の放出エネルギー分布を求め、津波インバージョンや地殻構造などと比較した。

#### (2) 短周期地震波発生域

得られた短周期地震波発生域は、添付の図のように海底地形図の上に重ねて、①-⑥の番号で地域分けして考察した。①の駿河湾の奥では、宝永地震と安政東海地震に短周期地震波発生域が見られ、この地域は駿河トラフと伊豆半島の衝突帯の接点にあたり、断層破壊が急激に停止し、短周期地震波が強く発生したと思われる。②の遠州灘沖では、潜り込む歴代の銭洲海嶺が、あるときはバリアーになりある時はアスペリティになって作用し、その近傍で短周期地震波発生域が形成されている可能性がある。③の熊野灘沖では、昭和東南海地震の津波や地震動によるインバージョン解析から求められるアスペリティに隣接しているところで、毎回地震の際に短周期地震波発生域となっている。④の潮岬沖では、この地域が断層の縁になった昭和と安政の時のみ短周期地震波発生域となり、東海側と南海側が一続きで破壊したと思われる宝永地震の際には短周期地震波発生域が認められない。⑤の紀伊水道の入口付近では、フィリピン海プレート内の深部低周波微動の発生域をさえぎるように短周期地震波発生域が存在している。この西方には室戸岬沖の沈み込む海山を挟み宝永地震の時のみ短周期地震波発生域がみられる。昭和、安政の際には、この領域は滑っていない可能性が高く、沈み込んだ海山をバリアーとして避けるように断層破壊が進んだが、宝永地震の時はそのバリアーが動いたことになる。⑥の高知県西部沿岸付近では、津波のインバージョンから推定される昭和南海地震のアスペリティの北西縁に隣接する地域で、毎回の地震で短周期地震波発生域となっている。ただし、この地域から海溝寄りに安政南海地震の時のみ現れる短周期地震波発生域があるが、解としては不安定であり、DSR（強反射面）と確認される地域に含まれ、非地震性すべりが定常的に起こっていると指摘されていることを考慮すれば、短周期地震波発生域であった可能性は低いもの

と考えられる。

引用文献

- 1) 橋本徹夫, 菊地正幸: 地震記象から見た 1946 年南海地震の震源過程, 月刊地球号外, 24, 16-25, 1999.
- 2) Baba, T. : Slip distributions of the 1944 Tonankai and 1946 Nankai earthquakes estimated from tsunami inversion using a new plate model, Doctor Thesis of Kanazawa Univ., Japan, 2003.
- 3) Kodaira, S., E. Kurashimo, J-O.Park, N. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, I. Iwasaki, N. Hirata, K. Ito, and Y. Kaneda: Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismic zone, Geophys. J. Int., 149, 815-835, 2002.
- 4) Cummins P,R., T. Baba, S. Kodaira, and Y. Kaneda: The 1946 Nankaido earthquake and segmentation of the Nankai Trough, Phys. Earth Planet. Inter., in press, 2002.
- 5) Obara, K. : Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002, .

成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

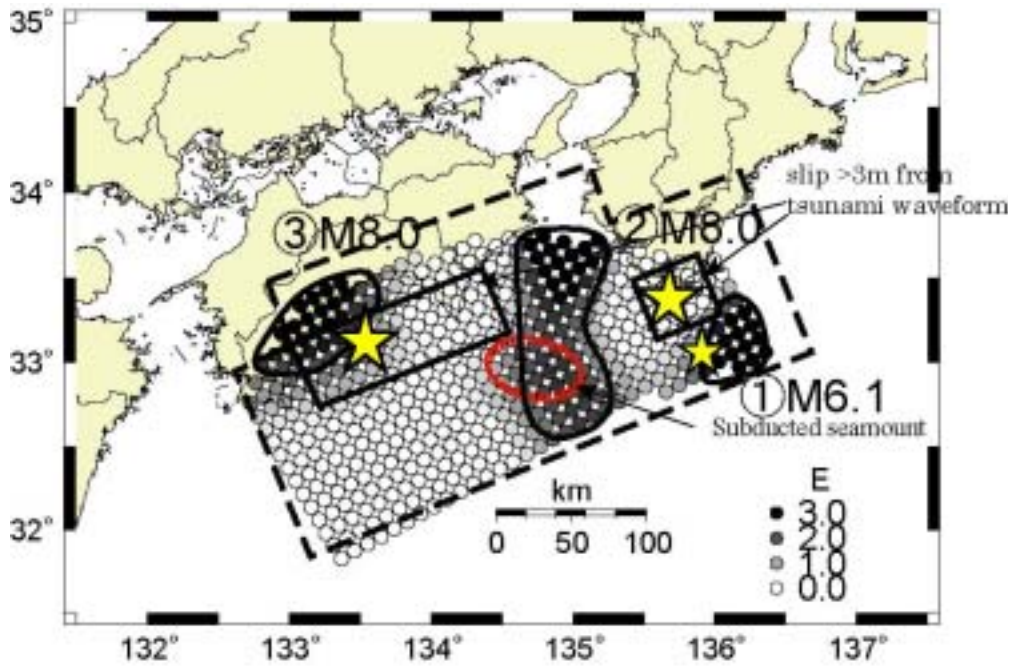
著者	題名	発表先	発表年月日
神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫	震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析	地震 2, 56	2003

2) 口頭発表、その他

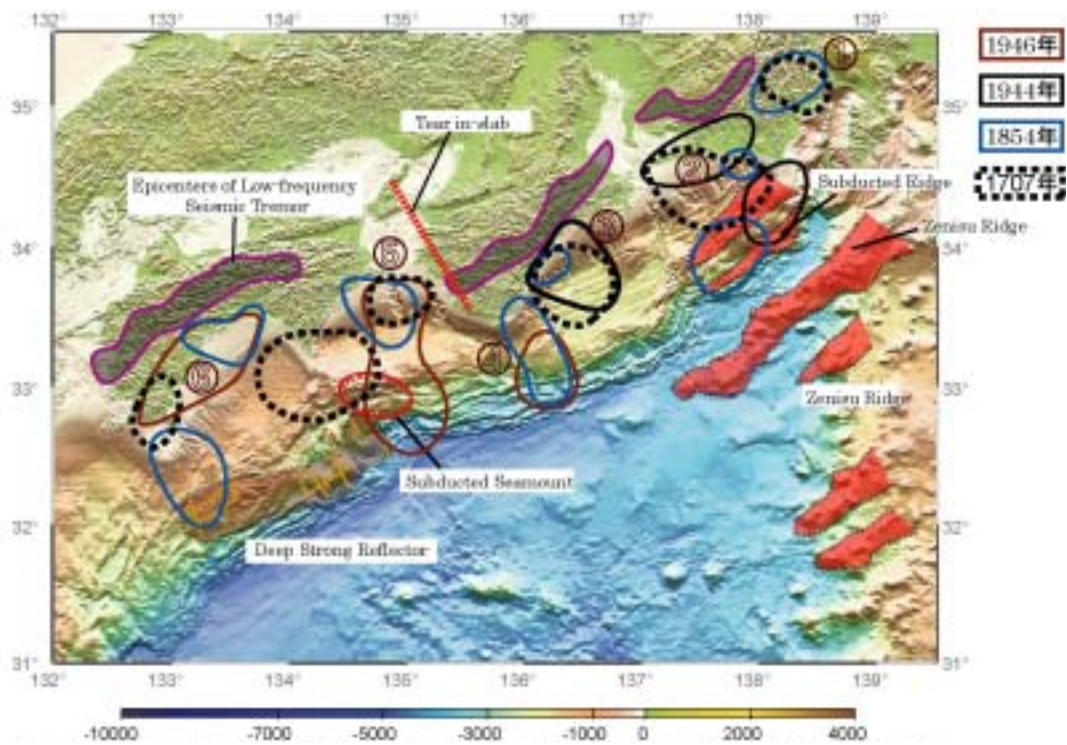
発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
武村雅之, 神田克久, 宇佐美龍夫	震度分布データから推定される歴史地震の震源過程: 東海・南海地震を例に	歴史地震研究会	2002 年 9 月
神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫	波形合成結果を用いた震度データによる震源特性のインバージョン解析法の検証	日本地震学会講演予稿集, 2002 年秋季大会	26, 2002 年 11 月 11 日
神田克久, 武村雅之, 宇佐美龍夫	震度データを用いた東海・南海地震の震源特性の推定	第 11 回地震工学シンポジウム, 28, 139-144	2002 年 11 月 20 日



武村雅之, 神田克久	強震動予測に向けたフィリピン海プレート の潜り込みに伴う巨大地震のアスペリ ティ評価と歴史地震研究の重要性	京都大学研究集会	2003 年 2 月
---------------	---	----------	---------------



Short-period seismic wave radiation zone of the 1946 Nankai earthquake. Curved solid lines show fault zones radiating larger than twice of average energy. Stars show hypocenters estimated from recorded strong motions [Hashimoto and Kikuchi (1999)]. Each magnitude is shown with the number of rapture sequence. Squared lines are large slip regions (more than 3m) [Baba (2002)]. The ellipse off Cape Muroto shows a subducted seamount [Kodaira et al. (2002)].



Short-period wave radiation zones derived from the seismic intensity inversion analysis for the Showa, Ansei, and Hoei earthquakes. Epicenters of Low-frequency seismic tremor by Obara(2002). Other information of crustal structures and topography by the courtesy of JAMSTEC.

### 3. 3. 2. 3 計測震度と建物被害の対応性

境 有紀 (筑波大機能工学)  
 纈纈一起 (東大地震研)  
 神野達夫 (広島大工)

#### (1) 研究の背景と目的

震度は、地震直後の対応や地震危険度予測地図の作成に用いられるなど、地震防災上非常に重要な役割を果たす。このことは、震度は実際の被害と対応する必要がある、ということの意味する。つまり、震源を正確にモデル化し、地下構造を詳細に調べ、これらを精密かつ的確にモデル化して、強震動を正確に予測できたとしても、「最終的なアウトプット」である震度が実際の被害と対応していないものになってしまうと、地震危険度予測地図は実際の被害と対応しないものになり、地震直後の対応も的確にできなくなってしまう。

震度は、1996年に時刻歴データから計算する計測震度となったが、2000年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001年芸予地震では震度6弱あるいは6強を記録したにもかかわらず被害はさほどでもなく、その一方で建物の耐震性能はやや異なるが、1999年台湾集集地震では震度6弱でも甚大な被害をもたらした地点もある<sup>1)</sup>など、同じ震度でも被害程度が大きく異なる事例が見られ、現行の計測震度は高震度において実際の建物被害との対応性から再検討が必要と考えられる。

そこでここではまず、現行の計測震度と実際の建物被害との対応性について検討し、現行の計測震度が高震度において実際の建物被害と対応していないことを定量的に示す。次に、現行の計測震度が実際の建物被害と対応しない原因について応答スペクトルに基づいた解析によって検討する。そして最後に、現行の計測震度に代わる、実際の建物被害と対応した震度算定法の提案を行う。

#### (2) 計測震度と実際の建物被害との対応性

1995年兵庫県南部地震などの日本で発生した地震の強震記録とその周辺建物被害データ(表1)を用い、現行の計測震度と建物被害率の対応性について図1に示す。現行の計測震度と建物被害率の対応性はあまりよくない。例えば、JR鷹取、葺合、神戸JMAの3点について、被害率が59.4%、20.2%、3.2%と有意に違うにもかかわらず、計測震度はほぼ6.5と、その違いを再現できていない。

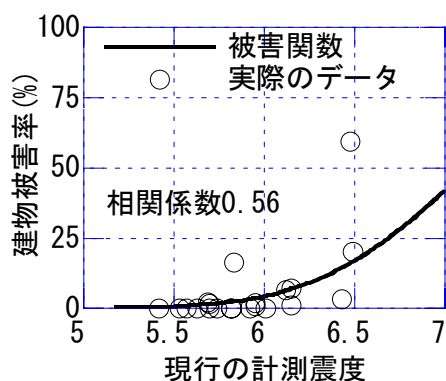


図1 計測震度と建物被害率の対応性

#### (3) 計測震度が実際の建物被害と対応しない原因

そこで、計測震度が実際の建物被害と対応しない原因について、応答スペクトルを用いた検討を行った<sup>4)</sup>。具体的には、応答スペクトルの何秒(下限周期)から何秒(上限周期)までの平均値を用いれば、現行の計測震度と最も対応するかについて検討し、計測震度が地震動のどの周期

表 1 解析に用いた強震記録とその周辺建物被害データ

地震	地点	PGA	PGV	$I_M$	$V_1$	$A_1$	d
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	742.7	161.9	6.48*	391.6	1737.4	59.4
1995 年兵庫県南部	葦合	834.0	139.8	6.49*	305.6	1395.9	20.2
1995 年兵庫県南部	NTT 神戸	331.3	91.2	5.83	188.3	819.2	16.1
1995 年兵庫県南部	JR 宝塚	690.4	91.7	6.15	185.2	811.7	7.2
1995 年兵庫県南部	本山第一小	794.0	86.7	6.12	151.4	666.4	6.5
1995 年兵庫県南部	神戸 JMA	847.9	96.6	6.43	220.9	864.7	3.2
1995 年兵庫県南部	尼崎高架橋	340.7	57.9	5.69	169.3	734.9	2.4
1995 年兵庫県南部	尼崎竹谷小	551.0	60.2	5.70	127.6	524.3	1.7
1995 年兵庫県南部	尼崎港	473.2	64.8	5.74	145.9	623.8	0.0
1995 年兵庫県南部	関電総合技研	555.9	64.2	5.95	123.2	498.6	0.8
1995 年兵庫県南部	六甲アイランド	368.0	79.8	5.70	148.8	694.6	0.0
1995 年兵庫県南部	JR 新大阪	253.0	41.5	5.42	70.2	296.7	0.0
1995 年兵庫県南部	大阪 JMA	83.1	19.5	4.54	40.5	174.7	0.0
1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	433.7	49.2	5.82	103.4	396.8	1.9
2000 年鳥取県西部	境港測候所	762.6	88.3	6.01	184.3	750.9	1.1
2000 年鳥取県西部	K-NET 米子	435.6	54.1	5.82	156.1	645.5	0.0
1993 年釧路沖	釧路 JMA	752.3	45.8	5.95*	100.8	385.9	0.0
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	1615.6	58.3	6.15	64.1	123.2	0.0
2001 年芸予	K-NET 大野	450.4	32.6	5.63	57.3	205.8	0.0
2001 年芸予	K-NET 東予	509.3	33.4	5.57	52.5	166.2	0.0
2001 年芸予	K-NET 三原	641.6	11.8	4.98	21.7	61.3	0.0
1997 年鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	542.8	37.7	5.53	51.7	189.9	0.0
1997 年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	978.0	47.5	5.92	64.9	195.1	0.0

PGA: 地動最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )、PGV: 地動最大速度 ( $\text{cm/s}$ )、 $I_M$ : 現行の計測震度 (\*がついたものは水平 2 成分による値)、 $V_1$ 、 $A_1$  それぞれ減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和の 1~2 秒平均速度、加速度応答 ( $\text{cm/s}$ 、 $\text{cm/s}^2$ )、d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合 (%)、ただし、2000 年鳥取県西部地震境港測候所周辺の建物総数は不明のため、代わりに世帯数を用い、d は自治体による被災度判定の全壊の 1/2 とした<sup>2)</sup>。PGV は、周期 15 秒、減衰定数 70.7%の系の最大速度応答を用いた<sup>3)</sup>。

帯と相関が高いか、即ち、計測震度が地震動のどの周期帯を対象としているかについて調べた。

縦軸、横軸にそれぞれ下限周期、上限周期をとって、平均弾性応答と現行の計測震度との相関係数を、速度応答を例としてコンターで図 2 に示す。用いたデータは、1996 年 5 月 11 日から 2001 年 12 月 2 日までに K-NET において現行の計測震度の最大値が 5 弱以上を記録した地震 5481 記録である。ただし、震度の高低に対するデータ数のアンバランスを補正するために、各震度でデータ数の逆数で重み付けをして回帰分析を行っている。

図 2 を見ると現行の計測震度と最も相関が高いのは、下限周期が 0.1 秒程度、上限周期が 1 秒程度、即ち、0.1~1 秒の平均速度応答が現行の計測震度と最も相関が高いことがわかる（加速度応答を用いた解析もほぼ同様の結果となった）。これは、人体感覚、あるいは室内物品の動きに対応した周期帯である<sup>5)6)</sup>。即ち、計測震度が高震度で実際の建物被害と対応しない原因は、人体感覚、あるいは室内物品の動きに対応した周期帯を用いて、建物被害と対応すべき高震度も算定しているためである。

#### (4) 建物被害と相関をもつ周期帯

そこで、表 1 の強震記録とその周辺建物被害データを用いて、地震動のどの周期帯が実際の建物被害と相関が高いかについて調べた<sup>4)</sup>。横軸に系の弾性周期、縦軸に弾性応答（減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和）と建物被害率の相関係数をとったものを、速度応答を例として（加速度

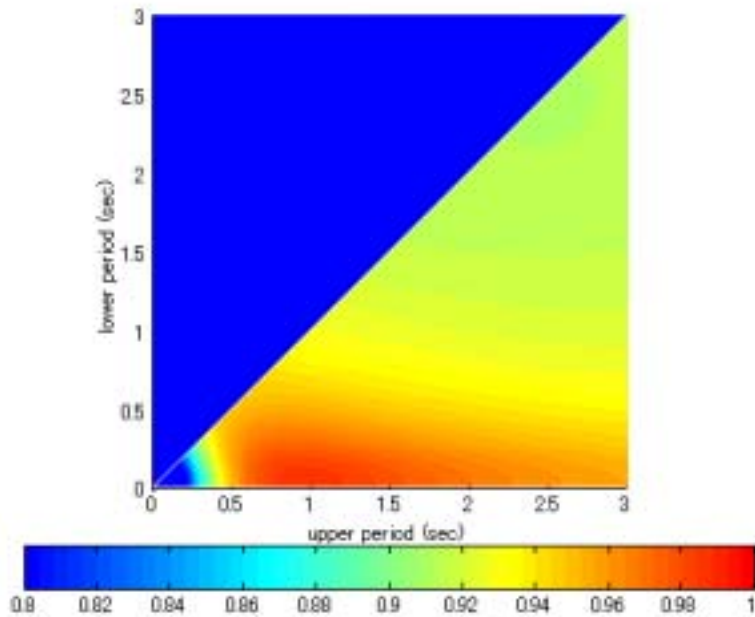


図2 応答スペクトルと現行の計測震度の相関係数

応答の場合もほとんど変わらない) 図3に示す。相関係数は1~2秒程度で大きくなっており、逆に、計測震度が対象としている0.1~1秒では小さくなっている。この1~2秒という周期帯は、大部分の建物(木造家屋および10層以下の中低層鉄筋コンクリート造建物:弾性周期0.2~0.5秒程度<sup>8)</sup>)の塑性化を考慮した等価周期(弾性周期0.2~0.5秒の3~4倍程度)にほぼ対応しており、構造物の弾塑性応答性状からも説明がつく。

よって、高震度において震度を実際の建物被害と対応するものとするには、現行の計測震度の0.1~1秒ではなく、1~2秒という周期帯を基に震度を算定する必要があることがわかる。

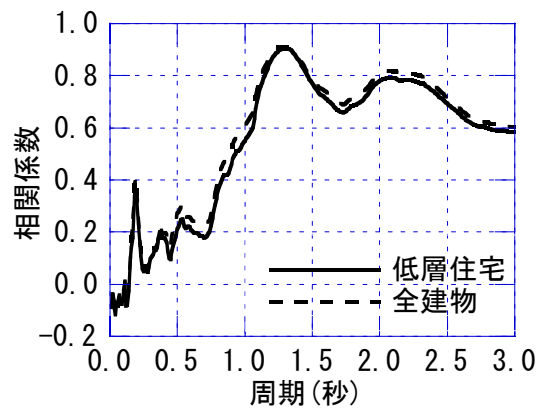


図3 弾性速度応答の周期と建物被害率の相関係数の関係

#### (5) 実際の建物被害と対応した震度算定方法の提案

そこで、高震度(5.5以上)では実際の建物被害と相関をもつ1~2秒、低震度(5.5未満)では、現行の計測震度と同様、人体感覚あるいは室内物品の動きと対応する0.1~1秒のスペクトルの値を用いて、震度を算定する方法について検討した<sup>4)</sup>。

まず高震度(5.5以上)を建物被害率と強い相関をもつ1~2秒程度の弾性応答を用いて定式化を行う。即ち、1~2秒の平均弾性加速度あるいは速度応答で震度を表現する。具体的には、対数正規分布を用いて1~2秒の平均弾性加速度あるいは速度応答による低層住宅の被害関数を求める。求めた被害関数を以下に示す。

$$D = \Phi(-10.26+3.84*\log(V_1)) \quad (1)$$

$$D = \Phi(-11.94 + 3.60 \cdot \log(A_1)) \quad (2)$$

ここで、 $D$  は建物被害率(%)、 $V_1$ ,  $A_1$  はそれぞれ 1~2 秒の平均弾性速度および加速度応答 (それぞれ  $\text{cm/s}$ ,  $\text{cm/s}^2$ 、いずれも減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和、以下同じ)、 $\Phi(x)$ : 標準正規分布の累積確率である。

次に、岡田・高井による震度の被害関数<sup>9)</sup>に修正を加えたもの<sup>8)</sup>(式(3))を用い、式(1)(2)と式(3)より、それぞれ震度を 1~2 秒平均弾性加速度あるいは速度応答によって表現した。求めた震度算定式 (以下、提案計測震度) を式(4)(5)に示す。

$$D = \Phi(-12.03 + 1.77 \cdot I) \quad (3)$$

$$I_{V1} = 2.17 \cdot \log(V_1) + 1.00 \quad (4)$$

$$I_{A1} = 2.03 \cdot \log(A_1) + 0.05 \quad (5)$$

ここで、 $I$  は震度、 $I_{V1}$ ,  $I_{A1}$  はそれぞれ  $V_1$ ,  $A_1$  を用いた提案計測震度である。

式(4)(5)で与えられる提案計測震度は、それぞれ 1~2 秒平均弾性速度あるいは加速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。提案計測震度 (式(4)を用いた場合を示している) の実際のデータとの対応関係を対数正規分布による被害関数と併せて図 4 に示す。

提案計測震度は、現行の計測震度 (図 1) と比べると、実際の建物被害率とよりよい対応関係が見られ、実際の建物被害をよりの確に予測できることがわかる。

よって震度 5.5 以上の場合、式(4)あるいは(5)で震度を表現することを提案する。

次に震度 5.5 未満については、現行の計測震度と対応する、0.1~1 秒の平均弾性応答を用いて震度を表現する。図 2 の作成に用いた 5481 記録のうち、震度 5.5 未満の 5469 記録について 0.1~1 秒の平均弾性応答と現行の計測震度の関係を図 5 に示す。相関係数は速度、加速度のいずれも 0.99 と非常に高く、変動係数 (速度で 0.17、加速度で 0.13) を見ても既往の同様の検討<sup>10)11)12)</sup>と同等かそれ以上の精度を有している。図 5 から求めた回帰式を式(6)(7)に示す。

$$I_{V2} = 1.92 \cdot \log(V_2) + 2.02 \quad (6)$$

$$I_{A2} = 1.97 \cdot \log(A_2) - 0.24 \quad (7)$$

ここで、 $I_{V2}$ ,  $I_{A2}$  はそれぞれ  $V_2$ ,  $A_2$  を用いた提案計測震度で、 $V_2$ ,  $A_2$  はそれぞれ 0.1~1 秒の平均弾性速度および加速度応答 (それぞれ  $\text{cm/s}$ ,  $\text{cm/s}^2$ 、いずれも減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和、

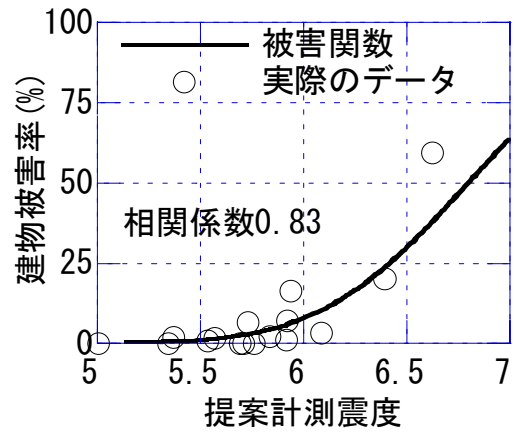


図 4 提案計測震度と建物被害率の対応性

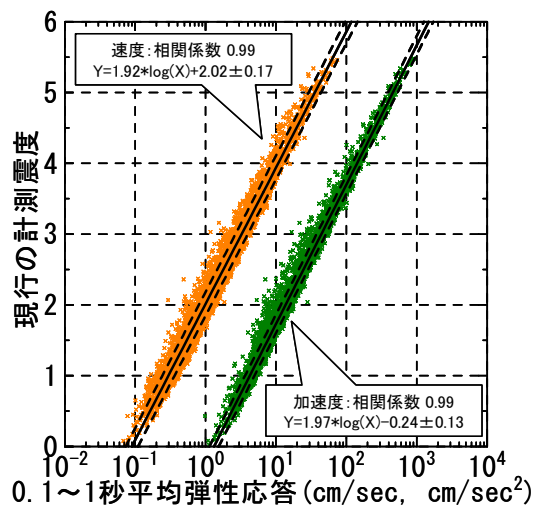


図 5 0.1~1 秒平均弾性応答と現行の計測震度との対応

以下同じ) がある。

式(6)(7)は式(4)(5)と同様に、それぞれ 0.1~1 秒平均弾性加速度あるいは速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

よって震度 5.5 未満の場合は、式(6)あるいは(7)で震度を表現する。

そして最終的な震度を、高震度と低震度の式を組み合わせることで求めることになる。また用いる式は、速度応答を使った式(4)(6)あるいは、加速度応答を使った式(5)(7)のどちらかとなる。これ以降は、説明をわかりやすくするため、速度応答、即ち式(4)(6)を用いる場合を例として説明を行う。加速度応答を用いる場合は、式(4)を式(5)に、式(6)を式(7)に置き換えればよい。

震度は、高震度における式(4)と低震度における式(6)を用いて算定する必要があるが、同じ記録を用いても式(4)と(6)では、異なる値が算出される。また、算出された値が式(4)と(6)でそれぞれ 5.5 以上、5.5 未満となるとは限らない。よって、最終的な震度を求めるアルゴリズムは慎重に決定する必要がある。

まず、式(4)の値が 5.5 以上となる場合 (Case 1) は、大きな建物被害が出ている可能性が高いので式(6)の値にかかわらず、式(4)の値をそのまま採用する。次に、式(4)(6)でいずれも 5.5 未満となる場合 (Case 2) は、人体感覚を優先し、式(6)の値を採用する。問題となるのは、式(4)で 5.5 未満となり、式(6)で 5.5 以上となる場合 (Case 3) であり、2000 年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001 年芸予地震において震度 6 弱あるいは 6 強を記録したにもかかわらず、被害はさほどでもなかったものは、まさにこのケースである。これは、体感是非常に大きい大きな建物被害はほとんど生じない、というケースであり、判断が難しい。そこでここでは、体感と被害の両方を考慮に入れるために、 $I_{v1}$  と  $I_{v2}$  がそれぞれ建物被害と人体感覚を、震度という同じ尺度で評価しているものと考え、 $I_{v1}$  と  $I_{v2}$  の平均値とした。以上の震度を求める

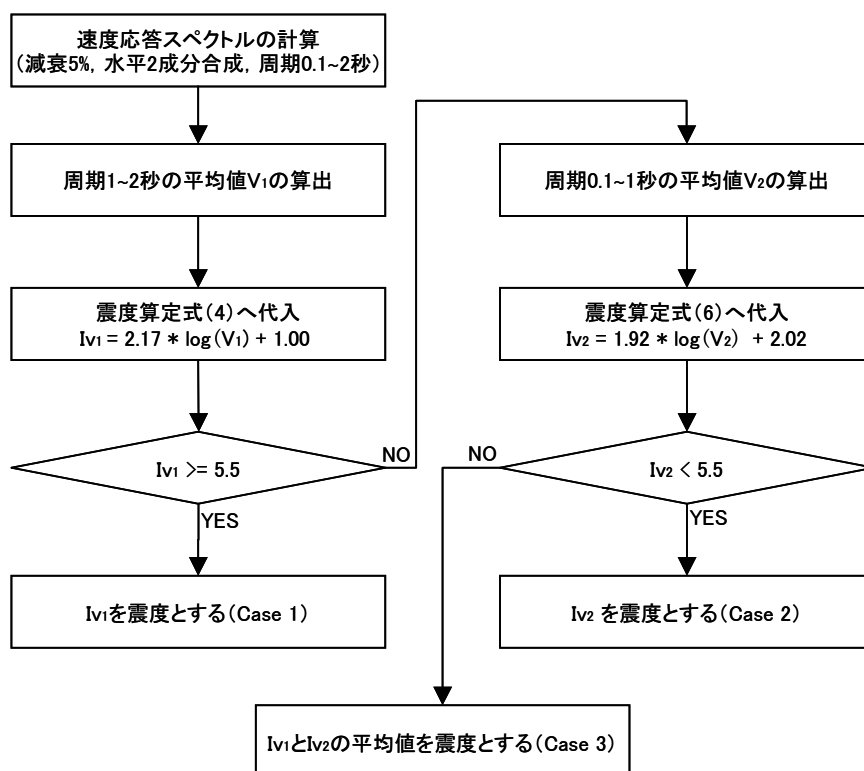


図 6 提案計測震度を求めるアルゴリズム

表 2 現行の計測震度と提案計測震度の比較

地震	地点	$I_M$	$I_{V1}$	$I_{V2}$	$I_P$	C	d
1995年兵庫県南部	JR 鷹取	6.48*	6.63	6.07	6.63	1	59.4
1995年兵庫県南部	葺合	6.49*	6.39	6.13	6.39	1	20.2
1995年兵庫県南部	NTT 神戸	5.83	5.94	5.53	5.94	1	16.1
1995年兵庫県南部	JR 宝塚	6.15	5.92	6.03	5.92	1	7.2
1995年兵庫県南部	本山第一小	6.12	5.73	5.83	5.73	1	6.5
1995年兵庫県南部	神戸 JMA	6.43	6.09	6.36	6.09	1	3.2
1995年兵庫県南部	尼崎高架橋	5.69	5.84	5.55	5.84	1	2.4
1995年兵庫県南部	尼崎竹谷小	5.70	5.57	5.66	5.57	1	1.7
1995年兵庫県南部	尼崎港	5.74	5.70	5.46	5.70	1	0.0
1995年兵庫県南部	関電総合技研	5.95	5.54	5.94	5.54	1	0.8
1995年兵庫県南部	六甲アイランド	5.70	5.71	5.38	5.71	1	0.0
1995年兵庫県南部	JR 新大阪	5.42	5.01	5.33	5.33	2	0.0
1995年兵庫県南部	大阪 JMA	4.54	4.49	4.40	4.40	2	0.0
1994年三陸はるか沖	八戸市庁舎	5.82	5.37	5.77	5.57	3	1.9
2000年鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.92	5.84	5.92	1	1.1
2000年鳥取県西部	K-NET 米子	5.82	5.76	5.54	5.76	1	0.0
1993年釧路沖	釧路 JMA	5.95*	5.35	5.93	5.64	3	0.0
1993年北海道南西沖余震	乙部小	6.15	4.92	5.95	5.44	3	0.0
2001年芸予	K-NET 大野	5.63	4.82	5.73	5.27	3	0.0
2001年芸予	K-NET 東予	5.57	4.73	5.59	5.16	3	0.0
2001年芸予	K-NET 三原	4.98	3.90	4.77	4.77	2	0.0
1997年鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	5.53	4.72	5.49	5.49	2	0.0
1997年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	5.92	4.93	5.84	5.39	3	0.0

$I_M$ : 現行の計測震度(\*がつけたものは水平2成分による値)、 $I_{V1}$ : 式(4)による  $I_{V1}$ 、 $I_{V2}$ : 式(6)による  $I_{V2}$ 、 $I_P$ : 図6のアルゴリズムによって求めた提案計測震度、C: 本文中の Case の値、d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%)。

アルゴリズムをフローチャートで図6に示す。提案計測震度は、弾性加速度あるいは速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

この方法を用いて、まず(3)で用いた K-NET の 5481 記録を使った震度の算定を行った。その結果、Case 1, 2, 3 に該当する記録数はそれぞれ、3, 5470, 8 だった。このうち Case 3 の 8 記録は、現行の計測震度では 6 弱、5 強がそれぞれ 6, 2 記録だったのが、提案計測震度では、5 強、5 弱がそれぞれ 7, 1 記録となった。

次に表1の23強震記録を用いて提案計測震度の算定を行った。求めた提案計測震度を現行のものと比較して表2に示す。現行の計測震度で6弱、6強であるにもかかわらず周辺に大きな建物被害がなかった1993年北海道南西沖地震余震の乙部小、1997年鹿児島県北西部地震の K-NET 宮之城、2001年芸予地震の K-NET 大野、東予が、提案計測震度ではいずれも5強となった。1993年釧路沖地震の釧路 JMA と 2000年鳥取県西部地震の K-NET 米子は震度6弱のままだが、値は小さくなっている。一方、大きな被害をもたらした1995年兵庫県南部地震の JR 鷹取、葺合の値は、大きな値のままとなっている。

以上のことから、提案計測震度は、実際の建物被害を的確に表現し、現行の計測震度と比較しても、実際の建物被害により対応したものになっていることがわかる。

## (6) 今後の予定



ここで提案した震度算定法は、低震度で現行の計測震度、高震度で大きな建物被害を考慮に入れたものであるが、この他に考慮すべき要因として、建物の中小被害、人体感覚と室内物品の動きの区別、建物の耐震性能の地方性、建物建設年の影響、歴史地震の被害記述との対応など様々なものがある。今後は、これらを考慮に入れた詳細な検討を行っていく予定である。

#### 引用文献

- 1) 境有紀, 吉岡伸悟, 瀬瀬一起, 壁谷澤寿海: 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, No. 549, pp. 43-50, 2001.
- 2) 山口直也, 山崎文雄: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No. 612/ I -46, 325-336, 1999.
- 3) 渡部丹, 大橋雄二, 長谷部廣行: 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, 1985.
- 4) 境有紀, 神野達夫, 瀬瀬一起: 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, 2002.
- 5) 岡田成幸: 防災学に必要な地震動入力尺度について考える～震度のフィルター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, 土木学会地震工学委員会, pp. 13-19, 2001.
- 6) 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, Vol. 1, pp. 51-56, 1999. 11.
- 7) 翠川三郎, 福岡知久: 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, 223-233, 1988.
- 8) 境有紀, 瀬瀬一起, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No. 555, pp. 85-91, 2002.
- 9) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, No. 524, pp. 65-72, 1999.
- 10) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度の対応関係, 生産研究, 第 48 巻, 第 11 号, pp. 31-34, 1996.
- 11) 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, Vol. 1, pp. 51-56, 1999. 11.
- 12) 功刀卓: K-NET 強震計記録に基づく気象庁計測震度と計測改正メリカリ震度の関係, 地震, 2, 53, 1, pp. 89-93, 2000.

#### 成果の論文発表・口頭発表等

##### 1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
境有紀, 神野達夫, 瀬瀬一起	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	平成 14 年 11 月 20-22 日

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
境有紀	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	平成 14 年 11 月 20 日