

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～

岡田 成幸

Shigeyuki OKADA

北海道大学大学院工学研究科

1. はじめに

最近、計測震度がらみで種々問題点が指摘されている。たとえば以下のような指摘である。

- 発表される計測震度は、今までの気象庁震度に比べ大きすぎるのではないか。
- 計測震度になってから、行政職員が動員される場面が多くなった。

これらの指摘の意味・それに対する筆者なりの回答を、少し回り道となるが「震度」という観点より以下に考えてみたい。

本稿における筆者の主張は、以下の2点である。

防災学といういわば古くて新しい研究領域において、地震動入力の大きさを測る尺度として震度は必要不可欠であるということ。

数多ある震度の定義それぞれに関して、それを利用する側にまだ誤解があるということ。

震度のフィルター特性の検証を通してという副題を付けさせていただいた。震度に関する多くの記述を読むにつけ、以下のことを強く感じているからである。

地震動入力はフィルターを通してしか計測できない。

当たり前のことである。地震動入力の大きさを地震計で計測する場合でも、体感で推し量ろうとする場合でも、はたまた建物被害から震度という尺度で評価する場合でも、それぞれ「地震計」「人間感覚」「構造物」というフィルターを通したアウトプットをフィルター補正して地震動入力というインプットを逆算していることに変わりはない。従って、**フィルター特性を正しく知る**ということが、地震動入力を正しく評価できるか、震度という尺度に正しく置き換えることができるか、そして震度を正しく利用できるかの要諦となる。フィルター特性とはいわゆる地震計の周波数特性に相当することのみではない。このこと自体は多くの方々ですでに承知のことと思うが、肝心のフィルター特性についてはあまり議論されていないし、また誤解もあるように思われる。

稿を起す前に、種々の震度について本稿での扱いを定義しておく。

- 震度：文中で「震度」といった場合、前後の文脈から判断できる場合を除き、ある地点における地震動の大きさを指標化したもの、すなわち一般的な意味における seismic intensity をここでは意味

する。

- 気象庁震度：わが国の気象庁が1996年4月以前まで発表していた7階級の震度をいう。時に、等級区分表示のみならず有効数字2桁で連続量として表したものも含む。
- MSK 震度：欧州で用いられている12階級の震度をいう。
- MM 震度：北米で用いられている12階級の震度をいう。
- 計測震度：わが国の気象庁が1996年4月より発表している地震波形から算出する震度をいう。
- アンケート震度：アンケート調査から求めた震度をいう。数値的意味は気象庁震度とほぼ同一に用いる。文中において、アンケートによりMM震度相当を求めた例も紹介しているが、この場合の数値はMM震度値をいう。

2. 震度の有用性について

まず、「震度」が防災学という研究領域で必要な尺度であるという議論から始めたい。

(1) 防災学という研究領域^{脚注)}

地震学とか地震工学・耐震工学という、地震や地震被害を扱う研究領域はその歴史も古く、地震動入力を評価する尺度に関しても、最大加速度・最大速度・S I 値 (Spectrum Intensity) の他、構造物に対する破壊力の観点から振動系の応答エネルギーに関する種々の尺度が1970年代に活発に議論されてきた¹⁻³⁾。それらの研究領域において「震度」は、地震波形がない場合の代替としての扱いに甘んじている。震度の物理量、すなわち震度を評価するフィルター特性があいまい(あるいは主観的)であるという理由からである。これらの研究領域が対象とする被災対象は建築物であったり土木構造物であったり、すなわちそれらの耐震性は時間領域あるいは周波数領域における応答計算を必要とし、それに精度上耐

脚注) 冒頭で防災学を古くて新しい研究領域と述べた。防災学という語句は古くからあり、その意味では歴史のある研究領域である。1995年阪神淡路大震災以降、住民レベルでの防災学が台頭してきたように筆者は感じている。これを称して新しい防災学とここでは扱う。

え得る地震動入力尺度が要求されているからである。

一方、行政レベル・住民レベルの地震防災は一部を除き、1995年阪神淡路大震災発生以前は上記の研究領域とは独立に、経験学を主体とする行政の手で進められていたと言っても過言ではない。彼らのテーブルでは地震動入力は震度以外理解されようもない。

阪神淡路大震災以降、行政・住民レベルの地震防災の重要性は漸く浸透し始めたと言えよう。地震被害マップをはじめ種々の防災情報が住民に公開され始めている。住民にとって防災情報（ここでは地震動入力情報に限って話を進めるが）はどのようなものでなければいけないのか。その利用の広範性から、特定の被災対象にのみ有効な尺度では意味がない。すなわち、種々の対象物に共通に使える汎用性の高い尺度でなければいけないということ、地震動の総合特性量を反映した尺度でなければいけないということである。そして、住民にとって理解しやすいということ、これが重要である。最大加速度や最大速度のような間隔尺度は、研究上使いやすくて、一般の住民には数値の意味が理解し難いし、覚えにくい。たとえば、最大加速度が200gal以上になったら危険であるといっても、感覚に訴えないし、200galという数字も覚えてもらえそうにない。199galでは安全なのかという問い合わせも必ず来るであろう。そうではなく、住民レベルでは分類型順序尺度、いわゆる等級区分が感覚的に量的把握を可能にするし覚えやすいのである。一対比較法という人間の感覚選好強度調査の方法がある。そこで用いる尺度は最大でも9分類（同等/やや大きい（小さい）/かなり大きい（小さい）/非常に大きい（小さい）/極めて大きい（小さい））である。この程度の分解能が人間の能力なのであろう。地震動入力の大きさを10階級程度に階級区分している震度階が使いやすいのは、このような理由があるのである。

大震災以降、新しい研究分野としての防災学が漸く市民権を得てきたように思われる。住民レベル・コミュニティレベルの防災を、理学・工学という自然科学的立場から基礎を固め・応用展開しようという研究領域である。防災の主体である住民とのコミュニケーションが必要な学問である。住民への情報伝達を踏まえた防災学、すなわち震度を共通尺度とした研究展開が要求されているのである。震度の利用価値の高い点は、震度階は等級区分されているが、それを間隔尺度に変換することができる点にもある。震度階を有効数字2桁で表し、連続量としての定量的取り扱いも可能である。この操作を経ることにより、研究上取り扱いやすい数値として種々の数式に適用できる。以上が、新しい研究領域 - 防災学 - に必要不可欠な尺度が震度（階）であるという理由である。

(2) 震度の利用法

a) 地震動入力予測にみる震度の有用性

上記の新しい防災学における最も代表的な研究は、市町村自治体が漸く取り組み始めた想定地震に対する地域の地震動入力（ハザード）評価・被害（リスク）評価である。

地震動評価（予測）にはその目的別に大きく二つのタイプがあるであろう。一つは構造物建設に代表されるように、その立地点における地震動強さが必要な場合であり、要求される入力情報は耐震設計に必要な地震動波形あるいはスペクトルである。一方、行政レベルにおける地震防災計画とはたとえば、防災対策優先地域の抽出・防災資源（避難所等の施設計画・非常食等の備蓄計画・

防災職員の有効配備計画等）の地域内準備・延焼防止に関する地区内不燃領域率設定等であり、これらに必要な情報は、行政管轄内の地震動強度の面的差違、すなわち地震動あるいは被害に関する地域内分布である。この場合、管轄内全域における地震動波形が要求されることはあまりない。むしろ、地震動をたとえば、最大加速度・速度、震度等々のように一指標化し、その地域差（分布）が対策のための情報として重要となる。上記3指標のうち、地震動の総合特性量という意味において、また行政職員への分かりやすさという点において、震度は一日の長がある。

一方、住民が欲しい情報は自分たちが住んでいる場所の揺れの大きさ（絶対値）である。被害との連想性・危機意識の訴求性において震度表記に勝るものはない。

b) 被害率関数にみる震度の有用性

防災学における代表的な研究のもう一つは、被害調査の結果求められる被害（率）関数（Vulnerability関数とかFragility曲線と呼称されているもの）に関するものである。この関数は先の被害評価にも使われるし、またその地域の建物群の耐震性評価にも使われる。わが国では古くは、物部⁴⁾によって木造住家の被害率関数が求められているが、筆者ら⁵⁾によって様々な被災対象の被害率関数が求められ、その利用が加速された。阪神淡路大震災後、木造住家・鉄筋コンクリート造建物等について同様の関数が多くの研究者により発表されている⁶⁻¹⁰⁾。代表的なものを図1に示すが、多くのものが最大速度に対する被害率を関数化している。下式の関数型である。

$$\text{被害率}[\%] = f(\text{最大速度}[\text{cm/sec}]) \quad \dots (1)$$

筆者はこれに疑義を唱えたい。被害率を防災施策に持ち込むのは行政レベルの対策である。被害率関数の左辺（従属変数）は行政情報なのである。その関数の右辺（独立変数）に最大速度という研究的指標を用いるのはバランスを欠いている。少なくとも、震度を従属変数とする関数を併記すべきである。筆者らも大震災後、同様のデータを用い建物に関する被害率関数を発表してきた。この場合、必ず従属変数に、震度そして最大速度を用いた関数を併記してきている。その理由は以上の通りである（図2参照）。

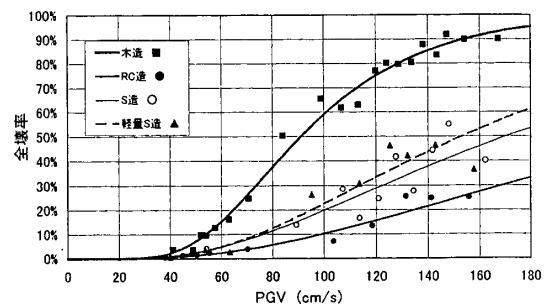


図1 一般に提示される被害関数の例（文献⁹⁾より）

c) 震度を横軸においた防災学

上記の理由より、防災への直接的応用を目的とし、筆者らは防災行政職員・住民とのコミュニケーション手段としての震度（地震動の総合特性量としての代表的指標という重要な意味においても）を説明変数として事象の説明を試みてきている。紙面の都合で一部を提示するに止めるが、要は地域の被害を以下で簡略表現し、被害事象及びそれへの対応を関数表示した。

被害 [Risk] = 誘因 [Hazard (t,site)] × 素因 [Vulnerability(t,site)]
ここで、誘因とは地震動入力のことであり震度で代表さ

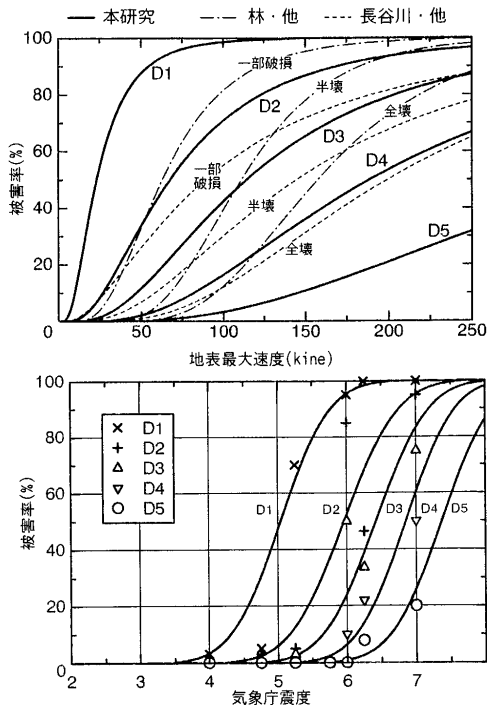


図2 震度と最大速度併記の被害関数（文献⁸より）

せることにより、被害のもう一つの要因である被災対象の脆弱性（素因）の地域性を扱いやすく、またそれへの行政レベル・住民レベルの対応を分かりやすい形で記載することが可能となる。

図3は先に示した種々の事象を震度を説明変数とする被害関数で数理表現したものをベースに、事象として現れる震度範囲を示したものである⁵⁾。

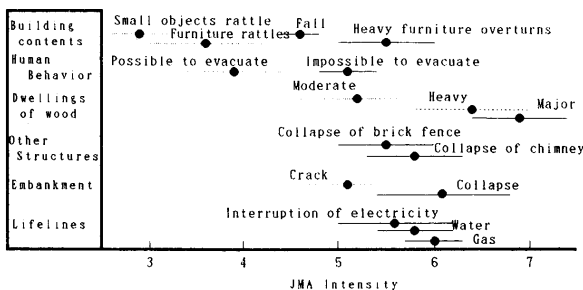


図3 各種被害事象が発生する震度（気象庁震度）（文献⁵より）

図4は行政の事後対応の実施率を震度を横軸にとり整理したものである¹¹⁾。揺れの強さに応じてとるべき行政対応の規準型を示したものである。

図5は震度によって世帯の生活レベルがどの程度落ち込み、復旧にどの程度の時間を要するかを物的被害・生活被害・人的被害・経済被害をそれぞれシミュレーションしモード合成したものである¹²⁾。世帯レベルにおける地震の時間影響度を知ることができ、行政からの住民支援のあり方を考察するための資料となる。

3. 震度のフィルター特性の検証

さて、漸く本題にはいるところまで話しを進めることができた。震度の有用性についてはご理解できたと思う。次にその震度の使い方、理解の仕方である。筆者は冒頭

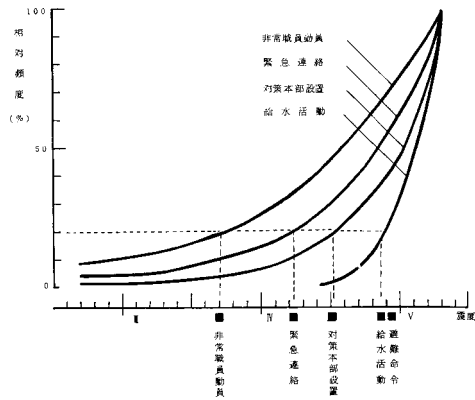


図4 震度（気象庁震度）に対する行政対応の実施率（文献¹¹より）

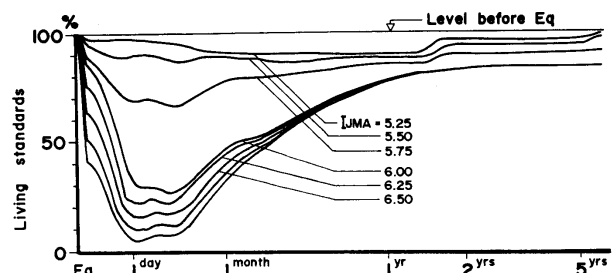


図5 地震による世帯の生活レベルの時間低下 - 復旧（文献¹²による）

で、地震動はフィルターを通してしか計測できないと述べた。震度を知ることもちろんである。だからフィルター特性を知ることが震度を正しく利用することに繋がるのである。ここでは、本邦気象庁の震度（階）^{脚注}を海外で用いられているMSK震度（またはMM震度）、そして計測震度とフィルター特性という観点から比較し、その違いを浮き立たせてみたい。

(1) Real time filter と After event filter の違い

わが国で馴染みの気象庁震度と世界標準となりつつあるMSK震度との決定的な違いは、気象庁震度が揺れている最中の事象（人体感覚・周辺の器物の動き・ごく周辺の直後の被害状況）から判断するのに対して、MSK震度は地震後、ある時間をおいた後の被害調査から判断するという点である。北米で通常用いられるMM震度もMSK震度と同様である。すなわち、気象庁震度は速報性を特段に重視したものであり、地震動をいわばリアルタイム・フィルターで計測したものと言える。

一方、MSK震度は揺れが収まったあとの調査による、いわばアフターイベント・フィルターを通して計測した震度と言えよう。

この違いは以下の意味で大きい。気象庁震度階は等級区分が0から7の10区分（震度5と6がさらに2区分されているため）であるのに対し、MSK震度階は1から12の12区分されている。しかし、MSK震度階において、1から4の説明は体感及び室内に設えたものの動きのみであり、事後被害調査から判断することは不可能である。

脚注) 本稿では気象庁震度といったとき、計測震度は意味しない。計測震度が持ち込まれる1996年4月以前に気象庁が発表した震度のことを意識していることに注意されたい。

また、11 と 12 の区別は不明確である。揺れている最中の状況をヒアリングまたはアンケートで調査しない限り、MSK 震度階は基本的に高震度のみを判別する尺度であると理解すべきであろう。図 6 に示すような気象庁震度階と MSK 震度階との対応表をよく見ると思うが、感度特性という意味では図 7 に示すのが正解であると思われる。気象庁震度階は震度を低～高まで広くカバーした尺度なのである。

JMA 震度階	0	1	2	3	4	5-	5+	6-	6+	7
MSK 震度階	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ¹¹ 12

図 6 気象庁震度階と MSK 震度階の対応関係の一般的表示法

JMA 震度階	0	1	2	3	4	5-	5+	6-	6+	7
MSK 震度階					5	6	7	8	9	10

図 7 気象庁震度階と MSK 震度階の（真）対応関係

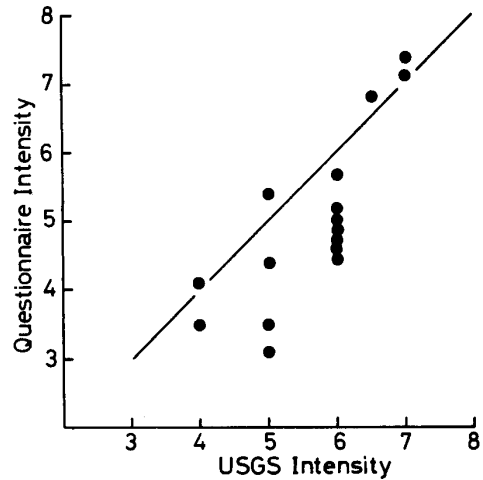
(2) 点の震度と面の震度

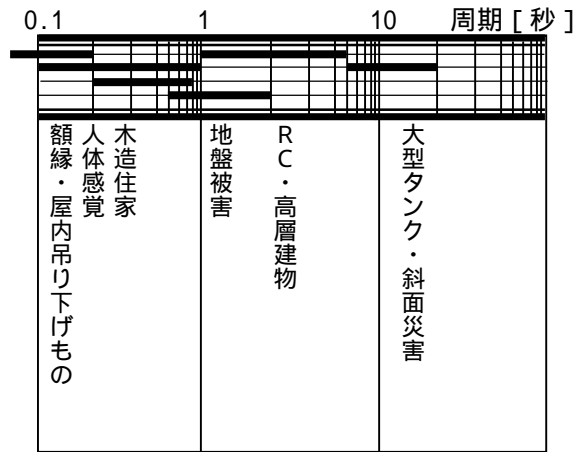
MSK 震度階は 1992 年に ESC (European Seismological Commission: 欧州地震委員会)により大改訂を行った。これについては Grunthal¹³⁾ に詳しいので、是非一読をお勧めする。大改訂後、MSK 震度階は macroseismic scale (マクロ震度階) と名を改めた。これは一つの震度が代表する地域の広がりであることをいっている。改訂書では、MSK 震度は村あるいは集落程度の広がり我代表すると言明しており、震度をいわばマクロゾーニングの立場から利用することに限定している。その理由は前記のとおり、震度を判定するための関連資料の収集方法にあるのであろう。欧米では震度は地震後の被害調査等を踏まえた後にある地域の代表値として判断される場合が多い。わが国では気象庁発表の震度が一般的に用いられているが、これは本来各機関の地震直後対応情報に供しようとの目的から即時性を第一に運用されているものである。地震発生後、数分ならずで各気象官署の震度が発表されるわけ、世界的にも希でかつ防災上極めて有効な情報となっている反面、その震度が代表する範囲は極めて狭く、気象官署の地点いわば点の震度を与えている。ESC がいうところの震度とは利用目的が本質的に異なるものである。震度をマイクロゾーニングに使おうという考え方は ESC にはないようである。すなわち、MSK 震度には以下のようなフィルターがかけられていると理解すべきである。

$$\text{MSK 震度} = \text{MAX} [\text{被害 1, 被害 2, ...} | \text{area}] \quad \dots (2)$$

気象庁震度が観測している【点】での震度を与えるのに対し、MSK 震度はある地域（【面】）内に発生した最大の被害をその地域の代表被害とみなし震度に変換する。その結果、MSK または MM をベースにした震度分布を日本のものと比べると、震度値としてやや大きく感じる場合がある。図 8 は、1984 年 Morgan Hill 地震と 1986 年 Hollister 地震を例にアンケートを用いて MM 震度を求め、これと USGS 発表の当該地の MM 震度と比較したものである¹⁴⁾。アンケートによる MM 震度とはいっても、この場合、地震の最中にいた住民をアンケートの被験者としたのであるから、MM 本来の定義から外れている。む

しろリアルタイムによる点の震度すなわち、気象庁震度相当を求めたものと理解した方が良さそうである。図 8 はその結果を如実に示しており、アンケートによる震度は USGS 発表による震度よりも小さな値を与えている。





かる。すなわち、それぞれの事象の感度特性が異なるの
図9 気象庁震度階解説表にある事象の固有周期

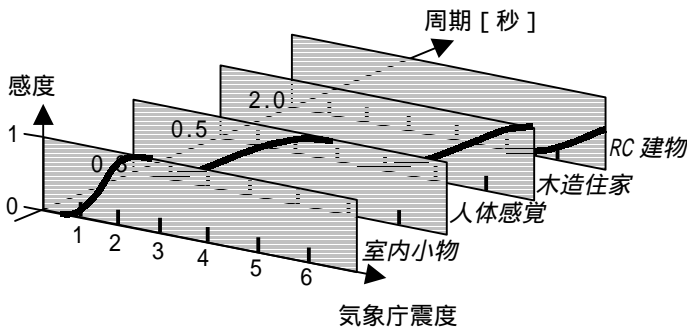


図10 気象庁震度を説明するための事象の固有周期と感度特性の関係

である。これを図10に整理した。横軸を図9の周期軸と震度軸に取り、縦軸を感度とする。感度曲線を描く際、それぞれの事象の被害関数⁵⁾を参考にしている。かなり大胆な整理であるが、固有周期の小さい事象(たとえば人体感覚では、周期0.1秒~1秒)の感度特性は、震度の小さいところ(震度0~4)で分解能が高く、震度5を越えると感度がサチュレーションを起こし、震度の違いを判別できなくなる。大型の室内家具(敏感な周期帯は0.5~1秒)は震度5~6弱にかけて分解能が高い。木造家屋(周期帯0.2~1秒)は震度5~6強、厚い堆積層が影響するより周期帯域の長い波による地盤災害(液化化を含む)や斜面崩壊は震度6弱~7における分解能が高い。このように、震度が大きくなるに従い、より注目する事象、換言すれば影響の大きな周期帯域がより長い方にシフトしていくと考えられる。このことは筆者が強震動のスペクトル解析により既に指摘していたことでもある^{19,20)}。図11は東京で観測された強震波形のフーリエスペクトルを求め、震度別に平均スペクトルを計算し示したものである。震度が大きくなるに従い、全体的にスペクトル振幅が大きくなるが、特に長周期帯においてその傾向が顕著である。すなわち、震度判定の感度特性は、震度増加に伴い長周期帯のウェイトが大きくなるような非線形性を持っている。これを筆者は震度の周期依存性と呼ぶ。

震度の周期依存性に関しては、他者の研究からも指摘

することができる。野越²¹⁾は秋田市におけるアンケート震度調査を整理し、軟弱地盤層の厚い地域ほど震度が大きくなる傾向があることを指摘している。S波重複反射理論からは、振幅は基盤と地表層とのインピーダンス比が司るのであり、層の深さは波の周期に影響するのみである。基盤面からの軟弱層の厚さで揺れの大きさを直接説明することは難しい。しかし、震度の周期依存性を認めるならば、以下の解釈が可能となる。すなわち、軟弱層厚が厚いほど地盤の固有周期は長周期側へ伸び、長い波がより強調される。人は震度の周期依存性に従い長周期の波により震度をより大きく判定する。定性的ではあるが、これが野越の指摘に対する解釈となろう。

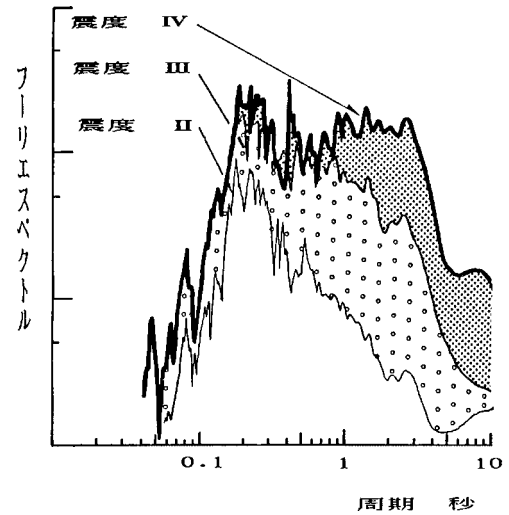


図11 気象庁震度別にみた加速度フーリエスペクトルの比較(文献¹⁹⁾より)

(4) 計測震度の問題点

本稿の冒頭で、計測震度が従前の気象庁震度に比し、少し大きな震度を与えすぎるとの指摘があると述べた。特に、近年多発する内陸直下地震にその傾向が多く見られる。これは前項で述べたこと、すなわち震度の周期依存性が計測震度では考慮されていないことに原因があるように思われる。計測震度が採用しているフィルターを図12に示すが、これは0.1~1秒の波に敏感な人体感覚そのものである。人体感覚を通したフィルターでしか震度を判定していないことになっている。高震度で短周期を強調し過ぎ、震度を大きく判定してしまっている可能性がある。

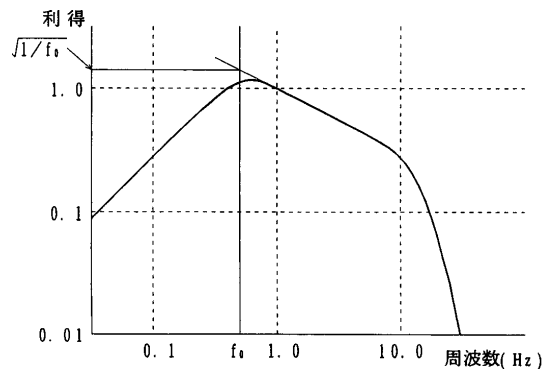


図12 計測震度が採用している感度特性フィルター(文献²²⁾より)

(5) 観測点の数の問題

気象庁の震度発表が計測震度に替わり、計測震度発表地点も飛躍的に増加した。この煽りを受けているのが防災行政職員である。本稿冒頭の2点目の指摘である。地震時の対応のための行政職員参集は発表震度を参考とする自治体が増えた。管轄地域内に震度4が発表されたとき、職員参集とするところが多い。気象庁震度が点の震度を与えるものであることは先に述べたとおりである。点の震度とは周辺の震度を必ずしも代表しない。局所的震度である。震度発表地点が少なかったときは、sampling spaceの粗い空間フィルターが働き、観測点間隔を s とすると、理論上 $2s$ 以下の波長の情報は捨てられてしまうことになるので、それほど局所的な高震度が数多く発表されることはなかったが、計測震度観測点が増えるに伴い、局所的高震度の発表が多発し、上記のような行政職員の悲鳴につながるのであろう。計測震度を防災情報として使う場合、ある程度の平均化操作は必要と考える。MSK震度がある地域の最大震度を代表値とするように、ある広がりの中で計測震度を収集し、その最大値を持って地域の震度とするようなことは、防災政策上必要なことであろう。しかしそれを実行するには、現在ある約600の観測点でもまだ少ないかも知れない。計測震度観測点を増やし、地域の代表値を求め、対策に利用する二段構えのプロセスを取り入れるべきであろう。発表されたものをただ闇雲に初動対応基準として採用するのは芸がない。

研究的レベルから見れば、計測震度の観測密度はまだ不十分である。恐らく研究レベルでは要求される観測密度に上限はないのであろう。防災施策的にも、上記したとおり、まず観測密度を上げそれを処理するプロセスを加え、防災情報として利用することが理想である。

4. パラダイム転換時における共通尺度の必要性

わが国の気象庁が、震度を計測量から求めることを決断したのは防災上革命的なことであり、パラダイム転換である。今後、地震記象があれば誰でも同じ震度を得られることになり、今までの震度の欠点であったあいまいさはこれではなくなったことになる(ただし、今の計測震度算定アルゴリズムに問題があるのは3章(4)節で述べたとおりである)。しかしこのパラダイム転換に大きな落とし穴があることに、特に研究者は気づくべきである。

それは発表される震度が、従来の震度と同様に扱えるかどうかの検証なしに、種々の統計処理を行い、過去のデータと比較する過ちをおかしかねないということである。同じ震度という名称が与えられていることによる過ちである。たとえば、計測震度と被害率との関係を図示し、過去の気象庁震度と被害率との関係を比較することは十分にあり得よう。その際、計測震度の値を従前の気象庁震度軸上に重ね、被害率を比較して良いのであろうか。計測震度が6.0(震度6弱と6強の境界を与える震度)であっても、過去の気象庁震度の6.0と全く等しいという検証はまだなされてはいない。特に震度6以上の高震度領域で問題が残されている。このとき、被害率が過去のものよりも仮に小さかったとしても、その原因を建造物の耐震性などの被災地の地域性に押しつけることは危険である。従前の震度尺度ではより小さい震度を与

えるかも知れないからである。計測震度は計測量によるので値は不変である。しかし、従前の震度と等価であるかどうかはこれからの検討課題なのである。

その検証のために、パラダイム転換の前後をつなぐ共通の尺度が必要である。筆者はアンケート震度^{23,24)}にこの役目を期待している。

5. おわりに

震度を有効利用するには、震度を正しく知る必要がある。そのためにフィルター特性という観点から話を進めてきた。フィルターというのは、震度判定のために事象を切り出すというウィンドウとしての性能(主に3章(1)(2)(5)節で議論)と事象の応答から入力を逆算する応答特性としての性能(3章(3)(4)節で議論)の二つを併せ持つ。われわれが普段気軽に使う震度(階)にも多くのものがあり、それぞれに特有のフィルター特性を持っている。本稿で展開した議論は筆者の独断であり、疑義も当然であろう。しかし、震度のフィルター特性を正しく理解しようという提案には、理解が得られるのではないかと思っている。シンポジウムでの活発な議論を期待する。

参考文献

- 1) Arias A. : A Measure of Earthquake Intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plants, Mass. Inst. Tec. Press., pp.438-483, 1970.
- 2) Housner G. W. and P. C. Jennings : The Capacity of Extreme Earthquake Motions to Damage Structures, Proc. Symp. Struct. Geotech. Mech., 1975.
- 3) 加藤勉・秋山宏 : 強震による建造物へのエネルギー入力と建造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, No.235, pp. 9-18, 1975.
- 4) 物部長穂 : 土木耐震学, 常磐書房, 1933.
- 5) 岡田成幸・鏡味洋史 : 震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成, 地震, 44, pp.93-108, 1991.
- 6) 林康裕・宮腰淳一・田村和夫・渡辺宏一 : 兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム講演集, pp.89-92, 1996.
- 7) 長谷川浩一・翠川三郎・松岡昌志 : 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の被害予測 - その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と被害予測例 -, 日本建築学会構造系論文集, No.505, pp.53-59, 1998.
- 8) 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.
- 9) 村尾修・山崎文雄 : 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No.527, pp.189-196, 2000.
- 10) 林康裕・宮腰淳一・田才晃・大野義照 : 1995年兵庫県南部地震におけるRC建造物群の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.135-142, 2000.
- 11) 岡田成幸・太田裕 : 市町村単位でみた地震時被災・復旧プロセスの要因分析 - 第2報 1982年浦河沖地震の応急・復旧対策 -, 日本建築学会構造系論文報告集, No.382, pp.1-9, 1987.
- 12) 太田裕・岡田成幸 : 震災のダイナミクス その2 世帯に及ぼす影響の時間変動性 - 算定例 -, 地震, Vol.43, pp.267-278, 1990.

- 13) Grunthal G. : European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Vol.15, pp.1-99, 1998.
- 14) 村上ひとみ・鏡味洋史：アンケートによる高密度震度調査法の修正メルカリ震度階への適用, 震度 , Vol.44, pp.271-281, 1991.
- 15) Kawasumi H. : Intensity and Magnitude of Shallow Earthquakes, Travaux. Scientifique. Publ. BCSI, Ser. A, Vol.19, pp.99-114, 1954.
- 16) 翠川三郎・福岡和久：気象庁震度階と地震動の強さの物理量との関係, 地震 , Vol.41, pp.223-233, 1988.
- 17) Muramatu I. : Expectation of Maximum of Earthquake Motin within 50 Years throughout Japan, Sci. Rep. Gifu Univ., Vol.3, pp.470-481, 1966.
- 18) 童華南・山崎文雄・清水善久・佐々木裕明：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, pp.458-459, 1986.
- 19) 岡田成幸：震度と物理量に関する関係式の考察, 地震災害事象の通信・面接・現地調査法にもとづく組織的研究, 自然災害特別研究成果 (代表：太田 裕), 41-55, 1987.
- 20) Okada S. and H. Kagami : An Expression of Seismic Intensity in Terms of Frequency-Dependent Physical Parameters, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, 2, 385-390, 1988.
- 21) 野越三雄：日本海中部地震における秋田市内の震度分布, 日本建築学会地盤震動小委員会地域交流会 (仙台), 2000.
- 22) 気象庁 (監修) : 震度を知る, ぎょうせい, pp.1-238, 1996.
- 23) 太田 裕・後藤典俊・大橋ひとみ：アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, No.92, 117-128.
- 24) 太田 裕・小山真紀・中川康一：アンケート震度算定法の改訂 - 高震度領域 -, 自然災害科学, Vol.16, 307-323, 1998.