

2. 計測震度と物理量の関係について

Relations between JMA's Measuring Seismic Intensity Scale (MI) and Physical Parameters of Earthquake Ground Motion

金刺靖一, 金子史夫

Seiichi Kanezashi, Fumio Kaneko

Abstract

Seismic intensity scales have been used all over the world as indices of earthquake ground motion without seismometers, especially well used in Japan. However, the recent JMA (Japan Meteorological Agency)'s scale has been said to be quite subjective, because it has been judged by observers using the existing reference table of body feeling and situation presenting around them during earthquake. Therefore, a new scale has been developed producing from seismograms and considering frequency content as well as exposure duration exceeding a certain level of earthquake ground motion. It is called "Measuring Seismic Intensity Scale", which we call "MI" hereinafter. This would be the first trial in the world.

The relationship between the new scale (MI) and physical parameters popularly used for earthquake ground motion indices, such as maximum ground acceleration (AMAX), maximum ground velocity (VMAX), due to the several recent strong accelerograms are investigated. The good empirical equations are gotten as follows:

$$MI = 1.957 \cdot \log_{10} (AMAX) + 0.569 \quad (\gamma = 0.966)$$

$$MI = 2.008 \cdot \log_{10} (VMAX) + 2.258 \quad (\gamma = 0.914), \quad \text{where } \gamma \text{ is correlation factor.}$$

Further, the procedure to calculate the measuring seismic intensity scale (MI) from response spectra, which is also generally used for aseismic design and seismic microzoning projects as an index for seismic intensity, is proposed. During this investigation, the effects due to both exposure time exceeding a certain level and the up-down component of ground motion are checked.

Finally, JMA's measuring seismic intensity scale (MI) appears more clearly in its physical meaning. However, since the data used are still limited, further investigation for more understanding should be necessary.

1 はじめに

気象庁による震度観測は100年以上の長い歴史を持っており、その震度階級は地震動の強さあるいは被害の程度を表す一般的な指標として広く社会に受け入れられている。したがって、震度は日本で地震動の強さや地震防災を考える際に、不可欠な情報となっている。

従来の気象庁の震度観測は、人間（観測者）が体感または、周囲の状況から判断する方法を採用していた。そのため、観測データに客観性が欠ける点や速報性に劣る側面を持っていた。これらの点を改善するため、1996年

4月から運用されるようになった新しい気象庁の震度階級では、計測震度計によって機械的に計測された数値をもって、「計測震度」が定義されている。以下では、これをMI : JMA's Measuring Seismic Intensity Scaleと呼ぶことにする。

一方、震度階級は、地震計のなかった歴史的な時代の地震の諸元や地震動の強さなどの解明、あるいは地震計の設置されていない地域での地震動の強さを表わす便利な指標として用いられてきている。したがって、計測震度の採用にあたっては、過去の震度観測の結果との継続性が配慮されている。このために計測震度も最大加速度

や最大速度などの地震動の強さを表す物理量との関係は必ずしも明確ではない。ちなみに、釧路沖地震の釧路市の被害と兵庫県南部地震の神戸市の被害を比べて見れば明らかなように、最大加速度の大きさからのみ震度を定めることには無理がある。

一方、建築や土木の分野では、最大加速度、最大速度あるいは応答スペクトルが地震動の強さを表わす指標として耐震設計などに広く用いられている。また、広い地域での地震防災を目的とする地震被害想定調査では、地震動の強さとして最大加速度や応答スペクトルなどの物理量が算出される。しかし、地震動の強さの分布の一般的な理解や公表のためには震度が有効である。さらには、建築物をはじめとした各種の構造物の被害状況を推定するための関係式（バルナラビリティ関数とも呼ばれる）では、過去の地震被害データを基礎とすることが多く、地震動の強さとして震度階がよく用いられる。このような目的のために、従来から最大加速度等の物理量と震度との関係式が提案されてきた。ただし、これらの関係式は、あくまでも震度を決定する式ではなく、観測データに基づいた統計的、経験的な関係を表わすものである。

以上のことから、計測震度といくつかの代表的な地震動の強さを表す物理量との関係を検討することは、工学的に見て実用性があり、また計測震度について考察するうえで意義がある。

本小論では、計測震度の得られている1995年兵庫県南部地震などの最近の被害地震における各地での観測波形を用いて、計測震度と最大加速度、最大速度との関係を調べて、関係式を示す。また、広域の地震防災対策を最終目的とする地震被害想定で使用されている地震動強さの指標である応答スペクトルを適用する際の計測震度の算出方法を検討する。

2 計測震度計

世界的に用いられている震度階級としては、ド・ロシュフォレル（1883）、改正メルカリ（1931）、MSK（1964）などのものがある（気象庁地震課（1971））。日本の気象庁（当初は中央気象台）による震度の観測は、1884年に始まった。このときに使われていた震度階級は、微震、弱震、強震および烈震の4階級であった。その後、1908年に細分されて0からVIまでの7階級となり、さらに1948年の福井地震による福井平野での激甚な被害を契機として1949年に震度VIが2分されて震度VIIが加えられ、従来の8階級の震度階が40年以上利用されてきた。世界的に見ても、日本はもっとも実用的に震度が使われている地域である。

この震度階の観測では観測者が、表-1に示す説明表に基づいて、体感や周囲の被害状況から判断してきた。このため、物理的な意味が不明確なことのほか、観測者の個人差がでることや、発表までに時間がかかるなどの問題点が指摘されていた。さらには、一時期、各震度階級の境界を表す加速度値が示されたが、観測計器の変遷によって、こうした加速度値が正確な境界を示さないことから、いつしか説明表から消えていった。このような状況を改善し、震度を機械的に自動観測するシステムを検討するための、有識者からなる震度問題検討会が組織された。この結果、1991年に震度を機械的に観測する計測震度計が開発された。この計測震度計で測定された震度を、従来の体感や被害状況から決めた震度と区別して計測震度と呼ぶことになった。ただし、この時点ではあくまでも従来の震度階級との継続性が重視され、震度0から6までが定義されていた。震度VIIの定義を従来通り家屋の倒壊が30%以上としていたのは、それまでに震度VIIの実験がなかったことが理由である。

さらに、地震動の継続時間の効果およびいくつかの係数についての検討が続けられていた時期に1995年兵庫県南部地震が発生した。地震発生の数日後には、気象庁の職員が実際に現地の被害状況を確認して、数100m程度の範囲を単位として家屋の倒壊被害が30%以上と判定された地区を震度VIIと認定し、発表された。これが歴史的に最初の震度VIIとなった。

兵庫県南部地震による震度VIIの認定などの問題点の発生が契機となって、震度階級の改訂作業が加速された。1996年4月から運用されている気象庁震度階級は従来と異なり、震度の観測が機械化されて、計測震度の数値で定義されている。これを表-2に示す。

また、震度階級の見直しも行われた。すなわち、発生する被害の幅が大きすぎるといわれていた震度V、震度VIは、それぞれ二つに分割されて震度5（弱）、震度5（強）、震度6（弱）、震度6（強）という名称になった。

最も大きな改訂点は、震度階級の説明表に従って震度を判定していたものが、計測震度計で観測された計測値によって震度を決めるようになったことである。説明表は記載されている事象が現代にそぐわないこともあって改訂されて、震度階級関連解説表（表-3）と名称が変わり、補足的なものとなって、主従が逆転した。さらには、世界で初めて、震度階に周期特性が考慮された。

気象庁の定めた様式に従い、機械的に震度を計測する計測震度計は1991年から導入が始まった。

計測震度計は、基本的には加速度を観測する強震計である。ただし、普通の加速度計と違い、観測された波形

表-1 従来の震度階級の説明表

Table 1 JMA's Seismic Intensity Scale Ever Used

0：無感 (No feeling) 人体に感じないで地震計に記録される程度	吊り下げ物のわずかにゆれるのが目視されたりカタカタと音が聞こえても、体にゆれを感じなければ無感である。
I：微震 (Slight) 静止している人や特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震	静かにしている場合にゆれをわずかに感じ、その時間も長くない。立っでは感じない場合が多い。
II：軽震 (Weak) 大勢の人に感ずる程度のもので戸障子がわずかに動くのが分かるくらいの地震	吊り下げ物の動くのがわかり、立っでもゆれをわずかに感じるが、動いている場合にはほとんど感じない。眠っでも目をさますことがある。
III：弱震 (Rather Strong) 家屋が揺れ、戸障子がガタガタと鳴動し、電燈のようなつり下げものは相当にゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震	ちょっと驚くほどに感じ、眠っでも目をさますが、戸外に飛び出すまでもないし、恐怖感はない。戸外にいる人もかなりの人に感じるが、歩いている場合感じない人もいる。
IV：中震 (Strong) 家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花びんなどは倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人は戸外に飛び出す程度の地震。	眠っている人は飛び起き、恐怖感を覚える。電柱・立木などのゆれるのがわかる。一般の家屋の瓦がずれるのがあっても、まだ被害らしいものではない。軽い目まいを覚える。
V：強震 (Very Strong) 壁に割れ目が入り、墓石、石どうろうが倒れたり、煙突、石垣などが破損する程度の地震	立っていることはかなりむずかしい。一般家屋に軽微な被害が出はじめる。軟弱な地盤では割れたりくずれたりする。すわりの悪い家具は倒れる。
VI：烈震 (Disastrous) 家屋の倒壊が30%以下で山くずれが起き、地割れを生じ、多くの人は立っていることが出来ない程度の地震	歩行はむずかしく、はわないと動けない。
VII：(Very Disastrous) 家屋の倒壊が30%以上におよび山くずれ、地割れ、断層などを生ずる	

右欄は、1978年に加えられた参考事項である。

表-2 計測震度と震度階級

Table 2 JMA's Measuring Seismic Intensity Scale

計測震度(MI)	震度階級
$6.5 \leq MI$	7
$6.0 \leq MI < 6.5$	6(強)
$5.5 \leq MI < 6.0$	6(弱)
$5.0 \leq MI < 5.5$	5(強)
$4.5 \leq MI < 5.0$	5(弱)
$4.0 \leq MI < 4.5$	4
$2.5 \leq MI < 3.5$	3
$1.5 \leq MI < 2.5$	2
$0.5 \leq MI < 1.5$	1
$MI < 0.5$	0

を処理して計測震度を表示する機能が付加されている点に特徴がある。また、0.1~50Hzの広い周波数帯域で平坦な特性が求められるなどの厳しい条件が課せられている。

兵庫県南部地震の被害状況でも明らかなように、地域が少しずつると被害の状況が大きく変わることがある。また、本場に地震動の激しかった地域からは、データの伝達が遅れることもあるため、より細かな観測網が求められている。そのため、気象庁は全国で574点(1996年度末時点；従来は約150点の気象官署)の観測点に増設している。

3 計測震度の算出方法

震度と物理量の関係を表す式としては、当時の石本式地震計などによる観測データに基づいた河角(1943)による(1)式があり、この経験式が長く用いられてきた。

表-3 計測震度関連の解説表

Table 3 Description for JMA's Measuring Seismic Intensity Scale

震度は、地震動の強さの程度を表すもので、震度計を用いて観測します。この「気象庁震度階級関連解説表」は、ある震度が観測された場合、その周辺で実際にどのような現象や被害が発生するかを示すものです。この表を利用される際は、以下の点にご注意下さい。

- (1) 気象庁が発表する震度は、震度計による観測値であり、この表に記述される現象から決定するものではありません。
- (2) 震度が同じであるとしても、対象となる建物、構造物の状態や地震動の性質によって、被害が異なる場合があります。この表では、小さな被害に限定して記述していますので、これより大きな被害が発生する場合があります。
- (3) 地震動は、地盤の地形や地質などに大きく影響されます。震度は、震度計が置かれている地点での観測値ですが、同じ市町村であっても場所によっては震度が大きく異なります。また、震度は通常地表で観測していますが、中高層建物の上層階では一般にこれより揺れが大きくなります。
- (4) 大規模な地震では長周期の地震波が発生するため、遠方において比較的低い震度であってもエレベーターの場合、石油タンクなどの近所発生した被害地震事例から作成したものです。今後、新しい事例が得られたり、建物、構造物の耐震性の向上などによって震度と合わなくなった場合には内容を変更することがあります。

*：液面が揺れ動くこと。

計測震度	階級	人間	屋内の状況	屋外の状況	木造建物	鉄筋コンクリート造建物	ライフライン	地盤・斜面
0.5	0	人は揺れを感じない。						
	1	屋内にいる人の一部が揺れを感じる。						
1.5	2	屋内に多くいる人が揺れを感じる。目を覚ます。	電灯などが揺れる。					
	3	室内に揺れを感じる。人恐怖を感じる。	棚が揺れる。食器類が揺れる。	電線が少し揺れる。				
2.5	4	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。	下げる物や物が倒れる。	電線が揺れる。				
	5(弱)	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。行動する。	激しく揺れる。物が倒れる。	電線が揺れる。	耐震性の低い住宅に傾くものがある。	耐震性の低い建物に亀裂が生じる。	安全装置が作動する。ガス、水道の供給が停止する。	軟弱な地盤で液状化が生じる。
3.5	5(強)	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。行動する。	激しく揺れる。物が倒れる。	電線が揺れる。	耐震性の低い住宅に傾くものがある。	耐震性の低い建物に亀裂が生じる。	安全装置が作動する。ガス、水道の供給が停止する。	軟弱な地盤で液状化が生じる。
	6(弱)	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。行動する。	激しく揺れる。物が倒れる。	電線が揺れる。	耐震性の低い住宅に傾くものがある。	耐震性の低い建物に亀裂が生じる。	安全装置が作動する。ガス、水道の供給が停止する。	軟弱な地盤で液状化が生じる。
4.5	6(強)	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。行動する。	激しく揺れる。物が倒れる。	電線が揺れる。	耐震性の低い住宅に傾くものがある。	耐震性の低い建物に亀裂が生じる。	安全装置が作動する。ガス、水道の供給が停止する。	軟弱な地盤で液状化が生じる。
	7	室内に揺れを感じる。恐怖を感じる。目を覚ます。行動する。	激しく揺れる。物が倒れる。	電線が揺れる。	耐震性の低い住宅に傾くものがある。	耐震性の低い建物に亀裂が生じる。	安全装置が作動する。ガス、水道の供給が停止する。	軟弱な地盤で液状化が生じる。

* ライフラインの[]内の事項は、電気、ガス、水道の供給状況を参考として記載したものである。

$$A = 0.45 \cdot 10_{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

これを書き直すと、(2)式になる。

$$I = 2 \cdot \log_{10}(A) + 0.7 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、I : 震度 (震度階級の中心値)

A : 最大加速度 (gal)

計測震度の基本的な算出式は、従来の震度との継続性を重視する側面から、この(1)式に基づいている。この(1)式では、地震波の周期特性がとくに考慮されておらず、東京付近の平均的な地動の周期として0.3秒程度を考えているものとして解釈されてきた。地震動の強さや被害には地震波の周期成分も大きく影響するため、計測震度の算出式は周期補正項を加えた次の(3)式のように定義されている。

$$MI = 2 \cdot \log_{10}(A) + 0.7 + \log_{10}(k \cdot t) \dots\dots (3)$$

ここで、MI : 計測震度

A : 最大加速度 (gal)

t : 周期 (sec)

k : 係数

ただし、この式をそのまま適用して計測震度を算出すると、周期の決定に任意性が残る。このため、次の手順で周期特性を考慮する。なお、加速度計により同一地点で同時に観測された3成分 (直交する水平動2成分・上下動1成分) の波形を使用する。

① フーリエ変換

3成分の波形をそれぞれフーリエ変換する。

② フィルター処理

計算された3成分のフーリエスペクトルに、それぞれ

以下の3種類のフィルターを施す。

1) 周期補正項に関するフィルター

$$Ff(f) = (k \cdot f)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、f は周波数 (Hz) であり、係数 k = 1.75 である。

2) ハイカットフィルター

$$Fb(f) = (1 + 0.694X_2 + 0.241X_4 + 0.0557X_6 + 0.009664X_8 + 0.00134X_{10} + 0.000155X_{12})^{-1/2} \dots\dots (5)$$

ここで、X = f/fc (fc = 10Hz) である。

3) ローカットフィルター

$$Fl(f) = (1 - \exp(-(f/f_0)^3))^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、f₀ は計測震度算出に用いる周波数の下限であり、f₀ = 0.5Hz である。

この3つのフィルターを合わせた総合特性を図-1に示す。

③ 逆フーリエ変換

フィルター処理を施した後の波形を逆フーリエ変換して、フィルター処理を行った3成分の加速度波形を求める。

④ ベクトル合成

以上の処理を行った3成分の加速度波形をベクトル合成する。

⑤ 超過時間を考慮した振幅の決定

この合成波形で、絶対値があるレベル a 以上となる合計の時間を τ (a) とし、この τ を超過時間と呼ぶ。合成波形の絶対値の最大値を a_m とすると、上記の定義か

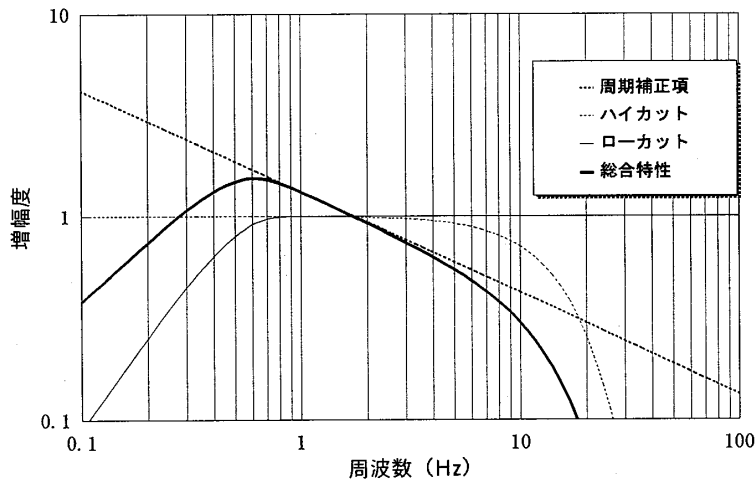


図-1 計測震度の周期フィルター特性

Fig.1 Characteristics of Filter for the Measuring Seismic Intensity

ら明らかのように以下の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \tau(a_1) > \tau(a_2) & \quad (0 \leq a_1 < a_2 \leq a_m) \\ \tau(a) = 0 & \quad (a_m < a) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

この超過時間について $\tau(a_0) = \tau_0$ となる振幅 a_0 を求める。ここで、経験的に $\tau_0 = 0.3s$ とされている。

なお、この τ に関して継続時間という用語を用いる向きもあるが、いわゆる地震動の継続時間とは意味が異なるので、ここでは超過時間とした。

⑥ 計測震度の算出

ここまでの処理で周期(周波数)特性は考慮済みなので、(3)式から周期補正項を抜いた形の(2)式に、⑤で求めた振幅 a_0 を代入する。

$$MI = 2 \cdot \log_{10}(a_0) + 0.7 \dots\dots\dots (8)$$

なお、係数 k , f_0 , τ_0 については、データの蓄積に伴って変更される可能性があることが気象庁により示唆されている。また、実際の気象庁の仕様では $k = 1.00$ が採用され、式(8)の定数項は0.7の代わりに0.94とされているが、実質的に同じことである。

4 関係式の検討に用いた観測波形データ

計測震度と物理量の関係式を検討する際に用いた地震観測波形データは、1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年能登半島沖地震、1995年兵庫県南部地震の4地震(表-4)の際に、各気象官署で観測された波形である。これらのデジタル値を気象庁が公開しており、のべ54地点での3成分の観測波形を使用した(表-5)。これらの波形は、20msecサンプリングの加速度波形である。速度波形については、加速度波形をチェビシェ

フ・フィルター(0.1~10Hz)により積分して算出した。地震動が継続している範囲を計算対象としたため、波形ごとに長さは82~328秒と異なっている。また、地震ごとのデータ数は異なり、1993年釧路沖地震のデータが半数以上を占めており、その全体に占める重みが大きくなっている。また計測震度の範囲は1から6であり、計測震度2~5がほとんどである。計測震度で6.5を越える波形(計測震度7相当)は含まれていない。さらに、震源距離は20~970kmであるがほとんどが50km以上である。このように限られたデータであることに注意する必要がある。

5 計測震度と最大加速度の関係

最大加速度は地震動の強さを端的に表わす指標として、これまでに最もよく用いられてきている。しかし、瞬間値であるがために、継続時間、周期特性、被害との関係などの課題が多く指摘されている。計測震度計では、観測された3成分の加速度波形にフィルターなどの処理を施して計測震度を求めている。そのため、計測震度と最大加速度値は1:1で対応するものではないが、過去の震度と最大加速度の関係を表す経験式の代表的なものが、前述の河角式(1)である。このほかに、翠川ら(1988)の式などがある。そのうち、いわゆるSMAC型強震計のデータをもとにしたMidorikawa(1982)、翠川ら(1988)では、河角式(1)よりも震度の境界を与える最大加速度値が2割から2倍程度大きくなることを指摘している。また、各種の物理量との関係を調べた結果、震度は加速度と速度の中間的な量との相関がよいとしている。水平2成分のベクトル合成した水平最大加速度と震度の関係は、それぞれ(9)、(10)式のように表わされている。

表-4 検討に用いた地震の諸元
Table 4 Dimension of Eartquakes Used for Investigation

No.	地震名称	発生年月日	マグニチュード M	震源位置		
				緯度(°)	経度(°)	深さ(km)
1	1993年釧路沖地震	1993. 1.15	7.8	42.92	144.36	101
2	1993年能登半島沖地震	1993. 2. 7	6.6	37.65	137.30	25
3	1993年北海道南西沖地震	1993. 7.12	7.8	42.78	139.18	35
4	1995年兵庫県南部地震*	1995. 1.17	7.2	34.61	135.04	14.3

*兵庫県南部地震の震源情報は暫定値

1~3 地震月報

4 強震観測速報

表-5 検討に用いた観測波形データ
Table 5 Data Used for Investigation

NO.	地震No.	観測点	震央距離 (km)	波形長 (sec)	観測最大加速度(gal)				A _{0.3}	観測最大速度(kine)				計測震度(MI)	
					NS	EW	UD	AMAX		NS	EW	UD	VMAX	3成分	2成分
1	1	ABJ	141.6	163.8	21.2	20.1	19.0	23.4	14.80	2.8	1.5	1.4	2.8	3.04	2.96
2	1	AJI	907.9	163.8	8.5	8.0	2.2	8.9	5.00	0.4	0.4	0.2	0.5	2.11	2.10
3	1	AKI	559.9	163.8	8.7	7.8	4.0	8.9	9.60	1.5	1.0	0.8	2.0	2.66	2.66
4	1	AOM	451.2	163.8	48.0	44.7	21.3	49.4	44.00	5.4	3.9	5.1	6.1	3.99	3.97
5	1	ASA	254.5	163.8	9.3	14.3	6.6	14.6	13.80	3.2	0.0	2.5	3.3	2.98	2.93
6	1	CHO	750.8	163.8	4.5	4.9	2.4	5.6	4.30	0.4	0.3	0.3	0.5	1.98	1.97
7	1	HAC	393.3	163.8	113.0	129.0	37.8	142.2	62.50	5.2	3.1	2.4	5.3	4.29	4.29
8	1	HAK	424.4	163.8	37.9	39.6	15.3	39.7	33.10	4.5	1.5	2.5	4.8	3.74	3.72
9	1	IID	972.6	163.8	1.0	1.3	0.7	1.4	1.10	0.2	0.1	0.1	0.2	0.81	0.80
10	1	ISN	533.1	163.8	19.8	25.3	9.3	25.8	11.80	1.0	0.2	0.9	1.2	2.85	2.79
11	1	KOF	907.5	163.8	5.4	5.4	2.7	6.3	4.40	0.5	0.4	0.3	0.6	1.98	1.97
12	1	KUS	101.2	81.9	919.4	814.9	465.5	1024.3	661.90	66.9	15.4	37.8	70.5	6.34	6.33
13	1	MAE	824.4	163.8	2.4	2.0	1.3	2.5	2.20	0.3	0.1	0.1	0.4	1.38	1.34
14	1	MIT	727.3	163.8	19.5	19.8	8.0	20.8	10.70	1.2	0.6	0.5	1.2	2.76	2.76
15	1	MIS	914.9	163.8	4.3	4.7	1.6	5.2	4.10	0.4	0.2	0.2	0.5	1.92	1.91
16	1	MOR	466.5	163.8	68.2	63.7	27.5	69.5	43.40	3.6	2.8	1.6	4.3	3.98	3.98
17	1	NEM	174.1	163.8	215.8	195.9	85.7	216.2	98.90	10.6	8.7	8.2	12.8	4.69	4.68
18	1	NII	741.2	163.8	2.9	2.3	0.7	3.0	3.40	0.8	0.2	0.1	1.3	1.77	1.77
19	1	ONA	660.4	163.8	12.1	12.8	5.4	14.3	12.10	1.4	1.0	0.5	1.5	2.86	2.85
20	1	OHI	910.1	163.8	2.7	3.9	1.7	4.0	2.60	0.4	0.4	0.2	0.4	1.53	1.52
21	1	SAK	621.2	163.8	11.2	16.4	3.4	16.5	17.40	3.6	1.8	1.5	3.7	3.18	3.17
22	1	SAP	351.8	163.8	30.3	27.7	11.1	30.9	33.20	6.2	4.4	1.8	10.2	3.74	3.73
23	1	SEN	572.4	163.8	23.0	15.9	9.9	23.0	12.20	1.3	0.8	0.8	1.4	2.87	2.85
24	1	SHZ	961.0	163.8	1.8	1.7	0.5	2.0	1.50	0.2	0.0	0.1	0.3	1.06	1.06
25	1	TKD	851.8	163.8	1.3	1.2	0.4	1.6	1.80	0.3	0.1	0.2	0.4	1.23	1.23
26	1	TOK	820.7	163.8	10.0	12.8	3.8	12.8	7.90	0.9	0.3	0.8	0.9	2.50	2.49
27	1	TMR	323.3	163.8	117.8	110.4	53.3	136.6	109.90	14.5	10.7	10.7	19.5	4.78	4.78
28	1	UTS	756.0	163.8	3.9	4.6	2.8	6.0	4.30	0.6	0.4	0.3	0.6	1.97	1.95
29	1	WAK	694.2	163.8	3.5	3.0	2.4	3.5	3.70	1.1	0.7	0.6	1.1	1.83	1.79
30	1	YOK	844.3	163.8	9.6	11.5	3.6	11.5	9.00	1.3	0.5	0.3	1.3	2.61	2.60
31	2	FUK	177.7	81.9	23.9	21.8	8.6	25.2	19.10	1.9	0.2	0.8	2.4	3.26	3.26
32	2	KAN	116.3	81.9	60.8	56.0	14.6	64.1	62.40	10.9	3.5	1.6	11.1	4.29	4.28
33	2	NAG	207.3	81.9	9.4	6.2	2.9	9.4	7.80	0.8	0.3	0.5	1.1	2.48	2.48
34	2	NII	197.5	81.9	27.4	24.9	7.6	36.4	16.60	1.9	1.0	1.2	2.0	3.14	3.14
35	2	TKD	117.4	81.9	64.2	57.4	15.6	72.1	48.10	4.6	1.5	0.9	6.2	4.06	4.06
36	2	TKY	124.9	81.9	16.6	12.7	4.9	17.3	9.90	0.6	0.3	0.4	1.6	2.69	2.69
37	2	TOY	81.6	81.9	33.8	39.9	10.7	48.1	28.80	3.1	0.9	0.8	3.4	3.62	3.62
38	2	WAJ	55.4	81.9	130.6	115.7	38.2	151.0	152.60	17.9	17.9	8.1	24.0	5.07	5.07
39	3	ASA	365.1	163.8	5.3	5.3	4.6	5.7	6.10	2.1	0.5	0.3	2.4	2.27	2.24
40	3	HAC	324.3	327.7	22.9	14.1	7.2	25.1	8.40	1.3	1.3	0.3	1.5	2.55	2.51
41	3	HAK	193.7	163.8	4.9	5.0	2.8	5.6	3.70	0.4	0.2	0.3	0.4	1.83	1.81
42	3	ISH	440.6	163.8	1.5	0.9	0.9	1.6	1.30	0.4	0.0	0.3	0.6	0.95	0.87
43	3	MOR	343.6	163.8	4.3	4.3	2.0	4.9	3.20	0.7	0.5	0.6	0.7	1.72	1.70
44	3	SAP	240.4	163.8	17.2	17.2	8.7	19.2	14.00	4.7	3.7	1.9	4.8	2.99	2.98
45	3	SUT	116.6	163.8	202.2	216.0	51.0	216.7	122.80	13.5	3.3	7.6	15.7	4.88	4.88
46	3	TMK	269.7	163.8	25.9	23.3	10.8	25.9	24.00	16.5	8.5	4.1	17.1	3.46	3.45
47	3	URA	404.0	163.8	5.7	5.9	2.8	5.9	6.20	1.8	1.5	1.3	2.3	2.28	2.25
48	4	FUK	175.3	81.9	33.0	41.5	10.1	41.7	36.70	4.1	3.4	1.1	5.4	3.83	3.83
49	4	HIK	144.8	81.9	136.8	146.9	39.1	143.2	140.80	15.0	8.4	4.3	15.9	5.00	5.00
50	4	KOB	21.9	81.9	818.0	617.3	332.2	847.9	739.90	89.5	68.3	42.5	103.5	6.44	6.44
51	4	MZH	74.4	81.9	67.0	52.2	39.4	72.2	45.40	5.1	3.7	0.8	6.1	4.01	4.00
52	4	OKA	125.5	81.9	77.3	59.1	36.0	77.5	41.60	5.0	2.6	1.9	5.1	3.94	3.94
53	4	OSA	55.6	81.9	80.9	65.9	64.5	83.1	84.80	18.4	4.9	10.3	18.5	4.56	4.56
54	4	TOT	113.0	81.9	76.7	74.2	14.7	81.8	80.20	10.2	6.3	4.2	10.8	4.51	4.51

$$\log_{10}(AMAX) = 0.54 \cdot I - 0.27 \quad (\gamma = 0.83) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\log_{10}(AMAX) = 0.46 \cdot I + 0.05 \pm 0.27 \quad (I = I \sim V)$$

$$\log_{10}(AMAX) = 0.58 \cdot I - 0.43 \pm 0.25 \quad (I = III \sim V) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、I : 震度
 AMAX : 水平2成分のベクトル合成
 最大加速度 (gal)
 γ : 相関係数

ここでは、1996年4月から使用されている上述の計測震度を求める手順を用いて、実際の波形データにより最大加速度と計測震度の関係を調べた。

計測震度は、上下成分を含む3成分の加速度波形を用いて算出されるが、従来、一般的に地震動の強さを表したり地震被害の解析の際には、被害に対してより影響の大きいとされている水平成分を扱うことも多い。そのため、実用性を考えて、水平2成分をベクトル合成して求めた水平最大加速度との相関関係を図-2に示した。図中の直線は、最小自乗法により求めた回帰直線であり、次の(11)式のように表わすことができる。

$$MI = 1.957 \cdot \log_{10}(AMAX) + 0.569 \quad (\gamma = 0.966) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、MI : 計測震度
 AMAX : 水平2成分のベクトル合成
 最大加速度 (gal)
 γ : 相関係数

明らかに両者の間には、非常によい相関が見られる。計測震度は、従来の震度階とも整合するように決められていて、河角式(1)と上記の翠川式(9)、(10)の中間の関係となっている。震度階級の境界を表わす最大加速度の値は河角式の場合のおよそ2割から4割程度大きい値となっている。この原因としては、石本式地震計と計測震度計の周期特性の違いが挙げられる。このように、最大加速度(物理量)とよい相関関係にあるということは、計測震度が従来の震度に比べ、物理的な性質がより明らかになっていることを示している。

6 計測震度と最大速度の関係

加速度は力と比例することから土木工学や建築工学の分野では最大加速度を持って地震動の強さを表わす物理量として広く使われてきている。最大速度についても被害と相関がよい、あるいは液状化評価のための指標として適当であるなどとも言われている。従来の震度と最大速度の関係式としては、Muramatsu (1966), Midorikawa (1982), 翠川ら (1988) などがある。これらはそれぞれ(12)~(14)式のように表わされている。

$$\log_{10}(VMAX) = 0.5 \cdot I - (1.398 \sim 0.886) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\log_{10}(VMAX) = 0.49 \cdot I - 1.14 \quad (\gamma = 0.80) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\log_{10}(VMAX) = 0.53 \cdot I - 1.32 \pm 0.32 \quad (I = I \sim V)$$

$$\log_{10}(VMAX) = 0.65 \cdot I - 1.78 \pm 0.23 \quad (I = III \sim V) \quad \dots\dots\dots (14)$$

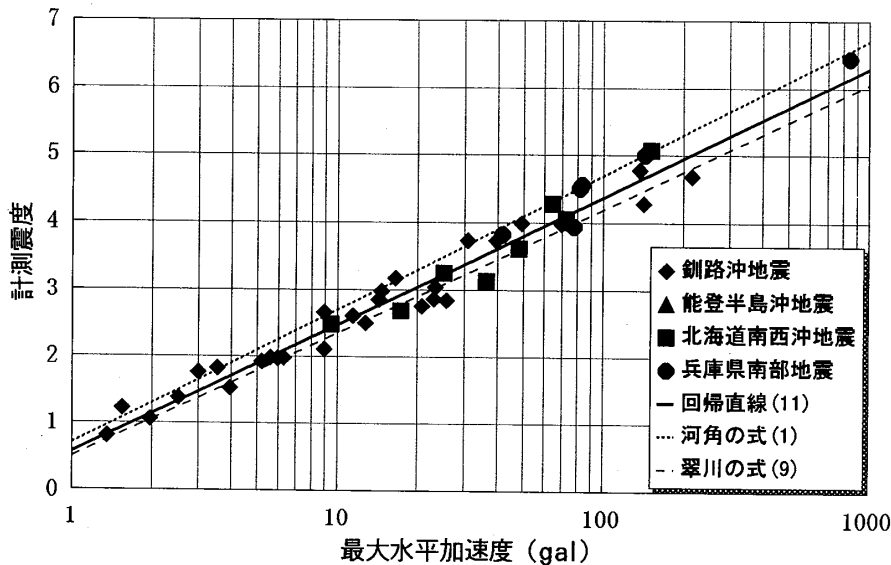


図-2 計測震度と水平最大加速度の関係

Fig.2 Relationship between JMA's Measuring Seismic Intensity Scale and Maximum Horizontal Acceleration

ここで, I : 震度
 VMAX : 水平 2 成分のベクトル合成
 最大速度 (kine)
 γ : 相関係数

前述の加速度波形から, 積分により速度波形を算出し, その水平 2 成分をベクトル合成して水平最大速度を求めた。水平最大速度と計測震度の関係を図-3 に表す。この図中の回帰直線は, (15)式のように表わされる。

$$MI = 2.008 \cdot \log_{10}(VMAX) + 2.258 (\gamma = 0.914) \quad \dots\dots (15)$$

ここで, MI : 計測震度
 VMAX : 水平 2 成分のベクトル合成
 最大速度 (kine)
 γ : 相関係数

この(15)式の計測震度と水平最大速度との関係は, 加速度の場合に比べてややばらつきがある。この原因の一つは, 波形の性質の違いである。すなわち, 1993年北海道南西沖地震と1993年釧路沖地震の長周期成分は, その強さがかなり異なっている。速度波形にすると, この長周期成分の影響で1993年北海道南西沖地震の最大速度は回帰曲線よりも大きくなる。

翠川式(13), (14)と比較すると傾きがやや異なる程度であり, 村松式(12)とほぼ等価である。このように, 最大加速度に比べると最大速度の方が周期帯域からして局所的な影響を受けにくく, より安定した関係が得られていると見ることができる。

7 応答スペクトルから計測震度を算出する方法の検討

従来から建築や土木の分野では, 耐震設計のための地震動の強さの指標として, 応答スペクトルが広く用いられている。また, 1970年代から広い地域における地震防災対策の推進を最終的な目標として実施されている地震被害想定調査では, 広域の地震動の強さが推定されている。この一般的な手順としては, 震源断層をモデル化し, 地震基盤での地震動を推定する。ついで, 表層地盤の増幅特性を考慮して地表での地震動を求めるというものである。本来, 地震動波形の推定が望ましいが, 実際的な方法は十分には確立されていない。厳しい条件のデータとかなり煩雑な手順が必要となるために広域への適用は試行され始めた段階である。たとえば, 既存の観測波形から標的とする地震動波形を合成する方法もあるが, 波形の選択に任意性があり, 一般的には利用しにくい。

現状, 地震基盤での地震動としては, 水平 2 成分を合成した応答スペクトルを求めるケースが多い。この地震動に, 応答計算などによる表層地盤の伝達関数(増幅特性)を加味して計算するため, 地表での地震動として得られるものは水平動の応答スペクトルである。計測震度を算出するためには, 以下の 2 点が主な問題となる。

- 1) 超過時間の処理
- 2) 上下動成分の取り扱い

以下では, 既存のデータから経験的な関係を求めて, 計測震度相当の値を求める方法を検討した。なお, 応答スペクトルとフーリエスペクトルとの間には変換が可能で

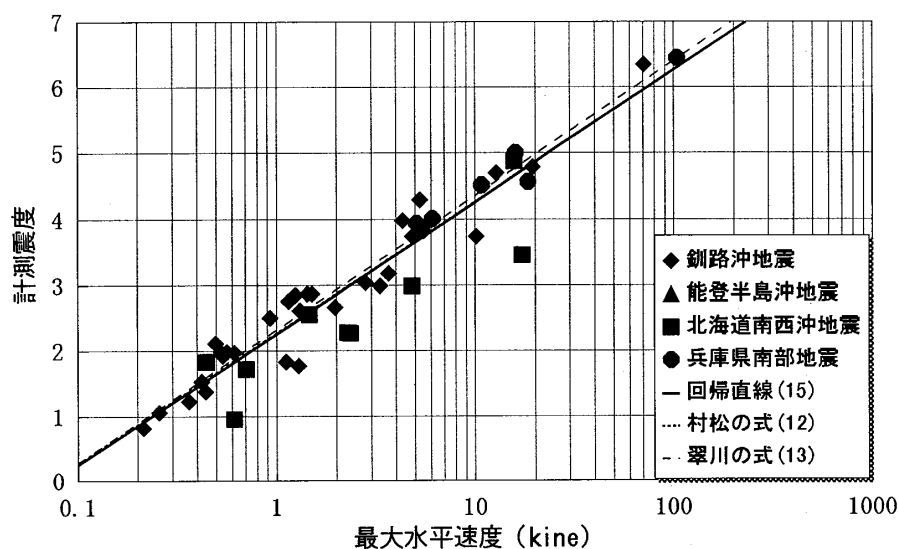


図-3 計測震度と最大水平速度の関係

Fig. 3 Relationship between JMA's Measuring Seismic Intensity Scale and Maximum Horizontal Velocity

ある。つまり、減衰率0%の速度応答スペクトルは、加速度波形のフーリエ振幅スペクトルと等価である。また、応答スペクトルと波形の最大値の関係については次の(16)式のような経験的な関係がある。

$$AMAX = 0.3 \cdot \int_{0.1}^{2.5} Sa(T) dT \quad (h=5\%) \quad \dots\dots (16)$$

- ここで、AMAX : 波形の最大加速度 (gal)
- Sa(T) : 加速度応答スペクトル
- T : 周期 (sec)
- h : 減衰率

7・1 超過時間の処理

超過時間の効果は、応答スペクトルに対しては、そのままの状態では計算することができない。しかし、フィルター処理はそのまま実行することができる。そこで、フィルター処理後の加速度波形の最大値 (Amax) と、超過時間 (τ) が0.3secになる振幅 (A_{0.3}) の関係を求めた。この関係を図-4に示す。最小自乗法により求めた関係式は次の(17)式のようになる。

$$A_{0.3} = 0.796 \cdot Amax \quad (\gamma = 0.995) \quad \dots\dots (17)$$

明らかに両者は非常によい相関を示しており、超過時間の処理については、フィルター処理した後の波形の最大値に係数0.8をかけることで、ほぼ解決できることになる。

7・2 上下動成分の取り扱い

実際の地震動の観測波形では、水平動成分に比べて上

下動成分が1/2から2/3程度以下となる場合が多い。しかし、限られたデータでは上下動の方が大きい場合もあるので、ここでは与えられたデータを用いて平均的な関係を求めることにする。

すなわち、水平2成分の波形から計測震度相当値を計算した場合と、上下動成分を加えた3成分の場合との比較を行った。この結果を図-5に示す。最小自乗法で求めた図中の関係式は、次の(18)式となる。

$$MI_{3c} = 1.0246 \cdot MI_{2c} \quad (\gamma = 0.999) \quad \dots\dots (18)$$

- ここで、MI_{2c} : 2成分で計算した計測震度相当値
- MI_{3c} : 3成分で計算した計測震度相当値

相関係数の値がほとんど1.0であることから、両者はほぼ1:1の関係にあり、しかも、計測震度としては2.5%程度の差があるが、補正はほとんど必要ない程度であることが示された。

7・3 地震被害予測における計測震度の算出手順

以上の検討結果から、計算される地表での応答スペクトル (pSv) にフィルター処理を施した後の波形の最大加速度に上記の2つの係数 (0.796と1.0246) を用いることによって、計測震度に相当する値を求めることができる。

これを整理して、一連の流れとして、地震被害予測調査において、計測震度を算出する手順を図-6に示した。この手順によって、応答スペクトル (pSv) からある程度の仮定はおくものの、計測震度を求めることができる。

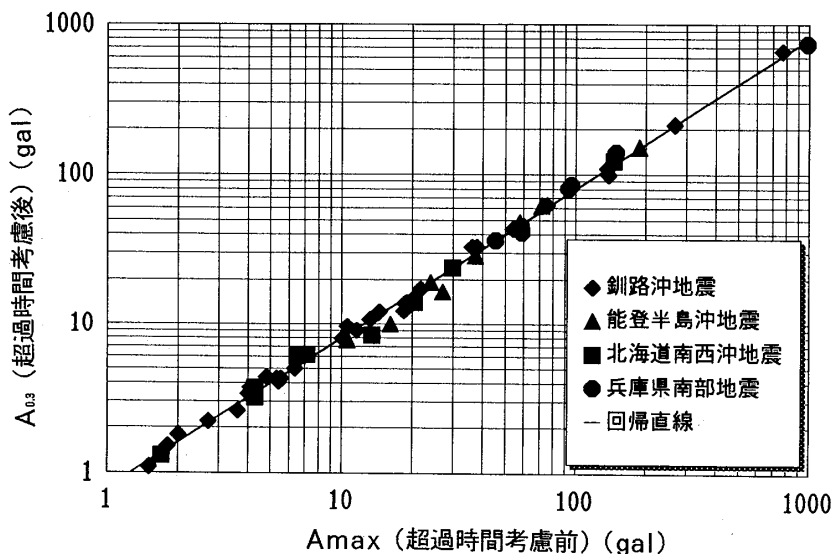


図-4 計測震度に対する超過時間の効果

Fig.4 Effect on JMA's MI due to Exposure Time Exceeding a Certain Level of Ground Motion

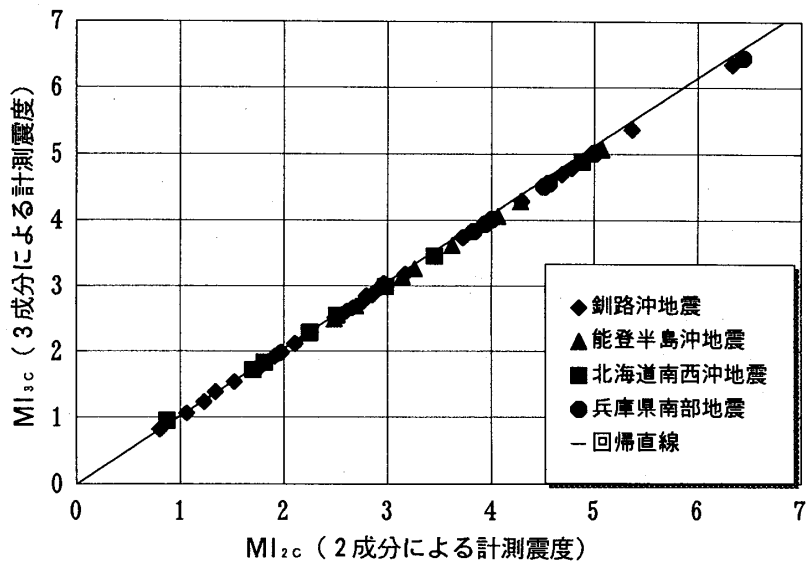


図-5 計測震度に対する上下動の効果
 Fig. 5 Effect on JMA's MI due to Up-down Component of Ground Motion

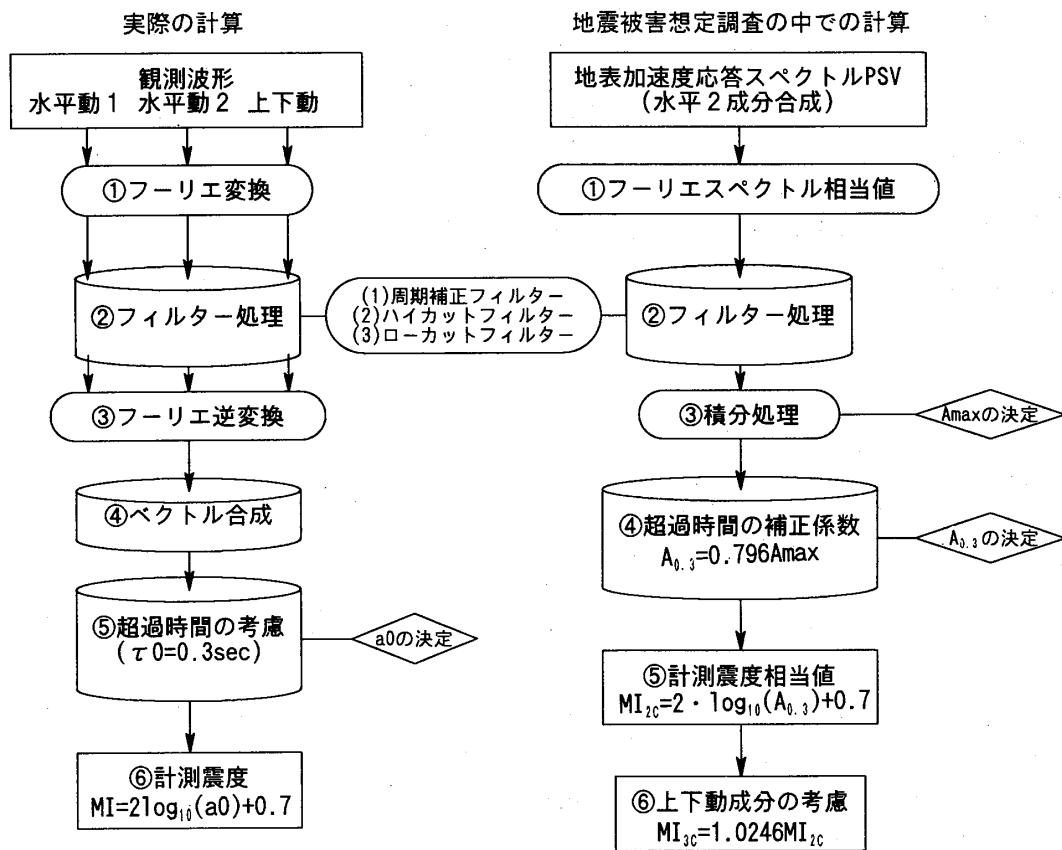


図-6 応答スペクトルから計測震度を求める手順の提案
 Fig. 6 Proposed procedure for Calculating JMA's MI from Response Spectra

8 おわりに

地震動の強さを表す便利な指標である震度階において、周期特性および超過時間を考慮した新しい計測震度につ

いて、物理量（最大加速度，最大速度）との関係を調べた。また、工学的な見地から、応答スペクトルから計測震度を導く手順を提案した。この結果、従来の震度階と比べて物理的な性状がより明確であることを示した。し

かしながら、本検討ではデータが限られており、周期特性を十分に検討したことになっていない側面もある。今後ともデータを蓄積して検討を進める必要がある。

(注記)

平成8年2月15日付の官報第1831号では、計測震度について規定しており、その中で、本報告とは異なる表現がなされている。この点について注記しておく。

官報第1831号で本報告と異なる点は、周期補正項と最終的に計測震度を表す式をそれぞれ以下のように表現しているところである。

$$Ff(f) = (k \cdot f)^{1/2}, k=1.0$$

$$I = 2 \cdot \log_{10}(a_0) + 0.94$$

これに対して、本報告では、それぞれ以下のようにしている。

$$Ff(f) = (k \cdot f)^{1/2}, k=1.75 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$MI = 2 \cdot \log_{10}(a_0) + 0.7 \quad \dots\dots\dots (8)$$

しかし、両者は実質的には同じことである。ただし、正確には定数項の0.94は0.943…である。元々、周期帯域を規定する短い側の周期は1.75秒であり、また式(8)に示した河角による式が下敷きとなっているので、式の意味を表現する観点から、あえてそのまま表示している。

参 考 文 献

- 鉢嶺 猛 (1989) : 震度の計測化について 験震時報 第52巻 第3～4号別冊 pp.43-68.
- 金子史夫, 瀬川秀恭 (1996) : 兵庫県南部地震の地震動分布について 応用地質技術年報 兵庫県南部地震特集号 pp -
- 河角 廣 (1943) : 震度と震度階 地震 Vol.15 pp.6-12.
- 気象庁地震課 (1971) : 日本における震度観測の記録 気象庁技術報告 第76号 pp.1-41.
- 気象庁地震津波監視課 (1996) : 防災情報としての震度階級の改善 気象 1996年4月号 pp.4-6.
- 北川良和 (1996) : 新しい震度階級の話 地震ジャーナル 第21巻 pp.32-36.
- Midorikawa, S. (1982) : The Correlation of the Japan Meteorological Agency Intensity Scale with Physical Parameters of Strong Ground Motions 7th European Conf. on Earthq. Eng. pp.103-110.

- 翠川三郎, 福岡知久 (1988) : 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.
- Muramatu, I. (1963) : Expection of Maximum Velocity of Earthquake Motion within 50 Years throughout Japan Sci. Rep. Gifu Univ. Vol.3 pp.470-481.
- 震度問題検討会 (1995) : 震度問題検討会最終報告.
- 宇津徳治総編集 (1987) : 地震の事典 朝倉書店 pp. 306-308.