

地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係

Relationship between Ground Motion Indices and New JMA Seismic Intensity

童 華 南*・山 崎 文 雄*

Huanan TONG and Fumio YAMAZAKI

1. はじめに

気象庁は客観的かつ迅速に震度を観測するため、従来の現象を基準にした人の判断による震度から、震度計による機械観測への移行を1991年から進めてきた。しかし、兵庫県南部地震をはじめとする多くの地震の経験から、震度5と6は被害の幅が広すぎることや、震度7を判断するには調査期間を要することなど、これまでの震度の問題点が明らかにされてきた。これらの経験を踏まえ、気象庁は震度計によって震度7まで自動的に計測する新しい震度階を1996年2月15日に正式に決めた。これにより、完全に自動化した震度の速報システムの構築が可能となった。今後新たに整備される地震観測網は、計測震度を基本観測指標とするものが多くなると思われ、既にある観測網とは互いに参照できない指標を使用することになれば大きな問題である。したがって、計測震度と従来よく用いられている最大加速度、最大速度、スペクトル強度 (SI) 値などの地震動強度指標との関係を明らかにすることは緊急の課題といえよう。

2. 気象庁の新しい震度階級

本文は新しい計測震度の算出方法について、従来の地震動指標の算出方法と比較しながら特徴的な点を絞って説明する。気象庁震度階級の変遷と新しい震度階級の詳細は文献^{1)~3)}を参照されたい。新しい計測震度 (平成8年2月15日官報1831号) は、0.1 Hz~50 Hz の範囲で平坦な感度を有する3成分の加速度記録を用いて、図1に示す手順で算出される。計測震度は $I = 2 \cdot \log_{10} (a_0) + 0.94$ (小数点2位を四捨五入) の式によるものである。ここで a_0 は絶対値があるレベル a 以上である時間の合計 τ を $\tau(a)$ とし、求めた $\tau(a)$ の関係から、 $\tau(a_0) = 0.3$ 秒により逆

算する。改正された計測震度には、次の3つの特徴をあげられる。

(1) 体感と構造物被害の相関を考慮したフィルター処理

$$F(f) = F_1(f) \cdot F_2(f) \cdot F_3(f) \quad (\text{図2参照})$$

周期効果フィルター	$F_1(f) = (1/f)^{1/2}$
ハイカットフィルター	$F_2(f) = U(x)$, ここでは $x = f/f_c$ ($f_c = 10 \text{ Hz}$) $U(x) = (1 + 0.694 x^2 + 0.241 x^4 + 0.0557 x^6 + 0.009644 x^8 + 0.00134 x^{10} + 0.000155 x^{12})^{-1/2}$
ローカットフィルター	$F_3(f) = 1 - \exp((-f/f_0)^3)^{1/2}$ ($f_0 = 0.5 \text{ Hz}$)

(2) 3成分波形のベクトル合成

(3) 新しい継続時間の定義に対応する振幅 a_0 の決め方

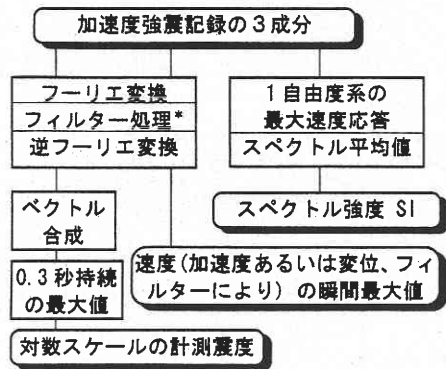
3. 計測震度の物理的背景

計測震度の計算方法は、加速度波形から振動数領域で積分して速度波形を求めるプロセスと似ている。計測震度と同様に、速度波形も一旦フーリエ変換をしたスペクトルに加速度から速度へのフィルターをかけて、逆フーリエ変換で速度波形を得る。加速度波形をフーリエ変換してから倍率1のフィルターを通して逆フーリエ変換を行うと、当然もとの加速度波形に戻る。このように考えれば、加速度、速度、変位と計測震度の波形の違いはフィルター特性だけで決められる。

図2に示した各種のフィルターから分かるように、振動

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報



*フィルターは目的により異なる (図2参照)

図1 計測震度と他の地震動指標の処理方法の比較

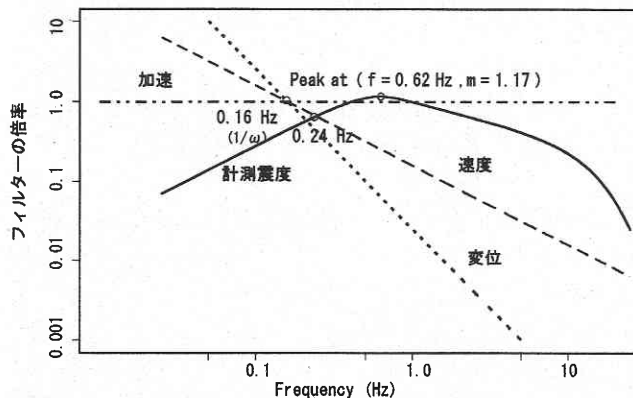


図2 加速度を基準とした計測震度、速度および変位の振動数フィルターの比較

数0.24 Hz以上の地震波形の主要区間では、計算震度フィルターは加速度フィルターと速度フィルターの間にはさまれている。ただし、振動数0.4~1 Hz (周期の1~2.5秒)の間で震度フィルターは加速度フィルターより高く(最大値は1.17)になっており、0.24 Hzより低振動数の区間で速度フィルターよりも低くなっている。物理的に解釈すれば、強調された1~2.5秒周期区間は、人間の震動感覚が卓越した帯域と考えられる。一方、人の感覚と構造物被害に関係のない長周期と短周期の成分は震度計測のノイズとして考えられる。計測震度の決め方を総括すれば、ある振動数部分を強調したフィルターを通した波形をもとに、3成分合成の効果および一定の継続時間などの条件も考慮した波形の最大値である。

4. 計測震度と従来の地震動指標の関係

計測震度のフィルター処理後の波形は、ある振動数部分が強調されるが、基本として加速度と速度との間に位置づ

けることができる。ただし、一般の最大加速度と最大速度では、3成分の合成と継続時間は考慮されていない。それに対して、SI値の計算過程では、1自由度系を0.1~2.5秒の間の周期領域のフィルター(20%減衰がフィルター形状に関連)としてみなすこともできる。ただし、SI値は計測震度と最大速度などと違って、フィルター処理した後、時刻歴に戻さないでスペクトルの平均値を取る。以上の理由から、従来の地震動指標である最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)およびSI値によって、計測震度を推定することが可能と思われる。

本研究でこれらの地震動指標と計測震度の関係の検討に使用した加速度記録は、計測震度の定義から、3成分が揃っている自由地盤の記録に限定した。使用データは、震源に近い記録のある兵庫県南部地震(76地点)とノースリッジ地震(27地点)の記録に、広範囲で記録のある大地震として釧路沖地震、北海道南西沖地震、北海道東方沖地震と三陸はるか沖地震、中小規模の地震としては92年の東京湾地震と兵庫県南部地震の余震の気象庁の記録を加えた、合計205地点の記録である。

まず、個々の指標と計測震度の単回帰分析を行い、これにより求められた推定式は、それぞれ式1~式3である。

最大加速度による計測震度の推定式:

$$I = 0.59 + 1.89 \cdot \log_{10}(PGA) \quad (\sigma = 0.281, \text{図3}) \quad (1)$$

最大速度による計測震度の推定式:

$$I = 2.30 + 2.01 \cdot \log_{10}(PGV) \quad (\sigma = 0.418) \quad (2)$$

SI値による計測震度の推定式:

$$I = 2.43 + 1.96 \cdot \log_{10}(SI) \quad (\sigma = 0.174, \text{図4}) \quad (3)$$

ここでのPGA, PGVとSIは、実用性の観点から3成分中の最大値を用いるものとし、ベクトルで合成したものではない。物理的背景から推測した通り、SI値は全域にわたって計測震度の推定精度が高い。最大加速度と最大速度も計測震度と明確な対応関係にある。ただし、最大速度から推定した計測震度の標準偏差はSI値からの場合の2倍以上になる。SI値とPGVとはよく対応する相関関係にある⁴⁾ことを考えれば、SIのPGVとの差の分が計測震度に現れていることが分かる。

標準偏差から見れば、単独の地震動指標としては、SI値が計測震度との相関が最も高い、実用上ではSI値を測るSIセンサー⁵⁾であれば、最大加速度も計測するので、2つの指標を用いて、計測震度を推定することも意味があ

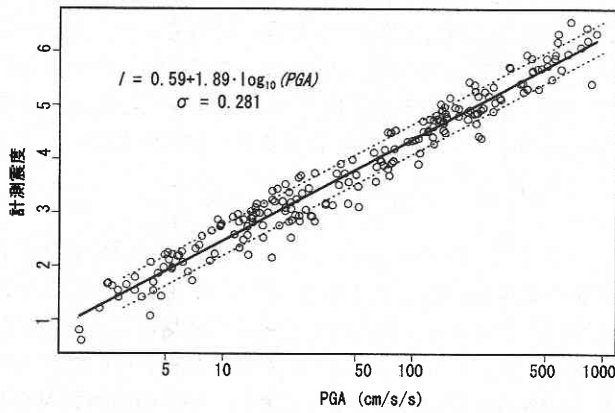


図3 最大加速度による計測震度の推定式

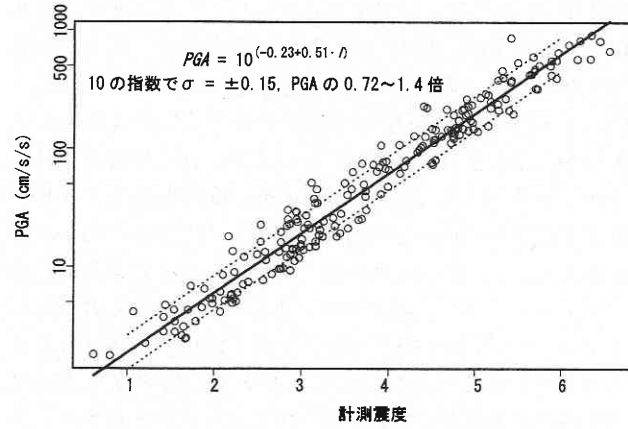


図6 計測震度による最大加速度の推定式

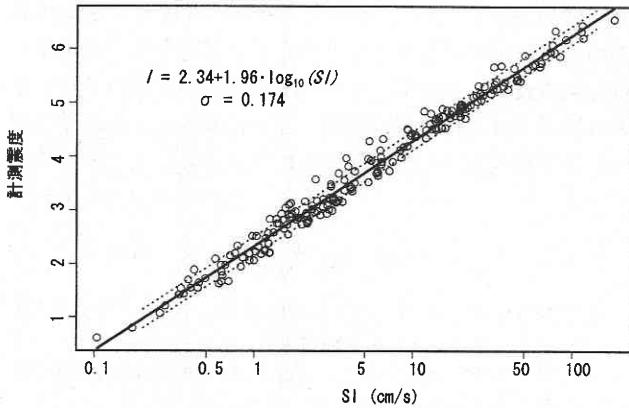


図4 SI値による計測震度の推定式

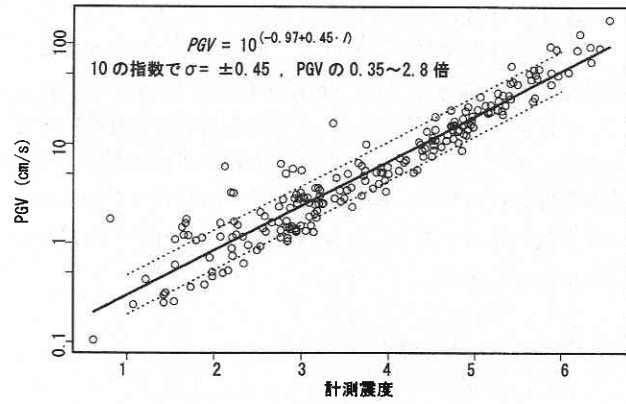


図7 計測震度による最大速度の推定式

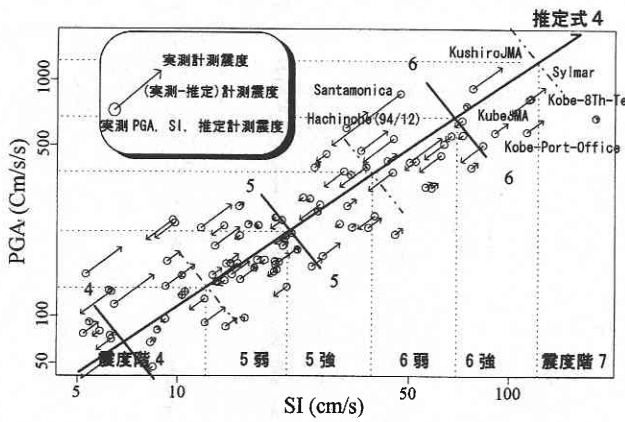


図5 SI値と最大加速度による計測震度の推定

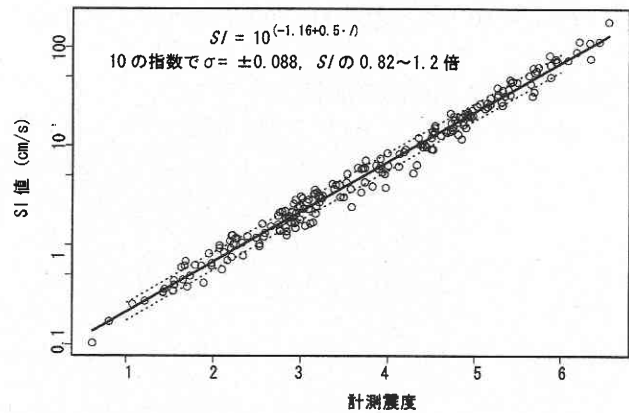


図8 計測震度によるSI値の推定式

る。重回帰分析の結果、以下の推定式が得られた。

$$I = 1.68 + 1.29 \cdot \log_{10}(SI) + 0.69 \cdot \log_{10}(PGA) \quad (\sigma = 0.097, \text{ 図5}) \quad (4)$$

また、最大速度と最大加速度を用いた計測震度推定式は以下のように求められた。

$$I = 1.11 + 0.78 \cdot \log_{10}(PGV) + 1.25 \cdot \log_{10}(PGA) \quad (\sigma = 0.180) \quad (5)$$

研 究 速 報

式 4 で SI 値と最大加速度から推定した計測震度は、標準偏差が震度 ± 0.1 以内におさまり、 SI 値だけ (式 3) が最大加速度だけ (式 1) からの推定誤差の半分以下である。即ち、 SI 値が計測震度より鈍感である高振動数を最大加速度がうまく補ってくれたことになる。図 5 は震度 4 以上のデータをズームアップし、 SI 値、最大加速度、計測震度および式 4 の推定値の関係を表すものである。図 5 から分かるように、計測震度 6 以上のものは式 4 による推定誤差が小さい。また、震度階の定義から、対応する最大加速度と SI 値も図から読みとれる。式 5 は最大加速度と最大速度から計測震度を推定する式であり、 SI 値より最大速度を観測するケースが多いので、実用性も高いと言える。計測震度の精度を考えれば、式 4、5 によって推定されたものを震度計のないところの計測震度の推定に使用することは問題ないと思われる。

気象庁の計測震度が分かれば、その震度に対応する最大加速度、最大速度および SI 値を推定する必要も場合によってはあろう。同じデータセットを用いた計測震度を説明変数とする回帰分析の結果は、式 6~8 である。ただし、計測震度は対数スケールであるので、回帰分析の標準偏差 σ は指数の偏差であり、目的変数の偏差は $m = 10^{\pm\sigma}$ の値を取る倍率である。

計測震度による最大加速度の推定：

$$PGA = 10^{-0.23+0.51 \cdot I} \quad (m = 0.72 \sim 1.4) \quad (6)$$

計測震度による最大速度の推定：

$$PGV = 10^{-0.97+0.45 \cdot I} \quad (m = 0.35 \sim 2.8) \quad (7)$$

計測震度による SI 値の推定：

$$SI = 10^{-1.16+0.50 \cdot I} \quad (m = 0.82 \sim 1.2) \quad (8)$$

以上 3 式の偏差倍率から、計測震度による最大速度の推定だけは誤差が大きすぎて、実用的ではないが、式 6 の最大加速度や式 8 の SI 値の推定は、計測震度しか公表されていない地域の最大加速度と SI 値を推定する場合、誤差は一定のばらつき範囲内におさまり、信頼性が高い。

5. ま と め

本文では、気象庁の新しい計測震度と従来の地震動強さ指標の最大加速度、最大速度および SI 値との関係について検討した。まず計測震度の定義から他指標との物理的関連を論じた。次に日米 205 地点の強震記録を用いて、これらの関係式を回帰分析により求めた。従来の観測網の地震動指標さえあれば、本研究で得た関係式から計測震度を精度よく推定することができ、逆に計測震度から最大加速度と SI 値も推定できる。本研究の結果は各機関の地震観測網の共同運用に貢献できると考えている。今後、本研究で得た関係式に基づいて、もっと多くの記録を用いて異なる地震による推定精度への影響、2 成分の記録と 3 成分の記録による推定精度の変動範囲などの検討も行うことを考えている。

(1996年 8 月 7 日受理)

参 考 文 献

- 1) 関田康雄 (1996). 新しい震度階級について, 財団法人震災予防協会, 地震工学振興会ニュース No. 147.
- 2) 北川良和 (1996). 新しい震度階級の話, 財団法人地震予知総合研究振興会, 地震ジャーナル, No. 21.
- 3) 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.
- 4) 童華南, 山崎文雄他 (1994). 実地震被害例による家屋被害推定式の構築, 土木学会第 49 回学術講演概要集.
- 5) 佐藤暢彦, 片山恒雄他 (1985). 新しい制御用地震センサーの開発試作, 第 18 回地震工学研究発表会.