

兵庫県内の強震観測点における地震記録と 常時微動を用いた計測震度分布の推定

齋田 淳¹・松岡昌志²・Khosrow T. SHABESTARI³・山崎文雄⁴

¹正会員 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)
(元 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター)

E-mail:jun@sdr.co.jp

²正会員 博士(工学) 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター
(〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

³正会員 Ph.D. 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (同上)

⁴正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

計測震度などの地震動の強度指標値は、地震後の緊急対応のための情報として極めて重要である。しかし地震計から集められた震度情報はあくまでもその地点のものであり、空間的な分布を得るためには、地盤特性などを用いた推定を行う必要がある。本研究では、兵庫県を対象として計測震度の推定手法について検討した。まず距離減衰式と地盤特性による推定手法について検討し、観測値を用いた空間補間を行うことで推定精度が向上することを示した。また兵庫県内116箇所の強震観測点で常時微動測定を行い、得られた常時微動のH/Vスペクトル比を用いた計測震度の推定手法を提案した。この手法により、多くの観測記録を用いるのと同程度の精度で計測震度を推定できることを示した。

Key Words : *earthquake ground motion, JMA Seismic Intensity, Kriging, microtremor, H/V spectrum ratio, Hyogo prefecture*

1. はじめに

計測震度など地震動の強度指標値は、災害対応における基本的な情報として非常に重要である。このため、とくに1995年兵庫県南部地震以降は、各市町村に少なくとも1台以上の計測震度計が整備されるようになり、地震後数分で高密度な計測震度情報がテレビ等に配信されるようになってきた。また自治体においても独自に地震計からの情報を統合するシステムを構築し、地震直後の初動体制の確立や住民意識の啓発に役立っている例も多くみられるようになった。

たとえば、兵庫県南部地震によって未曾有の被害を経験した兵庫県では、平常時から住民との情報交換や市町との連携にも活用し、災害時の迅速で的確な緊急対応に役立っている「フェニックス防災システム」の運用を開始している¹⁾。このシステムは地震計からの震度情報がリアルタイムかつ自動的に災害対策本部に送信され、震度4以上の地震が発生した場合には、被害の規模を自動的に予測することができるようになっている。また、日常的にもシミュレーションを行うことで防災教育や訓練に役立てられている。

地震計から集められた地震動強度指標値は、災害対応の基本情報として、被害推定システムのトリガや入力に用いられている。しかし、観測値はそれぞれの地震計が設置されている地盤の特性に強く影響されており、周辺の地盤を代表する値として扱うことはできない場合もある。地震計を用いてより詳細な地震動指標値の分布を得るためには、すべての地盤条件を網羅するように高密度に地震計を配置する必要があるが、広範囲にわたる場合は現実的ではない。このため地盤特性などを用いて推定することが必要となる。たとえば、国土数値情報²⁾を用いることで、1 kmメッシュ単位で日本の国土をいくつかの地形地質に分類し、その地盤特性を把握することができるようになってきた^{例えば3)~5)}。また、地震動の距離減衰特性についても多くの研究がなされている^{例えば6)~12)}。これらの研究成果を組み合わせることで、地震動の各種指標値の空間分布状況を把握することが可能である。しかし、この場合も任意の地点の地震動を精度よく推定できるとは限らない。

本研究では、計測震度の推定方法について兵庫県を対象として検討する。まず地形地質分類と地盤特性を用いるものとして、フェニックス防災システムに用い

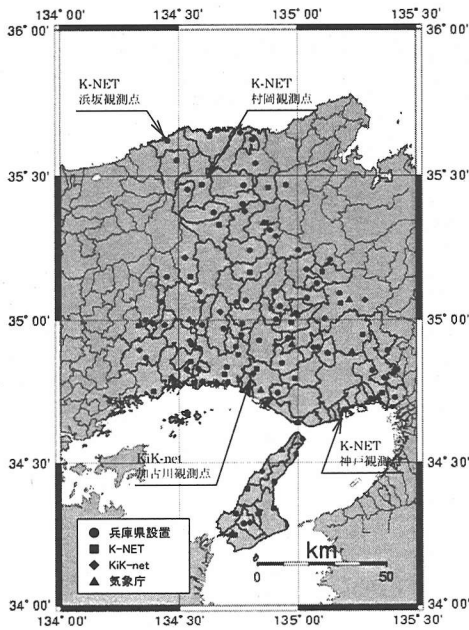


図-1 微動観測を行った兵庫県内の強震観測点

られている兵庫県地震被害想定調査報告書¹³⁾の方法と、距離減衰式と平均地点係数を用いて推定する方法をとりあげる。さらに、後者の結果に対しては観測値を用いた空間補間についても検討する。また、常時微動を用いた計測震度の推定方法を検討するために、図-1、表-1に示した兵庫県内のフェニックス防災システム、強震ネット (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net) のすべての強震観測点116地点において常時微動観測を行った。まず得られた微動の水平方向成分と上下方向成分のスペクトル比 (H/V スペクトル比)¹⁴⁾を地形地質分類や強震動の H/V スペクトル比と比較して、微動が地盤特性を表していることを確認する。この結果を踏まえて微動の H/V スペクトル比を用いた計測震度の推定方法を提案し、その精度を確認する。

2. 地形地質分類を用いた計測震度の推定

(1) 兵庫県地震被害想定に基づく推定

フェニックス防災システムに用いられている、兵庫県地震被害想定調査報告書による計測震度の推定手法 (以下「手法1」という。) を以下に示す。

まず兵庫県全域を 500 m メッシュに分割し、各メッシュを海岸平野・谷底低地・洪積台地・台地～丘陵地・山地の別と堆積物などの違いにより 20 の地盤区分に分類する。各地盤区分ごとに地盤応答解析を行い、地盤

表-1 常時微動測定を行った地点

種別	地点数	備考
兵庫県	91 地点	兵庫県設置強震計 60 地点 気象庁計測震度計 11 地点 K-NET 強震計 20 地点
姫路市	5 地点	
西宮市	1 地点	
強震ネット (K-NET)	7 地点	フェニックス防災システムに接続されていないもの
基盤強震ネット (KiK-net)	12 地点	
合計	116 地点	

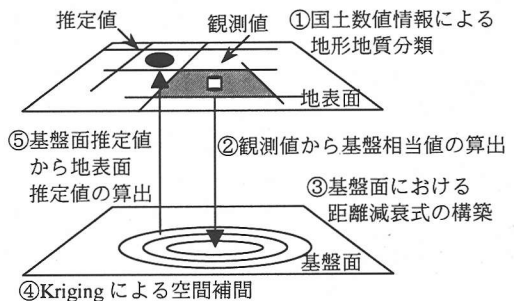


図-2 Kriging 法を用いた空間補間の流れ

増幅特性を式(1)のように近似する。ここでは、基盤上昇波成分の最大加速度 A_{max} が 100 cm/s^2 と 200 cm/s^2 の場合について等価線形法を用いた Haskell のマトリクス法を用いている。

$$\alpha = a \times A_{max}^b \quad (1)$$

ただし、 α は地表面加速度であり、係数 a 、 b の値は地盤区分ごとに固有の値である。

地震諸元が与えられると、各メッシュごとに基盤加速度を Fukushima and Tanaka¹⁵⁾に従って式(2)により算出する。

$$\log A_{max} = 0.51M_{JMA} - \log(r + 0.006 \times 10^{(0.51M_{JMA})}) - 0.0034r + 0.59 \quad (2)$$

ここで、 M_{JMA} は気象庁マグニチュード、 r は断層までの最短距離(km)である。式(1)、式(2)により各メッシュにおける地表面の最大加速度 α を求め、式(3)の気象庁震度観測検討委員会昭和 63 年 2 月提案式により計測震度 I を推定する。

$$I = 2 \log \alpha + 0.7 + \log kt \quad (3)$$

表-2 各手法の推定方法と精度の比較

	手法1	手法2a (空間補間なし)	手法2b (空間補間あり)	提案手法
地盤特性	500 m×500 m のメッシュを20分類し地盤応答解析を行う	1 km×1 km のメッシュを11分類し平均地点係数を与える		常時微動 H/V スペクトル比の比による
基準地震動	地震によらず同一の距離減衰式を用いる	地震ごとに距離減衰式を構築する	地震ごとに距離減衰式を構築し、換算観測値との差により補間する	基準点の応答スペクトルを用いる
推定精度 (残差の分散)	0.59	0.25	0.21	0.19
	0.31	0.40	0.29	0.24

推定精度の上段は鳥取県西部地震、下段は芸予地震

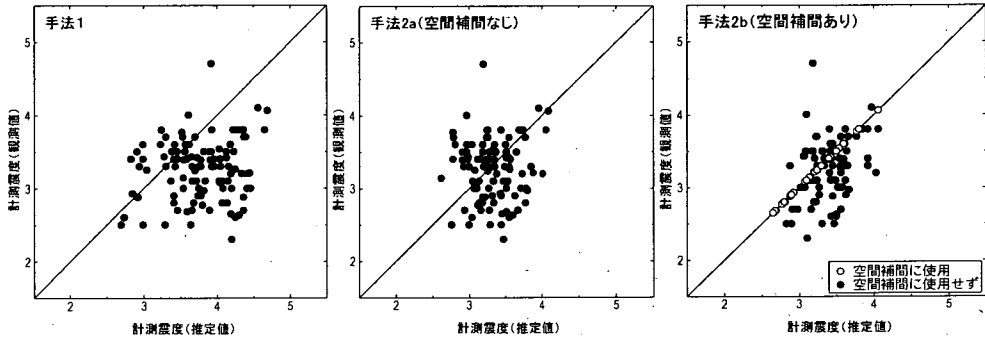


図-3 各手法による兵庫県内における計測震度の推定結果の比較（鳥取県西部地震）

ここで、 k は係数(= 1.75)、 t は各地盤区分ごとにあらかじめ定めた卓越周期(s)である。

(2) 距離減衰式と平均地点係数による推定と観測値を用いた空間補間

大西ら⁹⁾は、国土数値情報を用いて全国をほぼ一律の基準に従って地形地質分類し、各分類に対する平均地点係数により地震動の強度指標値を推定できること(以下「手法2」という。)を示している。なお、地点係数は Moras and Yamazaki¹⁰⁾の距離減衰式の補正項として導入された地点ごとの揺れやすさを表す係数で、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる。これを各分類ごとに平均したものが平均地点係数であり、ここでは、計測震度に関して「山地」に対する差を地盤増幅度 ARI とみなす。

手法2では、観測値が得られると地形地質分類ごとの地盤増幅度を差し引いて基盤面における計測震度 I_{BASE} を算出する。この分類は観測点が含まれるメッシュのものであり、必ずしも観測点そのものの分類を表しているわけではない。次に、地震ごとに観測値に基づいて、以下の関数形で表される基盤面における距離減衰

式を構築する。

$$I_{BASE} = c_1 - 1.89 \log(r + c_2) - c_3 \times r \quad (4)$$

ただし r は断層最短距離(km)であり、 c_1 、 c_2 、 c_3 は回帰により求める係数である。構築した距離減衰式から基盤面における計測震度の分布を求め、各メッシュごとの地盤増幅度 ARI を加えることで、式(5)に示すように地表面における計測震度 I の分布を推定することができる。

$$I = I_{BASE} + ARI \quad (5)$$

また、観測値が得られている場合は、それを用いた空間補間を行うことで推定精度が向上することが期待される。山崎ら¹⁰⁾は、平均値(トレンド成分)と共分散を既知とする Simple Kriging 法¹¹⁾を用い、基盤面における距離減衰式をトレンド成分、距離減衰式の値と基盤相当に変換した観測値の残差をランダム成分として空間補間を行う方法を提案している。この流れを図-2に示す。ここでは手法2に対してこの方法を適用し、必要に応じて「手法2a(空間補間なし)」「手法2b(空間補間あり)」として区別する。

空間補間を行うにあたり、共分散関数は距離に比例する指数関数型とした。つまり得られる空間分布は観測点では観測値と等しくなり、そこから離れるにしたがって手法2の推定値に近づくようになる。基盤面における計測震度 I_{BASE} に補間した残差 XI_e を加え、さらに地盤増幅度 ARI を加えることで、式(6)に示すように地表面の計測震度 I を推定することができる。

$$I = I_{BASE} + XI_e + ARI \quad (6)$$

手法1, 手法2の違いをまとめて表-2に示す。

(3) 推定精度の確認

図-3は、2000年10月30日に発生した鳥取県西部地震 ($M_{JMA} = 7.3$, 北緯 35.3 度, 東経 133.4 度, 深さ 11 km) について、それぞれの手法を用いた兵庫県内の強震観測点116地点における推定結果を観測値と比較したものである。なお、手法2では Yagi and Kikuchi¹⁸⁾による震源メカニズムをもとに震源断層を仮定し、観測値は記録の得られている K-NET 220 地点, KiK-net 109 地点のものを用いた。この地震に対して構築した距離減衰式の回帰係数は $c_1 = 7.527$, $c_2 = 5.0$, $c_3 = -0.00416$ となった。なお、係数 c_2 は震源近傍で地震動強度が飽和する影響を表すが、比較的小さな値となった。また、Kriging 法を用いた空間補間を行うにあたり、狭い範囲に複数の地震計があり、かつその値に大きな差があると補間が困難になる場合が生じる。そこで、半径 5 km 以内に複数の観測点が含まれている場合は、その中で計測震度が最大の地点のみを選択した。さらに、観測点の影響範囲を決める相関距離は、大西ら⁹⁾にならい 50 km とした。

手法1と手法2a(空間補間なし)を比較すると、手法1では推定値が大きな値をとるものが多いが、手法2aではバラツキが大きいものの均等に分布している。これは手法1の方が小さなメッシュと細かい地盤区分を用いているが、それでも地震計設置点とメッシュの地盤区分が等しくない場合があることと、手法1では距離減衰式がこの地震のために構築したのではないことによると思われる。また手法2b(空間補間あり)ではバラツキが小さくなっていることがわかる。なお補間に用いた点は○で示しているが、それらの点では観測値と推定値が等しいことがわかる。

3. 常時微動と地盤特性

(1) 常時微動測定

兵庫県内のフェニックス防災システム, K-NET, KiK-

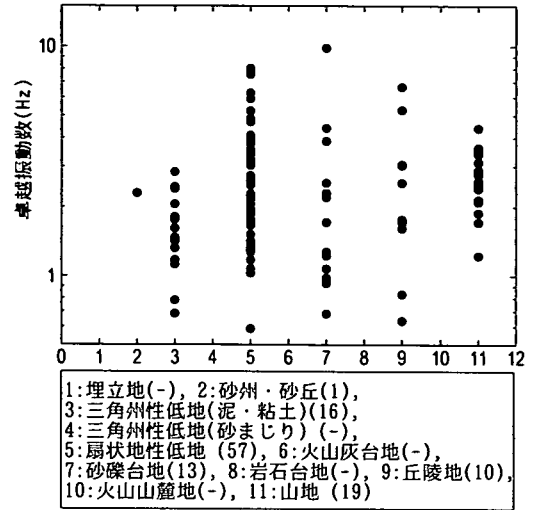


図-4 国土数値情報による地形地質分類ごとの常時微動のH/Vスペクトル比の卓越振動数

netの観測点合計116地点において常時微動測定を実施した。観測では水平方向2成分と上下方向1成分の合計3成分の速度波形を同時に計測した。センサは水平成分を南北方向と東西方向にあわせた。測定は100 Hz サンプリングで32768データ(約55分間)を連続して行った。得られた波形は16ビットのA/D変換を行って記録し、0.3 Hzから30 Hzのバンドパスフィルタをかけた後、2048データごとに分割した。この中から各成分とも比較的安定している4組の波形を選択し、これらの波形に対して高速フーリエ変換を行いHanning ウィンドウを20回(バンド幅は約0.4 Hz)かけて平滑化した。さらにそれぞれのH/Vスペクトル比を平均したものを最終的なH/Vスペクトル比とした。

(2) 常時微動H/Vスペクトル比と地形地質分類との比較

図-4は常時微動のH/Vスペクトル比から読みとった卓越振動数を各地形地質分類ごとにまとめたものである。図中には各分類に属す地震観測点の地点数を併せて示している。ただし、地震計が設置されていたのはこの中で6分類であった。この図から同一の分類でも卓越振動数のバラツキが大きく、同じ分類に属している地震計でも設置地盤の特性には大きな幅があることがわかる。またこの図の地形地質分類は右に行くほど揺れにくくなる順になっているものと考えられるので、一般的には揺れにくくなるに従い卓越振動数も右に行くほど高くなるものと考えられる。しかし常時微動の測定結果はバラツキが大きく、この傾向を読みとることが難しい。たとえば「砂州・砂丘」に分類されてい

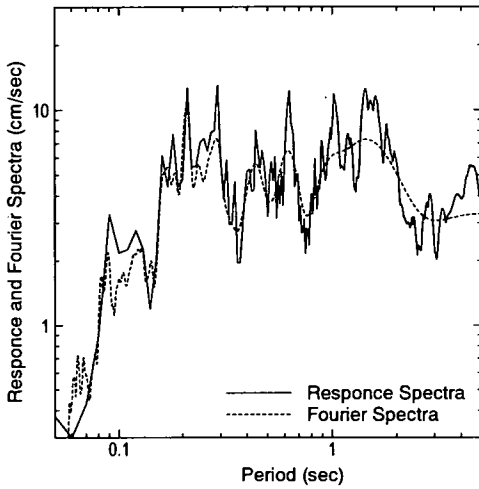


図5 速度応答スペクトルとフーリエスペクトルとの比較(鳥取県西部地震, K-NET神戸)

る地点が1箇所あり、全体的な傾向に対して比較的高い卓越振動数を示している。この地点は K-NET 浜坂観測点である。この地点の地盤は2mの埋土・盛土の下は岩盤であり、せん断波速度は深さ3mで270 m/s、深さ6mで690 m/sに達する。このため、この地点は地形地質分類から考えられるほど揺れやすくはなく、また高い卓越振動数を示すものと考えられる。

このように、地形地質分類はあくまでもそのメッシュを代表するものであり、地震計が設置されている地点とメッシュの分類が必ずしも等しいわけではない。これに対して微動の H/V スペクトル比を用いることで地盤のグルーピングやゾーニングに利用できる可能性がある。例えば松川・神山²⁾は常時微動の H/V スペクトル比の形状をカテゴリー分類し、地質や地盤の状況と比較的よい対応があること、H/V スペクトル比の卓越周期が地盤構造をよく反映していることを示している。また Rodriguez and Midonkawa²⁾は常時微動の H/V スペクトル比の形状をパターン認識に基づいて分類しており、卓越周期が0.5秒以下の場合には地震動の水平スペクトルを基盤スペクトルで除して得られる地盤特性とよく対応することを示している。

(3) 常時微動と強震動の H/V スペクトル比の比較

中村¹⁾は微動の H/V スペクトル比が地盤の震動特性を近似することを、地震観測記録と比較して示している。また強震動の H/V スペクトル比についても地震によらず安定しており、地盤構造を強く反映していると考えられている^{20)・29)}。例えば、加速度フーリエスペクトルと

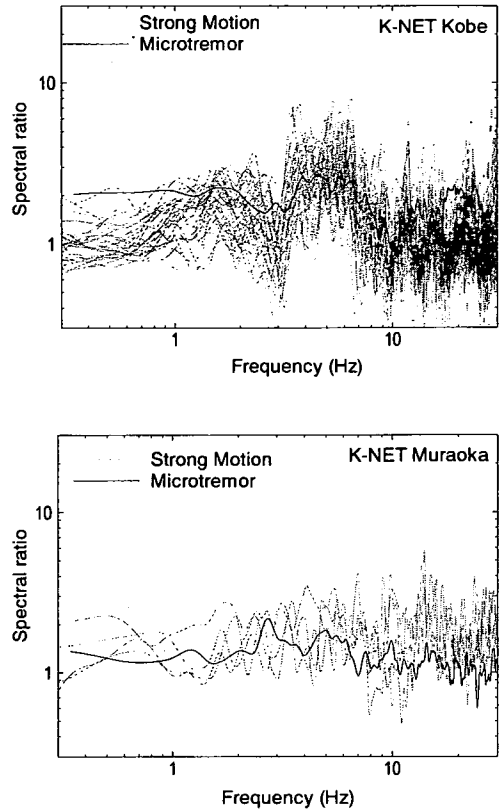


図6 複数の強震記録と常時微動のH/Vスペクトル比との比較(上: K-NET神戸, 下: K-NET村岡)

速度応答スペクトルが近似関係にあること²⁰⁾を利用して Yamazaki and Ansary²⁾は速度応答スペクトル距離減衰式の水平成分と上下成分の比を用いて地盤特性を評価できることを示している。このように常時微動と強震動の H/V スペクトル比はともに観測点の地盤特性を表しているため、その形状は類似しているものと考えられる。

このことを兵庫県内の K-NET, KiK-net で得られた強震記録により確認する。解析に用いたのはマグニチュード3.2から7.3までの164地震、1,131波形である。各成分ごとにP波到達前の5秒間のデータを用いて基線補正を行った後に、80秒間のデータについてフーリエスペクトルを算出した。平滑化には0.4 HzのParzenウィンドウを用いたが、Hanningウィンドウを繰り返して用いた場合はParzenウィンドウとほぼ等しいスペクトルウィンドウの形状が得られる²⁰⁾ため、微動と強震動はほぼ等しく平滑化されているものと考えられる。得られたスペクトルについては H/V スペクトル比を算出した。なお、木下ら²⁹⁾に従い、0.3~30 Hzを検討の対象とした。

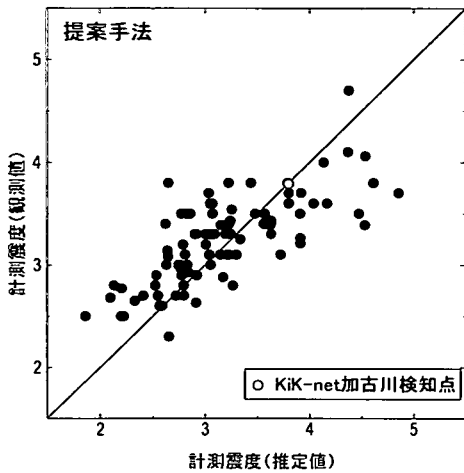


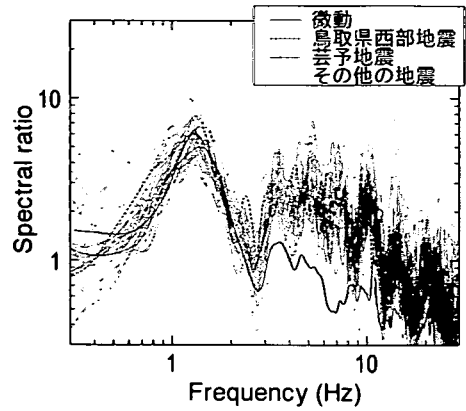
図-7 提案手法を用いた兵庫県内における鳥取県西部地震の計測震度の推定結果

K-NET 神戸観測点における鳥取県西部地震の速度応答スペクトル(非減衰)と加速度フーリエスペクトルを比較したところ、図-5に示すように両者の形状が類似していることが確認できる。また図-6は強震記録と常時微動のH/Vスペクトル比の形状を比較したものである。この図では観測地震波形数が最も多いK-NET神戸観測点と最も少ないK-NET村岡観測点のNS方向成分を例として示したが、ともに地震動と常時微動のH/Vスペクトル比の形状が類似していることが確認できる。なおEW方向成分についても概ね類似した傾向が得られており、さらに他の観測点においてもほぼ同様の結果を得た。以上により、兵庫県内においても常時微動記録は地盤特性を表していることが確認できた。

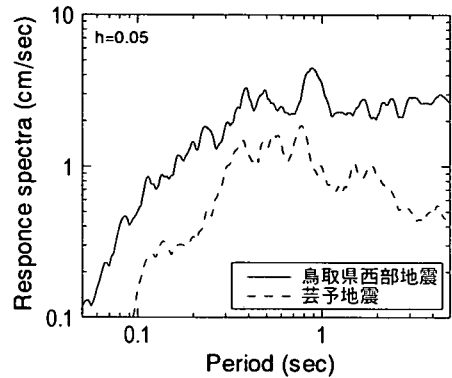
4. 常時微動を用いた計測震度の推定

常時微動を用いて地震動を推定する方法はいくつか提案されている(例えば29)~31)。大熊ら³¹⁾は速度応答スペクトルの距離減衰式と常時微動のH/Vスペクトル比の比を利用して地震動を推定する手法について検討を行い、基準点(A地点)の速度応答スペクトル $Sv_A(T)$ と微動記録により、微動を測定した他の点(B地点)における速度応答スペクトル $Sv_B(T)$ を式(7)により推定できることを示している。

$$\begin{aligned} \log Sv_B(T) &= \log Sv_A(T) + b_2^H(T)(r_B - r_A) \\ &- \log \frac{r_B}{r_A} + \log A^V(T) + \log R_{B/A}^{H/V}(T) \end{aligned} \quad (7)$$



(a) 微動と地震動のH/Vスペクトル



(b) 速度応答スペクトル

図-8 KiK-net加古川観測点の地震動特性

ただし、 r_A および r_B はそれぞれ A 地点および B 地点の震源断層までの最短距離(km)、 A^V は A 地点に対する B 地点の上下動の増幅度スペクトル、 $R_{B/A}^{H/V}$ は A 地点に対する B 地点の微動 H/V スペクトル比の比である。また、 b_2^H は Shabestari and Yamazaki¹²⁾で求められた断層面の最短距離に対する帰係数(周期の関数)であり、検討に用いた帯域ではほぼ -0.0015 で一定であった。なお、疑似加速度応答スペクトル Sa は円振動数 ω を用いて ωSv と近似することができるため、式(7)の $Sv_A(T)$ と $Sv_B(T)$ をそれぞれ $Sa_A(T)$ と $Sa_B(T)$ に置き換えることができる。すなわち、式(7)により $Sa_A(T)$ が既知であれば $Sa_B(T)$ を推定することもできる。また、Midorikawa and Kobayashi²⁰⁾は、5%減衰の速度および加速度応答スペクトル $Sv(T)_{h=0.05}$ 、 $Sa(T)_{h=0.05}$ からスペクトル強度 SI と修正スペクトル強度 MSI を求め、これから最大速度

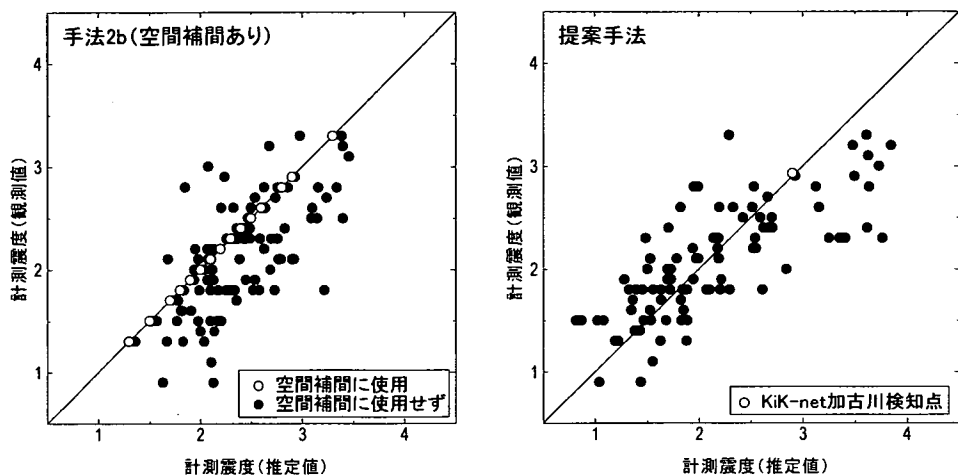


図-9 芸予地震に対する推定結果の比較

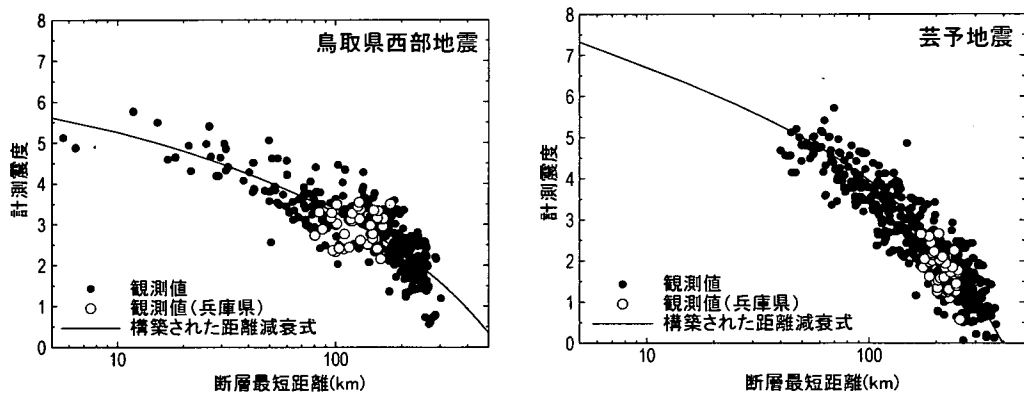


図-10 構築した距離減衰式と基盤面における換算観測値との比較

V_{\max} と最大加速度 A_{\max} を推定できることを示している。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} Sv(T)_{h=0.05} dT \quad (8)$$

$$MSI = \int_{0.1}^{0.5} Sa(T)_{h=0.05} dT \quad (9)$$

$$V_{\max} = 0.3 \times SI \quad (10)$$

$$A_{\max} = 1.2 \times MSI \quad (11)$$

なお、片山ら²⁹⁾が提案している SI は $h=0.2$ に対してのもので、平均化するために 2.4 秒で除しており、式(8)の定義とは異なっている。

さらに、計測震度と地震動指標の関係についても種々検討されてきている^{29)~30)}。この中で翠川ら³⁰⁾は最大速度 V_{\max} と最大加速度 A_{\max} の積と計測震度 I には高い

相関があり、式(12)で表されることを示している。

$$I = \log(V_{\max} \times A_{\max}) + 1.38 \quad (12)$$

以上の関係から、基準点の強震記録と微動記録を用いて、式(7)から式(12)に従って他の微動記録の存在する地点の計測震度を推定する（以下「提案手法」という。）ことができる。

提案手法を用いて鳥取県西部地震の計測震度を推定し、兵庫県内の観測値と比較した結果を図-7に示す。提案手法はいくつかの近似をしているものの、大きな計測震度の範囲まで比較的精度よく推定できていることがわかる。なお式(7)で A^V は 1 と仮定しているが、このことはバラツキがみられる要因のひとつと考えられる。

なお、今回の検討では基準点として KiK-net 加古川観測点を選択した。この観測点の地盤は盛土・埋土の下が花崗岩の層となっている。図-8 に、KiK-net 加古川観測点において観測した常時微動と記録された地震動の HV スペクトル比を比較したものと、鳥取県西部地震と芸予地震の際に得られた地震動の速度応答スペクトル (5%減衰) を示す。この図からも地震動と常時微動の HV スペクトル比の形状が類似していることが確認できる。

各手法の残差の分散により確認した推定誤差も表-2 に示している。提案方法では距離減衰式を構築せずに基準点の観測記録のみを用いているが、多くの観測記録を用いた場合と同程度の精度が得られていることがわかる。

他の地震の場合も確認するために、2001年3月24日に発生した芸予地震 ($M_{JMA} = 6.4$ 、北緯 34.1 度、東経 132.7 度、深さ 60 km) についても各手法を用いて計測震度の推定を行った。なお、提案手法では鳥取県西部地震と同様に KiK-net 加古川観測点を基準点とした。図-9 は手法2b (空間補間あり) と提案手法の推定値をそれぞれ観測値と比較したものである。また、表-2には芸予地震の場合の推定誤差も示している。これらから、芸予地震の場合にも提案手法を用いることで多くの観測値により推定したものとほぼ同等の精度が得られていることがわかる。なお、手法2a (空間補間なし) では全体的に計測震度が大きく推定される傾向がみられ、手法1と同程度かそれ以下の精度しか有していない。図-10に構築された距離減衰式と基盤相当の観測値の関係を示しているが、芸予地震の場合は県内の観測値が相対的に小さな値となっているものが多く、このため推定値は逆に大きな値となっている。KiK-net の観測値による地中の震度分布⁹⁾は南北方向が東西方向に比べて相対的に大きく、震源に対して東方向に位置する兵庫県では観測値が相対的に小さくなったものと思われる。これに対して、提案手法では県内の観測点を基準点としてることからこの影響をそれほど受けておらず、鳥取県西部地震の場合と同程度の推定精度が得られている。

以上により、基準点のみの強震記録を必要とする提案手法は、多くの観測値を用いる推定手法と同程度の精度を安定して得られることが確認できた。また地形地質分類はあくまでもメッシュの代表値であるが、提案手法を用いることで観測点の計測震度を直接推定できる。なお、提案手法のバラツキは上下動の増幅 A^V を無視していることも一因と考えられるため、的確に A^V を把握することでより精度が向上するものと思われる。また、図-7と図-9の提案手法の推定値は、ともに計測震度が大きくなるにつれて観測値から乖離していく傾向

が見られるが、この要因について今後検討する必要がある。なお、ここでは1地点のみの強震記録を基準点としているが、丸山ら³⁾のように基盤面での入射地震動が共通と考えられるような近傍の観測点があれば、それを用いてより高精度な推定が期待される。

5. 結論

地震後の緊急対応や初動体制確立において、地震動の強度指標値の空間分布は極めて重要な情報である。しかし広範囲にわたり高密度の観測をすることや必要な箇所すべてに地震計を設置することは困難であるため、地盤特性を反映した推定を行う必要がある。本研究では計測震度の推定方法について、フェニックス防災システムを整備している兵庫県を対象として検討を行った。

まず、フェニックス防災システムで用いられている推定方法 (手法 1) と、平均地点係数のみを用いて空間補間を行わない推定方法 (手法 2a) を比較したところ、鳥取県西部地震の場合は手法 2a の方が高い推定精度を得ることができたのに対して、芸予地震の場合は逆に手法 1 の方が推定精度が高かった。これは、手法 1 では同一の距離減衰式を用いているため地震によって推定精度が異なっていることと、手法 2a では地震に固有の距離減衰式を構築しているが、芸予地震の場合には兵庫県の観測値が相対的に小さく、推定値が大きな値をとる地点が多くなったことが影響している。なお観測値を用いて空間補間を行った手法 2b ではいずれの地震の場合でも精度よく計測震度を推定できることを確認した。

また兵庫県内 116 箇所の強震観測点において常時微動測定を行った。常時微動の HV スペクトル比が地盤特性を表していることを確認したうえで、常時微動の HV スペクトル比を用いた計測震度の推定についての検討を行った。この結果、必要な箇所において常時微動観測をあらかじめ行っておけば、基準点の強震記録と常時微動記録を用いて応答スペクトルを推定し、これから SI と MSI を介して計測震度を推定できること (提案手法) を示した。提案手法を鳥取県西部地震と芸予地震に適用したところ、距離減衰式を構築せずに基準点のみの強震記録を用いているにも関わらず、多くの強震記録を用いるのと同程度の精度で計測震度が得られることを確認した。この提案手法は基準点の強震記録と必要な箇所の常時微動記録により精度よく計測震度を推定することができるため、高密度に計測震度を把握する必要がある場合などに有用な手法であると考え

られる。

謝辞：兵庫県企画管理部主査春名常洋氏（元地震防災フロンティア研究センター）には、フェニックス防災システムの詳細および観測記録についてご教示いただくとともに、強震計設置点における常時微動測定についてもご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災のための地震動モニタリング，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp.5-12, 1999.
- 2) 兵庫県ホームページ：<http://web.pref.hyogo.jp/>
- 3) 国土庁計画調整局，国土地理院：国土数値情報(改訂版)，国土情報シリーズ8，大蔵省印刷局，1992.
- 4) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，pp.51-56, 1993.
- 5) 福和伸夫，荒川政知，西阪理永：国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定，構造工学論文集，Vol.44B，pp.77-84, 1998.
- 6) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁記録の距離減衰式に基づく地盤増幅特性と地形分類との関係，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.79-91, 1999.
- 7) Joyner, W. and Boore, D.M.: Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records including Records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake, *BSSA*, Vol. 71, pp.2011-2038, 1981.
- 8) 中村豊，富田健司：最大加速度の推定式，第39回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-393，pp.785-786, 1984.
- 9) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, pp.757-783, 1990.
- 10) Moras, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep Focus Events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, pp.1343-1358, 1995.
- 11) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.63-70, 1999.
- 12) Shabestari, K.T. and Yamazaki, F.: Attenuation Relation of Response Spectra in Japan Considering Site-specific Term, *12th world Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, 2000.
- 13) 兵庫県：兵庫県地震被害想定調査報告書，1999.
- 14) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，pp.18-27, 1988.
- 15) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Shimizu Tech. Res. Bull.*, No. 10, pp.1-11, 1991.
- 16) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.3, pp.3491-3496, 1998.
- 17) 野田茂，星谷勝：条件付き確率場の補間法に関する一提案，鳥取大学工学部研究報告，Vol.28，pp.175-197, 1997.
- 18) Yagi, Y. and Kikuchi, M.: Source Rupture Process of the Tottori-ken Seibu earthquake of Oct. 6, <http://www.weic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottri/>
- 19) 松川忠司，神山眞：仙台市圏の常時微動特性とそのゾーニング，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.305-308, 2001.
- 20) Rodriguez, V.H.S. and Midorikawa, S.: Applicability of the H/V Spectral Ratio of Microtremors in Assessing Site Effects on Seismic Motion, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 2, pp.261-279, 2002.
- 21) 中村豊，上野眞：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み，第7回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.265-270, 1986.
- 22) Lermo, J. and Chavez-Garcia, F.J.: Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, pp.1574-1594, 1993.
- 23) Yamazaki, F. and Ansary, M.A.: Horizontal-to-Vertical Spectrum Ratio of Earthquake Ground Motion for Site Characterization, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp.671-689, 1997.
- 24) 趙伯明，堀家正則，竹内吉弘，川瀬博：微動と地震動から推定された地盤特性の比較，地震 第2輯，Vol. 50, No. 1, pp.67-87, 1997.
- 25) 堀家正則，趙伯明，竹内吉弘：微動から推定された地盤特性の信頼性の観測的検討，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.989-994, 1998.
- 26) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 27) 木下繁夫，上原正義，斗沢敏雄，和田安司，小久江洋輔：K-NET95型強震計の記録特性，地震 第2輯，第49巻，pp.467-481, 1997.
- 28) 若松邦夫，安井諺：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.471，pp.61-70, 1995.
- 29) 松田裕，年縄巧，翠川三郎，阿部進：アンケート調査および微動観測による横浜市鶴見区での細密震度分布の推定，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.101-108, 2001.
- 30) 丸山喜久，山崎文雄，本村均，浜田達也：常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案，土木学会論

- 文集, No.675/1-55, pp.261-272, 2001.
- 31) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典: 宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696/1-58, pp.261-272, 2002.
- 32) Midonikawa, S. and Kobayashi, H.: On Estimation of Strong Earthquake Motions with Regard to Fault Rupture, *Proc. of the Second International Conference on Microzonation*, Vol. 2, pp. 825-836, 1978.
- 33) Katayama, T., Saito, N. and Saito, K.: SI-sensor for the Identification of Destructive Earthquake Ground Motion, *Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 7, pp. 667-672, 1988.
- 34) 村松郁栄: 気象庁の計測震度について, JSEEP NEWS, No.150, pp.27-35, 1996.
- 35) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, Vol.48, No.11, pp.547-550, 1996.
- 36) 中村豊: 新しい地震動モニタのための地震被害指標DI値とP波警報指標PI値の提案, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1117-1120, 1999.
- 37) 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.
- 38) Karim, K.R. and Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 1191-1212, 2002.
- 39) 小山香織, 佐藤健, 渋谷純一: 地震動強さ指標と計測震度の関係に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.47-48, 2001.
- 40) 防災科学技術研究所: K-NET, KIK-netによる最大加速度分布, http://www.bosai.go.jp/center/aki_nada/strong.html

(2002. 4. 1 受付)

ESTIMATION OF DISTRIBUTION OF JMA SEISMIC INTENSITY BASED ON MICROTREMOR AND STRONG MOTION RECORDS AT SEISMIC STATIONS IN HYOGO PREFECTURE

Jun SAITA, Masashi MATSUOKA, Khosrow T. SHABESTARI and
Fumio YAMAZAKI

Strong motion indices such as the instrumental JMA seismic intensity provide important information in earthquake emergency management. Because observed seismic motion is strongly affected by site response characteristics, some estimation procedures are necessary to obtain spatial distributions of these indices. Microtremor observations were conducted at 116 seismic stations in Hyogo prefecture. After confirming that the horizontal-to-vertical (H/V) Fourier spectral ratio of microtremor can express the site response characteristics, a method to estimate the JMA seismic intensity was proposed using the ratio of H/V spectral ratios of microtremor and a strong motion record of the reference station, and its accuracy was compared with other existing methods.