

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

大熊 裕輝¹・松岡 昌志²・山崎 文雄³・原田 隆典⁴

¹ 修士(理学) (株)三菱総合研究所 (〒100-8141 東京都千代田区大手町 2-3-6)
(元 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市福井三木山 2465-1))

² 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 (同 上)

³ 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)

⁴ 正会員 工博 宮崎大学工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

宮崎県では 52 カ所の強震観測点を利用した地震計ネットワークが整備されており、地震発生後早期に震度や加速度の値を取得できる。しかし、地震計は各市町村に 1,2 ヶ所に設置されているにすぎず、県内全域の地震動分布を詳細に把握するためには、地震計が設置されていない地点での地震動を推定する手法の構築が必要である。本研究では、簡易に地盤の震動特性を把握することができる常時微動に着目し、常時微動 H/V スペクトル比を用いて 1 地点の地震記録から他点の地震動を推定する手法について、その利用可能性について水平動と上下動の増幅度などの実観測データとの比較から検討した。

Key Words: *microtremor, earthquake ground motion, H/V spectral ratio, velocity response spectrum, station coefficient, Miyazaki Prefecture*

1. はじめに

兵庫県南部地震をきっかけとして、日本全国の市町村に少なくとも 1 つは地震計(震度計)が置かれるようになり、震度情報は従前に比べて格段に高密度になった¹⁾。東京ガス²⁾などの都市ガス事業者、国土交通省³⁾や日本道路公団⁴⁾などの道路管理者も密度の高い独自の地震計ネットワークを展開しており、これらからの地震情報を用いて、都市ガスの供給停止や高速道路の通行止めなど地震時緊急措置に利用する仕組みを構築している。このように観測記録を効果的に利用する試みがある一方で、自治体や国の防災担当機関にとっては、たとえば震度 4 以下の記録にはほとんど関心が持たれず、得られた記録も保存されずに、いつの間にか消去されてしまう事例もあるなど、必ずしも観測記録が有意義に使われているとはいえない。

地震計の観測値はあくまでも設置地点における地盤の揺れをあらわしているに過ぎず、その周辺での

揺れとかなり異なる場合もある。横浜市の 150 カ所に設置されている高密度地震計ネットワーク^{5),6)}の観測でも地盤の違いにより、揺れの大きいところと小さいところで、計測震度で 2 程度の差が観測される。少し離れた地点であっても地震動強さが大きく異なることは、様々な地震計ネットワークによる観測事実として報告されている⁷⁾⁻¹⁰⁾。したがって、的確な震度分布の推定のためには地盤の揺れやすさ(増幅度)を適切に考慮する必要がある。増幅度の算出にはボーリングデータに基づく地震応答解析が一般的であるが、応答解析に必要な弾性波速度までを調査している地盤調査データは数少ない。一方、地震動の広域把握の観点から、地盤の増幅度と国土数値情報の地形・表層地質などを比較した研究がある¹¹⁾⁻¹³⁾。しかし、地形・表層地質の分類が同じでも揺れの大きさに大きな差があるという横浜市における観測結果も報告されている⁷⁾。

大地震が来る前に地盤のそのような揺れやすさの特性を密に把握することが重要であるが、そのため

表-1 解析に用いた地震記録

	観測点数	地震数	記録数
K-NET	20地点	68	467
FDMA	32地点	4	81

には全国に設置された K-NET 地震計¹⁴⁾や、自治体に置かれた震度計などで観測された日頃の中小地震記録を丁寧に分析することが重要である。このような観点から、本研究では宮崎県を一例として、地震計ネットワークで得られた地震記録の解析を行う。同県では 52 カ所の強震観測点からなる地震計ネットワークを整備しており、地震発生後数分で県内の震度および最大加速度の値を把握することができる。また、電話回線を通して波形記録を回収することが可能である。したがって、詳細な地震動分布の推定に観測記録を反映させることができれば、早期により確かな被害分布の推定が可能になると考えられる。

そこで本研究では、地盤震動特性の比較的手軽な評価法として常時微動に着目し、宮崎県内の全ての地震観測地点で微動観測を行い、この結果と地震動記録との対比を行うことにより、地盤による揺れやすさの違いを検討する。また、常時微動の水平／上下 (H/V) スペクトル比¹⁵⁾を用いて、地震観測点以外の地点の増幅度や地震動を推定する方法について検討を行う。

2. 地震動に基づく地盤特性

(1) 地震動記録

宮崎県では、52 カ所の強震観測点からなる地震計ネットワークが整備されている (図-1)。このうち 20 カ所は K-NET の地震計を利用しており (図-1 の▲), 32 カ所は消防庁 (FDMA) の補助事業による市町村の震度計を利用している (図-1 の◇, 以下 FDMA と略す)。この地震計ネットワークで記録される地震波形の例を図-2 に示す。K-NET の記録は、約 0.05 秒以上の周期で振幅特性がおおむね平坦であり、サンプリング周波数が 100Hz、記録の長さが 60~120 秒である。本研究では、これらの観測点で 1996~1999 年に記録された 68 地震 467 記録 (3 成分) を利用した (表-1)。また、FDMA の記録は、サンプリング周波数が 100Hz、記録の長さが 60 秒であり、本研究ではこれらの観測点で 1998~1999 年に記録さ

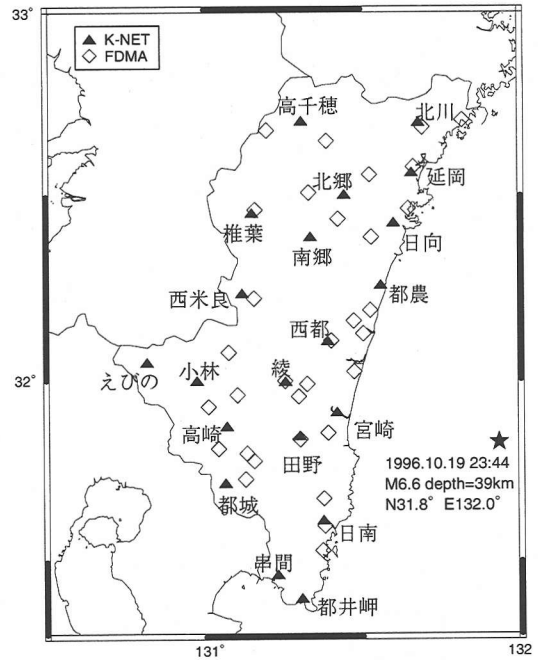


図-1 宮崎県内の強震観測点の分布

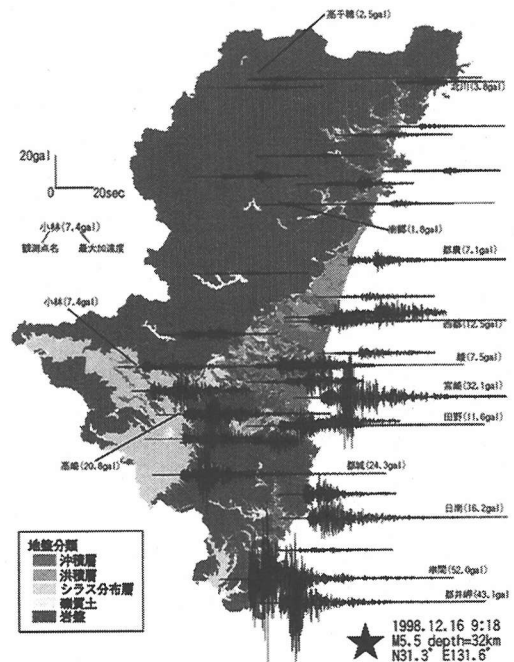


図-2 宮崎県の地震計ネットワークで記録された地震波形の例 (1998 年 12 月 16 日, M5.5)

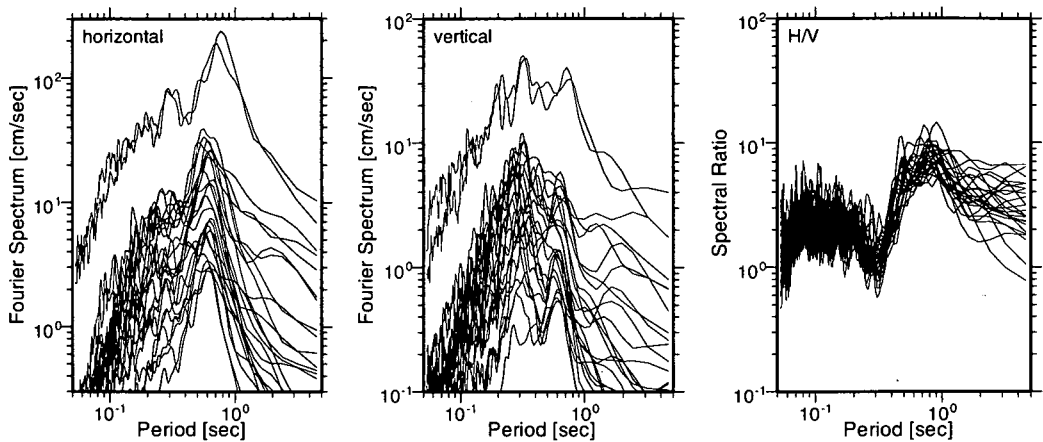


図-3 宮崎 (K-NET) における地震動の水平動, 上下動フーリエ・スペクトルおよび H/V スペクトル比

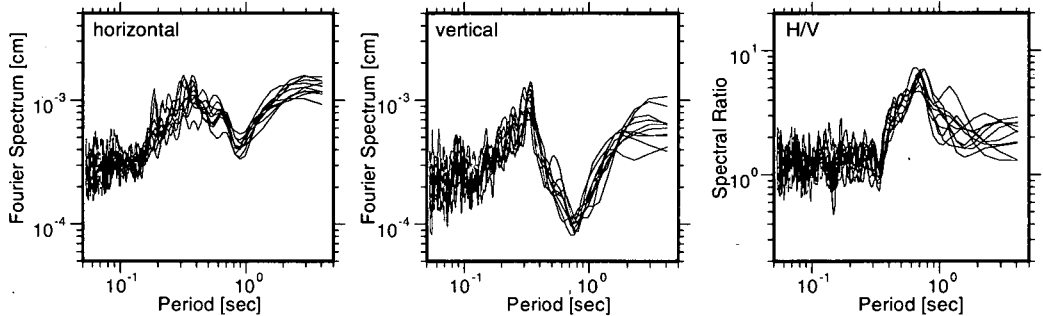


図-4 宮崎 (K-NET) における常時微動の水平動, 上下動フーリエ・スペクトルおよび H/V スペクトル比

れた4地震81記録(3成分)を利用した(表-1)。これらの4地震はK-NETでも記録されている。

(2) 地震動 H/V スペクトル比

県内52カ所の強震観測点に対し、地震記録を利用して地震計が設置されている地盤の震動特性を評価することを試みる。まず、地震記録(加速度記録)から地震動の主要動部分が含まれるように20秒間のデータを選び出してフーリエ・スペクトルを計算し、平滑化のために0.4HzのParzen Windowを施す。次に、水平動と上下動のフーリエ・スペクトルの比を計算し、地震動 H/V スペクトル比を導出する。ここで、水平動フーリエ・スペクトルはNS成分とEW成分の二乗和の平方根とした。

例として、宮崎(K-NET)における解析結果を図-3に示す。宮崎は宮崎市役所の駐車場内に地震計が

設置されている。そばを大淀川が流れ、厚い表層地盤に覆われており、深さ約30mでS波速度 $V_s=600\text{m/s}$ に達し、約530mで $V_s=1000\text{m/s}$ に達する非常に軟らかい地盤上に設置された観測点である。図-3から、地震動の水平動および上下動フーリエ・スペクトルは地盤の非線形性や地震規模によって励起される地震波の周期帯域が異なるなどの影響により、形状や振幅が異なる。しかし、水平動と上下動のフーリエ・スペクトルの比(H/Vスペクトル比)を計算すると振幅、形状とも地震によらず安定することがわかる。したがって、水平動あるいは上下動フーリエ・スペクトルよりもH/Vスペクトル比の周期特性の方が震源の影響が少なく、地盤構造をより強く反映していると考えられる。これらの特徴は他の観測点においても認められ、既往の研究とも調和的である¹⁶⁾⁻²⁰⁾。Yamazaki and Ansary¹⁸⁾は、H/Vスペ

クトル比の振幅形状が安定する理由を、加速度フーリエ・スペクトルと近似関係にある速度応答スペクトルの距離減衰式より説明を試みている。

また、H/V スペクトル比の振幅形状は観測点ごとに特徴が異なる。たとえば、硬い地盤上の観測点では地震動 H/V スペクトル比にはピークがみられず、ほぼ一定の振幅を示す。一方、軟らかい堆積層で覆われている地盤上では地震動 H/V スペクトル比にピークがみられる。このピーク周期は表層地盤の厚さに対応していると考えられる。宮崎は軟らかい地盤上の観測点であり、0.8 秒付近にピーク周期がみられる。表層地盤の 1/4 波長則から推測すると、深さ約 30m に現れる $V_s=600\text{m/s}$ の工学的基盤よりも浅い地層が表層地盤であると考えられる。

3. 常時微動に基づく地盤特性

(1) 常時微動記録

1999 年 4 月から同 7 月にかけて宮崎県内 52 カ所の強震観測点の近傍で常時微動測定を行った。測定は日中に行い、測定点のごく近傍を通る自動車や人の歩行等による影響をなるべく避けるようにして、41 秒間の 3 成分 (NS, EW, UD) のデータを 8 ないし 10 セット記録した。サンプリング周波数は 100Hz、分解能 16 ビットで AD 変換し、記録した。測定には周期 2 秒程度まで平坦な振幅特性を持つ速度計を用いた。

(2) 常時微動 H/V スペクトル比

各観測点に対して、常時微動記録の中から振幅が比較的安定している 20 秒間のデータを 10 区間選出出してフーリエ・スペクトルを求め、0.4Hz の Parzen Window を施した。さらに、水平動と上下動のフーリエ・スペクトルの比を計算することにより、常時微動 H/V スペクトル比を導出した。ここで、水平動については NS 成分と EW 成分の二乗和の平方根とした。

例として、宮崎 (K-NET) における解析結果を示す (図-4)。水平動フーリエ・スペクトルおよび上下動フーリエ・スペクトルはともに周期 0.3 秒付近にピークがみられるが、H/V スペクトル比を計算すると 0.8 秒付近にピークがみられるようになる。これは、水平動および上下動のフーリエ・スペクトルは微動の振動源による影響が強く現れるが、H/V スペクトル比はこの影響が除去されるからである。この

ように水平動あるいは上下動フーリエ・スペクトルのピークと H/V スペクトル比のピークが異なる場合は他の観測点でもみられる。したがって、中村¹⁵⁾が指摘するように常時微動の H/V スペクトル比は地点に固有の地盤震動特性を的確に表現していると考えられる。

4. H/V スペクトル比の特徴

(1) 地震動と常時微動の H/V スペクトル比の比較

2 および 3 章より、地震動 H/V スペクトル比および常時微動 H/V スペクトル比はともに地点に固有の地盤の震動特性を反映していることを再確認した。そこで、52 カ所の観測点に対してそれぞれ地震動 H/V スペクトル比と常時微動 H/V スペクトル比の比較を行う。図-5 に K-NET の観測点 20 点に対する比較の結果を示す。太線は地震動 H/V スペクトル比、細線は常時微動 H/V スペクトル比を表す。ここで、H/V スペクトル比は各観測点における複数の記録に対する相加平均を表している。観測点ごとに地震動 H/V スペクトル比と常時微動 H/V スペクトル比を比較すると、両者の周期特性はおおよそ一致し、値に関してはほぼ同じか常時微動 H/V スペクトル比の方がやや小さな値を示す。この特徴は堀家ら^{19), 20)}の報告と調和的である。たとえば、高千穂、北川、延岡、日向、宮崎、串間は両者の周期特性はよく一致しており、値もほぼ同じである。西都や田野は、ピーク周期はほぼ一致しているが、値は異なっている。

常時微動 H/V スペクトル比と地震動 H/V スペクトル比がほぼ等しくなるためには、両者が同じような種類の波動から構成されている場合か、もしくは波の種類が異なっても H/V スペクトル比が等しくなる場合かのいずれかが考えられる。地震動の主要動は実体波が主体であることから、前者は常時微動が主として実体波からなるとみなす立場であり¹⁵⁾、後者は微動に表面波 (レイリー波) が卓越するという立場である^{21), 22)}。仮に常時微動が主として実体波であれば、常時微動と地震動の H/V スペクトル比の振幅形状がよく似てくることは理解できる。表面波という立場であればレイリー波基本モードの楕円軌道の上下振幅比を考えればいいが、表層と基盤のせん断波速度のコントラストが大きいと、レイリー波の H/V 振幅比と実体波 (S 波) の卓越周期はほぼ等しくなる²²⁾。たとえば、宮崎のように沖積層が堆積しているような地盤構成はコントラストが大きい地盤

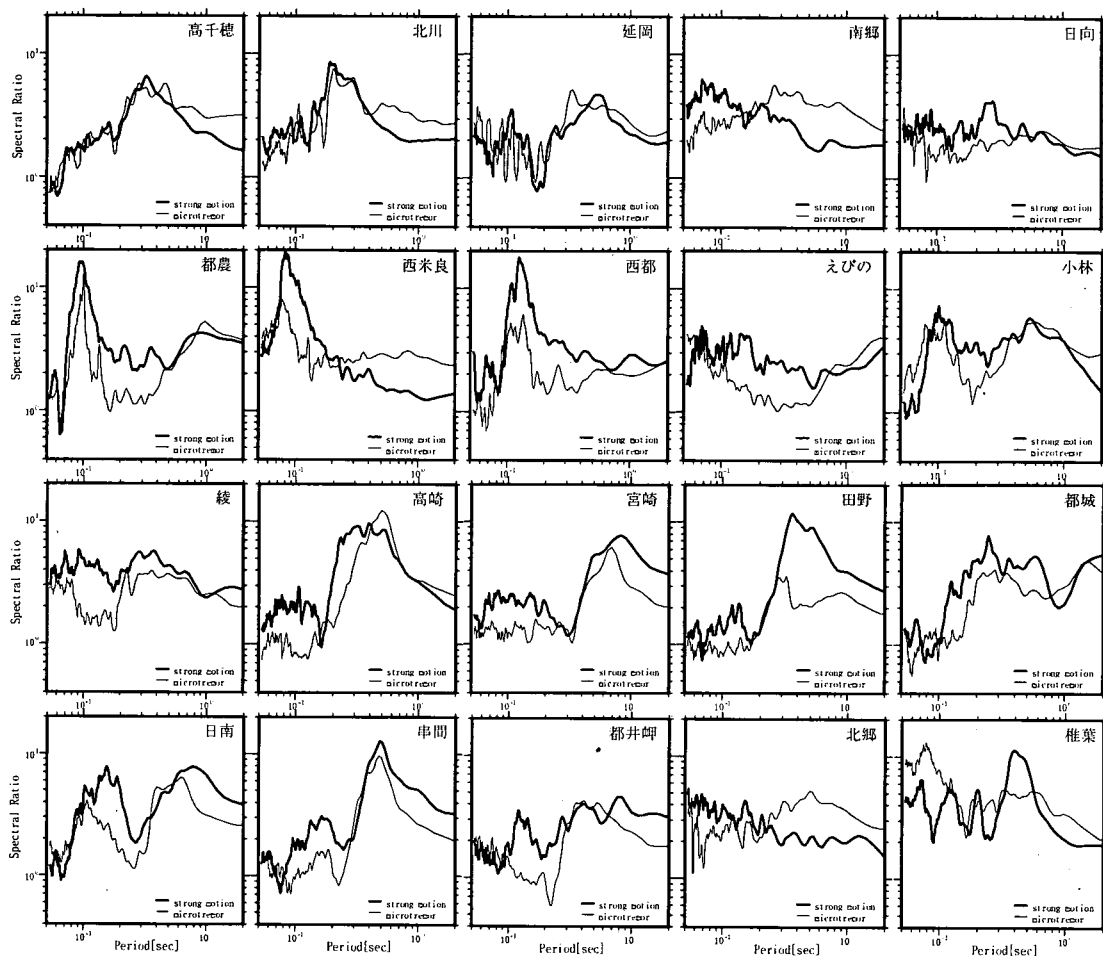


図-5 宮崎県の K-NET 観測地点における地震動と常時微動の H/V スペクトル比の比較 (太線：地震動 H/V スペクトル比, 細線：常時微動 H/V スペクトル比)

なので、常時微動を実体波と解釈しても表面波と解釈しても H/V 比のピーク周期は近似してくる²³⁾。一方、コントラストが小さくなると H/V スペクトル比のピーク周期は異なってくる²²⁾。

観測点ごとに地震動 H/V スペクトル比と常時微動 H/V スペクトル比の卓越周期を比較すると図-6 のようになる。ここで、●は K-NET, ○は FDMA の観測点に対する H/V スペクトル比のピーク位置での周期を示す。岩盤上の観測点では H/V スペクトル比の値はほぼ平坦になり、ピーク周期が存在しないため省略してある。図をみると、データは傾きが 1 の直線上にはほぼ分布している。したがって、ここで用いた微動計の性能の範囲内 (周期 2 秒以下の短周期) では、常時微動を計測することにより地震時におけ

る地盤の震動の周期特性を把握することが可能であると考えられる。常時微動を構成する波の種別に対する議論は残っているが、常時微動 (短周期微動) は振動源が地表にあるため²⁴⁾、表層地盤の影響が大きいと考えられる。また、地震動 H/V スペクトル比のピーク周期は表層地盤のせん断震動についての 1 次固有周期にはほぼ対応していると考えられる¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。以上から、ここで対象とした周期帯域では常時微動 H/V スペクトル比の周期特性は表層地盤の震動特性を表しており、常時微動測定を行うことによって地盤の 1 次固有周期を把握することが可能であると考えられる。この特徴を利用して、地震計が設置されていない地点や地盤構造が明らかになっていない地点で常時微動測定を行い、H/V スペクトル比を計算

すれば、表層地盤の震動特性を把握することができると考えられる。

(2) 常時微動 H/V スペクトル比と地震動距離減衰式の地点係数の比較

地表における地震動を推定するとき、表層地盤による増幅の影響は大きい。地盤構造が明らかになっている地点では伝達関数を計算すれば表層地盤の増幅度を求めることが可能である。しかし、実際には地盤構造が明らかになっている地点は数少ない。そこで、地盤情報に頼らず簡易に増幅度を推定する手法が求められる。

増幅度を表す指標の1つとして、距離減衰式における観測地点ごとの補正項（地点係数）が考えられる^{25)~27)}。Shabestari and Yamazaki²⁷⁾は、K-NETの観測記録に基づく速度応答スペクトルの距離減衰式を構築する際に、地盤の増幅特性を表す指標として地点係数スペクトルを導入し、全国823カ所の強震観測点に対してこれを求めている。地点係数スペクトルは、周期ごとに全国のその平均が0になるように回帰分析から求められた係数であり、全国の平均的な揺れを示す仮想地点に対する相対的な増幅度を意味する指標である。また、マグニチュードや断層までの距離、震源の深さとは独立で、地点に固有な値であり、山内ら²⁸⁾はこの地点係数を1kmメッシュ単位で推定する手法に拡張している。

上述までの検討によって、地震動 H/V スペクトル比もまた地震のマグニチュードや震源断層までの距離によらず地点ごとに安定し、地盤の震動特性を表していることを確認し、さらに、地震動 H/V スペクトル比は常時微動 H/V スペクトル比と似た振幅形状を示すことも確認した。したがって、本研究では K-NET の観測点に対して常時微動 H/V スペクトル比と地点係数スペクトルを比較し、表層地盤の増幅度について検討を行うこととする。ここで、地点係数は相対的な増幅度を表す指標であるため、2地点間で比較する必要がある。ここでは、A 地点に対する B 地点の相対的な増幅度について、速度応答スペクトルの距離減衰特性を用いて検討を進める。

A 地点における水平動および上下動の速度応答スペクトルをそれぞれ $S_{v_A}^H$ 、 $S_{v_A}^V$ とすると、Yamazaki and Ansary¹⁸⁾より、以下の式が得られる。

$$\log S_{v_A}^H = b_0^H + b_1^H M + b_2^H r_A - \log r_A + b_4^H h + c_A^H \quad (1)$$

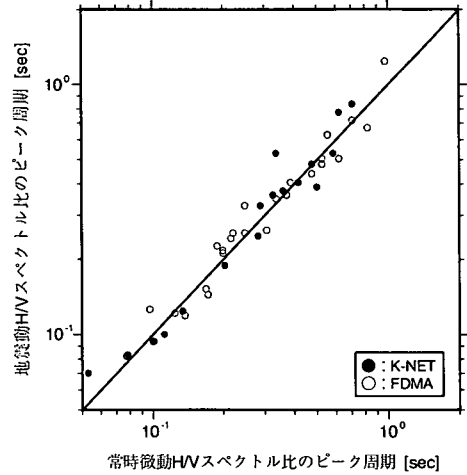


図-6 宮崎県の地震観測点における地震動 H/V スペクトルと常時微動 H/V スペクトルの卓越周期の比較

$$\log S_{v_A}^V = b_0^V + b_1^V M + b_2^V r_A - \log r_A + b_4^V h + c_A^V \quad (2)$$

ここで、 M は地震のマグニチュード、 r_A は A 地点から震源断層までの最短距離、 h は震源の深さ、 c_A^H 、 c_A^V は地点係数の水平動成分および上下動成分を表す。水平動および上下動に対する b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_4 は回帰分析によって求められる係数であり、全ての観測点に共通の値である。これらの係数は全て周期 T ごとに与えられるが、上式ではこれを省略して記述している。右辺第3項は地震波が伝播する媒質によって吸収あるいは散乱されることに起因する非弾性減衰、第4項は地震波が伝播するのに伴って波面が広がることに起因する幾何減衰を表している。

マグニチュードの係数 b_1 、断層面への最短距離の係数 b_2 および深さの係数 b_4 は、経験的に水平動および上下動についてはほぼ等しいので¹⁸⁾、A 地点における速度応答スペクトルの水平/上下 (H/V) 比は、式(1)ー式(2)より以下のように近似できる。

$$\log \frac{S_{v_A}^H}{S_{v_A}^V} \approx (b_0^H - b_0^V) + (c_A^H - c_A^V) \approx \log R_A^{H/V} \quad (3)$$

ここで、 $R_A^{H/V}$ は A 地点における常時微動 H/V スペクトル比を示し、地震動 H/V スペクトル比と常時微動 H/V スペクトル比の振幅形状が近似していることから右辺の近似が成り立つ。

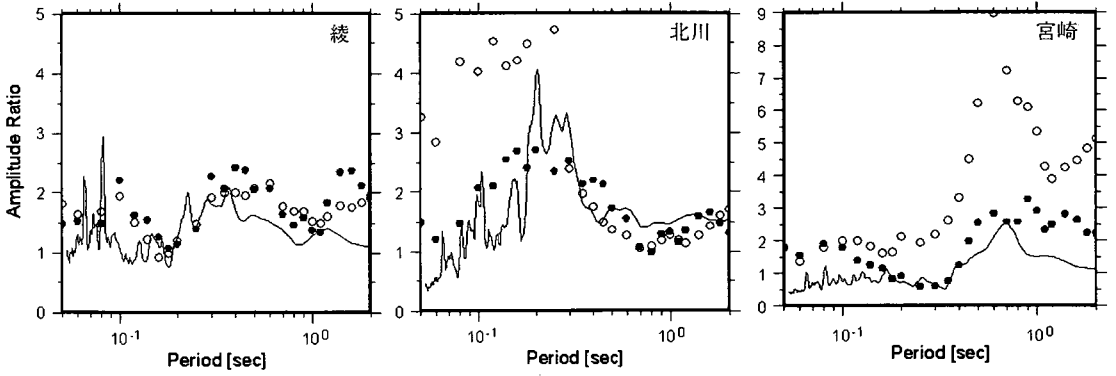


図-7 常時微動 H/V スペクトル比と地点係数の比較 (実線：日向に対する常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{H/V}$,
○：日向に対する水平増幅度 A^H , ●：日向に対する水平増幅度 A^H と上下増幅度 A^V の比 A^H/A^V)

式(3)の右側の近似式を用いると、A 地点の常時微動 H/V スペクトル比 $R_A^{H/V}$ に対する B 地点の常時微動 H/V スペクトル比 $R_B^{H/V}$ の比は以下の式で表せる。

$$\log \frac{R_B^{H/V}}{R_A^{H/V}} \approx (c_B^H - c_A^H) - (c_B^V - c_A^V) \quad (4)$$

($R_B^{H/V}/R_A^{H/V}$) を $R_{B/A}^{H/V}$ と表記することになると、式(4)は以下のように書き直すことができる。

$$R_{B/A}^{H/V} \approx 10^{c_B^H - c_A^H} / 10^{c_B^V - c_A^V} \quad (5)$$

ここで、

$$A^H = 10^{c_B^H - c_A^H}, \quad A^V = 10^{c_B^V - c_A^V} \quad (6)$$

とおくと、式(5)は、

$$R_{B/A}^{H/V} \approx A^H / A^V \quad (7)$$

となる。したがって、A 地点に対する B 地点の常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{H/V}$ は、A 地点に対する B 地点の水平動の増幅度 A^H と上下動の増幅度 A^V の比で近似することができる。そこで、次節で $R_{B/A}^{H/V}$, A^H および A^V の関係について考察する。

(3) 常時微動 H/V スペクトル比と地盤の増幅度の関係

常時微動の H/V スペクトル比が地震動の H/V スペクトル比と似た振幅形状を示し、これが S 波伝達関数のある程度の精度で再現できることから (例えば 16),

丸山ら⁹⁾は 2 地点間の常時微動 H/V スペクトル比の比が相対的な増幅度であると仮定し、1 点の地震記録をもとに他点の地震動を推定することを試みた。この研究では上下動に対する伝達関数が S 波の 1 次卓越周期付近ではほぼ 1 であり、水平動と上下動の伝達関数比が水平動の伝達関数とほぼ等しいことを解析的に示して、この特性を応答スペクトルの近似推定に利用している。本研究では、式(7)を用い、観測記録に基づいて水平動に対する上下動の伝達関数比 (上下増幅度 A^V) の影響について検討する。

比較の基準となる A 地点を日向(K-NET)とする。日向は岩盤上の観測点で、図-5 に示すように地震動 H/V スペクトル比および常時微動 H/V スペクトル比がともにほぼ平坦な形状を示す。まず、全ての K-NET の観測点で、日向に対する水平増幅度 A^H と日向に対する常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{H/V}$ を比較する。例として綾、北川および宮崎における比較の結果を図-7 に示す。ここで、 A^H は○、 $R_{B/A}^{H/V}$ は実線で示す。綾では A^H と $R_{B/A}^{H/V}$ は全体的によく似た形状を示している。一方、北川および宮崎では A^H と $R_{B/A}^{H/V}$ の振幅は大きく異なり、ピーク周期付近で $R_{B/A}^{H/V}$ は A^H よりも小さな値を示す。宮崎ではピーク周期はいずれも 0.6~0.7 秒付近ではほぼ一致しているが、振幅はおおよそ 3.5 倍異なる。

一方、日向の地点係数と B 地点の地点係数から求められる A^H/A^V は図-7 中の●のようになり、 $R_{B/A}^{H/V}$ の周期特性および振幅とおおよそ一致する。たとえば、宮崎では 1 次ピーク周期に対する A^H と $R_{B/A}^{H/V}$ の振幅比はおおよそ 3.6 倍であったが、 A^H/A^V と $R_{B/A}^{H/V}$ の振幅比はおおよそ 1.3 倍であり、ピーク周期以外の周期帯でもほぼ 2 倍以下となっている。北川では周

期 0.3 秒以下で A^H と $R_{B/A}^{HV}$ の振幅は大きく異なっていたが、 A^H/A^V と $R_{B/A}^{HV}$ で比較するとよく似た振幅形状を示す。ピーク周期において A^H と A^H/A^V の振幅が大きく異なるということは、S 波の 1 次固有周期で上下動の増幅度の比が 1 ではないことを意味していると考えられる。逆に、 A^H と A^H/A^V で振幅にあまり変化がみられなかった綾では、 A^V はほぼ 1 であることがわかる。そこで、 A^H の 1 次ピーク周期で A^V がほぼ 1 を示す観測点に注目すると、このような特徴を示す観測点は高千穂、小林、綾、高崎、椎葉で、いずれも山間部あるいは内陸部に位置する硬質地盤上の観測点であることがわかる。したがって、このような地形条件の下では岩盤上の観測点である日向を基準とした場合、 A^H の 1 次ピーク周期において A^V が 1 に近似していると考えられる。すなわち、 A^H/A^V は A^H と振幅がおおよそ一致し、地盤の増幅度として近似することが可能である。一方、 A^H の 1 次ピーク周期で A^V が 1 よりも大きな値を示す地点は北川、延岡、都農、西都、宮崎、日南、串間、都井岬であり、北川を除いていずれも海岸に近く、軟らかい沖積層が堆積している地盤である。したがって、軟らかい表層地盤に覆われている地点では、岩盤上の観測点である日向を基準とした場合には上下動の増幅度が S 波の 1 次固有周期付近で 1 よりも大きくなり、このような地点では H/V スペクトル比を用いて地盤の増幅特性を評価する際に上下動の影響を考慮する必要があると考えられる。

以上から、岩盤上の観測点である日向に対する各観測点の常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{HV}$ は、日向に対する各観測点の水平動の増幅度 A^H とほぼ一致するか小さな値を示す傾向があることがわかった。山間部や内陸部といった比較的硬い表層地盤からなる地形では、 $R_{B/A}^{HV}$ は A^H と近似することができる。しかし、軟らかい表層地盤に覆われているような地形では、 $R_{B/A}^{HV}$ は A^H に比べて振幅が小さくなる傾向がある。したがって、このような地形においては基盤に対する上下動の増幅を 1 に近似することが適切ではないと考えられる。

なお、全ての観測点で同一精度の地盤情報がないことや観測されている強震記録数の制約から、地盤条件と A^H/A^V の関係についての詳細な検討はできず、ここでは硬質地盤と軟らかい沖積地盤という定性的な 2 種類の分類による評価にとどめた。今後、地盤の PS 検層データ、ボーリングデータの充実した地点において、より定量的な検討を進めることで、どのような地形条件であれば上下動の増幅度を 1 に

近似できるのかを明らかにしていく必要がある。

5. 宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた速度応答スペクトルの推定

前章で、2 地点間の相対的な水平増幅度 A^H 、上下増幅度 A^V および常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{HV}$ の関係について述べた。本章では、A 地点に対する B 地点の相対的な増幅度として $R_{B/A}^{HV}$ を仮定し、速度応答スペクトルの推定を試みる。

A 地点と B 地点の水平動の速度応答スペクトルを比較すると、式(1)より、

$$\log S_{v_B}^H = \log S_{v_A}^H + b_2^H (r_B - r_A) - \log \frac{r_B}{r_A} + (c_B^H - c_A^H) \quad (8)$$

式(8)は式(4)および式(6)より、

$$\log S_{v_B}^H = \log S_{v_A}^H + b_2^H (r_B - r_A) - \log \frac{r_B}{r_A} + \log A^V + \log R_{B/A}^{HV} \quad (9)$$

したがって、B 地点の水平動の速度応答スペクトル $S_{v_B}^H$ は、A 地点の水平動の速度応答スペクトル $S_{v_A}^H$ 、A 地点に対する B 地点の常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{HV}$ 、A 地点および B 地点の震源断層までの最短距離 r_A 、 r_B 、A 地点に対する B 地点の上下動の増幅度 A^V を用いて近似することができる。 b_2^H は Shabestari and Yamazaki⁽²⁷⁾で求められた回帰係数である。

まず、A 地点として日向 (K-NET) を仮定し、日向の地震記録をもとにして 19 カ所の K-NET の観測点における水平動の速度応答スペクトルを推定することを試みる。推定に用いる地震は 1996 年 10 月 19 日 23 時 44 分に日向灘で発生した M6.6 の地震とする (図-1)。ここで、2 地点間における震源断層までの最短距離の差は最大でも約 35km なので、 $S_{v_B}^H$ を推定する際に $b_2^H (r_B - r_A)$ の項の影響はほぼ 0 に近似してもよい程度である。したがって、この非弾性減衰の項は無視でき、距離による影響は幾何減衰に大きく依存すると考えられる。

そこで、日向で記録された地震動の NS 成分の速度応答スペクトル $S_{v_A}^H$ (5%減衰) を求め、式(9)より B 地点に対する水平動の速度応答スペクトル $S_{v_B}^H$ を推定する。まず、上下増幅度 A^V を 1 と仮定し、 $S_{v_B}^H$ を推定する。解析例として、綾、北川および宮崎に

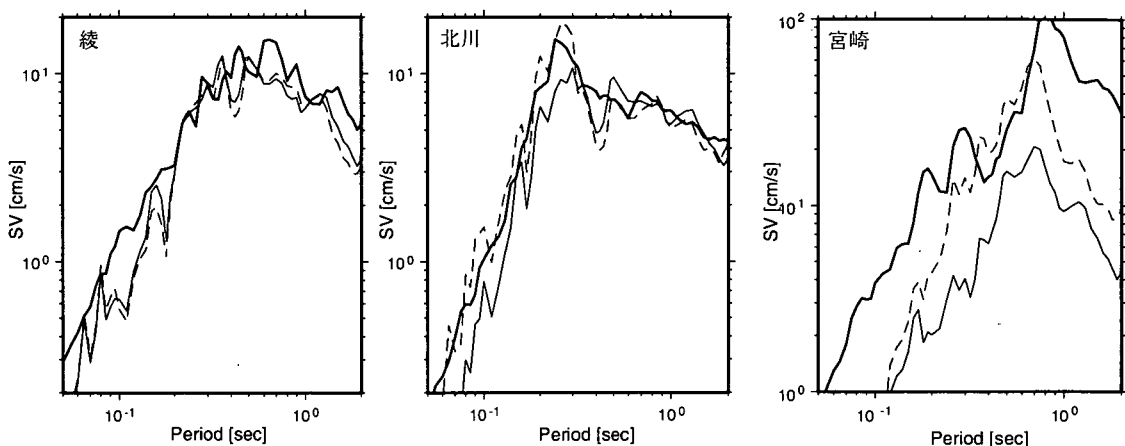


図-8 常時微動 H/V スペクトル比を用いた速度応答スペクトルの推定結果と観測値（基準：日向）
（細実線：推定値（ A^V を1と仮定），点線：推定値（ A^V を考慮した場合），太実線：観測値）

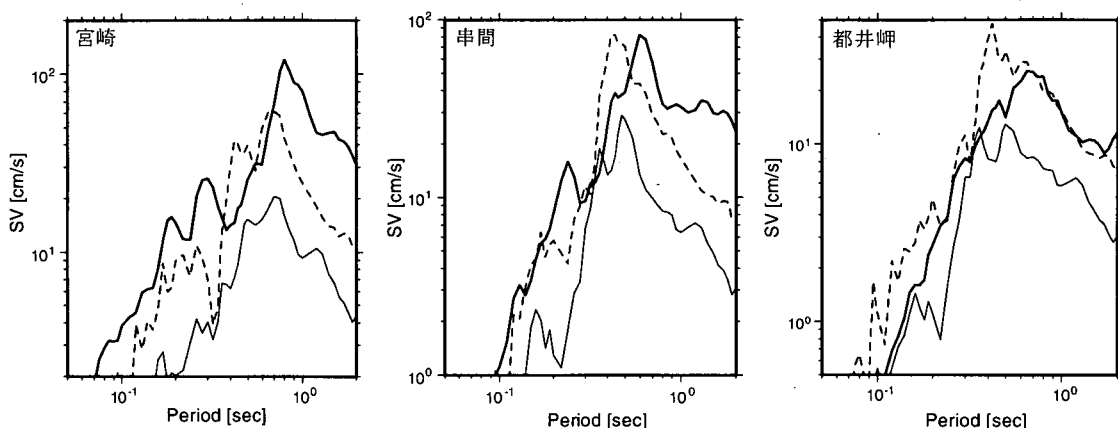


図-9 常時微動 H/V スペクトル比を用いた速度応答スペクトルの推定結果と観測値
（点線：推定値（基準：延岡），細実線：推定値（基準：日向），太実線：観測値）

おける推定結果を図-8に細実線で示す。ここで、実際にはこれらの観測点でこの地震が記録されているので、それぞれの観測点に対して地震記録のNS成分の速度応答スペクトル（5%減衰）を計算し、図-8に太実線で示した。綾では推定した速度応答スペクトルと観測記録の速度応答スペクトルはほぼ一致している。北川でもピーク周期でやや振幅が小さいが、観測記録に近い推定結果が得られている。これらの観測点に共通する特徴は、山間部あるいは内陸部に位置していることである。一方、宮崎では速度応答スペクトルの周期特性はほぼ一致しているが、推定値の方が振幅が小さい。

次に、2地点間の上下増幅度 A^V を考慮して SV_B^H

を推定すると、図-8の点線のようにになる。綾では A^V を1と仮定した場合とほとんど変化がない。また、北川は0.3秒以下の周期帯で推定値が観測記録により近づき、この周期帯で A^V による影響を受けているという前章の結果と一致する。一方、宮崎では、 A^V を考慮することによって推定値の振幅が大きくなり、観測値に近づく傾向がみられる。つまり、宮崎では水平動に対して上下動の影響が大きいと考えられる。上下動の増幅を考慮しても推定値が実測値よりやや小さくなる周期帯は、図-5に示すように、常時微動のH/Vスペクトル比が地震動のそれよりやや振幅が小さい周期帯とはほぼ一致する。

以上から、山間部あるいは内陸部に位置する地点

では、非常に硬い地盤（ここでは日向）に対する常時微動 H/V スペクトル比の比を相対的な増幅度と仮定して速度応答スペクトルを推定することが可能であると考えられる。一方、沖積層が堆積しているような軟らかい地盤上では常時微動 H/V スペクトル比を用いて速度応答スペクトルを推定すると観測値よりもやや小さく見積もられる傾向がみられる。しかし、上下動の増幅度を考慮することによって観測値により近い推定ができることがわかった。

そこで、基準となる観測点を、日向に近く沖積層が堆積している軟らかい地盤上の観測点である延岡として、軟らかい地盤上の観測点である宮崎、串間および都井岬における速度応答スペクトルを推定してみると、図-9 のようになる（点線：推定値、太実線：観測値）。日向を基準とした場合の推定値も細実線で示す。なお、これらの観測点は平野部に位置する軟らかい地盤上にあっても、図-5 に示すように地盤震動特性が若干異なっている。図より、軟らかい地盤上の観測点に対しては、日向（硬い地盤）よりも延岡（軟らかい地盤）を基準とした方がよい推定結果が得られることがわかる。これは、沖積層が堆積しているような軟らかい地盤同士を比較しているため、基盤に対する表層地盤の上下動の増幅特性が類似していることを示唆していると考えられる。本報では得られているデータの制約により、日向あるいは延岡を基準点として県全域に分布している観測点に対してこの推定手法を検討し、硬質地盤と軟らかい沖積地盤という定性的な地盤分類に基づく評価しかできなかったが、波動の伝播特性などの影響を考えた場合、基準点は推定する地点と近い方が望ましく、かつ、上下動の増幅度が 1 に近似できる地点を地形条件などから明らかにした上で基準点を選定する方が望ましい。しかし、宮崎県ではこの条件を満足するのに十分な観測データがまだ得られていないため、地盤条件との対応も含め推定精度の詳細な検討は今後の課題としたい。

本研究では、地震観測点での地震記録、および地震観測点と地震計のない地点における常時微動観測結果を用いて、地震計のない地点での地震動スペクトルを推定できる可能性を示し、水平動と上下動の地点係数などの実データに基づいて議論した。宮崎県では現在、市町村に約 1, 2 カ所の地震計が設置されているが、この観測点のみで市町村内の揺れを代表させることは困難である。今後は地震観測記録や常時微動観測に基づいて、より詳細に地盤震動特性の分布を把握しておくことが、きめ細かな防災対策

や地震時被害推定において必要になってくるものと考えられる。

6. 結論

地表における地震動を推定するとき、表層地盤による増幅の影響を考慮することは重要である。本研究では、宮崎県の地震計ネットワークに利用されている 52 カ所の強震観測点で得られた地震記録および常時微動記録を利用して、各観測点における地盤の震動特性の評価を行った。地震動 H/V スペクトル比および常時微動 H/V スペクトル比がともに地点に固有の地盤震動特性を表し、両者がよく似た振幅形状を示すことから、常時微動 H/V スペクトル比を利用して地震動を推定する手法について検討を行った。

まず、増幅の指標である地点係数と常時微動 H/V スペクトル比を比較し、常時微動 H/V スペクトル比にみられる増幅特性を検討した。岩盤上の観測点である日向に対する各観測点の常時微動 H/V スペクトル比の比 $R_{B/A}^{H/V}$ は、山間部および内陸部のように比較的硬い表層地盤からなる地形では、 $R_{B/A}^{H/V}$ は日向に対する増幅度 A^H に近似している。しかし、軟らかい表層地盤に覆われているような地形では、 $R_{B/A}^{H/V}$ は A^H に比べて振幅が小さくなる傾向があり、上下動の増幅度 A^V の影響を受けていることを地点係数との比較から明らかにした。

次に、常時微動 H/V スペクトル比を用いて 1 地点の地震記録から他点における地震動を推定すると、基準点が硬い地盤上の観測点である場合、山間部や内陸部のように基準点の地盤構造に近い地盤に対してはよい推定結果が得られ、沖積層などが堆積する軟らかい地盤に対しては小さく推定される傾向があることがわかった。一方、これらの地点については沖積層の地盤を基準とすることで観測値により近い推定を行うことができた。これは、これらの地点では基盤に対する表層地盤の上下動の増幅特性が類似していることを示唆している。今後、上下動の増幅特性の類似性と地盤・地形条件の関係を詳細に検討し、基準とすべき地点の選定条件を明確にすることで、常時微動記録を生かしたより精度の高い地震動分布の推定へと発展させていく予定である。

謝辞：常時微動測定にあたり、宮崎大学大学院学生の黒田拓士、山上武志の両君、宮崎県ならびに各市

町村の防災担当者の協力を得た。記して謝意を表する。また、本研究では K-NET (防災科学技術研究所) および震度情報ネットワークシステム (総務省消防庁) の強震記録を利用した。

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) 清水善久:東京ガスにおけるリアルタイム地震防災システム, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.127-134, 2000.
- 3) 濱田禎, 杉田秀樹, 金子正洋:地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.193-196, 1997.
- 4) 山崎文雄, 山内洋志, 本村均, 浜田達也:高速道路の地震観測値に基づく通行規制基準の検討, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1045-1048, 1999.
- 5) 鳥居盛男, 阿部進, 新保康裕, 岸本健二:横浜市のリアルタイム地震防災システム, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3451-3456, 1998.
- 6) 翠川三郎, 阿部進:横浜市における細密震度分布の即時評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.3467-3432, 1998.
- 7) 石田栄介, 磯山龍二, 清水善久, 中山渉, 山崎文雄, 末富岩雄, 阿部進, 鈴木誠:横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討, 第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.411-414, 1999.
- 8) 大熊裕輝, 山崎文雄, 松岡昌志, 原田隆典:宮崎県の強震観測点における地盤特性, 第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.459-462, 1999.
- 9) 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/I-55, pp.261-272, 2001.
- 10) Shimizu, Y., Koganemaru, K., Yamazaki, F., Tamura, I., and Suetomi, I.: Seismic Motion Observed in Taipei Basin by New SI sensors and Its Implication to Seismic Zoning, *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, pp.497-502, 2000.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江:気象庁地震記録に基づく地点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.
- 14) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No. 4, pp. 309-332, 1998.
- 15) 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.
- 16) 中村豊, 上野真:地表面震動の上下動と水平動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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 時松孝次, 宮寺泰生:短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.81-87, 1992.
- 22) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧:常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489, I-27, pp.251-260, 1994.
- 23) Okuma, Y., Harada, T., Yamazaki, F., and Matsuoka, M.: Site Amplification Characteristics in Miyazaki Prefecture, Japan using Microtremor and Seismic Records, *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, pp.551-556, 2000.
- 24) 堀家正則:微動の研究について, 地震 第2輯, Vol.46, No.3, pp.343-350, 1993.
- 25) 小林啓美, 長橋純男:地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質, 日本建築学会論文報告集, 240号, pp.79-92, 1976.
- 26) Molas, G.L., and Yamazaki, F.: The Effect of Source Depth and Local Site to the Attenuation Characteristics of Response Spectra, 第23回地震工学研究発表会講演論文集, pp.69-72, 1995.
- 27) 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.
- 28) 山内洋志, 山崎文雄, 若松加寿江, Shabestari, K. T.: 応答スペクトルの距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形・表層地質分類との関係, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.195-205, 2001.

(2001.4.13 受付)

ESTIMATION OF EARTHQUAKE GROUND MOTION IN MIYAZAKI PREFECTURE USING THE H/V SPECTRAL RATIO OF MICROTREMOR

Yuuki OKUMA, Masashi MATSUOKA, Fumio YAMAZAKI and Takanori HARADA

The seismic records observed from 52 stations in Miyazaki Prefecture are currently used to grasp the distribution of seismic intensity of the surface ground in the prefecture soon after the occurrence of an earthquake. However, the number of instruments may not be large enough to capture the detailed seismic intensity distribution. Hence, microtremor measurements were conducted to estimate site response characteristics of the seismic observation stations and other locations. The horizontal-to-vertical (H/V) Fourier spectral ratios were calculated for seismic records and microtremor, and their similarity was confirmed. Using the H/V spectral ratios of microtremor, the velocity response spectra for earthquake ground motions at microtremor sites were estimated and their applicability was discussed.