

揺れやすさマップ精度向上のための常時微動利用法に関する研究

Study on Utilization of Microtremor Data for Accurate Shaking Hazard Maps

山田 雅行¹, 原 忠², 北村 暢章³, 竹澤 請一郎¹, 羽田 浩二⁴, 八木 悟¹

Masayuki YAMADA¹, Tadashi HARA², Nobuaki KITAMURA³,
Koichiro TAKEZAWA¹, Koji HADA⁴ and Satoru YAGI¹

¹(株)ニュージェック 技術開発グループ

Technology Development Group, NEWJEC Inc.

²高知大学 総合研究センター防災部門

Science Research Center, Kochi University

³高知大学 大学院総合人間自然科学研究科

Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University

⁴(株)ニュージェック 建築グループ

Architecture Group, NEWJEC Inc.

Microtremor data that was an actual slight ground motion, was acquired widespread for Konan city, Kochi prefecture, and H/V spectral ratio was calculated to utilize for accurate shaking hazard maps.

At first, it was found that the predominant frequency and the corresponding peak value of H/V spectral ratio was not enough related to AVS30, ARV(an amplification rate) and so on based on the geomorphologic classification map. And it was shown that the predominant frequency of microtremor H/V spectral ratio corresponded to the transfer function at the investigated ground. We suggested and demonstrated a method to interpolate the transfer function at the site without investigation data using the microtremor H/V spectral ratio.

Keywords: *Shaking hazard map, microtremor, H/V spectral ratio, transfer function*

1. はじめに

過去 約1,400年の古文書によると、南海トラフでは約100～200年の間隔で地震が発生することが知られている。最近の地震は、1944年の昭和東南海地震、1946年の昭和南海地震が記録されている。これらの史実や津波堆積物の調査研究に加えて、前述の昭和東南海・南海地震時の地盤隆起量から、地震調査研究推進本部¹⁾は次の地震までの発生間隔を88.2年と報告している。現在では、昭和東南海・南海地震の発生から既に約70年が経過しているため、次の大地震発生の切迫性が高まっていると考えられている。高知県は、この東南海・南海地震の震源域から非常に近いため、県内の広い範囲で、強い揺れや斜面崩壊・液状化などの地盤災害、巨大津波とそれらに伴う建物被害、人的被害、ライフライン、交通、生活支障などの被害が危惧されている²⁾³⁾。

地震時の揺れの大きさ、揺れの周波数(周期)、揺れの長さといった揺れの特徴を決める要因は、震源特性、伝播経路特性、サイト特性である。震源の広がり(範囲)、変位の大きさや速さ、強震動生成領域(Strong Motion Generation Area, SMGA)の強さや位置等の震源特性によって、揺れは大きく影響を受ける。伝播経路特性と呼ばれる、震源からサイト直下の硬質地盤までの減衰特性も揺れに影響を与える。さらに、サイト直下の硬質地盤から

地表までの増幅特性は、特に揺れの大きさ、周波数、長さに、直接的な影響を与えられられる。また、市町村レベルの自治体を対象とし、南海トラフのような海溝型地震を想定した場合、対象エリアがそれほど広くないため、震源や伝播経路の影響は相対的に小さくなり、揺れの特徴はサイト特性に大きく依存することとなる。

サイト特性を評価する方法は、ボーリング調査、物理探手法など、調査に要する期間、コストや精度は異なるものの、多くの手法が実用化されている。近年では、観測が簡便で、コスト的にも有利な常時微動観測を用いて、地盤の卓越周波数や速度構造を求める手法が実用化されつつある^{例え(ば)4)5)}。

著者らは、これまでも常時微動観測で得られたH/Vスペクトル比のピーク周波数とピーク振幅を地形分類に着目して整理し、地形分類ごとに有意な差があることを示してきた。本研究では、高知県高知市を対象として、常時微動H/Vスペクトル比とサイト特性の関係について言及し、サイト特性に大きく依存する揺れやすさマップの精度向上に資する常時微動の利用方法を提案するものである。

2. 自治体における揺れやすさマップ

(1) 揺れやすさマップ

阪神・淡路大震災における教訓に鑑み、住宅の倒壊等を原因とする窒息・圧死、住宅・家財等財産の多大な損害から人命および個人財産を保護することを目的として、その地域に発生する恐れがある想定地震における、その地域の揺れの可能性を示す地図として、「揺れやすさマップ」の提供が提案された(地震防災マップ作成技術資料、内閣府、2005)⁸⁾。また、これを受けて2007年には、国土交通省国土地理院から「自治体担当者のための防災地理情報利活用マニュアル(案)ー土地条件図の数値データを使用した簡便な災害危険性評価手法ー」⁹⁾が公表され、より簡便な自治体レベルの揺れやすさマップ等の作成手法が提案されている。

一方、2012年に内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁰⁾より、南海トラフの巨大地震による関東以西における震度分布が公表された。南海トラフ沿いに駿河湾から日向灘までの800kmを超える震源域が想定され、モーメントマグニチュード(Mw)は9.0に相当する。高知県では、室戸岬、足摺岬、高知市付近等において震度7、県内のほとんどの領域において震度6弱以上と予測されている。

さらに、高知県も、内閣府の震源モデル(Mw9.0)を用いて、2012年に南海トラフの巨大地震による震度分布予測²⁾を公表した。内閣府の予測震度ほどではないが、県内の多くの地域が震度6強とされ、震源近傍の室戸岬付近や沿岸部では震度7の地域も見られる(図-1)。

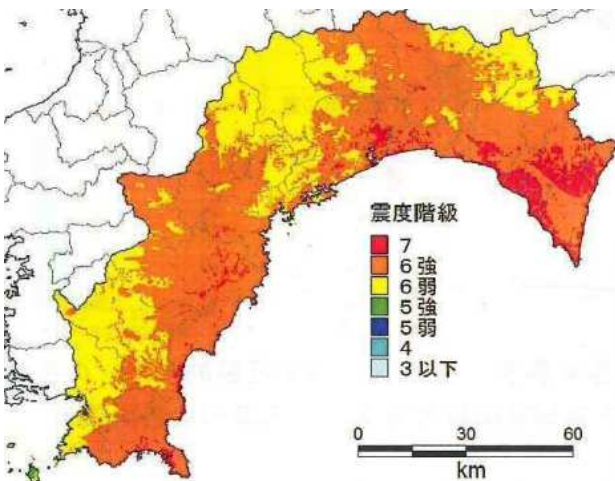


図-1 高知県による予測震度分布²⁾

(2) 揺れやすさマップの作成方法

揺れの推定は、震源から離れたある場所の硬質地盤での地震動を推定し(震源および伝播経路特性)、その場所の地盤の影響(サイト特性)を加味する方法が一般的である。「地震防災マップ作成技術資料」⁸⁾によれば、震源から離れたある場所の硬質地盤での地震動を推定する手法として、「震源モデルをもとに地震波形を計算する手法」および「震源からの距離に応じて地震の揺れの強さを推定する経験的手法」が挙げられている。一方、地盤の影響を加味する手法として、「表層地盤構造を設定して地震波形を計算する手法」および「表層地盤の柔らかさに応じて地震動がどの程度増幅するかを推定する経験的手法」が挙げられており、揺れの推定法はこれらの組み合わせにより4種類に分類されている。前述の内閣府による予測震度は、震源モデルをもとに硬質地盤での地震波形を計算し、表層地盤の柔らかさに応じた経験的な増

幅度を加味して算定されている。一方、高知県は、表層地盤の影響を設定した地盤モデルを用いて、応答計算により解析的に算定する「表層地盤構造を設定して地震波形を計算する手法」を採用している。

地盤の影響について、「表層地盤構造を設定して地震波形を計算する手法」では、ボーリング等の地盤調査データに基づいて、S波速度、密度などの地盤定数をモデル化し、地震波形の応答計算を行う。正確な地盤モデルが推定されれば高精度の地震動推定が可能であるが、地盤調査が行われていない場所も多く、必ずしもその限りではない。広域の面的な地震動の予測においては、むしろ地盤調査データの乏しい地域の方が多いと言っても過言ではない。

一方、「表層地盤の柔らかさに応じて地震動がどの程度増幅するかを推定する経験的手法」では、「表層地盤の柔らかさ」として、AVS30(地表から深さ30mまでの平均S波速度)を定義する。このAVS30から、Midorikawa et al.¹¹⁾や横田ほか¹²⁾による経験式を用いて地盤増幅度を求めることができる。地盤調査データのある場所では、AVS30は容易に計算することができる。しかしながら、地盤調査データのない場所では、松岡・翠川¹³⁾、藤本・翠川¹⁴⁾や松岡ほか¹⁵⁾によって提案された、微地形区分を用いた経験式によって推定することとなる。この経験式において、地盤調査データのある場所のAVS30を用いて地域的な係数を設定することも可能であるが、地盤調査データの乏しい地域では、予め提案された係数¹⁶⁾¹⁷⁾を用いることも少なくない。したがって、広域の面的な地震動予測において、一見有利と見える経験的手法も、地盤調査データのない場所では精度を担保することが難しいと言える。

3. 香南市における広域地質と常時微動観測

(1) 立地条件と広域地質

香南市は高知県の中東部に位置しており(図-2¹⁸⁾¹⁹⁾、南部地域は太平洋に面した海岸部と平野部が東西に広がり、中部地域は里山環境、北部地域は四国山地の一部を構成している。赤岡町、香我美町、野市町、夜須町、吉川村が平成18年に合併して誕生し、面積は126.49 km²、人口は3万4千人である。

図-2¹⁸⁾¹⁹⁾は香南市付近の土地条件図¹⁸⁾を示したものである。市の北東部には山地斜面、西部の物部川左岸側には段丘堆積物がみられ、南部の海岸沿いには砂州・砂堆が広く分布している。また、香宗川流域の東側に氾濫平野が広がっている。



図-2 香南市付近の土地条件図¹⁸⁾¹⁹⁾

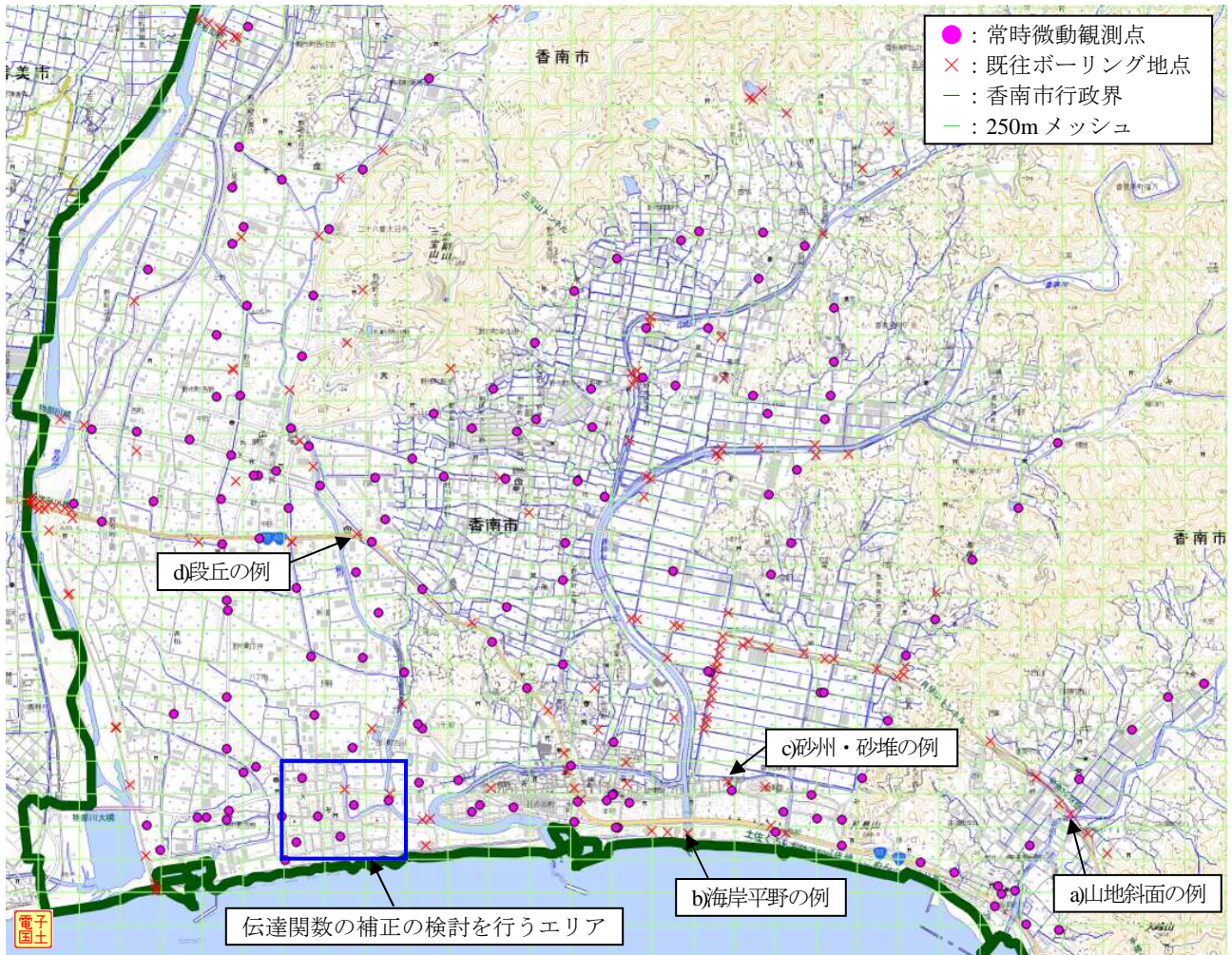


図-3 香南市における常時微動観測点(電子国土³³⁾に加筆)

(2) 常時微動観測

図-3に香南市付近における常時微動観測点(●印, 162点)を示す。図中の格子は国土数値情報4分の1地域メッシュ(約250mメッシュ)(以下、「250mメッシュ」と呼ぶ)、海岸線を含む太線は香南市の市境界、背景図の色は標高(赤:高標高, 青:低標高)、■は住宅等の建造物、×印は既往ボーリング地点(152点)を示す。既往ボーリングは、主として河川堤防、道路、橋梁などの大規模構造物の設計、施工において実施されることが多く偏在する傾向にあるが、常時微動観測点は任意に選定できることから、香南市平野部におおむね均等に配置することができた。

常時微動観測は、サーボ型加速度計(白山工業(株)製, JU210)²⁰⁾を用い、各観測点11分間観測を行い、得られたデータからH/Vスペクトル比を計算した。図-4に常時微動観測状況を示す。緑色の箱は風除けで、この中に微動計JU210が設置されている。常時微動H/Vスペクトル比の算出においては0.5Hz付近の波動成分の影響まで考慮できるように、各観測地点について擾乱の少ない40.96秒間のデータを5区間抽出し、その平均値としている。水平成分は直交する2成分の相乗平均とした。スペクトルの平滑化については、0.5Hz付近においてピークを明瞭に判別できるようにする観点から、水平成分、鉛直成分ともに0.2HzのParzenウィンドウを用いている。

図-5に香南市における常時微動観測結果の例(No.110)を示す。図-5は、横軸が周波数(Hz)、縦軸が常時微動H/Vス

ペクトル比を示し、薄い水色線(No.1~No.5)は40.96秒間のデータを用いた5区間それぞれの常時微動H/Vスペクトル比、濃い紺色線(ave)はそれらの平均値、赤○はピークと判断した位置を示す。吉川地区付近のNo.110地点は、5~7Hz付近が卓越しており、バラツキの少ない安定した結果が得られていることがわかる。



図-4 香南市における常時微動観測状況

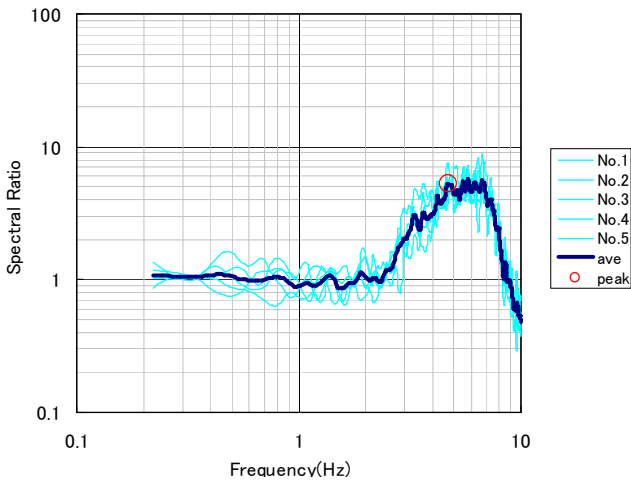


図-5 香南市における常時微動観測結果の例

4. 香南市における常時微動 H/V スペクトル比の特徴

(1) 常時微動 H/V スペクトル比を活用した地盤の評価法

常時微動H/Vスペクトル比は、主にそのピークに着目されて活用されている。ピークの周波数については、大町ほか²¹⁾が各種の地盤構造に対する理論上のレイリー波H/V振幅スペクトルとS波伝達関数のピーク周波数がほぼ一致することを示すなど、地盤の特徴を表す指標として用いられつつある。ピークの振幅についても、地震動の増幅特性のピーク振幅との相関に関する研究事例として、工学的基盤～表層地盤の増幅特性との相関²²⁾²³⁾、基準強震観測地点に対する他地点の増幅特性²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾、鉛直レーザ強震観測記録によるS波速度1000m/s以上の層に対する地表の増幅特性²⁷⁾、地表における強震記録のスペクトル特性²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾など地盤の特徴を示すことが多く論じられている。

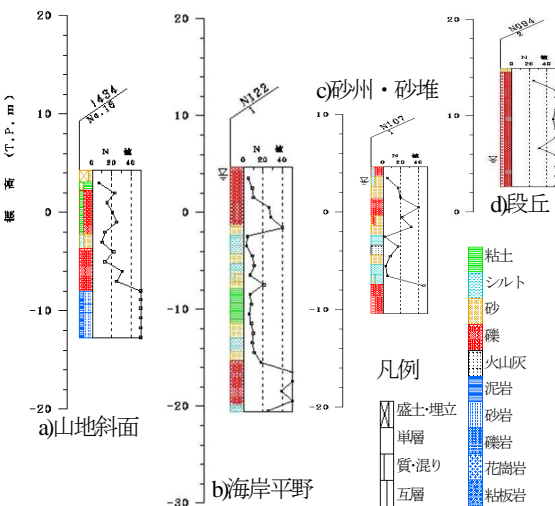


図-6 常時微動観測点近傍の地盤データの代表例³¹⁾

(2) ボーリングデータと常時微動 H/V スペクトル比の比較

図-6は、広域地質として示した山地斜面、海岸平野、砂州・砂堆、段丘について、代表的な地盤(ボーリング)データ³¹⁾を示したものである。ボーリングデータを見ると、山地斜面では、表層部に比較的厚い砂層や粘土混じり礫

層といった貫入抵抗値(N値)の低い層がみられる。海岸平野では、表層部にN値の比較的高い礫層がみられるもののその下部には砂層やシルト層、粘土層が厚く堆積している。砂州・砂堆では、表層部からシルト混じり礫層や砂層の厚い堆積がみられる。段丘は、表層部からN値の高い礫質層からなる。

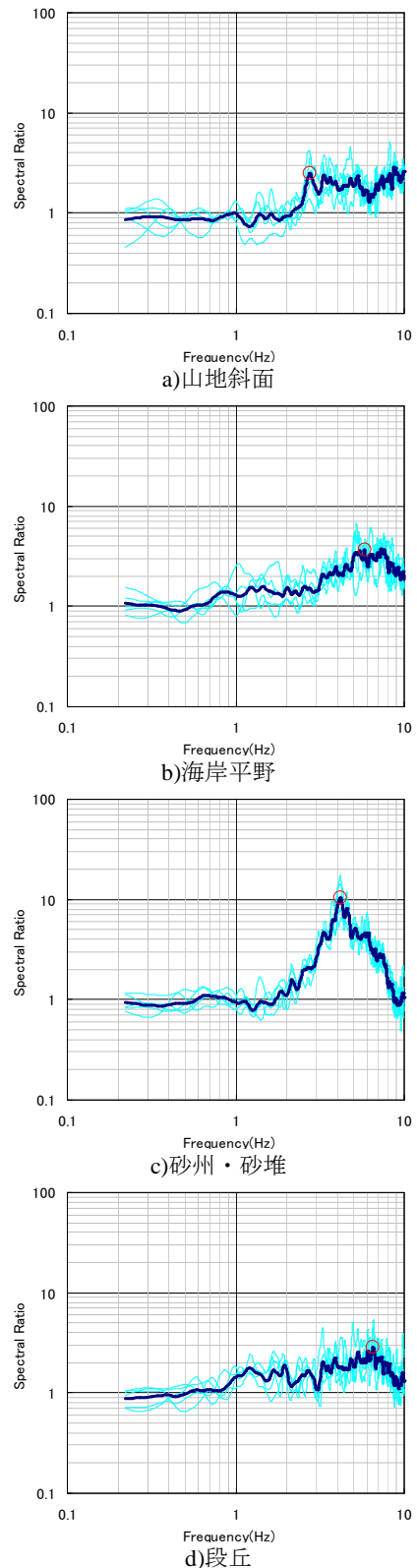


図-7 常時微動 H/V スペクトル比の代表例

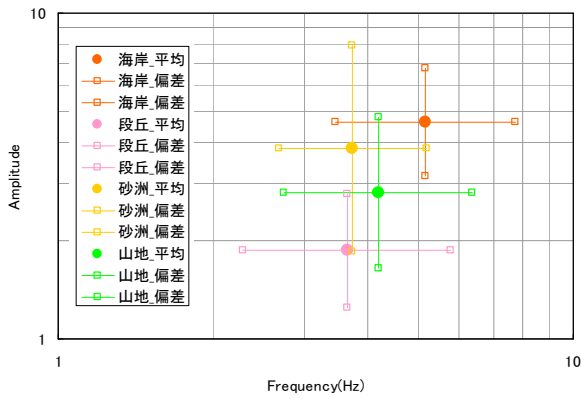


図-8 常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数・ピーク振幅と地形分類

この山地斜面、海岸平野、砂州・砂堆、段丘について、それぞれの常時微動H/Vスペクトル比の代表例を図-7に示す。これらの常時微動H/Vスペクトル比のピーク周波数とピーク振幅の関係を堆積履歴ごとに整理したものを図-8に示す。図-8の●印が、ピーク周波数およびピーク振幅の対数平均値を示し、●から伸びた上下左右の実線は対数標準偏差を示している。なお、ここでは常時微動観測を行った地点のうち、山地斜面、海岸平野、砂州・砂堆および段丘地盤に分類された112地点について整理を行った。

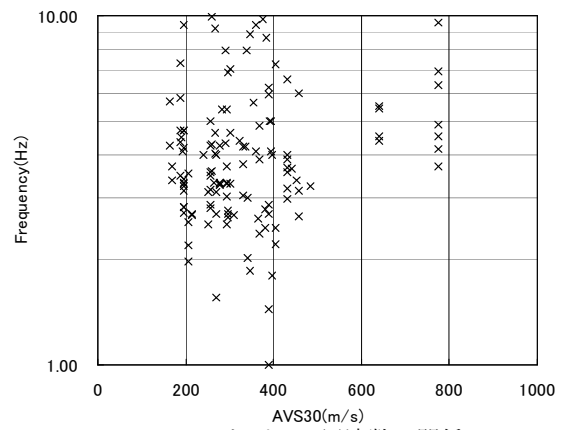
これをみると、ピーク周波数は、砂州・砂堆、段丘地盤が4.0Hz弱、山地斜面が4.0Hz強、海岸平野が約5.0Hzに平均値を有しており、段丘地盤のバラツキが若干大きいことがわかる。一方、ピーク振幅は、段丘地盤が2倍程度、山地斜面が3倍程度、砂州・砂堆、海岸平野が4～5倍に平均値を有している。また、砂州・砂堆のバラツキが大きいことがわかる。砂州・砂堆および海岸平野のピーク振幅は、ボーリングデータにみられる粘土・シルト層や礫混じり砂層などのN値が小さい軟弱層が厚く堆積していることによるものと推察される。また、砂州・砂堆のバラツキの大きさは、その層厚が変化していることを示唆していると考えることができる。

このように、地形分類ごとに有意な差があることは明らかであるが、そのバラツキが大きいことから、地形分類ごとにサイト特性を設定することは困難である。

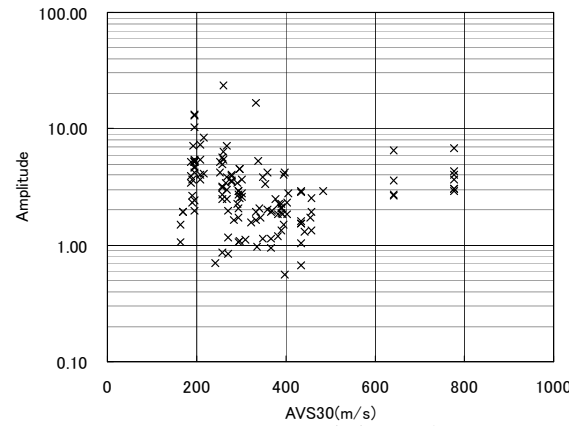
(3) 微地形区分に基づく AVS30 および地盤増幅率 (ARV) と常時微動 H/V スペクトル比の比較

全国を対象に、250mメッシュごとの微地形区分と AVS30 および地盤増幅率 (ARV) が、地震ハザードステーション³²⁾によって公開されている。図-9では、常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数、ピーク振幅を縦軸にとり、観測点が位置するメッシュの AVS30 および地盤増幅率 (ARV) を横軸にとって比較を行った。

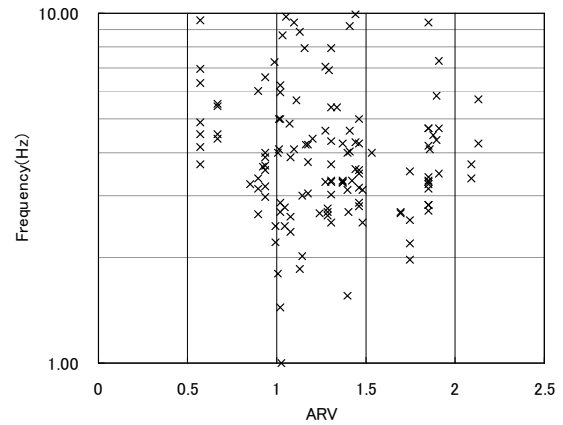
図-9を見ると、常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数およびピーク振幅は個々の地点の揺れの特性の違いを反映して、大きくばらついており、常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数、ピーク振幅と AVS30 および地盤増幅率 (ARV) との明瞭な関係を見出すことは容易ではない。強いて言えば、ARV とピーク振幅の関係において、右上がりの傾向、すなわち、ARV が大きいところでは常時微動 H/V のピーク振幅も大きい傾向を読み取ることができる程度である。



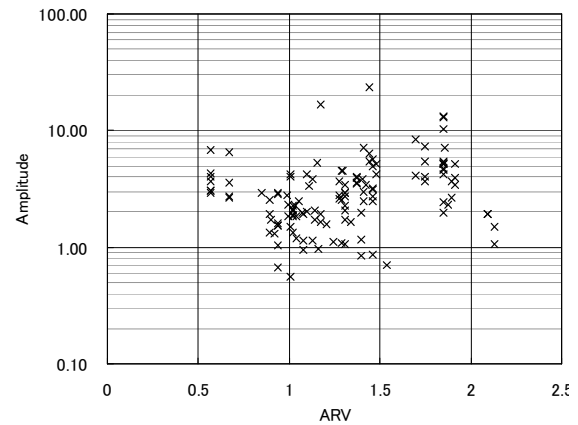
(1) AVS30 とピーク周波数の関係



(2) AVS30 とピーク振幅の関係



(3) ARV とピーク周波数の関係



(4) ARV とピーク振幅の関係

図-9 常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数・ピーク振幅と AVS30、地盤増幅率 (ARV) の関係

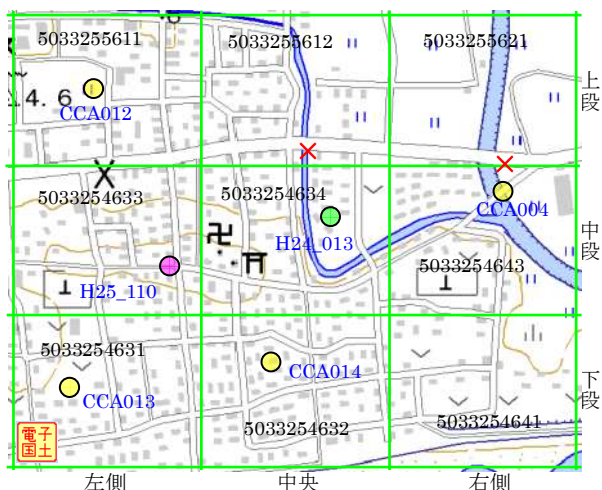


図-10 香南市吉川町吉原地区の 250m メッシュと常時微動観測点および既往ボーリング地点(電子国土³³⁾に加筆)

(4) 地盤モデルに基づく伝達関数と常時微動 H/V スペクトル比の比較

前述のとおり、高知県では、地盤の影響を設定した地盤モデルを用いて、応答計算により解析的に算定している。このモデルでは、正確な地盤モデルが推定されておれば高精度の地震動推定が可能であるが、広域の面的な地震動を予測する場合、地盤データが乏しい場所については地盤調査データのある場所からの”補間”を行わざるを得ない。

図-10に、香南市吉川町吉原地区の250mメッシュと常時微動観測点および既往ボーリング地点を代表例として示す。図-10は、電子国土³³⁾による地形図を基図として示したもので、図中の格子は250mメッシュ(黒字:メッシュID)、●印は常時微動観測点(青字:常時微動観測点No.)、×印は既往ボーリング地点である。右側-中段メッシュ(メッシュID: 5033254643)において、既往ボーリングおよび常時微動観測点が存在することから、後述する伝達関数の補間の基準点とみなした。なお、●印の常時微動観測点においても、高知県による震度分布²⁾公表後にボーリングデータが得られている。

まず、図-11に右側-中段メッシュ(メッシュID: 5033254643)における既往ボーリングと地盤モデルのS波速度分布の比較を示す。広域のモデル化を行うため、地盤モデルにおいて細かな地層分割がなされているが、平均的には整合していると見ることができる。

図-12は、図-10に示したメッシュの地盤モデル(高知県、深部および浅部地盤モデル)および右側-中段メッシュにおける既往ボーリングから求めたサイト特性である伝達関数を示した。右側-中段メッシュにおいては、既往ボーリングから求めた伝達関数(図中「ボーリング」)と地盤モデルから求めた伝達関数(図中の「4643」)がよく一致していることが確認できる。

図-10に示した9メッシュのうち、ボーリングデータのあるメッシュ(例えば、右側-中段メッシュ(メッシュID: 5033254643))の地盤モデルは、ボーリングデータの無いメッシュに比べて信頼性が高いと考えられる。ボーリングデータの無いメッシュの地盤モデルは単にボーリングデータを補間しているため、9メッシュ分の伝達関数は互いに似た形状を有しており、3.3Hz付近に最大ピークを有している。

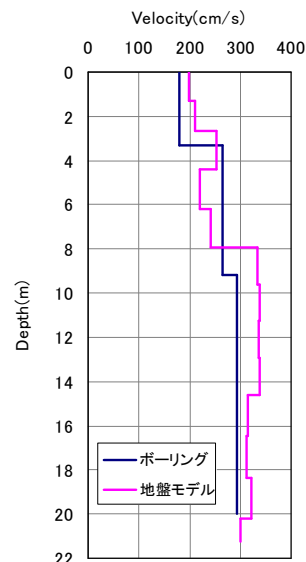


図-11 右側-中段メッシュ(メッシュID: 5033254643)における既往ボーリングと地盤モデルのS波速度分布の比較

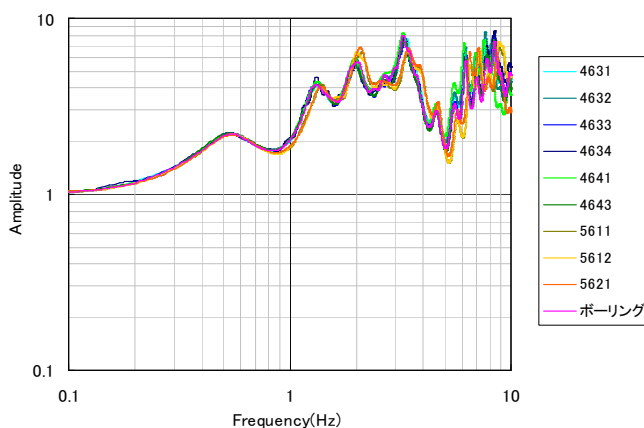


図-12 香南市吉川町吉原地区の 250m メッシュに対応する地盤モデル(高知県)から計算した伝達関数(凡例の数字はメッシュ ID の下 4 桁を示す)

一方、図-13には、図-10とメッシュを対応させて、常時微動H/Vスペクトル比を示した。中段および下段の図の横軸は0.1~10.0Hz(中央が1.0Hz)、左側-上段(メッシュID: 5033255611)の横軸は1.0~100.0Hz(中央が10.0Hz)を示している。これを見ると、各メッシュにおいて異なる形状を示していることがわかる。特に左側-中下段、中央-中下段の4メッシュでは、右側-中段(5033254643)のピーク周波数に比べて高周波のピークを有しており、左側-上段のメッシュでは10Hzまでの低周波数部分の振幅は大幅に小さいことがわかる。また、右側-中段メッシュ(5033254643)の常時微動H/Vスペクトル比のピーク周波数は、同じメッシュの伝達関数の最大振幅を与える周波数とよく一致することがわかる。なお、常時微動H/Vスペクトル比のピーク周波数およびピーク振幅は、振幅が概ね3倍程度以上となるピークをさす。

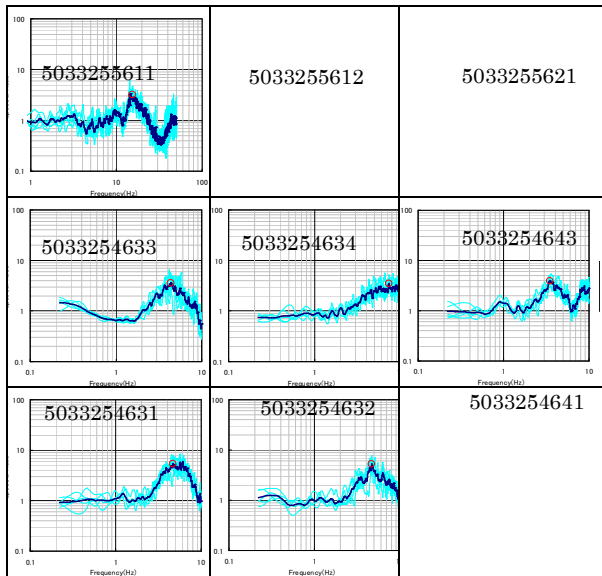


図-13 香南市吉川町吉原地区の 250m メッシュに対応する常時微動 H/V スペクトル比

5. 揺れやすさマップ精度向上のための常時微動利用法

常時微動を用いて地震動の補間を試みる方法は、先名ほか(2008)²³⁾など、いくつか提案されている。地震動の推定精度向上を考える場合、地盤の影響を示すAVS30や地盤増幅率の見直しによって行われていることが多い。一方で、表面波であるRayleigh波が主体と考えられている常時微動H/Vスペクトル比の振幅値を、実体波が主体と考えられる地震時の地盤増幅率と関係付けてよいかどうかについて、十分な議論がなされていないものも少なくない。

ここでは、常時微動H/Vスペクトル比を構成する波動成分について解明し、常時微動H/Vスペクトル比の振幅値と地震時の地盤増幅率の関係を明らかにしている長尾ほか(2012)⁵⁾を参考に、揺れやすさマップ精度向上のための常時微動利用法の検討を行った。長尾ほか(2012)⁵⁾では、常時微動は主に表面波によって構成されるものの、H/Vスペクトル比のピーク周波数付近、およびそれより低周波数帯域においては、実体波の影響が現れていると論じられている。この論理に基づいて、長尾ほか(2010)³⁴⁾では、港湾におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)の補正方法が提案されている。地震観測点においてスペクトルインバージョンを用いて算定されたサイト増幅特性から、常時微動H/Vスペクトル比を用いて、地震観測がなされていない港湾のサイト増幅特性を推定するものである。

長尾ほか(2010)³⁴⁾における既知のサイト増幅特性(地震基盤～地表)に、既往ボーリングデータがあるメッシュの深部および浅部地盤モデルから求めた伝達関数が対応するものと考えた。常時微動H/Vスペクトル比を用いて、この地盤データの有るメッシュの伝達関数から、地盤情報の無いメッシュの伝達関数の補間を行う。これにより、揺れやすさマップ作成時の地盤の影響を精度よく評価できるものと考えられる。

(1) 長尾ほか(2010)³⁴⁾による伝達関数の補間方法

長尾ほか(2010)³⁴⁾による伝達関数の補間方法の概略を以下に示す。

まず、伝達関数が既知のA地点の伝達関数と常時微動H/Vスペクトル比を、A地点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク周波数(f_A)が、伝達関数が未知のB地点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク周波数(f_B)に一致するように対数軸上で平行移動して補正する³⁶⁾。いま、A地点の補正前の伝達関数と常時微動H/Vスペクトル比をそれぞれ $AMP_A(f)$ 、 $HV_A(f)$ とすると、補正後の伝達関数と常時微動H/Vスペクトル比 $AMP_A(f)'$ 、 $HV_A(f)'$ は次式で表すことができる。

$$\Delta f = f_B / f_A \quad (1)$$

$$AMP_A(f)' = AMP_A(f / \Delta f) \quad (2)$$

$$HV_A(f)' = HV_A(f / \Delta f) \quad (3)$$

次に、A、B両地点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク振幅の違いがA、B両地点の伝達関数の着目するピーク振幅の違いを反映している可能性が高いことから、伝達関数が未知のB地点の伝達関数 $AMP_B(f)$ は、平行移動したA地点の伝達関数 $AMP_A(f)'$ に、A、B両地点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク振幅の比 ($HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$) を乗じることによって算定する。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B^{peak} / HV_A^{peak}) \quad (f > f_0) \quad (4)$$

このように処理を行うと、低周波レベルがA、B地点で大きく異なってしまうことから、低周波レベルに対しては、常時微動H/Vスペクトル比のピーク振幅の比 ($HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$) ではなく、常時微動H/Vスペクトル比の周波数ごとの振幅比 ($HV_B(f) / HV_A(f)'$) を乗じる。式(4)と式(5)の境界 f_0 は、ピーク周波数より高周波数側で、式(4)による値が式(5)による値をはじめて上回る周波数とする。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B(f) / HV_A(f)') \quad (f \leq f_0) \quad (5)$$

(2) 香南市における伝達関数の補正結果

前節に示した長尾ほか(2010)³⁴⁾に従って、伝達関数の補正を行った結果を図-14に示す。図中の青線が補正後の伝達関数、緑線は図-12に示す地盤モデルから計算された伝達関数、ピンク線が高知県による震度分布²⁾公表後のボーリングデータから計算した伝達関数である。

右中段のメッシュにはボーリングデータが存在するため、十分に精度高い伝達関数が得られているものとみなして、右中段メッシュの常時微動H/Vスペクトル比と各メッシュの常時微動H/Vスペクトル比を用いて補正を行った。左下側の4メッシュでは、右中段の伝達関数に比べて、ピーク周波数が高周波に移動しており、左上段のメッシュでは振幅が小さいことが表現されている。いずれも、常時微動H/Vスペクトル比の特徴と調和的であり、常時微動による揺れが小さい箇所(揺れにくい箇所)では、伝達関数も小さい値となるなど合理的な結果が得られているものと考えられる。

左側-上段(メッシュID: 5033255611)、左側-下段(メッシュID: 5033254631)、中央-下段(メッシュID: 5033254632)においては、高知県による震度分布²⁾公表後のボーリングデータから計算した伝達関数との比較を行った。補正した伝達関数(青線)は、地盤モデルから計算した伝達関数(緑線)よりもボーリングデータから計算した伝達関数(ピンク線)と調和的であるといえる。図-15にボーリングデータから計算した伝達関数と地盤モデル(高

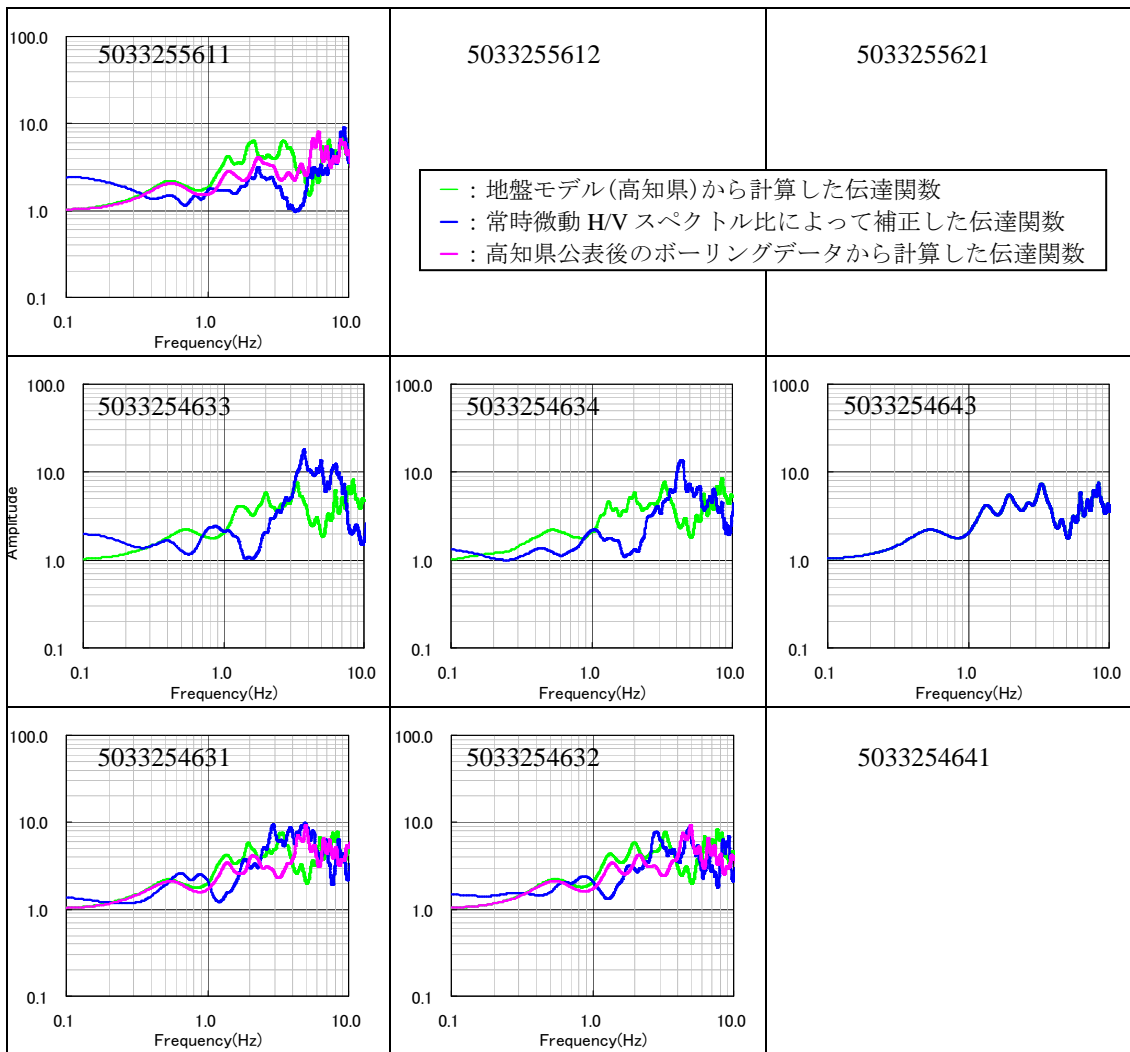


図-14 吉川町吉原地区の250mメッシュに対応する伝達関数の補正結果

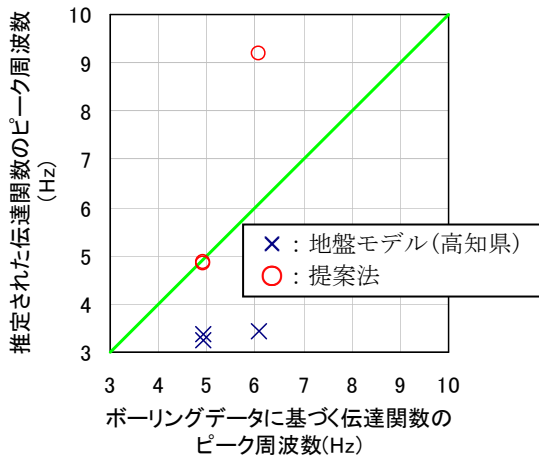


図-15 補正前後の伝達関数のピーク周波数の比較

知県)および提案法により推定された伝達関数のピーク周波数の比較を示す。地盤モデル(高知県)より推定された伝達関数のピーク周波数に対して、提案法により推定された伝達関数のピーク周波数の方が、ボーリングデータから計算した伝達関数のピーク周波数によく一致していることがわかる。

香南市において、人口密集地や重要構造物があるメッシュでは、より高密度に常時微動を観測することで、精

度の高い地盤調査位置での伝達関数と常時微動 H/V スペクトル比の組み合わせから、地盤調査が行われていないメッシュの伝達関数を高精度に推定することが可能と考えられる。さらに、高精度の伝達関数を用いて予測地震動を見直すことで揺れやすさマップの精度向上を図ることが可能である。

6. まとめ

高知県香南市を対象として、実際に地面が揺れる微小な振動である常時微動を広域に観測した。

本研究で得られた知見は下記のとおりである。

- (1)常時微動 H/V スペクトル比と堆積履歴や微地形区分に基づく AVS30 および地盤増幅率(ARV)などの関係について整理を行ったが、いずれもバラツキが大きく、高精度の揺れやすさを議論するには限界があることを示した。
- (2)地盤モデルを用いて、応答計算により解析的に求めた伝達関数とも比較を行った。
- (3)地盤データがある位置での伝達関数の最大振幅を与える周波数と常時微動 H/V スペクトル比のピーク周波数の対応もよく、精度が高いことが示唆されたが、地盤データがない場所においては常時微動 H/V スペクトル比との違いが明らかとなった。

(4)地盤データがある位置での伝達関数を、常時微動 H/V スペクトル比を用いて補正する方法を深部および浅部地盤モデルから求めた伝達関数に対して適用し、香南市吉川町吉原地区に適用した結果を示した。

(5)本結果の活用法として、人口密集地や重要構造物があるメッシュに対してより高密度に常時微動観測の実施を進めることで、揺れやすさマップの精度向上を図ることが可能であることを示した。

常時微動 H/V スペクトル比は、算定方法が簡便であることから、比較的安定した結果を得られることが知られている。しかしながら、気象など観測条件の影響や局所的な地盤の変化など、観測データにバラツキがあることは否定できない。このようなバラツキを適切に認識した上で、高精度の揺れやすさマップを実現するために、常時微動 H/V スペクトル比の急変部や同一メッシュ内の常時微動 H/V スペクトル比の取り扱い方、参照する伝達関数が複数の場合の取り扱い方などの課題について、今後検討を進める予定である。

謝辞

香南市防災対策課より、ボーリングデータおよび高知県によって作成された地盤モデルをご提供いただいた。また、常時微動観測の実施や本論文の投稿に対して、ご快諾いただいた。ここに記して、謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm,2013.
- 2) 高知県：【高知県版第2弾】南海トラフの巨大地震による震度分布・津波浸水予測,<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/nankai-3.html>,2012.
- 3) 高知県：【高知県版】南海トラフ巨大地震による被害想定,<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/higaisoutei-2013.html>, 2013.
- 4) 長尾毅,山田雅行,野津厚,諸星一信,小林哲人,安中正：微動 H/V を用いた東京港のサイト増幅特性のグルーピング,地震工学論文集,pp.197-205,2007.
- 5) 長尾毅,山田雅行,野津厚：常時微動 H/V スペクトルを構成する波動成分に関する一解釈,土木学会論文集 A1(構造・地震工学),Vol.68,No.1,pp.48-62,2012.
- 6) 原 忠,久保篤規,北村暢章,山田雅行,竹澤請一郎,羽田浩二,西原三登：常時微動観測による堆積地盤の揺れやすさの推定,第47回地盤工研究発表会発表講演集,pp.1689-1690,2012.
- 7) 原 忠,北村暢章,山田雅行,竹澤請一郎,羽田浩二,宮田稔久：常時微動観測による海岸平野に広がる堆積地盤の揺れやすさの推定,第48回地盤工研究発表会発表講演集,pp.1923-1924,2013.
- 8) 内閣府防災担当：地震防災マップ作成技術資料,<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050513siryu.pdf>, 2005.
- 9) 国土交通省国土地理院：自治体担当者のための防災地理情報活用マニュアル(案)－土地条件図の数値データを使用した簡便な災害危険性評価手法－,<http://disapotal.gsi.go.jp/totijouken/manual.pdf>, 2007.
- 10) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)強震断層モデル編－強震断層モデルと震度分布について－,http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report05.pdf, 2012.
- 11) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K. : Site Effect of Strong- Motion Records Observed during the 1987-Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthq. Eng. Sympo.,Vol.3, pp.85-90,1994.
- 12) 横田崇,稲垣賢亮,増田徹：数値実験による地盤特性と増幅率の関係,日本地震学会 2005 年度秋季大会講演予稿集,B064,p.86,2005.
- 13) 松岡昌志,翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング,第22回地盤震動シンポジウム,建築学会,pp.23-34,1994.
- 14) 藤本一雄,翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく平均 S 波速度分布の推定,日本地震工学学会論文集,Vol.3,No.3,pp.13-27,2003.
- 15) 松岡昌志,若松加寿江,藤本一雄,翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定,土木学会論文集,No.794/I-72,pp.239-251,2005.
- 16) 中央防災会議：「東南海地震・南海地震等に関する専門調査会」資料,<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index.html>, 2003.
- 17) 藤本一雄,翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定,日本地震工学学会論文集,第3巻,第3号,pp.13-27,2003.
- 18) 国土地理院：高知土地条件図,2006.
- 19) 国土交通省四国地方整備局：災害に強いまちづくり計画（香南市、美波町、愛南町、大豊町、中土佐町）地域モデル（案）,http://www.skr.mlit.go.jp/kensei/machizukuri/10-toshibousaijigyo/saigainituyoi_pdf/saigai_tiikimodel_02.pdf
- 20) 先名重樹,安達繁樹,安藤浩,荒木恒彦,飯澤清典,藤原広行：微動探査観測システムの開発,第115回物理探査学会学術講演会講演論文集,pp.227-229,2006.
- 21) 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.
- 22) 紺野克昭,大町達夫：常時微動の水平／上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例,土木学会論文集,No.525/I-33,pp.247-259, 1995.
- 23) 先名重樹,翠川三郎,若松加寿江：常時微動の H/V スペクトル比と地形・地盤分類を用いたスペクトル増幅率の推定,日本地震工学学会論文集,第8巻,第4号,pp.1-15,2008.
- 24) 佐藤智美,川瀬博,松島信一：微動と S 波, P 波, coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈,地震,第2輯,第51巻,pp.291-318,1998.
- 25) 神山真,松川忠司,片岡俊一：アレー強震観測システムを利用したローカルサイト増幅に関する研究,第30回土木学会地震工学研究発表会論文集,CD-ROM,2009.
- 26) 若松邦夫,安井謙：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.
- 27) 澤田義博：微動 H/V スペクトル比の特性とこれを用いた地震増幅特性の簡易推定法,物理探査,第61巻,第6号,pp.511-522,2008.
- 28) 年縄巧,西田秀明,翠川三郎,安部進：横浜市高密度強震計ネットワーク観測点における強震動と常時微動のスペクトル特性の比較,土木学会論文集,No.640/I-50,pp.193-202, 2000.
- 29) 原田隆典,中村真貴,王宏沢,齊藤将司：強震観測点の記録と常時微動 H/V スペクトル比を利用した近傍の未観測点の強震動推定法,応用力学論文集,Vol.11,pp.595-602,2008.

- 30) 中村真貴,原田隆典,市村彰,王宏沢,齊藤将司:常時微動 H/V スペクトル比を利用した強震観測点近傍の地震動推定法,第30回土木学会地震工学研究発表会論文集,CD-ROM,2009.
- 31) 四国地盤情報活用協議会:四国地盤情報データベース CD-ROM(平成22年度版),2010.
- 32) (独)防災科学技術研究所:地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 33) 国土地理院:電子国土 Web.NEXT, <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/index.html>, 2012.
- 34) 長尾毅,山田雅行,野津厚:常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性経験的補正方法に関する研究,構造工学論文集,Vol.56,pp.324-333,2010.
- 35) 岩田知孝,入倉孝次郎:観測された地震波から,震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み,地震2,Vol.39,No.4,pp.579-593,1986.
- 36) 長尾毅,平松和也,平井俊之,野津厚:高松港における被害地震の震度再現に関する研究,海洋開発論文集,第22巻,pp.505-510,2006.

(原稿受付 2013.8.30)

(登載決定 2014.2.24)