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

澤田義博*

要 旨

微動H/Vスペクトル比が表層の地震増幅特性に近似するかどうかを明らかにすることを目的として、表層の薄い硬質地盤から厚い堆積平野における地震観測点を対象に微動を観測し、地震観測データと比較した。その結果、微動H/Vスペクトル比には、表層における水平動と上下動の両方の応答特性が反映されており、微動H/Vが表層の地震増幅特性に近似するという考えは、実際のS波地震増幅特性をかなり過小評価する可能性があることが明らかになった。このため、微動H/Vの卓越周波数およびピーク振幅に着目し、卓越周波数と基盤深度、ピーク振幅と水平伝達関数の関係を用いて、2層構造モデルを仮定することにより、表層地盤の地震増幅特性を簡易に推定する手法を新たに提案した。この簡易推定法の適用性を地震観測データにより検証した結果、推定結果に1.4倍程度の余裕を考慮することにより、硬質地盤から厚い堆積層の地盤までおおよその地震増幅特性を概ね安全側に推定でき、本推定法は詳細調査に先立つ概査法として有用と考えられる。

キーワード：微動・H/Vスペクトル比・卓越周波数・地震動・地震増幅特性

1. はじめに

微動H/Vスペクトル比に関しては、その形状が表層のS波の地震応答特性に近似する（中村・上野，1986；Nakamura, 1989；中村，1998）という提案以来、いわゆる「中村の方法」として世界的に広く流布している。微動H/Vスペクトル比の形状は比較的安定し、軟質地盤では顕著なピークを有するが、岩盤や硬質地盤では平坦あるいは1に近いこと、また、軟質地盤ではそのピークは地盤の地震応答特性の卓越周期に良く一致すること等については、これまで行われた多くの研究についてのレビュー（例えば、Bard, 1999; Kudo et al, 2004）でも指摘されているように、大方の研究者の一致するところである。しかし、微動H/Vの形状が表層のS波地震応答特性に近似することに関しては、微動は表面波が優勢とする研究（例えば、堀家，1993）ではこうした考えそのものが受け入れ難いことに加え、これに肯定的な報告（例えば、Lermo and Chavez-Garcia, 1993; Seekings et al., 1996）、否定的な報告（例えば、Toshinawa et al., 2000）およびその中間的な結論を述べている研究（例えば、

Riepl et al., 1998）もあり、未だその是非について十分に明らかにされているとはいえない。

一方、微動H/Vスペクトル比の利用については、堆積平野の3次元構造の推定（Uebayashi, 2003）、上下動のシミュレーション（Zao and Horike, 2003）、S波速度構造や地震基盤、工学的基盤の推定（例えば、時松・宮寺，1992；中村ほか，2000）など、また、地盤の地震増幅特性に関しては、リファレンスサイトにおける地震動と微動H/Vスペクトル比を基準として他地点の地震増幅特性を求める研究（大熊ほか，2002）も行われているが、微動H/Vスペクトル比と地震基盤より以浅の地震増幅特性を議論している例は少ない。

このため、筆者等は地表と地中で地震観測データが得られており、かつ、地中のS波速度が1500m/s以上のKiK-net（基盤強震観測網）の観測点で微動を観測し、地震観測データとの比較を行った。その結果、中村の方法は実際のS波地震応答特性を過小評価する可能性が高いことを明らかにするとともに、濃尾平野における検討結果を加えて、工学的な観点から、地震応答特性を簡易に推定する手法を提案した（澤田ほか，2001；澤田ほか，

2008年10月3日原稿受付；2009年1月7日受理

*（財）地震予知総合研究振興会

〒101-0064 東京都千代田区猿樂町1-5-18 千代田ビル8階

© 2008 SEGJ

第104回（平成13年度春季）、第110回（平成16年度春季）、第114回（平成18年度春季）学術講演会にて一部を発表

2004; Sawada et al, 2004; 澤田ほか, 2006)。

しかしながら, この簡易推定法は, 微動H/Vスペクトル比の卓越周波数とピーク振幅に着目し, 卓越周波数と基盤深度の関係, およびピーク振幅と地表—基盤間の水平伝達関数の関係について, 限られた観測データを定式化することに基づいており, 地盤データや実測データに基づきその適用性を検証する必要がある。

そこで, 本研究報告では, これまで実施してきた微動観測に基づく微動H/Vスペクトル比の特性について総括し, これに基づく簡易推定法について述べるとともに, KiK-netのPS検層データと2004年9月5日に発生した紀伊半島沖地震(M7.4)の観測データに基づき, 簡易推定法の適用性を検討した。

2. 微動 H/V スペクトル比の特性について

2.1 微動観測, データの概要

微動 H/V スペクトル比と地震動の対応を検討するにあたり, 以下のような方針で微動観測地点を選定した。

- 地震観測データが得られている地点。特に, 地表と基盤の観測データがある地点。
- できるだけ, ボーリングや地震探査等により地盤構造に関する情報がある地点。
- 広い周波数範囲をカバーするよう, 表層が薄い硬質地盤から厚い堆積平野までの地点。

このため, 本研究では, KiK-net (基盤強震観測網), K-NET (強震観測網), 濃尾平野に着目するとともに, 地盤構造はやや不明であるが, 比較的狭い地域に高密度で展開されている東濃強地震観測網の各観測地点を微動観測地点に選定した。これらの観測地点の概略位置をFig.1の(a), (b), (c)に示す。

まず, KiK-net では, 地中地震計が設置されている岩盤のS波速度(V_s)がほぼ1500m/s程度以上であり, かつ, 地盤の卓越周波数が概ね10Hz程度以下と予想される176地点を選定した(岩盤の V_s の最小値は約1300m/s, 最大値は約3100m/s, 1500m/s~2500m/sが約78%を占めており, その平均値は約2200m/s)。地震基盤との関連性を検討するには, V_s が3000m/sまたはそれ以上の地点が望ましいが, この条件を満たすKiK-net観測点は非常に少ないため, 地震基盤に近い岩盤として $V_s \geq 1500$ m/sの地点を選定条件としたものである(以下では, これらの岩盤を「基盤」, また, 基盤より上部の地盤を「表層」と称する)。選定地点は全国に分布するが, 北上高地, 阿武隈高地, 美濃三河高原, 紀伊半島や中国・四国山地など, 山地に多く偏在している。基盤は泥岩, 安山岩, 花崗岩, 片岩等, 表層はローム, 砂, 粘土, 砂礫, 風化岩など様々な地層より構成されており, 総じて比較的硬質な地盤が多いと言えよう。各観測点のボーリング孔の深さは100m級が多く, 200m以下が約

80%を占めるが, OSKH02 (此花, 2008m), GIFH09 (羽島, 1508m) など, 1000mを超える地点が5点含まれている。なお, K-NETの中から, 数Hzまたは数秒の中間周期付近にピークを持つことが予測される地点として仙台平野の観測点を中心に11地点を追加した。

次に, 濃尾平野では, 自治体による44点の地表強震観測点のほか, K-NET点および名古屋大学が温泉ボーリングを利用して基盤と地表に地震計を設置したSNO (山王, 690m)地点(山口ほか, 1999)を加えた合計47地点を微動観測点とした。濃尾平野の基盤は, その東端の猿投山付近では花崗岩が露頭しているが, 東から西に行くに従い深くなり, 西端の養老断層付近では2~2.5kmに達する(愛知県, 2002)。このため, 基盤深度と微動H/Vの卓越周波数の関係を調べるために, 愛知県

(a) Kik-net and K-NET

(b) Nobi basin

(c) Tono region (vicinity of Mizunami city)

Fig.1. Distribution of microtremor observation sites in KiK-net, K-NET, Nobi basin and Tono region.

により実施された濃尾平野を東西、南北に横切る 3 本の反射法地震探査測線上において、約 1.5km 間隔の計 54 地点でも微動を観測した。

さらに、岐阜県東濃地域（土岐市、瑞浪市、恵那市付近）の比較的狭い地域に高密度展開されている 50 数点の東濃地域強地震観測網（（財）地震予知総合研究振興会、2005）のうち、39 地点を微動観測対象とした。地盤構造が明らかになっている地点は少ないが、地震計が設置されている深さ 4m の孔底付近の地質は砂礫や花崗岩、砂岩、泥岩等の風化岩が多いことから、表層の薄い硬質地盤に相当すると考えられる。

以上により、微動観測地点は合計 327 地点、このうち、濃尾平野の反射法測線の観測点を除く 273 地点では、地震データとの比較が可能である。

KiK-net 地点、K-NET 地点、および濃尾平野における微動観測データは 2000 年から 2005 年の間に、東濃地域における観測データは主として 2004 年から 2005 年にかけて観測したものである。観測に際して、一部のデータは複数の大学の協力を得た。観測機器は、数ヶ所の地点で長周期速度計（PELS、固有周期 8 秒にセット）および過減衰型加速度計（JEP 6 A3、（株）ミツトヨ製）を用いたが、ほとんどの地点で固有周期 1 秒の速度型高感度地震計（PMK-110；（株）勝島製作所製）を電気的に見かけ周期 5 秒に延ばしたものをを用い、分解能 16bit の A/D コンバーターにより、サンプリング周波数 100Hz でパソコンに収録した。

微動観測は、地震観測地点近傍の地表における 1 点 3 成分観測である。KiK-net のうち基盤が浅い地点、東濃地域では、パソコン画面上で波形を確認しながら交通振動等のノイズができるだけ混入しない約 40 秒間のデータを最低 10 セット、また、深部ボーリング地点など基盤の深い KiK-net 観測点、濃尾平野、K-NET ではデータ長約 80 秒間を最低 5 セット収録した。微動のフーリエスペクトルは、スペクトルのピークを捉えやすくするためにバンド幅 1.0Hz、0.5Hz、0.05Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化し、データセットごとに水平動 2 成分の幾何平均に対する上下動成分の比（H/V スペクトル比）を求め、それらの算術平均値をその地点の微動 H/V スペクトル比とした。

KiK-net、K-NET の観測点で解析に用いた地震データは、（独）防災科学技術研究所のホームページよりダウンロードした。また、濃尾平野に展開している愛知県、名古屋市、三重県の各観測点に関しては、名古屋大学が所有している観測データを用いた。その際、解析に使用した地震データの選定条件として、データの分解能の確保およびできるだけ表面波が含まれない地震波を選定するため、マグニチュード $M \geq 3.0$ 、最大加速度 $A_{max} \geq 3.0 \text{ gal}$ 、震央距離 $R \leq 200 \text{ km}$ 、震源深さ $D \geq 10 \text{ km}$ とした。観測

地点毎に原則として 5 セット収集した。東濃強地震観測網では、2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分に紀伊半島沖で発生した M7.4 の地震による波形が全地点で観測されているため、この観測記録を使用した。

次に、収集した地震動記録の S 波到着から基盤が浅い地点では約 5 秒間、深い地点では約 20 秒間の波形を切り出し、次の 5 つのスペクトル比を求めた。①地表地震動の水平成分と上下成分のスペクトル比； H_u/V_u 、②地中地震動の水平成分と上下成分のスペクトル比； H_L/V_L 、③地表と地中における水平成分のスペクトル比； H_u/H_L 、④地表と地中における上下成分のスペクトル比； V_u/V_L 、⑤地表と地中における水平成分、上下成分のスペクトル比の比； $(H_u/V_u) / (H_L/V_L) = (H_u/H_L) / (V_u/V_L)$ 。ここで、H は水平 2 成分のスペクトルの幾何平均、V は上下成分のスペクトル、添え字の U は地表、L は地中を示す。KiK-net 観測点では、各スペクトル比を地震データごとに計算し、5 データの算術平均値を最終的なスペクトル比とした。なお、KiK-net 観測点以外の地点では地中の観測記録が得られていないため、①のみである。また、以下の検討では、便宜上、上記の各スペクトル比のうち、特に①を「地震動 H/V」と称する。③、④は観測値の間の伝達関数と考えることもできるので、③を「水平伝達関数」、④を「上下伝達関数」、⑤を「伝達関数 H/V」と呼ぶこととする。

2.2 微動 H/V スペクトル比と地震動のスペクトル比

KiK-net、濃尾平野および東濃の各観測点の中から、微動 H/V と地震動の各スペクトル比を対比した例を Fig.2 に示す。図は、後述の微動 H/V と地震動 H/V の近似度からランク分けした場合の A ランク（微動 H/V と地震動 H/V の対比が良好）に相当する代表例であるが、後述するように、A ランクとこれより近似度はやや低下するものの対比が見られる B ランクを合わせると、全観測点の約 80% を占めており、これらのデータから得られる特徴をまとめると次のようである。

- 1) 多くの地点で、地震動の各スペクトル比の卓越周波数はほぼ一致し、微動 H/V のそれと良い対応が見られる。
- 2) 多くの場合、地震動 H/V の形状と伝達関数 H/V のそれはほぼ近似する。また、微動 H/V はピーク振幅がやや小さくなる傾向があるが、地表地震動 H/V、伝達関数 H/V に概ね近似する。
- 3) 一般に、地震動の水平伝達関数は、微動 H/V に比べかなり大きい。

ここで、伝達関数 H/V は、地表と基盤の各々において地震動の水平成分と上下成分の比を求め、更に地表と基盤の間でその比を求めたものであり、表層における地震動の水平伝達関数と上下伝達関数の比に等しい。したが

って、上記の 1), 2) から、地震動 H/V は表層における水平動と上下動の双方の地震応答特性を反映したものと考えることができると同時に、微動 H/V も地震動 H/V と

Fig.2. Example of comparison between microtremor H/V spectral ratios and several earthquake spectral ratios derived from earthquake observation records at KiK-net sites, Nobi basin and Tono region on the case of A Rank in the degree of similarity.

Fig.3. Spectral ratios of vertical component versus horizontal component on the borehole bottom of KiK-net sites.

同様に、表層における水平動と上下動の両方の応答特性を反映したものであると解釈することができる。このことは、地震動、微動に限らず、地表観測値の H/V スペクトル比そのものから、水平成分と上下成分を分離することは不可能であることを意味する。

一方、水平伝達関数は表層における観測波の応答であり、入射応答そのものではないものの、近似的には表層における S 波の入射応答特性に準ずると考えられる。したがって、3) から、表層の S 波応答特性は微動 H/V に比べて大きいこと、言い換え得れば、微動 H/V は表層の S 波応答特性を近似してはいないことが示唆される。

次に、KiK-net に関し、水平多層構造、鉛直入射を仮定して理論的な地震動 H/V、S 波入射応答特性およびレイリー波の H/V を求めた。検討対象地点は初期に微動観測した 70 地点で、地盤定数等は PS 検層データと地表、地中の地震観測データに基づき求めた最適地盤構造（澤田ほか、2002）を用いた。既述のように、地震動 H/V には水平動と上下動の双方の応答特性が反映されている。ここで、S 波部分の上下動成分は基盤に斜め入射した SV 波が P 波に変換されたものと考えられる（藤堂ほか、1998）ため、S 波（SH 波）と P 波の入射応答特性を求めればよいが、S 波と P 波では基盤での入射波の振幅は異なる考えるべきである。一方、地中地震計のデータから基盤での上下動成分と水平動成分のスペクトル比を求めると、Fig.3 に示すようにばらつきはあるものの、周波数依存性は小さく、平均的には 0.7 程度が得られた。そこで、この比率を基盤での入射波の振幅比とみなして、地表における S 波と P 波の応答特性の比から理論的な地震動 H/V を求めた。結果の例を微動 H/V とともに Fig.4 に示す。検討した地点の約 50% において次の関係が認められた。

- 各理論値の卓越周波数はいずれもほぼ対応し、微動 H/V とも整合的であり、実体波が支配的であれ、表面波が支配的であれ、表層の卓越周波数は概ね変わらない。
- スペクトル振幅については、理論的な地震動 H/V と微動 H/V は概ね近似する。また、S 波入射応答特性は微動 H/V に比べかなり大きい。

Fig.4. Example of comparison of microtremor H/V and several theoretical spectral ratios between surface and bottom at KiK-net site.

すなわち、先に述べた観測による各応答特性と微動 H/V との関係は、理論的な検討でも支持されたといえる。なお、レイリー波 H/V は、卓越周波数において極大値を示すため、振幅については議論しないこととする。

以上の観測データの解析および理論的検討から、微動 H/V が表層の S 波応答特性に近似すると見なすことは、実際の S 波入射応答特性を過小に見積もり、危険側の評価となる恐れが大きいことが判る。

さらに、微動 H/V と地震動 H/V に関して、次の定義にしたがって、定性的ではあるが両者の近似度を 3 段階にランク分けした。このランク分けの目的の一つは、次に検討する微動 H/V と地震データとの対比において、棄却する微動データの判断基準をある程度明確にするためでもある。

A ランク：微動 H/V のピークが明瞭であり、卓越周波数、ピーク振幅、形状の対応が良い。

B ランク：微動 H/V にピークが認められ、卓越周波数、ピーク振幅、形状の対応がやや良い。

C ランク：微動 H/V にピークが認められないか、認められても卓越周波数、ピーク振幅、形状の対応が悪い。

なお、地震動 H/V のスペクトルピークに関しては、振幅 3 以上の明確なピークが、Kik-net, K-NET, 濃尾平野では観測点の約 90%, 東濃地域では 70% 強に認められている。

ランク分けの結果は Table 1 のようになった。全観測点 273 地点の 33% に当たる 89 地点が A ランク、47% (129 地点) が B ランクとして認定された。A および B ランクの地点を合わせると 80% となり、高い比率で微動 H/V と地震動 H/V には近似性があると言える。また、C ランクとなったものは全体の 20% (55 地点) であるが、そのほとんどが KiK-net および東濃地域であった。KiK-net および東濃地域では、岩盤に近い地点や平坦ではないなどの地形的影響が考えられる地点があり、こうしたことが C ランクとなった理由と考えられる。

C ランク地点の微動データは今回の検討に適していないと考えられるため、以降の検討は、A ランク、B ランクのデータについて行うものとした。

Table1. Classification of degree of similarity.

Rank	KiK-net	K-NET	Nobi	Tono	Total (%)
A	45	7	22	15	89 (33)
B	88	4	22	15	129 (47)
C	43	0	3	9	55 (20)
Total	176	11	47	39	273 (100)

2.3 卓越周波数、ピーク振幅等について

最初に、卓越周波数に関して、微動 H/V と地震動の各スペクトル比を対比した。このうち、微動 H/V と地震動 H/V, 微動 H/V と水平伝達関数との対比を Fig.5 に示す。微動 H/V と地震動の各スペクトル比の卓越周波数はほ

ぼ 1 対 1 に対応しており、いずれも非常に高い相関性が認められる。微動 H/V の卓越周波数が地震動 H/V のそれによく近似することは良く知られた事実であるが、微動 H/V は地表の地震動 H/V のみならず、地震応答特性に関連する各種スペクトル比の卓越周波数とも良く対応しており、今回のデータに基づく、概ね 0.2Hz から 10Hz 程度までの広い周波数範囲において、また、硬質地盤から厚い堆積地盤に至る種々の地盤において、微動 H/V に卓越周波数が出現する場合には、それらから地盤の地震応答特性の卓越周波数を精度良く予測することが可能であると考えられる。

次に、KiK-net 観測点について、微動 H/V と地震動 H/V, 微動 H/V と水平成分伝達関数のスペクトルピーク振幅を対比した結果を Fig.6 に示す。ピーク振幅に関しては、微動 H/V と各スペクトル比との対応は必ずしも良いとは言えない。しかしながら、概して微動 H/V のピーク振幅が大きくなるほど、地震動の各スペクトル比のピーク振幅が大きくなる傾向が認められる。微動 H/V のピーク振幅を基準として地震動の各スペクトル比のピーク振幅の倍率を求めると、Table 2 に示すようである。いずれのピーク振幅比も大きなばらつきを有するが、地震動 H/V と微動 H/V のピーク振幅比の平均は 1.2, 伝達関数 H/V と微動 H/V のそれは 1.3 であり、地震動 H/V と

Fig.5. Comparison of the predominant peak frequencies between microtremor H/V and earthquake H/V (left side figure), horizontal transfer function (right side figure).

Fig.6. Relation of the predominant peak amplitudes between microtremor H/V and earthquake H/V (left side figure), horizontal transfer function (right side figure).

Table 2. Peak amplitude ratios based on microtremor H/V.

Earthquake Spectral Ratio	Average	Stand. Dev.
Earthquake H/V	1.21	0.56
Transfer Function H/V	1.32	0.56
Horizontal Transfer Function	3.84	2.29

伝達関数 H/V のピーク振幅は同程度で、かつ、微動 H/V はこれらよりやや小さい値となる。これに対し、水平伝達関数と微動 H/V のピーク振幅比は平均値で3.8倍という高い値となっていることが注目される。

さらに、各スペクトル比の $0.1\text{Hz}\sim 10\text{Hz}$ 区間におけるスペクトルの積分値(面積)を求め、これをスペクトル強度と定義する。一例として、Fig.7に微動 H/V の卓越周波数を横軸に、縦軸に地震動の水平伝達関数のスペクトル強度に対する微動 H/V のスペクトル強度の比を示す。スペクトル強度比は高周波数になるほど値が小さくなる周波数特性を有することが明らかである。これは、微動 H/V の振幅が、ピーク周波数付近より高周波数側では地震動のスペクトル比に比べ小さくなる傾向にあることに起因していると考えられる。したがって、微動 H/V を用いて、例えば表層の地震応答特性を推定しようとする場合、微動 H/V スペクトル比の形状そのものを用いることは適切ではないことが判る。

最後に、濃尾平野で行われた反射法測線に沿った微動 H/V の卓越周波数と基盤深度の関係について触れる。濃尾平野では東西方向2測線(EW-1, EW-2)、南北方向に1測線(NS)の反射法地震探査が行われ、基盤($V_p=5.5\text{km}$)に至るまでの構造が明らかにされている。これらの反射法測線に沿った微動観測から、微動 H/V に現れる低周波数側の卓越周波数と基盤深度の関係を示すと Fig.8 のようである。図の横軸は反射法の測線長、左縦軸は微動 H/V の卓越周波数、右縦軸は基盤深度であり、微動 H/V の卓越周波数は●印、基盤深度は実線で示してある。この図から、微動 H/V の卓越周波数と基盤深度の

Fig.7. Relation of the spectral intensity ratios (horizontal transfer function/microtremor H/V) and the peak frequencies of microtremor H/V .

Fig.8. Relation of the peak frequencies of microtremor H/V and the depth of base rock along three reflection survey lines in Nobi sedimentary basin. Black circles are the peak frequency and black lines indicate the depth of base rock.

間には、一定の比例関係があることが認められる。すなわち、微動 H/V の卓越周波数は地震基盤の深さに強く依存していると考えることができよう。

3. 地震増幅特性の簡易推定法

以上のように、微動 H/V スペクトル比は、その卓越周波数については高い信頼性を有している。また、そのピーク振幅および形状に関しては、ばらつきは大きいものの、地震動と一定の相関性が認められるため、こうした特性を踏まえたうえで、その工学的応用の一つとして、表層における地震増幅特性を簡易的に推定する手法を検討。

地盤の地震応答特性を評価する上で最も重要なのは、基盤への S 波入射による地震増幅特性であり、これにはボーリングを初めとする各種地盤調査により、その地点周辺における基盤に至るまでの地盤構造を詳細に知る必要があり、通常、かなりの経費と労力を要する。しかしながら、例えば、予備検討段階においては、地盤性状が良くわからなくても概略の地震増幅特性を把握する必要がある事は案外多いものである。このため、容易に観測できる微動 H/V を用いて、これを簡易に推定する手法があれば、詳細な検討を実施する前の概査法として有用と考えられる。

微動 H/V の形状が地震増幅特性に近似すると仮定した場合、実際の地震増幅特性を過小評価する恐れがある。また、微動 H/V のスペクトル強度と地震の各種スペクトル強度の比は周波数依存性を有しており、これらのことから、地震増幅特性の推定に際して、微動 H/V のスペクトル形状そのものを用いることは困難と考えられる。

そこで、微動 H/V の卓越周波数とそのピーク振幅値に着目し、これらと地震データとの関係および微動 H/V の卓越周波数と基盤深度の関係を定式化するとともに、2層構造モデルに基づく重複反射理論によって、地震増幅特性を推定する方法を検討した。Fig.9に簡易推定法のフローを示す。この図にしたがって、簡易推定手法の概略を述べると、次のようである。

図の左側のフローにより、微動 H/V の卓越周波数から基盤深度を求め、地盤モデルとして最も簡単な2層構造モデルを仮定して入射応答特性を求める。ここで求めた入射応答特性は、微動 H/V の卓越周波数を有するさまざまな地盤の平均値であり、その地盤固有のものではない。このため、図の右のフローによりこれを補正する。補正は微動 H/V のスペクトルピーク振幅と水平伝達関数との関係および入射地震応答のピーク振幅に対する微動 H/V のピーク振幅比の二つにより行う。

まず、濃尾平野では微動 H/V の卓越周波数と基盤深度の間には一定の比例関係が認められたことから、KiK-netの各地点のPS検層データに基づき、基盤深度

に対する微動 H/V の卓越周波数をプロットすると Fig.10 に示すようである。図には濃尾平野のデータもプロットされている。KiK-net の基盤深度は、多くが $V_s=1500\text{m/s}$ 以上の岩盤の上面深度であるが、場合によっては、コントラストの大きな速度境界までの深さを採用した。KiK-net のデータを見ると、ばらつきはやや大きいものの、微動 H/V の卓越周波数と基盤深度は大局的に反比例する関係が認められる。ただし、濃尾平野のデータと KiK-net のデータでは周波数依存性がやや異なる傾向があるため、データ全体に対応する近似式をフォワードモデリングで求めると、次式を得る。

$$h = 150 f_p^{-(0.85+0.1/f_p)} \quad (1)$$

ここで、 h は基盤深度 (m)、 f_p は微動 H/V の卓越周波数である。この式により、KiK-net 観測点のような硬質地盤から、濃尾平野のような厚い堆積平野に至る各種の地盤に対して、微動 H/V の卓越周波数から平均的な基盤深度を推定することが可能となる。

Fig.9. Flow chart on a simple estimation method of S wave amplification characteristics of surface layer using microtremor H/V spectral ratios.

基盤深度の推定結果を用いて、その地点での地震増幅

Fig.10. Relation between the peak frequency of microtremor H/V and the depth of base rock.

特性を簡易的に推定する。地盤構造として、ここでは最も単純な 2 層構造を仮定する。微動 H/V の卓越周波数 f_p から式 (1) を用いて表層の厚さ h を求める。次に、 $1/4$ 波長則から、表層の平均的な S 波速度 $\bar{V}_s$ を求める ($\bar{V}_s = f_p \times 4h$)。すなわち、2 層構造モデルは、その卓越周波数が微動 H/V の卓越周波数 f_p に一致するように定数を決定する。基盤の S 波速度は地震基盤に相当する $V_s=3000\text{m/s}$ とし、表層および基盤の密度 ρ 、減衰量 Q 値は、一般的な値として、Fig.11 のように一律に仮定する。なお、表層の Q 値は KiK-net の最適地盤構造の検討結果 (澤田ほか, 2002) に基づいている。種々の地盤特性がある中で、こうした仮定はあまりにも便宜的との批判は避けられないが、ここでは、微動 H/V が有する情報のうち卓越周波数のみに着目しており、これを実現できる地盤構造であれば、細部にこだわる必要はないと考えられる。なお、地盤構造としては、他の情報があれば多層構造や不整形地盤構造を想定することも可能であるが、表層の卓越周波数は微動 H/V のそれと一致させる必要がある。

このモデルから得られた入射応答特性 A_T (S 波増幅特性) は、微動 H/V の卓越周波数にのみに着目したもので

Fig.11. Two layer model.

あり、いわば、ある卓越周波数を有する色々な地盤の平均的な応答特性である。個々の地盤は、卓越周波数が同じであっても基盤深度、表層 S 波速度は様々であり、これらは卓越周波数に対してトレードオフの関係にある。したがって、入射応答特性の振幅は、何らかの方法で個々の地盤ごとに補正することが必要である。一般に、地震増幅特性の大きさは基盤と表層のコントラストに依存し、また、コントラスト比が大きい地盤においては微動 H/V のピーク振幅も大きいと考えられることから、微動 H/V のピーク振幅を補正に用いることを検討する。

地表と基盤との間の水平伝達関数は、前にも述べたように、入射応答そのものではないものの、近似的には表層における S 波の入射応答特性に準ずると考えられる。そこで、微動 H/V のピーク振幅 (A_M) と水平成分に関する基盤と地表との間の伝達関数 (T) のピーク振幅の関係を、微動 H/V の卓越周波数に対して次のように定式化する。

$$T(f_p) = \alpha \times A_M(f_p) \quad (2)$$

Fig.12 は、横軸に微動 H/V の卓越周波数、縦軸に水平成分の伝達関数と微動 H/V のピーク振幅比をプロットしたものである。ピーク振幅比のばらつきは大きい、

1~2Hz 付近より低周波側では比率が低下して 1 に近づく傾向が認められるようである。低周波が卓越する地盤は堆積層が厚く、地震と微動の両方に表面波成分が卓越することにより、両者のピーク振幅が近似してくる可能性が考えられる。このため、補正係数 α は、低周波ほど 1 に近づくことを考慮し、次の関数形を適用する。

$$\begin{aligned}\alpha &= 1.5f + 1 \quad (f < 2) \\ \alpha &= 4.0 \quad (f \geq 2)\end{aligned}\quad (3)$$

Fig.12. Peak amplitude ratio between the horizontal transfer function based on microtremor H/V and the formulation curve.

一方、2層構造モデルによる入射応答特性 A_T は、種々の地盤の平均的な特性を示すものであるため、何らかの方法でその地点固有の地盤特性で補正する必要がある。地震動も微動 H/V も基盤と表層のコントラストに影響されるため、ある地点の微動 H/V のピーク振幅は、その地点の平均的な入射応答特性からのずれを表す指標と見なすことができると考えられる。したがって、 A_T の補正係数を β とすると、

$$A_T * \beta = T \equiv A_M * \alpha \quad (4)$$

すなわち、

$$\beta = (A_M / A_T) * \alpha \quad (5)$$

先に求めた 2 層構造の入射応答特性スペクトルに β を乗じたものを、最終的に推定される地盤の入射地震応答スペクトルとした。

4. 簡易推定法の適用性について

上記の地震増幅特性の簡易推定法が、実際の地盤でどの程度の適用性を有するか、KiK-net 観測点、濃尾平野、東濃地域の各観測点で検証した。KiK-net 観測点ではボーリングデータをもとに重複反射理論により求めた入射応答と比較し、東濃地域および濃尾平野においては地震動の実測データと比較した。

まず、KiK-net 観測点では、PS 検層データが得られて

いるため、重複反射理論に基づき地震増幅特性を計算できる。KiK-net 観測点における簡易推定法によって求めた地震増幅特性とボーリングデータに基づく計算結果を比較した例を Fig.13 の (a) に示す。各地点の推定地震増幅特性は 1 次の卓越周波数に関してはほぼ一致し、高次ではややずれる地点も見られるが、全体的なスペクトル形状はボーリングに基づく結果と概ね対応している。これらの地震増幅特性はスペクトル振幅 1 の入射波に対する増幅特性であるため、実際の地表地震動にどのような差が生じるか明確ではない。このため、簡易推定法により推定した地震増幅特性および PS 検層データに基づく地震増幅特性の各々に入射波を乗じて、各地点の地表における加速度波形を求め、これらと比較することとした。入射波は、後述の濃尾平野における検討と同じく、GIFH09 (羽島) の深さ 1,530m の地中観測点で観測された 2004 年の紀伊半島沖地震 (M7.4) の波形を用いた。

得られた波形の最大加速度値に関して、観測値と推定値の比 (観測値/推定値) を求め、各観測点に対してプロットした結果を Fig. 13 の (b) に示す。ここで、PS 検層データに基づく地震増幅特性を用いた場合の地表波形の最大値を、便宜上、観測値とみなしている。図に示すように、最大加速度比はかなりバラつき、標準偏差値は 0.43 と大きいが、平均値は 0.90 であった。KiK-net 地点における本手法による推定値は、PS 検層データから計算された値に比べ、平均的にはやや安全側の結果を与えるようである。

次に、東濃強地震観測網では、2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分に紀伊半島沖で発生した地震 (M7.4) の波形がほぼ全点で観測されている ((財)地震予知総合研究振興会, 2005)。そこで、簡易推定法による結果とこれらの観測波形による各点の地震増幅特性と比較した。各測点における地震増幅特性を求めるために、入力地震動を推定した。観測網の中心に近い麗澤地点 (Fig.1 の (c) に示す RTK) では地盤調査から深さ 4m で $V_s=2133\text{m/s}$ の堅硬な花崗岩の基盤が確認されている。一方、麗澤地点に近接した屏風山地殻活動観測点 (Fig1 の (c) に示す BYB)

Fig.13. Examination on the applicability of the estimation method at KiK-net sites from comparison of the amplification characteristics and the maximum acceleration ratios on the ground surface.

では地下 1000m の孔底で観測波形が得られている。そこで、麗澤地点の観測記録から、瑞浪市の超深地層研究所が掘削している主立坑の解析モデルに用いられている S 波速度構造（延藤ほか，2003）を参考にした地盤モデル（Fig.14 の（a））を用いて重複反射理論により地下 1000m での入射波形（RTK）を求め、屏風山の観測波形（BYB）と比較して Fig.14 の（b）に示した。両者のスペクトル形状は類似するが、RTK の振幅は BYB より若干小さい。ここで、BYB は観測値であるから、地下 1000m でも上層からの反射波の影響が混入している可能性があるため、入射波は BYB より小さいと考えられる。一方、RTK は水平多層構造を仮定しているが、実際の地盤は不整形の構造を有し、かつ地震波も鉛直入射ではないため、入射波は RTK より大きいと推測される。したがって、実際の入射波は BYB と RTK の中間にあると考えられるため、両者の幾何平均をとったものを入射波スペクトルとした（Fig.14 の（b）に示す ORIGINAL）。これを用いて各観測点における水平成分の幾何平均スペクトルを割り、観測から得られる地震増幅特性と見なすこととした。その際、東濃地域の震央距離は約 240km と遠いことから、距離や方位の補正は行わなかった。

Fig.15 の（a）に地震増幅特性の比較例を示す。簡易推定法により、観測の地震増幅特性のスペクトル形状全体を模擬するのは難しいが、ピーク周波数、ピーク振幅

Fig.14. Estimation of input wave at Tono sites.

(a) Amplification characteristics (b) Max. acc. ratios

Fig.15. Examination on the applicability of the estimation method at Tono sites from comparison of the amplification characteristics and the maximum acceleration ratios on the ground surface.

は概ね対応している。推定した地震増幅特性と観測による地震増幅特性に入射波を入力し、地表における応答波形の最大加速度を求め、それらを比較した。入射波は BYB の観測波（NS 成分）を用いた。観測波形と推定波形の最大加速度の比（観測値/推定値）を Fig. 15 の（b）に示す。横軸は観測点の番号である。平均値は 1.18、標準偏差は 0.42 であり、推定波形の最大加速度は観測波形のそれより若干小さい値を与える。したがって、簡易推定法を適用する場合は、平均値＋標準偏差を考慮することが、安全側の評価といえる。

最後に、厚い堆積層を有する濃尾平野における簡易推定法の適用性を検討した。東濃地域と同じく 2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分に発生した紀伊半島沖地震（M7.4）の観測波形を検討に用いた。濃尾平野の KiK-net 観測点の GIFH09（羽島）では、深さ 1530m に地中地震計が設置されており、深さ 700m 以深の Vs は 3040m/s と地震基盤に相当する。地中地震計の記録には、ある程度上層からの影響も含まれていることは否定できないため、入射波を過大に評価する可能性がある。しかし、地震計の設置深度が基盤面よりかなり深いこと、東濃における検討結果でも、地中深部の観測波と実際の入射波のスペクトルの差異は濃尾平野の地震増幅特性に影響の大きい 1Hz より長周期側では 1/2 割であり、かつ、GIFH09（羽島）が濃尾平野の西北端に位置し、濃尾平野の各観測点分布の中心に対して震央距離が 1 割程度大きいことから、観測波形をそのまま入力地震動と見なしてもそれほど過大評価にはならないと判断し、地中地震動の NS、EW 成分の幾何平均スペクトルを入射波のスペクトルとした。各強震観測点の観測波と入射波との比から、各地点の地震増幅特性を求めた。なお、濃尾平野における強震観測地点の分布はやや広がっているが、それでも震源からかなり離れているため（観測点分布の中心で約 215km）、入力地震動に関して、距離や方位による補正は行っていない。

Fig.16 の（a）に推定結果と観測の地震増幅特性の比較例を示す。堆積層が厚いことから、ほとんどの地点で

(a) Amplification characteristics (b) Max. acc. ratios

Fig.16. Examination on the applicability of the estimation method at Nobi basin sites from comparison of the amplification characteristics and the maximum acceleration ratios on the ground surface.

長周期にピークが見られ、また、ピーク振幅値は 10 倍から 20 倍と大きい。推定値はスペクトルの高周波までの形状を模擬することは困難であるが、ピーク周波数およびピーク振幅に関しては概ね模擬されていると言える。次に、加速度波形との比較を行った。ここでは GIFH09 の NS 成分を入力地震波形として用いた。最大加速度比(実測/推定)を Fig. 16 の (b) に示す。最大振幅比の平均は 1.05、標準偏差は 0.36 であり、KiK-net、東濃地域に比してばらつきはやや小さい。

以上の検証結果から、簡易推定法に基づく地震増幅特性は、ボーリングデータや実測データに基づく地震増幅特性の詳細な形状までの模擬は困難であるが、卓越周波数およびピーク振幅について、概ね良好に表現している。また、地表における波形の最大加速度の比(観測値/推定値)は、Table 3 に示すように、平均値は 0.9~1.2、標準偏差は 0.36~0.43 に分布し、これらの平均値、標準偏差は、各々 1.0、0.40 となる。

したがって、Kik-net 観測点や東濃地域のような比較的表層の薄い硬質地盤から、濃尾平野のように厚い堆積平野まで、平均的な値に着目すれば、簡易推定法は概ね妥当な値を与えるといえる。一方、最大加速度比における標準偏差は 0.4 程度と大きい。これまで見てきたように、微動 H/V の卓越周波数は高い信頼性が認められるが、ピーク振幅には大きなばらつきが有する。これを用いた簡易推定法が振幅の予測に関して大きなばらつきを与えることは、むしろ当然といえよう。しかしながら、標準偏差を見込んで推定値を 1.4 倍程度とすることにより、概ね安全側に見積もることが可能であり、地震増幅特性の概査法として十分有用と考えられる。

Table 3. Summary of maximum acceleration ratios between observations and calculations based on a simple estimation method.

		KiK-net	Tono	Nobi	Ave.
Max. Acc. Ratio (Obs/Cal)	Ave.	0.90	1.18	1.05	1.0
	S. D.	0.43	0.42	0.36	0.40

5. まとめ

KiK-net 観測網、K-NET 観測網、濃尾平野強震観測地点および反射法測線、東濃高密度地震観測網地点における微動観測データと地震観測データの対比に基づき、微動 H/V スペクトル比の特性を明らかにするとともに、微動 H/V スペクトル比を用いて表層の地震増幅特性を簡易に求める手法を検討し、実測データを用いてその適用性を検証した。主な結果をまとめると、以下のようである。

1) 微動 H/V スペクトル比は、地表地震動の H/V およ

び地表と基盤の間における伝達関数の H/V と概ね良く近似し、表層における水平成分と上下成分の両方の応答特性が反映されていると解釈できる。水平伝達関数のピーク振幅に比して微動 H/V のそれは小さいことから、微動 H/V が表層の地震増幅特性に近似するという考えは、実際の地震増幅特性をかなり過小評価する可能性が高い。

- 2) 微動 H/V の卓越周波数およびピーク振幅に着目し、卓越周波数と基盤深度、ピーク振幅と水平伝達関数の関係を用いて、2 層構造モデルを仮定することにより、表層地盤の地震増幅特性を簡易に推定する方法を提案した。
- 3) 簡易推定法の適用性を地震観測データにより検証した結果、今回の検討範囲においては、推定結果に 1.4 倍程度の余裕を考慮することにより、硬質地盤から厚い堆積平野までおおよその地震増幅特性を概ね安全側に推定でき、詳細な検討に先立つ概査法として有用であることを示した。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多くの方々に多大なご協力を頂いた。微動観測・解析の大部分は、当時、名古屋大学工学部社会環境工学科および工学研究科社会基盤工学専攻の学生であった渡辺海奈都君、田賀雅宏君、中本文視君、香山雄治君、相原大介君の努力に負うところが大きい。また、名古屋大学・南雲秀樹博士(当時)、東京大学地震研究所・工藤一嘉博士(当時)、八戸工業大学・坂尻直己博士(当時)、愛知工業大学・正木和明博士、名城大学・田中寅夫博士(当時)には観測の一部を分担していただくとともに、特に、工藤一嘉博士と大阪工業大学・堀家正則博士には当初から観測・解析について貴重な議論と助言を賜った。地震観測データは、(独)防災科学技術研究所基盤強震ネットワーク(KiK-net)および強震ネットワーク(K-NET)、(財)地震予知総合研究振興会東濃地科学研究所の観測データおよび名古屋地域地震防災研究会が収集した各自治体の観測データを使用させていただいた。さらに、2 名の匿名の査読者および福井工業大学・野路利幸博士からは適切な指摘と助言を賜った。ここに記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 愛知県(2002):平成 13 年度地震関係基礎調査交付金濃尾平野の地下構造調査成果報告書。
- Bard, P-Y. (1999): Microtremor measurement: A tool for site effect estimation?, *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*(ed. Irikura, Kudo, Okada, Sasatani), Balkema, 3, 1251-1279.
- 延藤遵・佐藤稔紀・見掛信一郎・今津雅紀・西川洋二(2003):

- 瑞浪超深地層研究所主立坑の地震時健全性, 2003 年土木学会全国大会講演予講集, CS7-060.
- Kudo K., Sawada, Y., and Horike, M. (2004): Current studies in Japan on H/V and phase velocity dispersion of microtremors for site characterization, *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, Paper No. 1144.
- Lermo J., Chavez-Garcia F. J. (1993): Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.
- 中村仁・福和伸夫・高橋広人・飛田潤・堀啓輔 (2000): 常時微動計測に基づく名古屋市の地盤震動特性と基盤深さの推定に関する研究, 構造工学論文集, 46B, 413-421.
- 中村豊・上野真 (1986): 地表面振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, 265-270.
- 中村豊 (1998): 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, Vol.2, No.4, 18-27.
- Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Q. Rev. RTRI*, 30, 25-33.
- 大熊祐輝・松岡昌志・山崎文雄・原田隆典 (2002): 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, 696/1-58, 261-272.
- Riepl, J., Bard, P-Y., Hatzheld, D., Papaionnou, C., Nechtschein, S. (1998): Detail evaluation of site response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST), *Bull. Seism. Soc. Am.*; 88, 488-502.
- 澤田義博・中本丈視・南雲秀樹・正木和明 (2001): 微動の H/V 法の適用性に関する検討—濃尾平野における深部構造との対比—, 物理探査学会第 104 回学術講演論文集, 40-42.
- 澤田義博・田賀雅宏・南雲秀樹 (2002): KiK-net 地震観測点における地盤構造の最適モデルの検討, 物理探査学会第 106 回学術講演論文集, 232-235.
- 澤田義博・田賀雅宏・南雲秀樹 (2004): 微動の H/V 法の適用性に関する研究—表層地盤の地震増幅特性の簡易推定法—, 物理探査学会第 110 回学術講演論文集, 99-102.
- Sawada, Y., Taga, M., Watanabe, M., Nakamoto, T., Nagumo, H., Kudo, K., Horike, M., Sakajiri, N., Masaki, M., Sasatani, T. (2004): Applicability of microtremor H/V method for KiK-net strong motion observation sites and Nobi plain, *Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, Paper No. 855.
- 澤田義博・香山雄治・相原大介 (2006): 東濃地域の高密度地震観測地点における地震応答特性と微動 H/V 法の適用性, 物理探査学会第 114 回学術講演論文集, 130-133.
- Seekins L. C., Wennerberg L., Margheriti L., Liu H.-P. (1996): Site amplification at five locations in San Francisco, California: a comparison of S-waves, codas, and microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 627-635.
- 藤堂正喜・羽島俊明・千葉脩・高橋克也・武村雅之・田中英朗 (1998): 堆積地盤における上下地震動の特性と Q_P 構造, 日本建築学会構造系論文集, 475, 45-54
- 時松孝次・宮寺泰生 (1992): 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, 472, 81-87.
- Toshinawa, T., Matsuoka, M., Yamazaki, Y. (2000): Ground-motion characteristics in Sanciago, Chile, obtained by microtremor measurements, *Proc. 10th World Conf. Earthq. Eng.*, Paper No. 1764.
- Uebayashi, H. (2003). Extrapolation of irregular subsurface structures using the horizontal-to-vertical spectral ratio of long-period microtremors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2, 570-582.
- 山口伸治・高屋正・千葉忠・澤田義博・南雲秀樹・赤津正敏・杉山長志・木村伸一・後藤広和 (1999): 名古屋市山王における温泉ボーリングを利用した地震観測 その(2)物理検層結果について, 物理探査学会第 101 回学術講演論文集, 230-234.
- (財)地震予知総合研究振興会 (2005): 東濃地域における深地層研究施設を活用する試験研究等に係る事業, 平成 16 年度東濃地震科学研究所事業報告書, 45-48.
- Zao, B. and Horike, M. (2003), Simulation of high frequency strong vertical motions using microtremor horizontal-to-vertical ratios, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 6, 2546-2553.

Characteristics of microtremor H/V spectral ratios and a simple estimation method of earthquake amplification properties by using it

Yoshihiro Sawada*

ABSTRACT

The microtremors was observed for the earthquake observation site on the ground from a hard ground with thin surface layer to a thick sedimentary basin aiming to clarify whether to approximate microtremor H/V spectrum ratio to the earthquake amplification characteristic in the surface layer, and it compared with the earthquake observation data. As a result, both the horizontal and the vertical response characteristics of the surface layer were reflected in microtremor H/V spectrum ratios, and it was clarified that the idea of approximating microtremor H/V to the earthquake amplification characteristic in the surface invited a possibility of considerably undervaluing an actual S wave earthquake amplification characteristic. Therefore, it newly proposed the technique for simply presuming the earthquake amplification characteristic of the subsurface layer assuming two layer structural model by paying attention to the predominant frequency and the peak amplitude of microtremor H/V, and using the relation between a predominant frequency and bedrock depth, and the relation between the peak amplitude and the horizontal transfer function. The applicability of this simple estimation method was verified according to the earthquake observation data, therefore it is thought that even the ground from the hard ground to a thick sediment plains can presume a rough earthquake amplification characteristic to the safety side by considering about 1.4 times room, and this estimation method is useful for the presumption result as an outline investigation method that precedes a detailed investigation.

Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, predominant frequency, earthquake motion, earthquake amplification characteristics