



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

先名重樹¹⁾、翠川三郎²⁾、若松加寿江³⁾

- 1) 正会員 防災科学技術研究所 防災システム研究センター、研究員 理修
e-mail : senna@bosai.go.jp
- 2) 正会員 東京工業大学人間環境システム専攻、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp
- 3) 正会員 関東学院大学工学部社会環境システム学科、教授 博士(工学)
e-mail : wakamatu@kanto-gakuin.ac.jp

要 約

常時微動のH/Vスペクトル比からスペクトル増幅率を推定することを目的とし、K-NETおよびKiK-net観測点を対象として検討を行った。応答スペクトルの距離減衰式から求まる工学的基盤での応答スペクトルに対する観測記録の応答スペクトルの比からスペクトル増幅率を求め、これと常時微動のH/Vスペクトル比との関係を微地形区分毎に検討し、常時微動のH/Vスペクトル比からスペクトル増幅率を推定する簡便な関係式を作成した。この関係式を利用して、2007年新潟県中越沖地震を対象として、各地点でのスペクトル増幅率を常時微動測定結果と微地形区分から求め、距離減衰式から推定した工学的基盤での応答スペクトルに乗ずることにより、各地点での応答スペクトルを推定した。推定された応答スペクトルには、微動のH/Vスペクトル比からの地盤の卓越周期が反映され、観測記録にみられるスペクトルのピークが表現されており、多くの地点で観測記録と対応がよく、本方法の有効性が確認された。

キーワード：スペクトル増幅率、常時微動、H/V スペクトル比、微地形区分、応答スペクトル

1. はじめに

地震被害分布を予測するには、地震動強さの分布を適切に評価することが必要であり、このため各地点での地盤特性の評価が重要となる。そこで、各地点での地盤特性を評価する方法として、地盤モデルを作成し、重複反射等の解析的に地盤の増幅特性を計算することが行われている。しかし、広い範囲を対象として統一的に地盤の増幅特性を把握しようとする、利用できるデータが限られていたり、膨大な作業が必要となるため、実施は難しい。このため、より簡単な情報から得られる地質・地形条件等と地盤の増幅特性との関係から、地盤の増幅特性を推定することが行われている。

全国一律に地盤の増幅特性を評価する方法として、国土数値情報に含まれる地形分類から地盤の平均 S 波速度を推定し、さらに最大速度に対する地盤増幅率を推定する手法が提案され(翠川・松岡、1995)¹⁾、最近ではこの改良法も提案されている(松岡・他、2005²⁾；藤本・翠川、2006³⁾)。距離減衰式などを併用することにより、この方法により、地震動の最大速度振幅を評価することが可能であるが、耐震工学上、より細か

な情報として地震動のスペクトル振幅が必要とされる場合がある。そこで、スペクトルの周期毎の増幅率の検討も行われており、例えば、Boore et al.(1997)⁴⁾ や内山・翠川(2004)⁵⁾、Kanno et al. (2006)⁶⁾ は、地盤の平均 S 波速度とスペクトル増幅率の関係を示している。また、地形区分を利用したスペクトル増幅率の研究もある(山内・他、2001)⁷⁾。

これらの研究では、平均 S 波速度や地形区分に応じた平均的なスペクトル増幅率が抽出されるため、地点毎の地盤の卓越周期の違いを評価することは困難である。各地点の卓越周期を評価する簡便な手法として、常時微動測定がある。中村⁸⁾は常時微動の H/V スペクトル比が擬似的に地盤のスペクトル増幅率としてみなせるとしている。しかし、H/V スペクトル比とスペクトル増幅率の形状は相似の場合が多いものの、両者の値が広い周期範囲で一致するわけではない(例えば、Rodriguez and Midorikawa, 2003)⁹⁾。また、丸山・他(2001)¹⁰⁾は、常時微動の H/V スペクトル比から応答スペクトルを求める手法を提案しているが、対象とする地点の近傍で観測された地震記録を必要とし、広域での評価には適用しにくい。本研究では、応答スペクトルの距離減衰式から求まる工学的基盤での応答スペクトルに対する観測記録の応答スペクトルの比からスペクトル増幅率を求め、これと常時微動の H/V スペクトル比との関係を微地形区分毎に検討し、常時微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を推定する関係式を作成することを目的としている。

2. 使用したデータについて

2.1 地震動データの諸元

本研究では、距離減衰式から求まる工学的基盤での応答スペクトルに対する地表での観測記録の応答スペクトルの比からスペクトル増幅率を求める。その際、用いる応答スペクトルの距離減衰式として、最新の研究のひとつである Kanno et al. (2006)の式を使用した。地表での観測記録としては、1996年5月から2006年12月に得られた K-NET および KiK-net によるものを用いた。また、Kanno et al. (2006)が距離減衰式を作成した際に用いた条件にそって、微動データとの対応を考慮して強震動に伴う非線形効果が現れにくいものという条件も考慮し、① Mw=5.5 以上、② 最大加速度が 100gal 以下、③ 震源距離が 200km 以内、④ 1 観測点につき 5 個以上の地震データが得られている観測点、に対応する記録を選択した。表 1 に、上記条件により選択された地震観測点数を微地形区分毎に示す。表には若松・他¹¹⁾による微地形区分の ID(1p から 19)も示してある。なお、微地形区分は各観測点位置に対して 1/5 万地形分類図から判読されたものを使用している。この表からわかるように、微地形区分 ID=14 の旧河道では利用できる観測点がない。

表 1 各データの微地形区分毎の観測点個数

微地形区分 ID	微地形名	距離減衰式で評価可能な地震データ数のある観測点(K-net,KiK-net)	常時微動観測(本研究)による観測点数
1p	山地(先第三系)	17	52
1t	山地(第三系)	5	26
2	山麓地	13	37
3	丘陵	10	53
4	火山地	4	12
5	火山山麓地	19	39
6	火山性丘陵	3	10
7	岩石台地	3	7
8	砂礫質台地	81	161
9	ローム台地	31	53
10	谷底平野	87	215
11	扇状地	35	77
12	自然堤防	8	14
13	後背湿地	20	50
14	旧河道	0	33
15	三角州・海岸低地	31	56
16	砂州・砂礫州	21	54
17	砂丘	7	10
18	干拓地	5	20
19	埋立地	5	24
合計		405	1003

2.2 常時微動データの諸元

常時微動のデータは、K-NET 観測点においては、2005 年 7 月から 2006 年 11 月にかけて、約 1~2 時間程度の常時微動記録を取得した。また、KiK-net 観測点に関しては、2006 年 7 月から 2007 年 8 月にかけて、全 680 点について 15~20 分以上の観測を行った。観測に使用した機器は、高性能加速度センサー（日本航空電子工業社製：JA-40GA04）で、その詳細については、先名・他(2006)¹²⁾を参照されたい。また、K-NET および KiK-net 観測点が存在しない、ないしは数が少ない微地形区分でのデータを補うために 59 地点で微動観測を行った。追加の観測については、国土地理院発行の数値地図 25000（土地条件）¹³⁾を元に、関東および新潟地区で測定点を選択し、2006 年 10 月から 12 月にかけて観測した。表 1 に、微動観測点数を微地形区分毎に示す。収集した全ての微動データについては、防災科学技術研究所の微動データベースシステム¹⁴⁾にデータを納め、観測点情報と共に整理した。データを使用した観測点の分布を図 1 に示す。観測点が全国に分布していることがわかる。

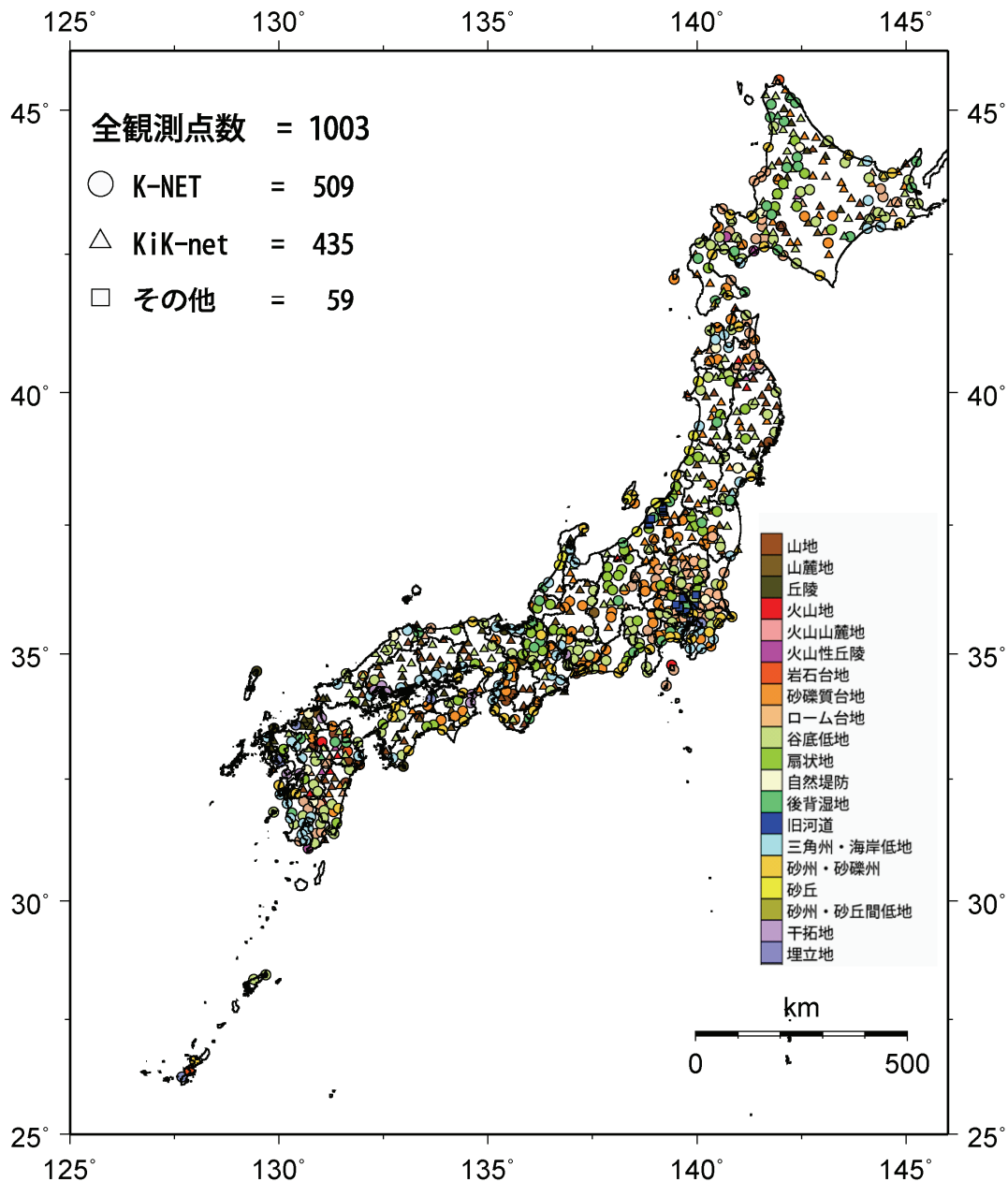


図 1 微動観測データを使用した観測点における微地形区分
(K-NET、KiK-net およびその他の微動観測点)

3. 常時微動のH/Vスペクトル比およびスペクトル増幅率の計算方法と結果の比較

3.1 微動データの計算方法

常時微動のデータ処理として、観測記録の中から、振幅が比較的安定している 81.92 秒間のデータを 10 区間選り出してフーリエ・スペクトルを求め、各区間の H/V スペクトル比を求め、それらの結果の平均処理をした。H/V スペクトル比の平滑化の方法として、① Parzen Window (0.2Hz)、② 対数型 Window (紺野・大町(1995))¹⁵⁾、③ 二項フィルター (Marchand and Marnet(1983)¹⁶⁾、神山・松川(2006)¹⁷⁾ の 3 種類について検討した。なお、H/V スペクトル比の計算における水平動は、NS 成分と EW 成分の二乗和の平方根とした。上記のフィルターのうち、①はスペクトル解析で良く用いられている手法であるが、長周期ほどピーク周期付近が滑らかになり、より長周期側にピークが移動するようになる。②の方法は、長周期領域においてピークの形状がより正確に評価出来るが、フィルターされるサンプリング幅が狭く、データにノイズ等の異常ピークがあると、平滑化が十分でないため局部的に大きくなるという難点がある。③の手法はこれらの問題が小さいことから、この手法 (項数 500) を使用して H/V スペクトル比を求めた。

3.2 スペクトル増幅率の計算方法

スペクトル増幅率を以下の手順で計算した。ここで、本研究におけるスペクトル増幅率とは、各観測点で、応答スペクトルの距離減衰式を用いて予測される工学的基盤でのスペクトルに対する実際の地震観測記録のスペクトルの比を求め、それぞれの記録に対する結果の対数平均から求めたものであり、式(1)で定義される。工学的基盤でのスペクトルは Kanno et al.(2006)の式から求めた。彼らは、主に日本の強震記録の統計解析から、深さ 30m までの平均 S 波速度で 300m/s 程度の地盤での応答スペクトルの距離減衰式を提案している。工学的基盤として、S 波速度で 300~700m/s 程度の地層が用いられることが多い。そこで本研究では、やや遅めではあるが、S 波速度で 300m/s 程度の地層を工学的基盤と仮定し、Kanno et al.(2006)の式をそのまま用いた。なお、観測記録のスペクトルについては、Kanno et al.(2006)と同様に、水平動 2 成分における応答波形の 2 乗和の平方根から最大値を求めて加速度応答スペクトルを算出した。

$$\log_{10} G_j(T) = \frac{\sum_{i=1}^n \{ \log_{10} O_{ij}(T) - \log_{10} P_{ij}(T) \}}{n} \quad (1)$$

ここで、 $G_j(T)$ は観測点 j におけるスペクトル増幅率、 $O_{ij}(T)$ は地震 i の観測点 j における観測値、 $P_{ij}(T)$ は地震 i の観測点 j における工学的基盤での予測値、 n は観測点 j における記録数である。

3.3 スペクトル増幅率と H/V スペクトル比との比較

図 2 に、表 1 に示した全微地形区分のうち旧河道(ID=14)を除く 19 の微地形区分でのスペクトル増幅率と微動の H/V スペクトル比の比較として、30 地点での結果を示す。この図より、微地形 ID が 1p、1t~7 の山地系の微地形区分においては、微動の H/V スペクトル比がスペクトル増幅率よりも大きい傾向がみられる。特に山地 1p、1t の微地形区分においては、スペクトル増幅率を上大きく平行移動したような形状となっていることが確認できる。また、スペクトル形状は平坦か短周期でピークを持つ場合が多い。微地形 ID が 8~11 の台地系の微地形区分においては、微動の H/V スペクトル比とスペクトル増幅率がほぼ一致する場合が多い。微地形 ID が 12~19 の低地系の微地形区分においては、卓越周期付近では両者の値はほぼ一致している。ただし、その他の周期では、スペクトル増幅率の方が大きい。特に卓越周期より短周期側で H/V スペクトル比がトラフを持ち大きな差がみられる場合が少なくない。このように、スペクトル増幅率と微動の H/V スペクトル比の関係は微地形毎に特徴があり、この特徴を考慮して補正することにより、微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を比較的精度良く推定できることが期待される。

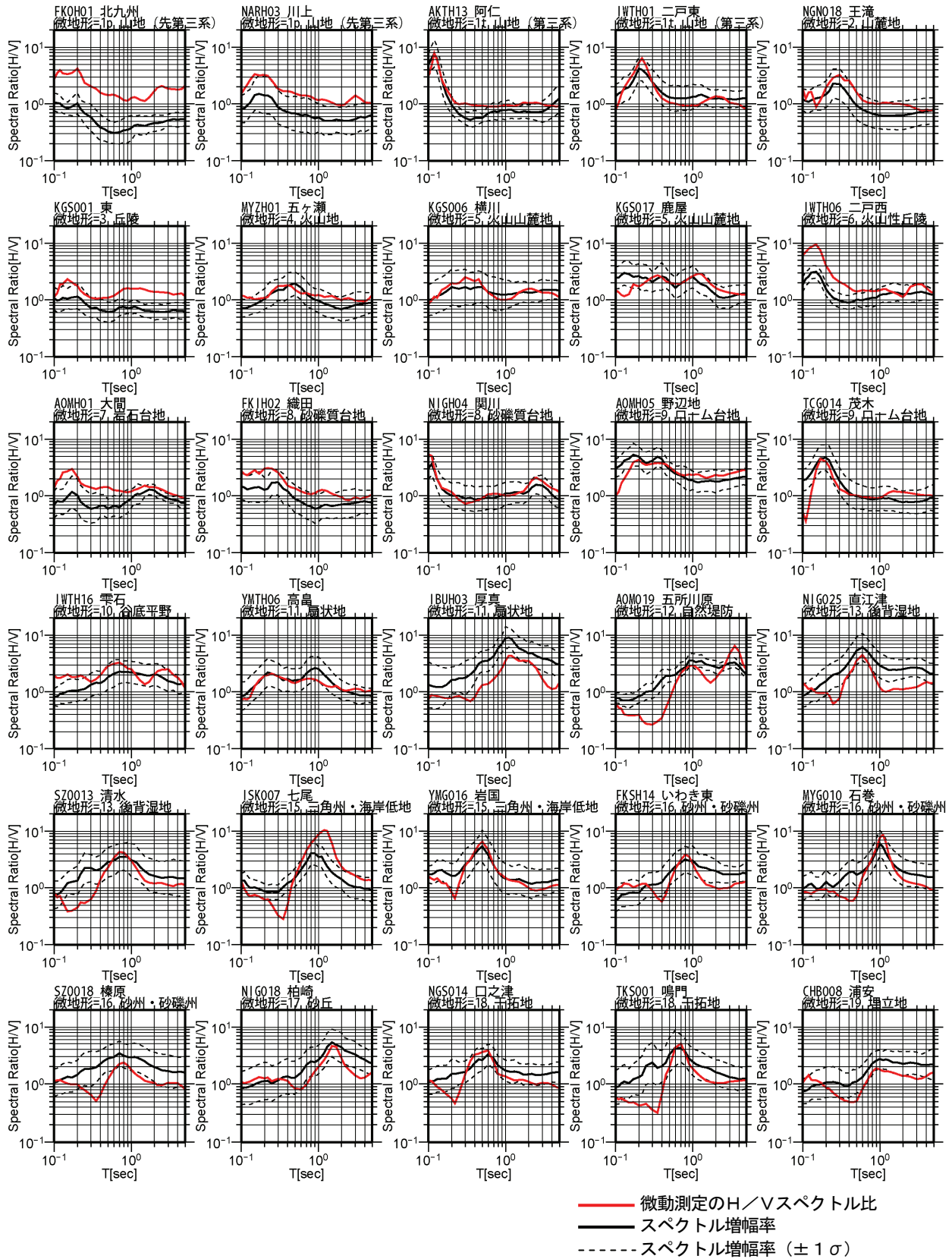


図2 スペクトル増幅率と常時微動の H/V スペクトル比の比較

※各グラフのキャプションは、上段：K-NET および KiK-net 観測点の観測点コードと観測点名、
下段：その観測点の微地形区分 ID、微地形区分名をそれぞれ示す。

4. スペクトル増幅率推定のための常時微動の H/V スペクトル比の補正係数

前章で述べた結果を踏まえ、常時微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を推定するために、微地形毎にスペクトル増幅率に対する常時微動の H/V スペクトル比の比について検討する。まず、全体的に両者の値に相違がみられるので、そのバイアスを取り除く。次に、卓越周期付近とそれ以外の周期での傾向の違いを補正する。

観測点 j でのスペクトル増幅率 $G_j(T)$ と常時微動の H/V スペクトル比 $HV_j(T)$ の比の周期 0.1 秒から 2 秒までの周期 T_l に対する平均値 a_j を式(2)で計算する。なお、周期の刻み q は、Kanno et al.(2006)に示される 0.1 ~ 2.0 秒の 25 点とした。

$$a_j = \frac{\sum_{l=1}^q \frac{HV_j(T_l)}{G_j(T_l)}}{q} \quad (2)$$

さらに、同一の微地形区分 k にある観測点の a_j の平均値を計算し、微地形区分 k での平均補正倍率 α_k と定義する。図 3 に各微地形区分での α_k とその分散を示す。微地形区分 1p の山地 (先第三系) で α_k は 2.8 倍と最も大きく、低地部の微地形区分 12 (自然堤防)、13 (後背湿地)、18 (干拓地) で 0.8 倍と最も小さい。本研究では、工学的基盤の S 波速度を 300m/s 程度と仮定しており、スペクトル増幅率はこの層を基準としている。実際の山地では基盤の S 波速度は 300m/s よりもかなり大きいことが予想され、これによりスペクトル増幅率が H/V スペクトル比に比べて相対的に小さくなったものと推測される。一方、台地や平野部では、S 波速度で 300~400m/s 程度の工学的基盤が表層地盤の下に存在する 경우가多く、基盤の S 波速度が 300m/s に近いために、 α_k は 1 程度の値となったものとも解釈できる。各微地形区分での α_k の値は、図 4 に示す松岡・他(2005)による各微地形での平均 S 波速度とほぼ同様の傾向であり、上述の推察を支持している。

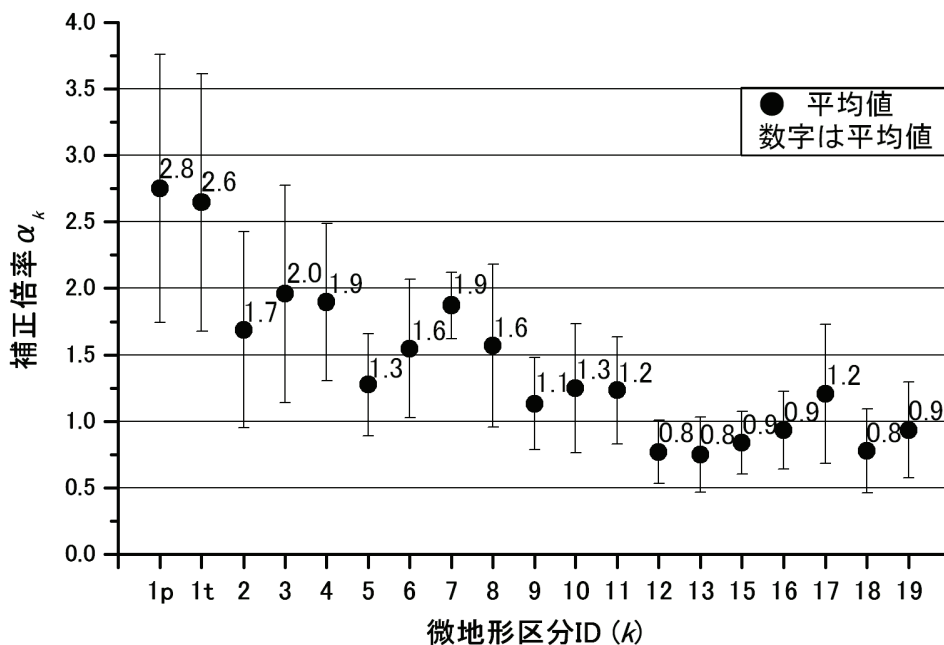


図3 補正倍率 α_k と微地形区分 k との関係 (微地形区分 ID=14 (旧河道) はデータなし)

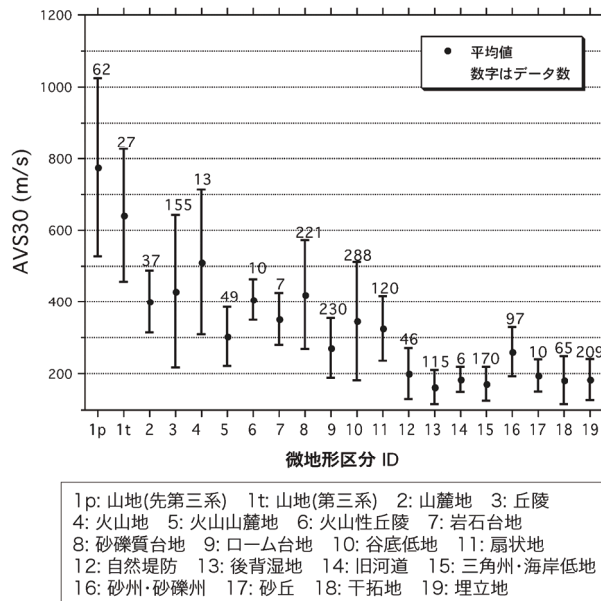


図4 微地形毎の地盤の平均S波速度（松岡・他(2005)より）

前章で述べたように、スペクトル増幅率と常時微動のH/Vスペクトル比とは、全体的な値の違いだけでなく、卓越周期付近とそれ以外の周期で傾向が異なる。例えば、低地部では、H/Vスペクトル比は卓越周期付近でスペクトル増幅率よりも大きなピークを示すが、卓越周期よりも短周期側では逆にトラフができて値が小さくなる場合が多い。この理由について、常時微動が主にレイリー波の基本モードからなると仮定して考えてみる。図5は、 $V_s=300\text{m/s}$ の基盤の上に、 $V_s=100\text{m/s}$ および 200m/s の表層地盤が存在すると仮定した場合のレイリー波の基本モードのH/Vスペクトル比を示す。表層と基盤のインピーダンス比が大きい場合には、卓越周期付近で大きなピークを示し、卓越周期の約0.6倍の周期でトラフを示す。インピーダンス比が小さい場合には、ピークとトラフの間隔が広くなり、その大きさも小さなものとなる。低地部では表層と基盤のインピーダンス比が大きく、台地部ではやや小さいことを考えれば、低地部でH/Vスペクトル比は卓越周期付近でスペクトル増幅率よりも大きなピークを示し、卓越周期よりも短周期側では逆にトラフができて値が小さくなることは定性的には説明ができる。

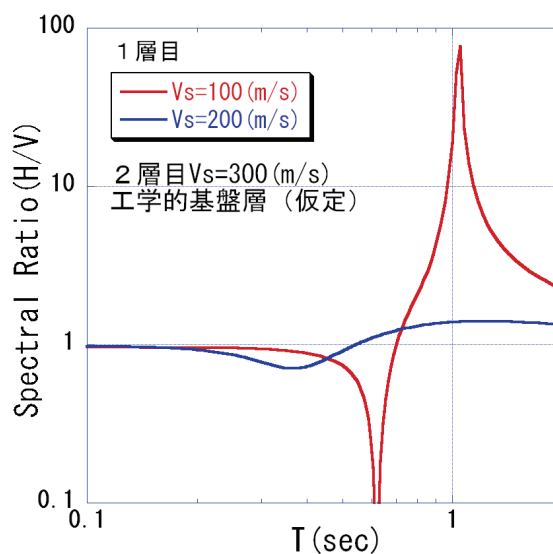


図5 2層地盤でのレイリー波基本モードの理論H/Vスペクトル比

そこで、この影響についても補正するために、観測点でのスペクトル増幅率を α_k で補正した上で、さらに H/V スペクトル比に対する比 $b_j(T/T_0)$ を計算した。なお、各地点で卓越周期が異なるため、微動のピーク周期 T_0 で周期 T を基準化した T/T_0 をパラメータとした。また、ピーク周期 T_0 は周期 0.1~2.0 秒で最大のピークに対応するものとした。各微地形区分による基準化した常時微動の H/V スペクトル比のピークおよびトラフの形状を確認し、おおまかに、グループ A (山地系の微地形区分)・グループ B (台地系の微地形区分)・グループ C (低地系の微地形区分) の 3 つのグループに分類した。図 6 の上段にグループ A の山地系微地形区分 (1p, 1t, 2, 3, 4, 5, 6, 7)、中段にグループ B の台地系微地形区分 (8, 9, 10, 11)、下段にグループ C の低地系微地形区分 (12, 13, 15, 16, 17, 18, 19) に対する結果をそれぞれ示す。図の左列が H/V スペクトル比を、中央の列がスペクトル増幅率を α_k で補正したものを、右列が補正したスペクトル増幅率に対する H/V スペクトル比の比 $b_j(T/T_0)$ を、それぞれ示し、赤線が平均値を、点線が $\pm 1\sigma$ を示す。なお、ここでは図をみやすくするために微動の H/V スペクトル比のピークでの値が 2.5 倍以上のものを示している。山地系の微地形では、微動の H/V スペクトル比 (図の左列) は大きなピークを示さず、短周期でトラフを示さない。その結果、 $b_j(T/T_0)$ も比較的平坦な形状をしている。一方、低地系の微地形では、H/V スペクトル比は大きなピークを示し、短周期側でトラフを示すものがある。その結果、 $b_j(T/T_0)$ は $T/T_0=1$ でピークを示し、 $T/T_0=0.4$ でトラフを示す。台地系の微地形では、両者の中間的な性質を示している。

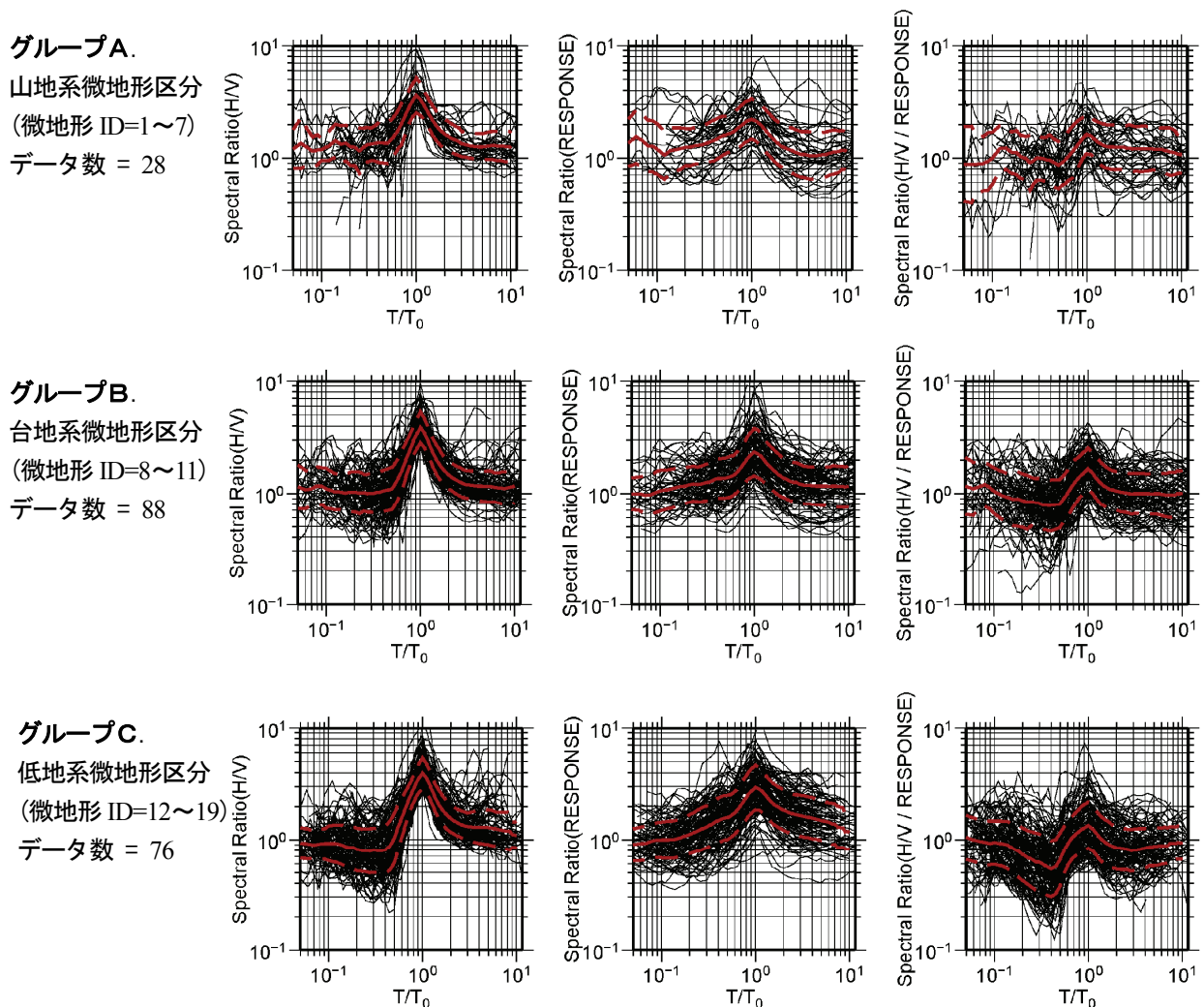


図 6 微地形グループ毎の微動の H/V スペクトル比 (左列)、補正したスペクトル増幅率 (中列)、補正したスペクトル増幅率に対する微動の H/V スペクトル比 (右列)

図6では、例として、微動の H/V スペクトル比のピークでの値が 2.5 倍以上のものを示したが、ピークでの値が小さいものも含めて検討するために、山地系微地形区分、台地系微地形区分および低地系微地形区分の3グループ毎に、H/V スペクトル比のピークでの値が①1 倍～2 倍、②2～3 倍、③3～5 倍、④5 倍以上のものにわけて、 b_i の平均値を計算した。尚、グループAについては、②と③の形状に差が認められなかったため、2～5 倍の1 区分にまとめた。結果を図7に示す。共通してみられる特徴として、i) $T/T_0=1.0$ において b_j の平均値が最大値を示すこと、ii) $T/T_0=0.4$ において $b_j(T/T_0)$ の平均値が最小値を示すこと、iii) ピークの値が大きくなると短周期側のトラフが大きくなること、iv) $T/T_0=2.0$ 以上または $T/T_0=0.1$ 以下で $b_j(T/T_0)$ の平均値が 1.0 に漸近すること、v) 微動の H/V スペクトル比のピーク値が小さくなるにつれて、 $b_j(T/T_0)$ の平均値は全体的に 1.0 に漸近する、等があげられる。グループ毎の特徴として、トラフが低地系微地形区分で顕著で、山地系微地形区分ではみられない。

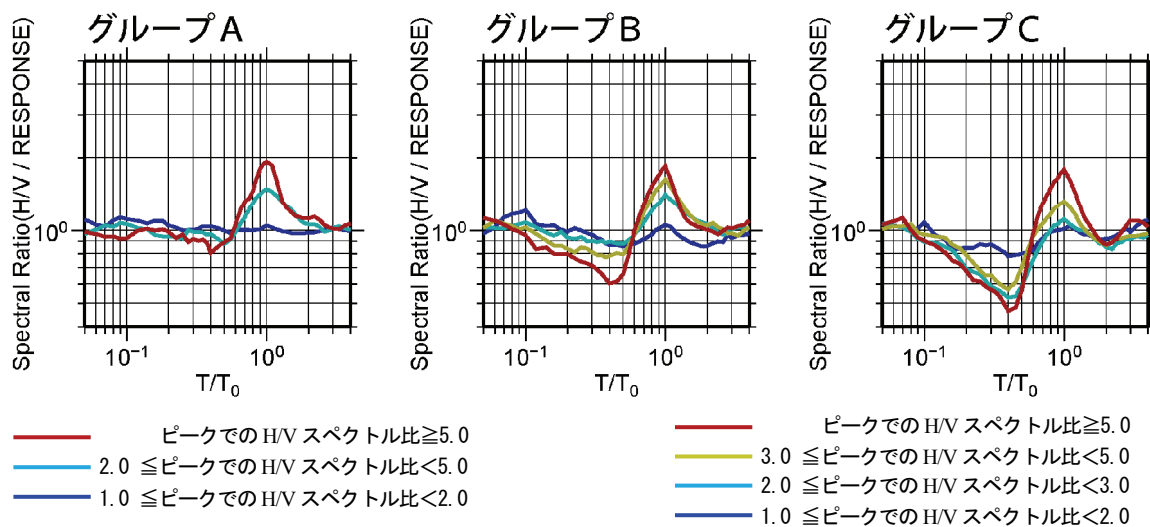


図7 T/T_0 軸（微動の H/V スペクトル比のピーク周期 T_0 で T を基準化したもの）における各微地形グループでの α_k で補正したスペクトル増幅率に対する微動の H/V スペクトル比の比の平均値

このような微地形グループや微動の H/V スペクトル比のピーク値による変化を考慮して、微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を推定するための補正倍率をモデル化する。図7の結果を COS 型の関数を用いてモデル化し、微地形グループ m にある観測点の補正倍率 β_m とした。モデルは、 T/T_0 が 0.1 以下で 1、0.4 で最小値、1.0 で最大値、2.0 以上で 1 となるもので、 $T/T_0=0.1, 0.4, 1.0$ および 1.5 での値を調整して、できるだけ図7に示す形状に近くなるように作成した。以下、モデル化に使用した基本関数式(3-1～3-5)と係数一覧(表2)および補正式による形状(図8)を示す。

$$\beta_m(T/T_0) = a + b \cdot \cos(3.33\pi \cdot (T/T_0) - 1.0) \quad (0.1 < T/T_0 < 0.4) \quad (3-1)$$

$$\beta_m(T/T_0) = c + d \cdot \cos(1.67\pi \cdot (T/T_0) + 0.95) \quad (0.4 < T/T_0 < 1.0) \quad (3-2)$$

$$\beta_m(T/T_0) = e + f \cdot \cos(2\pi \cdot (T/T_0) + 6.0) \quad (1.0 < T/T_0 < 1.5) \quad (3-3)$$

$$\beta_m(T/T_0) = g + h \cdot \cos(\pi \cdot (T/T_0) + \pi) \quad (1.5 < T/T_0 < 2.0) \quad (3-4)$$

$$\beta_m(T/T_0) = 1.0 \quad (2.0 < T/T_0, 0.1 > T/T_0) \quad (3-5)$$

なお、微地形区分 ID=14 の旧河道については地震動のデータがないため、微動の H/V スペクトル比のトラフ形状および、図4に示す松岡・他(2005)の平均 S 波速度の分布より、低地系と判定し、補正倍率 α_k は低地系全体の平均値(0.9)とした。本章の補正係数(補正倍率 α_k, β_m)についての検討結果を表3にまとめた。

表2 式(3-1)～式(3-4)の係数 a～h 一覧

($0.0 \leq T/T_0 \leq 0.4$)

ピークでのH/V スペクトル比	グループA		グループB		グループC	
	係数a	係数b	係数a	係数b	係数a	係数b
5～	0.90	0.08	0.80	0.20	0.73	0.27
3～5	0.95	0.05	0.88	0.12	0.76	0.25
2～3			0.94	0.06	0.78	0.22
1～2	1.00	0.00	0.94	0.06	0.88	0.12

($0.4 \leq T/T_0 \leq 1.0$)

ピークでのH/V スペクトル比	グループA		グループB		グループC	
	係数c	係数d	係数c	係数d	係数c	係数d
5～	1.38	0.55	1.22	0.62	1.12	0.67
3～5	1.20	0.30	1.18	0.41	0.92	0.40
2～3			1.13	0.25	0.83	0.29
1～2	1.00	0.00	0.96	0.08	0.91	0.15

($1.0 \leq T/T_0 \leq 1.5$)

ピークでのH/V スペクトル比	グループA		グループB		グループC	
	係数e	係数f	係数e	係数f	係数e	係数f
5～	1.55	0.36	1.50	0.33	1.45	0.33
3～5	1.32	0.17	1.36	0.22	1.20	0.10
2～3			1.25	0.12	1.08	0.04
1～2	1.00	0.00	1.03	0.01	1.03	0.02

($1.5 \leq T/T_0 \leq 2.0$)

ピークでのH/V スペクトル比	グループA		グループB		グループC	
	係数g	係数h	係数g	係数h	係数g	係数h
5～	1.20	0.20	1.20	0.20	1.12	0.11
3～5	1.13	0.12	1.15	0.15	1.10	0.10
2～3			1.12	0.12	1.04	0.04
1～2	1.00	0.00	1.01	0.01	1.01	0.01

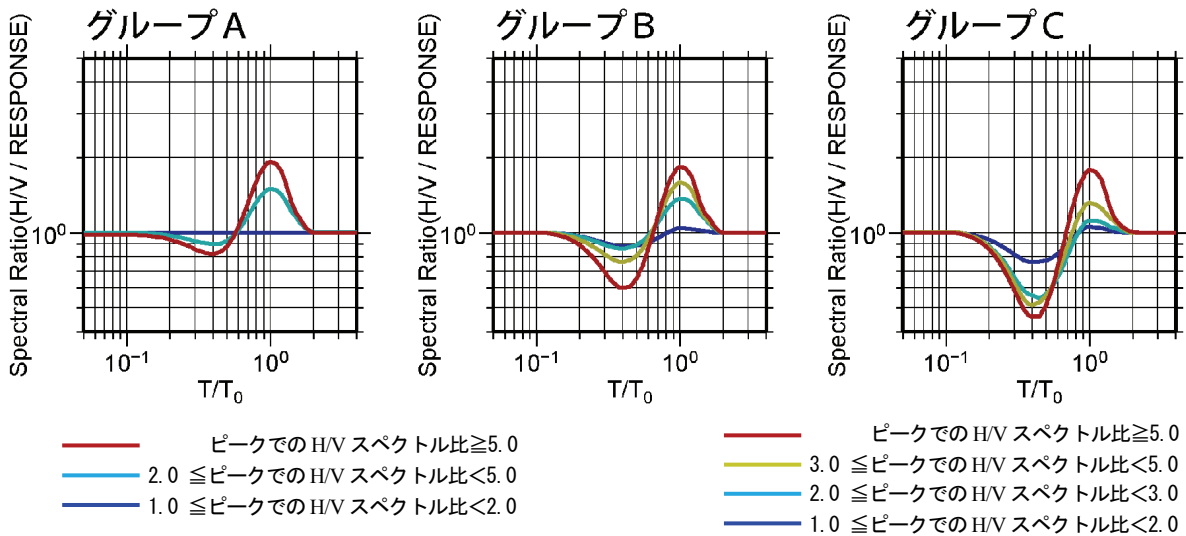


図8 各グループでの補正倍率 β_m の形状 (図7のモデル化)

表3 各微地形での補正倍率 α_k の値および補正倍率 β_m 算出の際のグループ名

微地形区分ID	微地形名	補正倍率 α_k	補正倍率 β_m
1p	山地(先第三系)	2.8	A
1t	山地(第三系)	2.6	
2	山麓地	1.7	
3	丘陵	2.0	
4	火山地	1.9	
5	火山山麓地	1.3	
6	火山性丘陵	1.6	
7	岩石台地	1.9	
8	砂礫質台地	1.6	B
9	ローム台地	1.1	
10	谷底平野	1.3	
11	扇状地	1.2	C
12	自然堤防	0.8	
13	後背湿地	0.8	
14	旧河道	0.9	
15	三角洲・海岸低地	0.8	
16	砂州・砂礫州	0.9	
17	砂丘	1.2	
18	干拓地	0.8	
19	埋立地	0.9	

前節の結果を利用して、地表における応答スペクトルは式(4)で推定できる。まず、観測点における H/V スペクトル比 $HV_j(T)$ に対し、微地形区分毎の補正倍率 α_k および各微地形グループ毎の補正倍率 β'_m ($\beta'_m(T)$) で割って補正する。これに工学的基盤で予想される加速度応答スペクトル $SA_b(T)$ を掛け合わせることで、地表での応答スペクトル $SA_s(T)$ が得られる。 $\beta'_m(T)$ は $\beta_m(T/T_0)$ を観測点での H/V スペクトル比のピーク周期 T_0 で T に変換したものである。なお、式(4)の適用周期範囲としては、 $\beta'_m(T)$ が $T/T_0 = 0.1 \sim 2.0$ でモデル化されたものである。厳密なことは言えないが、表面波の影響の少ない 2 秒程度以下が適当と考えられる。また、本研究で用いた常時微動の H/V スペクトル比については、大きなピークが 1 つあるものが殆どで、2 つの大きなピーク等の複雑な形状を持つ場合には、別途検討が必要かもしれない。

$$SA_s(T) = \frac{HV_j(T)}{\alpha_k \cdot \beta'_m(T)} \cdot SA_b(T) \quad (4)$$

$SA_s(T)$: 観測点 j における予測される地表の加速度応答スペクトル

$SA_b(T)$: 観測点 j における Kanno et al.(2006)による加速度応答スペクトル

α_k : 観測点 j の微地形区分 k における補正倍率 α

$HV_j(T)$: 観測点 j における微動の H/V スペクトル比

$\beta'_m(T)$: 観測点 j の微地形グループ m における補正倍率 $\beta_m(T/T_0)$ を観測点での H/V スペクトル比のピーク周期 T_0 で T に変換したもの

5. 2007 年新潟県中越沖地震における適用例

2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震に対して、提案した式(4)と表 3 に示す補正倍率一覧にしたがって、地表の応答スペクトルの計算を行った。計算結果を観測記録の応答スペクトルおよび Kanno et al. (2006) によるからの増幅率に基づいて算出された結果と比較した。対象とした観測点は、2.1 章に記した条件に合わせて、震源距離が 200km 以内で、得られた記録が 100gal 以下の地点、計 159 点である。新潟県中越沖地震の震源断層は地震調査委員会によるもの¹⁸⁾を使用した。図 9 に、新潟県中越沖地震の想定断層面の位置と、2.1 章に記載した地震の選択条件を満たす、K-NET および KiK-net の観測点 159 点をプロットした図を示す。プロットのシンボル型は、微地形グループ A~C を表し、色は微地形区分 ID を表す。表 4 にその断層モデルパラメータ一覧を示す。

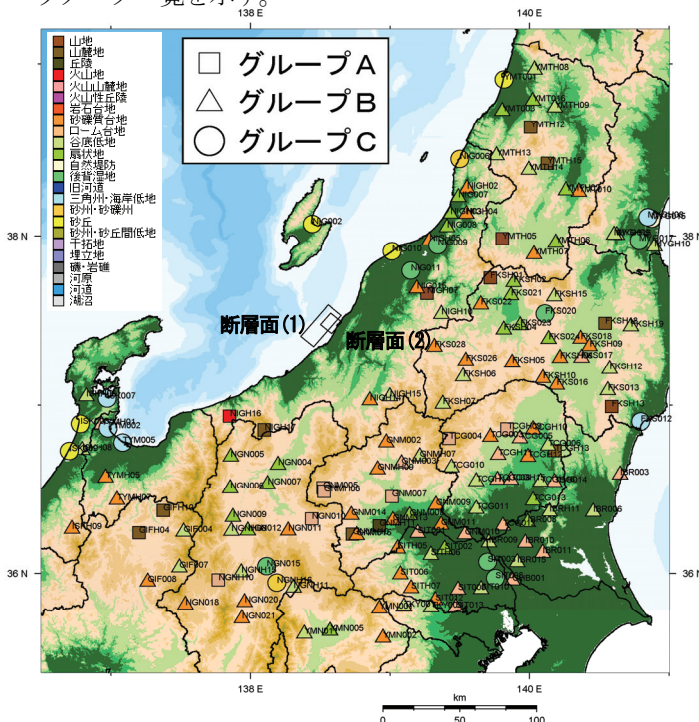


表 4 新潟県中越沖地震本震の断層モデルパラメータ一覧

	単位	断層面①	断層面②
地震規模	(Mw)	6.64	6.24
走向	deg	40	220
傾斜角	deg	40	50
断層長さ	km	27	10
断層幅	km	14	12
断層上端深さ	km	2	4

Total Mw=6.7

図 9 計算に使用した新潟県中越沖地震の断層面と、対象とした観測点(159 点)の分布。図中のシンボル型は、微地形グループ A・B・C の区分を、色は微地形区分を示す。

図10に、結果の例を示す。図の赤線が観測記録の加速度応答スペクトル、青線が本研究による結果、黒線が Kanno et al.(2006)による結果である。図の上段は山地系微地形区分、中段は台地系微地形区分、下段は低地系微地形区分での結果である。Kanno et al.(2006)による結果は滑らかなスペクトルであり、観測記録にみられるピークが表現されていない。一方、本研究による結果では、常時微動の H/V スペクトル比からの地盤の卓越周期が反映され、観測記録にみられるスペクトルのピークが表現されており、多くの地点で観測記録とより対応がよいことがわかる。

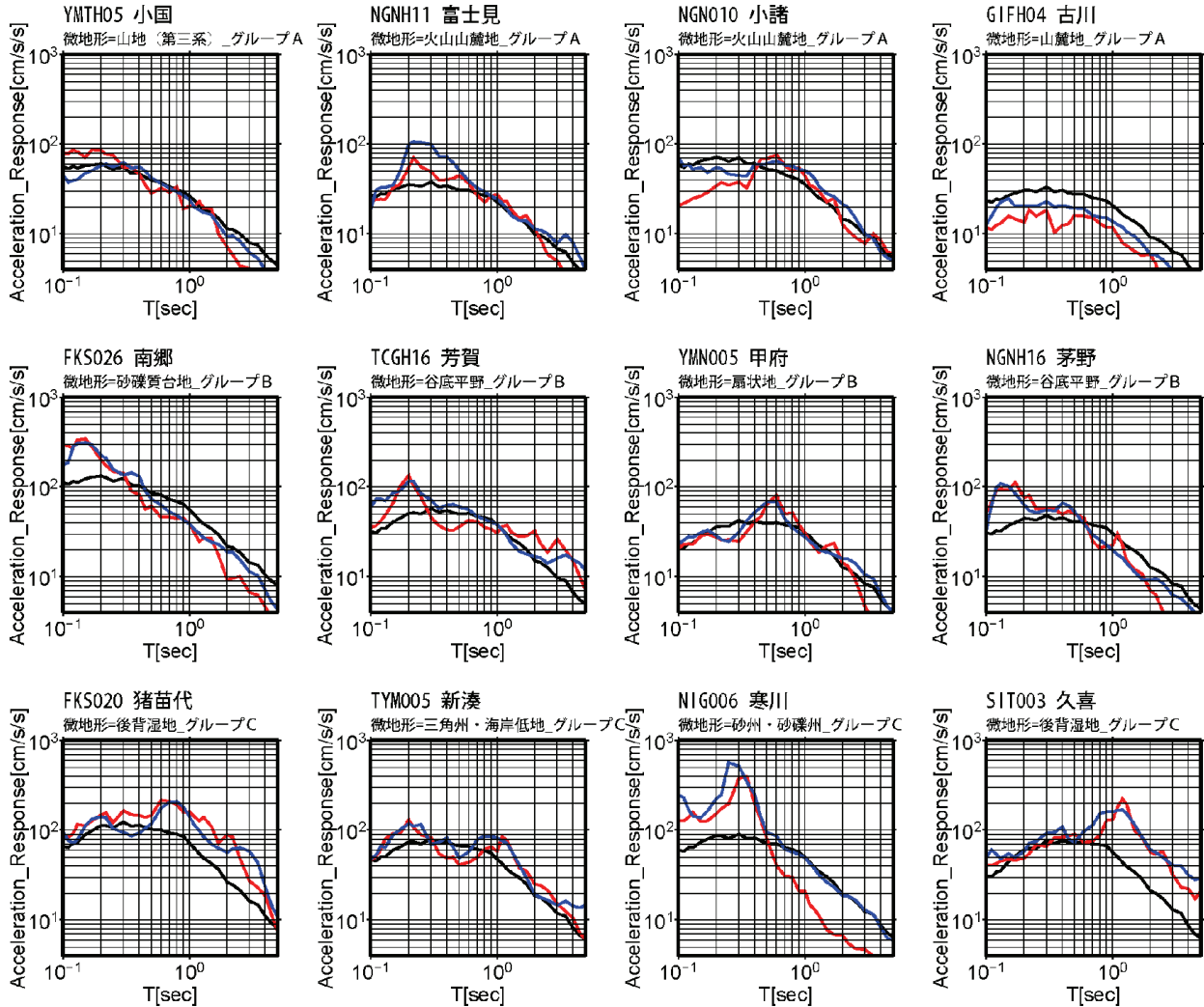


図10 予測値と観測記録の加速度応答スペクトル（5%減衰）の比較（赤線：新潟県中越沖地震の観測結果、青線：本研究による予測結果、黒線：Kanno et al.(2006)の AVS30 による予測結果）

※各グラフ上部のキャプションは、上段：K-NET および KiK-net 観測点の観測点コードと観測点名、下段：その観測点の微地形区分 ID_微地形区分名および補正係数 β_m の区分をそれぞれ示す。

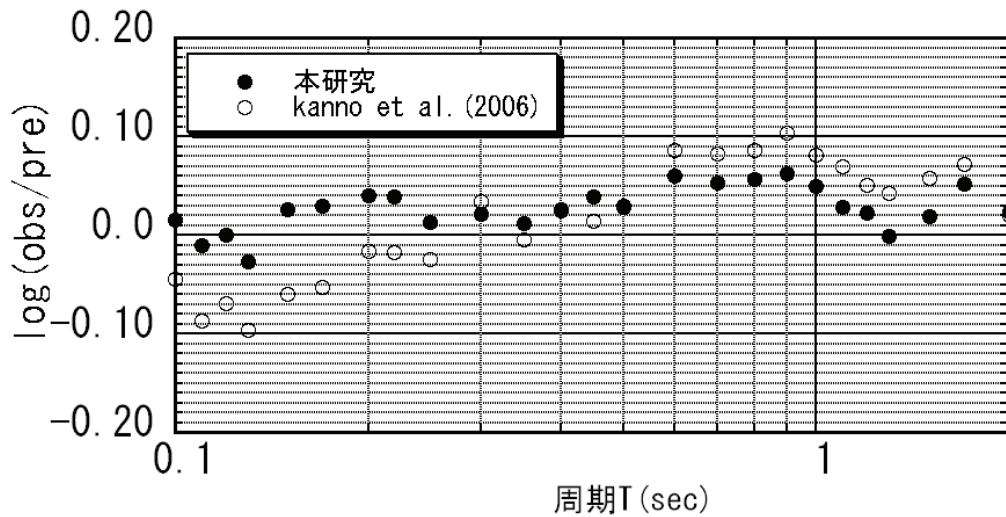


図 1 1 新潟県中越沖地震の予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数平均値（本研究による予測結果の場合が●、Kanno et al.(2006)による予測結果の場合が○）

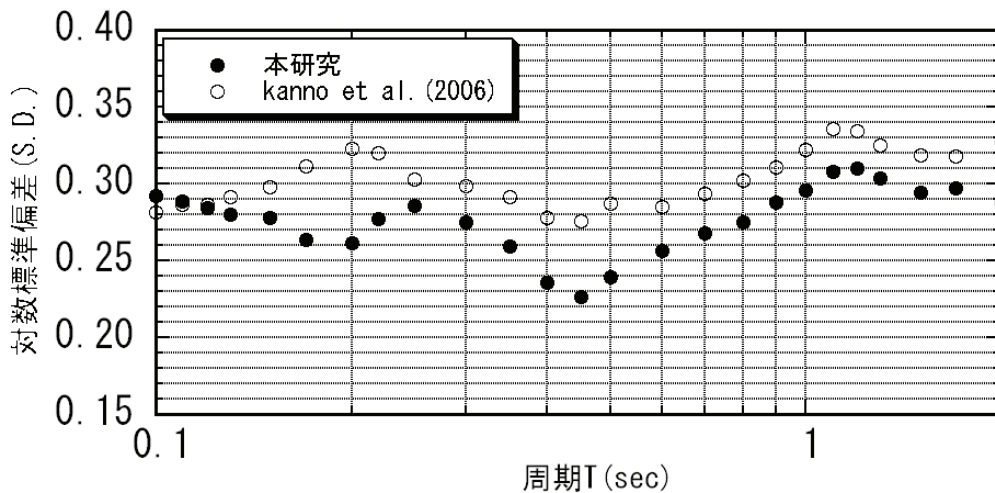


図 1 2 新潟県中越沖地震の予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数標準偏差（本研究による予測結果の場合が●、Kanno et al. (2006)による予測結果の場合が○）

図 1 1 に、対象とした 159 地点における、本研究による予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数平均値を●で示す。比較のため、Kanno et al.(2006)による AVS30 を考慮した結果に対する観測値の比の対数平均値を○で示す。本研究の結果においては対数値で-0.05~0.05（真数値で 0.9~1.1 倍）となっており、本研究による結果は平均的には観測値をよく説明している。また、Kanno et al. (2006)の結果の対数値-0.1~0.1（真数値 0.8~1.3 倍）と比べて、より 1 に近い。

図 1 2 に、本研究による予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数標準偏差を●で示し、Kanno et al.(2006)による予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数標準偏差を○で示す。本研究による結果は Kanno et al. (2006)による結果に比べ、周期 0.15 秒程度以上では、観測値からの偏差が小さくなっており、精度が向上していることがわかる。なお、本研究の結果は対数標準偏差で 0.22 から 0.31 の範囲にあり、十分小さな値とは言い難いが、工学的基盤での応答スペクトルを求める際に用いた距離減衰式の対数標準偏差が 0.4 前後であり (Kanno et al.(2006))、工学的基盤での応答スペクトルを評価した段階で既にある程度の誤差が含まれ

てしまい、最終的な結果の誤差が小さいものとはならなかったとも考えられる。

6. 結論

常時微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を推定することを目的とし、Kanno et al.(2006)の応答スペクトルの距離減衰式から求まる工学的基盤での応答スペクトルに対する観測記録の応答スペクトルの比からスペクトル増幅率を求め、これと常時微動の H/V スペクトル比との関係を検討した。この結果に基づき、微地形区分毎に常時微動の H/V スペクトル比からスペクトル増幅率を推定する関係式を作成した。この関係式を利用して、2007 年新潟県中越沖地震を対象として、各地点でのスペクトル増幅率を常時微動測定結果と微地形区分から求め、距離減衰式から推定した工学的基盤での応答スペクトルに乗ずることにより、各地点での応答スペクトルを推定した。推定された応答スペクトルには、微動の H/V スペクトル比からの地盤の卓越周期が反映され、観測記録にみられるスペクトルのピークが表現されており、多くの地点で観測記録と対応がよい。したがって、本手法は地表の応答スペクトルを推定するための有効な手法であることが確認されたものと考えられる。

謝 辞

本研究では、防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net による地震記録、地盤データおよび微動データベースを使用した。また、防災科学技術研究所 防災システム研究センターの森川信之博士には応答スペクトルの距離減衰式についてご教示を頂いた。3 名の査読者より有益な助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎, 松岡昌志: 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価; 物理探査, 48, [6], 1995, pp.519~529.
- 2) 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, 2005, pp.239-251.
- 3) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, 2006, pp.11-22.
- 4) Boore, D.M., W.B. Joyner and T.E. Fumal: Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Ground Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, Seism. Res. Lett., Vol.68, 1997, pp.154-179.
- 5) 内山泰生, 翠川三郎: 地盤分類別の地盤増幅率を用いた基盤地震動スペクトルの簡便な評価方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 582 号, 2004, pp.39-46.
- 6) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 2006, pp.879-897.
- 7) 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, 2001, pp.195-205.
- 8) 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 Vol.2, No.4' 1988, pp.18-27.
- 9) Rodriguez, V. and S. Midorikawa: Comparison of Spectral Ratio Techniques for Estimation of Site Effects Using Earthquake Motions Recorded at Surface and in Boreholes, and Microtremor Data, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.32, No.11, 2003, pp.1691-1714.
- 10) 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, 2001, pp.261-272.
- 11) 若松加寿江, 松岡昌志, 杉浦正美, 久保純子, 長谷川浩一: 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.11.

- 12) 先名重樹, 安達繁樹, 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回物理探査学会予稿集, 2007, pp.120-122.
- 13) 国土地理院 : 数値地図25000 (土地条件) 東日本, CD-ROM版, 2006.
- 14) 先名重樹, 大井昌弘, 藤原広行 : 微動探査データの収集管理とデータベースシステムの構築, 2007年地球惑星合同大会, 2007, 150-P010.
- 15) 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, 1995, pp.247-259.
- 16) P.Marchand and L.Marmet : Binomial smoothing filter : A way to avoid some pitfalls of least-squares polynomial smoothing, Rev.Sci.Instrum, 1983, pp.1034-1041.
- 17) 神山 真, 松川忠司 : 常時微動 H/V スペクトルによる地震動増幅スペクトルの一推定法 第61回土木学会予稿集, 2006, pp.535~536.
- 18) 文部科学省地震調査研究推進本部 : 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の評価(主に断層面に関する評価), 2008. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm

(受理 : 2008年5月12日)
(掲載決定 : 2008年8月8日)

Estimation of spectral amplification of ground using H/V spectral ratio of microtremors and geomorphological land classification

SENNA Shigeki ¹⁾, MIDORIKAWA Saburoh ²⁾ and WAKAMATSU Kazue ³⁾

- 1) Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Mr. Sci.
- 2) Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
- 3) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kanto-Gakuin University, Dr. Eng.

ABSTRACT

This study aims to estimate the spectral amplification factor of ground from the H/V spectral ratio of microtremors. The empirical amplification factor is calculated from the ratio of the response spectrum of the record to that on the engineering bedrock obtained from the attenuation relationship, for the K-NET and KiK-net observation sites. The empirical amplification factor is compared with the H/V spectral ratio of microtremors at different geomorphologic conditions. The relationships for estimation of the spectral amplification factor from the H/V spectral ratio are proposed for three geomorphologic groups. For the 2007 Niigata-ken-chuetsu-oki earthquake, the proposed method is applied. The estimated spectra show good agreements with the observed ones, and the effectiveness of the method is confirmed.

Key Words: Spectral amplification, Microtremor, H/V spectral ratio, Geomorphological classification, Response spectrum