



## 地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定

先名重樹<sup>1)</sup>、翠川三郎<sup>2)</sup>

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 博士 (工学)

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

### 要約

日本全国に適用できるスペクトル増幅率の簡便な推定方法の提案を目的として、先名・他(2008)のスペクトル増幅率を推定する関係式を使い、微地形区分が判明している地点の常時微動観測記録を用いて各微地形区分での平均スペクトル増幅率を計算した。さらに、スペクトル増幅率に比較的大きなバラツキがみられるものに対しては、河川からの距離や山地・台地系微地形区分等からの最短距離を考慮して微地形区分の細区分を行い、平均スペクトル増幅率を求め、その形状をモデル化した。作成されたモデルを用い、2007年新潟中越沖地震を対象として、各観測地点の微地形区分に対応するスペクトル増幅率モデルを、Kanno et al.(2006)の距離減衰式から推定した工学的基盤相当での応答スペクトルに乗じることにより、地表における応答スペクトルを推定した。推定された応答スペクトルは、多くの地点で観測記録との対応が良く、本手法が、日本全国任意地点の応答スペクトルを簡易に推定するための有効な手法であることが確認された。

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

### 1. はじめに

地震による地表面の地震動分布の推定は、耐震設計や防災計画などの基本条件となるばかりでなく、地震発生後の被害推定や緊急対応においても重要である。特に、近年における地震被害想定や緊急地震速報システムなどの高度利用を考えると、広域の地震動分布を簡便に推定する方法が望まれる。地震動の強さは、主に、震源特性、伝播特性、地盤特性の影響に支配される。地震動分布を簡便に推定する方法として、距離減衰式があり、地震記録の統計解析により様々なモデルが提案され、地震動予測地図等に多用されている。これらの多くは、最大加速度、最大速度、計測震度などの地震動強さについてのものであり、地震動の応答スペクトルに対するものは少ない。

応答スペクトルの距離減衰式での地盤増幅率の評価として、Boore et al.(1997)<sup>1)</sup>、内山・翠川(2003)<sup>2)</sup>、Kanno et al.(2006)<sup>3)</sup>等の研究があげられる。これらの研究では、過去に得られた地震記録の回帰分析等により、地盤の平均 S 波速度や大まかな地盤分類に応じてスペクトル増幅率を評価している。しかしながら、評価されたスペクトル増幅率は平均的なものであり、地点毎の地盤の卓越周期の違いを詳細に評価することは困難である。そこで、先名・他(2008)<sup>4)</sup>は、地点毎の卓越周期の違いを反映した増幅特性の評価法を提案した。これは、

距離減衰式から求めた工学的基盤相当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ものである。

しかし、この手法はスペクトル増幅率を計算する地点において、必ず常時微動の測定を必要とするため、広域について面的に強震動予測を行う場合、強震動予測計算範囲内において膨大な数の微動測定を実施する必要がある。例えば、日本全国を標準地域メッシュ（約 1km メッシュ）の解像度で一律にスペクトル増幅率の分布を求めるには、約 38 万点に対して微動測定を実施する必要がある。本研究では、既往の平均 S 波速度や大まかな地盤分類に応じたスペクトル増幅率の評価法の改良を目指して、先名・他(2008)で提案したスペクトル増幅率の計算方法を利用して各地点でのスペクトル増幅率を評価し、より細分化された地形・地盤分類毎にその特性を検討し、日本全国に適用できるスペクトル増幅率の簡便な推定方法の提案を目的としている。なお、本論文においては、以降、地形・地盤分類を微地形区分と呼ぶ。

## 2. 使用したデータについて

先名・他(2008)は、Kanno et al.(2006)による応答スペクトルの距離減衰式から求まる工学的基盤相当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をスペクトル増幅率と定義した。これと常時微動の 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提案した。この関係式を用いて、微地形区分が判明している地点の常時微動観測記録から、微地形区分毎のスペクトル増幅率を計算することができる。

常時微動観測は、防災科学技術研究所における K-NET および KiK-net 観測点全点の計 1709 点の観測を行い、これらを観測点の微地形区分毎に整理した。さらに、数が少ない微地形区分でのデータを補うために 93 地点で追加の微動観測を行った。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し、さらに土質柱状図がある地点はその情報を参考にした。その結果、K-NET については、全 1029 観測点中 509 観測点、KiK-net については 680 観測点中 435 観測点、合計 1037 点を評価する観測地点とした。観測およびデータの解析に関しては、先名・他(2008)を参照されたい。

表 1 に、若松・他(2002)<sup>9)</sup>の地形・地盤分類による微地形区分 ID の 1p から 19 に対する常時微動観測点数を示す。また、先名・他(2008)で、スペクトル増幅率が検討された各微地形区分での地震記録数も示す。この表より、常時微動観測数は全ての微地形区分において 10 個以上のデータが存在していることがわかる。一方、地震記録については、10 観測点未満となる微地形区分が、評価する微地形区分全体の約半分の 9 区分もあり、微地形区分 ID = 14 (旧河道) については対応する観測点がない。この地震記録数では、スペクトル増幅率を統計的に評価する上で十分とは言い難い。そこで、本研究では、常時微動の観測記録を用いて各微地形区分でのスペクトル増幅率を検討することとする。データを使用した常時微動観測点の分布を図 1 に示す。観測点在全国に分布していることがわかる。なお、埋立地の 55 地点のデータの内の 35 地点は東京湾沿岸のデータであり、分布に地域的な偏りがある。そこで、地域的偏りの影響について検討するため、これを 20 地点に減らして解析したが、結果はほとんど変わらなかったことを確認している。

表 1 各微地形区分毎の地震観測点および常時微動観測点個数

微地形区分 ID	微地形名	常時微動観測数	先名・他(2008)で検討した地震観測点数
1p	山地(先第三系)	52	17
1t	山地(第三系)	26	5
2	山麓地	37	13
3	丘陵	53	10
4	火山地	12	4
5	火山山麓地	39	19
6	火山性丘陵	10	3
7	岩石台地	10	3
8	砂礫質台地	161	81
9	ローム台地	53	31
10	谷底低地	215	87
11	扇状地	77	35
12	自然堤防	14	8
13	後背湿地	50	20
14	旧河道	33	0
15	三角州・海岸低地	56	31
16	砂州・砂礫州	54	21
17	砂丘	10	7
18	干拓地	20	5
19	埋立地	55	5
合計		1037	405

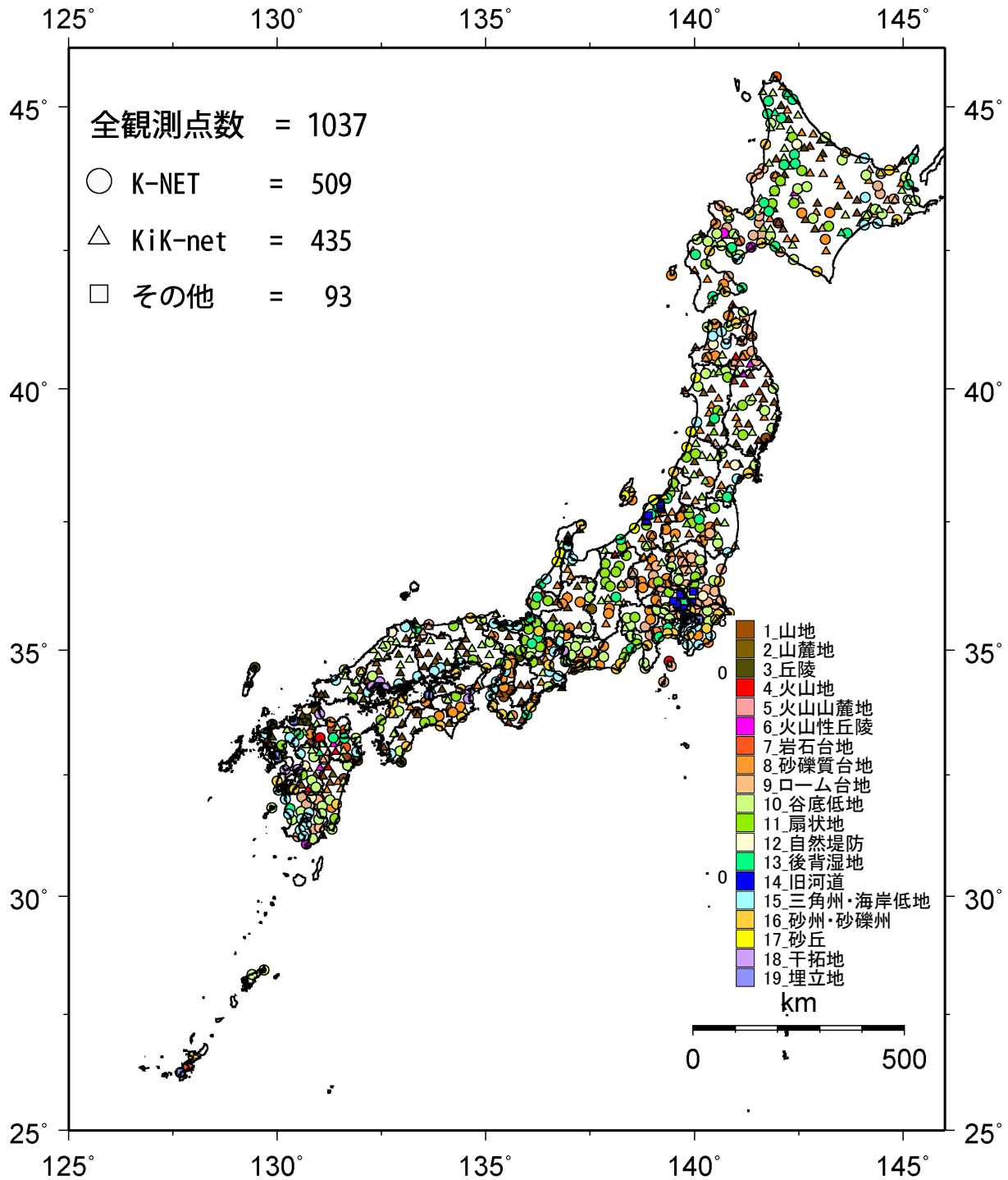


図1 微動観測データを使用した観測点における微地形区分  
(K-NET、KiK-net およびその他の微動観測点)

### 3. H/V スペクトル比のスペクトル増幅率への変換

表1に示す常時微動観測点全点のH/Vスペクトル比を、先名・他(2008)の定義するスペクトル増幅率 $c_j(T)$ に変換する計算を行った。スペクトル増幅率への変換は、式(1)に示すように常時微動のH/Vスペクトル比

$HV_j(T)$  を、先名・他(2008)に示される  $\alpha_k$  および  $\beta'_m(T)$  の補正倍率で割ることにより得られる。 $c_j(T)$  は、Kanno et al.(2006)による距離減衰式から求まる AVS30 が 300m/s 程度の地層でのスペクトルに対する各地点でのスペクトルの比で定義され、対象周期は 0.1~2.0 秒である。

$$c_j(T) = \frac{HV_j(T)}{\alpha_k \cdot \beta'_m(T)} \quad (0.1 \leq T \leq 2.0(s)) \quad (1)$$

ここで、

$c_j(T)$  : 観測点  $j$  におけるスペクトル増幅率

$HV_j(T)$  : 観測点  $j$  における微動の H/V スペクトル比

$\alpha_k$  : 観測点  $j$  に対応する微地形区分  $k$  における補正倍率  $\alpha$

$\beta'_m(T)$  : 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

である。なお、ここで示される微地形グループとは、先名・他(2008)による微地形グループ A (山地系微地形区分: 微地形区分 ID = 1~7)、グループ B (台地系微地形区分: 微地形区分 ID = 8~11)、グループ C (平地系微地形区分: 微地形区分 ID = 12~19) のことである。

さらに、各微地形区分  $k$  における  $q_k$  個のスペクトル増幅率  $c_j(T)$  に対する平均スペクトル増幅率  $\gamma_k(T)$  を式 (2) より計算する。

$$\gamma_k(T) = \frac{\sum_{j=1}^{q_k} c_j(T)}{q_k} \quad (0.1 \leq T \leq 2.0(s)) \quad (2)$$

各微地形区分 (ID = 1p (山地 (先第三系)) ~19 (埋立地)) に計算された平均スペクトル増幅率  $\gamma_k(T)$  の結果を図 2 に示す。式(1)の対象周期は 0.1~2.0 秒であるが、ピーク周期が 0.1 秒以下の場合があるので、ここでは参考のため、より広い周期範囲のスペクトル増幅率を示している。図の赤線が平均値  $\gamma_k(T)$  を、点線がその  $\pm 1\sigma$  を示す。また、各微地形区分における平均スペクトル増幅率の卓越周期、その増幅倍率を表 2 に示す。また、対象周期範囲のうち地震工学的に重要と考えられる 0.2~2.0 秒における対数標準偏差の平均値も示してある。これによると、山地系微地形区分 (微地形区分 ID = 1~7) においては、卓越周期が 0.08~0.17 秒で増幅倍率が 0.7~1.4 倍、対数標準偏差の平均値が 0.1 前後である。台地系微地形区分 (微地形区分 ID = 8~11) においては、卓越周期が 0.11~0.17 秒で増幅倍率が 1.2~1.6 倍、対数標準偏差の平均値が 0.13~0.16 である。

低地形微地形区分 (微地形区分 ID = 12~19) においては、データ数が 10 個とやや少ない微地形区分 ID = 17 の砂丘を除くと、卓越周期が 0.5~1.1 秒、増幅倍率が 2.0~2.8 倍、対数標準偏差の平均値が 0.16~0.19 であり、山地系および台地系微地形区分に対し、周期がより長くなり、増幅倍率もより大きく、対数標準偏差の平均値も大きくなるといった違いがみられる。山地系微地形区分および台地形微地形区分で対数標準偏差の平均値が小さいのは、0.2 秒よりも短い周期でピークを持つことが多いため、特徴的なピークの少ない 0.2 秒以上の対数標準偏差の平均値が小さいためと考えられる。一方、低地系微地形区分では、0.2 秒以上で卓越周期を持ち、地点毎に卓越周期の変動があることが多く、そのため、バラツキも大きくなると考えられる。

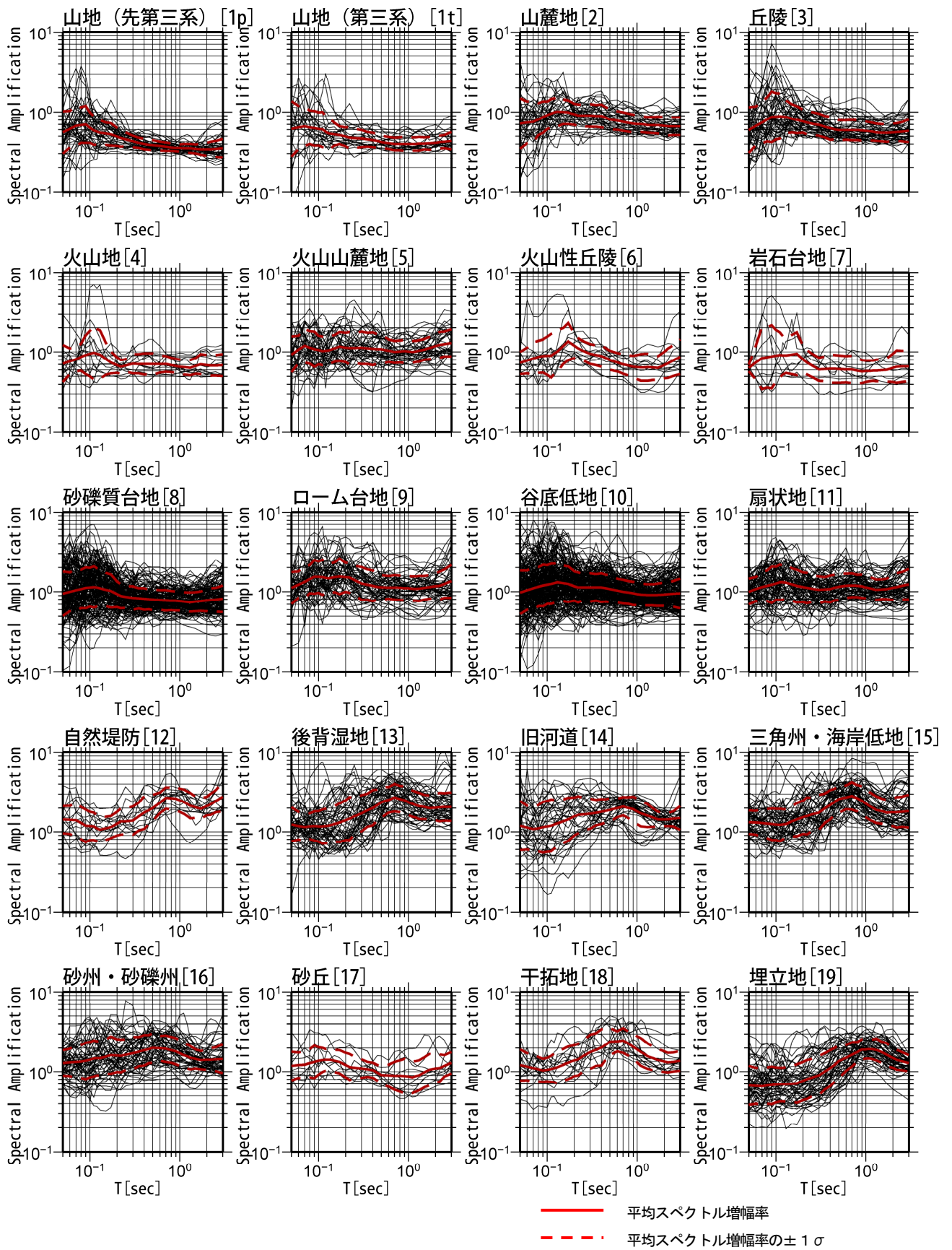


図2 全微地形区分におけるスペクトル増幅率分布図



表2 各微地形区分の平均スペクトル増幅率における平均卓越周期、増幅倍率および0.2~2.0秒における対数標準偏差の平均値一覧

微地形グループ	微地形区分ID	微地形名	卓越周期(sec)	卓越周期における増幅倍率	0.2~2.0秒における対数標準偏差の平均値
A	1p	山地(先第三系)	0.09	0.7	0.07
	1t	山地(第三系)	0.08	0.7	0.09
	2	山麓地	0.13	1.0	0.12
	3	丘陵	0.12	0.9	0.13
	4	火山地	0.11	1.0	0.11
	5	火山山麓地	0.17	1.2	0.16
B	6	火山性丘陵	0.17	1.4	0.14
	7	岩石台地	0.17	1.0	0.15
	8	砂礫質台地	0.11	1.2	0.13
	9	ローム台地	0.17	1.6	0.16
	10	谷底低地	0.13	1.3	0.15
	11	扇状地	0.13	1.3	0.15
C	12	自然堤防	0.70	2.7	0.16
	13	後背湿地	0.70	2.7	0.19
	14	旧河道	0.70	2.1	0.16
	15	三角州・海岸低地	0.70	2.8	0.18
	16	砂州・砂礫州	0.50	2.0	0.17
	17	砂丘	0.13	1.4	0.17
	18	干拓地	0.50	2.8	0.17
	19	埋立地	1.10	2.1	0.18

#### 4. 地形・地盤分類および地理的指標に基づくスペクトル増幅率のモデル化と結果の検証

前章で低地系微地形区分で卓越周期に変動が大きいことにより、対数標準偏差が大きくなることを示した。低地系微地形区分では他の微地形区分に比べて増幅率は大きく、その評価はより重要である。そこで、スペクトル増幅率の予測精度を向上させるため、対数標準偏差の比較的大きい低地系微地形区分のものについて、微地形区分の細区分について検討する。

##### 4.1 スペクトル増幅率と地理的指標の関係に基づく微地形区分の細区分の検討

スペクトル増幅率評価のための微地形区分の細区分を行うため、対数標準偏差の平均値が大きい低地系微地形区分（微地形区分 ID = 12（自然堤防）、ID = 13（後背湿地）、ID = 14（旧河道）、ID = 15（三角州・海岸低地）、ID = 16（砂州・砂礫州）、ID = 17（砂丘）、ID = 18（干拓地）、ID = 19（埋立地））の8区分について、以下に示す地理的指標によるパラメータ等と卓越周期との相関を検討した。まず、既往の研究である、微地形区分と AVS30 との相関を検討した研究（翠川・松岡(1995)<sup>8)</sup>、藤本・翠川(2003)<sup>9)</sup>、松岡・他(2005)）の地理的指標と微地形区分との関係を参考に、a) 標高、b) 平均傾斜角、c) 河川からの最短距離、d) 山地系および台地系微地形区分（微地形区分 ID = 1p~11）と、対象とする微地形区分（微地形 ID = 12、13、14、15、16、17、18、19）との最短距離、e) 自然堆積系微地形区分（微地形区分 ID = 1~17）と、対象とする人工地盤系微地形区分（微地形区分 ID = 18、19）との最短距離、について検討を行った。

a) 標高および b) 傾斜については、「日本全国地形・地盤分類メッシュマップ」<sup>7)</sup>の基準地域メッシュ（約1km四方）毎に与えられており、ここでは中央値を採用した。c) の河川からの最短距離については、既往研究<sup>5),8),9)</sup>と同様に、国土数値情報の河川流路データを用いて、一級および主要二級河川からの最短距離を計算した。d) 山地および台地系微地形区分からの最短距離については、第四紀完新世に形成された主に低地系微地形区分の堆積層下にある比較的硬い層（工学的基盤相当層）までの深さとの相関があるものと期待して、ここでは、山地および台地系微地形区分（1p~11）の属性を有するメッシュまでの最短距離を利用することとした。e) 自然堆積系微地形区分（1p~17）については、人工的な地盤（微地形区分 ID = 18、19）は、概ね海浜・湖沼周辺に多いため、旧汀線からの最短距離に近いと考えられる自然堆積系微地形区分までの最短距離と埋め立て深さとの相関を期待して、自然堆積系微地形区分（1p~17）の属性を有するメッシュまでの最短距離を利用することとした。検討の際には、上記に示す最短距離とスペクトル増幅率に変換する前の常時微動の H/V スペクトル比について、ピーク周期を同定しやすい、H/V スペクトル比のピーク値が2.5倍以上のものを用いた。

表3 微地形区分における各条件パラメータ a)～e) とピーク周期の相関 (数字は相関係数)

微地形区分ID	微地形区分名	a)標高	b)傾斜角	c)河川からの距離	d)微地形区分ID=1～11との最短距離	e)微地形区分ID=1～17との最短距離
12	自然堤防	0.33	0.35	0.29	0.41	—
13	後背湿地	0.47	0.43	0.51	0.62	—
14	旧河道	0.44	0.38	0.40	0.37	—
15	三角州・海岸低地	0.41	0.46	0.68	0.48	—
16	砂州・砂礫州	0.32	0.29	0.36	0.42	—
17	砂丘	0.38	0.48	0.34	0.41	—
18	干拓地	0.29	0.36	0.34	0.48	0.52
19	埋立地	0.22	0.32	0.28	0.61	0.72

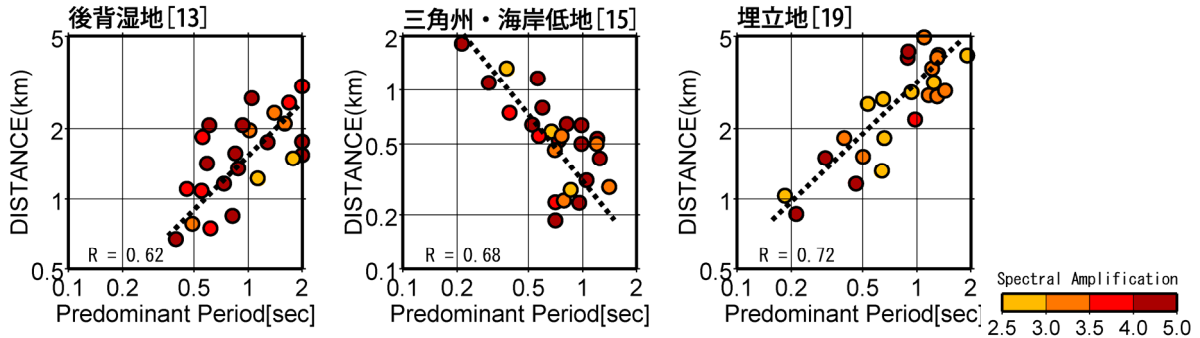


図3 微地形区分 ID = 13 (後背湿地)、15 (三角州・海岸低地)、19 (埋立地) におけるスペクトル増幅率のピーク周期と最短距離との関係 (○の色は、H/V スペクトル比の卓越周期の倍率を表す。ID = 13 については、山地・台地系微地形区分からの最短距離、ID = 15 については、河川からの最短距離、ID = 19 については、自然堆積系微地形区分からの最短距離をそれぞれ示す)。なお、図中の黒点線は最小二乗法による近似直線、R は相関係数をそれぞれ示す。

表3に、対象とする微地形区分でのスペクトル増幅率のピーク周期と各パラメータとの相関を示す。これらの分布をみると、ほとんどが相関係数0.5程度以下であるが、相対的に高い相関係数を示すものは、i) 微地形区分ID=13(後背湿地)における微地形区分ID=1p~11の山地・台地系微地形区分との最短距離の関係、ii) 微地形区分ID=15(三角州・海岸低地)における河川からの最短距離との関係、iii) 微地形区分ID=19(埋立地)における自然堆積系微地形区分(1p~17)およびiv) 微地形区分ID=19(埋立地)における山地・台地系微地形区分との最短距離の関係の4つとなった。これらの相関係数は0.61から0.72とそれほど高いものではないが、他のものが0.52以下であるのに比べて差があるため、検討を行うこととした。このうち、ID=19については条件をみたすものが2つあるが、うち相関係数の良い方iii)を検討の対象とした。図3にi)、ii)、iii)について卓越周期と各種最短距離との結果を示す。図に示すシンボル○の色は、H/V スペクトル比の卓越周期での増幅倍率を表す。

これらの微地形区分の細区分について検討を試みた。細区分を行うにあたり、スペクトル増幅率と最短距離との関係を確認するため、スペクトル分布を最短距離について面的に表現したものを図4に示す。図4に示す3つの微地形区分のうち、まず、微地形区分ID=13(後背湿地)については、最短距離2kmを境界として赤色で示される3倍以上のピーク値が0.5~0.8秒から0.7~1.5秒に変化しているため、ここでは最短距離2kmを境界として、2km以下を微地形区分ID=13a、2km以上を13bとして区分した。なお、図4のコンター図は必ずしも十分な数のデータから描かれたものではないため、閾値は目視で定めた。

微地形区分ID=15(三角州・海岸低地)については、河川からの最短距離について全体的に距離が大きい(河川から離れる)ほど短周期側にピークが移動していくことが確認できる。また、図中のオレンジまたは赤色で示したスペクトル増幅率2.5倍以上の領域について、黒点線で示した最短距離0.75km付近を境界として0.2秒程度の差異が見られるため、ここでは0.75km以上を微地形区分ID=15a、0.75km以下を15bとして区分した。微地形区分ID=19(埋立地)については、最短距離と周期の関係が比較的明瞭で、距離が大きい

ほど長周期となる傾向が確認できる。また、2km 未満で、スペクトル増幅率が 2 倍以上の黄色の分布がほとんど確認できないのに対し、2km 以上においては、0.7 秒から 1.5 秒付近に黄色で示す 2.0 倍以上の分布が確認できるため、ここでは黒点線で示した 2km 以下を微地形区分 ID = 19a、2km 以上を 19b として区分した。上記の区分設定についてそれぞれ平均スペクトル増幅率を計算した。微地形区分 ID = 13、15、19 以外の微地形区分については、区分を行わず 1 つの平均スペクトル増幅率とした。なお、細分化の際の閾値の設定を目視で行っていることや標準偏差の比較的大きな微地形区分 ID = 16~18 について細分化していないことなどの課題も残っているが、後述するように、微地形区分 ID = 13、15、19 を細分化することで、細分化しない場合に比べて統計上有意に精度が向上していることを確認している。

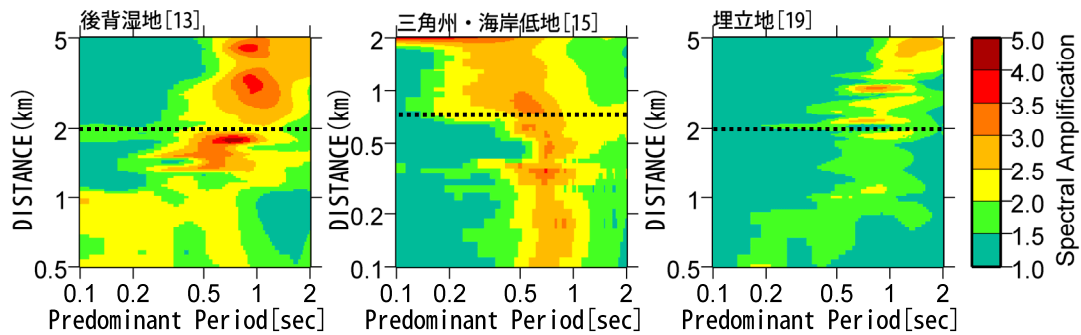


図4 微地形区分 ID = 13 (後背湿地)、ID = 15 (三角州・海岸低地)、ID = 19 (埋立地) におけるスペクトル増幅率の周期と最短距離との関係。黒点線は、検討した細区分の境界線を示す。

#### 4.2 各微地形区分におけるスペクトル形状のモデル化

各微地形区分  $k$  における平均スペクトル増幅率の形状について、4.1 で微地形区分を細区分したものを含めて合計 23 区分について式(3)に示す 4 次関数にて平滑化を行いモデル化した。

$$\overline{\gamma}_k(T) = a + b \cdot \log_{10}(T) + c \cdot \{\log_{10}(T)\}^2 + d \cdot \{\log_{10}(T)\}^3 + e \cdot \{\log_{10}(T)\}^4 \quad (0.1 \leq T \leq 2.0(s)) \quad (3)$$

ここで、 $\overline{\gamma}_k(T)$  は、微地形区分  $k$  (表4の微地形区分 ID) のスペクトル増幅率のモデル形状を示し、 $a \sim e$  は回帰係数である。各微地形区分および最短距離により、スペクトル増幅率を 2 つに細区分した微地形区分 (ID = 13、15、19) を含め、全部で 23 区分のスペクトル増幅率のモデル化を行った。式(3)で回帰計算をしたところ、近近似する周期範囲における相関係数が、全ての微地形区分において、0.9 以上と相関が良いことを確認している。上記式(3)と表4のパラメータより、計算した結果を図5の青線に示す。式(3)のモデルで良く近似できていることがわかる。

表4 各微地形区分における 4 次関数で平滑化したスペクトル増幅率モデルの回帰係数一覧

微地形グループ	微地形区分ID	微地形名	距離分類	係数					データ数
				a	b	c	d	e	
A	1p	山地(先第三系)	-	-0.457	-0.024	0.229	-0.271	-0.275	52
	1t	山地(第三系)	-	-0.398	0.008	0.201	-0.118	-0.134	26
	2	山麓地	-	-0.143	-0.169	0.148	0.155	-0.056	37
	3	丘陵	-	-0.250	-0.020	0.266	-0.239	-0.343	53
	4	火山地	-	-0.174	-0.070	0.120	0.718	0.722	12
	5	火山麓地	-	0.004	0.013	0.536	0.776	0.259	39
	6	火山性丘陵	-	-0.188	-0.092	0.618	-0.279	-0.878	10
B	7	岩石台地	-	-0.238	0.082	0.362	-0.368	-0.448	10
	8	砂礫質台地	-	-0.123	0.028	0.248	-0.211	-0.263	161
	9	ローム台地	-	0.036	0.001	0.404	0.097	-0.163	53
	10	谷底低地	-	-0.022	-0.106	0.187	0.121	-0.063	215
	11	扇状地	-	0.054	-0.029	-0.156	-0.099	0.105	77
C	12	自然堤防	-	0.400	-0.117	-1.755	-1.385	-0.071	14
	13	後背湿地	2.0km以下	0.310	-0.221	-0.170	0.892	0.602	28
			2.0km以上	0.446	-0.109	-1.265	0.099	0.907	22
	14	旧河道	-	0.248	-0.301	-0.298	0.925	0.755	33
	15	三角州・海岸低地	0.75km以上	0.338	-0.247	-0.384	0.680	0.572	32
			0.75km以下	0.395	-0.395	-1.198	0.647	1.149	24
	16	砂州・砂礫州	-	0.233	-0.323	-0.333	0.780	0.728	54
	17	砂丘	-	-0.052	0.068	0.967	0.153	-0.154	10
	18	干拓地	-	0.310	-0.432	-0.576	0.997	0.847	20
	19	埋立地	2.0km以下	0.207	-0.237	-0.543	0.639	0.666	19
			2.0km以上	0.312	0.368	-1.949	-2.670	-0.879	36



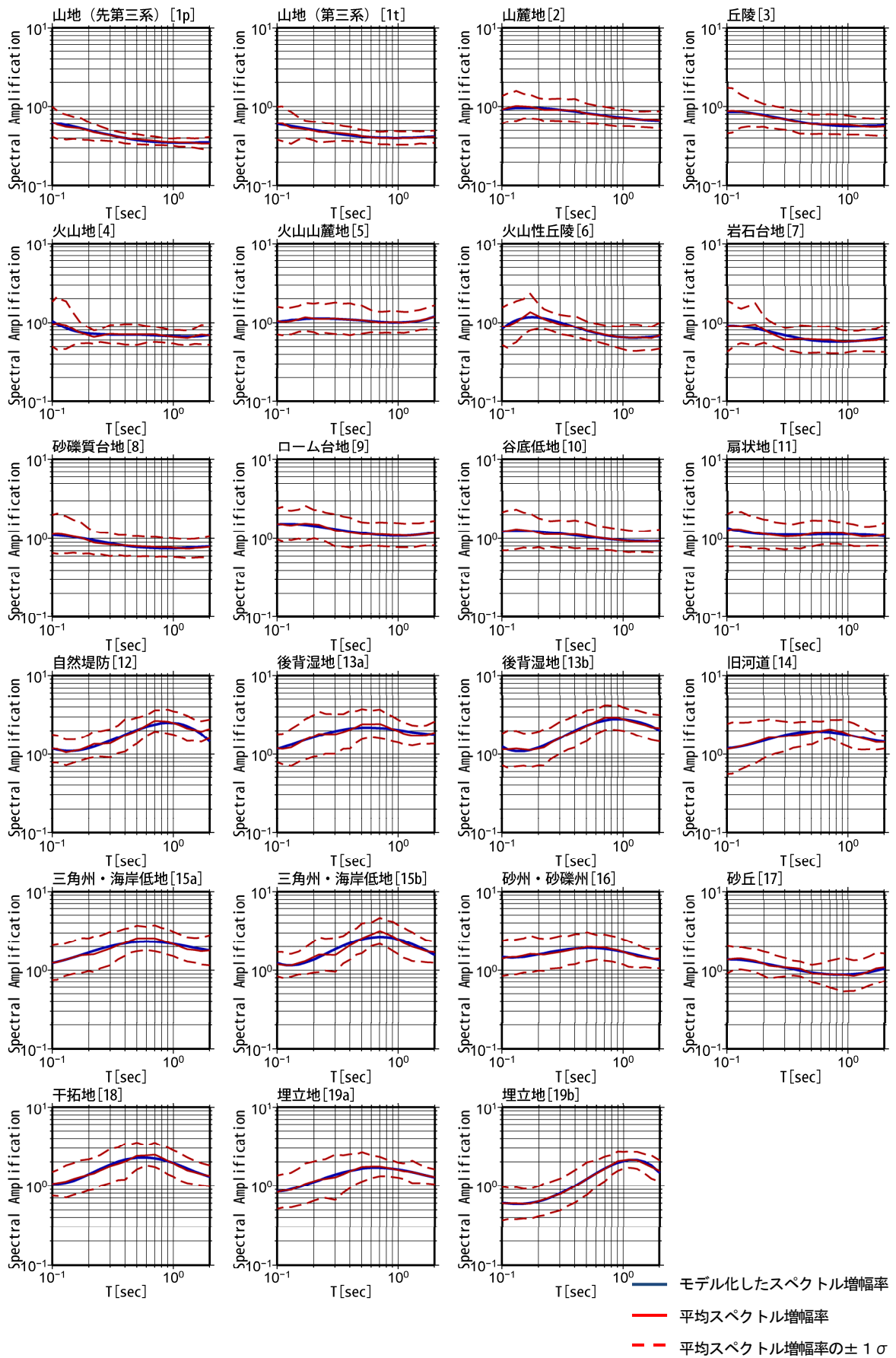


図5 各微地形区分におけるスペクトル増幅率のモデル化の状況

#### 4.2 2007年新潟県中越沖地震における適用例

4.2 の式(3)より、対象地点での微地形区分  $k$  の  $\overline{\gamma}_k(T)$  を求め、Kanno et al.(2006)の工学的基盤相当 (AVS30=300m/s) の応答スペクトル  $SA_j^b(T)$  に乗ずることで、地表における応答スペクトル  $SA_j^s(T)$  を式(4)で推定できる。

$$SA_j^s(T) = \overline{\gamma}_k(T) \cdot SA_j^b(T) \quad (0.1 \leq T \leq 2.0(s)) \quad (4)$$

ここで、

$SA_j^s(T)$  : 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

$SA_j^b(T)$  : 観測点  $j$  における Kanno et al.(2006)による工学的基盤相当 (AVS30 = 300m/s) の加速度応答スペクトル

$\overline{\gamma}_k(T)$  : 表4に示す微地形区分  $k$  におけるモデル化されたスペクトル増幅率

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震に対して、式(4)により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)による工学的基盤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、先名・他(2008)に示された新潟県中越沖地震による検証結果と同様、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<sup>10)</sup>を使用した。図6に、新潟県中越沖地震の想定断層面の位置と、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、先名・他(2008)による微地形グループA (山地系微地形区分: 微地形区分 ID=1~7)、グループB (台地系微地形区分: 微地形区分 ID=8~11)、グループC (平地系微地形区分: 微地形区分 ID=12~19) を表し、色は凡例に示す微地形区分を表す。表5にその断層モデルパラメータ一覧を示す。

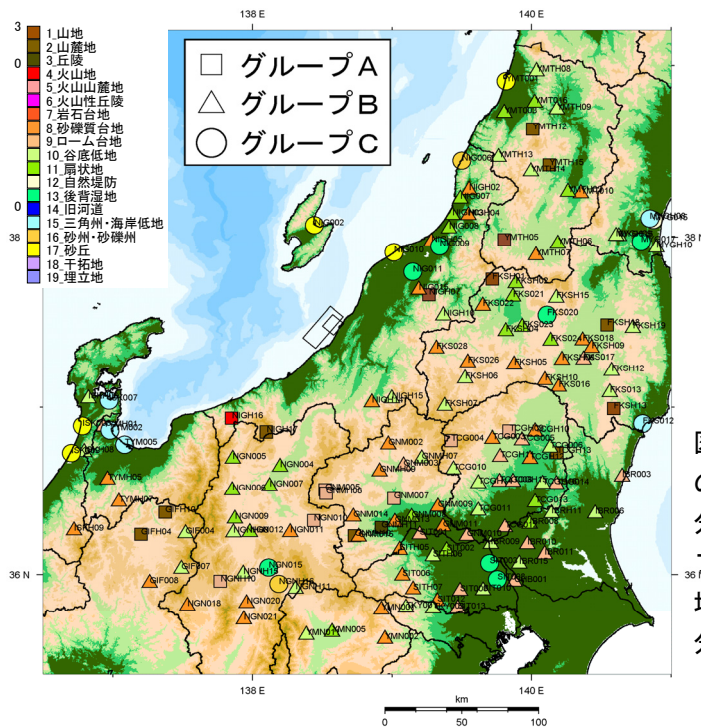


表5 新潟県中越沖地震本震の断層モデルパラメータ一覧

	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6 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 (山地系微地形区分)・B (台地系微地形区分)・C (低地系微地形区分)の区分を、色は微地形区分を示す。

図7に、結果の一例を示す。図に示す黒線が観測記録の加速度応答スペクトル、青線が微動測定結果を用いた先名・他(2008)による結果、緑線がKanno et al.(2006)に微地形区分のAVS30を用いた補正式で計算した結果、赤線が本研究の結果である。なお、Kanno et al.(2006)の計算で使用したAVS30は、松岡・他(2005)の手法にお

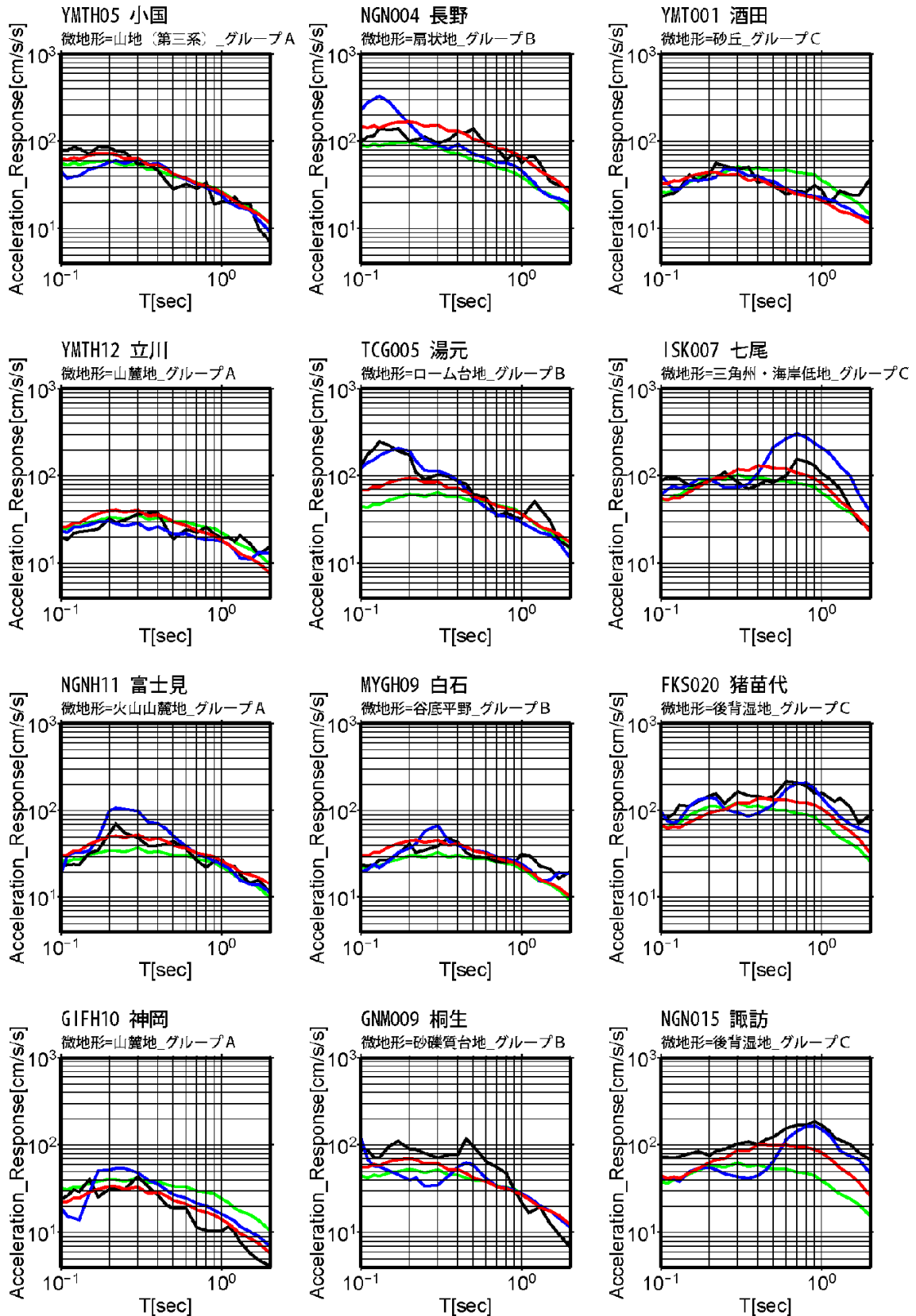


図7 予測値と観測記録の加速度応答スペクトル（5%減衰）の比較（黒線：新潟県中越沖地震の観測結果、青線：先名・他(2008)による予測結果、緑線：kanno et al. (2006)の微地形区分の AVS30 における予測結果、赤線：本研究のモデル化による予測結果）※各グラフ上部のキャプションは、上段：K-NET および KiK-net 観測点の観測点コードと観測点名、下段：その観測点の微地形区分名\_微地形グループ名をそれぞれ示す。

いて観測点位置における微地形区分の AVS30 について計算したものを用いた。なお、図の左側は山地系微地形区分 (グループ A)、中央は台地系微地形区分 (グループ B)、右側は低地系微地形区分 (グループ C) での結果である。本研究の結果 (赤線) は、先名・他(2008)の結果 (青線) ほど、観測記録 (黒線) に見られるようなスペクトルのピークは表現されていないが、Kanno et al.(2006)の補正式による地表の結果 (緑線) と比べると、比較的多くの地点で観測記録とより対応がよいことがわかる。

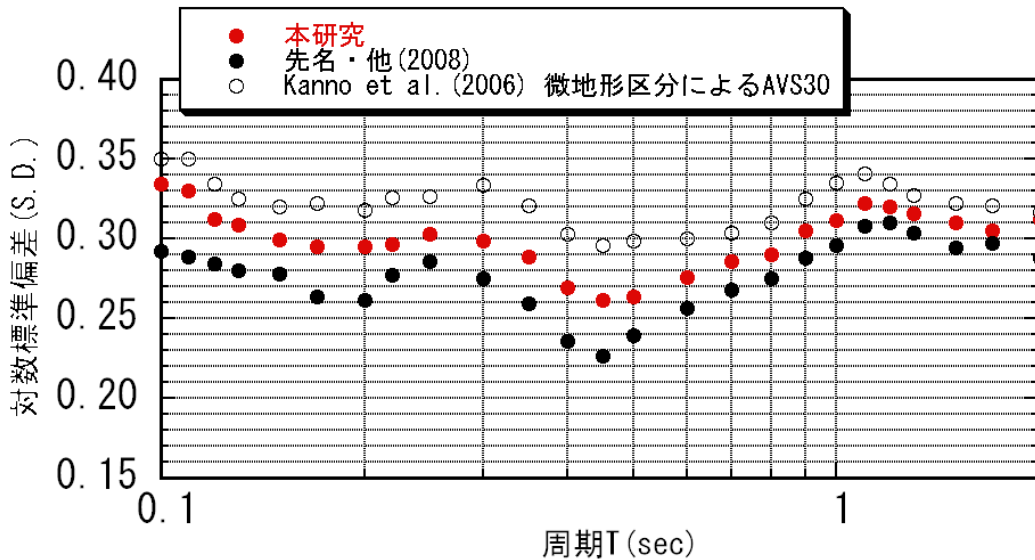


図8 新潟県中越沖地震の予測スペクトルに対する観測スペクトルの比の対数標準偏差 (先名・他(2008)による予測結果の場合が●、Kanno et al. (2006)による微地形区分の AVS30 による結果が○、本研究のモデル化による結果が●)

図8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)の微地形区分の AVS30 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。また、参考までに先名・他(2008)の結果を●で示す。本研究の結果は対数標準偏差で0.26から0.33の範囲であり、全体的に見ると Kanno et al.(2006)による結果と先名・他(2008)の結果とのほぼ中間程度の結果である。この結果は、微地形区分毎にまとめたスペクトル増幅率の形状が、平均 S 波速度に応じた平均的なスペクトル増幅率が抽出される Kanno et al.(2006)よりも適切にモデル化されていることを示唆している。しかしながら、本研究の結果と Kanno et al.(2006)の結果の差は大きなものでないことから、「統計的検定」を用い、両者の差の有意性の検討を行った。

検定法は、ウイルコクソン (Wilcoxon) の順位和検定<sup>11)</sup>を使用した。本研究では、対象とした159観測地点の地震動の応答スペクトルに対して、本研究の手法および Kanno et al.(2006)の手法とのそれぞれの差を取り、差の小さい方からの順位の総和 (検定統計量 W) を検定することで検定が可能である。検定の結果、表6に示すように対象となる周期のうち0.1秒~2.0秒の8割の周期で有意水準10%以下であり、そのうち3/4の周期について有意水準5%以下となった。特に、耐震工学的に重要と思われる0.2~2.0秒の範囲では、約8割で有意水準が5%以下である。この結果、有意な差が認められたことになり、本研究のスペクトル増幅率により精度が向上したといえる。

次に、本研究により提案した「微地形区分を細区分化したスペクトル増幅率」と「細区分化しないスペクトル増幅率」について有意差の検定を行った。検定については、スペクトル増幅率の設定において既存の微地形区分を2つに細分化した、微地形区分 ID = 13、15、19の3つの区分に相当する、合計12観測点について、「細区分化したもの (13a、13b、15a、15b、19a、19bの6区分)」と「細区分化しなかったもの (13、15、



19の3区分)」のスペクトル増幅率を計算し、新潟県中越沖地震の応答スペクトルとの差を計算して、統計的検定を行った。この結果、表7に示すように、全観測地点159点と時と同様に、細区分化した微地形区分のみにおいて、0.17秒よりも長周期側において有意水準5%以下であることより、有意な差が認められた。そこで、微地形区分を細区分化することで結果が改善されたものと考えられる。

表6 2007年新潟県中越沖地震の予測スペクトル159観測地点の本研究の結果(N<sub>1</sub>)とKanno et al.(2006)(N<sub>2</sub>)による検定統計量Wの比較

全159点					
周期(s)	N(N <sub>1</sub> +N <sub>2</sub> )	W	W(α=0.10)	W(α=0.05)	α
0.10	318(159+159)	24200	24011	23754	0.1571
0.11	318(159+159)	24135	24011	23754	0.1351
0.12	318(159+159)	24022	24011	23754	0.1027
0.13	318(159+159)	24029	24011	23754	0.1045
0.15	318(159+159)	24111	24011	23754	0.1276
0.17	318(159+159)	23998	24011	23754	0.0966
0.20	318(159+159)	23832	24011	23754	0.0623
0.22	318(159+159)	23866	24011	23754	0.0684
0.25	318(159+159)	23745	24011	23754	0.0488
0.30	318(159+159)	23752	24011	23754	0.0496
0.35	318(159+159)	23822	24011	23754	0.0606
0.40	318(159+159)	23659	24011	23754	0.0380
0.45	318(159+159)	23698	24011	23754	0.0426
0.50	318(159+159)	23612	24011	23754	0.0330
0.60	318(159+159)	23615	24011	23754	0.0333
0.70	318(159+159)	23442	24011	23754	0.0193
0.80	318(159+159)	23516	24011	23754	0.0245
0.90	318(159+159)	23460	24011	23754	0.0205
1.00	318(159+159)	23524	24011	23754	0.0251
1.10	318(159+159)	23581	24011	23754	0.0300
1.20	318(159+159)	23634	24011	23754	0.0353
1.30	318(159+159)	23612	24011	23754	0.0330
1.50	318(159+159)	23680	24011	23754	0.0404
1.70	318(159+159)	23722	24011	23754	0.0457
2.00	318(159+159)	23820	24011	23754	0.0603

表7 2007年新潟県中越沖地震における細区分化した微地形区分(13、15、19)12観測地点(N<sub>1</sub>)における、細区分化しない場合(N<sub>2</sub>)との差の結果による検定統計量W

全159点のうち細区分化した微地形区分ID=13,15,19の12地点					
周期(s)	N(N <sub>1</sub> +N <sub>2</sub> )	W	W(α=0.05)	W(α=0.01)	α
0.10	24(12+12)	159	115	105	0.6236
0.11	24(12+12)	142	115	105	0.6650
0.12	24(12+12)	143	115	105	0.7075
0.13	24(12+12)	126	115	105	0.1749
0.15	24(12+12)	118	115	105	0.0690
0.17	24(12+12)	114	115	105	0.0404
0.20	24(12+12)	111	115	105	0.0262
0.22	24(12+12)	108	115	105	0.0166
0.25	24(12+12)	106	115	105	0.0120
0.30	24(12+12)	102	115	105	0.0061
0.35	24(12+12)	100	115	105	0.0043
0.40	24(12+12)	98	115	105	0.0029
0.45	24(12+12)	99	115	105	0.0035
0.50	24(12+12)	98	115	105	0.0029
0.60	24(12+12)	101	115	105	0.0051
0.70	24(12+12)	97	115	105	0.0024
0.80	24(12+12)	98	115	105	0.0029
0.90	24(12+12)	96	115	105	0.0020
1.00	24(12+12)	100	115	105	0.0043
1.10	24(12+12)	106	115	105	0.0120
1.20	24(12+12)	103	115	105	0.0073
1.30	24(12+12)	102	115	105	0.0061
1.50	24(12+12)	109	115	105	0.0194
1.70	24(12+12)	114	115	105	0.0404
2.00	24(12+12)	113	115	105	0.0351

有意水準α=0.01(1%)  
 有意水準α=0.05(5%)  
 有意水準α=0.10(10%)

## 5. 結論

本研究では、先名・他(2008)の常時微動の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使い、常時微動観測記録を用いて、微地形区分毎に平均スペクトル増幅率を計算した。また、平均スペクトル増幅率の対数標準偏差が比較的大きい3つの微地形区分においては、地理的指標との関係に基づき、それぞれ2つに細分化した。これら23の微地形区分に対して平均スペクトル増幅率を計算し、4次関数にてモデル化した。この結果を用いて、2007年新潟中越沖地震を対象として、各地点の微地形区分に対応するスペクトル増幅率モデルを、Kanno et al.(2006)の距離減衰式から推定した工学的基盤相当(AVS30=300m/s)での応答スペクトルに乗じることにより、各地点での地表における応答スペクトルを推定した。推定された応答スペクトルは、先名・他(2008)の常時微動に基づくスペクトル増幅率で表現されるピーク形状ほど対応は良くないが、微地形区分から推定したAVS30を用いた従前の方法と比べると精度が向上していることを統計的検定により確認した。したがって、本手法は、日本全国の地表面での応答スペクトルを一律に簡易に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による K-NET・KiK-net の地震記録、地盤データおよび微動データベースを使用した。また、関東学院大学工学部社会環境システム学科の若松加寿江教授には、地形・地盤分類に基づく微地形区分についてご教示いただいた。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) 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.
- 2) 内山泰生, 翠川三郎 : 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 571 号, 2003, pp.87-93.
- 3) 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.
- 4) 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, 日本地震工学会論文集, Vol.8, No 4, 2008, pp. 1-15.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美 : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No. 759/I-67, 2004, pp. 213-232.
- 8) 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.
- 9) 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, 日本地震工学会論文集, Vol3, No.3, 2003, pp. 13-27.
- 10) 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](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08jan_chuetsu_oki/index.htm)
- 11) 石村貞夫 : 『統計解析のはなし』, 東京図書, 1990, pp. 258-264.

(受理 : 2008 年 9 月 12 日)  
(掲載決定 : 2009 年 5 月 18 日)

## Estimation of spectral amplification of ground motion based on geomorphological land classification

SENNA Shigeki <sup>1)</sup> and MIDORIKAWA Saburoh <sup>2)</sup>

- 1) Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Dr. Eng.
- 2) Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

## ABSTRACT

This study aims to estimate the spectral amplification factor for all of Japan. The spectral amplification

factor for each geomorphology is calculated from the H/V spectral ratio of the microtremor with the modification factors by Senna et al.(2008). For some geomorphologies, the subdivided units are used. The spectral amplification factor is modeled for each geomorphology. 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, Geomorphological classification, Response spectrum, Microtremor, H/V spectral ratio*