

# 拡散波場理論に基づく地震動H/Vスペクトルの 計算法に関する考察 —福井地域の地震観測記録を対象として—

安井 譲<sup>1</sup>・西川 隼人<sup>2</sup>・小嶋 啓介<sup>3</sup>・前田 寿朗<sup>4</sup>  
瀬瀬 一起<sup>5</sup>・宮島 昌克<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 早稲田大学理工研招聘研究員 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)  
E-mail:y.yasui@kurenai.waseda.jp

<sup>2</sup>正会員 舞鶴工業高等専門学校主任技術職員 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)  
E-mail:nisikawa@g.maizuru-ct.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 福井大学教授 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1)  
E-mail:k\_kojima@u-fukui.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 早稲田大学教授 創造理工学部建築学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)  
E-mail:tmaeda@waseda.jp

<sup>5</sup>非会員 東京大学教授 地震研究所災害科学系研究部門 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)  
E-mail:koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>6</sup>正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

拡散波場理論に基づく定式化によると地震動H/Vスペクトルは水平と上下の伝達関数の比に基盤の速度比により定まる係数を乗じて計算される。本研究はこの計算法の妥当性を福井地域の地震観測記録を用いて考察したものである。その際、伝達関数として水平と上下のスペクトルインバージョン解析から求まる地盤増幅特性を用いた。その結果、計算によるH/Vスペクトルは観測値とよく一致し拡散波場理論に基づく計算法の妥当性が示された。また、基盤の速度比に関係する係数の値は水平と上下の震源スペクトルの比にほぼ等しいことが導かれた。

**Key Words :** *H/V spectrum, earthquake motion, diffuse-wave field, spectral inversion, site amplification, source spectrum, propagation path effect*

## 1. はじめに

H/V スペクトル法は地表面の 1 点の常時微動波形の水平と上下成分のスペクトル比から得られる卓越周期や増幅特性を利用して地盤の地下構造を推定しようとするもので、その簡便性と機動性から地盤探査の補助手段の一つとして多用されている。この H/V スペクトルは古くから取り上げられていたが(例えば<sup>1)2)</sup>、中村ら<sup>3)</sup>が表層地盤の震動特性と関連付けたことが広く工学的に注目される契機となった。

常時微動の H/V スペクトルの成因は、現在では表面波のモード比スペクトルと考える説が優勢で、その逆解

析による地盤の速度構造の同定も試みられている<sup>4)</sup>。一方、地震動の H/V スペクトルについてもその性状や成因を明らかにしようとする多くの研究<sup>5)~10)</sup>があるが、なかでも小林ら<sup>9)10)</sup>は地震波の初期微動部分の H/V スペクトルは P 波の斜め入射で、主要動の H/V スペクトルは SV 波の斜め入射でそれぞれ説明できるとして、地盤構造の逆解析手法を提案している。この方法は波動理論的に正統なものであるが、地震記録の 1 波ごとに斜め入射波解析を行う必要があるなど簡便さにやや欠ける面があった。これに対して川瀬ら<sup>11)12)</sup>は、ランダムに分布した十分な数の震源群によって生じる地盤震動を拡散波場としてとらえると、地震動 H/V スペクトルは水平と上下

の伝達関数の比に基盤の速度比により定まる係数を乗じて計算できるとの簡明な手法を提起した。著者らも別の観点から同様な計算式の提案<sup>13,14)</sup>を行ったことがあるが川瀬らの定式化はその理論的な後ろ盾となるものである。

川瀬ら<sup>12)</sup>はさらに人工地震波を用いてパラメトリックな数値検討を行って多数の地震記録を用いれば入射角の影響やP-SV変換波の影響はキャンセルアウトされることを示したうえで、宮城県をはじめとする東日本の数点のK-NET観測地点の地震記録を用いて提案手法の妥当性を確認している。

本研究は福井地域の地震観測記録<sup>15,16)</sup>を用いて川瀬らの手法の妥当性を考察しようとするもので、その際、水平・上下の伝達関数としてスペクトルインバージョン解析<sup>17)</sup>で得られる地盤増幅特性<sup>例えば<sup>18)</sup></sup>を用いた。伝達関数を用いる場合は対象とする全観測地点のP波とS波の速度構造と減衰特性が必要であるが、地盤増幅特性を用いる場合は基準点のものがわかっていればよく、より効率的で直接的な検討が可能になる。また、著者らの提案式との関連で、基盤の速度比により定まる係数と水平・上下の震源スペクトル比との関係についても注目して検討を加えた。

## 2. 地震動H/Vスペクトルの計算法

### (1) 拡散波場理論による定義

川瀬ら<sup>11,12)</sup>はランダムに分布した十分な数の震源群によって生じる地盤震動に拡散波場理論を適用して下式に示す計算式を導いた。

$$HVR^D_j(f) = \sqrt{\frac{2V_{P0}}{V_{S0}}} \frac{H_j(f)}{V_j(f)} \quad (1)$$

ここに、 $HVR^D_j(f)$ ：拡散波場理論に基づくj地点の地震動H/Vスペクトル、 $H_j(f)$ ：j地点の水平（S波）伝達関数、 $V_j(f)$ ：j地点の上下（P波）伝達関数、 $V_{P0}$ ：基盤のP波速度、 $V_{S0}$ ：基盤のS波速度、 $f$ ：振動数。

### (2) 地盤増幅特性を用いる場合

スペクトルインバージョン解析から得られる地盤増幅特性を基盤に対する伝達関数とみなす<sup>19)</sup>と(1)式は次のように表される。

$$HVR^G_j(f) = \sqrt{\frac{2V_{P0}}{V_{S0}}} \frac{G_{Hj}(f)}{G_{Vj}(f)} \quad (2)$$

ここに、 $HVR^G_j(f)$ ：伝達関数として地盤増幅特性を用いた場合の地震動H/Vスペクトル、 $G_{Hj}(f)$ ：j地点の水平方向の地盤増幅特性、 $G_{Vj}(f)$ ：j地点の上下方向の地盤増幅特性。

### (3) 著者らの提案式について

水平成層地盤の一次元の重複反射理論によると、i地震によるj地点の地表面の水平方向の周波数応答 $u_{ij}(f)$ と上下方向の周波数応答 $v_{ij}(f)$ は、それぞれ次のように表される。

$$u_{ij}(f) = S_{Hi}(f) H_j(f) \quad (3a)$$

$$v_{ij}(f) = S_{Vi}(f) V_j(f) \quad (3b)$$

ここに、 $S_{Hi}(f)$ はi地震の露頭基盤における水平方向の入射波スペクトルで、 $S_{Vi}(f)$ はi地震の露頭基盤における上下方向の入射波スペクトルである。これらのスペクトルは後述するスペクトルインバージョン解析で得られる基盤における震源スペクトルと等価であるとする、水平方向の応答 $u_{ij}(f)$ は水平2方向の応答のRMS値に対応する。このとき、(3)式を用いると地震動H/Vスペクトルは次のように表される。

$$HVR^R_{ij}(f) = \frac{u_{ij}(f)}{v_{ij}(f)} = \frac{S_{Hi}(f) H_j(f)}{S_{Vi}(f) V_j(f)} \quad (4)$$

(4)式のH/Vスペクトルは地震ごとに異なることを示している。ここで、水平と上下の震源スペクトルは等しいとの検討結果<sup>20)</sup>を参考にして、少なくとも水平と上下の震源スペクトル比が地震によらず一定であるとする、(4)式は次のように表される<sup>13,14)</sup>。

$$HVR^R_j(f) = S_{HV} \frac{H_j(f)}{V_j(f)} \quad (5b)$$

$$S_{HV} = \frac{S_{Hi}(f)}{S_{Vi}(f)} \quad (5b)$$

ここで、(1)式と(5)式を照応すると次のような関係式が示唆される。本論ではこの点についても考察を加える。

$$\sqrt{\frac{2V_{P0}}{V_{S0}}} = S_{HV} = \frac{S_{Hi}(f)}{S_{Vi}(f)} \quad (6a)$$

なお、上の式は次のようにも表される。

$$S_{Hi}(f) = \sqrt{\frac{2V_{P0}}{V_{S0}}} \times S_{Vi}(f) \quad (6b)$$

## 3. スペクトルインバージョン解析

### (1) 対象とする地震と観測点

表-1にスペクトルインバージョン解析の対象とした地震の諸元を、図-1に対象地震の震央位置（図中×）と対象観測点（図中、△：K-NET、▲：KiK-net、□：福井大学観測網<sup>21)</sup> [以後FU-netと称する]）を、それぞれ示した。対象とした地震は福井県とその周辺で発生した21個の地

表-1 対象とした地震の諸元

No.	発生地域	地震発生日時	緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ(km)	M <sub>JMA</sub>
1	福井県沖	1999年 11月 7日 3:34 :01.6	36.0583	135.7933	15	5
2	福井県嶺北	2000年 3月 24日 23:00 :21.5	35.9067	136.7533	9	4.2
3	福井県嶺南	2000年 6月 5日 9:54 :41.2	35.7200	136.1100	9	4.9
4	福井県嶺南	2001年 4月 16日 19:05 :18.0	35.4800	135.9167	14	4.2
5	福井県嶺北	2002年 8月 18日 9:01 :01.8	36.1283	136.1767	11	4.7
6	滋賀県北部	2002年 11月 19日 18:36 :15.9	35.4533	136.3050	14	3.9
7	福井県嶺南	2003年 3月 13日 21:04 :56.0	35.5183	135.9733	14	4.2
8	石川県加賀地方	2003年 6月 5日 23:14 :21.5	36.2733	136.3100	12	4.1
9	岐阜県美濃中西部	2003年 12月 23日 14:34 :40.6	35.6183	136.3000	9	4.4
10	福井県嶺北	2004年 10月 5日 8:33 :51.4	35.9333	136.3767	12	4.8
11	岐阜県美濃中西部	2005年 6月 20日 14:04 :28.0	35.7567	136.8550	9	4.6
12	岐阜県美濃中西部	2005年 6月 20日 21:38 :24.8	35.7583	136.8567	9	4.3
13	岐阜県美濃中西部	2006年 2月 16日 23:10 :45.4	35.6883	136.4217	14	4.4
14	岐阜県美濃中西部	2006年 2月 18日 16:21 :10.6	35.6883	136.4183	13	4.1
15	岐阜県美濃中西部	2007年 1月 22日 2:16 :07.8	35.7333	136.3367	13	4.5
16	岐阜県美濃中西部	2007年 4月 28日 9:27 :24.6	35.7283	136.6250	10	4.6
17	若狭湾	2007年 8月 31日 23:36 :57.2	35.9150	135.6967	16	4.4
18	福井県嶺北	2007年 12月 21日 14:22 :54.5	35.9383	136.3483	7	4.5
19	福井県嶺北	2007年 12月 21日 16:01 :08.6	35.9383	136.3483	7	4.2
20	福井県嶺南	2008年 8月 8日 4:35 :16.2	35.4200	135.8550	15	4.2
21	岐阜県美濃中西部	2009年 2月 18日 6:47 :07.0	35.6617	136.3133	9	5.2

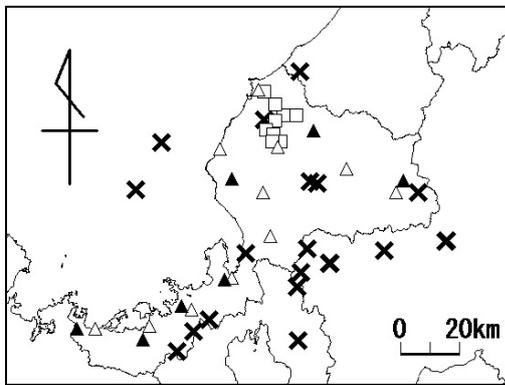


図-1 対象地震の震央と観測点の分布

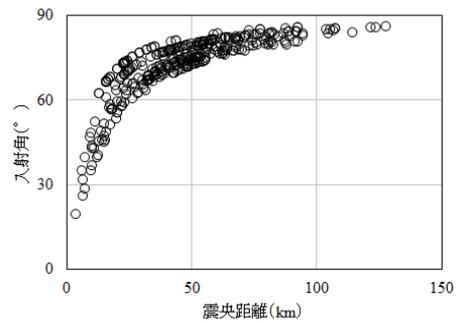


図-2 見掛けの入射角と震央距離

震であり、いずれも震源深さが16km未満の浅い地震である。対象観測点数は、K-netが11地点、KiK-netが7地点、FU-netが9地点の合計27地点である。また、観測に用いた地震観測記録は全部で341個であり、それらの震源距離の範囲は11km~128kmである。図-2に解析対象記録の震央距離と見掛けの入射角の関係を示したが、入射角が60度以上のものが全体の9割近くを占めている。

## (2) 解析方法

地震  $i$  による  $j$  地点における水平方向成分 ( $x=H$ ) あるいは上下方向成分 ( $x=V$ ) の地震波形の加速度フーリエスペクトル  $A_{xij}(f)$  は次式で定義される。

$$A_{xij}(f) = S_{xi}(f) \cdot P_{xij}(f) \cdot G_{x0}(f) \cdot G_{xj}(f) \quad (7)$$

ここに、 $S_{xi}(f)$  :  $i$  番目の地震の  $x$  方向成分の震源スペクトル、 $P_{xij}(f)$  :  $j$  地点の  $i$  番目の地震の  $x$  方向成分の伝播経路特性、 $G_{x0}(f)$  : 基準点 ( $j=0$ ) の  $x$  方向成分の地盤増幅特性、 $G_{xj}(f)$  : 基準点に対する  $j$  地点の  $x$  方向成分の地盤増幅特性。

$A_{xij}(f)$  は主要動のフーリエスペクトルで、次の要領で計算した。S波到達から5秒間を切り出し、零データを付加して81.92秒を計算の対象とした。波形を切り出す際には両端に5%のコサインテーパーを施した。振動数領域は0.5Hz~20Hzを対象とし、バンド幅0.4HzのParzenウィンドウを用いてスペクトルを平滑化した。なお、水平動成分は2方向のスペクトルのRMS値としている。

## (3) 基準観測点と地盤構造

基準観測点としてKiK-net観測地点の和泉 (FKIH03) を選びその  $G_{x0}(f)$  を下式<sup>22)23)</sup>により計算した。

$$G_{H0}(f) = \sqrt{\frac{\rho_0 V_{S0}}{\rho_r V_{Sr}}} \bar{H}_0(f) \quad (8a)$$

$$G_{V0}(f) = \sqrt{\frac{\rho_0 V_{S0}}{\rho_r V_{Pr}}} \bar{V}_0(f) \quad (8b)$$

ここに、 $\bar{H}_0(f)$  : 和泉地点の地中観測点位置の露頭地盤に対する地表面の水平 (S波) 伝達関数、 $\bar{V}_0(f)$  :

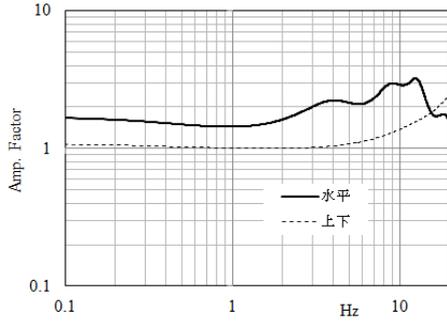


図-3 基準点の理論増幅特性

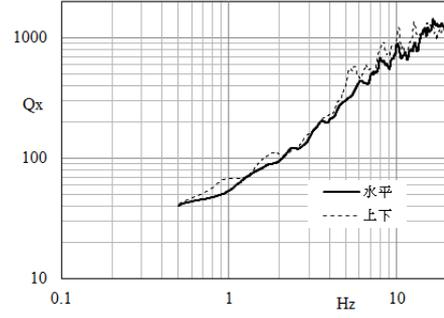


図-4 伝播経路特性

表-2 基準点の速度構造と減衰特性

層No.	厚さ (m)	深さ (m)	$\rho$ ( $t/m^3$ )	$V_s$ (m/s)	$n_{e,s}$ (m/s)	$n_{i,s}$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	$n_{e,p}$ (m/s)	$n_{i,p}$ (m/s)
1	6	6	1.77	313	101	14.2	657	180	44.8
2	6	12	1.93	619	234	12.3	1494	273	87.2
3	26	38	2.03	897	223	30.4	2959	645	105
4	42	80	2.11	1140	187	16.7	3482	862	144
5	120	200	2.23	1548	569	29.4	3800	942	121

同・上下 (P波) 伝達関数,  $\rho_r$  : 和泉地点の地中観測点付近の地盤の密度,  $V_{S_r}$  : 同・S波速度,  $V_{P_r}$  : 同・P波速度,  $\rho_0$  : 基盤の密度.

(8)式は基準点の地中観測点位置近傍の地盤が基盤に達していない場合に, 観測点位置地盤に対する基盤とのインピーダンス比で  $\bar{H}_0(f)$  や  $\bar{V}_0(f)$  を補正するものである. なお, (8b)式で  $V_{S0}$  を用いているが, これは基盤での地震波は上下動もS波である<sup>例えは20)</sup>とした理由による.

(8)式の  $\bar{H}_0(f)$  や  $\bar{V}_0(f)$  を計算するためには基準観測地点の速度構造と減衰特性が必要である. 著者らは福井県のKiK-net観測地点の地表面の地中観測点に対する水平と上下の地震時伝達関数を, 自由度を増す目的<sup>24)</sup>で細分割した地盤モデルを用いてGAで逆解析しており<sup>15),16)</sup>, 和泉地点については表-2に示す速度構造と減衰特性を得ている.

ここに, 減衰特性は(9)式に示すように散乱減衰と内部減衰の和で表され<sup>25)</sup>のものとし, 地盤密度  $\rho$  はS波速度と(10)式に示すような関係<sup>26)</sup>があるとしている.

$$h_x = h_{ex} + h_{ix}, (x = S, P) \quad (9a)$$

$$h_{ex} = \frac{n_{ex}}{V_x} \frac{1}{f}, (x = S, P) \quad (9b)$$

$$h_{ix} = \frac{n_{ix}}{V_x}, (x = S, P) \quad (9c)$$

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_S} \quad (10)$$

ここに,  $h_x$  ; 減衰定数,  $h_{ex}$  : 散乱減衰定数,  $h_{ix}$  :

内部減衰定数,  $n_{ex}$  : 散乱減衰係数,  $n_{ix}$  : 内部減衰係数,  $V_x$  : 速度, 等々であつて,  $x = S$  はS波の,  $x = P$  はP波の定数あるいは係数であることを, それぞれ示す.

図-3に(8)式を用いて計算した和泉地点の水平と上下の地盤増幅特性を示した. なお, 同式や(1), (2)中の基盤の諸定数については既往の文献<sup>27)</sup>を参考にして, また, 和泉の地中観測地点付近の地盤定数は表-2をもとに, それぞれ以下のように設定している.

$$\rho_0 = 2.75 g/cm^3, V_{S0} = 3.60 km/s, V_{P0} = 6.24 km/s$$

$$\rho_r = 2.23 g/cm^3, V_{S_r} = 1.55 km/s, V_{P_r} = 3.80 km/s$$

#### (4) 伝播経路特性

上下動や上下動と水平動をセットでインバージョン解析を行った例<sup>20),28),29)</sup>は少ない. そこで, 基本的な諸量のうちの考察で触れる機会がない伝播経路特性について述べておく. (7)式に含まれる伝播経路特性  $P_{xij}(f)$  が以下のようにあらわされるものとする.

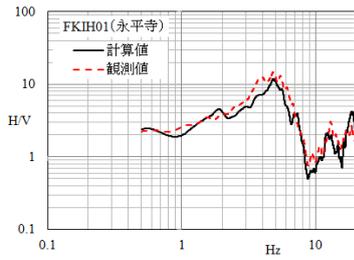
$$P_{xij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} \exp\left(-\frac{\pi f R_{ij}}{Q_x(f) V_a}\right) \quad (11)$$

ここに,  $R_{ij}$  : i 番目の地震におけるj 番目の観測地点の距離,  $Q_x(f)$  : 地震波の水平動 ( $x = H$ ) あるいは上下動 ( $x = V$ ) の伝播経路での減衰係数,  $V_a$  : 地震波の伝播経路での平均的な速度 (基盤でのS波速度).

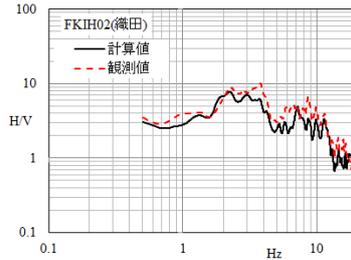
図-4に  $Q_x(f)$  の計算結果を示したが,  $Q_H(f)$  と  $Q_V(f)$  はほぼ等しい値を示すことがわかる. このとき,  $V_a = V_{S0} = 3.60 (km/s)$  としている.

#### 4. 地震動H/V スペクトルの考察

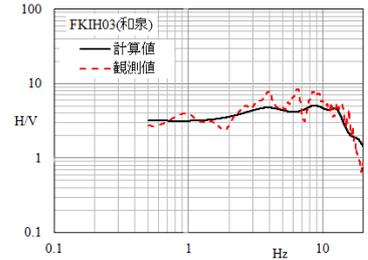
スペクトルインバージョン解析の結果から求められた地盤増幅特性を(2)式に代入して得られる地震動H/Vスペクトルと, 同じ観測地点の地表面の水平と上下の観測記録から直接的に得られるH/Vスペクトル (観測H/Vスペクトルと称する) とを比較する. この観測H/Vスペクトルは, スペクトルインバージョン解析の場合と同様な計算条件で計算した地表面の加速度波形のフーリエ振幅



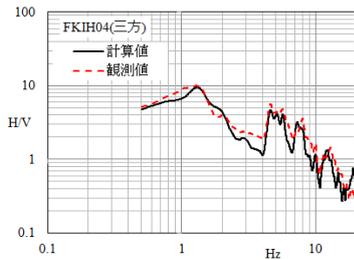
(a) FKIH01 (永平寺)



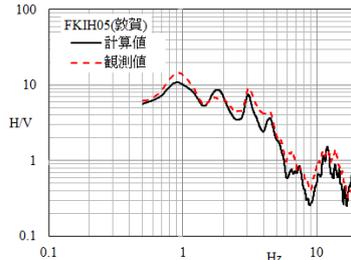
(b) FKIH02 (織田)



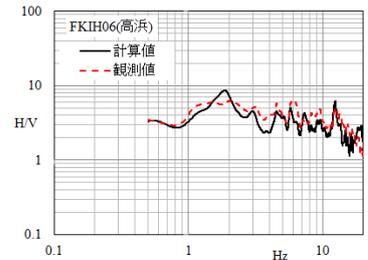
(c) FKIH03 (和泉)



(d) FKIH04 (三方)

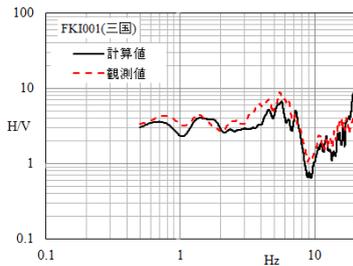


(e) FKIH05 (敦賀)

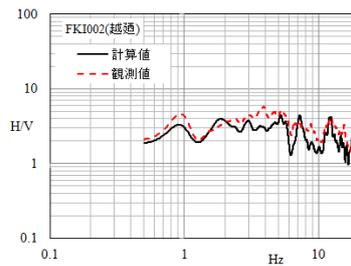


(f) FKIH06 (高浜)

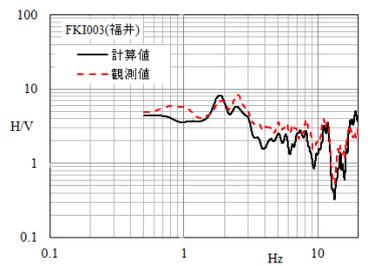
図-5 H/V スペクトルの(2)式による計算値と観測値との比較 (KiK-net)



(a) FK1001 (三国)

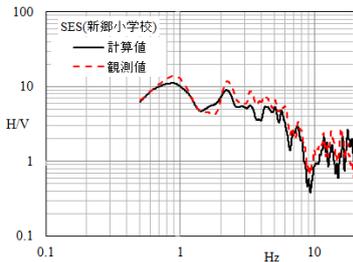


(b) FK1002 (越廼)

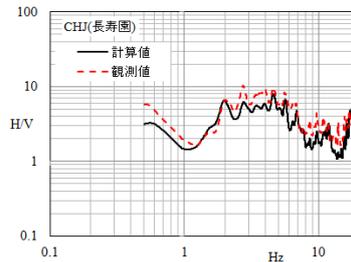


(c) FK1003 (福井)

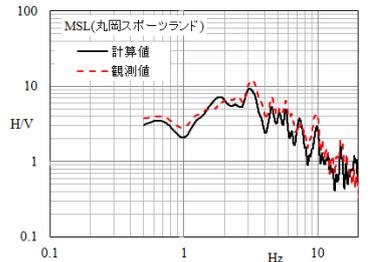
図-6 H/V スペクトルの(2)式による計算値と観測値との比較 (K-NET)



(a) SES (新郷小学校)



(b) CHJ (長寿園)



(c) MSL (丸岡スポーツランド)

図-7 H/V スペクトルの(2)式による計算値と観測値との比較 (FU-net)

スペクトルの水平2成分のRMS値を上下成分のもので除して求めたものを各観測地点ごとに地震波の数で平均したものである。

図-5(a)～図-5(f)にKiK-netの6つの観測点について観測

H/Vスペクトルと地盤増幅特性を用いて(2)式により計算したH/Vスペクトルとを比較して示した。同様に、図-6(a)～図-6(c)にはK-NETの3つの観測点について、図-7(a)～図-7(c)にはFU-netの3つの観測点について、それぞれ示

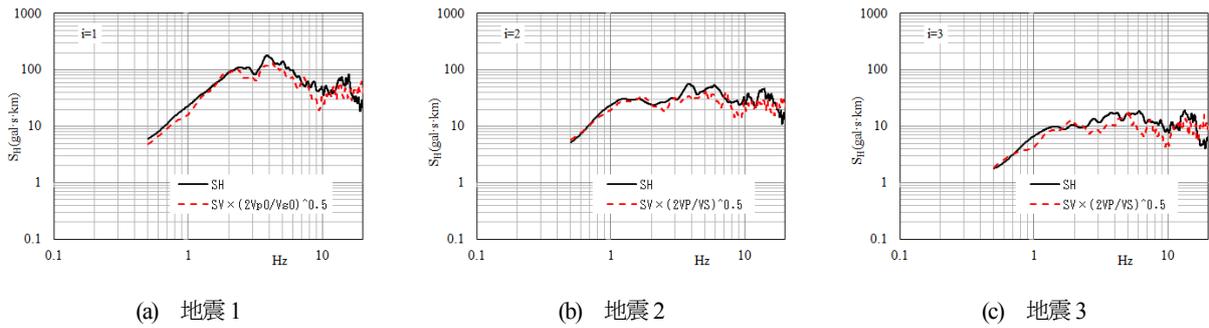


図-8 水平動と上下動の震源スペクトル

した. いずれの地点についても観測値は計算値とよく一致している. 見掛けの入射角が60度以上の観測記録がほとんどであったことを考えると, 入射角の影響やP-SV変換波の影響はスタッキングアウトされている<sup>12)</sup>ものと推察される. なお, 紙面の都合でKiK-netについてはFKIH07 (小浜) を, K-NETとFU-netについては掲載地点以外の観測点の結果の紹介を省いたが, これらの点についても同様な結果を得ていることを付記しておく.

図-8(a)~図-8(c)に, 震源スペクトルに関する(5)式の成立性を考察するために作成したものを, 地震番号  $i=1\sim 3$  を例として示した. 同図は(6b)式の左辺と右辺を比較して示したものであるが両者はよく一致している. 紙面の都合で3つの地震について示したが他の地震についても同様な結果が得られている. 図-9に, すべての地震の水平動の震源スペクトルの上下動の震源スペクトルに対する比  $S_{HV}$  を平均したものを示したが, その値は  $\sqrt{2V_{p0}/V_{s0}}$  にほぼ等しい. 水平動と上下動の震源スペクトルは等しいとする研究結果<sup>20)</sup>もあり今後検討する必要がある. なお, (5)式が成立する要件として水平と上下の伝播経路特性がほぼ一致したことが関係していることを特に付記しておきたい.

## 5. まとめ

拡散波場理論に基づく地震動H/Vスペクトルの計算法が妥当であるかどうかを福井地域の地震観測記録を用いて考察した. 検討は, 水平動と上下動のスペクトルインバージョン解析の結果得られる地盤増幅特性を基盤からの伝達関数とみなす方法によった. その結果, 拡散波場理論に基づく地震動H/Vスペクトルの計算値は観測記録によるH/Vスペクトルとよく一致し, 拡散波場理論に基づく計算式の妥当性が示された. また, 水平と上下の震源スペクトルの比は, 拡散波場理論と著者らが先に提案した関係式から予想される基盤の速度比から定まる値とほぼ一致した.

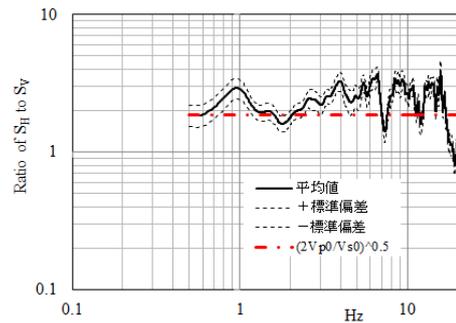


図-9 震源スペクトル比

謝辞: 防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの地震観測記録データを使用いたしました. また, 本研究をまとめるにあたり井口道雄東京理科大学名誉教授 (早稲田大学理工研) に貴重な助言を頂きました. ここに記して謝意を表します.

## 参考文献

- 1) 野越三雄, 五十嵐亨: 微動の振幅特性(その2), 地震, 第2輯, 第24巻, pp.26-40, 1971.
- 2) 塩野計司, 太田裕, 工藤一嘉: やや長周期の微動観測と地震工学への適用(6)微動に含まれる Rayleigh 波成分, 地震, 第2輯, 第32巻, pp.115-124, 1979.
- 3) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分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, pp.265-270, 1986.
- 4) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.94, No.1, pp.53-63, Feb. 2004.
- 5) 若松邦夫, 安井謙: 短周期微動の水平上下スペクトル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, 第471号, pp.61-70, 1995.
- 6) 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, 50巻, pp.67-68, 1997.
- 7) 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, 51巻, pp.291-318, 1998.
- 8) 野口科子, 笹谷努: 2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震, 第2輯, 63巻, pp.165-187, 2011.

- 9) Kobayashi, K., Uetake, T., Mashimo, M. and Kobayashi, H. : Estimation of Deep Underground Velocity Structure by Inversion of Spectral Ratio of Horizontal to Vertical Component in P-Wave Part of Earthquake Motion, *I2WCEE*, paper No.2658, 2000.
- 10) 阿部康彦, 小林喜久二, 大島豊, 真下貢, 小林啓美 : 地震動の上下動・水平動スペクトル振幅比の特性とその応用に関する研究—その3 上下動・水平動スペクトル振幅比に基づく深部地下構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I, pp.403-404, 1991.
- 11) 川瀬博, Sanchez-Sesma, F.J. 松島信一 : 地震動の H/V スペクトル比の新解釈とその適用事例, 日本地震学会秋季大会予稿集, D22-01, 2010
- 12) Kawase, K., Sanchez-Sesma, F.J., and Matsushima, S.: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.101, No.5, pp.2001-2014, Oct. 2011.
- 13) 安井謙, 西川隼人 : 地震波の主要動の H/V スペクトルに着目した逆解析手法について, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp.214-215, 2008.
- 14) 安井謙, 西川隼人 : 地震波の主要動の H/V スペクトルの逆解析による地盤構造推定の試み, 日本地震学会秋季大会予稿集, B12-05, 2008.
- 15) 安井謙, 西川隼人 : 福井県の KiK-net 観測地点の速度構造と減衰特性の検討, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, GO45-Fri-AM-2, pp.2299-2305, 2010.
- 16) 安井謙, 西川隼人 : 福井県の KiK-net 観測地点の速度構造と減衰特性の検討—その 4 P 波速度と減衰について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- II, pp.131-132, 2012.
- 17) 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, 第 2 輯, 39 巻, pp.579-593, 1986.
- 18) 西川隼人, 池本敏和, 宮島昌克 : 関西地方の地震観測記録による自治体観測点を想定したサイト特性推定手法の検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, pp.118-127, 2009.
- 19) 真鍋良輔, 小谷啓介, 神野達夫 : 強震記録に基づく地盤増幅特性を用いた地下構造モデルの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- II, pp.115-116, 2012.
- 20) 加藤研一, 武村雅之, 池浦友則, 高橋克也, 植竹富一 : 上下動強震記録から推定される基盤入射波スペクトルの性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I, pp.361-362, 1994.
- 21) 小嶋啓介, 山中浩明 : 観測地震動に基づく福井平野の地下構造の推定, 応用地質, 第 44 巻, 第 2 号, pp.94-103, 2003.
- 22) 友澤裕介, 池浦友則 : 距離減衰関数を距離レンジにより分割したスペクトルインバージョン解析手法, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, GO4-Thu-PM-10, pp.419-425, 2010.
- 23) 赤澤隆士, 入倉孝次郎, 羽田浩二 : KiK-net 地中強震記録を利用した経験的地盤増幅率の推定, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, GO1-Thu-PM-5, pp.147-154, 2010.
- 24) 引田智樹, 池浦友則, 笠松健太郎 : 波形逆解析による深部地下構造モデルの推定, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp.192-193, 2008.
- 25) 小林喜久二, 久家秀夫, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美 : 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定—その 3 Q 値の基本式に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I, pp.253-254, 1999.
- 26) 小林喜久二, 阿部康彦, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美 : 地震動初期微動部の上下動・水平動スペクトル振幅比の逆解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I, pp.307-308, 1995.
- 27) 大場政章, 野畑有秀, 圓幸史朗, 鈴木晴彦 : 敦賀半島における水平アレー地震観測, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, GO2-Thu-PM-1, pp.193-200, 2010.
- 28) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎 : 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.97-104, 1998.
- 29) 圓幸史朗, 野畑有秀, 大堀道広, 木下雅充 : スペクトル・インバージョンによるサイト地盤増幅特性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- II, pp.181-182, 2003.

(2012. 9. 14 受付)

## EXAMINATION ON THE CALCULATION METHOD OF EARTHQUAKE H/V SPECTRUM BASED ON DIFFUSE-FIELD THEORY - ON EARTHQUAKE RECORDS IN FUKUI PREFECTURE -

Yuzuru YASUI, Hayato NISHIKAWA, Keisuke KOJIMA, Toshiro MAEDA,  
Kazuki KOKETSU and Masakatsu MIYAJIMA

The calculation method of horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions based on diffuse-field theory was examined utilizing site amplification factors obtained through horizontal and vertical spectral inversion analysis. As a result, the calculated earthquake H/V spectral ratios were well in agreement with the observed ones, and the validity of the formula was shown. Moreover, horizontal-to-vertical ratios of the source spectra were mostly in agreement with the coefficient value fixed from the P-S velocity ratio of the bedrock, being expected from relating the diffuse-field theory with authors previous work.