

S波部分上下動、P波部分水平動のサイト増幅特性

岡本大志*・岩田知孝・入倉孝次郎

*京都大学大学院理学研究科

要 旨

堆積層上で観測されるS波上下動やP波水平動部分がどのような波型 (Wave type) で構成されているかを分析するために、スペクトルインバージョンによるサイト特性の分離を行った。S波上下動の(相対的)サイト特性はP波上下動のそれに近く、逆にP波水平動とS波水平動のサイト特性は似通った傾向を示し、S波上下動、P波水平動はそれぞれ観測点近傍でS波、P波で伝播している波で構成されていることが推察された。

キーワード：スペクトルインバージョン、S波上下動、P波水平動、Q値、関西地震観測研究協議会

1. はじめに

観測された地震動記録から震源特性・伝播経路特性・観測点近傍の増減幅特性(サイト特性と呼ぶ)を分離することは、それぞれの特性のモデル化や物理的背景の考察のためには必要不可欠である。主に80年代以降に得られ始めた精度のよい地震動記録データベースを用いて周波数領域において観測方程式をたてその方程式を一般化逆行列の手法を用いて解く方法が提案され(スペクトルインバージョン法とここでは呼ぶ)(例えば Andrews, 1986; 岩田・入倉, 1986; Iwata and Irikura, 1988 など)、多くの研究者に用いられてきた。実データに基づいた地震動評価を行う際にも、この特性分離手法を用いて震源の相似則に関する研究(例えば Iwata and Irikura, 1988; Castro et al., 1990; Kato et al., 1992)、地震波伝播特性及びサイト特性の評価を行うことにより、すくなくともその点におけるシナリオ地震時の地震動予測に有益な情報を与えることができる。特に表層地質の違いによって地震動特性は大きく異なるので、サイト特性の精度よい定量的な評価は地震動予測に必要不可欠である。サイト特性は地震学的には地震基盤(地殻上部のS波速度として3km/s以上)から上の表層地質の領域においての地震波動の伝播

特性を表していると考えており、他の深さに比して非常に複雑な地球内部における地震動の伝播問題を考えるうえで非常に興味深い。一方、地震工学的には建物の震動現象を1質点系の震動としてとらえていた場合には「震動の大きさ」の観点から、歴史的にはサイト特性の評価には水平動主要動部に着目した「水平成分」のサイト特性の評価がなされてきたが、近年構造物の複雑化・多様化に従い、2次元(上下動と水平動)さらには3次元方向の震動特性の把握が必要であるために上下動のサイト特性の評価がなされはじめている。例えば藤堂ら(1995)は、堆積地盤における鉛直アレー観測記録の相の対応関係から、S波部分の水平動および上下動は、それぞれS波およびSP変換波が支配的であるとしている。また、古和田ら(1998)は、同じデータセットの主要動部分(S波部分に対応すると考えられる)の水平動と上下動について独立にインバージョンした結果、伝播経路のQ値がほぼ同一であったことから、基盤から入射する地震波は水平動についても上下動についてもS波であるとしている。これらの研究から、特に地震動が相対的に増幅される堆積層での水平動、上下動成分がおのおのどのような地震波で構成されているかを知ることが重要である。本研究においては、岩田・入倉(1986)のスペクトルインバージョン

法に従い、近畿地方中部で観測された同じ強震記録のP波部分およびS波部分の水平動および上下動の各成分ごとに独立にインバージョンを実行し、伝播経路特性およびサイト増幅特性を抽出して、それらの比較、検討を行った。この際、後述するようにスペクトルインバージョン法において安定かつ精度の高い解を得るための工夫をし、解析をすすめた。

2. 方法

岩田・入倉(1986)に従い、観測スペクトル $O_{ij}(f)$ は、周波数領域において

$$O_{ij}(f) = S_i(f)G_j(f)\exp(-\pi f R_{ij}/Q(f)V)/R_{ij} \quad (1)$$

と表現できる。

ここで $S_i(f)$ はイベント i の震源特性、 $G_j(f)$ は観測点 j のサイト増幅特性、 f は周波数、 R_{ij} は震源距離、 $Q(f)$ 、 V はそれぞれ対象としている地震波伝播経路における平均的な Q 値および速度である。震源特性としてはラディエーション特性を無視している。

この i, j 個の式の両辺の常用対数をとって線形化すると、

$$\log O_{ij} = \log S_i + \log G_j - \log R_{ij} - (\pi f R_{ij}/QV) \log e \quad (2)$$

となる。この連立1次方程式に対して、最小二乗法を用い、各周波数独立に S_i 、 G_j 、 Q を推定する。この方程式系は自由度1を持っているので(Andrews, 1986; 岩田・入倉, 1986)なんらかの拘束条件を与えて解く必要があり、ここではある1観測点(基準観測点)のサイト特性を1とする拘束条件を与えている。従って求められた各観測点のサイト特性は基準観測点に対する相対的な値となる。スペクトルをとる区間は以下のように設定した。P波部分上下動(Pv): P相到着時以降5秒間。但し、その中にSP相が入る場合は、SP相到着時以前5秒間。P波部分水平動(Ph): PS相到着時以降5秒間。但し、その中にS相が入る場合は、S相到着時以前5秒間。S波部分上下動(Sv): SP相到着時以降5秒間。S波部分水平動(Sh): S相到着時以降5秒間。ここでいうSP、PS相は主に大阪堆積盆地内観測点で観測される堆積層・基盤境界で変換された相である(例えばIwata et al., 1996; Yamanaka and Aoi, 1996)。

各成分とも5秒間の解析区間で、前後1秒ずつのサイン型のテーパーウィンドウをかけた。また、水平動のスペクトルは2成分の振幅スペクトルのベク

トル和二乗和を用いた。各周波数 f_0 に対するスペクトルの値には前後 $f_0/5$ の幅について相加平均したものをを用い、その際に出てきた標準偏差をデータの標準偏差として読み替えた。伝播経路におけるS及びP波速度は $V_p=5.8\text{km/s}$ 、 $V_s=3.2\text{km/s}$ を仮定した。

3. 解析結果

3.1 伝播経路の Q 値の評価

まず、伝播経路の Q 値を評価する事を目的として、インバージョンを実行した。(1)式によって Q 値を安定に求めるためには、震源距離のコントラストが大きく、かつサイト増幅特性が小さいようなデータセットを選ぶ必要がある。例えばMoya et al. (1999)は関西地震観測研究協議会観測点で記録された兵庫県南部地震余震の記録を用いて観測点と地震の組み合わせをいくつか変えてスペクトルインバージョンを行ったところ、サイト特性の違いの大きい観測点が混在している場合や、震源距離レンジの小さい場合に Q 値が安定に求められないことを示した。本研究においては岩盤ないし硬質地盤観測点の記録を用いることと震源距離レンジがなるべく大きく取れるような震源-観測点の組み合わせを選んで伝播経路特性を推定した。Fig. 1に解析に用いた地震の気象庁による震央位置と地震動観測点を示す。Table 1には解析に用いた地震の気象庁による震源要素と気象庁マグニチュードを示す。ABD、OSYは滋賀県消防防災課と防災研究所の共同により速度型強震計によって観測が行われている岩盤上観測点である(松波・八里, 1995)。

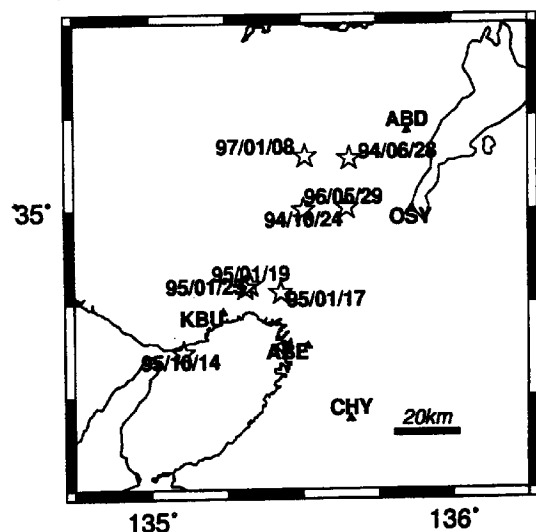


Fig.1 Locations of seismic stations and epicenters of earthquakes used for 3.1.

Table 1 List of magnitudes and locations of the earthquakes used for 3.1. Hypocenter information is from JMA.

Origin time Year/M/D H:M	Lat. (N)	Lon. (E)	Dep. (Km)	Mj	ABD	OSY	CHY	KBU	ABE
1994/06/28 13:08	35.135	135.660	16.0	4.6	o	o	o	o	-
1994/10/24 11:51	34.998	135.507	15.1	4.3	o	o	o	o	o
1995/01/17 06:42	34.778	135.430	15.6	4.2	-	o	o	o	o
1995/01/19 01:00	34.797	135.328	13.6	4.0	o	-	o	o	o
1995/01/25 23:15	34.790	135.313	16.7	4.7	-	o	o	o	o
1995/10/14 02:04	34.617	135.107	16.8	4.8	o	o	o	o	o
1996/02/07 10:33	35.932	136.622	7.6	5.0	o	o	o	o	-
1996/05/29 17:37	35.005	135.650	17.1	3.9	o	o	-	o	-

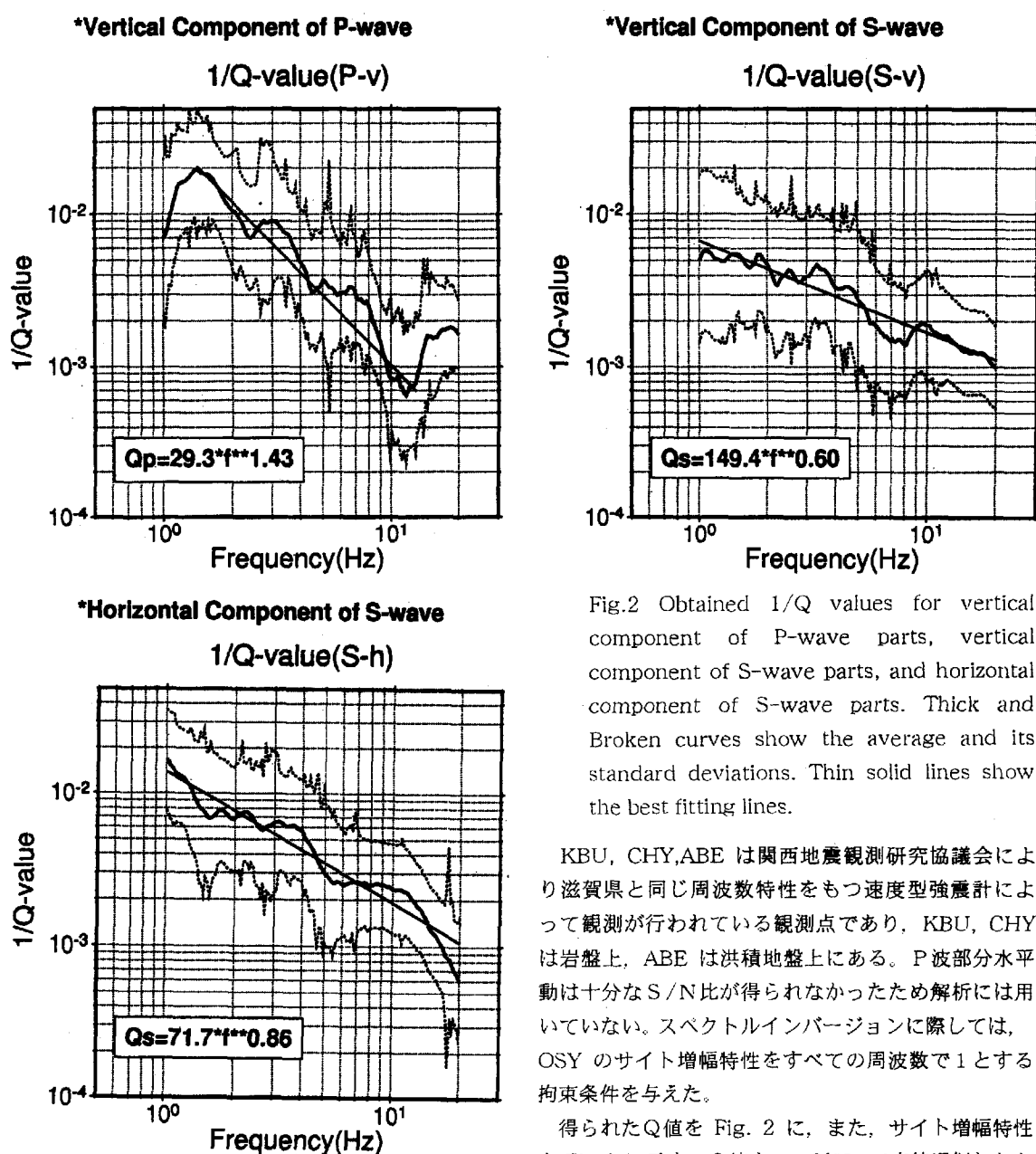


Fig.2 Obtained 1/Q values for vertical component of P-wave parts, vertical component of S-wave parts, and horizontal component of S-wave parts. Thick and Broken curves show the average and its standard deviations. Thin solid lines show the best fitting lines.

KBU, CHY, ABE は関西地震観測研究協議会により滋賀県と同じ周波数特性をもつ速度型強震計によって観測が行われている観測点であり, KBU, CHY は岩盤上, ABE は洪積地盤上にある。P波部分水平動は十分な S/N比が得られなかったため解析には用いていない。スペクトルインバージョンに際しては, OSY のサイト増幅特性をすべての周波数で 1 とする拘束条件を与えた。

得られた Q 値を Fig. 2 に, また, サイト増幅特性を Fig.3 に示す。Q 値を 1 ~ 20Hz で直線近似したと

ころ、それぞれ、

$$Q(Pv) = 29.3 f^{**1.43}$$

$$Q(Sv) = 149.4 f^{**0.60} \quad (3)$$

$$Q(Sh) = 71.7 f^{**0.86}$$

なる周波数依存性が認められた。この値は Tai et al. (1996) がほぼ同様の領域の地震を対象にして行った S 波水平動のスペクトルインバージョンによって得られた Q 値にほぼ等しい。Fig. 2 からわかるように、

標準偏差の大きさを考えると、Q (Pv), Q (Sv), Q (Sh) の間に有意な差は認められず、P 波部分と S 波部分の伝播経路特性の Q 値としての違いは明らかにされなかった。S 波部分の上下動と水平動は同じ波 (S 波) として地殻内を伝播し、観測点に入射していることは言える。Q (Pv) の見かけの周波数依存性が 1 乗を越えることは幾何減衰を 1/R と仮定していることとも関係していると考えられる。一方、

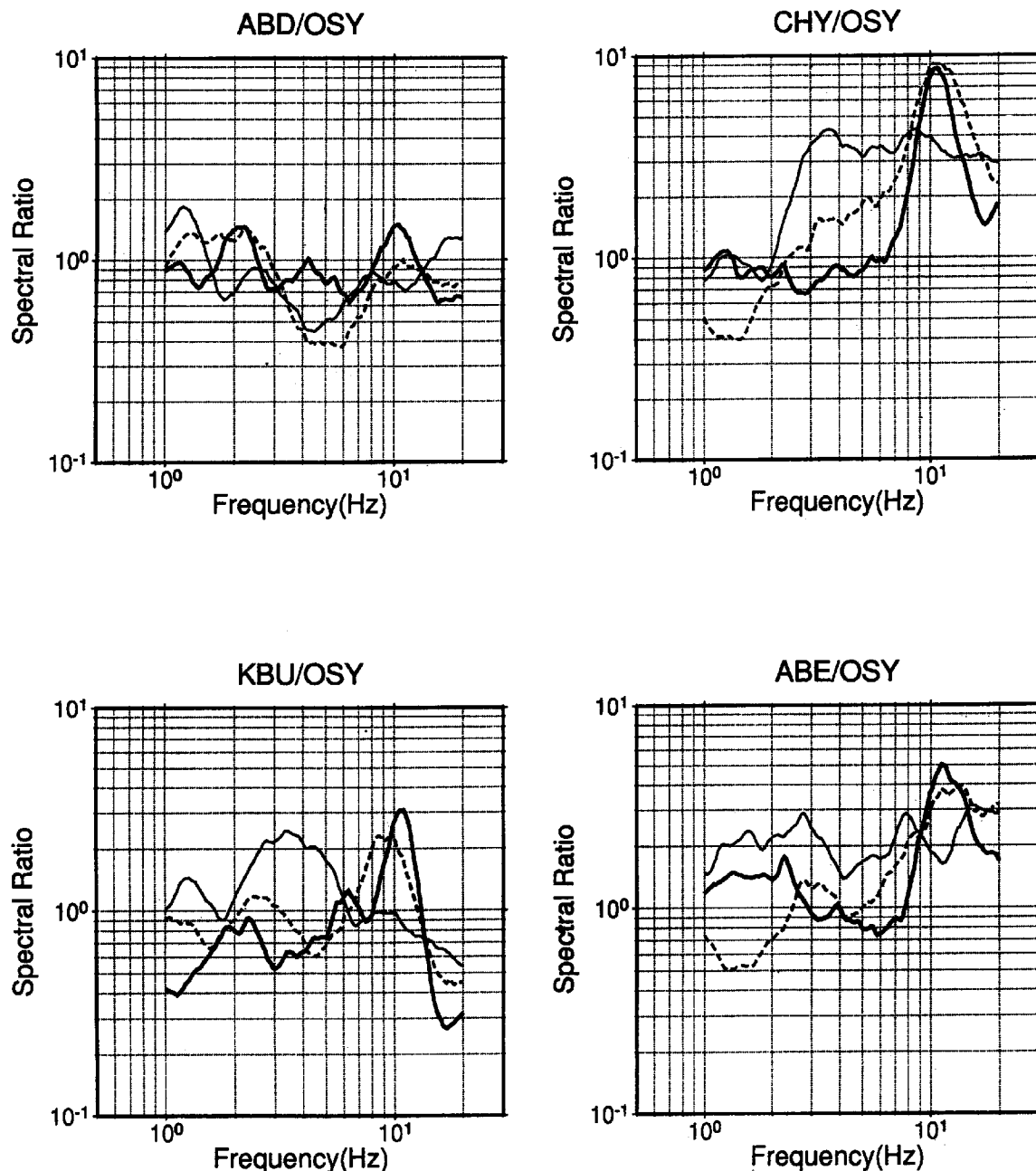


Fig. 3 Obtained site amplification factors for vertical component of P-wave parts (thick solid curves), those for horizontal component of S-wave parts (thin solid curves), and those for vertical component of S-wave parts (thin broken curves) at the ABD, CHY, KBU, and ABE stations relative to the OSY station.

サイト増幅特性については、特に7～20Hzの高周波数域において $G(P_v) = G(S_v)$ の傾向がみられた。このことは、岩盤サイトにおいてもインピーダンスの小さい極表層の影響を受けて、S波部分上下動は極表層をP波として伝播した波であると考えられる。

3.2 サイト増幅特性の評価

次に、サイト増幅特性を評価することを目的として、インバージョンを実行した。(2)式によってサイト増幅特性を精度よく求めるためには、震源距離の差が小さいデータセットで行う必要がある(例えば Maruo et al., 1998)。この場合、Q値を未知数として安定に評価することが困難となるため、3.1で求められた(3)式を用いて補正する。但し、P波部分水平動についてのQ値が得られていないので、P波部分上下動に対するQ値を用いた。

1地震に対する震源距離の差が小さいため、補正に用いたQ値の影響は小さく抑えることができる。Fig.4に観測点および解析に用いた地震の気象庁による震央位置を示す。Table 2には解析に用いた地震の

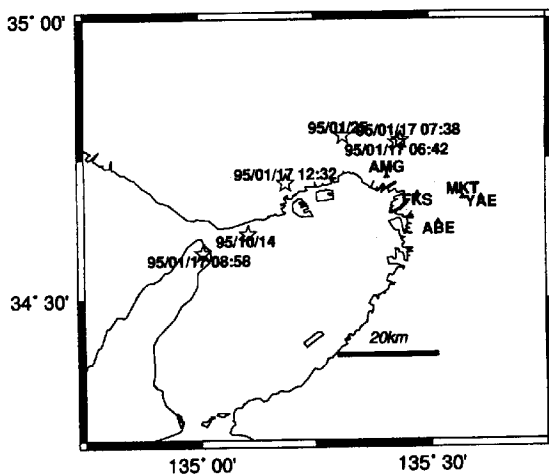


Fig.4 Locations of seismic stations and epicenters of earthquakes used for 3.2.

気象庁による震源要素と気象庁マグニチュードを示す。用いた5つの観測点はいずれも関西地震観測研究協議会による観測点であり、大阪堆積盆地内に位置している。このうちABEのみが洪積地盤上にあり、残りの4点(AMG, FKS, MKT, YAE)は全て沖積地盤上にある。スペクトルインバージョンに際しては、ABEのサイト増幅特性を1とする拘束条件を与えた。得られたサイト増幅特性をFig.5に示す。各観測点とも、1～20Hzの広い周波数帯にわたって

$$G(P_v) = G(S_v),$$

$$G(Ph) = G(Sh)$$

の傾向がみられる。

このことは、S波部分上下動およびP波部分水平動はそれぞれ観測点近傍の堆積地盤内をP波およびS波として伝播した波と考えられる。

4. 結論

岩田・入倉(1986)のスペクトルインバージョン法に従い、近畿地方中部で観測された同じ強震記録のP波部分およびS波部分の水平動および上下動の各成分ごとに独立にインバージョンを実行し、伝播経路特性およびサイト増幅特性を抽出した。その結果、以下のような知見を得た。

近畿地方中部の岩盤、洪積地盤上の記録を用いて伝播経路特性およびサイト増幅特性を抽出した結果、P波上下動、S波上下動、S波水平動各々のQ値(1～20Hz)は周波数依存性を持って推定された。それぞれのQ値間に有意な差は認められなかった。また、特に7～20Hzの高周波数域において $G(P_v) = G(S_v)$ の傾向がみられ、S波部分上下動は岩盤及び洪積地盤観測点近傍の極表層をP波として伝播した波であると推定された。

大阪盆地内の沖積地盤、洪積地盤の記録を用い、先の考察で得たQ値により伝播経路特性の補正を行ったのちサイト増幅特性を抽出した結果、各観測点

Table 2 List of magnitudes and locations of the earthquakes used for 3.2. Hypocenter information is from JMA.

Origin time Year/M/D H:M	Lat. (N)	Lon. (E)	Dep. (Km)	Mj	ABE	AMG	FKS	MKT	YAE
1995/01/17 06:42	34.778	135.430	15.6	4.2	○	-	-	○	○
1995/01/17 07:38	34.782	135.437	11.1	4.9	○	○	○	○	○
1995/01/17 08:58	34.583	135.009	18.9	4.5	○	○	○	○	○
1995/01/17 12:32	34.707	135.189	17.7	4.1	○	○	○	○	○
1995/01/25 23:15	34.790	135.313	16.7	4.7	○	○	○	○	○
1995/10/14 02:04	34.617	135.107	16.8	4.8	○	○	○	○	○

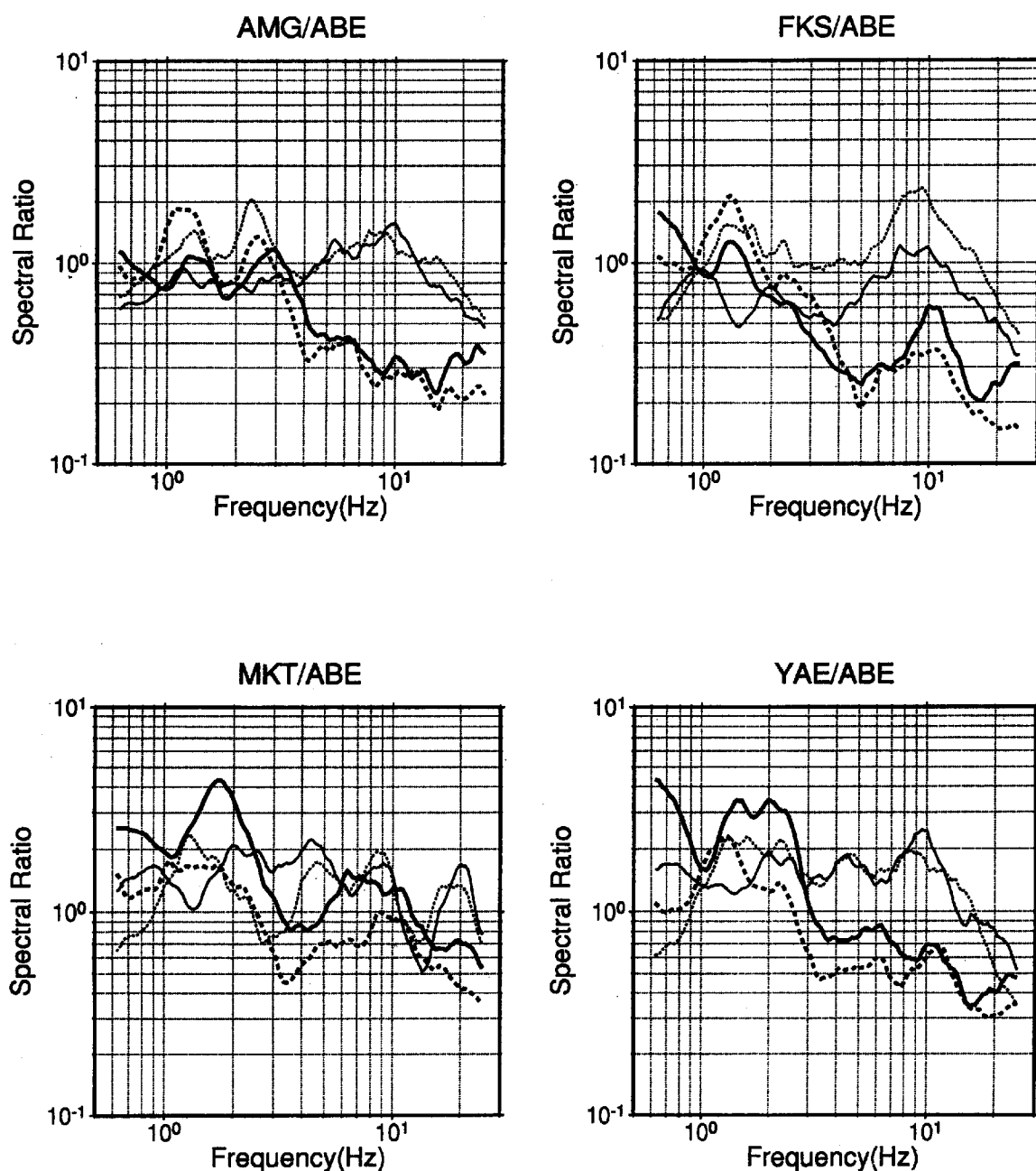


Fig.5 Obtained site amplification factors for horizontal component of P-wave parts (thick solid curves), those for vertical component of P-wave parts (thin solid curves), those for horizontal component of S-wave parts (thick broken curves), and those for vertical component of S-wave parts (thin broken curves) at the AMG, FKS, MKT, and YAE stations relative to the ABE station.

とも、1～20Hzの広い周波数帯にわたって $G(P_v) = G(S_v)$ 及び $G(P_h) = G(S_h)$ の傾向がみられた。このことは、S波部分上下動およびP波部分水平動はそれぞれ観測点近傍の堆積地盤内をP波およびS波として伝播した波であることを示唆している。

これらの解析結果が合理的に説明されるかどうかを地盤モデルをもとにP波やS波の増幅特性との比較を行う必要がある。また地殻内の距離減衰につい

ては、ここでは1/R則の仮定をおいてスペクトルインバージョンを行ったが、Frankel et al. (1990)が指摘しているように、震源距離によって幾何減衰の距離依存性の変化についての考察もラディエーション特性を無視した観測方程式の妥当性も含めて議論されるべきである。本稿においてはサイト特性の議論を行ったが同時に分離されている震源スペクトルに対して、地震規模レンジをふやすことにより、近畿地域の震源の相似則に関する知見を増やすことが

できる。

謝 辞

本研究では関西地震観測研究協議会および滋賀県消防防災課による記録を使わせていただきました。記して感謝いたします。また本研究の遂行には、平成 9-10 年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(C) 09680445 (研究代表者：岩田知孝) を用いた。

参考文献

- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986): 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性および観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, 39, 579-593.
- 古和田明・田居優・岩崎好規・入倉孝次郎 (1998): 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, 514, 97-104.
- 藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉脩・高橋克也・武村雅之・田中英朗 (1995): 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.
- 松波孝治・八里哲也 (1995): 琵琶湖周辺地域における強震動観測, 京都大学防災研究所年報, 38, B-1, 1-12.
- Andrews, D. J. (1986): Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, Earthquake Source Mechanics, Geophysical Monograph 37, Maurice Ewing Volume 6, American Geophys. Union, 259-268.
- Castro, R., J. G. Anderson and S. K. Singh (1990): Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico subduction zone, Bull., Seism. Soc. Am., 80, 1481-1503.
- Frankel, A., A. McGarr, J. Bicknell, J. Mori, L. Seeber, and E. Cranswick (1990): Attenuation of high-frequency shear waves in the crust: Measurements from New York State, South Africa, and southern California, J. Geophys. Res., 95, 17441-17457.
- Iwata, T. and K. Irikura (1988): Source parameters of the 1983 Japan-Sea earthquake sequence, J. Phys. Earth, 36, 155-184, 1988.
- Iwata, T., K. Hatayama, H. Kawase, and K. Irikura (1996): Site amplification of ground motions during aftershocks of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake in severely damaged zone - Array observation of ground motions at Higashinada Ward, Kobe city, Japan -, J. Phys. Earth, 44, 553-561.
- Kato, K., M. Takemura, T. Ikeura, K. Urao, and T. Uetake (1992): Preliminary analysis for evaluation of local site effect from strong motions spectra by an inversion method, J. Phys. Earth, 40, 175-191.
- Maruo, Y., T. Iwata, and K. Irikura (1998): Site effects of Kobe large earthquake disaster belt using aftershock data, Proc. 2nd Int. Symp. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Dec., Yokohama, Balkema, Vol. 2, 537-544.
- Moya, A., J. Aguirre, and K. Irikura (1999): Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms, submitted to Bull. Seism. Soc. Am.
- Tai, M., Y. Iwasaki and A. Okazaki (1996): A simulation of the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake using stochastic Green's function method in consideration of site specific amplifications and phase characteristics, Proc. 11th World Conf. Earthq. Eng., Acapulco, CD-ROM, 1137.
- Yamanaka, H. and S. Aoi (1996): Estimation of basement depth along the Sumiyoshi river in Kobe City - Travel time analysis of P-, S-, and SP-waves from an earthquake array observation, J. Phys. Earth, 44, 543-552.

Site effects of vertical component of S-wave parts and horizontal component of P-wave parts

Taishi OKAMOTO*, Tomotaka IWATA, and Kojiro IRIKURA

*Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

In order to investigate the characteristics of vertical and horizontal component of P- and S-wave parts, Iwata and Irikura (1986)'s method was applied to each component of each portion. Obtained for vertical component of P-wave parts, vertical component of S-wave parts, and horizontal component of S-wave parts are similar each other. Obtained site effect for vertical component of P-wave parts is close to that for vertical component of S-wave parts, and that for vertical component of P-wave parts is close to that for vertical component of S-wave parts for 1-20 Hz. These results show that vertical component of S-wave parts is what propagated as P-wave and horizontal component of P-wave parts is what propagated as S-wave in the sediment near the stations.

Keywords: Spectral inversion, Vertical motion of S-waves, Horizontal motion of P-waves, Q-value, CEORKA