

# 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

西川 隼人<sup>1</sup>・池本 敏和<sup>2</sup>・宮島 昌克<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234)  
E-mail: nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: tikemoto@t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

本論文では地震波形が得られていない自治体観測点を対象として、最大加速度とスペクトルの卓越振動数からサイト特性を推定する手法を提案する。まず、関西地方のK-NET, KiK-net観測点の地震記録を用いてスペクトルインバージョンによって、経験的なサイト特性を求めた。続いて、最大加速度の地盤増幅度とサイト特性、基盤スペクトルの関係式を導き、実観測記録においても関係式が概ね成り立っていることを明らかにした。サイト特性を推定するにあたり、地震動スペクトルの卓越振動数と1次ピーク振動数をパラメータとするサイト特性モデル式を考案し、各観測記録に対してサイト特性を推定した。推定したサイト特性とインバージョンによるものを比較したところ、ほとんどの観測点でサイト特性の形状や増幅度がよく対応していた。

**Key Words :** local government sites, PGA, amplification factor, Parseval's theorem, site spectrum

## 1. はじめに

地震観測点におけるサイト特性(振動数領域の地盤増幅特性)を評価する方法として、地震観測記録に基づく経験的な手法<sup>1)-5)</sup>が広く用いられている。この手法はK-NETのように比較的容易に地震波形を入力できる観測点に対しては有効であるが、全国の多くの自治体観測点のように地震波形を収集するシステムが十分に整備されていない場合は適用することが難しい。

著者らは自治体観測点を対象として地震基盤を基準としたサイト特性を推定するために、計測震度と9割以上の都道府県観測点で収集されている最大地動加速度の地盤増幅度をパラメータとするサイト特性評価式を提案している<sup>6)</sup>。提案した評価式はサイト特性の0.5~2Hz, 2~5Hz, 5~10Hzの平均増幅度は精度良く評価できたが、サイト特性の形状は十分に評価できなかった。

全国の6割程度の都道府県では自治体観測点での地震動スペクトルの卓越振動数(あるいは周期)のデータも集めている<sup>7)</sup>。本論文ではサイト特性評価の際に地震動指標だけでなく、スペクトルの卓越振動数を考慮することにより、サイト特性の平均増幅度

だけでなく、スペクトル形状も評価できる手法を提案する。ここでは関西地方と福井県の一部の地域にある地震観測点を対象にして、提案する評価手法の適用性を検証する。

本論文は以下の手順で検討を進める。

- ① スペクトルインバージョンによって対象とする観測点ごとに地震基盤を基準としたサイト特性や震源特性などを評価する。
- ② 最大地動加速度の距離減衰式を求める。
- ③ 地表と基盤の最大地動加速度とサイト特性、基盤入射波のスペクトル(基盤スペクトル)の関係式を導く。基盤スペクトルは①の結果、基盤の最大地動加速度は②の解析結果を用いる。
- ④ ③で求めた最大地動加速度や基盤スペクトルなどの関係式に基づいて、サイト特性を推定する。
- ⑤ 最後にインバージョンによって評価したサイト特性と推定したものを比較し、本論文で提案する手法の妥当性を検証する。

## 2. スペクトルインバージョン

### (1) 解析手法

ここではスペクトルインバージョン<sup>1)</sup>によるサイト特性などの評価手法について述べる。まず、地震動スペクトルが次のように震源特性、伝播経路特性、サイト特性を表すスペクトルから構成されていると考える。

$$A_{ij}(f) = S_i(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

$f$ は振動数(Hz)、 $A_{ij}(f)$ は*i*番目の地震における*j*番目の観測点のフーリエスペクトルである。 $S_i(f)$ は*i*番目の地震の震源特性を表わす係数、 $P_{ij}(f)$ は伝播経路特性、 $G_j(f)$ は*j*番目の観測点のサイト特性である。 $P_{ij}(f)$ を幾何減衰と内部減衰の積で表わされるとし、式(1)の両辺の常用対数をとると、次のようになる。

$$\log A_{ij}(f) = \log S_i(f) - \log R_{ij} + b(f)R_{ij} + \log G_j(f) \quad (2)$$

$$P_{ij}(f) = 10^{b(f)R_{ij}} / R_{ij} \quad (3)$$

$R_{ij}$ は*i*番目の地震における*j*番目の観測点の震源距離(km)であり、 $b(f)$ は内部減衰に対応する係数である。 $A_{ij}(f)$ は水平2成分(NS, EW成分)のいずれかの加速度フーリエスペクトルであり、S波到達から10秒間を切り出して計算した。波形を切り出す際には両端にコサインテーパを施したウィンドウをかけた。振動数領域においては0.5~20Hz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、フーリエスペクトルから判断して、0.5~20Hzの範囲でノイズが含まれる観測記録は解析に用いなかった。

式(2)を求める際に $S_i(f)$ と $G_j(f)$ にトレードオフの関係があるために、両者を一意的に求められない。そこで、基準となる観測点を定め、そのサイト特性 $G_j(f)$ を拘束条件として、スペクトルインバージョンを実施する。基準観測点はK-NET舞鶴(KYT005)とした。図-1に示すように野津、長尾<sup>5)</sup>によるK-NET舞鶴のサイト特性(岩盤観測点を基準とする相対的なサイト特性)はどの振動数でも増幅度が1前後と小さく、インバージョンの基準観測点として適していると考えられる。本研究ではK-NET舞鶴の増幅度を振動数によらず1として、解析を行う。

## (2) 解析データ

本論文では関西地方や福井県の一部の地域を対象として解析を行う。図-2に解析対象とした観測点と地震の震央分布を示す。また、解析対象とした地震の諸元を表-1に示す。対象地震は関西地方とその周辺で1997年~2008年に発生した18の地殻内地震である。それらの地震の気象庁マグニチュード $M_{JMA}$ は4.0~5.4、震源深さは7~18kmである。関西地方では表-1に示す以外にも複数の地震が発生しているが、それらはプレート間地震などであり、表-1の地震と

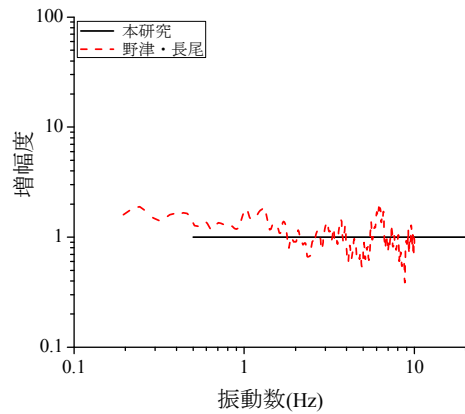


図-1 基準観測点K-NET舞鶴(KYT005)のサイト特性<sup>5)</sup>

表-1 地震の諸元

発生年月日時	発生地域	緯度(°)	経度(°)	$M_{JMA}$	深さ(km)
1997年1月8日22:36:29.2	京都府南部	35.1533	135.5167	4.0	15
1997年9月7日02:19:35.7	京都府南部	35.0417	135.5200	4.3	18
1999年2月12日03:16:45.6	京都府南部	34.9917	135.5583	4.2	15
1999年3月16日16:43:35.3	滋賀県北部	35.2767	135.9300	5.2	12
2000年5月16日04:09:25.8	大阪府北部	34.9700	135.4983	4.4	16
2001年1月12日08:00:4.2	兵庫県北部	35.4650	134.4900	5.6	11
2001年1月20日05:19:50.5	兵庫県北部	35.5033	134.4783	4.8	11
2001年4月16日19:05:18.0	福井県嶺南	35.4800	135.9167	4.2	14
2001年8月25日22:21:25.1	京都府南部	35.1517	135.6600	5.4	8
2001年12月28日03:28:2.7	福井県嶺南	35.4517	135.8917	4.5	7
2002年7月16日20:08:58.1	京都府南部	35.0700	135.6717	4.3	16
2003年2月6日02:37:4.4	京都府南部	35.0833	135.5633	4.2	15
2003年3月13日21:04:56.0	福井県嶺南	35.5183	135.9733	4.2	14
2004年12月1日23:30:23.4	京都府南部	35.0383	135.8100	4.0	13
2006年6月3日00:48:25.6	福井県嶺南	35.3867	135.7167	4.1	7
2007年8月31日23:36:57.2	若狭湾	35.9150	135.6967	4.4	16
2008年8月8日04:35:16.2	福井県嶺南	35.4200	135.8550	4.2	15
2008年8月30日18:28:30.1	福井県嶺南	35.4200	135.8567	4.2	15

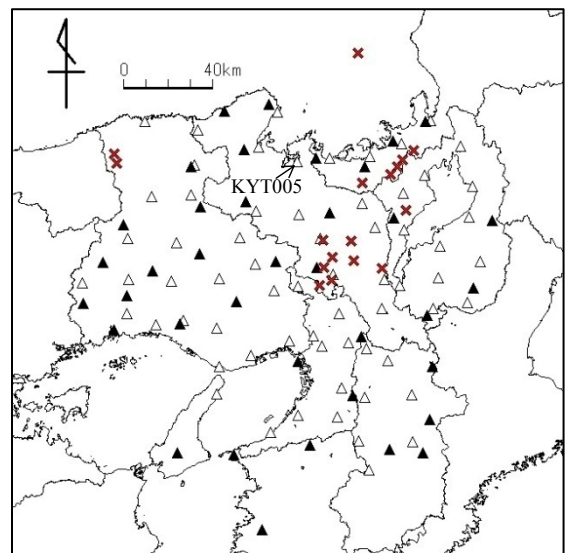


図-2 解析対象とした地震観測点と震央分布 (△K-NET, ▲KiK-net, ×震央)

は伝播経路特性が大きく異なる可能性があるので、今回は解析対象に含めなかった。インバージョンの対象とした地震観測点は表-1の5つ以上の地震で記録が得られているK-NET65地点、KiK-net37地点の計102地点である。対象観測点の震源距離の範囲は10~191km、データ数は合計で1000個である。

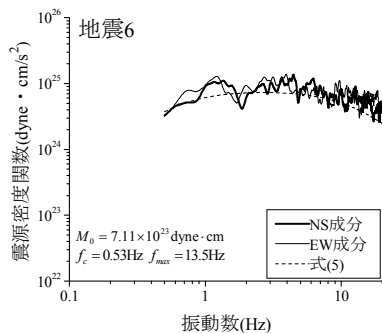


図-3 震源密度関数

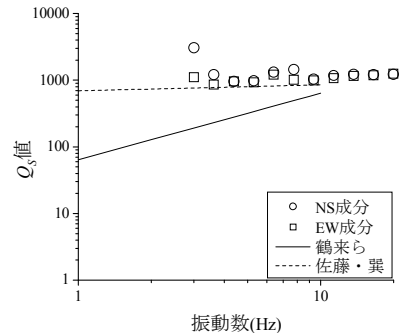
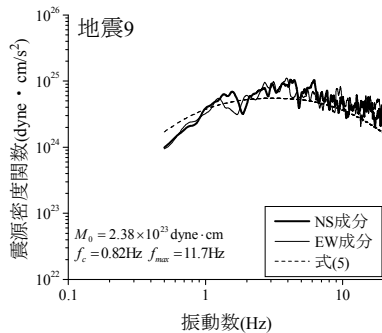


図-4  $Q_s$  値

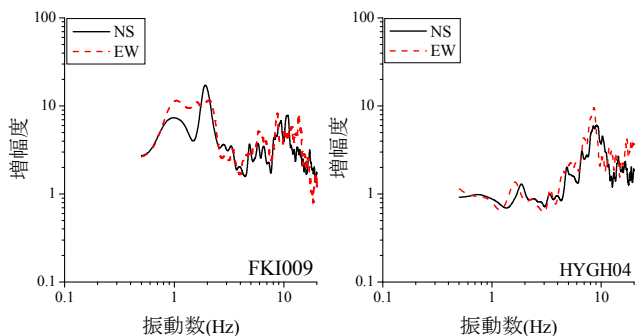


図-5 サイト特性の一例

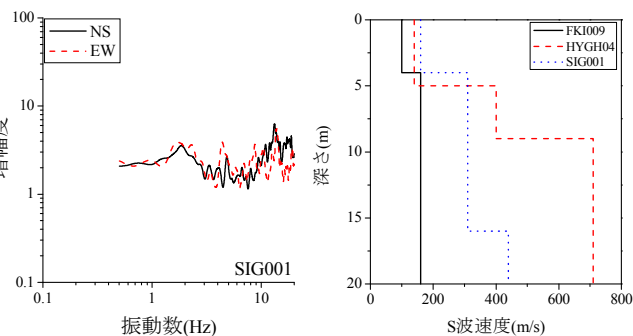


図-6 S波速度構造

### (3) インバージョン結果

ここではスペクトルインバージョンの解析結果について考察する。まず、インバージョンで得られた  $S_i(f)$  と  $\omega$ -2乗則に従う震源密度関数と比較するために、以下の式によって震源密度関数を求めた。

$$M_i(f) = \frac{4\pi\rho V_s^3}{F_s P_r R_{\theta\phi}} S_i(f) \quad (4)$$

$M_i(f)$  は  $i$  地震の加速度震源密度関数である。  $\rho$  は地震基盤の密度、  $V_s$  はS波速度であり、それぞれ  $2.7\text{g/cm}^3$ 、  $3.6\text{km/s}$  とした。  $F_s$  は自由地表面の増幅効果で2、  $P_r$  はエネルギー分配係数で0.71、  $R_{\theta\phi}$  はレイエーションパターン係数で0.63とした。また、  $\omega$ -2乗則に従う震源密度関数は川瀬・松尾<sup>4)</sup>を参考に、以下の式を用いて計算した。

$$M_i(f) = \frac{M_0 (2\pi f)^2}{\{1 + (f/f_c)^2\} \{1 + (f/f_{max})^2\}} \quad (5)$$

ここで  $M_0$  は地震モーメント ( $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ )、  $f_c$  はコーナー振動数 (Hz)、  $f_{max}$  は高域遮断振動数 (Hz) である。  $M_0$  はF-net<sup>8)</sup>、  $f_c$  と  $f_{max}$  は川瀬・松尾<sup>4)</sup>による値を用いた。図-3に地震6と9を対象に式(4)と(5)を用いて計算した  $M_i(f)$  を示す。同図から分かるように、観測値と  $\omega$ -2乗則に基づく震源密度関数はよく対応している。

続いて、  $b(f)$  から伝播経路におけるS波の減衰の程度を表す  $Q_s$  値を求め、既往研究による値と比較す

る。  $Q_s$  値は次式によって求めた。

$$Q_s(f) = -\frac{\pi f}{\ln(10)b(f)V_s} \quad (6)$$

$V_s$  は式(4)と同じ  $3.6\text{km/s}$  とした。図-4に本研究の  $Q_s$  値と鶴来ら<sup>9)</sup>、佐藤・巽<sup>3)</sup>の求めた  $Q_s$  値を示す。本研究の  $Q_s$  値は水平2成分の値が安定している  $3\sim 20\text{Hz}$  の値を示した。鶴来ら<sup>9)</sup>の  $Q_s$  値は関西地方で発生した地震で震源距離が  $75\text{km}$  以内の地震観測点の記録から評価したものである。佐藤・巽<sup>3)</sup>の  $Q_s$  値は西日本で発生した地殻内地震の記録によるものであり、震源距離が  $200\text{km}$  以内の地震記録から評価した値である。本研究と鶴来ら<sup>9)</sup>の  $Q_s$  値を比較すると、  $Q_s$  値の値や振動数に対する依存性が大きく異なっていることが分かる。一方、関西地方以外の地域も対象としているものの、本研究と震源距離の範囲がほぼ等しい佐藤・巽<sup>3)</sup>の  $Q_s$  値は本研究の結果と同じ程度の値になっている。

図-5にスペクトルインバージョンで得られたサイト特性の一例を、図-6に例として挙げた観測点の表層  $20\text{m}$  のS波速度構造を示す。表層  $20\text{m}$  までのS波速度が  $200\text{m/s}$  未満と軟弱な地盤にあるK-NET小浜(FK1009)は  $1\text{Hz}$  前後の増幅度が大きくなっている。KiK-net篠山(HYGH04)は地表から  $5\text{m}$  まではS波速度が  $140\text{m/s}$  と小さいが、その下の層は  $400\text{m/s}$  となっており、上の層とのコントラストが大きい。そのため、サイト特性において高振動数で明瞭なピークが見られるものと考えられる。S波速度構造が上述の2つの

観測点の中間的なものであるK-NET朽木(SIG004)はサイト特性に明瞭なピークがなく、全体的に見て増幅度の変動が小さい。

### 3. サイト特性、基盤スペクトルと増幅度の対応

#### (1) サイト特性と地盤増幅度の対応について

地震波の主要動区間で振幅に大きな変動がないとする場合、この区間において、ある地点の地表面と解放基盤の加速度波形の自乗平均値はそれぞれ次式で表わされる。

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{T_d} \int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df \quad (7)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{T_d} \int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df \quad (8)$$

ここで $\sigma_s^2$ と $\sigma_b^2$ はそれぞれ地表面波と基盤波の自乗平均値、 $G(f)$ はその地点のサイト特性、 $F_b(f)$ は基盤スペクトルである。また、 $T_d$ は地震波主要動の継続時間である。式(7)と(8)の比を求め、その両辺の平方根をとると次のようになる。

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_b} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (9)$$

また、Cartwright and Higgins<sup>10)</sup>に従うと、 $\sigma_s$ と $\sigma_b$ とその最大振幅の期待値の関係は次の式で表わされる。

$$E[A_b] = p_b \cdot \sigma_b \quad (10)$$

$$E[A_s] = p_s \cdot \sigma_s \quad (11)$$

式(10)、(11)の左辺はそれぞれ、地表面波の最大振幅 $A_s$ と基盤波の最大振幅 $A_b$ の期待値、 $p_b$ と $p_s$ はピークファクターであり、次式によって与えられる。

$$p_i = \sqrt{2 \ln N_i} + \gamma / \sqrt{2 \ln N_i} \quad (12)$$

$$N_b = T_d \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (13)$$

$$N_s = T_d \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}} \quad (14)$$

式(12)の添え字 $i$ は $s$ と $b$ に対応する。 $\gamma$ はオイラー一定数(=0.5772)である。式(9)、(10)、(11)から以下の関係が得られる。

$$\frac{E[A_s]}{E[A_b]} = \frac{p_s}{p_b} \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (15)$$

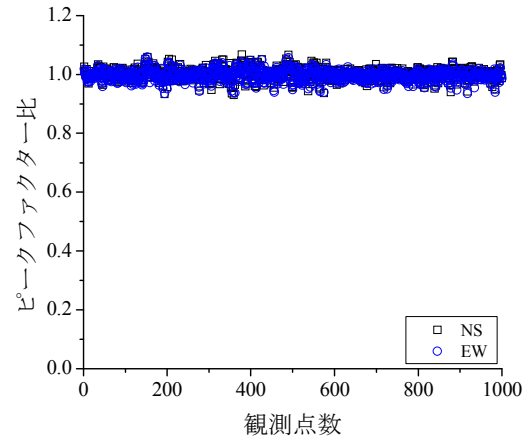


図-7 ピークファクター比

ここで地表の最大地動加速度 $PGA_s$ が $E[A_s]$ 、基盤の最大地動加速度 $PGA_b$ が $E[A_b]$ と等しく、 $p_s$ と $p_b$ の比が1に近い値であれば、式(15)は以下のように近似できる。

$$\frac{PGA_s}{PGA_b} \approx \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (16)$$

左辺はいわゆる最大地動加速度の地盤増幅度である。これまで、サイト特性と地震動指標の地盤増幅度の関係が調べられているが<sup>11),12)</sup>、式(16)のように基盤スペクトルは考慮されていない。ピークファクター $p_s$ と $p_b$ の比を今回対象とした全観測記録に対して計算したところ、図-7のように1前後となった。なお、ピークファクターの計算に用いる式(13)、(14)の積分範囲は0.5~20Hzである。後述する式(16)の計算でも、同じ積分範囲とした。

ほとんどの自治体観測点で $PGA_s$ を収集していることから、本論文では式(16)の関係式に基づいてサイト特性 $G(f)$ を推定する手法を検討する。式(16)の $F_b(f)$ はスペクトルインバージョンで得られる $S_i(f)$ と $P_j(f)$ の積によって、任意の地点について評価できる。 $PGA_b$ を評価するために、スペクトルインバージョンと同じデータセットを用いて、最大地動加速度の距離減衰式を求める。

#### (2) 距離減衰式の評価

最大地動加速度の距離減衰式は以下のような幾何減衰と内部減衰を考慮した式を用いる。

$$\log PGA_{sij} = S_i - \log R_{ij} + bR_{ij} + g_j \quad (17)$$

$PGA_{sij}$ は $i$ 番目の地震における $j$ 番目の観測点の地表面での最大地動加速度、 $S_i$ は $i$ 地震の震源特性を表す係数(震源係数)、 $b$ は距離減衰を表す係数(距離係数)、

$g_j$ は $j$ 観測点の地盤増幅特性を表す係数(地盤係数)である。なお、地盤増幅度は $10^{g_j}$ で定義される。

式(17)の係数は二段階回帰分析<sup>13)</sup>の一段階目の計算の要領で評価する。回帰分析ではスペクトルインバージョンと同様に、基準観測点をKYT005として、その地盤増幅度を1(地盤係数は0)に固定して計算を行う。各観測点の $g_j$ はKYT005に対する相対的な値となる。サイト特性推定の基本となる式(16)は水平2成分それぞれに対して成り立つものであるので、最大地動加速度の距離減衰式も水平2成分それぞれに対して求めた。

回帰分析の結果、得られた距離係数 $b$ の値はNS、EW成分でそれぞれ-0.0030、-0.0037であり、既往研究で指摘されている一般的な値<sup>14)</sup>と調和的であった。地震ごとに得られる係数 $S_i$ を $M_{JMA}$ と比較すると図-8のようになる。 $M_{JMA}$ が4.5以下ではややばらつきがあるが、全体的には両者に正の相関が見られる。

図-9に最大地動加速度の地盤増幅度の分布を示す。同図から分かるように、増幅度が1~5の観測点が全体の9割以上を占めている。NS、EW成分ともに地盤増幅度が5を超える観測点は3つあり、その中でKiK-net東吉野(NARH05)はEW成分の増幅度が10を超える大きな値となっている。インバージョンで求めたサイト特性を見ると(図-10)、EW成分のサイト特性は6Hz付近の増幅度が30を超える大きな値となっている。この観測点のボーリングデータを調べると、地表から6mまでのS波速度は141m/sと小さく、その下の層のS波速度は391m/sで上層とのコントラストが大きい。このようなコントラストの大きな層の影響でピーク増幅度が大きいものと推測される。

### (3) 地震観測記録による地盤増幅度とサイト特性の対応の評価

ここではサイト特性を推定する際に基本となる式(16)が実際の地震観測記録においても成り立つかどうか調べる。式(16)のパラメータで $PGA_b$ は観測記録、 $G(f)$ と $F_b(f)$ はスペクトルインバージョンの解析結果から得られる。また、 $PGA_b$ は式(17)の右辺で $g_j$ を除いた式によって評価できる。

図-11に対象とした全観測記録に対して、式(16)の両辺を計算した結果を示す。両辺の値に対して原点0を通る直線で回帰した関係式を求めると、NS、EW成分ともに右辺と左辺の相関係数は0.9を超える高い値となった。右辺と左辺が1対1で対応している訳ではないが、関係式の係数(0.843, 0.752)を考慮すれば、式(16)をサイト特性推定に利用しても問題ないと考えられる。

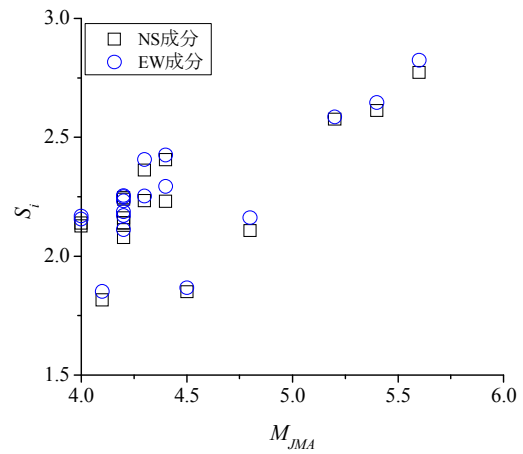
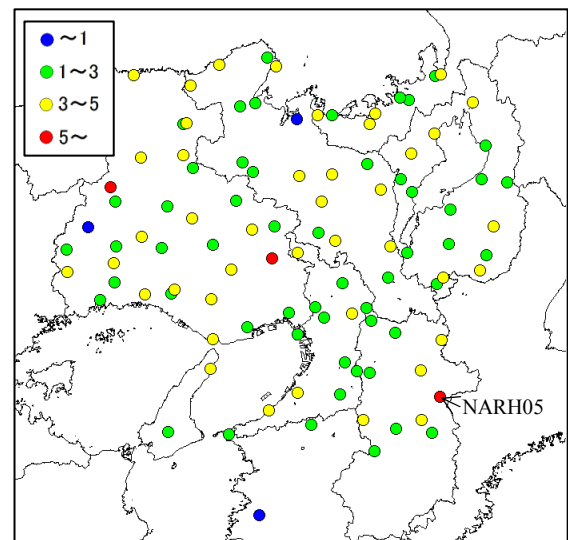
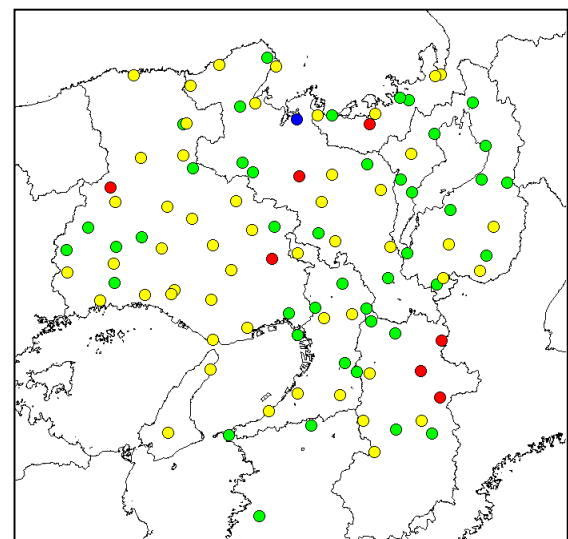


図-8  $M_{JMA}$ と $S_i$ の対応



(a) NS成分



(b) EW成分

図-9 増幅度分布



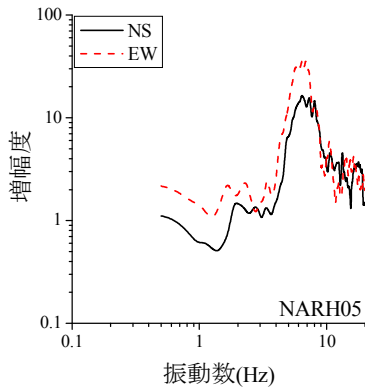


図-10 KiK-net東吉野のサイト特性

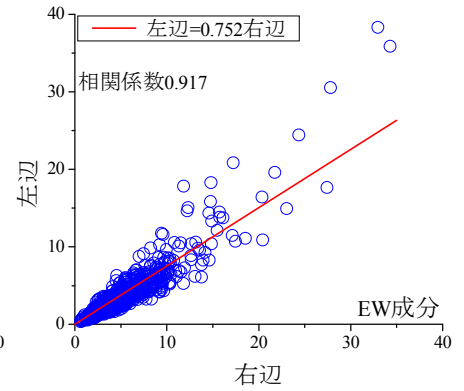
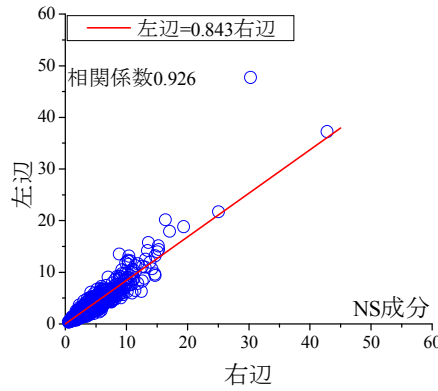


図-11 式(16)の右辺と左辺の対応

#### 4. サイト特性推定手法の提案と適用

##### (1) サイト特性の推定手法

3章では地盤増幅度がサイト特性と基盤スペクトルによって表わすことができることを導き、実観測記録においても概ね成り立つことを確認した。続いては自治体観測点を想定して、式(16)の関係式に基づくサイト特性推定手法の適用性を検証する。自治体観測点では地表面の最大地動加速度が収集されている場合が多く、気象庁の地震年報などからその値を知ることができる。また、対象観測点の震源距離が分かれば、別途、K-NETなどの観測記録に基づき求めた距離減衰式により基盤での最大地動加速度を、基盤スペクトルはスペクトルインバージョン解析の結果から求めることができる。よって、式(16)において、未知のパラメータはサイト特性だけとなる。この未知のサイト特性が推定するサイト特性である。

インバージョンによるサイト特性は各観測点に対して地震によらず一定とするが、式(16)に基づいて推定するサイト特性はインバージョンで解析対象とした1000の各観測記録に対して求める。全観測記録に対してサイト特性を推定した後、それを観測点ごとにまとめたものを算術平均して、それぞれの観測点の推定サイト特性とする。

サイト特性は振動数(あるいは周期)の関数であり、それを推定するには振動数特性に関する情報があると都合が良い。全国の都道府県のうち6割程度で自治体観測点で記録された地震動スペクトルの卓越振動数のデータを回収している<sup>7)</sup>。本論文ではフーリエスペクトルの卓越振動数がサイト特性に見られるピーク振動数に対応するものと考え、サイト特性を推定する際のパラメータとする。また、同じ観測点で複数の地震の観測記録から計算したフーリエスペクトルの卓越振動数を整理し、その中で最も振動

数の低いものを、その観測点のサイト特性の1次ピーク振動数と仮定して、サイト特性推定の際に考慮する。既往研究<sup>15)</sup>を参考にして考案した次式を推定サイト特性のモデル式とする。

$$\hat{G}(f) = G_1(f)G_2(f) \quad (18)$$

$$G_1(f) = \frac{1 + (f/f_g)^2}{\sqrt{(1 - f^2/f_g^2)^2 + 4h_g^2 f^2/f_g^2}} \quad (19)$$

$$G_2(f) = \frac{1 + \alpha(f/f_p)^2}{\sqrt{(1 - f^2/f_p^2)^2 + 4h_p^2 f^2/f_p^2}} \quad (20)$$

式(18)が推定サイト特性 $\hat{G}(f)$ であり、式(19)と(20)を掛け合わせたものである。式(19)と(20)はそれぞれ1次ピーク振動数 $f_g$ と卓越振動数 $f_p$ をピーク振動数とする関数である。式(19)の $h_g$ 、式(20)の $h_p$ はピーク振動数の増幅度を規定する係数であり、 $\alpha$ は式(20)において $f_p$ よりも高振動数の増幅度を規定する係数である。この係数により、 $f_p$ より高い振動数の増幅度を調整する。図-12に例として $f_g$ が1Hz、 $f_p$ が5Hz、 $h_g$ と $h_p$ が0.1、 $\alpha$ が2の場合の $\hat{G}(f)$ と $G_1(f)$ 、 $G_2(f)$ を示す。式(16)の $G(f)$ を $\hat{G}(f)$ に置き換え、右辺と左辺の差の自乗が最小になるような $\hat{G}(f)$ を推定サイト特性とする。図-11から分かるように右辺と左辺は完全に一対一で対応していないので、回帰分析で求めた両者の関係式(図-11の凡例の式)の係数を考慮する。すなわち、以下の式(21)の値が最小となるように $\hat{G}(f)$ を推定する。なお、式(21)は各観測記録に対して求めるので、添え字 $i$ と $j$ を各パラメータに添え字として付加する。

$$\left( \frac{PGA_{sij}}{PGA_{bij}} - C \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \hat{G}_{ij}(f)^2 F_{bij}(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_{bij}(f)^2 df}} \right)^2 \quad (21)$$

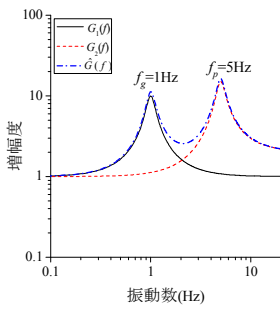


図-12 モデル式

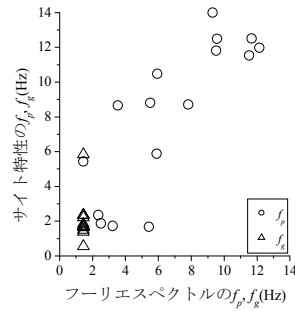
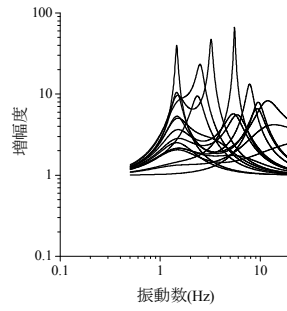
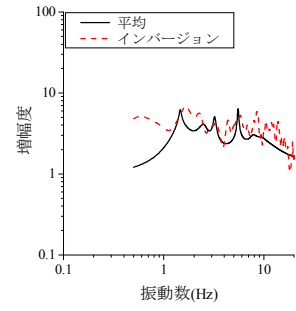


図-13 スペクトルとサイト特性の  $f_p$ ,  $f_g$



(a) 各地震の推定値



(b) 平均値とインバージョン

図-14 推定サイト特性の一例(FK1008, EW成分)

式(21)のCは図-11に示す回帰係数(NS成分では0.843, EW成分で0.752)である. 式(21)を計算する際に必要なパラメータのうち,  $PGA_{sij}$ と $f_g$ ,  $f_p$ は観測記録から得られる. また, 対象観測点の震源距離 $R_{ij}$ が分かれば, その観測点の $PGA_{bij}$ は距離減衰式から,  $F_b(f)$ はスペクトルインバージョンの解析結果から求めることができる. よって, 式(21)の最小値を求める際に推定すべきものは $\hat{G}(f)$ のパラメータ $h_g$ ,  $h_p$ ,  $\alpha$ の3つとなる.

パラメータ $h_g$ ,  $h_p$ ,  $\alpha$ を変えて計算した式(21)の値が最少となる $h_g$ ,  $h_p$ ,  $\alpha$ により計算した $\hat{G}(f)$ をその記録の推定サイト特性とする. 今回,  $h_g$ は0.1~1を対数軸で10等分して11通り,  $h_p$ は0.01~1を対数軸で20等分して21通り,  $\alpha$ は1~5まで1つつ変化させて, 合計で1155通り式(21)を計算した.

ここでFK1008(K-NET三方, EW成分)を例にサイト特性を推定した結果を示す. 推定するにあたり, 16地震で観測された記録から求めたフーリエスペクトル, スペクトルインバージョンの結果に基づいて求めたサイト特性の $f_p$ ,  $f_g$ の対応を調べた(図-13). サイト特性は16地震の各観測フーリエスペクトルを基盤スペクトルで除して, 求めたものである. 図-13から分かるように, 観測フーリエスペクトルとサイト特性の $f_p$ ,  $f_g$ は概ね対応していることが分かる. 次に図-14に16地震の観測記録から推定したサイト特性と, 16個の推定サイト特性の算術平均とインバージョンで求めたサイト特性を示す. 同図を見ると, 1Hzよりも高振動数で推定サイト特性の平均値とインバージョンによるサイト特性が概ね対応していることが分かる.

## (2) 解析対象記録に対するサイト推定手法の適用

解析対象とした全観測記録について推定サイト特性を求めるとともに, 各観測点ごとに推定したサイト特性をまとめ, その算術平均を求めた. 図-15, 16に一部の観測点の推定サイト特性を算術平均したものを, スペクトルインバージョンから求めたサイ

ト特性とともに示す. サイト特性は提案手法で推定したもの, インバージョンで求めたものとともにNS, EW成分を幾何平均したものである.

本論文で提案した手法により推定したサイト特性をインバージョンによるものと比較すると, スペクトルに関する情報は卓越振動数だけなので, サイト特性の細かな形状は再現できていないが, 多くの観測点でサイト特性の大まかな傾向や増幅度は対応している. 特にK-NET河内長野(OSK009)やKiK-net東吉野(NARH05)のようにインバージョンで求めたサイト特性に明瞭なピークが見られる場合, 推定によるものとの一致度が高い傾向にある.

推定とインバージョンによるサイト特性の対応が悪いものがいくつか見られるものの, 対象とする地震観測点で既知の地震動情報が最大地動加速度, 卓越振動数しかないという厳しい条件であるにもかかわらず, サイト特性をある程度の精度で推定できていると言える. なお, サイト特性の推定に用いたモデル式は増幅度が1以上になるので, インバージョンによるサイト特性の増幅度が1未満になっている観測点では, その振動数では対応が悪くなる. 今後は増幅度が1未満の部分についても対応できるように, モデル式を改良する必要がある. また, 対象とする地震観測点で十分な数の地震動情報(最大地動加速度, 卓越振動数)が得られていない場合は, 推定サイト特性のばらつきが大きくなって, 推定精度が低下する可能性があり, 注意が必要である.

最後に全地震観測記録に対して, 推定サイト特性に基づき式(16)の右辺を計算した結果と左辺による結果を比較した(図-17). なお, 右辺による計算値を $\hat{F}_a$ , 左辺による値を $F_a$ とする.  $\hat{F}_a$ と $F_a$ を原点を通る直線で回帰すると図-17の凡例の式から分かるように, 両者はほとんど一対一で対応している. また, 相関係数が0.9を超える高い値となっており, 全体的に見て, 今回, 推定したサイト特性が妥当なものであったことを示す結果となった.

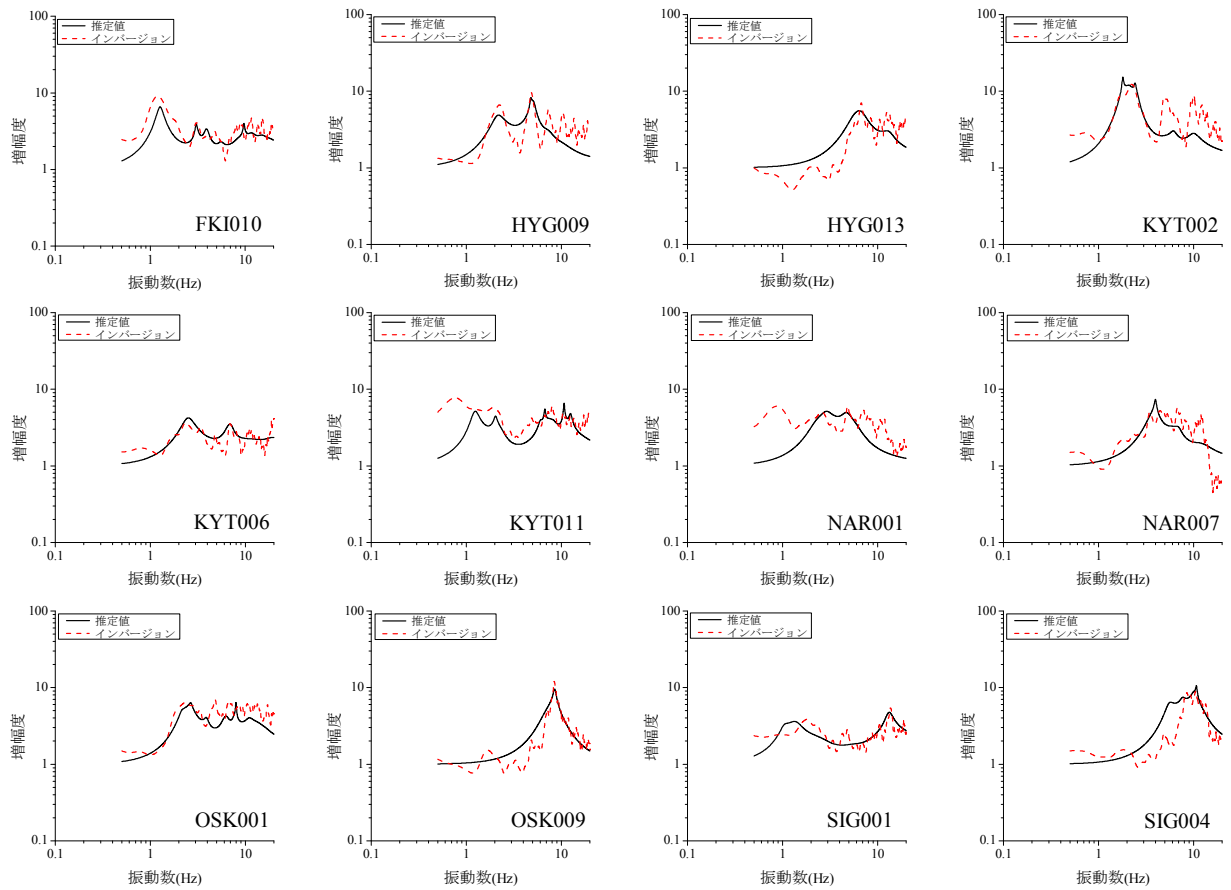


図-15 K-NET観測点の推定サイト特性とインバージョンによるサイト特性

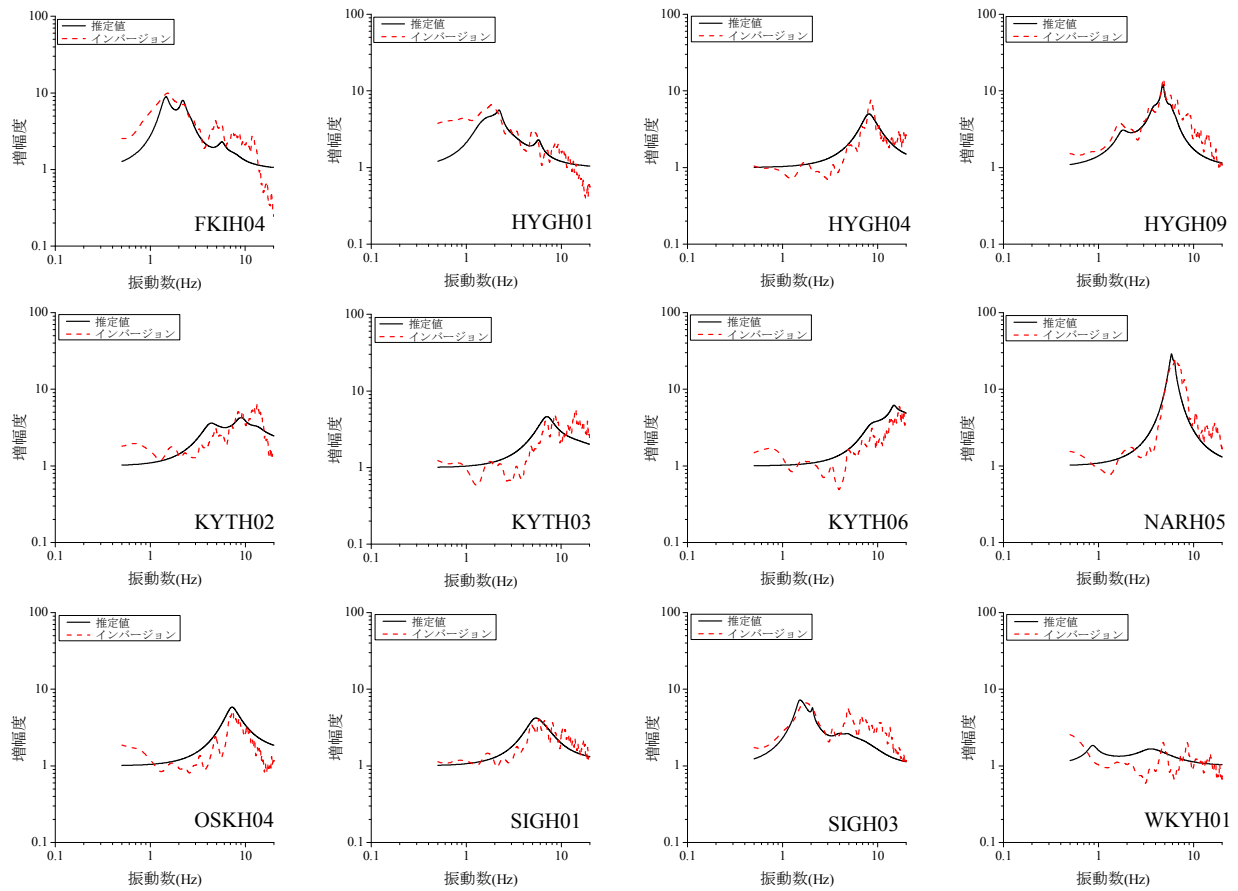


図-16 KiK-net観測点の推定サイト特性とインバージョンによるサイト特性



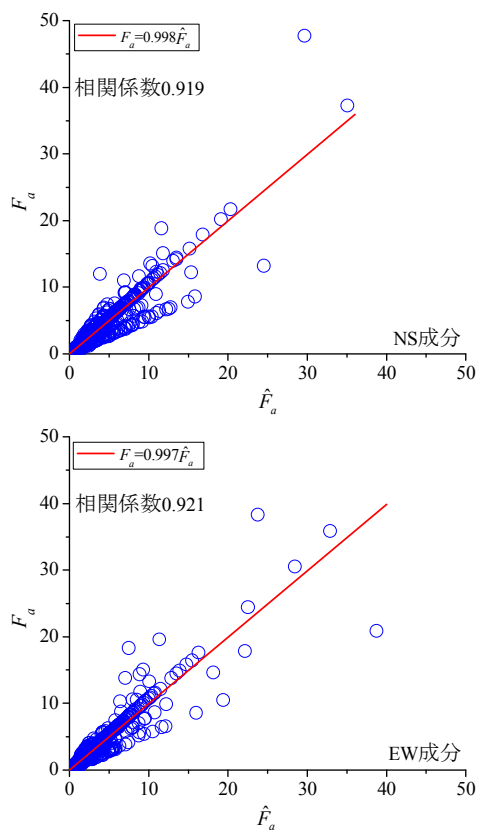


図-17  $\hat{F}_a$  と  $F_a$  の対応

## 5. まとめ

本論文では地震波形の得られていない自治体観測点を想定して、観測された最大地動加速度と卓越振動数からサイト特性を推定する手法を提案した。提案手法は最大地動加速度の地盤増幅度とサイト特性、基盤スペクトルとの関係式に基づくものである。

まず、関西地方のK-NET, KiK-net観測点で得られた地震観測記録を用いてスペクトルインバージョンによって経験的なサイト特性を対象観測点ごとに評価した。続いて、最大地動加速度の地盤増幅度とサイト特性、基盤スペクトルの関係式を導き、地震観測記録を用いた計算で、実観測記録においても関係式が概ね成り立っていることを示した。

続いて、地盤増幅度とサイト特性、基盤スペクトルとの関係式に基づいて、サイト特性を推定した。推定ではフーリエスペクトルの卓越振動数と1次ピーク振動数がサイト特性のものと等しいと仮定し、卓越振動数と1次ピーク振動数を考慮したサイト特性モデル式を用いた。今回、対象とした全観測点に対して、サイト特性を推定したところ、いくつかの観測点ではインバージョンによるものとの対応が悪かったが、全体的にはサイト特性の形状や増幅度がある程度、推定できることが明らかになった。

提案した手法で用いたパラメータは自治体観測点でも得られる最大地動加速度とスペクトルの卓越振動数という2つ地震動情報だけであったが、少ないパラメータの割にはよくサイト特性を推定できると言える。今後はサイト特性推定に用いたモデル

式の改良を行うとともに、他の地域の地震観測点でも提案手法を適用していく予定である。また、今回解析対象とした地震観測記録にはあまり含まれていない、地盤の非線形化の影響が大きい観測記録に対しても、サイト特性の推定を試みる予定である。

**謝辞:** 本研究では独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net観測記録を使用させて頂きました。記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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2, 39, pp.579-593, 1986.
- 2) 荘司雄一, 神山 眞: Small-Titanの観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定, 土木学会論文集, 703/I-59号, pp.237-253, 2002.
- 3) 佐藤智美, 巽 誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 4) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第1号, pp.33-52, 2004.
- 5) 野津 厚, 長尾 毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 6) 西川隼人, 宮島昌克: 自治体観測点で得られる地震動指標の地盤増幅度によるサイト特性の推定, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 1, pp.178-187, 2009.
- 7) 消防庁: 次世代震度ネットワークのあり方検討委員会中間報告書, 2005.
- 8) 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網F-net: <http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/top.php?LANG=ja>.
- 9) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦 勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集A, Vol.48, pp.577-586, 2002.
- 10) Cartwright, D. E. and Longuet-Higgins, M. S.: The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proc. Roy Soc. London*, Vol.237, pp.212-232, 1956.
- 11) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦 勝: サイト増幅スペクトルに基づく震度増加量の推定法, 土木学会論文集, 738/I-64号, pp.191-205, 2003.
- 12) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.126-145, 2004.
- 13) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.757-783, 1990.
- 14) 司 宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.
- 15) 澤田 勉, 平尾 潔, 辻原 治, 三神 厚: 最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法, 土木学会論文集, 682/I-56号, pp.311-322, 2001.

(原稿受理2009年6月28日)

# A STUDY ON ESTIMATION METHOD OF A SITE EFFECT OF LOCAL GOVERNMENT OBSERVATION SITES BASED ON EARTHQUAKE GROUND MOTION RECORDS IN KANSAI REGION

Hayato NISHIKAWA, Toshikazu IKEMOTO and Masakatsu MIYAJIMA

We propose a method to evaluate a site effect using peak ground acceleration (*PGA*) and predominant frequency of spectrum obtained at local government observation sites where seismic waveform records were not stored. Firstly, the site effects at K-NET, KiK-net observation sites in Kansai region were evaluated by the spectral inversion method. A relationship among amplification factor of *PGA* and the site effect, bedrock spectrum was derived. As a result, it was clarified that the relationship is valid for the observed records used in this study. In evaluation of the site effect, site effect model in terms of the predominant and first peak frequencies of the spectrum was proposed and the site effect at each observation record was evaluated using the proposed model. In comparison of the evaluated site effects with inverted one, the shape and amplification of the site effects at most observation sites were in good agreement with those of the inverted site effects.