

関西地域におけるサイト増幅特性の再評価

Re-estimation of site amplification effects in Kansai region

鶴来雅人*, 澤田純男**, 宮島昌克***, 北浦 勝****

Masato Tsurugi, Sumio Sawada, Masakatsu Miyajima, and Masaru Kitaura

*工修 財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)

** 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

*** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**** 工博 金沢大学教授 大学院自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

Seismic ground motions are affected by source, path, and site effects. The site amplification effects against seismic bedrock at seismic observation stations in Kansai region are estimated by the method that removes source and path characteristics from observed spectra. The estimated site amplification effects are categorized by local site condition. Moreover, the obtained results are consistent with those from one-dimensional theoretical analysis.

Key Words: Site amplification effects, Observed seismic records,

Prediction of strong ground motion, Fault rupture propagation model

キーワード: サイト増幅特性, 地震観測記録, 強震動予測, 断層モデル

1. はじめに

地震動が震源特性・伝播経路特性・サイト特性で構成されていることは良く知られている。強震動予測にあたっては、これらの総合特性として観測された地震動の統計的な解析からその大きさを経験的に得ようとする方法と、各特性を個別に評価して行なう方法（その主たるものに断層モデルに基づく強震動予測手法）がある。これらの強震動予測手法の現状と将来展望については香川・ほかに詳細にまとめられている¹⁾。前者の方法としては最大加速度あるいは最大速度の距離減衰式^{例えば 2-4)}や応答スペクトルの距離減衰式^{例えば 5)}による方法がある。この方法は既往地震による平均的な地震動強度を見るには便利な方法である。しかし、固有の震源特性・伝播経路特性・サイト特性が反映されないため、兵庫県南部地震における「震災の帯」のような現象を説明することはできない。これに対して後者の方法は多くのパラメータを必要とし、またそれを適切に設定するのはやや困難であるが、固有の震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した合理的な方法である。昨今ではこの方法の工学的適用を試みる研究が行われるようになり^{例えば 6)}、特に兵庫県南部地震以降は実務にも適用されるようになってきた^{7, 8)}。また、社団法人土木学会の土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言⁹⁾では、「内陸活断層によるレベル2地震動は、活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定

することにより定めることを基本とする。」とされており、今後、特に重要構造物の耐震設計用入力地震動の作成などに際しては、断層モデルに基づく方法を用いることが主流となるものと思われる。

断層モデルに基づく強震動予測手法を適用するには、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を評価しておく必要がある。

まず、震源特性については理論的検討と経験則の整合性の観点から中小規模地震の震源スペクトルが ω^{-2} 則に従うことが示されている^{10), 11)}。また、大地震の震源特性の一つとして、断層破壊伝播による指向性 (Directivity) が挙げられる。この断層破壊伝播による指向性が兵庫県南部地震の地震動の大きさやその分布に大きな影響を与えたことは周知のことである。この影響は、経験的グリーン関数重ね合わせ法^{12), 13)}のように小断層の破壊による時刻歴波形を断層破壊伝播による時間遅れなどを考慮しながら足し合わせることによって、考慮することが可能である。さらに、大地震での震源特性の一つとして断層すべりの不均一性が挙げられる。いくつかの大地震についてはその断層すべり量分布に関する検討がなされている^{例えば 14)~16)}。Somerville *et al.* はこれらの成果を統計処理し、各種断層パラメータと地震モーメントとの相関性などの検討を行っており¹⁷⁾、断層モデルを設定する際に有益な情報を提供している。

伝播経路特性とは震源から地震基盤までの波動伝播媒

質における地震波の幾何減衰と波動伝播媒質における粘性減衰や散乱減衰のことである。幾何減衰は震源距離で、粘性減衰と散乱減衰はその見かけの減衰を示す Q^{-1} 値で表現される。この Q^{-1} 値は観測記録から震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を分離する方法¹⁸⁾(以下「スペクトルインバージョン手法」と称す)、二重スペクトル比法¹⁹⁾などにより評価することができる。

サイト増幅特性を評価する方法としては、ボーリングデータなどの地盤情報から1次元重複反射理論や2次元・3次元地下構造に対する数値シミュレーションにより評価する方法、スペクトルインバージョン手法¹⁸⁾、常時微動観測記録の水平動と上下動のスペクトル比をサイト増幅特性とみなす方法²⁰⁾などがある。また、鶴来・ほかは観測記録から震源特性と伝播経路特性を取り除くことにより、地震基盤に対するサイト増幅特性を評価する方法を提案している²¹⁾。この方法には、「岩盤サイトにおいて表層付近の風化に起因する増幅も評価できる」等の特徴がある。しかし、当時の地震観測網の制約により、鶴来・ほかの検討²¹⁾(以下、「既検討」と称す)で得られたサイト増幅特性はやや過小評価であったことを著者は危惧している。またその後、独立行政法人・防災科学技術研究所の強震ネットなど地震観測網の整備が進んでいる。

そこで本研究では、関西地域において断層モデルに基づく強震動予測を行なうための基礎資料を得ることを目的に、鶴来・ほかによる手法²¹⁾を用いて、地震観測点におけるサイト増幅特性の再評価および追加評価を行なう。

2. Q 値の評価

サイト増幅特性を評価するための Q 値をスペクトルインバージョン手法¹⁸⁾により評価した。解析には関西地域で発生した5地震の、関西地震観測研究協議会による9観測点での観測記録を用いた。解析に用いた地震諸元を表-1に、地震の震央および地震観測点の位置を図-1に示す。解析に用いた地震はいずれも震源深さが11~16kmの地殻内で発生した気象庁マグニチュード M_J が3.8~4.3の中小規模地震である。スペクトルインバージョン

表-1 スペクトルインバージョン解析に用いた地震

	発震時	震源位置	D (km)	M_J
1	1999.02.12 03:16:46	京都・大阪府境	15	4.0
2	1999.08.02 04:58:14	大阪湾	14	3.9
3	2000.05.16 04:09:26	京都・大阪府境	16	4.3
4	2000.05.21 10:42:35	京都・大阪府境	15	3.8
5	2000.08.27 13:13:14	大阪府	11	4.1

D : 震源深さ, M_J : 気象庁マグニチュード

ン解析ではリファレンスサイトを設定する必要があるが、これはDIGとした。DIGは京都市伏見区醍醐山中のトンネル内観測点である。

得られた $Q(f)^{-1}$ を図-2に示す。佐藤は世界各地における Q 値に関する研究成果をまとめ、「 Q 値は 0.5Hz 以上の周波数領域では、周波数の 0.5~0.9 乗に比例することが多い。強震加速度記録のスペクトル比を用いた推定では 1.0 乗となる場合もありうる。」としている²²⁾。これ

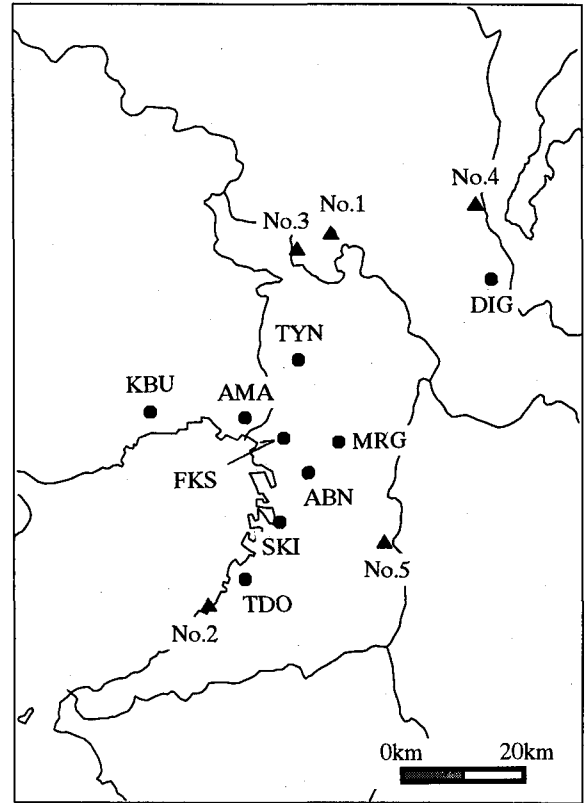


図-1 スペクトルインバージョン解析に用いた地震の震央(▲)および地震観測点(●)の位置

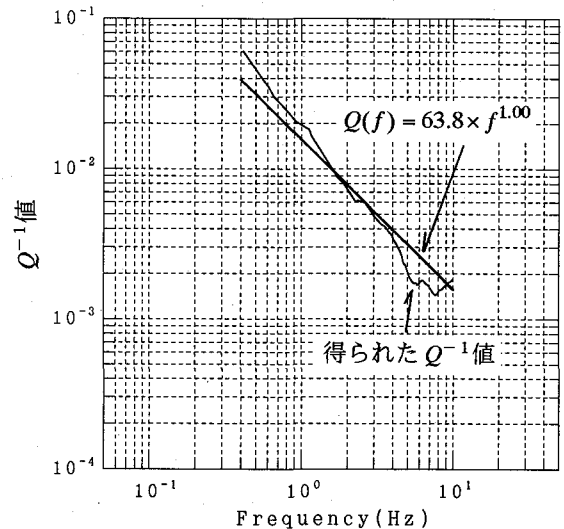


図-2 得られた Q^{-1} 値

と既往の Q 値の評価事例^{例えは 23)}における解析条件と結果を参考とし、総合的に判断して、次式でモデル化することとした。この関係を図-2に併記する。

$$Q(f) = 63.8 \times f^{1.00} \tag{1}$$

3. サイト増幅特性の評価

3. 1 サイト増幅特性評価手法

解析に用いたサイト増幅特性評価手法の概念を図-3に示す。この手法ではサイト増幅特性を求める際の基準として、対象とする地震について観測点で得られると考えられる「基盤スペクトル」²⁴⁾という概念を導入する²¹⁾。その「基盤スペクトル」(図-3中太線)と観測記録から得られるスペクトル(図-3中細線、以下「観測スペクトル」と称す)の比をサイト増幅特性と定義する。複数の地震に対して観測スペクトルと「基盤スペクトル」の比を求め、これらの平均を取ることで、対象地点の平均的サイト増幅特性を得ることができる。

ここでいう「基盤スペクトル」とは、対象とする地震の地震モーメント M_0 ・コーナー周波数 f_c ・高周波数限界 f_{max} ²⁵⁾を持ち、 ω^{-2} 則に基づくスペクトル特性に幾何減衰と Q^{-1} 値による減衰および自由地表面の影響による増幅を考慮したものである。

観測スペクトルは水平方向2成分の観測波形のS波主要動部を含む40秒間をフーリエ変換し、平滑化の後、ベクトル和を取ることで得られる。この解析区間には表面波部分も含まれており、得られるサイト増幅特性

にはこの影響も考慮される。
なお、高周波数限界 f_{max} に関してはその生成要因・地域依存性・地震規模依存性など未解明な点が多いのが現状であり、本検討では「基盤スペクトル」を求める際に、これを考慮しないこととした。

3. 2 検討対象地点と解析に用いた地震

検討対象地点は関西地震観測研究協議会による23観測点(以下、「関震協ネット」と称す)および独立行政法人・防災科学技術研究所強震ネット(K-Net)²⁰⁾の大阪府

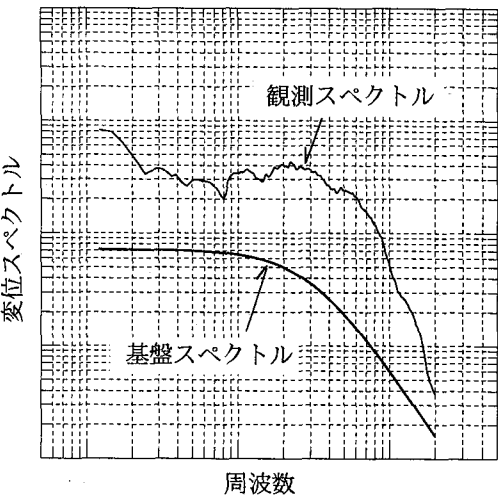


図-3 サイト増幅特性算出の概念図

表-2 サイト増幅特性算出に用いた地震とその諸元

	発震時	震源位置	D (km)	M_J	M_0 (dyn cm)	f_c (Hz)	$\Delta \sigma$ (bar)	M_w	備考
1	1995.07.24 04:00:01.3	京都・大阪府境	14	4.1	8.98×10^{21}	2.38	22.0	3.9	
2	1995.10.14 02:04:05.8	大阪湾	15	4.5	1.00×10^{23}	1.90	125.0	4.6	
3	1996.05.29 17:37:45.9	京都・大阪府境	17	3.8	3.24×10^{21}	3.16	18.5	3.6	
4	1996.07.18 13:44:15.4	京都・大阪府境	15	4.0	8.86×10^{21}	2.50	25.1	3.9	
5	1997.09.07 02:19:35.7	京都・大阪府境	18	4.1	1.83×10^{22}	2.10	30.8	4.1	
6	1999.02.12 03:16:45.8	京都・大阪府境	15	4.0	1.19×10^{22}	3.06	62.0	4.0	*
7	1999.03.16 16:43:35.6	滋賀県北西部	12	4.9	2.11×10^{23}	0.83	21.6	4.8	
8	2000.05.16 04:09:25.9	京都・大阪府境	16	4.3	3.50×10^{22}	1.20	11.0	4.3	*
9	2000.05.20 23:39:12.7	京都・大阪府境	16	3.7	2.91×10^{21}	3.94	32.3	3.6	
10	2000.05.21 10:42:34.8	京都・大阪府境	15	3.8	1.21×10^{22}	2.87	52.2	4.0	*
11	2000.08.21 15:18:09.8	京都・大阪府境	15	3.8	2.87×10^{21}	4.23	39.6	3.6	
12	2000.08.27 13:13:13.7	大阪府	11	4.1	1.38×10^{22}	2.39	34.4	4.0	*

D : 震源深さ, M_J : 気象庁マグニチュード
 M_0 : 地震モーメント, f_c : コーナー周波数, $\Delta \sigma$: 応力降下量, M_w : モーメントマグニチュード
* : スペクトルインバージョン解析に用いた地震

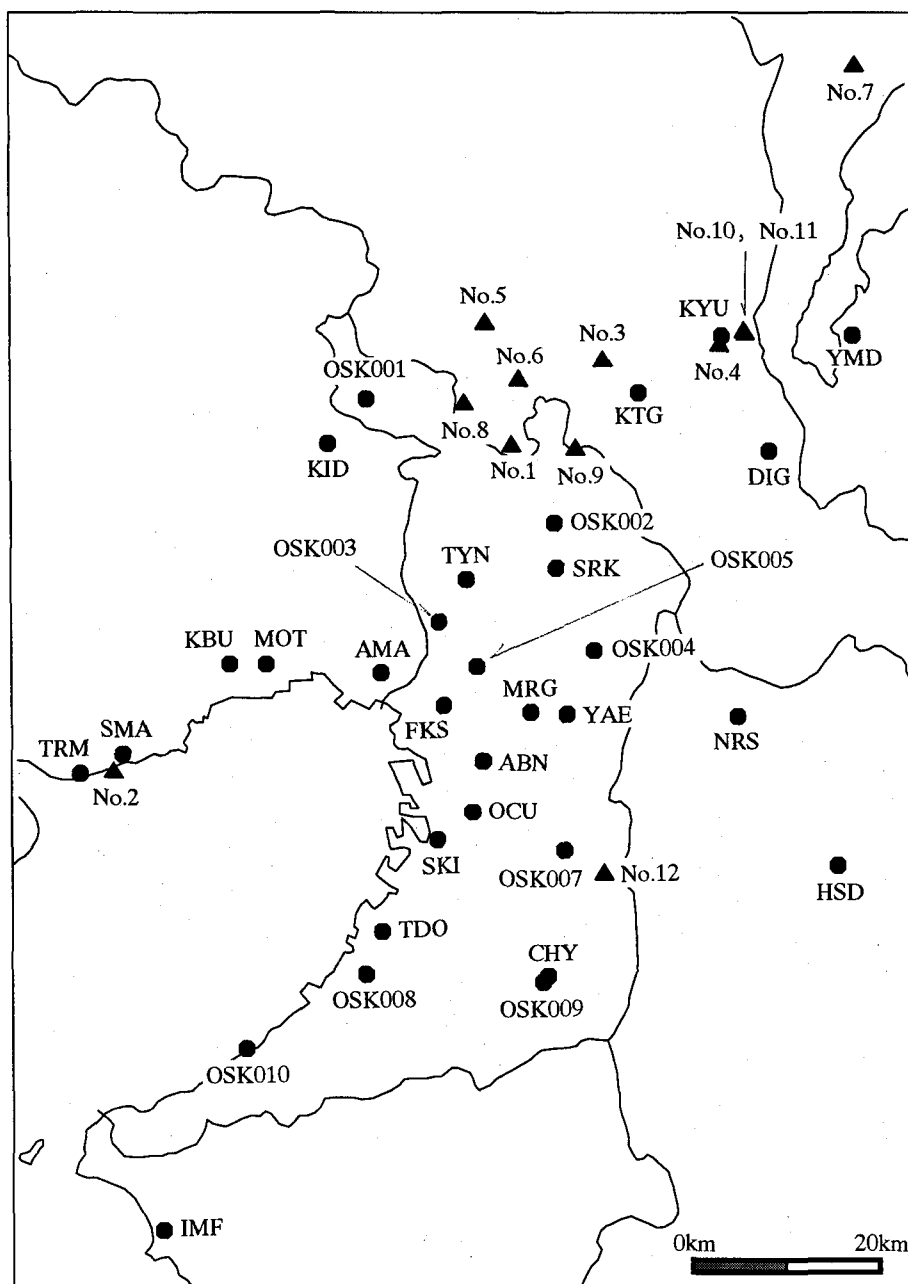


図-4 検討対象地点 (●) および解析に用いた地震の震央位置 (▲)

域の9観測点の計32地点である。このとき、解析可能な地震が1地震しかないKMN(関震協ネット)やOSK006(K-Net)は除外している。なお、関震協ネットでは速度型強震計により、K-Netでは加速度型強震計により観測が行なわれている。

検討に用いた地震の諸元を表-2に、これらの地震の震央および検討対象地点の位置を図-4に示す。解析に用いた地震は、いずれも震源深さが11~18kmの地殻内で発生した気象庁マグニチュード M_J が3.7~4.9の中小規模地震である。解析に用いた地震数はKYU(関震協ネット)において最多の12地震、IMF(関震協ネット)・OSK008・OSK009・OSK010(いずれもK-Net)において最少の3地

震である。検討に用いた12地震のうち4地震は Q 値を評価する際に用いた地震であり、表-2中備考欄に*印をつけた。基盤スペクトルの算出に必要な Q 値は式(1)で示される特性を用いた。各地震の地震モーメント M_0 とコーナー周波数 f_c はDIGにおける観測記録を用いて算出した。算出したそれぞれを表-2に併記する。既検討²⁾では風化岩上の観測点であるKBUにおける記録を用いて地震モーメントとコーナー周波数を算出した。本検討においてはより強固な岩盤観測点であるDIGにおける観測記録を用いることにより、これらをより正確に評価できるものと思われる。

算出した地震モーメントの妥当性を検討するため、まず、

独立行政法人・防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 (Freesia)²⁷⁾による地震モーメントとの比較を行なった。本検討に用いた12地震のうち7地震についてはFreesiaで地震モーメントが得られており、本検討で算出した地震モーメントはFreesiaで得られたものの1.2~2.0倍であった。2000年鳥取県西部地震の断層モデルに関する検討が多くの研究者によりなされている^{例えば 28)}が、これらの検討で得られた地震モーメントはFreesiaで得られたものの1.1~2.5倍程度である。鳥取県西部地震のDIGにおける観測記録から地震モーメントを算出すると、Freesiaによるものの2.3倍程度となった。以上のことを考えれば、本検討における1.2~2.0倍の差は問題ないものと判断できる。また表-2には、Brune^{29), 30)}による

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \times \beta \times \left(\frac{\Delta \sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (2)$$

から得られる応力降下量 $\Delta \sigma$ (bar) を示した。ここで、 β は地震地盤のせん断波速度である。この値は通常 3.5~4.5 km/sec であり³¹⁾、ここでは 3.6 km/sec を用いた。地震モーメント M_0 の単位は dyne·cm である。こうして得られた応力降下量は 10~120 bar 程度となった。既往の日本地殻内地震の応力降下量は数 bar~200 bar 程度に分布しており³²⁾、本検討で得られた値は概ね妥当な値と言える。さらに、佐藤³³⁾による

$$M_w = \frac{\log M_0 - 16.1}{1.5} \quad (3)$$

から得られるモーメントマグニチュード M_w も示したが、これと気象庁マグニチュードとの差は ± 0.2 以内である。以上の検討から表-2に示した地震モーメントやコーナー周波数は概ね妥当な値と言える。なおDIGにおける記録から、解析に用いた地震の震源スペクトルが ω^{-2} 則をほぼ満足することを確認している。

3. 3 サイト増幅特性評価結果

得られたサイト増幅特性を表層地質毎に整理した。岩盤上あるいは風化岩上の観測点のサイト増幅特性を図-5に、洪積層上の観測点(表層にごく薄い沖積層を有する観測点も含む)のそれを図-6に、沖積層上の観測点のそれを図-7に示す。図中、太線がサイト増幅特性の平均値、細線が平均値 $\pm$ 標準偏差である。図左上には観測点名を、その右隣には解析に用いた地震数を示した。観測記録の SN 比から、結果の有効周波数範囲は関震協ネットでは 0.1 ないし 0.2~10 Hz、K-Net ではほぼ 0.4~10 Hz であり、この周波数範囲のみを示した。以下、得られたサイト増幅特性について検討する。

(1) 岩盤上あるいは風化岩上観測点の増幅特性

DIG における増幅率はほぼ全周波数領域にわたって

1.0~1.5 倍で、フラットな傾向を示している。このことは、周波数の 1.0 乗に比例するという形で Q 値を与えたことの妥当性を示すものと考えられる。HSD では 4~6 Hz でやや大きく、2 倍程度の増幅率となっている。強風化岩と思われる KBU・CHY では 3~5 倍程度の増幅が見られ、OSK001・OSK009 では一部周波数で 10 倍近い増幅が見られる。また、CHY や OSK009 のように高周波数領域に顕著な増幅を示す地点がある一方、KBU や KID のように顕著なピークを持たない地点もあり、系統的な特徴は認められない。これは地点毎に風化層厚や風化の程度が大きく異なっているためではないかと考えられる。

(2) 洪積層上観測点の増幅特性

増幅率は概ね 2~6 倍の範囲である。その周波数特性は以下のように大きく 2 つのタイプに分類できる。

- ・タイプ I...増幅率が低周波数領域では小さいが、高周波数領域では大きいタイプ (MOT・TRM・KYU・OSK007)
- ・タイプ II...低周波数領域も高周波数領域と同程度あるいはそれ以上大きいタイプ (ABN・OCU・SKI・TDO)

洪積地盤では地盤の固有周期が比較的短いために、高周波数領域で増幅率が大きくなるのが一般的傾向と言える。ABN など 4 地点は大阪堆積盆地構造の中央部に位置し、長周期表面波の影響を受けるために、低周波数領域の増幅率も大きくなったものと考えられる。一方、MOT など 4 地点は盆地構造の端部に位置するため表面波の影響が小さく、上述の一般的傾向のみが現れたものと思われる。

このほか、本検討の結果では TYN・OSK002 のように上記 2 つのタイプのいずれにも分類できない地点も存在している。これらの地点ではタイプ I およびタイプ II の中間的な傾向が現れたものと考えられる。

(3) 沖積層上観測点の増幅特性

KTG・YMD・NRS・IMF 以外の大阪堆積盆地構造内の観測点では、低周波数領域で大きく、高周波数領域になると小さくなる傾向がほぼ共通して見られる。沖積層が厚い AMA や MRG などでは 10 倍を越える増幅率となっており、沖積層が薄い SMA や OSK003 などでは 4~8 倍の増幅率となっている。また、増幅率が減少傾向に遷移する周波数は 2~8 Hz で、地点により大きく異なっている。低周波数領域で増幅率が大きいのは、堆積層が厚く地盤の固有周期が長いこと、盆地構造の中央部に位置するため長周期表面波の影響を受けやすいこと、に起因するものと考えられる。

KTG (京都)・YMD (滋賀)・NRS (奈良)・IMF (和歌山) では大阪盆地構造内の観測点とはやや異なり、0.1~0.3 Hz の周波数領域での増幅率は小さくなっている。

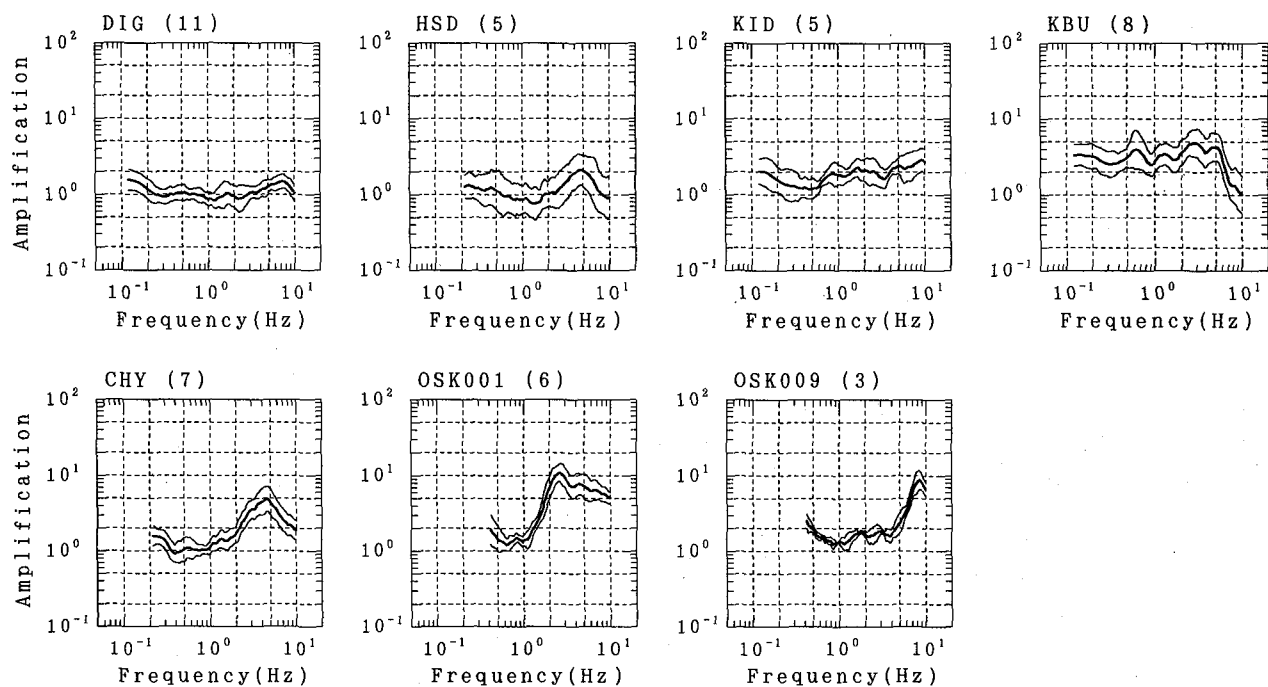


図-5 得られたサイト増幅特性 (岩盤上あるいは風化岩上観測点)

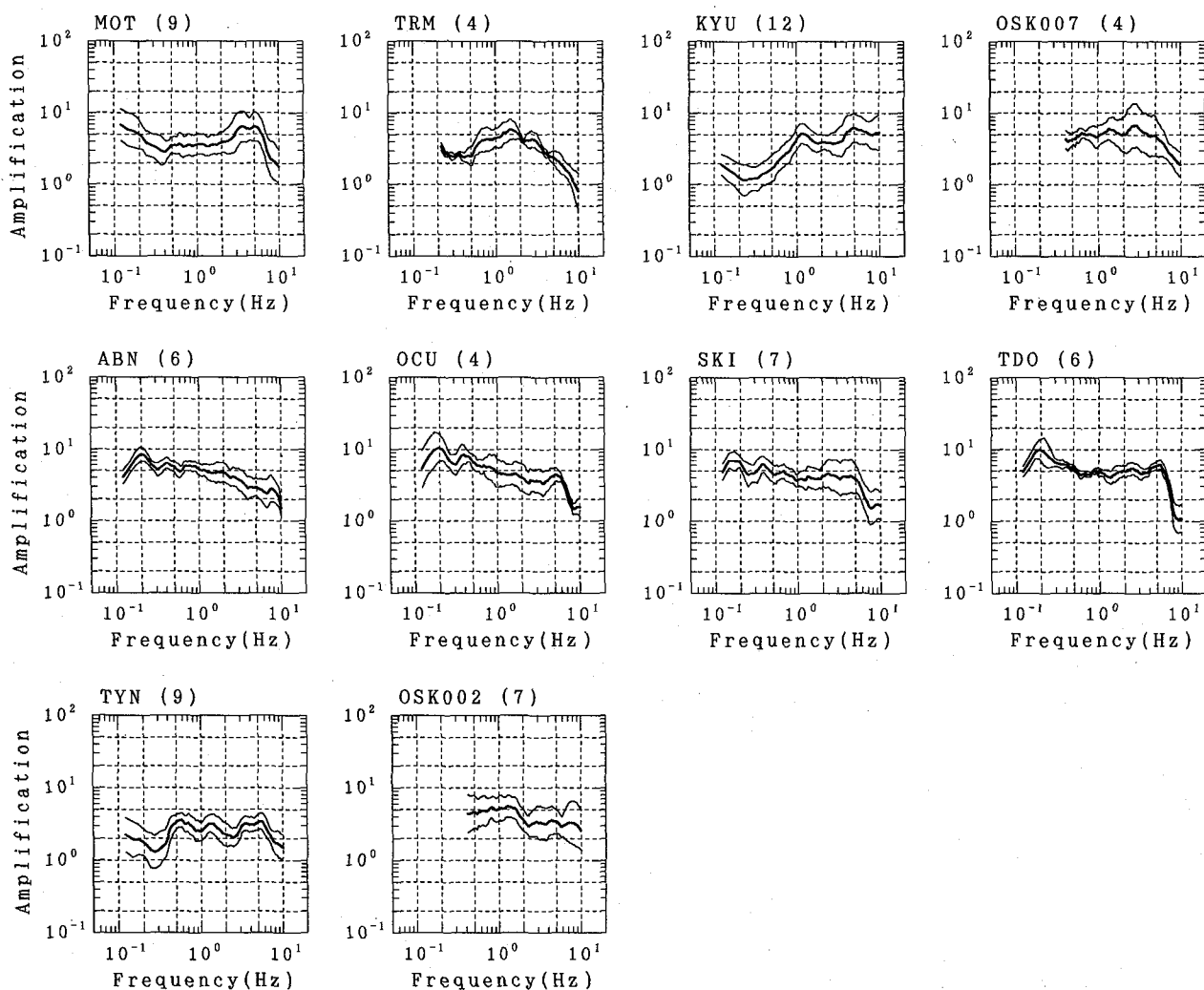


図-6 得られたサイト増幅特性 (洪積層上観測点)

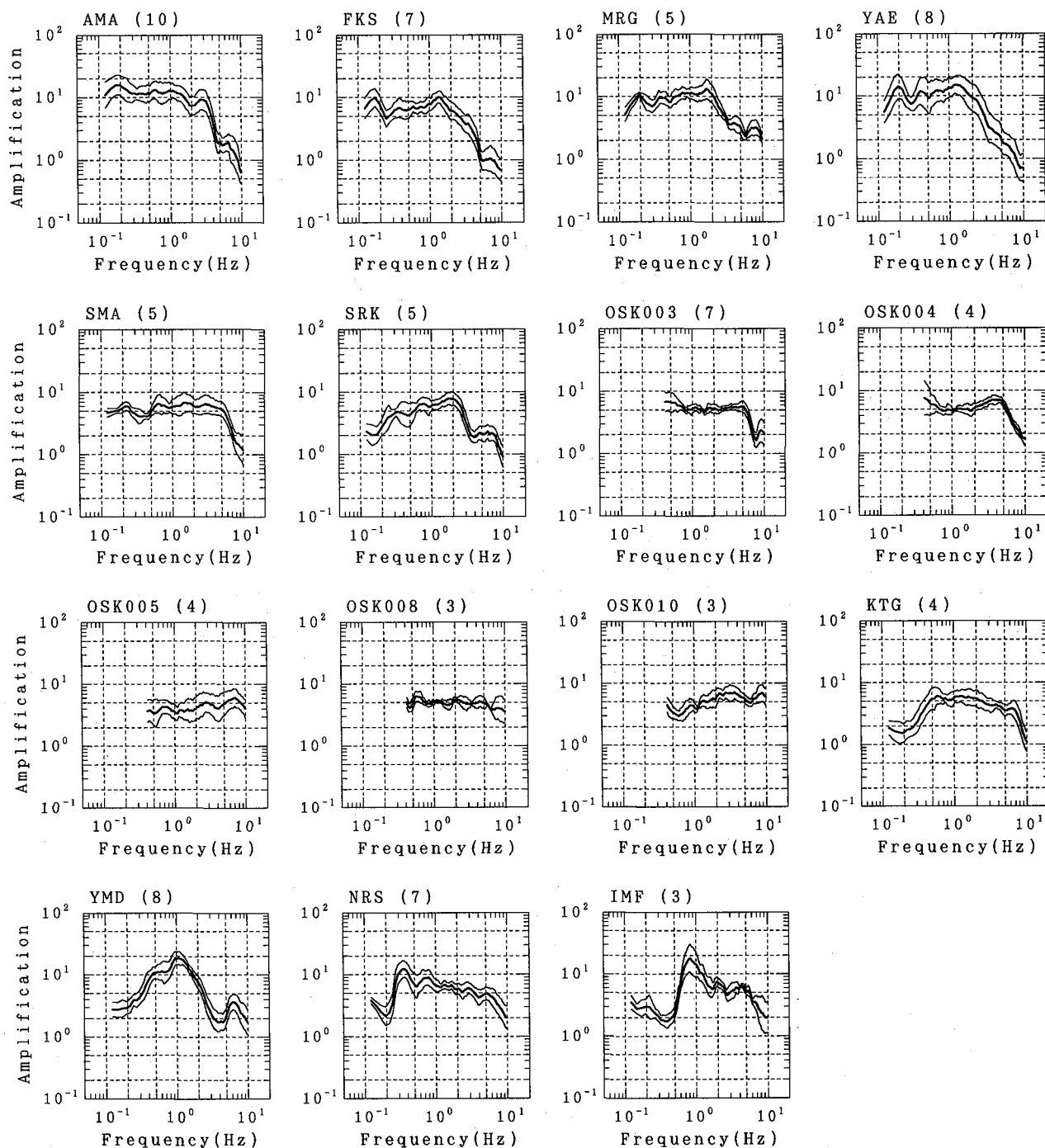


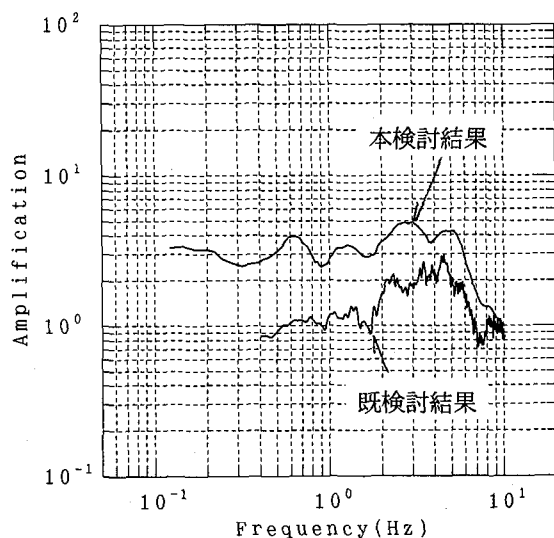
図-7 得られたサイト増幅特性 (沖積層上観測点)

3. 4 既検討結果²¹⁾との比較

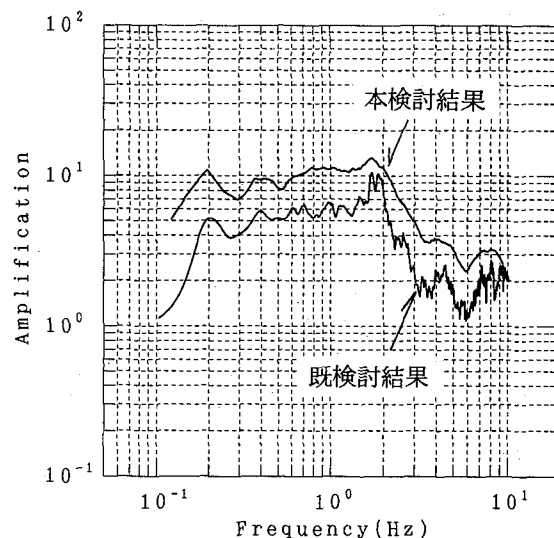
前述した通り、既検討²¹⁾ではその当時の地震観測網の制約から風化岩上の観測点 (KBU) における記録を用いて地震モーメントとコーナー周波数を推定した。したがって、その記録には風化層に起因するサイト増幅特性が含まれている可能性があり、推定された地震モーメントはやや過大評価、つまり得られたサイト増幅特性はやや過小評価であることが危惧される。そこで、本検討では

より強固な岩盤点の観測記録を用いることで地震モーメントとコーナー周波数をより正確に推定した。ここでは既検討結果との比較を行なう。

図-8に KBU および MRG (いずれも関震協ネット) における比較検討結果を示す。いずれの地点においても既検討結果は本検討結果の概ね半分程度であり、既検討結果が過小評価であったことが確認された。

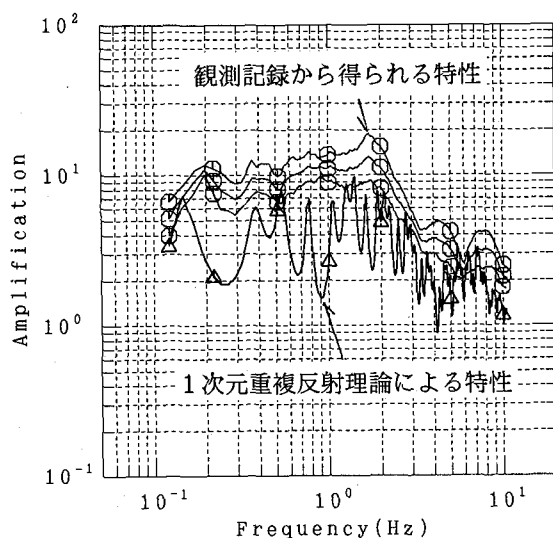


(1) KBU

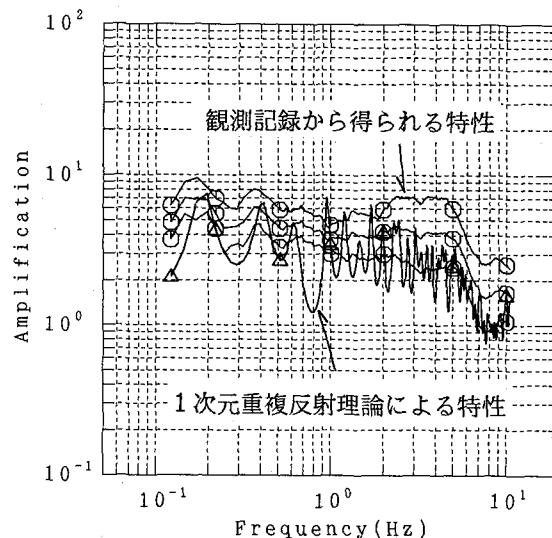


(2) MRG

図-8 既検討結果との比較



(1) MRG



(2) SKI

図-9 1次元重複反射理論による増幅特性との比較

3. 5 1次元重複反射理論による増幅特性との比較

得られた結果を1次元重複反射理論より得られる増幅特性と比較した。比較の対象サイトはMRGおよびSKI（いずれも関震協ネット）である。MRGではボーリング調査・PS検層・動的3軸試験が実施されており³⁴⁾、工学的基盤面以浅についてはこれらの結果から地盤モデルを設定した。SKIについてはN値のみが実測されているため³⁵⁾、せん断波速度はN値との関係式³⁶⁾により求め、減衰定数はMRGにおける実測値と同等とした。工学的基盤以深についてはいずれの地点も大阪堆積盆地構造の深層構造³⁷⁾により設定した。比較検討結果を図-9に示す。図中、○が本検討により得られた増幅特性の平均値

および平均値±標準偏差、△が1次元重複反射理論による増幅特性である。

SKIについては、1次元重複反射理論による増幅率は観測記録から得られる増幅特性の平均値±標準偏差とほぼ対応していることがわかる。一方MRGについては、1次元重複反射理論による増幅率に比べて観測記録から得られる増幅特性の方がやや過大となった。この原因として、地盤定数や地下構造の決定誤差などが考えられる。また、特に低周波数領域では、観測記録に長周期表面波の影響が含まれていることも原因の一つであると考えられる。しかし、卓越振動数は一致しており、全般的には調和的な結果が得られたといえる。なお、ここで示した2地点以外についても概ね調和的な結果が得られた。

4. おわりに

本研究では、関西地域の32の地震観測点におけるサイト増幅特性をその観測記録を用いて評価した。得られた結果は対象地点の地盤状況と整合し、さらに1次元重複反射理論による増幅特性とも概ね調和的であった。この結果は事前に評価した Q 値とともに、断層モデルに基づく強震動予測を行なう上で貴重な情報を提供するものと思われる。

謝辞

査読者の方々には有益な御指摘を頂きました。また、財団法人 地域 地盤 環境 研究所の香川敬生氏には解析を進めるにあたり貴重な御意見を頂きました。解析には独立行政法人・防災科学技術研究所の強震ネット (K-Net)・広帯域地震観測網 (Freesia) および関西地震観測研究協議会による観測記録を使用いたしました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 香川敬生, 入倉孝次郎, 武村雅之: 地震動予測の現状と将来の展望, 地震2, Vol.51, pp.339-354, 1998.
- 2) Kanai, K.: Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp.309-325, 1957.
- 3) Joyner, W. B., and Boore, D. M.: Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records from the 1979 Imperial Valley -California- Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.2011-2038, 1981.
- 4) Fukushima, Y., and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.80, pp.757-783, 1990.
- 5) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.142-143, 1990.
- 6) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.430, pp.1-9, 1991.
- 7) 入倉孝次郎: 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム, pp.91-100, 1996.
- 8) 大阪府土木部: 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, pp.4-103, 1997.
- 9) 社団法人土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言, 1996.
- 10) Aki, K.: Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 11) Brune, J. N.: Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 12) Hartzell, S. H.: Earthquake aftershocks as Green's function, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 13) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 14) Hartzell, S. H., and Heaton, T. H.: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1553-1583, 1983.
- 15) Wald, D. J., and Heaton, T. H.: Spatial and temporal distribution of slip of the 1992 Landers, California earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, pp.668-691, 1994.
- 16) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, K., and Hoshiba, M.: Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, *Journal of Physics of the Earth*, Vol.44, pp.473-487, 1996.
- 17) Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D. J., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 18) 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, Vol.39, pp.579-593, 1986.
- 19) 松澤 暢, 長谷川昭, 高木章雄: 二重スペクトル比による Q 値の推定, 地震学会講演概要集昭和59年度秋季大会, C75, 1984.
- 20) 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, 鉄道研究報告, Vol.4, pp.18-27, 1988.
- 21) 鶴来雅人, 田居 優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震2, Vol.50, pp.215-227, 1997.
- 22) 佐藤春夫: リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰 —ランダムな不均質構造による一次散乱理論—, 国防防災科学技術センター研究報告, Vol.33, pp.101-186, 1984.
- 23) Kato, K., Takemura, M., Ikeura, T., Urao K., and Uetake T.: Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method,

- Journal of Physics of Earth*, Vol.40, pp.175-191, 1992.
- 24) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high - frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 25) Hanks, T. C. : f_{max} , *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.72, pp.1867-1879, 1982.
- 26) 独立行政法人・防災科学技術研究所：強震ネットホームページ (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)
- 27) 独立行政法人・防災科学技術研究所：広帯域地震観測網ホームページ
(<http://argent.geo.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>)
- 28) 堀川晴央：2000年鳥取県西部地震の断層モデル,
(<http://www.gsj.go.jp/~horikawa/2000Tottori/source.html>)
- 29) Brune, J. N. : Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 30) Brune, J. N. : Correction, *Journal of Geophysical Research*, Vol.76, p.5002, 1971.
- 31) 金森博雄：地震の物理，岩波地球科学選書，p.120, 1991.
- 32) 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，p.89, 1989.
- 33) 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，p.23, 1989.
- 34) 関西地震観測研究協議会，中央開発株式会社：森河内観測点における地盤調査報告書，1999.
- 35) 川崎地質株式会社：湊小学校改築工事の内地質調査業務報告書，1981.
- 36) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，p.121, 1990.
- 37) 香川敬生，澤田純男，岩崎好規，南莊 淳：大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化，第22回地震工学研究発表会，pp.199-202, 1993.

(2001年9月14日受付)