

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

EVALUATION OF HORIZONTAL AND VERTICAL STRONG GROUND MOTIONS USING EMPIRICAL SITE-SPECIFIC AMPLIFICATION AND PHASE CHARACTERISTICS

古和田 明*¹, 田居 優*², 岩崎好規*³, 入倉 孝次郎*⁴

Akira KOWADA, Masaru TAI, Yoshinori IWASAKI

and Kojiro IRIKURA

The authors present a method to evaluate ground motions at a site which is based upon the site specific experimental spectral amplitude and phase characteristics for horizontal and vertical ground motions based on records at the observed site. The time domain characteristics are now given by the site specific phase spectra rather than a standardized envelop curve in time domain which has been a common practice to obtain time history. The recorded motions in Japan are used to obtain the synthesized Green's functions and predicted waves by summing this Green's functions were compared well with the recorded motions including 1995 Hyogo-Ken-Nambu earthquake. The method is expected to expand the ability of estimation of strong ground motions to vertical motions to improve the phase characteristics.

Keywords: *inversion, spectral ratio, site-specific amplification, group delay time $t_{gr}(f)$, synthesized Green's function, HYOGO-KEN-NANBU Eq.*

インヴァージョン、スペクトル比、サイト増幅特性、群遅延時間
合成グリーン関数、兵庫県南部地震

1. はじめに

近年、断層の面的な広がりを持つ破壊過程を考慮して、小地震動記録を空間的・時間的に重ね合わせる方法(経験的グリーン関数法)により、強震動が精度よく再現できることが示されてきた^{1),2)}。また水平動だけではなく、上下動への適用の可能性も検討されつつある³⁾。従来、観測記録の回帰による統計的手法^{4)~6)}で強震動評価を行っていたものとは違い、この手法は震源の物理的なモデルを考慮した合理的な強震動評価手法とすることができる。

設計入力地震動の評価にこの経験的グリーン関数法を応用する場合、水平動および上下動のグリーン関数となるべき小地震動波形が無いことが多い。震源から観測点までの伝播経路およびサイト特性の地域性を考慮したグリーン関数を、工学的に重要な高周波数域まで理論的に評価することは未だ困難であるので、観測記録から伝播特性としてのQ値およびサイト増幅特性を経験的にあらかじめ推定した上で、震源特性を確率論的に評価した小地震の波形記録を合成する⁷⁾ことで、経験的グリーン関数のかわりに用いる統計的波形合成法が現在実用化されつつある。水平動については、少なくともその主要動はS波の直達波成分が卓越しているため、S波として震源・伝播経路・サイト特性の評価が可能であるが、上下動では主要動を構成する波の性質が特定できないので、この方法が使えないのが現

状である。ここでは、水平動とともに上下動についても主要動の波動特性を検討し、グリーン関数の合成およびそれによる水平動、上下動の強震動評価を合理的に行う手法を提案する。

これまで、上下動における主要動の特性、特に震源スペクトル、Q値の特性およびサイトの増幅特性は観測事実としてあまり明らかにされていない。ここでは、上下動についても水平動と同じ地震のデータセットを用いて、震源・伝播・サイト特性の分離を水平動および上下動でそれぞれ独立に行い、それらの特性の違いを経験的および理論的に検討する。本論文で対象としているのはS波到達以後の波で、P波初動部分は除外している。また、水平動のスペクトルとしてはNSとEW成分のベクトル和を用い、上下動はUD成分のスペクトルを用いている。

統計的波形合成法では、地震動の震源継続時間を与えて包絡形状を決定し、位相ランダム仮定を用いて波形を合成することが多いが、その与え方が任意的で不明瞭な面がある。水平動はS波の直達波成分と考えることでそのパラメータが与えられるが、上下動は波の特性が特定できないためパラメータの意味がはっきりしなくなる。この問題を克服するため、本研究では包絡線の形状や継続時間を定義するのではなく、上下動と水平動を対象に地震動の震源・伝播・サイトでのそれぞれの位相特性を経験的に評価する方法を導入した。

*¹ 関西電力土木建築室 副部長・工修

*² 大阪土質試験所技術第5部 工修

*³ 大阪土質試験所 所長・工修

*⁴ 京都大学防災研究所 教授・理博

Deputy Manager, Office of Civil Engineering and Architecture, The Kansai Electric Power Co., Inc., M. Eng.
Geo-Research Institute, Osaka Soil Test Laboratory, M. Eng.
Geo-Research Institute, Osaka Soil Test Laboratory, M. Eng.
Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Sci.

ここでは波形の時間的な変動特性に直接関係している群遅延時間特性^{9)~10)}を観測記録から抽出して位相特性を評価し、それをを用いて小地震動記録を合成したものを経験的グリーン関数のかわりに用いることとした。経験的グリーン関数としての小地震動記録が得られていない地点での強震動評価については、水平動および上下動とも本論文で提案する方法でグリーン関数を合成し、重ね合わせることで強震動評価が可能となる。本論文ではその一例として、1995年兵庫県南部地震記録を用いることで、その強震動評価の予測精度を検討している。

2. 上下動の震源・伝播・サイト特性の評価方法

観測記録のスペクトル・インバージョンによる震源・伝播・サイト特性の分離は、過去多くの研究者により実施されている^{11)~18)}。インバージョンで分離された結果、震源スペクトル $S(f)$ 、伝播経路の $Q(f)$ 値およびサイト増幅スペクトル $G(f)$ が求められる。既往の研究では解析対象がすべて水平動である。インバージョンではAndrews(1982)¹¹⁾が指摘したように、解を求めるためには拘束条件が1つ必要であり、一般には岩盤上の観測点を基準点として拘束条件を与えることで解が求められている。

水平動のインバージョンについては、岩盤相当の基準点があれば、解析している波形の主要動をS波と考えると、その地点でのサイト増幅特性は $G(f)=2.0$ となる。したがって、解析される観測点に岩盤点が含まれていれば、分離された結果は相対的なものではなくなる。しかし、上下動ではその主要動をS波と考えると、岩盤点で $G(f)=2.0$ と仮定することができない。このように水平動では物理的に意味のある拘束条件を与えるために岩盤点としての観測点が必要であることと、更に上下動については岩盤点でも物理的に有意な拘束条件を与えることができないところに問題点があった。

上下動でのインバージョンにおける以上の問題点を検討するために、同じデータセットの水平動と上下動の主要動記録を用いて、それぞれ独立にインバージョン解析を行った。近地地震の水平動の主要動は、スペクトル・インバージョンから震源特性、伝播特性、地盤増幅特性ともS波が卓越しているとみなしてよいことが明らかになっている¹⁴⁾。そこで、ここでは上下動の波動特性を次の手法で検討する。(1)水平動記録を用いて、スペクトル・インバージョンにより、震源、伝播経路、地盤増幅特性の分離を行う。これらは既往の研究成果から、S波として取り扱うことができる。(2)次に、上下動記録を用いて適当なサイトを基準点としてインバージョンを行う。このとき、Q値については基準点とは独立に決定できる。上下動から得られたQ値と水平動からのものを比較することにより、基盤からの入射波の波動特性を特定することができる。(3)基盤の入射波が(2)で設定された後、基準点での水平動と上下動の観測スペクトル比とフォワード・モデリングで理論的に計算したスペクトル比の関係を比較検討する。この結果、両者が一致すればS波の問題として、水平動に対する上下動のサイト増幅特性を拘束条件として、全観測点でのサイト特性の推定が可能となる。

3. 解析に用いた観測記録

観測記録は、日本全国に展開された気象庁87型地震計(JMA87)^{20), 21)}による1988年7月から1992年7月までの加速度記録と、

関西地震観測研究協議会(CEORKA)により観測された1994年から1996年までの速度記録である。インバージョンに用いた観測点と震央位置との関係から解析ゾーンとして4つの領域を設定した。ゾーンAは北海道南部(JMA87型地震計で記録されたデータ)、ゾーンBは東北地方東部(JMA87)、ゾーンCは関東地方(JMA87)、ゾーンDは関西地方(CEORKAによって観測されたデータ)である。

解析に用いる観測点と地震の位置を図1(a), (b), (c), (d)に示す。ゾーンA, B, Cについては、火山フロントでQ値が低く、そこを通過する地震波は急激に減衰するため、地震波が火山フロントを通過しない領域の地震を選んだ。図中には波線を平面的に記入しているが、これはこの解析で求まるQ値がこの波線の領域における平均的なQ値であることを示している。

北海道、東北、関東地方(ゾーンA, B, C)での気象庁87型の記録は比較的マグニチュードが大き($M=5.1\sim 6.6$)、ほとんどが20km以深の深い地震で遠距離のものが多い。関西地方(ゾーンD)のCEORKAの記録は、ほとんどが兵庫県南部地震の余震記録であり、マグニチュードMは5.0以下で震源深さは20km以浅の記録である。

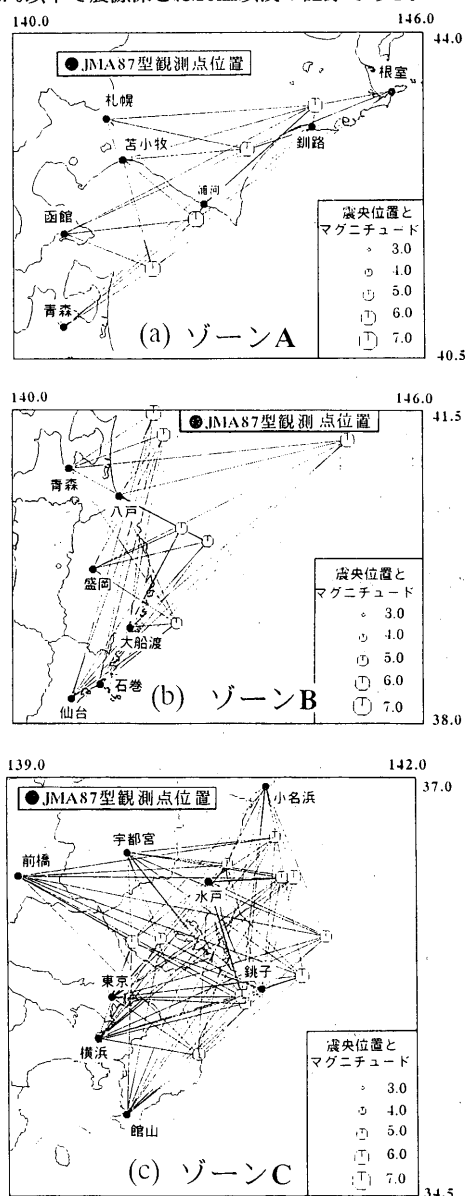


図1 各ゾーンで解析に用いた観測点と震央位置

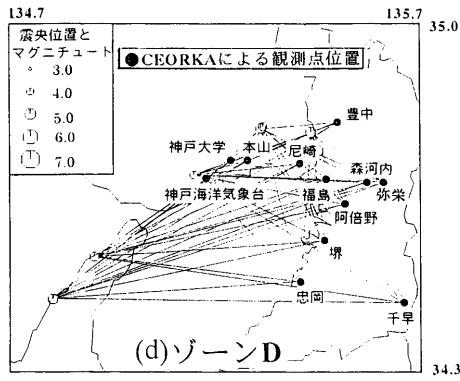


図1 各ゾーンで解析に用いた観測点と震央位置 (続)

4. 解析結果

スペクトル・インバージョンの解析結果の一例を図2に示す。図中縦棒線で示したものは、震源・Q値・サイト増幅の3項目の内2項を平均値で固定し、個々の地震記録の値を与えたときに残り1項目に生ずるバラツキの幅を標準偏差として示したものである。インバージョンは基本的には最小2乗法であるので、この指標がモデルの精度とみなすことができる。本解析で対象とした各ゾーンで平均対数標準偏差値として上記3項目および周波数領域で異なるが、0.1から0.2程度のもを目安とした。以後の議論はインバージョン結果(平均値)を用いて行う。

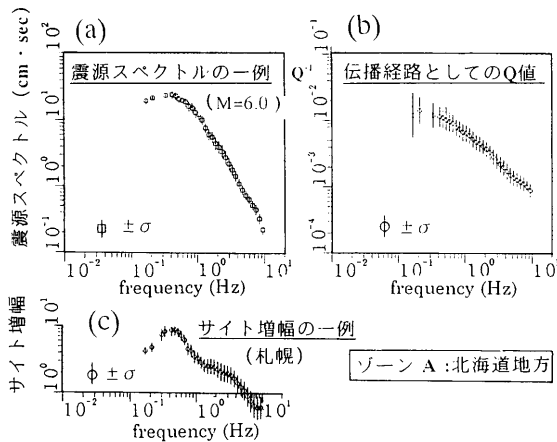


図2 スペクトル・インバージョン結果の一例

4.1 水平動及び上下動によるQ値の比較

スペクトル・インバージョンによる分離解析では指数関数で表せる減衰項からQ値が、震源やサイト増幅とは独立に求まる。分離されたQ値を水平動および上下動について図3に示す。図から明らかなように、水平動および上下動のQ値はほとんど一致している。すなわち、岩盤における入射スペクトルは水平動および上下動とも、基本的にS波そのものであると考えられる。Q値はAki (1980)²²⁾、佐藤 (1984)²³⁾により総括的に検討されているが、今回得られた結果はそれらと整合している。ゾーンA~Cでは解析に用いた地震がやや遠い ($\Delta=50\sim 100\text{km}$) ため、Q値は大きい傾向にあり $Q=(91\sim 143)f^{0.75\sim 1.0}$ で表される。ゾーンDでは近地地震のデータ ($\Delta < 50\text{km}$) であるこ

とから、Q値は他と比較して小さく $Q=37.0 f^{0.84}$ で表せる。

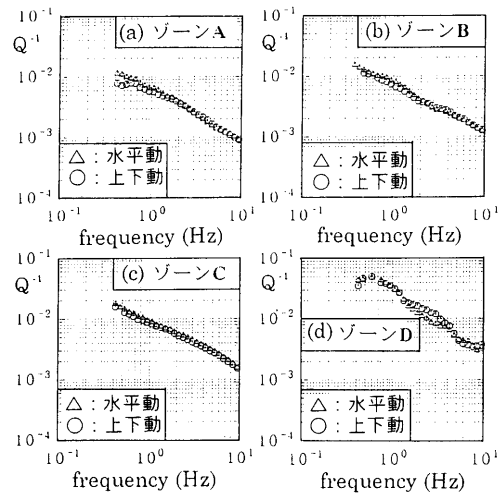


図3 各ゾーンにおける水平動および上下動のQ値

4.2 サイト増幅スペクトル

インバージョン結果のうち、サイト特性について検討する。インバージョンでは、サイト特性が基準点に対する相対的な値として決定される。基準点としてはできるだけ硬質な地盤を選定することとし、ゾーンAでは根室を基準点とした。ゾーンAとBでは青森を共有しており、これを介してゾーンBでも根室が基準となるよう補正した。ゾーンCでは岩盤深部での入射スペクトルに対する銚子でのサイト特性が求まっている¹⁰⁾ので、それを基準とした。ゾーンDでは神戸大学を基準点とした。

前節で示したように、水平動と上下動の伝播経路特性がほぼ同じであることから、上下動の主要動は基盤ではS波とみなすことができる。そこで、まず基盤にSV波が入射したときの地表での理論的応答と観測を比較した。ここでは震源の影響を除去するため、観測された水平動と上下動のスペクトル比を求め、平行多層構造への平面S波入射による理論的な応答を観測と比較することとし、その結果を図4に示す。基準点における地表面でのP波初動部の軌跡を別途検討し、基盤での入射角が10~20度程度と推定されたので、図中には基盤入射角10度と20度について求めた理論的なスペクトル比を併記した。図から根室(気象庁が決定した地盤種別では1種となっている²⁴⁾)については、付表1に示されるような表層と半無限層の2層構造により水平、上下スペクトル比がほぼ説明できる。また銚子は付表2²⁵⁾、26)、神戸大学では付表3²⁷⁾に示す実測の速度構造を用いて、ほぼ一致した結果が得られた。銚子では理論スペクトル比は2Hzと5Hz付近で落ち込んでいるが、観測のそれはよりなめらかとなっている。これは理論では単純な平行層モデルを仮定したためで、実際の構造はより複雑で入射方向に依存した変化などがあることを示しているが、観測は理論の包絡形状にほぼ一致する傾向を示している。このように理論との比較結果より、観測による水平動と上下動のスペクトル比は直下の表層地質に主に依存することが推定された。また、SV波入射に対する理論的応答と観測が一致することから、水平動と上下動の基盤入射スペクトルはほぼ同じであると考えられる。次に、基準点における水平動のサイト増幅特性を求める

必要がある。図5は基準点での地盤構造より、基盤にSH波が入射したときの理論的応答と、鶴来ほか(1997)の経験的方法²⁸⁾により推定した基準点でのサイト増幅特性を示したものである。ゾーンA, Bの基準点である根室では、10Hzまでは $G(f)=2.0$ と考えてよい。ゾーンCでは岩盤深部での入射スペクトルを基準としているので、銚子ではそのものが水平動のサイト増幅値となっている。ゾーンDで基準点としている神戸大学の観測点は、地表面ではなく坑道内で約10mの盛土層の下に位置するため、入射波と反射波の干渉により8Hz付近で谷となるスペクトル形状となっている。以上のように、基準点における絶対的な水平動のサイト増幅特性を求めることができ、更にはスペクトル比を介して上下動についてもその増幅特性を特定することができる。なお、各基準点で用いた地層構造と基準点以外の観測点におけるサイト増幅値を参考としてAPPENDIX 11(付図1)に示す。

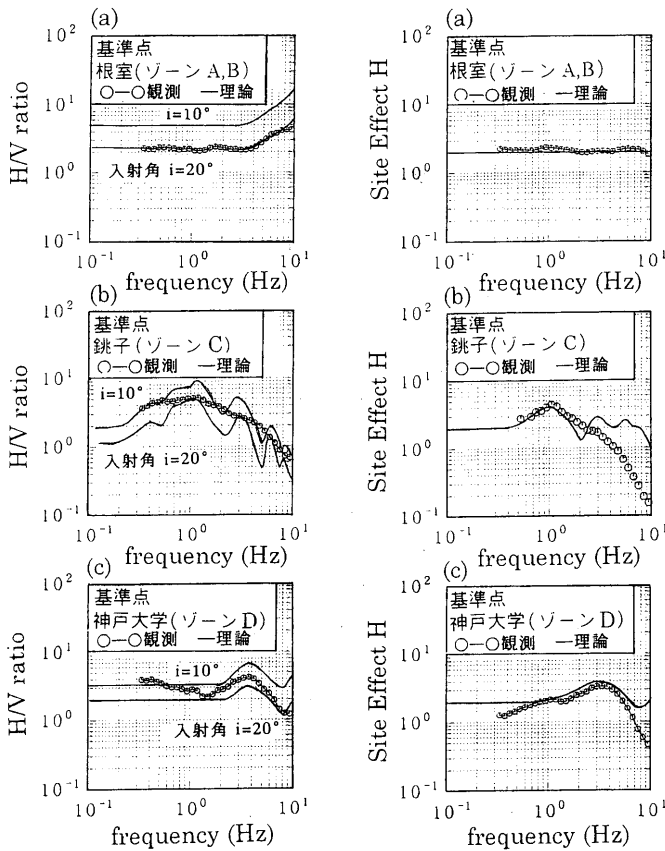


図4 基準点での水平動と上下動のスペクトル比の観測と理論の比較
図5 経験的、理論的に求めた水平動の増幅特性の比較

4.3 震源スペクトル

4.1に示したように、上下動におけるQ値は水平動によるものに等しいことから、上下動についてもS波として取り扱える。また、上下動のサイト増幅特性については、その地点での地盤構造に依存したS波の理論により説明できる。したがって、震源スペクトルについては上下動と水平動ともS波の震源スペクトルとしてほぼ同じであることが推定される。今回行ったインバージョンにより分離された震源スペクトルについて、北海道(ゾーンA)での上下動および水平動の例を図6に示す。上下動と水平動の主要動記録のスペクトル・インバージョンをそれぞれ別々に行っているにもかかわらず、

両者の震源スペクトルはほぼ値、形状とも一致している。

この震源スペクトルは低周波数で平坦な部分を持ち、コーナー周波数より高周波数ではほぼ-2乗で減衰しているのが分かる。なお図中に実線で示したものはAndrews(1986)²⁹⁾によるオメガ2乗モデルに対するフィッティング曲線である。この例からわかるように、震源スペクトルについてはオメガ2乗則が成立している。その傾向は他のゾーンの結果も同じであった。

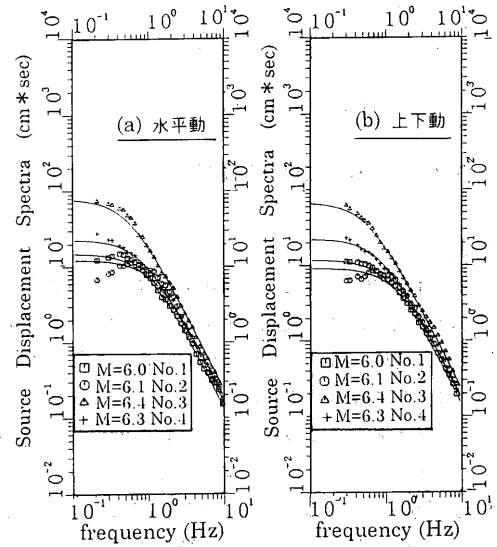


図6 震源スペクトルの一例(ゾーンA)

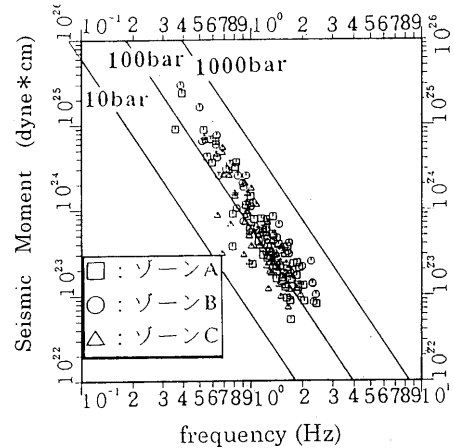


図7 地震モーメントとコーナー周波数の関係

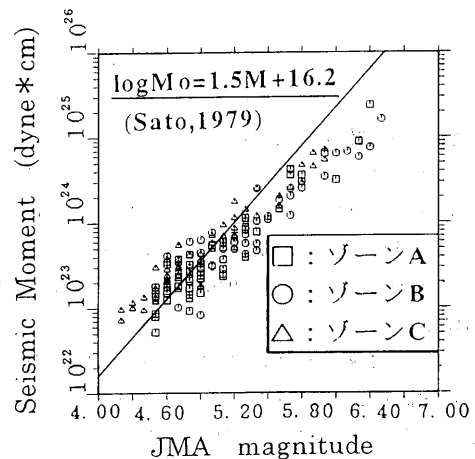


図8 地震モーメントと気象庁マグニチュードとの関係

以上のことから、これらの関係式を用いることでインバージョンで用いた以外の地震についても震源スペクトルを求めることができ、地震モーメントとコーナー周波数も得ることができる。ゾーンA~Cの地震について地震モーメント M_0 とコーナー周波数 f_c の関係を図7に示した。図8は気象庁マグニチュードと地震モーメントとの関係を示したものである。図中にはSato(1979)³⁰⁾による経験式を示したが、今回対象とした中小地震ではマグニチュードにかかる係数は1.5より小さい傾向にあることがわかる。このことは武村³¹⁾が示している、内陸地震の地震モーメントとマグニチュードとの関係とほぼ一致している。

5. 強震動評価

5.1 グリーン関数の合成

上下動についてもその主要動の特性がS波であることがわかったので、水平動における統計的グリーン関数法と同じ手法を用いて、強震動を推定することができる。Booreによる統計的波形合成⁷⁾は震源継続時間と包絡形状を用いて、位相ランダム仮定により作成しているが、伝播経路や表層構造による震動継続時間の増加などが考慮されていないなどの問題点が指摘されている。その欠点を補うために、震源継続時間、包絡形状および位相ランダム仮定を用いず、ここでは、経験的にその地点での観測記録に含まれている群遅延時間特性を抽出して、振幅特性のみでなく、位相特性を用いた対象地点に関するグリーン関数を合成する。

震源スペクトルはオメガ²乗則に従うものと仮定し、観測点地域でのQ値および観測点でのサイト増幅特性を用いて、地震動スペクトルは次式で求められる。なお、同式では次節の小断層の重ね合わせ式を考慮して表記を統一し、小断層によるものに添え字のi, jを付記している。

$$u_{ij}(f) = S_{ij}(f) \cdot \exp(-\pi f R_{ij} / Q_s(f) V_s) / R_{ij} \cdot G(f) \quad (1)$$

これを時間領域での波形として求めるために、その地点での観測記録から次式で示す群遅延時間を求めて位相の設定を行った。

$$t_{gr}(f) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(f)}{df} \quad (2)$$

一般的に地震動のS波部分での群遅延時間は、

$$t_{gr,ij}(f) = t_{gr,ij}^{source}(f) + t_{gr,ij}^{path}(f) + t_{gr,ij}^{site}(f) \quad (3)$$

で示される。第1項は震源での単一震源、多重震源、その他破壊形式などに応じて異なる。第2項は伝播経路での時間遅れを示すものであり、S波を仮定すると、媒質の平均S波速度を V_s 、震源距離をRとして、

$$t_{gr,ij}^{path}(f) = \frac{R_{ij}}{V_s} \quad (4)$$

で示される。第3項はサイト固有の遅れ時間を示し、この表現ではS波到着を基準とした遅れ時間を示す。観測記録よりサイトに依存した群遅延時間を求めるには、S波到達時間を基準として求めればよい³²⁾。想定する小地震の位相特性はその震源位置に応じて(3)式の第1, 2項を補正し、そのサイト固有の遅れ時間を加えた遅延時間に $2\pi f i$ を乗じて求められる。ここでは震源を点震源と考え、 $t_{gr,ij}^{source}(f) = 0$ と仮定する。

関西地震観測研究協議会(CEORKA)での3観測地点における1995年兵庫県南部地震の余震記録から、水平動および上下動の群遅延時間

を(2)式より計算したものを図9に示す。図はS波到達を基準とした時間遅れとして示している。群遅延時間特性はNS, EW, UD成分それぞれ若干異なった形状をしているが、特に長周期側については、レイリー波、ラブ波の表面波での分散特性が各成分に反映したものと考えられる。

以上の考え方を用いて、発震時間を基準としたそれぞれの小断層に対するグリーン関数は次式で示すものとなる。

$$u_{ij}(f) = S_{ij}(f) \cdot \exp(-\pi f R_{ij} / Q_s(f) V_s) / R_{ij} \cdot G(f) \cdot \exp(2\pi f i \cdot t_{gr,ij}(f)) \quad (5)$$

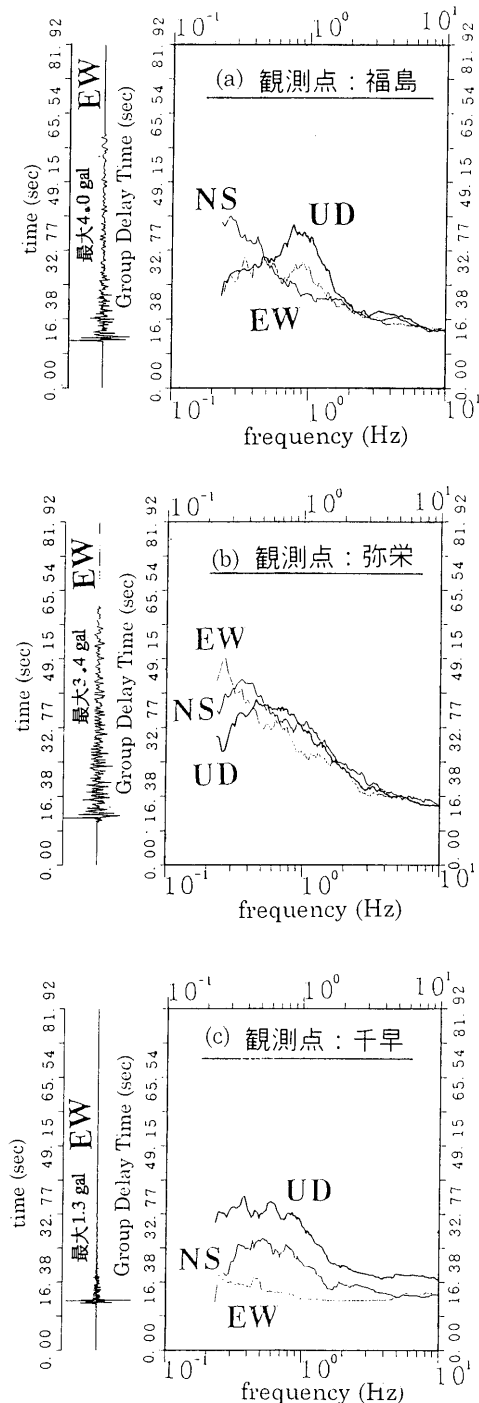


図9 群遅延時間特性の例

5.2 修正入倉モデルによる重ね合わせ手法

以上のように求められる(5)式を逆フーリエ変換したグリーン関数をここでは合成グリーン関数と呼ぶことにする。これを用いて修正入倉手法(Irikura, 1986)¹⁾により重ね合わせて強震動を評価する。合成式は次式で表せる。

$$U(t) = C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{R_{ij}}{R_{ij}} \cdot F(t) * u_{ij}(t - t_{ij})$$

$$t_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$

$$F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \delta \left[t - (k-1) \frac{\tau}{(N-1)n'} \right] \quad (6)$$

ここに、 $U(t)$ は大地震の地震動、 $u(t)$ は小地震の地震動であり、式中心*はコンボリューションを示している。また、発震時を基準とした時間遅れは(5)式で評価している。 N は分割数、 C は応力降下量の補正係数、 R は小地震の震源距離、 t_{ij} は (i, j) 小断層の破壊時間、 R_{ij} 、 ξ_{ij} は (i, j) 小断層と観測点間の距離、 (i, j) 小断層と大断層の発震点間の距離、 δ はデルタ関数である。 V_r は破壊速度である。 n' は再分割数 τ は大地震のライズタイムである。

具体的な強震動評価手順を以下に示す。

- (1) マグニチュード5.0程度の地震を想定し、地震モーメント、ストレス・ドロップを適切に与えて、オメガ2乗モデルに基づく震源スペクトルを推定する。
- (2) 観測点地域で求めた4.1の $Q(f)$ 値を用いて伝播経路特性を補正することにより、基盤入射スペクトルを推定する。
- (3) サイト増幅特性として水平動および上下動について4.2で求めたものにより、その地点での地表地震動スペクトルを推定する。
- (4) 位相特性は各観測点で経験的に求められた群遅延時間特性を用いて推定する。
- (5) 合成グリーン関数は(1)~(4)で求められた地震動スペクトル((5)式)のフーリエ逆変換により求める。
- (6) (6)式の重ね合わせ式により、その断層モデルに基づいた重ね合わせを実施することで強震動を求める。

6. 強震動予測結果の検証

ここでは前節で与えられる合成グリーン関数を用いて、1995年兵庫県南部地震の本震記録を修正入倉手法に基づいて再現し、その予測精度について検証する。ここでは合成グリーン関数として、上下動は最大余震記録のUD成分、水平動は観測記録のEW成分の群遅延時間特性を用いている。断層モデルは釜江・入倉³³⁾によるものを用いた。修正入倉手法による再現波と観測波の波形と、それらの速度応答スペクトルの比較を図10, 11に示す。図10は上下動について(a)福島、(b)弥栄、(c)千早における観測波形と合成波形を比較したものである。図11は水平動について同様の比較をしたものである。

上下動の強震動評価結果について、周期0.1~2.0秒での再現結果は観測記録に良く一致している。周期2秒以上の領域については、硬質地盤の千早では再現波と観測波とほぼ一致しているが、沖積地盤である福島、弥栄では若干その傾向が異なる。これはその周期領域では、特に沖積地盤で観測点近傍で2次的に生成されるRayleigh波など、この解析では必ずしも十分には考慮されていない特性に影響されていると推定され、今後より適切なモデルによって予測精度を向上させることが期待される。水平動に関しては、硬質地盤にお

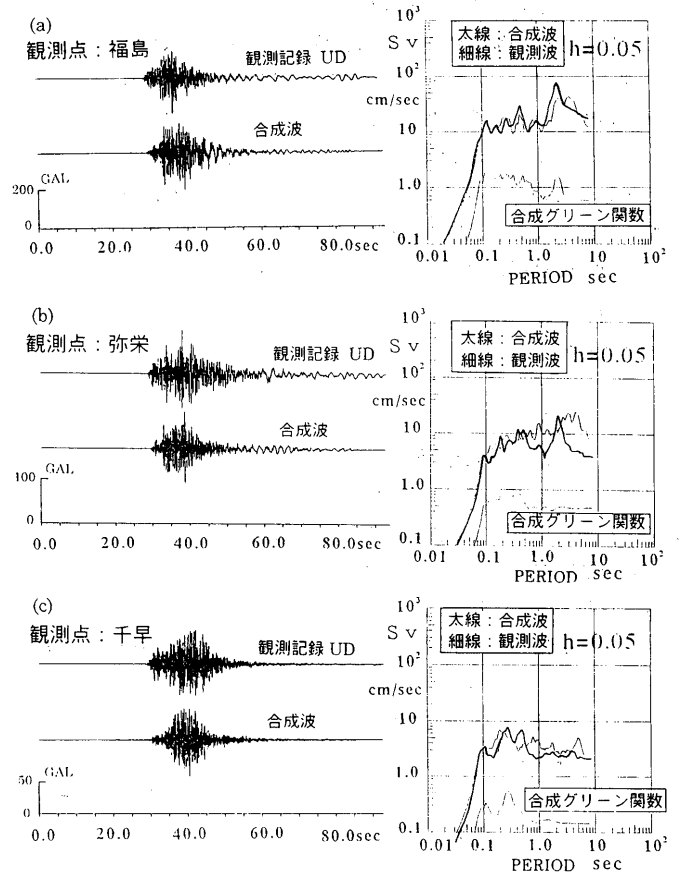


図10 1995年兵庫県南部地震の検証（上下動）

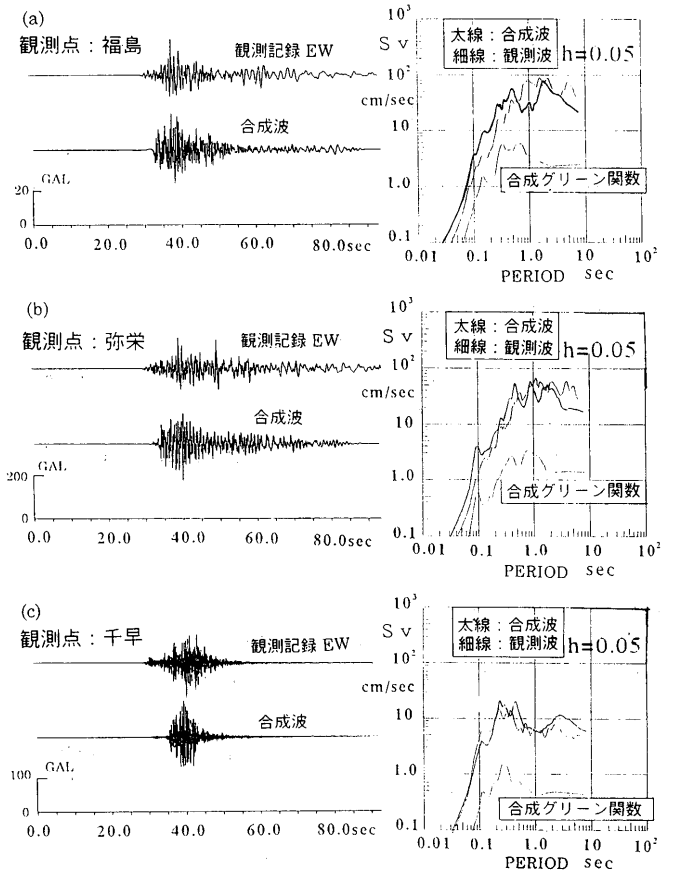


図11 1995年兵庫県南部地震の検証（水平動）

いて再現波と合成波はほぼ一致した結果を示している。沖積地盤では再現波のほうが観測波に対していくらか過大評価となっているが、工学的に考えると実用上問題のない範囲であり、ほぼその再現性は良好と考えられる。しかし周期2, 3秒以上では上下動と同じ傾向がみられ、過小評価となっている。これは長周期における2次の表面波特性をより適切なものにより改善されると考えられる。以上のように本手法による合成グリーン関数の作成、およびその重ね合わせによる強震動評価は工学的に十分実用的であると判断した。

7. まとめ

今回検討した内容で得られた知見を以下に示す。

(1) 上下動および水平動を別々にインバージョンした結果、伝播特性としてのQ値は上下動、水平動ともほぼ同一であった。この結果は基盤から入射する地震波が上下動についても主にS波であることを示している。

(2) 比較的硬質な地盤であることを条件に選定した基準点における水平動と上下動のスペクトル比と水平動の増幅特性に関しては、観測値とその地点の地盤構造より理論的に計算したものがほぼ一致した。これは上下動のサイト増幅特性が基盤からのSV波入射に対する理論解で説明できることを示している。

(3) 上下動のインバージョン解析で得られた震源スペクトルは、水平動と同じくオメガ2乗則を満足している。上下動の震源スペクトルは水平動と同じS波の震源スペクトルとして取り扱うことができる。

(4) 上記(1)～(3)の結果から上下動についても水平動と同じく統計的グリーン関数法を適用できる。ここでは時刻歴波形を作成するに当たって、群遅延時間特性を用いた合成グリーン関数を提案した。

(5) 上下動および水平動に関して上記の合成グリーン関数による重ね合わせ手法に基づき、1995年兵庫県南部地震の本震記録を対象に予測精度を検証した結果、十分に実用的であることを確認した。

謝辞

解析には気象庁87型加速度記録を使わせていただきました。関係者に感謝いたします。また、関西地震観測研究協議会(CEORKA)の1995年兵庫県南部地震の本震余震の記録を使用させていただきました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- Irikura, K.: Estimation of near-field ground motion using empirical Green's function, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 37-42, 1986. 8
- Kamae, K. and Irikura, K.: Prediction of site-specific strong ground motion using semi-empirical methods, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, vol. 2, pp. 801-806, 1992. 7
- 山田雅行, 釜江克宏: 経験的グリーン関数法による上下動の合成, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, vol. 1, pp. 17-20, 1997. 7
- Campbel, K. W.: Near-source attenuation of peak horizontal acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., 71, pp. 2039-2070, 1981. 12
- Boore, D. M. and Joyner, W. B.: The empirical prediction of ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 72, S43-S60, 1982. 12
- 福島美光: 地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, 東京工業大学大学院博士論文, 1994. 3
- Boore, D. M.: Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 73, pp. 1865-1894, 1983. 12
- Ohsaki, Y.: On the signification of phase content in earthquake ground motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 7, No. 5, pp. 427-439, 1979. 9-10
- Katukura, H., Watabe, T. and Izumi, M.: A study on the Fourier analysis of non-stationary seismic waves, Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering, vol. 2, pp. 525-532, 1984. 7
- Kimura, M. and Izumi, M.: A method of artificial generation of earthquake ground motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 18, pp. 867-874, 1989. 9
- Andrews, D. J.: Separation of source and propagation spectra of seven Mammoth Lakes aftershock, Proceedings of Workshop 16, Dynamic Characteristics of faulting, 1981, U.S. Geological Survey Open File Rep. 82-591, 1982
- Takemura, M., Kato, K., Ikeura, T. and Shima, E.: Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, J. Phys. Earth, 39, No. 3, pp. 537-552, 1991
- Kato, K., Takemura, M., Ikeura, T., Urano, K. and Uetake, T.: Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, J. Phys. Earth, 40, No. 1, pp. 175-191, 1982
- 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, 第39巻, 1986. 12
- Iwata, T. and Irikura, K.: Source parameters of the 1983 Japan Sea Earthquake sequence, J. Phys. Earth, 36, No. 2, pp. 155-184, 1988
- 田居優, 岩崎好規, 吉川宗治, 入倉孝次郎, 永野徹, 尾崎昌彦: 岩盤内で観測された加速度波形を用いた震源、伝播、サイト特性のインバージョンと震源パラメータの評価, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp. 163-168, 1990. 12
- 田居優, 入倉孝次郎, 尾崎昌彦: 近畿地方の地震記録による震源・伝播・サイト特性の分離, 第22回地震工学研究発表会講演概要, pp. 303-306, 1993. 7
- 田居優, 香川敬生, 中村晋, 蛇沢勝三, 亀田弘行: 断層モデルによる地震動予測式の作成法—インバージョン解析, 土木学会第51回年次学術講演会, I-B212, pp. 424-425, 1996. 9
- Lawson, C. L. and Hanson, R. J.: Solving Least Square Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974
- 若山昌彦, 藤沢格, 遠山忠昭, 神定健二: 気象庁における電磁式強震計観測の現状, 地震学会予稿集, No. 1, pp. 115., 1989. 6
- 柿下毅, 笹川巖, 小林正志, 永井章, 浜田信生: 気象庁87型電磁式強震計記録を用いた気象庁マグニチュードの決定式の評価, 地震, 第2輯, 第45巻, 1992. 12
- Aki, K.: Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequency from 0.05 to 25 Hz., Phys. Earth, Planet. Interiors, 21, 1980
- 佐藤 春夫: リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰—ランダム不均質構造による一次散乱理論, 国立防災科学技術センター研究報告, 3, 1984

- 24) 気象庁：気象庁地震観測官署の地盤調査， 験震時報， 第37巻， 1972
- 25) 太田外気晴，高橋克也，越田洋，山下利夫，鈴木孝夫：鹿島建設技術研究所および岩盤アレー観測（電力共研）の地震動観測結果，第16会地盤震動シンポジウム，1988。
- 26) 望月利男，田治米辰夫，荏本孝久，庄司正弘：アレー観測された地震記録にもとづく岩盤の地震動特性について(その5)，日本建築学会大会学術講演集，1984
- 27) 岩崎好規，本郷隆夫，横田祐，伊藤信一：関西地震観測研究協議会六甲台（神戸大学）観測点の地盤特性，日本地震学会講演予稿集，pp. 70, 1995. 9
- 28) 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，第2巻，第50巻，第2号，1997. 8
- 29) Andrews, D. J.: Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, Earthquake Source Mechanics, Geophysical monograph 37, 1986.
- 30) Sato, R.: Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude. J. Phys. Earth, 27, pp: 353-372, 1979
- 31) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震，第2巻，第13巻，1990. 6
- 32) 田居優，尾崎昌彦：経験的群遅延時間によるサイト特性の評価，日本建築学会大会学術講演便外集，pp297-298, 1995. 8
- 33) 釜江克宏，入倉孝次郎：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 500, pp29-36, 1997. 10

APPENDIX I [インバージョンにおける基準点の地盤構造]

図4，図5で理論計算に用いた地盤構造を付表-1, 2, 3に示す。

付表-1 根室観測点の地盤構造

深さ H(m)	P波速度 Vp(km/sec)	S波速度 Vs(m/sec)
0.0~15.0	1.4	0.7
15.0~	5.8	3.2

付表-3 神戸大学観測点の地盤構造

深さ H(m)	P波速度 Vp(km/sec)	S波速度 Vs(km/sec)
0.0~6.10	0.64	0.32
6.10~10.45	0.64	0.32
10.45~11.75	0.49	0.24
11.75~16.00	0.70	0.34
16.00~20.80	1.70	0.59
20.80~33.00	2.05	0.85
33.00~40.45	2.25	0.96
40.45~52.95	2.85	1.12
52.95~70.00	3.10	1.35

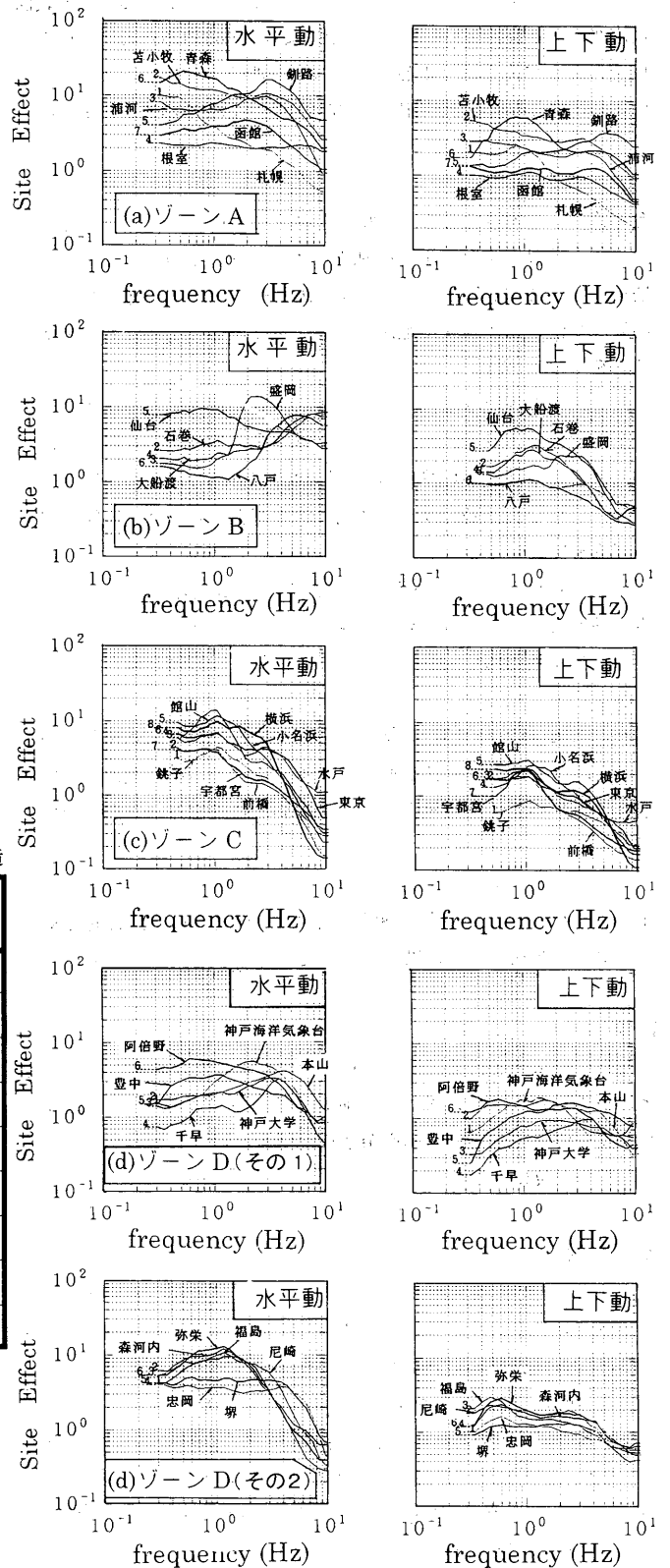
付表-2 銚子観測点の地盤構造

深さ H(m)	P波速度 Vp(km/sec)	S波速度 Vs(km/sec)
0.0~1.3	0.30	0.11
1.3~4.2	0.50	0.22
4.2~6.2	0.66	0.33
6.2~8.4	1.70	0.54
8.4~9.3	1.60	0.45
9.3~12.2	2.20	1.02
12.2~13.5	1.40	0.70
13.5~15.4	2.20	1.05
15.4~18.0	2.80	1.40

APPENDIX-II [各観測点での増幅特性]

4. 2節で求めた各観測点での水平動および上下動のサイト増幅特性を付図-1に示す。

付図-1 サイト増幅値（水平動，上下動）



(1997年10月10日原稿受理，1998年6月10日採用決定)