



## 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

川瀬 博<sup>1)</sup>、松尾秀典<sup>2)</sup>

- 1) 正会員 九州大学大学院人間環境学研究院、教授 工博  
e-mail:kawase@arch.kyushu-u.ac.jp  
2) 日立システム アンド サービス、工修  
e-mail:hi-matsuo@hitachi-system.co.jp

### 要 約

強震動予測には地震動特性、特にそれに大きな影響を与えるサイト特性の適切な評価が不可欠である。短周期域に着目した経験的予測の場合にはサイト特性を特長づける地盤の平均速度と増幅特性との関係が重要となる。また理論的予測では地下構造そのものの評価が必要である。そこで本論文では K-NET、KiK-net、JMA 震度計観測網の強震観測データに基づき、まずスペクトル分離手法によってサイト特性を分離抽出し、さらにそのサイト増幅率に適合するような地下構造を同定した。次に最大加速度、最大速度、および計測震度を求めるための換算加速度  $A_0$  に最も影響を与えると思われる振動数帯域を見出し、得られた地盤構造から求められる平均 S 波速度との対応関係を求めた。その結果最大速度や  $A_0$  のサイト係数は、物理的な期待とは異なり、地表から 10m までの平均 S 波速度と最も相関がよいことがわかった。

**キーワード:** スペクトル解析、サイト特性、地下構造、計測震度、S 波速度

### 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、全国規模で張り巡らされた強震観測ネットワークが公的機関によって一つならず整備され、データが公開されるようになったことは、強震動の特性を研究しそれを地震防災に役立てようとするものにとって大変貴重なことであり、そのデータを活用することは社会的要請の観点からも国費の説明責任上も重要である。我々は本研究に先立ち、防災科学技術研究所の K-NET<sup>1)</sup>・KiK-net、および気象庁の震度計観測網の強震観測データを用いて、スペクトル分離解析を行い、抽出された震源特性や伝播経路特性について考察した。

本研究ではこの分離解析で得られた K-NET・KiK-net 各観測点のサイト特性(周波数特性)を用いて、まずそのサイト増幅特性に適合する地下構造を遺伝的アルゴリズム(GA)により同定する。その際、ボーリングによる調査結果が得られている浅層構造は公表結果をそのまま採用し、その最下層から基準となる地震基盤までの層構造を逆算のターゲットとした。一方、最大加速度(以下 PGA)、最大速度(以下 PGV)、計測震度を求めるための換算加速度  $A_0$  についてもスペクトル分離解析と同様な分離解析を行い、得られたサイト係数を周期毎のサイト特性と比較することにより、最も影響を与えると思われる振動数帯域を見出す。さらに先に得られた地下構造のうち、適合度の高いサイトのみについて、その平均値とサイト特性との対応関係を分析する。今回解析に用いたデータ総量はかつてない規模であり、基準観測点も地震基盤相当であることから、非常に興味深い結果が得られた。

## 2. スペクトルの分離解析の概要

まずスペクトルの分離解析の概要について記述する。詳細は先行論文<sup>2)</sup>を参照されたい。

スペクトルの分離解析では拘束条件が1つ必要となる<sup>3)</sup>ので、分離に先立ち KiK-net の GL-200m のボアホール観測データを利用して地盤の影響を剥ぎ取った。事前解析により基準観測点は YMGH01(防府)とした。この観測点は PS 検層により表層の S 波速度が 1,000m/sec、すぐ下に 2,100m/sec の層、さらにその下には 3,100m/sec の層があることが地盤調査の結果で分かっており、硬質岩盤サイトである。ただし PS 検層値と実際の値は必ずしも一致しないことが多いので、地中地表記録のスペクトル比より正確な地盤構造を同定した。線形を仮定できる小加速度記録から、S 波の初動以降を 5 秒切り出し、地表・地中のスペクトル比を求めた。位相はクロススペクトルの位相を用いた。振幅と位相の両方の残差の和が最小となるように遺伝的アルゴリズム<sup>4)</sup>で同定した結果、図 1 に示すように両者をよく一致させる構造(図 2)が同定できた。その構造は最下層で S 波速度が約 3,400m/sec となった。このとき入射角としては、用いた記録が比較的近傍の小地震のものでありその影響は少ないと考え鉛直入射を仮定した。

図 2 を子細に検討すると二次のピーク振動数や位相特性はよく一致しているが、一次のピーク振動数については 4Hz 付近のピークと 5.4Hz 付近のピークの間と同定地盤のピークが位置していることがわかる。ここで、基準観測点のサイト特性評価はそれ以外の全地点のサイト特性評価に影響することから、この基準観測点での速度構造の評価がどの程度の影響をサイト特性評価に与えるかについて

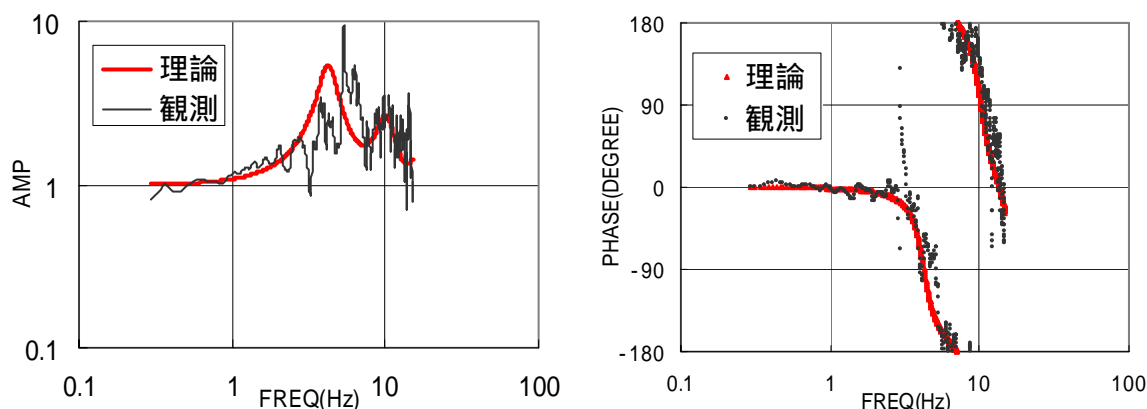


図 1 理論と観測によるスペクトル比および位相差の最適化

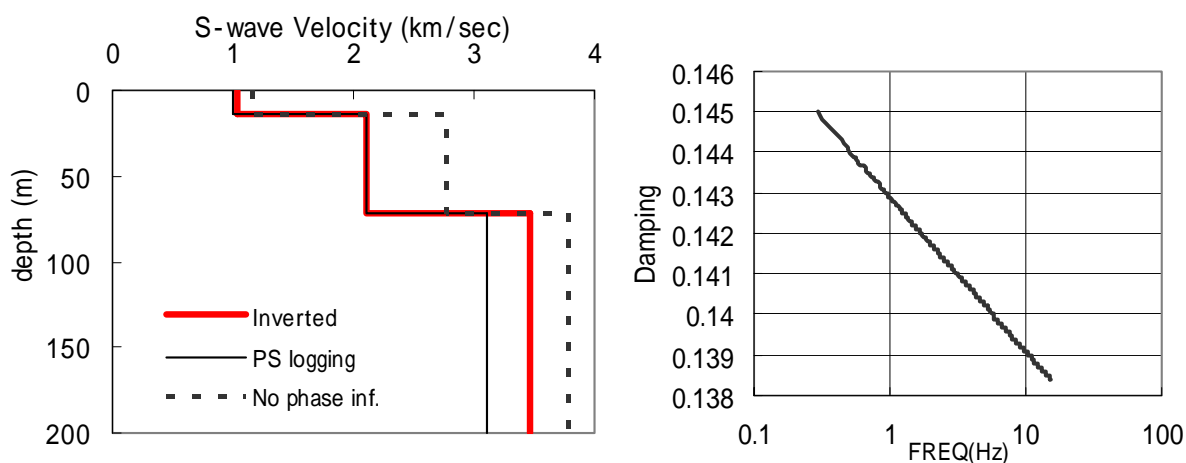


図 2 同定された S 波速度構造と減衰定数

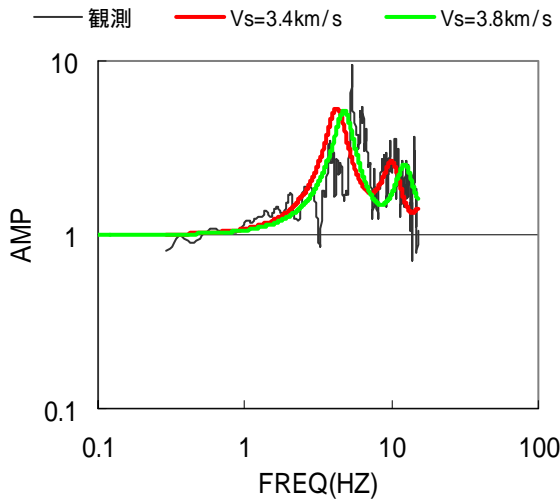


図3 異なる条件で同定した地盤モデルによる理論スペクトル比の比較

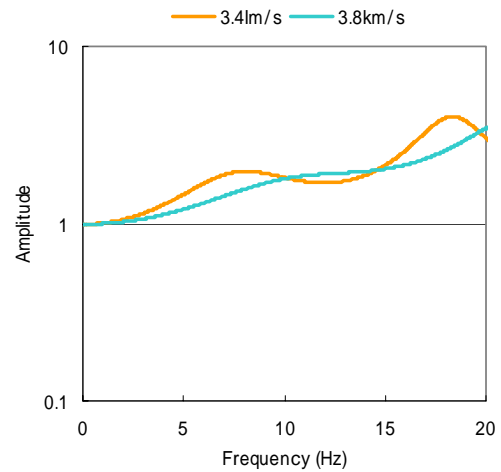


図4 基準観測点の補正に用いるサイト特性

検討しておく。図3には位相特性をターゲットとしないで振幅だけから求めた速度構造(図2に点線で示す)によって計算した地表・地中のスペクトル比を、ここで最終的に用いた構造によるスペクトル比と比較して示す。図から基盤の速度をかなり上げないと観測スペクトル比の最大ピーク振動数には一致しないことがわかる。そのとき二次のピーク振動数は明らかに観測とずれている。S波速度で3.8km/sec近い速度は地殻上部の速度としてもかなり速いレベルであり、それが表層200mの平均速度であるということは考えにくい。このようにここで用いている基準観測点の速度構造は総合的に見て妥当なもの判断される。なお補正に用いる増幅率は、図3に示した地中に対する地表のスペクトル比ではなく、入射波の2倍に対する地表の増幅率となる。その特性を図4に示すが、3.8km/secの構造を用いたとしても16Hzまでの相対誤差は30%以下である。

スペクトル分離解析には1996年8月から2002年6月までの間のMj 4.5、震源深さ60km、震源距離200km、最大加速度200gal、3地点以上でトリガーの条件にあうK-NET観測点(913点)、KiK-net観測点(468点)、JMA観測点(319点)のいずれかの地点で観測された地震波(約15,800地点・地震、各3成分)を用いた。そのフーリエスペクトル、およびPGA、PGV、さらに計測震度を計算するための3成分合成フィルター加速度A0を用いて分離するデータセットとした。

データはまず、日本の平均的走時を用いて、S波初動以降を気象庁マグニチュードに応じた時間区間(Mjma 6で5秒、6<Mjma 7で10秒、7<Mjmaで15秒)で切り出し、前後に2秒のコサインテーパをつけた。S波初動以降がうまく切り出されていない場合は、データセットから取り除いた。フーリエスペクトル、PGA、PGV、A0(以下ではそれらを $F_{ij}$ で代表させる)を次のようにモデル化した。

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j \quad (1)$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk} \quad (2)$$

- $i$ : 地震
- $j$ : 観測点
- $k$ : 地域
- $l(i)$ : 地震のタイプ

ここで $S_i$ は震源特性、 $G_j$ はサイト特性である。また $n$ は幾何減衰を表しており、スペクトルの場合理論的には実体波で1、表面波では0.5となる。 $b$ は内部減衰+散乱減衰を表す項である。本論文では震源距離100km以内では実体波が卓越すると仮定して $n=1$ とし、100km以上でのみ $n$ を同定した。減衰項

bには地域性を考慮して第四紀の火山の分布や糸魚川 静岡構造線などで6地域に分割し(図3)、地震のタイプとしては海溝性(プレート間) 海溝性(プレート内) 内陸の3タイプに分類した。そのときの分類の基準として内陸地震では震源深さが25km以浅で震源が内陸部にあるもの、プレート内地震は震源深さが25km以深で沈み込むプレートの内部に位置するもの、さらにプレート間地震は沈み込むプレート上面に位置し、かつCMTの発震機構解が低角逆断層であるものとして判断した。結果として解析した地震は内陸48地震、プレート間99地震、プレート内81地震の計228地震である。なおフーリエスペクトルの場合はSN比をチェックして0.3から20Hzの範囲で行い、NS・EW成分のrms値を用いた。またPGA・PGVについてはNS・EW成分のベクトル和の時刻歴最大値を用いた。

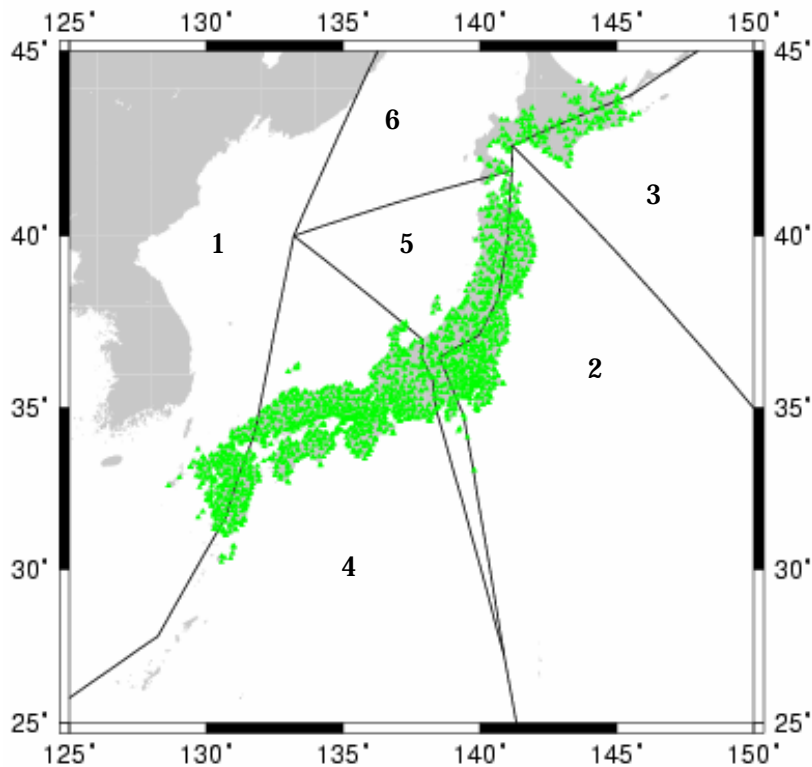


図5 観測点位置と地域区分

### 3. 抽出されたサイト増幅特性と地盤構造の同定

次に、分離で得られたフーリエスペクトルのサイト特性を用いて、PS 検層が実施されている地盤構造より深い構造を、その層厚とS波速度を未知数に、サイト特性と1次元重複反射理論より求まる増幅特性が適合するように、遺伝的アルゴリズム(GA)で同定した<sup>4)</sup>。ここでは地震基盤とPS 検層の最下層との間に3層あるものと仮定し、その層厚とS波速度、およびPS 検層の最下層の層厚を同定する。深部構造として3層を仮定したのは通常関東平野や大阪平野などの大規模な堆積盆地では浅部の更新世層、やや深部の新第三紀鮮新世層、および新第三紀中新世から古第三紀の層に相当する3層の速度構造がよく観察されることから、少なくとも3層は仮定する必要があるとの判断による。この同定の際、K-NET・KiK-netの浅い部分のPS 検層値はこれを信用してそのまま用いる。ここでJMA観測点ではPS 検層のデータがないため同定の対象からはずした。この同定は得られたK-NET・KiK-netの観測点1,300地点に対して行なった。GAでは個体数は50、世代数は500、交叉率は70%、突然変異率は1%を基準とし、世代が進むにつれて10世代~50世代に一回、変異率を3%~8%に増大させるような設定とした。ターゲットは観測振幅 $H_0$ と計算振幅 $H_t$ の残差自乗和、すなわち

$$misfit = \sqrt{\sum_{f=f_1}^{f_2} (H_o(f) - H_t(f))^2} \quad (3)$$

を最小化することである。ここで周波数帯域は 0.3Hz ~ 20Hz とした。第 i 層の密度  $\rho_i$  (g/cm<sup>3</sup>) は S 波速度  $Vs_i$  (km/sec) の関数として

$$\rho_i = 1.4 + 0.67\sqrt{Vs_i} \quad (4)$$

によって求めた<sup>5)</sup>。また減衰は速度とのトレードオフが危惧されたので今回は同定パラメータとはせず、ポアホール観測記録から直接求めている研究結果<sup>6)</sup>の値  $Q_i = 19.05f^{0.52}$  で全層同一とした。層の土質種別や S 波速度の関数とすることも考えられたが、ポアホールのスペクトル比から求めたものではない直接 S 波の減衰を地盤特性の関数形として提案している研究事例が少なく、今回は平均値としてこの値を採用した。なお速度には深さ方向で逆転が生じないという拘束を与えた。

図 6 にはいくつかの観測点について、こうして得られた理論増幅特性を観測サイト特性と比較して示す。ここで赤線は PS 検層で得られている地盤のみの増幅特性であり、青線が同定した最終結果の理論増幅特性である。後で示すように、独自に設定したクライテリアに従って判定したところ、1,300 点中 404 点のサイトで良好な地盤構造の同定結果が得られた。ここに示したのはそのうちの一部である。これらの観測点での速度構造の一例を図 7 に示す。多くの観測点ではあまり深い構造は必要とされておらず、浅い(500m 以浅の)部分に基盤相当の S 波速度 2km/sec 以上の層が来ていることが多い。しかし中には基盤までかなり深い構造が得られている地点もある。ただし、今回の解析周波数範囲が 0.3Hz からとなっているので、1km 以上の盆地構造を正確に推定することはそもそも困難であり、深い盆地については別途、より長い継続時間のデータから求めたより長周期のサイト特性を用いて推定する必要があると考えている。図 7 においても 0.3Hz から 1Hz の部分の計算サイト特性は観測を下回っている地点が多い。しかし、ここでの目的はむしろ K-NET では 10m ないしは 20m しか存在しないボーリングデータに加えて 100m 程度までの S 波速度構造を精度よく推定し、得られた浅層構造とサイト特性との関係を把握することにあるので、このやや長周期域まで精度よく評価できる構造の同定については今後の課題としたい。

得られた地盤構造による理論増幅特性と観測サイト特性との残差を周波数別に求めると図 8 となる。ここで赤い線は最終結果の全地点の対数残差の平均値、黒い線は PS 検層で得られている地盤を用いた場合の残差平均値である。両者の差が GA による合致度改善を表している。この図から同定の結果、残差は平均で約倍 / 半分に収まっていることがわかる。

図 6 のようなサイト特性の再現性を全点について行い吟味した結果、全体の約 1/4 は良好な結果が得られており、約半分の地点では傾向は合っているものの一部ピーク振動数や振幅にずれが見られ、残りの 1/4 は異なる結果となっていた。ここでは以下の解析のために、1,300 点から客観的なクライテリアで次元の S 波増幅によってサイト特性を良く説明できた観測点を抽出する。尺度として二つ考える。一つは両者の一致度を表す全残差の平均値  $\sigma$  である。もう一つは両者の周波数軸上での相関を表す相関係数  $\rho$  である。前者が小さければ後者は小さいかという必ずしもそうとはいえない。というのは、ピーク(あるいはディップ)のレベルは大きくない場合、前者は小さくなるが、その出現周波数がずれていると後者は小さくならないからである。横軸に相関係数  $\rho$  をとり、縦軸に対数残差をとって図化したのが図 9 である。目視による再現性チェックとあわせ検討した結果、相関係数が 0.5 以上あり、かつ対数残差平均値が 0.4 以下のサイトを良好な地下構造の得られたサイト(A ランク)として選択し、それを対象に、以下に示す地動の最大値指標と地下構造との関係に着目した検討を行なうこととした。

1,300 地点のなかで良好な同定結果の得られたのが 404 地点というのは少な過ぎるように思われるが、これは上記のクライテリアがかなり厳しいことに起因している。図 9 からわかるように、残差は大半の観測点で小さくなっているが、相関係数については大きい地点が相対的に少ない。これはピークの山と谷が少しずれてしまっているサイトあるいはそもそもフラットなサイト特性を有し変動の少ないサイトが多いことを意味している。ピークの山と谷が少しずれる理由は今回の同定では PS 検層データの存在する表層部分を PS 検層の値に固定しているためだと考えられる。従ってその部分の速度も含めて同定すればさらに半分以上のサイトで良好な一致度が得られるものと期待される。具体的にそうした観測点の適合度がどの程度なのかを理解するために、図 10 に A ランク地点の他に、対数残差平



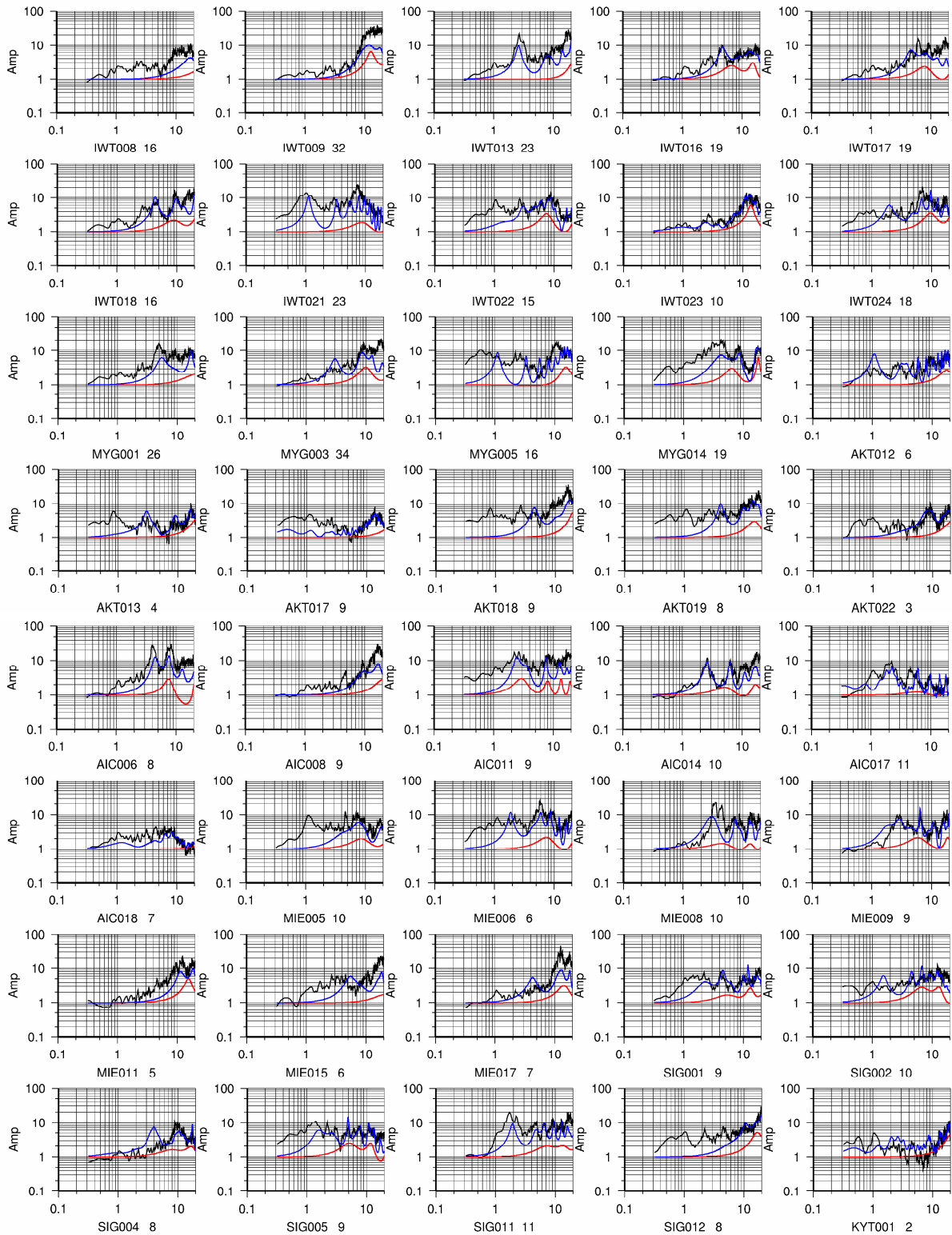


図6 同定結果が良好だった地点の観測サイト特性(黒)とPS 検層結果に基づく表層のみの理論一次元地盤応答(赤)、およびその表層の直下に3層の深部地層を追加して同定した最終モデルの理論一次元地盤応答(青)の比較の例(地点コードの次の数字はデータ数、横軸は周波数 Hz)

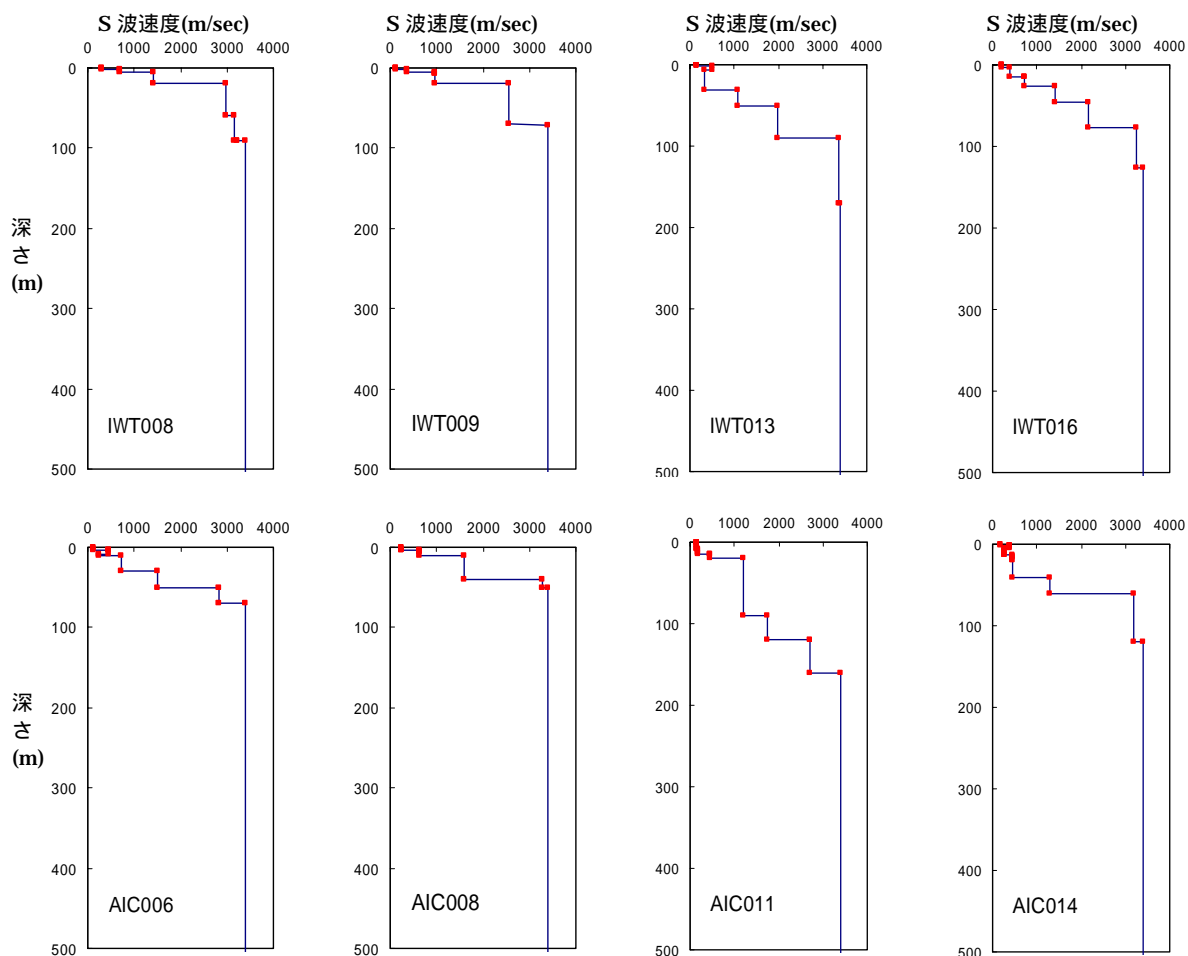


図7 同定したS波速度構造の例

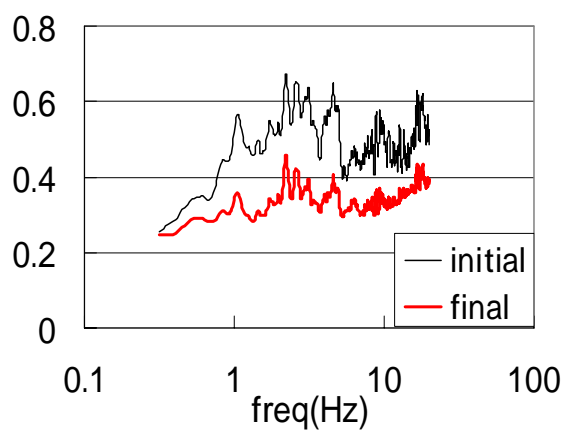


図8 全地点の同定前と後の全対数残差平均値

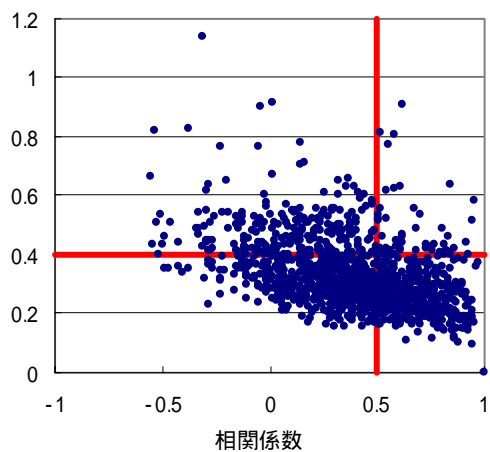


図9 全地点の相関係数と全対数残差

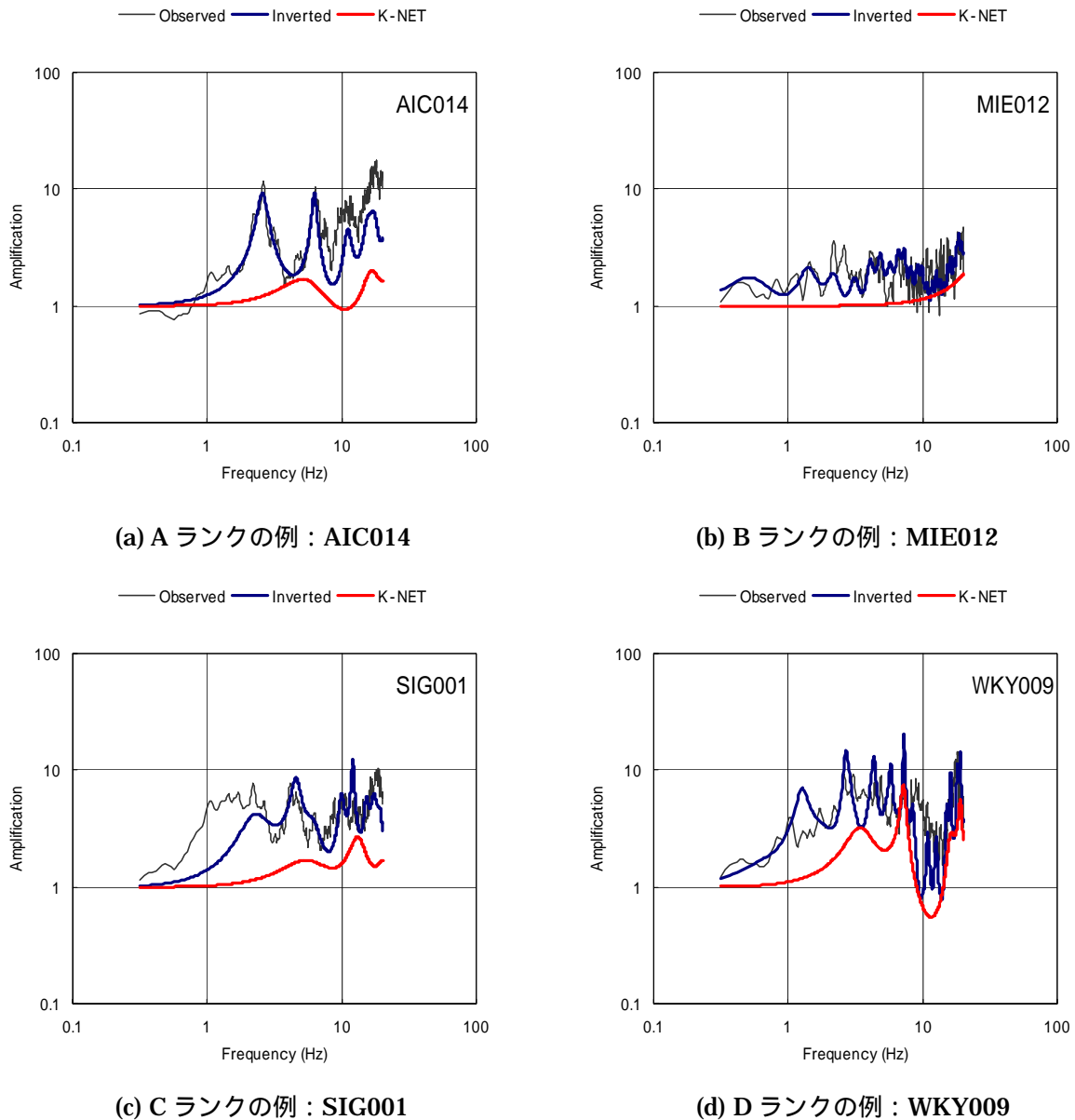


図 10 適合度で分類したランク別の理論増幅率(赤：PS 検層，青：同定)と観測サイト特性の比較

均値が 0.2 以下の B ランク地点、対数残差平均値が 0.4 以下の C ランク地点、対数残差平均値が 0.4 以上の D ランク地点(いずれも相関係数は 0.5 以下)の代表地点 1 点について、観測サイト特性と理論増幅特性を比較して示す。ここに示した例では B ランクや D ランクでもかなりよく観測サイト特性を再現できていることがわかる。

もちろん、サイトの中には理論と観測で似ても似つかない特性を示しているものもある。特に深い地盤構造を有する KiK-Net 観測点ではポーリングデータの層構造分割が少ない地点があり、そうした地点では同定が成功していない。またデータ点数の少ない地点では、今後の観測結果を追加して安定したサイト特性にすることによってより精度の高いサイト特性が得られることも考えられる。一次元モデルで説明できない場合によく指摘されるのは、二次元・三次元的な影響、特に地形的な影響である。現実にサイトを視察した経験から、地域の公共的な中核施設(小・中学校や公民館、グラウンドなど)に置かれている K-NET 観測点では地形の影響が不可避と思われる設置地点がかなり含まれていることがわかっている。従って地形効果等によって一次元モデルではそもそも再現できないサイトである



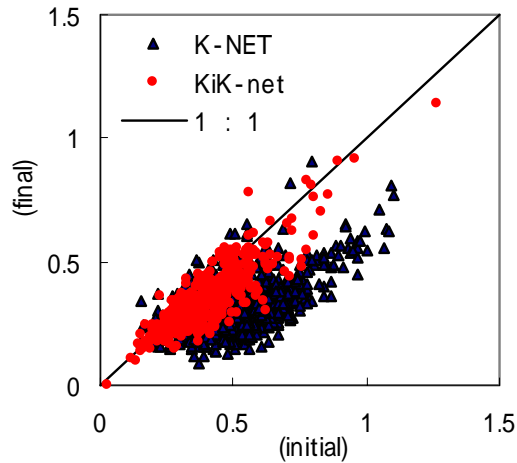
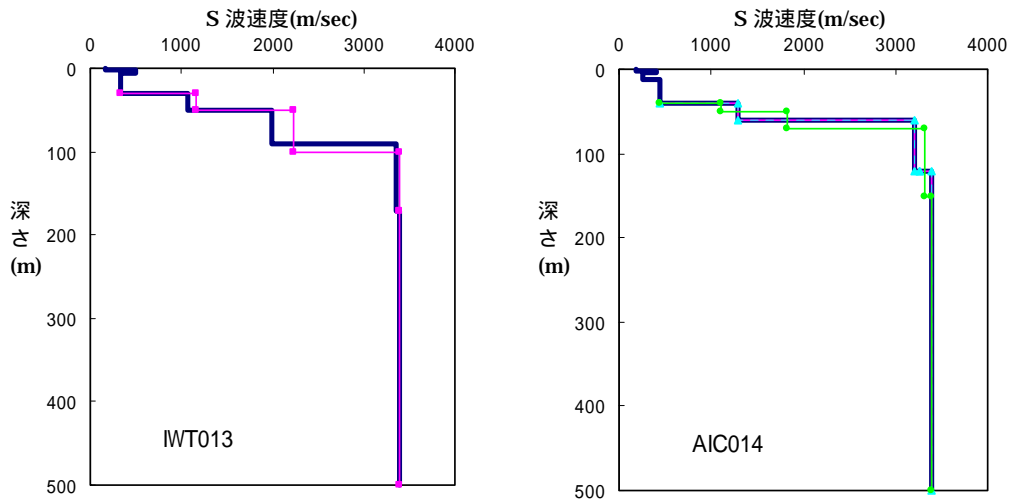


図 11 残差の初期モデルからの減少程度



(a) IWT013 の再同定結果

(b) AIC014 の再同定結果

図 12 同定した構造の一次元増幅特性をターゲットに再同定した速度構造

ケース中にもあるものと推察される。図 11 には残差が PS 検層結果だけから得られる増幅特性に対して最終モデルではどのように改善されたかを示した。図から KiK-net よりも K-NET の観測点の方が改善の度合いが大きいことがわかる。これは K-NET 観測点では 10m あるいは 20m までしか PS 検層結果が与えられていないことを考えると当然の帰結であろう。

得られた層構造を用いて総合的な分析をする前に、GA による同定の信頼性について吟味する。GA では最初ランダムにパラメータを設定した第一世代を突然変異と交配によってターゲットに適合させていくので、一意な解が得られるわけではない。今回の場合、表層構造と基盤の S 波速度、および減衰は固定されているので、強い拘束条件下での同定となっており、層厚と S 波速度のトレードオフが直接的に生じるわけではないが、解空間(スペクトル応答倍率)の拘束条件の強弱で同定する深部構造に推定誤差が生じることは避けがたい。そのレベルを把握するため、同定された速度構造による一次元増幅特性をターゲットに、異なる初期値で GA による同定を行いその結果を比較した。図 12 に例として IWT013 と AIC014 の結果を示す。IWT013 では初期値によらず 3 ケースとも同じ結果が得られた。S 波速度が 2.0km/sec の第 2 層で少し速度が大きめに同定されているがその誤差は 11%にとどまっている。AIC014 でも 3 ケースのうち 1 ケースで 1.3km/sec の第 1 層が 1.1km/sec の層と 1.8km/sec の層に分離されて同定されているが、残りの 2 ケースでは初期モデルを完全に再現できている。なお吟味したケ

ースではすべて表層最下層の層厚は 1/64 の精度で完全にターゲットに一致した。これは通常この最下層と同定した第 1 層とのインピーダンスコントラストがかなり大きくなるため、その層厚値はよく拘束されるということを意味している。すなわち、サイト特性の評価に大きく影響するパラメータは精度よく同定され、影響しないパラメータは精度よく同定できないということである。

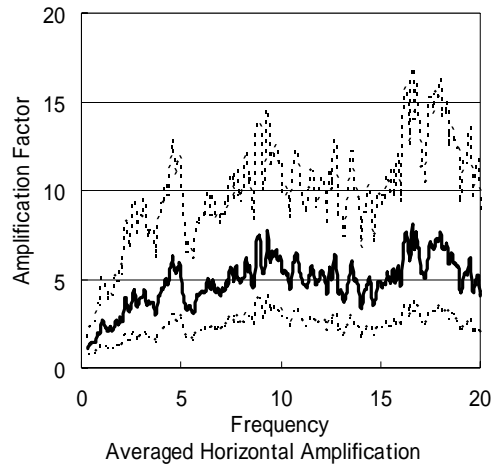
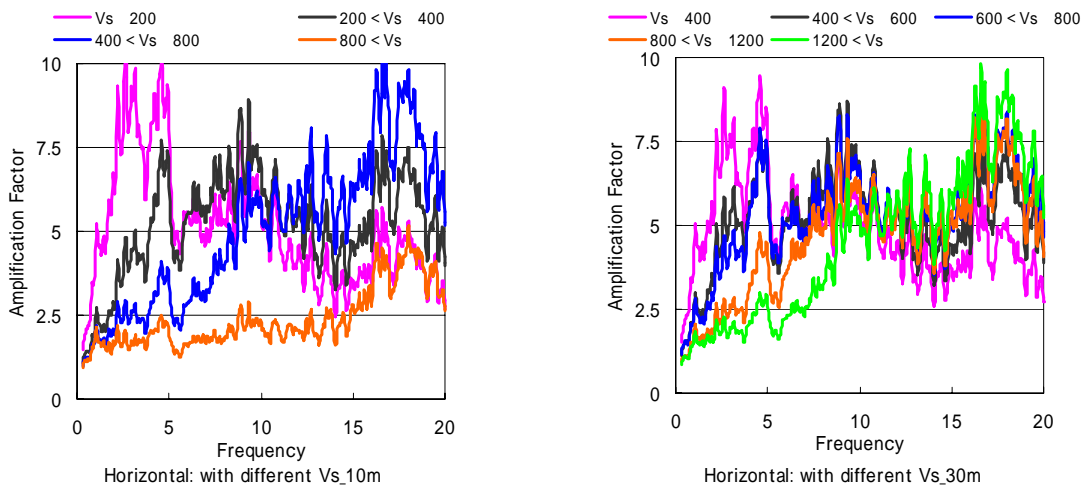


図 12 404 地点の平均サイト特性



(a) Vs\_10m で分類した場合

(b) Vs\_30m で分類した場合

図 13 平均 S 波速度で分類してカテゴリごとに平均したサイト特性

さて、以上のように 404 地点において、信頼できる基盤までの地下構造が得られたので、サイトをその平均 S 波速度に着目して分類し、平均的な増幅特性を把握する。まず 404 地点全部のサイト特性をそのまま平均するとどうなるかを見たのが図 12 である。平均で約 5 倍の増幅があること、低振動数から 5Hz までほぼ直線的に増加することがわかる。これを地盤の平均 S 波速度で分類して図化すると図 13 のようになる。ここで (a) は平均値として深さ 10m までを平均したもの、(b) は深さ 30m までを平均したものである。この図から、10m までの平均 S 波速度で分類すると、その値に応じてサイト特性がシステマティックに変化し、きれいに違いが見出されることがわかる。すなわち Vs\_10m が 200m/sec 以下のサイトは最大ピークが 2.5Hz であるのに対し、Vs\_10m が 200m/sec 以上 400m/sec 以下では 5Hz に、400m/sec 以上 800m/sec 以下では 10Hz に、800m/sec 以上では 18Hz に生じており、地盤が硬くなる効果が期待通りに生じている。これに対して Vs\_30m を用いた場合には 400m/sec 以下と 400m/sec 以上 600m/sec 以下、600m/sec 以上 800m/sec 以下の 3 クラスの平均増幅特性にはほとんど差がなく、

800m/sec 以上の場合でも Vs\_10m を用いた場合のように明瞭な高振動数化の傾向が見出し難い結果となっている。なお Vs\_10m のレンジと Vs\_30m のレンジとは概ね 2 倍程度で結果が対応するように見える。実際、Vs\_10m と Vs\_30m の関係を回帰すると図 14 に示したようにほぼ 1:2 の関係が見出せる。ちなみに今回用いているデータセットの平均 S 波速度別頻度分布は図 15 のようになっている。Vs\_10m で見ると 200m/sec から 400m/sec、Vs\_30m でみると 400m/sec から 700m/sec に最頻値がきている。図 12 の全地点の平均サイト特性が図 13(a) の 200m/sec-400m/sec あるいは(b)の 400m/sec-800m/sec のサイト特性と相似なのはこの頻度分布を反映したものと見えよう。

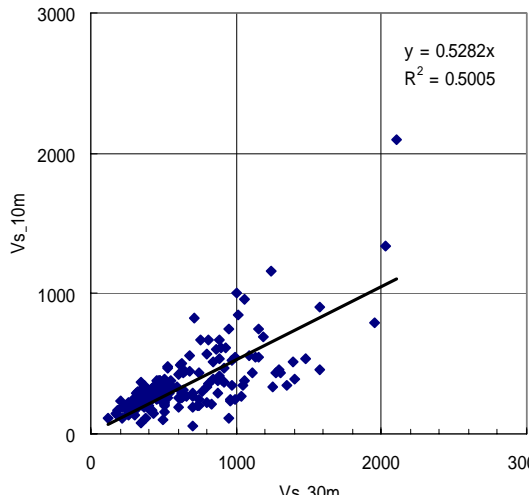


図 14 30m の平均 S 波速度 Vs\_30m と 10m の平均 S 波速度 Vs\_10m の関係

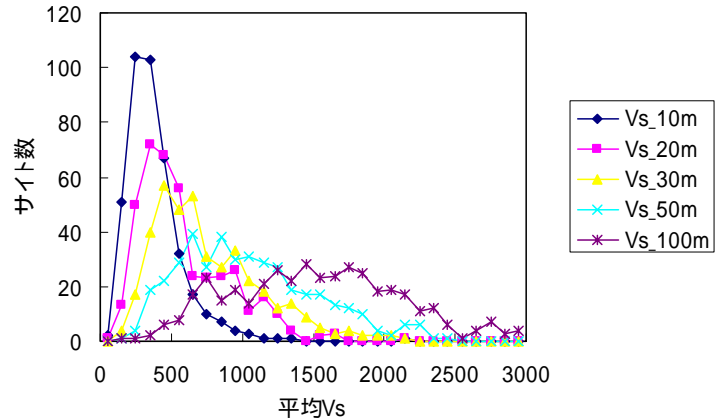


図 15 平均 S 波速度(m/sec)別サイト数頻度分布

#### 4. スペクトルのサイト特性と最大値指標のサイト係数の関係

これまで最大値指標とスペクトルの分離とは別々に行われることが多かった。今回、スペクトルのサイト特性と最大値指標のサイト係数を比較して最大値指標の性質を把握する目的で、最大加速度 (PGA)、最大速度 (PGV)、および河角式に従って計測震度を計算するのに用いられる 3 成分の合成フィルター加速度 (A0) を地震動の最大値指標として選び、それらも (1) 式に従って分離解析を行って震源係数・伝播経路係数・サイト係数に分解した。以下ではそのうちサイト係数とスペクトルのサイト増幅特性との関係について分析する。

以下 PGA・PGV・A0 から抽出されたサイト係数とフーリエスペクトルのサイト増幅特性との間の相関を計算する。フーリエスペクトルのサイト増幅特性はあらかじめ 1/3 オクターブバンドで平均化し、その振動数帯域の平均サイト増幅特性を求め、PGA・PGV・A0 のサイト増幅特性と比較した。3 つの振動数帯域の比較結果を図 16 ~ 図 18 に示す。なお比較したサイトは先の地下構造同定で良好な結果が得られた 404 点である。これらの図から PGA は高振動数域、PGV では低振動数域ほどまとまりがよいこと、A0 は中間的な帯域で相関が高いこと、およびスペクトル増幅率の倍率 (回帰直線の傾き) は PGA では 1.2 倍程度なのに、A0 で 1.4 倍、PGV では 1.7 倍となっており、相関の高い振動数域が低い強度指標ほどサイト増幅との倍率が大きくなるのがわかる。理論的にはフーリエスペクトルのピークの増幅度は最大値の増幅倍率よりもずっと大きいことが期待されるので、この結果が意味することは、1/3 オクターブバンドの平均化操作により、コヒーレントなピークが見られた低振動数域のサイト特性はそのままに近い大きさで評価されているのに対して、もともとランダムな変動によりピークが平均化されていた高振動数域のサイト特性はさらに平均化され最大値指標とあまり変わらないものとなっている、ということを示唆している。

また 0.4Hz から 16Hz まで全部で 17 区間の帯域別の積率相関係数の変化の様子を図 19 に示す。ここでは S 波速度構造が精度よく同定できた 404 点についての結果、は 1700 全地点に対する結果である。この図から PGA は 5Hz ~ 6.3Hz、PGV は 2 ~ 2.5Hz 付近、そして A0 は 2Hz ~ 4Hz 付近で相関ももっとも高くなるのがわかる。A0 は次元は加速度であるがフィルターで加速度と速度の平均的尺度になる

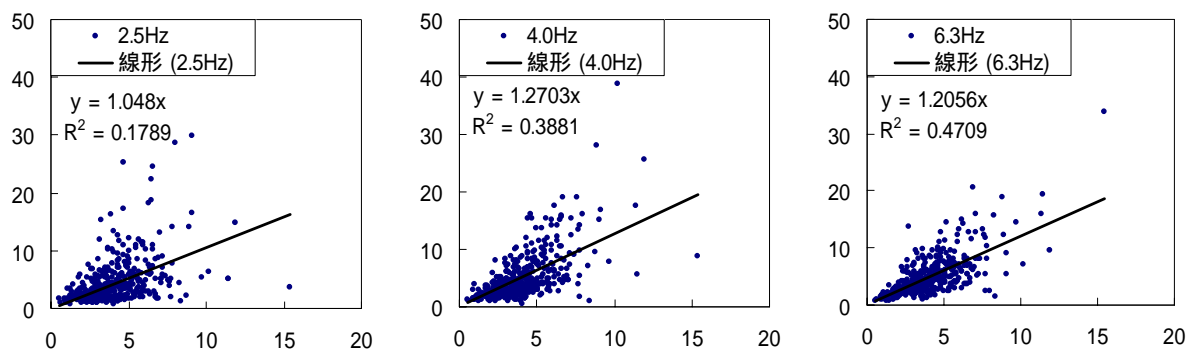


図 16 PGA のサイト係数(横軸)と 1/3 オクターブバンドの平均サイト増幅率(縦軸)

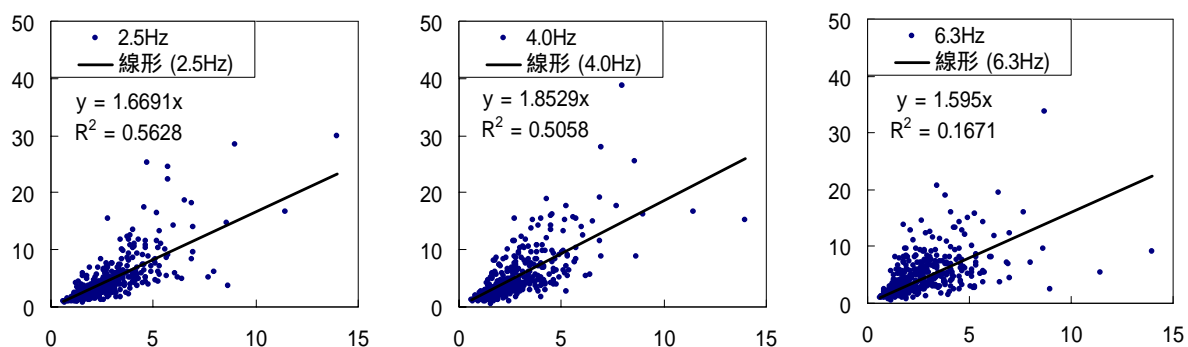


図 17 PGV のサイト係数(横軸)と 1/3 オクターブバンドの平均サイト増幅率(縦軸)

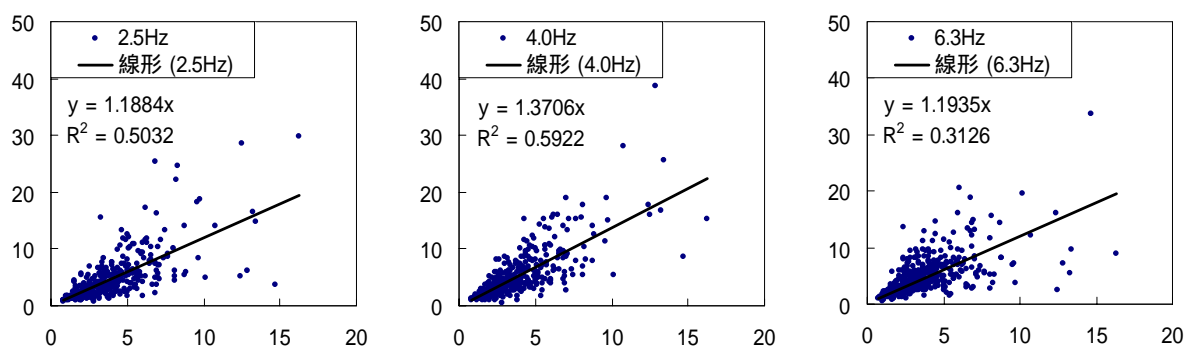


図 18 A0 のサイト係数(横軸)と 1/3 オクターブバンドの平均サイト増幅率(縦軸)

ように操作されており、実際の値も  $PGA \times PGV$  とよく対応することが報告されており<sup>7)8)</sup>、ここでの結果は期待される通りといえる。なお図 16～図 18 の図中の  $R^2$  値は回帰直線の寄与率であり、 $R$  は相関係数に等しい。404 点と全点を比較すると 404 点だけの方が高振動数域で最大相関が得られる結果となっている。この理由ははっきりしないが、理論増幅特性が観測サイト特性とよく一致したサイトは比較的硬質のサイトが多かったことを示しているのかもしれない。

## 5. スペクトルのサイト特性と平均 S 波速度との関係

次に先に得られた同定で良好と判定されたサイトの平均 S 波速度とスペクトルのサイト特性との関

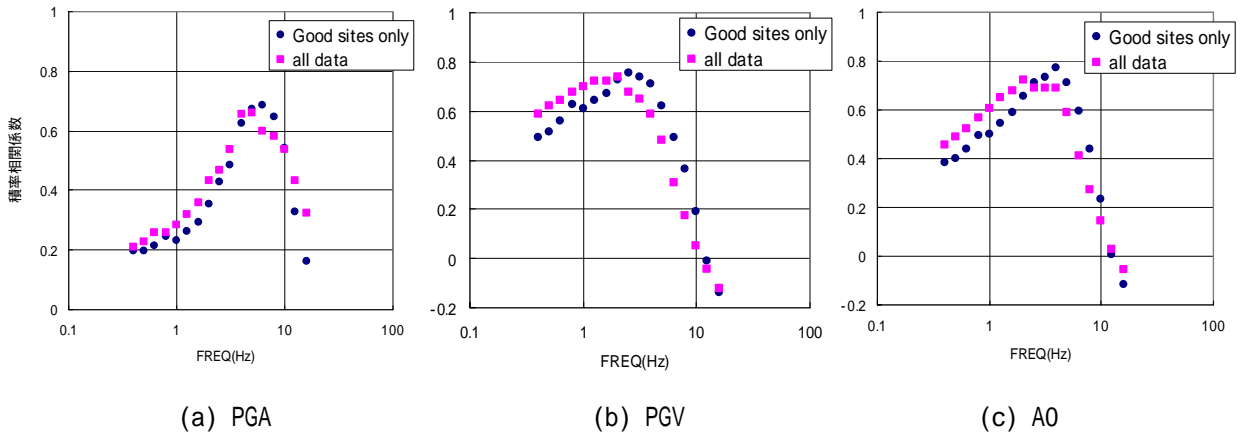


図 19 1/3 オクターブバンドの平均サイト増幅率と最大値指標のサイト係数との積率相関係数

係について分析する。ここで平均 S 波速度の求め方として 2 種類の求め方を考える。一つは従来から行なわれてきているように、地表から深さ x m までの層の平均 S 波速度を求める単純な方法である。その場合でも平均値の求め方にはいろいろ考えられるが、ここでは簡単のために層厚の重み付き算術平均とする。これについては既に 10m までと 30m までの平均値として図 13～図 15 に用いている。これを Vs\_x0m と表す。もう一つはある振動数閾値 nHz 以下に一次共振振動数があり、そのうち最もインピーダンス比が大きい(よってピークレベルが大きい)層までの平均を求めるものである。これを Vs\_nHz と表す。この場合の層厚はサイトごとに異なることになるが物理的には意味がある計算方法といえる。なお閾値と実際の各サイトの一次共振振動数とは一致しないので注意が必要である。

図 20・図 21 には Vs\_10m・Vs\_30m と 1/3 オクターブバンドで平均したスペクトルのサイト特性との相関関係を示す。図中の直線は累乗の回帰直線で、その関係式と R<sup>2</sup> 値を左下に示した。代表として 2.0

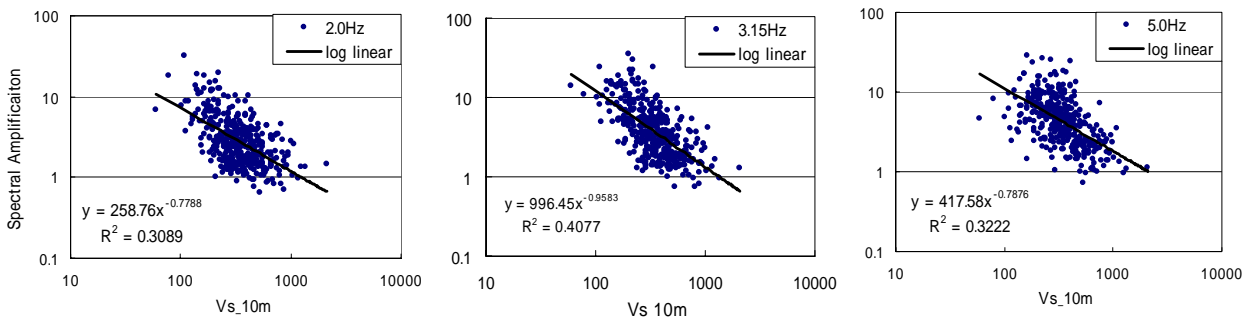


図 20 深さ 10m までの平均 S 波速度 Vs\_10m と 1/3 オクターブバンド平均サイト特性の関係

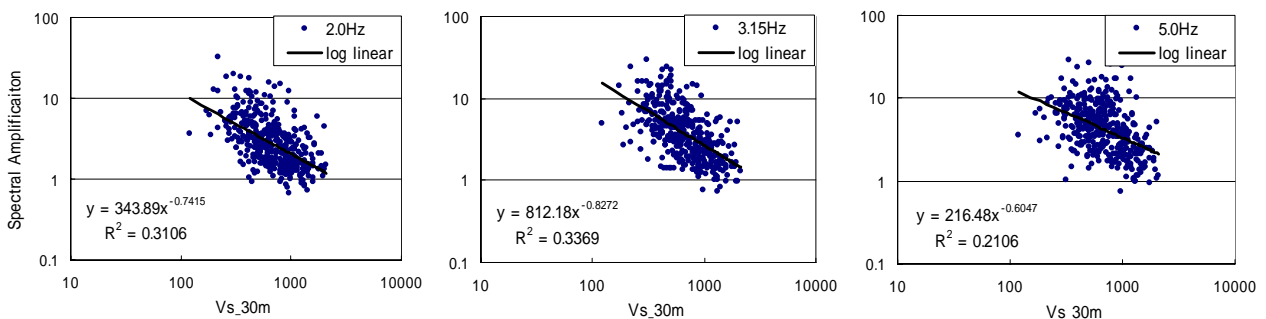


図 21 深さ 30m までの平均 S 波速度 Vs\_30m と 1/3 オクターブバンド平均サイト特性の関係

Hz、3.15Hz、5.0Hz の 3 バンドの結果を示す。Vs\_10m の場合、3.15Hz・5Hz の振動数域では Vs\_30m より良好な相関が得られていることがわかる。

図 22 にはこうして得られた、ある深さまでの平均 S 波速度とバンド周波数域ごとのサイト特性との相関係数 R(図 20・図 21 のように対数で線形関係を仮定して回帰した場合の相関)をまとめて示す。この図から最大の相関は Vs\_20m で得られること、層厚が厚ければ厚いほど低振動数域でピークとなることがわかる。図 23 には各周波数帯域でサイト特性を最もよく表現する層厚を図示した。1.25Hz から 5Hz までの広い振動数範囲で Vs\_10m と Vs\_20m がサイト特性を最もよく説明できている。なお 10Hz 以上で Vs\_100m が最大相関となっているがこれは逆相関を表しており、深い部分で速度が大きいほど表層とのインピーダンスコントラストが大きく、増幅が大きくなるということを示している。

最後に、一次共振振動数を閾値として層厚を決めた場合の平均 S 波速度との関係を図 24・図 25 に示す。期待通りに最大相関振動数が推移しているが、そのピーク振動数は閾値自体よりもかなり低い。これは結果として得られる共振振動数が閾値よりも平均的に小さくなっているからである。それを示すために、図 26 には深さ平均および一次共振振動数平均の最大相関を与える周波数帯域と一次共振振

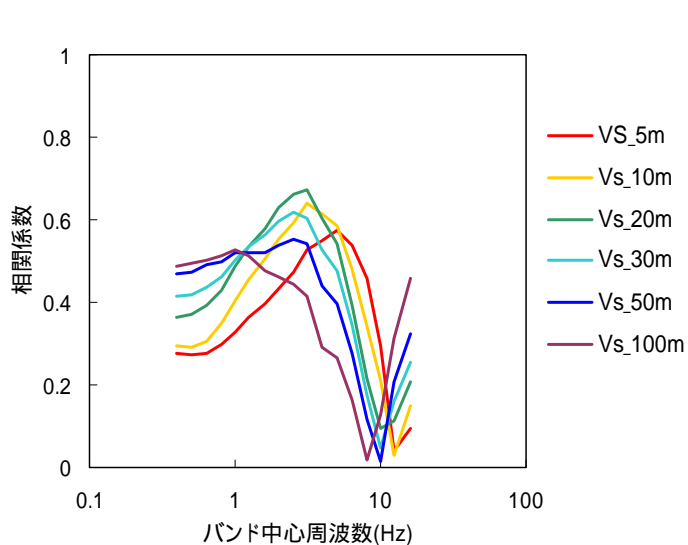


図 22 ある周波数帯域のサイト特性とある深さまでの平均 S 波速度の間の相関係数 R

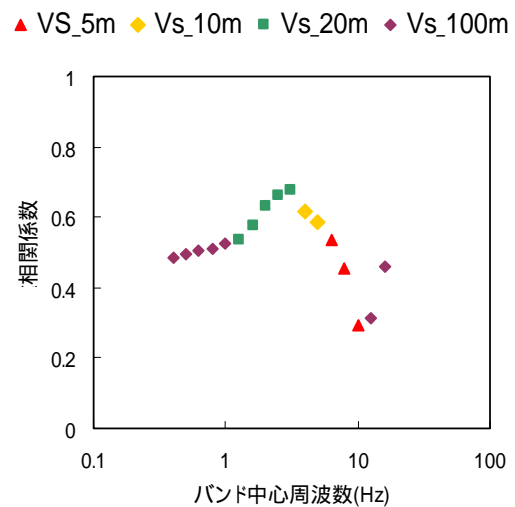


図 23 最大の相関係数を与える層厚 (深さ平均)

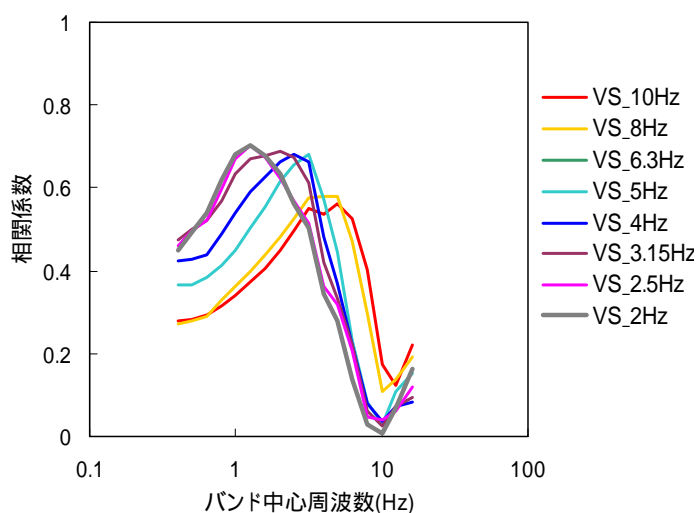


図 24 ある周波数帯域のサイト特性と 1 次共振振動数を閾値とした平均 S 波速度の間の相関係数 R

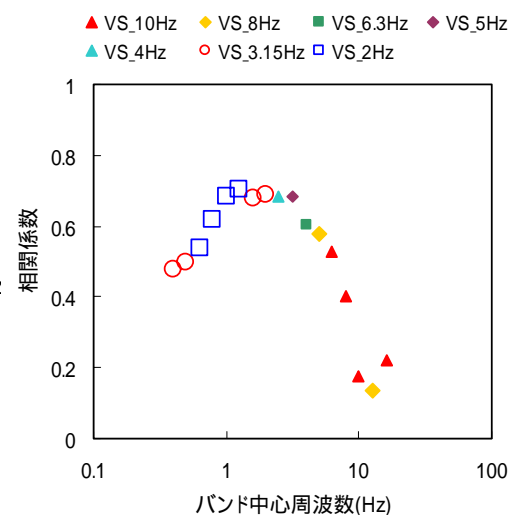


図 25 最大の相関係数を与える振動数 (一次共振振動数平均)



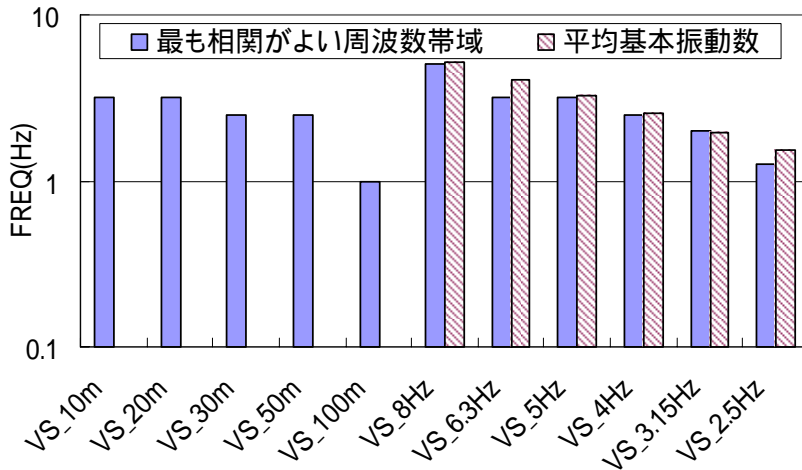


図 26 深さ平均  $V_s_{xm}$  および一次共振振動数平均  $V_s_{xHz}$  の最大相関を与える周波数帯域および一次共振振動数の平均値

動数平均の場合の実際の全サイトの一次共振振動数の平均値を示した。最大相関を示す周波数帯域は実際の一次共振振動数の平均値と良く一致しており、一次共振振動数平均は閾値ではなくこの実際の一次共振振動数の平均値に対応した S 波速度平均値であると理解する必要がある。また図 25 から、2Hz 以下の低振動数域では単純な層厚平均よりも相関が高いが高振動数域では大差ないことがわかる。

## 6. 最大値指標のサイト係数と平均 S 波速度との関係

簡便なサイト増幅係数の予測として、地盤種別による最大値指標に対する増幅度を予測する方法がいくつか提案されている。ここでは分離で得られた最大値指標と同定で得られた地下構造の S 波速度平均値との関係を整理して、より正確で簡便なサイト増幅の予測法に向けて検討を行なう。

図 27 には PGA のサイト係数とある深さまでの平均 S 波速度  $V_s_{xm}$  の関係を  $V_s_{10m}$ 、 $V_s_{30m}$ 、 $V_s_{50m}$  を例にとって示す。 $V_s_{10m}$  にはそれなりの相関が見られるが、 $V_s_{30m}$ ・ $V_s_{50m}$  ではほとんど相関がない様相となっている。図 28・図 29 には同様に PGV および A0 のサイト係数と深さ平均 S 波速度  $V_s_{xm}$  の関係を示す。PGV においては全体に相関が高いが、この場合でも  $V_s_{10m}$  の方が  $V_s_{30m}$ ・ $V_s_{50m}$  よりも高相関となっている。A0 の相関の程度は PGA と PGV の中間的な値であるが、 $V_s_{10m}$  では 3 種の強度指標の中で最も相関が高い。

同様の相関解析を一次共振振動数平均の S 波速度  $V_s_{xHz}$  についても行なうと(図は省略)、PGA では 8Hz を、PGV では 3.15Hz を、A0 では 6.3Hz を閾値として平均した S 波速度が最も相関がよい結果となった。

以上の結果得られた相関係数 R を平均する深さ、あるいは一次共振振動数の閾値をパラメタにして見てみると図 30 のようになり、PGA でも A0 でも、 $V_s_{10m}$  が最も相関が高いという結果が得られた。PGV についてのみ  $V_s_{3.15Hz}$  が一番相関が高いが、その値は 0.657 で、 $V_s_{10m}$  の 0.650 とほとんど変わらず、苦労して一次共振振動数を探し、最もインピーダンスコントラストの高い層までの平均を求めるだけの価値は見出せない。すでに見てきたように  $V_s_{10m}$  は 4Hz・5Hz の周波数帯域のサイト特性と相関がよく、PGA も A0 もその周波数帯域のサイト特性と相関がよいので、 $V_s_{10m}$  と PGA・A0 の相関が最もよいのは相互に整合性がある結果といえる。PGV に関してはより深い層までの平均 S 波速度、例えば  $V_s_{20m}$  と最大相関をとってもよさそうに思えるが、図 19 と図 22 を見比べると PGV については 3Hz 付近を中心に比較的広い範囲で相関が高く、今回のデータに関しては  $V_s_{10m}$  が最もよいという結果となったものと考えられる。

比較的low振動数の性質を反映していると考えられる PGV においても表層 10m までの情報で十分サイト係数が説明できるという結果は、以下のように解釈できる。今回の分離で得られたサイト特性・サイト係数は基準とした観測点の S 波速度が 3.4km/sec と非常に硬質であるため、増幅度がこの地震基盤と最表層のインピーダンスコントラストのみによって決まり、途中の層構造の影響を受けにくかったためである。これまで最大値指標の相対増幅率を求めている解析では往々にしてあまり硬質でない

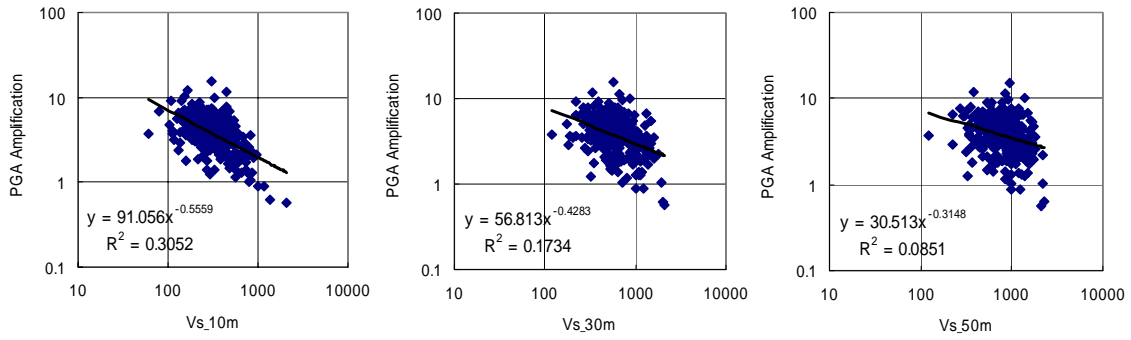


図 27 PGA のサイト係数とある深さまでの平均 S 波速度 Vs\_xm(m/sec) の関係

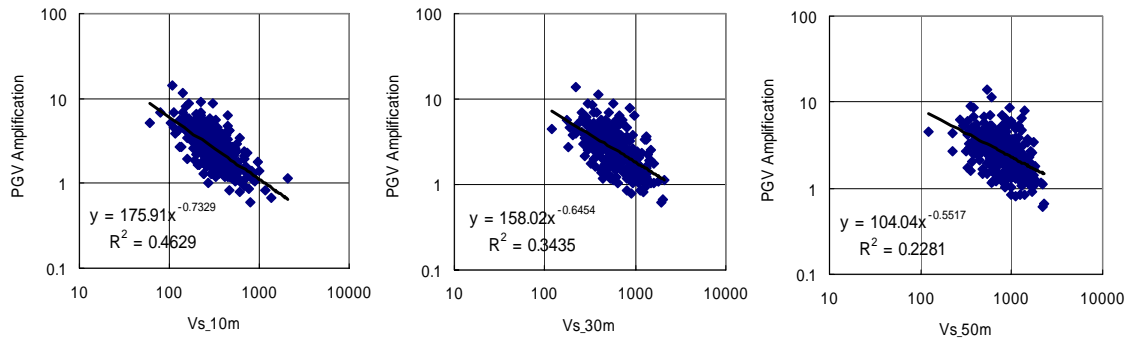


図 28 PGV のサイト係数とある深さまでの平均 S 波速度 Vs\_xm(m/sec) の関係

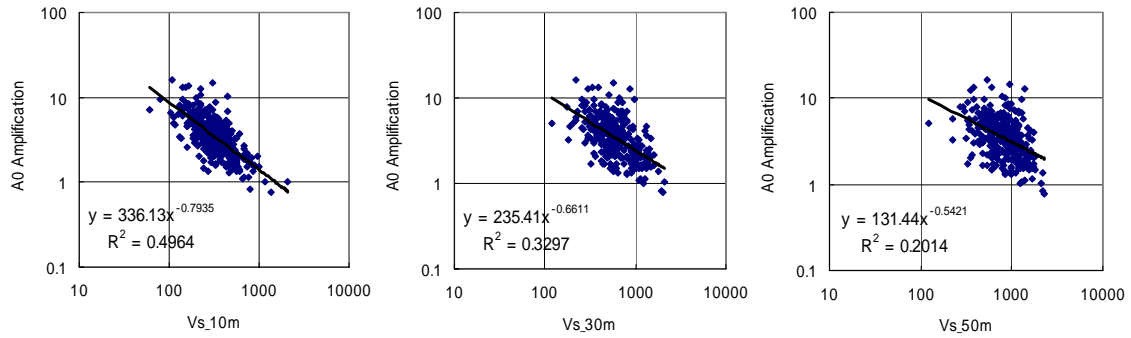


図 29 A0 のサイト係数とある深さまでの平均 S 波速度 Vs\_xm(m/sec) の関係

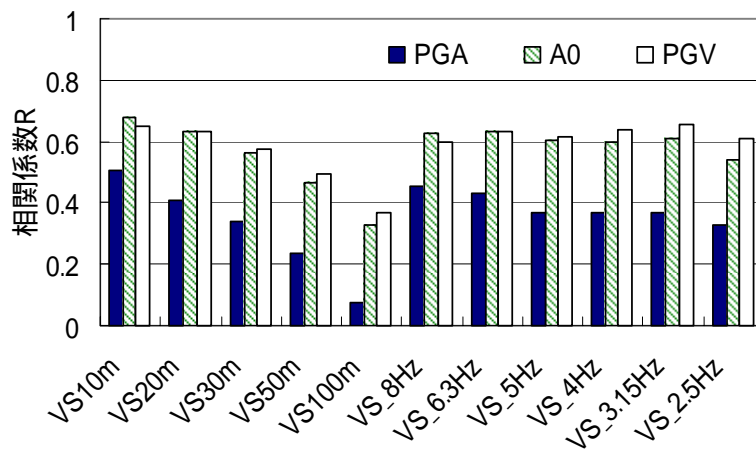


図 30 平均 S 波速度と最大値指標の相関係数 R

サイトが基準とされることが多く、その場合には深い層の情報が相対増幅度に相当の影響を及ぼすと考えられる。

## 7. 議論

ここで得られた各最大値指標のサイト係数を深さによる平均 S 波速度から推定するための計算式を深さ別に表 1 から表 3 にまとめた。一次共振振動数による平均速度値による推定式は基本的に深い層構造までわかっていないと利用できないためここでは割愛する。計算式は以下の通りである。

$$\log G_j = A + B \log Vs_j \quad (5)$$

ここで  $G_j$  は各最大値指標の j 地点サイト係数で、 $Vs_j$  はその地点の平均 S 波速度である。推定式の誤差は表に示すように  $Vs_{10m}$  が最も小さく、そのうち PGV が最小で 0.149、PGA が最大で 0.158 である。これは倍率でいうと 1.4 倍/1.4 分の 1 程度であり、元の増幅率の対数平均値が 2.6 倍 (PGV) から 3.7 倍 (PGA)、その対数標準偏差が 0.21 (PGA) から 0.24 (A0) であることを考えるとこの推定式による補正は有意に残差を減少させるといえる。それを示すために図 31 に PGV を例にとって推定式を用いた場合のデータとの対応 (赤線ではさまれた部分) と何も考えない場合の対応 (水色線ではさまれた部分) を比較した。推定式を用いることでサイト係数の大きい地点や小さい (1 に近い) 地点の評価精度が向上することが明瞭に理解される。

最後に、既往の文献で提案されている  $Vs_{30m}$  を用いた評価式の妥当性について、今回得られたデータをもとに議論する。Midorikawa et al.<sup>9)</sup> は千葉県東方沖地震で得られた主に関東地方の観測記録

表 1 平均 S 波速度から PGA のサイト係数を推定する式の係数と偏差

平均値	A	B	偏差
$Vs_{10m}$	1.959309	-0.5559	±0.157845
$Vs_{20m}$	1.816619	-0.4693	±0.165275
$Vs_{30m}$	1.754448	-0.4283	±0.172169
$Vs_{50m}$	1.484485	-0.3148	±0.181131
$Vs_{100m}$	0.919669	-0.1138	±0.188458

表 2 平均 S 波速度から PGV のサイト係数を推定する式の係数と偏差

平均値	A	B	偏差
$Vs_{10m}$	2.245291	-0.7329	±0.148575
$Vs_{20m}$	2.228913	-0.6833	±0.151612
$Vs_{30m}$	2.198712	-0.6454	±0.164259
$Vs_{50m}$	2.017200	-0.5517	±0.178113
$Vs_{100m}$	1.633529	-0.3960	±0.192204

表 3 平均 S 波速度から A0 のサイト係数を推定する式の係数と偏差

平均値	A	B	偏差
$Vs_{10m}$	2.526507	-0.7935	±0.150419
$Vs_{20m}$	2.447143	-0.7166	±0.158126
$Vs_{30m}$	2.371825	-0.6611	±0.173529
$Vs_{50m}$	2.118728	-0.5421	±0.189411
$Vs_{100m}$	1.648604	-0.3588	±0.203745

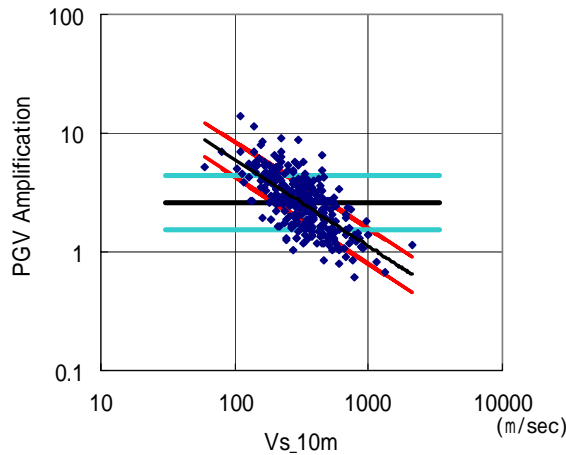


図 31 PGV のサイト増幅係数と Vs\_10m の関係  
および回帰で得られた推定式とその誤差

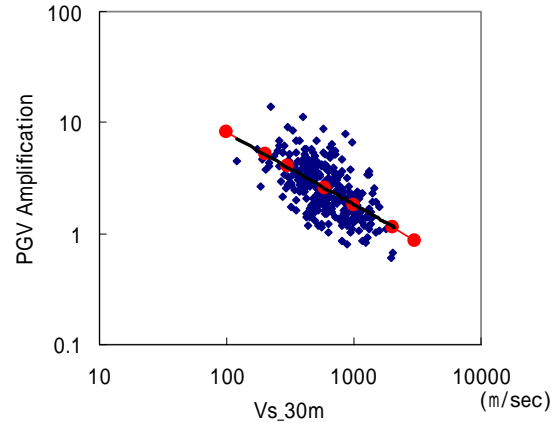


図 32 Midorikawa et al. の提案した Vs\_30m を  
用いた推定式と我々の推定式の比較

を用いて 30m の平均 S 波速度 Vs\_30m(m/sec) と最大速度の増幅率  $G_j$  との間に下記のような関係を見出した。

$$\log G_j = 1.83 - 0.66 \log V_{S\_30m_j} \quad (6)$$

この式は平均的な地盤に対する相対増幅率を求めたものであり、Vs\_30m で 600m/sec に相当する硬質地盤に対する相対増幅率を表しているものとされている。我々の増幅率は S 波速度 3,400m/sec 相当の地震基盤に対する相対増幅率なので、上式を直接表 2 の推定式と比較することはできない。そこで、まず我々の推定式を用いて、Vs\_30m で 600m/sec 相当の地盤までの増幅率を求め、それに対して(6)式を適用して観測サイト係数および我々の推定式と比較することとした。その結果補正値は 2.543 倍と得られる。これを補正して(6)式を重ね書くと図 32 の赤丸つき赤細線のようにになる。それは我々の推定式(黒太線)とほとんど一致している。これは我々の式で 600m/sec からの相対増幅率を求めると係数が 1.79 となり、B も -0.6454 で(6)式にほぼ等しいことによる。

## 8. まとめ

本論文では日本全国で観測されている K-NET、KiK-net、JMA 震度計ネットワークの強震観測データに基づき、スペクトルおよび最大加速度・最大速度・計測震度計算用フィルター加速度に対して分離手法を適用して、そのサイト特性・サイト係数を抽出し、抽出されたサイト特性の周波数特性と一次元の理論 S 波増幅特性を対応させることにより地盤構造を同定した。そして得られた地盤構造から平均 S 波速度を求め、それとサイト特性の関係、強度指標のサイト係数とサイト特性の関係、さらに平均 S 波速度とサイト係数の関係を分析した。用いた観測点は 1,700 点で、そのうち 404 地点で精度よく地盤構造を逆算することができた。得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 404 地点の平均的なサイト特性は 0Hz から 5Hz までほぼ直線的に増大し、5Hz 以上で 5 倍以上となる大きな増幅を示した。そのばらつきは約倍/半分であった。地盤の平均 S 波速度でカテゴリをわけて平均すると、深さ 10m までの平均値 Vs\_10m でカテゴリわけした場合にカテゴリごとに特徴あるサイト特性が得られた。
- 2) 最大値指標のサイト係数とスペクトルのサイト特性の相関性を比較した結果、PGA は 5Hz ~ 6.3Hz、PGV は 2 ~ 2.5Hz、そして A0 は 2Hz ~ 4Hz で相関が高くなることがわかった。
- 3) スペクトルのサイト特性と地盤の平均 S 波速度の相関性を分析した結果、1.25Hz から 5Hz の広い周波数範囲で Vs\_10m あるいは Vs\_20m が最も高い相関を示すことがわかった。1Hz 以下では相関値は低いが Vs\_100m が最も高い相関を示し、6.3Hz 以上 10Hz 以下でもやはり相関は低いが

Vs\_5m との間が一番高かった。一次共振振動数に着目して平均する層厚を変える平均化スキームも比較検討したが、単純な層厚平均に比べそれほど優位性が見出せなかった。

- 4) 最大値指標のサイト係数と地盤の平均 S 波速度の相関性を分析した結果、いずれの指標でも Vs\_10m が最も高い相関性を示した。PGV についてのみ 3.15Hz を閾値とした一次共振振動数による平均化が最もよい相関となったが、差は有意なものではなかった。
- 5) 単純な層厚による平均 S 波速度と最大値指標のサイト係数の関係を整理し、その予測誤差を評価した。その結果今回の Vs\_10m を用いた推定式の誤差は 1.4 倍/1.4 分の 1 程度(対数で 0.15)で、その補正は予測残差の減少に有効であることを示した。また既往の Vs\_30m を用いた推定式と比較して、既往の推定式はほぼ我々の推定式と一致することを確認した。

以上のような多面的解析の結果、少なくとも今回の地下構造が精度よく得られた 404 地点によるデータからは、サイト特性や最大値指標のサイト増幅率を推定するのに、30m までのボーリングデータは必ずしも必要なく、10m までの平均 S 波速度で十分だという結果が得られた。ただし、これは S 波の主要動部分について 2Hz 以上の比較的高振動数域で決まっているサイト係数についての知見であり、巨大地震のやや長周期強震動によって励起される盆地生成表面波を含むような堆積盆地の増幅特性に対して適用できるものではないので注意が必要である。

#### 謝辞

本論文で用いた観測記録は防災科学技術研究所および気象庁が観測・収集したものを配布いただいたものです。記して感謝の意を表します。なお本研究の一部は文部科学省振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」(研究代表者：入倉孝次郎)および「大都市大震災軽減化特別プロジェクト 地震動(強い揺れ)の予測」の研究資金によって実施しています。

#### 参考文献

- 1) 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔：K-NET 型強震計の記録特性，地震，第 2 輯，第 49 巻，467-481，1997．
- 2) 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，日本地震工学論文集，第 4 巻，第 1 号，33-52，2004．
- 3) 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，第 4 号，1986，579-593．
- 4) 石田良平・村瀬治比古・小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用，森北出版，1997.7．
- 5) 太田外氣晴・江守克彦・河西良幸：耐震・振動・制御，共立出版，2001.12．
- 6) Fukushima, Y., S. Kinoshita, and H. Sato : Measurements of  $Q^{-1}$  for S waves in mudstone at Chikura, Japan : Comparison of incident and reflected phases in borehole seismograms, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, 148-163, 1992.
- 7) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集 1, 51-56, 1999.11.
- 8) 増田有周・長戸健一郎・川瀬博：RC 造建物の地震応答解析結果に基づく被害関数構築に関する研究，日本建築学会構造系論文集，558，101-107，2002.8.
- 9) Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa, Site Effects on Strong-Motion Records during the 1987 Chiba-ken-Toho-Oki, Japan Earthquake, The 9<sup>th</sup> Japan Earthquake Eng. Symp., Vol.3, 85-90, 1994.

(受理：2004 年 1 月 13 日)  
(掲載決定：2004 年 8 月 13 日)

# **Relationship of S-wave Velocity Structures and Site Effects Separated from the Observed Strong Motion Data of K-NET, KiK-net, and JMA Network**

KAWASE Hiroshi <sup>1)</sup> and MATSUO Hidenori <sup>2)</sup>

1) Member, Professor, Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.

2) Engineer, Hitachi System and Service, M. Eng.

## **ABSTRACT**

Adequate evaluation of the strong motion characteristics is indispensable for quantitative strong motion prediction. For empirical prediction we need relationships between averaged S-wave velocity of ground and site amplification factors. For theoretical prediction we need S-wave velocity structures themselves. In this paper, we utilize separated site factors obtained from strong motion data of K-NET, KiK-net, and the JMA Shindo-kei network in Japan. Based on the spectral site factors and one-dimensional theoretical S-wave amplification analysis, we invert the best S-wave velocity structures for 1,300 sites in Japan. We obtained very good results for 404 sites among them. At the same time we separate site factors for strength indexes such as Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity. We then try to find the relationships between spectral site factors and site factors of these strength indexes and averaged S-wave velocity of ground. After thorough studies we conclude that the averaged S-wave velocity over only 10m from the surface is sufficient to predict site factors quantitatively for PGA and PGV, as well as JMA seismic intensity scale.

**Key Words:** Spectrum analysis, Site effects, Ground structure, Instrumental seismic intensity, S-wave velocity