



地震記録から抽出された地盤増幅特性とレシーバーファンクションの 同時逆解析による S 波速度構造モデルの推定

三浦弘之¹⁾、真鍋良輔²⁾、神野達夫³⁾、阿比留哲生⁴⁾

1) 正会員 広島大学 大学院工学研究院, 准教授 博士 (工学)

e-mail : hmiura@hiroshima-u.ac.jp

2) 非会員 元・広島大学大学院生, 修士 (工学)

3) 正会員 九州大学 大学院人間環境学研究院, 教授 博士 (工学)

e-mail : kanno@arch.kyushu-u.ac.jp

4) 非会員 中国電力株式会社 電源事業本部, マネージャー

e-mail : 368753@pnet.energia.co.jp

要 約

地震記録を用いたスペクトルインバージョンから得られる地盤増幅特性とレシーバーファンクションの同時逆解析により地震基盤から地表に至るまでのS波速度構造モデルを推定する手法を提案し, その適用性を検討した. 仮定した地盤モデルを用いた数値実験から, 地盤増幅特性とレシーバーファンクションの両者を用いることにより, 精度良くS波速度構造を推定できることを確認した. 広島県および岡山県のK-NET観測点4地点に対して本提案手法を適用した結果, 地盤増幅特性とレシーバーファンクションの両者を精度良く再現するS波速度構造モデルを推定できることを示した. さらに, 推定した地盤モデルの妥当性を検証するために, 微動アレイ観測による位相速度と比較したところ, 推定モデルによるレイリー波の理論分散曲線は観測値とよく対応することを確認した.

キーワード: S波速度構造, 地盤増幅特性, レシーバーファンクション, 同時逆解析

1. はじめに

広帯域での強震動予測を行うには, 地震基盤から地表に至るまでの地盤構造を把握することが必要不可欠である. 特に対象とする地点のS波速度構造を把握することは, 1次元的な線形時の地盤増幅評価のみならず, 強震動下における非線形時の地盤増幅評価や周辺地域の2・3次元的な地震動シミュレーションを行うための基礎的情報として重要となる¹⁾. 精度の高いS波速度構造の情報を得るには, 深層ボーリング孔によるPS検層を行うことが望ましいが, 予算や手間の面から多数の地点で調査を行うことは難しい. 最近では, 各種物理探査結果や地質断面図等を基に, 日本全国を対象とした3次元深部地盤構造モデルが作成されている^{2,3)}が, 全ての地点で精度の高い地盤構造が得られているわけではない. S波速度構造を推定する方法のひとつとして, 微動アレイ観測を用いて深部や浅部の地盤構造を求める方法が広く用いられるようになってきた⁴⁾. ただし, 深部地盤を対象とした場合, 一般にアレイ半径を大きくする必要があり, 地形が急峻な地域等では必要な大きさのアレイを展開することが困難になる場合がある. また, レイリー波の位相速度という単一の情報のみを使った解析であるので, 推定した地盤構造では特に

長周期帯域での観測地震動の特性をうまく説明できない場合もある⁵⁾。

一方、近年では気象庁や各自治体、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netをはじめとして、全国の多数の地点で地震観測が実施されており、蓄積された多数の地震記録を使って地盤増幅特性や地盤構造を推定する方法が数多く提案されている。例えば、多地点での地震記録に基づくスペクトルインバージョンによって震源特性と伝播特性を分離することで、個々の地点の地盤増幅特性を抽出する方法が広く利用されている⁶⁻⁹⁾。さらに、川瀬・松尾¹⁰⁾はそれらの結果を逆解析することにより直下のS波速度構造を推定している¹⁰⁾。ただし、得られた地盤増幅特性には長周期帯域の情報が乏しく、深部地盤を精度良く推定することは困難であった¹⁰⁾。一方で、P波初動を対象としたレシーバーファンクションや水平/上下スペクトル比を利用して、主として深部の地盤構造を評価・推定する方法も提案されており、その適用性が検証されている¹¹⁻¹³⁾。最近では、微動アレイ観測から得られるレイリー波の位相速度と地震記録から算出されるレシーバーファンクション等を同時逆解析することで、より精度の高いS波速度構造モデルを推定しようとする試みもなされている^{14,15)}。

精度の高い強震動評価を行うには、地震観測記録の様々な特徴を説明できる地盤構造モデルを構築する必要がある。しかし、地震記録から抽出される複数の指標を用いて、地盤構造モデルを推定・評価した例は未だに少ない。現在までに蓄積された多数の地震記録を有効に活用してS波速度構造を推定する方法を検討しておくことは、信頼性の高い地盤構造モデルの推定手法を構築する上で重要であると考えられる。そこで本研究では、比較的浅部の地盤構造に対して敏感なスペクトルインバージョンによる地盤増幅特性と深部の地盤構造に対して感度の高いレシーバーファンクションを同時逆解析することにより、地震基盤から地表までのS波速度構造を推定する方法について、数値実験および実観測記録への適用を通して検討する。さらに、微動アレイ観測結果との比較から、推定結果の妥当性を検証する。

2. 地盤増幅特性とレシーバーファンクションの同時逆解析に関する数値実験

2.1 計算方法とモデル

地盤増幅特性とレシーバーファンクションの同時逆解析による地盤構造モデルの推定に関して数値実験を行い、手法の妥当性を検討する。まず、表1に示すようなS波速度 (V_s (m/s)) と層厚 (H (m)) をもつ地表から地震基盤までのS波速度構造モデルを用意した。各層のP波速度 (V_p (m/s)) と密度 (ρ (kg/m³)) はそれぞれ狐崎・他(1990)¹⁶⁾、Dal Moro *et al.* (2007)¹⁷⁾を参考にして、下記の式を用いてS波速度と連動させて与えた。

$$V_p = 1.11 \cdot V_s + 1290.0 \quad (1)$$

$$\rho = 770 \cdot \log(V_s) - 150 \quad (2)$$

また、減衰については、S波のQ値 (Q_s) は式(3)に示すように各層のS波速度と連動させ、周波数に依存する形で与えた。また、P波のQ値 (Q_p) は小林・他(2005)¹³⁾を参考にして Q_s の0.5倍として与えた。

$$Q_s = \frac{V_s}{15} \cdot f^{1.0} \quad (3)$$

以上に示す地盤モデルを用いて、地震基盤に対する地表面での理論増幅率とレシーバーファンクションの理論値を、それぞれSH波、P-SV波における1次元重複反射理論^{18, 19)}に基づき計算した。理論増幅率は解放基盤に対する増幅を求めた。レシーバーファンクションの計算では、小林・他(1998)¹¹⁾を参考にして1~10Hzまでのバンドパスフィルターを施した上で、位相の情報のみを抽出するために周波数領域での振幅を全周波数帯域で1.0としてからフーリエ逆変換した。なお、地震基盤へのSH波およびP波の入射角については、それぞれの入射角の違いによる増幅

表1 数値実験におけるS波速度構造モデル

Layer	V_s (m/s)	H (m)
1	200	5.0
2	400	10.0
3	650	30.0
4	1,000	50.0
5	1,800	100.0
6	3,000	-

率やレシーバーファンクションの違いは小さいものと考え、SH波については鉛直入射を、P波については入射角45度を仮定してそれぞれ増幅率とレシーバーファンクションを計算した。

一般に、実際の観測値には様々な要因によるノイズが含まれる。そこで本検討では、理論増幅率に対数軸でピーク値の5%、レシーバーファンクションにピーク値の10%を最大値とするランダムノイズをそれぞれの理論値に加えた。得られた理論増幅率とレシーバーファンクションおよびS波速度構造を図1中の赤線で示す。レシーバーファンクションのピークを表す時間が直達P波と地震基盤で変換されたSV波（PS変換波）の到達時間差（PS-P時間）を表し、このモデルによるPS-P時間は0.12秒と求められた。数値実験では、これらのデータを擬似的な観測値として利用することで、表1に示す正解のS波速度構造モデルを推定することを試みる。

同時逆解析では遺伝的アルゴリズム（GA）²⁰を利用してS波速度構造モデルを推定した。GAでは、地震基盤から地表までの層に対して探索範囲を設定し、ランダムに発生させたモデルから地盤増幅率とレシーバーファンクションの理論値を計算し、下記の式から観測値との誤差を算出する。

$$misfit_A = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{N_A} \left(\frac{A_{obs}(f_i) - A_{cal}(f_i)}{A_{obs}(f_i)} \right)^2 \quad (4)$$

$$misfit_{RF} = \frac{1}{N_{RF}} \sum_{i=1}^{N_{RF}} \left(\frac{RF_{obs}(t_i) - RF_{cal}(t_i)}{RF_{obs}^{max}} \right)^2 \quad (5)$$

$$misfit = p \cdot misfit_A + (1-p) \cdot misfit_{RF} \quad (6)$$

ここで、 $misfit_A$ と $misfit_{RF}$ はそれぞれ地盤増幅率とレシーバーファンクションにおける観測値と理論値の誤差を表す。 A_{obs} と A_{cal} はそれぞれ周波数 f_i における地盤増幅率の観測値と理論値を表す。 N_A は解析対象周波数のデータ点数を表し、本研究では対数軸で等間隔となるように0.3~20Hzまでの200個とした。また、 RF_{obs} と RF_{cal} はそれぞれ時刻 t_i におけるレシーバーファンクションの観測値と理論値を表す。 RF_{obs}^{max} はレシーバーファンクションの観測値の最大値を表す。 N_{RF} は解析対象時間のデータ点数を表し、本研究では0秒から2秒までを解析対象とし、100Hzサンプリングで点数は200個とした。また、 $misfit$ は地盤増幅率とレシーバーファンクションの誤差の和を表し、 p は両誤差に対する重み付けを表すパラメータである。

2.2 数値実験結果

本数値実験では、探索モデルにおける層数を正解と同じく6層とし、表2に示す探索範囲でVsと層厚を変化させて逆解析を行った。なお、各層のVp、密度、減衰は、正解モデルと同様に式(1)~(3)に示すようにS波速度と連動させて与えた。GAの計算では、総個体数を40個体、交差確率は70%、突然変異確率は5%、世代数は150世代とし、乱数の初期値を変えて100回試行し、式(6)で示す誤差が最も小さくなったときのモデルを最終的な結果として出力した。誤差の重み付け $p=0.5$ としたときの逆解析で得られた増幅率とレシーバーファンクション、S波速度構造を図1に示す。図には擬似観測値および正解となるS波速度構造も示している。地盤増幅率、レシーバーファンクションともに擬似観測値とよく一致しており、推定されたS波速度構造も正解とほぼ一致していることが確認できる。

次に、両誤差の重み付けパラメータ p の値を変化させたときの逆解析結果について検討するため、 p の値を0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0の5種類に変化させて逆解析を行った。ここで、 $p=0.0$ はレシ

表2 探索範囲

Layer	Vs (m/s)	H (m)
1	100 - 300	1 - 50
2	200 - 600	1 - 100
3	500 - 800	1 - 200
4	800 - 1,800	1 - 200
5	1,200 - 2,700	1 - 200
6	3,000	-

ーバーファンクションのみ、 $p=1.0$ は地盤増幅率のみを用いた逆解析に相当する。乱数の初期値を変えた100回の試行の結果のうち、誤差が小さかった上位10ケースにおける結果を図2に示す。図の横軸は各層のVs、縦軸は層厚を表し、各層ごとの値をプロットしている。 $p=0.0$ のときの結果をみると、正解に近い値が得られているケースもあるが、得られたVsと層厚にはバラツキが大きい。一方、 $p=1.0$ のときの結果をみると、 $p=0.0$ のときに比べてバラツキが小さくなっていることがわかる。また、 $p=0.3\sim 0.7$ の結果には大きな違いはみられないが、 $p=0.5$ のときが最も結果のバラツキが小さかった。このことは、地盤増幅率やレシーバーファンクションのいずれか一方による単独逆解析に比べて、両者を用いて同時逆解析した方が安定して正解に近い値を得られることを示している。

2.3 層数の多い地盤モデルや逆転層を有する地盤モデルに対する同時逆解析結果

次に、同時逆解析時に想定される地盤層数よりも層数が多い地盤や、上層よりも下層の地盤のVsが小さくなる層（逆転層）を有する地盤に対する本手法の適用性を検討した。本検討では、表2に示すような2つのS波速度構造モデルを用意した。表2のモデル2は計9層からなる地盤で、表1のモデルに比べてVsが比較的緩やかに増加するモデルである。モデル3も計9層からなる地盤で、中間の層で逆転層を2つ有するやや複雑なモデルである。これらのモデルから前述と同様の方法で理論値を計算し、ランダムノイズを

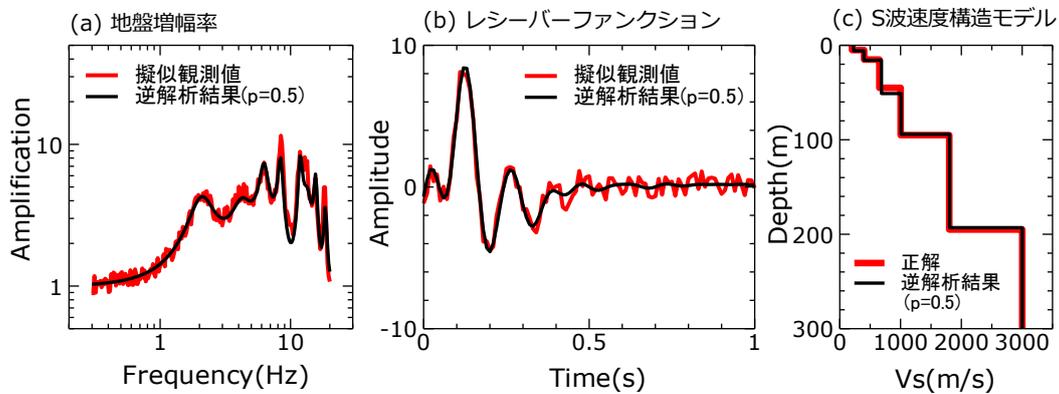


図1 数値実験で用いた地盤増幅率とレシーバーファンクション、S波速度構造モデルと逆解析結果

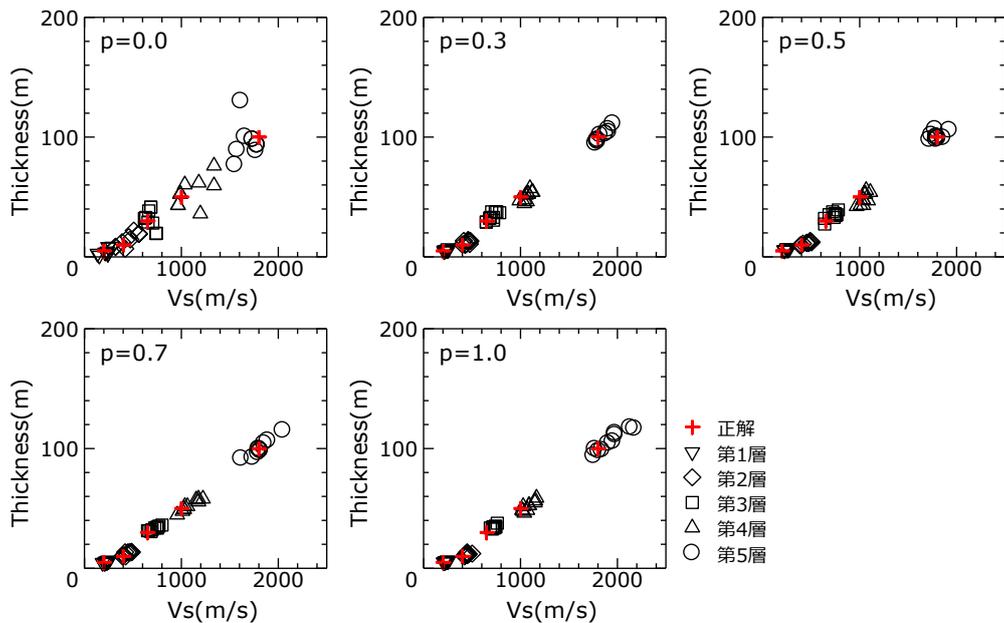


図2 重み付け係数 p を変化させたときの逆解析結果の比較

加えることで擬似観測値を求めた。これらの擬似観測値を用いて、6層モデルを仮定し、表2に示す探索範囲で同時逆解析によりS波速度構造を推定した。得られた結果を図3に示す。

モデル2に対する解析結果をみると、レシーバー関数は両者ともよく一致していることが確認できる。増幅率は理論値の形状はやや異なり、擬似観測値に比べて逆解析結果は2~4Hzで過小評価となっているものの、他の周波数帯域ではよく対応していた。S波速度構造の推定結果をみると、正解モデルにある $V_s=650\text{m/s}$ と $1,000\text{m/s}$ の二層が、逆解析ではそれらの平均に近い $V_s=約800\text{m/s}$ の一層と推定され、

層厚はもとの二層の層厚の和に近い値が推定された。また、正解モデルの $V_s=1,500\text{m/s}$ と $1,800\text{m/s}$ の二層についても同様に、逆解析では二層の V_s の平均に近い $V_s=約1,600\text{m/s}$ の一層と推定され、層厚はもとの二層の層厚の和に近い値が推定された。その他の層については、 V_s と層厚ともに正解に近い値が得られた。このため、地震基盤までの深度もほぼ正解に近い結果が得られていることがわかる。

モデル3に対する解析結果をみると、モデル2と同様にレシーバー関数のピークは両者ともによく一致していた。増幅率は2Hz前後のピークが逆解析ではやや過小評価となっているものの、全体としては対応していた。S波速度構造の推定結果をみると、逆解析では V_s が逆転している層の上下の層の

表3 モデル2, 3のS波速度構造モデル

モデル2			モデル3		
Layer	V_s (m/s)	H (m)	Layer	V_s (m/s)	H (m)
1	100	3.0	1	200	5.0
2	200	5.0	2	400	10.0
3	400	10.0	3	250	15.0
4	650	30.0	4	650	30.0
5	1,000	50.0	5	1,000	50.0
6	1,500	70.0	6	800	30.0
7	1,800	100.0	7	1,200	100.0
8	2,300	150.0	8	1,800	100.0
9	3,000	-	9	3,000	-

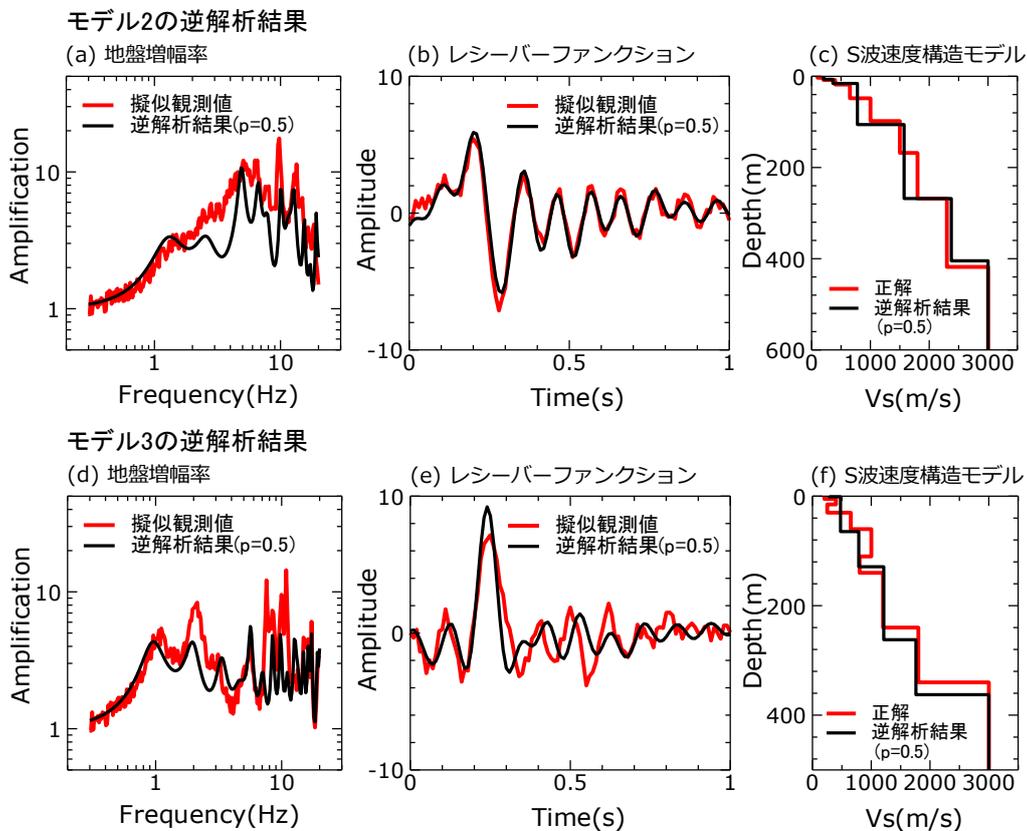


図3 モデル2, 3に対する同時逆解析結果

平均的な V_s が推定されていること、層厚は上下の層厚の和に近い値が得られていることがわかる。また、その他の層については、 V_s と層厚ともに正解に近い値が得られた。このため、地震基盤までの深度もほぼ正解に近い結果が得られた。

以上の結果より、限られたモデルに対する検討ではあるが、想定よりも層数が多い地盤や逆転層を有するやや複雑な地盤では、それを簡略化した地盤モデルが求まることがわかった。また、その簡略化したモデルによる V_s や層厚は、元のモデルによる値とほぼ等価であった。

3. 地震記録を用いた地盤増幅特性とレシーバーファンクションの算出

3.1 スペクトルインバージョンによる地盤増幅特性の算出

本研究で提案した手法を実観測記録に適用するために、地震観測点における地盤増幅特性とレシーバーファンクションを算出する。地表面における地震観測記録から地盤増幅特性を算出する手法として、多地点での観測記録から震源、伝播、地盤特性を分離するスペクトルインバージョンが広く利用されている⁶⁾。全国の地震観測点を対象として、スペクトルインバージョンによる地盤増幅特性の推定結果が公開されている例として、野津・長尾(2005)²¹⁾による結果がある。しかし、この解析では、記録のS波部分だけでなく後続位相も含めた長い時間区間で解析を行っていることから、得られた地盤特性に後続位相の影響が含まれている可能性がある。本研究による手法では、SH波の増幅特性による理論値との比較を行うことから、後続位相の影響が含まれない地盤増幅特性を求める必要がある。

また、本手法による結果を検証するには、PS検層等により地震基盤までのS波速度構造が得られている地点を対象とするのが望ましい。いくつかのKiK-net観測点では地震基盤までのPS検層が行われているが、いずれも地震基盤までの深度が小さいため、レシーバーファンクションによるPS-P時間が非常に短く、同時逆解析の有効性を検討することは困難と考えられる。その他に、スペクトルインバージョンによりS波の地盤増幅特性が得られており、かつ地震基盤までのS波速度構造が得られている地点はみあたらなかった。筆者らのひとは、既に中国地方の地震観測記録を用いて、波形のS波部を対象としたスペクトルインバージョンを実施し、各観測点の地盤増幅特性を得ている^{22, 23)}。本研究ではこれらの既往の研究による結果を利用することとした。

既往の研究^{22, 23)}によるスペクトルインバージョンでは、中国地方のK-NET、KiK-net観測点（計156地点）を対象として、2001年1月から2008年5月までの期間に、気象庁マグニチュード4.0以上の地震で、地表面最大加速度が200cm/s/s以下、1つの地震につき最低5地点の観測点で記録があること、を条件として、計119地震、計4,862記録のデータを収集し、解析を行っている。

収集された記録のS波到達から10.24秒間を対象としてスペクトルインバージョンを行っており、得られた地盤増幅特性は主にS波の増幅を表しているものと考えられる。解析対象周波数はノイズの影響を

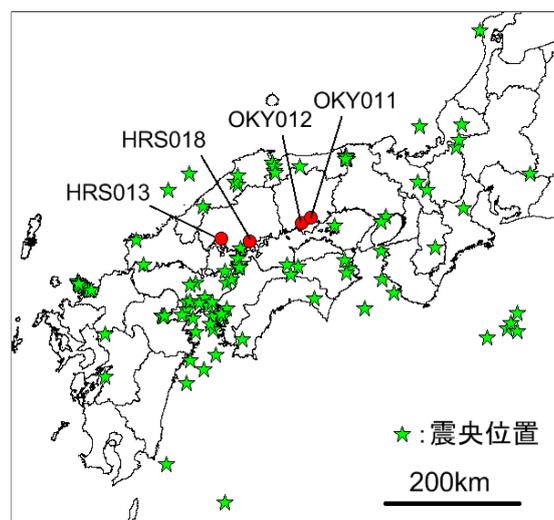


図4 対象地点と解析に使用した地震の震央位置

考慮して0.3Hzから20Hzまでとしている。また、解析では、地中と地表の地震記録から同定された5地点のKiK-net観測点における理論地盤増幅率を拘束条件としてスペクトルインバージョンを行っている。これらの5地点の地中地震計は、 $V_s=3,000\text{m/s}$ 程度の地震基盤に設置されているため、得られた地盤増幅特性は地震基盤からの増幅を表していることとなる。文献22), 23)による結果の一部をAppendixに示す。

本研究では、中国地方の地震観測点のうち、地震基盤まである程度の深さを有することが予想されるHRS013 (K-NET広島), HRS018 (K-NET竹原), OKY011 (K-NET岡山) およびOKY012 (K-NET倉敷) の計4地点を対象地点とした。対象地点と解析に使用した地震の震央位置の分布を図4に示す。まず、これらの地点で使用した記録における地盤の非線形性の影響を簡便な方法²⁴⁾によって検討した。地盤の卓越周期を評価するには地震記録におけるS波部のH/Vスペクトル比を用いることが有効であることが指摘されている²⁵⁾ことから、各記録のH/Vスペクトル比から卓越周期を求めた。その結果、地震ごとの卓越周期には大きな変化はみられず、顕著な地盤のせん断剛性比の低下はみられなかった。さらに、文献24)の方法により使用した記録の最大地動速度から地盤の有効せん断ひずみを求めた。この手法では地盤を表層と基盤の2層構造を仮定する必要がある。ここでは、 $V_s=400\text{m/s}$ 前後の層を工学的基盤と考え、以浅の層を表層とし、PS検層結果を基にして表層の層厚と平均的な V_s (V_{s0})を表4の通り求めた。なお、HRS013とHRS018のPS検層は工学的基盤にまで達していないため、層厚をPS検層の最下面の20mと設定した。これらの値を用いて有効せん断ひずみを算出したところ、ほぼ全ての記録でひずみは 10^{-4} 以下のレベルとなった。これらの検討から、使用した記録に含まれる地盤の非線形性の影響は小さいものと判断した。

スペクトルインバージョンにより得られた各地点の地盤増幅特性を図5に示す。いずれの観測点でも比較的明瞭なピークがみられ、1次ピークとしてHRS013とHRS018では1Hz前後、OKY011とOKY012は2~3Hzに卓越周期が現れていることがわかる。図には野津・長尾(2005)²¹⁾による結果も示している。両者の解析条件は異なり、単純な比較は難しく、ピークの大きさに若干の違いはみられるものの、ピークの周期や増幅特性の形状はほぼ対応していることがわかる。このため、本解析結果は概ね妥当なものと考えられ、結果としてこれらの地点では後続位相の影響は小さかった。また、いずれの解析結果においても、0.5Hz程度以下の周波数帯域ではスペクトル形状が平坦あるいは左上がりの傾向がみられた。これらの周波数帯域では、観測記録に含まれるノイズの影響が現れている可能性があるが、逆解析結果に与える影響は小さいと考え、これらの周波数帯域も含めて解析することとした。

3.2 レシーバーファンクションの算出

前節と同じデータセットを利用して、対象地点におけるレシーバーファンクションを計算した。計算は文献11)の方法を参考にした。すなわち、まず各地震の震央位置を基に水平2成分からRadial成分を算出し、解析区間をP波初動から4秒間として、後半1秒間にコサイン型のテーパを施した上で、Radial成分とUD成分のフーリエスペクトル振幅比

表4 表層地盤の V_s 、層厚および主な土質

表層	HRS013	HRS018	OKY011	OKY012
V_{s0} (m/s)	124	151	158	184
層厚(m)	20	20	15	10
主な土質	シルト	シルト	砂	礫

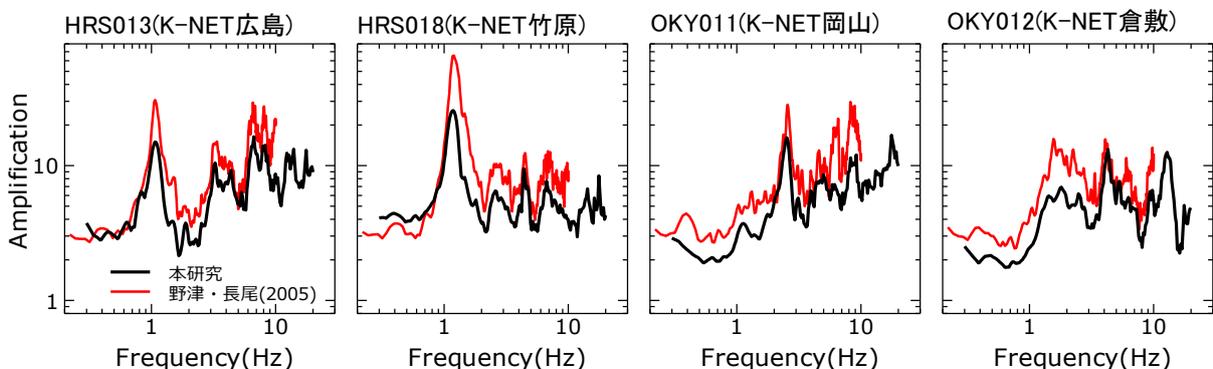


図5 スペクトルインバージョンによる地盤増幅特性と野津・長尾(2005)²¹⁾の結果との比較

を求めた。さらに、スペクトル比に1Hzから10Hzまでのバンドパスフィルターを施した上で、フーリエ逆変換によりレーザーファンクションを得た。また、2章における計算と同じく、周波数領域において振幅を1.0としてからフーリエ逆変換を行った。

HRS013では計19記録、HRS018では計17記録、OKY011では計13記録、OKY012では計12記録を用いてレーザーファンクションを計算し、その平均値を求めた。ここで、個々のレーザーファンクションをみたところ、全体の平均的なPS-P時間から大きく外れる記録がみられた。本解析では平均値から大きく外れるレーザーファンクションは除去することとした。全体のレーザーファンクションの平均におけるPS-P時間から $\pm 10\%$ の範囲を許容範囲と定め、個々のレーザーファンクションによるPS-P時間が許容範囲外にあるものを除去し、再度平均を求めた。その結果、HRS013では計15記録、HRS018では5記録、OKY011では7記録、OKY012では5記録を解析に使用することとなった。HRS013では全体の約8割の記録数が使用できたことから、比較的安定したレーザーファンクションが得られているのに対して、その他の地点では全体の30%から50%程度の記録しか使用できず、地震ごとのレーザーファンクションのバラツキはやや大きかった。

図6には各地点で使用した地震によるみかけの入射角の分布を示す。図中の点が各地震によるみかけの入射角を表し、図中の太破線がそれらの平均を表している。地点ごとにバラツキが大きいもののみかけの入射角は30度から90度で平均は概ね60~70度で、OKY011では平均が約80度と大きかった。図中の

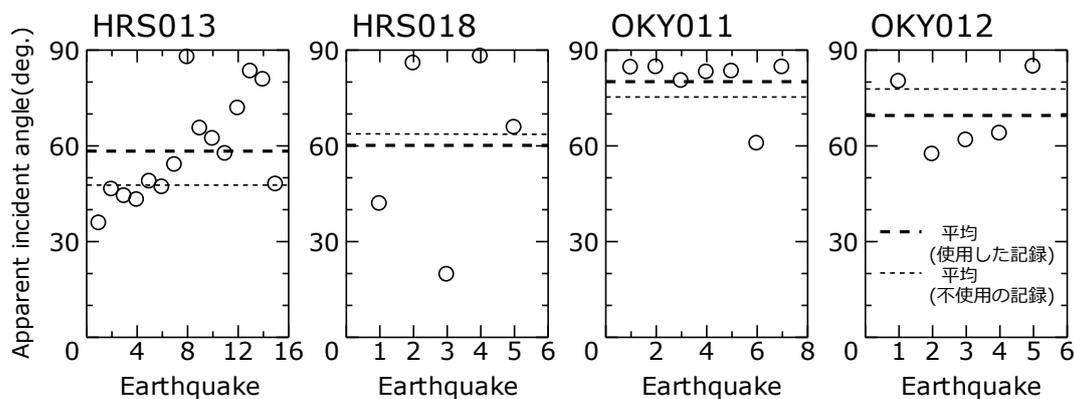


図6 レーザーファンクションの計算に用いた記録のみかけ入射角

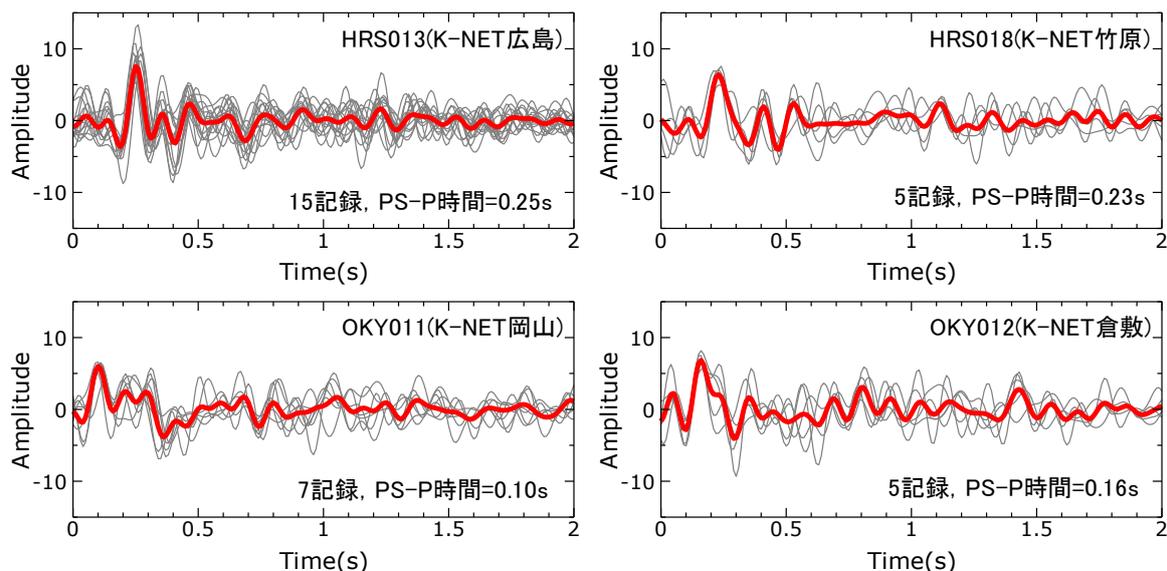


図7 得られたレーザーファンクションとその平均
(灰細線：各地震によるレーザーファンクション，赤太線：平均値)

細破線は本解析で使用しなかった記録のみかけの入射角の平均を表している。使用した記録の平均と比べると、両者に顕著な差はみられず、みかけの入射角の違いによるレシーバーファンクションの変化は小さかった。

得られた各観測点のレシーバーファンクションを図7に示す。細灰色線で示したものが採用したレシーバーファンクションを表し、赤太線がそれらの平均を表す。個々のレシーバーファンクションの形状はややばらついているものの、主たるピークだけでなく、その前後の特徴的な位相も共通してみられる記録が多く、赤線で示す平均値は各記録の特徴をとらえているものと判断できる。以降の計算では、レシーバーファンクションの平均値を利用することとした。また、図中には各地点のPS-P時間も示している。HRS013とHRS018のPS-P時間は0.25秒前後、OKY011とOKY012のPS-P時間は0.10秒、0.16秒と求められた。各地点のPS検層による浅部地盤とJ-SHISによる深部地盤³⁾を仮定したときの理論PS-P時間を試算したところ、それぞれ0.16秒、0.13秒、0.13秒、0.15秒弱となった。観測値はこれらの理論値と比較すると、広島県の観測点では長く、岡山県の観測点では同程度であった。特に広島県の2地点では理論値との差が大きいため、J-SHISのモデルによる地震基盤深度に比べて実際の基盤深度はより大きい、あるいは全体として V_s が小さいことが予想される。

4. 同時逆解析によるS波速度構造モデルの推定

4.1 解析条件

3章で得られた地盤増幅特性とレシーバーファンクションに対して、2章で示した同時逆解析手法を適用することで、各地点のS波速度構造モデルを推定することを試みた。解析手法は2章で示した通り、S波速度構造モデルから、地盤増幅率とレシーバーファンクションの理論値を算出し、(4)~(6)式から観測値との誤差を求め、誤差が最も小さくなるモデルをGAにより探索する。なお、本研究ではスペクトルインバージョンで得られた地盤増幅特性は、主としてSH波によるものと考えて理論値との適合を試みた。図5の地盤増幅特性や図7のレシーバーファンクションには、直下の地盤だけでなく、周辺の3次元的な地盤構造の変化の影響が含まれている可能性があるが、図4に示すように本解析では様々な方向から到来した地震記録を用いていることから、全体として周辺地盤の不整形性の影響は低減されるものと考え、直下の地盤を水平成層と仮定して解析を行うこととした。

K-NET観測点では深さ20m程度まではPS検層が行われており、深部についてはJ-SHIS³⁾による地盤構造モデルが推定されている。本研究ではこれらの結果を参考にして探索範囲を設定した。すなわち、 V_s が400m/s程度までの浅部地盤については、PS検層で得られた V_s の値を中心として探索範囲を設定した。なお、HRS013とHRS018ではPS検層の最下層の V_s が150m/s程度と小さかったことから、 $V_s=400$ m/s前後の層を追加した。深部地盤について、J-SHISによる対象地点の地震基盤までの V_s をみると、650m/s、1,200m/s、1,500m/s、1,800m/s、2,100m/s、2,700m/s、2,900m/s、3,200m/sの層がみられた。逆解析において層数が多いと解の探索が困難になる可能性があることから、次に述べるとおり層数を減らして解析を行うこととした。すなわち、本研究では、まず $V_s=2,700$ m/s以上の層を地震基盤と考え、地震基盤の $V_s=3,000$ m/sとして固定した。地震基盤以浅の層は500~800m/s、1,000~1,800m/s、1,500~2,500m/sの3層を設定して解析を行うこととした。ただし、OKY011ではJ-SHISのモデルにおいて $V_s=1,800$ および2,100m/sの層がみられ

表 5 同時逆解析における探索範囲

HRS013			HRS018			OKY011			OKY012		
Layer	V_s (m/s)	H (m)									
1	70 - 120	1 - 5	1	90 - 150	1 - 5	1	60 - 100	1 - 5	1	80 - 150	1 - 5
2	100 - 200	1 - 50	2	100 - 250	1 - 50	2	100 - 250	1 - 50	2	150 - 300	1 - 50
3	300 - 500	0 - 50	3	300 - 500	0 - 50	3	200 - 400	0 - 50	3	200 - 600	0 - 50
4	500 - 800	0 - 100	4	500 - 800	0 - 100	4	500 - 800	0 - 100	4	500 - 800	0 - 100
5	1,000 - 1,800	0 - 500	5	1,000 - 1,800	0 - 500	5	1,000 - 1,800	0 - 500	5	1,000 - 1,800	0 - 500
6	1,500 - 2,500	0 - 500	6	1,500 - 2,500	0 - 500	6	3,000	-	6	1,500 - 2,500	0 - 500
7	3,000	-	7	3,000	-				7	3,000	-

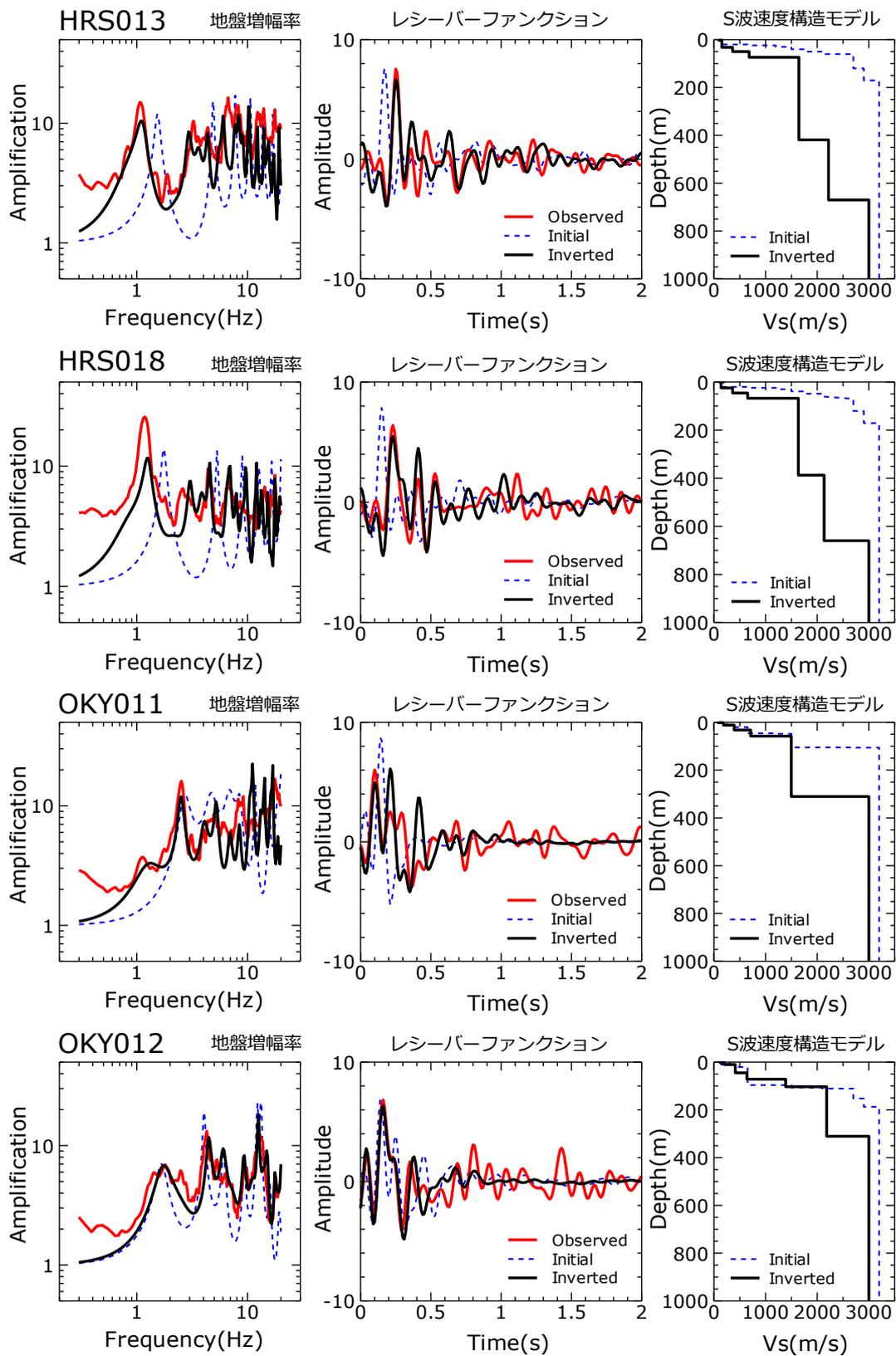


図8 同時逆解析結果

(赤線：観測値，青破線：初期モデルとその理論値，黒線：逆解析結果)

なかったことから2層と設定した。層厚の探索範囲については、最表層は1~5mとし、 $V_s=600\text{m/s}$ 程度までの層は1~50m、 $V_s=800\text{m/s}$ 程度までの層は0~100m、それ以深の層は0~500mと設定した。各地点の探索範囲をまとめたものを表5に示す。

地盤増幅率やレシーバーファンクションにおける入射角の影響は小さいものと考え、数値実験と同じく、理論値の計算ではSH波の増幅率は最も単純な鉛直入射を仮定し、レシーバーファンクションは図6に示すみかけの入射角の平均値を与えることとした。また、誤差の重み付けを表すパラメータは、 $p=0.5$ として計算した。GAの計算では、総個体数を40個体、交差確率は70%、突然変異確率は5%、世代数は150世代とし、乱数の初期値を変えた100回の試行を行い、誤差が最も小さくなるときのモデルを出力した。

4.2 解析結果

対象とした4地点における逆解析結果を図8に示す。図は左から地盤増幅特性、レシーバーファンクション、S波速度構造を表しており、各図の赤線が観測値を表す。S波速度構造モデルの図には、当該地点のPS検層による浅部地盤とJ-SHISによる深部地盤を結合した地盤モデル（以降、初期モデルとする）を

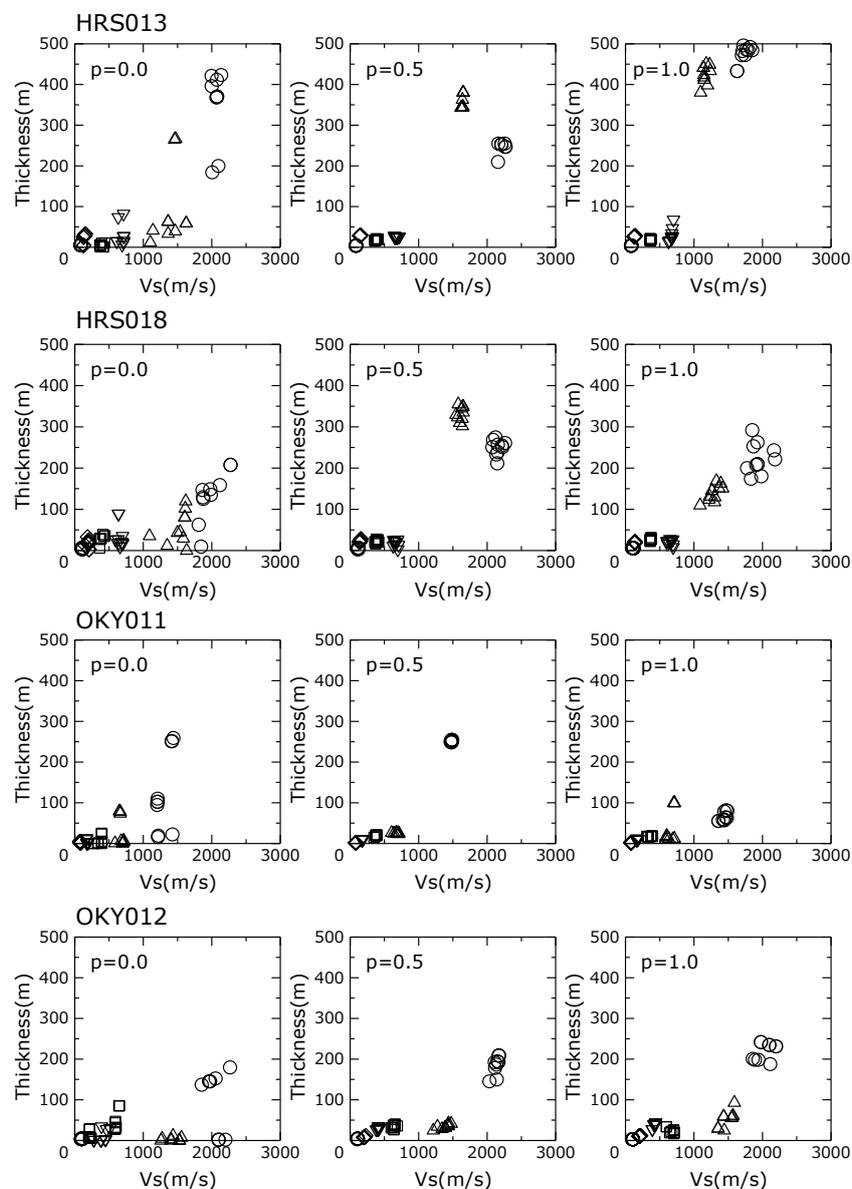


図9 単独逆解析 ($p=0.0$ および $p=1.0$) と同時逆解析 ($p=0.5$) による結果の比較

青破線で示し、初期モデルから計算される理論増幅率とレシーバーファンクションを各図の青破線に示す。OKY012では理論値は観測値と近い値を示しているが、その他の地点では増幅率、レシーバーファンクションともに理論値は観測値とは異なっており、初期モデルでは観測値を説明できないことがわかる。

同時逆解析によって得られたS波速度構造モデルと理論増幅率、レシーバーファンクションを各図の黒実線で示す。いずれの地点においても地盤増幅特性とレシーバーファンクションの理論値と観測値はほぼ一致しており、推定されたS波速度構造モデルは両者をうまく説明できていることが確認できる。ただし、HRS018における地盤増幅率の理論値は1Hz前後のピークで観測値よりやや小さかった。地震基盤の V_s やその他の探索範囲を変えて試行錯誤したが、観測値の大きな増幅率を一般的に考えられる V_s や層厚で表すことは困難であった。当該地点は表4に示すモデルよりも複雑な地盤構造となっている可能性があるが、現段階ではその要因は明らかでなく、今後の検討課題としたい。

地震基盤までの深度は、HRS013とHRS018では約650m、OKY011とOKY012では約300mと推定された。推定されたS波速度構造とJ-SHISによるS波速度構造を比較すると、いずれの地点においてもJ-SHISによるモデルよりも地震基盤深度は大きく、堆積地盤がより厚く存在しているものと推定された。

同時逆解析による解の精度について検討するため、誤差の重み付けを表す p の値を0.0および1.0に変化させて同条件下で逆解析を行った。乱数の初期値を変えて行った100回の試行のうち、誤差が小さくなった上位10ケースにおける各層の V_s と層厚の分布を図9に示す。いずれの地点においても、 $p=0.0$ としたとき、すなわちレシーバーファンクションのみの逆解析では、各層ごとの値のバラツキが大きく、解が安定して求まっていないことがわかる。また、 $p=1.0$ としたとき、すなわち地盤増幅率のみの逆解析では、 $p=0.0$ の結果と比べると各層の値がある範囲に集中しており、比較的安定して解が求まっていた。 $p=0.5$ のとした本研究による同時逆解析では、各層の値が最も集中して分布しているようにみえる。このことを定量的に示すために、図9に示す結果に対して、各層の層厚と V_s の平均値と標準偏差を算出し、変動係数(=標準偏差/平均値)を求めた。各地点での V_s と層厚の変動係数の分布を図10に示す。横軸が層番号、縦軸が変動係数を表す。いずれの地点でも $p=0.0$ のときに変動係数が大きいことがわかる。地点によっては $p=1.0$ のときの方が変動係数の小さくなる層もあるが、 $p=0.5$ のときはほとんどの層で変動係数が小さく、安定的に解が求まっていることがわかる。特に、第5層や第6層といった深い層における変動係数は $p=0.5$ が最も小さい。また、当然のことであるが、地盤増幅特性あるいはレシーバーファンクションの一方のみによる単独逆解析で得られたS波速度構造では、他方の観測値を説明できない場合が多い。以上より、地盤増幅特性とレシーバーファンクションの両観測値を満足し、安定して解を得るには同時逆解析による推定が有効であることがわかった。

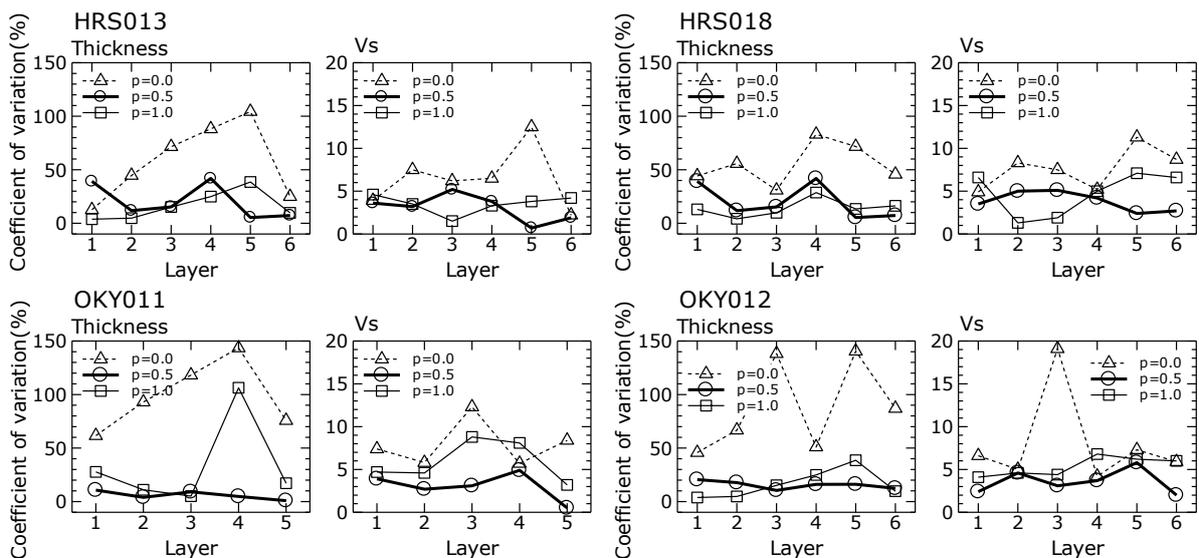


図10 単独逆解析および同時逆解析で推定された層厚とS波速度の変動係数の比較

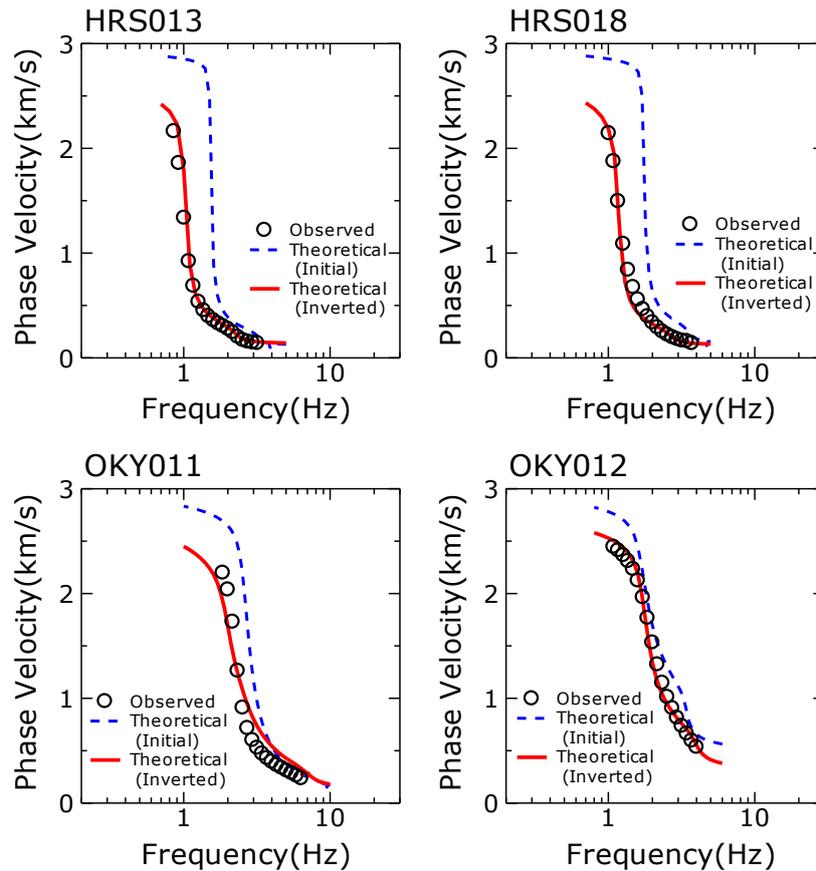


図 11 微動の位相速度と推定された S 波速度構造モデルによるレイリー波分散曲線の比較

4.3 微動アレイ観測結果との比較

推定された S 波速度構造の妥当性を検証するために、各地点での微動アレイ観測結果との比較を行った。微動アレイ観測では、0.2~30Hz 程度までフラットな振幅特性を有する加速度計を用いて、半径 15~30m, 50m, 100m, 250m および 500m 程度の 5 種類のアレイ観測を実施し、空間自己相関法²⁶⁾により微動の位相速度を算出した。得られた位相速度の周波数帯域は地点によって異なるが、おおよそ 0.8~7Hz 程度であった。

微動アレイ観測で得られた位相速度と図 8 で推定した S 波速度構造モデルから算出したレイリー波基本モードの理論分散曲線の比較を図 11 に示す。図中の丸印がアレイ観測から得られた観測値、実線が理論分散曲線を表し、破線は図 8 に示した初期モデルによる理論分散曲線を表す。図をみると、特に広島県の 2 地点では初期モデルによる理論分散曲線は観測値と大きく異なっているのに対して、本研究で得られたモデルによる理論値はいずれの地点でも観測値とほぼ一致していることがわかる。また、岡山県の 2 地点についても、初期モデルによる理論値に比べて本研究で得られたモデルの方が観測値により近い値が得られていることが確認できる。本研究で使用したデータの成分は主に実体波であることから、図 11 の結果は、実体波から推定したモデルが、表面波の性質も精度良く評価できていることを表している。以上の結果から、本手法により得られた S 波速度構造モデルは概ね妥当な結果であると考えられ、詳細な 3 次元地盤構造モデルの基礎資料として利用できるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、地震観測記録を利用して観測点直下の S 波速度構造モデルを推定することを目的として、多地点でのスペクトルインバージョンから得られる S 波部の地盤増幅特性と P 波初動のレシーバーファ

ンクシオンを同時逆解析する手法について検討した。数値実験から、両指標を用いることにより精度良くS波速度構造を推定できることを示した。広島県および岡山県のK-NET観測点計4地点において、本手法を適用した結果、地盤増幅特性あるいはレシーバーファンクシオンを用いた単独逆解析に比べて、両者を用いた同時逆解析により、S波速度構造モデルを安定的に推定できることを示した。また、その推定結果を微動アレイ観測結果と比較したところ、微動アレイ観測による位相速度と推定されたS波速度構造モデルによるレイリー波の理論分散曲線はよく対応することを確認した。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-netの地震記録を使用しました。本研究における微動アレイ観測では広島大学建築防災学研究室の学生の協力を得ました。また、匿名の3名の査読者には本論文を改善する上で有益なコメントをいただきました。関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山中浩明, 栗田勝実: 地震動評価のための地下構造探査とその活用, 物理探査, 第50巻, 第6号, pp.578-588, 1997.
- 2) 防災科学技術研究所: 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第337号, 2009.
- 3) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2014/3/26アクセス.
- 4) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤 浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 5) 山中浩明, 古屋伸二, 野澤 貴, 佐々木透, 高井 剛: 関東平野におけるやや長周期微動のアレイ観測 - 東京都江東地区におけるS波速度構造の推定 -, 日本建築学会構造系論文集, 第478号, pp.95-105, 1995.
- 6) 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, 第39巻, 第4号, pp.579-593, 1986.
- 7) 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, 第556号, pp.15-24, 2002.
- 8) 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.
- 9) 野津 厚, 長尾 毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号, pp.215-234, 2007.
- 10) 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.
- 11) 小林喜久二, 植竹富一, 真下 貢, 小林啓美: 深い地盤構造評価のためのPS変換波の検出方法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第505号, pp.45-52, 1998.
- 12) 三浦弘之, 翠川三郎: 3次元深部地下構造がやや長周期地震動の特性に及ぼす影響 - 横浜市とその周辺地域における検討 -, 地震 2, 第54巻, 第3号, pp.381-395, 2001.
- 13) 小林喜久二, 植竹富一, 土方勝一郎: 地震動の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定法の標準化に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 B2, pp.186-186, 2005.
- 14) Kurose, T. and Yamanaka, H.: Joint Inversion of Receiver Function and Surface-wave Phase Velocity for Estimation of Shear-wave Velocity of Sedimentary Layers, *Exploration Geophysics*, Vol.37, pp.93-101, 2006.
- 15) 鈴木晴彦, 山中浩明: 深部地盤のS波速度構造推定のための地震記録と微動探査データの同時逆解析, 物理探査, 第63巻, 第3号, pp.215-227, 2010.
- 16) 狐崎長琅, 杉山長志, 小林芳正, 井川 猛, 堀家正則, 斉藤徳美, 黒田 徹, 山根一修, 奥山宏一: 地震動予測のための深層地盤P・S波速度の推定, 自然災害科学, 第9巻, 第3号, pp.1-17, 1990.
- 17) Dal Moro, G., Pipan, M. and Gabrielli, P.: Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Marginal Posterior Probability Density Estimation, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.61, pp.39-55, 2007.

- 18) Haskell, N. A.: Crustal Reflection of SH Waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol.65, No.12, pp.4147-4150, 1960.
- 19) Haskell, N. A.: Crustal Reflection of Plane P and SV Waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol.67, No.12, pp.4751-4767, 1962.
- 20) 山中浩明, 石田 寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp.9-17, 1995.
- 21) 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の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾航空技術研究所資料, No.1112, 56p, 2005.
- 22) 武田純也, 神野達夫, 三浦賢治: スペクトルインバージョンに基づく広島県の地震観測点における地盤増幅特性評価, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2375-2381, 2010.
- 23) 武田純也, 神野達夫, 三浦賢治: スペクトルインバージョンに基づく中国地方の強震観測点における地盤増幅特性評価 -その3 解析対象地点の拡大と揺れやすさ分布の推定-, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第34巻, pp.929-932, 2011.
- 24) 翠川三郎: 強震時にみられる地盤特性の非線形性, 地震 第2輯, 第46巻, pp.207-216, 1993.
- 25) 神野達夫, 三浦賢治: 2001年芸予地震時における広島県の地盤震動特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第597号, pp.151-157, 2005.
- 26) 岡田 廣, 松島 健, 森谷武男, 笹谷 努: 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, 物理探査, 第43巻, 第6号, pp.402-417, 1990.

(受理 : 2014年4月28日)
(掲載決定 : 2014年9月11日)

Estimation of S-Wave Velocity Structure Model by Joint Inversion of Site Amplification Factor and Receiver Function

MIURA Hiroyuki ¹⁾, MANABE Ryosuke ²⁾, KANNO Tatsuo ³⁾
and ABIRU Tetsuo ⁴⁾

1) Member, Associate Professor, Hiroshima University, Dr. Eng.

2) Non-member, Former Graduate Student, Hiroshima University, M. Eng.

3) Member, Professor, Kyushu University, Dr. Eng.

4) Non-member, Manager, The Chugoku Electric Power Co., Inc.

ABSTRACT

In order to estimate S-wave velocity structure model at ground motion observation site, joint inversion technique using site amplification factor and receiver function is developed and the applicability is examined. Numerical experiments for the joint inversion reveal that S-wave profile is accurately estimated by the proposed method. The proposed method is applied to the actual data observed at four K-NET observation sites in Hiroshima and Okayama. The site amplification factors obtained by the spectral inversion technique are used. The receiver functions and the travel time of PS-wave converted from P-wave at the seismic bedrock are evaluated from the observed ground motion data. The result of the joint inversion shows that the site amplification factors and the receiver functions are well reproduced by the estimated S-wave velocity structure model. The estimated models are verified by comparing with the result of the array observations of microtremor.

Key Words: Subsurface structure, Site amplification, Receiver function, Joint inversion

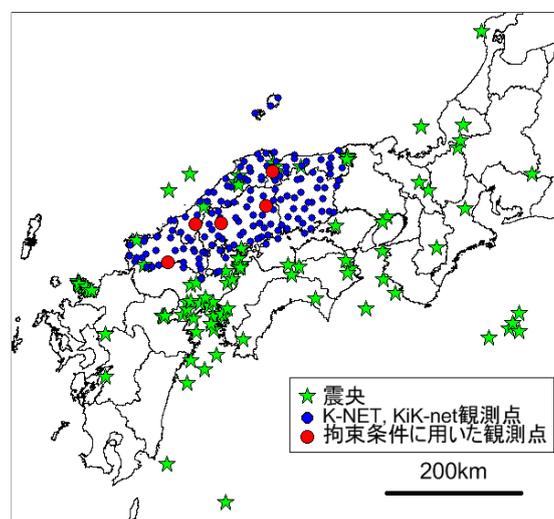
Appendix 武田・他(2010, 2011)^{22, 23)}による中国地方を対象としたスペクトルインバージョンについて

この論文における対象地点、使用した地震の震央位置、スペクトルインバージョンで拘束条件に用いた観測点の分布を付図1に示す。対象地点は中国地方のK-NET, KiK-net観測点計156地点で、使用した地震は計119地震である。また、各地震の諸元を付表1に示す。

この論文では、スペクトルインバージョンによる連立方程式を解く際の拘束条件として、付図1の赤丸で示す5地点の地盤増幅特性を与えることとした。拘束条件に用いた5地点はいずれもKiK-net観測点で、地震基盤相当の層で地中観測が行われており、かつ地震基盤深度が比較的浅い地点である。付図2に各地点のPS検層結果を破線で示す。まず、5地点の地中と地表の観測記録から水平動のスペクトル比を算出し、付図3中の赤線で示すようにそれらの平均を求めた。次に、付図2のS波速度構造モデルから各層の V_s のみを変化させて理論増幅率(地表/地中)を算出し、理論値と観測スペクトル比が合致するよう V_s を同定した。

同定されたS波速度構造を付図2中の実線に示す。また、観測スペクトル比と理論増幅率の比較を付図3の赤線および黒線で示す。理論増幅率が観測スペクトル比とよい一致を示していることが確認できる。同定されたS波速度構造から算出した解放基盤に対する理論増幅率を付図3中の青線に示す。いずれの地点も地震基盤までの深度は20~70m程度と浅く、増幅率も5Hz以下の周波数帯域ではほぼフラットな形状を示している。本スペクトルインバージョンでは付図3の理論増幅率(地表/解放基盤)を拘束条件として解析を行った。

解析結果の一例として、低周波成分の増幅が比較的小さかった地点における地盤増幅特性の例を付図4に示す。図には野津・長尾²⁾における地盤増幅特性も併せて示している。また、日向灘、伊予灘付近のプレート内で発生した地震($M_w=4.0\sim 5.0$)の震源特性と M_w が4.0, 4.5, 5.0のときの ω^2 モデルによる理論値の比較を付図5左に示す。なお、応力降下量はフィリピン海プレートのスラブ内地震の応力降下量の幾何平均値²⁾である31MPaとした。図をみると、スペクトルインバージョンで得られた震源特性は理論値とよい対応を示していることがわかる。また、伝播経路の減衰特性の推定結果を付図5右に示す。このQ値は既往の西日本のQ値³⁾に比べてやや大きな値を示しているが、中国地方にはQ値が大きな分布が広く分布するという中村⁴⁾による結果と調和的であるといえる。



付図1 スペクトルインバージョンに利用した観測点と地震の震央位置

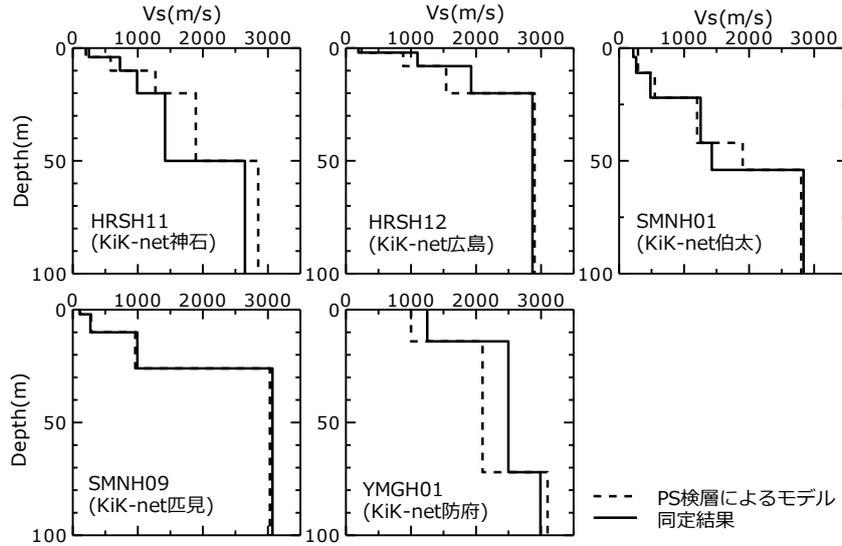
Appendix の参考文献

- 1) 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の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾航空技術研究所資料, No.1112, 56p, 2005.
- 2) 佐藤智美: 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集, 第27巻, No.48, pp.1-8, 2003.

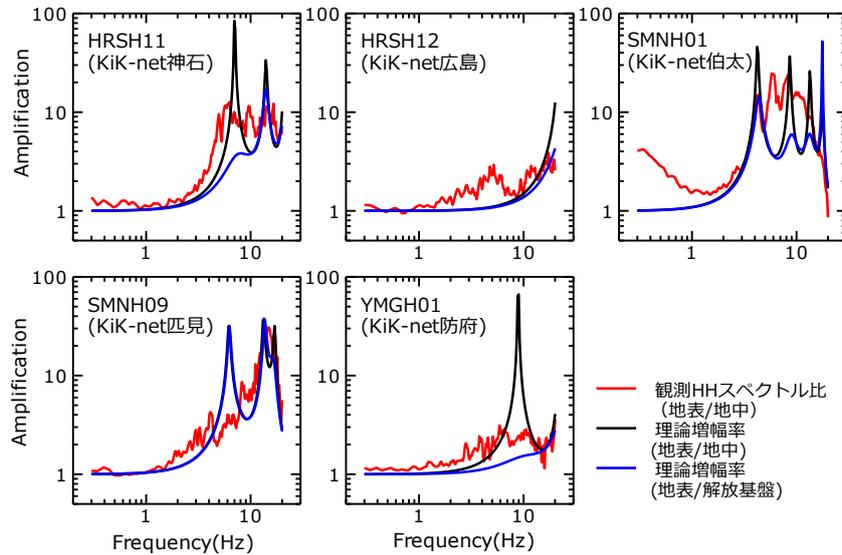
- 3) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.15-24, 2001.
- 4) 中村亮一: 伝播経路の 3 次元減衰構造と強震動, 第 38 回地震盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.23-32, 2010

付表 1 スペクトルインバージョンで使用した地震の諸元

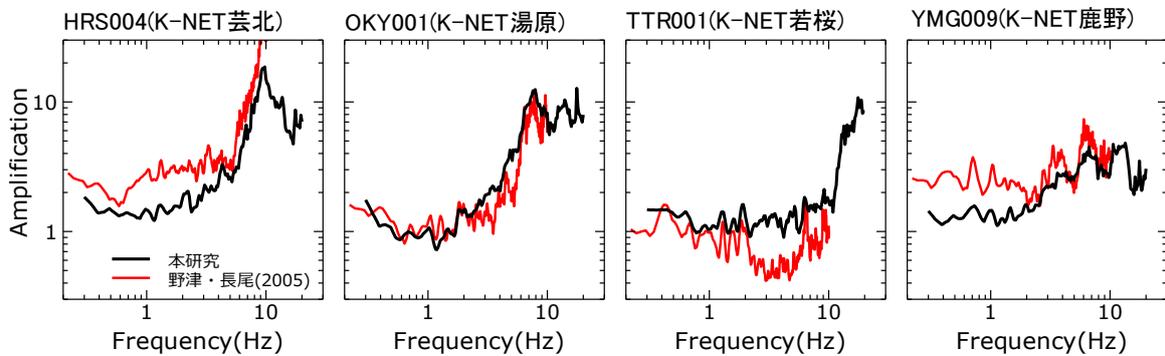
地震 No.	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	M _j	地震タイプ	地震 No.	発生日時	緯度	経度	深さ (km)	M _j	地震タイプ
1	2001/01/05/05:15	33.78	132.53	47	4.0	プレート内	61	2004/12/01/23:30	35.04	135.81	13	4.0	内陸型
2	2001/01/12/08:00	35.47	134.49	10	5.4	内陸型	62	2005/01/02/12:30	33.75	131.93	73	4.2	プレート内
3	2001/01/14/08:55	35.47	134.51	12	4.1	内陸型	63	2005/01/04/05:06	35.04	131.58	19	4.0	内陸型
4	2001/01/15/23:20	35.47	134.51	9	4.4	内陸型	64	2005/02/14/00:22	34.68	135.14	13	4.1	内陸型
5	2001/01/20/05:20	35.51	134.48	12	4.7	内陸型	65	2005/03/20/10:53	33.74	130.18	9	7.0	内陸型
6	2001/01/20/05:27	35.50	134.48	12	4.1	内陸型	66	2005/03/20/11:03	33.72	130.23	11	4.1	内陸型
7	2001/01/20/06:25	35.49	134.49	11	4.0	内陸型	67	2005/03/20/11:40	33.69	130.26	12	4.0	内陸型
8	2001/01/20/07:24	35.50	134.49	11	4.5	内陸型	68	2005/03/20/11:50	33.73	130.20	18	4.2	内陸型
9	2001/01/24/00:03	35.47	134.48	9	4.2	内陸型	69	2005/03/20/19:52	33.80	130.09	13	4.7	内陸型
10	2001/01/25/19:45	33.97	134.54	53	4.4	プレート内	70	2005/03/20/20:08	33.80	130.10	13	4.4	内陸型
11	2001/02/08/14:12	33.91	134.50	14	4.2	内陸型	71	2005/03/20/20:38	33.74	130.17	11	4.5	内陸型
12	2001/02/11/09:17	35.42	133.29	13	4.3	内陸型	72	2005/03/21/15:37	33.78	130.10	22	4.2	内陸型
13	2001/03/24/15:28	34.12	132.71	51	6.4	プレート内	73	2005/03/21/23:59	33.78	130.10	12	4.8	内陸型
14	2001/03/24/15:48	34.01	132.73	46	4.2	プレート内	74	2005/03/22/15:55	33.73	130.18	11	5.4	内陸型
15	2001/03/24/16:25	34.03	132.73	46	4.2	プレート内	75	2005/03/25/21:03	33.78	130.12	12	4.1	内陸型
16	2001/03/24/17:02	34.00	132.75	51	4.2	プレート内	76	2005/04/01/21:52	33.67	130.32	12	4.3	内陸型
17	2001/03/24/22:37	33.98	132.71	47	4.1	プレート内	77	2005/04/10/20:34	33.67	130.28	5	5.0	内陸型
18	2001/03/25/19:19	34.03	132.75	51	4.4	プレート内	78	2005/04/17/22:56	33.32	132.48	39	4.0	プレート内
19	2001/03/26/05:41	34.11	132.72	49	5.0	プレート内	79	2005/04/20/06:11	33.68	130.29	14	5.8	内陸型
20	2001/04/03/21:14	33.78	132.03	67	4.4	プレート内	80	2005/04/20/06:22	33.68	130.29	13	4.7	内陸型
21	2001/04/25/23:40	32.79	132.35	42	5.6	プレート内	81	2005/04/20/06:44	33.68	130.29	12	4.5	内陸型
22	2001/06/30/17:13	33.99	132.74	47	4.0	プレート内	82	2005/04/20/09:09	33.68	130.28	13	5.1	内陸型
23	2001/08/24/21:44	33.98	132.74	48	4.3	プレート内	83	2005/05/02/01:24	33.67	130.32	11	5.0	内陸型
24	2001/08/25/22:21	35.15	135.66	10	5.1	内陸型	84	2005/05/25/20:31	33.32	132.29	54	4.6	プレート内
25	2001/09/06/01:29	33.11	132.02	50	4.3	プレート内	85	2005/05/27/03:17	34.00	133.70	42	4.7	プレート内
26	2001/10/08/11:23	35.30	133.32	8	4.1	内陸型	86	2005/05/31/11:04	31.30	131.54	29	5.8	内陸型
27	2002/01/24/16:08	35.36	133.32	9	4.5	内陸型	87	2005/06/03/04:16	32.49	130.55	11	4.8	内陸型
28	2002/03/06/07:12	35.28	133.33	15	4.5	内陸型	88	2005/06/03/04:23	33.77	130.09	15	4.1	内陸型
29	2002/03/11/15:54	34.08	134.46	9	4.1	内陸型	89	2005/07/05/05:10	33.74	130.12	15	4.2	内陸型
30	2002/03/25/22:58	33.82	132.61	46	4.7	プレート内	90	2005/09/04/19:06	33.50	132.09	54	4.3	プレート内
31	2002/04/06/01:57	33.43	132.53	42	4.5	プレート内	91	2005/09/12/20:18	33.78	130.10	12	4.1	内陸型
32	2002/05/06/18:45	33.29	131.98	58	4.3	プレート内	92	2005/11/01/12:47	33.82	135.08	45	4.3	プレート内
33	2002/07/01/20:49	33.94	132.51	47	4.0	プレート内	93	2006/02/01/12:15	33.51	132.30	46	4.3	プレート内
34	2002/07/16/20:57	30.78	132.50	61	5.1	プレート内	94	2006/03/27/11:50	32.60	132.16	35	5.5	プレート間
35	2002/09/16/10:10	35.37	133.74	10	5.3	内陸型	95	2006/04/22/02:25	33.22	132.27	40	4.0	プレート内
36	2002/09/25/14:45	35.26	137.50	49	4.2	プレート内	96	2006/05/08/12:45	34.02	133.53	13	4.2	内陸型
37	2002/10/13/19:06	33.35	132.36	43	4.7	プレート内	97	2006/05/28/20:36	33.34	131.80	80	4.3	プレート内
38	2002/10/13/20:17	33.35	132.35	42	4.2	プレート内	98	2006/07/11/03:09	34.02	131.17	16	4.0	内陸型
39	2002/10/23/06:22	35.15	132.67	11	4.4	内陸型	99	2006/09/26/07:03	33.51	131.88	70	5.3	プレート内
40	2002/11/04/13:36	32.41	131.87	35	5.7	プレート間	100	2006/11/19/13:29	33.35	132.44	41	4.2	プレート内
41	2003/03/26/04:08	33.14	132.31	10	4.5	内陸型	101	2007/01/22/02:16	35.73	136.34	13	4.5	内陸型
42	2003/03/27/13:47	34.82	132.14	13	4.2	内陸型	102	2007/03/25/09:42	37.22	136.69	11	6.9	内陸型
43	2003/04/02/01:38	35.12	132.72	11	4.2	内陸型	103	2007/04/15/12:19	34.79	136.41	16	5.4	内陸型
44	2003/04/14/06:25	33.58	132.17	51	4.0	プレート内	104	2007/04/26/09:03	33.89	133.58	39	5.3	プレート内
45	2003/05/31/03:58	33.41	131.87	65	4.5	プレート内	105	2007/05/13/08:14	33.01	132.79	9	4.6	内陸型
46	2003/06/24/00:33	33.53	131.93	64	4.2	プレート内	106	2007/06/06/23:42	33.33	131.50	11	4.9	内陸型
47	2003/08/14/23:46	33.56	133.98	37	4.6	プレート内	107	2007/06/07/00:18	33.33	131.50	12	4.2	内陸型
48	2003/12/13/12:32	34.56	134.30	15	4.6	内陸型	108	2007/06/07/11:19	33.33	131.47	8	4.2	内陸型
49	2003/12/23/14:34	35.62	136.30	9	4.4	内陸型	109	2007/06/07/17:22	33.31	131.49	9	4.7	内陸型
50	2004/04/20/22:26	33.47	132.24	48	4.6	プレート内	110	2007/06/07/20:50	33.33	131.51	8	4.7	内陸型
51	2004/06/08/08:05	34.21	135.07	8	4.5	内陸型	111	2007/07/08/08:44	33.43	134.80	38	4.2	プレート内
52	2004/09/05/19:07	33.03	136.80	38	6.9	プレート内	112	2007/07/16/17:24	34.26	135.95	49	4.7	プレート内
53	2004/09/05/23:57	33.15	137.14	44	7.4	プレート内	113	2007/08/31/23:36	35.91	135.70	16	4.4	内陸型
54	2004/09/07/08:29	33.36	137.29	41	6.4	プレート内	114	2007/11/10/01:47	35.27	131.92	18	4.3	内陸型
55	2004/09/08/03:36	33.23	137.19	40	5.5	プレート内	115	2008/03/08/03:52	32.72	131.93	47	4.3	プレート内
56	2004/09/08/23:58	33.12	137.29	36	6.5	プレート内	116	2008/03/31/03:45	33.76	130.11	14	4.0	内陸型
57	2004/09/21/10:13	34.25	132.76	48	4.2	プレート内	117	2008/04/17/00:58	34.61	135.06	10	4.1	内陸型
58	2004/10/05/08:33	35.93	136.38	12	4.8	内陸型	118	2008/05/02/12:23	35.24	132.72	9	4.0	内陸型
59	2004/10/27/21:27	33.64	135.27	39	4.4	プレート内	119	2008/05/20/14:41	34.36	131.06	15	4.2	内陸型
60	2004/11/04/03:13	33.08	130.54	14	4.2	内陸型							



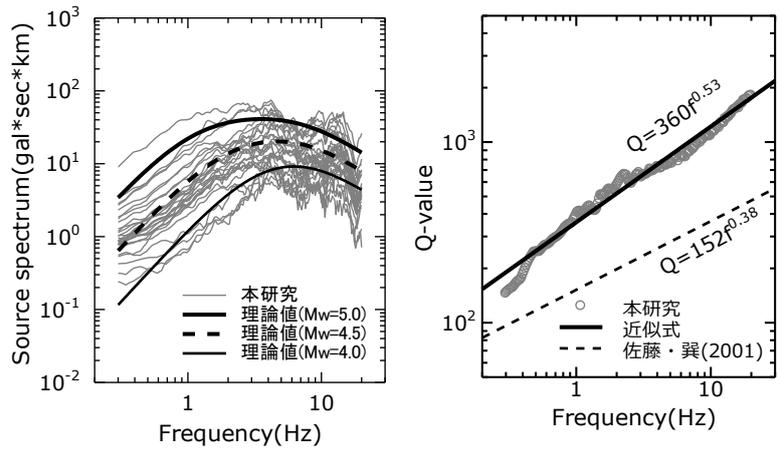
付図2 拘束条件に用いた5地点で同定されたS波速度構造モデル



付図3 観測スペクトル比と理論増幅率の比較



付図4 スペクトルインバージョンで得られた地盤特性の例
(低周波数帯域での増幅が比較的小さい地点)



付図5 スペクトルインバージョンで得られた震源特性の一例と減衰特性