

PS 検層の走時データを用いた地盤構造推定手法の高度化に関する研究

正願 拓哉

1. はじめに

地震動は、表層から深部に至るまでの地盤構造に強く依存することが知られており、地震動を予測するためにはその地盤構造を適切に把握することが重要である。

防災科学技術研究所が全国に設置している基盤強震観測網 KiK-net の鉛直アレイでは、PS 検層による S 波速度構造モデルが得られている。これは、PS 検層により得られる、P 波や S 波の初動走時から算出される。走時とは、ある振動源から発した P 波や S 波が地盤を通過してある深さに達するまでに要した時間であり、この走時を横軸、地盤の深さを縦軸としたときの曲線を走時曲線と呼ぶ。S 波振動源を用いた場合、その走時曲線は地盤の S 波速度構造に依存する。よって、走時曲線に層境界を設定した後に各層間の走時曲線の傾きを計算することで S 波速度が算出され、これによりその地点での S 波速度構造モデルを作成することができる。

しかし、公表されているモデルでは鉛直アレイで観測された強震記録の地中に対する地表のスペクトル比を説明できない事例が多く見られる。これは、公表されている速度構造モデルは、地質境界や PS 検層を行った技術者の主観で層境界が決められたことによって、必ずしも地震動を説明できる速度構造モデルが得られていないことを示唆している。このため、地震動特性を説明するために PS 検層による速度構造モデルのチューニングが行われているが、PS 検層の原データである走時曲線を考慮した例は少ない。

そこで、従来の地震記録や微動記録を用いた逆解析¹⁾に、拘束条件として PS 検層による走時データを加えることで、KiK-net 各観測点においてより高精度な地盤構造モデルを構築することができると考えられる。これにより、将来の全国各地地盤上での地震動評価の高度化などが期待できる。

本研究では、その基礎的検討として仮想の地盤モデルを用いた数値実験を行う。いくつかの仮想地盤モデルから理論的な計算された S 波走時データ、SH 波地盤増幅率、レシーバーファンクション、Rayleigh 波位相速度を利用した同時逆解析により S 波速度構造を推定し、正解となるモデルと比較することで、手法の有用性を検討する。

2. 仮想地盤モデルの設定と各理論値の算出

仮想地盤モデルについては、まず三浦・他 (2014)²⁾や

KiK-net における既存の S 波構造モデル²⁾を参考に基準となる 6 層のモデルを作成し、それに対して堆積層を厚くした 6 層モデル、速度コントラストを大きくした 6 層モデル、層数を減らした 4 層モデル (以下、少層モデル)、堆積層を薄くした 4 層モデル、層数を増やした 9 層モデル (以下、多層モデル)、上層の S 波速度 (V_s) よりも下層の方が小さくなる (逆転層を有する) 9 層モデルを作成した。上記 7 つの特徴を有するモデルをそれぞれにつき 3 つ、合計 21 種類の仮想モデルを作成した。

作成した仮想モデルを用い、SH 波、P-SV 波における 1 次元重複反射理論³⁾に基づき、地震基盤に対する地表面での理論地盤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算出した。理論地盤増幅率は解放地震基盤に対する増幅である。レシーバーファンクションの計算では、小林・他 (1998)⁴⁾を参考にして 1~10 Hz 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 波の入射角の違いによる地盤増幅率やレシーバーファンクションへの影響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 45 度入射を仮定した⁵⁾。また、仮想モデルに対するレイリー波基本モードの位相速度の理論値も算出した。なお、理論位相速度の計算に使用する各層の P 波速度や密度は、Ludwig et al. (1970)⁶⁾に従い S 波速度から算出した。

これらの理論値に対して、地盤増幅率では対数軸でピーク値の 5%、レシーバーファンクションではそのピーク値の 10%、Rayleigh 波位相速度では各周波数における数値の 5% を最大値とするランダムノイズを加えることで、実際の観測を想定した数値を算出した。一例 (基準モデル) を図 1 に示す。これらを擬似的な観測値として、逆解析的に S 波速度構造モデルの推定を試みる。

3. 遺伝的アルゴリズムによる同時逆解析

作成した仮想地盤モデルを正解モデルとし、遺伝的アルゴリズム (GA)⁷⁾を用いて S 波速度構造の推定を行う。従来の逆解析¹⁾では、SH 波地盤増幅率、レシーバーファンクション、Rayleigh 波位相速度を使用し、推定されたモデルの理論値がそれらに一致するよう、層厚と S 波速度を拘束せず広

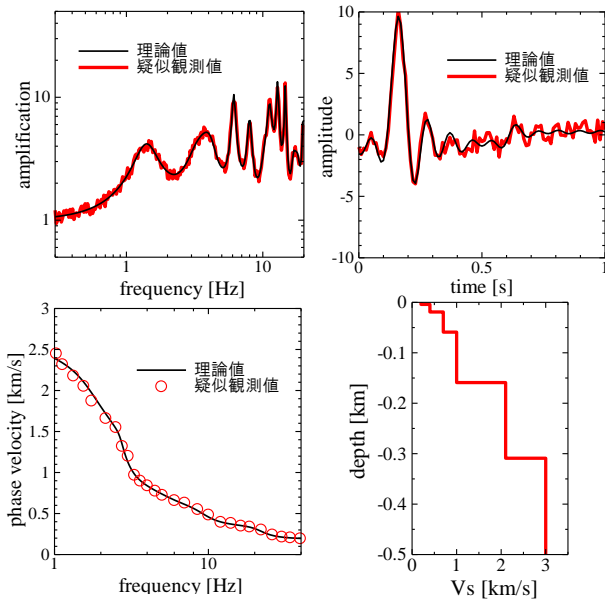


図1 SH波増幅率(左上)・レイシーバーファンクション(右上)・位相速度(左下)の理論値と擬似観測値、そのS波速度構造モデル(右下)の一例

範囲で変化させながら試行錯誤的に推定を行っていた。本研究では、層厚とS波速度を広い探索範囲内で与えた後、与えられた層厚を基に走時曲線の傾きによりS波速度を算出し、元のS波速度を算出されたものに置き換え逆解析を行う。

本研究では、総個体数を40個体、交差確率を70%、突然変異確率を5%、世代数を150世代、探索モデルにおける層数を正解モデルの層数に関わらず6層とし、表1に示す探索範囲でS波速度と層厚を変化させて逆解析を行った。地盤増幅率、レイシーバーファンクション、位相速度の重み付け比率は1:1:1とした。また、KiK-net観測点における実地盤での適用を想定すると、地震観測記録から得られる地盤増幅率やレイシーバーファンクションに対して、Rayleigh波位相速度は微動アレイ観測を別途実施する必要がある。しかしKiK-net観測点の周辺は、微動アレイ観測を実施するための十分なスペースの確保が困難な場合がある。これを考慮し、位相速度を使用せず、地盤増幅率とレイシーバーファンクションのみを重み付け比率1:1で用いる逆解析も行った。各世代においてS波速度と層厚が与えられた後、走時データを反映させたS波速度に置き換え、遺伝子的操作を繰り返す。そのS波速度の算出方法について、走時曲線を使用せずS波速度を置き換えない方法、層厚を基に走時曲線を区切り、各層厚区間における走時曲線の傾きの平均をS波速度とする方法(パターン①)、各層厚区間の上端と下端を結んだ直線の傾きによりS波速度を決定する方法(パターン②)の3種類について検証を行った。表2に全検証手法のパターンを示す。これらの6パターン手法による検証を21モデルについてそれぞれ30回ずつ試行した後、推定されたモデルと正解モ

表1 探索範囲

層数	Vs(m/s)	H(m)
1	100 - 300	1 - 33
2	200 - 600	5 - 85
3	400 - 1,200	10 - 170
4	800 - 2,400	40 - 200
5	1,200 - 2,800	40 - 200
6	3,000	-

表2 検証手法

走時データの組込	位相速度の利用
A	無し
B	無し
C	パターン①
D	パターン①
E	パターン②
F	パターン②

デルの各深さにおけるS波速度の誤差平均をそれぞれについて算出した。

また、PS検層による走時データは、地震基盤(Vs=3000 m/s程度)まで到達していない場合も少なくない。これを考慮し、正解モデルにおいて、Vs=2000 m/s以上の層に相当する走時データを除去し、下記C~Fの手法(表2)について再び逆解析を行った。これらについても同様に、それぞれ30回ずつ試行し、推定モデルと正解モデルのS波速度誤差平均をそれぞれについて算出した。

4. 解析結果・検証

4.1 走時データの有無に関する検証

解析結果の一例(基準モデル)を図2に示す。図に黒線で示したモデルは、前章で算出された誤差平均が最小となったものである。その誤差平均の最小値も同時に図に示した。モデルの比較図と誤差数値から分かるように、AとB(走時データを使用していないもの)に比べ、C~F(走時データを組み込んだもの)は正解モデルとよく一致していることがわかる。他20モデルについても同様に、A・Bに比べてC~Fの誤差は小さい。これより、走時データを拘束条件として逆解析に用いることで、より高精度なS波速度構造モデルの推

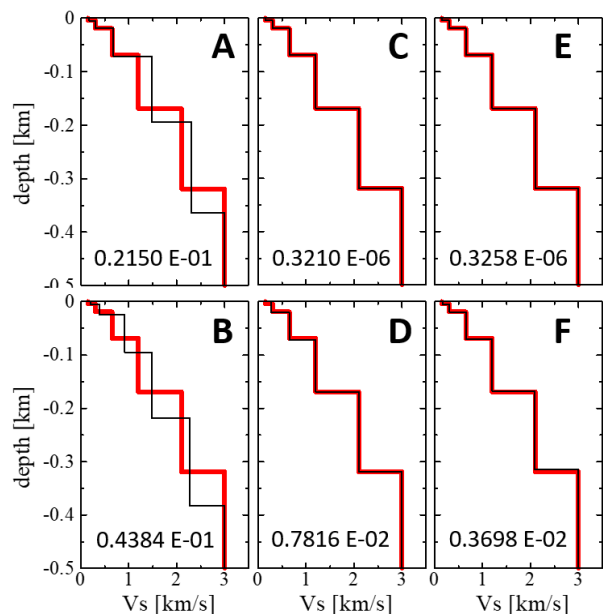


図2 正解モデル(太線)と解析結果(細線)、誤差数値

定が可能となることが明らかになった。

4.2 走時曲線を用いた場合の各手法に関する検討

続いて、C~Fについて最適な手法の検討を行う。平均誤差の最小値に加えて、結果の安定性や収束性についても評価するため、各モデルにおける誤差の最大値と最小値の差を8分割し、その分割された範囲内に30個中いくつかのモデルが収まっているかを示す分布図を作成した。その分布図の一例を図3に示す。

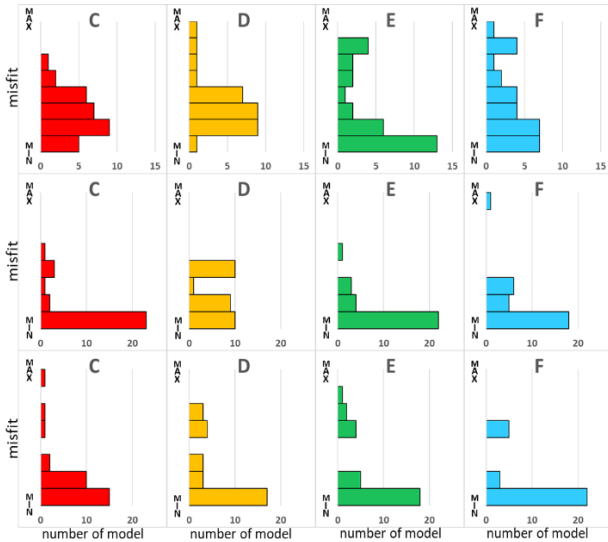


図3 各手法における誤差の分布図（基準モデル3つ）

図に示した基準モデルについては、いずれも手法Eにおいて最下段（最も誤差の小さい範囲）の数が多くなっている。これより、基準モデルは手法Eを適用することで、安定して正解に近い結果に収束する確率が高くなることが分かる。その他のモデルについて、堆積層が厚いモデルは手法Eにおいて、堆積層が薄いモデルは手法Fにおいて、多層モデルとS波速度が逆転する層を有するモデルでは手法Cにおいて最下段の数が最も多かったため、それぞれ上記手法を適用することで高精度かつ安定的にS波速度構造モデルを推定できると言える。また、速度コントラストが大きいモデルと少層モデルについては、手法Eと手法Fで比較的最下段の数が多くなっていた。実地盤での適用の際は良好な位相速度データを手に入れることが比較的困難であることを考慮し、ここでは位相速度データを使用しない手法Fを採用する。

4.3 走時データが地震基盤まで到達していない場合の検討

加えて、地震基盤まで到達していない走時データを組み込んだ逆解析も同様に、各モデルについてC~Fの最適な手法の検討を行う。基準モデル、堆積層の厚いモデル、多層モデル、S波速度逆転層モデルについては、走時データが地震基盤まで到達している場合と同様の傾向が見られた。速度コントラストが大きいモデルは手法E、少層モデルは手法Fをそれぞれ用いることで、高精度かつ安定的なモデルの推定が可

能であると言える。堆積層が薄いモデルについては、手法C、E、もしくはFにおいて最下段の数が比較的多くなっていた。しかし、算出した結果のみではいずれか一方の手法に決定することは困難であるため、このモデルについては、試行回数や世代数を増やし再度解析を行い、手法との相関を再考察する必要があると思われる。

地震基盤までの走時データの有無に関して、地震基盤まで到達していない走時データを組み込んだ逆解析結果は、到達しているものに比べて全体的に若干誤差が大きくなっていたものの、正解モデルとよく一致する結果が得られた。これより、走時データが地震基盤まで到達していない場合も十分高精度なモデルの推定が可能であることが分かる。

また、いずれの解析においても、手法CとEに比べて手法DとFの誤差が大幅に大きくなるという点は見られなかった。これより、解析に走時データを組み込むことで、位相速度を使用しなくても十分精度の高いS波速度構造モデルの推定が出来ると言える。実地盤での適用を考慮すると、条件の厳しい微動観測による位相速度データの入手が不要になるので、より簡便に高精度なモデルの推定を行えると考えられる。

4.4 正解と結果の比較

上記検証を踏まえた手法で得られたモデルの地盤増幅率・レシーバーファンクション・位相速度の理論値と正解（疑似観測値）との比較の一例（基準モデル）を図4に示す。地盤増幅率、レシーバーファンクション、位相速度のいずれにおいても、得られたモデルの理論値と正解の疑似観測値がよく一致していることから、推定されたモデルが非常に高精度

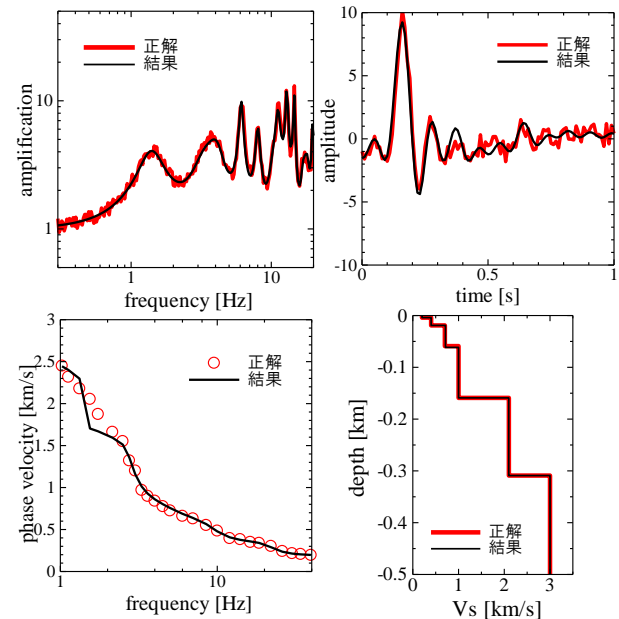


図4 地盤増幅率（左上）・レシーバーファンクション（右上）・位相速度（左下）・S波速度構造モデル（右下）の正解と結果の一例

であることが伺える。また、得られたS波速度構造モデルと正解モデルとの比較の例を図5に示す。4層モデルと6層モデルについては、ほとんど正解モデルの構造と一致する結果が導き出されている。9層モデルについては、6層では再現しきれない層において、上層と下層の中間値を取るような形で精度の高い結果を導き出している。これより、本手法では様々なモデルにおいて、精度の高いS波速度構造モデルを推定することが可能であると言える。

5. まとめ

地震観測点 KiK-net での適用を前提とし、S波速度構造モデル推定の高度化を目的とした数値実験を行った。複数の仮想地盤モデルを設定した後、モデルごとに地盤増幅率、レシーバーファンクション、位相速度の理論値を算出し、それらを用いてGAによる同時逆解析を行った。その際、拘束条件として走時データを組み込むことで、より高精度な地盤モデルの推定を試みた。得られた結果と正解のモデルを比較し、各解析手法について考察を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ・走時データを拘束条件として逆解析に用いることで、用いない場合よりも高精度なS波速度構造モデルの推定が可能となる。
- ・走時データを拘束条件として逆解析に用いることで、位相速度データを使用しない場合でも精度の高いモデルを推定することができる。
- ・使用する走時データが地震基盤まで到達している場合の方が推定モデルの誤差は小さくなるが、地震基盤まで到達していない場合でも十分高精度なモデルを推定できる。
- ・多くのモデルで推定モデルの精度・安定性と手法に相関が

見られ、各モデルについて適切な手法を用いて解析を行うことによって、高精度なモデルを推定できる。

- ・走時データが地震基盤まで到達していない場合の堆積層が薄いモデルでは、手法の検討を再度行うため、試行回数や世代数を増やし再解析する必要がある。

参考文献

- 1) 三浦弘之, 真鍋良輔, 神野達夫, 阿比留哲夫: 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, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第5号, pp. 31-49, 2014
- 2) 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2017/11/30参照)
- 3) Haskell, N. A.: Crustal Reflection of SH Waves, Journal of Geophysical Research, Vol. 65, No. 12, pp. 4147-4150, 1960
- 4) Haskell, N. A.: Crustal Reflection of Plane P and SV Waves, Journal of Geophysical Research, Vol. 67, No. 12, pp. 4751-4767, 1962
- 5) 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
- 6) Ludwig, W. J. et al: Seismic Refraction, The sea, No. 4, pp. 53-84, 1970
- 7) 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

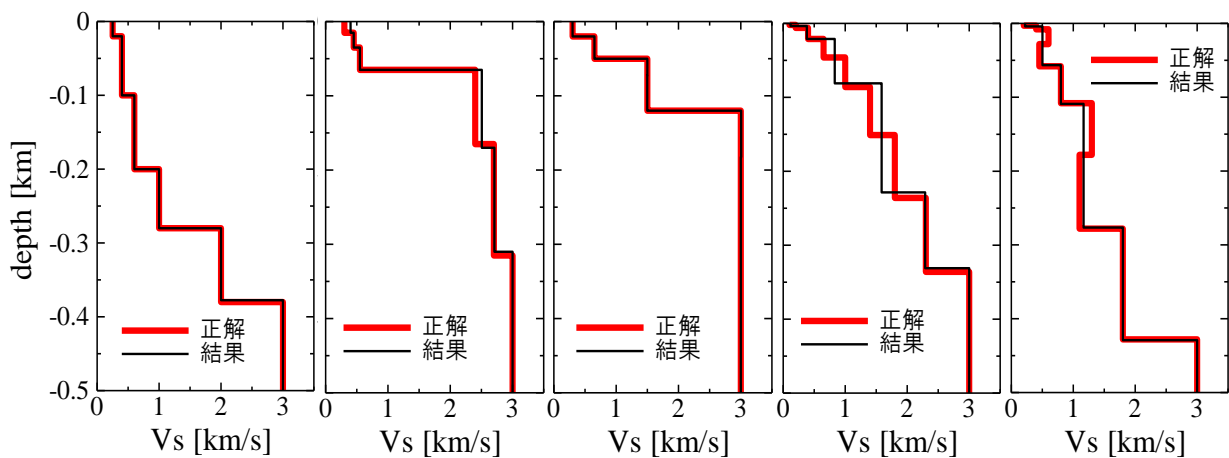


図5 得られたS波速度構造モデルと正解モデルの比較の例
左から、堆積層厚モデル、コントラスト大モデル、少層モデル、多層モデル、Vs逆転層モデル