

全国の強震動記録から分離したサイト特性に対する 最適化アルゴリズムに基づいた地盤構造推定

栗林 健太郎

1. 序論

『強震動』とは、地震動の中でも構造物の被害に直接関与するような地表面の強い揺れを意味し、構造物の設計をはじめとして、都市防災計画や避難計画を行う場合において、対象箇所が地震の際にどのくらい揺れるのかを精度よく評価することは非常に重要な調査項目の一つである。

強震動は震源・伝播経路・直下の地盤構造の三つの要因から成り立っており、特に地震基盤（S波速度3[km/sec]相当の堅固な岩盤）までの地下構造は近年注目されている長周期地震動の生成と伝播に重要な役割を果たしていることが指摘されている。現在の地下構造の推定方法として、反射法や微動探査法、あるいはボーリング調査に見られるような直接現地で得られたデータから推定する方法、そして全国で実際に得られている強震動記録を統計的に解析して推定する方法がある。特に強震動記録は1996年の兵庫県南部地震以来全国各地に強震動観測点が設置され、規模の大きな地震から微小な地震まで全国各地で24時間観測されるためそのデータ量は膨大なものとなっている。その強震動記録は全国で統一された品質を有し、なおかつ簡便で大量に入手できるデータであると言える。

松尾・川瀬(2004)は強震動記録を用いて全国の統計的なサイト増幅特性を分離抽出し、遺伝的アルゴリズムを用いてそのサイト増幅特性に適合するような地下構造を地震基盤相当の深さまで推定している¹⁾。しかし、良好な結果が得られた観測点はK-NET, KiK-net 観測点の約3割とまだ改善の余地がある。

本研究では松尾・川瀬で得られた分離サイト特性に基づいた地盤構造を更に精度良く同定するために、最適化アルゴリズムの改善と同定範囲の拡張を行った。最適化アルゴリズムには遺伝的アルゴリズムと焼きなまし法を融合したハイブリッドヒューリスティック探索²⁾を採用し、各観測点で得られているPS検層データも同定対象とすることによって、結果として良好な結果が得られた観測点を約6割にまで増やすことができた。

また、地下構造データが得られていない観測点（JMA震度計観測点等）に対しても、類似したサイト増幅特性を持つ観

測点とその同定地下構造を基本モデルとして用いることによってその分離サイト特性に適合するように新たな地下構造を同定した。この類似観測点を用いた地下構造の同定は、実際の観測点における地下構造の情報を用いずに同定を行っているため、将来的に強震動記録のみで地下構造が同定できる可能性を持っていると言える。

2. ハイブリッドヒューリスティック探索による同定

ハイブリッドヒューリスティック探索(以下HHS)の基本的なアルゴリズムは遺伝的アルゴリズム(以下GA)と焼きなまし法(以下SA)を融合したハイブリッド法である。GAの基本操作である選択・交差・突然変異をベースにし、SAで用いられる試行回数に依存した温度関数に基づく選択確率を取り入れている。これによって、試行回数の少ないときは広範囲のモデルが選ばれ、試行回数が進むにつれて次第に誤差の小さなモデルが選ばれるようになる。本研究では、山中(2007)によるHHS²⁾を用いて、分離サイト特性に合うようなS波速度構造を同定した。以下にHHSのアルゴリズムについて示す。

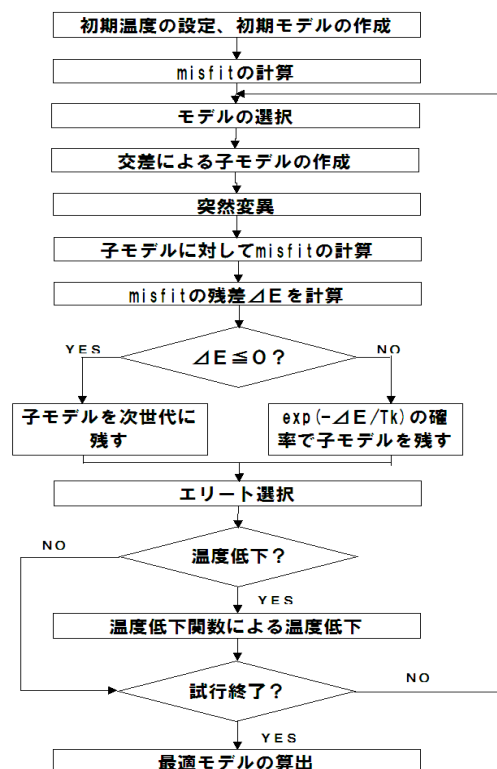


図1: HHSの基本的なアルゴリズム

本研究では最適化アルゴリズムの目的関数として、スペクトル分離解析によって得られたサイト特性 H_o をターゲットとし、土質パラメータから計算される一次元理論増幅特性 H_t との残差二乗和平均

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

を計算し、この値が最小になるような H_t を持つ地下構造を同定する。周波数領域は得られた離サイト特性に合わせて $f_1=0.3$ 、 $f_2=20$ [Hz] とする。また、速度とのトレードオフを避けるため減衰はボアホール観測記録により求められた³⁾

$$Q_i = 19.05 f^{0.52}$$

で全層統一し、各層の密度はS波速度からの換算式⁴⁾

$$\rho_i = 1.4 + 0.67 \sqrt{V_{Si}}$$

で求めた。一また、HHS のモデルには実数型モデルを用い、温度低下関数には

$$T_k = 100 \exp(-k^{0.5})$$

を用いた。kは温度更新回数で、試行回数10回につき1回温度を低下させることとする。

HHS と GA における解析結果を比較するため、PS 検層データ以深の3層を同定してみる。松尾・川瀬(2004)と同様に地震基盤とPS 検層最下層との間に3層あるものと仮定し、その層厚とS波速度、及びPS 検層最下層の層厚を同定した。

図2に結果の例を示す。赤線がGA、青線がHHSによる同定結果から得られた理論増幅スペクトルである。図からも分か

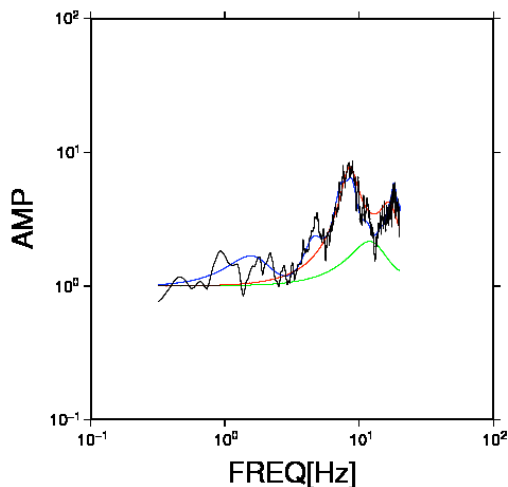


図2：OSK009(河内長野)におけるGA(赤線)とHHS(青線)の同定サイト特性。黒線は分離サイト特性、黄緑線はPS 検層データから求めた理論増幅特性。

るようにGA以上に分離サイト特性に近い同定結果が得られているのが分かる。

3. K-NET、KiK-net 観測点の地盤構造推定

HHSを用いてK-NET, KiK-net 観測点のうちスペクトル分離解析によってサイト特性が得られている観測点に対して地下構造の同定を行う。一つの観測点に対して2回の同定を行い、1回目はPS 検層最下層から地震基盤までを3層あるものと仮定し、そのS波速度と層厚及びPS 検層最下層の層厚の計7つのパラメータの同定を行い、2回目はPS 検層及び追加3層のS波速度を±20%の範囲で変動させて再度同定を行った。3層追加の際、S波速度の逆転が生じないようにし、地震基盤のS波速度は3.4[km/sec]に設定した。

同定結果の評価として、観測値と同定値の相関係数 ρ 及び対数残差平均 σ をとった。

$$\rho = \text{cov}(\log(H_o), \log(H_t)) / (\sigma_{\log(H_o)} \cdot \sigma_{\log(H_t)})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\log(H_o) - \log(H_t))^2}$$

$\rho \geq 0.5$ 、 $\sigma \leq 0.4$ を満たす観測点を良好な結果が得られた観測点とし、以下このクライテリアを元に同定結果の評価を行う。

同定結果の例として、AIC014(蒲郡)を見てみる。PS 検層データも含めて変動させた場合(青線)とPS 検層データを変動させずに3層追加のみで行った場合(赤線)とを比較すると、前者のほうが短周期から長周期まで広く分離サイト特性のスペクトル形状と一致している。

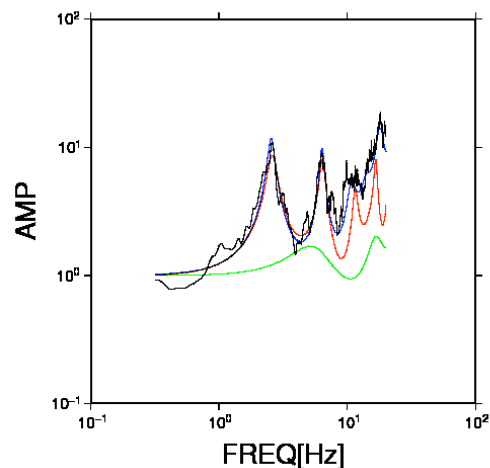


図3：PS 検層も含めた同定によるサイト特性。黒線と黄緑線は図2と同様に分離サイト特性とPS 検層データから求めた理論増幅特性を表す。

また分離サイト特性が得られているK-NET, KiK-net 全観測点で見ると、クライテリアを満たす良好な結果が得られた観測点は760点であった。これはおよそ全体の55%が良好な結果を示したことを表し、PS 検層データを変動させない場

合と比較して約10%増加したことに相当する。つまり松尾・川瀬で指摘されている PS 検層データの固定によるサイト特性のピークのずれの解消で同定結果が改善されたと言える。一方で3層を追加した後に全層のS波速度を変動させることにより、同定の際のパラメータの増加とHHSを行う回数の増加による結果の改善が見られたのではないかという可能性も考えられる。山中らはGAにおいて試行回数等の変化による同定値の変化について見ているが、必ずしも回数等の増加によって結果の改善はなされていないため後者の可能性は高いとは言えないが、他の同定でも同じような結果が出るか今後確かめる必要がある。

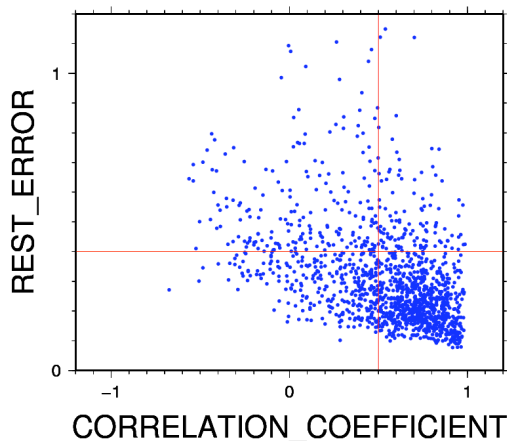


図4：K-NET, KiK-net 全観測点の対数残差平均（縦軸）と相関係数（横軸）の分布

4. JMA 観測点の地盤構造推定

K-NET, KiK-net 観測点はあらかじめ PS 検層データ等の観測点の地下構造情報が得られており、前節ではその地下構造を基本として分離サイト特性と一致するような地下構造を同定した。しかし、気象庁の強震動観測網（JMA）では観測点の地下構造情報が得られていない。そこで本研究では JMA 観測点で得られた分離サイト特性と前節で良好な同定結果が得られた K-NET, KiK-net 観測点の分離サイト特性を用いて JMA 観測点の地下構造の推定を試みた。

まず、JMA 各観測点の分離サイト特性と類似する分離サイト特性を持つ K-NET, KiK-net 観測点を選択する。選択する方法として、両方の分離サイト特性の対数残差平均 σ を取り、 σ の小さい 10 観測点に対して両方の分離サイト特性の総関係数 ρ をとる。 ρ の高い 3 観測点を解析の対象とする。

$$\rho = \text{cov}(\log(H_{JMA}), \log(H_o)) / (\sigma_{\log(H_{JMA})} \cdot \sigma_{\log(H_o)})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\log(H_{JMA}) - \log(H_o))^2}$$

そして、対象観測点の S 波速度及び層厚を変動させて、JMA 観測点の分離サイト特性をターゲットとした HHS により同定

サイト特性を求め、そのサイト特性に合うような S 波速度構造を JMA 観測点の S 波速度構造とした。ここで、HHS に用いるパラメータは前節と同じ設定で行い、S 波速度と層厚の変動幅は基準構造の不確定性に配慮して $\pm 40\%$ とした。

同定結果に対し、前述のクライテリアを元に各観測点を判別すると、分離サイト特性が得られている JMA 観測点 317 点に対し 262 点で良好な結果が得られ、約 8 割の観測点で分離サイト特性に合った地下構造が同定できた。但し注意すべき点は、この結果は観測点の実際の地下構造に関係なく分離サイト特性の類似性のみを用いた同定であり、本研究で得られた S 波速度構造はあくまでも JMA 観測点の分離サイト特性をよく表現できる S 波速度構造を出したものであり、実際の地下構造と一致しているかは現地調査もしくは別の手法による強震動記録の逆解析結果等を用いて検証する必要がある。

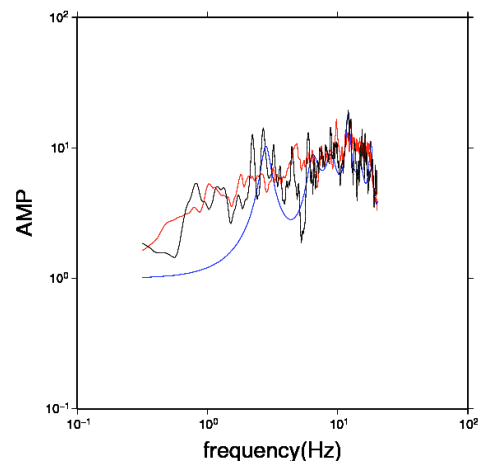


図5：JMA 観測点 516（黒線）と類似観測点 FKS021（赤線）の分離サイト特性。青線が同定サイト特性。

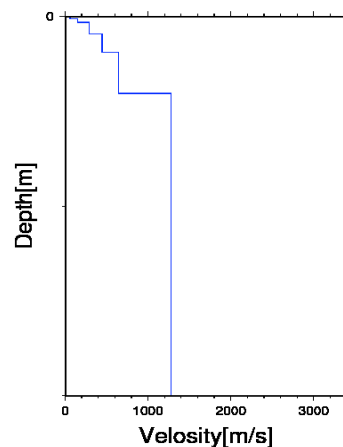


図6：JMA 観測点 516 の得られた S 波速度構造

5. 類似サイト特性からの同定手法を用いた K-NET, KiK-net 観測点の地盤構造推定

前節では、地盤構造の得られていない観測点に対して類似サイト特性からの同定により地盤構造を求めた。その良好な実績を踏まえ、PS 検層データまで含めた二次同定でも良好な結果が得られなかった K-NET, KiK-net 観測点 616 点に対して、

この類似サイト特性を用いた手法により地盤構造を求めた。

解析の結果、対象となる観測点のうち 462 点でクライテリアを満たすような良好な結果が得られた。図に例として FKOH05（犀川）を示す。サイト特性、S 波速度構造共に黒線が PS 検層データ、赤線が選択された観測点（NGS010）の地震基盤まで同定した値、青線が最終的な同定結果である。FKOH05 のボーリング記録を見ると、地下 12m 付近で花崗閃緑岩の岩盤層が見られる。その付近での S 波速度を見てみると、PS 検層データでは 2000[m/sec]、同定値では 14m 地点に 1570[m/sec]の岩盤層と判断できるような層が見られる。また、表層部分において複雑な層構造が見られるが、KiK-net の PS 検層における層構造の分割が少ない点と FKOH05 の表層付近のボーリング記録から判断すると速度構造としては妥当なものであるといえる。

一方でクライテリアを満たさなかった観測点を見てみると、ピークが判断できないようなサイト特性を持つ観測点や増幅率が 100 倍にも達するなど特異なサイト特性を持つ観測点が多く見られた。前者はサイト特性を正確に表現すること

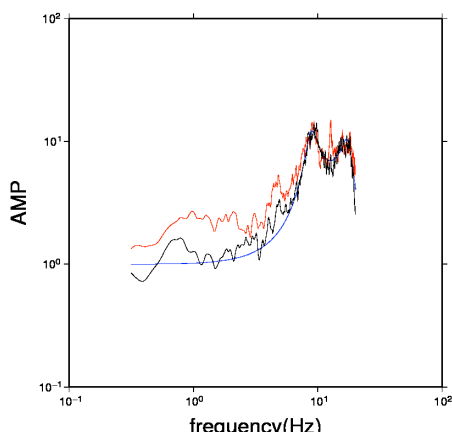


図 7：FKOH05（黒線）と NGS010（赤線）の分離サイト特性。青線が最終的な同定サイト特性。

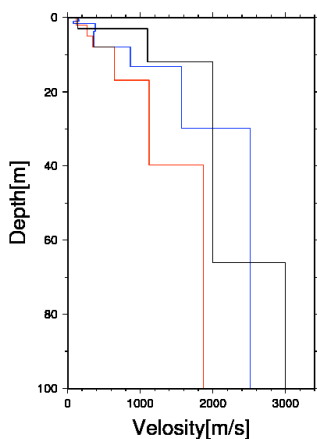


図 8：FKOH05 の PS 検層データ（黒線）と NGS010 の基盤層まで同定した S 波速度構造（赤線）。青線が最終的な S 波速度構造。

がそもそも難しく、後者はそのような特異な特性を持つ類似観測点が他に無いことが原因として考えられる。また、本研究は地下構造を一次元水平成層構造と仮定しているため、周辺が閉ざされた盆地構造やエッジ効果を引き起こす要因である不均一な層構造などの 2 次元・3 次元的な要因に対する影響は考慮していない。特に、K-NET 観測点には地形的な影響を受けやすい地点に設置されている地点が多く存在する。二次同定で良好な結果が得られていない 616 観測点のうち約 6 割が K-NET 観測点であることから、地形効果の影響に対しては本研究では同定が難しいことが指摘できる。

5. 結論

本研究から得られた主な知見は、以下の通りである。

- (1) HHS により広周期に渡って効率の良い解析が実現し、GA に比べて同定結果が改善された。
- (2) PS 検層データも含めた S 波速度構造を同定することで、PS 検層データを固定した場合に見られたサイト特性のピークのずれが解消されてより精度の高い同定サイト特性を持つ地盤構造が得られた。
- (3) 地下構造情報が得られていない JMA 観測点に対して、分離サイト特性の類似している観測点の地下構造を用いて同定を行うことにより JMA 観測点の分離サイト特性に合うような S 波速度構造を同定することができた。
- (4) PS 検層データを含めた解析でも同定が出来なかった K-NET, KiK-net 観測点に対して類似サイト特性を持つ観測点を用いた同定を行うことで、分離サイト特性に合い、なおかつボーリング記録にも対応する S 波速度構造を得ることが出来た。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net、気象庁から強震観測記録を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山中浩明, 2007. —ハイブリッドヒューリスティック探索による位相速度の逆解析物理探査, 第 60 巻, 第 3 号, 265-275.
- 2) 川瀬専, 松尾秀典, 2004. —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, 126-145
- 3) Fukushima, Y., S. Kinoshita, and H. Sato, 1992 — 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.
- 4) 太田外氣晴, 江守克彦, 河西良幸, 2001. —耐震・振動・制御, 共立出版