

1. はじめに

地震動は地盤構造によってその性状が大きく変化するため、広帯域の適切な地震動予測には浅部から深部にかけての地下構造を把握することが重要となる。地下構造の把握する手段として、微動観測^{1), 2), 3)}を用いる方法が提案されている。

本研究では、山口県防府市を対象地域とするが、この地域には、K-NET 防府と KiK-net 防府の2つの地震観測点が約3 km 程度離れて設置されている。これらの観測点の地震動を比較すると、その性状には大きな差異が見られるため、地下構造の急変が示唆され、この地域全体の複雑な地震動性状が予測される。

そこで本研究では、当該地域の地震動性状の把握を行うため、既存の地震観測点の近傍ならびに別途臨時的に地震計を設置した地点において微動アレー観測を実施し、地下構造モデルの推定を行う。さらに、通常の微動アレー観測よりも小さいアレーを用いた極小微動アレー観測と単点微動観測の結果の組み合わせにより、深部までの地下構造を推定する方法を提案する。そして、この提案手法を適用することで微動アレー観測を行った地点の間の地下構造モデルを補間することを試み、当該地域の2次元地下構造モデルを構築する。

2. 観測ならびに解析の概要

2.1 微動アレー観測

図1に観測点の分布を示す。本研究では、防府市の防府市競輪局 (HCS)、佐波小学校 (SBP)、華城小学校 (HNP)、華西中学校 (KSJ)、西浦小学校 (NUP) の計5観測点を観測対象とする。アレーは1~40 m の半径を有する円の円周上に等間隔に3点とその中心の合計4点で構成され、観測は半径の異なる複数のアレーを組み合わせで行った。観測時間は15~20分、サンプリングは100 Hz とした。

ここでは、SPAC法^{1), 2), 3)}を適用し、アレーごとに位相速度を求め、これらを1つに統合し、観測点ごとの分散曲線を求めた。そして、この分散曲線をおおよそ満たすS波速度構造を試行錯誤的に推定した。これを初期モデルとしてGA (遺伝的アルゴリズム)⁴⁾によって逆解析を行い、S波速度構造を決定した。なお、初期モデルを検討する際、工学的基盤以浅の地盤は1~3層とし、S波速度は1層目を100~300 m/s、2層目を

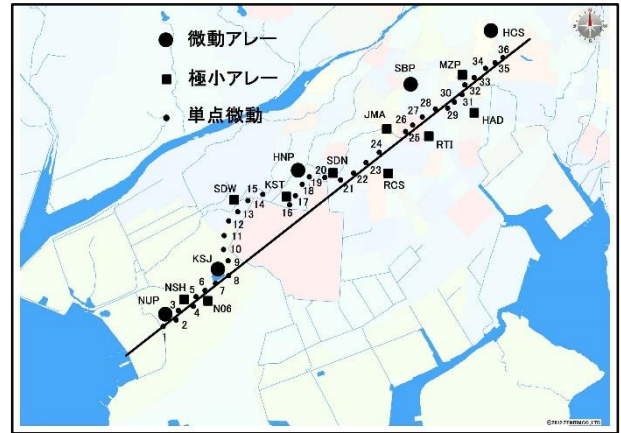


図1 観測点の所在

200~500 m/s、3層目を300~900 m/s、層厚については1~3層を0~1000 m に設定した。4層目以降については、観測点付近のボーリングデータやPS検層データを参考にS波速度を1000 m/s、2100 m/s と設定し、層厚のみを自由に変化させ、浅部から深部にかけての地下構造を推定した。

2.2 極小微動アレー観測

前述の微動アレー観測を行った際の、各観測点で最も半径の小さい1~3 m のアレーを極小微動アレーと見なし、CCA法を用いて表層の地下構造の推定を行った。CCA法の解析にはBIDO^{5) 6)}を用いた。次に、GAを用いて、得られた分散曲線を満たすような地下構造を決定する。なお、初期モデルを決定する際、工学的基盤以浅は、1~3層とし、S波速度は1層目を100~200 m/s、2層目を200~300 m/s、3層目を300~500 m/s (SBPのみ4層目に500~800 m/s)、層厚については各層0~32 m に設定した。例として、HNPにおいてGAで求められた分散曲線と推定されたS波速度構造を図2に示す。

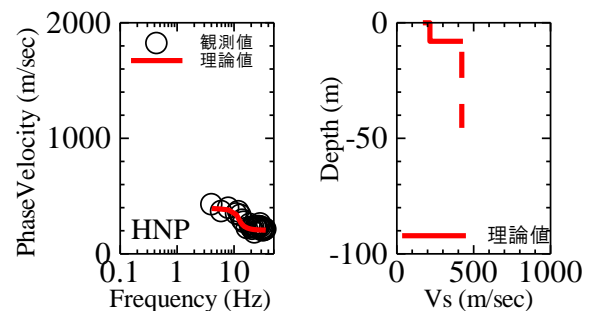


図2 GAにより推定された分散曲線とS波速度構造

2.3 単点微動観測

前述した微動アレー観測を行った際に、その中心で

観測された微動から H/V スペクトルを求めた。Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルは地下構造のみに依存し、振動源の特性に影響されないことが知られている。また、Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルと微動 H/V スペクトルの間には良く相関があり、Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルが最大となる周期は、微動 H/V スペクトルが最大となる周期と良く対応していることが指摘されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。そこで本研究では、微動 H/V スペクトルは Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルで近似できると考え、推定された S 波速度構造に基づく理論 H/V スペクトルが、観測された微動 H/V スペクトルを満たすように、S 波速度構造を推定した。Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルの周期特性を求めるには、各層の層厚、S 波速度、P 波速度、密度の 4 つの物性値を含む地盤モデルを作成する必要がある。微動 H/V スペクトルの逆解析による地下構造の推定では、速度と層厚がトレードオフの関係があるため、どちらかを固定しなければ、十分な精度を有する解は求められないことが指摘されている。本研究では、各層の層厚と S 波速度は、表層部分に関しては、極小微動アレー観測で求められた結果を利用し、それ以深の層に関しては、KiK-net 防府の PS 検層結果を S 波速度の代表値として採用した。PS 検層により P 波速度が求められていない層については狐崎らによる P 波速度 V_p と S 波速度 V_s (km/s) の関係式¹⁰⁾を用いて算出した。

$$V_p = 1.29 + 1.1V_s \quad (2.1)$$

また、密度 ρ (g/cm³) は以下に示す太田らによる密度と S 波速度との関係式¹¹⁾を用いて算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (2.2)$$

作成した地盤モデルにおける Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルを観測された微動 H/V スペクトルに一致するように各層の S 波速度を固定した状態で、層厚を試行錯誤的に変化させ、各地点の S 波速度構造

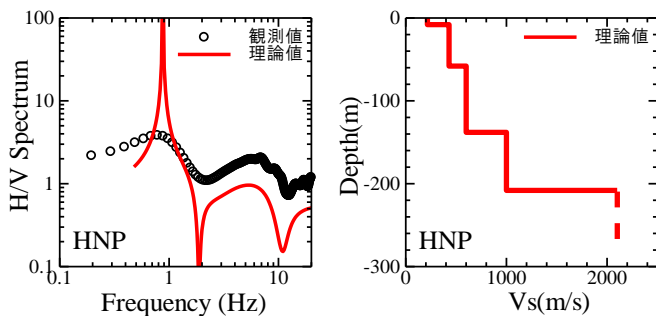


図3 観測された微動 H/V スペクトルと推定された S 波速度構造に基づく理論 H/V スペクトルの比較、推定された S 波速度構造

を推定した。なお、本研究の逆解析では、観測と理論計算による H/V スペクトルのピークとトラフとなる周波数を一致させることのみを対象としており、その他の周期特性や振幅は考慮していない。例として、HNP における観測された H/V スペクトルと推定された地下構造モデルに基づく理論 H/V スペクトル、推定された S 波速度構造を図 3 に示す。観測による H/V スペクトルと推定された地下構造モデルによる理論 H/V スペクトルのピークやトラフの位置はよく整合している。

3. 極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせた地下構造の推定

本研究では、極小微動アレー観測と単点微動観測の結果を組み合わせることで深部までの地下構造を推定することを試みる。そこで、通常の微動アレー観測(手法 1)によって、推定された S 波速度構造と極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせ(手法 2)推定した S 波速度構造を 3 つの方法で検証し、手法 2 の妥当性を検証する。

3.1 S 波速度構造の比較

それぞれの手法で検証された S 波速度構造を図 4 に示す。KSJ、SBP では深部の層厚について、若干のずれはあるものの、どの観測点も平均的な S 波速度や層厚は概ね一致している。

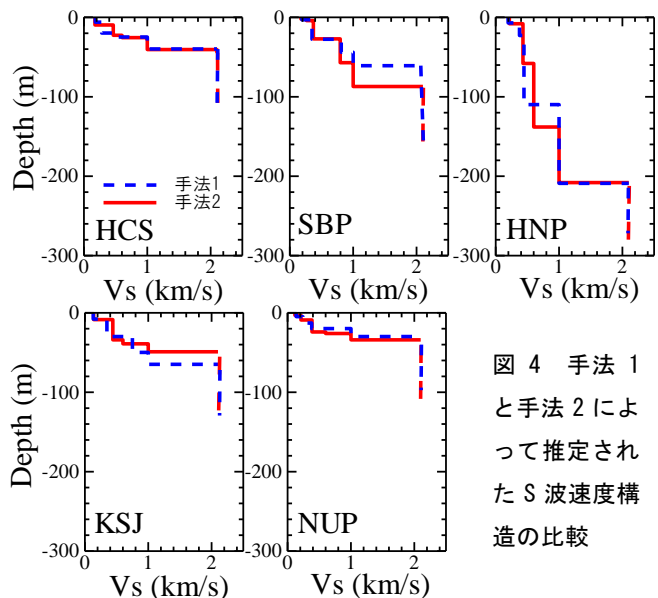


図4 手法 1 と手法 2 によって推定された S 波速度構造の比較

3.2 地震波のフーリエスペクトルによる比較

次に、本研究によって推定された地下構造モデルから 1 次元重複反射理論 (SHAKE)¹²⁾に基づいて計算された地震波形と観測された地震波形との比較を行う。入力地震波は、2014 年 11 月 1 日に KiK-net 防府で観測された地震である。PS 検層結果によると、KiK-net 防府では表層から $V_s=1000$ m/s の層が露頭しているとされるため、各地点の $V_s=1000$ m/s の層の上面位置に

において KiK-net 防府の地表面入射波が鉛直に入射すると仮定した。なお、各層の密度は前述の (2.2) の式を用いて計算し、地盤モデルの減衰定数 $Q(f)$ は $Q(f)=f_0 \cdot f^n$ で表現し、 f_0 は V_s (m/s) の 1/10、 n は 0.7 とした。なお、 f は周波数である。算出された地震波のフーリエスペクトルと、実際に観測された地震波のフーリエスペクトルの比較を図 5 に示す。SBP、KSJ については、スペクトルの形が概ね一致しているが、HCS、HNP、NUP については、3.0 Hz 以下の低周波数域では観測値との間に差が見られる。しかし、手法 1 により求めた地下構造に基づくフーリエスペクトルと、手法 2 により求めた地下構造に基づくフーリエスペクトルは概ね一致しており、地震動の増幅特性に対するそれぞれの地下構造の影響は同等であると判断できる。

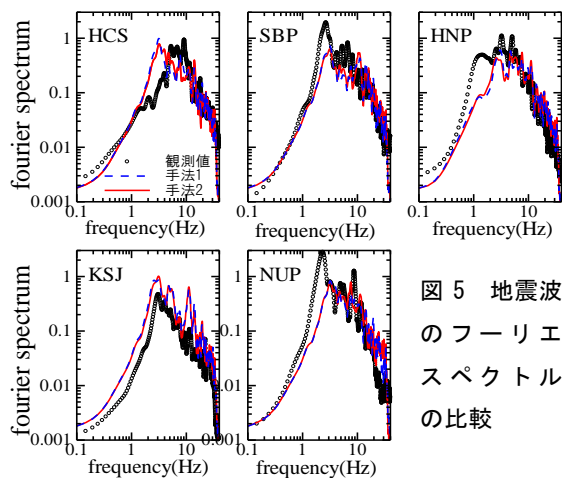


図 5 地震波のフーリエスペクトルの比較

3.3 Rayleigh 波の分散曲線についての比較

通常の微動アレー観測によって抽出された Rayleigh 波の分散曲線と手法 2 で推定された地下構造モデルに基づく理論分散曲線の比較を行う。両者の比較を図 6 に示す。図 6 より、手法 2 の地下構造による理論分散曲線と通常の微動アレー観測による分散曲線はよく一致している。

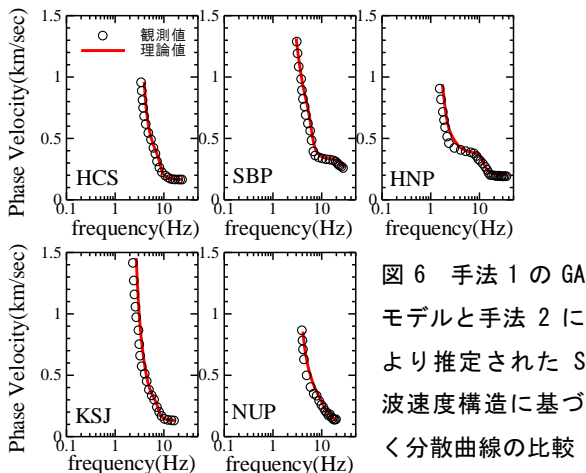


図 6 手法 1 の GA モデルと手法 2 により推定された S 波速度構造に基づく分散曲線の比較

3.4 極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせた手法の有効性

最終的に推定された地下構造モデルには若干の差異はあるが、それに基づく地盤増幅特性や Rayleigh 波の分散曲線において、極小アレー観測と単点微動観測を組み合わせると推定された S 波速度構造は、通常の微動アレー観測によって推定された S 波速度構造に比べて遜色ないと判断できる。よって、極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせる手法は地下構造の簡易的な推定方法として有効であると言える。

4. 2次元 S 波速度構造の構築

4.1 観測概要

前章により妥当性が検証された、極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせる手法により、防府市の各所における地下構造を推定し、これらを統合することで当該地域の 2 次元 S 波速度構造の構築を行った。観測点は、K-NET 防府と KiK-net 防府を通るラインに沿って、単点微動観測が 36 点と極小微動アレー観測が 10 点の計 46 点である。観測点の分布は図 1 に示した通りである。

4.2 極小微動アレー観測

防府市内の計 10 点で極小微動アレー観測を行った。アレー半径は 60 cm、観測時間は 15 分とした。次に得られた分散曲線を満たすように、GA を用いて逆解析を行い、表層部の S 波速度構造の推定を行った。なお、初期モデルを決定する際、工学的基盤は浅は、1~3 層とし、S 波速度は 1 層目を 100~200 m/s、2 層目を 200~300 m/s、3 層目を 300~500 m/s、層厚については 1~3 層を 0~32 m に設定した。4 層目の工学的層の V_s を平均して、630 m/s で固定し、層厚は 0~32 m とした。また、この観測における中心点の微動計によって観測された記録から H/V スペクトルを求め、前章の方法に基づいて地下構造モデルを推定した。

4.3 単点微動観測

当該地域の 2 次元地下構造モデルを構築するにあたり、通常の微動アレー観測ならびに極小アレー観測と単点微動観測を組み合わせる方法だけでは、地下構造を推定する位置の間隔が広すぎるため、それらの間の計 36 点で単点微動観測のみを行った。得られた H/V スペクトルを満たすように、表層部分は各点の最寄り既に推定されている地下構造を参考にしながら V_s と層厚を試行錯誤的に変化させ、各地点の S 波速度構造を推定した。また、4~6 層目に関しては前項の極小微動アレー観測、PS 検層結果を参考に V_s を 630 m/s、1000 m/s、2100 m/s と固定し、層厚のみをパラメータとした。また、 V_p と密度は、前述の式 (2-1)、式 (2-2) を用いてそれぞれ求めた。なお、本研究の逆解析で

は、観測と理論計算による H/V スペクトルのピークとトラフとなる周波数を一致させることのみを対象としており、その他の周期特性や振幅は考慮していない。

4.4 2次元S波速度構造モデルの構築

極小アレー微動観測、単点微動観測を行って得られた結果を直線的につなげて、山口県防府市の2次元モデルの構築を行った。これを図7に示す。図より防府市では KiK-net 防府付近で基盤が急激に傾斜しており、KiK-net 防府では表層に硬い地盤が露出していることが分かる。また K SJ から HNP にかけて、あるいは SBP から HNP にかけては、2地点間の距離はそれぞれ2 km 程度しか離れていないが、6層目 ($V_s=2100$ m/s) が現れる深さは約100 m 程度の違いがある。また、K SJ、HNP の地下構造はその近傍の地点との間に層厚に急激なずれが生じているが、これについては今後さらに検討が必要である。

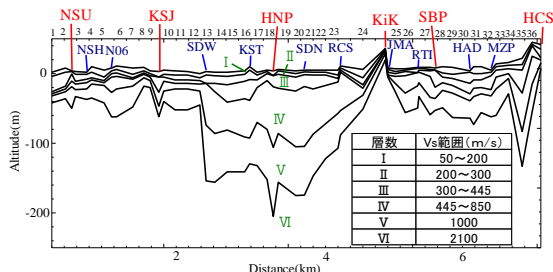


図7 防府市の2次元地下構造モデル

5. まとめ

山口県防府市で微動アレー観測を行い、半径1~40 mのアレーに対してSPAC法を用いて解析を行い、地下構造を推定した。この結果と、同観測点で行ったアレー半径のうち、最も半径の小さい1~3 mのアレーに対して、CCA法を用いて浅部地盤についての地下構造を推定した。さらに、そのアレーの中心点で得られた微動H/Vスペクトルを組み合わせることで、深部までの地下構造を推定した。この2つの手法により推定されたS波速度構造を比較した結果、極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせる方法は通常のアレー観測を同等の地下構造推定能力を有していることが確認できた。そこで、通常のアレー観測、極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせる方法で地下構造を推定し、これを単点微動観測の結果で補間することで、山口県防府市の2次元地下構造モデルを構築した。求めた地下構造の中には、再検討する余地がある観測点もあったが、本研究により、極小微動アレー観測と単点微動観測を組み合わせることで、これまで複数の半径を組み合わせ行っていた微動アレー観測を、効率化できる可能性を示唆する結果となった。

参考文献

- 1) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. E. R. I., Vol. 35, pp. 415-456, 1957
- 2) 岡田広 (研究代表者): 長周期微動利用の地下深部構造探査法のための現場解析システムとソフトの開発研究、平成7年度~平成9年度科学研究費助成金〔基盤研究(A)(2)〕研究成果報告書、85 p.、1998
- 3) 日本地震工学会、微動利用技術研究委員会: 微動の利用技術、250 p.、2011
- 4) 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
- 5) Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki: New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, pp. 115-124, 2010
- 6) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, GEOPHYSICS, VOL. 78, NO. 1, KS13-KS23, 2013
- 7) 塩野計司、太田裕、工藤一嘉: やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (6) -微動に含まれるRayleigh波成分-, 地震第2輯、第32巻、pp. 59-122、1991
- 8) 時松孝次、宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第439号、pp. 81-87、1992
- 9) 時松孝次、新井洋、酒井潤也: 短周期成分に含まれる表面波の性質と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文集、第472号、pp. 47-55、1995
- 10) 狐崎長琅、後藤典俊、小林芳正、井川猛、堀家正則、斉藤徳美、黒田徹、山根一修、奥田宏一: 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、vol. 9、No. 3、pp. 1-17、1990
- 11) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸: 耐震・振動・制御、共立出版、p. 339、2001
- 12) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC72-12, p. 88, 1972