

# 地震記録と微動記録を用いた不整形地盤構造の簡易的推定手法に関する研究

古谷 英康

## 1. はじめに

地震動の性状は地下構造によって大きく変化する。特に短周期の地震動は浅部、長周期の地震動は深部の地盤構造の影響を強く反映するため、広帯域の強震動予測のためには、地表から地震基盤までの地盤構造を把握することが重要となる。

本研究で対象とする山口県防府市には、防災科学技術研究所の強震観測点 K-NET 防府と KiK-net 防府の2つの観測点が設置されているが、3kmほどしか離れていないにもかかわらず、同じ地震でも震度階級が2階級異なるなど、その地震動性状は大きく異なり、その要因として傾斜基盤構造の存在が指摘されている<sup>1)2)3)</sup>。このように基盤の傾斜が顕著な地域においては、地震波の増幅的干渉の可能性があり、2・3次元地盤構造の把握が重要となる。1次元地下構造モデルの推定手法には、地盤増幅率やレシーバーファンクションを指標とした逆解析のように地震記録を用いるものや、微動アレイ観測、極小微動アレイ観測、H/V スペクトルによる逆解析のように微動記録を用いるものがある。これらそれぞれの手法には、推定条件や簡便性などの面において長所・短所が存在することから、どれか一つの手法を用いて、傾斜基盤構造を推定することは非常に困難であるといえる。

そこで本研究では、これらそれぞれの1次元地下構造モデルの推定手法のもつ長所をうまく生かすために、地震記録と微動記録を組み合わせた、不整形地盤構造を有することが想定される地域における、2・3次元地盤構造の簡易的推定手法を提案し、当該手法を適用して構築された2次元地下構造モデルに基づいた2次元地震動シミュレーションを行うことで、モデルおよび当該推定手法の妥当性の検討を行う。

## 2. 2次元地下構造モデルの構築

本研究で提案する手法による2次元地下構造モデルの推定手順は以下の通りである。

①地震観測点において、地震記録による地盤増幅率、レシーバーファンクション、微動アレイ観測による位相速度を用いた同時逆解析を行い、1次元地下構造モデルを構築する。

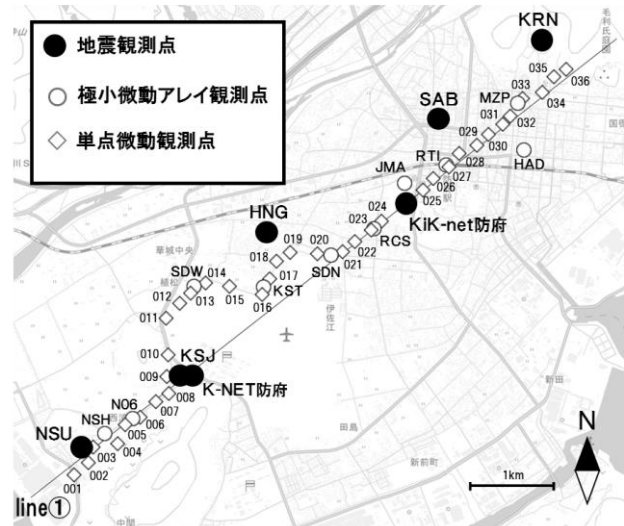


図1 観測点分布 (国土地理院地図に加筆)

- ②地震観測点の間を補間するために、2次元地下構造モデルを構築する測線に沿った複数の観測点において極小微動アレイ観測と単点微動観測を行い、各観測点での1次元地下構造モデルを構築する。
- ③①、②で各観測点において構築された1次元地下構造モデルを直線的につなぐことで、2次元地下構造モデルを構築する。

本研究では、山口県防府市を対象地域とし、まずこの手法を用いて2次元地下構造モデルを構築する。2次元地下構造モデルを構築するのは K-NET 防府と KiK-net 防府を含む測線 (以後 line①) とする。

### 2.1 同時逆解析による地震観測点の S 波速度構造モデル

松尾・他 (私信) は、5つの地震観測点 (NSU、K-NET 防府、HNG、SAB、KRN) で、微動アレイ観測による位相速度と、地震観測記録による地盤増幅率とレシーバーファンクションを用いた同時逆解析により、S波速度構造モデルを推定した。観測点の分布を図1に示す。本研究における同時逆解析については、松尾・他 (私信) による解析結果を引用する。各地震観測点において同時逆解析によって推定された S 波速度構造モデルを図2に示す。これら5点の中心に位置する HNG における地震基盤 ( $V_s=3000\text{m/s}$ ) の出現深度は他の観測点に比べ、非常に深いことから、当該地域で

は、中心部ほど基盤深度が深い盆地形状となっていることが推察される。

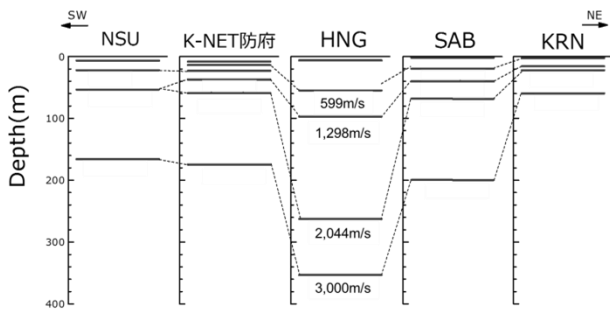


図2 同時逆解析によって推定された S 波速度構造の比較

## 2.2 極小微動アレイ観測による浅部地下構造の推定

当該地域の計 10 点 (NSH, N06, SDW, KST, SDN, RCS, JMA, RTI, HAD, MZP) において極小微動アレイ観測を行った。観測点の分布は図 1 に示した通りである。アレイ半径は 60cm、観測時間は 15 分とした。また、観測には、微動計として JEP-6A3-10 (ミツトヨ社製、感度 10V/g) を用い、得られた加速度データをトランスミッターである RS-AD24 (アルニック社製) を介して、ノートパソコンに直接収録した。観測された微動記録に対し、CCA 法を用いて、位相速度を推定した。解析には BIDO<sup>4)</sup>を用いた。そして、得られた分散曲線を満たす S 波速度構造を、GA (遺伝的アルゴリズム)<sup>9)</sup>によって逆解析的に推定した。GA による探索範囲は、前述した同時逆解析の際に使用したものと同一であり、すなわち、工学的基盤で浅について 3 層構造とし、S 波速度および層厚の探索範囲は、1 層目をそれぞれ 100~250m/s、0~20m、2 層目を 200~500m/s、0~50m、3 層目を 500~700m/s、0~100m に設定した。

## 2.3 単点微動観測

図 1 に示す当該地域の計 36 点 (001~036) において単点微動観測を行った。使用した機材は、極小微動アレイ観測と同じである。各観測点で観測された微動記録から微動 H/V スペクトルを算出した。なお、地震観測点 6 点および極小微動アレイ観測点 10 点においても、微動アレイ観測を行った際、その中心で観測された微動記録から同様に微動 H/V スペクトルを算出した。

## 2.4 1 次元地下構造モデルの構築

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 スペクトルの周期特性は良く対応しているということが既往の研究によって指摘されている<sup>7)8)9)</sup>。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、極小微動アレイ観測点 10 点および単点微動観測点 36 点において、微動記録から算出した微動 H/V スペクトルと Rayleigh 波基本モードの理論 H/V スペクトルを用いた逆解析により、S 波速度構造を推定した。解析に必要な物性値は、各層の S 波速度、層厚、P 波速度、密度の 4 つである。各層の S 波速度と層厚について、極小微動アレイ観測点の表層部分に関しては、極小微動アレイ観測で推定された結果を使用した。単点微動観測点の表層部分に関しては、各点の最寄りすでに推定されている地下構造を参考にしながら S 波速度と層厚両方をパラメータとした。それ以深の層に関しては、極小微動アレイ観測点、単点微動観測点ともに前述した同時逆解析によって推定された S 波速度 (599m/s、1298m/s、2044m/s、3000m/s) を用い、層厚のみをパラメータとした。また、各層における P 波速度および密度に関しては狐崎・他<sup>10)</sup>および太田・他<sup>11)</sup>による S 波速度との関係式を用いて算出した。これら 4 つの物性値を用いて、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 スペクトルが微動 H/V スペクトルに一致するよう各観測点における 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。

## 2.5 2 次元地下構造モデルの構築

各観測点で構築された 1 次元地下構造モデルを直線的につなぐことで、当該地域の line①における 2 次元地下構造モデル (以後、line①モデル) を構築した。図 3 に line①モデルを示す。また、各観測点において、算出された微動 H/V スペクトルを基に卓越周期を求めた。卓越周期分布を図 4 に示す。SDW から RCS までの範囲においては、ほとんどの観測点で、卓越周期は 0.8 秒以上と長く、1.2 秒を超える観測点も見られる。line①モデルにおける SDW から RCS までの範囲の地震基盤の出現深度は他の観測点と比べ非常に深く、長い卓越周期と対応する。また、構築された line①モデルについて、018、HNG、019 の間では層厚 (特に第 II 層) が著しく異なっており (図 3 灰色部)、HNG の卓越周期が 018、019 の卓越周期と大きく異なることと対応している。HNG は、line①から大きく外れていることから、HNG の周辺では、line①に直交する方向、すなわち 3 次元的にも地下構造が大きく変化していると考えられる。

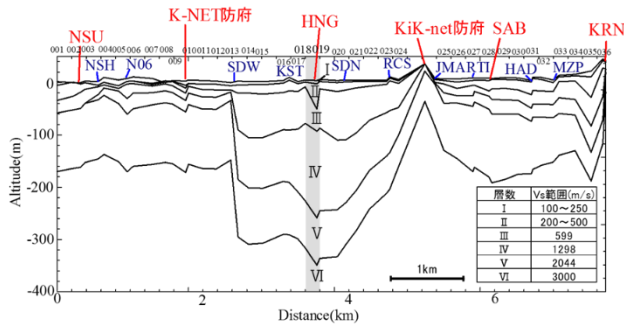


図3 line①モデル

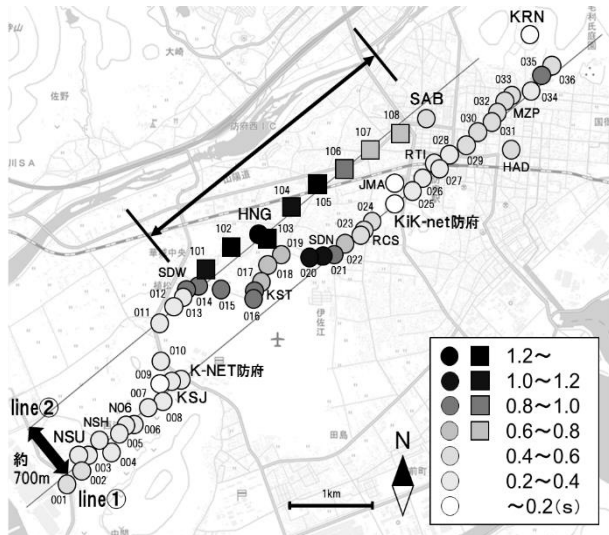


図4 卓越周期分布(□:追加の単点微動観測点)

## 2.6 追加の単点微動観測

HNG 付近の 3 次元地下構造の変化について検討するため、line①から北西方向におよそ 700m 平行移動した測線(以後 line②)上に沿った計 8 点(101~108)で追加の単点微動観測を行った。得られた微動記録から line①上の単点微動観測点と同様に微動 H/V スペクトルを算出し、それを基に卓越周期を求めた。line②上における追加の単点微動観測点とその卓越周期分布は図 4 に併せて示している。101 から 105 の範囲における卓越周期は 1.0 秒以上と非常に長い。

## 2.7 追加の単点微動観測結果を考慮した 2 次元地下構造モデルの修正

line②上における追加の単点微動観測点について、line①上の単点微動観測点と同様の手法を用いて 1 次元地下構造モデルの推定を行った。そして、line②上の SDW から SAB の範囲の計 11 点 (SDW、101、102、HNG、103、104、105、106、107、108、SAB ; 図 4) において、2 次元地下構造モデル (以後、line②モデル) を構築した。図 5 に line②モデルを示す。101 から 105 までの範囲の地震基盤の出現深度は他の観測点に比べて深く、line①モデルと同様、卓越周期と基盤の深さが対応する。また、line①モデルにおける 018、HNG、019 の間での層厚 (特に第 II 層) の急激な変化に関して、

line①モデル、line②モデルそれぞれの SDW から SAB までの範囲における第 II 層の層厚を比較すると、line①モデルに比べて、line②モデルの層厚は非常に深いことから、SDW から SAB までの範囲においては、line①から line②にかけて、第 II 層の層厚が 3 次元的に厚くなっていると推察される。以上より、line①における第 II 層の層厚が line②に比べ薄いこと、HNG と 018、019 の卓越周期が大きく異なること、そして HNG は line①から北西に 700m 外れた観測点 (line②上) であることから、line①における 2 次元地下構造モデルの構築において、HNG 直下の 1 次元地下構造モデルは用いないことが妥当であると判断した。図 6 に、HNG の地下構造モデルを除き構築した 2 次元地下構造モデル (以後、line①' モデル) を示す。

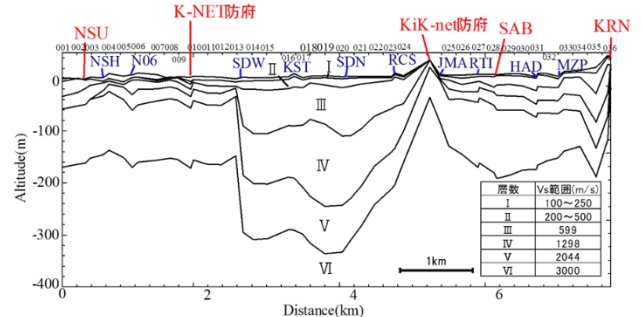
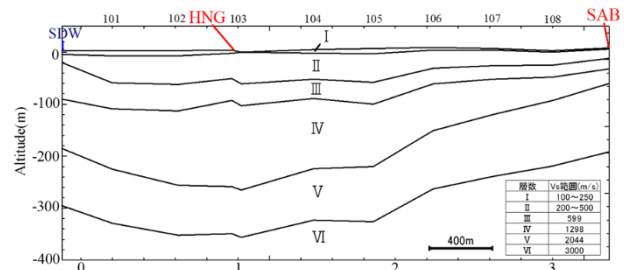


図5(上):line②モデル、図6(下):line①' モデル

## 3. 2次元地震動シミュレーションによるモデルの妥当性の検証

構築された 2 次元地下構造モデルに基づいて、有限要素法 (FEM) 解析による 2 次元地震動シミュレーションを行い、出力結果と地震観測点で観測された地震動を比較することで、各モデルの妥当性の検討を行った。対象モデルは、line①' モデルと、line②モデルである。FEM 解析について、まず各モデルに基づいて、それぞれ FEM 地盤解析モデルを作成した。なお、メッシュサイズについては、どちらのモデルも 1 メッシュ 20m×5m (X 方向: 断面方向×Z 方向: 深さ方向) とした。また、出力点について、line①' モデルでは、NSU、K-NET 防府、KiK-net 防府、SAB、KRN の 5 点、line②モデルでは HNG、SAB の 2 点とした。そして作成された各モデルに対して、モデル底面から基盤地震動を鉛直入射し、算出された各出力点における地震動のフ

ーリエスペクトルと観測された地震動のフーリエスペクトルを比較した。基盤地震動は、KiK-net 防府の地表で観測された 2014 年 11 月 1 日の伊予灘の地震（深さ 68km, M4.2）の地震動から 1 次元波動論 (SHAKE) <sup>12)</sup> に基づいて算出された地震基盤での入射波を測線の向きに座標変換して用いた。なお、KiK-net 防府観測点は、PS 検層の結果から、硬質な地盤 ( $V_s=1000\text{m/s}$ ) がほぼ露頭していることが明らかになっており、2 次元的な波動伝播の影響が殆どないことを別途確認している。

図 7、8 に line①'、②モデルの各出力点における X 方向のフーリエスペクトルの比較を示す。line①'モデルの KRN については解析結果と観測記録に差が見られるものの、その他の出力点においては、いずれも解析結果と観測記録が非常によく一致している。よって、本研究による推定手法によって構築された 2 つの 2 次元地下構造モデルはどちらも妥当であるといえる。また、本研究における地下構造モデルの推定手法は妥当であることが証明された。

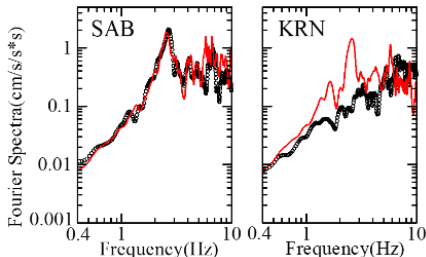
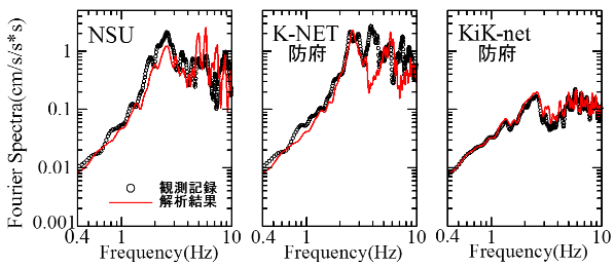


図 7 line①'モデルの各出力点での X 方向のフーリエスペクトルの比較

図 8 line②モデルの各出力点での X 方向のフーリエスペクトルの比較

#### 4. まとめ

本研究では、まず、山口県防府市を対象地域として、地震記録と微動記録を用いた 2・3 次元地盤構造の簡易的推定手法によって 2 つの 2 次元地下構造モデルの構築を行った。そして、構築されたモデルに基づいた 2 次元地震動シミュレーションによって各モデルの妥当性を確認し、本手法が妥当であることを証明した。今後、適用事例を増やしていくことで、本手法の更な

る精度向上や体系化を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 岡宏記、神野達夫、三浦弘之、阿比留哲生：微動アレイ観測に基づく防府市の地下構造の推定、2015 年度日本建築学会大会(関東)、構造Ⅱ、pp.55-56、2015
- 2) 正願拓哉、神野達夫、三浦弘之、阿比留哲生：微動アレイ記録と地震記録との同時逆解析による山口県防府市での S 波速度構造の推定 その 1 微動アレイ観測の概要と位相速度の推定、2016 年度日本建築学会大会(九州)、構造Ⅱ、pp.1085-1086、2016
- 3) 松尾敦子、三浦弘之、神野達夫、阿比留哲生：微動アレイ記録と地震記録との同時逆解析による山口県防府市での S 波速度構造の推定 その 2 S 波速度構造モデルの推定、2016 年度日本建築学会大会(九州)、構造Ⅱ、pp.1087-1088、2016
- 4) 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
- 5) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, GEOPHYSICS, VOL. 78, NO. 1, KS13-KS23, 2013
- 6) 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
- 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, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.