

微動のH/Vスペクトル比を利用した岩手県北上市の基盤深度の推定*

岩手大学工学部 鷲坂志織, 山本英和, 佐野剛

1. はじめに

常時微動は人間の日常活動, 交通, 工場などの人為的な振動や気象条件などからの自然な振動によるもので, 振動源や伝播経路, 地下構造, 表層地盤の特性を反映したものと考えられる。いつでもどこでも存在し測定可能であることから地震時の地盤振動特性などの概略的な予測などに利用されたり, 微動を伝播する表面波としてとらえ, 地下構造探査に利用されている。

微動から地下構造を推定する方法として, 微動アレー観測に基づいたレイリー波の分散特性を利用する方法と, 1点3成分微動の移動観測による水平成分と鉛直成分のスペクトル比を利用する方法の2通りがある。微動アレー観測は通常7台以上の地震計を同時に必要とし, 観測自体が大掛かりである。また, アレー長に依存した波長の波しか解析が行えないために, 深部の地下構造を推定するには数kmといった大規模なアレーを展開する必要がある。つまり, 都心部などではアレーの配置が困難であると考えられる。一方, 1点3成分微動の移動観測は地震計を1台しか使用せず, 観測時間が短いため, 多くの地点で観測が行える。また, 既知の情報が少ない地域における概略的探査の場合, アレー観測による正確な探査よりも深部の地下構造の推定が容易である。そこで本研究では, 都市部とは異なり詳細な地下構造がほとんどわかっていない岩手県盛岡市を対象に, 1点3成分微動観測を利用した地下構造の推定を行う。我々はこれまでの研究で, 北上低地帯北部岩手県盛岡市において2001-2005年にかけて約300点にのぼる1点3成分微動測定を密に実施し, 微動H/Vスペクトルを利用して北上低地帯北部の基盤構造を推定してきた(山本ほか, 2005, 2006)。

本研究の探査地域である北上市は北上低地帯中央部に位置し, 北上低地西縁断層帯のうち北西部に花巻断層帯, 南西部に出店断層帯は位置し, 活断層が動いて内陸地震が発生した場合, 大きな被害が予想される地域である(岩手県, 2000)。地震時の強震動を予測する上で, 表層のS波速度や基盤深度の空間分布は重要な地盤情報であるが, 地方都市ではその蓄積が皆無である。地盤情報は土質調査用の標準貫入試験のボーリング程度しかなく, ましてや基盤深度の情報はほとんど無い。本研究では北上市の約100地点において1点3成分常時微動測定を実施し, 微動のH/Vに基づいて地盤の卓越周期を推定し, さらにH/Vがレイリー波の振幅比で説明可能と仮定して北上市の基盤深度の空間分布を推定する。

2. 微動測定

図1に研究対象地区を示す。微動測定を行った岩手県北上市は人口約9万4千人, 北上川流域の低地である。北上市中心部では人間活動や交通による振動レベルが大きいことが, 郊外で

* Estimation of basement structures at Kitakami City by H/V spectral ratios of densely measured microtremor records
by Shiori SAGISAKA, Hidekazu YAMAMOTO and Tsuyoshi SANO

は非常に小さいことが予想される。測定地点は基本的には南北 2km, 東西 1 km の区画を作成し、できるだけ測定一点が等間隔になるように選定した。また、最終的に推定された構造とボーリングデータを比較する目的で、深度 100m 以上の PS 検層データがある基盤強震ネットの花巻南及び金ヶ崎観測点でも測定した。測点数は 104 点である。

微動測定に使用した機材を以下に示す。微動計として、レナルツ社製固有周期 5 秒 3 成分速度型振動計 LE-3D5s を使用し、収録機として、白山工業 (株) 製データロガー LS-8000SH を使用した。一箇所における微動の測定時間は約 15 分間、サンプリング周波数は 100Hz である。

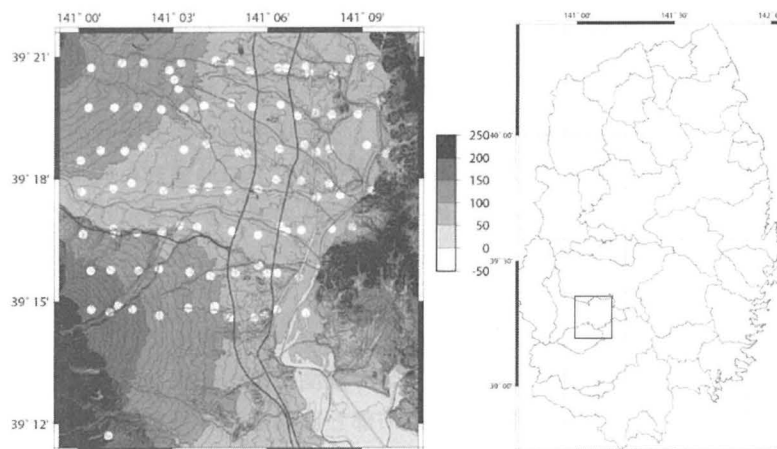


図 1 本研究における微動測定点。白丸が微動観測点を示す。南西端の一点は基盤強震ネット金ヶ崎観測点。右図は岩手県地図。図中の四角が左図の測定範囲に対応する。

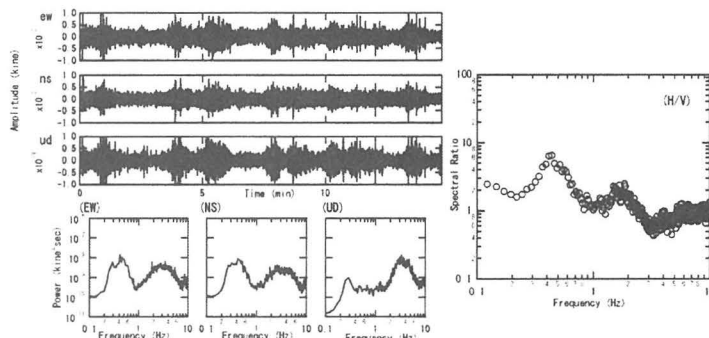


図 2 観測された微動波形，東西動，南北動，上下動のパワースペクトル，H/V スペクトル比。

3. 微動の H/V スペクトル

図 2 に測定した微動の波形，パワースペクトル，H/V スペクトルを示す。測定された 3 成分（東西動，南北動，上下動）の微動の波形から，FFT によるスペクトル解析により各成分のパワースペクトルを算出する。ただし，15 分の測定時間の中で車両の通行などによるノイズが混入している測定地点も多々存在していたため，以下の手順でスペクトル解析を実施した。測定時間を，5.12 秒ずらした 40.96 秒を基本とする解析区間に分割し，それぞれパワースペクトル

を算出した。それぞれの区間で rms 振幅を算出し、全測定区間の rms 振幅を下回る区間のみを使用した平均パワースペクトルを算出した。この操作により車両などの通行による振幅の大きい区間を除外し、定常的な振動のみからスペクトルが計算されたと期待される。

こうして得られた東西動と南北動の相乗平均から水平動のスペクトルを算出し、それを上下動のスペクトルで除して、最終的には2乗根をとることにより微動の H/V スペクトルを算出した。図3に北から2列目の同一緯度における H/V の経度方向の空間分布を示す。141.15 度付近では数 Hz でピークを示し、経度が小さくなるにつれて H/V ピークを示す周波数が変化するのがわかる。ピーク周波数は、141.1 度以西では 0.4Hz (2 から 3 秒) を示している。第2ピークは全体をみれば顕著でないこともわかる。

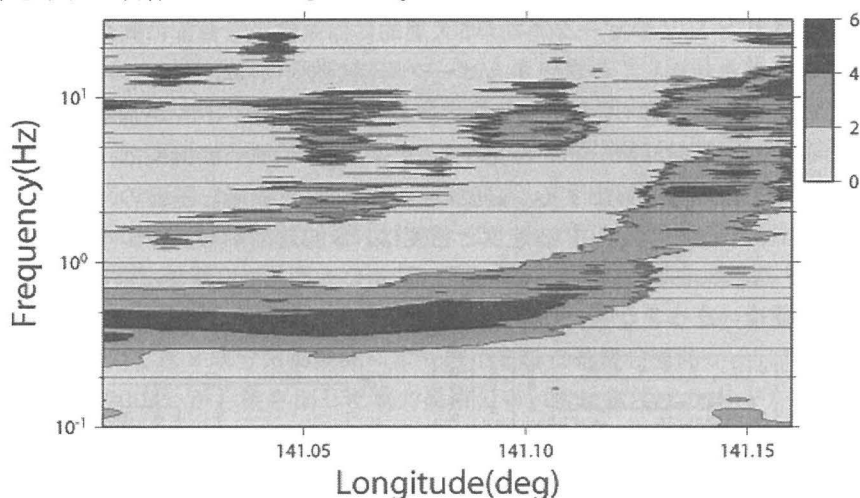


図3 北から2列目の微動の H/V の経度方向の空間変化。色の濃淡が H/V の値を示す。

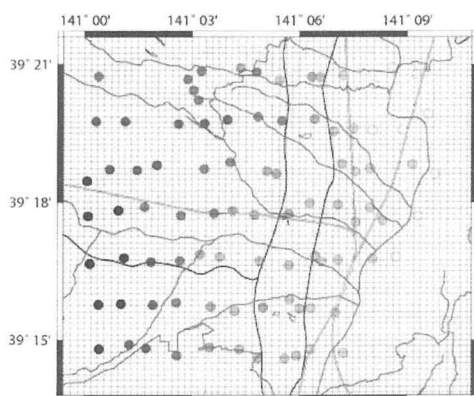


図4 H/V ピーク周期分布 (単位, 秒)

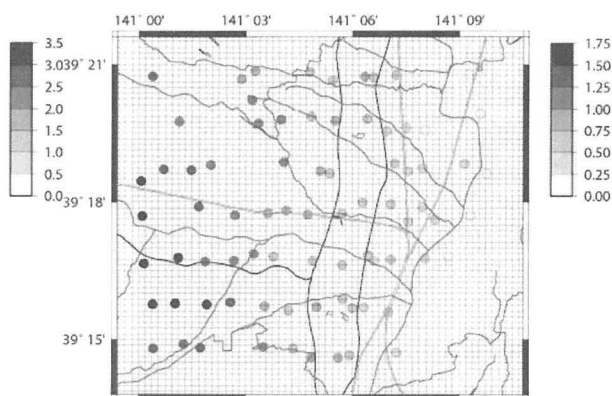


図5 H/V トラフ周期分布 (単位, 秒)

各地点で微動の H/V スペクトルからピーク周波数を読み取り、逆数をとることによりピーク周期とした。複数ピークが存在するところでは基本的には大きなピークを読み取った。

図4に微動の H/V スペクトル比のピーク周期の分布を示す。ピーク周期は全観測点のうち

89 地点で算出された。ピーク周期は、北上川の東側ではピーク周期が、北上川流域で約 0.1 秒から 1 秒程度、東部から西部にかけて 1 秒から 3 秒まで徐々に長くなり、測定範囲西端では最大 3.7 秒であった。ピーク周期の南北方向の変化はあまり顕著ではない。コンターで表現すると東西方向の変化がよくわかる。ピーク周期を読み取るとともにトラフ周期も読み取った。結果を図 5 に示す。H/V スペクトルでトラフが顕著でない観測点は除外してある。ピークと同様に南北方向の変化は顕著ではなく、最小で 0.05 秒、最大で 2.0 秒、東から西へ徐々に周期が長くなっているのがわかる。

4. ピーク周期を用いた基盤深度の推定

図 4 より測定された H/V のピーク周期が、大局的には東部から西部に向かって徐々に大きくなっていることが示された。このことからピーク周期が地下構造、とりわけ基盤の構造に影響を受けていることが予想される。そこで、測定された H/V スペクトルが基本モードレイリー波で表現可能と仮定して基盤深度分布を推定する。ここでレイリー波振幅は、地下構造を表層と基盤の 2 層モデルと仮定して算出する。必要なパラメータは表層と基盤の、層厚、S 波速度、P 波速度、密度である。このうち P 波速度と密度は、S 波速度から換算する。さらに基盤の層厚は無限大とし、基盤の S 波速度を 3000m/s と仮定することで、変数は表層の層厚(基盤深度)と、表層の S 波速度の 2 つとなる。

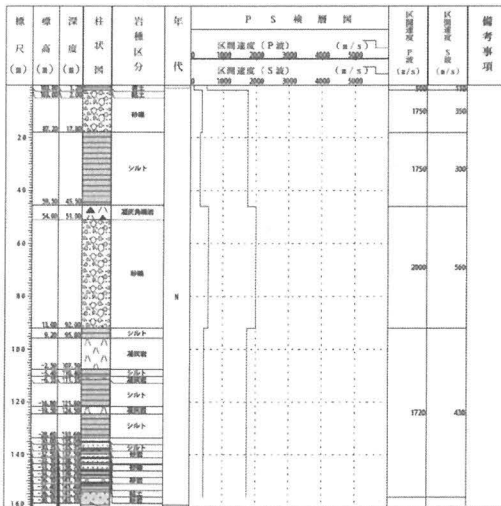


図 6

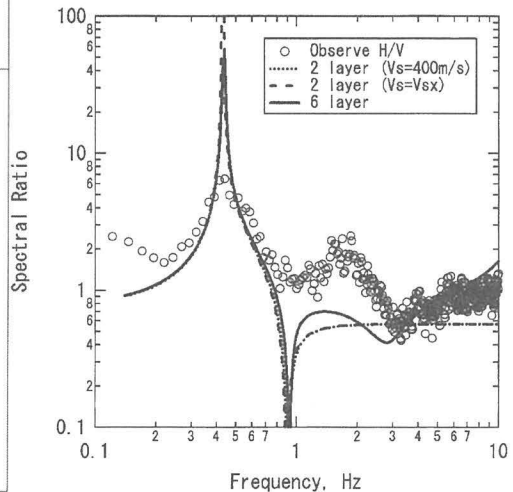


図 7

図 6 基盤強震ネット花巻南観測点のボーリング柱状図および PS 検層結果。

図 7 H/V スペクトル比の観測値と計算値。観測値を白丸で、計算値を点線(表層の VS=400m/s を仮定した単純 2 層モデル)、破線(表層の走時平均 VS=411m/s を仮定した単純 2 層モデル) および実線(柱状図に基づいた 6 層モデル) で示す。

基盤深度、すなわち表層の層厚を推定するためには、微動の H/V のピーク周期のみの利用では表層の S 波速度を仮定する必要がある。表層の S 波速度を決定するために、図 6 に示す基盤

強震ネット花巻南観測点でのボーリング柱状図を参考とした。掘削深度は実際の基盤深度より浅いと考えられるため、ピーク周期が適合するように基盤のすぐ上の層の厚さを求めた6層モデルを基準とする。この地域はシルト、砂礫、凝灰岩などからなり、検層結果ではS波速度が300m/sから560m/sを示している。5つの堆積層の速度値の走時平均411m/sであるため、2層で単純化した400m/sを表層のS波速度と仮定した。単純な2層モデルでも、図に示された6層モデルでもHaskellのマトリックス法でレイリー波の理論H/Vを計算しピーク周期を求めた場合、少なくとも第1ピーク周期はほぼ同一の値であることは確かめている。図7に観測値と計算値の適合の例を示す。6層モデルもVS=411, 400m/s仮定の2層モデルも少なくともピーク周辺は観測値をほぼ満足していることがわかる。この方法によって、全観測点の基盤深度を、Vs400m/sの2層モデルの表層の厚さとして推定する。

図8に2層モデルにおける表層の層厚を示す。北上川の東側では層厚は最小8.6m、概ね50m以下程度を示し、東から西に向かって徐々に深くなり、中央部では100mから200m程度の値となり、範囲西端では最大360m程度となっている。この結果から、実際の標高から推定された表層の厚さの差をとることにより基盤の標高を推定した。図9に基盤の標高分布を示す。北上市では北上川の東側ではほぼ基盤が露出している。北上市の東から西へ基盤は落ち込んでおり、西側では基盤は海拔260m程度となっている。傾斜は東部では急激に落ち込み、中央部から西部にかけてなだらかとなっているように傾斜が変化していることもわかる。

最後に、本研究の1点3成分微動観測により推定された基盤の標高と、日本の重力(地質調査総合センター, 2004)から抜き出した重力異常分布(仮定密度 2.3g/cm^3)と比較を行った。図10に重力異常分布を示す。東から西にかけて重力異常が低くなっているため、基盤の深度が東から西へ深くなっていることが予想される。基盤の傾斜と重力異常の変化の傾向は類似していることがわかる。

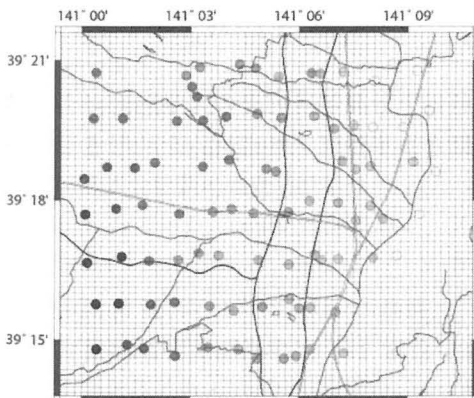


図8(a)

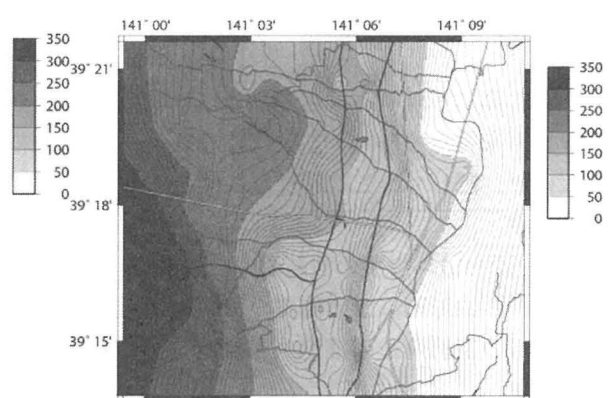


図8(b)

図8 2層モデルでの基盤の層厚(単位, m) (a)観測点における層厚, (b)コンター表示。

5. まとめ

岩手県北上市において104点の1点3成分微動測定を実施し、そのうち89地点でH/Vスペ

クトルのピーク周期を読み取り，レイリー波振幅に基づいて 2 層モデルの基盤の深度分布を推定した。その結果，

1. H/V のピーク周期は東から西に向けて 1 秒以下から 3 秒以上まで徐々に大きくなっている。
2. 北上市における基盤深度は東から西にかけて深くなっており，その中央部で基盤の傾斜が変化している。
3. 推定された基盤深度分布は，重力異常分布と傾向が類似している。

今後の課題として，H/V の形状を精査し，単純 2 層モデルを拡張する地区を判別し，より真実に近い構造モデルを構築する必要がある。

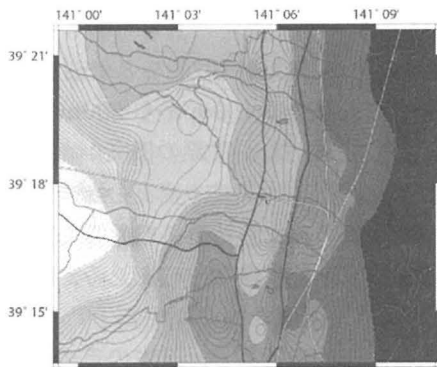


図 9

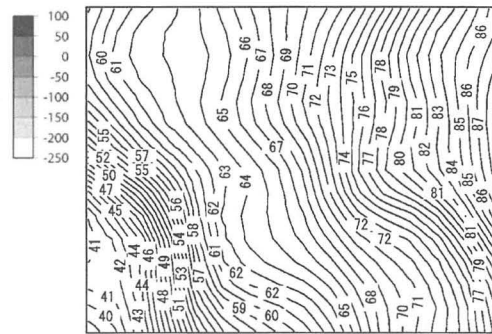


図 10

図 9 基盤標高等高線分布 (単位, m)。

図 10 日本の重力 (地質調査総合センター, 2004) から本研究の測定範囲部分を抜き出した仮定密度 2.3g/cm^3 のブーゲー異常分布 (単位, mgal)。東側で高異常，西側で低異常を示す。東から西に向かってブーゲー異常が小さくなっている。

謝辞

微動の測定・解析には岩手大学工学部建設環境工学科地下計測学研究室の大学院生および学生の協力を得た。日本の重力 CDROM から重力異常を抜き出す際にプログラムを利用させていただいた。記してここに謝意を表す。

参考文献

岩手県 (2000), 岩手の活断層, p.25.

山本英和, 佐野剛, 齋藤徳美 (2005), 高密度測定された微動の H/V スペクトル比を利用した盛岡市域の基盤構造の推定 (序報), 社団法人物理探査学会第 113 回学術講演会講演論文集, pp.53-56

山本英和, 角舘健太, 佐野剛, 齋藤徳美, 郷右近友貴 (2006), 高密度測定された微動の H/V スペクトル比を利用した盛岡市域の基盤構造の推定 (その 2), 社団法人物理探査学会第 114 回学術講演会講演論文集, pp. 134-137.

地質調査総合センター(編) (2004), 日本の重力 CD-ROM 第 2 版, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター