

浅部 2 次元 S 波速度構造推定を目的としたリニアアレイで観測された

3 成分短周期微動の地震波干渉法解析*

岩手大学工学部 荒井貴紀

岩手大学理工学部 山本英和 齊藤剛

1. はじめに

地震時の揺れやすさを評価するために、地盤の S 波速度構造を把握することが重要である。最近、浅部地盤の S 波速度を探索するために、地震波干渉法という新しい手法が提案されている。地震波干渉法が 2 次元探索にも応用されている（例えば、Chávez-García et al, 2016）。本研究では、短周期微動を利用して浅部の 2 次元 S 波速度構造探索の新たな手法開発を目的に、3 成分微動計の直線配置による長時間の微動観測を実施し、地震波干渉法解析により、上下動および水平動の波動伝播が確認できるかどうかを試みた。山本ほか（2017）では岩手大学内のグラウンドで 10m 間隔のリニアアレイを用いて唯一の測線長により微動観測を行った。そこで本研究では盛岡市内の違う観測場所で複数の微動計間隔を用いて微動観測を行い、解析した。複数の微動計間隔を用いることで、地下構造の 2 次元的变化をより正確に把握できるとともに、測線長に対してどの程度の観測時間が必要とされるのかを模索する。もし、波動伝播が明瞭に観測されるなら、直線配置という実務的には労力が少ない配置で、2 次元的な構造探索への展開が開ける可能性が出てくることが期待される。

2. リニアアレイによる微動観測

岩手県営運動公園の直線道路において、直線に微動計を配置し微動観測を行った。直線道路は、真北から東に約 3 度ずれているが、ずれによる影響が結果に及ぼさないと考え、直線道路は南北と見なした。微動計間隔は、40m, 20m, 10m として観測を 3 回行った。微動計は白山工業株式会社製の 3 成分加速度計 JU310 を 10 台使用した。サンプリング周波数は 200Hz である。図 1 に観測点配置図を示す。それぞれの配置で南側の端を No.1 とし、北側の端を No.10 とした。No.1 から No.10 の方向を正、No.10 から No.1 の方向を負とした。JU310 の場合、ch1 が radial 方向、ch2 が transverse 方向、ch3 が上下動方向となる。観測

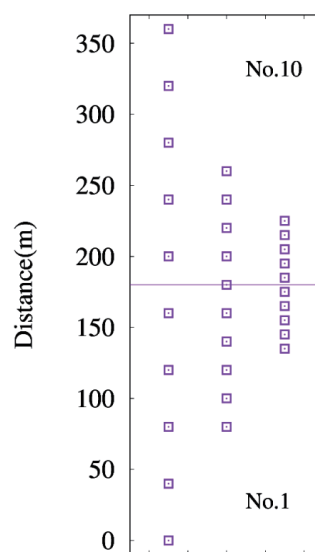


図1 観測点配置

* Seismic interferometry analysis of short-period three-component microtremors observed with a linear seismometer array for estimating two-dimensional shallow S-wave velocity structures by T.Arai, H.Yamamoto and T.Saito

は、40m 測線が平成 29 年 5 月 9 日の 10 時から 16 時、20m 測線が平成 29 年 7 月 4 日の 11 時 26 分から 14 時 26 分、10m 測線が平成 29 年 7 月 4 日の 9 時 20 分から 11 時 20 分に実施した。40m 測線の No.1 を距離の原点とした。距離 180m 地点の直線は、40m 測線の中心を示している。図 2 に 20m 測線において 12 時 56 分から 13 時 25 分までに観測された 3 成分波形を示した。上から下に No.1, No.2 と並んでいる。観測場所が運動公園で、ランニングをしている人が多くいたため、少しノイズが多いということが分かる。また、図 3 に図 2 と同時刻で、それぞれの観測点の ch1, ch2, ch3 のスペクトル波形と H/V スペクトル比を示した。各方向のスペクトル、H/V スペクトルは場所によるずれがほぼなく、形状がそろっているため、今回の観測データの質が良いことが確認できた。

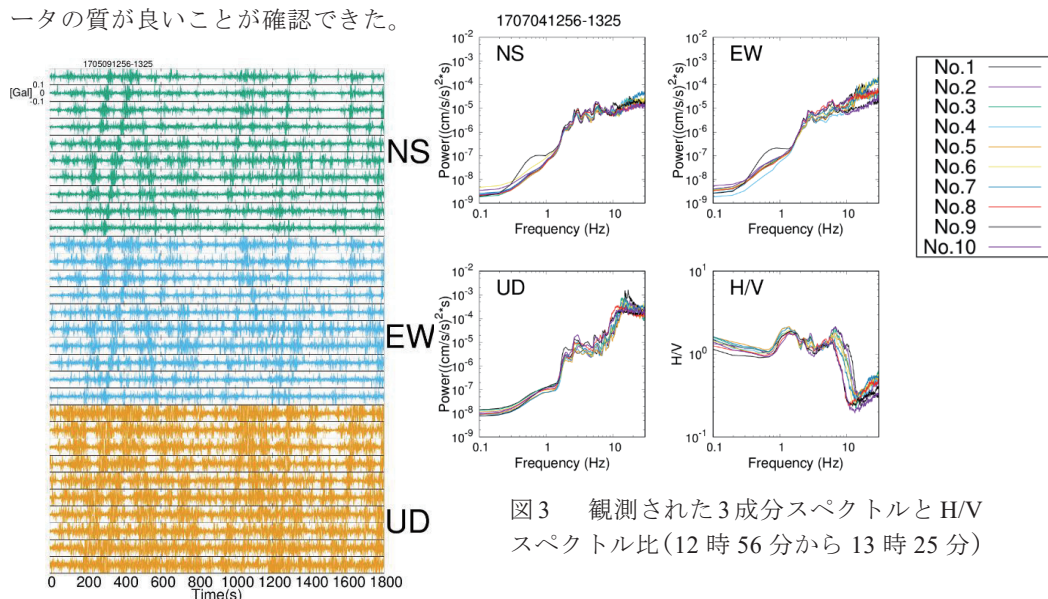


図 2 観測された 3 成分加速度波形
(12 時 56 分から 13 時 25 分)

3. 重合相互相関解析

基本解析区間を 20.48 秒とし、FFT によるスペクトル解析により相互相関関数を計算する。今回は、道路の方向を NS つまり radial 方向、道路と直交する方向を EW つまり transverse 方向とする。Bensen et al. (2007) の解析方法に基づき、観測された微動に対して周波数規格化、二値化をおこなってから、それぞれの成分に対して相互相関関数を計算し、重合した。図 4 に 20m 測線的全組み合わせの重合相互相関関数

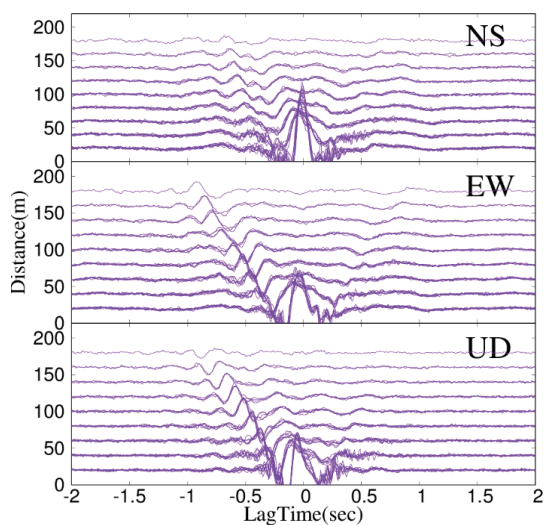


図 4 距離ごとの全組み合わせ相互相関関数

を距離ごとに示した。1Hz から 40Hz のバンドパスフィルターをかけて、解析した。この図から、180m の距離で特徴的な位相のラグタイムが EW 方向では約 0.8 秒であるのに対して、NS 方向及び上下動方向では約 0.7 秒であるので、EW 方向のラグタイムが長いことが分かる。このことから、EW 方向のみかけの伝播速度が遅いことが予想される。

4. 群速度の推定

Dziwonsky et al. (1969) のマルチプルフィルター解析を行い、群速度の推定を行った。例として、観測点 No.1 と No.10 の相互相関から算定された群速度を図 5 に示す。plus が本研究の正の方向、minus が負の方向である。NS 方向、UD 方向は正負でばらつきが大きいことが分かる。それに対して、EW 方向は正負でほぼ一致していることが分かる。次に、No.1 と No.10 の相互相関から算定された SN 比を図 6 に示す。SN 比とは、狭帯域フィルタ波形の包絡線の最大値をラグが十分大きい平均自乗振幅で除したものである。NS 方向、UD 方向では、正方向の SN 比が低いことが分かる。

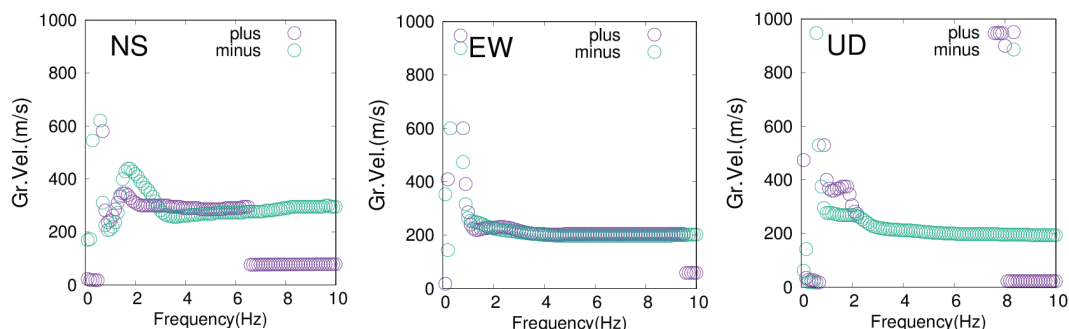


図 5 観測点 No.1 と No.10 の相互相関から算定された群速度

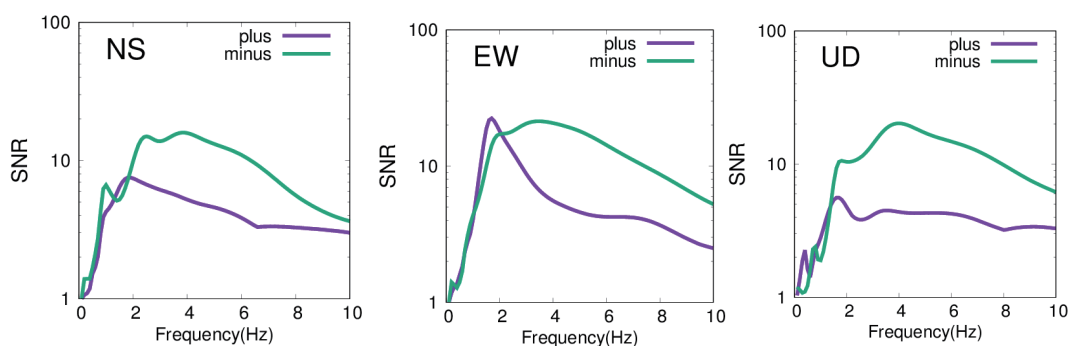


図 6 観測点 No.1 と No.10 の相互相関から算定された SN 比

5. 既存のモデルから計算した群速度と観測群速度の比較

大橋 (1999) による微動アレイ探査により推定された S 波速度モデルと、このモデルから計算した群速度を図 7 に示す。また、SN 比が 10 より大きいものを使った観測群速度と計算群速度を比較したものを図 8 に示す。3 成分とも観測値が計算値よりも少し速くなったが、同様の傾向を示した。少し速くなった原因としては、今回の観測と大橋 (1999) の観測場所が同一地点でない可能性が考えられる。

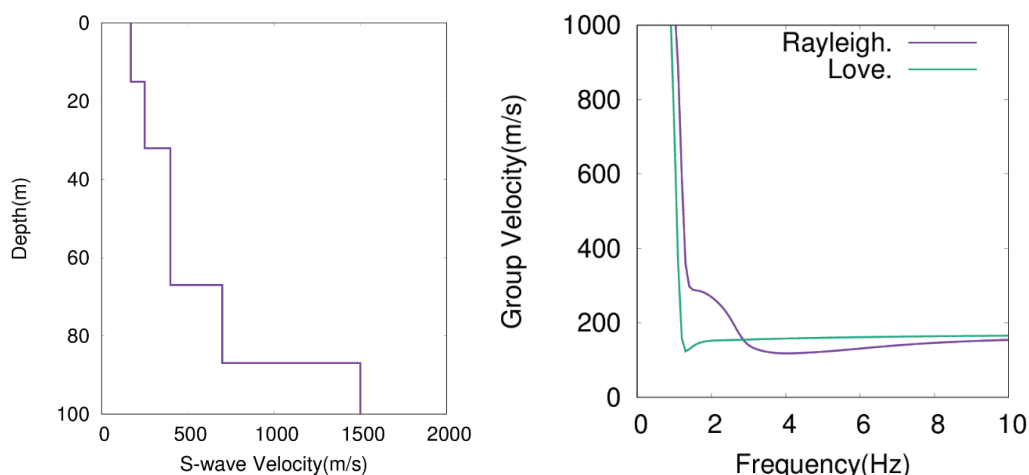


図 7 大橋 (1999) による微動アレイ探査により推定された S 波速度モデルと計算された群速度

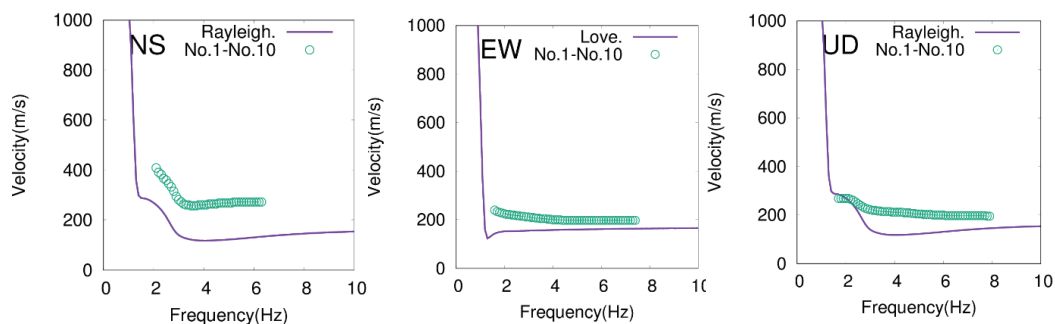


図 8 観測された群速度 (SN 比 > 10) と計算された群速度の比較

6. 群速度の 2 次元表示

Pan et al. (2016) を参考にし、群速度を 2 次元表示した。方法は、推定された群速度がそれぞれの観測点ペアの midpoint の位置の構造を表すと仮定した。例えば観測点 No.1 (0m) と観測点 No.10 (180m) のペアならば、90m 地点の構造を表した。その後、GMT を用いて空間平均化し、

つなげて表示した。図 9 に EW 方向についての負方向の群速度の 2 次元表示を示す。SN 比が 10 以下のデータは除外してコンターを作成したため、データが無い領域まで図化されている。そこで本研究では、周波数範囲を約 2Hz 以上、30m 地点から 140m 地点の範囲に限定し、信頼性の低いデータを除外した。図 10 が信頼性の低いデータを除外した図である。本来であれば、縦軸は逆解析により深さにする必要があるが、群速度をそのまま 2 次元表示するだけでも、地下構造のある程度の 2 次元的变化を把握することができる。図 10 を見てみると、少なくとも 20m 測線での群速度の空間変化はあまり大きくないと判断できる。

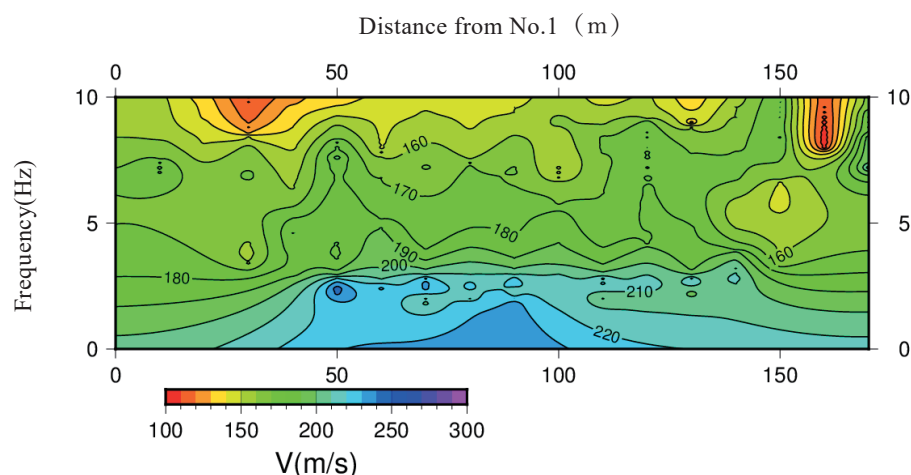


図 9 EW 方向における群速度の 2 次元表示

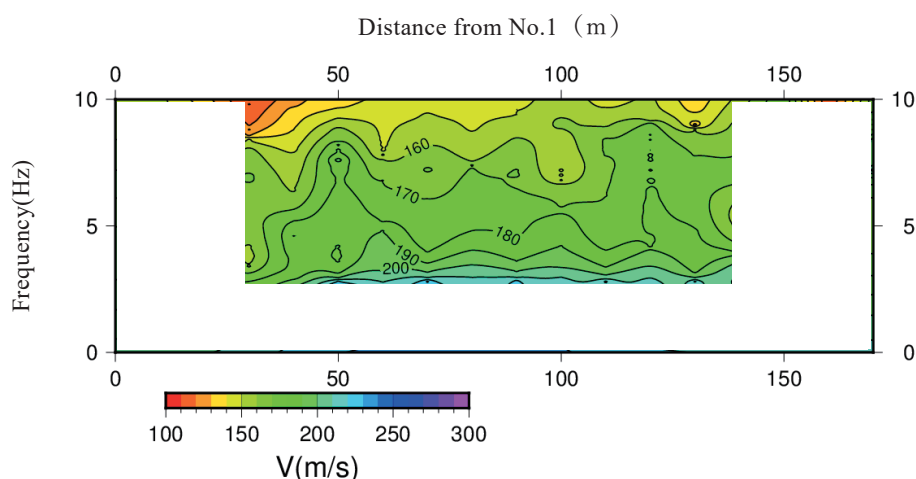


図 10 EW 方向における群速度の 2 次元表示（除外後）

7. 考察

重合相互相関解析において、正負の方向で位相を観察すると、負の方向の位相がはっきりしている。これより、振動源に偏りがあると考えられる。また、位相をより明瞭にするためには、重合時間を増やす必要があると考えられる。

群速度の推定では、例として No.1 と No.10 のペアで比較したが、NS 方向及び UD 方向では正負でばらつきが大きい結果となった。その原因としては、表面波と実体波が混在していることが挙げられるので、表面波と実体波の分離を行うことでばらつきが小さくなると予想される。

また SN 比が 10 より大きい周波数帯のみ取り出し、既存の大橋（1999）S 波速度構造モデルから計算された群速度と比較した結果、今回の観測群速度の方が若干速い結果となった。しかし、同様の傾向を示したことから、今回の観測の妥当性が確認された。また、若干速い結果となった原因としては、今回の観測場所と大橋（1999）の観測場所が同一地点でない可能性が考えられる。

群速度を 2 次元表示した結果、20m 測線では群速度の空間変化はあまり大きくないと判断できた。

40m, 10m 測線においても同様の解析を行ったが、10m 測線は 20m 測線及び山本ほか（2017）と同程度の結果が得られたが、40m 測線の結果は芳しくなかった。原因としては、重合時間が足りないことが挙げられる。40m 測線について検討を重ねることで地下構造の 2 次元変化をより正確に把握できると考えられる。

謝辞

（国研）防災科学技術研究所から微動計をお借りしました。記してここに謝意を表します。

参考文献

- Bensen, G.D., M.H. Ritzwoller, M.P. Barmin, A.L. Levshin, F. Lin, M.P. (2007) : Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.*, 169, 1239-1260.
- Chávez-García, F.J, and Toshiaki.Y. (2016) : High lateral resolution exploration using surface waves from noise records, *Exploration Geophysics*, 47, 123-132.
- Dziewonski, A., S.Bloch, and M. Landisman (1969) : A technique for the analysis of transient seismic signals, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427-444.
- 大橋玄昌 (1999) : 3 成分微動アレー観測システムの構築とその地下構造探査への適用, 修士論文, 岩手大学大学院工学研究科.
- Pan, Y., J.Xia, Y.Xu, Z.Xu, F.Cheng, H.Xu, and L.Gao (2016) : Delineating Shallow S-Wave Velocity Structure Using Multiple Ambient-Noise Surface-Wave Methods: An Example from Western Junggar, China, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 106, 327-336, doi: 10.1785/0120150014.
- 山本英和, 佐々木恭輔, 齊藤剛 (2017) : 浅部 2 次元 S 波速度構造推定を目的としたリニアアレーで観測された短周期微動の地震波干渉法解析-岩手大学構内における試み-, 東北地域災害科学研究第 53 巻, 157-162.