

岩手大学で観測された短周期微動の地震波干渉法解析による群速度の推定*

岩手大学工学部 佐々木恵太
岩手大学理工学部 山本英和 齋藤剛

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。これらの探査には、微動アレイ探査がよく用いられる。微動アレイ探査とは、表面波の位相速度にみられる分散性(位相速度が周波数によって変化するという性質)を利用して、主に地下の S 波速度構造を推定する手法(例えば Okada, 2003)である。しかし、この手法では、逆解析等で解が 1 つに求まらない可能性がある。よって、より多くの地下構造の情報があることが望ましい。そこで、最近では、別の手法である地震波干渉法が提案されている。これは、2 観測点における波動場の相互相關関数を長時間重合することによって、1 点を震源とし、もう 1 点を観測点とするグリーン関数(インパルス応答)を求める手法である(中原 2015)。この地震波干渉法を用いて、群速度の分散曲線を得ることで、地盤の S 波速度構造の情報量を増やすことを試みられ始めている。岩手大学内では、過去に、山本ほか(2017)で、岩手大学内のグラウンドにおいて 100m のリニアアレイを用いて微動観測及び解析を行った。より深部の情報を得るために、100m より長い測線間隔が必要とされる。かつ、より長時間の微動データの重合が必要である可能性がある。そこで、本研究では、数百 m 離して微動計を配置し、1 ヶ月程度という比較的長い時間の微動観測を実施し、解析をした。

2. 微動観測

図 1 に岩手大学内での観測地点を示す。数百 m 間隔で 3 成分微動計を 5 台設置し、No.1~No.5 とした。使用した微動計はレナーツ・エレクトロニクス社製の固有周期 5 秒三成分速度計 Lennartz LE-3D/5s である。データロガーは、白山工業株式会社の LS-8800 を用いた。サンプリング周波数は 100Hz とした。本観測は 2018 年 8 月 8 日から 2018 年 10 月 3 日の約 2 ヶ月実施した。解析はデータロガーに不具合が生じた以外の、のべ 33 日分を使用した。Lennartz LE-3D/5s の場合、ch1 が UD 方向、ch2 が NS 方向、ch3 が EW 方向となる。

図 2 に 8 月 8 日 2 時 0 分から 2 時 59 分に観測された 3 成分加速度波形を示した。上から下に No.1, No.2, No.3, No.4, No.5 と並んでいる。また、No.3, No.4 近くを通る道路は交通量が多く、ノイジー



図 1 微動観測地点

*Estimation of group velocity by seismic interferometry analysis of short period microtremors observed at Iwate University by K.Sasaki, H.Yamamoto and T.Saito

な場所であった。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。5Hz以上の高周波帯やノイジーな場所であるNo.3, No.4に関しては、多少のずれが確認されたが、2~4Hz付近の低周波帯では形状がそろっていることが確認された。

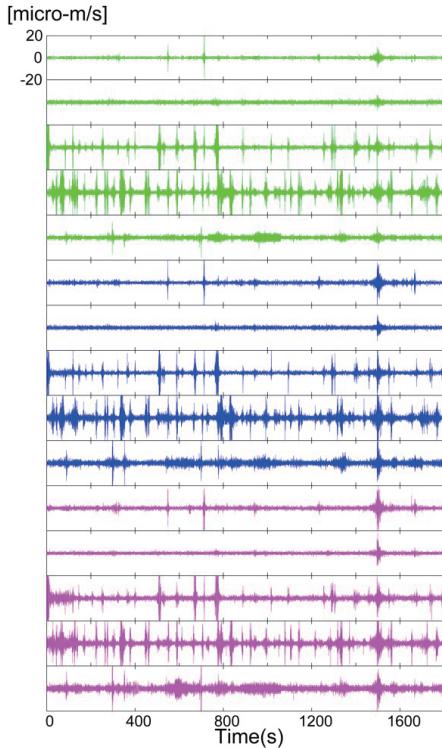


図2 観測された3成分加速度波形
(8月8日2時0分から2時59分)

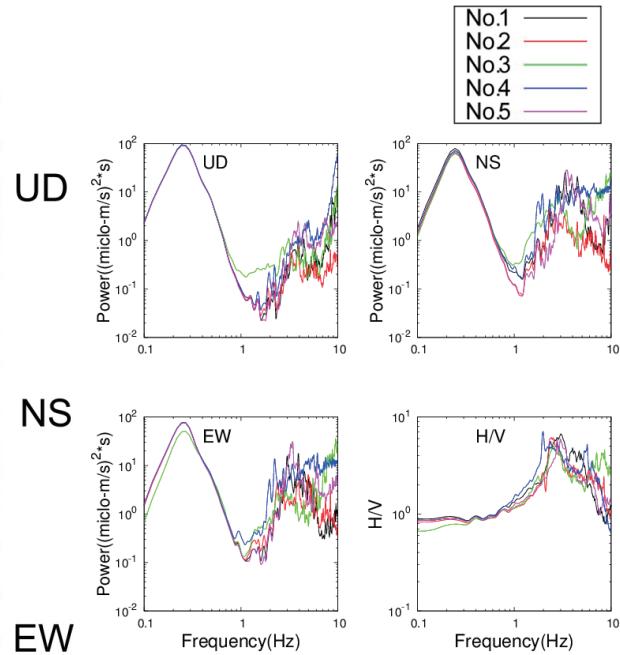


図3 観測された3成分スペクトルと
H/Vスペクトル比(8月8日2時0分から2時59分)

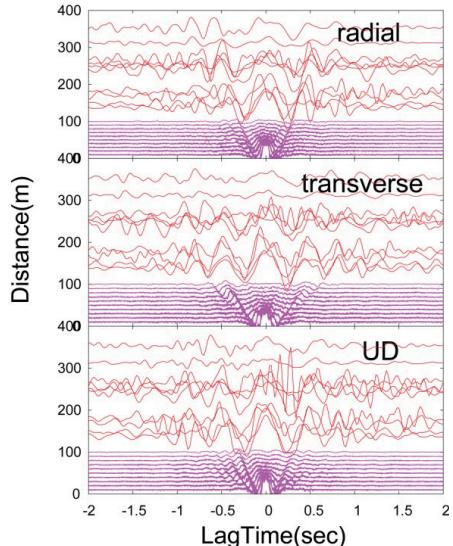


図4 距離ごとの全組み合わせ相互相関関数

3. 重合相互相関解析

基本解析区間を81.92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。EW, NS成分から、radial, transverse成分を座標回転し、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、二値化をおこなう。radial, transverse, UD成分に対して相互相関関数を計算し、重合した。図4に全組み合わせの相互相関関数を距離ごとに示す。今回の観測から得られた重合相互相関のみでは、波動の

伝播が確認しにくいため、桃色の線で山本ほか(2017)で得られた重合相互相関を重ね合わせた。それぞれの方向で特徴的な位相のラグタイムを比べてみると、約 350m の距離で radial, UD 方向では約 1.3 秒であるが、transverse 方向では約 2.0 秒とラグタイムが長いことが分かる。したがって、transverse 方向の伝播速度が遅いことが予想される。また、今回は、33 日間のものを重合し、群速度の推定を行った。

4. 群速度の推定

Dziewonski et al. (1969)のマルチプレルフィルター解析を行い、群速度の推定を行った。まず、No.2 と No.5 の重合相互相関から算定された SN 比を図 5 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。つまり、SN 比が高いと信頼性が高いといえる。赤の線が plus で、本研究の正の方向であり、黄緑の線が minus で、負の方向である。次に、観測点 No.2 と No.5 の重合相互相関から推定された群速度を図 6 に示す。正負のばらつきがみられることから、SN 比が低いデータも混ざっており、信頼性の低いデータが含まれている可能性が考えられる。これらを踏まえ、SN 比が 10 以上のものを抽出した上で、既存モデルから計算した群速度や山本ほか(2017)から得られた観測群速度との比較を行った。

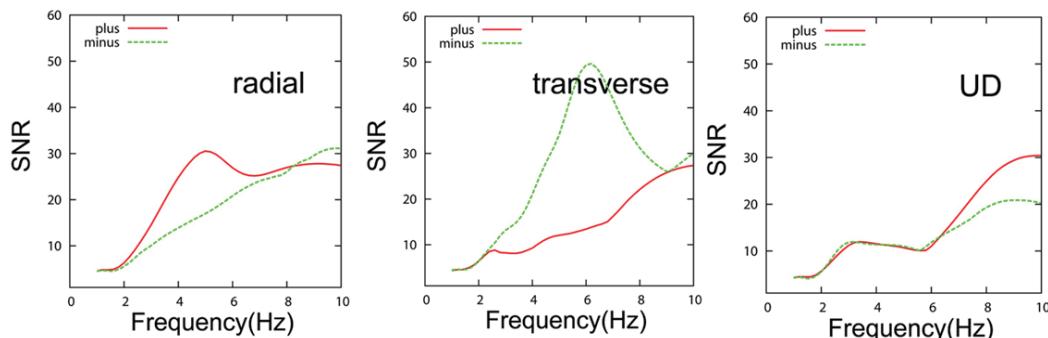


図 5 観測点 No.2 と No.5 の重合相互相関から算定された SN 比

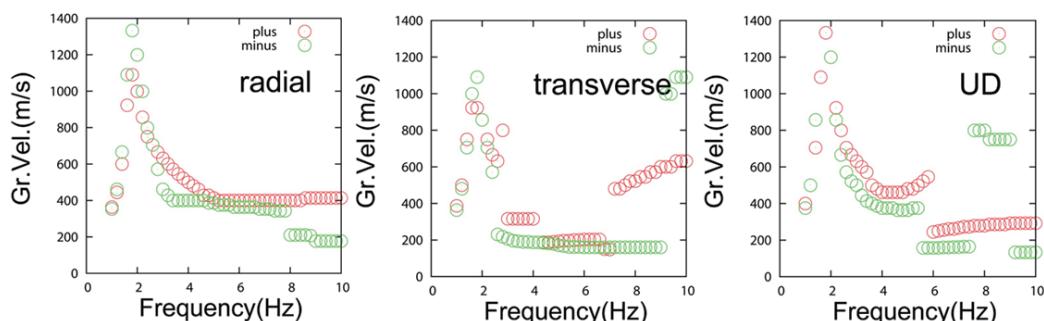


図 6 観測点 No.2 と No.5 の重合相互相関から推定された群速度

5. 既存モデルから計算した群速度や山本ほか(2017)から得られた観測群速度との比較

山本(2000)による S 波速度構造と、このモデルから計算した群速度を図 7 に示す。また、図 8 に山本ほか(2017)のリニアアレイ観測から得られた観測群速度を示す。図 8 は、佐藤(2016)論文を参考にし、SN 比が 10 以上のものを抽出した群速度である。これら図 7、図 8 と今回の観測結果から得られた群速度の SN 比が 10 以上のものを重ね合わせたものが図 9 である。過去の計算群速度や観測群速度と比較した結果、まず、各成分によって、群速度が異なっていることがわかった。そして、今回の観測は観測点間距離が比較的長いため、3~4Hz 程度の低い周波数帯まで群速度が得られていた。また、transverse 方向は、今回の観測群速度、山本ほか(2017)から得られた観測群速度と既存モデルから計算した群速度がほぼ一致した。これらを踏まえて、山本ほか(2000)の S 波速度構造を今回の観測結果を満足できるように修正する。

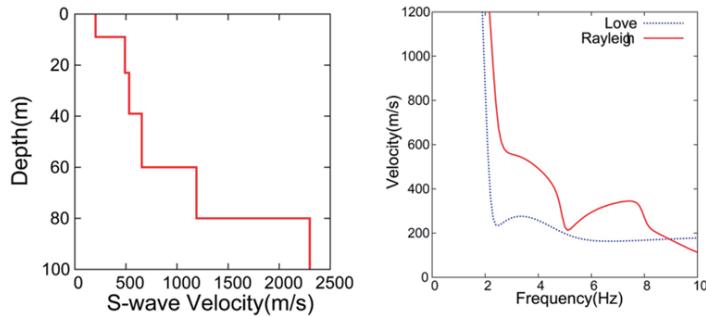


図 7 山本(2000)による S 波速度モデルとモデルから計算した群速度

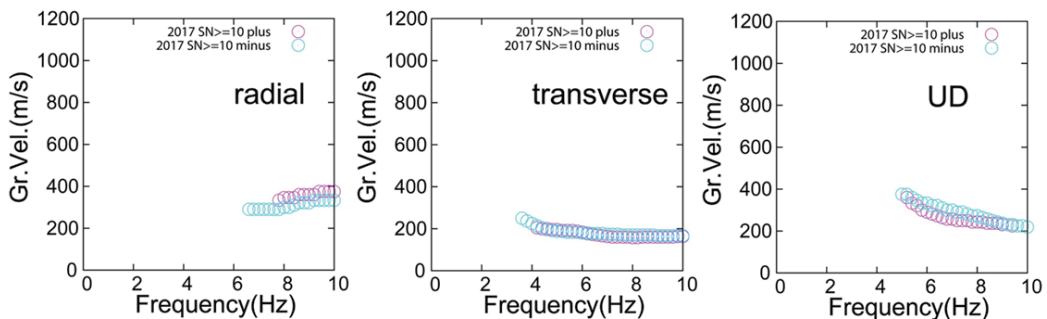


図 8 山本ほか(2017)から得られた観測群速度($SN \geq 10$)

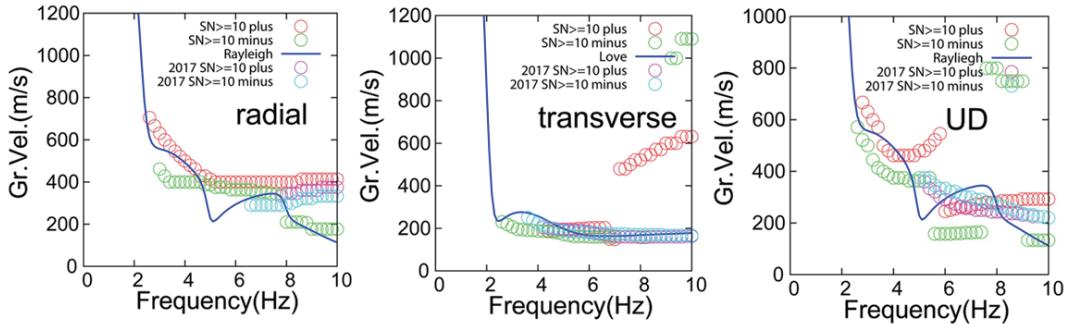


図 9 計算群速度と観測群速度($\text{SN} \geq 10$)の比較 青の直線は山本(2000)での既存モデルから計算した群速度
赤・黄緑は今回の観測群速度 桃・水色は山本ほか(2017)の観測群速度

6. 従来の岩手大学内における S 波速度モデルの修正

図 10 に修正前の S 波速度構造と修正後の S 波速度構造を示す。また、図 11 に今回の観測群速度と山本ほか(2017)のから得られた観測群速度に修正前の計算群速度と修正後の計算群速度を重ねたものを示す。Transverse 成分は観測群速度と計算群速度がほぼ一致したが、Rayleigh 波は radial 成分、UD 成分の両方に発生するので、観測群速度と計算群速度が完全には一致しない結果となった。

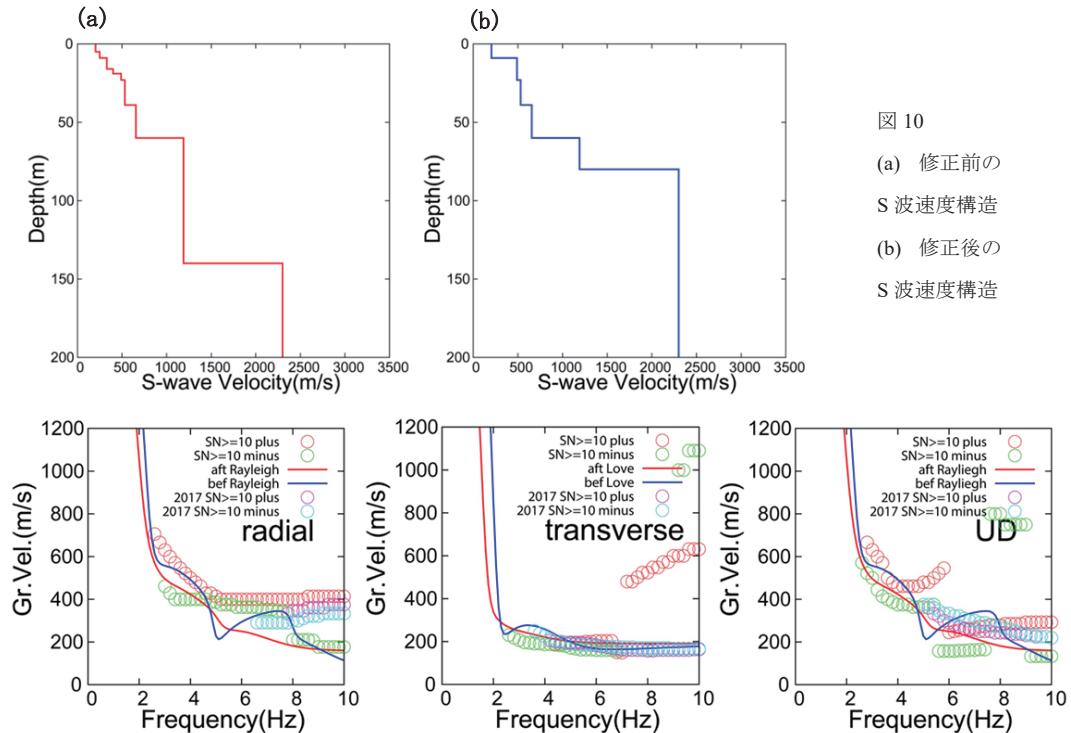


図 11 観測群速度($\text{SN} \geq 10$)に修正前の計算群速度(青線)と修正後の計算群速度(赤線)を重ね合わせたもの

7. 考察とまとめ

重合相互相関解析では、波動の伝播を確認することができた。また、山本ほか(2017)の岩手大学内グラウンドでの微動観測では、交通振動を考慮しなくても良い静かなグラウンドで行っていたため、微動計設置の際、交通振動を考慮せずに設置をした。今回得られた解析結果から、約1ヶ月もの長時間の観測であると交通振動も考慮しなくてはいけないことが分かった。さらにより結果を得るために、相互相関関数を出す際に時間規格化をかけるなどが考えられる。

群速度の推定では、例としてNo.2とNo.5のペアで比較した。山本ほか(2017)より比較的長い測線間隔にしたこと、3~4Hz付近の低周波帯において、今まで得られていなかった群速度を得ることができた。つまり、距離に応じた群速度が求められることがわかった。今後は、どのくらいの深度を探査したいかによって、測線の長さを考え、観測を行うことが求められる。

また、transverse方向では、ピークのSN比が50程度であり、既存モデルから計算した群速度や山本ほか(2017)での観測群速度との比較でも分かるように正しい群速度の推定ができたと考える。一方で、radial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、実体波が混在している可能性が考えられる。Takagi et al. (2014)などを応用して、表面波と実体波を分離させ、精度の高い解析を試みる必要がある。

従来のS波速度モデルの修正では、今回の観測結果に合わせるようにS波速度構造を修正した。今後は、精度向上のため、遺伝的アルゴリズム逆解析等を用いることも有効であると考えられる。

参考文献

- Bensen, G.D., M.H. Ritzwoller, M.P. Barmin, A.L. Levshin, F. Lin, M.P. Moschetti, (2007), Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, Geophys. J. Int., 169, 1239-1260.
- Dziewonski, A., S.Bloch, and M. Landisman(1969), A technique for the analysis of transient seismic signals, Bull. Seism. Soc. Am., 59, 427-444.
- 中原(2015), 地震波干渉法, その1歴史的経緯と原理, 地震, 第2輯, 第68巻(2015), 75-82頁
- Okada. H. (2003) : The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series, No. 12, Society of Exploration Geophysicists, 135
- Takagi R., Nakahara H., Kono T., and Okada T.(2014), Separating body and Rayleigh waves with cross terms of the cross-correlation tensor of ambient noise, J. Geophys. Res., 10.1002/2013JB010824.
- 山本英和(2000), 3成分微動アレイ観測によるLove波の位相速度の推定の試み, 物理探査, 53, 153-166.
- 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イ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.
- 山本英和, 佐藤史佳, 齊藤剛 (2016) : 福島県の広帯域リニアアレイで観測された常時微動の地震波干渉法, 東北地域災害科学研究 第52巻, 263-268.