

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解析—南北測線における解析—*

岩手大学工学部 起田賢親
岩手大学理工学部 山本英和 齊藤剛

1.はじめに

我々は福島県の直下で発生するスープラスラブ地震(例えば, Uchida et al, 2010)と呼ばれる地震の発生メカニズムを解明するため, 2012年度から(公財)地震予知総合研究振興会で設置された広帯域地震計リニアアレイにより2014年まで東西測線(10台)の地震・微動観測を行ってきた。佐藤ほか(2017)では東西測線の10点の観測点に対し, 1ヶ月重合相互相關関数を計算し, 群速度の算定を行った。また, Takagi et al.(2014)の手法を用いて表面波の分離を行った結果, 東西測線の観測結果では表面波が卓越していると考えられた。さらにリニアアレイの組み合わせ位置の近い観測点間の群速度と付近のHi-netの観測記録で得られる群速度の比較を行ったところ, 値が同等になることからリニア記録に地震波干渉法解析を適用し, 浅部の構造を推定する手法が有効であると判断された。

今回は地震予知総合研究振興会により新たに設置され, 2014年から2015年までの約6ヶ月観測された4点の南北測線の解析を行った。南北測線に加え, 付近のHi-net、F-netの観測記録も用いて3成分相互相關関数を計算し, 群速度の算定を行った。また, Takagi et al.(2014)の手法を用いて表面波の分離を行い, Nishida et al.(2008)の速度構造モデルから計算したレイリー波, ラブ波との比較を行い, 得られた結果の妥当性を検討した。

2. 広域リニアアレイ観測

南北測線は地震予知総合研究振興会により設置された4点とF-net広野(N.HROF)の計5点の測線とし, 広野から南に向かって順に番号を振った。センサーは固有周期120秒3成分速度計(Trillium Compact)を使用し, 収録にはデータロガーLS8800を使用した。サンプリング周波数100Hzで観測点ごとに独立に連続測定された。広野のほかに参照点としてF-net八溝(N.YMF)とHi-netいわき西(N.IWWH)を使用した。図1に今回使用した観測点位置とHi-net, F-netの位置を示す。

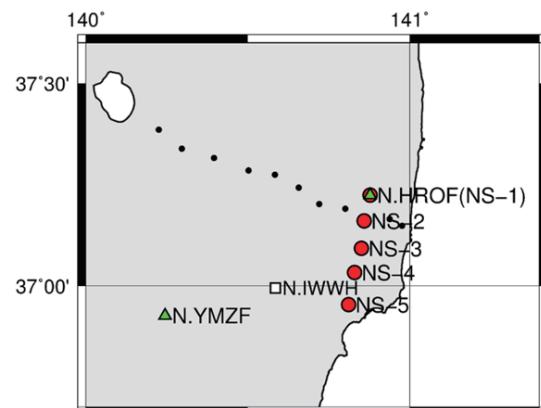


図1 南北測線の観測点位置と使用した

Hi-net, F-net位置

●は南北測線, ●は東西測線

□はHinet, ▲はF-net

*Seismic interferometry analysis of microtremors observed in a lineae array with broadband seismometers in Fukushima Prefecture by K. Okita, H. Yamamoto and T. Saito

3. 相互相関関数の算定

観測データや取得した Hi-net, F-net の観測記録は 100Hz でサンプリングされているが、データ量が膨大であるため計算時間を短縮するため波形データを 20Hz にリサンプリングした。リサンプリングを行ったデータに対し、時間領域における巨大地震や非定常雜音による振幅の乱れを取り除くため 1 秒の時間規格化、同時に二値化を行い、さらに周波数領域で規格化するためにホワイトニングを前処理として行った（例えば、Bensen et al., 2007）。観測記録は振興会の地震計によるもの、Hi-net, F-net の 3 つがあるが今回機器補正は行わなかった。前処理を行った波形に対し FFT 处理によりクロススペクトルを算出し、逆フーリエ変換により相互相関関数を計算した。相互相関関数計算には日野（2010）のスペクトル解析のプログラムを参考にした。基本区間 15 分の相互相関関数を 4 個平均して一時間重合相互相関関数として算出した。機器の不具合やバッテリー交換等で記録が数分から数時間途絶える時間帯があった日付は除いたうえで 1 カ月とした。重合する時間が長いほどノイズが小さく、特徴的な位相を確認することができる為、可能な 6 カ月の重合を行った。図 2 に比較のため重合期間を 1 時間、1 日、10 日、1 カ月、6 カ月とした相互相関関数を示す。図からは時間が長いほど特徴的な位相が見えることを確認できた。

Vertical(ZZ)相関関数と Transverse(TT)相関関数の比較を行った。図 3 に NS-1 から各測点へ計算した相関関数 ZZ, TT を示す。遅れ時間を比較すると TT の方がわずかに速く検出されていることが分かる。

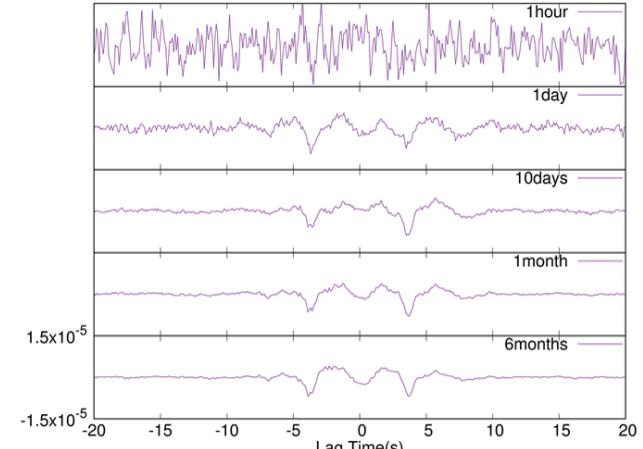


図 2 NS-2, NS-3 間の重合相互相関関数 vertical 方向の期間ごとの比較

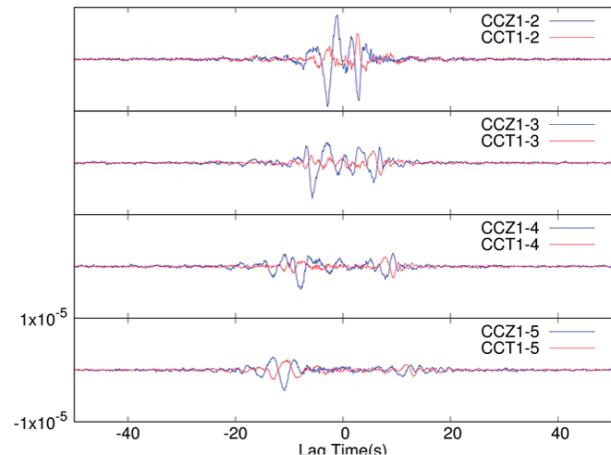


図 3 NS-1 から各測点への 6 カ月重合相互相関関数 vertical 方向, transverse 方向

4. 群速度の算定

得られた相互相関関数に対して Dziewonski et al.(1969) のマルチプルフィルタ解析を行い、群速度の算定を行った。相互相関関数に狭帯域のバンドパスフィルタをかけ、波形の包絡線の最大値から遅れ時間を算定し、地震計間距離を時間遅れで除することで周波数ごとの群速度を求めた。同時にシグナルをノイズで除すことにより SN 比を周期の関数として算出し、群速度の評価に用いた。詳しい計算方法については佐藤ほか(2017)に従う。今回は SN 比 10 以上を基準として群速度の信頼性を評価した。

図 4 に Vertical 方向の 6 カ月重合相互相関関数より算定した群速度と SN 比を示す。今回は機器補正を行っていないため、F-net である NS-1 と振興会の地震計を使用したほかの点とではフィルタリングがことなる可能性が考えられる。そのためか比較的距離が近い 1-2 の群速度はプラス方向とマイナス方向でわずかに異なっていた。2-3 での群速度は SN 比がピークをとる周波数 0.5Hz 程度以上からはプラス方向とマイナス方向でほぼ一致し、また約 2.2km/s で一定の値をとっていた。周波数によって速度が変化していないのでここでは実体波である可能性が考えられる。NS-5 との組み合わせでは分散曲線の連続性が低いことが確認できた一方で、NS-5 と最も近い組み合わせである 4-5 は他と比較して連続性が高く、群速度は約 1km/s まで低下していた。これらの結果から NS-2, NS-3, NS-4 付近の地下構造は近いものであると考えられる。また、NS-5 は分散曲線の連続性が低い中、NS-4 との組み合わせで連続的に群速度が低下する

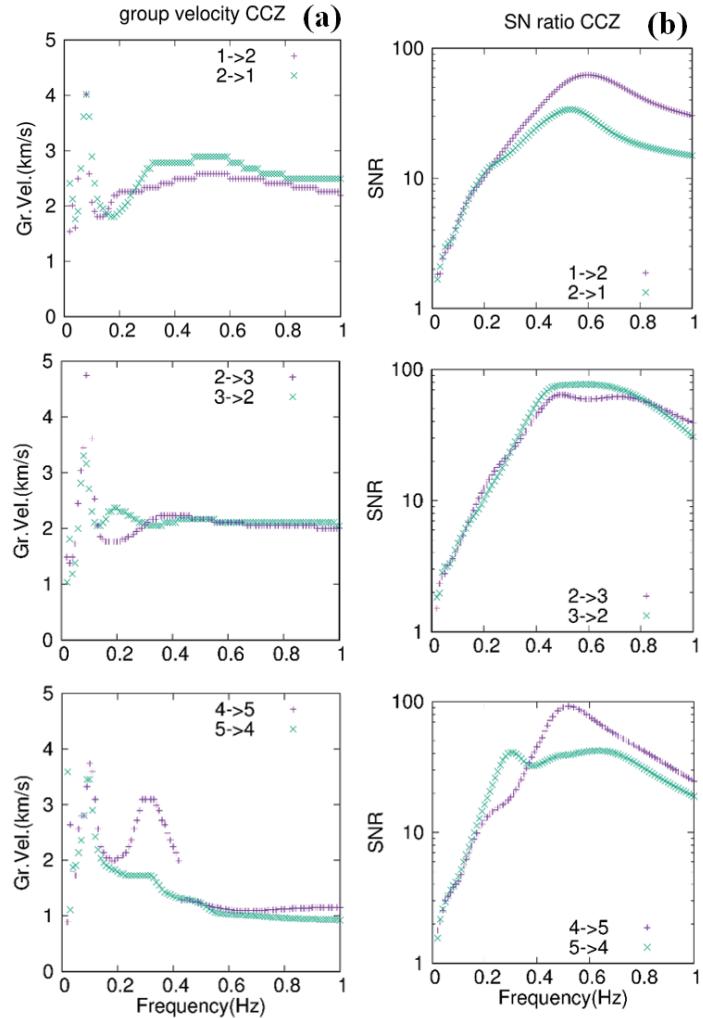


図 4 Vertical 方向の 6 カ月重合相互相関関数より算定した
群速度と SN 比
(a)は群速度、(b)は SN 比を示す

ことから、NS-4 と NS-5 の間で地下構造が変化していると考えられる。実際に NS-5 付近は平野部であり、浅部構造は他点より遅いと思われる。

5. 表面波の分離

上記の解析では得られた相互相関関数をそのまま計算に用いたため、群速度には実体波と表面波が混在していると考えられる。そこで Takagi et al.(2014)の手法によって表面波の分離を行

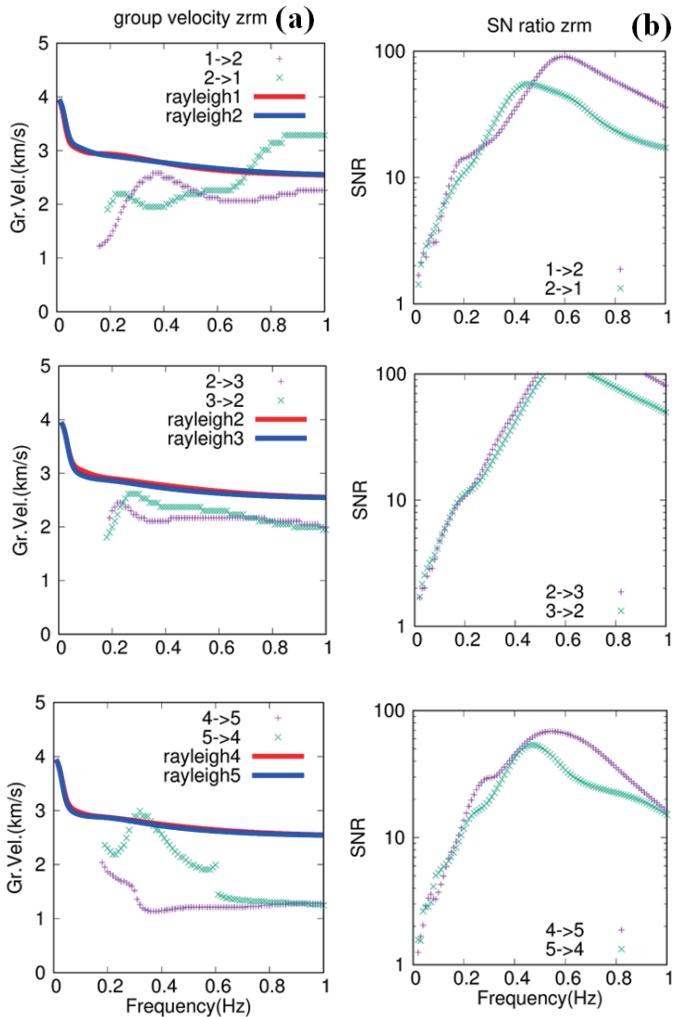


図 5 Vertical 方向の 6 カ月重合相互相関より
算定した分離群速度と SN 比
(a)は群速度、(b)は SN 比を示す

った。レイリー波の梢円運動とは対照的に P 波は直進粒子運動を有する。Takagi et al.(2014)では Vertical-Radial 相互相関関数(ZR), Radial-Vertical 相互相関関数(RZ)を求め、和をとることでレイリー波の寄与を相殺して P 波の寄与のみを保持し、対照的に ZR と RZ の差をとることで P 波の寄与を相殺してレイリー波の寄与のみを保持することで分離を行う。

分離を行ったレイリー波の比較対象として、Nishida et al.(2008)の速度構造モデルを使用した。モデルは Hi-net の傾斜計で測定された常時微動の地震波干渉解析から日本全国の S 波速度構造が求められており、緯度経度 0.1° 間隔、深さ 60km まで層厚 1 km ごとに物性値が求められている。今回は観測点周辺で、物性値が求められている 4 点を用いて線形補完を行い、観測点直下の構造とした。

図 5 に分離を行った表面波の群速度と SN 比、Nishida モデルより計算したレイリー波群速度を示す。全体的に Nishida モデルより遅い結果となった。

Nishida モデルは地表から 1km ごとの構造を求めており、実際の浅部の速度構造より速くなっていることが原因として考えられる。今後実際の浅部構造やそれに準ずる構造をモデルに取り入れることで、算定結果との一致が望めると考えられる。2-3 の群速度を分離前と比較す

ると周波数によって変化しているように見える。このことから分離によって表面波を卓越させることができると判断できる。また、SN 比の向上も確認できた。4-5 の群速度は SN 比が高いプラス方向を見ると、やはり約 1.2km/s 程度の他と比べて遅い値を示している。

6. 参照点の使用

参照点として F-net 八溝 (N.YMZ) と Hi-net いわき西 (N.IWWH) を使用し、1 カ月の重合相互相関を用いて群速度、SN 比を算定した（例えば、Yamanaka et al., 2015）。図 6 にいわき西と南北測線との相互相関より算定した群速度と SN 比を示す。いわき西は測線より内陸に位置しているためマイナス方向で SN 比が高くなっている。群速度を比較すると、図では省略した NS-3 を含め、NS-1 から NS-4 までは速度構造が似ていると判断できる。NS-5 に関しては、参照点を用いることでよりはつきりと浅部の遅い構造を相対的に確認できたと言える。

7. まとめ

福島県東部で南北方向のリニアアレイ観測に地震波干涉法解析を適用し群速度を求め、Nishida モデルとの比較を行った。また、参照点を用いて各測点での速度構造の比較を行った。Nishida モデルとの比較では

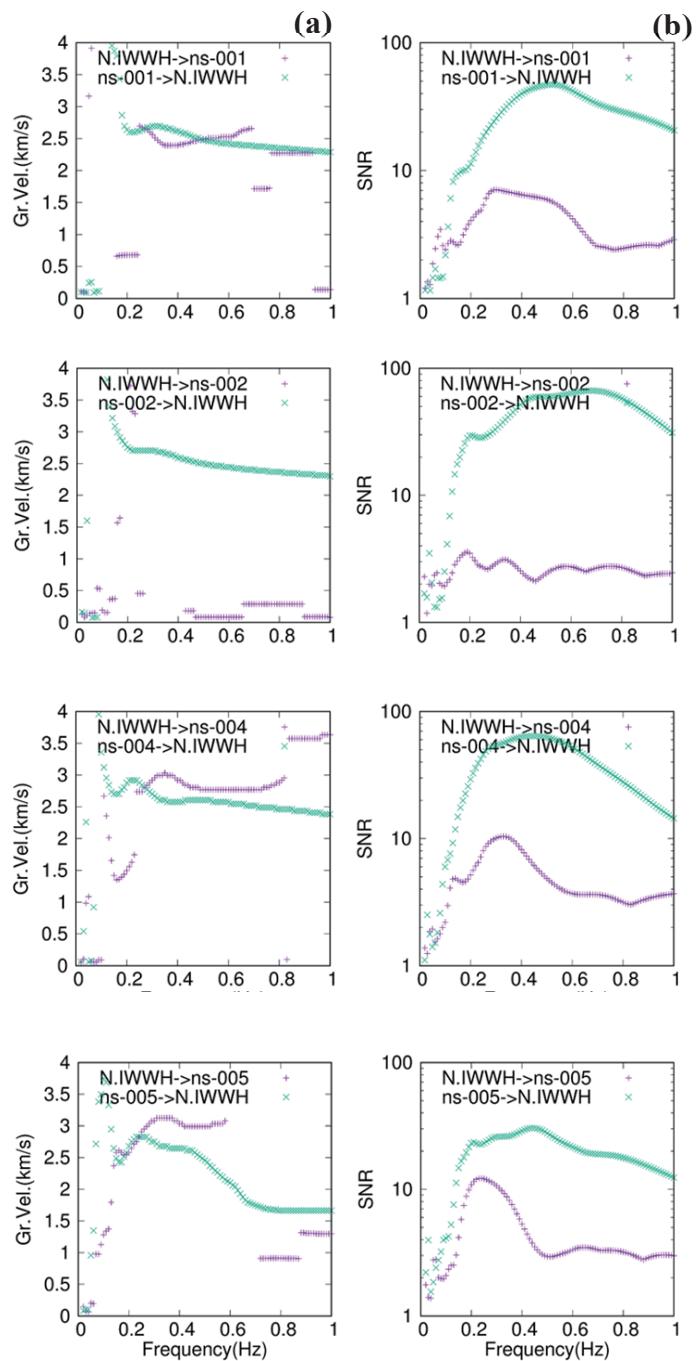


図 6 いわき西(N.IWWH)から南北測線への群速度と SN 比

(a)は群速度、(b)は SN 比を示す

観測結果が全体的に Nishida モデルより遅い結果となった。原因として Nishida モデルでは表されていない表層の影響が考えられ、浅部構造との比較を行ううえでは、新たに表層の構造を取り入れる必要があると思われる。参照点を用いた比較では NS-1 から NS-4 が近い速度構造を持つことが示唆され、NS-5 付近平野部の遅い構造を表すことができたと思われる。しかし、参照点は 1 カ月分のデータで解析を行ったため、今回より遠方の参照点を使用する場合にはさらに長期間のデータが必要であると判断される。

謝辞

(公財) 地震予知総合研究振興会からデータを提供していただいた。(国研) 防災科学技術研究所から F-net, Hi-net のデータを提供していただいた。一部の図面の作成には GMT(Wessel and Smith, 1998)を使用した。記して謝意を表する。

参考文献

- Bensen, G.D., M.H. Ritzwoller, M.P. Barmin, A.L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro and Y. Yang(2007), Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.*, 169, 1239-1260.
- Dziewonski, A., Bloch, and M. Landisman(1969), A technique for the analysis of transient seismic signals, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427-444
- 日野幹夫 (2010), スペクトル解析新装版, 朝倉書店, pp. 300.
- Nishida, K., H. Kawakatsu, and K. Obara, (2008) : Threedimensional crustal S wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters, *J. Geophys. Res.*, 113, B10302, doi: 10.1029/2007jb 005395.
- 佐藤史佳, 山本英和, 齊藤剛 (2017) : 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解析(その 2), 東北地域災害科学研究 第 53 卷, pp. 163 - 168.
- 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.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith(1998), New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- Yamanaka, H., K. Kato, K. Chimoto and S. Tsuno (2015) : Estimation of surface-wave phase velocity from microtremor observation using an array with a reference station, *Exploration Geophysics*, 46, pp. 267-275.