

常時微動の地震波干渉法解析に基づく Rayleigh 波位相速度を用いた 福島県における 3 次元 S 波速度構造の逆解析*

岩手大学大学院総合科学研究科 土屋隆
岩手大学理工学部 三浦賢太郎 山本英和 齊藤剛

1. はじめに

我々は、2012 年度から（公財）地震予知総合研究振興会の協力のもと地震波干渉法解析を用いた福島県直下における地下構造推定の研究を行ってきた（例えば、山本ほか、2015）。山本ほか（2015）では、福島県の Hi-net 及び広帯域地震計リニアアレイで観測された常時微動記録に地震波干渉法解析を適用して 2 点間の相互相関関数を算出し、得られた相互相関関数から群速度を算定していた。しかし、土屋ほか（2020）では、常時微動記録から得られた 2 点間のクロススペクトルに Ekstöm et al.(2009)が提案したゼロクロス法を適用し、Rayleigh 波位相速度の算定を行った。また、土屋ほか（2020）のパス密度は不均一で逆解析をする上で十分なものとは言えないため、本研究では福島県周辺の Hi-net や F-net の観測点も追加して、十分高いパス密度にする。そして、得られた福島県全体を網羅するパスの位相速度分散曲線に基づいて、Fang et al.(2015)によるトモグラフィ解析手法を利用し、福島県直下の 3 次元 S 波速度構造の推定を試みる。

2. 使用観測点と五か月間平均クロススペクトルの算定

図 1 に Hi-net 観測点の位置を示す。図 2 に F-net 観測点及びリニアアレイ測線の位置を示す。使用した Hi-net 観測点は福島県及びその周辺に設置されている全 46 観測点で、使用データ期間は 2012 年 9 月から 2013 年 1 月までの五か月間である。使用した F-net 観測点は、N.KSKF（川崎）と N.ASIF（足尾）の 2 観測点で、使用データ期間は Hi-net 観測点と同様である。この期間は広帯域リニアアレイ観測が 2011 年 8 月から 2014 年 2 月まで実施され、全観測期間のうち一か月データが連続して全て存在している期間であり、解析期間を同一にしたかったためである。また、リニアアレイ測線の NO4 と NO10 に関しては、データ不足のため解析対象から除いている。広帯域リニアアレイの詳しい観測システムは、山本ほか（2016）に示されている。

また、Hi-net は 100Hz で観測が行われているが、計算の負荷を減らすために本研究では 20Hz にダウンサンプリングした。さらに、前処理として時間規格化、二値化、スペクトルホワイトニングを行った (Bensen et al., 2007)。前処理を行った 1 時間波形に対し、FFT 処理によりクロススペクトルを算出した。本研究では基本区間を 15 分とし、4 つ平均することで 1 時間平均とした。例として、Hi-net 観測点 N.NMEH（浪江）と H.TDMH（只見）の 2 点間の規格化クロス

*An inversion of a three-dimensional S-wave velocity structure in Fukushima Prefecture using phase velocities of Rayleigh wave based on seismic interferometry analysis of microtremors by T. Tsuchiya, K. Miura, H. Yamamoto and T. Saito

スペクトルの実部を図 3 に示す。上から順に一時間、一日、一ヶ月、五ヶ月間平均したクロススペクトルを表している。短時間平均では見られなかった特徴的な振動が長時間平均により確認できるようになった。さらに、算出したクロススペクトルにノイズによる小さな影響を除くために移動平均操作を行い、ゼロクロス点を検出できるように試行錯誤して平滑化している。

3. ゼロクロス法による位相速度推定

はじめに、クロススペクトルの零点から位相速度を求めるために、以下のゼロクロス法を用いた。第 1 種 0 次ベッセル関数が n 回目に 0 となる零点を Z_n 、周波数を f_n とすると Rayleigh 波位相速度は(1)式で表される。

$$C(f) = \frac{2\pi f_n r}{Z_n} \quad (1)$$

しかし、観測されたクロススペクトルは一般的にノイズを含み不安定である。本来の零点が欠如する場合や余分な零点を読む場合がある。そのため、ベッセル関数の特定の零点とクロススペクトルの零点を対応させるのが困難である。そこで、零点の欠如と余分な零点を考慮した(2)式を用いて位相速度の推定を行う(Ekstöm et al., 2009)。

$$C_m(f) = \frac{2\pi f_n r}{Z_{n+2m}} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2) \quad (2)$$

ここで m は、欠如した、もしくは余分に読む零点の数を表す。本研究では、あらかじめ n を仮定して $n - 4$ から $n + 4$ までの 5 つの位相速度を算出した。例として、図 4 に観測点 N.NMEH(浪江)と H.TDMH(只見)のクロススペクトルとゼロクロス法から推定した Rayleigh 波位相速度分散曲線を示す。同時に気象庁一次元速度構造から計算された位相速度分散曲線(上野ほか, 2002)も示し、0.1Hz から 0.2Hz の間で比較することにより一番近い分散曲線を選定したその結果、0.1Hz で約 3200m/s、0.2Hz で約 3000m/s、0.3Hz で約 2800m/s となった。このように周波数ごとの位相速度を読み取り、複数の組み合わせからなるパスごとの位相速度分布図を作成した。本研究では、観測点間距離が 100km 以上の組み合わせのみを使用し、機器特性の異なる Hi-net と広帯域地震計の組み合わせは使用しない。

図 5 に、周期 8 秒におけるパスごとの位相速度分布、図 6 に周期 3 秒におけるパスごとの位相速度分布をそれぞれ示す。使用しているパスの数はそれぞれ 275 個と 215 個である。図 5 では、位相速度が概ね 3000m/s 以上を示す経路が多く、また地域ごとの違いは判別しにくい。図 6 では、図 5 よりも位相速度が平均的に遅くなっている。福島県の東部では約 3000m/s を示す経路が多く、北西部や南部では約 2400m/s から約 2800m/s を示す経路が多いことが確認できた。

4. 直接 S 波速度逆解析の手順

本研究では、Fang et al.(2015)による表面波の分散データを直接逆解析して 3 次元 S 波速度構造を算出する表面波トモグラフィ法を使用した。通常の S 波速度構造は、各グリッドポイントでの S 波速度の 1 次元プロファイルの 2 次元位相速度マップを使用した点ごとの逆解析によって構築される。しかし、Fang et al.(2015)では位相速度二次元マップを作成せずに、直接 3 次元

S 波速度モデルを推定できるものである。また、この手法は表面波の走時の計算に波線追跡法を利用した高速マーチング法(FMM) (Rawlinson and Sambridge, 2004)を使用しており、周波数依存する波線の曲げを考慮している。速度が大きく変化する複雑な媒体で直線伝播の仮定は適切ではないため、逆解析における波線の曲げの影響を考慮することは適切である。

トモグラフィ解析を行うにあたり本研究における解析条件を次のように設定した。対象範囲は北緯 36.6 度から 38.4 度、東経 138.9 度から 141.3 度とし、福島県を十分に覆う範囲とした。緯度経度の分割数はそれぞれ 30 個である。使用する位相速度の周期の範囲は 3.0 秒から 10.0 秒の間で 0.5 秒間隔とした。求めたい深さは、2.0km から 9.0km の間で 1.0km 間隔とした。反復回数は 10 回行った。なお、解析に用いているパスの数は最大 275 個である。S 波速度トモグラフィの初期モデルは、全部のパスで平均した位相速度を 1.1 倍して擬似的な S 波速度とし、波長の 3 分の 1 を深さとした。

また本研究では、逆解析を行う前にあらかじめ信頼できる範囲を把握するために、チェックカードテストを実施した。 $\pm 0.4\text{km/s}$ の速度偏差を与えた S 波速度の初期モデルを作成した。速度の平均値は本番の解析で使用する速度勾配と同じ値を使用し、深さとともに増加させていく。図 7 に深さ 5km におけるチェックカードテストの結果を示す。得られた結果を比較してみると、主に福島県内を中心に格子模様を復元することが出来た。これは今回の入力データでは信頼性が高い場所と予想される。

5. 推定 S 波速度構造と考察

推定した深さ 5km の S 波速度構造を図 8 に、深さ 3km の S 波速度構造を図 9 にそれぞれ示す。深さ 5km では、福島県の東部や南西部において S 波速度が約 3.3km/s と速い速度を示している一方で、会津地域では約 2.8km/s と速度の遅い値を示している。深さ 3km では、東部や南西部において約 3.0km/s と依然として速度の速い値を示している一方で、会津地域では約 2.6km/s と先ほどと同様に他地域と比べて速度が遅い地域となっている。また会津地域を通るような緯度 37.56 度における東西断面の S 波速度分布を図 10 に示す。信頼性が高い福島県内に注目すると、東経 139.5 度から 140.0 度に位置する会津地域では暖色で示される S 波速度の遅い分布が深部まで表現されており、一方で、東部や西部では寒色で示される S 波速度の速い分布が会津地域よりも浅部まで表現されていることが分かった。

さらに本研究では、深さ 3km の S 波速度構造と福島県の地質分布と比較する。S 波速度が 3.0km/s 程度を示す白色の分布は前期漸新世以前の基盤岩類と、S 波速度が 2.6km/s 程度を示す赤色の分布は前期更新世以降の堆積物や火山岩類とそれぞれほぼ一致していることが確かめられた。

6. まとめ

本研究では、福島県及びその周辺で観測された常時微動の 2 点間のクロススペクトルのゼロクロス点から求められた位相速度分散曲線を用いて、Fang et al.(2015)の逆解析手法を適用して S 波速度構造を推定した。その結果、福島県の東部や南西部において、深さ 5km では S 波速度が約 3.3km/s、深さ 3km では約 3.0km/s と速度の速い値を示した。一方で、会津地域において

は、深さ 5km では S 波速度が約 2.8km/s、深さ 3km では約 2.6km/s と遅い値を示した。また、深さ 3km の S 波速度構造と福島県の地質分布を比較したところ、S 波速度が速い地域と遅い地域は地質年代と関係していることを確認することができた。しかし、福島県沿岸地域のパス密度が他地域と比べて低いことから、浅部の沿岸部における解析結果の信頼性が低い。これは、100km 以下の組み合わせを増やすことで沿岸部における推定解像度が上がると考えられる。

謝辞

(国研)防災科学技術研究所から高感度地震観測網(Hi-net)または広帯域地震観測網(F-net)のデータを使用させていただいた。(公財)地震予知総合研究振興会による広帯域リニアアレイで観測されたデータを使用させていただいた。3 次元 S 波速度構造解析には Fang 博士による解析プログラム DSurfTomo を使用させていただいた。一部の図の作成には GMT(Wessel and Smith, 1998) を使用させていただいた。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. 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.
- Ekström, G, Geoffrey A. Abers, and Spahr C. Webb (2009), Determination of surface-wave phase velocities across USArray from noise and Aki's spectral formulation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18301, doi:10.1029/2009GL039131, 2009.
- Fang, H, H. Yao, H. Zhang, Y. C. Huang, and van der R. D. Hilst (2015), Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application, *Geophys. J. Int.*, 201, 1251-1263.
- 一般社団法人東北地質業協会, 東北 6 県の地質, 福島県の地質, <https://tohoku-geo.ne.jp/information/daichi/img/53/03.pdf> 最終閲覧日 2022 年 1 月 6 日
- Rawlinson, N. and M. Sambridge (2004), Wave front evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method, *Geophys. J. Int.*, 156, 631–647.
- 土屋隆, 山本英和, 齊藤剛 (2020), 福島県の Hi-net 観測点で観測された常時微動の地震波干渉法解析による Rayleigh 波位相速度の二次元分布の推定, 令和 2 年度東北地域災害科学研究集会, 講演予稿集.
- 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 船崎淳, 浜田信生 (2002), 気象庁の震源決定方法の改善－浅部速度構造と重み関数の改良－, 験震時報第 65 卷, pp.123-124.
- Wessel, P. and W. HF. Smith (1998), New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- 山本英和, 澤田義博, 齊藤剛 (2015), 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 1), 第 132 回物理探査学会, 学術講演会講演論文集, pp.28-31.
- 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解析, 平成 28 年度東北地域災害科学研究, 第 52 卷論文集, pp.263-268.

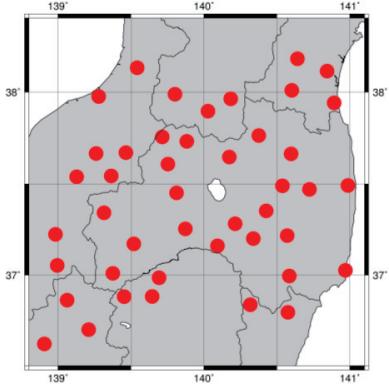
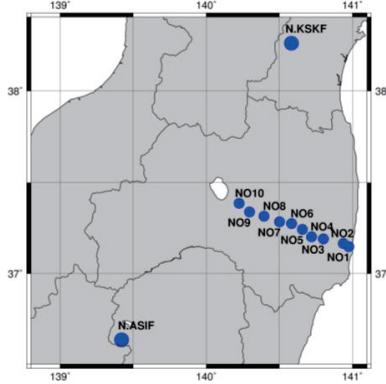
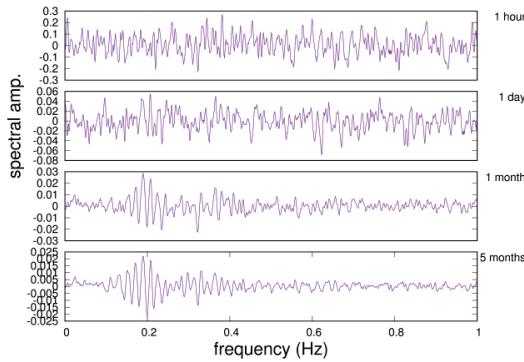
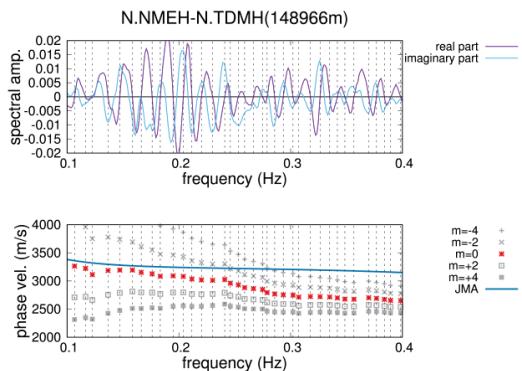
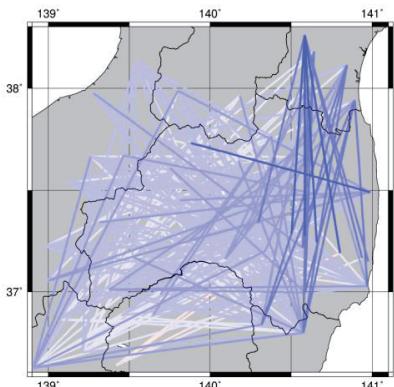
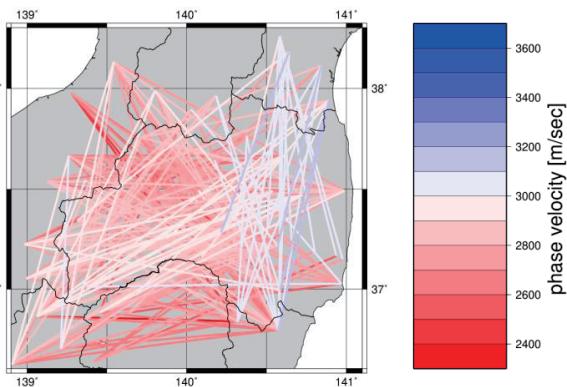


図 1 使用した Hi-net 観測点の位置

図 2 使用した F-net 観測点及び
リニアアレイ測線の位置図 3 Hi-net 観測点 N.NMEH(浪江)と
H.TDMH(只見)の 2 点間の規格化クロス
スペクトルの実部図 4 Hi-net 観測点 N.NMEH(浪江)と
H.TDMH(只見)のクロススペクトル振幅と
推定位相速度図 5 周期 8 秒における 275 個の
パスからなる位相速度分布図 6 周期 3 秒における 215 個の
パスからなる位相速度分布

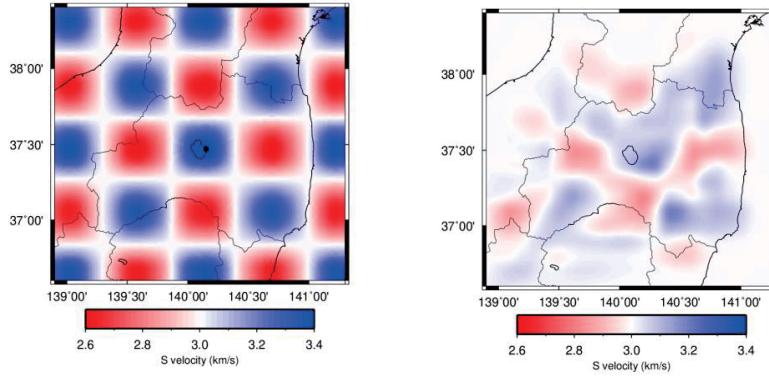


図 7 深さ 5km におけるチェックバードテスト。
左図が初期モデル、右図が逆解析モデル。

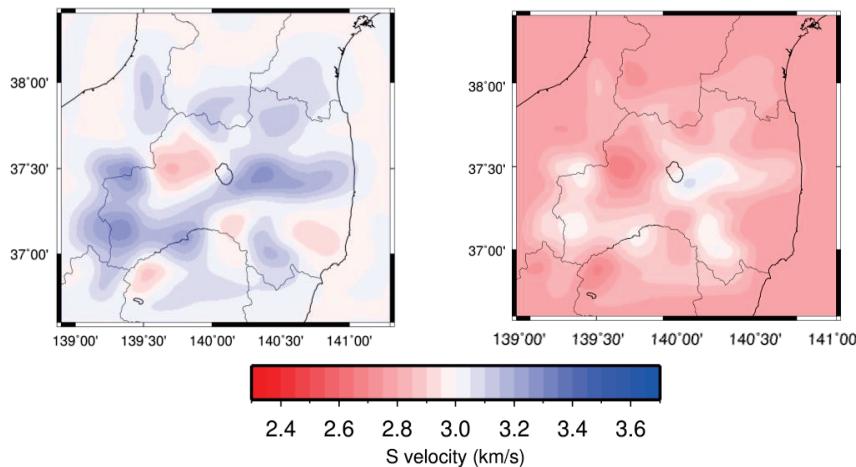


図 8 深さ 5km の推定 S 波速度構造

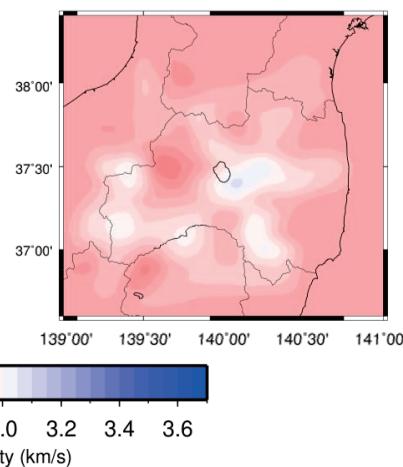


図 9 深さ 3km の推定 S 波速度構造

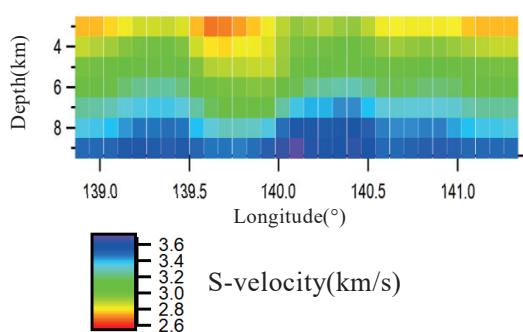


図 10 紋度 37.56 度における東西断面の
S 波速度分布

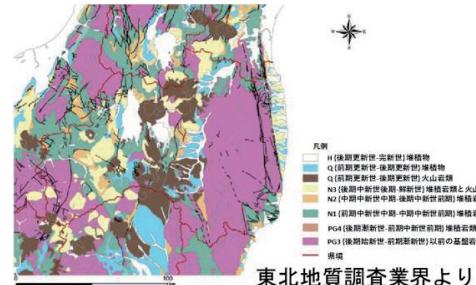


図 11 福島県の地質図