

地震波干渉法に基づく青森県周辺のレイリー波群速度分布と その周期依存性*

弘前大学大学院理工学研究科 石田 早祐美・前田 拓人・小菅 正裕

1. はじめに

最近、地震波干渉法を用いた地下構造推定が盛んに行われるようになった。たとえば、地震波干渉法に基づく表面波解析によって日本全域のS波速度構造が推定されている(Nishida et al., 2008)。しかし、津軽平野および青森県周辺の詳細な構造が得られているわけではない。一方、自然地震を用いた実体波トモグラフィ（例えば、Nakajima et al., 2001）では、浅部構造は精度よく求まらないことが多い。浅部構造については、J-SHIS 表層地盤モデルや深部地盤モデル（防災科学技術研究所, 2019）が提案されているが、これらは全国を統一した基準でモデル化したもので、県内の詳細な構造については各地域のデータを使用してモデルを精緻化する余地がある。特に地震波干渉法は表面波を解析に用いるため、平野における浅部の速度構造の推定が可能であると期待される。そこで、本研究では地震波干渉法を用いて津軽平野を中心とした青森県周辺のレイリー波群速度の推定を行う。

2. 地震波干渉法解析

本研究では、防災科学技術研究所高感度地震観測網 Hi-net 観測点で記録された、上下動成分の連続波形記録を用いて解析を行った。対象地域は、青森県を中心に秋田県・岩手県北部から渡島半島南部にかけての領域である。津軽平野地域には Hi-net 観測点が少ないため、弘前大学の金木農場と藤崎農場に固有周期 1 s の地震計を設置し、波線密度の向上を図った。臨時観測点を含めた解析期間は、2017 年 10 月 19 日から 2018 年 3 月 17 日である。本研究で使用した観測点を図 1 に示す。解析は Bensen et al. (2007) により提案された手法に基づいて行なった。まず、自然地震による信号を取り除くために、時間領域での規格化による振幅の平準化と、周波数領域でのスペクトルホワイトニングを前処理として行なった。次に、1 日の連続データに対する観測点間の相互相関関数の計算を行い、全期間の相互相関関数を足し合わせて（スタックして）平均化を行なった。その後、フィルタリングを行い、各周期帯における群速度の推定を行なった。周期帯は 2–4 s, 4–8 s, 8–16 s, 16–32 s, 32–64 s の 5 つとした。

解析を行なった全期間についての相互相関関数をスタックすることで S/N 比が改善され、位相が明瞭となった。得られた相互相関関数は、どの観測点ペアについてもピークの到来時刻が観測点間距離の増加とともに系統的に遅くなっていることから、表面波のグリーン関数が抽出されたと考えられる。しかし、2–4 s の短周期帯と 32–64 s の長周期帯のグリーン関数については、他の周期帯に比べ、明瞭な位相が見られなかったため、以下では 4–8 s, 8–16 s, 16–32 s の周

*Frequency-dependent Rayleigh wave group velocity around Aomori prefecture inferred from seismic interferometry by Sayumi Ishida et al.

期帯について議論する。各周期帯で得られたグリーン関数を図2に示す。

各観測点ペアの相互相関関数から波形エンベロップを算出し、各観測点間距離をエンベロップ振幅が最大となる時刻で除することで群速度を求めた。ただし、異常値を排除するため、周期帯によらず 2.0 km/s~4.0 km/s の範囲の推定値のみを結果とした。推定した各周期帯での群速度波線分布を図3に示す。全ての周期帯において、青森県の北西部で低速度の波線が卓越する特徴が見られた。各周期帯について見ると、4-8 s 帯域 (図3a) では、青森県南部で高速度の波線が、八戸地域で低速度の波線分布が見られた。8-16 s 帯域 (図3b) では、下北半島から南にかけてと青森県南部から秋田県にかけて高速度の波線が、他の地域では低速度の波線が卓越した。16-32 s 帯域 (図3c) では、他の周期帯に比べ高速度の波線が広く分布しており、特に青森県北東部と青森県南部から秋田県・岩手県にかけて卓越する傾向が見られた。

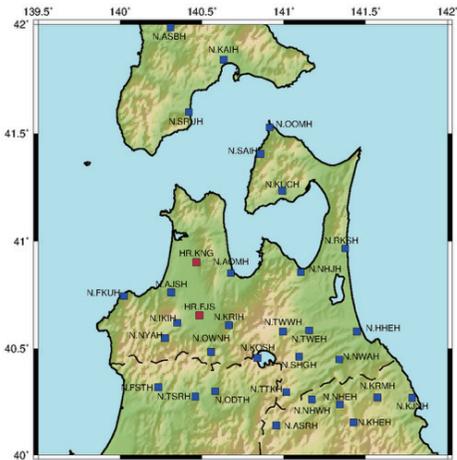


図1. 解析に使用した観測点の分布。青い四角はHi-net 観測点の位置を、赤い四角は本研究で設置した臨時観測点の位置を示す。

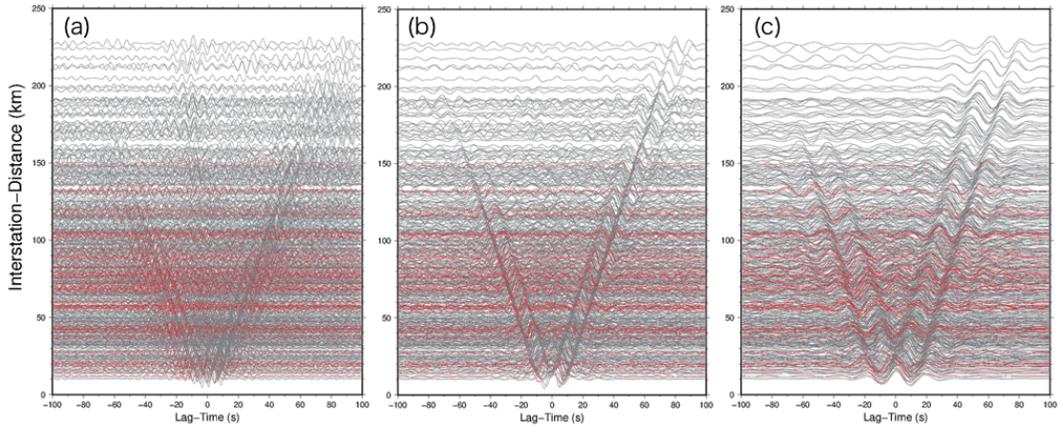


図2. 各周期帯における相互相関関数。(a)4-8 s 帯域, (b)8-16 s 帯域, (c)16-32 s 帯域での相互相関関数。灰色の線はHi-net 観測点ペアを、赤色の線は臨時観測点を含んだ観測点ペアでの相互相関関数を表す。

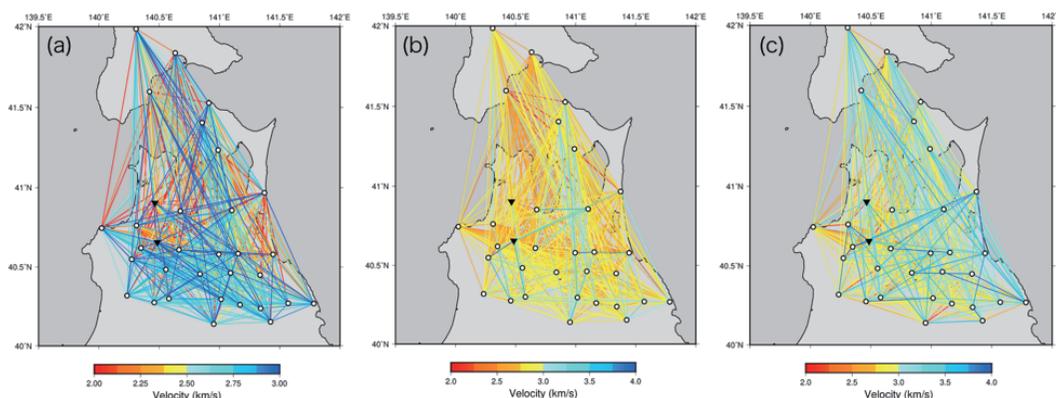


図3. 各周期帯における群速度波線分布。(a)4–8 s 帯域, (b)8–16 s 帯域, (c)16–32 s 帯域における結果。白丸は Hi-net 観測点, 黒逆三角は臨時観測点を示す。群速度のカラースケールを図の下に示す。

3. レイリー波群速度トモグラフィー

群速度の空間分布をより詳細に推定するため, 対象領域を水平面でブロックに分割し, レイリー波群速度を逆問題により解くブロック・トモグラフィー解析を行った。まず, トモグラフィー解析のブロックサイズをどの程度に設定できるかを調べるために, チェッカーボードテストを行なった。本研究では, 平均速度 2.5 km/s に対して $\pm 20\%$ の速度揺らぎを与えたチェッカーボードモデルと, 平均速度 3 km/s に対して $\pm 50\%$ の速度揺らぎを与えたチェッカーボードモデルの 2 通りを用意した。両モデルともブロックサイズは 4 km \times 4 km, チェッカーパターンの大きさは 20 km とし, 逆問題のイタレーション回数は 5 回とした。また, 最小二乗法において, モデルパラメータの絶対値を小さくするダンピングと, モデルパラメータを空間的に滑らかにするスムージング条件を適用し, 波線は直線であると仮定した。ダンピングとスムージングの重みは周期帯ごとに試行錯誤的に決定した。4–8 s, 8–16 s, 16–32 s の各周期帯における最適なダンピング値とスムージング値を用いたチェッカーボードテストの結果を図 4 に示す。観測点密度が高い青森県南部を中心にチェッカーボードパターンが回復し, この地域におけるトモグラフィー解析の空間分解能が高いこと, およびブロックサイズが妥当であることが示された。短周期帯では, ダンピング, スムージングの両方の値を相対的に強くする必要があり, 平均速度に近い値を取っている可能性がある。

次に, 走時データを用いてトモグラフィー解析を行なった。初期速度は, 4–8 s 帯域で 2.5 km/s, 8–16 s と 16–32 s 帯域では 3 km/s とし, ブロックサイズは 4 km \times 4 km の一様構造モデルとした。チェッカーボードテストと同様, イタレーション回数は 5 回とし, ダンピングとスムージングの強さは周期帯ごとに最適なものを検討した。

トモグラフィーの結果を図 5 に示す。チェッカーボードテスト (図 4) により空間分解能が高かった領域について調べると, すべての周期帯において, 青森県北西部で低速度領域が, 夏泊半島で高速度領域が確認できた。4–8 s 帯域 (図 5a) では, 青森県南部で高速度領域が, 八戸

地域で低速度領域が見られた。8–16 s 帯域 (図 5b) では、夏泊半島を除く地域で低速度領域が広がった。また、16–32 s 帯域 (図 5c) で、青森県南部で低速度領域が、青森県南東部で高速度領域が見られた。これらの特徴は、図 3 の波線分布と概ね調和的で、それをより詳細な空間分布として見る事が可能になった。

4. 議論

本研究では観測点が密ではない津軽平野地域に臨時観測点を 2 点設置したことで、津軽半島南部を中心に波線密度が向上した (図 6)。この領域については群速度分布の地域性をより詳細に推定することが可能となったといえる。

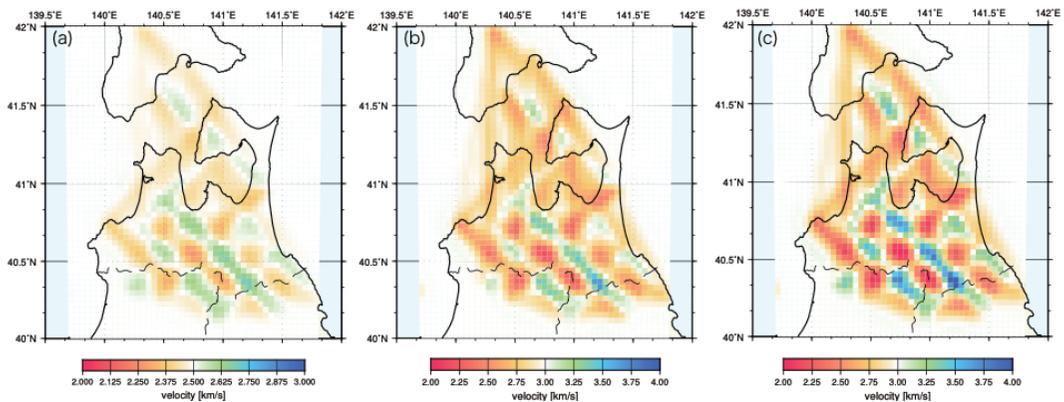


図 4. 各周期帯に対応する最適パラメータ値を適用したチェッカーボードテストの結果。(a)平均速度 2.5 km/s で $\pm 20\%$ の速度揺らぎを与えた場合。(b), (c)平均速度 3.0 km/s で $\pm 50\%$ の速度揺らぎを与えた場合。速度の値はカラースケールで示す。

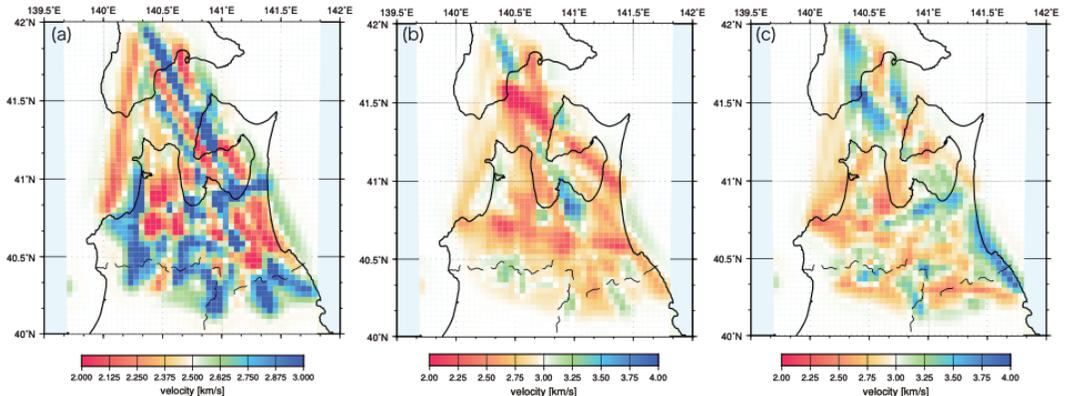


図 5. 各周期帯におけるトモグラフィー結果。(a)4–8 s 帯域, (b)8–16 s 帯域, (c)16–32 s 帯域における結果。速度の値をカラースケールで示す。

表面波の群速度は、周期が長いほどより深部までの構造の影響を受けるので、周期による群速度分布の違いはこれを反映している。

解析に使用したすべての周期帯において、夏泊半島には高速度領域が分布する（図 5）ことは、表層から深部まで高速度領域が存在することを示唆する。シームレス地質図（産業技術総合研究所地質調査総合センター，2019）によれば、この地域には、白亜紀から新第三紀の深成岩である花崗閃緑岩、石英閃緑岩の岩体やデイサイト、貫入岩等の火山起源の硬い岩石（火成岩）が分布しており、これらの岩石が高速度領域と対応する可能性がある。

次に、J-SHIS 深部地盤構造（防災科学技術研究所，2019）から群速度を計算し（図 7）、本研究で推定した群速度と比較を行なった。その結果、津軽平野地域や八戸地域で低速度領域が、夏泊半島や青森県南部で高速度領域が見られることは、本研究で推定した 4–8 s の短周期帯での群速度（図 5a）と整合している。しかし、他の周期帯での対応関係があまり良くなかった。これは、J-SHIS 深部地盤構造は、地震基盤（S 波速度が 3 km/s に相当する層）から工学的基盤（S 波速度が 400 m/s～700 m/s に相当する層）までの深さについての構造であることに起因する。本研究では長周期帯についての群速度を推定することができたことから、J-SHIS 深部地盤構造で推定されている基盤深度よりも深部までの構造を反映した結果が得られたと考えられる。

5. 結論

本研究では、津軽平野を中心とした青森県周辺地域について、地震波干渉法を用いて観測点間のレイリー波群速度を求め、ブロック・トモグラフィ解析により群速度の空間分布を推定

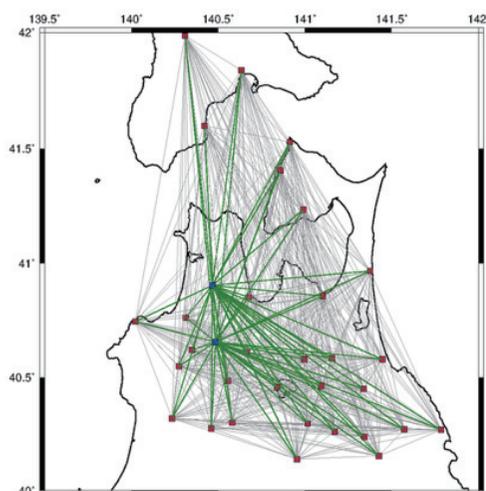


図 6. 解析に使用した波線分布。赤い四角は Hi-net 観測点、青い四角は臨時観測点を示す。灰色の線は Hi-net 観測点ペア、緑色の線は臨時観測点を含んだペアの波線を表す。

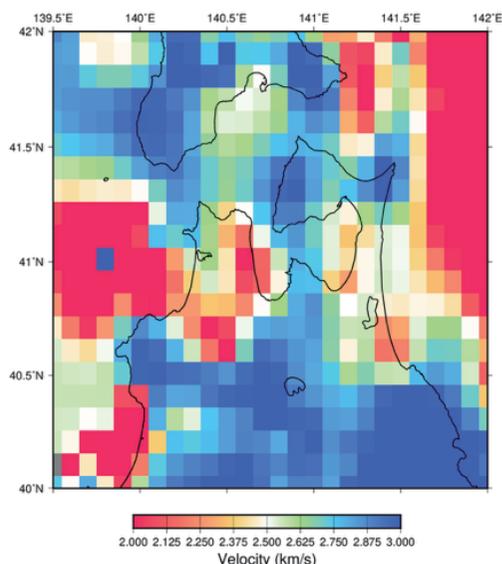


図 7. J-SHIS 深部地盤構造より求めた群速度。周期 4 s における速度構造を示す。速度はカラースケールで示している。

した。観測点が密ではない津軽平野地域に臨時観測点を追加したことにより、津軽半島南部での解像度が向上した。

夏泊半島は全ての周期帯で高速度であることから、表層から深部まで高速度域が存在し、この地域に分布する火成岩の分布を反映すると考えられる。また、本研究で推定した群速度は、4–8 sの短周期帯ではJ–SHIS 深部地盤構造で推定された基盤深度までの深さについての構造を反映しており、他の周期帯では基盤深度よりも深部までの構造を反映していると考えられる。

謝辞

本研究では国立研究開発法人防災科学技術研究所高感度地震観測網 Hi-net の連続地震波形記録を利用しました。また、弘前大学農学生命科学部の伊藤大雄教授を始めとした弘前大学農学生命科学部附属生物共生教育研究センター金木農場および藤崎農場の関係の方々には臨時観測の便宜をはかっていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, Y. Yang, 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophysical Journal International*, 169, 37, 1239–1260, [doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x).
- Nakajima, J., T. Matsuzawa, A. Hasegawa and D. Zhao, 2001, Three-dimensional structure of V_p , V_s , and V_p/V_s beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, *J. Geophys. Res.*, 106, B10, 21843–21857, [doi:10.1029/2000JB000008](https://doi.org/10.1029/2000JB000008).
- Nishida, K., H. Kawakatsu and K. Obara, 2008, Three-dimensional crustal S wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters, *J. Geophys. Res.*, 113, B10302, [doi:10.1029/2007JB005395](https://doi.org/10.1029/2007JB005395).
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2019, 20万分の1日本シームレス地質図 V2 (データ更新日:2019年6月5日, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>).
- 国立研究開発法人防災科学技術研究所, 2019, 浅部・深部統合地盤モデル, [doi:10.17598/nied.0012](https://doi.org/10.17598/nied.0012).