

地震波干渉法による西日本の地殻速度構造 (1) —表面波群速度の推定—

山下佳穂里・浅野公之・岩田知孝

要 旨

西日本のF-netの観測点で観測されている連続記録に地震波干渉法を適用し、得られた観測グリーン関数の特徴を調べた。1)観測グリーン関数は周期3秒程度で卓越しており、2～15秒の範囲ではっきりとした信号としてとらえられた。2)上下成分同士の観測グリーン関数の信号部分のparticle motionの特徴は基本モードのレイリー波の特徴を持っていた。3)観測グリーン関数の群速度を求め、本地域の地殻内の1次元地震波速度構造により得られる理論的なレイリー波群速度と比較した。対応はとれているものの、一致しない地域もあった。今後速度構造の地域性との比較を行う必要がある。また、4)観測グリーン関数の構築には長期間のデータを用いることによってSN比が高くなることがわかった。その解析の中で季節によってSN比が違う場合があることが示され、その影響についての精査も必要である。

キーワード: 地震波干渉法, Rayleigh波群速度, 西日本の地殻速度構造

1. はじめに

2003年十勝沖地震では震源域から200km以上も離れた苫小牧市を中心として数多くの石油タンクが被害を受け、そのうち2基からは火災が発生した。苫小牧市は厚い堆積層からなる勇払平野に位置し、厚い堆積層で周期7-10秒の長周期地震動が生成し、その周期がタンクの固有周期と近かったため共振を起こし、事故が発生したと考えられている(例えば、畑山ら, 2004)。Aoi et al. (2008)は2003年十勝沖地震を対象として、震源モデルと大規模地殻構造モデルに基づいて地震波動伝播シミュレーションを行い、巨大地震から生成した地震波が地殻内を減衰せずに伝播し、厚い堆積層で長周期地震動が増幅されることを確認した。

近畿圏では大阪や神戸などの大都市が大阪堆積盆地内に位置している。西南日本の太平洋側のフィリピン海プレート境界では、M8クラスの南海・東南海地震の発生が逼迫しており、これらの巨大地震が発生した場合には大都市が長周期地震動に見舞われることは確実である。このような巨大地震発生時に生じる長周期地震動の高精度な定量的評価には、震源モデルに加え、震源域からサイトに至る長い伝播経路に対する地殻速度構造モデルが堆積平野・盆地の

構造モデルとともに、対象周期帯域の伝播特性を適切に表現できるよう与えられる必要がある。長周期地震動予測や評価に関する地殻速度構造モデル、堆積平野・盆地の速度構造モデルはそれぞれの地域において複数の研究グループが提案しているとともに、文部科学省地震調査研究推進本部において全国版の地殻及び深部地盤の速度構造モデルが集約されつつある(例えば、藤原, 2009)。それらの地殻・深部地盤の速度構造モデルは、強震観測網等(例えば、Kinoshita, 1998; Aoi et al., 2000)の実記録データを用いて検証される必要がある。

長周期地震動(2-20秒)に着目した場合にはその周期帯域で励起される地震動記録が必要であり、そのためには比較的規模の大きい(実用的にはM5クラス以上)イベントの発生が必要であるが、その発生数が少ないことや、発生域が限られていることから検証できる領域が限られている。近年、連続観測されている微動の相互相関関数を多数回スタックすることにより、一方を仮想震源とし、他方を観測点とする観測点間のグリーン関数を得る地震波干渉法(例えば、Campillo and Paul, 2003)が注目を浴び、地震学の多方面において適用されている。例えば、Ma et al. (2008)は南カリフォルニアでの広帯域地震観測網の連続記録に地震波干渉法を適用して得られた観測

グリーン関数により、SCECにおいて行われている地震動予測のための地殻速度構造モデルを検証することが行われている。我々はこの地震波干渉法を西日本のF-net記録に適用して観測グリーン関数を求め、既往の地殻速度構造モデルの検証に用いることを最終的な目標とする。そのために本研究では地震波干渉法を実記録に適用した場合にどのような特徴があるのかについて調べた。

2. 解析手法

解析には(独)防災科学技術研究所が全国に展開している広帯域地震観測網(F-net)の観測点のうち、まず西日本の観測点での広帯域地震計(STS-1及びSTS-2)の記録を用いた。Fig.1に本研究で用いた観測点、線で相互相関関数を計算した観測点ペアを示す。観測点は全部で26点である。連続記録は2008年9月1日から2009年8月31日までの1年間のものを用いた。ここでは計算時間等を考え、相互相関関数のラグタイムは最大100秒とした。観測グリーン関数には主として表面波が卓越すると考えて、観測点間距離は約200 km以内の観測点ペアを対象として相互相関関数を求めた。

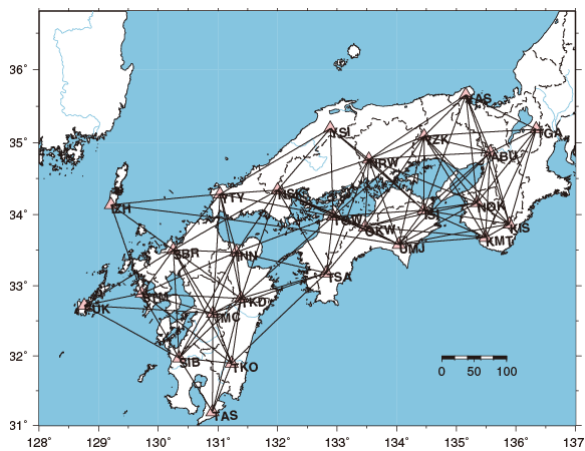


Fig. 1 Map of stations used in this study and lines show station-pairs for estimating observed Green's function

微動データは観測点ペア毎にRadial成分、Transverse成分、Vertical成分に回転させる。つぎに、地震などの振幅が大きい部分の影響を少なくするために、位相情報のみを取り出すone-bit normalization(例えば, Sabra et al., 2005)を行う。これらのデータ処理後、記録長を1時間、最大ラグタイムを100秒として相互相関関数を計算し観測点ペアごとに相互相関関数をスタックすることにより、観測グリーン関数を得る。観測記録を重複して使わない場合、相互

相関関数を得る記録長を長くするとスタック回数は減る。これに関しては, Stehly et al. (2008)に従っていくつかの組み合わせについて観測グリーン関数の信号部分のSN比を求め、適切と思われる値として1データ長を1時間としている(山下ら, 2009)。

3. 相互相関関数の特徴

3.1 西南日本内帯を中心とした観測点

ここでは、西南日本内帯を中心とした24ペアで、2009年4月の1ヶ月分のデータから相互相関関数を求めた結果を示す。Fig.2はその中の観測点ABU(阿武山)とNRW(成羽)の全ての成分間での観測グリーン関数を示した。Radial, Transverse, Vertical成分同士やRadialとVertical成分の観測グリーン関数はラグタイムが0秒の軸を挟んで±60-80秒程度のところに信号が確認され、その出現時間も対応している。一方他の組み合わせのところはそのような明らかな信号は見えない。Fig.3には求めた観測グリーン関数を観測点間距離でペーストアップしたものを示している。左から、仮想震源と観測点ともにRadial成分、Transverse成分、Vertical成分を示す。SN比のよい信号波群が各観測グリーン関数に見えており、伝播している様子がわかる。

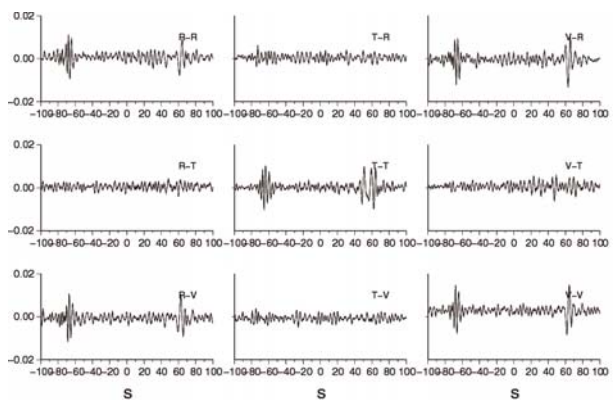


Fig. 2 Observed Green's functions for ABU and NRW pair

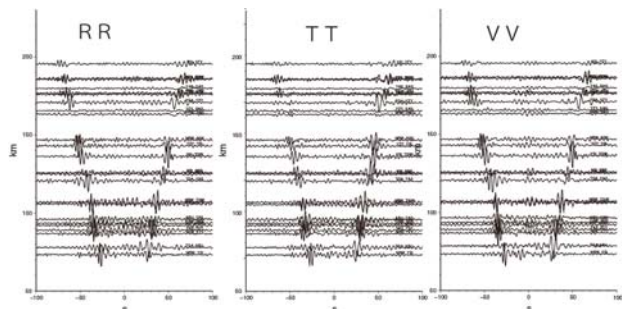


Fig. 3 Paste-up of R-R, T-T, and V-V components of the observed Green's functions

3.2 観測グリーン関数の特徴

前項で得られた観測グリーン関数がどのような波の情報を有しているのかを調べた（例えばCampillo and Paul, 2003）。ABUを仮想震源，NRWを観測点と見なし，ABUのVertical方向に力をかけた場合のNRWでのRadial, Transverse, Vertical成分から信号部分のparticle motionをFig.4に示す。R-Vのparticle motion (Fig.4(左))から，軌跡はRetrogradeの動きをしており，R-Tの図面からは，水平面内ではRadial成分が卓越していることがわかる。この信号はRayleigh波基本モードの特徴を有していると考えられる。

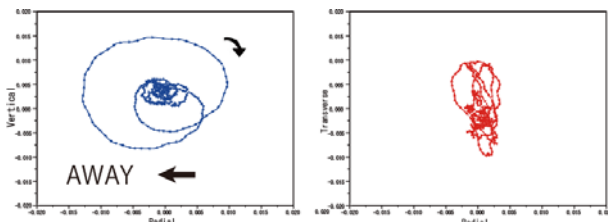


Fig. 4 (left) Particle motion of Radial-Vertical component between ABU (V) and NRW (R and V) stations and (right) Transverse-Radial component between ABU (V) and NRW (R and T)

さらに，ABUとNRWの観測グリーン関数 (Vertical-Vertical成分) の振幅スペクトルをFig. 5に示す。信号は0.3 Hz (周期3秒) 付近の振幅スペクトルがもっとも大きく，0.05 Hzから0.5 Hzくらいまで (2–20秒) の周波数帯域でS/Nがあるように見える。また，1時間の相互相関関数を1年間スタックして得た相互相関関数のスペクトルは1ヶ月分スタックし

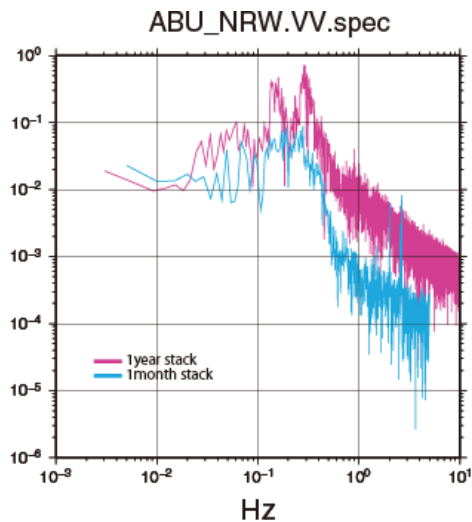


Fig. 5 Amplitude spectra of the observed Green's function of ABU(V) and NRW(V) stacked for one month (blue) and for one year (magenta)

た結果と形状は類似しており，1カ月分スタックしたものに比べてどの周波数帯でもS/Nがよい。

4. Rayleigh波の群速度推定

3の結果より，信号部分のparticle motionの特徴から，この部分をRayleigh波の基本モードであると仮定し，この信号部分の分散解析からRayleigh波の群速度を求めた。推定された信号部分の振幅スペクトルの特徴から，SN比が十分にあると考えられる周期2–4秒，4–8秒，8–16秒の群速度を推定した。

全ての観測点で観測点間距離が200km以内の相互相関関数を計算した。前章の結果を踏まえて，1年間スタックを最終的な観測グリーン関数とした。Vertical-Vertical成分間の観測グリーン関数に周期2–4秒，4–8秒，8–16秒のバンドパスフィルターをかけエンベロープの最大振幅をとるラグタイムから群速度を求めた。

推定した信号の群速度を各観測点ペアの経路に書いたものをFig.6に示す。観測点ペアによって求められた群速度が異なっていることがわかる。

5. 議論

5.1 既往の速度構造モデルから計算した理論Rayleigh波群速度との比較

観測グリーン関数に卓越している信号部分の群速度の妥当性を検討するため，京都大学防災研究所地震予知研究センターの阿武山，鳥取，徳島観測所が震源決定に用いている1次元地殻速度構造モデルから理論的に計算されるRayleigh波の群速度と観測グリーン関数の群速度と比較した。群速度の計算にはSaito (1988)のプログラムを利用した。Fig.7 に比較をする。観測値は各領域を通る測線の値を代表として示している。観測されている群速度は平均的にはこの地域の速度構造から考えられる群速度と対応しており，観測グリーン関数に現れている波群はRayleigh波の基本モードであると考えられる。しかしながら，観測のばらつきは大きく，それがどういったことに起因しているのかについて今後詳細に調べる必要があると考えられる。

5.2 観測グリーン関数の季節による違いについて

地震波干渉法を用いた研究において，その励起源は波浪と考えられるため，季節変化や到来方向の影響についての研究が行われている（例えばStehly et al., 2008）。ここでは相互相関関数の1ヶ月毎のスタック

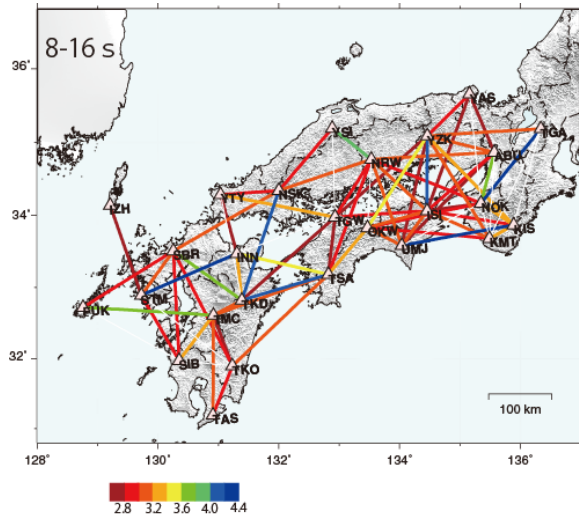
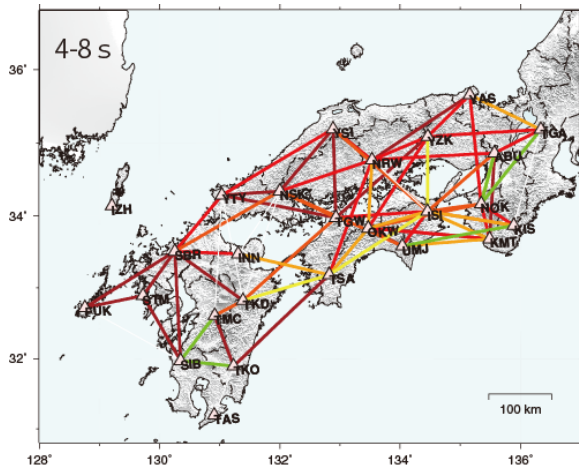
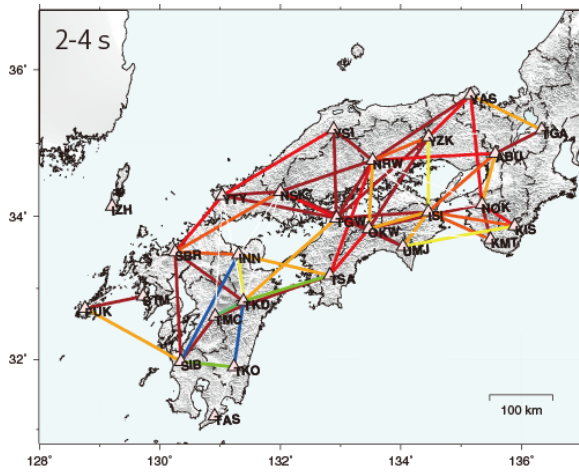


Fig. 6 Estimated group velocities for each station-pair. Color lines indicate group velocities

くと、1年間分のスタックの比較を行い、その季節による影響を調べる。

Fig.8はYTY(豊田)とYSI(吉田)のV成分の観測グリーン関数を1ヶ月毎のスタッキング結果と1年分のスタッキング結果を比較する。震源が均質にある場合には時間ゼロを対称軸とした形状が得られること

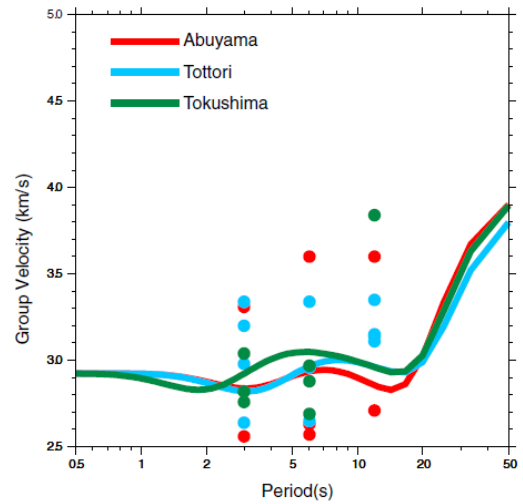


Fig. 7 Comparison between theoretical (lines) and observed (dots) group velocities at three regions, Abuyama, Tottori, and Tokushima area

が期待されるが、冬の期間はマイナス側の信号が、夏の期間はプラス側の信号が強く表れている事がわかる。信号の強弱によって位相が変化の様子は見られない。1年スタックをすると、この観測点ペアの場合は対称性が保たれた信号が得られていることがわかる。こういったことから、本研究で調べているような周期帯域において、SN比のよい観測グリーン関数を得るには、1年間のデータ程度を準備する必要があるのかもしれない。

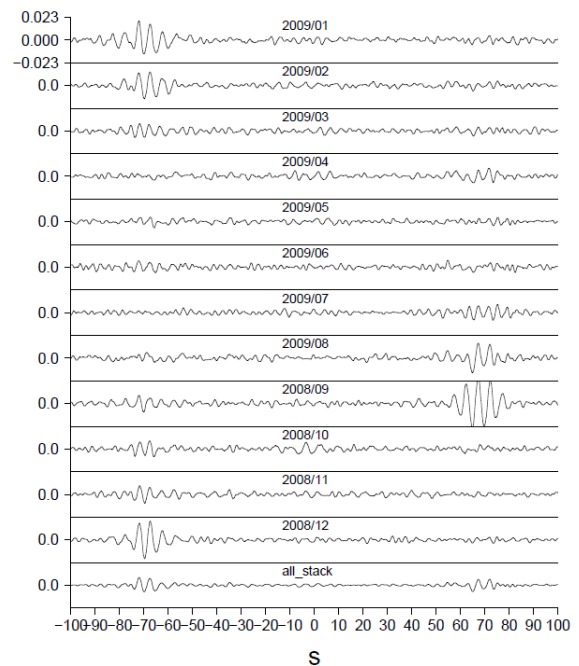


Fig. 8 Observed Green's function using every one month data and one year data (bottommost trace)

6. まとめ

西日本のF-netの観測点で観測されている連続記録に地震波干渉法を適用し、得られた観測グリーン関数の特徴を調べた。観測グリーン関数は周期3秒程度で卓越しており、2~15秒の範囲ではっきりとした信号が見られた、上下動成分同士の観測グリーン関数の信号部分のparticle motionの特徴は基本モードのレイリー波の特徴を持っていた。その波群の観測グリーン関数の群速度を求めた。求められた群速度は各観測点ペアでばらついていた。本地域の地殻内の1次元地震波速度構造により得られる理論的なレイリー波群速度と比較した。対応はほぼとれているものの、観測値にはばらつきが多いため、精査が必要である。観測グリーン関数の構築には長期間のデータを用いることによってSN比が高くなることがわかった。その解析の中で季節によってSN比が違う場合があることが示され、それを踏まえた観測グリーン関数の推定が必要と考えられる。

SN比の影響を踏まえて、群速度推定と速度構造モデルとの比較を行い、観測グリーン関数による速度構造モデルの検証と改良に取り組んでいきたい。

謝 辞

独立行政法人防災科学技術研究所のF-netデータを使用させていただきました。速度構造モデルについては、京都大学防災研究所附属地震予知研究センターの公開データを参考に致しました。記して感謝いたします。

参考文献

畑山 健・座間信作・西 晴樹・山田 實・広川幹浩・井上涼介 (2004): 2003年十勝沖地震による秋季数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害, 地震第2輯, 第57巻, 2号, pp.83-103.
藤原広行 (2009): 地下構造データの収集・モデル化による地下構造データベースの構築, 「統合化地下

構造データベースの構築」第3回シンポジウム予稿集, pp.5-14.

山下佳穂里・浅野公之・岩田知孝 (2009): F-net広帯域地震観測網連続記録を用いた地震波干渉法による西南日本の地殻速度構造の推定(1), 日本地震学会2009年秋季大会予稿集, P1-37.

Aoi S., Honda, R., Morikawa N., Sekiguchi H., Suzuki H., Hayakawa Y., Kunugi T. and Fujiwara, H. (2008): Three-dimensional finite difference simulation of long-period ground motion for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, No.7, B07302, doi:10.1029/2007JB005452.

Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara and Y. Okada, (2000): New strong-motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. AGU*, Vol.81, No.48, Fall Meet. Suppl., Abstract S71A-05.

Campillo, M. and Paul A. (2003): Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science* Vol.299, pp.547-549.

Kinoshita, S. (1998): Kyoshin Net (K-NET), *Seism. Res. Lett.*, Vol.69, pp.309-332.

Ma, S., Prieto, G.A. and Beroza, G.C. (2008): Testing community velocity models for southern California using the ambient seismic field, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.98, No.6, 2694-2714.

Sabra, K.G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W.A. and Fehler, M.C. (2005): Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, No.3, L03310, doi:10.1029/2004GL021862.

Saito, M. (1988): DISPER80: A subroutine package for the calculation of seismic normal mode solutions, *Seismological Algorithms*, ed. by Doornbos, D.J., Academic Press, 293-319.

Stehly, L., Campillo, M., Froment, B. and Weaver, R. L. (2008): Reconstructing Green's function by correlation of the coda of the correlation (C3) of ambient seismic noise, *J. Geophys. Res.*, Vol.113, No.11, B11306, doi:10.1029/2008JB005693.

Crustal Velocity Structure in Western Japan Using Seismic Interferometry (1) Estimation of Surface Wave Group Velocity

Kaori YAMASHITA, Kimiyuki ASANO and Tomotaka IWATA

Synopsis

Seismic interferometry is applied for F-net continuous data in western Japan area to obtain Green's functions between station-pairs for validating crustal velocity structure model. As part 1, we estimated observed Green's functions and see the characteristics. 1) Signals of the observed Green's function have sufficient SN ratio for 2-15 s with station distances up to 250 km. 2) The signals mainly composed by surface waves that were judged by particle motion and group velocity characteristics. 3) The observed Green's functions show seasonal variation.

Keywords: Seismic interferometry, group velocity of Rayleigh waves, crustal velocity structure in western Japan