

## 東北地方太平洋沖地震の震源周辺で発生した地震のS波エンベロープ伸張 Envelope broadening of S-wave seismograms from earthquakes near the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

長谷川 和也<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 鈴木 健介<sup>1</sup>, 海野 徳仁<sup>1</sup>

Kazuya Hasegawa<sup>1\*</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>, Yoshihiro Ito<sup>1</sup>, Kensuke Suzuki<sup>1</sup>, Norihito Umino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ

<sup>1</sup> Graduate school of Science, Tohoku Univ.

東北地方前弧域で発生した地震の観測波形の形状は、震源のプレート境界からの深さに依存して変化することが知られている。プレート境界近傍で発生する地震を東北地方太平洋側の観測点で観測した波形では、S波のエンベロープ形状の顕著な時間軸方向の伸張がみられる一方、スラブ内地震の波形ではエンベロープ伸張の程度は小さい [古賀, 2010; Gamage, 2007]。本研究では、多重前方散乱の影響を強く受けるS波の到達時からS波の最大振幅を示すまでの遅延時間 (S波ピーク遅延時間) に注目して、こうした観測波形の違いについて検討を行った。解析対象は、日本海溝陸側斜面域下で発生した地震で、東北地方太平洋沖地震の余震を対象に含めることによりスラブ内、プレート境界、上盤プレート内の広い範囲で発生した地震の波形を解析できた。これらの地震の震源深さはいずれも海底地震計を用いて再決定された [Suzuki et al., 2012] ものである。

解析の結果、プレート境界付近で発生する地震のすべてで顕著なエンベロープ伸張を示す大きなS波ピーク遅延時間が得られるわけではないことがわかった。特に大きなS波ピーク遅延が見られるのは、海溝軸からおよそ130 km 陸側までの領域のプレート境界近傍で発生した地震に限られ、それより西側のプレート境界近傍の地震の波形は顕著なS波エンベロープ伸張を示さない。

顕著なエンベロープ伸張の原因を探るため、S波ピーク遅延時間の震源距離に対する増加率を調べた結果、これらの地震では震源近傍で急激にピーク遅延時間が増加する傾向をもつことが示唆されることから、海溝近くのプレート境界近傍には局所的に短波長の不均質性に富む構造が存在している可能性が指摘できる。一方、エンベロープ伸張が少ないスラブ内地震は、ピーク遅延時間の震源距離に対する増加率が、解析対象とした地震全体の平均と比べて小さく、このことは太平洋スラブ内の短波長不均質性が弱いことを反映していると考えられる。

キーワード: S コーダ波, プレート境界型地震, プレート内地震

Keywords: S-coda wave, interplate earthquake, intraplate earthquake

## 常時微動を用いた2011年東北地方太平洋沖地震後の地震波速度の時間変化の推定 Time-lapse change in seismic velocity after the 2011 Tohoku-Oki earthquake estimated using ambient noise record

高木 涼太<sup>1\*</sup>, 内田 直希<sup>1</sup>, 岡田 知己<sup>1</sup>, 河野 俊夫<sup>1</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 長谷川 昭<sup>1</sup>

Ryota Takagi<sup>1\*</sup>, Naoki Uchida<sup>1</sup>, Tomomi Okada<sup>1</sup>, Toshio Kono<sup>1</sup>, Syuichi Suzuki<sup>1</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ

<sup>1</sup> RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

常時微動に地震波干渉法を適用し、2011年東北地方太平洋沖地震前後の地震波速度の時間変化を検出した。使用したデータは、東北大学が岩手県遠野に展開しているアレイ観測網で観測された連続記録である。アレイは、広帯域地震計10点で構成され、最小間隔は2.4 km、最大間隔は18 kmである。解析には、そのうち9点で観測された2010年1月から2011年12月までの2年間の上下動成分のデータを使用した。データ振幅を用いて地震を除去した後、周波数領域で規格化されたクロススペクトルを1日毎に計算した。

常時微動が等方的に入射する場合、規格化されたクロススペクトルは、波数と観測点間距離の積を指数に持つベッセル関数で表される [Aki 1957]。対象地域における平均的なレイリー波位相速度とその変化を推定するために、周波数毎のクロススペクトルにベッセル関数をフィッティングさせ、位相速度の分散曲線を得た。地震前のクロススペクトルを用いて推定された位相速度は、0.4, 0.8, 1.2 Hz において、3.183, 2.985, 2.878 km/s である。また、地震後の位相速度は、3.176, 2.978, 2.863 km/s と推定され、速度低下率は0.22, 0.22, 0.52%となった。また、他の周波数においても、地震後に位相速度が低下した。特に、0.4-1.2 Hz では、速度低下率が周波数に比例する傾向があった。

実際の常時微動の入射は等方的でないため、常時微動源の変化によって、見かけ上速度が変化する場合がある。そこで、常時微動源を方位角の関数としてフーリエ級数展開することで、常時微動源の分布と位相速度を同時に推定した [Harmon et al., 2010]。4次の項までのフーリエ級数を用いた場合、0.4, 0.8, 1.2 Hz における地震前の位相速度は、3.181, 2.980, 2.855 km/s と推定された。地震後は、3.173, 2.972, 2.842 km/s となり、0.24, 0.27, 0.46%の速度低下を示した。

キーワード: 地震波速度変化, 地震波干渉法, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Seismic velocity change, Seismic interferometry, The 2011 Tohoku-Oki earthquake

## 短周期海底地震計とハイドロフォンで記録された ambient noise の相関解析 Ambient noise analysis using short-period seismometers and hydrophones

利根川 貴志<sup>1\*</sup>, 深尾 良夫<sup>1</sup>, 高橋 努<sup>1</sup>, 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>, 小平 秀一<sup>1</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>

Takashi Tonegawa<sup>1\*</sup>, Yoshio Fukao<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>, Koichiro Obana<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Yoshiyuki Kaneda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

干渉法の分野において、異なる二つの観測点で記録された常時微動(ノイズ)の相関解析を行うことで、その二つの観測点間を伝わる波動場を抽出する研究がいくつも報告されている。また、この手法は、超音波、音波(海中音波)、地震波など、様々な波動場に適用できることが知られている。(独)海洋研究開発機構では、文部科学省の受託研究「東海・東南海・南海地震の運動性評価のための調査観測・研究」の一環として、2012年度に短周期(4.5 Hz)海底地震計約150台を紀伊水道付近に約2ヶ月間展開しており、その各海底地震計にはハイドロフォンが併設されている。本研究では、その海底地震計とハイドロフォンで記録された常時微動の相関解析を行うことにより、それぞれの装置でどのような波動場が抽出できるのかを調べ、そこから海中、地中および固液境界での波動場の性質を理解することを試みた。

観測期間は2012年9月下旬から2012年12月上旬で、各観測点での設置期間は約2ヶ月間である。観測点間距離は約5 kmで、5本の各測線上に30-40台ほど設置されている。サンプリング間隔は海底地震計(地震計は上下動のみ使用)・ハイドロフォン共に200 Hzである。設置された水深は100-4800 mである。解析では、まず、両連続記録に1-3 Hzのバンドパスフィルターを適用し、次に、ある閾値を越える振幅をすべて0に置き換え、最後にone-bit化を行う。(上記の処理後の)600秒間の連続記録から相互相関関数を計算し、観測期間(約2ヶ月)分の相互相関関数をすべてスタックすることで、二点間を伝わる波動場の抽出を試みた。

ハイドロフォンの相関解析の結果では、隣り合う二点(観測点間距離約5 km)の相互相関関数には明瞭なピークが検出された。また、その隣の観測点(距離約10 km)との相互相関関数にもピークが検出されたが、さらにその隣(距離約15 km)との相互相関関数にはほとんど検出されなかった。次に、ある1測線の隣り合う二点間(距離約5 km)ごとの相互相関関数を並べてみたところ、その検出されたピークの走時に明瞭な深さ(水深)依存性が確認できた。伝播速度は、水深約2000 mでは約1.2 km/sで、水深約4000 mでは約0.7 km/sであり、その間の水深では伝播速度は連続的に変化していた。また、この波に加え、ピークに深さ依存性がなく、伝播速度が約1.4-1.5 km/sのシグナルが微弱ながら見られた。

次に、海底地震計の相関解析の結果では、ハイドロフォンと同様に、隣り合う二点の相互相関関数に明瞭なピークが確認でき、また深さ依存性も確認できた。しかし、伝播速度が0.7-1.2 km/sの信号の振幅はハイドロフォンのものに比べそれほど大きくなかった。逆に伝播速度が約1.4-1.5 km/sのシグナルはハイドロフォンよりも顕著に現れた。現時点では海底地震計水平成分に明瞭な信号は識別できていない。

以上の波は、海底面で最も大きな振幅を持つ Stoneley 波、SOFAR channel で最も大きな振幅を持つ水中音波(T-phase)及び海洋と海底堆積層に大きな振幅を持つ Rayleigh 波の何れか、その重ね合わせ、あるいはカップリングで説明できる可能性があると考えられる。

キーワード: 干渉法, 海底観測

Keywords: Interferometry, Seafloor observation

## 地盤伝達関数のクロスターム -Normalized Energy Density の一般化- Cross terms of ground transfer function -generalization of Normalized Energy Density-

後藤 浩之<sup>1\*</sup>Hiroyuki Goto<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 京都大学防災研究所<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地盤伝達関数は、S波実体波が表層地盤に鉛直に入射すると近似できる場合に、表層に入射する地震波と地表で観測される地震波の振幅比として定義されるものである。与えられた地盤に対して地盤伝達関数を求める問題は古典的な問題であって、その方法は広く実務にも利用されている。近年、地盤伝達関数に関する興味深い特徴である Normalized Energy Density (NED: Goto et al., 2011) が示されたことで、地盤伝達関数は今新しい広がりを見せつつある。本研究は、NEDが対象とする地盤伝達関数のパワーのみならず、クロスタームに着目してその性質を議論するものである。

組成の異なる2つの水平成層地盤に対して、それぞれ正規化した地盤伝達関数を $a$ 、 $b$ で表現する。また、 $a$ 、 $b$ のクロスタームをある汎関数で定義する。NEDの性質から $a$ と $b$ が等しい場合にはある確定値を取るが、正規化によってその値が1となるようにしているものとする。

基盤と表層1層とからなる2層系の場合、 $a$ と $b$ はそれぞれ表層のS波速度と層厚に依存した周期をもつ周期関数となる。この周期の比は一般に有理数とはならないが、有理数である場合についてまずは考えることにする。このとき、複素平面の単位円周上にある複素数 $z = \exp(i h / \dots)$ と、周期の比を表す自然数 $n_a$ 、 $n_b$ とによって $a$ と $b$ を表現でき、汎関数は単純に単位円周上の複素積分とすることができる。単位円周内に存在する被積分関数の極について調べることで複素積分の厳密解を得る事ができる。主な特徴は、 $n_a + n_b$ が奇数の場合にはクロスタームの値が0となることである。 $n_a$ 、 $n_b$ が互いに素な自然数の場合に限っても一般性を失わないことから、クロスタームが有限値をとるためには $n_a$ 、 $n_b$ がそれぞれ奇数であり、かつその和が偶数となることが要請される。また、 $n_a$ および $n_b$ が非常に大きい場合にクロスターム値が0に収束することを厳密に証明できる。このことは、無理数の場合を $n_a$ および $n_b$ が非常に大きい場合に対応させる事で、全ての実数においてクロスタームの値が評価できることを表している。

さて $n_a$ 、 $n_b$ の和が偶数となる場合とは、地盤伝達関数のピーク周期が一致するという事に相当する。すなわち、ピーク周期がずれることによりクロスタームは0となり、その一致度に応じてクロスタームの絶対値の大きさが定まることを物理的には表していると理解すればよい。

3層系以上の多層系については、解析的手法によって厳密に解を求めて議論することが難しい。そこで、代表的なケースについて数値実験を行うことで、2層系と同様な性質を持つか検討した。結果として、2層系で結論付けた内容に矛盾する結果はなく、3層系以上についてもこの性質が成立するものと予想される。

### 参考文献

Goto et al., Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -Normalized Energy Density-, Wave Motion, 48, 602-612, 2011.

Goto, Fundamental property of cross terms of ground transfer function, Wave Motion, submitted.

キーワード: Normalized Energy Density, 地盤伝達関数, クロスターム, 複素積分

Keywords: Normalized Energy Density, Ground transfer function, Cross term, Complex integration



## 2 地点でのパワースペクトルの比を用いた空間自己相関法の改良に関する研究 Improvement of SPAC method by taking the ratio of power spectra between two sites

ZHANG XINRUI<sup>1\*</sup>, 盛川 仁<sup>1</sup>  
XINRUI ZHANG<sup>1\*</sup>, Hitoshi Morikawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

Since Aki proposed a new approach to estimate phase velocities of surface waves, spatial auto-correlation (SPAC) method has been a very useful tool to estimate ground structure because of its simple post-process. After that, many researchers both in and out of Japan continued to publish papers on practical adaption of Aki's theory to microtremor exploration. However, in all those improved methods, the layers under surface can only be assumed to be horizontal through the SPAC method while in fact, the layers are likely to be inclined slightly with certain angle. Hence, it is expected to obtain more detailed information of ground structure such as inclination by making better use of the records.

In recent years, the seismic interferometry theory has also been widely used to estimate ground structure. It is proved that in an elastic medium the Fourier transform of azimuthal average of the cross correlation of motion between two sites is proportional to the imaginary part of the exact Green's function between these sites. Hence, it becomes possible to calculate the ratio of imaginary part of different Green's function by taking the ratio of corresponding cross correlation to analyze ground

structure more particularly because Green's function indicates intrinsic property of the medium. Actually, seismic interferometry is conditionally consistent with the SPAC method which offers the base of introducing seismic interferometry to SPAC method.

SPAC method requires the multiplication calculation of Fourier transformation of records at two sites of center of an array and a one site on the circular array. By taking the ratio of power spectral between two different sites, it is hoped to obtain the ratio of imaginary part of Green's function according to seismic interferometry theory correspondingly and analyze the difference of ground structure through the ratio. More information such as the inclination of layers could be obtained.

Since this new concept has been proposed, some problems has been pointed out and the availability of the combination remains to be proved. Firstly, the ratio of power spectra is used to calculate the ratio of imaginary

part of Green's function which means the wavefield is supposed to consist of mainly body wave. However, the SPAC method requires the wavefield to be dominated by microtremors. It seems to be paradox but it is believed

that seismic interferometry theory itself satisfies wavefield of full wave. It is hoped that by taking the ratio of power spectra between two sites, the surface wave content will be extinguished and the body wave content remains.

Secondly, under the assumption of body wave being dominating, it is said that power spectra itself of each site could be used to analyze out the peak frequency of the ground structure (in simple case, the first layer) which tend to say that there is no need to take the ratio of them. Nevertheless, in wavefield dominated by microtremor and with the inclination of layers small enough, it is hard to extract useful information from each power spectra alone and to compare between them.

In this paper, the concept of SPAC method, interferometry and the combination of them are firstly proposed comprehensively. Then, in order to solve the two problems mentioned above, we use finite-difference method to

simulate some 2-layered simple layered medium under the wavefield dominated by microtremors. Next, SPAC method is applied to certain array of observation sites to examine if this wavefield is effective for SPAC method. Finally, the availability of seismic interferometry would be analyzed and the need to take the ratio of power spectra will be shown.

Keywords: Power spectra, seismic interferometry, SPAC method, Green's function, layered medium

富士川河口断層帯 糸静横断深部地殻反射法探査で観測された地震記録の地震波干渉法イメージング  
Seismic interferometry imaging of seismograms observed in the Fujikawa-kako fault zone - ISTL seismic reflection survey

川崎 悠介<sup>1\*</sup>, 渡辺 俊樹<sup>1</sup>, 伊藤 谷生<sup>2</sup>, 狩野 謙一<sup>3</sup>, 池田 安隆<sup>4</sup>, 津村 紀子<sup>5</sup>, 野崎 謙治<sup>5</sup>, 阿部 信太郎<sup>6</sup>, 武田 哲也<sup>7</sup>, 阿部 進<sup>8</sup>, 藤原 明<sup>8</sup>, 白石 和也<sup>8</sup>

Yusuke Kawasaki<sup>1\*</sup>, Toshiki Watanabe<sup>1</sup>, Tanio Ito<sup>2</sup>, Ken-ichi Kano<sup>3</sup>, Yasutaka Ikeda<sup>4</sup>, Noriko Tsumura<sup>5</sup>, Kenji Nozaki<sup>5</sup>, Shintaro Abe<sup>6</sup>, Tetsuya Takeda<sup>7</sup>, Susumu Abe<sup>8</sup>, Akira Fujiwara<sup>8</sup>, Kazuya Shiraiishi<sup>8</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>平成帝京大学, <sup>3</sup>静岡大学, <sup>4</sup>東京大学, <sup>5</sup>千葉大学, <sup>6</sup>(独)産業技術総合研究所, <sup>7</sup>(独)防災科学技術研究所, <sup>8</sup>(株)地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Teikyo Heisei University, <sup>3</sup>Shizuoka University, <sup>4</sup>The University of Tokyo, <sup>5</sup>Chiba University, <sup>6</sup>AIST, <sup>7</sup>NIED, <sup>8</sup>JGI, Inc.

地震波干渉法は、異なる受振点で観測された波形記録の相互相関により、一方を仮想的な震源、他方を受振器として観測した場合に対応する擬似的な反射波記録を得る手法である。この手法の特徴は、人工震源を必要とせず、地震記録から地下構造をイメージングすることができる点にある。

平成24年4月2日～15日に富士川河口断層帯 糸静横断深部地殻反射法探査が実施された。調査測線は静岡県北東部において、富士川河口断層帯とその西方にある身延断層系、糸魚川 - 静岡構造線を横断するように設定された。この探査の目的は、富士川下流域の堆積構造、および断層群とフィリピン海プレートの深部形状を明らかにすることであった。

本研究では、調査期間中にこの測線で観測された自然地震の記録に対して、地震波干渉法の自己相関解析および相互相関解析を適用した。得られた結果を反射法探査の解析結果と比較し、結果の妥当性について検討した。

期間中に観測された自然地震記録を検討した結果、24個の地震の記録を解析に使用した。広角反射法探査の制御震源の記録8個も合わせて使用した。自然地震についてはP波、制御震源の記録については初動から10s間を切り出して解析を行った。前処理として、バンドパスフィルター(4~16Hz)の適用、およびS/N比の低いトレースの除去を行った。また、表層や標高の影響を取り除くために反射法探査でよく用いられる静補正を適用した。

自然地震と制御震源を用いたそれぞれの干渉法解析の結果の特徴はよく一致した。また、反射法探査の解析結果とおおむね整合的であった。このことは、地震波干渉法が有効な地下構造探査手法となりうることを示唆している。しかし、プレート境界などの深部構造をイメージするには至らなかった。その理由として、観測期間が限られ、使用した地震数が少なかったことが挙げられる。

キーワード: 地震波干渉法, 反射法探査, 地下構造, 富士川河口断層帯, 糸魚川 - 静岡構造線

Keywords: seismic interferometry, seismic reflection survey, subsurface structure, Fujikawa-kako fault zone, Itoigawa-Shizuoka tectonic line

## 深発地震を用いた東海地域の地殻構造の地震波干渉法イメージング Seismic interferometry imaging of crustal structure using deep earthquakes in Tokai region

戸谷 真亜久<sup>1\*</sup>, 渡辺 俊樹<sup>1</sup>, 山岡 耕春<sup>1</sup>, 加藤 愛太郎<sup>2</sup>, 飯高 隆<sup>2</sup>, 生田 領野<sup>3</sup>, 津村 紀子<sup>4</sup>, 大久保 慎人<sup>5</sup>, 鈴木 貞臣<sup>5</sup>  
Mark Totani<sup>1\*</sup>, Toshiki Watanabe<sup>1</sup>, Koshun Yamaoka<sup>1</sup>, Aitaro Kato<sup>2</sup>, Takashi Iidaka<sup>2</sup>, Ryoya Ikuta<sup>3</sup>, Noriko Tsumura<sup>4</sup>, Makoto OKUBO<sup>5</sup>, Sadaomi Suzuki<sup>5</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>静岡大学, <sup>4</sup>千葉大学, <sup>5</sup>東濃地震科学研究所

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>The University of Tokyo, <sup>3</sup>Shizuoka University, <sup>4</sup>Chiba University, <sup>5</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science

地下構造をイメージングする手法として人工震源を用いる反射法地震探査が一般的に用いられている。地震波干渉法の理論を使えば、自然地震の地震波を震源として反射法と同様に地下構造をイメージングすることが可能である。自然地震のほうが人工震源よりエネルギーが大きいいため、より深部のイメージングが可能であると期待できる。

本研究は、地震波干渉法のうち自己相関解析 (Claerbout, 1968) を、2008年4月から8月に行われた東海アレイ観測 (Kato et al., 2010) で取得された自然地震記録に適用することで、東海地域の地殻及びプレートの構造をイメージングすることを目標としている。東海アレイ観測の測線近傍に存在する Hi-net の定常観測点 8 点の記録も加えた。

自己相関解析は一次元波動場を考えているため、波動が垂直入射であることを仮定している。そのため、東海地域の地下深部 (約 200 - 300 km) で発生した太平洋プレートスラブ内における深発地震記録を用いた。Kato et al. (2010) によれば、東海アレイ観測直下におけるプレート境界の最深部は約 40km である。フレネルゾーンの理論から、解析に使用する周波数では入射角約 10° まで垂直入射と見なすことができると見積もられる。そのため、全ての観測点において入射角が約 10° 以下となる範囲の深発地震を使用した。

入射角の条件を満たし、東海アレイ観測で地震波形を明瞭に確認することができた深発地震のイベントは 11 個存在した (Mj 2.2 - 3.6)。Hi-net の定常観測点において 2004 年から 2012 年の期間に解析可能な深発地震イベントは 40 個存在した (Mj 3.0 以上)。イベントの UD 成分を P 波として、NS,EW 成分を S 波として処理を施した。自己相関以前に適用した主な前処理は、地震計の周波数特性の補正、バンドパスフィルタ (パスバンド: 0.5 - 1.0 Hz)、入射波形によるデコンボリューションである。

解析の結果、Kato et al. (2010) におけるプレート境界と近い位置に北西傾斜を持つ連続的な反射波をイメージングすることができた。連続的な反射波は北西側では明瞭だが、南東側では不明瞭である。この傾向は南東側ほどノイズレベルが大きいことに起因していると考えられる。また、中央構造線と仏像構造線付近で反射波のイメージが変化する傾向も見られた。

今後、相互相関解析を適用して S/N 比の向上を図るとともに、同様の処理を遠地震記録に適用する予定である。

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関解析, 地殻構造, イメージング, 深発地震

Keywords: seismic interferometry, autocorrelation analysis, crustal structure, subsurface imaging, deep earthquake

## コーダ波形状の特徴から見るフィリピン海スラブの分裂の可能性

### A split in the subducting Philippine Sea slab beneath the Izu-western Nankai collision zone

SIMANCHAL PADHY<sup>1\*</sup>, 古村 孝志<sup>2</sup>, 前田 拓人<sup>1</sup>

PADHY SIMANCHAL<sup>1\*</sup>, Takashi Furumura<sup>2</sup>, Takuto Maeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>CIDIR, the University of Tokyo

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>CIDIR, the University of Tokyo

On July 5, 2011, an earthquake with a magnitude of 5.5 occurred off the Kii Peninsula in the northern Wakayama Prefecture in southwest Japan within the subducting Philippine Sea (PHS) plate at a depth of around 10 km. The earthquake caused strong shaking in the area near the epicenter. We analyzed the waveforms from this earthquake recorded at Hi-net and F-net stations in Japan. Such waveform analyses exhibit most of the earlier observations like dominance of low-frequency ( $f < 0.25\text{Hz}$ ) onset and following high-frequency ( $f > 2\text{ Hz}$ ) energy with long coda due to the stochastic waveguide effect of the subducting plate, proposed earlier by Furumura and Kennett (2005). Interestingly, we observed a clear difference in wave propagation pattern between east and west of the epicenter. For example, the waveforms for eastern part show S-coda are depleted with high frequency energy as compared to the western part. The duration of S-coda varies alternatively between high and low from east to west through center of the epicenter. The central stations show loss of low-frequency precursor to P-waves and presence of converted phases in P-coda. Such complexities in the observed waveforms are difficult to explain due to the radiation pattern of P- and S-waves and/or by anomalous propagation of seismic waves in existing plate model, indicating sudden lateral change in the wave guiding properties of the subducting slab, such as caused by the splitting of the slab as proposed by Ide et al. (2010).

To explain the observations, we employ two-dimensional finite-difference method (FDM) simulations of complete high-frequency P-SV wave propagation taking thinning of the PHS slab into account. In the plate model we included stochastic random heterogeneities described by exponential distribution function with a longer correlation length of 10 km in horizontal direction and much shorter correlation length of 0.5 km in depth and standard deviation from background P- and S-wave velocities of 5 % following the study of Furumura and Kennett (2007). We expect that the observed guided wave energy decouples from the waveguide where the slab is split. Low frequency energy leaks out of the slab in the low velocity mantle surrounding the slab. Taking into account the distribution of seismicity and focal mechanisms (Ide et al., 2010), and receiver function analyses (Shiomi et al., 2004) in the PHS plate, we expect a local velocity discontinuity or splitting of the plate at least to a depth of 30 km. Such a split in the PHS plate structure could also be manifested as non-volcanic tremor sources in the southwest Japan (Obara, 2002). The preliminary results, which suggest that the Philippine Sea slab is strongly split or partitioned beneath the Izu-western Nankai Trough in southwestern Japan, is the cause of the complicated waves from shallow inslab events. These effects need to be tested further with a 3-D FDM simulation employing high-performance computers with a variety of possible slab geometries. We finally discuss the implications of the new split plate model on the seismogenic potential of the area and the dynamics of the Nankai subduction in southwest Japan.

キーワード: Philippine Sea Plate, Scattering, Plate Tear, Wave Propagation

Keywords: Philippine Sea Plate, Scattering, Plate Tear, Wave Propagation



## 北朝鮮の核実験からのT波 T-waves from the nuclear test in North Korea

小菅 正裕<sup>1\*</sup>  
Masahiro Kosuga<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Sci. and Tech., Hirosaki Univ.

North Korea conducted 3rd nuclear test on 12 February 2013. P-waves from the explosion were observed widely in the Japanese Island. We examined seismic T-waves observed by the seismometers of Hi-net stations because T-waves have been effectively used to detect explosions in the context of the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT). We found that the T-waves were clearly observed in the Japan Sea side of northern Japan, while the waves are obscure along the coast from Yamagata to Fukuoka prefectures. This is probably due to the topography of ocean bottom. Along the paths of T-waves from the source to northern Japan the depth of ocean bottom is almost deeper than 3000 m. Thus there is few topographic high to prevent the propagation of sonic waves in the SOFAR channel. On the other hand, shallower and complex bathymetry causes incoherent arrival of T-wave energy along the paths to the southern Tohoku to Kyushu. We investigated the characteristics of T-waves by seismograms, envelopes, and spectrograms. At some stations in Hokkaido and northern Tohoku the amplitude of T-waves is much larger than P-wave. The peak frequency of T-waves reaches about 4 Hz. The most notable feature is the duration of T-waves; the duration is longer at stations in Hokkaido than at stations in northern Tohoku. Longer duration in Hokkaido is attributed to the contribution of reflected/scattered T-waves from the northern edge of the Yamato Bank situated at the middle part of the Japan Sea. Thus the T-waves from the nuclear test provide unique opportunity to investigate the lateral variation of the SOFAR channel and scattering characteristics of sonic waves in the Japan Sea.

Acknowledgement: We thank the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) for providing waveform data from Hi-net.

キーワード: T波, 核実験, 日本海, 地形, 散乱, SOFAR チャンネル

Keywords: T-wave, nuclear test, Japan Sea, topography, scattering, SOFAR channel

## Hi-net 地震計の計器特性変化と地震波干渉法解析

### Possibility of apparent velocity fluctuation caused by changes of the Hi-net instrument response

上野 友岳<sup>1\*</sup>, 齊藤 竜彦<sup>1</sup>, 汐見 勝彦<sup>1</sup>, 針生 義勝<sup>2</sup>

Tomotake Ueno<sup>1\*</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>, Yoshikatsu Haryu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科研, <sup>2</sup> 防災科研/振興会

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>NIED/ADEP

防災科学技術研究所が運用している高感度地震観測網 (Hi-net) は、日本全国を対象に展開されており、その観測データは、24 時間 365 日連続的に収録している。しかしながら、Hi-net 観測点の多くは施設完成後 10 年以上が経過した。その間、日本の各地で大きな地震が発生してきたため、経年劣化等によって地震計の特性が変化している可能性もある。近年、地動ノイズを利用した地震波干渉法でごく微少な構造変化を検出する解析が盛んになってきたが、このようなより精密な観測データを必要とする場合、計器特性の経年変化等、明瞭な異常波形として認識出来ていなくても解析に影響が生じる可能性が危惧される。そこで、我々は、全国の Hi-net 地震計の固有周波数および減衰定数の長期間にわたる変化の様子を調査した。

Hi-net では、毎日 9:00 に、地震計に内蔵されている検定用コイルを用いて地震計の振り子を強制的に振動させた応答波形を記録している。我々はこの応答波形から日々の地震計の固有周波数と減衰定数をグリッドサーチで求めた。なお、検出分解能は固有周波数でおおよそ  $\pm 0.05\text{Hz}$ 、減衰定数で  $\pm 0.05$  であった。過去 10 年近くの Hi-net 地震計の特性の時間変化を求めた結果、ある日を境に明瞭な特性変化を起こしている観測点があるが、ほとんどが検出分解能以下の変動であった。例えば釜石観測点では、2011 年東北地方太平洋沖地震の前後において、上下動地震計の固有周波数の変化は  $0.02\text{Hz}$  程度と検出分解能以下の変動にとどまった。また、この観測点は、数年の年月を経て徐々に特性が変化する傾向が見られた。

このような計器特性変化が地震波干渉法解析へ与える影響を調べるため、固有周波数を  $1.0 \pm 0.1\text{Hz}$ 、減衰定数を  $0.7 \pm 0.1$  の範囲で変更させた様々な波形を作成し、地震波干渉法解析を行った。この際、 $1 \sim 3\text{Hz}$  のバンドパスフィルターおよび 1bit 化処理を適用した後に自己相関関数 (ACF) を求めた。基準とする ACF を Hi-net 地震計特性 (固有周波数が  $1.0\text{Hz}$ 、減衰定数が  $0.7$ ) で作成し、見かけ上の速度構造変化を評価したところ、おおよそ速度変化は  $0.1\%$  未満に収まること分かった。このことから、少なくとも検出限界以下の地震計特性の変化は、地震波干渉法解析にほとんど影響しないことが分かった。このように、計器特性変化によって影響する見かけ上の速度構造変化は、実際に同様な解析で得られた  $0.3\%$  以上の速度低下 (例えば Ueno et al., 2012) に比べて十分に小さいと考えられる。

キーワード: Hi-net, 計器特性, 地震波干渉法, 見かけ速度変化

Keywords: Hi-net, instrument response, seismic interferometry, apparent velocity change

## 雑微動の自己相関解析にもとづく地球潮汐による地震波速度変化の検出の試み An attempt to detect seismic velocity change due to tidal strain based on autocorrelation analysis of ambient noise

高野 智也<sup>1\*</sup>, 西村太志<sup>1</sup>, 中原恒<sup>1</sup>, 田中佐千子<sup>2</sup>

TAKANO, Tomoya<sup>1\*</sup>, NISHIMURA, Takeshi<sup>1</sup>, NAKAHARA, Hisashi<sup>1</sup>, TANAKA, Sachiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>NIED

### 1. はじめに

雑微動の自己相関関数 (ACF) および相互相関関数 (CCF) の時間変化から, 地震や火山活動に伴う速度変化や年周変動的な速度変化が検出されている (e.g. Titi et al., 2012; Hobiger et al., 2012). このような地殻変動の時間変化の要因として, 地盤浅部での強震動, あるいは断層運動や火山性地殻変動に伴う応力変化などが原因として考えられている. 応力変化による効果は, 潮汐を利用した観測研究が行われている (e.g. Reasenberg & Aki, 1974; Yamamura et al., 2003). これらの先行研究では, 圧電素子やエアガンを震源として, 1kHz あるいは 30Hz といった高周波成分の地震波の解析から 0.1%~0.5% 程度の地震波速度変化が報告されている. ただし, この周波数帯は, 地震波干渉法で速度変化が報告されている帯域 (概ね数 Hz 以下) とは必ずしも一致しない.

そこで, 本研究では, 雑微動の ACF を用い, 地球潮汐による地震波速度変化を調べたので報告する.

### 2. 手法

東北地方の防災科学技術研究所 Hi-net 観測点 118 点の 2010 年の 1 年間の上下動速度連続記録 (100Hz サンプリング) を解析した. 自然地震の混入を避けるために, 各観測点で 10 分間ごとに RMS 振幅値を計算し, 1 年間の中央値の 5 倍を閾値とし, それを超える波形データは除去した. さらに二値化処理を行い, 1-2Hz, 2-4Hz の周波数帯域で ACF を計算した.

本研究では, 潮汐による 103 Pa 程度の応力変化に伴う極微小な速度変化の検出を試みるため, 比較的静穏な日のデータを選択する必要がある. そこで, まず 1 日分のデータを重合して求められた ACF と 1 年分を重合した ACF について, 2.56 秒幅の時間窓を 1.28 秒から 10 秒まで設定して相互相関を計算し, それぞれの時間窓でラグタイムを求めた. 観測点の周囲で一様に速度変化が生じると考え, ラグタイムと経過時間の関係から 1 日ごとの地震波速度変化率を求めた. そして, 求められた速度変化率が  $\pm 0.1\%$  以内の日のみを以下の解析に使用した. なお, ACF 同士の相互相関の計算では, 周波数領域で 800Hz にアップサンプリングすることで時間分解能を改善した.

上記によって求められた静穏日に対して, GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) を用いて各観測点における理論潮汐体積歪みを計算した. 求められた体積歪が  $5.0 \times 10^{-9}$  以上と  $-5.0 \times 10^{-9}$  以下のグループに分け, 前者の期間を膨張時, 後者の期間を収縮時として, それぞれの期間で ACF をすべて重合した. 膨張時の ACF を DACF, 収縮時を CACF とし, 両者の相関係数が 0.99 よりも高い観測点のみを抽出した. そして, 相互相関のラグタイムから, CACF に対する DACF の速度変化率を求めた.

### 3. 結果

CACF に対する DACF の速度変化率が安定して得られているものを選ぶため, 速度変化率の推定誤差が 0.01% 未満の結果のみをまとめた. その結果, 2-4Hz は 27 点の観測点で速度変化率は  $-0.06\% \sim 0.06\%$  に求められた. ピークは  $-0.01\%$  にある. 収縮時に速度が速くなっていれば負の符号となるので, 応力変化により地震波速度が変化している可能性がある. ただし, 平均値とその標準偏差を求めると  $-0.006 \pm 0.005\%$  となり, 必ずしも顕著に有意な変化とはいえない. また, 1-2Hz の速度変化率は 45 点の観測点で測定され,  $-0.14\% \sim 0.09\%$  に求められた. 平均値と標準偏差は  $0.0 \pm 0.004\%$  となり, 応力変化による地震波速度の顕著な変化は認められない.

### 4. まとめ

本研究では, 先行研究と異なり, 潮汐に対応した明瞭な地震波速度変化が観測されたとはいえない. この原因として, 本研究では 1-4Hz, 先行研究は 30Hz 以上の周波数を解析している可能性がある. 今後はより高周波数帯域においても解析を行う予定である.

謝辞 本研究では, 防災科学技術研究所の Hi-net の連続波形記録を使用させていただきました.

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関関数, 雑微動, 地球潮汐, 地震波速度変化

Keywords: seismic interferometry, autocorrelation function, ambient noise, earth tide, temporal seismic velocity change

## 地震波干渉法によるグリーン関数に基づく南関東地域のS波速度構造モデルの検証 Validation of S-wave velocity structure in the southern Kanto based on Green's functions with seismic interferometry

地元 孝輔<sup>1\*</sup>, 山中 浩明<sup>1</sup>

Kosuke Chimoto<sup>1\*</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東工大総理工

<sup>1</sup>Tokyo Tech

地震波干渉法では、異なる観測点で得られた長期微動の相互相関により、観測点間のグリーン関数を合成できるといわれている。地表観測による微動を用いれば、その観測点間のグリーン関数には表面波成分が卓越すると考えられる。表面波は地表近くでの速度構造の推定に役立てられるため、本研究では、地震波干渉法によって合成されるグリーン関数に基づき、南関東地域のS波速度構造モデルの妥当性の検証を行う。

著者らはこれまで、南関東地域において長期連続微動観測網を構築し、得られた微動記録の地震波干渉法への適用性について検討をすすめる、相互相関関数の位相情報に着目し、そのスローネスのトモグラフィ解析によってS波速度構造を推定した。しかし最近、相互相関関数の振幅情報を利用する試みが始められており(例えば、Tsai, 2011; Prieto et al., 2009)、地震波干渉法によってグリーン関数の位相のみならず振幅も合成できる可能性が示されている。微動による地震波干渉法への適用事例では、非定常過程の影響を軽減するため、微動の1ビット化(Campillo and Paul, 2003)や、閾値によるクリッピング(Shapiro and Campillo, 2004)などが通常行われるが、それらは振幅情報を大きく歪めるため、データ処理に関する検討も進められている(例えば、Prieto et al., 2011)。地元・山中(2012)は、Prieto et al. (2011)のデータ処理によって、振幅情報をそれほど歪めず保存できる可能性を示し、さらに、相互相関関数において適切なシグナルが得られているか検討できることを示している。

そこで本研究では、グリーン関数の振幅情報も利用するため、地元・山中(2012)のデータ処理を用い、グリーン関数の波形に着目する。前述のようにグリーン関数の表面波成分は地表付近の速度構造の推定に利用できるため、厚い堆積層を有する南関東地域において、グリーン関数とS波速度構造の関係を明らかにすることとする。南関東地域においては例えば、山中・山田(2006)でS波速度構造が推定されているため、ここでは、それによる理論グリーン関数と、地震波干渉法によって推定されるグリーン関数を比較して、その妥当性の検証を行う。理論グリーン関数は三次元差分法により周期4秒以上の成分を得た。相互相関関数には周期依存性があると考えられるため、比較は、各周期で狭帯域通過フィルタによるものを用いた。

まず、密な微動アレイ探査が実施されている関東平野南部においてはおおよそ両グリーン関数が類似していることから、適切なS波速度構造を推定できているものと考えられる。しかし、短周期成分では散乱などの影響による後続位相をうまく表現できない場合があり、より精緻なモデルが要求されると考えられる。次に、物理探査が容易ではないために、妥当性が明らかとなっていない、相模湾や東京湾、伊豆半島に着目した。その結果、東京湾や相模湾では両グリーン関数に違いが確認された。それらの地域の地下構造は複雑であると考えられており、そのため、相互相関関数と理論グリーン関数も複雑な波形を呈しており、直達波と考えられる成分が異なっているだけでなく、後続波も異なっており、モデルの改善が必要と考えられる。特に短周期ほどその傾向が顕著であった。

キーワード: 地震波干渉法, グリーン関数, S波速度構造, 南関東, 相互相関関数, 微動

Keywords: Seismic interferometry, Green's function, S-wave velocity structure, Southern Kanto, Cross correlation function, Microtremor