

## ランダム波の相互相関関数からのグリーン関数抽出とエネルギー保存則：任意形状の散乱体に関する一般化された光学定理の導出 Green's Function Retrieval from the CCF of Random Waves and Energy Conservation for an Obstacle of Arbitrary Shape

佐藤 春夫<sup>1\*</sup>  
Haruo Sato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, 理, 地物

<sup>1</sup>Tohoku university, Science, Geophysics

ランダム波が等分配状態にあるとき, その相互相関関数 (CCF) からグリーン関数を導出することが可能であり, 地震学においても雑微動解析による構造推定にしばしば用いられてきた. 散乱体が存在するような時, これらを取り囲むようにランダム波の震源が分布する場合 (Wapenaar et al. 2010, Snieder and Fleury 2010) や, 空間に一様に分布している場合 (Margerin and Sato 2011, Margerin and Sato 2011) に, 光学定理が成立することとグリーン関数の導出条件が等価であることが報告されている. 本研究では, 二次元一様速度構造の中に置かれた任意の形状の散乱体 (障害物) と 2 観測点, これらを取り囲む十分大きな円環上に分布するノイズ震源によって照射されている時, その CCF からグリーン関数を抽出するための条件を考察する.

グリーン関数抽出の基本式は 2 観測点におけるランダム波の CCF が遅延グリーン関数の反対称和とノイズ源の自己相関関数のたたみ込みで書かれることであり, これは 2 観測点におけるグリーン関数の積の円環状のノイズ震源の分布について積分がグリーン関数の虚部に一致することと等価である. 座標原点に置かれた任意形状の散乱体の場合, 散乱体の外部におけるグリーン関数の散乱波部分は, 一般に第一種ハンケル関数 (動径成分) と複素指数関数 (角度成分) の級数展開で表すことが出来る. エネルギー流束の円環状の積分を, このグリーン関数の級数展開形を用いて表すと, エネルギー保存則が展開係数に対する拘束式 (一般化された光学定理) として得られる. 一方, グリーン関数の積の角度成分の積分を実行し, 遠方でのハンケル関数の漸近形をもちいると, これはグリーン関数の虚部と残余の項の和で表される. エネルギー保存則から導かれた拘束式は, この残余項をゼロとすることと等価である. すなわち, エネルギー保存則が満たされる場合にはランダム波の CCF からグリーン関数を導くことが可能となり, 具体的なグリーン関数の関数表現は一般化された光学定理の拘束条件を満たさねばならない. この結果は, 三次元空間においても成立することが確かめられる. なお, 2 観測点が散乱体の遠方場にあるという条件がこれまでよく用いられてきたが, 上記証明ではこの条件を用いていない.

Sato, H. 2013. Green's Function Retrieval from the CCF of Random Waves and Energy Conservation for an Obstacle of Arbitrary Shape: Noise Source Distribution on a Large Surrounding Shell, Geophys. J. Int. in press.

キーワード: 地震波動, 散乱, 構造解析, グリーン関数, 波動理論

Keywords: Seismic waves, Scattering, structure study, Green function, wave theory

## コーダ波の相互相関関数の特徴：震源と観測点ペア間の角度依存性 Characteristics of the CCF of coda waves: dependence on the angle between the station pair and the source

江本 賢太郎<sup>1\*</sup>, カンピーロ ミシェル<sup>1</sup>, ブランギエ フローラン<sup>1</sup>, ブリアン ザビエ<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>2</sup>  
Kentaro Emoto<sup>1\*</sup>, CAMPILLO, Michel<sup>1</sup>, BRENGUIER, Florent<sup>1</sup>, BRIAND, Xavier<sup>1</sup>, Tetsuya Takeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 地球科学研究所, グルノーブル大学, フランス, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>ISTerre, University of Grenoble, France, <sup>2</sup>NIED

Coda of earthquakes consists of scattered waves and the late coda can be regarded as a diffuse field. The diffuse wave field is necessary for the seismic interferometry. Campillo & Paul (2003) showed that we can extract the Green's function from field-to-field correlation of coda waves. Different from the noise field, scattered waves around the source region are included in the coda. We analyze the cross-correlation functions (CCF) of coda of earthquakes occurred around the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake and examine the fluctuation of them.

We use the earthquakes with magnitude larger than 5 occurred from 2008 to 2011 and about 74 Hi-net stations located in the east coast of northeastern Japan. We apply the band-pass filter (0.1 - 0.2Hz) and divide the coda window into 300s-long segments from 200s after the origin time until 700s with an interval of overlap of 100s. By stacking the CCFs, we detect the Rayleigh wave with the propagation velocity of 3.2km/s. We examine the dependence on the source location by using the angle between the source and the station pair. The CCFs with angles less than 45 degrees are asymmetry. On the other hand, the CCFs with the angles larger than 45 degrees are more symmetric. This feature was also reported in Paul et al. (2005). This observation indicates that the energy coming from the source is still dominant in the late coda.

We calculate the fractional travel-time change,  $dt/t$ , by applying the stretching method to the coda of the CCF and analyze the fluctuation of it. The  $dt/t$  shows the strong fluctuation and the RMS of it is about a few percent. This fluctuation is not systematic. The fluctuation of the  $dt/t$  measurement based on the stretching method due to the random fluctuation of the waveform is theoretically estimated by Weaver et al (2011). When we apply their theory to our measurement, the predicted fluctuation and the observed fluctuation are the same order of magnitude. This result indicate that the observed fluctuation of  $dt/t$  is not reflected the uniform change of the medium. Because the diffuse field of coda is not isotropic, we can't obtain the stable CCF from the coda. We also calculate the CCF of noise field in the same region and calculate the  $dt/t$  due to the 2011 Tohoku-oki earthquake by applying the stretching method. We observe the co-seismic change of  $dt/t$ . The  $dt/t$  increases by about 0.2 % after the earthquake. This is one order of magnitude smaller than the fluctuation of  $dt/t$  derived from the CCF of coda. Therefore we can't detect the change due to the earthquake from the CCF of coda. In order to improve the stability of the CCF of coda, we apply the curvelet denoising filter (Stehly et al 2011). By the denoising, the correlation coefficient between each CCF and the stretched reference CCF increases and the fluctuation of the  $dt/t$  decreases. However, the fluctuation is still too large to detect the co-seismic change.

Finally, we mention about the signal to noise ratio (SNR) of the CCF. The SNR of the CCF of noise is about 3 times larger than that of the CCF of coda. The ratio of the square root of the length of the time window of the noise used to calculate the one-day CCF to that of the coda is about 14. Therefore, in terms of the length of the time window, the CCF of the coda is efficient to extract the Green's function compared with the noise.

キーワード: コーダ波, 地震波干渉法

Keywords: Coda wave, Seismic interferometry

## 地震波干渉法により減衰構造を求めるための理論的背景 Theoretical background for estimating attenuation structures with seismic interferometry

中原 恒<sup>1\*</sup>  
Hisashi Nakahara<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 中原 恒  
<sup>1</sup> Hisashi Nakahara

### はじめに

近年、地震波干渉法を用いたパッシブな速度構造の推定が世界各地で行われるようになってきている。地震波干渉法により計算した相互相関関数のフェイズの時刻の読み取りは、ノイズ源の分布に対して比較的口バストであることが知られている(たとえば Snieder, 2004)。一方で、相互相関関数の振幅を用いて減衰構造を推定する手法も提案されているが(例えば, Prieto et al., 2009)が、その安定性に関してはまだ理論的によくわかっておらず、理論的・数値的な研究が進められているのが現状である(例えば, Tsai, 2011)。本研究では、Prieto et al. (2009)が減衰を推定するために、物理的直観に基づき、Aki (1957)の SPAC 法の式を減衰性媒質に拡張した予測式について、その理論的な背景を明らかにすることを目的とする。

### 定式化

本研究では、まず減衰性無限不均質媒質に対して、地震波干渉法の証明を行った。証明の流れは Snieder (2007)と同じであるが、彼が用いている減衰性波動方程式にさらに場に比例する項が付いた別の形の減衰性波動方程式を用いている点異なる。この減衰性波動方程式では、Q 値が周波数に比例する形となり、波形は減衰がない場合と同じで振幅のみが減少し、解がとても単純な性質をもつ。速度と減衰が空間的に不均質な場合でも、それを補償するようなノイズ源が体積的に分布する場合には、地震波干渉法が成立することが示された。Snieder (2007)と異なる形の減衰性波動方程式に対しても、地震波干渉法が成立することを具体的に証明したのが本研究の成果である。

次に、この結果を用いて、地震波干渉法と SPAC 法との理論的関係式の導出を試みた。SPAC 法で重要な規格化されたクロススペクトルでは、分子に2観測点での波動場のクロススペクトル、分母にそれぞれの観測点での波動場のパワースペクトルが現れる。地震波干渉法に基づく、クロススペクトルは2点間のグリーン関数の虚部に比例し、パワースペクトルは震源と観測点と同じ場合のグリーン関数の虚部に比例することになる。すなわち、地震波干渉法と SPAC 法との間には理論的関係があり、それを用いると、規格化されたクロススペクトルがグリーン関数を用いて記述できる。

さらに以下では、均質な無限減衰媒質を考えることにする。その場合、減衰性波動方程式に対するグリーン関数は、表面波の場合、周波数領域において、0次の第1種ハンケル関数で表現できる(例えば、今村, 1978)。その際、減衰の影響で波数が複素数になっていることに注意する。この厳密式に対して、(1)減衰が弱いこと、(2)観測点間距離が波長に比べて十分長いこと、の2つの条件を付加すると、Prieto et al. (2009)の予測式を導出できることが示された(Nakahara, 2012)。つまり、Prieto et al. (2009)の予測式は厳密解ではないが、無限均質媒質において、上の2つの条件を満たす場合の近似式であることが明らかになった。

### まとめ

本研究では、減衰性無限媒質に地震波干渉法が成立することを証明し、地震波干渉法と SPAC 法との理論的関係式を示した。その結果を用いて、Prieto et al. (2009)の式が、無限均質媒質における近似式であることを理解した。最近では、Prieto et al. (2009)の式が減衰トモグラフィーに使用されているが、この式は比較的均質な媒質に適用すべきである。不均質な領域でトモグラフィーを行うことの妥当性はいまだ明らかではなく、今後さらなる理論的な検討が必要である。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構の国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)による支援を受けました。

キーワード: 地震波干渉法, SPAC 法, 減衰  
Keywords: seismic interferometry, SPAC method, attenuation

## 地殻構造探査のためのパッシブサイスミックデータに対する地震波干渉法的リバースタイムマイグレーション

### Seismic interferometric reverse time migration to passive seismic data for subsurface structural survey

白石 和也<sup>1\*</sup>

Kazuya Shiraiishi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>(株)地球科学総合研究所

<sup>1</sup>JGI, Inc.

#### (1) 研究の目的

本講演では、自然地震観測記録や環境雑震動などのパッシブサイスミックデータを直接利用して、リバースタイムマイグレーションにより地殻構造を可視化する方法を示す。地震波干渉法は主にデータ領域において利用され、観測に用いた受振点間の仮想震源記録を合成した後に、波形解析やイメージングに用いられるのが一般的である。しかしここでは、地震波干渉法の概念をイメージング過程に導入することにより、パッシブデータを直接利用して実体波による地下の反射面や散乱体のイメージングを行うことを目的とする。工学的社会背景として主要な地下利用分野においてモニタリング調査と称する受動的なデータ収集を行う機会が増える中、パッシブサイスミックデータを有効活用する解析技術の開発は重要である。

#### (2) 背景となる技術体系

本手法の基礎となる主な技術は「リバースタイムマイグレーション (Reverse Time Migration, RTM)」と「地震波干渉法 (Seismic Interferometry, SI)」である。RTMは物理探査分野において近年の主要なイメージング技術の一つである。RTMは計算コストがかかるものの波動場の再現度が高いため、従来法では対処困難であった複雑な地下構造に対して効果を発揮している。反射法地震探査におけるRTMの原理は、発震点から震源波形を順伝播させた波動場と受振点から受振波形記録を逆伝播させた波動場について、同一時刻の相関を観測時間について積分すること(イメージングコンディション)により地下の反射面や散乱体を結像させることである。RTMのイメージング過程自体は、波動場モデリングツールがあれば比較的容易に実装可能である。

一方のSIは、制御震源記録のリデータミングやパッシブサイスミックデータからの信号抽出などを目的にその活用分野を広げつつある。データ領域でのSIの基本は、地中の震源で励起された地震波が地表の受振点Aへ到達した後、下方へ再伝播し地下の境界面で上方へと反射して別の受振点Bで観測される場合、両者の観測波形記録を相関処理することで点Aを震源として点Bへ伝播する地震波形記録を合成することである。

#### (3) SI-RTMの実装と数値シミュレーションによる検証

ここで提案するイメージング手法 (Seismic interferometric reverse time migration, SI-RTM) は、RTMによるイメージング過程にSIの概念を導入し、イメージ領域での干渉処理により地下構造を可視化する。SI-RTMでは、通常のRTMにおける順伝播させる震源波形と逆伝播させる観測記録の代わりに、信号を含む任意の時間窓について仮想発震点となる受振点から観測波形記録を順伝播させ受振点側からは観測波形記録を逆伝播させる。すると、データ領域で干渉処理により抽出されるフェーズを考えた場合、一度地表面から下方に伝播した地震波(順伝播波動場)とその波が境界面で反射して別の受振点で観測された波(逆伝播波動場)が反射点でイメージングコンディションを満足し、地下の反射面や散乱体が結像することになる。これは、速度モデルに基づく波動場外挿と地震波干渉処理をイメージ領域で同時に行っていることに相当する。

本研究では、2Dシミュレーションデータを用いてSI-RTMの検証を行った。弾性波動場の有限差分法モデリングにより、(a)近地自然地震観測記録と(b)実体波を主とする環境雑震動を想定した二種類のパッシブサイスミックデータを合成し、テストデータとした。音響波動場のもとで実装したSI-RTMを、それぞれのデータに適用してモデル構造の再現テストを行った。いずれの場合もモデルの再現性は高く、SI-RTMの妥当性を確認できた。

#### (4) SI-RTMの特徴と課題

本手法に期待される長所は、パッシブサイスミックデータの直接利用に加えて、震源に関わる諸情報が厳密にはわからない場合でも利用できる点である。また、震源や観測点の分布が不均質かつ疎らなときに、データ領域における干渉処理結果ではフェーズの特定が困難で解析の難しいことが多いが、そのような場合にデータ領域(仮想震源記録)とイメージ領域(SI-RTM断面)の双方からのアプローチで解析精度の向上を期待できる。短所は、データ量や対象エリアのサイズによっては計算コストが莫大なこと、事前に速度モデルが必要な点である。後者については、従来法と本手法を組み合わせ速度モデルを構築していく枠組みを今後設計する。その他の技術的課題として、理論的な裏付けや成分記録への対応を行うとともに、実際のパッシブサイスミックデータの解析をする中で現実的な問題は順次解決される。

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS24-04

会場:303

時間:5月20日 09:45-10:00

キーワード: リバースタイムマイグレーション, 地震波干渉法, パッシブサイスミック, 反射法地震探査, 数値シミュレーション

Keywords: reverse time migration, seismic interferometry, passive seismic, reflection seismic survey, numerical simulation

## 地震波干渉法を用いた東北沖地震に伴う時間変化の解析

### Time-lapse changes in velocity and anisotropy after the 2011 Tohoku earthquake estimated by seismic interferometry

仲田 典弘<sup>1\*</sup>, Roel Snieder<sup>1</sup>

Nori Nakata<sup>1\*</sup>, Roel Snieder<sup>1</sup>

<sup>1</sup>コロラド・スクール・オブ・マインズ

<sup>1</sup>Colorado School of Mines

東北沖地震から二年間、この地震に起因した地下の速度や異方性の時間変化が推定される中で、地震波干渉法は速度や異方性のモニタリングに有用な手法であると考えられている。我々はこの手法を KiK-net で観測された地震データに適用した。KiK-net は防災科学技術研究所が設置している強震度地震計ネットワークで、全国に 700 ほどある観測点はそれぞれ地表と地中に 1 つずつ受振器がある。地震波干渉法により、地中の受振器を仮想震源とする震源記録を合成することが出来、その仮想震源記録を用いて東北沖地震前後の浅層部の S 波速度をモニタリングした。東北沖地震後二ヶ月間の平均速度は地震前と比べて北東本州全域において約 5% 低下しており、これは他の大地震によって引き起こされた速度変化と比較して広い範囲で速度低下が起こった事を表している。この速度低下は時間とともに一部回復しているが、完全ではない。また、地震波干渉法を用いる事で異方性媒質による S 波分離の強度も推定する事が出来、S 波分離強度の変化についても東北地震前後で検討を行った。この結果、北東本州で、約 10% の S 波分離強度の増加が見られた。

キーワード: 地震波干渉法, 東北沖地震, 時間変化, S 波速度, S 波分離, KiK-net

Keywords: seismic interferometry, Tohoku earthquake, time lapse, shear-wave velocity, shear-wave splitting, KiK-net

## 海洋リソスフェアを伝わる高周波数 Po/So 波の成因と特性

## Computer simulation of high-frequency Po/So propagation in the oceanic lithosphere

古村 孝志<sup>1\*</sup>, ケネット・ブライアン<sup>2</sup>Takashi Furumura<sup>1\*</sup>, BLN Kennett<sup>2</sup><sup>1</sup> 東大情報学環 / 東大地震研, <sup>2</sup> オーストラリア国立大 地球科学研究所<sup>1</sup> CIDIR/ERI Univ. Tokyo, <sup>2</sup> RSES ANU

本研究では、海洋性リソスフェアを遠地まで良く伝播する実体 P 波と S 波 (Po/So 波) について、その生成と伝播のメカニズムを詳しく調べることを目的に、太平洋海域での海底地震観測データの解析と、不均質なリソスフェアモデルを用いた高周波数地震動の伝播の差分法シミュレーションによる検討を行った。

海域観測点での地震観測において、しばしば高周波数成分 (10~20Hz 以上) に富む、大震幅かつ長いコーダを伴う P 波と S 波が観測される (Po/So 波; Walker, 1982)。Po/So 波は海洋プレート内で発生した浅発地震のほか、スラブ内で発生した深発地震でも見られ、1000~3000km 以上にわたって遠地まで良く伝播する。

これは、海洋リソスフェア (海洋マントル) が低減衰 (High-Q) であるとともに、その内部に短波長で横長の不均質構造 (ラミナ構造) が存在するために、高周波数地震動が強い前方散乱を繰り返し起こし、プレート内部にトラップされるように遠地まで伝えられるためである。加えて、海水層内での P 波の多重反射や、海底面での P-to-S 変換も Po 波や So 波の長いコーダの生成に寄与するものと考えられる。

こうした、High-Q かつ不均質な海洋リソスフェアが Po/So 波の「導波管」として働く効果を確認するために、2 次元差分法を用いて高周波数地震動の伝播シミュレーションを行った。計算領域 1000km × 150km を 0.2km の細かな格子間隔で離散化し、周波数 8Hz までの高周波数地震動の伝播を評価した。海洋リソスフェア・アセノスフェアモデルは、海域の地震波伝播の先行研究として知られる Sereno(1985) のモデルを用いた。このモデルでは、海水層が 4km、堆積層 ( $V_s=1.15\text{km/s}$ ) が 0.5km、海洋性地殻が 5.5km、海洋マントルが 95km の厚さに設定されている。海洋マントルの非弾性減衰 ( $Q_s=1000; Q_p=Q_s*2$ ) は、海洋地殻 ( $Q_s=450$ ) やマントル下のアセノスフェア ( $Q_s=225$ ) より 2~4 倍以上大きく設定されている。

このモデルに対して、短波長不均質構造を、P 波と S 波のランダム速度揺らぎの形で与え、分布関数としては地震波散乱研究で一般的に用いられる von Karman 型の分布特性を与えた。海洋地殻内には、ダイクをイメージした鉛直方向の相関距離 ( $A_z$ ) が大きな不均質モデル (相関距離  $A_x/A_z=0.5/2.5\text{km}$ , 揺らぎの標準偏差  $e=2\%$ ) を、地殻内 (5/0.25km, 2%) とマントル内 (10/0.5km, 2%) にはラミナ構造をイメージした不均質モデル、アセノスフェアには不均質スケールのやや大きなモデル (5/1km, 2%) を与えた。差分法計算は、海洋研究開発機構の地球シミュレータの 16 ノードを用いた並列計算により行った。

まず、海域の地下構造を構成する各要素 (海水、堆積層、地殻・マントル内の不均質性) の効果を調べた。これらを省いたモデルでは、計算から求められた地震波形は P 波と S 波の直達波形と地表・モホ面での反射・変換波から構成されるパルス条の単純な波形である。これに、海水層と堆積層を加えると、海水層内での P 波の多重反射や堆積層内での P 波と S 波の反射・変換が発生し、後続相が生成される。そして、海洋地殻とマントルに短波長不均質構造を導入すると、震幅が大きく長いコーダを持つ Po/So 相が突然現れる。Po/So 相は High-Q かつ不均質の強い海洋アセノスフェアが厚いほど震幅が大きく長いコーダを持ち、また震幅は震源メカニズムに寄らないが、深い地震ほど大きくなることも確認できた。

海洋アセノスフェア内に不均質構造がない場合には、Po/So 波は気が減衰とともに、海洋地殻の Low-Q 値により伝播距離とともに急激に減衰する。ところが、マントル内の短波長不均質構造により高周波数地震動が強い前方散乱を起こすことにより、Po/So の距離減衰は小さくなり、見かけの Q 値はマントル内の High-Q 値相当に大きくなる。

こうした海洋アセノスフェアの高周波 Po/So 波の導波管効果は、各地のプレート毎に大きく異なり (Kennett, Zhao and Furumura, 2009) 特に、本研究で対象とした太平洋プレートは年代が古く (130Ma) 厚い (80km) ために、Po/So の伝播効率が高い。年代が若く厚さの薄いフィリピン海プレートを伝わる Po/So 波 (たとえば, Shito et al., 2012) との比較や、伝播経路に沿いのリソスフェア構造の急変化による So の消失も興味深い。

## Elastic waveform modeling in frequency domain with an efficient MATLAB code

Ehsan Jamali Hondori<sup>1\*</sup>, Hitoshi Mikada<sup>1</sup>, Tada-nori Goto<sup>1</sup>, Junichi Takekawa<sup>1</sup>  
Ehsan Jamali Hondori<sup>1\*</sup>, Hitoshi Mikada<sup>1</sup>, Tada-nori Goto<sup>1</sup>, Junichi Takekawa<sup>1</sup>

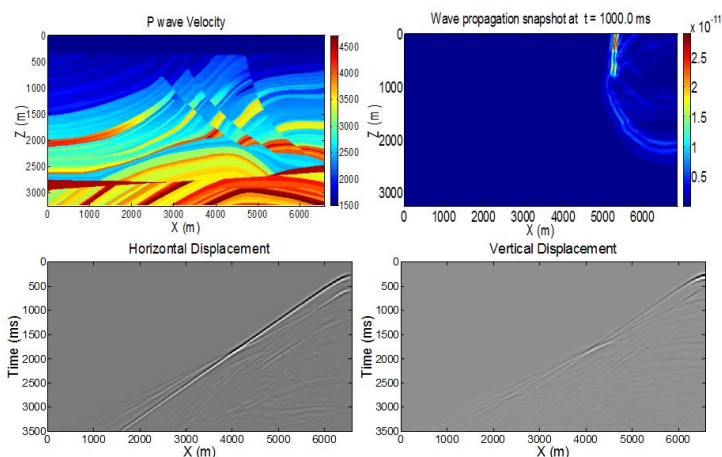
<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University

Seismic waveform modeling is a key tool to estimate subsurface characteristics, not only for hydrocarbon explorations but also for proper managements of seismic hazards and civil engineering infrastructures. Modeling in frequency domain found to be effective for its numerous advantages compared to that in time domain. Once triangular factors of impedance matrix have been calculated, multiple sources can be processed with the minimum computational costs. Monochromatic and band limited modeling at desired frequencies are implemented in a straightforward manner and the attenuation behavior of elastic media can directly be dealt with considering complex valued elastic parameters. However, discretizing the computational domain requires more grid points to achieve acceptable accuracy and a program with robust algorithm is needed to minimize the modeling time and cost. We used 25-point finite difference stencils to discretize the elastic wave equation in frequency domain to develop an effective MATLAB package for elastic waveform modeling. By using array-processing abilities of MATLAB, we efficiently computed the large impedance matrix for realistic model sizes. In order to solve the system of equations impedance matrix is factorized to lower and upper triangular matrixes, then forward and backward substitution results in horizontal and vertical displacements. Since the impedance matrix has a band structure and very sparse pattern, using efficient ordering schemes to reduce fill-in during factorization is necessary. We used METIS library together with SuiteSparse library for sparse LU factorization. METIS uses a multilevel nested dissection algorithm to calculate a fill reducing ordering which brings a superior performance to the program. SuiteSparse includes several factorization and solution modules, such as UMFPACK, SparseQR, and CHOLMOD, for sparse matrixes and linear system of equations. We used UMFPACK and SparseQR modules in our modeling code for problems with different sizes. Once the factors have been calculated, several seismic sources could be modeled by solving for multiple right hand sides. Reflections from truncated boundaries appear in the solution of the wave equation which must be suppressed by boundary conditions. In order to truncate the computational area we applied Perfectly Matched Layers (PML) on the boundaries. Complex valued velocities based on Kolsky-Futterman model were used to consider attenuation effects in the seismic waveforms. Marmousi2 example (Figure 1) confirmed the efficiency and accuracy of the MATLAB code. We have cropped the original model to focus on the more complex area in the center of the geological model; the final model in the example is 6600 m long and 3200 m deep. A snapshot of wave propagation and shot gathers of horizontal and vertical components of the displacement recorded at the surface are shown in the Figure 1. As is obvious in the horizontal displacement component, strong Rayleigh waves appear in the seismograms and travel near surface with low velocity. Based on the results of Marmousi2 example and several other models which have already tested the program, the developed MATLAB package can be used for fast and accurate elastic waveform modeling.

キーワード: seismic, waveform modeling, frequency domain, finite difference, perfectly matched layers

Keywords: seismic, waveform modeling, frequency domain, finite difference, perfectly matched layers





## 東北地方太平洋沖で発生した地震からの反射 sP 波の振幅分布 Amplitude distribution of sP reflected phase from offshore earthquakes in the Pacific side of Tohoku district

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.

We observed a prominent phase on vertical seismograms of interplate and intraplate earthquakes offshore Miyagi prefecture with depth ranges from 30 to 60 km. The phase that appears between P- and S-waves is observed widely at stations in the Japan Sea side. Here we examine the waveform and travel times of this phase using Hi-net data and estimate its origin, and discuss potential usage of the phase.

A polarization analysis indicates that the phase has a strike toward the epicenter, nearly vertical dip angle, and large rectilinearity. This indicates that the phase is P-wave coming from the direction of the source. The travel time of the X-phase is proportional to epicentral distance with an apparent velocity of about 7 km/s. This suggests that the reflection/conversion occurs at relatively shallow part. There is no significant azimuthal variation in arrival times of the X-phase, which implies that the plane of reflection/conversion is nearly horizontal. We estimate the position of conversion/reflection by using ordinary hypocenter location method assuming that the phase is P-wave from the conversion/reflection point. The location is near the surface of the coastal area of Miyagi prefecture. The above observational facts of large amplitude, polarization characteristics, apparent velocity, azimuthal variation of arrival times, and the location of conversion/reflection point, are all consistent with an interpretation that the phase is sP reflected phase from the surface. This phase has already found by previous studies and has been used as a depth phase to improve the depth accuracy in hypocenter location and delineate a seismicity pattern along the plate boundary.

Next we investigated amplitude distribution of sP phase. We measured amplitude on RMS envelope as the deviation of smoothly varying envelope. In many cases the amplitude is largest at stations in Akita and Yamagata prefectures, while the amplitude is smaller at stations in the northern and southern part of Tohoku district, and at stations in the Pacific side. The focal mechanisms of these events are reverse faulting with N-S strike. In the case of reverse faulting earthquake with E-W strike, the area of large amplitude shifts to the northern part of Tohoku district. This indicates that the amplitude distribution of sP phase depends on focal mechanisms. Thus the amplitude of sP phase has a potential usage to determine focal mechanisms of offshore earthquakes, which is difficult from the P-wave polarization only.

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: sP 波, 反射, 振幅, 震源メカニズム

Keywords: sP wave, reflection, amplitude, focal mechanisms

## 塩水粘性が超音波伝播減衰に及ぼす影響 Effect of brine viscosity on ultrasonic wave attenuation

松島 潤<sup>1\*</sup>  
Jun Matsushima<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科  
<sup>1</sup>The University of Tokyo

Seismic attenuation is a highly variable physical parameter that depends on confining pressure, porosity, degree of fluid saturation, and variations in fluid properties such as elastic modulus, viscosity, and polarity. In our previous paper, we used partially frozen brine as a solid-liquid coexistence system to investigate seismic attenuation phenomena. Ultrasonic wave transmission measurements on this ice-brine coexisting system were conducted to examine the influence of unfrozen brine in the pore microstructure of ice on ultrasonic waves. From liquid phase to around the freezing point, the presence of a partially frozen brine increases both velocity and attenuation. During the growth of ice from brine, salt cannot incorporate into the ice crystals. As the ice freezes, the salt is rejected and concentrates in the brine; thus, as the salinity increases in the brine filled pores, the freezing point of the remaining fluid is successively lowered and furthermore the viscosity of remaining high salinity unfrozen brines becomes larger and larger. Seismic attenuation related to viscous effect is caused by relative fluid-solid motion is one of the most important attenuation mechanisms. This paper is concerned with the effect of such viscosity on attenuation at ultrasonic frequencies. We observed the variations of a transmitted wave, changing its salinity and quantitatively estimated attenuation for unconsolidated porous material saturated with brine by considering different distances between the source and receiver transducers. The waveform analyses for P-waves indicate that the attenuation increases with increasing salinity (i.e. increasing viscosity). In order to elucidate the physical mechanism responsible for ultrasonic wave attenuation measured at different salinity (i.e. different viscosity), we employ a poroelastic model based on the Biot theory to describe the propagation of ultrasonic waves through partially frozen brines.

キーワード: 地震波減衰, 粘性, 孔隙弾性体  
Keywords: Seismic attenuation, viscosity, poroelastic

## 関東地方で発生するやや深発地震に見られる高周波数地震動の特徴と不均質構造 Characteristics of high-frequency seismic waves during relatively deep event at Kanto region

武村 俊介<sup>1\*</sup>, 吉本 和生<sup>1</sup>

Shunsuke Takemura<sup>1\*</sup>, Kazuo Yoshimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学

<sup>1</sup>Yokohama City University

### 観測波形に見られる特徴

2005年10月16日茨城県南部の深さ53kmで発生した地震では、同じ関東平野内であっても観測された地震動の特徴が大きく異なる。特に、千葉県中部から南部にかけて観測された2-4Hzの速度記録を見てみると、同じ関東平野内の他の地域に比べてS波の立ち上がりが緩やかで最大振幅の到来時刻も遅くなっている。このような大きな最大振幅の遅れ(ピーク遅延)は、茨城県南部の深さ50~60kmで発生した地震時に千葉県中部から南部において共通して見られる。1Hzを超える高周波数地震動は伝播経路中の短波長の速度のゆらぎによって大きく崩れ、ピーク遅延や継続時間の増大が見られることが知られている(例えば、Sato, 1989)。関東平野下の短波長の速度ゆらぎの空間分布が、局所的なピーク遅延の増大に大きく影響していることが考えられる(例えば、Takahashi et al., 2007)。

本研究では、千葉県中部から南部にかけて見られる大きなピーク遅延の原因を明らかにし、観測記録より得られた特徴を説明できる速度構造モデルを提案する。

### 2次元差分法による地震動シミュレーション

2次元差分法による地震動シミュレーションによって、高周波数地震動の伝播と不均質構造の関係を調べた。245km×123kmの計算領域を0.015kmで離散化し、4次精度のスタッガード格子の差分法を用いて地震動シミュレーションを行った。

Koketsu et al.(2008)の層構造モデルを用いて2次元の速度構造モデルを構築した。地震波散乱の影響を取り込むために各層に短波長の速度ゆらぎを導入した。速度ゆらぎは指数関数型自己相関関数によって特徴づけられ、上部地殻では相関距離 $a=3$ km、ゆらぎの強さ $e=0.05$ 、下部地殻では $a=3$ km、 $e=0.07$ 、マントルでは $a=10$ km、 $e=0.02$ とした(e.g., Takemura and Furumura, 2013)。海洋プレート内については水平方向の相関距離 $a_H=10$ km、鉛直方向の相関距離 $a_Z=0.5$ km、ゆらぎの強さ $e=0.02$ とした(Furumura and Kennett, 2005)。また、堆積層内については $a=1$ km、 $e=0.07$ を仮定した。これをモデルAとする。

Matsubara et al.(2004)の走時トモグラフィ解析により、千葉県北西部の地下30km程度に局所的に $V_s$ の小さな領域が存在することが報告されている。この領域は震源から千葉県中南部を結ぶ経路上に位置していることから、観測で見られた大きなピーク遅延の原因であると考え、千葉県北西部地下30km付近に低速度領域を加えたものをモデルBとする。また、低速度層内に $a=0.5$ km、 $e=0.10$ のガウス型の自己相関関数で特徴づけられる速度ゆらぎを追加し、2-4Hzの周波数帯における短波長の速度ゆらぎを強化したモデルCとした。それぞれのモデルについて2-4Hzの最大振幅の到来時刻やエンベロープ形状について観測記録と比較を行い、低速度領域や地震波散乱の影響を調べた。

### シミュレーション結果

モデルAでは盆地内の地震波散乱やエネルギーのトラップにより、継続時間が長い計算波形となったが、観測で得られたような大きなピーク遅延は見られなかった。千葉県北西部地下30kmに低速度層を仮定したモデルBでは、Aに比べると大きなピークの遅延が見られるが観測記録の定量再現には至らなかった。低速度層内に強い速度ゆらぎを追加したモデルCでは、低速度層内での強い地震波散乱により観測で得られたような千葉県中南部での大きなピーク遅延および紡錘形の波形を再現することができた。

千葉県北西部下の低速度域は沈み込む海洋性地殻の脱水作用によるものと解釈されており、強い短波長の速度ゆらぎも流体が関与していることが考えられる。

### 謝辞

防災科学技術研究所のK-NET/KiK-netおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-netの波形記録を使用させていただきました。数値シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。

キーワード: 地震波, 数値シミュレーション, 地震波散乱, 不均質構造

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



---

SSS24-10

会場:303

時間:5月20日 12:00-12:15

Keywords: seismic wave, numerical simulation, seismic wave scattering, heterogeneous subsurface structure

## Hi-net, F-net で捉えた 2010 年 Maule 地震津波による傾斜変動 Tsunami-induced ground tilt changes observed by Hi-net and F-net in Japan

木村 武志<sup>1\*</sup>, 田中 佐千子<sup>1</sup>, 齊藤 竜彦<sup>1</sup>  
Takeshi Kimura<sup>1\*</sup>, Sachiko Tanaka<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

2010 年チリ Maule 地震 ( $M_W$  8.8) 時の津波に伴う傾斜変動が, 日本全国に展開する高感度地震観測網 Hi-net 併設の高感度加速度計 (Kimura et al., 2013, JGR) と広帯域地震観測網 F-net の広帯域地震計の水平成分で観測された。本発表では, 観測された傾斜記録の特徴を明らかにするとともに, その発生メカニズムや津波観測に対する有用性について検討した。

Maule 地震津波時の傾斜変動は Hi-net によって広範囲・高密度に観測され, 太平洋岸付近では  $5 \times 10^{-2} \mu\text{rad}$  程度の振幅を示し, 海岸線からの距離に対してほぼ一定値であった。一方で, 海岸線から 3 km 以上離れると振幅は距離に反比例して減少し, 約 50 km 程度で  $5 \times 10^{-3} \mu\text{rad}$  程度になった。また, 傾斜変動の振動方向は海岸線に直交する方向に卓越していた。さらに同様の変動は F-net 観測点でも観測され, Hi-net 観測点の存在しない島嶼部でも明瞭な記録を得ることが出来た。

観測された傾斜変動やその特徴は, 津波に伴う海面変動によって発生する荷重変形によって説明可能であった。また, 単純な 2 次元ボックスカー型津波モデルを適用し, Maule 地震津波によって海岸線から 14-20 km 以内の範囲に単位海岸線長さ当たり  $2-7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m}$  程度の海水体積変化が発生した と見積もることが出来た。

## 海底変動による津波の発生と伝播：線形ポテンシャル理論

### Tsunami generation and propagation due to sea-bottom deformation: A linear potential theory

齊藤 竜彦<sup>1\*</sup>

Tatsuhiko Saito<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup> NIED

海底変動による津波の発生と伝播過程は、微小振幅を仮定し速度ポテンシャルを利用する線形ポテンシャル理論によって記述できる。特に、海面変動の時空間変化は、これまで数多く研究され、その結果は、2次元津波伝播シミュレーションの初期津波波高分布の設定などにも応用されている。しかし、海中の流速成分の時空間変化に関する数式表現は得られておらず、2次元シミュレーションでの初期流速分布設定に関する理論的根拠は不明瞭であった。本研究では、一定水深のもと任意の時間変化を示す海底変動に対する速度ポテンシャルの数式表現を導出し、さらに、海底での圧力、海中での流速、海面波高の時空間変化の解析解を理論的に導出した。流速分布は、海底変動が直接生み出す流速成分と海面変動を介して間接的に生み出す流速成分の和として表現される。得られた解析解によって、2次元津波伝播シミュレーションの初期流速分布は、海底変動が直接生み出す流速成分をゼロと設定し、間接的な流速成分のみを考慮にいれるべきであると解釈できる。また、海底における水圧は、静水圧と海底変動の運動に伴う動的な圧力変化の和で表され、海底が加速度的に上昇する場合、海底水圧は、動的な圧力変化の効果ぶんだけ大きくなる。このことは、海底水圧計を利用した即時波源規模推定において、注意すべき効果である。

キーワード: 津波, 線形理論

Keywords: tsunami, linear theory

## 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引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、地震計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