

## 大地震に伴う地震波速度変化の空間分布および速度回復の時間スケールについて

## On spatio-temporal variation of seismic velocity change associated with large earthquakes

\*澤崎 郁<sup>1</sup>\*Kaoru Sawazaki<sup>1</sup>

## 1.防災科学技術研究所

## 1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

地球内部の地震波速度は、地震や火山活動、地殻変動などの突発的な事象に伴い急激に変化するほか、地下水の移動やプレート運動などの定常的な変動によっても緩やかに変化する。地震波干渉法はこれらの現象に伴う微細な速度変化を検出するのに有効な手法であり、Hi-netやF-netに代表される高密度の連続地震観測網が整備されてきたこの20年程の間に広く実施されてきた。これまでの研究で、多くの大地震の直後に地震波速度は最大で数%の低下を示し、その後数カ月以上の時間をかけて回復するという共通の特徴が見られることが明らかとなってきた。大地震に伴う地震波速度低下の主な原因としては、断層帯の破碎、地殻変動に伴う静的歪変化、強震動による地盤の損傷などが指摘されている。初期の研究では、速度変化—回復過程を断層面での摩擦強度変化と関連付ける議論が多かったが、近年では、地盤工学における非線形応答や液状化現象の研究の進展とも相まって、強震動による地盤浅部の損傷と関連付ける研究が多く行われるようになった。一方で、スロースリップや余効変動、群発地震などの強震動を伴わない現象について速度変化が検出された事例も報告されており、速度変化の主要因については今も議論が続いている。本発表では、地震波速度変化の原因について、これまでに報告されてきた速度変化の空間分布、および速度回復の時間スケールの観点から議論を行う。空間分布については、波動場のセンシティビティを用いて速度変化を深さごとに分離して検出し、地殻変動と強震動の寄与の足し合わせにより速度変化の深さ依存性を説明した事例を紹介する。速度回復の時間スケールについては、観測された回復過程を、岩石実験で近年注目されているslow dynamicsに見られる経過時間の対数に比例する回復や、余効変動や地下水の拡散過程を特徴づける時定数などと関連付けて議論する。回復過程を議論する際には定常的な変化と地震などの非定常な現象に伴う変化との分離が必要であり、このような複数の要因が足し合わされて速度回復が検出される場合についても考察する。

キーワード：地震波速度変化、地震波干渉法

Keywords: seismic velocity change, seismic interferometry

## 地震波速度変化に対するコーダ波の感度カーネルの定式化：ベクトル波への拡張（1）

Formulating sensitivity kernels of coda waves to seismic velocity changes: Extension to vector waves (1)

\*中原 恒<sup>1</sup>、江本 賢太郎<sup>1</sup>\*Hisashi Nakahara<sup>1</sup>, Kentaro Emoto<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座

1.Solid Earth Physics Laboratory, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに 地震波干渉法やコーダ波干渉法に基づき、地震や火山噴火などに伴う地下の地震波速度変化の空間分布を調べるには、感度カーネルを考慮したトモグラフィーを行う必要がある。コーダ波が卓越する短周期帯域においては、感度カーネルの計算は地震波散乱モデルに基づいて行われ、2次元1次等方散乱モデルに基づいたもの (Pacheco and Snieder, 2006)、拡散モデルに基づいたもの (Pacheco and Snieder, 2005)、多重散乱まで考慮した輻射伝達理論に基づいたもの (前田, 2007; Obermann et al., 2013) などがこれまでに提案されている。中原 (2015, 地震学会) では、実体波 (3次元) の1次等方散乱モデルに基づいた感度カーネルを新たに導出した。しかし、これまでの定式化はすべてスカラー波の枠組みに基づいており、ベクトル波である地震波の異なる成分への影響が理論的には明らかではない。そこで、本研究では、ベクトル波に基づく感度カーネルの定式化を開始した。その第1弾として、2次元一次散乱モデルに基づき、弾性波への簡単な拡張を行った結果について報告する。

感度カーネルの導出 干渉法などで得られた観測記録について、震源経過時刻におけるコーダ波の波群の到達時刻がだけ変化した場合、その到達時刻の変化とある場所のスローネス (地震波速度の逆数) 変化率とを、感度カーネルを介して関係づけることができる (たとえば, Pacheco and Snieder, 2006)。感度カーネルは、震源経過時刻に到達するコーダ波のすべての波群のうち、地震波速度が変化した領域を通過した波群の寄与の割合を表すものと解釈でき、各波群の重みはエネルギー密度で表される。本研究では2次元問題を扱い、エネルギー密度の計算にはスカラー波の等方1次散乱モデル (Kopnichev, 1977) を用いて計算する。ただし、スカラー波に対する感度カーネルの計算はすでにPacheco and Snieder (2006) により行われている。これに対して、本研究ではベクトル波への拡張を行う点が新しい。ここでの拡張のポイントは、ベクトル波の成分への分解を行う際には、エネルギー粒子の進行方向と振動方向を考え、振動方向を水平成分と鉛直成分に分解するというものである。例えば、P波のエネルギー粒子の場合、振動方向は進行方向と一致し、そのエネルギーを振動方向の方向余弦の2乗を用いて水平成分と鉛直成分に分配する。S波の場合は、振動方向は進行方向に直交するとして、同じく振動方向の方向余弦の2乗を用いて水平成分と鉛直成分に分配する。このような考え方をを用いると、P波かS波のどちらか一つだけしか扱えないという制約はあるものの、従来のスカラー波の等方1次散乱モデルを少し拡張するだけで、感度カーネルを成分ごとに解析的に導出できることが分かった。その結果、水平成分と鉛直成分とでは、感度カーネルの表現が異なることが明らかになった。またそれに応じて、地震波速度の空間変化に対して、波群の到達時刻の変化の震源経過時間依存性も水平成分と上下成分では異なることが分かった。これらは従来のスカラー波の枠組みでは扱えなかったことで、本研究によるベクトル波への拡張による大きな成果である。一方で、スカラー波の感度カーネルに見られた震源と観測点の2か所に現れる鋭いピークは、今回のベクトル波の感度カーネルの場合にも確認できる。

まとめ

本研究では、2次元1次等方散乱モデルに基づき、ベクトル波の感度カーネルを新たに導出した。その結果、スカラー波の感度カーネルとは異なるベクトル波の感度カーネルの特徴が明らかになった。今回導出したカーネルは解析的に表現できる点の一つのメリットである。今後差分法による数値計算波形を用いて、結果の検証を進めていく予定である。今回の定式化は一つの波のモードの卓越を仮定した簡単なものであるが、並行して、ベクトル波へのより厳密な拡張も順次進めていく予定である。

キーワード：感度カーネル、コーダ波、ベクトル波

Keywords: Sensitivity kernel, coda waves, vector waves

## 弾性波を用いた地下水状態の受動的モニタリングの試み

## Passive monitoring of groundwater using elastic waves

\*土井 一生<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>2</sup>、塩見 尚也<sup>2,3</sup>

\*Issei Doi<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>2</sup>, Naoya Shiomi<sup>2,3</sup>

1.京都大学防災研究所、2.立命館大学理工学部、3.東建ジオテック

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 3.Token Geotec Co.,Ltd.

地すべりや斜面崩壊の早期発生予測には地下水の状態をモニタリングすることが重要である。弾性波は地下の媒質内を通過する際に積分値としての情報を持っており、小さな状態変化をも検出するツールとなりうる（例えば、Yoshimitsu et al., 2009）。これまでに、地すべり地などにおいて地震波干渉法が適用され、地すべり変動に先行する弾性波速度の低下が報告されている（例えば、Mainsant et al., 2012）。しかしながら、これらの解析は直達波を除くコーダ波部分に対する解析であり、媒質全体の弾性波速度の変化を一様であると仮定するため、そのような変化が発生した場所の特定には至っていない。

そこで、浅部（深さ数十 m 以内）の地下構造を把握し、時間的なモニタリングをおこなうため、我々は地すべりの末端部に地震計を設置した。防災科学技術研究所地すべりマップより滋賀県信楽町内の地すべり地の一つを観測サイトとして選定した。この地すべり地内の末端部においては湧水が見られ、地下水位は浅い。また、滑落崖の開析が進んでいることから、地すべりの活動そのものは古くにあったことが想像される。

地震波形は 200 Hz サンプリングで連続集録されたが、浅部からのフェイズを捉えるためには時間分解能が不足する。そこで、波形データに 1 ms 間隔のスプライン補間を施した。この波形記録 1 日分に対して、周波数領域で自己相関関数を計算しホワイトニング処理を施したところ、走時が 1 秒以内の時間において複数のコヒーレントなフェイズを検出した。今後、このフェイズの成因や時間変化についてノイズの時間変化も考慮しながら議論をおこなっていく。

## 広帯域地震探査による不均質速度構造推定の高精度化

Waveform-based estimation of velocity heterogeneity for prestack imaging from broadband seismic reflection data

\*阿部 進<sup>1</sup>、佐藤 比呂志<sup>2</sup>、石山 達也<sup>2</sup>

\*Susumu Abe<sup>1</sup>, Hiroshi Sato<sup>2</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>2</sup>

1.地球科学総合研究所、2.東京大学地震研究所

1.JGI, Inc., 2.ERI, University of Tokyo

近年、独立型データ収録システムの小型化に伴って有線テレメトリー方式の陸域及び浅海域における受振システムとの複合化による長大稠密測線の設定が可能となり、多様な異種震源を併用した反射法・屈折法複合型データの取得が実現した。こうした長大稠密展開データに対する屈折トモグラフィ解析は、広域スケールの堆積盆形状に関わる長波長の速度構造推定には有効であるが、層序対比を行う上で、要求される解像度に乏しく、坑井から得られる各種速度情報との乖離が指摘されてきた。近年、Full Waveform Inversion(FWI)の適用によって、屈折トモグラフィ解析と対比して、短波長構造不均質を伴う高精度速度情報の抽出が可能となり、併せて、FWIによって推定された速度構造を入力として、重合前深度マイグレーション結果の品質改善へと帰結する海上データへの適用事例が、数多く報告されている。一方、測線屈曲及び標高変化を伴う調査測線における反射法地震探査データについては、表面波、屈折多重反射波及び地表後方散乱波の卓越、表層構造の不規則変化、イメージング点の拡散とアジマス変動、さらには、不規則な発震点分布、発震点及び受振点レスポンスの不均一等による品質低下等の問題が数多く、FWI解析の入力データ準備には、詳細な事前解析が要請される。本研究では、従来型のCMP重合解析のみでは限界があった深部地殻構造プロファイリングについて、不均質速度構造の推定と広角領域を含む反射法イメージングの改善を目的として、軸波線理論を前提としたMDRS(Multi-dip Reflection Surface)法を含めた最適化重合処理、さらには短波長不均質を含むFWIによって推定された速度構造を前提とした重合前深度マイグレーション処理の適用性を検討した。その結果、FWI解析において、解の収斂性、安定性及び解像度を規定する最大の要因は入力データに含まれる5.0Hz以下の低周波成分であることを確認した。また、国内における深部地殻構造探査データを対象事例として、多様な速度推定情報の複合化を実施すると共に、推定された速度構造の不均質と深部反射波イメージングの解像度について議論を行った。

キーワード：フルウェーブインバージョン、速度推定、反射法地震探査

Keywords: Fullwave inversion, Velocity estimation, Reflection seismic exploration

## アジョイントトモグラフィーと日本列島の地震波速度構造への適用

## Adjoint tomography and its application to the seismic wave-speed structure beneath Japanese Islands

\*三好 崇之<sup>1</sup>\*Takayuki Miyoshi<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

スーパーコンピュータの発達に伴って、大規模計算を必要とする理論地震波形計算が実行可能となり、厳密な波動理論に基づく波形インバージョンによって地球内部構造を推定することが可能になりつつある。アジョイントトモグラフィーは、フォワード計算による波動場とアジョイント計算による波動場とを干渉させることで、地震波速度構造に関するモデルパラメータの勾配（ミスフィットカーネル）を得ることを利用したインバージョン法で（例えば、Tromp et al. 2005, Tape et al. 2007）、アジョイント計算は理論波形と観測波形から得られるミスフィットの時間反転を震源時間関数として観測点に与え、各観測点から波動場を計算することで実施される。最急降下法などの勾配法によって速度構造モデルを更新し、観測波形と理論波形の一致度が高まるまで繰り返し実施する。アジョイントトモグラフィーを利用した地下構造推定は、カリフォルニア（Tape et al. 2009）、オーストラリア（Fichtner et al. 2009）、ヨーロッパ（Zhu et al. 2013）、東アジア（Chen et al. 2015）などを対象に行われている。

日本列島の地震波速度構造モデルは、地震波走時トモグラフィーによる波線論をベースにしたモデル、地震動を再現することを目的とした防災科学技術研究所地震ハザードステーション（J-SHIS）による層構造モデルがあげられる。前者は地震動を再現する保証がなく、後者はさまざまな方法で得られた結果を統合したものがベースとなっている。筆者らは、地震動の再現と詳細な地下構造を明らかにすることを目的として、アジョイントトモグラフィーを用いて日本列島の標準三次元地震波速度構造モデルの構築に取り組んでいる。

ここでは、関東地域を対象として防災科研F-netによる広帯域地震波形を用いてアジョイントトモグラフィーによって地震波速度構造を推定した例を紹介する。まず、F-netのカタログに基づき、波形のS/Nが高いM4.5-5.5の地震140個を抽出した。選ばれた地震は、太平洋プレートとフィリピン海プレートの上面で発生したプレート間地震がほとんどで、陸のプレート内地震は乏しい。すれ違いのプレート境界であるカリフォルニアのケース（Tape et al. 2009）と違って、沈み込みに伴う深い地震が多いため、モデル領域を深い場所まで設定する必要がある。走時トモグラフィーモデル（Matsubara and Obara 2011）の三次元構造を初期モデルとし、固体地球のみ、減衰構造なしの条件で130秒間のフォワードとアジョイント計算を実施した。波形計算はスペクトル要素法（e.g. Peter et al. 2011）で実施した。初期モデルにおける理論波形の精度は2.6秒である。大規模計算は京コンピュータで実施し、1回の反復は4,000ノード時間を要した。インバージョンでは10-20秒の帯域で4回の反復を実施し、その結果を利用して5-20秒の帯域で反復3回を実施した。初期モデルには関東盆地にあたる構造がなかったが、東京湾を中心とした深さ5kmまでの領域で盆地構造に相当する低速度領域が推定されたほか、伊豆半島北方から銚子にあたる領域で帯状の低速度領域が初期モデルよりも顕著になるなど、S波速度は最大で10%程度遅く変更された。大きな変更となった理由は、初期モデルや初期震源の影響、観測点が少ないことによる構造変化の集中、波線論と波動論の違いなどが考えられる。今後は、陸域に加えて海域観測網によるデータも用いて構造推定に取り組む予定である。

本研究は、HPCI戦略プログラム（分野3）「防災・減災に資する地球変動予測」の一部として行われました。地震波形データは防災科研F-netの速度波形、計算コードはSPECFEM3D\_Cartesianを使用しました。KAUSTのDaniel Peter 博士には貴重なコメントをいただきました。記して感謝いたします。

キーワード：アジョイントトモグラフィー、波動論、大規模計算、地震波速度構造

Keywords: adjoint tomography, wave theory, large computing, seismic wave-speed structure

## 使いやすい並列地震波伝播数値シミュレーションコードの開発

An easy-to-use parallel finite difference method numerical simulation code for seismic wave propagation

\*前田 拓人<sup>1</sup>、武村 俊介<sup>2</sup>、古村 孝志<sup>1</sup>

\*Takuto Maeda<sup>1</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>, Takashi Furumura<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### はじめに

地震波伝播の数値シミュレーションは、リソスフェアや浅部地盤構造の推定、巨大地震の震源モデル研究、不均質構造中の地震波伝播の評価などの高度化に直結することが期待される基盤的な技術である。数値シミュレーション手法の改良、標準的な構造モデルの整備、そして計算機自体の進化という三者の発展によって、今日の地震波伝播シミュレーションは日常的な解析研究に活用できるレベルに達しつつある。こうした背景の下、本研究では地震波解析研究における数値シミュレーションの利用の促進に向け、これまでスーパーコンピュータ上で開発してきた並列差分法コードの性能を最大限に維持したままに、シミュレーションの専門家だけでなくとも容易に使えるようコードの全面的な刷新を行い、かつより広範な分野で利用可能となるよう高度化を行った。

### 計算コードの開発

本研究で開発した差分法に基づく並列地震波動伝播シミュレーションコードは、媒質の減衰構造を一般化 Zener 粘弾性体モデルを用いて表現するなど、現実の不均質構造下での広帯域地震動を評価するための有効な技術を採用し、かつスーパーコンピュータにおける並列計算によってその計算機性能を最大限に引き出すことのできるものであった。しかし、高性能化の代償としてそのコードが各スパコンの計算機アーキテクチャに特化しており、汎用性が低くなっていた。

そこで、専門家だけでなくとも容易に扱えるよう、このコードの抜本的な改修を行った。開発したコードは、入力パラメタに応じて計算機メモリの動的な確保、3次元構造モデルの自動生成と離散化、波動伝播計算と出力を一貫して行う。モデルの変更や計算サイズの修正および並列数の変更などはすべて入力パラメタのみで制御可能であり、原則として利用者がコードを修正する必要はない。また、入力データとなる地下構造モデルの準備や計算結果の後処理等の必要な作業をすべて計算コードに統合化することによって、利用者の負担が大幅に軽減されている。

本コードはデカルト座標系で差分法計算を行うが、緯度・経度座標からの座標変換についても Gauss-Krüger の等角地図投影変換が計算コードに内包されており、震源や観測点位置などの位置情報は緯度経度のままで与えることができる。地震波速度構造についても、緯度・経度・境界面の深さからなる複数の速度不連続面で表現された成層構造モデルにより表される 3次元不均質構造から、自動的に指定領域を切り出し、デカルト座標系の差分格子に合わせた不均質構造モデルを生成させることができる。震源についてもさまざまな問題に適應できるように、モーメントテンソルで表される点震源の他に、実体力震源、遠地震・地盤構造研究のための平面波入射が選択可能である。相反定理を用いて多数の震源要素位置からの応答を高速に計算する Green 関数モードも整備した。これら動作モードの変更も、すべて入力パラメタの変更だけで制御できる。

地震波速度構造モデルやスナップショット出力などの空間情報を扱う入出力ファイルには NetCDF を、地震波形出力には SAC フォーマットをそれぞれ採用した。どちらも広く使われている解析・可視化ツールを通じて地震学研究コミュニティになじみ深いものであり、ユーザーにとってシミュレーション結果の取り扱いが容易になると期待される。

### 全国1次地下構造モデルに基づく計算

開発したコードを用いて、日本列島各地で発生した Mw 6-6.5 の地震の F-net メカニズム解を用いて、広帯域地震波観測記録の再現を試みた。シミュレーションには F-net の 1次元速度構造ならびに全国 1 次地下構造モデルを用い、観測記録と計算記録の走時ずれを許容した相互相関係数を通じた波形一致度の評価を行った。

周期50-100秒帯域においては、数値シミュレーション結果と観測記録の相関は全般に高いが、周期50秒を下回ると相関が急激に落ち、またその落ち方に地域性が見られることが明らかになった。ここで、1次元構造を仮定した計算波形と3次元不均質構造を仮定した計算波形とが比較的長周期帯でも顕著に異なる場合があり、かつそれが海溝や盆地構造など特定の不均質構造に起因すると思われる地域性を持つことは特筆に値する。F-netメカニズムの震源位置およびメカニズムは1次元速度構造を仮定して推定されており、それを元に3次元構造モデルで計算した波形が観測記録によりよく一致するとは限らないことには注意が必要であるが、本結果は今後適切な3次元不均質構造を導入することで、長周期波形を用いたモーメントテンソル解析が大幅に高精度化する可能性を強く示唆するものである。

キーワード：地震波伝播、差分法、並列計算、数値シミュレーション

Keywords: Seismic wave propagation, Finite difference method, Parallel computing, Numerical simulation



## 地震波伝播シミュレーションによるT-phaseの生成と伝播メカニズムの検討

## Evaluation of the generation and propagation mechanism of T-phase based on wave propagation simulation

\*干畑 まい<sup>1</sup>、古村 孝志<sup>1</sup>\*Mai Hoshihata<sup>1</sup>, Takashi Furumura<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

## 1. はじめに

T-phaseとは、海域を伝播する地震波において、P波やS波の後からずっと遅れて観測される第3番目 (Tertiary) の波を指し、その実態は速度1.5 km/sで海水中を伝播する音響波である。海底下の震源から放射されたP波やS波が海底面でP波に変換して海水中へ入射し、海面と海底面で広角反射を繰り返すことで生成される。そのため、震源の直上に海底傾斜が存在すると、P波が全反射を起こしやすくなりT-phaseの発生効率も高まると期待されている (Johnson et al., 1963)。一方で、深海の比較的平らな海底地形下で発生した地震においてもT-phaseが観測された報告もあり (Okal, 2008)、T-phaseの成因に関する議論が続いている。また、T-phaseの伝播過程においては、海水中のSOFARチャンネル(Sound Fixing And Ranging)と呼ばれる低速度帯にP波がトラップされることで遠地まで伝わるというメカニズムがよく知られおり、海底地形の高まり (海山) でのT-phaseの反射についても詳しく調べられている (Obara and Maeda, 2009)。本研究では、こうした海水中を伝播するT-phaseの特性と、その発生や伝播特性について、海底地震計で観測されたT-phase波形と地震波伝播の2次元差分法シミュレーションにより詳しく検討した。

## 2. 海底地震計によるT-phase観測データ

カムチャッカ半島からアリューシャン列島付近で発生した、深さ14~62 kmの18個の地震について、北太平洋上に設置された広帯域海底地震計 (WPAC) で記録された、震源距離788~1899 kmの地震波形データに見られるT-phaseの特性を調べた。地震計記録に対して2~8 Hzのバンドパスフィルタをかけ、表面波を取り除いた。観測波形それぞれにおいて、P波またはS波の最大振幅でノーマライズしたT-phaseを用いることで、マグニチュードによらないT-phaseの相対強度を調べた。3成分記録におけるT-phaseの最大振幅を求めたところ、多くの地震記録においてS波に対して0.2~1倍程度の大きな振幅を持つT-phaseが認められた。これらの波形は紡錘形で継続時間が長く、最大1899 kmの遠地までよく伝わることを確認できた。震源と観測点を結び、いくつかの伝播経路について、T-phaseの振幅と海底地形の関係について調べた結果、震源直上の海底傾斜が大きく、傾斜が長く続いている場所ほど強いT-phaseが現れることが確認できた。また、震源が浅いほどT-phaseの振幅が強くなることや、伝播経路に海山がある場合にはT-phaseの振幅が弱まることも確認できた。

## 3. 地震波伝播シミュレーション

海底地震計で観測された強いT-phaseを再現するために、2次元差分法による地震波伝播シミュレーションを行ない、海底地形と地下の不均質構造の影響について調査した。まずT-phaseの発生における海底地形の影響を検討するために、水深5 kmの平らな海底面のモデルと、距離100 kmで水深が0 kmから5 kmへ伸びる直線的な海底傾斜を持つモデルを用いて、地震波伝播シミュレーションを行った。海底下の速度構造は (Serenio and Orcutt, 1985) による成層構造により与えた、海水中のP波速度は1.5 km/sと設定した。深さ33 kmの逆断層型の地震について周波数8 Hzまでの高周波数地震動を計算した。その結果、平らな海底ではT-phaseは発生しないが、海底傾斜を持つモデルでは大振幅のT-phaseがS波の後続相として現れた。次に、海底傾斜に加えて現実の海底地形の凹凸を入れたモデルを用いて計算を行ったところ、T-phaseの振幅は若干弱まり、波形の形状は紡錘形で観測に近いT-phaseの波群が形成された。地殻・マントルに短波長不均質構造を加えたモデル (Kennett and Furumura, 2014) では、P波とS波 (P<sub>0</sub>, S<sub>0</sub>波) の継続時間は長くなったが、T-phaseの波形にはあまり差が現れなかった。従って、紡錘形のT-phaseの生成には、海底傾斜と凹凸を含む海底地形の存在が強く関係していることがわかった。このモデルを用いて、震源が浅いほどT-phaseの振幅は強まることもシミュレーションから確認した。次に、海水中にSOFARチャンネルあり/なしの2つのモデルを用いた計算結果を比較したところ、T-phaseがSOFARチャンネルにトラップされることで、距離減衰が小さくなり遠地までよく伝わることも確認

できた。

謝辞 東大地震研海半球ネットワークデータセンターの海底地震計データを使用しました。計算は東大地震研EIC計算機を使用しました。

キーワード：T-phase、海底地形、地下構造、地震波伝播シミュレーション

Keywords: T-phase, Submarine topography, Underground structure, Wave propagation simulation

## 火山性地震のエンベロープ幅から推定される火山の散乱・減衰特性

Scattering and attenuation characteristics at active volcanoes inferred from envelope widths of volcano-seismic events

\*熊谷 博之<sup>1</sup>、ロペス クリスチャン<sup>2</sup>、前田 裕太<sup>1</sup>、森岡 英恵<sup>1</sup>、ロンドニョ ジョン<sup>2</sup>\*Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, Cristian Lopez<sup>2</sup>, Yuta Maeda<sup>1</sup>, Hanae Morioka<sup>1</sup>, John Londono<sup>2</sup>

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.コロンビア地質調査所

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Colombian Geological Survey

火山は一般の地殻に比べて非常に強い不均質性を持つことが知られている。本研究では、このような火山における不均質性をあらかず散乱および減衰特性を推定するために、火山性地震のエンベロープ波形を用いた手法を提案する。この手法では、各観測点における高周波地震波形のエンベロープ波形のピーク振幅 (A) と、エンベロープ波形の時間積分から累積振幅 (I) を推定する。累積振幅とピーク振幅の比 (I/A) は、エンベロープ波形として単純な三角関数を仮定すると、波形の継続時間の半分となる。そこで  $p = I/A$  から推定される  $p$  をエンベロープ幅と定義する。3次元等方散乱媒質における輻射伝達方程式の近似解析式 (Paasschens, Physical Review E, 1997) に基づくと、エンベロープ幅 ( $p$ ) は全拡散係数 ( $g_0$ ) と内部減衰率 ( $Q$ ) の関数として距離とともに拡大し、一定距離で見ると、 $g_0$  および  $Q$  がそれぞれ大きいほど  $p$  は大きくなる関係を示す。フィリピンのタール火山の火山構造成地震 (Kumagai et al., GRL, 2014) およびコロンビアのネバド・デル・ルイス火山の低周波地震について 5-10 Hz の帯域のエンベロープ波形について  $p$  を求めた結果、ばらつきはあるものの、1~5秒の範囲で距離とともに拡大する傾向が見られた。 $p$  とイベントサイズとの関係を調べたところ両者に相関は見られなかった。これは  $p$  が媒質特性によって決まっていることを支持している。輻射伝達方程式を用いて  $p$  の解釈を行ったところ、 $Q = 50$  を仮定すると  $g_0$  の逆数である平均自由行程 ( $l_0$ ) は 500~1500 m と推定された。これらの推定値は先行研究から他の火山で推定されている値とも整合的である。さらにこれらの値を用いると、輻射伝達方程式から計算されるエンベロープ波形は、拡散方程式に従う特徴を示した。タール火山の地震に関して、震源位置が近接している複数のイベントの  $p$  値を比較したところ、同じ観測点では異なるイベントにおいても同様の値が推定されていたが、 $g_0$  と  $Q$  を空間的に一定と仮定することではすべての観測点の  $p$  値を説明することが出来なかった。また Kumagai et al. (GRL, 2014) により推定されたタール火山の減衰領域を波線が通過する観測波形に関しては、時期によって異なる  $p$  値が推定された。これらの結果は、 $p$  が  $g_0$  および  $Q$  の時空間分布を反映していること示している。本研究の結果は、火山性地震のエンベロープ幅が火山の散乱・減衰特性を推定するパラメータとして活用できることを示している。

## 火山におけるS波等方輻射：高周波地震波形シミュレーションによる検討

## Isotropic radiation of S waves at volcanoes revealed by numerical simulations of high-frequency scattered wavefields

\*森岡 英恵<sup>1</sup>、熊谷 博之<sup>1</sup>、前田 拓人<sup>2</sup>\*Hanae Morioka<sup>1</sup>, Hiroyuki Kumagai<sup>1</sup>, Takuto Maeda<sup>2</sup>

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.東京大学地震研究所

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

火山は強い短波長不均質場をもっており、地震波は散乱の影響を強く受けて伝播することが知られている。多くの火山ではS波の等方輻射の仮定に基づいた高周波地震波振幅を用いた震源決定法（ASL法）が利用されている。S波の等方輻射は、散乱の効果によってS波が卓越し放射パターンが崩れ振幅が距離のみに依存するという仮定である。Kumagai et al. [JGR, 2011]は、ランダムな不均質媒質を用いた波形シミュレーションによって火山における散乱場の特性を調べたが、彼らが用いた不均質媒質ではASL法が適用できるほどの等方輻射にはならず、S波の等方輻射の仮定が散乱に起因するかは証明できなかった。その原因としては不均質の強さが十分でないことが考えられる。そこで本研究では、先行研究より強い不均質媒質を用いて波形シミュレーションを行い、S波の等方輻射の仮定が本当に散乱に起因しているのかを明らかにし、火山における波動場の特性について調べる。

波形シミュレーションには Maeda et al. [BSSA, 2013]によって開発されたSEISMを使用した。このプログラムコードは運動方程式の時間発展を差分法で解いて波動場を計算しており、時間発展は2次精度、空間微分は4次精度で差分化する。粘弾性体モデルにより3次元のQ構造を考慮でき、また地形と3次元地下構造も考慮できる。

シミュレーションにはタール火山（フィリピン）の地形を用いた。計算範囲はタール火山を含む13x17x5 kmで、空間グリッドサイズは10 m、時間刻み幅は $5 \times 10^{-4}$ 秒とした。震源位置は計算範囲の中心におき、横ずれ型のメカニズムを用いた。不均質媒質はvon Karman型のパワースペクトル密度関数で表される3次元のランダム媒質を用いた。このランダム媒質は、速度ゆらぎの大きさ $\varepsilon$ 、相関距離 $a$ 、ゆらぎの短波長成分の量を定める $\kappa$ の3つのパラメータで特徴付けられる。今回は $\kappa = 0.5$ で一定とし、 $a = 50-1000$  m、 $\varepsilon = 0.05-0.2$ の範囲の値を用いた。なお、速度ゆらぎの下限は1500 m/sとし、上限は安定条件に基づいた速度で打ち切りを行った。ランダム媒質はそれぞれのパラメータにおいて乱数のシードを変えて複数回シミュレーションを行った。 $a$ と周波数が一定の場合、合成波形は $\varepsilon$ が大きいくほどコーダ波持続時間が長くなる傾向にあった。さらに、4つの周波数帯（0.2-2, 1-6, 3-8, 5-10 Hz）で振幅の放射パターンを調べた結果、 $\varepsilon = 0.05$ では高周波数帯でも4ローブのパターンが残っているのに対し、 $\varepsilon$ が強くなるにしたがって放射パターンが崩れていく様子がみられた。

実際にタール火山に設置されている6点の観測点に対応する合成波形を用いて、ASL法で震源決定を行い、どのパラメータの場合に震源位置の推定ができるかを調べた。 $a = 50$  mの場合で周波数を変えて震源決定を行ったところ、 $\varepsilon = 0.05, 0.1$ ではどの周波数の場合でも真の震源位置との差は6-7 kmほどになり、震源付近には決まらなかった。一方、 $\varepsilon = 0.2$ の場合は、高周波になるに従って真の震源位置との差が徐々に小さくなり、5-10 Hzにおいて震源に近い場所に決定することができた。波数 $k$ と相関距離 $a$ との関係で考えると5-10 Hzでは $ka \sim 1$ であり、ASL法が適用できるのは波長と相関距離がほぼ等しく $\varepsilon = 0.2$ 程度の強い不均質場であることを示している。今回のvon Karman型のランダム媒質において $ka = 1$ 、 $\varepsilon = 0.2$ の場合に散乱係数から平均自由行程を見積もると約1500 mとなった。火山の平均自由行程は約1000 mと推定されており[例えば Yamamoto and Sato, JGR, 2010]、本研究では実際の火山に近い強い散乱場を再現している。ASL法はこのような強い散乱場において適用でき、火山におけるS波の等方輻射が散乱に起因するという仮説を本研究は支持している。

キーワード：散乱、火山、S波等方輻射、ASL法、差分法

Keywords: Scattering, Volcano, Isotropic radiation of S waves, Amplitude source location method,  
Finite-difference method

## 2015年箱根火山水蒸気噴火に伴い観測された連続微動

Volcanic tremor accompanied by the phreatic eruption at Hakone volcano, 2015

\*行竹 洋平<sup>1</sup>、本多 亮<sup>1</sup>、原田 昌武<sup>1</sup>、道家 涼介<sup>1</sup>、齊藤 竜彦<sup>2</sup>、上野 友岳<sup>2</sup>、酒井 慎一<sup>3</sup>、森田 裕一<sup>3</sup>\*Yohei Yukutake<sup>1</sup>, Ryou Honda<sup>1</sup>, Masatake Harada<sup>1</sup>, Ryosuke Doke<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>2</sup>, Tomotake Ueno<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>, Yuichi Morita<sup>3</sup>

1.神奈川県温泉地学研究所、2.防災科学技術研究所、3.東京大学地震研究所

1.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

箱根火山では2015年4月末より微小地震活動が活発化し、6月29日から7月1日にかけて大涌谷で小規模な水蒸気噴火が観測された。この水蒸気噴火に先行し6月29日7時33分ごろから数分間、大涌谷周辺に設置された傾斜計及び広帯域地震計により、数 $\mu$ radの傾斜変動（以下、低周波イベント）が観測された。この傾斜変動は大涌谷直下の標高600m付近に上端をもつ北西-南東走向のクラックの開口により説明でき、この際約10万m<sup>3</sup>の熱水が貫入したと考えられる（本多ほか、2015）。低周波イベント発生後に、大涌谷近傍の観測点を中心に、連続的な微動が観測された。本発表ではこの連続微動に焦点を当て、活動の時系列、発生場所及び空振記録との比較に基づき、水蒸気噴火との関係について考察する。

連続微動は2-8Hzの周波数帯域の振幅が卓越し、上記の低周波イベント発生から約5時間後の6月29日13時03分に最初に観測にされ、7月1日の未明にかけて断続的に発生した。6月30日13時頃から7月1日未明にかけて、特に振幅が大きく継続時間の長い連続微動が観測された。

本研究では、連続微動の震源位置をエンベロープ相関法（Obara, 2002）を用いて推定した。大涌谷周辺に設置された地震観測点の連続波形記録に、4-8Hzのバンドパスフィルターを施した後、3成分合成波形のRMSエンベロープを求めた。1分間の波形記録に対して、すべての観測点ペアで相互相関処理を行い、相関係数が0.8以上の走時差が26観測点ペア以上ある場合に震源決定を試みた。得られた観測点間の走時差を説明する最適な震源位置をグリッドサーチにて求めた。この際、エンベロープはS波速度で伝搬すると仮定し、理論走時の計算にはYukutake et al. (2015)による3次元速度構造を用いた。ブートストラップ法により微動の震源決定誤差を推定した結果、水平方向に $\pm 0.6$ km及び深さ方向に $\pm 0.8$ kmであった。決定できた微動の震源は全て噴火口から半径1km以内の地表付近（標高1km）、低周波イベントに伴う開口クラックの上部延長付近に位置することが分かった。

さらに、大涌谷に設置された空振計記録と連続微動の比較から、噴火に伴って発生した空振と連続微動の発生には相関があり、多くの場合連続微動の発生時に空振が記録されていることが分かった。中でも6月30日13時頃から7月1日未明にかけての振幅の大きな微動活動の終盤に活発な空振が記録されている。火口の連続可視画像記録から、この際に大涌谷で新たな噴火口が形成されたことが確認されている（萬年ほか、2015）。以上の結果を考慮すると、連続微動は低周波イベントの際に浅部に貫入した熱水が、地表付近を移動する過程で誘発された現象であると解釈することができる。連続微動と空振の時系列から、移動した熱水が空振を伴いながら地表に噴出し新たな噴火口が形成されたと考えられる。

## 謝辞

本研究では、気象庁、防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所観測点により取得された地震波形データ及び、気象庁の観測による空振波形記録を使用させて頂きました。

キーワード：火山性微動、水蒸気噴火、箱根火山

Keywords: Volcanic tremor, Phreatic eruption, Hakone Volcano

F-net石垣点で観測される単色振動とその周波数(7-11mHz)の時間変化について

Monochromatic oscillation and its frequency variation from 7 to 11 mHz observed at F-net IGK station, Ishigakijima, Japan

\*名和 一成<sup>1</sup>、竿本 英貴<sup>1</sup>、千田 康介<sup>2,1</sup>、木村 武志<sup>3</sup>

\*Kazunari Nawa<sup>1</sup>, Hidetaka Saomoto<sup>1</sup>, Kohsuke Chida<sup>2,1</sup>, Takeshi Kimura<sup>3</sup>

1.産業技術総合研究所、2.筑波大学、3.防災科学技術研究所

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.University of Tsukuba,

3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

石垣島に設置した地震計(名和ほか,2015)のデータ評価の過程において、防災科学技術研究所のF-net石垣観測点の広帯域地震計データに10mHz前後の振動が頻繁に記録されていることに気がついた。F-net石垣観測点の連続データ(20HzサンプリングのBH\*, 1HzサンプリングのLH\*チャンネル)を解析して、2012年から2014年半ばまで概ね11mHz付近にスペクトルのピークが立つこと、2014年7月から2015年4月にかけてそのピークの周波数が低周波側に徐々にシフトしたことを見出した。特に、NS成分に顕著に表れている。周辺のFnet点と遠地地震波形を比較した地震計の特性チェック(Kimura et al., 2015)およびノイズ解析(木村, 2015)から、その期間、地震計システムは正常に動作していることを確認している。観測点近傍の灌漑用の名蔵ダムの観測記録と比較して、ピークの周波数が11mHzの時期がダムの満水位の時期と一致すること、そのピークの周波数の時間変化が貯水位の時間変化と良く相関することがわかった。モデル計算によって、ダム貯水池の固有振動が満水時の周波数と一致すること、水位/水量が減少するとその周波数は低くなることが再現できた。これらのことから、観測された振動は名蔵ダム貯水池のセイシュに伴う振動が原因と結論できる。

謝辞:

名蔵ダム観測データの収集・整理に協力していただいた沖縄県名蔵ダム管理所、国立天文台VERA石垣島観測局の宮地竹史氏、産総研の高橋美江氏に感謝します。本研究はJSPS科研費 26289350の助成を受けたものです。

参考文献:

名和ほか(2015) 石垣島における陸水擾乱の重力への影響とそのモニタリングのための新たな試み、日本地球惑星科学連合2015年大会

Kimura, T., H. Murakami, and T. Matsumoto (2015) Systematic monitoring of instrumentation health in high-density broadband seismic networks, *Earth, Planets and Space*, 67:55, doi:10.1186/s40623-015-0226-y.

木村(2015) 広帯域地震計の周波数応答特性異常と背景ノイズレベル、日本地震学会2015年秋季大会

キーワード: 広帯域地震計、ノイズ、セイシュ、ダム貯水池、石垣島

Keywords: broadband seismometer, noise, seiche, dam reservoir, Ishigaki Island

## べき乗型スペクトルを持つランダム構造における波形エンベロープの拡大と散乱減衰

## Envelope broadening and scattering attenuation in random media having a power-law spectrum

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

1.東北大学

1.Tohoku University

ランダムな速度不均質構造の中を伝播する波動は、震源ではパルスであっても伝播距離の増加と共にその見かけ継続時間は大きくなる。微小地震のS波波形にはこのエンベロープ拡大現象が明瞭に観測される。これまで、高波数領域でべき乗型スペクトルを持つフォンカルマン型ランダム媒質が数理的モデルとして多く用いられ、パルス波の中心波数 $k_c$ がコーナー波数 $a^{-1}$ より高いという条件の下では放物近似が成り立つと仮定した取り扱いが行われてきた。しかしスペクトル勾配が緩い場合には、広角度散乱が強くなり散乱減衰を大きくさせることが考えられる。べき乗型スペクトル領域では構造に特徴的な尺度が存在しないことに注意しよう。本研究ではパルス波の中心波数を基準にとり、(1) 速度ゆらぎのパワースペクトル密度を低波数（長波長）成分と高波数（短波長）成分とに分解し、(2) 長波長ランダム成分に放物近似を適用し、(3) 短波長ランダム成分にボルン近似を適用することを提案する。長波長ランダム成分は波線前方の狭い角度内の散乱を生じ、エンベロープの拡大と最大振幅着信の遅延をもたらす。これはMarkov近似法によって計算することができ、エンベロープ拡大率は伝播距離の2乗に比例することが導かれる。短波長ランダム成分は広角度の散乱を生じるが、これによる全散乱係数を伝播距離あたりの減衰因子とみなすことができる。速度ゆらぎのべき乗型スペクトルの勾配が大きい場合、エンベロープ拡大率は周波数に依存せず、散乱減衰は弱いことが導かれる。一方、べき乗型スペクトルの勾配が小さい場合には、周波数が高くなるにつれてエンベロープ拡大率は大きくなり散乱減衰は強くなるが示される。ここに提案するエンベロープ導出法は解析的な解が得られるという利点があり、エンベロープの周波数依存性からランダム速度揺らぎを推定する基礎を与えると考えられる。

Sato, H. (2016) *Envelope broadening and scattering attenuation of a scalar wavelet in random media having power-law spectra*, Geophys. J. Int., 204, 386-398.

キーワード：地震波動、エンベロープ、ランダム媒質、散乱、減衰、波動理論

Keywords: seismic waves, envelope, random media, scattering, attenuation, wave theory



## 3次元ランダム不均質媒質中におけるスカラー波エンベロープ：差分法計算による改良マルコフ近似理論の検証

Envelopes in 3-D Random Media: Comparison of the new Markov approximation and the finite difference simulation

\*江本 賢太郎<sup>1</sup>、佐藤 春夫<sup>1</sup>

\*Kentaro Emoto<sup>1</sup>, Haruo Sato<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohokuk University

短周期地震波は地球内部の微細不均質構造の影響を強く受けるため、複雑な波形を示す。その特徴として、主要動部は震源時間関数よりも長くなり、長いコーダ振幅が励起される。これらの現象は、ランダムな不均質速度ゆらぎの中を伝播する地震波の散乱によるものと解釈され、伝播距離と共に主要動の幅が広がるといった現象を説明することができる。ランダム不均質媒質を用いて地震波伝播を統計的に解釈する手法として、輻射伝達理論、拡散近似、マルコフ近似理論などが提案されている。本研究では、主要動部分の地震波エンベロープをよくモデル化できるマルコフ近似理論に着目する。マルコフ近似理論は多重前方散乱を扱う手法であり、2次元ランダム媒質において、差分法と比較することにより適応可能条件が検証されてきた(Saito et al. 2003, Emoto et al. 2012)。しかし3次元ランダム媒質における検証は少ない。最近、Sato (2016)は、波動の卓越波数を基準としてゆらぎのスペクトルをエンベロープ拡大に寄与する長波長成分と散乱減衰に寄与する短波長成分に分けて考える新しい方法を提案した。その長波長成分にマルコフ近似を適用することにより、これまで不可能だったべき乗型スペクトルをもつランダム媒質でのエンベロープを解析的に導出することに成功した。本稿では、この改良マルコフ近似理論によるエンベロープと波動方程式の差分法シミュレーションで数値的に計算したエンベロープを比較することにより、新理論の妥当性と適用限界について検討する。

3次元差分計算は1.5Hzと3Hzをターゲットとしてスカラー波の波動方程式を解く。平均伝播速度を4km/sとし、3Hzの場合は空間刻み・時間刻みを40m, 3msとした空間4次・時間2次精度の差分式を用いる。伝播距離200kmの観測点におけるコーダ部分まで計算するため、媒質サイズはx, y方向に174km, z方向に約250kmとする。このセッティングでは、伝播距離200kmの観測点において、初動到達から少なくとも10秒間は境界の影響がない。1.5Hzの場合には空間刻み・時間刻みをそれぞれ倍にし、グリッド数を $1/2^3$ にして行う。地球シミュレータにおいて、124ノードを用いた並列計算を行うと、1回の計算に、3Hzの場合は約3時間、1.5Hzの場合は約15分必要である。統計的な平均エンベロープを求めるために、同じ統計的特徴を持つランダムゆらぎに対し、シードを変えて少なくとも5回計算する。1つの媒質には等伝播距離にあり、観測点間隔が約10km離れた9箇所を観測点を設定してあるため、1つのエンベロープを得るのに最低でも45個のエンベロープを平均する。ゆらぎの相関距離は5km, RMS値は5%とし、スペクトル勾配を決める $\kappa$ が0.1, 0.5, 1.0の場合を調べた。3Hzの場合は $\kappa=0.5$ のみである。

差分法で求めた平均二乗エンベロープは、伝播距離の増加と共に幅が広がり、ピーク値は伝播距離の-2.6乗から-3.5乗で減少した。この減少率は $\kappa$ が小さいほど大きかった。3Hzの場合は-2.7乗であった。また、コーダ励起量も $\kappa$ が小さいほど大きくなった。

Sato (2016)では、ゆらぎの短波長成分のコーナー波数 $1/a_s$ を中心波数 $k_c$ を用いて、 $1/a_s = \zeta k_c$ として定義した。パラメータ $\zeta$ は、ゆらぎの短波長成分と長波長成分を分離する基準スケールであり、 $\zeta=1$ の場合には中心波数が境界になるが、 $\zeta$ が小さくなると短波長成分の寄与が大きくなり、マルコフ近似から求まるエンベロープ拡大は小さく散乱減衰が大きくなる。一方、 $\zeta$ が大きい場合には長波長成分の影響でエンベロープ幅が大きくなり、散乱減衰は小さくなる。 $\kappa$ の値が小さいほど、エンベロープの $\zeta$ 依存性は強い。 $\zeta$ が小さいほどエンベロープ幅が小さく、ピーク到達時刻が早くなる。差分法と理論エンベロープを $\zeta=0.25, 0.5, 1.0, 1.5$ の場合に対して比較した結果、 $\zeta=0.25$ では明らかに、差分法より理論エンベロープのピーク到達が早い。 $\zeta=1.0$ と $1.5$ の場合に、差分法と理論エンベロープの主要動付近の合いが良くなった。マルコフ近似では広角散乱を無視しているため、コーダ部分では差分法エンベロープの方が大きくなる。 $\kappa=0.1$ の場合にも大まかには理論エンベロープはよく差分法エンベロープをモデル化しているが、 $\zeta$ のすべての場合に対して差分法エンベロープの振幅は理論

エンベロープよりも小さくなった。これは、短波長成分の寄与が大きくなり、改良マルコフ近似理論の限界を示している可能性がある。

今後、さらに異なる周波数と $\kappa$ の組み合わせを解析し、理論の適応範囲を詳しく調べる予定である。

謝辞：本研究では、海洋研究開発機構が運営する地球シミュレータを使用させて頂きました。

キーワード：地震波散乱、差分法、エンベロープ

Keywords: Scattering, finite difference simulation, envelope

## Vector energy transfer of seismic waves and lithospheric heterogeneities beneath the US

\*Piero Poli<sup>1</sup>

1.EAPS MIT, Cambridge USA

*Stochastic analysis of seismic waves can provide a different vision of the structures in the lithosphere, complementing the deterministic pictures provided by seismic tomography models. To infer the stochastic properties of the lithosphere beneath US we analyzed the vector transfer of energy using 3 component seismograms recorded at USarray seismic network. The application of theoretical scattering model based on the Markov approximation permits to interpret the vector energy ratio and derive statistical information about the heterogeneity distribution in the analyzed medium. By using high frequency seismic waves a continental vision of the scattering properties of the US lithosphere is obtained by the regionalization of our observations. The derived map of the lithospheric scattering reveals strong correlation of the scattering property with well-known geological features of the US lithosphere. High scattering is observed in tectonically active east US and highly deformed central regions, while low scattering is characteristic of old cratonic regions in the eastern US.*

Keywords: Scattering, Stochastic imaging, Wave propagation in complex media

## Imaging melting of Philippine-Sea Plate subducting beneath central Japan

\*Simanchal Padhy<sup>2,1</sup>, Takashi Furumura<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad

The central Japan is a globally unique seismo-tectonic zone with the complex interaction of the Eurasian, North American, Pacific (PAC), and Philippine-Sea Plate (PHS). Thermal and petrologic models predict that the oceanic crust of the young (<20 Ma) PHS subducting beneath central to south-west Japan is ~300° to 500°C warmer than that of the old (~100 Ma) PAC subducting beneath northeast Japan, and is thus more prone to melting. Deriving a high-resolution image of the slab melting is a key to understand the basics of plate tectonics and magma genesis. Although several structural models of the PHS, based on travel-time tomography (Hirose et al., 2008) and receiver function analyses (Shiomi et al., 2004), detected the gross features of subduction zone, the melting in PHS, at a scale on the order of seismic wavelength, is yet to resolve from the tomography image of the slab due to the coarser spatial resolution. The high-resolution waveform analysis and numerical simulation of wave propagation are alternatives to obtain such images of complex subduction zone. In this direction, Padhy et al. (2014) recently detected slab thinning/tearing in PAC by analyzing deep-focus earthquakes beneath central Japan. Similarly, Lin et al. (2013) proposed slab melting as one of the probable causes for the observed spindle-shaped, highly scattered waveforms from mantle earthquakes in central Japan. Their study is, however, based on mere observation of only two mantle earthquakes recorded at few stations. To build on this work, we extensively analyzed waveforms of intermediate (50-300 km) to deep (>300 km) intra-slab moderate-sized (M4-6) earthquakes occurring in central Japan and conducted numerical simulation to derive a fine-scale PHS model, incorporating slab melting in the model. Spindle-shaped seismograms with strong excitation of slowly decaying, long-duration high-frequency coda are observed for a group of PAC events occurring in northern part of central Japan recorded by Hi-net. These waveform anomalies can be explained by the 2-D finite difference method (FDM) simulation of high-frequency (up to 10 Hz) seismic waves in subduction zone containing features such as the melting in PHS crust, serpentized mantle wedge, and the heterogeneous PAC. Comparison of observations and simulations shows that the data are primarily explained by the presence of an anomalous low-velocity zone in upper mantle, that focuses the high-frequency energy, which is further guided through multiple forward scattering by the overlying heterogeneous PHS. These anomalies inside the PHS exhibit the net strong effect of scattering of high-frequency seismic waves. The data are also moderately explained by melting, mainly in the basaltic crust of PHS; features like melting of the eclogitic crust and serpentized wedge have a minimum effect on waveforms. By further conducting a suite of simulations by changing the shape and location of the mantle anomaly, as constrained by both findings of very similar study on PAC thinning/tearing (Padhy et al., 2015), as well as the gradual change in waveform anomaly in the region, we find that all the models explain the observations, although the vertically elongated mantle anomaly is more effective for stronger focusing over a longer distance range. We also examined the influence of thickness of melt and its location in relation to the plate bending on waveform changes. The simulation results show that the melt zone, especially in the basaltic crust, has to be thicker than 10 km to produce a detectable waveform effect. The findings of this study have important implications for our understanding of the mechanism of intermediate to deep earthquakes under the dehydration embrittlement hypothesis.

Keywords: Wave propagation, Finite-difference method simulation, Philippine-sea plate, Melting

## 次元可変なパラメータ空間でのコーダ波解析による地殻構造イメージング

## Seismic imaging of crustal structures by a trans-dimensional coda-wave analysis

\*高橋 努<sup>1</sup>\*Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

1. Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

数Hz以上の高周波数帯域においてS波は散乱や非弾性減衰の影響を強く受け、直達波部分の波形の崩れやコーダ波の励起、総エネルギーの減衰を示す。散乱および内部減衰の1/Q値を分離して推定するMultiple Lapse Time Window Analysis (MLTWA)は、直達波からコーダ波までのエネルギーの時空間変化に着目し、単一観測点の記録のみから観測点近傍の1/Qを推定することができる (e.g., Hoshiya 1993)。この手法は稠密地震観測網へも適用され、散乱や減衰の空間変化の推定が試みられてる (e.g., Carcole & Sato, 2010)。しかし、解析領域内で構造が水平変化する場合にはエネルギーの時空間分布の評価が困難であるため、構造の空間変化を考慮したMLTWAの適用が必要になると考えられる。そこで本研究では次元可変空間でのベイズ推論に基づいてMLTWAを一般化し、散乱減衰および内部減衰の空間変化をより適切に推定する手法を提案する。

本手法では空間をVoronoi Cellsにより分割し、各cell内は一樣な内部減衰と散乱減衰で特徴付けられると仮定する。各cellにおいてその内部を伝播するデータに対してMLTWAで用いられるエネルギー比に対する残差を求め、全データに対する残差二乗和から尤度関数を定義する。そしてReversible Jump Markov Chain Monte Carlo (Green, 1995)を用いて次元可変な空間での事後確率の元でサンプリングを行い、Voronoi Cellsの個数や分割を変化させながら最適解の周辺を探索する。これにより、一樣構造であることが期待される領域群をデータに基づいて生成しながら、データに対して適切な空間分解能で構造を推定することが可能となると期待される。本研究ではこの手法を宮城沖アウターライズ地域での海底地震観測記録へ適用した。この観測は2011年東北沖地震直後に20台の海底地震計により実施され (Obana et al. 2012)、東北沖地震発生の約40分後に発生したMw7.6の正断層地震の震源やその後の余震活動域のほとんどをカバーする。各観測点の記録に対して従来のMLTWAを適用した結果では、内部減衰はすべての観測点で1/Q ~ 1/1000程度と非常に小さく空間変化も見られなかった。また散乱減衰はいくつかの観測点で1/Q ~ 1/300程度のやや強い散乱を示していたが、その空間変化に地震活動や構造との関連を示唆する特徴は見られなかった。このデータに対して本研究の手法を適用した結果、内部減衰は同様にほぼ空間一様に非常に弱く、また散乱減衰は二つの領域で強いことがわかった。強散乱域の一つは観測網の北側に位置し、2011年東北沖地震の約40分後に発生したMw7.6の震源付近に対応する。またもう一つの強散乱域は観測網の南側にやや広く分布し、余震活動が活発な領域に分布する。これらの結果は、コーダ波が地震活動によって形成された不均質性などを把握する上で重要であり、本研究の手法がその情報を適切に抽出する上で有効であることを強く示唆する。

キーワード：コーダ波、MCMC、散乱、減衰、アウターライズ

Keywords: coda wave, MCMC, wave scattering, wave attenuation, outer rise

## 海底地震計記録に見られる海水層の影響

## Effects of seawater layer on broadband seismic wavefield

\*武村 俊介<sup>1</sup>、齊藤 竜彦<sup>1</sup>、汐見 勝彦<sup>1</sup>\*Shunsuke Takemura<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

近年、海域を伝播する地震動への海水層や海底堆積物の影響が報告されている（例えば、Noguchi et al., 2013; Maeda et al., 2014; Nakamura et al. 2015）。しかし、地震動への海水層の影響は未だ未知な点が多く、S-netやDONETなどの海底地震計の記録を有効に活用するためには、海域における地震波動伝播特性の把握が必要不可欠である。本研究では、海水層を含んだ地震動シミュレーションを行い、海底地震計記録に含まれる海水層の影響を調べた。

関東を中心とした512x512x128 km<sup>3</sup>の計算領域を水平方向0.1 kmおよび鉛直方向0.05 kmで離散化し、3次元差分法により地震波動伝播を評価した。地震波速度構造モデルとして全国一次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）、震源モデルとしてF-net CMT解を用いた。最小S波速度を0.9 km/sとし、0.01-1 Hzまでの広帯域地震波動場を評価した。このような計算条件において、2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震（Mw 6.8）の地震動シミュレーションを行ったところ、計算波形は陸域および海域の観測波形を概ね再現しており、使用した震源および地震波速度構造モデルの妥当性が確認された。

次に、海底地震計記録に含まれる海水層の影響を明らかにするため、海水を仮定しないモデルについても地震動シミュレーションを行い、海域においてシミュレーション結果同士を比較した。シミュレーション結果を比較すると、解析した全ての周波数帯において、水平動に大きな違いが現れないのに対し、上下動では顕著な違いが見られた。特に直達波到来後のコーダ波部分において、海水による振幅の増幅や継続時間の増大を確認した。水平動ではS波が卓越しているため、海水の影響をほとんど受けないと考えられる。一方で、上下動ではP波またはRayleigh波が卓越するため、海水の影響をうけやすいと考えられる。

## 謝辞

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用しました。

キーワード：地震波伝播、海水、コーダ波、地震動計算

Keywords: Seismic wave propagation, Seawater, Coda wave, Numerical Simulation

## タイムリバーサル法による活断層構造と震源球との比較

## Comparison between active fault structure by time-reversal method and beachball

\*菊池 年晃<sup>1</sup>\*Toshiaki Kikuchi<sup>1</sup>

## 1.防衛大学

## 1.National Defense Academy

活断層の構造とその震動機構を解明することは地震予知の観点から重要である。比較的大きな地震に関しては、その発生後に気象庁から観測された震源球が報告される。この震源球は地震波の初動極性を震源付近の球上に置換したもので、その極性の分布図から活断層の亀裂方位が求められる。最近、著者らは地震波のタイムリバーサル処理に基づいた活断層の動的モデルを構築した。この動的モデルは震源球と類似した特性を持っている。そこで、今回は、震源球と動的モデルとを比較し、それらが示す初動極性分布と活断層の方位がほぼ一致することを示す。更に地震予知に繋がる動的モデルの特徴を示す。

初めに、震源球に関しては気象庁のホームページに詳説されている。受信した地震波の最先端のみの変位を正極と負極に分別し、その極性を、音線経路により受信点から震源付近まで戻した位置に再配置する。全方位にわたる受信点からの極性再配置は一つの球上に表示される。球上の極性分布の境界方位から活断層の方位が求められる。この方法では活断層の全体の変位に着目しているので処理周波数範囲は1 Hz以下の低周波である。次に、動的モデルについて概説する。このモデルは波動伝播に関するタイムリバーサルの原理に基づいて構築される。観測点で受波した地震波の中からP波成分を切り出して、その波を時間的に反転させる。その反転させた信号を伝播シミュレーション上で放射して、震源位置に形成されるパルス、即ちタイムリバーサルパルス(TRP)を求める。伝播シミュレーションには放物型方程式法を用いた。処理周波数範囲は1~20 Hzの広帯域である。震源を囲む観測点から求められたTRPの集合が、等価的な震源震動に相当する。その低周波特性は震源球に類似した特性を持つが、その高周波特性は動的な震動特性を示す。

動的モデルの実例として、2009年8月に駿河湾の中部で発生した地震を対象に述べる。震源を囲む44ヶ所の観測点で受信したP波信号にタイムリバーサル処理を施し、震源の位置に形成されるTRPを求めた。このTRPは震源が放射する等価的な音源に相当する。

一般に、雑音はランダムな振動であるから干渉性を持たない。そのため指向性もない。しかしながら、求められたTRPには明確な方位依存性が存在した。この方位依存性の成因を解明するために、方位に対するTRPの周波数スペクトルを求めた。周波数スペクトルは方位角によって大きく変化した。そこで、方位角に対する最大振幅周波数の分布を求めた。その結果、方位が西から東に移動するにつれて最大振幅周波数が大きく上昇して、そして下降した。音波の周波数変動は音源の移動によるドップラー効果が一般的である。しかしながら、上記地震の場合、震源と観測点の相対位置は大きく変化していないのでドップラー効果ではない。この場合の周波数上昇は音源が局所的に高速で移動したためと考えられる。移動方向は西伊豆西、河津及び伊東方向へ集中した。

これらの観測点で受信したP波を調べると特徴ある波形が表れた。西伊豆西の受信波の先頭部が膨張していた。しかし、西伊豆西に近い伊東と河津での受信波は通常の波形であった。この様に頭部が増大することは、活断層中における亀裂の進行速度が伝搬速度に近くなった場合に発生する。亀裂によって発生した圧力が高速で移動することにより累積的に加算される、即ち、パラメトリック効果によって生じると考えられる。西伊豆西はこの地震の特性を反映する特定点である。この観測点で受波した余震の波形は、本震以上にP波の先頭部が膨張していた。これは亀裂が断層全般に拡大したためと考えられる。一方、本震以前に発生した前兆地震でも先頭部の膨張が多く観測された。これらの結果から震源振動の動的モデルを提唱した。活断層から放射された狭角のビームが地表に達する点をパラメトリックスポット、ここで観測される頭部の増大したパルスの頭部をパラメトリックヘッドと呼ぶ。活断層から放射された狭角のビームの方位は活断層の方位である。従って、パラメトリックスポットの方位が、活断層の方位である。

この地震のパラメトリックスポットの方位は86°である。一方、気象庁が求めた震源球による方位は71°でほぼ一致している。また、TRPを1 Hzの低周波フィルターを通した信号の初動極性の分布は震源球の分布とほぼ一致



した。上記のように、TRPの高周波特性により活断層の放射ビームが算出され、また低周波特性から初動極性の分布が算出される。このことから、タイムリバーサル法に基づいた動的モデルは活断層の震動特性の解明に有効と考えられる。

本報告では、防災科学技術研究所のHi-netによる地震データを使用しました。ここに謝意を表します。

キーワード：タイムリバーサル法、震源振動、震源球

Keywords: Time reversal method, active fault vibration, beachball

## データ探索のための地震波可聴化

## Seismic audification and sonification for data exploration

\*内出 崇彦<sup>1</sup>、森本 洋太<sup>2</sup>、松原 正樹<sup>3</sup>

\*Takahiko Uchide<sup>1</sup>, Yota Morimoto<sup>2</sup>, Masaki Matsubara<sup>3</sup>

1.産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門、2.ハーグ王立音楽院ソノロジー研究所、3.筑波大学 図書館情報メディア系

1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.Institute of Sonology, Royal Conservatory of the Hague, 3.Faculty of Library, Information and Media Science, University of Tsukuba

地震波形記録は地震学における基本的なデータである。地震学者は通常、地震波形を画面や紙に描いて可視化して、そこから情報を読み取る。しかし、ほかの方法もある。地震波形を音に変換するという可聴化である。これは近年よく行われるようになってきたが、主に非専門家へのアウトリーチが目的である。われわれは、地震波の音を研究目的で利用することを試みている。一般に、時系列データを音に変換する方法には2つある。ひとつは時系列データをそのまま音響信号に見立てて再生するaudificationであり、もうひとつは瞬時周波数や振幅といったデータの特徴に応じて音を割り当てるというsonificationである。われわれは地震波形のaudificationとsonificationの手法を開発して、どのような情報が地震波可聴化音から聞き取れるかを検討した。

初めに2011年東北地方太平洋沖地震を題材とした。防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)と強震基盤観測網(KiK-net)の地表観測点のうち116点を適当に選んで使用した。一般に、地震波記録は聴きとるには周波数が低すぎるため、audificationの場合は再生速度を上げて、周波数を可聴域に移さなければならない。116観測点の地震波形のaudificationを10倍速の再生速度で行い、それらを重ね合わせた。可聴化音は聴きとることができるが、まだ低い。可聴化音からは日本全国に地震波形が広がる感じが感じ取れる。地震波の特徴をより明らかにするために、零交差率と振幅に応じて音を割り当てるsonification手法を設計した。10倍速で再生するものとしたため、可聴化音の全長は40秒ほど聞き取りやすい長さとなった。さらに、アウトリーチ活動で利用することも考慮して、怖くない雰囲気になるように音を選んだ。全116観測点からのデータは時間同期を考量した上で、同時に再生する。

Sonificationによって得られた音は、やはり全国的な地震波伝播を感じさせるものである。初めは大きく高い音であるのに対し、徐々に小さく低い音に移行していく。これは、地震波の幾何減衰や非弾性減衰の効果を反映している。可聴化音の23秒ごろ(発震時の230秒後に相当する)に、全国的な地震波伝播とは明らかに異なった高い音が聴こえた。地域ごとに可聴化を行ってこの原因を追究した結果、岐阜県飛騨地域からのものであることがわかった。この地域で動的に誘発された地震[例えば、Uchide, SSA, 2011; Miyazawa, GRL, 2011; 大見ほか, 地震, 2012]と時刻も一致する。

Audificationとsonificationによって、周波数や振幅の違いや変化を多くの観測点について同時に観測することが容易になった。本研究は、巨大地震から長距離を走ってきた地震波より高い周波数の地震波を放射する動的誘発地震を検出する方法として優れていると考えられる。

謝辞: 本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)と強震基盤観測網(KiK-net)の地震波形記録を使用しました。

キーワード: 地震学、地震波可聴化(audification)、地震波可聴化(sonification)、2011年東北地方太平洋沖地震、動的誘発地震

Keywords: Seismology, Audification, Sonification, The 2011 Tohoku-oki earthquake, Dynamic triggering of earthquakes

## 核・マントル境界S波多重反射波の時間領域解析を用いたマントル構造の推定

Estimation of the mantle structure with multiple ScS phases by time-domain analysis

武藤 未央梨<sup>2</sup>、\*蓬田 清<sup>1</sup>Maori Muto<sup>2</sup>, \*Kiyoshi Yomogida<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

1.Earth and Planetary Dynamics, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earth and Planetary Dynamics, Graduate School of Science, Hokkaido University

地震波形記録（あるいは単一記録中の異なった部分）の定量的な比較では、通常、FFTを用いたフーリエ解析、すなわち周波数領域での解析が用いられる。定常的な時系列ではこの手法は適当だが、地震学の多くの場合では、ある時間幅に集中している非定常的な波群が対象となる。このような信号の処理として古く開発された一つに、ウィナーフィルタがある。これは2つの時系列を時間領域で直接比較した結果をフィルタの形で示している。

ここでは、2016年5月30日の小笠原西方沖の巨大深発地震について、日本列島のF-netの広帯域地震波形記録から、マントル内をほぼ垂直に地表と核・マントル境界を往復するScS多重反射波について、ウィナーフィルタを用いた時間領域での解析を行い、従来の周波数領域でのスペクトル解析と比較する。一つの観測点でのトランスバース成分、すなわちSH波であるScS波やその多重反射波の部分と比較し、この地域のマントルの平均構造を推定する。

得られた波形記録ではScS波などの波群は、100-200秒程度の時間窓に入っている。他の信号の混入を避けるため、このような短い記録長の複数の時系列を比較することとなる。通常のスเปクトル解析では、各時系列の両端を滑らかにゼロに揃えるために何らかのフィルタ（例：taper filter）をかけた後、フーリエ解析を施す。高周波数成分はこのフィルタによる波形の変形の影響は少なく、位相も大きな変調はないが、広い底周波数領域ではスペクトルの振幅が傘上げされてしまうことが確認され、減衰構造の推定に大きく影響する。

そこで、二つの波群（例えば、ScS波とScS2波）の時間領域の記録を、入力と出力の時系列とみなし、ウィナーフィルタでこの二つを直接的に比較する。このフィルタは最小二乗フィルタの一種で、フィルタの係数（すなわちフィルタの長さ）が増えれば誤差は小さくなるが、大きく振動する不安定な特性となる。そこで、AICなどの統計的手法により誤差と係数の個数のトレードオフから最適なフィルタを求める。こうして得られたフィルタをフーリエ解析することで、振幅や位相の周波数特性が広い周波数帯域で安定・精度よく求めることができる。例えば、小笠原西方沖の深発地震のF-net波形では、周期20秒から0.5秒まで太平洋沿岸の観測点ではQ値が150-500程度に求まり、観測点毎の相違も議論できる。

このような時間領域のフィルタを用いた波群の定量的な比較は、他の例として、相互相関を求める際に、通常の係数を用いるよりも精度よく推定することが期待され、時間変化の検出などを従来の手法よりも安定して求める可能性がある。

キーワード：ScS多重反射波、マントル速度・減衰構造、時間領域波形解析

Keywords: multiple ScS phases, velocity and attenuation structure of the mantle, time-domain analysis of seismic waveforms

## 脈動実体波を用いた上部マントル不連続面変換波の検出

Detection of converted phases from the upper mantle discontinuities using teleseismic body-wave microseisms

\*西田 究<sup>1</sup>

\*Kiwamu Nishida<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震を用いた構造探査手法は、全地球スケール地球内部構造を知る上で大きな役割を果たしてきた。その解像度は地震分布の偏りに大きく制約される。この問題点を解決すべく、近年海洋波浪によって励起されたランダムな表面波を使い、観測点間の構造を抽出する手法(地震波干渉法)が発展してきた。実際に多くの地域で、地殻構造・上部マントル構造が決定されるようになってきた。より深部の構造を調べるため、地震波干渉法を用いた実体波の解析が注目され始めている。しかし実体波を抽出する際、励起源の不均質性が強い制約になることが知られている。本研究では地震波干渉法のように脈動の励起源が一様ランダムと仮定することとは対照的に、局所的かつ持続的なイベントとして捉える戦略を取る。励起源の重心からP波が射出していると仮定して、観測点下でのマントル不連続面でPS変換した波の検出を目指す。

イベントとして、2014/12/9に大西洋で発生した爆弾低気圧(weather bomb)に注目する。本解析ではまず、Hi-net 速度計 779点を使用し、観測されたP波からvertical centroid single forceの位置を推定した。波線理論に基づきP波に対するGreen関数を計算し、観測された上下動記録からその震源時間関数を推定した。

ここでは上部マントルでの変換波変換波(P660s等)は動径成分に卓越すると仮定する。色々な見かけ速度を仮定して動径成分をスタックし、推定した震源時間関数でデコンボリューションした。スタックに際しては、観測点直下の3次元不均質・大規模不均質構造が推定に大きく影響すると考えられるために、Icelandで発生した地震(2012 8/20)から観測点補正を計算した、その影響を取り除いた。予察的な解析では、日本列島下の660km不連続面でPからSVへ変換した波束を検出した。今後定量的に、既存のレシーバー関数の解析結果と比較検討してく予定である。

キーワード：脈動、アレー解析

Keywords: microseisms, ambient noise, array analysis

## 拡散・減衰モデルに基づく北海道東部における地震波減衰特性の推定

Estimation of seismic attenuation properties in eastern Hokkaido based on a diffusion-absorption model

\*金谷 希美<sup>1</sup>、江本 賢太郎<sup>2</sup>、中原 恒<sup>2</sup>、西村 太志<sup>2</sup>

\*Nozomi Kanaya<sup>1</sup>, Kentaro Emoto<sup>2</sup>, Hisashi Nakahara<sup>2</sup>, Takeshi Nishimura<sup>2</sup>

1.東北大学理学部宇宙地球物理学科、2.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics, Faculty of Science, Tohoku University, 2.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

コーダ波は一般に地下の不均質媒質によって散乱されたランダムな位相を持つ地震波で、十分な時間経過後にはエネルギーが空間に一樣等方に分布する特徴を持つと考えられている。しかし、火山フロント付近のように地下の減衰構造が大きく変化する地域では、その仮定が成り立たないことがある。例えば、東北地方では火山フロントを境にエネルギー分布が前弧側では大きく、背弧側では小さいというはっきりとした地域性が見られる。これは、異なる減衰係数を持つ隣り合う2層の半無限空間における地震波エネルギーの伝播を想定した拡散・減衰モデルによって、物理的に説明されている [Yoshimoto *et al.* (2006)]。このモデルにおける各領域のエネルギー密度の時間・空間発展は、拡散・減衰方程式に従う。本研究では北海道東部を対象とし、火山フロント付近でのSコーダ波エネルギー分布を求め、このような現象が他の地域でも見られるのかを調べた。さらに拡散・減衰モデルを適用して減衰特性を推定した。

解析には、北海道十勝地域で発生したやや深発地震（2013年2月2日、深さ102km, M6.5）を選択した。防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netより、北海道東部の観測点40点の記録を用いた。各観測点の東西・南北・上下動3成分の速度記録について、2-4, 4-8, 8-16, 16-32Hzの周波数帯のバンドパスフィルタ処理を行った。それらのSコーダ波部分に5秒間の時間窓を7つとり、それぞれに対して二乗平均振幅の3成分和を算出した。その値に地殻・上部マントルの平均的な密度  $3.0[\text{g}/\text{cm}^3]$  を乗じることによりSコーダ波エネルギー密度とした。

エネルギー密度の空間分布を調べた結果、前弧側では一樣に大きいエネルギー分布である一方、背弧側では火山フロントからの距離と共にエネルギーが減少するという東北地方と同様の現象が見られた。各時間窓における火山フロントからの距離とSコーダ波エネルギー密度の関係を周波数帯ごとに調べると、背弧側でのエネルギー密度は距離とともに指数関数的に減少しているのに対し、前弧側のエネルギー密度は距離によらずほぼ一定となり、経過時間に伴い指数関数的に減少する。背弧側の空間減少率の値は全周波数帯で平均して東北地方の結果（2-32Hzで  $(1.7-4.8) \times 10^{-2} [\text{km}^{-1}]$ ）より2-3倍程度大きい。その周波数依存性は東北地方と同程度となる。拡散・減衰モデルによれば、背弧側の空間減少率は拡散係数と減衰係数の比の平方根で決まり、前弧側の時間減少率は減衰係数で決まる。この関係を解析結果に適用し、平均的なS波の散乱係数  $(0.01[\text{km}^{-1}])$  を仮定して内部減衰の  $Q_i^{-1}$  値を求めたところ、背弧側の  $Q_i^{-1}$  値は全周波数帯で東北地方よりやや大きいと見積もられた。一方で前弧側の  $Q_i^{-1}$  値は背弧側よりも小さく、 $Q_i^{-1} \propto f^{-1}$  程度の周波数依存性を持っていた。同様の結果は、他の2つの地震を解析した場合にも求められた。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所が提供する高感度地震観測網 Hi-net の波形を使用させて頂きました。また、気象庁が提供する気象庁一元化処理震源リストのデータを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

キーワード：拡散、減衰、コーダ波、火山フロント

Keywords: diffusion, attenuation, coda-wave, volcanic front

一次元地下構造モデルの推定を目的としたトランスディメンショナル波形インバージョンの開発  
Development of trans-dimensional waveform inversion to estimate 1D layered underground structure model

\*久保 久彦<sup>1</sup>、鈴木 亘<sup>1</sup>

\*Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>

1. 独立行政法人防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

震源過程解析における信頼性の高いグリーン関数の構築を目的として、しばしば小地震の波形モデリングを基にした一次元地下構造モデルの推定が図られている (e.g., Ichinose et al. 2003; Kakehi 2004; Asano and Iwata 2009)。本研究ではリバーシブルジャンプマルコフ連鎖モンテカルロ法 (rjMCMC法、Green 1995) を用いた、一次元地下構造の推定を目的とする新たな波形インバージョン手法を開発する。rjMCMC法を用いたトランスディメンショナルインバージョンの利用は地球物理学の分野で近年進んできている (e.g. Malinverno 2002; Agostinetti and Malinverno 2010; Bodin et al. 2012; Dettmer et al. 2014; Hawkins and Sambridge 2015)。rjMCMC法の利点として、同手法はモデルパラメータ数も逆問題の未知数とする解析手法であるため、解の複雑性を決める一つの要因であるモデルパラメータ数を人の手を介することなく記録から直接決めることができる点が挙げられる (Gallagher et al. 2009; Agostinetti and Malinverno 2010)。層数や初期構造モデルなどの強い事前情報を必要としないという点で、本研究で提案する波形インバージョン手法は高い汎用性を持つと考えられる。そのほかの利点としてはMCMC法で得られる解の確率分布が解の不確実性の評価に有用である点が挙げられる。得られた地下構造モデルの不確実性に関する情報は震源インバージョンへの理論誤差の導入などにおいて役立つことが期待される。

一次元地下構造モデルの層構造は個数可変のボロノイ分割を用いて表現する (e.g. Bodin et al. 2012)。観測方程式の誤差はガウス分布に従っており、互いに独立であると仮定する。本手法における未知数は層数、各層の厚さ、各層のVs、そして誤差の大きさに相当するハイパーパラメータである。各層のVpおよび密度はBrocher (2005)の経験式より各層のVsから求める。各層のQpおよびQsはKawabe and Kamae (2008)およびKoketsu et al. (2009)を参考に各層のVsから求める。理論波形は離散化波数積分法 (Bouchon 1981) と反射・透過係数行列法 (Kennett and Kerry 1979) を用いて計算する。またモデルのサンプリングにおいてパラレルテンパリングアルゴリズム (e.g. Sambridge 2013) を導入している。パラレルテンパリングアルゴリズムは、MCMC法におけるモデルの受託・棄却に関する温度が異なる系を並列で実行し、一定回数でそれぞれの系が持つ温度をメトロポリスヘイスティングス基準に基づいて交換していくことで、サンプリングの効率性の向上とパラメータの探索領域の拡充を図る手法である。

発表では理論テストや実際の記録を用いた解析を通して、本手法の妥当性やその有用性を示す予定である。

キーワード：トランスディメンショナル波形インバージョン、一次元地下構造モデルの推定、リバーシブルジャンプMCMC法

Keywords: Trans-dimensional waveform inversion, Estimation of 1D structure model, Reversible jump MCMC method

大規模シミュレーションとアジョイントカーネルに基づく沈み込み帯での地震波伝播の考察  
 Property of the seismic-wave propagation in subduction zone studied by large-scale simulation and adjoint kernels

\*岡元 太郎<sup>1</sup>、竹中 博士<sup>2</sup>、中村 武史<sup>3</sup>、青木 尊之<sup>4</sup>

\*Taro Okamoto<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>2</sup>, Takeshi Nakamura<sup>3</sup>, Takayuki Aoki<sup>4</sup>

1.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2.岡山大学大学院 自然科学研究科、3.海洋研究開発機構 地震津波  
 海域観測研究開発センター、4.東京工業大学 学術国際情報センター

1.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology,  
 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.R&D Center for  
 Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4.Global Scientific  
 Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology

At the subduction zones, such as the Japan trench, the Nankai trough and the Ryukyu Islands, the propagation of the seismic-waves are affected by the strong lateral heterogeneities [1]. Such effects must be considered in generating the synthetic waveforms for the analyses of earthquake sources and structural heterogeneities. In the previous presentation [2], by using a 3D structure model for the northeastern Japan (including Japan trench) and by using finite-difference simulations, we showed that the observed surface-waves with a period band of 12-40 s were well reproduced by the synthetics while for periods shorter than around 10 s the misfit between the observed and synthetic waveforms were large. In order to improve the structure model for the short-period waves we need to understand the properties of the wave propagation through the heterogeneous media. Thus, in this paper, as a continuation of the project [2], we study the property of the wave propagation in term of the adjoint kernels [3-6] which represent how the waves sample the different part of the structure. As an example, we use the same 3D structure model (Japan trench) and the same shallow suboceanic earthquake whose epicenter is only about 50 km landward from the trench (2003/11/1, Mw5.8) as those of [2]. We apply a GPU-accelerated finite-difference program developed by ourselves [7,8] and use the TSUBAME-2.5 supercomputer in Tokyo Institute of Technology. As in [6] the adjoint kernels are computed by using two wave-fields: one propagates from the source point and the other from the station point. We selected a KiK-net station, Yamada (IWITH21 in Iwate) as the preliminary example. The horizontal slice of the resultant rigidity kernel at near the source depth (11 km) and at period of 12.80 s shows nearly symmetric pattern with respect to the straight line (i.e., great circle path) connecting the source and the receiver positions projected onto the plane of the slice. Thus, for this period, the distortion of the wave propagation path is weak: the required perturbations in material parameters would be applied mainly to those along and near the great circle path to improve the structure. The rigidity kernel at period of 7.31 s, however, shows distorted pattern that represents complicated wave propagation such as bending and scattering. This result indicates that perturbations just along the great circle path would not be enough to improve the structure for short period waves. We will consider more kernels computed for the Japan trench and the Ryukyu Islands. This project is partially supported by HPCI System Research Project (hp130118), JHPCN (15-NA12) and KAKENHI (26282105).

References: [1] Nakamura, T. et al. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep16648, 2015. [2] Okamoto, T. et al. *JPGU Meeting*, SSS25-P02, 2015. [3] Tarantola, A. *Geophysics*, 49, 1259-1266, 1984. [4] Tanimoto, T. *Geophys. J. Int.*, 102, 89-100, 1990. [5] Tromp, J. et al. *Geophys. J. Int.*, 160, 195-216, 2005. [6] Tanimoto, T. and Okamoto, T. *Geophys. J. Int.*, 198, 1081-1095, 2014. [7] Okamoto, T. et al., *Earth Planets Space*, 62, 939-942, 2010. [8] Okamoto, T. et al., *GPU Solutions*

*to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, 375-389, Springer-Verlag, 2013.

キーワード：アジョイント・カーネル、沈み込み帯の地震、短周期地震波のモデリング、GPU計算、差分法  
Keywords: adjoint kernel, subduction zone earthquake, modeling short period seismic waves, GPU computing, finite-difference method



## 地震波散乱による見掛け輻射特性および振幅のばらつきの周波数・震源距離変化を考慮した地震動予測

Ground-motion prediction based on the scattering theory by incorporating the effects of random velocity inhomogeneities in the crust

\*吉本 和生<sup>1</sup>、武村 俊介<sup>2</sup>、小林 学<sup>1</sup>

\*Kazuo Yoshimoto<sup>1</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>, Manabu Kobayashi<sup>1</sup>

1.横浜市立大学、2.防災科学技術研究所

1.Yokohama City Univ., 2.NIED

### はじめに

近地地震の高周波数帯（約1 Hz以上）の地震波の振幅には、地殻構造のランダム不均質性による散乱作用を反映した最大振幅分布の方位依存性の消失（見掛け輻射特性の崩れ; Kobayashi et al., 2015）および最大振幅のばらつき（以下、単に振幅のばらつき; Yoshimoto et al., 2015）が観測される。このような観測現象については、近年になって地震波散乱の基礎研究（例えば、Sawazaki et al., 2011）が大きく進展したことから、そのモデル化や定量的な評価が可能になった。本研究では、地震波散乱による見掛け輻射特性および振幅のばらつきの周波数・震源距離変化を考慮した地震動分布の予測手法を提案する。

### 地震動分布の予測手法

近地で発生する小・中規模の地殻内地震による地震動の最大振幅の空間分布を地震波散乱理論に基づいて予測する。簡単のため、地殻構造のランダム不均質性による散乱作用だけを考慮し、非弾性による減衰（内部減衰）や地盤の増幅特性の影響は考慮しない。地殻構造のランダム不均質性は空間的に一様であると仮定し、指数関数型の自己相関関数で表されるとする。また、震源はダブルカップル型の点震源モデルで近似し、各観測点の最大振幅はS波の特定の周波数成分によって発現すると仮定する。

最大振幅の空間分布は以下の2ステップの計算により評価できるとする：（1）見掛け輻射特性の崩れ（周波数・方位・距離による変化）の平均的な指標（平均振幅に相当）を求める、（2）振幅のばらつき（周波数・距離に依存）を平均振幅に重畳する。計算ステップ1には、Sawazaki et al. (2011)による前方散乱近似に基づいた地震波エンベロープの評価手法を使用する。同手法の使用により、ダブルカップル型震源による非等方的な地震動分布の評価が可能になる。計算ステップ2には、Yoshimoto et al. (2015)によるランダム不均質中の点震源から伝播する波の振幅のばらつきの評価手法を使用する。

### 議論

上述の地震波散乱理論に基づいた地震動分布の予測手法は、観測される見掛け輻射特性および振幅のばらつきの周波数・震源距離変化を同時に説明できる。例えば、ダブルカップル型震源の非等方的な輻射特性は震源距離の増大とともに地震波散乱の影響で不明瞭になる。その一方で、振幅のばらつきは震源距離の増大にともない大きくなる。その結果、両効果の相乗作用として、震源距離が十分に大きくなっても、同距離における最大振幅には観測点間で10倍程度の差異が発現し、観測される地震波振幅の距離減衰の特徴を定性的に再現する。学会発表では、見掛け輻射特性および振幅のばらつきの周波数・震源距離変化の数値評価の結果について詳しく紹介するとともに、その結果と地殻構造のランダム不均質性との関係についても説明する。尚、観測されたP波とS波の最大振幅のばらつきの特徴については、本セッションの小林・他（2016、本大会）を参照されたい。

キーワード：地震波散乱、見掛け輻射特性、振幅のばらつき、地震動予測、ランダム不均質性

Keywords: Seismic scattering, Apparent radiation pattern, Amplitude fluctuation, Ground-motion prediction, Random velocity heterogeneity

## 地殻構造の短波長ランダム不均質性による地震波の振幅のばらつき

## Seismic amplitude fluctuations in small-scale random velocity heterogeneous crust

\*小林 学<sup>1</sup>、吉本 和生<sup>1</sup>、武村 俊介<sup>2</sup>\*Manabu Kobayashi<sup>1</sup>, Kazuo Yoshimoto<sup>1</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>

1.横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科、2.防災科学技術研究所

1.Yokohama City University, 2.NIED

はじめに

高周波数帯（約1 Hz以上）では観測される地震波の振幅に大きなばらつきがみられる。この要因として、地盤増幅や震源の輻射特性の他に、地殻構造の短波長ランダム不均質性による地震波散乱の影響が指摘されている（例えば、Hoshiba, 2000）。Yoshimoto et al. (2015) は、高品質なHi-netで得られた地震波形の解析から地殻内地震のP波振幅のばらつきの特徴を明らかにし、その周波数・距離依存性について数理モデルにより評価が可能であることを示した。しかしながら、地震動予測の高度化に関連するS波振幅のばらつきの特性の把握についてはこの限りでなく、詳細は依然として不明である。本研究では、P波振幅に加えてS波振幅のばらつきについても解析することで、それぞれの周波数・距離変化の特性について詳しく調べた。

データと解析手法

解析には、中国地方の地殻内で発生した横ずれ型の23地震のHi-net速度波形記録を用いた。Kobayashi et al. (2015) の解析手法を使用し、1-2, 2-4および4-8 Hzのフィルターをかけた震源距離75 km以下の速度波形について、震源経過時間60-70秒の平均S波コーダ振幅で規格化した3成分合成最大P波およびS波振幅（以下、単にP波振幅、S波振幅）を評価した。また、震源の輻射特性の影響を最小化するために、CMT解から予測される輻射特性係数（Aki and Richards, 2002, Ch. 4）が0.7以上のデータのみを使用した。

地震波の振幅のばらつき

S波振幅のばらつきは、2-4 Hz以下では、震源距離の増大とともに単調に大きくなり、震源距離約70 kmで最小値と最大値の差が約10倍に達した。それと比べて、より周波数の高い4-8 HzでのS波振幅のばらつきには、その大きさが震源距離の増大とともに急激に大きくなり、震源距離約30 kmで最小値と最大値の差が約10倍に達し、それ以遠では概ね頭打ちになる特徴が見られた。P波振幅のばらつきについては、Yoshimoto et al. (2015)と同様の解析結果が得られた。

本研究で測定されたP波振幅とS波振幅のばらつきには、震源距離の増大とともに単調に増加し、周波数が高いほどその増加率が大きいなどの周波数・距離変化が共通点として見られた。このことから、S波振幅のばらつきもP波振幅のばらつきと同様に、地殻の地震波速度構造の短波長ランダム不均質性による地震波散乱によって引き起こされているものと解釈される。

謝辞

防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net・広帯域地震観測網F-netの波形記録およびF-netのCMT解を使用しました。また、気象庁の一元化震源情報を使用しました。

キーワード：振幅のばらつき、地震動予測、短波長ランダム不均質性、地震波伝播、地震波散乱

Keywords: Amplitude fluctuation, Ground-motion prediction, Small-scale random velocity heterogeneity, Seismic wave propagation, Seismic scattering

常時微動を用いた地震波干渉法による震源断層近傍の地震波速度変化の検出可能性  
detectability of temporal variation in seismic velocity around an earthquake source fault,  
using a seismic interferometry

\*植村 美優<sup>1</sup>、川方 裕則<sup>1</sup>、平野 史朗<sup>1</sup>

\*Miyuu Uemura<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>

1.立命館大学理工学部物理科学科

1.Department of Physical Science College of Science and Engineering Ritsumeikan University

On the basis of experimental studies (e.g. Yoshimitsu et al., 2009 and Lockner et al., 1977), it has been expected that seismic velocity decreases prior to earthquakes. To detect temporal variation in the velocity, stable monitoring of the velocity for a long time is required. Seismic interferometry using micro-tremors is one of the potential techniques which enable us to detect such variation if seismic stations are densely located. With a seismic interferometry technique, some researchers have tried to detect the velocity variation before and after an earthquake using seismograms of a station pair whose interval was longer than ~20 km, but remarkable variation preceding target earthquakes have never been reported. If we can use seismograms of a station pair with a shorter interval, we might be able to detect the variation. In this study, we chose the 2014 Nagano Kamishiro Fault Earthquake (Mj 6.7) as a target, whose source fault (Kamishiro fault) is located between two NIED Hi-net seismic stations (N.HBAH and N.HKKH). The interval of these stations is about 7.3km.

At first, we investigated how frequency contents of micro-tremors depend on time, such as day or night, weekday or weekend. After checking, we confirmed that seismograms on Saturday night are the best for our analysis. After applying one-bit normalization, we divided continuous seismograms into one-minute seismograms. Then, we calculated the cross-correlation function of each one-minute seismograms pair of two stations, and stacked all cross-correlation functions for a period of six hours, on Saturday night. Finally, we obtained stacked cross-correlation from 2011 to 2015.

We found obvious and pulse-like phases around -2s, from which we estimate apparent seismic velocity ~3.5km/s. Further, we found the increase and decrease in velocity during two years before the earthquake. However, the variation of average velocity is as large as 10%, and we cannot find any corresponding phase in positive time. Moreover, we could not find any coseismic variation. It is suggested that distribution of the micro-tremor sources is anisotropic and asymmetric in space and unstable in time even though we focused only on November and December for every year. Consequently, if we try to detect the structure variation around a seismic source fault, we should confirm that the spatio-temporal distribution of the micro-tremors source does not change.

Acknowledgments: We used continuous waveform records of NIED high-sensitivity seismograph network in Japan (Hi-net).

キーワード：地震波干渉法、常時微動

Keywords: seismic interferometry, micro-tremor

## 地震波干渉法の1ビットノーマライズ処理に対する余震活動の影響

Effect of successive aftershocks for one-bit normalization on the seismic interferometry

\*磯野 卓也<sup>1</sup>、山田 卓司<sup>1</sup>、河原 純<sup>1</sup>\*Takuya Isono<sup>1</sup>, Takuji Yamada<sup>1</sup>, Jun Kawahara<sup>1</sup>

1.茨城大学

1.Ibaraki University

## 1. はじめに

1ビットノーマライズ処理(以下、ノーマライズと記す)とは、地震波解析の過程で観測波形に行う抽出処理のひとつである。その原理は、観測波形の振幅値の正負のみによって、その値を±1のどちらかに変換するものである。振幅の大小に左右されずに位相の正負のみを抽出できるため、地震波干渉法のような相関関数を用いる解析においては、自然地震の影響を最小限に抑えるために用いられている。

Fig.1(a) は、茨城県内の大子における雑微動記録から自己相関関数 (ACF: Auto-correlation function) を計算し、その時間変化を示したものである。Hi-netの観測波形に1~3Hzのバンドパスフィルタをかけた後、60個の自己相関関数を平均することで各日の結果としており、赤い部分は正の相関を示している。2011年東北地方太平洋沖地震(以下、2011年東北地震と記す)の直後に、ACF卓越周波数の変化とLag time 5s 付近のコヒーレントな位相の分断が確認できる。

これは、余震のように自然地震が断続的に記録される場合に、ノーマライズによって変換した波形内にランダムなタイミングで起きる地震による位相が残されることから、それらを用いた解析に影響が生じたものと考えられる。

本研究では、余震がどの程度ノーマライズに影響するのかを調査した。

## 2. 解析手法

地震波干渉法を用いて、ノーマライズ後の波形からACFを算出し、波形重合(スタッキング)の回数を変えて比較を行った。波形重合は、同時間長のACFを平均することで信号を増幅させる処理である。ランダムに観測される余震が、スタッキングの過程でどの程度減衰するかを確認し、ノーマライズの有効性を検証した。

対象としたのは2011年東北地震に伴う余震で、茨城県内の大子と十王にあるHi-net観測点での観測波形を使用した。2011年2月から2011年5月までの毎月1日と15日の計8日間、各日24時間分の波形を取得し、1~3Hzのバンドパスフィルタとノーマライズの後、1分間ごとにACFを算出した。これらを1, 3, 5, 10, 24時間分ずつスタッキングしたものを並べ、比較を行った。

## 3. 結果および考察

Fig.1 (b),(c) は、大子のACFの例である。1時間分から10時間分スタッキングしたACFで見られたランダムな余震による見かけの信号は、24時間分スタッキングしたACFでは減衰していた。また、コヒーレントな位相が明確であったのは24時間分スタッキングしたACFのみであり、10時間分までのスタッキングでは、任意の正の相関とその両隣の負の相関を時間経過に合わせて追うことが困難であった。これは、解析に使用した日数による影響も考えられるが、10時間分までではノーマライズが余震から受けた影響を除ききれないことによる可能性が考えられる。

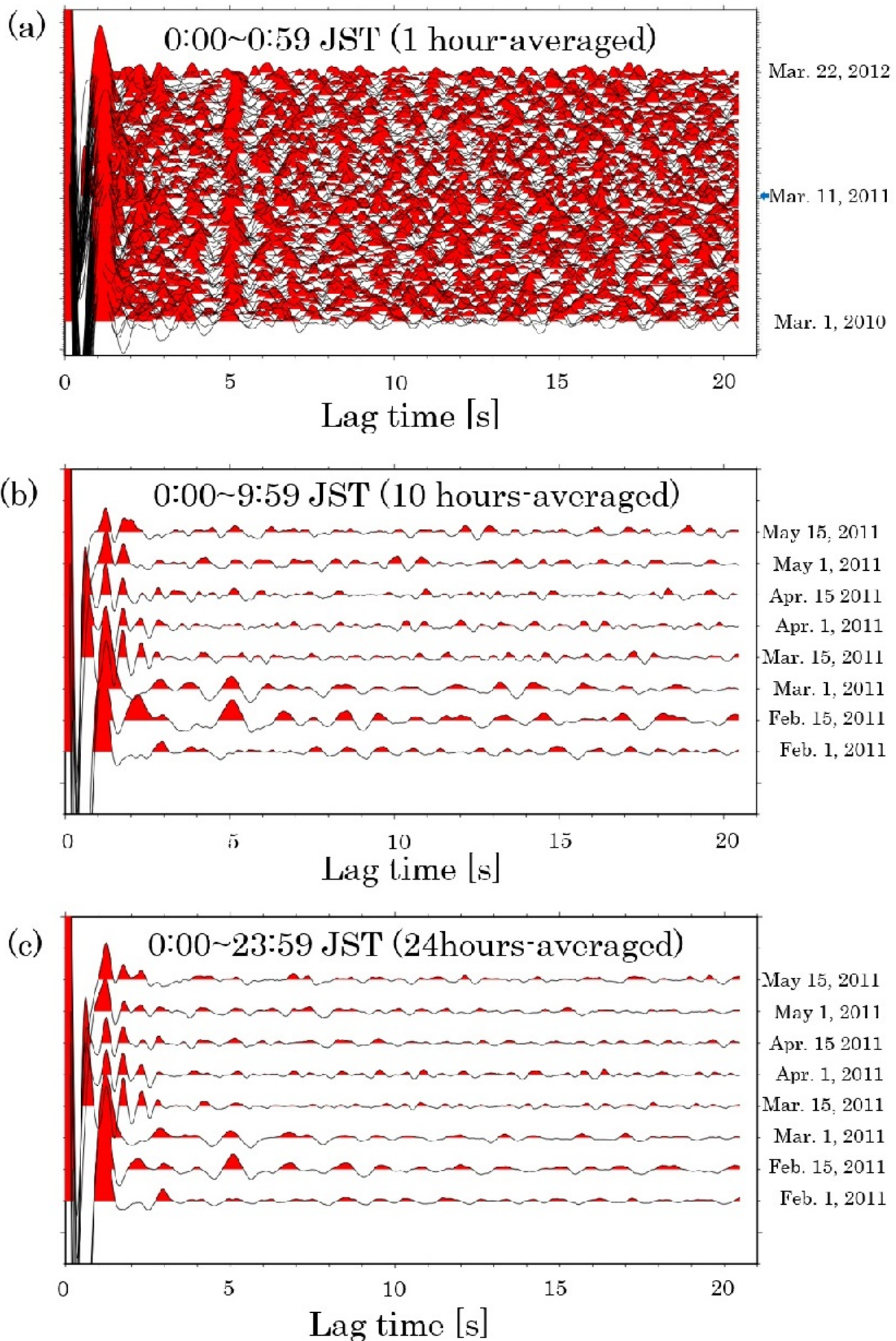
したがって、1ビットノーマライズ処理に対する余震の影響は無視できないものであるといえる。波形取得に時間を要するものの、24時間分スタッキングすることによってその影響を減衰させることは可能とみられる。

謝辞

解析にはHi-netの観測波形を使用させていただきました。

キーワード：地震波干渉法、1ビットノーマライゼーション、続発する余震

Keywords: Seismic interferometry, One-bit normalization, Successive aftershocks



**Fig. 1** (a) An example of averaged ACF at Daigo, Ibaraki prefecture, Japan. Individual ACFs were averaged by 60 one-min results. (b) ACFs averaged by 600 results. (c) ACFs averaged by 1440 results.



## 宮城県における東北地方太平洋沖地震前後の地震波速度変化

Subsurface velocity change in Miyagi prefecture associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

\*沼澤 雄也<sup>1</sup>、山田 卓司<sup>1</sup>、河原 純<sup>1</sup>

\*Yuya Numasawa<sup>1</sup>, Takuji Yamada<sup>1</sup>, Jun Kawahara<sup>1</sup>

1.茨城大学

1.Ibaraki University

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（以降 2011年東北地震と記す）は日本の本州東部に強い揺れをもたらした。本研究では、防災科学研究所の高感度地震観測網(Hi-net)で観測された微動波形の自己相関関数を計算し、宮城県における2011年東北地震前後での地震波速度構造変化の有無を検討した。

## 2. 地震波干渉法

地震波干渉法は、2観測点間における観測地震波形の相互相関関数を計算することにより、片方の観測点に震源があった場合、もう一方の観測点で得られる波形（グリーン関数）を疑似的に生成する手法である。したがって、観測波形の自己相関関数を求めることで、その点を仮想震源かつ観測点とした場合に観測される反射波を疑似的に生成することができる。

すなわち、自己相関関数の変化を調べることにより、人工震源を使わずに地下反射面の位置および地下速度構造の時間変化を監視することができる。

## 3. 使用データと処理

宮城県内のHi-net観測点のうち、2011年東北地震前後で連続波形記録が利用可能であった10観測点における連続地震波形データを使用した。解析期間は、2011年2月1日から4月30日までの3ヶ月間で、人間活動の影響を避けるために日本時間の午前2時から3時のデータを使用した。具体的な波形処理は、以下のとおりである。

まず、観測波形にバンドパスフィルターを適用し、1.0~3.0Hzの帯域の波を抽出してS/N比を向上させた。次に、自然地震の影響をできるだけ除くために、振幅を1と-1に二値化する1ビットノーマライズ処理（Shapiro *et al.*, 2005）を施した後、自己相関関数を計算した。なお、各月1日の午前2時から3時までの1分間の自己相関関数60個の平均を各日の結果とすることにより、解析結果の安定性を確保するよう工夫した。

## 4. 結果および考察

図1は白石観測点で2011年2月1日から4月30日に観測された波形で計算した自己相関関数を示している。図中の黒矢印は、2011年東北地震が発生した3月11日を表す。Lag timeが4秒および5秒付近にコヒーレントな波群が見られ、これは地下からの反射波を表していると考えられる。この波群の到達時刻の変化に注目したところ、3月11日を境に遅れており、2011年東北地震によって地震波速度が低下したと考えられる。この結果

は、Nakahara(2014)と調和的である。

また、波群の振幅に注目すると、2011年東北地震直後に自己相関係数が下がり、不明瞭となっていることがわかる。これは本震後に多発した余震の影響が1ビットノーマライズ処理でも除去しきれないことが原因として考えられる。この問題については、磯野ほか（2016, 本大会）で詳しく議論する。

謝辞：

本研究では防災科学技術研究所のHi-net観測点における波形データを使用しました。

キーワード：地震波干渉法、速度変化、東北地方太平洋沖地震

Keywords: Seismic interferometry, Velocity change, 2011 Tohoku earthquake



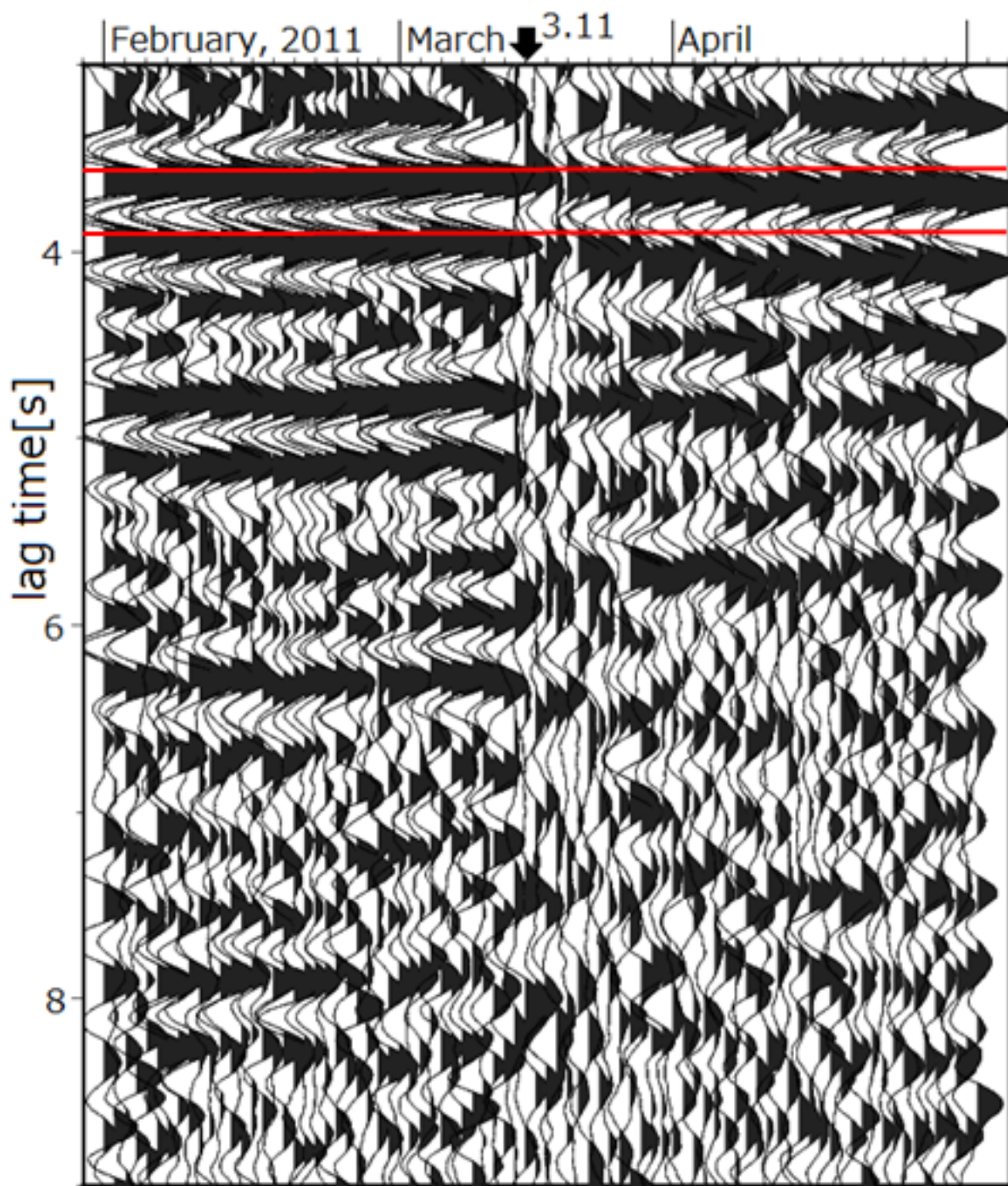


Figure 1. Calculated ACFs at Shiroishi station. Horizontal axis indicates dates from February 1 to April 30, 2011. Vertical one shows lag times of ACFs.



## Seismic Wave Propagation in a 6-story Building Using Seismic Interferometry of Strong Motion and Broadband Records

\*Loic Viens<sup>1</sup>, Hiroe Miyake<sup>2,1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Koji Miyakawa<sup>1</sup>, Takashi Furumura<sup>1</sup>

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Center for Integrated Disaster Information Research, Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, Tokyo, Japan

Seismic waves generated by earthquakes propagate from the source in all directions throughout the Earth. At a given site on which a building is situated, incoming seismic waves, which are a convolution of the source, path, and site effects, propagate inside the building causing the structure to vibrate. The response of a building to earthquake ground motions mainly depends on the velocity of shear waves and their attenuation in the building. To investigate the response of a 6-story campus building of the University of Tokyo, we deployed ten 3-component seismometers (5 strong motion and 5 broadband sensors) for 5 months between July and November 2015. The building is 28.8 m high from the basement to the roof top, and has a rectangular shape of 85 m by 16 m, with the long side on the east-west axis. The strong motion and broadband seismometers were placed together at the basement, 2F, 3F, 5F, and roof top, and recorded continuous data with a sampling rate of 100 Hz that was shifted to 200 Hz for the last month of the experiment. We use deconvolution interferometry of ambient vibration and earthquake records to determine the properties of the waves (e.g., wave velocity, frequency content, and attenuation) propagating inside the building. We find that the frequency of the fundamental mode is around 2.7 Hz for the EW component and 3.1 Hz for the NS component, due to the rectangular shape of the building. Moreover, extracted waves propagate faster in the NS direction than in the EW direction. We also find that the deconvolved waves computed from strong motion and broadband records are similar for this building. However, broadband sensors would be more appropriate to investigate the characteristics of high-rise buildings that have long natural periods.

Keywords: Ambient seismic field, Seismic interferometry, Building response

## 1-D SIMULATION OF LONG-PERIOD GROUND MOTIONS IN THE KATHMANDU VALLEY DURING MEDIUM AND LARGE EARTHQUAKES

\*Subeg Man Bijukchhen<sup>1</sup>, Nobuo Takai<sup>1</sup>, Michiko Shigefuji<sup>2</sup>, Masayoshi Ichiyanagi<sup>2</sup>, Tsutomu Sasatani, Yokito Sugimura

1. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

Kathmandu valley, housing the capital and most populous city in Nepal, lies in seismically active region of the Himalayan collision zone where large earthquakes occur during certain periods. The valley in central Nepal is a basin formed by drying up of a lake of Plio-Pleistocene origin and has ~ 600 m thick unconsolidated sediments. It has suffered the brunt of past earthquakes due to the wave amplification as a result of basin effect. The impact of an earthquake is directly related to the amplification of seismic waves due to the sediments in a basin. Hence, it is necessary to study the behaviour of seismic waves in the basin to help reduce the damages to infrastructure during earthquake. To meet the aim, seismic records and information of underground structures are necessary. Though previous studies have tried to study the underground structure of the valley, there is still much to be done.

The records of a medium sized (mb4.9) earthquake is used to construct a 1-D velocity model of the basin. The earthquake occurred in 2013 August 30 in Tibet-Nepal border (80 km NE of Kathmandu) was recorded in four accelerometers installed as a collaborative work between Hokkaido University and Tribhuvan University. We used acceleration record from the rock-site station as the input motion to model the velocity structure under three sediment-site stations. Available geological maps and borehole logging data were used as the basis for constructing the velocity models which were tuned with trial-and-error. The SH component of the input motion was band-passed filtered (0.1-0.5 Hz) and passed through the velocity models by using the Propagator Matrix method to simulate the waveform for the sediment sites. The input motion was considered to impinge the basin perpendicularly as the hypocentre of the earthquake was more than 50 km deep. We fixed the shear wave velocity of basement rock as 3.2 km/s based on the 1-D velocity model of the Himalaya region. As the shear-wave profiling carried out in 2011 during the installation of the accelerometers shows the rock-site station to have a shear wave velocity of more than 700 m/s, we considered a ~20 m thick weathered rock layer at the bottom of the basin overlying the fresh bedrock.

We found a good-fit of the simulated waveforms when compared with the observed waveform in the initial S-wave motion of the Tibet Earthquake. We also used the same velocity models to simulate the 2015 Gorkha Earthquake (Mw7.8) and they also showed a good-fit with observed waveforms. Nevertheless, the amplification in the later phases in one of the station couldn't be simulated properly. The complex basement topography and 3-D basin structure might have played a role in the high amplification in the later phases. We will work further in understanding the 3-D basin structure of the Kathmandu valley in future.

Keywords: Kathmandu Valley, 1-D velocity structure, Propagator Matrix

## 茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関する評価・分析（その2）

### Numerical simulation of long-period ground motion generated from intraplate earthquakes around Ibaraki and Fukushima prefectures ~ Part II

\*藤原 了<sup>1</sup>、桐田 史生<sup>2</sup>、河路 薫<sup>1</sup>、山崎 敏彦<sup>2</sup>、瓜生 満<sup>2</sup>

\*Satoru Fujihara<sup>1</sup>, Fumio Kirita<sup>2</sup>, Kaoru Kawaji<sup>1</sup>, Toshihiko Yamazaki<sup>2</sup>, Mitsuru Uryu<sup>2</sup>

1.伊藤忠テクノソリューションズ、2.日本原子力研究開発機構

1.ITOCHU Techno-Solutions, 2.Japan Atomic Energy Agency

2011年3月11日に発生した平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（Mw9.0：以下、「東北沖地震」という。）に伴う東北日本太平洋側の応力場の変化に誘発される形で、内陸の地殻内において同年4月11日福島県浜通りの地震（M7.0：以下、「浜通り地震」という。）が発生したと考えられている。浜通り地震の発生以降、震源断層と思われる井戸沢断層及び湯ノ岳断層周辺では多数の余震が発生しており、これら浜通り地震及びその余震によって、茨城県北部沿岸域の一部の地震観測点において長周期地震動が観測された。東北沖地震以前、茨城県北部沿岸域では内陸地殻内地震がほとんど発生しておらず、内陸地殻内地震と長周期地震動に関する地震動特性の知見は乏しかった。したがって、東北沖地震以降得られた長周期地震動の特徴を正確に理解し、これらを踏まえた地震動評価を行うことは、これらの周辺地域における耐震設計を行う上において重要である。

本研究では、茨城県北部沿岸域における内陸地殻内地震による長周期地震動及び強震動評価の高精度化を主な目的としている。既往研究<sup>1)</sup>を基盤として、地震調査研究推進本部による地盤構造情報を踏まえ、新たにプレート構造を踏まえた茨城県北部沿岸域における三次元地盤構造モデルを作成し、さらに、茨城県北部沿岸域の地震観測点（防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-net観測点及び日本原子力研究開発機構）で得られた浜通り地震の余震（内陸地殻内地震）の地震観測記録を用いて有限要素法による波動伝播シミュレーション解析を行うことで、地震観測点で得られた長周期地震動を説明する三次元地盤構造モデルの構築・最適化を行う。また、最適化に用いた地震と同程度の規模及びメカニズムの地震に加え、茨城県沖で発生するプレート間地震を用いて三次元地盤構造モデルの妥当性を評価することで、より多角的な精度を確保した地盤構造モデルを作成する。

次に、茨城県北部沿岸域における地震動の伝播特性を把握するために、最適化された三次元地盤構造モデルに対して茨城県北部沿岸域周辺で発生する地震の震源付近に仮想的な震源を設定し、波動伝播シミュレーションを実施する。具体的には、浜通り地震の震源付近の他、多くのプレート間地震が発生する茨城県沖等からの地震動の伝播特性を評価する。結果として、浜通り地震の様な内陸の浅い地震において一部の地震観測点において確認される長周期地震動は基盤の不整形性が要因であることを把握すると共に、茨城県沖で発生する地震の様なプレート境界の深い地震においては、前述した長周期地震動があまり励起されないことを把握した。

以上のように、茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関して評価・分析した既往研究について、更なる検討を行った結果を報告する。

1) 藤原了, 桐田史生, 河路薫, 山崎敏彦, 瓜生満, 安田昌宏: 茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関する評価・分析, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015.05.

キーワード：三次元地盤構造モデル、長周期地震動、福島県浜通り地震、波動伝播解析

Keywords: 3D structure, Seismic wave propagation, FEM simulation, Hamadori

2015年11月24日にペルーで発生した2個の深発地震の日本における波形の特徴

The feature of waveform in Japan of two deep earthquakes which occurred beneath Peru on November 24, 2015

\*関根 秀太郎<sup>1</sup>、津村 建四朗<sup>1</sup>

\*Shutaro Sekine<sup>1</sup>, Kenshiro Tsumura<sup>1</sup>

1.地震予知総合研究振興会

1.Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

2015年11月24日22時45分38秒と50分53秒（UTC）にブラジルとチリの国境付近の深さ600km付近において2回の地震が相次いで発生した。USGSによれば2回の地震ともMw 7.6の地震であり、メカニズム解も正断層型でほぼ似たような地震であった。

この2つの深発地震は日本全国で観測されているが、その観測波形を並べて見てみると、一つ目の地震と二つ目の地震において最大振幅比が一定ではなく、0.5倍から2倍程度のばらつきが生じていた。メカニズム解とマグニチュードがほぼ同じである2つの地震においてこのように大きなばらつきがあるのが不思議だった為、どこに原因があるかを探ることにした。

この二つの震源から見て、日本の観測網は角距離で約135度から150度の範囲に位置しており、シャドーゾーンの境目である143度は、中部地方で通過していることがわかった。また、理論走時を計算したところ、最大振幅だと判断した部分は、PKPやPKIKPなどの波群での振幅であることがわかった。この波群の振幅分布は、それぞれの地震においては角距離が140度を越えたあたりから徐々に大きくなり、143度を超えると急増するように見える。さらに2つの地震の震源が0.5度ほど離れて発生していた事によって、角距離がずれた為に、2つの地震の最大振幅比が変化することがわかった。

発表では、日本各地におけるこれらの地震の波形の特徴を示し、メカニズムの影響等を除いた分布から、地球内部構造の影響がどれくらい見られるかについて考察をする。

キーワード：シャドーゾーン、深発地震

Keywords: shadow zone, deep earthquake