

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¹*Kaoru Sawazaki¹

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、波動場のセンシビリ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¹、江本 賢太郎¹*Hisashi Nakahara¹, Kentaro Emoto¹

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¹、川方 裕則²、塩見 尚也^{2,3}
*Issei Doi¹, Hironori Kawakata², Naoya Shiomi^{2,3}

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¹、佐藤 比呂志²、石山 達也²

*Susumu Abe¹, Hiroshi Sato², Tatsuya Ishiyama²

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¹*Takayuki Miyoshi¹

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¹、武村 俊介²、古村 孝志¹

*Takuto Maeda¹, Shunsuke Takemura², Takashi Furumura¹

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¹、古村 孝志¹*Mai Hoshihata¹, Takashi Furumura¹

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 (Po, So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¹、ロペス クリスチャン²、前田 裕太¹、森岡 英恵¹、ロンドニョ ジョン²

*Hiroyuki Kumagai¹, Cristian Lopez², Yuta Maeda¹, Hanae Morioka¹, John Londono²

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性地震 (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¹、熊谷 博之¹、前田 拓人²*Hanae Morioka¹, Hiroyuki Kumagai¹, Takuto Maeda²

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 5×10^{-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 ϵ 、相関距離 a 、ゆらぎの短波長成分の量を定める κ 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、 $\epsilon = 0.05-0.2$ 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 ϵ 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、 $\epsilon = 0.05$ 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、 ϵ 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、 $\epsilon = 0.05, 0.1$ 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、 $\epsilon = 0.2$ 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 $\epsilon = 0.2$ 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 $ka = 1$ 、 $\epsilon = 0.2$ 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¹、本多 亮¹、原田 昌武¹、道家 涼介¹、齊藤 竜彦²、上野 友岳²、酒井 慎一³、森田 裕一³*Yohei Yukutake¹, Ryou Honda¹, Masatake Harada¹, Ryosuke Doke¹, Tatsuhiko Saito², Tomotake Ueno², Shin'ichi Sakai³, Yuichi Morita³

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 μ 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m³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 ± 0.6 km及び深さ方向に ± 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¹、竿本 英貴¹、千田 康介^{2,1}、木村 武志³

*Kazunari Nawa¹, Hidetaka Saomoto¹, Kohsuke Chida^{2,1}, Takeshi Kimura³

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¹*Haruo Sato¹

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¹、佐藤 春夫¹

*Kentaro Emoto¹, Haruo Sato¹

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 κ 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 κ 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 κ 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 ζ 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、 ζ 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、 ζ 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。 κ の値が小さいほど、エンベロープの ζ 依存性は強い。 ζ 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、 ζ 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 κ 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 Poli¹

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^{2,1}, Takashi Furumura¹

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¹*Tsutomu Takahashi¹

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内は一様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、一様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¹、齊藤 竜彦¹、汐見 勝彦¹*Shunsuke Takemura¹, Tatsuhiko Saito¹, Katsuhiko Shiomi¹

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 km³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