

## イメージ領域地震波干渉法によるタイムラプス調査の可能性 Possibility of timelapse survey by seismic interferometry in image domain

白石 和也<sup>1\*</sup>  
SHIRAISHI, Kazuya<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>(株)地球科学総合研究所  
<sup>1</sup>JGI, Inc.

### (1) イメージ領域の地震波干渉法

地震波干渉法 (seismic interferometry, SI) は、異なる受振点の観測波形を相互相関処理して新たな地震波形記録を合成する、速度など媒質の情報とは独立したデータ領域における処理であるというのが一般的な理解である (データ領域 SI)。この場合、地下構造イメージングのためには、SIにより合成された仮想震源記録に対してその後の処理が必要である。一方、速度情報に基づくモデリングによって観測波形記録から外挿された波動場を相関処理して構造を直接イメージングするのは、イメージ領域において地震波干渉法を適用することと理解できる (イメージ領域 SI)。このようにイメージ領域 SI には、観測波形記録に加えて媒質の情報 (速度モデル) が必要となる。しかし、速度モデルを如何に準備するかはさておき、構造のイメージングまで含めて考えれば、イメージ領域 SI とデータ領域 SI では必要な情報は同じである。

反射法地震探査におけるリバースタイムマイグレーション (reverse time migration, RTM) の原理は、発震点から震源波形を順伝播させた波動場と受振点から観測波形を逆伝播させた波動場について、同一時刻における両者の相関結果を時間積分することで地下の反射面や散乱体を結像させることである (イメージングコンディション)。この RTM に SI の概念を導入すると、パッシブな観測波形記録について信号を含む任意の時間窓で記録を切り出し、仮想発震点となる受振点から観測波形記録を順伝播させ受振点側からは観測波形記録を逆伝播させることで、イメージングコンディションを満足する点では反射面や散乱体が結像する。

パッシブな観測の場合、受振点毎に波動場は独立ではないため、同時に取得された一組の観測記録に対する順伝播と逆伝播は、全受振点から同時にそれぞれ一回限り行えばよい。データ領域 SI に基づくイメージングの場合、観測記録毎に相互相関処理を行った後に全てを加算し、各受振点位置で合成された仮想震源記録はそれぞれ独立なものとして利用する必要があるため、最終的に一度きりの RTM であるものの仮想震源の数だけ順伝播と逆伝播を繰り返す必要がある。従って、同じ速度モデルと RTM アルゴリズムを用いる想定では、条件次第ではイメージ領域 SI の方が全体の計算コストを抑えることができる。その他の特徴的な違いは、データ領域 SI では干渉処理によって観測点に情報が集約されるのに対して、イメージ領域 SI では波動場外挿によって情報が分散された後にモデル上で干渉処理が行われる。この違いによる効果については今後検討したい。

### (2) パッシブなタイムラプス調査への適用可能性

近年、各方面で常設型観測機器等を用いたパッシブな地震観測が行われつつある。また、タイムラプス調査では、自然または人為的な要因で地下の一部が変化するかしないかの把握が目的である。制御震源による調査では発震点と受振点ともに高い再現性を保持可能だが、パッシブな観測では震源の分布やメカニズムについて再現性が全く保証されない。

本研究では、イメージ領域 SI を用いて、パッシブなタイムラプス調査による構造イメージの再現性と地中で生じる物性変化の抽出可能性について、数値シミュレーションによる検討を行った。今回は第一段階として、音響場において地中の震源は全て同じメカニズムであると単純な仮定を設けた。震源分布と媒質について一方または両方に変化を与えたモデルに対する観測波形合成とイメージングを行い、いずれにも変化を与えないモデルから得た結果との相違について、複数の再現性指標を用いて評価を行った。修正を加えた SEG/EAGE の overthrust モデル (15km × 5km) を用いて、上述の各モデルについて地中にランダムに配置した震源 (P 波震源、10Hz リッカーウェーブレット) に対する 151 点の地表受振点における観測波形記録を 128 組ずつ合成し、RTM にはスムージングした速度モデルを共通して用いた。媒質の変化として、モデル中央付近の背斜部に鉛直方向には波長以下のサイズである楕円状 (1km × 0.1km) に 10% 速度低下を与えた。

シミュレーション結果からは、解釈に足る大局的な構造は再現されたものの、再現性指標を用いて評価すると、本手法によって媒質変化を抽出できる可能性がある一方で、震源分布の違いによる変化も無視できないほど大きいことがわかった。媒質の変化のみを捉えるには、それ以外の影響を取り除く手段を講じる必要がある。また、現実の問題では、震源分布以外に、メカニズムの違い、弾性体の効果、ノイズの存在などの影響で、なお困難を伴うことが予想される。

キーワード: 地震波干渉法, タイムラプス, リバースタイムマイグレーション  
Keywords: seismic interferometry, timelapse, reverse time migration

## 相似地震解析による東北地方太平洋沖地震 M9 に伴う P 波・S 波速度の時間変化 Temporal changes of P and S wave velocities in NE Japan associated to the M9 Tohoku-Oki earthquake from doublets analyses

pacheco-vivero karim<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>1</sup>; 中原 恒<sup>1</sup>  
PACHECO-VIVERO, Karim<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>1</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 理学部 地球物理学

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

Application of seismic interferometry using ambient noise and coda waves of regional earthquakes have shown notable seismic wave velocity decreases associated with the occurrence of the M9.0 Tohoku-Oki earthquake. These analyses can be generally attributed to S-wave velocity changes at shallow structures because these waves are dominant in surface waves. On the other hand, analyses of doublets have also succeeded in detecting temporal changes of direct arrival times of P waves as well as those of S waves. Also, the seismic rays pass deeper portions. However as the medium changes by the M9 earthquake are widely observed in East Japan, it is difficult to separate the observed travel time differences into the effects of hypocenter parameters and the travel time differences caused by the change in the medium beneath the stations. In this study, therefore, we develop a new method to determine temporal changes of P and S wave velocities beneath stations by simultaneously determining hypocenter parameters of doublets. We relate travel time differences of doublets to site factors at each station and the differences of hypocenter parameters. We further give a constraint in which the sum of the differences in origin times of the doublets analyzed is set to be zero, since the doublets are considered to randomly occur. As a result, our inverse problem estimates the model parameters, namely the site factors for P and S waves at each station and the relative locations of hypocenters and origin times of the doublets. Seismic data at 454 stations of the Hi-net seismic network in East Japan are used. We analyze 35 doublets with magnitudes ranging from 3.7 to 4.7 and depths from 30 to 60 km located offshore in East Japan for the period from 2005 to 2013. The seismic data are band-pass filtered between 1-2 Hz and travel time differences of arrival times of P and S waves are measured by applying a cross-spectrum method. The inversion results show that hypocenters of doublets differ by about 0.05 km and 0.12 km at a maximum each other in the horizontal and vertical directions, respectively. Even when we change the data set of doublets, the relative hypocenter locations do not significantly change, which indicates our inversion method is stably determining the hypocenter parameters. For the site factors, we find significant delays of arrival times as large as 0.04 s for the S-waves and about 0.01 s for the P-waves. Time delays are observed mainly at stations located widely in Tohoku region between 37 and 40 degrees in latitude, which are west from the M9 fault zone. The observed spatial distributions of time delays seem not to be well matched with the regions strongly shaken, which are located mostly in the eastern area of Tohoku region, or the regions where seismic velocity reductions at shallow medium are detected from analyses of bore-hole and ground surface records. These discrepancies suggest that the time delays detected from doublets originate from different regions, maybe deeper portions beneath Tohoku region.

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, Velocity change, Similar earthquakes, Direct P and S waves

## 地震波干渉法に基づく農業用フィルダム等土構造物の地震波伝播特性評価 Estimation for seismic wave propagation property of soil structure based on seismic interferometry

黒田 清一郎<sup>1\*</sup>; 増川 晋<sup>1</sup>; 田頭 秀和<sup>1</sup>  
SEIICHIRO, Kuroda<sup>1\*</sup>; MASUKAWA, Susumu<sup>1</sup>; TAGASHIRA, Hidekazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 農研機構 農村工学研究所

<sup>1</sup> National Institute for Rural Engineering, NARO

地震波干渉法は地盤だけではなくビル等の比較的大きな公共構造物の地震波伝播特性評価にも適用されてきた。また同手法の震源を用いることなく、受動的な観測記録から繰り返しの評価が可能であるという特徴と、高い再現性や微小変化に対する高い感度等の特徴から、伝播特性変化のモニタリングにも用いられて来た。

本報では同手法のフィルダム堤体等の土構造への適用性を検証するために、特に地震計が整備されているフィルダム等に注目し、デコンボリューション干渉法の適用性の検討を行なった結果について述べる。

地震計が基盤に相当する監査廊、堤体中間部、堤頂上に設置してある農業用フィルダムにおいて観測された地震データに対して、デコンボリューション干渉法の適用を行なった。得られた時間領域の応答波形は、基盤から堤頂へと上方進行波が伝播する様相を示し、またその波形の初動ピークを上昇進行波の伝播とみなしたときの伝播時間と速度は、基盤-堤頂間のスペクトル比のピーク（卓越周期）と調和的な結果となった。このことからフィルダムにおいても地震波伝播特性を地震計観測記録へのデコンボリューション干渉法によって評価できるものと考えられた。

土構造物はその材料である土の特徴から、強震動等の影響による剛性等の変化により、地震波伝播特性も大きく変化することが予測された。そこで土堤体模型の遠心力载荷振動実験において、圧縮変形や強い振動に起因する地震波伝播特性の変動の実態を明らかにするために、同手法の実験時の振動データへの適用性を検証した。遠心場における人工的な強制加振による振動時のデータだけではなく、非加振時の雑振動データからも地震波伝播特性を評価することができた。これにより、遠心力増加時の圧密・圧縮の進行に伴う剛性の上昇過程を地震波伝播速度の増大として捉えることができた。

また強制加振により、加振時に土の非線形性により一時的に見かけ上地震波伝播速度が低下するだけではなく、加振前に比べて加振完了後の剪断波速度が低下することが確認された。その後時間の経過とともに伝播速度は上昇し、剛性が回復する過程を確認できた。人工的な加振の強度の増大にともない、速度低下は顕著なものとなったが、同様に回復過程も確認することができた。400Gal相当の加振により土模型において亀裂が発生した後は回復過程は鈍化した。

以上の結果をもとに、地震波干渉法とその繰り返し計測（モニタリング）による、フィルダムやため池等土構造物の地震波伝播特性評価、および長期供用時の経年変化監視への適用性について検討する。

キーワード: 地震波干渉法, 土構造物, 堤体, 剪断波速度, 遠心载荷振動実験, フィルダム

Keywords: Seismic interferometry, Soil Structure, Dam body, Dike, Shear velocity, Centrifuge test, Fill dam

## 箱根火山の火山活動に伴う雑微動による自己相関関数の時間変化 Temporal changes of auto-correlation functions associated with the volcanic activity in Hakone volcano, central Japan

行竹 洋平<sup>1\*</sup>; 上野 友岳<sup>2</sup>; 本多 亮<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>; 原田 昌武<sup>1</sup>; 里村 幹夫<sup>1</sup>  
YUKUTAKE, Yohei<sup>1\*</sup>; UENO, Tomotake<sup>2</sup>; HONDA, Ryou<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>; HARADA, Masatake<sup>1</sup>; SATOMURA,  
Mikio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### 1. はじめに

雑微動の自己相関関数 (ACF) の時間変化は、地殻構造の時間変化をモニタリングする有用なツールとなりうる。大地震の体積変化あるいは、強震動による表層地盤の速度変化の検出のみならず、地熱地帯や火山地域における群発地震活動に伴う速度変化の検出例も報告されている (例えば、Wegler et al., 2009; Maeda et al., 2010; Ueno et al., 2012)。本研究では、活発な地震活動が頻発する箱根火山において ACF の時間変化を求め、火山活動との関係について調査した。

### 2. 箱根火山の群発地震活動

箱根火山は伊豆衝突帯北部に位置し、周囲を直径約 15km の外輪山に囲まれる第四紀の活火山である。箱根カルデラ内では、群発地震が頻繁に発生しており、近年では 2001 年、2006 年、2008~2009 年、2011 年及び 2013 年に特に活発な群発地震活動が発生した。このうち、2011 年東北地方太平洋沖地震直後に発生した地震活動を除く、それぞれの地震活動に対応して、周辺の国土地理院 GNSS 観測点において山体の膨張を示す地殻変動が観測された。こうした地殻変動は、カルデラ下深さ 10km 付近における、球状圧力源の変動もしくはダイクより説明することができる (例えば、代田ほか、2009; 原田ほか、2009)。加えて、2001 年及び 2013 年の地震活動時においては、カルデラ内に設置されている傾斜計にも地殻変動が観測され、これらの変動源として浅部での開口クラックが推定されている (例えば、代田ほか、2009; 宮岡ほか、2013)。深部のダイクについてはマグマの貫入もしくは体積増加、浅部の開口クラックについては熱水の貫入を反映したものとして考えられている (代田ほか、2009)。マグマや熱水の貫入や体積増加に伴い、その周辺の数構造が変化すると予想されるため、ACF においても変化が生じることが期待される。

### 3. データ及び手法

箱根カルデラ内及び周辺に設置された、神奈川県温泉地学研究所、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁観測点における連続地震波形データを解析に使用した。2013 年 1 月~3 月の活発な地震活動に関係した速度変化の検出をターゲットとし、2012 年 1 月から 2013 年 12 月までの 2 年間の波形データを使用した。上下動成分の連続地震波形データに 1-3Hz のバンドパスフィルター処理を施すとともに、振幅値を 1bit に規格化した。1 時間毎の ACF を計算し、それを 24 時間分足し合わせ 1 日毎の ACF を求めた。さらに、より安定した ACF を得るために、1 週間分の ACF をスタッキングした。このようにして得られた 1 日毎の ACF に対して、時間遅れ 4-15 秒に見られる波群の変化が観測点周辺の速度構造の微小な変化によるものと仮定して、その速度変化量を全期間の ACF のスタッキングからもとめたりファレンス ACF との比較により求めた (例えば、Wegler et al., 2009)。

### 3. 結果と解釈

カルデラ内に設置された観測点のうち、駒ヶ岳観測点と二の平観測点において、群発地震活動に先行して 2012 年 12 月上旬ごろから緩やかな速度低下が始まり、2013 年 6 月頃にかけて 0.4%~0.6% 低下した。カルデラ内の大涌谷噴気地帯近傍に設置されている大涌谷観測点では、地震活動が活発化した 1 月下旬頃から 0.8% 程度の急激な速度低下が見られた。それ以外の観測点については、変動幅の大きな速度変化が常時から生じており、一連の活動に関連する速度変化は検出できなかった。駒ヶ岳観測点と二の平観測点の速度低下については、箱根火山周辺の国土地理院 GNSS データによる山体の膨張を示す基線長変化の開始時期と一致している。大涌谷観測点の速度変化については、地震活動の活発化時期並びに傾斜変動の開始時期直後から始まっている。こうしたことから、火山活動やそれに伴う地殻変動変化に伴い、ACF が時間変化した可能性が示唆される。ACF の時間変化の原因には地殻内へのマグマなどの貫入 (例えば、Maeda et al., 2010) やマグマ貫入に伴う開口クラックで生じたひずみ変化によるもの (例えば、Ueno et al., 2012) が考えられる。今後は、地殻変動源によるひずみ分布や ACF のラグ時間毎の位相遅れを調べることにより、速度変化の原因についてより詳細な議論を行う予定である。

### 謝辞

本研究では、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁観測点の地震波形データを使用させていただきました。東京大学地

SSS27-04

会場:411

時間:4月29日 09:45-10:00

震研究所前田拓人博士から自己相関関数の計算に関するアドバイスをいただきました。

キーワード: 自己相関関数, 火山活動, 箱根火山

Keywords: auto-correlation functions, volcanic activity, Hakone volcano

## 2011年東北地方太平洋沖地震における津波の分散性と非線形性 The roles of dispersion and nonlinear effects in the 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami

齊藤 竜彦<sup>1\*</sup>; 稲津 大祐<sup>1</sup>  
SAITO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>; INAZU, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

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

津波の伝播過程の理解を深めることは、信頼度の高い震源過程推定や津波予測に不可欠な高精度グリーン関数を得るためだけでなく、波動現象の基礎研究として興味深い。本研究では、波動現象としての2011年東北地方太平洋沖地震津波（以後、東北地震津波）に注目し、波の分散性と非線形性が伝播過程で果たした役割を解明することを目的とする。まず、高分解能の津波波源モデルと非線形分散波方程式に基づく差分シミュレーションによって、沿岸・沖合で実際に観測された津波波形記録、そして、仙台平野の浸水域を忠実に再現した。これにより、使用する津波波源と伝播方程式の妥当性を確認した。さらに、非線形分散波方程式の代わりに、分散現象をモデル化できない非線形長波方程式、そして、非線形現象をモデル化できない線形分散波方程式を使用し、シミュレーション結果と比較することで、東北地震津波における分散性と非線形性の影響を評価した。その結果、以下の知見を得た。太平洋を伝播する津波のモデル化においては分散性を考慮することが非常に重要であり、分散性を考慮しない場合、津波最大波高分布を過大評価する。実際、外洋（水深>1000 m）において最大波高(>2m)を得た観測点の津波波形記録を正確に再現するには分散性を考慮する必要があった。非線形現象は沿岸浅部での津波の振る舞いを再現するために必要であることが知られている。沖合に位置する観測点であっても、津波波形記録の後続波群は陸から反射する津波で構成される。そのため、非線形現象を正確に考慮することで沖合波形記録の再現性が高まることを確認できた。特に、岩手沖で観測された東北地震津波の場合、陸地の浸水を考慮することよりも方程式の非線形項を考慮することのほうが、沖合波形の後続波を忠実に再現することに重要な役割を果たしている。

キーワード: 津波, 分散, 非線形, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: tsunami, dispersion, nonlinear wave, the 2011 Tohoku-Oki earthquake

## 地すべりや山体崩壊に伴う津波の数値解析 Numerical simulation of tsunamis due to a landslide

吉川 諒<sup>1\*</sup>; 柿沼 太郎<sup>1</sup>  
YOSHIKAWA, Ryo<sup>1\*</sup>; KAKINUMA, Taro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

MPS法を適用し、地すべりや山体崩壊に伴う津波生成の数値解析を行なった。桜島の山体崩壊に伴う土砂流入を想定した場合、ここで設定した条件では、最大で10 m強の津波高さが算出された。津波高さは、流入土砂の総質量、初期形状の高さ及び長さや、流入速度に依存する。また、水面下で生じる地すべりでは、水に対する初期の相対的な位置エネルギーが大きいと、津波高さがあまり大きくならない。

キーワード: 津波, 地すべり, 山体崩壊, MPS法  
Keywords: tsunami, landslide, sector collapse, MPS method

## 震源イメージングに対する点広がり関数 Point spread functions for earthquake source imaging

中原 恒<sup>1\*</sup>; ヘイニー マシュー<sup>2</sup>  
NAKAHARA, Hisashi<sup>1\*</sup>; HANEY, Matthew<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> アメリカ地質調査所  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku Univ., <sup>2</sup> U.S. Geological Survey

### はじめに

近年、地震の震源イメージングにおいて、波形インバージョン法 [例えば Hartzell and Heaton (1983)] に加えて、バックプロジェクション (BP) 法 [例えば Ishii et al. (2005)], 時間反転 (TR) 法 [例えば Larmat et al. (2006)], ハイブリッドバックプロジェクション (HBP) 法 [Yagi et al. (2012)] などの手法が適用されている。また、それらの手法間の理論的な関係も明らかにされている [例えば Kawakatsu and Montagner (2008), Fukahata et al. (2013)]。本研究では、光学分野で用いられる点広がり関数 (Point Spread Function; PSF) の概念を用いれば、震源イメージングの物理的意味を理解しやすくなることを示す。また理想的な場合には、震源イメージングの PSF は、地震波干渉法の問題として解釈できることを示す。

### 定式化

(運動学的) 震源インバージョンとは、観測される波動場から、既知のグリーン関数を用いて、震源断層面上のすべり量分布を推定することであり、その基礎となる観測方程式は表現定理に基づいている。この手法は震源過程解析の正攻法と考えるとよいと思うが、もう少し簡略化された震源イメージング法もあり、BP 法、HBP 法、TR 法などがこれにあたる。Claerbout (2001) の物理探査の教科書によれば、イメージングとは、観測方程式にグリーン関数のアジョイントをかける操作として数学的に定義されている。つまり、各観測点の波動場とグリーン関数との相互相関をとり、それをすべての観測点について重畳したものが、求められる震源イメージとなる。Fukahata et al. (2013) により指摘されているように、この操作は HBP 法とかなり近い。この震源イメージが、観測点数の制限や分布の片寄りなどのため、どれだけ真の震源過程からずれる (ぼける) かを示すのが、PSF である。この PSF は、観測点から震源の 2 点までのグリーン関数の相互相関をすべての観測点について重畳したものととして、表現することができる。

震源と観測点を空間的に離散化すれば、観測方程式を行列で書き下すことができる。正規方程式の導出には、観測方程式の両辺にグリーン関数のアジョイント (随伴) 行列をかければよい。こうして得られる正規方程式を解くことが震源インバージョンである。そして、これは PSF を補正することによって、真の震源過程を推定することを意味する。また、その他の震源イメージングの手法では、PSF の影響を補正できていないことになり、この影響によるゴーストに注意する必要がある。

### PSF の地震波干渉法による解釈

以下では、震源イメージングの PSF をさらに物理的に解釈することを考える。そのため、理想化された状況であるが、観測点が震源をぐるりと取り囲むように連続的に分布していると仮定する。そのときに、点広がり関数は、震源の 2 点へのグリーン関数の相互相関を全観測点について重畳したものであることを思い出そう。震源と観測点とを入れ替えるグリーン関数の相反性を利用すると、点広がり関数は、ぐるりと取り囲んだ震源に対して、2 点の観測点間の波形の重畳された相互相関を求める問題に置き換えることができる。これは地震波干渉法によるグリーン関数復元の問題と完全に等価である。これにより、震源イメージングの点広がり関数は、地震波干渉法の問題として解釈可能になる。さらに具体的に考察を進めるため、2 種類の震源を考える。まずはシングルフォース震源の場合である。この場合は、点広がり関数は、2 点間の (シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部に等しいことが分かる。この結果は、全く等価ではないが類似の TR 法の観点から、すでに Fink (2006) によって指摘されている。次に、モーメントテンソル震源を考える。この場合は、点広がり関数が、(シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部を、2 点の観測点座標で、それぞれ 1 階ずつ空間偏微分したものに对应することが導かれた。これは、本研究により初めて明らかになった結果である。また 2 種類の震源のいずれの場合にも、地震波干渉法が成立する場合には、震源イメージは、真の震源過程を 1 回時間積分した結果になることが示唆される。

### まとめ

震源イメージングの問題を PSF の概念を利用して考察した。その結果、震源インバージョンでは PSF の影響を補正した震源イメージが得られること、他のイメージング手法では PSF の影響が残るため、データの適切な重みづけを行うなどゴーストの影響に注意する必要があることが分かった。また、グリーン関数の相反性を利用すると、PSF は地震波干渉法の問題として解釈可能であることも明らかになった。本研究は、震源インバージョン法の意味をよく理解する上で有益であろう。



---

SSS27-07

会場:411

時間:4月29日 11:00-11:15

キーワード: 震源イメージング, 点広がり関数, 地震波干渉法

Keywords: Earthquake source imaging, Point spread functions, Seismic interferometry

## 減衰媒体におけるスイープ波形の伝播過程とその利用 Analysis and application of wave propagation process of sweep signals in attenuative media

松島 潤<sup>1\*</sup>

MATSUSHIMA, Jun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

The sweep signal is the most extensively used land seismic exploration technique. In conventional data processing using sweep signals, a received trace is cross-correlated with source sweep to convert the extended sweep signal into a pulse signal. For attenuation estimation, a time window is often used to compute the frequencies of the direct-arrival waveforms. Uncorrelated sweep signals are useful in the discussion of harmonics simply because the uncorrelated data are one of the few situations in which we commonly input a nearly pure frequency into the earth. Our previous study proposed a method that enables accurate measurement of ultrasonic attenuation using sweep signals under the assumptions that velocity dispersion can be ignored and the quality factor ( $Q$ ) is not dependent on frequency. This method is independent of the effect of windowing while the windowing effect underestimates the attenuation results due to a spectral leakage effect. In most cases, however, the presence of attenuation is accompanied by velocity dispersion because of causality. The presence of velocity dispersion causes attenuation to be disturbed, although the proposed method is not so sensitive to the presence of velocity dispersion. The present paper elucidates the wave propagation process of sweep signals in attenuative media with velocity dispersion to develop the method which can take the effect of dispersion into account. We obtain a time-scale representation of sweep signals by using the continuous wavelet transform method to perform a time-series analysis of a seismic trace that decomposes the trace into its respective amplitude and phase components in both the frequency and time domains.

キーワード: 地震波減衰, 速度分散, スウィープ波形

Keywords: Seismic attenuation, velocity dispersion, sweep waveform

## 不均質な岩石試料内の3次元波動伝播シミュレーション 3D numerical simulation of seismic wavefield in inhomogeneous rock samples

吉光 奈奈<sup>1\*</sup>; 古村 孝志<sup>1</sup>; 前田 拓人<sup>2</sup>  
YOSHIMITSU, Nana<sup>1\*</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>1</sup>; MAEDA, Takuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大院情報学環, 地震研, <sup>2</sup> 東大地震研

<sup>1</sup> CIDIR/ERI, The Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> ERI, The Univ. of Tokyo

### はじめに

岩石試料の透過波実験を3次元差分法(FDM)による波動伝播のシミュレーションで再現し、実測波形に見られる特徴的な位相の起源を、計算波形の比較によって同定した。室内岩石実験では、試料内部の構造変化や亀裂生成の様子を詳細に観察するために透過波を用いたモニタリングが行われてきた(例えば, Yukutake et al., 1989)。しかし、実験室で通常扱われる岩石試料は一辺が数 cm 程度と小さく、記録された透過波には試料の端面で何度も反射したと考えられる多数の後続相が含まれる。そのため、これまで行われてきた解析は、後続相の影響を受けない初動付近の波を用いたものが一般的だった。後続相の成因を明らかにし、波形全体を解析に積極的に利用できるようなれば、得られた透過波形から媒質の構造をより詳細に評価することが可能になると期待される。

### 解析手順

まず、岩石実験における実測波形の取得では、Westerly 花崗岩試料の周表面上に貼付した圧電素子に対してステップ電圧を与え、透過波による試料表面の振動をレーザー Doppler 振動計によって速度波形として記録した。震源位置は円筒軸方向の中央とした。

シミュレーションでは、実験室で集録された波形との比較をおこなうため、縦横比 1:2 の円柱形試料に相当する解析領域を、格子間隔 100  $\mu\text{m}$  で 512  $\times$  512  $\times$  1024 グリッドに離散化してモデル媒質とした。岩石試料の持つ不均質性を計算モデルに取り入れるために、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いて Westerly 花崗岩の試料内部を撮影し、X 線吸収係数と密度・弾性波速度が比例関係にあると仮定して、計算モデルの各グリッドにおける密度 (2.5 - 3.1 g/cm<sup>3</sup>)、P 波速度 (5.0 - 6.0 km/s)、S 波速度 (2.8 - 3.5 km/s) を与えた。岩石実験に用いた圧電素子の動きを模したシングルフォースの点震源を入力として、3次元 FDM 計算により波動場を計算した。得られた計算波形には、圧電素子の感度帯域と同じ 50 kHz - 2 MHz のバンドパスフィルタをかけて、実測波形との比較をおこなった。

### 結果・議論

計算によって得られた波動場は、速度の発散場と回転場から P 波と S 波の速度振幅に分離して評価した。波動伝播のアニメーションから、試料内部に入射した波が曲率のある試料の周境界で反射波 (PP, SS, PPP, SSS 等) やその変換波 (PS, SP, PPS 等) を生成しながら伝播していく様子が確認できた。震源から出た波が試料周境界で反射して震源方向へ戻っていくと同時に、試料の上下端で反射した波が試料全体を覆うように伝播し、別起源の反射波と変換波が重畳することによって、時間の経過とともに複雑な波動場が形成されていく。また、鉱物粒子による不均質性による散乱が試料全体に見られたが、現時点で仮定した構造下ではこれらの反射・屈折波が波動場へ与える影響は限定的であった。

震源と同一平面内にある観測点で得られた速度波形を、動径方向に回転して実測波形との比較を行ったところ、波形全体の位相形状は比較的よく一致することが確認できた。観測波形には、大きな振幅を持つ2つの特徴的な位相が見られたが、計算波形との比較からこれらが直達 P 波と SS 波であることがわかった。さらに、SS 波到達後の複雑な波形は、主として試料周境界上で何度も反射・変換された S 波によって構成されていることが明らかになった。

キーワード: 透過波, 反射波, 岩石試料, 数値シミュレーション

Keywords: transmitted wave, reflected wave, rock sample, numerical simulation

## 深さ依存速度構造下の大規模地震波伝播数値シミュレーションのための曲線座標系 差分法 Curvilinear grid finite difference method simulation of seismic wave propagation for depth-dependent velocity structure

前田 拓人<sup>1\*</sup>  
MAEDA, Takuto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>ERI, The University Tokyo

深さに応じてグリッドサイズが滑らかに増大するような曲線座標系を用いた差分法に基づく地震動シミュレーションを提案する。地震波伝播シミュレーションに広く用いられている差分法は、空間を一波長あたり6?10格子程度以上に細かく分割し、弾性体もしくは粘弾性体の運動方程式を離散化して陽的に解く方法である。この方法は簡便であり、かつ大規模な並列シミュレーションにも非常に向いているが、数十?数百 km スケールの計算においては、深さに依存する地震波速度構造のために波長帯域が広く、計算領域全体を一様な格子間隔で覆うのはきわめて不経済である。浅部の堆積層はきわめて細かい空間格子を要求するが、そのような格子では深部の高速度領域で安定条件を満たすため非常に細かい時間刻みを取らざるを得ない。この問題に対処するため、浅い部分と深い部分で異なる格子サイズを用い、それらを空間補間で繋ぐ不連続格子法 (Aoi and Fujiwara, 1999; Lee et al., 2008) が用いられてきた。しかし、この方法では急激に格子サイズが変わることに伴う数値不安定の可能性が指摘されている (Kristek and Moczo, 2010)。Pitarka (1999) や Moczo (1989) は差分公式を改変することで深さ方向にのみ格子サイズを柔軟に変更可能な手法を提案した。しかし、座標系の直交性を維持しつつ格子形状を変更するには限界がある。本研究で報告する曲線座標系では、平均的な地震波速度の増大に合わせてすべての方向の格子間隔が滑らかに大きくすることができるため、一波長あたりの格子数を一定程度に保つことで経済的に大規模なシミュレーションが可能になる。

本研究で採用した曲線座標系によるシミュレーションでは、数値微分ならびに積分を行う座標系を任意の計算座標系に変換しつつ、速度・応力等の成分は物理空間のカーテシアン座標系のもをそのまま用いる。計算座標系で空間等間隔刻みの差分法を適用することで、実空間で複雑な座標系形状であっても簡便な差分法で計算が可能となる。従来この手法は複雑な地形形状に沿った座標系を用いるために使われてきた (Hestholm, 1999) が、本研究ではこれを深部と浅部の間の速度コントラストを吸収するために利用する。一方、地表あるいは海底の境界は階段形状で近似した。近年のスタガードグリッド差分法の関する研究 (e.g., Nakamura et al., 2012) から、解像度が十分細かければ二次の差分法と適切な媒質平均化を用いることで階段形状近似によって境界条件がよく再現できることが明らかにされている。曲線座標系は任意の座標系形状に適用可能であるが、本研究では深さ方向の計算座標値にのみ依存し、深さとともに滑らかに増大する関数を通じて座標系を定義する。このような1変数関数を用いることで、運動方程式の座標変換のために必要となる係数ならびにヤコビアンを簡略化し、曲線座標系の欠点である計算量と所要メモリ量の増大を最小限にすることができる。また、計算座標系における水平面は物理空間においても水平面になり、対応関係が明確であるという特徴もある。一方この座標系は非直交座標系であり、座標変換された運動方程式はカーテシアン座標系よりも多くの方向への空間微分を必要とする。そこで、回転食い違い格子座標系 (RSG; Saenger et al., 2000) を採用した。この座標系では応力テンソルと速度ベクトルの各成分がそれぞれ同じ場所に配置されるため、いかなる方向の微分についても中心差分を維持することが可能である。

具体的な座標系として、鉛直方向に相当する座標軸がバターワースフィルタの伝達関数形状に比例するような形状関数を試験関数として検討した。この座標系は特徴的なカットオフ深さを持ち、それ以上の深さでグリッド間隔が深さに比例して増大する一方、浅い側はカーテシアン座標系に漸近するという特徴をもつ。したがって、浅い側を一定深度まで十分に細かいカーテシアン座標系で解き、一定深度より深い部分は深さとともにほぼ線形にグリッドを粗くすることが特段の接続操作なしに可能となった。予備的な二次元SHならびにP-SVシミュレーションの結果、浅い部分で急峻に座標軸が変化し、最大10倍のグリッドサイズ比があるような構造下でも安定かつ高精度に地震動が計算できることが確認された。本研究の座標系はすべて解析的な関数形状で与えられるため、座標変換に伴う変換係数の数値誤差の影響は非常に小さく、かつ高速・省メモリの評価が可能である。今後この方法を三次元に拡張することによって、浅部低速度から深部構造までをより適切にカバーした広帯域シミュレーションが実現可能になると期待される。

キーワード: 地震波伝播, シミュレーション, 差分法, 曲線座標系

---

SSS27-10

会場:411

時間:4月29日 11:45-12:00

Keywords: seismic wave propagation, numerical simulation, finite difference method, curvilinear coordinate

## 反射法データの波形インバージョンと断層構造調査への適用 Waveform inversion of seismic reflection data and its application to fault structure survey

渡辺 俊樹<sup>1\*</sup>; 小林 雅実<sup>1</sup>; 山岡 耕春<sup>1</sup>; 伊藤 谷生<sup>2</sup>; 狩野 謙一<sup>3</sup>; 阿部 進<sup>4</sup>  
WATANABE, Toshiki<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Masami<sup>1</sup>; YAMAOKA, Koshun<sup>1</sup>; ITO, Tanio<sup>2</sup>; KANO, Ken-ichi<sup>3</sup>; ABE, Susumu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>帝京平成大学, <sup>3</sup>静岡大学, <sup>4</sup>(株)地球科学総合研究所  
<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Teikyo Heisei University, <sup>3</sup>Shizuoka University, <sup>4</sup>JGI, Inc.

波形インバージョン (Tarantola, 1984) は地下構造イメージングの最新の手法であり、非線形最小二乗法により観測データの波形を最もよく説明する物理パラメータのモデルを再構築する手法である。波形インバージョンは走時トモグラフィよりも高分解能な構造モデルを与える。近年の計算機環境の発展により、2次元、3次元のフィールドデータへの実際的な適用が加速されている研究分野である。

本研究では、本来孔間データに向けて開発されたこの手法を反射法データに適用するための検討を行った。問題点として、(1) 地表に設置した震源と観測点付近で感度が特異点的に振る舞うこと、(2) 断面の深部における感度の減衰、(3) 表面波の混入、がある。これらの問題点の影響を低減するために、修正勾配への深度に関する重み付けの導入とニアオフセットトレースの抑制をおこなった。与えられた構造モデルに対して数値的に生成した波形データを用いて、反復修正により明瞭な構造イメージを再構成できることを示した。

さらに、この手法を、2012年に実施された富士川河口断層一糸静構造線反射法構造探査(2012FIST)(伊藤ほか, 2013)における広角反射法のフィールドデータに適用し、大宮断層の詳細構造の解明を試みた。再構成された速度構造は大宮断層が逆断層であるという最新の解釈と整合しているものの、調査で使用した震源数が不足していたため、よく収束した結果とは言い難かった。将来の調査デザインのための問題点や必要事項について議論する。

キーワード: 反射法, 波形インバージョン, 断層構造, 非線形逆問題

Keywords: seismic reflection method, waveform inversion, fault structure, non-linear inversion

## Hi-net 観測点のサイト増幅特性 Site amplification factor of the Hi-net stations

上野 友岳<sup>1\*</sup>; 齊藤 竜彦<sup>1</sup>; 汐見 勝彦<sup>1</sup>  
UENO, Tomotake<sup>1\*</sup>; SAITO, Tatsuhiko<sup>1</sup>; SHIOMI, Katsuhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup>NIED

防災科学技術研究所が運用する基盤の地震観測網の一つに高感度地震観測網 Hi-net がある。Hi-net 観測点では、地表における様々な地動ノイズを低減するために、3成分速度型高感度地震計がボアホール底部に設置されている。その多くは深さ 100-300m に設置されているが、地震基盤が深いとされる平野部では 2000m 以深にセンサーを設置している観測点もある。また、他のプロジェクトにより整備された旧式あるいは簡易型の観測施設では、地表もしくは深さ数十 m にセンサーが設置されている点もある。このように、Hi-net では、様々な設置環境で観測を実施しているため、観測点固有の増幅特性が存在する。そこで、我々は観測された地震波形データに基づき、Hi-net 観測点のサイト増幅特性を求め、その特徴を調べた。

サイト増幅特性を求めるためには、比較的広範囲の観測点で記録されるマグニチュードが中程度以上の地震データが必要とされる。しかしながら、Hi-net では感度の高いセンサーを用いているため、このような地震の実体波記録は飽和してしまう可能性がある。そこで、観測記録を確実に利用するため、地震波のコーダ部分を用いてサイト特性を推定した。2000年10月から2010年12月に日本全国の内陸の深さ 20 km 以浅で発生した M3.5 以上の地震を解析対象とし、震央距離 150 km 以内に位置する観測点で得られた地震波形のコーダ部（地震発生時からの経過時間 65-75 秒部）をデータとした。なお、解析においては、その総和が 0 になるように条件付けした。この解析を 0.6-1.0Hz, 1-3Hz, 2-4 Hz, 2-6 Hz, 4-8 Hz, 6-9 Hz, 8-12 Hz の各帯域に分け、時間領域でサイト特性を求めた。

サイト増幅特性の頻度分布は高周波側で正規分布に近い特徴を示す一方、低周波側で正規分布が崩れ、増幅率が相対的に小さい観測点が多くなる傾向が見られた。サイト増幅特性と地表面標高、センサー標高、掘削長を比較すると、いずれも相関が低かった。一方で、地震計設置位置における地震波速度とサイト増幅特性には、若干の相関性が見られた。ただし、S 波速度が 1.5km/s 程度以上となる場所にセンサーが設置された観測点では、サイト増幅特性はほぼ一定値となった。一方、空間的な特徴としては、主に西南日本でサイト増幅率が小さく、東北日本で相対的に大きくなる傾向が見られた。東北日本では房総半島、新潟県、北海道東部地域のような平野部、あるいは東北脊梁部のような火山地域に集中してサイト増幅率の高い観測点があることが分かった。

キーワード: Hi-net, サイト増幅特性

Keywords: Hi-net, Site amplification factor

## 常時微動の相互相関テンソルのクロスタームを用いた実体波とレイリー波の分離 Separating body and Rayleigh waves with cross terms of the cross-correlation tensor of ambient noise

高木 涼太<sup>1\*</sup>; 中原 恒<sup>2</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>  
TAKAGI, Ryota<sup>1\*</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>2</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 東北大・理・地球物理

<sup>1</sup>RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Geophysics, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

We develop a novel method to separate body and Rayleigh waves with the vertical-radial (ZR) and radial-vertical (RZ) components of the cross-correlation tensor of ambient noise. Furthermore, analyzing ambient noise records observed at a seismic array, we validate the method. For the separation, we utilize the difference in polarizations between the rectilinear P and the elliptic Rayleigh waves. Assuming the two-dimensional surface and three-dimensional body waves are the superposition of random uncorrelated plane waves, we derive two fundamental characteristics of the ZR and RZ correlations. One is that, between the ZR and RZ correlations, Rayleigh wave contributions have the opposite signs and P waves have the same signs. The other is that, for both ZR and RZ correlations, Rayleigh wave contributions are time-symmetric and P waves are time-antisymmetric. Accordingly, we can separate P and Rayleigh waves by just taking the sum and difference between ZR and RZ correlations and by just taking the time-symmetric and time-antisymmetric components. This method can be performed (1) without any knowledge of velocity structure, (2) using only two stations with three-component sensors on a ground surface, (3) even in the case of anisotropic wave incidence, and (4) with the quite simple procedure. We consider that the developed method can make better use of three-component observations of ambient noise for evaluating the cross-correlation tensor accurately, for improving deep velocity structure using both of extracted body and surface waves and, more fundamentally, for understanding the composition of ambient noise.

キーワード: 常時微動, 地震波干渉法, 相互相関関数, 波動場分離, 粒子軌跡, 実体波とレイリー波

Keywords: ambient noise, seismic interferometry, cross-correlation function, wavefield separation, polarization, body and Rayleigh waves



## アクティブソースによる高周波地震波の伝搬の研究 Study of high-frequency seismic wave propagation by active-source experiments

谷本 俊郎<sup>1\*</sup>; 岡元 太郎<sup>2</sup>  
TANIMOTO, Toshiro<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学サンタバーバラ校, <sup>2</sup>東京工業大学地球惑星科学科  
<sup>1</sup>University of California, Santa Barbara, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Seismic wavefields generated by resonant shaking experiments of the Millikan Library, on the campus of California Institute Technology (Pasadena, California, USA), were analyzed. Because the resonant shaking frequencies are 1.12 Hz (the east-west direction) and 1.64 Hz (the north-south direction), this active-source experiment can provide opportunities for studying high-frequency seismic wave propagation in Southern California.

Two such experiments for each frequency were analyzed; for the north-south shaking experiments, the harmonic signals were observed up to distance 323 km in one experiment and up to 396 km in another experiment. For the east-west shaking (1.12 Hz), the maximum distance was 200 km but most observations were confined to less than 100 km.

Spectral amplitudes showed a systematic decaying trend with distance in all cases. Numerical simulations indicated that the predominant signals were surface waves. Assuming that all signals were surface waves, we obtained estimates for the parameter  $QU$  for surface waves where  $Q$  is the attenuation parameter and  $U$  is the group velocity (in km/s). There was, however, a major break in the amplitude-distance trend at a distance about 50 km; for data with distance less than 50 km,  $QU = 95 \pm 16$ , where  $U$  is in km/s. For data beyond 50 km, we obtained  $QU = 1454 \pm 226$ . This change in trend must be related to the regions sampled by waves, as the shorter-distance data were dominated by paths in the Los Angeles basins while the longer-distance data did not contain paths in the basin structures.

Through cross correlations between MIK (station in the Millikan library) and a station in the regional network, phase information was also analyzed. For many stations, phase was stable for frequencies between 1.637 and 1.638 Hz which meant that phase is locked between MIK and a station. While it was not possible to estimate phase velocity, because the number of cycles cannot be resolved for high-frequency waves, a stacking approach for multiple-window data allowed us to estimate frequency derivative of phase and group velocity for 25 paths. Group velocity between MIK and network stations are mostly less than 2 km/s. For stations with distance less than 50 km, most group velocity results were about 0.5 km/s or less. Combined with the estimate for  $QU$  from the amplitude-distance data,  $Q$  is estimated to be 190 for distances less than 50 km. This estimate, however, contains uncertainty up to a factor of two as variations in group velocity estimates differ from station to station.

キーワード: 地震波伝搬, 地殻構造, アクティブソース実験  
Keywords: Seismic wave propagation, Crustal structure, Active source experiment

## 海底地震計記録を用いた北西太平洋域の構造推定: 短周期成分 (>1 Hz) の活用 Estimations of seismological structure in the northwestern Pacific using OBS records: Approaches from >1 Hz component

利根川 貴志<sup>1\*</sup>; 深尾 良夫<sup>1</sup>; 藤江 剛<sup>1</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 杉岡 裕子<sup>1</sup>; 伊藤 亜妃<sup>1</sup>  
TONEGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>; FUKAO, Yoshio<sup>1</sup>; FUJIE, Gou<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; SUGIOKA,  
Hiroko<sup>1</sup>; ITO, Aki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

Tentative ocean bottom arrays using seismometer, hydrophone and pressure gauge have recently been deployed through many scientific projects all over the world. However, in Japan, a permanent ocean bottom monitoring system, called DONET, is now working, and dense cabled-OBSs (ocean bottom seismometers) have been constructed around the Japan Trench. It seems that, compared to other countries, such environments in Japan potentially give us some advantages for investigating the Earth's interior, seismic activity, and wavefields under the ocean. In order to easily kickoff the use of these records, it would be better to know characteristics of wavefields observed at seafloor.

A large amplitude in the frequency range of 0.07-0.5 Hz can be often seen in the spectrum of noise record observed at seafloor, which is known as microseisms that are generated by wind propagating sea surface. This large amplitude also emerges at land observation. At frequencies longer than 0.02 Hz in the spectrum observed at typical broadband OBS, the amplitude of infragravity wave is strong in the vertical component, and that of tilt effect is dominant in the horizontal component.

In this presentation, avoiding the use of such longer period components, we focus on shorter period components than 1 Hz of records observed at OBSs. We introduce what kind of analyses we can do hereafter with permanent OBS records, which is based on the use of records observed at tentative ocean bottom arrays. In particular, we will introduce ambient noise and receiver function analyses, in which short period components are mainly used.

キーワード: 海底地震計記録, 短周期成分, レシーバ関数, 地震波干渉法

Keywords: OBS records, short period components, receiver function, seismic interferometry