

Coda-Q を用いた地域地殻応力場変化推定のための基礎的研究 Fundamental study on estimation of change in local stress field using coda-Q

岡本 京祐^{1*}, 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹

OKAMOTO, Kyosuke^{1*}, MIKADA, Hitoshi¹, GOTO, Tada-nori¹, TAKEKAWA, Junichi¹

¹ 京都大学工学研究科

¹ Graduate School of Engineering, Kyoto University

本研究では、地震波末尾のコーダ部分の減衰率から得られる Coda-Q 値が地殻の地域応力場変化を反映するという仮説を立て、その仮説を数値実験により実証した。

過去には Coda-Q 値が地震前に変化することや、火山体周辺の低速度地域で異常を示すことが言われていたが、決定論的に Coda-Q 値の変化に影響を及ぼす要因を見出した研究はなく、変化を引き起こす原因は判然としていなかった。言い換えれば、不均質の度合いの強い媒質に対する地震波でのイメージングは困難であり、個々の散乱体や断層の形状・大きさなどを決定論的に決めて解析されることは少なかった。そのため、不均質の度合いの強い媒質に対しては、Coda-Q 値を用いた統計論的解釈に基づく解釈がほとんどであったと言える。本研究では、それら統計論的解釈の中で、Aki (2004) の観測結果に着目した。この研究では米国カリフォルニア州サンアンドレアス断層周辺の地震頻度と、当該地域の Coda-Q 値の逆数が時系列で似た挙動を示し、両者の相互相関を取ると相関係数が 0.8 以上という高い値を取ることが言われている。この事実に基づき、我々は「地震活動を引き起こす地殻応力場変化と Coda-Q 値が相関性を持つ」という仮説を立てた。また、1995 年に発生した兵庫県南部地震前後において、Coda-Q 値や b 値といった統計量がともに大きな変化を示したことが言われており、こうした統計量と地下の物理的状態との間に何らかの規則的関係が存在する可能性があり、前述の仮説を支持している。

仮説の検証のために、数値計算による波動伝播シミュレーションにより、コーダ波の応力に対する応答性を検討する。本研究では、コーダを構成する波群が地殻内に分布する散乱体から発生する散乱波であると仮定し、数値的にコーダを形成し、その Coda-Q 値を求めることとした。既に岡本ほか (2010) では、地殻モデルに応力が載荷された際に弾性変位を考慮すると、Q 値変化から応力の大きさと方向が定量的に分かる可能性があることが示されている。しかし、この研究では応力変化に伴う Coda-Q 値変化が系統的であるとはいえ、微小な変化 (数十 MPa の応力を載荷した際に、%オーダー程度の Coda-Q 値変化) だったため Coda-Q 値変化の実測値を説明できるモデルとは言えなかった。そこで、本研究では応力が載荷された際に Coda-Q 値変化を及ぼす要因として、弾性変位の他にクラックの開鎖・生成及び配置の変化、弾性波速度異方性の発生を考慮することとする。また、震源は十分遠方にあり観測点においては、平面波がモデル下方から一様に入射する状態を仮定した。数値計算の結果、Coda-Q 値の変化と平均法線応力 (封圧) の大きさの変化に比例関係があることが明らかとなったことに加え、Coda-Q 値変化は実測を説明できる可能性があることが分かった。このことは、Coda-Q 値変化より応力の大きさを推定できる可能性があることを示している。

Coda-Q 値と地殻応力との間に統計処理から見出される定性的関係ではなく、定量的な関係を見出すことができれば、将来的には地震の準備期間を捉える事や、トンネル掘削・CO₂ 地下貯留などの際に用いることのできる新たな地殻活動モニタリングにつながる可能性がある。また、ボアホール掘削による応力解放法や GPS から面ひずみを計測し応力を求める方法と異なり、地震発生の際となる地殻で深数 km の応力変化を得られる可能性がある。

キーワード: Coda-Q, 減衰, 異方性, 地殻応力, 数値計算

Keywords: Coda-Q, attenuation, anisotropy, stress field, numerical simulation

直達波とコーダ波振幅の冪乗型減衰と内部減衰物質と散乱体のフラクタル分布 Power-Law Decay of Direct- and Coda-Wave Amplitudes and the Fractal Distribution of Intrinsic Absorbers and Scatterers

佐藤 春夫^{1*}
SATO, Haruo^{1*}

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

地震のマグニチュードを決定する際には、地震波の最大振幅が幅広い範囲にわたって距離の冪乗に従って減少するという観測事実が用いられる。また、コーダ波振幅も震源時からの経過時間の冪乗に従って減少することが観測されている。これは、コーダ Q^{-1} が経過時間と共に減少することとして知られている。一方、内部減衰物質と散乱体（不均質と言い換えても良い）が空間に一様ランダムに分布するような場合、直達波振幅は冪乗型の幾何減衰に指数関数型の内部減衰と散乱減衰が加わることが理論的に予測される。同様に、コーダ波振幅も経過時間の冪乗の幾何減衰に指数関数型の減衰が加わることが予測される。一様分布の場合、直達波振幅の指数関数型減衰は避けられない。それゆえ、これらの観測事実を解釈するには、背景速度及び内部減衰物質や散乱体の分布に深さ依存性を導入することが必然と考えられてきた。

本講演では、直達波とコーダ波、双方の振幅について冪乗型の減衰を導くモデルを提案する。散乱体や内部減衰物質の分布を直接測定することは容易ではないが、微小地震の震源分布については空間次元よりかなり小さいフラクタル次元の計測例があり、例えば関東地方では2.3という値が報告されている。地震の震源が断層であることを考えると、散乱体や内部減衰物質の分布にフラクタル概念を導入することは不自然なことではなく、これらの分布のフラクタル次元が3であるとすると必然性は無い。

散乱体と内部減衰物質の空間分布がフラクタル的にランダムな場合、このような構造の中でのエネルギーの多重等方散乱過程を記述する輻射伝達方程式を定式化することができる。ただし、発散を防ぐため、近距離では一様分布（フラクタル次元が3）となるような距離の閾値を導入しておく。フラクタル次元が空間次元と同じ3の場合には、良く知られているように、直達波の振幅は距離の逆数の幾何減衰に加えて指数関数的な減衰を示す。フラクタル次元を下げてゆくと、振幅の距離減衰の関数形が変化する。特にフラクタル次元が共に空間次元3より1小さい2の場合、直達波の振幅減衰は、幾何減衰のみならず内部減衰と散乱減衰の双方の効果が共に距離のべき乗で表されることが導かれる。内部減衰が存在しても、コーダ波振幅も経過時間の冪乗に従って減少することが示される。内部減衰がある程度以上に強い場合には、一次散乱過程が卓越する。直達波振幅とコーダ波振幅の比とこれらの減衰勾配の違い（冪数の違い）は内部減衰と散乱減衰の強さの比と距離の閾値によって支配される。

散乱体や内部減衰物質の空間分布にフラクタル性を導入することで、直達波振幅とコーダ波振幅に関する冪乗則を輻射伝達理論から導くことができた。フラクタル分布に深さ依存性を導入する事も可能である。今後、このモデルをもとにして短周期地震波エンベロープを解析し、内部減衰物質と散乱体の分布の地域性や深さ依存性を調べてゆくことが可能であろう。

キーワード: コーダ波, 減衰, 散乱, 輻射伝達理論, 実体波

Keywords: coda, attenuation, scattering, radiative transfer theory, body waves

波線トモグラフィーと有限周波数トモグラフィーの比較研究 A comparison of finite-frequency and ray approaches in local tomography

趙大鵬^{1*}, 童平¹
ZHAO, Dapeng^{1*}, TONG, Ping¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹Department of Geophysics, Tohoku University

We determined detailed 3-D P and S wave velocity models of the crust in the 1995 Kobe earthquake (M 7.2) area in Southwest Japan using both finite-frequency and ray tomography methods. Our finite-frequency tomography technique is based on the single-scattering theory (Tong et al., 2011). The finite-frequency sensitivity kernel derived in this study reflects correctly the sensitivity of the heterogeneity off the geometrical ray path and the existence of Fresnel volume, and the kernel depends on the dominant frequency of the observed wave. The dominant frequency is estimated directly from the earthquake magnitude based on a relation that is obtained by regressively analyzing the displacement spectra of 20 earthquakes in the study area. We used a great number of P and S wave high-quality arrival-time data from the Kobe aftershocks and other local earthquakes during 2002 to 2010. Our tomographic images obtained with the finite-frequency and ray tomography methods show a high level of similarity, which is verified quantitatively by adopting the structural similarity index. Similar to the previous studies (e.g., Zhao et al., 1996), the present results show that the Kobe mainshock hypocenter is located in a distinctive zone characterized by a high Poisson's ratio and a low product of P- and S-wave velocities, which is interpreted as a fluid-filled, fractured rock matrix that may have triggered the 1995 Kobe earthquake. The crustal fluids in the Kobe hypocenter are considered to originate from the dehydration of the subducting PHS slab beneath Southwest Japan (Zhao et al., 2002, 2010).

キーワード: 波線理論, 有限周波数, トモグラフィー, 地殻構造, 地震

Keywords: ray theory, finite-frequency, tomography, crustal structure, earthquakes

海溝に沿って伝播する顕著な地震波のメカニズム：海底地形・海水層を評価した3次元差分法シミュレーションに基づく評価 The mechanism of anomalous wave propagating along trench shown by 3D-FDM simulation considering topography and seawater

野口 科子^{1*}, 前田 拓人², 古村 孝志²
NOGUCHI, Shinako^{1*}, MAEDA, Takuto², FURUMURA, Takashi²

¹ 電力中央研究所, ² 東京大学大学院情報学環/地震研究所

¹CRIEPI, ²CIDIR/ERI, The University of Tokyo

海溝付近の浅い地震により生成される顕著な後続相の生成メカニズムを探るために、3次元差分法シミュレーションに基づき、海溝付近の海底地形やプレート構造など、3次元不均質構造が変換波の生成・伝播に及ぼす影響を詳しく調査した。

海溝付近で起こる浅い地震（特にアウターライズ地震）の際に、震源から数百～千 km 以上離れた限られた観測点において、顕著な後続相が観測されることがある。この後続相は S 波から数百秒以上遅れて現れ、走時から推定される伝播速度は 1~1.5 km/s と遅く、粒子軌跡はレイリー波の特徴を示す。卓越周期は 10~20 s であり、地殻内を伝わる通常のレイリー波と同等の大きな変位振幅を示すこともある。千島海溝付近の地震の際に北海道で観測された例（Nakanishi et al., 1992）をはじめ、F-net 広帯域観測網の整備以降、2005 年の三陸沖アウターライズ地震（Mw 7.0）の際の伊豆諸島の青ヶ島（Noguchi et al., 2011）、2010 年 12 月の小笠原諸島付近のアウターライズ地震（Mw 7.4）の際の関東周辺（http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201012_ogasawara/#trappedsw）など、同じ起原と考えられる後続相が各地で観測されている。これらの観測地点は、いずれも十勝沖の海溝の会合点や千葉沖の三重会合点の周辺に位置しており、これらの後続相は海溝や会合点を含む伝播経路で生じた可能性が高い。こうした特異な後続相の成因について、Yomogida et al. (2002) は、波線追跡法を用いて、この後続相が海溝沿いにトラップされたレイリー波である可能性を議論している。Noguchi et al. (2011) は、2次元差分法による波動伝播シミュレーションからに基づき、海底の固液境界面に沿って遅い速度（~1.1 km/s）で伝わる境界波が、陸上へ続く海底斜面でレイリー波に変換して観測されるというメカニズムを述べている。この結果では、固液境界での境界波の生成過程と地震波への再変換過程をよく説明するが、海溝軸に沿って境界波がトラップされる仕組みと海溝軸の形状の関係には、海底地形や地下構造の 3 次元的不均質性が強く寄与していると考えられる。

こうした、海溝付近の海底地形やプレート構造など、不均質地殻・マントル構造が変換波の生成・伝播に及ぼす影響を詳しく調査するために、前研究（Noguchi et al., 2011）を進め、3次元地下構造モデルを用いた差分法シミュレーションに基づく検討を行う。ここでは、2005 年三陸沖アウターライズ地震における F-net 青ヶ島（AOGF）観測点の観測波形の再現を試みる。3次元地下構造モデルは、J-EGG500 による海底地形、J-SHIS による深部基盤構造および大大特によるプレート境界面のデータを用いて作成し、東北沖太平洋から伊豆諸島に至る 900 km x 360 km の領域を伝播する周期 10 秒以上の地震動を評価する。差分法計算において海水を含む媒質中での地震波伝播計算を高精度に行うため、岡本・竹中 (2005) に基づく液体/固体境界条件を計算コードに組み込んだ。

計算の結果、海底面に沿って伝播する境界波が、水深の深い海溝軸付近にトラップされて長距離を伝わる様子が明確に再現された。これは、水深の深い領域が境界波の低速度域となるためである。こうして、海溝に沿って伝播する境界波は、千葉沖の三重会合点において、突き当たった海底斜面でレイリー波に変換され、その先の AOGF で独立した大振幅の波群として観測される様子が明らかになった。こうしたメカニズムは、これまでの 2 次元シミュレーションでは明瞭には再現されなかったが、3次元シミュレーションにより、境界波が海溝軸付近にトラップされる事、それが海溝の折れ曲がり部分で特に強くレイリー波に変換される様子が明瞭に示された。また、この後続相の S 波やレイリー波部分に対する振幅は、震源の海底面からの深さや海溝との位置関係に依存し、海溝直下の浅い地震で特に強く生成することも示された。さらに、海水層の影響を見るために、海水層を空気に置き換えてシミュレーションを行ったところ、顕著な後続相が見られる特定の観測点に限らず、陸上を含む多くの観測点で地震動の継続時間が短くなった。こうした海水層の効果は、他の研究（Maeda et al., 2011 など）でも同様に示されており、地震波エネルギーが海水/海底面を伝わる速度の遅い境界波として長時間・広範囲にわたって海域にトラップされるためとみられる。したがって、海域の地震の地震波伝播シミュレーションにおいて、海水層の影響を考慮することの重要性が再確認された。

キーワード: 海中音波, 海溝トラップ波, 差分シミュレーション, アウターライズ地震, 長周期地震動評価

Keywords: Ocean acoustic wave, Trench trapped wave, FDM simulation, Outer-rise Earthquake, Long period ground motion simulation

高周波観測地震学のススメ Encouragement of High Frequency Observational Seismology

大久保 慎人^{1*}, 雑賀 敦¹

OKUBO, Makoto^{1*}, Atsushi Saiga¹

¹ 東濃地震科研

¹ TRIES, ADEP

観測地震学で用いられる地震動の周波数帯域の上限は、一般に 30Hz 程度である。これは地震計の周波数応答やデータ収録装置のサンプリング速度の制限によるところが大きい。一方、弾性波を用いた室内実験等で用いられている振動の周波数帯域は、供試体サイズによる制限もあるが数 10kHz、場合によっては MHz 帯にまで及ぶ。これらの観測、および実験の間の周波数帯域には観測がおこなわれていない空白の周波数帯域が存在する。

このような空白の周波数帯域、例えば 50Hz から 1 kHz といった帯域では有為な地震学的現象は存在しないのであるか？いや、この周波数帯域に有為で興味深い現象がない訳ではなく、地震計やデータ収録装置が未発達であったこと、そして何よりも膨大なデータを扱わねばならないであろうという地震学者の未知への恐怖が、この周波数帯域への観測地震学の進出を踏みとどまらせていたのではないかと考えられる。さらに、室内実験用のデータ収録機器を観測地震学に利用することも可能であったが、観測を行う上でいくつかの問題点が存在した。自然地震を対象にした観測地震学では対象となる現象の振幅が様々なため、高い測定分解能が必要とされるが、室内実験ではシグナルソースの振幅が制御可能であるため測定分解能は高くない。また、地震はいつ発生するかわからないため、常時観測状態を維持し、データ収録を行う必要があるが、室内実験用のデータ収録機器では、実験期間中のごく短時間のみ記録がおこなわれる。

現在、計測技術の発達により、kHz 帯までの周波数帯域で高測定分解能をもち連続観測が可能なデータ収録装置が登場してきた。今回、データ収録装置を開発しているシモレックス株式会社から開発中の機器 (SC-AD10K) をを借り受けることができた。このデータ収録装置では、GPS に同期した 10kHz という高速なサンプリングで 24bit 分解能のデータを連続観測が可能である。このデータ収録装置と、過減衰型加速度計、1Hz 短周期地震計、2Hz 短周期地震計などデータ収録装置を組み合わせ、岐阜県瑞浪市にある東濃地震科学研究所観測実験室で地震動の連続観測を行った。危惧していた観測データ量は、4CH、10kHz という高速なサンプリング、連続観測という条件で 1日あたり 3GB 程度であった。

2011 年 12 月より観測を行い、2011 年 12 月 14 日 13 時 01 に発生した、 $M_{JMA} = 5.6$ の岐阜県美濃東部の地震とそれに伴う $M_{JMA} = 3.6$ の余震を記録することができた。本研究では、観測した地震動波形を解析して得られた、観測地震学にとっての空白の周波数帯域における興味深い現象について発表を行う。また、高周波地震動の観測地震学への応用として、詳細地震波速度構造推定や地震波速度モニタリングへの応用する計画についても紹介する。

キーワード: 高速データ収録, 高周波地震動, 詳細地震波速度構造, 地震波速度モニタリング

Keywords: High speed data logging system, High frequency seismogram, Detailed velocity structure, Seismic wave velocity monitoring

駿河湾における地震波に対するタイムリバーサル解析 Time reversal analysis of seismic waves in Suruga Bay

菊池 年晃^{1*}, 水谷孝一²

KIKUCHI, Toshiaki^{1*}, Koichi Mizutani²

¹ 防衛大学, ² 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

¹National Defense Academy, ²Acoust. Lab., Univ. Tsukuba

我々は海洋音響の分野において位相共役波やタイムリバーサルの応用に関する研究を行っている。海中に設置した音源から音波パルスを放射して、その音波パルスを、離れた位置に設置した変換器アレイで受波する。その受波した信号に時間反転処理を施した後に、アレイから再放射すると元の音源位置に収束する音波パルスが形成される。そして音源位置に収束した音波パルスの波形は始めに放射された音波パルスの波形と同一になる。今回は、このタイムリバーサル処理を2009年12月18日に伊豆半島中部で発生した地震波に適用し、震源における振動を求めた。その結果は海中における結果とは一致しなかった。その原因として、震源と観測点の偏在性が上げられる。そこで、今回はより広範囲に調べるために、2009年8月11日に駿河湾中部で発生したマグニチュード6.5の地震に着目する。この震央を取り囲むように多くの観測点が設置されているので広い範囲の距離や方位角に対する効果を調べることが出来る。

地震波にタイムリバーサル処理を適用するためには解決しなければならない多くの問題がある。海洋では伝播環境、即ち音速分布は深海域においてさえ正確に把握することができる。また海面から海底に至るまでの長いアレイも構築できる。更に、多くの伝播モデルも提案されている。一方、地中では詳細な伝播環境の取得が困難で、アレイの素子数が限定され、更に受信信号とモデルの適合性や伝播モデルなどの問題がある。

我々は、タイムリバーサルの適用に最も重要な要因である伝播環境を求めるために、タイムリバーサルの堅牢性を利用した逆問題法を提案した。そしてその方法で求められた伝播環境において、地震計で観測した信号に時間反転処理を施した信号を再放射して震源近傍における振動を求める。海洋におけるタイムリバーサルの堅牢性とは、音源からアレイまでの往路の伝播環境とアレイから音源までの復路の伝播環境が変化しても音源への収束性は大きく変化しないことである。そして、往路と復路の伝播環境が近づくにつれ音源に形成されるパルスの振幅が増大する。この特性を逆問題的に応用して、伝播環境を求める。

次に、地震計による受信信号からP波成分のみを切り出し、それに時間反転処理を施す。そして伝播シミュレーション上で、反転信号を伝播環境中に送波する。そして震源付近に形成されるパルス、即ちタイムリバーサルパルスを求める。地震計で計測される上下、水平(東西、南北)速度の3種の信号に対して同じ処理を施す。このシミュレーション上で使用する伝播モデルは放物型方程式法である。

伊豆半島から浜松に至る31観測点で受信した信号に対して、タイムリバーサル処理を施し震源に形成されるタイムリバーサルパルス求めた。その結果、観測点によって大きく異なるパルスが得られた。その原因として、各観測点の特性が異なることが考えられる。

それらの特性には、震源から観測点までの距離、地震計の設定深度、地震計の型、及び観測点の方位などがある。しかし、距離や深度はグリーン関数に含まれているため、自動的に補正される。また地震計の型や感度は相対的レベルの問題であるから影響を及ぼさない。

キーワード: タイムリバーサル, 位相共役, 震源振動, 地震波伝播, 水中音響

Keywords: Time reversal, Phase conjugation, hypocenter vibration, Seismic wave propagation, underwater acoustics

反射波を用いた豊後水道下のプレート境界付近の不均質構造 Inhomogeneous structure inferred from reflected S waves beneath the Bungo channel, southwest Japan.

宮崎 真大^{1*}, 松本 聡², 清水 洋², 植平 賢司²

MIYAZAKI, Masahiro^{1*}, MATSUMOTO, Satoshi², SHIMIZU, Hiroshi², UEHIRA, Kenji²

¹ 九大・理, ² 九大・地震火山センター

¹ Grad. Sch. Sci., Kyushu Univ., ² SEVO, Kyushu Univ.

豊後水道では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴い、スローリップ (Hirose et al., 1999) や深部低周波微動 (Obara, 2002) といった、様々な継続時間を持つ振動 (いわゆるスロー地震) が発見され、海溝型巨大地震の発生過程に影響を及ぼすと考えられている。継続時間の変化は、プレート境界面上で物性が変化していることを示唆している。そこで、本研究では、反射波を用いて豊後水道下のプレート境界付近の構造を明らかにし、スロー地震との関連性の有無を検証することを目的とする。

豊後水道で発生した深さ約 10 km の地殻内地震の記録には明瞭な反射波が認められる。Normal moveout 補正の結果、深さ 20km 前後や、プレート境界付近に相当すると考えられる深さ 30km 前後からの反射波を見出した。これらは、豊後水道下のプレート上面の地殻中に、強い構造不均質が存在することを示している。

プレート境界付近に相当すると考えられる反射波のうち、明瞭に識別できる佐伯観測点 (防災科学技術研究所, Hi-net) で観測されたものに注目し、反射面の形状を推定した。通常、反射波と直達波の相対走時差を用い、観測値と理論値の残差二乗和が最小となる反射面の走向・傾斜・深度を求める解析が一般的であるが、相対走時差が一定となる領域に誤差が広く分布するという欠点がある。そこで、本研究では走時に加えて、地震の発震機構の違いによる振幅の変化に着目した。

反射波の振幅は、震源の発震機構解と震源から反射面への地震波の射出方向に依存して変化する。そのため、発震機構の影響を正しく補正した直達波と反射波の振幅比は、用いた地震の中で一定の値となるべきであるが、反射面の位置を誤って推定した場合、発震機構解による影響を正しく補正することが出来ず、ばらついた値となる。本研究では、この特徴を利用して、反射面の形状を決めるパラメータをグリッドサーチにより決定した。

反射面の形状は、直達波と反射波の相対走時差と対数振幅比を用いることで、相対走時差のみを用いた場合よりも、安定して推定することができた。推定された反射面は、深部低周波微動の発生域付近に位置するものの、プレート境界面とは異なる形状であることが明らかになった。グリッドサーチで得られた反射点分布をもとに、幾何補正と発震機構解による補正を行った上で反射係数を推定すると、1 に近い値となった。この結果から、反射面は周辺の媒質と比較して、非常に大きなインピーダンスコントラストを持つことがわかった。これは、プレート境界面の直上に流体が存在していることを示唆しており、スロー地震の発生との関連性を示唆している。しかしながら、推定値の分散が大きく、発震機構解やその他の補正について、さらに吟味を行う必要がある。

謝辞

本研究では、九州大学の定常観測点・臨時観測点、京都大学との共同研究による地震観測点のデータに加え、気象庁・防災科学技術研究所・産業技術総合研究所・東京大学・京都大学・高知大学の定常観測点のデータを使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 豊後水道, スロー地震, 反射波振幅

Keywords: the Bungo channel, slow earthquakes, amplitude data of reflect phases

可視化を通じてみる 2011 年東北地方太平洋沖地震の表面波伝播の特徴 The characteristics of the surface wave propagation for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

有末 真穂^{1*}, 川方 裕則¹, 土井 一生¹
ARISUE, Maho^{1*}, KAWAKATA, Hironori¹, DOI, Issei¹

¹ 立命館大学理工学部

¹ College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

近年日本では、防災科学技術研究所の K-NET や KiK-net に代表される強震観測網が発達している。これらの密な強震観測網により大地震で生じる地震動の可視化が可能となった。Furumura et al. (2003) では K-NET、KiK-net の波形記録を用いて、2000 年鳥取県西部地震について地震動の可視化をおこない、地震波の放射特性と広域の波動場の特徴的な伝播特性を得た。また Maeda et al. (2011) は 2007 年スマトラ沖地震の Hi-net の観測記録を広帯域化することにより周期 20 ~ 50 秒の範囲で位相も含めた可視化をおこなった。その結果、実体波と異なる伝播方向をもつ表面波が現れ、さらには中部日本で位相の反転が確認された。これは到来方向がわずかに異なる平面波が重なることで、互いに干渉し、位相の反転が起こったと考えられている。このように位相情報も含めるとより詳細な地震波の伝播特徴が捉えられるといえる。本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震を対象とし、表面波が卓越する周期帯で地震動の可視化をおこなった。

解析には 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震の際に記録された K-NET の 525 点、KiK-net 地表の 698 点の計 1223 点分の 3 成分加速度波形記録を使用した。K-NET、KiK-net の平均観測点間隔 20 ~ 25km を考慮し、周期 10 ~ 20 秒の加速度波形データを速度波形に変換し、地震動の可視化をおこなった。速度波形において最大振幅をもつ波群は発震時刻の約 50 秒後に震源付近から約 3km/s で伝播しており、これは Furumura et al. (2011) によって推定された 2 つ目の大きな波源から放射された表面波に相当すると考えられる。

この波群が到達している時間帯のスナップショットに着目すると、東北地方で波面の断裂がみられ、位相のずれが発生した。断裂の両側の波の特徴を詳しく調べるために粒子軌跡を調べた。周辺観測点における粒子軌跡を調べるのに先立って K-NET、KiK-net と両観測点の設置方位の補正をおこなった。東北地方周辺で発生した 3 つの地震の初動記録を用いて、P 波初動が震源 観測点方向を向くように補正角を求めた。補正後の粒子軌跡から、断裂に対して北東側でトランスバース方向、南西側でラディアル方向の振動が卓越していることがわかった。すなわち北東側ではラブ波が、南西側ではレイリー波が卓越したと考えられる。本震のメカニズム解を考えると、ラブ波とレイリー波の放射パターンと調和的である (Lay and Wallace, 2002)。すなわち数百 km 程度の短い震源距離においても表面波の放射パターンが見られることが確認された。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net) の波形データを使用させて頂きました。東京大学総合防災情報研究センターの前田拓人氏には地震動の可視化について、参考となる情報を頂きました。また京都大学防災研究所の岩田知孝氏、浅野公之氏には地震計設置方位に関する情報を頂きました。記して謝辞を表します。

キーワード: 表面波, 可視化, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 放射パターン

Keywords: surface wave, visualization, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, radiation pattern

実用面から観た物理探査分野における地震波干渉法 Seismic interferometry in exploration geophysics: a review from practical aspect

白石 和也^{1*}

SHIRAISHI, Kazuya^{1*}

¹(株)地球科学総合研究所

¹JGI, Inc.

物理探査分野において地震波干渉法を利用する立場から、4つの観点で分類を行いレビューする。地震波干渉法は、この数十年の間に理論面と応用面において急速な発展と遂げた。地下を伝播する地震波を多数の受振点で観測した記録の相互相関処理により、任意の受振点位置を仮想的な震源とする擬似発震記録を合成することができる。計算機システムと観測システムの発展とともに地震波干渉法技術の高い応用可能性に注目が集まり、物理探査および地震学の分野において多数の研究が実施され、いまなお発展を続ける。物理探査分野においては、直接的に探査の難しい対象に対して震源や受振点の配置を工夫することで任意のジオメトリのデータを再構成できる点、これまで有用とは考えられていなかった受動的な観測記録から信号を抽出できる点、などが重要視されている。その結果、従来の反射法や坑井を利用した探査では得られなかった情報を取得できるようになり、石油探査開発や環境防災の分野に活用されている。地震波干渉法が高度化・多機能化するいま、敢えて単純化してこの技術の基本を捉え直し、利用効果の向上を狙いとす。

[1] 震源による分類：何を観測するか

- (a) 制御震源（エアガン、パイプレータ、ダイナマイトなど）
- (b) 自然地震（近地震、遠地震、微小地震）
- (c) 環境雑震動（ambient seismic noise）

地震波干渉法は実体波と表面波の区別なく適用でき、人工的に制御された震動源に対するアクティブな観測記録と、制御されていない自然または人工的な震動源に対するパッシブな観測記録のいずれにも適用できる。リデータミングやデータ内外挿を目的とする場合、震源波形や発震時刻の分かっている制御震源を利用するのが有効である。これに対して、自然地震や環境雑震動（自然現象に起因する雑微動、交通や作業による震動ノイズ）を利用する場合には、震動源の位置や発震時刻、震源波形等が不明な場合が多いためそのままでは解析が難しく、観測記録に潜む有意な信号を干渉処理により抽出できることが期待される。自然地震の場合、S波コーダおよびP波コーダ波による地殻構造推定に利用されている。

[2] 手法による分類：どんな干渉法があるか

- (a) クロスコリレーション
- (b) デコンボリューション
- (c) 多次元デコンボリューション
- (d) クロスコーヒレンシー
- (e) コンボリューション

地震波干渉法では(1)干渉処理による位相（走時）のシフトと(2)停留点における振幅の重ね合わせにより波形記録が合成される。上記の(a)-(d)は波線に沿った受振点間の走時差に停留点が位置し、(e)では同様に走時和に停留点が位置する。それぞれの手法は、理論的背景、計算安定性、震源関数の扱い、再現できる波動場など、異なった特徴を持つので利用目的に合わせて選択される。

[3] 機能による分類：何ができるか

- (a) リデータミング
- (b) データ内外挿
- (c) 信号抽出

物理探査分野では、従来の調査法では直接探査が困難な場合に、新たな観測ジオメトリの記録を再構成するリデータミングを目的とした利用が特に有効である。例えば、地表発震に対する垂直坑内受振記録（VSP記録）から発震も受振も坑内にある擬似的な反射法記録を合成し、地表の反射法では調査困難な鉛直方向の構造を調査できる。また、観測ジオメトリは変えないで、観測機器や周辺環境の都合による発震または受振の抜けを合成記録により内外挿することも可能である。さらに、パッシブな長期連続観測から、干渉処理によって表面波や実体波を信号として抽出することで、制御震源を用いることなく地下の構造や物性に関する情報を得られる。

[4] 目的による分類：何のために利用するか

- (a) 反射波による地下構造イメージング

SSS27-09

会場:103

時間:5月23日 11:15-11:45

(b) 表面波トモグラフィやインバージョンによる速度構造推定

(c) 合成波形に基づく物性値推定

(d) データ処理における活用（信号強調やノイズ除去など）

物理探査においては、波形合成そのものを目的とするのではなく、合成された記録に対して既存または新規の解析技術を用いて、いかに新たな地下情報を得るかが重要である。反射波による構造イメージングのほか、屈折波または表面波に対するトモグラフィ解析や表面波分散特性に基づくインバージョンによる速度構造推定、多チャンネル多成分記録から合成された波形の解析による物性解析、データ処理における利用など、多くの事例が報告されている。

キーワード: 地震波干渉法, 物理探査, 制御震源, リデータミング, 受動観測, 信号抽出

Keywords: seismic interferometry, exploration geophysics, controlled-source, redatuming, passive seismic, signal extraction

傾斜した成層構造の推定のための地震波干渉法の適用性に関する研究 Discussion on the significance of seismic interferometry to estimate inclined layered medium

ZHANG XINRUI^{1*}, 盛川 仁¹

ZHANG, XINRUI^{1*}, MORIKAWA, Hitoshi¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

In a case where the spatial auto-correlation (SPAC) method (Aki, 1957) is used to estimate phase velocity, the underground structure is assumed to be horizontal layers, which confine the estimation accuracy. On the other hand, according to seismic interferometry theory, in an elastic medium the Fourier transform of azimuthal average of the cross correlation of motion between two sites is proportional to the imaginary part of the exact Green's function between these site (SanchezSesma, 2006). It means that it is possible to introduce the concept of Green's function to SPAC method because we calculate out many Fourier transform of cross correlation as intermediate results. Actually, there was a successful example combining the H/V method and seismic interferometry by Sanchez-Sesma before. Hence, we propose a method combining the conventional SPAC method and the concept of Green's function, which is known as the seismic interferometry in frequency domain. It is expected to obtain more accurate model of ground structure like inclined layered medium.

Afterwards, we take the ratio of power spectra of center of the array and one site on the circular array to calculate the ratio of imaginary part of Green's functions of these sites. Therefore, in practical observations, we calculate the ratio of power spectra of center of the array and one site on the circular array to obtain the ratio of imaginary part of Green's function of these sites. The ratio of Green's function can be obtained without any additional calculation, because the power spectra are just intermediate results in the process of the SPAC method. Then, we can modify the structure, such as the thickness of each layer, to satisfy the ratio of the imaginary part of Green's function. Therefore, more detailed information of ground structure such as inclination can be obtained from the combination of the SPAC method and seismic interferometry. The condition to satisfy this method is the diffusive wavefield.

In order to examine the validity of the proposed method, we do the sensitivity analysis and numerical simulation. In sensitivity analysis, we calculated the ratio of imaginary part of Green's function between varieties of 2-layered models with different thicknesses and see how the ratio varies with the thickness. Through 36 comparisons between 36 pairs of models, it is found that the shallower ground structure is, the more sensitive the ratio is with respect to the thickness. In numerical simulation, we use certain finite difference method-based program to simulate the diffusive wavefield by random sources and see how the ratio of power spectra matches the ratio of imaginary part of Green's function. Through 12 comparisons, it is found that the critical frequency which gives the peak value of ratio matches quite well. Through error analysis, it is found that the shallower structure is, the smaller error is.

In conclusion, the validity of proposed method is primarily confirmed. It has best accuracy in estimating shallow structure.

Keywords: Seismic Interferometry, Green's function, Cross spectrum, layered medium, SPAC method

近地地震記録の相互相関による地殻構造イメージング 震源分布と偽像に関する数値シミュレーション Structure imaging by cross-correlation of local earthquake records: Simulation on source distribution and artifacts

辻 琢允¹, 渡辺 俊樹^{1*}

TSUJI, Takuma¹, WATANABE, Toshiki^{1*}

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Nagoya University

地震波干渉法は2点で観測された地震記録から、片方を震源、片方を受振点とした地震記録を合成することができる方法である。この操作は地表面反射を抽出することと等価である。この手法を密な測線で観測した近地地震記録に適用することにより、人工震源なしで地震波反射法に相当する記録を得ることができ、反射法地震探査で用いられているデータ処理やイメージング手法を適用できる。地震波干渉法では震源が密に一樣に分布することを仮定しているが、自然地震の震源は偏在しており、このため合成された記録の品質の低下や結果断面上の偽像の発生を招くことが考えられる。本研究では、地殻構造イメージングのための近地自然地震を用いた地震波干渉法の精度と信頼性について、数値実験により検討を行った。主に、1) 震源の偏在が仮想震源記録やイメージング結果に与える影響、2) 対象構造をイメージするために効果的な震源 - 観測点配置、3) 偽像の発生原因とその抑制、について検討した。モデルは地殻内構造や沈み込む海洋プレートといった東海地域の2次元地下構造を模擬し、水平、鉛直方向に100 x 50 kmとした。地震の震源を地殻浅部、地殻深部、陸側スラブ内、海側スラブ内に125個置き、有限要素法によりSH波記録を計算した。仮想震源記録の精度は震源(地震)を多く用いるほど向上した。記録の品質は震源、観測点、対象とする反射面の位置によって変化し、少ない震源でも効果的に仮想反射記録を合成する震源 - 観測点配置が見いだされた。これらは停留位相の概念で説明できる。このような記録を用いると効果的にイメージングが可能である。陸側および海側スラブ内の地震を用いたイメージング結果はモデル内の対象構造を浅部から深部まで広い範囲でイメージングできた。震源の深度に依存する偽像は異なる深度の震源を多く用いることで抑制することができる。

キーワード: 地震波, 散乱, 干渉法, 地殻構造, イメージング, シミュレーション

Keywords: seismic wave, scattering, interferometry, crustal structure, imaging, simulation

海底地震計記録の干渉法解析による異方性の推定 Seismic anisotropy from the interferometric analysis of seafloor records

竹尾 明子^{1*}, 西田 究¹, 一瀬 建日¹, 川勝 均¹, 塩原 肇¹, 杉岡 裕子², 末次 大輔², 伊藤 亜妃², 金沢 敏彦¹
TAKEO, Akiko^{1*}, NISHIDA, Kiwamu¹, ISSE, Takehi¹, KAWAKATSU, Hitoshi¹, SHIOBARA, Hajime¹, SUGIOKA, Hiroko²,
SUETSUGU, Daisuke², ITO, Aki², KANAZAWA, Toshihiko¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²IFREE, JAMSTEC

The seismic interferometry is now widely applied to the ambient noise source in continental regions [e.g. Shapiro et al., 2005] and in an oceanic region, the East Pacific Rise (EPR). Harmon et al. [2007] used the vertical components of ocean bottom seismometers deployed in the EPR region for analyzing the Rayleigh wave. In this study, we apply similar method to the three-component record of broadband ocean bottom seismometers (BBOBSs) deployed in (i) the Shikoku Basin (SB) region by the Stagnant Slab Project and (ii) the French Polynesia (FP) region by the TIARES (tomographic investigation by seafloor array experiment for Society hotspot) project. The spacing of the stations is about 100-200 km. For each region, we obtain the phase velocities of (i) the fundamental mode of Rayleigh wave (14-29 sec), (ii) the first higher mode (5-11 sec) of Rayleigh wave, and (iii) the fundamental mode of Love wave (2.5-14 sec) by the SPAC method [Aki, 1957]. The propagation of the first higher mode of Rayleigh wave appears (i) in the horizontal component (7-11 sec) for the SB region, (ii) in both vertical and horizontal components (5-10 sec) for the FP region, and (iii) in the vertical component (3.5-7 sec) for the EPR region. The difference between EPR and SB regions can be interpreted by the difference between the periods of analysis. To account for the difference between FP and SB regions, on the other hand, we need to discuss other causes such as the difference of sedimental thickness and the source intensity of ambient noise.

By further using the phase velocities measured by array analysis of teleseismic waveforms, we obtain one-dimensional radially anisotropic structures at the uppermost mantle beneath SB and FP regions. Both structures show that the velocity of horizontally propagating shear-wave with horizontal polarization (V_{SH}) is 3 % higher than that with vertical polarization (V_{SV}). We also focus on the azimuthal anisotropy. By the analysis of teleseismic waveforms, the phase velocity (30-50 sec) beneath the FP region is revealed to depend on the back-azimuth, t , in a form with $\sin(2t)$ and $\cos(2t)$. We obtain consistent pattern at shorter periods (20-30 sec) by the ambient noise interferometry with assuming homogeneous structure beneath the array. We will discuss the effects of inhomogeneous structure and inhomogeneous source distribution, and will estimate the azimuthal dependence at shorter periods.

キーワード: 地震波干渉法, 異方性

Keywords: Seismic interferometry, ambient noise, anisotropy

雑微動による東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度変化の検出 Detecting Temporal Evolution of the Subsurface Structure Associated with the 2011 Tohoku Earthquake Using Ambient Noise

大見 士朗^{1*}
OHMI, Shiro^{1*}

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

地震観測記録の雑微動部分の自己相関関数 (ACF) や相互相関関数 (CCF) を使う地殻構造の研究の目標のひとつは、地殻の歪の蓄積・解放の時間変化をモニタリングすることである。これまで、地震の発生前後の地下構造の時間変化が精力的に調べられてきており、主に地震発生後の地震波速度構造の変化が報告されている。これらの結果では、主に、地震後の地震波速度の低下が報告されており、強震動により媒質の圧密状態が変化したこと等に原因を求めている。そのため、地殻歪の変化による地震波速度変化を検出するためには、強震動を受けていない、歪変化の大きな観測点が必要となる。2011年東北地方太平洋沖地震は、従来の M6 クラスの内陸地震では震源域周辺に限られていた 10^{-6} クラスの体積歪変化を広範囲にもたらし、それらの地域には震度 3 程度以下の震動しか経験しなかった地域も含まれる。本講演では、そのような、強震動は経験していない、歪変化の大きな地域で、本手法による地震波速度変化が検出できるかどうかを試みた。

2. 手法とデータ

東北地方太平洋沖地震やその余震で強震動を経験した地域として東日本の太平洋岸の地域を、経験していない地域として中部地方北部を対象として、CCF や ACF による地震波速度の時間変化の検出を試みた。データは Hi-net、気象庁および京都大学の短周期微小地震観測網の、2011 年 1 月から 5 月または 6 月までのデータの上下動成分を用いた。

CCF については、それぞれの地域内での観測点間距離 120km までの基線について求めた。連続データを 1 時間のセグメントに分割して CCF を求め、1 日から 3 日程度の移動平均を取ったのち、Rayleigh 波の波群の走時の時間変化を調べた。なお、使用した周波数帯域は 0.1Hz - 1.0Hz、および 1.0Hz-2.0Hz である。ACF は、各観測点の波形記録の日々の自己相関関数を計算したものの時間変化を調べた。使用帯域は、2Hz-10Hz である。

3. 予備的な結果

強震動を経験した福島県の観測点間の CCF では、主に 0.1Hz-1.0Hz の帯域のものにラグタイムの delay が認められたが、delay は、数週間で回復する傾向がみられた。同地域の 2Hz-10Hz の ACF の解析では、ラグタイムが 0s-2s の、比較的浅部を反映している部分に明らかなラグタイムの delay が認められる観測点があり、観測点近傍の地震波速度低下を示すと考えられる。ACF のラグタイムの回復には、CCF のそれよりも長期間を要しているように見えるものが多い。

強震動を経験していない中部地方の CCF については、0.1Hz-1.0Hz と 1.0Hz-2.0Hz のどちらの帯域においても特徴的なパターンを見出すことは困難であった。しかしながら、2.0Hz-10.0Hz の ACF においては、ラグタイムの明瞭な delay が観測される点があった。この中にはラグタイムの delay が数週間で回復する点も散見された。

4. 考察

強震動を経験した東北地方太平洋岸では、CCF による解析に速度低下を示す傾向が見られたが、中部地方北部では検出が困難であった。これは、CCF に見られる速度変化が、歪変化というよりも強震動でもたらされたことを示唆するのかもしれない。これに対して、ACF による解析では、東北地方太平洋岸と中部地方の双方で地震に同期した変化が検出された。東北地方では強震動による表層近傍の物性変化を反映している可能性が高いが、中部地方で観測された結果は、Savage and Ohmi (2010, AGU FM) で報告されたような、歪変化が地下水位に変化をもたらし、それが ACF に影響を与えた可能性が考えられる。

4. 謝辞

解析には Hi-net および気象庁の観測点のデータを使用した。記して謝意を表す。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 雑微動の相互相関関数, 地震波速度変化

Keywords: 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Cross-correlation of ambient noise, Temporal change of subsurface structure

相似地震解析による2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度低下 Seismic velocity reduction after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using repeating earthquake

高木 涼太^{1*}, 内田 直希¹, 岡田 知己¹, 長谷川 昭¹

TAKAGI, Ryota^{1*}, UCHIDA, Naoki¹, OKADA, Tomomi¹, HASEGAWA, Akira¹

¹ 東北大学・理・予知セ

¹ RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

We used repeating earthquakes data to estimate velocity change in the overriding plate from Kanto to Hokkaido region associated with the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. Because repeating earthquakes occur as the repeating slips on the same patch on the Pacific plate with the same source mechanism at different time, waveform data of repeating earthquake is suitable for detecting temporal change in subsurface structure.

First, we performed the moving window cross-spectral analysis for vertical component of seismograms of 54 repeating earthquake sequences. Before the analysis, data were filtered with a band-pass window of 1-10Hz. To align the arrival time of P-wave, we used cross-correlation for the P-wave in a 5-sec time window centered by computed arrival time according to the 1-D structure of JMA2001 [Ueno et al., 2002]. After aligning the P-wave, we computed cross-spectra for the moving time window with a length of 2-sec at every 0.1 sec to measure time-shift between a pair of repeating earthquakes. For pairs of repeating earthquakes that are both before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, the time-shifts are almost zero from direct P-wave to S coda. In contrast, for pairs before and after the earthquake, the time delay gradually increases with lapse time. This result indicates the velocity decrease after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. For example, at a Hi-net station (N.KAKH) near the Oshika Peninsula, the time delay linearly increase just after P arrival to about 0.02 sec in 40 sec for an repeating earthquake sequence of which epicentral distance is 232 km. From the slope of the time delay, the amplitude of velocity reduction is about 0.05 %. The time delay does not always show linear increase with lapse time. The behavior of the time delay seems to depend on the location of event-station pair, which means heterogeneous distribution of velocity change.

Secondly, we only used the information of direct part of a seismogram to estimate the location of the velocity reduction. This is because the time-shift in direct part simply reflects the velocity change only along a direct ray path in contrast to the complex path of coda waves. One problem for using the direct part is an error of origin time. However, because the errors of origin times are identical at all stations, we can estimate the relative delay in many stations for a pair of repeating earthquakes that can be used for the estimation of the spatial variation of time-shift in direct part. In order to evaluate the spatial variation of time-shift for a pair of repeating earthquakes, we subtract a median of the time-shifts of direct P-wave for all stations from the time-shifts of P and S-wave at every station. From the result of all repeating earthquake sequences, we can recognize clear relative time-delay of about 0.01 sec for S-wave by in both the fore-arc and back-arc region from Fukushima to Iwate prefecture. Furthermore, we estimated spatial distribution of the S-wave velocity change by a tomographic inversion method using the time-shift as input data. In this inversion method, we solved slowness changes in three-dimensional blocks and the errors of the origin times simultaneously. The ray path is computed by using the JMA2001. As a preliminary result, a major slowness increase (velocity decrease) of 0.05 % is estimated in upper crust in Tohoku region from Fukushima to Iwate prefecture. The receiver-side velocity reduction can be interpreted as the damage in near surface due to strong motion or the static stress change due to coseismic slip on the fault.

地震波干渉法による浅部地盤構造時間変化の抽出 - 長期変動と東北地方太平洋沖地震に伴う変動 - Temporal change in shallow subsurface structure detected by coda wave interferometry

山本 希^{1*}

YAMAMOTO, Mare^{1*}

¹ 東北大学・理・地球物理

¹Geophysics, Science, Tohoku University

浅部地盤構造およびその時間変動を理解することは、強震動の予測や地下水流動の理解などにとって重要である。一方、近年の地震波干渉法の理論的・観測的研究の進歩に伴い、地殻構造のごく僅かな物性変化を実測データから捉えられる可能性が示されてきており、地震波干渉法は浅部地盤構造時間変動の直接モニターにも有用であると考えられる。本発表では、防災科学技術研究所基盤強震観測網 KiK-net で記録された地震波コーダ波に地震波干渉法(コーダ波干渉法)を適用し明らかになった長期的および東北地方太平洋沖地震に伴う浅部地盤構造の時間変化について報告を行う。

本研究では、防災科学技術研究所基盤強震観測網 KiK-net のデータを使用した。KiK-net 観測点では、平均深度約 100m の孔底および地表に 3 成分強震計が設置されているため、両者の記録に地震波干渉法(e.g., Schuster et al., 2004)を適用することで、地中-地表間の伝達関数とその時間変化を捉えることが可能である。最近 Nakata and Snieder (2012) が、KiK-net 地中-地表記録にデコンボリューション法を適用して同様に浅部地盤構造の時間変化を求めているが、本研究では入射角依存性などが少なくより安定したコーダ波干渉法を用いてより安定した結果を得た。解析は、2004 年 1 月から 2011 年 12 月までの期間から 1005 個の地震を選択し、KiK-net 全観測点の記録を用いて行った。データ解析にあたっては、まず地中・地表のセンサー方位を補正した記録を周波数領域で 1000Hz にアップサンプリングを行い、2-4, 4-8, 8-16Hz の各周波数帯のバンドパス・フィルタを施し、S 波走時の 2 倍となる時刻から 2 秒毎の時間窓を切り出し地中-地表間の相互相関関数を計算した。S 波走時の 2 倍以上のコーダ波部分は多重散乱による散乱波であると考えられるため、各時間窓で計算した相互相関関数のアンサンブル平均は、地中-地表間のグリーン関数とみなすことができる。

このようにして得られた各 KiK-net 観測点の相互相関関数には、地中-地表間を伝播する明瞭な位相が見られ、その走時は検層記録から推定される S 波の走時とおおむね調和的であった。一方、解析を行った期間においては、得られた走時に主に二つの時間変化が確認された：一つは、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震の地震波到達時および地震後の長期的な変動であり、もう一つは年周・季節変動的な長周期の時間変化である。これまで大地震の強震動に伴う急激な S 波速度の低下とそれに続く長期的な回復の事例が報告されているが(e.g., Sawazaki et al., 2009)、本研究の結果も同様の傾向を示し、地震直後において約 5-15% 程度の速度低下が現れ、解析期間終わりの 2011 年末においても回復が継続している。一方、年周・季節変動的な変動の速度変化量は、東北地方太平洋沖地震に伴う変動に比べ 1 桁小さなものであるが、長期的な降水量推移と負の相関を示し、浅部地盤における地下水位の影響を示唆する。これらの結果は、浅部地盤構造の推定・モニタリングに地震波干渉法が有効な手法であることを示すものである。

謝辞 本研究では、防災科学技術研究所 KiK-net のデータを使用させていただきました。

キーワード: 地震波干渉法, 浅部地盤構造, 時間変化

Keywords: Seismic interferometry, Shallow subsurface structure, Temporal change