

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を求めた。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

部分凍結した未固結砂における超音波減衰測定

Attenuation measurements of ultrasonic wave in partially frozen unconsolidated sands

松島 潤^{1*}

MATSUSHIMA, Jun^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹The University of Tokyo

Ultrasonic wave transmission measurements were conducted in order to examine the influence of ice-brine coexisting system grown in unconsolidated porous material on ultrasonic P- and S-waves. We observed the variations of a transmitted wave, changing its temperature from 25 degree C to -15 degree C and quantitatively estimated attenuation for unconsolidated porous material during the freezing of brine in porous material by considering different distances between the source and receiver transducers. This paper is concerned with attenuation at ultrasonic frequencies of 350-600 kHz for P-waves and 150-250 kHz for S-waves. The waveform analyses for P-waves indicate that the attenuation curves reach their peak at a temperature of freezing point and gradually decrease with decreasing temperature, which is interpreted as the increase of the ice fraction or the increase of the effective bulk modulus of the system. The waveform analyses for S-waves indicate that the attenuation decreases with decreasing temperature, which is interpreted as the increase of the effective shear modulus of the system due to the increase of cementation of ice in the frozen sand. The laboratory experiments of the present study demonstrated that ultrasonic waves with such a frequency range are significantly affected by the existence of a solid-liquid coexistence system in the porous material. From liquid phase to around the freezing point, the presence of a partially frozen brine increases both velocity and attenuation. Attenuation estimation for P-wave is repeatable and stable while that for S-wave is not. However, the frequency content of S-wave shifts to higher with decreasing temperature. This implies that the attenuation decreases with decreasing temperature. In terms of a plausible mechanism for attenuation, we must consider the physical interactions between pore fluid, sands, and ice, that is, the pore microstructure and permeability in such system is important. Furthermore, several considerations on velocities using some theoretical models are also demonstrated.

地盤最表層のインピーダンス推定手法に関する基礎的検討 Preliminary study to estimate elastic impedance in ground surface layer

田中 伸明^{1*}, 後藤 浩之², 澤田 純男³
TANAKA, Nobuaki^{1*}, GOTO, Hiroyuki², Sumio Sawada³

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 京都大学防災研究所, ³ 京都大学

¹Kyoto University, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ³Kyoto University

地震時のように構造物が動的に応答する場合、地盤と構造物との動的相互作用によって地盤の物理パラメータが影響を与えることが知られている。その影響は複雑であるが、逸散減衰に地盤のインピーダンスが関連することが知られている。

また、最近提案された Normalized Energy Density (NED; Goto et al., 2011a) は水平成層地盤内を伝播する波動に関する物理量で、層構造がどのような構成であるかに関わらず、各層で一定値をとる特徴がある。この特徴を利用すると地盤の具体的な速度構造が分からなくても、最表層の NED と基盤相当の地盤の NED とを観測することが出来れば、地盤の減衰を直接求めることができる (Goto et al., 2011b)。NED は層のインピーダンス値をパラメータとして含むため、最表層の NED を求めるためには最表層のインピーダンス値を何らかの方法で計測する必要がある。

本研究は、地盤最表層のインピーダンスを実測する手法を検討するため、有限差分法を用いた数値実験によって基礎的な検討を行ったものである。地表面の一部に空間的に一様な調和振動を与え、その反力を観測することで得られる関係と最表層のインピーダンスとの関連性について検討した。

Hiroyuki Goto, Sumio Sawada and Toshiyuki Hirai: Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -Normalized Energy Density-, Wave Motion, 48, pp.602-612, 2011.

Hiroyuki Goto, Sumio Sawada, Yuichi Kawamura, Toshiyuki Hirai and Takashi Akazawa: Definition of normalized energy density and its application to direct estimation of damping property, The 4th International IASPEI/IAEE Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 2011.

「京」コンピュータによる大規模シミュレーションのための地震動計算コード Seism3D の高度化及び性能チューニング Performance tuning of the Seism3D, the seismic wave propagation code, for large-scale parallel simulation using K comput

前田 拓人^{1*}, 古村 孝志¹, 井上 俊介², 南 一生²

MAEDA, Takuto^{1*}, FURUMURA, Takashi¹, Shunsuke Inoue², Kazuo Minami²

¹ 東大情報学環総合防災情報研究センター, ² 理化学研究所計算科学研究機構

¹ CIDIR, III, the University of Tokyo, ² RIKEN AICS

はじめに

「京」コンピュータは理論最大性能 10PFlops の、現時点で世界最高性能をもつスーパーコンピュータである (Yonezawa et al., 2011)。地震学においても、「京」を利用することで地震波や津波伝播・プレート運動シミュレーション等の高度化が期待されている。しかし、「京」の性能を引き出すためには、80,000 以上もの大ノード数での超並列性能が必要であり、また、各 CPU の 8 個のコアを用いたノード内並列の設計も重要である。そこで、本研究では地震動シミュレーションコード Seism3D について、「京」のハードウェア特性から見た理論的な最大性能を評価し、大規模シミュレーションに向けて性能チューニングを行った。

地震動シミュレーションコード Seism3D とその改良

Seism3D は弾性体運動方程式を Staggered grid 差分法を用いて陽的に解く MPI 並列地震動シミュレーションコードである (Furumura and Chen, 2005)。本研究では、Seism3D の高精度化に向けて、応力歪みの構成方程式を一般化 Zenner 粘弾性体に拡張し、広帯域の内部減衰の導入を可能にした。また、モデル境界には Split-PML を導入し、地震波のモデル境界からの人工反射を効果的に押さえることに成功した。このことにより、長時間ステップ計算後に残留する地殻変動成分を安定して推定することも可能になった。本シミュレーションコードは、震源等価体積力とともに重力項を外力として加え、地震動から津波まで統一的に取り扱う「地震-津波同時シミュレーション」(Maeda and Furumura, 2011) へと拡張することができる。

理論性能の定量評価

Seism3D の地震動計算では、CPU が地球内部構造・地震波動場・応力場といった多量の変数データを参照しながら計算が行われる。そのため、地震動計算は CPU 速度だけではなく、CPU が単位命令を発行する間にどれだけのデータ量をメモリから供給できるか、という相対的なメモリへのアクセス速度 (Byte/Flop 値) に律速される。そこで、コード内の特に計算負荷の高い部分について、演算量および必要とされるメモリ量と「京」のメモリアクセス速度と CPU 速度から、本計算コードの計算速度の上限を推定した。その結果、Seism3D は「京」の理論ピーク性能の約 15-16% が上限であることが確認され、この数値を性能チューニングの目標とすることにした。

並列性能チューニングと並列計算レイアウトの検討

最大 80,000 ノード (CPU) 以上を用いた大規模並列計算を行うには、隣接するノードとの効率的な通信とノード間での並列バランスの調整が必要である。我々は、隣接間通信を伴う領域分割法のうち、計算領域を一般的な 3 次元分割ではなく、水平方向に分割する 2 次元分割を採用した。ノードに割り当てられる領域は Z 方向に極端に大きい棒状の形状を持つ。この形状の特性を生かし、Z 方向の計算を 3 次元ループ演算の再内ループになるよう配列の添え字の順番を変更することで、連続的なメモリアクセスを持つ長いループ長を確保し、さらにソフトウェアパイプラインによる高速化も実現した。

単体性能チューニング

CPU がメモリから読み込んだデータは、L1 もしくは L2 キャッシュに置かれる。キャッシュへのアクセス速度はメモリよりはるかに速いため、高速化にはキャッシュ上のデータを有効活用することが必須である。本研究では、3 次元の微分演算についてキャッシュチューニングを行った (南・他, 2012)。微分演算では、3 次元配列の 3 方向への連続したメモリアクセスが必要となる。配列の第 1 添字については元々メモリ上に連続的にデータが載っており、まとめてキャッシュに読み込まれたデータを有効に再利用することができる。しかし、配列の第 3 添字方向については、データがメモリ上に離散的に配置されており、キャッシュの有効利用が困難であった。そこで、CPU 内のスレッド並列計算を第 3 添字について連続的に割り当てるサイクリック分割を適用した。このことにより、ある添字に関わるデータが、キャッシュを共有する隣のコアによって利用でき、キャッシュに納められた離散的なデータを効率よく利用することが可能になった。

SSS27-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 17:15-18:30

まとめ

地震動計算コード Seism3D について、キャッシュ利用の効率化を軸にした単体性能チューニングと、並列性能チューニングを組み合わせることにより、「京」上でほぼ理論的上限值とみられる実効性能 16% を達成することが出来た。講演ではチューニング手法の詳細と、実用レベルの計算の実例とを合わせて紹介する。

謝辞

本研究は文部科学省 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」の一環として、理化学研究所が実施している京コンピュータ「京」の試験利用により実施した。

キーワード: 地震波伝播, 数値計算, シミュレーション, 並列計算, チューニング

Keywords: Seismic wave propagation, numerical computation, numerical simulation, parallel computation, tuning

南極大陸内陸部の観測地震波形に氷床が与える影響について Influence of Antarctic ice sheet on seismic waveform observations at intra-Antarctic region

豊国 源知^{1*}, 竹中 博士², 金尾 政紀³

TOYOKUNI, Genti^{1*}, TAKENAKA, Hiroshi², KANAOKA, Masaki³

¹ 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター, ² 九州大学, ³ 国立極地研究所

¹RCPEVE, Tohoku University, ²Kyushu University, ³NIPR

近年は国際極年 (IPY) 2007–2008 に伴うプロジェクトで、これまで観測があまり行われていなかった南極大陸内陸部の氷床にも広帯域地震計が多数設置されるようになっており、得られた波形データの活用が期待されている。しかし南極氷床は厚さ約 3km にもおよぶため、データ解析の際には氷床の影響の考慮が不可欠である。今回我々は、これまで開発を行ってきた全地球を対象とした地震波伝搬シミュレーション手法「球座標系 2.5 次元差分法」と、簡単な形状の南極氷床モデルを用いて、様々な周波数の入力地震動に対する南極氷床の応答を調べる。

グローバル地震学の分野では従来、計算精度と効率の良い波形計算手法として、球の中心と震源とを結ぶ軸の周りに構造の軸対称性を仮定することで、構造の 2 次元断面で 3 次元の地震波動場を計算する「軸対称モデリング」が用いられてきた。この手法は断面上だけで計算を行うため、3 次元計算に比べて計算機資源を大幅に節約できるメリットがあるが、構造が原理的に軸対称に制約されてしまうデメリットもあった。我々の球座標系 2.5 次元差分法は、従来の軸対称モデリングの進化形であり、任意の非対称構造、モーメントテンソル点震源、非弾性減衰、および地球中心を取り扱うことができる (例えば、Toyokuni et al., 2005, *GRL*)。

発表では標準地球モデル PREM (Dziewonski & Anderson, 1981, *PEPI*) のベースに、厚さ 3 km、密度 0.914 g/cm³、S 波速度 2 km/s の均質な南極氷床モデルを乗せ、4 s から 30 s までの様々なパルス幅の震源時間関数を入力して行った SH 波伝搬のシミュレーション結果を紹介し、氷床上に設置された地震計による観測波形に氷床がどのように影響するか考察する。

キーワード: 地震学, 理論地震波形, 差分法, グローバルモデリング, 国際極年 2007-2008, 南極

Keywords: seismology, synthetic seismogram, finite-difference method (FDM), global modeling, IPY2007-2008, Antarctica

高周波数におけるS波輻射パターンの崩れに対する地形の影響

Effect of complex surface topography on the distortion of the apparent S-wave radiation pattern

武村 俊介^{1*}, 古村 孝志², 前田 拓人²

TAKEMURA, Shunsuke^{1*}, FURUMURA, Takashi², MAEDA, Takuto²

¹ 東大地震研, ² 東大情報学環総合防災情報研究センター

¹ERI, the Univ. Tokyo, ²CIDIR, the Univ. Tokyo

はじめに

均質な地下構造において横ずれ型の震源から輻射された地震動の最大振幅分布(以下、見かけの輻射パターン)は、断層の走行方向とそれに直交する方向に大きい四象限型の分布となる。しかし、不均質な地下構造を伝播した1 Hz以上の高周波数地震動の見かけの輻射パターンは方位によらず等方的な分布となることが報告されている(e.g. Liu and Helmberger, 1985; Takemura et al., 2009)。Takemura et al.(2009)は高密度・大量の観測記録の解析から、この輻射パターンの崩れは伝播経路中に含まれる短波長の速度ゆらぎによる地震波散乱が主たる原因であることを明らかにした。さらに、地下構造中に統計的に合成した速度ゆらぎを考慮した地震動シミュレーションと観測記録の比較により、西南日本の上部地殻における速度ゆらぎ構造の推定を行った。その結果、見かけの輻射パターンの崩れを説明するには相関距離 $a = 3-5$ km、ゆらぎの強さ $e = 0.07$ の指数関数型の媒質が最適であることが明らかとなった。

その一方で、複雑な地表地形に伴う散乱波の影響が大きいことも指摘されている(Kumagai et al., 2011)。そこで、本研究では数値シミュレーションに基づき、地形散乱の影響および速度ゆらぎによる影響を速度ゆらぎによる影響と区別して評価した。

3次元差分法による地震動シミュレーション

128 km × 128 km × 64 km の計算領域を、水平方向に0.1 km、鉛直方向に0.05 kmの格子間隔で離散化し、空間4次・時間2次精度のスタッガード格子による並列差分法を用いて計算を行った。複雑な地形による散乱波を高精度に評価するため、固体/気体境界(自由表面)に対して適切な境界条件を適用した(e.g. Okamoto and Takenaka, 2005; Maeda and Furumura, 2011)。地表面形状については国土地理院のデータを利用し、中国・四国地方の一部を切り出してモデル化した。媒質の速度ゆらぎによる地震波散乱の影響も考慮するために指数関数型のランダムな速度ゆらぎ(相関距離 $a = 5$ km、ゆらぎの強さ $e = 0.05$)を仮定した。

媒質の中央、深さ5 kmの地点に横ずれ型の震源を仮定した。(a)複雑地形モデル、(b)速度ゆらぎモデル、(c)速度ゆらぎおよび複雑地形の3つのモデルについてシミュレーションを行い、得られた波形から2-4 Hzにおける二乗振幅の最大値を計算し、その空間パターンを見かけの輻射パターンとしてモデルごとの変化を調べた。

シミュレーション結果

複雑地形モデルを用いた計算結果は、地形によるS波振幅の局所的な増幅・減衰の効果は見られるものの、四象限型の見かけの輻射パターンは保持される。また、崩れ方も各地点近傍の地形に依存しており、震央距離によらないことが明らかとなった。それに対して速度ゆらぎモデルを用いた計算結果は、伝播に伴い前方散乱・回折の効果が蓄積し、震央距離30 kmより遠くにおいては見かけの輻射パターンが四象限型から大きく崩れるようになる。このように、地形と媒質内部不均質構造では、見かけの輻射パターンの崩れの程度や距離依存性が異なることがわかった。また、速度ゆらぎと複雑地形の双方を含んだより現実に近いモデルでは2つの不均質構造の効果が合わさり、崩れはさらに大きくなる。

見かけのS波輻射パターンの四象限型からの崩れを定量的に評価するために、半無限均質媒質で計算された見かけの輻射パターンを基準として二乗振幅の残差の総和を計算した。複雑地形モデルでは二乗振幅残差の総和が2016であったのが、速度ゆらぎモデルでは6324と大きい。速度ゆらぎと複雑地形を両方仮定したモデルでは7042とそれぞれ単独の場合に比べて11%大きくなった。Takemura et al. (2009)では速度ゆらぎのみを仮定した数値シミュレーションと観測記録の比較により西南日本における不均質の強さを推定した。しかし、その際に地形による寄与を考慮に入れていないため、速度不均質構造の推定が過大評価となっている可能性がある。速度ゆらぎ構造の推定に地形の影響を考慮することで、より精緻な地球内部不均質構造の推定が可能になると期待される。

謝辞

海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。記して感謝いたします

キーワード: 地震波動伝播, 地震波散乱, 短波長不均質, 表層地形, 数値シミュレーション

Keywords: Seismic wave propagation, Seismic wave scattering, Small-scale heterogeneity, topography, numerical simulation

Lateral structure beneath the Izu-Nankai collision zone: Implication of a plate split in the subducting Philippine slab

Lateral structure beneath the Izu-Nankai collision zone: Implication of a plate split in the subducting Philippine slab

SIMANCHAL PADHY^{1*}, Takashi Furumura¹, Takuto Maeda¹, Shunsuke Takemura¹

PADHY, SIMANCHAL^{1*}, FURUMURA, Takashi¹, MAEDA, Takuto¹, TAKEMURA, Shunsuke¹

¹CIDIR, ²ERI, ³NGRI

¹CIDIR, ²ERI, ³NGRI

On July 5, 2011, an earthquake with a magnitude of 5.5 occurred off the Kii Peninsula in the northern Wakayama Prefecture in southwest Japan within the subducting PHS plate at depth of around 10 km. The earthquake caused strong shaking in the area near the epicenter. We analyzed the waveforms from this earthquake recorded at Hi-net and F-net stations in Japan. Such waveform analyses exhibit most of the earlier observations like dominance of low-frequency ($f < 0.25\text{Hz}$) onset and following high-frequency ($f > 2\text{Hz}$) energy with long coda due to the stochastic waveguide effect of the subducting plate, proposed earlier by Furumura and Kennett (2005). Interestingly, we observed a clear difference in wave propagation pattern between east and west of the epicenter. For example, the waveforms for eastern part show S-coda are depleted with high frequency energy as compared to the western part. The duration of S-coda varies alternatively between high and low from east to west through center of the epicenter. The central stations show loss of low-frequency precursor to P-waves and presence of converted phases in P-coda. Such complexities in the observed waveforms are difficult to explain due to the radiation pattern of P- and S-waves and/or by anomalous propagation of seismic waves in existing plate model, indicating sudden lateral change in the wave guiding properties of the subducting slab, such as caused by the splitting of the slab as proposed by Ide et al. (2010).

To explain the observations, we employ two-dimensional finite-difference method (FDM) simulations of complete high-frequency P-SV wave propagation taking thinning of the PHS slab into account. In the plate model we included stochastic random heterogeneities described by von Karman distribution function with a longer correlation length of 10 km in horizontal direction and much shorter correlation length of 0.5 km in depth and standard deviation from background P- and S-wave velocities of 5% following the study of Furumura and Kennett (2005). We expect that the observed guided wave energy decouples from the waveguide where the slab is split. Low frequency energy leaks out of the slab in the low velocity mantle surrounding the slab. Taking into account the distribution of seismicity and focal mechanisms (Ide et al., 2010), and receiver function analyses (Shiomi et al., 2004) in the PHS plate, we expect a local velocity discontinuity or splitting of the plate at least to a depth of 30 km. Such a split in the PHS plate structure could also be manifested as non-volcanic tremor sources in the southwest Japan (Obara, 2002). The preliminary results, which suggest that the Philippine Sea slab is strongly split or partitioned beneath the Izu-western Nankai Trough in southwestern Japan, is the cause of the complicated waves from shallow inslab events. These effects need to be tested further with a 3-D FDM simulation employing high-performance computers with a variety of possible slab geometries. We finally discuss the implications of the new split plate model on the seismogenic potential of the area and the dynamics of the Nankai subduction in southwest Japan.

キーワード: philippine sea plate, wave propagation, numerical simulation, coda

Keywords: philippine sea plate, wave propagation, numerical simulation, coda

東北地方日本海東縁地域における常時微動トモグラフィ Ambient noise tomography in the eastern margin of the Japan Sea, NE Japan

米川 真紀^{1*}, 高木 涼太¹, 岡田 知己¹
YONEKAWA, Maki^{1*}, TAKAGI, Ryota¹, OKADA, Tomomi¹

¹ 東北大・理・予知セ

¹RCPEV, Grad. Sch. of Sci., Tohoku University

Seismic interferometry has been used to estimate subsurface structure. Seismic interferometry is based on the fact that cross-correlation function of random wavefields observed at a pair of stations contains Green's function between the two stations. Recently, seismic interferometry has been applied for ambient noise to estimate velocity structure, called ambient noise tomography. In this study, we applied this method for data of a dense seismic network in the region of the eastern margin of the Japan Sea. We estimated group velocity under the Sea of Japan and the western part of Tohoku region.

Data are vertical component of continuous record observed at 90 seismic station of Hi-net, JMA, Tohoku University, and temporary seismic stations installed for 'Multidisciplinary research project for high strain rate zone' promoted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan. Time period of data is 10 months from January 2009 to October 2009.

First, we calculated daily cross-correlation function for each pair. We divided day-long data into 287 segments with a length of 10 minutes and with an overlap of 5 minutes and downsampled the data with a sampling with a sampling frequency of 20 Hz. Then we corrected instrument response. In order to avoid contamination of outliers such as natural earthquakes and packet deficits due to error of data transfer, we did not use the segments that include outliers. Determination of the earthquake was carried out automatically by using a root-mean-square value of the amplitude. After these procedures, we applied a fast Fourier transform for data segments and multiply the spectrum of the first segment with the complex conjugate of the second spectrum. The cross-spectra is normalized by spectral amplitude of both segments. We computed averaged cross-spectra over all segments. The daily cross-correlation function is obtained by applying invert Fast Fourier transform for the averaged cross-spectra. Finally, we stacked all available cross-correlations functions for each station-pair during 10 months.

We applied band-pass filter for the cross-correlation functions with three periodic bands 2-5 sec, 5-10 sec, and 10-20 sec. Line up of the cross-correlations in order of separation distance between the two stations shows clear seismic wave propagation with an apparent velocity of 3 km/s, which corresponds to the fundamental mode of Rayleigh wave. We estimated group velocity in the period of 5-10 sec, which the peaks emerge. Group velocity between two stations is calculated by dividing the separation distance by the peak time of envelope function. As a first step, we averaged group velocities between certain station and all the other stations and estimated average velocity for each station. The average velocity of each station is about 2.5-3.5 km/s.

Acknowledgment: This study is a part of 'Multidisciplinary research project for high strain rate zone' promoted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan.

地震波干渉法による DONET 観測データの解析 An application of seismic interferometry for DONET data

西田 究^{1*}, 藤 亜希子², 高橋 成実², 利根川 貴志², 深尾 良夫²

NISHIDA, Kiwamu^{1*}, TO, Akiko², TAKAHASHI, Narumi², TONEGAWA, Takashi², FUKAO, Yoshio²

¹ 東大地震研, ² 海洋研究開発機構

¹ERI, Univ. of Tokyo, ²JAMSTEC

周期 2 秒から 20 秒の帯域では、脈動と呼ばれるランダム励起された表面波が卓越していることが良く知られている。脈動は海洋波浪が励起源と考えられており表面波の励起が卓越している。その励起振幅は大きく、かつランダムに励起されているために、この帯域で地震波形を解析するには困難が伴った。最近、脈動がランダムに励起されている表面波であることを逆にとり、観測記録の相互相関解析による表面波トモグラフィ (ambient noise tomography) が盛んに行われるようになってきた。短周期帯でトモグラフィが可能になった大きな要因として、高密度の広帯域地震計観測網が利用可能になった事があげられる。

地震波干渉法の海底データへの適応の試みも始まっているが [e.g. Harmon et al., 2007]、地上に比べ観測点密度が低いため、波動伝播特性はまだ完全には理解されていない。特に、付加帯が発達している海域では、厚い堆積層の影響で波動伝播が複雑になる。そのため、その伝搬特性の理解は非常に難しい。本研究の目的は、海域での広帯域地震計のアレーデータを用いることにより、その波動伝搬を明らかにすることである。

解析には、海洋研究開発機構が構築した地震・津波観測監視システム (DONET) を用いた。DONET は 5 つのサブアレーから構成されている。解析には、各観測点に設置された広帯域地震計 (Guralp CMG-3T) 上下動成分、水晶水圧計 (Paroscientific 社製) の記録を用いた。解析期間は 2011/7/19-29 である。各時系列データを 409.6 秒の時系列に分割し、全ての観測点ペアに対して規格化されたクロススペクトルを計算した。その際、ローカルな地震など過渡的な変動を含む記録は解析から除外した。以下の解析では、表面波が等方的乱ランダムに励起されていると仮定する。

まず相互相関関数 (上下動) を見ていく。0.1Hz より長周期側では、普通の意味での Rayleigh 波 (地殻に感度を持つ) が卓越する。0.1-0.5 Hz では付加帯にエネルギーをもつモードが卓越する。特に 0.2-0.5 Hz では波動の伝搬が複雑となるので、分散曲線は求まりづらい。この帯域で群速度は 500m/s より遅くなる上、分散の影響もあり波形は崩れ長い coda を引く。0.5Hz より短周期になると、上下動には付加帯にエネルギーをもつ波動は顕著ではなくなる。それに変わって、固液の境界波である Scholte waves [Yao et al., 2011] の存在が顕著になってくる。この波は水平方向の位相速度、群速度ともに 1.5 km/s であり、おもに海底付近の海中側にエネルギーを持つ。圧力記録の相互相関関数も、基本的には同様の波動伝播を示す。例外的に、付加帯の厚い領域で 0.2 から 0.4 Hz の周期帯である。上下動で Rayleigh 波の基本モードが卓越しているのに対して、圧力記録では 1 次高次モードが卓越する。

アレー下で構造が 1 次元構造であると仮定して、クロススペクトルから分散曲線を計算した。付加帯が厚い領域では分散曲線のばらつきが大きく、とくに上下動記録でモード・ブランチをはっきりとは見て取れない。付加帯の厚い領域では、位相速度も 500 m/s (0.2-0.4Hz) と、その他の領域 (1000 m/s 程度) に比べて有意に遅い。相互相関関数の項目で述べたとおり、圧力記録と上下動記録では卓越するモードブランチが異なる。今後は水平動の解析も行い、上下動、水平動、圧力記録の振幅比も考慮し、アレー下での局所的な 1 次元構造を決定する予定である。

キーワード: 地震波干渉法, 表面波

Keywords: seismic interferometry, surface wave

海底常時微動の自己相関解析による2005年宮城県沖地震に伴う地震波速度変化の検出 Seismic velocity changes due to the 2005 Miyagi-Oki Earthquake revealed from auto-correlation analysis of ambient noise

中条 恒太¹, 伊藤 喜宏^{1*}, 中原 恒¹, 日野 亮太¹, 山田 知朗², 篠原 雅尚², 金沢 敏彦²

CHUJO, Kota¹, ITO, Yoshihiro^{1*}, NAKAHARA, Hisashi¹, HINO, Ryota¹, YAMADA, Tomoaki², SHINOHARA, Masanao², KANAZAWA, Toshihiko²

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 東京大学地震研究所

¹ Graduate School of Science, Tohoku University, ² Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

地震波干渉法とは2地点での地震観測波形に相互相関処理を行うことにより、一方を仮想震源、他方を受震点とした場合の波形を合成するもので、1観測点での地震波形に自己相関処理を行えばゼロオフセットの反射記録に相当するものが得られる(例えば、Campillo and Paul, 2003)。近年、地震波干渉法を常時微動に適用することにより地震波速度構造とその時間変化の検出の試みが精力的に行われている(例えば、Wegler et al., 2009)。しかし長期連続観測データの蓄積に乏しい海域では、常時微動を用いた地震波干渉法の研究事例は少ない。日本周辺の海域は地震活動が活発な領域であり、海底常時微動を用いた地震波干渉法による海底下構造の時間変化がモニタリングできるようになれば、地震発生過程の解明に大きく貢献するものと期待される。本研究は地震波干渉法による海底下構造モニタリングの可能性を検証することを目的として、2005年宮城県沖地震発生時に震源域周辺に設置されていた海底地震計のデータに記録された常時微動の自己相関解析により、この地震に伴う震源域周辺での地下構造の変化の検出を試みる。

解析には宮城県沖に設置された14観測点に設置された海底地震計の上下動成分に記録された常時微動を用いた。解析期間は長いもので約300日間、短いもので約45日間である。0.5~2 Hzの周波数帯域において2値化処理を行ったのち120秒の自己相関関数を計算した。得られた1日ごとの平均自己相関関数は、観測期間全体を通して安定した形状を示したことから、海底常時微動の自己相関関数は海底下の地震波速度構造を反映したものであると考えられる。得られた自己相関関数の振幅の大きい部分に注目してその時間変化を解析したところ、2005年宮城県沖地震を境にその前後で有意な変化が検出された。

2005年宮城県沖地震の前後で得られた自己相関関数に対して相互相関解析を行い、地震前後での自己相関関数の変化の詳細を検討したところ、地震発生後にみられる自己相関関数の変化には二つのパターンがあることがわかった。一つは、地震後の相互相関関数が時間軸方向にほぼ均等に伸張する変化であり、観測点周囲の様な速度低下を示唆する。もう一つは、特定のラグタイムにおいて波形の相似性が低下する変化で、地下の特定の場所に局在した構造変化を示唆する。様な速度変化の要因として強震動による表層の損傷が、局所的な構造変化として震源となったプレート境界面近傍の物性変化が考えられる。

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関関数, 海底地震計, 常時微動, 速度変化

Keywords: Seismic interferometry, auto-correlation function, ocean-bottom seismometer, ambient noise, velocity change

2011年東北地方太平洋沖地震に関連した地下構造の速度変化の検出 Fractional velocity changes in Japan Islands related to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

上野 友岳^{1*}, 齊藤 竜彦¹, 汐見 勝彦¹, Enescu Bogdan¹

UENO, Tomotake^{1*}, SAITO, Tatsuhiko¹, SHIOMI, Katsuhiko¹, ENESCU, Bogdan¹

¹ 防災科学技術研究所

¹NIED

我々は地震波干渉法を用いて2011年東北地方太平洋沖地震前後における地下構造の時間変化を調べた。近年の研究で、大地震や群発地震、火山活動などに関連して地下の速度構造が急激に変化することが明らかにされている。Mw9.0におよぶ東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の場合、その速度構造の時間変化が全国規模で観測されることが考えられる。本研究では、日本全国に設置されているHi-net観測点のうち、東北地方を中心に400点以上を選び、地震前後の自己相関関数を雑微動から求め、地下構造の時間変化の検出を試みた。また、地震時に得られた最大加速度や震源モデルから推定される体積歪と速度構造の時間変化の変化量を比較し、その関連性を推定した。

解析にはHi-netの速度形地震計(固有周期1Hz, 100Hzサンプリング)で2010年から2011年に記録された上下動成分の連続波形データを使用した。この連続波形記録に対し、1時間長の波形データを切り出し、オフセット処理およびトレンド処理を行った後、1-3Hzのバンドパスフィルターを施し、データの重みを等しくするために1bitに振幅を規格化した。これらの処理後に雑微動の自己相関関数を計算し、得られた自己相関関数の安定性を高めるために1週間分の自己相関関数をスタックした。時間変化を求める際の基準となる自己相関関数は、本震発生前である2010年1年間の自己相関関数の平均値を採用した。基準となる相関関数と日々の相関関数の位相差は、地下の速度構造が一様に変化すると仮定した時、地下構造の変化量 dv/v に変換可能であるため、自己相関関数の時間変化から日々の dv/v を算出した。この後、地震発生前後1ヶ月間における dv/v の平均値をブートストラップ法で評価し、その差を地震前後における地下構造の時間変化とした。この際、予め計算していた dv/v の揺らぎを基準として、それより大きな時間変化が見られた観測点を地震前後に地下構造の時間変化のあった観測点として採用した。これらの dv/v の時間変化の結果と、本震から推定される体積歪変化、あるいは、KiK-netで記録された最大加速度(PGA)データと比較し、時間変化の原因を調査した。

日本全国に分布するHi-net観測点の自己相関関数の時間変化から、2011年東北地方太平洋沖地震前後の速度構造変化を求めたところ、東北地方・関東地方・中部地方東部で dv/v の低下が、北海道東部・中部地方西部・近畿中国地方で弱いながらも dv/v の上昇が得られた。得られた速度変化と震源モデルから計算される体積歪を比較すると、 10^{-6} より大きな歪変化が予想される観測点において dv/v の変化が顕著であり、その多くは速度低下の傾向を示した。この体積歪と速度変化の関係は、伊豆東方沖群発地震域で観測された結果と一致する。このことから、地震によって引き起こされた地殻内の静的な変形と dv/v の低下に関連性が示唆される。しかしながら、 dv/v の上昇領域は、体積歪にして 10^{-7} 以下と歪が比較的小さい領域であり、北海道東部で圧縮場、中部地方西部以西では引張場となり一定ではなかった。一方で、PGAと速度変化を比較すると、おおよそ10galを超えたあたりから dv/v の低下を示し始めるが、 dv/v の速度上昇を説明することは困難である。

キーワード: 地震波干渉法, 2011年東北地方太平洋沖地震, 時間変化

Keywords: seismic interferometry, The 2011 Tohoku-Oki Earthquake, temporal changes

相似地震解析にもとづく東北地方太平洋沖地震 (M9) による地震波速度変化の検出 Temporal seismic velocity changes associated with the 2011 Tohoku Earthquake from repeating earthquakes analyses

西村 太志^{1*}

NISHIMURA, Takeshi^{1*}

¹ 東北大・理・地球物理

¹Geophysics, Science, Tohoku Univ.

近年、雑微動をもちいた地震波干渉法により、大地震や火山活動に伴う地殻浅部の地震波速度が数パーセント増加あるいは減少するという報告がなされるようになった。この雑微動をもちいた解析は、一般には、数秒程度の表面波による解析となるため、対象は深さ数キロメートルに限られることが多いという弱点がある。そこで、本研究は、先駆的な研究 Poupinet (1984) にならって、同一震源から同じ波形を繰り返し励起する相似地震を用いて、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 M9 の前後の地殻構造の時間変化の検出を試みる。

気象庁一元化カタログをもとに、近接して発生している M4 程度の地震群を選択する。震源に近い Hi-Net 観測点の地震波形約 30 秒間の相関係数を求め、0.9 以上の高い値を数十点以上示すものを相似地震として解析に用いる。相似地震の P 波および S 波の直達波に、震央距離に応じて数秒から 10 秒程度の時間幅を設定し、クロススペクトル法を用いて、ペアとなる 2 つの相似地震の P 波および S 波それぞれの相対的な到達時間差を読み取る。三陸地域から茨城沖の深さ 40-60 km 付近に震源のある相似地震 13 個を解析した結果、以下のことが明らかとなった。P 波の到達時間は、M9 地震の発生前後で、北海道から中部地方にかけてほとんど変化しない。一方、S 波の到達時間は、M9 の地震発生後に、おおそ青森県から茨城・新潟付近までの地域で、0.01-0.06 秒ほど遅れる。また、東西成分の方が南北成分に比べて全体的に遅れがやや大きい。さらに、M9 の地震発生以前に発生した相似地震のペア 5 個を調べた結果、P 波、S 波ともに到達時間差の変化はほとんどない。以上のことから、M9 地震の発生により、東北地域の Hi-net 観測点下の S 波速度が低下したといえる。

大地震の発生前後の地震波速度の低下要因として、強震動による地殻表層部の剛性率低下が考えられている。このような浅部で剛性率変化が起きるとすると、S 波速度の小さい領域ほど時間差が大きくなると期待される。しかしながら、検層データにもとづく観測点直下 100 m の S 波速度は、相似地震解析から得られた S 波速度低下の空間的分布と相関が高いとはいえない。このことは速度低下領域が観測点直下に限らないことを示唆している。今後、解析データ数を増やすとともに、浅部の変化に敏感な雑微動解析の結果を加味することにより、地震波速度が低下した領域をより明らかにすることができる。

キーワード: 地震波速度変化, 東北地方太平洋沖地震, 地殻構造, 相似地震

Keywords: Temporal seismic velocity change, The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, crustal structure, repeating earthquake

コーダ波の自己相関解析による浅部地下構造の時間変化の検出 Detecting temporal changes in shallow subsurface structures by auto correlation analysis of coda waves

中原 恒^{1*}

NAKAHARA, Hisashi^{1*}

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku Univ.

はじめに

微動を用いた地震波干渉法は、地下構造を常時監視する手法として近年盛んに利用され、世界各地で地震や火山噴火に伴う地下構造の変化が検出されている(例えば、Sens-Schoenfelder and Wegler, 2006, Brenguier et al., 2008)。一方、実体波成分を多く含むコーダ波を用いた地震波干渉法は、地下からの反射波を捉えられる点で有利であり、地下構造の推定(イメージング)に用いられている(例えば、吉本・他, 2007)。自然地震の発生を待つ必要がある点是不利になるが、地震活動が高い地域ではこの手法も地下構造の監視(モニタリング)に有効に利用できるものと考えられる。地下浅部の地震波速度変化の検出には、鉛直ボアホール内の地表と地中の地震計の相互相関関数やデコンボリューションを用いた手法(たとえば Sawazaki et al., 2009)が提案されてきた。この手法は大変有効であるが、地表点のみの場合には適用できない。そこで、本研究では、東日本の太平洋沿岸域に発生した地震に対する地表点のコーダ波記録の自己相関関数を用いて、特に2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地震波速度変化の検出を試みる。なお、この地震に伴う浅部地盤構造の時間変化については、すでに Wu and Peng (2011) や Nakata and Snieder (2011) などにより報告されているため、本研究は手法の有用性の検証を目的とする。

データ解析

本研究では、東日本の太平洋側(青森から千葉まで)にある防災科学技術研究所のKiK-net観測点のデータを使用した。2009年1月から2011年12月の期間に東日本太平洋沖の深さ20-60kmで発生したM7.0以下の地震を用いて、地表観測点における水平動2成分の記録を解析に使用する。特に2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の後には、余震や誘発地震活動が活発で、コーダを用いた地下構造の監視の時間サンプリングは通常より高い。それに比べると本震前は地震活動が低い。解析には1-20Hzの帯域におけるSコーダ波を用い、直達S波走時の1.5倍の時刻から10.24秒間の時間窓を1秒ずつずらしながら20個とり、時間窓ごとに規格化された自己相関関数を計算し、最後にすべての時間窓の結果を重合した。各地震に対する結果を時間順にならべ、自己相関関数に変化が見られるかを観察する。特に浅部地盤構造の変化に着目するために、自己相関関数のラグタイムが1s以下のフェイズに着目する。

結果

データ解析の結果、東北地方太平洋沖地震の発生前後で自己相関関数の位相が変化している観測点と変化していない観測点の双方が発見された。変化が見えた観測点の中で、特に岩手の三陸沿岸域や茨城の沿岸域では、地震の発生に伴い、自己相関関数の位相が明らかに遅れていることが分かった。フェイズの遅れを定量的に求めるために、自己相関関数のゼロラグのピークの次に大きい2次ピークの時刻に着目し、地震前の期間の平均値を基準にして、地震後の時刻の変化率を求めた。遅れが見られた観測点では、概ね10%程度の値となったが、中には最大30%程度の遅れとなる点も見られた。変化の検出精度は数%で、相似地震を用いた解析(例えば Poupinet et al. 1984)に比べるとかなり大きい。結果の解釈であるが、自己相関関数を用いているため、観測された変化は、震源、伝播経路、観測点直下のいずれによる可能性もあり、本研究のみでは分離できない。しかし、10%程度もの大きな変化や空間変化も大きいことを考えると、観測点直下の可能性が高い。実際、先に挙げた既往の研究により、地震に伴い観測点直下の浅部で平均5%程度、最大30%程度の地震波速度低下が見られたことが報告されている。

まとめ

コーダ波記録の自己相関関数を用いて、東日本の太平洋沿岸のKiK-net観測点直下の地震波速度が2011年東北地方太平洋沖地震に伴って変化したことを確認することができた。現在のところ、1-20Hzという比較広い周波数帯域を取り扱っているが、観測点の卓越周波数を考慮した帯域選びにより、もっと多くの観測点でフェイズの出現時刻の時間変化を高精度に検出できる可能性がある。なお、この手法の適用には、地下からの反射フェイズが弱い場合には厳しい、結果のばらつきが数%と大きいなどの制限がある。またこの手法単独では、震源、伝播経路、観測点直下のどこに変化があるのかを特定できない。これらの短所にもかかわらず、この手法は地表点のみのデータで解析できるという大きな利点をもつため、K-NETなど他の観測網のデータも有効に利用できるものと期待される。

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS27-P12

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 17:15-18:30

謝辞 本研究では(独)防災科学技術研究所のKiK-netのデータを使用しました。また、本研究の一部は、科学技術振興機構の国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)による支援を受けました。

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関関数, コーダ波

Keywords: seismic interferometry, auto correlation function, coda wave