

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 (Paroscienti?c 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