

観測記録と3次元地震動シミュレーションに基づく高周波数地震動のモデル化

Modeling of high-frequency seismic wave propagation via observed waveform and numerical simulations using 3D heterogeneous model

*武村 俊介¹

*Shunsuke Takemura¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

1 Hz以上の高周波数地震動の伝播過程をモデル化するためには、数km以下のスケールの不均質性（短波長不均質性）を考慮する必要がある。地震波散乱理論及び数値シミュレーション研究の進展により、地震波速度の短波長不均質性（短波長速度不均質）と表層地形による地震波散乱の性質が明らかとなってきた（例えば、Sato, 1984, 1989; Kumagai et al., 2011; Takemura et al., 2015）。本研究では、地殻内地震を対象として、表層地形及び短波長速度不均質構造を含んだ地震動シミュレーションを行い、観測地震動と直接比較を行うことでそれぞれの不均質の効果を調べた。

計算手法

2011年11月25日に広島・島根県境の深さ14 kmで発生したMw 4.4の地殻内地震を対象として地震動シミュレーションを行った。384×384×128 km³の計算領域を0.1 kmの格子間隔で離散化し、差分法による地震動シミュレーションを行った。技術的な詳細はTakemura et al. (2015)と同様である。背景の地震波速度構造として全国1次地下構造モデル(JIVSM; Koketsu et al., 2012)を仮定し、地殻内にKobayashi et al. (2015)による短波長速度不均質構造を一様に付与した。地殻内の内部減衰は単一のZener Bodyで表現し、 $Q_s^{-1} = Q_p^{-1} = 4.0 \times 10^{-3}$, 参照周波数 $f_0 = 1$ Hzとした(Takemura et al., 2017)。F-net MT解を用いたダブルカップル型の点源を仮定し、地震動シミュレーションを行った。

計算結果

短波長速度不均質を考慮しないモデル(JIVSM)でも地震動シミュレーションを行い、Hi-netで記録された観測記録と比較を行った。どちらのモデルについても、観測された0.1-4 Hzの地動最大速度(PGV)と地震波伝播の特徴を概ね再現しているが、短波長速度不均質を考慮しないモデルではS波コーダの再現性が低い。表層地形による地震波散乱によりコーダ波が励起されるが、観測で見られるような緩やかに時間減衰するコーダエンベロープを再現するには短波長速度不均質が必要不可欠である。

高周波数では短波長速度不均質構造の影響は顕在化する。JIVSMによる計算結果では震源輻射特性の影響でPGVが大きくばらつくのに対し、短波長速度不均質を付与することで最大振幅の方位角変化が小さくなり、ばらつきが抑えられる。

謝辞

防災科学技術研究所のHi-net/F-netの波形記録およびF-net MT解を使用しました。数値シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

キーワード：地震波伝播、短波長速度不均質、表層地形、高周波数地震動、地震動シミュレーション

Keywords: Seismic wave propagation, Small-scale velocity heterogeneity, Irregular topography, High-frequency seismic waves, Numerical modeling

関東地域で観測されたスラブ内地震に見られる顕著な高周波地震波異常 Significant anomalies in high-frequency seismograms for intra-slab earthquakes observed in Kanto area, Japan

*金谷 希美¹、前田 拓人¹、小原 一成¹、竹尾 明子¹

*Nozomi Kanaya¹, Takuto Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

関東・東海地域は太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む複雑な沈み込み帯の上に位置しており、複雑な高周波地震波形が観測される地域である。本研究では、本地域で太平洋スラブ内地震のP・S波間の高周波地震波エンベロープを詳しく調べ、この地域の不均質構造に関係していると考えられる特徴的な地震波エンベロープ異常を明らかにした。

解析に使用した地震は、2004年10月から2016年4月に太平洋プレート内で発生した深さ227–453 km、M4.4–6.9の20のスラブ内地震であり、関東・東海地域に防災科学技術研究所により設置されている高感度地震観測網Hi-netの258観測点で記録された速度波形データを使用した。周波数帯1–16 Hzにおける観測波形に対しオクターブ幅の帯域通過フィルタをかけ、その2乗平均平方根 (RMS) エンベロープに見られる特徴的な波群とその周波数依存性について調べた。その結果、複数の深発地震に対して関東地域で観測される8–16 Hz上下動成分のRMSエンベロープは、理論S波到達時刻の10–20秒程度前にPコーダ波の振幅から顕著に振幅が増加し、10秒程度継続する波群を形成していることがわかった。一方で、低周波数帯1–2 HzのRMSエンベロープにおいて同様の波群は観測されなかった。また、深さ200 km以浅のスラブ内地震では、このような波群は確認されなかった。高周波数RMSエンベロープにおけるこの波群の振幅は水平動成分に比べ上下動成分に卓越して現れており、水平動成分の振動極性はほぼ等方的であった。

高周波数帯に卓越し10秒程度継続する複雑な波群は、反射波のようなインパルス的な波形ではないことから、地下構造の小規模な統計的速度ゆらぎによるランダム不均質により生成された散乱波であると考えられる。それに加え、この波群の到達は直達S波の到達時刻に先行するため、単純なS-S散乱では説明がつかない。これらの波群を系統的に検出した結果、S波と同程度の見かけ速度で震央から離れる方向に伝播していることが示された。S波よりも早く到達することを考えると、これらの波群は伝播過程でP-SまたはS-Pのようなモード変換を伴った散乱を起こしていると考えられる。

対象地域において、予備的な地震波伝播数値シミュレーションを行った。一般的な速度モデルを使用し、小規模な統計的速度ゆらぎを弾性媒質に重ね合わせて地震波動を再現したが、実際の観測波形に見られた高周波の波群を説明することはできなかった。複雑な観測波形を説明するためには、本シミュレーションにおいて使用した速度モデルに対し、特にランダム不均質について改良を加えていく必要があると考えられる。今後このようなより詳細なモデリングを含めたシミュレーションを通じ、本対象地域のような沈み込み帯に置ける地震波伝播現象について理解が進むことが期待される。

キーワード：地震波伝播、散乱、地震波エンベロープ、沈み込み帯、数値シミュレーション

Keywords: seismic wave propagation, scattering, seismogram envelope, subduction zone, numerical simulation

ランダム不均質媒質中のスカラー波伝播の3次元差分法シミュレーションと統計的手法の比較

Comparison of the 3D FD simulation and statistical methods for the scalar wavelet propagation through random media

*江本 賢太郎¹、佐藤 春夫¹

*Kentaro Emoto¹, Haruo Sato¹

1. 東北大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Tohoku University

短周期地震波は、地球内部の短波長不均質構造による散乱により複雑な波形を示す。例えば、エンベロープ拡大現象や、最大振幅の散乱減衰、コーダ波の励起などが挙げられる。これらを説明するには、ランダムな不均質媒質中での波動伝播を統計的に記述し、波形エンベロープを直接導出する方法が有効であり、ボルン近似を用いた輻射伝達理論や放物近似に基づくマルコフ近似理論が用いられてきた。手法の妥当性の検証には波動方程式の差分法計算との比較が必要であるが、3次元では計算コストの問題からこれまでほとんど行われていない。本研究では、地球シミュレータを用いた3次元差分法計算によりランダム媒質中のスカラー波伝播を再現し、その特徴を調べ統計的手法と比較する。

ランダムな速度ゆらぎは指数関数型自己相関関数で特徴づけられるとし、ゆらぎの強さは5%、相関距離 a は1kmと5kmとした。差分法での解析対象周波数は1.5Hzとし、空間刻み0.08km、平均伝播速度4km/sとすると、1波長あたり33グリッドとなり数値分散の影響は無視できる。差分計算は空間4次・時間2次精度とする。計算領域は1辺307kmの立方体とし、中心からRicker波を等方に輻射する。観測点は伝播距離25, 50, 75, 100kmに各距離に20個配置する。この大きさのランダム不均質媒質を一度に作成するのは困難であるため、異なるシードで作成した小さなランダム媒質をなめらかにつなげて全体を構成する。同様に作成した計6個のランダム不均質媒質における計算結果をアンサンブルとして用いる。

まず、差分トレースをスタックした平均2乗エンベロープを統計的手法と比較する。相関距離1kmの場合、ボルン近似を用いた輻射伝達理論は、立ち上がりからコーダまで差分エンベロープをよく再現することができた（計算にはモンテカルロ法を用いた）。一方、相関距離5kmの場合、ピーク付近のエンベロープは改良マルコフ近似（Sato, 2016）でよく再現でき、コーダ部分はボルン近似を用いた輻射伝達理論で再現できることを確認した。中心波数を k_c とすると、前者は $ak_c = 2.3$ 、後者は $ak_c = 12$ であり、後者はボルン近似よりもマルコフ近似が適している領域である。

次に、エンベロープを構成する差分トレースの2乗振幅分布を調べる。直達波到達直後は対数正規分布を示すのに対し、コーダ部分は指数分布に従うことが分かった。これは、エンベロープを構成する散乱波が、前方散乱波からランダムな分布へと変化していくことを示している。また、相関距離が小さいほど、指数分布へと変化するまでの時間が早くなり、相関距離1km、伝播距離100kmではエンベロープのピーク付近も指数分布となった。

また、各観測点の周りに小さな3つの正12面体の頂点となるようにアレイを設置し、各時刻においてFK解析から散乱波の到来方向を調べた。震源方向を基準とした散乱波の入射角は、初動到達後から単調増加した。差分計算は経過時間50秒まで行ったが、この範囲内では、入射角のピーク値の平均は60°程度まで増加したが、等方的にはならなかった。つまり、エネルギーフラックスが等方的になる前から、2乗振幅は指数分布に

従うことがわかった。相関距離が1kmの方が5kmと比べてコーダ振幅の励起量が多いが、入射角分布は両者に顕著な違いは見られなかった。

キーワード：地震波散乱、差分法、マルコフ近似、ボルン近似

Keywords: Scattering, Finite Difference Simulation, Markov Approximation, Born Approximation

べき乗型スペクトルを持つランダム媒質を伝播するスカラー波束強度の理論計算

Synthesis of Scalar Wavelet Intensity Propagating through Random Media Having Power-Law Spectrum

*佐藤 春夫¹、江本 賢太郎¹

*Haruo Sato¹, Kentaro Emoto¹

1. 東北大学

1. Tohoku University

微小地震の観測から、短周期のS波は伝播距離の増加と共にその見かけ継続時間が大きくなり、その後ろには長い継続時間をもつコーダ波を伴うことが知られている。ここでは、ランダムな速度ゆらぎの数理的モデルとして伝播速度 V_0 、パラメータ (ε, a, κ) で特徴付けられるフォンカルマン型ランダム媒質を考え、中心波数 k_c のスカラー波束の伝播を考察する。条件 $\varepsilon^2 a^2 k_c^2 \ll 1$ を満たす場合には、Born近似を用いた輻射伝達方程式を用いて波動強度（自乗平均振幅）の時間変化を導出できることが知られている。一方、中心波数 k_c がコーナー波数 a^{-1} より高いべき乗型スペクトル領域にあって上記条件を満たさない場合、放物近似に基づくMarkov近似を用いることで直達波近傍の波動強度を計算することができる。特にスペクトル勾配が緩い場合には広角度散乱が強くなりコーダ波が励起されると考えられるが、従来の方法ではコーダ波を含めた波動強度の時間変化を統一的に説明することができない。本研究では昨年提案した方法(Sato,2016)を発展させ、初到着信からピーク値を超えてコーダに至るまでの波動強度を計算する次のような方法を提案する。(1)ランダムな速度ゆらぎのパワースペクトル密度を、 ζ k_c にコーナーを持つフォンカルマン型の高波数（短波長）成分と、差としての低波数（長波長）成分とに分解する。ここで ζ は調節因子である。(2)速度ゆらぎの短波長成分にボルン近似を適用して散乱係数を求め、これを伝播速度一定の輻射伝達方程式に用いてモンテカルロ法で波動強度の時間変化を計算する。(3)Markov近似法によって速度ゆらぎの長波長ランダム成分による継続時間幅の拡大と最大値の着信遅延を計算する。(4)これらを伝播速度の揺らぎと解釈し、(2)で求めた波動強度に時間領域でたたみ込み、グリーン関数を求める。計算に用いるパラメータはランダム媒質の $\varepsilon, a, \kappa, V_0$ 、中心波数 k_c 及び調節因子 ζ であり、これによって速度揺らぎの全スペクトルを反映した波動強度の理論計算が完結する。例として、 $V_0=4\text{km/s}$ 、 $\varepsilon=0.05$ 、 $a=5\text{km}$ 、 $\kappa=0.1\sim 1$ で与えられるランダム媒質において3HzのRicker波が点震源から放射される場合を考察し、上記理論計算と差分計算との比較を行った。その結果、初動から最大値を経てコーダ波の前半に至るまでの範囲で、両者は良く一致することが確かめられた。ここに提案する方法は、短周期地震波のエンベロープの解析から固体地球の内部構造を推定する研究に寄与できるものと考えられる。

キーワード：地震波の散乱、地球の不均質構造、波動論

Keywords: scattering of seismic waves, Heterogeneous structure of the earth, wave theory

Seismic wave attenuation in carbonate rocks: challenging but promising parameter for petroleum exploration.

*Fateh Bouchaala¹, Mohammed Yussuf Ali¹, Jun Matsushima²

1. The Petroleum Institute, 2. University of Tokyo

Seismic wave attenuation is an important parameter in geophysical studies, thanks to its sensitivity to physical parameters of the subsurface such as, fluid content, lithology and fractures. So, an accurate estimation of this parameter can help to enhance the geophysical interpretation and also to increase signal to noise ratio of seismic data. However, getting an accurate seismic attenuation profiles is challenging due to its high sensitivity to noise and immaturity of the methodology. The challenge is bigger in the case of carbonate rocks media, due to their high heterogeneity and complex lithology.

In this study we estimate seismic wave attenuation from different oilfields having different locations in Abu Dhabi. The subsurface of this region is mainly composed of carbonate rocks. We implemented a robust processing workflow and we developed a new method, this in order to get an accurate and high depth-resolution attenuation profiles from Vertical Seismic Profiling (VSP) and sonic data. The results show a significant contribution of scattering on total attenuation, this can be interpreted by high the heterogeneity and the complex lithology of carbonate rocks. The scattering and intrinsic attenuation show a sensitivity to fractures, fluid and clay content. This is a good indication about the attenuation potential for reservoir characterization and to enhance geophysical interpretation. The cross plots showed a link between sonic attenuation and petrophysical logs, which means that these latter can be predictable from the attenuation.

The results obtained herein can be improved if we overcome the limitation of the conventional approach, which uses well-log velocities and densities to calculate scattering attenuation based on the assumption that the total attenuation is a linear summation of intrinsic and scattering attenuation. It is important to confirm the validity of the assumption of strong scattering in order to adequately estimate the scattering attenuation from velocity or acoustic impedance data. We proposed a new approach to separate between scattering and intrinsic attenuation based on reforming the modified median frequency shift (MMFS) (Suzuki and Matsushima 2013) method with seismic interferometry (SI) (Matsushima et al 2016) under the assumption that intrinsic and scattering attenuation are frequency independent and frequency dependent, respectively. The numerical results demonstrate the superiority of the proposed method as compared to the conventional approach and the importance of optimizing parameters in the application of preprocessing filters to balance the resolution power and noise reduction effect.

Keywords: seismic wave attenuation, carbonate rocks, fluid and fractures, mechanism

Strong Land-Atmosphere Coupling in Low Frequency Band below 0.05 Hz

*谷本 俊郎¹、Valovcin Anne¹、Wang Jiong¹

*Toshiro Tanimoto¹, Anne Valovcin¹, Jiong Wang¹

1. Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, CA93106, USA

1. Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara, CA93106, USA

There are now many arrays that have co-located seismometers and barometers. They provide new opportunities to examine the nature of coupling between the atmosphere and the solid Earth. We will discuss some basic characteristics of the coupling that we learned from the Earthscope Array when we analyzed hurricane data.

In our recent paper (GRL, 43, Geophys. Res. Lett., 43, 2016, doi:10.1002/2016GL070858), we showed that there is a threshold pressure for the coupling between atmospheric pressure and vertical seismic motions; below this threshold pressure vertical amplitudes are flat and are irrespective of local atmospheric pressure. Above this pressure the local atmospheric pressure directly controls vertical amplitudes. This applies only to a low frequency range, below about 0.05 Hz, but for such a low frequency band, correlation between vertical displacement and pressure becomes very high. The correlation coefficients (with zero time shifts) are about 0.8-0.9. In a higher frequency range than 0.05 Hz, such a high correlation does not occur; for example, for 0.1-0.4 Hz which is a secondary microseismic frequency band, amplitudes (noise) are generated in the ocean and are irrelevant to the local atmospheric pressure.

As an interesting display of this characteristics, we will show an example from a hurricane. When Hurricane Isaac (2012) moved over some stations in the Earthscope Transportable Array, pressure and seismic data showed clear effects of vanishing amplitudes near the center of this hurricane for a frequency band below 0.05 Hz. Both pressure and seismic time series showed vanishing amplitudes, appearing like data gaps, if the hurricane center moved over a station almost exactly (within less than 10km). But for stations away from the hurricane track by more than 50 km, such gap-like features were not seen. This may not be surprising for barometer data as pressure is known to be small near the hurricane center but vertical seismic amplitudes also showed similar small amplitudes. This is of course related to a high correlation between pressure and vertical displacement in a low frequency band. Such gap-like features were not found for higher frequency bands.

This feature is somewhat counter-intuitive for a seismologist as we tend to think that the generated low-frequency seismic waves should propagate from a high atmospheric pressure region. Such waves should reach the center of a hurricane and cause some seismic signals. There may be some such signals but the data show that they are quite small; what we observe are highly correlated vertical seismic motion with the local pressure, an almost perfect phase-to-phase match.

キーワード：大気-固体地球のカップリング、地震計とバロメーターのアレー

Keywords: Land-Atmosphere coupling, Seismic and barometer array

Hi-netデータの粒子軌跡解析から推定した脈動レイリー波源

Source locations of Rayleigh waves in secondary microseisms inferred from polarization analysis of Hi-net data

*高木 涼太¹、西田 究²

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida²

1. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2. 東京大学地震研究所

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Microseisms are energetic ambient seismic wavefield generated by ocean swells, which are categorized into primary (10-14 s) and secondary microseisms (5-7 s). Although observation and application, such as seismic interferometry, of microseisms have been established well, source locations of secondary microseisms still remain uncertain. In the present study, we locate dominant source locations of Rayleigh wave microseisms observed in the Japan islands using Hi-net records. In order to locate microseism source, we first estimate back azimuths of Rayleigh waves in the period of 4-8 s based on polarization analysis. Since fundamental Rayleigh waves, dominating secondary microseisms, generally show retrograde particle motions, back azimuth of Rayleigh waves can be determined without uncertainty of 180 degrees from three component records at single stations. We then search locations explaining the back azimuth distribution, and select source locations with small location errors. The dominant sources of Rayleigh waves mainly distribute in two specific regions: 100-200 km off the coast of Fukushima in the Pacific and off Tottori in the Sea of Japan. The off Tottori sources show a clear seasonal variation, existing only in the winter season. In contrast, the off Fukushima sources are detected stationary. The seasonality is consistent with ocean wave activity in the sea near Japan predicted by an ocean action model WAVEWATCH III. The observation suggests that Rayleigh waves in secondary microseism are dominated by contribution from adjacent sea. The off Tottori and off Fukushima sources are located at an ocean basin with the depth of 1000-2500 m and at shelf slope with the ocean depth of 2000-6000 m, respectively. The oceanic depths are close to the resonance depth of 1500-3000 m for the period of 4-8 s. Improving source locations and investigating their frequency dependence may deepen our understanding of mechanism of microseisms.

キーワード：脈動、表面波

Keywords: Microseisms, Surface waves

Global source locations of P-wave microseisms using Hi-net data from 2005 to 2011

*西田 究¹、高木 涼太²

*Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi²

1. 東京大学地震研究所、2. 東北大学

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Tohoku University

Observations of microseisms date back to the early 1900s [Wiechert 1904]. Although observations of microseisms were firmly established, the excitation mechanisms are still in debate. According to the typical frequency, they can be categorized as primary microseisms (0.02-0.1 Hz), and secondary microseisms (0.1-1 Hz). The former frequency range corresponds to that of ocean swell itself, whereas the latter corresponds to double the frequency of ocean swell. Excitation of primary microseisms can be attributed to linear forcing by ocean swell through the topography in shallow depth, whereas that of secondary microseisms can be attributed to non-linear forcing by standing ocean swell at the sea surface in both pelagic and coastal regions.

The source distribution of secondary microseisms is crucial for understanding the excitation mechanism of secondary microseisms. A back projection method is feasible for locating secondary microseisms. However, complex wave propagations of surface waves caused by strong shallow, lateral heterogeneities prevent from the precise location of the sources. In contrast, body wave microseisms are less scattered than the surface-wave microseisms. Although the amplitudes of body wave microseisms are smaller than surface wave amplitudes, recent developments in source location based on body-wave microseisms enable us to estimate precise locations of forcing and the amplitudes quantitatively [e.g. Nishida and Takagi, 2016].

In this study, we made a catalogue of P-wave microseisms by array analysis using the high-sensitive seismograph network (Hi-net) operated by NIED from 2005 to 2011. We analyzed vertical-component velocity-meters with a natural frequency of 1 Hz at 202 stations in Chugoku district. The instrumental response was deconvolved by using an inverse filtering technique [Maeda et al. 2011] after reduction of common logger noise [Takagi et al. 2015]. The records were divided into segments of 1024 s. After exclusion of segments which include transients, the frequency-slowness spectra were calculated. The spectra at 0.15 Hz show that clear teleseismic P-wave microseisms on seismically quiet days when local swell activities were calm. The local maxima of the spectra were picked up. The centroids of the sources were located by backprojecting the corresponding slowness. The source locations show clear seasonal variations. In winter months, they were located in the northwestern Pacific, and in the summer months, they were located in the southern Indian ocean. Through the years, centroids stayed in the north Atlantic ocean, although they show a weaker seasonal variation with the maximum in winter. The locations can be explained by an ocean action model (WAVEWATCHIII: Arduin et al. 2011). In further studies, we will calculate the equivalent vertical single force for quantitative discussions.

キーワード：脈動、海洋波浪、P波

Keywords: microseisms, ocean swell, P wave

Multi-mode phase speed measurements of surface waves with array-based analysis

*松澤 仁志¹、吉澤 和範^{1,2}

*Hitoshi Matsuzawa¹, Kazunori Yoshizawa^{1,2}

1. 北海道大学大学院理学院、2. 北海道大学理学研究院

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University

Recent deployment of dense broadband seismic networks, such as USArray in the United States, leads to the construction of improved 3-D upper mantle models with unprecedented horizontal resolution using surface waves, although many of such dispersion measurements have been primarily based on the analysis of fundamental mode. Higher-mode information can be of great help in the further improvement of the vertical resolution of 3-D models, but their phase speed analysis is intrinsically difficult, since wave trains of several modes are overlapped each other in an observed seismogram. In case of Love waves, even the fundamental mode tends to be overlapped with higher modes, which result in larger uncertainties in the phase speed measurements of the fundamental-mode Love waves than those of Rayleigh waves. Modal separation is not a straightforward issue because several higher-modes share similar group speeds, but it can be done by utilizing a dense seismic array. In this study, we develop an efficient method for measuring the phase speeds of the fundamental- and higher-mode surface waves based on an array-based analysis, and demonstrate its utility through extensive synthetic experiments and its application to USArray.

Our array-based analysis of multi-mode dispersion measurements is modeled on a one-dimensional frequency-wavenumber method originally developed by Nolet (1975, GRL), which can be applied to broadband seismic records observed in a linear array along a great circle path. At first, proper seismic signals are extracted using varying group-speed windows and slant-stacked with a fixed wavenumber to generate a “beam”. Since the spectrum of this beam is a function of frequency f , phase speed c and group speed U , we can construct spectrograms in $c-U$ domain for each f . After the reduction/removal of spurious spectral peaks by applying narrow wavenumber filter to the largest spectral peaks, the spectrograms in $c-U$ domain are projected in a $c-f$ domain, which eventually provides us with multi-mode dispersion curves.

Extensive sets of synthetic experiments suggest that the method works well for a long linear array with lateral extension of several thousand kilometers. Estimated dispersion curves in the period range between 20 and 150 seconds using a heterogeneous array (i.e., an irregularly distributed stations) reflect an average velocity structure beneath the centroid of the array. The dispersion curves are matched well with theoretical estimation from the average structure depending on the station configuration, especially in a period range with sufficiently strong excitation of each mode. In practical applications, the reliability and errors of measured phase speeds can be assessed by using the width of spectral peaks in a $c-f$ plane. This array-based method of multi-mode phase speed measurement can be of help in the reconstruction of 3-D upper mantle structures with enhanced vertical resolution.

キーワード：表面波、高次モード、地震計アレイ、北米大陸、USArray

Keywords: surface waves, higher mode, seismic array, North America, USArray

開発された応力計の観測レンジは如何に広いか？－STS地震計との比較－

How wide is observation range of the developed stress meter ? -

Comparison with STS seismometer -

*石井 紘¹、古本 宗充¹、浅井 康広¹

*Hiroshi Ishii¹, Munemitsu Furumoto¹, Yasuhiro Asai¹

1. 公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（M9.0）においてはF-netのSTS地震計はすべてスケールアウトとなり最大振幅は記録することができなかった。しかしながら当研究所の複数の応力計・歪計は最大振幅も含めて全て良好に波形を記録することができた。海で発生した大きな地震の場合には長周期成分の記録がスケールアウトせずに記録できることが重要である。何故なら大きな津波を発生する地震かどうかを判断することが重要であるからである。そこでSTS地震計と応力計・歪計の観測レンジを比較検討するとともに応力計・歪計はどこまで大きな変動も記録できるのか検討した。当研究所で開発した応力計は応力と歪の両方を連続して記録することができる。調べた結果、以下のことが明らかになった

1. 応力計は高感度成分においてもSTS地震計よりも10倍以上の観測レンジを有している
2. 3.11地震の応力鉛直成分の最大振幅は約300kPaであったが高感度の応力計でも2～5 MPaの応力変動を記録することができる。
3. 応力計は応力のみならず歪も観測できているが歪計の観測レンジは高感度成分においても破壊限界に近い 2×10^{-4} の観測可能なレンジを有している
4. 以上の結果から応力計は巨大地震においても振幅がスケールアウトすることなくことなく記録可能である。従って津波地震の判定、マグニチュードの決定や震源メカニズムの研究に関して信頼できる計器であることが明らかになった。

キーワード：応力計、STS地震計、観測レンジ、東北地方太平洋沖地震（M9.0）、最大振幅の記録

Keywords: stress meter, STS seismometer, observation range, Tohoku earthquake (M9.0), record of maximum amplitude

地震波動伝播方程式の数値解の平滑化スキーム

A smoothing scheme for numerical solutions of the seismic wave equation

*今井 隆太¹、高椋 恵¹、藤原 広行²

*Ryuta Imai¹, Kei Takamuku¹, Hiroyuki Fujiwara²

1. みずほ情報総研株式会社、2. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. Mizuho Information & Research Institute, Inc., 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

長周期地震動計算で実施している地震波動伝播シミュレーションでは、浅部・深部統合地盤モデルに基づいた地下構造モデルに対して安定した長時間積分が求められている。しかしながら、実際には数値不安定性によって発散が生じることがしばしばある。これまでの経験から、地下構造の空間分布が局所的に大きなコントラストをもつ場合に不安定になることが多いことが確認されている。そこで、数値不安定性を緩和するための方法のひとつとして、地震波動伝播シミュレーションに平滑化スキームを導入することが考えられる。平滑化によって長周期地震動の特徴を損なわないためには、空間的に局所的な擾乱成分のみを選択的に除去できるようなスキームが望ましい。本研究では、地震波動伝播方程式の数値計算における短波長成分の平滑化スキームについて検討する。

本研究で提案する平滑化スキームは、基礎方程式である地震波動方程式に対して、短波長成分を選択的に除去するような修正項を追加することで構成される。平滑化のための修正項は、移流方程式に対する安定化手法としての風上差分の操作を形式的に空間一次元の波動方程式に拡張することによって発見的に導出した。その結果、導出した修正項は、ラプラシアンと熱方程式の組み合わせによって表わされる作用素となった。以下では、提案する平滑化スキームを修正方程式スキームと呼ぶことにする。修正方程式スキームは次のような特徴を持っている。

- (a) 波動方程式の特性（波の伝播速度）を保存する
- (b) 短波長成分を選択的に除去する
- (c) 短波長成分が除去された以降のエネルギーの減少が緩やかである

本研究では、空間一次元の波動方程式に対する数値実験と離散化手法の分析によって修正方程式が上記の特徴を持っていることを示す。また、修正項にかかるパラメータを適切に設定する必要があることを示す。

修正方程式スキームで追加する修正項はシンプルな式で表わされているため、空間二次元あるいは三次元波動方程式や、より一般の地震波動方程式に対して容易に適用することができる。本研究では、空間二次元波動方程式および空間二次元地震波動伝播方程式に対して修正方程式スキームを適用して、より現実的な問題に対しても十分な平滑化の機能を発揮することを示す。

キーワード：地震波動方程式、平滑化スキーム、長周期地震動計算

Keywords: seismic wave equation, smoothing scheme, long-period ground motion evaluation

Time-lapse seismic full waveform inversion for monitoring near-surface velocity changes during microbubble injection

*Rie Kamei¹, UGeun Jang², David Lumley¹, Takuji Mouri³, Masashi Nakatsukasa³, Mamoru Takanashi³, Ayato Kato³

1. University of Western Australia, 2. Seoul National University, 3. JOGMEC

Seismic monitoring provides valuable information regarding the time-varying changes in subsurface physical properties caused by natural or man-made processes. However, the resulting changes in the subsurface properties are often small both in terms of magnitude and spatial extent, leading to minimal time-lapse differences in seismic amplitudes and travel time. In order to better extract information from the time-lapse data, exploiting the full seismic waveform information in the data can be critical. We explore methods of seismic full waveform inversion that estimate an optimal model of time-varying elastic parameters at the wavelength scale. The full waveform inversion methods fit the observed time-lapse seismic waveforms with modelled waveforms based on numerical solutions of the wave equation. Using waveform information beyond first arrivals enables full waveform inversion to achieve much higher resolution (wavelength scale) compared to conventional traveltimes tomography (Fresnel zone scale).

We apply acoustic full waveform inversion to time-lapse cross-well monitoring surveys, and estimate the velocity changes that occur during the injection of microbubble water into shallow unconsolidated Quaternary sediments in the Kanto basin of Japan at a depth of 25 m below the surface. Microbubble water is comprised of water infused with air bubbles of a diameter less than 0.1 mm, and may be useful to improve resistance to ground liquefaction during major earthquakes. Monitoring the space-time distribution of microbubble injection is therefore important to understand the full potential of the technique.

The time-lapse data set consists of 17 monitoring surveys conducted over 74 hours which exhibit excellent repeatability, allowing us to analyze small time-lapse changes in the subsurface. We observe transient behaviors in the seismic waveforms during microbubble injection manifested as traveltimes shifts and changes in amplitude and frequency content. Time-lapse full waveform inversion detects changes in P-wave velocity of less than 1 percent during microbubble injection, initially as velocity increases, and then subsequently as velocity decreases. The velocity changes are mainly imaged within a thin (1 m) layer between the injection well and the receiver well, inferring that microbubble water flow is constrained by the fluvial sediment depositional environment. The resulting velocity models fit the observed waveforms very well, supporting the validity of the estimated velocity changes. In order to further improve the estimation of velocity changes, we investigate the limitations of acoustic waveform inversion, and by applying and comparing elastic waveform inversion to the time-lapse data set.

Keywords: Full waveform inversion, Seismic monitoring, Fluid injection

Nonlinear Attenuation Caused by the Wave Interaction in the Near Surface

*Nori Nakata¹, Norman H Sleep²

1. University of Oklahoma, 2. Stanford University

Strong seismic waves produced dynamic stresses that bring the shallow subsurface into nonlinear frictional failure. Therefore, when the dynamic stress of one type of waves is strong enough to reach the frictional failure, the structure cannot hold other types of waves, and hence these waves have to be attenuated. Physically, the anelastic strain rate increases with increasing dynamic stress, and the dynamic stress is proportional to the difference between total strain and anelastic strain. To the first order with frictional rheology, the effective friction bounds the resolved horizontal acceleration. This hypothesis can be tested at single-station seismograms. We select five earthquakes as examples for examining the effect of the nonlinear attenuation: 1992 Mw 7.3 Landers earthquake, 2008 Mw 6.9 Iwate-Miyagi earthquake, 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, 2015 Mw 8.3 Coquimbo Chilean earthquake, and 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake. The strong Rayleigh waves generated by the Tohoku earthquake brought rock beneath MYGH05 station into frictional failure, and the high-frequency S waves simultaneously arrived at the station suppressed. We discover the similar wave phenomena occurred at the Coquimbo Chilean earthquake. In the example of the Iwate-Miyagi earthquake, we find that the P and S waves are nonlinearly attenuated. For this example, the boundary of the observed horizontal and vertical acceleration is close to the gravity acceleration since cohesion of near-surface rock is relatively small. During the Kumamoto earthquake sequence, two strong waves hit at a station within 30 hours and modified the condition of the friction.

長期孔内観測システムおよび鉛直地震計アレイを用いた地震探査データによる地震波干渉法イメージング

Interferometric imaging from borehole seismic data with long-term observatory system and vertical seismometer array

*白石 和也¹、荒木 英一郎¹、木村 俊則¹

*Kazuya Shiraishi¹, Eiichiro Araki¹, Toshinori Kimura¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We applied interferometric seismic imaging with multiple reflections to borehole seismic survey data with airgun shooting. In the conventional primary reflection imaging such as a vertical seismic profile (VSP), we obtain the reflection image around boreholes in a deeper section than receiver locations, but do not obtain the reflection image in wide range including shallower part than receivers. In addition, boreholes are sparsely distributed. The multiple reflections are generally noise in the primary reflection imaging, but they contain much information in both the deeper part and the shallower part. One effective method to utilize them to obtain subsurface image is seismic interferometry. It is a technique to redatum the multiple reflections to all airgun shooting points them as pseudo-primary reflections by means of cross-correlation for each borehole seismic survey data. Then continuous subsurface image can be obtained along airgun shooting lines.

In this study, we use the borehole seismic data in Nankai Trough. One dataset is a walkaway VSP data acquired in 2009 at IODP C0009 site. The vertical seismometer array was temporally deployed by D/V Chikyu using a downhole wireline tool at 16 levels in the borehole, and a tuned airgun array of R/V Kairei was fired along 54 km shooting line. Other datasets were acquired in airgun surveys with the long-term borehole observatory systems installed at IODP C0002 site and at C0010 site. The airgun surveys were repeatedly conducted with tuned airgun array on R/V Kairei in 2013, 2015, and 2016. In this study, we used the dataset in 2016 along a 128-km-long shooting line, NS1. This line is almost crossing three holes: C0009, C0002, and C0010, and it is very close to the shooting line of the walkaway VSP survey at C0009. The distances from C0009 to C0002 and from C0002 to C0010 are about 20 km and 11 km, respectively. In this study, final reflection image was obtained after merging the post-stack migration sections from each borehole dataset. We achieved to obtain the continuous reflection image along the survey line in the shallow part, including the structures in Kumano forearc basin and faults in frontal thrust zone. Integration of the multiple reflection imaging with the primary reflection imaging will be useful to obtain the whole subsurface image from the shallow to the deep. The spatial resolution and artifacts due to the data sparseness should be investigated for further practical applications. Our result shows an important possibility of the reflection imaging from the sparse borehole seismic data for future monitoring surveys, for example, we might be able to image the location of timelapse change on the subsurface section with the long-term observatory system.

キーワード：孔内地震観測、長期孔内観測システム、鉛直地震計アレイ、地震波干渉法

Keywords: borehole seismic survey, long-term borehole observatory system, vertical seismometer array, seismic interferometry

陸上難地域地震探査記録に対するフルウェーブインバージョン適用とイメージング処理の高精度化

Application of full waveform inversion and pre-stack imaging to 2D land seismic data in a complex terrain

*新部 貴夫¹、榎谷 将吾²、阿部 進³、松浦 紳二²、佐藤 比呂志⁴、石山 達也⁴

*Takao Nibe¹, Shogo Masaya², Susumu Abe³, Shinji Matsuura², Hiroshi Sato⁴, Tatsuya Ishiyama⁴

1. (株)地球科学総合研究所、2. 国際石油開発帝石株式会社、3. 石油資源開発株式会社、4. 東京大学地震研究所

1. JGI, Inc., 2. INPEX, 3. JAPEX, 4. ERI

国内の陸域における深部地殻構造のイメージングでは、様々な波長を伴う標高及び表層構造の不規則変化、測線の屈曲による反射点の拡散及びアジマスの変動、不規則な発震点分布及び高いノイズレベル等の問題が存在し、深部構造を抽出する観点で、反射法による速度解析を阻害する要因となってきた。近年、有線テレメトリー方式の受振システムと独立型データ収録システムの併用によって、稠密展開を伴う長大測線の設定が標準化し、屈折初動走時トモグラフィ解析を通じた客観的な速度情報抽出が試みられてきた。屈折初動を対象とした同手法は、反射波が乏しく反射法速度解析が困難な難地域においても、精度の高い解析結果を得ることができる一方、分解能が低い点が課題点として指摘されてきた。

Full Waveform Inversion(以下、FWI)は、後続波を含んだ波形情報自体を用いてインバージョンを実施し、地下の物性値分布を高分解能に求める手法である。FWIは解析の非線形は強いが、屈折トモグラフィ解析と比較した場合、インバージョンに用いる情報量増加によって、解析結果の分解能が大きく向上することが利点として挙げられる。近年、反射法地震探査記録への適用が進んでおり、高精度速度情報の抽出への適用例が増えている。

本研究では、国内難地域で取得された記録を想定したFWI適用性に関する検証を行った。稠密長大展開による国内における構造探査データに対して、FWIによる速度推定を実施し、続いて重合前深度マイグレーションによる高精度イメージングを実施した結果を示す。

キーワード：フルウェーブインバージョン、速度推定、反射法地震探査

Keywords: Full Waveform Inversion, Velocity estimation, Reflection seismic exploration

Simulation and field studies of the seismic time lapse by ACROSS methodology

*笠原 順三¹、羽佐田 葉子²

*Junzo Kasahara¹, Yoko Hasada²

1. 静岡大学理学部地球科学科 東京海洋大学、2. 大和探査技術（株）

1. University of Shizuoka, Faculty of Earth Sciences, 2. Daiwa Exploration and Consulting Co.

Introduction

The temporal change of seismogenic zone and the volcanic evolution are the typical examples of time progression problems in earth sciences. The seismic time-lapse technology is used to estimate the change of subsurface in such cases. ACROSS (Accurately Controlled and Routinely Operated Signal System) methodology has been developed by Kumazawa and others since 1994. According to this methodology, the ACROSS seismic sources were built and has been tested by the groups of JAEA, Nagoya University and JMA. We tested the application of ACROSS technology by simulations and the field tests in Japan and Saudi Arabia.

The authors have applied this methodology for the monitoring of CCS (Carbon Capture and Storage), and EOR (Enhance Oil Recovery). We tried to image the changing zone by the backpropagation of residual waveforms before and after some temporal change in subsurface (Kasahara and Hasada, 2016). In this presentation, we introduce the recent advances of the ACROSS application.

ACROSS methodology

The typical signal used by the ACROSS seismic source is chirp signal within the desired frequency range. By the deconvolution of observed waveforms by the source signature in frequency domain, the transfer function can be calculated. Enhancement of S/N can be obtained by stacking of data during long duration owing to the steady control and the strict synchronization of the source and recording devices.

Detection and imaging of temporal changes

We carried out the field experiment in Awaji Island in 2011 using an ACROSS seismic source with air injection to the 100 m depth during 5 days (Kasahara et al., 2012). Because of excellent repeatability of source signature of the source, the residual waveforms before and after the injection show almost no temporal change before injection and large waveform changes after the injection. We attempted the imaging of the temporal change by backpropagation or reverse-time migration using the residual waveforms.

Another field experiment using the ACROSS seismic source was held in Saudi Arabia. We detected temporal changes possibly due to water movement in the aquifers. We discussed the repeatability of observed system and concluded that the repeatability using ACROSS seismic source was the excellent (Kasahara et al., 2016),

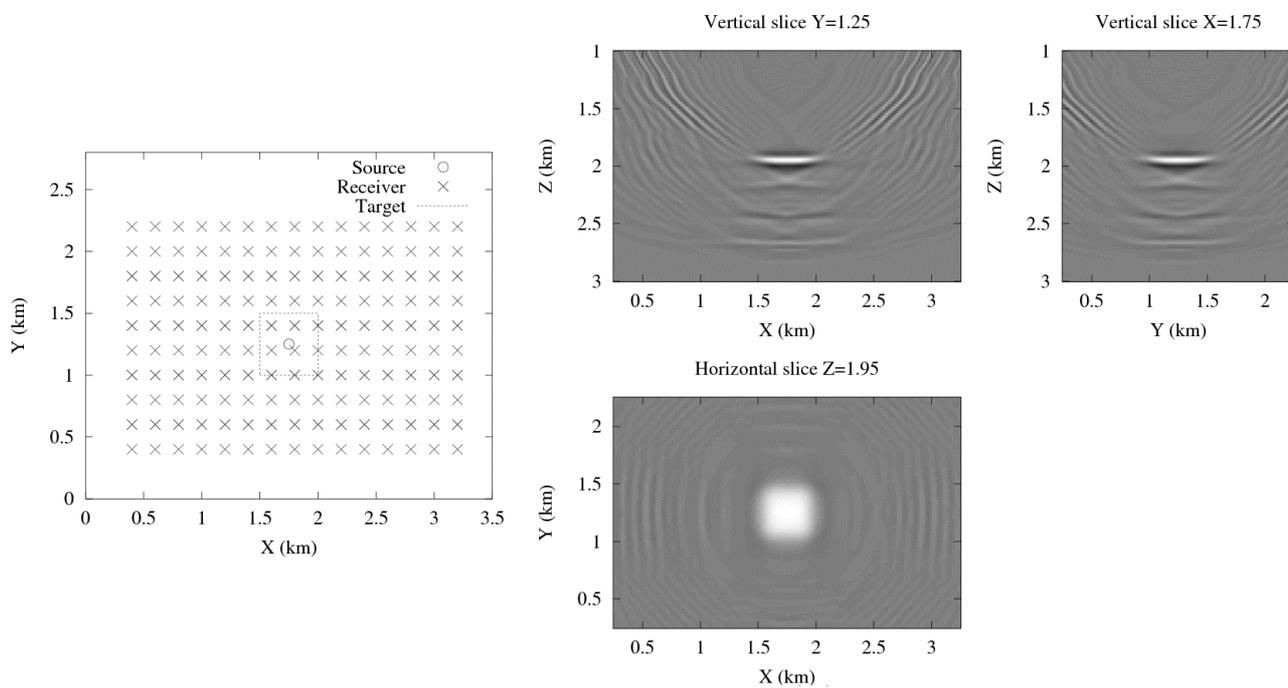
We also carried out several simulation in some cases to investigate the effective source and receiver arrangement for subsurface imaging (see figure).

Conclusions

We examined the time-lapse study using the ACROSS seismic source by field tests and simulations assuming a few source and a dense seismic array (Kasahara and Hasada, 2016). Through field studies and simulations, we showed the temporal changing zone by the backpropagation of residual waveforms. Although we studied the time lapse in a few km scales, this technology can be applied to many cases such as seismogenic zones, volcanic region, civil engineering such as road, river levees, bridges, tunnels and buildings.

キーワード：タイムラプス、アクロス、残差波形、逆伝搬、イメージング、時間変動

Keywords: time lapse, ACROSS, residual waveform, backpropagation, imaging, temporal change



The model setting (left) and the result (right) of the simulation assuming a 2 km deep reservoir.

Detection of spatio-temporal changes of seismic scattering properties with seismic interferometry: Dike intrusion event on 15 August 2015 at Sakurajima volcano

*廣瀬 郁¹、中原 恒¹、西村 太志¹

*Takashi Hirose¹, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

In recent years, seismic interferometry has been used to detect spatio-temporal changes of seismic scattering properties (e.g. Obermann et al. 2013a). At Sakurajima, a dike intrusion took place on 15 August 2015, and large ground deformation was observed (e.g. Hotta et al. 2016). Such a dike may work as a new scatterer for seismic waves. Therefore, we applied seismic interferometry to detect spatio-temporal changes of seismic scattering properties associated with this dike intrusion. We used the vertical components of ambient seismic noise data at 1 –2 Hz recorded at 6 JMA stations from 1 January 2012 to 31 August 2015. We calculated coherences between reference CCFs (stacked over 2012 and 2013) and daily CCFs, and found that all station pairs showed significant decreases of coherences before and after the dike intrusion. To locate the region where the seismic scattering properties changed, we used sensitivity kernels calculated from 2D radiative transfer model. Parameters of scattering and intrinsic absorption that are needed to calculate sensitivity kernels were estimated by modeling the space-time distribution of energy density of active shot records in 2013. The best-fit parameters were as follows: Mean free path of Rayleigh waves was 1.2 km at 1 –2 Hz, and the value of intrinsic absorption Q was $62.8f$ (f is the frequency). Then, we calculated the differences between mean values of coherence in 2014 (before the event) and those of from 16 August 2015 to 31 August 2015 (after the event) (hereafter called ΔC). Assuming that one seismic scatterer appeared on the surface projection of the dike, we searched the best location of the scatterer to explain observed ΔC . As a result, such region was located at the same place as the dike determined by using GNSS, tilt, and strain data (Hotta et al. 2016) with an accuracy of about a few km, and the amount of change of scattering coefficient (Δg) was estimated to 1.4 km^{-1} . These results indicate that seismic interferometry is one of useful methods to detect structural changes of volcano.

Acknowledgements: We used seismograms recorded by JMA. Active seismic experiments were conducted by DPRI, Kyoto University, other 8 universities, and JMA.

キーワード：地震波干渉法、地震波散乱特性変化、桜島

Keywords: seismic interferometry, seismic scattering property change, Sakurajima volcano

特異値分解法による震源の振動構造の解析

Analysis of the vibration structure of a hypocenter using a singular value decomposition method

*菊池 年晃¹

*Toshiaki Kikuchi¹

1. 防衛大学

1. National Defense Academy

震源の振動構造を非線形信号解析に関する手法を用いて解析した。その結果から震源構造に起因する特有の放射特性が明らかになる。その特有の放射特性は、熊本地震を含む5つの地震で確認された。これらは地震予知に繋がる重要な結果である。解析処理はタイムリバーサル法を用いた等価的な震源振動の取得と、得られた震源振動の非線形解析の二段階で行う。

各地の観測点で観測される地震波は、震源から観測点までの伝搬環境による影響を受けるため震源本来の振動とは異なる。そこでタイムリバーサル法を活用して、地震波を震源位置に置換した震源本来の振動を求める。求められたタイムリバーサルパルスは多周波成分からなる複雑な振動波形である。そこでこの複雑な振動波形を非線形信号解析の特異スペクトル解析法を用いて解析し、その中で振幅が最も大きい主要な振動成分を求める。求められた主要な振動成分の周波数の、震源からの方位に対する分布は明確な指向性を示した。

初めに、震源を囲む観測点で受信した地震波からP波を切り出し、その信号の時間軸を反転させた信号を伝搬シミュレーション上で放射して震源位置に形成されるパルスを求める。この際、伝搬環境を変化させてパルスの振幅が最大になる条件を求め、それを最適伝搬環境とする。次に、最適伝搬環境で求めたタイムリバーサルパルス(TRP)、即ち等価的な震源振動を分析する。TRPは多周波数からなる複雑に振動する非線形信号であるから、特異スペクトル解析法を用いて解析する。まず、ある観測点に対応するTRPを含むn点からなる時間間隔dtの行列を作る。この行列を全体にdt遅らせた第二の行列を作る。更にdt遅らせた第三の行列を作る。これをm回繰り返して、 $m \times n$ の行列 X が得られる。これが軌道行列である。これを $U^T U = V^T V = E$ (E : 単位行列) を満たす正規直交行列 $U(m \times n)$, $V(m \times n)$ を用いて分解するため、次の関係式 $X = U W V^T$ に適用して W を求める。この中の最も大きい特異値 λ_1 に注目し、それを主要な成分として取り出す。

ここでは、2009年8月11日に駿河湾の南部で発生したM6.5の地震に対して例示する。最初に、駿河湾の周辺に位置する観測点で受信した信号からP波を切り出し、その時間軸を反転して震源位置における波、TRPを求めた。このパルスに特異値分解法を適用してパルスを構成する成分を算出し、その中で最も振幅の大きい成分を求めた。それは、ほぼ単一の周波数からなる緩やかに変動するパルスである。

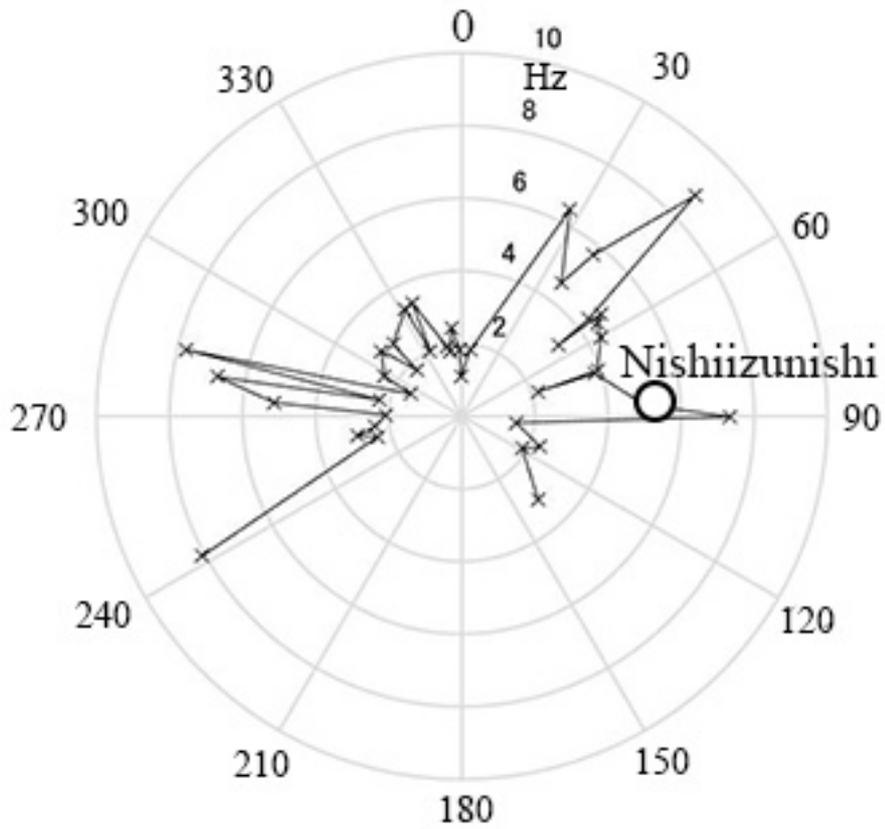
同様に、各観測点に対応するTRPに特異値分解法を適用して最も振幅の大きい成分を抽出した。それらの成分の周波数を、震源を中心とした観測点の方位に対する分布として図に示した。明らかに、震源からの放射周波数は方位によって大きく異なる指向性を持っている。即ち、方位角27.4°の裾野から、方位角97.0°の河津までの周波数が高く、特に、裾野6.41Hz、南足柄5.70Hz、西伊豆西5.00Hz及び河津7.34Hzなどの周波数が高い。

我々が先に示した震源振動の動的モデルでのパラメトリックスポットは西伊豆西、○印である。このスポットは活断層中で亀裂が進行する際に発生した圧力が累積的に加算されて受信波の先頭が膨張する方位である。この圧力の累積的加算は亀裂の進行速度が縦波の速度に等しい場合に生じる。この原理に基づけば、軸となる西伊豆西(86.4°)より方位角の小さい裾野(27.4°)や南足柄(39.0°)での高い周波成分は、活断層中の亀裂がより速い位相速度で進行したことを示唆している。これらの放射パターンは活断層の振動モードに関係すると考えられる。

このような震源振動の主要な振動数の取得は防災上重要であり、震動構造の解明にもつながる。

キーワード：震源振動、タイムリバーサル法、特異値分解法

Keywords: Hypocenter vibration, Time reversal method, Singular value decomposition



The summary of Wave Features Theory of 2011.2.NZ Earthquake Motion.(The same as URAYASU CITY of The TOHOKU Great, The 1964 NIIGATA Earthquake.)

*西澤 勝¹

*Masaru Nishizawa¹

1. なし

1. none

I . PREFACE: had summarized wave features theory of 2011.2.NZ Earth quake Motion. In this area, many seismoments are mstalled. As a result, 9easily summarized wave features theory. City of the 2011 TOHOKU Great Earthquake and The 1964 NIIGATA Earthquake.

II . The Wave Features Theory

(1) V(vertical)this wave features are closely related to the normal wave features. A and B wave features appears soft ground states.

(2) The excellent period is about 0.2 sec, therefore $f=1/f$ this fregurency is high considerably. But the period of the A and B is 4 or 5 times.

(3) The fregurencie of V in completely different from A, B. As thus result, phase shift gres rise to amatter of course. On the CTV building, some supernatural power seems to be at work.

In this short, the complicated oscillation and sotation (twis acr on bwdlings, moreover coming ont top of Raylaigh wave actions.

(4) The horizontal rayleigh wave features shows many reversal of phase. As a result, the building satate on an vential axis. This setation (twist) is very important force. Of course, CTV building. (Reference. Masaru NISHIIZAWA : The strong spectrum of resemblance between frontier spectrum and Phase difference spectrum of the seismic wave. (Science of form) 2016, JpGU,S-SS25-P35.

This notation force is one of the importance pf the phase spectrum.

(5) (+)Acceleration and (-)Acceleration indicates different values. Namely, A,B,U acceleration together (+)acceleration indicates higher values than (-) one. This fact indicates the existence of the firm ground than the appear ground. This is the difference of the reflection between firm and soft ground.

(6) I Think that the thickness of the soft ground in soft is not all by my fair judgment by observing wave features of the soft ground.

(7) The same distance from the center from the center of the earthquake, though the time of arrival in exists different observation point . This reason is that the spead of the wave of soft ground in slow generally than the firm one.

Abstract:

Because of soft ground, Phase of seismic wave devided from correct behavior and generated rotation (twist) arownd CTV Building (the buildings).

This factor of this rotation (twist) in the phase shift or reversal of phase. This is one of the importance of the phase spectrum.

Surface wave characteristics from ambient seismic noise in Northern China

*Yiqiong Li¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

Studies have shown that the western Taiwan coastal plain is influenced by long-period ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, and engineering structures with natural vibration long-period are damaged by strong surface wave in the western coastal plain. The thick sediments in the western coastal plain are the main cause of the propagation of strong long-period ground motion. The thick sediments similar to in the western coastal plain also exist in northern China.

It is necessary to research the effects of thick sediments to long-period ground motion in northern China. We extract surface wave from ambient seismic noise in Northern China and analyze frequency spectrum of surface wave. Our purpose is to reveal the formation and propagation of long-period surface wave in thick sediments and to grasp the amplification effect of long-period ground motion due to the thick sediments.

Keywords: Surface wave, Ambient seismic noise, Thick sediments

熊本地震に伴う間隙水圧変化とP波速度変化との関係

Relationship between P wave velocity change and pore water pressure variation induced by the 2016 Kumamoto Earthquake

*國友 孝洋¹、石井 紘¹、浅井 康広¹

*Takahiro Kunitomo¹, Hiroshi Ishii¹, Yasuhiro Asai¹

1. 公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

我々は、超磁歪アクチュエータ (GMA)を用いた高周波地下探査が可能な小型の人工地震源を開発した。GMAによって駆動される加振部は、シングルフォース方式 (最大発生力91kgf) であり、GPS同期の任意波形を発震できる。観測に用いたポアホール総合観測装置に内蔵されたA/Dのサンプリング周波数が400Hzであるため、現在は、100–200Hzの帯域で発震し、主として土岐花崗岩内のP波速度変化のモニタリングを行っている。本震源では、700m離れた観測点でも、1日間スタッキングすれば、約 $10\mu\text{s}$ の精度でのP波走時変化観測が可能である。

2016年4月から開始した連続送信では、熊本地震 (2016/04/16 Mj=7.3) に伴い、直接P波のステップ状の走時遅延がTGR350 (距離353m。約 $25\mu\text{s}$ 遅延) とTRIES (距離690m。約 $60\mu\text{s}$ 遅延) で観測された。これらの走時遅延は、土岐花崗岩内のクラックが開くことによってP波速度が低下したことが原因と考えられる。また、地震時およびその後に、TRIESで観測された直接P波の走時変化は、瑞浪超深地層研究所の立坑内で観測された間隙水圧の長期的な変動パターンと極めて良く一致している。間隙水圧は、地震時に急激に上昇した後も徐々に上昇し、6月初めにピークに達し (約30kPa)、その後は徐々に下降している。直接P波の走時は、地震当日に急激に遅延した後も徐々に遅れ、間隙水圧のピークと同じ頃に約 $90\mu\text{s}$ まで遅延し、その後は徐々に回復に向かっている。10kPaの間隙水圧上昇が約 $30\mu\text{s}$ の走時遅延に相当すると考えると、両者は数か月間に渡って走時変化推定誤差の範囲で一致している。このことは、土岐花崗岩内の間隙水圧の変化がクラックの開閉をコントロールしており、それに応じてP波速度も変化することを示していると考えられる。

キーワード：超磁歪震源、P波速度変化、間隙水圧、クラック、花崗岩

Keywords: giant magnetostrictive seismic source, P wave velocity change, pore water pressure, crack, granite

水槽実験を用いた表層崩壊模擬斜面における弾性波透過特性の変化の検出 Detection of the changes in elastic wave characteristics in the model slope before and during shallow landslides

*土井 一¹、川方 裕則²、中山 雅之²、高橋 直樹³、岸田 貴兆⁴

*Issei Doi¹, Hironori Kawakata², Masayuki Nakayama², Naoki Takahashi³, Takahiro Kishida⁴

1. 京都大学防災研究所、2. 立命館大学理工学部、3. 三井住友建設株式会社、4. SMCテック

1. Disaster Prevention Research Institute, 2. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 3. SUMITOMO MITSUI CONSTRUCTION CO., LTD, 4. SMC Tech.

2013年10月の伊豆大島や2014年8月の広島市で発生した土砂災害のように、近年、集中豪雨に伴う表層崩壊が多発している。このような土砂災害の減災に向けた試みの一つとして早期警報システムが挙げられる。斜面の変位や傾斜、水分量をモニタリングする手法が考案、実証試験されつつある（例えば、内村ほか、2016）が、より早く、確度の高い情報を提供するためには、多項目のモニタリングが必須である。Yoshimitsu et al. (2009) や、Yoshimitsu and Kawakata (2011) は1軸圧縮下の岩石試料に対して弾性波を透過させ、主破壊前に弾性波速度が低下し、減衰が大きくなることを示した。斜面においても弾性波を用いたモニタリングをおこなうことによって、いち早く崩壊の兆候を検出し早期警報の正確な発令に寄与できる可能性がある。そこで、本研究ではまず水槽に用いて作製した模型地盤において表層崩壊を発生させ、透過させた弾性波がどのような挙動をするか調べた。

奥行き100 mmの水槽を用いて地盤は以下のように作製した。砂層は水槽正面から見て底面と側面を2辺とする長さ340 mm、高さ200 mmの直角三角形となる斜面とし、奥行き方向には一定とした。このうち、下側の長さ255 mm、高さ150 mmには珪砂6号にシリカを重量比7:3で混合したものを、その上には珪砂6号を高さ50 mmで一定の高さとなるようにそれぞれ空中落下法で敷き詰めた。両層の密度はそれぞれ、 1.38 g/cm^3 、 1.84 g/cm^3 である。また、シリカを下層に混合することで、上層が良透水性、下層が難透水性を持つように調整した。加速度計は奥行き方向50 mmのところ、地表に斜面方向に地表を4等分した内分点に1個ずつ（合計3個）、上層と下層の境界面の中央に1個設置し、それらの振動記録を51.2 kHzサンプリングで連続集録した。。スピーカー（振動源）は砂層の背となる側面外側に奥行き方向 50 mm、高さ67.5 mmの位置に設置した。降雨は水槽上方約1 mの位置から水槽全体で均一な雨滴となるように与えた。また、デジタルビデオカメラで実験中の砂層の様子を終始撮影した。

弾性波は2 kHzの周波数を持つ正弦波の10回の繰り返しを400 ms 間隔で与えた。初期状態の弾性波を集録するため、実験開始後3分間は降雨を与えず弾性波を収録した。続いて、時間雨量約50 mmの降雨を与え、さらに20分後に降雨量を2倍とした。

地表に設置した加速度計を巻き込む大崩壊は実験開始後4分、23分、26分に起きた。記録された波群の立ち上がりは、地表全点において降雨開始時に、また、地表の斜面中央において崩壊発生前の10分程度前から崩壊発生時にかけて遅くなった。これらの観察事実から、弾性波によって斜面内部の水分状態や崩壊前の微小な変形についてモニタリングできる可能性が示唆された。

Application of seismic interferometry to attenuation estimation on zero-offset vertical seismic profiling data

*松島 潤¹、アリ モハメド²、ブチャラ ファテ²

*Jun Matsushima¹, Mohammed Y. Ali², Fateh Bouchaala²

1. 東京大学大学院、2. アブダビ石油大学

1. School of Engineering, The University of Tokyo, 2. The Petroleum Institute, Abu Dhabi

Although seismic attenuation measurements have great potential to enhance our knowledge of physical conditions and rock properties, their application is limited because robust methods for improving both the resolution and accuracy of attenuation estimates have not yet been established. In general, it is difficult to improve both the resolution and accuracy of attenuation estimates because there is a relationship of trade-off between them. Thus, the development of a robust method for improving both the resolution and accuracy of attenuation estimates is important. A zero-offset VSP measurement is considered to be best suited for attenuation studies as it enables sampling of the downgoing wavefield at various known depths because the downgoing waveform in a zero-offset VSP data set provides direct observations of the changing nature of the source wavelet as it propagates through the Earth. We propose attenuation estimation methods for zero-offset vertical seismic profile (VSP) data by combining seismic interferometry (SI) and the modified median frequency shift (MMFS) method developed for attenuation estimation using sonic waveform data. One important advantage of the application of SI to seismic exploration is that it allows flexibility of the source and receiver configurations. For example, this means that by applying SI to two different seismic traces recorded at different receivers, a new seismic trace with one receiver acting as a source (virtual source) and the other acting as a receiver can be created. The configuration of zero-offset VSP data is redatumed to that of the sonic logging measurement by adopting two types of SI: deconvolution interferometry (DCI) and crosscorrelation interferometry (CCI). Then, we can apply the MMFS method to the redatumed VSP data. Although the amplitude information estimated from CCI is biased, we propose a correction method for this bias to correctly estimate attenuation. First, to investigate the performance both in resolution and accuracy, we apply different trace separations to synthetic data with random noise at different signal-to-noise ratio (SNR) levels. Second, we estimate the influence of residual reflection events after wavefield separation on attenuation estimation. The proposed methods provide more stable attenuation estimates in comparison with the spectral ratio (SR) method because the mean-median procedure suppresses random events and characteristic features caused by residual reflection events in spectral domain. Our numerical experiments also demonstrate that the MMFS methods identify impulsive attenuation values caused by transmission loss due to reflection at an interface while such impulsive values are not observed in SR methods. This is because the SR method derives attenuation estimates based on frequency component change between two receiver depths while the MMFS method uses the amplitude variation, implying that the proposed methods can estimate scattering attenuation values from amplitude information even if frequency components are not changed between the two receiver depths. By preliminarily applying the proposed methods to field VSP data, we find some differences in the depth resolution and stability of attenuation values between the proposed method and the SR method, demonstrating that the proposed methods are more stable than the SR method especially in the shortest receiver separation. The responses of attenuation results obtained by applying different attenuation estimation methods to field data at different receiver separations correlate with those in our numerical experiments. To further verify and extend the applicability of the proposed method, one of future works should focus on validation of obtained attenuation results by comparing a seismic trace or its spectrum before and after attenuation compensation by inverse Q filtering. In our case,

a component of attenuation due to scattering effects is also included in the obtained attenuation estimates and thus such scattering effects should be taken into account in attenuation compensation. This attenuation compensation process might be used to estimate the scattering effects. To this end, a study to further investigate the response of the proposed methods to seismic scattering effects which are frequency dependent could be useful in providing new perspectives on the usage of the proposed method.

キーワード：地震波干渉法、地震波減衰、ゼロオフセットVSP

Keywords: Seismic interferometry, Seismic attenuation, zero-offset VSP

コーダ波のデコリレーションの近似ベクトル感度カーネル：2次元1次散乱の場合

Approximate vector sensitivity kernels of coda-wave decorrelation: 2D single scattering

*中原 恒¹、江本 賢太郎¹

*Hisashi Nakahara¹, Kentaro Emoto¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座

1. Solid Earth Physics Laboratory, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに 地震波干渉法やコーダ波干渉法に基づき、地震や火山噴火などに伴う構造の時空間分布を調べるには、感度カーネルを考慮したトモグラフィーを行う必要がある。地震波速度変化に対するコーダ波走時の変化の感度カーネルについては、近似的ながらもベクトル波のモデリングが始まったところである（中原・江本, 2016）。一方で、散乱構造の変化に対するコーダ波のデコリレーション（相関係数を1から引いたもの）変化の感度カーネルについては、まだスカラー波のモデル化にとどまっているのが現状である（例えば, Planes et al., 2014; Margerin et al., 2016）。そこで本研究では、中原・江本（2016）が走時変化に対して行ったのと同様の2次元1次散乱モデルと波線理論的な振動エネルギーの射影に基づき、デコリレーション変化の近似ベクトル感度カーネルの計算を行ったので、その結果について報告する。

感度カーネルの導出 干渉法などで得られた観測記録について、震源経過時刻におけるコーダ波の波群のデコリレーションがだけ変化した場合、その変化とある場所の散乱係数変化率とを、感度カーネルを介して関係づけることができる（たとえば, Margerin et al. 2016）。感度カーネルは、震源経過時刻に到達するコーダ波のすべての波群のうち、散乱係数が変化した領域で散乱した波群の寄与の割合を表すものと解釈でき、各波群の重みはエネルギー密度で表される。本研究では2次元問題を扱い、エネルギー密度の計算にはスカラー波の等方1次散乱モデル（Kopnichev, 1977）を用いて計算する。ただし、スカラー波に対する多重散乱まで含めた感度カーネルの計算はすでにMargerin et al. (2016)により行われている。これに対して、本研究では1次散乱に対して近似的にはあるがベクトル波への拡張を行う点が新しい。ポイントは、ベクトル波の成分への分解を行う際には、エネルギー粒子の進行方向と振動方向を考え、振動方向を水平成分と鉛直成分に分解するというものである。これは地震波速度変化の場合に中原・江本（2016）が用いたのと同じである。P波かS波のどちらか一つだけしか扱えないという制約はあるものの、従来のスカラー波の等方1次散乱モデルを少し拡張するだけで、感度カーネルを成分ごとに解析的に導出できる。その結果、1次散乱なので散乱殻上だけに感度をもつことを確認した。また、水平成分と鉛直成分とでは感度カーネルの表現が異なり、特に感度がゼロになる場所が存在し、それらの場所は成分ごとに異なることが分かった。またそれに応じて、地震波散乱特性の空間変化に対して、コーダ波のデコリレーション変化の震源経過時間依存性も水平成分と上下成分では異なることが分かった。これらは従来のスカラー波の枠組みでは扱えなかったことで、本研究によるベクトル波への拡張による大きな成果である。

まとめ

本研究では、2次元1次等方散乱モデルに基づき、デコリレーション変化の近似ベクトル感度カーネルを新たに導出した。その結果、スカラー波の感度カーネルとは異なるベクトル波の感度カーネルの特徴が明らかになった。今回導出したカーネルは解析的に表現できる点は一つのメリットである。今回の定式化は一つの波のモードの卓越を仮定した簡単なものであるが、並行して、ベクトル波へのより厳密な拡張も順次進めていく必要がある。

キーワード：感度カーネル、コーダ波、ベクトル波

Keywords: Sensitivity kernel, coda waves, vector waves

中国地方における散乱係数と内部減衰の推定(2)

Estimation of scattering coefficient and intrinsic absorption in the Chugoku district (2)

高萩 大輔¹、*河原 純¹、江本 賢太郎²、齊藤 竜彦³

Daisuke Takahagi¹, *Jun Kawahara¹, Kentaro Emoto², Tatsuhiko Saito³

1. 茨城大学、2. 東北大学、3. 防災科学技術研究所

1. Ibaraki University, 2. Tohoku University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

観測された高周波地震波エネルギー密度の時空間分布を、輻射伝達理論の解と比較することにより、地下の散乱係数と内部減衰を分離して推定することが可能である。そのような方法の一つであるMultiple Lapse-Time Window (MLTW) 法 (Fehler et al., 1992; Hoshiya, 1993; Carcole and Sato, 2010) では、各地点で観測された地震波エネルギー密度を複数の時間窓で積分し、その空間変化を輻射伝達理論で解釈する。近年、齋藤・他 (2013, 2014, 地震学会秋季大会) は、各時刻での地震波エネルギー密度の空間分布を複数の空間窓で積分した量を求め、その時間変化を輻射伝達理論で解釈することにより、散乱係数と内部減衰を推定する手法を提案した。また、その手法をHi-netで得られた中国地方の浅い地震の観測記録に適用した。佐々木・他 (2015a, JpGU大会; 2015b, 地震学会秋季大会) はこの手法の改善と解析事例の追加を行い、中国地方周辺の平均的なS波 (1-2 Hz) の散乱係数を $0.002-0.0025 \text{ km}^{-1}$ と推定した。これはMLTW法に基づく同地域の過去の推定値と比べると、半分程度である。

本研究では、佐々木・他 (2015b) の手法を再検討し、修正と改善を行った上で、彼らが扱ったデータを再解析した。特に、震源・サイト特性の補正のために行うコーダ規格化の手続きを改善することで、1-2 Hzに加え、2-4, 4-8 Hzの帯域でも散乱係数と内部減衰の値を推定した。また、これまで空間一様を仮定していた散乱係数と内部減衰に対し、地殻と最上部マントルで散乱係数と内部減衰が異なるモデルを検討した。本研究で得られた散乱係数は、過去のMLTW法による散乱係数の値に比べて、解析した全ての帯域において有意に小さい値となった。また、散乱係数は明瞭な周波数依存性を示さず、内部減衰 (Q^{-1}) は周波数と負の相関を示した。最上部マントルの散乱・減衰は結果にほとんど影響を与えなかった。これは扱った地震が浅く (深さ9-13 km)、マントルを経由する波線がほとんど無かったためである。最上部マントルの散乱係数と内部減衰を推定するためには、より深い地震を使う必要がある。

謝辞：防災科学技術研究所のHi-netの地震記録、および同所が公開しているMatsubara and Obara (2011) の3次元地震波速度構造モデルのデータを使用しました。

キーワード：地震波エネルギー、散乱、内部減衰

Keywords: seismic wave energy, scattering, intrinsic absorption

V-netを用いた地震波干渉法による阿蘇山地域での表層構造時間変化の推定

Temporal change of subsurface structure near Mt. Aso inferred from seismic interferometry using V-net vertical array data

*水谷 雄太²、西田 究¹、青木 陽介¹

*Yuta Mizutani², Kiwamu Nishida¹, Yosuke Aoki¹

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Univ. of Tokyo

2016年4月の熊本地震、10月の噴火など、近年、阿蘇山は活動的である。地震や火山噴火活動を理解する上で、これらのイベントに伴う地震波速度構造をモニタリングすることは重要な手がかりとなる。本研究では阿蘇地方で、地震波干渉法による地下構造の時間変化を推定したので報告する。

地震波干渉法を用いて地下構造の時間変化を推定するに当たって、励起源が等方的に分布しているのが望ましい。励起源分布の時空間変化が見かけの地下構造の時間変化を作ってしまうためである。この問題を解決するためには、地震波干渉法によって計算された相互相関関数の直達波部分ではなく、散乱波であるコーダ波を用いることが有効である。これは散乱にともない、励起源の情報を失っていくためである。加えて、走時遅れは直達波よりもコーダ波で大きくなり、わずかな速度変化も精度良く検出できることが期待される。本研究では特に、直達波部分とコーダ波部分に現れる時間変化の速度構造への感度の違いから、構造速度変化の空間分布をどの程度制約できるかに注目した。

解析には、防災科学技術研究所V-netでの阿蘇山近辺の4観測点で、取得されたデータを用いた。解析期間は2015年1月1日から2016年10月31日である。各観測点は地表の広帯域地震計(3成分)とボアホール(深度~200 m)の速度型地震計(1 Hz, 3成分)で構成されている。まず、2-8 Hzのバンドパスフィルタをかけ1bit化した後に、ホワイトニングを適用した。同じ観測点、同じ成分に対して相互相関関数(CCF)を1日毎に計算した。地下構造時間変化を推定する際のレファレンスは、2016年10月25日から31日までのCCFをスタックすることで計算した。次にレファレンスのCCFと任意の1日分のCCFに対して、長さ2.56秒の時間窓についてそれぞれ遅延時間を求めた。この時、中心時間は-5秒から+5秒まで0.2秒ずつずらした。速度変化が空間的に一様であるならば、各時間窓に対する遅延時間のプロットを直線フィッティングした傾きの符号を反転させたものが速度変化を示し、切片は直達波の走時における変化を示すと考えられる。すなわち、推定された傾きからは広域(~2 km)な速度変化を、切片からは2観測点間の局所的な(~200 m)速度変化を推定できる。

熊本地震前後で、高森観測点を除く3観測点の東西成分において、傾きから推定される観測点から2 km程度の領域における速度低下はおよそ0.2%であった。高森観測点に関しては、東西成分ではこの領域での速度変化がほとんど見られなかったが、南北成分ではやはり0.2%程度の速度低下が検出された。切片から推定されるボアホール間約200 mにおける速度変化に関しては、白水観測点、一ノ宮観測点の東西成分、高森観測点の南北成分から5-8%の速度低下が検出され、永草観測点では20%の速度低下があった。これは永草観測点付近では地表断層が見られるほど、熊本地震によって大きなダメージを負ったためだと考えられる。

また一ノ宮観測点では、降水量データと対応する数週間のタイムスケールの速度変化が検出された。この変化は、降水量のデータから求めた簡単な地下水位のモデルとよく対応している。これは、この観測点が火山麓扇状地に立地するためだと考えられ、ボアホール間の局所的な変化として検出されたと考えられる。

本研究では、同じ観測点のボアホール・データを用いて解析を行い、数百メートルから数キロメートルでの

速度変化を検出できた。今後、阿蘇山を挟むような観測点間で同様の解析を行い、より大きなスケールでの火山活動に伴う速度構造の時間変化の検出を目指す。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所V-netのデータを使用した。

キーワード：地震波干渉法、地震波速度構造の時間変化

Keywords: Seismic interferometry, Temporal change of seismic velocity

2016年熊本地震による地下構造の速度変化

Temporal change of subsurface velocity structure associated with the 2016 Kumamoto earthquakes

*上野 友岳¹、齊藤 竜彦¹、澤崎 郁¹、汐見 勝彦¹

*Tomotake Ueno¹, Tatsuhiko Saito¹, Kaoru Sawazaki¹, Katsuhiko Shiomi¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年4月に発生した熊本地震前後において地下の速度構造変化と地震発生の関連性を調べるために、雑微動を用いた地震波干渉法解析 (Shapiro and Campillo, 2004) を九州地域のHi-net観測点で実施した。Hi-net上下動地震計で記録された1-3 Hzの雑微動の自己相関関数を計算し、ストレッチング法 (Sens-Schönfelder and Wegler, 2006) により地震波速度構造の時間変化を調査した。自己相関関数を計算する際には、地震などのエネルギーの大きな揺れの影響を軽減するために、振幅値を1 bit化 (Campillo and Paul, 2003) している。自己相関関数のストレッチングにはラグ時間1-5秒と4-15秒を使用した。

この結果、ラグ時間1-5秒では、震源極近傍のN.MSIH, N.KKCH, N.OGNHの3観測点で速度上昇が、N.ASVH, N.TYNH, N.NMNHの3観測点で速度低下が得られた。速度低下は安定して得られたが、速度上昇については、N.KKCHおよびN.OGNH観測点の結果は不安定で2016年9月には既に速度変化が地震発生前とほぼ同じになっている。N.MSIHについては速度増加を示したままである。一方、ラグ時間4-15秒では、地震直後からN.MSMH, N.TYNH, N.ASVH, N.HKSH, N.NMNH, N.KKEH, N.SNIHで0.5%から6%程度の明瞭な速度低下が見られた。断層近傍点の観測点ではあるが、N.MSIHとN.KKCHは速度変化の推定が安定せず、N.OGNHは地震前後の速度変化が不明瞭であった。

N.MSIH観測点は、断層近傍に位置しているために複雑な地殻変動場になっていることが考えられるが、計算上は本震断層モデルによる永久変位場から体積減少が予想される地点である。また、KiK-net地中・地表観測から推定された永久変位からも鉛直方向の伸び歪が -8×10^{-4} 程度と推定されており (Fukuyama and Suzuki, 2016)、断層運動の静的な圧縮歪みによって地下の地震波速度が上昇したと推察される。N.MSIH観測点ではラグ時間4-15秒は安定せず速度構造変化の推定が困難であったことから、観測点近傍の速度構造変化のみが検出可能であったことが考えられる。一方、N.ASVHなどの観測点は、強震動による動的歪みの影響を受け、表層部の速度構造が低下したことを示していると考えられる。大地震発生により変化する地下の速度構造は、断層極近傍の場合は静的歪変化の影響を受けていることが示唆される。

キーワード：2016年熊本地震、速度構造変化

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquakes, Temporal velocity change

常時微動を用いた地震波干渉法による2011年に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)及びSlow Slipに伴う地震波速度変化検出

Temporal Variation in Seismic Velocity Accompanied by 2011 Tohoku-Oki Earthquake and the Slow Slip Event, on Seismic Interferometry of Ambient Noise

*植村 美優¹、伊藤 喜宏²、太田 和晃²、日野 亮太³、篠原 雅尚⁴

*Miyuu Uemura¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Ryota Hino³, Masanao Shinohara⁴

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所、3. 東北大学、4. 東京大学地震研究所

1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Tokyo University

巨大地震前後あるいは、巨大地震に先行する地震波速度変化を検出する一つの手法として常時微動を用いた地震波干渉法が有効である。これまでに複数の先行研究において、地震発生前後(例えば、Wegler et al., 2009; Yamada et al., 2010)及び地震発生前に地震波速度が低下するという結果が得られている(例えば、Lockner et al., 1977; Yoshimitsu et al., 2009)。一方、Slow Slipに伴う地震波速度変化はほとんど知られていない。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)発生前の同年1月末から3月9日の最大前震(Mw7.3)発生までの間にSlow Slipおよび低周波微動が宮城沖で観測された (Ito et al., 2013; Ito et al., 2015; Katakami et al., 2016)。本研究では、常時微動を用いて地震波干渉法解析を行い、東北地方太平洋沖地震及びSlow Slipに伴う地震波速度変化の検出を試みた。解析には2010年11月初旬から2011年4月下旬まで宮城県沖に設置されていた17点の自己浮上式海底地震計(固有周波数4.5Hz)の記録を用いた。解析を行う前に海底地震計の設置方位を自然地震の直達P波の振動軌跡を用いて推定したところ、17点中13点の海底地震計については設置方位を決定することができた。

解析手法は以下の通りである。はじめに、連続波形データに0.25~2.0Hzのバンドパスフィルタをかけ、その後1bit化処理を行う。次に、ラグタイム-30~30秒に0.1秒刻みで、5秒間時間窓を用いて相関係数を計算し自己相関関数を作成する。連続した7日間又は16日間、及び全期間の自己相関関数をスタックして7日間自己相関関数、16日間自己相関関数、Referenceを計算する。最後に、7日間自己相関関数とReference、16日間自己相関関数とReferenceの相互相関係数(Correlation Coefficient, CC)を計算する。

解析の結果、Slow Slip発生初期ではCCが低下するがSlow Slip後半ではCCがSlow Slip発生前の値まで戻ることがわかった。また、Slow Slip発生初期の16日間とReferenceのCCの1.0からの減少量(Absolute CC Reduction, ACR)とSlow Slip発生直前の16日間とReferenceのCCからの減少量(Incremental CC Reduction, ICR)を比べると、Slow Slip発生息周辺ではACRとICRに差が発生せず、最大前震発生領域周辺ではACRとICRに差が発生することがわかった。16日間とReferenceのCCの推移をみると、前者ではSlow Slip発生するまでCC≒1.0を保っておりSlow Slipに伴って急激に低下するが、後者ではCCが11月から徐々に低下しておりSlow Slipに伴って少し低下するという違いが見受けられた。これは、Slow Slipと地震の違いだと考えられる。

キーワード：地震波干渉法、常時微動

Keywords: seismic interferometry, ambient noise

地震波速度の潮汐応答特性の推定：13活火山における雑微動の相関解析

Estimation of seismic velocity changes in response to the earth tide: Noise correlation analysis at 13 active volcanoes in Japan

*高野 智也¹、西村 太志¹、中原 恒¹

*Tomoya Takano¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹

1. 東北大学理学研究科

1. Graduate School of Science, Tohoku University

大地震に伴う地震波速度変化として、強震動による地盤損傷と、媒質の応力変化がある。この2つの速度変化メカニズムを理解するためには、それぞれを独立に扱える場での解析が必要である。近年、既知の応力である地球潮汐と雑微動を用いた地震波干渉法を利用し、浅部構造における地震波速度変化の潮汐応答が推定されている[Takano *et al.*, 2014; Hillers *et al.*, 2015]。しかしながら、このような研究はまだ2例と少ない。そこで、本研究は、日本の13の活火山に設置されている気象庁の上下動短周期地震計に記録された雑微動を用いて、地震波速度の潮汐応答特性を推定する。

解析を行った活火山は、十勝岳、雌阿寒岳、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、吾妻山、磐梯山、那須岳、草津白根山、御嶽山、伊豆大島、三宅島、雲仙普賢岳である。これらの各火山には、それぞれ水平距離が約5 km離れた2観測点以上に地震計が設置されている。本研究では、2年間（2013年から2014年まで）の連続記録を利用した。各観測点ペアに対して、GOTIC2[Matsumoto *et al.*, 2001]の計算潮汐歪みの振幅値を用いて、地球潮汐の膨張期間と収縮期間の2つの期間に分けて解析を行った。それぞれの期間で雑微動の相互相関関数(CCF)をスタックし、CCF間の位相差により潮汐による速度変化を推定した。なお、CCFに見られる主要動の伝播速度から、雑微動によるCCFには表面波が卓越していると考えられる。

潮汐歪みの鉛直成分と面積成分による速度変化量を求めた。潮汐歪みの鉛直成分による速度変化量は、全観測点ペアで加重平均すると、0.5-1Hzで $-0.02 \pm 0.02\%$ 、1-2Hzで $-0.01 \pm 0.01\%$ 、2-4Hzで $-0.06 \pm 0.01\%$ と求められた。負の速度変化量は収縮期間に対する膨張期間での速度低下量としたので、この結果は、鉛直方向に媒質が伸びる際に速度がわずかに低下したことを示す。一方、潮汐歪みの面積成分による速度変化量は、0.5-1Hzで $0.03 \pm 0.02\%$ 、1-2Hzで $0.02 \pm 0.01\%$ 、2-4Hzで $0.06 \pm 0.01\%$ となり、媒質が伸びた際に速度がやや上昇した。このような結果は、CCFのコーダ波部を用い、表面波を主に解析したと考えられるHillers *et al.* [2015]の結果と整合的であった。しかしながら、一方、実体波を解析したYamamura *et al.* [2003]やTakano *et al.* [2014]では、潮汐の面積歪みが正の期間での速度低下を検出している。これらのことから、潮汐歪みの方位や波動場の振動方向によって地震波速度変化の応力感度が異なる可能性が示唆される。今後、雑微動の3成分を利用して、波動場の特性と潮汐歪みの方位との関係性について調べる予定である。

謝辞：本研究では、気象庁が管理する短周期地震計の連続記録を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

キーワード：地震波速度変化、地震波干渉法、地球潮汐

Keywords: seismic velocity change, seismic interferometry, earth tide

Globally optimized finite difference method to minimize the angle dependent numerical dispersion.

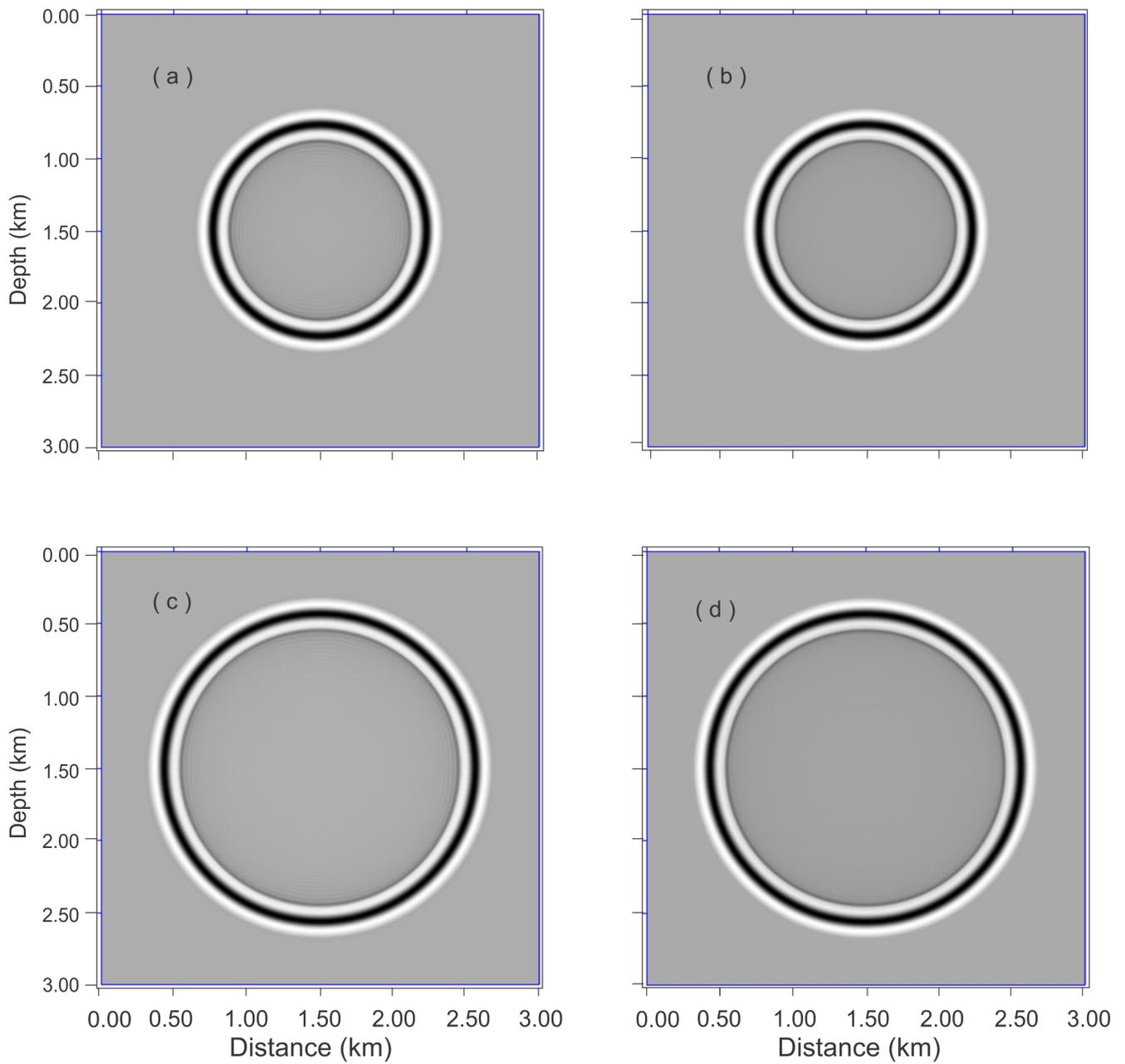
*DEBAJEET BARMAN¹, Dr. MAHESWAR OJHA¹

1. CSIR National Geophysical Research Institute Hyderabad, India

Finite difference modeling is a basic and important tool to solve a differential equation like acoustic wave equation. This method is also used in high resolution seismic imaging. But it faces some challenges for two dimensional wave propagation due to propagation angle dependent numerical dispersion in square grid system. In a conventional Finite Difference Method (FDM), the coefficients are fixed for 1D and 2D propagation. So, with increase of order of approximation the dispersion may be reduced but the non uniformity of dispersion with varying propagation angle retains itself. For existing Pseudo Spectral Method (PSM) using specific window parameter the FD coefficients are constant and is not properly optimized for every angle of propagations.

Here, we propose a method to automatically optimize FD coefficients for every propagation angle. To make the method robust, at first FD coefficients for every propagation angle is optimized by minimizing phase velocity ratio error with reference to the analytic solution using genetic algorithm of certain initial population. Here, the fitness function is generated by the weighted average error in phase velocity ratio for each wave number. As we know that the error in lower wave number should be in higher priority, so we use decay type functions like linear, exponential to calculate the weighted average error by multiplying the function weight with the error at specific wave number. The stability criteria is considered for choosing best of optimized FD coefficients i.e. the FD coefficients whose stability ratio is higher than conventional is considered for the next step for the algorithm. Then final FD coefficients are generated by optimizing from those highly optimized FD coefficients for each propagation angle by genetic algorithm. In the second step, the same stability criteria technique is used for optimization. In second step the FD coefficients are optimized by using fitness function where error is average for every propagation angle. The new method is automated and it does not depend on specific window property like Pseudo Spectral Method (PSM). For some acoustic model PSM technique does not better result for lower order approximation and use of higher order approximation increase the complexity of the method. But in new method there is no such limitation.

Keywords: Genetic algorithm, Phase velocity ratio, Decay function



(a) Conventional 12th order at 500ms, (b) New 12th order at 500ms, (c) Conventional 12th order at 700ms, (d) New 12th order at 700ms velocity 2500m/sec, grid spacing 15m, sampling time 1ms, source is 10Hz Ricker wavelet

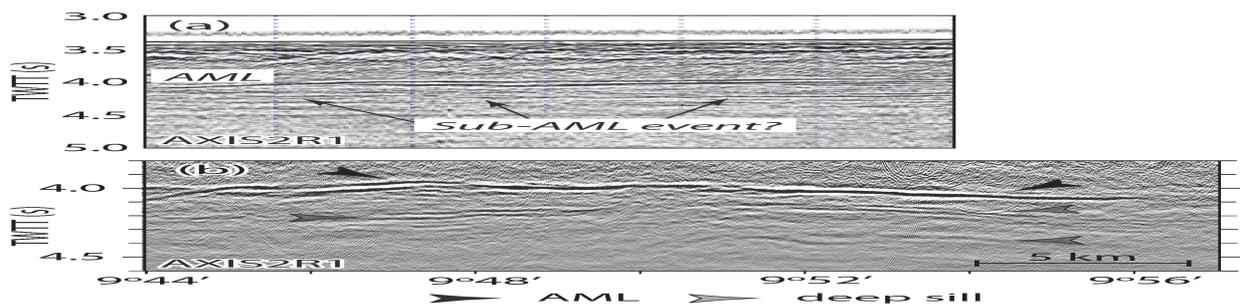
Waveform modeling of the seismic response of a mid-ocean ridge axial melt sill

*Min Xu¹, Wen Yan¹

1. SCSIO, CAS

Seismic reflections from axial magma lens (AML) are commonly observed along many mid-ocean ridges, and are thought to arise from the negative impedance contrast between a solid, high-speed lid and the underlying low-speed, molten or partially molten (mush) sill. The polarity of the AML reflection ($P_{AML}P$) at vertical incidence and the amplitude versus offset (AVO) behavior of the AML reflections (e.g., $P_{AML}P$ and S -converted $P_{AML}S$ waves) are often used as a diagnostic tool for the nature of the low-speed sill. Time-domain finite difference calculations for two-dimensional laterally homogeneous models show some scenarios make the interpretation of melt content from partial-offset stacks of P - and S -waves difficult. Laterally heterogeneous model calculations indicate diffractions from the edges of the finite-width AML reducing the amplitude of the AML reflections. Rough seafloor and/or a rough AML surface can also greatly reduce the amplitude of peg-leg multiples because of scattering and destructive interference. Mid-crustal seismic reflection events are observed in the three-dimensional multi-channel seismic dataset acquired over the RIDGE-2000 Integrated Study Site at East Pacific Rise (EPR, cruise MGL0812). Modeling indicates that the mid-crustal seismic reflection reflections are unlikely to arise from peg-leg multiples of the AML reflections, P -to- S converted phases, or scattering due to rough topography, but could probably arise from deeper multiple magma sills. Our results support the identification of Marjanovic et al. (2014) that a multi-level complex of melt lenses is present beneath the axis of the EPR.

Keywords: East Pacific Rise, Axial melt lens, Waveform modeling, Mid-crustal seismic reflection event, Multiple-sill model



広帯域地震波形を用いた関東地域のアジョイントトモグラフィー Adjoint tomography beneath the Kanto region using broadband seismograms

*三好 崇之¹

*Takayuki Miyoshi¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

関東地域において地震波形の再現／予測が保証され、同時に地域テクトニクスも論じられる地震波速度構造モデルの構築を目的として、三好・他（2015 SSJ）、三好（2016 JpGU）ではアジョイントトモグラフィーを用いて三次元構造モデルを推定してきた。本稿では三好（2016）から解析方法を変更して得られた結果について報告する。

解析方法の主要な変更点は次の3点である。(1)セントロイド時刻の再決定を行った。インバージョンの初期震源には、防災科学技術研究所F-netのモーメントテンソル解を用いてインパルスを与えたが、観測波形と理論波形との間に破壊継続時間に由来する系統的な差が認められた。本研究では、インバージョンで用いる5-30秒の帯域で、P波部分について観測波形と三次元構造モデルを用いて計算した理論波形の相関を求めて、相関が最大となるラグタイムを走時差とし、そのズレからセントロイド時刻を推定した。(2)理論波形計算において減衰構造を考慮した。従来は完全弾性体で計算を実施してきたが、Olsen et al. (2003)を参考にS波速度に依存した減衰構造を導入した。(3)長周期側からインバージョンを実施した。インバージョンでは、20-30秒、10-30秒、8-30秒、5-30秒の順に適用することで、位相ズレが起きないようにした。

1回の反復は、理論波形計算、ミスフィットの計算、アジョイント法を用いたカーネル計算、Hessianカーネルを用いたモデル更新からなり、16回の反復による結果を最終モデルとした。初期モデルはMatsubara and Obara (2011)による走時トモグラフィーモデルである。結果の概要は以下のとおりである。振幅評価によって観測波形と理論波形の一致度を調査したところ、5-30秒の帯域で初期モデルに比べて約20%改善された。長周期側ほど一致度が高く、震源が浅い地震よりも深い地震の方が一致度は高かった。インバージョンで使用しなかった地震についても理論波形の改善がみられた。速度構造モデルについて、速度の深さ平均は、新モデルは初期モデルに比べてP波速度でやや遅くなったが、大局的には変化しなかった。一方、深さ断面や鉛直断面を作成して検討したところ、深さ40kmではマントルウェッジ内の低速度領域、火山下の低速度領域などがイメージングされ、初期モデルと同様の構造が得られたが、初期モデルよりも顕著な低速度を示した。また、深さ5kmのスライスでは関東盆地に相当する低速度領域が検出でき、鈴木（1996）による盆地基盤構造と調和的な構造が得られた。

本研究では、防災科学技術研究所F-netによる震源カタログと地震波形データ、オープンソースコードSPECFEM3D_Cartesianを使用しました。記して感謝いたします。本研究は、日本学術振興会科学研究費(Grant Number 16K21699)および文部科学省科学研究費(Grant number 15H05832)の助成を受けています。

キーワード：地震波速度構造、アジョイントトモグラフィー、広帯域地震波形

Keywords: Seismic wave-speed model, Adjoint tomography, Broadband seismogram

深発地震波形で比較した世界のスラブ

Global features of slabs inferred from regional low- and high-frequency body waves of deep earthquakes

*大畑 祐樹¹、久家 慶子¹

*Yuki Ohata¹, Keiko Kuge¹

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

We show that high-frequency P and S phases from deep earthquakes arrive at fore-arc stations after low-frequency phases, with increasing delay with thermal parameters in subduction zones. The observation in Tonga may be associated with the metastable olivine wedge (MOW) as well as in northern Japan.

By analyzing features of P and S waves radiated by deep earthquakes, we can elucidate the nature of slabs where the seismic waves have passed. One of the features is difference in arrival time between low-frequency ($f < 0.25$ Hz) and high-frequency ($f > 2$ Hz) signals. This can be observed clearly in the fore-arc side of the volcanic front in northern Japan. Furumura and Kennett (2005) showed that the P and S waves from deep earthquakes beneath the Sea of Japan have low-frequency onsets with high-frequency long-duration signals, suggesting that they are the result of small-scale quasi-laminar heterogeneity within the subducting Pacific slab. The late arrivals of high-frequency P and S signals can be enhanced for earthquakes deeper than 400 km due to the low-velocity MOW in the slab (Furumura et al., 2016).

In this study, we examined seismograms worldwide for the features suggested by Furumura's studies. We collected waveform data of P and S waves from IRIS and F-net broadband seismometers in fore-arc sides of subduction zones where deep earthquakes occur. We measured separation time between low- and high-frequency arrivals. By comparing it with several physical parameters of subduction zones, we found that the separation time could increase with the thermal parameter. The result is consistent with Kennett et al. (2014) who suggested that the quasi-laminar heterogeneity within the oceanic lithosphere can guide high-frequency P_o and S_o waves more efficiently in the older, cold areas of the Pacific. Therefore, the observed correlation between the separation time and thermal parameter may arise from the dependence of the quasi-laminar heterogeneity on temperature. In the areas except for Tonga and northern Japan, we did not find observations that are likely to be evidence for MOW. Large separation time was observed in Tonga, and it tends to be increased for earthquakes deeper than 500 km.

The cause of M_j overestimates ($M_j > M_w$) for the shallow earthquakes in western Japan

*河本 洋輝¹、古村 孝志¹

*Hiroki Kawamoto¹, Takashi Furumura¹

1. 東京大学地震研究所

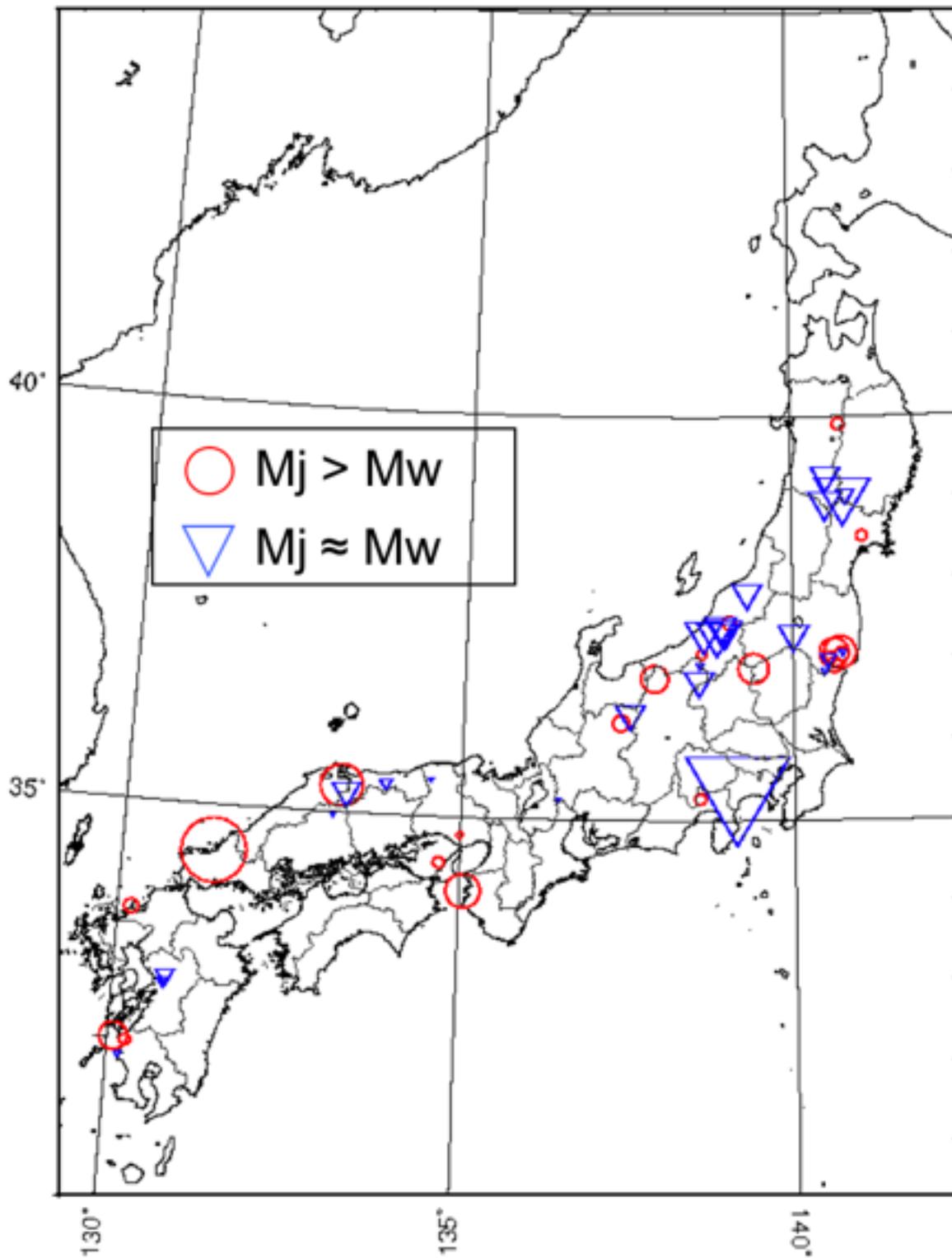
1. Earthquake Research Institute The University of Tokyo

In Japan, the Japan Meteorological Agency (JMA) magnitude (M_j) is officially used for the magnitude estimates of the earthquakes occurring in the area around Japan. However, it is well recognized that the estimated M_j sometimes shows large discrepancies between the moment magnitude (M_w) and momentum magnitude (M_w). Typical examples are the Western Tottori earthquake in 2000 ($M_j=7.3$; $M_w=6.8$) and Northern Yamaguchi earthquake in 1997 ($M_j=6.6$; $M_w=5.9$), all are strike-slip fault events occurred in the inland of western Japan. Since the M_j of shallow ($h < 60$ km) earthquakes are estimated by using the maximum amplitude of horizontal displacement motions recorded by long-period seismometers with a natural period of $T=5$ s, it is expecting that the propagation and attenuation properties of the long-period ground motions in this period range might be different in western Japan. In this study we examined the cause of such discrepancy between M_j and M_w occurring in western Japan based on the analysis of the K-NET and KiK-net strong ground motion data for recent shallow earthquakes.

We analyzed 47 inland earthquakes of shallow ($h < 40$ km) and large ($M_j > 5.5$) event occurred during between Sep. 1994 to Nov. 2016 in which the K-NET and KiK-net data is available. We made a regression analysis of relation between M_j and M_w , which are obtained from the JMA and the GCMT catalog, respectively. The result shows that the M_j is proportional to the M_w with a bias of 0.16 ($M_j=M_w+0.16$). After substituting this bias (0.16) from the M_j we selected the events having large discrepancy between M_j and M_w . We confirmed such peculiar events are mostly located in some area such as in Chugoku-Kinki and from South-Fukushima to South-Niigata (Fig).

To study the cause of larger M_j than M_w in western Japan we examined the strong motion record of the K-NET and KiK-net for the 2000 Western Tottori ($M_j=7.3$; $M_w=6.8$) and the 2004 Mid Niigata ($M_j=6.8$; $M_w=6.8$) earthquakes. The accelerograms of the K-NET and KiK-net are integral twice to obtain the ground displacement after applying a band pass filter ($f=0.20$ to 40 Hz) to match to the response of the JMA seismograph. Obtained waveform shows that the attenuation of the long-period ground displacement motion from the Mid Niigata earthquake is very strong with propagation in northern Japan, but it is rather weak for the Western Tottori earthquake in western Japan. It is also confirmed that the large ground displacement of the Western Tottori earthquake has strong directional dependency with larger tangential motion in the direction of fault strike and its perpendicular directions where the radiation of the SH wave from the strike-slip fault source develops large Love waves. The seismogram demonstrated that the Love wave traveling longer distances in western Japan without showing strong dispersion properties, while the development of the surface wave from the Mid Niigata earthquake is very weak in all directions. The results of this study demonstrated that the earthquakes of larger M_j , which occurred in western Japan, might be due to larger radiation of the Love wave from the source as well as efficient propagation of the short-period ($T=5$ s) Love wave in regional distances without causing significant dispersion. Such efficient Love wave propagation in western Japan might indicate the peculiarity of the crustal structure beneath western Japan compared with that of northern Japan. Such propagation and dispersion properties of the fundamental-mode, short-period ($T=5$ s) Love wave might occur due to the difference in the shallow

structure such as sedimentary layers between western and northern Japan.



茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関する評価・分析（その3）

Numerical simulation of long-period ground motion generated from intraplate earthquakes around Ibaraki and Fukushima prefectures ~ Part III

*藤原了¹、桐田史生²、河路薫¹、山崎敏彦²、瓜生満²、武川大祐²

*Fujihara Satoru¹, Fumio Kirita², Kaoru Kawaji¹, Toshihiko Yamazaki², Mitsuru Uryu², Daisuke Takekawa²

1. 伊藤忠テクノソリューションズ 原子力・エンジニアリング部、2. 日本原子力研究開発機構 建設部

1. CTC ITOCHU Techno-Solutions, Nuclear & Engineering Department, 2. Japan Atomic Energy Agency, Construction Department

[はじめに] 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0：以下、「3.11東北沖地震」という。）に伴う東北日本太平洋側の応力場の変化に誘発される形で、内陸の地殻内において同年4月11日福島県浜通りの地震（M7.0：以下、「浜通り地震」という。）が発生したと考えられている。浜通り地震の発生以降、震源断層と思われる井戸沢断層及び湯ノ岳断層周辺では多数の余震が発生しており、これら浜通り地震及びその余震によって、茨城県北部沿岸域の一部の地震観測点において長周期地震動が観測された。3.11東北沖地震以前、茨城県北部沿岸域では内陸地殻内地震がほとんど発生しておらず、内陸地殻内地震と長周期地震動に関する地震動特性の知見は乏しかった。このため、3.11東北沖地震以降得られた長周期地震動の特徴を踏まえた地震動評価を行うことは、茨城県北部沿岸域における耐震設計を行う上において重要である。以上を踏まえ、本研究では、茨城県北部沿岸域における内陸地殻内地震による長周期地震動評価の高精度化を主な目的とする。

[既往の検討結果] 既往研究₁₋₂₎において、主に以下の内容を議論してきた。①浜通り地震の震源域より南方に位置する地震観測点の一部において有意な長周期地震動が観察されたが、この長周期地震動に対して地震調査研究推進本部による三次元地盤構造情報に基づく波動伝播シミュレーション解析では再現困難な部分が見られた。②これを踏まえ、茨城県北部沿岸域の地震観測点（防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-net観測点及び日本原子力研究開発機構の各観測点）で得られた浜通り地震の余震（M6以下の地震で点震源と仮定）の地震観測記録を用いて有限要素法による波動伝播シミュレーション解析を行うことで、各地震観測点で得られた長周期地震動を説明する三次元地盤構造モデルの最適化を行った。③さらに、最適化に用いた地震と同程度の規模及びメカニズムの地震に加え、茨城県沖で発生するプレート間地震を用いて検討することで、三次元地盤構造モデルの精度向上を図った。

[本発表の内容] 本発表では主に以下の内容を説明する。①先述した点震源による妥当性検証に加えて、有限断層でモデル化される大規模地震に対する波動伝播シミュレーション解析を実施することで、地震規模の観点から三次元地盤構造モデルの妥当性検証を行う。ここでは、浜通り地震に関する複数の既往震源断層モデルを活用する。②また、茨城県北部沿岸域における地震動の伝播特性を把握するために、三次元地盤構造モデルに対して仮想的な震源を設定し、波動伝播シミュレーション解析を実施する。

[まとめ] 有限断層でモデル化される大規模地震に対する三次元地盤構造モデルを用いた長周期地震動評価の有用性を確認した。また、震源と観測点との位置関係による地震動の伝播特性の違いを把握した。具体的には、浜通り地震の様な内陸地殻内地震では基盤の不整形性が主な要因となり、一部の観測点において長周期地震動が励起することを把握した。その一方で、茨城県沖で発生するプレート間地震においては、内陸地殻内地震のような長周期地震動の励起があまり見られないことを把握した。

[引用情報]

1) 藤原了, 桐田史生, 河路薫, 山崎敏彦, 瓜生満, 安田昌宏: 茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸

地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関する評価・分析, 日本地球惑星科学連合2015年大会, S-SS26-P10, 2015.

2) 藤原了, 桐田史生, 河路薫, 山崎敏彦, 瓜生満: 茨城県及び福島県の県境付近で発生した内陸地殻内地震による茨城県沿岸域における長周期地震動に関する評価・分析(その2), 日本地球惑星科学連合2016年大会, S-SS28-P15, 2016.

キーワード: 三次元地盤構造モデル、長周期地震動、福島県浜通り地震

Keywords: 3D structure, Seismic wave propagation, Hamadori Earthquake