

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。

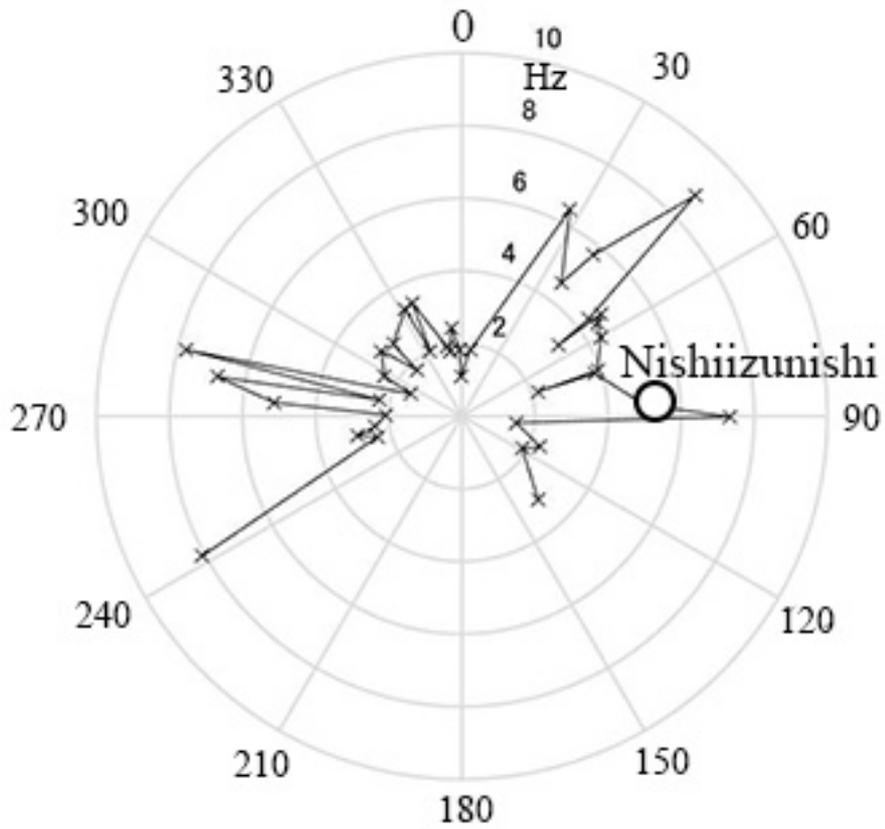
同様に、各観測点に対応するTRPに特異値分解法を適用して最も振幅の大きい成分を抽出した。それらの成分の周波数を、震源を中心とした観測点の方位に対する分布として図に示した。明らかに、震源からの放射周波数は方位によって大きく異なる指向性を持っている。即ち、方位角27.4°の裾野から、方位角97.0°の河津までの周波数が高く、特に、裾野6.41Hz、南足柄5.70Hz、西伊豆西5.00Hz及び河津7.34Hzなどの周波数が高い。

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 bwdlgs, 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:

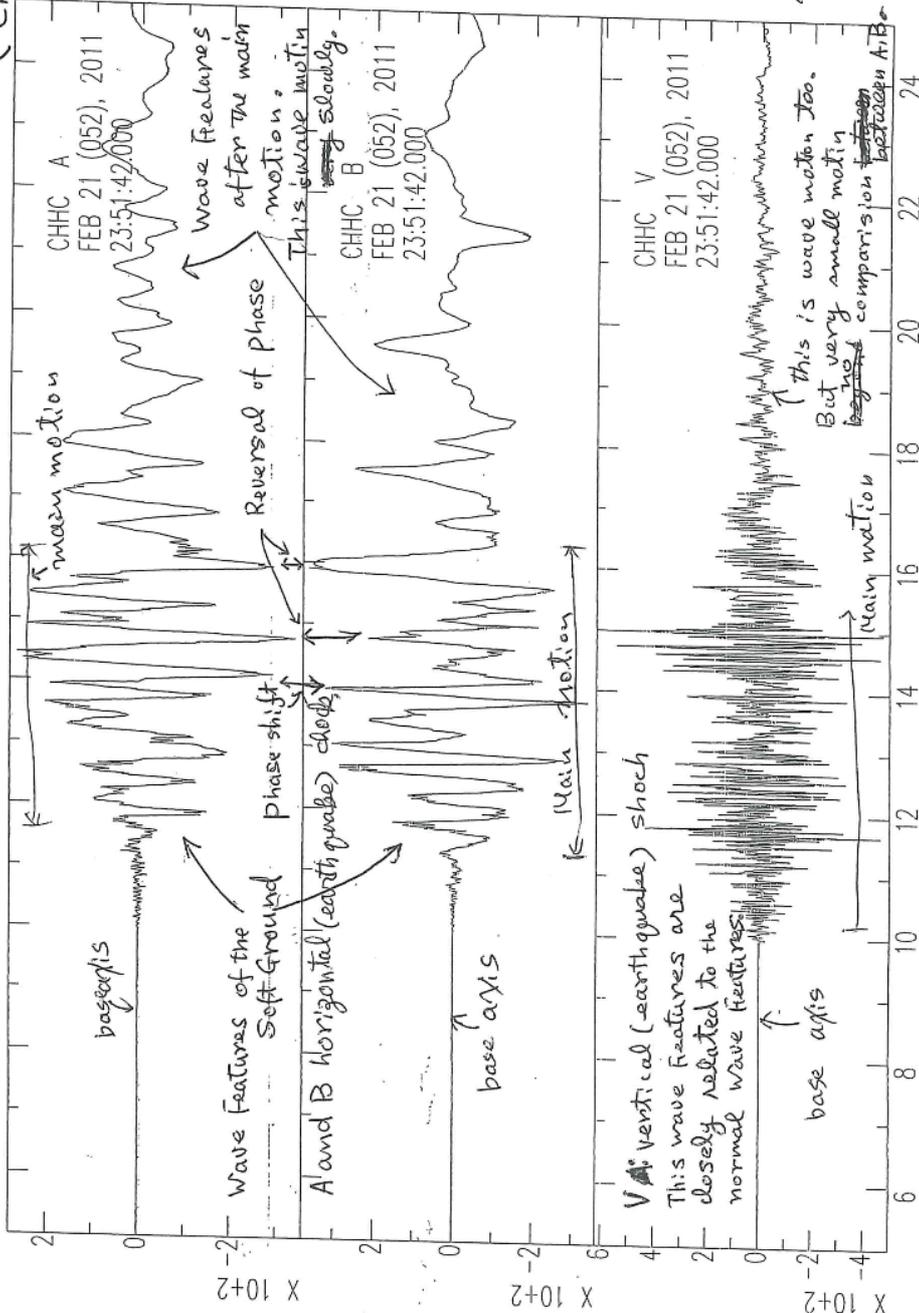
Because of soft ground, Phase of seismic wave devided from correct behavior and generated rotation (twist) arownd CTV Building (the buildings).

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

The wave Features of Christchurch.

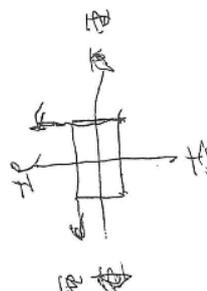
73 仅 A
(Christchurch)
の波形状
(Wave features)

の事取西、南に
波の位相は逆転
している。他と同
いじ、水手方(向)に
建物、に反対(向)回
力(又は中心)が
いじるとなり
の主要動は以後の
波形状は波の
まじは他と同
手取。
中心、上下動も
各少は波の
如、重複、波化
比よりと、小、

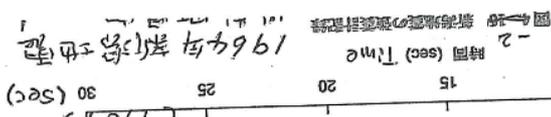


(+) amount of SA, B, V acceleration is high (電中距離 8 km)

than (-) amount acceleration. This fact point out existence of a hard type of the ground than this soft ground. And this soft ground is not thickly layered particularly thick.



The Wave Features of Niigata Earthquake (1964)



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.

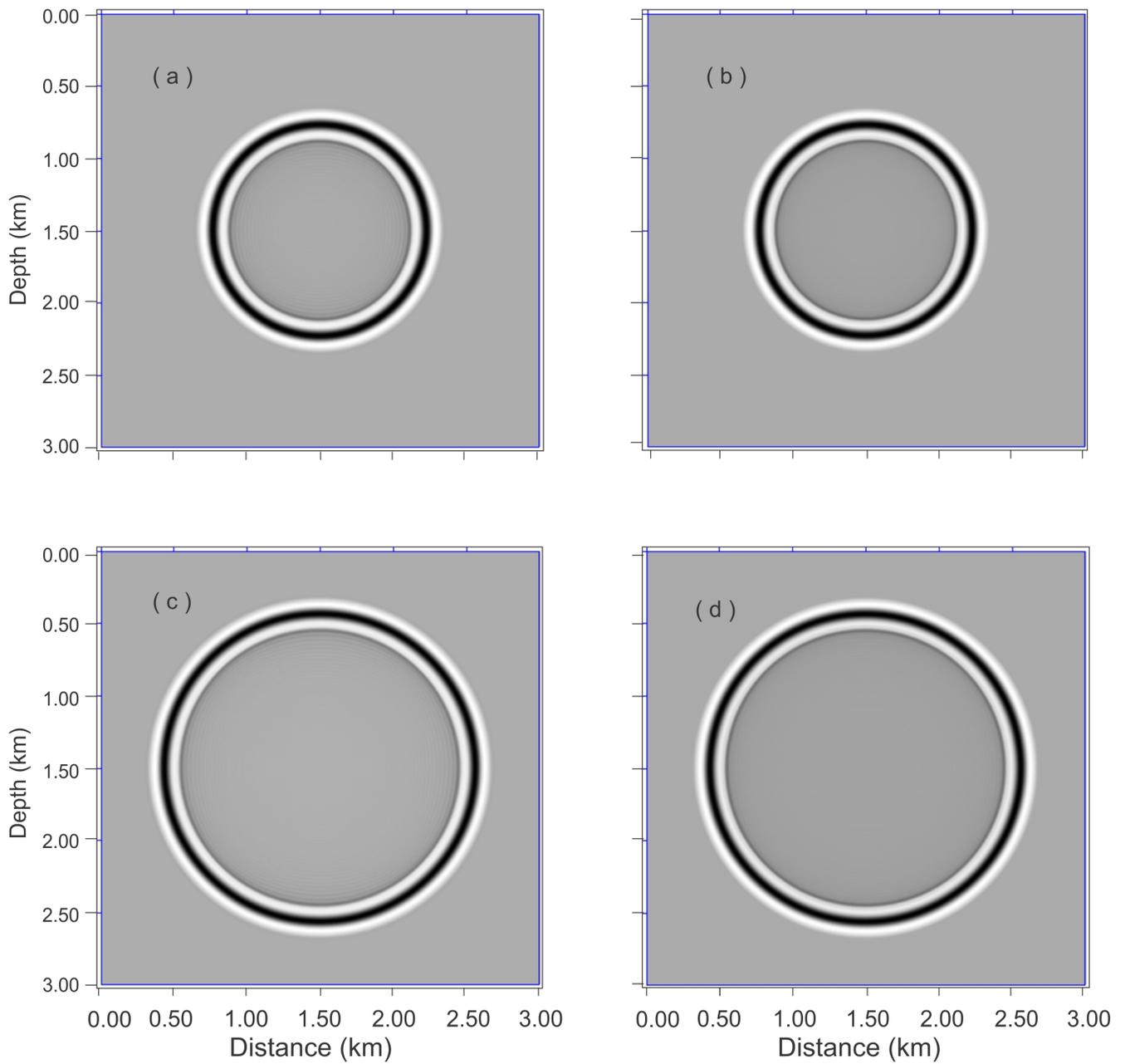
*DEBAJEET BARMAN¹, Dr. MAHESWAR OJHA¹

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



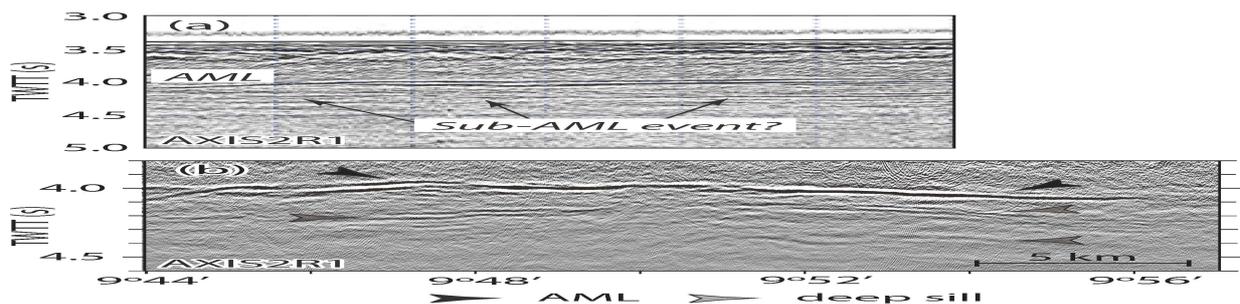
Waveform modeling of the seismic response of a mid-ocean ridge axial melt sill

*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

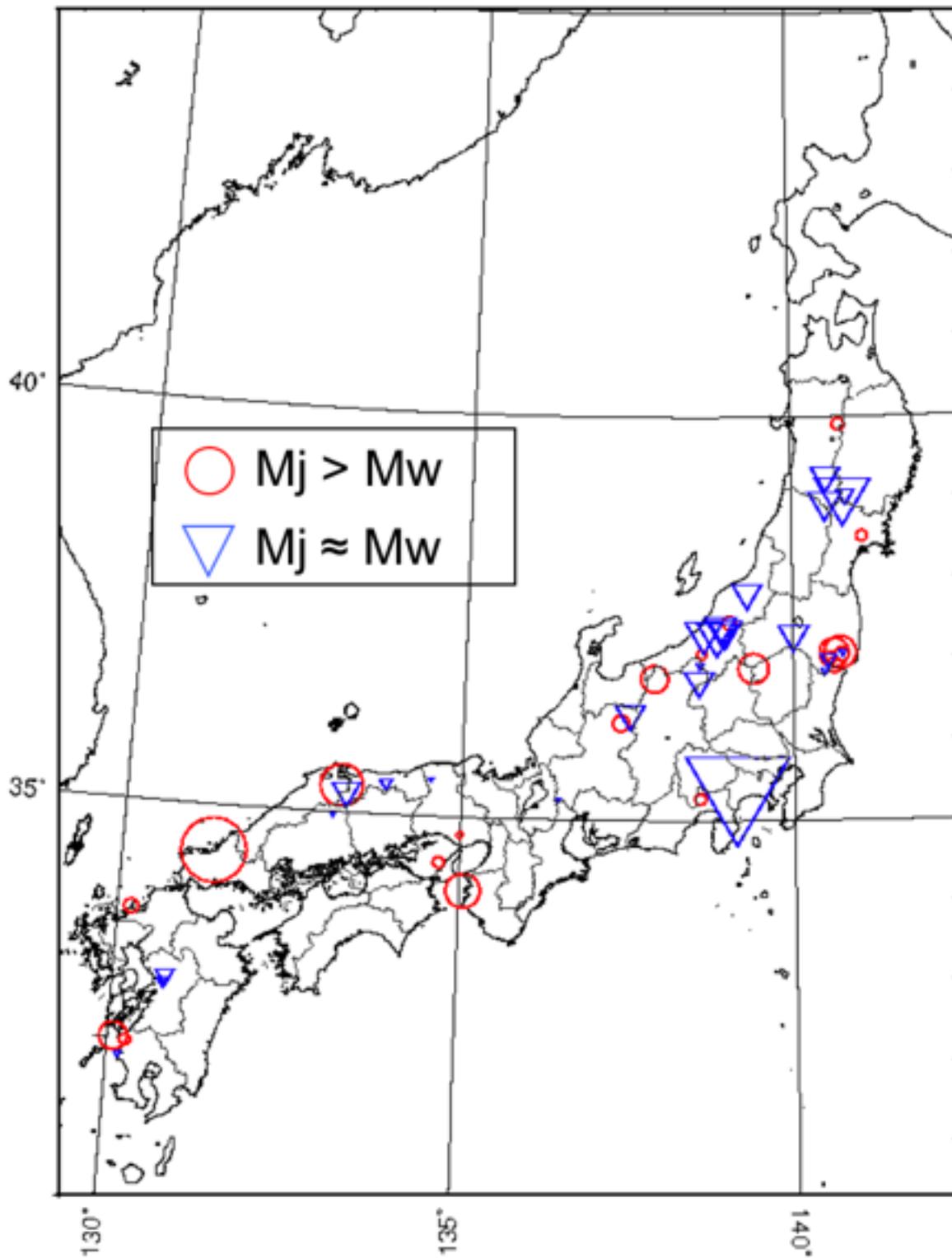
1. Earthquake Research Institute The University of Tokyo

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