

真の極小に収束する波形インバージョン法：ウィーナーフィルターの活用 Waveform inversion converged towards the grand minimum: A Wiener-filter approach

蓬田 清^{1*}
YOMOGIDA, Kiyoshi^{1*}

¹ 北海道大学大学院理学研究院
¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

波形インバージョンは現在では地震学に限らず、地球惑星科学の幅広い分野で応用、さらにはルーチン的な大量あるいは自動処理が行われている。そこでは、時間領域の観測波形と合成波形の差を最小二乗法的に評価し、モデルを修正していく。しかし、山谷がある波形は一つずれると最小二乗的な誤差は周期的に繰り返す、すなわち、いくつものローカルな極小が存在し、インバージョンの過程で本当の極小でないモデルへ収束してしまうことが多い。数学的には位相の 2π の任意性による。この問題点を処理する過程は *phase unwrapping* と呼ばれ、扱う問題に応じて、経験的なアプローチしかこれまで知られていない。

本研究ではこの問題点を解消するために、二段階からなる新しいインバージョン法を提案する。まず、観測波形 $d(t)$ と合成波形 $p(t)$ (離散型の時系列とする)との違いを、ウィーナーフィルター $w(t)$ によって表す。 $p(t)*w(t) - d(t)$ の二乗和が最小になるように $w(t)$ の係数を求めるが (*は畳み込み)、これは再帰的解法から効率よく求められる (Levinson, 1949)。モデルが最適ならば観測波形と合成波形が一致するので ($p(t)=d(t)$)、 $w(t)$ は $t=0$ が1で他は0のユニットフィルターとなる (連続変数ではデルタ関数に対応)。よって、時間ラグの重みをかけた $t \cdot w(t)$ の二乗和を最小にする基準で、モデルを修正すればよい (ただし、 $w(t)$ の絶対値に依存するので、規格化した二乗和を用いる)。

この基準では $t=0$ からの時間差だけが最適化モデルへの基準として用いられるので、従来の手法での位相の任意性は関係がなく、真の極小値 (最適モデル) へ反復すれば収束する点が重要である。

波形インバージョンでは順問題の形式をきちんと逆変換 (離散的な形式ならば逆行列) を行うのは膨大な計算が必要なので、随伴行列 (adjoint operator) をデータ残差 $d(t)-p(t)$ に掛けたものをモデル修正値として求める。この随伴行列は基準となる $t \cdot w(t)$ の二乗和を合成波形 $p(t)$ で偏微分して得られる。すると、随伴行列は $-t^2 w(t)^2 * p(t)^{-1}$ となる。つまり、 $t \cdot w(t)$ の二乗和を $p(t)$ で畳み込みの逆操作 (deconvolution) をすればよく、他の操作は従来の波形インバージョンと同じである。

この手法を簡単な速度変動を与えたモデルで数値実験した所、十分に密な観測点・震源ペアがなくとも、従来の波形インバージョンで求めた結果よりも元のモデルを再現した。これは位相の任意性によるローカルな極小にトラップされず、真の極小へこの手法ならスムーズに収束することを示す。特に、初期モデルが最適モデルからかなりずれた場合のテストでも、元のモデルに近づく結果となり、実用面で有効であることが示された。

キーワード: 逆問題, 地震波形, ウィーナーフィルター, 真の極小, 位相の任意性
Keywords: inverse problem, seismic waveform, Wiener filter, grand minimum, phase unwrapping

西南日本で発生するスラブ内地震の地震波伝播と沈む込みに伴う不均質構造 Seismic wave propagation in the heterogeneous structure associated with the subducting Philippine Sea Plate

武村 俊介^{1*}
TAKEMURA, Shunsuke^{1*}

¹ 横浜市立大学
¹Yokohama City University

はじめに

フィリピン海プレートが沈み込む西南日本で発生するスラブ内地震の観測波形を詳細に調べると、直達PおよびS以外に多様な後続層が観測される (e.g., Ohkura, 2000; 三好・石橋, 2007; Hayashida et al., 2010)。直達波と比べ後続層はより広範囲を伝播するため、フィリピン海プレートとその周辺の不均質構造の影響を強く受けていると考えられる。そこで、これらの後続相の特徴と地震動シミュレーションの結果を用いて、後続相の成因および伝播特性とフィリピン海プレートの沈み込みによって発達した不均質構造の関係を明らかにする。

スラブ内地震の観測波形の特徴

2004年9月21日に広島県南部深さ50kmで発生したスラブ内地震(Mw 4.2)の波形を前弧(四国・紀伊半島)と背弧(中国地方)に分けてHi-net速度波形から3成分のペーストアップを作成した。前弧側では明瞭な後続相は見られず、フィリピン海プレートが浅い四国において紡錘形のS波が観測された。これは浅部海洋性地殻の不均質構造の影響を受けているものと考えられる。一方、背弧側では既往研究で指摘されるような後続相が多く観測された。震央距離150km以上でpPmP、sPmPやsSmSなどのMoho面での反射波が明瞭に見られ、特にsSmSは直達S波よりも振幅が大きく効率的に遠方まで伝播している。

3次元差分法による地震動シミュレーション

JIVSM(Koketsu et al., 2008)による層構造モデルを仮定し、3次元差分法による地震動シミュレーションを行った。計算領域は中国・四国地方を含む512km×320km×80kmの領域で、dx=dy=0.25km、dz=0.2kmで離散化し、1.5Hzまでの地震動を計算した。

計算結果においても明瞭な後続相が確認でき、JIVSMによるMohoおよびプレート上面形状は概ね妥当であるといえる。しかし、sSmSの振幅が直達Sと同程度、前弧側のS波が紡錘形でないなど、観測波形の特徴を完全には再現出来ていない。

沈み込むフィリピン海プレートからの脱水により、深さ30-50kmのマントル内に低速度異常(LVA)が形成されることが指摘されている(e.g., Hirose et al., 2008)。そこで、計算モデルにLVAを取り入れ、地震動シミュレーションを行った。LVAを取り入れたことで震源域とマントルのインピーダンスコントラストが小さくなり、S波が効率よく鉛直方向へ伝播し、観測波形と整合的な大振幅のsSmSを再現することに成功した。

発表では上記に加えて、海洋性地殻を伝播するトラップ波の伝播特性についても着目し、スラブ内地震による地震波伝播とフィリピン海プレート周辺の不均質構造について議論する。

謝辞

防災科学技術研究所のHi-netの速度波形記録およびF-netのCMT解を使用させていただきました。数値シミュレーションには東京大学地震研究所 地震火山情報センターの計算機システムを利用しました。

キーワード: 地震波伝播, スラブ内地震, フィリピン海プレート, 地殻構造, 地震動計算

Keywords: Seismic wave propagation, intraslab earthquake, Philippine Sea Plate, crustal structure, numerical simulation

2014年に発生した長野県北部の地震後に見られる速度構造変化 Temporal velocity changes after the 2014 northern Nagano earthquake, central Japan

上野 友岳^{1*}; 澤崎 郁¹; 齊藤 竜彦¹; 汐見 勝彦¹; 浅野 陽一¹
UENO, Tomotake^{1*}; SAWAZAKI, Kaoru¹; SAITO, Tatsuhiko¹; SHIOMI, Katsuhiko¹; ASANO, Youichi¹

¹ 防災科研

¹NIED

近年、防災科研 Hi-net を始めとする高密度かつ高精度な地震観測網で得られた観測データを対象に、雑微動の自己相関関数を用いた地震波干渉法解析が精力的に実施されている。これまでの地震波干渉法解析により、大規模な地震の発生前後や火山活動と関連する活発な群発地震活動の際に、震源域周辺の地震波速度構造が明瞭に低下することが報告されている。しかし、このような速度低下がなぜ発生するのか、速度低下は大規模な地震の発生に対して普遍的な現象なのかどうかなど、未解明な点が多い。本研究では、2014年11月22日に発生した長野県北部の地震 (Mj6.7) について、震源域周辺の Hi-net 観測点に雑微動を用いた地震波干渉法を適用した結果を報告する。

解析には、2014年長野県北部の地震の震源域およびその周辺に位置する Hi-net 12 観測点のデータを使用し、地震波干渉法解析を行った。うち6観測点は、糸魚川 - 静岡構造線周辺の地震活動の詳細を把握するために、文部科学省の「糸魚川 - 静岡構造線断層帯における重点的調査研究」により整備された簡易型の Hi-net 観測点であり、深さ約 50 m の観測井の孔底に固有周期 1 秒の 3 成分高感度速度型地震計が設置されている。干渉法解析で用いる自己相関関数 (ACF) の計算には 1 時間の連続波形記録に 1?3Hz のバンドパスフィルターをかけたのち、振幅値を 1 ビットに規格化した波形を用いた。また、ACF の各ラグ時間での変化を速度構造の変化によるものと仮定し、ストレッチング法を用いて速度構造の変化を推定した。

震源域近傍に位置する N.HBAH, N.HKKH (簡易型), N.OTNH (簡易型) の 3 観測点では、地震後に 1 % 以上の明瞭な速度低下が見られた。加えて、震源域から 15km ほど北側にある N.IGWH, および北東側にある N.MKGH でもそれぞれ 0.5 % および 1.5 % 程度の速度低下が見られた。一方、震源域より 15km ほど南側あるいは南東側にある観測点では明瞭な速度低下は見られなかった。地震発生後の速度低下の要因を調べるため、各観測点での PGA, PGV, ボアホール観測点のサイト増幅特性、傾斜記録および想定されている震源断層から推定できる体積歪変化との比較を行ったが、速度低下との明瞭な関連性は見られなかった。また、地震発生後に関して、N.OTNH を除く 4 観測点では 2 ヶ月強で 50 % 程度まで速度低下が回復しているが、N.OTNH 観測点ではほとんど回復していないことが分かった。

キーワード: 2014年長野県北部の地震, 地震波干渉法, 自己相関関数, 速度低下, Hi-net

Keywords: a large earthquake, seismic interferometry, auto correlation functions, velocity reductions, Hi-net

脈動記録を用いた霧島山の表面波速度構造推定の試み Subsurface velocity structure beneath Kirishima volcanoes inferred from ambient seismic noise tomography

長岡 優^{1*}; 西田 究²; 青木 陽介²; 武尾 実²; 大倉 敬宏³; 吉川 慎³
NAGAOKA, Yutaka^{1*}; NISHIDA, Kiwamu²; AOKI, Yosuke²; TAKEO, Minoru²; OHKURA, Takahiro³;
YOSHIKAWA, Shin³

¹ 気象庁気象研究所, ² 東京大学地震研究所, ³ 京都大学火山研究センター

¹MRI, JMA, ²ERI, Univ. Tokyo, ³AVL, Kyoto Univ.

2011年1月に噴火した霧島山新燃岳については、地殻変動の圧力源が新燃岳の北西5 km、深さ約8 kmの位置に検出され、噴火に関わるマグマだまりであると考えられている(Nakao et al., 2013)。しかし、このマグマだまりを地震学的手法によってイメージングした研究例はまだない。複数の手法によりマグマだまりの位置を推定できれば、その存在がより確からしくなる。また、詳細な地震波速度構造を求めることにより、霧島山のマグマ供給系を解明することが期待される。

本研究では、地震波干渉法により霧島山周辺の観測点間を伝播する表面波を抽出し、表面波位相速度トモグラフィーによって上部地殻の位相速度構造を推定することで、マグマだまりのイメージングを試みる。地震波干渉法は脈動などのランダムな波動場から観測点間の地震波伝播を抽出する手法であり、局所的な構造の推定に適している。

霧島山周辺の38観測点(東大地震研、京大火山研究センター、防災科研、気象庁)の上下動成分で記録された2011年4月~2013年12月の脈動記録を用いた。まず脈動記録の相互相関関数を計算することにより、観測点間を伝播するRayleigh波を抽出した。次に、SPAC法により分散を測定し、解析領域全体の平均構造に対応する分散曲線とした。様々な周波数帯において、パスごとに平均構造に対する走時異常を測定した。

霧島周辺の観測点間を伝播するRayleigh波は、0.1 Hzで位相速度約2.7 km/s、0.8 Hzで約1.7 km/sという分散性を示した。この平均構造に対して各パスの走時異常を測定すると、周波数帯によらず、霧島山の山体内は周囲に比べて低速度という大局的な傾向がある。また、マグマだまりがあると考えられている領域の浅部(地表から数km程度)は比較的高速度となっている。今後は、各パスの走時異常を用いて、表面波位相速度トモグラフィーにより速度構造を推定する。

キーワード: 霧島山, 表面波速度構造, 脈動記録

Keywords: Kirishima volcanoes, subsurface velocity structure, ambient seismic noise tomography

富士山の固有振動特性の評価と火山モニタリングへの応用可能性に関する研究 Study on vibrational characteristics of Mt.Fuji for applicability of monitoring volcanic activity

小嶋 薫^{1*}; 山中 浩明¹; 地元 孝輔¹; 佐口 浩一郎¹; 山田 伸之²

KOJIMA, Kaoru^{1*}; YAMANAKA, Hiroaki¹; CHIMOTO, Kosuke¹; SAGUCHI, Koichiro¹; YAMADA, Nobuyuki²

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科, ² 福岡教育大学

¹Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, ²Fukuoka University of Education

富士山は、1707年の宝永噴火以来、約300年平穏を保っている。しかし、その平均噴火間隔は120年程度であるため、長期予測の観点からはいつ噴火してもおかしくない時期に達している。噴火した場合、その経済的・社会的影響は計り知れず、噴火を予知することが火山防災を検討する上で大変重要になってくる。

本研究では、富士山の活動のモニタリングの方法として、建物などの振動特性評価に用いられている、常時微動測定に基づく手法を火山に適用することを試みた。まず、富士山において微動観測を実施した。観測は2012年8月6日から9日に実施し、富士山の南斜面において、2合目及び5~10合目の計7点で同時観測を行った。観測には、3成分加速度計とデータロガーを用いた。得られた観測記録からスペクトル解析を行った結果、NS'成分では0.21Hz、EW'成分では0.20Hzで卓越振動数が確認できた。また、卓越振動数における振動モード形や卓越振動数付近の周波数帯における相互相関関数からは、6合目を境に振動が変化していることが示唆された。これは、6合目以下では低次モードよりも高次モードの影響が大きくなっていることが起因していると考えられる。

固有値解析では、数値標高モデルデータを用いてモデルを作成して解析を行った。その結果、1次固有振動数は0.22Hzとなり、観測結果とほぼ同じ結果が得られた。このことから富士山の1次固有振動数は0.20~0.22Hzであると推定できた。また、マグマを考慮したモデルで固有値解析を行った。その結果、振動モード形の変化または高次モードの寄与率の変化からマグマの貫入を検知できる可能性が示された。しかし、そのためには観測で正しく固有振動数を把握できるほどの精度が求められる。また、火山モニタリングへ向け現実的に評価するためには、マグマの位置や大きさ、物性等さらなる検討が必要である。

本研究で観測を行うにあたり、観測に参加していただいた方には多大なるご協力をいただきました。また、山小屋の方々にも大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

キーワード: 富士山, 振動特性, 火山, 微動観測

Keywords: Mt.Fuji, vibrational characteristics, volcano, microtremor observation

地震波の減衰がS波偏向異方性に及ぼす影響 Effect of seismic attenuation on S-wave polarization anisotropy

小田 仁^{1*}
ODA, Hitoshi^{1*}

¹ 岡山大学 理学部
¹ Okayama University

1. はじめに

異方性弾性体を伝わるS波のradial (R)成分とtransverse (T)成分の間には位相のずれが生じる。同様に、非弾性媒質中を伝わるS波のR, T成分の位相にずれが生じるならば、非弾性・異方性媒質を伝わるS波の偏向異方性が、媒質の非弾性効果によって影響を受ける可能性がある。そこで、これを確かめるために、非弾性・異方性水平成層構造に平面P波が入射したときのレシーバ関数を計算し、それに現れるPs変換波の偏向異方性に減衰が及ぼす影響について調べた。

2. 非弾性・異方性水平成層速度構造

半無限弾性体の上に二つの非弾性層が水平に重なる三層構造を仮定した。二つの表層は、水平面内に六方対称軸を持ち、対称軸は地表から1番目の層で北から35度、2番目の層で65度の方角を向いているものとした。また、3番目の層である半無限媒質は、完全弾性体で異方性は無いものとした。第1層、第2層の厚さは35kmとし、各層のP波、S波の異方性の大きさにはそれぞれ2%、5%とした。また、P波、S波の減衰に関する無次元量 Q_p 、 Q_s は第1層で50、25、第2層で100、50とした。各層の等方性P波、S波速度及び密度に地殻・上部マントルの代表的な値を与えた。

3. P波レシーバ関数の計算

非弾性層の弾性率を六方晶系の弾性率に Q_p 、 Q_s を組み込んだ複素弾性率で表し、平面P波が入射角10度で基盤から非弾性・異方性水平速度構造に入射したときの応答関数を、入射波が伝播する方位を変化させて計算した。応答関数の計算には層行列法(Crampin, 1970)を用いた。この応答関数を使って、P波レシーバ関数を計算した。レシーバ関数の計算には、water level法(Langston, 1979)を用いた。

4. 結果

層内に減衰が有る場合と無い場合のレシーバ関数波形を比較した。両方のレシーバ関数には、層境界面で発生したPs変換波が現れた。減衰が有る場合のPs変換波の波形は、それが無い場合の波形よりも短周期成分が取り除かれて、波形が滑らかになった。また、非弾性による波動の減衰のために、Ps変換波の振幅が小さくなることも確認した。層境界面で発生したPs変換波に剥ぎ取り解析(Oda, 2011)を行って、二つの異方性層の六方対称軸の向きや異方性の強さを見積った。得られた六方対称軸の向きは、減衰が有る無しにかかわらず、速度モデルに与えた対称軸の向きと概ね一致した。また、解析より得られた異方性の強さも、速度構造モデルから予測される強さと大体一致した。このことは、地震波の減衰が地震波異方性の測定に大きな影響を及ぼさないことを意味する。

キーワード: 地震波の減衰, S波偏向異方性
Keywords: seismic attenuation, S-wave polarization anisotropy

地震波インターフェロメトリを用いたVSP測定配置変換と減衰評価 Q estimation by transforming VSP measurement configuration with seismic interferometry

松島 潤^{1*}
MATSUSHIMA, Jun^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹ Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

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 obtaining reliable attenuation estimates have not yet been established. The combined use of velocity and attenuation data reduces the uncertainty in characterizing such conditions and properties. Although Vertical seismic profile (VSP) measurement is considered to be best suited for attenuation studies and the spectral ratio method is a popular means of measuring seismic attenuation, this method is not stable because it is strongly subject to the variation of the S/N in the spectra. In the present paper, we propose attenuation estimation methods for VSP data by combining seismic interferometry and a robust attenuation estimation method developed for sonic waveform data. Seismic interferometry allows VSP data to be converted from the VSP configuration to the sonic logging measurement configuration. Then, we can apply the robust attenuation estimation method developed for sonic waveform data to the converted VSP data. We adopt two different types of seismic interferometry, one based on deconvolution interferometry and one based on cross-correlation interferometry. By applying the proposed methods to synthetic and field VSP data, we demonstrate the advantages of the proposed methods over the conventional spectral ratio method. For the case without noise, we demonstrate the applicability of deconvolution interferometry and the incompleteness of cross-correlation interferometry for attenuation estimation. The application of cross-correlation interferometry cannot provide absolute attenuation but can provide relative attenuation from the slope information of the attenuation results curve. The bias of cross-correlation interferometry is due to the incorrectness of the amplitude information, that is, the phase information estimated from cross-correlation interferometry is correct, whereas the amplitude information is not adequate for attenuation estimation. In the case of the application of cross-correlation interferometry, we have also pointed out the relationship between the magnitude of attenuation and the biased attenuation results. For the case with random noise, deconvolution interferometry does not have an advantage over the conventional spectral ratio, whereas cross-correlation interferometry is less sensitive to random noise than the application of deconvolution interferometry and the conventional spectral ratio method. This is because a cross-correlation operation improves the S/N ratio, i.e., not only the cross-correlation between random noises but also the cross-correlation between signal events and random noise is ideally zero, whereas the cross-correlation between signal events is enhanced. Sensitivity tests on borehole irregularities, such as unnecessary residual events after wavefield separation, also reveal the advantage of the proposed methods using deconvolution interferometry over the conventional spectral ratio method. The inverted attenuation results from field data obtained by deconvolution interferometry do not completely correlate with those obtained by the spectral ratio method, except for the high-attenuation zone. The difference between these inverted attenuation results might be the difference in sensitivity to borehole irregularities, such as unnecessary residual events after wavefield separation. Furthermore, the difference in quality and resolution among the inverted attenuation results obtained by cross-correlation interferometry is relatively small compared to the two other cases. This might be due to the lower sensitivity of cross-correlation interferometry to noise.

キーワード: 地震波インターフェロメトリ, 地震波減衰評価, VSP データ
Keywords: seismic interferometry, seismic attenuation estimation, VSP data

立山火山下における散乱減衰と内部減衰の推定 Separation of scattering loss and intrinsic absorption under Tateyama volcano

岩田 晃治^{1*}; 川方 裕則¹; 土井 一生²
IWATA, Koji^{1*}; KAWAKATA, Hironori¹; DOI, Issei²

¹立命館大, ²京大防災研

¹Ritsumeikan Univ., ²DPRI, Kyoto Univ.

はじめに

立山火山(弥陀ヶ原火山)は、飛騨山脈立山連峰(富山県南東部)に存在する活火山である。現在のこの火山の活動は水蒸気、火山性ガスの噴出などは認められるものの比較的静穏である。また、気象庁によると、この火山において溶岩の噴出を伴った噴火活動は有史以来確認されていない。立山火山あるいは飛騨山脈を対象として行われた研究は過去にいくつかあり、その1つである Katsumata et al. (1995) では臨時の観測点群を飛騨山脈の北部に並べ、P波のコーダ部分を使用することで減衰領域の推定を試みている。この研究の結果、立山火山近傍の槍ヶ岳、乗鞍岳、焼岳の地下5 km~15 km付近に強減衰領域の存在が示唆され、また同時に低速度領域、低密度領域の存在も示唆されている。岩田ほか(2014)は、二重スペクトル比の形状の比較から減衰領域の推定を行い、立山火山の南あるいは南東に南北に細長い形状の強減衰領域が存在すること、そのQ値の強さはおおよそ50~200程度であることを示した。

地震波の減衰は、散乱減衰と内部減衰の2つに大別することができる。散乱減衰は地球内部の不均質性によって地震波が散乱する現象である。一方、内部減衰は、地震波動のエネルギーが摩擦などによって主として熱エネルギーに転化する現象である。火山地帯では周囲よりも地震波速度が遅く不均質であるマグマだまりの影響などにより散乱減衰、内部減衰がともに強くなることが知られている。本研究では立山火山周辺を対象として比較的静穏な火山地帯の局所的な地域における散乱減衰、内部減衰の推定を行う。

手法・データ

散乱減衰と内部減衰が地震波形に与える相対的な寄与は時間経過とともに変化する。散乱減衰の場合、波が媒質中の散乱体によって散乱されるために着震時が遅れるとともに初動が弱くなり、コーダ波が形成される。そのため震源から出た地震波のエネルギーの一部がコーダ波に分配され、直達波の振幅は減衰するが、波のエネルギーが広い時間範囲に分布するだけで、理想的な媒質の場合には、無限時間分を合計した地震波動のエネルギーが失われることはない。一方、内部減衰は、地震波動のエネルギーが熱エネルギーなどに転化されるので、地震波動のエネルギーは無限時間分積算しても失われる。

散乱減衰パラメータと内部減衰パラメータの同時推定は、複数のタイムウィンドウのエネルギー密度の積分を計算するMLTW(Multiple Lapse Time Window)法を用いて行われている(e.g. Fehler et al., 1992; Hoshiba, 1993; Carcole and Sato, 2009)。本研究ではMLTW法を参考に、地震波動のエネルギー積分の値を輻射伝達理論の近似解析解(Paasschens, 1997)のものと比較し、観測値をもっともよく説明する散乱減衰、内部減衰を求める。

解析対象とした地震は、2012年1月から2013年12月の間に発生した、立山火山からの震央距離が70 km~140 km、M 2.5以上、震源深さ30 km以浅のものである。ただし、使用観測点でP波、S波の主要部分のS/N比が十分大きい地震のみを解析に使用した。地震波形は立山近傍に位置する5つのHi-net観測点で記録されたものを使用した。波形には1-2, 2-4, 4-8, 8-16 Hzのバンドパスフィルタをかけたのちに、三成分の二乗平均を取り、S波到達時から複数のタイムウィンドウでエネルギー積分を行い、規格化した。Hoshiba(1993)やCarcole and Sato(2009)ではタイムウィンドウはS波到達時から15秒区切りで3つ取られている。本研究では波形を考慮してタイムウィンドウの取り方を変え、S波到達時の誤差の影響に関しても重ねて検討し、散乱減衰と内部減衰を推定する。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所のHi-net高感度地震観測網の波形データおよび気象庁の一元化震源データを使用しました。ここに記して感謝申し上げます。

キーワード: 立山火山, 散乱減衰, 内部減衰, マルチタイムウィンドウ法
Keywords: Tateyama volcano, Scattering loss, Intrinsic absorption, MLTWA

Hi-net データを用いた脈動実体波成分の解析 Body wave microseisms from a distant storm revealed by Hi-net data

西田 究^{1*}
NISHIDA, Kiwamu^{1*}

¹ 東大地震研
¹ERI, Univ. of Tokyo

地動の脈動の存在自体は1940年代の昔から知られているが [e.g. Gutenberg, 1947]、その励起の問題は古くて新しい問題である。励起源が海洋波浪であることは既に確立されており、その励起の特徴から大きく2つに分類されている。1つ目は、primary microseisms (以後 PM) と呼ばれる約 0.07 Hz の特徴的な周波数を持つ振動である。この周波数が海洋波浪の特徴的な周波数と対応している事と Love 波の振幅が卓越している事から、海岸線付近の斜面に打ち寄せる海洋波浪が励起源だと考えられている [Darbyshire and Okeke, 1969]。2つ目は secondary microseisms (以後 SM) と呼ばれ、海洋波浪のちょうど倍の卓越周期 (0.15 Hz) をもつ。海洋波浪の非線形効果が励起に寄与していると考えられている [Longuet-Higgins, 1950]。

脈動の励起源は浅いため、表面波が卓越していることがよく知られている。しかし近年、遠地の嵐が励起した脈動の実体波成分が報告され注目され始めている [e.g. Gerstoft et al. 2006, Landes et al. 2010]。先行研究では数 1000km 以上離れた嵐が励起した P 波が観測可能なことが示されており、back-projection 法により励起源の空間分布が推定され議論されている。これらの研究では上下動成分の解析に主眼が置かれることが多いが、水平動も励起に関して多くの情報を持っていると考えられるため、水平動を含めアレー解析を行った。イベントとして特に 2014/12/9 に大西洋に発生した "weather bomb" を選んだ。

解析には、構造の1次元性が高い中国地方の観測点 (Hi-net 速度計 3 成分 202 点) に注目した。機器応答は時間領域で補正し [Maeda et al. 2011]、収録機器起源のコヒーレントなノイズは予め差し引いた [Takagi et al. 2015]。これら "広帯域化" した速度計を用い、2つの周波数帯域 (0.07, 0.15 Hz,) で波数・周波数スペクトルを計算した。

0.15 Hz (SM の帯域) では、上下動・radial 成分ともに slowness 0.05 [s/km] 程度の P 波が北から到来している様子が見え、はっきりと見て取れる。また、transverse 成分では実体波に対応する波は確認できず、近地で励起されたと思われる表面波が卓越していた。一方 0.07 Hz では O 波を含め実体波は見取れない。上下動と radial 成分には weather bomb 起源と思われる、Rayleigh 波が卓越しており、過去の研究と調和的である [Matsuzawa et al., 2011]。一方、weather bomb 起源の Love 波は検出できなかった。これは Love 波の方が散乱が強いことが原因かもしれない。PM 帯域で P 波が観測されないという観測事実は、PM の力源が海底面の shear traction で近似できるという観測事実 (Nishida et al. 2008) と調和的である。これらの解析結果はまだ暫定的なものであるため、今後解析を進めより定量的に議論していく予定である。

Keywords: ambient noise, microseisms

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 Evaluation of long-period ground motion generated from intraplate earthquakes around Ibaraki and Fukushima prefectures

藤原 了^{1*}; 桐田 史生²; 河路 薫¹; 山崎 敏彦²; 瓜生 満²; 安田 昌宏²
FUJIHARA, Satoru^{1*}; KIRITA, Fumio²; KAWAJI, Kaoru¹; YAMGAZAKI, Toshihiko²; URIYU, Mitsuru²; YASUDA, Masahiro²

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

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0: 以下、「3.11 地震」という。) の発生以降、同年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震 (Mj7.0: 以下、「4.11 地震」という。) の他、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って、茨城県沿岸域の幾つかの地震観測点において長周期成分を有する地震動が観測された。3.11 地震以前、茨城県沿岸域については目立った内陸地殻内地震が発生しておらず、これらの地震による長周期地震動の発生要因や、その地震動特性については未知の領域が多い。したがって、これら内陸地殻内地震によって観測された地震観測記録を用いて長周期地震動の発生要因やその地震動特性を的確に把握することは、茨城県沿岸域における地震動評価を高度化させることができ、この地域における建家及び地盤の合理的な耐震安全性評価に繋がるものである。

本研究において、長周期地震動の発生要因として茨城県沿岸域の基盤構造に着目した。まず、地震調査研究推進本部による地盤構造情報を基本とした茨城県沿岸域における三次元地盤構造モデルを作成し、茨城県及び福島県の県境付近で発生した中規模の内陸地殻内地震について、有限要素法を用いた波動伝播シミュレーション解析を実施した。地盤構造モデルの最適化にあたっては、茨城県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 (以下、「原子力機構」という。) の茨城地区各サイト観測点) における記録を用いた。これらの地震観測点について、平行成層を仮定した一次元地盤構造モデルと、作成した三次元地盤構造モデルとを比較・分析することによって、茨城県沿岸域における長周期地震動の生成要因について検討した。検討の結果、内陸地殻内地震による長周期地震動について、一次元地盤構造モデルでは表現できなかった地震動が、三次元地盤構造モデルを用いることで概ね表現できることを確認でき、KiK-net 観測点の硬質岩盤による地震観測点と、原子力機構の地震観測点とを比較・分析することによって、長周期地震動の発生要因が地震観測点周辺の基盤構造に由来することを把握した。

さらに、最適化された三次元地盤構造モデルを用いて、規模の大きな実地震である 4.11 地震の震源断層モデルを設定し、茨城県沿岸域の地震観測点における再現解析を行うことで、三次元地盤構造モデルによる地震動評価の妥当性を確認した。結果として、茨城県沿岸域の地震観測点における地震観測記録を概ね再現することを確認することができ、三次元地盤構造モデルを活用することが、この地域における地震動評価において有用であることを把握した。以上のように、本発表においては、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して、評価・分析した結果を報告する。

キーワード: 三次元地盤構造, 長周期地震動, 福島県浜通り地震, 内陸地殻, FEM 波動伝播
Keywords: 3D structure, Seismic wave propagation, Hamadori, FEM simulation

西南日本および南海トラフ周辺のS波減衰構造 S-wave attenuation structure in southwestern Japan and Nankai trough

高橋 努^{1*}; 尾鼻 浩一郎¹; 山本 揚二郎¹; 海宝 由佳¹; 仲西 理子¹; 小平 秀一¹; 金田 義行²
TAKAHASHI, Tsutomu^{1*}; OBANA, Koichiro¹; YAMAMOTO, Yojiro¹; KAIHO, Yuka¹; NAKANISHI, Ayako¹;
KODAIRA, Shuichi¹; KANEDA, Yoshiyuki²

¹ 海洋研究開発機構, ² 名古屋大学

¹JAMSTEC, ²Nagoya University

地殻や最上部マントル中を伝播する数 Hz 以上の地震波は伝播距離の増大とともに波形が崩れ複雑な波群を示す。このような波群の特徴を理解するには、地下のランダム速度不均質や内部減衰構造を詳細に解明することが重要である。我々はこれまで、直達 S 波の波形エンベロープに着目した研究によりランダム速度不均質と S 波減衰の三次元構造を求める手法を提案してきた (Takahashi et al. 2009; Takahashi 2012)。本研究では Takahashi (2012) の手法を西南日本周辺の陸上観測点および海底地震計で得られたデータに適用し、西南日本と南海トラフ周辺における減衰構造を推定した。解析には、(独) 防災科学技術研究所の Hi-net および F-net の速度波形記録と、(独) 海洋研究開発機構が自然地震観測用に設置した海底地震計の記録を用いた。海底地震観測の一部は、文部科学省の受託研究「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」の一環として実施されたものである。得られた速度波形記録の水平動 2 成分から 4-8Hz, 8-16Hz 16-32Hz の RMS エンベロープを合成し、直達 S 波の最大振幅を解析に用いた。不均質媒質中の多重前方散乱によって生じる見かけの振幅減衰は、この地域におけるランダム速度不均質構造 (Takahashi et al. 2014, AGU Fall meeting) を用いて評価した。

解析の結果、沈み込むフィリピン海プレート上面付近に周囲に比べ高減衰の領域が広く分布し、深さ 20km 以浅では遠州灘から日向灘の南海トラフ全域で高減衰域が見られた。プレート上面付近の 1/Q は深さの増大とともに小さくなり、深さ 40km 付近では四国西部付近でのみ高減衰を示した。西南日本陸側では第四紀火山周辺や大阪平野周辺に周囲に比べ高減衰域の領域が分布することが分かった。大阪平野周辺のやや高減衰域は地殻から沈み込むフィリピン海プレートの上面付近まで広がる。この地域では、非火山的な温泉水の分析からスラブ起源の流体の存在が示唆されており (Kusuda et al. 2014)、これらの流体と関連した構造である可能性が考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 減衰構造, ランダム媒質

Keywords: Nankai trough, attenuation structure, random media

海底地震計記録を用いた Po-to-s 変換波の抽出 Extraction of Po-to-s converted waves from OBS records

利根川 貴志^{1*}; 塩原 肇²; 一瀬 建日²; 杉岡 裕子¹; 伊藤 亜妃¹; 竹尾 明子³; 川勝 均²; 歌田 久司²
TONEGAWA, Takashi^{1*}; SHIOBARA, Hajime²; ISSE, Takehi²; SUGIOKA, Hiroko¹; ITO, Aki¹;
TAKEO, Akiko³; KAWAKATSU, Hitoshi²; UTADA, Hisashi²

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学地震研究所, ³ 北海道大学

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³Hokkaido University

Po/So wave has been frequently observed by ocean bottom seismometers (OBSs) at frequencies higher than 2 Hz with long wave duration, e.g., a few hundred seconds. These waves are primarily generated by earthquakes within subducting slabs, and propagate along the mantle in the oceanic plate for long distances due to scattering effects. With propagating within the mantle, a part of Po and So wave energies goes upward through the oceanic crust and sediment from the mantle, and are observed at the seafloor. This implies that P-to-s and S-to-p converted waves should be generated at the Moho and basement below the observation sites in the case that the impedance contrast at the boundaries is large. Here, in order to extract such P-to-s (Pos) converted phases from Po coda waves, we deconvolved records in the vertical component from ones in the radial component for Po coda portion, i.e., receiver function (RF). If such converted waves are extracted, it would greatly contribute to understand in details seismic structure for oceanic crust and sediments.

We used records of earthquakes during 2010-2014 with magnitudes greater than 5.5 and epicentral distances less than 30°, which were observed at 18 broadband OBSs deployed by NOMan project. We selected Po records with good S/N, and hand-picked their arrival times. For deconvolution, the time window was set to be -2 ~ 25 s from the arrival time of Po wave. The used frequency was 2-5 Hz. As a result, we totally collected 1063 traces from 233 events.

RF traces showed clear Ps converted phases from the basement and Moho. In addition, they showed PwPs from the basement and Moho. Here, PwP is the first water reverberation, and PwPs is P-to-s reflected wave from interfaces below the seafloor. At the seafloor, upgoing P wave incidence mainly generates upgoing transmitted P wave and less downgoing reflected P wave. As a result, P-to-s converted waves associated with PwP are often emerged in the RF traces in the seafloor observation.

Since the location of OBSs deployed by NOMan project is good for collecting earthquakes from the Aleutian, Kuril, Japan, Izu-Ogasawara, and Mariana trenches, the back azimuth coverage of Po wave is excellent. Also, since higher frequency components are enough in Po coda waves, RF traces showed clear converted phases, which enable us to investigate seismic structure of oceanic crust and sediment in details.

地震波エネルギーの空間分布からの散乱係数と内部減衰の推定 (3) On estimation of scattering coefficient and intrinsic absorption from spatial distribution of seismic energy (3)

佐々木 悠人^{1*}; 河原 純¹; 齋藤 竜彦²; 江本 賢太郎³
SASAKI, Yuto^{1*}; KAWAHARA, Jun¹; SAITO, Tatsuhiko²; EMOTO, Kentaro³

¹茨城大学, ²防災科学技術研究所, ³東北大学

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

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 法 (Fehler et al., 1992; Hoshiya, 1993) 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。我々はこの対して、各時刻での地震波エネルギー密度の空間分布を「空間窓」で積分した量(「見かけのエネルギー」)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(齋藤ほか, 2013, 日本地震学会秋季大会)。前回(齋藤ほか, 2014, 日本地震学会秋季大会)、この手法を Hi-net で得られた中国地方の地震の観測記録に適用し、西南日本の平均的な S 波 (1 - 2 Hz) の散乱係数として約 0.002 km^{-1} 、内部減衰の Q^{-1} 値として約 0.0075 という結果を得た。しかし、観測された見かけのエネルギーは複雑な時間変動を示し、その詳細は輻射伝達理論で十分に再現できなかった。

我々はこの不適合が、理論解の計算に用いる 1 次元 S 波速度構造モデルの不適切さによると考えた。そこで、Matsubara and Obara (2011) による 3 次元地震波速度構造モデルに基づき、中国・四国地方の平均的な 1 次元 S 波速度構造を求め、これを理論解の計算に用いた。また、これまで波面の拡大に比例して拡大する空間窓を用いていたが、これを固定幅の空間窓に変更した。その結果、見かけのエネルギーの観測値への理論値の適合度が大きく改善された。今後、改善された手法に基づきデータ解析事例を増やしていく予定である。

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, Earth Planets Space, 63, 663-667) 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

3次元形状を考慮した山体の振動特性に関する数値シミュレーション Simulation of three-dimensional vibrational characteristics of mountains

清水 翔吾^{1*}; 山中 浩明¹; 佐口 浩一郎¹; 小嶋 薫¹

SHIMIZU, Shogo^{1*}; YAMANAKA, Hiroaki¹; SAGUCHI, Koichiro¹; KOJIMA, Kaoru¹

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科

¹ Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Natural frequencies of soil and buildings are controlled by their physical property and regarded as one of fundamental characteristics in their vibration. We usually can identify a natural frequency from a largest peak of spectrum of vibration data. However, identification of a natural period is sometimes difficult for a building with a three-dimensionally complex shape. Kojima (2013) focused on the natural frequency of Mt. Fuji, from an analysis based on microtremor observation data and interpreted the vibration characteristics from finite element analysis[1]. However, many mountains existing in Japan have mountain-range shape such as Tateyama Mountain range and Yatsugatake Mountain. It is considered that their natural frequencies are more complex than a mountain with single-peaked shape such as Mt. Fuji.

In this research, I simulated vibration of various mountains with different shapes using finite element method (FEM). I firstly conducted FEM analysis using an elastic mountain models with simple three-dimensional shapes considering mountain range. Natural frequency for the mountain range model differs from single peak mountain model indicating large effects of three-dimensional shapes. I next conducted FEM analysis for vibration characteristics of mountain model with real shapes of Mt. Yatsugatake based on the digital elevation data. The results show that natural frequencies in long-side and short-side directions are different from each other. And vibration modes are also different between in higher and lower locations. This clearly indicated that sensor direction and installation site must be carefully oriented in a field observation of vibration in Mt. Yatsugatake.

Reference

[1] Kojima K (2013), Study on natural frequency of Mt. Fuji, Graduation thesis, Tokyo Institute of Technology

キーワード: 山体, 振動特性, 固有振動数, 振動モード, 有限要素法, 八ヶ岳

Keywords: mountains, vibration characteristics, natural frequency, vibration mode, finite element method, Mt. Yatsugatake

高層ビルの減衰特性の抽出のための逆重畳法を用いた地震波干渉法の応用 Application of deconvolution interferometry to extract quality factor of high-rise buildings

呉 浩^{1*}; 正木 和明²; 入倉 孝次郎¹
WU, Hao^{1*}; MASAKI, Kazuaki²; IRIKURA, Kojiro¹

¹ 愛知工業大学地域防災研究センター, ² 愛知工業大学都市環境学科

¹Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology, ²Department of Urban Environment, Aichi Institute of Technology

Deconvolution interferometry has been proved an effective method over cross correlation interferometry and coherence interferometry to monitor the health of buildings, extracting the shear velocity and quality factor from earthquake ground motion data or microtremor data (Snieder and Safak, BSSA, Vol. 96 (2), 2006; Nakata et al., BSSA, Vol.103 (3), 2013); Nakata and Snieder, BSSA, Vol. 104(1), 2014). Wang et al. (JAEE, Vol. 13(2), 2013) extended this method to monitor a multi-story damaged building in stricken city with microtremor by extracting the story-by-story shear velocity propagated inside the building during the 2011 Tohoku earthquake. However, the application of this method to estimating the quality factor of the buildings has not been fully investigated.

In this study, we focus on extracting the quality factor of shear waves from deconvolved waves with reference record on the ground floor. We conducted the microtremor measurement simultaneously in five floors for an hour by employing five sets of velocity seismometers with an 800 Hz record logger in several high-rise buildings being over 20 stories. The measurement is accomplished by moving four sets of equipment sequentially with one set fixed at the reference floor. The extracted quality factors of the buildings are expected to provide a reference for damping factor in the analysis of structural response.

キーワード: 逆重畳法, Q 値, 常時微動, 高層ビル

Keywords: Deconvolution interferometry, quality factor, microtremor, high-rise buildings