

非線形性振動源から放射される地震波と地震予知 Seismic waves radiated from nonlinear vibration source and prevision of earthquakes

菊池 年晃^{1*}
KIKUCHI, Toshiaki^{1*}

¹ 防衛大学
¹National defense academy

先に、震源振動をタイムリバーサルに基づいた解析法を用いて分析した。その結果から震源振動の動的モデルを提唱した。そしてそのモデルの有効性を確認した。今回はそのモデルを用いて震源の活動域の算出を試みる。

始めに、動的モデルの概要を述べる。2009年8月に駿河湾の中部で発生した地震に対して、観測点で受信したP波信号にタイムリバーサル処理を施し、震源の位置に形成されるパルス、即ち、タイムリバーサルパルスを求めた。このTRPは震源が放射する等価的な音源に相当する。求められたTRPには明確な方位依存性が存在した。この方位依存性の成因を解明するために、方位に対するTRPの周波数スペクトルを求めた。周波数スペクトルは方位角によって大きく変化した。そこで、方位角に対する最大振幅周波数の分布を求めた。その結果、方位が西から東に移動するにつれて最大振幅周波数が大きく上昇して、そして下降した。この場合の周波数上昇は音源が局所的に高速で移動したためであると考えられる。移動方向は西伊豆西、河津及び伊東方向へ集中した。

これらの観測点で受信したP波を調べると特徴ある波形が表れた。西伊豆西の受信波の先頭部が膨張していた。しかし、西伊豆西に近い伊東と河津での受信波は通常の波形であった。この様に頭部が大きくなることは活断層中での亀裂の進行速度が伝搬速度に近くなった場合に発生する。亀裂によって発生した圧力が高速で移動することにより累積的に加算される、即ち、パラメトリック効果によって生じると考えられる。西伊豆西はこの地震の特性を反映する特定点である。この観測点で受波した余震の波形は、本震以上にP波の先頭部が膨張していた。これは亀裂が断層全般に拡大したためと考えられる。一方、本震以前に発生した前兆地震でも先頭部の膨張が多く観測された。これらの結果から震源振動の動的モデルを提唱した。活断層から放射された狭角のビームが地表に達する点をパラメトリックスポット、ここで観測される頭部の増大したパルスの頭部をパラメトリックヘッドと呼ぶ。

このモデルを、2009年から2012年の間に富士山付近で発生したM5以上の4つの地震について検証する。その有効性を示した。この動的モデルは、前兆、本震及び余震に関して一貫して成立する。従って、その特性を地震予知に利用することが出来る。2009年8月に駿河湾の中部で発生した本震より前の、2008/1/26から2009/8/11までに、同じ震源域で発生したM2以上の地震は17回である。その中でパラメトリックヘッドを伴った波形は7回観測された。これらは活断層中を亀裂が高速で移動し始めた前兆を示している。従って、各活断層に固有のパラメトリックスポットで、M2程度の微弱な段階の地震波を観測して、その変化を調べることは、その後の大きな地震を予知することができると思われる。

キーワード: 震源振動, タイムリバーサル, 地震波形, 遷移放射, 地震波伝播, 地震予知

Keywords: Hypocenter vibration, Time reversal, Waveform of seismic wave, Transition radiation, Seismic wave propagation, Prevision of earthquakes

海底水圧観測で捉える津波の発生過程：固液複合シミュレーションの非圧縮性理論による解釈

Tsunami observation inside the source region: a simulation and a theory

齊藤 竜彦^{1*}

SAITO, Tatsuhiko^{1*}

¹ 防災科学技術研究所

¹ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

東日本太平洋沖で広域かつ稠密な地震津波観測網が建設中である。震源域から離れた場所で行う従来の津波観測と異なり、新しい観測網では震源域内に設置された海底水圧計を利用することで、より迅速に津波を検知することが期待されている。しかしながら、震源近くでは、地震波・海中音響波と津波が同時に現れるため、震源域内の水圧記録を使って津波規模を正確に推定するためには、海底変位、地震波、海中音響波が、海底の水圧に与える影響を正確に評価することが重要となる。本研究では、地震断層運動による海底変位・弾性波・海中音響波・津波の発生過程を、連続体の運動方程式・構成方程式に基づく数値シミュレーション (e.g. Maeda and Furumura 2013 PAGEOPH) により再現し、津波発生場における海底圧力の時空間変化の特徴を調査した。これまでの研究では、海底変動の加速度 a によって、海底には、 $p = \rho h a$ の圧力が加わるとされていたが (e.g. Filloux 1982 GRL), 本研究のシミュレーションによって、海底変動の空間スケールが短い場合、つまり、海底変位が急激に変化する箇所では、 $p = \rho h a$ の関係は成り立たなくなることを確認した。一方で、非圧縮性理論による津波発生過程の解析解 (Saito 2013 EPS) を利用することで、海底圧力と海底変動の関係を拡張できる。波数 (k) 領域のフィルタ $\tanh(kh)/kh$ を用いることで、従来のシンプルな関係式では再現出来ない、海底圧力と海底変動の関係をも含めてシミュレーション結果を忠実に再現できることを確認した。

キーワード: 津波, 断層, 地震波, 海洋音響波

Keywords: tsunami, earthquake fault, seismic wave, ocean acoustic wave

Hi-net 高密度地震観測と地震波伝播シミュレーションから見た、日本列島の地殻・マントル不均質性と近地地震波動伝播の地域性 The crust and mantle heterogeneities beneath Japanese Islands investigated by the Hi-net and wave propagation simulation

古村 孝志^{1*}
FURUMURA, Takashi^{1*}

¹ 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター/地震研究所
¹ CIDIR/ERI The Univ. Tokyo

1. はじめに

日本列島に展開された Hi-net 高感度地震観測網の地震波形データと、高分解能トモグラフィ等から推定された地震波速度・減衰モデルを用いた地震波伝播シミュレーションから、日本の近地地震波動場の地域性と不均質な地下構造との対応を詳しく評価した。

近地地震波場は、伝播経路に沿った地殻・マントルの不均質構造の影響を強く受けるが、中でも、屈折波 (Pn と Sn 相) は地殻/マントル境界 (モホ面) 近傍の速度構造に敏感である。また、短周期表面波 (Rg 波) は地表付近の低速度層の影響を受け、強い分散と減衰を起こす。そして、地殻内を広角反射して伝わる Lg 波は、地表・モホ面形状、地殻/マントルの速度コントラスト、地殻内の不均質構造・減衰構造など、地殻全体の影響を受ける。伝播特性の異なる地震波を使い分けることにより、地殻・マントルの不均質性を総合的かつ詳細な推定が期待できる。

2. データ・解析手法

日本周辺で発生した、M4-5 程度の浅い ($H < 40\text{km}$) 地震における Hi-net 観測データを用いて、各地の地震波伝播特性を評価し、特に地殻・マントル構造が大きく異なると期待される西南日本と東北日本の地震波伝播特性の違いを調べた。次に、高分解能速度構造トモグラフィ (例えば、Matsubara et al., 2008) や減衰構造トモグラフィ (関根, 2001; 中村, 2008) の結果を用いて、高周波数 ($f < 6\text{ Hz}$) 地震波伝播の 2 次元・3 次元差分法シミュレーションを行なった。1-2 Hz を超える高周波数地震動は、地殻・マントルの短波長 (< 数 km) 不均質構造により強い散乱を起こして波形の伸びや減衰を起こす。そこで、既往の研究 (Furumura and Kennett, 2005; Furumura et al., 2014 等) を参考にして、相関距離 $A_{x,y}/A_z = 10\text{km}/0.5\text{km}$ 、標準偏差 $e=2\%$ の vonKarman 型の分布関数を持つ短波長速度揺らぎをトモグラフィモデルに付加した「ハイブリッド型不均質モデル」を用いて波動伝播計算を行った。

3. 結論

Hi-net 地震観測データ解析と地震波伝播シミュレーションに基づき、近地地震波伝播の地域とその原因に関して、以下の結論を得た：

(1) 西南日本では Sn の振幅が大きい (東北日本に比べて)。その原因は、1) 西南日本のモホ面直下の最上部マントル (サブモホ) に速度勾配があり、最上部マントルを伝播する S 波が地殻内に戻り大きな Sn を作ること、2) マントルの Q_s が大きく (> 800) Sn の距離減衰が小さいことが原因と考えられる。

(2) 東北日本で Lg 波の距離減衰が大きい (西南日本に比べて)。その原因は、1) 東北地方 (特に火山地帯) の低速度の表層地盤において強い Lg?P 波変換が発生して S 波エネルギーが弱まること、2) 東北地方の背弧側 (日本海側) では地殻内の Q_s 値が小さく Lg の距離減衰が大きいこと、3) 東北地方ではモホ面の速度コントラストが小さい (V_s : $3.5/6.0\text{km/s}$) ぐ、マントルへの S 波エネルギーの散逸が起きやすいことが考えられる。

(3) 東北日本で Pg 波の振幅が大きい。その原因は、東北地方の低速度の表層の存在により、地表での P->S 変換が抑制され、P 波が地殻 (上部地殻) 内を広角反射しながら Pg 波として伝播するためと考えられる。

(4) 東北日本で短周期表面波 (Rg 波) の減衰が大きい。その原因は、1) 東北地方の低速度の表層で表面波が強い分散を起こし、波群の伸びとともに振幅が小さくなること、2) 低 Q_s の地殻 (特に表層) による短周期地震動の距離減衰が大きいことが考えられる。

アジョイントトモグラフィー法による関東平野下の三次元地震波速度構造の推定 Three dimensional seismic wave-speed structure beneath the Kanto Plain based on adjoint tomography

三好 崇之^{1*}; 大林 政行¹; 東野 陽子¹; 安藤 和人¹; 坪井 誠司¹
MIYOSHI, Takayuki^{1*}; OBAYASHI, Masayuki¹; TONO, Yoko¹; ANDO, Kazuto¹; TSUBOI, Seiji¹

¹ 海洋研究開発機構
¹ JAMSTEC

関東平野の周期5秒より長周期側の地震観測波形の再現を目的として、スペクトル要素法による理論波形計算とアジョイント法によるカーネル計算を組み合わせたアジョイントトモグラフィー法を用いて関東平野下の三次元地震波速度構造を推定した。インバージョンで使用したデータは、関東地方とその周辺で発生したM4.5以上の地震で観測された広帯域地震波形である。地震波速度構造の初期モデルは走時トモグラフィーモデル(Matsubara and Obara 2011)の三次元構造とし、理論波形を500km×450km×120kmの領域で計算した。理論波形の精度は約4秒で、シミュレーションは固体地球のみ、減衰なしで行った。理論波形と観測波形を変位波形5-20秒の帯域で比較したところ、P波部分は観測波形との一致がよいが、S波以降の波は観測波形との一致が高くないことがわかった。観測波形と理論波形の実体波部分について、相関係数が0.75以上となる区間をwindowとして抽出し、アジョイント波形を計算して(Liu and Tromp 2006)、モデルパラメータ V_p および V_s の勾配であるイベントカーネルを得た。フォワード計算とアジョイント計算はSPECFEM3D-Cartesianコード(例えばPeter et al. 2011)を用いて京コンピュータで実施した。京コンピュータにおけるオリジナルコードのピーク性能比は約5%であったが、最適化を進めることで性能は約2倍向上した。1反復には約10万CPU時間を要する。すべてのイベントカーネルを足し合わせmisfitカーネルを計算し、モデルパラメータを最急降下法によって更新した。1回の反復による更新モデルは、S波速度がやや遅くなるように修正され、更新モデルに基づいて理論波形を計算したところ観測波形の一致も改善された。

本研究は、HPCI戦略プログラム(分野3)「防災・減災に資する地球変動予測」の一部として行われました。Daniel Peter博士には貴重なコメントをいただきました。地震波形データは防災科学技術研究所広帯域地震観測網F-netの速度波形を使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 関東平野, 地震波速度構造, アジョイントトモグラフィー
Keywords: Kanto Plain, seismic wave-speed structure, adjoint tomography

高周波地震波形シミュレーションから推定されるタール火山の減衰構造と地震波動場の特性

S wave attenuation and high-frequency seismic wavefield at Taal volcano, Philippines, inferred from waveform simulations

森岡 英恵^{1*}; 熊谷 博之¹; 前田 拓人²; 前田 裕太¹
MORIOKA, Hanae^{1*}; KUMAGAI, Hiroyuki¹; MAEDA, Takuto²; MAEDA, Yuta¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 東京大学地震研究所

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

フィリピンのタール火山は世界で最も活発な火山のひとつであり、現在は40年近く噴火が起こっておらず、いつ噴火してもおかしくない状態にある。Kumagai et al. [GRL, 2014] は、高周波地震波振幅を用いた手法 (ASL 法) によって地表付近に強い減衰領域 (Q 異常領域) があることを推定した。さらに、その領域にはマグマがあり、将来その場所から噴火する可能性が示唆されている。ASL 法は、地震波が散乱の効果によって S 波が卓越し、振幅が距離のみに依存する等方輻射が成り立つという単純な仮定に基づくものである。このような仮定で推定された Q 異常領域の妥当性と高周波地震波動場の特性を調べるために、本研究では、波形シミュレーションで波動場を計算し、広い周波数帯で波形を解析した。

波形シミュレーションには Maeda et al. [BSSA, 2013] によって開発された SEISM を使用した。このプログラムは運動方程式の時間発展を差分法で解いて波動場を計算しており、時間発展は2次精度、空間微分は4次精度で差分化する。粘弾性体モデルにより3次元の Q 構造を考慮でき、また地形と3次元地下構造も考慮できる。

シミュレーションの計算範囲はタール火山を含む $13 \times 17 \times 10$ km で、空間グリッドサイズは 15 m、時間刻み幅は 0.0010 秒とした。P 波・S 波速度と密度は一定として、(1) Q 値 50 で一定の場合、(2) ASL 法で推定された Q 値 10 の異常領域を含む場合、(3) Q 異常領域を拡大した場合、(4) Q 異常領域を縮小した場合の4つについて計算した。震源位置とメカニズムは、初動走時と初動の押し引きで決められた、タール火山で起こった2つのイベント (火山島の南東部と北西部) のものを用いた。

観測波形と合成波形を比較して定量的に評価するために、各観測点において4つの周波数帯 (1-6, 3-8, 5-10, 7-12 Hz) で10秒間の平均振幅をとり残差を求めた。北西部のイベントでは、Q 異常領域を拡大した場合のみ残差が大きくなり、他の3つの場合はほぼ同じ値をとっていた。一方で南東部のイベントでは、高周波側になるにしたがって残差に違いが現れ、最も小さくなったのは ASL 法で推定された Q 異常領域の場合であった。

本研究の波形シミュレーションでは、ASL 法で推定された Q 異常領域と整合的な結果が得られた。ASL 法は散乱の効果によって S 波の等方輻射という単純な仮定が成り立つとする確率論的アプローチであるのに対し、本研究の波形シミュレーションは決定論的アプローチであるが、Q 異常領域に関する結果は等しくなった。さらに、メカニズムには複数の候補があったため、それぞれのメカニズムについて合成波形を計算し、観測波形との残差を求めたところ、メカニズムによって残差の違いがみられた。もし、観測波形で等方輻射の仮定が成り立っているとすると、どのようなメカニズムで合成波形を計算しても残差は大きく変化しないと考えられる。2つのアプローチによる Q 異常領域の結果の一致とメカニズムによる残差の違いから、観測波形は高周波側で放射パターンの崩れはあるがメカニズムの影響もある程度受けているのではないかと考えられる。

キーワード: Q 値, マグマ, ASL 法, 差分法, 放射パターン

Keywords: Q factor, Magma, Amplitude source location method, Finite-difference method, Radiation pattern

長大距離地震波動伝播シミュレーションのための地球の曲率を考慮した計算スキーム Scheme for computing seismic wave propagation in a 3D round sub-global earth model

竹中 博士^{1*}; 豊国 源知²; 中村 武史³; 小松 正直¹; 岡元 太郎⁴

TAKENAKA, Hiroshi^{1*}; TOYOKUNI, Genti²; NAKAMURA, Takeshi³; KOMATSU, Masanao¹; OKAMOTO, Taro⁴

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 独立行政法人海洋研究開発機構, ⁴ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, ²Graduate School of Science, Tohoku University,

³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁴Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

例えば日本列島全体域を地震波動伝播シミュレーションのターゲットにする場合、水平距離で約3千キロメートル、深さ方向にも数百キロメートルの大規模領域を扱う必要がある。このような広大で深い領域（ここでは「超広域スケール」と呼ぶ）をモデル化する場合、ローカルな領域の地震動シミュレーションで多用されている「平たい地球」モデルではなく、地球の曲率を考慮した「丸い地球」のモデルを採用するのが自然である。ただ、この規模の領域は、全球ではなく、球殻の一部にすぎない。従来は球殻の一部であっても球座標系 (r, θ, ϕ) を用いて解かれることがほとんどで、デカルト座標系が使われるローカルな「平たい地球」モデルの計算との間に大きなギャップがあった。これまでは計算機能力の問題もあって「丸い地球」モデルの地震波動シミュレーションと「平たい地球」モデルのシミュレーションでは異なる周波数帯をターゲットに独立に行われてきたため、そのギャップはほとんど問題にならなかった。しかし、最近の超並列スパコンに代表されるハードの進展のお蔭で、両モデルともに同じ周波数帯をターゲットにしたシミュレーションが計算機能力的には可能になりつつある。ただ、現時点では、上述のギャップによって「丸い地球」モデル（「超広域スケール」）の計算と局所的な「平たい地球」モデル（ローカルなスケールのモデル）の計算との連携は容易ではない。「超広域スケール」の計算における球座標系の利用は、小スケールの詳細な構造モデルとの階層化やマルチスケール計算には適していないためである。そこで、今回我々は、球座標系の支配方程式をローカルな疑似デカルト座標系 (x, y, z) で表現して、それを差分法で解くスキームを新たに開発した。「丸い地球」モデル用の疑似デカルト座標系の方程式は、形式的にデカルト座標系の「平たい地球」モデル用の方程式にたいへんよく似ており、「平たい地球」モデル用の計算コードの一部を書き換え・付加するだけで実装可能である。我々は、現在ローカルスケールの地震動シミュレーション等で多用されているデカルト座標系の3次元スタガード格子差分法のコードを一部書き換えるだけで、「丸い地球」モデル用の疑似デカルト座標系スキームを実装した。スキーム自身の検証には、実際の地球よりも曲率の効果が大きい、地球より半径の小さな天体における地震波動シミュレーションも予定している。

キーワード: 地震波動, シミュレーション, 差分法

Keywords: seismic wave, simulation, finite-difference method

2011年Mw9東北地震の時に房総半島南部で生じたハイパーレゾナンス Hyper resonance in the southern part of the Boso Peninsula for a period of 15 s to 20 s

川崎 一朗^{1*}; 西村 卓也²; 石井 紘¹; 浅井 康広¹
KAWASAKI, Ichiro^{1*}; NISHIMURA, Takuya²; ISHII, Hiroshi¹; ASAI, Yasuhiro¹

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, ² 京都大学防災研究所
¹Tono Research Institute of Earthquake Science, ²Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

川崎・他 (2014) は, 試行錯誤によって, 2011年東北地震の時の GEONET の GPS 1秒サンプリング変位記録の波形合わせを行い, 次の結論を得た。

記録上の最も卓越的なフェイズは, 東北地方の U_r 成分記録に顕著に表れる, 幅ほぼ 100 秒, 振幅数 m の, Mw9 のモーメントレイト関数そのまま伝わってくるような主パルスで, 気象庁発震時からほぼ 35 秒後に初期破壊が始まる単純な長方形の低角逆断層型断層モデルで大勢を説明できる。

2番目に卓越的なのは, U_ϕ 成分記録に顕著な, 幅ほぼ 30 秒, 振幅最大 70cm の, 片振れの副パルス (SH波) で, 特に関東地方で目立つ。Fig.1 は, 南関東の 5 度間隔のレコードセクションで, 経過時間 65 秒と 95 秒の補助線の間が副パルスである。副パルスの大勢は, 主地震からほぼ 30 秒後, 主地震の破壊過程が進行中に, 震央 (E142.5, N38.5) から破壊を始め, Mw8.4 に匹敵するモーメントを解放した, 走向 N140E, ほぼ垂直断層面の左横ずれ断層型のサブイベントによって説明できる。彼らはこのサブイベントをスーパーサブイベントと呼んだ。ただし, 試行錯誤のため, 波形の一致は完全ではなく, パラメーター間のトレードオフもあり, パラメータの曖昧さは大きい。

2. 周期 15 秒~20 秒のハイパーレゾナンス

Fig.1 の方位 N140W-N145W の三浦半島や方位 N145W-N150W の房総半島南部 (震央距離 420~460km) において副パルスに続いて顕著なのが, 周期 15 秒から 20 秒, peak-to-peak 振幅が 1m 近い数サイクルのレゾナンス (HR-1) である。この巨大なレゾナンスをハイパーレゾナンスと呼ぶ。ハイパーレゾナンス発生域は, 房総半島先端部の分厚い付加体堆積層 (中山, 2013) に対応するように思われる。

約 30 分後に茨城県 50km 東方沖で MJ7.6 (G-CMT は Mw7.9) の最大余震が生じた。それによる U_ϕ 成分主要動は, 関東以外の地域では本震の SH波同様の片振れのパルス (幅~25 秒) であるが, 房総半島 (震央距離 150km~200km) では peak-to-peak 振幅が 20cm~30cm を越える数パルスの波形 (周期 15 秒~20 秒) となり, それ自身がハイパーレゾナンスの性質 (後述) を有している。

3. 周期 10 秒~15 秒のレゾナンス

次ぎに顕著なのが, 千葉県北部の東京湾近くで見られる, 周期 10 秒~15 秒, 振幅 10cm~20cm で 1 分から 2 分程度継続するレゾナンス (R-2) である。第三紀堆積層の特に分厚い分布域に対応している。同様のレゾナンスが, 新潟平野信濃川河口部, 最上川河口部の酒田などでもみられる。

4. 周期 6 秒~7 秒のレゾナンス

3番目に顕著なのが, 東京湾北部から荒川周辺に広く見られる, 周期 6 秒~8 秒で数分継続するレゾナンス (R-3) である。

5. まとめ

房総半島南端と三浦半島において, 周期 15 秒~20 秒の巨大なハイパーレゾナンスを認識することができた。それ以外にも, 周期 10 秒~15 秒, 周期 6 秒~8 秒のレゾナンスが生じ, それは付加体堆積層や, 第三紀堆積層に対応している。茨城沖の最大余震 (MJ7.6) の時に同様のレゾナンスが再来したが, Mw9 の地震によるレゾナンスより一回り小さい。

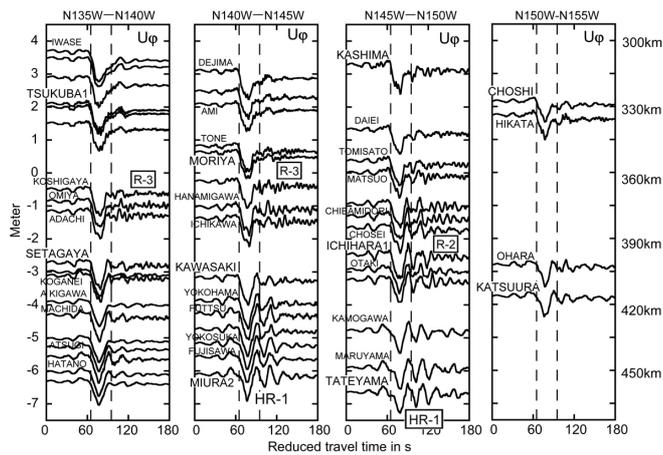
SH波の変位波形は, 半無限媒質の理論計算からも期待されるように, 片振れのパルスになる。震源から放出された実体波なのか, レゾナンスなのかの識別に使うことができる。そのため, 記録を円筒座標系に座標変換することが重要であり。GPS 1秒変位記録は大変有用な記録と言える。

参考文献

川崎一朗・石井紘・浅井康広・西村卓也, 2014, 2011年Mw9.1東北地震に伴ったMw8.4スーパーサブイベント, 地震2, 87-98.
中山貴隆, 2013, 制御震源による房総半島の地殻構造, 東京大学院理系研究科地球惑星科学専攻修士論文。

図の説明 2011年東北地震のときの南関東におけるGPS 1秒サンプリング記録の、方位N135WからN155Wまでの5度間隔のレコードセクション。横軸は、気象庁発震時からの経過時間。Mw8.4のスーパーサブイベントの震央(E142.5, N38.5) (Kawasaki et al., 2014) を仮定し、3.9km/sでレデュースした。縦軸は、右辺が震央距離、左辺が振幅。HR-1が周期15秒から20秒のハイパーレゾナンス、R-2とR-3は、周期10秒から15秒、5秒から10秒のレゾナンス。

キーワード: ハイパーレゾナンス, GPS 1秒サンプリング記録, 2011年東北地震, 房総半島, 第三紀堆積層
 Keywords: hyper resonance, GPS high sampling record, 2011 Tohoku earthquake, Boso Peninsula, Tertiary sedimentary layer



Stochastic excitation of seismic waves by an intense Hurricane: Seismic excitation proportional to the cube of pressure
Stochastic excitation of seismic waves by an intense Hurricane: Seismic excitation proportional to the cube of pressure

TANIMOTO, Toshiro^{1*}
TANIMOTO, Toshiro^{1*}

¹Dept. of Earth Science, UCSB, CA93106, USA

¹Dept. of Earth Science, UCSB, CA93106, USA

Earthscope Transportable Array (TA) has recorded a few hurricanes that propagated through the network. We report our analysis of Hurricane Isaac in 2012 that provided an opportunity to monitor the interactions between the atmosphere and the solid earth in detail as this hurricane passed through the network; this was possible because TA has both seismometers and barometers and allowed us to examine how seismic ground motions were excited with changing surface pressures. We analyzed data in a low frequency band 0.01-0.02 Hz because we had evidence that the signals are generated by processes near the center of a hurricane.

Surface pressure is the excitation source of seismic signals; it has short correlation length (~1 km or less) whereas excited surface waves (0.01-0.02 Hz) have horizontal wavelengths of 100-300km. The source is also spread over some areas. Under such conditions, we must model the source by a stochastic pressure source that is spread over the surface of the Earth. In terms of parameters, this source is then characterized by two parameters, the pressure power spectral density S_p and its correlation length L but both parameters can vary in space. We derived a relation between the observed power spectral density (PSD) of seismic velocity S_v and the PSD of surface pressure S_p by the normal mode theory.

For a low frequency range 0.01-0.02 Hz, seismic and pressure amplitudes show, at least to first order, axisymmetric variations and also decreasing trends with distance from the center of a hurricane. Taking the center of a hurricane at the origin and assuming axisymmetry, we can write down an integral relation between S_v and S_p as

$$S_v(x) = \int K(x, y) L^2 S_p(y) dy$$

where x and y are distances from the center of a hurricane. $K(x, y)$ is the excitation kernel for a source at y and a seismic observation at x and was computed for an Earth model PREM.

From data, we have S_v and S_p in the integrand. We first noted that a constant L cannot make the two observed quantities compatible. Therefore, we introduced the y dependence in L^2 where the correlation length varied with distance and solved for it. With such spatially varying $L(y)$, the two data can be made compatible. The important point is that we also found a correlation between this L (solution) and surface pressure S_p . In fact there is a good linear relationship that can be expressed as $L=c S_p^3$ where c is a constant. This is equivalent to saying that $L^2 S_p$ in the integrand is $c^2 S_p^3$.

This relation implies that the excitation of seismic ground motion becomes proportional to the cube of pressure. Near the center of a hurricane, pressure variations generally increase, but seismic-excitation becomes even more efficient near the center because of this nonlinear relation.

キーワード: Stochastic excitation, Hurricane, Atmosphere-Solid Earth interaction
Keywords: Stochastic excitation, Hurricane, Atmosphere-Solid Earth interaction

エアガン-OBS 探査データのレシーバ関数解析による PS 変換波イメージング Receiver function analysis of airgun-OBS survey data for imaging PS converted wave

白石和也^{1*}; 阿部進¹; 浅川栄一¹; 藤江剛²; 佐藤壮²; 小平秀一²
SHIRAISHI, Kazuya^{1*}; ABE, Susumu¹; ASAKAWA, Eiichi¹; FUJIE, Gou²; SATO, Takeshi²;
KODAIRA, Shuichi²

¹(株)地球科学総合研究所, ²海洋研究開発機構
¹JGI, Inc., ²JAMSTEC

多成分の海底地震計(以下 OBS)を用いたエアガン-OBS 探査では、成分毎の共通受振点記録を対比することで、基盤面などからの PS 変換波の発生がしばしば観測される。観測波形記録から P 波と S 波の走時や振幅の情報が得られれば、堆積層内の S 波情報の獲得が期待できる。レシーバ関数解析は、主として自然地震観測記録に対して適用され、例えば水平成分を鉛直成分でデコンボリューションすることで PS 変換波を抽出し、P 波から S 波への変換を生ずる地層境界の構造をイメージングするのに利用されている。本研究では、このレシーバ関数解析をエアガン-OBS 探査データに対して適用することにより、PS 変換波を抽出し受振点側の基盤面その他の構造推定を試みる。

多成分 OBS で取得されたエアガン発震記録のうち、三つの速度成分を解析に用いる。まず、水平二成分について発震点と受振点を直線で結ぶ方向(ラディアル方向)と直交方向(トランスバース方向)に回転を行う。次に、受振点毎にすべての発震記録について、三つの成分を互いにデコンボリューション演算を施すことで、全部で $3 \times 3 = 9$ 通りのデコンボリューショントレースを得る。ただし本研究では、このうち鉛直成分(Z)とラディアル方向成分(R)から得られる二つのレシーバ関数(R/Z と Z/R)を解析対象とする。オフセット距離の比較的大きい領域について、透過 P 波と変換 S 波が OBS へ入射する方向がほぼ鉛直となる場合には、変換面から受振点までの片道走時差がほぼ共通となるので、これらを足し合わせることで PS 変換波のみを抽出できる。さらに、相反性を仮定して R/Z 成分と Z/R 成分の時間反転したものを足し合わせる。時刻ゼロは海底面を表し、時間遅れは変換面からの透過 P 波と透過 S 波の片道走時の差を表す。OBS を用いた探査の場合、一般的に受振点間隔が広く、水平方向に連続的な変換波による断面を構築するのが難しい。そのため OBS 設置位置に最終的なレシーバ関数をプロットすることで、受振点側の PS 変換面のイメージング結果とする。

本研究では、北西太平洋で取得されたエアガン-OBS 探査データ(JAMSTEC)(エアガン発震測線長約 237km、OBS 間隔 6km)へ適用した例では、明瞭な PS 変換面を抽出することができる。受振点間距離は大きいものの、構造が比較的単純な成層構造で海底起伏も小さいため、同じフェーズの変換波を水平方向に追跡でき、この変換面はマルチチャンネル反射法の断面との対比により、海底下の堆積層下面からの反射波とはっきりと対応づけられる。この結果は、エアガン-OBS 探査データに対してレシーバ関数解析を適用することで OBS 近傍の堆積層の形状をイメージングすることの妥当性を示している。レシーバ関数解析から得られる波形記録はさらに、S 波に関連する情報の推定、多成分の組み合わせによる異方性解析など、堆積層内の詳細な地質情報を獲得できる可能性を持つ。

キーワード: レシーバ関数, エアガン-OBS 探査, PS 変換波
Keywords: receiver function, airgun-OBS survey, PS converted wave

FK-filtering vs. Predictive Deconvolution in the Multiple Reflection Removal Approach

ISCAN, Yeliz^{1*}; LORETO, M.filomena²; ZGUR, Fabrizio³; OCAKOGLU, Neslihan⁴
ISCAN, Yeliz^{1*}; LORETO, M.filomena²; ZGUR, Fabrizio³; OCAKOGLU, Neslihan⁴

¹Istanbul University Engineering Faculty Department of Geophysical Engineering 34320 Avcilar/Istanbul, ²Istituto di Scienze Marine Consiglio Nazionale delle Ricerche 40129 Bologna/Italy, ³Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale 34010 Sgonico, Trieste, Italy, ⁴Istanbul Technical University Department of Geophysical Engineering Maslak 34469 Istanbul/Turkey

¹Istanbul University Engineering Faculty Department of Geophysical Engineering 34320 Avcilar/Istanbul, ²Istituto di Scienze Marine Consiglio Nazionale delle Ricerche 40129 Bologna/Italy, ³Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale 34010 Sgonico, Trieste, Italy, ⁴Istanbul Technical University Department of Geophysical Engineering Maslak 34469 Istanbul/Turkey

Multiple reflection removal is one of the most important topic in seismic reflection processing, especially in the marine seismic data, where seabed multiple reflections can often severely mask the primary events. It is thus necessary to remove or to attenuate them prior to stack the data. In shallow water, the most common type of multiples is water reverberation.

In this study two different pre-stack attenuation techniques have been tested and compared by using the Focus PARADIGM software package: namely, the FK-filtering and the Predictive deconvolution. We performed this comparison on a multichannel seismic profile acquired offshore W-Calabria (SE Tyrrhenian Sea; Loreto et al., 2012), and characterized by the presence of remarkable multiple reflections.

Coherent linear events within the t-x domain can be separated as dip events within the F-K domain. This allows to remove some undesired energy (such as multiples) from the data. F-K filtering works based on the following strategy. NMO (Normal Move Out) correction is first applied to the Common Mid Point sorted data by using velocity lower than water velocity up to the first seabed multiple occurrence; a velocity close to sea water velocity (or slightly higher) will instead be applied from the first multiple up to the end of the record.

This will result in an overcorrection of the primary events in the t-x domain that consequently will fall within the positive sector of the F-K spectrum. The multiple reflections, conversely, will be either flattened or slightly under corrected, and thus will be positioned in the proximity of the F-K spectrum vertical axes or in its negative sector.

By applying the F-K filter on either the corrected (vertical axis) or undercorrected (negative sector) events, the multiples will be removed leaving untouched the primary events.

Deconvolution is a process whose purpose is to improve the temporal resolution by compressing signals to very short duration wavelets (spiking deconvolution) or to remove, if present, periodic events present in the data (peg lag multiples, bubble effect etc.). In the latter case, we refer to predictive deconvolution that can also be used to suppress seafloor multiple reflection. To perform predictive deconvolution, first the seafloor reflector has been picked on the brute stacked section, and the corresponding time stored within the water depth data header. Later, a dedicated velocity analysis was performed in order to flatten both the seafloor and the related multiple reflections of the first and secondary order. Finally, the deconvolution was applied with by adopting a gap parameter retrieved by the picked water depth, representing in this specific case the predictable occurrence of the first multiple. Compared to the conventional predictive deconvolution, where the gap parameter is kept constant, in the applied deconvolution the water depth changes continuously because it refers to the seafloor depths. Operator length is chosen so as to carefully remove only the multiple reflections and possibly leave untouched the primaries.

The results of F-K filtering and Predictive deconvolution indicate that the predictive deconvolution is more successful both to remove the multiples and to increase the resolution in the shallow part of the section.

References

Loreto, M. F., et al., 2012. In search of new imaging for historical earthquakes: a new geophysical survey offshore western Calabria (southern Tyrrhenian Sea, Italy). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 53(4), 385-401.

キーワード: FK Filtering, Predictive Deconvolution, Multiple Reflection
Keywords: FK Filtering, Predictive Deconvolution, Multiple Reflection

強振動波形のフェーズ Phase of Severe Earthquake of Seismic Wave

西澤勝^{1*}
NISHIZAWA, Masaru^{1*}

¹なし

¹none

1. まえがき

2011年東北地方大地震の近地強震動波形に見られるフェーズの特徴を述べる。用いたのは防災科学技術研究所⁽¹⁾の資料である。

2. 要旨

図-1に、北は岩手から南は千葉までの波形が示されている。波の波動の基本式は $v = \lambda/T = f\lambda \dots (1)$ ($f = 1/T$)で示される。波動には、音波、水面の波、地震波、光などたくさんある。

(1)式より、 f (振動数)が大きければ波の速度は大きくなる。文献(1)で述べたように、フェーズの最初の強震動の山は、プレート型地震により、2番目のフェーズの強震動の山はソリトンによるものである。

文献(2)で述べているように、ベル型あるいは富士山型に正規分布が近づき、最終的にはソリトンになるのであるから、2番目のフェーズの山の振動数は、最初のプレート型のフェーズの山の振動数より大きい。したがって第二のフェーズの山は、第一のフェーズの山よりも早く伝わると考えられる。ソリトンは文献(3)で述べたように、波高が高いほうが、低いほうより速く進むため、小さいほうに追いついて、衝突し追いついてゆくわけである。また、波動論から述べると、波が岸に近づくと、波の速度は減少し、波高が増大する。こういうことになると、波を微小振幅波とみなせなくなる。すなわち自由表面の力学的、運動学的境界条件式を線形化することができなくなる。このような波を有限振幅波 (finite amplitude wave) と呼んでいる。有限振幅波の解としてはストークス波、クノイド波・孫立波、ソリトンおよびゲルストナーのトロコイド波がある。(日野幹雄著：流体力学)

したがって、第一のフェーズの山は微小振幅波理論であつかえ、第二のフェーズの山はソリトンであるから、有限振幅の扱いになる。

こんなことを基本に、図-1の強震動波形のフェーズについて述べる。上の3つ、IWITH08、IWT019、IWT016では南より震源に近かったため第一の山が第二の山より先に到達したと考える。震源に最も近い三つのフェーズは第一の山、第二の山のフェーズ共しっかりと型で顕著である。FKS004、FKS013の福島フェーズを見ると、第二のフェーズが第一のフェーズに追いついてきたことを示している。第二のフェーズが卓越してきている。福島より南の千葉方面になると、第二のフェーズがほぼ完全に第一のフェーズに追いつき、IBR001、CHB012では完全に一つになっている。

ところで、緊急地震速報であるが、昨年横浜での日本地球惑星科学連合の学会でも、関東地方は良く合ったが、北部では合わなかったと、確か議論されていたと、記憶している。この原因は、今述べた、北の岩手から南の千葉までの強震動波形のフェーズの説明で明らかである。緊急地震速報が東京から発せられると聞いて、合うわけがないと思われる。

第一のフェーズの山は微小振幅波理論で、第二のフェーズの山は有限振幅波 Soliton の理論による地震波である。

したがってこの二つの式を一本にまとめることは無理と考えられる。このフェーズの山の北から南までは40秒足らずで達している。

筆者は緊急地震速報には詳しくないので、関東と東北で合わなかった理由のみ述べ、対応は専門に研究している方々におまかせする。

参考文献

(1) 東日本大震災調査報告：防災科研

(2) 西澤勝 著：GPS 波浪計の Soliton と 2011 東日本大震災の地震波との関係。

「The Relationship between Soliton in GPS wave gage and Seismic Wave of 2011 the Tohoku District Pacific Ocean Earthquake」日本地球惑星科学連合 JGUM, 2013, 5

(3) 日野幹雄 著「流体力学」1992

(4) 西澤勝 著 (Masaru Nishizawa)

「Handling by Solitary Wave and Soliton Earthquake Motion」2012, 10月18日 日本地震学会秋季大会 D22-01

Keywords: Severe Earthquake, Finite Amplitude Wave, Phase

SSS26-11

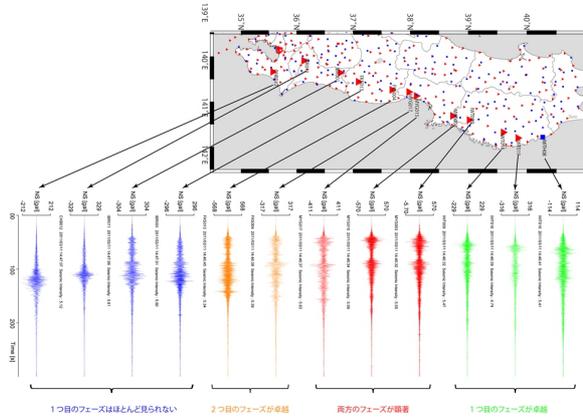
会場:103

時間:5月26日12:00-12:15

近地強震動波形に見られるフェーズの特徴

「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による強震動 pp.6」
 防災科学技術研究所
http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/ul/EVENT/201103_NIED_0313.pdf

- ・断層近傍の加速度波形には顕著な2つのフェーズがみられ、少なくとも2つの大きなすべりが示唆される
- ・北では1つ目のフェーズが卓越するのに対し、南では1つ目のフェーズはほとんど見えず2つ目のフェーズのみが見える
- ・これら2つのフェーズは、北および南に位置するすべりに対応すると考えられる
- ・リアルタイム震度の立ち上がり早いものと、遅いものがあるが、いずれのすべりで最大震度が出ているかに対応すると考えられる
- ・2つの顕著なフェーズの中間に、鋭いフェーズが見られる観測点がある(例えばFKS013, FKS004, MYG017, MYG015)
- ・他にも多くのフェーズが見られ、複雑な震源過程が示唆される



九州地方の散乱減衰と内部減衰 Scattering and intrinsic attenuation in Kyushu

志藤 あずさ^{1*}; 松本 聡²; 大倉 敬宏¹
SHITO, Azusa^{1*}; MATSUMOTO, Satoshi²; OHKURA, Takahiro¹

¹ 京都大学地球熱学研究施設, ² 九州大学地震火山観測研究センター

¹Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, ²Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

Attenuation of seismic wave energy is caused by two factors: scattering and intrinsic absorption. The former is the scattering of seismic wave energy due to random heterogeneities in seismic wave velocity and the density of the medium, while the latter is the conversion from seismic wave energy to heat energy by internal friction due to anelasticity of the medium. Quantifying scattering and intrinsic attenuation is important to understanding the structure of the lithosphere in terms of seismotectonic features.

We separately estimate scattering and intrinsic attenuation by applying the multiple lapse time window analysis (MLTWA) technique [Hoshihara et al., 1991]. This technique is based on a comparison between observed and calculated seismic wave energy density obtained using radiative transfer theory in several successive lapse time windows. In the present study, we measure the integrated seismic wave energy as a function of distance and frequency for three consecutive time windows with a length of 15 s following the S-wave onset. The window length is chosen in such a way that the first window contains a significant contribution of the direct S-wave energy and the last two windows mainly contain the contribution of the scattered energy. The observed energy is calculated in three steps. First, we filter the waveforms using a third-order Butterworth band-pass filter at the following frequency bands: 1-2, 2-4, 4-8, 8-16, and 16-32 Hz. Second, we obtain the envelopes by taking the sum of squares of the three-component amplitudes of filtered waveforms. Third, we integrate the root mean square amplitude of the envelopes in the three time windows. By comparing the observed and calculated energy distributions in terms of the misfit function, we obtain the best pair of scattering and intrinsic attenuation. We use the Levenberg-Marquardt algorithm, a non-linear least squares fitting procedure, to find the minimum of the misfit function.

We estimate the scattering and intrinsic attenuation in Kyushu, which is the site of active volcanoes and seismic activity within the Beppu-Shimabara rift valley and elsewhere. We collect waveform data from the Hi-net network operated by NIED. During the period from 2004 to 2014, we choose 180 earthquakes with magnitudes (M_{jma}) of 0.5-3.5 and with depths of <20 km. We select event station pairs with epicentral distances of <100 km recorded at 78 Hi-net stations.

In all the studied area, intrinsic absorption dominates over scattering loss at low frequencies (1-2 Hz), whereas scattering loss predominates at high frequencies (16-32 Hz). The results show strong spatial variations in scattering and intrinsic attenuation that depend mainly on the tectonic setting. For frequencies of 1-2 Hz, areas with strong scattering loss correspond mainly to the locations of the volcanoes, while areas with strong intrinsic absorption correspond to the locations of volcanoes and active faults, which are marked by low-velocity anomalies.

Keywords: crust, scattering attenuation, intrinsic attenuation

浅部海洋性地殻内の短波長速度不均質構造 Small-scale velocity heterogeneity of subducting oceanic crust inferred from high-frequency trapped P and S waves

武村 俊介^{1*}; 吉本 和生¹; 利根川 貴志²

TAKEMURA, Shunsuke^{1*}; YOSHIMOTO, Kazuo¹; TONEGAWA, Takashi²

¹ 横浜市立大学, ² 海洋研究開発機構

¹Yokohama City University, ²Japan Marine Science and Technology

観測波形に見られるトラップ波の特徴

茨城県南部の深さ 50-60 km で発生した地震において、微弱な直達波の数秒後に大振幅の後続波が観測されることが報告されている (Hori, 1990, 2006)。この後続波は海洋性地殻を伝播してきたトラップ波と解釈されており、その伝播特性は海洋性地殻内部の不均質構造の影響を受けていると考えられている。

関東・東海地域で得られた Hi-net の地震波形記録を詳細に調べたところ、フィリピン海プレートが 10-15 km と浅い地域において紡錘形で不明瞭なトラップ P 波および S 波が観測された。その他の地域ではパルス的で明瞭なトラップ波が観測されていることから、浅部海洋性地殻の不均質構造が紡錘形のトラップ波の成因と考えられる。

差分法による地震動シミュレーション

パルス的および紡錘形のトラップ波が観測されるそれぞれの測線の断面について 2 次元差分法による地震動シミュレーションを行い、高周波数トラップ波の伝播特性と不均質構造の関係を調べた。シミュレーションの詳細は武村・他 (2014, 日本地震学会秋季大会) に従って行い、16 Hz までの地震動を評価した。

高周波数地震動への地震波散乱の効果を取り込むため、短波長速度不均質構造を導入した。地殻、マントルおよび海洋性マントルについては Takemura and Yoshimoto (2014) の表 4 によるパラメータを採用した。海洋性地殻内の短波長不均質構造は紡錘形の波形形状から、相関距離 $a = 3$ km、ゆらぎの強さ $e = 0.07$ の指数関数型と $a = 1$ km, $e = 0.07$ のガウス型を重ねあわせた媒質を仮定した (Takemura and Yoshimoto, 2014)。関東・東海下に沈むこむフィリピン海プレートの海洋性地殻第 2 層は深さ 30-40 km での脱水反応により高速化し、深さ 40 km 以深では均質な構造へ変化していることが指摘されている (武村・他, 2014; Takemura et al., 2015)。そこで、海洋性地殻第 2 層の高速化と同時に海洋性地殻内の短波長速度不均質構造も消失すると仮定して、その深さ Z_D を 30, 40, 50 km と変化させて地震動シミュレーションを行い、観測波形と比較を行った。

シミュレーションで得られた速度波形を比較すると、 $Z_D = 50$ km ではどちらの断面においても紡錘形のトラップ波となっており、逆に $Z_D = 30$ km とするとパルス的なトラップ波となる。 $Z_D = 40$ km の時、観測事実を最もよく説明した。

トラップ波の伝播特性と浅部海洋性地殻

紡錘形のトラップ波が観測される断面ではフィリピン海プレートが 10-15 km まで浅くなっており、そのためトラップ波のエネルギーは地殻へ解放されず、海洋性地殻に沿って観測点まで伝播する。そのため、浅部海洋性地殻内の短波長速度不均質構造によりトラップ波の最大振幅が大きく遅延し、紡錘形のトラップ波となった。

脱水反応 (30-40 km) 以浅の浅部海洋性地殻は多くの含水鉱物が含まれていることが考えられ、流体または含水鉱物による短波長不均質構造の形成が示唆された。

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海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。

キーワード: 地震波伝播, 海洋性地殻, 短波長速度不均質構造, 地震波散乱, 地震動計算

Keywords: Seismic wave propagation, oceanic crust, small-scale heterogeneity, seismic wave diffraction and scattering, numerical simulation

見掛けP波及びS波輻射特性の周波数・距離変化 Frequency and distance changes in the apparent P-wave and S-wave radiation pattern

小林 学^{1*}; 武村 俊介¹; 吉本 和生¹
KOBAYASHI, Manabu^{1*}; TAKEMURA, Shunsuke¹; YOSHIMOTO, Kazuo¹

¹ 横浜市立大学
¹Yokohama City University

はじめに

地震時に震源断層から輻射されるS波は、断層面の走向とそれに直交する方向で大きく、45度ずれた方向で小さい4象限型の振幅の分布となることが予想される。しかし、観測された地震波形を解析すると、1 Hz以下の低周波数では4象限型の最大振幅分布になるが、5 Hz以上の高周波数ではほぼ等方的になることが指摘されている(例えば、Liu and Helmberger, 1985; Takemura et al., 2009)。近年、高感度地震観測網Hi-netの良質な地震波形記録により、P波についても高周波数において振幅分布(見掛け輻射特性)が崩れることが報告されている(小林・他, 2014, 日本地震学会秋季大会)。本研究では、小林・他(2014)の手法をS波にも適応し、見掛けP波及びS波輻射特性の周波数・距離変化を解析から明らかにし、P波とS波の伝播特性の相違を調べた。

データと解析手法

解析には、高感度地震観測網Hi-netで得られた中国地方の地殻内で発生した地震(横ずれ型の10イベント、震源距離0-150 km)の755の速度波形を用いた。小林・他(2014)による手法を用い、Coda規格化法(e.g., Yoshimoto et al., 1993)で求めたP波及びS波の平均的な距離減衰のトレンドからの振幅のばらつきの方位依存性の精査によって見掛け輻射特性を評価した。ダブルカップル震源モデルから予測される輻射特性係数の方位依存性を理論予測とし、この理論予測と観測振幅の方位依存性との相関係数をもとに見掛け輻射特性の崩れを定量的に調べた。解析周波数帯は0.5-1 Hz, 1-2 Hz, 2-4 Hz, 4-8 Hz, 8-16 Hzとした。

見掛け輻射特性の周波数・距離変化

P波、S波とも見掛け輻射特性は0.5-1 Hz以下の低周波数において4象限型を保持しているが、周波数の増大に伴い単調に4象限型から崩れることが明らかになった。4-8 Hz以下の帯域では、見掛け輻射特性は震源距離の増大に伴い単調に崩れることから、伝播経路中の短波長不均質構造による地震波散乱の影響が示唆された。一方で、8-16 Hzでは見掛け輻射特性は震源距離40 kmにおいてすでに大きく崩れている。このことから高周波数においては、震源近傍の不均質構造や震源過程の複雑さが見掛け輻射特性の崩れに寄与していることが示唆された。

見掛け輻射特性の4象限型からの崩れは、震源距離・周波数帯によらず、常にS波のほうがP波より大きかった。例えば、4-8 Hzにおける理論予測との相関係数はP波とS波でそれぞれ0.37と0.23であった。また、震源近傍に対して推定したこの相関係数は、P波では低周波数において1程度の値を2-4 Hzまで保持するのに対して、S波ではP波よりも有意に小さい値が求まる(例えば2-4 Hzでの比較でそれぞれ0.75と0.55)。以上の結果は、地殻内の不均質性や震源破壊過程の複雑さの影響がP波とS波で異なる可能性を示している。

発表では、見掛け輻射特性の周波数・距離変化の特徴についてより詳しく紹介し、P波とS波の伝播特性の相違や地殻内の不均質性について議論する。

謝辞

防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netおよび広帯域地震観測網F-netの波形記録を使用させていただきました。また、F-netのCMT解と気象庁の初動発震機構解を使用させていただきました。

キーワード: 輻射特性, 実体波, 地震伝播, 地震波散乱
Keywords: Radiation pattern, Body wave, Wave propagation, Wave scattering and diffraction

Comparison between ray theory and synthetic seismograms for transversely isotropic media Comparison between ray theory and synthetic seismograms for transversely isotropic media

BORGEAUD, Anselme^{1*} ; KONISHI, Kensuke¹ ; GELLER, Robert J.¹ ; KAWAI, Kenji²
BORGEAUD, Anselme^{1*} ; KONISHI, Kensuke¹ ; GELLER, Robert J.¹ ; KAWAI, Kenji²

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, ²Department of Earth Science and Astronomy, Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, ²Department of Earth Science and Astronomy, Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

Imaging seismic anisotropy is essential for a better understanding of geodynamics, since it provides information on deformation and flow in the crust and mantle. S-wave splitting has been widely used to infer the presence and extent of anisotropy. The inference of anisotropy from S wave splitting relies, however, on ray theory, which is strictly valid only for infinitely high frequencies, and thus may not accurately reflect real finite-frequency seismic data. For example, a recent study by Komatitsch et al. (2010) showed that splitting of diffracted S waves in the D'' region, just above the CMB, is present in synthetics computed for an isotropic velocity model. In this study we compute travel times for a transversely isotropic (TI) medium using a newly developed software package (Konishi et al., JpGU, 2015). We then compute full-wave synthetics using the Direct Solution Method (DSM; Kawai et al., 2006). We focus on two regions of the mantle: D'' and the upper mantle. We confirm apparent S-wave splitting in synthetics computed for the isotropic IASP91 velocity model for epicentral distances over 100 degrees, in agreement with the results of Komatitsch et al. (2010). We also compare the predictions of geometrical optics to synthetics for TI models for phases which sample the upper mantle and the D'' region.

キーワード: DSM, Travel time, D double prime, Upper mantle, Anisotropy, S-wave splitting

Keywords: DSM, Travel time, D double prime, Upper mantle, Anisotropy, S-wave splitting

東北地方太平洋沖で発生した地震からの近地 sP 波の振幅分布 Amplitudes of sP depth phase observed at small epicentral distances from offshore events in the northeastern Japan

小菅 正裕^{1*}; 加藤 爽¹
KOSUGA, Masahiro^{1*}; KATO, So¹

¹ 弘前大学理工学研究科

¹ Grad. Sch. Sci. & Tech., Hirosaki Univ.

sP 変換波の走時が、近地においても震源深さの決定精度の向上に有効であることはよく知られているが、sP 波の振幅に関する研究はあまり行われていない。そこで本研究では、波動の特徴を利用して sP 波を効率よく抽出する手法の開発を行い、それを東北地方太平洋沖で発生した地震に適用して sP 波の振幅分布の特徴を把握し、振幅分布に影響する要因の検討を行った。抽出のための解析では、polarization 解析によって求めた振動の長軸方位・傾斜角・直線性が P 波としての条件を満たす時間ウィンドウにおいて、エンベロープ振幅の最大値を sP 波振幅として読み取った。sP 波の卓越周波数は 1-2 Hz であるので、解析は中心周波数 1 Hz の帯域フィルターを通した波形を用いて行った。この方法によれば、目視では困難な場合も含めて、極めて効率よく sP 波を検出できる。sP 波の振幅は一般的に日本海側で大きく、方位依存性を示唆するような分布を示す。振幅分布に影響する要因として、距離減衰、震源からの放射特性、海底での反射係数の空間的不均質性を考えて検討した。距離減衰については P 波とほぼ同様であることがわかったので、震央距離に対して線形近似をすることによって除いた。震源からの放射特性は、距離減衰補正後の振幅を震源球上にプロットして F-net の CMT 解と比較することで検討した。その結果、振幅分布が放射特性を反映しているような例もあったが、震源球上で近接する観測点において振幅が大きく異なる場合は、放射特性では説明することができない。そこで、振幅を反射点位置にプロットして海底地形と対応を調べたが、明瞭な対応は見られなかった。以上のことから、sP 波振幅は距離減衰と震源からの放射特性を反映していると考えられるが、反射に対する地形や地下構造の局所的な不均質性が影響している可能性も否定できない。それが、sP 波が観測される観測点の割合が震源位置によって大きく異なる原因となっているのかもしれない。

キーワード: sP 波, 反射, 振幅, 震源メカニズム

Keywords: sP wave, reflection, amplitude, focal mechanisms

“AnisoTime” TI媒体下走時計算ソフトウェア ”AnisoTime” Travel time computation software for transversely isotropic media.

小西 健介^{1*}; ボジヨー アンセルム²; ゲラー ロバート²; 河合 研志³
KONISHI, Kensuke^{1*}; BORGEAUD, Anselme²; GELLER, Robert²; KAWAI, Kenji³

¹台湾中央研究院, ²東京大学大学院理学系研究科, ³東京大学大学院総合文化研究科

¹Academia Sinica, ²Graduate School of Science, University of Tokyo, ³Graduate School of Arts and Sciences University of Tokyo

多くの地震学研究において実体波の走時計算ソフトウェアは必要不可欠である。水平方向均質な等方媒体の場合、TauP toolkit (Crotwell et al., 1999) が

多くの研究教育機関で使われている。一方、Transversely isotropic (TI) の異方性媒質における走時を計算する理論 (Vlaar, 1968, 1969; Woodhouse, 1981) はすでに定式化されているが、走時計算ソフトウェアは、知りうる限り公開されていない。そこで、私たちは水平方向均質 TI 媒体における走時計算ソフトウェア (AnisoTime) を開発し、そのテスト版の公開を行った。(http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~dsm/からダウンロード可。) 本発表ではそのソフトウェアの紹介を行う。

キーワード: 走時, 異方性

Keywords: Travel time, anisotropy

タブレット端末での地震波動伝播シミュレーション Simulation of the seismic wave propagation on the tablet computer

江本 賢太郎^{1*}
EMOTO, Kentaro^{1*}

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku Univ.

近年、スマートフォンやタブレット端末が広く普及してきた。それらの端末で使用されている CPU 性能やメモリ容量も高性能化しており、数年前の PC に匹敵する性能を持つものもある。つまり、簡単な数値計算であればモバイル端末でも行うことが可能である。また、気軽に起動させて直感的に操作するという面においては、タブレット端末の方が PC よりも優れている。本研究では、タブレット端末上での数値計算の可能性を探るとともに、手軽に地震波動伝播をシミュレーションすることのできるアプリケーションを作成することを目的とする。複雑で専門性の高い数値計算は PC で行うべきであり、ここではタブレット端末の利点である手軽さを追求する。本研究では、iPad Air をターゲットとして開発を行う。

地震波動伝播シミュレーションは 2 次元で行う。弾性体の運動方程式をスタッガードグリッドで差分化する。計算を簡単にするため、精度は空間・時間ともに 2 次とする。ここでは、地表の表現として空気層を考え、地中は 3 層構造とする。空間刻みは上下・水平ともに 200m とし、グリッド数は水平方向 512 個、深さ方向 384 個とした。つまりシミュレーション領域は水平方向 102km、深さ方向 77km である。時間刻みは 10ms とした。ユーザの待ち時間をなくするため、計算終了後に動画を作成して波動伝播の様子を表示するのではなく、差分計算と同時に波動場のスナップショットを描画する。ここでは、20 ステップごと (0.2s) ごとに波動場を描画する。波動場は勾配と回転を計算して、P 波と S 波の振幅を分離して表示させる。この時、ピクセルごとに値を指定して描画すると処理が間に合わないため、波動場の画像を作成してそれを表示させる。波動場と共に、任意の観測点での波形表示を更新する。直感的な操作の一つとして、層境界、震源位置、観測点位置を指で自由に変更できるようにする。層境界は 10 個の点を動かすことによって規定する。それぞれの層の速度は固定だが、境界を自由に動かすことにより、さまざまな状況における地震波動伝播シミュレーションを行うことが可能である。また、より高度なシミュレーションとして、それぞれの層の速度にランダムなゆらぎを与えることが可能である。ここでも直感的な操作を重視し、与えるゆらぎの空間スペクトルの形状を指で自由に変更できるようにすることで、任意のサイズのゆらぎを与えることが可能である。

水平方向、鉛直方向のサイズをともに 2 倍 (面積 4 倍) にしてもメモリ容量に問題はない。しかし、10 秒間の地震波伝播シミュレーションの計算・描画をするのに、従来は約 40 秒かかっていたが、2 分 45 秒かかるようになった。波動場の描画は 0.2s 更新であるため、10 秒のシミュレーションでは 50 回更新される。つまり、広くした領域では描画の間隔が 1 秒以上空くことになる。軽快な動作が求められるタブレット端末では遅すぎることになる。たとえば、描画を 0.1s (10 ステップ) 更新にすれば描画間の時間は短くなるが、描画する負荷もあるため、単純に半分の時間間隔で描画が進むことにわならない。このとき、波動場の進み具合も小さくなり、軽快にシミュレーションが進んでいるようには感じられなくなる。また、波動場の画像サイズが大きくても描画の負荷が大きくなり、動作が遅く感じられるようになる。このとき、画像の細かさよりも、画像全体のサイズの影響の方が大きい。

iPad で 2 次元地震波伝播をシミュレーションすることは十分可能であり、直感的でインタラクティブな操作ができるため、専門家以外の人へ地震波動伝播の様子を伝えるのに役立てることができる。

キーワード: モバイル端末, アプリ, 地震波伝播シミュレーション, iOS
Keywords: mobile application, seismic wave propagation, simulation, iOS

Hi-net および KiK-net 記録の地震波干渉法解析と波動伝播計算に基づく地震波速度変化の深さ推定 Estimation of velocity change depth from wave-propagation simulation and interferometric analysis of Hi-net and KiK-net

澤崎 郁^{1*}; 上野 友岳¹; 汐見 勝彦¹; 齊藤 竜彦¹
SAWAZAKI, Kaoru^{1*}; UENO, Tomotake¹; SHIOMI, Katsuhiko¹; SAITO, Tatsuhiko¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Hi-net と KiK-net とは同一の観測サイトに併設されているため、双方の観測記録に地震波干渉法解析を施し、その結果を比較することにより、地震波速度変化の深さ依存性を検出できると考えられる。この考えに基づき、本研究では、妙高高原観測点 (N.MKGGH/NIGH17) の Hi-net 速度計で取得された雑微動記録の自己相関関数 (ACF) と、KiK-net 強震計で取得された地震波記録の地表地中間デコンボリューション関数 (DCF) とを併用し、2014 年 11 月 22 日に発生した長野県北部の地震 (M_W 6.3) に伴う地震波速度変化の深さ依存性を調査した。地震波干渉法解析の結果、本震発生から一週間の期間内において、Hi-net 記録の ACF からは 1-2%、KiK-net 記録の DCF からは 3-4% の速度低下率をそれぞれ検出した。この速度低下率の違いは、KiK-net 記録の DCF が地表-地中観測点間 (深さ 0-150 m) の速度変化のみを検出するのに対し、Hi-net 記録の ACF はより広い範囲の平均的な速度変化を検出するために生じると考えられる。次に、深さ 0m から 150m までの地震波速度を KiK-net で観測された速度低下率と同じく 3% 低下させた場合の ACF の変化を、差分法による 2 次元波動伝播計算により調べた。解析に用いる速度構造は、地震波トモグラフィにより得られた妙高高原観測点周辺の深さごとの速度平均値にランダムな速度揺らぎを足し合せて作成した。トモグラフィの分解能がない 2.5km 以浅については、最上層の速度が $V_P=4.0\text{km/s}$ および $V_S=2.0\text{km/s}$ の場合 (モデル 1) と $V_P=3.0\text{km/s}$ および $V_S=1.0\text{km/s}$ の場合 (モデル 2) について、トモグラフィ結果と滑らかにつながるように速度を補間して作成した。震源および観測点は深さ 150m の同位置とし、速度変化に伴う計算波形の位相変化をストレッチング法により調べた。計算の結果、計算波形から検出された速度低下率はモデル 1 とモデル 2 についてそれぞれ平均 0.7% および 1.2% となった。妙高高原観測点の検層記録によると、深さ 0m から 150m までの平均地震波速度は $V_P=1.8\text{km/s}$ および $V_S=0.6\text{km/s}$ であり、モデル 2 で採用した最上層の速度よりも遅い。したがって、実際の速度構造を用いた計算では 1.2% 以上の速度低下が見込まれる。この結果は、Hi-net 記録の ACF から検出された速度低下率の半分以上が 150m 以浅での速度低下によって説明可能であることを示唆する。

キーワード: Hi-net, KiK-net, 地震波干渉法, 地震波速度変化, 差分法

Keywords: Hi-net, KiK-net, interferometry, velocity change, finite-difference simulation

Ground Motion Prediction of Finite Rupture Subduction Earthquakes using the Ambient Seismic Field

Ground Motion Prediction of Finite Rupture Subduction Earthquakes using the Ambient Seismic Field

VIENS, Loic^{1*} ; KOKETSU, Kazuki¹ ; MIYAKE, Hiroe¹ ; SAKAI, Shin'ichi¹ ; HIRATA, Naoshi¹ ;
HONDA, Ryou²
VIENS, Loic^{1*} ; KOKETSU, Kazuki¹ ; MIYAKE, Hiroe¹ ; SAKAI, Shin'ichi¹ ; HIRATA, Naoshi¹ ;
HONDA, Ryou²

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

The ever-increasing construction of large-scale structures such as high-rise buildings, oil tanks, and suspension bridges requires an accurate prediction of long-period ground motions (4-10 s) for seismic hazard assessment. The slow attenuation with distance of the long-period ground motions combined to possible amplification in sedimentary basins can lead to large damages as those observed during the 1985 Michoacan earthquake (M_w 8.0) where more than 1000 buildings were destroyed in the Mexico city located at more than 300 km from the hypocenter. We focus this study on the Kanto basin where the Tokyo city is located. In the basin and its surrounding, more than 600 stations composed of 3 component seismometers recording continuous data have been selected. These stations are a part of different networks including the Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net), Hi-net and F-net of NIED, the Japan Meteorological Agency (JMA) network, and the Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture network. Stations located above the 1923 Kanto earthquake rupture area have been considered as virtual sources and others as receivers. Deconvolution method has been applied between every virtual source and the receivers to extract single force impulse response functions for each pair of stations. As only relative, rather than absolute, amplitude can be extracted with this technique, we calibrated the impulse response function amplitudes using records of a moderate shallow earthquake ($M_w \sim 5$) that occurred close to the virtual sources. Once the amplitude scaled, we show that both impulse response functions and earthquake records have similar phase and amplitude in the period range of 4 to 10 s. Then, we built finite rupture models for $M_w \sim 7$ subduction earthquake scenarios that we discretized in subfaults. For each station considered as a receiver, we show that it is possible to interpolate the calibrated impulse response functions extracted between every virtual source and the receiver to obtain one impulse response function for each subfault. We also took into account the depth and the dip angle of the fault and the rupture propagates radially with a speed of 2 km/s. We confirm that peak ground velocities and durations of our simulated ground motions are strongly amplified in the Kanto basin.

キーワード: Long-period ground motion prediction, Finite rupture subduction earthquakes, Ambient seismic field, Seismic interferometry, Kanto basin

Keywords: Long-period ground motion prediction, Finite rupture subduction earthquakes, Ambient seismic field, Seismic interferometry, Kanto basin

農業用ダム既設地震計における微小振動記録への地震波干渉法の適用 Application of seismic interferometry to waveforms of small vibration recorded by the existing seismometer of a dam

黒田 清一郎^{1*}; 田頭 秀和¹; 増川 晋¹

SEIICHIRO, Kuroda^{1*}; TAGASHIRA, Hidekazu¹; MASUKAWA, Susumu¹

¹ 農研機構 農村工学研究所

¹ NARO, National Institute for Rural Engineering

大規模で重要度の高いダムにおいては一般的に地震計が整備されており、大規模地震の発生時には貴重な地震時振動波形データを記録してきた。そのようなダムの強震動観測記録は、大規模地震時にダムがどのような挙動をしたかを示す貴重なものであり、農業用ダムにおいても総合的に活用がなされてきた。一方で、ダムの地震時の挙動は、ダムに照射する地震波の特徴だけではなく、ダム堤体周辺の地盤や堤体そのものの特徴を反映する。そこで筆者等は構造物内の地震波伝播特性を継続的に評価・監視を行なう技術として、地震波干渉法のダム地震観測記録への適用を行なってきた。

本報では、農業用ダム既設地震計の観測記録から、有感地震以外の微小な振動についても、地震波干渉法に基づき時間領域応答を抽出できるかどうかを検討する。そのために、実際の農業用ダムの既設地震計において、10時間以上の連続的な振動波形記録を取得し、それを対象とした検討事例を示す。その結果、一定強度の有感地震において得られた地震時時間領域応答と同様の結果を、より微小な無感地震や常時微動に伴う雑振動からも抽出できる可能性を示した。このことから地震波干渉法概念に基づく提案手法は、一定強度の地震を待つ事無く、より頻度の高い評価・監視を行なうことができる可能性を示す。

本方法が他のダムにも適用でき、同様の結果が得られるかどうかは今後検証する必要があるが、このような結果が得られた場合には、地震発生頻度が低い地域やダム地震計設置期間が短く観測記録が不十分なサイト等において、ダムの振動特性等を把握する際に有効に活用されるものと期待される。

キーワード: 農業用ダム, 地震計, 振動波形, 地震波伝播, 地震波干渉法, 地盤構造物

Keywords: sam for irrigation, seismometer, seismic waveform, seismic wave propagation, seismic interferometry, soil structure

弾性波アクロス土岐送信による東海地域の地震波速度変化 Temporal changes of seismic velocity in Tokai area revealed by the observation of the Toki seismic ACROSS signals

國友 孝洋^{1*}; 山岡 耕春¹; 渡辺 俊樹²

KUNITOMO, Takahiro^{1*}; YAMAOKA, Koshun¹; WATANABE, Toshiki²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 東京大学地震研究所

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., ² ERI, Univ. of Tokyo

東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日、M9.0)の際には、東海地域のHi-net観測点で、土岐送信所(岐阜県土岐市)からの弾性波アクロス信号の走時にミリ秒オーダーの遅延が生じ、その後も経年的な変化が継続している。本発表では、Hi-net観測点で収録装置が更新された2008年以降、2014年までの約7年間の土岐アクロス信号の解析に基づき、東海地域の地殻の地震波速度変化について概観する。

解析は、土岐送信所の南東～南方向に分布するHi-net観測点のデータを中心に行ったが、一部、北東方向の観測点も含まれている。中には、サンプリングクロックの補正ができない、あるいは、S/N比が低いなどの理由により結果が不明瞭な観測点があったため、それらを除いた14観測点(土岐送信所からの距離11から70km)の走時変動について検討を行った。走時変化は、2010年3月1日～2011年2月28日の1年間スタッキングしたグリーン関数を基準とし、3ヶ月間ないし1年間スタッキングを1ヶ月毎に行ったグリーン関数とのクロススペクトルの位相から計算した。

多数の波群について走時変化を求めたが、まずは、パスがほぼ明らかなS波(Sg)およびP波(Pg)について議論を行う。東北地震の際には、概ね全ての観測点でミリ秒オーダー(例えば、土岐送信所から約57km離れたN.HOUHのSH波で2ms程度)の走時遅延が生じている。中にはN.STRHのようにほとんど変化しない観測点も存在する。これらはの走時変化は、土岐送信所近傍の観測点(9km以内)で得られた結果から、送信点および観測点近傍の比較的浅い場所(1～2kmより浅部)の変化を反映していると考えられる(國友・他、本連合大会)。東北地震後、年間1msないしそれ以下のレートで走時が経年的に早くなる変化も、ほぼ共通に見られる。東北地震前から走時が早くなる経年変化をしている観測点も複数存在している(N.YOTH, N.KSSH, N.TYEH, N.HOUH, N.TOEH)。送信点からの距離と走時変化との間には系統的な関係性は見出せないものの、方位角に近い観測点は概して似た変動パターンを示している。地震波速度変化は、最も大きな変化を示した東北地震の際にも0.01%～0.1%オーダーであり、ほとんどの観測点で解析期間の初め(2008年)と終わり(2014年)の走時がほぼ一致している。このように大局的に見た東海(中部)地域の地震波速度の変化は非常に小さいが、地震時の応答から見ても地殻応力の変化と関係していることは間違いないと考えられ、今後、広域なテクトニック応力場との関係を抽出する方法を検討して行く予定である。

(謝辞) 防災科学技術研究所のHi-netのデータを使わせて頂きました。また、原子力機構東濃地科学センターの方々には、土岐弾性波アクロス送信所の稼働にご尽力を頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 弾性波アクロス, 地震波速度変化, 走時変化, Hi-net

Keywords: seismic ACROSS, seismic velocity change, travel time change, Hi-net

長周期地震波動場の特徴を利用した自動CMT解の精度向上のための手法開発 A simple method to improve automatic CMT solutions based on a feature of long-period seismic wavefields

酒井 孝英^{1*}; 熊谷 博之¹; プリード ネルソン²; 中野 優³
SAKAI, Takahide^{1*}; KUMAGAI, Hiroyuki¹; PULIDO, Nelson²; NAKANO, Masaru³

¹名古屋大学環境学研究科, ²防災科学技術研究所, ³海洋研究開発機構
¹Nagoya University, ²NIED, ³JAMSTEC

1. はじめに

地震・津波被害の迅速な対応には適切なセントロイドモーメントテンソル (CMT) 解を短時間に推定する必要がある。フィリピン・インドネシア地域には地震・津波警報のために広帯域地震観測網が配備され、この波形記録の解析に Nakano et al. (GJI, 2008) が開発した SWIFT 震源解析システムが用いられており、長周期 (50-100 s) の波形から波形インバージョン法を用いて自動で CMT 解 (自動解) を決定されている。広帯域地震計に地震波が到達すると、非地震性の長周期のノイズ波形 (異常波形) が不定期に発生することが知られている。この波形は地震波形と比べ相対的に振幅が大きく、波形インバージョンによる震源解析に影響を与えるが、この波形を適切に除去あるいは補正する手法は確立されていない。そこで、本研究では長周期地震波動場の特徴を利用して、この異常波形を簡便に短時間で判別する手法の開発を行った。

2. 手法

長周期の地震波形の最大振幅について表面波を仮定し、震源までの距離と非弾性による減衰を考慮したものを震源振幅と定義する。CMT 解の推定に使用した全波形記録について震源振幅を推定し、モーメントマグニチュード (M_w) と比較することで地震波形と異常波形の振幅の違いを利用した波形の判別法を検討した。また、震源振幅の幅と M_w の関係について、その物理的意味を調べるため、フィリピンの観測点配置と格子状に密に置いた観測点配置の場合について合成波形を用いた数値計算を行った。

3. 結果

フィリピン・インドネシア地域で 2012 年に発生した地震について、手動で波形を選択し推定した CMT 解 (手動解) の震源振幅と M_w を比較した。震源振幅は地震波の放射パターンによりばらつくが、手動解において、この幅は M_w が変化しても一定であり、イベントごとの震源振幅の最小値 (最小震源振幅) と各震源振幅との比 (震源振幅の比) を取ると、ほとんどの波形の震源振幅の比は 10 以内に収まった。一方で 2013 年から 2014 年までにフィリピン地域で発生し不適切な自動解を推定した 25 のイベントにおける震源振幅には手動解の震源振幅の幅より大きい値を持つ波形が見られ、震源振幅の幅は一定に集まらなかった。手動解の震源振幅の幅より大きい値を持つ波形は異常波形に対応しており、震源振幅の比は 10 以上であった。この結果より、震源振幅の比について 10 付近にしきい値 (R) を設け、パルス状波形を判別する手法を検討したところ、 $R=11$ とすると手動解との震源の距離の差が最小となり、 M_w および震源メカニズムに大幅な改善が見られた。数値計算より、震源振幅の幅は地震波の放射パターンがゼロとなる方向 (ノード) と観測点との間の角度が小さくなる程広がり、観測点密度が増加すると震源振幅の幅が広がる傾向が見られた。そこで、観測点間隔が 200~300 km 程度であるフィリピン・インドネシア広帯域地震観測網と比べ、間隔が約 100 km である観測点密度の高い日本の広帯域地震観測網 F-net の観測記録について、 M_w が 4~8 の範囲で震源振幅を推定したところ、本研究で調べたイベントにおいて、震源振幅は M_w に依存せず一定の幅に集まり、ほとんどの波形の震源振幅の比が 10 程度になる結果が得られた。

4. 議論

波形判別法について、 $R=11$ としたとき手動解との合いが最も良くなり、本手法が適切な波形の選択を行う上で有効である事が示された。数値計算では観測点密度が高くなると震源振幅の幅が広がる傾向が見られたが、観測点密度の異なるフィリピン・インドネシア広帯域地震観測網および F-net の観測記録において震源振幅の比はどちらも 10 程度で一定であった。この結果は震源振幅の幅が観測点密度に依存しない可能性を示しており、その解釈として震源の複雑性や地球内部の不均質構造により地震波の放射パターンが崩れる事で震源振幅の比が 10 程度になる可能性が指摘できる。本手法は、他の広帯域地震観測網においても異常波形の簡便な判別に有効であると考えられる。

謝辞: 本研究には (独) 防災科学技術研究所 F-net のデータを利用した。

地震波形解析から地震波動場解析へ：Seismic Gradiometry法の広帯域化Hi-net記録への適用可能性 From seismic waveforms to seismic wavefield: A feasibility study of the seismic gradiometry applied to the Hi-net array

前田 拓人^{1*}; 西田 究¹; 高木 涼太¹; 小原 一成¹
MAEDA, Takuto^{1*}; NISHIDA, Kiwamu¹; TAKAGI, Ryota¹; OBARA, Kazushige¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, UTokyo

はじめに

防災科学技術研究所 Hi-net は、固有周波数 1 Hz の速度型地震計を用いた稠密高感度地震観測網である。Hi-net では 1 Hz 以上の高周波帯を主たる解析対象としているが、収録機器の広ダイナミックレンジと良好な S/N により、特に振幅の大きな大地震に対しては、超稠密な長周期アレイとしても十分に機能しうることが明らかにされてきた [Maeda et al., 2011, 2014]。波長が観測点間隔よりも長くなる長周期帯においては、地震波形は独立した観測点の時系列というよりも、その集合として 2 次元の面的波動場としての情報をもたらさうと期待される。実際に、地震動の補間された空間分布から、不均質構造に起因する散乱波を検知した事例が報告されている。

近年、空間的に稠密な記録を用いて地震動の空間勾配を推定することにより、地震動の到来方向のみならず幾何減衰や震源輻射特性を分離できる Seismic Gradiometry (以下 SG 法) が提案されてきた [Langston, 2007a,b,c; Liang and Langston, 2009]。本報告では、SG 法を Hi-net 観測点配置に基づく理論地震波形に適用することで、周期数 10 秒から 100 秒の長周期帯においてより定量的に面的波動場を推定し、波動伝播特性を抽出することの可能性を検討した。

Seismic Gradiometry

SG 法とは、離散的な観測点における地震波形の空間分布からその空間勾配を推定し、空間勾配と波形振幅から波動伝播を特徴付ける特徴量を推定する一連の手法である。空間勾配を推定するために、地震波動場が 2 次元の空間的に連続な関数であるとの仮定の下にそれを Taylor 展開し、周辺観測点の記録から逆問題によって空間微分係数を求める手法が提案されている。また、地震波動場の関数形状としては、時間とともに平行移動する項と、それとは独立な空間分布項を持つものが提案されている。この仮定の下では、到来波の位相速度と到来方向に加え、波の幾何減衰や震源輻射パターンに伴う空間変動が同時に推定できる。これは、主として平面波を仮定してその位相ずれから到来方向と位相速度を求めるアレイ解析とは大きく異なる特徴である。

Hi-net 観測点への適用可能性

Hi-net の実観測点配置に基づいた数値実験を行った。位相速度 3 km/s で水平方向に同心円状に広がるガウス型関数形状をもち、かつ表面波と同様な距離の平方根に反比例する幾何減衰と水平角度方向に四象限型の輻射パターンをもつ理論波動場を生成し、Hi-net 観測点位置に相当する部分での理論地震波形を計算した。生成した波動場は波長に相当する特徴的な空間スケールが 60 km であり、周期 20 秒程度の表面波と同程度である。これらを仮想観測記録として、日本列島および周辺の 0.1 度間隔の等間隔グリッドにおいて、周辺 50 km 内の観測点の波形振幅を用いた最小自乗法によって波動場とその空間微分係数を推定した。波動場とその微分推定は常に優決定問題であり、その解を求めるための逆行列を予め計算しておくことが可能である。したがって、波動場と空間微分の推定は観測点波形の重み付き和というきわめて単純な演算に帰着される。推定された波動場と解析解との比較から、波動場と微分量がそれぞれ相対誤差 5 % と 10 % 程度の精度で推定可能であることが明らかになった。さらに、推定された空間微分量と変位波動場、速度波動場から、スローネスベクトルおよび幾何減衰と輻射パターンの空間変動量を推定した。スローネスベクトルは震源からの放射線上によく一致したほか、輻射パターンの空間分布は、仮定した輻射パターンにより振幅が 0 になる位置でその振幅が急変し、震源からの方位角方向に緩やかに変化する様子が確認された。

本報告の予備的な検討から、SG 法は広帯域化された大地震の Hi-net 記録に、周期 20 秒程度以上の帯域において十分に適用可能であることが明らかになった。本手法はアレイ解析と比べても空間的に均一な推定が可能であること、輻射パターンのような振幅情報を抽出できることが確認できた。SG 法は、単一の地震の地震動解析だけで表面波位相速度の空間分布を直接推定することを可能にする点も、特筆に値する。また、波線平均された観測量の逆問題という経過を経

SSS26-24

会場:103

時間:5月26日 17:30-17:45

る必要が無い場合、位相速度ゆらぎの絶対値やその入射方位角の依存性を議論できる可能性がある。さらに、従来のアレイ解析に基づくような伝播方向が空間的に一様なグリッドで求まるため、不均質構造等に起因するコヒーレントな散乱波の検知ならびに波源同定にも有効であると期待される。

キーワード: 地震波動場, 広帯域, 表面波, 到来方向

Keywords: seismic wavefield, broadband, surface waves, arrival direction