

海底強震動記録の震源過程解析への適用可能性に関する地震波動場シミュレーションを用いた検討

A study using waveform simulations on the applicability of seafloor strong motion records to the source process analysis

*久保 久彦¹、武村 俊介¹、鈴木 亘¹、功刀 卓¹、青井 真¹

*Hisahiko Kubo¹, Shunsuke Takemura¹, Wataru Suzuki¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

近年DONETやS-netなどの海底強震観測網の整備が進み、震源インバージョンなどの震源過程解析における海底強震動記録の使用が現実味を帯びてきている。海底強震動記録の利用は海域の地震に対する震源過程解析の観測点カバレッジの改善に大きく寄与すると考えられ、それにより震源過程解析の分解能および解の信頼性の向上が期待される (e.g. Iida et al. 1988; Iida 1990)。しかしながら、海底強震動記録の利用にはいくつかのハードルがあり、その一つとしてグリーン関数の不確定性の問題が挙げられる。海域の浅部S波速度構造については詳しい調査があまり行われておらず、観測波形を説明可能なグリーン関数を得ることが現時点では難しいと考えられる。また、多くの震源過程解析では一次元速度構造モデルから計算される理論波形 (1D理論波形) を用いているが、海水層や起伏に富んだ海底地形、厚い堆積層、沈み込む海洋プレートなどの海域特有の不均質構造を1D理論波形の計算で用いる一次元速度構造モデルにおいて十分に反映させることは難しい。この不均質構造を考慮するには堆積層や海水層、地形を含めた三次元速度地下構造モデルから差分法などで計算される理論波形 (3D理論波形) を用いる必要があるが、海域の詳細な地下構造に関する情報の不足および多大な計算コストの理由からあまり現実的ではない。本研究では地震波動場シミュレーションに基づいて、海底強震動記録の震源過程解析への適用可能性に関する検討を行う。

S-netが沿岸付近から海溝付近まで展開する福島県沖の各S-net観測点での、沿岸付近および海溝付近での浅い地殻内地震による3D理論波形 (海あり)・3D理論波形 (海なし)・1D理論波形を用意し、5-10秒・10-25秒・25-50秒の三つの周期帯域で波形の比較を行う。3D理論波形 (海あり) は、J-SHIS全国深部地盤モデル (藤原・他 2009, 2012) をベースとし、地形および海水層を含めた三次元速度構造モデルを仮定した上で、Takemura et al (2015)の差分法により計算した。3D理論波形 (海なし) は海水層を空気層に変換した三次元速度構造モデルを用いて計算した。1D理論波形は、J-SHIS全国深部地盤モデルの観測点直下の情報を基にした一次元速度構造モデルを仮定し、離散化波数積分法 (Bouchon 1981) と反射・透過係数行列法 (Kennett and Kerry 1979) により観測点毎に計算した。

まず3D理論波形 (海あり) と3D理論波形 (海なし) を比較し、S-net観測点における理論波形への海水層の影響を調べた。全体として、トランスバース成分においてはどの周期帯域でも海水層の有無に関わらずおおむね同じような波形が得られたのに対し、ラディアル成分および上下動成分では周期25秒よりも短い帯域において差異が見られた。波形に違いが見られる観測点の分布は沿岸付近の地震と海溝付近の地震で異なる。沿岸付近の地震では水深が深い (約2 km以上) の観測点において、震央での水深が2kmを超える海溝付近の地震ではほぼ全ての観測点において、波形の違いが見られた。海水層と堆積層のカップリングにより海洋性レイリー波が励起され、またその海洋性レイリー波の卓越周期は海水層の厚さに依存することが先行研究によって指摘されている (e.g. Nakamura et al. 2014; Noguchi et al. 2016)。本研究と先行研究の結果から、水深が深い領域で発生した地震の場合もしくは水深が深い観測点の波形を用いる場合、海水層を考慮してしないグリーン関数を用いる限り、震源過程解析に用いることができる地震波形の成分や周期帯域には限りがあると考えられる。

次に3D理論波形 (海あり) と1D理論波形を比較し、沈み込み帯特有の不均質構造を考慮した三次元速度構造モデルを用いて計算される3D理論波形を、観測点直下の一次元構造モデルから計算される1D理論波形でどれくらい説明できるのかを確認した。その結果、S波およびその後続波における振幅の違いや到着時刻のずれ

が多く見られた一方で、S波部分の位相自体は似ている観測点がいくつか見られた。このことは到着時間ずれの補正および理論波形の振幅補正を行うことにより海底強震動記録を震源過程解析で用いることができる可能性を示す。

キーワード：海底強震動記録、震源過程解析、地震波動場シミュレーション

Keywords: Seafloor strong motion records, Source process analysis, Waveform simulations

2016年10月21日鳥取県中部の地震の震源過程解析

Source process of the October 21, 2016, Tottori-chubu earthquake

*引間 和人¹*Kazuhito Hikima¹

1. 東京電力ホールディングス株式会社

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

【はじめに】

2016年10月21日14:07に鳥取県中部でM 6.6の地震が発生した。震源域の直上のK-NET倉吉(TTR005)では震度6弱が記録され、最大加速度はEW成分で約1380gal、3成分合成で約1490galに達するなど、震源ごく近傍で大振幅の地震動が観測された。このような強震動の生成要因の一つとして、一般には観測点直下の地盤構造の影響が考えられる。それに加えて、この地震では多くの観測点で明瞭な2つの波群が見られ、それらの前半部分では相対的に長周期のパルス的な波が卓越するのに対して、後半では短周期成分が卓越し最大加速度が記録される地点があった。このような観測波形の特徴は震源特性を反映している可能性も考えられる。そこで、震源近傍の強震動の生成原因について検討するため、強震記録を用いて震源過程解析を行った。

【解析条件】

震源インバージョン解析には、浅部地盤構造による影響を軽減するために、KiK-net観測点の地中記録(16観測点)を使用する。さらに、震源近傍の観測記録として、震源直上のK-NET倉吉(TTR005)および震源域の南に位置するK-NET上斎原(OKY015)の記録をを合わせて解析を実施した。観測された加速度波形に0.05~0.8Hzをフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を用いた。震源インバージョン解析に先立ち、震源付近で発生した規模が小さな地震(2016年10月21日, Mw 4.1)の観測記録を用いて観測点毎に水平成層構造モデルをチューニングし、これらを使ってグリーン関数の計算を行った。

震源インバージョン解析はマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al.(1996), 引間(2012))により行った。解析の際の断層面は、気象庁一元化処理による震源位置(速報値)を基準とし、F-netによるメカニズム解や余震分布を参照して設定した。はじめに小断層サイズを2km×2kmとしてやや大きめな断層面を仮定して概略検討を行い、観測波形の再現性などを考慮して断層面のパラメータを修正した。その後、主要なすべりが推定された範囲に小断層サイズを1km×1kmとした断層面を設定して、最終的なすべり分布を推定した。

【解析結果】

最終的な断層面は走向:341°, 傾斜:89°のほぼ鉛直な平面とし、長さ×幅は14km×14km程度とした。震源深さは10.6 kmである。求めた地震規模はMw 6.2程度、最大すべり量は約1.2 mの左横ずれ成分を主とする結果が得られた。破壊開始点付近に大すべり域が存在し、破壊は主に北側に進展したと推定される。断層の北端付近にもやや小さいながら周囲に比べて大きなすべりが存在する。

【考察・まとめ】

震源インバージョンの結果、主要なすべり域は震源付近と断層面の北端付近の2ヶ所に求めた。これらは震源近傍の観測記録に見られる2つの波群に対応していると考えられる。また、断層面のほぼ直上に位置するTTR005は、破壊開始点付近から浅部に広がる大すべり域からのディレクティブ効果が見えやすい地点に位置しており、これが観測波形の前半にパルス状の波形を生成した要因の一つであると考えられる。一方で、断層北部のすべり域は、面積や最終すべり量は小さいがすべり速度は比較的大きな値が求められた。従って、短周期成分の励起は大きかったものと思われ、観測波形の後半部との関連が示唆される。このように、得られた震源過程は、震源近傍で観測された地震動の特徴と矛盾しない。また、最終すべり分布から静的な応力降下量を計算したところ、局所的に大きな値でも20MPa弱であり、平均的には過去の内陸地殻内の地震で求まっている値と同程度であった。

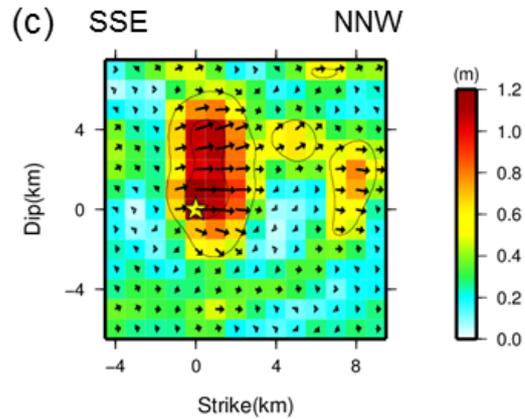
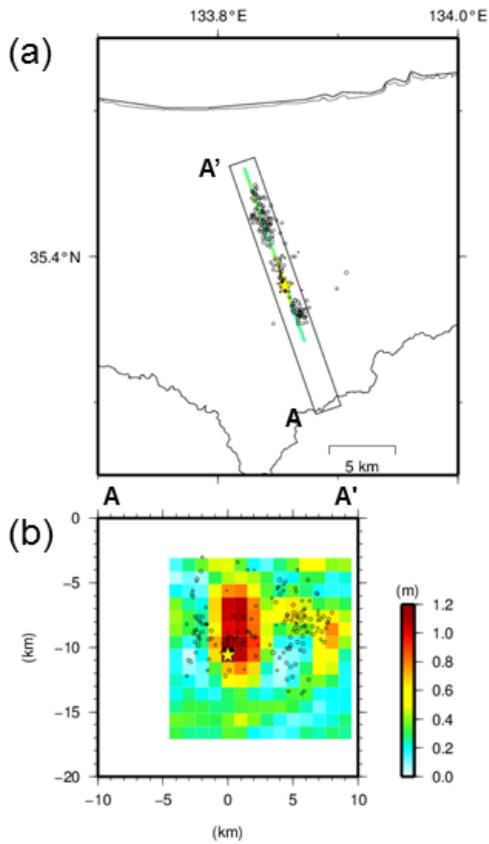
<謝辞: 解析には、防災科学技術研究所K-NET, KiK-netの観測記録, F-netメカニズム解, 気象庁一元化震源等を使用させて頂きました。記して感謝致します。>

キーワード：震源過程、強震動、鳥取県中部地震、内陸地殻内地震

Keywords: Source process, Strong motion, Tottori-Chubu earthquake, Crustal earthquake

Tottori-chubu (M_w 6.2)

【Tentative Result】



- (a): Surface projection of the final slip distribution. The star indicates the epicenter.
- (b): Vertical cross section onto the strike direction (A-A'). Aftershocks occurred within 1 hour are shown in black dots.
- (c): Final slip distributions on the fault plane. The arrows denote the slip vector on the hanging wall. The yellow star means hypocenter.

経験的グリーン関数法を用いた2016年鳥取県中部の地震の震源断層のモデル化

Source model for the 2016 mid Tottori prefecture earthquake using Empirical Green's function

*吉田 昌平¹、香川 敬生¹、野口 竜也¹

*Shohei Yoshida¹, Takao Kagawa¹, Tatsuya Noguchi¹

1. 鳥取大学大学院工学研究科

1. Graduate School of Engineering, Tottori University

2016年10月21日、鳥取県中部を震源とする地震(M_w 6.2)が発生し、最大震度6弱を記録した。この地震による建物被害は局所的で、被害地域では余震観測や常時微動観測などが精力的に行われた。また、この地震は防災科学技術研究所のK-NETやKiK-net、自治体観測点、鳥取大学の常設観測点など多くの観測点で強震観測記録が得られており、これらの情報を用いて震源断層をモデル化することは被害要因の検討や今後の地震防災対策において非常に重要な情報になると考える。本検討では、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより震源断層をモデル化する。なお、地震動はアスペリティのみから生成される(背景領域は考慮しない)と仮定し、対象周波数はS/N比を考慮して0.2-10Hzとした。震源モデルを構築するために、対象とした観測点は、KiK-net地中観測点4点、K-NET観測点1点、自治体観測3点の計8地点で、経験的グリーン関数法の要素波は2016年10月21日12時12分(M_w 4.1)の地震波形とした。アスペリティの位置は不均質すべり量分布を参考とし、震源パラメータは観測波形とフィッティングが良いものを試行錯誤により決定した。推定された震源モデルは、観測波形のパルス波など概ね再現できている記録もあるが、再現性が不十分な点も幾つか存在するため、今後はこの原因を検討するとともに、より再現性の高い震源モデルを構築していきたい。

キーワード：2016年鳥取県中部の地震、震源モデル、経験的グリーン関数法

Keywords: 2016 mid Tottori prefecture earthquake, Source model, Empirical green's function

経験的グリーン関数を用いた2016年鳥取県中部の地震の震源インバージョン解析

Source inversion using empirical Green's functions for the 2016 Tottori earthquake (Mj 6.6)

*芝 良昭¹

*Yoshiaki Shiba¹

1. 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震（Mj 6.6）では、震源近傍のK-NET倉吉(TTR005)で最大加速度1381 gal (EW成分)を記録した。大加速度地震動の要因としては、地震計設置地盤の増幅特性も考慮する必要があるが、一方で観測点が余震分布から推察される震源断層域の直上に位置することから、断層面上のすべりの空間分布の影響が無視できない。TTR005における本震観測記録の応答スペクトルを見ると、周期1秒以下の帯域の振幅が相対的に大きく、これらの帯域を反映した震源モデルの構築が重要となる。ここでは、比較的高周波数帯域までの波形の再現性に優れる経験的グリーン関数を用いた震源インバージョン手法を適用し、震源域の強震動特性を説明可能な震源モデルの推定を試みた。

余震の震央は、本震震央からおおむね南北方向に分布する。このため断層面モデルの設定では、F-net震源メカニズム解のうち南北方向に走向を持つ左横ずれの解を採用した。また経験的グリーン関数には、TTR005観測点の直下で発生したMj 4.0の余震記録を用いた。解析には震央から半径60 km以内に位置するKiK-net観測点に、震源域近傍のK-NET観測点を追加した計18地点の水平2成分速度波形のS波部分を用いた。解析周波数帯域は0.2 - 2 Hzである。またモーメント密度の時空間分布を推定した後で、得られたモデルパラメータの頻度分布を事前確率分布とみなして、実効応力（最大すべり速度）とモーメント密度の同時インバージョンを追加実施した。このときは、実効応力に大きく影響する高周波数成分を考慮するために、解析周波数帯の上限を5 Hzに拡張している。

検討の結果得られた震源モデルでは、破壊開始点の周辺の、特に浅い側に主要なすべり領域が認められた。このほか、震源から約5 km北側の浅部にも独立したすべりの大きい領域が存在する。ライズタイムは最大でも1.6秒と短い。断層北側浅部のすべり域はTTR005の直下に相当することから、TTR005の強震動は破壊開始点付近のSMGAと観測点直下のSMGAが断続的に破壊したことにより生成したと解釈できる。なおTTR005を除いてインバージョンを行った場合でも、TTR005直下には同様のすべり域が同定される。一方、実効応力とモーメント密度の同時インバージョン結果によれば、破壊開始点付近の大すべり域ではモーメント密度、実効応力ともに大きな値を示すのに対し、TTR005直下の浅部すべり域では実効応力が相対的に小さく、地下浅部のSMGAでは応力降下量が小さい傾向と整合する結果が得られた。

キーワード：2016年鳥取県中部の地震、震源モデル、経験的グリーン関数、強震動

Keywords: 2016 Tottori earthquake, source model, empirical Green's function, strong ground motion

近地P波記録を用いたバックプロジェクション法による2016年熊本地震の破壊過程の推定

Source imaging of the 2016 Kumamoto earthquake by back-projection of near-filed P wave records.

*大島 光貴¹

*Mitsutaka Oshima¹

1. 清水建設株式会社

1. Shimizu corporation

2016年熊本地震(M7.3) (以降、熊本地震) では、日本における観測史上初めて震度7が2回観測され、度重なる強い揺れによって、布田川-日奈久断層帯周辺を中心とした地域において甚大な被害を生じた。地震発生後、波形インバージョンにより得られた断層すべりの時空間分布が複数報告されており、深さに応じたすべり速度時間関数の違いが指摘されるなど、断層破壊の不均質性が報告されている。また、破壊の伝播方向や伝播速度は、周辺の地震動を大きく左右することが知られているが、バックプロジェクション法による破壊過程の解析結果からは、地震時の複雑な破壊過程が示されており、走向や傾斜の異なる断層面間の破壊の乗り移りや、破壊伝播速度の変化が報告されている。

断層破壊の不均質性は地震動に大きな影響を与えるが、現状の地震動予測においては、これらの不均質性の全てが考慮されているわけではない。将来の地震動予測においては、すべり速度時間関数や破壊伝播速度等の断層破壊の不均質性が考慮されることになると予想され、実際にそのための取り組みが国内外において始められている。このような状況を踏まえると、断層破壊の不均質性に関するデータを蓄積することは、将来行われるであろう断層破壊の不均質性を考慮した、より高精度で現実的な地震動予測のための震源モデル構築に不可欠である。本研究では、熊本地震の断層破壊の不均質性を、バックプロジェクション法を用いた地震放射強度の時空間分布の解析を通して調べた。

解析には、震源距離100km以内に位置する27のKiK-net、K-NET観測点の強震波形記録を用いた。地震波形は、地震計の設置方位の補正を行った後、オフセットを取り除き、木下(1986)の格子型フィルタにより積分して速度波形とした。震源位置に対する観測走時から観測点補正値を求め、走時データの補正を行うとともに、竹中・山本(2004)と同様の走時データ処理を行うことにより、放射強度の震源位置に対する相対位置の精度を向上させた。本研究で用いたバックプロジェクション法は、Kao and Shan(2004)、Ishii et al.(2005)と同様である。波形は、Hann windowを用いたN乗根スタッキングを行った。バックプロジェクション法による解析では、断層面を事前に特定しておく必要はないが、本検討では、余震分布から断層面をあらかじめ設定しておき、その断層面上での地震波強度の時空間分布を求めた。

解析の結果、破壊が日奈久断層帯から生じ、地震波放射強度を急激に増しながら布田川断層帯に乗り移り、北東へと伝播していく様子をとらえることができた。ただし、得られた結果の時空間分解能はまだ十分ではなく、今後、走時データやスタッキング法等の波形処理について、再検討を行う。

謝辞：本研究には、防災科学技術研究所のKiK-net、K-NETの強震波形記録を使用させて頂いた。ここに記して御礼申し上げます。

キーワード：バックプロジェクション法、断層破壊のイメージング、熊本地震

Keywords: back-projection, source imaging, Kumamoto earthquake

2016年熊本地震の観測記録にみられるスペクトル低減特性に関する検討 Study on spectral decay characteristics in high frequency range of observed records during The 2016 Kumamoto Earthquakes

*鶴来 雅人¹、香川 敬生²、入倉 孝次郎³

*Masato Tsurugi¹, Takao Kagawa², Kojiro Irikura³

1. 一般財団法人 地域 地盤 環境研究所、2. 鳥取大学、3. 愛知工業大学

1. Geo-Research Institute, 2. Tottori University, 3. Aichi Institute of Technology

1. はじめに

高周波数領域においてはスペクトルが低減し、 ω^{-2} 則から乖離することが知られており、強震動予測の精度向上のためにはこの領域における地震動特性の解明が必要不可欠である。このスペクトル低減特性を表現する方法として f_{\max} フィルター [Hanks(1982)]による方法、 κ [Anderson and Hough(1984)]による方法があり、我が国では前者が、アメリカなど諸外国では後者が主流となっている。本検討では2016年熊本地震の前震、本震および余震等を対象にその観測記録に見られるスペクトル低減特性を f_{\max} フィルターおよび κ を用いて評価し、両者の比較を行なう。

2. 解析概要

解析対象とした地震は2016年熊本地震の前震、本震および余震等の全35地震であり、その M_j は4.1~7.3、震源深さは7~18kmである。これらの地震について、

* 地中地震計設置深度におけるせん断波速度が 2,000m/sec 以上の観測点

* 震源距離が概ね100km程度以下の KiK-net 地中観測点

の観測スペクトルを平均震源距離におけるスペクトルに補正して、その平均（「平均観測スペクトル」と称す）を求める。

【 f_{\max} フィルター】

平均観測スペクトルと理論スペクトルを比較し、平均観測スペクトルに適合するような理論スペクトルを与える4つのパラメータ（地震モーメント、コーナー周波数、 f_{\max} 、べき乗数 s ）を推定する。理論スペクトルとは ω^{-2} 則に基づく震源特性と伝播経路特性および高域遮断フィルターを考慮したスペクトルである。

【 κ 】

Anderson and Hough(1984)はS波の加速度スペクトル $A(f)$ が高周波数領域において指数関数的な低減特性を示すとして、次式のように定式化した。

$$A(f) = A_0 e^{-\pi f \kappa} \quad (f > f_E)$$

本検討では、平均観測スペクトルの形状からスペクトルがほぼ平坦となる上限周波数 (f_E) を決め、 $f_E \sim 30$ Hzの範囲で最小二乗法によりスペクトル低減の傾き κ を求める。

3. 解析結果

2016年熊本地震の最大前震（2016年4月14日21時26分、 M_j : 6.5）、本震（2016年4月16日01時25分、 M_j : 7.3）の f_{\max} およびべき乗数 s 、 f_E および κ は以下のように得られた。

* 最大前震: $f_{\max} = 9.9$ Hz, $s = 1.43$, $f_E = 3.0$ Hz, $\kappa = 0.0466$

* 本震: $f_{\max} = 7.1$ Hz, $s = 1.37$, $f_E = 2.7$ Hz, $\kappa = 0.0482$

既往研究により得られている他の地殻内地震の結果と比べ、 f_{\max} の値はほぼ調和的であるが、べき乗数 s および κ は比較的大きな値であった。中小地震の f_{\max} は10~20Hz、 s は1.0~2.6、 f_E は3~10Hz、 κ は0.0274~0.0553となり、他の地殻内の中小地震の結果と比べ、べき乗数 s および κ は比較的大きな値であった。これらはスペクトル低減特性の地域性を示唆する結果と言える。

続いて、 f_{\max} フィルターのパラメータ (f_{\max} , s) と f_E や κ との関係性を求めた。その結果、 κ と f_{\max} フィル

ターのスペクトル低減の傾き s , および f_E と f_{max} の間には概ね正の相関が認められた。これは、同じ低減特性を異なる方法を用いて表現したことに因るもので、合理的な結果と言える。

謝辞：本研究は、原子力規制庁の委託研究「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の検討）事業」の一部として実施しました。独立行政法人防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の観測記録および広帯域地震観測網 F-net の震源パラメータを使用しました。記して感謝します。

参考文献

Anderson and Hough(1984), BSSA, Vol.74, pp.1969-1993.

Hanks(1982), BSSA, Vol.72, pp.1867-1879.

キーワード：2016年熊本地震、スペクトル低減特性、fmaxフィルター、 κ

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquakes, Spectral decay characteristics, fmax filter, Kappa

長周期地震動計算のための地震波伝播経路のQ値の検討

Appropriate Q value model in the Kanto region for simulating long-period ground motion

*前田 宜浩¹、森川 信之¹、岩城 麻子¹、藤原 広行¹

*Takahiro Maeda¹, Nobuyuki Morikawa¹, Asako Iwaki¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究では、関東地域の浅部・深部統合地盤モデルに基づく計算用地下構造モデル（深部地盤モデル）を用いて、地震動シミュレーションと観測記録との比較により、S波速度が350m/s程度の解放工学的基盤上での地震動評価に用いる地震波伝播経路のQ値について検討する。

我々は、不連続格子による空間4次・時間2次精度の3次元差分法を用いた地震動シミュレータ（GMS）（青井・他、2004, 物理探査）を用いている。GMSではGraves (1996, BSSA)により提案された時間領域で簡易に非弾性減衰効果を導入する方法が採用されている。Gravesの方法では、変位と応力が時間ステップ間隔 Δt 毎に更新される際に、S波に対する減衰係数 $a(x,y,z)=\exp(-\pi f_0 \Delta t/Q_s(x,y,z))$ を掛けることで非弾性減衰の効果を導入している。ここで、 Q_s はS波に対するQ値、 f_0 は参照周波数である。Gravesの手法は広く用いられていることから、本検討ではGravesの方法を適用する場合に適したQ値の設定について検討する。

関東地域を対象に構築された浅部・深部統合地盤モデルは、中規模地震を対象とした差分法による地震動シミュレーションによる検証が行われている（前田・他、2015, SSJ）。この検証では、地下構造に起因した地震動の周期特性の再現性を重視し、観測記録と計算記録のフーリエスペクトル比を指標値として周波数領域（周期領域）において合致度の評価を行っている。合致度の評価では、SCEC広帯域地震動評価検証（Goulet et al., 2015, SRL; Dreger et al., 2015, SRL）の基準を参考に、スペクトル比が1/1.4倍～1.4倍の範囲内である場合に合致度が高く、1/2以下、もしくは2倍以上の場合に合致度が低いと判定している。5地震197地点（K-NET、KiK-net観測点）の全ての観測記録と計算記録から算出したスペクトル比の平均値、および観測点毎に算出した複数地震によるスペクトル比の平均値は、周期2秒から10秒で概ね1/1.4倍～1.4倍の範囲に収まっており、観測記録の説明性の高いモデルであることが確認されている。しかしながら、短周期側ほど計算スペクトルの振幅が大きくなる周期依存性が認められ、Q値の設定を変えることにより合致度が改善される可能性が示唆された。そこで、複数のQ値モデルを設定して合致度が改善されるかどうか検討した。

既往研究では、 $Q_0(=Q_s)$ は $Q_0=\alpha V_s$ (V_s の単位はm/s) としてS波速度に比例させたモデル化がなされる場合があり、例えば全国1次地下構造モデル（Koketsu et al., 2008, WCEE; 地震調査委員会、2012）では $\alpha=0.2$ とされている。そこで、本検討では、S波速度に比例するQ値モデルを仮定し、 $\alpha=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ 、参照周期 ($T_0=1/f_0$) を3秒とした。このうち、 $\alpha=0.2$ としたものが上記の検証と同一の設定である。定性的には、 α が小さいほどQ値による減衰の効果が大きくなるため、計算スペクトルの振幅は減少する。 α の違いによる全てのデータによるスペクトル比の平均値の変化を調べたところ、短周期側ほど α の影響を大きく受けており、 $\alpha=0.1$ とすることで観測スペクトルの説明性が向上することが確認された。また、観測点毎のスペクトル比の平均値も、 $\alpha=0.1$ とした場合に1に近くなる傾向が見られた。さらに、以上の周波数領域での検討に加え、継続時間に着目した時間領域での検討も行った。観測記録と計算記録の速度波形のエンベロープ形状を比較したところ、本検討で設定したQ値モデルにより観測記録の経時特性を概ね説明することができていた。ただし、観測記録のデータ長が限られているため、時間領域における適切な α の検討は今後の課題である。

謝辞 本研究は、長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業の一環として行った。

キーワード：Q値、浅部深部統合地盤モデル、長周期地震動、GMS

Keywords: Q model, shallow-deep integrated velocity structure model, long-period ground motion, GMS

九州地方北部におけるQsの地域性に関する考察

Studies on Qs at the northern part of Kyushu district in Japan.

*仲野 健一¹、境 茂樹¹

*kenichi Nakano¹, Shigeki Sakai¹

1. 株式会社 安藤・間

1. HAZAMA ANDO CORPORATION

筆者らは既報で九州地方南部を対象にして、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netで観測されたM4-5程度の中小地震の地震観測記録を用いて、二重スペクトル比法により同地域のQsを評価した。その結果、気象庁地震カタログの震源位置と観測地点を結ぶ側線の平均的なみかけのQsが、解析対象とする領域（伝播経路の組み合わせ）によって有意に変化することを示した。このことは、例えば統計的グリーン関数法等に基づく強震動計算に用いるQsの設定には、計算対象領域における適切なモデルを用いる必要があることを示唆している。

2016年4月、九州熊本地方を震源とする2016年熊本地震が発生した。この地震は、九州の別府-島原地溝帯における布田川-日奈久断層で発生しており、ちょうど九州地方を南北に分断するような形になっている。この地震に関しては多くの研究者によって、2016年熊本地震の震源断層モデルや表層地盤の非線形地盤モデルが提案されている。一方で、九州地方の減衰に関する研究としては、スペクトルインバージョン解析によって震源特性やサイト特性と併せて評価されたものが多い。

本研究では加藤（1999）に倣って拡張した二重スペクトル比法を採用している。この手法で推定される伝播経路の平均的なみかけの減衰特性は、数学的にはスペクトルインバージョン解析で評価される減衰特性と同一と見なすことができる。従って、二重スペクトル比法によって減衰特性を評価し、スペクトルインバージョンによって推定されたそれと比較することで、お互いの評価結果を相互に確認することができる。

以上のことから、本稿では九州北部を対象にして、二重スペクトル比法を用いた減衰特性としてのQsを評価する。まず、九州地方北部をFig.1の薄い橙色のハッチで示すような「Region A」と「Region B」に分割した。また、既報で評価した九州地方南西部の領域を「Region C」として薄い青色のハッチで示す。同図には、白抜きの丸印として2016年熊本地震後に発生したM1 ~ M7.3のイベントの震央分布（2016年4月14日~2016年4月30日）と赤色の三角印としてK-NET & KiK-netの地震観測地点を併記している。震央位置は気象庁一元化震源リストを参照した。図中に示した領域において、面的な広がりをもつ領域（Area）での評価と側線としての評価（Line）をそれぞれ実施する。ただし、「Region B」についてはAreaの設定が困難であったため、Lineでの評価のみ実施した。なお、各解析ケースの名称は「Region A-Area」もしくは「Region A-Line」のように記す。

Qs評価結果をFig.2に示す。この図をみれば明らかなように、各領域においてAreaとLineでは異なる減衰モデルが評価されていることがわかる。これは、Areaの場合、Lineに比べて相対的に伝播経路が長くなり、表面波や最短経路以外の経路で伝播された地震動成分の影響で、見かけ上減衰が小さく評価されているものと考えられる。「Region A-Area」と「Region C-Area」ではQ0がどちらも約70であり、周波数依存性はどちらも約0.92と推定され、顕著な差異はみられないことがわかる。一方で「Region B」については大きく異なっていて、 $Q_s = 23.6 \cdot f^{1.0}$ となっている。このQsは泉谷（2000）によって霧島直下で評価されたもの（浅い経路）とほぼ同じであり、Lin et al. (2016)によって阿蘇山直下のマグマだまりが約5kmから約10kmにかけて存在することが指摘されており、「Region B」では阿蘇山直下を通過していることから、上記の解釈が正しいとすれば、本研究で得られたQsの顕著な違いを説明することができる。一方、他の領域で評価されたQsは内山・山本（2016）で評価されたものと調和的である。しかしNakano et al. (2015)で評価されている値とは異

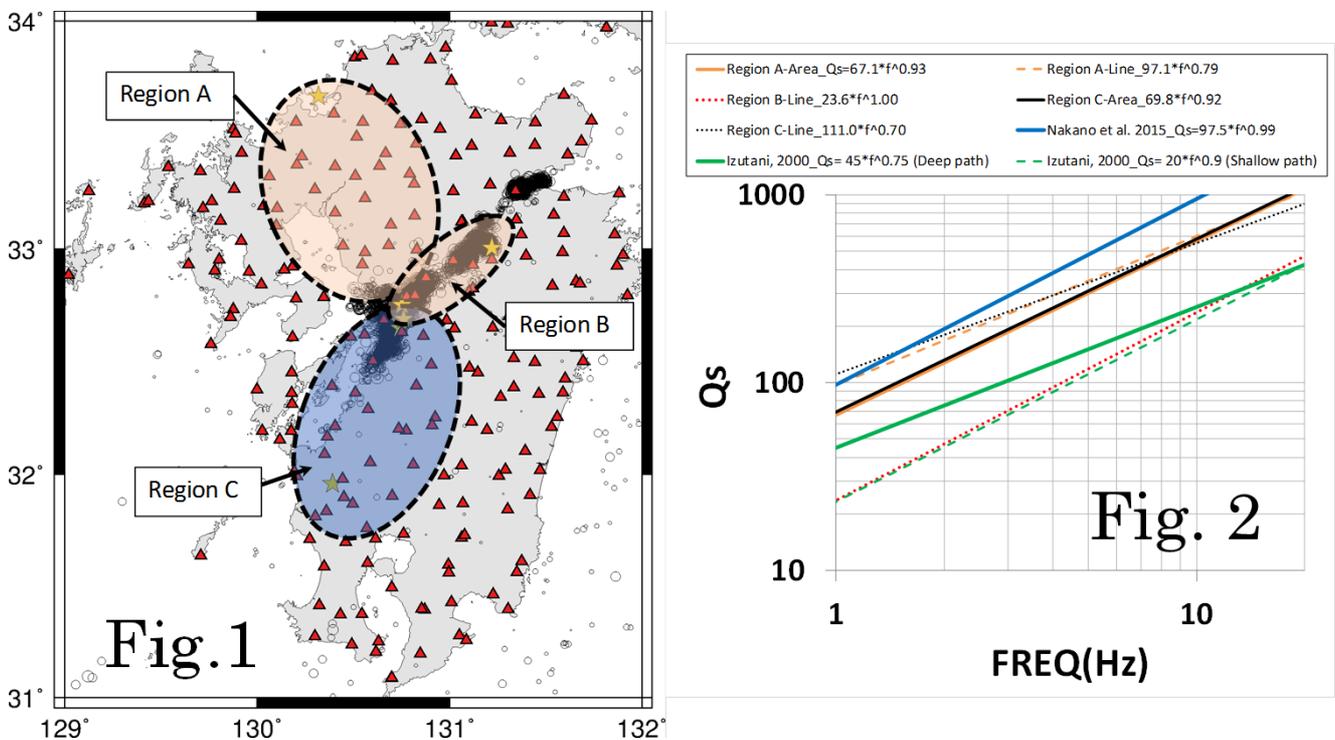
なっている。それは、解析条件として設定した震源距離が異なっていること、解析対象としている領域が大きく異なっていること等が原因と考えられる。実際に、内山・山本（2016）や佐藤（2016）に合わせた条件でスペクトルインバージョン解析を実施したところ、彼らと同様のQsモデルが得られることを確認している。

今回得られた結果はあくまで少数の地震を選択して実施されていること、解析対象領域を広範囲に設定していること等から、地震と観測地点の異なる組み合わせの場合や細かく領域を分割した場合でどの程度これらの値が変化するか、継続的に調査していく必要がある。我々の今後の取り組みとしては、上記の検討数を増やすとともに、強震動予測の精度向上に役立つため、複雑な減衰構造の評価手法を開発していく予定である。

謝辞：本研究の実施にあたって、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netで観測された地震波形記録を使用させて頂きました。一部の図の作成にはGMTを使用しています。記して感謝します。

キーワード：Qs、伝播経路、二重スペクトル比法

Keywords: Qs, Propagation pass, Twofold spectral ratio method



計測震度の多次元距離減衰式の提案

A New Multidimensional Attenuation Relationship for Instrumental Seismic Intensity

*田中 裕人¹、松浦 律子²、古村 美津子²、高浜 勉¹*Hiroto Tanaka¹, Ritsuko S. Matsu'ura², Mitsuko Furumura², Tsutomu Takahama¹

1. 株式会社構造計画研究所、2. 公益財団法人地震予知総合研究振興会地震調査研究センター

1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction

松浦・他(2011)および野田・他(2016)は、異常震域等による補正項として、観測点下のプレート上面深度を用いることで、広い周期帯、広い距離範囲に適用できる速度応答スペクトルの距離減衰式を構築した。本検討では、速度応答スペクトルと同様に計測震度の距離減衰式を構築した。

解析にはK-NET, KiK-netの観測記録を使用した。なお、地表観測記録のPGVが0.1cm/s以下およびS/N比の悪いデータは取り除いた。距離減衰式は震源タイプごとにInter-Plate, Intra-Plate, Very Shallow (VS) の3タイプに分類して推定した。なお、Inter-Plate, Intra-Plateは太平洋プレート上面あるいはスラブ内で発生した地震を対象とした。距離減衰式の式形は、代表的な周期の速度応答と計測震度の分布および減衰の傾向を比較した上で、応答スペクトルの距離減衰式と同じ形とした。

$$INT = A_c + A_w \cdot M_w - b \cdot \Delta - \beta \cdot \log(\Delta) - d \cdot \min(\delta, 250) \pm \sigma$$

ここで、INTは計測震度、 Δ は震源距離(km)、 δ は観測点下の太平洋プレート上面深度(km)を示す。ただし、距離について $M_w > 7.5$ の地震には震源域からの最短距離を用いた。また、 δ は深度250km程度で頭打ちさせることで観測の再現性が向上した。 A_c, A_w, b, β, d は回帰係数、 σ は標準偏差である。 $\log(\Delta)$ に比例する減衰項の係数 β は、既往の計測震度の距離減衰式では2程度で固定されることが多いが、本検討では回帰により推定した。回帰係数は、線形インバージョンによりすべて同時に推定した。ただし、震源タイプによって最適な回帰係数の組み合わせは異なり、最終的な組み合わせはAICにより決定した。

Inter-Plateは係数 A_c, A_w, b, β, d の組み合わせが最適であった。従来のシンプルな式形(係数 A_c, A_w, b, β)で解析した場合の標準偏差は0.691であったのに対し、係数 A_c, A_w, b, β, d とした場合の標準偏差は0.643に減少し、AIC的にも優位であった。Intra-Plateの係数の組み合わせは A_c, A_w, β, d が最適であった。Inter-Plateでは近距離のデータを説明するのに係数 b の項が必要であったが、Intra-Plateは近距離のデータが少なく $\log(\Delta)$ に比例する減衰項(係数 β)と δ に比例する減衰項(係数 d)により観測を説明できた。Intra-Plateの係数の組み合わせを係数 A_c, A_w, b, β とした場合の標準偏差は0.751であったのに対し、係数 A_c, A_w, β, d とした場合の標準偏差は0.644に減少した。Inter-Plate, Intra-Plateにおいて、 δ に比例する減衰項(係数 d)は異常震域などの減衰の違いを考慮できる有効な項であることが分かった。一方、VSには δ に比例する減衰項は必要なく、係数 A_c, A_w, b, β の組み合わせが最適であった。このときの標準偏差は0.677であった。

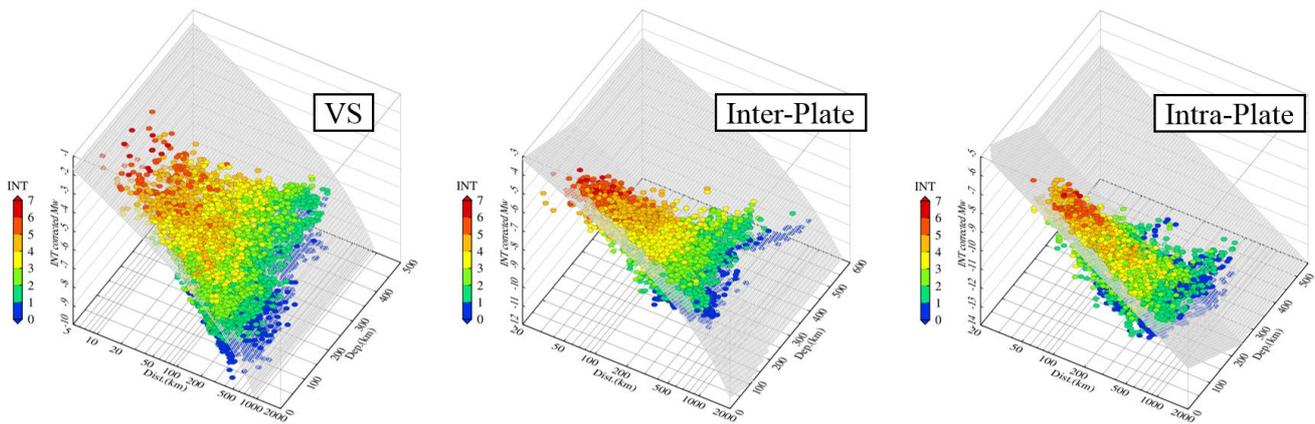
本検討の距離減衰式(以降、提案式)の妥当性を検証するため、観測記録や既往の距離減衰式と比較した。プレート上面深度に比例する減衰項を用いるInter-Plateの地震およびIntra-Plateの地震において、提案式の予測値と観測の残差は既往式の残差に比べて広い距離範囲で小さかった。一方、プレート上面深度に比例する減衰項を用いないVSの地震に対しては、提案式と既往式の予測値は同程度であり、式ごとの残差の違いは小さかった。これらは、提案式のプレート上面深度に比例する減衰項の有効性を示唆している。

今後は、任意の地点でより精度良く予測できるように地盤増幅の補正項について検討する予定である。本検討は文部科学省からの委託によるものである。防災科学技術研究所の観測記録を使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。

キーワード：距離減衰式、プレート深度に比例する減衰項、AICによる選択

Keywords: Ground Motion Prediction Equation (GMPE), Attenuation term proportional to plate depth, Selection by AIC

Type	A_c	A_w	b	β	d	σ
VS	2.096	0.962	0.00287	2.409	-	0.677
Inter-Plate	4.726	0.674	0.00171	2.416	0.00527	0.643
Intra-Plate	2.509	1.444	-	3.576	0.00883	0.644



活断層で発生する一回り小さい地震の確率論的な地震ハザード評価のための地震活動モデル

Seismic activity modeling of earthquakes occurred on inland active faults with smaller magnitude than assumed characteristic event for probabilistic seismic hazard

*宮腰 淳一¹、森井 雄史²、大島 光貴²、森川 信之³、藤原 広行³

*Jun'ichi Miyakoshi¹, Takeshi Morii², Mitsutaka Oshima², Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³

1. 大崎総合研究所、2. 清水建設、3. 防災科学技術研究所

1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. Shimizu Corporation, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究では、確率論的な地震ハザード評価に活用するために、活断層で発生する固有規模より小さい地震の地震活動モデルについて検討する。このような地震の例として、2014年11月22日の長野県北部の地震（神城断層地震 M6.7）や2016年4月14日21時26分頃の熊本地震（M6.5）が挙げられる。

地震調査研究推進本部（地震本部）では、固有規模より小さい地震の一部を「地表の証拠からは活動の痕跡を認めにくい地震」として扱い、その地震活動モデルを設定して確率論的地震動予測地図を作成している。ここでは、地震規模の上限を固有規模またはM7.4、地震規模の下限をM6.8、平均活動間隔を単位区間の平均活動間隔の2倍としている。本研究では、地震本部のモデルを参考に、固有規模より小さい地震の地震活動に対する3つのモデルを考える。モデル1は、地震本部のモデルのうち、地震規模の下限をM6.5とする。モデル2は、地震本部のモデルのうち、平均活動間隔を単位区間の平均活動間隔と等しいとする。モデル3は、モデル1とモデル2を組み合わせたモデルとする。

これらのモデルを用いて確率論的地震動予測地図を作成した。その結果、モデル3のハザードが最も大きくなり、モデル1とモデル2のハザードは同程度であった。

1914年桜島の地震の震度分布および震源断層の位置とマグニチュードの検証

Seismic intensity distribution and validation of the source location and the magnitude of the 1914 Sakurajima earthquake

*小林 励司¹、古屋 幸菜^{2,3}、桑原 大樹²

*Reiji Kobayashi¹, Yukina Furuya^{2,3}, Hiroki Kuwahara²

1. 鹿児島大学大学院理工学研究科、2. 鹿児島大学理学部、3. グランラセーレ鹿児島

1. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 2. Faculty of Science, Kagoshima University, 3. Grand Lacere Kagoshima

The 1914 Sakurajima earthquake (M 7.1) occurred about eight hours after the eruption of Sakurajima. The seismic intensity distribution in Kagoshima city is estimated from the damaged data of houses and stone block walls (Imamura, 1920). The intensity data used in Imamura (1920) is originally defined in his study and cannot be directly compared to the present seismic intensity scale in Japan defined by the Japan Meteorological Agency (JMA) in 1996. Takemura and Toraya (2015) proposed a conversion procedure from damage data of houses to the present seismic intensity scale for the 1944 Tonankai earthquake.

The seismic intensity distribution in Kyushu Island has also compiled by Imamura (1920) and its isoseismal maps were drawn by Imamura (1920) and Omori (1922). The intensity data can be compared to the present seismic intensity in JMA scale, because the present seismic intensity scale was revised several times from that used for the isoseismal map for the Kyushu Island in Imamura (1920).

In this study, we convert from the damage data of houses in Kagoshima city (Imamura, 1920) to the present seismic intensity in the JMA scale. We also review the seismic intensity distribution in Kyushu Island. Then we verify the source location and magnitude using an attenuation relation of seismic intensity for Japan presented by Morikawa et al. (2010).

Imamura (1920) presents the total number of households but does not present the total number of houses. The sum of the completely destroyed, half destroyed, and partially damaged houses are larger than the number of households in a town, Shiomi-cho. We adopt two assumptions for the total number of houses. One is that the total number of houses in each town is equal to that of households in it. The other is that the ratio of total number of houses to that of households in each town is equal to the ratio in Shiomi-cho. The true value may be between those inferred from the two assumptions. The distribution of the present seismic intensity scale adopting the former assumption shows that the maximum intensity is 6 Upper, and that adopting the later assumption is that the maximum intensity is 6 Lower. The maximum difference between the intensities at a same place adopting the two assumptions is one grade.

We also plot the seismic intensities in Kyushu Island to review the isoseismal maps of Imamura (1920) and Omori (1922). The isoseismal contours of both papers are inconsistent to the intensity data at several observation points. It is difficult to draw the isoseismal contours being consistent with the seismic intensity data.

We verify the source location and magnitude of the 1914 earthquake. The source fault of the 1914 Sakurajima earthquake has not been investigated in previous studies. Kagoshima Prefecture assumes a source fault for the same type of an earthquake as the 1914 Sakurajima earthquake to predict the strong ground motions for disaster prevention. The seismic intensities predicted by the attenuation relation with Mw 7.1 are much higher than the observed ones in Kagoshima city. When the magnitude is fixed at Mw 7.1, the source fault location should be moved at least 50 km further from the assumed fault. If the source fault location is fixed, the magnitude should be 5.6. The comparison of the predicted seismic intensity to the observed ones in Kyushu Island shows that Mw 7.1 is too large.

キーワード : 1914年桜島の地震、震度、マグニチュード

Keywords: The 1914 Sakurajima earthquake, seismic intensity, magnitude

1889（明治22）年明治熊本地震の詳細震度分布

Seismic Intensity Distribution of the 1889 Meiji Kumamoto Earthquake

新井田 倫子²、*山中 佳子¹Noriko Niida², *Yoshiko Yamanaka¹

1. 名古屋大学大学院環境学研究科、2. 名古屋大学理学部

1. Graduate School of Environmental Studies, University of NAGOYA, 2. Department of Earth & Planetary Sciences, University of NAGOYA

歴史上の地震についての文献記録は従来の研究でも広く収集・整理され、「新収日本地震史料」「日本の歴史地震史料」などとして刊行されている。本研究では、熊本県内の歴史的地震被害を調査するため、市町村史・郡史などを含めた郷土資料を中心に新聞記事・官報などの文献調査を行った。これらの資料から明治22年7月28日熊本地震について地域ごとの被害情報をまとめ、家屋、橋、地割れなどの被害情報をもとに宇佐美(2016)の基準を用いて各地の震度を推定し、震度分布図を作成した。被害情報から震度を推定しているため、被害を生じる震度4以上の震度しか求めることはできない。

得られた震度分布とJ-SHISで公開されている表層地盤増幅率の分布とを比較した。概ね震源から離れるほど震度は小さくなっているが、離れていても表層地盤増幅率の大きな場所では大きな被害が出ていることがわかる。また求められた震度分布は北側に広がる傾向にあるが、その原因として震央の北側に比較的揺れやすい地盤が広がっていることも関係していると思われる。

すでに武村(2016)が、今村(1920)による家屋の被害統計に基づいてこの地震の詳細震度分布を作成している。本研究の結果は武村の結果とほぼ一致するが、震度が大きく異なった場所がいくつかあった。3段階（震度4→震度6）大きく判定された村が2カ所、2段階（震度5弱→震度6）大きく判定された村が3カ所である。それらの地点について、表層地盤増幅率の分布及び地震発生当時の土地利用を参考にして原因を検討した。

震度が2段階違った玉名郡伊倉町では、「家屋全倒1、半倒4、橋梁壊落2」などの被害があったことが報告されている。そこで同町について明治期の地形図から当時の家屋の分布を抽出し、表層地盤増幅率の分布と重ね合わせてみた。すると当時の家屋は揺れにくい地盤に立地していたということが確認できた。一方、橋のある河川域は地盤増幅率が大きい。その結果家屋の全半潰率のみから震度を推定している武村の結果では、橋梁壊落など他の被害も含めて検討している本研究より小さな震度になったことがわかった。上益城郡飯野村や託麻郡廣畑村、上益城郡津森村でも同様の傾向がみられた。上益城郡杉合村は、家屋被害がなかったために武村では震度4とされた地域である。官報によると「裂地2、橋梁壊落2」の被害がでているため、本研究では震度6としたが、この村のほぼ全域が軟弱地盤となっており、家屋被害はなかったものの実際の揺れは場所によって震度4よりは大きかったことが推測される。このように、地震の揺れは表層地盤の影響によって同じ地区の中でも強弱があるということが確認された。歴史地震のように被害の情報のみで震度を求める場合には、地盤の影響がかなり含まれること、どのような被害情報から決められた震度かを注意して使う必要がある。

また今回明治期の土地利用と地盤増幅率の分布を重ねてみたことで、当時の家屋が比較的地盤の良好な場所に位置していることがわかった。現在は当時と比べて比較的弱い地盤の上にまで家屋の分布が広がっている。かつては被害が少なかった地域でも、再び同規模の地震が起きた場合、大きな被害が出る恐れがあることは注意すべきである。

キーワード：明治22年熊本地震、震度分布

Keywords: the 1889 Meiji Kumamoto Earthquake, Seismic Intensity Distribution

2016年熊本地震の被災地域における長周期地震動シミュレーション Simulation of Long-Period Ground Motion in Damaged Areas during the 2016 Kumamoto Earthquake

*室井 謙吾¹、山中 浩明¹、地元 孝輔¹、津野 靖士²、三宅 弘恵³、山田 伸之⁴

*Kengo Muroi¹, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹, Seiji Tsuno², Hiroe Miyake³, Nobuyuki Yamada⁴

1. 東京工業大学 環境・社会理工学院、2. 鉄道総合研究所、3. 東京大学地震研究所、4. 福岡教育大学

1. Tokyo Institute of Technology Department of Environmental Science and Technology, 2. Railway Technical Research Institute, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. University of Teacher Education Fukuoka

2016年熊本地震では、4月14日にM6.5の地震、16日にM7.3の地震が起こった。熊本県益城町では震度7を2回観測し、木造家屋の倒壊などの被害が生じた。本研究では、地震調査研究推進本部の地下構造モデルとGMSを用いて、2016年熊本地震の余震による地震動シミュレーションを行い、被災地域における強震動特性を理解することを試みた。対象地震としては、4月19日のM5.5、深さ10kmの地震を考えた。まず、岩盤サイト(KMM014)における波形を検討すると、計算波形は観測波形における波形の特徴をよく捉えていた。次に、山中ほか(2016)による被災地域の余震観測における観測記録と計算波形を比較した。被災地域における計算波形では、短周期のS波が5秒間程度卓越した後、より長周期の波が続くという観測波形と同様の傾向が見られた。また、一部の観測点において、地震動の大きい観測点では被害が大きく、地震動の小さい観測点では被害が小さいといった関連性を見ることができた。

キーワード：熊本地震、地震動シミュレーション、強震動

Keywords: Kumamoto Earthquake, Simulation of ground motion, Strong ground motion

A Study on Characteristics of Long-Period Ground Motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha Nepal earthquake aftershocks

*重藤 迪子¹、高井 伸雄²、Bijukchhen Subeg²、一柳 昌義²、笹谷 努²

*Michiko Shigefuji¹, Nobuo Takai², Subeg Bijukchhen², Masayoshi Ichianagi², Tsutomu Sasatani²

1. 九州大学、2. 北海道大学

1. Kyushu University, 2. Hokkaido University

The Indian Plate underthrusts the Eurasian Plate resulting in occurrence of a number of large earthquakes in the Nepal Himalaya. The Kathmandu Valley is formed by drying of a paleo-lake and consists of thick soft sediment below the center of city. We have installed a strong motion east-west line array observation (four sites; one rock site and three sedimentary sites) in the valley, on 2011, to understand the site effects of the valley. On 25 April 2015, a large M_w 7.8 earthquake occurred along the Himalayan front. The epicenter was near the Gorkha region, 80 km north-west of the Kathmandu Valley, and the rupture propagated eastward from the epicentral region passing through the valley and reached about 80 km north-east of the valley. The aftershock of M_w 6.6 occurred on 25 April 2015 ~80 km northwest of Kathmandu at epicenter near to that of the main shock. The other three large aftershocks were originated ~80 km east of Kathmandu; the aftershock of M_w 6.7 occurred on 26 April 2015 and the aftershocks of M_w 7.3 and M_w 6.3 occurred on 12 May 2015. The ensuing aftershock activities are concentrated in the eastern part of the rupture area. After the mainshock, we installed additional four stations on sedimentary sites on 05 May 2015. We discuss the characteristics of long-period ground motion in the Kathmandu Valley based on these strong motion records from large aftershocks ($M_w > 6$).

The acceleration waveforms at the sedimentary sites are longer and larger than those at the rock site. We checked acceleration Fourier spectra of 40.96 sec of S-wave with rotated acceleration records for each sites and compared between the rock site and other sedimentary sites. In high frequency range (around 0.2 Hz ~), we can observe the strong amplification factor in each site condition. On the other hand, the amplification are extremely small in low frequency (~ around 0.2 Hz) on horizontal components, whereas amplitude are almost same on vertical component. In low frequency range, the spectra have peak in 0.1 ~ 0.2 Hz even in the rock site. Furthermore, the spectral shape on the low frequency range is proportional not to the square but to the cube of frequency. The transition frequency is around 0.2 Hz, but this frequency has small variations by earthquake. Regarding M_w 7.3, M_w 6.3 aftershocks, vertical components semblance analysis show that 0.1 Hz waves are propagated from epicenter with 3 km/sec phase velocity. The particle motion of vertical-radial component shows the retrograde motion which is fundamental Rayleigh wave.

Considering the shape of spectra in low frequency range, we tried to calculate 1-D theoretical waveforms by the discrete wave number method (Takeo, 1985) with 1-D velocity structure (Crust1.0; Laske *et al.*, 2013) and GCMT source mechanism. By this simulation, the surface waves are contained in the analyzed time window; Rayleigh and Love waves which have 0.1 Hz power reached just after direct S-wave initial motion. Therefore, we understood that the shape of the low frequency range are affected by these surface waves.

Spectral ratios of the sedimentary sites to rock site have different dominant frequency (0.2 ~ 0.8 Hz) and amplitude at each sites. These differences of the spectral shape in closed area speculate the complexity of the basin structure. The predominant frequencies of the spectra could be roughly explained by theoretical response based on 1-D structures made with geological data and gravity anomaly data (Bijukchhen *et al.*, 2016).

During examination of long period motion on large aftershocks, the characteristics are strongly affected by surface wave. We will study the excitation and propagation of surface wave of the Kathmandu basin extensively, try to examine the amplification characteristics quantitatively, and construct the velocity structure of each site in detail.

キーワード：2015年ネパール・ゴルカ地震、カトマンズ盆地、長周期地震動

Keywords: The 2015 Gorkha Nepal earthquake aftershocks, Kathmandu Valley, Long-Period Ground Motion

熊本平野における2016年熊本地震の余震と微動観測

Observation of microtremors and aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake in the Kumamoto basin

*地元 孝輔¹、山中 浩明¹、津野 靖士²、山田 伸之³、三宅 弘恵⁴

*Kosuke Chimoto¹, Hiroaki Yamanaka¹, Seiji Tsuno², Nobuyuki Yamada³, Hiroe Miyake⁴

1. 東京工業大学、2. 鉄道総合技術研究所、3. 福岡教育大学、4. 東京大学

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Railway Technical Research Institute, 3. University of Teacher Education Fukuoka, 4. The University of Tokyo

2016年熊本地震により甚大な被害を受けた地域において、著者らは余震の臨時強震観測を実施してきた (Yamanaka et al., 2016)。益城町、西原村、阿蘇市、南阿蘇村での観測は終了しているが、熊本市内の観測は現在も継続している。本報では、熊本平野で観測された強震記録の分析、および微動探査を実施した結果を報告する。

熊本市内では、地震直後の2016年4月17日から臨時強震観測点の設置を開始しているが、その後、観測点の移設や増設をしており、ここでは主に2016年7月に観測された余震の分析を行った。観測点は、熊本市中央区に2点、東区1点、南区3点、西区の2点である。西区と中央区では、マンションに被害があった場所と液状化が発生した場所に近い。他の観測点周辺では大きな被害はみうけられない。使用した機械は、ミットヨ製加速度計JEP-6A3 (感度は10V/Gまたは2V/G)、白山工業製ロガーLS7000XTまたはLS8800である。100Hzサンプリングのオフライン連続観測とし、GPSによる時刻補正を行っている。

観測された主な余震は、M2~4程度の22地震である。各観測点で得られた余震記録は変化に富んでいる。熊本平野の北西に位置する観測点と、マンション被害があった西区の観測点では高周波が卓越している。南区の観測点では、比較的長周期の後続位相がみられる。このような傾向は、リファレンス観測点に対するスペクトル比にもみられる。

各余震観測点では微動アレイ探査により、表層地盤のS波速度構造モデルを推定した。いずれの観測点でも、S波速度が150m/s程度の低速度層が確認され、その厚さは15m以上である。南区の観測点では、その厚さは25m以上であった。中央区の段丘面に位置する観測点は、2m程度である。表層地盤モデルから求められる増幅特性は、周期0.5~1秒程度に一次卓越周期をもっており、南区の海岸に近い観測点では周期1秒以上で卓越する。

本研究の一部は、科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水洋)の支援によって実施されたものである。

キーワード: 2016年熊本地震、臨時強震観測、余震、微動

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Temporary Strong Motion Observation, Aftershocks, Microtremors

2016年鳥取県中部地震の臨時余震観測および被害地域における微動観測 Observation of aftershock due to the 2016 mid Tottori prefecture earthquake and microtremor observation in the structural damage area of mid Tottori prefecture, Japan

*野口 竜也¹、香川 敬生¹、吉田 昌平¹、中井 翔¹、上野 太士¹、吉見 和¹、有村 翔也¹

*Tatsuya Noguchi¹, Takao Kagawa¹, Shohei Yoshida¹, Sho Nakai¹, Hiroshi Ueno¹, Kazu Yoshimi¹, Shoya Arimura¹

1. 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

1. Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Civil Engineering Course Graduate School of Engineering, Tottori University

2016年10月21日に鳥取県中部の地震（Mj6.6）の地震が発生し、震源となった倉吉市、北栄町、三朝町など鳥取県中部の広範囲で建物被害が生じた。倉吉市および北栄町の被害の大きい地域において地震発生直後から臨時余震（強震）観測を実施し、自治体に常時設置されている震度計の地震記録とともにデータの整理と分析を行った。また、臨時観測点および被害が甚大であった地域において微動観測を実施した。その結果、対象地点、地域における微動H/Vとその卓越周期（分布）が得られた。さらに余震記録の地震動H/Vと微動H/Vの比較、微動アレイ観測によるS波速度構造によるSH伝達関数の算出等により、サイト特性の評価を行った。

キーワード：2016年鳥取県中部地震、余震観測、微動観測

Keywords: 2016 mid Tottori Prefecture earthquake, aftershocks observation, microtremor observation

2016年熊本地震の強震記録を用いた岡山県内のサイト特性の評価 Site characteristics in Okayama prefecture inferred from strong-motion records of the 2016 Kumamoto earthquake

*畝岡 歩¹、小松 正直²、竹中 博士²、西村 敬一³

*Ayumu Uneoka¹, Masanao Komatsu², Hiroshi Takenaka², Keiichi Nishimura³

1. 岡山大学、2. 岡山大学大学院、3. 岡山理科大学

1. Okayama University, 2. Graduate school of Okayama University, 3. Okayama University of Science

2016年4月16日1時25分に熊本県を震源とする M_{JMA} 7.3の熊本地震が発生した。西南日本を中心に広い地域で有感であり、岡山県においても岡山市南区や真庭市などで震度3を観測した。震源から岡山県内の観測点の方位角は40~50度と限られており、震源とパスの影響はほぼ同じであると見なすことができる。したがって、岡山県内で観測された地震動の違いは主に観測点直下の地盤構造が大きく影響している。本研究では岡山県内で得られたこの地震動の波形記録を解析し、各観測点における地盤増幅特性を調べた。使用した波形データは岡山県内に設置されている防災科研のK-NETとKiK-netや、自治体の震度観測網で得られた強震波形記録である。各観測点の3成分記録から地動最大加速度（PGA）と地動最大速度（PGV）の分布を求めると、北部の山間部では真庭市蒜山を除いてPGAとPGVが小さく、笠岡市~岡山市南部にかけての沿岸部及び、山間部の真庭市蒜山ではPGAとPGVが大きい観測点が見られた。また各観測点においてS相のフーリエ振幅スペクトルを計算した。スペクトルを計算する際、S相の継続時間はPolarization analysisより約11秒であることから、S波記録10秒間をコサインテーパーで切り出した。そして、地盤による影響が少ないと思われる基準観測点と各観測点のスペクトル比をとった。基準観測点には、PS検層より地下10 m付近でS波速度が2000 m/sと速く、フーリエ振幅スペクトルにも目立ったピークが見られない観測点OKYH12（美作市大原）を選定した。さらに、各観測点についてH/Vスペクトル比をとり、2種類のスペクトル比の1次ピーク周波数をそれぞれ読み取った。基準観測点とのスペクトル比とH/Vスペクトル比、それぞれの1次ピーク周波数や概形を比較したところ、沿岸部や真庭市蒜山の観測点ではほぼ対応しており、1次ピーク周波数は低い。そのほかの観測点では1次ピーク周波数は先述の2地域より高いが、H/Vスペクトル比の1次ピーク周波数の方が相対的に低くなる傾向にある。さらに、これらの結果と防災科研が公開しているJ-SHISの微地形区分や地盤増幅率を比較すると、干拓地である震度観測点3320112（岡山市南区浦安）や盆地に位置する3366450（津山市中北下）では1次ピーク周波数が低く、かつ地盤増幅率が高いため、厚い地盤によって地震波がよく増幅されると考えられる。しかし、粘土や砂が堆積した谷底低地に分類される震度観測点3321430（真庭市蒜山上福田）と3358860（真庭市蒜山下福田）ではPGAとPGVが高く、かつ1次ピーク周波数が低いものの、J-SHISの地盤増幅率は低いため、観測事実をモデルが説明できていない。この2観測点についてはJ-SHISの地盤増幅率モデルの改良が必要であると考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETとKiK-net、岡山県の震度観測網で得られた強震波形記録を使用しました。

キーワード：サイト特性、2016年熊本地震、H/Vスペクトル比

Keywords: Site characteristics, the 2016 Kumamoto earthquake, H/V spectral ratio

強震記録のスペクトルインバージョンによる長野県北部地域の地盤増幅特性の推定

Estimation for site amplification characteristics from spectral inversion of ground motion records in Northern Nagano area

*河合 亮太¹、山中 浩明¹、地元 孝輔¹、津野 靖士²

*kawai ryouta¹, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹, Seiji Tsuno²

1. 東京工業大学、2. 鉄道総合技術研究所

1. institute titech of tokyo, 2. Railway Technical Research Institute

2014年11月22日に起きた長野県神城断層地震は最大震度6弱の地震であった。この地震の特徴として、震度5強を観測した地点から直線距離5km程度離れた地域に被害が密集していた点があげられる。その局所的な地震被害と地盤増幅の関係を明らかにするため、地元ほか（2016）による余震観測の記録と強震観測網を用いて主に長野県北部地域を対象とした強震記録のスペクトルインバージョンを行い、地盤増幅を推定した。スペクトルインバージョンによって分離された伝播経路のQ値は既往の研究と矛盾のない結果を示し、震源特性はオメガ2乗モデルによって説明することができた。被害の大きい地域の地盤増幅は、周波数1-3[Hz]で他の地点と大きな違いを示した。また、地盤増幅倍率とAVS30の相関を見ると、低周波数で相関がよく出ており、本地震での局所的な被害がAVS30の小さい表層が軟らかい地域であるため引き起こされたと考えられる。

キーワード：スペクトルインバージョン、地盤増幅、2014年長野県北部の地震

Keywords: Spectral inversion technique, Site amplification, 2014 Northern Nagano

関東地域における微動アレイ観測記録を用いた工学的基盤の設定方法に関する検討

A method for setting engineering bedrock using records of miniature array microtremor observation in Kanto Area

*若井 淳¹、先名 重樹¹、神 薫¹、長 郁夫²、松山 尚典³、藤原 広行¹

*Atsushi Wakai¹, Shigeki Senna¹, Kaoru Jin¹, Ikuo Cho², Hisanori Matsuyama³, Hiroyuki Fujiwara¹

1. 防災科学技術研究所、2. 産業技術総合研究所、3. 応用地質

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. OYO

1. はじめに

巨大地震による被害推定を行う上で、広域における広帯域の地震動予測精度を向上させることは重要である。そのためには、より高度化された地盤モデルの構築が重要な課題の一つである。

防災科研ではこれまで、広帯域(0.1Hz~10Hz程度)の地震動特性を適切に説明することを目的として、ボーリングデータおよび物性値データ(主に微動観測データ)を収集し、浅部・深部を結合した地盤モデルを作成してきた。現在、防災科研では、内閣府SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」の⑤「リアルタイム被害推定・災害情報収集・分析・利活用システム開発」のテーマの1つである「地震被害推定のための地下構造モデルの構築」において、関東・東海地域の広域地盤モデルの構築を実施している。

本検討では、SIP事業の一環で2014年度後半から2016年度までに極小アレイ微動観測を実施した関東1都6県を対象として、極小アレイ微動観測記録から得られるS波速度構造を用いて、既存のボーリングデータや表層地質情報に基づいて作成された初期地質モデルの調整を行い、当該地域における浅部地盤モデルの高度化を試みる。ここでは特に、浅部・深部統合地盤モデルの構築を念頭におき、浅部および深部地盤の遷移領域に相当すると考えられる工学的基盤面周辺(Vs300m/s~500m/s層程度)の速度層境界面に着目した検討を行う。

2. 極小アレイ微動観測

常時微動観測については、関東地域の主に低地・台地において、アレイ半径60cmの「4点極小アレイ」および1辺3m~10m超の「3点不規則アレイ」を組み合わせたアレイ観測を実施した。これらの観測は、関東1都6県の公道上や地震観測点(K-NET, KiK-net, SK-NET, MeSO-net および気象庁)付近など合計で約10,000地点(2017年2月現在)において実施した。また、一体型常時微動観測機材JU210/215¹⁾およびJU410¹⁾を用いて、約1~2km間隔で各地点15分間の観測を行った。サンプリング周波数は100Hzもしくは200Hzとした。

3. 浅部地盤S波速度構造の解析手法とその結果

本検討では、近年の研究^{2)~4)}で提案・高度化されている微動観測に基づく浅部地盤探査手法により、1次元S波速度構造の評価を行った。解析は、微動解析ソフト「BIDO」および「Microtremor Array Tools」等を用いて、以下の手順で行った。

- (1)分散曲線およびH/Vスペクトル比の自動解析, 読み取り
- (2)AVS30等の増幅特性の抽出
- (3)分散曲線の直接深度変換(Simple Profiling Method; SPM)
- (4)簡易逆解析(Simple Inversion Method; SIM)等の逆解析処理
- (5)H/Vと3,4の工程で得られた速度構造を初期値としたジョイントインバージョン(線形化逆解析)
- (6)V_s350およびV_s500上面深度の抽出

以上により得られる1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面について、既存の初期地質モデルと比較・検討した上で、必要に応じて修正を行った。その結果、河川部ではボーリングデータに基づくS波速度構造モデル（初期地質モデル）と調和的であった。さらに、ボーリング調査結果のみからでは判断が難しい、工学的基盤速度層周辺（ $V_s300 \sim V_s500$ ）の3次元構造が明瞭になった。

4. まとめ

本検討では、関東地域の主として低地・台地における極小アレイ微動観測で得られた記録に基づき、1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面を推定し、当該地域における既存の初期地質モデルと比較・検討した上で、可能な限り適切に速度層境界面を設定した。今回の取り組みは、今後の地震動予測のための地盤のモデル化手法の要となるであろう。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理人：JST）によって実施されました。

参考文献

- 1)先名重樹, 藤原広行, 微動探査観測ツールの開発その1-常時微動解析ツール-, 防災科学技術研究所研究資料, 313, 2008.
- 2)長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三, 極小アレイによる新しい微動探査法, 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, 物理探査, 61(6), 457-468, 2008.
- 3)Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara, Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78, KS13-KS23, doi:10.1190/geo2012-0248.1, 2013.
- 4)長郁夫, 先名重樹, 極小微動アレイによる浅部構造探査システムー大量データの蓄積と利活用に向けてー, *Synthesiology*, Vol.9 No.2, pp.86-96, 2016.

キーワード：工学的基盤、S波速度構造モデル、極小アレイ、常時微動

Keywords: engineering bedrock, S-wave velocity structure model, miniature array, microtremor

微動アレイ観測による関東地域全域の3次元S波速度構造モデルの構築<その2>

Modeling of 3D S-wave velocity structure for sedimentary layers in Kanto area, using microtremor array surveys -part 2-

*神 薫¹、先名 重樹¹、若井 淳¹、藤原 広行¹

*Kaoru Jin¹, Shigeki Senna¹, Atsushi Wakai¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

防災科研は、地震動特性の評価の精度を向上させる目的で、これまでに関東地域において浅部・深部統合地盤モデルの作成に取り組んできており¹⁾、さらにこの地盤モデルを高度化するため、2009年～2016年にかけて関東地域の低地部において、微動探査（アレイ・単点・極小アレイ）を高密度に実施してきた。先名ほか(2016)²⁾は、2015年度までに実施してきた約400地点の微動アレイ、約5000地点の極小アレイ微動探査結果と強震記録を用いてそれまでの地盤モデルをチューニングし、成果を得ている。

ここでは、深部地盤を対象として実施している微動アレイ探査について、2016年に新たに実施した約100地点のデータを加えてさらにチューニングを施した結果を報告する。

2. 微動アレイ探査（観測と解析）

防災科研はこれまでに関東地域7都県の低地部において、約5km間隔、414地点で微動アレイ探査を実施してきた。これに加え2016年には、千葉・東京・神奈川を対象に新たに103地点において追加観測を行い、関東地域における実施合計は517地点（うち強震観測地点351点）となった。

展開するアレイの大きさは、工学的基盤相当層以深をターゲットとしていることから、半径100～400m（一部半径800mでの観測も実施）の正三角形アレイおよび辺長75mのL字型としている。なお観測に用いた微動計は、JU210、JU215（白山工業社製）およびアレイの一部ではVSE-15D6（東京測振社製）である。

このようにして得られた位相速度からS波速度構造を推定するために、強震記録のR/Vスペクトル（または微動記録のH/Vスペクトル）を併せて、ジョイントインバージョンを実施した。

なお、既往の微動探査が実施され結果が公表されている³⁾⁴⁾地点等では、その既往微動アレイの位相速度と本研究での観測で得られた位相速度とを接合して、S波速度構造解析に使用した。

3. まとめ

微動アレイ探査と強震記録により、特に今回データが追加された東京周辺において、500～900m/s程度の中速度層(0.5～3Hz程度の周波数帯に対応)が修正された。作成した地盤モデルは差分法を用いて検証し、これまでの地盤モデルから大きく改善されたことが確認できている。

防災科研では、2016年より東海地域においても微動観測を展開している。今後は、東海地域における統合地盤モデルの作成に取り組んでいく予定である。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理人：JST）によって実施されました。

参考文献）

1) Senna,S,, T.Maeda, Y.Inagaki, H.Suzuki, H.Matsuyama, and H.Fujiwara(2013) : Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation, J.Disaster Res.,8,889-903.

2) 先名ほか(2016) ; 強震動評価のための関東地域における浅部・深部統合地盤モデルの構築, 地球惑星科学

連合大会, SSS25-12.

3) 松岡・白石(2002) ; 関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性ー埼玉県南部地域の三次元S波速度構造の推定ー, BUTSURI-TANSA, Vol.55, No.2, pp.127-143.

4) 山中浩明・山田伸之(2002) : 微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, 物理探査, 55, pp.53-65.

キーワード : 微動アレイ探査、S波速度構造、地下構造モデル

Keywords: microtremor array observation, S-wave velocity structure, Underground structure model

強震動計算のための大分県域の3次元速度構造モデル 3D velocity structure of Oita prefecture, Kyushu, Japan for strong ground motion simulation

*吉見 雅行¹、松山 尚典²、鈴木 晴彦²、谷田貝 淳²、林田 拓己³、松島 信一⁴、竹中 博士⁵、三宅 弘恵⁶
、竹村 恵二⁷

*Masayuki Yoshimi¹, Hisanori Matsuyama², Haruhiko Suzuki², Atsushi Yatagai², Takumi Hayashida³, Shinichi Matsushima⁴, Hiroshi Takenaka⁵, Hiroe Miyake⁶, Keiji Takemura⁷

1. 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2. 応用地質株式会社、3. 建築研究所、4. 京都大学防災研究所、5. 岡山大学、6. 東京大学、7. 京都大学

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Oyo Corporation, 3. Building Research Institute, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Okayama University, 6. Tokyo University, 7. Kyoto University

大分県域を対象に地震基盤以浅の3次元速度構造モデルを作成した。大分県全域の深部速度構造モデル（最小S波速度 500m/s）と、大分平野域の浅部速度構造モデルから成る。

1) 大分県全域の深部速度構造モデル

別府-万年山重点観測にて得られた微動アレイ観測結果、自治体震度観測点でのR/Vスペクトル、微動観測結果等を用い、既往速度構造モデルを修正した。従来に比べ、九重、由布院、大野、竹田周辺におけるVs3.1 km/s、2.1、1.7、1.4 km/s層上面深度が浅く修正された。中小地震の再現結果は良好である。

2) 大分平野域の浅部速度構造モデルの作成

浅部・深部統合地盤モデル作成方法（先名ほか）に概ね準拠した手法で250mメッシュの速度構造モデルを作成した。大分平野のボーリングデータを収集し微地形区分も考慮して、上部砂層・砂礫層、中部泥層、下部砂・粘性土層の地質層構造を推定し、土質、N値のメッシュモデルを作成した。このメッシュモデルの土質、N値と深度を用い、太田・後藤の経験式にてS波速度に変換し深部構造と接続したところ、大分平野稠密微動アレイ観測（吉見ほか、2016）による位相速度を概ね説明することができた。

本研究は、文部科学省委託事業「別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）における重点的な調査観測」の一環として実施しました。

キーワード：S波速度構造モデル、地震動予測、地盤震動、微動探査

Keywords: shear wave velocity structure model, ground motion prediction, site amplification, microtremor observation

地震波干渉法を用いた別府湾周辺地域における深部地盤構造モデルの検証 Evaluation of Three-dimensional Basin Structure Model beneath Beppu bay, Oita Prefecture, using Seismic Interferometry

*林田 拓己¹、吉見 雅行²、小松 正直³、竹中 博士³

*Takumi Hayashida¹, Masayuki Yoshimi², Masanao Komatsu³, Hiroshi Takenaka³

1. 建築研究所 国際地震工学センター、2. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、3. 岡山大学大学院 自然科学研究科
1. IISEE, Building Research Institute, 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. Graduate School of Natural Science and
Technology, Okayama University

2014年8月下旬より、別府湾および周辺地域の深部地盤構造モデルの検証を目的として、別府湾を中心とした東西65km、南北30kmの範囲内の12地点（観測点間隔約12km）において広帯域連続微動観測を実施している（林田・他、2015；Yoshimi and Hayashida, 2017）。2014年9月から2016年4月（熊本地震発生前まで）の約20か月間にわたって観測された連続観測記録に対して地震波干渉法を適用し、観測点間の相互相関関数（ZR, ZT, ZZ, RR, RT, RZ, TR, TT, TZ各成分）を導出した。観測点間ペアは66組で、観測点間距離は6.4～65.2kmに及ぶ。相互相関関数のスタッキング処理の結果、多くの観測点ペアにおいて表面波に対応した波群が確認できた。また、波群の明瞭性も前報告（林田・他、2015）と比較して向上した。波群には、季節を問わず常に形状が類似したもの（東西方向に近い配置の観測点ペア）、形状に季節変動を伴うもの（南北方向に近い配置の観測点ペア）が見られた。また、基盤岩深度が深く分布する別府湾内を跨ぐ観測点ペアでは、他の領域と比べて波群が複雑な形状となる。本研究ではまず、これらの相互相関関数が観測点間のグリーン関数に相当すると見なし、マルチプルフィルタ解析（Dziewonski et al., 1969）による表面波（Rayleigh波およびLove波）群速度の分散性の推定を行い、周波数毎の群速度の空間分布を検討するとともに、既往の地震波速度構造モデル（J-SHISモデル）より推定される理論値との比較を行った。続いて、三次元有限差分法（HOT-FDM; Nakamura et al., 2012）を用いて観測点間の理論グリーン関数を導出し、相互相関関数との比較を行った。なお、有限差分法を行う際には奥仲・他（2016）によるモデル（J-SHIS深部地盤構造モデルに陸上・海底地形と海水を付加したもの：東西90km、南北100kmの領域、グリッド間隔50m）を使用し、各観測地点上で鉛直加振および水平加振を行った際に他地点で観測される波形（0-60秒間）を計算した。陸域を結ぶ観測点ペアでは、0.1-0.5Hzの周波数帯域において群速度およびグリーン関数の特徴を既往の地下構造モデルによって概ね再現することができるが、別府湾内を跨ぐ観測点ペアにおいては、0.3Hz以上の周波数帯域において理論値および理論波形との乖離が見られる。ただし、別府湾を挟む観測点間ペアの相互相関関数は波群が不明瞭であるケースも多いことから、波群の明瞭性や対称性など、グリーン関数としての妥当性を考慮した上での詳細なモデルの検証が必要である。

謝辞：

本研究は、文部科学省委託事業「別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）における重点的な調査観測」の一環として実施しました。

キーワード：地震波干渉法、表面波、群速度、グリーン関数、微動、有限差分法

Keywords: seismic interferometry, surface wave, group velocity, Green's function, ambient noise, finite difference method

極小微動アレイ解析による森本・富樫断層帯の2次元速度構造モデルの推定

The Estimation of 2D S-wave velocity structure model across the Morimoto-Togashi fault zone through miniature microtremor array analysis

*松本 なゆた¹、平松 良浩²、先名 重樹³

*Nayuta Matsumoto¹, Yoshihiro Hiramatsu², Shigeki Senna³

1. 金沢大学大学院自然科学研究科、2. 金沢大学理工研究域自然システム学系、3. 防災科学技術研究所

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Around the Noto peninsula, ENE-WSW or NE-SW striking reverse faults developed under the E-W compression stress in Quaternary (Okamura, 2007). It is important to reveal the subsurface structures of the faults, which have formed the topography of this region, to understand the geotectonic history of this area.

The object of our study is to reveal subsurface structures of the Morimoto-Togashi fault zone, which is located in southern part of the peninsula. The probability of a large earthquake occurring within the next 30 years is high, 2-8%, and the fault passes the city center of Kanazawa. Therefore, this study is also useful for the disaster prevention. A seismic reflection survey around Togiya, the north part of the Morimoto fault, suggests that the fault structure is an east dipping reverse fault with 40-60 degree, (AIST, 2008). However, the details of the subsurface structures are still unknown. Additionally, the gravity anomaly analysis cannot detect the structural boundary along the fault. In this study, we conduct miniature array analysis (Cho et al., 2013) using miniature arrays with a radius of 0.6 m and irregular-shaped arrays with a radius of 5-15 m. Sampling frequency is 200 Hz and the observation duration is around 15 minutes. Seismometers used for the observation are JU410 manufactured by Hakusan Corporation. We set 11 lines across the fault zone. The intervals of the observation points are 100-200 m. We analyze data with the software BIDO and infer the two-dimensional S-wave velocity sections. The software BIDO combines a simple profiling method (e.g., Heukelom and Foster, 1960), where an S-wave velocity structure is calculated directly from a dispersion curve, and a simplified inversion method (Pelekis and Athanasopoulos, 2011) to estimate the S-wave velocity structure. Around Togiya where the seismic reflection survey was held, the obtained S-wave velocity section shows a discontinuous structure of bedrock ($V_s=500$ m/s) on the 100 m east side of the surface fault trace. This discontinuity infers the east dipping structure with a high angle, corresponding to the faulting type of the fault.

キーワード：常時微動、極小アレイ、不規則アレイ、速度構造、活断層

Keywords: microtremor, miniature array, irregular-shaped array, velocity structure, active fault

2016年熊本地震による被災地における重力探査にもとづく基盤構造の推定

Density Structure Model Estimated from Gravity Survey around Mashiki damaged by 2016 Kumamoto Earthquake

荒木 俊²、野口 竜也³、駒澤 正夫⁴、有村 翔也³、田村 充宏³、中山 圭³、*盛川 仁¹、宮本 崇⁵、飯山 かほり¹、秦 吉弥⁶、吉見 雅行⁷、香川 敬生³、後藤 浩之⁸

Shun Araki², Tatsuya Noguchi³, Masao Komazawa⁴, Shoya Arimura³, Mitsuhiro Tamura³, Kei Nakayama³, *Hitoshi Morikawa¹, Takashi Miyamoto⁵, Kahori Iiyama¹, Yoshiya Hata⁶, Masayuki Yoshimi⁷, Takao Kagawa³, Hiroyuki Goto⁸

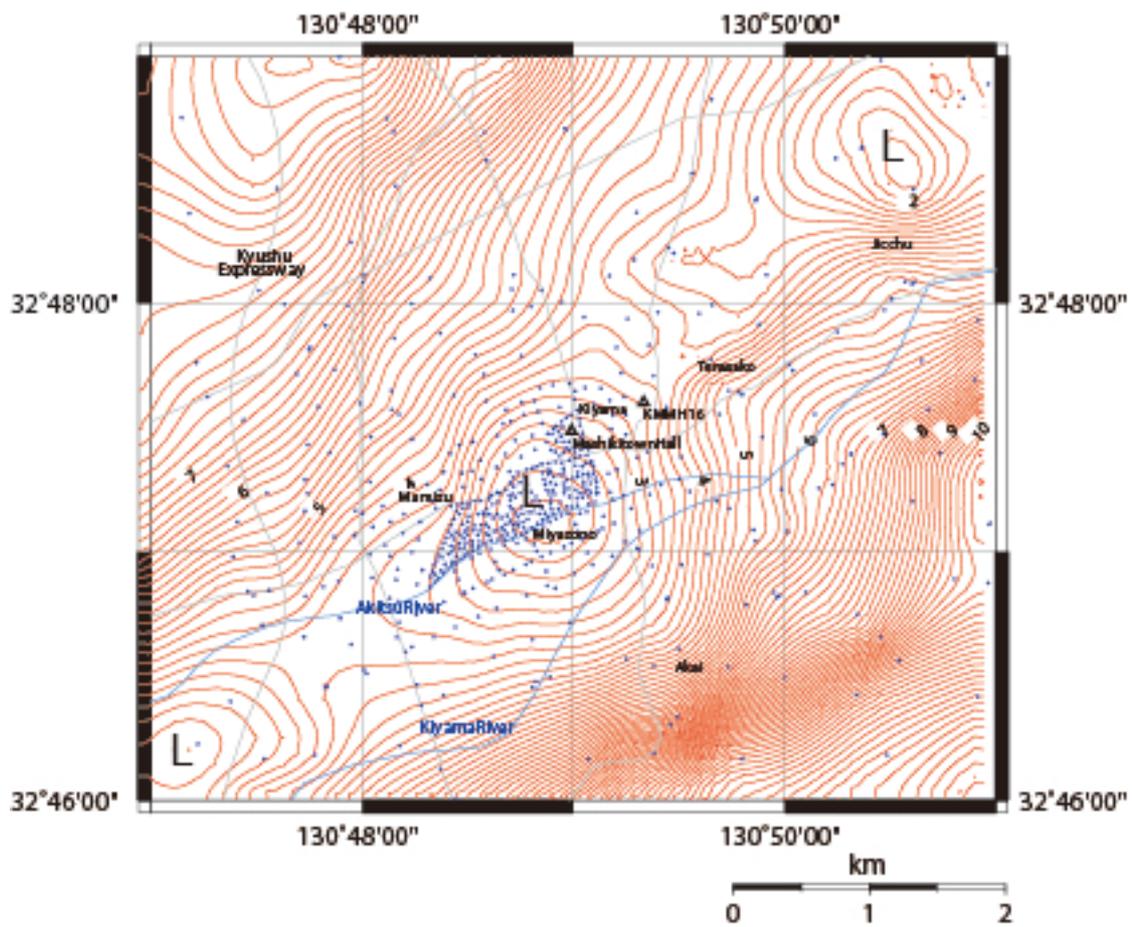
1. 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系、2. 東京工業大学 工学部 土木・環境工学科、3. 鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤専攻、4. 応用地質株式会社、5. 山梨大学 工学部 土木環境工学科、6. 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻、7. 産業技術総合研究所、8. 京都大学 防災研究所

1. Department of Urban Design and Built Environment, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Institute of Technology, 3. Department of Management Social Systems and Civil Engineering, Tottori University, 4. Oyo Corporation, 5. Department of Civil Engineering, Yamanashi University, 6. Division of Global Architecture, Osaka University, 7. Geological Survey of Japan, AIST, 8. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

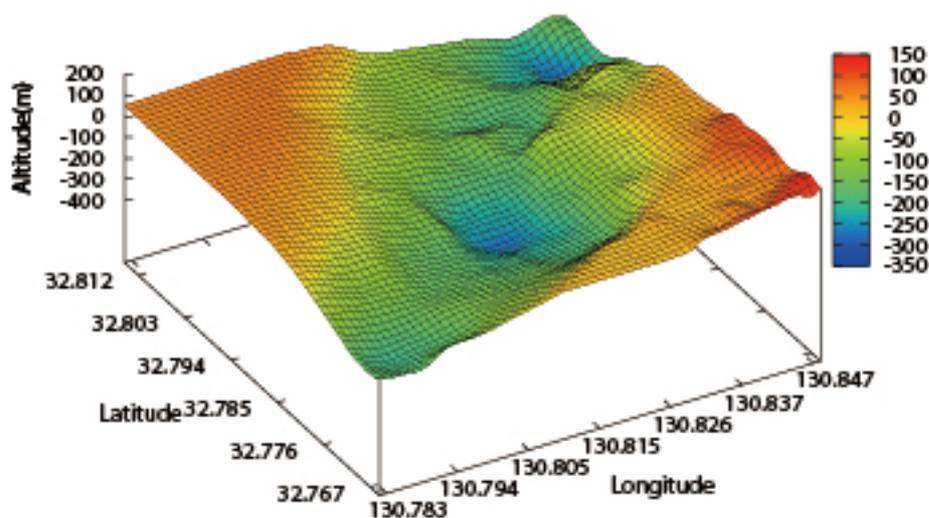
Gravity survey has been carried out around downtown of Mashiki, Kumamoto, Japan, where is severely damaged by 2016 Kumamoto earthquake, from November 28 to December 2, 2016. We applied three LaCoste gravimeters and one Schintrex CG-3M. Closed observations were carried out at more than 300 sites around the central part of Mashiki with about 50-meter intervals. And, more than 150 sites surround the central part with 250- to 500-meter intervals. The observation sites satisfy enough density to discuss density structure shallower than 500-meter depth around central part of Mashiki. After applying some corrections to the observed data, the Bouguer anomaly is calculated under the assumed density of 2.4 g/cm³. Furthermore, gravity basement is estimated under an assumption of two layered medium with density difference of 0.5 g/cm³. As a result, a graben runs parallel to the Akitsu river and some isolated small basins are found inside of the graben. The central part of Mashiki is located immediately above of the one of such the small basins. This may suggest that the focusing phenomena of seismic rays.

キーワード：重力探査、熊本県益城町、密度構造

Keywords: Gravity Survey, Mashiki, Kumamoto, Japan, Density Structure



Bourier anomaly (assumed density = 2.4 g/cm³)



Gravity basement (density difference = 0.5 g/cm³)

Microtremor Array Measurement Survey and Strong Ground Motion Observation Activities of the SATREPS, MarDiM Project, Turkey

*seckin ozgur citak¹, Safa Arslan², Ozlem Karagoz^{3,7}, Kosuke Chimoto³, Oguz Ozel², Hiroaki Yamanaka³, Bengi Aksahin², Ken Hatayama⁴, Michihiro Ohori⁵, Muneo Hori⁶

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Research and Development Center for Earthquake and Tsunami (CEAT), Yokohama, Japan, 2. Istanbul University, Department of Geophysical Engineering, Istanbul, Turkey, 3. Tokyo Institute of Technology, Dept of Environmental Science and Technology, Yokohama, Japan, 4. National Research Institute of Fire and Disaster, Tokyo, Japan, 5. Fukui University, Research Institute of Nuclear Engineering, Fukui, Japan, 6. University of Tokyo, Earthquake Research Institute, Tokyo, Japan, 7. Canakkale Onsekiz Mart University, Department of Geophysical Engineering, Canakkale, Turkey

Since 1939, devastating earthquakes with magnitude greater than seven ruptured North Anatolian Fault (NAF) westward, starting from 1939 Erzincan ($M_s=7.9$) at the eastern Turkey and including the latest 1999 Izmit-Golcuk ($M_s=7.4$) and the Duzce ($M_s=7.2$) earthquakes in the eastern Marmara region, Turkey. On the other hand, the west of the Sea of Marmara an $M_w7.4$ earthquake ruptured the NAF's Ganos segment in 1912. The only un-ruptured segments of the NAF in the last century are within the Sea of Marmara, and are identified as a "seismic gap" zone that its rupture may cause a devastating earthquake. In order to unravel the seismic risks of the Marmara region a comprehensive multidisciplinary research project The MarDiM project "Earthquake And Tsunami Disaster Mitigation in The Marmara Region and Disaster Education in Turkey", has already been started since 2003. The project is conducted in the framework of "Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS)" sponsored by Japan Science and Technology Agency (JST) and Japan International Cooperation Agency (JICA).

One of the main research field of the project is "Seismic characterization and damage prediction" which aims to improve the prediction accuracy of the estimation of the damages induced by strong ground motions and tsunamis based on reliable source parameters, detailed deep and shallow velocity structure and building data. As for detailed deep and shallow velocity structure microtremor array measurement surveys were conducted in Zeytinburnu district of Istanbul, Tekirdag, Canakkale and Edirne provinces at about 140 sites on October 2013, September 2014, 2015 and 2016. Also in September 2014, 11 accelerometer units were installed mainly in public buildings in both Zeytinburnu and Tekirdag area and are currently in operation. Each accelerometer unit compose of a Network Sensor (CV-374A) by Tokyo Sokushin, post processing PC for data storage and power supply unit. The Network Sensor (CV-374A) consist of three servo type accelerometers for two horizontal and one vertical component combined with 24 bit AD converter.

In the presentation current achievements and activities of research group, preliminary results of microtremor array measurement surveys and recorded data by the newly installed stations will be introduced.

Keywords: Satreps, MarDiM project, Seismic observation, Microtremor array measurement

Elaboration of a velocity model of the Bogota basin (Colombia) based on microtremors array and gravity measurements, and strong motion records

*Nelson Pulido¹, Shigeki Senna¹, Hiroaki Yamanaka², Helber Garcia³, Leonardo Quiñones⁴, Chimoto Kosuke², Cristina Dimaté⁴, Mario Leal⁵

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. Servicio Geológico Colombiano (Colombian Geological Survey), 4. Universidad Nacional de Colombia (National University of Colombia), 5. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (Bogota Agency for Risk Management and Climatic Change)

Bogotá, a megacity with almost 8 million inhabitants is prone to a significant earthquake hazard due to nearby active faults as well as subduction megathrust earthquakes. The city has been severely affected by many historical earthquakes in the last 500 years, reaching MM intensities of 8 or more in Bogotá. The city is also located at a large lacustrine basin composed of extremely soft soils which may strongly amplify the ground shaking from earthquakes. The basin extends approximately 40 km from North to South, is bounded by the Andes range to the East and South, and sharply deepens towards the West of Bogotá. The city has been the subject of multiple microzonations studies which have contributed to gain a good knowledge on the geotechnical zonation of the city and tectonic setting of the region. To improve our knowledge on the seismic risk of the city as one of the topics, we started a 5 years project sponsored by SATREPS (a joint program of JICA and JST), entitled “Application of state of the art technologies to strengthen research and response to seismic, volcanic and tsunami events and enhance risk management in Colombia (2015-2019)”. In this paper we will show our preliminary results for the elaboration of a velocity model of the city. To construct a velocity model of the basin we conducted multi-sized microtremors arrays measurements (radius from 60 cm up to 1000 m) at 41 sites within the city. We calculated dispersion curves and inferred velocity profiles at all the sites. We combine these results with available gravity measurements within the city to obtain the initial velocity model of the basin. We also evaluated site effects in Bogota using records from the Strong Motion Network of Bogota.

Keywords: Site Effects, Strong motion, Bogota basin, microtremors array, gravity

Observation of source rupture directivity and site effect using earthquake early warning systems

*Ting-Yu Hsu¹, Pei-Yang Lin², Hung-Wei Chiang², Shieh-Kung Huang²

1. Taiwan TECH & NCREC, 2. NCREC

The National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREC) in Taiwan has developed an on-site Earthquake Early Warning System (NEEWS). The Meinong earthquake with a moment magnitude of 6.53 and a focal depth of 14.6 km occurred on February 5, 2016 in southern Taiwan. It caused 117 deaths, injured 551, caused the collapse of six buildings, and serious damage to 247 buildings. During the Meinong earthquake, the system performance of sixteen NEEWS stations was recorded. The directivity of the earthquake source characteristic and also possibly the site effects were observed in the diagram of the distribution of PGA difference between the predicted PGA and the measured PGA. In addition, based on a preassigned PGA threshold to issue alarms at different stations, no false alarms or missed alarms were issued during the earthquake. About 4 seconds to 33 seconds of lead-time were provided by the NEEWS depending on the epicenter distance.

Keywords: Source Rupture Directivity, Site Effect, On-Site Earthquake Early Warning

Multi-use seismic stations for earthquake early warning

Stephen Kilty¹, Bruce Townsend¹, Geoffrey Bainbridge¹, David Easton¹, *Nahanni McIntosh¹

1. Nanometrics Seismic Monitoring Solutions

Earthquake Early Warning (EEW) network performance improves with the number and density of sensing stations, quality of the sites and of strong-motion instrumentation, degree of coverage near at-risk populated areas and potential fault zones, and minimizing latency of signal processing and transmission. Seismic research tends to emphasize competing requirements: low-noise sites, high-performance broadband seismic instrumentation, and high-quality signal processing without regard for latency. Recent advances in instrumentation and processing techniques have made feasible the concept of a multi-use seismic station in which strong- and weak-motion seismometry are both cost-effectively served without compromising the performance demands of either.

Our concept for a multi-use seismic station meets the needs of both EEW and high-quality seismic research. One significant enabler is a 6-channel dual-sensor instrument that combines a 120s broadband seismometer and a class A accelerometer in a single ultra-compact sonde suitable for direct burial. Combining two sensors effectively adds broadband capability to a station without increasing the already optimized site footprint, preparation and management costs associated with shallow direct-burial installations. The combined sensors also simplify and speed up installation (for example, the accelerometer provides real-time tilt readings useful to leveling the seismometer). Integration simplifies alignment to north, as there is only one instrument to orient. A dual-use 6-channel digitizer simultaneously provides two sets of independently processed streams from both sensors, one set optimized for low-latency earthquake warning, and the other set for high-quality seismic research purposes.

Such a dual-use seismic station can serve both seismic research and civil warning infrastructure objectives without adding significantly to the cost of a single-use station, while increasing the utility for all users of the station's data.

Keywords: earthquake early warning, broadband seismometer, accelerometer, multi-use seismic station

回転成分推定法の開発について

Development of inference methods for rotational motions on ground surface

*羽田 浩二¹、堀家 正則²

*koji hada¹, Horike Masanori²

1. 株式会社ニュージェック、2. 株式会社阪神コンサルタンツ

1. NEWJEC INC., 2. Hanshin Consultants Co., Ltd.

ねじれ振動による建物の被害の報告は古くから多くある。しかしながら、ねじれ振動の生成原因は主に建物の偏心に求めており、回転入力の影響についてはよくわかっていないため、無視されている。よって、回転入力の影響の有無を論じるためにも、回転成分を推定する方法の開発が重要になる。本研究では、地表面におけるロッキング2成分とトーション1成分の回転3成分ベクトルの2つの推定法を開発する。

1)n次弾性体法

最初は、n次弾性体法と呼び、地表面が弾性体であると仮定し、回転ベクトルは地盤振動の空間に関する1次導関数から構成される。1次導関数は、複数観測点の差動をn次のテーラー展開することにより得られる連立方程式より求める。

2)n次弾性体法もしくは単点剛体法

2つ目は剛体法と呼び、地表面を剛体と仮定して観測差動から最小二乗法により求める。剛体法は更に複数観測点の差動記録を用いる多点剛体法、2点の観測点の差動記録のみを用いる単点剛体法に細分される。

この二つの方法について、小規模高密度微動アレイ観測記録を適用した。また、1次弾性体法と多点剛体法が同じであることも示した。n次弾性体法を小規模高密度微動アレイ記録に適用した結果、3成分の角加速度が推定でき、トーション成分に対しては剛体として振舞う範囲が基準点を中心とした半径5m程度内である可能性を示せた。さらに、観測の最も簡単な単点剛体法による自乗平均平方根は、基準点近傍では1次弾性体法(或いは、多点剛体法)によるそれとほぼ同じであることもわかった。

キーワード：回転成分推定法、地表面、微動、小規模高密度アレイ

Keywords: Inference methods of rotational motions, Ground surface, Microtremors, Small-size dense array

Study on the backtracking factors of Arias Intensity based on the Ground-motion response spectrum and time-period envelope function parameters

*Liang Xiao¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

Arias intensity, as a parameter describing ground motion amplitude and duration characteristics, has good correlation with earthquake damage such as landslide and sand soil liquefaction. The study on the relationship between the Arias Intensity and the ground-motion response spectrum has important application value in the rapid assessment of earthquake disaster, seismic landslide hazard analysis and so on.

Our previous research found it was difficult to backtrack or reproduce Arias Intensity by using only response spectrum through artificial ground-motion. T_s , a critical parameter of the envelope function, defined as the duration of stationary portion of an earthquake record, was found to have great influence on the backtracking results of the artificial Arias Intensity. However, T_s could vary a lot due to different rules of definition. Thus, one proper definition of T_s is needed to meet the demand for backtracking of Arias Intensity.

In this paper, a set of strong ground-motion records chosen from U.S. PEER NGA database were used as the basic data. The corresponding response spectrum (5% damping ratio) and Arias Intensity was calculated. T_s for each record were calculated using several frequently-used definitions. Artificial ground-motion acceleration time periods were generated and were used to reproduce artificial Arias Intensity.

The statistical difference between real values of Arias Intensity and artificial ones were identified. The proper T_s was defined as the one that minimizes the difference between the statistical mean of artificial Arias Intensity and the real values. Additional tests showed that backtracking of Arias Intensity could be improved in a statistical sense by using both the response spectrum and proper T_s parameter.

Keywords: Arias Intensity, Strong ground-motion, Response spectrum

The detailed explanation of the strong resemblance between Fourier Spectrum and Phase difference Spectrum of the Seismic Wave.(Science of Form)

*西澤 勝¹

*Masaru Nishizawa¹

1. なし

1. none

1.The phase difference Spectrum and The Phase Wave of the seismic wave.

Fig-(1). Show “The relationship between the phase difference spectrum and the phase wave” . Please refer to reference (3). Find the phase difference Spectrum from the phase wave on the right -hand side, the peak position and added an expanse state of Spectrum are in perfect harmony accord. In short (in other words), in case of the frequency of the phase wave is high, the shape of the normal distribution of the phase difference spectrum is build up sharp. And in the case of large frequency get a flat normal distribution of spectrum. This phenomena stand up all right frequency is high or low. Of course this phenomena is reversible was stated reference (3).

I shall state a next item 2, the seismic wave and this phase wave should be a one-to-one relation. And still more the Fourier spectrum of the seismic wave and the phase difference Spectrum should be a one-to-one relation.

2.The Fourier Spectrum and the normal distribution of seismic wave.

We think that the case of the epicenter length is becoming shorter little by little. The large epicenter length to get along with, the seismic wave energy is dispersed in every direction and still more had died out. As a result, the shape of the Fourier spectrum don’ t become a hill shape and happened occasionally a pointed shape. The shorter epicenter length to get along with, the shape of the Fourier spectrum of seismic wave is formed a hill and soon are considered the shape of the normal distribution.

Reference. “Earthquake” written by Seismologist KIYOO Wadachi. The Chuukou Library. (A pocket edition) 1933 and 1993(reprint) p.99

“In the near area to the epicenter, the earthquake have very sharp motion. In many case, intense vertical motion happens in the early shocks of an earthquake. The longer the epicenter length little by little, vibration of seismic wave become slow little by little and becomes superior in a horizontal vibration.” The shape of this normal distribution has flat hill and besides has large frequency of the peak of the hill. But get shorter little by little, the shape of the normal distribution (or Bell type) becomes sharp and becomes short frequency.

Moreover make the short epicenter length, we shall study the normal distribution theory (Gaussian distribution, Mt.Fuji-type or Bell type) of probability and statics.

In the reference (4), I have explained the KdV equation.(literature (3),(4))

Abstract

1. The shorter epicenter length shorter, the shape of the normal distribution becomes sharp. And this frequency too becomes small. The case of the epicenter length is large, the normal distribution of spectrum of seismic wave was not build up. Only build up a scattered peak.

2. On the case of the phase wave and the phase difference spectrum, the same phenomenon too come into being.

Reference

1. Yorihiro Osaki "Shin Jishindou no Spectrum Kaiseki Nyumon" P78.

2. Masaru NISHIZAWA. (2012): Study of shape of Mountain (Normal Distribution) of Fourier Spectrum of Earthquake Motion. May 20-25, S-SS30-P12(2012, JpGU)
3. Masaru NISHIZAWA. (2012): Handling by Solitary Wave and soliton of Earthquake Motion: October D22-01, 2012, The Seismological Society of Japan.
4. Masaru NISHIZAWA. (2015): Normal Distribution of Seismic Wave Spectrum and Solitary Wave in Water Waves (Science of Form). October 27. S01-P20, 2015, The Seismological Society of Japan.
5. Research Report on the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster. NIED, Japan.

* Reference 1: The very excellent and the easy to understand book. I can say with confidence.

キーワード : Fourier Spectrum、 Phase difference spectrum、 Seismic wave、 Phase wave、 KdV equation、 Solitary wave

Keywords: Fourier Spectrum, Phase difference spectrum, Seismic wave, Phase wave, KdV equation, Solitary wave

