

# 2011年と2016年に茨城県北部で発生したM6クラスの地震の震源過程

## Source processes of the M 6 class earthquakes which occurred in northern Ibaraki Prefecture on 2011 and 2016

\*引間 和人<sup>1</sup>

\*Kazuhito Hikima<sup>1</sup>

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12月28日21:38に茨城県北部でM6.3の地震が発生した。この地震の震源域では、2011年東北地方太平洋沖地震の直後から、それ以前には殆ど発生していなかった正断層型の地震を主とする地震活動が活発化し、2011年3月19日にはM6.1の地震が発生している。合成開口レーダによる解析では2016年と2011年の地震の地殻変動はほぼ同じ領域で確認されており(国土地理院, 2017), それらの観測によれば、5.7年程度の間隔で同規模の地震が繰り返し発生したことになる。

また、震源域に位置するKiK-net観測点(IBRH13, 高萩)では両地震とも1G程度の強震動が観測されており、断層近傍の地震動レベルを考えるためにも貴重な記録である。そこで2016年の地震と合わせて2011年の地震の震源過程解析を行い、これらについての考察を行った。

### 【解析条件】

震源インバージョン解析には震源域を取り囲むK-NET, KiK-netの観測記録を使用した。2016年と2011年の地震の解析で同じ観測点を使用することを基本とし、震央距離が50km程度以内で観測点分布や地盤条件を考慮して16観測点を選定した。震源インバージョン解析に先立ち、震源域で発生した小規模地震(2012年2月19日, M5.2)の観測記録で観測点毎に水平成層構造モデルのチューニングを行った。震源インバージョン解析には、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た後に積分した速度波形を用いた。

断層面を設定する際の基準となる震源諸元は、JMA一元化検測値をデータとしてDouble Difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により再決定した値を用いた。断層面はF-netによるメカニズム解を初期値として、余震分布との比較や観測波形の再現性を確認しながら設定した。インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al.(1996), 引間(2012))により行い、その際の小断層サイズは1km×1kmとした。

### 【解析結果：2016年の地震】

解析の際の断層面は余震発生域を覆うようにやや広めに設定し、最終的には、走向:164°,傾斜:50°,長さ×幅は17km×12kmとした。震源深さは10.3kmである。インバージョン解析により、地震モーメントは $M_0=9.7e17$  Nm(Mw 5.9), 最大すべり量は0.7m程度の正断層成分を主とする結果が得られた。破壊は震源から主に北方向の浅部に進展し、破壊開始点から6~7km程度離れたところで最大のすべりを生じたと推定された。

### 【解析結果：2011年の地震】

断層面は余震分布を参考に破壊開始点から主に南に向かって設定し、走向:141°,傾斜:40°,長さ×幅は15km×11kmとした。震源深さは5.9kmである。インバージョン解析の結果、地震モーメントは $M_0=7.0e17$  Nm(Mw 5.8), 最大すべり量が0.6m程度の正断層成分を主とするすべり分布が推定された。震源付近に最大すべりが推定された、大すべり域は北方向に数km程度の範囲に広がっている。震源よりも南側のすべり量はあまり大きく無い結果であった。

### 【考察】

2016年の地震の震央位置は2011年の地震より7kmほど南に位置している。しかし、インバージョン結果では2016年の地震は北に向かって進展したことが示され、一方で2011年の地震は震源付近で大きなすべりを生じたと推定されるため、2つの地震の大すべり域はかなり近接している結果となった。但し、断層面の走向・傾斜は異なり、設定上は両者の断層面は同一では無い。さらに、両者のすべり分布の比較からは、最大す

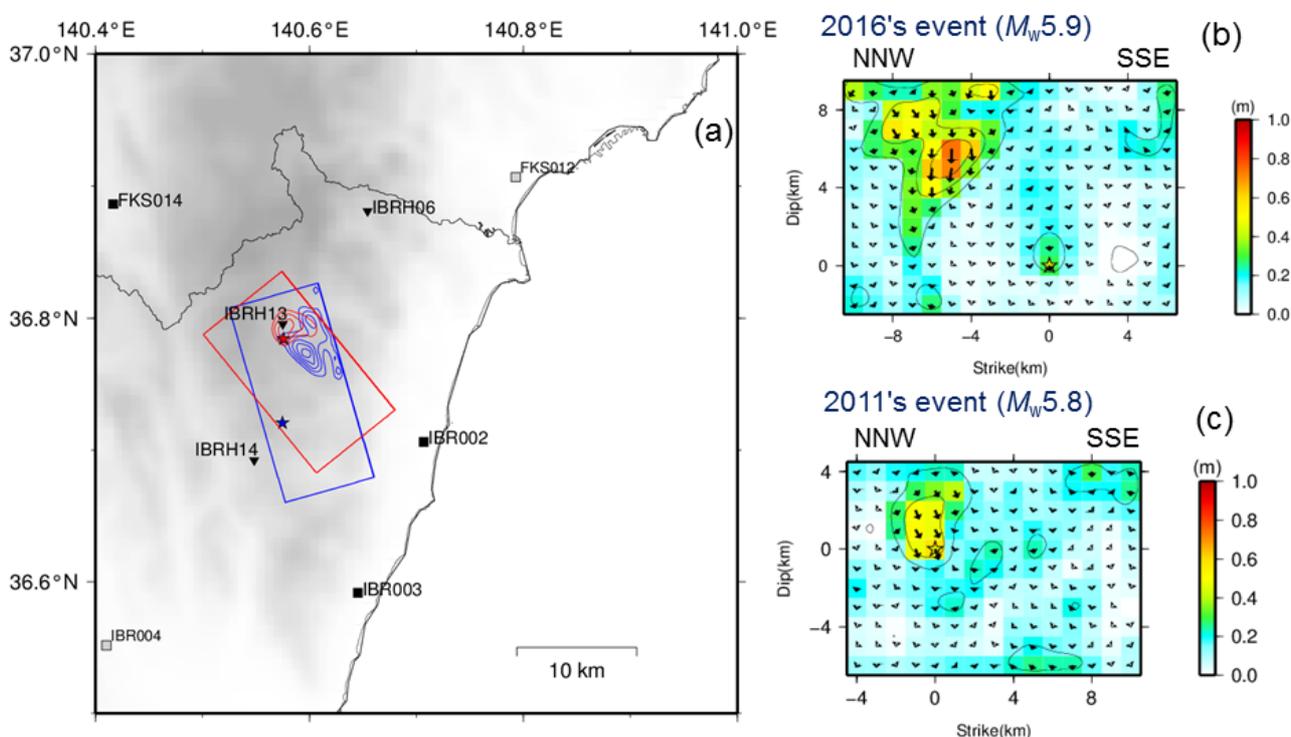
ペリを生じた位置は近接しているものの、2016年と2011年の大すべり域は平面的にも殆ど重ならないことが確認された。以上のことから、両者の主要なすべり域は異なっていたと推定される。

これらの地震で大振幅の地震動が観測されたIBRH13(高萩)観測点は、両者の大すべり域のごく近傍に位置している。特に、2011年の地震ではIBRH13の直下で相対的に大きなすべり量が推定された。IBRH13の地表地震計では2011年の地震で1084gal、2016年の地震で887galの最大加速度(3成分合成, NIED強震観測網のHPより)が観測されているが、観測点直下でのすべりが大きかった2011年の地震でより大きな強震動を生じたものと考えられる。

<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, JMA一元化検測値等を使用させて頂きました。>

キーワード: 震源過程、内陸地殻内地震、強震動、繰り返し地震、茨城県北部地震

Keywords: Source process, Crustal earthquake, Strong motion, Repeating earthquake, Northern Ibaraki Prefecture earthquake



(a): Surface projection of the final slip distribution of 2016's and 2011's events. Blue denotes the 2016's event and red denotes the 2011's event. Squares and stars indicate set fault planes and epicenters, respectively. Contour shows slip area larger than 0.3 m, with interval of 0.1 m. Black marks denote KiK-net and K-NET stations.  
 (b), (c): Final slip distributions on fault planes of 2016's and 2011's events. The yellow stars mean hypocenters.

# アレイ解析による2016年4月16日大分誘発地震の震源の推定

## Estimation of the source location of the 16-April-2016 Oita induced earthquake with array analysis

土井原 健太<sup>1</sup>、\*小松 正直<sup>2</sup>、竹中 博士<sup>2</sup>

Kenta Doihara<sup>1</sup>, \*Masanao Komatsu<sup>2</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>2</sup>

1. 岡山大学理学部地球科学科、2. 岡山大学大学院自然科学研究科

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

2016年4月16日1時25分に熊本県を震源とする $M_{JMA}$  7.3の熊本地震本震が発生した。その約32秒後に大分県由布を震源とする $M_{JMA}$  5.7の大分誘発地震が発生し、両地震により大分県内で最大震度6弱を観測した。観測波形を見ると、本震のフェーズの後に誘発地震による短周期のフェーズが見られ、これは震源近傍の観測点で顕著になる。この地震については、気象庁が主にS波の到達時刻を読み取り、震源決定を行っている。本震によるフェーズがノイズとなり、誘発地震のP波の読み取りが困難になっているため、P波の到達時の読み取りは震源近傍の4観測点のみである。他に大分誘発地震の震源を決定した例として、Yoshida (2016), Miyazawa (2016)があり、これらも震源近傍の観測点におけるP波およびS波を読み取っている。また、Nakamura and Aoi (2017)は加速度エンベロープ波形を用いたバックプロジェクション法により震源を推定している。本研究では、アレイ解析の一種であるセンブランス法を用いて、大分県内の強震/震度観測点を用いた3点アレイを複数組設定して誘発地震のS相をセンブランス解析し、震源からの波の到来方位と水平スローネスを推定した。推定された到来方位と水平スローネスをデータとし、グリッドサーチにより震央及び震源深さを決定した。さらに、誘発地震のS相の変位スペクトルについて、その水平レベルを用いてモーメントマグニチュードの推定も行った。本研究で使用した波形データは防災科研の強震観測網(K-NET, KiK-net), 広帯域地震観測網(F-net), 気象庁と大分県の震度観測点、計17点である。そのうち、15観測点の記録をアレイ解析に使用し、震源近傍の2観測点の記録をマグニチュードの推定に使用した。震源から見たアレイの方位分布がほぼ均等になるように5組のアレイを設定した。それぞれのアレイにセンブランス法を適用し、各観測点の波形に見られる誘発地震のS相1秒間を解析した。推定された波の到来方位と水平スローネスを用いてグリッドサーチを行った結果、震源は33.277N, 131.420E, 深さ10.7 kmと決定され、これは気象庁によって決定された震源より東方向約2 kmの位置にある。震源近傍の5観測点におけるPGAおよびPGVを求めると、震源に一番近い気象庁震度観測点である別府市鶴見のPGAが一番高い。2番目にPGAが高い観測点は震源の西にあるK-NETのOIT009であり、この観測点においてPGVが一番高い。これはOIT009において由布院盆地による地盤増幅の影響を強く受けているためであると考えられる。一方、別府湾に近い別府市鶴見は由布院盆地ほど地盤増幅の影響は大きくない。これは震源が気象庁決定の位置よりも東寄りであることを示唆しており、本研究の推定結果の妥当性を示す。震源に近い上述の2観測点の変位スペクトルを用いてマグニチュードの推定を行った。その際、最大余震( $M_{JMA}$  5.4)の余震のスペクトルを用いたサイト補正を行った。その結果、マグニチュードは $M_w$  5.5と求まった。この値は気象庁やNakamura and Aoi (2017)による値に対応する。誘発地震発生後24時間以内の余震分布を見ると、本研究で推定した震源の周辺では余震が起きていないことが確認された。この領域は、誘発地震のアスペリティに当たると考えられる。

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」の一部として実施しました。また、防災科研、気象庁および大分県の強震波形記録を使用しました。

キーワード：大分誘発地震、センブランス法、アレイ解析

Keywords: Oita induced earthquake, Semblance method, Array analysis



## 震源パラメタ評価のための動力学モデルの応用：別府一万年山断層帯の場合

### On Application of Dynamic Rupture Simulations to Assess Possible Earthquake Source Parameters for Beppu-Haneyama Fault Zone, southwestern Japan

\*安藤 亮輔<sup>1</sup>、今西 和俊<sup>2</sup>、三宅 弘恵<sup>4</sup>、吉見 雅行<sup>2</sup>、松島 信一<sup>3</sup>

\*Ryosuke Ando<sup>1</sup>, Kazutoshi Imanishi<sup>2</sup>, Hiroe Miyake<sup>4</sup>, Masayuki Yoshimi<sup>2</sup>, Shinichi Matsushima<sup>3</sup>

1. 東京大学大学院理学系研究科、2. 産業技術総合研究所、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学地震研究所

1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

For the strong ground motion prediction, increasing the physical constraints for source models is important to increase the predictability of the phenomena caused by possible future earthquakes.

Currently standard approaches constrain the source models basically with the macroscopic characteristics of the slip-fault length scaling in a kinematic manner, where fault lengths, faulting styles and slip distributions are determined based on judgements of professionals. Relying on such external information causes major difficulties of this approach since it contains large ambiguities due to observational limitations and, further, it is not necessarily physically based.

In this study we aim to utilize results of dynamic rupture simulations to provide the constraints of the source parameters targeting hypothetical future earthquakes generated along the Beppu-Haneyama fault zone (BHF), which exists as western continuation of the median tectonic line, southwestern Japan. The western part of BHF had been broken during the 2016 Kumamoto earthquake sequence. We constrained our dynamic model based on the regional stress field obtained basically by the seismological stress tensor inversions (Matsumoto et al., 2015) and newly modified fault geometry there, consisting of the three segments called the Funai-Asamigawa-Hotta (hereafter Funai), the Misa and the Hoyo channel from the west. The nonplanar geometry of these fault segments is treated by the spatio-temporal boundary integral equation method (ST-BIEM) with the fast domain partitioning method. The simulation results show, for example, the rake angles differ by up to approximately 30 degrees from the values assumed based on the recipe for kinematically predicting strong motion, namely 90 degrees for the Funai and Misa segments and the 180 degrees for the Hoyo channel segment. The dynamic rupture simulations may provide additional information for the strong ground motion prediction regarding the rupture/slip profiles, which are physical and natural outcome of the model.

This work is supported by the Comprehensive Research on the Beppu-Haneyama Fault Zone funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT), Japan.

キーワード：別府一万年山断層帯、動力学モデル、境界積分方程式法

Keywords: Beppu-Haneyama fault zone, Dynamic earthquake rupture models, Boundary integral equation method

## 宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の震源特性，距離減衰特性，サイト特性

### Source, path, and site effects of intraslab and interplate earthquakes off Miyagi Prefecture in Northeastern Japan

\*笥 楽磨<sup>1</sup>

\*Yasumaro Kakehi<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

笠谷・笥（2014）は宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震に対し，防災科学技術研究所のK-NET記録を用い，スペクトルインバージョンを行い，同程度の深さを持つスラブ内地震とプレート境界地震の高周波レベルは同程度で，スラブ内，プレート境界を問わず震源深さが深いほど高周波レベルが高いという結果を得た。それ以前の研究では，スラブ内地震の方がプレート境界地震よりも高周波地震波をよく放出するという見解が定説であったのに対し，高周波地震波の振幅レベルは，プレート境界地震／スラブ内地震といったテクトニック環境ではなく，単純に震源が深いほど高いという別の見解も提出されていた（例えば加藤・他，1999）。笥・笠谷（2014）の結果は，後者の見解を支持するものである。

笥（2016）は，笠谷・笥（2014）が解析した地震の中から，宮城県沖で震央が直線上に並ぶ3つの地震を選び，防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netデータを使って加速度最大振幅の距離減衰特性を比較し，震源が深い地震ほど距離減衰の傾斜が急である（＝減衰が強い）ことを示した。このような距離減衰特性の震源深さ依存の傾向は，従来しばしば見られるものである。

笥・笠谷（2014）のスペクトルインバージョン解析では，伝播経路特性としては震源の深さによらず同一の距離減衰（幾何減衰＋内部減衰）の式を仮定している。この場合，実際は深さ依存する距離減衰特性を，震源特性やサイト特性に押しつけることになる。実際，笥（2016）が解析した3地震について，笠谷・笥（2014）が求めたsite effectを取り除いた上で加速度の距離減衰を見ると，震源の深い地震が，震源の浅い地震とほぼ同じゆるやかな傾斜を示すことがわかった。従って，笠谷・笥（2014）のスペクトルインバージョンにおいては，深い地震については距離減衰の強さを実際より過小評価していることになり，従って，震源の高周波レベルも過小評価していることになる。

この過小評価の影響を考慮すると，深い震源の高周波地震波の励起のレベルは笠谷・笥（2014）による評価より更に高くなる。すなわち，笠谷・笥（2014）の「震源が深いほど高周波レベルが高い」という結論自体は変わらず正しく，震源の深さによる高周波レベルの違いがより強調されることになる。

講演では，池浦・加藤（2011）による「隣接2観測点ペアのネットワーク」のインバージョンによる，距離減衰特性を仮定しないサイト特性評価法を用い，宮城県沖のプレート境界地震，スラブ内地震の震源特性，距離減衰特性，サイト特性について詳しく報告する。

キーワード：高周波レベル、スラブ内地震、プレート境界地震、震源深さ、距離減衰、サイト特性

Keywords: high-frequency level, intraslab earthquake, interplate earthquake, focal depth, attenuation relation, site effect

# Analysis of Systematic Path Effects form Ground-Motion Variability Using Different Path-Bin Plans

\*CHIH HSUAN SUNG<sup>1</sup>, Chyi-Tyi Lee<sup>1</sup>

1. National Central University-Graduate Institute of Applied Geology

This paper describes the path diagram method should aim to the record-to-record residuals of a single earthquake instead of a single station, to solve the limitations of the bracket. We use 150 shallow earthquakes with moment magnitudes greater than 4.0 obtained from the Taiwan Strong-Motion Instrumentation Program network to build the Taiwan ground-motion prediction equations for peak ground acceleration and spectral accelerations with 5% damping for different structural periods. The record-to-record residuals are divided into small brackets in a path diagram for six distance bins and twenty-four azimuth bins. The mean residuals are estimated for each path bin, from which we can get 144 inter-path residuals for a source and compute a repeatable path-term for all inter-path residuals. Comparing the results with those obtained with the same data, but using the path diagram of a site, show that we obtain a lower remaining variance and the higher repeatable path-term with the 15° bracket of the path diagram approach for a source. The remaining unexplained intra-event standard deviations are 40-44% smaller than the record-to-record standard deviation for peak ground acceleration and spectral accelerations at periods of 0.3, 1.0, and 3.0 seconds. The results of path-to-path variability of each earthquake show that some earthquakes of small magnitude have a higher sigma because their source-to-site distances almost locate in the range of 0-50 km.

Keywords: GMPE, aleatory variability, strong ground motion, path effect, PSHA

# The single-path standard deviation derived from ground motion records in Japan

\*引田 智樹<sup>1</sup>、瀬瀬 一起<sup>2</sup>、三宅 弘恵<sup>3</sup>

\*Tomoki Hikita<sup>1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>2</sup>, Hiroe Miyake<sup>3</sup>

1. 鹿島建設株式会社、2. 東京大学地震研究所、3. 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター

1. Kajima Corporation, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Center for Integrated Disaster Information Research, Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo

## 1. Introduction

The amplitude of a ground motion record includes aleatoric variability, even if the records observed at one site by the earthquakes with same magnitude and same location. It is important to clarify the characteristics of such variability in order to understand the accuracy of earthquake ground motion prediction. Using ground motion records from dense networks, several recent studies (e.g. Anderson and Uchiyama, 2011; Lin et al., 2011) have estimated the single-path standard deviations by removing ergodic assumption. Those studies are based on the difference between observed ground motion amplitude and a ground motion prediction model. Estimated variabilities may be affected by modeling error of applied ground motion prediction model. In this study, the single-path standard deviation have investigated directly from the amplitude ratio of pairs of ground motion records observed at one site by two earthquakes with same magnitude and same location.

## 2. Data and Method

The amplitude ratios of pairs of ground motion records by two earthquakes have been investigated. The two earthquakes satisfy the following conditions. 1) JMA magnitudes ( $M_j$ ) are the same. 2) Focal mechanisms are similar. 3) Distance between hypocenters is 3 km or less. Pairs of ground motion records of K-NET and KiK-net by two earthquakes have been used. Hypocentral distances of records are 5 or more times of the distance between hypocenters of two earthquakes, and 200km or less. Maximum acceleration of the records at free-field exceeds  $1 \text{ cm/s}^2$ . As a result, 39,103 pairs of record by 696 pairs of earthquake were used for this study. The single-path standard deviation ( $\sigma$ ) estimated by variance of the natural logarithmic acceleration response spectrum ratio ( $v$ ) of record pairs.  $\sigma = (\text{Var}[v]/2)^{0.5}$ . The acceleration response spectrum was averaged of two horizontal components.

## 3. Results

Estimated  $\sigma$  from all data was about 0.3 - 0.45 (Fig. 1). This result at period of 0.02 s was consistent with single-path standard deviations for maximum acceleration from previous studies (Morikawa et al., 2008; Lin et al., 2011). In Fig. 1,  $\sigma$  was slightly large around the period of 0.2 s. According to comparison of  $\sigma$  estimated from data of every magnitude range, the dominant period of  $\sigma$  moved to the longer period depending on magnitude (Fig. 2). Since site and propagation path of each record pairs are the same respectively, the main factor of  $\sigma$  is considered to be the differences in the source characteristics of two earthquakes. If the rupture processes of two earthquakes are different, the within-event variability of pairs of records from two earthquakes may be large around corner frequencies of two earthquakes. The dominant period of  $\sigma$  from large earthquakes was longer than that from small earthquakes. The logarithms of the dominant period of  $\sigma$  were proportional to about  $0.4M_j$  (Fig. 3). Those characteristics of  $\sigma$  indicate that the uncertainty of rupture process is one of the factors in single-path standard deviation.

キーワード：地震動、応答スペクトル、ばらつき、不確実性

Keywords: ground motion, response spectrum, variability, uncertainty

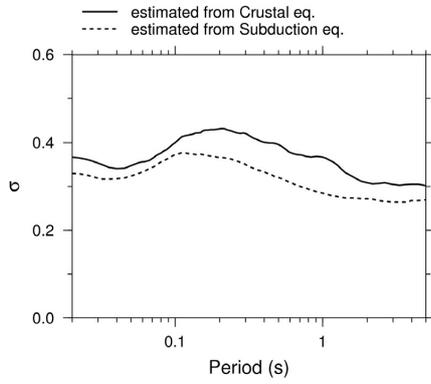


Fig. 1 Estimated single-path standard deviation  $\sigma$ . Solid line shows  $\sigma$  from data by crustal earthquakes. Dotted line shows  $\sigma$  from data by subduction earthquakes.

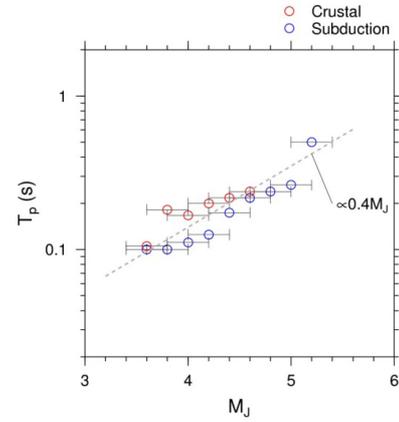


Fig. 3 Dominant period ( $T_p$ ) of single-path standard deviation from data of every magnitude range. Red circle and blue circle shows  $T_p$  from data by crustal earthquakes and subduction earthquakes. Dotted line shows the approximate slope to  $M_J$ .

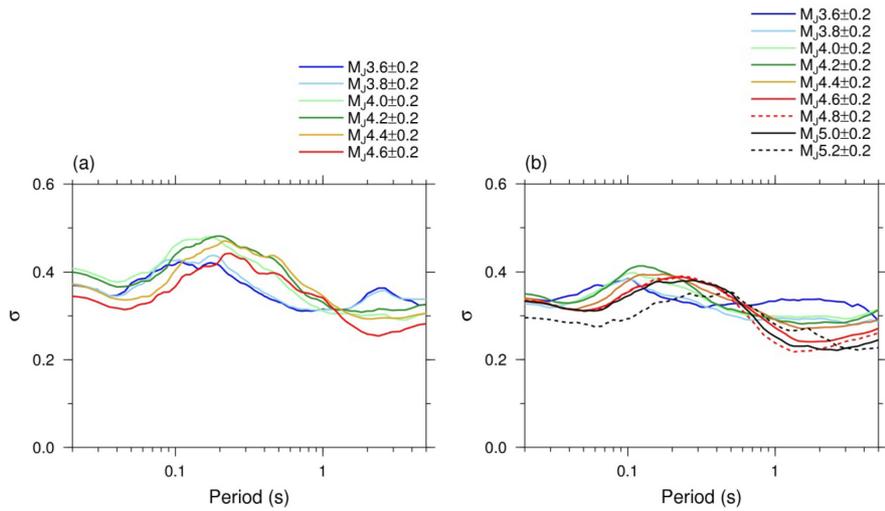


Fig. 2 Single-path standard deviation  $\sigma$  estimated from data of every magnitude range. (a)  $\sigma$  from data by crustal earthquakes. (b)  $\sigma$  from data by subduction earthquakes.

## 東北地方太平洋沿岸部で発生した内陸地殻内地震による短周期地震動の距離減衰特性

### Attenuation characteristics of high frequency strong motions due to inland earthquakes in the Pacific coast of Tohoku region

\*池浦 友則<sup>1</sup>

\*Tomonori Ikeura<sup>1</sup>

1. 鹿島建設（株）技術研究所

1. Kajima Technical Research Institute

経験的な強震動予測の誤差を最小限に抑制することを目指し、広域の距離減衰特性を仮定せずに評価したサイト特性を用いて観測地震動の距離減衰特性を詳細に明らかにすることを試みている。今回は東北地方沿岸部の福島県浜通りと茨城県北部で発生した内陸地殻内地震についてK-NET, KiK-netの記録を用いて検討した結果を報告する。

#### ■距離減衰特性の検討法

距離減衰特性の研究では、スペクトルインバージョン解析をはじめとして、a prioriに仮定した単純な距離減衰関数を用いて距離減衰特性と震源特性、サイト特性が推定されることが多い。しかしながら、ここではそのa prioriな仮定を検証することも念頭に置き、距離減衰特性を仮定せずに推定した相対サイト特性を用いて観測地震動から相対サイト特性の違いを取り除いた基盤地震動の水平動ベクトル和振幅を求め、それらが震源からの距離とともにどのように変化してゆくかを調べる。なお、震源からの地震波の放射に関しては、低周波数領域ではRadiation Patternや移動震源効果に起因する方位性がある。また、高周波数領域でも低周波数領域ほどは顕著でないが、やはり方位性があり、必ずしも等方的ではない。そのため、同一方向の観測記録を用いて距離に対する基盤地震動振幅の変化に注目する。

#### ■東北～関東の相対サイト特性

本検討ではKiK-net都路地点(FKSH19)の地中観測点水平動を基準にして評価した東北～関東におけるK-NET, KiK-net地点の相対サイト特性[池浦・友澤, 2012]を用いた。この相対サイト特性は、次のように広域の距離減衰特性を仮定しないサイト特性評価法[池浦・加藤, 2011]で評価されている。まず、隣接する2地点で同時に観測した多数の地震動記録で2地点間の平均的な相対サイト特性を評価することとし、これを検討する領域内のすべての隣接観測点間(3642組)に適用した。次いで、それらの隣接観測点間の相対サイト特性が同時に満足されるように全観測地点(729地点)の相対サイトファクターを最小二乗法で評価した。なお、"隣接観測点"の条件としては地点間の距離が25km以内とし、また隣接2地点間の相対サイトファクター評価では、2地点への入射波の共通性を確保するため震源から2地点への方向の角度が5度以内の観測地震を用いている。

#### ■福島県浜通りの地震と茨城県北部の地震の距離減衰特性

今回、距離減衰特性を検討した地震は2011/3/23福島県浜通りの地震(MJ6.0)と2011/4/11福島県浜通りの地震(MJ7.0)および2011/3/19茨城県北部の地震(MJ6.1)と2016/12/28茨城県北部の地震(MJ6.3)である。いずれの地震でも全方位の距離減衰分布は観測地震動振幅(OBS)に比べて相対サイト特性(RSF)を除いた振幅(OBS/RSF)の方がよくまとまり、距離減衰特性が観察し易くなる。ここでは、火山体周辺の高減衰領域を避け、各々の震央をとるN15E方向の測線に注目して高周波数領域のOBS/RSFを求め、実体波の仮定(1/r)のもとでQ値減衰効果の振幅分布を検討した。その結果、(1)いずれの地震でも北側に比べて南側の方が振幅が大き

めであった。また、(2)震央から $\pm 100\sim 150\text{km}$ の範囲ではQ値減衰の効果が非常に弱く、むしろ増加しているようにも見える場合があった。(3)さらにその遠方では、北側の岩手県にかけての領域では比較的単調に減少するが、南側では房総半島にかかる領域になって振幅がやや急減する傾向が認められた。このうち、(1)と(3)については震源特性の方位性および不均質な減衰構造に起因して距離に関する地震動のばらつきを増大させる要因になると考えられる。また、(2)の特徴に関しては震源からの距離を指標にした単純な距離減衰関数では解釈できないため、震源周辺の構造を考慮して震源からの地震波特性と波動伝播特性を定量的に検討してみる必要がある。

キーワード：強震動、内陸地震、距離減衰特性

Keywords: strong motions, inland earthquakes, attenuation characteristics

# Non-Causal Zero-Phase Filters Underpredict NGA 2 GMPE's for Long-Period, Near-Source Motions of Large Earthquakes

\*Becky Roh<sup>1</sup>, Kenny Buyco<sup>1</sup>, Thomas H Heaton<sup>1</sup>

## 1. California Institute of Technology

The Lucerne record from the 1992 M7.3 Landers earthquake had motions too large to be accommodated by the San Bernardino Law and Justice Center. This is problematic because this structure was designed for maximum ground motion with triple pendulum base isolators. We investigated the predictions for 10-second response spectral displacements and found that NGA 2 GMPEs under-predict, specifically long-period, near-source motions from large earthquakes. The under-prediction may be due to the conventional data processing method used in the NGA ground-motion database, which is a non-causal zero-phase Butterworth filter at a corner frequency corresponding to the expected level of noise in the record.

Theoretically, a non-causal zero-phase filtered response is approximately half the value of the response with no filter. We can see this by filtering a unit step function, in which we get a response with half the amplitude of the original, unfiltered function. While non-causal zero-phase filtering leaves the acceleration unchanged, the effect of the corner frequency in this filtering is noticeable when we integrate twice to obtain the displacement. Therefore, because long period components of the recorded ground motion may contain valuable information, it is critical to choose the appropriate period of the non-causal zero-phase filter.

We examine the strong motion data from large earthquakes, such as the 1999 M7.7 Chi-Chi, 2015 M7.8 Nepal, 2016 M7.0 Kumamoto, and 2016 M7.8 New Zealand earthquakes. We apply the baseline correction to the uncorrected acceleration records, in which we account for the linear trend in velocity. Then, we integrate for the peak displacement. The same process is applied to the acceleration records that are non-causal zero-phase filtered at 10 seconds and 60 seconds. We compare the baseline corrected displacement responses of these earthquakes to the filtered ones. Ultimately, we take these broadband ground motion records containing long period effects, conduct both linear and nonlinear response analyses of tall buildings, and observe how static offset affects these responses.

# 2016年熊本地震で観測された関東平野の長周期地震動

## Long-period ground motion in the Kanto basin during the 2016 Kumamoto earthquake

\*植竹 富一<sup>1</sup>

\*Tomiichi Uetake<sup>1</sup>

1. 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 技術開発部 耐震技術グループ

1. Seismic Design Group, R&D Department, TEPCO research Institute, Tokyo Electric Power Company

2016年4月16日の熊本地震（M7.3）では、震央から約900km離れた首都圏でも長周期地震動が観測された。この地震により関東平野に入射した地震動の特性や、それに対する平野の応答を理解しておくことは、西日本で大地震が発生した際の首都圏の地震動を評価する上で重要である。

まず、平野への入射波を確認するために、F-NETの速度波形を震央付近から関東周辺まで調べた。トランスバース成分に卓越周期が約10秒で継続時間60秒ほどの顕著な波群が存在し、関東平野に向かい見かけ速度約3.3km/sで伝播していることがわかった。この波群は、分散性を示しておりラブ波と考えられる。また、平野西側の関東山地の波形は、平野西部の波形と類似性が高く、この波群が平野への入射波と考えられる。

次に平野内の観測点について波形の変化を調べた。関東平野に入射した波群は、平野部で増幅されるとともに継続時間が延びる。ただし、どの観測地点でも地震動の卓越周期は約10秒であり、入射波の影響が大きいことが示唆される。また、周期10秒の速度応答スペクトル振幅は、東側ほど大きい傾向があり、平野西側の岩盤点で約2cm/s、平野の西部で5~10cm/s、平野東部で10~20cm/sである。これには地震波速度の遅い堆積層による増幅ばかりでなく、継続時間の伸びも関係していると考えられる。

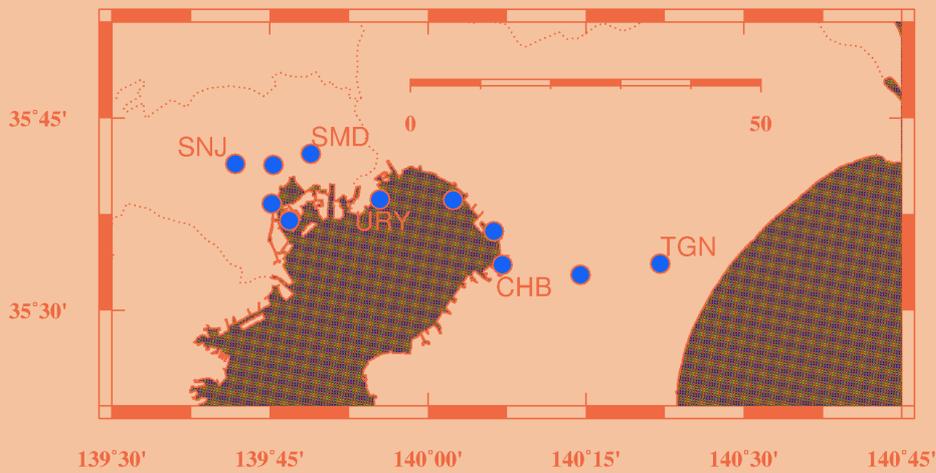
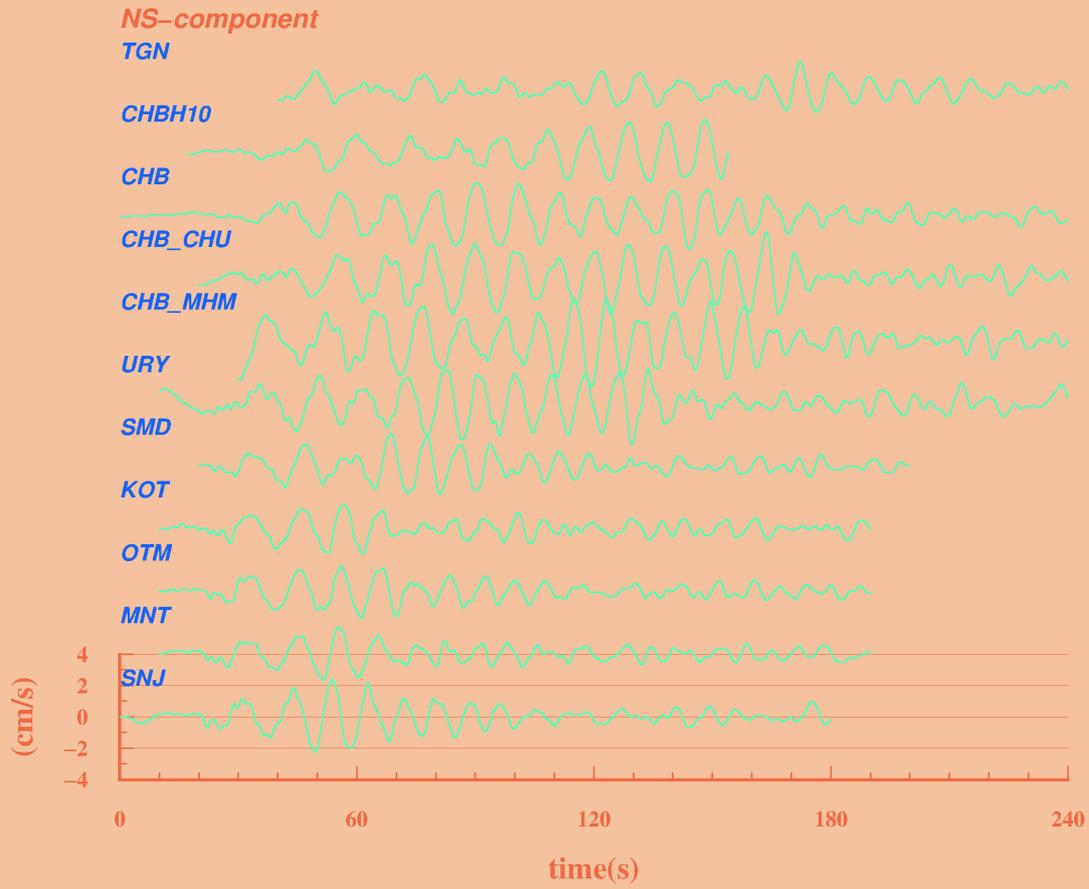
波群の継続時間は、波群の伝播に伴い変化し、平野の西側に比べて東側で長い傾向がある。速度波形のマルチプルフィルター解析を行うと、継続時間の伸びには波動の分散性が影響しており、東側の観測点ほど波群が分散していることが確認できる。新宿（SNJ）から千葉（CHB）、東金（TGN）にかけての速度波形の変化を図に示す。西側の新宿（SNJ）で継続時間90秒程度であるが、東側の千葉（CHB）では180秒以上になっている。2点間の距離45km程度で、周期10秒の波の継続時間が大きく変化している。なお、東京湾西側では南北成分の地震動が卓越しているが、東側の千葉市周辺では波形後半部では東西成分の大きな波群も見られるようになる。速度軌跡で確認すると、振動の卓越方向が変化しており、盆地の三次元構造による表面波の回り込みが示唆される。

解析には東京電力の速度型強震計、防災科研のF-NET、K-NET、KiK-net、気象庁の多機能震度計記録を使用致しました。作図にはGMTを利用いたしました。記して感謝いたします。

キーワード：2016年熊本地震、表面波、長周期地震動、関東平野

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Surface wave, Long-period strong ground motion, Kanto basin

Site Location and Velocity Waveforms



# Observation and preliminary 3-D finite difference simulation of long-period ground motions (3 - 15 s) for the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake

\*Yadab Prasad Dhakal<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Takahiro Maeda<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The Mw 7.1 Kumamoto earthquake, which occurred on 16<sup>th</sup> April, 2016, at 1:25 local time, is the largest inland earthquake to occur in Japan after the dense installation of K-NET and KiK-net strong-motion stations. Many previous studies based on the recorded ground motions from this earthquake noted that the non-existence of long-period structures such as high-rise buildings in the source area of the earthquake avoided potential risk that could be incurred due to the extremely large response spectra at periods of ~ 3 s to 7 s (e.g., Furumura, 2016). The occurrence of long-period ground motions near the source fault area of large earthquakes, particularly associated with the direct fault movement, has been well documented after the 1999 Chi Chi earthquake (Mw 7.6). On the other hand, if the size of earthquake becomes bigger such as the 1985 Mexico City earthquake (Ms 8.1), 2003 Tokachi Oki earthquake (Mw 8.3), 2011 Tohoku Oki earthquake (Mw 9.1), damaging long-period ground motions could be observed several hundred kilometers far from the source area. The 2016 Kumamoto earthquake also excited long-period ground motions at distant basins such as the Osaka basin which is located at a distance of about 400 km from the source area. Nonetheless, the motions were moderate and did not cause harmful effects on humans and infrastructures. The Kumamoto earthquake also reconfirmed that the long-period ground motions can propagate effectively in the north east region from the source area of the earthquake due to radiation pattern of the typical fault motions and crust-mantle structure in the region (Dhakal et al., 2016). In this paper, we describe the observed characteristics of long-period ground motions from the earthquake and compare a large number of recordings with synthetics from 3-D finite difference simulations. We employ the 1<sup>st</sup> grade subsurface velocity model reconstructed for the prediction of long-period ground motions by Headquarters for Earthquake Research Promotion and the source rupture model by Kubo et al. (2016) who used strong motion recordings within a distance of 100 km of the source fault for inversion. This study is expected to contribute to better understanding of the performance of the velocity and source models for the prediction of long-period ground motions from future big earthquakes.

## References

- Dhakal YP, Suzuki W, Kimura T, Kunugi T, Aoi S, 2016, Analysis of long-period response spectra from the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake. In proceedings of JAEI annual meeting P4-20.
- Furumura T, 2016, Destructive near-fault strong ground motion from the 2016 Kumamoto prefecture, Japan, M7.3 earthquake. Landslides 13:1519-1524.
- Kubo H, Suzuki W, Aoi S, Sekiguchi H, 2016, Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong motion waveforms. Earth Planets Space 68:161.

Keywords: Kumamoto earthquake, Long-period ground motions, Finite difference method

## 関東平野における長周期地震動の生成条件

### Generation conditions of long period ground motion in Kanto Basin

\*向井 優理恵<sup>1</sup>、古村 孝志<sup>1</sup>

\*Yurie Mukai<sup>1</sup>, Takashi Furumura<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

#### 研究の目的

内陸や浅い海域で大地震 ( $M > 7$ ) が起きた際に、関東平野では周期3~10秒の長周期地震動が強く生成する。浅い地震で地表に生成した長周期の表面波が長距離を伝播し、平野 (盆地) の堆積層で強く増幅されるとともに、盆地端を2次震源として表面波が強く励起することが一般に説明される。これまでの関東平野での地震観測データから、新潟中越地方や紀伊半島沖の地震では長周期地震動が強く発生し、東北地方で発生した地震では生成強度が弱いことが指摘されている(湯浅・南雲, 2012; Furumura, 2014)。このように、関東平野の長周期地震動の生成強度と地震の方位性には、平野の3次元地下構造や伝播経路の影響など様々な原因が関わっていると考えられる。本研究では、関東平野の長周期地震動生成に地震の強い方位性が生まれる原因を探るために、2004年新潟県中越地震の長周期地震動の地震波伝播シミュレーションをもとに、いくつかの原因を検討した。

#### 地震の方位と長周期地震動の生成

関東平野での長周期地震動生成における地震の方位性の影響を評価するために、関東周辺の堆積層モデル (JIVSM; Koketsu, 2008) を用いた地震波伝播の3次元差分法シミュレーションを行った。2004年新潟県中越地震 ( $M 6.8$ ) の震源断層モデルを、関東平野から北北東~南西方向の方位に等距離に仮想震源として配置し、地震波伝播シミュレーションを行った。この際、断層面からの放射特性の影響をなくすため、断層走行を震源の方位に合わせて回転させた。計算の結果、都心で観測される長周期地震動は、震源が新潟中越沖の方位で強くなり、東北地方の方位では弱まることが確かめられた。しかしながら、その差は固有周期6秒の速度応答で4倍程度に過ぎず、観測の大きな違いを説明するには不十分であった(約10倍程度; Furumura, 2014)。

#### 震源断層からの表面波の放射特性

そこで、新潟中越の地震や東北の地震など、地震毎に見られる関東平野の長周期地震動のレベルの大きな変動の原因として、震源からの表面波の放射特性の違いについて検討した。ここでは、新潟中越地震の震源モデルの走行をいくつか変えた地震波伝播シミュレーションを行い、都心での長周期地震動を比較した。その結果、長周期地震動のレベルと応答スペクトルのピーク周期は断層走行により大きく変わり、その変動幅は上記の地震の方位による変動よりずっと大きいことがわかった。そして、都心での長周期地震動の周期6秒における応答レベルは、新潟中越地震の断層走行 (212度) に相当する地震断層で大きくなることがわかった。

#### 盆地生成表面波と盆地転換表面波

ところで、平野における長周期地震動の成因として、地中を伝わるS波が盆地端で表面波に変換して生まれる「盆地生成表面波」と、地表を表面波として伝わってきた波が、盆地で別の表面波に転換する「盆地転換表面波」の2つのメカニズムが一般に議論されている (たとえば、Kawase and Sato, 1992; Kawase, 1993)。このうち、新潟県中越地震の際に、関東平野における盆地生成表面波の寄与を調べるために、伝播経路中の自由表面を剛体境界条件に置き換え、表面波の伝播を止めたモデルで地震波伝播シミュレーションを行った。結果、平野での長周期地震動の振幅は激減し、周期3秒以上での速度応答レベルが1/2程度に弱まった。したがって、関東平野での長周期地震動の生成において、盆地端での表面波の生成による寄与は小さいと判断された。

まとめと今後の課題

以上の検討から、2004年新潟県中越地震において関東平野で強い長周期地震動が観測された原因は、元々震源において関東方向に表面波が強く放射されたことと、伝播経路を表面波が良く伝播したことの2点に原因があると考えられる。一方、東北地方の地震において長周期地震動が弱い原因は、震源からの表面波の放射特性が異なり、かつ太平洋沿岸の伝播経路で表面波の減衰が大きいことが関係している可能性が高い。

キーワード：長周期地震動、関東平野、表面波

Keywords: long-period ground motion, Kanto Basin, surface wave

# 広帯域地震動シミュレーションによる地震動のばらつきの空間分布

## Spatial distribution of ground-motion variability in broadband ground-motion simulations

\*岩城 麻子<sup>1</sup>、前田 宜浩<sup>1</sup>、森川 信之<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>

\*Asako Iwaki<sup>1</sup>, Takahiro Maeda<sup>1</sup>, Nobuyuki Morikawa<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

震源断層モデルと地下構造モデルに基づく地震動シミュレーションによってシナリオ地震の地震動予測を行う際、「平均的な地震動レベル」と「モデルの不確定性に起因する地震動のばらつき」の両方を評価する必要がある。

本検討では、ハイブリッド法による広帯域地震動シミュレーションによって断層モデルの不確定性、中でもパラメータの偶然的ばらつきに起因する予測地震動のばらつき評価を試みた。

横ずれ断層型である2000年鳥取県西部地震、および逆断層型である2004年中越地震（ともに $M_w$ 6.6）をモデリングの対象とした。実地震を対象としたのは、観測記録と比較することにより地震動シミュレーションのパフォーマンスを確認するため、および現実的な地下構造の影響を考察するためである。

それぞれの地震について断層位置と形状（長さ・幅・傾斜角）、メカニズムを既知として固定させ、レシピ（地震本部、2016）に従う特性化震源モデルを基にして、(1)アスペリティ位置、(2)破壊開始点、(3)地震モーメントの3つのパラメータについて偶然的ばらつきを考慮した多数の震源モデル群を作成した。アスペリティ位置は2つのアスペリティが互いに重ならないようにランダムに配置し、破壊開始点については断層上端から4kmより深い2km間隔格子からランダムに選んだ。地震モーメント $M_0$ は入倉・三宅(2001)により断層面積 $S$ から求められる値を平均値とし、常用対数の平均値 $\pm 2\sigma$ で倍半分となるような頻度分布を作成した。地震モーメントにばらつきを与える一方で、短周期レベル $A$ は壇・他(2001)による $A-M_0$ 関係を固定させて与えた。

得られた震源モデル群とJ-SHIS v2の3次元深部地盤構造モデル（藤原・他、2012）を用いて、三次元差分法（Aoi and Fujiwara, 1999）と統計的グリーン関数法（壇・佐藤, 1998）による1秒を接続周期としたハイブリッド法で地震動を計算した。震源域周辺に厚い堆積層が分布している2004年中越地震については、複雑な地下構造による地震動のばらつきの空間分布への影響を見積もるため、単純な成層構造を仮定した地下構造モデルを用いた計算も行った。

それぞれの地震について50個の震源モデル群から計算された10kmメッシュ地点での地震動を5%減衰加速度応答スペクトル(Sa)およびPGA, PGVの指標を用いて平均値と標準偏差SD（ある地点におけるイベント間のばらつき、inter-event variability）を求めた。短周期のSaやPGAでは、断層からの距離が大きくなるほどSDは小さくなるという距離依存の傾向が見られた。一方、1秒以上の長周期のSaやPGVは、破壊進展のforwardまたはbackward方向でSDが大きくなる傾向が見られた。中越地震で三次元地下構造モデルを用いた場合は、SDの空間分布が複雑な地下構造によって変化した。

シナリオ地震の地震動予測における地震動のばらつきのモデル化にむけて、まずは横ずれ断層、逆断層それぞれについて単純な地下構造の場合のSDの空間分布を断層最短距離および断層面と観測点の成す角度によって回帰した。

本検討ではばらつきを与えたパラメータに限りがあるため、地震動のばらつきSDの大きさが十分に評価できていない可能性があり、今後は破壊伝播速度など他のパラメータのばらつきを検討するとともに、既往研究で観測記録から得られているばらつきとも比較していく必要がある。

キーワード：地震動予測、地震動のばらつき、震源パラメータ、不確実性

Keywords: ground-motion prediction, ground-motion variability, source parameter, uncertainty



## レシピに準拠した別府-万年山断層帯のハイブリッド法強震動シミュレーション

### Broadband strong motion simulation for the Beppu-Haneyama Fault Zone based on the recipe

\*吉見 雅行<sup>1</sup>、三宅 弘恵<sup>2</sup>、安藤 亮輔<sup>2</sup>、松島 信一<sup>3</sup>、鈴木 晴彦<sup>4</sup>、眞鍋 俊平<sup>4</sup>、松山 尚典<sup>4</sup>

\*Masayuki Yoshimi<sup>1</sup>, Hiroe Miyake<sup>2</sup>, Ryosuke Ando<sup>2</sup>, Shinichi Matsushima<sup>3</sup>, Haruhiko Suzuki<sup>4</sup>, Shunpei Manabe<sup>4</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>4</sup>

1. 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2. 東京大学、3. 京都大学防災研究所、4. 応用地質

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo University, 3. DPRI, Kyoto University, 4. Oyo Corporation

別府-万年山断層帯東部のハイブリッド法による広帯域地震動予測計算を実施した。接続周期は1秒とし、短周期側は統計的グリーン関数法と一次元増幅計算、長周期側は差分法で計算した。工学的基盤面で合成した後、陸域については1次元増幅計算を実施した。

考慮した断層は、府内-浅見川-堀田セグメント、三佐セグメント、豊予海峡セグメントの連動である。断層面位置及び形状は主に反射法探査結果と活断層位置を考慮して設定した。このうち、正断層からなるセグメントの傾斜角は45°と60°の2ケースとした。滑り角は別府湾周辺の応力場を考慮した動的破壊シミュレーション（安藤・他、JpGU-AGU 2017）の平均値とし、その他の断層パラメータはレシピ（Irikura & Miyake 2001, 2011）に準拠した。速度構造モデルは本重点調査で構築した大分県域および大分平野域の速度構造モデル（吉見・他、JpGU-AGU 2017）を用いた。レシピ準拠の平均的な強震動像について検討した。

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：強震動、活断層、ハイブリッド法、大分地域

Keywords: strong ground motion, active fault, hybrid method, Oita

## 別府-万年山断層帯での動的破壊過程シミュレーションに基づく断層パラメータを考慮した強震動シミュレーション

### Strong Motion Simulation considering the Fault Parameters based on Dynamic Rupture Simulation on the Beppu-Haneyama Fault Zone

\*松島 信一<sup>1</sup>、吉見 雅行<sup>2</sup>、安藤 亮輔<sup>3</sup>、三宅 弘恵<sup>4</sup>、鈴木 晴彦<sup>5</sup>

\*Shinichi Matsushima<sup>1</sup>, Masayuki Yoshimi<sup>2</sup>, Ryosuke Ando<sup>3</sup>, Hiroe Miyake<sup>4</sup>, Haruhiko Suzuki<sup>5</sup>

1. 京都大学防災研究所、2. 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、3. 東京大学大学院理学系研究科、4. 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、5. 応用地質株式会社東京支社技術センター地震防災部

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 4. The University of Tokyo, 5. Oyo Corporation

別府-万年山断層帯のうち、府内-浅見川-堀田セグメント、三佐セグメント、豊予海峡セグメントの3セグメントから構成される震源断層モデルを考慮した強震動予測を行う。震源断層モデルの断層パラメータの一部は、震源断層における動的破壊過程シミュレーション（安藤・他, JpGU-AGU2017）に基づくものを取り入れる。ここでは、傾斜角に応じたすべり角とオーバーラップしていない三佐セグメントと豊予海峡セグメント間の伝播時間について、動的破壊過程シミュレーションの結果を参考に決めた。また、地盤構造については、重点的な調査観測の結果得られた新しい知見を元に再構築された三次元速度構造モデル（吉見・他, JpGU-AGU2017）を用いた。強震動計算には有限差分法（GMS, 防災科学技術研究所）を用い、断層パラメータや破壊開始点の違いによる工学的基盤での強震動の違いについて検討を行った。

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：別府-万年山断層帯、動的破壊過程、強震動シミュレーション

Keywords: Beppu-Haneyama Fault Zone, Dynamic Rupture, Strong Motion Simulation

# 平成28年鳥取県中部の地震で得られた強震観測記録について

## Strong ground motions observed under the 2016 mid Tottori prefecture earthquake, Japan

\*香川 敬生<sup>1</sup>、野口 竜也<sup>1</sup>、吉田 昌平<sup>1</sup>、上野 太士<sup>1</sup>、中井 翔<sup>1</sup>、吉見 和<sup>1</sup>、有村 翔也<sup>1</sup>、山本 真二<sup>2</sup>

\*Takao Kagawa<sup>1</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>1</sup>, Shohei Yoshida<sup>1</sup>, Hiroshi Ueno<sup>1</sup>, Sho Nakai<sup>1</sup>, Kazu Yoshimi<sup>1</sup>, shoya Arimura<sup>1</sup>, Shinji Yamamoto<sup>2</sup>

1. 鳥取大学大学院工学研究科、2. 鳥取大学技術部

1. Tottori University Graduate School of Engineering, 2. Tottori University Technical Division

2016年10月21日に鳥取県中部においてMj6.6の地震が発生した（平成28年鳥取県中部の地震）。この地域では2015年10月から群発地震活動があり、鳥取大学でも臨時の観測点を設置していた。鳥取県中部の地震では、鳥取県、気象庁、防災科学技術研究所の震度計、強震計で多くの強震観測記録が得られた。また、鳥取大学では本震後速やかに被害の大きかった地区を中心に臨時の強震観測点を設置して余震観測を実施した。からこれらの初期解析から、観測記録がその場所の地盤応答特性に強く影響されていることが示唆された。特に、事前に実施していた常時微動観測による地盤の卓越周期分布と、強震観測点で得られた特徴的な周期は良い一致を示した。このような地盤応答特性が強震観測記録および地震被害に及ぼした影響を中心に、解析事例を報告する。

キーワード：平成28年鳥取県中部の地震、強震観測記録、表層地質

Keywords: The 2016 mid Tottori prefecture earthquake, Strong Ground Motion, Surface Geology

## 2016年熊本地震で益城町に現れた震災の島とその生成要因

### Damage Islands in Mashiki Town from the 2016 Kumamoto Earthquakes

\*山田 真澄<sup>1</sup>

\*Masumi Yamada<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The 2016 Kumamoto earthquakes caused serious building damage in the near-source regions. The first earthquake (foreshock, Mj6.5) occurred at 21:26, April 14 and the second event (mainshock, Mj7.3) occurred at 1:25, April 16. Since there was only a 28 hour interval between the two events, it is difficult to separate the damage of the two earthquakes from field surveys.

We analyzed aerial photos taken by the Geospatial Information Authority of Japan on the 15th and 16th of April and investigated the distribution of collapsed buildings along the Akitsu river. The photos cover the most severely damaged areas in Mashiki town. The two sets of photos taken between the foreshock and mainshock and after the mainshock, enable identification of the separate damage due to the foreshock and mainshock. The damage distribution is very heterogeneous, and the concentrations of severe damage occur in isolated areas resembling islands. The spatial pattern of the collapsed buildings due to the foreshock and mainshock were similar, but the number of collapsed buildings from the mainshock was 4 to 5 times the number for the foreshock.

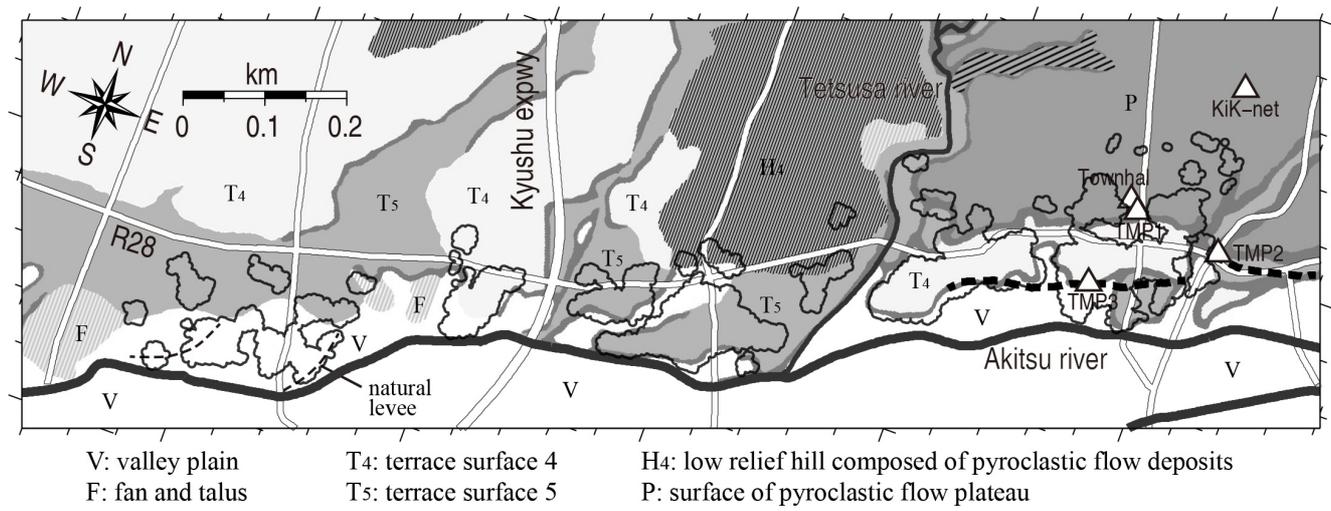
The distribution of the collapsed buildings was compared with other information, such as the location of fault surface rupture, geomorphological map, and the location of the older built areas. The surface rupture was observed in the center of Mashiki town. The largest offset was about 40 cm along the southern edge of the concentrated damage area. Since this surface rupture was observed only after the mainshock, it is unlikely that the presence of the surface rupture generated the similar pattern of damage for the foreshock and mainshock in Mashiki.

Local geology in the survey area consists of the floodplain of the Akitsu river, multiple layers of river terraces, and an upper plateau of volcanic material. The heavily damaged area was in consistently in the lowest river terrace. The floodplain has the softest soil conditions in the area, but damage on the floodplain was much less than on the river terrace. The soft soil conditions are confirmed by microtremor array observations which showed thick sedimentary deposits with S-wave velocity less than 100 m/s on the floodplain. The observation that the most severe damage did not occur on the softest soil sites, is contradictory to many past studies. This unusual result needs further study to clarify the mechanisms of this damage distribution.

The damage islands correspond well to the distribution of the older built areas, which were constructed in the Meiji era (~1900s). Our photo analysis showed that the older buildings have a higher collapse ratio throughout the area. Therefore, building age and deterioration of the structures contribute to the damage distribution. The cause of the damage islands is likely due to a combination of the subsurface soil structure and age of buildings.

キーワード：熊本地震、建物被害、強震動

Keywords: kumamoto earthquake, building damage, strong motion



# 2016年熊本地震の震源近傍におけるS波速度の異方性について —KiK-netの地表地中間の地震波干渉法に基づく方位による伝播速度の違い—

A Study on anisotropy of shear wave velocity near the source region of the 2016 Kumamoto earthquake  
-On the basis of seismic interferometry between ground surface and down hole of KiK-net observation-

\*元木 健太郎<sup>1</sup>、加藤 研一<sup>1</sup>

\*Kentaro Motoki<sup>1</sup>, Kenichi Kato<sup>1</sup>

1. 小堀鐸二研究所

1. Kobori Research Complex

## 1. はじめに

2016年熊本地震での益城町の大振幅の生成要因として、微動観測や余震観測などから地盤増幅の寄与が大きいと見解を示す報告が多い。筆者らは、微動アレイ探査に基づき地盤モデル（以降、微動モデル）を推定し、KiK-net益城（KMMH16）のNS成分の地表—地中間の伝達関数を説明し、断層極近傍との比較分析から地盤増幅と被害の関係を検討した（元木・他、2016）。しかしEW成分に関しては同じ地盤モデルで説明できず、NS成分と卓越振動数が異なる特性を示すことが分かった。そこで、本研究ではKMMH16を含む3観測点において、地震波干渉法に基づきS波伝播時間を水平2成分で求め、震源近傍のS波速度の異方性を調査した。

## 2. 解析方法とデータについて

解析には地表記録と地中記録を用い、地中記録に対する地表記録のデコンボリューションを行うことにより、地中地表間の伝播特性を調べる。水平2成分それぞれに対して適用し、伝播時間の違いを調べる。

解析に使用した観測点はKMMH16（GL-252m、335地震）、KMMH14（GL-110m、474地震）、KMMH03（GL-200m、354地震）の3点である。（）内は地中観測点深さと地震数を表す。直達S波を解析区間に確実に入れるため、P波初動が得られていない地震は解析対象から外した。解析区間は記録長全てを用いた。なお、KMMH16においてS波20秒間を用いた解析も行い、全記録時間を用いた結果と同様の結果が得られることを確認している。

## 3. 地震波干渉法による伝播速度の異方性

デコンボリューション波形のピークが地表地中間のS波の伝播時間になる。デコンボリューション波形の全記録のアンサンブル平均をとり、KMMH16のNS成分とEW成分のピークを求めると、それぞれ0.50秒と0.39秒となった。EW成分がNS成分より速い伝播速度であることを表している。NS成分の伝播時間は微動モデルによる伝播時間と対応したが、EW成分はPS検層モデル、微動モデルの両モデルとも説明することができなかった。速度の異方性を表すパラメータとして  $(v_{fast} - v_{slow}) / v_{fast}$  を求めると22%になる。その他の観測点で求めた伝播時間は、いずれの観測点でもEW成分が短い。前述のパラメータを求めると、KMMH14で15%、KMMH03で23%となった。

## 4. 地盤不整形性や地盤非線形に関する考察

方位による伝播性状の違いは、表層付近の不整形性によることが考えられる。地盤の不整形性が高い時、波の到来方向によって性質が変わると考えられるので、KMMH16において、地震の到来方向による違いを調査した。KMMH16を原点として45°毎に8象限に分割し、震央位置によって分類した。到来方向の違いはほとんど認められず、成分ごとの違いの方が大きかった。このことは方位による伝播時間の違いは、地盤の不整形性では説明が難しいことを表している。

次に、地盤の非線形性による影響を検討した。地震時の地盤の非線形挙動により、地震前後の伝播時間が変

化することが報告されている（例えば、Yamada et al.,2008）。熊本地震前後での伝播時間の変動を調査すると、NS方向で0.02秒、EW方向で0.03秒の違いが見られた。地盤の非線形性が現れることは確認できたが、その差は成分の違いよりも小さい。

熊本地震の震源域は東西圧縮、南北伸張の応力場となっていることがGNSSを用いた解析から推定されている。S波速度の異方性の要因の一つとして、方位による応力の違いが考えられる。より多くの観測点で伝播時間の違いを求めることによって、応力場との対応が検討できる。東北日本においても地震波干渉法によって表層付近の伝播時間が方位によって異なり、それはプレートの動きと対応していることが確認されている（Nakata and Snieder, 2012）。その速度比はNIGH13において7%と評価され、熊本地震の震源近傍ではその差がより顕著に現れていると考えられる。

今後、伝播速度の異方性について、より多くの観測点で適用することや、他の探査手法（例えば、レシーバー関数や位相速度）も用いた解析を行い、方位ごとの地盤モデルを構築する予定である。

キーワード：2016年熊本地震、地震波干渉法、KiK-net、S波速度の異方性

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, seismic interferometry, KiK-net, anisotropy of shear-wave velocity

# 微動アレイ探査による富山県内の堆積平野域の速度構造の推定 Velocity Structure Model of Sedimentary Basins in Toyama Prefecture, Japan, by Microtremor Array Measurements

\*浅野 公之<sup>1</sup>、吉田 邦一<sup>2</sup>、宮腰 研<sup>2</sup>、大堀 道広<sup>3</sup>、岩田 知孝<sup>1</sup>

\*Kimiya Asano<sup>1</sup>, Kunikazu Yoshida<sup>2</sup>, Ken Miyakoshi<sup>2</sup>, Michihiro Ohori<sup>3</sup>, Tomotaka Iwata<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所、2. 一般財団法人地域地盤環境研究所、3. 福井大学附属国際原子力工学研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute, 3. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui

富山県の平野域は、黒部川、片貝川、早月川、常願寺川、神通川、庄川など飛騨山脈から富山湾に流れ込む大河川に沿った扇状地および海岸平野によって構成され、東から富山平野、射水平野、砺波平野として区別される（藤井, 1992）。これらの堆積平野の地質構成の特徴として、沖積層と更新統の下に、日本海形成時およびそれ以降の新第三系が数km以上の厚さで堆積していることが挙げられる（富山県, 1992）。基盤岩は飛騨変成岩や船津花崗岩からなる。また、呉羽山断層帯、砺波平野断層帯、魚津断層帯といった主要活断層帯が平野と丘陵の境界付近などに分布するほか、富山トラフ周辺にも複数の活断層の存在が報告されている（石山・他, 2014）。陸域や海域の活断層で発生する地震の強震動予測には信頼できる地下速度構造モデルが不可欠であるが、富山県の堆積平野では地震基盤までの堆積層のS波速度構造に関する調査はこれまでほとんど行われていなかった。このため、我々は富山県内の堆積平野を対象に微動アレイ探査を新たに実施し、堆積層の速度構造を推定した。

現地での微動アレイ観測は、2014年10月、11月及び2015年11月の3次に分けて、計15地点で実施した（地図参照）。観測サイトは既存の強震・震度観測点の近傍に選定した。下新川郡入善町1地点（NYZ）、魚津市1地点（UOZ）、滑川市1地点（NMK）、中新川郡立山町1地点（TTY）、富山市4地点（TYB、TYF、YTO、OYM）、射水市3地点（SIM、DIM、SNM）、砺波市1地点（TNM）、南砺市2地点（FKM、NNT）、小矢部市1地点（OYB）である。各地点では、沖積層から地震基盤までの速度構造情報を得るため、半径20 m程度の小アレイから半径1.5 km程度の大アレイまで、アレイ半径の異なる複数式のアレイ観測を実施した（具体的なアレイ半径やアレイ展開数は地点によって異なる）。各観測はLE-3D/5s地震計7台による二重正三角形アレイにより行った。観測微動記録に空間自己相関法（SPAC法）を適用して解析し、位相速度の分散曲線を得た。各観測点では、約0.2 Hzから約2~5 Hzの範囲で、位相速度の分散曲線が得られた。NYZ、UOZ、TTY、TYF、YTO、OYM、TNM、FKM、NNT、OYBでは、2 Hz付近以上でも位相速度が0.6~1.0 km/sと比較的速い位相速度が得られており、これらの地点は扇状地に位置しており、工学的基盤相当の地層が露頭していることが示唆された。反対に、NMK、TYB、SIM、DIM、SNMでは、比較的遅めの位相速度（約0.2~0.5 km/s）が得られた。

得られた分散曲線の連続性、分散性から、Rayleigh波基本モードの位相速度に対応すると仮定し、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析手法（Yamanaka and Ishida, 1998）によってS波速度構造の推定を行った。既往のJ-SHIS V2モデル（藤原・他, 2012）を基礎にしたモデル改訂に資することを目的としたため、複数の層からなる堆積層と地震基盤からなる水平成層構造を仮定し、各層のS波速度はJ-SHISで用いられている値に固定し、観測位相速度にフィットするように堆積層各層の層厚を探索した。高周波数域での観測位相速度が0.6 km/sを下回る観測点では、表層を追加し表層のS波速度と層厚を合わせて探索した。また、いくつかの観測点では観測と理論位相速度のフィッティングの状況を判断し、Vs 0.6 km/sと1.1 km/sの層の間にVs 0.75 km/sの層を追加した。これにより、各観測点において、観測位相速度の特徴を概ね説明する水平成層速度構造モデルが得られた。富山平野や砺波平野の主要部分では、地震基盤の深さが5~6 kmにも及ぶことがわかった。砺波平野については、反射・屈折法地震探査によるかほく一砺波測線で推定されている先新第三系の深さ（Ishiyama *et al.*, 2016）とも調和的である。

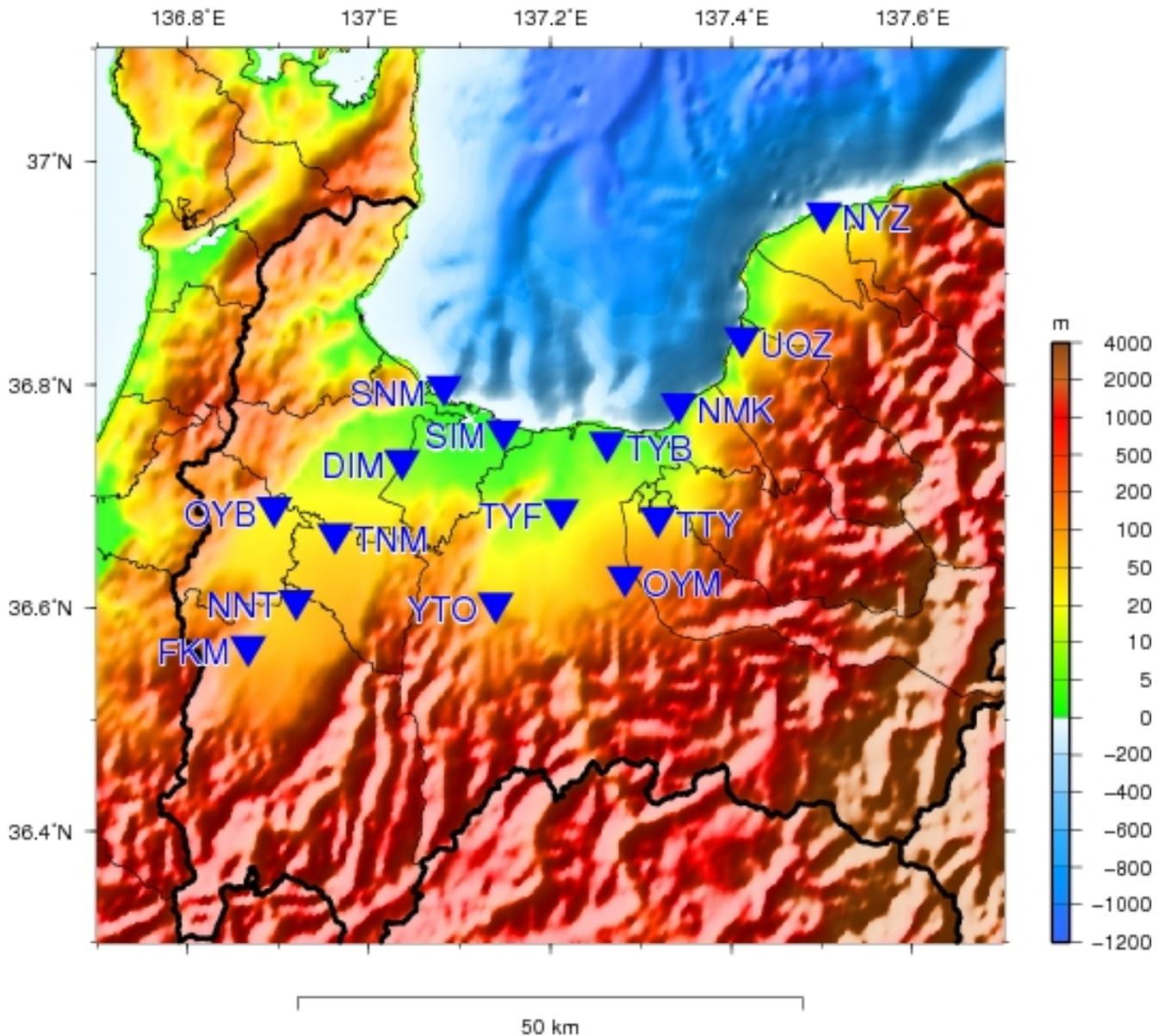
今後、本研究で得られた成果や、日本海プロジェクトで実施されている人工地震探査の成果などを統合

し、対象地域の三次元速度構造モデルの改良を進めていく予定である。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術試験研究委託事業「日本海地震・津波調査プロジェクト」（代表機関：東京大学地震研究所）の一部として実施しました。現地での微動観測は、有限会社ジオアナリシス研究所、一般財団法人地域地盤環境研究所、京都大学防災研究所及び関係自治体の皆様のご協力の下に実施しました。記して感謝いたします。

キーワード：富山平野、速度構造モデル、微動アレイ探査

Keywords: Toyama plain, velocity structure model, microtremor array measurement



## 関東地域における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築（その2）

### Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation in Kanto Area. (part2)

\*先名 重樹<sup>1</sup>、若井 淳<sup>1</sup>、神 薫<sup>1</sup>、松山 尚典<sup>2</sup>、前田 宜浩<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>

\*Shigeki Senna<sup>1</sup>, Atsushi Wakai<sup>1</sup>, Kaoru Jin<sup>1</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>2</sup>, Takahiro Maeda<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所、2. 応用地質

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corp

#### 1. はじめに

防災科研では、これまでに関東地域において地盤モデル（S波速度構造）の高度化<sup>1),2)</sup>を行ってきた。本研究では、さらなる高度化として、ボーリングデータおよび微動観測データを追加し、より詳細に浅部地盤構造モデルの修正手法を検討し、関東地域の浅部・深部統合地盤モデルを構築した。

本検討では、特に2秒よりも短周期側（工学的基盤よりも浅い構造：浅部地盤）に対し、1次元重複反射法による地震観測記録とサイト増幅特性等との比較を行い、既往の地盤モデルに対しての工学的基盤以浅の精度検証を行っている。ここでは、関東全域（1都6県）の結果を報告する。

#### 2. 地盤構造モデル作成のための地盤関連データ（ボーリング・地震観測記録・微動観測）の収集について

本研究では、関東地域全域において、自治体等が所有しているボーリングデータ、地震観測記録および常時微動観測データの収集等を行った。ボーリングデータの収集は防災科研の「ジオステーション<sup>3)</sup>」に存在するデータと、自治体が所有する建築確認申請および民間事業者のボーリングデータ等を改めて収集し、主に浅部地盤のモデル構築に活用した。地震観測記録については、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体（主に県）の観測記録を収集した。常時微動観測については、2種類の微動アレイ観測を実施している。1つは極小アレイ観測で、約1km間隔で約10,000点（平成29年2月現在）、大きめのアレイ観測は、約5km間隔で、K-NET、KiK-net、自治体の震度観測地点等の約520地点（平成29年2月現在）でそれぞれ実施した。観測には一体型常時微動観測装置JU-210, JU-215, JU-410（白山工業社製）を用いた。極小アレイ観測は、60cmの4点による三角形のアレイと5~10mの不規則アレイを約1km間隔にて行い、15分の観測を行った。微動アレイ観測については、約5km間隔で設定し、半径R=(800m)、400m、200m、100mの大きさの三角計のアレイと、それよりも小さな半径については、一辺75m、50m、25mのL字アレイ（一部R=10~60mの三角アレイ）を展開した。三角アレイについては、90分程度、L字アレイについては30分程度の観測を行った。

#### 3. 初期地盤モデルの構築

浅部初期地質モデル作成については、地質および土質モデルの両方を作成し、ボーリングデータのあるところはその情報を使用し、無い箇所の地層境界については、周辺のボーリングにおける地層区分データを用いて、微地形区分と矛盾しないように、地質学的な検討を加えて補間を行った。さらに、補間した地層境界データを用いて、作成する地盤モデルのメッシュごとの地層境界データおよびN値の深度分布データを作成した。なお、データの少ないところでは後述する極小アレイのデータを活用し、速度構造の連続性を勘案して層境界を設定した。

#### 4. 地盤構造モデルの修正解析と作成された地盤モデル

微動探査(極小アレイ)では、測定データにより得られた実測分散曲線に対し、深さ方向に単純に変換するSPM(Simple Profile Method)<sup>4)</sup>と逆解析(Simple Inversion Method(Pelekis and Athanasopoulos (2011)<sup>5)</sup>, Arai and Tokimastu(2005)<sup>6)</sup>)を行って、その平均値を用いて、地盤の速度構造を求めた。なお、逆解析に際しては、近傍の強震観測点において観測された地震波形のSコーダ波を用いてR/Vスペクトルを求め、これを併せた同時逆解析(ジョイント・インバージョン)を実施した。作成された関東地域全域の地盤構造モデルから解析される揺れやすさ・分布の各指標(AVS30、卓越周期、震度増分、最大速度増幅率等)は同セッションのポスター発表(若井ほか)にて報告する。

## 5.まとめ

本検討では、昨年の報告<sup>1)</sup>における浅部・深部統合地盤モデルをさらにデータを追加することで、高精度化を行った。関東地域で作成された工学的基盤と、それよりも浅い浅部地盤モデルは、既往の浅部地盤モデルと比較すると、周期・増幅特性が改善した。次元重複反射法の計算においては、特に防災の観点で重要な周期1秒付近の結果がさらに改善した。改善の理由として、極小アレイによって、ボーリングデータのみではデータが少なく確認が難しい $V_s=300\sim 500$ (m/s)程度の工学的基盤周辺の構造について、微動観測による位相度と周期特性等の評価によってモデルの精度が高くなったもと考える。

## 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」(管理法人:JST)によって実施されました。

## 参考文献

- 1) 先名重樹、若井淳、神薫、前田宜浩、木村克己、松山尚典、藤原広行: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、2016.
- 2) Senna, S., T. Maeda, Y. Inagaki, H. Suzuki, N. Matsuyama, and H. Fujiwara: Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation, *Journal of Disaster research.*, Vol.8, No.5, pp.889-903, 2013.
- 3) 大井昌弘、藤原広行、河合伸一:地震防災のための統合化地下構造データベースの構築、日本地震工学会論文集、第13巻第1号、pp.1-16、2013.
- 4) Satoh, T., C. J. Poran, K. Yamagata, and J. A. Rodriguez (1991), Soil profiling by spectral analysis of surface waves, in *Proc. 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 2, edited by S. Prakash, pp. 1429-1434, University of Missouri-Rolla, Rolla, Mo.
- 5) Pelekis, P. C., and G. A. Athanasopoulos (2011), An overview of surface wave methods and a reliability study of a simplified inversion technique, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 31, 1654-1668.
- 6) Arai, H., and K. Tokimatsu: S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, pp.53-63, 2004.

キーワード: 強震動予測、S波速度構造モデル、微動アレイ、ボーリングデータ

Keywords: Strong motion evaluation, S-wave velocity structure model, Microtremor array, Borehole data

# 強震記録を用いたレシーバ関数解析による京都盆地の基盤深度の推定 Estimation of bedrock depth by receiver function using strong motion data in the Kyoto basin

下村 智也<sup>1</sup>、浅野 公之<sup>1</sup>、\*岩田 知孝<sup>1</sup>

Tomoya Shimomura<sup>1</sup>, Kimiyuki Asano<sup>1</sup>, \*Tomotaka Iwata<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We estimated R/V receiver functions of P waveforms of local earthquakes observed at strong motion stations in the Kyoto basin. Assuming a peak time of observed R/V receiver functions corresponds to the difference in arrival time between the direct P wave and the P-to-S converted wave (PS-P time) generated at the sediment/bedrock boundary in the Kyoto basin, we got the basin depth. The present Kyoto basin velocity model (Kyoto Prof., 2006) agreed with the obtained bedrock depth at most stations except several stations located near the basin edge. We modified the bedrock depth beneath each station. For validating that the peak time is corresponding to the PS-P time, we calculated theoretical R/V receiver functions using the discrete wavenumber method (Bouchon, 1981) with a double-couple point source in laterally homogeneous modified velocity model. Theoretical R/V receiver functions using the modified model showed good agreement to the observed R/V receiver functions.

キーワード：レシーバ関数、京都盆地

Keywords: receiver function, Kyoto basin

## 拡散波動場に基づく微動H/Vの厳密解の高速近似解法を用いた地盤構造の同定

### Application of a fast calculation for full waves microtremor H/V based on diffuse field to identify underground velocity structures

\*呉 浩<sup>1</sup>、正木 和明<sup>1</sup>、入倉 孝次郎<sup>1</sup>、Sanchez-Sesma Francisco<sup>2</sup>

\*Hao Wu<sup>1</sup>, Kazuaki Masaki<sup>1</sup>, Kojiro Irikura<sup>1</sup>, Francisco Jose Sanchez-Sesma<sup>2</sup>

1. 愛知工業大学地域防災研究センター、2. Instituto de Ingenieria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico

1. Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology, 2. Instituto de Ingenieria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico

Based on Diffuse Field Approximation, the Full Waves (DFA-FW) Microtremor H/V Spectral Ratio (MHVSR) is expressed as the square root of imaginary part of the Green's functions in the horizontal component to that in the vertical component. The DFA-FW MHVSR evaluated with the underground velocity structures composed of PS logging data is found to be the best matching with the observed MHVSRs at some KiK-net stations, compared with the transfer function of SH waves, H/V spectral ratio of fundamental mode of Rayleigh waves (ellipticity), and H/V spectral ratio of surface waves including contributions from fundamental and higher modes of both Rayleigh and Love waves excited by distributed surface sources. Therefore, the DFA-FW MHVSR should be applied to identify the underground velocity structures at the interested sites.

However, the conventional methods, such as discrete wavenumber method and contour integration method, is very time consuming in calculating the imaginary part of the Green's functions. For a given layered medium, the DFA-FW MHVSR is found well approximated with only Surface Waves (DFA-SW) MHVSR of the "cap-layered medium" without fixed bottom which consists of the given layered medium and a large velocity cap layer in the deep added to the bottom of the given layered medium. Because the contribution of surface waves can be simply determined by residue theorem, the computation of DFA-SW MHVSR of cap-layered medium is significantly faster than that of DFA-FW MHVSR computed by other methods. The DFA-SW MHVSR of cap-layered medium, as a fast calculation for DFA-FW MHVSR of layered medium without cap layer, is then applied to identify the underground velocity structures above the bottom of the boreholes at KiK-net strong-motion stations.

The identified underground velocity structures between surface and bottom of boreholes were employed to evaluate DFA-FW MHVSRs which were consistent with the DFA-SW MHVSRs of corresponding cap-layered media. The earthquakes records at KiK-net stations provided the earthquake motions of H/V spectral ratios and spectral ratios of horizontal motions between surface and bottom of boreholes. The consistency between observed and theoretical spectral ratios for earthquake motions, indicated that the underground velocity structures identified from DFA-SW MHVSR of cap-layered medium were reasonable.

キーワード：常時微動H/Vスペクトル比、拡散波動場、全波動、表面波、キャップ層、地盤構造

Keywords: microtremor H/V spectral ratio, diffuse field approximation, full waves, surface waves, cap layer, underground velocity structures