

海溝型繰り返し地震の震源特性のばらつきの評価に向けて～気仙沼沖の繰り返し地震を例に～  
Evaluation of Variation in Source Parameters of Repeating Characteristic Subduction  
Earthquakes in Case of Characteristic Earthquakes off Kesenuma, northeast Japan

\*浅野 公之<sup>1</sup>

\*KimiYuki Asano<sup>1</sup>

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

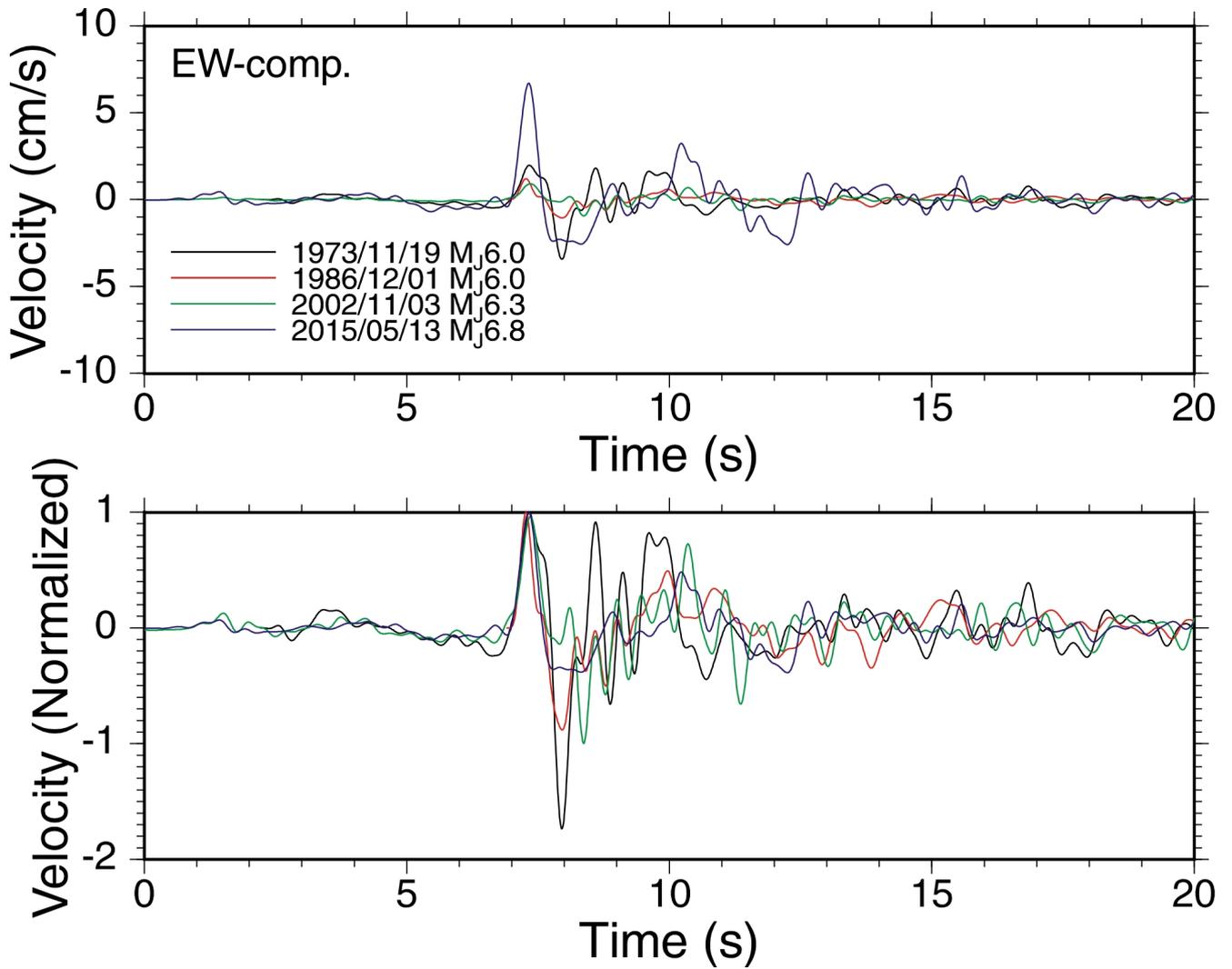
2011年東北地方太平洋沖地震以降、強震動予測において予測結果のばらつきを提示することが強く意識されるようになってきている。本発表では、強震動予測に不確実性を生じさせる要因のうち震源特性に着目する。震源断層を特定した強震動予測において、断層面積や強震動生成域の面積、応力降下量といった震源パラメータは、過去の地震の震源過程の解析結果を集約した経験的なスケールリング則に従って与えられる（例えば、Murotani *et al.*, 2008）。当然のことながら、スケールリング則を構築する上での元データにはイベント毎に平均的なスケールリングからのずれが存在し、スケールリング則の標準偏差も提示されているので、これをもとに震源特性のばらつきを評価することもできる。しかし、経験的なスケールリング則によるばらつきは、さまざまな震源域で発生した地震の解析結果を集約した結果であり、地域性による地震発生環境の違いに伴うものと、同じ震源域で繰り返し発生する地震の個々のばらつき、の両方が内在されている。また、中小地震のスケールリングを調べた研究は国内外に数多くあり、応力降下量にして2～3桁のばらつきが提示されているが、強震動予測の対象になるような大地震について、1回1回のイベントで震源特性がどの程度ばらつくのかは必ずしも明らかになっていない。このような地震現象に本質的に内在されている真のばらつきの分布が明らかになれば、より合理的に震源パラメータの確率分布のようなものを与えることができるようになることを期待できる。このためには、同一震源域で繰り返し発生する地震を解析する必要がある。永井・他(2001)やYamanaka and Kikuchi (2004)によるアスペリティマップの研究などもそのような先行研究として位置づけることができるが、強震動予測の観点からは、強震動生成域のサイズ、応力降下量など重要な震源パラメータについて、何が保存され、何がばらつくのかについての知見を蓄積することが特に重要である。特に東北日本におけるプレート境界地震は、強震観測の歴史の中で繰り返し地震が観測される事例が増えつつある。例えば、瀧口・他(2011)は、1982年と2008年に発生した茨城県沖の地震（ともにM<sub>j</sub>7.0）の強震記録を解析し、1982年本震と2008年本震の強震動生成域の面積は同じであるが、1982年本震は2008年本震に比べて応力降下量が1.5倍大きいという結論を得た。

本研究では、気仙沼沖で繰り返し発生するM6クラスのプレート境界地震を検討対象とした。最新の地震は2015年5月13日（M<sub>j</sub>6.8）に発生している。気象庁の記録をもとに気仙沼沖の繰り返し地震を調査した長谷川・他(2005)や高齋・他(2014)によれば、この震源域では、1940年11月20日、1954年11月19日、1973年11月19日、1986年12月1日、2002年11月3日と繰り返し発生してきており、平均繰り返し間隔は15.5年、平均M<sub>j</sub>は6.3と報告されている。このうち、2002年と2015年の地震はK-NET及びKiK-netにより多数の強震記録が得られている。また、50年以上の歴史をもつ港湾地域強震観測では1973年以降の4つの地震の記録が複数の同一地点で得られており、貴重な強震記録が公開されている。図は震源に最も近い大船渡防地観測点におけるSMAC強震計またはSMAC強震計相当記録の東西成分の速度波形（0.2-2Hz）の比較である。S波部分の波形を比較すると、最大振幅は2015年の地震が最も大きく、1986年の地震は小さい。1986年と2002年の地震の振幅はほぼ同程度であり、1974年の地震は1982年や2002年の地震よりも大きい、2015年の地震よりは小さい。しかし、およそ0.8秒程度とみられるパルス幅は4つの地震でほとんど変わらない。このことから、強震動生成域の位置が厳密に同じかどうかは判断することはできないが、破壊継続時間がほぼ等しいことが推測されるため、ほぼ同一の面積の強震動生成域が破壊したとすれば、イベント間の応力降下量の違いが反映されていると考えられる。今後、スペクトル比法による解析や理論波形または経験的グリーン関数を用いた波形モデリングを実施することで、個々の地震の応力降下量を推定し、ばらつきを議論する。

謝辞： 港湾地域強震観測及び国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET及びKiK-netの強震記録を使用しました。貴重な観測網の維持に関わられる皆様に感謝いたします。

キーワード：繰り返し地震、震源特性、強震動生成域

Keywords: Repeating characteristic earthquakes, Source characteristics, Strong motion generation area



## 断層幅の不確かさの強震動評価結果への影響に関する検討 – 活断層の地震 –

A study on effects of uncertainty in fault width to strong motion evaluation for earthquakes in active faults

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

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

地震調査委員会による活断層の長期評価では地震発生層下限深さが微小地震の震源分布から評価されているが、大地震時に断層下端がそれよりも深くなる可能性はある。しかしながら、どこまで深くなるかという知見は今までにほとんど得られていない。従って、地震発生層下限深さ、結果として断層幅、を認識論的不確かさとして考慮した強震動評価が今後必要となる。

地震調査委員会による強震動予測手法「レシピ」の（ア）の方法では、断層モデルの面積から震源パラメータが設定され、断層幅によって地震規模や各パラメータの値が変わる。一方で、「レシピ」の（イ）の方法では、長期評価による断層長さから震源パラメータが設定される。この場合、断層幅によって地震規模は変わらないものの、地震規模と断層面積の関係が変わるためにすべり量や応力降下量などの震源パラメータの値は変わる。

以上のように、現行の「レシピ」に基づいた方法で強震動評価を行う場合、断層幅の不確かさが巨視的および微視的震源パラメータに及ぼす影響はきわめて複雑である。本検討では、これらの地震発生層下限深さの不確かさを考慮した複数のモデルを「レシピ」により設定し、強震動計算結果への影響を分析する。なお、断層幅に影響を及ぼすパラメータとして、傾斜角の不確かさも考慮する必要があるが、本検討では地震発生層の下限深さのみを対象とする。

キーワード：不確かさ、強震動、断層幅、活断層

Keywords: Uncertainty, Strong ground motion, Fault width, Active faults

## 沈み込み巨大衝上地震の強震動予測の考え方

Construction of a recipe for predicting strong ground motions from subduction mega-thrust earthquakes

\*入倉 孝次郎<sup>1</sup>、倉橋 奨<sup>1</sup>

\*Kojiro Irikura<sup>1</sup>, Susumu Kurahashi<sup>1</sup>

1.愛知工業大学

1.Aichi Institute of Technology

### 1. はじめに

東北地方太平洋沖でプレートの沈み込みにより発生したMw 9.0の地震では、プレート境界に沿う長さ約500m、幅約200kmに及ぶ震源断層が破壊された。強震動記録、遠地実体波、GPSによる測地データ、津波データなど性質の異なる種々のデータを用いた断層面の破壊過程の解析により、この地震は周波数依存の震源モデルを有していることが明らかになってきた。

このような震源破壊の特徴は、この地震に限ったものではなく、最近10年間に起こった4つの沈み込み巨大衝上地震（2004年Mw9.2スマトラ地震、2005年Mw8.6スマトラ地震、2010年Mw8.8チリ・マウレ地震、2011年東北地震）に共通していることが分かってきた(Yao et al, 2016)。

切迫性の指摘されている南海トラフ地震など、沈み込み型巨大地震に対する防災・減災対策を効果的に進めるためには、信頼性の高い強震動や津波の予測技術の確立が必要とされている。本研究の目的は、2011年東北地震の強震動生成の詳細な解析により、南海トラフ地震のように沈み込み地域に発生の予測される大規模プレート境界地震に対する強震動予測手法を検討することにある。

### 2. 震源断層のセグメント化

2011年東北地震の震源域を含む三陸沖から房総沖までの太平洋沿岸を含む日本海海溝沿いの地域について、地震調査委員会は過去400年間の地震活動の調査結果を基に長期評価を行い2002年に公表している（2011年と2012年に第2版）。それによると東北地震の震源域は6個のセグメントに分けられ、セグメントごとに30年間の最大マグニチュードと発生確率の評価がなされた。

近地の強震動の長周期成分や遠地実体波を用いて久保・他(2013)は周期別の震源モデルを構築している。それによると、海溝軸に近い浅部セグメントから、きわめて大きな長周期のすべりを生じたが短周期地震動の生成は小さく、一方、陸に近いプレート境界深部のセグメントからは、強い短周期地震動が生成されている。

### 3. 短周期～やや長周期地震動（0.1-10.0 秒）のための震源モデル

2011年東北地震の震源近傍域に近い観測点での強震動加速度波形には、顕著な複数の孤立した波群が観測された。これらの波群を説明するために、5つの強震動生成域(Strong Motion Generation Area: SMGA) からなる短周期生成モデルが推定された(Kurahashi and Irikura, 2013)。SMGAの位置は、震源断層の中で西端に近いプレート沈み込みのダウン・ディップに沿っていることがわかってきた。超高層ビルなどの長周期構造物の被害に影響する長周期地震動（2 - 10秒）は、これらのSMGAからの地震動として評価可能なことが分かってきた。

### 4. 衝撃的地震動のための震源モデル

もう1つの問題として、この地震の強震動波形は顕著な複数の孤立した波群からなっているが、それぞれの波群は先頭部に衝撃状の波形形状を有している。Kurahashi and Irikura (2013)は、2003年宮城県沖地震(Mj 7.2)の地震動を経験的グリーン関数として、短周期地震動の波形がほぼ再現できることを示している。しかしながら、それよりも小さなM6クラスの中小地震の記録を経験的グリーン関数としてSMGAからの地震動を合成すると、野津・他(2014)が指摘するように、パルス形状を持つ地震動にならない。ここでは、2003年宮城県沖地震(Mj 7.2)の地震動をより小さな中小地震からの地震動記録を経験的グリーン関数として用いて、短周期の地震動の生成過程について再検討を試みる。2003年宮城県沖地震の震源モデルは、2つのSMGAからなり、破壊はそれぞれのSMGAの東端部から西方向に伝播した。そのため、震源域に近い宮城県の太平洋沿岸域での強震動記録には、顕著な破壊の前方方向指向性効果が見られる。その1つのSMGAからの地震動を経験的グリーン関数として、2011年東北地震の強震動を合成すると、短周期地震動がほぼ再現できる。波群の始まりの衝撃的地震動のより良く再現をするためには、最大すべり速度とライズタイムの不均質を考慮したマルチスケール震源モデル

が必要である。

キーワード：沈み込み巨大衝上地震、強震動、短周期震源モデル、強震動予測レシピ

Keywords: subduction mega-thrust earthquakes, strong ground motions, short-period source model,  
strong motion prediction recipe

## 低角逆断層面直上の近地場地震動：浜岡の場合

Near-field strong motion on the hanging wall of low angle thrusting: a case of Hamaoka

\*川崎 一朗<sup>1</sup>\*Ichiro Kawasaki<sup>1</sup>

1.公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

■近地場強震動について次のようなエポックがあったと考えている。

- (1) Maruyama (1963) や Burridge and Knopoff (1964) による転位震源から放出される弾性波の厳密解の定式化。
- (2) Aki (1968) による, 1966年6月M6.6のパークフィールド地震のときに断層線から80mのところまで得られた記録の解析。
- (3) Haskell (1969) による矩形断層面による地震波の計算。
- (4) Kanamori (1972) による1943年鳥取地震のライズタイムと実効応力の推定。
- (5) Kawasaki et al. (1973) による, 半無限媒質における弾性波の定式化。
- (6) 安藤・川崎 (1975) による, 1945年三河地震の非対称被害分布の解析。
- (7) 岡田(1980)による弾性歪み波形などの定式化。
- (8) 梅田・他 (1986) などによる, 1984年長野県西部地震のときに跳んだ石の発見。
- (9) 1995年兵庫県南部地震に震災の帯の周辺で1m/s近い強震動を記録。
- (10) 1999年台湾地震の時に, 低角逆断層面上盤で3m/s近い地震記録を記録 (Ma et al., 2001)。
- (11) 2011年M9.0東北地方太平洋沖地震の22MPaの大きな応力降下 (Hasegawa et al., 2011)。

■(1)~(10)から, 低角逆断層面直上の強震動の特徴は, 単純化して次のように箇条書きできる。ただし, 対象となるのはライズタイムより長周期である。なお, 本稿では, 強震動と言えば速度と加速度を指すものとする。

- ①強震動の波形は, 観測点近傍の断層滑り時間関数に強く支配され, 周期はライズタイムに規定される。
- ②変位の断層滑り平行成分は滑り時間関数に似た波形になり, 断層面直交成分は平行成分波形を1回微分したような波形になる。
- ③強震動の最大振幅は直交成分の方が大きい。
- ④低角逆断層面で滑り面が地表に突き抜けた場合, 見かけ上, 断層滑りの多くを上盤側が受け持ち, 断層線に近いほど, その割合が大きくなり, 強震動は激烈になる。
- ⑤断層面直近の強震動の最大振幅は1m/s, 1g を越える。

■東北地震の22MPaの大きな応力降下 $\Delta\sigma$ は, 断層面近傍の強震動予測に大きな問題を突きつけた。単純化して, 起震応力 $\sigma_e$  (effective tectonic stress) は $\Delta\sigma$ と同じとする。Starr (1928)の定式化に従うと $\Delta\sigma$ は滑りの大きさ $D_0$ と断層の幅 $W$ の比 $D_0/W$ に比例し, Brune (1970) や Ida and Aki (1972) の定式化に従うと, 平均的滑り速度 $D_0/t_0$  ( $t_0$ はライズタイム) は $\sigma_e$ に比例する。 $W$ は一定とすると,  $D_0$ も $D_0/t_0$ も $\sigma_e$ に比例し, その結果, 『断層近地場の強震動は $\sigma_e$ にほぼ比例して大きくなる』という基本的な「応力-強震動関係」が導かれる。なお, 東北地震の平均的滑り速度は 2.6-6.5m/s となる。

■フィリピン海プレート境界面の直上ほぼ10kmという極端な断層近地場に位置している浜岡の場合を考えてみよう。断層の長さ100km, 幅50km, 傾き15度, 断層面下端の深さ18km,  $V_p$ 6.8km/s,  $V_s$ 3.9km/sとし, 断層面下端中央から長さ方向にはバイラテラルに, 上方にユニラテラルに, それぞれ3.5km/sの速度で拡大するモデルを考える。中央防災会議 (2012) の「南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告)」の「津波断層モデル編」のケース①は駿河湾周辺の $D_0$ を 15m~20m と想定している。 $D_0$ を15~20mとすると $\Delta\sigma$ は11~14MPaとなり, 滑り速度の範囲は1.3m/s~4.2m/sになるので, 1m/s, 3m/s, 5m/s の3つのケースの理論合成波形を示したのが Fig.1 である。計算には, Kawasaki et al. (1973) と岡田(1980)の半無限媒質のプログラムを用いた。

(上下成分の速度の最大振幅, 加速度の最大振幅) は, 図示していないものも含めて, 滑り速度1m/s (0.5m/s,

0.3m/s/s), 2m/s (0.9m/s, 0.6m/s/s), 3m/s (1.4m/s, 0.9m/s/s), 4m/s (1.9m/s, 1.2m/s/s), 5m/s (2.3m/s, 1.5m/s/s) である。「応力-強震動関係」に従った振幅変化をしていることが分かる。滑り速度が 3m/s を越すと加速度は  $g$  を越える。

この断層モデルは単純化されたもので、多くの不確定要素が残るが、その多くは、強震動を大きくする方向に働く。しかし、一番肝心の駿河湾周辺の起震応力も強震動生成域の分布がしっかり分かっていないので、議論を本質的にこれ以上煮詰めることは出来ない。

■短周期の場合は、遠地場項が相対的に優勢になり、散乱や減衰などの要素の比重が大きくなるので、ここまでの論理は該当しなくなる。とはいえ、

(a) マルチ・スケールのあらゆるスケールの破壊で「応力-強震動関係」が成り立つ、

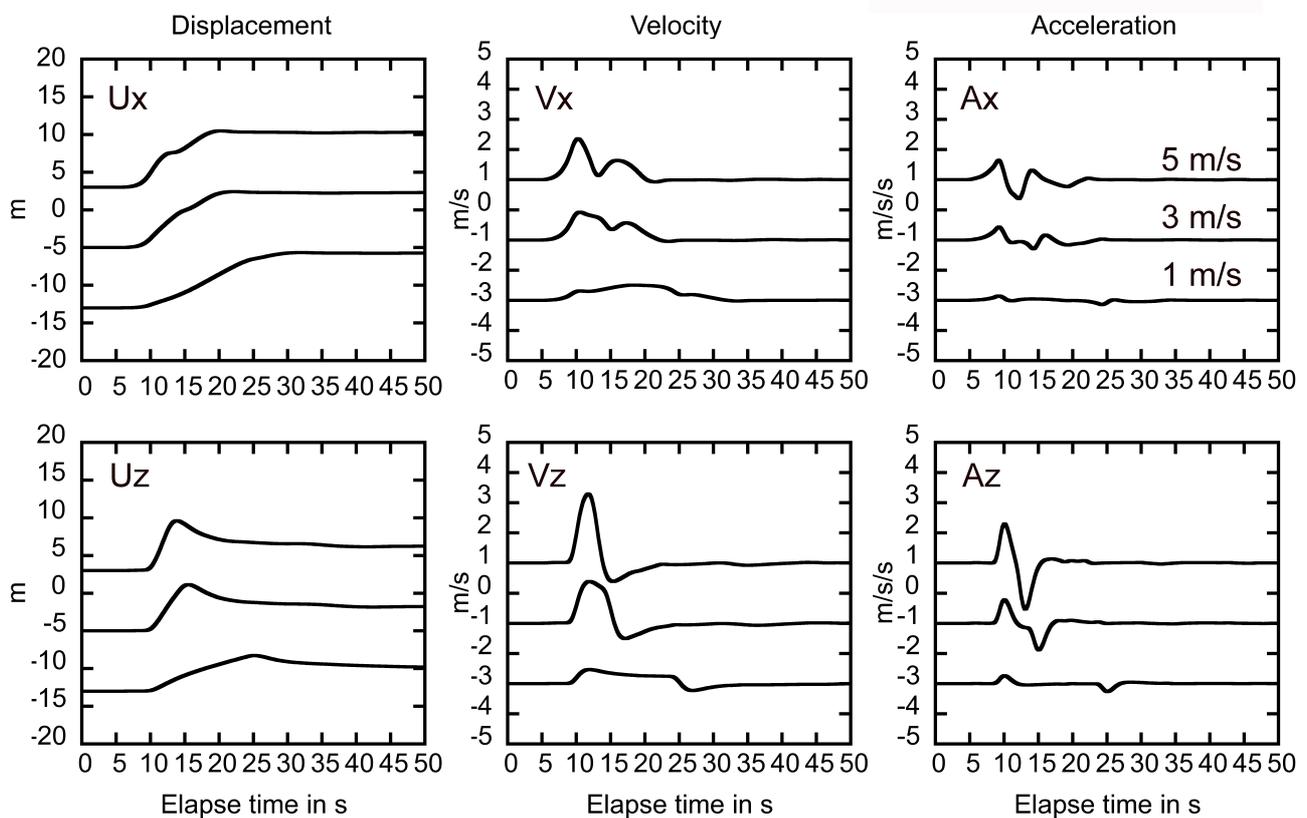
(b) レベル2の超巨大地震における起震応力は、レベル1の巨大地震における起震応力より何倍も大きい、という2つの仮定が正しいとすると、レベル2の大津波が浜岡を襲う寸前に、短周期も長周期も含めて、昭和東南海地震や安政東海地震のときを何倍も上まわる強震動が襲うと想定することが出来る。

■以上の議論から、地震学の現在の段階では、レベル2の超巨大地震のときの低角逆断層直上の浜岡の強震動を適切に予測することは無理と言うほかない。適切な強震動予測を行うためには、直下のプレート境界面の強震動生成域の分布と、南海トラフ巨大地震の一部として駿河湾が破壊するときの起震応力の把握が不可欠であろう。

■Fig.1 本文に述べた断層モデルを仮定した浜岡の理論合成波形。左から、変位(U)、速度(V)、加速度(A)。上行(添字 x)は断層走向に直交方向の水平成分、下行(添字 z)は上下成分。Doは15m。各パネルの3つのトレースは、下から、滑り速度 1m/s, 3m/s, 5m/s。浜岡は断層面中央の下端から断層面上30km海溝よりの地表投影点で、断層面までの距離は10km。

キーワード：断層近地場、低角逆断層、起震応力、滑り速度、強震動、浜岡

Keywords: near-field, low angle thrusting, earthquake generating stress, slip velocity, strong motion, Hamaoka



## 相模トラフの海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価

## Long-period ground motion evaluation for the Sagami Trough megathrust earthquakes

\*前田 宜浩<sup>1</sup>、岩城 麻子<sup>1</sup>、森川 信之<sup>1</sup>、今井 隆太<sup>2</sup>、青井 真<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>\*Takahiro Maeda<sup>1</sup>, Asako Iwaki<sup>1</sup>, Nobuyuki Morikawa<sup>1</sup>, Ryuta Imai<sup>2</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

1.防災科学技術研究所、2.みずほ情報総研

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Mizuho Information &amp; Research Institute, Inc.

我々は相模トラフ沿いで発生する海溝型巨大地震を対象として、差分法シミュレーションに基づいた長周期地震動評価を行っている。これまで、巨大地震の発生パターンの多様性を考慮し、震源域、アスペリティ配置、破壊開始点などの不確実さを考慮した検討（岩城・他、2013、連合大会；森川・他、2014、連合大会）、解析対象周期帯の広帯域化に向けて、震源モデルの短波長不均質性を考慮した検討や、浅部・深部統合地盤モデルを用いた検討（前田・他、2015、連合大会）を行ってきた。本検討では、これまでの知見を踏まえ、大正関東地震型と元禄関東地震型を対象とした長周期地震動のハザード評価を行う。

本検討では、周期2秒以上を対象とした長周期地震動の計算を行うために、これらの震源域に対して設定した特性化震源モデルに短波長不均質性を付与した震源モデルを用いる。まず、基本となる特性化震源モデルに対しては、アスペリティ配置および破壊開始点位置を複数設定する。また、これまでの検討ではアスペリティの総面積を断層面積の20%としていたが、これに加え、10%とする場合も考慮する。これらのパラメータの組合せにより408ケースの特性化震源モデルを設定した（大正型：120、元禄型：288）。これらの特性化震源モデルに付与する短波長不均質性については、破壊伝播速度、すべり量、すべり角の3つのパラメータに対して関口・吉見（2006）によるマルチスケール不均質性を付与することとした。なお、不均質性は計算ケースごとに異なる乱数を用いて設定した。

長周期地震動の計算に用いる地下構造モデルは、関東地域において構築された浅部・深部統合地盤モデル（先名・他、2015、地震学会）である。このモデルでは浅部地盤と深部地盤が同時にモデル化されており、工学的基盤面が適切に設定されていると考えられる。そこで、本検討では浅部地盤をはぎ取った解放工学的基盤（ $V_s=350\text{m/s}$ 層）上での評価を行うこととした。

以上のように設定した多数の震源モデルに対する計算結果に基づいて、長周期地震動のばらつき評価を行う。本検討では、最大速度、および速度応答を指標値として用いた。地震動の空間分布に対しては破壊開始点の違いの影響が支配的であることが示された。これは、我々が相模トラフや南海トラフの地震を対象として行った既往研究と整合した特長である。また、震源域が関東平野の直下に拡がっているため、平野内においても実体波の影響を強く受けた波形となっていた。また、最大速度や速度応答の頻度分布は対数正規分布に近い分布となっていた。なお、本検討で設定した震源モデルは“レシピ”による平均的なパラメータ設定となっており、レシピの範囲内でのばらつき評価となっているが、レシピからのばらつきを考慮したケースについての検討も行う予定である。

謝辞 本研究は文部科学省の「平成27年度長周期地震動ハザードマップ等支援事業」による。

キーワード：相模トラフ、長周期地震動、差分法

Keywords: Sagami Trough, Long-period ground motion, Finite difference method

## ボアホールひずみ計と応力計で観測されたP波とS波の間の長周期地震動

The long-period ground motion between P and S arrivals observed by the deep borehole strainmeters and stressmeters

\*村上 理<sup>1</sup>、石井 紘<sup>1</sup>、浅井 康広<sup>1</sup>

\*Osamu Murakami<sup>1</sup>, Hiroshi Ishii<sup>1</sup>, Yasuhiro Asai<sup>1</sup>

1.地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

We deployed multi-component borehole instruments equipped with strainmeters and/or stressmeters around the Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES). We recorded the continuous data at a rate of 1-50 Hz for these instruments. In these records, we observed the long-period variations between P and S arrivals from large earthquakes. In order to investigate the nature of these long-period variations, we estimated the dominant periods of these variations. After we manually picked the P and S wave arrivals for each waveform, we calculated spectrum of the records between P and S wave arrivals. We found that the dominant periods of these long-period variations are typically a few tens seconds. Though W phase (Kanamori, 1993) is well known as the long-period phase between P and S arrivals, the periods of W phase are usually hundreds seconds or more, and are longer than our observed dominant periods. We consider that the observed long-period variations are responsible for other effects, such as PL wave caused by the leaking mode (Yoshii, 1970). These long-periods variations are also recorded by seismometers equipped with the same borehole instruments installed in deep borehole. The long-periods variations observed at seismometers, however, will be clearly found, after we applied the bandpass (0.01 -0.1 Hz) filter. Because the strainmeters and stressmeters have enough sensitivity to DC, we consider that the strainmeters and stressmeters are also useful to detect the long-period ground motions. We will present the results obtained from the analysis.

キーワード：P波とS波の間の長周期地震動、ひずみ計、応力計、ボアホール

Keywords: long-period ground motion between P and S arrivals, strainmeters, stressmeters, borehole

## Studying the effect of seawater on seafloor strong ground motions using simulation method

\*Hongqi Diao<sup>1,2</sup>, Jinjun Hu<sup>2</sup>, Lili Xie<sup>2,3</sup>

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan, 2.Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China, 3.School of Civil Engineering and Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

For the seismic design of offshore engineering, we need to estimate the design parameters of seafloor strong motion. Under the influence of seawater and seafloor soil, seafloor ground motion may present different characteristic from that of onshore ground motion. Until now, there have been very few researches on the seafloor strong motion and also very little seafloor strong motion data has been observed. Our present paper focuses on the effect of seawater on the engineering characteristics and attenuation characteristic of seafloor strong motion. Our main work includes two main parts: one is the effect on engineering characteristics (PGA, Fourier spectra and acceleration response spectra, and 90% energy duration) of seafloor strong motion under seawater of different depth; and the other is the effect of seawater for 50-meter depth on seafloor strong motion attenuation characteristic. Using the wavenumber integration method program of Computer Programs in Seismology (CPS), we perform numerical simulation of seafloor ground motions in six different conditions (water depth: 50 meter, 60 meter, 70 meter, 80 meter, 90 meter and 100 meter) for three kinds of fault types (Normal fault, Reverse fault and Strike-slip fault) and compare them with that without seawater on them. As a result, for whatever kind of fault types, the difference of effect on seafloor horizontal ground motions of seawater is little and can be ignored. However, the effect on seafloor vertical ground motions of seawater is obvious. For all the three kinds of fault types, with the increasing depth of seawater, the effects on vertical motions are similar: 1) waveform becomes more visually complicated; 2) PGA becomes smaller; 3) Fourier spectra decreases greatly near the P wave resonance frequencies of seawater, acceleration response spectra becomes smaller in short periods less than 0.1s. The effect on 90% energy duration time of seafloor vertical motion of seawater has something to do with fault types. We establish the attenuation characteristic relationships of PGA and acceleration response spectra for seafloor vertical ground motion with 50-meter depth of seawater using CPS software and compare them with that without seawater. We found that: the 50-meter depth of seawater has a great effect on the attenuation relationships of PGA and the acceleration response spectra in very short periods (not exceeding 0.04s), the PGA and acceleration response spectra values of seafloor vertical motion are obviously smaller than those without water.

Keywords: seawater, seafloor ground motion, numerical simulation, attenuation characteristic relationship

## Finite Source Modeling of a Large Earthquake Using the Ambient Seismic Field

\*Loic Viens<sup>1</sup>, Hiroe Miyake<sup>2,1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>

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

Large ( $M_w \geq 7$ ) earthquakes have the potential to generate long-period seismic waves that can be significantly amplified, even at large distances, by sedimentary basins. Prediction of these long-period ground motions ( $\geq 4$  s) is essential to mitigate their impact on large-scale structures, such as high-rise buildings and oil storage tanks. We focus on the well-recorded Iwate-Miyagi Nairiku earthquake ( $M_w$  6.9), which occurred on 14 June 2008 in the Tohoku region, Japan. This earthquake, which has a reverse-fault mechanism, caused several fatalities, collapse of houses and a bridge, and severe landslides. To simulate the long-period ground motions (4-10 s) generated by this event, we take advantage of the ambient seismic field continuously recorded by seismic stations of the Hi-net/NIED, Japan Meteorological Agency, and Tohoku University networks. Stations located in the vicinity of the mainshock fault plane are used as virtual sources and other stations as receivers. We use the deconvolution method to extract single force impulse response functions between each pair of stations. We first show that, after calibration of the amplitude, impulse response functions accurately simulate the long-period ground motions of a moderate  $M_w$  5.0 aftershock that occurred close to the mainshock hypocenter. To simulate the mainshock, we construct a simple finite source model that is similar to the ones determined by source inversions. The fault plane is first discretized into subfaults of the size of the moderate  $M_w$  5.0 earthquake. We show that it is possible to interpolate the impulse response functions extracted between every virtual source and each receiver to obtain one impulse response function for each subfault. We finally initiate and spread the rupture radially from the hypocenter with a constant velocity to simulate the long-period ground motions. We find that the simulated long-period ground motions are consistent with the earthquake records, which confirm the power of this technique to assess seismic hazard.

Keywords: Ground motion simulation, Ambient seismic field, Green's function, Finite source modeling

スペクトルインバージョンに基づく北陸地方の強震観測点におけるサイト増幅特性の推定  
Estimation of site amplifications for strong motion stations in Hokuriku district, Japan,  
based on spectral inversion technique

\*染井 一寛<sup>1</sup>、浅野 公之<sup>2</sup>、岩田 知孝<sup>2</sup>、宮腰 研<sup>1</sup>、大堀 道広<sup>3</sup>

\*Kazuhiro Somei<sup>1</sup>, Kimiyuki Asano<sup>2</sup>, Tomotaka Iwata<sup>2</sup>, Ken Miyakoshi<sup>1</sup>, Michihiro Ohori<sup>3</sup>

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

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

地震基盤から地表までの地下構造モデルを詳細に把握することは、信頼性の高い強震動予測を実施するために不可欠な要素の1つである。本研究は、北陸地方の強震動予測のための地下構造モデルの高度化に資するために、福井県、石川県、富山県の強震観測点に対して、地震基盤から地表までのサイト増幅特性の推定を行った。ここでは、防災科学技術研究所の強震観測網K-NET、KiK-netの強震観測点に加えて、各県の市町村に設置されている震度計（自治体震度計）の観測点も対象とした。自治体震度計は、震度情報ネットワークによって、各市町村の震度情報を提供することで、その地域の地震動情報や地震被害状況を詳細に把握することに利用されており、人口が密集する場所に設置されていることが多い。そのため、対象とする地域の強震動予測を行う上で、自治体震度計の観測記録を解析することは重要であると言える。

各強震観測点のサイト増幅特性は、観測スペクトルからスペクトルインバージョン手法によって、震源、伝播経路、サイトの各特性を分離することで評価した。観測スペクトルは、各地点の観測波形の水平動2成分の加速度Fourier振幅スペクトルの二乗平方根とした。加速度Fourier振幅スペクトルは、観測波形のS波を含む10.24秒間を切り出して、区間の開始、終了の各0.5秒間に余弦関数型のテーパ処理を適用し、周波数軸上で各周波数の±5%の移動平均によって平滑化を行うことで求めた。震源とサイト特性のtrade-offを避けるために、本研究では基準観測点を設定した。基準観測点は、サイト増幅特性が無いと仮定できるような観測点であることが望ましいため、対象地域の観測点の中でも、比較的硬質な岩盤上に設置してあると考えられるF-netのSRN（白峰）観測点を選択した。

推定されたサイト増幅特性の一例として、K-NETのISK011（小松）観測点の例を示す。スペクトルインバージョンで得られたサイト増幅特性は、0.5から2.0 Hzの周波数範囲で10から20倍の増幅のピークが見られた。ISK011観測点に対しては、既存の速度構造モデルとして、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション（J-SHIS）の全国深部地盤モデルV2によるモデル（J-SHISモデル）と、微動観測に基づいて推定された浅野・他（日本地震工学会論文集、15(7)、194-204、2015）によるモデル（微動モデル）があり、これらの1次元速度構造モデルから計算される理論増幅率とサイト増幅特性とを比較することができた。理論増幅率は、J-SHISモデルの場合は、0.5から2.0 Hz付近にピークは見られなかったが、微動モデルでは、同様のピークを示し、本研究で得られたサイト増幅特性と良い一致を示した。このように、北陸地方の主に市街地に対して高密度に得られたサイト増幅特性を用いることで、この地域の既存の速度構造モデルの検証を詳細に行うことができる。

謝辞：本研究の解析に際しては、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網K-NET、KiK-net、及び広帯域地震観測網F-netの各強震記録を使用させて頂きました。また、福井県、石川県、富山県の震度計観測点の強震記録も使用させて頂きました。記録の維持管理にご尽力頂いている関係者、関係機関の皆様にご感謝申し上げます。また、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。

キーワード：サイト増幅特性、北陸地方、スペクトルインバージョン、強震観測点

Keywords: Site amplification, Hokuriku district, Spectral inversion, Strong motion station

## 大阪堆積盆地北西部(尼崎～東灘)の地震記録においてS波到達後に見られる特徴的な後続波群の地震動シミュレーションによる検討

Simulation of characteristic late arrivals after S-wave of local events between Amagasaki and Higashinada in Osaka sedimentary basin

田中 宏樹<sup>1</sup>、\*岩田 知孝<sup>1</sup>、浅野 公之<sup>1</sup>  
Hiroki Tanaka<sup>1</sup>, \*Tomotaka Iwata<sup>1</sup>, Kimiyuki Asano<sup>1</sup>

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

田中・他(2014, 2015, 日本地震学会秋季大会)において、大阪堆積盆地北西部に位置する関西地震観測研究協議会尼崎観測点(尼崎市)と1995年兵庫県南部地震の臨時強震観測を行った芦屋(芦屋市)、福池、深江観測点(ともに東灘区)(岩田・他, 1995)で観測された近地地震の記録に現れている、直達S波に続く後続波群の特徴について報告をしてきた。尼崎観測点では、直達S波到達後、水平成分に約4秒間隔に顕著な相が見られ、その長軸震動方向は波群を追って変化していることや、長軸震動方向と波群の走時差は、尼崎観測点から見た震央方位によって系統的に異なっていることがわかった。一方、芦屋、福池、深江観測点では、尼崎観測点でみられるような約4秒間隔の顕著な相はみえておらず、複雑な後続動であることがわかった。

ここでは、特徴的な相及びその震動特性の再現と、波動伝播の特徴を探るために、ダブルカップル点震源モデルと大阪堆積盆地三次元地下構造モデル(関口・他, 2013)を用いた、差分法による三次元波動場シミュレーションを行った。有効周波数は2Hzである。尼崎観測点に対するシミュレーション結果においては、直達S波以降に繰り返し現れる相の走時や波群の振動方向が変化している特徴の再現に成功した。震央—観測点間測線での計算波形のペーストアップから、尼崎観測点は、特徴的な波群が顕著に見えやすい位置にあることが分かり、こうした顕著に見えやすい領域は限られていることも分かった。また、震央—観測点間の深さ断面での波群伝播の様子から、こうした約4秒間隔の特徴的な相は、直達S波が地表面と堆積層と地震基盤の構造境界面で多重反射により生じていることを示した。振動方向が変化していくのは、堆積層下の地震基盤面の3次元形状によるものと考えられる。

一方、芦屋などの観測点では、顕著な相が見えないのは、堆積盆地の縁に近いために、堆積盆地の縁で生じる回折波の到達が堆積層と地震基盤境界での反射波の到達と重なるため、独立では見えにくい位置であることが震央—観測点間での計算波形のペーストアップから示された。

キーワード：大阪堆積盆地速度構造モデル、地震動シミュレーション、多重反射波

Keywords: Osaka sedimentary basin velocity structure model, ground motion simulation, multiple-reflection

## 2015年大分県南部地震(Mj5.7)における大分県周辺の長周期地震動シミュレーションと地下構造モデルの検討

Strong-motion simulation of the 2015 Southern Oita, Japan, earthquake (Mj5.7) using a 3D structure model including the land and sea-floor topography

奥仲 達也<sup>2</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、\*竹中 博士<sup>1</sup>、吉見 雅行<sup>3</sup>、中村 武史<sup>4</sup>、岡元 太郎<sup>5</sup>

Tatsuya Okunaka<sup>2</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, \*Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>, Masayuki Yoshimi<sup>3</sup>, Takeshi Nakamura<sup>4</sup>, Taro Okamoto<sup>5</sup>

1.岡山大学 大学院自然科学研究科、2.岡山大学 理学部 地球科学科、3.産業総合技術研究所 活断層・火山研究部門、4.国立研究開発法人海洋研究開発機構、5.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

1.Department of Earth Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 2.Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Okayama University, 3.Geological Survey of Japan, AIST, 4.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology

南海トラフによる巨大地震や、別府湾から大分県西部にかけての別府-万年山断層帯による地震の被害が懸念される大分県付近を対象に、陸海地形と海水を含む地下構造モデルを用いて長周期地震動のシミュレーションを行い、地下構造モデルの検討を行った。使用した地下構造モデルは以下の通りである。陸上地形は50 mメッシュ数値地図(国土地理院)、海底地形はJTOP030v2(海洋情報センター)と別府湾周辺の90 mメッシュDEM(大分県)を用いた。地盤構造は、防災科研が公開しているJ-SHIS深部地盤構造モデルを使用した。このモデルでは、愛媛県佐田岬北側~別府湾~大分平野~豊後大野にかけて厚い地盤が存在している。また、島弧地殻、島弧マントル、フィリピン海スラブは地震調査研究推進本部による全国1次地下構造モデル(暫定版)を使用した。ただし、フィリピン海スラブ内の物性値は、深さ依存する馬場・他(2006)の提案するものを用いた。解析した地震は、2015年7月13日2時52分(日本時間)に発生した大分県南部地震(Mj5.7)である。気象庁による震源の深さは58 kmで、震源メカニズムは北北西-南南東方向と東北東-西南西方向に節面を持つstrike-slipである。観測波形に周期2~20秒のバンドパスフィルタを施したところ、震央距離約35~55 km付近で特に震動継続時間の長い後続波が観測された。この地震について、差分法(HOT-FDM, Nakamura et al., 2012, BSSA)を用いて地震動シミュレーションを実施した。震源は点震源とし、震源の深さを検討するために6通りの深さを仮定した。差分の空間格子間隔50 mで、50秒間の地震動を計算した。観測波形と同様のフィルタを適用し、相互相関係数を用いて観測波形との一致度を定量的に評価した。その結果、震源深さを48 kmとしたケースの計算波形が観測波形と最も良い一致を示したことから、震源の深さを海洋性地殻第3層内の48 kmに決定した。この震源の深さによる計算波形においても、震央距離約35~55 km付近の顕著な後続波が再現された。観測波形と計算波形の一致度が全成分で低かった地域は大分平野周辺や火山性丘陵・火山山麓地周辺であった。また、NS成分のみ一致度が低かった地域は震央付近の谷底低地であった。これらの地域の波形の再現性に、地下構造モデルのどの部分が影響しているかをより詳しく見るために時間周波数解析を行った。その結果は、その地域周辺の特に地盤内のモデルの改良の必要性を示唆している。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省委託「別府-万年山断層帯(大分平野-湯布院断層帯東部)における重点的な調査観測」(代表：京大・竹村恵二教授)の一環として実施しました。大分県をはじめデータをご提供頂きました各機関に感謝申し上げます。

キーワード：地震動、大分、2015年大分県南部地震、長周期地震動、シミュレーション、差分法

Keywords: strong motion, Oita, the 2015 Southern Oita, Japan, earthquake, long-period ground motion, simulation, finite-difference method

## 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

Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation in Kanto area

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

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

1.防災科学技術研究所、2.（株）応用地質

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

## 1.はじめに

我々はこれまでに、広帯域(0.1Hz~10Hz)の地震動特性を評価できるような地盤モデルを構築するため、特に浅部と深部地盤の両方に影響のある周期付近(0.5~2.0秒)を説明する上で重要となる、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)を収集した上で、浅部・深部を接合した地盤モデルの検討を行っている。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1つのテーマ「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。本報告では、関東全域の初期地盤モデルの構築結果および、周期特性・増幅特性をチューニングした速度構造モデルについて報告する。

## 2.浅部・深部統合地盤初期モデルの作成

地下構造モデルの作成について、浅部地盤モデルは、主に防災科研でこれまでに収集および平成27年度に新たに収集した、約20万本(関東地域)のボーリングデータを用いた。モデルの作成については、既往の南関東地域での浅部地盤モデル(例えばsenna et al.(2013))、および自治体で作成された地盤モデル等を再整理し、埼玉県・東京都・神奈川県・千葉県・茨城県地域の統一的な地質・土質の層序整理作業による浅部地盤モデルの作成・修正を行った。また、北関東(栃木県・群馬県)の浅部地盤モデルも上記整理作業を行い、関東全域の浅部地盤モデルを構築した。この浅部地盤モデルと既往の深部地盤モデル(J-SHISモデル)を、PS検層や地質構造によって工学的基盤( $V_s=300\sim700$ (m/s))を調整して接続し、初期の浅部・深部統合地盤モデルとした。

## 3.地震観測と常時微動観測記録の収集について

本研究では、地震観測記録および常時微動観測データの収集をあらためて実施している。地震観測記録については、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体(主に県の震度計データ(SK-NET))の記録を使用した。常時微動観測については、単点による観測および微動アレイ観測を実施している。単点観測は、主に小・中・高校の敷地(関東全域約7000地点)で、アレイ観測は、「極小・不規則アレイ(アレイ半径60cm~10m)」と比較的大きなサイズの「大アレイ」の2種類を実施しており、K-NET、KiK-net、自治体の震度観測地点等(極小アレイ・不規則アレイ:H27.8現在で5000地点、大アレイ:約410地点)でそれぞれ実施した。観測には一体型常時微動観測機材JU210、JU215およびJU410(白山工業社製)と大アレイの一部については、VSE-15D6(東京測振社製)を用いた。単点による微動観測は約1~2km間隔にて各15分の観測を行った。極小アレイは単点同様の間隔にて、60cmの三角形のアレイと、不規則アレイについては5~10mの中心のない三角形を構成し、それぞれ単点同様15分の観測を行った。一方、大アレイ観測については、約5km間隔で設定し、大アレイの中心点を主に自治体の震度計、K-NET、KiK-netの地震計が存在する位置を中心として、半径R=400m、200m、100mの大きさの三角形のアレイと、それよりも小さな半径については、一辺75m、50m、25mのL字アレイを展開し、約1時間程度の観測を行った。

## 4.解析結果とまとめ

本検討では、senna et al.(2013)に示されている手法を基本として、初期地質モデルを用い、地震記録および微動探査結果により地盤モデルをチューニングして速度構造モデルを構築した。構築したモデルは、既往の浅部・深部統合地盤モデルと比較すると、広帯域全体が改善されており、特に防災の観点で重要な周期1秒付近において結果が大きく改善されたといえる。また、K-NET、KiK-net測点位置でのサイト増幅率の計算結果と、野津ほか(2005)等のサイト増幅率とも、特に本検討で重要視している周期帯(0.5~2Hz)において調和的であ

ることも確認した。また、本モデルにおいて2秒よりも長周期成分について差分法等による周期特性および増幅特性の検証を行ったところ、既往モデルに対して広帯域で改善しており、特に2~7秒での長周期領域での改善が顕著であることが確認できた。

今後さらに関東地域での検証とモデルの修正を行い、東海地域についても同様のモデル化を実施する予定である。

<参考文献>

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

<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。

キーワード：強震動予測、地下構造モデル、常時微動観測

Keywords: strong ground motion evaluation, underground structure models, microtremor observation

## ESTIMATION OF SEISMIC HAZARD FOR STRONG EARTHQUAKES IN TAIWAN

\*YU-WEN CHANG<sup>1</sup>

1.NCREE National Center for Research on Earthquake Engineering of Taiwan

Two main factors that affect the result of ground motion prediction analysis are the existence of the event and site effect. A hybrid procedure, which combines site-dependent ground motion prediction and the limited real time observations, was set up to provide a high-resolution shakemap in a near-real-time manner after damaging earthquakes in Taiwan. The purpose of this paper is to develop the prediction model and procedure considering the characteristic of the damaging earthquake and local site effect, in order to provide an early estimation of potential hazard. In the site-dependent ground motion prediction model, the site effects of each strong motion stations are discussed in terms of a bias function that is site and intensity-level dependent function. Instead of such model, an empirical procedure is supplied to correct the discrepancy of the ground shaking estimated from the attenuation relation and applied to precisely estimate the shakemap of damaging earthquakes for emergency response.

Keywords: shakemap, site effect, ground motion prediction

## 2016年台南地震(台湾)の強震動パルスと建物倒壊

## Strong motion pulse and building collapse during the 2016 Tainan earthquake

\*瀨瀬 一起<sup>1</sup>、小林 広明<sup>1</sup>、司 宏俊<sup>1</sup>、Viens Loic<sup>1</sup>、Diao Hongqi<sup>1</sup>、三宅 弘恵<sup>2</sup>

\*Kazuki Koketsu<sup>1</sup>, Hiroaki Kobayashi<sup>1</sup>, Hongjun Si<sup>1</sup>, Loic Viens<sup>1</sup>, Hongqi Diao<sup>1</sup>, Hiroe Miyake<sup>2</sup>

1.東京大学地震研究所、2.東京大学情報学環

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo

2月6日に台湾南部で発生した2016年台南地震では、P-alertと呼ばれる地震早期警報システムのために展開されている多数の観測点において強震記録が得られている。これらのうち、台南市内の観測点での速度波形を見ると、主にその東西成分に最大で100 cm/sに近い長周期の強震動パルスが現れている。たとえばW21B観測点の波形全体のフーリエスペクトルからは、長周期パルスが1秒から4秒程度の卓越周期を持っていることが見てとれる。一方、倒壊して100名以上の死者を出した建物は16階建てであるから、換算式 $T = (0.049 \sim 0.082) \times N$  (Nは階数; 日本建築学会, 2000) より固有周期は0.8から1.3秒程度であり、手抜き工事などで長周期化している可能性を考えれば、このパルスが大きな影響を与えたであろう。一方、遠地実体波を用いた震源インバージョンなどによれば、北に傾斜した震源断層は台南市中心部の東側に位置しており、横ずれと逆断層が組み合わさった断層破壊が走向に沿った東西方向に伝播していったと考えられる。このうち台南市中心部に向かう西向き断層破壊は、すべり分布の中でも横ずれ成分が卓越する部分を伝播している。横ずれ断層ならば破壊伝播方向に長周期の強震動パルスが走向に直交して発達することは、ディレクティブティ効果としてよく知られている。しかし、走向に直交するのは今回のパルスの東西成分ではなく南北成分であるから、パルスの要因として西側の余震群付近に想定される第二の震源断層を考えるか、元の震源断層の幾何形状を考え直す必要がある。

キーワード：台南地震、強震動パルス、建物倒壊

Keywords: Tainan earthquake, strong motion pulse, building collapse

## 疑似点震源モデルによる1995年兵庫県南部地震 (M7.3) の強震動シミュレーション

Simulation of strong ground motions for the 1995 Kobe earthquake based on the pseudo point-source model

\*野津 厚<sup>1</sup>\*Atsushi Nozu<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

1. Port and Airport Research Institute

一般にわが国の強震動予測においては、強震動を生成する矩形のサブイベントを断層面上に複数配した特性化震源モデル（例えば釜江・入倉，1997）が用いられることが多い。それに対し、著者は、従来の特性化震源モデルよりも単純化された新たな震源モデルとして疑似点震源モデル（野津，2012）の提案を行っている。疑似点震源モデルでは、強震動の生成に関わる各々のサブイベントに対し、その内部におけるすべりの時空間分布を詳細にはモデル化せず、各々のサブイベントが生成する震源スペクトルのみをモデル化する。提案モデルでは、サブイベントの破壊に起因する震源スペクトルはオメガスクエアモデル（Aki, 1967）に従うものとしている。提案モデルにおけるモデルパラメーターの数は、サブイベント1個あたり、東経・北緯・深さ・破壊時刻・地震モーメント・コーナー周波数の6個であり、従来の震源モデルに比べ大幅に少なくなっている。また、この震源モデルに基づいて強震動シミュレーションを行う場合には、震源スペクトルに伝播経路特性と経験的なサイト増幅特性を乗じることにより対象地点での地震動のフーリエ振幅を求め、これと対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、サブイベントからの地震動の時刻歴波形を求めることができる。さらに、複数のサブイベントからの地震動を重ね合わせれば、地震動の全体が求まる。

このような単純化された震源モデルにより、ある程度の精度で強震動が計算できるのであれば、強震動予測における労力が大幅に軽減され、多数のシナリオを考慮した強震動予測などにおいて有用であると考えられる。また、実際に疑似点震源モデルを海溝型巨大地震（野津，2012）やスラブ内地震（長坂他，2014）に適用したところ、その結果はたいへん良好であり、むしろ一般的な特性化震源モデルよりも、観測された地震動のある一面をうまく説明できる場合さえあることがわかっている。

ただし、強震動の生成に関わるサブイベントを点で表現するというモデルの性格上、断層面距離が小さくなるようなケースでは適用性が低下することが当然予想される。また、現時点で疑似点震源モデルは破壊伝播の影響を考慮していない。従って、海溝型地震やスラブ内地震よりも内陸地殻内地震の場合の方が、本モデルの適用はより難しくなることが予想され、実際の観測記録に照らして、どの程度のシミュレーションができるかを調べておくことは重要であると考えられる。

内陸地殻内地震を対象とした疑似点震源モデルの適用の試みはすでに開始されているが（例えば秦・野津，2012；野津，2015），本研究では、深刻な被害をもたらした地震として重要である1995年兵庫県南部地震を対象に疑似点震源モデルを作成し、神戸市内の複数地点を対象に強震動シミュレーションを実施した。ここでは震源近傍の強震動を適切に再現できる特性化震源モデルとして山田他（1999）の震源モデルに着目し、その神戸側部分の3つのサブイベント（サブイベント1，2，4）を表現する疑似点震源モデルを作成した。選択したパラメーターは次のとおりである。（サブイベント1）：東経=135.061，北緯=34.623，深さ=13.6km，地震モーメント=3.4E+17 Nm，コーナー周波数=0.48Hz。（サブイベント2）：東経=135.103，北緯=34.650，深さ=9.6km，地震モーメント=1.0E+18 Nm，コーナー周波数=0.48Hz，破壊遅れ=2.6s。（サブイベント4）：東経=135.238，北緯=34.732，深さ=8.0km，地震モーメント=3.0E+18 Nm，コーナー周波数=0.18Hz，破壊遅れ=8.1s。震源付近の媒質の密度は $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，密度は3.5km/sとした。ラディエーション係数としては全方位への平均値0.63，地震動のエネルギーの水平2成分への分配を表すパラメーターであるPRTITN（Boore, 1983）は0.71とした。Q値は $Q=180 f^{0.7}$ （Petukhin et al., 2003）を用いた。位相特性の評価には2月2日16:19に発生した余震の記録を用いた。その結果、神戸大学と神戸本山で観測された強震動を良好に再現できることがわかった。

兵庫県南部地震による神戸市内の強震動はforward directivityの影響を受けていると考えられる（例えば釜

江・入倉, 1997). これを, 破壊伝播を陽な形で考慮していない疑似点震源モデルで計算できることをどのように考えれば良いだろうか. この点をフーリエ振幅とフーリエ位相の両面から考察する. まずフーリエ振幅については, 理論上, directivityの影響はコーナー周波数の変化として表れる (forward側ではコーナー周波数は高周波側にシフトする). 本モデルでは, モデルパラメーターであるコーナー周波数を観測に合うように設定しているので, 結果的にforward directivityの影響を含んだコーナー周波数が設定され, その結果として観測の再現が上手く行っていると考えられる. 一方, フーリエ位相については, 一般に地震動のフーリエ位相は震源特性, 伝播経路特性, サイト特性の三者の和であると考えられるが, 疑似点震源モデルでは中小地震のフーリエ位相特性を用いているため, 伝播経路特性とサイト特性を考慮していることになる. これは, サブイベントの震源時間関数をデルタ関数と見なしていることと等価である. 従って, フーリエ位相の観点からは, 疑似点震源モデルはみかけの震源時間関数がデルタ関数に近づくforward側でのシミュレーションにむしろ適していると言え, フーリエ位相に起因する誤差が懸念されるのはbackward側である.

以上をまとめると, 疑似点震源モデルは, コーナー周波数としてforward directivityの影響を含んだものを設定する限り, forward側でのシミュレーションには適した手法であり, 誤差が懸念されるのはbackward側であると考えられる. この点について, 今後は, より多くの観測点で記録の得られている他の内陸地殻内地震を対象に調べていきたい.

謝辞 関西地震観測研究協議会の強震記録を利用しました. 心より御礼申し上げます.

キーワード: 疑似点震源モデル、兵庫県南部地震、強震動

Keywords: pseudo point-source model, the 1995 Kobe earthquake, strong ground motion

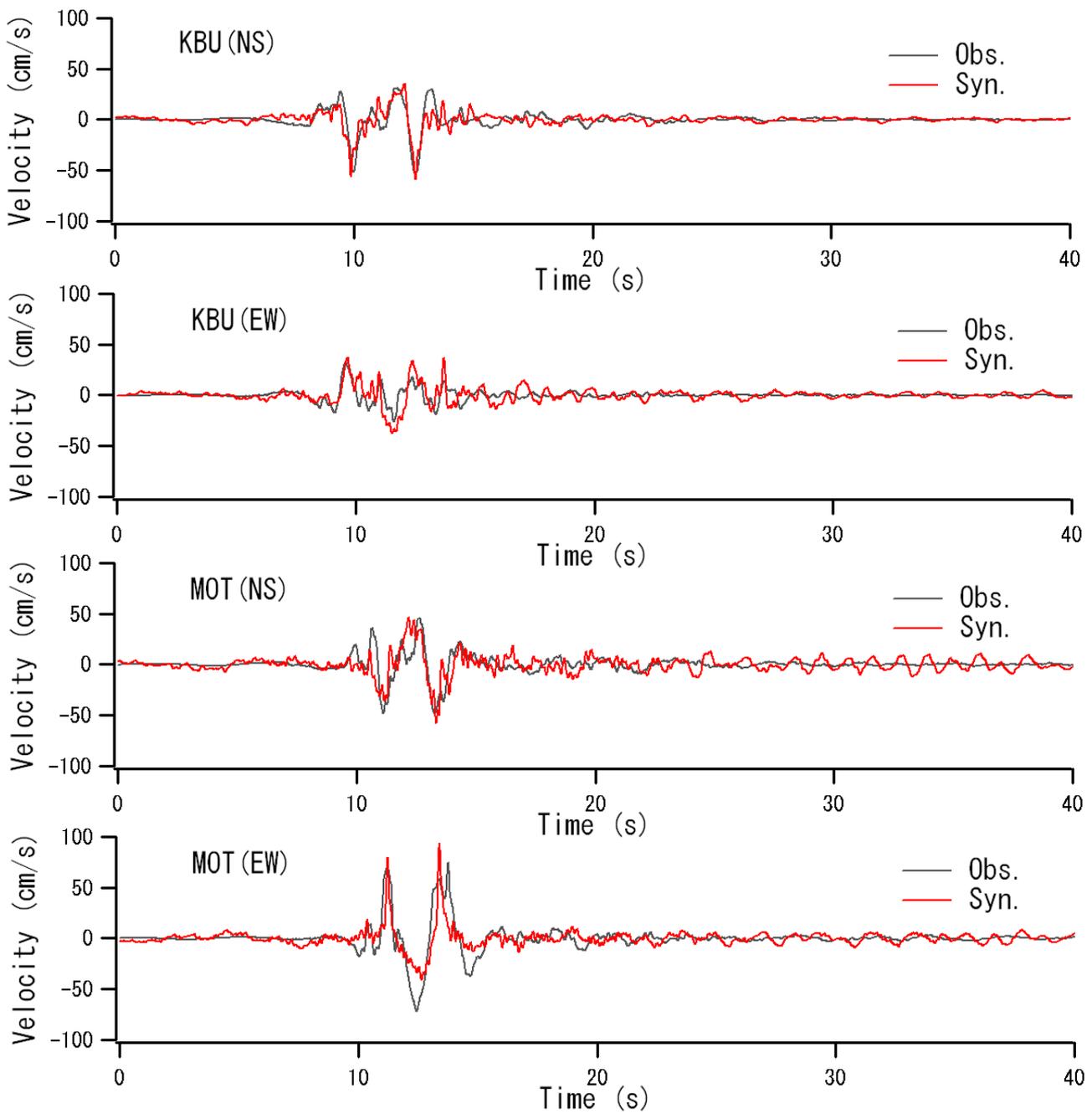


Figure 1 Observed and synthetic velocity waveforms at KBU and MOT

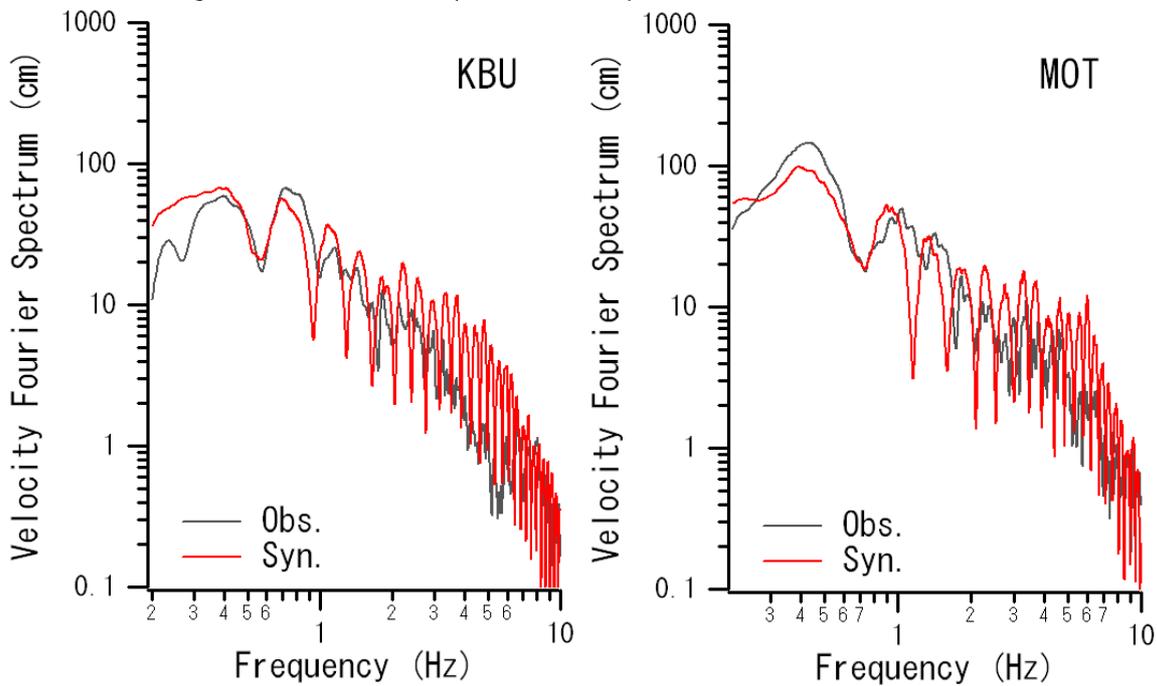


Figure 2 Observed and synthetic Fourier spectra at KBU and MOT



## カトマンズ盆地で観測された2015年ネパール・Gorkha地震群における長周期地震動

## Characteristics of long-period motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha Nepal earthquake sequence

\*重藤 迪子<sup>1</sup>、高井 伸雄<sup>1</sup>、Bijukchhen Subeg<sup>1</sup>、一柳 昌義<sup>1</sup>、笹谷 努<sup>1</sup>\*Michiko Shigefuji<sup>1</sup>, Nobuo Takai<sup>1</sup>, Subeg Bijukchhen<sup>1</sup>, Masayoshi Ichiyonagi<sup>1</sup>, Tsutomu Sasatani<sup>1</sup>

1.北海道大学

1.Hokkaido University

2015年4月25日、ネパールの首都カトマンズの北西約80 kmで $M_w$  7.8の地震が発生した（2015年ネパール・Gorkha地震）。本震発生以降、 $M_w$  6以上の余震が5回発生し、5月12日には最大余震（ $M_w$  7.3）がカトマンズの東74 kmで発生している。首都カトマンズが位置するカトマンズ盆地は、軟弱な湖成堆積物が厚く沈積する山間盆地であり、過去にも近地・遠地の地震で被害を受けてきた。本地震時、カトマンズ盆地においては、岩盤上に1点、堆積層上に5点の強震観測点があり（Takai et al. 2016, Bhattarai et al. 2015, USGS 2015）、それらの観測点において強震記録が得られている。本震・余震における観測速度波形では、岩盤上の記録に比べ、堆積層上の観測点で振幅が増大し、長周期の継続時間の長い後続波が観測されている。本報では、カトマンズ盆地で観測された、2015年ネパール・Gorkha地震群（ $M_w > 6$ ）における長周期地震動（2~10 sec）の特徴について調べた。

まず、本震の強震記録を調べた。本震の岩盤上のKTP観測点の速度波形は、周期5秒程度の単純なパルスが見られ、顕著な後続波は見られない。断層平行方向では両振幅、断層直行方向および上下動では片振幅であり、本地震を対象にした、遠地実体波を用いた震源過程解析結果（例えば、Galetzka et al. 2015, Grandin et al. 2015）からは、震央はカトマンズ盆地の北西80 kmに位置するが、大すべり域はカトマンズの近傍に位置しており、この強震観測記録の特徴は、震源過程を反映したものであると考えられる。上下動成分の速度波形は堆積層上の観測点と岩盤観測点で非常に似ている一方で、水平動成分は堆積層上の観測点で継続時間の長い周期3-5秒程度のやや長周期地震動が観測され、特にカトマンズ盆地東部の堆積層上のTHM観測点では、水平動において周期約4秒で450 cm/sに達する大速度応答値であった。そこで、観測点直下の1次元深部速度構造（Bijukchhen et al. 2016）を用いて、岩盤上のKTP観測点を入射波とした、鉛直下方入射の1次元重複反射理論による、堆積層上の観測点のS波初動部の再現を行った。多くの観測点では概ね再現できたが、THM観測点におけるS波の後続の長周期地震動が説明できず、今後2・3次元地下構造を基に表面波の励起特性等を含め議論する必要がある。

次に、最大余震の強震記録を調べた。速度フーリエスペクトルを見ると、全観測点で周期10秒程度のピークが認められた。そこで、0.2 Hzのローパスフィルター波形のVertical-Radial平面での粒子軌跡を調べると、岩盤上のKTP観測点を含めた全観測点で、直達S波の初動直後からRetrogradeの動きを示した。これは、Rayleigh波が伝播していると思われ、他の浅発の余震（ $\Delta$ ~80 km）でも同様に観測されている。そこで、我々は、最大余震の1次元シミュレーションを行い、Rayleigh波の再現性を確認した。理論計算には、離散化波数法（武尾 1985）、速度構造にはMonsalve et al. (2006)、震源情報はGCMTの値を用いた。理論波形は、概ね観測記録を再現でき、その波がRayleigh波であることが確認できた。

カトマンズ盆地で観測された、2015年ネパール・Gorkha地震群における長周期地震動の特徴について調べたところ、本震と余震群では、生成メカニズムの異なる長周期地震動がカトマンズ盆地を伝播していることが分かった。今後、カトマンズ盆地における長周期地震動の伝播特性および地下構造との関係についてより詳細に検討を行う。

キーワード：2015年ネパール・Gorkha地震群、カトマンズ盆地、強震記録、長周期地震動

Keywords: The 2015 Gorkha Nepal earthquake sequence, Kathmandu Valley, Strong motion records, Long-period motion

2015年Gorkha地震においてカトマンズ盆地で観測された長周期地震動のシミュレーション  
Simulation of long-period ground motions in the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha,  
Nepal, earthquake

\*久保 久彦<sup>1</sup>、Dhakal Yadab Prasad<sup>1</sup>、鈴木 亘<sup>1</sup>、功刀 卓<sup>1</sup>、青井 真<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>

\*Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Yadab Prasad Dhakal<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

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

2015年4月25日5時56分 (UTC) にネパールで発生した2015年Gorkha地震 ( $M_w$  7.9) はネパール社会に甚大な被害を及ぼした。同地震によって、ネパールの首都カトマンズが位置するカトマンズ盆地では周期4-5秒の成分が卓越した地震動が観測されている (e.g. Galetzka et al. 2015; Takai et al. 2016)。盆地内外で観測された波形記録およびそのスペクトルから、カトマンズ盆地内で観測された特徴的な長周期地震動は震源とカトマンズ盆地のサイト特性の両方の影響を強く受けていると考えられる。本研究では、カトマンズ盆地内に位置するアメリカ地質調査所の強震観測点KATNPで観測された長周期地震動が近地波形記録を含むデータセットから推定された震源モデルとカトマンズ盆地の地下構造モデルによってどれくらい再現できるのかを調べるために、2015年Gorkha地震の震源モデルとカトマンズ盆地の一次元速度構造モデルを推定した上で、周期4秒以上の長周期地震動を対象とした地震波シミュレーションを行った。

2015年Gorkha地震の震源モデルは近地波形記録と遠地波形記録、地殻変動記録を用いたジョイント震源インバージョンによって推定した。解析手法にはフルベジアンマルチタイムウィンドウ震源インバージョン (Kubo et al. 2016) を使用した。推定された震源モデルの地震モーメントは  $7.5 \times 10^{20}$  Nm ( $M_w$  7.9)、最大すべり量は7.3 mであり、破壊全体の継続時間は約50秒間である。同地震の破壊は主として東方向のユニラテラルなものであり、カトマンズの北の領域下に大きなすべり領域が推定された。

カトマンズ盆地の地下構造モデルとして、KATNPで観測された余震記録のコーダ波部分のH/Vスペクトル比を再現する一次元速度構造モデルを試行錯誤的に求めた。解析には計8個の余震による強震動記録を用いた。またボアホール記録などの情報も参照した。推定された速度構造モデルにおける  $V_s$  が500 m/s以下の低速度層の厚さは約460 mである。

推定された震源モデルとカトマンズ盆地の速度構造モデルを用いて、KATNPにおける2015年Gorkha地震中の長周期地震動シミュレーションを行った。その結果、同観測点で観測された波形の主たる特徴を再現することができた。

[謝辞] 本研究ではDepartment of Mines and GeologyおよびTribhuvan大学、カリフォルニア工科大学から提供された高サンプリングGPS記録とアメリカ地質調査所から提供された強震動記録を用いました。

キーワード：長周期地震動、2015年Gorkha地震、カトマンズ盆地、地震波シミュレーション

Keywords: Long-period ground motions, The 2015 Gorkha earthquake, The Kathmandu basin, Waveform simulation

## 2015年ネパール・ゴルカ地震の本震・余震を使ったカトマンズ渓谷のDMG観測点の非線形サイト効果の検出

Detection of nonlinear site response using the main shock and its aftershocks of the 2015 Gorkha, Nepal Earthquake recorded at the DMG site of the Kathmandu Valley, Nepal

\*バットライ ムクンダ<sup>1</sup>、アディカリ ロク・ビジャヤ<sup>1</sup>、ゴータム ウメッシュ・プラサド<sup>1</sup>、コイララ バーラト・プラサド<sup>1</sup>、ティムシナ チンタン<sup>1</sup>、横井 俊明<sup>2</sup>、林田 拓巳<sup>2</sup>、ボリンジャー ローレント<sup>3</sup>

\*Mukunda Bhattarai<sup>1</sup>, Lok Bijaya Adhikari<sup>1</sup>, Umesh Prasad Gautam<sup>1</sup>, Bharat Prasad Koirala<sup>1</sup>, Chintan Timsina<sup>1</sup>, Toshiaki Yokoi<sup>2</sup>, Takumi Hayashida<sup>2</sup>, Laurent Bollinger<sup>3</sup>

1.ネパール産業省鉱山地質局、2.国立研究開発法人 建築研究所 国際地震工学センター、3.フランス原子力庁環境調査解析部

1.Department of Mines and Geology, Ministry of Industry, Nepal , 2.International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute,Japan, 3.Departement Analyse Surveillance de l'Environnement, Commissariat Energie Atomique, France

We have tested the occurrence of non-linear behavior of soil at the DMG site using the accelerograms of the main shock and its aftershocks during the 2015 Gorkha, Nepal Earthquake. The DMG accelerometric station is installed on the surface at the concrete slab of the single-storey office building in the central part of the Kathmandu Valley filled by sediments. We calculated the horizontal to vertical spectral ratios of S-waves part of the earthquake records (S-H/V) which is expected to provide information about the ground response. Then we calculate the degree of non-linearity (NDL) (Noguchi and Sasatani 2008) for the main shock and its 5 aftershocks in the frequency range from 1 Hz to 10 Hz. It is found that DNL of the main shock record clearly different from those of the aftershocks records. The PGA-DNL plot shows that the main shock runs off from the trend formed by the aftershock records.

Based on the above study we guess that non-linear behavior took place during the main shock of the 2015 Gorkha, Nepal Earthquake.

キーワード：非線形サイト効果、非線形指標、ゴルカ地震、カトマンズ渓谷

Keywords: Non-linear site effect, Degree of non-linearity, Gorkha earthquake, Kathmandu Valley

## 常時微動のH/Vピーク周期の空間変動と表層地盤の不整形性の関係

—数値解析に基づく検討—

Relationship between Irregularity of Boundary of Subsurface Geology and Spatial Variation in Peak Periods of Horizontal to Vertical Spectral Ratio of Microtremors  
-A Study Based on Numerical Simulations-

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

\*Kentaro Motoki<sup>1</sup>, Tetsushi Watanabe<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

不整形な地盤上で地震動評価の評価精度を高めるには、層境界面の形状を調べることが必要であるが、全てのサイトで詳細な分布を求めることは経済的に非効率である。詳細な調査の前に地盤不整形性の有無を簡便に識別できれば、地下構造探査の効率化が図れると考えられる。表層地盤の不整形性の有無を判断する指標として、微動のH/Vスペクトル比のピーク周期（以降、ピーク周期）の空間変動に着目し、工学的基盤が平坦なサイトと不整形なサイトで、観測記録のピーク周期の変動係数が大きく異なることを示した（元木・他、2012）。本報告では、工学的基盤が不整形なサイトを対象とし、数値解析に基づきピーク周期の空間変動に及ぼす地盤モデルの影響パラメータを検討した後、ピーク周期の空間変動を確率変数として捉えることにより、地盤モデルの不整形性との関係性を明らかにした。

### 2. 数値解析に基づく変動係数の算出

ここでは、微動計測を実施した名張サイト（元木・他、2012）を対象とし、まずは観測記録の空間変動を3次元差分法に基づく数値解析シミュレーションによって再現できるかを確認した。次に傾斜などを変更した種々の地盤モデルを設定し、ピーク周期の変動係数に影響を及ぼすパラメータを求めた。

地盤モデルは、物性をPS検層結果に、層境界面の深度分布を地盤調査車による掘削結果に基づいて設定し、地盤減衰は1Hzで5%となる減衰を与えた。このモデルを基本モデルとする。地盤モデルが変動係数に及ぼす感度解析には、基本モデルから層境界の傾斜、モデルサイズ、地盤物性を変動させたモデルを用いた。振動源は周辺にランダム配置した点加振源に加速度スペクトルでホワイトノイズを与え、シミュレーションの継続時間は160秒間とした。観測記録と同様に10.24秒間のセグメントに分割し、各セグメントのH/Vを算出し、それらの結果を平均化して各評価点のH/Vとし、ピーク周期を求めた。ピーク周期の空間変動を調べるために、観測点からの距離範囲ごとにピーク周期の変動係数を求めた。

### 3. 数値解析結果

まず、基本モデルのシミュレーション結果と微動計測結果によるピーク周期の変動係数を比較した。基本モデルによる変動係数は範囲が長くなるほど変動係数が増加し、その後傾きが小さくなる傾向が得られ、その傾向は微動計測結果と調和的であった。

感度解析の結果、地盤モデルのピーク周期の変動係数の絶対値は地盤モデルの層境界面の傾斜に、変動係数の傾きが小さくなる距離は層境界面の不整形性の水平方向の距離に関係し、地盤の物性は変動係数にほとんど影響がないことを確認した。

### 4. ピーク周期と地盤不整形性の関係性

数値シミュレーション結果を用い、ピーク周期の空間変動を確率変数として捉え、パワースペクトル密度に変換し、地盤モデルの不整形性と比較する。地盤モデルの不整形性は、地表から最下層上面までの鉛直方向のS波走時 $T_z$ をフーリエ変換してパワースペクトル密度で表現する。ピーク周期の変動係数はセミバリオグラムを介して、自己相関関数をモデル化し、フーリエ変換することによってパワースペクトル密度に変換する。

自己相関関数をフォンカルマン型でモデル化し、ピーク周期の変動係数に適合するように、ハースト指数、相関距離、揺らぎをグリッドサーチで求めた。それらのパラメータから求めたパワースペクトル密度は、地盤モデル $T_z$ のパワースペクトル密度とよく対応する。この傾向は、モデルサイズや傾斜を変動させた場合にも成立することを確認した。両者が対応することは、不整形地盤上のピーク周期の空間変動と地盤モデルの凹凸の程

度が類似していることを表している。このことはピーク周期の変動係数が、地下構造の不整形性が大きい  
か、水平成層に近いかの判別に利用できることを表している。

参考文献)

元木・他(2012) : 工学的基盤の傾斜による微動H/Vピーク周期の空間変動、日本建築学会大会学術講演梗概  
集、B-2、pp.157-158.

キーワード：常時微動、H/Vピーク周期、空間変動、変動係数、パワースペクトル密度

Keywords: Microtremors, Peak period of H/V, Spatial variation, Coefficients of variation, Power  
spectral density

不整形地盤におけるH/Vスペクトル比を用いた構造推定 ~宮崎県中部沿岸地方を対象として~  
Estimation of S-wave velocity structures of an irregular ground using H/V spectral ratio  
~Case study in the middle coast of Miyazaki prefecture~

\*岡本 京祐<sup>1</sup>、津野 靖士<sup>1</sup>、是永 将宏<sup>1</sup>

\*Kyosuke Okamoto<sup>1</sup>, Seiji Tsuno<sup>1</sup>, Masahiro Korenaga<sup>1</sup>

1.鉄道総合技術研究所

1.Railway Technical Research Institute

微動から地盤のS波速度構造を求める方法として、複数観測点を用いて求めた位相速度による逆解析や、単点での3成分観測から求まるH/Vスペクトル比を用いた逆解析、また両者の同時逆解析など様々な手法が採られている。しかし、これらの手法は地盤が水平成層構造であるという仮定に基づいており、傾斜や不連続面を持つような不整形地盤においては正しい地盤構造を求めることが困難となる可能性がある。この原因として、レイリー波の高次モード励起や、実体波への変換が生じるため、観測される波動場が水平成層構造仮定から乖離していくためと考えられる。しかしながら、不整形箇所では複雑な波動場が生じ地震波の増幅の干渉が生じる危険性があるので、不整形構造の把握、それに基づく地震動推定の必要性は高い。直接的に不整形地盤をイメージするには、ボーリングや反射法地震探査といった手法が強力であるが、コスト面や用地の問題から実施が困難な場合も多い。そこで、我々は比較的容易で安価に広範囲の観測ができる単点微動観測から求まるH/Vスペクトル比に着目する。

本研究では、過去の研究にて地下の不整形地盤の存在が指摘されている宮崎リニア実験線（鉄道総合技術研究所が保有）に沿って複数点で微動観測および地震観測（2015年9月～11月）を行い、微動探査の不整形地盤への適用性の検討を行った。なお、微動観測、地震観測ともに不整形地盤の存在が指摘されている箇所を中心に2kmの測線を取り、約290mのインターバルで8箇所にて観測を行った。SPAC法を用いた構造推定により、過去に指摘された位置において傾斜構造が存在していることが分かった。各観測点で観測された地震波形を基盤における波形に変換して比べることによって推定された構造の確かさを精査した。また推定構造から重複反射理論により求めた微動のH/Vスペクトル比は、実際に観測されたH/Vスペクトル比のピークを良く説明することも分かり、H/Vスペクトル比から傾斜構造を求めることが可能だということをサポートする。しかしながら、傾斜構造両端付近において、推定構造から計算された理論的なH/Vスペクトル比と、観測されたH/Vスペクトル比は大きく乖離することが分かった。この要因として、傾斜構造端部では表面波の基本モード成分に加えて、反射波や高次モードの励起により波動場が複雑となり、水平成層構造仮定下での波動場と一致しなくなるためと考えられる。また、地震動コーダ部分を用いたH/Vスペクトル比を用いた検討も行った。

この波動場の乱れがどのような箇所から生じるのか精査するために、推定構造に基づいた数値計算により波動場の合成を行う。傾斜構造端部付近で観測された模擬波形を表面波部分とそれ以外に分離し、表面波以外の成分がいずれの箇所から生じているか逆伝播に基づく手法により明らかとした。その結果、観測点からおよそ一波長内の不整形箇所が波動場の乱れに寄与している可能性が高いことが分かった。また、分離された表面波部分から計算されるH/Vスペクトル比は理論的なH/Vスペクトル比と比較的一致することからも、波動場の乱れがH/Vスペクトル比を乱している可能性が指摘される。

本研究では二次元構造に基づいて解釈を行ったが、今後は三次元的な影響を考慮することも必要になってくると考える。

キーワード：微動探査、地震動、傾斜構造

Keywords: microtremor exploration, Earthquake ground motion, dipping structure

表層地盤の力学的非線形性および複雑な幾何形状を考慮した工学的基盤への入射波の推定法の提案  
 A Method of Estimating Incident Wave Considering Nonlinear Response of the Non-uniform  
 Surface Ground

\*山田 正太郎<sup>1</sup>、野田 利弘<sup>2</sup>、浅岡 顕<sup>3</sup>、澤田 義博<sup>3</sup>

\*Shotaro Yamada<sup>1</sup>, Toshihiro Noda<sup>2</sup>, Akira Asaoka<sup>3</sup>, Yoshihiro Sawada<sup>3</sup>

1.名古屋大学大学院工学研究科、2.名古屋大学減災連携研究センター、3.地震予知総合研究振興会

1.Civil Engineering, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University,

3.Association for the Development of Earthquake Prediction

地表にせよ地中にせよ、設置場所の如何に依らず地震計で計測されたデータは地盤の非線形挙動の影響を含んでいる。したがって、地震計の記録からどのような情報を読み取るにせよ、表層地盤の非線形挙動を表現する地盤力学無くして解析できないはずのものである。一方、液状化現象を含む表層地盤の地震時応答の予測・再現手法として、土骨格を弾塑性体として取り扱う水～土連成解析<sup>1)</sup>の有用性がよく知られている。本研究ではその応用例として、いわゆる工学的基盤に置かれた地震計の記録から表層地盤の力学的非線形性や複雑な幾何形状を考慮して工学的基盤に入射された地震動を推定する手法を提案する。

提案する手法では、工学的基盤以深の地層を均質な半無限弾性体と仮定した上で、表層地盤を含む計算領域下端に粘性境界<sup>2), 3)</sup>を課す。通常、表層地盤の非線形地震応答解析において、粘性境界を使用する場合は、その点に対する上昇波(E)を計算に用いる入力波とし、解析領域全体の運動が求められる。結果として、解析領域下端でも上昇波(E)と下降波(F)からなる運動が求められる。したがって、一般にはEを与えてE+Fを求める計算が行われる。このような解析では、当然のことながら真のEを如何にして与えるかという点が問題となる。この課題に対し、一般には、地表面の観測記録から一次元重複反射理論に基づいて基盤まで波を引き戻す方法などが取られているが、先に述べた通り、例え工学的基盤で計測された波形であっても、表層地盤の非線形性が含まれている上に、多次元効果も絡んでくるため、Eの推定手法として、これでは全く不十分である。工学的基盤における観測波についても、純粋なEではなく、表層地盤を介して反射されてきたFを含むという点において直接的な使用はできない。これに対し、我々は工学的基盤において観測された波形が表層地盤の非線形挙動の影響を含むE+Fであることを素直に認めた上で、多次元の水～土連成弾塑性解析によりEを推定することを目指す。具体的には、粘性境界に対する入力として工学的基盤で観測されたE+Fを使用し、表層地盤の非線形応答と共に解析領域下端に入射されてくるEを解として求める方法を提案する。

多次元問題における工学的基盤への入射波、すなわち上記の方法で解析領域下端の各点で計算されてくるEは一樣である必要がある。本研究ではこれを満足させる制約を、ラグランジュの未定乗数法を導入することで課す。拘束力を与えるラグランジュ乗数とともに刻々の解Eを求める方法を述べることになる。

本研究の方法により、表層地盤の力学的非線形性、表層地盤の複雑な幾何形状を加味して入射波を推定することが可能となるが、その推定結果の精度は表層地盤の非線形応答のモデル化ならびに境界条件に強く依存することになるが、これらモデル化や境界条件の妥当性の検証は地表付近や近傍の工学的基盤での地震動の計測結果との照合によって可能となる。本研究では鉛直方向および水平方向に対し多点で観測することの意義も強調する。

キーワード：入射波、観測波、工学的基盤、表層地盤、非線形解析、粘性境界

#### 参考文献

- 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, 45(6), 771-790.
- 2) Lysmer, J. and R., L., Kuhleemeyer (1969): Finite dynamic model for infinite media, *ASCE, EM4*, 859-877.
- 3) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A. (2009): Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, *Soils and Foundations*, 49(5), 739-756.

キーワード：入射波、観測波、工学的基盤、表層地盤、非線形解析、粘性境界

Keywords: incident wave, observed wave, engineering base surface, surface ground, nonlinear analysis, viscous boundary

地層の不整形性を考慮した二次元弾塑性有効応力解析による表面波の再現と液状化被害に及ぼす影響  
 Numerical realization of surface waves and assessing their influence on liquefaction using  
 2D effective stress analysis

\*中井 健太郎<sup>1</sup>、野田 利弘<sup>2</sup>、浅岡 顕<sup>3</sup>、尾崎 奨<sup>1</sup>

\*Kentaro Nakai<sup>1</sup>, Toshihiro Noda<sup>2</sup>, Akira Asaoka<sup>3</sup>, Sho Ozaki<sup>1</sup>

1.名古屋大学大学院工学研究科、2.名古屋大学減災連携研究センター、3.地震予知総合研究振興会

1.Graduate School of Engineering, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3.Association for the development of earthquake prediction

地震が発生すると、P波やS波に続いて、地表面を伝達する「表面波」が発生する。この表面波は伝達時の距離減衰が小さく、震源から数百キロ離れた地点にまで伝わるのが特徴で、地震動の継続時間を長くする「後揺れ現象」を引き起こす。また、兵庫県南部地震では、この表面波と深部からの直達波が地表の特定位置で干渉することで、地震被害が局所化・甚大化したことが知られている（震災の帯）。しかし、実際の地震観測記録から表面波のみを抽出することは難しく、表面波が表層地盤の揺れや液状化に与える影響は十分には解明されていない。本稿では、深部地層の不整形性を考慮した二次元弾塑性有効応力解析を実施し、傾斜基端部から発生する表面波を再現するとともに、表層地盤の液状化被害へ及ぼす影響を把握することを試みた。用いた解析コードは、砂から中間土、粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式（SYSカムクレイモデル<sup>1)</sup>）を搭載した水-土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA<sup>2)</sup>である。

図1は析結果を示す。縦100m、幅30,000mの地盤モデルを作製し、左端2,700m部分のみに基盤傾斜を設けている。地層構成は、浦安地盤を参考に、下部から硬質な洪積層、軟弱な沖積粘土層、液状化危険度の高い沖積砂層となっている<sup>3)</sup>。水理境界は、地表面が水位面と一致するよう水圧をゼロし、下端と両側面は非排水とした。地震波は、東京都港湾局品川地震観測所のG.L.-36m付近での観測地震波を2E波と見做し、加振領域は基盤傾斜部直下のみとした。地震時は境界両側端で側方境界要素単純せん断変形境界を設定するとともに、加振領域を含む地盤底面全節点に $V_s=400\text{m/s}$ に相当する粘性境界を用いた。図1(b)は地震発生から100秒後の速度ベクトル図である。表層部において、進行方向に対して反時計回りに巻き上げるような表面波の発生が確認できる。この表面波は傾斜基端部で発生し、図中の右側へ進行していく。図1(d)にはA~Cの各地点における地表面加速度とフーリエ振幅スペクトルを示す。傾斜基端部（表面波発生箇所）よりも左側の地点Aでは、地点Bと比べて最大加速度は小さく、鉛直動もほとんど発生していない。一方、地点Bでは、鉛直動が生じていることに加えて、水平動に関しても最大加速度、継続時間ともに長くなっている。これは、傾斜基端部で生成した表面波が伝播した結果である。加振領域から20,000m離れた地点Cを見てみると、最大30gal程度ではあるが地震動が伝播している様子が伺える。図は省略するが、地点C'においても同様の加速度が観測されることから、地表面をあまり減衰せずに伝播してきている。フーリエ振幅スペクトルを見ると、加振領域直上では様々な周期帯の波を有していたが、表面波は1.7秒付近のやや長周期成分が卓越している。図1(c)に、各地点における平均有効応力低下率を示す。地点Aでは液状化していないが、地点Bでは平均有効応力低下率が主要動終了後もダラダラと上昇を続け、最終的には95%以上となって液状化している。これは、表面波と直達波が同地点で干渉して揺れが大きくなった（エッジ効果）ことが要因である。さらに地点Cを見ると、液状化にまでは至らないものの、表面波の影響で平均有効応力低下率が60%まで上昇している。今回は液状化していないが、余震等によって連続的に揺れた場合は、さらに平均有効応力低下率が下がって液状化する危険性も秘めている。

以上まとめると、1) 基盤の傾斜によって傾斜基端部から表面波が生成され、表層地盤の継続的な揺れを引き起こすこと、2) 数値解析の中で再現された表面波は1.7秒付近のやや長周期成分が卓越しており、距離減衰が小さい特徴を有していること、3) 表面波と直達波の干渉で傾斜基端部より右側で液状化危険度が高まること、を示し、地層の不整形性を考慮した多次元有効応力解析の必要性と有用性を示唆した。

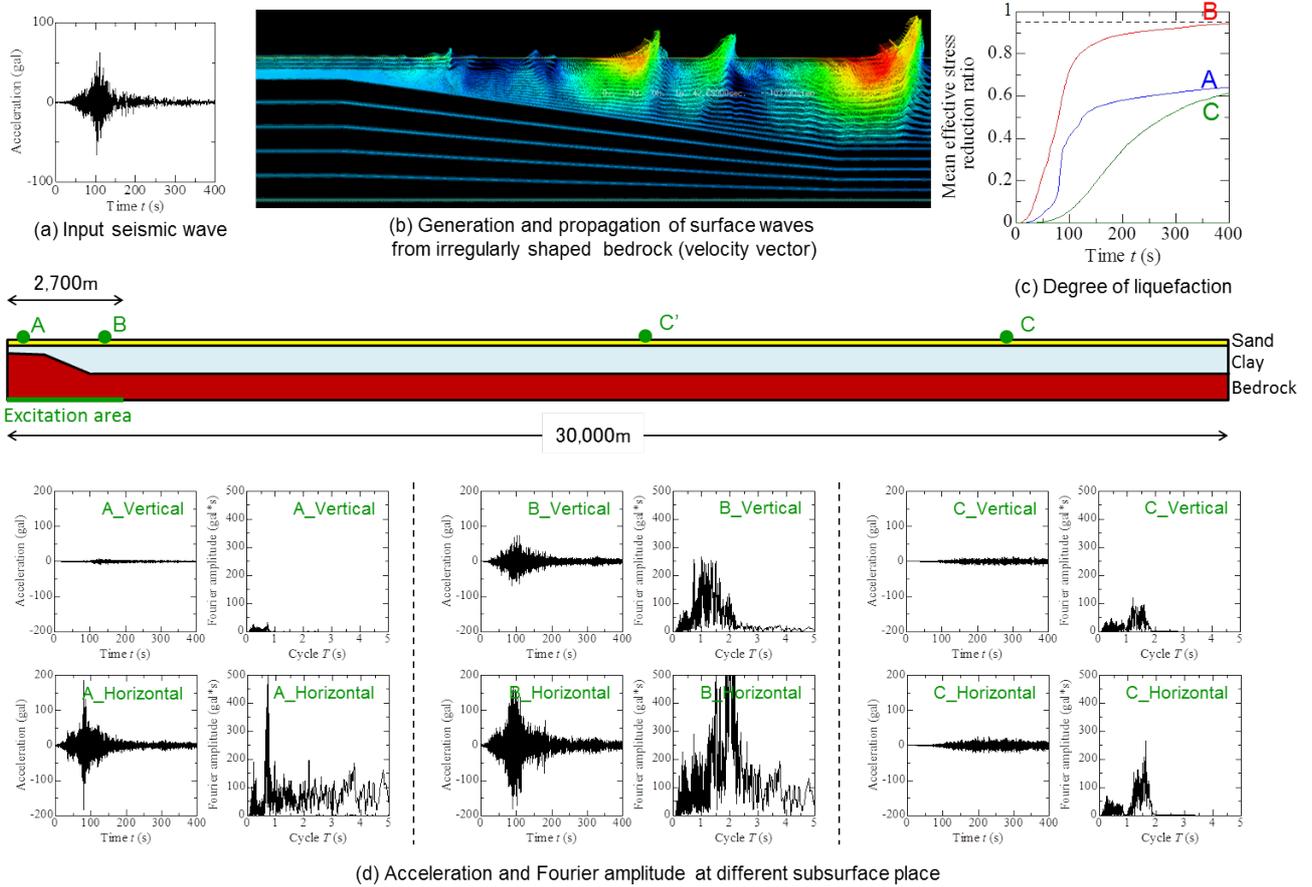
1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.  
 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*,

48(6), 771-790.

3) Nakai, K., Noda, T., Murase, K. and Asaoka, A. (2014): Liquefaction damage expansion caused by the generation of surface waves from base end section, Japan Geoscience Union Meeting, SSS23-19.

キーワード：表面波、液状化、不整形基盤、有効応力解析

Keywords: surface wave, liquefaction, irregularly shaped bedrock, effective stress analysis



東アジア地域地震火山災害情報図の編集と主要被害地震の原因別犠牲者数リストの作成  
 Earthquake Fatalities Mapping for the Eastern Asia Earthquake and Volcanic Hazards  
 Information Map

\*吉見 雅行<sup>1</sup>、石川 有三<sup>1</sup>、宝田 晋治<sup>1</sup>、Bandibas Joel<sup>1</sup>、丸山 正<sup>1</sup>、松本 弾<sup>1</sup>、吾妻 崇<sup>1</sup>、古川 竜太<sup>1</sup>、高田 亮<sup>1</sup>、桑原 保人<sup>1</sup>、佃 栄吉<sup>1</sup>

\*Masayuki Yoshimi<sup>1</sup>, Yuzo Ishikawa<sup>1</sup>, Shinji Takarada<sup>1</sup>, Jeol Bandibas<sup>1</sup>, Tadashi Maruyama<sup>1</sup>, DAN MATSUMOTO<sup>1</sup>, Takashi AZUMA<sup>1</sup>, Ryuta FURUKAWA<sup>1</sup>, Akira Takada<sup>1</sup>, Yasuto Kuwahara<sup>1</sup>, Eikichi Tsukuda<sup>1</sup>

1.産業技術総合研究所地質調査総合センター

1.Geological Survey of Japan, AIST

東アジア地域地震火山災害情報図（2016年5月発行予定）は、東アジア地域の地質とテクトニクス、活断層、地震の震央と震源域の分布、主要地震の原因別犠牲者数、津波災害、火山分布、カルデラ、降下火砕物と大規模火砕流、主要火山の犠牲者数について一枚の図面にまとめ、裏面に説明書を付したものである。産業技術総合研究所地質調査総合センターのG-EVER推進チームが中核となり、アジア各国の地質調査機関（PHIVOLCS, CVGHM, CEA, VAST, Academia Sinica）のメンバーと共に作成した。

この災害情報図編纂のため、西暦1850年以降の主な被害地震を対象に原因別の犠牲者数（行方不明者含む）を調べた。地震の被害形態は地域や時代によって様々であるが、被害形態を示す一つの指標として原因別の犠牲者数を用いることで、地震被害の特性が比較でき地震防災の資料としても有用になると考えたからである。カテゴリーは、1) 構造物の倒壊等、2) 津波、3) 土砂災害、4) 火災、5) その他（関連死）とした。

まず、NOAAの主要地震データベース等を基に被害者数を基準に各国最大20程度の地震を選定した。具体的には、犠牲者数1,000名以上の地震は全て選定した。国または地域別に犠牲者数1,000名以上の地震数が1～3件の場合は犠牲者数10～1,000名の地震を2件追加した。犠牲者数の最大値が100～1,000名の場合は最大2件、100名未満の場合は1件の被害地震を選定した。これらの地震について、原因別の犠牲者数を調べた。日本の被害地震については、内閣府中央防災会議の「災害教訓の継承に関する専門委員会」の各報告を参照したほか、被害調査資料等の一次情報にあたった。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の犠牲者数は、警察・消防資料から復興庁資料の関連死分を差し引いて市町村別リストを作成し、河北新報記事による土砂災害、建物被害の犠牲者数（90名）がほぼ内陸地域の直接犠牲者数に相当することを確認、残りを津波によるものとした。1995年兵庫県南部地震の内訳は公式資料に基づいた。1946年昭和南海地震は地震研究所の速報（河角・佐藤，1947，金井ほか，1947）の表及び内閣府中央防災会議資料から集計した。1944年昭和東南海地震は、飯田（1977）による集計資料から、中央气象台資料「昭和19年12月7日東南海大地震調査速報」を基に建物被害分を差し引き、残りを津波被害とした。1923年関東地震は諸井・武村（2004）の集計を用いたが、津波と土砂災害による犠牲者数は内閣府中央防災会議による推計を採用した。1855年安政江戸地震は、中村ほか（2011）では江戸での死者数は7,095名以上であるが、中央防災会議資料に基づき全体の死者数は1万名とし、このうち8割程度を建物被害によるものとした。安政東海・南海地震の被害内訳は、昭和東南海・南海地震の原因別犠牲者数比を参考に、建物被害と津波被害が1：1であるものとした。海外の地震については、内陸地震は基本的に構造物被害、津波のあった地震は津波被害とした。ただし、個別資料により原因別内訳を確認できたものについては示した。

海外の被害地震のうち、文献等により原因別犠牲者数を推定できたものは、2015年ネパール・ゴルカ地震、2008年四川省地震、1999年台湾集集地震、1976年モロコシ湾の地震など多くはない。内陸地震は建物被害、海溝型地震のうち津波被害が知られているものは津波、それ以外は建物被害に区分した。荒削りではあるが、これらの集計と地図への表示により、海溝型地震でも揺れによる被害、津波による被害、海底地滑りに起因する津波による被害など、地域によって被害形態は様々であることが視覚的に読み取れるようになった。今後も資料収集を継続しデータの精査を行う予定である。災害情報図は紙媒体によるもののほか、ウェブサイト（<http://ccop-geoinfo.org/G-EVER>）上でも随時公開していく予定である。



## 津波襲来に伴う死者の年齢等依存性（7）死亡率の伝統算定法吟味と改善

## Age-dependent Mortality in the 2011 East Japan Earthquake -Further Revision of Traditional Mortality at Attack by Tsunami

\*太田 裕<sup>1</sup>、小山 真紀<sup>2</sup>、志垣 智子<sup>3</sup>\*Yutaka Ohta<sup>1</sup>, Maki Koyama<sup>2</sup>, Tomoko Shigaki<sup>3</sup>

1.東濃地震科学研究所、2.岐阜大学流域圏研究センター、3.高齢者住宅研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, 2.River Basin Research Center Gifu University,

3.Institute of Elderly Housing Science

## 1. はじめに

本論は地震（津波）に伴う伝統の死亡率算定法について問題点を指摘し、改善を計るものである。一般には、死亡率(%) = 「年齢区分別」死者数 / 「年齢区分別」地域人口・・・(1)

という簡単な算定式が広く用いられているが、算定結果の意味するところは見かけとは違って結構複雑である。それ故、この式の単純な適用で済みとはならない。中でも特に重要な問題は2つある。

第1の問題は、この算定式による限り—特に東日本大震災では—乳幼児側の死亡率が極端に小さく算定され、逆に高齢者側では非常に大きな値となる等—死者発生の実態を正しく捉え切れていないのではという疑問である。

第2の問題は、式(1)の適用に際して、「地域人口をどの範囲で捉えるか」である。この点に関して、Sawai<sup>1)</sup>は「既往研究では適用範囲（地域人口）に統一性がなく」死亡率算定時の基準化が急務と説いている。その通りであるが、まだ問題提起の段階に止まっている。

本論では、上記2つの異質の問題を併せて考察できるよう、死亡率算定の新たな提案を試みている。その上で、改訂版死亡率の算定結果を津波強度とか沿海域地形との関係等、さらには防災対応との関わり具合について再考察を試みている。

## 2. 死亡率算定時の問題点打開

第1の問題の解消に向けて、尾崎<sup>2)</sup>による「平常年の死亡率との対比」を基本とし、若干の改訂の上でシリーズ研究を進めてきた<sup>3)</sup>。その結果、第1の問題は著しく改善した。つまり、乳幼児・若年層では低きに過ぎ、高齢者側で極端に高い死亡率となる異常さは大きく低減した。今回、この方式をさらに発展させた。

2番目の問題に関して、当初は関係Dataの入手容易性を理由に東北3県（岩手、宮城、福島）について、県人口を分母として話を始めた。その結果、県別の死亡率対比は可能となったものの、被災域外に居住する人々を含めた扱いとしていることから、見掛けの対比に止まってしまう（周知の片田の研究<sup>4)</sup>も同断である）。そこで、津波襲来を受けた地域を「市区町村」単位の算定へと話を進めた。しかし、なお津波被害とは無関係な住民が多々おり、十全と言えるには問題が残った。

一方、本論の共同研究者の1人、小山を代表とする研究<sup>5)</sup>では関係地域をさらに細かく立ち入って「津波浸水地域」と「津波による家屋等流失域」を峻別した上で、関係地域在住の住民数を分母とする伝統の死亡率算定を実施している。これは上記のSawai<sup>1)</sup>による指摘の好個の実践事例ともなっている。そこで、その結果を活用し、さらに改訂尾崎法による対比を導入することで、1番目の問題に加えて2番目の問題も解決へと進展させた。

なお、このようにして得られた基準化死亡率のうち、家屋等流失域の人口を母数とした場合が特に重要である。何故なら、羽鳥<sup>6)</sup>（1984）以来「津波死者はもっぱら一般家屋等の流失域において発生する」という事実を既に承知しているからである。

## 3. まとめ

以下は、今回成果の一端である。

- ①津波襲来に起因する死亡率の算定には、伝統の算定式に平常年の死亡率との対比を計ることが肝要である。
- ②死亡率算定時の人口として「津波による家屋等の流失域人口」を採用することが理にかなった手法である。
- ③津波による死の激甚性を「津波襲来時の死亡率」と「平常時の死亡率」を対比させることで定量化出来る。その結果、乳幼児・少年期のそれが平常時に比べて格段に高いことが判る。

- ④その中で、釜石市および周辺地区では乳幼児等の死亡率が他地区に比べてかなり低いことが改めて確認され、片田<sup>4)</sup>らの対津波防災教育の効果を示唆している。
- ⑤その他、津波高さ（浸水深）と今回得た死亡率との間に一定の関係を見出した。

#### 参考文献

- 1) Sawai, M., Who is vulnerable during tsunamis? 1-18, 2012, ESCAP Spec. Rep.
- 2) 尾崎, 地震災害時および災害後の健康被害, 厚生指標, 59, 2012.
- 3) 太田他, 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(2~6) JpGU大会等.
- 4) 片田, 人が死なない防災, 集英社新書, 2012.
- 5) 小山他, 東北地方太平洋沖地震における浸水状況を考慮した市町村別・年齢階級別死者発生状況, 土木学会地震工学論文, 2012.
- 6) 羽鳥, 津波による家屋の被害率, 地震研彙報, 59, 1984.

キーワード：東日本大震災、津波、死亡率、吟味と改善

Keywords: East Japan Earthquake, Tsunami, Mortality, Critical Revision