

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¹

*KimiYuki Asano¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

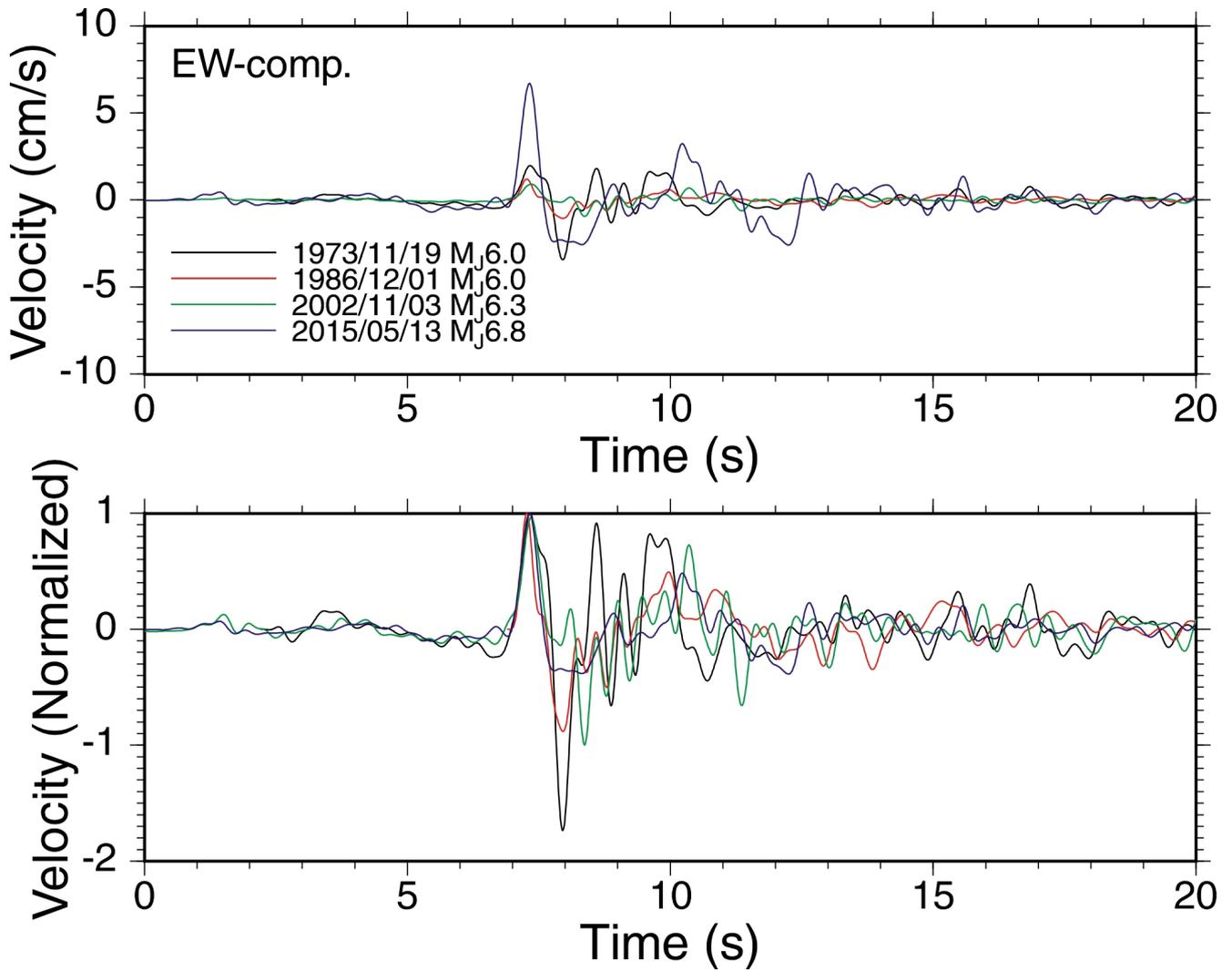
2011年東北地方太平洋沖地震以降、強震動予測において予測結果のばらつきを提示することが強く意識されるようになってきている。本発表では、強震動予測に不確実性を生じさせる要因のうち震源特性に着目する。震源断層を特定した強震動予測において、断層面積や強震動生成域の面積、応力降下量といった震源パラメータは、過去の地震の震源過程の解析結果を集約した経験的なスケーリング則に従って与えられる（例えば、Murotani *et al.*, 2008）。当然のことながら、スケーリング則を構築する上での元データにはイベント毎に平均的なスケーリングからのずれが存在し、スケーリング則の標準偏差も提示されているので、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と期待できる。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 $M_j 7.0$ ）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 ($M_j 6.8$) 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_j 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



断層幅の不確実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¹、前田 宜浩¹、岩城 麻子¹、藤原 広行¹

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

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、を認識論的不確実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、断層幅の不確実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実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、傾斜角の不確実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：不確実さ、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¹、倉橋 奨¹

*Kojiro Irikura¹, Susumu Kurahashi¹

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¹*Ichiro Kawasaki¹

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のところでも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 σ_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 σ_e に比例する。 W は一定とすると, D_0 も D_0/t_0 も σ_e に比例し, その結果, 『断層近地場の強震動は σ_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、

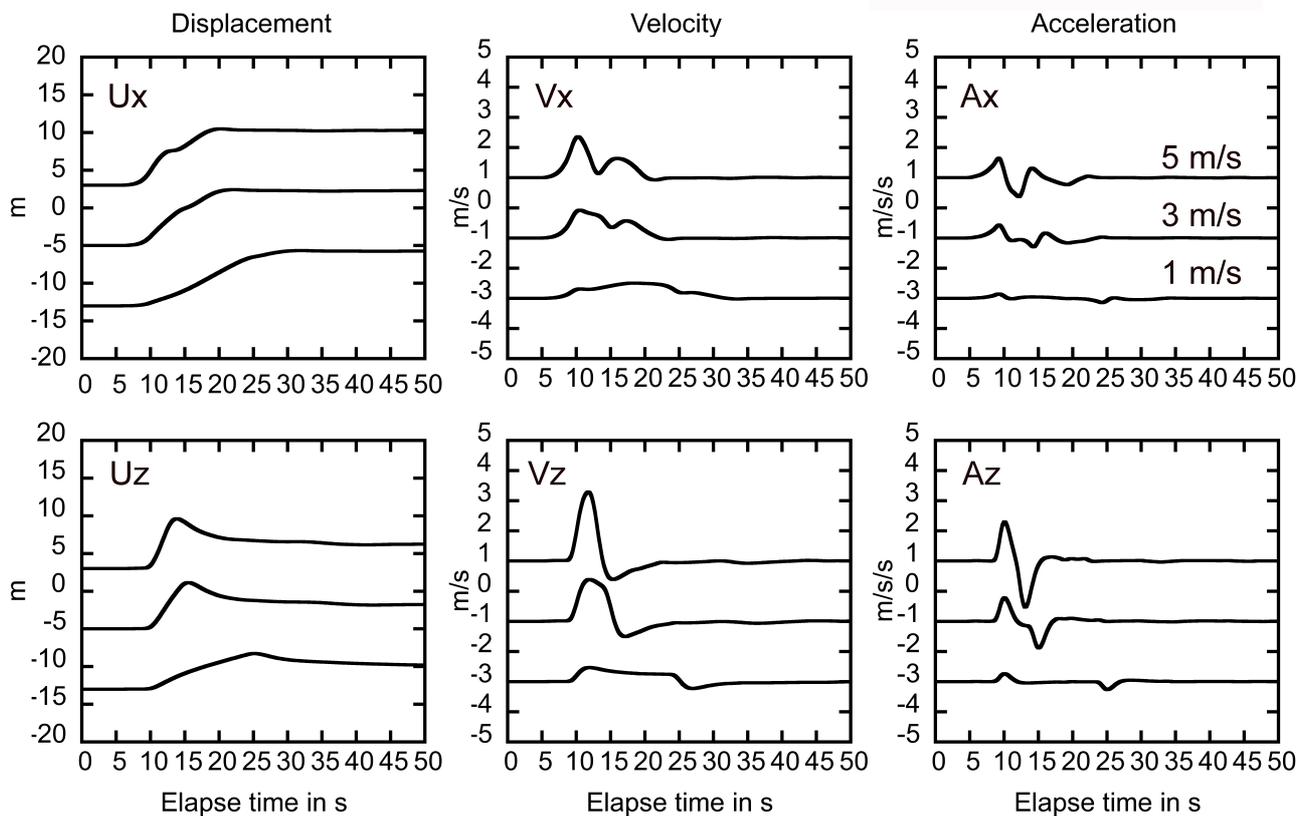
(b) レベル2の超巨大地震における起震応力は、レベル1の巨大地震における起震応力より何倍も大きい、という2つの仮定が正しいとすると、レベル2の大津波が浜岡を襲う寸前に、短周期も長周期も含めて、昭和東南海地震や安政東海地震のときを何倍も上回る強震動が襲うと想定することが出来る。

■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¹、岩城 麻子¹、森川 信之¹、今井 隆太²、青井 真¹、藤原 広行¹*Takahiro Maeda¹, Asako Iwaki¹, Nobuyuki Morikawa¹, Ryuta Imai², Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

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 & 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¹、石井 紘¹、浅井 康広¹

*Osamu Murakami¹, Hiroshi Ishii¹, Yasuhiro Asai¹

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^{1,2}, Jinjun Hu², Lili Xie^{2,3}

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 Viens¹, Hiroe Miyake^{2,1}, Kazuki Koketsu¹

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 (≥ 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¹、浅野 公之²、岩田 知孝²、宮腰 研¹、大堀 道広³

*Kazuhiro Somei¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata², Ken Miyakoshi¹, Michihiro Ohori³

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、関係機関の皆様方に記して感謝申し上げます。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¹、*岩田 知孝¹、浅野 公之¹

Hiroki Tanaka¹, *Tomotaka Iwata¹, Kimiyuki Asano¹

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²、小松 正直¹、*竹中 博士¹、吉見 雅行³、中村 武史⁴、岡元 太郎⁵

Tatsuya Okunaka², Masanao Komatsu¹, *Hiroshi Takenaka¹, Masayuki Yoshimi³, Takeshi Nakamura⁴, Taro Okamoto⁵

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¹、若井 淳¹、神 薫¹、前田 宜浩¹、木村 克己¹、松山 尚典²、藤原 広行¹

*Shigeki Senna¹, Atsushi Wakai¹, Kaoru Jin¹, Takahiro Maeda¹, Katsumi Kimura¹, Hisanori Matsuyama², Hiroyuki Fujiwara¹

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 CHANG¹

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¹、小林 広明¹、司 宏俊¹、Viens Loic¹、Diao Hongqi¹、三宅 弘恵²

*Kazuki Koketsu¹, Hiroaki Kobayashi¹, Hongjun Si¹, Loic Viens¹, Hongqi Diao¹, Hiroe Miyake²

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¹*Atsushi Nozu¹

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

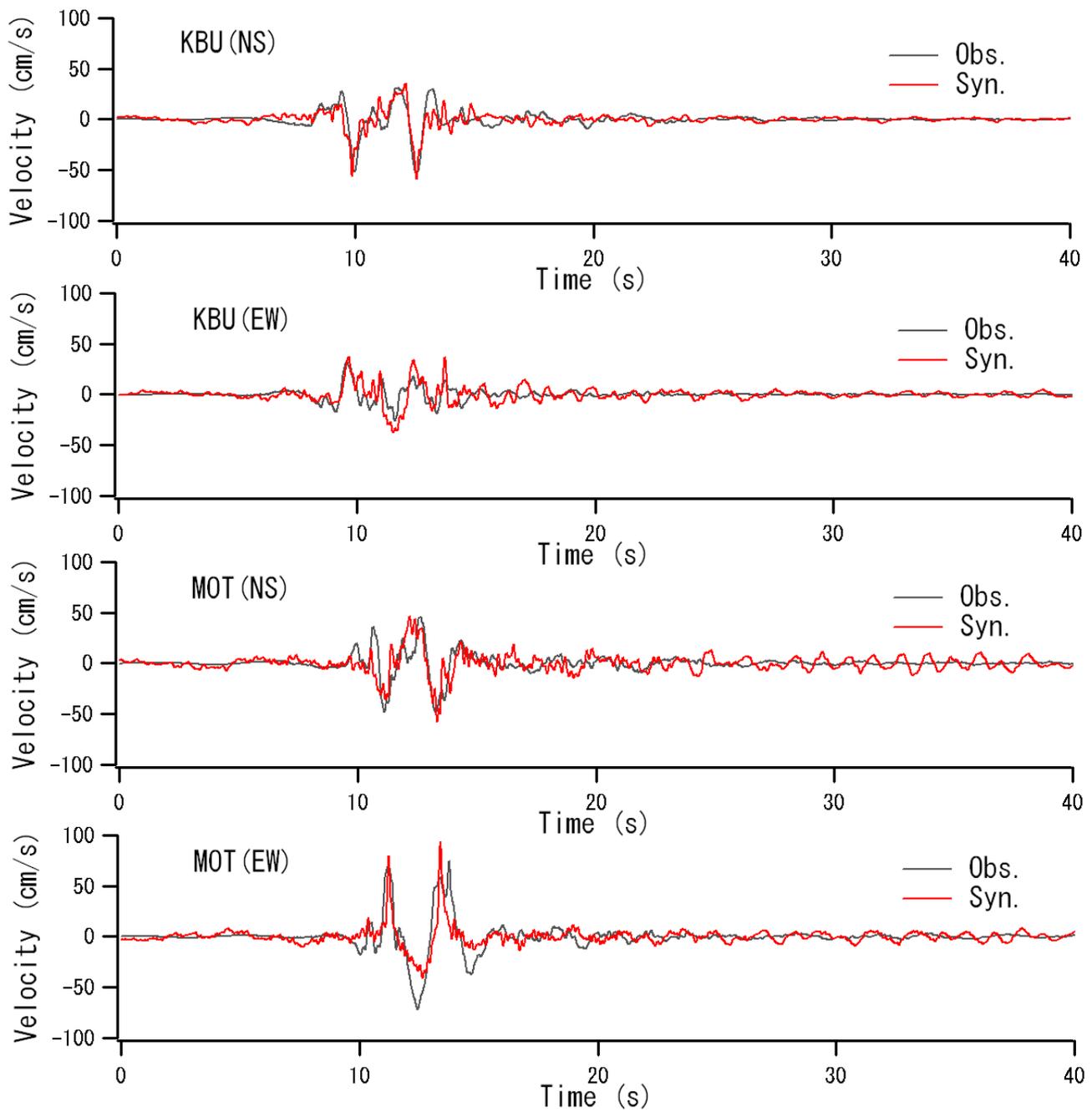


Figure 1 Observed and synthetic velocity waveforms at KBU and MOT

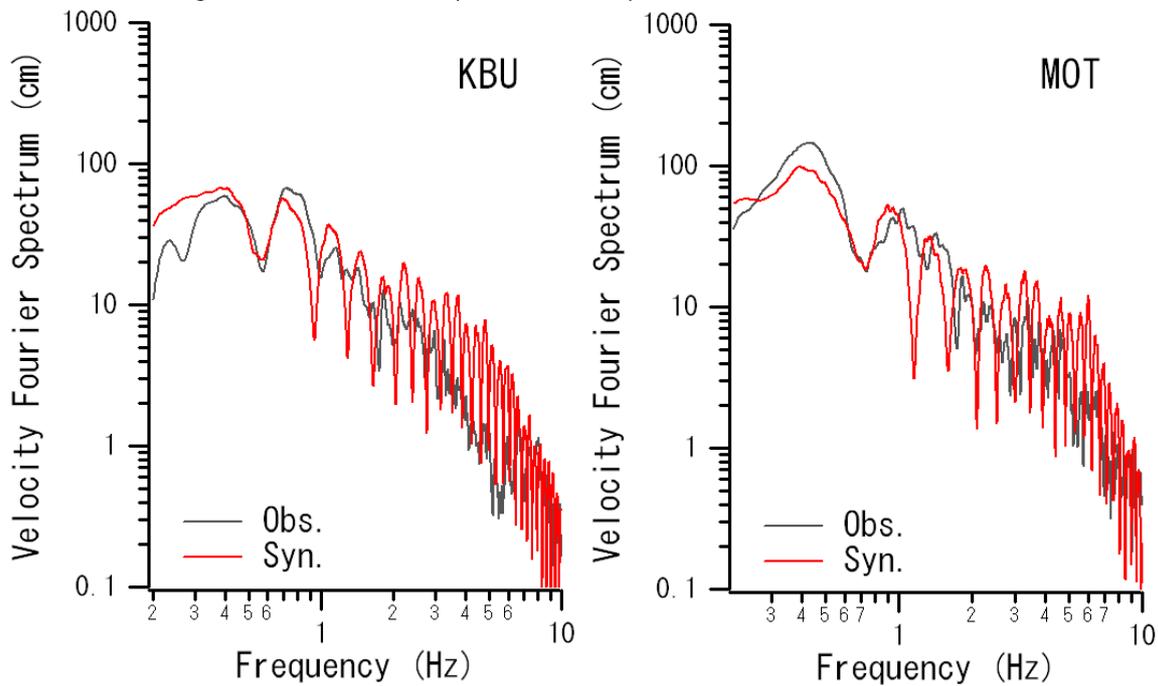


Figure 2 Observed and synthetic Fourier spectra at KBU and MOT

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¹、高井 伸雄¹、Bijukchhen Subeg¹、一柳 昌義¹、笹谷 努¹

*Michiko Shigefuji¹, Nobuo Takai¹, Subeg Bijukchhen¹, Masayoshi Ichiyonagi¹, Tsutomu Sasatani¹

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（ Δ ~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¹、Dhakal Yadab Prasad¹、鈴木 亘¹、功刀 卓¹、青井 真¹、藤原 広行¹

*Hisahiko Kubo¹, Yadab Prasad Dhakal¹, Wataru Suzuki¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

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イズ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 7.5×10^{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¹、アディカリ ロク・ビジャヤ¹、ゴータム ウメッシュ・プラサド¹、コイララ バーラト・プラサド¹、ティムシナ チンタン¹、横井 俊明²、林田 拓巳²、ボリンジャー ローレント³

*Mukunda Bhattarai¹, Lok Bijaya Adhikari¹, Umesh Prasad Gautam¹, Bharat Prasad Koirala¹, Chintan Timsina¹, Toshiaki Yokoi², Takumi Hayashida², Laurent Bollinger³

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¹、渡辺 哲史¹、加藤 研一¹*Kentaro Motoki¹, Tetsushi Watanabe¹, Kenichi Kato¹

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必要があるが、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¹、津野 靖士¹、是永 将宏¹

*Kyosuke Okamoto¹, Seiji Tsuno¹, Masahiro Korenaga¹

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¹、野田 利弘²、浅岡 顕³、澤田 義博³

*Shotaro Yamada¹, Toshihiro Noda², Akira Asaoka³, Yoshihiro Sawada³

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¹⁾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^{2), 3)}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¹、野田 利弘²、浅岡 顕³、尾崎 奨¹

*Kentaro Nakai¹, Toshihiro Noda², Akira Asaoka³, Sho Ozaki¹

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¹⁾）を搭載した水-土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA²⁾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³⁾。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。

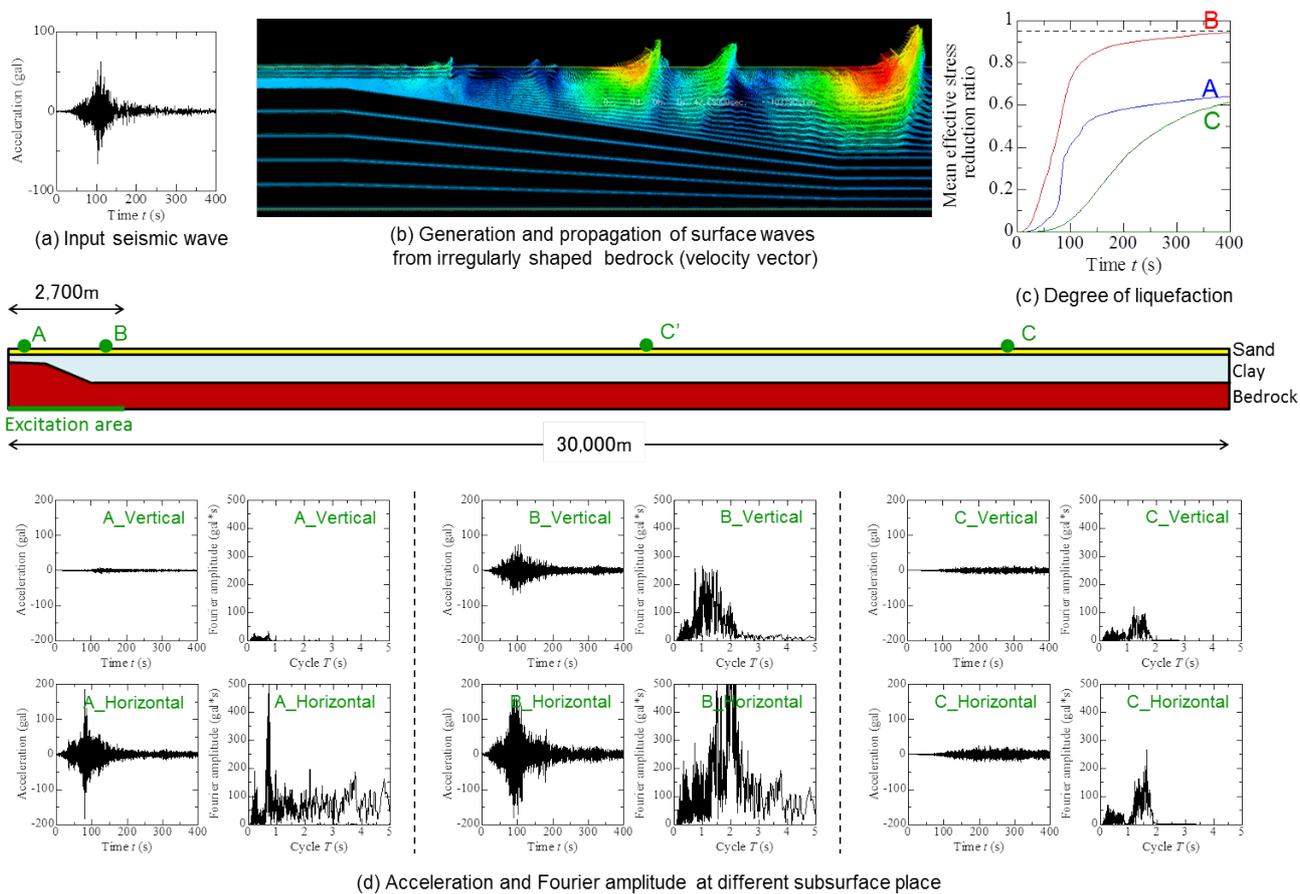
1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.
 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type 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¹、石川 有三¹、宝田 晋治¹、Bandibas Joel¹、丸山 正¹、松本 弾¹、吾妻 崇¹、古川 竜太¹、高田 亮¹、桑原 保人¹、佃 栄吉¹

*Masayuki Yoshimi¹, Yuzo Ishikawa¹, Shinji Takarada¹, Jeol Bandibas¹, Tadashi Maruyama¹, DAN MATSUMOTO¹, Takashi AZUMA¹, Ryuta FURUKAWA¹, Akira Takada¹, Yasuto Kuwahara¹, Eikichi Tsukuda¹

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¹、小山 真紀²、志垣 智子³*Yutaka Ohta¹, Maki Koyama², Tomoko Shigaki³

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、Sawai¹⁾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²⁾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³⁾。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⁴⁾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⁵⁾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Sawai¹⁾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⁶⁾（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⁴⁾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

東京都本郷での長周期地震動記録を用いた1931年西埼玉地震の震源モデルの推定

Estimation of source model of the 1931 NISHI-SAITAMA earthquake using long-period ground motion at Hongo in Kanto basin

*中條 良亮¹、山中 浩明¹、地元 孝輔¹、工藤 一嘉²、瀬瀬 一起³、三宅 弘恵³

*Ryosuke Chujo¹, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹, Kazuyoshi Kudo², Kazuki Koketsu³, Hiroe Miyake³

1.東京工業大学大学院総合理工学研究科、2.日本大学生産工学部、3.東京大学地震研究所

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

2.College of Industrial Technology, Nihon University, 3.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The 1931 Nishi-Saitama earthquake occurred in the northwestern part of Saitama prefecture on September 21, 1931 with a magnitude of 6.9. This is one of the most destructive shallow crustal earthquakes in the Kanto district in the last 100 years. Heavy building damage was experienced in the epicentral area during the quake. It is important from the viewpoint of disaster mitigation to know the source model of the earthquake for considering ground shaking during future events. Abe (1974) estimated the focal depth according to observed P-wave travel time in distant station and suggested shallow focal depth. However, the focal depth has not been precisely understood. In this study, we tried to estimate a source model of the 1931 Nishi-Saitama earthquake by comparing a long-period seismogram observed in Hongo, Tokyo, which is the only seismogram recorded completely in the Tokyo Metropolitan area with synthetic seismograms simulated by a 3D finite differential method considering recent detailed model of the Kanto basin. It is clarified that the main part of the observed long-period seismogram is composed of surface waves affected by the three-dimensional effect of the sedimentary layers in the Kanto basin. We also found good agreement between the calculated and observed seismograms, when the depth of the source fault is set to be in a range of 20-30 km with a rupture propagating from the bottom edge of the center of the fault.

キーワード：1931年西埼玉地震、長周期地震動記録、震源深さ

Keywords: The 1931 Nishi-Saitama earthquake, long-period seismogram, focal depth

高精度余震分布データに基づいた経験的グリーン関数法による2008年岩手宮城内陸地震の震源インバージョン解析

Source inversion using EGF for the 2008 Iwate-Miyagi earthquake based on precisely relocated aftershock distribution

*芝 良昭¹

*Yoshiaki Shiba¹

1. 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

2008年岩手宮城内陸地震(M7.2)ではKiK-net一関西(IWTH25)など複数の地点で1Gを超える大加速度が観測された。この地震は、CMT解や一元化震源要素による余震分布、地表地盤変状の出現位置などからは西傾斜の逆断層メカニズムが想定される。一方で、震源域の稠密余震観測に基づく高精度の余震分布(吉田, 2013)やInSAR地殻変動データを用いた解析結果(Abe et al., 2013)などからは、共役の関係にある複数の断層面が同時に動いた可能性が示唆されている。また強震記録を用いたインバージョン解析でも共役の断層面を仮定した検討が行われた結果、いずれの断層面にも有意なすべりが生じたモデルが示されている(引間・瀬野, 2013)。ここでは、吉田(2013)による余震震源の再決定データに基づき、共役の断層面モデルと西傾斜単独の断層面モデルをそれぞれ仮定し、経験的グリーン関数(EGF)を用いた震源インバージョン解析により、断層面上のすべり分布や実効応力分布の推定を試みる。

共役断層を仮定した初期断層面モデルは3枚の面から構成される。西傾斜の断層面は、余震分布と地表地盤変状のトレースを同時に説明するように、北部と南部で走向、傾斜が異なる2枚の面を仮定し、東傾斜の断層面は北部の西傾斜断層とほぼ共役になるように設定した。一方、西傾斜断層面モデルは共役モデルから単純に東傾斜の断層面を除いたモデルである。EGFには、北部と南部の断層面近傍で発生した2つのいずれもM4クラスの余震記録を用いた。なお共役を考える際の東傾斜断層面のEGFは、北部西傾斜の断層面と共通としている。解析には震源域直上のIWTH25を含む20地点のK-NET、およびKiK-net地中観測点の水平2成分速度波形を用いた。解析周波数帯域は0.1-1Hzである。また本震断層面上から放射される地震波とEGFとのそれぞれに対して、Boore and Boatwright (1984)にしたがい、有限の幅を持つ射出角で平滑化した放射特性を算出し補正を行った。

検討の結果得られた共役断層面の震源モデルでは、西傾斜の北部断層面において、破壊開始点の南側に主要なアスペリティが同定されるとともに、東傾斜の断層面においても有意なすべりが推定された。一方で、西傾斜の南部断層には大きなすべりは生じていない。西傾斜北部断層からは全体の6割強、東傾斜断層からは2割強の地震モーメントが解放されている。また西傾斜と東傾斜の断層面におけるアスペリティの位置関係を水平面内に投影すると、互いに相補的になる傾向が認められる。最大すべり量は西傾斜断層面で5.3mが得られた。一方、西傾斜単独の断層面モデルを仮定した検討では、破壊開始点南部に主要なアスペリティが分布する傾向は変わらず、最大すべり量として6.1mとやや大きめの値が得られた。またいずれのモデルでも、西傾斜断層面のアスペリティは地表変状がみられた領域の近傍に位置するが、その重心はやや深い位置に求められており、明瞭な地表地震断層が出現しなかった観測事実と調和的であると考えられる。

キーワード：2008年岩手宮城内陸地震、震源インバージョン、経験的グリーン関数

Keywords: The 2008 Iwate-Miyagi earthquake, source inversion, empirical Green's function

運動学的震源モデルから求めた2008年岩手・宮城内陸地震の動力学パラメータ

Dynamic source parameters of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake inferred from kinematic source model

*吉田 邦一¹、宮腰 研¹、染井 一寛¹

*Kunikazu Yoshida¹, Ken Miyakoshi¹, Kazuhiro Somei¹

1.一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所

1.Geo-Research Institute

●はじめに

震源の破壊は動力学的パラメータに支配されるので、今後、強震動予測の動的破壊シミュレーションなどにより震源モデルを作成する際に、妥当な動力学パラメータの設定が重要であるし、現在レシピで用いられる特性化震源モデルの改良にも資する。ここでは、2008年岩手・宮城内陸地震を対象に、我々が強震記録から推定した震源モデル（吉田・他、2015、地震学会）を境界条件として、差分法により計算した応力場から摩擦構成則を調べ、震源の動力学パラメータを検討した。

●応力場の計算

解析に用いた震源モデルは、周期1-20秒の地震動記録を用いて推定されており、格子間隔が2 km² kmである。Ide and Takeo (1997)と同様に、運動学的震源モデルを境界条件とした応力場を差分法（例えば、Pitarka, 1999, BSSA）により計算し、震源での応力の時間変化を計算した。この地震では断層すべりは地表面に到達し、地表に断層運動に伴う亀裂が生じている（例えば、遠田・他、2010、地震2）ので、計算では地表面を設定し、断層面は運動学的震源モデルと同様に傾斜40°とした。運動学的震源モデルの2kmメッシュのモデルを補間して、333 m²333 mメッシュとし、この補間モデルの格子間隔と一致するように差分法の格子間隔を設定した。また、最上部の点震源を差分法の地表面付近になるよう設定した。速度構造モデルには震源インバージョンで用いたものを、安定な計算となるよう多少改変して用いた。

●結果

解析で得られた動的応力降下量 $\Delta\sigma$ は静的応力降下量と大差ない値が求められたが、アスペリティ全体で約13 MPaであった。この地震では断層面上端にアスペリティがあり、それが地表に接しているが、アスペリティの地表付近に限ると $\Delta\sigma$ は約8 MPaと、小さい値が求まった。この領域では、ライズタイムも深部に比べ長く、 $\Delta\sigma$ の深さ依存性が示唆される。破壊エネルギー G_c は、断層面全体で 6×10^6 J/m²で、Tinti et al (2005)のスケールと整合的であった。また、アスペリティ領域で 2×10^7 J/m²であった。応力最大値を示す時刻（すなわち降伏応力に達した時刻）を破壊開始時刻とみなして追跡すると、アスペリティ内部で破壊が加速する傾向や、断層面上端で破壊伝播が遅れる傾向がみられた。

謝辞：本研究は、平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の高度化）事業による成果の一部である。

キーワード：2008年岩手・宮城内陸地震、動力学パラメータ、運動学的震源モデル

Keywords: The 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake, Dynamic source parameter, Kinematic source model

運動学的震源モデルから求めた2013年栃木県北部の地震の動力学パラメータ

Dynamic source parameters of the 2013 Tochigi-ken hokubu earthquake inferred from kinematic source model

*染井 一寛¹、宮腰 研¹、吉田 邦一¹*Kazuhiro Somei¹, Ken Miyakoshi¹, Kunikazu Yoshida¹

1.一般財団法人地域地盤環境研究所

1.Geo-Research Institute

強震動予測レシピにおいて、高精度な予測強震動を得るためには、実際に発生した地震の震源像を詳細に把握し、その知見を特性化震源モデルの構築に活かしていくことが重要である。現在広く用いられている特性化震源モデルの概念は、運動学的震源モデルの上に立脚しているが、断層破壊現象は本質的には動力学で表現される。近年、動的破壊過程に基づいた強震動シミュレーションに関する研究も発展を遂げており、震源での動力学パラメータをモデル化することは、強震動予測の高精度化、或いは特性化震源モデルの高度化において期待されることの1つであると考えられる。本研究は、動力学パラメータの知見を特性化震源モデルに組み込むことを目的とし、2013年2月25日栃木県北部の地震 (M_w 5.8) の運動学的震源モデルから、断層面上での応力変化を推定し、アスペリティや背景領域での動力学パラメータの特徴を調べた。

断層面上での応力の時空間変化は、運動学的震源モデルのモーメント時間関数を境界条件として、運動方程式を3次元有限差分法で解くことで応力の時間変化を推定した (Ide and Takeo, *J. Geophys. Res.*, 102, 27379-27391, 1997)。ここで運動学的震源モデルは、染井・他 (JpGU, SSS23-P19, 2014) による近地強震波形 (0.1-1.0 Hz) インバージョンから推定した不均質震源モデルを採用した。なお、有限差分法の計算は空間に対して4次精度、時間に対して2次精度のStaggeredグリッドを用いた。計算の入力に用いる震源インバージョンモデルは、1.0 km四方の小断層を双一次補間によって250 m四方の分布に補間することで与えた。なお、各小断層の破壊伝播時間の遅れは考慮している。得られた応力変化履歴と変位履歴から、変位と応力の摩擦構成則を評価し、それを基にして、静的応力降下量、動的応力降下量、実効応力、破壊強度 (Strength excess)、臨界すべり量 (D_c)、破壊エネルギーといった動力学パラメータを抽出した。

得られた動力学パラメータの特徴は以下の通りである。1) 臨界すべり量は、アスペリティ領域の方が、背景領域よりも2倍程度大きい。2) アスペリティ領域、および背景領域の臨界すべり量は、最終すべり量の50%程度である。3) 静的、及び動的応力降下量は、アスペリティ領域の方が背景領域よりも3-5倍程度大きい。4) アスペリティ領域での静的、動的応力降下量、及び実効応力の平均値は、各々6.0 MPa, 6.7 MPa, 7.7 MPaと推定され、静的応力降下量に対して、動的応力降下量は1.1倍、実効応力は1.3倍となった。5) 破壊強度は、アスペリティの端部で大きい傾向がある。ここで、アスペリティ領域は、運動学的震源インバージョンモデルのすべり量に基づいて特性化された領域である。今後は、他の震源パラメータ (破壊伝播速度等) との比較や、動力学パラメータ抽出の事例を増やすことでこれらの傾向の統計的特性を調べていく予定である。

謝辞：本研究は、平成27年度原子力施設等防災対策等委託費 (地震動評価における不確かさの評価手法の高度化) 事業による成果の一部である。

キーワード：2013年栃木県北部の地震、動力学パラメータ、運動学的震源モデル

Keywords: The 2013 Tochigi-ken hokubu earthquake, Dynamic source parameter, Kinematic source model

ハイブリッド法における強震動評価のためのすべり速度関数の検討

Slip velocity function for strong motion evaluation based on the hybrid method

*倉橋 奨¹、吉田 邦一²、宮腰 研²、入倉 孝次郎¹

*Susumu Kurahashi¹, Kunikazu Yoshida², Ken MIYAKOSHI², Kojiro Irikura¹

1.愛知工業大学、2.一般財団法人地域 地盤 環境研究所

1.Aichi Institute of Technology, 2.Geo-Research Institute

1. はじめに

広帯域強震動を計算する場合、長周期成分は(数値的手法や)理論的手法を、短周期成分は半経験的手法を適用したハイブリッド法が利用され、1Hz付近でマッチングフィルターを通して両成分が足しあわされる。長周期帯域での計算には、単純化されたsmoothed ramp 関数や中村・宮武(2000)などが用いられ、短周期帯域は、経験的グリーン関数法を例にとると、小地震のすべり速度関数と補正関数のconvolutionされたものが利用される。既往の研究で、適切な震源断層モデルが設定できればハイブリッド手法で合成記録は概ね観測記録が再現されることからその有効性が示されている(例えば、釜江・他、1998)。

しかしながら、長周期と短周期のつなぎの周波数帯域については、すべり速度関数の違いによりスペクトルの落ち込みが出る可能性がある。高精度な強震動を予測するためには、すべり速度関数のスペクトルをスムーズにつなぐことを考える必要がある。

以上より、本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震を対象として、強震動評価のための長周期帯域と短周期帯域の地震動スペクトルをなめらにつなぐためのすべり速度関数について検討する。はじめに、吉田・他(2015)の波形インバージョン結果を参考として、経験的グリーン関数法によるSMGA震源モデルを構築する。次に、吉田・他(2015)が提案しているピークモーメントレートの大きな領域(High Rate Area: HRA)から長周期成分の計算を行う。これらの結果より、長周期側と短周期側をつなぐ周期帯(0.5~1秒)で地震動スペクトルがすべり速度関数に依存してどのように変化するかについて検討を行う。

2. SMGA震源モデルの構築

2008年岩手・宮城内陸地震の強震動生成域のモデルは、倉橋・入倉(2013、2014)などにより更新されているが、吉田・他(2015)により波形インバージョンが更新されたため、再構築を行った。吉田・他

(2015)は、波形インバージョンによるすべり量の大きな領域(アスペリティ)の特性化震源モデルの他に、ピークモーメントレートが大きな領域(High Rate Area: HRA)の特性化震源モデルを提案している。これは、すべりの大きさで推定されたアスペリティ領域よりもすべり速度が大きい場所の方が短周期地震動をより強く励起する可能性があるとの考えに基づいている。そこで、このHRA特性化震源モデルを基として、SMGAを見直した。対象周期は、0.1~3秒とした。

その結果、観測波形の主要な部分については、すべり分布からのアスペリティモデルよりもHRAの領域に基づいてSMGAを設定した方が、強震動の再現性がよいことがわかった。

次に、HRA特性震源モデルの長周期成分の計算を実施する。対象周期は、1~10秒とした。波形計算には、離散化波数法(Bouchon, 1981)を利用した。ライズタイムは、吉田他(2015)の方法を参照しながら、観測波形に合うように設定した。すべり速度関数は、smoothed ramp関数のほかスペクトルがスムーズにつながるような他のすべり速度関数を検討する。長周期側と短周期側では見かけのライズタイムが異なる結果が得られているが、つなぎの周期帯域ではスペクトルがスムーズにつながるすべり速度関数を検討する。

キーワード：すべり速度関数、ハイブリッド法、2008年岩手宮城内陸地震

Keywords: slip velocity function, the hybrid method, 2008 Iwate Miyagi nairiku earthquake

κを用いた高周波数領域におけるスペクトル低減特性に関する検討 ～地殻内地震～

Study on spectral decay characteristics in high frequency range using parameter κ- For crustal earthquakes -

*鶴来 雅人¹、香川 敬生²、入倉 孝次郎³

*Masato Tsurugi¹, Takao Kagawa², Kojiro Irikura³

1.一般財団法人 地域 地盤 環境研究所、2.鳥取大学、3.愛知工業大学

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

1) はじめに

高周波数領域においてはスペクトルが低減し、 ω^{-2} 則から乖離することが知られており、強震動予測の精度向上のためにはこの領域における地震動特性の解明が必要不可欠である。このスペクトル低減特性を表現する方法として f_{\max} フィルター[Hanks(1982)]による方法、κ [Anderson and Hough(1984)]による方法があり、我が国では前者が、アメリカなど諸外国では後者が主流となっている。ここで、 f_{\max} は主に震源に、κは主に伝播経路やサイト特性に由来すると考えてられているが、最近ではκを震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性に分離する試みが行われている[例えば、Hotte *et al.*(2011)]。

本検討ではすでに f_{\max} フィルターを用いてスペクトル低減特性が評価されている地殻内地震を対象に、κを用いてその低減傾向を評価し、 f_{\max} フィルターとの関係を整理する。

2) 解析概要

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

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

本検討では地殻内大地震とその余震を対象として、スペクトルがほぼ平坦となる上限周波数(f_E)およびスペクトル低減の傾きκを求める。

解析対象とした地震は2003年宮城県北部地震、2005年福岡県西方沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震の本震および余震の全48地震、その M_j は3.4~7.2、震源深さは3~14kmである。これらの地震について f_{\max} フィルターを評価した際と同様、平均観測スペクトルを求め、その形状から f_E を決め、 $f_E \sim 30$ Hzの範囲で最小二乗法によりスペクトル低減の傾きκを求めた。平均観測スペクトルとは、

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

* 震源距離が概ね100km程度以下のKiK-net地中観測点

の観測スペクトルを平均震源距離におけるスペクトルに補正をして、その平均を求めたものである。なお、既往研究[例えば、鶴来・ほか(2009)]において各本震記録の f_{\max} およびべき乗数 s は以下のように得られている。

* 2003年宮城県北部地震 本震： $f_{\max} = 8.0$ Hz, $s = 0.93$

* 2005年福岡県西方沖地震 本震： $f_{\max} = 6.5$ Hz, $s = 0.90$

* 2008年岩手・宮城内陸地震 本震： $f_{\max} = 9.4$ Hz, $s = 0.84$

3) 解析結果

3つの本震の f_E および κは以下の通りとなった

* 2003年宮城県北部地震 本震： $f_E = 2.6$ Hz, $\kappa = 0.0190$

* 2005年福岡県西方沖地震 本震： $f_E = 2.0$ Hz, $\kappa = 0.0277$

* 2008年岩手・宮城内陸地震 本震： $f_E = 4.5$ Hz, $\kappa = 0.0142$

2003年宮城県北部地震および2008年岩手・宮城内陸地震の余震の f_E は8~15Hz, κ は0.0036~0.0233, 2005年福岡県西方沖地震の余震の f_E は2.6~10Hz, κ は0.0272~0.0408と

なった。Anderson and Hough(1984)による岩盤点における κは0.02~0.06の範囲に分布しており、2005年福岡県西方沖地震の本震および余震の κの値はこれと概ね同等であったが、2003年宮城県北部地震および2008年岩手・宮城内陸地震の本震および余震の κの値はこれよりやや小さい値であった。κ の値の地域依存性については、今後より詳細な検討が必要である。

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

ターのスペクトル低減の傾き s , および f_E と f_{max} の間には概ね正の相関が認められた。これは、同じ低減特性を異なる方法を用いて表現したことに因るもので、合理的な結果と言える。さらに、 κ に関する既往研究 [例えば、Anderson and Hough(1984), Hotte *et al.*(2011)]では κ の値に震央距離依存性が認められるとしているが、本検討においても同様の傾向が認められた。

謝辞：本研究は、原子力規制庁の委託研究「平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の高度化）事業」の一部として実施しました。独立行政法人 防災科学技術研究所 基盤強震観測網KiK-netの観測記録を使用しました。記して感謝します。

参考文献

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

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

Houtte *et al.*(2011), BSSA, Vol.101, pp.2926-2941,.

鶴来・ほか(2009), 日本地震工学会論文集, Vol. 9, No.1.

キーワード：スペクトル低減特性、 κ 、 f_{max} フィルター、地殻内地震

Keywords: Spectral decay characteristics, Kappa, f_{max} filter, Crustal earthquakes

時間領域における経験的地盤増幅特性を導入した統計的グリーン関数法

Stochastic Green's Function Method Incorporated Empirical Site Effects in Time Domain

*赤澤 隆士¹、入倉 孝次郎²*Takashi Akazawa¹, Kojiro Irikura²

1.一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所、2.愛知工業大学

1.Geo-Research Institute, 2.Aichi Institute of Technology

地盤増幅特性は、地点毎の地震動特性に大きく影響する特性であり、地震被害想定における震度や建物被害、人的被害等に大きな影響を与える。地盤増幅特性は、地表付近の地盤構造によって特徴付けられ、硬質地盤では揺れの振幅は小さく継続時間は短い、軟弱地盤では振幅は大きく揺れの継続時間は長い、という特性を有する。そのため、強震動予測を高精度で実施するためには、地盤増幅特性の振幅特性（振幅の大きさ）と位相特性（継続時間）を定量的に評価・抽出する必要がある。しかし、ほとんどの手法では、地盤増幅特性は対象地点における地震動の振幅スペクトルのみで評価される。赤澤・他(2009)は、ウェーブレット解析を利用し、複数の地震観測記録の地震動特性を時間領域で評価することで、地盤増幅特性の時刻歴特性（非定常地盤増幅特性）を定量的に抽出することができる経験的手法を提案した。この手法は、振幅に対して周波数に依存した平均的な経時特性（包絡形状）を与え、位相に対して利用地震観測記録に共通したコヒーレントな特性を与える。赤澤・他(2009)は、抽出された非定常地盤増幅特性を利用してMj3~5程度の中小地震の地震動波形をシミュレーションすることで、手法の有効性を示した。

本検討では、赤澤・他(2009)の手法により抽出される非定常地盤増幅特性を統計的グリーン関数法に導入し、大地震（例えば、2011年東北地方太平洋沖地震）時に得られた観測記録をシミュレーションする。非定常地盤増幅特性は対象地点直下の地震基盤からインパルス波が入射した際に対象地点に現れる波形として定義づけられることから、本検討では、統計的グリーン関数法を利用して地震基盤における地震動波形を計算し、それを赤澤・他(2009)の手法により抽出された非定常地盤増幅特性とコンボリューションすることで、検討対象地点の地震動波形をシミュレーションする。大地震に対してこのシミュレーション手法を適用した結果、得られている観測記録が適切に再現され、手法の有効性が確認された。

キーワード：地盤増幅特性、時間領域、統計的グリーン関数法、強震動予測

Keywords: Site Effects, Time Domain, Stochastic Green's Function Method, Strong Ground Motion Method

震源パラメータのばらつきを取り入れた広帯域地震動予測と観測記録の再現性

Broadband ground motion prediction considering variabilities of source parameters and comparison with observed records

*岩城 麻子¹、前田 宜浩¹、森川 信之¹、藤原 広行¹

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

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

強震動予測手法「レシピ」（地震調査委員会，2009）による特性化震源モデルでは、スケーリング則等に基づく平均的な震源の特徴のモデル化によって震源パラメータを決めている。そのため、レシピに基づいて計算される全国地震動予測地図では、平均的な予測地震動を提示している可能性が高く、破壊開始点の位置やアスペリティ配置設定等も含めて、未知の地震に対する予測としては現状ではまだ十分とは言えないという課題がある。この課題に対処するためには、過去の地震記録の解析により考慮すべき震源パラメータのばらつきの範囲を推定するアプローチ、および、統計的に発生させた多数の震源パラメータの組み合わせからなる震源モデル群を用いた多量の地震動計算によるアプローチが重要であると考えられる。

本研究ではこのようなアプローチへの取りかかりとして、震源パラメータのばらつきを取り入れた震源モデル群を用いて過去の地震に対する「地震動予測」を行い、予測地震動のばらつきと観測記録の再現性を調べる。まずは2000年鳥取県西部地震を対象とし、山田・他(2007)、Yamada et al. (2011)を参考にして、特性化震源モデルを構成するパラメータのうち偶発的ばらつき(aleatory variability)を持つと考えられるパラメータについて、レシピにおける平均的なパラメータ設定からのばらつきを正規分布で表現し、Latin Hypercube Sampling (LHS)によって震源モデル群を作成する。ばらつきを考慮するパラメータは①短周期レベル（地震モーメントの1/3乗との比）、②アスペリティのすべり量（断層全体のすべり量との比）、③破壊伝播速度（震源域媒質のS波速度との比）、④アスペリティ位置、⑤破壊開始点とする。①②③についてはレシピや先行研究を参考にして平均値と標準偏差を設定する。アスペリティと破壊開始点はランダムな位置に設定する。

予備検討として、アスペリティ位置と破壊開始点を固定した上で、短周期レベル、アスペリティのすべり量、破壊伝播速度に平均値または平均値+標準偏差の値を与えたケースについてそれぞれ震源モデルを作成し、接続周期を1秒とした3次元差分法と統計的グリーン関数法のハイブリッド法で広帯域地震動を計算した。震源距離およそ1 ~ 180 kmの40観測点における工学基盤相当の5%減衰擬似加速度応答スペクトルを用いた指標(Goulet et al. 2015)によって観測記録との比較や計算結果同士の比較を行った。全ての震源パラメータに平均値を設定したケース（基本ケース）による予測地震動は、周期1秒より長周期側で観測記録をやや過大評価、短周期側でやや過小評価する傾向があった。短周期レベルだけを平均+ σ としたケースでは、おおむね周期1秒よりも短周期側では観測点全体で基本ケースと比べて振幅が大きくなった。アスペリティのすべり量だけを平均+ σ としたケースは基本ケースとの差が他のケースと比べて小さかった。破壊伝播速度だけを平均+ σ としたケースでは、基本ケースとの差が観測点によって大きくばらつく傾向が見られた。

今後は、LHSによって全てのパラメータについてばらつきを考慮して生成した100ケース程度の震源モデル群を用いて地震動を計算し、予測地震動のばらつきの評価および観測記録との比較を行う。さらに、多くの過去の地震について同様の解析を行い、予測地震動のばらつきが観測記録の有するばらつきと同程度となるような地震動評価手法を検討することが必要である。

キーワード：地震動予測、震源モデル、ばらつき

Keywords: ground motion prediction, source model, variability

破壊伝播効果を考慮した疑似点震源モデルに関する検討

Introduction of rupture directivity effect into the pseudo point-source model

*長坂 陽介¹、野津 厚¹*Yosuke Nagasaka¹, Atsushi Nozu¹

1.国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

1.Port and Airport Research Institute

強震動シミュレーションのための震源モデルとして疑似点震源モデル（野津、2012）がある。このモデルは従来の特性化震源モデルよりシンプルながら、これまでに東北地方太平洋沖地震をはじめとするいくつかの地震に対して適用例があり、特性化震源モデルと同程度の再現性を得られることが報告されている。

疑似点震源モデルでは特性化震源モデルと異なり強震動を発生させるサブイベントを時空間的に分割せず、各サブイベントに対して1つのオメガスクエアモデルに従う震源スペクトルを与える。そのためサブイベントのサイズを直接的には考慮しないが、コーナー周波数を適切に与えることによりサブイベントのサイズを間接的に考慮している。また、重ね合わせによる人工的なスペクトルの谷が現れないことがメリットの1つとして挙げられる。

一方、2005年7月23日の千葉県中部の地震(M_w 5.9)への適用例（長坂ら、2015）では、全体的な再現性は良好であったが、震央西の東京湾西側の地点で震源での破壊伝播を考慮していないためと考えられる過小評価が見られた。現状の疑似点震源モデルは震源域での破壊伝播を考慮せずにフォワード側でもバックワード側でも同一の震源スペクトルを与えているため、フォワードディレクティビティが現れる地点では疑似点震源モデルによる結果は過小評価となり得る。照査用地震動への適用を考えると過小評価は大きな問題であり、解決が望まれる。

そこで、本研究では疑似点震源モデルに破壊伝播効果を導入することを目的とし、破壊伝播効果を表すためのコーナー周波数のモデル化について検討を行うこととした。

検討対象は既往研究でも用いた2005年7月23日の千葉県中部の地震(M_w 5.9)のK-NET, KiK-netにおける記録とし、まずは各地点でフーリエスペクトルの観測と計算結果の誤差(0.2-2Hz)が最も小さくなるようなコーナー周波数を調べた。その結果、既往研究で過小評価であった震央西側の地点は1.0Hz程度のコーナー周波数が最適であった。これは既往研究で全体的な最適値としていた0.75Hzより大きな値であり、この地域の観測記録にフォワードディレクティビティが表れていたことを示唆するものである。また、その周辺部では最適なコーナー周波数が小さくなっており、コーナー周波数を適切にモデル化することで再現性が向上することが期待された。

コーナー周波数モデルは、震源をユニラテラルに破壊する線震源と仮定し、破壊進行方向と地震波の進行方向のなす角(φ)によってコーナー周波数を変動させるもの考えた。強震動シミュレーションには震源パラメータとして破壊の長さ(L)、破壊伝播速度(V_r)、破壊進行方向が新たに必要となり、コーナー周波数は $(V_r/\pi L)/(1-V_r/V_s \cdot \cos\varphi)$ で表される。これは対象地点にとっての見かけの破壊継続時間が変わることによってコーナー周波数を変動し、フォワード側ではコーナー周波数が大きく、バックワード側では小さくなることを表している。検討としては、パラメータを様々に変動させることで最適なパラメータを決定し、コーナー周波数を0.75Hzとした既往の検討結果（長坂ら、2015）と再現性を比較することで検証を行う。また、波形インバージョンにより震源の破壊過程も調べ、得られたパラメータから予想される破壊過程と比較する予定である。

キーワード：強震動シミュレーション、疑似点震源モデル、破壊伝播効果、コーナー周波数

Keywords: strong ground motion simulation, pseudo point-source model, rupture directivity effect, corner frequency

High Frequency Ground Motion Simulation of an Un-happened ShanChiao Fault in Northern Taiwan from an ETF-Based Site Correction Method for Stochastic Simulation

*Jyun-Yan Huang¹, Kuo-Liang Wen^{1,2}, Che-Min Lin¹, Chun-Hsiang Kuo¹, Chun-Te Chen³, Shuen-Chiang Chang²

1.National Center on Research Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan , 2.National Central University, Chung-Li, Taiwan, 3.Institute of Earth Science, Taipei, Taiwan

Strong motion generation area (SMGA) was mentioned as an important source parameter for high frequency strong motion simulation (Kurahashi and Irikura, 2011) that was identified as different asperity distribution from traditional source inversion results. Meanwhile, high frequency strong motion simulation is very important in application of engineering seismology. Site correction method from Empirical Transfer Function (ETF, Wen et al., 2013) for stochastic finite fault simulation was applied in Northwestern Taiwan for 1999 ChiChi Taiwan earthquake as high frequency simulation. Except the traditional inverted asperity model was used, random asperity distribution ones were test from Huang et al. (2014). In this study, different construction method of random asperity models followed Japan's Recipe (Irikura et al., 2004; NIED, 2009) are constructed for the same event first to check near fault response for randomly SMGAs. ShanChiao fault is the most important fault system in northern Taiwan owing to it could probably generate earthquake directly hit the Capital urban area. Finally, this study will try to identify possible ground shaking level for Shanchiao Fault system. The simulation results could help to preliminary plan of disaster prevention issue or building design problems in the future.

Keywords: Stochastic Simulation, Empirical Transfer Function, SMGA, ShanChiao Fault

大規模並列計算による2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の長周期地震動シミュレーション
Simulation of long-period ground motions for the 2011 Tohoku earthquake (Mw9.0) using
large-scale parallel computing

*笠松 健太郎¹、加藤 研一¹

*Kentaro Kasamatsu¹, Kenichi Kato¹

1. (株)小堀鐸二研究所

1. Kobori Research Complex INC.

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、KiK-net此花 (大阪) をはじめとする日本全国の地震観測点で長周期の地震動記録が得られた。各地で観測した長周期地震動の再現性や伝播過程を明らかにすることは、今後、深部地盤のS波速度構造の高精度化や、南海トラフ等で発生する大地震の強震動予測を検討する上で欠かせない。本検討では、日本全国を対象領域とした長周期地震動シミュレーションのために、領域分割に基づいて並列計算を行う三次元差分法の地震動計算コードを作成した。作成したコードを用いて3.11本震による長周期地震動シミュレーションを行い、まずは首都圏で得られた周期2~10秒の観測記録の再現を検討した。

三次元差分法による地震動の並列計算を効率的に実施するために、3台の計算機を配備し、各ノードにintel製のCPU (E5-2690v3, 12コア) を2つ、192Gbyteのメモリを搭載した。伝送速度40GbpsのInfinibandで3ノードを接続し、MPIを用いたノード間通信によって最大72並列を可能とする計算環境を整備した。並列計算は、各ノードに搭載した多数のコアを有効活用するために、3次元の領域分割により行い、ノード内通信もMPIを用いた。簡単な例題を対象に並列化効率を調べたところ、32並列の場合に約15倍のスピードアップが得られた。16ノードで構成される別のPCクラスタ (16ノードx2CPUx8コア) を用いた場合では、64並列の場合に約60倍のスピードアップが得られ、全体の実行時間をほぼ期待通りに短縮できることを確認した。

3.11本震の長周期地震動シミュレーションは、周期2~10秒の震源特性に対する点震源の適用性を検討することを目的として、野津(2012)による疑似点震源モデルを用いて行った。全ての点震源についてすべり角90度を仮定し、タイムウィンドウ数を1つとしたTriangle型の震源時間関数を用いた。ライズタイムは野津(2012)のコーナー周波数に基づいて設定した。深部地盤のS波速度構造モデルは地震調査研究推進本部(2012)を用い、水平600kmx300km、上下約100kmを計算領域として、水平0.2km、上下0.1~1.0kmのグリッド間隔で離散化した。計算に用いた合計の格子点数は約16億Gridであり、時間長を300s、時間間隔を0.005sとした計60001ステップの計算を2日弱で終えた。観測記録とシミュレーション結果の周期2~10秒を比較したところ、点震源を用いていることもあり、首都圏で観測した周期6秒程度以上の振幅を過小評価するが、スペクトルの形状は良く似た結果が得られた。観測記録には茨城県南部で励起した周期6~10秒の表面波が首都圏に伝播した様子が認められるが、振幅を除けばその特徴も概ね再現されることが分かった。引き続き、3.11本震の震源モデルの調整と、長周期地震動の伝播特性の分析について検討予定であると共に、作成した並列計算コードを地球シミュレータに実装中である。

キーワード：並列計算、差分法、2011年東北地方太平洋沖地震、長周期地震動

Keywords: parallel computing, finite difference method, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, long-period ground motion

首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト

Benchmark Test for Strong Motion Simulation in The Tokyo Metropolitan Area.

*石川 理人¹、久田 嘉章²

*ayato ishikawa¹, Yoshiaki Hisada²

1.工学院大学大学院、2.工学院大学

1.Graduate school , Kogakuin University, 2.Kogakuin University

首都直下地震を対象とした強震動予測手法に関するベンチマークテストを実施した。STEP7では2005年の千葉県北西部地震を対象として観測記録との比較も行った。STEP8では想定首都直下地震を対象とした強震動予測を行った。

キーワード：強震動予測手法、ベンチマークテスト

Keywords: Strong ground motion prediction, Benchmark test

地表における速度応答スペクトルの距離減衰式の提案

A New Attenuation Relationship for Velocity Response Spectra at the surface

*野田 朱美¹、松浦 律子²、古村 美津子²、田中 裕人¹、高浜 勉¹*Akemi Noda¹, Ritsuko S. Matsu'ura², Mitsuko Furumura², Hiroto Tanaka¹, Tsutomu Takahama¹

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

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

松浦ほか(2011)は、速度応答スペクトルの距離減衰式に、異常震域等による補正として、観測点*i*におけるプレートの深度 δ_i を用いる手法を提案した。その後蓄積されたK-NET, KiK-NETの観測例を追加することによって、マグニチュード範囲はMw5.4~8.7と地震規模のレンジを広げることができた。そこで、今回はInter Plate, Intra Plate, Very Shallow(VS), と地震を3タイプにグルーピングして、各グループに対して、対象周期は0.1~10秒、震源距離には上限を設けず利用可能なデータはすべて解析対象として、M6~9程度の範囲で遠距離まで利用できる距離減衰式を求めた。なお、利用データは、PGV0.1cm/s以下のデータは除外するとともに、地震規模に応じて長周期側を打ち切ることによって、S/Nの悪いデータの混入を防いでいる。

減衰式の形は、個別の地震毎にAICで選択された最適解をグループ内で比較して、タイプ毎に決定した。また、Yabuki and Matsu'ura(1992)を参考として、係数の値を周期の関数として、キュービックBスプライン関数で展開して線形インヴァージョンで求める手法によって一度に決定した。従来の工学的な式の多くは仮想的な基盤上での応答スペクトルの値を与えるが、今回我々の式では、地表での速度応答スペクトルの平均的な値が求まる。用いたのはK-NETとKiK-NETなので、日本で商用電源が確保できる地域の平均的地盤に対する値と言えよう。

モーメントマグニチュード Mw_j の*j*-地震に対する*i*-観測点の周期*t*での速度応答スペクトル Sv_{ij} は、観測点特有の応答 e_{ij} を含めて、InterとIntraに対しては、(1)式の形、VSに対しては(2)式の形で統合できた。

$$\log Sv_{ij}(Mw_j, \Delta_{ij}, \delta_i, t) = A_w(t) \cdot Mw_j + A_c(t) - \beta(t) \log(\Delta_{ij}) - d(t) \delta_i + e_{ij}(t) \quad \text{式 (1)}$$

$$\log Sv_{ij}(Mw_j, \Delta_{ij}, t) = A_w(t) \cdot Mw_j + A_c(t) - b(t) \Delta_{ij} - \beta(t) \log(\Delta_{ij}) + e_{ij}(t) \quad \text{式 (2)}$$

従来の工学的基盤などにおける距離減衰式では必ず組み込まれている、震源距離 Δ_{ij} に比例する $b(t)$ の項は、(2)式では特に短周期において近距離での頭打ちを表す項として働いている。この項が(1)式に無いのは、InterとIntraの地震群には、近地の観測データが殆どなく、統合インヴァージョンでは近距離での頭打ちの部分を取り入れる利得が十分に得られないことと、従来の式では理論的予察から定数としてある、震源距離の対数に比例する項の係数 β を、周期の関数としたこととによる。なお、 b の値は周期数秒以上ではほぼゼロとなった。

今回の検討の過程で、プレートの深度 δ は、PAC, PHSともに、深さの限度を設ける頭打ち方式が回帰を改善することが判った。そこで、式の形とプレート深度の最大値とを、地震毎・周期毎の回帰でAICによって同時に選択した。この作業によって、プレート深さによる項は、従来期待されていた、異常震域と同様にHigh Q・High Vのスラブを伝わる波による効果の補正に留まらず、日本列島の形成とも関係が深い地質的特徴である、東日本の日本海側が太平洋側に比べて減衰が大きいこと、飛騨山脈あたりを境に東西で減衰傾向が異なること、まである程度織り込める便利な項であることが判った。例えばPACの深度は、250km以上は250kmと置き換えると回帰が改善する。但し b と同様、(1)式の d も周期数秒以上では殆ど寄与しなくなる。また、VSの地震に対しては d 項は不要であった。

今回求めた距離減衰式は、地表での応答スペクトルの距離減衰式である。この式に対する観測点毎の残差 $e_{ij}(t)$ は、松浦ほか(2010)で示したように、地震のタイプや規模が違ってても、値も周期変化の形も似て $e_{ij}(t) \doteq e_i(t)$ として扱える。また、 $e_i(t)$ は経験的にサイトの微動観測から求まるH/Vの値で代替できることが判っている。従って観測波形の無い場所に対してこの式から応答スペクトルを予測する工学的利用には、地盤

種別やAVS30等の情報がなくても、応答スペクトルを予測すべきサイトのH/Vを実測から求めることで、工学的にも利用可能である。

本研究は文部科学省の委託によって実施された。

キーワード：地震タイプ別速度応答スペクトル距離減衰式、プレート深さ依存の上限設定、AICによる選択、B-スプライン関数展開による逆問題の線形化

Keywords: Attenuation relationships of Velocity Response Spectra, Upper limit of the effective plate depth at a site, Selection by AIC, linear inversion method with cubic B-spline expansion

速度応答スペクトルの距離減衰式の妥当性の検証

Validation of Attenuation Relationships for Velocity Response Spectra, Comparing with Observed Records

*田中 裕人¹、野田 朱美¹、高浜 勉¹、古村 美津子²、松浦 律子²*Hiroto Tanaka¹, Akemi Noda¹, Tsutomu Takahama¹, Mitsuko Furumura², Ritsuko S. Matsu'ura²

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

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

野田・他(2016)では、広い周期帯域、広い距離範囲に適用できる速度応答スペクトルの距離減衰式を構築した。この式は、式の係数はもちろんのこと、式の形もAICで決めたものである。この式の妥当性を検証するため、観測記録や既往の距離減衰式と比較した。

検討に用いた地震は、プレート境界の2地震(2003年十勝沖、2011年東北地方太平洋沖)、スラブ内の3地震(2003年宮城県沖、2004年紀伊半島南東沖、2011年宮城県沖)、および、地殻内の3地震(2000年鳥取県西部、2005年福岡県西方沖、2008年岩手宮城内陸)の計8地震である。いずれの地震も、Mwは6.6以上で、K-NET、KiK-net観測点により多数の観測記録が得られている。比較対象の既往の距離減衰式には、内山・翠川(2006)、佐藤(2008、2010)、Morikawa and Fujiwara(2013)を用いた。これらの距離減衰式は加速度応答スペクトルに対する式であるので、比較の際は、擬似速度応答スペクトルに変換した。各距離減衰式で求められている各観測点の増幅率を考慮して地表応答を求め、周期0.1~5.0秒で比較した。距離範囲などの条件は各距離減衰式の適用条件に留意して設定した。

比較の結果から、野田・他(2016)は震源距離200km以上の広い距離範囲まで観測記録をほぼ説明できること、また、0.1~5.0秒の広い周期帯域で観測記録に対する残差のばらつきが小さいことが分かった。これに対し、既往の距離減衰式の短周期側では、震源距離が150km程度まではほぼ観測を説明できるが、遠距離ではばらつきが大きくなる傾向がみられた。野田・他(2016)が遠距離まで精度良く説明できている理由として、異常震域等の補正を担うプレートの深度に比例する減衰項の有効性や、震源距離の対数に比例する減衰項の係数を周期ごとに回帰して求めている点が挙げられる。後者は、震源距離の対数に比例する減衰項の係数を理論的予測から定数(アприオリに1と仮定されていることが多い)で固定することが、日本の場合には適切ではない可能性を示唆している。また、野田・他(2016)が広い周期帯域でばらつきの小さい理由は、距離減衰式に対する観測データの周期ごとの残差から求めた各観測点の増幅率が有効に働いていることにある。

本検討は文部科学省からの委託によるものである。

参考文献

Morikawa, N. and H. Fujiwara, 2013, A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, *Journal of Disaster Research*, 8, 878-888.

野田朱美・松浦律子・古村美津子・田中裕人・高浜勉、2016、地表における速度応答スペクトルの距離減衰式の提案、地球惑星連合同大会2016年。

佐藤智美、2008、地殻内地震に対するP波部・S波部・全継続時間の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集, 632, 1745-1754.

佐藤智美、2010、日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集, 647, 67-76.

内山泰生・翠川三郎、2006、震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式、日本建築学会構造系論文集, 606, 81-88.

キーワード：距離減衰式、速度応答スペクトル

Keywords: attenuation relationship, velocity response spectra

Probabilistic Seismic Hazard in Low Seismicity Region: Kalimantan, Indonesia

*Sri Hidayati¹, Athanasius Cipta², Amalfi Omang¹

1.Center for volcanology and Geological Hazard Mitigation, 2.Australian National University

The island of Kalimantan lies upon the southeastern margin of the greater Eurasian plate. The features that affected Kalimantan came from its great tectonic activity during Late Paleozoic-Pliocene. The absence of present-day major earthquakes makes the island is considered as a relatively stable block. In the past decades, seismic hazard analysis in Kalimantan is not prioritized due to its low seismicity. However, two moderate yet destructive earthquakes hit the island in 2015: the 6.5 Mw Sabah (Northern part of Kalimantan, Malaysia) earthquake on June 5, and the 6.1 Mw Tarakan (Eastern part of Kalimantan, Indonesia) earthquake on December 21. It seems that the eastern and northern parts of the island are subject to potential hazard from small to medium sized earthquakes. Those recent earthquakes show that Kalimantan is not sterile from destructive earthquakes. Hence, we must remain alert to the possibility of such an earthquake disaster, as it had happened last year and 95 years ago. In addition, more than 18 million people living in this island should be considered.

In order to reduce earthquake disaster, the Kalimantan seismic hazard map was created using probabilistic approach called PSHA. The uncertainties of size, location and time of earthquake sources and GMPE were taken into account in calculation of acceleration. Seismic hazard analyses involve the quantitative estimation of ground-shaking intensity that was obtained by converting the acceleration on 0.3 second RSA (Response Spectral Acceleration) having 10% probability of exceedance in 50 years (500 years return period). Based on ground-shaking intensity, the hazard level was divided into four classes: they are very low ($MMI < V$), low ($V \leq MMI \leq VII$), moderate ($VII < MMI \leq VIII$), and high ($MMI > VIII$) respectively. Important to note, this classification is primarily intended to non-engineered building, a common building in Indonesia.

The hazard level in Kalimantan is mainly controlled by diffuse zones of deformation (background seismicity) while Palu Koro and/or North Sulawesi subduction affected eastern tip of Mangkalihat Peninsula. The inclusion of site amplification is another important aspect that included in the hazard map, since it can change the hazard level significantly.

Keywords: PSHA, Kalimantan , Low Seismicity Region, Seismic Hazard Map

The Impact of Westward Extension of Flores Back-Arc and The Inclusion of an Active Crustal Fault in Southeastern Bali to Bali Seismic Hazard Map (Preliminary Results)

*Amalfi Omang¹, Sri Hidayati¹, Irwan Meilano², Asdani Soehaimi³

1.Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Indonesian Geological Agency,

2.Institute of Technology Bandung, 3.Center for Geological Survey, Indonesian Geological Agency

Recent study utilising Global Positioning System (GPS) measurements of surface deformation conducted in western area of Lesser Sunda Islands, show the westward extension of Flores Back-Arc for 300 km onshore into East Java. Another recent study, utilising geology, geophysics and geodetic methods reveal indication of an active crustal fault in southeastern Bali which pass Denpasar, the capital city of Bali Province and the most dense city in its province. The Implications of these findings are the increasing hazard and risk levels in Northern and Southeastern parts of Bali. Seismic hazard analyses (deterministic and probabilistic) using OpenQuake show increasing hazard levels compared to the previous seismic hazard map of Bali. The direct impacts are the number of people and buildings affected by the inclusion of these seismic sources increase significantly. The preliminary results show the need for a careful evaluation of the infrastructures and contingency plan within areas which affected by these seismic sources in order to ensure the safety of the people and to reduce loss of infrastructures.

Keywords: Back-Arc, Active crustal Fault, Seismic Hazard Analyses, OpenQuake

過去最大震度の面的分布図作成の提案

A proposal for creating a maximum seismic intensity map of past damaging earthquakes

*小林 励司¹、中本 浩一²*Reiji Kobayashi¹, Koichi Nakamoto²

1.鹿児島大学大学院理工学研究科、2.鹿児島大学理学部

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

1995年兵庫県南部地震を契機に、地震動ハザードを示すものとして地震調査研究推進本部が「全国地震動予測地図」（2008年までは「全国を概観した地震動予測地図」）を作成し、公表している。これには、大きく分けて2つの問題点がある。1つめは、確率が住民に理解されにくいことである。高い確率は危機感を持たれやすいが、低い確率では危機感が薄くなる可能性がある。また実感が伴わないことも挙げられる。2つめは、手法の不確定さが大きく、検証も不十分であり、得られる結果の信頼性が低いことである。実際に初期の「全国を概観した地震動予測地図」とそれ以降の被害地震の対応を見ると、確率の低いところで大きな揺れに襲われているケースが多い。2011年東北地方太平洋沖地震を契機に手法が見直されたが、改善されたかどうかを検証するのはまだ時間がかかるだろう。

そこで、より住民に理解されやすく、不確定さの小さいと思われる、過去最大震度の面的分布図作成を提案する。これまで分かっている震度分布は観測点における震度のみを示しており、観測点が少ないと実感しにくいと思われ、また地盤条件による増幅の違いが分からない。面的な分布図にすることによって、自分の身の回りの、その土地その土地の過去の揺れを実感しやすくなる。この分布図で震度の大きい地域の住民にとっては、我がことと捉えやすくなるのではないかと思われる。特に自分の生まれる前の地震については、その存在すら知らない住民も多いと思われる。その一方で、震度の小さいところに関しては、将来も安全であるとは限らないことは、十分に周知する必要がある。その意味では、この過去最大震度の面的分布図は、補足的に使うことがのぞましい。

本研究では、その試作として著者の1人の実家のある熊本県の明治以降の被害地震6つに絞って作成を行った。手法は、森川ら（2010）の距離減衰式を使って簡便的に行った。距離の計算には、断層モデルが推定されているものは断層面からの距離を使い、分からないものは震源からの距離とした。標高は国土交通省国土制作局で公表されているものを用いた。地盤増幅の計算に必要な30 m平均S波速度（AVS30）は地震ハザードステーション（J-SHIS）で公開されているものを用いた。標高とAVS30はいずれも5次メッシュ（250 m格子）だったので、震度の面的分布図も5次メッシュで計算を行った。地震ごとについて、震度を求めたあと、メッシュごとに最大震度を判定し、それを地図に示した。

広い範囲で震度4以上となった。これは1946年南海地震と1968年日向灘地震の影響が大きい。不確定さを考えると、住民相手には、少なくとも震度5弱程度の揺れには備えておいたほうが良いと言えるだろう。熊本市を中心に大きな震度の分布が見られ、最大で震度6強となっている。これは1889年熊本地震によるものである。

キーワード：震度、防災

Keywords: seismic intensity, disaster prevention

Amplification characteristics in Kanto district estimated from waveforms of the 2015 Ogasawara Deep earthquake with Mw8.0
Amplification characteristics in Kanto district estimated from waveforms of the 2015 Ogasawara Deep earthquake with Mw8.0

植田 直樹¹、*山田 卓司²、河原 純²
Naoki Ueta¹, *Takuji Yamada², Jun Kawahara²

1.茨城大学理学部（学生）、2.茨城大学理学部

1.College of Science, Ibaraki University, 2.Faculty of Science, Ibaraki University

A deep large earthquake with Mw8.0 took place beneath the Ogasawara islands on May 30, 2015. This earthquake caused a large shaking in Kanto district in Japan with the JMA intensity of 4 to 5 major, which provides an opportunity to investigate the amplification characteristics in the region.

We analyzed waveforms of 56 KiK-net sites in Kanto district and investigated the spectral ratio of the observed waveforms at stations on the surface and on the bedrock in the borehole at each site. We first picked arrival times of P and S waves and cut the waveforms from -10.00 to 30.95 s after the arrivals. We then calculated spectra of the waveforms and obtained the spectral ratios of P and S waves. We calculated average values of spectral ratios in the frequency band from 0.1 to 1 Hz (Fig. 1a) and attributed them to amplification factors at each KiK-net station.

We first investigated the relationship between the observed amplification factors and distances of surface and borehole seismometers. The relationship showed a good proportionality with a correlation coefficient of 0.744, indicating that the factors have a strong correlation with the thickness of the sediments the same as results of previous studies. We then calculated the normalized amplification factors (NA factors) for every 100 m of the distance between surface and bedrock stations to remove the effect associated with different thickness of sediment at each site (Fig. 1b). The NA factors were around 1 for sites at mountain regions as expected. In the Kanto plain, only sites around the Tone river had high NA factors.

Acknowledgements: We used KiK-net waveform data.

キーワード：スペクトル比、KiK-net、関東地方

Keywords: Spectral ratio, KiK-net, Kanto district

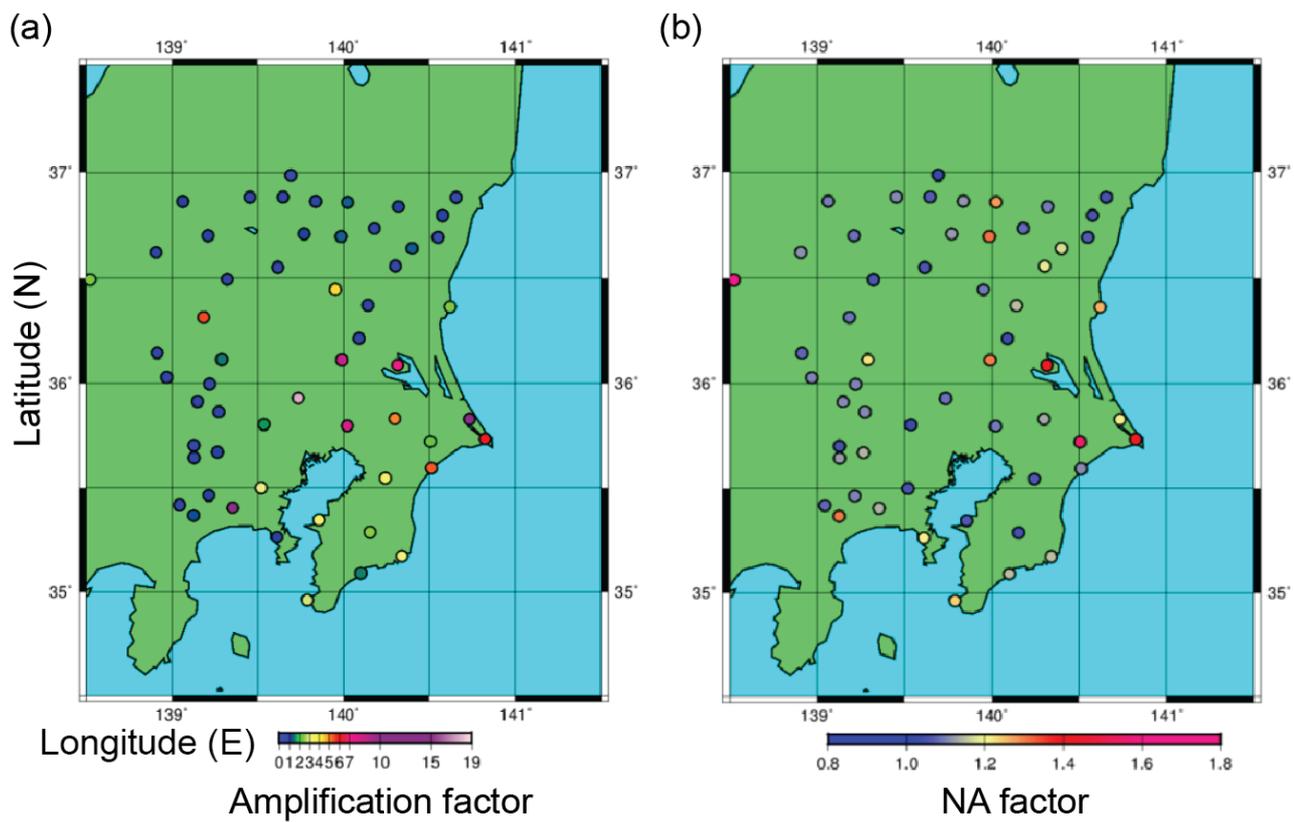


Fig. 1 (a) Amplification factors at KiK-net sites. (b) Normalized amplification factors.

関東平野北部における長周期地震動の大きさと卓越周期の震央方位依存性

Variations in strength and predominant period of long-period ground motions around the northern Kanto sedimentary basin due to epicentral directions

*鍛治川 謙吾¹、吉本 和生¹、武村 俊介²

*Kengo Kajikawa¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

1.横浜市立大学、2.防災科学技術研究所

1.Yokohama City University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

はじめに

関東堆積盆地では周期数秒以上のやや長周期地震動（以下、長周期地震動）が頻繁に観測され、その卓越周期は観測地点の地震基盤の深度と関係があることが指摘されている（例えば、Yoshimoto and Takemura, 2014）。一方で、複雑な地震基盤構造の影響で震央方位による長周期地震動の励起の大きさの差異（震央方位依存性）が現れることが報告されている（例えば、湯沢・南雲, 2012）が、長周期地震動を構成するLove波やRayleigh波の励起過程とその震央方位依存性についての詳細は不明であり、高密度な地震観測網で得られた波形データを用いた調査研究が求められている。

そこで本研究では、関東堆積盆地内に敷設されたK-NET/KiK-netおよびSK-net観測点の強震記録を用い、主に関東堆積盆地の北部における水平動記録と上下動記録を独立に解析することにより、長周期地震動の震央方位別の大きさと卓越周期の特徴を詳しく調べた。

解析に使用した地震と解析方法

関東堆積盆地の周囲で発生した震央方位の異なる8つの浅発地震を解析対象とした。F-netのCMT解では、 M_w は5.8~6.9、震源の深さは8 km以浅であり、逆断層型または正断層型の横ずれ型でない成分を多く含んでいる。S波の後続に発現する長周期地震動を解析するため、震央距離150 km未満の観測点では発震時刻から100秒以上記録されている強震記録、震央距離150 km以上の観測点では発震時刻から200秒以上記録されているまたは記録時間が150秒以上である強震記録のみを解析に使用した。これらの条件を満たす地震波形について、速度波形のフーリエスペクトルから長周期地震動の大きさと卓越周期を評価した。

長周期地震動の大きさと卓越周期の震央方位依存性

上記の解析方法により求められた水平動と上下動のフーリエスペクトルを比較すると、どの地震についても、上下動と比べ水平動においてスペクトル振幅が大きく卓越周期も長いことが分かった。これは、関東堆積盆地内では、Love波の振幅がRayleigh波の振幅よりも卓越するためと考えられる。卓越周期は、どちらの成分についても地震基盤が深くなるほど長周期化することが確認された。しかしながら、この特徴が見られるのは地震基盤の深さが1.5~2 km程度までであり、それより地震基盤が深くなると観測される卓越周期は水平動で6.3秒程度、上下動で4.9秒程度と概ね一定値を示した。この観測現象も、関東堆積盆地内では、水平動にはLove波の振幅、上下動にはRayleigh波の振幅が卓越するためと考えられる。

関東堆積盆地北部における長周期地震動の振幅と卓越周期を2004年新潟県中越地震と2011年福島県浜通り地震で比較したところ、振幅スペクトルの大きさは同程度であったが、卓越周期には大きな違いが見られた。地震基盤の深い（2 km以上）地点における卓越周期は、2004年新潟県中越地震では水平動で6.6秒程度、上下動で5.2秒程度であるが、2011年福島県浜通り地震では水平動で5.6秒程度、上下動で4.6秒程度であった。この解析結果は、長周期地震動の励起が上下動および水平動ともに地震の震央方位に依存することを示唆するものである。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所のK-NET/KiK-netの波形記録およびF-netのCMT解を使用しました。また、首都圏強震動総合ネットワークSK-netの波形記録を使用しました。

キーワード：長周期地震動、関東堆積盆地、震央方位依存性、卓越周期、表面波

Keywords: long-period ground motion, Kanto sedimentary basin, variation due to epicentral direction, predominant period, surface wave

関東平野における長周期地震動の震源方位特性とその時系列変動

Source Azimuthal Dependence of Long-Period Ground Motions in the Kanto Basin and the transition of time-history

*野寄 真徳¹、津野 靖士²、山中 浩明³、地元 孝輔³

*Masanori Noyori¹, Seiji Tsuno², Hiroaki Yamanaka³, Kosuke Chimoto³

1.前東京工業大学大学院、2.鉄道総合技術研究所、3.東京工業大学大学院

1.Tokyo Institute of Technology (Former), 2.Railway Technical Research Institute, 3.Tokyo Institute of Technology

2011年東北地方太平洋沖地震の際、関東平野全域で長周期地震動が観測され、超高層建物にも大きな揺れが生じた。その本震や余震等のデータ分析により、関東平野で観測される長周期地震動の増幅特性が震源の方位によって異なることが報告されている(湯沢・南雲, 2012; 津野ほか, 2012)。津野ほか(2012)は、東北地方太平洋沖地震とその余震記録の解析を行っており、地中と地表で観測された地震記録の速度応答スペクトル比から算出されたサイト増幅特性は、周期3秒以上の地震動に対して震源の位置に依存すると報告している。

著者らは、関東平野周辺で発生した10地震の観測記録と地震動シミュレーションの結果を用いて、関東平野における長周期地震動の震源方位特性について検討(Noyori et al., 2015)を行ってきた。その結果、関東平野中心部の観測記録において、関東平野から北西の新潟方面または南西方向の静岡方面に震源が位置する地震に対して周期3秒以上の長周期地震動が卓越しやすく、地震動シミュレーションの結果においてもこの傾向が得られることが分かった。本報告では、関東平野で観測されたKiK-netの記録を一定時刻ごとに区切り地表/地中の速度応答スペクトル比を求め、震源方位特性の時系列変動について検討をした。

キーワード：長周期地震動、震源方位、サイト増幅特性、関東平野

Keywords: Long-period ground motion, Source azimuth, Site effect, Kanto Basin

Equivalent-Linear Site Response Analysis in the Kanto Plain

*Rami Ibrahim¹, Tetsu Masuda¹, Kazuki Koketsu¹, Takeshi Hirose², Hideaki Takaku²

1.Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 2.East Nippon Expressway Company Limited

The Kanto plain, the largest and most populated plain in Japan, is covered with thick marine sediments that can cause large amplifications of seismic waves during a big earthquake. The sediments thickness over the engineering base reaches to several hundred meters under the central part of Tokyo Metropolitan area. In this study, we evaluated the nonlinear site responses of layers between engineering base and free surface in the Kanto plain. We adopted an equivalent linear approach using DYNEQ program developed by Yoshida and Suetomi (1996) for the site response analyses. We use stochastic Green's function method to generate synthetic waveforms from 16 hypothetical earthquake source models located in the crust, and on the interface or within the of subducting Philippine Sea Plate. The simulations were done between the seismic sources and the engineering base where shear-wave velocity is equal to 500 m/s. Synthetic waveforms on the engineering base were used as input motion in DYNEQ program. Shear modulus versus strain ($G/G_0-\gamma$) and damping versus strain ($h-\gamma$) relationships of Central Disaster Management Council of Japan (CAO) are recognized to express the dynamic shear deformation of soil (clay, sand, and gravel). Shallow shear-wave velocity structural models above the engineering base were also provided by CAO. Resultant waveforms on the free surface show a systematic dependence on the thickness of soft structures above the engineering base. Large amplifications are dominant at short periods above shallow soft sediments, whereas peak amplitudes shifted to longer periods for sites located above deep soft sediments. Nonlinear site effects, inferred by de-amplification of the site responses, were typically obvious at short periods of approximately 0.2 s and shorter. Predominant periods of the soil was calculated based on empirical relations and compared to those obtained from the spectral ratio. Both predominate periods show disagreement at sites where nonlinear site responses are expected. The large deformations are mostly concentrated in shallow 30 m of soil inferred from shear strain analysis. Our analyses showed considerable effects of nonlinear response of surface layers to large seismic inputs on the engineering base. Our results reconfirm the importance of nonlinear soil effect consideration in risk assessment of structures.

Keywords: Equivalent linear approach, Site effects, Tokyo Meteropolitan Area

The Effects of Thick Sediments to Long-period Ground Motion in Northern China

*Yiqiong Li¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, China

The study of ground motion is a cross research field between earth science and engineering science. Theoretical seismologists are more concerned about propagation path and the effect of seismic focus, while engineering seismologists are more concerned with the ground effect. Studies have shown that the western Taiwan coastal plain is influenced by long-period ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, and engineering structures with natural vibration long-period are damaged by strong surface wave in the western coastal plain. The thick sediments in the western coastal plain are the main cause of the propagation of strong long-period ground motion. The thick sediments similar to in the western coastal plain also exist in northern China.

It is necessary to research the effects of thick sediments to long-period ground motion in northern China. The numerical simulation of ground motion based on theoretical seismology is one of important means to study the ground motion. We will carry out the numerical simulation of long-period ground motion in northern China by using the existing tomographic imaging results of northern China to build underground medium model, and adopting finite fault source model for wave input. In the process of simulation, our previous developed structure-preserving algorithm, symplectic discrete singular convolution differentiator (SDSCD), is used to deal with seismic wave field propagation. Our purpose is to reveal the formation and propagation of long-period surface wave in thick sediments and grasp the amplification effect of long-period ground motion due to the thick sediments. It will lay the foundation on providing the reference for the value of the long-period spectrum during determining the ground motion parameters in seismic design. This work has been supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41204046, 42574051).

Keywords: Thick Sediments, Long-period Ground Motion

地震波形の広帯域性を考慮した三次元速度構造インバージョン

A multi-period inversion of broadband seismic waveforms for 3-D velocity structures

*郭 雨佳¹、瀨瀬 一起¹*Yujia Guo¹, Kazuki Koketsu¹

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

信頼度の高い長周期地震動の予測や、地震波の長周期成分を用いた正確な震源過程解析を行うには、三次元速度構造モデルの高度化が必要不可欠である。また、堆積盆地や海溝沿いの付加体などの三次元速度構造が地震波の長周期成分の伝播に複雑な影響を与えることが、多くの既往研究において指摘されている。そのような影響を考慮に入れるべく、地震波形そのものを用いた三次元速度構造のインバージョンは非常に有効な手法である。波形インバージョンに基づく三次元速度構造の推定は、これまでに先行研究がいくつかある。Aoi (2002) は三次元堆積盆地の形状を波形インバージョンによって求める手法を提案した。Iwaki and Iwata (2011) は実際の観測記録を使用して、Aoi (2002) の手法を大阪平野の堆積盆地構造に適用した。引間 (2006) は速度層の層厚を未知パラメータとして、震源と観測点を結ぶ二次元断面で速度構造を推定し、その結果を補間して三次元速度構造モデルを作成する手法を開発し、実観測記録に適用した。また、南カルフォルニアでは、波動場とアジョイント法を組み合わせたアジョイント・トモグラフィによる地震波速度や非弾性減衰の推定の事例もある (e.g., Askan and Bielak, 2008; Tape *et al.*, 2010)。

長周期地震動の評価では、周期2-3秒から20秒程度までの周波帯域における地震波が重要である。そこで、本研究は、このような広い周波帯域の観測波形を再現できる三次元速度構造を、波形インバージョンによって推定する手法を提案する。本手法では10-20秒、次に5-20秒、最後に2-20秒というように、対象とする周期を複数に分割する。長周期側の成分からインバージョンを開始し、得られた暫定解を次の短周期成分を含む波形インバージョンでの初期モデルとして利用し、対象周期全体をカバーする帯域の波形インバージョンまでこれを繰り返す。インバージョンの未知パラメータは引間 (2006) と同様、層内の物性値が一定な複数の速度層の各層の層厚とし、非線形のダンプ付き最小二乗問題を線形近似して反復法で解く。本手法は、長周期側成分のインバージョンでインバージョン節点の間隔を粗く設定できる (e.g., Bunks *et al.*, 1995) うえ、短周期側成分を含んだ波形インバージョンでの解の収束が速いことから、従来のインバージョンと比べてフォワード計算の回数を削減できる利点がある。また、多数の速度層からなる複雑な速度構造に対しても、安定的に解が求まる。

インバージョンに必要な偏微分波形は差分近似で求め、その際のフォワード計算はKoketsu *et al.* (2004), Ikegami *et al.* (2008) によるボクセル有限要素法を使用する。また、インバージョンの反復の安定化を図るため、修正Marquardt法を使用する。各反復では、ヤコビ行列を特異値分解して解を求める。広帯域波形に対する再現性および地震波の波長等に基づく適切な周波帯の分割方法など、本手法の妥当性を確認するための数値実験を実施した。発表ではその結果について報告する。

キーワード：速度構造モデル、波形インバージョン、広帯域地震波形、ダンプ付き最小二乗法、非線形問題

Keywords: Velocity structure model, Waveform inversion, Broadband seismic waveform, Damped least-squares method, Non-linear problem

大分県の震度計データを用いたH/V, R/Vスペクトルの算定と既往速度構造モデルの検討
Performance Check of the Velocity Structure Model of Oita Prefecture Using Strong Motion
H/V and R/V Spectral Ratio

*吉見 雅行¹、山田 雅行²

*Masayuki Yoshimi¹, Masayuki Yamada²

1.産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2.株式会社ニュージェック

1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.NEWJEC Inc.

大分県の自治体震度計49点およびK-NET, KiK-netの地震波形記録について、H/VスペクトルおよびR/Vスペクトルを算出した。解析対象は自治体震度計で波形記録が得られた2005年3月から2015年11月までの全68地震である。主な地震の震源域は、2005年3月20日福岡県西方沖地震(M7.0)とその余震、2007年6月別府湾北西部付近の浅い地震(最大M4.9)、伊予灘付近のやや深い地震(最大は2014年3月14日のM6.2)、大分県中部の深い地震(D=145km, M6.2)、2015年7月13日大分県南部の地震(D=58km, M5.7)である。大分県自治体震度計は全て加速度計で構成され、サンプリング周波数は100Hz、自治体役場・支所、消防署等の公共施設に設置されている。震度計の波形記録は60秒間を1単位として切り出されており、ほとんどのデータ長は60秒間である。また、観測点によっては数個の地震記録しか得られていないところもある。

収集した地震観測記録の主要動部分(後続波含む)を用いて、H/Vスペクトルを算定した。0.2~10Hzの周波数帯域について地震間のスペクトル平均をとり、観測H/Vスペクトルとした。さらに、地震規模の大きな地震についてR/Vスペクトルを算定した。S波初動から20.48秒以降の後続波部分を用いた。ただし、大分県震度計については、観測データ長が60秒間のものが多いため高々数個の地震の平均値となった。

これらH/V, R/Vスペクトルを既往速度構造モデル(大分県, 2008)による理論H/Vスペクトルと比較した。大分県の地質構造は臼杵-八代構造線以南の主に地震基盤相当が露頭する地域、構造線付近の上部白亜系堆積岩類(大野川層群)が分布する地域、深い地震基盤相当面の上に新第三紀から第四紀の地層が厚く分布する「別府-島原地溝」の地域、およびその北部の地域に大別される。この地質構造に対応して、理論H/Vスペクトルは概して「別府-島原地溝」の地域で1Hz以下にピークを持ち、それ以外の地域では低周波数帯域に明瞭なピークを持たないものが多い。既往モデルはK-NET, KiK-netおよび気象庁の観測記録を用いた補正が行われているが、自治体震度計の近傍にこれらの観測点がある場合には、自治体震度計のスペクトル特性は既往速度構造モデルで概ね説明可能である。ただし、大野川層群の分布地域ではやや理論値と観測値にズレがある傾向が見られたが、浅部地盤の影響である可能性もあり精査が必要である。今後はこれらのデータを基に、速度構造モデルを修正する予定である。

謝辞: 大分県生活管理部防災危機管理課には自治体震度計ネットワークのデータをご提供頂きました。防災科研のデータを使用しました。また、本研究は文部科学省委託「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(平成26~28年度)」の一環として実施しました。

キーワード: H/Vスペクトル、R/Vスペクトル、3次元速度構造モデル

Keywords: H/V spectral ratio, R/V spectral ratio, three-dimensional velocity structure model

レシーバー関数を用いた鳥取県内の地震観測点における地盤構造推定

Estimation of Subsurface Structure Using Receiver Function at Seismograph Observatory Site in Tottori Prefecture

*野口 竜也¹、西川 隼人²、吉田 昌平¹、香川 敬生¹

*Tatsuya Noguchi¹, Hayato Nishikawa², Shohei Yoshida¹, Takao Kagawa¹

1.鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻、2.舞鶴工業高等専門学校

1.Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Civil Engineering Course Graduate School of Engineering, Tottori University, 2.National Institute of Technology, Maizuru College

鳥取県ではM7クラスの1943年鳥取地震、2000年鳥取県西部地震が発生しており、地盤震動の影響による地震被害の相違が報告されている。本研究では、鳥取県内の地震観測点の地震記録から得られたレシーバー関数（野口ら、2015）を用いて、微動探査による表層地盤モデル（野口ら、2014）、既存の深部地盤モデル（鳥取県、2005）およびJ-SHISの地盤モデル等を基に地盤構造の推定を行った。解析手順としては、まず地震記録によるレシーバー関数と既往の地盤構造モデルのパラメータによるPS-P時間を比較し、層厚を調整することにより推定を行った。次に既往の地盤構造モデルからHaskellマトリックスに基づく1次元解析によりレシーバー関数を求め、観測値のレシーバー関数と比較し、両者が一致するように試行錯誤で地盤構造のモデリングを試みた。

キーワード：レシーバー関数、地盤構造、地震観測点、鳥取県

Keywords: Receiver function, Subsurface structure, Seismograph observatory site, Tottori Prefecture

鳥取県中部地域における地下構造探査および地震記録の分析

Exploration of Underground Structure and Analysis of Seismic data in Central Area of Tottori Prefecture

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

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

1.鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

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

鳥取県中部地域では、1983年M6.2の地震が発生し、倉吉市を中心にその地震による被害が報告されている。ほぼ同じ震源域で2015年10月と12月にM4クラスで最大震度4の地震が立て続けに4回発生している。本研究では同地域の湯梨浜町、三朝町、鳥取市青谷町において微動および重力探査により地下構造探査を行った。また、2015年に発生した地震後に震源域周辺で臨時観測点の設置による余震観測を行い、自治体に常時設置されている震度計の地震記録とともにデータの整理と分析を行った。地下構造探査の結果、対象地域のS波速度構造および微動H/Vの卓越周期、重力異常による基盤構造を得ることが出来た。また、地震記録の分析により対象地点の地震指標の特徴を把握することができた。

キーワード：地下構造、物理探査、地震記録、鳥取県中部

Keywords: Underground structure, Geophysical exploration, Seismic data, Central Area of Tottori Prefecture

阿蘇山の長周期火山性微動記録を用いたRayleigh波位相速度の推定—別府湾周辺地域—

Estimation of Rayleigh Wave Phase Velocities around the Beppu Bay Area using Long-period Volcanic Signals

*林田 拓己¹、吉見 雅行²*Takumi Hayashida¹, Masayuki Yoshimi²

1. (国研) 建築研究所 国際地震工学センター、2. (国研) 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門
1.IISEE, Building Research Institute, 2.Geological Survey of Japan, AIST

別府湾および周辺地域における深部地盤構造モデルの検証を目的として、2014年8月より湾の周囲12地点に広帯域地震計を展開し、地震動および微動の連続観測を実施している(林田・他、2015年連合大会)。観測点の設置とほぼ同時期に、阿蘇山の火口周辺を振動源とする火山性の長周期微動(e.g. Kaneshima et al., 1996, Science)が活発化しており[三反畑・他(2015年連合大会); 松澤・他(2015年連合大会)]、本観測網で得られた波形記録においても10か月以上にわたって明瞭なシグナルが捉えられている。観測されたシグナルの特徴として、(1) 0.06-0.12Hz(周期8-16秒)の周波数帯域において明瞭に観測されること、(2) 水平動成分に比べて上下動成分の振動が顕著に見られること、(3) Rayleigh波の挙動を示すこと、(4) 伝播速度は約3.2km/sであることが挙げられる。本観測網で得られる常時微動記録を用いた地震波干渉法処理では、観測点間隔の都合上0.2Hz以下の低周波数帯域におけるグリーン関数の抽出が困難であることから(林田・他、2015年地震学会)、より広い周波数帯域における表面波の分散性を把握するための手段としてこのシグナルに着目した。まず、阿蘇山中央火口から別府湾までの距離(50-100km)に比べて十分に短い観測点間距離を有する観測点ペア15組を選定し、明瞭なシグナルが見られる上下動成分の速度波形に対して0.05-0.12Hzの範囲内で0.001Hz毎に通過帯域フィルタを施した。そして2地点の波形の位相差とシグナルの入射方位よりRayleigh波の位相速度を推定し、既往の地震波速度構造モデルから導出される理論分散曲線との比較を行った。推定された位相速度は多くの観測点ペアで分散性を有しており、0.06-0.08Hzの帯域における推定値(3.4-3.6km/s)は広域の地殻構造モデル(Nihsida et al., 2008, JGR)から得られる理論値と調和的である。一方、0.1Hz前後では推定値に地域性が見られる。また、一部の観測点ペアでは0.1H前後において推定値と理論値が乖離しており、必ずしもシグナルの入射方位が阿蘇山の方角と対応していない可能性も示唆される。既往の微動アレイ探査(吉見・他、2015年地震学会)との整合性の確認や深部地盤構造モデルに基づく長周期微動の理論波形との比較を行うことで、推定値の妥当性を検討する必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省委託「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(平成26~28年度)」の一環として実施しました。

キーワード：阿蘇山、長周期微動、位相速度、Rayleigh波

Keywords: Aso volcano, long period tremor, phase velocity, Rayleigh wave

長周期地震動評価のための簡易地下構造モデルの構築方法 –レイリー波の分散特性の利用–

A method for constructing seismic velocity structure model for long-period ground motion evaluation - utilization of Rayleigh-wave dispersion information -

*増田 啓¹、吉本 和生¹、武村 俊介²

*Kei Masuda¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

1.横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科、2.防災科学技術研究所

1.Yokohama City University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

はじめに

首都圏における周期数秒以上の長周期地震動の評価のためには関東堆積盆地の精緻な地震波速度構造モデルが必要である。近年、Yoshimoto and Takemura (2014) により同堆積盆地内では堆積層のS波速度の鉛直変化が簡便な3変数モデル (Ravve and Koren 2006) により近似できることが指摘され、Takemura et al. (2015) によりそのモデル化手法が長周期地震動の評価に有効であることが示された。本研究では、このモデル化手法に基づき、長周期地震動のアレイ解析と微動アレイ解析から得られるレイリー波の分散特性を用いた長周期地震動評価のための簡易地下構造モデルの構築方法を提案し、その実用性を数値テストにより検討した。

簡易地下構造モデルの構築方法

簡易地下構造モデルの構築にあたり、レイリー波の位相速度に関する情報を、長周期帯 (6-8秒程度) では高密度強震観測網で得られた長周期地震動波形のアレイ解析から、短周期帯 (1-3秒程度) では微動アレイ観測とそのデータ解析から利用できるものと仮定する。上述した3変数モデル (変数: 地表のS波速度, S波速度の深さ方向への変化率, S波速度の堆積層内の最大増大値) は、堆積層内のS波速度の最大増大値を地震基盤のS波速度に固定することで、2変数モデルに単純化できる。さらに密度とP波速度をS波速度との経験式から仮定することで、レイリー波の位相速度の分散特性を最適に説明する堆積層の地震波速度構造の逆解析は、2変数のグリッドサーチによる残差評価で簡単に実行可能となる。

数値テストの結果

上述の逆解析手法の実用性を評価するために数値テストを実施した。横浜観測井の地下構造 (山水 2004) をテストモデルとして、どの程度のレイリー波の位相速度の情報が利用できれば、堆積層の地震波速度構造を正確に逆推定できるのか調べた。具体的には、位相速度の情報が長周期帯では周期6, 7, 8秒で利用できるとし、短周期帯では周期1, 2, 3秒のうち幾つかに限り利用できるものとした。1次元構造中のレイリー波の位相速度についてはHerrmann (2013) によって評価した。

様々な数値テストの結果、長周期帯の情報だけでは安定的に地震波速度構造は推定できないが、短周期帯のうち特に地表のS波速度に感度の高い周期1秒の位相速度を利用できれば、モデルパラメタ空間における残差分布に明瞭な局所的最小値が現れ、安定して地震波速度構造を推定できることがわかった。この結果は、長周期地震動波形のアレイ解析で得られるレイリー波の位相速度の情報に比較的小規模の微動アレイ観測で得られる情報を追加することにより、本研究の逆解析手法を用いて、長周期地震動評価のための簡易地下構造モデルを構築できる可能性を示すものである。

学会発表では位相速度の測定値に誤差が混入する場合の逆解析の安定性などについて詳しく説明する。

キーワード: 長周期地震動、堆積層構造、レイリー波、位相速度

Keywords: long-period ground motion, sedimentary structure, Rayleigh-wave, phase velocity

微動アレイ観測による関東地域全域の3次元S波速度構造モデルの構築

Estimation of 3D S-wave velocity model of sedimentary layers in Kanto area, using microtremor array measurements

*神 薫¹、先名 重樹¹、若井 淳¹、藤原 広行¹

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

1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

防災科研は、地震動特性の評価の精度を向上させる目的で、これまでに関東地域において浅部・深部統合地盤モデルの作成に取り組んできている¹⁾。この地盤モデルを高度化するため、2009年～2015年にかけて関東地域の平地部において、微動探査（アレイ・単点・極小アレイ）を高密度に実施してきた。先名ほか(2015)²⁾は、2014年度までに実施してきた約320地点の微動アレイ、約5000地点の極小アレイ微動探査結果と強震記録を用いて既往の地盤モデルをチューニングし、成果を得ている。

このモデルに対して2015年度に実施した微動観測データを加えてさらにチューニングを施し、関東地域全体の地盤モデルについてまとめている（先名ほか(2016)※本大会発表）。ここでは、前述のデータおよび、防災科研の微動データベース等に登録されているものも含めた関東地域全域での微動アレイ探査の結果について報告する。

2. 微動アレイ探査について

防災科研で実施した研究業務における微動アレイ探査はこれまでに、関東地域7都県の平地部において約5km程度の間隔で、強震観測地点264地点を含めた414地点で実施している。展開したアレイの大きさは、工学的基盤相当層以深をターゲットとして、半径100～400m（一部半径800mでの観測も実施）の正三角形アレイおよび辺長75mのL字型とした。また観測にはJU210、JU215（白山工業社製）およびアレイの一部ではVSE-15D6（東京測振社製）を用いた。

またS波速度構造は、微動アレイ探査によって得られた位相速度に対して、強震記録のR/Vスペクトル（または微動記録のH/Vスペクトル）を併せ、ジョイントインバージョンによって求めた。

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

3. まとめ

この結果に対して差分法を用いて検証した結果、微動アレイ探査と強震記録により、特に、山地部との境界付近と、平地部の350～900m/s程度の中速度層（0.5～3Hz程度の周波数帯に対応）が大きく改善されたことが確認できた。

今後は、関東地域の地盤モデルの精度をさらに向上させるとともに、東海地域においても関東地域同様に統合地盤モデルの作成に取り組んでいく予定である。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。また、埼玉県環境科学国際センターの白石英孝氏より、微動アレイデータの提供を頂きましたことに感謝します。

参考文献

- 1) Senna, S., T. Maeda, Y. Inagaki, H. Suzuki, H. Matsuyama, and H. Fujiwara (2013): Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation, *J. Disaster Res.*, 8, 889-903.
- 2) 先名・松山ほか(2015)；関東地域における微動観測に基づくS波速度構造の推定と地盤モデルの構築，物理探査学会第133回学術講演会論文集，p.58-61.
- 3) 松岡・白石(2002)；関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性－埼玉県南部地域の三次元S波速度構造の推定－，*BUTSURI-TANSA*, Vol.55, No.2, pp.127-143.

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

キーワード: 微動アレイ探査、速度構造

Keywords: microtremor array observation, velocity structure

関東地域における極小・不規則アレイ微動観測に基づく浅部地盤モデルの高度化

Improvement of shallow subsurface structure models based on miniature and irregular array microtremor observations in Kanto Area

*若井 淳¹、先名 重樹¹、神 薫¹、長 郁夫²、藤原 広行¹

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

1.防災科学技術研究所、2.産業技術総合研究所

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

1. はじめに

巨大地震による被害推定を行う上で、広域における広帯域の地震動特性を精度良く評価できるようにすることは重要である。そのためには、より高度化された地盤モデルの構築が重要な課題の一つである。

防災科研ではこれまでに、広帯域(0.1Hz~10Hz程度)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双方に影響のある周期付近(0.5~2.0秒)の地震動をうまく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、浅部・深部を結合した地盤モデルを作成してきている。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」のテーマの1つである「地震被害推定のための地下構造モデルの構築」において、関東・東海地域の広域地盤モデルの構築を実施している。

本検討では、SIP事業として2014年度後半から2015年度に極小・不規則アレイ微動観測を実施した関東1都6県を対象として、極小・不規則アレイ微動観測記録から得られる1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面を用いて、既存のボーリングデータや表層地質情報に基づいて作成された初期地質モデルの修正を行い、当該地域における浅部地盤モデルの高度化を試みる。ここでは特に、浅部・深部統合地盤モデルの構築を目標に据えていることを踏まえ、浅部および深部地盤の遷移領域に相当すると考えられる工学的基盤面周辺

(Vs300m/s~500m/s層程度)の速度構造に着目した検討を行う。

2. 極小アレイ微動観測

常時微動観測については、関東地域の主に低地・台地において、アレイ半径60cmの「極小アレイ」、3m~10mの「3点不規則アレイ」を実施している。極小アレイおよび3点不規則アレイ観測は主に、公道上や地震観測点(K-NET, KiK-net, SK-NET および気象庁)など合計で約5,000地点(2016年2月現在)において実施した。観測機器としては、一体型常時微動観測機材JU210, JU215およびJU410(白山工業社製)¹⁾を用いて、約1~2km間隔で各地点15分間の観測を行った。また、サンプリング周波数は100Hzもしくは200Hzとした。

3. 浅部地盤S波速度構造の解析手法

本検討では、近年の研究^{2)~5)}で提案・高度化されている微動観測に基づく浅部地盤探査手法により、1次元S波速度構造の評価を行う。解析は微動解析ソフト「BIDO」等を用いて、以下の手順で行う。

- (1) 分散曲線およびH/Vスペクトル比の自動解析, 読み取り
- (2) AVS30等の増幅特性の抽出
- (3) 分散曲線の直接変換(Simple Profiling Method; SPM)
- (4) H/Vスペクトル比の深度変換等
- (5) 簡易逆解析(Simple Inversion Method; SIM)等の逆解析処理

以上により得られる1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面にて、既存の初期地質モデルと比較・検討した上で、必要に応じた修正を行う。

- (6) Vs350およびVs500上面深度の抽出

4. まとめ

本検討では、関東地域の主として低地・台地における極小アレイ微動観測で得られたデータに基づいて、1次元S波速度構造や2次元S波速度構造断面を推定して、当該地域における既存の初期地質モデルと比較・検討した上で適切に修正する。特に、工学的基盤面周辺(Vs300m/s~500m/s層程度)に着目した浅部地盤モデルの高度化

を試みている。結果の詳細については、大会にて報告予定である。

謝辞

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

参考文献

- 1) 先名重樹, 藤原広行, 微動探査観測ツールの開発 その1-常時微動解析ツール-, 防災科学技術研究所研究資料, 313, 2008.
- 2) 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三, 極小アレイによる新しい微動探査法, 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, 物理探査, 61(6), 457-468, 2008.
- 3) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara, Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78, KS13-KS23, doi:10.1190/geo2012-0248.1, 2013.
- 4) 長郁夫, 先名重樹, 藤原広行, 微動のH/V スペクトルを用いたS波速度不連続の概査法の提案, 第129回物理探査学会学術講演会, P-4, 2013.
- 5) 先名重樹, 長郁夫, 藤原広行, 常時微動を用いた浅部地盤構造探査の高度化について, 物理探査学会第130回学術講演論文集, 43-46, 2014.

キーワード：浅部地盤、速度構造、極小アレイ、微動

Keywords: shallow subsurface structure, velocity structure, miniature array, microtremor

常時微動のH/Vスペクトルの推定値とF分布との関係に関する一検討

An examination of the relation between the distribution of microtremor

Horizontal-to-Vertical spectral ratios and the F distribution

*長 郁夫¹、岩田 貴樹²*Ikuo Cho¹, Takaki Iwata²

1.独立行政法人 産業技術総合研究所、2.常磐大学

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.Tokiwa University

3種類の微動波形（ランダム位相波形、地盤モデルを仮定した現実的な数値微動波形、観測微動波形）を用いてそれぞれHorizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr)推定値とF分布との関係性を評価した。F分布との適合性の評価には、Kolmogorov-Smirnov (KS) 検定の統計量Dを乖離度の指標として用いた。ランダム位相波を用いたHVSr推定のシミュレーションによって、微動の波の到来方向の分散が大きければ大きいほどHVSrはF分布に近付くことが示された。すなわち、F分布との乖離度は微動の波動場に依存する。現実的な数値微動波形及び観測微動波形を用いて様々なスペクトル解析パラメータの組み合わせでHVスペクトルを推定したところ、HVSrの推定値の標本数が3000の時にはDの実現値が1.5~6 %の範囲に入ることが示された。この範囲にはF分布の統計的適合性の閾値が含まれるので、このばらつきの中でF分布の統計的適合性は変わり得る。以上の結果は、現実の微動では標本数が十分に大きい場合のDの下限すなわち微動のHVSrとF分布との乖離度は数%もしくはそれ以下であること、Dの具体的な値や適合度検定の結果は微動の波の到来方向の偏りやその揺らぎに依存する可能性があることを示している。

キーワード：微動、H/Vスペクトル、確率分布

Keywords: microtremor, H/V, probability distribution

空間自己相関法による埼玉県加須低地の微動アレイ探査

Microtremor array survey with spatial autocorrelation technique of Kazo lowland in Saitama prefecture, Japan

*白石 英孝¹、八戸 昭一¹、佐坂 公規¹

*Hidetaka Shiraishi¹, Shoichi Hachinohe¹, Kouki Sasaka¹

1. 埼玉県環境科学国際センター研究推進室

1. Center for Environmental Science in Saitama

埼玉県北東部に位置する加須低地を対象に、空間自己相関法(SPAC法)による微動アレイ探査を実施し、およそ深度3000mまでのS波速度構造の推定を行った。

異なる半径をもつ3つのタイプのSPACアレイそれぞれ半径100m、300m、600mのアレイを各調査サイトの地盤上に設置し、およそ1時間の微動観測を行った。調査サイトは、全11地点で、東西約20km、南北15kmの領域に展開した。この観測により、レーリー波基本モードに対応する位相速度分散曲線が、およそ0.2~1.5Hzの範囲で得られた。

S波速度構造は、遺伝的アルゴリズムを用いた観測分散曲線の逆解析によって推定し、初期値には地震被害想定調査で作成されたモデルを使用した。

全11地点の1次元S波速度構造モデルを推定し、既存の探査結果と比較したところ、全体の傾向としては概ね調和的であったが、細部では既存モデルの微修正が必要になるものと推測された。

キーワード：微動探査法、空間自己相関法、S波速度構造

Keywords: Microtremor survey method, Spatial autocorrelation technique, S-wave velocity structure

島根県出雲平野北縁の異常震動帯における微動チェーンアレー探査

Microtremor chain array survey across the abnormal damaged zone of the 1946 Nankai Earthquake in the northern part of the Izumo Plain, Taisha-cho, Izumo City, Shimane Prefecture, Japan.

*林 広樹¹、桑田 庸平¹、汪 発武¹

*Hiroki Hayashi¹, Yohei Kuwada¹, Fawu Wang¹

1.島根大学大学院総合理工学研究科

1.Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

島根県出雲市大社町の出雲平野北縁付近では、1946年の昭和南海地震の際に、東西方向の直線的な異常震動帯が出現した。この異常震動帯を横切る南北約140mの微動チェーンアレー探査を実施した結果、深度40mまでの位相速度断面が得られた。得られた位相速度断面を疑似S波速度やM値に換算し、周辺資料と対比した結果、深度約11mに更新統差海層と完新統中海層の境界が存在するものと考えられる。両層の境界は、出雲平野地下に広く分布する埋没平坦面の一部に相当する可能性がある。測線中央付近には、埋没平坦面をさらに10m近くV字型に削り込む埋没谷が認められ、地震被害との関連が示唆される。

キーワード：微動チェーンアレー、昭和南海地震、出雲平野

Keywords: microtremor chain array, the 1946 Nankai Earthquake, Izumo Plain

微動アレー観測に基づいたボゴタ（コロンビア）盆地における速度構造モデルの構築

Estimation of Bogota (Colombia) basin velocity model from microtremors array measurements for strong motion simulations

*プリード ネルソン¹、先名 重樹¹、関口 徹²、山中 浩明³、地元 孝輔³、中川 博人⁴、Eraso Jaime⁵、Garcia Helber⁵、Perico Nelson⁶、Reyes Juan⁷

*Nelson Pulido¹、Shigeki Senna¹、Toru Sekiguchi²、Hiroaki Yamanaka³、Kosuke Chimoto³、Hiroto Nakagawa⁴、Jaime Eraso⁵、Helber Garcia⁵、Nelson Perico⁶、Juan Carlos Reyes⁷

1.防災科学技術研究所、2.千葉大学、3.東京工業大学、4.建築研究所、5.コロンビア地質調査所、6.ボゴタ危機管理庁、7.ロスアンデス大学

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Chiba University, 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Building Research Institute, 5.Servicio Geológico Colombiano, 6.Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, 7.Universidad de los Andes

Bogota a megacity with almost 8 million inhabitants is prone to a significant earthquake hazard due to nearby active faults as well as subduction megathrust earthquakes. The city has been severely affected by many historical earthquakes in the last 500 years, reaching MM intensities of 8 or more in Bogota. The city is also located at a large lacustrine basin composed of extremely soft soils which may strongly amplify the ground shaking from earthquakes. The basin extends approximately 40 km from North to South, is bounded by the Andes range to the East and South, and sharply deepens towards the West of Bogota. The city has been the subject of multiple microzonations studies which have contributed to gain a good knowledge on the geotechnical zonation of the city and tectonic setting of the region. In order to construct a detailed velocity model of the basin we conducted 68 small to medium size microtremors arrays measurements (radius from 60 cm to 50 m) at 26 sites within the city, and two large arrays measurements at the central part of the basin (radius of 500 m and 1000 m). We calculated dispersion curves and inferred velocity profiles at all the sites. Our velocity profiles for the shallower sediments are characterized by a wide variability in V_{s30} whose values range from 80 ~ 150 m/s in the northern and central part of the basin, and 120 ~ 390 m/s in the southern part. Our velocity models reached values of $V_s=2000$ m/s at a 2 km depth at the central part of the basin, but previous models suggest that the basin depth may largely increase further west. Our preliminar results indicate a sharp boundary in shallow S wave velocities between very soft sediments North of the basin and harder sediments to the South. This striking difference appears to have a strong correlation with the very large water content of the shallower soils (clays and silts) to the North as compared to the small water content of soils (gravels and sands) to the South. Our initial results indicate the need of denser microtremors measurements within the city by including large arrays that allow to characterize in detail the geometry of the basin depth.

Acknowledgements

These activities are a component of a multidisciplinary cooperative research project between Colombia and Japan entitled "Application of state of the art technologies to strengthen research and response to seismic, volcanic and tsunami events and enhance risk management in Colombia (2015-2019)", sponsored by SATREPS. We would like to thank members of our SATREPS team involved in this study; Monica Arcila, Diana Arevalo, Ivan Bautista, Luisa Castillo, Cristina Dimaté, Cristian Gonzalez, Jessica Luengas, Elizabeth Mayo, John Mora, Patricia Pedraza, Leonardo Quiñones, Gustavo Redondo, Andrea Riaño, Marta Tovar.

キーワード：地盤モデル、強震動予測、ボゴタ盆地

Keywords: Soil velocity model, Strong motion simulation, Bogota basin

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

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

*西澤 勝¹

*Masaru Nishizawa¹

1.なし

1.none

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

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

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

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

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

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

"In the near area to the epicenter, the earthquake have very sharp motion. In many case, intense vertical motion happens in the early shocks of an earthquake. The longer the epicenter length little by little, vibration of seismic wave become slow little by little and becomes superior in a horizontal vibration."

The shape of this normal distribution has flat hill and besides has large frequency of the peak of the hill. But get shorter little by little, the shape of the normal distribution (or Bell type) becomes sharp and becomes short frequency.

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

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

Abstract

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

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

Reference

1. Yorihiro Osaki "Shin Jishindou no Spectrum Kaiseki Nyumon" P78.
2. Masaru NISHIZAWA. (2012): Study of shape of Mountain (Normal Distribution) of Fourier Spectrum of Earthquake Motion. May 20-25, S-SS30-P12(2012, JpGU)
3. Masaru NISHIZAWA. (2012): Handling by Solitary Wave and soliton of Earthquake Motion: October D22-01, 2012, The Seismological Society of Japan.
4. Masaru NISHIZAWA. (2015): Normal Distribution of Seismic Wave Spectrum and Solitary Wave in Water Waves (Science of Form). October 27. S01-P20, 2015, The Seismological Society of Japan.
5. Research Report on the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster. NIED, Japan.

キーワード : Fourier Spectrum、Phase difference spectrum、Seismic wave、Phase wave、Science of Form、Normal distribution

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

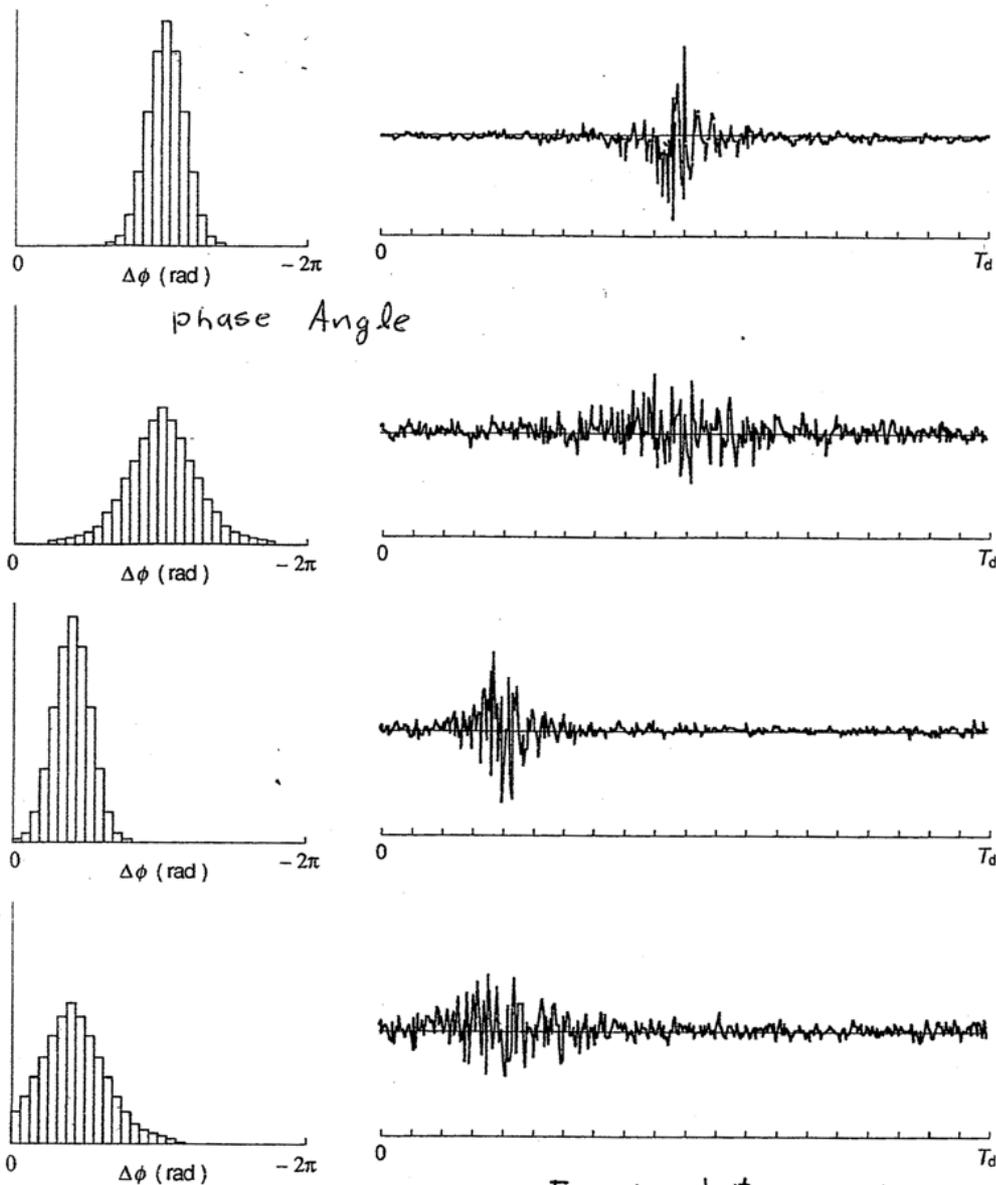


Fig-1 The relationship between the Phase difference Spectrum and the Phase Wave.
~~図-1~~ 位相差分スペクトルと位相波の関係