

## 2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証

本報告では、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」（以下、「レシピ」という）の検証を行うため、平成17年（2005年）3月20日に発生した福岡県西方沖の地震（M7.0）についての震源断層に関する既往の研究成果を整理して「レシピ」を適用した強震動の計算を行い、実際に得られた観測記録との比較を行い、「レシピ」における適用性やその改良すべき点について検討を行った。

### 1 検証の流れ

図1に強震動評価手法の検証の流れを示す。まず、波形インバージョンで求められたすべり量分布に基づく3種類の震源モデルに対して震源の特性化を行うとともに、現行のレシピに準拠したパラメータ設定によるモデルを加え、合計4種類の震源モデルを設定した。次に、評価対象領域の地下構造に関する資料収集・整理から地下構造の初期モデルを構築し、地震観測記録による調整を実施の上、強震動計算のための地下構造モデルを作成した。さらに、これらに基づき、「詳細法（ハイブリッド合成法）」による強震動計算を行った。

2005年福岡県西方沖の地震の観測記録については、防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net）、気象庁および自治体で得られた時刻歴波形と震度分布、最大速度分布を収集した。

評価結果の検証は、観測記録との比較により行った。用いた指標は①最大速度および計測震度、②波形と応答スペクトルである。

また、

- a) 破壊伝播速度の違い
- b) 波形インバージョンに基づく震源破壊過程をそのまま用いた場合の計算結果による比較検討
- c) ライズタイムの違い

等のパラメトリックスタディを実施し、現行のレシピにおける課題について検討した。

### 2 想定する震源断層

2005年福岡県西方沖の地震では、種々の機関より波形インバージョンに基づく震源破壊過程の解析結果が示されている。本検討では、レシピの適用性の確認とその改良を念頭に、レシピによる特性化震源モデルを基本として、波形インバージョンに基づく震源破壊過程を参考に以下の4ケースの特性化震源モデルを設定した。波形インバージョンの結果として参照した既往研究は、Kobayashi et al. (2006)、Asano et al. (2006)、Sekiguchi et al. (2006)である。

- ケース 1 : Kobayashi et al. (2006) に基づく特性化震源モデル
- ケース 2 : Asano and Iwata (2006) に基づく特性化震源モデル
- ケース 3 : Sekiguchi et al. (2006) に基づく特性化震源モデル
- ケース 4 : 「レシピ」 に基づく特性化震源モデル

震源モデルの設定において、断層面の位置や面積、地震モーメントは全ケースで同じ値とした。断層面の位置や走向・傾斜については余震分布や F-net によるモーメントテンソル解などから求め、断層幅は地震発生層を余震分布から 3~19km と設定した上で求める手順とした。設定した震源モデルのパラメータは表 1 に示す通りである。なお、備考欄には各パラメータの設定根拠および用いた関係式を示す。

### 3 用いた地下構造

地震波は、一般的には震源断層から上部マントル層を含む地下を伝わり、次第に減衰していく。しかし、地震基盤から上の工学的基盤までの地下構造（以下「深い地盤構造」という）の影響、および工学的基盤から地表付近に分布する表層地盤（以下「浅い地盤構造」という）のごく地域的な影響により増幅される。強震動評価に際してはこれらを考慮することが必要なため、想定する震源断層を含む強震動評価範囲の地下構造モデルを既存の地下構造探査データ等により作成した。

#### (1) 計算対象領域

福岡県西方沖の地震の本震において、震度 5 強が観測された地点を包含する、以下の 4 点で囲まれる矩形内（図 2）を対象領域とした。

北西端	: 北緯 33.9167°	東経 129.7375°
北東端	: 北緯 33.9167°	東経 130.7375°
南西端	: 北緯 33.1167°	東経 129.7375°
南東端	: 北緯 33.1167°	東経 130.7375°

#### (2) 深い地盤構造について

「深い地盤構造」のモデル化にあたっては、各種物理探査結果、ボーリング調査および物理検層結果、地形・地質解釈資料等の資料収集、整理を行った。九州北部地域においては、強震動計算に必要である速度構造モデルを構築するに足る物理探査データが十分でないことから、主に地質的な補完データを基にモデルの作成を行った。地質的な補完データとしては、表 2 に示す既往文献（主にボーリング資料や地質断面）による地質境界面の分布、表層地質図、ブーゲー異常分布などを用いている。図 3 に表層地質図に模式断面図の位置図を、図 4 に代表的な東西方向の模式断面図を示す。

なお、山地部で地表面に基盤岩類が露出している場合には、KiK-net の速度検層データをもとに風化層のモデル化を行った。

深い地盤構造モデルの物性値は、既往の物理探査データ（屈折法および反射法探査など）や検層データ（K-NET および KiK-net など）から、地質区分毎の深さと P 波速度との対応関係を検討し、表 3 に示す区分とした。さらに、Ludwig et al. (1970) の関係図（図 5）や KiK-net の速度検層による  $V_p$ 、 $V_s$  の関係（図 6）より、S 波速度、密度の設定を行った。

作成した地盤構造の初期モデルに対して、対象地域の地震観測点における地震観測記録に基づく調整を行った。用いた地震観測記録について、図 7 に地震の震央位置を、表 4 に地震諸元のリストを示す。各観測記録の S 波主要動以降の部分から、震源からの到来方向の水平動成分と上下動成分のスペクトル比（図中では“観測記録 H/V スペクトル”と表記）を算出し、観測点ごとに平均を求めた。次に、対象地点の深い地盤構造のモデルにより計算されるレイリー波の基本モードによる H/V スペクトル比（図中では“モデルによる理論 H/V スペクトル”と表記）を求め、両者の比較を行った。対象とした観測点の位置図を図 8 に示し、H/V スペクトル比の比較図を図 9 に示す。ここで、左列は初期モデルによる理論 H/V スペクトルとの比較、右列は K-NET における PS 検層結果も考慮の上で卓越周期が合うように調整を行った修正モデルによる理論 H/V スペクトルとの比較である。

以上の手順により、地質的な補完データから作成した深い地盤構造モデルに対して、観測記録の H/V スペクトル比による調整を行い強震動計算のための深い地盤構造のモデルを作成した。図 10 に、計算に用いた深部地盤構造のモデルの各速度層上面の深さ分布を示す。

### （3）浅い地盤構造について

浅い地盤構造の考慮に関しては、国土数値情報を利用した手法（松岡・翠川 (1994) および藤本・翠川 (2003)）による最大速度の増幅率（図 11）を用いることとした。なお、詳細法工学的基盤の S 波速度は 600m/s であるため、実際には図 11 に示されている値に対して、松岡・翠川 (1994) による経験式を用いて求められる S 波速度が 400m/s の地盤までの増幅率 (1.31) を乗じた値を用いた。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \cdot \log AVS$$

$ARV$  : 最大速度の増幅率

$AVS$  : 深さ 30m までの平均 S 波速度 (m/s)

## 4 強震動評価手法

工学的基盤上面位置での強震動計算は、短周期領域に統計的グリーン関数法、長周期領域に理論的手法である有限差分法を用いる、ハイブリッド合成法により行った。ここで、接続周期は1秒としている。

工学的基盤から地表への換算については、工学的基盤における最大速度の値に前述の最大速度の増幅率を乗じることにより算出した。また、計測震度は、下記に示す翠川・他(1999)による最大速度と計測震度の経験的關係式より求めることとした。

$$I = 2.68 + 1.72 \cdot \log PGV \pm 0.21 \quad (I: 4 \sim 7)$$

$PGV$ : 最大速度(cm/s)

## 5 強震動評価結果とその検証

### (1) 評価結果

ハイブリッド合成法による計算結果として、図12に工学的基盤における最大速度分布、図13に地表における最大速度分布、図14に計測震度分布を示す。図13および図14では、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体の観測点とそれらの観測値も示している。

### (2) 観測記録との比較

#### 1) 最大速度と計測震度

ハイブリッド合成法による地表の最大速度および計測震度の計算結果と2005年福岡県西方沖の地震の観測記録との比較を図15、図16に示す。最大速度の比較で用いた観測記録は、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、気象庁および福岡県内の自治体の一部の震度計によるものである。また、震度については気象庁より発表された計測震度(気象庁および自治体)と、K-NET、KiK-netの観測記録から気象庁(1996)に従って算出した計測震度相当値である。なお、図15の最大速度における相関係数は、常用対数をとった値より計算している。最大速度および計測震度ともに、いずれのケースも概ね観測値に対応する計算結果が得られ、ケース4のレシピによる特性化震源モデルの場合が観測記録との相関が比較的良好となった。これは、ケース1～3では観測記録の長周期成分を対象とした波形インバージョンによる解析結果に対して震源の特性化を行っている一方、ケース4の場合は広帯域の強震動予測を目的とする「レシピ」による震源の特性化であるため、最大速度や計測震度といった評価指標に関しては「レシピ」の方法論が対応していることも一因と考えられる。

#### 2) 差分法計算波形との比較

差分法による計算波形と観測波形との比較を図17に示す。ここでは周期1秒以上の長周期成分を対象としている。ここに示した観測点・観測記録は、波形インバージョン解析で用いられたものが多く、地下構造が比較的単純である地点がほとんどで

ある。観測記録は K-NET、KiK-net における地表の記録であり、地震計の設置方位の測定結果（森川・他、2006）に基づき方位の修正を行っている。計算波形は差分法による詳細法工学的基盤上 ( $V_s=600\text{m/s}$ ) のものであるが、観測波形に見られる比較的短周期成分による位相特性までは表現できていないものの、長周期成分の位相は良く説明できている。なお、図 17 の各図左上段には、差分法による工学的基盤上での最大速度分布を示すが、ハイブリッド合成法の場合（図 12）と比べると、ケース間の相対的な差が大きい。解析ケースによる評価結果の相違は差分法による長周期成分に大きく現れているものと考えられる。

### 3) ハイブリッド合成法による計算波形と擬似速度応答スペクトルとの比較

ハイブリッド合成法による計算結果と観測記録について、波形および擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）における比較を図 18 に示す。工学的基盤相当 ( $V_s=500\text{m/s}$  以上) を含む速度構造が S 波速度検層によって把握されている観測点については、地表から工学的基盤に至る表層の影響を除くために次元重複反射理論により工学的基盤上相当の波形を求めている。ただし、PS 検層の速度値をそのまま用いているため、観測記録における工学的基盤の S 波速度は必ずしも詳細法工学的基盤上 ( $V_s=600\text{m/s}$ ) とは一致しない。図 18 によれば、気象庁福岡および福岡市城南区については観測記録を概ね説明できているが、K-NET 福岡、福岡市博多区、南区に関しては周期 2 秒前後のスペクトルが観測記録と対応していない（図 18-1）。筑紫平野では、全般的に観測記録の方が大きく、この傾向は特に周期 1 秒以下の短周期で顕著である（図 18-2）。K-NET 鎮西、K-NET 玄海、K-NET 中間では観測記録に見られる周期 1 秒前後から 2 秒前後のピークが再現されていない（図 18-3）。これらに対して、山地、台地の観測点である図 18-4 においては、概ね観測記録と対応する結果が得られた。

## (3) レシピに関わる検討

### 1) 破壊伝播速度の違いによる波形の比較

図 17 において、ケース 2、ケース 3 では、ケース 1 と比べて振幅が  $1/3$  から  $1/4$  程度に小さくなっている観測点が見られる。震源モデルにおいての設定パラメータの大きな違いは破壊伝播速度 ( $V_r$ ) であり、ケース 1 では  $3.0\text{ km/s}$ （震源域の S 波速度の約 88%）であるのに対して、ケース 2、3 では  $2.1\text{ km/s}$ （同約 62%）となっている。そこで、破壊伝播速度の影響を見るためにケース 1、2 を対象として、破壊伝播速度を変えた震源モデルに基づいて差分法による波形計算を行い、速度波形による比較を行った。なお、すべり速度時間関数として用いている中村・宮武（2000）による近似式では、ライズタイム ( $t_r$ ) および最大すべり速度 ( $V_m$ ) が破壊伝播速度の値をパラメータとして扱っているため、破壊伝播速度とすべり速度時間関数の各々の影響を明確に見るための計算も行うこととした。具体的には、ケース

1, 2 に対して 3 通りのパラメータ設定による計算を加え、計 5 通りの計算結果について比較検討を行った。

- ① ケース 1 ( $V_r = 3.0$  km/s)
- ② ケース 2 ( $V_r = 2.1$  km/s)
- ③ ケース 2 において  $V_r = 3.0$  km/s と変更  
(すべり速度時間関数においても  $V_r = 3.0$  km/s を設定)
- ④ ケース 2 において  $V_r = 2.1$  km/s のままとする。但し、すべり速度時間関数は  $V_r = 3.0$  km/s としてパラメータを設定
- ⑤ ケース 1 において  $V_r = 2.1$  km/s と変更。但し、すべり速度時間関数は  $V_r = 3.0$  km/s のままでパラメータを設定

【参考】 「レシピ」の(20), (22)式

- ・最大すべり速度振幅  $V_m$   

$$V_m = \Delta\sigma \cdot (2 \cdot f_c \cdot W \cdot V_r)^{1/2} / \mu \quad \dots \dots \dots (20)$$
  - $\Delta\sigma$ : 震源断層全体およびアスペリティの平均応力降下量
  - $f_c$ : ローパスフィルタのコーナー周波数 ( $f_{max}$  と同等)
  - $W = W_a$  (アスペリティ領域)
  - $= W_b$  (背景領域)
- ・最大すべり速度到達時間  $t_d$   

$$f_{max} \cong 1 / (\pi \cdot t_d) \quad \dots \dots \dots (21)$$
- ・すべり速度振幅が  $t^{1/2}$  に比例する Kostrov 型関数に移行する時間  $t_b$   
(19)式で最終すべり量を与えることにより自動的に与えることができる。
- ・ライズタイム  $t_r$   

$$t_r \cong \alpha \cdot W / V_r \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$\alpha = 0.5$$

図 19 に計算結果の波形の比較を示す。①～③を比較すると、概ね①と③が調和的であり、破壊伝播速度の値が支配的となっていると考えられる。また②, ④, ⑤の結果も概ね同じような振幅レベルとなっていることから、破壊伝播速度そのものの影響の寄与が大きく、すべり速度時間関数における  $V_r$  の値の影響は余り大きくないと考えられる。なお、ハイブリッド合成法の結果における地震動分布 (図 12～図 14) では、ケース間で大きな違いが見られないため、短周期成分 (統計的グリーン関数法による合成) に対して破壊伝播速度の影響は比較的小さいと考えられる。

## 2) 波形インバージョンから同定された震源パラメータをそのまま用いた計算結果との比較

ケース 1 からケース 3 の震源モデルを設定する際に参照した波形インバージョンから求められた震源パラメータを直接用いて差分法による計算を行い、特性化震源

モデルによる計算波形との比較を行った。なお、地下構造については今回の検討で作成したモデルを用いた。図 20 に計算波形の比較を示す。特性化震源モデルを用いた場合にはケース 1 では過大評価、ケース 2、3 では過小評価となっていたが、それぞれの波形インバージョンに基づく震源パラメータをそのまま用いた計算では、観測記録の再現性はいずれも改善されることが確認された。

### 3) アスペリティ内のライズタイムの違いによる波形の比較

差分法の計算では、中村・宮武 (2000) によるすべり速度時間関数の近似式を用いているが、「レシピ」において、ライズタイム ( $t_r$ ) の設定は前述の(22)式のとおりである。これまで  $W$  については、アスペリティ領域においてはアスペリティの幅を、背景領域では断層全体の幅を用いてきた。しかし、パラメータの決め方が明確に記されていないため、アスペリティ領域の場合には  $W$  はアスペリティの幅もしくは断層全体の幅の両方に解釈され得ることになる。そこで、このパラメータによる影響をみるために、アスペリティ領域のライズタイムについて 2 通りの幅の値より設定して差分法による波形計算を行い、計算波形の比較を行った。図 21 に結果を示す。断層幅を用いた場合には、最大速度振幅が 1 割程度小さくなる程度で、本検討では影響がそれほど大きくはなかった。但し、アスペリティの幅が全体領域の断層幅に比して相当に小さい場合には、計算結果に及ぼす影響も大きくなるものと推察されることから、

・ライズタイム  $t_r$   
 $t_r \cong \alpha \cdot W / V_r$  . . . . . (22)  
 $\alpha = 0.5$   
 ここで  $W = W_a$  (アスペリティ領域においてはアスペリティの幅とする)  
 $= W_b$  (背景領域においては断層全体の幅とする)

のように追記することが必要と考えられる。

### (4) 検討結果のまとめ

以下に検討結果をまとめて記す。

- ・ハイブリッド合成法による地表の最大速度および計測震度については、いずれの解析ケースも概ね観測値に対応する計算結果が得られた。特に広帯域の強震動予測を目的とした「レシピ」による特性化震源モデルを設定したケース 4 の場合、評価指標に対応していることもあり、観測記録との相関が最も良好となった。
- ・差分法による計算では、観測波形に見られる比較的短周期成分による位相特性までは表現できていないものの、長周期成分の位相特性は良く対応する結果が得られた。
- ・ハイブリッド合成法による計算結果を波形および擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%) で見た場合、山地・台地等の堆積層厚の薄い観測点については概ね

観測記録と対応する結果が得られた。但し、平野部等の堆積層が厚いと考えられる地点に関しては、観測記録に見られる周期 1 秒～2 秒前後のスペクトル上のピークを再現するには至らなかった。

・波形インバージョンによる震源破壊過程を特性化した震源モデルによる計算では、破壊伝播速度の影響が大きいことがわかった。但し、特性化の手続きを経ずに波形インバージョンによる震源破壊過程をそのまま用いた場合には、相互の結果の差異は小さく、いずれも観測記録をある程度再現できることが確認された。このため震源の特性化の際に失われる断層破壊過程の複雑さを何らかの手立てで補うことが必要と考えられる。

## 6 今後に向けて

2005 年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づいた強震動評価手法の検証を実施し、現在のレシピによって概ね再現可能であることが確認された。ただし、福岡平野や筑紫平野などでは周期 1 秒～2 秒付近に見られる卓越周期の振動性状を十分に説明できていないことが課題としてあげられた。

今回の検証結果によれば、山地や台地などの表層の軟弱層が薄い地域では観測波形の再現性は良いものの、福岡平野や筑紫平野など軟弱層が厚く堆積している地域では観測波形の再現性は必ずしも良くなく、このような平野等では地下構造モデルの検討が改めて必要であることを示唆した結果となっている。今回実施した H/V スペクトル比によるモデルの調整のみならず、山田・山中(2006)の検討のように、中小地震の波形シミュレーション等により地下構造モデルの検証および修正を行うことが必要と考えられる。

観測記録を仔細にみると、震源距離がほぼ等しい観測点間であっても最大速度値に大きな差が生じている。このような差異は、福岡市中心部での第四紀層の厚さの変化によるものと推測され、表層地盤の 1 次元地盤増幅特性で説明できるとの研究結果(川瀬, 2006)も発表されている。一方、西島他(2006)は、福岡市中心部に重力の低異常が認められ、警固断層西側のやや重力異常の高い領域よりも低重力異常域において地震被害が大きかったことを指摘しており、深部地盤の影響のあることを示唆している。平野部での観測記録の特徴が、1) 浅部地盤構造、2) 震源モデルを含めた深部地盤構造、もしくはその両者の影響によるものかは現状では判断できないが、このような狭い地域での地震動の違いを見るためには、瀨瀨他(2006)の提案する手法により深部地盤構造のモデル化の再検討を実施するとともに、浅い地盤についてもボーリングデータや観測事実に基づくモデル化を行い、現状の 1km メッシュでは表現しきれない表層の増幅をよりきめ細かく評価していくなどの対処が必要と考えられる。

また、波形インバージョンに基づく震源破壊過程をもとに特性化を行った場合には、特に長周期成分における評価結果に関しては、破壊伝播速度の影響が支配的であることがわかった。その一方で、波形インバージョンに基づく震源破壊過程を直

接用いた場合には、観測記録をある程度再現できることも確認された。これは現行のレシピではアスペリティ内の破壊伝播速度や応力降下量を一定と仮定しているが、現実の断層破壊はこれらが複雑であることを示唆している。したがって、震源の特性化に際しては、断層面の形状や震源の地域性等を考慮して破壊伝播速度を規定することや、破壊形式に応じた破壊伝播の揺らぎを導入することなどの方策が必要と考えられる。このためには、今まで実施されてきた波形インバージョンに基づく震源破壊過程を破壊形式や地域性等の観点より整理し、データベースを構築していくことや、破壊伝播速度の揺らぎに関するパラメトリックスタディと観測記録との比較などの検討が待望される。

## 参考文献 (アルファベット順)

- Asano K. and T. Iwata (2006) : Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 58 (No. 1), pp. 93-98
- 藤本一雄, 翠川三郎(2003) : 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定, *日本地震工学会論文集*, 第 3 巻, 第 3 号, pp. 13-27
- 川瀬 博(2006) : 福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害の関係に関する調査研究、平成 17 年度科学研究費補助金 (特別研究促進費) 研究成果 (課題番号 17800001)
- 気象庁(1996) : 震度を知る ー基礎知識とその活用ー, (株)ぎょうせい
- Kobayashi R., S. Miyazaki and K. Koketsu (2006) : Source processes of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake and its largest aftershock inferred from strong motion and 1-Hz GPS data ,*Earth Planets Space*, Vol. 58 (No. 1), pp. 57-62
- 額瀨一起・三宅弘恵・田中康久(2006) : 強震動予測のための地下構造の標準的なモデル化手法, *日本地震学会講演予稿集(秋季大会)*, C055, pp. 106.
- Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake (1970): *Seismic Refraction, in the Sea* Vol. 4, Part 1, Wile-Interscience, p. 74.
- 松岡昌志・翠川三郎(1994) : 国土数値情報とサイスマックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム資料集, pp. 23-34
- 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄(1999) : 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, *地域安全学会論文集*, pp. 51-56
- 森川信之・安達繁樹・竹中博士・功刀 卓・藤原広行 (2006) : 福岡県西方沖地震で強震動記録を観測した K-NET、KiK-net 観測点の調査, 平成 17 年度科学研究費補助金研究成果報告書「福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害の関係に関する調査研究」 (課題番号 17800001) , pp. 56-65
- 中村洋光・宮武 隆(2000) : 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震第 2 輯*, 53, pp. 1-9
- 西島 潤・藤光康宏・福岡晃一郎・江原幸雄(2006) : 福岡市警固断層周辺の高密度重力測定による重力異常と福岡県西方沖地震による地震被害, *日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集*, 0106-P002.
- Sekiguchi H., S. Aoi, R. Honda, N. Morikawa, T. Kunugi and H. Fujiwara (2006): Rupture process of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, Vol. 58 (No. 1), pp. 37-43
- 山田伸之・山中浩明(2006) : 2005 年福岡県西方沖地震の余震の地震動シミュレーション, 物理探査学会第 115 回 (平成 18 年度秋季) 学術講演会, P-2