

# 福岡市における 3 次元地下構造を考慮した広周波数帯域強震動予測

中道 聡

## 1. 序論

地震動は「震源特性」、「伝播経路特性」、「地盤増幅特性」の3つの特性で説明される。地震動の予測を行う場合、これら3つの特性を精度良く評価する必要がある。評価方法には大きく分けて「理論的方法」、「経験的方法」、「半経験的方法」の3つがあり、理論的方法はこれら3つの特性を全て実体に則した物理モデルで表現し、理論的に地震動を計算する方法で、震源特性は震源モデルにより、伝播特性と地盤特性は解析的、あるいは数値的に求めたグリーン関数により表現される。一方、経験的方法は多数の地震記録を統計処理して、マグニチュードや震源距離などをパラメータとする簡易な式(回帰式)を用いて3つの特性を表現する方法である。半経験的方法は、震源特性を震源モデルにより表し、グリーン関数を小地震による記録で代用する方法で、震源断層の面的効果を考慮する事ができ、現在最も有効な手段の一つとされている。

しかし、これらの手法にはそれぞれ一長一短があり、広周波数帯域の強震動を単一の方法で評価する事は非常に難しい。そこで、ある特定の周期を境に地震動を長周期帯域と短周期帯域に分け、それぞれの帯域に適した、異なる手法で時刻歴波形を計算した後、その両者を足し合わせて広周期帯域地震動を求めるハイブリッド法<sup>1)</sup>で強震動評価が行われるようになってきた。

本研究では、まず、統計的グリーン関数法(以下SGFM)、三次元有限差分法(3D-FDM)、及びこれらを組み合わせたハイブリッド法を用いて兵庫県南部地震の強震動評価を行いハイブリッド法の有用性を確認する。その後、これまで構築されたことのない福岡地域の三次元地下構造を推定した上で、その地盤モデルに基づいてSGFMと3D-FDMによって合成波形を求める。最後にそれらを組み合わせたハイブリッド法によって仮想福岡地震の強震動評価を行う。福岡地域の三次元地下構造を考慮した広周波数帯域の強震動予測を行うことで、より精度の高い設計用入力地震動の作成や地震被害想定、防災計画の策定などに貢献できるものと期待できる。

## 2. 解析手法

本研究では、短周期帯域を半経験的方法であるSGFMで、長周期帯域を理論的方法である3D-FDMで計算し、それぞれの手法によって得られた時刻歴波形に、ある特定の周波数(マッチング周波数)を境にして交差するハイパスフィルターとローパスフィルターを用いて重ね合わせるハイブリッド法を用いた。なお、SGFMは基盤面における統計的地震動特性を用いてグリーン関数を求め、入倉ら<sup>2)</sup>の手法を用い重ね合わ

せ基盤面における合成波形を求める。その後、地盤構造を考慮して次元波動論により地表面における合成波形を求める2段階の手法を取った。3D-FDMではGraves<sup>3)</sup>の開発した4次精度のスタガードグリッドによる手法を用い、格子点間隔0.08km、時間刻みは安定条件を考慮して0.005sとして、5000タイムステップまで計算する。また、モデル外周には1.6kmのQ値を小さくしたエネルギー吸収境界をつけ、さらに理論的な波動伝播境界をつけ遠方場に逸散する波を吸収させている。

## 3 ハイブリッド法による兵庫県南部地震の強震動評価

### 3.1 解析領域と断層モデル

解析領域は図3.1に示す北西角(34.645° N、134.957° E)を基準点とした長さ42km、幅18kmの範囲で、同時に基準点を中心として時計回りに33°回転させた解析領域の盆地深さコンターを示す。また、表3.1に盆地内の地盤構造を、表3.2に岩盤及び地殻上部の地盤構造を示す。なお、盆地内部の各層の層厚は盆地深さに比例するものとし、その比率を層厚比としている。また、断層モデルは図3.3に示す松島・川瀬(2000)<sup>4)</sup>モデルに従った。表3.3に各アスペリティの諸元と断層パラメータを示す。

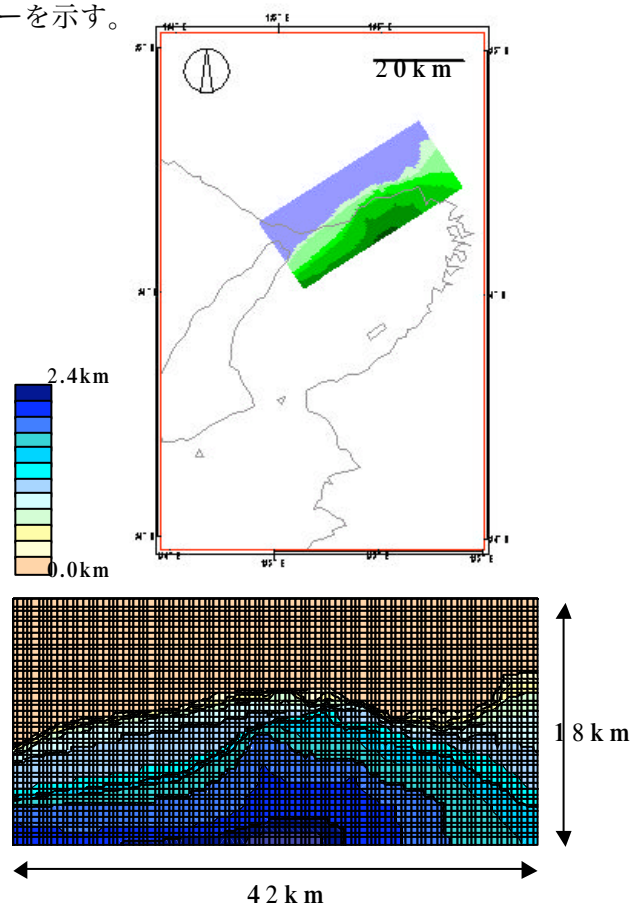


図 3.1 解析領域と盆地深さコンター

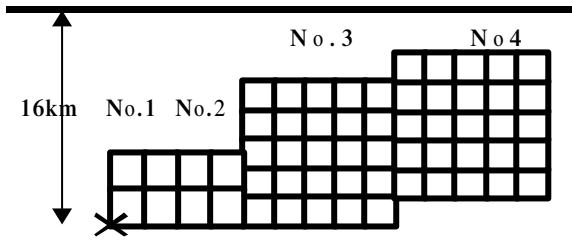


図 3.3 松島・川瀬の断層モデル

表 3.3 各アスペリティの諸元と断層パラメータ

No	$M_0 \times 10^{18}$ ( $N \cdot m$ )	$L \times W$ ( $km^2$ )	破壊開始 時間(sec)	$D_0$ (m)	C	N
1	0.62	4.5×5	0.00	0.85	0.90	2
2	1.07	4.5×5	1.79	1.47	1.56	2
3	2.59	8×10	3.70	1.00	0.53	5
4	4.83	8×10	6.25	1.90	1.01	5

3.2 各手法による合成波形の生成 : SGFMでは、上に示した断層モデルに基づき、伊藤ら<sup>5)</sup>が求めた基盤面における統計的地震動特性を用い基盤面( $V_s=1100m/s$ 相当)における合成波形を計算し、表3.1の盆地内における表層(400m/sec)までの地盤構造を用いて次元波動論により地表面の合成波形を求めた。なお、立ちあがり時間は釜江・入倉<sup>6)</sup>に従い全て0.6secとした。3D-FDMは松島・川瀬に従い、解析領域は図3.2に示した長さ42km幅18kmで深さ22.8kmの領域である。ハイブリッド法で重要になるのはマッチング周波数の設定だが、本研究ではフィルターをした加速度波形とフーリエスペクトルから判断しマッチング周波数を最適と思われる1.75Hzに設定してハイブリッド合成を行った。図3.4に用いたフィルターを示す。

3.3 各手法による合成波形の比較 : ここでは各手法による合成波形と観測波形とを比較、検討し、ハイブリッド法の有用性を明らかにする。解析領域中の14観測点について比較を行った。図3.5、図3.6に観測点KOB( $34.725^\circ N, 135.280^\circ E$ )における加速度波形及び速度波形を示す。なお、比較に用いるのは多くの観測記録の強軸方向である断層直交方向に相当する $N33^\circ W$ 成分についてである。まず、加速度波形を見てみる。Hybrid波は当然のことながらSGFM,3D-FDM両者を反映した結果となっており、観測波に見られる立ちあがり部のパルス波、後続動部の短周期成分の包絡形ともに最もよく再現できている。図は省略するが、特にJMA,FKA,SKH,KOB,NTTについて再現性が高く、そのフーリエスペクトルは時刻歴波形以上に一致した。ただ、建物地盤相互作用の影響が見られるSKBや液状化の影響が大きいKKJではSGFM同様に後続動部で過大評価となった。速度波形では3D-FDMの結果が支配的となっており、3D-FDMで精度良く再現されたJMA,KBU,PIS,HKO,KOB,

表 3.1 盆地内部の地盤構造

層	P波速度 (km/sec)	S波速度 (km/sec)	密度 ( $g/cm^3$ )	Q値	層厚比
1	1.70	0.40	1.75	20	0.08
2	1.85	0.50	1.85	25	0.12
3	2.20	0.70	2.10	35	0.25
4	2.50	1.10	2.50	55	0.55

表 3.2 岩盤及び地殻上部の地盤構造

層	P波速度 (km/sec)	S波速度 (km/sec)	密度 ( $g/cm^3$ )	Q値	下層深さ (km)
1	2.50	1.00	2.00	50	0.00
2	3.20	1.80	2.10	100	0.08
3	5.15	2.85	2.50	200	0.40
4	5.50	3.20	2.60	400	0.56
5	6.00	3.46	2.70	600	5.04
6	6.70	3.87	2.80	700	18.00
7	7.50	4.33	3.00	800	34.56

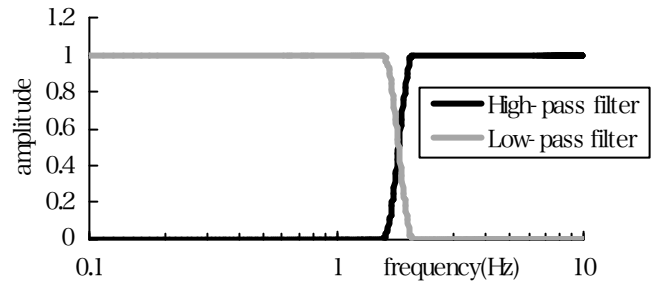


図 3.4 マッチング周波数 1.75 Hz のハイブリッドフィルター

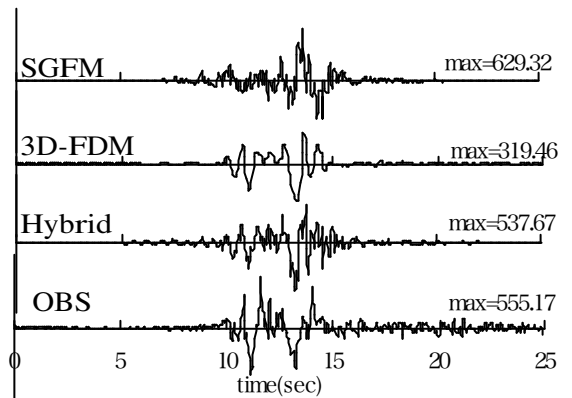


図 3.5 KOB における加速度波形

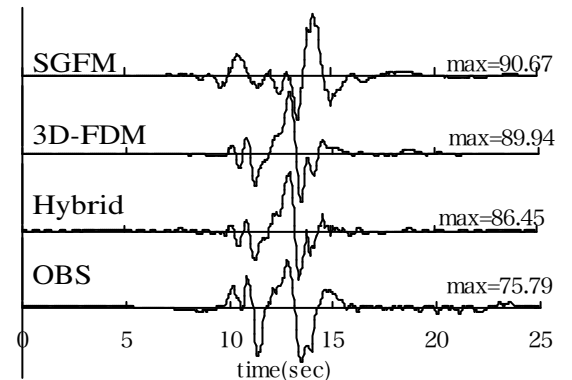


図 3.6 KOB における速度波形

NTT では時刻歴波形と共にその7-アスペクトルまでも非常に精度よく再現している。ただ、3D-FDMでうまく再現できなかった TKT, KKJ, TKZ では良い一致は得られなかった。全体的に見ると、地盤などの影響により合成波の再現性が低い観測点を除けば Hybrid 波が最も高い再現性を有しているといえる。

3. 4 まとめ : 以上により、SGFM、3D-FDM、ハイブリッド法それぞれによって兵庫県南部地震の強震動評価を行い比較することで、ハイブリッド法が最も精度良く観測波形を再現する事を確認した。

#### 4 福岡地域における三次元地盤モデルの構築

福岡地域の深部地盤構造はいまだ充分に明らかとなっていない。そこで本研究では地質図などを参考に盆地境界を設定し、重力異常図から重力値を目測で読み取り、長波長フィルタをかけてトレンドを取り除き、それに木下ら が推定した福岡市内の深部地盤構造を考慮して盆地深さと盆地内の層構造を設定した。なお、各地点の層厚はその地点における盆地深さに比例させた。解析領域は図 4.1 に示された北東角(33.755° N, 130.445° E)を基準点とした長さ40km幅32km深さ22.8kmの直方体で、同時に基準点を中心として時計回りに45°回転させた盆地深さコンターを右側に示す。表 4.1 に仮定した盆地内の地盤構造を、表 4.2 に岩盤及び地殻上部の地盤構造を示す。

#### 5 三次元地盤構造を考慮した福岡市における広周波数帯域強震動予測

5. 1 断層モデルと予測手法 : 本研究では、推定した三次元地盤モデルを用い、図 3.3 の断層モデルを基本として第4アスペクトリを福岡市側に配置したシナリオ1、アスペクトリ、発震点共に左右反転させたシナリオ2、発震点はシナリオ1と同じで第1,第2アスペクトリと第3,第4アスペクトリの配置を換えたシナリオ3の3つのシナリオについて強震動予測を行った。想定断層は警固断層を南東方向へ約5km延長させたものとし(33.438° N, 130.569° E)と(33.598° N, 130.380° E)をつなぐ直線上に配置した。また、松島・川瀬の断層モデルは第4アスペクトリの傾斜角だけ85°となっているが、本研究では全て90°とした。予測に用いたハイブリッド法の手順は以下の通りである。まずSGFMと3D-FDMによってモデル最表層(Vs=600m/s)における合成波形を求める。次にマッチング周波数1.75Hzとしたハイブリッド合成を行い、最後に伊藤らが推定した福岡市の浅い地盤構造を用い一次元波動論により地表面予測波形を求めた。なお、SGFMではまず基盤面(Vs=1100m/s相当)における基盤波を求め、次に表4.1に示す盆地内の地盤モデルを使い一次元波動論によってモデル最表層(Vs=600m/s)における合成波を求める2段階の手法を用いた。

5. 2 ハイブリッド法による合成波形の生成 : 図5.1にシナリオ1の基盤面及びモデル最表層(600m/s)における最大速度コンターを示す。基盤面ではシナリオ1、

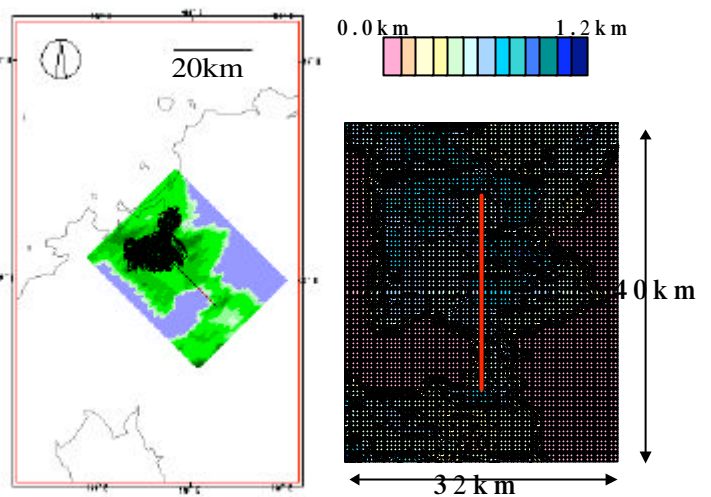


図 4.1 解析対象地域と盆地深さコンター

表 4.1 盆地内部の地盤構造

層	P 波速度 (km/sec)	S 波速度 (km/sec)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Q 値	層厚比
1	1.90	0.60	1.90	30	0.09
2	2.60	1.10	2.10	50	0.29
3	3.50	1.70	2.30	80	0.62

表 4.2 岩盤及び地殻の地盤構造

層	P 波速度 (km/sec)	S 波速度 (km/sec)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Q 値	下層深さ (km)
1	3.20	2.00	2.10	100	0.10
2	5.15	2.85	2.50	200	2.00
3	5.50	3.20	2.60	400	5.00
4	6.00	3.46	2.70	600	18.00
5	6.70	3.87	2.80	700	84.50

シナリオ2,シナリオ3ともに断層直交成分において断層直上の破壊進行方向において大きな速度が見られ、その値は約60kineと兵庫県南部地震の岩盤での最大値と一致した。どのシナリオでも放射特性と破壊伝播によるディレクティブの影響により断層直交成分では断層に沿って大きな速度が分布し、平行成分では断層の両側に分布している。図5.2にシナリオ2,シナリオ3のモデル最表層(Vs=600m/s)における断層直交成分を示す。シナリオ1では断層直交成分において第4アスペクトリの破壊進行方向で110kine程のピークが見られ、その南側で70kine程の上下に分かれた小さなピーク見られる。このピークは第1,第2アスペクトリの影響によるものと思われる。平行成分では断層の両側に約50kineの速度が広範囲で分布しており、盆地が深い場所でやや大きな速度が生じた。シナリオ2の断層直交成分では、シナリオ1と同様に110kine程のピークが第4アスペクトリ側に見られる。これは図4.1に示した筑紫平野北部の盆地で増幅されたものである。また、断層の中間付近で70kine程のピークが盆地境界に沿って斜めに分布しているのがわかる。シナリオ3の

断層直交成分ではモデル中央の断層破壊方向よりで約100kineのピークが見られたが、シナリオ1,シナリオ2で見られた中間レベルのピークは生じなかった。3つのシナリオでいずれも最大約100~110kineの速度が第4アズベリイの破壊進行方向で見られた。これは兵庫県南部地震と比べるやや小さめであるが、その理由は地盤モデルが最深部でも約1200mと浅く、最表層もVs=600m/sで神戸の地盤と比べると硬いためと思われる。図は省略するか断層平行成分では各シナリオとも断層の両側で40~50kineの速度が広範囲で分布し、盆地の深い地点でやや大きなピークが見られた。モデル最表層(Vs=600m/s)では各シナリオとも断層直交成分、平行成分ともに盆地内部で大きな増幅が見られ、地盤構造の影響を良く反映していると考えられる。

5.3 地表面における強震動予測：図5.3、図5.4にシナリオ1,2による福岡市内の地表面最大速度マップ(断層直交成分)を示す。表層を考慮したためシナリオ1では基盤が深かった福岡市中心部において約130kineと、モデル最表層(600m/s)と比べ約20kineの増幅が見られた。シナリオ2では断層の破壊進行方向が逆向きとなるため、南側に大きな分布となったが、最大50kine程度にとどまることがわかる。

5.4 まとめ：推定した地盤モデルと兵庫県南部地震の断層モデルを用いて福岡市における広周期帯域の強震動予測を行った。シナリオ1の断層直交成分では福岡市内中心部で兵庫県南部地震と同レベルの速度が生じており、かなり大きな被害が予想される。シナリオ2では断層の破壊進行方向に沿って最大50kineと小さな値となった。

## 6 結論

本研究では、兵庫県南部地震の強震動評価によって広周波数帯域ではハイブリッド法が有用であることを確認した。次に、重力異常図、地質図及び微動探査結果などから解析領域の三次元地盤構造モデルを構築した。最後に構築した三次元地盤モデルを用いて福岡市における広周波数帯域の強震動予測を行った。シナリオ1の断層直交成分では福岡市中心部で兵庫県南部地震と同レベルの130kine程度の速度が生じており、かなりの被害が予想される。

参考文献 1)入倉他, 1999, 1948年福井地震の強震動ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現, 地震, 第2巻, 129-150. 2)Irikura, 1986, Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp. 151-156. 3)Graves, R.W. Simulation Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, 1996, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 86, No. 4, 1091-1106. 4)松島他, 2000, 1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造論文集第534号, 33-40. 5)伊藤他, 2001, K-Netデータから抽出した地震動の統計的性質とそれを用いた波形合成用グリーン関数の生成, 日本建築学会構造論文集第543号, 34-41. 6)釜江他, 1997, 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション,

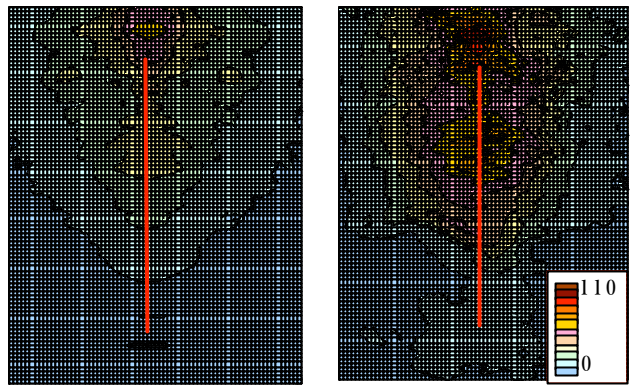


図5.1 シナリオ1における最大速度コンター  
断層直交成分(左:基盤面 右:モデル最表層)

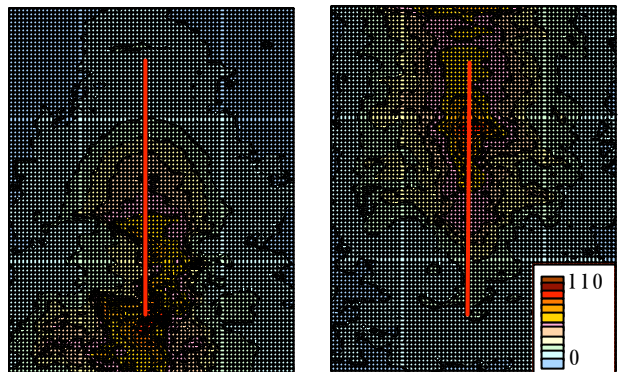


図5.1 モデル最表層における最大速度コンター  
断層直交成分(左:シナリオ2 右:シナリオ3)

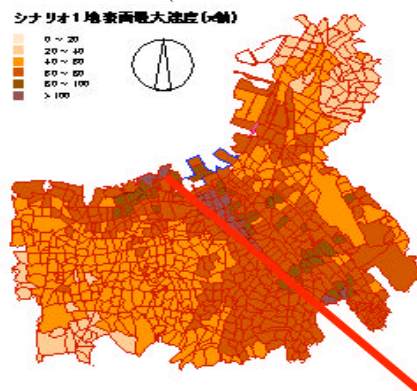


図5.3 シナリオ1における地表面最大速度分布(直交成分)

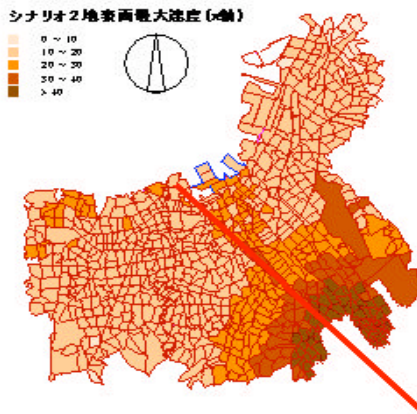


図5.4 シナリオ2における地表面大速度分布(直交成分)

日本建築学会構造論文集第500号, 29-36. 7)木下, 2000, アレイ微動による福岡市の深部地盤構造の推定, 九州大学大学院修士論文.