

大阪平野の3次元地下構造モデルと地震動シミュレーション

— 地下構造モデルの構築と3次元有限差分法による中小地震のシミュレーション —

栗本 修 奥田 暁
田中 清和 若松 邦夫

Three-dimensional Modeling of Deep Basin Structure and Simulation Analysis of Seismic Ground Motions for Long Periods in the Osaka Plain

— Modeling of Deep Basin Structure and Simulation of Ground Motions of Small Events using Three-dimensional Finite Difference Method —

Osamu Kurimoto Satoshi Okuda
Kiyokazu Tanaka Kunio Wakamatsu

Abstract

It is important to evaluate long-period ground motions considering large-scale ground topography for seismic design of long-period and/or base-isolation buildings. This paper describes three-dimensional (3-D) modeling of the deep basin structure in the Osaka plain and simulation analyses using a 3-D Finite Difference Method (FDM). The 3-D basin structure model, based on the model proposed by Miyakoshi et al.(1997), has been re-constructed with recent investigation data. Simulation analyses of seismic motions of small earthquakes are performed with two FD models: that proposed by Miyakoshi et al.(1997) and the re-constructed one. Simulation results verified that the basin structures were appropriate. Comparison of the calculated waveforms with the observed ones showed that the structure of the re-constructed model well simulated the underground topography. However, in the north and east areas of the plain, where the sedimentary layer structure is complicated, observation records are not simulated well. Therefore, it may be necessary to revise the model considering the latest investigation results.

概要

堆積平野・盆地上に位置し長周期構造物を多数抱えた都市における地震動評価には、深層の基盤構造の影響が指摘される。そこで大阪平野を対象に、周期2~3秒以上のやや長周期地震動を対象とした3次元地下構造モデルを構築し、3次元有限差分法による地震動シミュレーションを試みた。モデル構築に当たっては、既往のモデルを参照し、その他に微動探査や反射法探査、温泉ボーリングなどの成果を取り入れてデータを再構成した。結果として、地下構造の急変地において不整形構造が良く再現されるようになった。次に、構築したモデルを対象にM4~5の中小地震のシミュレーションを行い、結果を観測記録と比較した。波形の比較から構築した地下構造モデルが概ね妥当だと確認した。しかし、地盤構造が複雑な平野の東部や北部では観測記録の再現性が良くなく、構築した地下構造モデルに今後も新たな知見を取り入れて改良する必要があるとの結論を得た。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震での強震動地域分布が示すように、堆積平野・盆地上の地震動特性は地震基盤などの深層の地下構造の影響を受けると考えられる。また、沖積平野に位置し大規模構造物を多数抱えた関東や大阪などの都市部の地震動評価では、長周期地震動の予測精度の向上が超高層建物や免震建物をはじめとする建築構造物の総合的な耐震安全性の確保のために重要である。そのため、地下構造の3次元的な形状を考慮した空間的な地震動評価が求められる。

本報告では、大阪平野における周期2~3秒以上のやや長周期地震動を対象として、震源断層を取り込み得る大

規模な3次元地下構造モデルを構築し、次に、3次元有限差分法を適用してM4~5程度の中小地震のシミュレーションを行い、結果を観測記録と比較して構築した地下構造モデルの妥当性の検討を行った結果について示す。

2. 大阪平野の深層地下構造モデルの構築

2.1 既往の地下構造モデル

大阪湾を含めた大阪平野の地下構造は、六甲・北摂山地、生駒山地、和泉山地などの山地に囲まれた堆積盆地構造となっており、その基盤構造は堆積盆地の中心部に向かって傾斜し深くなっている。堆積盆地の地盤構造の調査については、反射法・屈折法・微動探査法・深層ボ

ーリングなどが数多く実施されている。香川ほか¹⁾はこれらの調査結果、地盤データを整理してまとめ、約72km四方の領域内で4層(堆積層3層および基盤)から成る堆積盆地構造のモデルを提案している。また、宮腰ほか²⁾は1995年兵庫県南部地震以後に実施された地盤調査結果を含めてデータを再整理し、香川ほか¹⁾のモデルを改良したモデルを提案している。

宮腰ほか²⁾のモデルは、大阪平野の第1次近似モデルとして評価が高い。しかし、地層境界面の形状を全域に渡ってスプライン関数(単位領域は9km角)による滑らかな接続としたため、断層などの地下構造の急変地の形状が表現されておらず、そのまま地震動評価へ適用するには問題点がある。そこで、最近の調査結果、公開資料を取り込みつつ、局所的な不整形形状を表現可能な3次元地下構造モデルを構築することとした。

2.2 改良モデルの構築

大阪堆積盆地の3次元地下構造モデルを構築するに当たっては、宮腰ほか²⁾の層区分(Table 1)を踏襲し、東経134.86~135.76度、北緯34.29~34.90度(東西約75km、南北約65km)の範囲を対象地域として国土数値情報準拠の1kmメッシュ単位でモデル化することとした。

既往の文献、探査結果から地盤データを整理し、1kmメッシュ重心点ごとの層境界深度分布を推定した。代表的なデータを以下に述べる(Fig. 1)。

- 1) 微動によるH/V: 大阪府下の特に平野山地境界部分周辺の形状を決めるため、微動調査の結果³⁾を適用した。同データは宮腰ほか²⁾のモデルにおいても基礎データの一つとして参照されているが、ここでは微動のH/Vスペクトルが示す卓越周期の実測値を直接、基盤から上の1次元増幅特性の検証に適用することで、宮腰ほか²⁾のモデルが与える層境界深度分布を修正した。
- 2) 反射法ほかによる基盤深度: 阪神間の不整形構造を決めるために、周辺で実施された反射法探査ほかの結果

果を総括した基盤等深度線図⁴⁾を参照した。同様に、上町断層や生駒断層などの形状も反射法探査などの結果⁵⁾を参照している。

- 3) 温泉ボーリングほか: 基盤ほか地層境界の深度を地質学的に直接測定したレファレンス・ポイントとして、

Table 1 大阪堆積盆地構造モデルの地盤定数
Layer Parameters of the Osaka Basin Structure Model

	Vp(km/s)	Vs(km/s)	密度(t/m ³)
A層(堆積層上部)	1.60	0.35	1.7
B層(堆積層中部)	1.80	0.55	1.8
C層(堆積層下部)	2.50	1.00	2.1
D層(基盤)	5.40	3.20	2.7

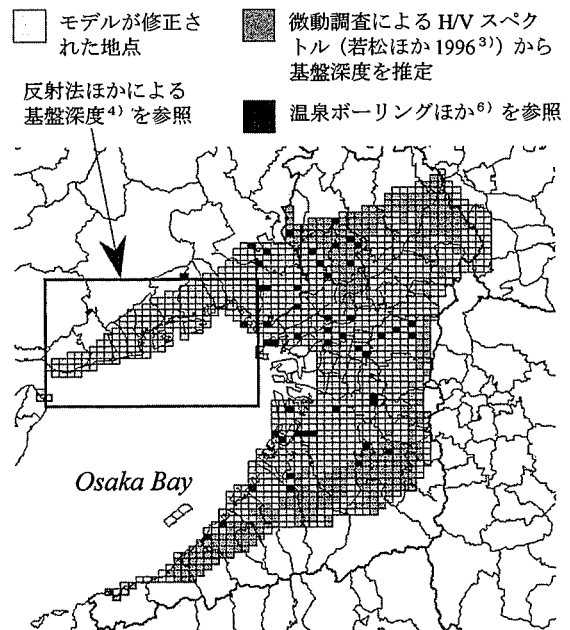
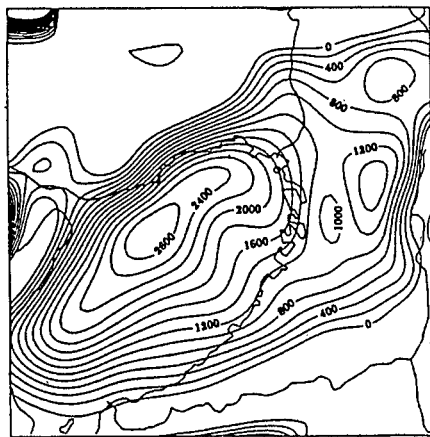
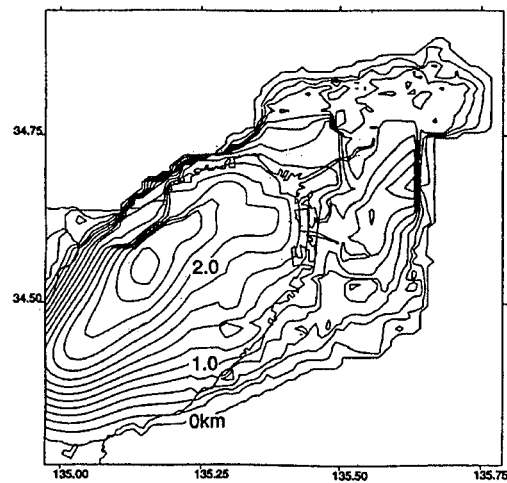


Fig. 1 参照した主な地盤データ種別の分布
Investigation Data of the Osaka Plain



P-0 Model (Miyakoshi et al. 1997)



P-1 Model

Fig. 2 地下構造モデルの基盤構造(等深度線図)

Depth Contours for the Sediment-Bedrock Interface of the Osaka Basin Model

深層ボーリングのほか、各地に点在する温泉ボーリングの結果⁶⁾を参照した。

なお、適当な地盤データが得られなかった地点については宮腰ほか²⁾のモデルが与える層境界深度を参照し、適用した(例えば大阪湾内南部など)。

Fig. 2に、宮腰ほか²⁾による滑らかな地下構造モデル(以下、P-0モデル)の基盤面と、新たに構築したモデル(P-1モデル)の基盤面の等深度線図を示す。両モデルとも大局的には相似しており、重力探査⁷⁾から推定される構造とも調和的である。P-1モデルにおいては局所的な不整形性が良く表現されていることが確認できる。但し、地盤データが得られた地点の分布には偏りがあり、不整形性の表現が十分でない部分もある。新たな地盤データの蓄積により細部形状を改良していくとともに、モデル化の範囲を京都・奈良盆地へ拡大していく方針である。

3. 3次元有限差分法による地震シミュレーション

3.1 解析モデル

地震動のシミュレーション解析にはスタaggerドグリッドを用いた空間4次精度時間2次精度の3次元有限差分法⁸⁾を用いた。解析モデルは、P-0モデルとP-1モデルのそれぞれについて、東西65km、南北60km、深さ17kmの領域を対象とした。Fig. 3にモデル化範囲を示す。地盤定数にはTable 1で示した値を使用した。減衰⁹⁾については各層のQ値を $Q=Vs[m/s]/10$ として与え、周期3秒で所定の値となるように設定した。

解析に当たっては時間刻み0.014秒、差分メッシュ間隔を175mとし、最小S波速度350m/sの層において2.5秒以上の周期帯域で計算精度が確保されるようにした。Fig. 4にP-0とP-1の差分モデルの東西断面と南北断面を示す。モデル断面の比較から、P-1モデルではP-0モデルに比べ地

下構造の凹凸形状がより微細にモデル化されているのが確認できる。

3.2 シミュレーションの対象とする地震

シミュレーション解析の対象とする地震には、大阪平野周辺での中小規模の地震であること、異なる伝播経路をもつこと、といった理由から、大阪平野の南部を震源とする1994年7月28日10:01大阪府南部の地震 $M_{JMA}4.1$ (EQ1)と、北部を震源とする1995年1月25日23:16兵庫県南部地震の余震 $M_{JMA}5.0$ (EQ2)の2地震を選定した。

3.2.1 震源モデル 震源は点震源でモデル化し、震源時間関数はベルシェイプ型のスムーズランプ関数として与えた。ライズタイムは1秒と仮定した。Table 2に解析に使用した断層パラメーターを示す。それぞれの地震の断層パラメーターは、気象庁によるメカニズム解を基に

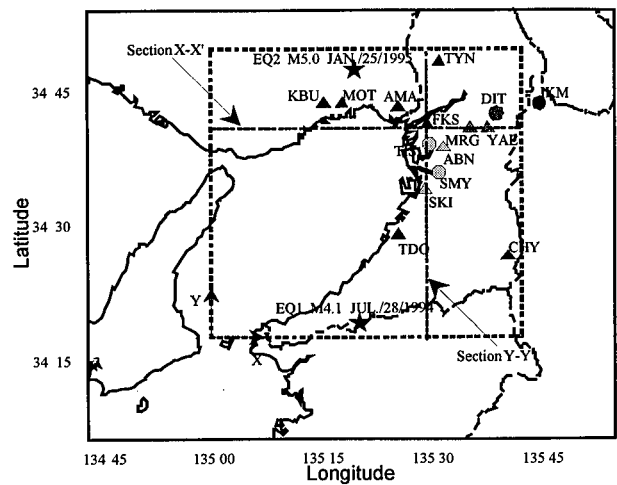


Fig. 3 差分モデル化範囲と観測点位置
Observation Stations and Region of FD Modeling

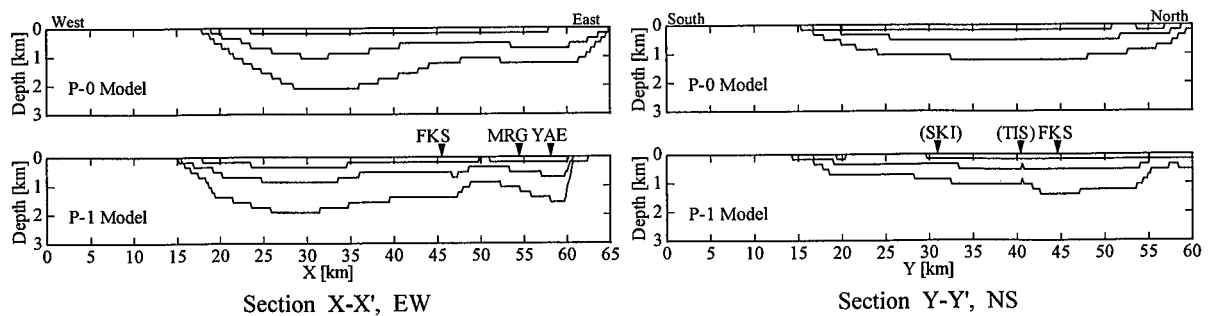
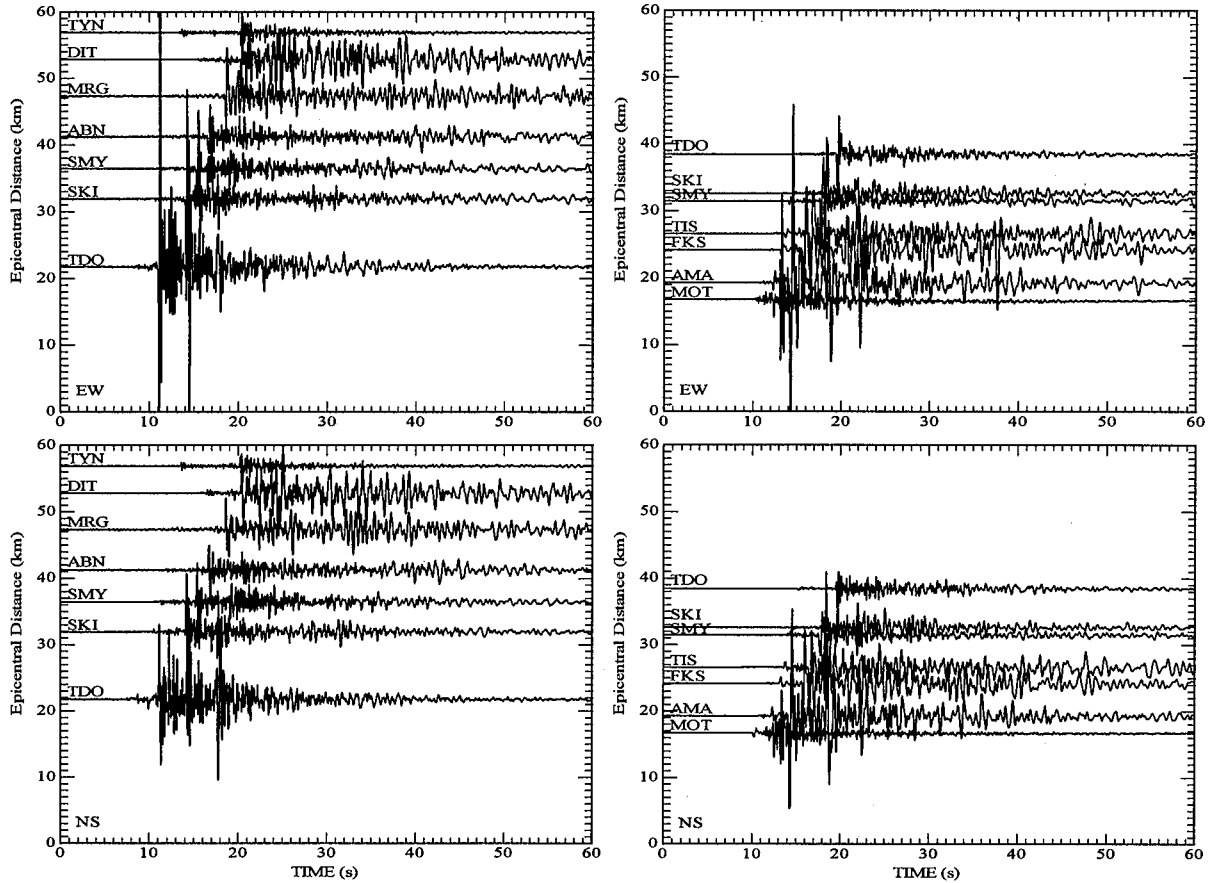


Fig. 4 差分モデルの断面形状
Vertical Cross Sections of the 3-D FD Model

Table 2 断層パラメーター
Source Parameters

event	origin time (JST)	M_{JMA}	longitude [deg.]	latitude [deg.]	depth [km]	strike / dip / rake [deg.]	seismic moment M_0 [N·m]
EQ1 (大阪府南部の地震)	1994.07/28 10:01 47.5	4.1	135.318	34.318	9	348 / 30 / 111	0.56E+15
EQ2 (兵庫県南部地震の余震)	1995.01/25 23:15 57.1	5.0	135.307	34.788	15	60 / 56 / -169	0.82E+16



EQ1, 1994.7/28大阪府南部の地震

EQ2, 1995.1/25兵庫県南部地震の余震

Fig. 5 地震動観測記録 (速度波形)

Observed Earthquake Records of EQ1 and EQ2 (Velocity Waveform)

設定した。但し、地震モーメントは、EQ1については岩盤上の観測点CHYの振幅により補正した値を用い、EQ2については松島ほか¹⁰⁾が求めた値を用いた。

3.2.2 観測記録に見られる大阪平野の地盤震動特性
大阪平野での地震観測点をFig. 3に、観測記録をFig. 5に震央距離によって並べて示す。大阪平野における地震観測記録にみられる地盤震動特性について、鳥海¹¹⁾は観測記録にS波の後続波が長く続いているのが観察されることを指摘している。また、松波ほか¹²⁾は、平野の南側を震源とする地震の場合に、上町台地上での観測記録のNS方向成分に生駒山地により生成されたLove波と思われる後続波が観察されるとしている。

対象とする2地震の観測記録から見られる大阪平野の地震動特性は以下のように言える。(1)観測点SKIとSMYはS波主要動後5~10秒の波群の振幅は主要動とほぼ同じ程度に大きい。(2)観測点MRGとDITでは主要動後15~20秒の波群の振幅が大きいだけでなく長周期で長く続いている。(3)観測点TIS, FKS, AMAでも主要動後15~20秒に長周期波群が見られるものの振幅は主要動に比べ小さい。観測点はこれらの3グループに区分され、それぞれ、(1)は上町断層の近傍、(2)は上町断層と生駒山地の中間地域、(3)は大阪湾周辺の軟弱地盤地域、と対応している。

3.3 解析結果と考察

Fig. 6にシミュレーション解析によるP-1モデルの地表面での波動伝播の様子を示す。上町断層と生駒山地の中間に位置する地域では、震源からの主要動の後に比較的大きな振幅の波が後れて伝播しているのが確認される。Fig. 7には地表面速度応答の最大値分布をP-0とP-1のそれぞれのモデルについて、観測記録の最大値と併せて示す。最大値分布からは、おおむね堆積層の深度の増大に伴い最大値が大きくなる傾向がNS, EWともに見られる。P-0とP-1モデルを比較すると、EW断面の東側(X=60km付近)ではP-1モデルの方がP-0モデルよりも最大値が増大しており、NS断面の北側(Y=55km付近)では反対にP-1モデルの方が減少していることから、モデルへの不整形形状の反映程度の違いが地盤震動評価に影響することを確認できる。

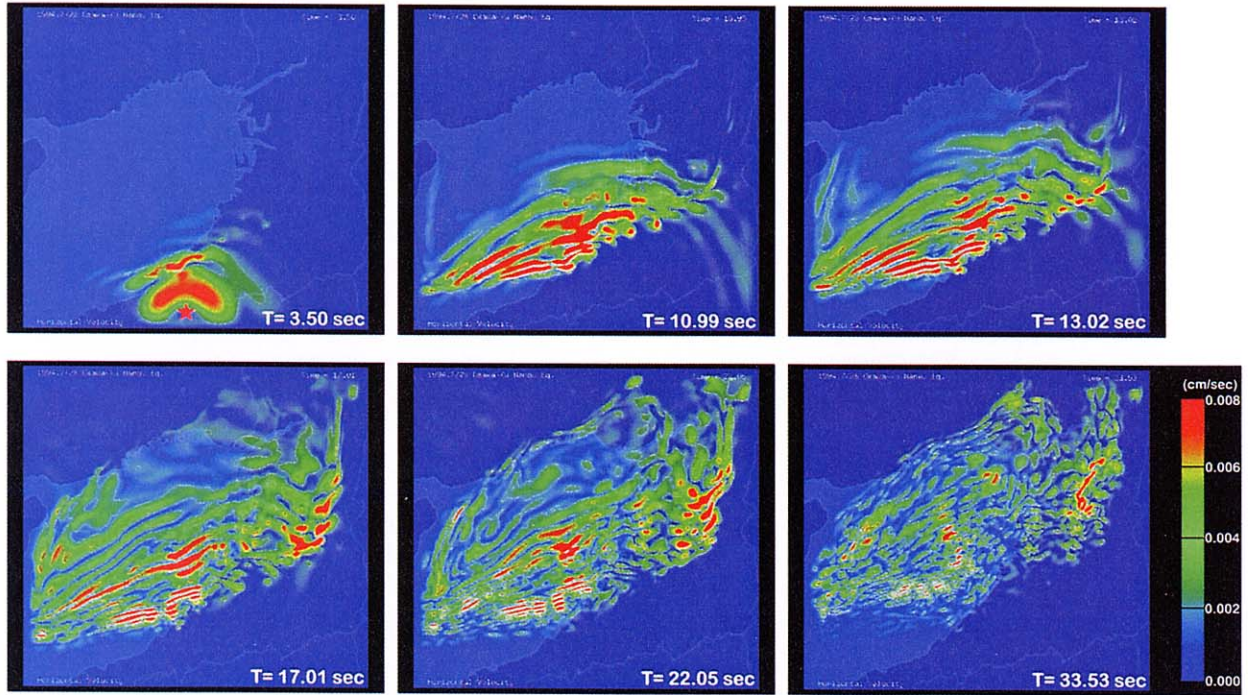
Fig. 8, Fig. 9に解析結果と観測記録の時刻歴波形を併せて示した。波形については解析結果、観測記録ともに振動数0.1~0.4Hz (周期2.5~10秒)のバンドパスフィルター処理をしている。解析結果のS波の立ち上がり部分の形状などは、どちらの地震についてもほぼ観測記録と同様であり、両地盤モデルの基本的な3次元地下構造は妥当であるといえる。また、基盤の浅い地点での地表面応答は

継続時間が短くパルス的な波形であるのに対して、基盤の深い平野中心部付近では継続時間が長く長周期成分が多い波形である、といった傾向についても解析結果は観測記録と調和している。

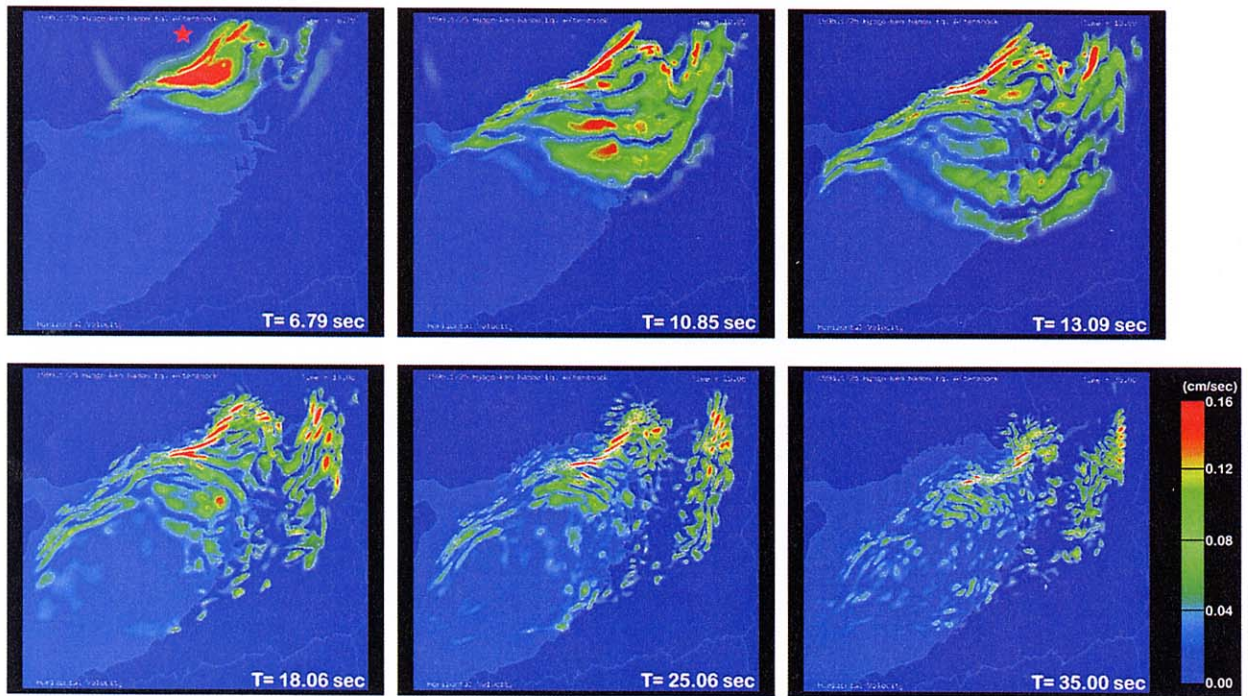
解析による観測記録の再現性を地域別に検討してみると、MRG以西の観測点（AMA, SMY, TDO）では振幅、

形状ともによく再現できているのに対して、平野東部（YAE, DIT）や平野北部（TYN）では再現性があまり良くないという傾向がみられる。

直下の地盤構造の変化が少ない観測点SMYとAMAでの波形はP-0, P-1の両モデルともに観測と良く一致しているが、後続波についてはAMAではEQ1の40~50秒辺り



EQ1, 1994.7/28大阪府南部の地震



EQ2, 1995.1/25兵庫県南部地震の余震

Fig. 6 シミュレーション解析による地表面での波動伝播（速度，水平方向成分絶対値）
Snapshots of Synthetic Velocity Motion on the Surface (Absolute Value of the Horizontal Component)

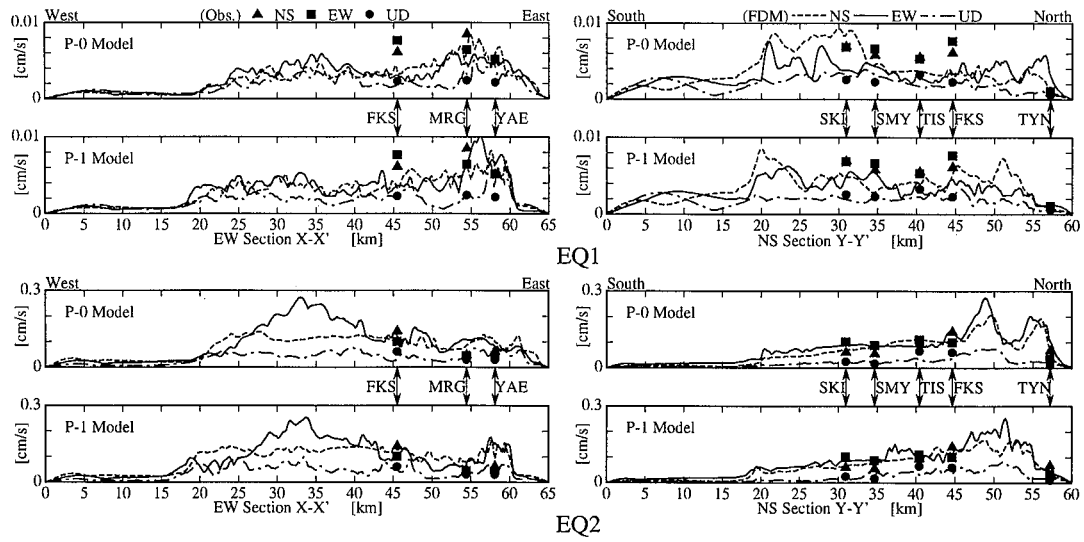


Fig. 7 地表面での速度応答の最大値分布
Distributions of Ground Motion Peak Velocity at Ground Surface

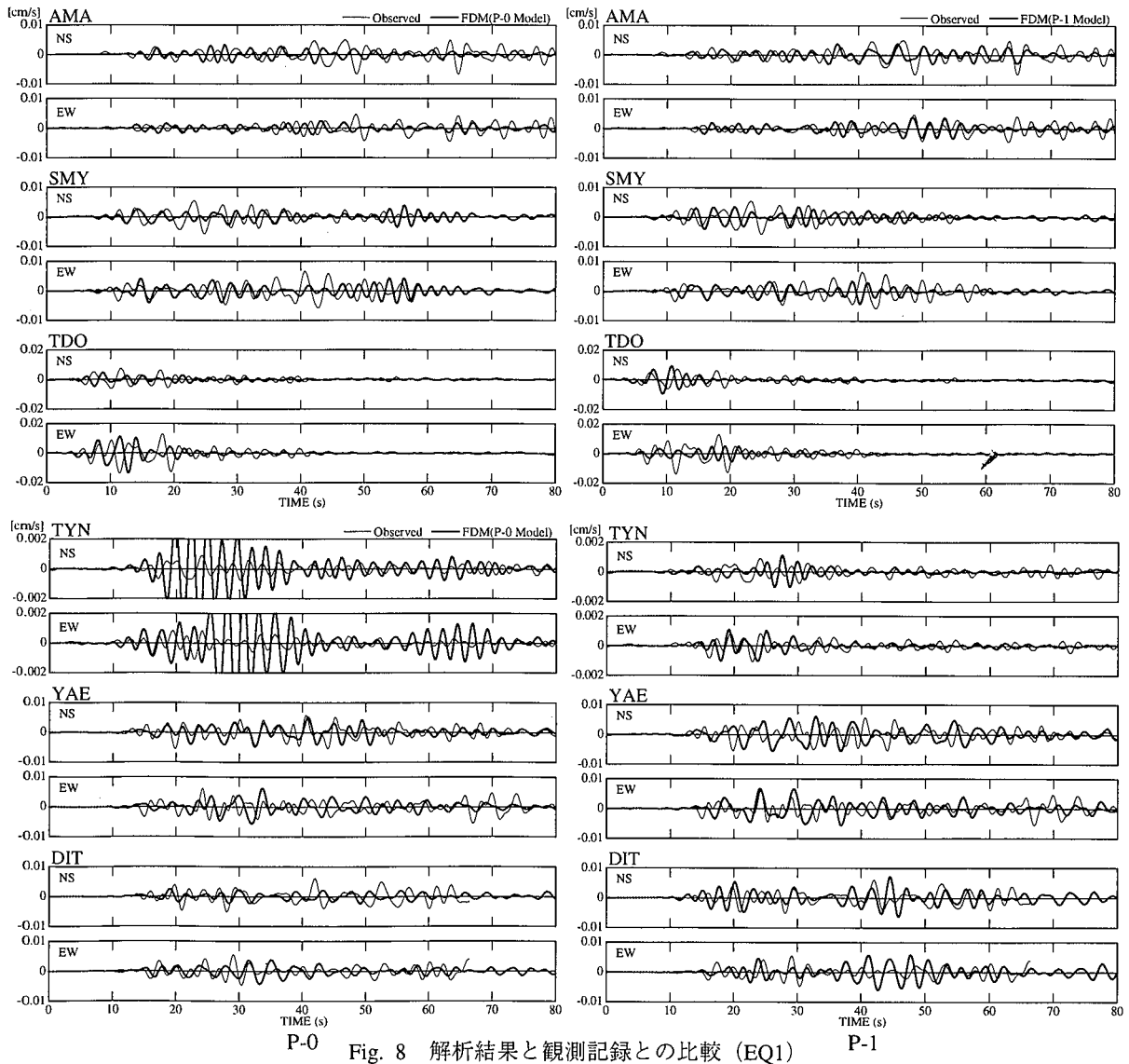


Fig. 8 解析結果と観測記録との比較 (EQ1)
Comparison between Recorded and Calculated Waveforms (EQ1)

やEQ2の15秒、25秒辺りの位相をP-1モデルの方が良く再現している。また、波形だけでなく、非定常スペクトルにおける卓越周期の変化、すなわち波の位相速度の分散性についてもP-1モデルの解析結果は観測記録と調和しており、観測記録が良く再現されていることが確認される (Fig. 10)。

観測点TYN周辺の平野北部ではP-1モデルにおいて直下の堆積層厚が薄くなるように修正されているが、両モデルとも位相はあまり良く再現されない。但し、振幅についてはP-1の方が観測に近く、モデルが改善されたといえる。平野東部の地下構造については、反射法結果⁵⁾に基づき生駒断層付近の基盤形状と堆積層厚を修正している。しかし、この地域の観測点YAE周辺では、P-1モデルでも観測記録の再現性は向上していない。この原因としては、生駒断層北部などの周辺地下構造からの影響、或いは基盤以浅の堆積層厚を基盤深さに比例させると仮定したことなどが考えられる。これらの平野の東部や北部での再現性の向上のためには、地盤モデルに今後も新た

な知見を取り入れて改良していく必要がある。

4. まとめ

- 1) 既往の地盤調査結果や地質資料などを基に、大阪および神戸の都市地域を含む深部堆積地盤構造モデルを構築した。
- 2) 3次元有限差分法により中小規模の地震観測記録のシミュレーション解析を行なった結果、観測記録を概ね良く再現できた。これにより構築した大阪平野の地下構造モデルが概ね妥当であると確認した。
- 3) 地盤構造がより複雑であると思われる平野の東部や北部では、解析結果の振幅が観測記録と一致しないなど、再現性があまり良くない。
- 4) 地盤構造が複雑な地点での観測記録の再現性を向上させるため、不十分な地盤資料を補ったり新たな知見を取り入れるなどによって、構築した地下構造モデルを今後も改良していく必要がある。

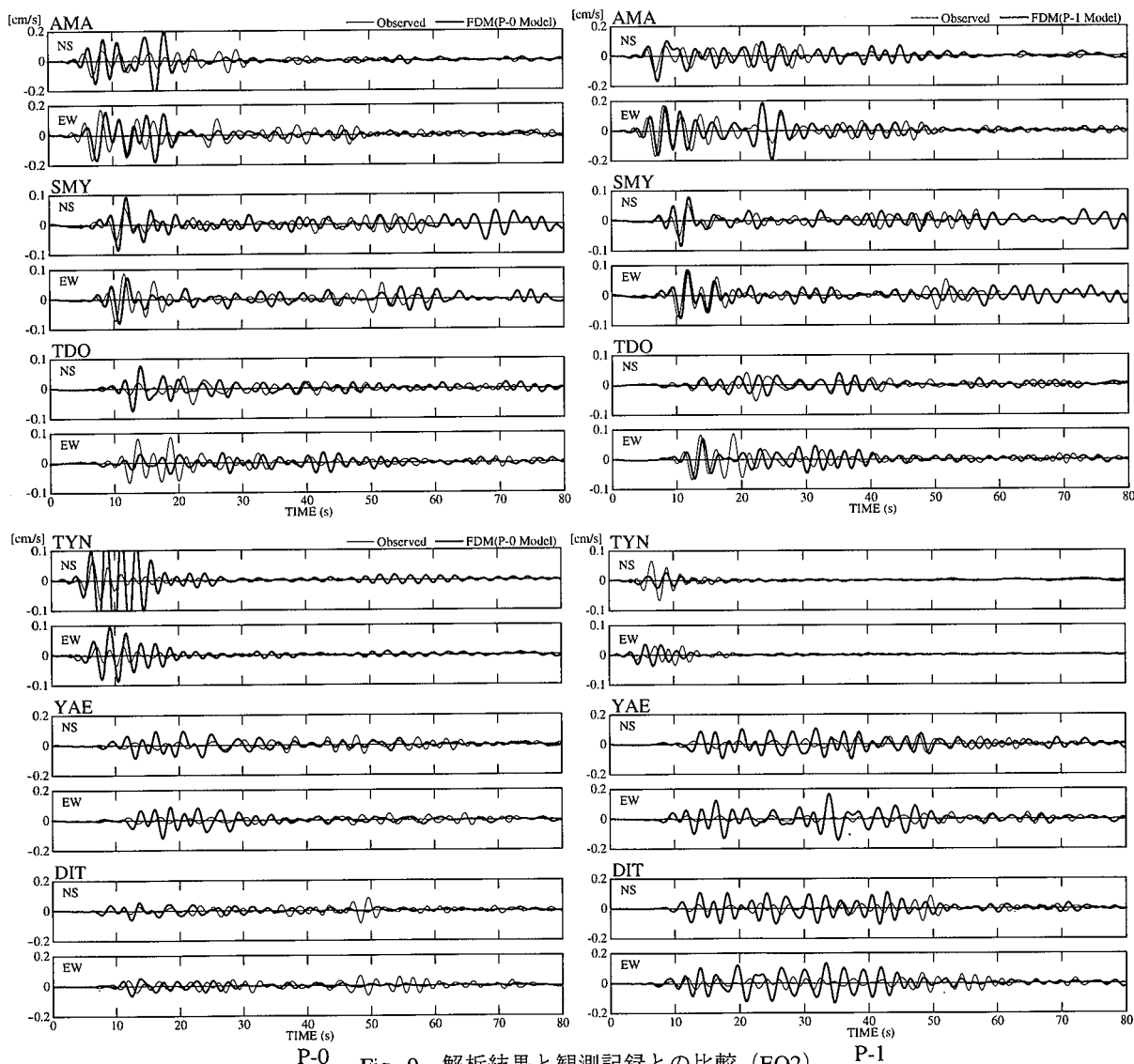


Fig. 9 解析結果と観測記録との比較 (EQ2) Comparison between Recorded and Calculated Waveforms (EQ2)

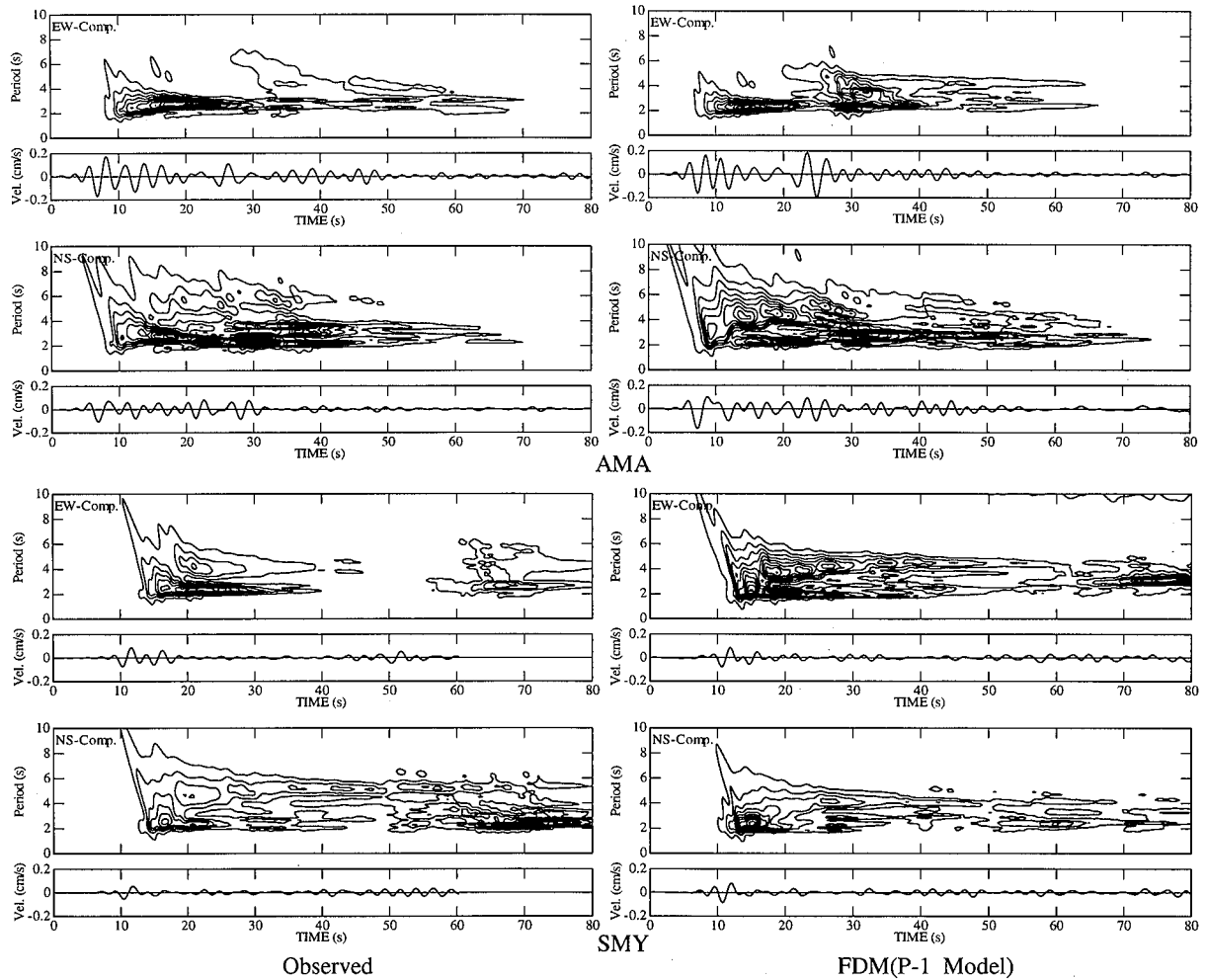


Fig. 10 解析結果と観測記録の非定常スペクトルの比較 (EQ2)

Comparison of Nonstationary Spectra between Recorded and Calculated Seismograms (EQ2)

5. 謝辞

観測記録の一部は関西地震観測研究協会によるものであり、関係各位には感謝の意を表します。また、3次元有限差分法による地盤震動解析には京大防災研・入倉孝次郎教授、岩田知孝助手に御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 香川ほか：大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化，第22回地震工学研究発表会講演概要，pp.199-202，(1993)
- 2) 宮腰ほか：大阪平野における深部地下構造のモデル化，物理探査学会第96回学術講演会論文集，pp.186-190，(1997)
- 3) 若松ほか：微動からみた大阪平野の地盤震動特性，第24回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.21-34，(1996)
- 4) 日本応用地質学会地震防災技術委員会：都市地震防災地盤図（動的地盤図）の作成手法に関する調査研究—神戸市域における解析事例研究—，「都市の地震防災と深部地下構造」に関するシンポジウム，p.19，(1998)
- 5) 例えば，堀家正則：深部地下構造探査とモデル化，第26回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.47-54，(1998)
- 6) 市原実：大阪とその周辺地域の第四紀地質図，アーバンクボタ，Vol.30，株式会社クボタ，(1991)
- 7) 例えば，井上ほか：大阪平野の重力異常と基盤構造，物理探査，Vol.51，No.1，pp.1-16，(1998)
- 8) Pitarka, A. and K. Irikura : Modeling 3D surface topography by finite-difference method : Kobe-JMA station site, Japan, case study, Geography. Res. Lett., Vol.23, No.2, pp.2729-2732, (1996)
- 9) Graves, R. W. : Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences., Bull. Seism. Soc. Am., Vol.86, No.4, pp.1091-1106, (1996)
- 10) 松島ほか：1995年兵庫県南部地震の余震観測記録のシミュレーションによる震源メカニズム及び基盤速度構造の推定，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.691-696，(1998)
- 11) 鳥海勲：大阪平野のあとゆれについて，第24回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.65-70，(1996)
- 12) 松波ほか：近畿における広帯域強震動アレイ観測，京大防災研究所年報，第35号，B-1，pp.1-11，(1992)