(2-2) 南海・東南海地震時の長周期地震動の予測高精度化に関する研究

釜江克宏 (京都大学原子炉実験所)

- kamae@kuca.rri.kyoto-u.ac.jp
- 川辺秀憲(京都大学原子炉実験所)

kawabe@rri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

今年度は、南海・東南海地震時の高精度強震動予測の実現に向けた地下構造モデルの高 精度化を図るため、まず大阪平野を対象に最新の地下構造情報を収集し、3 次元地下構造 モデルを再構築した。次に、想定されている東南海地震の震源域付近で発生した三重県南 部の地震(2000年10月31日, M5.7)のシミュレーションを行い、構築した地下構造モ デルの妥当性を検証した。その結果、観測波形のS波の振幅及び位相をほぼ再現でき、構 築した3次元地下構造モデルの有効性を確認した。しかしながら、観測波形の後続波の再 現性が悪い観測点もあり、後続波の再現精度の向上のための予備検討として、地下構造の 不均質性についての数値実験を行い、媒質の不均質の度合いと後続波の継続時間の関係に ついて検討した。

## (b) 業務の実施方法及び成果

1) はじめに

2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震(M6.9やM7.4)では、大阪平野や濃尾平野で 継続時間の長い長周期地震動が観測された。大阪平野での卓越周期は5~6秒で、濃尾平 野では3秒程度であった。南海トラフ沿いで起こる巨大地震ではより強い長周期地震動に 襲われる可能性が高い。本研究では南海・東南海地震時における大阪平野などでの高精度 な長周期地震動予測の実現に向け、長周期地震動の生成、伝播、成長に関与するパラメー タ(3 次元堆積盆地構造、伝播経路での減衰特性など)の抽出とその高精度化を目的とし ている。

平成 16年度までは、宮腰・他(1999)<sup>1)</sup>や堀川・他(2002)<sup>2)</sup>による研究成果を参照し、大 阪平野の 3 次元地下構造モデルを構築するとともに、長周期地震動の減衰(Q値)の最適 値について観測記録に基づき検討した。その結果、大阪平野で励起される継続時間の長い 長周期地震動、特に後続波の振幅を再現するためには減衰パラメータが重要で、その値(Q 値)としてS波速度の 1/2 から 1/5 程度の値が妥当であるという結果を得た。ただし、S波 振幅や位相特性については十分に再現できない地点もあった。こうした結果から、用いた 堆積盆地の 3 次元地下構造モデルに改良の余地があるものと考え、平成 17 年度は、まず 3 次元地下構造モデルの高精度化のために、最新の地下構造情報を収集し、大阪平野の 3 次 元地下構造モデルを再構築した。再構築したモデルの有効性を調べるため、ここでは想定 されている東南海地震の震源域付近で発生した三重県南部の地震(2000年 10月 31日, M5.7)時の大阪平野内などでの観測記録のシミュレーションを行った。なおシミュレーシ ョンに際しては、プレート構造も考慮した。現在、前述した 2004 年 9月 5日の紀伊半島南 東沖の地震のシミュレーションも実施中である。さらに、より高精度な観測記録の再現の ため、地下構造モデルの不均質性についての数値実験を行い、媒質の不均質性が地震動の 継続時間に与える影響についての予備検討を行った。

2)3次元地下構造モデルの構築

東南海・南海地震の強震動予測を視野にいれ、大規模堆積盆地である大阪平野及び、紀 伊半島を含む領域の3次元地下構造モデルを構築した。

大阪平野では宮腰・他 (1999)<sup>1)</sup>や堀川・他(2002<sup>2)</sup>; 2003<sup>3)</sup>)などいくつかの地下構造モ デルが既に構築されている。昨年度までの地下構造モデルは、大阪平野の盆地構造の形状 を、東側は堀川・他(2002)<sup>2)</sup>をもとに、西側を宮腰・他(1999)<sup>1)</sup>をもとに構築していた。 今年度はまず、最新の地下構造情報を収集し、堀川・他(2003)<sup>3)</sup>もとに大阪平野の盆地構 造の形状を決定し、宮腰・他<sup>1)</sup>で使用されている速度構造(物性値)をもとに、基盤岩を 含む4層の3次元速度構造モデルを再構築した。大阪平野の地下構造モデルの各層の上面 深度を図1に、各層の物性値を表1に示す。表1のQ値は、後述の式(1)により設定した値 である。堆積盆地外の領域は地表に基盤岩が露頭していると仮定した。フィリピン海プレ ートの形状は、Hori et al.(2004)<sup>4)</sup>のモデルを採用した。大阪平野の堆積盆地構造設定領域、 フィリピン海プレート上面深度を図2に示す。堆積盆地外の速度構造はNakanishi et al. (2002)<sup>5)</sup>をもとに設定した。堆積盆地外の地下構造モデルの物性値を表2に、P波速度構 造の一例を図3に示す。



表1 大阪平野地下構造モデル各層の物性値

Layer Number	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
Vs (km∕s)	0.4	0.55	1.0	3.2
Vp (km/s)	1.6	1.8	2.5	5.4
ho (g/cm <sup>3</sup> )	1.7	1.8	2.1	2.7
Qs (1Hz)	200	275	500	1000



図2 堆積盆地構造設定領域及びフィリピン海プレート上面深度

Layer Number	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6
Vs (km/s)	3.2	3.87	4.33	2.5	3.9	4.5
Vp (km/s)	5.4	6.6	7.2	4.8	6.8	7.8
$ ho(g/cm^3)$	2.7	2.8	3.0	2.6	2.9	3.1
Qs (1Hz)	1000	1000	1000	1000	1000	1000



図3 東経136.375度(堆積盆地外)の地下構造モデル南北断面 P 波速度構造

3) 観測記録による地下構造モデルの検証

a) 解析手法

三重県南部で発生した地震(2000年10月31日, M5.7)のシミュレーションを行い、 構築した地下構造モデルの有効性を検証した。地震動の計算は、スタッガードグリッドを 用いた空間4次・時間2次の精度の3次元有限差分法(Graves, 1996)<sup>6</sup>に、不等間隔 のStaggered Grid (Pitarka, 1999)<sup>7</sup>を設定して行った。差分法解析領域の周囲には40グ リッドの吸収領域(Cerjan et al., 1985<sup>8</sup>)を設け、その外側にClayton and Engquist (1977)<sup>9</sup>による吸収境界条件を適用した吸収境界を設定した。差分法への減衰(Q値)の適 用はGraves (1996)<sup>6</sup>の手法を用いる。ここで設定したQs値には次の式に示す周波数依存 がある。

$$\mathbf{Q}(\mathbf{f}) = \mathbf{Q}_0 \times (\mathbf{f}/\mathbf{f}_0)$$

ここで、fは周波数(Hz)、f<sub>0</sub>はreference frequency(Hz) 、 $Q_0$ はreference frequency にお けるQ値、Q(f)は周波数fでのQ値である。本研究ではreference frequency を1Hzに設定 した。式(2)に示すようにQ値はS波速度に比例すると仮定した。

$$Qs(1) = \alpha \times Vs$$

(2)

(1)

ここで、Qs(1)は 1Hz における S 波の減衰(Qs 値)、Vs は S 波速度(m/s)、 α(s/m)は S 波速度にかける係数を表す。平成 15 年度の研究成果より、 α の値は 1/2 とした。3 次元 地下構造モデルは、前節で示したモデルを用いる。三重県南部で発生した地震(2000 年 10 月 31 日, M5.7)の震源パラメータを表 3 に、差分法の解析条件を表 4 に、震央位置、 差分法解析対象領域、堆積盆地構造設定領域及び観測点位置を図 4 に示す。震源は点震源 とし、震源パラメータのうち地震モーメントは防災科学技術研究所の F-net の値を用い、 その他のパラメータについては Hi-net による値を用いた。地下構造モデルの物性値と差分 法解析条件から、計算波形の有効周期は 2.5 秒以上である。解析結果の検証には関西地震 観測研究協議会の観測記録を用いた。

表3 三重県南部で発生した地震(2000/10/31, M5.7)の震源パラメータ

Lon.	Lat.	Depth	Mo	Strike	Dip	Rake
(deg.)	(deg.)	(km)	(Nm)	(deg.)	(deg.)	(deg.)
136.34	34.30	35.4	1.7 × 10 <sup>17</sup>	295.8	59.8	121.7

表 4 差分法解析条件

グリッド間隔(km)	
・堆積盆地(大阪平野)内	0.2km
・堆積盆地外	0.6km
時間間隔	0.01s
吸収領域のグリッド数	40
(Cerjan et al., 1985)	



図4 (a) 三重県南部で発生した地震(2000年10月31日, M5.7)の震央位置、差分法 解析対象領域、堆積盆地構造モデル設定領域。★印は震央、実線で囲まれた領域は差 分法解析対象領域、1 点鎖線で囲まれた領域は堆積盆地構造設定領域、破線はフィリ ピン海プレート上面の等深線を表す。(b) 堆積盆地構造設定領域の基盤岩上面深度及 び観測点位置。

b) 解析結果

図5に三重県南部の地震の観測波形と計算波形の比較の一例を示す。どの観測点についても、S波到達付近の計算波形の振幅及び位相は、観測波形と概ね一致している。よって、 観測点及びその周辺地域での設定した地下構造モデルの層構造、速度構造及び減衰構造に ついて概ね妥当なモデルであると考えられる。しかしながら、FKSの 60~80 秒付近の NS成分など、S波の後に続く大きな振幅を再現できていない観測点もあり、部分的にモ



図5 観測波形と計算波形の比較



図5 観測波形と計算波形の比較(続き)

デルの層境界形状等の改良も必要である。詳細に見ると、堆積盆地外の HSD や基盤岩深 度が比較的浅い TYN では後続波まで観測波形の振幅をよく再現できているが、基盤岩深 度が深い FKS や YAE などでは、波形の後半部分で時間とともに計算波形の振幅が観測波 形と比べて小さくなり、後続波の再現性が悪くなっている。ここで用いた地下構造モデル では、地下構造を層構造として層内の媒質は一定と仮定し、不均質性(ゆらぎ)を考慮し ていない。このことが、後続波の再現性が悪くなった要因のひとつと考えられ、地下構造 の不均質性による影響についての数値実験を行い、媒質の不均質の度合いと後続波の継続 時間の関係について予備検討を行った。

4) 地下構造の不均質性についての検討

a) 解析手法

ここでは、地下構造の不均質性についての数値実験を行い、媒質の不均質の度合いと後 続波の継続時間の関係について検討した。

3 次元の半無限地盤に式(3)に示す ξ(**x**)により速度構造の揺らぎを与える。

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{V}_0 \ (1 + \boldsymbol{\xi} \ (\mathbf{x}))$$

(3)

ここで、 $V_0$ は波の平均伝播速度を、 $\xi$ (**x**)は揺らぎの関数を表す。揺らぎの関数 $\xi$ (**x**)は式(4) により求める。

$$\xi (\mathbf{x}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{F} \{ \mathbf{S}(\mathbf{x}) \}^{-1}$$

(4)

ここで、F**{**<sup>-1</sup>はフーリエ逆変換を、Aは振幅をコントロールする係数を表す。この係数A により $\xi$ (**x**)のばらつき(標準偏差 $\sigma$ )をコントロールする。S(**x**)は式(5)に示すP(**x**)の振幅 にランダム位相を与えることにより求める。

$$P(\mathbf{x}) = \mathbf{F}\{R(\mathbf{x})\}$$
(5)

 $R(\mathbf{x}) = \exp(-|\mathbf{r}|/a_{r}) \cdot \exp(-|\mathbf{z}|/a_{z})$ (6)

ここで、**F** $\{$ はフーリエ変換を、  $a_r, a_z$ は相関距離(correlation distance)を表す。**r**は原 点からの水平方向の距離である( $r^2 = x^2+y^2$ )。速度構造の揺らぎは、式(3)~式(6)を用い、  $a_r, a_z$ 及び $\xi$ (**x**)の標準偏差を与えることにより設定する。

地震動の計算には空間 4 次・時間 2 次の精度の 3 次元有限差分法<sup>6)</sup>を用い、点震源を 仮定して、図 6 に示すモデルについて数値実験を行った。差分法解析領域の周囲には 40 グ リッドの吸収領域 (Cerjan et al., 1985<sup>8)</sup>)を設け、その外側にClayton and Engquist (1977)<sup>9)</sup>による吸収境界条件を適用した吸収境界を設定した。差分法の解析条件を表 5 に



図6 数値実験に用いた地盤モデル

示す。震源は点震源を仮定して、震源時間関数は Bell Shape 型の関数で与え、ライズタ イムは 1.2 秒とした。設定した震源パラメータを表6に示す。表7に示す5ケースについ て計算を行った。Case1 は均質媒質の計算である。表 7 のパラメータから計算した $\xi(\mathbf{x})$ によりS波速度構造の揺らぎを与え、P波速度構造の揺らぎは、 $\xi(\mathbf{x})$ を0.5倍して与えた。

b) 解析結果

まず、表7に示した5ケースの不均質構造の違いについて検討する。設定した地下構造の地表面におけるS波速度の揺らぎを図7に示す。図7の(b)(c)(d)から、相関距離ar, azを小さくしていくと、速度の揺らぎも細かくなっていくことが分かる。図7のCase3とCase5を比較すると、標準偏差が小さくなると、速度の揺らぎも小さくなっていることが分かる。

次に、不均質構造の違いが計算結果に与える影響について検討する。図7に示したP1、 P2、P3の3地点での速度波形を図8に示す。3地点の震央距離はそれぞれ14km、42km、 71kmである。図8から、震源に近いP1の地点では地下構造の不均質による後続波の振幅 には違いがあまり見られないが、震源からの距離が遠くなるとともに後続波の振幅(継続 時間)が、地下構造の不均質により異なってくることが分かる。詳細に見ると、P3の地点 ではCase2、Case3、Case4と相関距離ar, azが大きくなるに従い、25秒以降の後続波の波 長(卓越周期)が長くなっていることが分かる。また、P3の地点のCase3とCase5の波形を比較すると、揺らぎの関数 ξ(x)の標準偏差が小さくなると、20~30秒の時刻に到達するS波及びその前後の地震波の振幅が小さくなっていることが分かる。これらの傾向は、 震源距離が近くなると不明瞭になっていく。よって、不均質媒質を伝播する地震波は、その不均質構造の揺らぎの関数 ξ(x)の標準偏差、相関距離ar, az及び不均質構造中を伝播する距離により、後続波の振幅及び卓越周期が異なってくると考えられる。

表 5 差分法解析条件

表6 震源パラメータ

グリッド数(nx,ny,nz):	500, 500, 250	-	位置(x,y):	30km, 30km
グリッド間隔:	0.2km		深さ:	8km
時間間隔:	0.01s		strike, dip, rake:	0°,90°,0°
伝播速度(Vs, Vp):	3.2km/s, 5.4km/s		M <sub>0</sub> :	$1.0 \times 10^{18}$ Nm
密度:	2.7g/cm <sup>3</sup>	-	-	

表7 揺らぎを与えるパラメータの設定

	$\xi(\mathbf{x})$ の標準偏差 $\sigma$	ar (km)	az (km)
Case1	0.00	-	-
Case2	0.10	1.6	1.6
Case3	0.10	3.2	3.2
Case4	0.10	4.8	4.8
Case5	0.05	3.2	3.2





図 8 速度波形の比較。括弧の中は図 6 に示した原点からの x 軸、y 軸方向の距離を表す。 (d) 結論ならびに今後の課題

平成 17 年度は、まず、最新の情報をもとに大阪平野の堆積盆地構造モデルを再構築した。次に、想定されている東南海地震の震源域付近で発生した三重県南部の地震(2000年10月31日, M5.7)のシミュレーションを行い、構築した地下構造モデルの有効性を検証した。その結果、どの観測点についても、S波到達付近の計算波形の振幅及び位相は観測波形と概ね一致しており、構築した地下構造モデルの速度構造は概ね妥当であると考えられる。ただし、基盤岩深度が比較的浅いTYNなどでは後続波まで観測波形の振幅をよく再現できているが、基盤岩深度が深いFKSなどでは、波形の後半部分で時間とともに計

算波形の振幅が観測波形と比べて小さくなり、後続波の再現性が悪くなっている。ここで 用いた地下構造モデルでは地下構造の不均質性を考慮していないことから、このことが、 後続波の再現性が悪くなった要因のひとつと考えられる。この結果を検証するための予備 検討として、地下構造の不均質性についての数値実験を行い、媒質の不均質の度合いと後 続波の継続時間の関係について検討した。その結果、不均質媒質を伝播する地震波は、そ の不均質構造の揺らぎの関数 ξ(**x**)の標準偏差、相関距離ar, az及び不均質構造中を伝播す る距離により、後続波の振幅及び卓越周期が異なるという結果を得た。

今後の課題として、①観測波形の後続波を説明できるように地下構造の層境界形状及び 減衰構造を改良すること、②ここで示した不均質構造の設定法を実際の地下構造モデルに 適用し、より高精度な長周期地震動評価のための最適な不均質パラメータを求めることが 必要である。

(e) 引用文献

- 1) 宮腰研,香川敬生,趙伯明,徳林宗孝,澤田純男:大阪堆積盆地における深部地盤構造 のモデル化(その3),第25回地震工学研究発表会講演論文集,pp.185-188,1999.
- 2) 堀川晴央,他:大阪平野の3次元地盤構造モデルの作成,活断層・古地震研究報告,No.2, pp.291-324, 2002.
- 3) 堀川晴央,他:断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No.3, pp.225-259, 2003.
- 4) Hori, T., N. Katob, K. Hiraharac, T. Babaa, Y. Kanedaa: A numerical simulation of earthquake cycles along the Nankai Trough in southwest Japan: lateral variation in frictional property due to the slab geometry controls the nucleation position, Earth and Plan. Sci. Lett., 228, 215-226, 2004.
- 5) Nakanishi, A., et. al.: Deep crustal structure of the eastern Nankai trough and Zenisu ridge by dense airgun-OBS seismic profiling, Mar. Geology, 187, 47-62, 2002.
- 6) Graves, R.W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1091-1106, 1996.
- 7) Pitarka, A.: 3D finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 54-68. 1999.
- Cerjan, C., D. Kosllof, R. Kosllof and M. Reshef: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic boundary condition, Geophysics, Vol.50, pp.171-176, 1985.
- 9) Clayton, R. and B. Engquist: Absorbing boundary condition for acoustic and elastic wave equations. Bull. Seism. Soc. Am., Vol.67, pp.1529-1540, 1977.

著者	題名	発表先	発表年月日
川辺秀憲	2004年紀伊半島南東沖地震の強	地球惑星科学関連学会2005	平成 17 年
釜江克宏	震動シミュレーション	年合同大会	5月22日

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

川辺秀憲	2004年9月5日紀伊半島南東沖	2005年度日本建築学会大会	平成 17 年
釜江克宏	の地震の強震動シミュレーショ	(近畿) 学術講演会	9月1日
	ン		
Hidenori	Estimation of Q Value for Long	大大特(大都市大震災軽減	平成 17 年
KAWABE,	Period Ground Motion	化特別プロジェクト)I 第	10月27日
Katsuhiro	Simulation in Osaka Basin,	2回国際ワークショップ	
KAMAE	Japan	「Strong Ground Motion	
		Predction and Earthquake	
		Tectonics in Urban Areas」	
釜江克宏	南海地震による近畿圏の強震動	第 33 回地盤震動シンポジ	平成 17 年
川辺秀憲	予測	ウム (2005)	11月18日
Hidenori	Long Period Ground Motion	2005 American Geophysical	平成 17 年
KAWABE,	Prediction Of Linked Tonankai	Union Fall Meeting, San	12月6日
Katsuhiro	And Nankai Subduction	Francisco, USA.	
KAMAE	Earthquakes Using 3D Finite		
	Difference Method		

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

## (3) 平成18年度業務計画案

近畿圏におけるこれまでの各種探査情報、特に平成16年度の大大特探査結果を参照して、 地盤・地殻構造モデルのプロトタイプと呼ぶべきものを策定した。そのモデルの妥当性は、 収集された強震動観測記録をモデリングすることによって検討を進めている。それにより 近畿圏の主たる堆積盆地において震動継続時間や卓越周期等の基本的な特性を周期数秒以 上の周期帯域で評価できつつあることが示されており、更に短周期域の評価をすすめてい く中でもこれらの貴重なデータでの検証と、地盤モデルの改良に進めていく必要がある。 盆地構造情報が不十分な地点の情報収集と記録に基づく検証を行い、モデルの改良を進め ていく。