

京都盆地の地下構造と地盤震動特性

清野純史¹・土岐憲三²・坂井康伸³

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³工修 清水建設(株) (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

京都市の地下構造調査で実施された P 波反射法探査による反射断面、ボーリング調査および重力異常調査の結果を基に、京都盆地の深部地下構造を 2 次元 3 次のスプライン関数を用いてモデル化した。この 3 次元地盤モデルに有限差分法(FDM)を適用し、京都盆地の地盤震動特性について検討を行う。本論文では、京都市の要注意活断層の一つである花折断層を対象に、有限差分法によるやや長周期地震動のシミュレーションを行い、京都盆地の震動特性についての検討を行った。

Key Words: Kyoto basin, subsurface structure, ground motion, fault model, finite difference method

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、地震防災を考える上で深部地下構造の解明が不可欠という認識が生まれ、現在多くの都市で深部地下構造に関する調査が活発に行われている。京都市においても平成 10 年度より 3 ヶ年計画で京都盆地の地下構造調査が行われており、京都市域の 3 次元地盤モデルを作成するための基礎資料がそろいつつある。このような資料を援用し、京都盆地の地盤震動特性を評価することは非常に重要な課題である。また、震源の破壊特性といった要因も地盤の震動特性に大きく影響するため、京都盆地の震動特性を評価する場合には、防災対策上考慮すべき断層を特定した解析が必要である。

したがって、本論文ではまず京都市の地下構造調査で得られた結果を援用し、京都盆地の基盤構造をモデル化する。このモデルを用いて断層破壊を含めた京都盆地の 3 次元地震動解析を行なうことで、京都盆地の地盤震動特性の定量的な検討を行う。

2. 京都盆地のモデル化

京都盆地の基盤岩構造は、京都市によって実施された P 波反射法地盤探査¹⁾によって得られる反射断面深さ、および基盤岩が地表面に露出していると考えられる周辺岩盤山系の標高値を基に、図-1 の黒枠で囲む地域([0,2100]~[6000,27000])に対して 3km×3km のメッシュに分割した 2 次元 3 次の B スプライン関数²⁾で補間することによって求めた。図中の盆地内の太実線は調査によって反射断面が得られている測線である。

用いたスプライン関数は次式で与えられる。

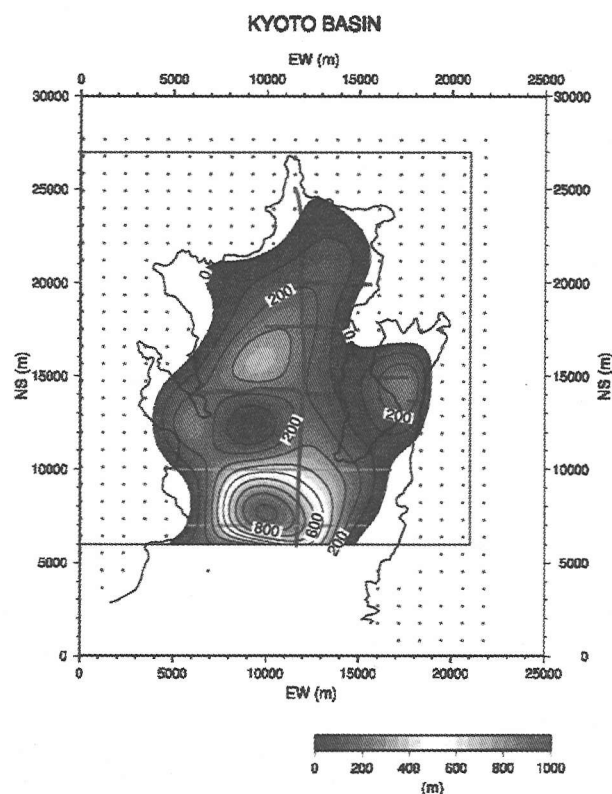


図-1 京都盆地の基盤岩構造モデル

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 c_{k+i, l+j} B_{4-i} \left(\frac{x-x_k}{w_x} \right) B_{4-j} \left(\frac{y-y_l}{w_y} \right) \quad (1)$$

ここに、 c_{ij} は曲面の形を表現するためのスプライン係数であり、 $B_1 \sim B_4$ は以下のような B スプライン関数を表す。

表-1 基盤岩深度を表現するためのスプライン係数

		I									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J	1	-0.925	0.803	-1.240	2.335	-5.082	-0.574	-0.300	0.150	-1.056	4.716
	2	-0.024	-0.281	-0.036	-0.217	1.397	1.314	-0.486	0.238	-0.576	0.318
	3	1.168	-0.865	-0.246	-0.324	1.245	0.249	0.574	-0.648	0.416	-4.746
	4	-1.274	-0.652	-0.233	0.862	-0.868	0.601	-0.251	0.417	-1.219	4.211
	5	2.304	-1.015	-0.101	-0.011	0.829	0.077	0.012	0.963	-1.593	2.195
	6	0.933	-0.259	-0.357	-0.258	0.116	0.474	-0.265	-0.613	0.743	-4.275
	7	-4.837	0.578	-0.539	0.246	0.070	0.099	0.352	-0.473	-0.537	2.250
	8	9.650	-2.269	0.415	-0.609	-0.529	0.127	-0.136	-0.387	-0.402	0.926
	9	-6.480	-0.746	-0.946	-0.128	-0.001	-0.011	-0.196	0.269	-3.751	14.523
	10	9.572	0.279	0.039	-0.520	-3.223	-0.682	-0.617	-1.685	10.189	-50.398

$$B_1(r) = r^3/6$$
$$B_2(r) = (-3r^3 + 3r^2 + 3r + 1)/6$$
$$B_3(r) = (3r^3 - 6r^2 + 4)/6 \quad (2)$$
$$B_4(r) = (-r^3 + 3r^2 - 3r + 1)/6$$

図-1 の黒枠で囲む地域の基盤岩深度を表現するスプライン係数を表-1 に、その係数によって表現される京都盆地の基盤岩構造モデルを図-1 に示す。ただし、図 1 に示すモデルは京都市によってまとめられた京都市域の重力異常調査¹⁾から推測される基盤岩構造との適合性を考慮して 5km×5km メッシュに分割したスプライン関数によって補間された基盤岩深度の値を、入力値の一部として用いることで得たモデルである。

3. 有限差分法による解析

解析は、時間に関して 2 次精度、空間に関して 4 次精度の staggered grid³⁾による 3 次元有限差分法で行った。

図-2 に本解析の計算領域を示す。ただし、図-2 の原点は図-1 の原点から北に 6km、東に 1km ずれた地点(北緯 34 度 53 分 14.8 秒、東経 135 度 38 分 8.5 秒)である。格子間隔は x 軸(NS)方向、y 軸(EW)方向については 0.1km とし、z 軸(深さ)方向については Nonuniform Grid⁴⁾を適用している(1km 以浅は 0.1km、1km 以深は 0.2km)。以上の格子間隔にしたがって計算領域を 350×250×90 の格子点で離散化した。また、非物理境界からの反射波を抑制するために、計算領域内の地表面以外の非物理境界面付近の 20 格子を減衰領域としている⁵⁾。したがって、解析できる領域は図-2 の黒枠で囲む地域となる。

京都盆地の速度構造は、表-2 のような基盤と堆積

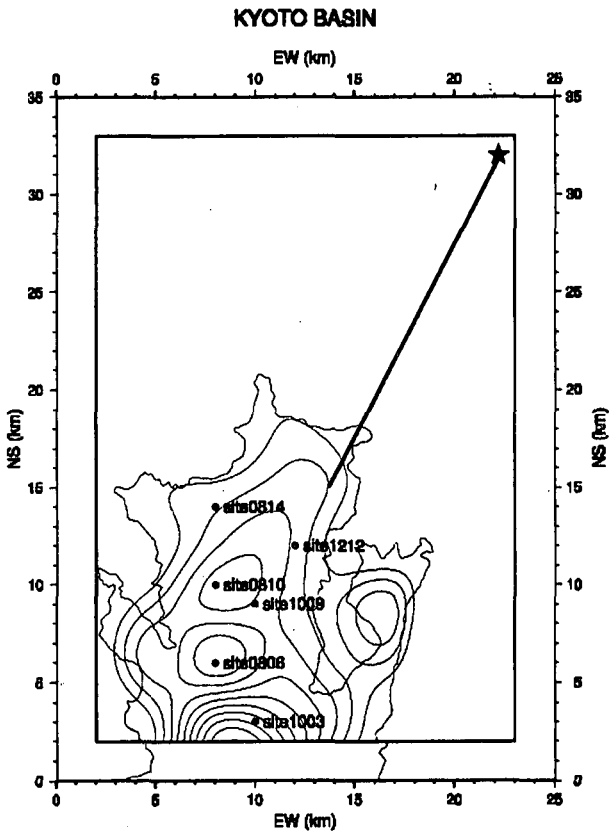


図-2 解析モデル

表-2 京都盆地の速度構造

	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ(g/cm ³)	Q-値
堆積層	1800	500	2.0	100
基盤岩	4500	2500	2.5	500

層から成る 2 層構造でモデル化し、地表面は水平であると仮定した。

表-2 の各パラメータは京都市によって実施された基準ボーリング孔総合検層¹⁾の結果を参考とし

表-3 解析に用いた断層パラメータ

走向 ϕ_s	26.5°
傾斜角 δ	90.0°
すべり角 λ	180.0°
立ち上がり時間 T_0	2.2 sec
地震モーメント M_0	6.31×10^{25} dyne·cm
破壊伝播速度 v_r	2000 m/sec

で決めており、地盤の減衰は Graves³⁾の手法に従い、 Q 値によって実現している。

ただし、その値は S 波速度の 20%としている。

震源断層としては花折断層を考え、この一部が破壊した場合を考える。地震の規模はモーメントマグニチュード $M_w=6.5$ の地震を想定し、断層長さ 19.2km、断層幅 9.6km(深さ 2km~11.6km)の矩形断層でモデル化した。この矩形断層の 1 端(図-2 の★印)で生じた破壊が断層長さ方向に破壊伝播速度 2.0km/sec で伝播するユニラテラルな破壊を想定した。差分法による計算では、断層面上の点震源の破壊開始時刻を破壊伝播速度にしたがって、破壊開始点から南西方向に変化させることで、このユニラテラルな strike slip 型の破壊伝播を表現している。なお、ダブルカップル型の点震源の導入は Arben⁴⁾の手法を用いた。

表-3 に解析に用いた断層パラメータを示す。ただし、地震モーメント M_0 は Hanks & Kanamori の関係式⁶⁾から求めている。また、滑り時間関数

$f^s(t)$ は、時刻 $0 \leq t \leq T_0$ の範囲内で以下の式によって定義されるベル型の関数を用いている。

$$f^s(t) = \{1 - \cos(2\pi/T_0)\}/T_0 \quad (3)$$

計算時間間隔 Δt およびカットオフ周波数 f_c はそれぞれ $\Delta t = 0.01$ sec, $f_c = 1.0$ Hz とした⁴⁾。

地表面の観測点として図-2 の●印で示す 6 ヶ所を取り、この場所における速度波形を計算した。各観測点において特に震動が大きい成分である EW 成分を図-3 に示す。また、図-4 に各成分の地表面速度の最大値を示す。

4. 京都盆地の震動特性

図-3 の各観測点の波形において、盆地内直下に深い基盤構造が与えられる site0810, site1003 および site1009 では継続時間が長く、振幅の大きい波形が得られている。一方、直下に比較的浅い基盤構造が与えられる site0806, site0814 および site1212 の波形ではパルス状の波が卓越しているが、以後の後続位相には振幅の大きな波群はほとんど見られない結果となっており、速度波形の最大値およびその位相特性が基盤岩深度と密接に関係していることが確認できる。また、浅い構造の速度波形に見られるパルス状の波には、想定した右横ずれ断層によるユニラテラルな破壊によって発生する長周期パルスの影響が現れているものと考えられる。

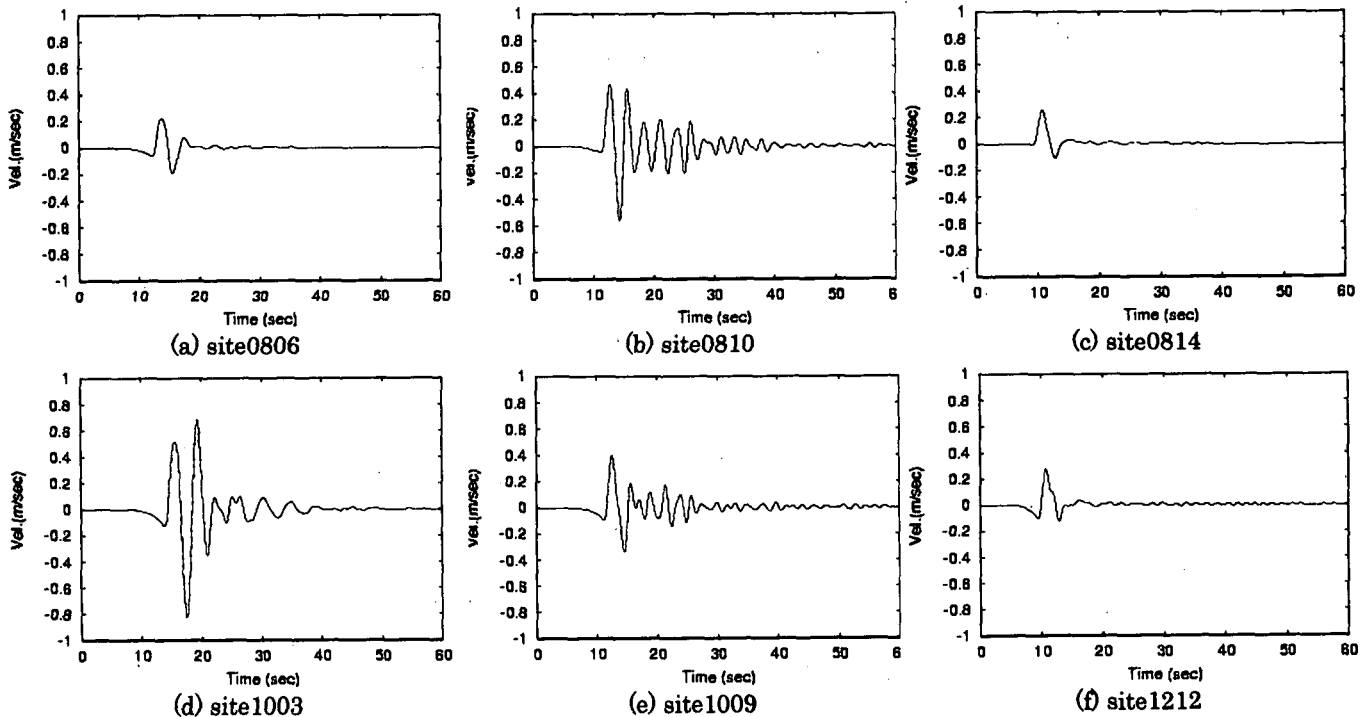


図-3 地表面の速度波形(EW 成分)

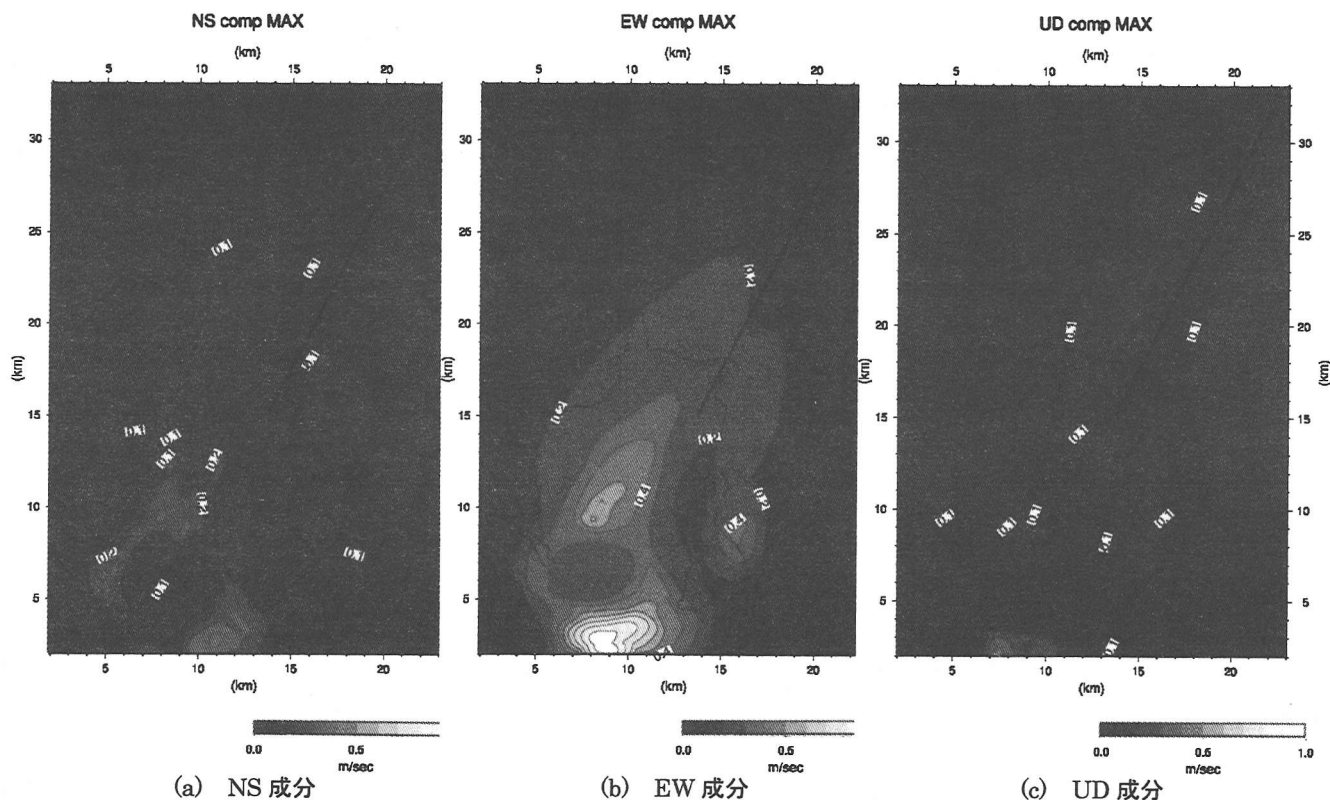


図-4 各成分ごとの地表面の速度の最大値

図-4 の地表面速度の最大値を見ると、EW 成分が卓越し、他の 2 成分(NS,UD)のそれぞれの約 2 倍程度大きいことが確認できる。また、盆地内の強い震動は、各成分とも概ね図-1 の基盤岩構造で深い構造が与えられる地域に見られ、盆地内の震動特性が震源における破壊メカニズムのみならず深部地下構造に大きく依存することを再認識する結果といえる。盆地内で最も強い震動を与える地域である解析領域の南部(site1003 付近)は、非物理境界面の反射波を抑制するために設けた減衰領域に非常に近い地域である。そのため、今後さらに詳細な京都盆地のモデル化を進める上では、特に京都盆地南部の基盤構造のモデル化が必要である。

5. まとめ

本論文ではまず京都盆地の基盤岩構造を 2 次元 3 次のスプライン関数を用いてモデル化し、そのモデルに有限差分法を適用することで京都盆地のやや長周期地震動の評価を行った。その結果、盆地内の震動は基盤岩構造と密接に関係していることを確認するとともに、その影響を定量的に評価することができた。

本解析では京都盆地を単純な 2 層構造でモデル化し、震源断層はアスペリティー等を考慮していない。このような仮定は京都盆地の震動特性の概略把握には充分であると考えられるが、ここで算出した最大速度の絶対値等を議論する場合には十分とはいえない。したがって、今後は京都市南部

の地盤データを集積するとともに、盆地の多層構造のモデル化を行い、より詳細な京都盆地のモデルを構築していく予定である。

謝辞：本解析で用いたスプライン補間のプログラムは(財)地域地盤環境研究所の香川敬生氏が作成したものを利用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 京都市：平成 11 年度地震関係基礎調査交付金「京都盆地の地下構造に関する調査」成果報告書(概要版), 2000.
- 2) 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南荘 淳：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.
- 3) Robert W. Graves: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp 1091-1106, 1996.
- 4) Arben Pitarka: 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggerd Grid with Nonuniform Spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, pp 54-68, 1999.
- 5) Charles Cerjan, D. Kosloff, R. Kosloff and M. Reshef: A nonreflecting boundary condition for discrete acousitic and elastic wave equations, Geophysics, 50, pp 705-708, 1985.
- 6) Hanks. T. C. and H. Kanamori : A moment magnitude scale, Geophysics, 84, pp 2348-2350, 1979.