

## 兵庫県南部地震の3次元差分シミュレーション —西宮市域および明石海峡周辺の強震動

3D finite difference simulation of Hyogo-ken Nanbu Earthquake  
- The strong motion in Nishinomiya city and Akashi strait region

吉見雅行\*, 東原紘道\*\*

Masayuki YOSHIMI and Hiromichi HIGASHIHARA

\* 学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 地震研究所地球計測部門 ( 同上 )

We simulate the strong ground motion of Kobe earthquake by means of 3D finite difference method and studied the strong motion distribution and waveforms in some points. The dynamic faulting model is used in order to represent natural rupture process. Simulated distribution of maximum velocity almost matches to that of damaged area, including Nishinomiya, and simulated waveforms in heavily damaged region have pulse like wave in common. We also executed 3D simulation including new seismic fault -Akashi Kaikyo fault, which was recently revealed to have ruptured during the Kobe earthquake, and studied its effect on the strong motion near the fault.

**Key Words**: finite difference method, Hyogo-ken Nanbu Earthquake, strong motion

### 1. はじめに

1995年1月17日、兵庫県南部地震が発生し、断層近傍の大都市神戸に壊滅的な被害を及ぼした。特に被害が甚大で震度7に認定された地域は、本州側では神戸市南西部から西宮市、宝塚市にかけて帯状に分布した。

この地震では多量の強震動記録が得られた。しかしながら、被害域全体での細かな強震動分布を決定するには不十分な量であった。そこで、被害率を基にした地震動強さの逆推定やアンケートによる震度調査がおこなわれ、震度7に認定されなかった地域でも揺れの激しい地域が存在したことが報告されている<sup>1)4)</sup>。これらの研究で共通して地震動が大きかったとされている地域に西宮地区がある。事実、ニテコ池のアースダム崩壊、仁川上流での大規模な地滑り、数百mにわたる新幹線高架橋の崩壊などの深刻な被害が多数生じている<sup>5)6)</sup>。

一方、地震発生後に大・小規模の地下構造調査がおこなわれ、被害域の地下構造が明らかになった。また、震源インバージョンが数多くおこなわれ、断層過程が解明されつつある。さらに、これらの結果を利用したシミュレーションがおこなわれ、観測波形の再現や、構造物被害の著しい帯状地域の出現に対する説明の試みがなされている<sup>7)11)</sup>。

工学目的においてはシミュレーションによる定性的な説明にとどまらず定量的な予測、すなわち波形、が重要である。特に費用対効果の高い地震防災対策として損傷系・免震系の構造物の活用が進んでいるが、これらの系の挙動を解析するためには地震波の最大値では不十分で、波形データそのものが必要である<sup>12)</sup>。

本研究では、兵庫県南部地震の西宮における被害を地震

学・工学的観点から突き止める目的で、3次元差分法を用いたシミュレーションをおこなう。

最近、Kohketsuら<sup>13)</sup>やMegawati<sup>14)</sup>によって明石海峡直下で、従来検出されていたものとは別の断層破壊が存在したことが示された。インバージョンにより求められたこの断層の規模は小さいが、滑り量の大きな領域が地表近くにあるため、近傍の地動に大きな影響をもたらした可能性がある。事実、当時建設中であった明石海峡大橋主塔への入力地震に大きな寄与を与えたと報告されている。しかし、この断層を考慮したシミュレーション解析は未だおこなわれていない。そこで、この小断層がもたらした地動をシミュレーションにより評価する。

### 2. 既往の研究

兵庫県南部地震に関するこれまでの研究を本研究に必要な範囲で記述する。

#### 2.1 震源モデル

これまで、①遠地震記録、②強震動記録、③測地学データを用いた、震源断層の滑り分布および震源過程のインバージョンが数多くなされている。破壊したと推定されている断層は、南西から北東に向かって列挙すると、野島断層、須磨断層、諏訪山断層、五助橋断層である。

Kikuchiら<sup>15)</sup>は①のみを用い、断層面と面全体でのモーメント解放量を求めた。Sekiguchiら<sup>16)</sup>は②による波形インバージョンと軌跡の解析をおこなった。Ideら<sup>17)18)</sup>は一枚の断層を仮定し、②のみを用いて滑りの時空間分布を求めた。Horikawaら<sup>19)</sup>は②③を用い、野島断層と須磨断層系の二枚の断層を仮定したインバージョンをおこなった。

Wald<sup>20</sup>, Yoshida<sup>21</sup>らは①②③を用いたジョイントインバージョンをおこなっている。

これらの結果に共通していることは、野島断層のアスペリティが浅く、大きいこと、深部にある須磨断層の破壊開始点付近で大きなアスペリティがあること、神戸海洋気象台より北東側にもアスペリティがあることである。

神戸海洋気象台の記録をはじめとする極近地記録は、震源破壊のディレクティブティにより、各地点以南、以西の断層破壊の影響を濃く反映している。五助橋断層の影響を強く受ける観測点は宝塚のみであるので、五助橋断層の情報を、極近地地震記録から求める際の誤差は大きいと考えられる。

## 2.2. 明石海峡直下の断層モデル

Megawati は、GPS 測量によって明らかにされた明石海峡近傍での永久変位を説明するために、明石海峡直下の断層（以後、小断層と呼ぶ）変位の必要性を指摘した。さらに地震当時建設中であった明石海峡大橋の主塔における地震動記録の再現によって、実際に小断層が破壊したことを示した。

最適断層解は、strike N97°E, Dip 85°, rake 222°, 長さ 4 km, 深さ 8km, 解放地震モーメント Mw=6.2であった。実に全地震モーメントの10分の1が解放されたことになる。また、この小断層破壊は主破壊の10秒後に発生したとしている。

Kohketsu らは、GPS 測量データから同様な小断層を指摘し、さらに②③とのジョイントインバージョンにより、破壊の時空間分布を求めた。このとき、滑り量は地表近くが最も大きく、ほぼ右横ずれであるという結果を得た。小断層破壊は主破壊と同時に進行したとしている。

## 2.3. 神戸の波動数値シミュレーション

Pitarka ら<sup>7</sup>は、インバージョンにより求めた震源モデルを用いて淡路島北部から五助橋断層北端に至るまでの長辺が58kmにも及ぶシミュレーションを実施した。神戸から西宮にかけての強震動分布を提示しており、観測波形との符合も良い。Furumura and Kohketsu<sup>11</sup>は Pseudospectral 法を用いたシミュレーションをおこない、強震動の時空間分布を説明した。

これらの研究では、震源断層モデルを事前にインバージョンにより詳細に求めて使用している。また、研究の重点が、計算波形と観測波形との摺り合わせと、強震動分布の説明に置かれている。

## 3. 解析手法

解析には Virieux and Madariaga<sup>22</sup>の3次元差分法を空間4次精度にした Graves の方法<sup>23</sup>を用いた。これは、運動方程式、支配方程式を速度-応力で定式化し、図-1(左)に示すスタッガード格子を用いて離散化したものである。自由表面以外の非物理境界からの反射波を消すために、吸収境界を用いた。また、自由表面には Graves の応力フリー境界を用いた。

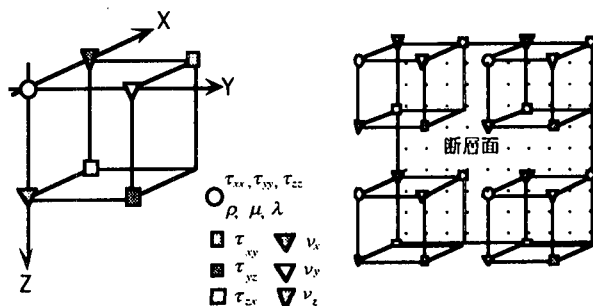


図-1 スタッガード格子(左)と断層導入面(右)

断層滑り導入法には、宮武の動力学モデル<sup>24,25</sup>を用いた。これは、断層運動の自然な表現を目指した方法である。

図-1(右)に示すような断層面において、破壊が到達した瞬間に剪断応力を一定値変化させ、応力降下を導入する。

差分法を用いた地震波動計算には運動学モデルに基づく震源導入法が広く用いられている。この方法では断層面上の各点の動きを既知として与える必要がある。本研究では、主に震源断層およびアスペリティの大きさと位置をモデル化するため、動力学モデルが適当と判断し、これを使用した。

## 4. 強震動シミュレーション

前述の3次元差分法を用いて、兵庫県南部地震の強震動シミュレーションを実行した。計算領域は図-2に示す淡路島北部から大阪府北部に至る85km×30kmの範囲である。図中には、本州側の震度7の区域と解析で考慮した震源断層の位置とを併せて示した。表-1に計算に用いた地下構造の速度構造を、図-3に基盤最上面の構造を示す。基盤構造は、重力調査等の結果<sup>26</sup>を参考にして作成した。この基盤最下面は海水面から3.2kmである。地下構造は、基盤3層(表-1(b))と堆積層3層(表-1(a))からなるものとした。この物性値は文献<sup>27</sup>を参考にした。ただし、海水面より上の構造はモデル化していない。

表-2に、計算パラメータを示す。最小S波速度と格子間隔がカット周波数を決定する。断層モデルを表-3に、断層の概形およびアスペリティ位置と応力降下量(MPa)を図-4に示す。図中の黒丸は破壊開始点、アスペリティ中の矢印は、滑り方向である。アスペリティ以外の領域は純粋な右横ずれとした。インバージョン結果では須磨断層系の傾斜角は85°であるが、断層導入法に宮武の動力学モデルを用いる制約上、それを90°とした。断層破壊は破壊開始点から円形に等速度で進むものとし、破壊伝播速度は2.6km/secとした。

これらの断層パラメータ(明石海峡断層を除く)は文献<sup>10</sup>と同様であり、波形の精度等については議論済みである。ただし、五助橋断層については、宝塚観測点の波形をもとに検討を加えアスペリティ位置を決定した。

明石海峡断層の長さは4.5kmとした。走向は、須磨断層系のそれと45°をなすよう設定した。この格子に沿わない断層を、動力学モデルを用いて導入するための工夫を

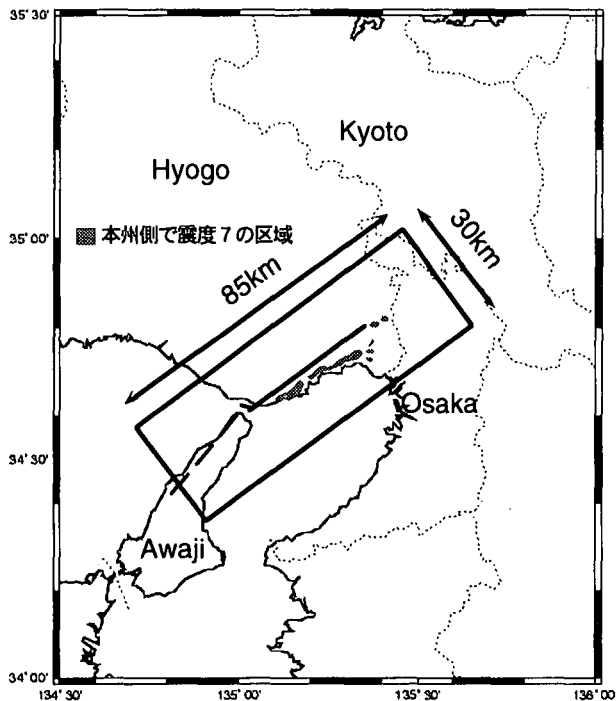


図-2 計算領域

地図上の黒枠が計算領域。枠内の直線は断層  
点線は解析には取り入れなかった断層(野島断層)

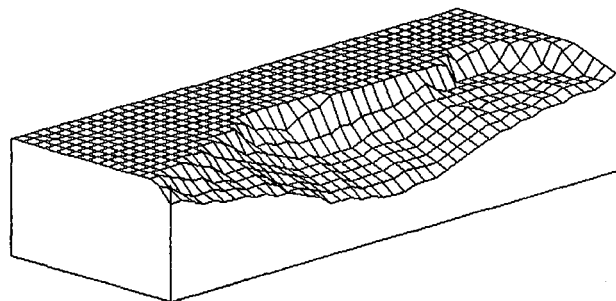


図-3 基盤最上面の構造

表-1(a) 速度構造(堆積層)

	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	最大層厚(km)
第1層	2.2	0.5	2.0	0.4
第2層	2.8	1.5	2.2	0.4
第3層	3.5	2.0	2.25	0.4

表-1(b) 速度構造(基盤)

	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	最大層厚(km)
第4層	4.25	2.85	2.3	1.2
第5層	5.7	3.2	2.5	4.0
第6層	6.0	3.46	2.8	$\infty$

表-2 計算パラメータ

格子間隔(km)	0.2
計算時間刻み(sec)	0.01
最大P波速度(km/sec)	6.0
最小S波速度(km/sec)	0.5
最小密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.0
グリッド数	151×425×150
計算ステップ数	3000
1ステップあたり計算時間(sec)	16

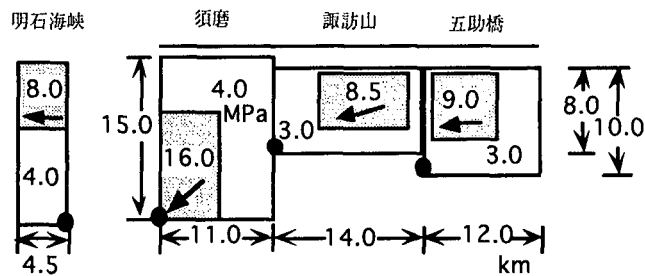


図-4 断層モデル図

表-3 断層モデル

断層名	走向(deg)	Dip(deg)	深さ(km)	長さ(km)
須磨	N53°E	90°	15.0	11.0
諏訪山	N53°E	90°	8.0	14.0
五助橋	N53°E	90°	10.0	12.0
明石海峡	N98°E	90°	14.0	4.5

した。また、明石海峡断層の破壊開始時刻は、Kohketsu  
らの結果にもとづき、須磨断層のそれと同じであるとす

すべての計算結果には0.5Hzのローパスフィルターを  
かけた。これはS波速度が最小(0.5 km/sec)である表層  
において、波長が5グリッド(1 km)よりも短い波を除  
去することに相当する。結果としてもたらされるやや長周  
期の波は、空間的な広がりを持った長大構造物や高層建物、  
免震構造物などの応答に影響するばかりでなく、固有周期  
の短い低層建物など一般の建築物の実際の被害にも直接  
関わる可能性があり、工学的にも重要である。

#### 4.1 最大速度の空間分布および速度の時空間分布

本節では、計算結果の空間分布及び時空間分布を示し、  
震源過程および地下構造の効果を検討する。計算領域のう  
ち、神戸側については、これまでになされた研究を検証す  
る立場で記述する。

図-5に最大速度分布を示す。上から順に、(a)水平成分  
のベクトル和、(b)断層直交方向成分、(c)断層方向成分、  
(d)鉛直成分、の最大値分布である。図中の直線は震源断  
層を、地図でも断層でもない線は地表における基盤-堆積  
層境界を示している。基盤-堆積層境界より南東側(図の  
下側)が堆積層部分である。断層破壊は図の左から右へと  
進行させてある。

図-5(a)より、速度の大きい領域は、断層に沿う地域か  
ら北東(図の右)にかけての堆積層地盤(図の下)に偏っ  
て分布していることがわかる。この偏りは、断層破壊の指  
向性(ディレクティビティ)効果、および堆積層内での地  
震波増幅として説明される。また、堆積層部で速度の特  
に大きいところは基盤と堆積層の境界から少し(1~3km)  
離れた場所であることもわかる。これは盆地端効果<sup>8)</sup>  
として指摘されてきた事である。大速度領域は、神戸の西  
部と東部に二分されている。実際の震度7の分布(図-2)  
も、神戸の西部と東部に二分されており、この被害分布の  
傾向とおおむね一致する。西宮付近で30cm/sec前後の最  
大速度が現れた地域は、堆積層-基盤の境界からすこし離

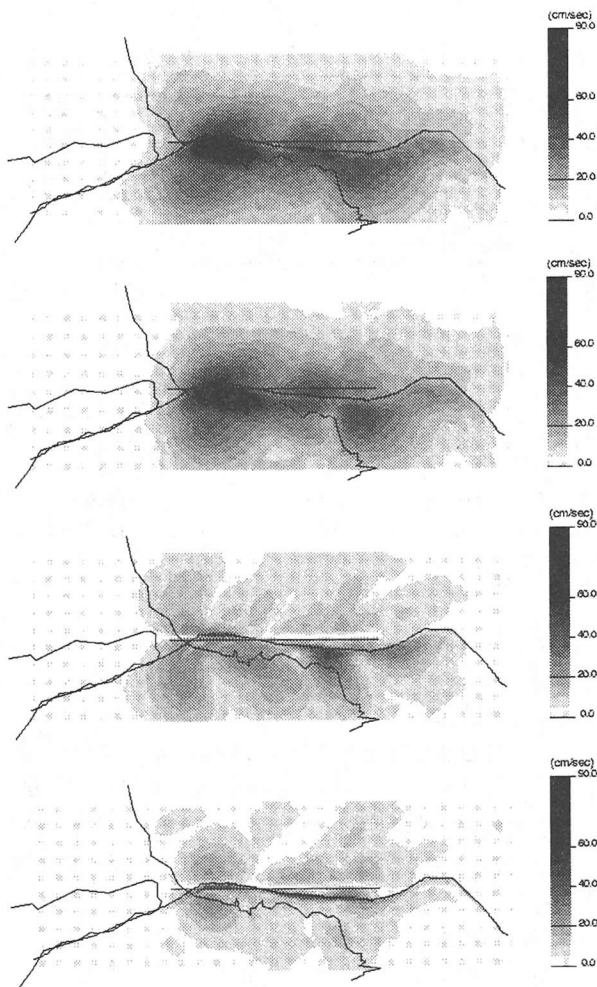


図-5 最大速度分布  
上から (a) 水平ベクトル和, (b) 断層直交成分,  
(c) 断層方向成分, (d) 鉛直成分

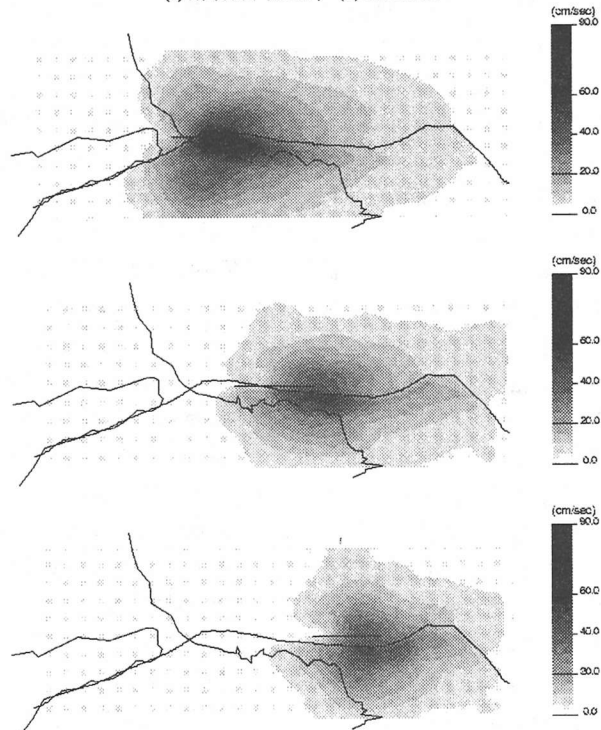


図-6 各々の断層による最大速度分布  
上から, (a) 須磨断層, (b) 諏訪山断層, (c) 五助橋断層

れた堆積層地盤であることがわかる。

図-5の(a)と(b)より、断層直交方向成分の強度分布と水平速度のそれがほぼ一致していることが見てとれる。このことは断層が地上に達しない横ずれ断層であることに対応している。これは、横ずれの断層破壊が通過するとき、地震波の放射特性から、断層近傍では断層直交方向の揺れが卓越し、さらに、断層が地上に達していない場合には断層方向の揺れはほとんどない<sup>9)</sup>ことによる。

図-5(c)より、断層方向成分が強い領域は、断層の境目(図-4参照)から、堆積層側へ放射するように分布していることがわかる。これは断層のストップフェーズが現れたものとする。この効果が特に強く現れている領域は、堆積層と基盤との境界の向きが断層の走向からずれている場所である。この場所に西宮西部の一部が含まれている。宝塚付近にも断層方向成分が強く現れている。しかし計算上現れるこのフェーズが、実現象と対応するか否かについては、今後検討していく必要がある。

図-6に各々の断層がもたらす水平ベクトル和の最大速度分布を示す。上から順にそれぞれ、(a)須磨断層、(b)諏訪山断層、(c)五助橋断層による最大速度分布である。図-5では神戸の南西部で速度の特に大きな一帯がみられたが、図-6(a)から、これは須磨断層がもたらしたものであることがわかる。また、図-6(a)と(b)から、神戸中部では須磨断層と諏訪山断層の影響が大きいことがわかる。これはこれまでの研究と一致する。図-6(b)、(c)から、西宮西部では諏訪山+五助橋、西宮東部および宝塚付近では五助橋断層による影響が顕著であることがわかる。

図-7に地表の絶対水平速度のスナップショットを示す。スナップショットは時刻5.0秒から23.0秒までの2.0秒刻みとしてある。時刻の基準は須磨断層の破壊開始の瞬間とした。それぞれの図の左上に時刻を表示した。既往の研究では10秒前後までのスナップショットをもとに、神戸での被害との結び付けをおこなっているものがある。そこで図-7の左側には、パルスが神戸を通過する時刻13.0秒までの図を示し、右側に、西宮付近へ強い地動が入力される時刻15.0秒以降の図を示した。

図-7の左側、5.0秒の図からは、堆積層部分に大きな速度が現れ始めたのがわかる。7.0秒の図からは、大きな速度を持つ2つの領域が、伝播速度の速い基盤側の地動に引っ張られるように北東方向へと進んでいく様子が明瞭に見て取れる。これが盆地端効果の説明に用いられてきた波動であり、波形の上では長周期パルス波に対応する。11.0秒にみられる速度の大きい領域のうち北東端(図の右側)にあるものは、図-6を考慮すると、諏訪山断層によるものであることがわかる。13.0秒に見られる東側(右側)の大速度領域についても同様である。

15.0秒で諏訪山断層からの大速度領域が西宮に到達し始める。このとき、神戸市南側の強い揺れは収まっていることがわかる。17.0秒では、さらに五助橋断層からの大

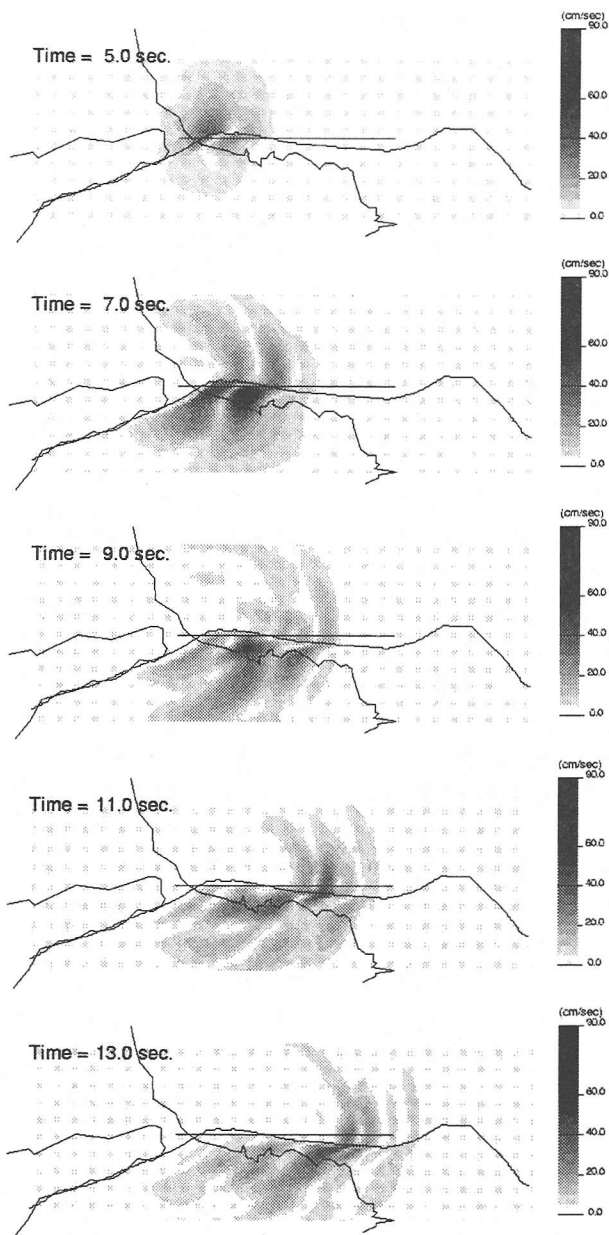


図-7-1 水平動のスナップショット(1)

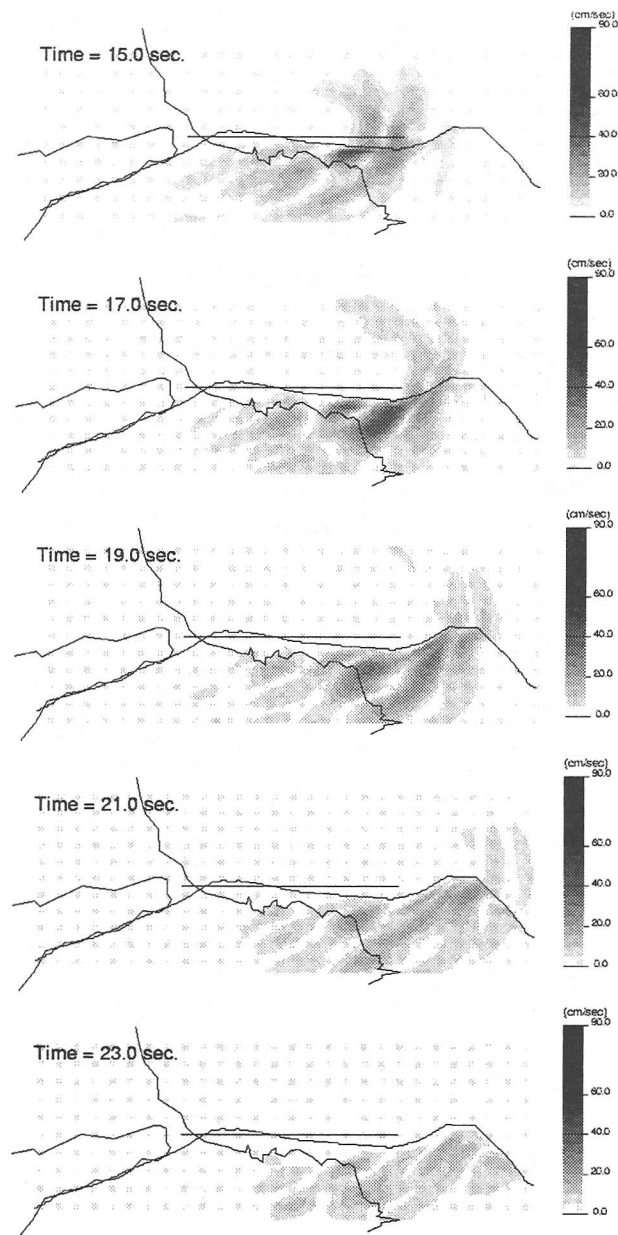


図-7-2 水平動のスナップショット(2)

速度領域が西宮に入る。時刻 19.0 秒, 21.0 秒の図からは、大速度の波動が堆積層-基盤露出面との境界に沿うように分布していることが見てとれる。23.0 秒の図からは、基盤層側の地動はほぼ収まっている一方で、堆積層にはやや強い揺れがまだ残っていることがわかる。

#### 4.2. 計算速度波形

前節で示したような最大速度分布や時空間的分布は、地震のマクロな増幅効果や伝播経路の把握に大いに有効である。しかし、これらの知見を工学的に有用なものにするためには、はじめに述べたように、計算波形そのものを提示する必要がある。

本節では神戸大学付近 (KBU)、西宮市満池谷付近 (MCTNI)、西宮市仁川付近 (NIKWA) の計算速度波形を示す。測点位置を図-8-1 に示す。満池谷付近はアースダムの崩壊や阪急電鉄の高架橋倒壊などがあり、西宮の中

でも被害の大きい地点である。仁川は大規模な地滑りが発生した地点であり、ここも地動が大きかったと推定されている。両者は直線距離で 3 km ほど離れている。

図-8-2 に神戸大学付近の観測波形と計算速度波形との比較を示す。太線が観測波形、細線が計算波形である。波形は、ほぼ 2 周期のパルス状となっている。これらのパルス波は須磨断層と諏訪山断層のアスぺリティによってもたらされたものである。また、この地点の断層方向成分は直交成分のそれに比べ小さいことがわかる。

次に西宮市満池谷の水平 2 成分の波形を図-8-3 に示す。波形は、アスぺリティの影響を受けた大きなパルスである点で神戸大学の波形と同様である。しかし、その周期は 5 秒ほどであり、これは明らかに異なる性質を持った波であると言える。

続いて仁川の水平 2 成分の波形を図-8-4 に示す。こ

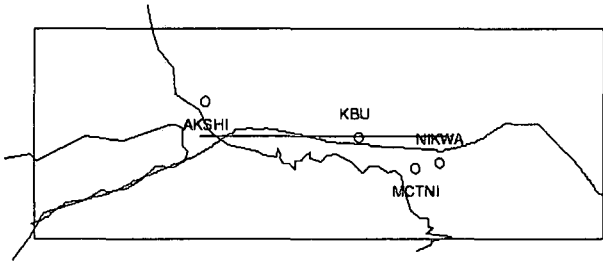


図-8-1 波形を提示する地点

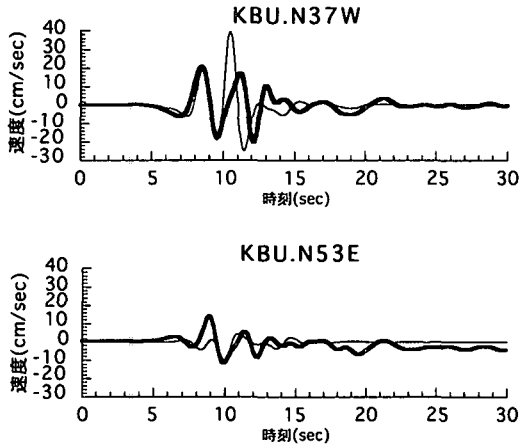


図 8-2 神戸大学付近の速度計算波形比較  
 上図：N37W（断層直交方向），下図：N53E（断層方向）  
 太線：観測波形，細線：計算波形

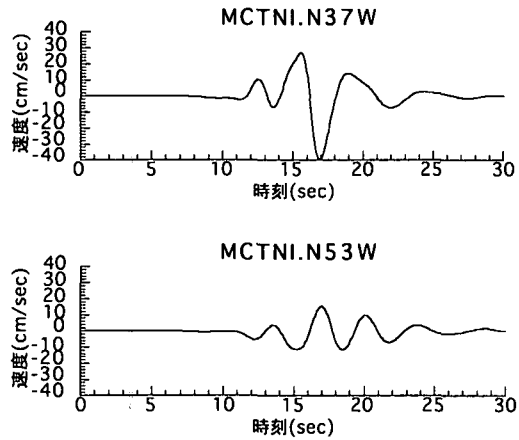


図 8-3 西宮市満池谷付近の速度計算波形

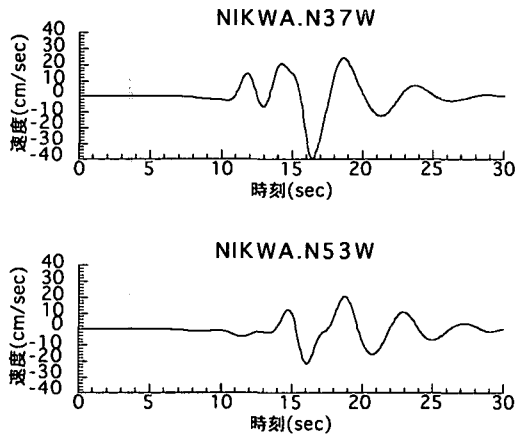


図-8-4 西宮市仁川付近の速度計算波形

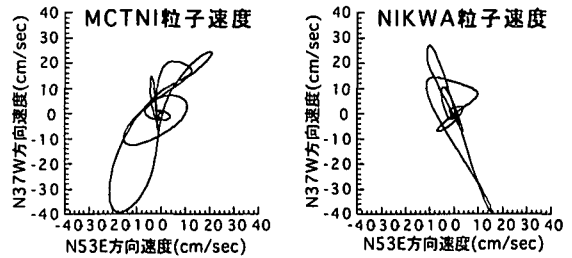


図-8-5 粒子速度軌跡  
 左図：満池谷，右図：仁川

でも満池谷と同様に、波形は周期の長いパルスとなっていることがわかる。パルスの周期は5秒ほどであると読みとれる。

図-8-5に満池谷と仁川の粒子速度軌跡を示す。満池谷の速度軌跡卓越方向は南北であるのに対し、仁川のそれは東西に近いことがわかる。この卓越方向の違いは、図-7と併せて考察すると、付近の基盤-堆積層境界の形状の影響によるものと考えられる。一方、長周期パルスは、諏訪山断層と五助橋断層からの波が堆積層に入射し回折する際にもたらされたものであると考える。

#### 4.3 明石海峡断層を取り入れたシミュレーション

明石海峡断層の位置およびモーメント解放量を求めた研究は、MegawatiとKohketsuらによるものがあるのみである。本節では3次元シミュレーションにより、この断層が近傍にもたらす地動を評価する。断層モデル及び断層パラメータは既に図-4および表-3に示してある。

図-9に明石海峡断層によってもたらされる水平成分（ベクトル和）の最大速度分布を示す。また、図-10上側に、前節で考慮していた断層によってもたらされる最大速度分布（図-5(a)）を、下側には、それらの断層に加え明石海峡断層を考慮したときにもたらされる水平最大速度分布を示す。

図-9、図-10より、明石海峡断層が大きく寄与する地域は断層近傍に限られていることがわかる。しかしながら、近傍における最大速度は40cm/sec程度であり、構造物に被害を及ぼしかねない地動がもたらされている。図-9にくらべて図-10下側では、明石海峡の淡路島側での最大速度が小さくなっているが、これは波が計算上打ち消し合ったためである。

明石海峡断層の導入によって、地表最大速度が大きく変化する地点である明石市付近（AKSHI）の地動速度を図-11に示す。図-11-1には須磨断層系のみによる速度波形を、図-11-2にはそれに明石海峡断層を加えて計算した波形を示す。明石市の位置はAKSHIとして既に図-8-1に示してある。

図-11-1から、時刻4秒で須磨断層の破壊による地動が伝わってきたことがわかる。また図-11-2からは、その直後の時刻5秒過ぎに、明石海峡断層からのより大きな地動が伝わってきたことがわかる。須磨断層による地動が明石海峡断層のそれにくらべて小さいのは、明石地域からみて明石海峡断層の破壊は近づく方向に進むのに対し、須磨



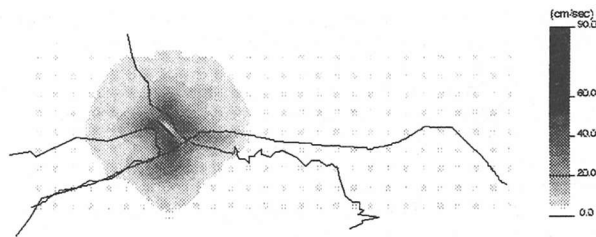


図-9 明石海峡断層の寄与

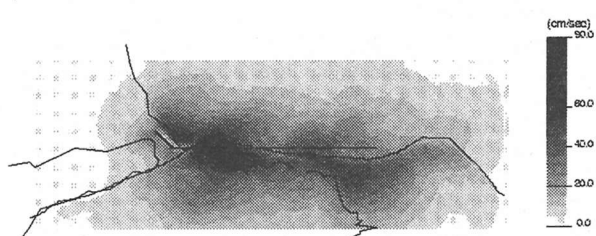
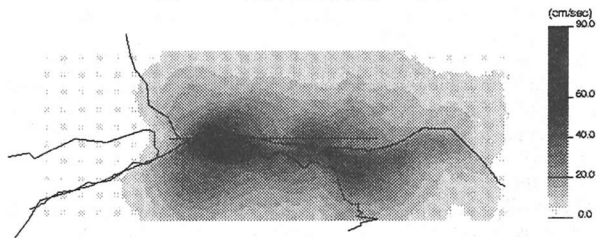


図-10 水平最大速度分布の変化

上側：明石海峡断層導入前，下側：明石海峡断層導入後

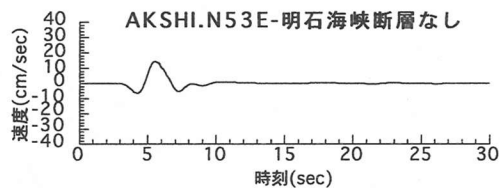
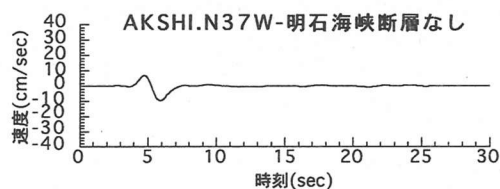


図-11-1 明石の速度波形  
明石海峡表層断層なし

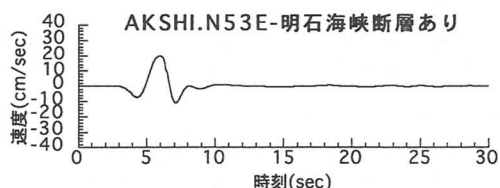
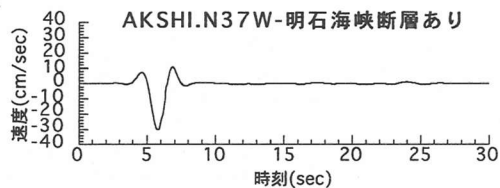


図-11-2 明石の速度波形  
明石海峡表層断層あり

断層の破壊は遠ざかる方向に進むからである。須磨断層の影響が明石付近で大きくないことは図-5，図-6(a)，図-10上側からもわかる。波形はパルス状となっている。

明石地域では新幹線高架橋の落橋という大被害が発生している。この被害には表層地盤，高架橋の構造とともに，明石海峡断層も大きく影響したと考える。ただし，本解析において明石海峡以西の堆積層はモデル化していない。また，野島断層も考慮していない。今後はこれらを考慮した研究が必要であると考える。

## 5. 結論

西宮市域の被害分布の地震学・工学的考察をおこなうため，動力学的考察に基づいた断層モデルを用いて，神戸から西宮以西を含む広い範囲にわたる，1995年兵庫県南部地震の3次元シミュレーションをおこなった。震源断層は3つ仮定し，それぞれの断層にアスペリティを設定した。五助橋断層のアスペリティはフォワードモデリングによって求めた。

まず，最大地動速度分布の考察をおこない，得られた分布が実際の被害域と西宮市域も含めよく一致していることを確かめた。次に，それぞれの断層がもたらした速度分布を計算し，各々のアスペリティの効果を検討した。

西宮地域で実際に大被害があった地点を選び，その地点における計算速度波形の考察をおこなった。西宮地域における地動は，地下構造の影響とアスペリティの影響が大きいことがわかった。

さらに，最近の研究により存在が明らかにされた明石海峡直下での断層破壊が，近傍の地動に及ぼした影響を考察するために，この断層を含めたシミュレーションをおこなった。最大速度分布と速度波形の考察により，明石海峡近傍にはこの断層による地動が卓越した場所があったことを示した。

謝辞：本研究のために，東京大学地震研究所地震予知センターの計算機システムを利用しました。匿名の査読者の方々には貴重な意見をいただきました。

## 参考文献

- 1) 山口直也，山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No. 612/I-46，pp.325-336，1999。
- 2) 鶴来雅人，澤田純男，入倉幸次郎，土岐憲三：アンケート調査による兵庫県南部地震の大阪府域の震度分布，土木学会論文集，No. 612/I-46，pp.165-179，1999。
- 3) 翠川三郎，藤本一雄：被害分布から推定した兵庫県南部地震の震度分布，平成8年京都大学防災研究所研究集会「兵庫県南部地震の強震動はすべてわかったのか？」研究発表資料集，pp. 111-112，1997。
- 4) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No. 502，pp. 61-68，1997。
- 5) 奥村俊彦，石川裕：兵庫県南部地震における西宮市内の被害とその特徴，第23回地震工学研究発表会講演概要集，pp. 581-584，1995。

- 6) 武村雅之, 諸井孝文, 辻泰一: 1995年1月17日兵庫県南部地震の被害分布から見た強震動の特徴—1923 関東地震との比較—, 第23回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 577-580, 1995.
- 7) Pitarka, A., K. Irikura: Modeling 3D surface topography by finite-difference method: Kobe-JMA station site, Japan, case study, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 23, No2, pp. 2729-2732, 1996.
- 8) Pitarka, A., K. Irikura, T., Iwata, H. Sekiguchi: Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake, *B.S.S.A.*, Vol. 88, pp. 428-440, 1998.
- 9) 入倉孝次郎: 阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—阪神大震災を引き起こした強震動, 京都大学防災研究所年報, 第39号A, pp. 17-33, 1996.
- 10) Gurler E. D.: 3D Simulation of Near Field Strong Ground Motion During 1995 Kobe Earthquake - Effects of Irregularity of Underground Structure and Complexity of Rupture Process, *Tokyo Univ.*, Doctoral Thesis, 1997.
- 11) Furumura, T. and K. Koketsu: Specific distribution of ground motion during the 1995 Kobe earthquake and its generation mechanism, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.25, pp 785-788, 1998.
- 12) 東原紘道: 地震科学者の説明責任, *科学*, Vol. 67, pp. 831-835, 1997.
- 13) Koketsu, K., S. Yoshida, H. Higashihara: A fault model of the 1995 Kobe earthquake derived from the GPS data on the Akashi Kaikyo Bridge and other database, *Earth Planets Space*, 50, pp. 803-811, 1998.
- 14) Megawati, K.: Study of rupture process beneath the Akashi Strait during the Hyogo-ken Nanbu earthquake, based upon near-source data, *Tokyo Univ.*, Doctoral Thesis, 1997.
- 15) Kikuchi, M., H. Kanamori: Rupture process of the Kobe, Japan, earthquake of Jan. 17, 1995, determined from teleseismic body waves, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 429-436, 1996.
- 16) Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, M. Hoshiba: Minute location of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 473-487, 1996.
- 17) Ide, S., M. Takeo, Y. Yoshida: Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake determined by near-field strong motion records, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 649-653, 1996.
- 18) Ide, S., M. Takeo, Y. Yoshida: Source process of the 1995 Kobe earthquake: determination of spatio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, *B.S.S.A.*, Vol. 86, pp. 547-566, 1996.
- 19) Horikawa, H., K. Hirahara, Y. Umeda, M. Hashimoto, F. Kusano: Simultaneous inversion of geodetic and strong-motion data for the source process of the Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 455-471, 1996.
- 20) Wald, D. J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 489-503, 1996.
- 21) Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibasaki, T. Sariya, T. Kato, Y. Yoshida: Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, pp. 437-454, 1996.
- 22) Virieux, J., R. Madariaga: Dynamic faulting studied by a finite difference method, *B.S.S.A.*, Vol. 72, pp. 345-369, 1982.
- 23) Graves, W. R.: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 86, pp. 1091-1106, 1996.
- 24) 島田篤, 宮武隆, 谷山尚: 動力学モデルによる断層近傍の地震動—1984年長野県西部地震—, *地震*, 第49巻, pp. 179-191, 1996.
- 25) Inoue, T., T. Miyatake: 3D Simulation of near-field strong ground motion based on dynamic modeling, *B.S.S.A.*, Vol. 88, pp. 1445-1456, 1998.
- 26) 石田寛, 野澤賢, 古屋伸二, 高井剛, 加藤研一, 丹波正憲: 神戸市街地直下における基盤岩震度分布の推定—やや長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価—, *日本建築学会構造系論文集*, 第485号, pp. 63-72, 1996.
- 27) 慈道充, 赤松純平, 駒澤正夫, 西村敬一, 中村佳重郎, 志知龍一: 重力と脈動からみた甲陽断層周辺の基盤構造, 平成8年京都大学防災研究所研究集会「兵庫県南部地震の強震動はすべてわかったのか?」研究発表資料集, pp. 31-40, 1997.

(1999年4月23日受付)