

第2編 各 論

第1章 地震動

1. 兵庫県南部地震の地震動分布について

On the Strong Ground Motion Distribution During Hyogo-ken Nanbu Earthquake

金子史夫, 瀬川秀恭

Fumio Kaneko, Shukyo Segawa

Abstract

Many researches have been actively carried out to make clear what mechanism created the so called "Seismic damage belt" due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Fig.1 shows the classification of the existing research works concerning to the earthquake ground motion around Hanshin-Awaji area. As the source mechanism of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake and the ground structure around Kobe area have been well studied, the researches about the earthquake ground motion will become active more and more. Some important factors which affected to the earthquake ground motion were already simulated using numerical calculation individually, and the total model which can explain the earthquake motion distribution is highly expected.

1 はじめに

兵庫県南部地震は神戸市をはじめとする阪神・淡路地域に大災害を引き起こした。この大災害の原因を考えるに当たってまず重要なのは、はたして地震時においてどの程度の大きさの地震動がこれらの地域を襲ったかを把握することである。当時これらの地域に設置されてあった強震計は決して少ない数ではなかったが、海岸線に沿って東西に細長く広がった震度7のいわゆる「震災の帯」の中では観測記録は残念ながらほとんど得られていない。

なぜ、被害の激しい、すなわち気象庁によって震度7であると認定された地域があのように細長い形状となったかについては、観測記録が得られなかったことと相まって、地震直後から多くの研究者がそれぞれの立場から様々な解釈を行っている。たとえば、震災直後は、地表まで断層の破壊が達しなかった伏在断層が震災の帯の直下に存在することが推定されたが、現在ではあまり強く主張されなくなっている。これに対し、表層地盤の特性や、深い基盤構造にその原因を求め、地表での地震動分布を推定することにより震災の帯を解釈しようとする研究が活発に進められた。一方では、震災の帯の原因を建物の強度やその分布と関係づけて考えようとするものもある。このような研究は、震災後に阪神地域で行われた基盤構

造探査、ボーリング調査などにより地盤の特性が明らかになるにつれてますます活発化し、数多くの研究成果が発表されつつある。

本報告では、このような目的で行われた阪神・淡路地域での地震動分布推定に関する研究および、災害を考える上での基本となる、阪神・淡路地域での面的な地震動分布を推定しようとする研究をできる限り収集し、その概略を報告するが、このような研究は今後ますます盛んに行われ新たな見解も出されていくことと思われる。本報告は、あくまでも震災発生から約2年半を経過した、現時点でのまとめであることをお断りしておく。

図-1に示したのは、これまでに発表された地震動分布に関する論文を、目的と手法で分類してみたものである。この種の研究の目的とするところは大きく分けて2つあり、1つは「震災の帯」がどのようなメカニズムで形成されたかを説明しようとするもので、多くの場合、「震災の帯」を横切る測線を仮定し、地表地震動分布の特徴を再現しようとしている。一般に地表で観測される地震動は震源特性、基盤での伝播特性、表層地盤での増幅特性の掛け合わせで表すことができるが、ここでもこの3つの特性のうちどの特性に主として着目したかによって3分類を行った。もう1つの目的は、災害を考える上で不可欠な要素である、阪神地域での地震動の面的な分

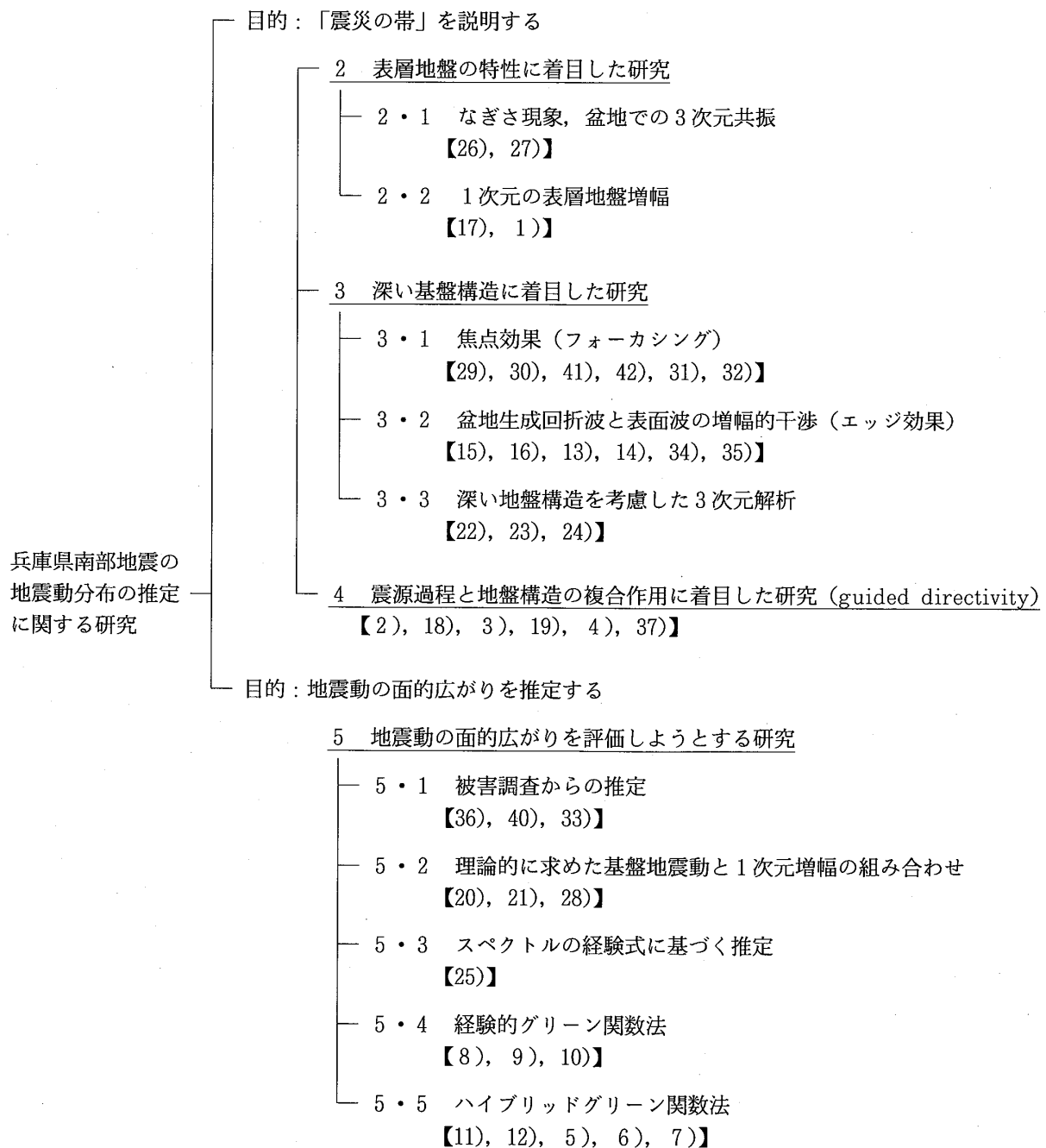


図-1 兵庫県南部地震の地震動分布に関する研究の分類 【】内の数字は参考文献のNo.

Fig.1 Classification of the researches related to the earthquake motion during Hyogo-ken Nanbu Earthquake; No. in 【】 corresponds to No. of references

布を推定しようとする研究で、多くの手法を使った試みがなされており、ここでは5種類に分類した。以下では、この分類に沿って各研究の概要を示していく。

2 表層地盤の特性に着目した研究

地震動の特性は、震源特性、震源から観測点付近までの基盤での伝播特性、観測点の地表付近の表層増幅特性の重ね合わせと考えることができる。ここではまず、観

測点側に最も近い、表層の特性に着目した研究をまとめる。なお、表層地盤の評価に関しては、古くからS波の重複反射理論に基づく1次元等価線形法（たとえばSHAKEなど）が広く用いられてきているが、ESG (Effect of Surface Geology on Seismic Motion) 研究において多くの課題が指摘されるとともに手法の適用性についての研究が進められている状況にある。

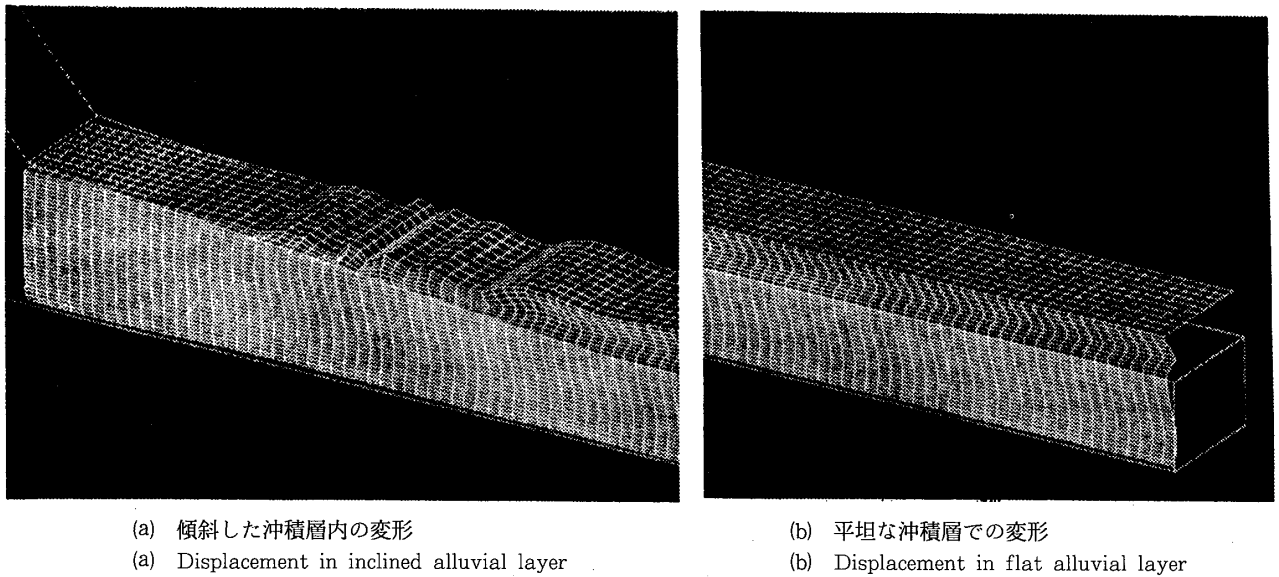


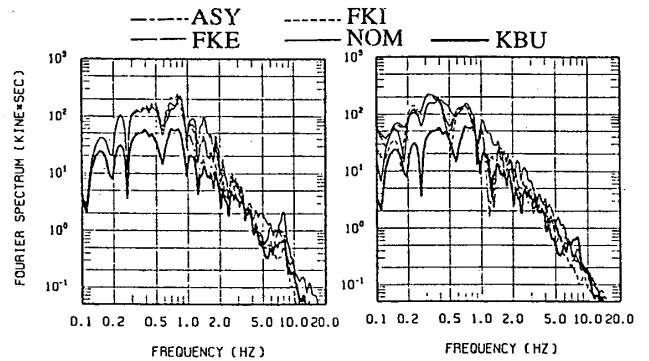
図-2 FEMで計算した平面波入力による沖積層内の変形 [鈴木ら (1995) より転載]
Fig.2 Displacement in alluvial layer calculated by FEM method with plane wave incident [Reproduced from Suzuki et al.(1995)]

2・1 なぎさ現象、盆地での3次元共振

沖積地盤で地震被害がより大きくなることは広く知られているが、伯野は多くの被害地震の調査結果から、硬質地盤に近い、軟弱地盤の層厚が薄くなる部分でエネルギーが集中して大きく揺れることを見だし、海岸での波の大きさと類似から「なぎさ現象」と名付けた。鈴木ら (1995) は、阪神地区で被害が集中した地域がおおよそ傾斜した沖積地盤上にあり、沖積層の厚い海岸近くより内陸で地震動が大きかったであろうと推測されることから、傾斜した軟弱地盤のために「なぎさ現象」が生じ地震動が増幅されて被害が大きくなった可能性を指摘している。鈴木らは解析的アプローチとして有限要素法を用い、しだいに薄くなる $V_s=100\text{m/s}$ の沖積層と $V_s=300\text{m/s}$ の洪積層をモデル化して平面波が下方から入力した場合の2次元での解析を行い、図-2に示すように傾斜した沖積層では大きな揺れが発生することを示している。

さらに鈴木ら (1996) では、洪積層の3次元傾斜(窪み)が局所的な揺れの増幅に影響を及ぼした可能性を示唆し、3次元の有限要素法を用いて大開駅周辺の基盤構造をモデル化して解析し、すり鉢状の埋没谷で大きな揺れが生じることを示した。

これらの研究ではいずれも沖積層の厚さの変化だけを取り出した解析であり、沖積層が平坦な部分との比較において傾斜部分あるいは窪み部分で大きな地震動が発生する可能性を数値実験により示したものである。

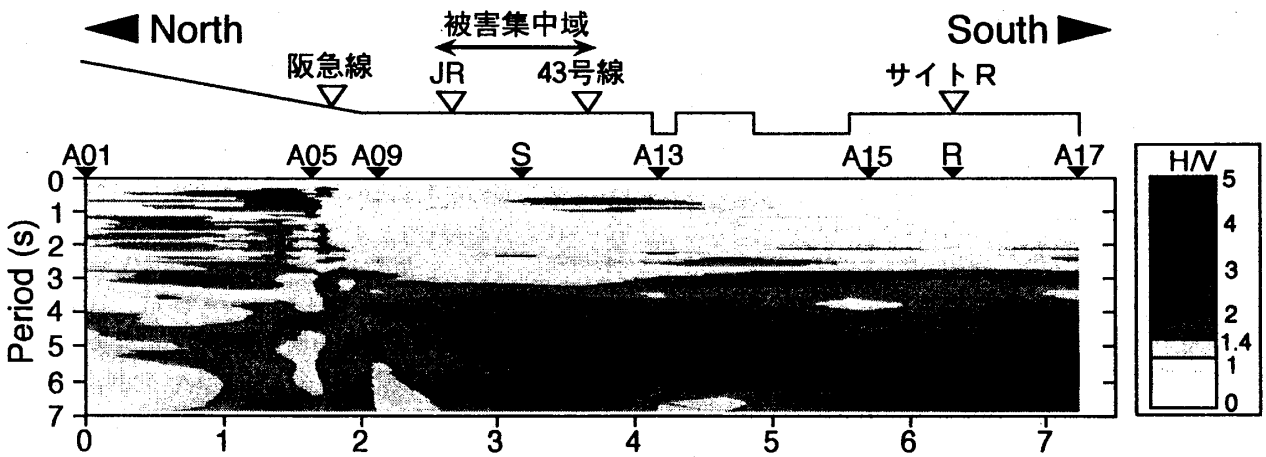


(a) 等価線形解析 (b) 液状化解析
(a) Equivalent linear analysis (b) Effective stress analysis

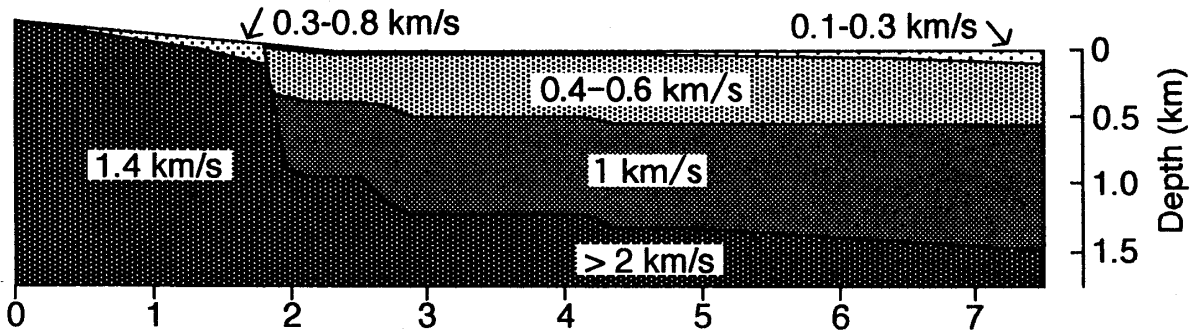
図-3 1次元等価線形解析および液状化解析により推定された波形と入力として用いたKBUでの速度フーリエスペクトル(最大主軸方向成分) [川瀬ら (1995) より転載]
Fig.3 Velocity Fourier spectrum of surface wave, estimated by 1-D equivalent linear analysis and effective stress analysis, and wave of KBU used as incident wave in analysis (maximum principal axis direction) [Reproduced from Kawase et al. (1995)]

2・2 1次元の表層地盤増幅

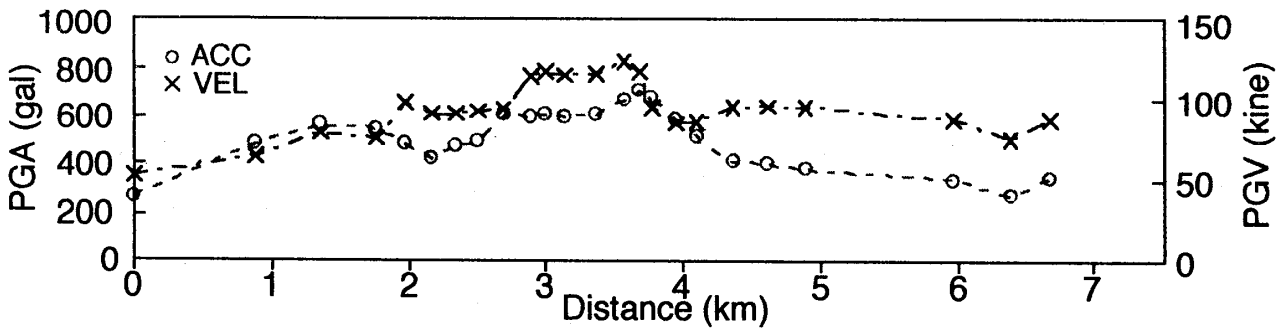
表層地盤の増幅特性は、水平成層構造で近似できる場合には1次元解析で表現することができる。川瀬ら (1995) は震災後3ヶ月間に入手しうる最大限の情報として、東灘区内での基盤上と堆積地盤上での余震観測記録のスペクトル比から、各観測地点での地表から25mまでの地盤をモデル化し、以下 $V_s=2.5\text{km}$ の基盤までの



(a) 微動のH/Vスペクトルの分布
(a) H/V microtremor spectrum along observation line



(b) S波速度構造
(b) S-wave velocity model



(c) 最大加速度, 速度分布
(c) Maximum velocity and maximum acceleration distribution estimated by 1-D effective stress analysis

図-4 測線沿いのH/V微動スペクトル, S波速度構造および1次元有効応力解析による最大加速度, 速度分布 [浅香ら (1996) より転載]

Fig.4 H/V microtremor spectrum along observation line, S-wave Velocity model and maximum velocity and maximum acceleration distribution estimated by 1-D effective stress analysis [Reproduced from Asaka et al. (1996)]

構造は弾性波探査結果などから推定して、1次元解析で本震地動の推定を行っている。解析には等価線形解析と間隙水圧の上昇を考慮した時刻歴非線形解析(液状化解析)を用い、基盤上で観測した記録を入力とした。その結果、堆積地盤上では基盤上に比べてスペクトルで5～

20倍増幅しており、本震時には東灘区の堆積地盤上では加速度で600gal以上、速度で130kine以上(図-3)であったことが推定でき、被害の集中は第1義的には表層地盤の非線形応答で説明できるとしている。

浅香ら(1996)は、同じく1次元非線形液状化解析を

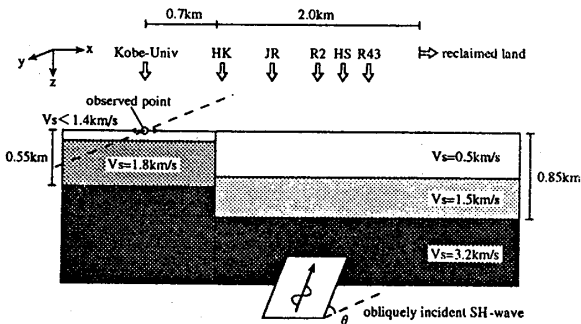
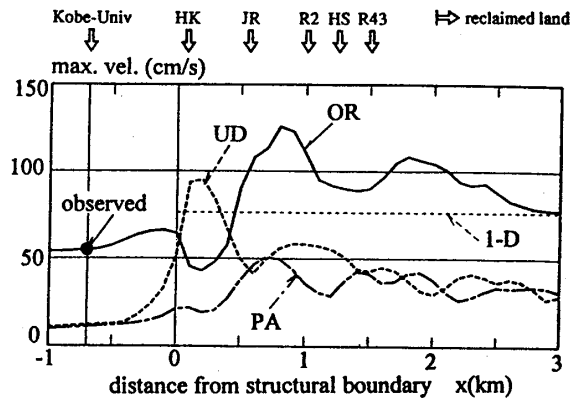


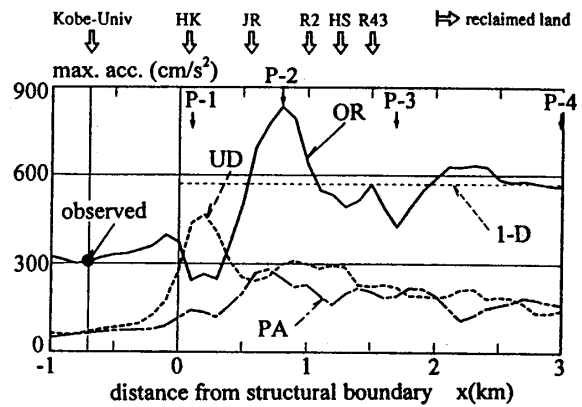
図-6 神戸大学を通り六甲断層系に直交する2次元断面 (HK : 阪急線, JR : JR線, R2 : 国道2号線, HS : 阪神線, R43 : 国道43号線) [源栄・永野 (1996) より転載]

Fig.6 2-D ground model through Kobe Univ. and orthogonal to Rokko fault plane (HK : Hankyu line, JR : JR line, R2 : Route 2, HS : Hanshin line, R43 : Route 43) [Reproduced from Motosaka & Nagano (1996)]

層群 ($V_s=500\text{m/s}$) とそれ以深 ($V_s=1500\text{m/s}$) とし、基盤の速度は $V_s=3200\text{m/s}$ の3層構造、岩盤部分では基盤の上に $V_s=1800\text{m/s}$ の風化部を考慮している。解析手法としては、有限要素法の拡張であるHyperelement法を彼らが2次元断面の3次元応答解析法に拡張した手法を用い、SH波が図-6の様断面に沿って斜めに入射した場合の応答を計算している。この際入力波形は、神戸大学の観測波を解析モデルの当該位置での結果に一致するように逆応答解析して規定している。大阪層群上面での速度、加速度分布は図-7に示されるように計算され、いずれもJR線から国道2号線の間でそれぞれ約120kine, 800galの最大値を示し、1次元解析の結果と比較すると段差構造の南側で速度で75%ほど大きくなり、海岸へ近づくとつれてその差が小さくなっている。また、上下動では岩盤との境界部で顕著に大きな振幅となり観測結果と整合するとしている。図-8に示した速度波形のうち上下動成分には、境界部で発生した表面波が顕著にみられるが水平動では明瞭ではなく、水平動の最大速度は表面波の影響が小さい最初の数秒のうちに発生しており、水平最大速度の分布は六甲山の岩盤との境界から発生する実体波、回折波と直下の基盤から伝播してくる波との重なりによる焦点効果によって震災の帯における地震動が発生したものとしている。また、さらに沖積層、上部洪積層の構造を $V_s=200\text{m/s}$, 300m/s として、増幅特性を1次元等価線形解析で評価した結果を示しており、図-9によれば地震動はJR線から国道2号線の間で速度で170kine, 加速度で1200galとなり震災の帯に相当する地域の地震動は1次元解析では説明できず、焦点効果を考える必要があると結論している。なお、大阪



(a) 速度
(a) Maximum velocity



(b) 加速度
(b) Maximum acceleration

図-7 大阪層群上面での速度、加速度分布 (SH波が45°斜め入射した場合) [源栄・永野 (1996) より転載]

Fig.7 Distribution of maximum velocity and acceleration at surface of Upper Osaka group (subjected to obliquely incident SH-wave) [Reproduced from Motosaka & Nagano (1996)]

層群のQ値について、 $Q=V_s(\text{m/s})/15$ の場合(上記)と $Q=10$ の場合を検討しており、後者の場合は最大加速度は850galとなったとしている。さらに、永野ら(1996)では六甲山地の断層系沿いに1kmおきに23断面を設定し、同じ手法を用いて地表面での速度分布を計算している。ただし入力波形は観測波ではなく、震源断層の不均質滑り分布を使った理論計算による波形を使用している。結果は図-10に示すように六甲山側で40~50kine、震災の帯の中心では焦点効果により80~90kine、海岸沿いの埋め立て地区では軟弱地盤の影響で100kine以上となっている。また、永野ら(1997)では、それまで用いていた鉛直境界を有する段差モデルにかえて、反射法探査結果等を用いて作成した、六甲山地から海岸へ向けて

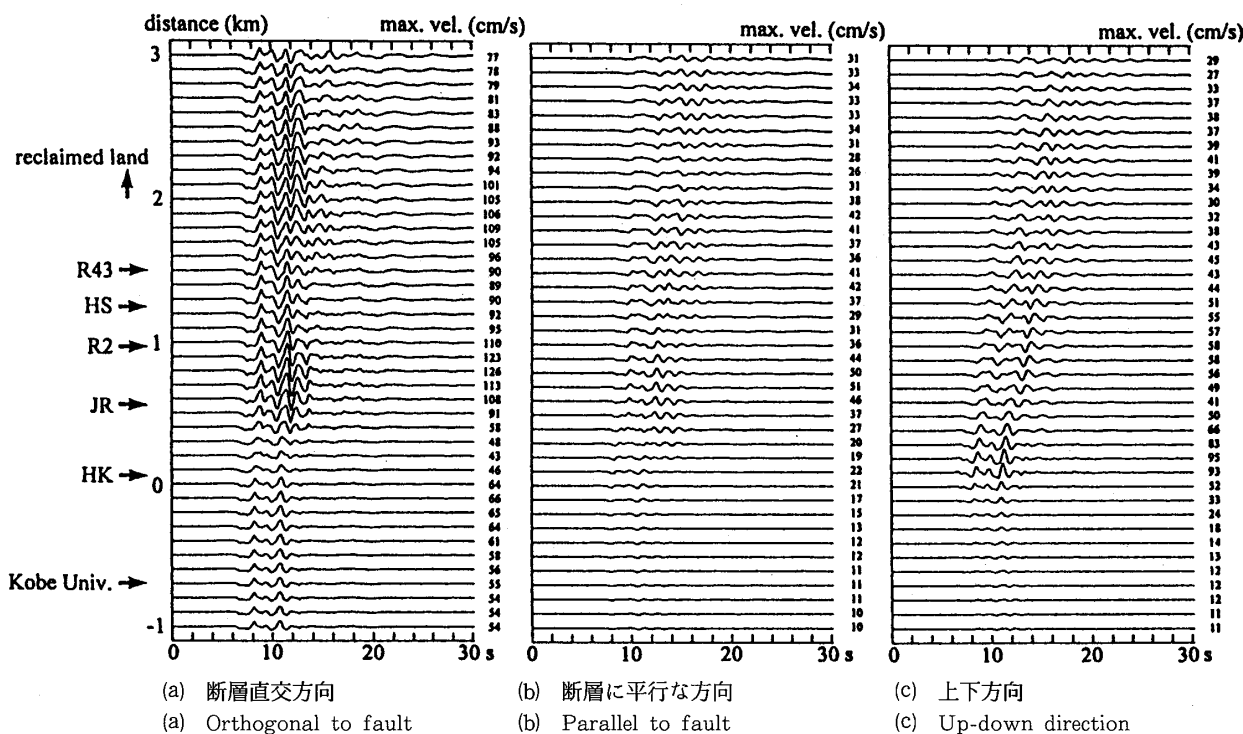


図-8 大阪層群上面での速度波形 (SH波が45° 斜め入射した場合) [源栄・永野 (1996) より転載]
 Fig.8 Velocity wave forms at surface of Upper Osaka group (subjected to obliquely incident SH-wave) [Reproduced from Motosaka & Nagano (1996)]

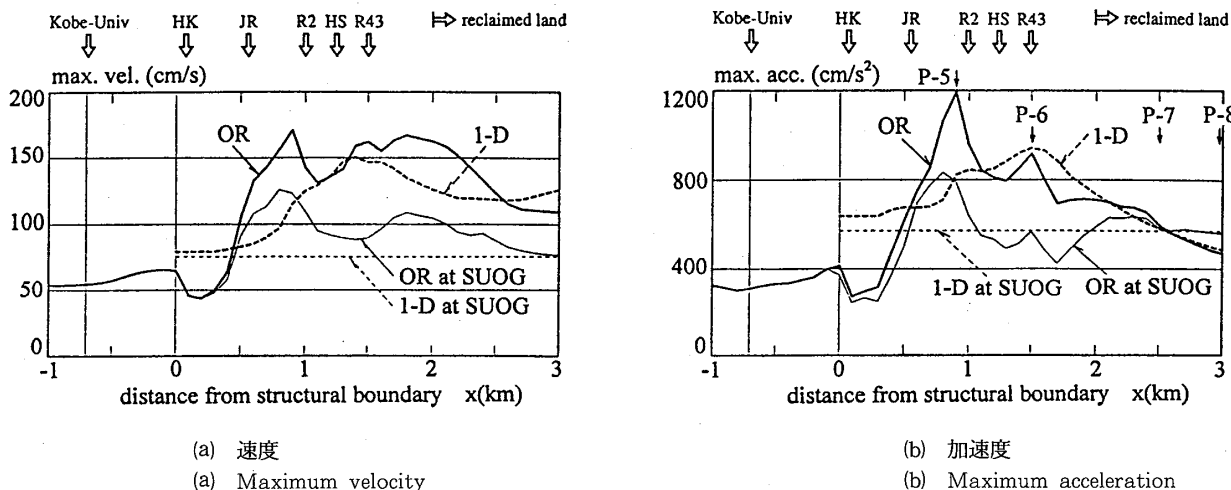


図-9 地表での速度、加速度分布 (SH波が45° 斜め入射した場合) [源栄・永野 (1996) より転載]
 Fig.9 Distribution of maximum response values at ground surface (subjected to obliquely incident SH-wave) [Reproduced from Motosaka & Nagano (1996)]

数段の逆断層構造で徐々に堆積層が深くなる、神戸大学を通る断面モデルを作成し、同じ手法を用いた解析を行ない、源栄・永野 (1996) の結果に比べて最大加速度発生地点が0.5km海岸ヘシフトするものの、段差境界より堆積層側にやや離れた地点で最大加速度が現れる傾向は同様であることを示した。

3・2 盆地生成回折波/表面波と直達波の増幅的干渉 (エッジ効果)

川瀬・林 (1995,1996), 川瀬 (1996a) は、源栄らと類似の解析を行い、同様に震災の帯に対応する位置で大きい地表地震動となる解析結果を得ているが、川瀬らは

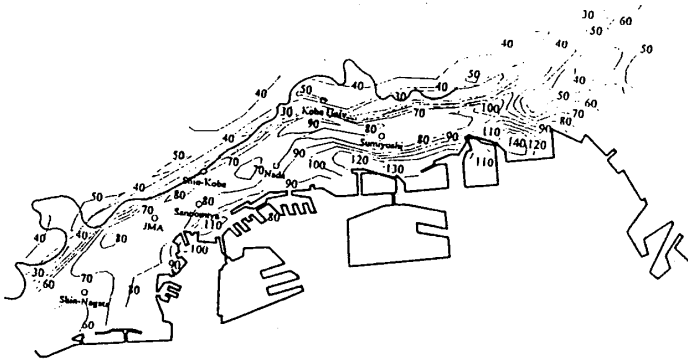


図-10 地表での速度分布 (単位: kine) [永野ら (1996) より転載]

Fig.10 Contour of peak ground velocity on ground surface (unit: kine) [Reproduced from Nagano et al. (1996)]

これを波線理論で解釈できる焦点効果とは異なり、盆地端部で生成された回折波/表面波と直達波の増幅的干渉であるとしてエッジ効果と命名している。川瀬らは三宮を含む南北断面を図-11のように岩盤部分と堆積層部分からなる2領域モデルで作成し、岩盤部は源栄らのモデルと異なって $V_s=2500\text{m/s}$ 層の露出とし、堆積層部分は大坂層群上部、中部、下部をそれぞれ $V_s=450, 550, 650\text{m/s}$ 、その下に $V_s=1000\text{m/s}$ の下大阪層群を置き、基盤は $V_s=2500\text{m/s}$ とした。解析方法は有限要素法を用いているが、源栄らがSH波の斜め入射を想定しているのに対し、気象台の観測波の主軸が断層直交方向であり、断層直交成分は震源からの波としてはSH波に相当するが地盤モデルに対してはSV波であるとして、2次元モデルに鉛直入射する面内問題としているところが異なっている。入力波形は、気象台付近の地盤構造、断層との位置関係のため気象台直下の地盤が1次元的に振る舞えないことから気象台を通る南北断面を別に

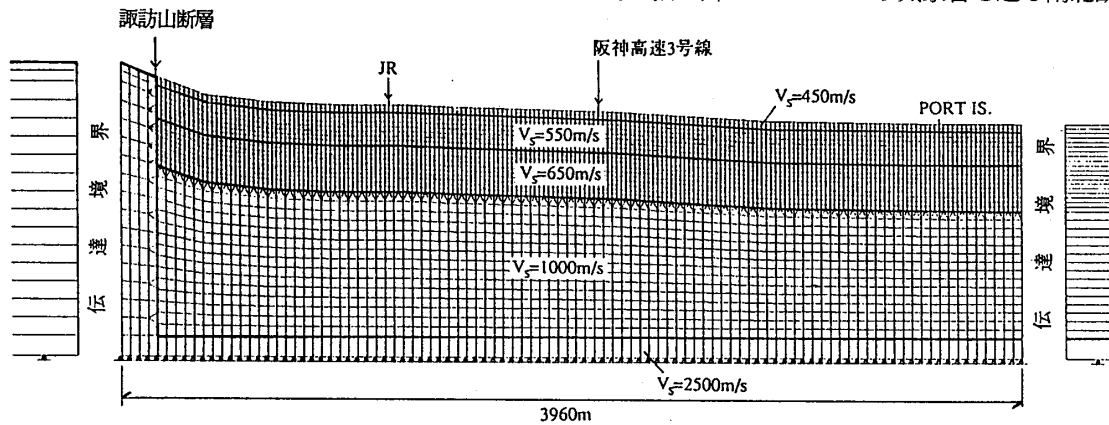


図-11 三宮を通る南北断面のFEM地盤モデル [川瀬・林 (1996) より転載]

Fig.11 NS direction FEM ground model in Sannomiya district [Reproduced from Kawase & Hayashi (1996)]

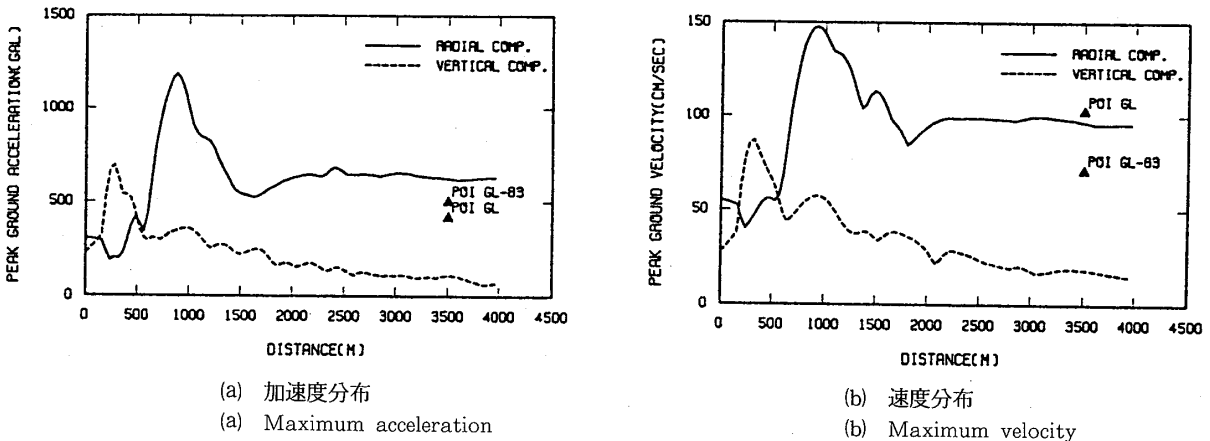


図-12 三宮を通る南北断面での地表加速度、速度分布 [川瀬・林 (1996) より転載]

Fig.12 Distribution of maximum acceleration and maximum velocity at ground surface along NS line in Sannomiya district [Reproduced from Kawase & Hayashi (1996)]

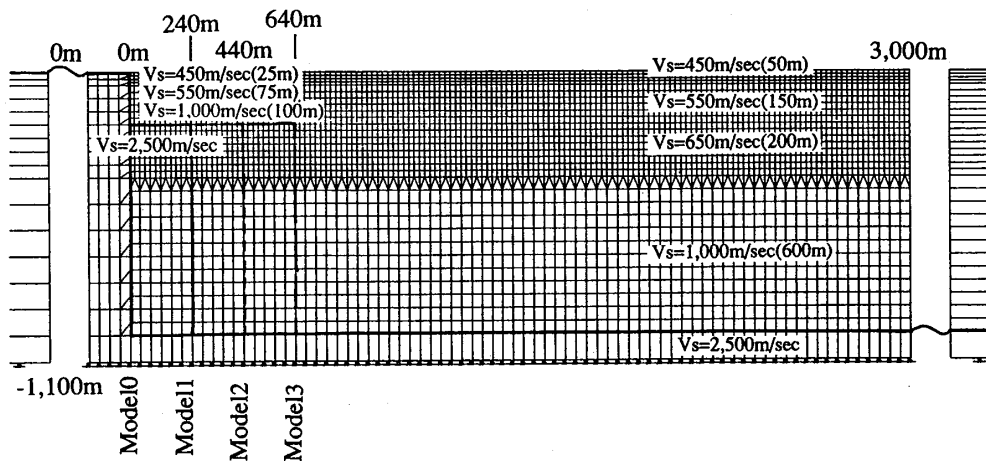


図-13 神戸周辺の地下構造モデル [川瀬 (1996a) より転載]

Fig.13 FEM ground model around Kobe district for simulation [Reproduced from Kawase (1996a)]

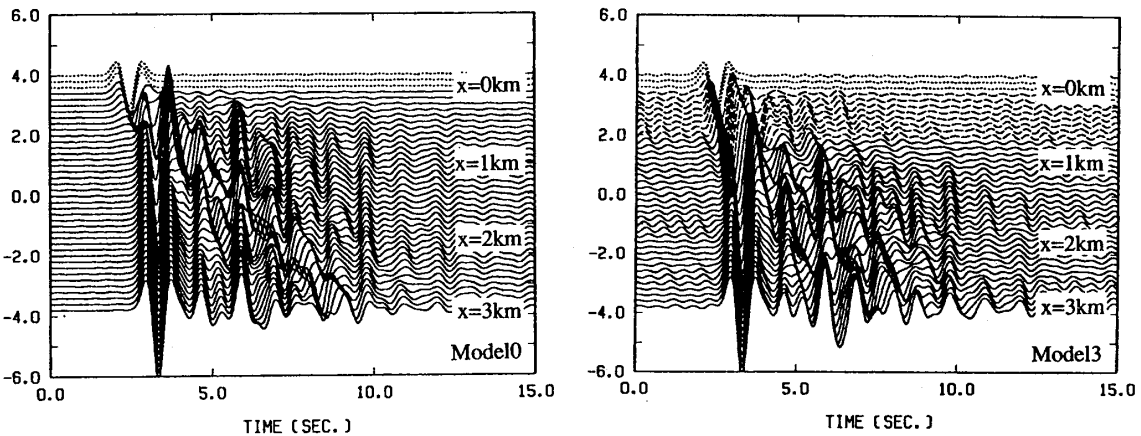


図-14 1HzのRicker波に対する地表面波形 [川瀬 (1996a) より転載]

Fig.14 Response wave forms at surface for 1Hz incident Ricker wavelet [Reproduced from Kawase (1996a)]

設定し、気象台記録から基盤での記録を逆算して用いている。大阪層群上面での速度、加速度分布は図-12に示すように900m地点(加速度1200gal, 速度150kine)を中心として幅600mの領域で加速度800gal以上、速度120kine以上となり、2000mより海岸側では1次元解析結果に収斂する様子を示しており、三宮地区における被害の集中をおおむね説明できるとしている。川瀬(1996b)ではその後の神戸周辺の深い地下構造探査によって、特に東灘区から灘区にかけては2段かそれ以上の段差があり、場所によって一様ではないことを受け、三宮のように1段で深くなる構造(図-13, Model 0)と1段目では200mだけ落ち込み2段目で深くなる構造(同, Model 1~3)を同様にモデル化して解析し、エッジ効果の性質を示している。図-14はRicker波を入力した場合のModel 0とModel 3での波形を示しており、Model 0の盆地内部(実線)では同位相の直達S波と重複反射部分

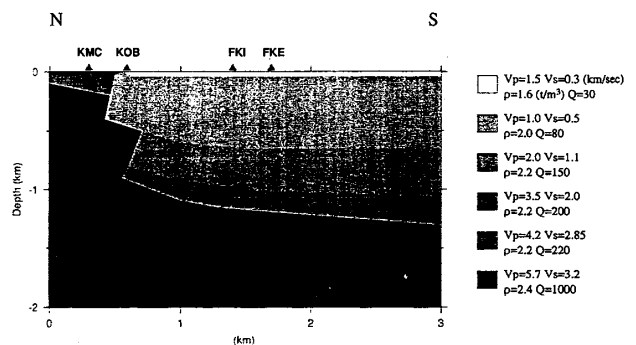


図-15 階段状の基盤の段差を持つ南北方向の地盤モデル [Pitaruka et al. (1996) より転載]

Fig.15 2-D NS-direction ground velocity structure with step-like baserock structure [Reproduced from Pitaruka et al. (1996)]

のほか盆地端部で発生し盆地内部を伝播する表面波がみられる。この表面波は平面波として入力した波が岩盤部

分の表面に達したとき岩盤部分と堆積層部分の変位の不連続から回折波が生じ、これが表面波（レーリー波、水平動は1次モード、上下動は基本モード）として水平に堆積層部分の方へ伝播し、これと堆積層部分の地表面に遅れて伝わってくる直達S波が増幅的に干渉することによって大きな地震動が生じるとしている。

Pitaruka et al. (1995, 1996) は岩盤および震災の帯の内外に設置された観測点からなる東灘区のアレイで観測された、本震のメカニズムと類似したメカニズムを持つ余震の記録を用い、アレイを通る弾性波探査結果に基づいて作られた、基盤が階段状に落ち込んでいるモデル（図-15）を使って数値計算によって説明することを試みている。余震の震源にダブルカップルのソースを置き、長さ3kmの区間をグリッドサイズ10mでモデル化して、2次元差分法を用いて断面沿いに波動の伝播を計算し（図-16）、盆地構造の端部で発生する表面波、回折波と直達S波によって震災の帯の中に位置する観測点FKI（東灘区福池小学校）での大振幅が説明できるとしている。また、この際には2Hz付近での増幅にはごく表層の地盤の影響が大きく、これを補正するため1次元解析による増幅度を用いている。以上から、本震での強い地震動の偏在は、盆地構造と、非常に軟弱な表層堆積物の双方が影響していると結論づけている。

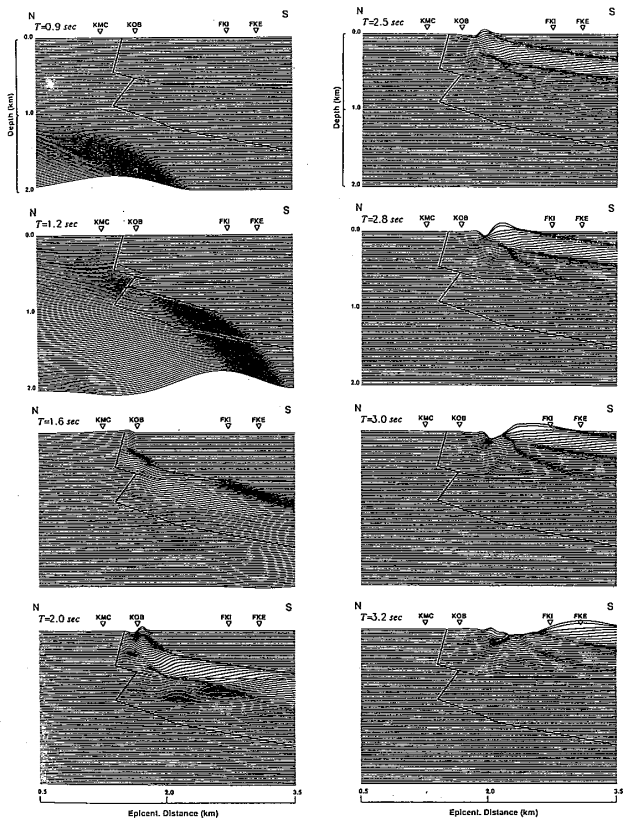


図-16 階段状の段差を持つ地盤モデルでの波動伝播スナップショット [Pitaruka et al. (1996) より転載]
 Fig.16 Snapshots in the cross section with step-like structure [Reproduced from Pitaruka et al. (1996)]

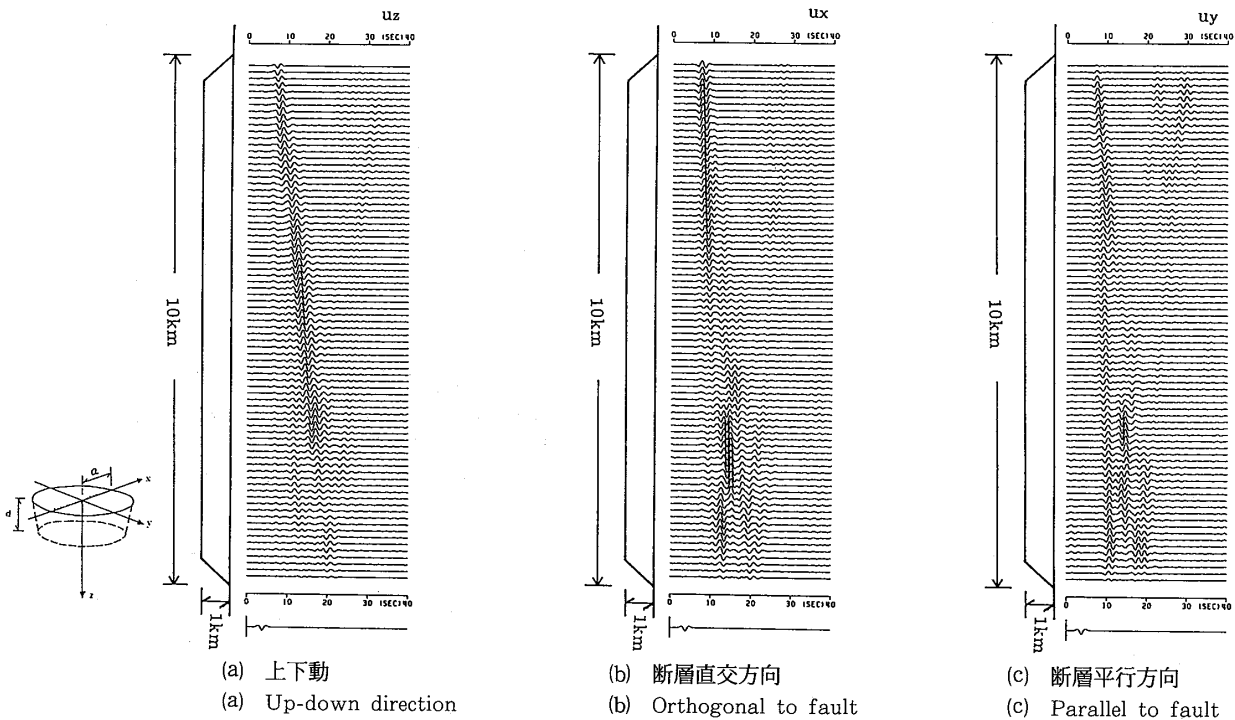


図-17 3次元円錐台形状堆積盆地に震源断層による地震動を入射した場合の地動応答 [篠崎・吉田 (1996) より転載]
 Fig.17 Time-domain responses for surface displacement of the 3-D sedimentary basin due to a double couple source [Reproduced from Shinozaki & Yoshida (1996)]

3・3 深い地盤構造を考慮した3次元解析

篠崎・吉田 (1995,1996), Shinozaki & Yoshida (1996) は、震災の帯が六甲山系から海側に向かって基盤岩が急激に深くなっている地域に相当するとして神戸の市街地を円錐台形型の3次元堆積盆地モデルに設定し、3D-BEM (境界要素法) を用いてモデル計算を行っている。図-17に計算結果の一例が示されるが、堆積盆地の外におかれたダブルカップル震源によって、地層境界に近い部分で振幅が大きく、離れるに従って急速に減衰するところから、震源の震動方向によっては鉛直地層境

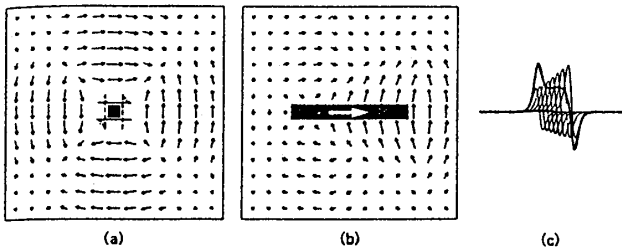


図-18 右横ずれ断層における指向性の原理 [額額 (1996) より転載]

Fig.18 The principle of directivity in right lateral strike-slip fault [Reproduced from Koketsu (1996)]

- (a) 小さな断層では最大速度振幅部分の震動方向が4象限型の方位特性になる
- (a) In the case of small fault, the azimuth of maximum velocity amplitude becomes quadrant type
- (b) 断層が大きさをもちその破壊が左から右へ進行するとき断層半ばから右側を中心に全体的に断層直交方向の震動が卓越する
- (b) In the case of large fault and if rupture propagate from left to right, the orthogonal component to the fault dominate throughout the area, especially center to right of the fault
- (c) この卓越は断層各部からの地震動が増幅的に干渉することによって起こり、地震動は長周期パルスになる
- (c) This domination happens from amplification by the interference of waves from every part of fault, consequently the wave form become long period pulse-like shape

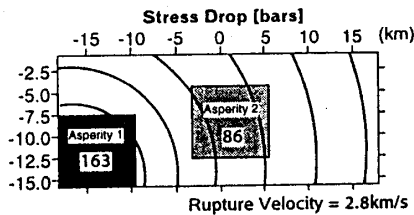


図-19 アスぺリティーを持つ断層モデル [井上ら (1996) より転載]

Fig.19 Fault model with asperity [Reproduced from Inoue et al. (1996)]

界近傍で増幅域が生じうるとしている。

以上、3・1から3・3の研究では、 $V_s=2000\sim3000$ m/s程度の基盤層の不整形性に基づいて部分的に地震動が大きくなる現象を、モデル化した構造を用いて波線理論や有限要素法、差分法などを用いて数値的に解釈しようとしている。

4 震源過程と地盤構造の複合作用に着目した研究 (guided directivity)

ここでは、震源の破壊過程を物理モデルを用いて動学的にシミュレーションし、観測点の地盤の影響との複合的效果に着目した研究をまとめる。

兵庫県南部地震では、震源の近傍で周期1~2秒の波が震源断層と直交する方向に顕著にみられたが、この理由について額額 (1996) は右横ずれ断層特有の現象としてディレクティブティーのために断層の破壊の進行方向に長周期パルスが強く現れたものと説明している (図-18)。井上・宮武 (1996a,1996b), 井上ら (1996) は震源として2つのアスぺリティーを持つモデル (図-19) を採用し、断層の破壊が明石海峡直下の断層左下端から破壊が進行するとして、3次元の差分法で動力学シミュレーションを行い、地表面に現れる1 Hz以下の最大速度の分布を求めている。図-20に示した基盤露出あるいは一

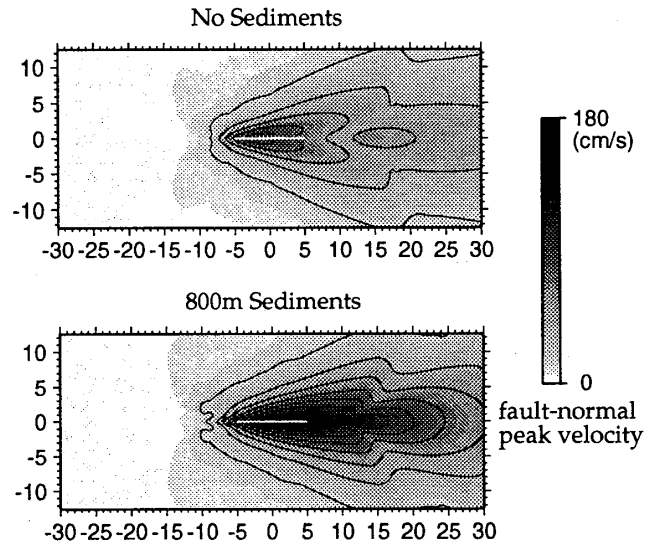


図-20 図中央の白線の直下にある断層による地動速度の分布 (断層に直交する成分)、上が基盤露頭、下が堆積層厚800mの場合 [額額・古村 (1996) より転載]

Fig.20 The distribution of surface velocity by the fault beneath the white line at the figure center (orthogonal to fault direction); Upper: base rock outcrop, Lower: 800m thick sediment overlaid [Reproduced from Koketsu & Furumura (1996)]

様な堆積層に覆われている場合は、額頰の言うように断層の破壊の進行方向に断層と直交する方向に強い揺れが現れているが、図-21の様に横ずれ断層に隣接して堆積層が分布する場合、図-22に示すように断層直上およびその延長にあるべき強震動領域が堆積層側に誘導されることを示している。この理由について井上・宮武 (1996b) は、図-23に示すように、震源で発生した大振幅S波パルスが堆積層にはいると急激に減速し、波面間隔が狭まってエネルギー集中が起こることによるとの波動論的解釈を示している。

額頰、古村 (1996) は、ディレクティブティー効果の誘導は横ずれ断層に隣接して堆積層が分布する場合には

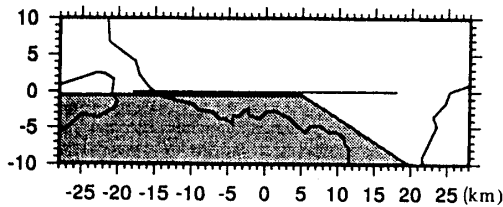


図-21 地下構造と断層配置, (左)平面図, (右)断面図 [井上ら (1996) より転載]

Fig.21 Ground structure and fault location ; Left : plane figure, Right: section figure [Reproduced from Inoue et al. (1996)]

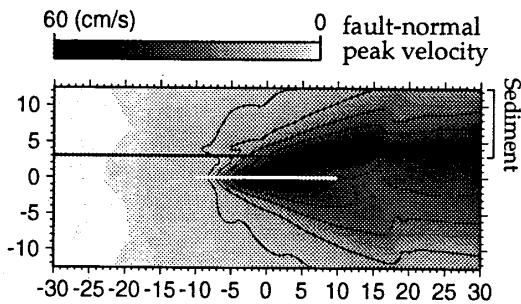


図-22 図中央の白線の直下にある断層による地動速度の分布 (断層に直交する成分), 断層に直交する座標yにおいて $y \geq 3$ kmの領域が厚さ800mの堆積層で覆われている [額頰・古村 (1996) より転載]

Fig.22 The distribution of surface velocity by the fault beneath the white line at the figure center (orthogonal to fault direction) ; the area of $y \geq 3$ km are covered by the sediment of 800m thick [Reproduced from Koketsu & Furumura (1996)]

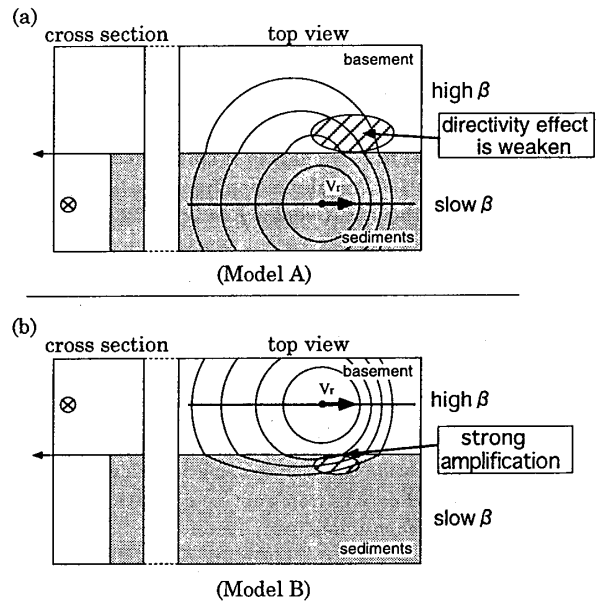


図-23 細長いベルト状の強震動領域が現れるメカニズム, 線震源が堆積盆地の縁に沿って分布している [井上・宮武 (1996b) より転載]

Fig.23 The cause of the narrow belt of strong motion ; A line source is assumed to be run parallel to the basin edge [Reproduced from Inoue & Miyatake (1996b)]

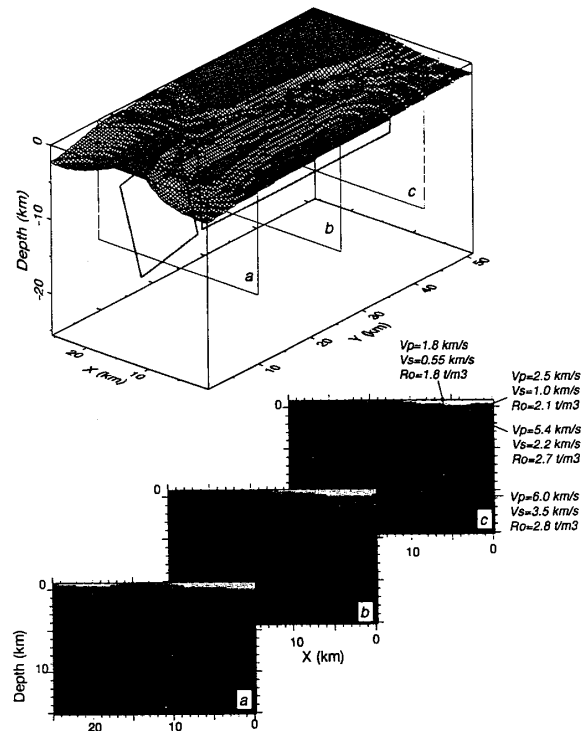


図-24 3次元地下構造モデル (断面図 a, b, c) と震源断層の位置 [古村・額頰 (1996) より転載]

Fig.24 3-D ground model (sections ; a, b, c) and location of fault model [Reproduced from Furumura & Koketsu (1996)]

必ず起こる現象で、川瀬 (1996a) の言うエッジ効果は断層が深い場合に生じる、震災の帯が構造境界から離れることを説明する2次の効果だとしている。古村、額額 (1996) は、実際の3次元地下構造モデル (図-24) と震源断層モデルを組み込んだ3次元数値シミュレーションをおこなって、ディレクティブティー効果の誘導 (guided directivity) によって断層破壊方向に沿って堆積盆地上に帯状の強震動地帯が生成される (図-25) ことを示している。彼らは、震災の帯が堆積層上に現れた原因として、1) 軟弱地盤による増幅、2) エッジ効果、3) ディレクティブティー効果の誘導をあげ、パラメタスタディーの結果からディレクティブティー効果の誘

導がかなり大きな比重を占めていると結論している。なお、計算値は観測値の60%にとどまっているが、地表付近の速度構造と震源断層の位置の見直して解決できるとしている。

これらの一連の研究では、断層の破壊が淡路島側から神戸市側へ進んだこと、神戸市付近の地盤構造が岩盤部分と堆積層部分が接している構造をしていること、および断層が地盤構造の境界より山側にずれていたことが複合的に作用して震災の帯が生じたと解釈している。また、3次元でのシミュレーションを実施しているが、現在の並列計算機を用いれば数10時間の計算でこのような解析が可能となっている。

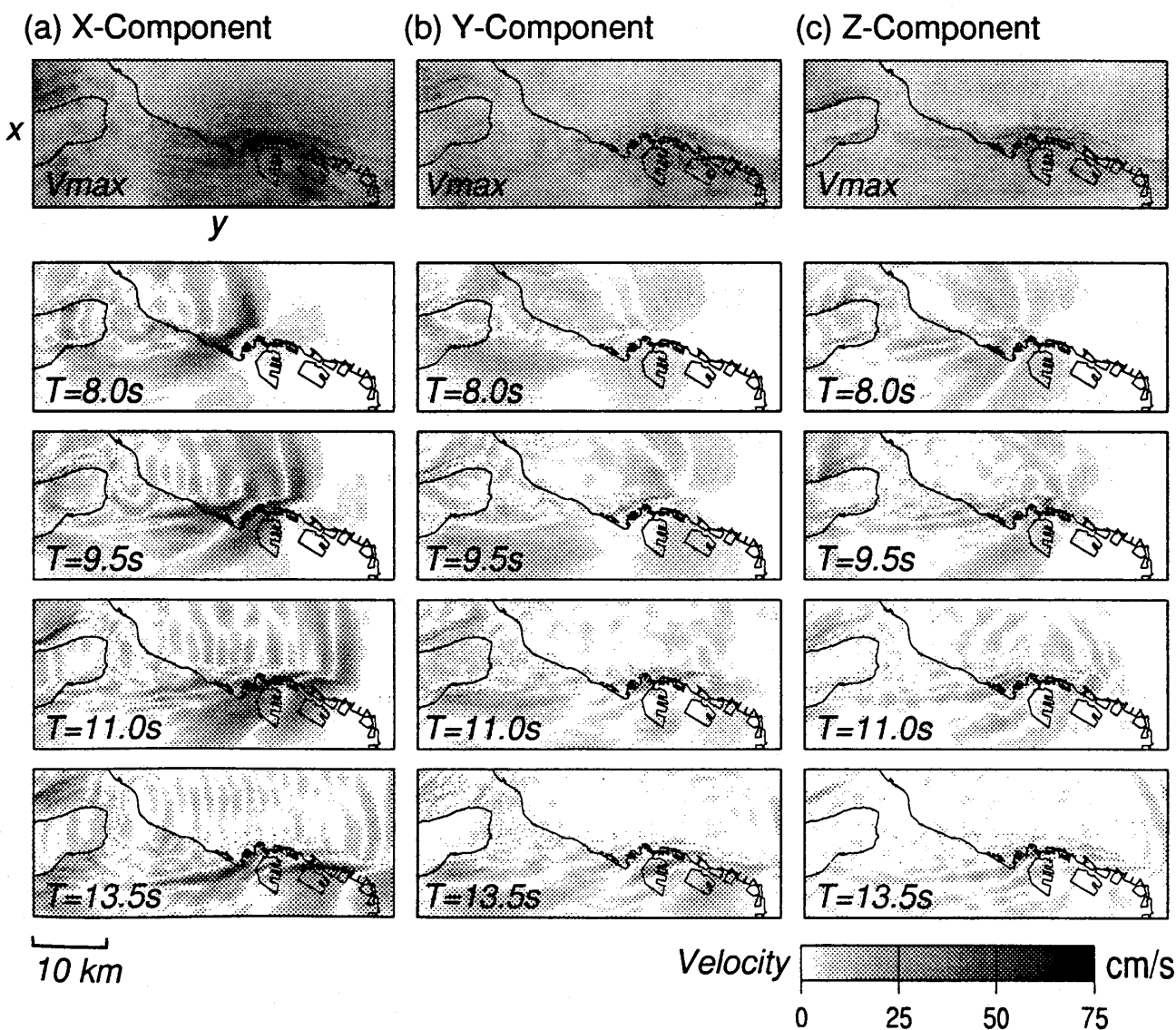


図-25 地震動の3次元数値シミュレーション結果、最上段：成分毎の最大地動速度分布、他：各時刻の地動速度のスナップショット [古村・額額 (1996) より転載]

Fig. 25 The result of 3-D numerical simulation of earthquake motion ; Uppermost : maximum velocity distribution, Other : snapshots of each time indicated lower left [Reproduced from Furumura & Koketsu (1996)]

5 地震動の面的広がりを評価しようとする研究

兵庫県南部地震の後、震災の帯における地震動分布を解明しようとする多くの研究が行われてきたが、一方、将来に発生するであろう地震動の予測を念頭に置いて、大都市直下で発生する大地震による地震動分布を面的に推定する方法論の検討、実践も数多く行われている。ここでは、兵庫県南部地震を例にとって神戸周辺での面的な地震動分布を想定した研究を中心にまとめる。

5・1 被害調査からの推定

藤本・翠川(1996)は墓石転倒率の現地調査結果と地形図から読みとった地盤分類ごとの地形勾配の関係を求め、これから各地の墓石転倒率を推定し、これに兵庫県南部地震での最大速度と墓石転倒率の関係から最小2乗法で求めた関係式を使って最大地動速度分布を図-26の様に求めている。これによると、緩扇状地で最も大きく140kineに達するとしている。

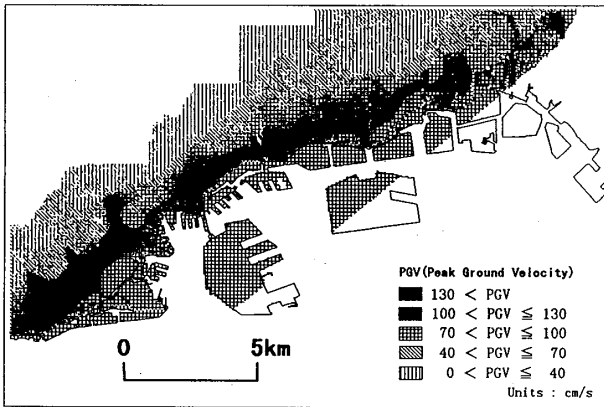


図-26 墓石転倒率から推定した最大速度分布 [藤本・翠川(1996)より転載]

Fig.26 Maximum velocity distribution estimated from tombstone tumbling [Reproduced from Fujimoto & Midorikawa (1996)]

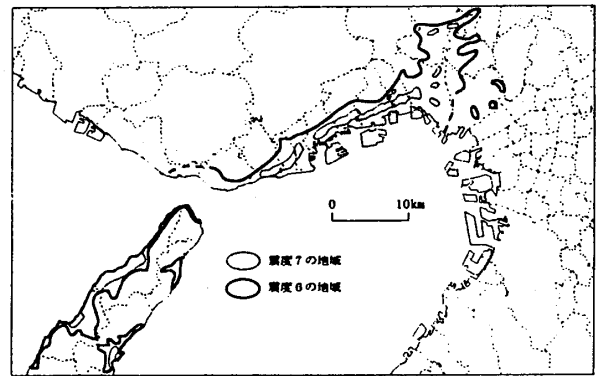


図-27 住宅の被害分布などから推定した震度6の範囲 [翠川・藤本(1996)より転載]

Fig.27 The area of JMA-intensity 6 estimated from the damage of houses etc. [Reproduced from Midorikawa & Fujimoto (1996)]

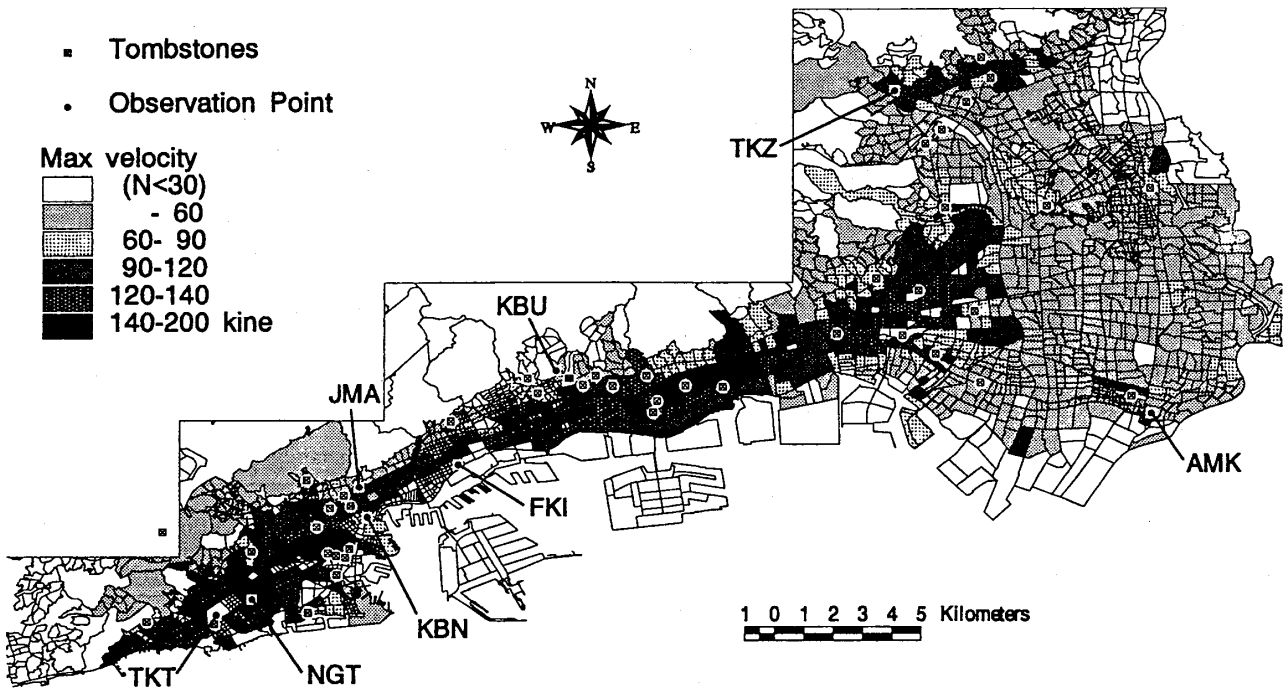


図-28 建物の被害率に基づく最大速度分布 [林ら(1996)より転載]

Fig.28 Peak ground velocity distribution estimated from the damage of buildings [Reproduced from Hayashi et al. (1996)]

翠川・藤本 (1996) は、過去の震害調査事例から、木造建物の全壊率が1%程度以上の地域が震度6以上と対応するところから、各種建築物被害調査結果を補正し、さらに基石転倒率なども参考にして震度6の地域を図-27の様に推定している。

林ら (1996) は、兵庫県などの行った建築物被災度調査結果を、建築学会の行った建築物の構造的被害の調査結果と対応させることによって補正し、建築学会の調査結果と川瀬ら (1996) の推定速度分布の対応結果をもとにして作成した低層独立住宅の震害率と速度との関係を用いて、図-28の最大速度分布を求めている。

5・2 理論的に求めた基盤地震動と1次元増幅の組み合わせ

佐藤・塩見 (1996), Sato (1996) では、彼らがこれまでに開発していくつかの地震動分布を再現してきた手法を用い、神戸での地震動分布の推定を試みている。この手法は波形合成法と同様に、分割された小断層領域からの波形を重ね合わせる構成式を使っているが、これをフーリエ変換して小領域に対応する震源スペクトルを用いており、任意の地点での予測を行うため、余震記録の代わりに理論震源スペクトルを採用している。表層の増幅特性は埋め立て地盤のみ1次元等価線形解析、他の地盤は1次元線形解析で評価し、震源断層解に基づいて地表加速度分布を求めている。さらに、こうして求めた加速度値を観測値で補正して図-29に示す最大加速度分布を求めている。

また、Segawa & Komaru (1996), 金子ら (1997) には、分割した断層の各小領域からの寄与を速度応答スペクトルで評価し、観測点側で破壊速度、波動伝播時間差を考慮して足しあわせる、翠川・小林 (1979) の方法で基盤での地震動を評価し、表層の増幅特性は松岡・翠

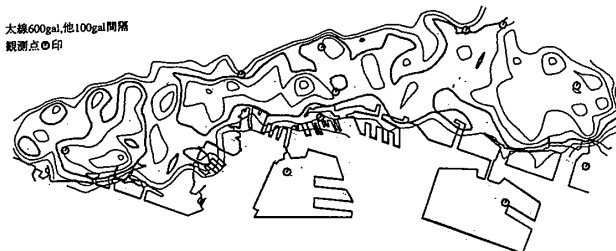


図-29 理論計算値を観測値で補正して得た最大地表加速度分布 [佐藤・塩見 (1996) より転載]

Fig.29 Maximum acceleration distribution of ground surface; derived from theoretical calculation and modified with observed data [Reproduced from Sato & Shiomi (1996)]

川 (1994) の方法に準じて国土数値情報による地形地質情報を用いる方法で評価した、阪神地域での地表加速度分布の推定結果が示されている。この研究は余震分布のほかは既存データのみを使うため、震源に関する詳しい解析や地盤調査結果がなくても地震後短時間で結果が出せる利点があるが、結果は最大加速度分布のみとなる。

5・3 スペクトルの経験式に基づく推定

杉戸 (1996) では、彼らが実用的な強震動予測を目指して開発した基盤レベルでの地震動のシミュレーション手法を使って、神戸での地震動分布の推定を行っている。この方法は、工学的地震基盤での強震観測データからマグニチュードと距離の関数として非正常スペクトルの経験式を作り、断層をマグニチュード6相当の小領域に分割したうえで、破壊伝播速度などを考慮して観測点で時間軸上で小領域からの寄与を足しあわせるものである。兵庫県南部地震の場合は図-30の様に6分割した小領域にモーメント比を与え、図-31の加速度分布が得られている。

5・4 経験的グリーン関数法

釜江・入倉 (1995) は、本震時に観測記録が得られた9地点において、余震記録を経験的グリーン関数として用いて本震の波形合成による再現を行い、観測記録と良い一致を見ている。釜江・入倉 (1996a, 1996b) では、さらに本震後に設置された東灘区内の震度7の地域内に位置する観測地点について、余震観測記録を使って本震

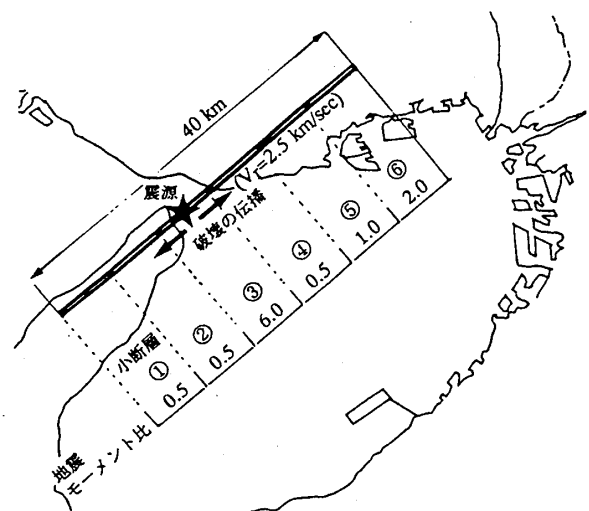


図-30 シミュレーションのための断層モデル [杉戸 (1996) より転載]

Fig.30 Fault model for simulation [Reproduced from Sugito (1996)]

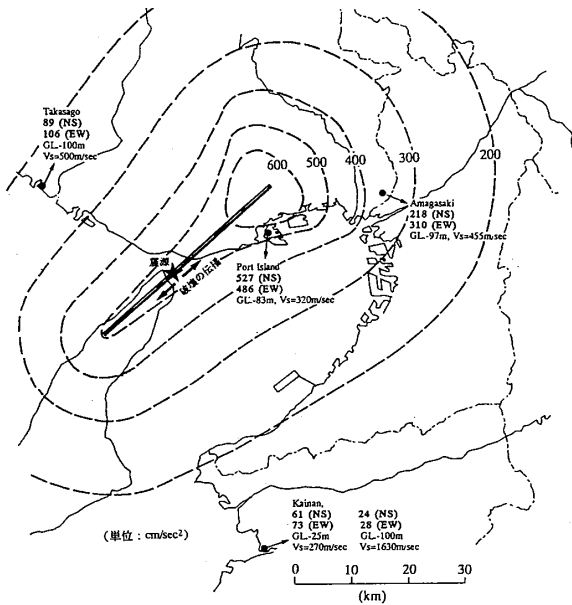


図-31 最大加速度のシミュレーション結果と孔中観測加速度 [杉戸 (1996) より転載]
 Fig. 31 Distribution of simulated peak acceleration compared with peak acceleration at borehole stations [Reproduced from Sugito (1996)]

地動の推定を行っている (図-32)。この際にはインバージョン解析結果から本震の断層内に淡路側1つ、神戸側2つのアスペリティーを置き、エネルギーはすべてアスペリティー内から発生しているとしている。これによると、東灘区内の堆積地盤上での本震地動は加速度で1000 gal、速度で130kine程度であったと推定している。

5.5 ハイブリッドグリーン関数法

釜江ら (1996,1997) は、彼らがすでに提案している、ハイブリッドグリーン関数法を使って、神戸大学、神戸海洋気象台などでの本震記録の再現計算を行い、ほぼ再現できたとしている (図-33)。この方法は、1秒以上の長周期領域で使用するグリーン関数を不規則な地盤構造モデルを用いた3次元数値シミュレーション法で求め、1秒以下の短周期領域で使用するグリーン関数は統計的シミュレーション法に1次元モデルによる局所増幅特性を考慮しさらに包絡形状と位相ランダムを仮定して評価

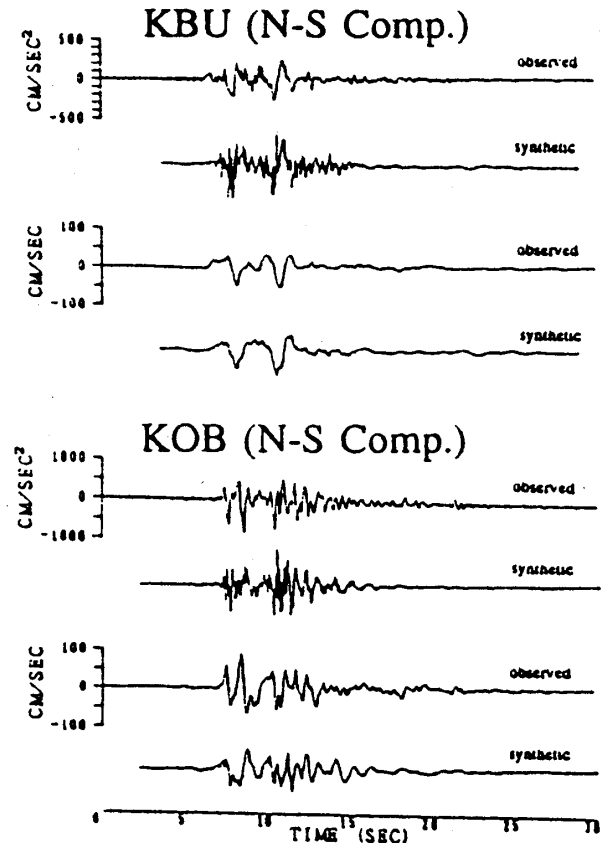
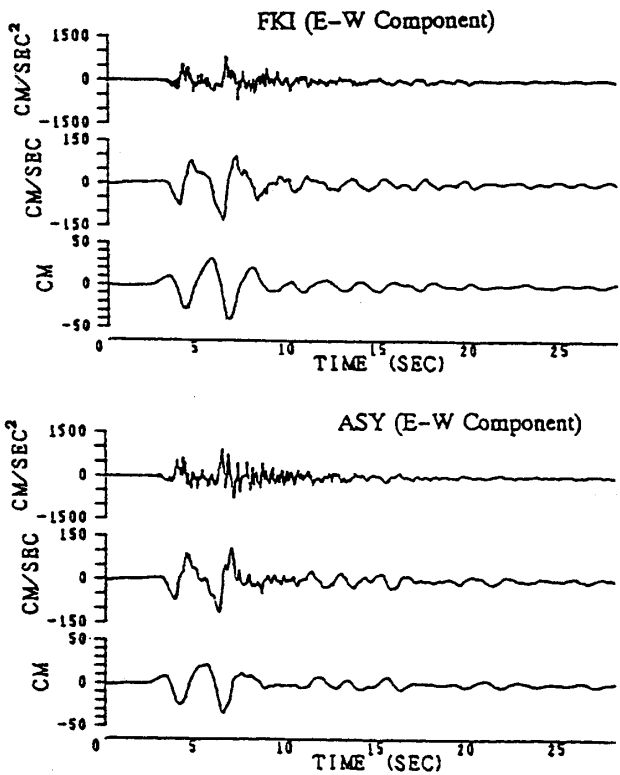


図-32 神戸市における震度7地域での再現波形 (FKI: 福池小学校, ASY: 芦屋精道小学校) [釜江・入倉 (1996b) より転載]
 Fig. 32 Simulated wave forms in the region of JMA intensity 7 of Kobe city [Reproduced from Kamae & Irikura (1996b)]

図-33 神戸大学 (KBU)、神戸海洋気象台 (KOB) でのハイブリッドグリーン関数を用いた合成結果と観測結果の比較 [釜江ら (1996) より転載]
 Fig. 33 Comparison between observed and synthesized seismograms using hybrid Green's function at Kobe Univ. (KBU) and JMA Kobe (KOB) station [Reproduced from Kamae et al. (1996)]

して、時間軸上で両者を足しあわせてハイブリッドグリーン関数（要素地震波）を作成する。このハイブリッドグリーン関数を使って、経験的グリーン関数法と同様に波形合成をおこなうという方法である。また、この際には釜江・入倉（1996a, 1996b）と同じアスペリティーが用いられている。入倉（1996）は、強震動予測に際しては断層の不均質性を考慮することが重要であるが、前もってアスペリティーを予測することが現状困難なことから、大阪地域での防災を目的とした地震動評価に際して、全破壊領域とアスペリティー面積の比の統計値およびアスペリティーの経験的位置関係を導入する考え方を示している。

香川（1996）は、断層破壊過程を考慮した人工的小地震波形に観測点までの伝播経路特性を加えてグリーン関数法で合成を行い、大阪地域まで含めた広い範囲での洪積層上面での地震動分布を求めている（図-34）。

金子ら（1997）にも、小田原周辺で行った、観測記録にもとづくスペクトルの経験式を用いた、ハイブリッドグリーン関数法による地震動の想定が紹介されている。

以上の研究は、いずれも地震防災を視野に置き、将来の地震による地震動の予測を大きな方向性として持っている。5・1は被害分布から逆に兵庫県南部地震による地震動分布を詳細に求めようとする研究であり、被害と

地震動強さとの関係の研究や、地震動予測手法の検証のために重要な意味を持つ。5・2から5・4は既存の手法、あるいはそれを改良した手法を用いて神戸市周辺での面的な地震動分布を求めようとしている。5・5ではさらに、既存の手法を改良し、将来発生する地震に対して、地震動の予測に使えるような一般化を行った上で兵庫県南部地震に対して適用し、その有効性を評価しようとしている。

6 あとがき

兵庫県南部地震は、「大地震」ではなく、「大災害」であると言われることがある。これは、地震学的にみれば内陸の活断層の運動で生じた特に異常ではない地震であり、歴史的には過去何度も各地で繰り返されてきたであろう地震と大きく変わることはない普通の地震が、神戸という大都市の直下で発生したために大災害を引き起こしたことを強調するためにこのような表現がされているようである。しかし災害の面からみると、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）には、いくつかの大きな特徴がみられた。すなわち、被害の激しい地域が帯状に分布する、いわゆる「震災の帯」が形成され、しかも余震分布から推定された震源域と震災の帯が一致していないこと、断層が地表に現れた淡路島よりも、神戸市、芦屋市に被害の激しい地域が広がった点などである。これらの特徴は単一の要因で説明できるとは考えにくく、複合的な要因が考えられている。兵庫県南部地震に関しては、震源断層の滑りの様子や破壊の進行、停止のパターンなどの震源特性の解析、神戸付近の基盤構造探査など多くの成果が上げられつつあるが、本報告でまとめた研究ではこれらの成果を利用して個々の要因については数値計算によってかなり再現できるようになってきている。震源から表層地盤までを動的に一貫して解釈できる総合的なモデルに関してはこれからの課題となるが、基盤構造の解明、解析への取りいれ方に比べ、表層地盤の評価に関しては国土数値情報等の利用にとどまっているのが現状であり、この面でのデータの集積、解明が望まれる。

さらに、これらの研究の多くは、「震災の帯＝地表地震動（速度、加速度）が周囲より大きかった場所」の前提のもとに、被害の大小を地震動の大小だけで説明しようとしている。しかし、被害の程度には被害を受ける側の特性の違い、すなわち建築物の新旧、強弱も大きな要因となっていることは間違い無い。実際、震災の帯と呼ばれているJR線と国道2号線の間には昭和30年代に建築された耐震性の低い建物が多く存在していたといわれている。建築物の耐震性についても非常に多くの研究が

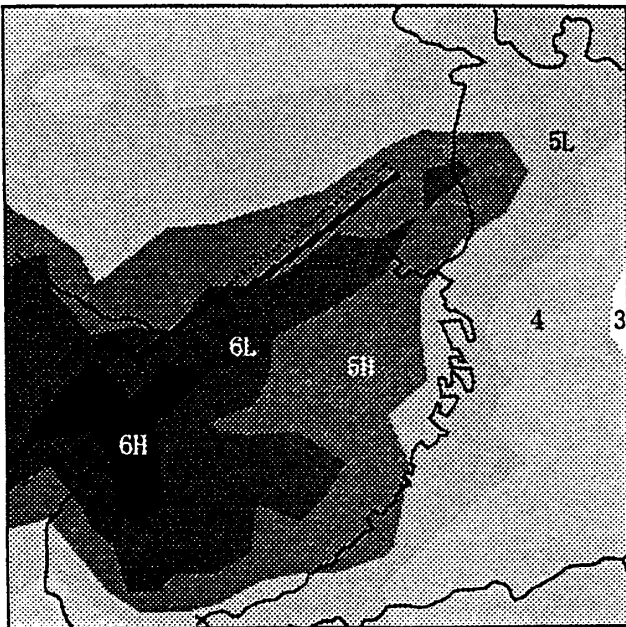


図-34 人工地震波を用いた経験的グリーン関数重ね合わせ法による震度分布 [香川（1996）より転載]

Fig. 34 Simulated seismic intensity distribution by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake using empirical Green's function method with synthesized small event [Reproduced from Kagawa (1996)]

なされているが、地震動分布と建築物の耐震性の地域特性の相方を取り入れた研究は将来に委ねられており、震災の帯の真の解明はまだこれからである。

参 考 文 献

- 1) 浅香美治, 時松孝次, 新井洋 (1996): 微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部地盤構造と地震動特性分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2.
- 2) 井上智広, 宮武隆 (1996a): 神戸「震災の帯」はなぜできたか?, 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集.
- 3) 井上智広, 宮武隆 (1996b): 動力学モデルによる断層近傍の強震動予測, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム.
- 4) 井上智広, 宮武隆, 額縁一起 (1996): 兵庫県南部地震の震源過程と強震動分布, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 5) 入倉孝次郎 (1996): 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム.
- 6) 香川敬生 (1996): 震源断層近傍における地震動分布のSIMULATION, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 7) 金子史夫, 瀬川秀恭, 早川譲, 小丸安史 (1997): 直下地震による地震動分布の予測, 応用地質技術年報兵庫県南部地震特集号.
- 8) 釜江克宏, 入倉孝次郎 (1995): 1995年兵庫県南部地震時の強震動シミュレーション, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 9) 釜江克宏, 入倉孝次郎 (1996a): 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと強震動の推定, 強地震動予測に関する総合的研究(最終年度), 平成7年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書(課題番号05302069).
- 10) 釜江克宏, 入倉孝次郎 (1996b): 1995年兵庫県南部地震時の震度7地域での強震動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2.
- 11) 釜江克宏, Arben Pitarka, 入倉孝次郎 (1996): ハイブリッドグリーン関数を用いた強震動評価—1995年兵庫県南部地震への適用—, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 12) 釜江克宏, Arben Pitarka, 入倉孝次郎 (1997): 単純な震源モデルとハイブリッドグリーン関数を用いた1995年兵庫県南部地震の強震動評価, 日本地震学会講演予稿集, No.1.
- 13) 川瀬博 (1996a): Q: 何が震度7の震災帯をもたらしたのか? A: 盆地生成回折波/表面波との増幅の干渉, 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集.
- 14) 川瀬博 (1996b): 兵庫県南部地震の際神戸市内に震災帯を生成させた盆地端部でのエッジ効果の生成プロセスと深部地下構造の関係に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2.
- 15) 川瀬博, 林康裕 (1995): 兵庫県南部地震の際の神戸気象台での強震観測記録を用いた基盤波の逆算と三宮地区における本震地動評価, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 16) 川瀬博, 林康裕 (1996): 兵庫県南部地震の際の神戸気象台での強震観測記録を用いた基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 480.
- 17) 川瀬博, 佐藤智美, 松島信一, 入倉孝次郎 (1995): 余震観測に基づく兵庫県南部地震時の神戸市東灘区における本震地動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 476.
- 18) 額縁一起 (1996): カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震, 科学, Vol.66, No.2.
- 19) 額縁一起, 古村孝志 (1996): 兵庫県南部地震の震源域における強震動, 第24回地盤震動シンポジウム.
- 20) Sato, T. (1996): Estimation of peak ground motion in the severely damaged area during 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Proceedings of the International Workshop on Site Response.
- 21) 佐藤忠信, 塩見祐二 (1996): 震度7の帯内において最大地動を推定することは可能か, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集.
- 22) 篠崎祐三, 吉田一博 (1995): 点震源による3次元不整形堆積地盤の地震動(2), 日本地震学会講演予稿集, No.2.
- 23) Shinozaki, Y., K. Yoshida (1996): Seismic waves in 3-D sedimentary basins due to point source, Proc. of 11th. World Conference of Earthquake Engineering.
- 24) 篠崎祐三, 吉田一博 (1996): 3次元不整形地盤の地震動解析: 兵庫県南部地震「震災の帯」に関する考察, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム.

- ム.
- 25) 杉戸真太 (1996) : 非定常地震動シミュレーション手法 (EMP-IIB) による直下地震動の推定, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム.
 - 26) 鈴木崇伸, 伯野元彦, 五十嵐俊一 (1995) : 傾斜した軟弱層上の地震動増幅に関する数値実験, 第23回地震工学研究発表会.
 - 27) 鈴木崇伸, 伯野元彦, 五十嵐俊一 (1996) : 地盤の不整形による地震動の増幅についての3次元シミュレーション, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集.
 - 28) Segawa, S., Y. Komaru (1996) : Prediction of earthquake damage and simplified instantaneous earthquake damage prediction system using personal computer, Proc. of 11th. World Conference of Earthquake Engineering.
 - 29) 中川康一, 大阪市立大学阪神大震災学術調 (1995) : 震害と地盤構造, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集.
 - 30) 中川康一, 塩野清治, 井上直人 (1996) : 大阪盆地の地下構造とフォーカシング効果, 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集.
 - 31) 永野正行, 源栄正人, 山田有孝, 加藤研一, 野澤貴, 佐々木透 (1996) : 1995年兵庫県南部地震時の神戸市中心部の強震動推定, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
 - 32) 永野正行, 加藤研一, 大野晋 (1997) : 反射法結果に基づく2次元断面を用いた1995年兵庫県南部地震時の強震動シミュレーション解析, 日本地震学会講演予稿集, No.1.
 - 33) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 渡辺宏一 (1996) : 兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム.
 - 34) Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata and T. Kagawa (1995) : Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
 - 35) Pitarka, A., K. Irikura and T. Iwata (1996) : Was the basin edge geometry responsible for the ground motion amplification in the disaster belt-like zone during January 17, 1995, Kobe (Hyogo-ken Nanbu), Japan earthquake?, Proceedings of the International Workshop on Site Response.
 - 36) 藤本一雄, 翠川三郎 (1996) : 墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の被災地域での震度分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2.
 - 37) 古村孝志, 額瀨一起 (1996) : 3次元シミュレーションによる兵庫県南部地震の強震動の生成過程, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム.
 - 38) 松岡昌志, 翠川三郎 (1994) : 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム.
 - 39) 翠川三郎, 小林啓美 (1979) : 地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, 282.
 - 40) 翠川三郎, 藤本一雄 (1996) : 被害分布からみた兵庫県南部地震の震度6の範囲について, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
 - 41) 源栄正人, 永野正行 (1995) : 不整形地下構造を考慮した兵庫県南部地震における神戸市の地震動増幅特性解析, 日本地震学会講演予稿集, No.2.
 - 42) 源栄正人, 永野正行 (1996) : 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析, 日本建築学会構造系論文集, 488.

