

2. 兵庫県南部地震を考える



兵庫県南部地震がもたらしたもの

藤原 重彦（株式会社キンキ地質センター）

1. まえがき

1995年1月17日、午前5時46分52秒、明石海峡の海面下約8kmの岩盤が破壊し始めた。この破壊は南西方向と北西の両方向に毎秒約9kmの速さで約4秒間進み、延長24kmの断層を生じた（図1の1）。

つづいて、46分54秒に第一の断層の北東端付近で新たな破壊が始まり北北東方向へ約9km延びた（図1の2）。そして46分57秒に第二の断層の中間地点付近から東北東方向に第三の破壊が5秒間走り12kmの長さの断層（図1の3）を生じて47分2秒に断層の破壊活動は停止した（菊池1995a, b）。

この11秒間の断層破壊活動に伴って生じた断層変位および地震動によって5500名をこえる方が亡くなり、35,000人以上の負傷者をもたらした。建築物の被害も甚大で全壊は8万戸以上、被災家屋は20万戸以上に及んだ。

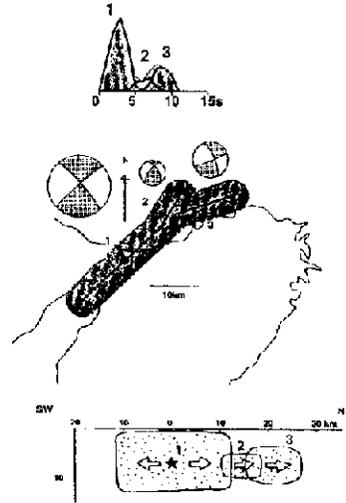


図1. 遠地の地震の解析結果（菊池,1995b）
 (a)モーメント速度関数
 (b)断層の空間分布。丸はメカニズム図
 (c)破壊域および破壊方向を示す北東-南西断面図

2. 地震の概要

2. 1. 本震の諸元

表1. 本震の諸元

	気象庁 (岩崎1995a)	菊池 (1995a)	京都大学防災研究所 地震予知研究センター (安藤ほか,1995)
北緯	34° 36.41'	明石海峡	34.801
東経	135° 02.57'		135.033
震源の深さ	14 km	8km	17.73km
マグニチュード	MJMA 7.2	MN 6.9	

MJMA:気象庁のマグニチュード MN:モーメントマグニチュード

2. 2. 震度階分布

本震の震度（階）分布は図2に示す通りで関東・甲信越地方より西方の日本列島全域で地震の揺れを感じた。図2では神戸の震度は6となっているが、気象庁は2月7日、図13に示す地域に震度7を適用した。

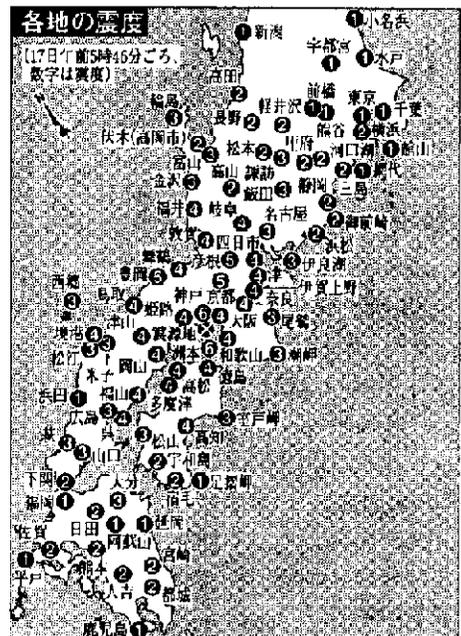


図2.各地の震度（京都新聞1月17日）

2. 3. 地震動

兵庫県南部地震の地震動記録は多くの地点で観測され、発表されている（たとえば岩崎,1995）。

図3, 図4は神戸海洋気象台における加速度および速度波形で最大加速度はNS方向で818ガルを、最大速度は 92cmに達している。

気象庁震度階級 (1949年)		参考事項 (1978年)	MM	MSK
0	無感 人体に感じないで、地震計に記録される程度。 最大加速度 0.8ガル	吊り下げ物のおずかにゆれるのが目視されたりカタカタと音がきこえても、体にゆれを感じなければ無感である。	I	I
I	微震 静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震。	静かにしている場合にゆれをわずかに感じ、その時間も長くない。立っただけでは感じない場合が多い。	II	II
II	軽震 大勢の人に感ずる程度のもので戸障子がわずかに動くのが分かるぐらいの地震。 2.5ガル	吊り下げ物の動くのがわかり、立っただけでもゆれをわずかに感じるが、動いている場合にはほとんど感じない。眠っただけでも目をさますことがある。	III	III
III	弱震 家屋がゆれ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のような吊り下げ物は相当にゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震。 8.0ガル	ちょっと驚くほどに感じ、眠っている人も目をさます。戸外に飛び出すまでもないし、恐怖感はない。戸外にいる人もかなりの人に感じるが、歩いている場合感じない人もいる。	IV	IV
			V	V
IV	中震 家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花びんなどは倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震。 25ガル	眠っている人は飛び起き、恐怖感を覚える。電柱・立木などのゆれるのがわかる。一般の家屋の瓦がずれるのがあっても、まだ被害らしいものは出ない。軽いめまいを覚える。	VI	VI
			VII	VII
V	強震 壁に割れ目はいり、墓石、石どうろが倒れたり、煙突・石垣などが破損する程度の地震。 80ガル	立っていることはかなりむずかしい。一般家屋に軽微な被害が出はじめる。軟弱な地盤では割れたり傘折れたりする。すわりの悪い家具は倒れる。	VIII	VIII
			IX	IX
VI	烈震 家屋の倒壊が30%以下で山くずれが起き、地割れを生じ、多くの人々が立っていることができない程度の地震。 250ガル	歩行はむずかしく、はわないと動けない。	X	X
VII	激震 家屋の倒壊が、30%以上に及び、山くずれ、地割れ、断層などを生ずる。 400ガル		XI	XI
			XII	XII

表2. 気象庁の震度階と世界の震度階 (阿部1990)

MMは改正メルカリ震度階法で欧米で多く使われている。
MSK震度階はソ連で使用されている。

●神戸海洋気象台の記録

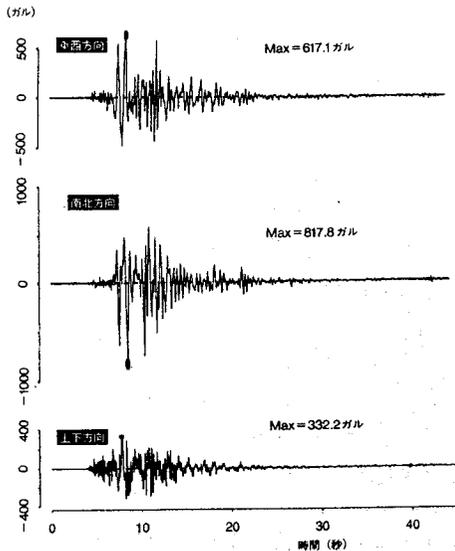


図3. 加速度記録 (神戸海洋気象台)
日経アーキテクチャー編, 1995を一部改変

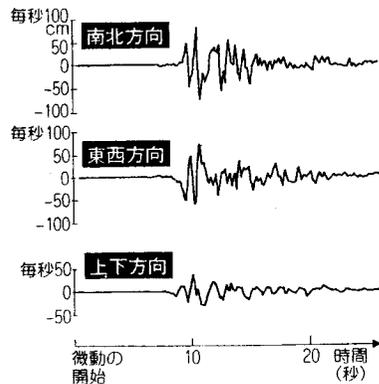


図4. 速度記録 (神戸海洋気象台)
朝日新聞3月31日

図5 は兵庫県南部地震，釧路沖地震，および三陸はるか沖地震の加速度記録と速度記録を比較したものであるが、兵庫県南部地震においては周期が長く、加速度記録において2～3秒の初期微動（P波）の次に現れる非常に大きい振幅の主要動（S波）の周期は加速度記録としては異例に長く1～1.5秒ある。これに対して釧路や八戸の主要動では周期はともに0.2～0.3秒程度しかなく短い。

加速度の周期が長いということは速度が大きくなることを意味しており、最大加速度では釧路の方が上回っているにもかかわらず、最大速度では神戸の方（92kine）が釧路（59kine）を大きく上回っている（瀧野,1995）。

図6 は神戸海洋気象台の観測記録をもとに水平動の東西、南北の2成分を合成したものであるが、これによると速度、変位には北西－南東の方向性が見られ、断層に対して直角方向に大きな揺れが起こったことがわかる。

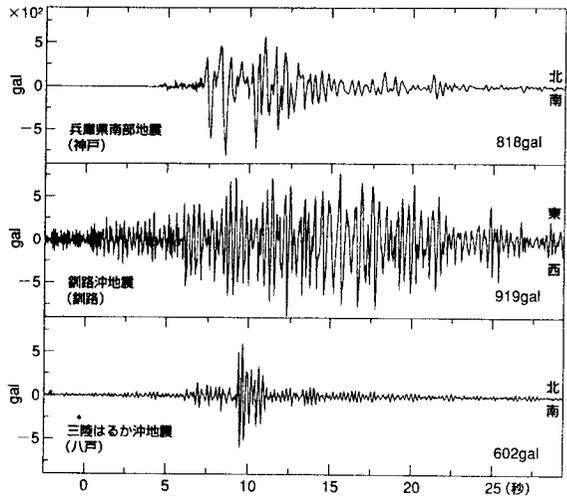
加速度は上述のように東西、南北、上下の3成分にわけて測定される。図7 は最大加速度を水平動と上下動にわけて図示したものである。

図中最大の加速度値は中央区葺合の818ガルで、被害の大きかった地域では軒並み600ガルを超えている。水平動は大きなところでは300～500ガルに近い値を示しポートアイランドでは556ガルを記録している。

上下動も直下型地震のため減衰されことなく到達したため大きな値を示し、多くのところで300ガル以上を記録している。なお、ポートアイランド、六甲道近く、東灘区の海岸部および淀川河口部付近では上下動が水平動を上回っている地点が見られる。

なお、上述のように観測された最大上下加速度はポートアイランドの556ガルであるが、「跳ね石」現象が西宮市剣谷町（標高250m，読売新聞2月1日），神戸市東灘区森北町，住吉霊園，長田区の長田神社，芦屋市荒地山東側（本冊写真集），同奥池町および淡路島の

●兵庫県南部地震、釧路沖地震、三陸はるか沖地震の加速度記録（気象庁との共同研究による）



●兵庫県南部地震、釧路沖地震、三陸はるか沖地震の速度記録（気象庁との共同研究による）

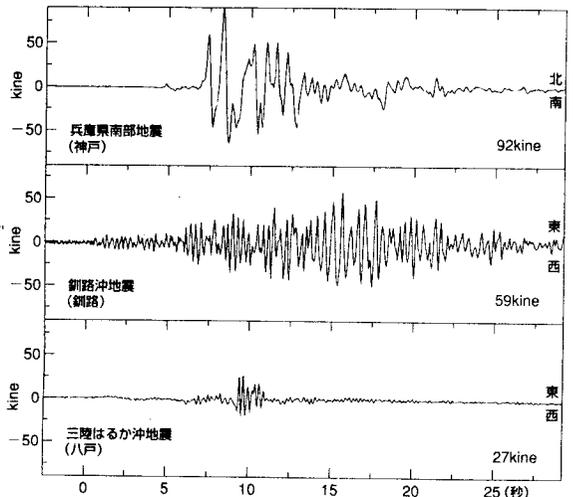


図5. 兵庫県南部地震，釧路沖地震，三陸はるか沖地震の比較（瀧野,1995）

3. 地殻変動

3. 1. 野島地震断層

兵庫県南部地震は淡路島北西部に「地表地震断層」を出現させた。野島地震断層については多くの報告がなされているが、ここでは栗田 (1995) , 宮内ほか (1995) , 荒井ほか (1995) にもとづいてその概要を記す。地表地震断層は既存の「野島断層」(水野ほか1990) とほぼ一致したところに出現し、全長は約10kmに達している。多くの地点で70度~80度前後で南東方向に傾く高角の逆断層である。一部を除き右横ずれの水平変位と北西落ちの垂直変位を示す。変位量は大部分で右横ずれ1~2m、南東側隆起0.5~1mである。最大変位量は断層の中央部あたりの野島平林で観測され、水平変位量 1.7~2.1m、垂直変位量1.3mである (図8)。

地表断層の北東端は、江崎灯台~松帆の海岸において右横ずれ1.2m、南東側隆起0.7mの変位量を保ったまま、その走向をN60° Eに転じて明石海峡に没する。

また、断層の南西部は野島^{ひきのうら}墓浦において2条の断層に分岐する。1条は既知の推定地質断層に沿って南にのび、その分岐直後の変位量は右横ずれ0.6m、南東側隆起0.3mであるが、次第に変位量を減じて約1km南で地表変位は認められなくなる。

もう1条は、分岐点からさらに3km南西にのびて、水越撓曲の北部に走る。この断層は分岐直後の野島墓浦から梨本にかけての区間では変位量が小さく、北西隆起0.5mを示す。

しかし、分岐点から約1kmの小倉では右横ずれ1.4m、南東側隆起0.5mを示す。これより南東側では次第に変位量を減じ、約2kmの地点で地表変位は認められなくなる。

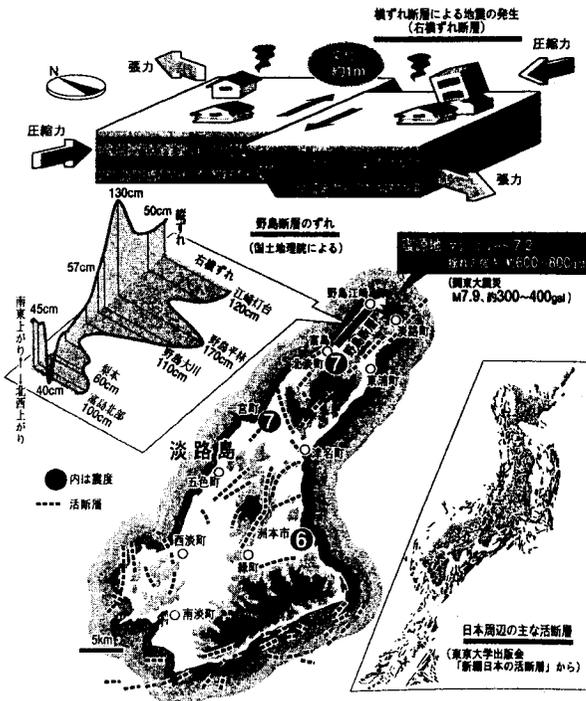


図8. 野島地表地震断層による横ずれ量および縦ずれ量 (京都新聞 1月25日)

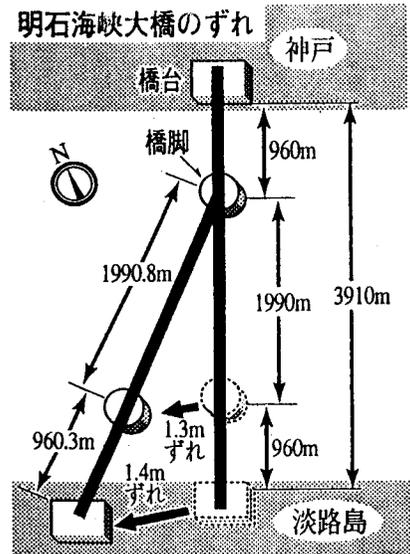


図9. 明石海峡大橋のズレ (京都新聞1月28日)

ただし、林愛明ほか(1995a)はこの断層はさらに約6km 南西にのび、一宮町尾崎・枯木付近まで追跡できるとしている。

江崎灯台で明石海峡に没した野島地震断層の延長については不詳であるが、建設中の明石海峡大橋の淡路島側の橋脚および橋台が約1.3~1.4m西にずれたこと(図9)からして、このずれた橋脚より北側を北東方向に延びたことが推定される。

3. 2. 神戸側での地殻変動

神戸側では明瞭な地震断層が出現しなかったため、どの断層が動いたのか議論が続いている。

このことに関しては国土地理院が測定した三角点の移動についてのデータが重要な情報を与えている(多田,1995,a,b, 橋本,1995)。

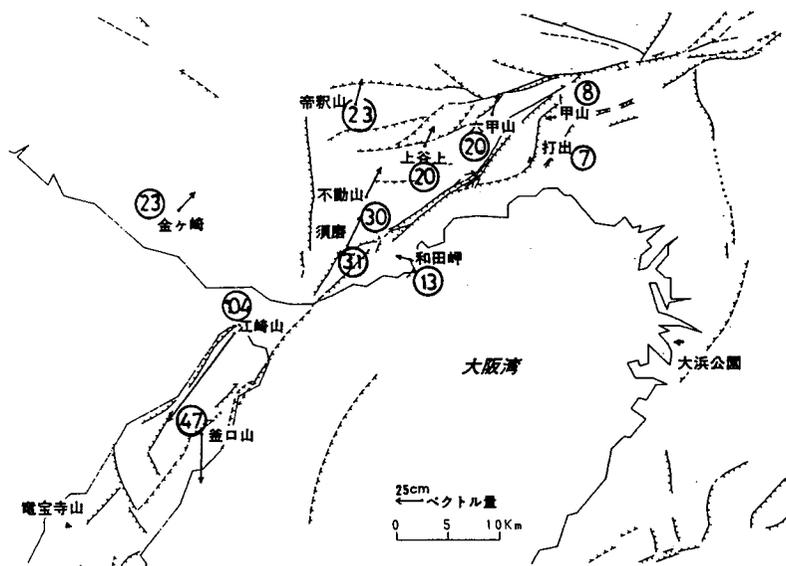


図10. 主な三角点の水平変位量. 1984~85年と1995年の比較, 単位cm (橋本1995を一部改変)

すなわち三角点の移動方向は図10に示されるように、きわめて系統的な動きをしており、六甲断層系の北西側ではすべて北東方向に、南東側では西方向に移動している。従ってこの間に震源断層が走ることは確実で、その断層は図10に示されるように須磨-五助橋断層と考えられる。この断層は余震分布から推定される断層とも一致している。

また、図11は国道2号線沿いの一等水準点の上下動変動図で須磨断層を挟んで上下変動に不連続が見られる。この位置は上述の三角点の水平変動からの断層推定位置とも一致しており、須磨断層が神戸側での震源断層の一部である可能性は高い。

4. 被害分布-「震災の帯」と島状分布

今回の兵庫県南部地震においては建築物-特に木造建築物-の被害が激しかった地域が北東-南西方向に細長い帯状をなしてあらわれ、「震災の帯」と名付けられた。被害の帯

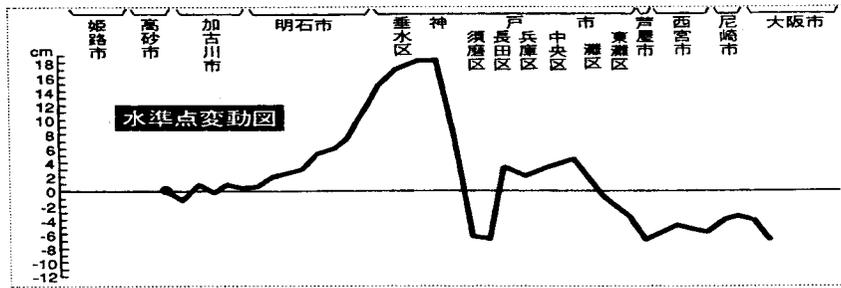


図11(1). 水準点変動グラフ (毎日新聞2月11日)

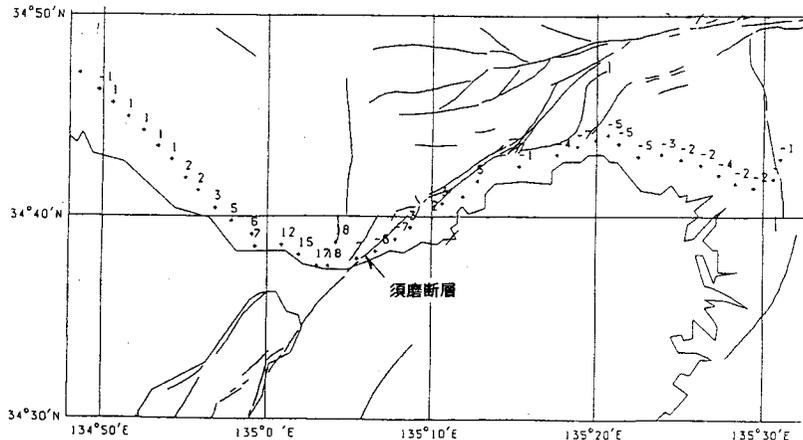


図11(2). 水準点変動図-測定地点及び上下変位置・単位cm (多田,1995c)

状分布は建築物だけでなく「墓石の倒壊」「道路舗装の亀裂」にも見られた。

ただし、中央開発㈱の詳細な調査 [中央開発㈱阪神大震災災害調査団(1995a), 溝口(1995), 石川(1995), 石川・大鹿(1995), 石川・溝口・大鹿(1995)] によれば建築物の激甚被災地(震度7の地域)は単純な帯状ではなく半島状(出入りの多いことを意味する)をなすことが多く、またさらに被害の激しい地域(超震度7)は島状をなすことが明らかにされた。

ここでは、これらの被害分布について紹介し、その原因についてはあとで考える。

4. 1. 「震災の帯」

地震直後から調査に入った東大地震研の嶋本らは神戸市から西宮市にかけて北東-南西方向に延びる激甚被災地を「震災の帯」と名付けた(読売新聞1月26日)。

嶋本ほか(1995a,b)は「震災の帯」を次のように説明している。

①神戸市から芦屋市・西宮市に至る地域の顕著な被害は幅約2kmの帯状領域に集中し(震災の帯, 図12)、灘区から東灘区にかけてはこの帯の中心部の幅約1kmの範囲で震度が7に達している。震災の帯はJR神戸駅周辺で一旦とぎれる。須磨から長田区にのびる帯は兵庫区で複雑な分布を示し、被害の程度が弱くなりながら海岸に抜けている。

②被害分布などから判断すると須磨断層の西端部、^{えげやま}会下山断層、灘区から西宮市に至る震災の帯の北限付近の伏在断層(おそらく甲陽断層の延長部)、渦ヶ森断層、五助橋

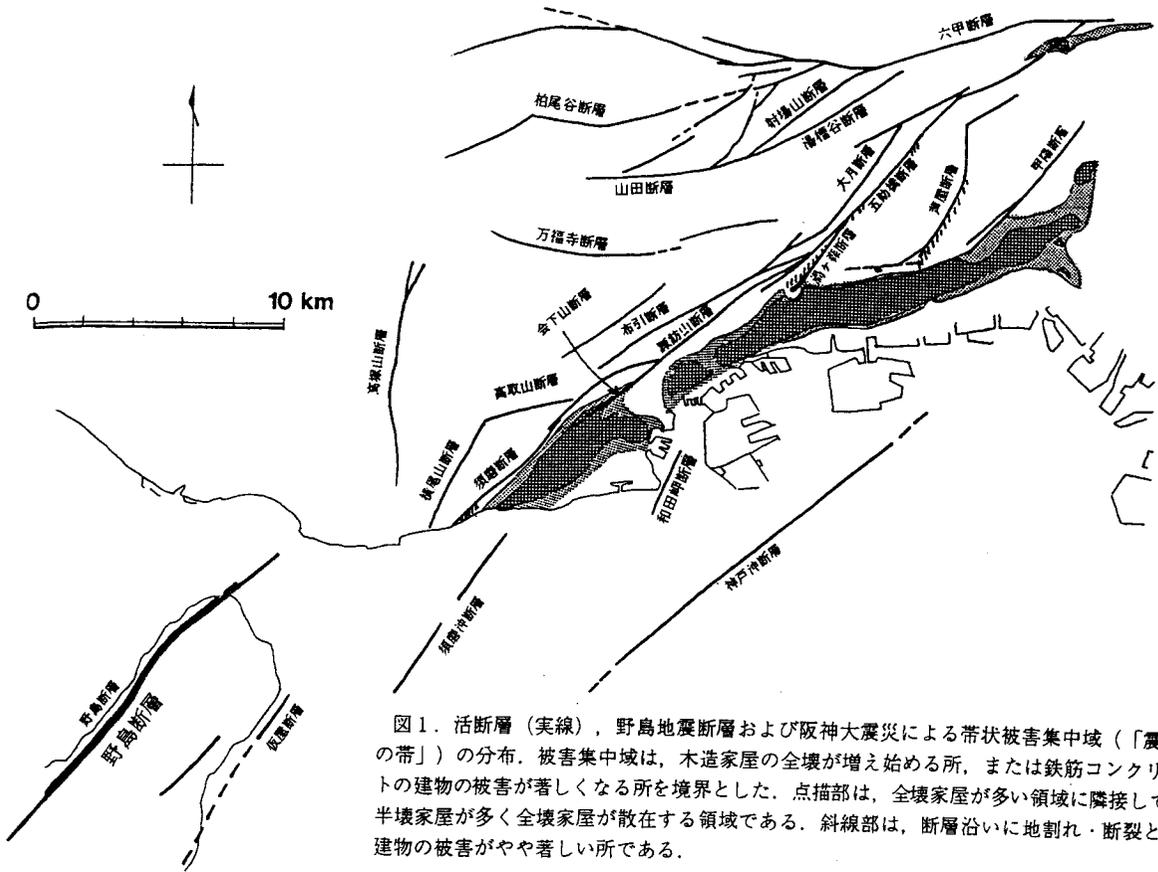


図1. 活断層(実線), 野島地震断層および阪神大震災による带状被害集中域(「震災の帯」)の分布。被害集中域は, 木造家屋の全壊が増え始める所, または鉄筋コンクリートの建物の被害が著しくなる所を境界とした。点描部は, 全壊家屋が多い領域に隣接して, 半壊家屋が多く全壊家屋が散在する領域である。斜線部は, 断層沿いに地割れ・断裂とか建物の被害がやや著しい所である。

図12. 「震災の帯」(嶋本ほか, 1995a)

断層が動いた可能性がある。

- ③宝塚でも震災の帯は段丘面、沖積層を横断して武庫川対岸の花崗岩が分布する所にのびており、この被害の帯は五助橋断層の北東延長部につながっている。

なお、この「震災の帯」は気象庁が2月7日に発表した震度7の区域(図13)とほぼ一致している。

また、日本建築学会近畿支部の調査(朝日新聞2月2日)では鉄筋コンクリートや鉄骨構造のビルの倒壊・破壊が5割に達した区域は須磨から武庫川に至る約25kmの間で、幅200~300mと

現地調査による震度7の分析

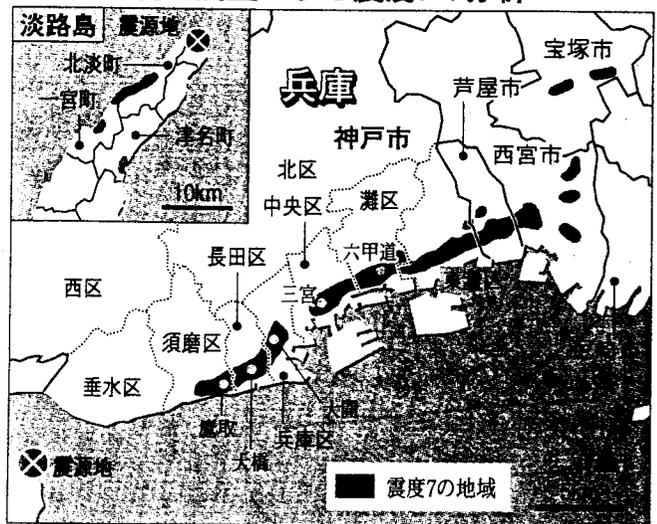


図13. 気象庁による震度7の分布 (京都新聞2月8日)

「震災の帯」よりさらに狭い帯状をなすとしている（図14）。

図15は神戸市須磨区から兵庫県・大阪府の境界までに分布するおよそ250の墓石を調査した結果得られた墓石転倒率である（野村ほか，1995）。なお、調査対象とされた墓石は直方体の普通の形式のもので、底面に対する高さの比はほぼ1:2.5である。

本図に示される転倒率60%以上

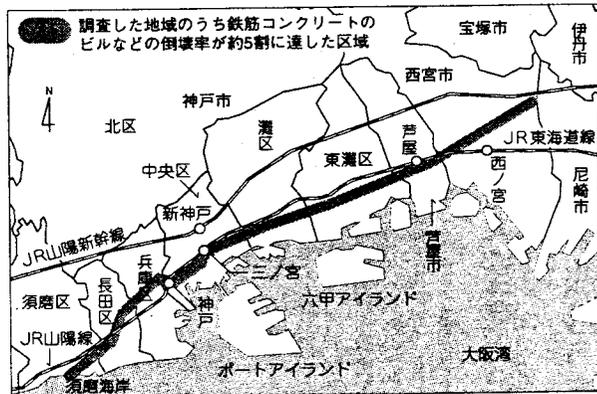


図14. ビルの倒壊率が約5割に達した地域（日本建築学会近畿支部の調査）朝日新聞2月2日

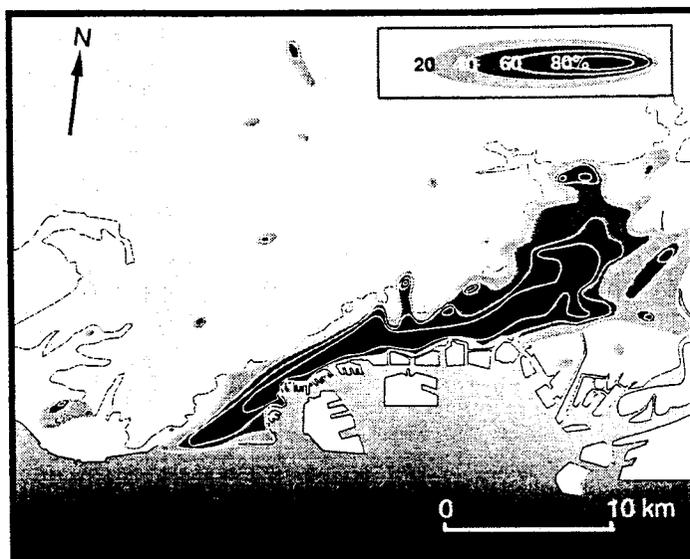


図15. 墓石倒壊率分布図（野村ほか，1995）

の地域はほぼ「震災の帯」に一致するが、「震災の帯」に見られるJR神戸駅付近における被害軽微地が見られないこと、および「震災の帯」の東限である武庫川を大きく越えて分布していることなどにおいて差異が見られる。

図16は舗装した路面上に見られる亀裂の分布パターンに基づいて地域区分したものである（竹村，1995）。

舗装の亀裂にも帯状の分布が見られ、神戸市街地西部（元町以西）では地下鉄・山陽電鉄とJRに挟まれた帯状の地域において圧縮による亀裂が卓越する。その南側のJRより南においてはまったく亀裂の見られない地帯が分布する。

神戸市街地中・東部（元町以東）では亀裂が多数分布する地域とあまり見られない地域が明瞭に区分される。亀裂の多い地域の1つは海岸近くに帯状に分布する。もう1つのゾ

Figure 2. Distribution of pavement cracks in the western part of Kobe City.

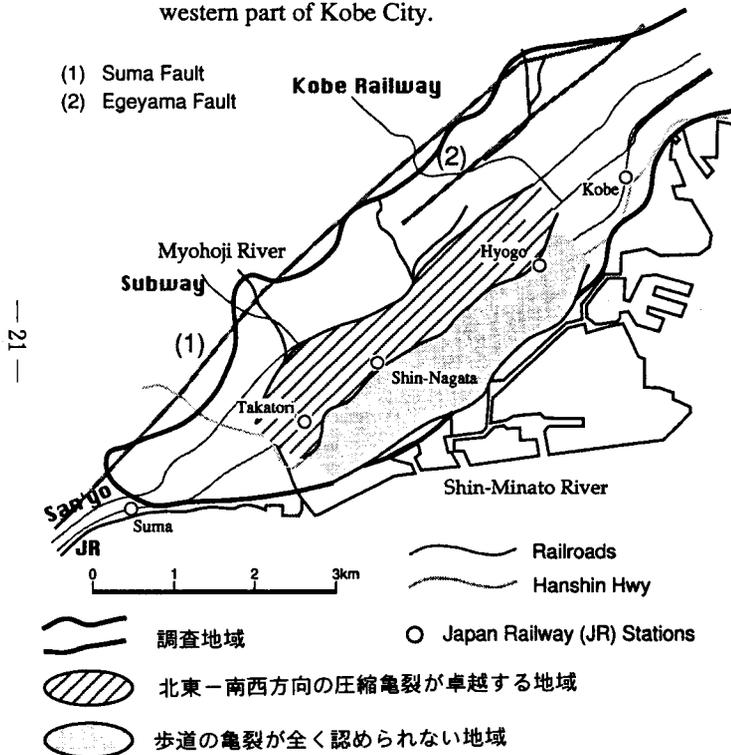


図16(1). 舗装の亀裂の分布 (神戸市西部地域)
竹村(1995)を一部改変

Figure 3. Distribution of pavement cracks in the eastern part of Kobe and Ashiya Cities.

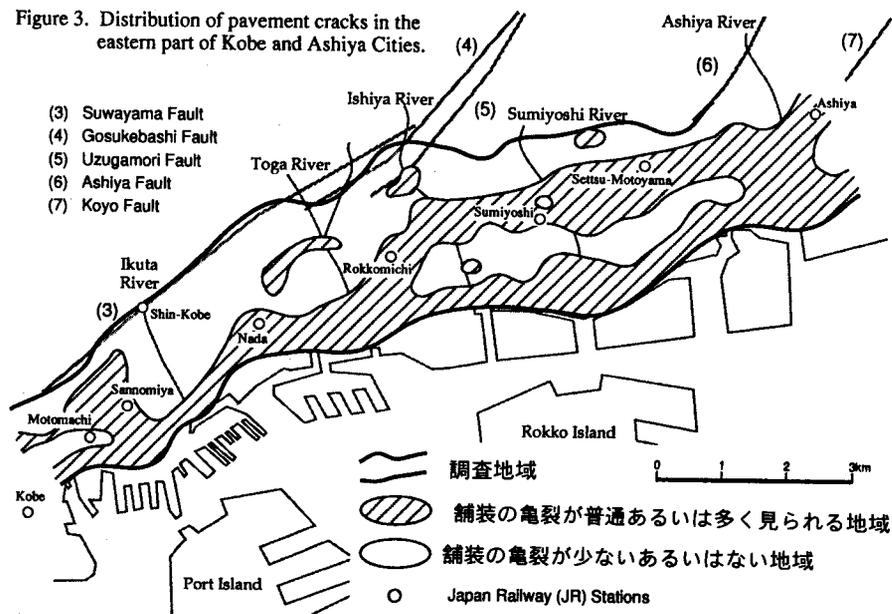


図16(2). 舗装の亀裂の分布 (神戸市東部および芦屋市地域)
竹村(1995)を一部改変

ーンは内陸部の阪急以南から2号線にかけてあり、特に六甲道から東灘区東端にかけて亀裂の多い地域が2列に分かれて分布している(竹村,1995)。

このように舗装した路面上にみられる亀裂の密集帯には帯状分布が見られるが、これは「震災の帯」および後述の中央開発(株)の「帯状・島状分布」と以下の点で違いが見られる。

- ①神戸市街地西部地域の新長田駅周辺においては建物の被害はJR線より南におよんでいるが、舗装の亀裂は全く見られない。
- ②六甲道から芦屋西部に分布する亀裂の少ない地域は建築物の被害では明瞭には見られない。
- ③建築物の被害は阪神高速(国道43号線)以南では少ないが、舗装の亀裂は非常に多い。これは地盤の液状化のためだと考えられる。

4. 2. 震災の帯状・島状分布

図17は中央開発(株)の独自の調査による激甚被害(震度7以上)地域分布図(石川,1995)である。中央開発(株)の調査による被害状況の概要は以下のとおりである。

- ①震度6以上の地域は六甲山系南麓の神戸平野を南北方向に1.0~2.5kmの幅で南西-北東方向に延長約28kmの長さでのび武庫川にまで至り、その左岸側で震度5となり消滅する。
- ②その北方の宝塚市の有馬-高槻構造線に沿った区域に点々と、また伊丹断層付近にも震度6以上の被害が局所的に見られる。
- ③震度7の被害は i) 長田区新長田駅~兵庫駅付近 ii) 中央区三宮駅から市役所付近 iii) 灘区、東灘区から芦屋市に至るJR神戸線から阪神高速線間付近、および iv) 西宮市夙川~武庫川右岸域に点々と分布している。

その被害域は低地から台地に及び神戸市東地区では標高40m、西地区では約20mの比較的高い標高まで及んでいる。

- ④超震度7(木造建築物の倒壊率が50%以上で、鉄筋コンクリート建物の倒壊が多い)の地域が震度7の地域の中央部に島状に分布する。ただし、JR芦屋駅付近ではごく小さい島となる。
- ⑤新生田川沿いの地域、神戸海洋气象台、兵庫県庁のある丘陵地や標高5m以下の海岸に沿った低地では被害は概ね震度6以下で比較的小さい傾向にあった。
- ⑥低位段丘、沖積扇状地でも扇頂から扇央部の現天井川、微高地は一般に砂礫、玉石を主体としており、周辺より1ランクほど震度が小さい傾向にある。
- ⑦震度7の分布は地盤または地盤構成の影響によることが大きいと考えられ、次の地形・地質・地盤条件の所でおこった。
 - i) 地形区分では扇状地、緩扇状地性低地及び後背湿地。標高の違いは六甲山地の傾動地塊地形とも対応している。
 - ii) 地盤的には東部地域では最終氷期後期以降の緩扇状地性堆積物である砂質土、細粒土を主体とし、長田地区では沖積低地の後背湿地性の粘性土(N<5)を主体としている。また、三宮地区では沖積層と段丘堆積物が埋没地形を埋めて厚く堆積している。

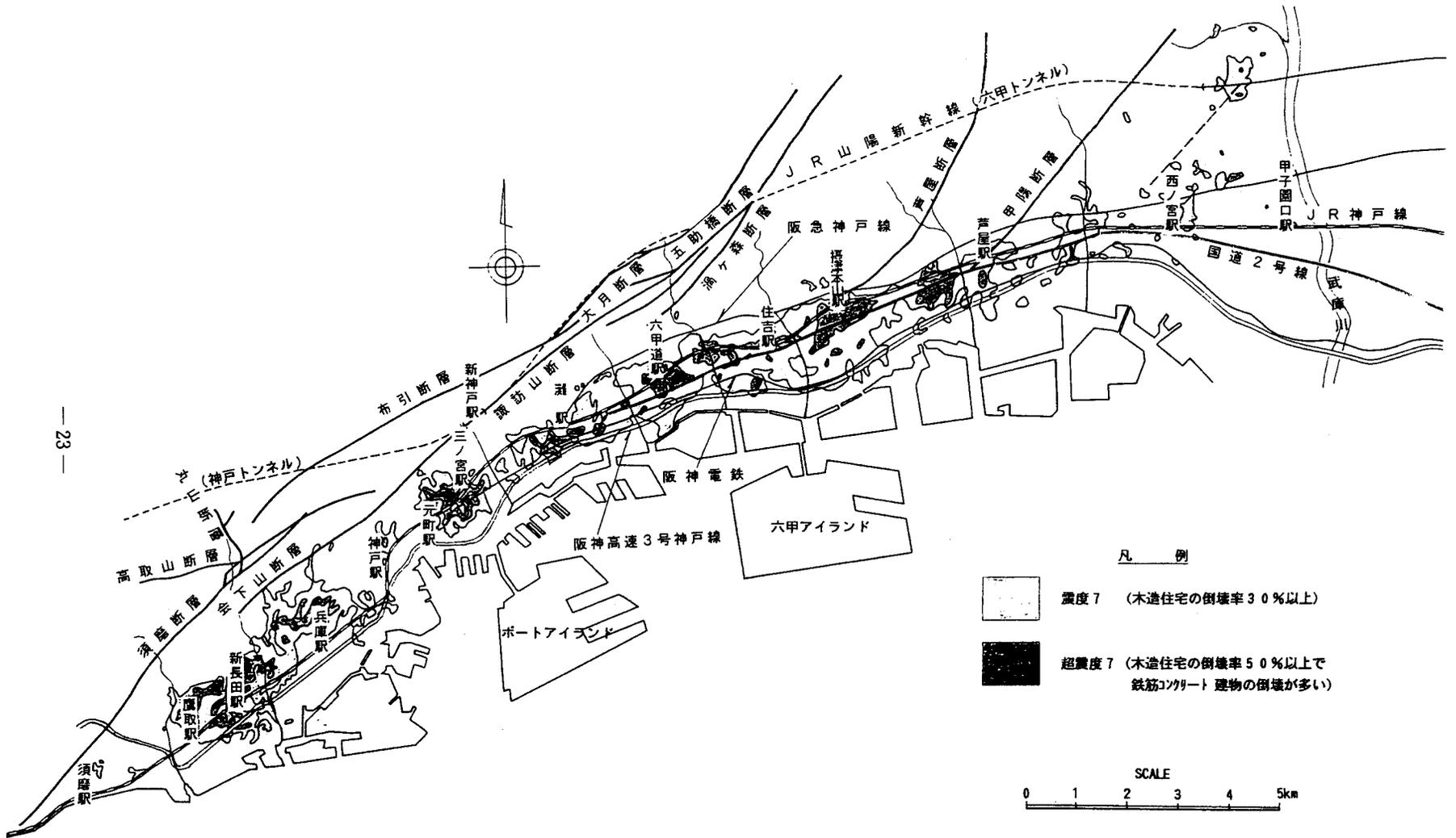


図17. 震度7及び超震度7の分布域 (石川,1995)

5. 液状化・流動化

今回の地震では神戸から西宮市にかけての海岸埋立地を中心に広範囲に液状化が生じ(図18)、大阪府及び淡路島においても、その発生が見られた。

楡井・千葉県地質環境研液状化・流動化被害調査団(1995)、森本(1995)により液状化、側方流動について地域ごとにまとめてみれば以下の通りである。

神戸市～芦屋市域では明治以降の沿岸埋立地では、液状化、流動化現象が広く認められるが、明治時代にすでに陸地であった地域では噴砂も少なく被害は比較的軽微である。

西宮市では明治時代にすでに陸地であった所においても液状化がみられ、特に武庫川右岸の河口域において顕著であった。

尼崎市及び淀川以西の大阪平野においては限られた地域内に液状化・流動化が集中している。それらの一部は明治以降における旧河道等の水域埋立地である。最も液状化・流動化の被害が大きかった地域は戦前の埋立地(尼崎市築地、大阪市西淀川区など)である(三田村ほか,1995)。

ポートアイランド及び六甲アイランドでは大規模な液状化・流動化が発生した。ポートアイランドは三宮の沖合に1966年から1980年度にかけて建設された南北約2km、東西約3km、埋立土砂約8000m³の人工島である。

ポートアイランド付近の水深は10～13mで埋立土の厚さは15～20mに達する。埋土の下には厚さ約13mの主に粘土・シルトからなる海成の沖積粘性土層(Ma13層)が、その下には砂、砂礫、粘土の互層が分布し、杭基礎構造物の支持層となっている。

埋立土は神戸市西部の高倉・横尾・名谷・西神など六甲山地の宅地造成地から切り取られたマサ土を主体とするが、このマサ土は礫分から細粒分まで含む粒度配合のよい土で、これまで液状化をしにくいとされて来たものである。

島全域で液状化が発生し、泥水が流出し、島の面積の半分以上が泥水の洪水に覆われた。泥

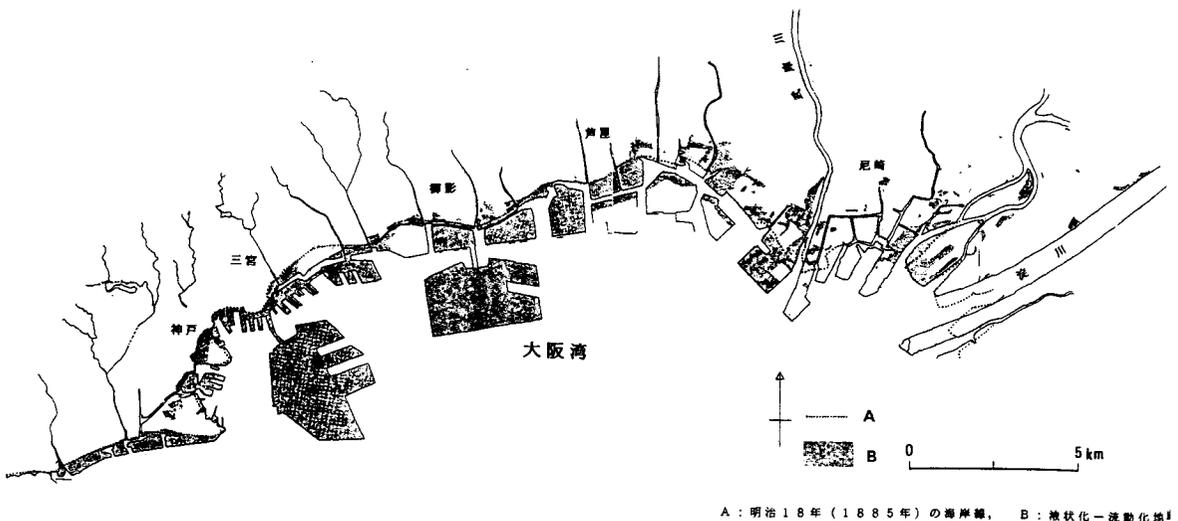


図18. 阪神地区における液状化・流動化分布地域
(楡井・千葉県地質環境研液状化・流動化被害調査団,1995)

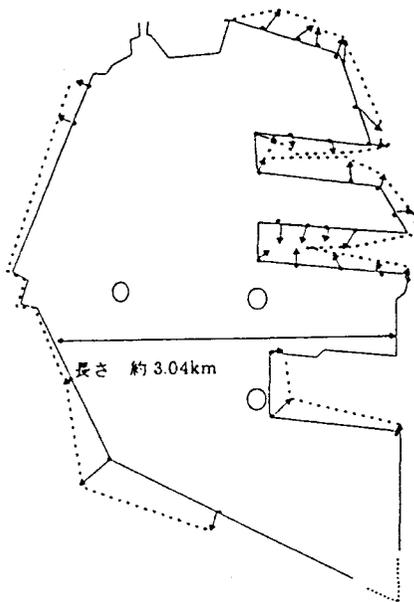
水の水位は約20cmにも達した。島の中心を環状に走るポータルライナーの内側に位置する高層オフィス街・高層住宅街では地盤沈下量は10~30cmと少なく、また均等に沈下し被害も少なかったが、島周辺では地盤沈下量が大きく(50~100cm)被害は甚大であった。

ポートアイランドでは沖積粘土層の圧密促進を目的として「プレローディング工法」と「サンドドレーン工法」、また、埋土層の地盤改良として「振動締固め工法」が一部の地域で実施されており、これが液状化被害の軽減に役立ったとの指摘がある(谷本,1995)。

護岸は数10cm~数mのオーダーで海側に移動しており平均変位量は2.7mに達する(図19・嘉門,1995)。

ポートアイランド

平均変位量 2.7m



六甲アイランド

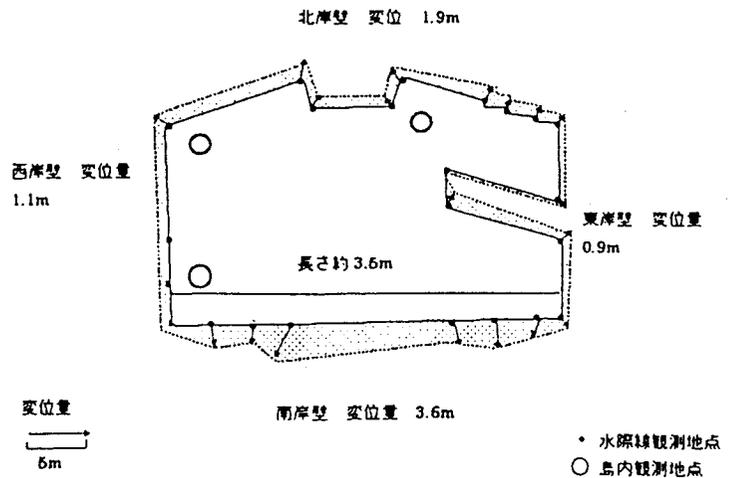


図19. 護岸の水平変位量 (嘉門,1995)

六甲アイランドは神戸市東灘区住吉の沖合に1972年から1990年度にかけて埋立造成された南北約1.5km, 東西約3km, 埋立土砂量約12,000 m^3 の人工島である。

埋立地の土層構成は上位より埋土層(厚さ約20m), 沖積粘土層(厚さ10~20m, N=0~7), 洪積砂・泥互層(厚さ約40m)および洪積粘土層(厚さ約15~20m)の順で重なっている。

埋立土は六甲山地からその西方にかけての宅地造成地から切土された神戸層群の砂岩・泥岩・凝灰岩からなる岩ズリが主体であり、一部淡路島から採取されたマサ土を含む。

六甲アイランドでは北側半分で噴砂が多いのに対して、南半分では新しく造成された南東の港湾部を除いて比較的噴砂が少ない。これは北側半分の埋立には神戸層群とマサ土が併用され、以後の南半分の埋立では主として神戸層群が用いられたためと考えられる。

六甲アイランドでも中央部を中心に軟弱粘土層の圧密促進を目的として「サンドドレー

ン工法」等の地盤改良が行われている。

なお、六甲アイランドの護岸もほぼ全域で水平移動しその量は1~5.0mに達している(図19)。

一般に飽和した緩い砂が地震などの繰り返し剪断力を受けることで粒子間のかみ合わせがはずれ、粒子が間隙水中に浮いた状態になる現象を液状化という(これを正規型の液状化と呼ぶ)。正規型の液状化の発生では、繰り返し剪断応力を発生させるS波による水平加速度が最も重要な役割を果たす。ところが今回の地震ではS波の到達前に、先行して到達するP波の強い上下動によって発生したと考えられる液状化(瞬間型の液状化)が生じたことが報告されている(楡井ほか,1995, 林ほか,1995b)。

林ほか(1995b)は淡路島の小倉地区で野島地震断層によって切られている同心円の噴砂痕を発見し、この噴砂をもたらした液状化は地表地震断層の形成後またはほぼ同時に到達するS波によって生じたとは考えられず、断層の出現の3~6秒程度先行して到達したP波の強い上下動によって引き起こされた瞬間型の液状化であると考えた。

なお、この地点では10~20cm厚の耕作土のすぐ下位に100m以上にわたり大阪層群の半固結の粘土層と砂層の互層が分布しており、液状化はこの互層中で発生し、噴砂はこの中からもたらされたものと考えられる(写真2)。

楡井ほか(1995)はポートアイランド、六甲アイランド及び和田岬で人頭大の礫を含む礫を主体とする噴礫現象(写真3)があったことを報告し、これは強い地震波の上下動成分で地層が上下動し、地下水圧の不均一性が起こることと、地層粒子自身の上下動によりラミナの破壊や構成粒子が剥離しやすくなり、砂を伴わない地層構成物が地下水とともに噴出する現象と考えている。彼らはこのような型の液状化・流動化現象を「瞬間的地層破壊型の液状化・流動化」と呼んでいる。



写真2. 地表地震断層によって切られる噴砂痕・矢印1(林ほか,1995b)



写真3. マンホールから噴出した人頭大の礫の環状分布(楡井ほか,1995)

6. 「震災の帯」はなぜ生じたのか

6. 1. 諸説の紹介

4. で激甚被災地が帯状をなして分布していることをみた。この帯状分布の原因については諸説が出されており、震災後7ヶ月をたった現在（8月15日）においても結論はでない。それらは断層説、地質構造説、表層軟弱地盤説に大別されるが、以下、これらについて紹介する。

(1) 断層説

断層説は地震動よりも断層運動に伴う地盤の変位運動によって建築物の被害が生じたという点で以下の地質構造説および表層軟弱地盤説と根本的に異なる。

この説は断層が「震災の帯」に平行して1本分布するという考え（嶋本ほか,1995a,b, 櫻井,1995 a,b,c, 池田ほか,1995）と震災の帯に斜交して多くの断層が分布する（平野・波田,1995a,b, 平野・藤田,1995, 前田ほか,1995など）という2種類に区分される。

嶋本ほか（1995a,b）は前出の図12「震災の帯」に沿って断層が動いたとしている。

櫻井（1995a,b）は木造建物の倒壊方向に規則性が認められることより図20のように「震災の帯」の南寄り（長田では北寄り）を断層が走ったとし、矢印の方向に地面が急激に動いた結果その逆の方向に家が倒れたとしている。なお、海岸寄りに被害が少なかったのは断層より南側では「断層変位運動」がわずかであったためとしている。

表2. 「震災の帯」の原因についての考え方

区 分	調査対象	文 献	
断層説	「震災の帯」に平行して断層が分布	主に木造建築物	嶋本ほか(1995a,b)
		墓石のズレ	池田安隆ほか(1995)
		地震動波動、建物の倒壊方向	櫻井(1995a,b)
	「震災の帯」に斜交して多くの断層が分布	亀裂	平野・波田(1995a,b)
		電柱の変位・倒壊方向、被害密集地域の帯状配列	前田・宮田(1995) 宮田ほか(1995a,b)
		亀裂・被害の線上分布	佐藤ほか(1995)
地質構造説	フォーカス現象	建物被害・大阪上町台地	中川ほか(1995a,b)
	不整形地盤（渚現象）		篠崎(1995)
	はち合わせ現象		竹宮（毎日新聞2/7）
表層軟弱地盤説	震災の半島状・島状	建築物	中央開発(株) 石川(1995)ほか
	泥層の占める割合	建築物	1995年兵庫県南部地震地質調査グループ(1995)
		建築物（三宮～神戸）	巽ほか(1995)

木造住宅の倒壊方向

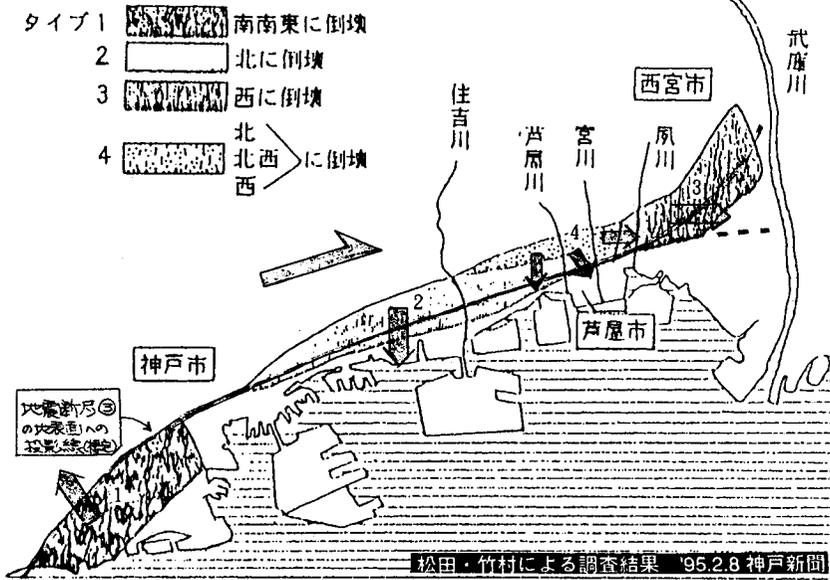


図20. 木造住宅の倒壊方向から推定される地盤の変位方向 (櫻井, 1995b)

池田安隆ほか (1995) はセメントで固着していなくて表面が平滑な墓石に刻まれた擦痕を用いて水平主要動の初動を判定した。その結果は図21に示されるとおりで海側では北～北西の初動を、山側では南南東方向の初動を示すところが多く、両者の境界線の地下に伏在断層が存在する可能性があるとしている。

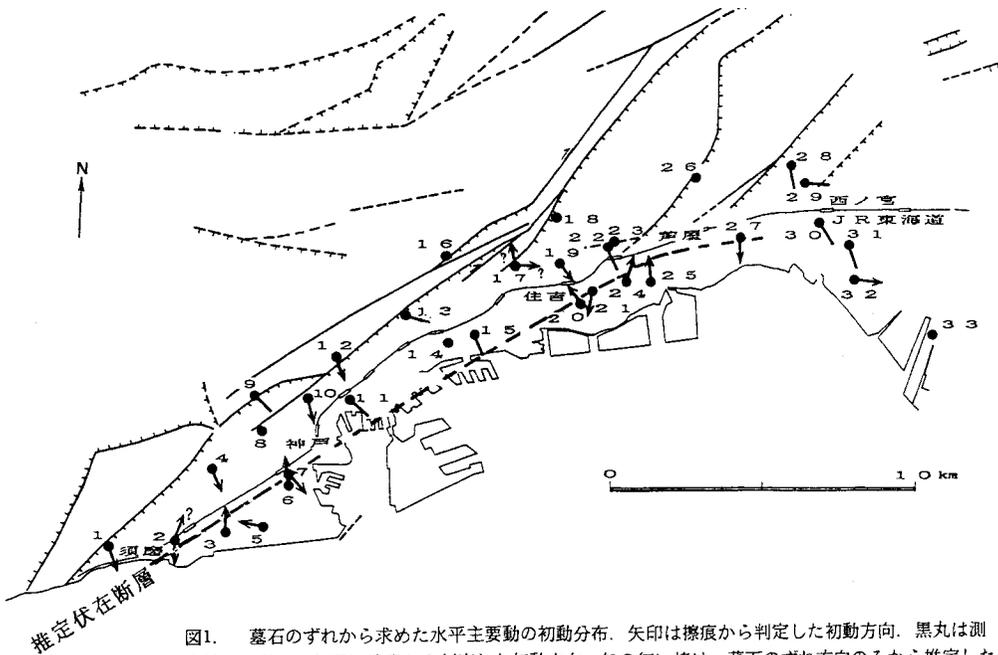


図21. 墓石のずれから求めた水平主要動の初動方向分布 (池田安隆ほか, 1995)

図21. 墓石のずれから求めた水平主要動の初動方向分布 (池田安隆ほか, 1995)

前田・宮田(1995)および宮田・洪・前田(1995a,b)は電柱の変位量分布(図22上図), アスファルト道路, 側溝, 護岸などに見られる亀裂および高架橋等の著しい被害ゾーンが北東-南西方向に帯状に分布し、その山側延長部が既知の断層に続くことから、被害密集地の地下に活断層を推定した(図22下図)。

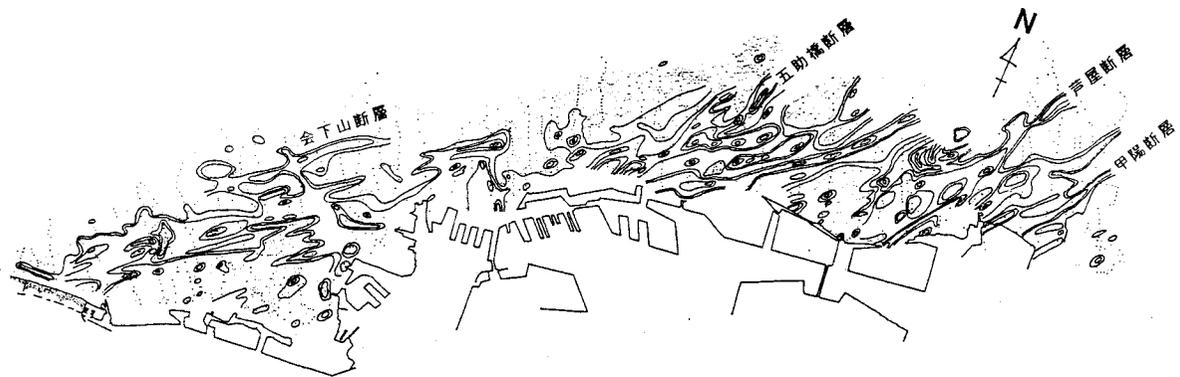


Fig. 2 (Upper) Motion of the electric-wire poles on the urban ground of Kobe.
Contour line (0-1-2-3-4< cm) shows the opening around the poles. Dot:
Location of the pole. Shaded part: Area of the poles without motion.

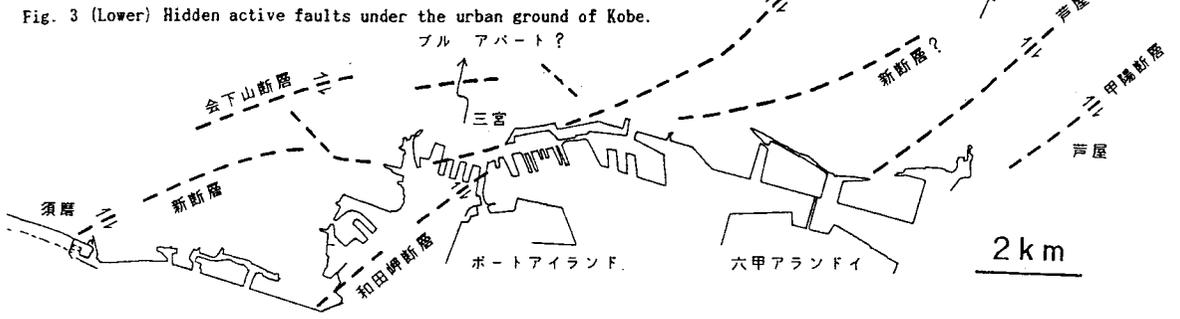


Fig. 3 (Lower) Hidden active faults under the urban ground of Kobe.

図22. 電柱の変位量(上図)および伏在活断層(下図)(宮田ほか,1995b)

平野・波田(1995 a,b)は地表部にみられる変位より断層変位を抽出し図23に示されるような断層が神戸~西宮市街地に出現したとみている。なお、西北西-東南東方向の共役断層も多くみられると考えている。

(2) 地質構造説

地質構造説および表層軟弱地盤説はいずれも地震動の増幅により強く揺れるところが生じたという考えである。

フォーカス現象は図24に示すように地盤の厚さが異なっているとき地震波の屈折が起こり、ある地点に地震波が集中するために増幅される現象である(中川ほか,1995a,b)。

六甲山地南麓, 大阪の上町台地西側, 宝塚市の北摂山地南麓ではこのような地下構造にあるものと考えられ、その海側に被害が集中したというものである。

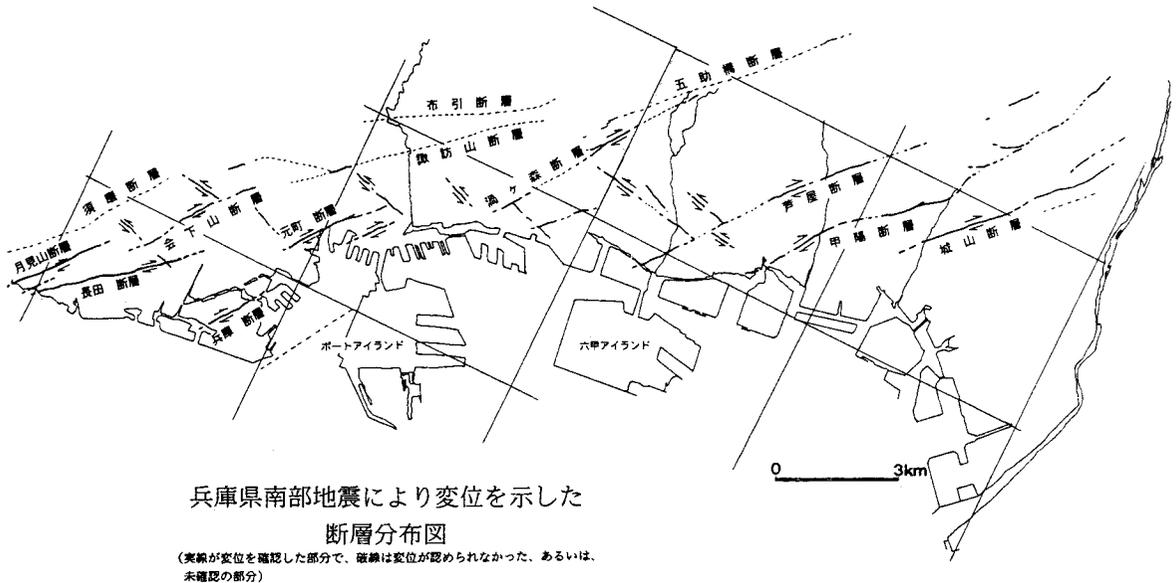


図23. 兵庫県南部地震により変位を示した断層分布図 (平野・波田,1995b)

不整形地盤によるいわゆる「なぎさ現象」はちょうど海で沖合よりも海岸近くの浅いところで波が大きくなるのと似た現象で、軟弱な地盤（沖積層）が薄くなる部分で波動エネルギーが集中して大きく揺れる現象である（篠崎,1995a,b, 図25）。

なお、この現象は人工の地盤（切土・盛土地盤）の実験でも確認されている（図26・篠崎,1995a,b）。

「はち合わせ現象」は震源から直接伝わった地震波に加えて、六甲山麓で反射した地震波がはち合わせをして増幅した（図27・毎日新聞2/7, 竹宮の解析）というものであるが、新聞報道以外には入手できていないので詳細は不明である。

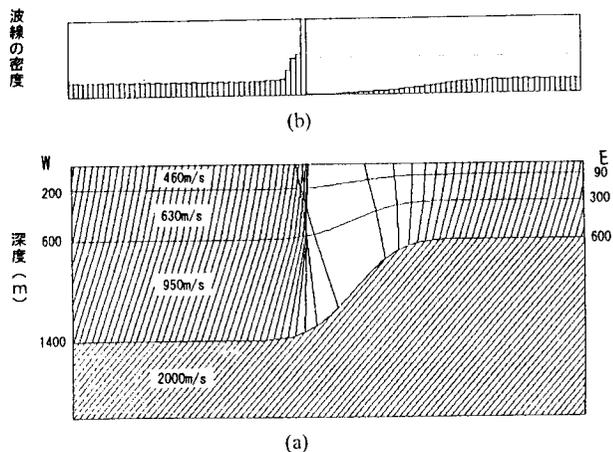


図24. フォーカス現象による地震波の集中
基盤岩に海側から40°で入射したSH波が被覆層内で屈折する様子 (中川ほか,1995b)。

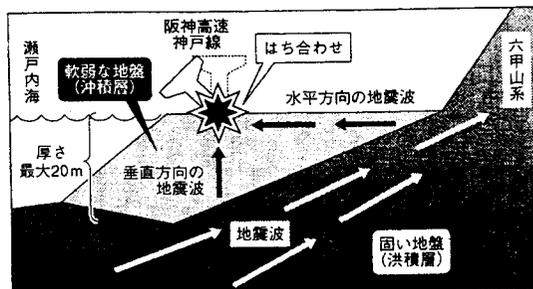


図27. はち合わせ現象を示す模式図 (毎日新聞2/7)

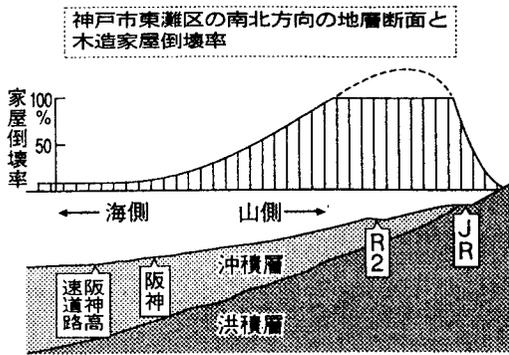


図25. 不整形地盤による増幅 (京都新聞2/11)

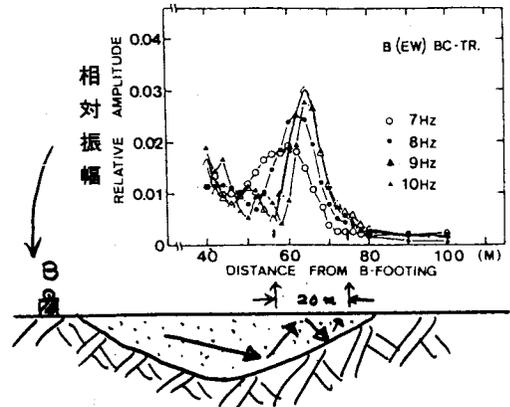


図26. 不整形地盤の振動異常増幅の例—盛土地盤と切土地盤境界での増幅 (篠崎,1995a を一部改変)

(3) 表層軟弱地盤説

4. 2でも少し触れたが、神戸市西部の長田地区においては震度7の地域は表層（特に深度5mまで）に粘土層が2m以上分布するところときわめて良く対応しており、表層地盤が砂礫層よりなるところでは震度は6以下となっている（図28・溝口,1995）。

長田地区以外で震度7は以下の所にみられる（石川,1995, 石川・大鹿,1995）。

①表層にN値5以下の粘土混り砂層が分布する所

②N値15前後の砂質地盤をなす所

③N値15以上の場合4m以上の厚さで粘土混り砂や砂礫が堆積している所

また、低位段丘、沖積扇状地でも扇頂から扇央部の現天井川、微高地は一般に砂礫、玉石を主体としており、周辺より1ランクほど震度が小さい傾向にある。

このように震度は表層地盤—特に5m以浅—に関係しており、粘土層が少しでも分布すると震度が大きくなる傾向がうかがえる。

1995年兵庫県南部地震地質調査グループ（1995）は粘性土層（粘土、シルト層）が多く分布（深度10mまでに1~3m分布）する所が被害集中地域と一致すると述べている。

異ほか（1995）は三宮から神戸駅までの地域の地震被害を詳細に調査し次のようにまとめている（図29）。

①岩盤の露出している地域や段丘および扇状地には目立った被害はなく、沖積平野に被害は集中している。

②沖積平野の中でも被害が顕著なのは旧河道を含む後背湿地で砂堆や海岸の埋立地では被害はそれほど著しくなかった。

③以上、建物被害は地盤の種類に強く支配されていることは明らかである。

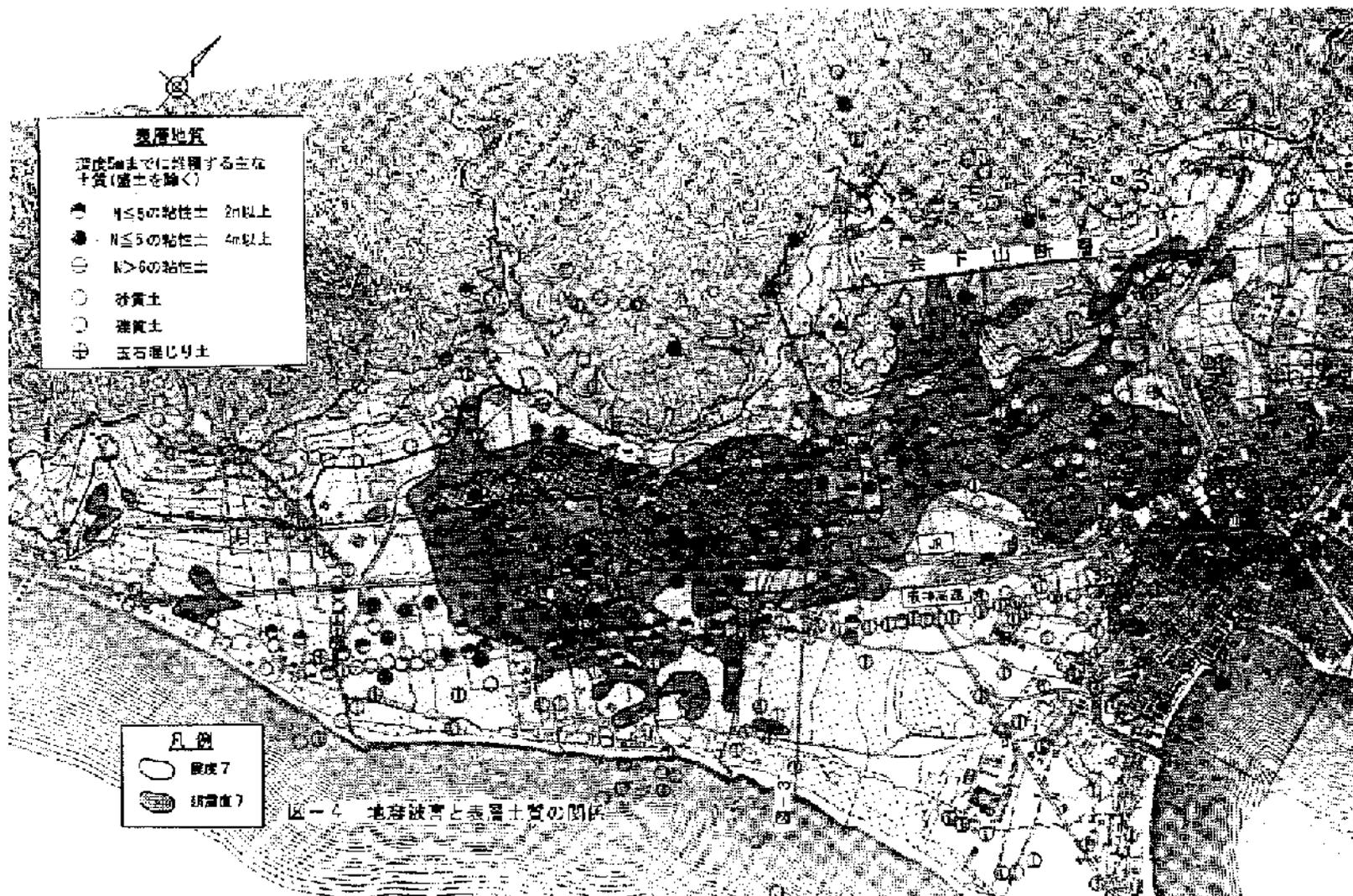


図28. 地震災害と表層土質の関係・長門地区(清口,1995)

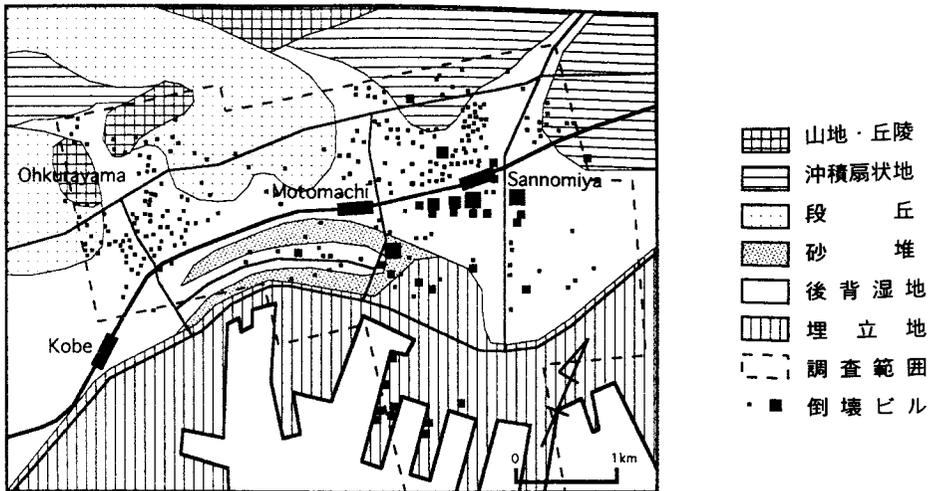


図29 . 三宮周辺の倒壊ビルと地形区分図 (巽ほか,1995)

6. 2 「震災の帯」の原因

(1) 地表地震断層は「震災の帯」の原因にはなりえない。

6. 1 (1) でみたように震災の帯の原因を地表あるいは地表近くまで達した地震断層によるものだという考え方(断層説)がある。

断層説にも二通りの考えがあり震災の帯に平行してその中あるいは端を断層が走るとする「平行断層説」と震災の帯に斜交して何本もの地震断層が走るとする「斜交断層説」にわけられる。

平行断層説は、ほぼ一直線に延びる「震災の帯」を説明するものとして一見非常に説得力があるように見える。ただし、この説は後述のように余震の分布状況から否定されるが地表地震断層の破壊力の点からも否定される。

すなわち、地表地震断層は断層直上の建造物は確かに破壊するが断層沿いに広範囲に被害を及ぼすということはないものなのである。このことは今回の地震で淡路島にあらわれた「野島断層」沿いの被害状況でもはっきりと認められ、木造住宅では断層の近傍においても地盤のよい所の建物にはほとんど被害がみられない(原口ほか,1995)。鉄筋の建物では断層直上付近においても断層線をわずかに(1m)でも避けていればほとんど構造上の被害を受けていない(皆川ほか,1995a,b)。

地表地震断層のごく近傍において被害が少ないあるいは、ほとんどないという現象は古くから知られており、報告されている(表3)。

それでは地表地震断層の近傍でなぜ被害が少ないのであろうか。これには2つの理由が考えられる。

1つは地震動は破壊面(断層面)から発振されるが、地表近くの断層面は固着が進んでおらず、また地下深部と違って高い圧力で押されていないため強い地震動を発生しにくいものと考えられる。強い地震動を発生するのは地下数km以深と考えられるため、そこから発振された強い地震動は地表に達したときには断層を挟んだ両側の広い地域に伝搬され断

表3. 地表地震断層と被害状況

地震名／マグニチュード	被害状況	文献名
三河地震(1945年) M6.8(7.2)	深溝地震断層近くの石灯籠が傾いても倒れなかった(震度IV以下)	小出ほか(1995)
伊豆半島沖地震(1974年) M6.9	・硬い岩盤が約20cm水平にずれたが直上にある建物はコンクリート基礎が壊れただけで倒壊はしなかった ・断層が家屋から少しずれたため建物は窓ガラス1枚割れなかった	伯野(1992)
伊豆半島近海地震(1978年)	・稲取・大峰山地震断層 ・今にも倒れそうな掘っ立て小屋が無傷のまま立っていた	小出ほか(1995)
フィリピン地震(1990) M7.8	・ディグディグ断層(長さ120km), リサールの町では左横ズレ約4m, 垂直変位約1mの変位があったが、断層のズレの上にあった家だけがやられて隣の家には被害がないという場合が多かった。	尾池(1989)

層近傍にのみ強い振動域を形成することはないのである。

断層の変位量にもよるが、未固結の堆積層が厚く被覆しているところでは基盤岩に断層によるズレが生じてもそのズレは堆積層が吸収してしまい地表にまでなかなか達しない。断層線上で大阪層群の地層が撓曲しているのをよく見かけるのは、これを物語っている。

従って、地表地震断層は地盤の良いところー岩盤が直接露出するか、ごく浅いところにあるような場所ーに現れやすい傾向にあり、そのような場所では地震動はほとんど増幅されずに大きな震度にはならない。これが地表地震断層近傍に被害が少ないもう1つの理由である。

(2) 神戸側では地表に震源断層が現れなかった可能性が大である

今回の地震では明石海峡付近を震源として南西および北東方向に震源断層が走った。

断層の北東端がどこまで達したかについては研究者により若干見解が異なるが、地震波の解析および余震分布域等より芦屋市北部から西宮市にかけて付近までと考えられている(菊池,1995,井出,1995)。従って、明石海峡の震源から北東方向に約25kmの長さにわたって震源断層が走ったものと考えられる。

神戸側における震源断層の位置は明瞭な地震断層が現れなかったためはっきりしないが、一部の研究者は「震災の帯」に沿って断層が走ったと考えている(6.1参照)。

しかし、余震の分布は「震災の帯」に一致せず山側に数kmずれており、しかも断面的にほぼ垂直に分布している(安藤ほか,1995)ことから、「震災の帯」の真下に震源断層が分布する可能性はきわめて少ない。余震の分布は須磨断層,会下山断層,布引・諏訪山断層,渦ヶ森断層,五助橋断層および大月断層付近に集中しており、これらの断層(の深部)

が動いて強い地震動を発生させたと考えられる。

なお、図30（井出,1995）に示されるように震央から150km以内の観測点18ヶ所の強震計のデータを用いた解析では神戸側でのすべり量は淡路島にくらべてきわめて小さく、そもそも神戸側では地表に地震断層が現れなかった可能性が大である。

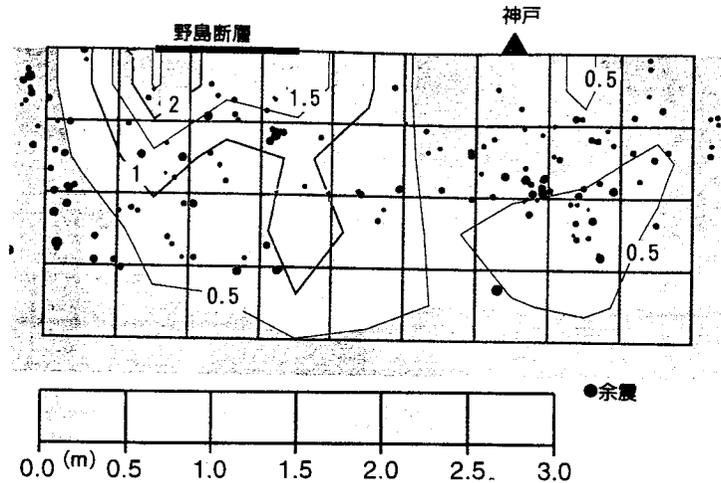


図30. 兵庫県南部地震の断層の総すべり量，単位m（井出,1995を一部改変）
正方形のメッシュは5km×5km

（3）倒壊，移動の方向は断層変位運動でなく地震動によることを示している。

図20で木造家屋の倒壊方向に地域による規則性が見られること、図21で墓石のずれから求めた水平主要動の初動方向が山側と海側で逆方向を示すことについてふれた。その方向は神戸市域で見ると、震源断層にほぼ直交しており、断層の横ずれ変位ではなく地震波（S波）により倒壊、移動が生じたことを示している。同様の現象は6月28日に起こったサハリン地震でも観察されている（嶋本ほか,1995c）。

なお、横浜市立大学の菊池正幸教授はコンビニエンスストアの防犯ビデオに映った揺れ方の解析から、断層に直交する方向の地震動と平行する断層変位による揺れを区別し、断層の北側では図中A型の揺れの変化を、また南側ではB型の揺れの変化を示すと考え、両者の間を断層が走ったと考えている（図31，瀬川,1995）。

（4）「震災の帯」は地震動が増幅・減衰されたため生じた

今回の地震では神戸側においては神戸市の西、須磨付近から北東方向に震源断層が走り、そこから強い地震動が発生した。各地点における地震動の強さは基本的には震源からの距離（震源距離）によって規制される。ただし、注意しなければならないことは震源距離は震央からの距離ではなく、あくまで震源からの距離である（図32）。

面的に破壊する場合において、震源をどのように考えるかは非常に難しい問題で、また断層面の固着度も場所によって違い、アスペリティすなわち断層面の固着した部分が破壊される時には強い地震動を出すことが考えられるため、アスペリティの分布も考える必要

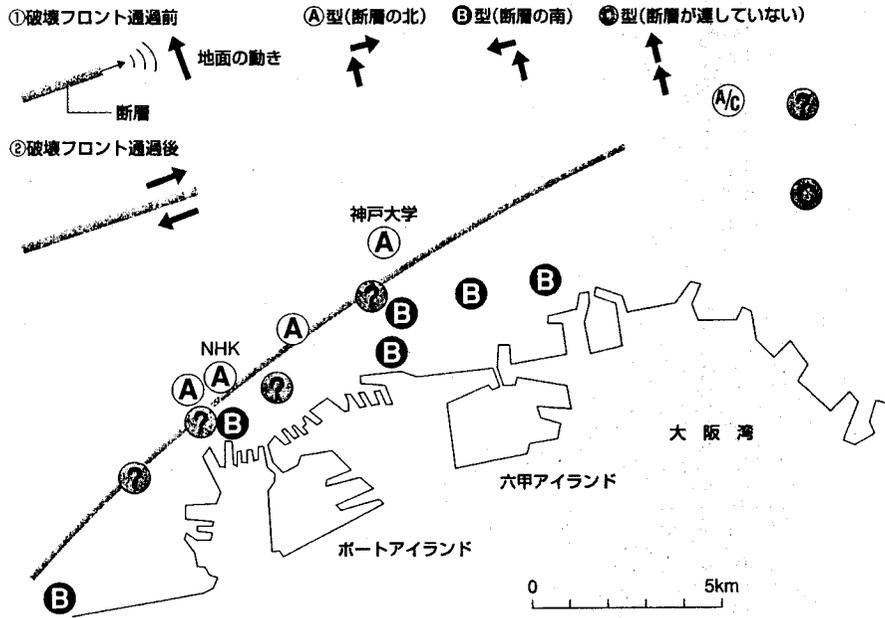


図31. 地面の揺れ方の変化から得られた伏在震源断層の位置 (瀬川,1995)

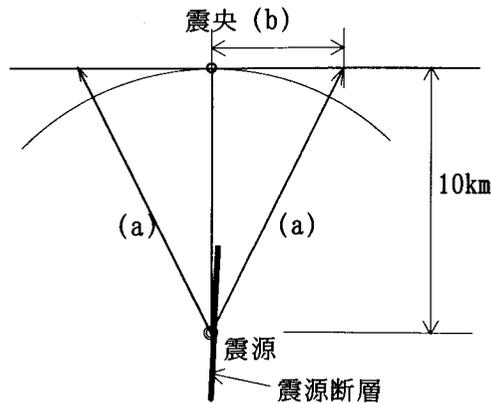


図32. 震央距離(b)と震源距離(a)の関係

がある。特にそのような小部分の不規則な動きや破壊の際には、建築物の破壊に重要な意味を持つ短周期の地震動が生じるため重要である (井出,1995)。

また、震源深度も研究者によって8km~17kmと異なっており (表1参照)、震源距離の取り方は難しいが、震源が地下10kmにあるとし、地表面をほぼ水平と見なせば、震央距離と震源距離の関係は表4・図33のような関係になる。

すなわち、震央距離が20kmを超えれば震源距離は震央距離にほぼ正比例して大きくなるが、震央距離が10kmのときは震源距離は震央でのその1.4倍にすぎず、震央距離が5km位までは震源距離はほとんど変わらない。

表4. 震央距離と震源距離の関係

震央距離 (km)	震源距離 (km)
0.0	10.0
2.0	10.2
4.0	10.7
5.0	11.1
6.0	11.6
8.0	12.7
10.0	14.1
15.0	18.0
20.0	22.3
25.0	26.8
30.0	31.5
40.0	41.1

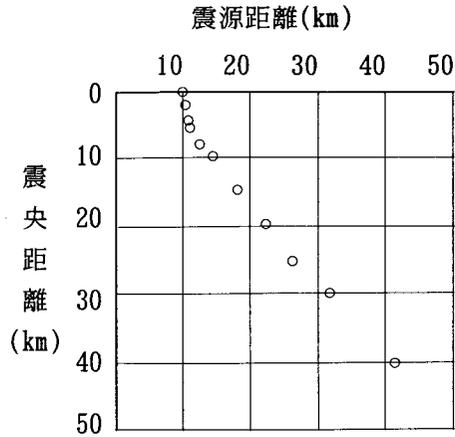


図33. 震央距離と震源距離の関係

このことより、震源が10km位の深さを有する地震の場合、震央距離が10km以内の区域においては地質構造および被覆土層による地震動の増幅・減衰がなければ地震動はほとんど変わらなかったと考えることができる。

すなわち、もしこの範囲内の地盤がすべて岩盤であったならば震度はすべて同じで、今回の場合震度4～5であったと考えられる。従って、主に岩盤よりなる山地域では震度は4～5のままで、当然「震災の帯」に加わることはない。

一方、山地より海側の被覆土層が分布する地域では多かれ少なかれ増幅作用により地震動が強くなる。

ただし、山麓の丘陵地や古い扇状地（図35）においては増幅作用はあまり見られず、岩盤地域の揺れとさほど変わりはなく震度5にとどまった。なお、JR神戸駅から元町駅にかけて「震災の帯」が途切れているのは、ここに古い扇状地性堆積物や大阪層群などからなる丘陵地が張り出してきているためである。

また海岸沿いの地域においては震度は6までしか増幅されず、震度5にとどまった地域も見られる。これまでの地震においては沖積層—特に沖積粘土層の厚さと木造建築物の倒壊率とは比例し、沖積粘土層の厚いところで木造建築物が多く倒れた（図34，大崎1983）。

しかし、今回の地震では沖積層が厚い海岸沿いの地域においてかえって震度が小さく被害が少ないという現象が見られた。このことはこれまでの地震ときわだった相違点として注目される。

この原因の1つとして海寄りの地域では液状化によって水平方向の地震動が減衰されたのではないかと考えられてお

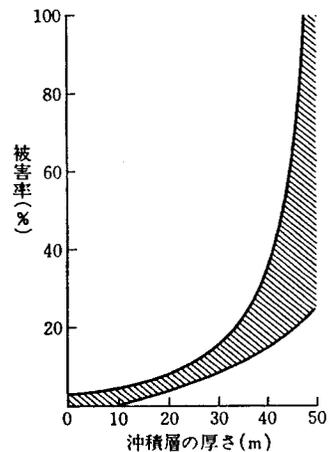


図-34. 沖積層の厚さと木造建築物の被害率（関東大地震1923年）（大崎,1983）

り、実際に減衰の様子が観測されている。(入倉孝次郎,1995a,b,岩崎,1995C,五十嵐,1995)。

たしかに、液状化した地域(図18参照)は震度5となっている所が多く、液状化が地震動を減衰させる役割をになったことは確実なようである。

沿岸部の震度が抑制された要因としてもう1つ砂州の存在があげられる。

6.1(3)でもみたように砂州の部分では明らかに周辺より震度が低くなっており(図29参照)、和田岬地域が震度6以下であったのはまさにこのためである(図28参照)。和田岬の砂州は主に砂礫よりなりそのN値は30を超えており良く締まった地盤をなしている(神戸市企画局,1980)。

他の地域においては砂州はそれほど顕著に発達しないが、海岸沿いに細長く発達している所があり(図35で浜堤に区分された所・吉岡ほか,1995)、そのような所では震度が低く押さえられたものと考えられる。



図35. 阪神地区微地形区分図(吉岡ほか,1995)

このように山麓地域および海岸沿いの地域ではそれほど増幅されなかったが、両者の間に挟まれる地域において地震動が大きく増幅され「震災の帯」が形成されたものと考えられる。

「震災の帯」付近において特に地震動が増幅されることは余震観測でも確かめられており、1月25日の余震での最大加速度は「震災の帯」の中心部に位置する福池小学校(FKI)地点ではその北側に位置する神戸薬科大学(KMC)地点より4~10倍以上に増幅されたことが観測されている(岩田ほか,1995,本冊の入倉報告参照)。

それでは、「震災の帯」において何故、大きな増幅が生じたのであろう。

地質構造説のうち「フォーカス現象」説は、幅の狭い被害集中域および「震災の帯」の海側の境界線がやや不明瞭であるのに対して、山側の境界が極めてシャープであるという現象を明解に説明している（図24、本冊三田村報告参照）。

図24は大阪市の上町断層の西側におけるものであるが、六甲山地の南麓でも模式的にはこれに近い地質構造にあるものと考えられ、同様の現象が起こった可能性は十分に考えられる。

京都盆地においては、今回の地震では目立った被害は生じなかったが、盆地の西縁と東縁の断層により落ち込んだ地点付近において瓦の落ちる被害が集中して見られた。図36は盆地西部における被害状況を示したものであるが、榎原断層の東側に沿って瓦の落ちる被害が集中していることがわかる。榎原断層は西山山麓の丘陵地と京都盆地の低平地を画する断層で、この断層により基盤岩は盆地側が100m以上落ち込んでいる。京都盆地内においては盆地南部の淀地区や向島団地周辺など榎原地区よりも地盤がもっと悪い地域が存在するが、そのような地域には被害が発生せず、榎原断層に沿った地域に被害が集中して見られたことは、この地域の被害を地盤の悪さだけで説明することができないことを示している。ここでも「フォーカス現象」が生じた可能性が高いものと考えられる（本冊安松報告参照）。

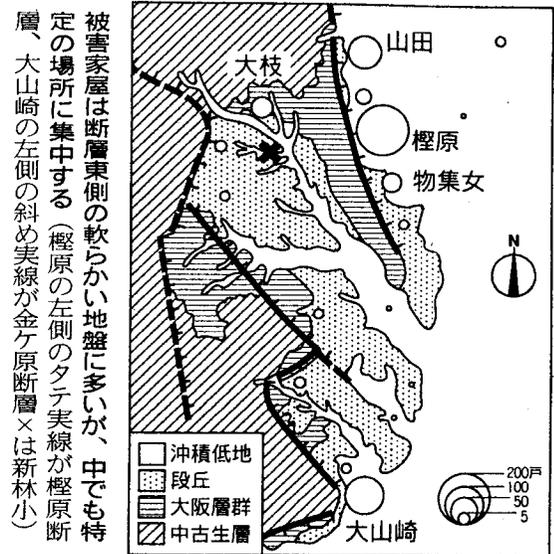


図36. 西山山麓丘陵における被害家屋の分布状況
（京都新聞3月23日、植村の調査）

源栄ほか(1995)は神戸地域において断層により急激に基盤岩が深くなる地下構造のルデルを想定し、直下の基盤岩から伝搬してくる波と六甲山岩盤から来る波との干渉によって「震災の帯」地域で地震動が増幅されることを解析している。

ただし、前述のように「震災の帯」はJR神戸駅から元町駅にかけて途切れており、中央開発(株)の調査においてもこの地域は震度5～6にとどまっている。この地域における地下の様子が不明なので、はっきりしたことは言えないが、もし他の地域と同様の地下地質構造にあるならば、この地域も他地域と同様、震度7にならなければならない。それが震度6以下であるということは「フォーカス現象」は震度6の原因にはなり得ても震度7を生じさせる要因にはならなかったことを伺わせる。

不整形地盤による「なぎさ現象」説は沖積層分布地で、しかも沖積層が山側で薄くなる所に被害が集中したことをうまく説明する。しかし、長田地区の新湊川沿いの断面で見れば必ずしも沖積層が薄くなる部分で被害が大きくなっているわけではなく、どの位の現象が増幅に寄与したかについては不明な点が多い。

6. 1(3)で見たように長田地区における被害状況は表層の地盤と非常に良く対応してお

り、表層に粘土層が2m以上分布する地域では震度が7以上となり、砂礫層が分布する所では震度は6以下となっている（図28参照）。

この対応はきわめて明瞭で長田地区においては震度7に増幅された原因が表層地盤にあることはほぼ間違いない。

他地域においては、表層に粘土層が広域にわたって分布する所がないため表層地盤と震度との関係ははっきりしないが、震度の大きいところには表層に軟弱な粘土層が分布したり緩い砂層が厚く分布する傾向にあり、震度が地表面下10m -特に5mまでの表層地盤に規制されていると見なされる地点が多く見られる。

ごく表層の地盤がS波の増幅に強い影響を及ぼすことは余震の波形シミュレーションによっても解析されており、図37の地下構造モデルに対して行われたシミュレーションにおいては表層に100 m/sec のS波速度を持つ極軟弱層が7mの厚さで分布すると仮定しないと合成波形の振幅は約半分となり観測結果を説明できないとしている（図38、入倉,1995b）。

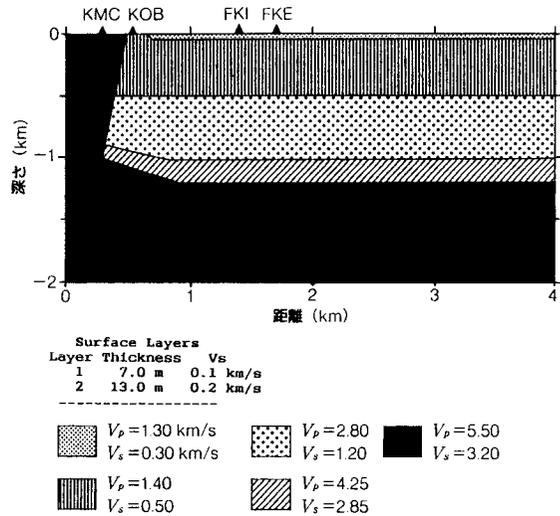


図37 東灘付近の被害集中域を横断する方向(北北西-南南西)での地下構造モデル。最近行われた関西地震観測研究協会による反射波探査結果を基に推定 (入倉,1995a, bによる)

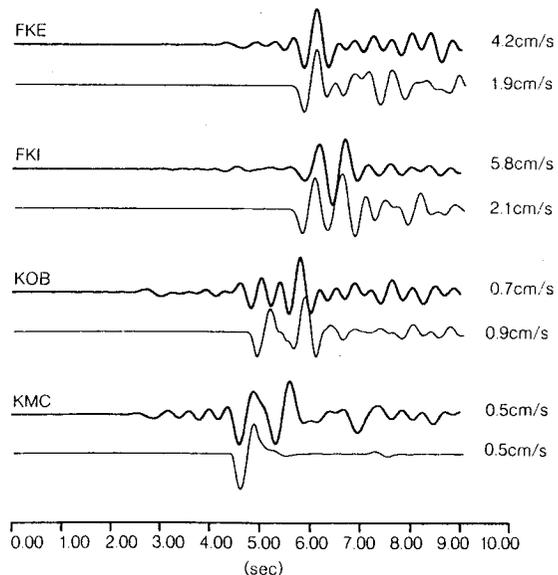


図38. 2.5D 差分法を用いて図37の地下構造モデルに対して合成された地震動と観測記録の比較。震源はKMCの左方7km 深さ14kmに右横ずれ断層を仮定

太線が観測波形、細線が合成波形 (入倉,1995b)

以上、現時点では「震災の帯」の原因についてはっきりと結論づけることは出来ないが、地下深部の地質構造に由来する地震波の屈折による増幅と、地表面下のごく表層の軟緩地盤による増幅とが相まって震度7以上の強い地震動が生じ「震災の帯」が形成されたものとするのが最も合理的なようである。

7. 引用文献

- 1)阿部勝征(1990):「地震は必ず来る」,読売新聞社,pp.64.
- 2)安藤雅孝ほか(1995):1995年1月17日兵庫県南部地震(M7.2)観測結果速報,「平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究」,1995年3月,pp.11-41.
- 3)荒井良祐ほか(1995):1995年兵庫県南部地震で淡路島に出現した地震断層,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.21-24.
- 4)伯野元彦(1992):「被害から学ぶ地震工学」,鹿島出版会,pp.24.
- 5)原口強(1995):兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層,(社)全国地質調査業協会連合会主催,「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会(3/27,砂防会館)資料,1995.3.27発行,pp.20-39.
- 6)橋本学(1995):兵庫県南部地震による地殻変動と断層運動の推定,地質ニュース,490号,pp.33-40,1995年6月号.
- 7)平野昌繁・波田重熙(1995a):六甲山地東南部の断層の活動と変位地形,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.24-27.
- 8)平野昌繁・波田重熙(1995b):神戸市街地西部の断層の活動と変位地形,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.79-84.
- 9)平野昌繁・藤田崇(1995)1995年阪神大震災に伴う地盤災害—とくに断層に沿う変位地形について,地球科学第49巻2号,pp.7-14.
- 10)井出哲(1995):追跡・阪神大震災,断層破壊を再現,科学朝日1995年7月号,pp.118-121.
- 11)五十嵐道子(1995):追跡・阪神大震災,揺れは「震災の帯」で増幅され,ポर्टアイランドで減衰されていた,科学朝日1995年7月号,pp.116-117.
- 12)入倉孝次郎(1995a):1995年兵庫県南部地震による強震動,月刊地球号外No.13,pp.54-62
- 13)入倉孝次郎(1995b):兵庫県南部地震の地震動特性,特集,検証阪神淡路大震災,「建築技術」1995年8月号,No.544,pp.54-59.
- 14)池田安隆・東郷政美・澤祥・加藤茂弘・隈元崇(1995):墓石のずれから推定される初動分布と伏在地震断層の挙動,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催,1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行,pp.45-46.
- 15)石川浩次(1995):神戸の地形・地質・地盤と構造物の帯状・島状被害,日本応用地質学会主催,「阪神大震災」中間報告会—人工改変と地震被害—(5/25中央大)予稿集,1995.5/23発行,pp.72-104.
- 16)石川浩次・大鹿明文(1995):建築物被害と地質・地盤,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.187-192.
- 17)石川浩次・溝口昭二・大鹿明文(1995):兵庫県南部地震の神戸の地盤と被災状況調査,応用地質,Vol.36, No.1,1995,pp.62-83.
- 18)岩崎好規(1995a):1995年阪神大地震の強震動記録,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催,1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行,pp.21-25.
- 19)岩崎好規(1995b):1995年兵庫県南部地震の地震動と京阪神の地震,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.1-21.
- 20)岩崎好規(1995c):阪神域の地盤構成と平成7年兵庫県南部地震による地震記録,土と基礎,43-6,1995年6月号,pp.15-20.
- 21)岩田知孝ほか(1995):神戸市東灘区におけるアレイ強震観測,「平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究」,1995年3月,pp.147-154.
- 22)嘉門雅史(1995):兵庫県南部地震におけるウォーターフロントの被害,第30回土質工学研究発表会会,特別セッション,阪神大震災調査報告—都市直下型地震と地盤工学的諸問題—(7/12,金沢文化ホール),pp.25-36.
- 23)川崎一朗・島村英紀・浅田敏(1995):「サイレント・アースクェイク」,東京大学出版会,pp.70-71.
- 24)菊池正幸(1995,a):遠地の地震記録による震源メカニズム,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催,1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行,pp.17-20.
- 25)菊池正幸(1995,b):1995年1月17日兵庫県南部地震の震源メカニズム,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.117-120.
- 26)小出仁・山崎晴雄・加藤碩一(1995):「地震と活断層の本」,国際地学学会,pp.50-54.
- 27)神戸市企画局(1980):「神戸の地盤」,pp.254.
- 28)藤 綱 一 起(1995):大規模被害の元凶は主要動の周期?,科学朝日,緊急増刊号「地震科学」最前線,Vol.55, No.4,1995.3/20,pp.11-15.
- 29)栗田泰夫ほか(1995):1995年兵庫県南部地震で淡路島に出現した地震断層,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.11-14.
- 30)前田保夫・宮田隆夫(1995):神戸—西宮間における活断層の観察,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委

- 員会主催, 1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行, pp.43-44.
- 31)皆川潤・大槻憲四郎・青木正夫・大友淳一・中村教博(1995a):野島断層の性状,応用地質,Vol.36,No.2,1995,pp.50-62.
 - 32)皆川潤・大槻憲四郎・日吉直・松井和夫・青木正夫(1995b):野島断層と構造物被害につて,日本応用地質学会主催,「阪神大震災」中間報告会-人工改変と地震被害-(5/25中央大)予稿集,1995.5/23発行,pp.22-37.
 - 33)三田村宗樹・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団(1995):1995年兵庫県南部地震による地盤被害と地形の人工改変,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.209-214.
 - 34)宮田隆夫・洪景鵬・前田保夫(1995a):神戸-芦屋間における伏在断層とその動き,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.28-29.
 - 35)宮田隆夫・洪景鵬・前田保夫(1995b):神戸市街地の隠れた活断層,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.45-48.
 - 36)宮内崇裕ほか(1995):兵庫県南部地震にともなう淡路島北部の地表断層-地形・地質・地震のテクニクな関連性-,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催,1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行,pp.35-36.
 - 37)溝口昭二(1995):神戸市街地の地震被害と地形・地盤,(社)全国地質調査業協会連合会主催,「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会(3/27,砂防会館)資料,1995.3.27発行,pp.78-95.
 - 38)水野清秀ほか(1990):明石地域の地質,地域地質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,pp.90.
 - 39)水野昇(1995):これだけは知っておきたい地震の基礎知識,建築知識1995年5月増刊号「阪神大震災に学ぶ地震に強い建築設計のポイント」,pp.134-143.
 - 40)森本巖(1995):湾岸地域における液状化被害の特徴,(社)全国地質調査業協会連合会主催,「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会(3/27,砂防会館)資料,1995.3.27発行,pp.96-105.
 - 41)源 栄正人・永野正行(1995):神戸市の基盤不整形構造を考慮した地震動の増幅特性に関する解析的検討,「土と基礎」Vol.43,No.7,1995年7月号,pp.15-20.
 - 42)中川康一・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団(1995a):大阪周辺域での震害と地盤構造,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.92-108.
 - 43)中川康一・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団(1995b):震害と地盤構造,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.233-238.
 - 44)日経アーキテクチャー編(1995):「阪神大震災の教訓」日経BP社,1995.3/30発行,pp.64.
 - 45)日経アーキテクチャー編(1995):「阪神大震災の教訓」日経BP社,1995.3/30発行,pp.65.
 - 46)楡井久・千葉県地質環境研液状化・流動化被害調査団(1995):1995年兵庫県南部地震の液状化・流動化被害-噴礫現象の意味すること-,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.109-116.
 - 47)楡井久・楠田隆・古野邦雄・佐藤賢司・酒井豊・香村一夫・風岡修・森崎正昭・香川敦(1995):瞬間的な地層破壊型の液状化現象,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.137-142.
 - 48)野村亮太郎・川崎輝雄(1995):墓石・石造物の転倒などから見た地震被害分布と地形特性,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催,1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行,pp.49-50.
 - 49)尾池和夫(1989):「地震発生のしくみと予知」,古今書院,pp.171.
 - 50)大崎順彦(1983):「地震と建築」,岩波新書,岩波書店,pp.127.
 - 51)林愛明ほか(1995a):野島断層の性状,応用地質,Vol.36,No.1,1995,pp.41-46.
 - 52)林愛明ほか(1995b):兵庫県南部地震により野島地震断層沿いに起きた瞬間型の液状化,応用地質,Vol.36,No.3,1995,pp.27-32.
 - 53)櫻井孝(1995a):震害状況から推定される断層変位運動,日本地質学会ほか共催,「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集,1995.3.13発行,pp.77-87.
 - 54)櫻井孝(1995b):神戸側での断層と被害について,日本応用地質学会主催,「阪神大震災」中間報告会-人工改変と地震被害-(5/25中央大)予稿集,1995.5/23発行,pp.38-54.
 - 55)櫻井孝(1995c):兵庫県南部地震による西宮地区の震害から想定される断層変位運動,応用地質,Vol.36,No.1,1995,pp.39-40.
 - 56)佐藤鋭一・初倉克幹・中道育夫(1995):芦屋市南部における被害集中ゾーンの分布と成因的考察,日本地質学会主催,シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集,1995.6/20発行,pp.161-166.
 - 57)瀬川茂子(1995):追跡-阪神大震災,やっぱりあった伏在断層,科学朝日1995年9月号,pp.43-45.
 - 58)嶋本利彦ほか(1995a):神戸市・芦屋市・西宮市における地震被害と推定地震断層,日本第四紀学会・第

- 四紀研究連絡委員会主催，1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行, p.41-42.
- 59)嶋本利彦ほか(1995b)：兵庫県南部地震の被害分布と推定地震断層，「平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究」,1995年3月,pp.92-97.
- 60)嶋本利彦ほか(1995c)：ネフチェゴルスク大地震の地震断層，地質学雑誌,第101巻,第7号,1995年7月号,口絵.
- 61)篠崎祐三(1995a)：神戸市の地盤と地震被害に関する研究，「平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究」,1995年3月,pp.210-228.
- 62)篠崎祐三(1995b)：地盤特性，社団法人日本建築学会編著「1995年兵庫県南部地震災害調査速報」,1995年3月31日発行, pp.27-30.
- 63)篠崎祐三(1995c)：地盤特性と被害分布，特集，検証阪神淡路大震災，「建築技術」1995年8月号, No.544, pp.60-65.
- 64)多田亮(1995a)：1995年兵庫県南部地震と地殻変動，日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催，1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行, pp.27-28.
- 65)多田亮(1995b)：1995年兵庫県南部地震と地殻変動，「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集, 1995.3.13発行,pp.22-23.
- 66)多田亮(1995c)：1995年兵庫県南部地震の地殻変動と測地学的断層モデル，日本地質学会主催，シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集, 1995.6/20発行,pp.7-10.
- 67)竹村厚司(1995)：神戸市・芦屋市市街地における舗装の亀裂の分布，日本地質学会主催，シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集, 1995.6/20発行,pp.65-68.
- 68)谷本喜一(1995)：兵庫県南部地震の地盤災害，第30回土質工学研究発表会会，特別セッション，阪神大震災調査報告一都市直下型地震と地盤工学的諸問題一(7/12,金沢文化ホール), pp.1-24.
- 69)巽保司ほか(1995)：三宮駅から神戸駅までの地震災害と地盤変状,日本地質学会主催，シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」(6/20-21,目黒文化会館)論文集, 1995.6/20発行,pp.205-208.
- 70)中央開発㈱阪神大震災災害調査団(1995a)：1995年兵庫県南部地震の被害調査と神戸の地盤,日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会主催，1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会(2/18,日大)記録,1995.3/6発行, pp.71-74.
- 71)吉岡敏和ほか(1995)：1995年兵庫県南部地震による阪神地区の被害分布と微地形区分，日本地質学会ほか共催，「阪神大震災」緊急合同報告会(3/13,大阪市大)資料集, 1995.3.13発行,pp.88-91.
- 72)1995年兵庫県南部地震地質調査グループ(1995)：1995年兵庫県南部地震における被害集中域と地質学的特性,地球科学第49巻2号,pp.15-18.

地震動

兵庫県南部地震 一震源断層、強震動、そして震災の帯一

入倉 孝次郎（京都大学防災研究所）

1. はじめに

歴史の古い近畿地域は地震に関する資料も豊富に残されており、歴史上繰り返し大被害を被ってきていることはよく知られている。近畿に被害をもたらす内陸部に発生する地震は南海沖から紀伊半島沖にかけての南海トラフ沿いに繰り返し起こるマグニチュード8クラスの巨大地震と連動して発生してきた（例えば、茂木、1981）¹⁾。南海トラフ沿いの巨大地震は100～150年程度の間隔でかなり規則的に起っているが、これまでの歴史記録からこの巨大地震に先行して50年程前から西日本の内陸の地震活動が活発化することがわかっている。この内陸地震は最大でもマグニチュード7を少し超える程度で南海沖の巨大地震に比べて数10分の1のエネルギーに過ぎないが、都市直下に起こる可能性があるため、大被害となることが懸念されていた。しかしながらこの内陸地震が実際にいつ・どこに・どの位のものが起こるかという決定論的な意味での地震予知は兵庫県南部地震の発生前には全くなされてはいない。兵庫県南部地震は予知にのみに頼る地震防災対策では大震災は防ぐことはできないことを教えている。

ここでは、まず最初に今回の地震の震源と活断層の関係について、余震分布、強震動記録、被害分布などから考察し、そのあと今回の地震の被害の直接の原因となった強震動というものがどういうものであったか、どうして非常に大きい地震動が形成され、またそれによって大被害が引き起こされたのかについて述べる。

2. 兵庫県南部地震と近畿の活断層

今回の地震の全体的な様相を見るために「日本の科学者」に掲載された気象庁気象研の石川有三氏の論文²⁾中の気象庁による本震及び余震の震源分布を図1に引用する。彼の指摘によれば、今回の地震の余震は志筑断層から有馬高槻構造線の間分布している。従って、破壊が広がっていった先端部分に応力が集中することから、今回の地震を引き起こした断層帯の北東端に位置する有馬高槻構造線とか、南西端に位置する志筑断層およびその延長にある中央構造線というものを今後注意深く見守るべきだとしている。

この地震は石川氏が前から指摘していた空白域の1つに起こっている。しかし、今回の震源域は淡路側から神戸側にかけて少なくとも40km以上と思われるが、空白域といわれていたのは神戸側のみで、淡路側では1916年マグニチュード6.1の地震が起こったおり空白域とはみなされていなかった。従って今回の地震では従来の空白域を埋めるという形だけではなく、さらに空白域だけではない所まで含む広い領域が震源となったことになる。このことは将来の地震の規模が単に空白域の大きさからはわからないことを意味する。

震源となった断層がどこかをみるには余震域についてももう少し詳しく検討する必要がある

る。全国の大学が共同して地震の1週間後から約3カ月間行った精密な余震観測で決めた余震の震源分布が図2である³⁾。できるだけ早い時期の大きいものを選んで示されている。震源を決めたことのある人はよく知っていることであるが、一つ一つの地震については1キロとかそれ位の精度を考えないといけないので、一つ一つの点がそれほど正しいとは言えないが、全体的にみれば既存の断層帯、六甲断層系に非常によく一致しているというこ

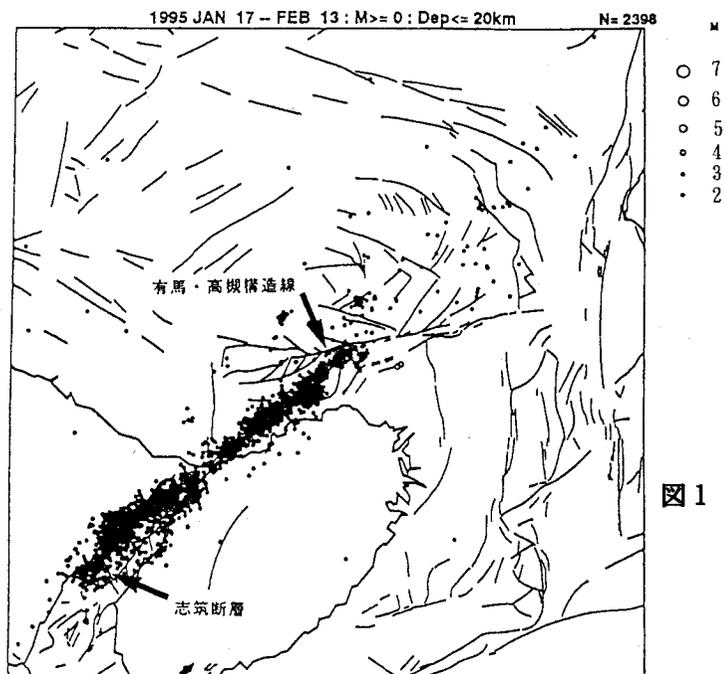


図1 兵庫県南部地震の本震・余震分布と活断層
[石川有三(1995)による]

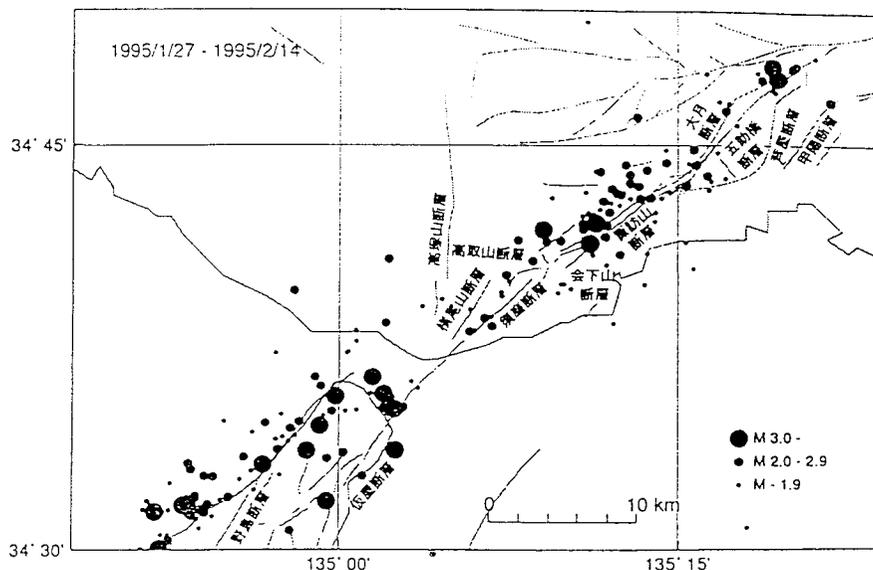


図2 全国大学共同緊急地殻活動調査・地震観測網による余震分布(再検測)と活断層(飯高他、1995)。27ヶ所の臨時観測点が設置された。1月27日から2月14日の間余震分布が示される。

とがわかる。断層系はいくつもの断層（一つ一つにいろいろな名前が付いている）の集まったものであるが、地震の方は必ずしも名前をついた断層毎には起こってくれない。そういう意味で、将来の地震の大きさを推定する場合、どこからどこまで破壊するかということの想定は重要課題の1つと思われる。この場合一つ一つの断層はあまり大きくないので個別に地震を起こしていたら、こんな大きな地震が起こらない訳であるが、今回はいくつかの断層が適当に一緒に動いてしまったようである。

しかしながら余震域は時間経過と共に広がってしまうので本震の時にどの断層が実際に動いたかを知るには図2の余震分布は適当ではない。最近根本ら⁴⁾は京大防災研究所および東大地震研究所和歌山観測所の記録を手動で読み取り本震の震源および本震直後の余震分布の精密な決定を行い図3のようにまとめている。余震分布の平面図と断面図が示され、断面図は断層系に平行する面とそれに直交する面に余震分布を投影したものである。本震直後約6時間以内の余震分布（実際には停電のため本震発生後の5時46分から10時までは欠測）は、明石海峡付近深さ約17kmの本震の発震点を中心として、水平に神戸側約30km、淡路側約20kmで、深さにして約17kmから数kmにわたるほぼ垂直な面と推定される。

今回の地震に関してもう一つの重要なことは淡路側の震源域で地震断層が地表に現れたが、神戸側に関しては現れてないことである。これは将来の地震を考える場合に考慮すべ

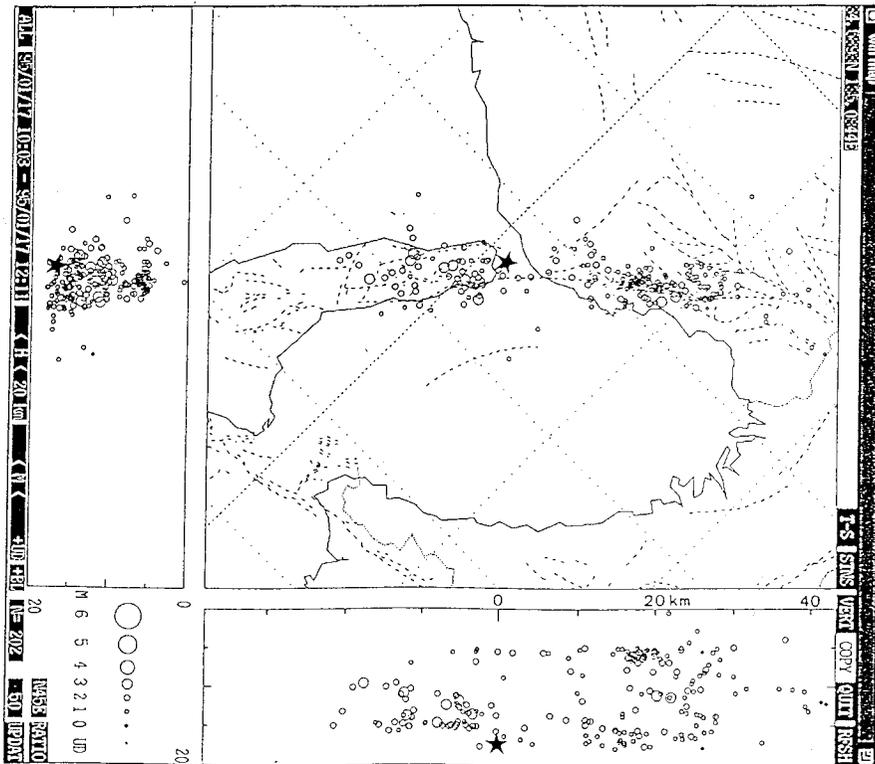


図3 本震（1995年1月17日5時46分51.63秒）直後1月17日10時から12時の間の余震分布（根本他、1995）。京大防災研究所地震予知研究センターおよび東大地震研究所和歌山観測所のデータが用いられた。平面図、断層方向およびその直交方向の断面図が示される。星印は本震の震源位置。

と考えるのが理にかなっている。今回の地震で一番最初にテレビに写りだされた阪神高速の高架橋の倒壊したところは、断層からやはり2～3キロ離れている。その近くに断層が動いたという証拠は無いが、あのような大きな被害が起こっている。その理由はやはりそういう地域で地震動が大きくなったことにある。どうして大きくなるかということを考えていくべきだと思う。

3. 強震動記録

今回の地震に対して種々の機関によって強震計で観測された最大加速度の分布が図5である。各観測点位置が地盤条件の違いによって異なったマークで示され、加速度レベルは数字(ガル)と色の濃さで示されている。この図から北東方向、すなわち京都の方向は南東方向に比べて加速度が大きかったことがわかる。震源断層は神戸市の北東縁部付近で止まっているはずなのに北東方向では宝塚周辺で大きな被害がでており、さらに、京都でも多少被害が出ている。これは断層面での破壊の伝播方向で断層から発生する地震動が大きくなる、いわゆるディレクティビティ効果に関係していると思われる。

断層から生成された地震動がどういうものであったかを知るには震源域に近いところでの強震動の記録が必要である。逆に強震動記録があればどのように断層破壊が生じたかを知りこともできる。そのためには、震源近傍での強い地震動、すなわち強震動の観測が充実していなければならない。残念ながら京阪神地域というのは地震に対する関心度も低いということもあって、この地震が起こる前までは強震観測は非常に少ない機関でしか行なわれていなかった。実際にはいろいろ建設会社とか記録を持っている所はたくさんあるが、

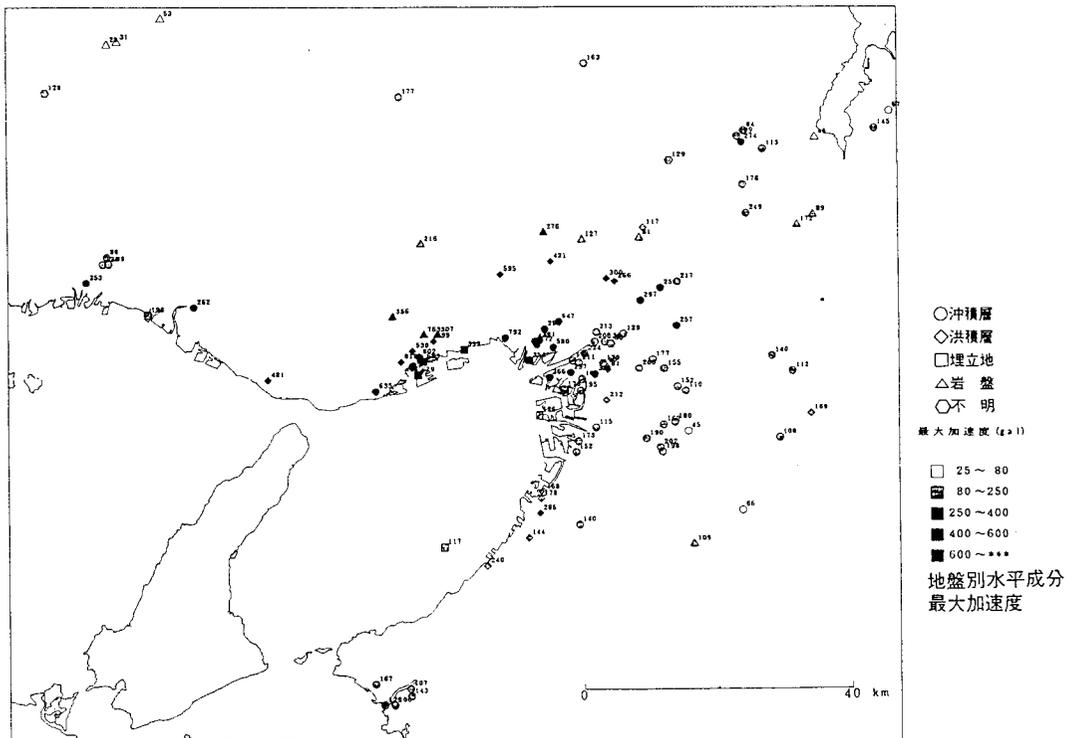


図5 本震の時の水平動最大加速度分布

被害が起こると補償とか裁判などの問題もあって、強震動をせっかく記録してもいまだ研究用に公表してもらえないものもある。

関西地震観測研究協議会（代表：土岐憲三京都大学教授）は関西地域で強震計による観測を行うため、民間会社が協力し資金を出しあって置いた強震計のネットワークであるが、ここの記録に関しては全て研究用にはオープンにしている。それ以外にも、海洋気象台の記録と神戸市のポートアイランドの記録は地震の後すぐに公表されている。今回の地震の震源域と考えられる断層帯のすぐそばに海洋気象台であるとか、神戸大学の観測用トンネルなどの観測点があったことになる。震源域のすぐそばで記録がとれているということは今回の地震の生成のメカニズムを知る上で非常に貴重なものとなっている。神戸大学のトンネルに設置されていたのは広い周波数範囲で平坦な特性をもつ速度型強震計でその記録（図6）をみると大体どの程度の長さの断層の範囲かわかる。記録から約10秒ぐらいで地震動は終わっており、これは破壊が継続した時間は10秒しかかかっていないことを意味している。その中で大きなピークが2つでているという事は、2つぐらいの領域で非常に大きな破壊が起こったと推定できる。

震源の極近傍の海洋気象台（K O B E）と神戸大学（K B U）でとれた加速度記録が図7である。水平動をみると気象台（K O B E）は非常に大きな820ガルに対し神大（K B U）は300ガルと小さくなっているのは気象台は地盤構造によって増幅されている可能性がある。一方、上下動をみると気象台では水平動に対し2分の1以下となっていて、これまでの経験的關係に一致する。ところが神戸大学の記録をみると、上下動が約400ガルで水平動よりも大きくなっている。ところがよく見ると、上下動記録のみかけ周期はきわめて短周期で水平動とは全く異なっている。こういう短周期のものというのは地盤の条件に

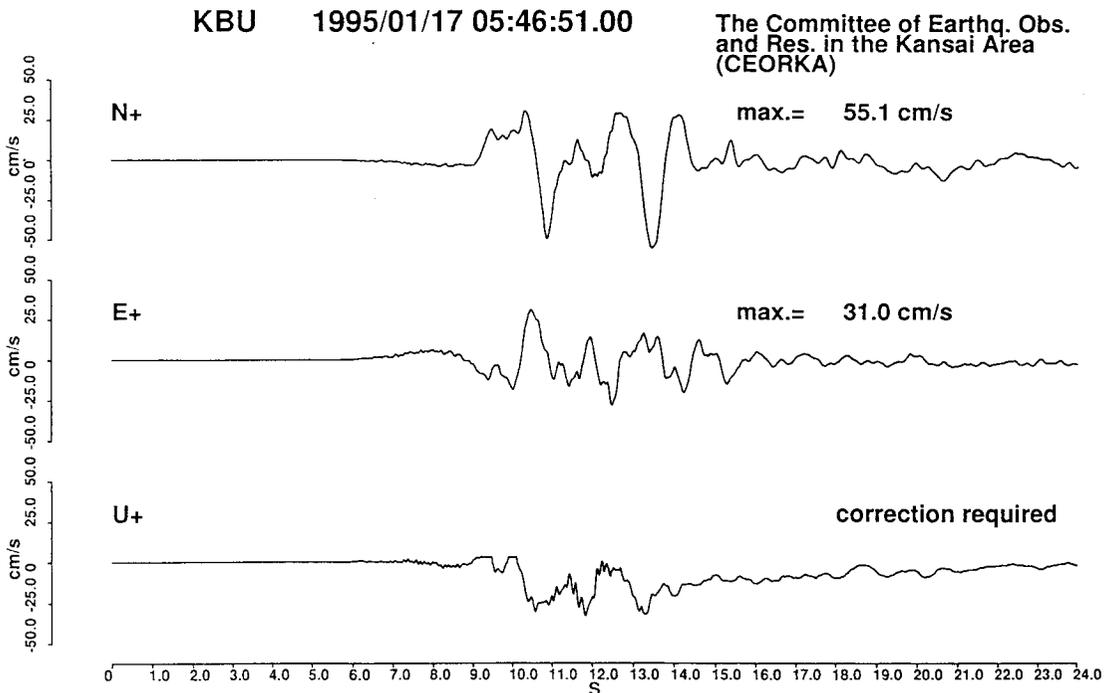
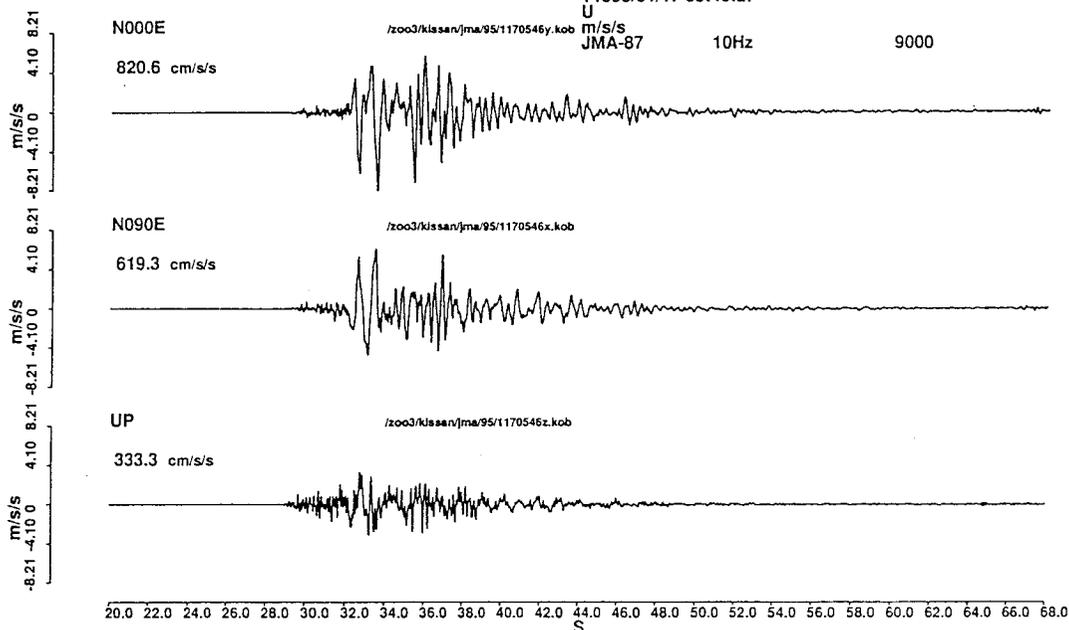


図6 震源の極近傍に位置する神戸大学（K B U）で得られた速度波形記録

JMA KOB 1995/01/17 05:46

ACCELERATION
T1995/01/17 05:46:27
U
m/s/s
JMA-87 10Hz 9000



KBU 1995/01/17 05:46

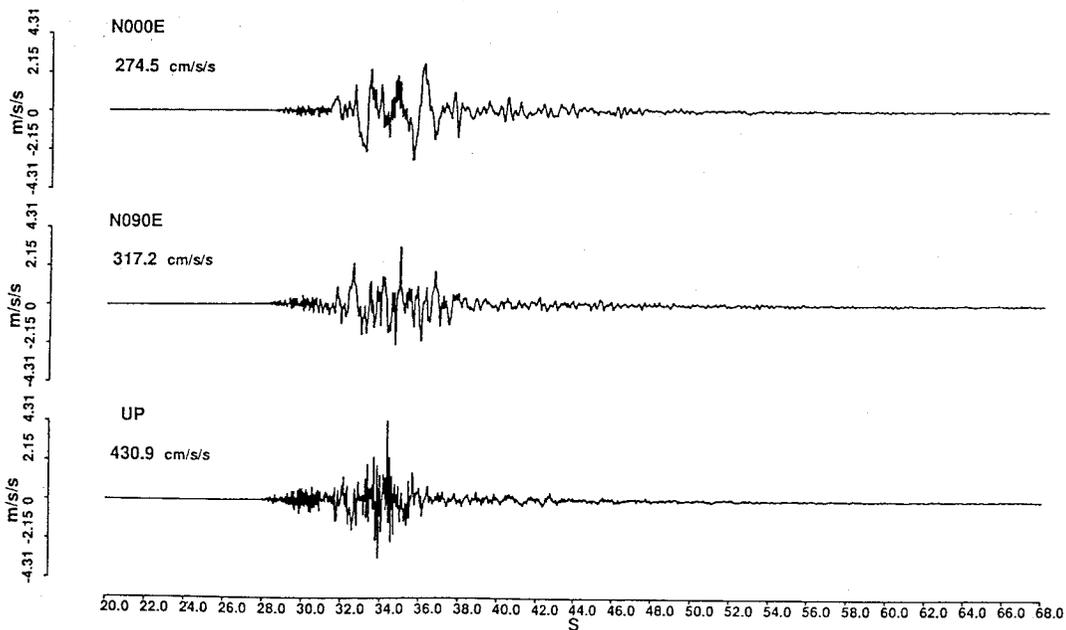


図7 震源の極近傍での2つの観測点、神戸海洋気象台（K O B E）
と神戸大学（K B U）、での加速度波形記録

よってごくローカルにできたと考えられる。このように震源からの地震波はどうだったかとか、上下動がとくに大きかったのか等考えるにはできるだけ沢山の記録をみないとまちがった結論になってしまう。

4. 断層破壊過程：どの断層がどのように動いたのか

地震は断層面での岩盤のすべり破壊によって地震動を発生する現象である。生成された地震動が異なった方向と距離にある観測点で記録されていると、それらの記録から逆のどの断層がどのように動いたか推定することができる。

図8は京大防災研究所の地震予知センターでまとめた各地のP波初動の押し引き分布である。この分布からこの地震は東西方向に圧縮力により北東-南西方向の面の右横ずれか或いは北西-南東方向の面の左横ずれのすべりを起こしたことによることがわかる。この

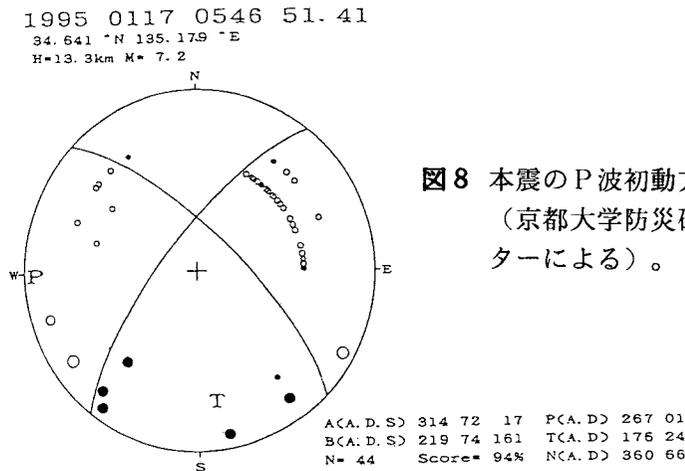


図8 本震のP波初動方向によるメカニズム解
 (京都大学防災研究所地震予知研究センターによる)。

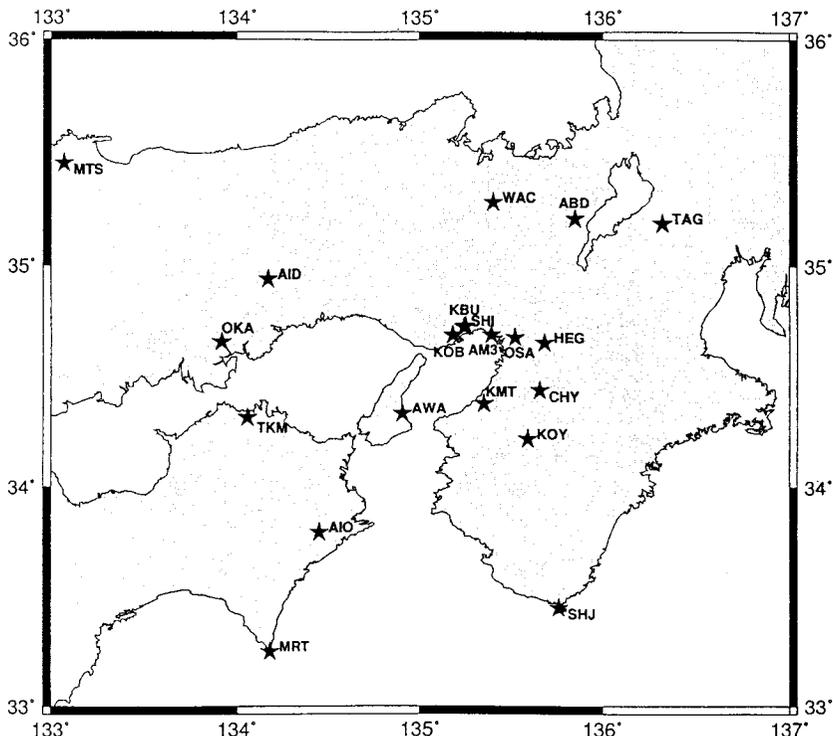


図9 波形インバージョンにもちいた震源の極近傍および
 近距離地域での強震動記録の観測点位置。

震源メカニズムはこれまで近畿地方に起こった地震と一致している。余震は本震の時の破壊面に沿って起きることは経験的にわかっており、余震分布から断層面は当然北東-南西方向ということになる。右横ずれの動きは野島断層の動きに一致している。

断層面内での詳細なすべりは断層面近傍での強震動の記録から知ることができる。現在までに震源近傍で公表された記録の観測点の位置が図9に示されている。断層面位置は、余震分布に加えて、地震前後の地殻変動データ、強震動のパーティクル・モーションの偏奇性などを参考にして、震源断層は図10に示されるように、淡路側1つ、神戸側2つ、計3つのセグメントからなると仮定している。

想定された断層面に震源があると考え観測点で得られた地震動を断層面上に戻す波形インバージョンという方法で断層面上のスリップ分布を推定する。この際地下構造による地震動への影響を理論的に考慮する必要があり、これがこの方法の適用限界ともなる。このようにして得られた結果は図11に示されるようなものである。主要な破壊は発震点（図の白丸）付近、淡路側の浅いところ、および神戸側（図で発震点から16~26km付近）のやや深いところ（深さ約15km）の3つの領域で生じている。最も大きなスリップは淡路側の浅いところで、これは野島断層での地表の右横ずれに対応していると思われる。興味深いのはこの結果では大被害を被った神戸側では淡路側に比べて小さなスリップでしかも深いところにしか起こっていないことである。この結果からでは神戸の大きな被害の説明はできない。

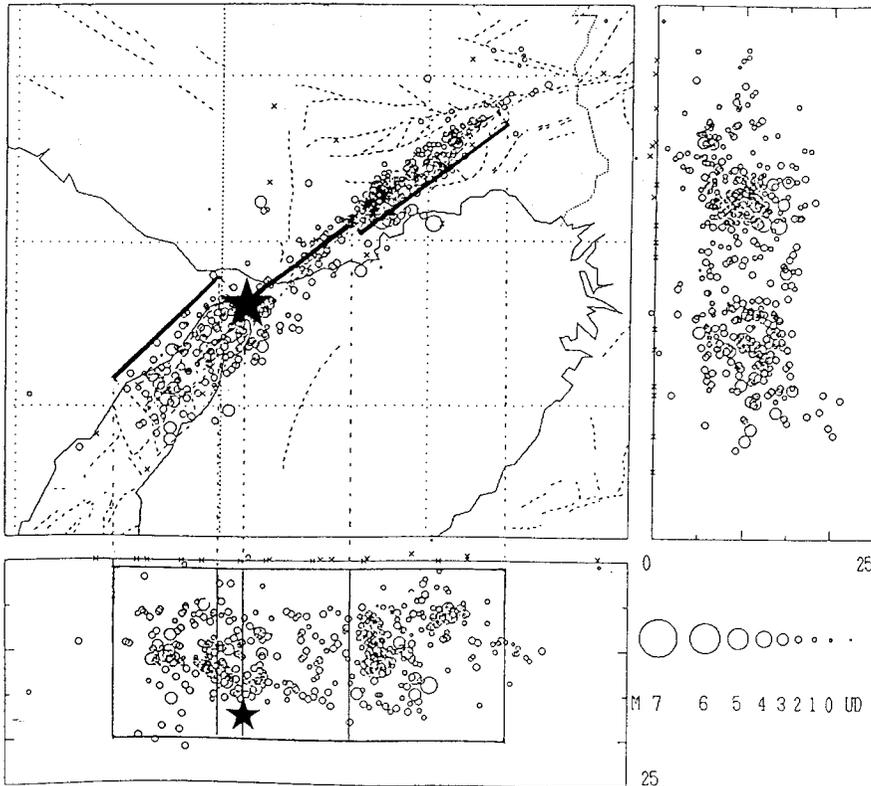


図10 波形インバージョンのためにモデル化された震源断層面
(断層は3つのセグメントからなると仮定)

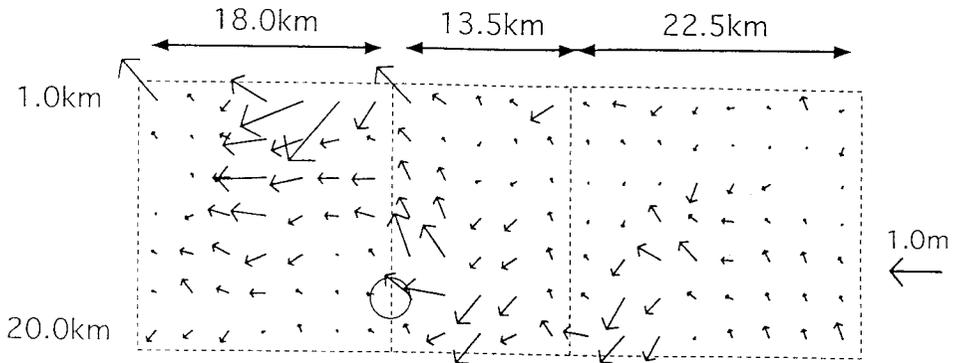


図 11 波形インバージョンにより求められた断層面内でのモーメント解放量 (スリップ・ベクトルに対応)。

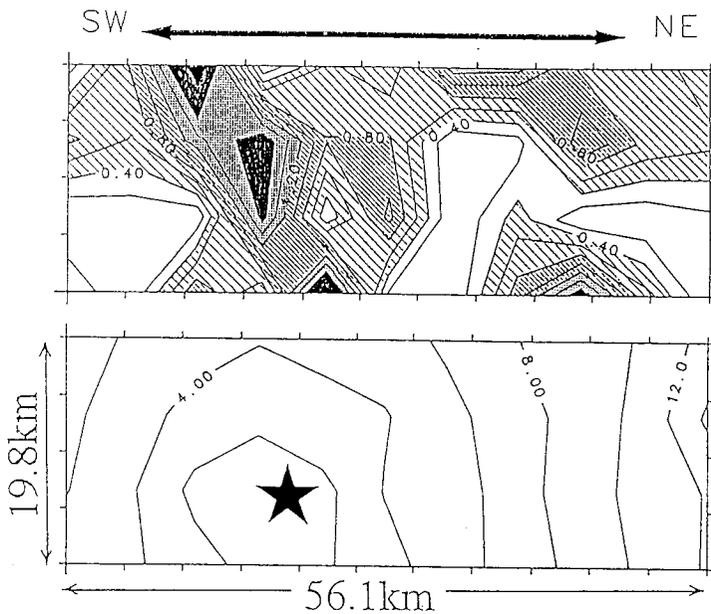


図 12 加速度波形の包絡形インバージョンによる短周期地震波生成強度分布 (上図) と破壊伝播時間分布 (下図)。

上記の波形インバージョンでは数秒よりも長周期の変位記録を用いている。地震時の被害に直接的に影響するのはより短周期の地震動である。断層面のどこで短周期の地震動が生成されたかを知るには上記の波形インバージョン法は地下構造推定の信頼性や理論計算の精度から困難である。そこで筆者等は震源近傍で得られる加速度波形の包絡波形を用いた震源インバージョン、包絡波形逆解法を開発して、断層面での短周期地震動の放射強度を求めてみた。得られた結果は図 12 に示される。強震動を構成する短周期地震動の生成域はストライク方向約 45km、深さ方向 1~19km の範囲となっている。主な短周期生成域は発震点から淡路側の浅いところにかけた領域に加えて神戸側の浅いところにもある。この神戸直下の浅いところで短周期の地震動の生成が阪神地域の大被害の源と考えられる。

5. 最大加速度・速度と震源断層の関係

この地震による強震動がこれまでの同様の規模の地震に比べて異常に大きなものであったのかどうかを調べるために、断層面からの観測点までの距離とそこで記録された最大加速度や最大速度の関係について調べてみる。

本震時に観測された各地の最大加速度と最大速度が本震の断層域からの最短距離の関数として図 13 に示される(図中□印)。最大加速度については Fukushima and Tanaka (1991)⁵⁾による最大加速度の距離減衰式との比較がなされ、最大速度については福島(1994)⁶⁾による式との比較がなされている。図から震源近傍域の 20km 以内で観測された最大加速度は経験式の標準偏差の範囲にはほぼ含まれていることがわかる。最大速度も種

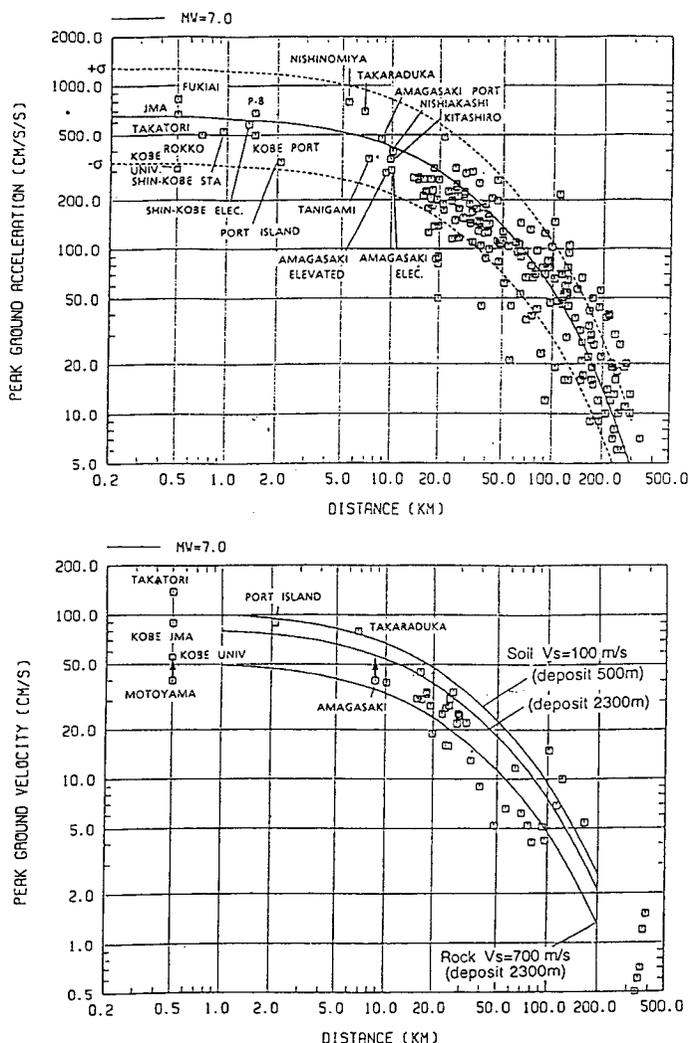


図13 上：最大加速度の距離減衰。実線は福島・田中(1992)による日本の平均的地盤におけるモーメントマグニチュード7.0の地震に対する距離減衰式。点線はその標準偏差の範囲を示す。下：最大速度の距離減衰。実線で示される経験式は地盤条件により異なる。距離は断層からの最短距離とする。

々の異なる地盤条件の経験式の範囲に入っている。これらの関係からはこの地震による揺れは特に大きいものではなくこれまでの経験的關係から予測可能な範囲に入ることがわかる。

したがって最大加速度や速度からみる限り今回の地震動というものは、もしこの地域にこの程度の断層が動くという事が予測されたならば、地震動の大きさもある程度推定できたという事がわかる。そこが今後のこういう地震防災対策を考える重要な点だと思う。

もう一つ重要な点は、今回の地震の被害は衝撃的な地震動、おおきな上下動によって引き起こされたという考えがマスコミを賑わしたが、地震動記録からみて事実どうだったかということである。上下動というものが建築や土木の構造物では設計に考慮されていない、それが為被害が起こったのではないか、今回の地震は従来のものに比べて強震動として特別に大きな上下動成分をもっていたのかをみる必要がある。

図 14 では水平動の最大加速度と上下動の最大加速度の大きさの関係を見ることができ、従来から考えられていたのは、水平の加速度は上下動の約 2 倍大きいということである。だから構造の設計には水平のことだけ考えればよいとされていた。そのため上下動というのはあまり設計に考慮されていなかったのは事実である。この図から今回の地震も上下動は大ざっぱにみると水平動が 200ガル ぐらいまでは約 2分の1の直線にそっており、今回もやはり経験的關係とよく一致するような結果となっている。しかしながら、加速度が 200ガル より大きくなったところで、上下動と水平動が振幅としてはあまり変わらなくなっている。こういうことが起こる一つの理由としては、震源が近かったため震源から発

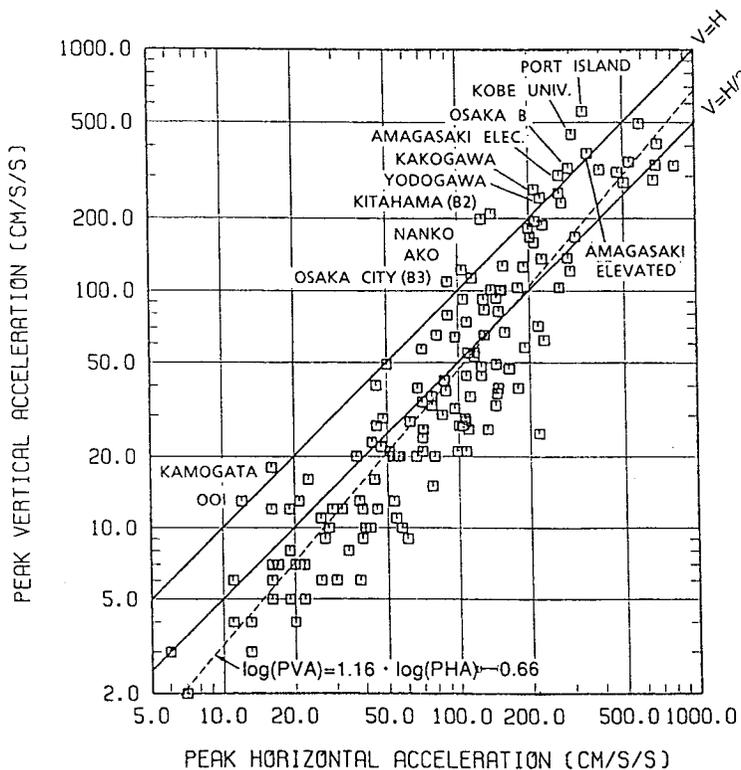


図 14 水平動の最大加速度と上下動の最大加速度の関係

生じた縦波の振幅が大きくそのため上下動が大きいという説明がある。今回の地震に関する限り震源メカニズムは右横ずれで横ずれが縦ずれより大きかったため、震源近傍で縦波よりも横波の方が卓越する。事実として図7の震源近くの海洋気象台や神戸大学の記録で震源で生成された縦波（P波の初動部の上下動）は横波（S波部分の水平動）にくらべて大変小さい。神戸大学の記録で上下動の最大振幅の部分はS波部分に相当するので、震源からは縦波でなく横波として生成・伝播してきたものである。神戸大学で上下動が水平よりも大きかったわけであるが、これは神戸大学のトンネルは埋立地盤で作られており高周波数の上下動が表層付近の乾いたやわらかな層（遅いP波速度をもつ）で増幅されたためと考えられる。

上下動の最大加速度値が水平動よりも大きかった観測点を調べてみると殆どが海岸線であるとか、川筋であるとか、埋立て地盤であるとか、非常にやわらかい地盤であることがわかる。これらの事実から上下動が大きくなったのはむしろ地盤条件によるものというふうに結論することができる。これは表層付近で地下水レベルよりも浅いところにある乾いた層がおそいP波速度をもっており、そこでのP波の重複反射で上下動が大きくなるというこれまでの研究結果とよく一致している。この場合上下動の卓越周波数は一般に5Hz以上の極めて高周波数のため必ずしも構造物に大きな影響を及ぼすことはないのであるが、構造物周辺の付属物の被害には関係すると思われる。

6. 被害集中域での地震動

本震時の断層破壊域は余震分布からこれまでの調査によりすでに活断層として知られていた帯状域に一致することはすでに述べた通りであるが、顕著な被害の集中は断層帯ではなく、断層から1~2km南側に巾1~1.5km程度の細長い帯状の地域で既存断層に並行して広がっているように見える。このような被害の集中がなぜ生じたのかを解明するため、筆者等は本震直後から東灘区付近で断層に近い丘陵部から被害集中地域を横断する南北方向のアレー状の強震動観測（図15）を行った。このネットからみて震央が北側約7~8kmにあるM4.7の地震による地震動の空間的变化が図16に示されている。断層域の北側の岩盤地域（KMC）および南側でも岩盤の極近傍域（KOB）では地震動は相対的に小さく、さらに南側の被害集中域（FKI）では地震動が大きく増巾されることがわかる。種々の到来方向の余震にたいして岩盤の観測点（KMC）に対して地盤上の観測点（KOB, NOM, FKI, ASY, FKE）の地震動のスペクトル比が図17に示されている。これらの地震動スペクトル比は表層地盤構造による地震動の増幅特性に相当するものである。FKIで最も大きく2Hz付近の卓越周波数で20倍を越え、ASYやFKEでも約10倍以上となっている。NOMは卓越周波数がより高周波3~5Hzにずれたところで20倍以上の増幅となっている。一方KOBはおなじ堆積地盤上ではあるが2~4Hzの周波数で1~3倍とあまり大きくなく5Hz以上の高周波数でのみ増幅されるようである。ここでのスペクトルのもう1つの特徴は比の値すなわち増幅度が地震により大きくばらついてみえることである。これは地震の到来方向に依存しており、表層地盤の2次元的な変化に対応していると考えられる。スペクトル比のピークの周波数、すなわち卓越周波数は、どの方向からの地震に対してもほぼ同じ周波数約2Hzとなり、比較的安定している。2~3Hzに卓越周波数をもち大きな増幅度のところと激甚被害地はよく一致していることから、地盤の地震動卓越周波数が木造住宅や中低層の

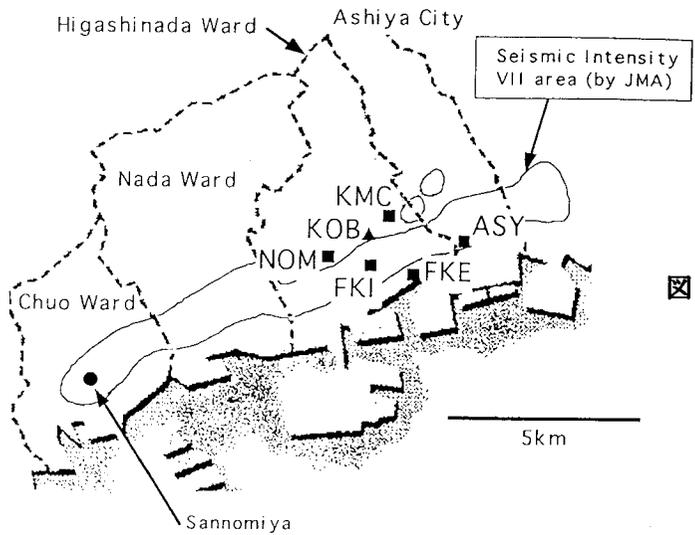


図 15 東灘区における余震観測のための水平アレー観測網

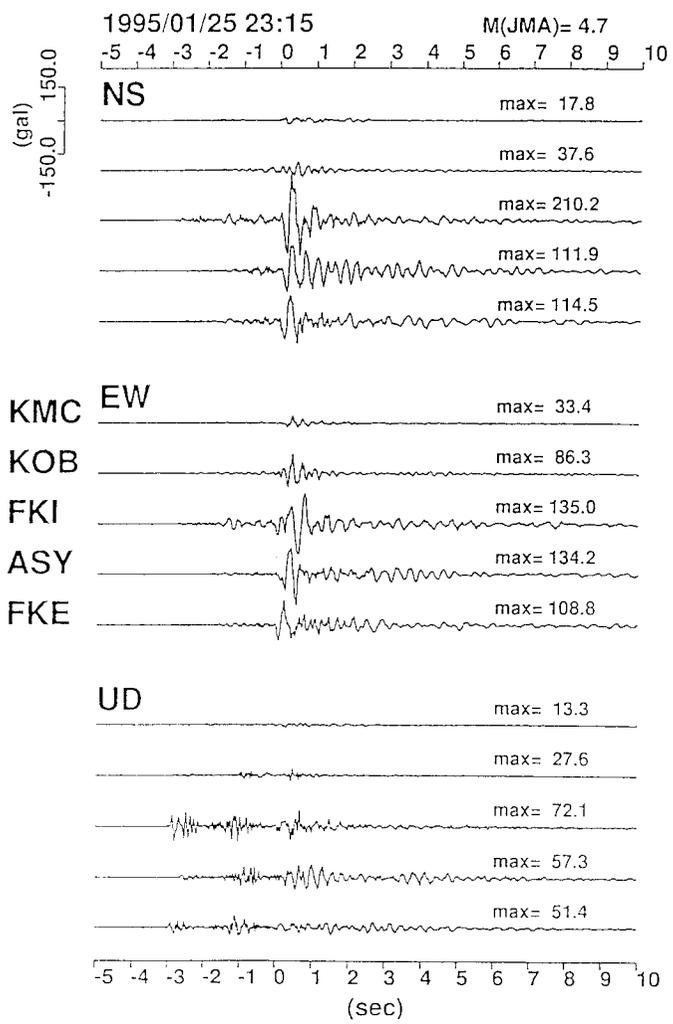


図 16 観測波形の例。地震は M4.7 (1995/01/23, 21:44) で、震源は KMC からみて北方約7km、深さは約10km。

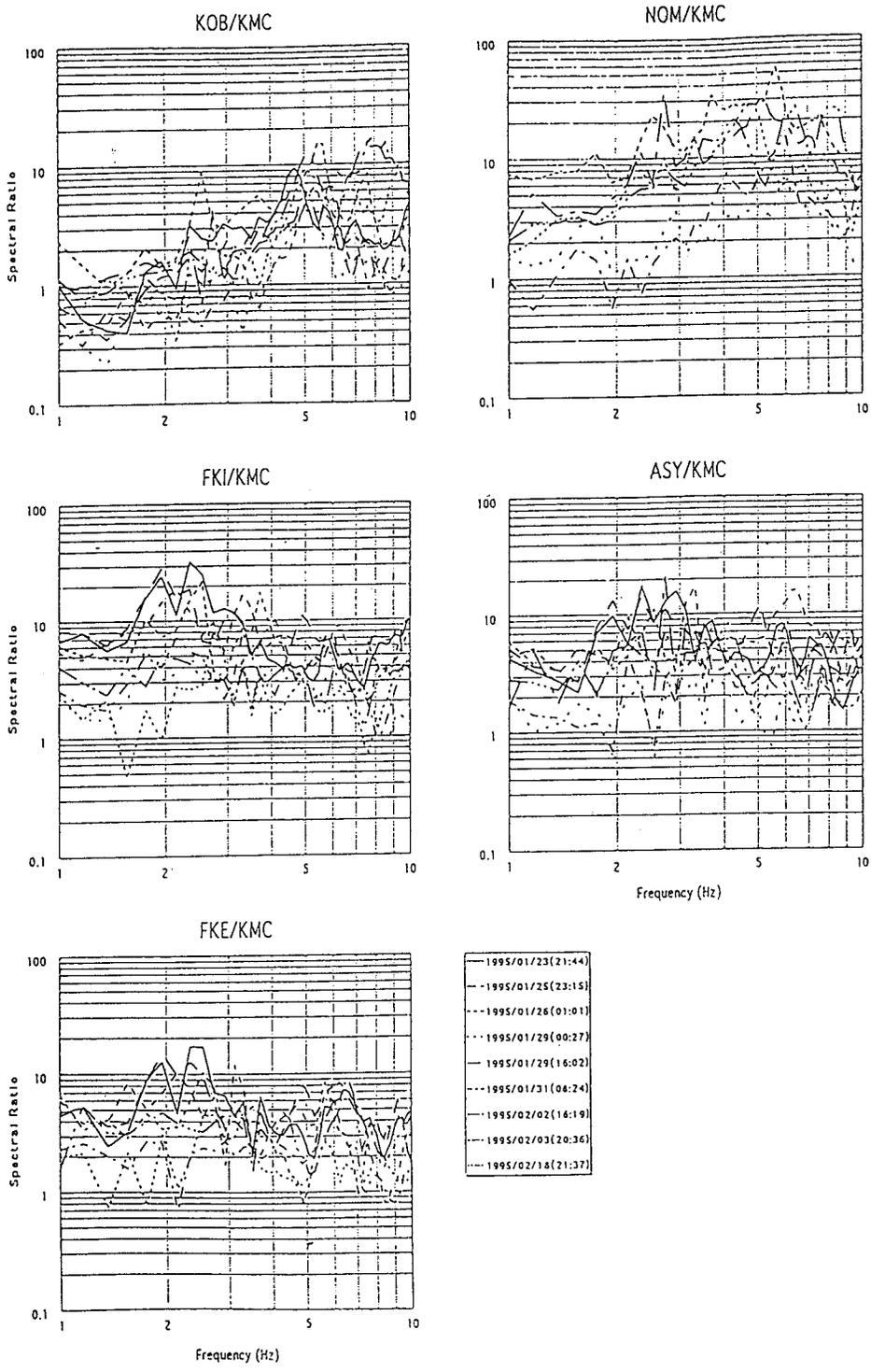


図 17 岩盤上の観測点 (KMC) に対する堆積上観測点 (KOB, NOM, FKJ, FKE, ASY) のスペクトル比。

鉄筋コンクリート建物のそれに一致しているのが被害集中の一因と考えられる。

この付近の被害集中域を横断する方向（北北西—南南東）での地下構造の変化を明らかにするため反射法探査が図 18 に示される 2 つの測線でなされた（関西地震観測研究協議会）。得られた反射波断面が図 19 a, b である。基盤が典型的な逆断層の形状を有しており南側では急激に深くなっていることがわかる。これらの反射波断面を参考にしてこの付近の地下構造を図 20 のようにモデル化し地震動の数値シミュレーション（2.5次元の差分法）を試みてみた。このような地盤構造地域に地震波が入射した場合の合成された地震動の水平変化が図 21 のようになる。ここでは基盤側の KMC から北方約 7km 深さ 15 km にある横ずれ地震（1995年 1月 25日の M4.7 地震に対応）を想定している。基盤が急激に深くなる地域で地震動のフォーカシングのような現象により地震動振幅が大きく増幅されている。図 22 に示されるように合成波形の形状は観測波形によく一致しているが、震災の帯の中にある FKI や FKE では振巾はまだ半分程度となっている。さらに表面付近に S 波速度 100 m/s 程度の軟らかい層を 10m 程度考えると振巾も一致する合成波形が得られる。

従って震度 7 の帯は基盤の形状と軟らかい表層地盤の両方を考慮した地震動の増巾効果により形成されたと考えられる。より南側の沖積層の厚い地域でなぜ被害がむしろ縮小しているように見えるかは次に述べる軟弱地盤の非線形性を考える必要があると思う。

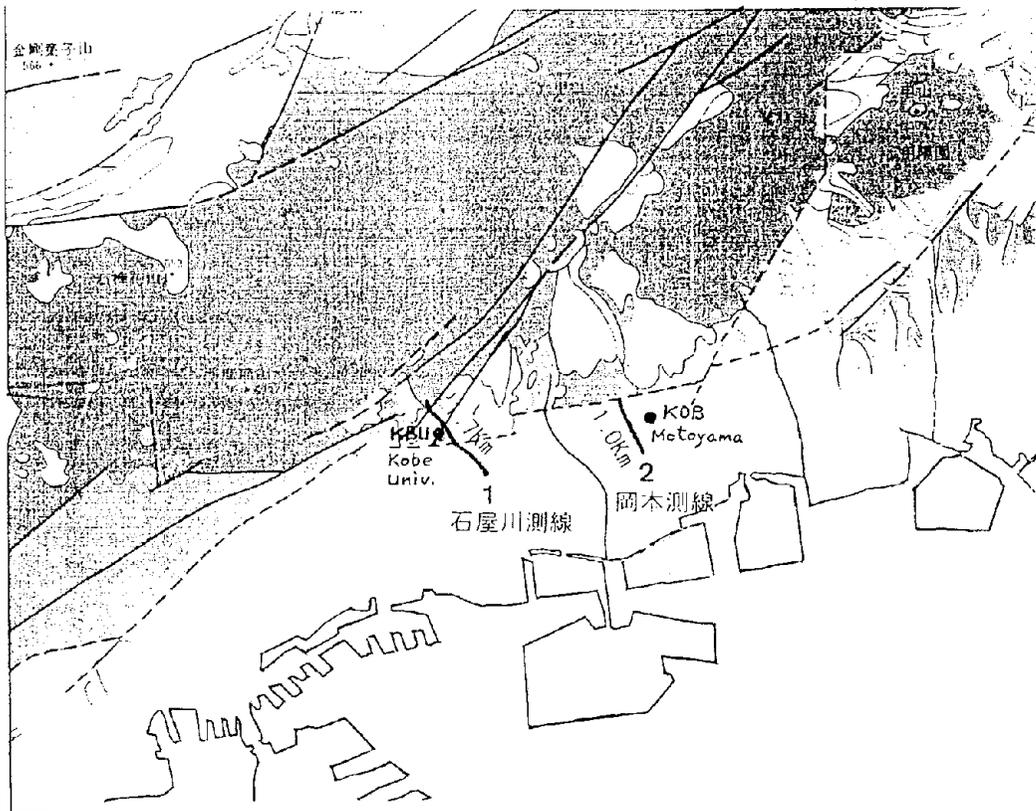
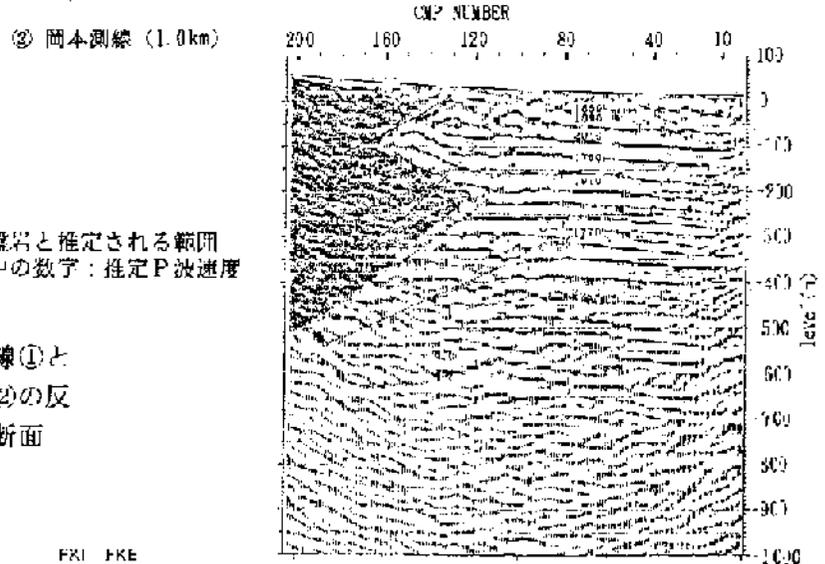
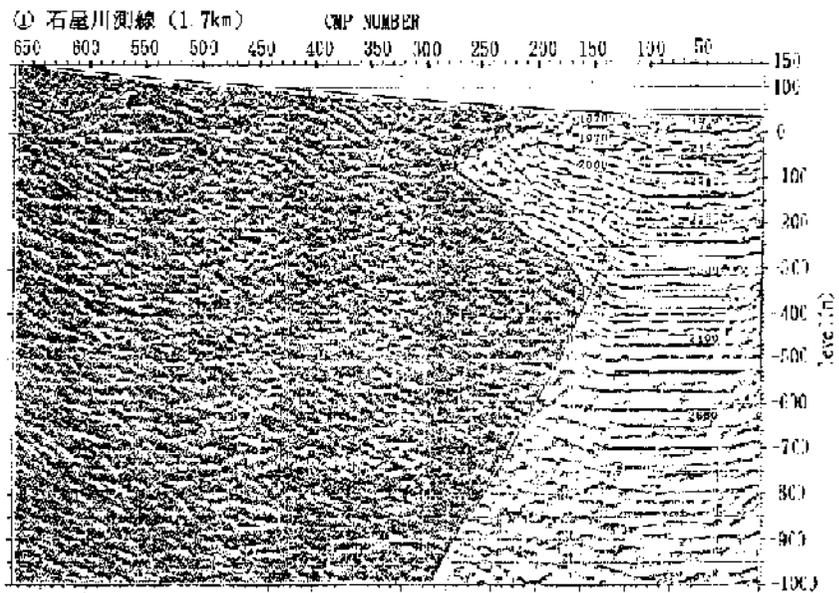


図 18 神戸市域での 2 つの反射波探査測線
1：石屋川測線。2：岡本測線。



■ 頁岩と推定される範囲
 图中的数字：推定P波速度

图 19 石屋川測線①と岡本測線②の反射波探査断面

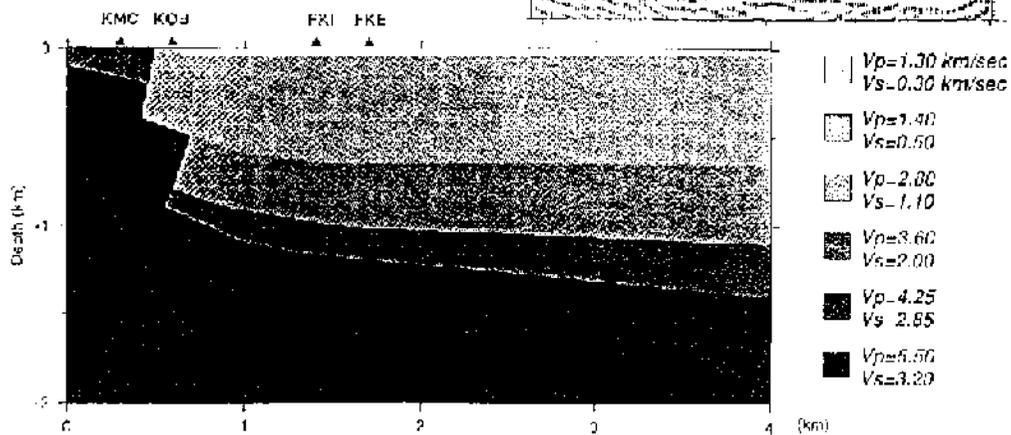


图 20 東濃付近の被害集中域を横断する方向（北北西-南南西）での地下構造モデル。最近行われた関西地震観測研究協議会による反射波探査結果を基に推定。

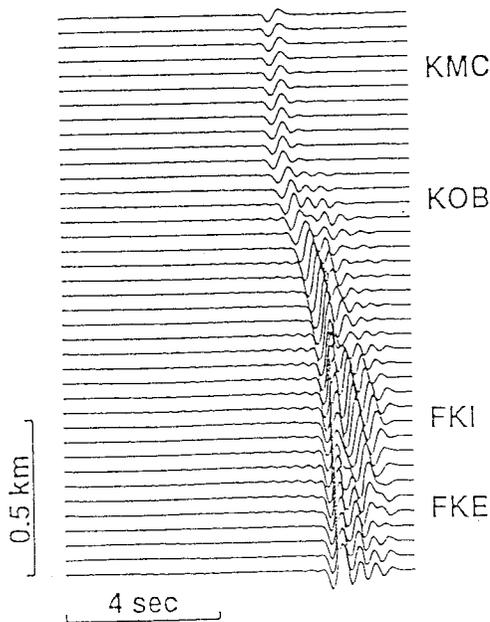


図 21 2.5次元差分法を用いて図 13の地下構造モデルに対して合成された地震動（速度波形）の空間分布。震源は KMC の左方 7km 深さ 14km に右横ズレ断層（図 8 に示される M 4.7 地震）を仮定。

1995/01/25 23:15
 VELOCITY TRANSVERSAL comp.
 BAND PASS FILTERED 0.1_2.5 Hz

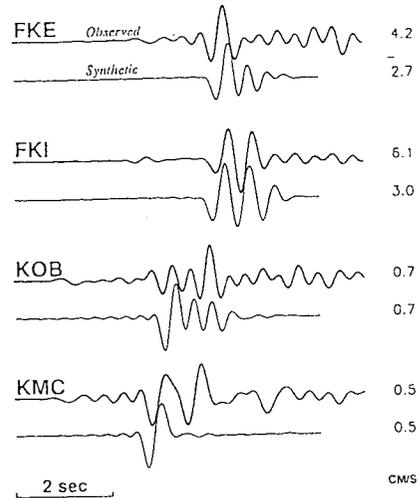


図 22 M4.7地震による観測記録と合成波形の比較。震源は図 13 の数値計算と同じとする。

7. 強震動に対する軟弱地盤の非線形挙動

今回の地震の被害の集中域は、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところであった。海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ建造物の倒壊は少なかったように思える。この問題を考えるための貴重な記録が神戸市開発局によってポートアイランドで得られている。ここでは深さ 83m、32m、16m の 3 つのボーリング孔および地表からなる鉛直アレー観測網（図 23）で本震および余震の地震動が記録されました。ポートアイランドは海を埋め立て人工的に作られた島で、ボーリング資料によると地表面近くは埋立土砂（約19m）、その下に粘土や砂からなる沖積層（深さ約 37m まで）、さらに砂礫の洪積層と続く地盤構造となっている。地震動は一般に地表面近くの軟らかい表層で増幅されるが、ここでの本震の記録を見ると図 24 に示されるように地表面近くの水平成分の地震動が地中よりも逆に小さくなっている。上下成分は地中で小さく地表近くで急に大きくなっている。図 25 では鉛直アレーの本震観測記録と1次元線形地下構造モデルを仮定して計算された合成波形と比較している。水平方向成分のシミュレーションはSH波の鉛直入射に、および垂直方向はP波の鉛直入射に対し、最も深い -83m の地点で入射波と反射波の足し合わせで表せる合成波形が観測に等しいとし、-32m、-16m、および地表での地震動が求められる。地盤が線形的に振る舞うとすると水平成分については明らかに地表のみならず -16m や -32m でも観測より大きな振幅の合成波形となる。とくに地表のNS成分の合成波形は 1300 ガル を超える大振幅となり観測の3倍以上にもなる。

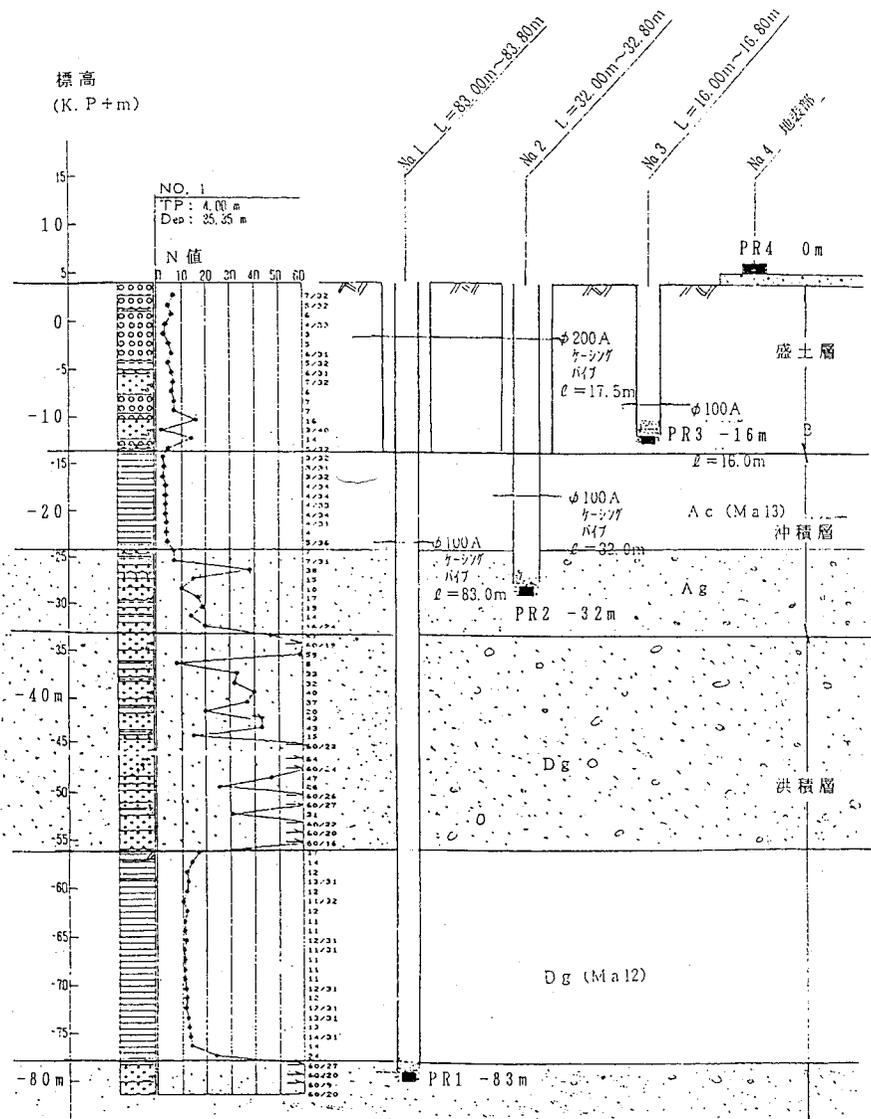


図 23 ポートアイランドでの鉛直アレー強震動観測網（神戸市開発局による）。
強震動加速度計は深さ 83m, 32m, 16m の 3つのボーリング孔と地表に設置されている。

一方余震に対する同様の計算では合成波形の振幅はほぼ観測と一致している。これは本震の強震動に対して表層地盤が強い非線形性を示したことを意味していると考えられる。

9. おわりに

日本では、兵庫県南部地震が起こるまでは、1948年に死者 3895 名にもおよぶ大被害を受けた福井地震以後、都市を直撃する大地震は起こっていない。その間新潟、日本海中部、北海道南西部地震などの大地震は起こっているのであるが、これらはいずれも震源は海にあるため、津波による被害はあったが地震動による被害は極めて少なかった。見かけ上の被害の少なさは日本が防災先進国になったという錯覚を抱かせたきたように思える。

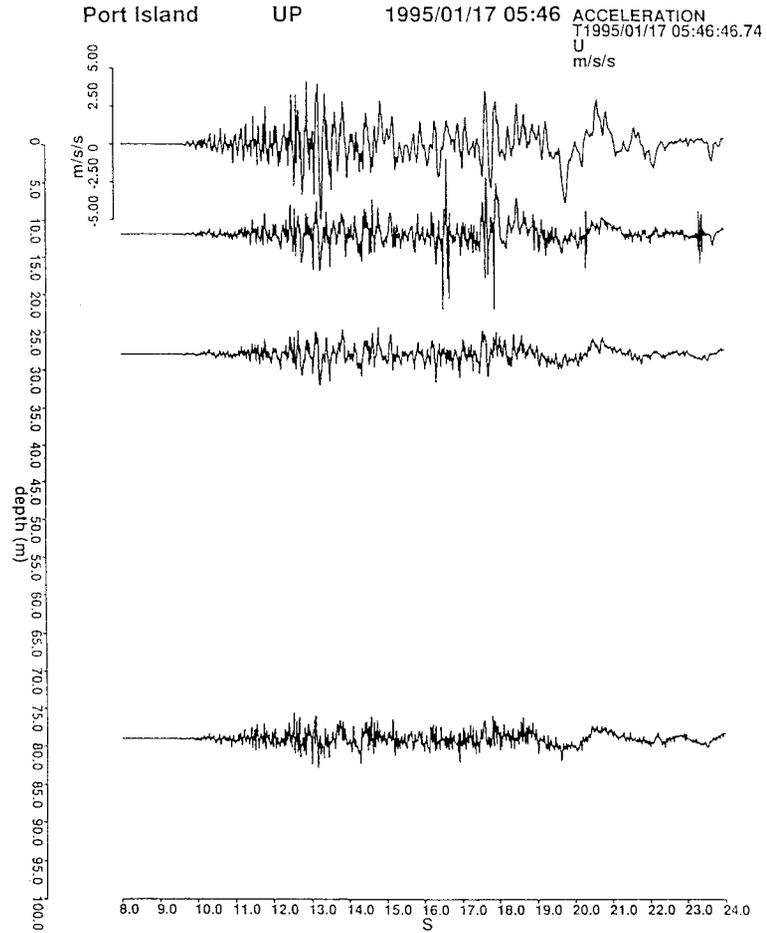
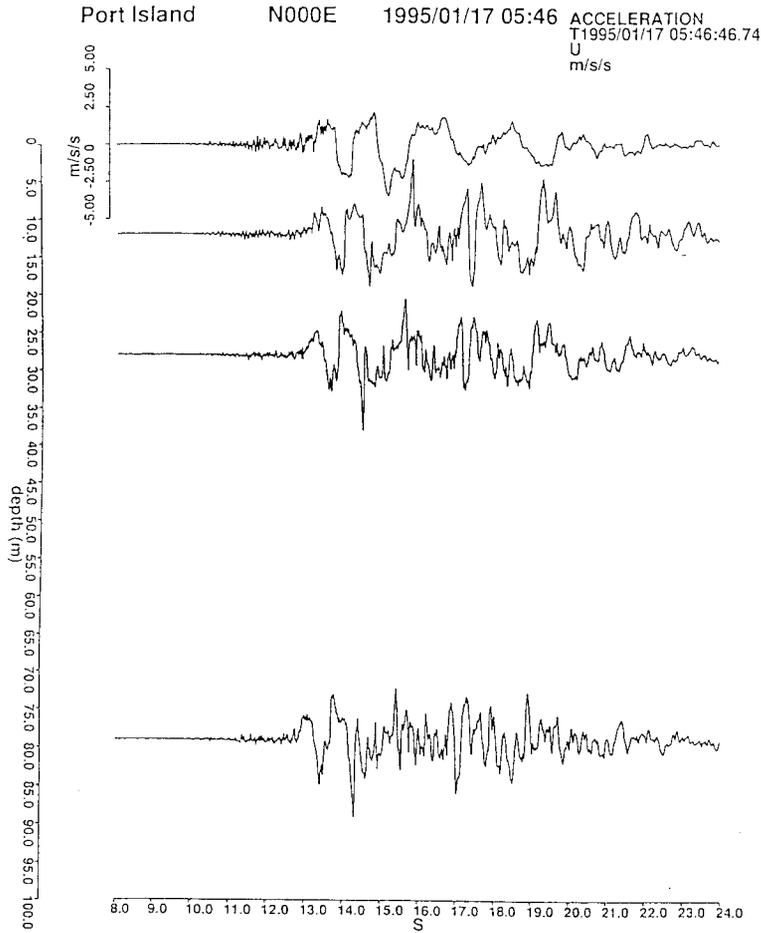
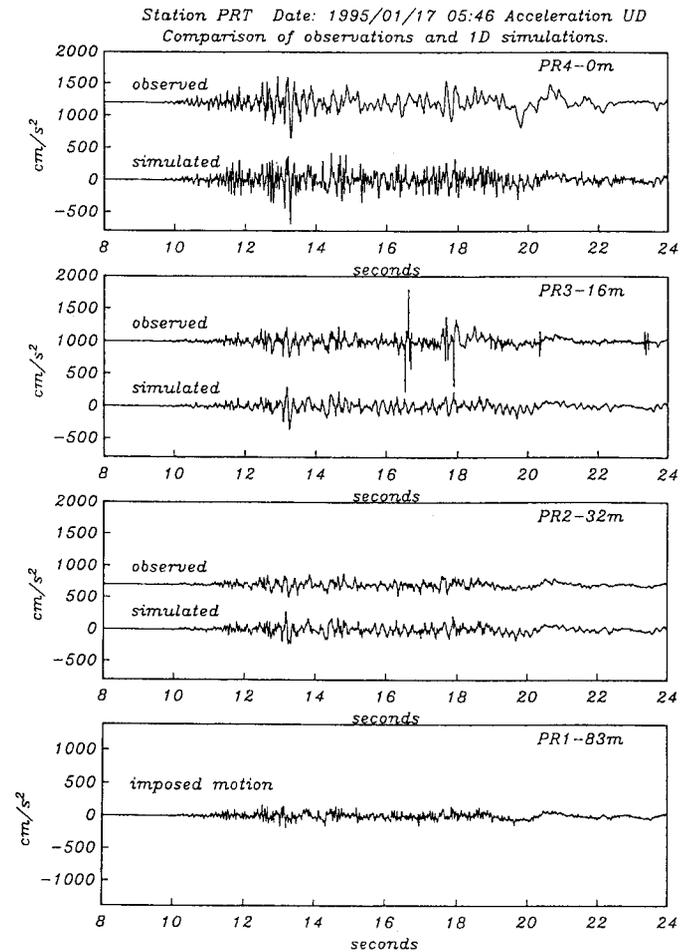
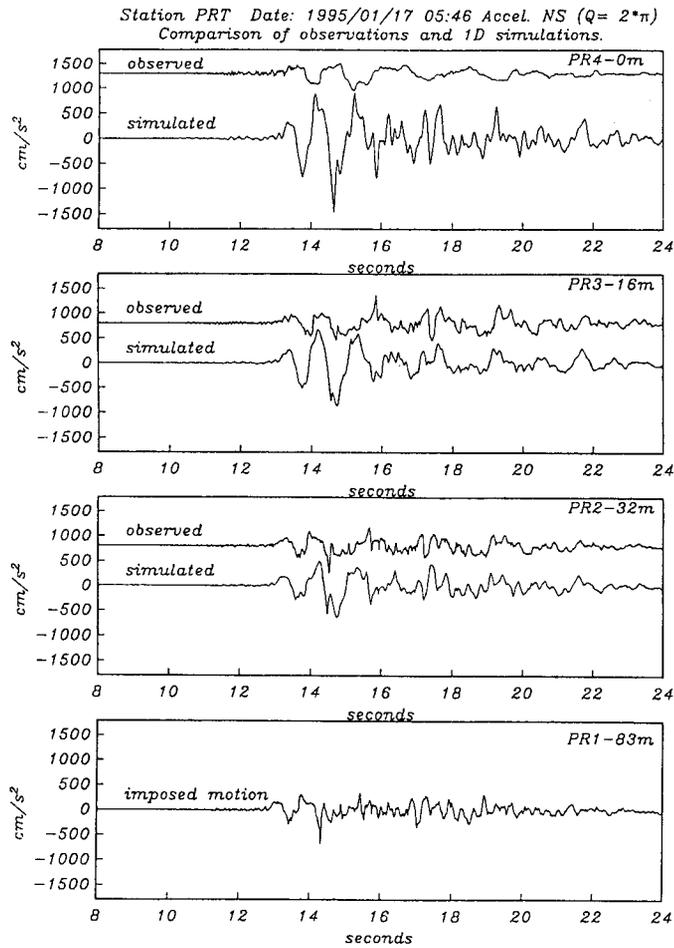


図 24 神戸市ポートアイランドの鉛直アレー観測網によって異なった深さ（83m, 32m, 16m, 0m）で観測された水平動および上下動の加速度波形記録。



・ 図 25 神戸市ポートアイランドの鉛直アレー観測網で観測波形（加速度）と水平成層で線形応答を仮定した地盤モデルによる合成波形の比較。
左：水平NS成分、右：上下動（UD）成分。

事実として今回の地震による強震動の大きさはこれまでのマグニチュード7クラスの地震に対する経験式によく一致している。歴史的には近畿の内陸部では四国沖に繰り返し発生する巨大地震に連動して活動期にはマグニチュード7クラスの地震が頻発している。これらのことは今回のような強震動は近畿における地震防災を考えると当然予想しておくべきものであったといえる。

本震及び余震の強震動記録を用いて波形インバージョンなどの解析により推定された本震の断層破壊域は必ずしも地震動被害の集中したところとは一致していない。余震の地震動観測から被害地と地震動が大きく増幅される地域とはよく一致しているので、地震防災対策において地盤条件の調査は最重要課題と考えられる。もう1つの問題は今回の地震の被害の集中域が、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところであり、海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ構造物の倒壊が少なかったことである。表層地盤の強震動に対する非線形性が地震動災害の観点からは構造物にむしろ有利に働くことは防災対策を考える上で興味深いことである。

近代都市の地震に対する脆弱性は1989年のロマプリエタ地震や1994年のノースリッジ地震の災害で日本でもよく知られていた。阪神・淡路大震災は日本の都市はアメリカよりも耐震性能が優れているというような考えは誤りであることを明らかにした。このような大震災の可能性は当然日本のどの主要都市でも極めて高いと考えられる。このような大災害を繰り返さないために強震動予測に基づいた都市の耐震安全性の点検を行っていく必要がある。

謝 辞

本論のなかで、種々の機関の不断の努力で得られた兵庫県南部地震の震源域近傍の記録を使わせて頂いた。特に神戸市開発局、関西地震観測研究協議会、気象庁はデジタル記録をいち早く提供して頂いたことに記して感謝の意を表します。京都大学防災研究所地震予知研究センターからは余震分布など多くの資料を提供して頂き、清水建設株式会社和泉研究室による東灘区での貴重な余震記録を解析に使わせて頂いた。京都大学防災研究所地震動部門の皆様には多大の協力を得て本稿をまとめることができたことを感謝します。

参考文献

- 1) 茂木清夫：「地震—その本性を探る—」，東京大学出版会，1981.
- 2) 石川有三：特集 阪神大震災：地震メカニズム—兵庫県南部地震の特徴，日本の科学者，pp. 5-11，1995.
- 3) 飯高隆他：平成7年兵庫県南部地震の余震活動，平成6年度文部省科学研究費（総合研究A，代表：藤原悌三）研究成果報告書，pp. 98-102，1995.
- 4) 根本康雄他：私信，1995.
- 5) Fukushima, Y. and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 757-783, 1990.
- 6) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力時震動の経験的予測，ORI 研究報告 93-7，1994.

近畿地方の地震観測体制

小泉 尚嗣（京都大学防災研究所）

近畿地方の中・北部における大学による地震観測の現状と兵庫県南部地震についての観測結果を簡単に説明する¹⁾。

図1に近畿中・北部の京都大学による定常的な地震観測点と活断層を示す。地震観測点はWKM（和歌山）とABU（阿武山）を除いて無人観測点であり、データは電話回線を通じてリアルタイムで宇治にある京都大学防災研究所附属地震予知研究センターに送られて解析・処理される。このように電話回線を利用してデータが送れる観測点をテレメーター観測点と呼ぶ。ちなみに、大学の地震予知研究予算の大部分をこの電話回線料が占める。生石崎（OZK）・WKM・HBR（榛原）は東京大学の観測点で、UGK（宇賀溪）は名古屋大学の観測点である。これらの大学の地震観測点は一般にマグニチュード3以下の非常に小さな地震（微小地震、たいてい無感である）も検知できるようになっており微小地震観測点と呼ばれる。他方、気象庁の地震観測点は主にM3クラス以上の地震（たいてい有感）を検知できる体制になっていて、現状では相補的なシステムになっている。

図2には、これらの定常地震観測点（図では既設テレメーター観測点）に加えて、今回

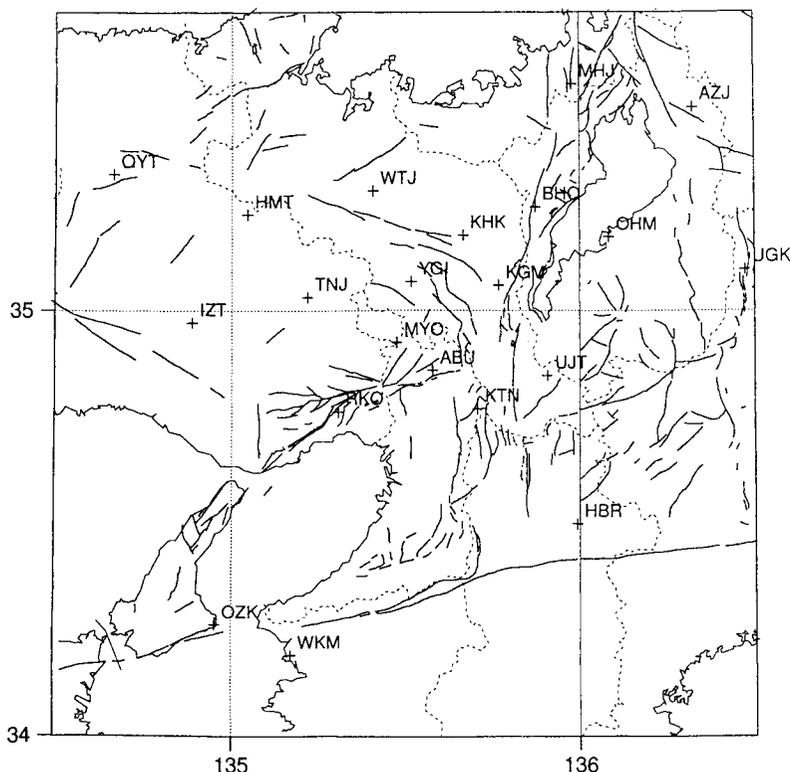


図1 近畿中・北部の京都大学による定常的な地震観測点（+）と活断層

の兵庫県南部地震後に臨時に設置された地震観測点（図では臨時テレメーター観測点）を示してある。図のように、東京大学・京都大学・名古屋大学・北海道大学・東北大学・弘前大学・九州大学・鹿児島大学の8つの大学（=地震予知研究に参加している主な大学）の協力によって約30の臨時観測点が設けられ、詳細な余震観測がなされた。現在では、さしあたって大きな余震の発生する確率が低くなったのと、予算上の制約もあって、下線の4つの臨時観測点以外は観測は停止されている。

図3は、兵庫県南部地震の本震と本震前に発生した2つの地震のメカニズム解が示されている。なお、本震が起こる前日に同地域で発生した地震は図3で示された以外にも2つ発生している。メカニズム解というのは、震源を囲む球を考えてその上半分（=上半球）のどの部分が最初の縦揺れで押される（黒い影の部分）か引かれるか（白い部分）を示したものである（場合によっては下半球で示される場合もある）。黒い部分と白い部分を分ける境界線（大円）が2本見えるが、このうちの1本が断層面を示し、残りの1本が断層面に直交する面を表す。後に示す余震の分布から、北東-南西方向を示す境界線が、断層面を示すと考えることができる。同じようなメカニズムで発生した地震は、当然のことながら似たメカニズム解を示す。図3に示した本震以外の2つの地震は、本震と場所的にも時間的にもすぐ近くで発生した上に、本震のメカニズム解とよく似ていることから、前震（本震発生の前触れの地震）と考えられている。

図4は図1に示した常設の地震観測点の記録によって求められた1995年1月17日の本震直後から1月20日までの本震発生域周辺の地震分布である。淡路島の北部から神戸側に向けて南西-北東方向に地震が並んでいて、これは兵庫県南部地震の余震と考えられ

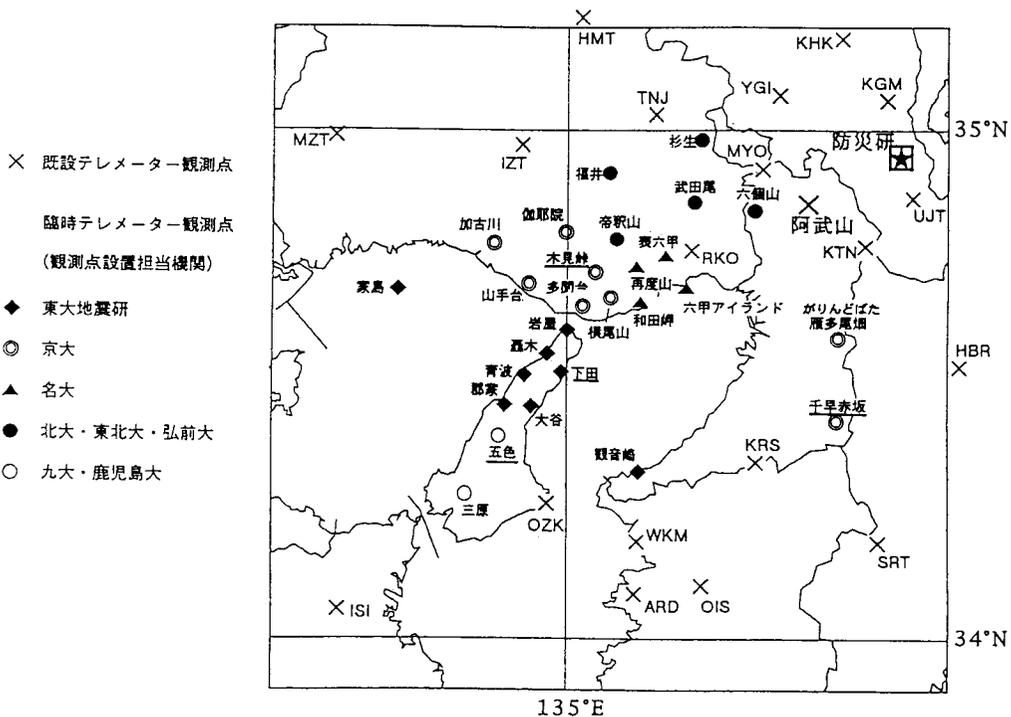


図2 大学合同観測による地震観測点配置図

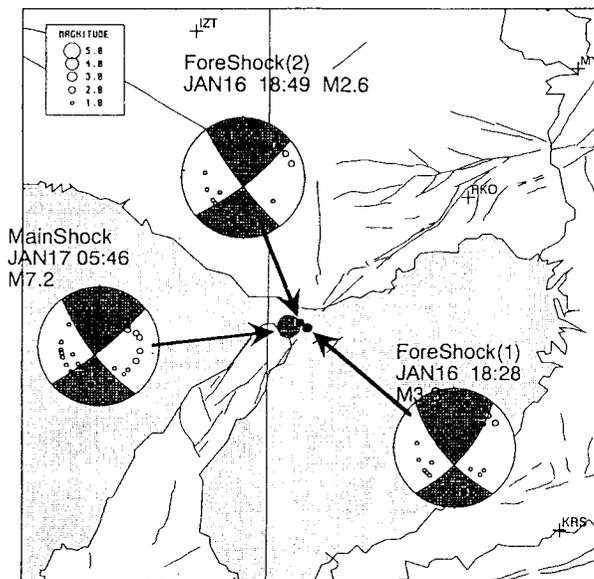


図3 兵庫県南部地震の本震（Main Shock）と本震前に発生した2つの地震（ForeShock(1)とFore Shock(2)）のメカニズム解

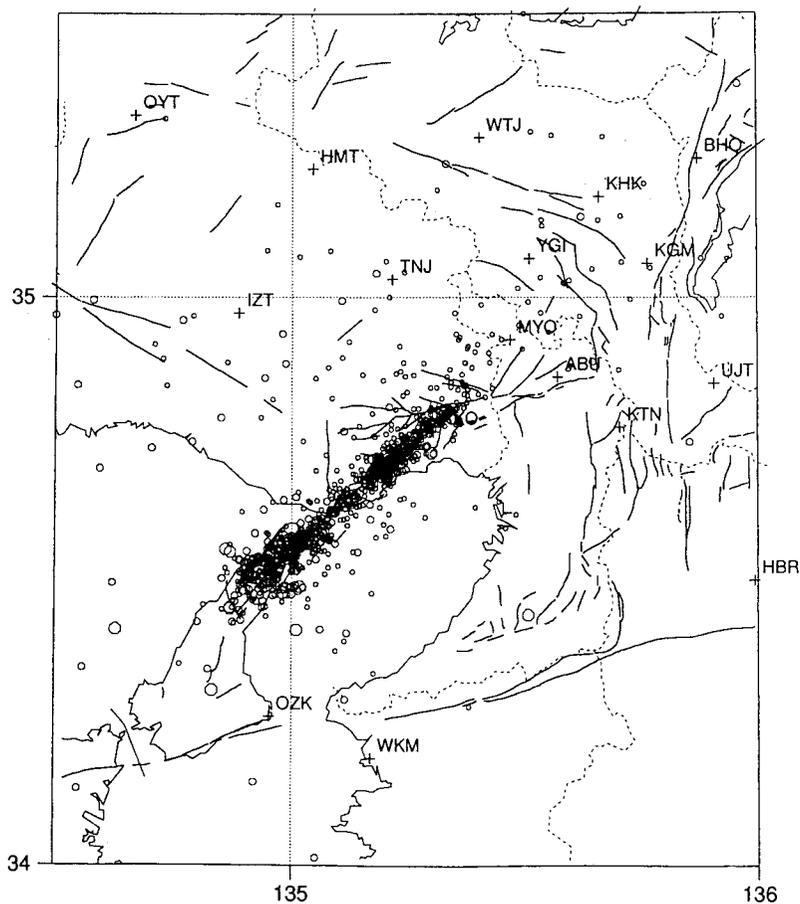


図4 1995年1月17日から1月20日までの本震発生域周辺の地震分布

る。余震は、本震の断層面（破壊面）の割れのこりの部分が割れ続けているものと考えられ、余震の分布が本震の断層面を示すと考えることができる。これらの余震分布や地震波の解析等から、本震の破壊は明石海峡直下の約 17 km で始まり（この破壊の開始点が震源）、南西方向（淡路島側）と北東方向（神戸側）にそれが伝播していったと考えられている。

図5は1時間毎の余震回数の推移である。これらの地震のほとんどは、人体に感じない地震（無感地震）である。1月17日の本震発生直後は1時間あたり150回も発生していた余震が、多少の盛衰は伴いながらも順調に減少していき、2月3日の時点では、1時間あたり10回以下になっていることがわかる。このような余震の順調な減少が、さしあたって大きな余震が発生する確率は低くなったという地震予知連絡会の解釈の有力な論拠となった。

図5 1時間毎の余震回数の推移
（阿武山観測点（ABU）
での回数測定）

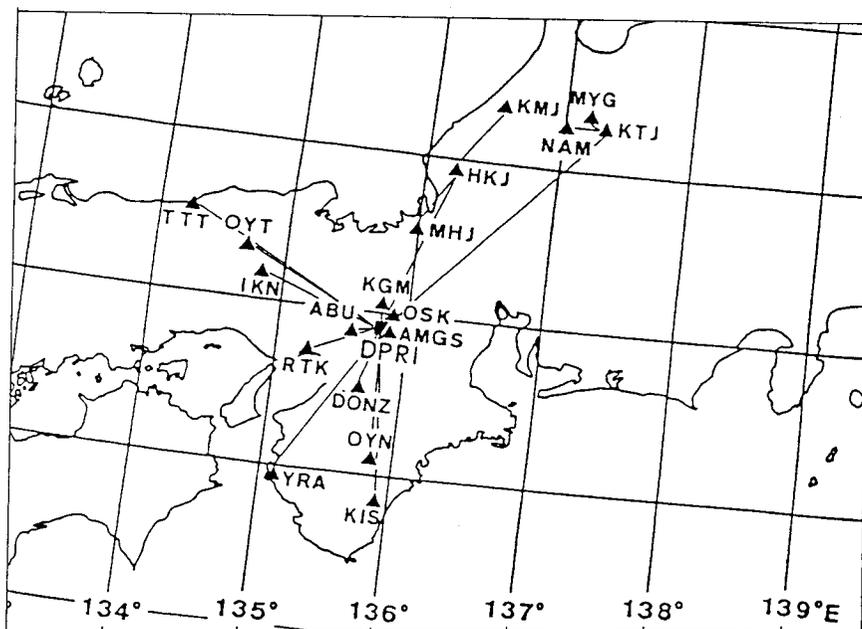
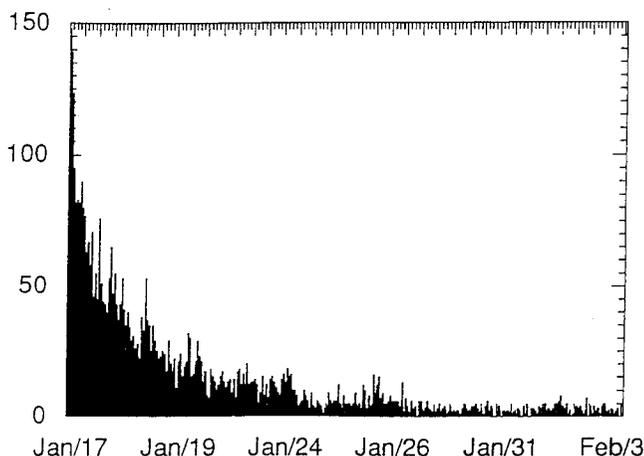


図6 近畿地方周辺の地殻変動観測トンネルの分布図。
直線はデータの（電話回線による）流れを示す。

図6は近畿地方周辺の地殻変動（地表面の変形）を観測するトンネルの分布図である。地震発生直前には、岩盤に大きな力が加わっているため、地面がわずかに伸縮したり傾いたりすることがあり得る。それを検出しようというのが地殻変動観測である。非常に微小な変化を測定しなくてはならないから、気温変化による地面の伸縮は測定の邪魔になる。したがって、温度変化の少ないトンネルの中で観測することとなる。これらの地殻変動観測トンネルもほとんどが無人であり、データは電話回線で防災研究所の地震予知研究センターに送られてくる。

図7は兵庫県南部地震後に置かれた磁力の観測点である。この他に琵琶湖や岡山県周辺で地電位（地面の電位）の観測も行われている。岩盤に力が加わると岩石の電気的性質や磁氣的性質が変化する。それによる磁力や地電位の変化を検出するのがこの観測の目的である。地震予知に成功しているといわれるギリシャのVAN法は地電位測定にもとづいた地震予知法で、日本でも兵庫県南部地震後に、本格的な導入が検討されている。しかし、日本はギリシャとは違って、電気や磁気のノイズが非常に多いのが難点で、VAN法の導入にあたってはこの点の克服が課題だろう。また、兵庫県南部地震では、地震の前兆現象として電磁波の異常がいくつか報告されたが、この研究に当たっても日本における電磁波ノイズの克服が焦点になると思われる。

図8は地下水や地下ガスの観測点である。上述のように地震前に地面が伸縮すれば、地下水や地下ガスにも変化があらわれえる。それを検出するための観測が、地下水・地下ガス観測である。これらのデータは、一部を除いては、現地においた記録計に収録され、定期的（1～2ヶ月に1回）に我々がデータを回収に行っている。地下水や地下ガス観測は、地震や地殻変動観測に比べて、本格的な観測が始まって日が浅く、人員や予算が不十分なのが悩みの種であるが、兵庫県南部地震では、地震前後に多数の地下水異常が見いだされた。

図9は、そのような地下水の前兆現象と思われるものの一例である。六甲高尾の地殻変動観測トンネル内の湧水量（Discharge）は、雨の影響を受けると共に、遠方の地震に対しても敏感に反応して、地震発生後にスパイク状（急増して急減する）変化を示す。図を見

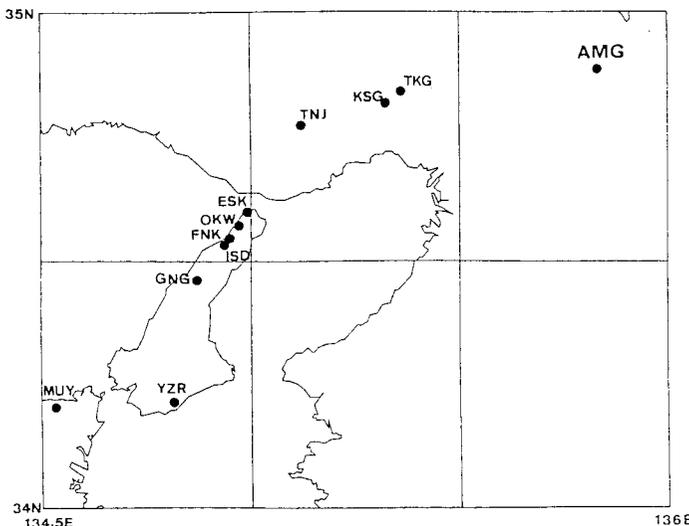


図7 大学合同観測による
磁力観測点（●）

ると湧水量（図8の上図）は1993年8月中旬から増加し同年11月頃から減少に転じていたのが、1994年11月から増加をし始めている。1993年8月からの湧水量の増加は、1993年の7月から10月頃までの過剰な雨量（図8の中図）に対応したものと考えることができる。しかし、1993年11月からの湧水量の増加は、雨量では説明できず、兵庫県

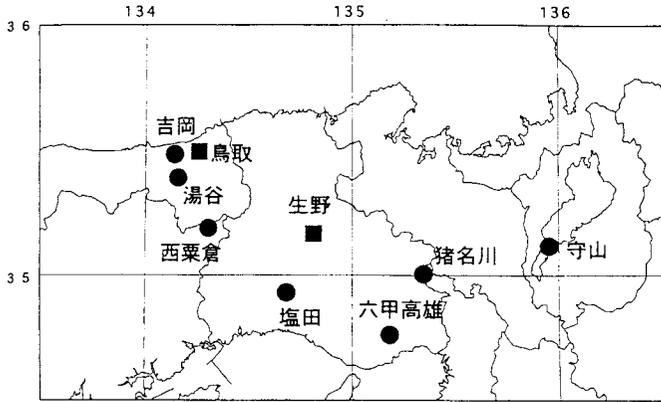


図8 京都大学による地下水(●)
・地下ガス(■)の観測点

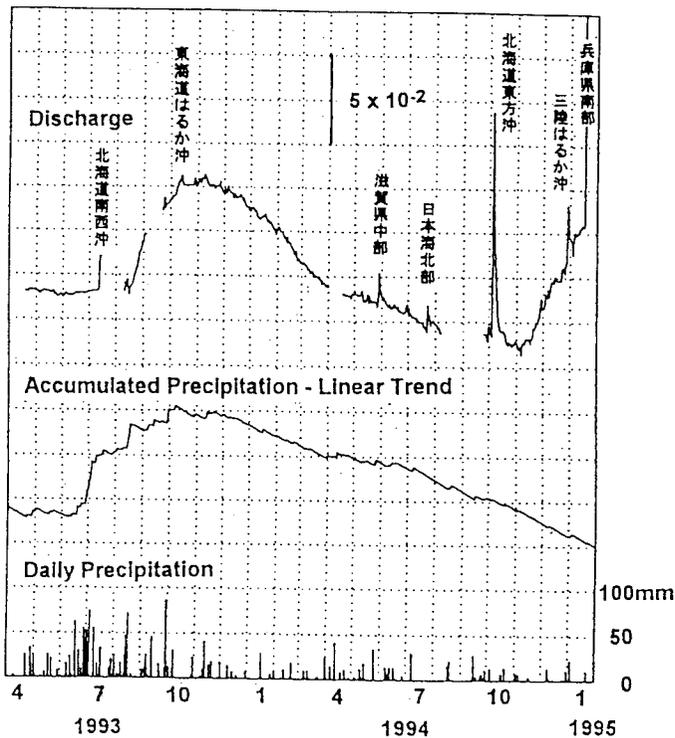


図9 上：六甲高雄の地殻変動観測トンネル内の湧水量(Discharge)の変化。
平均的な値からのずれで示してある。「 5×10^{-2} 」とは5%のこと。
地震後に湧水量変化があった地震名が記されている。
中：平均的な降雨量からのずれ
下：日雨量

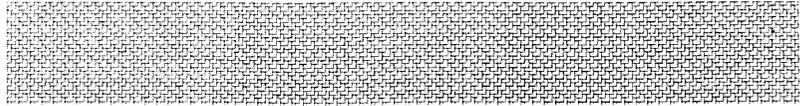
南部地震の前兆の可能性が高い。

このように大学グループによって、近畿地方中・北部でも多彩な観測がなされている。しかし、内陸の大地震（マグニチュード7クラス）の、1つの活断層における再来周期は短くても約1000年と言われており、それに比べて観測期間（日本の国家事業として地震予知計画が始まって約30年）はあまりにも短い。不十分な観測期間であっても、観測から得られた情報をどのように生かして地震防災に役立てていくかが今後の課題であろう。

参考文献

- 1) 京都大学防災研究所地震予知研究センター：1995年1月17日兵庫県南部地震（M7.2）観測結果速報，地震予知研究センター研究速報，第6号，1995，pp. 1-42.

地震と地形



被害地域と地形

池田 碩（奈良大学）

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分に淡路島の北端で発生した兵庫県南部地震は、マグニチュード7.2・震度7の激震であった。その被害は、阪神間の市街を襲った都市直下型地震となったため極めて大きく、死者5,500名・全壊家屋105,000戸を超す状況に至った。

今回の震災による被害地域は、淡路島西岸から六甲山地の南麓へと带状に延び、さらには六甲山地の東方へと分散しつつ広がった（図1）。このように被害地域が、震源地から带状に拡大していることは、地塁として形成された淡路島や六甲山地の地形の配置と地塁を形成してきた断層の走向に起因していることは明らかである。しかも今回は地震の規模がきわめて大きく、被害も甚大であったため、一見激甚被災地域はひとまとめに見られがちだが、そう単純ではない。

すなわち、この带状地間のすべてが均一な地形ではなく、また被害も同様な状況を示したわけではない。そこで、地形と被害とのかかわりを把握するため、地域性を明らかにしてみることにした。まず、被災地域は地形や被害の広がり方など種々な特徴から、大きく「A) 淡路島北部、B) 六甲山地南麓・東麓、C) 淀川下流低地」に分けられる。

A) の淡路島北部地区の場合は、島の西岸に沿って約10kmの長さで地表に断層変位が

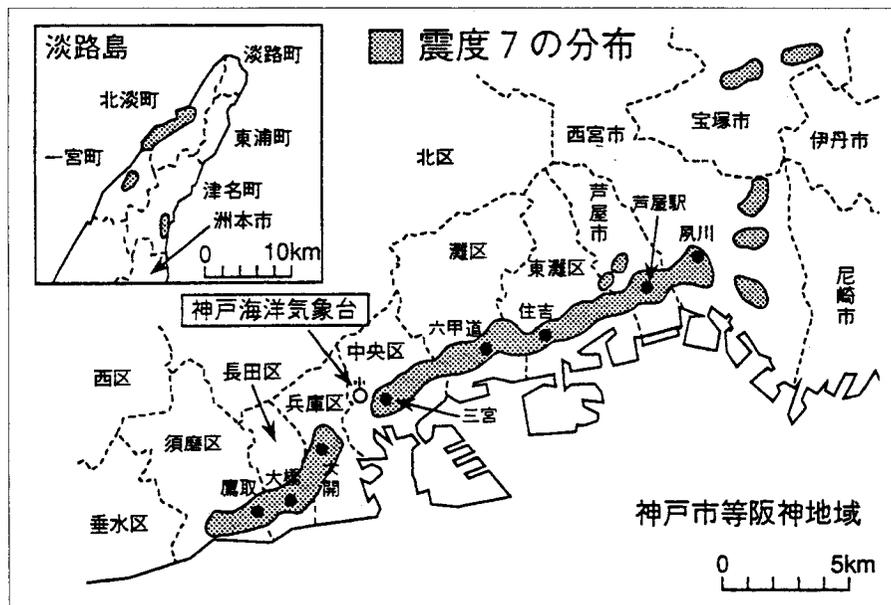


図1 現地調査による震度VIIの分布（気象庁発表）

現れた。垂直で最大 1.3 m、水平には最大 1.7 m の右ヨコズレを示し、断層地形の典型的な様相を出現し、被害もこの活断層に沿って生じた。この状況は仮に断層を地層の骨折現象にたとえれば「単純骨折」の状態であり、大変理解しやすい。この型式と類似するのは、1964 年アラスカのアンカレジ市街を襲った直下型地震と同タイプである。

B) 六甲山地の山麓低地の被害地域は、今震災の被害中心地域に当たるが、断層変位が地表には明瞭な形では現れなかった。これを淡路島の場合と同様にたとえれば、大変理解しにくい「複雑骨折」の状態であり、この型式と類似するのは 1994 年にロサンゼルス近郊で発生し、高架のハイウェイを落下させるなどの被害が生じたノースリッジ地震のタイプである。

C) の淀川下流低地部での被害は、震源地から遠く離れているだけではなく、断層とも関係していない地域での被害である。すなわち、地震波が沖積地や埋立地の軟弱な地盤に影響したため生じた被害である。この型式は、サンアンドレアス断層中で発生した 1989 年のロマプリエタ地震で、その被害は何と震源地から約 100 km も北方に位置するサンフランシスコ市や対岸のオークランド地域の沖積地・埋立地で生じ、液状化でライフラインが破壊され、ハイウェイの落下や火災に見舞われた状況と類似する。

2. 被災地域の地形と被害の特徴

A)、B)、C)、それぞれの地域内での地形と被害の特徴を分析しておこう (図 2)

A) 淡路島北部の場合

島の西岸で地表に出現した活断層を中心に被害が発生したが、被害の特徴として、活断層の位置が山麓よりであったため集落の直上とはわずかにずれている。また、たまたま変位した断層の直上に建てられていた民家で破壊されなかったものがあつたが、それは建物が今震災では一般に被害が軽微であったとされる鉄筋コンクリート建てや新建材による住宅であったことに留意しておく必要がある。被害が大きかった野島・富島・平林などの集落や街は、断層より若干離れ、海岸近くの河口沿いの低地や三角州上に位置していたが、地形的に軟弱地盤であるため被害が大きくなった地域である。しかし、この地域も活断層からわずかに 400m 以内しか離れていなく、基本的には変位した断層の活動による被害そのものである。

B) 六甲山地南麓低地の場合

被害地域および被害規模共に大きく、今回の震災の中心被害地域であった。ここでは、さらにこの地域内の特徴から、「B)-イ：西部の須磨区・長田区・兵庫区周辺、B)-ロ：中央部の中央区・灘区・東灘区・芦屋市周辺、B)-ハ：東部の西宮市・宝塚市周辺」の 3 地域に分けられる。

B)-イ 地域

六甲地壘山地の西端部で、山地の南麓を境してきた主断層である須磨断層が海に抜ける場所であり、その南側には並走するように会下山断層が位置している。この断層の南側には山地から流下してくる河川も少なく、新湊川(旧荊藻川)や妙法寺川の緩扇状地がみられるくらいで山麓まで沖積低地が接している。この低地域は完全に市街地化されており、今震災では被害が特に著しく、火災も多発した地域となってしまった。

一方、この沖積低地のうち、南部の和田岬にかけての部分ではやや被害が減少するが、ここは旧海岸に沿って砂堆が次々と沖合いへ向かって拡大してきた地域であるため、砂質地盤の海性平野が形成されてきた地域であり、地震による振動が若干小さかったことが考えられる。

またこの地域の北西部と北東部では、市街地が山側へと会下山断層を越え、一部は須磨断層をも越えており、被害が断層上で生じているのも特徴のひとつである。

B)-ロ 地域

この地域は、常に今回の震災の代表地域のように取り扱われてきた。しかしそれは被害地域全体の中央部に位置しているためであり、被害の特徴をすべてここで代表してしまうことはできない。

ここでの被害は、山麓に続く大阪層群からなる丘陵や高中位段丘からなる台地と旧期の扇状地には少なく、後氷期以降に形成された新期の扇状地とそれに続く三角州性低地に被害が集中した。しかし、このうち海岸近くになると被害はやや減少してくる。すなわちこの地域の被害は、全体としてかなり山地寄りに位置しつつ山麓とほぼ平行に延びているのが特徴である。

B)-ハ 地域

ここからは、西方から連なってきた六甲山地から離れ武庫川が形成した沖積平野となり、被害地域が拡散していくところである。このため被害の集中地帯も、ここに至ると一旦途切れて島状に北部・中部・南部に分散して延びていく。また、後述する「超震度7の島」の分布も少なくなると共に小さくなっていく。これは活断層による変位が B)-ロ まででほぼ終了し、この地域は地震波の延長域だから

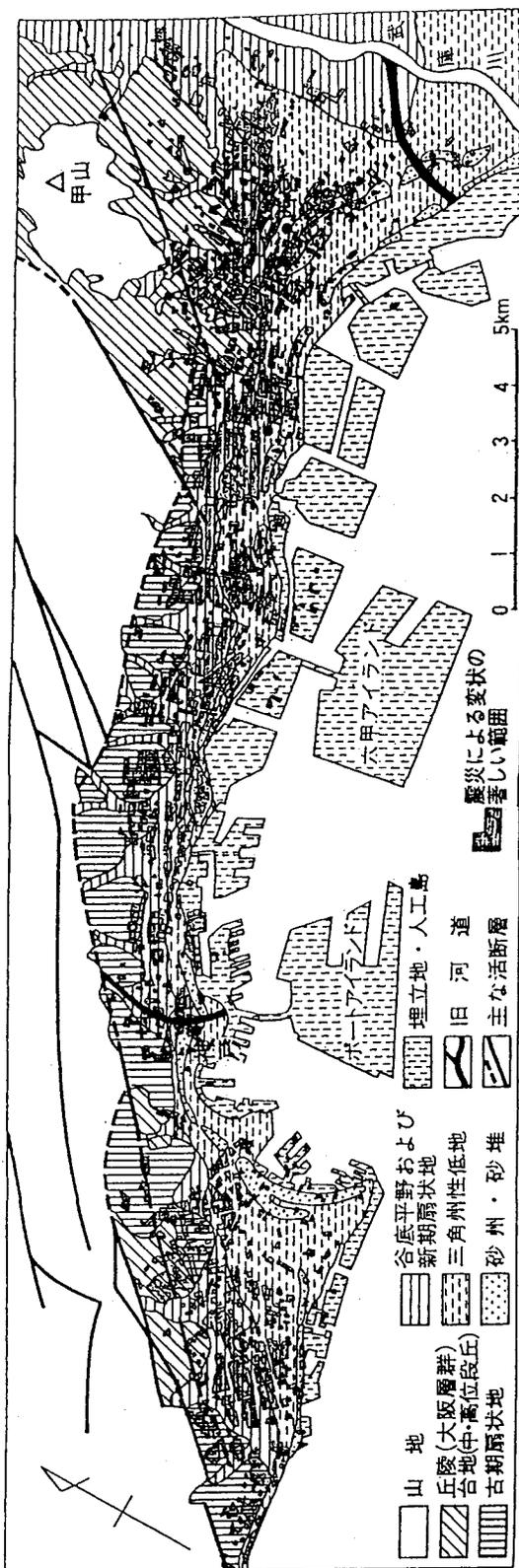


図2 阪神・淡路大震災被災状況-その1 (地形分類:池田碩、被災状況:建設省国土地理院)

ではないかと思われる。

ただし、さらに北部へ分散して延びる島状被害地域は北摂山麓に位置する有馬高槻構造線とのかかわりも考えられる。この点では変動規模は小さいとはいえ六甲南麓の断層沿いと同様な状況下に位置しているようであるが、断層の活動ではなく地震波の影響だとすると、大阪の上町台地西麓や京都の西山山麓での被害と対応できよう。

C) 淀川下流低地部の場合

ここでは液状化に伴う淀川堤防の破壊が大きな問題となった。ここは明治中期に淀川下流の河道がつけ替えられたところであり、明治 18 年測量の 2 万分の 1 地形図と現在の地形図を比較してみれば、その後の変化の様子がよくわかる。

今回の震災では、堤防が各所で液状化を伴って沈下し側方の低地へと流動した。この堤防の築堤は、河道つけ替えが決定された後、河床となる部分を掘り下げ、そこで生じた土を盛り上げて堤防としたものであった。

それゆえ、堤防の下も堤防自体も、軟弱な土層であったことに留意しておかねばならない。築堤後、改修・改良工事が行われていたとはいえ、基本的には堤防そのものの構築物質と工法自体に元々問題があったのである。

さらに周辺の低地での液状化現象による被害も大きかった。この一帯は、明治の地形図で見れば、まさにデルタ最下流部の極めて低湿な軟弱地盤からなる地域で、その中の微高地上に加島・姫島・四貫島などの島地名がつく集落が点在しているのがわかる。しかし現在では低湿地域を含め、すき間なく建造物におおわれてしまっている。このため市街の中で液状化現象が顕著に現われた地域となった。

そのような地域の事例として、旧海岸より 4 km 程上流に位置する神崎川下流の中州の佃地区の状況をあげておこう。この一帯では民家の液状化による被害が著しい。その中には中州の北端に高層のマンションも建てられている。このビル自体には被害はないが、その周囲は液状化を伴ない地盤が沈下したため、建物は 20cm ほど浮き上がり階段がずれてしまっている。マンション前の公園の中央部には数本の地割れが走り噴砂の列ができるという状況であった。

3. 帯状の被害集中地域の出現とその要因についての解釈

3.1 被害集中地域の出現

地震発生後、地図上に被害の分布地域として最初に公表されたのは、気象庁発表の震度 7 に当たる帯状地域を地図上に示したものであった（図 1）。

その後も、家屋の被害地域、鉄筋コンクリート建造物の被害地域、死亡者の分布地域など、地図上に帯状の広がりとして報告されてきた。そのうちに、このような被害集中地域を「震災の帯」と称されるようになった。

しかし、その後国土地理院や民間企業の国際航業（株）、中央開発（株）、さらに日本都市計画学会関西支部、日本建築学会近畿支部、日本地図学会等から精力的な調査にもとづく被害の広がりや密度を示す被害状況図が報告されてきた。

その結果、現在では被害の詳細な分布状況や全体像が把握されるようになった。

これらの被害状況図のうち、中央開発（株）からは震度階による被害分類図が作成され

た。これまでは家屋の倒壊率が 30 % 以上の段階である震度7を最高値として表現されてきたが、中央開発（株）の図ではさらに詳細な現地調査の結果、倒壊家屋率が 50 % 以上のところの多いことから、新たに超震度7段階を設定し、その分布地域を図示した。

この結果、これまでの震度7の被害分布地域では带状に広がっていた被害集中地域も、超震度7の分布地域になると、その間にあって多数の島状地が分布することがわかってきた。しかも超震度7の島は带状地中の一部の地域に集中するのではなく、全体にわたって分散しつつ分布しており、これらの島状の分布地をもとに現河道、旧河道との関係やその他の地形条件についての分析が可能となった。

3.2 地形分類図との対比

今回の震災で、震災の帯と称される被害集中地域の状況を、山麓から海岸にかけて作成した地形分類図と中央開発（株）の震度階分布図とを重ね合わせて図3に示し、再検討してみた。

被害集中地帯を示す震度7に当たる部分は、山麓とほぼ平行して带状に延びている。この部分を地形からみると、新期の扇状地を中心にしてそれより山麓側に位置している旧期の扇状地の末端や下部に位置する三角州性低地の部分を一部含んで広がっていることがわかる。

すなわち、被害が集中している地域の帯は、山麓と平行してはいるが、山麓に位置する山地と低地を境させてきた断層からはやや低地側へと離れている。一方、軟弱層が最も厚くなる三角州性低地のうちでも海岸よりは山地側に寄った部分に当たっている。しかもこの帯に当たる部分では、一部帯の延長上に位置する大阪層群の丘陵や段丘地形面上をも被災地と

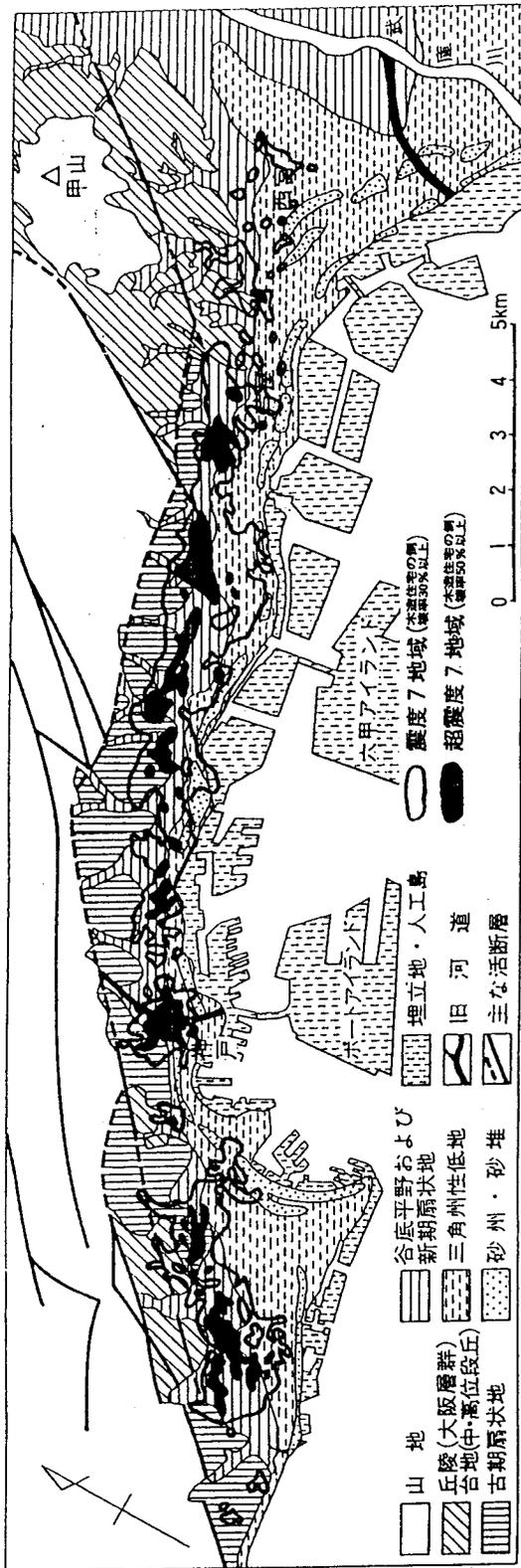


図3 阪神・淡路大震災被災状況-その2 (地形分類:池田碩、被災状況:中央開発株式会社)

化し、それを越えてさらに延長していく。これらのことから推測すると、震災の帯に当たる部分は、基本的には形成の新しい軟弱地盤のところではあるが、全体に山地側寄りであり、しかも一部には地形区分の単位を越えて延びていることが注目される。

さらに被害集中地帯の中であって、多数の島状の分布を示しながら連なる超震度7の島の列についての考察も重要である。特徴としては、

1. 島状地の形態が現在の河道に沿って発達していないものが多い。
2. 島状地の形態は円形か帯の延びる方向に楕円形を示していること。
3. 河間地や後背湿地に多いこと。
4. しかも震災の帯の西端から東端にまで、途中途切れることなく分布していること。
5. それゆえ、島状地だけを連ねても带状地となること。

などがあげられる。これらのことからみても、被害が集中する带状地の形成については、地形分類だけでは解釈できず、やはり震災の帯と斜交する断層・伏在断層の活動や地震波の影響が強いかかわっているものと思われる。

4. さいごに

兵庫県南部地震による被災地域と地形の特徴から得られた教訓を整理しておく。

今回の震災は、淡路島北端を震源地として発生した震度7の激震であった。その被害地域は震源地点を境に南西部の野島断層沿いと、北東方の六甲山地南麓の断層に沿って発生した。この断層活動は山地側が隆起していることから、淡路島・六甲山地の両地塁を形成してきたこれまでの構造運動を継続したものとみなしてよい。

ところで、今回の地震の活動状況を巨視的にみれば、地塁周辺に沿うひと連りの断層の活動と、それに伴う被害ではあったが、詳細にみればその内容をいちがいにひとまとめにできるほど単純ではなかった。

すなわち、地域的にも断層そのものの活動とのかかわりから、「A)断層が地震断層として地表に現われた淡路島、B)断層変位が地表に現われなかった六甲山地南麓、C)地震波による振動の延長域としての淀川下流低地域」と、大きく3地域に分けられ、それぞれの地域での違いを明らかにした。

次に被害が集中する地域は、淡路島の場合断層上かそれに近い沖積低地で生じたが、六甲山地南麓の場合共通して延びている震災の帯は、山地と低地を境させた山麓に位置する断層線よりは低地側であるが、軟弱な地盤が最も厚くなる海岸線よりは山地寄りに位置し、しかも山地とほぼ平行して带状に出現した。

つまり、大きくは地塁を形成してきた断層にほぼ平行した被害域であり、さらにそれは軟弱な地盤の地域で強まった。さらに、震災の帯の中に位置している超震度7の島の分布からは、これらの島と現在の河道とはかかわりが少ないものも多く、河間地に多い。やはり今回のような大地震と震災とのかかわりには、地下の地質構造と地震波の伝わり方によって被害に地域差が生じているようかなり複雑な要素をはらんでおり、表層の地質や地形分類だけでは解釈しにくい点も多いことがわかった。だが、表層の地質や地形調査によって地表での断層の位置を確認し活動度を明らかにしておくこと、さらに沖積層の広がり方や形成過程の特徴をつかんでおくことなどは基本的作業にかわりない。人間活動の舞台は地表を中心に展開されていることから地表でのデータは重要であり、これに今回の大地

震を経験して得た種々の知識を加えながら将来の震災へ向けての対応を検討し、防災マップの作成等に努めておかねばならない。

参考資料

- 1) 気象庁：現地調査による震度7分布図，1995.
- 2) 池田碩：六甲山地山麓の地形分類と震度7（激震）分布地域，阪神大地震と地形災害所収，地理40巻4号，1995.
- 3) 国土地理院：兵庫県南部地震災害現況図，1:10,000，1995.
- 4) 中央開発株式会社：阪神大震災マップ，1:25,000，同災害調査報告書，1995.
- 5) 国際航業株式会社：阪神大震災の被災マップ，1:10,000，1995.
- 6) 日本地図学会：阪神大震災地図，1:21,000，日地出版株式会社，1995.
- 7) 日本都市計画学会関西支部・日本建築学会近畿支部：被災度別建物分布状況図集，1:5,000，1:10,000，1995.

六甲山地の自然斜面崩壊災害

奥西一夫（京都大学防災研究所）

直下型地震は直下の断層の活動と関連して起こるが、継続して活動度の高い断層は山地と低地、および断層崖斜面を作り出し、地震に伴う斜面災害、土砂災害が不可避となる。六甲地域はその典型例である。六甲山系は過去 100年程にわたる豪雨災害と復旧の歴史を持ち、今後起こり得る激しい土砂流動を伴う洪水に対してかなりの preparedness を有している。しかし風化花崗岩特有の地盤の脆弱さのため、斜面崩壊と土石流が起こりやすく、都市域の山地部分へのスプロール化の影響もあって、斜面崩壊に起因する土砂災害が繰り返され、しかも次第に都市災害的な色彩を強めてきている。兵庫県南部地震による六甲山地の斜面崩壊は自然斜面に関しては幸い人命災害にいたらず、阪神淡路大震災と呼ばれる災害の中ではごく限られた位置を占めているにすぎないが、上記の観点から、今後の阪神地区の防災のためにも、今後直下型地震が起こり得る他地域の防災のためにも、今回六甲山地で起こった斜面崩壊の特性を解明することは重要だと考えられる。

なおこの小文は文部省科学研究費による「平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する研究」（代表者藤原悌三）の報告書の一部として書いたものである（一部修正）。

1. 調査の内容

斜面崩壊の発生状況は空中写真の観察の観察によってかなり詳しく把握することが出来る。しかし今回の斜面崩壊の多くは旧崩壊地の滑落面上の薄い風化土の崩落であったり、崩れ残った滑落崖上部の土石の崩落であったり、落石型であったり、変位量の少ないスランプであったりするため、空中写真の観察だけでは今回の地震によって起こったかどうかを判定できない。

そこで、斜面崩壊が集中的に起こったいくつかの地域、特に地形や表土、露岩の状態などにおいて代表的な地域を選んで現地踏査を行い、その結果と空中写真の観察結果を付き合わせて、空中写真判読マニュアルを作成し、これに基づいて六甲山地全域の斜面崩壊を、空中写真判読によって統一的行った。空中写真の判読ミスを避けるため、神戸大学工学部沖村 孝助教授の判読結果を同氏のご厚意によって参考にした。現地踏査を行った主要な地域は下記の通りである。

- 六甲山地北東端地域（宝塚温泉～岩倉山～逆瀬川上流部）
- 裏六甲地域のバッドランド地域（座頭谷、蓬萊峡、白水峡）
- 苦楽園周辺の山麓と山地
- 芦屋川流域とロックガーデン
- 住吉台～渦森台～鶴甲地域
- 六甲山上道路沿い
- 住吉川流域

2. 斜面崩壊の種類

兵庫県南部地震による六甲山地の斜面崩壊は大まかに、スランプを伴う円弧すべり、表層すべり（岩塊の崩壊を含む）、土砂崩落および落石の4つに分類できる。このように分類された斜面崩壊の発生位置を図1に示す。但し、記号が小さい斜面崩壊よりも大きいので、2~3個の同じ種類の斜面崩壊をひとつの記号にまとめている場合もある。

第1の種類はスランピングを伴う円弧すべりである。直下型地震に際しては大規模ないし巨大規模の斜面崩壊が起こることがあり、例えば1984年長野県西部地震によって御嶽山南斜面で約3,400万 m^3 の大規模崩壊が起こり、その崩土は伝上川~王滝川に沿って13kmの距離を流下した。このような斜面崩壊は円弧状のすべり面に沿うスランピングを伴うのが普通である。兵庫県南部地震によって引き起こされた斜面崩壊の土量はせいぜい10万 m^3 オーダーであり、スランピングを伴うものは7個所に過ぎない。そのため、その発生原因はかなり個別的な条件に関係すると思われるが、盛土斜面での発生がやや目立つ。この種類の斜面崩壊には、仁川百合野町や宝塚ゴルフクラブ内の斜面崩壊のように、スランプ土塊のかなりの部分が2次的に崩壊・流動したケースもあるが、西岡本の地すべりのように、クラックの発生とわずかのスランピングを生じただけに終わっているケースもある。鶴甲団地の老人ホーム脇の斜面崩壊はややそれに似ているが、側方滑落崖に相当する部分の表層が大面積で崩壊している。しかしこの種類の多くは、スランプ土塊のごく一部が2次的に崩壊したに過ぎない。

第2の種類は表層崩壊、土砂崩れ、またはdebris slideと呼ばれるものである。この種類の崩壊は多くの場合、過去に起こった豪雨による斜面崩壊の跡地で起こっている。そして前回の崩壊後に滑落崖で露出した風化花崗岩がその後大気にさらされることによって急速に風化し、今回滑落したものと考えられる。便宜上、この類型には近い過去に崩壊していない斜面の崩壊や、岩塊の座屈による岩石斜面の表層崩壊を含んでいる。この種類の斜面崩壊は六甲山地南面の比較的標高の低い部分に多い。これは人工的な盛土斜面を除けば、風化帯が比較的厚いか、風化した岩塊が地面に露出しているゾーンに該当する。

第3の種類は土砂崩落である。これは第2の種類と区別しがたい場合が多々あるが、概念的にはすべり破壊によるのではなく、崩落物質が他の斜面構成要素から引っ張り破壊によって切り放された形で崩れ、すべると言うよりも落下したものである。第2の種類と第3の種類は、現地踏査では明瞭に区別することができるが、空中写真の判読では明確に区別することが困難なことが多い。そのため、空中写真だけによる判定では、比較的土量の多いものを第2の種類に、少ないものを第3の種類に分類していることがある。第3の種類の斜面崩壊は最も数が多い。その発生は風化帯の比較的浅い六甲山地の北東端に集中しているが、その他の区域にも多く見られる。

第4の種類は落石である。落石には石の大きさ、個数においてさまざまなものが起こっており、いくつかは土砂崩落として認識されるが、多くは空中写真上で認識・発見することが困難である。そこで、空中写真の注意深い観察によって発見可能な、30 m^3 以上の体積の落石のみをピックアップした。それはわずか4個所のみである。そのうち3個所では複数個の30 m^3 以上の落石が発生した。このような大径の落石は質量の割に転がり摩擦が小さいため、いったん転動し始めるとなかなか止まらず、傾斜が緩くても、長い距離を移動する。落石のいくつかはスランプ土塊の2次的な崩壊や土砂崩れの中から現れた巨石で、他

- スランピングを伴う斜面崩壊 ☆ 大きい落石
- ◆ 表層をベリネおよび風化岩の前坡
- 土砂崩落



図1 類型別の斜面崩壊の発生分布図

の崩土がすぐに停止したにもかかわらず転動を続けて、全く別の場所に停止している。落石の中にはケーブルカーの軌道に飛び込んだり、家の玄関先の自動車をクラッシュしたものもあるが、幸い人身に直接影響する事例はなかった。このような大径の落石は数が極めて少ないため、その発生地点の共通的な特徴を挙げることは困難である。

3. 斜面崩壊の頻度分布

斜面崩壊の分布特性は図1からもある程度分かるが、単位面積当たりの発生頻度を定量化するため、国土地理院の基準メッシュ（1kmメッシュ）ごとの発生数をカウントし、ランク分けした（図2）。ここでは斜面崩壊の大きさや形態に無関係に、上記の4つの類型に属する斜面崩壊を機械的にカウントした。ひとつの旧崩壊地内に複数の小崩壊が見られるケースが多いが、空中写真で分離して見えるものは別の崩壊とみなした。いっぽう、山麓部の住宅地で頻発している崖崩れは空中写真では壊れた家屋の影になって見えないことが多く、またすべてを現地調査によってカウントすることも困難なので、住宅地を巻き込んだ斜面崩壊は、仁川百合野町および西岡本のスランピングを伴う地すべり・崩壊のみをカウントし、その他はカウントしなかった。住宅地の地盤災害については大阪層群の丘陵地の中の谷部で地すべりにやや似た形態の地盤破壊や側方流動が起こっているが、これに

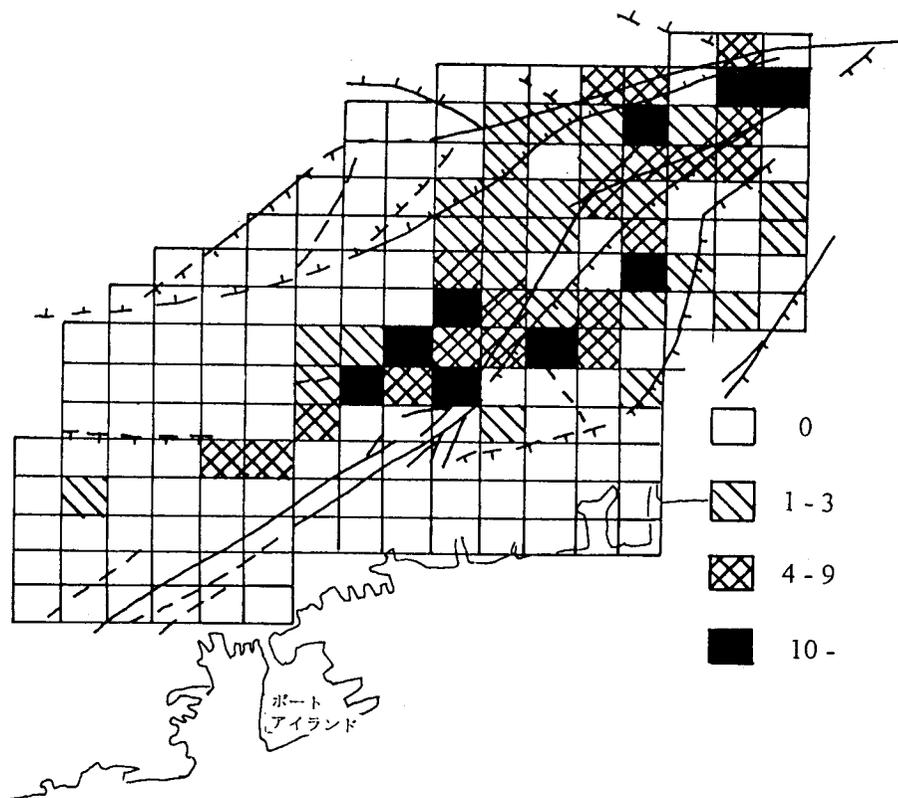


図2 国土地理院の基準メッシュ（いわゆる1kmメッシュ）内の斜面崩壊の個数。調査域の北東端A地点と南西端B地点はそれぞれ 34-41' N, 135-8' 15" E および 34-49' N, 135-21' E.

についてはほとんど調査していない。海沿いの埋め立て造成地などでは地盤の液状化に関連した側方流動およびそれに類似した地盤変状が広範に見られたが、これもほとんど調査していないので、斜面崩壊としてはカウントしなかった。

このようにカウントした斜面崩壊の総数は 317 である。このカウントにはかなり見落としがあり、正しくは 400 程度であろう。それにしてもこの総数は従来の同じマグニチュードの直下型地震による斜面崩壊に比べてひと桁以上小さい（川邊，1995）。それに対して 1 km メッシュあたりの崩壊数は最大 21 で、崩壊規模が小さいことにもよるが、豪雨による斜面崩壊（1972 年の西三河災害では 200 程度）に比べるとかなり少ないものの、地震による斜面崩壊頻度としてはかなり大きい部類に属する（川邊，1995）。

斜面崩壊の発生頻度は図 2 に見られるように独特のパターンを呈している。この図には「新編日本の活断層」（東大出版会，1991）による活断層の分布も示されているが、ごく大まかに見ると、斜面崩壊が密に起こっているゾーンは主要な活断層の走行方向に分布しているものの、若干のオフセットがあり、活断層と斜面崩壊発生との関係は微妙である。それでは地震時に動いた断層はと言うと、地殻変動及び測地的な観測値から求められる断層変位と地表のクラックなどの地盤変状から推定される断層運動（例えば平野・石井，1995）とはかなり結果が異なり、図 2 に示したような斜面崩壊発生パターンと直接比較することは困難である。いっぽう、周辺地域の地震動から推定される強震域は、余震分布から推定される震源断層と、活断層の密集域よりも南東側にオフセットし、図 2 に示す斜面崩壊密集ゾーンからはかなり外れてしまう。山地部の地震動の大きさに関する情報がほとんどないことは重大な問題であるが、このような事情で、斜面崩壊の発生状況を地震動の大きさと関連づけて説明することは今の所極めて困難である。むしろ斜面崩壊の発生状況の分析から地震動の大きさを推定するほうが、まだしも信頼性が高いのかもしれない。

4. 斜面崩壊の発生原因とメカニズムおよび対策

六甲山地は地形が急峻で、断層が密に分布しているため、昔から斜面崩壊の頻発地として知られ、数年に 1 度の割合でまとまった数の斜面崩壊が起こっている。既に述べたように、今回の地震では、地震のマグニチュードに比べると斜面崩壊の発生数は極めて少なかったが、部分的にはかなり高い発生頻度が見られる。また斜面崩壊の類型にも特徴が見られる。このような特徴を分析し、斜面崩壊発生のメカニズムを解明することは、今後直下型地震が起こるであろう他の地域の防災計画の確率にも資するであろうし、今後雨期に向かって土砂災害の発生が心配される六甲山地周辺の住宅域の防災のためにも重要である。

斜面崩壊の総数が少なかったことについてはいろいろな原因が想定される。強震域のかかなりの部分が海域で、そこでは斜面崩壊が起こらなかったことは、確実な原因のひとつであるが、これだけでは説明しきれない。斜面崩壊の発生は過去の発生履歴に影響される面が強く、過去に多くの斜面崩壊が発生した六甲山地では崩壊しうる斜面があまりなくなっているのではないかという可能性は一応考えられるが、これは当たっていない。降雨による斜面崩壊は最近も起こっており、今後も降雨によって崩壊すると考えられる斜面は数多く存在するからである。あり得る可能性は降雨による斜面崩壊と地震による斜面崩壊の競合関係である。地震による斜面崩壊の過去の研究成果によると、豪雨時にはほとんど起こらないような形態の斜面崩壊、特に尾根部の崩壊が特徴的なものとして報告されることが

多く、しばしば大規模～巨大規模の斜面崩壊も起こっている。いっぽう、比較的規模の小さい斜面崩壊では、水が集まりやすい凹型の斜面で地震時にも崩壊が頻発する傾向も報告されている。しかし、今回の六甲山地の斜面崩壊においては、このような傾向はあまり認められない。このことから、かなり特殊な条件を考慮しないと今回の斜面崩壊発生状況を説明できないのではないかと考えられる。

六甲山地の斜面表層物質は、自然斜面であれ、盛土斜面であれ、花崗岩または花崗閃緑岩の風化生成物である。このような物質の共通的な性質として、内部摩擦角が大きく、粘着力が小さく、圧縮には強いが引っ張りに弱く、また飽和に近い含水によって土壌構造が崩壊しやすいことを挙げられる。いっぽう、気候学的な条件としては、前年来渇水傾向にあり、雨の少ない冬季にあたり、斜面はかなり乾燥していたものと考えられる。ちなみに六甲山地では冬季の終わりから春期にかけて山火事がかなりの頻度で発生する。これらのことから、地震による瞬間的な圧縮応力の増加による破壊はかなり起こりにくい条件があると考えられる。ただし急崖の基部に風化して脆弱化した岩塊があって、そこに応力が集中し、辛うじて安定を保っていたような斜面で、岩塊の座屈破壊による崩壊はかなり多く見受けられた。これに対して、地震動による瞬間的な引っ張り応力に起因すると思われる土砂崩落は極めて多数見られた。しかし、このような形態の斜面崩壊は過去の豪雨による崩壊跡地で植生がまだ回復していない部分や、植生が回復している旧崩壊地の滑落崖上端部の崩れ残ったブロックが崩落している場合に限られ、植生のある斜面はかなり急傾斜であってもほとんど崩れていない。これは既に多くの研究者によって報告されているように、樹木の根による緊縛作用のために、表層土の引っ張り強度が補強されているためと考えられる。

六甲山地では他の都市周辺山地と同様、江戸時代に森林の乱伐が起こり、江戸時代末期から明治時代にかけては山麓部で土砂災害・洪水災害が絶えなかったといわれている。折しも神戸港の国際港としての発展があり、大災害のリスクが予測されたので、大規模な砂防事業が展開されてきた。しかし1938年には阪神大水害という未曾有の災害を喫している。その後砂防事業はさらに精力的に進められ、第2次世界大戦に伴う停滞を除いて、着実に成果を上げ、1967年の豪雨に際しては、都市化の進行に伴う新たな災害を受けたものの、1938災害時以上の斜面崩壊・土砂流出があったにもかかわらず、土砂の大半をくい止めることが出来た（奥田ほか、1989）。その後もさらに砂防体制の充実が図られてきているが、その成果として今回の地震による斜面崩壊が例外的に少なかったということが出来る。この程度まで砂防対策が完備している地域は全国的にも稀であり、同程度のマグニチュードの直下型の地震が他の地域で起これば、これよりもひと桁多い斜面崩壊が起こっても決して不思議ではないであろう。

今回の地震に際して、スランプを伴う大規模～巨大崩壊が起こらなかった原因は、ひとつには花崗岩および花崗閃緑岩自体の強度が大きく、風化生成物の内部摩擦角が高いことに求められる。しかし、花崗岩質の山体は絶対に崩壊しないと言うわけではなく、隆起速度の大きい赤石山地（いわゆる南アルプス）では過去に山体崩壊が起こっている。今回六甲山地で起こった、土砂崩落の中には、過去に大地震によって大規模な山体崩壊が起こり、その崩れ残りブロックが風化し、今回崩落したと考えられるものがあり、さらに大きな地震があっても山体崩壊が起こらないと予測するのは危険である。今回起こったスランプを

伴う斜面崩壊は、このような大崩壊に比べるとはるかに災害ポテンシャルの小さいものである。その発生原因は、今後個別的に十分調査されなければならないが、今後の降雨によって土石なだれを起こす危険性も秘めており、適切な防災対策が施される必要がある。

表層崩壊などの原因は第一に表土や露岩の風化が進み、強度が低下していたことにある。人工構造物（道路や鉄道の盛土のり面など）や宅地に面した斜面ではこのような状況は常時チェックし、地震時にも崩壊しないように補強しなければならないが、自然斜面についてこれを行うことは経済効率的にも自然保護の立場からも実際的でない。しかしこのような形態の崩壊はゾーナルな分布を示すことが今回の調査で明らかになった。次の地震でも同じゾーンでこのようなタイプの斜面崩壊が起こると言うことは出来ないが、斜面の地質、地形条件などの詳細な調査に基づいて、このようなタイプの発生危険度や発生個数の予測とそれに基づく防災対策をおこなうことは原理的に可能である。

引っ張り破壊による土砂崩落は花崗岩質斜面の基本的な性質に原因があると考えられる。しかし従来はあまり考慮されなかったタイプの斜面崩壊である。花崗岩質の斜面は内部摩擦角が大きいため急傾斜の長大な斜面が崩壊せずに残る傾向があるが、局部的な過大傾斜やオーバーハングが地震時に引っ張り破壊を起こし、もとの斜面から切り放された土石は当然落下・転動して災害の原因を作る。このような危険部位は山地ではいちいちチェックして対策を施すことは難しく、統計的に単位面積当たり何箇所かの発生を予測し、防災対策に組み込んで置くのが唯一の効果的な対策であろう。

斜面崩壊によって発生した土砂は取り除いて安全な場所に移動し、崩壊面の安全チェックと補強を行うことが望ましいが、300 箇所ほどある斜面崩壊のすべてについてこれを行うことは困難だと思われる。しかしそのまま放置すれば今後の豪雨に際して土砂流出を起こし、今回崩れなかった斜面も含めて地震の影響を受けた斜面がさらに崩壊する危険性も高い。防災の観点からは、このような土砂発生源のすべてに対して対策を施す必要は必ずしもなく、潜在的被災域を防護すれば事足りるので、このような土砂生産の予測に基づいた十分な砂防対策が行われればよいという考え方ができる。

落石はこぶし大のものであっても人間を殺す能力を秘めている。しかし今回の地震では 30 m³ 以上の体積の落石が4 箇所が発生したにも関わらず、これによる人命被害はなかった。これらの落石の原因は巨礫混じりの表土層の崩壊が主で、これを予測することはかなり困難であり、対策も大変難しい。六甲山地の東南部の斜面はかなり岩石質であり、尾根上に tor と呼ばれる塔状の巨岩があったり、斜面に仏石と呼ばれる 1m³~1000m³ の岩石が屹立しているケースはかなり多いが、このような岩石が転動・落下した事例は極めて少ない。そのため、これらの岩石のすべてについて安全性をチェックする必要はないと考えられるが、力学的バランスの悪い石や、伐採などを含む斜面の人工改変が計画されたり、実施される場合には十分な注意が必要であろう。

5. 今後の課題

本項では斜面崩壊および斜面崩壊による災害について、これまでの調査で明らかにされたことを概説したが、調査もデータ解析もまだ不十分である。特に、斜面崩壊の発生原因を解明し、地震動との関係を明らかにするために、多くの調査がなされなければならない。斜面崩壊の原因は、表土が十分乾燥していたという前提の元に、おおまかには植生、斜面

構成物質の物性，斜面傾斜および地震動の4つの要因に分類できるであろう。そのうち斜面傾斜と地震動は，はっきりわからない形で断層と関連していると思われる。このような要因との関係を分析するためには，多くの見方に基づく統計学的あるいは推計学的研究が必要である。

参考文献

- 1) 沖村 孝：兵庫県南部地震による山地崩壊の概要。兵庫県南部地震に伴う土砂災害に関する緊急報告会資料，砂防学会，1995，pp.9-14.
- 2) 平野昌繁・石井孝行：六甲山地頭部の崩壊の特徴。兵庫県南部地震に伴う土砂災害に関する緊急報告会資料，砂防学会，1995，pp.15-19.
- 3) 川邊 洋：過去における地震と山地崩壊。兵庫県南部地震に伴う土砂災害に関する緊急報告会資料，砂防学会，1995，pp.29-32.
- 4) 奥田節夫・横山康二・沖村 孝・柏谷健二：六甲山系南麓における市街地の発達にともなう土砂災害の形態の変化。昭和62年度特定研究研究成果，1989，pp.117-133.

地震と地盤

地質・地盤と震災

志岐 常正（元京都大学）

兵庫県南部地震以来、地盤と地震動、および震災との関係について、多くの研究や論議が行なわれてきた。以下にこれらの概況と問題点について、地質学的視点からまとめて述べる。とくに、一般市民だけでなく関連専門分野間でも共通の理解がなく、誤解や新たな“神話”を生みかねない問題については、なるべくわかりやすく記述・説明し、今後の調査や討論、対策などの参考に供したい。

1. 活断層と地震被害

1.1 六甲断層系のどの断層が活動したか

地殻内にストレス（あるいは歪み）が蓄積されると、ついには地殻の破壊がおこり、それらが開放される。これによって断層が生じ、あるいは既存の断層があらためて割れ、地盤が振動する。この場合、一般に断層が活動したと言う。

兵庫県南部地震の際に、淡路島では既知の野島断層が活動して、直線状にのびる地震断層露頭その他の地表変状を出現させた。しかし、明石海峡をこえた本州側に関しては、多くの断層が知られていたにもかかわらず、淡路島でのような鮮明な露頭は現われなかったため、その解釈を巡り多くの異なった意見が出された。

多くの人々によって指摘されたように、今回の震災の特徴は、山地の縁および活断層に平行に、それから1~2km離れた平野側に激甚被災の帯を生じたことである。同じ傾向は六甲山地の南側だけでなく、その東側の西宮-宝塚や、淡路島、さらに京都府西京の檜原断層に沿ってもみられる（安松, 1995）。果たしてどの断層が動き、あるいは動かなかったために、このような被災分布を生じたのだろうか。これについての地震学者の見解は大きく2つに分かれる。

ちなみに、山麓平野部に断層が伏在しても、構造地質学的には不思議でない。また実際に、工業技術院地質調査所は、反射法探査によって、神戸市王子公園の南、JRと国道2号線の間などで、阪神・淡路大震災の“震災の帯”の下に、伏在断層を発見している（瀬川, 1995による）。震災との関係でここで問題にするのは、それが今回活動したか否かである。

本報告中にも入倉によって述べられているように、兵庫県南部地震の余震分布は既知の六甲断層系の一部の断層（須磨断層、諏訪山断層、大月断層、五助橋断層）にほぼ一致する。このことは、それらの断層の深部が本震でも動いたことを意味する。逆に言えば、他の断層は活動しなかったと考える。

これに対し、嶋本ほか（1995）は、被災の顕著な地域が直線的に細長い帯（震災の帯）をなしていることや、余震分布と重なる既知の断層沿いには沖積層を横切る場所でも顕著な被害がない（と述べている）ことなどから、起震断層が地下に伏在しており、かつ、か

なり地表近くにまで達していると主張した。“震災の帯”は余震分布から約2km系統的に南にずれているが、これは断層の傾きによって説明できるとする。

その後、菊地正幸は、神戸市内のコンビニエンスストアのビデオに記録された地震時の物の動きの変化を解析し、伏在断層の位置に加えて断層面の破壊進行状況をも推定した。その推定された位置は、地質調査所が反射探査法で見いだした伏在断層の位置と一致している（瀬川, 1995 による）。

この問題についての地質関係者の見解は、現在のところ、公表、未公表を含め、地震学者の場合よりさらに多様で、むしろ混乱している。はなはだしくは、同一露頭についての観察・調査結果が人により異なる場合すらある。

当初、山地内では断層が活動していないことが強調された。とくに新幹線トンネルを切る活断層に今回の地震の変位が見られないことが注目された。しかし、その後、山地およびその北西縁の2~3の断層は、わずか（数cm程度）ながら動いているという人もある（中井・須内, 1995; 松岡, 1995; 桜井, 1995, など）。

一方、扇状地を含む山地南麓平野部では、断層の動きによる変位や変状が、地震の直後から報道機関を通じて何人もの人々から報告された。しかし、人工盛土あるいは埋め立て土でない自然の地層を切る変状が平野部で一ヶ所も確認されていないということから、平野部でも基盤は動いていないと強く主張する人も少なくない（談話による）。

地震に際して、地すべり、液状化に関係した地盤の不等沈下や移動、舗装の慣性的すべり、地形や埋設構造物の影響などによる亀裂が発生する。これらの地表やごく地表近い部分にのみ現われる亀裂と、地下深くの地震断層につづく亀裂との区別は、容易なようで必ずしもそうでなく、個々の場合について慎重な検討、評価を必要とする。地震断層が地表に達していても、地表やその近くに舗装や盛土その他の多くの人工物がある場合には、その表れ方が複雑なことは当然である。

平野・波田（1995 a, b）は、このことに注意しつつ地表の断裂や変状地を調査し、それらが直線上に分布するだけでなく、系統的な横ずれの動きを示すことを主張している。それによれば、芦屋断層、五助橋断層-渦ヶ森断層、甲陽断層などは右横ずれ、これらに共役な関係にある副断層である住吉断層、三宮断層は左横ずれの変位をした。諏訪山断層、布引断層などについてはその直上での変位が認められない。一方、宮田ら（1995 a, b）は、石垣、コンクリート擁壁、側溝などを切る右横ずれの剪断（地変線）を多く観察したほかに、電柱や家屋の倒れた方向を測定して、それが推定される潜在断層（伏在断層）を境に変わるとも述べている。なお、嶋本ら（1995）の考える伏在断層が“震災の帯”の中であり、東北東-西南西にのびるのに対し、平野らや宮田らの推定する断層は、平野部でも山地の断層と同様に、ほぼ東北-西南方向（副断層は西北-東南）に、平行していくつも発達するものである点で異なっている。

地質関係者は地震の際に生じた変状を地表で観察する。その変状が、地表と地表近い浅いところだけの亀裂ではなく、地下深くにつづく“地震断層”であったとしても、それは断層の地震動を起こした部分（震源断層、起震断層）そのものではなく、その延長ないし地表での表現であるに過ぎない。地表付近では静地圧が低くストレスもあまり高まらないので、地震断層の動きは地震動の発生にはほとんど関係がない。起震部分の深さ（10km~20km）にくらべると、起震部分直上（余震の震央分布）から2~3kmの距離はごく小さい。

(図1)。したがって、このオーダーで見た場合、地表に現われた地震断層に近いところほど地震の振動やそれによる被害が大きいわけではないのは驚くにあたらない。この意味では、地表でどの断層が動いたかを論ずることは、あまり本質的に重要なことではないかも知れない。

平行する断層間の距離(2~3km)も、震源断層面の深さに比べれば小さい。これらの断層は、浅いところだけ分かれていて、深部ではむしろ1つの起震断層としてとらえられる場合もあるだろう。筆者の見るところでは、六甲山地東麓平地の甲陽断層やこれに平行する断層の直上では、地震断層露頭とは判定できない亀裂においても、数cm以下の小さい右横ずれ変位を伴う場合がある。またそれ以外の、地表だけの変状と考えられる亀裂でも、同様な応力場に形成されたと解析される場合がある。あるいはむしろ、六甲山地深部に蓄積された応力歪みの右横ずれ起震断層による解放は、その上方延長の地表では断層の変位としてだけでなく、帯状のかなり広域に、同じく右横ずれ(および一部これと共役な左横ずれ)の小さな断層や剪断亀裂をつくる応力場変位群として表出しているのではないだろうか。

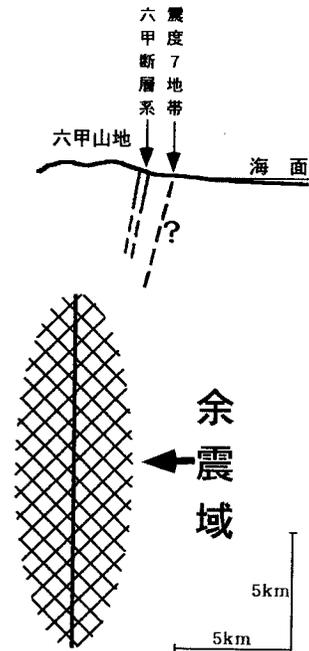


図1 神戸地域の断面。
余震域、六甲断層系、震度7地帯の関係を示す

1.2 活断層からの距離と被害

兵庫県南部地震による阪神-淡路島震災によって、“活断層”がにわかに世人の注目を集めるにいたった。断層が“活動した”からこそ地震が起こったのであり、活動度の高い活断層が多い地域の危険性が、少ないところより高いことは疑いない。活断層をまたぐ建造物が断層の活動で引きちぎられる場合さえもある。

しかし、震源断層からの距離による地震動や被害程度の違いは、たとえば、マグニチュードが7を越すような大きな地震の場合、数10kmとか200km, 300kmといったオーダーでの問題である。上にも触れたように、神戸の山麓-平野部市街地内といった範囲で比べると、断層に近いほど大きな被害を受けるわけではなく、地盤や構造物の特性による違いが大きい。今回活動した野島地震断層露頭のすぐそばの家屋やお堂が外見上ほとんど無被害で立っていることは、多くの人々に強い印象を与えている。実は同様の現象は古くから報告されており、書物にも書かれている(例えば松沢, 1976; 田治米ほか, 1977; 小出ほか, 1979)。

たとえば、1975年大分県中部に起こった直下型地震にさいしても、剛性が著しく低い建物を含め、おおくの建物が倒壊するまでに至らなかったが、その原因としては、地震動の継続時間が著しく短く、かつ、その卓越周波数成分もおそらく短周期であったことが指摘されている(田治米ほか, 1977)。ちなみに、次節の内容にかかわるが付言すると、大分県中部地震の場合は被覆層の薄い山間地で起こったことである。上記野島断層露頭付近も、大阪層群を削って造成された平地であり、比較的地盤のよいところでの直下型地震被害で

ある点で共通している。

1.3 断層があること自体の影響

ところで、地震による地盤の動きかたには、断層が活動するかしらないかでなく、断層があること自体や両側の地盤がつくる構造が大きく影響する。断層破碎帯はそれ自体特殊地盤帯であり、ここを伝って地震波が上がってくるのがすでに知られている（入倉の教示による）。この点で、今回の被災地域に関しても、過去の地質調査で活断層が推定されているところの直上の、ごく狭いゾーン（家屋3・4軒幅）に限り、その両側に比べて被害がどうも大きいという場合があることも、指摘しておく必要がある。このことは筆者らだけでなく、神戸大学の田結庄も認めている（談話）。

遠藤ら(1995a, b)は、反射法地震探査や重力探査によって伏在断層を調査し、低層住家被害率急変線や非木造建物の大破・全壊の直線状分布が伏在断層とほぼ一致するか、あるいはそのすぐ脇に伏在断層があると解釈できる場合が多いことを報告した。彼らは伏在断層で区切られたブロック状の地質単元の狭い範囲の中で振動が集中した可能性や、ブロックによる揺れ方の大きな違いのため、その境界をまたぐ大きな建物に大きな歪みを生ずる可能性を指摘している。

山腹傾斜地を活断層や断層破碎帯が通過しているところでは、地震に際し崩壊が起こる危険性がとくに高く、現に兵庫県南部地震でも各所に崩壊を生じた。このような箇所は余震や豪雨による2次災害の要因ともなる恐れが高い。この問題については別に述べる機会があるものと考え、今回は省略する。

要するに、断層に近いほど被害が大きいわけではない。しかし、断層の直上やすぐ近くはやはり被災程度が大きくなる可能性はある。一面的な理解は危険である。

2. 地盤と地震動、震害

地震による斜面崩壊にかかわる地盤の違いについては、ここでは省略する。

構造物が地震動によって直接に受ける被害は、地震、地盤、構造物の3つの特性の組合せによって決まる。よく“地盤が悪い”と言ひ、また“軟弱”な地盤を“悪い”地盤と言う。確かに、沖積層や埋め立て地など軟弱地盤のところでは、地震によってはもちろん、それ以外にも種々の問題が生ずることは言うまでもない。しかし、地盤が軟弱なほど、またそれが厚いほど、その上につくられた構造物が地震で破壊されるというわけでは必ずしもない。上に触れた今回の阪神大震災の狭い带状激甚被害地のかなりの部分が、沖積層があまり厚くない、比較的地盤がよいとされてきたところであることは、地震後早くからすでに多くの調査者によって指摘され、研究されてきた（たとえば、1995年兵庫県南部地震地質調査グループ, 1995; 石川ほか, 1995）。この問題は、今後、直下型地震に見舞われる恐れのある京都、大阪その他の地域での災害予測や防災の上で重要である。

家屋その他の構造物の地震による被害分布は、すでに詳細にマッピングされている（中央開発, 1995; 応用地質学会関西支部・関西地質調査業協会合同調査団, 1995; 神戸大学工学部調査団, 1995, など）。また、それと微地形分類、地質図、古地理、古土地利用などとの関係が、検討されつつある（たとえば、溝口, 1995; 石川ほか, 1995）。

別に池田によっても述べられるように、阪神-淡路島大震災の山地-海岸被害分布パタ

ーンは、1) 淡路島、2) 神戸市街西部(須磨-長田-兵庫区)、3) 神戸市街中・東部(三宮-芦屋)、4) 西宮、および宝塚、5) 尼崎-伊丹 などの地域ごとに異なっている。上記の、沖積層が厚くない地盤の比較的良好なところで被害が高い現象は、とくに神戸中部で著しい。

今回の震災の被害地域が、活断層の分布から外れて東方の西宮東部や尼崎に広がるのは、いわゆる指向性効果(これについては、今回は省略する。土岐ほか、1995を参照)のほか、この地域に沖積層の軟弱地盤が発達することが強く影響している。高橋(1995)や吉岡(1955)、田結庄(1995a, b)も述べているように、三角州や、扇状地内の河道、古河道、後背湿地など、とくに、明治以後に開発された湿地が激甚被害地となっている例は多い。扇状地や大阪層群の台地でも、小さな谷があり、軟らかい埋土などがある谷底や斜面では、てき面に被害が多い。

しかし、兵庫区や長田区その他の海岸寄りでは、地盤の液状化は各所で激しかったものの、家屋倒壊により死傷者がでるといった被災はむしろ比較的には軽かった。このような地域でとくに強度の高い構造物のみがあったというわけではない。「神戸の地盤」(1980)によれば、長田区から兵庫区南部にかけて、尖角岬を造りつつ発達した平野の表層5mは、礫質や砂質な堆積物からなっており、軟弱な粘土からなる地盤は、その内側に分布している。溝口(1995)も指摘するように、この粘土質地盤の地域が激甚被災地にかなりよく一致していることが注目される。

激甚被災地の帯状分布の問題を、伏在断層によって説明しようとする考えについては上にのべた。この考えに対する地震学的批判は第2章に入倉によって述べられているが、要するに、たとえそこに地震断層があったとしても、余震震源がそこに分布しないということは、(後述のブライトスポットにあたる場合を除き)本震でも発震しなかったことを示すから、そこでの激甚災害の説明にはなりえないということであろう。

入倉によれば、軟弱地盤に入った地震波は、縦波の加速度が3~6倍に増幅される。しかし横波はそのエネルギーが液状化に消費されるなどのため逆に減衰する。軟い地盤の厚さが薄いところでは、軟い地盤が厚いところよりもかえって地震波が強まる。その他、軟い沖積地盤や大阪層群の厚さ(岩石基盤までの深さ)がある線を境に急にかわる(その境は断層であろう)場合や、軟らかい地盤が山側にむかって薄くなる場合など、色々なモデルについて、地盤の性質やその構造と地震波の増幅、共振などが検討されているが、これらについては、別に入倉や藤原によって論及されているので、ここではこれ以上述べない。ただこれらの力学的議論の多くが、いままでのところかなり単純なモデルについての計算によるものであり、今後実際の地質断面についての具体的な検討が望まれる。

地盤の卓越振動数と構造物固有振動数との一致による共振が、建築物の被害を大きくすることは古くから指摘されてきた。関東大震災に際し、東京の下町低地では木造家屋の被害が多かったのに対して、更新統地盤の山の手台地では二階建の土蔵が多く被害をうけたことは広く知られている。擁壁、舗装道路、土蔵、鉄筋コンクリート建造物など、剛性の高い構造物の方が被害が多い現象は、1974年伊豆半島沖地震(M 6.9)や1975年大分県中部(M 6.4)などの内陸型浅発地震でも特徴的に見られた(田治米ほか、1977)。しかし、阪神大震災の場合、地盤の性質だけでなく、その構造による振動の強さや性質の変化が、地盤と建築物との共振その他にそれぞれの場所でどう影響したかの具体的研究は、ま

だ不十分であり、むしろ今後の問題として、地震学・地質学・土木—建築学的総合調査・研究が必要であろう。その具体的内容については別に述べる。

3. 現場に見られる地震動特性記録現象

3.1 衝撃的破壊と、いわゆる足払い倒壊について

阪神大震災での家屋や墓石の倒壊について、“最初の一撃で倒れた”、“初動で倒れた”、といったことが、激震地の多くの住民から語られている。地元住民の言う“初動”は、地震学で言うP波初動を体感したものではないであろうが、急激、かつ強力な破壊力が、ほとんど一瞬にして多くの家屋その他を破壊したことは事実と思われる（阿部, 1995）。

一方、松田・竹村（1995）、菊山ほか（1995）、池田（1995）などが述べているように、家屋や墓石が、地域ごとに、高い比率で特定方向に倒れていることが注目される。

墓石や灯籠の倒れる方向の傾向性は、地震波の押し引き分布を反映する可能性があることから、北丹後地震の昔から注目され、測定されてきた。もちろん、個々の墓石の倒れかたは、押し、引き、回転などの動きの最終結果を示すものであり、その意味では、移動を示す地震計としても精度の悪いものに過ぎない。しかし、現地では注意深く観察すれば、最初に一齐に倒れた墓石とその後に倒れたものを見分けることや、最初に倒れた方向と一度倒れてからの回転その他の動きとを区別することができる場合も少なくない。

これらの証言、および、野外の事実からは、墓石の転倒だけでなく、多くの家屋の倒壊も、大きい加速度（おそらく横ゆれの）の最初のものによって衝撃的に倒れたものと考えられる。

最初の一撃、ないし、数波で主要な被害が与えられたとみなせる現象は、前節で触れたように、他の直下型地震、たとえば1975年の大分県中部の地震でも報告されている（田治米ほか, 1977）。

松代地震の際の被害についてくわしく検討した大沢ほか（1967）によれば、住家（木造家屋のことと思われる）の傾斜や梁の落下など大きな変形を必要とする被害は地盤のやわらかなところで、他方、煙突の折損、灯籠・墓石・ブロック塀など堅い構造物の倒壊（大きな加速度を必要とする）は地盤が堅い場合にそれぞれ多く見られた。なかには、堅い地盤の上の柔構造の家で、補強したためかえって被害が現われた例さえあるという。ここでは共振の問題としてではなく、変形が効くか加速度が効くかという形で問題がとらえられていることが注目される。同様の問題は、他の局所強震の被害についてもしばしば指摘された（松沢, 1976）。最近、梅田（1995）は、阪神・淡路大震災について、初めに衝撃的な短周期波で建物の耐久力が低下させられたところへ長周期大振幅の波が襲うという、言わば“2段階時間差攻撃”タイプの地震が、被害を大きくしたことを指摘している。上記のような問題との関係は明らかではないが、解析を一步進めたものとして興味深い。

以上に述べた考え、あるいは見方は、いずれも、継続時間のきわめて短い地震動（地震の波）が被害にどう関係したかというものである。一方、地震の揺れでなく地盤の非常に急な動きによる、慣性的な効果、いわば“足払い”によって多くの家屋が倒壊したという考えがある。桜井（1955 b, c）は、直下の伏在断層の変位運動による衝撃（的な直接せん断）破壊が、地上の建物や構造物に激甚な被害をもたらした原因であることを主張してい

る。この問題は多くの地震学者の関心にはなっていないように見えるが、検討に値するように思われる。

ともかく、家屋の被害と地盤の性質との関係については、2. に共振の問題として述べたが、それだけでなく、大加速度による衝撃的破壊が重要であることは間違いない。さらに、いわゆる“足払い”についても、さらに検討されることが望まれる。これらの関係についての、地震学者からの、なっとくできる説明を受けた上で、それらと家屋、墓石、灯籠、電柱などの倒壊や傾きとの関係を、学際的に検討したいものである。

3.2 大きい上下動の発生について

兵庫県南部地震の地震動が特異なものでなかったことは、入倉（1995 a, b）によってすでに述べられ、本報告集中にも強調されている。もともと、地震発生の際である応力場や発生メカニズムが、今回の地震と他の多くの日本列島内陸直下に発生した地震と基本的に異なるとは考えられないので、もし今回の地震動が特異であったならば、かえって不思議と言わねばならない。

今回の地震で上下動がかなり大きかったことは、一部の土木・建築家を驚かせたように見える。しかし、これまでも、地震計の記録としてはではなくとも、野外でみられる“跳び石”（“飛び石”、“跳ね石”）その他の証拠が報告され、非常に局部的にせよ地震の上下動の加速度が重力を越えたところがあることを示すとされている（たとえば、田治米ほか、1977； Umeda, 1992）。同様な“跳び石”は、兵庫県南部地震にさいしても見いだされた（梅田, 1995；杉本・楡井, 1995；中井・須内, 1995）。

このような大きな上下動はどこで、どのようなメカニズムで起こったのであろうか。

いわゆる軟弱地盤が発達するところで、地震の水平成分が減衰し、反対に上下成分は増幅されることは、入倉（1995）によって明らかにされている。問題なのは、上記“跳び石”のあるものが、むしろ軟弱地盤でないところで発見されていることであろう。今回の兵庫県南部地震にさいしての“跳び石”は、大振幅の短周期波が集中的に放出された明石海峡と、断層活動の東北端の芦屋市奥池で認められている（梅田, 1995）。この問題は、後にも触れるように、今後の構造物設計と立地を考える上で無視出来ないとはいわねばならない。

4. 今後の課題

最後に、上記3. を踏まえて、今後の防災のためになすべき調査・研究を、自然科学的な問題に限って2, 3 挙げておこう。ただし、活断層の活動度や活動予測、各種地盤の分布の把握（地質調査）のような、多くの人々によって指摘され、検討されている問題については、ここで述べる必要はないものとする。

4.1 活断層について

神戸激甚被災地直下での伏在断層の調査・研究や、地表での変状の評価なども、今後の直下型地震による被害の起こり方一般を考える基礎として、さらに進めなければならない重要な課題であるに違いない。ただ、この数年～20年といった中・短期での当面の防災問題としては、京都や大阪、滋賀など次に地震が起こる恐れがある地域での活断層の方が気になるところである。もちろんこれに関しての、地域住民の関心は今かなり高い。ところが、これらの地域のいくつもの断層に関しては、その活動度はおろか、正確な位置や延長

の長ささえもよくわからないものが少なくない。とくに平野の下の伏在断層の調査は急がねばならない。なかでも、京都西京の檜原断層に平行な被災地域下の断層の存否や地質構造の調査は、神戸での激甚被災帯の形成理由を考える上でも有用であろう。

なお、世上、地質調査といえば、もっぱらボーリングをおこなうことと考えられているむきがないでもない。確かに、ボーリング調査は、地表下の垂直的な地質の変化を知るには欠くことが出来ない。しかし、それは掘削されたそれぞれ一点についての資料に過ぎない。それによって地表下の地質構造を知るためには、より広域の地表地質調査と弾性波、電位差、放射能などの物理探査を先行させる必要がある。また、トレンチ調査による確認が重要である。

4.2 地盤と家屋の共振による被害について

建築物の振動周期についての研究は、高層建築についてを中心に、かなり進んでいるときく。一方、地盤の卓越振動周期については、それぞれの場所毎に地震計を置いて、兵庫県南部地震の余震その他ときどき起こる中・小の地震を観測することによって知ることができる。したがって、それができたところに関しては、事後の地震による建築物の被害予想がより具体的になされうるし、これから建築する場合については、地盤の振動との共振をできるだけ避けるように建築物を設計・建築することができる。このような問題についての工学的研究や具体的事例の検討にはすでに多くの例があるだろう。問題はすべての場所で、一般の家屋のすべてについて、地盤の振動周期を測定するわけにはゆかないことであろう。しかし、地質家が協力するならば、典型的な地質と地質構造の場所を選んでその場所の地盤の振動を測定することにより、同様な地質・地質構造の場所全般に適用可能な値を得ることができる。もちろん、はじめに被害状況のわかっている阪神地域のいずれかの場所を選んで測定、検討をおこなえば、計算による推定と実際の被害との比較ができてよいに違いない。その結果は京都、大阪、奈良、滋賀その他、今後地震が起こりそうなどころにも、適用でき、防災的まちづくりに生かされる場合も少なくないはずである。これらのことは、従来おこなわれてきたことではあろうがを、もう一歩学際的、総合的にすすめ、あるいは広げることが重要であり、可能ではないだろうか。

4.3 地盤の“良い”ところでの上下動による被害について

いわゆる軟弱地盤での上下動の増幅とそれによる被害は、すでに地震学者、地震工学者の注目の的となり、研究されている。しかし、上記、梅田（1995）の指摘した、ブライトスポット、あるいは断層の端において、大きく瞬間的な上下動が生ずることによる被害については、“跳び石”に注目する“野外派”以外の関心が、未だ低いように思われる。しかし、このような激しい上下動が、山腹や山麓のいわゆる“地盤の良い”ところでも起こるとすれば、このようなところ立地し、あるいは開発されようとしている、ダムや宅地の安全にとって無視出来ない問題であることを指摘しなければならない。

謝 辞

本稿執筆にあたっては、藤原重彦氏に多量の資料の教示を、また、武蔵野実氏には図の提供をいただいた。さらに、両氏や入倉孝次郎氏には内容の討論や検討をお願いした。これら各氏のご協力を厚く感謝する。

参考文献

- 1) 安松貞夫：1995兵庫県南部地震で、花折・檜原活断層近くの住宅に被害がなぜ集中したか、東山学園研究紀要, No. 40, 1995, pp. 123-152.
- 2) 瀬川茂子：追跡・阪神大震災, やっぱりあった伏在断層, 科学朝日1995年9月号, pp. 43-45.
- 3) 嶋本利彦・堤 昭人・大友幸子・川本英子：神戸市～西宮市における地震被害と推定地震断層「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 1995, pp. 121-122.
- 4) 中井卓巳・須内寿男：五助橋断層周辺にあらわれた変状, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995, pp. 37-40.
- 5) 松岡 篤：六甲山地の断層系統と1995年兵庫県南部地震における断層変位, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995, pp. 75-78.
- 6) 桜井 孝：兵庫県南部地震によって現われた横尾山断層近傍の地山変状状況, 応用地質, 1995, 36, 167-172.
- 7) 平野昌繁・波田重熙：六甲山地東南部の断層の活動と変位地形, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 1995a, pp. 24-27.
- 8) 平野昌繁・波田重熙：神戸市街地西部の断層の活動と変位地形, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995b, pp. 79-84.
- 9) 宮田隆夫・洪 景鵬・前田保夫：神戸－芦屋間にみられる潜在断層とその動き, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 1995a, pp. 28-29.
- 10) 宮田隆夫・洪 景鵬・前田保夫：神戸市街地の隠れた活断層, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995b, 45-48.
- 11) 松沢武雄：地震の理論とその応用, 東京大学出版会, 223p., 1976.
- 12) 田治米辰雄・望月利男・松田馨余：地盤と震害－地域防災研究からのアプローチ, 槓書店, 1977, p. 258.
- 13) 小出 仁・山崎晴雄・加藤碩一：地震と活断層の本, 1979, 国際地学協会, 123P.
- 14) 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・卜部厚志：兵庫県南部地震による阪神域の被害と伏在断層の分布, 「阪神大震災」中間報告会－人工改変と地震災害－予稿集, 日本応用地質学会, 1995a, pp. 55-71.
- 15) 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・卜部厚志：阪神地域の地下構造と地震による地質災害, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995b, pp. 225-228.
- 16) 1995年兵庫県南部地震地質調査グループ：1995兵庫県南部地震における被害集中域と地質学的特性, 1995, 地球科学, 49, pp. 85-88.
- 17) 石川浩次・溝口昭二・大鹿明文：兵庫県南部地震による六甲山地東南縁部における地震被害と地形・地盤条件, 応用地質, 1995, 36, 81-87.
- 18) 中央開発株式会社阪神大震災災害調査団：阪神大震災災害調査報告書, 1995, 21P. 写真集つき.
- 19) 応用地質学会関西支部・関西地質調査業協会合同調査団：六甲山地東部およびその周辺の地盤変状と地震被害, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 1995, pp. 34-76.
- 20) 関西地質調査業協会阪神大震災合同調査委員会：六甲山地東部とその南麓部の地震被害, 「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会資料, pp. 40-77.
- 21) 神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：神戸大学工学部兵庫県南部地震緊急被害報告書（第2報）, 1995, 301p.
- 22) 溝口昭二：神戸市周辺の地震被害と地形・地盤, 地盤から見た“阪神大震災”緊急報告会

- 資料, 1995, pp.78-95.
- 23) 土岐憲三・後藤洋三・江尻譲嗣・澤田純男: 兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, 1995, 80, No.10, 32-48.
 - 24) 高橋学: 古環境からみた阪神大震災, 地理, 1996, 40-4, pp.114-117.
 - 25) 吉岡敏和・粟田泰夫・宮地良典・寒川旭・水野清秀・下川浩一・井村隆介・奥村晃史・杉山雄一・佃 栄吉・木村克己・松山紀香: 1995兵庫県南部地震に伴う被害分布と微視的・巨視的に見た地質環境, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995, pp.215-218.
 - 26) 田結庄良昭: 神戸付近の地盤と活断層, みんなできりひらこう震災復興, 日本科学者会議・兵庫県労働運動総合研究所, 1995a, pp.14-21.
 - 27) 田結庄良昭: 神戸長田地域の地震災害と地質・地盤との関係, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995b, 149-154.
 - 28) 神戸市企画局総合調査課: 神戸の地盤, 1980, 254p.
 - 29) 桜井 孝: 震害状況から推定される断層変位運動, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 1995b, pp.77-87.
 - 30) 桜井 孝: 神戸側での断層と被害について, 「阪神大震災」中間報告会－人工改変と地震災害－予稿集, 日本応用地質学会, 1995c, 38-54.
 - 31) 松田高明・竹村厚司: 兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向と分布, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 1995, pp.181-186.
 - 32) 菊山浩喜・横山俊治: 墓石・灯籠の転倒からみた1995年兵庫県南部地震の地震動, シンポジウム「阪神大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員, 1995, pp.91-96.
 - 33) 池田安隆・東郷政美・澤 祥・加藤茂弘・隈元 崇: 墓石のずれから推定される初動分布と伏在断層の挙動, 1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録,
 - 34) 阿部勝征: 近代都市直下のきわめて浅い場所で, 科学朝日緊急増刊「地震科学最前線」, 1995, pp.3-5.
 - 35) 大沢 胖・村上雅也・南 忠夫・梅村 魁・青山博之・伊藤 勝・遠藤利根穂: Study on the earthquake resistivity of wooden houses, part 1, On the aseismic experiment of a wooden houses in Wakino Town in connection with the damage due to Matsumoto Earthquake, 震研い報, 1967, 45, 473-488, (松沢武雄, 1976 による).
 - 36) 松沢武雄: 地震の理論とその応用, 東京大学出版会, 1976, 223p.
 - 37) Umeda, Y.: The bright spot of an earthquake. Tectonophysics, 211, 1992, pp.47-51.
 - 38) 梅田康弘: 1995年兵庫県南部地震の破壊成長過程－地震のブライトスポットと跳び石－, 地質ニュース, No.490, 1995, pp.50-55.
 - 39) 杉本 実・楡井 久: 1995年兵庫県南部地震による野島断層上の物の移動と飛跡, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 1995, 37-40.
 - 40) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の強震動の特徴, 文部省科学研究費(総合研究A, 代表 藤原 悌三)研究成果報告書(06306022)平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究, 1995a, 103-119.
 - 41) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の地震動特性, 特集, 検証阪神淡路大震災, 「建築技術」, 1995b, No.544, pp.54-59.

再活動した野島断層

武蔵野 實（京都教育大学）

1. まえがき

近畿地方は戦後まもなく紀伊半島沖の南海トラフで発生した南海道地震以降、大きな地震活動が無く、一般に地震の少ないところだと受け止められていた。しかし、一方で地震学者、自然地理学者、構造地質学者を先頭に多くの研究者は、藤田和夫によって近畿三角帯と呼ばれた地域が地殻変動の激しい活断層集中地域であり、内陸型地震がいつ起こってもふしぎでないところであることを認識していた。一部の研究者は、そうした内陸型地震への警鐘をならし、災害を未然に防ぐ上での真剣な対策が必要であることを強調していた。残念ながら、本年1月17日早朝の兵庫県南部地震は、自治体の地震に対する危険性の軽視や、防災対策がほとんど無い中で発生し、予想をはるかに超える人的被害と建造物被害をもたらすに至った。

今回の地震に関する報道の中では、地震の原因についての解説もなされ、「歪みの蓄積した岩盤が破壊して地震が発生すること、内陸型（直下型）地震による岩盤の破壊は”活断層”として地表に現れた断層によって知ることが出来ることなどが広く国民の知るところとなった。しかしこうした報道の中には、地震断層と活断層を取り違えるなどの誤りもあり、正確な断層についての認識が必要であるように思われる。また今回の地震で再活動した野島断層については、既に地質調査所等による記載報告があるが、現地では断層を観察する機会を得たものとして、この断層と兵庫県南部地震および起震（震源）断層との関係でいくつか気をついた点があるので、ここに報告する。

なお野島断層の観察は、本年2月5日、6日の両日、京都府職労土木建築部会の方々と同行して行ったもので、現地では兵庫県職労の方にご案内いただいた。

2. 地震と断層について

地震は地盤の内部に蓄積された歪みエネルギーが、岩石の破壊によって解放されるものである。こうした岩盤の破壊部は面状に分布しているが、これは地殻にかけられた応力によって剪断破壊が生じた場合にできる剪断面に一致しており、震源断層と呼ばれている。小規模の地震では、こうした震源断層のズレが地表に達することは希であるが、規模の大きなものでは地表に地盤の変位が現れることがあり、これは（地表）地震断層と呼ばれる。

ところで、今回の兵庫県南部地震では、淡路島北部の活断層である野島断層が再活動し、明瞭な地震断層として出現した（図1）。このため、神戸市側でも地震断層の出現の可能性があり、地震直後から断層探しが積極的に行われた。このとき地震断層という呼称の代わりに活断層という用語がマスコミおよび一部研究者によって積極的に用いられたために、やや活断層本来の意味が誤解されかねない状況にあるように思われる。活断層は一般に「最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層」に対して用いられるものであるが、活断層研究会編「日本の活断層」では第四紀、つまり約200万年

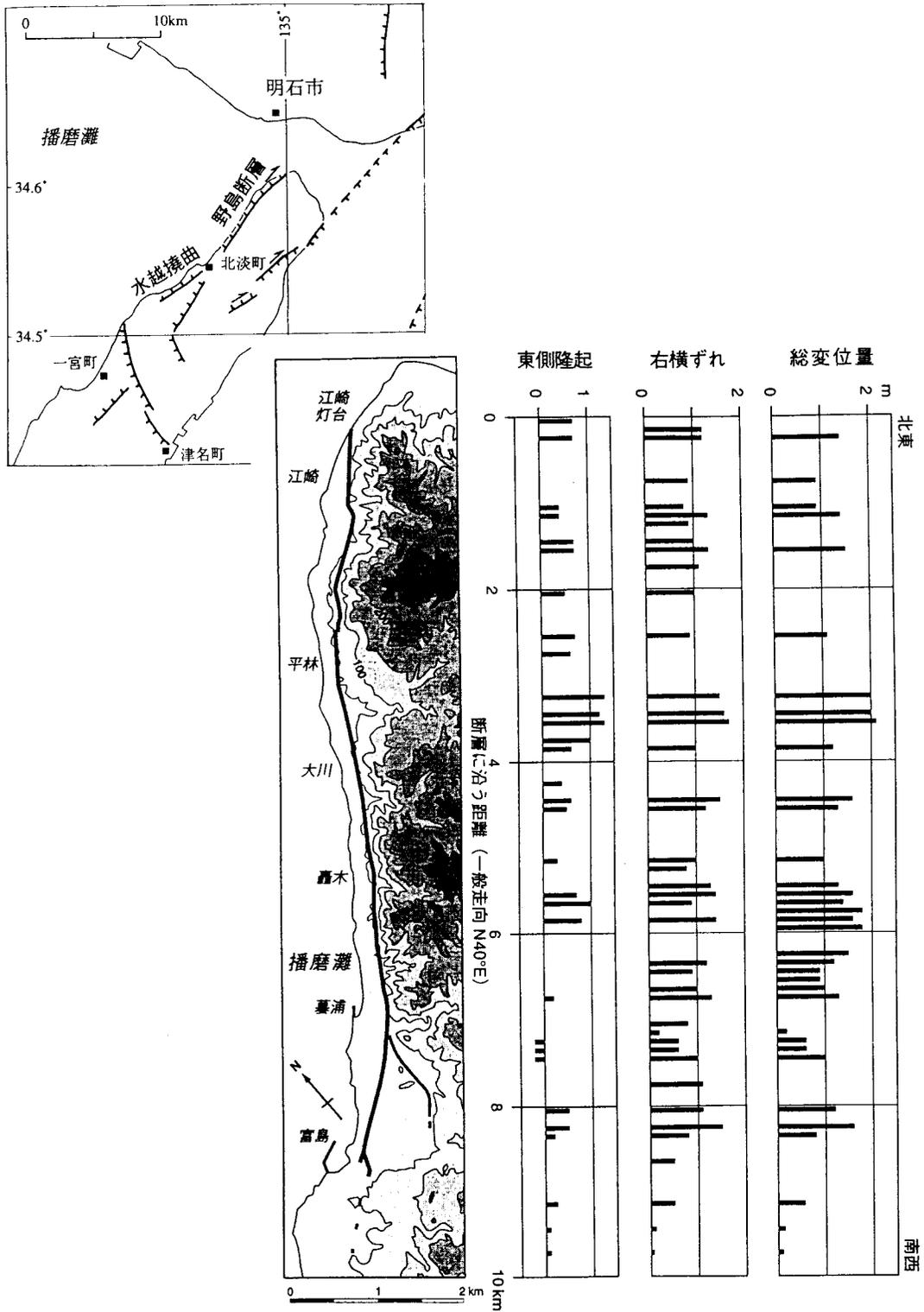


図1 野島断層とその変位置 (栗田他, 1995)

前から現在までの間に、動いたとみなされる断層が活断層として扱われている。したがって、活断層としての認定基準は、第四紀に動いたと見なしうる断層変位や断層地形が存在するかであり、それは地震活動に伴うか否かといったこととは別の基準であることに注意する必要がある。ただし、地震学分野では一般に、大規模な地震活動によって地表断層が出現することから、活断層が地震活動に伴って変位してきたものであると考えられている。一方、大規模な活断層としてよく知られているなサン・アンドレアス断層系のなかには、ほとんど地震活動を伴わずに滑動しているハイワード断層なども知られており、日本の活断層が 100パーセント地震活動に伴うものであるかは議論の余地があるところであると思われる。ともあれ、日本にはきわめて多くの活断層が識別されており、これが第四紀に地震活動を伴って変位したものであるとしてもごく最近の歴史時代の地震によるとは限らないわけで、活断層=地震断層といった印象を与える用法は避け、本来の定義からしても地震断層と活断層は区別して用いることが良いと考えられる。

3. 野島断層

野島断層は水野他(1990)によって詳しい記載がされている活断層であり、今回の地震活動によっても、全く同一の断層が滑動している。北淡町平林南方では、水野他によって南東側の花崗岩が上昇し、北西側の大阪層群の粘土層と接している露頭が写真とともに記載されている。ここでは今回右ズレ120cm、南東上がり 100cm 程度の変位が明瞭に認められ、断層面には同センスの滑り面が見られた。また断層面には厚さ 5 cm の圧砕粘土ができており、この断層面が繰り返し地震活動に伴って変位したものであることがわかる。断層面は平面性がよく、直線的に延びている。しかし、より南側の造成に伴う人工盛土の部分では、杉型(図2)の展張性割れ目となっている。このようなことは、北淡町小倉の造成地の野島断層にも認められる。ここでは断層は大阪層群の粘土層を切っており、その場合は断層の平面性もよく、直線的に延びているが、盛り土や水田部分になると、杉型の展張性割れ目になったり、南東側上がりのセンスが弱くなる傾向などが認められる。つまり、軟弱な被覆層が存在する場合には、断層の本来のズレのセンスが弱くなったり、異なる現れ方をすることがあるようである。このことは神戸市側の断層変位を考える上では注意しておく必要がある。つまり、野島断層のように岩盤や更新世のやや締まった地層を切る明瞭な断層は、完新世の被覆層が厚いところでは認められない可能性が高い。

地震断層は震源断層と調和的であることが多いとされており、野島断層も大局的には余震域から推定されている地震断層と一致している(図3)。しかし詳細を見ると余震域の延びが N50。E 方向であるのに対して、野島断層は N40。E 方向で斜行している(図4)。

このように斜行している場合は、震源断層のズレのセンスが右水平ズレであったとしても、地表断層では圧縮型の逆断層となることが期待される(図5)。淡路島の断層を含めた六甲断層系は今回の余震域ときわめて調和的な延びを示しているが、詳細に見ると野島断層のように左回りに斜行しているのが目に付く。つまりミ型に配列した雁行配列になっている。この場合は断層が逆断層のセンスを示すこと

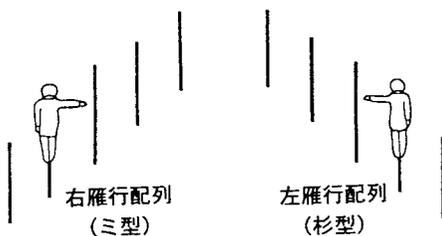


図2 ミ型と杉型の雁行配列

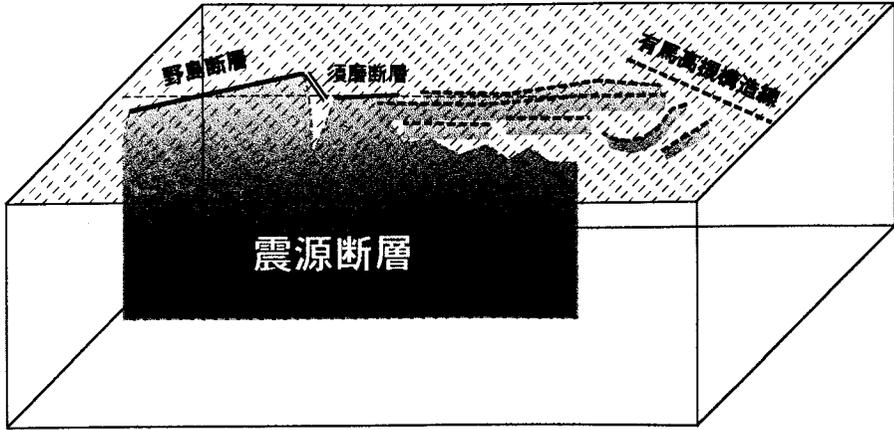


図3 震源断層（兵庫県南部地震）と地表地震断層

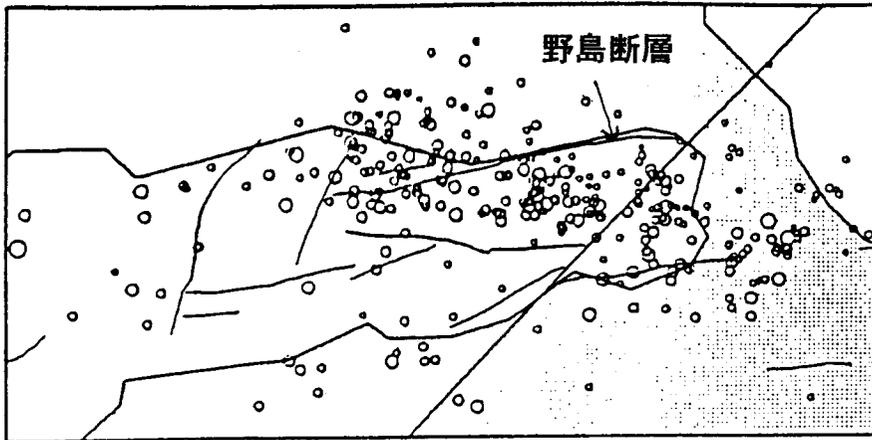


図4 淡路島における余震分布と野島断層との斜交関係
余震分布は京大防災研究所地震予知センター「1995年1月17日兵庫県南部地震(M7.2)観測結果速報(1995年2月20日発行)」による

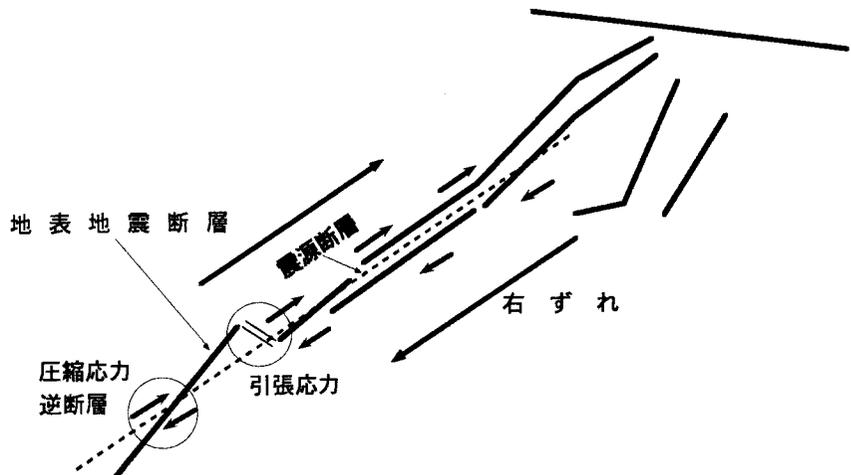


図5 震源断層に斜交した地震断層（左下の断層線が野島断層を示す）

になるが、淡路島が西側の野島断層と東側の楠本断層に挟まれて隆起し、神戸市近辺では六甲断層系によって六甲山地が隆起している事実は、この断層のセンスと極めて調和的である。昭和2年に起きた北丹後地震では、地震断層として郷村断層が生じたことはよく知られている。この郷村断層は左ズレの断層であるが、この断層系は杉型の複数の断層の集合で上下動も伴われていることが、地震直後の調査でも明らかにされている(図6)。近畿地方に普遍的に見られる北東-南西方向の断層系、北西-南東方向の断層系は共役断層で、太平洋プレートとアジアプレートの間の東西の圧縮応力によって形成されるものとされている。この圧縮によって地殻内部では今回の震源断層のような水平ズレを生ずるが、地表では断層が斜行した雁行配列となり、逆断層によって地表の起伏が拡大されていくことになっている。

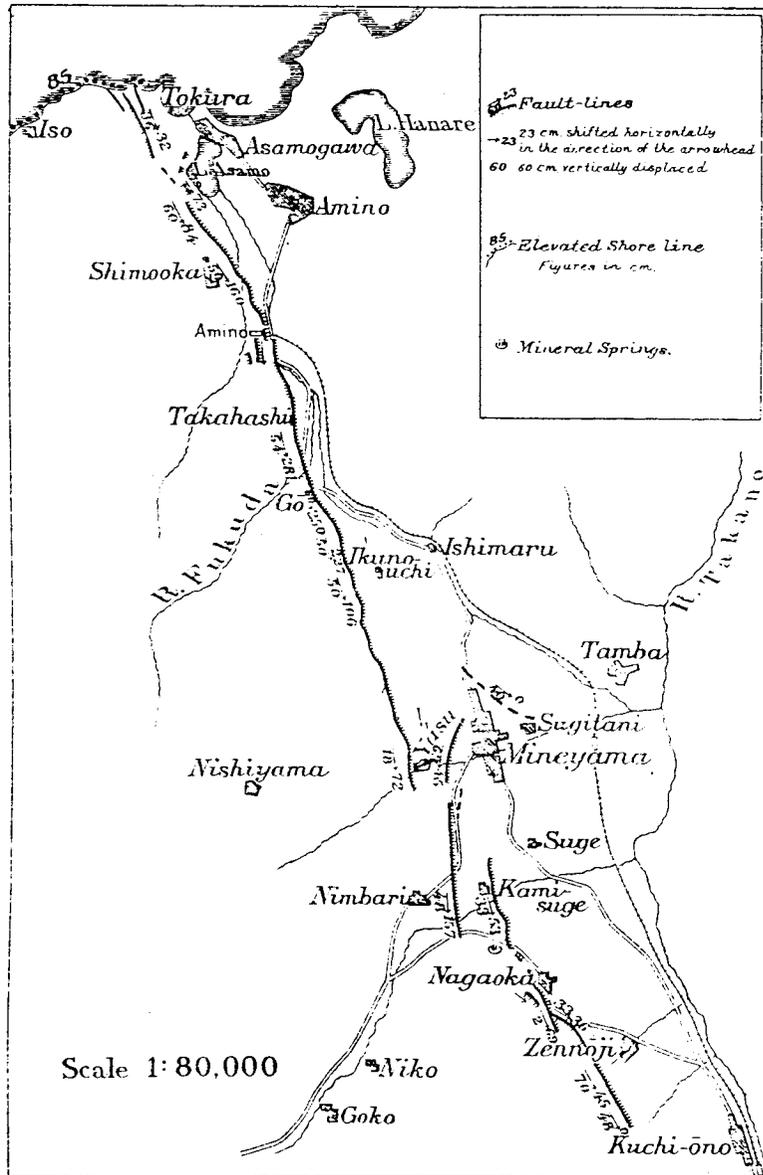


図6 北丹後地震に伴う地震断層 (Yamazaki and Tada, 1927, 東大地震研彙報)

参考文献

- 1) 粟田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・木村克己：1995年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層. 地質ニュース, 1995, no. 16-20.
- 2) 活断層研究会編：新編日本の活断層. 東京大学出版会, 東京, 1991, 437p.
- 3) 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩：明石地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図), 地質調査所, 1990, 90p.

地盤災害 —西宮・大阪周辺部を中心に—

三田村 宗樹（大阪市立大学）

兵庫県南部地震による被害は、特に阪神間では、家屋の被害もさることながら土木構造物をはじめとする鉄筋コンクリート構造物や鉄骨製構造物等が予想されなかったような大きなものとなっている。一方、淡路島北部の野島断層に沿う地域では、木造家屋の被害はかなり大きい。学校校舎・住宅などの鉄筋コンクリート構造物は神戸地域に比べるとその被害程度は大きくない。また、野島断層は、地震断層として、その変位が地表に現れ、その地表変位に伴う基礎の変形から家屋が倒壊したものが多く見られるようである。淡路島の野島断層西側地域では花崗岩をおおう神戸層群・大阪層群の厚さは 200~300 m であるのに対して、阪神間では数100 mから 1000 mを越えるとされている。このような地質構造の差異が地表付近の地震動に大きな影響を与え、被害分布にも現れているものと見られる。

これらの被害をより明確に解釈し、今後の都市直下型地震の災害に備えるためには、地盤構造を介した地震動の伝播機構を詳細に検討しなければならない。その前段としては、今回の被害分布と地盤構造との対応関係を検討しておく必要がある。ここでは、西宮・大阪におけるこれらの点についてふれることにする。

1. 西宮周辺地域の地盤災害と地盤構造との関係

図1は西宮周辺地域の液状化地域と亀裂集中地域の分布を示したものである。この図には、新旧の地形図の比較から抽出した盛土地域と池の跡地と地質構造線を併記した。液状化の発生地点が沖積谷や溜池跡地であった箇所であることがわかる。また、亀裂集中地域が盛土地域や傾斜地（多くの場合小規模な盛土地域であることが多い）に分布している。特に多くの犠牲者を出した仁川百合野町の崩壊地は、新旧の地形図の比較から明らかに盛土地域であることがわかり、今回の地震でその盛土部分が崩壊したことがうかがえる。

一方、これらの被害分布を地質構造線との比較でみると、断層線を境に落下側（南東側）の地域に集中する傾向があり、上昇側（北西側）では対照的に被害が軽減する。これは、

- ① 断層線に沿って斜面地が連続し、そこが景観上の理由などから選択されるように造成がなされ、山麓湧水の顕著な谷間に盛土地域が集中していること
- ② 断層線を挟む落下側の地域は、被覆層である第四紀層が厚く発達し、これに伴う地震動の増幅作用、フォーカシング現象によって震動集中帯となったこと

などがその要因として考えられる。

阪神間の土地利用の変遷をみてみると、最初に開発がなされたのは、河川自然堤防や沿岸砂州上の微高地で、砂地盤で適度な支持力を持ち、地下水位も周りに比べ低く、湿気の少ない住み良い場所である。明治の地形図ではそれがよく現れている。その後、人口の増加とともに、戦後の神戸・大阪の復興とともに、低湿地にも住宅地が広がってゆく。このような地域は従来、湿気の多い、地盤の軟弱な地域であったが、建築技術の発達や水田の

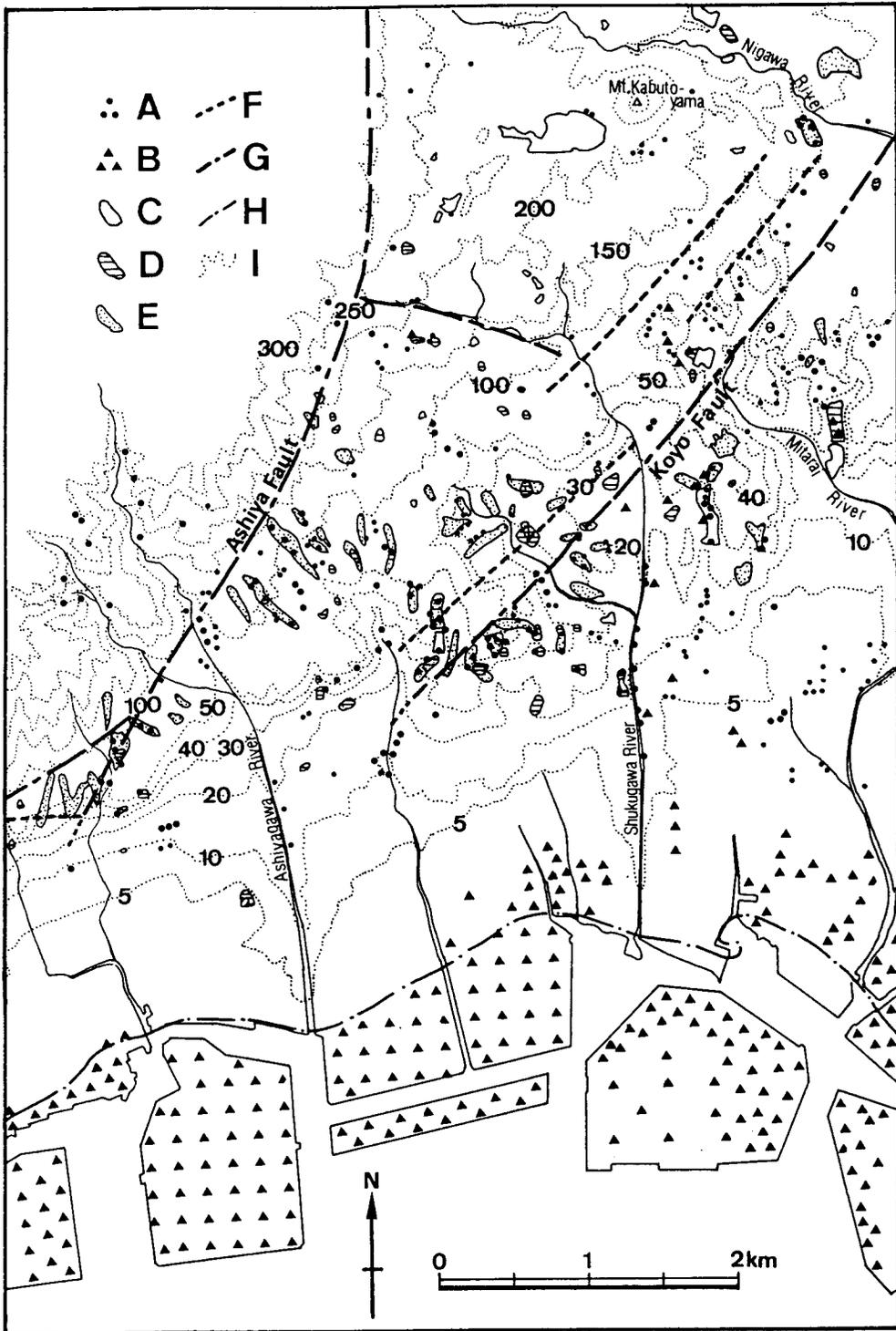


図1 西宮市夙川周辺の液状化・亀裂被害・人工改変地と地質構造線¹⁾
 A: 亀裂集中地域, B: 液状化被害地域, C: 現存溜池, D: 溜池跡地, E: 斜面盛土地,
 F: リニアメント, G: 断層線, H: 明治18年(1885年)の海岸線, I: 地形等高線.

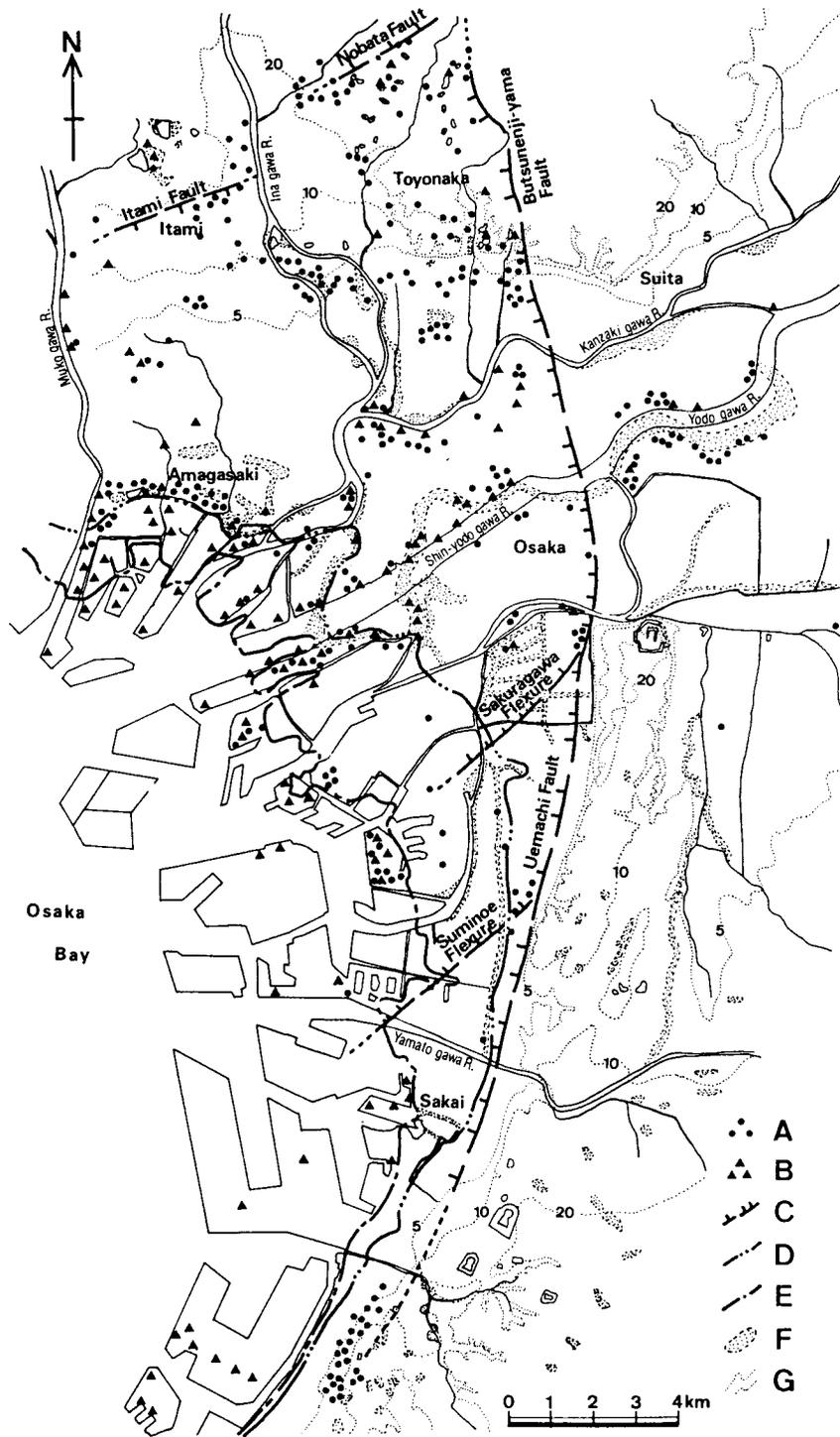


図2 大阪周辺の液状化・家屋損壊被害・人工改変地と地質構造線¹⁾
 A:家屋損壊地域, B:液状化被害地域, C:地質構造線, D:旧海岸線(江戸期1680年頃),
 E:旧海岸線(明治18年, 1885年), F:旧河道, G:地形等高線。

減少とともにそれらの箇所が急速に開発されてゆくことになる。低地部の開発が飽和状態となると、次に進められたのは、丘陵地の開発である。これまでは、起伏が多く好まれなかった土地を造成して平坦化し、宅地化することが行われた。阪神間の自然の平坦地である台地部は戦前に宅地化されていたが、その周辺の傾斜地は、戦後急速に開発が進み、景観の良さも相まって多くの住民が居住することとなる。ところが、このような傾斜地は、阪神間では活断層の影響を受けた構造地形であることが多く、上記のような地盤変形を集中的に受ける箇所となってしまった。被害の大きな箇所は、多くが昭和 30～40 年代にかけて造成されたところが多いようである。

2. 大阪周辺地域の被害分布と地盤構造との関係

図 2 は液状化被害・家屋損壊被害地域の分布と旧河川跡・地質構造線を示したものである。明治以降、大阪では多くの河川が埋め立てられてきた経緯がある。新淀川は、明治期に開削された人工河川である。新淀川開削までは、淀川の河口部の分流である中津川が大きく蛇行しながら流下していた。今回の地震で新淀川の堤防周辺で大きな被害を受けた箇所は、旧中津川河道であって、河川数だけでなく周辺宅地に及ぶ広範囲な液状化が発生し、不等沈下も確認された。また、やや上流部の守口周辺でも、旧淀川河道であった箇所の家屋損壊被害が集中している。

地質構造線との関係に関しては、西宮地域と同様に、断層線を挟んで盆地側地域（西側地域）に被害が集中し、東側ではやはり対照的に被害が軽減する傾向がみられる。上町断層の西側には第四紀層が厚く覆っている。

大阪平野では、深層ボーリングや反射法地震探査が行われ、地盤構造に関わる資料が神戸地域に比較すると充実している。これらをもとにした上町断層を挟む地域の簡単な地下構造モデルを作成して、地震波線の二次元レイトレーシングを行った結果²⁾は、図 3 に示すように波線は断層線より盆地側に寄った箇所でも集中し、その反対側で粗になっていることがわかる。上記の②のフォーカシング現象による効果が大きく被害分布に影響を与えたものと見られる。

3. 日本の大都市地盤にみる共通点と今後の課題

日本の大都市は、そのほとんどが、海岸平野に立地している。このような地域は、第四紀の構造運動の活発な地域であり、平野地下には軟弱な地層が厚く分布している。沿岸には特に軟弱な粘土や緩い砂層が表層をおおっている。また、平野の周辺には丘陵地があり、造成しやすい半固結の第三紀層や第四紀層が分布し、その多くがベッドタウンとして開発されている。低地・丘陵地・山地の地形的境目は、多くの場合、活断層があり直下型地震の震源となり得る可能性を介在している。

このような共通の地盤条件を持つ都市は、ひとたび大規模な地震に見回れると、基盤岩から入射した震動が、厚い被覆層で増幅され、断層などの地下構造に伴ってフォーカシングなどを伴ってより強調され、地表に伝達されてゆく。表層では、また緩い砂層が浅い地下水位という条件も重なって大規模な液状化現象を発生させる。特に沿岸部の埋立地や池・旧河道の埋立池などで多くの被害が集中する。谷埋めの造成盛土でも異常な間隙水圧の上昇で極端な強度低下が起こり、大きく変形する。盆地内を往復するような表面波の重複

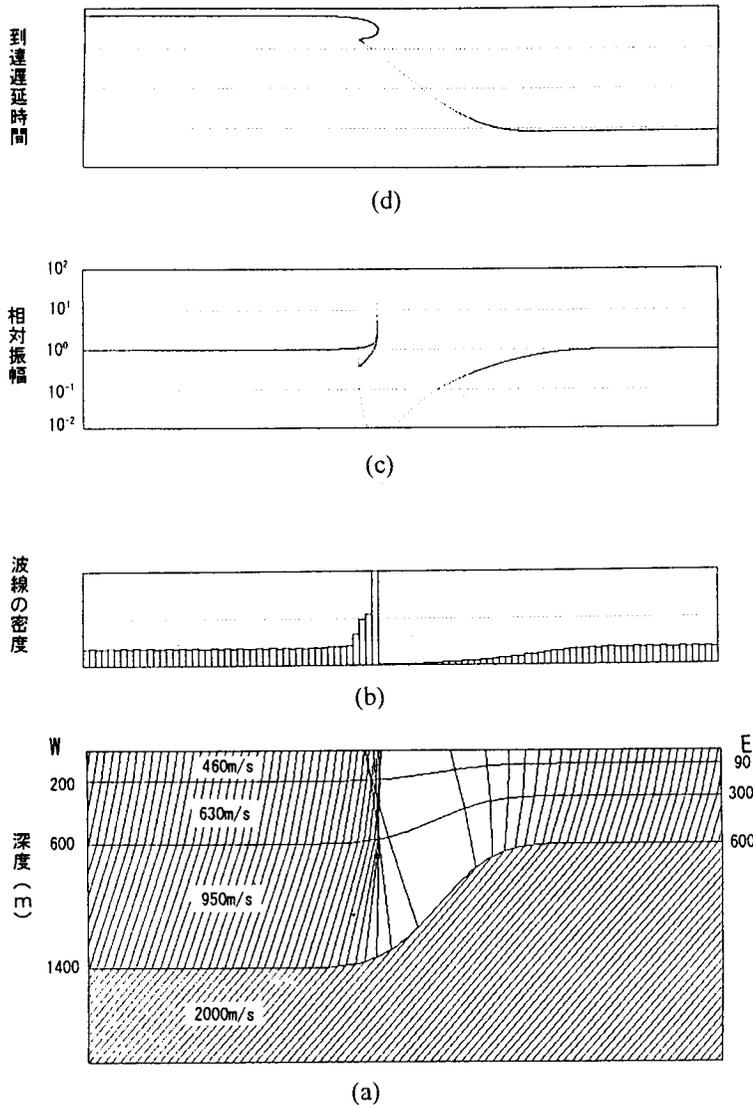


図3 大阪平野上町断層の地盤モデルによるSH波のレイトレーシング結果の一例²⁾

反射によって、特に長周期の震動が長時間継続する、などといった共通した現象が現れ、大きな被害が発生することになる(図4)。

阪神間の山麓部から低地部にかけての緩傾斜地は、山麓扇状地が表層を覆っている箇所が多く、大阪沿岸部や東大阪の低地部に比べ比較的地盤の良い地域であるとみなされ、建設基礎地盤としては、表層付近から十分に支持力を確保できる地域である。しかし、六甲山麓部には活動度の高い活断層が多く確認されていたのも事実である。その多くが、六甲山地の東北東-西南西方向の伸びに対して、北東-南西方向をもち、やや斜交している。このため山麓部までは断層露頭が確認できるが、それらの低地部への延長については、従来ほとんど確認されてこなかった。調査ボーリングも建設基礎調査が目的であるため、支

持層が確認できる深度に掘削がとどめられ、深層ボーリングは行われていない。山麓部の扇状地成堆積物の諸特性や低地部に存在する伏在断層に伴う諸特性の変化は、地盤の地震時の挙動をつかむ上で最も重要なデータであり、地盤の動的モデルを組み立てる上で必要不可欠なものであるが、これに関する資料は、現在ほとんど神戸地域では公表されていない。特に被害激甚地区の地盤構造に関する諸資料の収集を早急に進め、議論にみあう動的な地盤モデルを確立し、被害との関連を各種のシミュレーションから検討し、阪神間だけでなく各地の類似した都市地震防災に寄与できるものをつくらねばならない。

引用文献

- 1) 三田村宗樹・大阪市立大学阪神大震災学術調査団：
1995年兵庫県南部地震による地盤被害と地形の人工改変，シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集，日本地質学会環境地質研究委員会，1995，pp. 209-214.
- 2) 中川康一・大阪市立大学阪神大震災学術調査団：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，日本地質学会環境地質研究委員会，1995，pp. 233-238.

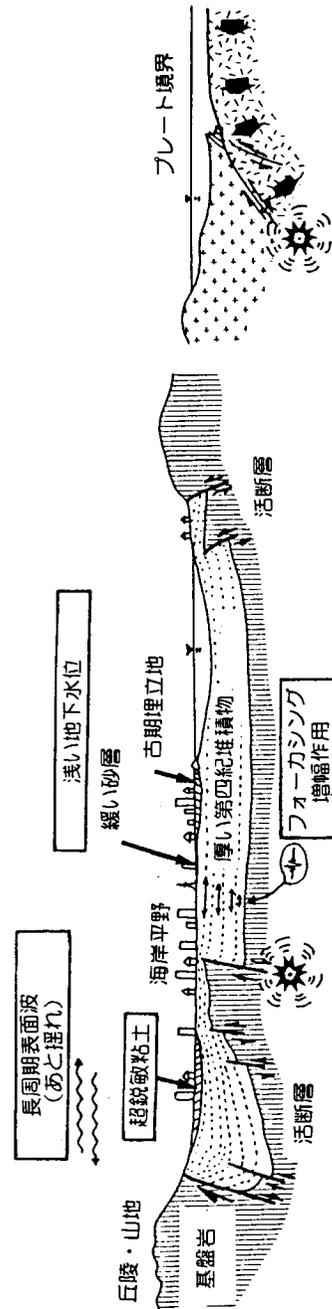


図4 日本の海岸平野に立地した大都市の抱える地震動特性の共通点を示す模式図²⁾

京都市内の被害の特徴

—花折、檜原断層近くの住宅に被害がなぜ集中したか—

東山高校地学部*・安松 貞夫（東山高校）

1. はじめに

兵庫県南部地震は京都においても少なからぬ被害を及ぼした。とりわけ被害は西山丘陵麓の檜原地域と、大文字山の麓の浄土寺地域に集中した。地学部はこの両地域を中心に被災住宅の分布調査を行い災害が集中した原因を検討した。災害が集中している地域は断層による基盤の変位が大きく、かつ、軟弱地盤という2つの要素を有するところであった。この2つの地下の要素のために振動が地表で大きかったと結論付けた。

この調査結果は東山学園研究紀要第40集にまとめた。ここでは、その要旨を示す。研究紀要第40集の別刷を必要とされる方は請求されたい。

2. 実態の発覚と浄土寺地域への現地調査の実施

地震の直後に檜原在住教員宅が被害を受け、周辺一帯に被害が集中しているとの情報を受けた。被災地域の方々が檜原活断層が動き被害を生じたと考えていることも知った。1月31日に京都新聞がこの地域の被害を報じ、概要が判明した。また、東山高校の北、大文字山麓の浄土寺地域でも住宅被害が多発していることを、在生生徒から知った。この地域でも「花折活断層が動いたために被害が多かったのではないか。今後が心配だ」の声もあり活断層恐怖症の体であった。浄土寺地域住民の疑問にこたえる必要もあり被害調査を行った。

敏速で、分担でき、客観的であるために被害確認基準を「屋根瓦が落ちた家」に絞り調査した。比較対照のため周辺の地域も調査した。調査は1月31日から開始し総日数12日間で行なった。この期間に修復の進捗状況を観察していると、調査結果はこの地域の被害の様子をほぼ把握出来たと思われる。

3. 調査結果

調査結果を図で示す（図1）。黒丸で示した瓦の落ちた家は60軒、白丸で示した一部の瓦の落ちた家は16軒だった。被害は浄土寺地域の盆地状の地形に従って分布し西田町など田の付く、かつての水田地域に集中し、白川の川筋に沿っても集中し、花折活断層に沿ってはいない。地下地質が白川砂の堆積地域であっても被害が生じるとは限らない。大正・昭和時代にかけて発達した地域で、埋め立て、盛り土の場所もあると考えられ、一部の被災住宅は必ずしも地下の地質との関係が明瞭ではないと思われる。

606京都市左京区永観堂町51東山高校内 電話075-771-9121 FAX075-771-7217

* 2年生 岡部 恒隆、中郷 芳将、藤川 武久、宮崎 博

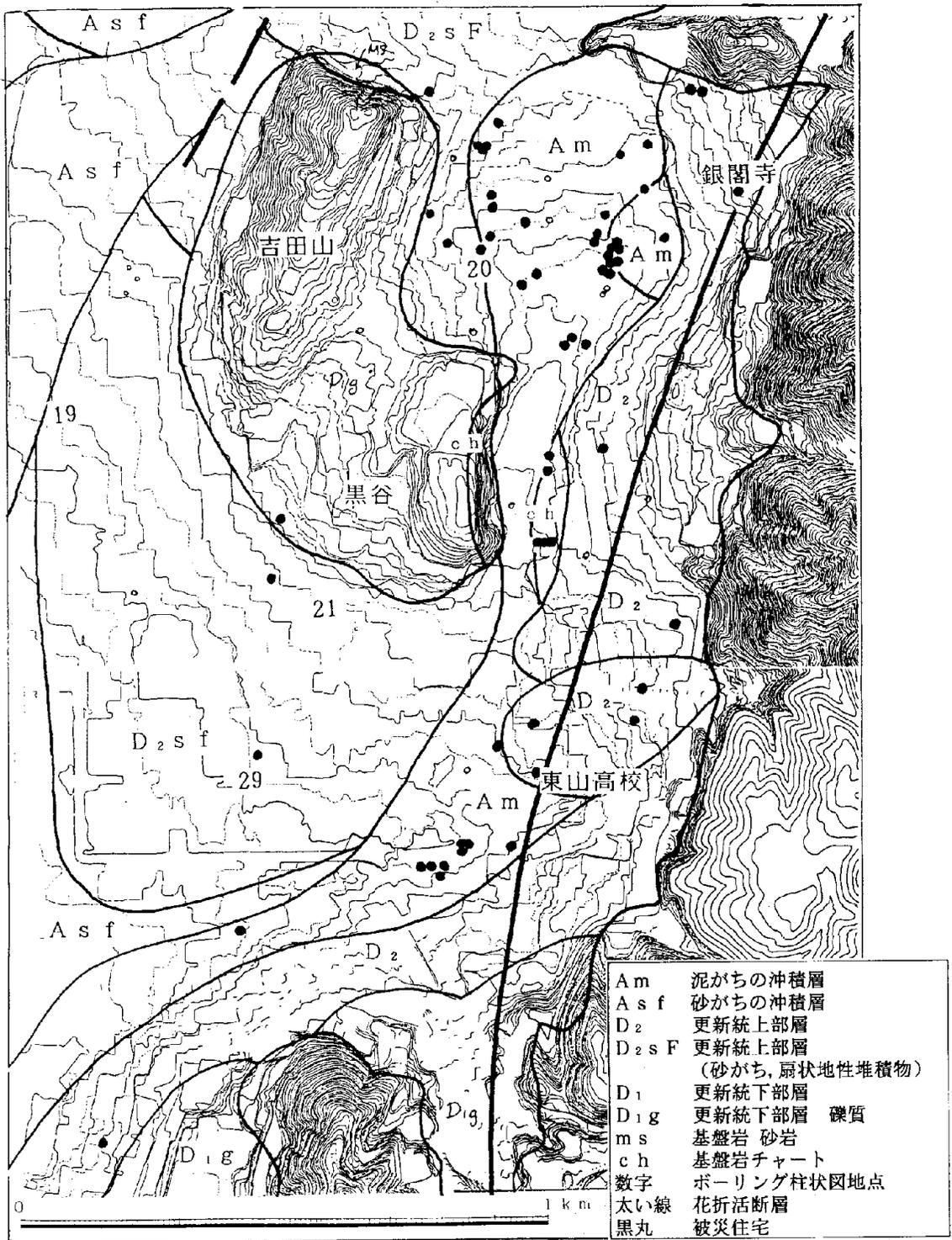


図1 浄土寺地域における被災住宅分布図
 等高線は京都市都市計画図 1/2,500, 吉田, 岡崎図幅利用.
 地質分布は石田他¹⁾による.

4. 土地の性質の調査

土地の改変状況を知るため古老への聞き込みや地形図、古地図の読取りを行なった。土地の古老の話は以下のものであった。

「かつては広く広がる水田地域。場所によっては汁田であった。白川は扇状地性の河川で頻繁に氾濫。通常は小川のような流れで白川砂がたまる。川の流れは時代によって少し付け替えられている」

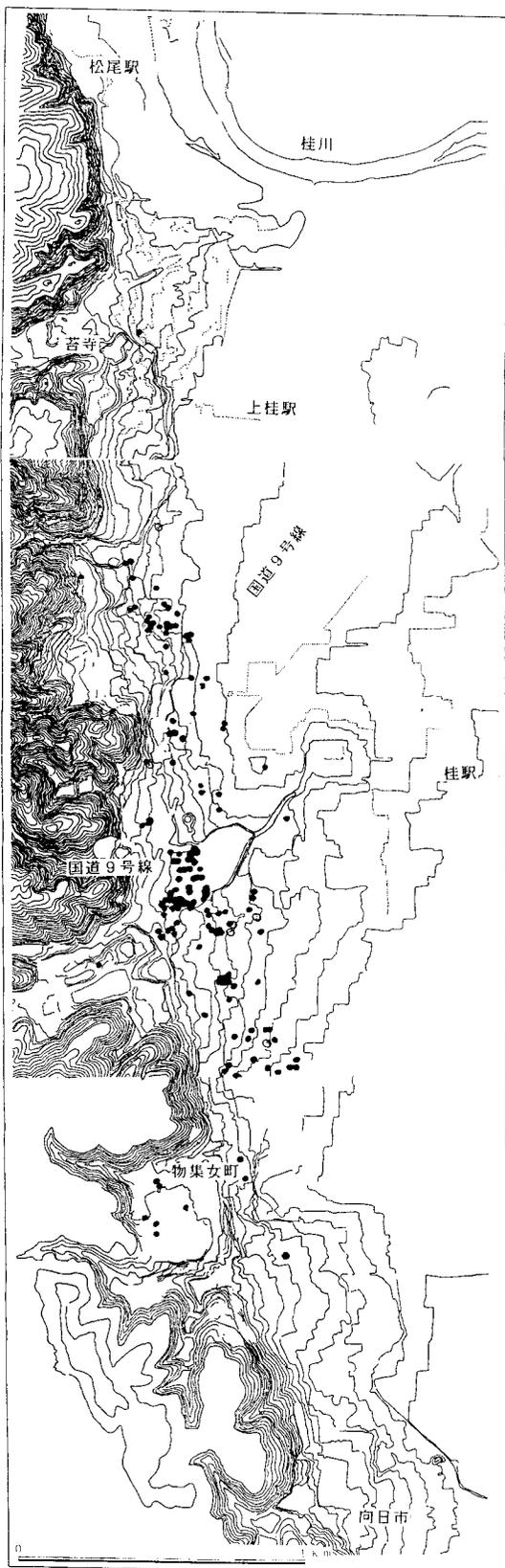
仮製2万分の1地形図や都市計画図などの読み取りの結果は次のようである。大文字山の西の低地および白川の流域地域に被害住宅が集中する。大文字山西の低地には北から南下する白川扇状地があり浄土寺地域は扇状地末端である。扇状地には北東-南西方向の現在の白川の川筋と北西-南東方向の川筋が認められる。この相対的な低地=谷筋に被害が集中する。

地質と被害住宅分布の関係では泥質沖積層地域に被害は集中し砂がちの沖積層地域には被害は存在しない。上部洪積層地域には15、基盤地域に5被害住宅があるが、局地的な埋め立てによるものと考えられる。

以上から浄土寺地域は白川扇状地の末端、泥炭の堆積した低湿地で最近まで水田として利用されていた地域で、被害は土地の軟弱さによるもので活断層によるものではない。しかしなぜ、この地域に限って被害が集中したのか説明できない。

図2 檜原地域における被災住宅分布。

等高線は京都市都市計画図(1/2, 500)地形図を利用。被害は山地と低地の間の緩傾斜地域に集中し、低地では見られない。

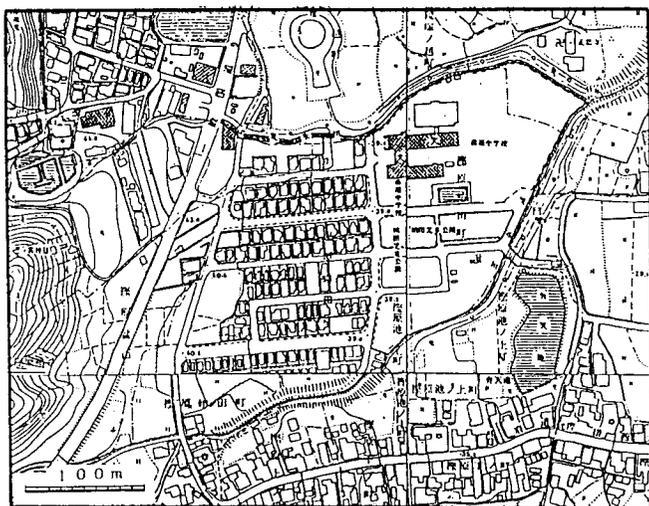


5. 檜原活断層地域の被害の調査

檜原活断層近辺の被害を2月6日から3日間調査した(図2)。ここでは檜原活断層に沿って幅300mの範囲に被害家屋が集中していたが檜原活断層に沿う全域ではなく、山田南山山田町から檜原前田町の約1.5kmの範囲に限られる。被害の集中する地域は地形図によれば天井川周辺や扇状地末端などの低湿地とか、蛸田町のような埋立地域である(図3)。この地域よりも北や南は段丘地域であり、被害は生じていない。この地域の場合も、湿地、埋め立てなど軟弱地盤で説明できる。



昭和10年修正測図
原図は1/3000



昭和47～54年修正測図
原図は1/2500

山田	昭和50年	柱	昭和50年
中山	昭和47年	川島	昭和54年

図3 檜原地域でも被害が集中した蛸田町の新旧地形図での対比

上：昭和10年修正測図，下：昭和47～54年修正測図

2つの天井川の内側が埋め立てられ、平地が作られている。檜原中学付近では5m以上の埋め立て、住宅地でも2～3mの埋め立てがなされたことがわかる。

6. この段階での問題点の整理

a. 「活断層」から離れた軟弱地盤の低地ではなぜ被害が出なかったのか。軟弱地盤地帯の京都市南部ではこれら両地域に似た被害は聞かない。また、大文字山麓でも白川沿いの軟弱泥質沖積層は南西に延びるが被害は生じていない。また檜原地域でも活断層から離れた水田埋め立て地域でも被害住宅が見られない。今回のこの2地域の被災は軟弱地盤だけでは説明できない。

b. 他の「活断層」近辺、たとえば、震源地の神戸側により近い光明寺断層や金が原断層の場合はどうであったのか。断層付近の光明寺では、白壁がひび割れ方丈池では堤防がひび割れた。しかし、周囲の住宅を含め瓦の落ちる被害はなかった。檜原や浄土寺地域のように断層の近辺に軟弱地層の地域が無く住宅開発も進んでいないためと考えた。なお光明寺断層北東延長部の川沿いの軟弱地域にある住宅には被害があった。

7. 「活断層」に沿った地下構造に原因があるのでは。

地下構造と軟弱層の2つの要素で検討していくと、檜原地域、浄土寺地域、さらに光明寺断層延長上に被害が集中したことを説明できるのではないか。浄土寺と檜原に共通するのは、軟弱地盤、そして、基盤のブロック直下という位置である。両地域では、震源地側に岩盤が高く位置し、東では深くなる。この構造によって活断層に接する軟弱地盤地域に地震波が集中したと考え、岩盤の構造を検討した。

浄土寺地域では、熊谷直一(1961)が重力探査による地下構造調査を行い、吉田山から大文字山にかけては基盤の大きく落ち込んだ構造地域であることを明らかにしている。この陥没地域に白川の扇状地が発達し、浄土寺地域は、京都東北東南地質図(石田ほか1984)にあるように扇状地末端の泥質堆積物の集積する場である。この泥質堆積物はこの2万年間に厚さ6m堆積したものである。この泥質堆積物が液状化はしなかったにせよ強い揺れの原因となったと考えられる。

檜原地域の地下の様子も同様に推測される。植村善博(1990)は井戸調査で地下構造を推定している。それによれば被災集中地域は檜原活断層により基盤は境され盆地側が少なくとも、170mほど落ち込む地域である。小堀鐸二(1978)の軟弱地盤図、藤原重彦(1982)の支持層分布図や、表層地質図の細粒土層厚も西山に向かって厚くなる。つまりこの檜原地域の基盤は深く、沖積層が厚くなっている。

震源側に高く岩盤があり、断層を境して反対側に軟弱地盤のある地域で、揺れが大きく被害を発生させたと結論できよう。京滋の他の地域でもこうした立地条件の地域では規模こそ違え被害が集中している可能性がある。実際はどうだったのだろうか。

8. 今後役に立たいことと今後の課題

今回被害を生じた場所は、過去の大地震時には住宅は皆無の地域で、今回が初体験の新興住宅地域である。今回の地震による揺れを十分に財産として今後備えることこそ阪神大震災でお亡くなりになった方への最大の供養であると考えます。軟弱地盤とくに、活断層に沿う地盤変換地域は被害がとくに大きいことを承知して対策および開発を行うべきであ

る。

今回の地震による揺れと軟弱地盤との関連を求めれば、岩盤の垂直的な変位の存在、すなわち潜伏する未発見の活断層を捜し出せるのではないか。今後、調査すべき事項として京都の軟弱地域に対しての調査を急ぎ実施すべきであろう。

屋根瓦の損傷に今回の調査は限定したが、住宅の壁などの損傷から、揺れの方向、地盤の強弱を知ることが可能と今回の調査の中で感じた。住宅の損傷具合を調べ被災調査マップを完成させていけば、今後の災害への対策資料となろう。

この調査を行なうにあたって近畿地質センターの藤原重彦氏には資料、情報の提供を頂き那須民子氏、清水大吉郎博士には資料などお世話になった。本校の藤本秀弘氏には貴重な示唆を頂いた。これらの方にあつくお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石田志朗ほか：5万分の1表層地質図土地分類基本調査，京都東北部・京都東南部・水口，京都府農林部耕地課，1984.
- 2) 植村善博：京都盆地西縁の変動地形と第四紀テクトニクス，立命館地理学第2号，1990.
- 3) 熊谷直一：重力測定から見た比叡山西南側沖積地の地下構造、特に山麓下の花折断層について，比叡山，京都新聞社，1961.
- 4) 小堀鐸二：京都市の地盤について（地盤図とその考察），京都市防災会議，1978.
- 5) 西山団研グループ：京都盆地西南部、西山山麓の大阪層群，地球科学21-5，1967.
- 6) 東山高校地学部・安松貞夫：兵庫県南部地震で花折、檜原断層近くの住宅に被害がなぜ集中したか，東山学園研究紀要第40集，1995.
- 7) 藤原重彦：京都市の地盤について．応用地質学の最近の研究，日本応用地質学会関西支部，1982.