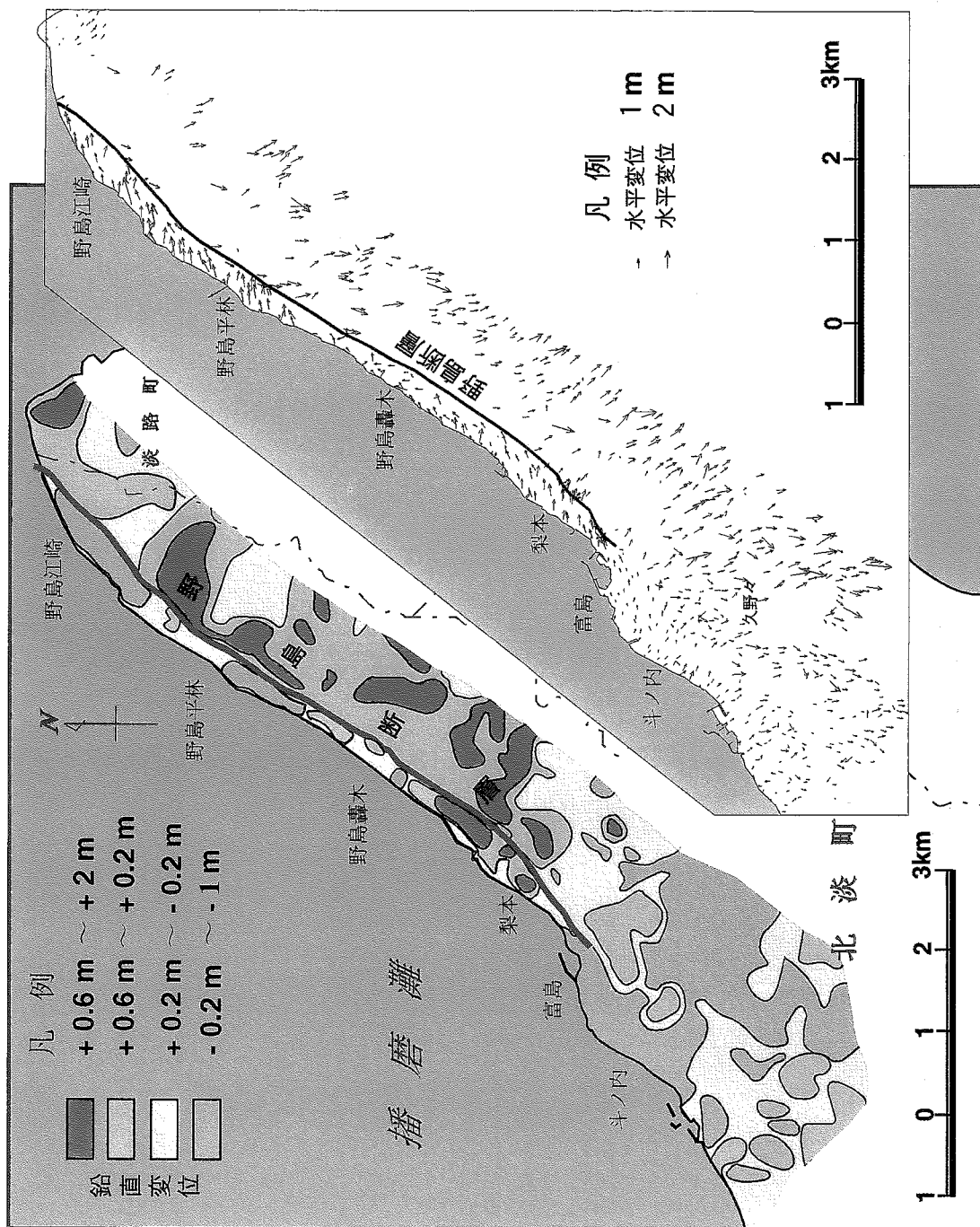


兵庫県南部地震

——応用地質学からの視点——

1996年10月

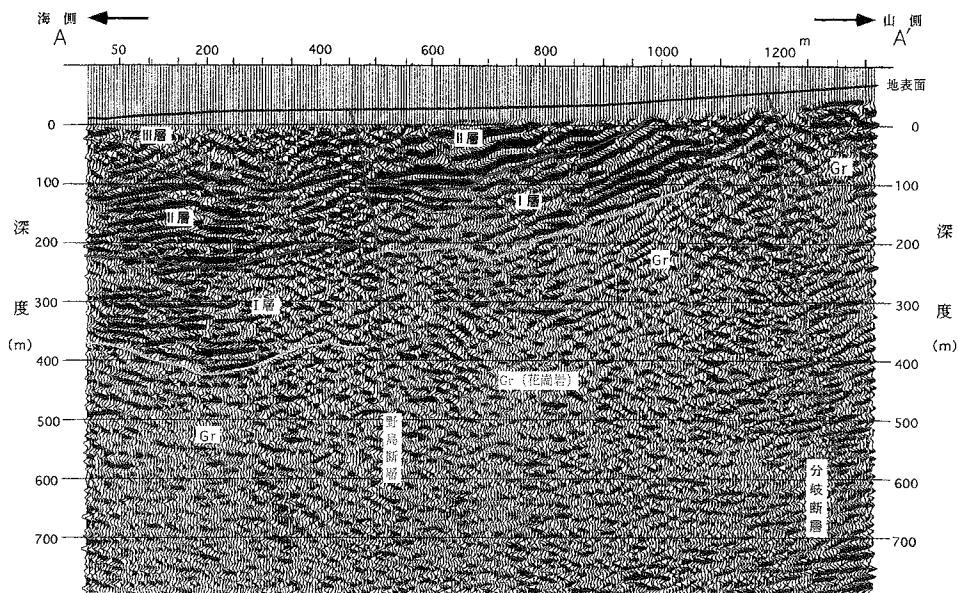
日本応用地質学会
阪神・淡路大震災調査委員会



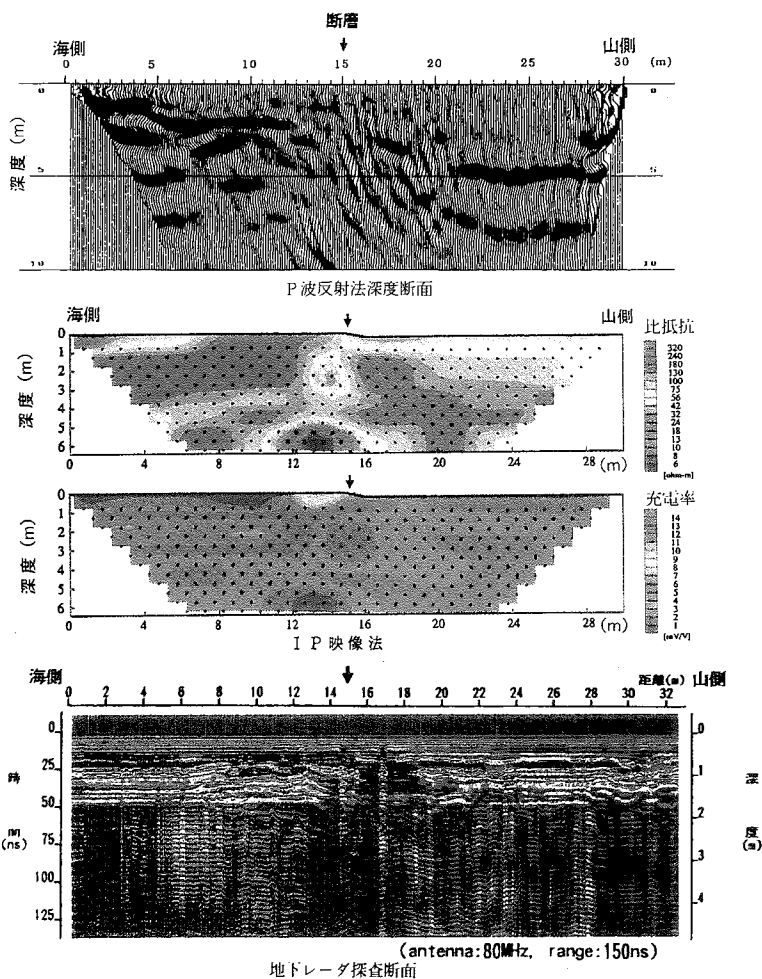
地殻変動量は、平成6年度兵庫県南部地震前後の空中写真を用いて、写真測量により880点の変位量計測を行い、水平変位量および鉛直変位量を算出した。

水平変位は、矢印の始点で計測を行っており、変位方向を矢印の向きで表している。鉛直変位は、880点の変位量を編集して面的な表現とした。

口絵-1 写真測量による野島断層周辺の地殻変動量（星野ほか、1996）（I編参照）



(a) P波反射法探査による断層の追跡〈北沢町梨本〉



(b) 極浅層探査による断層の追跡〈北沢町梨本〉

口絵-2 地震断層を対象とした各種物理探査結果 (I 編参照)

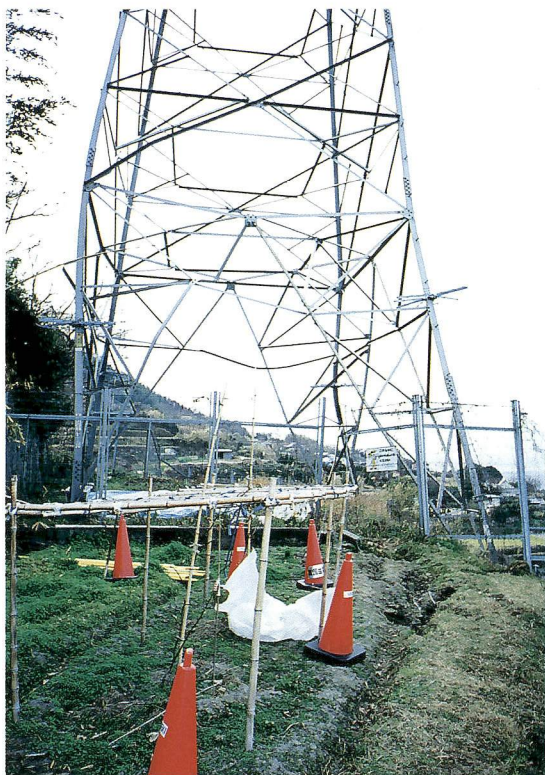
[資料提供: (a) ㈱ダイヤコンサルタント; (b) 応用地質㈱]



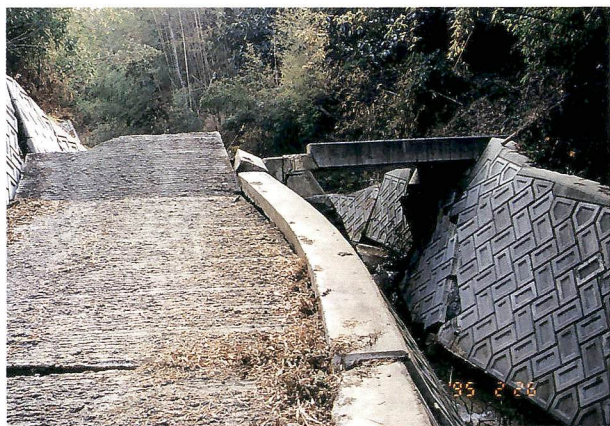
① 斜交する断層による道路の破壊と変形〈北淡町小倉〉



③ 水路の断層横断部〈北淡町梨本〉



② 断層直上の送電鉄塔の変形〈北淡町野島江崎〉



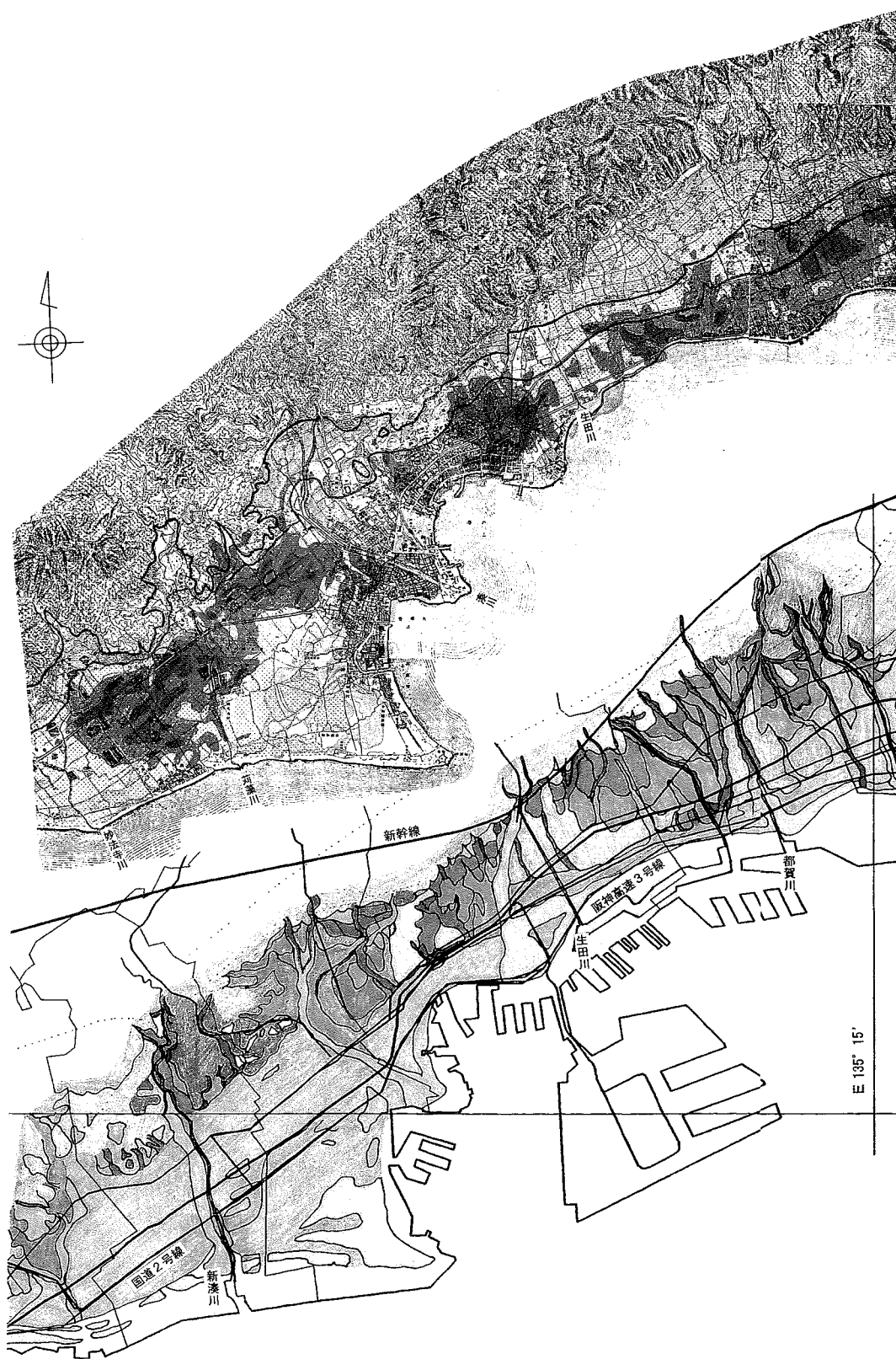
④ 断層横断に伴う河川護岸の破壊と道路のめくれ上り〈北淡町野島平林〉

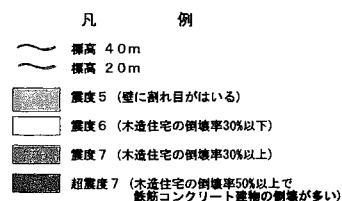


⑤ 断層横断によるため池余水吐の破壊〈北淡町大石〉

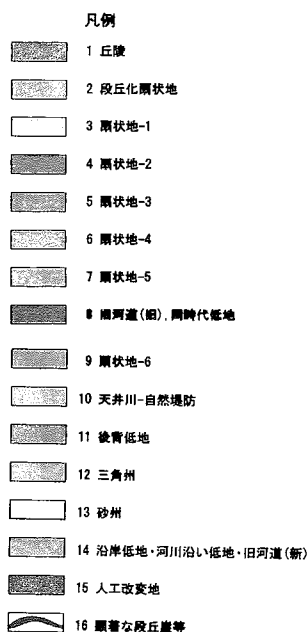
口絵-3 野島地震断層に伴う構造物被害 (I 編参照)

[写真提供: ①, ③, ④田中芳則; ②皆川潤; ⑤日吉直]





(a)被害状況と古地図（神戸東部～西宮）
（古地形は「明治前期関西地誌図集成」より引用）



(b)神戸・阪神間の地形区分 (田中真吾 原図 1995.)

凡例

温泉・鉱泉

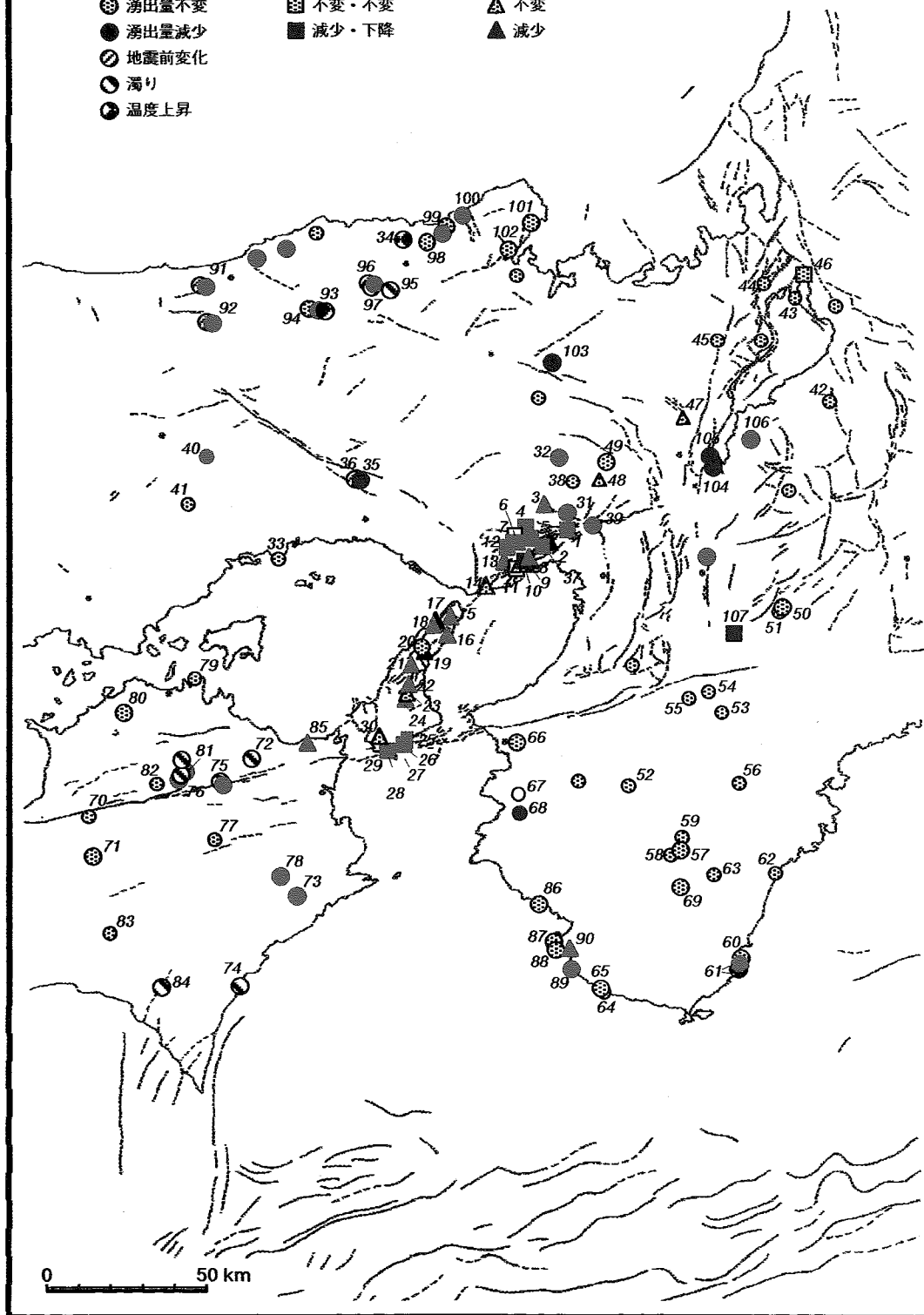
河川流量・貯水池水位

湧泉水量

- 湧出量増加
- ⊙ 湧出量不変
- 湧出量減少
- ⊙ 地震前変化
- 濁り
- 温度上昇

- 増加・上昇
- ▨ 不変・不変
- 減少・下降

- ▲ 増加
- △ 不変
- ▲ 減少



口絵-5 兵庫県南部地震に伴う広域地下水挙動 (Ⅳ編参照)

西村ほか (1995), King *et al.*, (1995), 佐藤ほか (1995)のデータを加筆, 地点番号は遠田ほか (1996)を参照

目 次

序 文	(3～4)
I. 地殻変動と地震断層	(5～45)
はじめに	(5～6)
1. 活断層と震源断層	(6～13)
1.1 既往の活断層とその評価	
1.2 震源断層モデル	
1.3 震源断層と地表地震断層	
2. 地殻変動の実態	(13～17)
2.1 地殻変動に関するデータ	
2.2 神戸側の地殻変動	
2.3 明石海峡の地殻変動	
2.4 淡路島の地殻変動	
2.5 地殻変動から見たテクトニクス	
3. 地表の変状と地震断層	(17～28)
3.1 兵庫県南部地震によって発生した地表変位	
3.2 地震断層と構造物被害	
4. 地震断層調査の実態	(28～44)
4.1 調査対象	
4.2 空中写真撮影と判読	
4.3 地表踏査	
4.4 トレンチ調査から得られた地震断層の挙動	
4.5 物理探査による断層の追跡	
5. ま と め	(44～45)
5.1 地震断層と活断層の調査	
5.2 地震断層の評価と課題	
II 地震動・地盤と構造物の被害	(46～93)
はじめに	(46～47)
1. 地質・地盤調査と地質・地盤特性	(47～63)
1.1 地質・地盤調査の実態	
1.2 地形・地質・地盤構造とその特性（六甲山南麓）	
2. 構造物被害の特徴	(64～68)
2.1 被害調査	
2.2 地形・地盤と被害の特徴	
3. 地震動特性と解析結果	(68～89)
3.1 定性的現象解析	
3.2 地震動特性	

4. 大局的地質構造と被害の相関 (89～92)
 - 4.1 ディレクティビティおよび岩盤上の地震動
 - 4.2 基盤地質と地震動
 - 4.3 活断層近傍の地震動
 - 4.4 軟弱堆積層の非線形性
5. まとめと今後の課題 (92～93)
 - 5.1 地形的特徴と地震被害
 - 5.2 地盤構成と地震被害
 - 5.3 震災の帯を発生させた原因
 - 5.4 大局的な地質構造と被害の関係
 - 5.5 今後の展望

Ⅲ 地盤災害の実態と地盤条件

(94～106)

- はじめに (94)
1. 地盤災害、とくに斜面災害の実態 (94～102)
 - 1.1 山地の地盤災害
 - 1.2 丘陵部の地盤災害
 - 1.3 海岸部の地盤災害
 2. 地盤災害と地形・地質との関わり (102～104)
 - 2.1 過去の地震災害に見る地盤災害
 - 2.2 地盤災害の発生条件に関する検討
 - 2.3 地盤災害発生危険箇所の抽出
 3. ま と め (104～105)

Ⅳ 地震による地下水の変動

(107～114)

- はじめに (107～108)
1. 浅層地下水の変動 (108～111)
 2. 広域地下水の変動 (111～112)
 - 2.1 淡路島における地下水挙動
 - 2.2 広域地下水挙動
 - 2.3 連続観測結果
 3. 地下水の水質変化 (112)
 4. ま と め (112～113)

解説：地震断層・活断層関係の用語について

(115～119)

1. まえがき (115)
2. 地表地震断層 (115～116)
3. 活断層 (116～119)

阪神・淡路大震災調査委員会名簿

(120)

本特集の執筆者

(121)

特集

兵庫県南部地震 — 応用地質学からの視点 —

The January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu Earthquake — from the Viewpoint of Engineering Geology —

序 文

Introduction

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震については、当学会としてもいち早く阪神・淡路大震災調査委員会を結成し、「地震動と活断層」、「地盤・地震動と構造物」、「地震動と地盤災害」の3分科会による調査活動を進めてきた。

本委員会では、1995年5月に中間報告会、12月に報告会を開催するなど、逐次委員会としての活動報告を行ってきた。本特集は、12月の段階ではとりまとめきれなかった新しい知見も加えて、現時点での成果の総括を試みたものである。

本特集では、「地殻変動と地震断層」、「地震動、地盤と構造物」、「地盤災害の実態と地盤条件」、「地震による地下水の変動」についての報告をとりまとめた。同時に、こうしたとりまとめを通して、地質・地盤に関する防災・耐震工学的な立場からさまざまな課題が山積みされていることが示された。これらの成果が、広く会員諸氏の目に触れ、この分野の研究開発の端緒となればと期待するところである。

一般に、科学的な思考過程には、順解析的手法と逆解析的手法の2つの経路がある。地震防災という観点か

ら言えば、順解析の手法は、地盤物性や地震力から構造物等が地震に際してどういう挙動をするかを予測する方法であり、逆解析の手法は、構造物等が壊れたという事象からどのような破壊が起きたのかという原因を究明していく手法である。われわれは、常日頃この2つの手法を使って問題の解決を図っている。

しかしながら、今回の震災でこうした両手法がバランスのとれた機能を果たしたかについては疑問の余地が残る。必要なデータが入手しづらかったこと、マスメディアを通じた情報の氾濫が社会の混乱を招いたことなどもその一つである。

今回の震災で課題として提示されたものとして、地震が起きたときに地盤物性とか地震力とかをすぐに入手し、モデルを作れる体制の整備が挙げられる。基本的には、地盤・地震に対するデータベースがそれぞれの地域で備えてあり、地震が起こった場合には、解析に必要な物性や基盤地震動などがすぐに入手できる不断の備えが必要である。そのための一つが全国的な「動的地盤図」や「人工改変地盤図」の作成である。

一方、活断層と地震断層との関連や活断層のメカニズ

ムの解明は進んでいるものの、防災工学、耐震工学的立場からの活断層の整理方法、地表に地震断層が現れてからの調査内容などに対する統一的な見解はなされていない。

地下水については、全体として地盤災害などに水がどう関与しているかは地震のメカニズムとも関連して重要な問題である。地下水の観測には、既存の観測孔をもとにしたシステム化ができれば、より多くの情報をじん速に知ることができるはずである。

活断層にしても、地下水にしても、すぐに調べる技術、何から調べたらいいか、これとこれは調べておくべきだというものについての系統的な考え方の整理が必要である。また、それに対する基本的なマニュアルが必要である。

このように、地震に関する「データベースと動的地盤図の整備」や、「活断層の工学的評価法」、そして「地震災害調査法」や「地下水観測システム」といった調査の方法や調査・観測の体制を構築しておく必要がある。本学会に関連した今後の大きな課題である。

もう一つの重要な点は社会との接点である。逆解析的な思考では、得られた情報から原因が何であったかを考えるときに、異なった判断にたどりつくことがあり、解

の一意性が保証されていない。こうしたことから、今回、社会に対して情報が氾濫し、被害原因についての判断に対する混乱が生じてしまった。

日頃から地盤に対する説明を社会に対して積極的に行うとともに、地震発生後も社会に対して現象の判断に関する適切な情報をできるだけ速く流すことが重要である。このために、速やかに情報分析を行う組織の確立と、また、一般社会の人々にわかりやすく解説するための情報伝達技術の確立が重要になってくる。

このほかにも、情報の流れやすいシステムの構築、常日頃の防災に対する住民意識の向上の方法、人々が住んでいる地盤がどんな災害に弱いかといった危険度を専門的に解説できる場の構築なども重要である。

以上述べてきたことは、産学官の協力の下で、社会に対して本学会が貢献すべき大きな課題の一つである。

応用地質学会は、地質学という面での基礎科学を土台として、防災・耐震工学等の工学分野への寄与という重要な使命を担っている。こうした背景のもと、本委員会も新たな研究委員会組織として今後も活動していく方針である。これまでの会員諸氏のご協力に厚く御礼申し上げるとともに、今後ともこうした研究委員会へのご参加、ご協力をお願いする次第である。

I. 地殻変動と地震断層

Crustal Movement and Seismic Faulting

Key words : 震源断層 earthquake source fault, 地殻変動 crustal movement, 野島地震断層 Nojima seismic fault, 構造物被害 damages on civil engineering structures, 物理探査 geophysical exploration

Abstract

The Nojima seismic fault, appeared in the Awaji Island following the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, it attracted the interest of many researchers from immediately after the occurrence, since it showed a large displacement crossing a farmland, road and a river embankment. Engineering geological surveyers and researchers energetically investigated and studied the scale and moving mode of the surface seismic faulting and the relation between the surface deformation around the fault and various other kinds of damage.

In contrast to the Nojima seismic fault, a seismic surface faulting in the Kobe district was not clear except in a part of the area. Although the presence of faulting particularly becomes of major interest as an expansion factor of damage in the earthquake disaster belt; the remarkable damaged zone from Kobe to Ashiya and Nishinomiya; the results of the surveying were confined to finding out the intermittent shear displacement in some places. However, the results of deep ground prospecting showed that the extended part of known faults and the unknown faults lay under the alluvium or dilluvium. The relations between the lying positions of these faults and the damage on ground surface, ground ruptures and ground deformation, are so important to the engineering geologist.

The engineering geological investigation practiced after the earthquake about the crustal movement, the surface seismic faulting and the ground deformation related to the faulting, was unprecedented in scale, and it was the first case that various kinds of investigation methods were applied to the ground after the earthquake. Therefore, this chapter was written from the standpoint that the results of the investigation should be left as a documentary record as much as possible. These records would be expected to become valid material when later evaluation on fault activities, or to estimate any damage during earthquake.

はじめに

兵庫県南部地震に伴って淡路島に出現した野島地震断層は、1978年の伊豆大島近海地震に際して活動した稲取・大峰山断層以来の明瞭な地震断層であった。比較的観察しやすい位置に出現したことに加え、変位量が大きく、耕地や道路、河川護岸などの人為工作物を横断する

箇所が多かったため、当初から関係者の大きな関心を呼んだ。地震研究者が地震発生機構と関連づける立場から、地形・地質研究者が関西地方の造構テクトニクスの観点から取り組んだのに対して、我々応用地質関係の調査・研究者は地震断層の規模、運動様式や断層周辺の地表変状と各種被害との関係を明らかにすべく、精力的に調査・研究を実施した。

一方、神戸側では一部を除いて地震断層の存在は明瞭ではなかった。特に、震災の帯と称された神戸から芦屋、西宮にかけての顕著な被害域では被害拡大の一因として地震断層の存在の有無が注目されたが、地表において長距離にわたってずれ変位が連続する断層は発見されなかった。しかしながら、各種調査の結果は沖積層などの被覆層下に既知の断層の延長部、あるいはこれまで知られなかった断層が伏在することを示し、これらの断層位置と地表においての被害の関係や、地表に断続的に現れた割れ目、地盤変状との関係が、応用地質学的観点において重要であることを明らかにした。

本地震後に、既存断層、伏在断層、地表地震断層、および断層運動に関連した地盤変状に対して実施された調査は、かつてない規模であり、多様な調査手段が適用された初めてのケースであろう。したがって、本編は主としてこれらの調査結果をできるだけ記録としてとどめておくことが必要であるとの立場から書かれているが、同時にこれらの記録が、今後、断層の活動評価を行う上で、あるいは地震時の被害を考える上で、有効な資料として役立つことをも期待している。

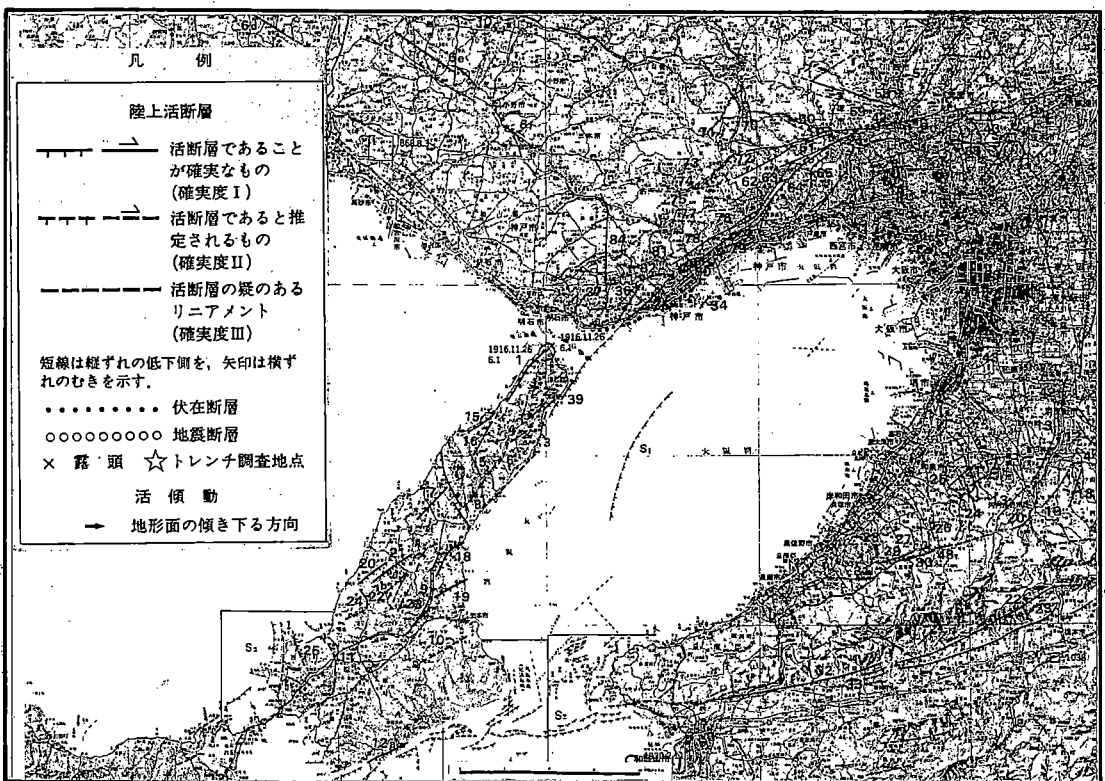
1. 活断層と震源断層

1.1 既往の活断層とその評価

1995年兵庫県南部地震は、近畿三角帯(藤田, 1974; 池辺, 1961)北西辺にあって、阪神地域の背後に当たる六甲山地の麓から、震央付近を経て淡路島北部に至る有馬-高槻-六甲-淡路島活断層系を構成する断層群の一部の活動に起因するものである(例えば、中田ほか, 1995a, b; 栗田ほか, 1995など)。

この活断層系は、図I・1-1のように、六甲山地付近では北西側隆起成分と右横ずれ成分を有するいくつかのB級活断層から成り、淡路島では地塁山地の両側を限るいくつかのB級(一部A級)の活断層からなる(活断層研究会, 1991)。

藤田(1968)および藤田(1995a)によると「淡路島を含めた近畿のネオテクトニクスは第四紀初期まで南北圧縮が優勢であったが、中期以降になって東西圧縮に変換し現在に至っている」といった指摘がある。岡ほか(1981)および岡田(1995a)によっても、第四紀後半の東西圧縮下での山地の急激な隆起に伴う地形発達につ



図I・1-1 活断層分布図(活断層研究会, 1991)

いて同様の指摘がある。近畿地方における東西圧縮については、田中ほか(1972)による測地学的観測や HUZITA *et al.* (1973) による微小地震の発震機構によっても裏付けられている。今回の地震解析からも東西圧縮の応力場が復元され(例えば、吉田, 1995; 菊地, 1995a; 石橋, 1995など), その応力場が現在も続いていることが示されている。

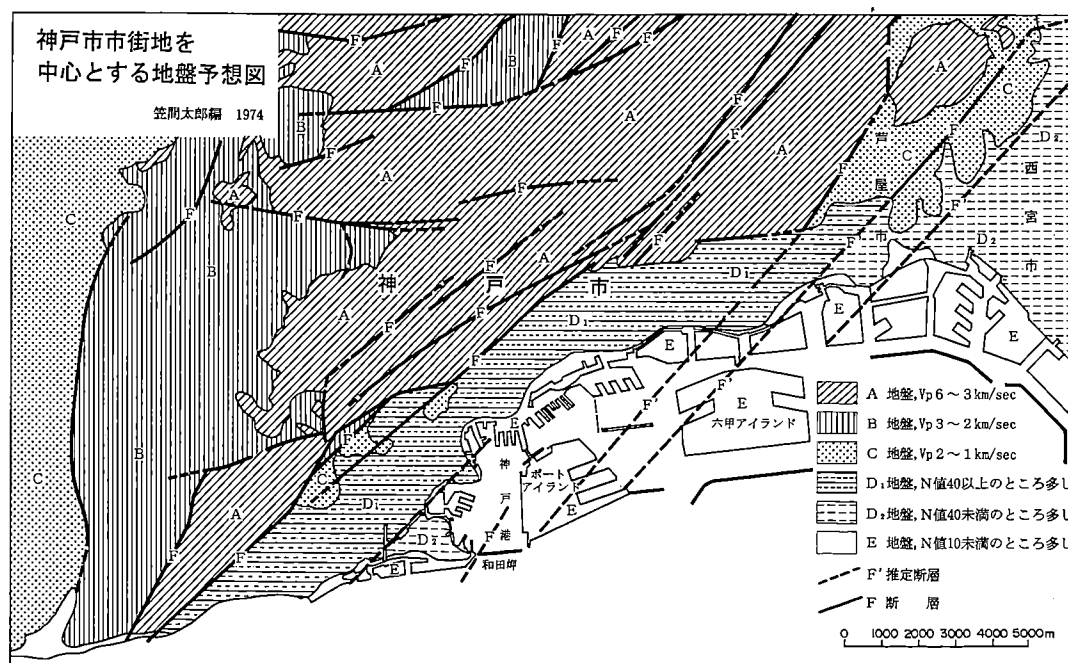
六甲山地周辺地域については HUZITA *et al.* (1971) によって詳細な断層の分布が示され、その結果は1/50,000の地質図にまとめられているが、とくに神戸地域に関係する地質調査所発行の1/50,000「大阪西北部」「神戸」「須磨」図幅は、基本的にはこれに準拠している。

六甲山地周辺の断層の本質はスラストであり、六甲断層、五助橋断層、芦屋断層などはいずれも大阪層群あるいは段丘礫層に衝上する活断層である。平野(1971)は、六甲山地を東西圧縮力のもとで形成された共役断層群からなる菱形ブロックの集合としてとらえており、市街地部分については、笠間ほか(1974)が、六甲山地の断層系の一部が神戸市街の沖積地を横切って北東から南西方向に斜めに延長している可能性を指摘し(図I・1-2)、それらを推定断層として表示した。さらに、神戸における直下型地震発生の可能性とその場合の被害についても言及したが、それは必ずしも充分活かされた

とは言えない。

淡路島の北部で山地を地塊状に区切る活断層は、中部においては海拔200~300 mの定高性(浸食小起伏伏面状)がある山地と、急斜面を介して幅の狭い丘陵地を境している。この山地は主として花崗岩類からなり、丘陵側は神戸層群(中新統)や大阪層群(鮮新統~更新統)を主体とする。神戸層群と大阪層群は一般に水平であるが、山地との境界をなす活断層近接部では急傾斜する。岡田(1995a, b)によると、これらの活断層は北東-南西方向と北西-南東方向の2系統が卓越し、北東-南西方向に延びる野島・浅野・楠本・東浦・仮屋・先山などの活断層は右横ずれが、志筑断層など北西-南東のものは左横ずれが卓越する(図I・1-3)。

明石海峡の海底には図I・1-4に示すように、NE-SW, NW-SE, ほぼE-W走向の3方向の断層が存在する(藤田ほか, 1984; 建設省道路局ほか, 1970; 藤田, 1995b)。明石海峡の海底基盤をなす神戸層群の上面等高線は北西-南東方向に延びており、海底地形に似た形状を示している。この神戸層群の上には大阪層群が分布している。神戸層群の上面等深度面は淡路島側および六甲山地側の神戸層群上面との最大高度差は300 m以上であり、明石海峡の両側の陸地の近辺には、北西-南東方向または近東西方向の断層が存在している。



図I・1-2 大阪層群海成粘土の不連続部に基づく神戸地域市街地部分における推定断層(笠間ほか, 1974)

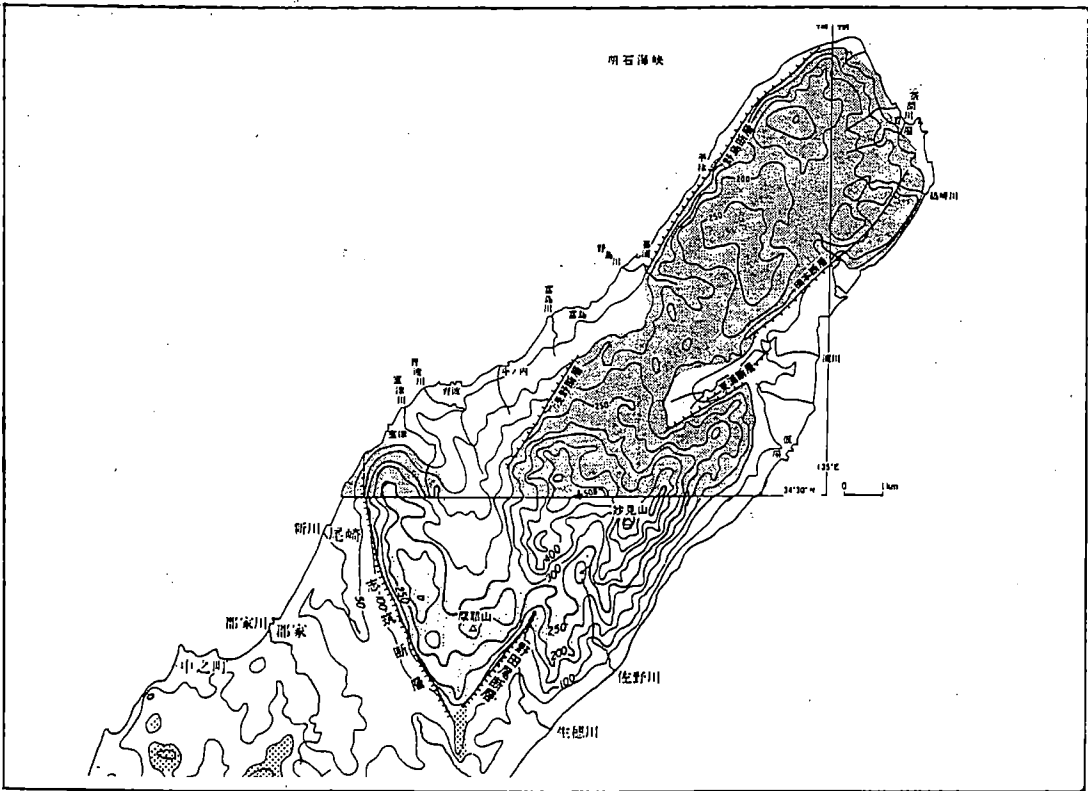


図 I・1-3 淡路島北部の活断層分布 (水野ほか, 1990および高橋ほか, 1992)

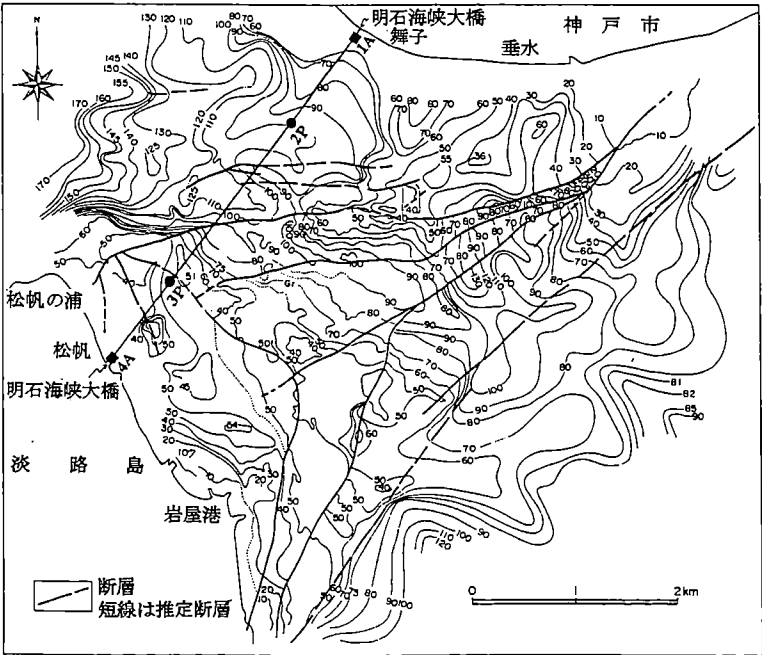


図 I・1-4 明石海峡の基盤をなす神戸層群の上面等深度線分布図 (建設省道路局ほか, 1970に加筆)

1.2 震源断層モデル

震源断層モデルについては、地震発生後すぐにいくつかの報告がなされた。それには大別して、地震の波形データをもとにしたものと測地データをもとにしたものの2種類がある。

菊地 (1995b) は、地震波の広域の広がり方から (全球的規模の長周期観測から)、本震が3つのサブイベントから成る多重震源であることを示した (図 I・1-5)。また、SEKIGUCHI *et al.* (1995) は、震源近傍と周辺の強震動観測記録をもとにして、図 I・1-6 に示すような断層モデルを算定し、この地震では、破壊開始点 (明石海峡) 付近、淡路島側の10 km より浅い所、神戸側の10 km より深い所の3つのサブイベントが見られ、全体としては長さ40~45 km の破壊であることを示した。さらに、図 I・1-7 に見られるように、いくつかの観測データに基づいた比較的多量なデータを用いた波形インバージョンなどの手法により本震の複雑な破壊過程が推定されている (吉田ほか, 1995; KAKEHI *et al.*, 1995など)。

一方、これらとは別に、梅田ほか (1995) は、強震動記録と空白域の分析からブライトスポットモデル^{*1}と呼ばれる震源断層モデルを提唱している (図 I・1-8)。

こうした震源断層モデルには、いくつかの相違点はあるものの、以下の点で共通している。

1) 3つのサブイベントによって特徴付けられる多重地震で、地震モーメントの放出は野島断層下部が顕著である。続いて、明石海峡直下、神戸市街地の下部となる。

2) 破壊は明石海峡直下の15~20 km 程度のやや深いところからバイラテラルに北東-南西方向に広がった。はじめ神戸側に破壊伝播し、2~3秒ほど遅れて野島断層側 (淡路側) に伝播した。全体としてはほぼ10秒間程度の破壊である。

さらに多くのデータを加え、断層位置、特に神戸側の震源断層の位置を特定する報告がいくつか示されている。

菊地 (1995c) は、図 I・1-5 の震源断層モデルの考え方を基本として、コンビニエンスストア^{*}の防犯カメラの映像解析から、震源断層は神戸付近まで達していたこと、断層線は、NHK 神戸局とその約1 km 南の間を

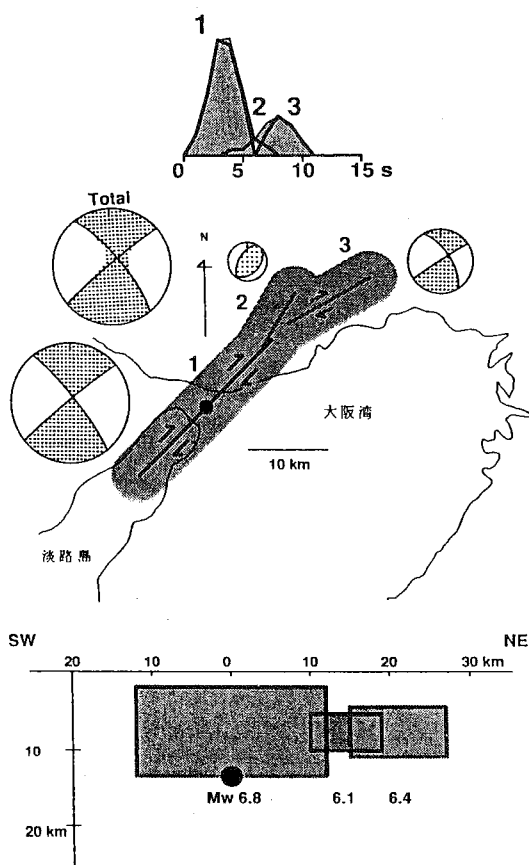


図 I・1-5 兵庫県南部地震の震源モデル (菊地, 1995b)
(上) 震源時間関数, (中) 3つのサブイベントのメカニズム図 (下半球等積投影) と断層線の空間分布, (下) 北東-南西断面図

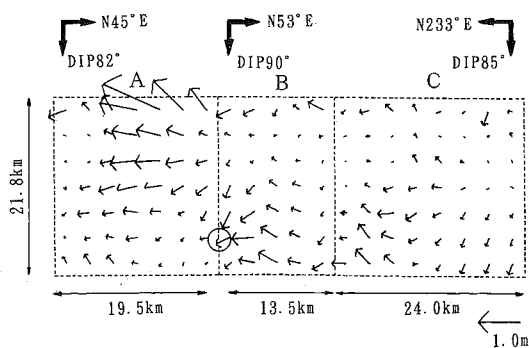


図 I・1-6 すべりベクトルの分布 (SEKIGUCHI *et al.*, 1995)

^{*1} 地震の震源付近に明瞭な余震空白域が生じた原因を、数多くの副断層が空間的に発生したためストレスも空間的に解放されたためとした説がある。これをブライトスポットと呼んでいる。

通り、いわゆる“震災の帯”と余震域の間 (余震域の南縁) を通ることを示した (図 I・1-9)。また、入倉 (1995) や岩田ほか (1995) は、図 I・1-10 に示すよ

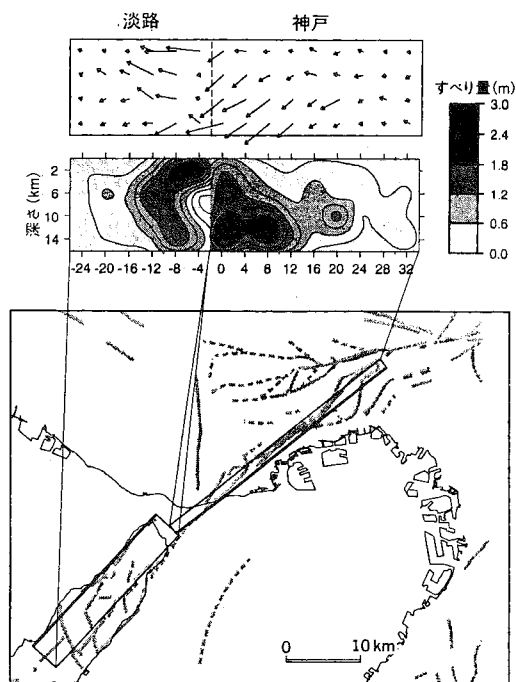


図 I・1-7 兵庫県南部地震の断層モデル
(吉田ほか, 1995)

うに強震動の粒子運動の軌跡から神戸側の震源断層の位置を既知の活断層帯の南端付近に対応し、震災の帯から北に約 1 km ほどずれた所に位置していることを示した。この結果は、菊池 (1995c) とほぼ同じ位置に震源断層があることを示している。

一方、釜江ほか (1996) はこれまで示されたインバージョン結果を参考にし、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより、震源近傍も含めた本震時の強震動を説明する断層モデルを推定した。この結果、図 I・1-11 のように淡路側 1 つと神戸側 2 つの合計 3 つのアスぺリティーによって断層破壊が生じたことが示された。

こうした波形データを用いた震源断層モデルとは別に、測地データなどを用いた地殻変動の立場からの震源断層モデルも提案されている。

橋本 (1995) は、図 I・1-12 に示すような断層モデルを提唱し、破壊様式は波形データから示されるバイラテラルではなくユニラテラルな破壊の広がり主張している。また、野島断層の食い違い変位量が約 2.3 m と大きいのにに対して、六甲断層系のそれは 1 m にも満たないという結果を得ている。

さらに平面的なものとしては、多田ほか (1995) は

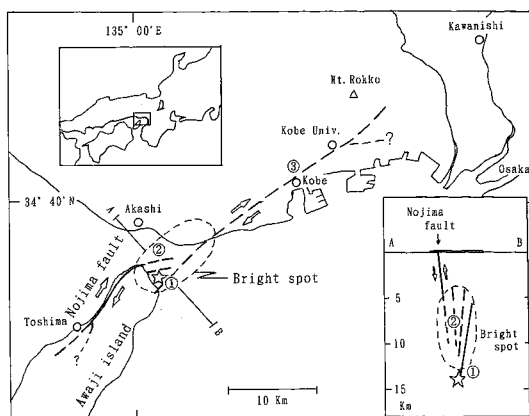


図 I・1-8 ブライトスポットモデル (梅田ほか, 1995)

淡路側の野島断層と神戸側の六甲断層系の 2 本が断層として動き、明石海峡で不連続となり右横ずれ的な断層の乗り換えが起きたことを示している。さらに、六甲断層系の方は地下数 km で破壊が止まり地表にまでずれ (破壊) が達しなかったとしている (図 I・1-13)。

1.3 震源断層と地表地震断層

地表地震断層は震源断層が地表にずれとして現れたものである。

兵庫県南部地震の場合、淡路島側の野島断層は地表地震断層として異論のないところであるが、神戸側の地表地震断層についてはさまざまな議論がある。

例えば、入倉 (1995) は、「神戸側では、震源断層破壊が地表に到達しないで止まり、破壊が止まった地殻の浅い所で高周波、すなわち破壊的な地震動が生成されたことが被害を大きくした原因の一つである」とし、神戸側には地表地震断層は現れなかったとしている。このように、波形データによるインバージョン解析からは、神戸側に見られる震災の帯の直下の伏在断層は存在しないとする見解が多い。

これに対して、嶋本 (1995) は、菊池 (1995b) の示した 3 つの震源断層面に対してそれぞれ、 $N51^{\circ}E86^{\circ}NW$ は野島断層から須磨断層西端部を経て会下山断層にかけて、 $N32^{\circ}E54^{\circ}NW$ は渦ヶ森断層と五助橋断層であり (横尾山断層とする意見もある)、 $N56^{\circ}E88^{\circ}NW$ は震災の帯の直下にある潜在断層であるとし、神戸側にも地表地震断層が現れたのではないかとする立場をとっている。

いずれにしても、菊池 (1995b) の示した 3 つ目のサブイベントによる震源断層や、釜江ほか (1996)、梅田ほか (1995) などの示す 3 番目の破壊に相当する地表地震断層は特定されていない。地震から 1 年以上経っ

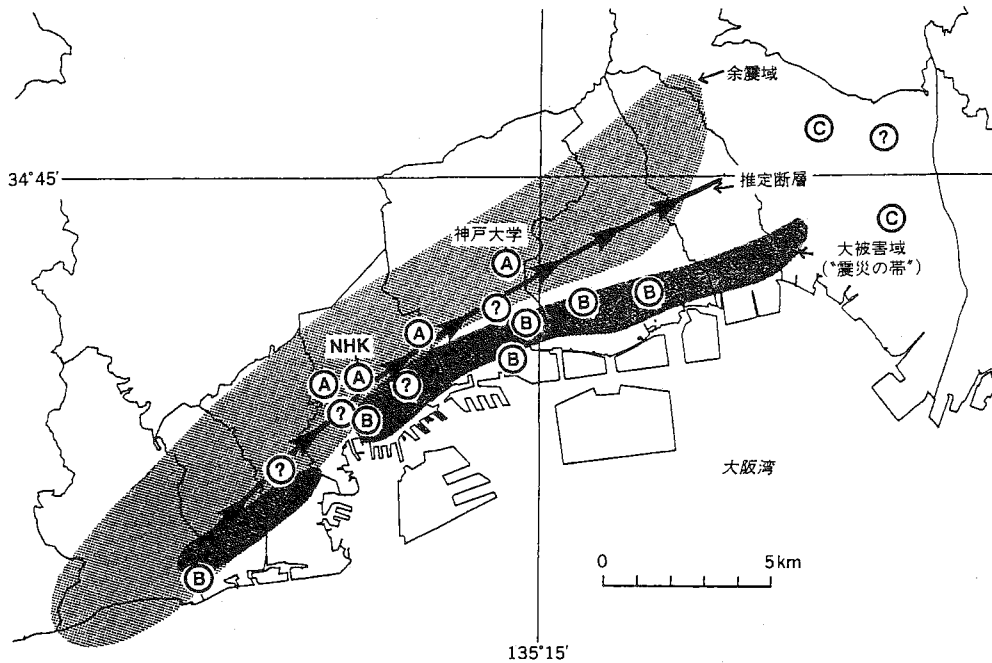


図 I・1-9 防犯ビデオの映像から推定した震源断層を地表に延長した切り口 (菊地, 1995c)

矢印付きの実線が推定断層を地表まで延長した切り口で、“震災の帯”と余震域の間を通る。NHK 神戸放送局の映像と神戸大学の GPS データも使い、遠地での地震は解析から得られた断層走向 (N60°E) を参考にした。図中の ABC は、S 波到達以後の主要な地面の揺れについてのパターンである。

A 型：断層の北側では、S 波到達によってまず北西に動き、ついで真下の断層の動きを反映して北東に動く。

B 型：断層の南側では、S 波到達によってまず北西に動き、ついで真下の断層の動きを反映して南西に動く。

C 型：断層の届かない地点では、S 波到達によってまず北西に動き、その後は北西-南東方向に振動する。

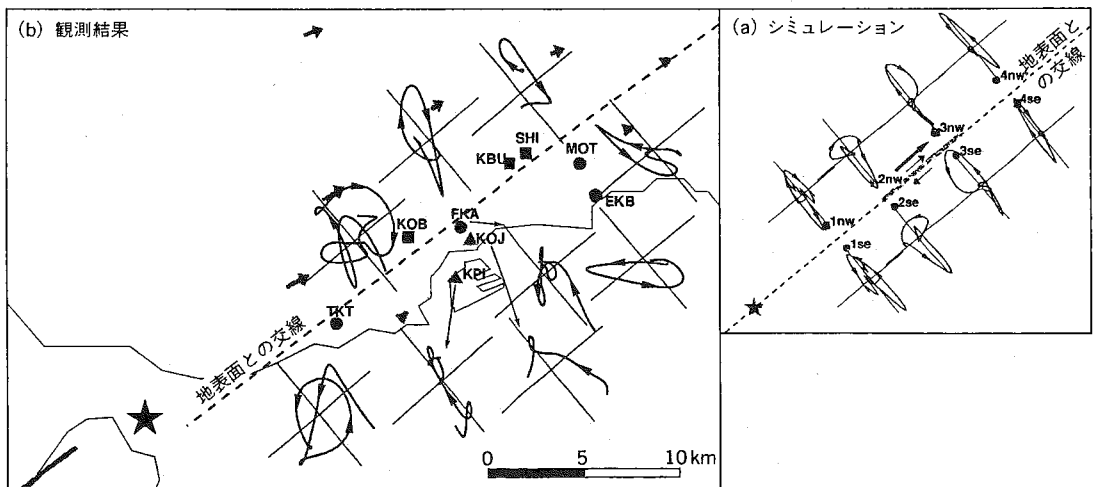


図 I・1-10 断層破壊面近傍での理論的地震動の粒子運動の軌跡と各観測点で観測された地震動の粒子運動の軌跡 (岩田ほか, 1995)

★：震源, TKT: JR 鷹取駅, KOB: 神戸海洋気象台, FKA: 大阪ガス葺合供給所, KBU: 神戸大学, SHI: 新神戸, MOT: 本山第一小学校

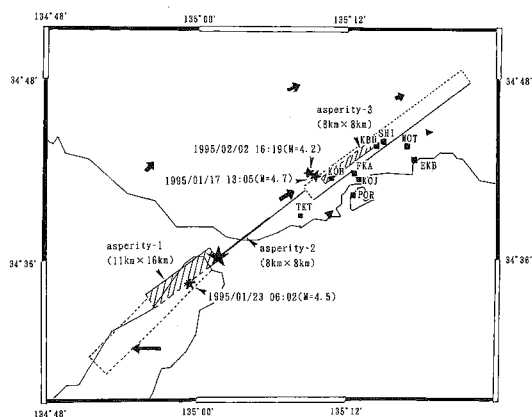


図 I・1-11 フォワードモデリングによる断層モデル
(釜江ほか, 1996) 図中の記号は図 I・1-10と同じ。

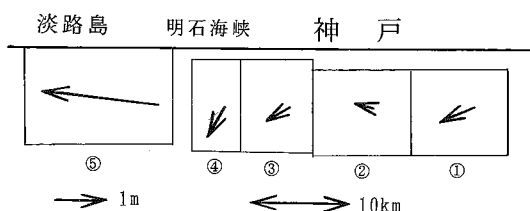


図 I・1-12 測地データを説明する断層モデル
(橋本, 1995)

たことを考えると、この震源断層に起因するずれは明瞭な地表地震断層としては今後も発見されない可能性が高い。

一方、震源から北東部の地表地震断層も、さまざまな議論がある。この部分は、菊地 (1995) の1つ目のサブイベントの北東部の震源断層や釜江ほか (1996) の2つ目の震源断層に相当する。この震源断層に伴い外浜断層が地表地震断層としてずれたという見方もあるが、須磨断層と会下山断層とする見方もある。

なお、岩渕ほか (1995) は、大阪湾の音波探査により明石海峡に3つの活断層が認められ、地表地震断層の可能性が高いと判断している。一方、佃 (1995) は明石海峡海底下の高磯断層が活動したと主張している。このように明石海峡海底下に地震断層が存在する可能性が指摘されている。いずれにしてもこの部分は、明石海峡内ということもあり地表地震断層を観察しにくいことなどから、その特定は難しい。

このほかにも、このような神戸側の地震断層に関する見解はさまざまなものがあり、六甲断層帯と有馬-高槻構造線が動いたと判断している林ほか (1996) の例も

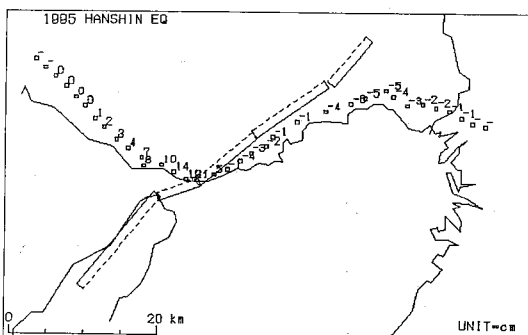
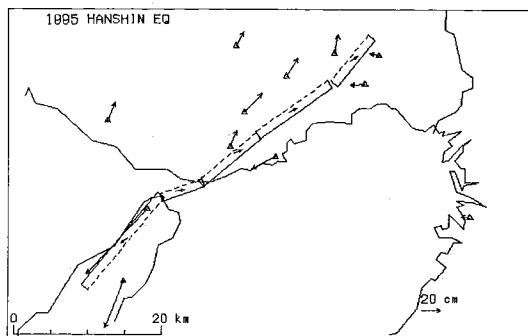


図 I・1-13 兵庫県南部地震の断層モデル
(多田ら, 1995)

ある。

震源断層については神戸側にも生じたが、地表地震断層としての特定はできていないのが現状である。

参 考 文 献

- 1) 栗田泰夫, 水野清秀, 杉山雄一, 下川浩一, 井村隆介, 木村克己 (1995): 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, No. 486, pp. 16-20.
- 2) 池辺展生編 (1961): 兵庫県地質鉱産図 (17万分の1), 同説明書, 兵庫県, 171p.
- 3) 石橋克彦 (1995): 「アムールプレート東縁変動帯」における1995年兵庫県南部地震と広域地震活動 (予報), 地質ニュース, No. 490, pp. 14-21.
- 4) 入倉孝次郎 (1995): 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.
- 5) 入倉孝次郎 (1995): 「震災の帯」をもたらした強震動, 科学, Vol. 66, No. 2, pp. 86-92.
- 6) 岩田知孝, 関口春子, 畑山 健, A. PITARKA (1995): 1995年兵庫県南部地震時の神戸市域における強震動生成過程—Source and Site Effects—, 1995年都市施設耐震システム研究センター報告書, pp. 1-22.
- 7) 岩渕 洋, 春日 茂, 穀田昇一, 沖野郷子 (1995): 大阪湾の活断層, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 117-122.
- 8) 梅田康弘, 山下輝夫, 伊藤 潔, 堀川晴央 (1995): 1995

- 年兵庫県南部地震のブライトスポット, 日本地震学会講演予稿集, A78.
- 9) 岡 義紀, 寒川 旭 (1981): 東部瀬戸内堆積区の形成と淡路島の隆起, 地学雑誌, Vol. 90, pp. 393-409.
 - 10) 岡田篤正 (1995a): 六甲断層系のネオテクトニクス, 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 第四紀学会・第四紀研究連絡委員会, pp. 9-12.
 - 11) 岡田篤正 (1995b): 六甲-淡路島活断層系と中央構造線活断層系, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 99-107.
 - 12) KAKEHI, Y., K. IRIKURA and M. HOSHIBA (1995): Estimation of high frequency wave radiation area on the fault plane of the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake by the envelope inversion of acceleration seismograms, submitted to the Journal of Physics of the Earth.
 - 13) 笠間太郎・岸本兆方 (1974): 神戸と地震, 神戸市総務局・土木局, 48p.
 - 14) 活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会.
 - 15) 釜江克宏, 入倉孝次郎 (1996): 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと強震動の推定, 「強地震動予測に関する総合的研究 (最終年度)」平成7年度科学研究費補助金 (総合研究A) 研究成果報告書 (研究課題番号05302069), pp. 23-52.
 - 16) 菊地正幸 (1995a): 兵庫県南部地震の震源過程モデル—遠地の地震波解析速報—, 地質ニュース, No. 486, pp. 12-15.
 - 17) 菊地正幸 (1995b): 遠地実体波による震源のメカニズム, 月刊地球, 号外No. 13, pp. 47-53.
 - 18) 菊地正幸 (1995c): 兵庫県南部地震の震源断層—防犯カメラが記録した地震動を読む—, 科学, Vol. 65, No. 9, pp. 569-572.
 - 19) 建設省道路局・近畿地方建設局 (1970): 本州四国連絡道路調査概要報告書.
 - 20) 嶋本利彦 (1995): 「震災の帯」の不思議, 科学, Vol. 65, No. 4, pp. 195-198.
 - 21) SEKIGUCHI, H., K. IRIKURA, Y. KAKEHI and M. HOSHIBA (1995): Source process inversion of the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake with minute locationing of fault plane in Kobe area, submitted to the Journal of the physics of the earth.
 - 22) 高橋 浩, 寒川 旭, 水野清秀, 服部 仁 (1992): 洲本地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 107p.
 - 23) 多田 亮, 橋本 学, 鷺谷 威, 小沢慎三郎 (1995): 1995年兵庫県南部地震の測地学的断層モデル, 月刊地球, 号外No. 13, pp. 136-140.
 - 24) 田中 豊, 林守 孝, 加藤正明, 藤田和夫 (1972): 六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測 (第1報), 京大防災研年報, B-15, pp. 29-41.
 - 25) 佃 栄吉 (1995): 兵庫県南部地震の地震断層と近畿地域の歴史地震との関係, 第5回環境地質学シンポジウム論文集, pp. 121-126.
 - 26) 中田 高, 蓬田 清, 尾高潤一郎, 坂本晃章, 朝日克彦, 千田 昇 (1995a): 1995年兵庫県南部地震の地震断層, 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 127-142.
 - 27) 中田 高, 蓬田 清, 尾高潤一郎, 坂本晃章, 朝日克彦, 千田 昇 (1995b): 1995年兵庫県南部地震の地震断層調査, 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究, 平成6年度文部省科学研究費 (総合研究A) 研究成果報告書, pp. 72-91.
 - 28) 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, No. 490, pp. 33-40.
 - 29) 平野昌繁 (1971): 花崗岩の節理を中心とした深成岩のbrittleな変形・破壊を考える上での問題点, 地質学雑誌, Vol. 77, pp. 257-263.
 - 30) 藤田和夫 (1968): 六甲変動, その発生前後—西南日本の交差構造と第四紀研究. Nol. 7, No. 4, pp. 248-260.
 - 31) 藤田和夫 (1974): 第四紀地殻変動図「近畿」(50万分の1), 構造図(3), 地質調査所.
 - 32) 藤田和夫 (1995a): 近畿の第四紀テクトニクスからみた兵庫県南部地震—神戸の地震に六甲変動を見た—, 地質ニュース, No. 490, pp. 7-13.
 - 33) 藤田和夫 (1995b): 兵庫県南部地震の地質学的特性—横ずれ断層系の活動, 土木学会誌, 7月号, pp. 44-49.
 - 34) 藤田和夫・前田保夫 (1984): 須磨地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 101p.
 - 35) HUZITA, K., T. KASAMA, M. HIRANO, T. SHINODA and M. TANAKA-YAMASTA (1971): Geology and geomorphology of the Rokko area, Kinki district, Japan; with special reference to Quaternary tectonics. Jour. Geosci., Osaka City Univ, vol. 14, 71-124 (with colored geological map of the Rokko area, Kinki Japan in 1/50,000).
 - 36) HUZITA, K., Y. KISIMOTO and K. SHIONO (1973): Neotectonics and seismicity in the Kinki Area, South-west Japan, Jour. Geosci., Osaka City Univ., vol. 16, pp. 93-124.
 - 37) 水野清秀, 服部 仁, 寒川 旭, 高橋 浩 (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, 90p.
 - 38) 吉田明夫 (1995): 1995年兵庫県南部地震. 地質ニュース, 地質調査所, No. 486, pp. 6-11.
 - 39) 吉田真吾, 綾瀬一起, 芝崎文一朗, 鷺谷 威, 加藤照之, 吉田康弘 (1995): 強震計記録, 遠地実体波, 地殻変動データの同時インバージョンによる兵庫県南部地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, A76.
 - 40) 林 愛明, 宇田進一 (1996): 明石海峡のテクトニクスと兵庫県南部地震, 応用地質, Vol. 37, No. 3, pp. 12-23.

2. 地殻変動の実態

2.1 地殻変動に関するデータ

兵庫県南部地震時の地殻変動を知る上で利用できる主なデータは、次に示すようなものである。

①基準点測量結果: 国土地理院は、兵庫県南部とその周辺地域の1・二等三角点について、光波測距儀による精密測地測量 (1984~1985年) の成果と、兵庫県南部地震発生後のGPSによる高度基準点測量 (1995年1月27~30日) の結果とを比較して得られた地殻水平変動量を公表している (図I・2-1)。

②水準測量結果: 国土地理院は、吹田市から高砂市に

かけての国道43号線及び国道2号線沿いの水準路線の水準測量を1995年1月29日～3月15日にかけて実施し、1990年の水準測量成果との比較により得られた地殻上下変動量を公表している（図I・2-2、図I・2-3）。これは高砂市の一水準点 No. 428を仮不動点としたもので、西宮以東は地盤の悪い地域のため、地殻変動以外の要因による上下変動が含まれているかもしれない（橋本, 1995）。

③建設中の明石海峡大橋の橋脚の変位：本州四国連絡橋公団が地震後実施した明石海峡大橋のGPS測量により、4本の橋脚（海岸部の橋台2本と海峡内の主塔2本）の水平・垂直変位量が報告されている（溝上ほか, 1995；山縣, 1995）。

④出現した地震断層の相対的変位：淡路島北部では、すでに活断層として知られていた野島断層（水野ほか, 1990）に一致して出現した地表地震断層については、それが震源断層の運動を反映したものと考えられるという点で研究者間の意見はほぼ一致しており、断層変位地形などから相対的変位量の分布が報告されている（栗田ほか, 1995；など）。それ以外で地震断層として報告されているものと震源断層との関係については、研究者間の見解は一致していない。仮にこれらがテクトニックな地殻変動を反映しているとしても、わかるのは個々の相対的変位量であり、量的にも大きいものではない。

⑤空中写真測量による野島地震断層周辺の変位量分布：国土地理院は、地震前後の空中写真の計測により、上述の野島地震断層周辺の3次元変位量分布を明らかにしている（図I・2-4）（国土地理院, 1996；星野ほか, 1996）。

⑥海岸の離水現象：淡路島北端部では、地震時の隆起を示す海藻の離水現象が観察されている（太田ほか, 1996）。

⑦干渉SARによる地殻変動パターンの分布：地球資源衛星 JERS-1（ふよう1号）に搭載されたSAR（合成開口レーダー）の地震前後のデータの干渉縞から、広域的な地殻変動パターンの分布をある程度知ることができる（村上ほか, 1995）。

このほか、潮位の観測記録から上下変動を探る試みがなされている（太田ほか, 1996）が、十分なデータが残されていない。また、建物の倒壊方向が地殻水平変動を反映しているという見解もある（櫻井, 1995）が、証明が難しい。

2.2 神戸側の地殻変動

上述のデータから、次のことがわかる。

六甲山地内あるいはその西方の三角点はいずれも北東

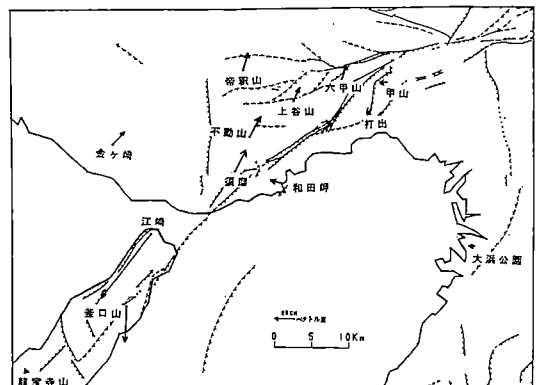
方向に20～30 cm 移動した。一方、六甲山地より南東側に位置する三角点は、わずかながら西方向へ移動している。また水準測量結果によれば、明石市から神戸市垂水区にかけては西方へゆるやかな角度で傾動隆起し、隆起量は最大19 cm であるが、水準路線が六甲山地南縁に位置する六甲断層系須磨断層付近を越えると沈降に転じ、落差27 cm の撓曲状の変位が認められる。これらのことから、震源断層は六甲山地南縁付近の地下にあり、右横ずれ、西上りの断層運動を行ったことが推定される。干渉SARデータでも、海岸部の地殻変動パターンが撓曲状変位の場所を境にして逆転している。

2.3 明石海峡の地殻変動

明石海峡大橋は、神戸側の震源断層が位置すると考えられる六甲山地南縁の延長部と、淡路島側の震源断層と考えられている野島断層の延長部にはさまれている場所にある。これについて、神戸側橋台と淡路島側橋台との距離が約1.1 m 伸びたこと、神戸寄りの主塔が東方向に、淡路島寄りの主塔が西方向に移動し、その間隔が約30 cm 広がったことが報告されている。つまり、明石海峡が広がるとともにその中央部で右横ずれの変位があった可能性が考えられる。明石海峡の音波探査結果（建設省, 1970）によれば、この部分には東西～東北東～西南西方向の断層が走っている。また、水準測量の結果と合わせれば、淡路島寄りの主塔は20 cm 弱の沈降となる。

2.4 淡路島の地殻変動

野島地震断層の観察から、その変位量は右横ずれおおむね1～1.5 m、垂直変位が一部を除き東側の相対的隆起でおおむね数十 cm である。最も変位量が大いのは野島平林地区で、ネットスリップは2 m を超える。干渉SARデータでも、ここを中心とした地殻変動パター



図I・2-1 高度基準点測量による兵庫県南部地震の水平変動（国土地理院による）

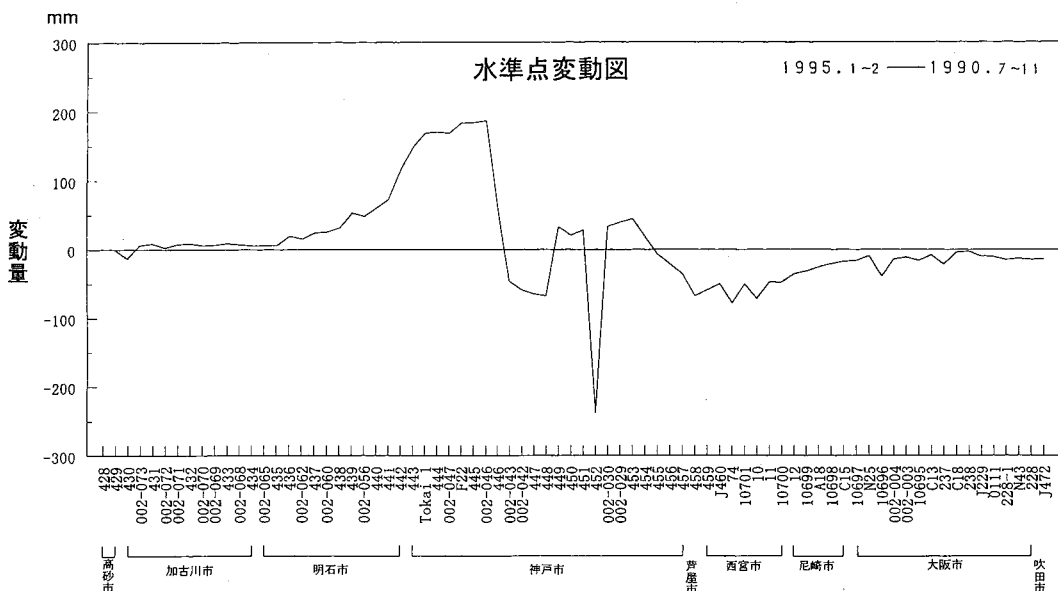


図 I・2-2 水準測量の結果 (国土地理院による)

ンが認められる。三角点のデータは少ないが、淡路島北端部の野島断層東側近傍の三角点が約 1 m 南西に移動しており、地震断層で認められる右横ずれ変位とよく一致している。また、淡路島北端の野島断層東側部分では海岸の隆起現象が認められており、明石海峡大橋の橋台でも 25 cm 程度の隆起が観測された。

空中写真測量による変位量計測手法の評価についてはいくつかの課題があるが、絶対的変位量が面的に把握で

きるという特徴があり、今回の結果は上記の各種観測事実ともおおむね調和的である。注目すべきことは、野島断層の東側ブロックは南方向へ、西側ブロックは東方向へ移動したという結果である。東側ブロックでは、三角点も南方向へ移動した。

2.5 地殻変動から見たテクトニクス

以上に示した地表の地殻変動を模式的に示すと、図 I・2-5 のようになり、大まかには東西圧縮を反映したも

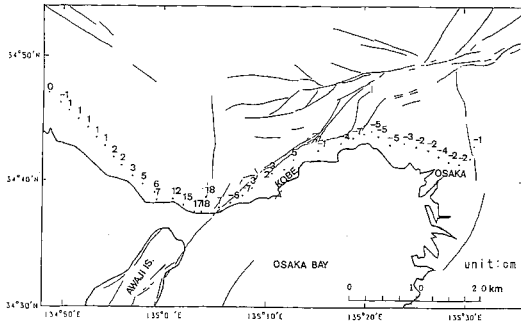


図 I・2-3 水準測量による兵庫県南部地震の上下変動量分布 (cm) (国土地理院による)

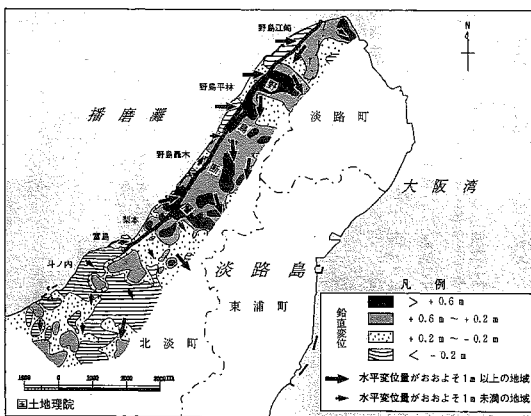


図 I・2-4 空中写真測量による野島断層周辺の地表面変位量の面的分布 (国土地理院, 1996)

のとして説明できる。

これまで、地表で観測された地殻変動を説明するモデルがいくつか提出されている (宮内ほか, 1995; 多田ほか, 1995; 日吉・櫻井, 1995; 林・宇田, 1996; 岡田, 1996)。問題となるのは、互いに大きく雁行して連続せず、神戸側では西隆起、淡路島側では東隆起と、垂直変位センスが異なっている2つの断層が震源断層となっていることである。

両断層の垂直変位は、六甲山地と淡路島の山地を隆起させるという、現在の地形形成と調和的な動きであるが、両断層のギャップの部分に明石海峡という凹所があり、ここが右横ずれ断層の右雁行部分という二次的な引っ張り応力場に当たることから、pull apart basin または strike slip duplexes が形成されているという考えがある (宮内ほか, 1995; 林・宇田, 1996)。後者の説は、明石海峡における東西～東北東-西南西方向の断層の存在と、明石海峡大橋の主塔の水平変位を説明するの

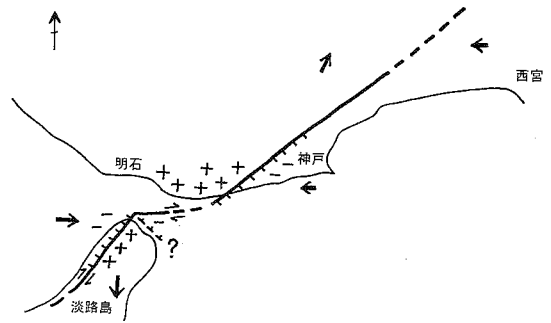


図 I・2-5 兵庫県南部地震に伴う地殻変動の概要
太矢印：水平変動方向
+：隆起域，-：沈降域

に都合がよい。

しかし、明石海峡の東西～東北東-西南西方向の断層は二次的な応力場に生じたものではなく、これこそが兵庫県南部地震の初期破壊 (右横ずれ) を引き起こしたのではないかとの説も出されている (垣見, 1996)。これによれば、近畿地方では東西～東北東-西南西方向の断層は北東-南西方向の断層よりも一般的であり、明石海峡のものも必ずしも二次的なものと考えする必要はない。この断層が神戸側震源断層 (六甲断層系) の南西端と淡路島側震源断層 (野島断層) の北東端をつないでいるとすると、一見離れている神戸側、淡路島側の2つの断層に破壊が伝播したと、つなぎ目の屈曲の内側部分が圧縮場となって六甲山地と淡路島の山地が隆起すること (神戸側と淡路島側の垂直変位が逆向きであること) が説明できる。

いずれにせよ、兵庫県南部地震の際の陸上の地殻変動は、地形・地質から知られる第四紀後期の地殻変動の傾向と大局的にはよく一致していたといえる。今後さらに、地形・地質学的地殻変動と地震発生メカニズムとの関係を解明していくことが重要と思われる。

参 考 文 献

- 1) 栗田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・奥村晃史・木村克己 (1995): 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, No. 486, pp. 16-20.
- 2) 太田陽子・山口 勝・吾妻 崇・小林真弓 (1996): 野島地震断層に伴う地表変位に関する新資料, 地理学評論, Vol. 69, pp. 353-364.
- 3) 岡田篤正 (1996): 兵庫県南部地震の地震断層と六甲-淡路島活断層帯, 兵庫県南部地震と地形災害, 日本地形学連合編, 古今書院, pp. 28-63.

- 4) 垣見俊弘 (1996) : 兵庫-淡路地域の活構造と兵庫県南部地震, 地震災害予測の研究, 地震災害予測研究会編, 損害保険料率算定会.
- 5) 建設省道路局・近畿地方建設局 (1970) : 本州四国連絡道路調査概要報告書.
- 6) 国土地理院地理調査部地理調査技術開発室 (1996) : 1995 年野島地震断層周辺の変位量図, 国土地理院技術資料 D・1-No. 328.
- 7) 櫻井 孝 (1995) : 震害状況から推定される断層変位運動, 応用地質, Vol. 36, pp. 144-153.
- 8) 多田 堯・橋本 学・鷺谷 威・小沢慎三郎 (1995) : 1995 年兵庫県南部地震の測地学的断層モデル, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 136-140.
- 9) 橋本 学 (1995) : 兵庫県南部地震の概要, 国土地理院時報, No. 83, pp. 6-14.
- 10) 日吉 直・櫻井 孝 (1995) : 地盤変位や被災分布状況から推定される兵庫県南部地震における地盤変動のメカニズム, 応用地質, Vol. 36, No. 5, pp. 359-365.
- 11) 星野 実・村上広史・水越博子・山後公二 (1996) : 兵庫県南部地震による野島地震断層周辺の地表面変動, 地理学評論, Vol. 69, pp. 483-492.
- 12) 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (1990) : 明石地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 90p.
- 13) 薄上 恵・中村正夫・瀬戸憲彦 (1995) : 1995 年兵庫県南部地震の震源域周辺における運動性地震活動を伴う断層系, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 38-46.
- 14) 宮内崇裕・伊藤谷生・荒井良祐・村田明広・狩野謙一・澤田啓臣 (1995) : 兵庫県南部地震にともなう淡路島北部の地表断層, 「1995 年 1 月 17 日兵庫県南部地震速報会」記録, 日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会, pp. 35-36.
- 15) 村上 亮・藤原 智・斉藤 隆 (1995) : 干涉合成開口レーダーを使用した平成 7 年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, 国土地理院時報, No. 83, pp. 24-27.
- 16) 山縣 守 (1995) : 兵庫県南部地震と明石海峡大橋の橋脚の動き, 1995 年構造地質研究会夏の例会口頭発表.
- 17) 林 愛明・宇田進一 (1996) : 明石海峡のテクトニクスと兵庫県南部地震, 応用地質, Vol. 37, No. 3, pp. 160-171.

3. 地表の変位と地震断層

3.1 兵庫県南部地震によって発生した地表変位

今回の地震によって, 地表には多くの変位・変状が生じており, しかもそれは何らかの形で地表に永久的変位をもたらしている。これらは連続した地変 (水平ずれ・垂直ずれ), 道路など人工構造物のずれ, 崩壊, 地すべりなどを含めた包括的概念としての「変状」としてとらえられる。

兵庫県南部地震により, 淡路島では明瞭な地震断層が野島断層付近の地表に出現し, それに沿う横ずれ変位地形は極めて顕著であるが, その他の地域のいわゆる「六甲断層系」を構成する六甲山地内および淡路島の主要な

断層については, そのように顕著なものが認められず, 道路などの人工構造物の変位・変状の評価も関係して, 断層は動いていないとの考えも表明されている (熊木ほか, 1995 ; など)。

しかし, 余震域は特に大きな被害の集中した地域に対応して, 淡路～神戸にまたがって一定のまとまりを示している (溝上ほか, 1995 ; 平田, 1995 ; など), 測地学的データも, 淡路側と神戸側が東西主圧力のもとで変位・変形したことを示している (橋本ほか, 1995 ; 多田, 1995a ; 佐藤・杉原, 1995 ; 平野・波田, 1995b), 地表の変位・変状の分布する範囲にはほぼ対応している。

ことに震源断層に直接つながる地震断層が生じなかったと言われる場所における地表の変位・変形は, これらの地下にある起震断層面上の変位がいかに上方へ伝播し, 地表にどのような実態を示すに至ったかを直接示す唯一の証拠である。

したがって, これらの変位・変形をどう評価するにしろ, 震源域範囲内とおぼしき範囲に生じた地表変位を詳細に記載し, 記録しておくことは震源断層が地表に表れた直接的な証拠であるといふにかかわらず, 地震時における地変を検討するための将来の貴重な資料となるものである。

今回の地震で生じた永久的変位は, 地表面だけに限らず, 道路などの人工構造物の水平変位においても, 一定のセンスをもって系統的に断層の上またはごく近傍に断層と調和的な方向に線状に配列している。しかもこれは, 市街地背後の山地部分で知られている「活断層」およびその市街地部への延長上でも同様に認められ, 北東-南西方向のものは右横ずれ, 西北西-東南東方向のものは左横ずれ変位を示す。変位は, 道路のコンクリート路盤や側溝・流路工の継目あるいは地下に埋設物のある場所など, 構造物の弱い部分をとくに選んで発生している。このような系統の変位は, 山地部で知られている右横ずれ活断層の南西延長部の直上またはごく近傍で右横ずれのものがまず注目され, 次いで西北西-東南東方向の左横ずれのものが確認された (平野・波田, 1995b ; 林, 1995c)。

3.1.1 神戸地区

六甲山地および神戸地区における変位または変状については, 平野・藤田 (1995), 平野・波田 (1995a, d) に従って述べる。今回の地震による六甲山地および神戸地区における変位・変状は, 山麓部において盛土地盤など地盤特性に対応して生じている一方, 市街地部分では 10 cm オーダーの横ずれを伴う道路などの構造物に, 地盤特性に対応した部分のほかにも既存の断層の上あるいは

断層付近のみである。五助橋断層はそれに沿って斜面崩壊あるいは登山道の路肩の損傷は多いが、必ずしも確実な右ずれ変位は確認できない。また、最も顕著な活断層である諏訪山断層沿いについては、ほとんど変位の痕跡が無く、被害も著しくない。

神戸市東灘区から中央区までの地域における変位の連続性は必ずしも良くない。特徴として左ずれ変位が卓越する。右横ずれとして芦屋断層、五助橋・渦ヶ森断層およびその一部付近、共役左ずれ変位として住吉断層付近などがある。この区域における最も顕著な活断層である諏訪山断層に沿っては、系統的な変位は検出されず、地震動による被害も大きくない。

長田区、須磨区、兵庫区の主として平地部分については、長田区を中心とする市街地西部は厚い沖積層の分布地であるが、北東-南西方向の右横ずれ変位が卓越している。

市街地西部における第三紀および第四紀の丘陵部分において盛土部分あるいは池を埋めた部分で発生した地すべりによる被害も大きく、また、とくに長田区においては火災発生による被害が著しい。それらは「震災の帯（嶋本ほか、1995）」と呼ばれているが、第三紀および第四紀丘陵の中の遷急線とその延長方向、および同方向に延びる凹地に一致している。

横尾山断層については、櫻井（1995b, d）によれば、垂水漁港から北東方向に点々と系統的に、JR 塩谷駅、霊友会集会場、94 m 独標のある尾根の北東斜面などでずれや開口割れ目が発達しており、それらはいずれも横尾山断層の線上にある。また、本断層を横切る塩屋谷川放水路トンネルでは断層横断地点で、右横ずれ北西側上がりを伴う坑壁の破損が生じている。

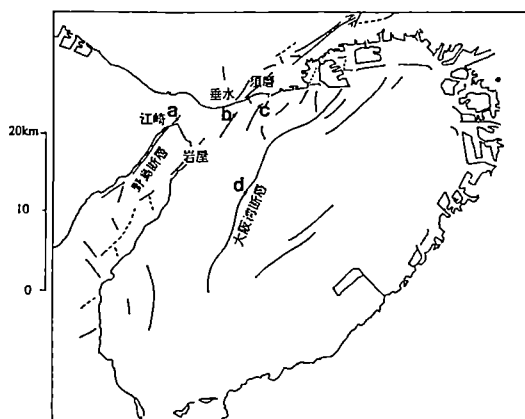


図 I・3-2 大阪湾付近の活断層の分布
[岩渕ほか（1995）による]

港湾部における変位は楠田ほか（1995）によってその概要が述べられているが、液状化と側方流動によるものが中心となる。港湾部における変位は、ある程度一定したパターンを示し、埋立地の東側西側で変位量に多少の差はあっても、変位の絶対値が大きいため、その多くは地盤の押し出して説明できる。

3.1.2 明石海峡部

地震直後、海上保安庁により行われた明石海峡域の調査（岩渕ほか、1995）により、図 I・3-2 に示すように多くの断層が確認された。そのうちの a, b, c は今回の地震に伴って現われた地震断層である可能性が大きいと判断されている（岩渕ほか、1995）。断層 a は、野島地震断層の延長部に位置することから、今回動いた断層であると判断される。断層 b および断層 c については、

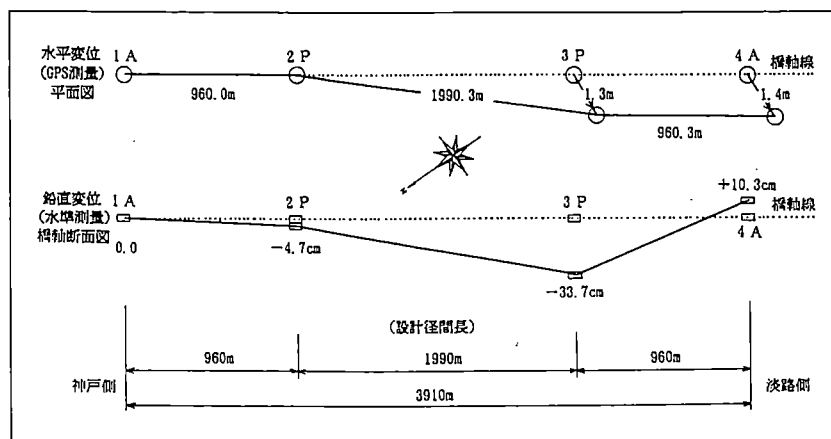


図 I・3-3 兵庫県南部地震による明石海峡大橋の橋脚の変位 [山懸（1995）による]

殻が10 cm~14 cm 隆起したことが観察された(多田, 1995)。これらは神戸側および淡路島側の隆起, 明石海峡中央部の沈降を示しているという(林, 1995c)。

3.1.3 淡路島地区

淡路島北部では島の北西側, 北側, 東側の3地域に地表変位が現れた。この中で北西側に現れた変位のうち北部の約10 km は, 神戸側や他に比べて特に顕著であることから, 地震断層が出現したものとして支持されたが, これに続く南半部分や北側, 東側の変位については明確に地震断層であると認める研究者は少ない。

(1) 淡路島北西側地区

1) 淡路町松帆の浦から富島市街地までの約10 km の範囲

地震断層とされたこの断層は既存の野島断層(活断層)が再活動したもので, 山地と山麓緩斜面(土石流性の堆積面)との地形境界をなす地形的リニアメントにはほぼ一致して出現した(林ほか, 1995a; 中田ほか, 1995a, b; 皆川ほか, 1995a, b)。この断層は今まで考えられていた断層線を越えてさらに南西方向に向かって進行し, 少なくとも水越撓曲まで達している(栗田ほか, 1995a,

b; 岡田, 1995a, b)。

林ほか(1995a, b)は, 断層の進行はさらに南の志筑断層付近まで延びていると考え, これらを一括して野島地震断層としているが, 太田ほか(1995)は郡家港やさらに南の室津, 育波などの地震被害については断層変位による可能性を否定している。栗田ほか(1995c)は, 既存の野島断層に沿って出現した今回の地震断層主部を「野島地震断層」, 野島菰浦から分岐し, 小倉を経て浅野南まで約3.0 km 区間に出現したものについては「小倉地震断層」とし, 両地震断層を合わせて「北淡地震断層系」と命名している。

この部分の地震断層は, おおむね北東-南西方向に延びており, 全般的には南東側が隆起する逆断層成分を持つ右横ずれ断層である。江崎灯台から富島市街地までの地表地震断層は全般的に断層による地表の変位がはっきりしており, 多くの地点で断層面が観察され, 断層ガウジの見られる断層面には明瞭な条線が発達する。この区間の地震断層は全体としてN30°~60°Eの走向を持ち, 75°~80°南東へ傾斜する南東側隆起の逆断層成分を持つ右横ずれ断層であるが, 梨本をはじめ数箇所の地点では

表 I・3-1 野島地震断層沿いの主な断層露頭記載の一例(林ほか, 1995)

露頭番号	位置	指標	断層	水平変位		垂直変位	亀裂	備考
				走向	傾斜			
①	江崎灯台	林道	N22° E 78° E	右ずれ	70	SE	20	灯台から南西に延長した花崗岩中最大幅180cm 破砕帯。雁行配列した開口亀裂帯。幅5~7m, 方向N10° E。
②	長谷池南	斜面	N10° E 78° E	右ずれ	100	SE	50~70	最大10
③	桃林寺	農道	N22° E	右ずれ	70	NW	58	アスファルト変形し一部陥没。陥没部に液状化が認められる。開口亀裂が水田に発達している。
④	飯小学校南	農道	N60° E	右ずれ	70	NW	58	N85° W
⑤	野島江崎畑	の畝	N78° E 88° E	右ずれ	105	SE	30~35	N80~85° W
⑥	探土場北東部	道路	N41° E	右ずれ	65	NW	10	
⑦	探土場	崖	N30° E					
⑧	野島平林	時	N39° E 81° E	右ずれ	180	SE	130	
⑨	野島大川北	道路	N45° E 78° E	右ずれ	70	SE	不明	
⑩	野島大川	田		右ずれ	145	SE	45	N80~85° W
⑪	野島大川南	田	N35° E	右ずれ	45	NW	35	
⑫	野島森木	田		右ずれ	約40	SE	数十	
⑬	野島森木	田		右ずれ	50	SE	45	
⑭	森木南	田	N45° E 85° E	右ずれ	105	SE	75	
⑮	小代呂川北	田	N45° E 85° E	右ずれ	80	SE	75	N85° W
⑯	小代呂川北	田	N18° E 73° E	右ずれ	不明	SE	10以上	
⑰	野島菰浦	田		右ずれ	数十	SE	10以上	
⑱	野島川南	水田		右ずれ	85	NW	28	N45° E
⑲	野島安室南	水田	N46° E 84° E	右ずれ	100	NW	45	N67° W
⑳	⑳の南	田		右ずれ	85	SE	30	
㉑	小倉川北	水田	N55° E 85° E	右ずれ	100~140	SE	55	N70° W
㉒	富島	水田		右ずれ	30~40	NW	50	N51° E
㉓	八幡神社	路床		左ずれ	26	SE	58	N42° E
㉔	浅野神田	斜面						N40° E
㉕	浅野漁港	路床		右ずれ	10	NW	7	
㉖	無配水池	田		右ずれ	5~6	SE	10	N53° E
㉗	育波大池	田		右ずれ	3~7	SE	7	NE
㉘	室津	田						NE
㉙	一宮町北	田						NE
㉚	尾崎	水田		右ずれ		数cm	N35° E	
㉛	枯木	田				SE	13	NE
㉜	枯木	田		右ずれ	6.5	SE	5~7	N25° E

北西側隆起の変位も見られる(林ほか, 1995a)。地震断層はすべて一直線状に連なるものでなく、雁行状に配列している。

2) 富島市街地から一宮町尾崎までの約8 km

北部の明瞭な地表地震断層は、富島地区の北淡町役場付近で急激にその規模を減ずる(林ほか, 1995a)。また断層線の分布は、かなり断片的となり、ひと続きの断層～亀裂帯はせいぜい数10 m 程度となる。しかし、各々の断層～亀裂帯は走向方向に連続的に配列することが多く、そのトータルの延長は2～3 km で、その方向は野島断層に近い傾向を示す。これらは北淡町斗ノ内地区から北淡町育波地区にかけてと、北淡町室津地区から一宮町尾崎地区にかけて出現した断層～亀裂帯で顕著であり、互いに末端部を重複させながら、全体として右雁行(ミ型)配列を示している(林ほか1995a)。亀裂帯には開口亀裂が多く見られるが、明瞭な変位を伴うものは少ない。また、変位を伴うものでも水平右横ずれ5～6

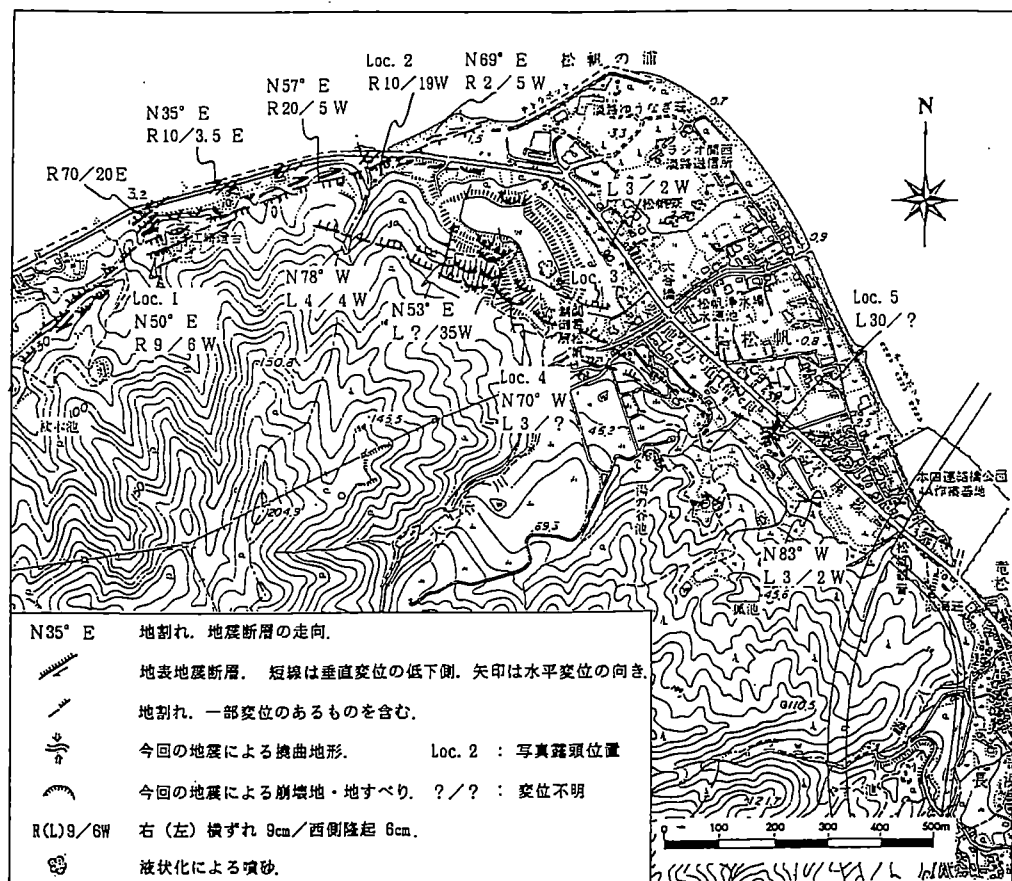
cm, 南東側隆起5～15 cm 程度のものが多く、北部に比べてその変位規模は小さい。志筑断層についても、断層の活動によるものとは考え難いとしている見解の多い中で、林ほか(1995a)はこの付近まで野島地震断層の影響範囲と考えている。

断層沿いに観察される主な露頭の記載の例を図I・3-4と表I・3-1に示す。

(2) 淡路島北側地区

兵庫県南部地震で淡路島北西末端部松帆に現れた北西走向の変位群を、LIN & UDA (1995) は松帆地震断層と命名している。

この変位群は、江崎灯台の東部の尾根部から明石海峡大橋の淡路島側橋脚部までの約1 km の区間にはほぼ大阪層群の砂礫層と花崗岩との境界沿いに断続的に分布している(図I・3-5)。野島地震断層のような明瞭な断層面を伴うものはほとんど見られず(大部分は開口亀裂の連続, 図中の Loc. 3), 変位量は一般に数 cm 程度と小



図I・3-5 野島地震断層北端部および松帆地震断層分布図 [林ほか(1995)に加筆]

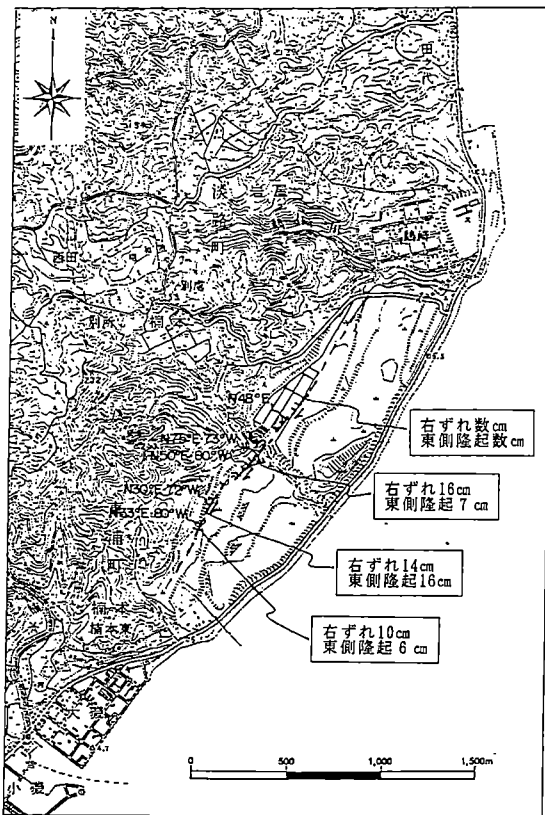


図 I-3-6 楠本地区の地震断層分布図 [LIN & UDA (1995) のデータによる]

さい。この亀裂帯沿いに一部の地すべりも観察される (図中の Loc. 4)。林 (1995c) に従えば、これらは、全体としては $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}W$ の走向方向に連続性を持ち、北東側 (明石海峡側) 下りの正断層成分を持つ左横ずれ断層であることを示しており、野島地震断層の北東末端部の南東下りの変位と一致して、淡路島北西末端部の沈降を示しているという。

(3) 淡路島東側地区

東側海岸の既存の楠本断層より東方約 0.5 km 付近に地震断層が出現した。LIN & UDA (1995) はこれを楠本地震断層と命名し、栗田ほか (1995c) は灘川地震断層系と命名している。

この地震断層は、淡路町と東浦町との境界である灘川を挟んで、工事中の高速道路の南東側の造成地法面に北東～南西方向に断続的に約 1.5 km 延びている (図 I-3-6)。灘川の南部では、断層ガウジを持つ明瞭な高角度の断層面が数箇所観察される。いずれも幅数 m 以内の断層破砕帯や数 10 cm 以内の粘土帯を伴っていて、直

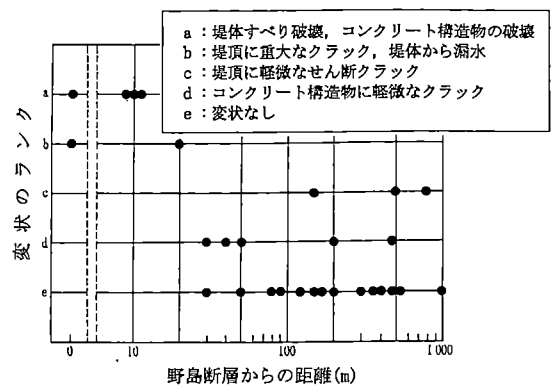


図 I-3-7 野島地震断層からの距離とため池被害状況 (日吉, 1995)

線性が高く、既存の断層が再活動したものである (岡田・鬼木, 1995)。第四紀層がないため、第四紀に入ってから今までに動いたか否かの認定は露頭では直接判定できないが、軟弱な断層破砕帯や粘土帯が伴われているので、微弱的な動きとしては第四紀にあった可能性がある (岡田・鬼木, 1995)。灘川の北部では、明瞭な断層面が見られず、大部分は亀裂の連続であるが、全体としては $N20^{\circ}\sim 40^{\circ}E$ 走向を持ち、 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}NW$ へ傾斜する北西側下りの正断層成分を持つ右横ずれ断層である。変位量は野島地震断層より一桁小さく、水平では、最大 20 cm 右横ずれ、垂直では平行な数本の断層毎にセンスが異なるが、最大北西側上り 16 cm である。

この地震断層は大規模な採石に伴う反発隆起に関連した可能性が高いと指摘されている (例えば、栗田ほか, 1995c) のに対し、LIN & UDA (1995c) は、この断層を既存の楠本断層が再活動した地震断層としている。

3.2 地震断層と構造物被害

3.2.1 構造物被害の分布

地震による被害は基本的に次の 2 つに分けられる。

- 1) 断層変位によるもの
- 2) 地盤特性によるもの

これ以外に構造物の種類、強度特性、構築年代 (耐震設計基準に関わる) などとも関係している (例えば、大崎, 1990) が、ここでは断層の変位による被害状況について、今回の地震断層の影響範囲を検討しやすいと思われる構造物、つまり道路、送電線鉄塔、ため池、家屋・建物および崖崩れ・斜面崩壊に着目して被害状況を見る。

(1) 道路の被害

道路の被害は断層との交差部の局所的なものが殆どで、損傷の程度も比較的軽微であり、数 m も離れれば

損害は極めて小さい状況である。しかし、断層を横断する道路のほとんどが割れたり、食い違ったり、陥没したり、あるいはプレッシャーリッジ状に盛り上がったりしている。道路は断層変位の良い基準となる（皆川ほか，1995b；平野・波田，1995c）。

(2) 送電線鉄塔の被害

淡路島北部の送電線はかなり長区間にわたって地形上のリニアメントに平行あるいはやや斜交して走り、送電線鉄塔はところどころでそれを跨いで設置されている。地震断層直上にあるものは、変位によって変形している。とくに野島江崎付近の断層直上の鉄塔は、基礎地盤に生じた右ずれ性の開口割れ目によって、脚部が“く”の字形に曲がり、西に傾いている。また、断層を跨いでいる区間の鉄塔には、地震断層の変位に伴って強く引かれ、傾いているように見えるものもある。いずれにしても、地すべりや電線の引張りによる2次的な影響を別とすれば、断層直上の鉄塔以外のものはほとんど損傷がない（皆川ほか，1995b；原口，1995）。

(3) ため池の被害

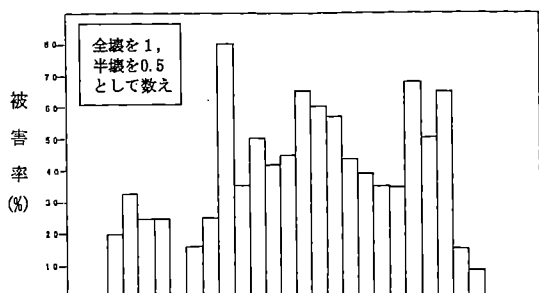
図 I・3-7 は淡路島北部のため池の被害状況を、断層からの距離との関係として整理したものである（日吉，1995）。それによると、断層直上では堤体がすべり破壊を起こしたり、コンクリート構造物が破損したりしているが、ある程度離れた位置にあるため池には、使用に支障をきたす直接的な影響がほとんど認められていない（日吉，1995）。今回の地震断層近傍のため池の数は多くないので、統計的に扱い難いものの、断層変位と地震動によって大きな破損を受けた箇所は図 I・3-7 を見る限り、断層から少なくとも20 m 以内に集中している。

なお、栗田（1995c）のいう「小倉地震断層」の南方に位置する浅野断層直上に位置しているため池の堤体に大きなクラックが見られたり（日吉，1995）、志筑断層沿いの谷側に位置する堰堤、とくに地すべり地形の上端部分に位置するため池の堰堤にひびが多く入っているものが多い（西村ほか，1995）など、ため池被害も断層近傍に集中する傾向があり、今回ずれの見られなかった既存の活断層上における地震動は周辺と比べてかなり大きかった可能性がある（皆川ほか，1995b）。

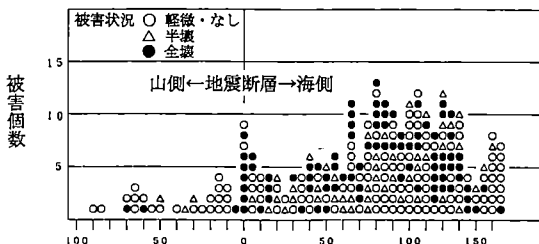
ダム施設の変状については、今回の地震断層からかなり離れていることもあって、いずれのダムもほとんど変状が認められていない。

(4) 家屋・建物の被害

現行の気象庁震度階級（1949）では、震度Ⅶの定義は「家屋の倒壊率が30%以上の地域」とされている。気象庁は、地震後に実施した現地調査に基づき、神戸側



a) 建物の被害率 (断層を基準に10m区間毎の家屋総数に対する被害家屋の割合)



b) 建物の被害個数 (断層を基準に5m区間毎の被害状況)

図 I・3-8 野島地震断層からの距離と建物被害状況 (皆川ほか，1995b)

a), b) とも小倉川から簡易保険センター入口道路までの区間を対象

では神戸市須磨から西宮市にかけての海岸に平行な内陸側で幅約1 kmの連続した範囲（震災の帯：嶋本ほか，1995）と、西宮市から宝塚市に至る武庫川右岸側の六甲山塊を取り巻く地域に点々と飛び地状に、淡路島側では北淡町富島から室津、一宮町群家、津名町志筑の各地区について、震度Ⅶに達していたとの判定を下した（小泉，1995；原口，1995）。これらはいずれも地震断層上ではなく、その延長線上の住宅の密集した市街地に当たっている。

鈴木ほか（1995）は、このことに関し、淡路島北部のように住家が山野に散在している地域が多い場合には、被害統計の最小単位毎の家屋被害データは、それ自体がさまざまな地形・地盤条件を持った地区内の単純平均値を与えるにすぎず、前記のような密集した市街が形成されている地区でのみ、その地区の実態に見合った被害率を得られることに充分留意する必要があると指摘した上で、六甲断層群の北端部に位置する宝塚市や野島地震断層のさらに南に位置する一宮町・五色町などの市街地で被害がかなり大きかったのは、地震に伴う破壊の進行方向にドブラー効果が強く働き、大きな加速度が生じたものと考えている。これに対して林ほか（1995a）

は、一宮町までの被害は野島断層よりさらに南に延びた地表地震断層に集中したものと考えているし、平野・波田 (1995e) は神戸側について断層変位に関連した現象としている。

今回の淡路島における地震被害は海岸部からやや内陸に入った低地地域において大きく、段丘・山地地域では全般的に小さい傾向が認められる。さらに野島地震断層以外の活断層上における顕著な被害の集中は認められていない。段丘・山地地域内における家屋の被害は表層堆積物の移動によって引き起こされたものが多く (鈴木ほか, 1995), 同じような構造物でも地盤の良い所に立地したものは損害が少ない (原口, 1995; 原口ほか, 1995)。

構造物特性と被害の関係を見ると、倒壊した家屋は木造家屋ではそのほとんどが本瓦葺の重い屋根を持ったものであり、プレハブのような頭部が軽い新木造住宅で倒壊に至るものは見られなかった。RC 造や鉄骨造りの建物で顕著な被害を受けたものは少なく (中山, 1995), 鉄筋コンクリート建築物は断層のごく近傍にあっても、これをわずかに避けていれば構造上ほとんど被害を生じていない。

野島地震断層南端の富島市街地での構造物被害概況を空中写真により整理したもの (図 I・3-8, 皆川ほか, 1995) によれば、被害の密集している地域は、台地～丘陵と市街地を載せる平坦地との境界付近を通る地震断層の直上 (およびごく近傍) と、これより海側に離れた位置にあり、後者は地盤条件の悪い地域ほど倒壊率が高くなっている。このように地震による被害は地震断層上で直接せん断されるものと、地盤条件によるものとがあるが、地震断層に近づくに従って被害の程度が増すといった特徴は認められない (皆川ほか, 1995)。

神戸市内の都市域においては、鉄筋コンクリート系の建物の倒壊または破壊が北東-南西方向に系統だって連続する場合があります、これが既往活断層群の延長線近傍に当たることが少なくない (日本建築学会, 1995)。

(5) 崖崩れ・斜面崩壊

斜面崩壊・崖崩れの発生は、今回の地震ではそれ程顕著でなかったが、淡路島側では野島地震断層沿いに崖崩れが集中する傾向が認められた (堀野ほか, 1995)。断層沿いの山体を刻む斜面はおおむね北西向き斜面が卓越し、谷が深く刻まれた部分では南西・北東向き斜面が認められるが、今回の崩壊は南西向き斜面に集中する傾向があった (鈴木ほか, 1995)。桃林寺～平林間の南側では数箇所の斜面崩壊が発生し、平林～大川間の採土場でベルコン切り通しの北側斜面が大規模に崩壊、簀川右岸

の道路法面にも大きな崖崩れが生じている (中田ほか, 1995a)。北淡町の野島大石バス停東約 20 m 付近の崩壊は、幅約 40 m 長さ約 50 m の規模で野島断層近傍で発生しているし、江崎灯台の少し南西側の断層崖部や野島墓浦付近では表層崩壊がかなり集中して発生している。

神戸側では既往の活断層沿いに多くの斜面崩壊・崖崩れが発生している。

3.2.2 被害の特徴

このような特性を持つ地震の被害について、平野・波田 (1995c) は次の 3 つの側面に分けて分析する必要があると指摘している。

- 1) 地盤特性に関連するもの、
- 2) 建築物の強度に依存するもの、
- 3) 断層変位 (もしくはそれによる特異かつ大きな水平加速度) に伴うもの、

以下主として平野・波田 (1995c) に従って述べる。

地盤特性については傾斜地において、とくに谷部分を埋め立てた部分でしばしば既往の活断層線上やその近傍で地すべりが発生しており、それによる家屋の集中的被害が見られることがある (平野・波田, 1995c)。

建築物の強度については、木造建築においても鉄筋コンクリートについても、耐震設計基準も関係して、建築年代に対応した古い建造物ほど被害は大きい。寺院など重い屋根を載せた木造建築の倒壊率が高いが、それは建築後の年数のみならず、足元をすくわれたようにして倒れる震動特性にも対応している (平野・波田, 1995c)。

断層変位に関係しては、とくに山麓部の住宅地で断層に沿った狭い幅の中で大きな被害が見られる区間がある。芦屋断層に沿った部分で家屋の倒壊が市街地から飛石状に離れて北東方向に分布するのがその例で、芦屋断層に沿う震度Ⅶの地域の特異な分布はこれに対応し、被害地が線状に山麓部の市街地の中を北東から南西に延びている (平野・波田, 1995c)。

新幹線トンネルの被害については、とくに五助橋断層を横切る付近で圧挫損傷が見られ、それ以外にも損傷箇所がいくつもあったというが (平野・波田, 1995c), ずれの見られたトンネルとしては塩屋谷川放水路トンネルのみが知られている。

都市構造物の破壊様式については、次の 3 つが特徴的である。

- 1) 縦方向応力による破壊 (那谷, 1995)
- 2) 水平方向衝撃による破壊
- 3) 倒壊方向の規則性

縦方向のせん断破壊については、鉄道のコンクリート橋あるいは重い瓦を載せた寺院本堂、高架の橋脚部分な

どが縦方向にせん断破壊あるいは座屈し、コンクリートの建物でも垂直方向の応力により窓枠が左右に圧縮されている事例が見られ、非常に大きな垂直加速度あるいは衝撃力が働いた場合もあることが推定される（平野・波田, 1995c）。

水平方向の衝撃による破壊は、横尾山断層にごく近いJR 塩谷駅の窓枠の平行四辺形の変形に見られる（櫻井, 1995c）。層状破壊を起こした、例えば神戸市役所の場合もこの付近一帯における複数の破壊例から、地盤特性による地震動のほかに大きな衝撃的な水平加速度を受けたことが考えられる。むしろ強い衝撃的な水平加速度の存在の方が大きかったことを考慮することが必要ではないかと考えられる。これに関連して断層運動におけるずれの速度、ずれの広がる速度および地塊の移動速度を含めて今後の問題を残している。

今回の直下型地震に関わる地盤の水平変位について、櫻井（1995a）は第1次近似的には弾性反発によるものとみている。断層の水平変位に関係した加速度は一般に小さいとされているが、それに関与する地盤の質量は大きく、地盤に強く固定されたものは断層を横切る部分で極めて大きな力を受けることになる。

このような顕著な水平変位があると、ガス管・水道管などのライフラインが損傷することが考えられ、地震後の出火・焼失地域の多くが平野・波田（1995c）のいう「造構変位」を連ねた線上にすることがこれに関係していると思われる。

水平力が働いたときの構造物の倒壊方向は、地盤との結合の弱いものは地盤の変位に取り残されて逆方向に変位し、取り残されるのが妨げられたものは地盤と一緒に動き、運動停止時に地盤の運動方向に投げ出されて変位・倒壊する。弾性反発などにより断層を境とする急速な水平変位が起こるとき、断層の近傍では変位の開始時と停止時に大きな水平加速度が生じる。淡路島における斜面崩壊（石井ほか, 1995）も後者の例で、南西向き斜面の崩壊が圧倒的に多い（平野・波田, 1995c）。

宮田ほか（1995）は電柱の倒れる方位について系統性のあることを指摘している。神戸側における各種構造物の倒壊方向そのものについて、松田・竹村（1995）、菊山・横山（1995）、千葉・若松（1995）もふれているが、現在のところこれらを全体的に説明する解答は得られていない。しかし、それは今後さらに詳しい検討が必要と思われる。

いずれにせよ、東西方向への短縮と南北方向への押し出しという地殻変動の一般傾向に対応して、地表はさまざまな影響を受けているのであり、局部的に変位した地

盤や、その上に載る構造物などの示す変位はその結果であると言える。

参 考 文 献

- 1) 栗田泰夫, 水野清秀, 杉山雄一, 下川浩一, 井村隆介, 木村克己 (1995): 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, 地質調査所, No. 486, pp. 16-20.
- 2) 栗田泰夫, 地質調査所緊急調査グループ (水野清秀, 杉山雄一, 下川浩一, 井村隆介, 佃 栄吉, 木村克己) (1995b): 1995兵庫県南部地震に伴って淡路島に出現した地震断層, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, pp. 30-33.
- 3) 栗田泰夫, 水野清秀, 杉山雄一, 下川浩一, 井村隆介, 木村克己, 奥村晃史, 佃 栄吉 (1995c): 1996年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層, 地震学会講演予稿集, 1995年度秋大会, A83.
- 4) 岩淵 洋, 春日 茂, 穀田昇一, 沖野郷子 (1995): 大阪湾の活断層, 月刊地球, 号外13, pp. 117-122.
- 5) 石井孝行, 平野昌繁, 藤田 崇 (1995): 兵庫県南部地震によって淡路島北淡町に現われた断層および変位地形, 地形, 第16巻第3号, pp. 312-313 (講演要旨).
- 6) 大崎順彦 (1983): 地震と建築, 岩波新書, 岩波書店.
太田陽子, 堀野正勝 (1995): 1995年兵庫県南部地震の際に出現した野島地震断層と被害状況, 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 143-155.
- 7) 岡田篤正 (1995a): 六甲断層系のネオテクトニクス, 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 第四紀学会・第四紀研究連絡委員会, pp. 9-12.
- 8) 岡田篤正 (1995b): 六甲-淡路島活断層系と中央構造線活断層系, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 99-107.
- 9) 岡田篤正, 鬼木史子 (1995): 1995年兵庫県南部地震の地表地震断層, 藤田和夫・岡田篤正著「1995 (平成7年) 兵庫県南部地震の地震断層と六甲-淡路島活断層系」, 断層研究資料センター, pp. 1-49.
- 10) 関西地質業協会阪神大震災合同調査委員会 (1995): 地震による地盤変位状況, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, pp. 45-50.
- 11) 菊山浩喜, 横山俊治 (1995): 墓石・灯籠の転倒からみた1995年兵庫県南部地震の地震動, 兵庫県南部地震シンポジウム論文集, 日本地質学会, pp. 91-96.
- 12) 楠田 隆, 佐藤賢司, 古野邦雄, 酒井 豊, 香村一夫, 風岡 修, 香川 淳, 森崎正昭, 高梨祐司, 浅尾一己, 石渡康尊, 楳井 久 (1995): 1995年兵庫県南部地震による液状化-流動化被害, 日本地質学会兵庫県南部地震シンポジウム論文集, pp. 125-130.
- 13) 熊木洋太, 宇根 寛, 国土地理院災害地理調査班, 脇坂安彦, 佐々木靖人, 太田陽子, 戸田 茂 (1995): 六甲山地周辺地域の活断層と地震, 1995年1月17日兵庫県南部

- 地震調査速報会記録, pp. 51-52.
- 14) 小泉岳司 (1995): 平成7年(1995年)兵庫県南部地震(速報). 気象, Vol. 39, No. 3, pp. 4-12.
- 15) 櫻井 孝 (1995a): 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, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, pp. 77-87.
- 16) 櫻井 孝 (1995b): 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, pp. 38-54.
- 17) 櫻井 孝 (1995c): 震害状況から推定される断層変位運動, 応用地質, 第36巻第2号, pp. 40-49.
- 18) 櫻井 孝 (1995d): 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, 第36巻2号, pp. 167-172.
- 19) 佐藤隆司, 杉原光彦 (1995): 三角点のGPS測量による1995年兵庫県南部地震にともなう地殻変動の測定, 地質ニュース, 第490号, pp. 41-43.
- 20) 嶋本利彦, 堤 昭人, 大友幸子, 川本英子 (1995) 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, pp. 121-122.
- 21) 鈴木勝義, 海野芳聖, 堀野正勝, 木佐貫順一, 星野 実, 岩橋純子, 水越博子, 根本寿男, 中野 修, 飯田剛輔 (1995. 5): 兵庫県南部地震に伴う淡路島北部地域の地形変化. 国土地理院時報, 建設省国土地理院, 第83集, pp. 34-51.
- 22) 多田 堯 (1995a): 1995年兵庫県南部地震による地殻変動, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, pp. 22-23.
- 23) 多田 堯 (1995b): 1995年兵庫県南部地震の地殻変動と測地学的断層モデル, The Committee of Environmental Geology, Geological Society of Japan, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, pp. 7-10.
- 24) 千葉達郎, 若松尚則 (1995): 神戸市灘区海岸付近でのスラストの発見とその構造地質学的意義, 兵庫県南部地震シンポジウム論文集, 日本地質学会, pp. 61-64.
- 25) 中田 高, 蓬田 清, 尾高潤一郎, 坂本晃章, 朝日克彦, 千田 昇 (1995a): 1995年兵庫県南部地震の地震断層. 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 127-142.
- 26) 中田 高, 蓬田 清 (1995b): 地震断層からみた1995年兵庫県南部地震の震源過程, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 107-116.
- 27) 中山昭夫 (1995): 淡路島の地震被害. 兵庫県南部地震災害調査緊急報告会, 建築学会, pp. 54-59.
- 28) 那谷晴一郎 (1995): 地盤上下動と建造物破壊の関連性について, 兵庫県南部地震シンポジウム論文集, pp. 193-198.
- 29) 西村 進, 西田潤一, 桂 郁雄, 赤松 信 (1995): 兵庫県南部地震 淡路一宮での災害. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 地質学会・環境地質委員会, pp. 143-148.
- 30) 日本建築学会 (1995): 地域別の建物被害, 1995年兵庫県南部地震災害調査速報, pp. 51-152.
- 31) 橋本 学, 多田 堯, 村上 亮, 藤原 智, 齊藤 隆 (1995): 兵庫県南部地震前後の地殻変動, 地質ニュース, 490号, 巻頭.
- 32) 原口 強 (1995): 兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層, 地盤から見た「阪神大震災」緊急報告会資料, 全国地質調査業協会連合会, pp. 20-39.
- 33) 原口 強, 岡村 眞, 露口耕治 (1995): 1995年兵庫県南部地震に伴う野島地震断層調査, 応用地質, Vol. 36, No. 1, pp. 51-61.
- 34) 日吉 直 (1995): 野島断層とため池の変状との関係, 土と基礎, 地盤工学会, Vol. 43, No. 454, pp. 59-60.
- 35) 平田 直 (1995): 1995年兵庫県南部地震の余震活動, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 63-70.
- 36) 平野昌繁, 波田重熙 (1995a): 六甲山地東南部における断層の活動, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, pp. 24-27.
- 37) 平野昌繁, 波田重熙 (1995b): 六甲山地の構造特性と兵庫県南部地震による共役断層系の活動, 1995年構造地質研究会夏の例会講演要旨集, pp. 28-30.
- 38) 平野昌繁, 波田重熙 (1995c): 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書, 日本応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会, pp. 116-159.
- 39) 平野昌繁, 波田重熙 (1995d): 六甲山地の地形構造と兵庫県南部地震による断層の活動, 日本地形学連合.
- 40) 平野昌繁, 波田重熙 (1995e): 六甲山地東南部の断層の活動と変位地形, 東海大学出版会.
- 41) 平野昌繁, 藤田 崇 (1995): 1995年阪神大震災に伴う地盤災害—とくに断層にそう変位地形について—, 地球科学, 49巻2号, pp. 77-84.
- 42) 堀野正勝, 津沢正晴, 緊急災害地理・測図調査班(1995): 平成7年兵庫県南部地震緊急調査速報, 日本地理学会予稿集47, 1995年度総会・春季学術大会, 地理学会, pp. 422-423.
- 43) 松田高明, 竹村厚司 (1995): 兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向と分布, 兵庫県南部地震シンポジウム論文集, pp. 181-186.
- 44) 溝上 恵, 中村正夫, 瀬戸憲彦 (1995): 1995年兵庫県南部地震の震源域周辺における連動性地震活動を伴う断層系, 月刊地球/号外, No. 13, pp. 38-46.
- 45) 皆川 潤, 大槻憲四郎, 青野正夫, 大友淳一, 中村教博 (1995a): 野島地震断層の性状, 応用地質, Vol. 36, No. 2, pp. 54-63.
- 46) 皆川 潤, 大槻憲四郎, 日吉 直, 松井和夫, 青野正夫 (1995b): 野島地震断層と構造物被害について, 「阪神大震災」中間報告会—人工改変と地震被害—予稿集, 応用地質学会, pp. 22-37.
- 47) 宮田隆夫, 洪 景鵬, 前田保夫 (1995): 神戸—芦屋間における潜在活断層とその動き, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, pp. 28-29.
- 48) 山縣 守 (1995): 兵庫県南部地震と明石大橋の橋脚の動き, 1995年度構造地質研究会夏の例会口頭発表.
- 49) 林 愛明, 井宮 裕, 宇田進一, 飯沼 清, 三沢隆治, 吉田智治, 清松保貴, 和田 卓也, 川合功一 (1995a): 兵庫県南部地震により淡路島に生じた野島地震断層の調査, 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 113-122.
- 50) 林 愛明, 井宮 裕, 宇田進一, 三沢隆治 (1995b): 野

島地震断層の性状, 応用地質, Vol. 36, No. 1, pp. 41-46.

- 51) 林 愛明, 宇田進一 (1995c): 明石海峡のテクトニクスおよび兵庫県南部地震の断層モデル, 日本地震学会講演予稿集, 1995年秋季大会, A82.
- 52) Aiming LIN and Shinich UDA (1995): Morphological characteristics and fault segmentation of the Nojima Earthquake Fault, THE PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM ON THE GREAT HANSHIN-AWAJI EARTHQUAKE AND ITS GEO-ENVIRONMENTS, THE COMMITTEE OF ENVIRONMENTAL GEOLOGY, GEOLOGICAL SOCIETY OF JAPAN, pp. 15-20.

4. 地震断層調査の実態

4.1 調査対象

兵庫県南部地震を発生させた地震断層(震源断層)は明石海峡の震源を中心にして北の神戸側と南の淡路島側に向かってNW-SE方向に延びた延長約50~60 kmの断層であることが, 余震分布等から推定されている。しかし, 地表部での出現状況は両地区でかなり異なっており, 淡路側では地表地震断層(主として野島地震断層と呼ばれている)が, 明瞭に連続して出現したのに対し, 神戸側ではそれほど明瞭ではない。ここでは地震発生時に実施された断層調査の実態を把握する目的で, 対象がはっきりし, かつ各種調査が集中して行われた野島地震断層を中心にして各種の調査内容およびその成果について述べる(表I・4-1)。

なお, 野島地震断層出現後に実施された各種の調査は各調査・研究機関がその専門分野の手法(調査法)を生かして, 適宜行われたものである。一つの活断層調査としてみれば, 必ずしも系統立って行われたものではない。しかし, それぞれが実際に出現した言わば「生の活断層」を対象にしているため, それぞれの調査手法の実態がよく現れており, 今後の活断層調査の一助になりうると考えられる。

4.2 空中写真撮影と判読

中田ほか(1995a, b)によって発見された地表地震断層は, 地震直後に各調査・研究機関あるいは報道機関によって空中写真等の撮影がなされ, その映像はマスコミによって直ちに報道され, 生々しい活断層の実態が世の多くの人の関心を呼んだのは周知の事実である。しかも地震発生後の早い時期に高精度の空中写真(縮尺1/10,000~1/5,000程度)が一般調査・研究者にも容易に入手可能となり, その後の地表地震断層のジオメトリーを含む各種調査研究の上で貴重な資料となったのも事実である。なお, 野島平林や富島北部(小倉)付近などの

大規模な土取り場の改変前(原地形)の変位地形判読に1948年米軍撮影の空中写真が補助手段として可能であった。

これら空中写真解析から, 今回出現した地表地震断層は, 水野ほか(1990)の野島断層(B級, 一部A級の活断層と評価)にはほぼ一致した位置に出現したことが判読された。この断層は地形的にも明瞭であり, 主として山地と丘陵とを境するリニアメントとなっている。また, 水野ほか(1990)が指摘したように, 野島平林を中心にして, リニアメントを横断するいくつかの河谷が右横ずれを示すような形状で屈曲しているのが観察される。

4.3 地表踏査

4.3.1 地表地震断層のジオメトリー

上記の高精度の空中写真あるいはその判読結果をもって現地調査の効率の実施がなされた。さらに現地で詳細に地震断層をトレースして, そのジオメトリーの精度向上が図られた(断層追跡結果と露頭記載の一例を図I・3-4, 表I・3-1に示した)。

(1) 断層の長さ

今回の地表地震断層は淡路島北端の淡路町松帆の浦付近から北淡町浅野南にかけての約10.5 km間に, 既存の野島断層に沿って出現した(栗田ほか, 1996a, b)。途中の野島蓼浦以南では2つの断層に分岐している。今回の地震断層は, 江崎灯台付近から富島の市街地までの区間では後述するように比較的変位量が大い状態(山側上がり成分を持った右横ずれ主体)で連続的に追跡できるため, 江崎灯台から富島間での地表地震断層の存在は統一的な見解となっている(中田ほか, 1995a; 太田ほか, 1995; 林ほか, 1995a; 原口ほか, 1995; 皆川ほか, 1995a; 栗田ほか, 1995)。

しかし, 富島から南に延びた地表地震断層の見解は必ずしも一致していない。つまり, 富島から南では, かなり断続的分布となり, 変位量も著しく減少する。しかも右横ずれといった系統性のある変位状況も顕著でなくなる。これら地震断層を最も長く引いた場合, 育波~津渚までとされている(林ほか, 1995a)。育波の沖積低地(図I・3-4の27地点)で地表地震断層とされた地割れや波状撓曲地形(林ほか, 1995a)と言われる緩やかな小起伏の性状を詳細に観察すると, 一見, 富島以北の地表地震断層と同じような方向に延びているが, ここで確認される割れ目先端部が湾曲し, 全体に緩やかに海側に開いた馬蹄形状の変位地形が確認される。また, 割れ目の開口状況は右横ずれ性というより, むしろ地すべりによって海側にずり出したようにも見える(阪神・淡路大

表 I・4-1 地震発生時の初動的調査一覧表

調査手法	調査内容・目的	調査結果	順序	備考
①空中写真判読	活断層の認定、性状および評価を行う。とくに、地震発生後出来るだけ早い時期に撮影を行うことによって、断層のジオメトリの全体的把握および詳細な状況を把握する。	各調査・研究機関が、地震直後に空中写真撮影を実施し、しかも速急に調査技術者・研究者に入手可能となり、断層のジオメトリの研究に大きく貢献した。	I	必ず実施される
②地表踏査	地震断層直後に速急に実施し、断層の正確な位置、性状を把握する。とくに、出現した断層変位、割れ目等の断層露頭が踏み荒らされ消失する前に出来るだけ、詳細な観察記録（ルートマップ、スケッチ、写真等）を作成し、断層のジオメトリや断層構造等の検討をおこなう。	地震発生後の調査技術者・研究者の迅速な働きによって、地表地震断層の詳細な性状が記録されている。それによって、断層の長さ、変位量分布、断層岩の構造等が明らかにってきた。	II	必ず実施される
③トレンチ調査	既存の活断層が再活動したことを確認すること、この活断層の完新世後期における活動履歴を明らかにし、当地区で地震がどのような周期性をもって再来するかを検討する。	各研究機関によって何回かにわたって実施。その結果野島断層は約 2 千年前に活動したことが確認された。しかし、それより若い時代でのイベントについて見解が異なるということが生じ、一つのトレンチで結論を出すことに注意が喚起された。	IV	露頭状況によるが、実施される場合が多い。
④物理探査				
・重力探査	震源域周辺における深部地下構造を広域～かなり限定した範囲までの重力特性を把握。さらに断層に沿ったマイクロ重力探査により断層を挟んだ浅層部の重力特性を把握する。	有馬一高機構造線、野島断層は大きな重力変化を伴った構造であることが確認。大阪層群等の堆積岩と基盤をなす花崗岩との分布状況を精度よく把握できた。		
・反射法探査	広域の地下深部（震源は陸域でバイブレータ、海域でエアガン；発振間隔は陸上で平均 50m、海域で平均 25m、受振点間隔は陸域で 25m、海域で 12.5m）、中程度の深部～浅部（重錘落下方式、測定チャンネル数を 48ch とし、震源間隔 10 m、受振点間隔 5 m）および極浅部（ポータブルバイブレータ震源、起震間隔 50 cm、受振間隔 25 cm）を対象とした P 波反射法により、各深度での反射構造を把握。また、S 波反射法探査（板叩き、起震間隔 1～2m、受振間隔 1m）で断層付近の浅部の反射構造の把握	大阪層群等の堆積岩層と基盤となる花崗岩類との深度境界がかなり明瞭に確認され、広域的な深部基盤の反射構造から野島断層付近の中～浅部の反射構造さらに極浅部の反射構造を確認することができた。それによって野島断層の深部から極浅部までの連続性および性状の特定に有用な情報が得られた。	III	断層の位置、性状を把握する上で、重要な補助手段。対象地の地質状況によって効果的な調査手法の選定を行う必要がある。
・電気探査	断層位置及びその周辺の比抵抗分布を把握する（電極間隔は梨本で 0.5 m（鈴木ほか）、1 m（高橋ほか）、是石ほか）、小倉で 25 m（高橋ほか）、1 と 5 m（茂木ほか）、野島断層で 8 m（高橋ほか）、1 と 5 m（茂木ほかはインバージョンの結果得られる比抵抗構造の信頼性評価も検討している）	梨本、小倉および野島断層ともに比抵抗分布値の特徴は砂礫層、砂質シルト層あるいは花崗岩類といった岩質の相違をかなり良く反映していることが判明し、断層推定に有用な情報を得ることが出来た。		
・地下レーダー探査	断層位置及びその周辺の探査結果による解析（この探査記録の解析ではオリジナル記録に対する種々の処理が必要）。80Mhz（高橋ほか）と 100Mhz（是石ほか）アンテナによる。さらにステップ式連続波地下レーダー法探査の成果検討。	梨本の水田面（トレンチ掘削箇所）で、実施され、測定者のいずれも断層部で反射面の不連続を検出。しかし、100Mhz の方が可探深度が深い。ステップ式連続波地下レーダー法探査では 25 m 以深までの構造を検出している。	III'	
・放射能探査	放射能探査は携帯型ガンマ線測定器を用いて、比較的簡便に実施でき、断層探査に良く利用されている。	野島地震断層部で実施した放射能探査では花崗岩、大阪層群およびそれら覆う未固結堆積物で断層に起因すると考えられる放射能異常部を検出。		
・電磁探査	地質調査所では反射法地震探査の補足調査として、空中電磁法調査およびアレイ式 CSAMT 法調査を実施。前者は地表付近の地質構造の状況を面的に把握。後者は断層周辺の深部構造および断層破砕帯に伴う比抵抗異常を検出。その他に野島断層横断した電磁探査を実施（矢野）。	<空中電磁法調査>花崗岩類分布域は高比抵抗域、神戸層群・大阪層群分布域は低比抵抗域に対応。比抵抗リニアメントは断層と良く一致する。 <アレイ式 CSAMT 法調査>野島断層は顕著な比抵抗構造の境界に位置する。		地調報告は高倉ほか(1996)参照
・磁気探査	地表における磁気探査をプロトン磁力計使用、センサー高 1.5m、測定間隔 1m、測定値は 3 回の平均値で実施。専用ヘリコプターによる広域の空中磁気測定はセシウム磁力計、精度 0.05nT を使用し探査実施。	上記の各種物理探査に比べて磁気探査は活断層探査の適用性について検討の余地が多い。		

※地震発生以降の調査順序は系統だっていないので、ここでは一般的な活断層調査時における順序をしめしてある。

震災調査委員会, 1995)。

また、江崎灯台の東方から松帆にかけて断続的に出現している主として WNW-ESE 方向の地割れ群についても直接地震断層を反映しているか否かの見解が一致しているわけではない(阪神・淡路大震災調査委員会, 1995)。

このように、神戸地区に比べればかなり顕著であるはずの淡路島地区の地表地震断層も、とくにその末端部にいくとその認定が容易でなくなる。活断層の長さは、地震の規模を評価する上で重要な要素となり、今後物理探査やボーリング調査を実施して地下の構造と合わせ、その実態を解明していくことが望ましい。

(2) 断層の分布状況

1) 全体的形状

今回の地表地震断層はその存在がはっきりしている江崎灯台～富島間で見ると、急崖地形をなす既存の野島断層に沿ってかなり直線的に現われるが、N30°~60°E の走向(傾斜75°~80°SE)を持ち、全体としては弱く S 字状にカーブしている。途中の野島菰浦から南では地表地震断層は分岐し、一つはそのまま海岸線沿いに延び富島市街地に達する。もう一つは多少山側に屈曲して折ヶ谷池を通る N-S 方向の断層となる。そのうち、富島市街地に向かう断層は、これまでに記載されていた既存の野島断層を突き抜けてさらに南西へ延びたものである(例えば、中田ほか, 1995a, b)。

2) セグメントの区分

今回の地震断層はほぼ直線状に連なっているが、もう少し細かいオーダーで見ると左雁行(杉型)状に配列する長さ数 km 単位の 5~6 のセグメント単位に区分できる[中田ほか(1995a)は5区分、皆川ほか(1995c)は6区分、林ほか(1995a)はこの区間では2区分]。また、個々のセグメントはトレースの一般方向に対し 10°前後斜交している(皆川ほか, 1995c)。セグメントの境界付近では断層線は走向を変え、屈曲したり断続的となり、多くの場所で変位が認められなくなる(中田ほか, 1995a)。

セグメントをさらに細かいオーダーで見ると、雁行配列をなす断層線から構成されている。その断層線も地表付近が軟弱な堆積物によって構成されている所では、さらに短い左雁行配列をなす開口割れ目から構成されている。全体的な断層の形状から小単位の断層の形状まで近似性が認められ、全体としてフラクタルな構造をなしている(中田ほか, 1995a)。

3) 地盤条件による断層の出現状況

現地でトレースできる単一の断層線の長さは、長くて

も数百 m 程度である(林ほか, 1995a)。地表部への地震断層の現れ方は、基本的に表層部の地盤条件により大きく異なり(原口ほか, 1995)、栗田ほか(1995)によると、地震断層の形態は次のように区分される。

- ① 大阪層群などの基盤の露出地域では直線状の断層崖となる。
- ② 段丘堆積物や崖錐堆積物などが薄く覆う地域では、幅 1~3 m の撓曲崖となって現れ、撓曲の肩の部分に左雁行配列する開口割れ目を伴う。
- ③ 段丘堆積物や崖錐堆積物が厚く分布する地域では最大幅約 10 m の規模の大きな左雁行する開口亀裂帯が発達し、北西下がりの傾斜では亀裂帯の斜面下側に沿って小規模(幅・比高ともに 20~30 cm)なプレッシャーリッジが見られることがある。

上田ほか(1995)、谷ほか(1996)によると、割れ目のゾーンは、右横ずれ変位を伴う割れ目が左雁行配列し、個々の割れ目間でプレッシャーリッジや逆断層(傾斜角 40 度程度)が形成されている。これら割れ目や逆断層により地表付近の地盤はブロック化し最大 25 度回転している箇所もある。割れ目は主として伸張性のものであるが、一部リーデル・シア状のものも含まれている。未固結層の厚さや物性によって、割れ目ゾーンの幅は 1.9~8.4 m と、場所によって異なる。さらに、高見ほか(1995)によると崖錐・扇状地堆積物や地すべり土塊あるいは沖積層などの未固結堆積物の厚さが 10 m を越えると地震断層による変位はほとんど地表に現れないとしている。

(3) 変位量分布

今回の地表地震断層の変位量の計測結果によると、この断層は東側隆起の逆断層成分を伴う右ずれ断層で、そのおおむねの変位量は右ずれ 1.2~1.6 m、東側隆起 0.5~0.7 m であるが、野島平林付近では右ずれ 2.1 m、東側隆起 1.3 m 位と著しく突出して大きい変位量を示している(栗田ほか, 1996a, b; 図 I・4-1)。野島菰浦以南で分岐して富島市街地に向かう断層の約 700 m の短い区間(主として梨本地区内)に限って、北西側隆起成分を持つが、さらにその区間以南では一般的な南東側隆起成分に戻っている(例えば中田ほか, 1995a; 栗田ほか, 1995; 林ほか, 1995a; 皆川ほか, 1995a)。

それぞれの断層セグメント単位で見ると、変位量はセグメントの中央部で大きく末端部で小さくなる傾向があり、セグメントの境界は断層が屈曲したりステップして乗り換えるジョグと呼ばれる場所になっている(中田ほか, 1995a)。また、セグメントの組み合わせで示される断層形態は岩石破壊実験で発生するせん断破壊でも封

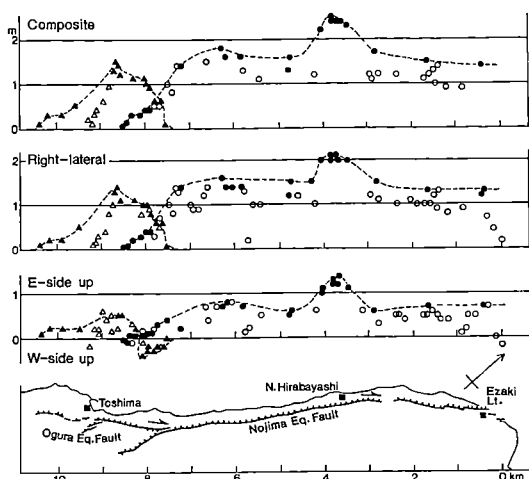


図 I・4-1 地震断層に沿う変位量の分布

(栗田ほか, 1996a, b)

黒塗りのシンボル (●) は精度の高い計測値

庄の大小にかかわらず普遍的に認められることから (永広ほか, 1974), このようなセグメントとその境界は, 地下深部でも同様に雁行配列の関係にあり (皆川ほか, 1995c), 震源断層の破壊の伝播過程において重要な役割をになっている可能性がある (中田ほか, 1995a)。

(4) 地震発生以後の地盤の挙動観測

地震断層発生後のアフタースリップを観察する目的で梨本付近のアスファルト道路白線を基準として地盤の挙動を計測する試みが行われ, その結果, 本震後1月26日~2月19日間で約20 cm 右ずれ変位量を測定したとしている (皆川ほか, 1995b)。しかし, その結果には測定精度上の問題や局地的地盤の変状の問題が指摘されている (阪神・淡路大震災調査委員会, 1995)。また, 北淡町育波付近でも沖積面上に見いだされる波状撓曲地形が成長しているといった指摘がある (林ほか, 1995a)。

しかし, 本震後の予効変動の検出はGPSによって試みられており, その結果によると, 野島地震断層のアフタースリップはほとんど検出されていない (GPS 大学連合ほか, 1995)。

4.3.2 地表地震断層の断層構造

(1) 主要露頭で見られる断層構造

断層全線のかなりの部分は崖錐性~扇状地性の未固結堆積物 (一部沖積層) に覆われるが, ところどころで第三紀層や花崗岩等を切る地質構造が観察される。断層を含む地質構造の把握は, 当該地で実施された各種の物理探査等の解析のためにも重要な基礎資料となる。

1) 小倉での断層構造 (大阪層群中)

小倉付近では地表地震断層は大阪層群中に出現し, 上盤側 (山側) の急傾斜した砂質シルト岩層 (走向 $N55^{\circ}E$, 傾斜 $60^{\circ}S$) と下盤側 (海側) の緩傾斜の砂礫岩層とを境する既存の断層部を通っている (図 I・4-2)。この既存断層の破砕帯の幅は, 弱破砕部を入れると $30\sim40$ cm, 強破砕部のみで約 15 cm 程度である。この強破砕部には厚さ数 mm~数 cm の薄くて黒っぽい粘土岩脈が何本も見いだされる。この粘土岩脈は, 断層変位による磨耗で細粒化した部分で, 大部分はまわりの破砕帯と同じような硬さに固結している。今回の地表地震断層の断層面にも, ごく軟質な黒っぽい粘土の薄膜が付着していた。この粘土の薄膜は, 形成当初は含水比が高く, 硬さの点を除けば上記の強破砕部にある粘土岩脈に似ている。このような粘土岩脈あるいは粘土の薄膜は, 今回のような地震断層の形成に伴って生じた断層ガウジである。つまり, このような断層の内部構造から見て, 今までに地震を伴う断層活動が何回も繰り返した結果, 何本もの断層粘土を伴う断層破砕帯が形成されたものと考えられる (皆川ほか, 1995b)。

2) 野島平林の断層構造 (花崗岩類と大阪層群の境界部)

野島平林は今回の地震で最も大きな変位量が確認された地点である。ここでは花崗岩と大阪層群が断層で直接接し, 山側の花崗岩はカタクラサイト化し, 断層面までの幅約 4 m 間は熱水変質によって白褐色の粘土~シルト状になっている。海側の大阪層群とは幅 $10\sim40$ cm の固結した断層岩を持って接している (図 I・4-3)。この断層岩は後述するシュードタキライト様岩を含む古いもので, 断層運動に伴って地下深所より引きずり上げられてきたものである。今回動いた断層部はこの断層岩と大阪層群との境界で, 幅数 mm~数 cm の断層ガウジを伴っている (皆川ほか, 1995b)。この断層面から北西方向に数 m 以内にある大阪層群粘土層は走向 $N20^{\circ}E$, 傾斜 $86^{\circ}E$, 断層面から約 30 m の位置にある大阪層群砂礫層は走向 $N22^{\circ}E$, 傾斜 $83^{\circ}W$ と著しく急傾斜し, さらに 20 m 離れた位置では, 走向 $N30^{\circ}E$, 傾斜 $30^{\circ}W$ と急に緩傾斜となっている (水野ほか, 1990)。ここでの地震断層は明らかに上記の既存の断層が再活動したものである。今回の地震断層は走向 $N38^{\circ}E$, 傾斜 $83^{\circ}E$ で, 明らかに, 近傍の大阪層群粘土層に近い構造を示している。また, 地質調査所による断層ボーリング調査からも, 地下深部で求められた断層の傾斜角は 85° とかなり大きな角度が得られている (地質調査所, 平成8年1月28日コブ資料検討会資料)。しかし, 地震発生以前に測定された断層面は $N75^{\circ}E48^{\circ}S$ (水野ほか,

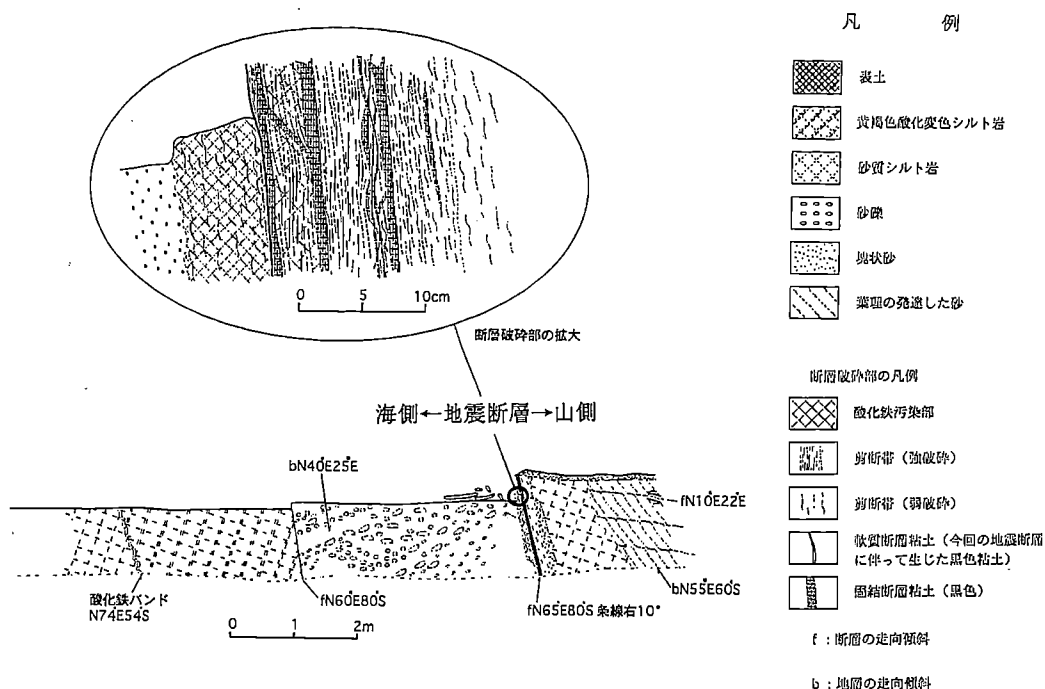


図 I・4-2 小倉地点での地震断層の構造 (皆川ほか, 1995b)

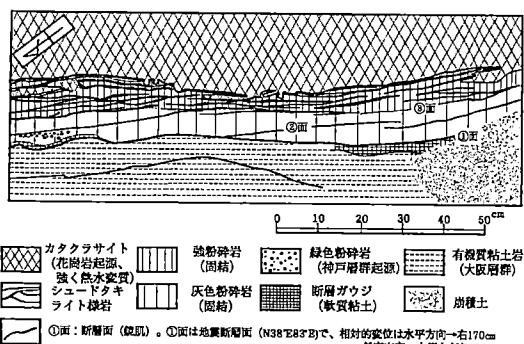


図 I・4-3 野島平林での平面的に見た地震断層の構造 (皆川ほか, 1995b)

1990) であり、明らかに本来の構造に対しねじれて平野側に倒れかかったような形状を示している。これは、当初高角度で出現した地震断層も時間の経過とともにクリープによって谷側に変形したためと考えられる (皆川ほか, 1995b)。

3) 折ヶ谷池付近の断層構造 (花崗岩類と神戸層群～大阪層群境界部)

野島麓浦から山側に延びた地表地震断層は、折ヶ谷池右岸アバット部を通っている。そこでは花崗岩 (山側) と高角度に傾斜した神戸層群 (海側) とが断層

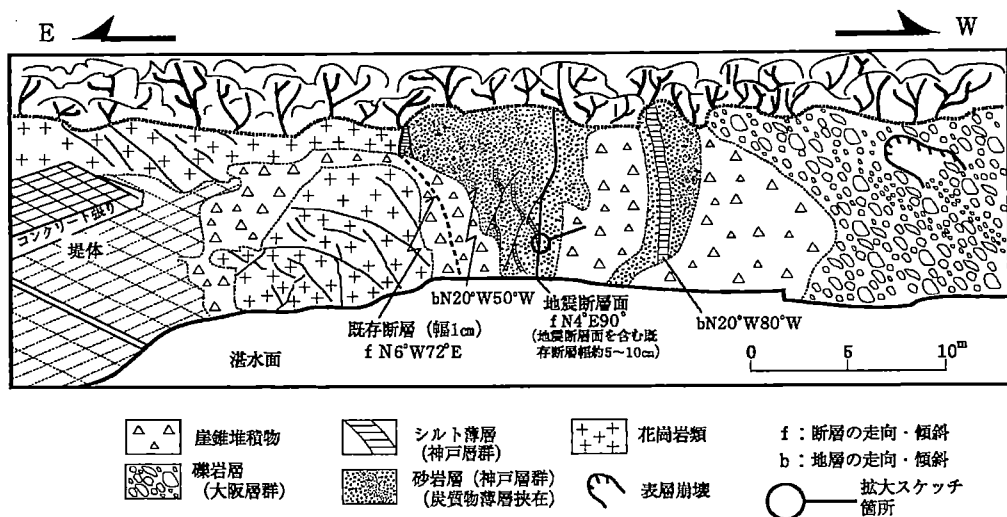
($N6^{\circ}W72^{\circ}E$) で接している (図 I・4-4)。その境界の断層は幅がせいぜい 1 cm 程度のもので、しかも少なくとも今回の地震で全く動いた気配がない。その境界の断層から 5 m 程度神戸層群に入った所に幅約 5~10 cm の既存の断層剪断帯があり、その部分を今回の地震断層が通っている。

さらに折ヶ谷池から南に行くと、熱水変質を強く受けたカタクラサイトが直線的な断層分離面を境にして、緑色味を帯びる青っぽいシルト～粘土より成る細粒の断層ガウジ (幅 40 cm 前後) と接している (図 I・4-5)。このガウジの断層分離面側は強くせん断され、鏡肌が鱗片状に細かく発達する。このガウジと大阪層群砂層と砂礫層の互層とはかなり凹凸のある面をもって接するが、大阪層群は引きずられて、やや傾斜がきつくなっている。断層ガウジはやや緑色がかった青灰色シルト岩より成り、おそらく神戸層群起源のものと考えられる。このカタクラサイトの直線的な断層面が今回の地震断層面となり、その面上にはやはり黒っぽい軟質粘土の薄い断層ガウジが生じている (皆川ほか, 1995b)。

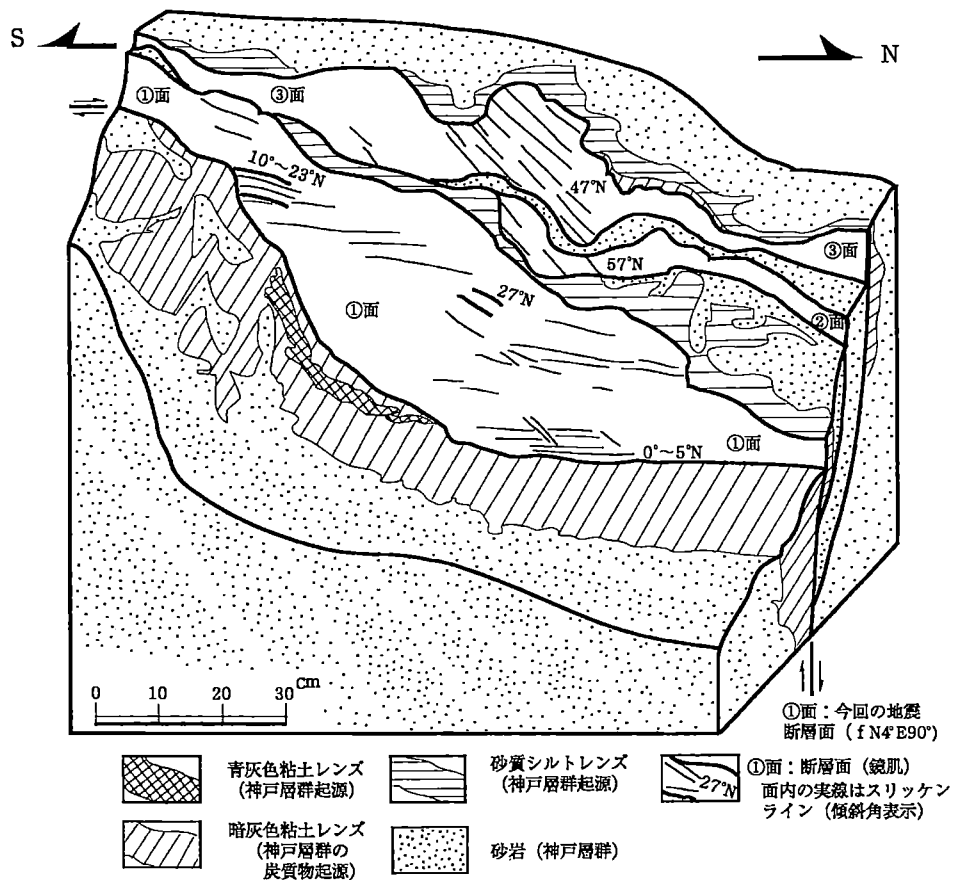
(2) 断層構造の特徴

1) 浅部での形成状況を示す断層構造

LIN & UDA (1995b) の観察結果によると、断層近傍の神戸層群と花崗岩質岩は破碎によって、面構造の発達



a) 折ヶ谷池右岸アバット付近の地質状況と地震断層位置



b) 断層部のスリッケンラインの詳細性状

図 I・4-4 折ヶ谷池右岸の地震断層の構造と断層条線の性状 (皆川ほか, 1995b)

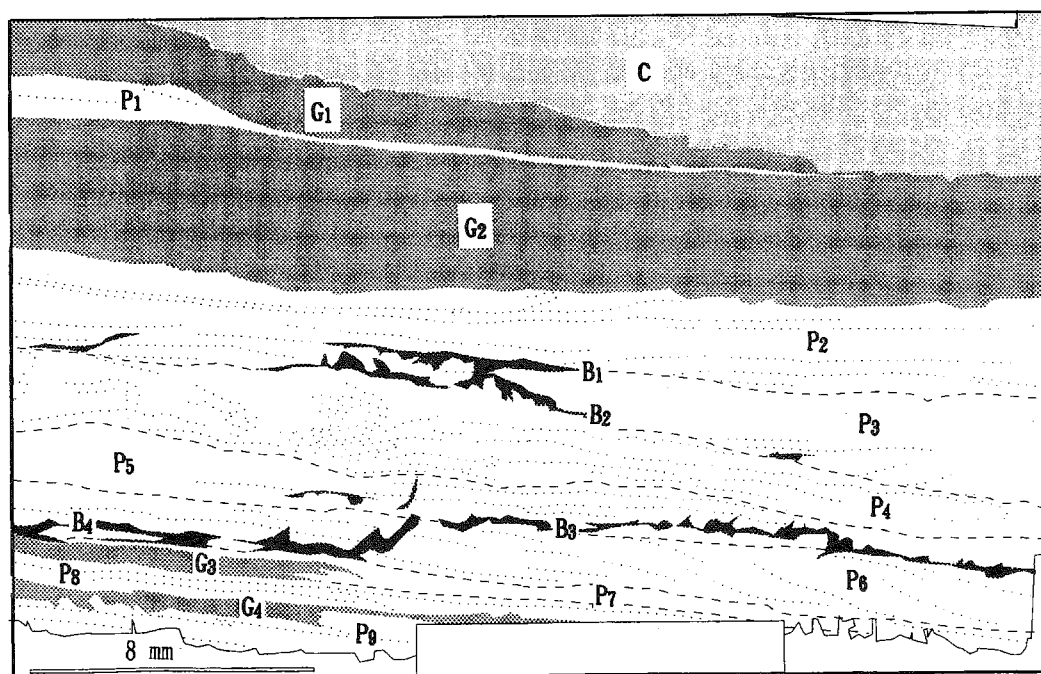
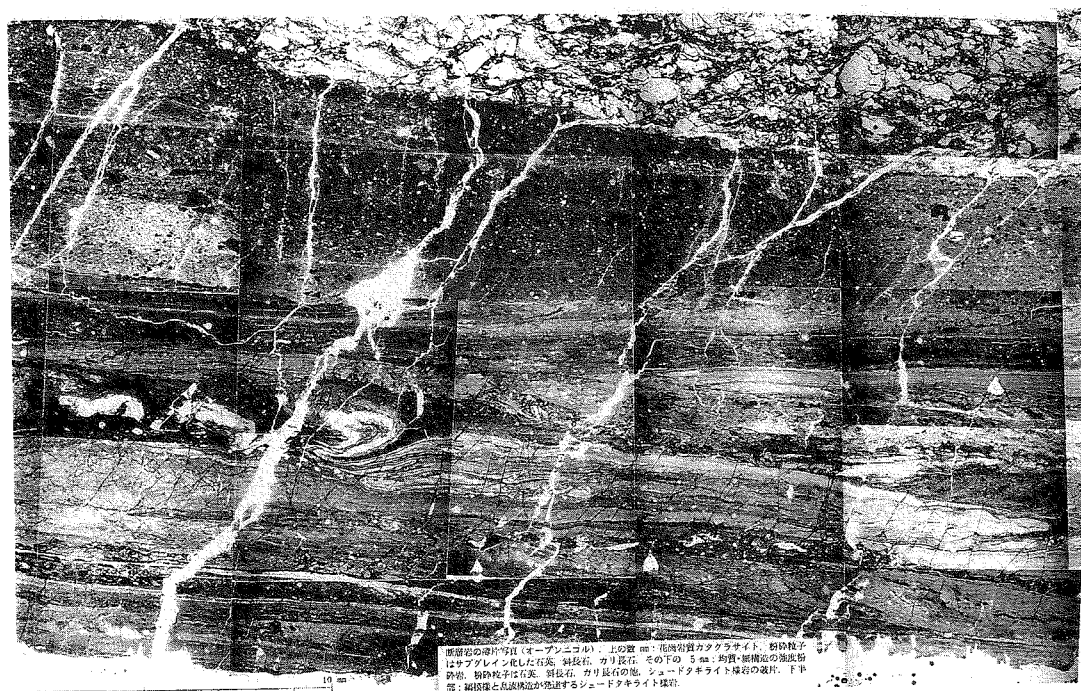


図 I・4-7 断層岩中に見出されたシュードタキライト様岩の性状（大槻ほか，1995）

上：固結断層岩の顕微鏡写真

下：上の写真の概念図。 C：カタクラサイト。P₁～P₉：シュードタキライト様岩の薄層。G₁～G₄：固結粉体岩の薄層。B₁～B₄：ブリットル・シアーゾーン

る固結ガウジ（幅約10 cm）、大阪層群の粘土質岩起源の未固結ガウジ（約20 cm）が帯状をなしている。②今回は未固結ガウジ部ですべった。それ以外の断層岩は過去の活動によるものである。③粉碎組織から、カタクラサイトは固相のみでの低速粉碎によるものである。④これに対し、粉体岩は固体・気体（または液体）の2相での、シュードタキライト様岩は固体・気体・溶融体の3相での高速粉碎（地震を伴う）で形成された。⑤形成順序は、カタクラサイトとシュードタキライト様岩→粉体岩→これらの層状構造と平行な小角礫状破碎帯→層状構造を斜断する開口性クラック→神戸層群と大阪層群のガウジ、である。破碎の位置は大局的には順次北西側に移動した。また、これらの形成順序は形成深度の順序にも対応する（大槻ほか、1995）。

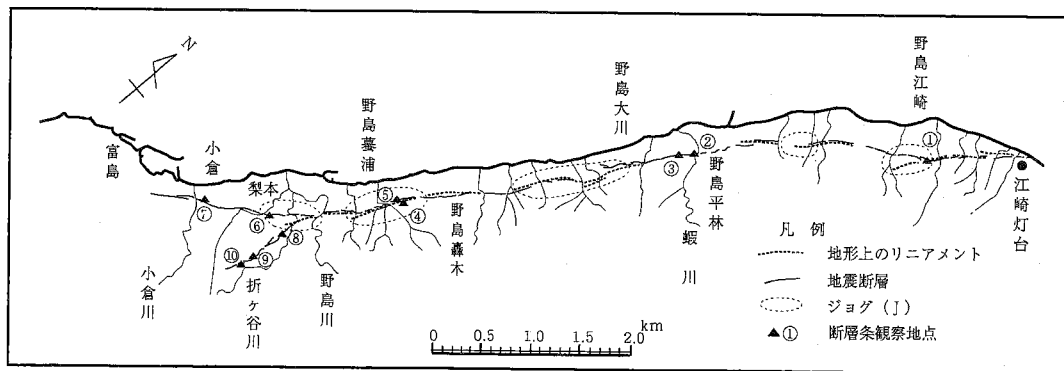
(3) 断層条線の特徴

今回出現した断層崖にはしばしば条線の刻まれた暗灰色～灰色の断層粘土（厚さ数 mm 程度）を伴う断層面が観察された（太田ほか、1995；林ほか、1995a；原口ほか、1995；皆川ほか、1995a；岡崎、1995）。しかし、明瞭な断層条線が確認できる露頭は、大阪層群以下の地層が露出する野島平林や小倉など10箇所ほどにすぎなかった（図 I・4-8）。

主な露頭で、断層条線の性状を観察すると、野島平林地点2では3方向の条線が認められ、それらの消す・消されたの関係から、70°N→20°N→30°Sの順に形成されたことがわかった。また、条線の強さはこの順で減少している。同地点3では、今回の地震時に形成されたすべり面（図 I・4-9の①面）上の条線は、面の上方では46°Nと立っているが、下方ではほぼ水平である（皆川ほか、1995a, b, c）。

小倉地点7は採土場跡地の造成地であって、そこでは140 m 余りにわたって出現した直線状の断層面（オーバーハングした崖、図 I・4-10はその一部）に見事な条線が刻まれている。この地点の断層条線の組織等については高木ほか（1996）に詳しい。この条線の特徴は①まず、長さ15 cm ほどで、75°N→90°のやや弱い条線が形成されたこと、②次いで、上記の条線とは不連続的に、全体的には北傾斜であるが、下に凸や上に凸のカーブした長く強い条線が形成されたこと、③このカーブした条線はいずれも南に倒れたS字の一部に当たり、水平方向に繰り返して認められること、である（皆川ほか、1995c）。

折ヶ谷池地点8の直立した断層破碎帯中の①面は今回の地震断層面で、この面には2種類の条線が認めら



観察地点	⑩地点	⑨地点	⑧地点	⑦地点	⑥地点	⑤地点	④地点	③地点	②地点	①地点
地震断層の区別	分岐	分岐	分岐	本体 (S)	本体 (分岐点付近)	本体 (J)	本体 (J)	本体 (S)	本体 (S)	分岐 (J)
断層面の走向傾斜	N30°E60°W	N50°E60°N	N4°E90°	N62°E72°S	N52°E82°S	N40°E80°W	N52°E72°N	N38°E83°E	N44°E87°E	N12°E90°
地層	上盤側 熱水変質化カタクラサイト	大阪層群	神戸層群砂岩	大阪層群泥岩砂岩	大阪層群泥岩	硬質カタクラサイト	不明	熱水変質化カタクラサイト	大阪層群泥岩	大阪層群泥岩
	下盤側 大阪層群砂礫層	大阪層群	神戸層群砂岩	大阪層群砂礫層	大阪層群泥岩	不明	神戸層群泥岩	大阪層群泥岩	不明	不明
変位量	水平 (cm) 5>(右)	15 (右)	4~6 (右)	120 (右)	95 (右)	110 (右)	不明	170 (右)	135 (右)	16 (右)
	鉛直 (cm) 5>(NW落)	10 (NW落)	不明	45 (NW落)	20 (SE落)	0 (NW落)	不明	130 (NW落)	65 (NW落)	4.5 (NW落)
条線の傾斜 (°) 古い条線	32°N (40°N)	0°	23°N→10°N	40°N→10°N	5°S	0° (15°S, 12°S)	15°N	46°N→0°	66°N→15°~20°N→20°S	0°~6°S
測定深度 (cm)	0~100	0~10	50	20~50	30~50	45 (20,30)	40	75~200	60~100	20~50

※地震断層区分：本体（野島地震断層本体）、分岐（分岐断層）。(S) 直線部、(J) ジョグ部

図 I・4-8 野島地震断層の分布と断層条線の性状（皆川ほか、1995c）

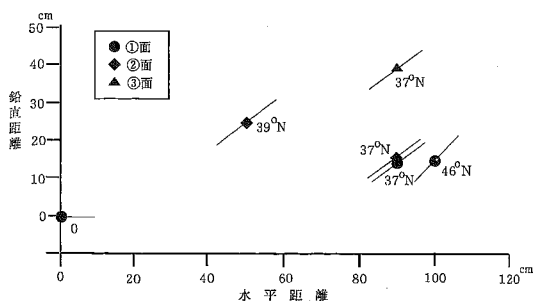


図 I・4-9 野島平林地点 3 での断層条線の性状
(皆川ほか, 1995c)

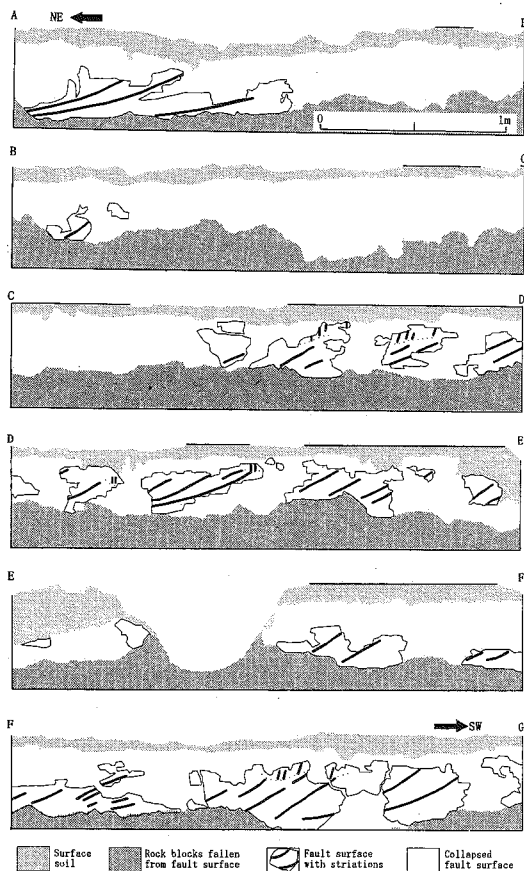


図 I・4-10 小倉地点 7 での断層条線の性状
(皆川ほか, 1995c)

れ、太い実線で示した $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ のものが今回の地震時の条線で、他は過去のものである(図 I・4-4)。
②、③面上の条線はいずれも古い条線であるが、いずれも北に傾斜している。

今回の地震活動に伴って刻まれた断層条線は全体とし

て見ても、横すべり成分の卓越したものであるが、地域によりその傾斜方向にかなりのばらつきがあり、同一の断層面であっても湾曲したり、複数の方向の条線が刻まれている。つまり、断層の条線を全体的に見てみると、おおよそ高角北傾斜の条線を伴う地点 2, 3, 7 は、直線的な断層セグメントの中に、他方、地点 2, 3, 7, 10 を除く他の地点での条線はほぼ水平に近いが、地点 1, 4, 5 はジョグに当たり、地点 6, 8, 9 は断層分岐点近傍にあるという特徴が読める。また、このような破碎帯内部に認められる古いすべり面に刻まれていた断層条線も今回地震のそれと似たような傾斜方向を示しており、今回のような地震が繰り返し発生したことを物語っている(皆川ほか, 1995c)。

4.4 トレンチ調査から得られた地震断層の挙動

4.4.1 トレンチ調査の位置選定

トレンチ調査は最近の地震断層の活動史(再来性)、つまり断層のイベントを解析するための有効な調査手段である。そのために沖積層が比較的厚く、しかも年代測定を試料が得やすい箇所を実施する必要がある。

今回のトレンチ箇所は、地表地震断層が梨本の谷の屈曲部を横切って出現した沖積面(水田面)で、第1次(1月末)と第2次(5月上旬)の2回にわたって実施された(中田ほか, 1995b; 鈴木ほか, 1995a, b; 図 I・3-4 の19地点)。その後、地質調査所によっても、同地点でトレンチ調査が実施され、断層活動のイベントが再検討されている(杉山ほか, 1996)。

4.4.2 野島地震断層の最近の活動評価

今回の地震断層変位によって梨本の水田面は相対的に40~50 cm 南側下がりの変位を受けている。第1次トレンチの南側面(図 I・4-11)においては、断層を挟んで、礫層(d層)には比高約1.2 mの食い違いが認められる。この食い違いは今回の断層の上下変位量(0.5 m)に比べ2倍以上大きい。礫層(d層)の年代から判断して、過去2千数百年間に今回を含めて少なくとも2~3回の地震があった可能性が示唆される。さらに、今回変位した断層面から約1 m離れた地点に、開口した比較的大きな地割れが認められた(鈴木ほか, 1995a)。

今回の地震時にこの断層に近い地割れ部は動いていないが、この地割れの形成はb層(^{14}C 年代=827±65 yBP)堆積後、a層堆積前に相当大きな地震動をもつ古地震に伴うものであった可能性が高い。b層最上部から出土した数 cm 大の素焼の土器片は、形態的な特徴から12~14世紀頃のものとして鑑定された。また、開口地割れの中に落ち込んでいる腐植層の年代は440±50 yBP(暦

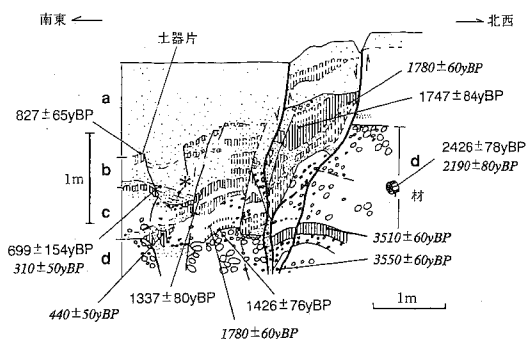


図 I・4-11 梨本地点第1次トレンチ南側面スケッチ
(鈴木ほか, 1995a)

年代で概ね A.D.1450+25/-20), 地割れ内に地割れ形成直後に堆積したと推定される砂泥互層の年代が 310±50 yRP (同, おおむね A.D.1640+15/-20) である。このような各層の年代から見て, 地割れを生じさせたこの地震は, 歴史地震として知られる慶長地震に起因する可能性が高いと考えられた (鈴木ほか, 1995a)。

しかし, 第2次トレンチの南側面 (図 I・4-12) では複数の断層が確認されるが, そのうち今回の活動した断層 (F1) を除く他の断層は, ^{14}C 年代で 2100~1840 yBP である BL 層を覆う BU 層を切っていない。ここでは約400年前に変位したと考えられる断層は見つっていない (鈴木ほか, 1995b)。

その後地質調査所で実施されたトレンチでは400年前のイベントは認められず, 野島地震断層が今から約2000年前に活動したとする調査結果を出している (杉山ほか, 1996)。

4.5 物理探査による断層の追跡

4.5.1 重力探査

重力探査によって, 広域探査と断層付近の詳細な探査が実施されている。図 I・4-13に示す広域探査結果 (志知ほか, 1995; 駒澤ほか, 1996) では仮屋断層と須磨断層が最も顕著な重力急変帯として現れ, 次いで野島断層と水越撓曲が顕著な重力急変帯として現れている。

また, 小倉地区を中心に実施した重力探査結果をもとにフィルター処理により深部の状況を示す長波長成分と比較的浅部の状況を示す短波長成分とに分離して解析した結果 (図 I・4-14), 長波長成分のブーゲー異常の急激な変化は分岐断層である花崗岩と堆積岩との境界に良く一致し, 低ブーゲー異常帯の延びの方向も分岐断層の方向に一致している (高橋ほか, 1995)。短波長成分はブーゲー異常の山谷のトレンドが野島地震断層のトレースにほぼ平行に分布しており, 地表の断層の位置がほぼ

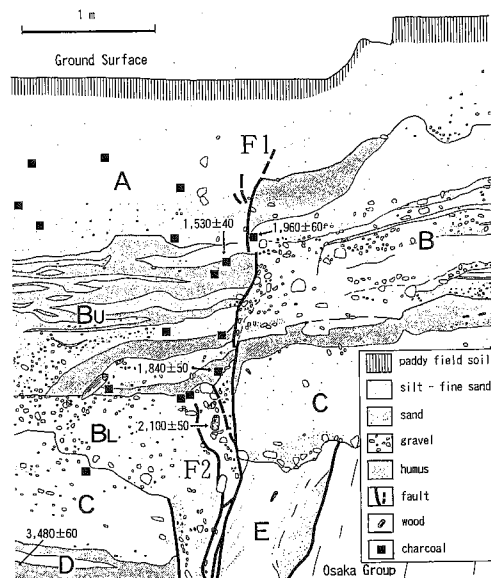


図 I・4-12 梨本地点第2次トレンチ南側面スケッチ
(鈴木ほか, 1995b)

高低の境になって海側に低, 山側に高異常が分布していることがわかる。さらに, 大阪層群中を通る野島地震断層部で実施されたマイクロ重力探査 (数10マイクロガル) では, 極浅部で断層を境に高低の明瞭な密度変化, つまり山側の粘性土主体の地層と海側の砂礫層との密度差を検出することができている (高橋ほか, 1996)。

4.5.2 反射法探査

兵庫県南部地震の震源域を横断した広域深部を対象とし, さらに地域を限定した野島地震断層の南部の梨本~小倉付近の深度数百 m を対象として, P 波反射法地震探査が実施されている。また, 梨本の断層極浅部を対象に P および S 波探査が実施されている。

図 I・4-15 (往復走時断面) で示す広域の深部地下構造断面を見ると, 淡路島東岸に大きな落差があり, 基盤は沖合いすぐの所で 1.4 s (深度約 1,400 m) に達している。また, 播磨灘側の基盤はせいぜい 1 km 程度である (横倉ほか, 1996)。

梨本付近の深度数百 m を対象にした反射断面 (是石ほか, 1995; 皆川ほか, 1995b; 口絵-2(a), ㈱ダイヤコンサルタント提供; 参照) では花崗岩体とそれを被覆する成層した堆積岩の分布状況がよく読み取られる。それによると既存の野島断層は花崗岩体と堆積岩類の境界に約 150~200 m 海側落ちの累積変位量を与えている (皆川ほか, 1995b)。

P 波極浅層探査結果 [高橋ほか, 1995; 口絵-2(b),

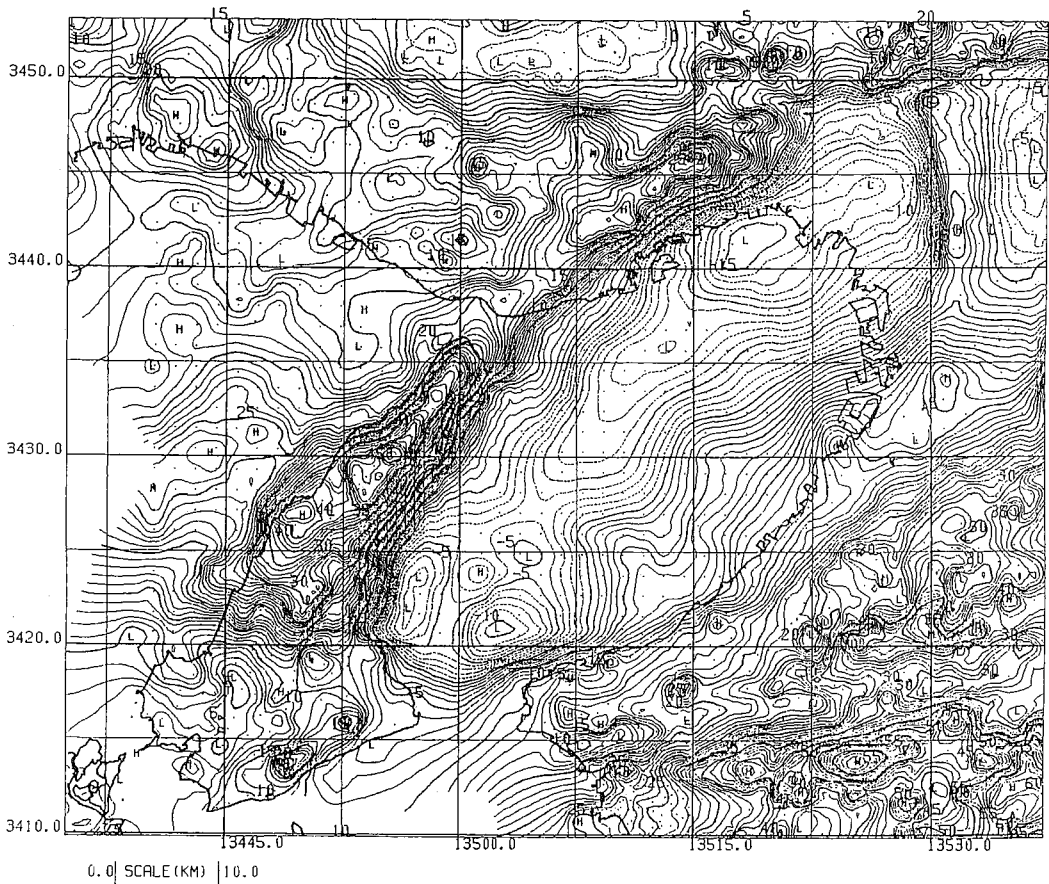


図 I・4-13 大阪湾およびその周辺域のブーゲー異常 (駒澤ほか, 1996)

上), 応用地質(提供; 参照] では, 今回の地表地震断層の位置を中心に幅 10 m 程度の範囲で反射波の連続性が悪い部分があり, その両側には沖積層の構造を示すと考えられる顕著な水平の反射面が現れ, 断層を境に不連続となっている。どちらの反射面も 2 m 以深に位置しており, 休耕田上の軟弱な地表条件の下でも見かけの周波数で 200 Hz 弱, 波長にして 1~2 m の反射波が得られている (高橋ほか, 1995)。

S 波による極浅層反射法探査によると図 I・4-16 (是石ほか, 1996) に示す梨本では, 反射面の不連続部が大阪層群中を通る断層に一致する。つまり, ここでの反射構造は海側が緩傾斜層で山側が急傾斜層となっている顕著に成層した堆積物の地質構造の変化を良く反映している。それに対して, 図 I・4-17 (高橋ほか, 1996) に示す野島平林では均質な花崗岩類と断層に引きずられて急傾斜となった大阪層群の堆積物が接するた

め, 断層を境にしての反射面の不連続は顕著でない。

4.5.3 電気探査

比抵抗 2 次元探査 (高密度電気探査, 比抵抗映像法あるいは $\rho_a - \rho_v$ 法, さらに類似探査として IP 映像法がある) は梨本地区 (高橋ほか, 1995; 是石ほか, 1996), 小倉地区 (高橋ほか, 1995; 茂木ほか, 1995) および野島平林 (高橋ほか, 1996, 茂木ほか, 1995) において実施されている。口絵-2(b, 中) の比抵抗断面 (応用地質(提供; 高橋ほか, 1995) に示すように梨本地区では, 沖積面 (水田面) 上で実施され, その比抵抗は 100 Ωm 以上の層に着目すると断層を境に山側で 1 m 程度落ちており, さらに地表部で確認された断層の地下延長部で低比抵抗帯を検出している (高橋ほか, 1995)。是石ほか (1996) も断層部ではほぼ同様の低比抵抗帯を検出している。さらに, 電極間隔を 0.5 m として表層部分の分解能を上げた場合でも, 断層部に低比抵抗帯を検

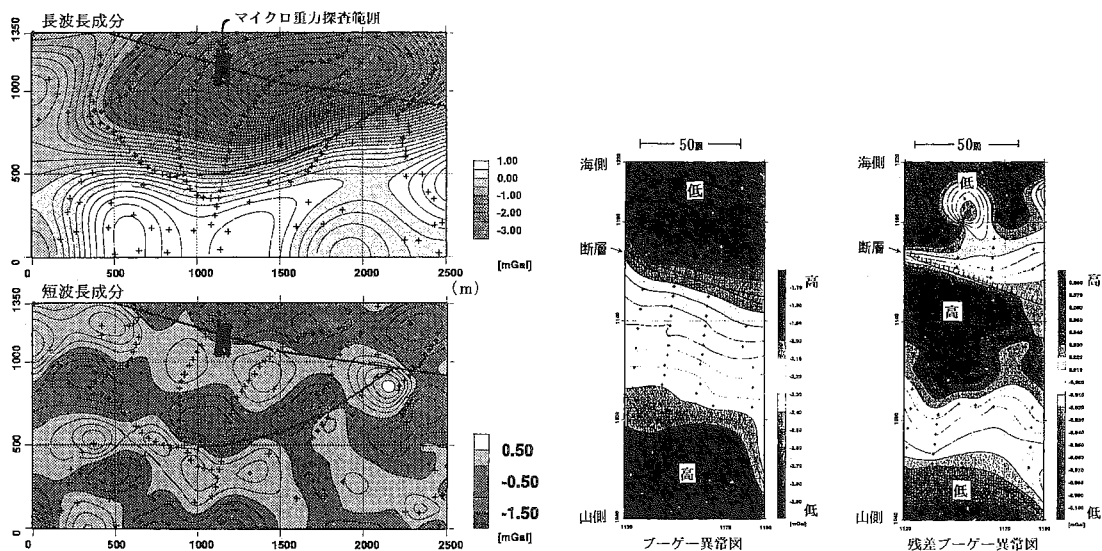


図 I・4-14 小倉地区重力探査結果およびマイクロ重力探査結果 (高橋ほか, 1995; 高橋ほか, 1996)

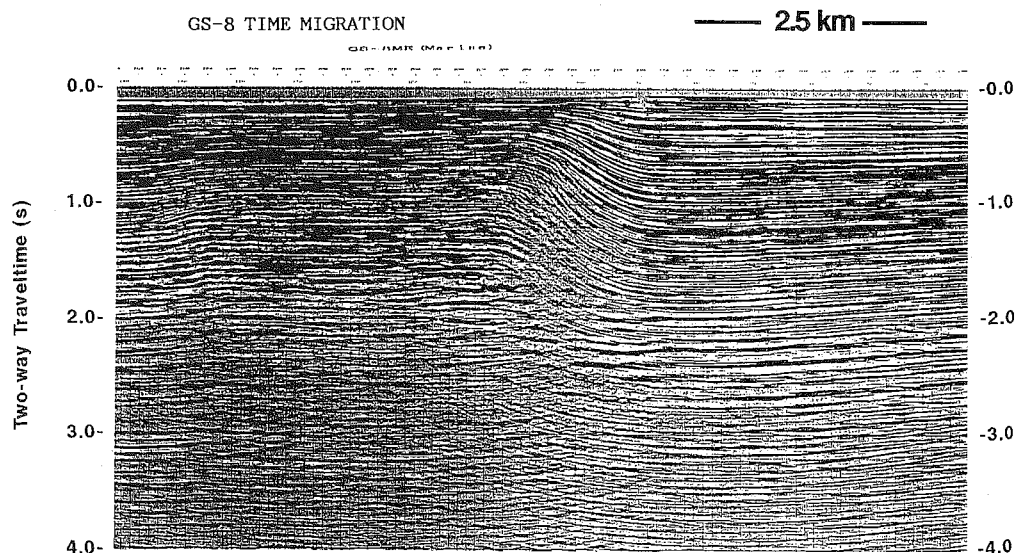


図 I・4-15 淡路島北部横断時間断面 (マイグレーション後) (横倉ほか, 1996)

出している (鈴木ほか, 1996)。

小倉地区の測定結果では断層より山側で低比抵抗部, 海側で高比抵抗部が卓越している (茂木ほか, 1995)。このような比抵抗の差は山側の砂質シルト岩層と海側の砂礫層の電気的特徴の違いを反映している。さらに鈴木ほか (1996) は, 5 m 間隔のグリットを切って測定を行った結果 (3 次元比抵抗法), 上記の高比抵抗と低比抵抗との境界が水平的にもほぼ断層に沿っていることを

確認している。さらに, 高橋ほか (1995) は断層位置直下に断層に沿って盛り上がっている低比抵抗帯を検出している。

野島平林地区では図 I・4-18 に示すように, 断層を境として山側の比較的比抵抗値の高い花崗岩 (強風化) と低比抵抗値を示す大阪層群の堆積岩を識別している (茂木ほか, 1995; 高橋ほか, 1996)。また, 比抵抗解析断面で示されるように, 断層が約 75 度で山側に傾斜

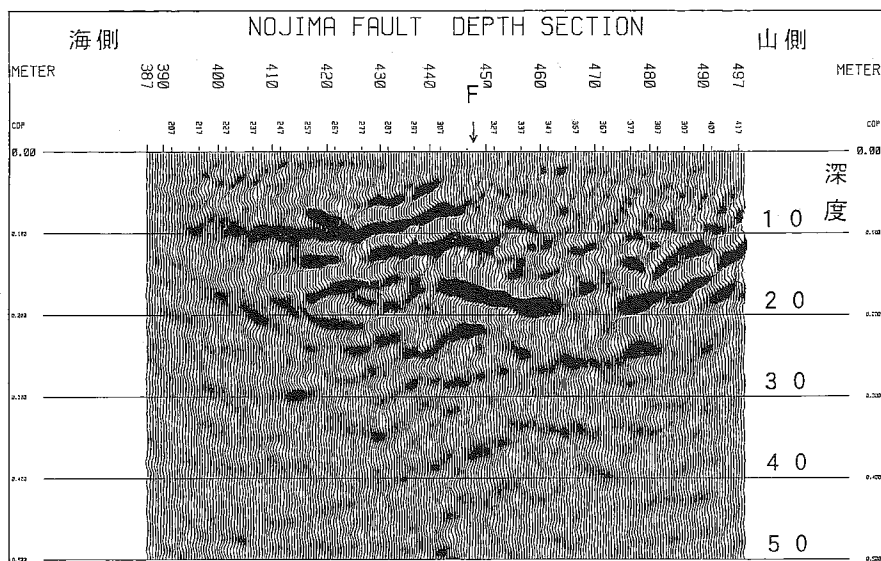


図 I・4-16 梨本地区を通る S 波極浅層反射法深度断面 (是石ほか, 1996)

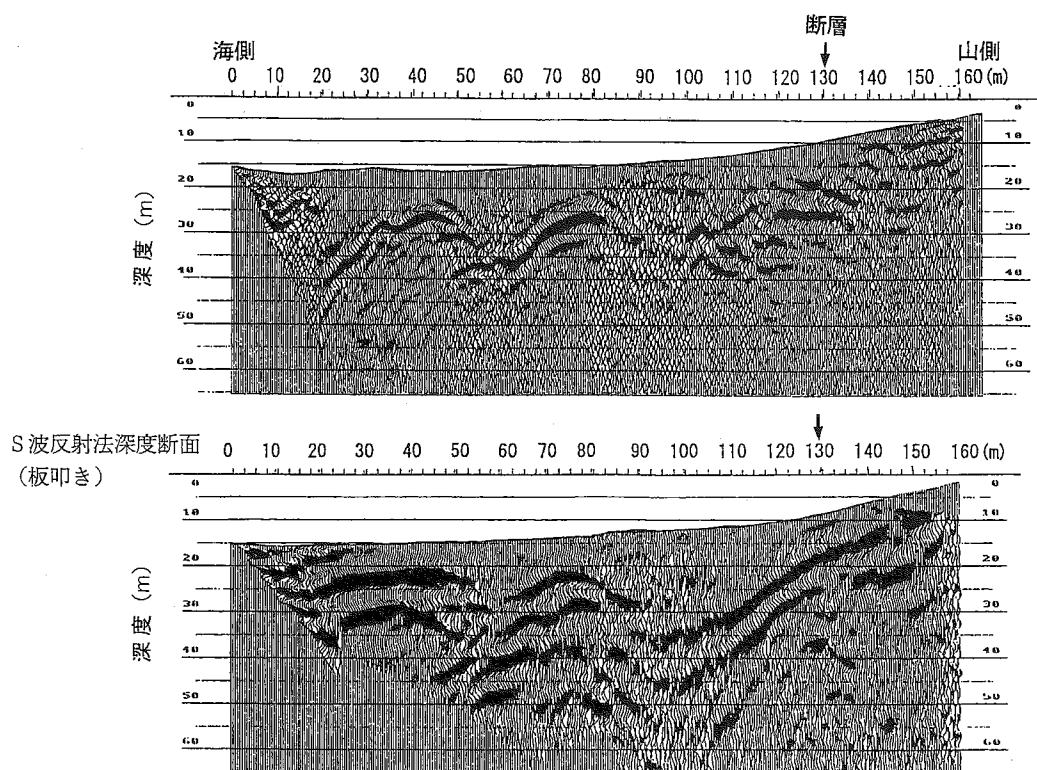


図 I・4-17 野島平林地区を通る P・S 波極浅層反射法深度断面 (高橋ほか, 1996)

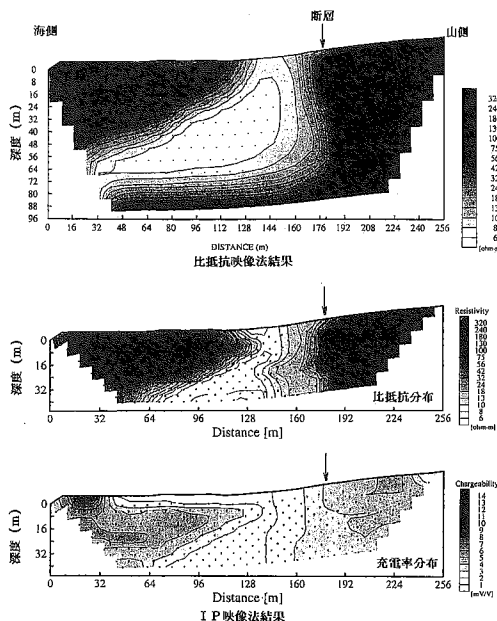


図 I・4-18 野島平林地区を通る比抵抗断面
(高橋ほか, 1996)

している状況が捕えられている (高橋ほか, 1996)。

4.5.4 地下レーダー探査

梨本のトレンチ掘削付近 (水田面) で実施された地下レーダー探査結果 [口絵-2(b, 下), 応用地質(提供) (80 MHz アンテナ使用); 高橋ほか, 1995; 図 I・4-19 (100 MHz アンテナ使用); 是石ほか, 1996] によると, 断層の付近は乱れが大きく不明瞭になっているが, 海側・山側ともに明瞭な反射面が見られる。可探深度は, 単一周波数の100 MHz アンテナ使用の場合が3 m ぐらいまでの深度まで可能となっている。さらに高橋ほか (1995) は, その可探深度を CDP スタック法などによりもう少し改善できれば分解能の高さ, 探査の手軽さ, 3D への拡張の容易さからトレンチ調査で要求される深度2 m 程度までの地質状況を検討する手法になるとしている。

鈴木ほか (1996) によると小倉地区で実施したステップ式連続波地下レーダー法探査結果 (図 I・4-20) で, 3枚の連続性の良い反射面が地表下25 m 程度まで認められている。さらに, この反射面はほぼ水平に連続するが, 断層の位置を境に撓曲し, 海側に向かい徐々に深くなっているとしている。しかし, 断層の山側の急傾斜した地層の構造部は緩やかな反射面として捕えられおり, 反射面の解釈に吟味を要する。

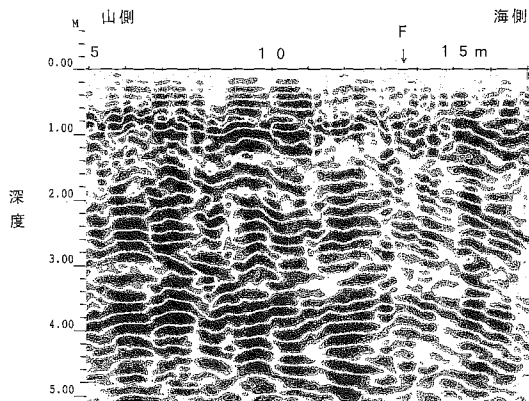


図 I・4-19 梨本地区を通る地下レーダー解析断面
(100 MHz アンテナ) (是石ほか, 1996)

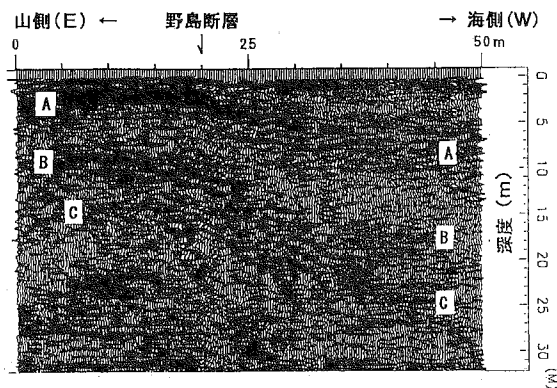


図 I・4-20 小倉地区を通るステップ式連続波地下レーダー法による解析断面 (測点間隔5 m)
(鈴木ほか, 1996)

4.5.5 放射能探査

携帯型ガンマ線測定器を使用した探査が野島断層を横断して実施されている (吉村ほか, 1995; 守岡ほか, 1995; 城森ほか, 1995)。吉村ほか (1995) の測定 (測点間隔1~2 m, 異常値検出地点で10~20 cm) 結果では, 花崗岩での断層破碎帯幅は7.9 m, 大阪層群4.6 m, 段丘堆積層で0.4 mであった。前2者では相対的に高いγ線強度を示し, 後者では低いγ線異常を示している。また, 守岡ほか (1995) が総放射性元素に対しK, U, Thの4項目について測定した結果では, 変動率5%以上10%以下の高異常値が断層を挟んだ近傍幅約50 mで集中して見られている。また, 城森ほか (1995) は江崎灯台の破碎帯部の測定で, 約7.9 m 幅のγ線異常値部を検出している。

計測機器を装備した専用ヘリコプターで広域に空中ガ

ソマ線放射能強度が測定されている(奥野, 1995)。その結果では野島地震断層は明瞭な放射能の異常帯とし検出されている。

4.5.6 電磁探査

野島断層を直交方向に横断して電磁探査(探査深度数m~数十m, 測線間隔20m, 測点間隔2m)が実施されている(矢野, 1995)。1次電場・2次電場の振幅比と位相差(1mag)を解析した結果, 断層面部に明確な異常はないが, 花崗岩と堆積岩との境界部に電磁気異常を検出した。

地質調査所では反射法地震探査の補足調査として, 空中電磁法調査およびアレイ式CSAMT法調査を実施した。前者は地表付近の地質構造を対象に, 後者は深部構造を対象にしている(高倉ほか, 1996)。その結果比抵抗異常の多くが野島断層を含む活断層に対応していることが判明している。

4.5.7 磁気探査

小倉地区で断層に直交して実施した結果, 地表で見られる大小2つの亀裂の直上では磁場強度に落ち込みが見られ, 大きい亀裂より山側で磁場強度は特異的な2つの傾きを示していた(矢野, 1995)。

専用ヘリコプターによる広域の空中磁気測定結果によると, 磁気異常値は淡路島の北東から南西方向に緩やかに高くなっているが, この傾向は野島断層の方向と一致していない。広域に分布する花崗岩の性質を示すものかもしれない(奥野, 1995)。

参 考 文 献

- 1) 栗田泰夫・地質調査所緊急調査グループ(水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・佃 栄吉・木村克己)(1995): 1995年兵庫県南部地震に伴って淡路島に出現した地震断層。「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 地質学会・応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, pp. 30-33.
- 2) 栗田泰夫・水野清秀・杉山雄一・井村隆介・下川浩一・奥村晃史・佃 栄吉・木村克己(1996a): 兵庫県南部地震に伴って淡路島北西岸に出現した地震断層。地震, Vol. 2, No. 49, pp. 113-124.
- 3) 栗田泰夫・水野清秀・斎藤 勝・杉山雄一・井村隆介・下川浩一・奥村晃史・佃 栄吉(1996b): 兵庫県南部地震で淡路島北西岸に出現した地震断層の規模について。地質学会第103年会学術大会講演要旨82.
- 4) 上田圭一・谷 和夫・仲田洋文・加藤貴宏・丸山力之(1995): 兵庫県南部地震時の野島断層の変位に伴う第四紀層分布地域の地表の変形構造。第30回土質工学研究発表会—「土質工学」から「地盤工学」へ—平成7年度発表講演集, 土質工学会, pp. 91-94.
- 5) 太田陽子・堀野正勝(1995): 1995年兵庫県南部地震の際に出現した野島地震断層と被害状況。地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 143-155.
- 6) 大槻憲四郎・皆川 潤・青野正夫(1995): 野島地震断層の性状—断層破砕帯の内部構造とシェードタキライト様岩—。第5回環境地質学シンポジウム講演論文集, 地質学会環境地質研究委員会, pp. 99-102.
- 7) 岡崎和彦(1995): 野島地震断層の断層面の組織と移動方向。応用地質, Vol. 36, No. 5, pp. 56-59.
- 8) 奥野孝晴(1995): 兵庫県南部地震被害地域空中放射能・磁気探査結果。㈱エースヘリコプター社内資料.
- 9) 駒澤正夫・太田陽一・渋谷昭栄・熊井 基・村上 稔(1996): 大阪湾海底重力とその考察。第94回(平成8年度春季)学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 430-434.
- 10) 是石康則・江尻寿延・松井和夫・衣笠善博(1995): 北淡町野島断層における反射法地震探査。第93回(平成7年度春季)学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 255-259.
- 11) 是石康則・藤田 淳・中東秀樹・浅川真也・先名茂樹・石田孝一(1996): 活断層調査への物理探査の適用性。第94回(平成8年度春季)学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 443-447.
- 12) 志知龍一・中井新二・中村佳重郎・慈 道充・斎藤秀雄・赤松純平・西村敦一・井上直人(1995): 淡路島北部・神戸市西部の重力探査。1995年秋季大会地震学会講演予稿集, p. 63.
- 13) 城森 明・脇坂良男(1995): 放射能探査(γ 線スペクトロメータ)による断層調査—(野島断層における調査事例)。第30回土質工学研究発表会—「土質工学」から「地盤工学」へ—平成7年度発表講演集, 土質工学会, pp. 63-64.
- 14) GPS 大学連合・平原和朗(1995): GPS 観測により捉えられた1995年兵庫県南部地震の余効変動。月刊地球/号外, No. 13, pp. 153-162.
- 15) 杉山雄一・寒川 旭・栗田泰夫(1996): 近畿地域における活断層発掘調査結果と今後の活断層研究戦略。地質学会第103年会学術大会講演要旨81.
- 16) 鈴木浩一・小田義也・谷 和夫・林 泰幸・城森 明(1996): 野島断層における3次元比抵抗法とステップ式連続波地下レーダー法探査—トレンチ調査地点での比抵抗測定結果—。1995年兵庫県南部地震震源域周辺の断層・基盤構造について。第94回(平成8年度春季)学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 58-63.
- 17) 鈴木康弘・松田時彦・中田 高・坂本晃章・尾高潤一郎・後藤秀昭・朝日克彦・千田 昇・竹内 章・吾妻 崇・岡田篤正・中村俊夫(1995a): 兵庫県南部地震の地震断層の活動歴—北淡町製本地区でのトレンチ発掘調査(中間報告)—。「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 第四紀学会・第四紀研究連絡委員会, pp. 33-34.
- 18) 鈴木康弘・中田 高・渡辺満久・澤 祥・今泉俊文・松田時彦・野島断層トレンチ調査団(1995b): 野島断層のトレンチ調査(中間報告)。第5回環境地質学シンポジ

- ウム講演論文集, 地質学会環境地質研究委員会, pp. 75-80.
- 19) 高木秀雄・小林健太・坂 幸恭・加藤 潔・松田達生・江原宏幸 (1996): 野島地震断層に形成された鏡肌と条線の姿勢と組織. 構造地質, No. 41, pp. 1-15.
 - 20) 高倉伸一・小西尚俊・高橋直良・菊池 晃 (1996): 電磁法による淡路町北部の活断層調査: I. 空中電磁法, II. アレイ式 CSAMT 法, 第94回 (平成8年度春季) 学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 453-457.
 - 21) 高橋 亨・野崎京三・島 裕雅・山根 誠・五十嵐 亨 (1995): 活断層への物理探査法の適用性研究 (1)—野島断層における現場実験結果. 第93回 (平成7年度秋季) 学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 140-144.
 - 22) 高橋 亨・野崎京三・島 裕雅・山根 誠・五十嵐 亨 (1996): 野島断層における各種物理探査法の適用実験. 第94回 (平成8年度春季) 学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 448-452.
 - 23) 高見智之・秋山晋二・中村秀貴・妹尾正晴 (1995): 野島地震断層の現れ方と表層状態の関係. 平成7年度研究発表会講演論文集, 応用地質学会, pp. 63-66.
 - 24) 谷 和夫・上田圭一・仲田洋文 (1996): 野島断層上に発達した変形帯の調査結果—第四紀地盤地域で見られた地表面の断裂構造—. 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996年1月・土木学会, pp. 29-36.
 - 25) 中田 高・蓬田 清・尾高潤一郎・坂本晃章・朝日克彦・千田 昇 (1995a): 1995年兵庫県南部地震の地震断層. 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 127-142.
 - 26) 中田 高・蓬田 清 (1995b): 地震断層からみた兵庫県南部地震. 科学, Vol. 65, No. 4, pp. 202-204.
 - 27) 永広昌之・大槻憲四郎・北村 信 (1974): 高封圧下における岩石の割れ目の形態とその発達過程. 地質学雑誌, Vol. 80, No. 11, pp. 555-558.
 - 28) 原口 強・岡村 眞・露口耕治 (1995): 1995年兵庫県南部地震に伴う野島地震断層調査. 応用地質, Vol. 36, No. 1, pp. 51-61.
 - 29) 阪神・淡路大震災調査委員会 (1995): 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書. 日本応用地質学会, 364p.
 - 30) 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (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, 90p.
 - 31) 皆川 潤・大槻憲四郎・青野正夫・大友淳一・中村教博 (1995a): 野島地震断層の性状. 応用地質, Vol. 36, No. 2, pp. 54-63.
 - 32) 皆川 潤・大槻憲四郎・日吉 直・松井和夫・青野正夫 (1995b): 野島地震断層と構造物被害について. 「阪神大震災」中間報告会—人工改変と地震被害—予稿集, 応用地質学会, pp. 22-37.
 - 33) 皆川 潤, 大槻憲四郎, 大竹政和, 青野正夫 (1995c): 野島地震断層における断層条線の特徴. 平成7年度研究発表会講演論文集, 応用地質学会, pp. 67-70.
 - 34) 茂木 透・内田利弘・城森 明・鈴木浩一・楠建一郎・Djedi S. Widarto・坂中伸也・中野 進 (1995): 高密度電気探査による野島断層の比抵抗構造, 1995年度秋季大会地震学会講演予稿集, p. 44.
 - 35) 守岡康一・新見知宏・花輪小夜子・小俣雅志・木崎健二・久家直之 (1995): 放射能 (γ 線) 探査からみた野島断層. 地質学会第102年学術大会講演「兵庫県南部地震」特別ポスターセッション, 地震地質に関する調査・計測・研究要旨, p. 4.
 - 36) 矢野 亨 (1995): 電磁気学的手法による地下構造の推定. 全地連「技術フォーラム'95」講演集, 全国地質調査業協会連合会, pp. 161-164.
 - 37) 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓 (1996): 1995年兵庫県南部地震震源域周辺の断層・基盤構造について. 第94回 (平成8年度春季) 学術講演会講演論文集要旨, 物探学会, pp. 423-424.
 - 38) 吉村辰朗・松木宏彰・森田英利・中井真司・西村一影・岩榎泰子 (1995): 1995年兵庫県南部地震の地震断層 (野島断層) における γ 線測定. 第30回土質工学研究発表会—「土質工学」から「地盤工学」へ—平成7年度発表講演集, 土質工学会, pp. 95-96.
 - 39) 林 愛明・井宮 裕・宇田進一・飯沼 清・三沢隆治・吉田智治・清松保貴・和田卓也・川合功一 (1995a): 兵庫県南部地震により淡路島に生じた野島地震断層の調査. 地学雑誌, Vol. 104, No. 1, pp. 113-122.
 - 40) Aiming LIN and Shinichi UDA (1995b): Microstructures and ^{14}C datings of foliated cataclastic rocks in the Nojima fault and their implications for the tectonic history. THE PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM ON THE GREAT HANSHIN-AWAJI EARTHQUAKE AND ITS GEO-ENVIRONMENTS, THE COMMITTEE OF ENVIRONMENTAL GEOLOGY, GEOLOGICAL SOCIETY OF JAPAN, pp. 25-30.
 - 41) 林 愛明 (1996): 断層岩の微細構造から見た野島断層の運動像. 構造地質, No. 41, pp. 17-29.

5. ま と め

5.1 地震断層と活断層の調査

兵庫県南部地震に関連した地震断層と活断層については多くの調査が実施され, その実態も明らかにされつつある。しかし, 調査対象によって, その精度は大きく異なっている。

今回は, 従来の空中写真判読, 地表踏査やトレンチ調査による活断層調査に加え, 新たに都市域直下の潜在活断層調査が行われている。今後, 地震を発生させる可能性のある活断層を調査するには, 従来の方法だけでは限界があり, とくに, 厚い堆積層の下に隠れた伏在断層や海底断層を対象とする調査手法が必要とされるようになってきている。

現在の活断層調査は, 活断層の地震発生のポテンシャル評価に重点が置かれている。国レベルでは今後10年間に調査が実施される活断層の数は約100本程度になるとされており, 地質調査所および地方自治体にそれぞれ分担される予定である。これらの調査および活断層に関

する研究内容には多くのものがあるが、例えば、地質調査所においては以下の項目が挙げられている。

- (1) 全国の主要活断層の活動履歴調査
- (2) 大都市などの平野部伏在活断層の調査
- (3) 活断層のセグメンテーションの研究
- (4) 島弧サイスモテクトニクスの研究
- (5) 活構造情報の社会への提供

一方、このような活断層の特定または特性に関する調査、研究に対し、今回の地震断層の直接的な影響に関する調査は非常に少ないことが指摘されている。工学的な見地からは、地震断層が構造物に及ぼした影響とそれが今後の防災検討にどのように関わるのかについての調査が最も必要であるが、ほとんど行われていないと言ってよい。すなわち、構造物の被害の大きさを左右する地盤変動への地震断層の影響に関しては、その振動特性についてかなりの調査が実施されたものの、断層変位特性についての調査はほとんど行われていない。今後は、地震断層の直接的な影響としてその断層がどのような構造物にどの程度の影響を及ぼすのか、といった木目の細かい調査研究が必要とされよう。

5.2 地震断層の評価と課題

構造物の耐震性の検討で必要とされる断層に関する情報は、その構造物の種別によって異なる。すなわち、道路や鉄道などの線状構造物は影響を及ぼすと思われる断層を回避することが困難な場合が多く、構造物への耐震性の付与に際しての地震時の変位、振動の情報が不可欠である。一方、単一の構造物については、その断層の地震時の挙動が予想されれば、その地点を回避することも可能であり、原子力施設や大規模ダムなどのように必要な耐震性能を持たせることも可能である。

しかしながら、現時点ではそのために必要な地震断層および活断層に関するすべての情報が得られるまでには至っておらず、またその評価法も定まっていない。震源断層あるいは発生した地震断層からの離間距離による変位や振動の大きさや、活断層毎の地震時の変位特性、さらには断層の存在そのものが入力地震動にどのように

反映されるかなど、今後解明されねばならない課題は多い。

今後はこうした活断層の存在そのものに対応するための調査が実施されねばならないのは当然であり、さまざまな方面での検討が行われている。土木学会では、すでに構造物種別毎の耐震検討の最大振動値の設定に際しての地域係数の決定に活断層を考慮するように勧告が出されている。そのほか、米国における活断層法に見られるような、断層周辺の建築物の構築制限も一部で取り沙汰されている。

しかしながら、断層の直接的な影響が定まっておらず、さらに地震発生ポテンシャルの大きい活断層は全国で20数本程度しかないことから、未だ議論されるまでには至っていない。いずれにしても、地震断層と震害の関係については今後さらに多くの詳細な研究が必要とされよう。

狭い国土を高度に開発しなければならないのは、我が国の宿命であり、今後も地表部での新しい形の人工改変や開発が行われるのは必然である。そこでは将来発生するであろう事態を予測し、新しい形の災害も未然に防ぐことが我々に課せられた使命である。とくに直下型地震の場合、活断層調査などによる地震発生の方と規模の予測、断層近傍で発生する強振動の予測、都市部の動的地盤条件の調査などによる地震災害リスク評価が必要である。さらに今回の震災では深部地盤構造の影響も指摘されている。具体的な課題として、

○潜在活断層、深部地盤構造把握のための物理探査や深部ボーリングの実施

○地震災害予測に必要な都市域の地質環境図（例えば動的地盤図等）の作成が挙げられている。

現在、首都圏や関西圏などの都市域の地下深部の調査が少ないことは、地震防災や環境保全のための障害となっている。今後システムチックな深部ボーリング、リモートセンシング、物理探査等を充分に利用した都市部の地下地質環境の調査が必要とされている。

Ⅱ．地震動・地盤と構造物の被害

Earthquake Motion : Geology and Structure Damage

Key words : 地震動 earthquake motion, 地震被害 earthquake damage, 地震シミュレーション earthquake simulation, 動的地盤図 dynamic geotechnical map, 動的地盤区分 seismic micro-zoning, 物理探査 geophysical exploration

Abstract

Many structures were damaged in the vicinity of the epicenter, including Kobe-city and Ashiya-city, and severe damage occurred along an east-northeast trending narrow zone, so-called "the linear earthquake damage zone." Structure damage also extended sporadically farther to Itami-city, Takarazuka-city, Toyonaka-city and Osaka-city where seismic motion with more than 5 of Richter scale was recorded. The damage grade becomes smaller concentrically from the epicenter except the linear damage zone.

The occurrence of the narrow severe damage zone has been explained by several hypothesis, e.g. the possible movement of hidden active faults under sediment, geomorphologic effect, amplification of earthquake motion in surface soft sediment, contrast of load-proof strength of structures between damaged and undamaged area, deep geological structure, etc.

After the earthquake, deep geological investigations involving dynamic explorations have been performed and seismic simulation has been carried out by several organizations, which revealed detailed geological structures and dynamic character of the basement. These results are going to lead a true cause of earthquake damages.

This chapter first clarifies that earthquake damages caused by the geomorphologic and geological structure. However detailed study on it has already been described in the interim report, so new data was straightened in this paper. Secondly, we focus target structure of the basement and it's particular physical properties from the investigation of geological and geomorphologic consideration and earthquake motion simulation. Finally relationships between damages in the distant places and geological structure, geological distribution and geotechnical characteristics were described.

はじめに

構造物の被害は、震源地に近い神戸市、芦屋市域でいわゆる震災の帯として現れただけでなく、震源地から遠い伊丹市、宝塚市、豊中市や大阪市でも島状と震度Ⅴ以上の被害となって現れた。

これら被害の分布形態は、加速度が震源地に近いとこ

ろから同心円状に距離減衰が生じるような、従来言われている傾向とは明らかに異なった特異なものであった。

この“震災の帯”の原因については、嶋本（1995）によって、伏在断層説がいち早く唱えられ、以後断層変位運動説、地形・表層地盤説、構造物強度差説、深い地質構造説など多くの推論がなされた。

その後、多くの機関で、深い地質構造調査や動的な地

盤調査が精力的に行われ、より詳細な地質構造や地盤特性などが明らかになるとともに、各種のシミュレーション解析が行われることによって、より適確な推論がなされつつある。

本編では、地震によって発生した地震動による被害を地形・地質構造や地盤との関係についてとりまとめているが、地形・地質構造や地震被害については、中間報告および報告書（日本応用地質学会1995.12）で詳細に報告したので、ここではその後の地質・地盤調査で新たに判明した事実を整理して述べる。特に最近実施された深い地質構造調査等に基づいて、地形・地質・地盤構造とその特性について考察する。そして、最近得られた地質・地盤構造とその物性値をとり入れた各種シミュレーション解析に関する新知見を述べ、特に震災の帯の原因について検討を行うものである。また、地震動と遠方の被害の関係について、地質構造、地質分布、地盤の特性などの観点から言及する。

参 考 文 献

嶋本利彦（1995）；“震災の帯”の不思議，科学，65，pp. 195 - 198.

1. 地質・地盤調査と地質・地盤特性

1.1 地質・地盤調査の実態

神戸・阪神地域では、兵庫県南部地震以後、さまざまな機関で震災関連の調査が実施されている。主なところを取り上げても、兵庫県、神戸市、通商産業省地質調査所、文部省（東京大・京都大など）、建設省（土木研究所、国土地理院、近畿地方建設局）、阪神高速道路公団、海上保安庁、科学技術庁などの多くにわたる。

そのうち、地質構造（活断層を含む）や地盤に関する調査は、激震地をはじめ大阪湾や播磨灘東部を含む広い範囲が対象となっており、この範囲を中心に反射法地震探査や掘削深度が数百 m ～ 2,000 m に達する大深度のボーリング調査が行われている（図Ⅱ・1-1、表Ⅱ・1-1、表Ⅱ・1-2）。

反射法地震探査は、人工震源により地表で発生させた波が、地下にはいると地層境界（速度や密度の異なる地層の境界）で反射して地表に返ってくるという性質を利用し、地下の構造を調べる調査であり、この探査によって地質構造の枠組みを把握することが可能となる。また同時に、速度構造もある程度明らかにすることができ

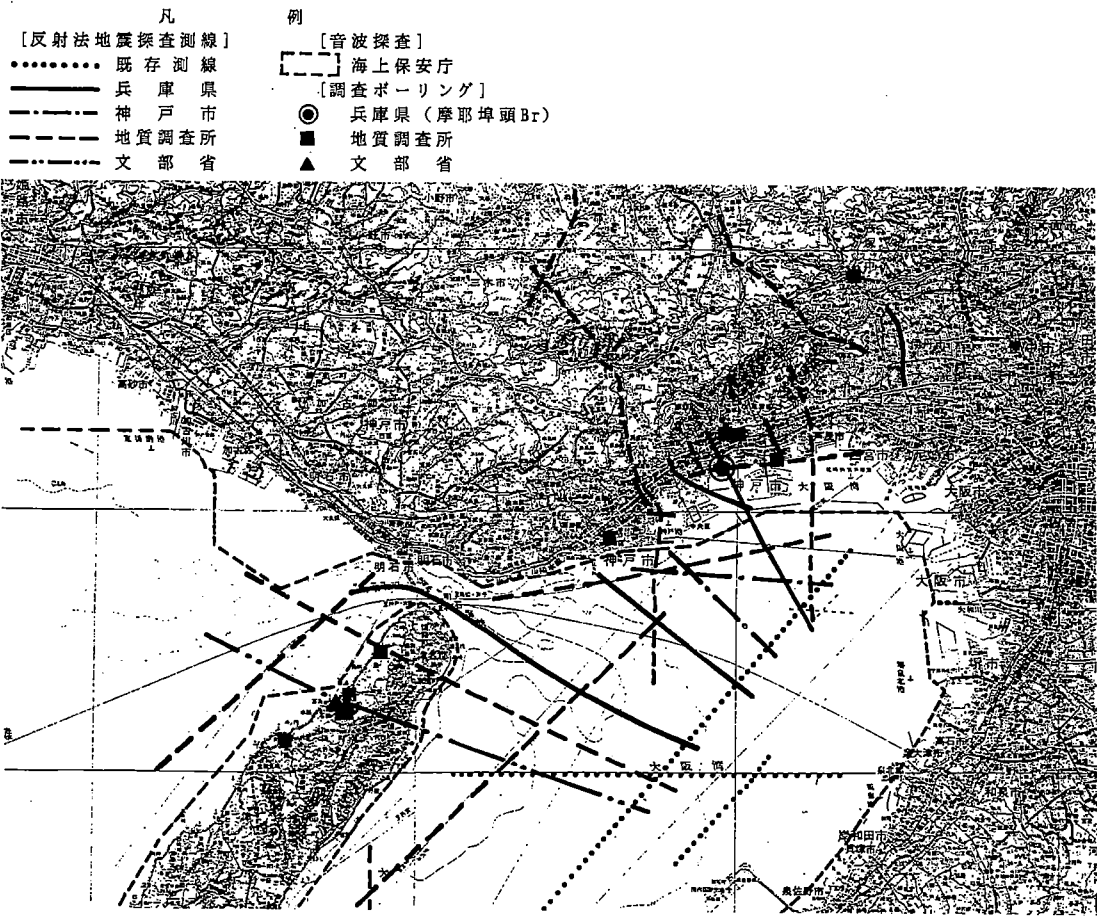
る。

しかし、反射法地震探査では、地下構造のおよその形

表Ⅱ・1-1 阪神地域活断層調査で実施した反射法地震探査一覧（兵庫県 阪神地域活断層調査委員会，1996）

測線名	調査地域	測線長	調査法	備 考
HG-1-1M	明石海峡～大阪湾	29.5 km	エガン+ストリーマー	
HG-1-2M	須磨沖～大阪湾	14.0 "	エガン+ストリーマー	
HG-2-1	神戸市兵庫区市街地	2.6 "	ハイブリット+ジオン	有馬街道沿い。
HG-2-2	神戸港内	2.0 "	エガン+ベクター	兵庫第1突堤北側～ポートアイランド西側の海域。
HG-3-1	神戸市中央区市街地	2.5 "	ハイブリット+ジオン	生田川沿い。
HG-3-2	神戸港内	5.0 "	エガン+ベクター	新港第6突堤一六甲アイランド南西側の海域。
HG-4-1	神戸市灘区市街地	3.0 "	ハイブリット+ジオン	都賀川沿い。
HG-4-2	神戸港内	2.0 "	エガン+ベクター	摩耶埠頭東方一六甲アイランド西側の海域。
HG-4-2M	都賀川沖～大阪湾	11.0 "	エガン+ストリーマー	
HG-5	神戸市東灘区市街地	3.2 "	ハイブリット+ジオン	十二間道路沿い。
HG-6	武庫川（宝塚～西宮）	5.76 "	ハイブリット+ジオン	

（計） 11 測線 80.56km



図Ⅱ・1-1 神戸・阪神地域およびその周辺地域を対象とした地質・地盤構造および活断層に関する主な調査（兵庫県・阪神地域活断層調査委員会，1996）

表Ⅱ・1-2 阪神地域活断層調査で実施した調査ボーリング一覧（兵庫県 阪神地域活断層調査委員会，1996）

ボーリング No.	調査地域	掘削深度	掘削法	調査項目		
				検層	室内試験	分析
No. A	神戸市東灘区 田中町	125m	オールコア ボーリング	PS，密度 電気	物理一式，単位体積重量 一軸圧縮，圧密	微化石総合，火山灰 ¹⁴ C年代測定
No. B	神戸市東灘区 本山北町	55"	オールコア ボーリング	PS，密度 電気	物理一式，単位体積重量 一軸圧縮，圧密	微化石総合，火山灰 ¹⁴ C年代測定
No. C	神戸市灘区 摩耶埠頭	580"	オールコア ボーリング	PS，密度 電気，VSP	物理一式，単位体積重量 一軸圧縮，圧密	微化石総合，火山灰 ¹⁴ C年代測定， 古地磁気測定

(計) 3箇所 760m * ボーリングコアは「兵庫県立人と自然の博物館」に保管。

状がわかって、それを構成している地層の中身(岩相や形成時期など)が直接明らかにできるわけではない。そのために実施されるのがボーリング調査である。ボーリング調査により、反射法地震探査で得られた反射断面に地質情報(岩相や形成時期)を重ね合わせる事が可能となり、特にこれまで未解明であった伏在する活断層の活動性を把握するためにも重要な情報を提供することになる。したがって、これらの調査により神戸・阪神地域を中心に大阪湾を含めた広い範囲の地下構造が明らかにされるものと思われる。

一方、今回の震災をもたらししたのは、活断層や深部構造だけではなく地盤の特性も大きな比重を占めていることから、今後の防災対策には、地盤情報が必要不可欠となってくる。神戸・阪神地域(海岸地域を除く市街地)では、これまで深度20~30 m程度の浅いボーリング情報しかなく、地盤構造も詳しくわかっていなかった。その上、地震動に対する地盤の挙動を予測するための情報(S波速度など)も極めて少なかった。そのため、神戸・阪神地域では、深度50~100 m級を含む調査ボーリングが数多く実施あるいは計画されており、地震時の被害予測などに活用できるような地盤図作成に向けて貴重な資料となることが期待される。

1.2 地形・地質・地盤構造と特性 (六甲山南麓)

1.2.1 地形構造とその特性

六甲山南麓は、山地から海岸に向っては幅の狭い(幅3~4 km程度)緩い傾斜地形であり、東西方向に延々

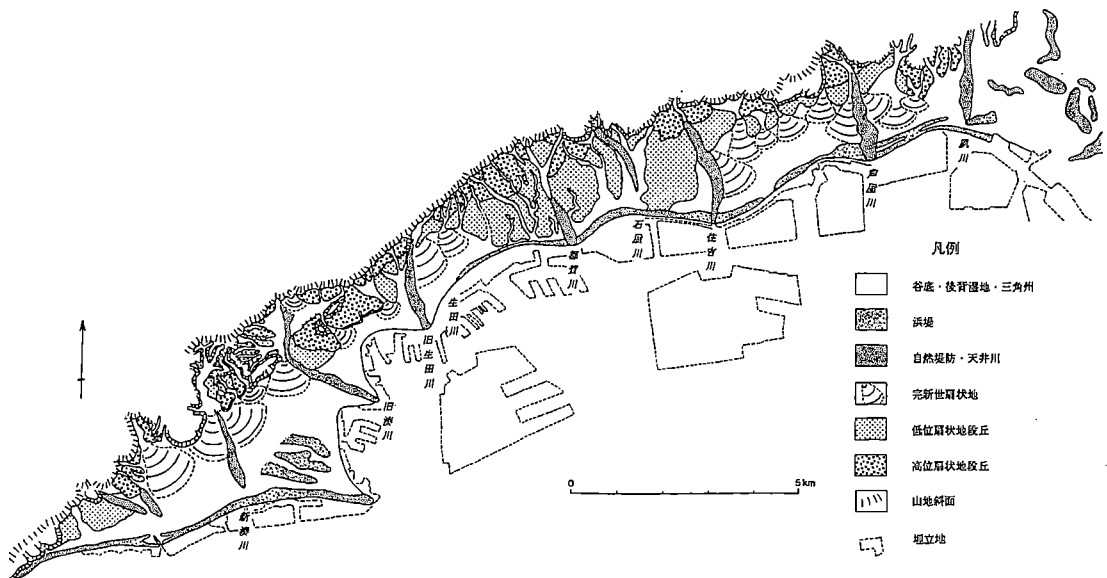
と延びる海岸平野地形である。

山麓に近い部分は、丘陵・段丘より成るが、芦屋川、住吉川、石屋川、都賀川、生田川、湊川などの各河川は、傾斜1~4°の急流河川であり、その流域付近は扇状地形を形成し、流心付近は天井川、自然堤防となっている。扇状地から海に向っての海岸平野付近は、三角洲、砂洲、砂堆を形成する。地形分類は、多くの機関や研究者によって行われているが、比較的新しいものとして田中の地形分類図(1995)が挙げられる(口絵-4(a))。

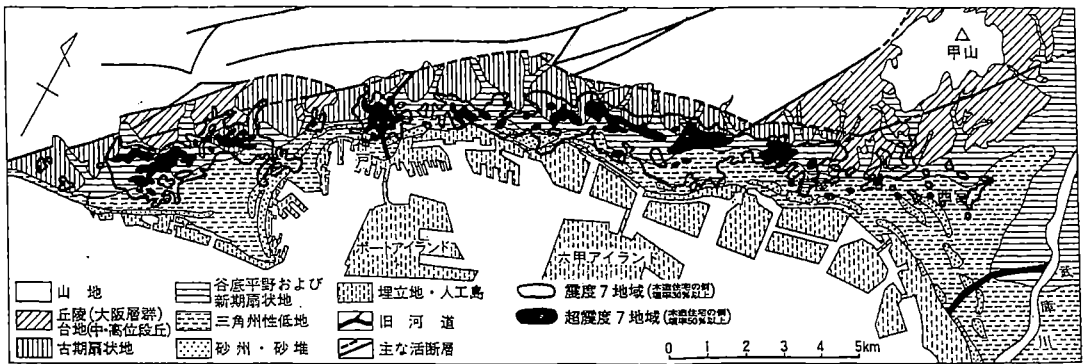
この分類図の特徴の一つは、兵庫県内に広く分布している麓面および扇状地の研究との関連から、扇状地の形状・配置・形成時期には規則性があるとして、扇状地を形成期によって5つに区分していることである。その他、丘陵、段丘化扇状地、旧河道・谷底平野、天井川、自然堤防、後背低地、三角州、砂洲、沿岸低地、河川沿い低地、人工改変地などに区分している。この区分図のほかに、池田(1995)、石川ほか(1995)、関口ほか(1995)、吉岡ほか(1995)等の地形・地盤区分図が震災後公表され、地形、地盤と被害の関係が議論された(図Ⅱ・1-2(a)~(d))。

これら区分図の詳細は、研究者の視点の置き方あるいは表現法等によってそれぞれ異なっているが、大局的には、砂礫堆積物から成る低位段丘や完新世扇状地の分布する区域で被害が大きかったことについては、各区分図とも共通している。

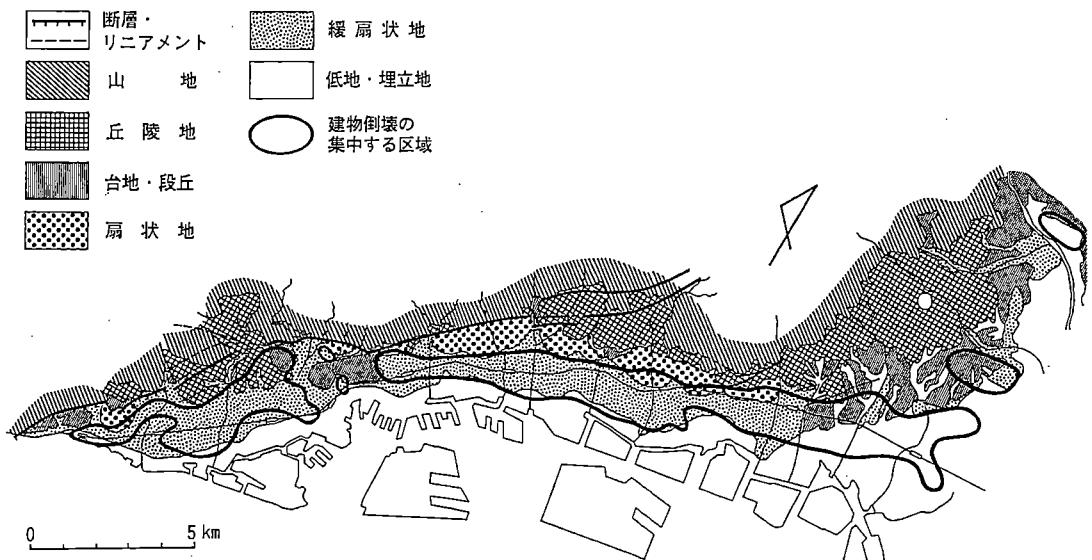
図Ⅱ・1-3は、六甲山接峯面図と六甲山隆起による



図Ⅱ・1-2(a) 六甲山南麓の地形分類図(吉岡ほか, 1995)



図Ⅱ・1-2(b) 阪神大震災被害状況 (地形分類: 池田, 1995; 被災状況: 中央開発㈱, 1995)



図Ⅱ・1-2(c) 神戸地域の地形分類と災害集中域 (関口ほか, 1995)

扇状地の発達程度を示したものである。

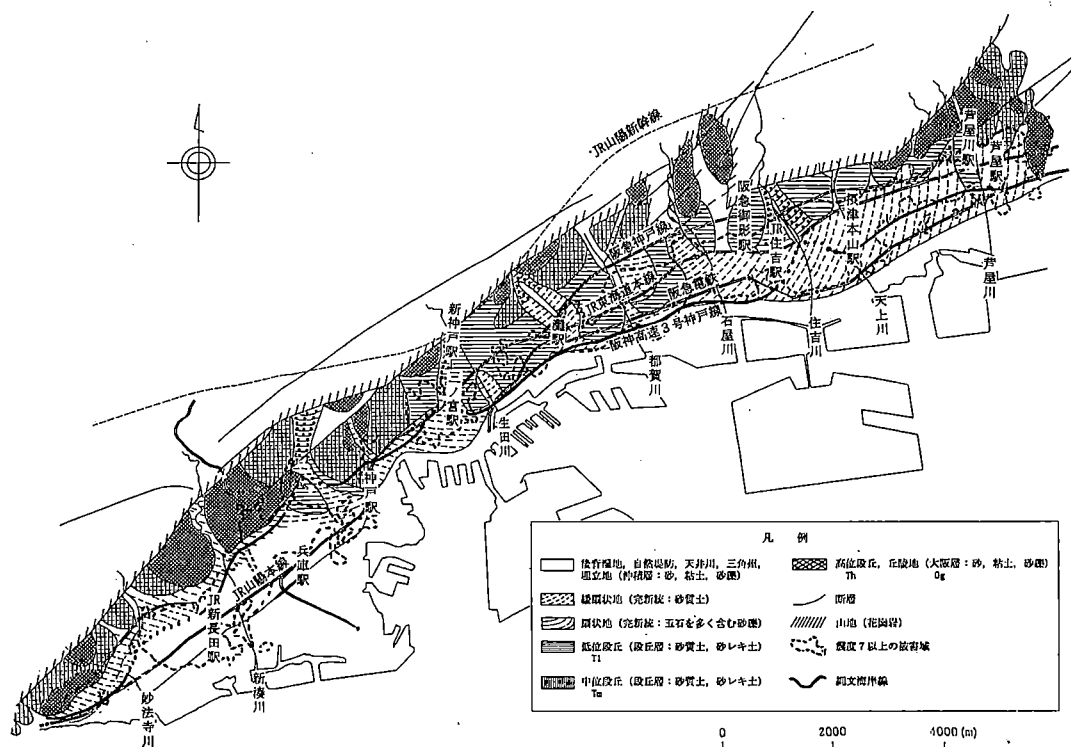
この図によると、東六甲では最高標高は六甲山の918 m、西六甲では小部峠の418 mであり、六甲山系は西に向って傾動している。その傾動地形による山地と平地との比高差の関係から、平野も対応して西に傾動していると考えられ、六甲山地に近い住吉川を頂点として、扇状地の発達パターンが3つに区分できるとしている(石川ほか, 1995)。

このうち、六甲山頂(918 m)を水源とする比高差のもっとも大きい、かつ集水面積の大きい住吉川から生田川にかけての扇状地は、更新世後期以降から現世まで土砂供給量がもっとも多く、扇状地の発達が比較的著しく、かつ厚い堆積物を形成している(パターンA)。

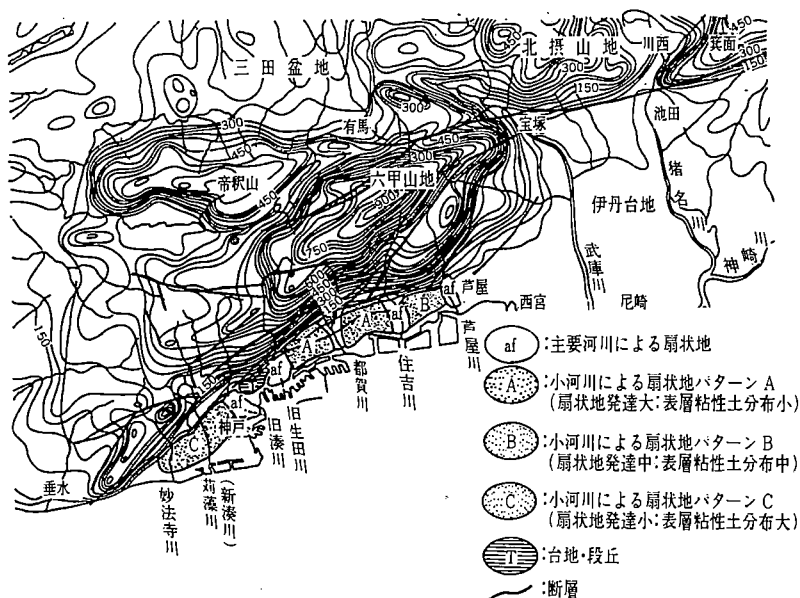
住吉川と芦屋川間の平地は、住吉川左岸側と比較すると地形・標高はやや低く、傾斜勾配は 2° 以下の緩扇状地であり、扇状地の発達は中程度とみられる(パターンB)。また、この現住吉川は過去の扇状地の扇央部に当たるJR住吉駅の東側約500 mに弓なり状となって、東に移動して位置し、左岸部の最凹部を流下している西への傾動地形となっている。

一方、神戸市西部域での小部峠(418 m)を水源とする西神戸の荻藁川付近の平地は、土砂供給が比較的少なく、扇状地の発達が著しくないとしている(パターンC)。

これらの区分は、最近の地盤調査によっても明らかにされ、被害度の関係についてもより詳細に明らかにされ



図II・1-2(d) 地形・地質分類と被害度図。(石川, 1995a) 震度Ⅶの被害は、更新世後期末期以降の低位段丘、扇状地（一部）と、完新世の緩扇状地後背湿地等で見られる。



図II・1-3 六甲山接峰面図と隆起による扇状地の発達区分。(石川, 1995a)

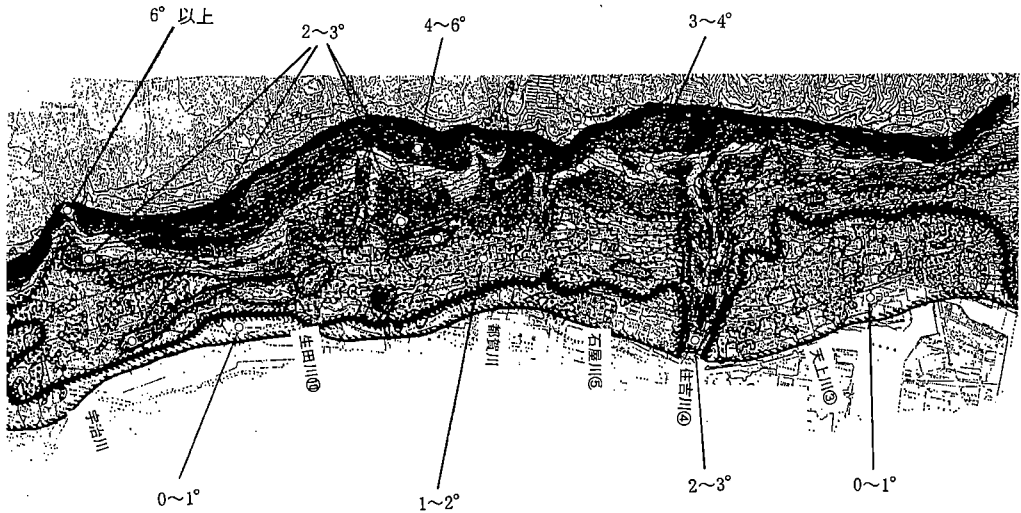
つつある。この説明については後述するが、震度Ⅶの被害は、この住吉川周辺の緩扇状地と沖積谷西部域の後背低地で起っている。

図Ⅱ・1-4に神戸市東部域における地形傾斜区分を示す。図によると、震度Ⅶ以上の被害は傾斜 2° 以下の緩扇状地に起こっている。また、現河床付近は傾斜 7° 以上の天井川の自然堤防で、震度はⅥ～Ⅶとなっている。

1.2.2 地盤構造とその特性

表層地盤の分類は、研究者によって必ずしも一致しておらず、とくに薄い沖積地盤の表示法や低位段丘層、更新世後期～完新世扇状地の区分や分布の判定がさまざまである。

また、深さ方向の分布についても、主として構造物調査のボーリング資料(1980)によっているため、 N 値 $=30\sim50$ を示す砂礫層を、地質学的に区分することは、

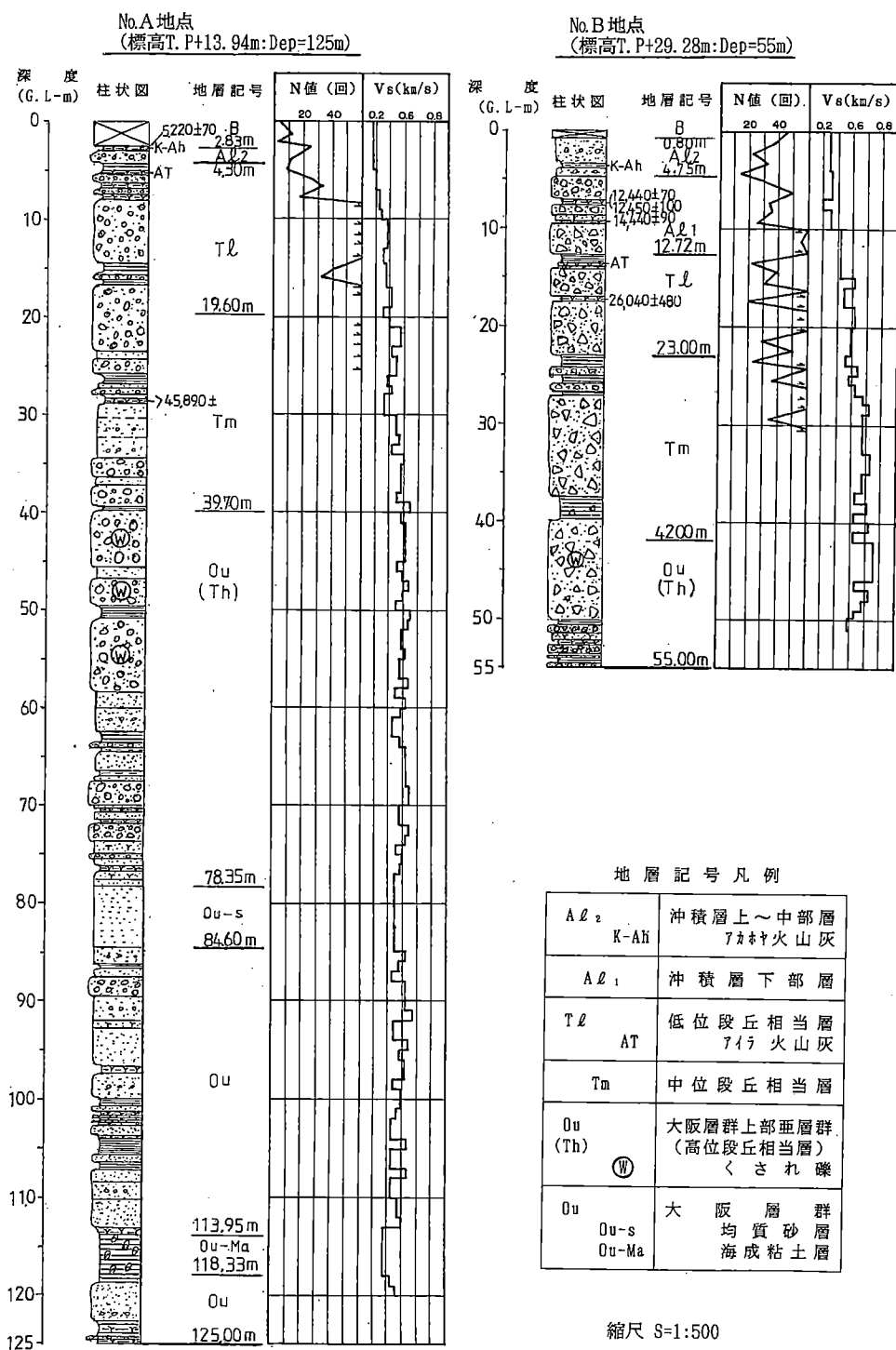


図Ⅱ・1-4 神戸市東部域における地表面傾斜区分 (石川, 1995b)

表Ⅱ・1-3 東神戸陸域の地質・地盤特性の概要 (兵庫県 (1996) を基に作成 石川, 1996)

時代 (万年)	地層名	地 質	火山灰	層厚 (m)	堆積勾配 ($^{\circ}$)	N 値	S 波速度 V_s (m/sec)	比抵抗 R_{50} ($\Omega \cdot m$)	環 境	田中 分類
1.5	沖積層 (A1)	・砂礫(玉石混) ・礫混砂	Ah U2	2~9	1.6 1.4~1.9	・6~20 ・4~10	110~160	—	扇状地性堆積物	F-5 F-4
7.0	低位段丘層 (T1)	・砂礫(玉石混) 有機質土, 砂質土	AT (745) DNT DMT	10~15	2.0~2.4	・30~50 ・15~20	200~350 160~200	10~200 10~60	やや寒冷期の扇状地 性堆積物(淡黄褐色) (土石流性)	F-3 F-2
	中位段丘層 (Tm)	・砂礫(玉石混) (花崗岩角礫)	—	12~20	± 3.0	≥ 50	300~450	50~150	やや温暖な時期の 扇状地性堆積物(土 石流性)(暗褐灰~ 淡青灰色)	F-1
20.0	高位段丘層 (T1) 上部重層群 O*	・砂礫 ϕ (10~100 mm) (くされ礫, 角礫)		深さ20m~ 40m以下		> 50	500~650	100~200	土石流性堆積物 角礫, 淘汰不良 深層風化, 酸化色 (黄灰~灰褐色)	

注：田中分類については田中(1995)を参照のこと。



図Ⅱ・1-5(a) 東神戸(天上川)地質柱状図(兵庫県, 1996)

むずかしい現状にあった。

地震発生後、その表層地盤の地質が火山灰同定や微化石分析などの地質学的手法によって、ようやく明らかにされつつある。それらを要約すると次のようにまとめられる(表Ⅱ・1-3)。

①東神戸陸域では、深さ5.0~18.0 m 付近に始良 TN 火山灰(AT)が数箇所で見られている(図Ⅱ・1-5(a), 図Ⅱ・1-7)。

②縄文海岸線(標高約5 m)の北寄山側では、中位段丘時代には Ma 12, Ma 11等の海成粘土は発見されていない(当時海の侵入はなかった?) (図Ⅱ・1-6)。

③深さ20~40 m 以下に、赤褐~褐灰色を呈し、風化した「くされ礫」($\phi 0 \sim 100$ mm 程度の花崗岩の角~亜角礫より成る)を多く含む土石流性(単層は逆グレーディング, 基質は淘汰不良の細粒~粗粒まき土)扇状地堆

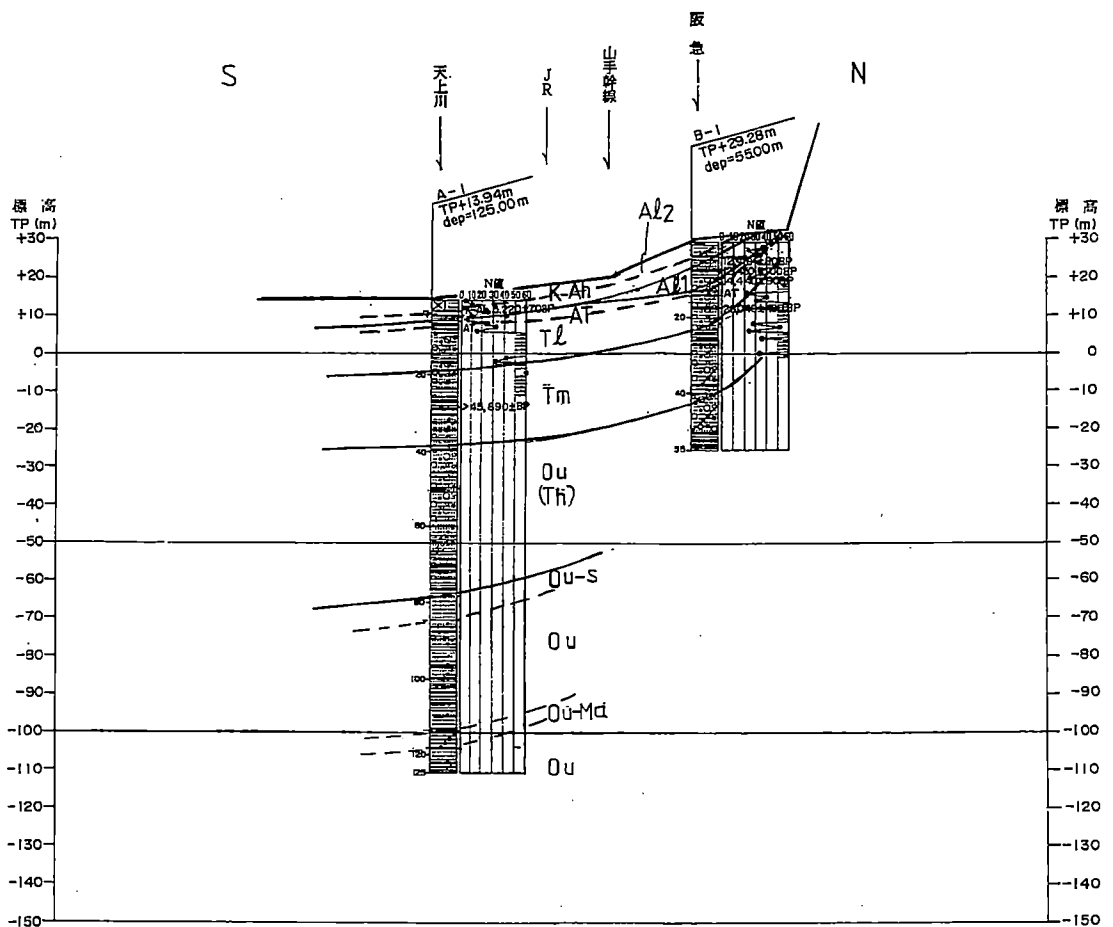
積物の砂礫層が現れる。この地層は明美礫層(高位段丘相当層, 大阪層群の最終離水面)と対比される(図Ⅱ・1-5(a),(b))。

④高位段丘相当層(Th)は、海域例えばポートアイランドでは深さ80~100 m 以下であり、この時期の地形面の勾配は4~6°程度で当時海水面よりかなり高く露出し、ゆるい丘陵地を形成していたことが推定され、亜寒氷期時代に風化が進行したことが考えられる。

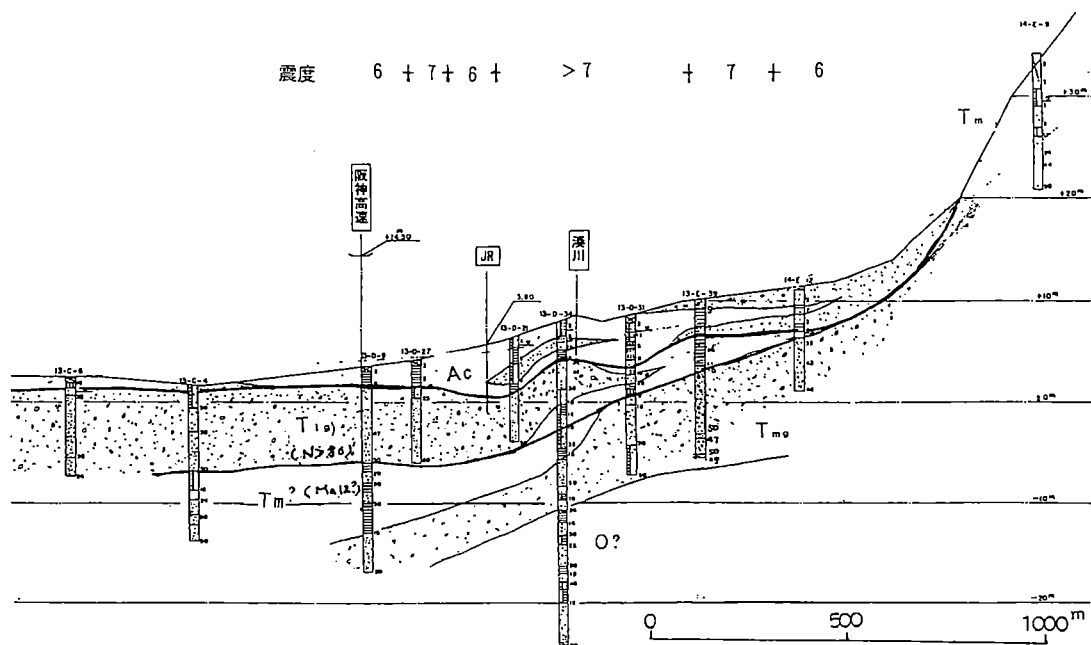
⑤一方、段丘相当層(砂礫層)の堆積勾配は一般に1~2°前後であり、現扇状地の堆積勾配と概ね一致している。

このように、ようやく最近表層地盤の地質年代区分がより明確になりつつあり、さらにより的確な検討が可能になると考えられる。

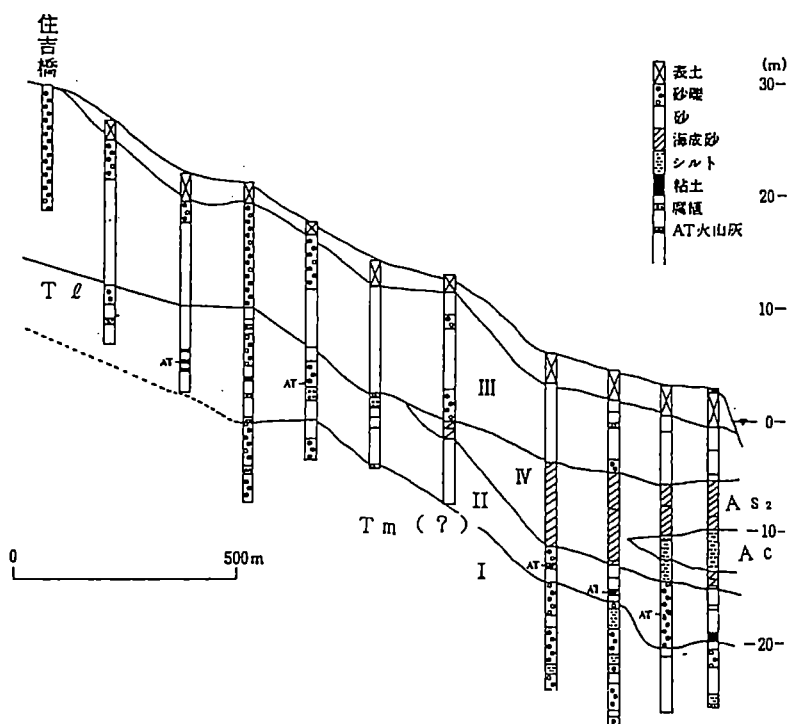
表Ⅱ・1-4は、東神戸地域における田中ほかの地形



図Ⅱ・1-5(b) 天上川流域地質断面図(兵庫県, 1996) 地質記号は図Ⅱ・1-5(a)と同じ。(縦横比10:1)



図Ⅱ・1-6 長田区新湊川沿いの南北断面 (石川, 1995)



図Ⅱ・1-7 住吉川沿いの断面 (田中, 1988)

表Ⅱ・1-4 河川別の地形分類と堆積物、扇状地発達区分
(兵庫県(1996)を基に作成, 石川, 1996)

	河川名	勾配	田中の分類	地形分類	土質	震度 VIIの観測	震度 VIIIの観測
(東神戸)	a 天上川	0.5~2°	F-5	緩扇状地	砂レキ	⑤	5~30m
	b (扇前部)	<1.5°	F4~F5	緩扇状地	砂レキ	⑤	5~30m
	c 住吉川 (流心部)	2~6°	F5	天井川~ 自然堤防	玉石混 砂レキ	④	5~40m
	d (扇前部)	0.5~2°	F3~F5	(扇状地)~ 緩扇状地	砂レキ	④	5~40m
	e 石屋川 (流心部)	0.5~3°	F5	天井川~ 自然堤防	砂レキ	④	5~30m
(東神戸 f~中央)	石屋川~ 生田川 (扇前部)	(<1° ~1° ~3°)	F3~F5	(扇状地)~ 緩扇状地	砂レキ	④	5~30m
(西神戸)	新瀬川	<2°	-	後背低地	粘土 粘土	③	5~20m

分類図を基に、地形勾配、地形分類、堆積物、扇状地の発達程度などを河川別に示したものである。図Ⅱ・1-1に、今回新たに実施された兵庫県は地質調査を基に東神戸陸地の地質、地盤特性の概要を示した。

この図や図Ⅱ・1-2, Ⅱ・1-3などによると、東神戸で被害の大きかった区域(JR線-阪神高速線の間で扇状地発達パターンA, B区域)は、更新世後期以降から後氷期にかけて田中分類の扇状地2の扇状地性堆積物が厚く(沖積層と低位段丘層の厚さ計15m程度)、かつ広く分布し、標高30m以下(図Ⅱ・1-4)傾斜2°以下の緩扇状地に当たる。また、この堆積物は、N値30程度、S波速度100~350 m/s、比抵抗200 Ω・m以下の花崗岩の玉石混じり砂礫により成っている。

1.2.3 地質構造とその特性

1995年兵庫県南部地震では、淡路島北西部の野島断層と、神戸側の複数の断層が活動したと言われているが、神戸側では誰の目にもはっきりとわかるような断層変位は、地表には生じなかった。しかしながら、神戸~阪神地域では「震災の帯」と称される震度Ⅶの激震地域が、六甲山地と大阪湾に挟まれた細長い市街地内に形成された。

六甲山地周辺は、第四紀地殻変動の研究が早くから行われ、活断層についても地表に現れているものは、概ねその実態は明らかにされてきた(藤田ほか, 1982; 1983, 1984)。しかし、市街地から大阪湾にかけて伏在

する活断層については、大阪湾断層や和田岬断層などその一部は知られていたものの、地下構造を含めその全貌は把握されていなかった。そのため、震災の帯に象徴される今回の被害の原因についても、予察的な地質あるいは地盤モデルを用いての解釈にとどまっており、震災後1年以上たった今でも統一的な見解は出されていない。

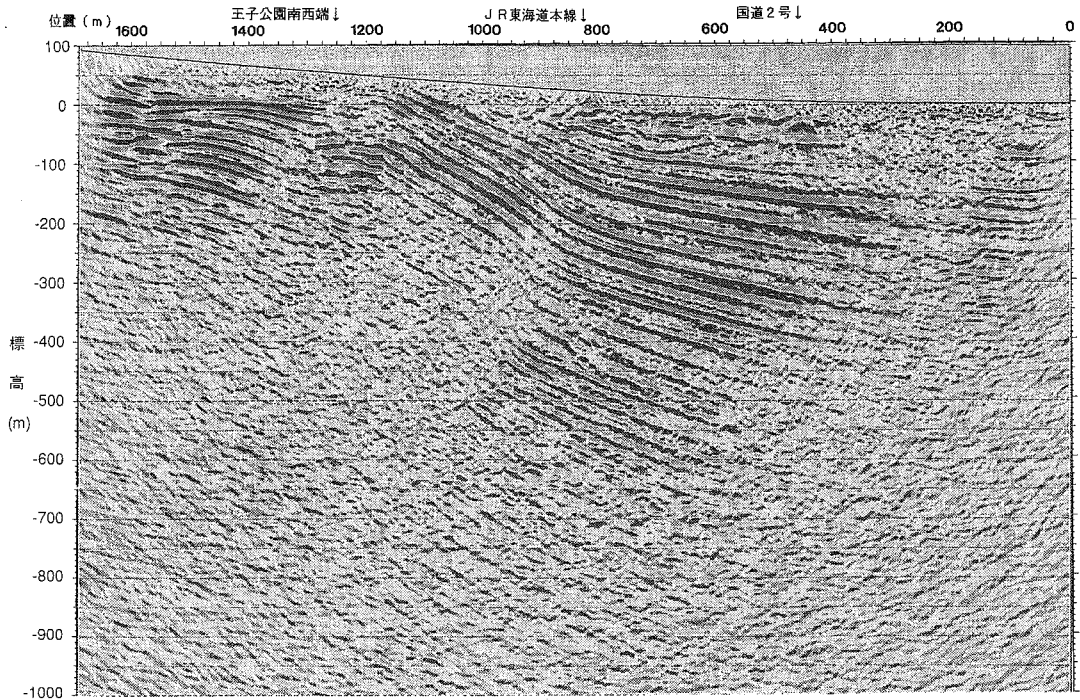
遠藤ほか(1995a, b)は、震災発生直後に脇浜測線、芦屋川測線で実施した反射法地震探査から、基盤構造、断層帯の解析を行った。その結果、被害集中地帯周囲の地下に断層が伏在していることを示し、反射面が堆積層の分布構造を示すと解釈し、反射面の食い違い、あるいは浅部での折れ曲がりの主要なものは、いずれも断層変位に伴うものと推定した(遠藤ほか, 1996; 図Ⅱ・1-8)。この各測線で2箇所の断層帯が認められ、伏在断層であるとした。さらに、被害の関係についても考察を行っている。

また、兵庫県では、この震災の原因を正しく位置づけ防災面に生かすためには、神戸・阪神地域の地下構造や地盤構造を明らかにするとともに、伏在する活断層の位置や特性を十分理解しておくことが重要と考え、「阪神地域活断層調査委員会」(委員長: 藤田和夫大阪市立大学名誉教授)を組織し、この一年間調査が進められてきた。この項では、平成8年3月にこの委員会の一応の締めくくりとして報告された「委員会の総括」(阪神地域活断層調査委員会; 1996)のうちの地質構造と活断層に関する内容を中心に紹介する。

なお、本委員会では、「1.1 地質・地盤調査の実態」で述べたように、反射法地震探査7測線80 kmと調査ボーリング(掘削深度580 mの基準ボーリングなど3本計760 m)が実施され、その成果と既存資料(土質工学会関西支部編, 1992, 1995; IKEBE, N., *et. al.*, 1970; 市原実編, 1993; 岩崎好規ほか, 1990; 藤田和夫, 1966; 中川康一, 1990)地形・地質調査と合わせて検討されている。

(1) 地質の概要

当地域の基盤岩は、主に六甲山地に見られる白亜紀の花崗岩類から成り、山地周辺の丘陵・台地から沖積低地大阪湾にかけて基盤岩類は地下に潜り、その上に新第三紀鮮新世後期(およそ300万年)以降に堆積した粘土・シルト・砂・砂礫などから構成される未固結な地層が分布している。これらの地層は大阪層群と呼ばれており、そのうち上部の段丘層に相当する時期(およそ20万年前~2万年前)の地層は上部洪積層、最終氷期最終寒冷期以降(およそ2万年前~現在)の地層は沖積層とし



図Ⅱ・1-8 脇浜第2側線反射断面 (遠藤ほか, 1996)

て区分されている。その他、花崗岩類と大阪層群との間には、神戸層群などの新第三紀層が分布している所もあるが、その分布は局所的であり、層厚もそれ程厚くないとみられている。

(2) 調査結果

反射法地震探査とボーリング調査の結果からは、神戸・阪神地域の地下の反射構造と地質層序は、図Ⅱ・1-9のように対応づけられることがわかった。この区分は、すでに大阪地域で報告されている地質区分と反射断面の特徴(中川, 1990)と良く似ており、両地域が反射断面を通し、互に対比可能であることもわかった。そのため、今回得られた反射断面は、図Ⅱ・1-8の地層区分に基づいて層区分され、地下構造などが検討されている。

①地下構造の概要

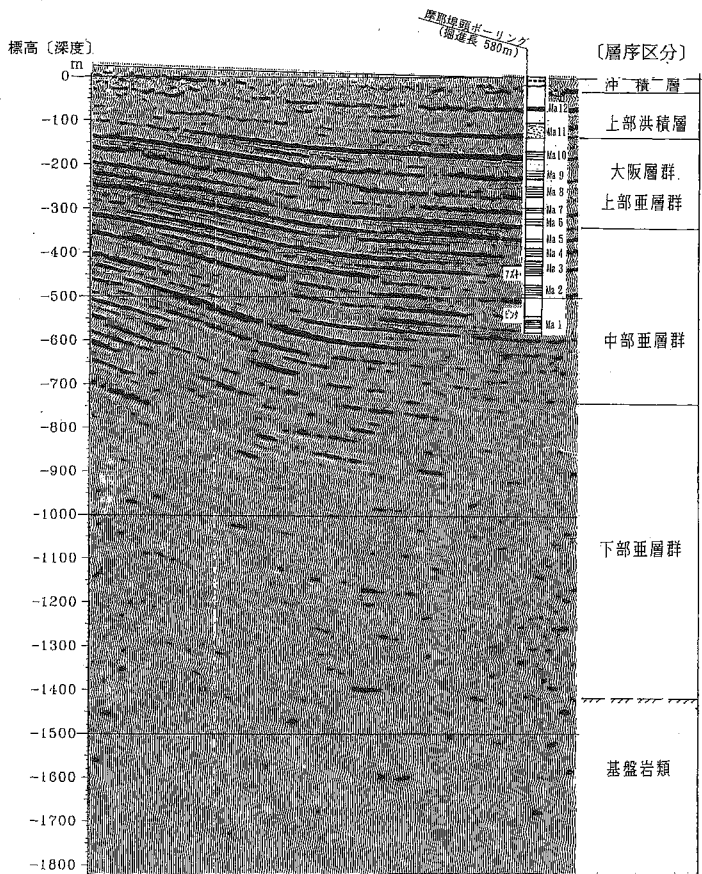
兵庫県「阪神地域活断層調査委員会」の調査では、神戸・阪神地域の地下には、山麓付近で400 m～1,000 m程度、海岸線付近では1,200～1,900 mに達する堆積層が存在しており、大阪湾の中心部では、2,500～3,000 mに達することが明らかにされた(図Ⅱ・1-10; 阪神地域活断層調査委員会, 1996)。同図に示された基盤等深度線の密度は、六甲山麓付近と大阪湾断層周辺で高く

なっており、後述する活断層の分布とよく一致している。神戸地域における重力探査によって得られているブーゲー異常図から想定されている地質構造(遠藤ほか, 1995b)とも概ね一致している。

六甲山地は、主に花崗岩類から構成される山地であり、その南東斜面には複数の活断層が存在し、急峻な斜面地形が発達している。これに対して、その頂上はなだらかな平坦面が広がっている。この平坦な地形は、もともと侵食基準面近くまで侵食されていたものが、地殻変動により隆起し、今の高度にまで持ち上げられた隆起準平原と考えられている。

一方、大阪湾の地下には、厚さ2,000ないし3,000 mに達する大阪層群をはじめとする地層が分布し、その下の基盤岩の表面は、六甲山頂を思わせるような平坦な面であること、上に堆積している大阪層群の堆積構造がこれとほぼ平行していることも明らかにされた。この傾向は、既存の調査結果(岩崎ほか, 1990)でも現れている。

したがって、大阪層群が堆積し始めたころには、少なくとも六甲山地から大阪湾にかけた一帯には、主に花崗岩類からなる小起伏面が広がっていたことがはっきりしてきた。このことは、地殻変動を読み解く上で重要な情



図Ⅱ・1-9 反射断面とボーリング結果に基づく地質区分 (兵庫県, 1996)

報を提供してくれる。それは、現在見られる最大4,000 mにおよぶ高度差が、おもに第四紀以降の変動によってもたらされたことを示すからである。

②伏在する活断層——被覆層と基盤の変形像——

大阪湾断層や和田岬断層などをはじめ市街地の下に伏在する活断層の様子は、今回の調査でかなり鮮明にとらえられている。

大阪湾断層を例にとると、その反射断面は図Ⅱ・1-11のように、大阪層群などの被覆層が撓み曲がった構造を呈する。その曲がりの度合い、すなわち、変位の量は下位に位置する古い地層ほど大きく、構造運動が地層を堆積しながら継続的に進行してきたことが読み取れる。

断層変位している基盤の構造に着目すると、単純に断層のみで変位しているようには見えず、被覆層同様に、断層とともにその周辺の広い範囲がたわみ曲がっている

大阪層群の標準層序 (千里丘陵地域、OD-1 ボーリング) と直接対比できているのは、現地地点では、Ma1 (直上にピンク火山灰層が挟まれる)、Ma2 (山田火山灰層が挟まれる) および Ma3 (アズキ火山灰層が挟まれる) 層準のみである。また、Ma3 層の上位の海成粘土層の下部に、地磁気の反転層 (松山・ブリュンヌ境界) が確認されたことから、この海成粘土層が Ma4 層であることも明らかである。

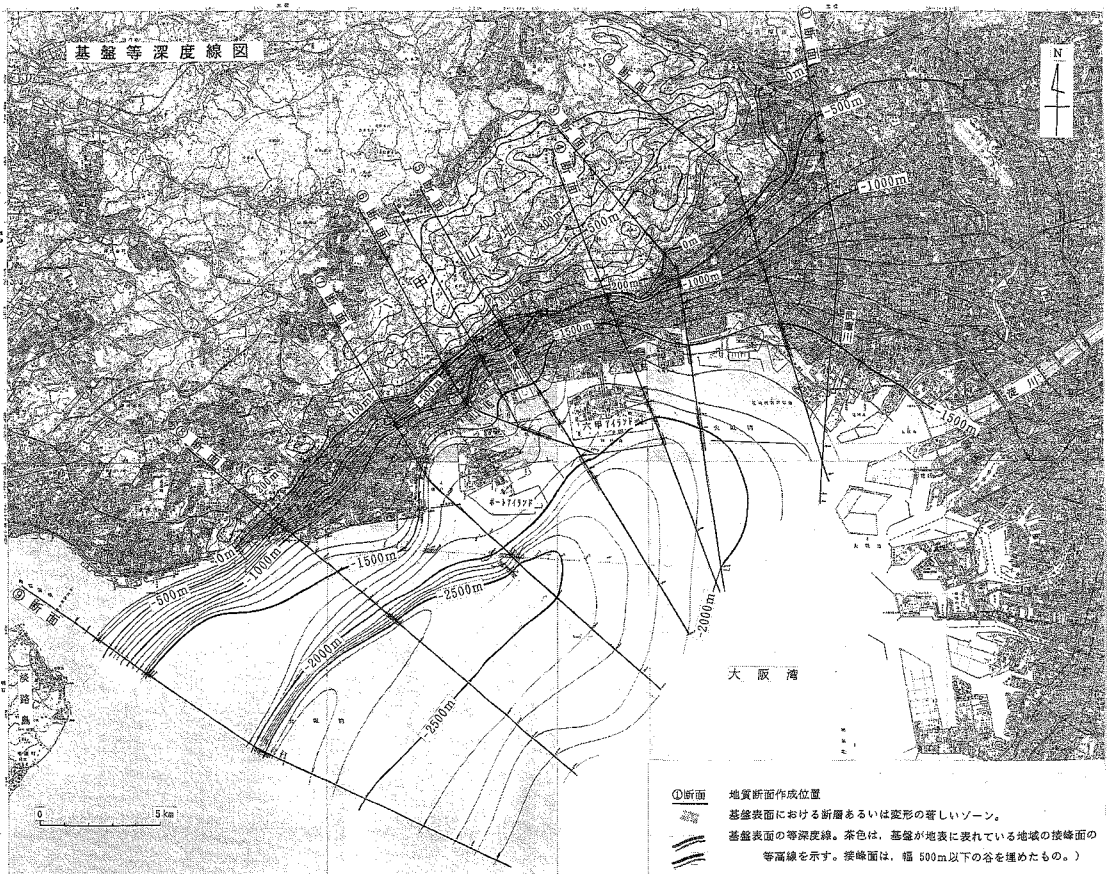
その他、当ボーリングで確認された最上位の海成粘土層は、周辺地域の既存ボーリングとの関係から見て Ma12 層と考えられるが、Ma11 層準と推定される深度の地層では、海成の証拠は見つかっていない。

一方、直接層序対比はできていないが、Ma11 層準 (推定) と Ma4 層との間に 6 層の海成粘土層が挟まれている。現在のところ、これらの海成粘土層は下位から Ma5、Ma6、Ma7、Ma8、Ma9、Ma10 層相当と推定しており、神戸・阪神地域の標準となる反射断面と地質層序でも、この考え方に基づいて層序区分を行っている。

ように読み取れる。また、これら 3 断面を比べてみると、大阪湾断層という一連の断層であるにもかかわらず、断面毎にその形状が大きく異なる点も注目される。とくに a 断面 (六甲アイランドの沖) では、大阪湾断層の延長は、ゆるやかな波状の変形としか認められなくなる。

一方、断層構造直上の地表付近に目を移すと、最も垂直変位が大きく現れている (断層を挟んだ垂直変位は 1,000 m 以上) c 断面でも、地表付近の上部洪積層や沖積層は、極めてゆるやかな変形を被っている程度であり、地層がすばっと切れるような断層が地表付近まで延びている様子は見られない。

また、灘区の都賀川沿いの測線の断面で活断層が伏在している箇所を地質平面図と比べてみると、活断層の分布する位置は海側に位置する活断層を境に、これより山側では地表に分布していた上部洪積層が地下に没し、海



図Ⅱ・1-10 基盤岩等深度線図（兵庫県，1996）

側の地表には沖積層が出現するようになる（図Ⅱ・1-12）。これは、活断層による変位が地表まで影響を及ぼしていることを示唆しているとみられる。しかし、空中写真や現地踏査で容易に判別できるほどの明瞭な低断層崖や地形面の変形ゾーンとして現れていないのも事実である。したがって、このような伏在する活断層を、平面図に線で表現することは困難であり、また不適切であると言えよう。

③活断層の連続性と問題点

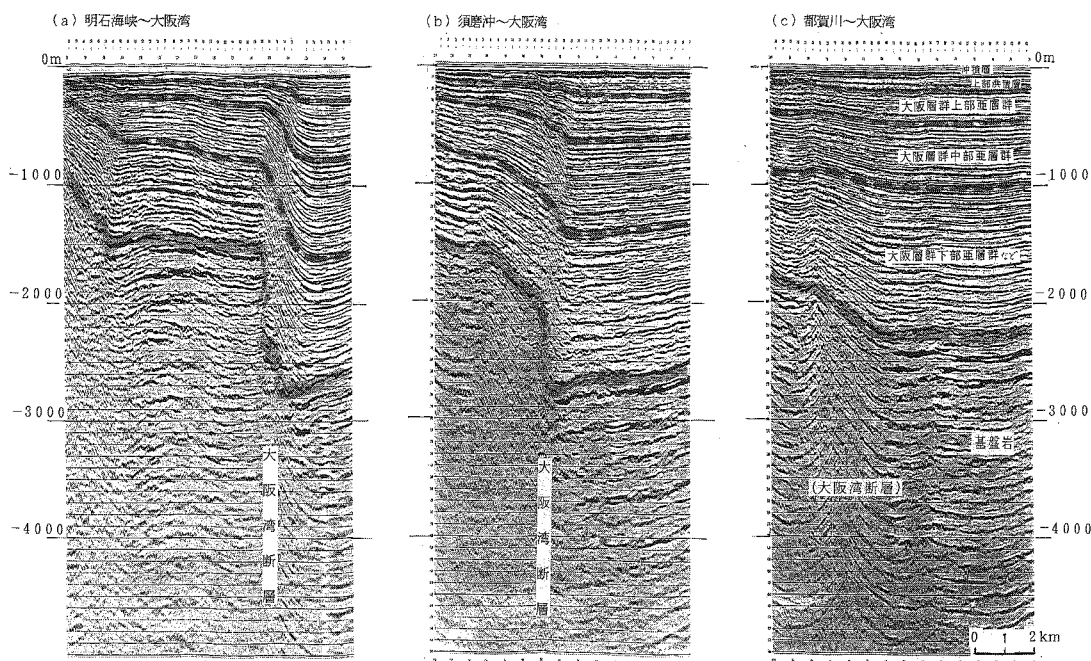
今回の反射法地震探査では、各側線毎に活断層・地下構造の様子がかなり鮮明にとらえられ、神戸・阪神地域の地下構造が、図Ⅱ・1-13のようになっていることがわかってきた。

図Ⅱ・1-10の基盤岩等深度線図とこの地質断面図を見較べてみると、以下のことがわかる。

断層の連続性を考えた場合、大きくは、神戸・阪神地

域の活断層は、六甲山地から市街地直下の広い範囲で傾動を伴いながら、その中に複数の活断層が存在する北西側の断層系（須磨断層、諏訪山断層など既知の活断層が多い）と、その南東側およそ5 kmをこれに平行して延びる大阪湾断層系に分けられる。また、その間には北北東—南南西方向の和田岬断層が位置している。

大阪湾断層の北東延長部は、六甲アイランド沖で不明瞭になり、これより北東へは延びていない可能性がある（図Ⅱ・1-14）。一方、六甲山麓の断層系は、東灘付近では山麓部に垂直変位が集中する形へと変化し、さらに北東部では甲陽断層へ続くようである。さらに東部の武庫川付近～伊丹台地にかけては、全体にゆるやかに傾動するパターンとなり、この地域に位置する伊丹断層や昆陽池陥没帯ともそれほど大きな垂直変位が見られない。以上、活断層・地下構造の概要はつかめてきたが、今回の論争の一つにもなった、既知の断層（例えば、五助橋



図Ⅱ・1-11 伏する活断層の様子（大阪湾断層の例）（兵庫県，1996）

断層や甲陽断層）の延長問題，断層の詳細な連続性については，現在のところ断定的な結論づけはできていない。それは，断層が数多くあり，またその形態や方向が単純でないことや，活動時期を考慮した場合，予察段階では連続するとみられた断層が，断面に時間面を入れて活動時期を検討してみると，時代による活動性の違いが見られる場合があることなど，いくつかクリアされなければならない問題点が残されているためである。また，今回の調査では，おもに垂直の変動がとらえられ，これが評価対象となっているが，六甲の断層系に見られる横ずれを含めた検討も必要と考えられる。

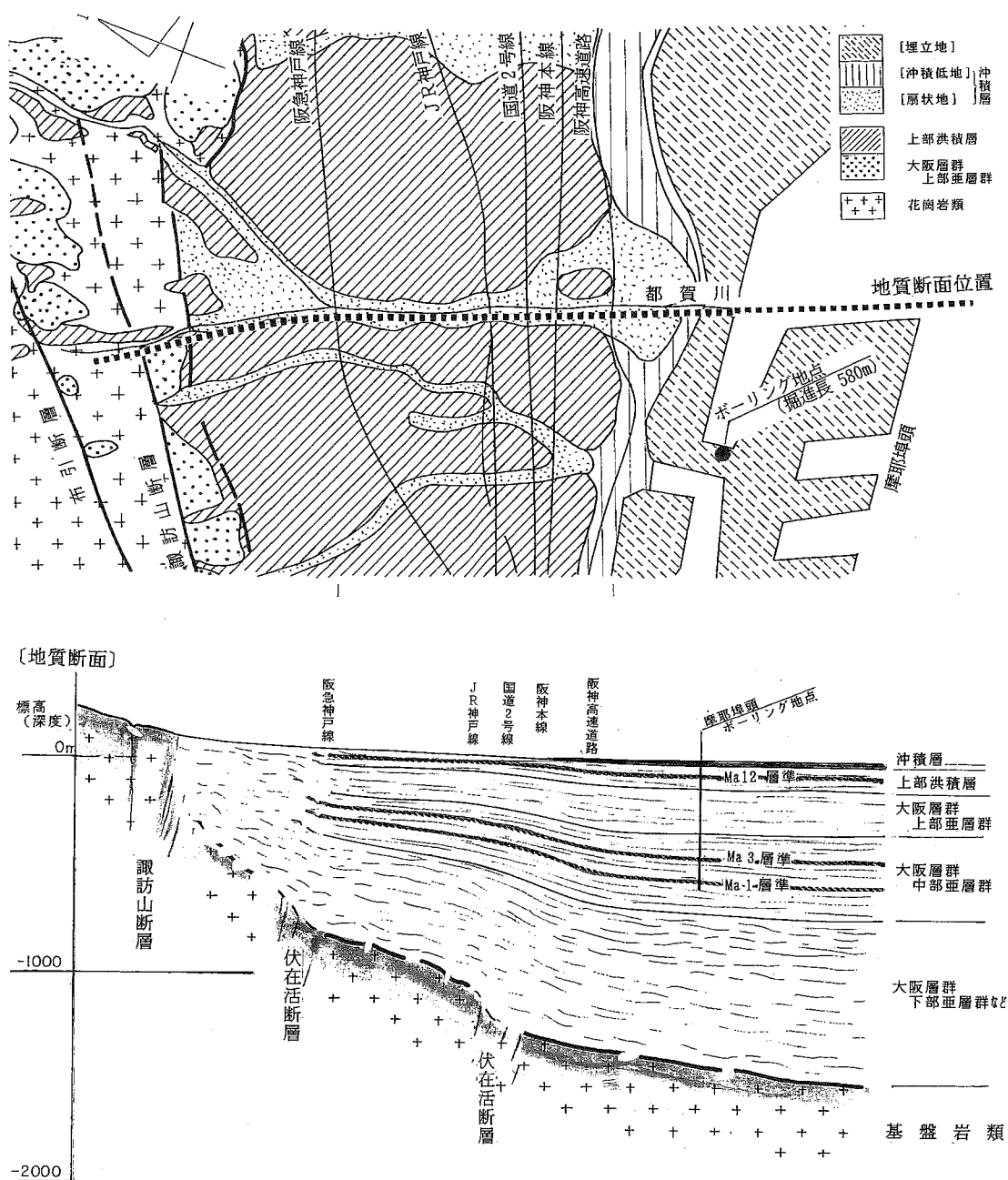
各調査結果を要約すると以下のようにまとめられる。

- ・六甲山地から神戸・阪神地域を経て大阪湾に至る地下構造の全体像が把握できた。

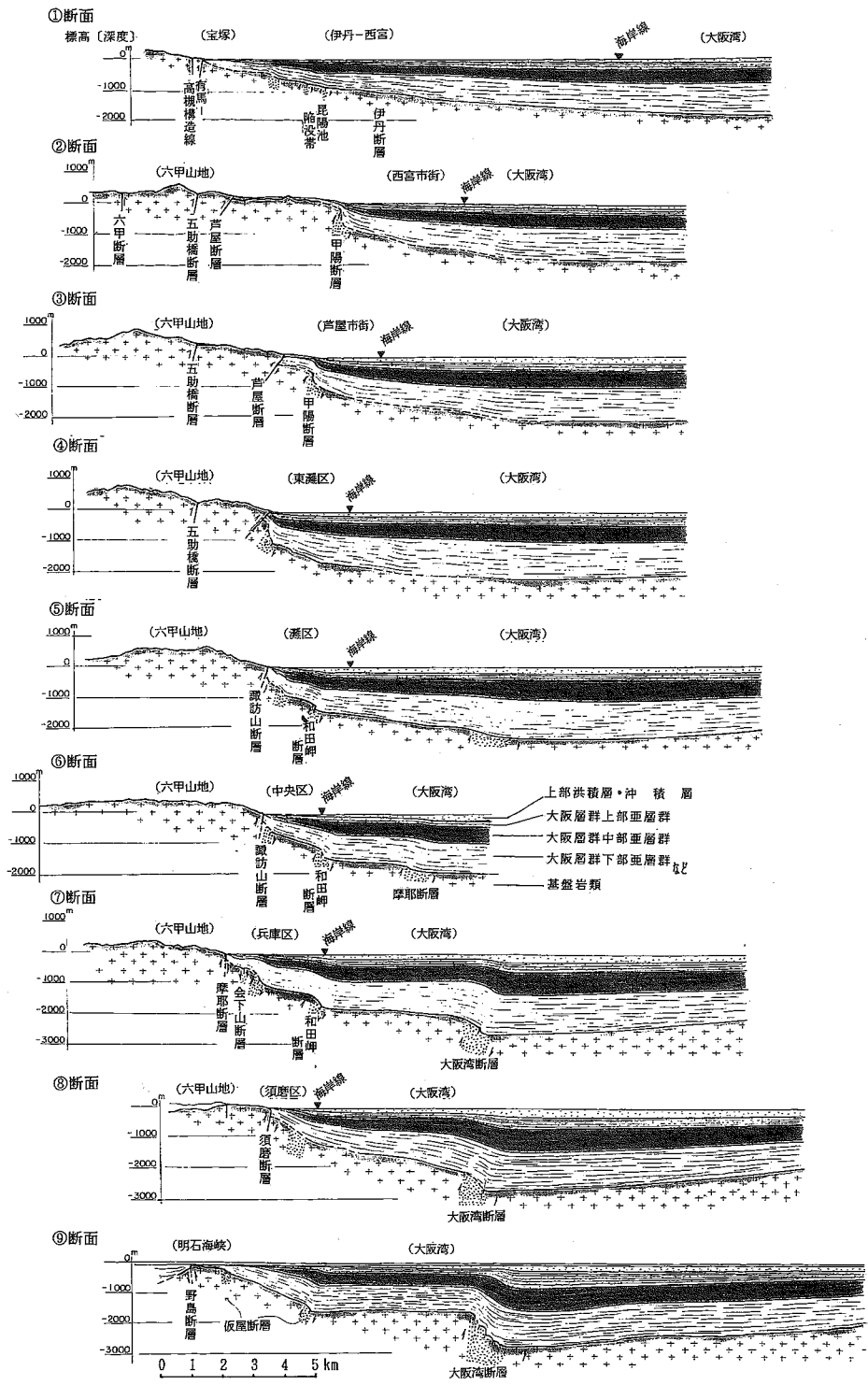
- ・伏する活断層の特徴として，基盤の変位に伴い被覆層を变形させているが，地表まで断層変位としては延びていないこと，地表付近では地層の变形も極めて緩やかであり，断層崖のような明瞭な断層変位地形としては現れてこないことなどが明らかになった。

参考文献

- 1) 中央開発(株) (1995)：兵庫県南部地震阪神大震災災害調査報告書，pp. 1 - 51.
- 2) 土質工学会関西支部編 (1992)：関西地盤，212p.
- 3) 土質工学会関西支部編 (1995)：海底地盤—大阪湾を例として—，406p.
- 4) 遠藤秀典 (1995a)：兵庫県南部地震による阪神地域の被害と伏在断層の分布，「阪神大震災」中間報告会，予定案，日本応用地質学会，pp. 55 - 71.
- 5) 遠藤秀典ほか (1995b)：阪神地域の地下地質構造と被害分布．シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集，p. 219 - 224.
- 6) 遠藤秀典，渡辺史郎，牧野雅彦，横田 裕，野田利一，香川敏幸 (1996)：兵庫県神戸市における脇浜第2測線の反射法弾性波探査，地質調査所月報，第47巻，第2/3号，pp. 95 - 108.
- 7) 藤田和夫 (1966)：大阪湾の地質構造的意義，松下進記念論文集，p. 131 - 141.
- 8) 藤田和夫・笠間太郎 (1982)：大阪西北部地域の地質．地域地質研究報告，(5万分の1地質図幅) 地質調査所，112p.
- 9) 藤田和夫・笠間太郎 (1983)：神戸地域の地質．地域地質研究報告，(5万分の1地質図幅)，地質調査所，115p.
- 10) 藤田和夫・前田保夫 (1984)：須磨地域の地質．地域地質研究報告，(5万分の1地質図幅)，地質調査所，101p.
- 11) 兵庫県 阪神地域活断層調査委員会 (1996) 調査結果の



図Ⅱ・1-12 伏在する活断層と地表地形との対応 (兵庫県, 1996)。断面図縦横比1:1。



図II・1-13 神戸・阪神地域の地質断面(兵庫県, 1996)。縦横比1:1。

2. 構造物被害の特徴

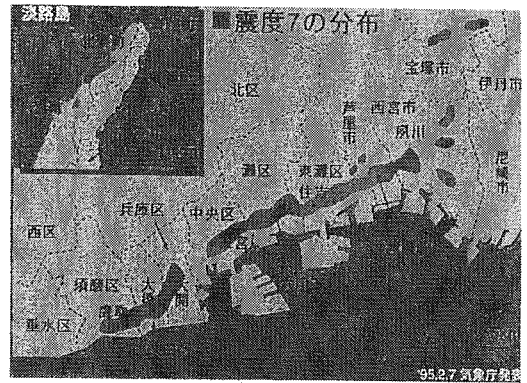
2.1 被害調査

構造物の被害状況は、震災直後の国土地理院（1995）や国際航業㈱（1995）などが実施した空中写真撮影とその判読結果が、いち早く発表された。引続いて官・学・民の多くの機関による精力的な詳細な現地調査が行われ、その災害報告が発表された（図Ⅱ・2-1）。地震の震度階は、気象庁（当初神戸は震度Ⅵと発表）が現地調査を行った結果、建物の倒壊率が30%を超える震度Ⅶの区域が2月7日に公表された（図Ⅱ・2-2）。

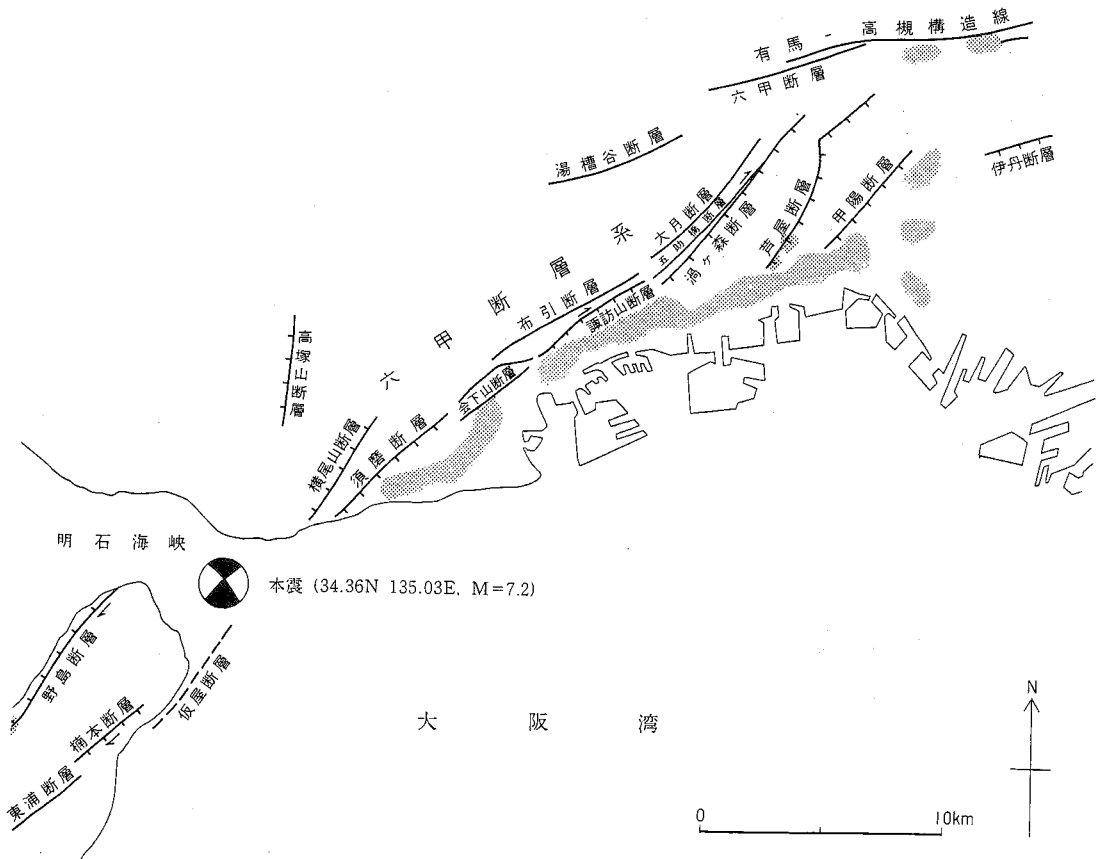
これらの調査報告によると、その大部分は被害の大きかった箇所、すなわち震度Ⅶの地域は、神戸市域を東西方向に帯状に、一部とぎれて島状に長く分布し、芦屋市から西宮市にかけて、北東、東、東南方向に分岐して島状分布することが指摘された。また、震源地から遠い伊丹断層（伊丹地溝帯）付近、有馬—高槻構造線の南側の宝塚市中山付近、さらに上町断層西側の豊中市～大阪市

（堺筋線沿い）付近に被害の大きかったことなども指摘された（図Ⅱ・2-2）。

口絵-4(a)は中央開発㈱（1995）が震災直後から実施した町丁単位の被害調査報告であり、この震度階によ



図Ⅱ・2-1 気象庁2月7日発表の震度Ⅶの分布



図Ⅱ・2-2 六甲断層系周辺の活断層と震度の分布（気象庁，1995；遠藤，1996）

る被害度分布を明治初期の古地図と重ね合わせたものである。

この図の震度Ⅶの分布域は、気象庁発表のものとおおむね対応しているが、被害度の細かい違いについては、より詳細に表示されている。この図の特徴の一つは、被害のとくに大きい（木造家屋の倒壊率が50%を超え、かつ鉄筋コンクリート建屋の倒壊の大きいもの）ものを超震度Ⅶとして表示し、神戸市域で3区域に島状に分布すると指摘していることである。

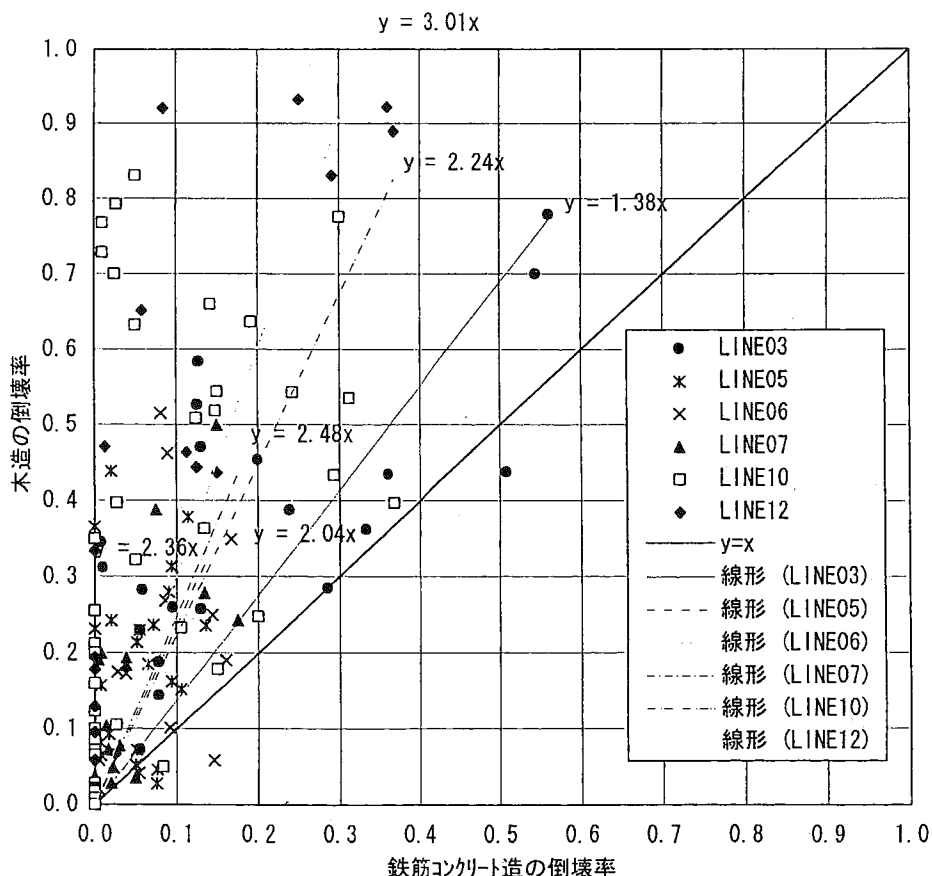
被害の状況を建物種別で見ると、瓦ぶき2階建の古い木造建屋の被害が目立ったが、4～5層の直接基礎型式のRC建屋の不等沈下による倒壊も随所で見られた。この木造家屋とRC建屋の倒壊率は地域によって違いが認められた（図Ⅱ・2-3）。

一方、軟弱地盤の厚く分布する海岸低地、埋立地などでは、比較的被害が少なく、地盤の非線形性によることが推論された。木造家屋や墓石の倒壊方向が、地域別に

規則的なある方向性を持っていることも指摘された（図Ⅱ・2-4(a), (b)）。また、構造物の種別や建築年代等による被害度についても多くの調査機関によって公表された（図Ⅱ・2-5(a), (b), (c)）。

図Ⅱ・2-5(a), (b), (c)は木造家屋の建設年代と被害の関係、屋根仕上げと被害の関係および構造物種別と被害の関係を調査した例である。これによると、土ぶき瓦屋根様式（おおむね戦前～終戦直後建築）のものが大破率の高い傾向を示している。ただし、これらを他の地区で見ると定量的には必ずしも同一ではなく、他の要因もあることを示唆している。構造物の被害の特徴を述べるとしても、調査目的によってその対象物の選定や分類のための母集団の扱いが異なっていることなども加味しなければならない。

構造物の被害のもう一つの特徴に、RC構造（4～5階建）の被害例が挙げられる。これら事例の大部分は、砂礫地盤（ $N \geq 30$ ）に、直接基礎型式で造られたもの



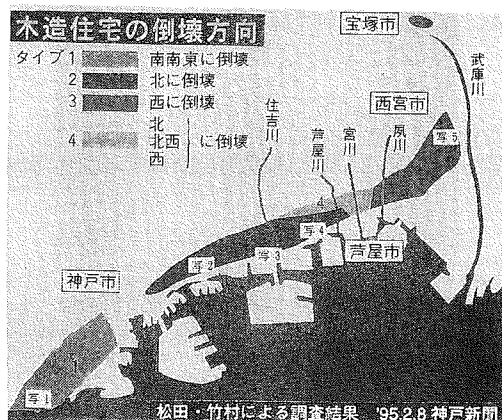
図Ⅱ・2-3 木造と鉄筋コンクリート造の倒壊率の関係（石川，1995b）

が、地震によって30~50 cmの不同沈下が生じ、建物が1°~2°程度傾動したものである(石川ほか, 1995)。地盤震動そのものによる建物の倒壊でなく、不同沈下によるものであり、特異な被害例と言えよう。

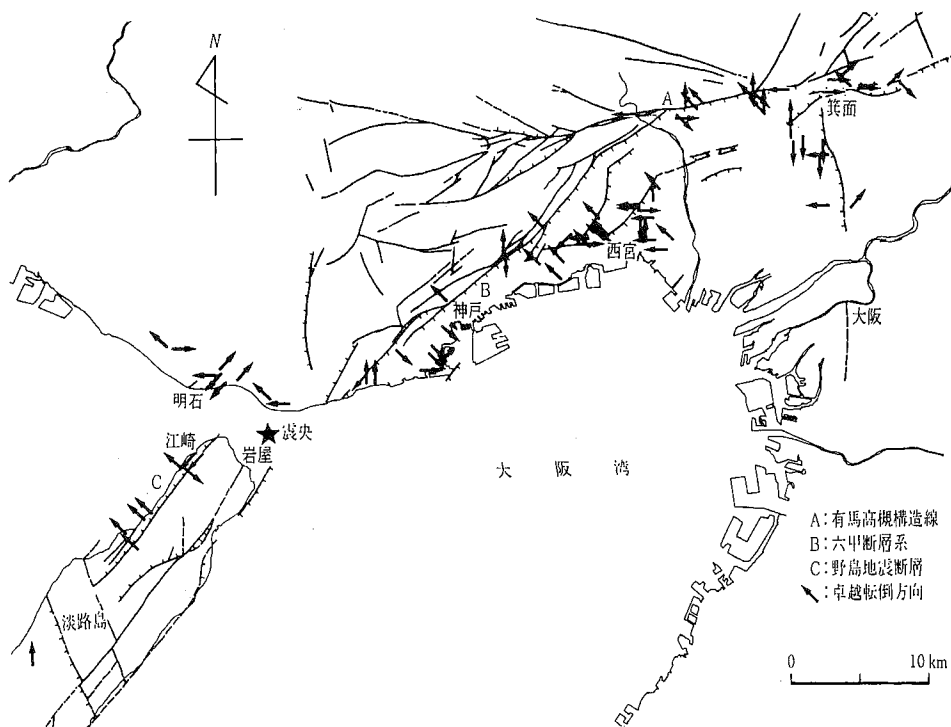
これら震災直後に実施された被害状況調査は、基本的にもっとも大切なものであり、被害原因の真相究明に以後役立ったことは言うまでもない。

2.2 地形・地盤と被害の特徴

池田(1995), (1996)は、口絵-4(a)の被害図(中央開発, 1995)を用いて地形区分との関係を検討した。その結果、「超震度Ⅶの島状被害は、地形区分とおおむね対応(現在の河道沿いよりも河開地や後背湿地に楕円形状に分布)する」としたが、震度Ⅶの帯状被害は、新期扇状地の扇央部と、それより山側に位置する旧期扇状地

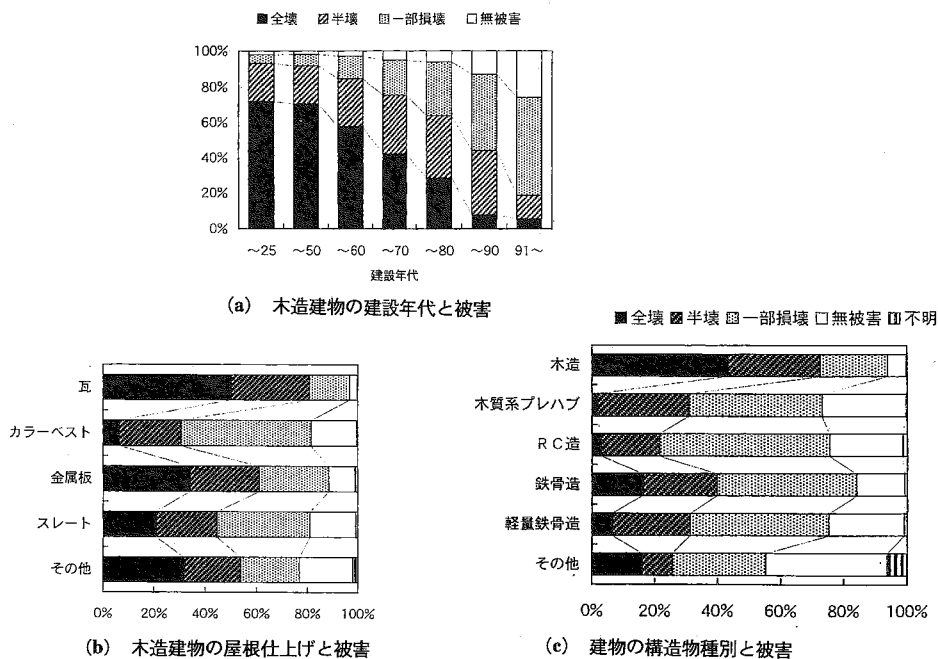


(a) 木造住宅の倒壊方向調査 (松田ほか, 1995)

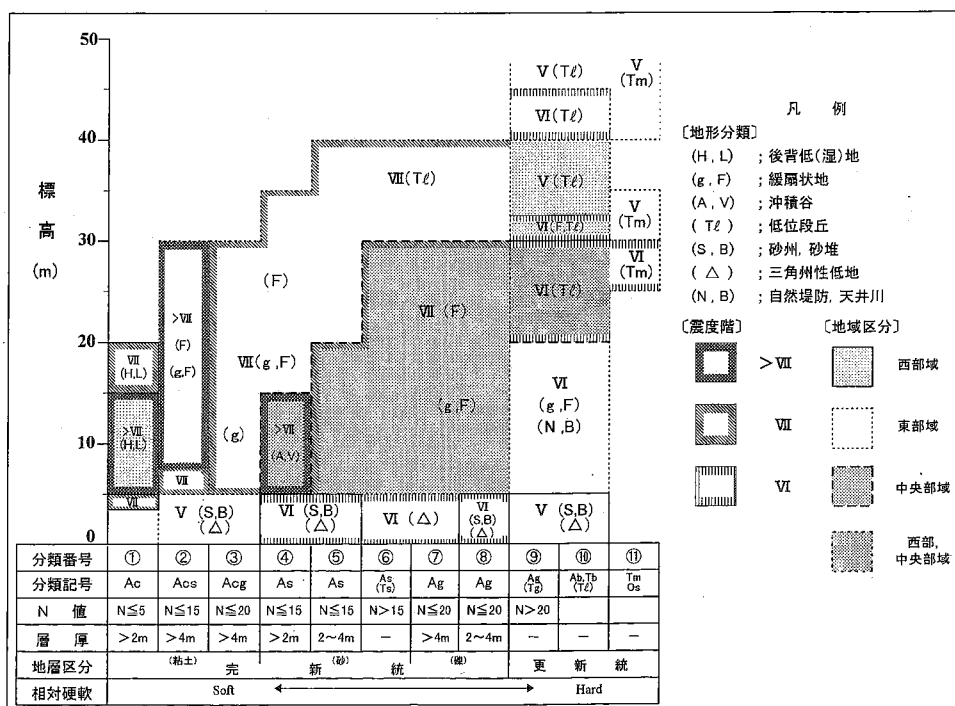


(b) 灯籠・墓石の卓越・転倒方向 (菊山ほか, 1996)

図Ⅱ・2-4 構造物の倒壊方向の調査



図Ⅱ・2-5 建設時期・工法別建物と被害 (芦屋市, 日本建築学会, 1995)



図Ⅱ・2-6 3 地域の地質区分別(地形分類別)の震度階と標高模式図 (石川1995を図化)

の末端下部に位置する三角州性低地（全体的に山寄り）におおむね分布し、地形区分の単位を越えて延びている」とした。すなわち、地形以外の要因があることを示唆した。

このように構造物の被害の特徴は“震災の帯”の言葉に要約されたとしても、地形・地盤（扇状地・Ⅱ種地盤）区分との良い対応は、単なる結果の一つと思われる。このほかに被害度を説明できる主な原因は2次元的な深い基礎構造の影響による地盤の増幅帯が生じたことを示唆する。

図Ⅱ・2-6は、神戸の3地域（東神戸域、中央部域、西部域）における地質区分（地形分類）別の震度階と標高分布の関係を模式的に示したものである。

これによると、3地域の被害の空間分布はそれぞれの特長を有しており、

- ①おおむね標高5 m以下の三角州性低地（記号△）や砂州（記号S.B.）付近では、地盤分類の違いに関わりなく、震度階はⅤ～Ⅶを示す。
- ②東部域は、標高5～40 mの間で、地盤区分、地形分類の強弱に対応して、震度階はⅤ～Ⅶに変化する。
- ③中央部域は、標高5～30 mの間で地盤区分（④～⑩）、地形分類（Tm, Tl, F, gF, Av）の強弱に対応して震度階はⅤ～Ⅶに変化する。
- ④西部域は、標高5～20 m（震度階>Ⅶ最大）の間で、地盤区分（①～⑩）、地形分類（Tl, F, S. B., H. L.）の強弱に対応して震度階はⅤ～Ⅶに変化する。

このように、震度階の違いは地盤区分や地形分類を因子としていることが容易に推察されるが、東部域と西部域の震度Ⅶの標高の違い、また、標高5 m以下の震度Ⅴ～Ⅶは地盤や地形以外の要因があるものと推察される。

調査によるこの震害の特徴を要約した、いわゆる“震災の帯”は軟弱層の厚い海岸区域ではなく、更新世後期～完新世の砂礫地盤（Ⅱ種地盤）の緩扇状地段丘に沿って分布していることは、多くの研究者にとっても意外であったに違いない。ただし、その原因については、当初、伏在断層活動説、断層変位説、地盤増幅説、建物老朽説などさまざま論じられた。また、震度Ⅶ以上が点々と比較的小規模に分布する区域は、人工改変地盤（沼地の埋立て）または不整形地盤構造であるとして、それらとの関係が議論された。詳細は後述する。

これら構造物被害の特徴に関する整理検討結果は、被害の程度と地盤構造その他の関係を定性的に解析することによって、今後その結果を用いた動的地盤モデル設定による詳細解析に有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 芦屋市消防本部(1995): 市内建築物被害状況, 神戸新聞, 1995年1月30日。
- 2) 池田碩 (1995): 阪神大震災と地形災害, 地理, 40(4), pp. 98-105.
- 3) 石川浩次 (1995): 構造物種別の被害の特徴, 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書, 日本応用地質学会, pp. 267-271.
- 4) 石川浩次, 溝口昭二, 小野 諭 (1996): 神戸市街地の帯状被害と地盤, 土と基礎, 44-2 (457) pp. 38-41.
- 5) 菊山浩喜, 横山俊治, 中山幸恵, 柏木健司 (1996): 墓石・灯籠の転倒調査から推定される1995年兵庫県南部地震の地震動, 土と基礎, Vol. 44, No2, No 457, pp. 42-44.
- 6) 建設省建築研究所 (1996): 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, pp. 331-402
- 7) 三田村宗樹 (1995): 人工改変地盤と被害, 兵庫県南部地震—地質地盤と災害—報告書, 日本応用地質学会, pp. 261-265.
- 8) 日本応用地質学会—地質・地盤と災害—報告書, pp. 267-279.
- 9) 日本地形学連合編 池田碩 (1996): 兵庫県南部地震と地形災害, 古今書院, pp. 95-109.
- 10) 沖村 孝, 神戸大学工学部兵庫県南部地震学術調査団 (1995): 兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報), 家屋被害調査と震災マップ pp. 22-41.
- 11) 地盤工学会 阪神大震災調査委員会 (1996): 土構造, 鉄道・道路, 補強土, pp. 287-341.

3. 地震動特性と解析結果

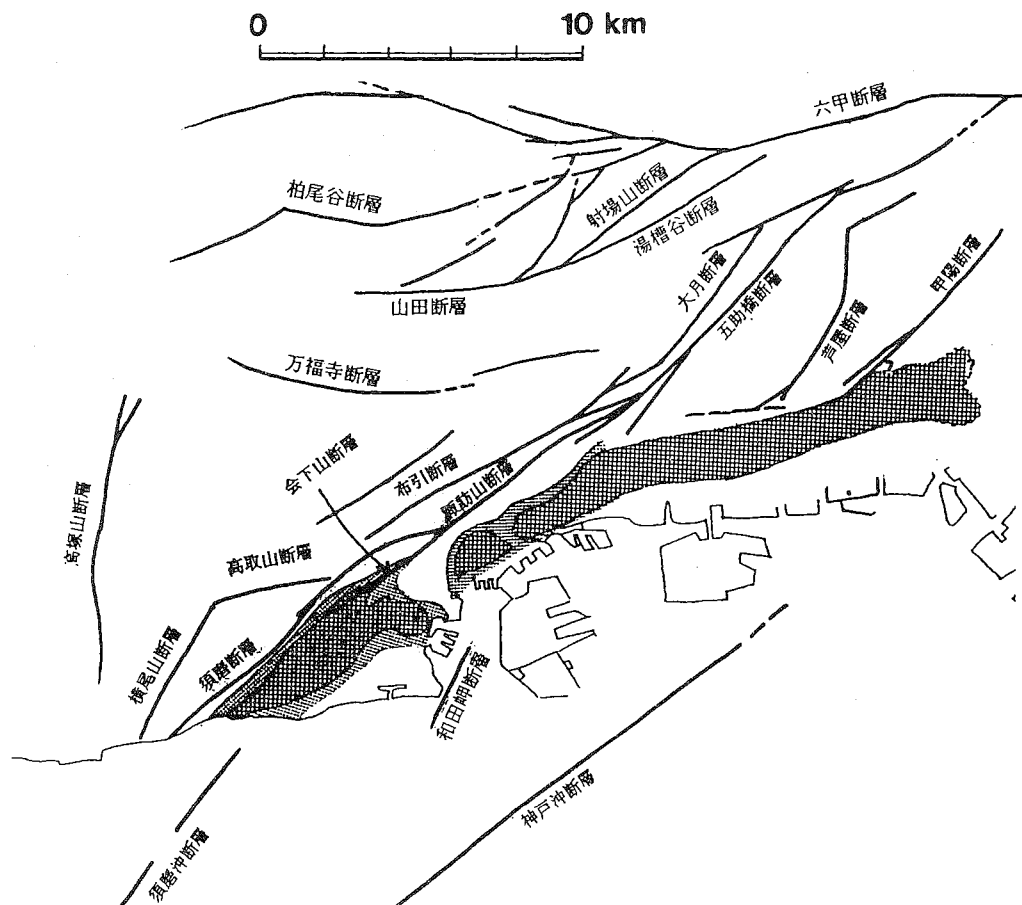
震災直後から、主として地形学、地質学の立場からの災害調査によって、被害と地形・地質・地盤との関係についての現象解析が行われた。引続いて主として地震工学の立場から、地震動解析が行われた。

本章では、主として地形学、地質学の立場から行われた定性的な現象解析と最近の地震工学の観点から行われた数値解析結果についてレビューする。

3.1 定性的現象解析

(1) 伏在断層起震説

嶋本ほか (1995a) は、地震直後からの精力的な現地調査から、被災域が直線に延びること、「帯」がとくに地盤の弱い場所ばかりでないこと、余震分布と重なる既存の活断層沿いには、沖積層を横切る場所でも顕著な被害がないことなどから、起震断層はこの「震災の帯」付近でかなり地表近くまで達したと考えた（図Ⅱ・3-1参照）。また、既往活断層付近に集中して分布する余震分布域とは、直下の起震断層が北西70°～80°傾斜していれば説明できるとした。この伏在断層の起震説は、その



図Ⅱ・3-1 活断層（実線）、野島地震断層および兵庫県南部地震による帯状被害集中域（震災の帯）の分布（嶋本ほか，1995）。

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、全壊家屋が多い区域に隣接して、半壊家屋が多く全壊家屋が散在する区域である。

後、前田ほか（1995）による現地地盤亀裂等調査からも支持された。

遠藤ほか（1995, 1996）は、反射法探査の解析結果から芦屋川、脇浜測線において、地下に伏在断層が存在するとして、被害との関係についても言及した。この伏在断層が地震時に活動したとする根拠は、直接的にはかなりむずかしい問題である。また、この後新たに実施された断層モーメント解析や深い地質構造調査などでも直接的な根拠とはなりえていない。とくに東神戸の灘区、東灘区の被害の大きかった地下では、伏在断層は見つかっておらず、現在のところ、伏在断層起震原因説は否定的である。ただし、この説は、その後の原因究明調査の契機となったものであり、高く評価される（図Ⅱ・3-

1）。

(2) 建築構造物の老朽度説

震災直後の多くの調査機関（例えば、防災関係団体、日本建築学会、日本応用地質学会、神戸大学、関西地質調査業協会等）による主として建築物の被害調査が広域にわたって行われた。

その結果、老朽化の激しい建築物や木造家屋の構造的（例えば軸組構造）なものに被害集中、また、その密集域で建物の倒壊率の大きいことが指摘された（図Ⅱ・2-5(a), (b) 参照）。このことは、町丁ブロック数単位の狭い区域では、その傾向が読み取れるとみられるが、広域的な調査によると、震災の帯の中では、比較的新しい建築の枠組工法（プレハブ等）建築物やRC構造などで

も倒壊例が多く見られ、老朽度以外の他の要因（例えば地盤特性）などにあることが推察された。

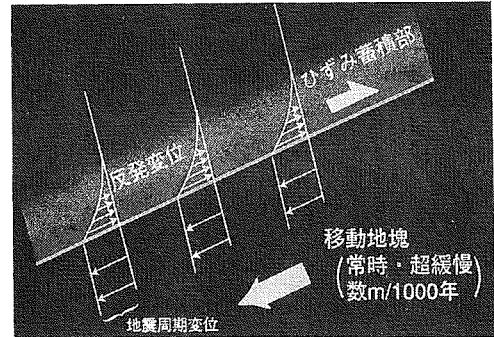
(3) 断層変位運動説

櫻井（1995）は、菊地（1995）の震源解析結果や松田ら（1995）の木造住宅の倒壊方向調査結果を用いた一連の地震発生と断層運動の推定から、この構造物に激甚な被害をもたらした原因は「伏在活断層の直下型地震」の断層運動、すなわち、推定変位速度が1 m/s以上に及ぶ衝撃的な直接せん断破壊によるもの（図Ⅱ・3-2）とした。

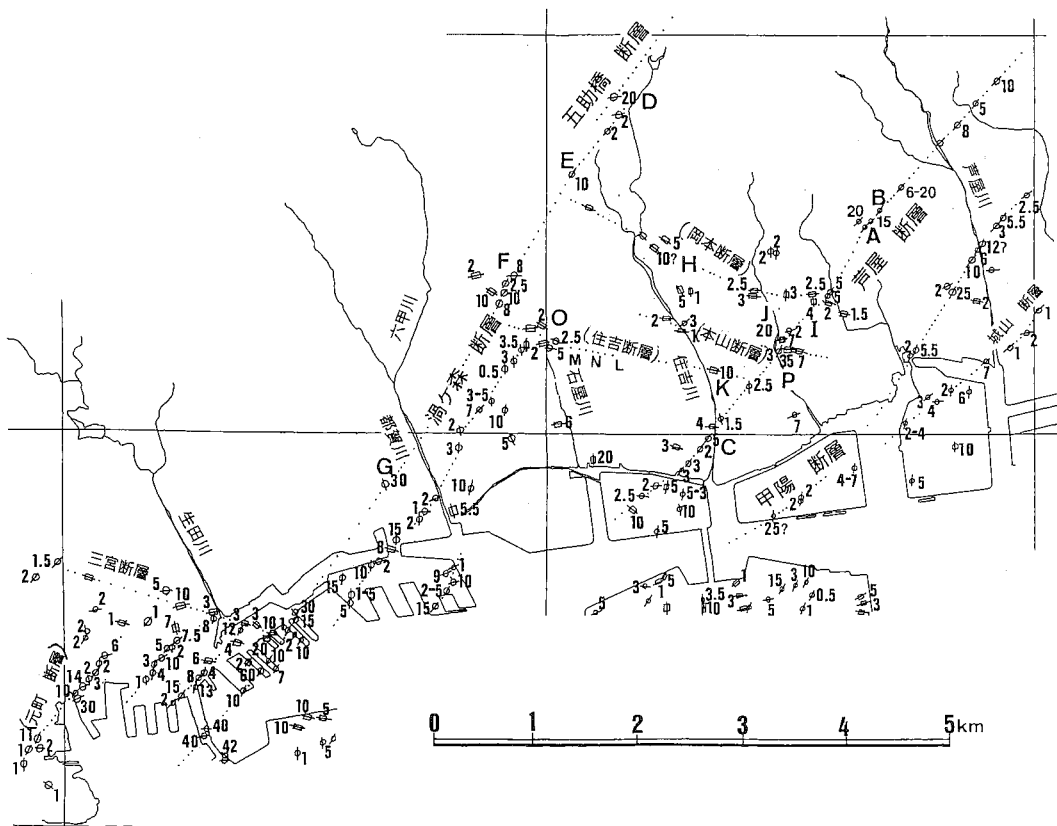
平野ら（1995）も、断層変位（もしくはそれによる特異かつ大きな水平加速度）に伴うもの、すなわち横ずれ断層の変位に関係するとして、櫻井の説を支持している（図Ⅱ・3-3、3-4）。

この断層変位運動説は、言い換えると区域別の初動の揺れの方向と関係のあることを説明するものであり、ま

た震災の帯状分布というよりも、地盤変形も含めた被害の幅の狭い線状分布との関係の方がより密接と思われる。

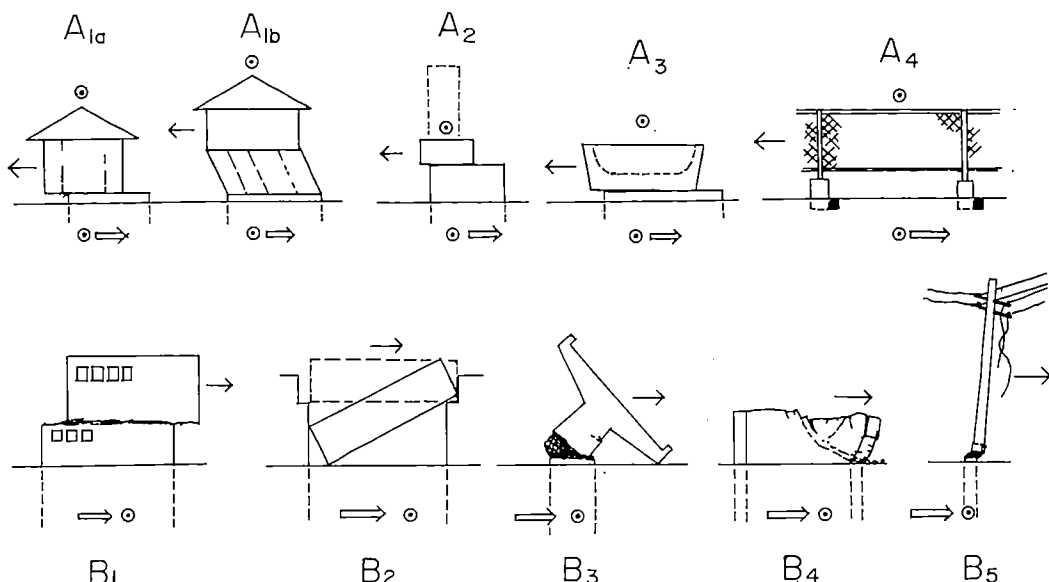


図Ⅱ・3-2 断層変位運動（水平右ずれ断層）（櫻井，1995）



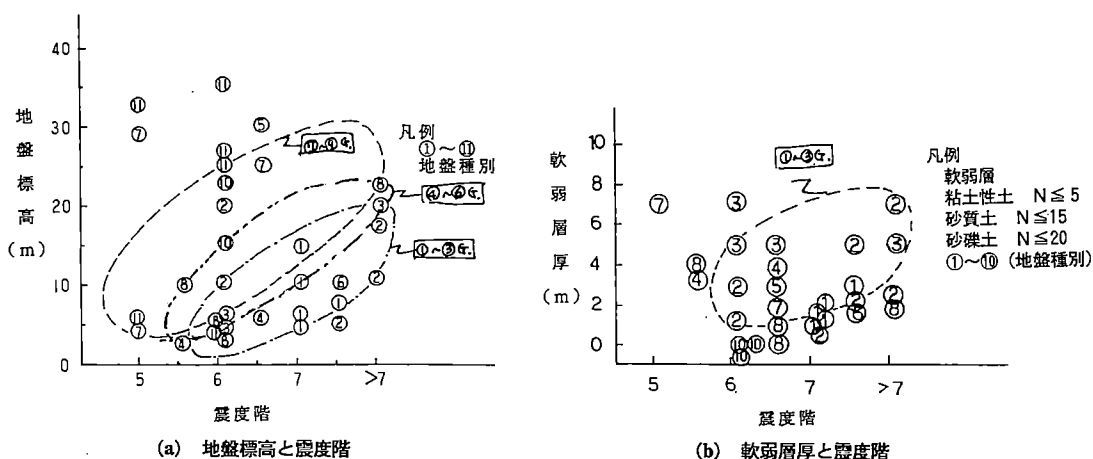
図Ⅱ・3-3 兵庫県南部地震による神戸市街地東部における「造構変位（広義の変位地形）」確認地点と変位量の分布。（平野ほか，1995）

ただし、波田・平野（1995）に一部準拠し、右ずれ（○印）と左ずれ（□印）を区別して示す。数値は主として見かけの変位量を cm で示す。区画線は国土地理院 1/10,000 地形図の図幅範囲を示す。



図Ⅱ・3-4 地盤の急激な変位に伴う2つの破壊様式を示す概念図。(平野ほか, 1995)

ただし、Aは水平変位の開始時の運動に残された場合、Bは運動停止時に失速した場合。平野・波田(1995)による。電柱でも破壊しないで傾くものはAが多く、高速道路橋脚など連結された構造物では単純にいかない。



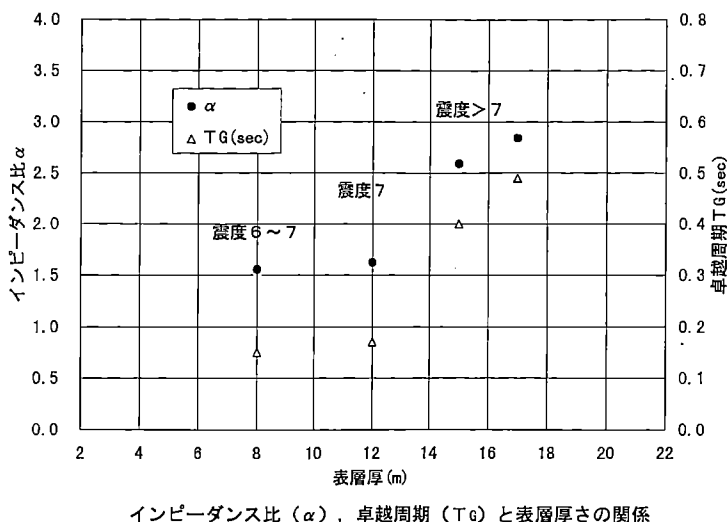
図Ⅱ・3-5 地盤種別による地盤標高・軟弱層厚と震度階の関係(石川, 1995)

(4) 地形・地盤構造増幅説について

図Ⅱ・3-5(a),(b)は、神戸市域における代表点(37地点)地盤種別区分による震度階と地盤標高および軟弱層厚との関係を示したものである。

本図によると、軟弱層の厚さはたかだか10m足らずであるが、層厚と震度階とは関係が小さいことを示している。

一方、地盤標高との関係は、地盤種別とグループ別に見ると、標高の高いほど被害度の大きくなっている傾向が読み取れる。地盤の分布形態によるかも知れないが、震源からの距離減衰と地盤震動の違いの関係を示唆するものである。図Ⅱ・3-6は、震災後、神戸市域で行われた動的地盤調査によって求めた表層地盤(A1層+T1層)の層厚と卓越周期 $T_G(=4H/V_s)$ とインピーダンス



図Ⅱ・3-6 インピーダンス比 (α), 卓越周期 (T_g) と表層厚さの関係 (石川, 1996b)

比 $\alpha (= \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2)$ の関係を示した (石川ほか, 1996a) ものである。これによると, 表層地盤の 8~17 m 程度変化する範囲で卓越周期 T_g は 0.2~0.5 s に変わり, α は 1.5~3.0 倍に増大し, 震度もⅥから超震度Ⅶに変化しているように読み取ることができる。このたかだか, 10 m~15 m 程度の軟弱層厚で, V_s が $V_s = 100 \sim 200$ m/s と変化するだけで, 地盤の震度増幅が大きく変化している様子がうかがわれる。

図Ⅱ・3-7(a)は, 神戸市全域の表面土質と被害の関係を示したものである。また図Ⅱ・3-7(b)は, 西神戸域のそれらの関係を調べたものであり, これらの結果から, 定性的には次のようにまとめられる。

①表層地盤 10 m 程度中に軟弱地盤 (粘性土で $N \leq 5$) が 1~2 m 分布する箇所と震度Ⅶとは関係が深い。

②厚さが 2~4 m 程度厚くなると, さらに被害度は増大する。

③これらの関係は, 広域的に (特に西神戸域) 震災の帯となって現れる。

④中央部域, 東神戸域は別の要因が加わり島状, 帯状被害となっていることが推察される。

三田村ほか (1995) は, 地盤の液状化, 亀裂被害, 人工改変地と地質構造線との関係を調べた (図Ⅱ・3-8)。

それによると, 埋立地盤, 盛土地, 旧溜池・旧河道埋立地などの人工改変地盤の箇所で, 付近の自然地盤と比較すると, 液状化や地盤亀裂, 被害などが集中的に起きていることを指摘した。

(5) まとめ

伏在断層起震説, 構造物の考朽度説, 断層変位運動説は, 余震分布, 被害分布等からみて大局的には主因とは考えにくい。

地形・地盤条件の定性的検討結果から, 震度Ⅶの帯状・島状分布の原因は地域によって異なるが, その素因は以下のようにまとめられる。

①地形条件: 東部域は緩扇状地, 中央部は沖積谷 (不整形地盤構造) (標高 5~30 m), 西部域は後背低地 (標高 5~20 m)。

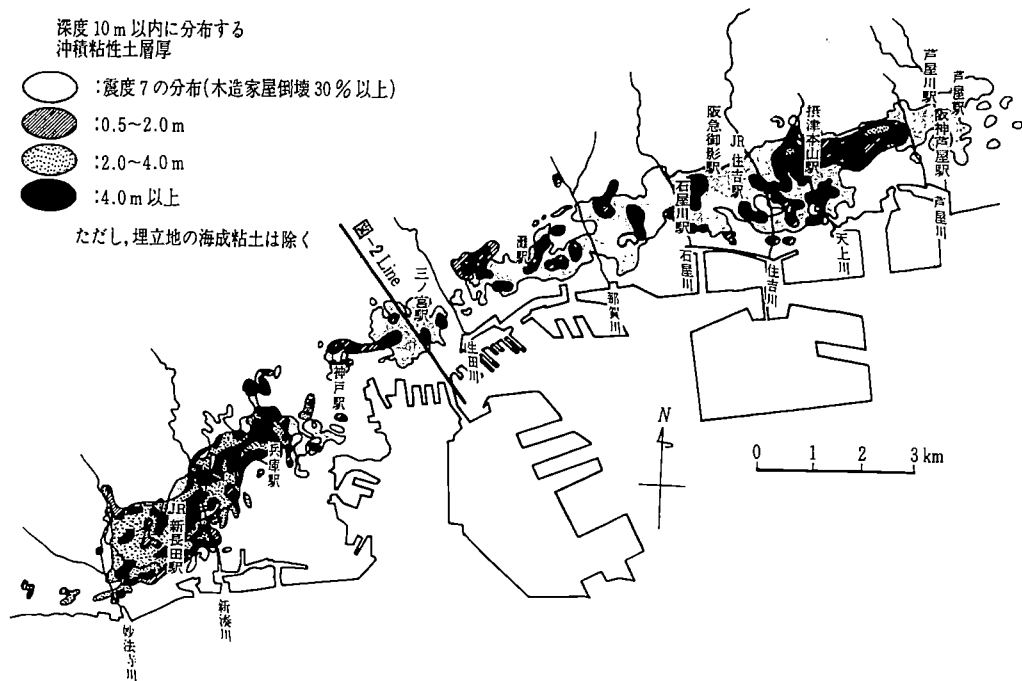
②地盤条件: 東部域および中央部域は, $N=30$ 前後の砂礫土 (Ag, Tlg 層) (厚さ 5~20 m), 西部域は $N \leq 5$ の粘性土 (Ac, Asc) (厚さ 4~6 m)。

③地質条件: 更新世後期以降の扇状地性堆積物の泥層, 砂層, 砂礫層。

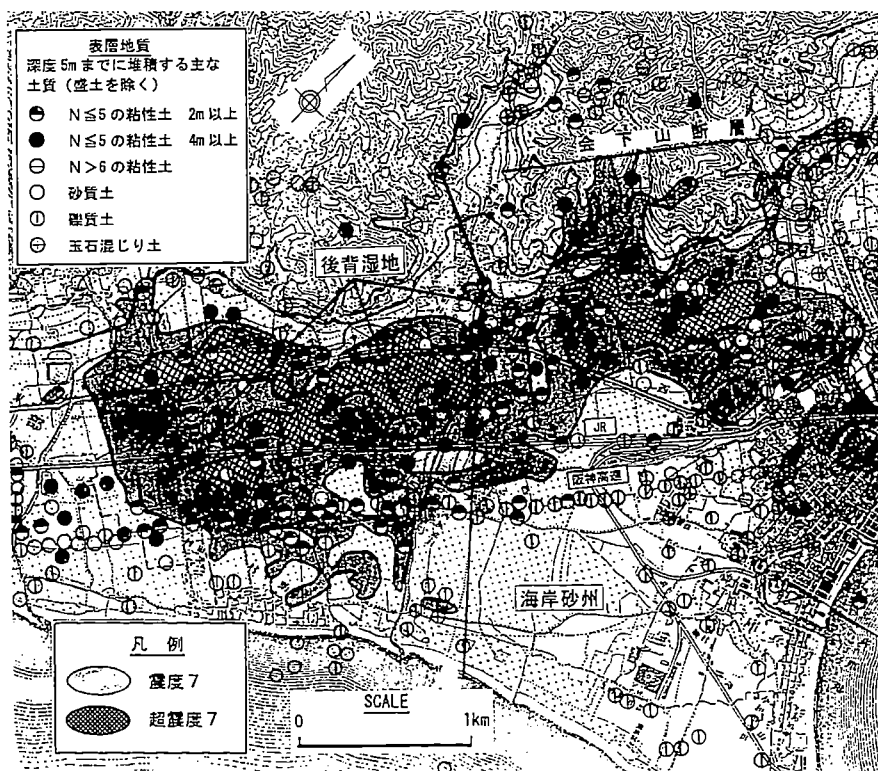
なお, 中段段丘層 (Tmg) 以下は, おおむね $V_s \geq 350$ m/s で, 下位の大坂層群とも, 工学的な地震基盤に該当すると思われる。平野地下の基盤 (花崗岩) の深さは, 1,000~2,000 m と推定されたが, 地盤の増幅は断層構造など, 複雑な基盤構造による影響の大きいことが推察される。

一方, 海成層 (Ac, As) の分布域で被害の揺れが少なかったのは, 地盤の非線形性によるものと推察される。

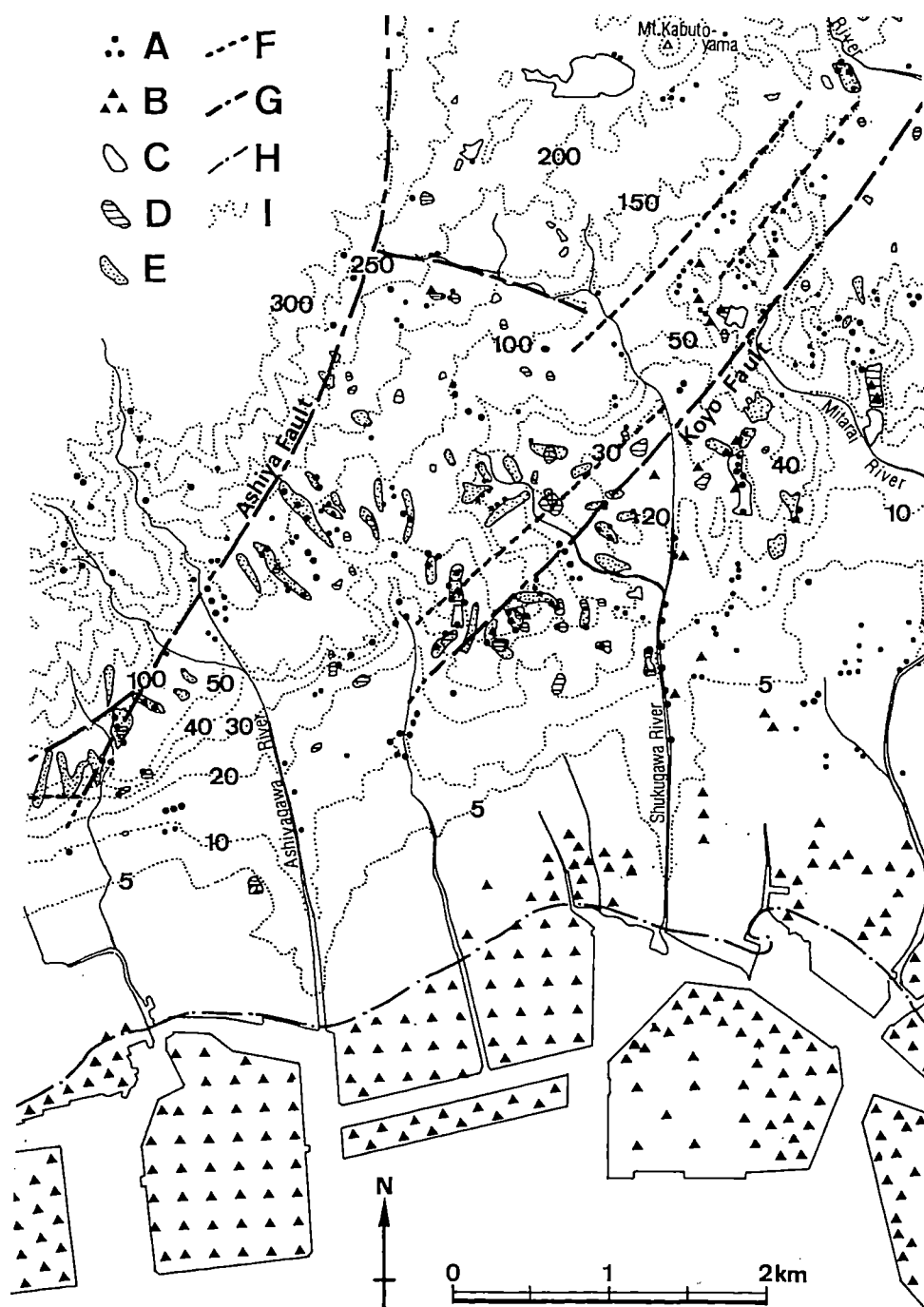
要約すると, 震災の帯の原因は, 大局的には, 地盤の揺れの違いに起因するものである。この地盤の揺れの違



図Ⅱ・3-7(a) 構造物被害と表層土質の関係 (石川ほか, 1996)



図Ⅱ・3-7(b) 神戸市西部域の構造物被害と表層土質の関係 (石川, 1995b)



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Ⅱ・3-8 西宮市夙川周辺の液状化・亀裂被害, 人工改变地と地質構造線 (三田村, 1995)

いは、浅い地形・地盤構造特性と、深い2次元的な地質構造に起因するものと考えられる。

以上、地形学、地質学の立場からの定性的検討結果について述べたが、次には正確な動的地盤モデルを与えた上で動的解析を行えば、被害度の関係は適確に説明できると考えられる。

3.2 地震動特性

3.2.1 強震動記録

ちょうど1年前にロスアンジェルスで発生した都市直下型のノースリッジ地震に比べて、今回の地震は桁違いに大きな被害を発生させた。ノースリッジ地震のモーメント・マグニチュードは $M_w=6.8$ で、今回の地震($M_w=6.8\sim 6.9$)とあまり変わらない。しかし、観測された最大加速度は1780ガルで、神戸の場合より2倍以上と非常に大きかった。それにもかかわらず被害は大変小さかったわけである。今回の地震において、大被害に結びついた地震動特性とはいったいどのようなものであったのかという重要な課題が残されている。今回の地震では、幸いにも震源断層の比較的近傍において、多くの強震動記録がとれた(TOKI, *et al.*, 1995; 岩崎, 1995)ことは特筆すべきことの一つで、地震動による多様な被害過程を解明する上で、これらの記録が今後大変重要な役割を果たしていくに違いない。しかし、被害と地震動の関係解明には、その地点での強震動を把握する必要があり、今回得られた強震動記録は多いといってもその数は限られていて、任意の地点の地震動を考察するにはまだまだ少なすぎる。

地表付近に出力される地震動を規制している因子にはたくさんのものがあると考えられるが、基本的には震源特性、伝播経路特性および地表面付近の地形や構造物を考慮した局所地盤の表面動特性の3つが挙げられる。それぞれについての的確な情報がなければ、地震動被害の発生過程を明らかにすることは困難である。

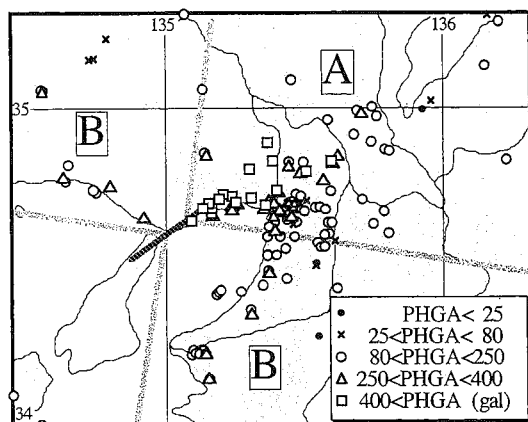
3.2.2 震源特性

(1) 指向性効果 (directivity)

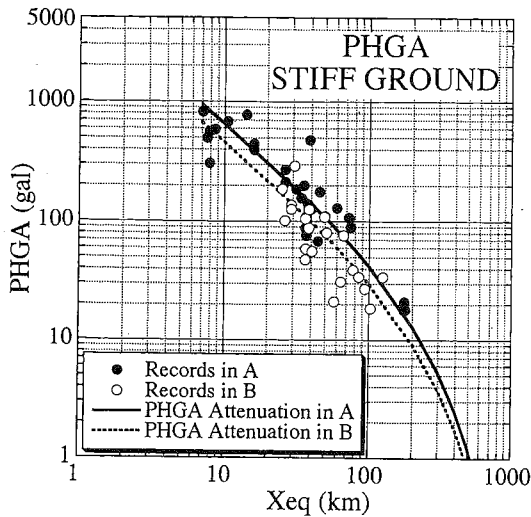
地震動は震源からの距離によって減衰してゆくが、これには幾何学的な減衰と伝播経路内物質の内部摩擦によるものとが含まれる。今回の地震の距離減衰について、震源断層からの距離と水平地震動の最大加速度との関係はカリフォルニア南部でまとめられたものと本質的には違いがなく、ごく一般的なものであったという。しかし、地震波は関与した震源断層の破壊面全体から放出されるため、震源断層近傍での地震動の減衰に関連した議論では点震源の仮定は成り立たない。また、破壊によるすべりは一般に断層面に平行であるため、その放射特性

により地震動の波形や振幅は方向によって大きく異なり、破壊(断層)の進行方向にはより大きな地震動が放出されることになる。このように方向に強く依存する現象は指向性効果(directivity effect)と呼ばれ、内陸型の地震で、とくに横ずれ断層を伴ったものではごく一般に見られるが、1906年のサンフランシスコ地震ではこの効果が大きく現れ、サンアンドレアス断層に沿って幅約10 km、長さが数百 km に及ぶ非常に細長い帯状の大震度域が形成された。

図Ⅱ・3-9には震源近傍の地震動記録から得られた地震動の水平加速度の最大値(PHGA)の分布(EJIRI, *et al.*, 1996)を示す。図に見られるように、最大加速度値は同じ地域内であっても必ずしも同じではなく、震源特性以外の影響も大きく受けているとみられるが、全般的に見て断層の軸方向の地域に分布している加速度の方が側方のものより大きいことは明らかである。図Ⅱ・3-10はこれらのうちで、硬質地盤(沖積層の厚さが10 m 未満または洪積層の厚さが10 m 以上)上で観測された最大水平加速度と等価震源距離(X_{eq})との関係(EJIRI, *et al.*, 1996)を示したもので、局所的な地盤の違いによる影響は除かれている。ここで用いられている等価震源距離とは、ある広がりを持つ震源断層からの平均的な距離に相当している。図に示されているプロットおよび回帰曲線は図Ⅱ・3-9の断層からの方位の違いによって領域(A, B)毎に分けられている。図から明らかなように、それぞれのプロットのばらつき具合はそれほど大きくなく、断層の軸方向に相当する地区の加速度の方が側方にある地区のものより1.5倍くらい大きくなっている。



図Ⅱ・3-9 地震動の最大水平加速度の分布
(EJIRI, *et al.*, 1996)



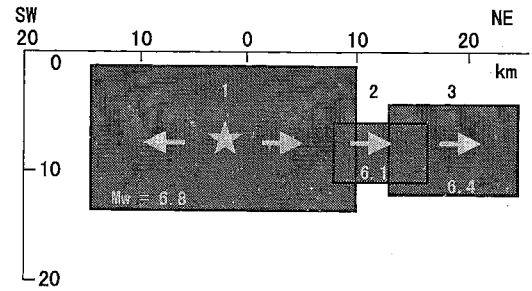
図Ⅱ・3-10 等価震源距離による地震動の最大水平加速度の距離減衰 (EJIRI, *et al.*, 1996)。観測点は硬質地盤上の地点。

(2) 長周期実体波の放出過程

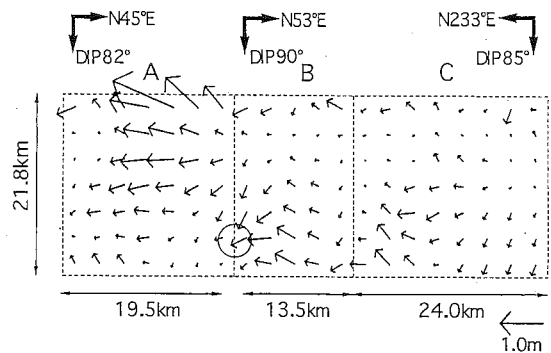
地震を発生させた断層破壊面の形成過程の解明は、このまわりに設置されている多くの地震計の記録波形を解析することによって可能となる。これは断層破壊に関するいくつかのパラメータが与えられれば、理論的に震源近傍における地震波形を合成できるということに基づいている。震源過程は初期条件としての地震波の生成を制する点で大変重要である。今回の地震でも解析結果がいくつか報告されているが、大局的に見てその震源パラメータには大きな相違はない。

震央距離が 30° ~ 100° の遠地震観測点の記録には、マントル内の単純な経路を伝播した実体波 (P 波や S 波) は反射波や他のノイズとなるような波とは時間的に分離してくるために、比較的精度の良い波形計算が可能となり、震源の破壊過程を解析する上で一つの利点となっている。菊地 (1995) はグローバルネットワークによる地震計記録を用いて今回の地震の断層モデルの解析を行った。個々の地震波形の特徴から、破壊の継続時間は総量で10秒前後であって、震源機構がそれぞれ違う複数のイベントからなる地震として位置づけられることを明らかにした。図Ⅱ・3-11に得られた震源モデルの断面を示す。

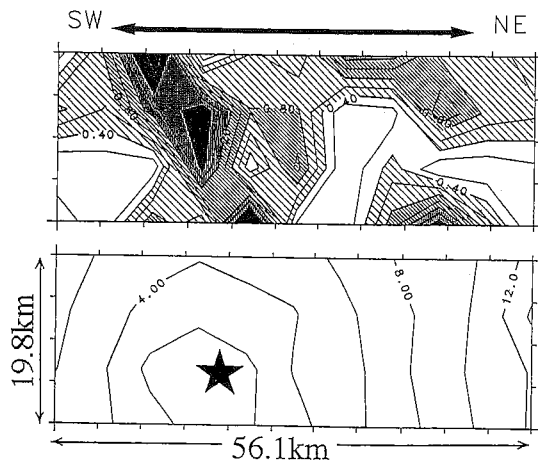
一方、SEKIGUCHI *et al.* (1996) は、震源域周辺で観測された強震動記録を用いて断層形成過程のインバージョンを行った。このような震源に比較的近い観測網の地震記録を用いた波形インバージョンでは、さらに



図Ⅱ・3-11 グローバルネットワークの地震記録から求められた断層モデルの断面 (菊地, 1995)



図Ⅱ・3-12 ローカルネットワークの強震記録から求められた断層モデルの断面 (SEKIGUCHI, *et al.*, 1996)。矢印はスリップベクトルを表す。



図Ⅱ・3-13 加速度の包絡波形インバージョンから求められた断層モデルの断面 (KAKEHI, *et al.*, 1996)。上：短周期地震動生成強度。濃い部分ほど放射強度の高い部分を示す。下：破壊の伝播速度。コンターは伝播時間(秒)を示す。

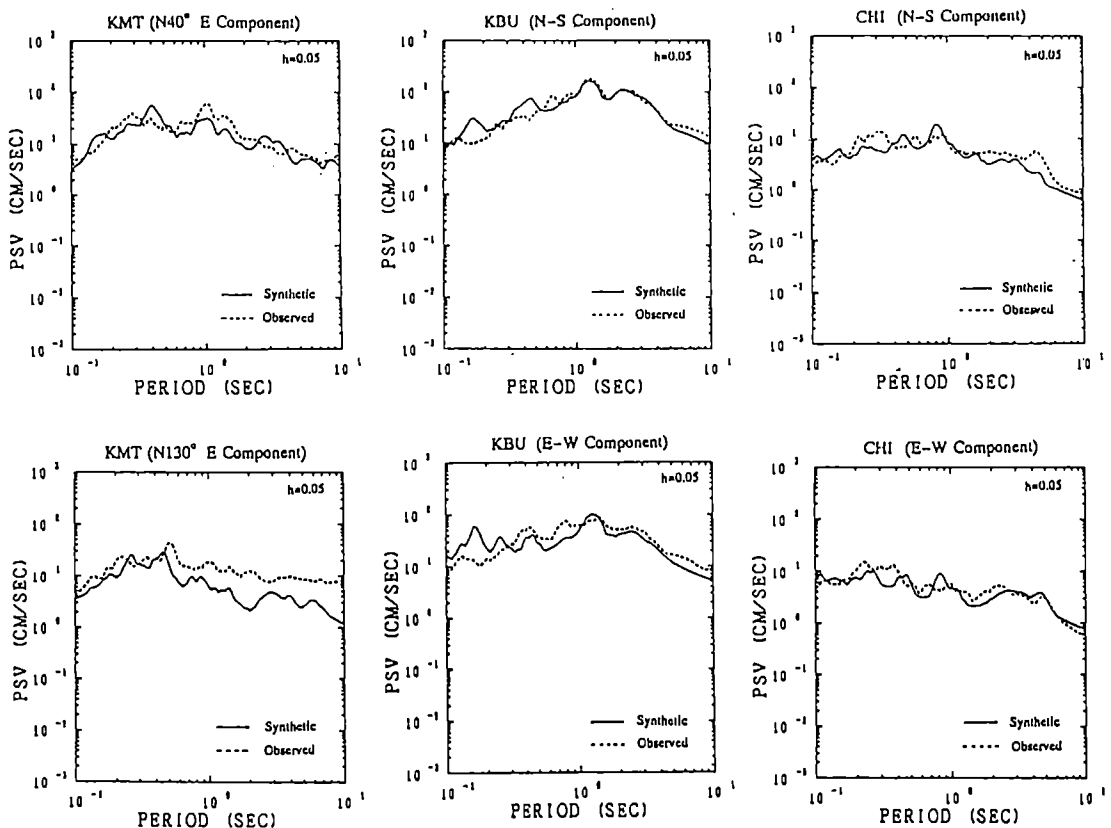
微細な断層破壊過程の解析が可能で、すべり量の分布特性（図Ⅱ・3-12）やその時間的変化が解析されている。この解析のために必要となる正確な断層の位置に関しては、本震直後の余震分布の考察と震源断層近傍の地震記録による粒子運動軌跡の理論的考察からこれを特定している。

(3) 短周期実体波の放出過程

上述したように、長周期実体波を用いれば、震源での断層破壊過程を解析できるが、被害と直接関連するような地表面の応答特性の議論では、数秒以下の高周波地震動の生成を考慮する必要があり、上述の方法では解析精度の点から困難となっている。これを克服する一つの方法としてはアスペリティの高周波加速度特性の解析を基本とした破壊過程インバージョン（PITARKA, *et al.*, 1995）が有効となる。この強震動予測の方法は、その震源域内で発生した小地震の記録を経験的グリーン関数

として用い、これらをいくつか重ね合わせて波形合成を行う IRIKURA (1986) の方法が基本となっている。この方法による利点は、小地震の記録の中には地震波の伝播経路特性や観測地点付近のサイト特性が含まれているために、大地震の波形記録との比較ではこれらの効果が相殺され、残る大地震の震源パラメータだけが必要となるが、これには、震源スペクトルに周波数の逆2乗スケーリング則を適用した重ね合わせが行われる。

このような手法によって予測された強震動波形と実際の観測波形との比較による評価は構造物の耐震性の問題のみならず、一般の地震波動の形成過程を理解する上でも大変重要な意味を持つと考えられる。図Ⅱ・3-13は観測された加速度波形の包絡線形状から、断層面内での高周波地震動の生成過程を解析した結果を示しており、高周波地震動の放射強度が断層面内で一様でなく、不均質な分布をしていることがわかる。放射強度の高い部分



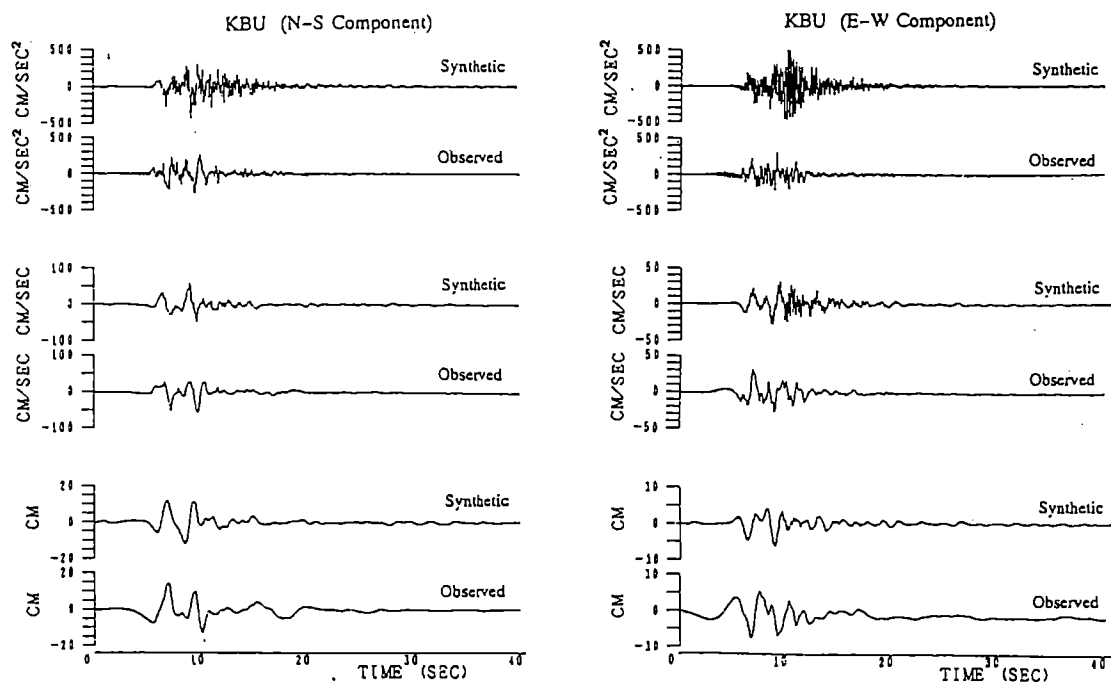
図Ⅱ・3-14 疑似速度応答スペクトル (KAMAE and IRIKURA, 1996)。

KMT: 大阪府泉南郡熊取町京大原子炉実験所原子炉建屋基礎盤上, 北緯34.382, 東経135.354, 洪積地盤上,
KBU: 神戸大学, 北緯34.725, 東経135.240, 岩盤上トンネル内, CHI: 大阪府千早赤坂村, 北緯34.439, 東経
135.659, 岩盤露頭上。

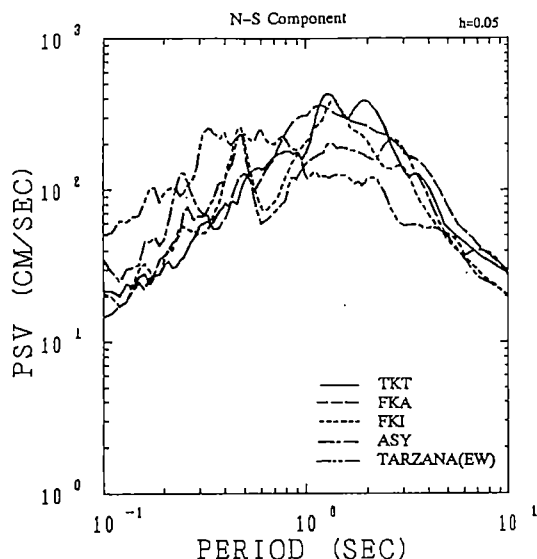
は通常報告されている3つのアスペリティに対応しているとみられるが、神戸側の断層セグメントに相当する3番めのアスペリティとの対応については、他の低周波地震動を対象とした波形インヴェージョンの結果と微妙に異なっている。この部分は、断層面を包含する物質の不均質な破壊特性が周波数効果となって現れた可能性がある。

このモデルを基本に、淡路島と神戸側で発生した $M=4.5$ と 4.7 の2つの余震の記録を経験的グリーン関数として重ね合わせることで本震の波形が合成されている(KAMAE and IRIKURA, 1995)。合成された波形と観測されたものを比較すると、加速度から変位に至るまで、波形全般にわたってその位相および振幅を含めて比較的良く一致しているだけでなく、さらに後続の波までも良く再現されているように見える。このように良好な結果が得られたことから、各周波数領域についてもその一致性が期待されるが、これらから得られた疑似応答スペクトルは図Ⅱ・3-14に示されているように、予想どおり観測値と良い一致を見せている。したがって、各波形が全体として大変良く合成されていることから、大地震の強震動波形はその震源域で発生した余震の記録を用いることによって、かなりの確度で再現しうることが明らかになったと言える。

今回の地震では震度Ⅶの典型的な強震ゾーン内には強震動記録がほとんど得られていないため、これらの地域の強震動がどのようなものであったかを再現することは地震工学的に極めて重要な課題である。震度Ⅶのゾーンを横断するアレー観測の余震記録から同様の解析によって得られた合成波形と観測波形の比較の一例を図Ⅱ・3-15に、またそれらの速度応答スペクトルを図Ⅱ・3-16に他の観測例も含めて示す。この図でTKT(JR, 鷹取)とFKA(大阪ガス, 葺合)は震度Ⅶのゾーンのごく近傍の観測記録によるもので、FKI(福池小学校)とASY(芦屋精道小学校)はこのゾーン内において観測された余震に基づく合成波形の応答スペクトル(入倉, 1996)である。これらは非常によく似た形をしており、震度Ⅶのゾーンの特性が現れていると見られ、全体的な特徴として、最大ピークは $1\sim 3$ Hz付近にあり、30 kine程度の大きさを持っている。震度Ⅵの神戸海洋気象台の応答スペクトルを見ると、最大応答速度値はそれほど異なっていないが、ピーク周波数がこれに比べてわずかに高いため、この周波数領域では応答速度がかなり小さく、 $1/3\sim 1/2$ となっており、この周波数領域のピーク値が構造物の大きな被害と結びついている可能性がある。さらに図には、1780ガルを記録したノースリッジ地震におけるTarzana地区(日本の震度Ⅵの地域



図Ⅱ・3-15 合成波形と観測波形の比較 (KAMAE and IRIKURA, 1995)。



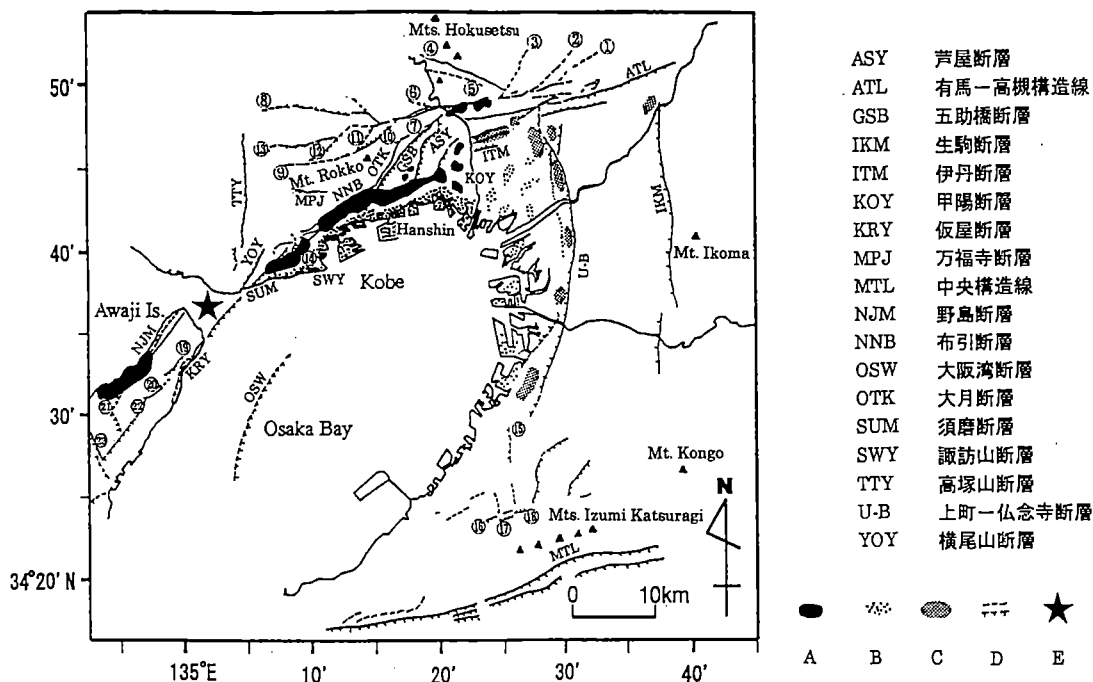
図Ⅱ・3-16 震度Ⅶのゾーン内および近傍の地点における観測波形または計算波形の疑似応答速度スペクトル (入倉, 1996)。

に相当)の強震観測記録によるものも比較のために示されているが、全体の様相が他のものとは大きく異なり、とくに1~0.3 Hzでは応答速度はかなり小さく、このような違いは被害特性との関連でその重要性が示唆される。

3.2.3 伝播経路特性

(1) 被害分布特性

震源から放射された地震波はすべての方向に伝播し、均質な物質内を直進するが、他の物質との境界では反射したり、屈折したり、あるいは回折したり、さらには他の波と干渉したりする。これらの効果もまた地表面の地震動に大きく影響すると思われる。気象庁による震度Ⅶが分布するゾーンはちょうど平地部と山地の境界付近にあって、地形や地下構造が水平方向に急変する複雑な部分に隣接している (図Ⅱ・3-17)。このような分布特性はさらに詳しい調査によっても明らかにされているが (中川ほか, 1995)、この被害が激甚であった地区は深部地下構造、表層の地盤構成や地形など複雑な構造要素の複合効果によるとみられ、それぞれの効果を定量的に評価することは大変困難である。今回の地震では、芦屋



図Ⅱ・3-17 活断層、液状化・側方流動、震度Ⅶ (気象庁) などの分布。A: 震度Ⅶの分布 (気象庁), B: 液状化および側方流動化被害の分布, C: 周りに比べて構造物の被害が著しかった所, D: 活断層および撓曲帯, E: 兵庫県南部地震の震央。 数字 (○の中) が付してある線は活断層を表す。

断層、甲陽断層、伊丹断層などの近傍および延長上と思われる付近に多くの構造物被害や地盤変状が見られた。これらは余震分布や断層の変位量から見ると、地震断層が原因であるとは考えにくく、地盤構成や地下構造の特性に起因する可能性が非常に高い。

宝塚市周辺は被害が非常に大きい地域であったが、その被害はまた川西市や池田市へと東の方にも分布している。とくに震源から遠く離れている豊中市でも全壊家屋が多く見られ、その全壊数は500戸を越えた。大阪ではこの地区の被害が最も大きい、これらの被害の集中している部分は、とくに南北方向に延びるという特徴がある。大阪市内では、液状化や側方流動等の地盤変状と直接関係のない家屋の損壊はそれほど多くはないが、界筋の一部に南北に細長く延びた被害集中域が存在する。上町台地では地震による被害はほとんどなかったが、上町台地の西方、界筋にある三越デパートのビルが柱や壁などに大きな被害を受け、使用不能となったほか、外壁や大きなガラスが割れる等の被害が軒並み1 km 位にわたって見られ、道路も数 cm 沈下した所が何箇所も見られた。このような変状はすぐ隣の御堂筋や松屋町筋、谷町筋、その他この付近では観察されていない。

界方面ではやはり南北方向に延びた狭い範囲に被害が見られ、浜寺船尾町あたりから東羽衣を経て加茂に至る北北東—南南西の細長いゾーン（幅2~300 m で長さ約3 km に及ぶ）に被害が集中した。しかし、隣の段丘堆積物上にある家屋にはほとんど被害がなかった。

前述したとおり、震度Ⅶのゾーンや大阪およびその周辺での液状化とは直接関連がないとみられる被害は、大きな断層の近傍にこれと平行して、細長く帯状に分布したということが一つの特徴として挙げられる。被害の多くは断層直上よりも、相対的に落ち込んでいる側に圧倒的に多い。これらの被害分布を説明する一つの可能な解釈として、堆積層の分布構造や深部の基盤形態に起因する地震波のフォーカシングによる効果を挙げることができる（中川ほか, 1995; PITARKA, *et al.*, 1996; SHIONO, *et al.*, 1996; 志知, 青木, 1995.)

(2) 地下構造の違いによる波線特性

地震波は地層境界で屈折し、層内では直進すると考えれば、 j 番目の地層中を伝わる地震波線に平行な単位ベクトルを $\mathbf{n}_j$ とし、速度 v_j を持つ j 番目の地層から、速度 v_{j+1} を持つ $(j+1)$ 番目の地層中に入射する地震波の方向は

$$\mathbf{n}_{j+1} = M_j \mathbf{n}_j - M_j (A_j - B_j) \mathbf{N}_j$$

で表される (SHIONO, *et al.*, 1996)。ここで、 $M_j = v_{j+1}/v_j$,

$\mathbf{N}_j$ は j 番目の境界面に垂直な単位ベクトルで、 $(j+1)$ 番目の地層を向く。また、 $A_j = \mathbf{n}_j \mathbf{N}_j$, $B_j = (M_{j-1}^2 + A_j^2)^{1/2}$ であり、 $\mathbf{N}_j$ は $(j+1)$ 番目の地層を向いているので、 A_j は常に正となる。

図Ⅱ・3-18は上町断層を横切る淀川河川敷におけるP波とS波の反射法地震探査実験の結果について、P波断面を基に地質学的な解釈を加えたものである。断面には基盤内の断層面の形態が現れていないので、これを適当に仮定せざるをえない。この付近の高密度重力測定による異常分布を考慮し、ここでは関数 $\text{erf}(\eta)$ を用いて次式のように仮定した。

$$s(x) = z_c + w_z \text{erf}((x - x_c)/w_x), \quad (x \geq x_c),$$

また、

$$s(x) = z_c - w_z \text{erf}((x_c - x)/w_x), \quad (x < x_c),$$

ここで、

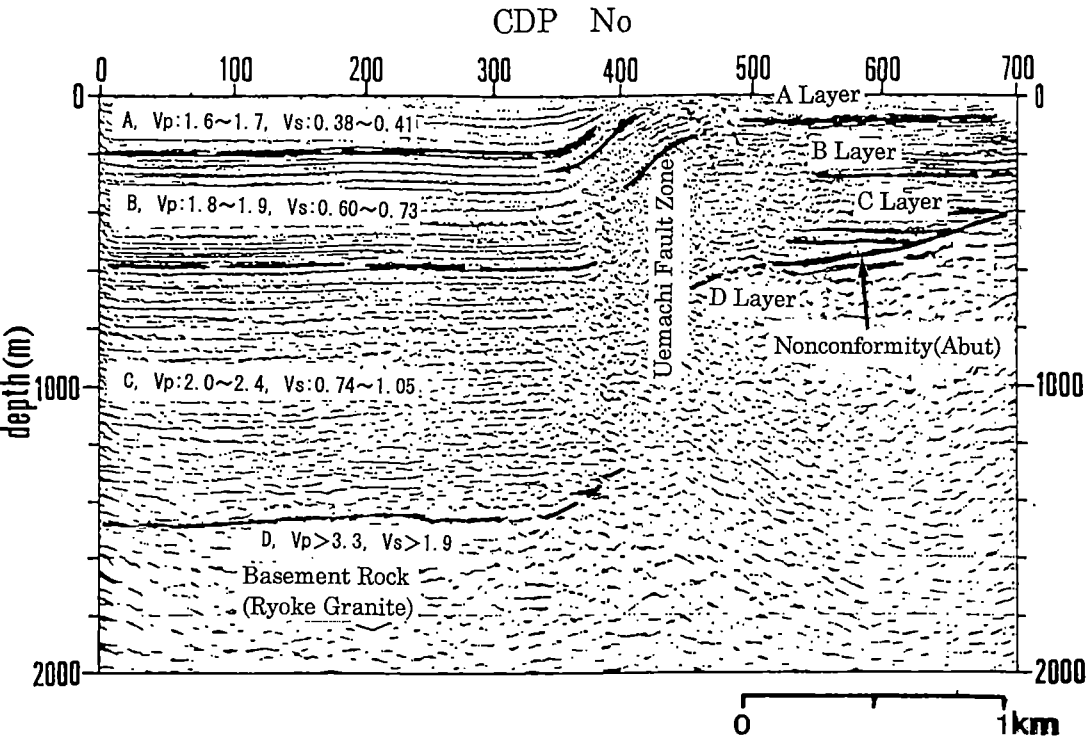
$$x_c = (x_R + x_L)/2, \quad z_c = (z_R + z_L)/2,$$

$$w_x = (x_R - x_L)/2, \quad w_z = (z_R - z_L)/2,$$

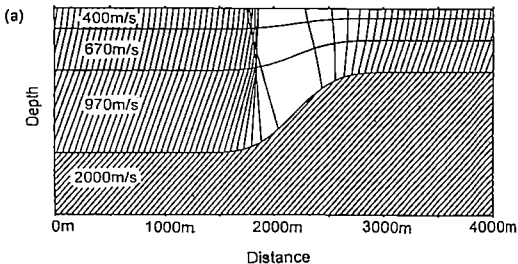
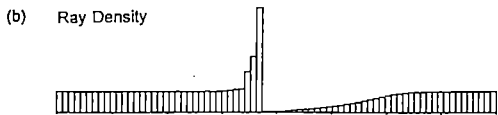
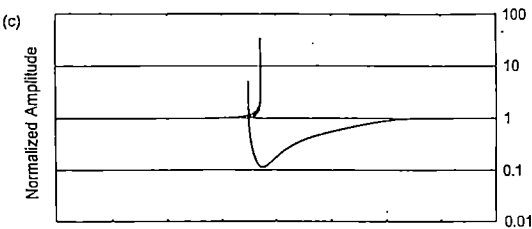
$$\text{erf}(\eta) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^\eta \exp(-\xi^2) d\xi$$

表Ⅱ・3-1には計算に用いた地下構造モデルについてのそれぞれの定数の値を示す。図Ⅱ・3-19に書き込まれた直線群はSH波の伝播経路を表すが、明石海峡の地下10 km 付近からの地震波の到来を考え、入射角（鉛直方向から測った波の入射する角度）を40°とした場合を示している。境界面が湾曲していることからこれがレンズのような働きをして、断層の西側に波線の集中するゾーンが生まれ、また逆に、その東側には波線のまばらな領域が発生していることが定性的にわかる。大阪管区気象台はちょうどこの部分に相当しているが、公表された大阪の震度はⅣとやや低く見積もられたとみられ、ここで得られた震度や最大加速度などを大阪全体の代表値とすると、かなり過小に評価する可能性がある。地下構造が局所的に大きく変化しているような地点の観測値はその地域の代表値としては適当でない。

(b), (c)は波線の地下構造による効果をやや定量的に見たもので、(b)は地表に到達する波線の粗密を棒グラフによって示したものである。一定間隔で基盤側から入射する4000本の波線について、地表のどの位置に到着するかを計算し、図に示した区間毎に到着する波線の個数を相対的に示したものである。図の両端の境界面が水平な部分では一様であるが、断層のすぐ西側で極端な波の集中が見られる。また、その東側では広い範囲にわたって



図Ⅱ・3-18 上町断層を横切る深度断面解釈図（淀川河川敷における P 波と S 波の反射法地震探査の結果から）
(NAKAGAWA, *et al.*, 1996)。



表Ⅱ・3-1 地下構造モデルの定数値

地層	P 波速度 m/s	S 波速度 m/s	密度 g/cm ³	地層境界面の深さ			
				x_L	z_L	x_R	z_R
A	1650	400	1.5	1800m	-200m	2600m	-90m
B	1850	670	1.8	1800m	-600m	2600m	-300m
C	2260	970	1.9	1800m	-1400m	2600m	-600m
D	3500	2000	2.3				

波の到着の少ない領域が見られる。

(c)には 3 枚の境界面で屈折しながら地表に到着した SH 波の振幅を計算した結果を示す。基盤側で一定の振幅を持った SH 波が地表に到達したときの振幅を計算したものであり、多重反射による増幅作用の効果は考慮されていない。計算結果は、図の両端の境界面が水平な部分での振幅を基準にした相対値で示している。(b)で求め

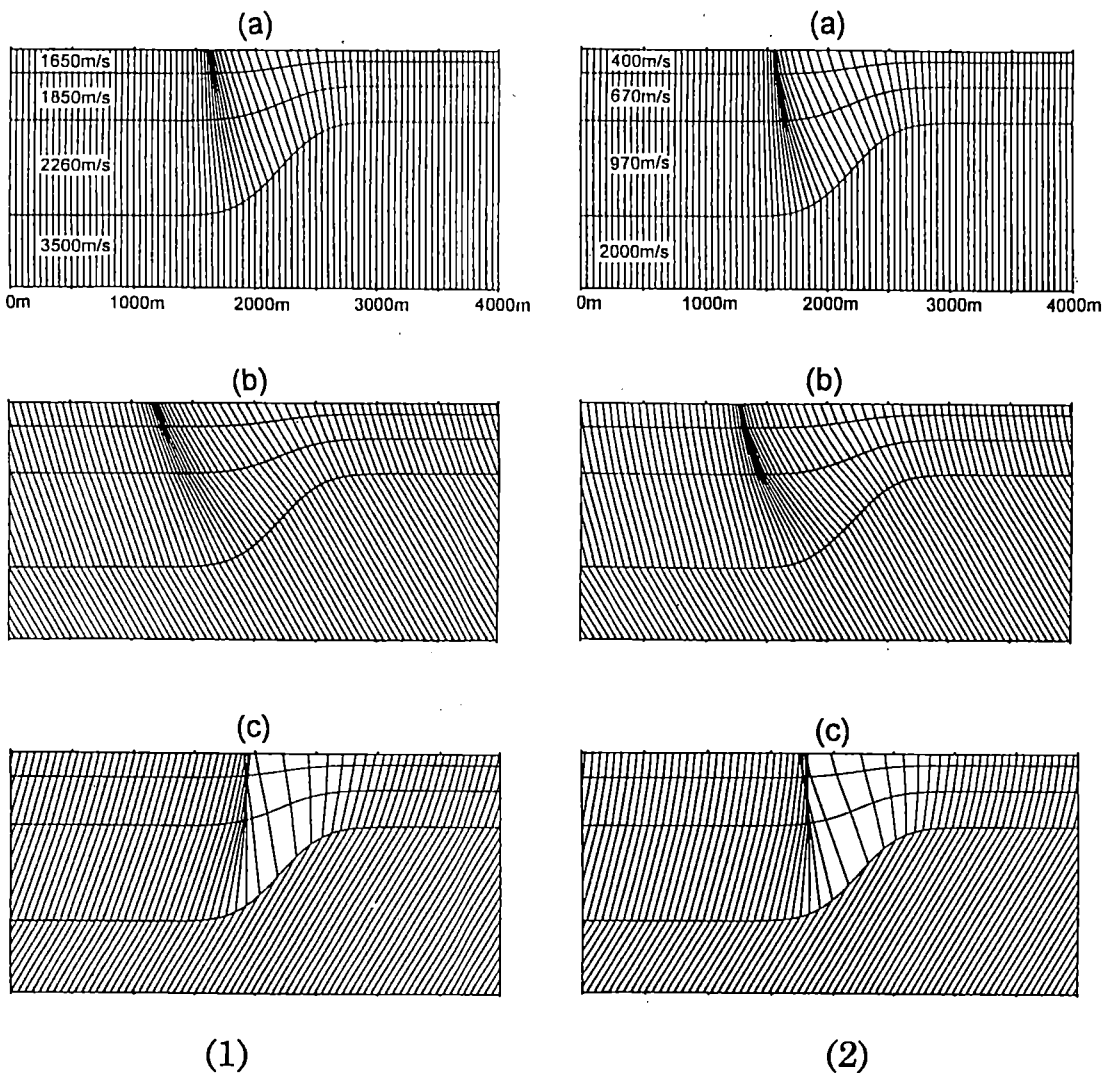
◀ 図Ⅱ・3-19 基盤入射角が40°で SH 波が入射した場合の
(a) : 波線経路, (b) : 波線密度,
(c) : 正規化された振幅
(SHIONO, *et al.*, 1996)。

た4000本の波線の各々についての結果を、到着点を横軸に、縦軸には振幅を対数目盛でプロットした。断層の西側で波線が集中する所では、振幅が10倍以上になることが予想され、断層の東側の波線が拡散する領域では1/10以下になることが予想される。ただし、この計算では波長が地下構造の変化に比べて無視できる程度に小さいことを仮定している。現実には10 Hzの波でも波長が数十mあり、地下構造の変化に比べて、無視できるほど小さくないので、ここでの計算値ほどは極端な振幅の変化はないと考えられる。

さらに、図Ⅱ・3-20は同様のモデルに入射角 α が0

度、および ± 30 度の地震波を基盤に入射した場合のフォーカシングの効果を計算したものである (SHIONO K., *et al.*, 1996)。(a)には計算に用いた地下構造のモデルも示している。いずれも断層帯の西側に波線の集中するゾーンがあることがわかる。S波、P波のどちらの場合もあまり違いがなく、地震波は光の場合と同様に、速度が変わる境界面で、あたかもレンズのように屈折する。したがって、このような地下構造を有する地域では地震工学的な対策が必要になってくるであろう。

グラベンと呼ばれる地溝状(凹地状)構造の場合、凹地の中央部に波線の集中が見られ、特に両壁が高角



図Ⅱ・3-20 屈折S波(1)とP波(2)の波線経路。入射角は(a): $\delta=0^\circ$ (b): $\delta=-30^\circ$ (c): $\delta=30^\circ$, 速度構造は(a)に示す。(SHIONO, *et al.*, 1996)。

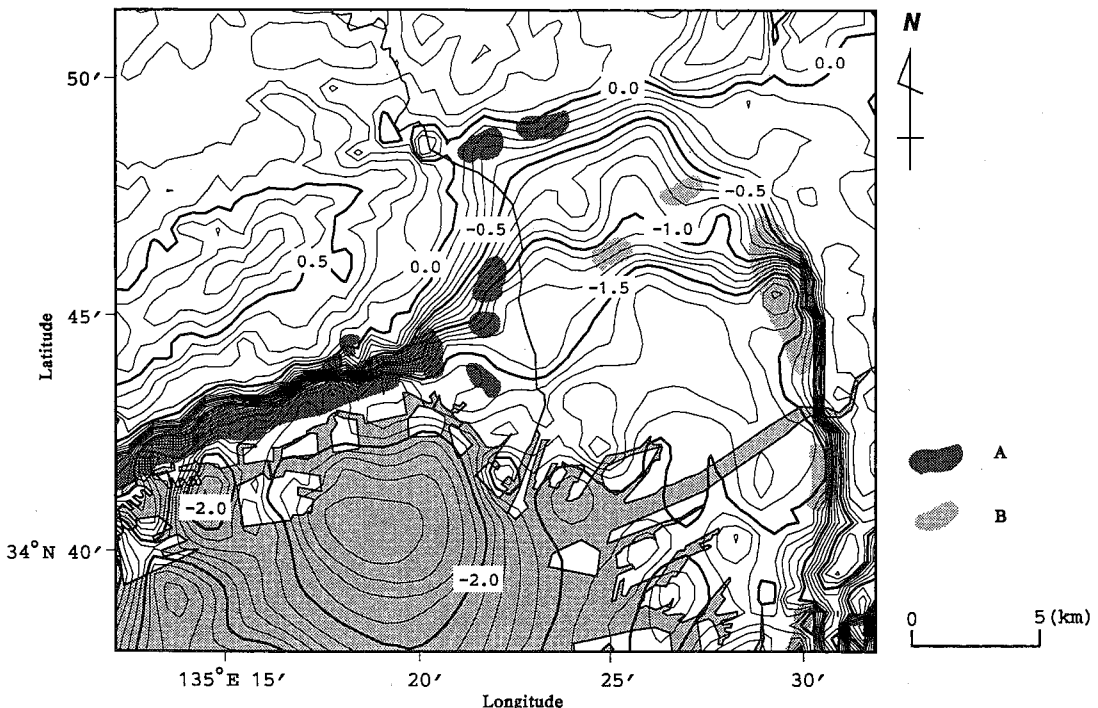
で、底の深い構造のグラベンでは2重3重に波が集まり、トラップされることになり、その中央部では激しい地震動の増幅が予想される。これは宝塚をはじめ有馬—高槻構造線付近に見られる断層に平行な顕著な被害ゾーンは、このような効果が直接現れた地域である可能性が高い。今回の多くの被害は活断層付近に沿って集中しているように見えるが、とくに被害が激甚であった低地の震度Ⅶのゾーンは、重力異常から見ると、その下の基盤が海側に非常に急な角度で傾斜しており、断層である可能性が極めて高い。このゾーンが、主として種類の異なるいくつかの波の干渉とか、あるいは屈折や全反射などによるフォーカシングの影響によって形成された可能性が高いと結論づけられるであろう。現在いくつか行われている反射法地震探査の結果はこのような地下構造を裏付けている。

(3) 深部地下構造特性

上で検討したようなフォーカシングがどのような地点で有効に働くかは深部地下構造に大きく依存する。このような構造を的確に把握するためには深層のボーリング

調査や反射法地震探査が大変有効である。膨大なコストを伴うこれらの調査も震災後多くの地点でなされ、これまで未知であった地下構造がかなりの点で明らかにされた。しかし、大阪堆積盆地という範囲では、その数は大変に限定されていて、面的に地下構造を明らかにするところまでには至っていない。ここでは深部基盤の構造特性を知るために重力異常の値を用いて地下構造解析を行った結果 (NAKAGAWA K., *et al.*, 1996) と被害分布特性についての関係を見てみよう。

重力異常から地下構造に関する情報が得られるが、自由度が高いため、一義的に構造決定することはできない。しかし、大阪平野地下の先新第三系から成る基盤の主要な部分は花崗岩であって、多くの場合、その上を数百万年前以降の比較的軽くて柔らかい堆積物層が被覆しているために、全体としては近似的に二層構造モデルを適用できる。これまで反射法による地下構造探査や深層のボーリング掘削がたびたび行われ、基盤深度に関する情報がかなり得られている。地表に露出している基盤岩の標高および埋没している基盤岩の深度と重力異常 (フ



図Ⅱ・3-21 三次元重力解析による阪神・大阪周辺の基盤岩深度分布 (単位は km)。

A: 震度Ⅶの地域 B: まわりより被害が大きかった地域

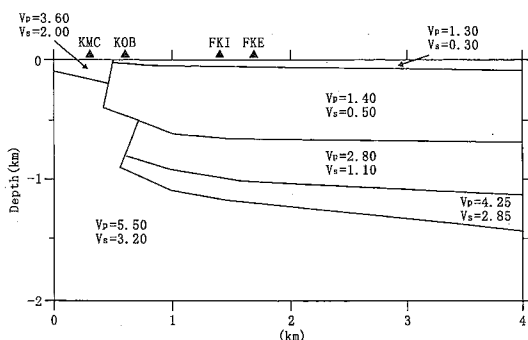
ボーリング資料、反射法地震探査および地表調査のデータを基準にしてフリーエア異常値から計算 (井上ほか, 1996)。

リーエア異常)との間にはかなりのばらつきがあるが、このばらつきは地球内部構造によるより深いところの影響が混在された結果であり、このばらつきを最小にするような条件から、深部構造による広域的重力異常が見積もられる。フリーエア異常からこの広域的な影響を差し引けば、被覆層の厚さによる重力異常、すなわち地表付近の地下構造による重力異常が得られる。この広域的な重力の影響を除去した残りの重力異常と基盤深度との間にはきれいな直線性が見られるので、この関係を用いれば、通常の複雑な重力解析を経ずとも、基盤深度分布の概略を容易につかめる。このようにして得られた基盤深度を初期モデルとし、地下の地震波速度分布から得られる密度情報を用いて、3次元の重力インバージョンを行った。得られた基盤岩の深度分布を被害分布に重ねて図Ⅱ・3-21に示す。いずれも被害の大きかった地域は基盤深度が急変する断層より少し海側に平行に分布しているのが良くわかる。

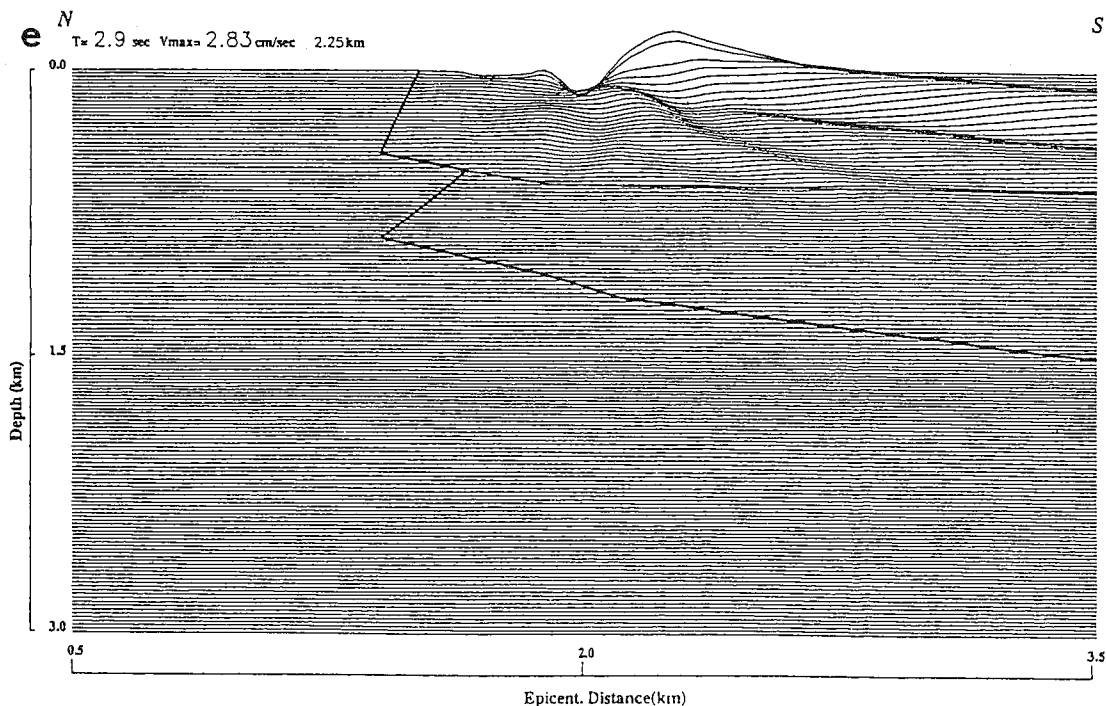
(4) 堆積盆縁辺部の強震動シミュレーション

前項で述べたように余震記録を用いた強震動波形の合成では、本震波形との比較において、かなりのレベルで

よく再現できることが明らかになっている。震源パラメータが明らかになっておれば、上記のような深部地下構造において地震動がどのように伝播してゆくかを解析することができ、比較的大きな地震の観測波形があれば、これとの比較によって解析法の妥当性の正否を判断できる。PITARKA, *et al.* (1996) は震災後に行われた反射



図Ⅱ・3-22 東灘区を通る NNE-SSW 方向の地下構造モデル断面 (PITARKA, *et al.*, 1996)
地震波速度の単位は km/s。



図Ⅱ・3-23 2.5次元差分法による地震動シミュレーション。図Ⅱ・3-22の地下構造モデルに対しての合成された地震動(速度波形)のスナップショット(入倉, 1996)。
地震発生から2.9秒後。露出している基盤から2次的に生成された表面波と下から上がってきた実体波が重なり合って大振幅の地震動が形成され、やがて2つの波は分離して振幅が小さくなる。

法地震探査や他の調査結果などから震度Ⅶのいわゆる震災の帯付近の地下構造モデルを図Ⅱ・3-22のように設定し、地震動のシミュレーションを行った。その際震源として震災の帯から約8 km 北に発生した余震を考え、震災の帯を横切る地点の波形を2.5次元の差分法によって解析し、余震の記録波形と比較している。

その結果を見ると、地震動（速度振幅）が大きくなる位置はちょうど震災の帯の部分に一致し、さらにその合成波形は観測波形と位相を含めて良く一致している。入倉（1996）は図Ⅱ・3-22の地下構造モデルに、先の余震に対応させた横ずれ断層破壊を想定し、そこで発射された地震波が花崗岩基盤中を伝播し、大阪層群から地表に現れる様子を4枚のスナップショットとして描いている。例としてこれらの内の1枚を図Ⅱ3-23に示す。

結局、基盤内では地震波速度が一樣なので、震源から放出された実体波は球面を描きながら地表面に伝播して

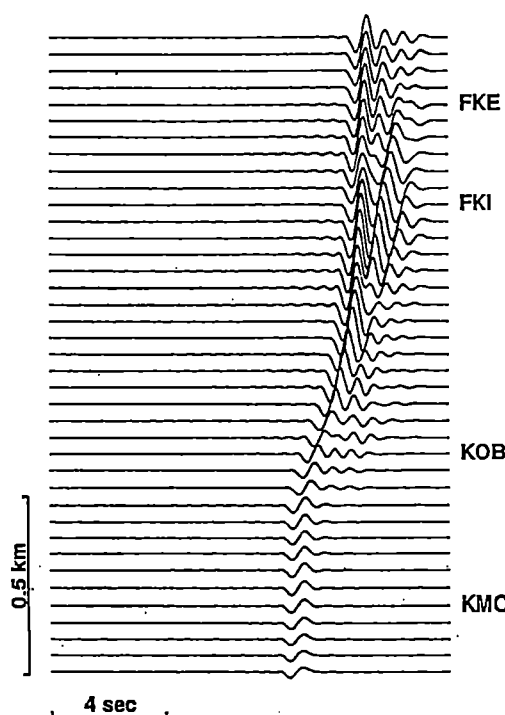
ゆくが、分厚い堆積層に入射すると遅い速度のために上方に向きを変え進行する。この波が地表面に伝わる以前に、基盤が露出している所では直接に地表に達する。地表に現れた波は堆積層との境界で、堆積層の表面に2次のな表面波を形成する。これが表面に沿って伝わり、やがて下から上がってきた実体波と干渉することで振幅が増大し、その後これらは分離して振幅が小さくなってゆく。ちょうどこの2つの波が干渉し合う所が震災の帯に相当している。図Ⅱ・3-24はこのような地震動シミュレーションによって得られた各地点における地震動再現波形と余震記録波形の比較を示す。これら2つの波形は良く合っていると言えるが、さらに細かく合わせるためには、厚さ10 m 位の軟弱な地層による増幅を加味しなければならないという。

したがって、フォーカシングのような特異な現象は、このような地下構造を有している堆積盆地縁辺地域に一般的に発現する可能性が高く、地下構造の細部にわたる

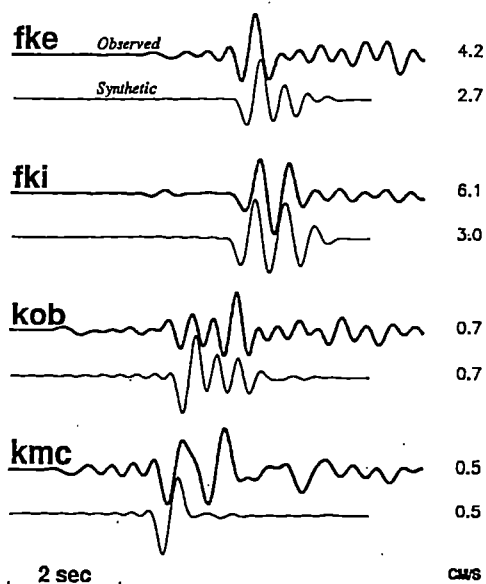
1995/01/25 23:15

VELOCITY TRANSVERSAL comp.

BAND PASS FILTERED 0.1 ~ 2.5 Hz



a



b

図Ⅱ・3-24 合成された地震動（速度波形）（左），合成された地震動と観測記録の比較（右），両者とも0.1～3 Hz のバンドパスフィルターを通した速度波形（入倉，1996）。

地質調査が今後の防災を検討する上で大変重要な課題となるであろう。

3.2.4 サイト特性

(1) 最大加速度分布の非一様性

震源から遠距離に限られたある小さな地域に注目して見ると、その地域付近の深部帯には一様な地震動が入射するものと考えられる。しかし、実際には今回の地震の被害状況を見ると、局所的に複雑な分布をしている例が多く報告されており、具体的な被害分布の例としては、より詳細に調査された震度Ⅶや、超震度Ⅶの分布（石川ほか、1996）からも読み取れる。これらの複雑な地震動特性は、深部地下構造に関する地震波の伝播経路特性よりも、地表付近に存在する材料の動的特性に依存しているように見える。図Ⅱ・3-25（EJIRI, *et al.*, 1996）は最大水平加速度の距離減衰を示すが、図Ⅱ・3-10の硬質地盤と対応していて、図Ⅱ・3-9に示される軟弱地盤上における観測記録から得られたものである。この2種類の地盤上の水平最大加速度を比較すると、軟弱地盤における最大加速度は地震動の増幅により2倍近く大きくなっていて、プロットの分散幅も大きくなっていることが明かである。さらに、等価震源距離が20 km 未満の所では30 km 以遠における距離減衰とは様相が異なり、回帰線よりかなり下方に位置し、軟弱地盤における非線形性の影響が大きく現れていると言える。このような傾向は硬質地盤には見られないことから

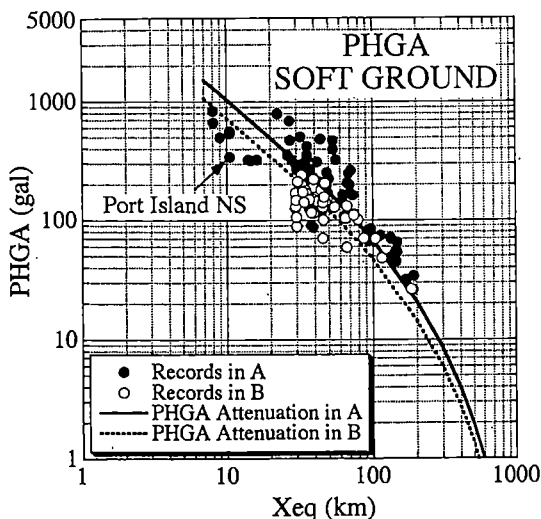
軟弱地盤特有のものと考えられる。また、鉛直地震動ではこのような非線形性の効果はそれほど大きくはない。図Ⅱ・3-26には水平および鉛直地震動の最大加速度の比（PHGA/PVGH）の関係を表すが、その比が0.7~4.0位まではほぼ一様に分布している。軟弱地盤上では分布幅が若干大きくなるが、等価震源距離が10~30 km の範囲で極端に小さな値を示しており、30 km 未満では大きな非線形効果が現れていると見られる。

(2) 地盤の不整形性効果

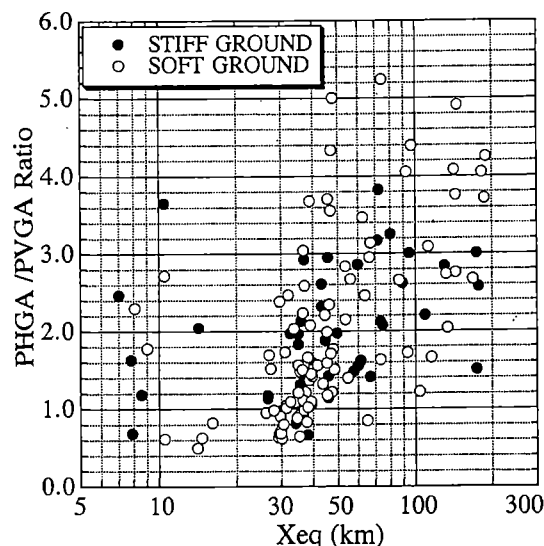
地震動は一般に表層付近のやわらかい地層の中で増幅されることが知られている。佐藤ほか（1996）はIRIKURA K. (1986) の方法を基本として、PITAR-KA, *et al.* (1996) の震源解を用い、 N 値50以下に対応している表層地盤の増幅特性を考慮して最大加速度の平面分布を計算した。その結果によると、表層地盤の増幅特性だけでも震度Ⅶのおおよその分布を説明できるとしている。

一方、さらにこの中の沖積層は海側に向かって、漸増していくが、これに注目して、竹宮（1995）はこのような不整形地盤を構成している軟弱地盤についての地震動シミュレーションを行っている。

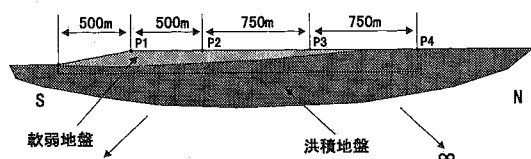
図Ⅱ・3-27に示されるように、くさび状の軟弱層（横波速度 $V_s=100$ m/s）が一様な堅い基盤層（ $V_s=1,000$ m/s）の上に被覆されているようなモデルにより、被覆層を FEM で、基盤層を BEM でモデル化し、



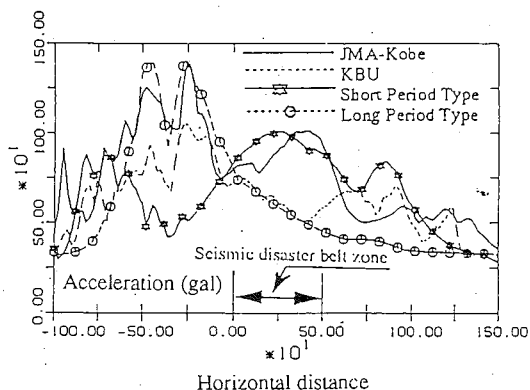
図Ⅱ・3-25 等価震源距離による地震動の最大水平加速度の距離減衰（EJIRI, *et al.*, 1996）。観測点は軟弱地盤上の地点。



図Ⅱ・3-26 等価震源距離による地震動の最大水平加速度/最大鉛直加速度の比（EJIRI, *et al.*, 1996）。



図Ⅱ・3-27 不整形軟弱地盤の地震動シミュレーションのための地下構造モデル。

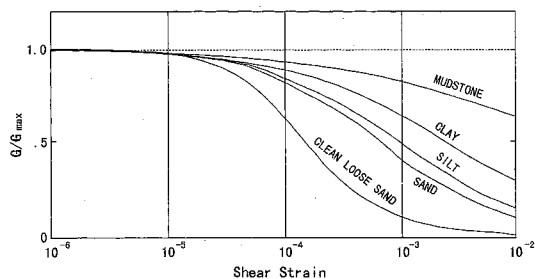


図Ⅱ・3-28 不整形地盤モデル(図Ⅱ・3-27)に対するいくつかの入力地震動による地盤応答の例(TAKEMIYA, 1996)。

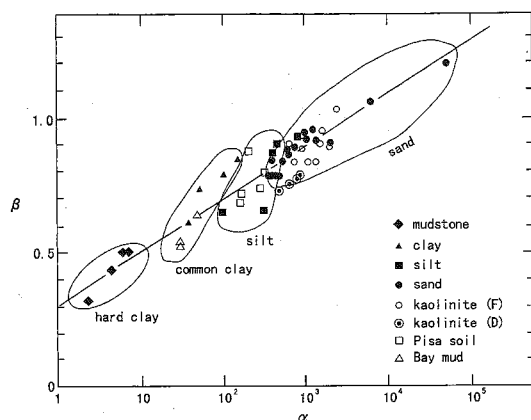
時間領域ハイブリッド法によって地震動シミュレーションを実行した。基盤への入力波は神戸大学および神戸海洋気象台における観測波形を基本にしたものと2種類の合成波であり、解析結果の一部を図Ⅱ・3-28に示す。基盤に入射した波は上昇しながら軟弱な被覆層を伝わってゆくが、その被覆層が消滅する境界部付近で新しい波が生成され、これが水平に伝わり、直接下から伝わってきた波と干渉して地震動が増幅される。竹宮はこれをバンプ現象(はち合わせ)と呼んだ。2つの合成波の卓越周期は0.43秒と1.28秒であるが、震度Ⅶに相当するゾーンでは短周期の方が大きく増幅されている。これらの様子は単純なリッカー波を用いた解析結果の方がよりわかりやすく表現されている。TAKEMIYA (1996) は深層の基盤構造にも言及したが、結局、震災の帯は上記の軟弱な沖積層の増幅によって説明できるとした。

(3) 軟弱層の動的特性

軟弱な地盤の動的特性として、地震動の増幅効果と非線形効果が見られることはこれまで述べたとおりで、地震動は軟弱地盤によって増幅されるものの、地震動が大きくなれば、非線形性によってせん断応力波の振幅は押さえられる。したがって、どんなに震源に近くても地盤上では地震動が飽和してしまい、ある一定の大きさ以上



図Ⅱ・3-29 土の種類による剛性率のひずみ依存性(中川, 狐崎, 1989)。微小ひずみの剛性率 G_0 で正規化。



図Ⅱ・3-30 種々の土の非線形パラメータ α, β の関係(SOGA, et al., 1995)(本文参照)

にはなりえないだろう。これは距離減衰曲線の形に現れていて、震源(断層)からはほぼ10 km未満では、もはや距離に依存しない、すなわち加速度がほとんど変化しないことの一つの理由になっている。

大阪盆地の低地部表層は過圧密比(OCR)の小さな、より正規圧密に近い状態にある地層によって構成されており、地表面付近では土かぶり圧がほとんどないため、極めて低いせん断抵抗しか示さない。したがって、土の種類(例えば粒度組成)によって動的性質は大きく異なり、結局、非常に不均質な場を提供することになり、軟弱地盤の応答性を複雑にしている。このような地盤の特性としては、低剛性率が地震動を増幅するが、このような物質は同時に大きなひずみ依存性を有することになり、塑性変形によって地震動を大きく減衰させる作用を持つ。一方、このような非線形性はダイラタンシー特性と密接に関連しており、地震動による非排水せん断過程では、間隙水圧が増大し、非線形効果がより増大する。

図Ⅱ・3-29に土の種類による剛性率のひずみ依存性の違いを示す。このようなひずみ依存性は簡単な2つのパラメータによって、次式のように表される(中川, 狐崎, 1989)。

$$G/G_0 = 1 + \alpha\gamma^\beta$$

ここで、 G はせん断ひずみ (γ) における剛性率、 G_0 は微小ひずみにおける剛性率、 α および β は土の種類と状態に依存する定数である。しかしながら、この2つのパラメータ α, β は独立でなく、図Ⅱ・3-30 (SOGA, 1995) に示されるように互いにかなり高い相関を持っており、次のような式で関連づけられている。

$$\beta = 0.2 \log \alpha + 0.3$$

言うまでもなく、 α または β の値が高いものほど構造敏感であって、液状化強度の低い状態を示す。このようなパラメータを間隙水圧の上昇を絡めながら、地震動の解析にどのように組み込んでゆくかが今後の課題であろう。

参 考 文 献

- 1) EJIRI J., SAWADA S., GOTO Y. and TOKI K. (1996) : Peak ground motion characteristics, Special issue of soil and foundations, Japanese Geotechnical Society, pp. 7-13.
- 2) 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・渡辺和明・ト部厚志 (1995), 兵庫県南部地震による阪神地域の被害と伏在断層の分布, 日本応用地質学会, 中間報告会, pp. 55-65.
- 3) 平野昌肇, 波田 重 (1995) : 直下型地震と都市部の断層調査, 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書, 日本応用地質学会 pp. 136-159.
- 4) IRIKURA K. (1986) : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 'th Japan Earthq. Symp. pp. 151-156.
- 5) 入倉孝次郎 (1996) : 兵庫県南部地震の断層モデルと震度7地域の強震動の推定, 「阪神淡路大震災調査報告書 (解説編)」, 地盤工学会・阪神大震災調査委員会, pp. 151-170.
- 6) 石川浩次 (1995) : 神戸市域の地盤と構造物の被害, 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書 日本応用地質学会, pp. 207-218.
- 7) 石川浩次, 溝口昭二 (1996a) : 神戸市街地における震度の判定と分布, 日本地質学会第103学術大会講演要旨, p. 32.
- 8) 石川浩次, 溝口昭二, 小野 諭 (1996b) 神戸市街地の帯状・被害と地盤, 土と基礎, Vol. 44. No. 2, Ser. No. 457, pp. 38-41.
- 9) 井上直人, 中川康一, 千田智志, 領木邦浩, 志知龍一 (1996) : 重力から見た大阪盆地の基盤構造, 地球惑星科学関連学会, 1996年合同大会予稿集, p. 285.
- 10) 岩崎好規 (1995) : 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), pp. 15-20.
- 11) KAKEHI Y., IRIKURA K. and HOSHIBA M. (1996) : Estimation of high frequency wave radiation are as on the fault plane of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake by the envelope inversion of acceleration seismograms (in press), Jour. Phys. Earth.
- 12) KAMAE. K. AND IRIKURA K. (1995) : A fault rupture model of the 1995 Hyogoken Nambu earthquake (MJ-MA=7.2) estimated by the empirical Green's function method, Jour. Natural Disaster Science, vol. 16, No. 2, pp. 31-40.
- 13) 菊地正幸 (1995) : 1995年1月17日兵庫県南部地震の震源メカニズム, 大阪周辺域での震害と地盤構造, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会, 日本応用地質学会, 関西地質調査業協会, 断層研究資料センター, 大阪市立大学阪神大震災学術調査団, pp. 117-120.
- 14) 前田保夫 : 宮田隆夫 (1995) : 神戸—西宮間における活断層の観察, 第四紀学会速報会, pp. 43-44.
- 15) 松田高明, 竹林厚司 (1995) : 兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向と分布, 神戸新聞2.8.
- 16) 中川康一, 大阪市立大学阪神大震災学術調査団 (1995) : 大阪周辺域での震害と地盤構造, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会, 日本応用地質学会, 関西地質調査業協会, 断層研究資料センター, 大阪市立大学阪神大震災学術調査団, pp. 92-108.
- 17) 中川康一, 狐崎長琅 (1989) : 動的安定解析に必要な地盤定数の現位置計測法について, 第34回土質工学シンポジウム, pp. 317-324.
- 18) NAKAGAWA K., SHIONO K., INOUE N. and SANO M. (1996) : Geological characteristics and problems in and around Osaka basin as a basis for assessment of seismic hazards., Special issue of soil and foundations, Japanese Geotechnical Society, pp. 15-28.
- 19) PITARKA A., IRIKURA K., IWATA T. and KAGAWA T. (1996) : Basin structure effects in the Kobe are inferred from the modeling of ground motions two after shocks of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake (in press), Jour. Phys. Earth.
- 20) 櫻井 孝 (1995) : 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, 日本応用地質学会, pp. 38-54.
- 21) 佐藤忠信, 杉戸震真太, 清野純史, 澤田純男, 森尾 敏, 末富岩雄, 北勝 利 (1996) : 地震震動特性, 「阪神淡路大震災調査報告書 (解説編)」, 地盤工学会・阪神大震災調査委員会, pp. 123-150.
- 22) SEKIGUCHI H., IRIKURA K., IWATA T., KAKEHI Y. and HOSHIBA M. (1996) : Minute locating of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake from the waveform inversion of strong ground motion (in press), Jour. Phys. Earth.
- 23) 嶋本利彦 (1995b) : 「震災の帯」の不思議, 科学, 65, pp. 195-198.

- 24) 嶋本利彦ほか (1995a): 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等, 日本地質調査協会断層研究資料センター, 大阪市立大学「阪神大震災, 学術調査団」, pp. 121-122.
- 25) SHIONO K., NAKAGAWA K., MITAMURA M., MASUMOTO S. and IRIKURA K. (1996): Focusing of seismic ray along the Uemachi fault, -Damages in Osaka area caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and subsurface geologic structure. (in press), Jour. Phys. Earth.
- 26) 志知龍一, 青木治三 (1995): 1995年兵庫県南部地震震源域の重力異常. 月刊地球, No. 13, pp. 129-134.
- 27) SOGA K., NAKAGAWA K. and MITCHELL J. K. (1995): Measurement of stiffness degradation characteristics of clay using a torsional shear device, 1st inter. Earthq. Geotech. Eng. (IS-Tokyo, '95), pp. 107-112.
- 28) 竹宮宏和, アダム・マヘール (1995): 縦と横に伝わる波が鉢合わせ, 地盤の加速度が異常に増幅, 日経コンストラクション, 7月14日号, pp. 123-129.
- 29) TAKEMIYA H. (1996): Effects of irregular soil profile on strong ground motions, "THE 1995 HYGOKEN-NANBU EARTHQUAKE—Investigation into Damage to Civil Engineering Structures—", Committee of Earthquake engineering, Japan Soc. Civil Engineers, pp. 15-25.
- 30) TOKI, K., IRIKURA, K. and KAGAWA, T. (1995): "Strong motion records in the source area of the Hyogoken-nambu earthquake, January 17, 1995, Japan," Jour. Natural Disas. Sci., 16 (2), pp. 23-30.

4. 大局的地質構造と被害の相関

兵庫県南部地震においては、微地形・表層地質と被害の相関について、多くの地形・地質研究者から、さまざまな成果が得られている（例えば、中央開発, 1995; 関口ほか, 1995）。一方、より大局的な地質構造と地震動との相関についての知見は、もっぱら地震工学の研究者（例えば、入倉, 1996, 源榮ほか, 1995）から提供されているかの感がある。しかしこのテーマについても、地質学的方法論による検討が可能と思われる。それには調査・研究の対象を六甲山南麓地帯から、さらに被害の少なかった地域にまで広げる必要がある。

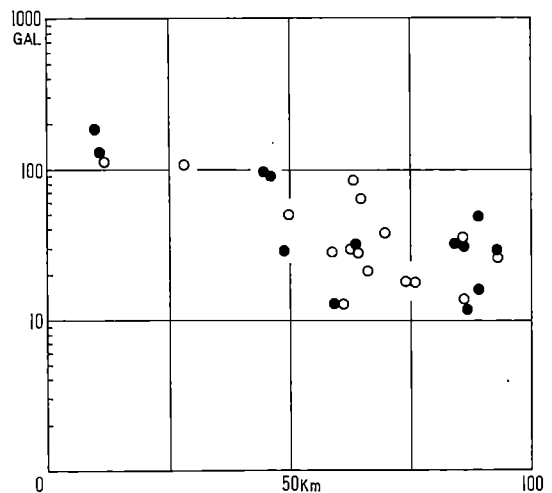
4.1 ディレクティビティおよび岩盤上の地震動

震害と広域的な地質構造の相関を検討するに当たって、地質構造とは一応独立の要因であるディレクティビティ、すなわち震源断層からの方位によって地震動の大きさが変化する現象が現れたとする説（菊地, 1995; 上岐ほか, 1995）を検討しておく必要がある。合わせて地震基盤上ないし岩盤上の加速度値を推定したい。図Ⅱ・4-1にダム基礎岩盤上または岩盤に近接する監

査廊内で得られた最大水平加速度値の距離減衰を示す（江川, 1996）。このうち黒丸は断層方向、白丸は直交方向に位置するダムである。双方の加速度値の大小に系統的相違は見られない。したがって、震源過程に基づくディレクティビティは、少なくとも顕著ではなく、被害の大小は地質にその原因を求めて良いことを示している。図Ⅱ・4-1から距離減衰曲線を描くと、距離ゼロ付近の加速度は220ガル程度となる。距離減衰曲線は本来、震源域近傍の加速度を云々するものではないが、一つの目安にはなろう。六甲山をはじめとする花崗岩類（流紋岩を含む、以下、同様）の地域では、震度Ⅶの地域に近接しているにもかかわらず、多くの地区では墓石の転倒率がゼロかそれに近い値であるなど（菊山ほか, 1995; 野村ほか, 1995）、震度階は一般にⅣ～Ⅴ程度であった。先の距離減衰に基づく加速度値はこれと整合的であり、実態に近いと考えられる。なお、六甲山中の V_s 値はトンネル内の計測で最大1.5 km/s程度であり、決して大きな値ではない。花崗岩類の神戸海洋気象台等の堆積層上で800ガル以上を記録していることを想起すれば、堆積層上で著しい地震動の増幅が生じていることは明らかである。

4.2 基盤地質と地震動

図Ⅱ・4-2に沖積層・上部洪積層を剥ぎ取った際に



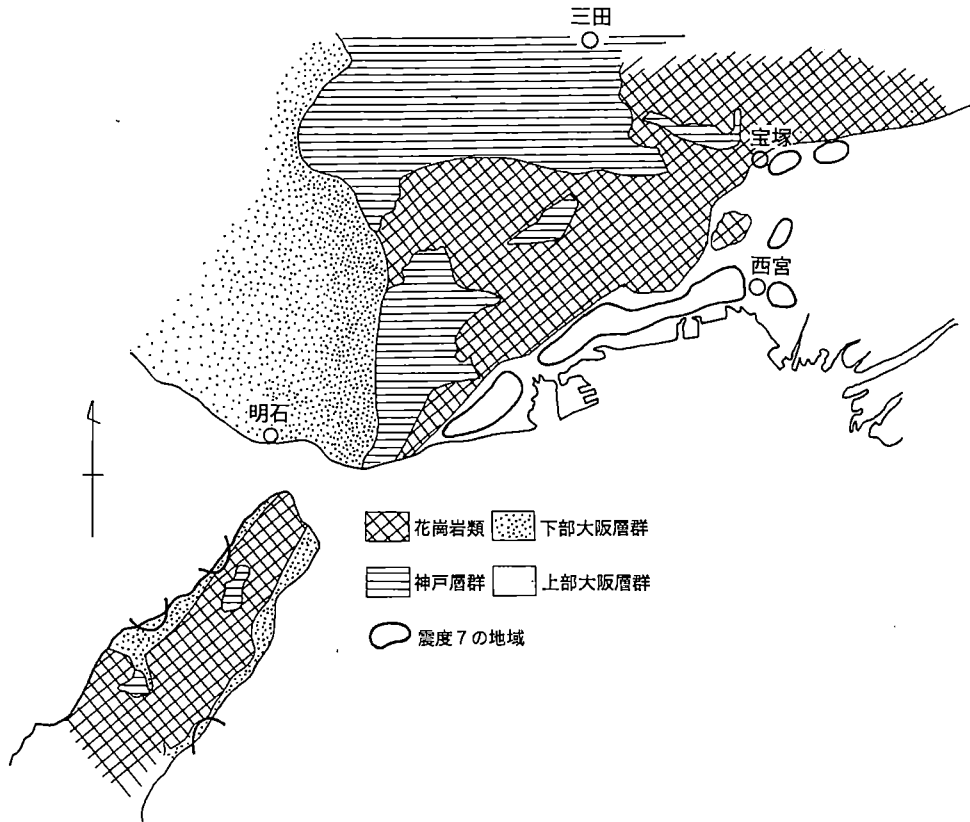
図Ⅱ・4-1 方向別の距離減衰

包絡線の距離ゼロでの値は約220ガル,

●: 断層方向の観測点,

○: 断層に直交する方向の観測点

ダムの耐震性に関する評価検討委員会（建設省, 1995; 建設省河川局開発課, 1995）による距離減衰図を断層との位置関係で細分したもの



図Ⅱ・4-2 震度Ⅶの地域と沖積層・上部洪積層の下盤

現れる地質と、震度Ⅶの地域の空間的關係を示す。本州側では下部大阪層群、神戸層群、花崗岩類が広く分布するにもかかわらず、震度Ⅶの地域はすべて上部大阪層群の地域に集中している。一方、花崗岩類の地域はもとより神戸層群上の三田市では、震源から離れているにしても被害が極端に少なかったことは注目される。淡路島では震度Ⅶの地域は下部大阪層群上である。しかし、一部を除いて鉄筋コンクリート構造物には被害が見られないなど、本州側の震度Ⅶの地域とは被害の様相が異なる。また、本地域に震度階Ⅶの被害が現れたのは、この地域特有の建築物の特徴が関わっているとされる（日本建築学会、1995）。したがって、地震動の大きさは六甲山南麓地帯に比べて小さかったと考えられる。花崗岩類、神戸層群上では本州側と同様、被害は少ない。このように、激しい地震動は、大阪層群、特に上部大阪層群上に顕著であった（江川b, 1996）。これは上部大阪層群が軟弱、すなわち V_s が小さいことによるとも考えられる。しかし上部大阪層群の存在は、大阪層群を形成した

沈降盆の中心に近く、下部大阪層群を含めた大阪層群全体の層厚が大きいことをも意味している。入倉による地震工学的研究成果等を加味すれば、大阪層群の物性に加えて、厚い大阪層群の存在に大きな被害の原因を求めることが妥当と思われる。

4.3 活断層近傍の地震動

図Ⅱ・4-3に、活断層近傍で被害が大きかったと思われる地域を示した。本図は武庫川以東の各市域毎に、被害の相対的に大きな地域を表示したものであって、被害の絶対的な大きさを表していない。このうち、宝塚市、豊中市、大阪市、茨木市、京都市については既往文献（妹尾、1995；香川、1995；中川、1995；茨木市、1995；安松、1995；天白、1995；西村、1995）、高槻市、吹田市については市の内部資料によった。なお、活断層の近傍に被害が集中するという傾向は必ずしも顕著なものではない。宝塚市、豊中市、大阪市、京都市では比較的明瞭であったとされるが、茨木市に至っては図Ⅱ・4-4に示す程度の不明瞭な傾向にすぎない。しかし図

に見るように、有馬—高槻構造線、仏念寺山断層とその延長と見られる上町断層、花折断層、樫原断層付近で被害は大きくなる傾向は認めて良からう。

六甲山中において、新幹線トンネルや自動車トンネルが活断層と交差する地点でライニングが破損している(兵庫県道路公社, 1995)。いずれも活断層を挟んでの岩盤、ライニングの永久変位は認められていないが、破損したという事実は、地震時の大きな動的歪みまたは断層を挟む一時的なブロックムーブメントが存在したことを示している。したがって、図Ⅱ・4-3に示した活断層近傍の被害の集中をこれによって説明することもある。しかし、活断層上またはその近傍での被害の集中が比較的明瞭な豊中市、大阪上町台地、京都樫原付近を子細に見れば、被害の集中は断層上ではなく、その下盤側の大阪層群上に見られる。中川(1995)は大阪上町台地西方の被害集中は、地盤の不整形性のゆえとしている。したがって、活断層そのものよりも活断層が形成する顕著な不整形地盤に、その原因を求めるのが自然と考える。

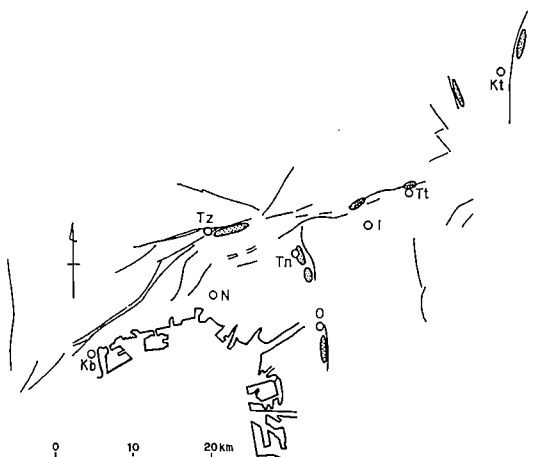
4.4 軟弱堆積層の非線形性

神戸ポートアイランドにおいて地震波が地表に向かって上昇する過程で加速度が減衰する現象、非線形性が観測された(国生, 1995)。入倉(1995)は神戸から西宮にかけての、海岸沿いの地盤が軟弱な地域において比較的被害が少なかった原因の一つに本現象を挙げている。この考え方によれば、地震波の入力が小さかった遠方で

は非線形性が現れず、被害は軟弱地盤において顕著になるはずである。しかしながら、神戸から西宮にかけての地域に比べて、これよりはるかに被害の軽かった豊中市、さらに軽かった京都市においても、相変わらず軟弱地盤の方に被害が少ないといった事例が少なからず認められる。非線形性が生じたのは観測によって明らかであり、これが被害の空間的分布に現れないのは謎である。

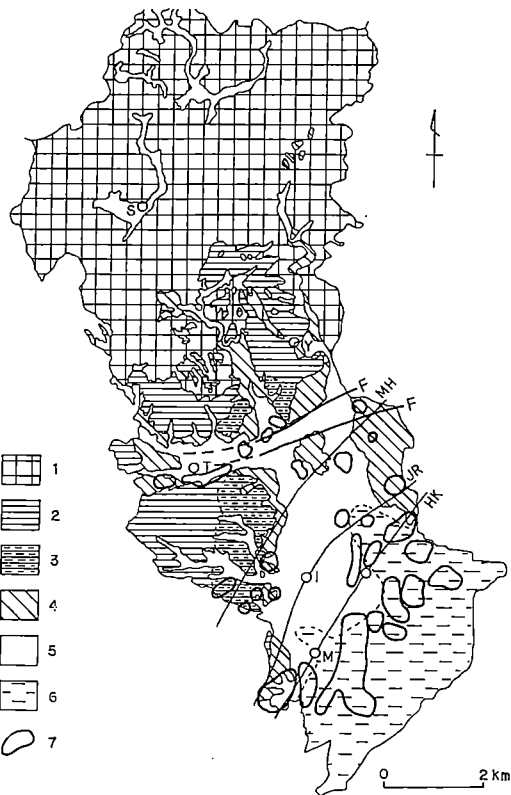
参考文献

- 1) 中央開発株式会社(1995): 阪神大震災・災害調査報告書。
- 2) 江川良武(1996): 兵庫県南部地震においてなぜ震災の帯が発生したのか、—震災縁辺地域の震災と地質環境—,



図Ⅱ・4-3 活断層近傍で被害が大きかった地域

細線: 活断層 点: 被害が当該市域において、相対的に大きかった地域 Kb: 神戸 N: 西宮 Tz: 宝塚 Tn: 豊中 O: 大阪 I: 茨木 Tt: 高槻 Kt: 京都



図Ⅱ・4-4 茨木市の地質と被害状況(茨木市; 1995の図を集約)

1: 基盤岩類 2: 下部大阪層群 3: 上部大阪層群 4: 段丘 5: 沖積層(砂質) 6: 沖積層(シルト質) 7: 被害集中地域
I: 茨木駅 T: 豊川 M: 南茨木駅 MH: 名神高速道路 HK: 阪急京都線 F: 構造線

- 土木研究所資料, No. 3398.
- 3) 江川良武 (1996): 兵庫県南部地震におけるダム基礎相当層の挙動, ダム技術, No. 112.
 - 4) 兵庫県道路公社 (1995): 内部資料.
 - 5) 茨木市 (1995): みんなの防災ハンドブック (もし地震がおこったら!).
 - 6) 妹尾正晴 (1995): 有馬一高槻構造線周辺の被害状況, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団共催, pp. 56-61.
 - 7) 入倉孝次郎 (1995): 年兵庫県南部地震による強振動, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 54-62.
 - 8) 入倉孝次郎 (1996): 「震災の帯」をもたらした強振動, 科学, Vol. 66, No. 2, pp. 86-92, 1996.
 - 9) 香川貴志 (1995): 兵庫県南部地震による豊中市の被災状況, 地理学評論, 68A-8, pp. 550-562.
 - 10) 建設省 (1995): ダムの耐震性に関する評価検討委員会, ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書.
 - 11) 建設省河川局開発課 (1995): ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書 (概要版), ダム技術, No. 111.
 - 12) 菊地正幸 (1995): 遠地実体波による震源のメカニズム, 月刊地球, 号外 No. 13.
 - 13) 菊山浩喜・横山俊治 (1995): 墓石・灯籠の転倒からみた兵庫県南部地震の地震動, 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.
 - 14) 狐崎長環・後藤典俊・竹内文朗 (1972): 六甲地殻変動観測甲における, 地震探査による弾性波速度分布の測定, 京都大学防災研究所年報, 第15号 B, 7-13.
 - 15) 国生剛治・佐藤清隆・松本正毅 (1995): 兵庫県南部地震での地盤の非線形振動特性, 土と基礎, 43-9.
 - 16) 野村亮太郎・川崎輝男 (1995): 墓石・石構造物の転倒から見た地震被害分布と地形特性, 1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録, pp. 49-50, 日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会.
 - 17) 中川康一 (1995): 大阪周辺域での震害と地盤構造, 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団共催, pp. 92-108.
 - 18) 日本建築学会 (1995): 兵庫県南部地震災害調査速報, 1-1293.
 - 19) 西村昌能 (1995): 兵庫県南部地震 (1995/1/17) における向陽高校校区の地震動調査について, 京都地学, 第14号, pp. 12-15.
 - 20) 関口辰夫・堀野正勝・根本寿男・津沢正晴・国土地理院災害地理調査班 (1995): 兵庫県南部地震の災害現況図と地形特性について, 1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録, pp. 49-50, 日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会.
 - 21) 天白駿馬・馬淵博夫 (1995): 兵庫県南部地震時における洛水校区の建築物の揺れについて, 京都地学, 第14号, pp. 7-11.
 - 22) 土岐憲三・後藤洋三・江尻 譲・澤田純男 (1995): 兵庫県南部地震の震源特性と地盤振動特性, 土木学会誌, 9月号, pp. 32-43.
 - 23) 安松貞夫 (1995): 兵庫県南部地震で花折, 榎原断層近くの住宅に被害がなぜ集中したか—花折断層について, そのⅦ—, 東山学園研究紀要第40集, pp. 133-152.
 - 24) 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, 7-43.

5. まとめと今後の課題

兵庫県南部地震によって被害の大きかった神戸市を中心として, 地形, 地質の特徴などを整理し, 地震動と地盤の関係についてこれまでに考察を加えられていることを参考にして取りまとめを行った。

5.1 地形的特徴と地震被害

神戸市周辺には六甲山地からもたらされた堆積物により構成される扇状地が発達するが, 地震の被害は完新世に形成された扇状地や低位の段丘の分布域に集中している。

また, 超震度Ⅶの島状被害地域は地形区分と対応し, 震度Ⅶの帯状被害地域はおおむね新期扇状地や三角州性低地と対応するが, 地形区分の単位を越えて延びているなど地形区分だけでは説明できない。

5.2 地盤構成と地震被害

被害の大きかった「震災の帯」は必ずしも軟弱層が厚く分布する区域ではなく, 更新世後期から完新世の砂礫地盤で N 値が 1 桁ないしは 2 桁でも 20 以下の地質に分布している。いずれにしても, 扇状地堆積物はその分布が複雑で, 一義的にどの岩相が原因であるかを特定する決め手はないようである。

5.3 震災の帯を発生させた原因

神戸市周辺には超震度Ⅶの帯状被害や, 島状被害が発生し, 両者を包括した地域が震災の帯と呼ばれ, 何故その地域に被害が集中したかが, 多くの研究者の疑問となっていた。その原因として, 地下に伏在断層が存在しそれらが活動したとする説, 老朽化した構造物が集中していたとする説, 直下の断層運動による軟弱層の振動による説, などが提案されてきた。最近の地震動を含めた研究の成果によれば, 深部における地質構造と, 浅い表層地盤構造およびその動的特性の両者が大きく関わっていることがわかってきている。

5.4 大局的な地質構造と被害の関係

震源断層からの方向によって地震動の大きさが変化するかどうかを確かめるために, 周辺のダムにおいて観測した地震動によれば, その変化の差は顕著に現れていない。一方, 広域的な地震の被害と被覆層を除いた基盤の

地質との関係においては、被害の顕著な地域は大阪層群のうち特に上部大阪層群と一致している。既存の活断層と被害の関係をみると、一部の活断層に沿って被害の顕著な地域が分布しており、地盤と地震動が何らかの形で影響し合っているような傾向になると思われる。

5.5 今後の展望

明治以来これまでわが国で発生した地震による被害は数多くあり、その被害を大きく見ると断層の変位によるものと、地震動によるものとに分けられる。前者は海底で起きた場合には津波という大災害をもたらす。後者は地震動により建築物の崩壊、地すべり、液状化など著しい被害が発生し、とくに地質学的特性によってその被害の程度は著しく異なるという特徴を有している。

今回の地震ではかなり密な強震動観測網によって、多くの地震動記録を捉えることができた。これらの記録から種々の解析がなされ、多くの事柄がわかってきた。地震動を大きく決定する震源特性、伝播経路特性、局所的な地盤の動特性等かなりの程度で解析が進み、その概要がほぼ明らかにされた。

しかしながら、今回の地震はマグニチュードや距離減衰特性に見られる最大加速度の分布など、内陸型地震によく見られるものと特に変わりがないという。ではどうして、たぐいまれな大災害が引き起こされたのであろうか。これに対する説得力のある回答は完全にはまだ出されていないのではなかろうか。これらを明らかにするた

めに、またよりの確な強震動予測のために、リアルな震源過程、木目の細かい地下構造、地質材料の動的特性の把握、応答解析手法の確立、構造物の被害解析など多くの課題が残されている。これらの解決の過程では、当然のことながら、地質学的諸特性に関する十分な把握が重要課題として浮かび上がってくる。

わが国に広く分布する沖積層や洪積層の分布地域には都市が発達し、人口が集中している、その近くで大きな地震が発生したときには被害が甚大になる。防災の意味からも都市近郊の沖積層や洪積層の地質、地盤構造を詳しく調べておくことがこれからの課題として最も重要と考えられる。わが国ではすでに地質図もいろいろな立場から発行されているが、都市の地下については必ずしもそれが判明しているとは限らない。最近では反射法等による深部の地質構造を調査する手法が確立されてきている。それによって、地下の地質構造の決定や地震基盤をどこに設定するか、また、沖積層や洪積層の物性値の想定などが可能になると思われる。また、より詳細な調査方法としてレーダー探査、電気探査による浅部の地質構造、ボーリング調査による地質調査・物性試験などを駆使して、地盤種別によるサイズミックマイクロゾーニングを目指し、いわゆる動的な地盤図作成に向けての考え方を確立していくことが、今後応用地質学を実地に活かしていく上での急務となるものと考えられる。

Ⅲ. 地盤災害の実態と地盤条件

Actual Circumstances and Geological Conditions of Ground Disasters

Key words : 兵庫県南部地震 the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 地盤災害 ground disaster, 地すべり landslide

Abstract

The ground disasters caused by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake occurred in the areas stretching at the foot of the Rokkou Mountains and emerged in various types. We have been collecting data on these disasters, mainly investigating the relationship between some landslide occurrences and topographical-geological conditions.

As a result of investigation, it is seen that several common conditions exist to these ground disasters accompanying the Earthquake.

はじめに

兵庫県南部地震に伴う地盤災害は、六甲山地の山麓周辺を中心とする地域でさまざまな形態をもって発生した。これらの地盤災害の実態、発生条件あるいはメカニズムについては関係機関による精力的な調査に基づき、さまざまな立場あるいは見解による報告がなされている。当委員会第三分科会では、各機関の調査結果等の地盤災害に関する情報を収集するとともに、特に斜面災害と地形・地質の関わりという観点から過去の地震災害を含めて検討を行った。

本編では今回の地震による主な地盤災害についてその特徴を記載し、次いで、これらの災害に関する地形・地質条件との関係について若干の考察を行い、どのような条件が災害の誘因となっているかという点について検討を試みる。また、今回検討できなかった問題を含め、今後応用地質学会として明らかにしていくべき課題について整理する。

1. 地盤災害、とくに斜面災害の実態

兵庫県南部地震 ($M7.2$) に伴い、その震源近傍の淡路島北部では延長約 10 km にわたり地震断層が出現したが、阪神地域においても、山腹崩壊や地すべり、液状化等の多様な地盤災害が発生し、建築物や道路、鉄道、港湾施設等に甚大な被害をもたらした。紙面の都合で割愛するが、災害実態解明の基礎的資料として、阪神地域の地盤災害を網羅した「阪神大震災被災マップ」(縮尺 1/25,000)^{1)~5)}が作成されている。

本章では、これらの地盤災害をその分布や種別という観点から、上記資料に基づき、①山地、②丘陵部および③海岸部等、に区分し、各区分毎に地形・地質との関連性等に関する情報を整理するとともに、現地調査、古地図解析等による検討結果について記述する。

1.1 山地の地盤災害

六甲山地では多数の斜面崩壊と多数の亀裂、落石等が発生した。とくに、山腹崩壊は六甲山地で数百箇所にのぼり、空中写真判読を中心とした検討から以下の 3 点

ほどの特徴と、それに関わる地形・地質条件とにまとめることができる。

(1) 斜面崩壊の発生箇所の分布は震源に近い六甲山地西部より六甲山地東部に多い^{7)~9)}(図Ⅲ-1)。

沖村^{10),11)}はこの点について、崩壊は東六甲山系に多く、とくに崩壊個数と崩壊面積では住吉川流域が、また、単位面積当たりの崩壊個数、面積、土量では宝塚市内の観音寺川と塩谷川付近に顕著なピークが見られ、さらに、これらの流域は地質構造的に五助橋断層の延長が有馬-高槻構造線に近づく付近に位置することを指摘している。

(2) 確認した斜面崩壊の総数は、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一桁以上少ない(奥西¹²⁾)。

沖村^{10),11)}は発生箇所の地形条件は、概して過去の大分県中部地震や伊豆大島近海地震での崩壊の特徴と同様であるとした。これに対し、山腹崩壊が小規模であった原因として、奥西¹²⁾は六甲山地の地質的条件(斜面表層物質は花崗岩の風化生成物で、内部摩擦角が大で圧縮に強い)、気象学的条件(1994年は稀な渇水年であり、かつ冬の渇水期で斜面はかなり乾燥状態であった)および樹木の根による緊縛作用の効果等を挙げている。さらに、安江¹³⁾や中筋・郡⁸⁾、水山・西田⁹⁾、落合・北原¹⁴⁾、丸井¹⁵⁾等は、原因として上記の地質条件や気象条件等に加えて、直下型地震で地震動の側方減衰が大きい地震動特性を挙げている。

(3) 崩壊発生分布は主要な活断層の走向方向に調和的な傾向が見られる。

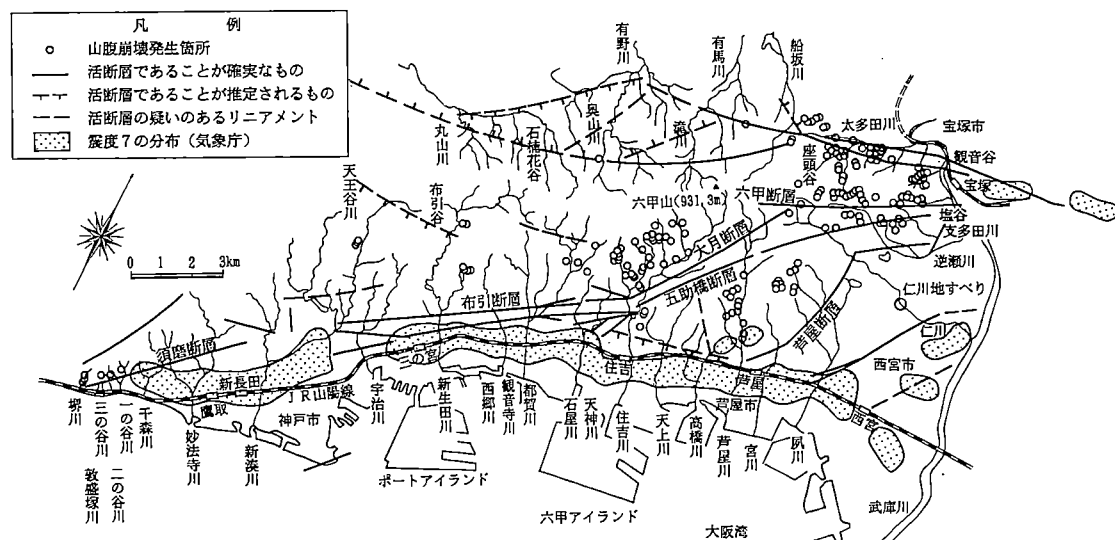
沖村^{10),11)}は前述の六甲山地東部での高い発生頻度と活断層との関連性と合わせ、斜面方位解析結果からNE系の方位を持つ斜面での崩壊が顕著であることを指摘し、その原因がNE系の断層に沿った三角末端面の崩壊によると考えている。また、奥西¹²⁾はその崩壊発生頻度は主要な活断層の走向方向に分布するものの、若干のオフセットがあり、活断層との直接な関係は現状では明確でないとしている。

1.2 丘陵部の地盤災害

六甲山地東南麓に位置する丘陵や台地およびその縁辺部では、東北方向の帯状の分布域をもって斜面変状あるいは地すべりが多発した。とくに新湊川や夙川の両岸部には地すべりの密集域が認められ、集中的な調査が行われている。これらの調査結果は、釜井ほか¹⁶⁾や奥西¹²⁾により、斜面の崩壊形態および地形・地質条件に基づく分類が行われ、整理されている。

さらに、藤田ほか¹⁷⁾は、釜井や奥西の分類に基づいて、丘陵地とその縁辺の斜面変状として1)~3)の3つのタイプ、山地の斜面変状として4)~5)の2つのタイプに再整理している。

- 1) 高盛土の急斜面で、比較的大規模の高速運動をしたタイプ
- 2) 造成地緩斜面における谷埋め堆積物・盛土の緩慢な運動をしたタイプ



図Ⅲ-1 兵庫県南部地震による山腹崩壊箇所等(文献6,7,8)をトレース

- 3) 緩斜面の現世堆積物・盛土が緩慢な運動をしたタイプ
- 4) 風化花崗岩・段丘崖などの急斜面の表層物質が崩壊したタイプ
- 5) 山地で落石を起こしたタイプ

以下に、上記の1)～3)の3つのタイプについて具体的な事例に基づきその概要を述べる。

1.2.1 高盛土の急斜面で、比較的大規模の高速運動をしたタイプ

〔事例1〕西宮市仁川百合野町の浄水場東斜面

a) 地形条件

六甲山地の東縁部の甲山東側山麓部に位置し、花崗岩類と大阪層群からなる丘陵地と中位段丘面の上ヶ原平坦面との境界部に当たる。周辺には仁川がおおむね西から東へ流下し、地すべり発生地点より上流では溪谷状、それより下流では段丘崖～台地に挟まれた狭長な谷が形成されている。地すべりは、この段丘崖状の一次谷斜面を埋めた盛土部分で発生している。

仁川百合野地区周辺の1948年米軍撮影および1961年国土地理院撮影の空中写真ならびに地形図を比較した結果、この斜面は、不整形な一次谷斜面を阪神水道企業団用地造成工事で出た現地発生土砂を用いて盛土したものと考えられる。さらに、盛土部は、のり肩部分が前方へ張り出し、のり尻部分は後方へ下がった形状で、自然斜面より勾配が大きくなっていたことがうかがえる（図Ⅲ-2）。

b) 地質条件

この地すべり地域の地質は、基盤岩である花崗岩類を大阪層群下部（Ma-1 とされる海成粘土を挟む砂層主体層）が不整合に覆い、北側と西側では大阪層群はアバットした状態で分布する。また、南東側には中位段丘堆積層（砂礫主体層）で構成される上ヶ原面が広がる。さらに、仁川の下流域には、低位段丘面が広がる。

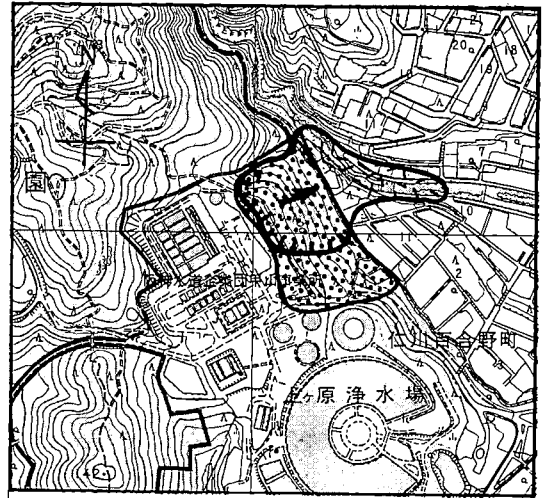
浄水場の東側に北東－南西方向の甲陽断層が通過し、北側にはその派生断層が分布する。

c) 災害の形態

兵庫県南部地震によって発生した斜面災害のうちで最も規模が大きく、12世帯の民家を直撃し、死者は34名にのぼった。この地すべりは地震の発生と同時に起こり、崩壊土砂の移動距離も大きく、仁川に沿って約200 m 流下している。崩壊土砂は建物の被害状況や被災民の談話から、「土しぶきを伴って高速に斜面を流動した」ことが判明している。

d) 災害発生に関わる問題

川辺ほか¹⁸⁾によれば、盛土部は花崗岩質の礫混り粗



崩壊範囲

崩壊土砂流出範囲

旧地形図から推定される盛土地

0 200 400m

国土地理院発行 1/10,000地形図「甲山」（昭和62年発行）

図Ⅲ-2 西宮市仁川百合野地区の地形変化と地盤変状

粒砂、大阪層群起源の海成粘土・シルトのブロックを含む粘土質の部分およびチャートなどの玉石を含む砂質の部分から成り、さらにその上位に礫混り砂を主体とする層がほぼ水平に分布する。また、盛土と大阪層群との境界には、50 cm 以上の黄褐色の花崗岩質礫混り粗粒砂と、0～20 cm の松葉や枝などを含む腐植土層が分布する。これらのうち、盛土下部の礫混り砂は基質が青灰色の粘土状で、多量の水を含んでおり、厚さ数 mm～2 cm 前後のすべり面が分布している。このことから、地震時に高含水砂が液状化してせん断強度が低下して地すべりを起こした、としている。なお、川辺ほか¹⁸⁾は各年次の空中写真判読から判断して、1974年の時点において地すべりの兆候があったとも述べている。

藤田ほか¹⁷⁾は、小さな谷に厚く施工された盛土であり、谷部に沿って地下水が集水（集水効果）し、旧表土層と盛土の境界に分布する高い含水状態の砂層が地震時に液状化を起こして高速に滑動したものと考えている。また、釜井ほか¹⁶⁾は、斜面下方に傾斜した大阪層群が分布し、その層理面に沿ってすべり面が形成され、大阪層群の砂・シルト層とこれを覆う段丘礫層および盛土が

崩壊したものであると推定している。

さらに、佐々ほか¹⁹⁾によれば、斜面下部に花崗岩類、斜面上部に大阪層群の地層と盛土が存在し、一部に段丘堆積物が介在するとし、すべり面は大阪層群中あるいはその上位の盛土との境界部と考えている。また、地すべり後の地下水滲み出しによる崩積土の二次的流動や水たまりの存在から判断して、地下水で飽和した砂層が地震の振動によって一種の液化化現象を起こし、せん断強度が急激に低下し、支持力を失って上部の土塊が滑ったとしている。

[事例2] 宝塚市蔵人地区の宝塚ゴルフ場内の斜面

a) 地形条件

丘陵尾根の頂部を切土し、その発生土砂で尾根の両側斜面に分布する小谷沢を盛土している。今回の地すべりはこの境界部で発生したものである。

この箇所の旧地形は、1948年撮影の米軍写真と1961年撮影の国土地理院の写真ならびに地形図の比較から、ゴルフ場の造成により尾根部は切土、谷部は盛土され、平坦な状態に改変され、各コース間ののり面の大部分は、すり付けた緩い盛土となっている(図Ⅲ-3)。

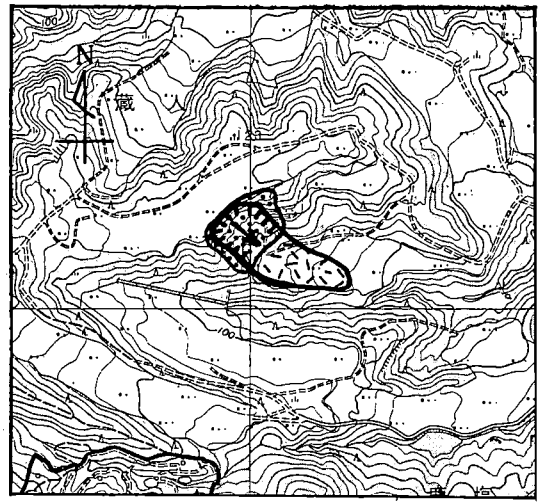
b) 地質条件

地質は仁川百合野地区と同様に花崗岩類を覆う大阪層群下部層を主体とする。大阪層群の各部層は、よく締まった砂・砂礫層と硬質な淡水性粘土(一部海成粘土)から構成される。また、盛土層は各尾根を切土した発生土砂であり、砂・砂礫と粘土の混合材を主体とする。

c) 災害の形態

藤田ほか¹⁷⁾によれば、地すべりは北西-南東方向の旧谷筋に沿って発生し、崩壊土砂は急斜面直下の緩斜面で流下方向を東西方向に変えて移動した。滑落崖には盛土が露出し、地表から深さ約2mの所に数箇所の湧水が見られた。これらの湧水の位置を境にして、浅所の盛土は硬質であるが、深部の盛土は非常に軟質な状態であった。この軟弱な盛土は、基質が青色あるいは多量の枝や葉を含み、ヘドロ臭を発する所もある。なお、これらの盛土の下位には、非常に硬い大阪層群の粘土が分布する。

また、当該地すべり跡地周辺には地震動により発生したと考えられる、尾根の延びの方向と概ね一致する東北東-西南西方向の割れ目群が見られる。この割れ目群は地すべり跡地での観察では、滑落崖の上位では大きく開口し、下位では狭くなる傾向が認められ、さらに盛土深部の軟質な部分では連続性も不明瞭になり、大阪層群中には見られない。また、滑落崖にはこれらの引張り割れ



崩壊範囲

崩壊土砂流出範囲



旧地形図から推定される盛土地

0 200 400m

国土地理院発行 1/10,000地形図「甲山」(昭和62年発行)

図Ⅲ-3 宝塚市蔵人地区の地形改変と地盤変状

目と直交する縦方向の割れ目も見られる。なお、急傾斜の割れ目群の直下には、平面滑動や円弧滑動のすべり面に相当するような割れ目やせん断面は観察されない。

d) 災害発生に関わる問題

藤田ほか¹⁷⁾は、周辺の割れ目の分布特性から、この地すべりは盛土内で発生したものとした。

また、横山ほか²⁰⁾は、上部が硬質で下部が軟弱な盛土構造が、大きな地震動による上載荷重の分布の不均質化を招き、軟弱な盛土に局所的な大きな荷重の発生を生じる原因とした。さらに地下水の関与については、含水比の高い軟質な盛土中の地下水が急上昇したのではなく、もともと軟質な盛土中の地下水位が高かった所に強い地震動が作用したためである、としている。

1.2.2 造成地緩斜面における谷埋め堆積物・盛土の緩慢な運動をしたタイプ

[事例3] 西宮市豊楽町の斜面変状

a) 地形条件

周辺は、現在宅地として利用されている。しかし、明治前期の古地図によれば当該地は大阪層群からなる丘陵を刻んだ自然谷となっており、現地盤はこの谷を埋めて

作られた造成地盤であることがわかる。また、谷の出口部に相当する北夙川小学校付近は、古地図では水田、ため池となっている（図Ⅲ-4）。いずれにしても、当該地一帯は地すべり地域の指定は受けていなかった。

b) 地質条件

釜井ほか¹⁶⁾はボーリング調査の結果から、すべり面を深度2~7mの盛土下面に想定している。地下水位は、盛土部の浅い位置で確認している。また、地すべり末端部で電柱が1mほど沈下し、北夙川小学校校舍（杭基礎構造物）において5~15cm程度の抜け上がりがあったこと等から、谷出口の沖積低地では液状化現象が発生していた可能性が高い。

c) 災害の形態

当該地の地すべりは、長さ250m、幅30~40mの細長いものであった。豊楽公園など地すべり頭部および上半部の湾曲部では顕著な引張りクラックが、下半部側面および末端部では顕著な圧縮性の盛り上がりが確認された。

d) 災害発生に係る問題

地すべりが旧谷地形に沿って緩やかに湾曲しながら連続していること、すべり面が盛土下面に推定されること等から、旧谷部を埋めた造成地盤が地震の強震動により崩壊したものと考えられる。また、崩壊の促進要因として、高い地下水位、地すべり脚部での液状化が挙げられる。松山ほか²¹⁾は、高い地下水位は旧自然谷が付近の斜面の集水溝として機能し、盛土の底部に水が集まりやすい状態にあったためであると推定している。

なお、当該地点は甲陽断層の通過点付近に位置するが、顕著な断層変位は認められていない。

〔事例4〕西宮市高塚公園の斜面変状

a) 地形条件

高塚公園および宅地となっている当該地は、古い地図（明治前期、大正12年等）によれば、谷を堰止めた池であったようである。現在の公園内にある池はその一部であり、西側の宅地は谷および池に盛土して作られた造成地であることがわかる（図Ⅲ-5）。

b) 災害の形態

50~70m規模のはぼ円形状の小さな地すべり性斜面変状が認められた。なお、当地区も、地すべり地域には指定されていなかった。

高塚公園付近では、公園の北側斜面、西側斜面および南側広場に多数の引張りクラックが、西側道路には顕著な変状が認められた。これら変状は全体をトレースすると公園内の池を中心に円弧状に分布している（図Ⅲ-



国土地理院発行 1/10,000地形図「甲山」「西宮」（昭和62年発行）

図Ⅲ-4 西宮市豊楽町の地形改変と地盤変状

6)。また、西側道路では1m以上の段差を生じ、隣接するマンションの杭が露出した。

c) 災害発生に関わる問題

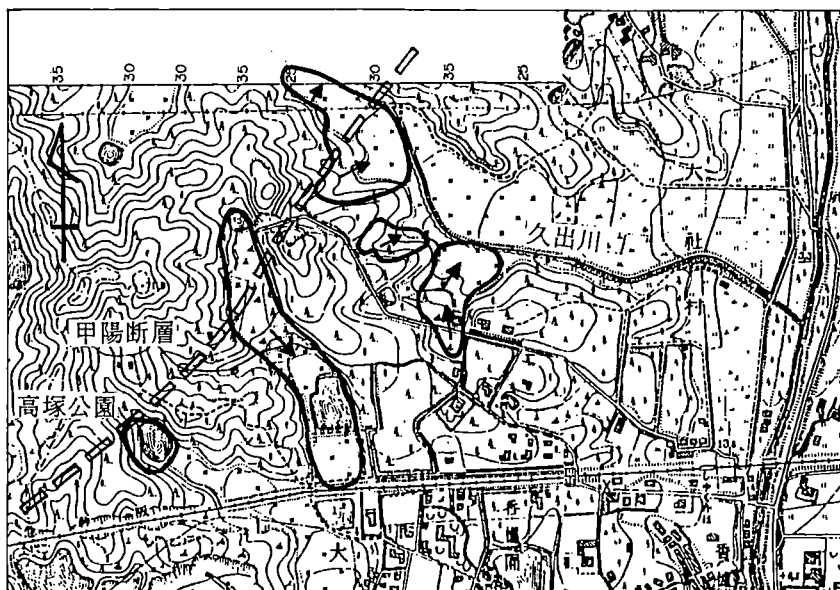
地すべりの分布範囲は、旧池とはほぼ一致しており、地震の強震動により盛土造成地盤が崩壊したものと推定される。液状化あるいは側方流動が発生したか否かは不明であるが、その可能性はあると考えられる。

なお、平野²³⁾等は、当該地点の西側道路での1m落差、周辺道路側溝での25~30cmの右ずれ変位を記載し、甲陽断層が活動し地表にその変位が現れたものとしている。

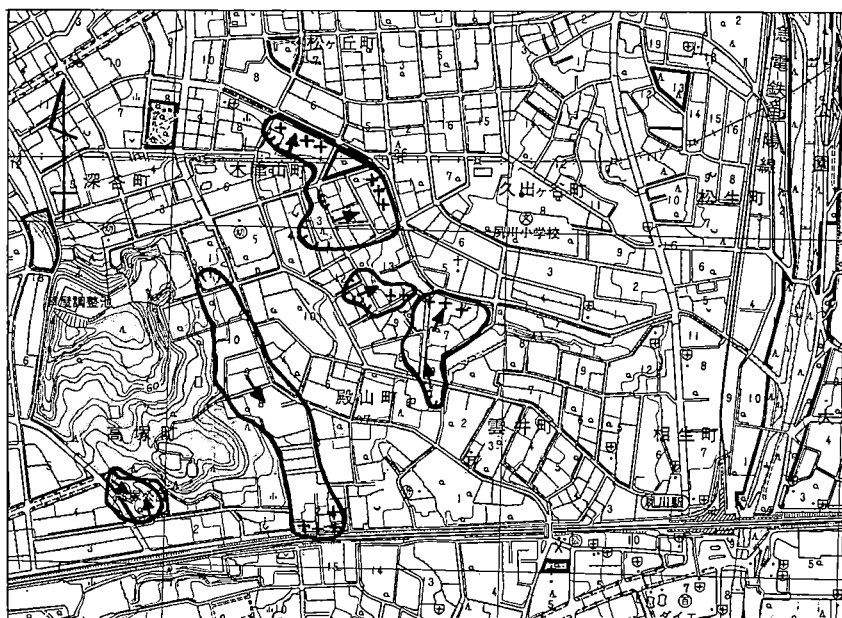
〔事例5〕芦屋市三条町~神戸市森北町の斜面変状

a) 地形条件

現在宅地となっている当該地のうち、地すべりが発生した地域は、古い地図に（明治前期、大正12年等）よれば、いずれも旧自然谷およびそれを堰止めた池となっており、谷を埋めて作られた造成地であることがわかる（図Ⅲ-7）。



大正12年発行1/10,000地形図「東芦屋」「西宮北部」
甲陽断層の位置は、藤田ほか²²⁾をトレース

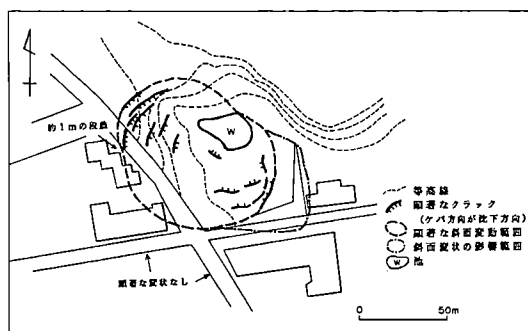


国土地理院発行1/10,000地形図「西宮」(平成3年修正)

- ⊖ 地すべりブロック
- 〰 引張クラック
- +++ 圧縮性盛り上がり

0 200 400m

図Ⅲ-5 高塚公園および西宮久出川周辺の地形改変と地盤変状



図Ⅲ-6 高塚公園付近の地盤変状

b) 災害の形態

地すべりは長さ200～300 m、幅100 m程度の比較的大規模の大きな階段状のもので、住宅に大きな被害を与えた。なお、当地区は、地すべり地域には指定されていなかった。

三条町地すべりは、三条公園から上部には落差50～80 cm程度の滑落崖や引張りクラックが、下半部側面および末端部では圧縮性の盛り上がりが確認された。

また、森北7丁目地すべり地においても中部にある空き地付近から上部では顕著な引張りクラックが、甲南女子中学校裏門付近には圧縮性の盛り上がりが確認された。中部の空き地において、見かけ上の走向N35°E、5～10 cm右横ずれのクラックが見られたが、その延長は円弧状にトレースされることが確認されている。

c) 災害発生に関わる問題

地すべりの分布は、旧谷地形とほぼ一致しており、地震の強震動により盛土造成地盤が崩壊したものと推定される。

なお、平野・藤田²⁴⁾は、当該地点付近を通過する芦屋断層の影響を示唆している。

1.2.3 緩斜面の現世堆積物・盛土が緩慢な運動をしたタイプ

〔事例6〕西宮市木津山町周辺の斜面変状

a) 地形条件

当地域は段丘が開析され、段丘面と沖積面の間に緩斜面が形成されている。現在この緩斜面は階段状に宅地化されている。宅地化は戦前から始まったが、自然地形に沿った改変であり、切土・盛土量ともに大きくない。

b) 地質条件

釜井ほか¹⁶⁾は、木津山町でのボーリング調査から2層の埋没土壌を確認し、このうち下位のものは、古い地すべり土塊の一部と考えられる大阪層群の根無しブロックを覆っているとした。このことから、この地域に分布

する緩斜面堆積物は、段丘礫層および大阪層群が侵食され、段丘面の脚部に再堆積したものであり、一部は地すべりとして下方に移動したものと推定している。

それに対して、松山ほか²¹⁾は、空中写真判読から宅地化以前の自然斜面には地すべり地形は認められないことから、今回のすべりは初生的なものであるとしている。

c) 災害の形態

西宮市木津山町から殿山町・雲井町にかけての久出川右岸には、斜面変動域が長さ、幅ともに100～150 mで、変動が斜面全体に及んでいる地すべりが発生した。なお、当地区は、地すべり地域には指定されていなかった。

地すべりの頭部は緩斜面の中腹にあって引張りクラックが、末端部の久出川右岸で護岸部のはらみ出しが、道路部で圧縮性の盛り上がりが見られた。また、松山ほか²¹⁾は、久出川左岸の低地部において、アスファルト路面の割れ目から淡茶褐色の噴砂を確認し、液状化が広範囲に発生したとしている。

d) 災害発生に係る問題

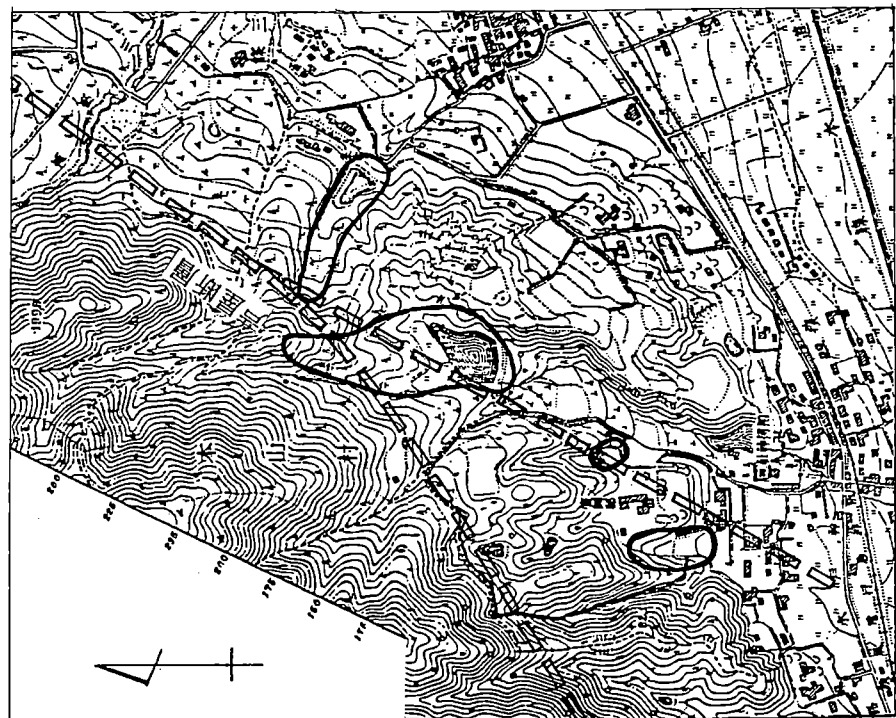
木津山町地すべり以外の地点では、調査ボーリング等による調査結果が報告されていないためその詳細は不明であるが、他の地すべり地点での移動土塊は緩斜面堆積物（過去の地すべり土塊）ではなく、宅地造成のための盛土の可能性もある。いずれにしろ、当地域の地すべりは、地震の強震動により沖積層が液状化し、緩斜面脚部が不安定になりすべりが発生したものと推定される。

1.3 海岸部の地盤災害

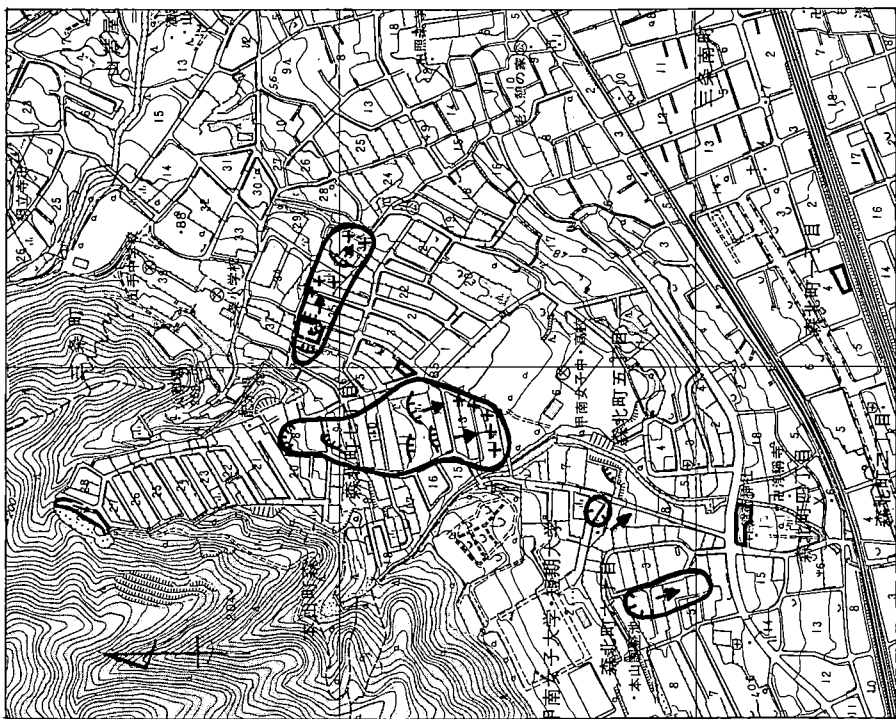
今回の地震で、海岸部等では液状化や側方流動等の地盤災害が見られた。被害の分布は、神戸から尼崎にかけての沿岸がほぼ全域で被災しており、西宮地域では部分的に内陸までその被害が及んでいる。また、被害の程度が最も大きい地域は、ポートアイランド・六甲アイランドをはじめとする阪神間の埋立地域である。さらに、河川堤防、路線構造物等の土木構造物にも液状化の被害が見られる。

1.3.1 海岸部での災害

今回顕著な液状化現象が発生した箇所は、古い地図との対応で海岸線を比較してみると、江戸期の干拓地や明治以降に埋立てられた人工地盤であることがわかる。江戸期の干拓から昭和30年代までの埋立地は、その多くは浚渫土砂による埋立であり、かなり緩い状態の土砂で構成されており、振動が加わると容易に液状化するものである。また、近年の埋立は、内陸部の造成工事で排出される土砂を利用している。しかし、埋立水域が深いた



大正12年発行1/10,000地形図「芦屋」「東芦屋」
芦屋断層の位置は、藤田ほか²²⁾をトレース



国土地理院発行1/10,000地形図「芦屋」(平成3年修正)

- ② 地すべりブロック
- ≡ 引張クラック
- +++ 圧縮性盛り上がり

図Ⅲ-7 芦屋市三条町および神戸市東灘区森北町の地形変化と地盤変状

め埋立表層部は重機による締め固めが行われるものの、下半部は海上から投棄され、ほとんど締め固めの効果は期待できない状態である²⁵⁾。

〔事例7〕ポートアイランドⅠ期工事区間

a) 被害状況

埋立土砂は、六甲山系高尾山・横尾山などの風化花崗岩である²⁶⁾。同人工島では、液状化による噴砂が生じた。ポートライナーの橋脚、高層住宅街等杭基礎構造物は相対的に数十cm～1mの抜け上がりが見られ、島全体に液状化による揺り沈み沈下が生じたものと考えられる。また、楡井ほか²⁷⁾は、同島第2期埋立地の神戸シティエアーターミナル駐車場地点において、最大で人頭大の噴礫現象を記載している。

岸壁は液状化・側方流動により海側へはらみ出し、傾斜、沈下し、その内側は1m以上陥没している。また、神戸大橋では液状化による可動支承の約50cm海側へ移動、ループ橋の落橋が見られた。

b) 液状化地盤特性

ポートアイランドおよび六甲アイランドにおいて液状化した地盤の粒土特性について、石原ほか²⁸⁾、軽部ほか²⁹⁾、溝口等³⁰⁾の報告がある。これらの調査結果を整理すると、表Ⅲ-1に示すように液状化の程度は盛土材料によって大きく異なることが分かる。また、従来、2つの島の埋立材料（まさ土、神戸層群）は、粒度配合が良好で一般に締め固まりやすく、内部摩擦角も35°以上あり、静的には安定した材料であり、動的にも一般の均質な砂に比べて安定した材料で、液状化強度も大きく良質な材料と考えられていた。しかし、今回の地震で、主な埋立て材料がまさ土である箇所は大きく液状化し、神戸層群である箇所は液状化の程度が小さいことが指摘されている。

c) 地盤改良効果

石原ほか²⁸⁾は、各種地盤改良の効果について以下のように調査結果を整理している。

- ①無処理の地盤では40～50cmの沈下が平均的に生じている。これは3～5%の圧縮ひずみに相当する。
- ②サンドコンパクションパイル、ロッドコンパクション工法は効果的で、液状化は発生していない。
- ③圧密防止工法であるサンドドレーンやプレロード工法も、無処理の地盤に比べ沈下量を抑制する効果が認められ、液状化軽減策としてある程度効果がある。

また、岸壁については、置換工法による岸壁では液状化により側方移動、沈下が大きかった。それに対して地盤改良工法による岸壁の被害は、置換工法の岸壁よりも小さかった。このように地盤改良の有無により、液状化

表Ⅲ-1 液状化被害と盛土材料

場 所	液状化被害	盛 土 材 料
ポ-トアイランドⅠ期	被害大	まさ土主体
六甲アイランド	小さい	まさ土、神戸層群を混入
ポ-トアイランドⅡ期	最も小さい	まさ土、神戸層群を最も多く混入

被害に顕著な差があることが確認された。

1.3.2 河川堤防

淀川堤防では左・右岸ともに液状化が発生し、とくに左岸の西島地区では大きな被害を受けた。淀川河川堤防は高潮区間であるため波返しのためのパラベットが施工されている3面張りのコンクリート堤防である。堤防周辺に多くの噴砂痕が認められたことから、堤防基礎地盤が液状化し、堤防がすべり破壊したものと考えられる。天端の沈下は最大3mとなり、堤防の機能を失うこととなった。被災区域は、高水敷が無かったり、漏水矢板が施工されていない区間であった。それに対して、隣接する高水敷施工区間での沈下量は10cm程度で収まっており、高水敷の施工の有無による被害の差が現れた。

また、猪名川、藻川、神崎川、左門殿川、武庫川などでも、被害規模は小さいが液状化が報告されている。

2. 地盤災害と地形・地質との関わり

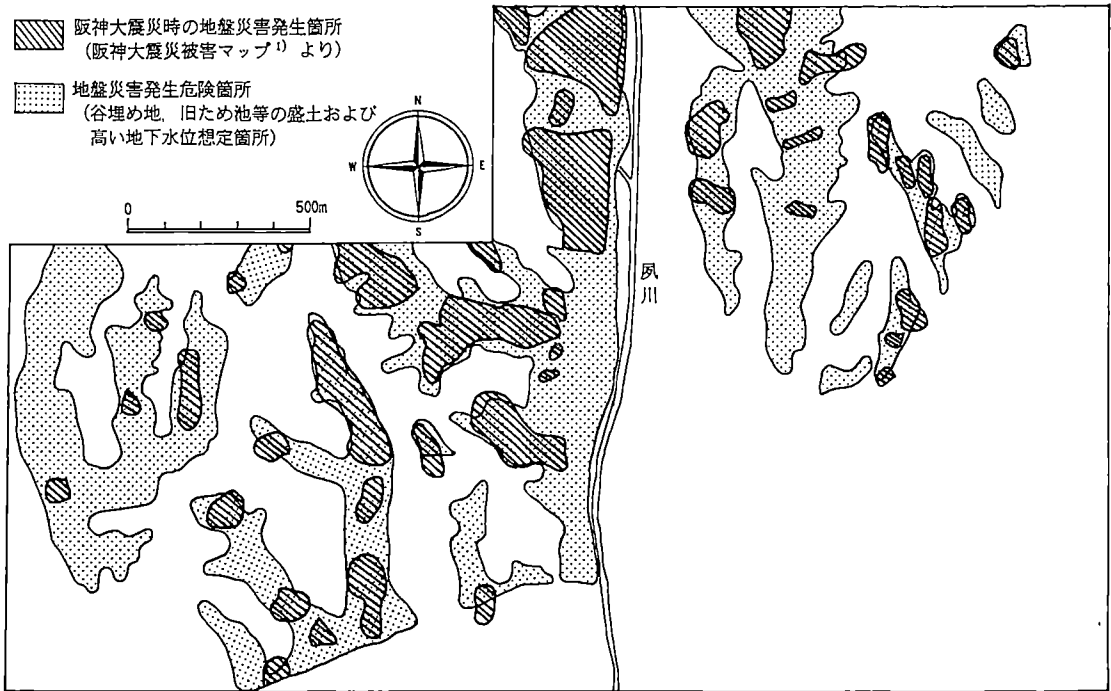
前項の主な地盤災害の発生事例については、個々に多くの調査報告、原因等に関する考察がなされているが、必ずしも統一的な見解が示される段階には至っていないのが現状である。

本章においては、上記のような状況を考慮し、兵庫県南部地震に伴う地盤災害発生箇所の地形・地質条件についていくつかの共通事項を抽出することを目的として調査・研究を行ってきた。本章では、この検討結果について、その概要を紹介する。なお、ここでは問題点を整理すること、関連する資料の入手が比較的容易であること等の理由から、対象を主に丘陵部の斜面崩壊箇所に限定した。

2.1 過去の地震災害に見る地盤災害

この問題に関する検討を進めるに当たり、まず過去の同種の地盤災害に関する調査を行った。その概要はすでに報告した³¹⁾が、その結果から以下のような事項が指摘できる。

- ①沢地形、ため池あるいは軟弱地盤等、地下水位の高い箇所に構築された盛土部での地盤災害が多く報告されている^{32)～37)}。



図Ⅲ-8 地盤災害危険箇所の1次抽出例(西宮市夙川付近)(陸地測量部大正15年発行東芦屋 1/10,000「東芦屋」,「西宮北部」および国土地理院平成7年発行 1/10,000「西宮北部」による)

②同様な条件での盛土を比較すると、施工時に地震時の安定性等を詳細に検討したうえで施工された盛土部では一般に被害は少なく、一方、暗渠排水設備等が施工されていてもその機能が十分働かなかった箇所では崩壊が発生している^{33)~36),38)}。

③傾斜したり、埋没谷状をなす基盤(硬い地盤)の上部に新期の堆積物や盛土が分布する箇所では地盤災害が発生している³⁸⁾。

2.2 地盤災害の発生条件に関する検討

上記の事項と、今回の兵庫県南部地震に伴う主な地盤災害事例に見られる発生条件にはいくつかの共通事項が見出せる。以下にその共通事項を挙げながら、阪神大震災の地盤災害に見られる特徴について述べる。

今回甚大な被害を受けた神戸市周辺は、その急速な都市化に伴う土地利用の変化に対応するように著しい地形改変が進められてきた地帯である。この地形改変を概観すると、人口の増加に伴う宅地化を主とする丘陵や傾斜地の開析(切盛りによる平坦地の確保)、港湾域の埋立て地に著しい。また、市街地についても明治以降、さまざまな目的での切り取り、盛土により現在の市街地の形態が形成されている。

これらの人工的な地形改変と地盤災害の関わりで最も

顕著なものとしては、海岸付近での埋立て地における液状化、あるいは丘陵部や傾斜地付近の盛土部での斜面崩壊が挙げられる。このうち特に後者については、地形・地質条件の関わりから精力的な調査が行われ、発生条件や崩壊形態から今回発生した災害の総合的な整理、分類が行われており(例えば釜井ほか¹⁶⁾、奥西¹²⁾、藤田ほか¹⁹⁾等)、これらの分類における主要な発生条件として取り上げられている。さらに、前述の丘陵の地盤災害事例として挙げた事例を見ると、これらの発生条件は多くが旧沢地形あるいはため池を埋めた盛土造成地部であり、その他についてもその可能性が示唆される。これらの点から、兵庫県南部地震に伴う丘陵部での地盤災害についても、人工改変、特に盛土造成地部にその発生が集中していると考えることができる。

次に重要な事項としては地下水の関与が挙げられる。地盤災害の発生に関する地下水の挙動としては、液状化の発生メカニズムにも知られるような地震時の高い間隙水圧や、あるいは元来その地形・地質条件に起因する高い地下水位が、斜面の不安定化の原因として働くことが考えられる。例えば、前述の西宮市仁川百合野の浄水場東斜面や宝塚市蔵人地区の宝塚ゴルフ場内の災害事例に見られるように、地下水がその発生に強く関与したと考

えられるものがある。ただし、地震の前後で特に災害発生箇所近傍の水位変化等を直接示す資料は現状では得られていない。

さらに、地下水環境に関わる問題として、ため池や軟弱地盤の存在がある。とくに、六甲山地南山麓部には、多くのため池が主に緩扇状地から丘陵地にかけて存在している³⁹⁾。前述の西宮市豊楽町、西宮市高塚公園さらに神戸市東灘区森北町付近で発生した地すべりでは、盛土がため池を伴う谷地形上に構築されている。これらのため池は当該地域が元来傾斜地上で水田等の耕作を行うために必要であったことは容易に想像されるが、同時に前述のように、沢地形部で地下水位が比較的高く湧泉水等を集めやすかった場所に作られた可能性が考えられる。このような地下水環境と利用の関係が部分的にでも正しければ、ため池が作られている場所は地下水位の高い箇所である可能性を示す一つの条件と考えられる。また、規模の大きいため池の場合には同様な考え方から、周辺を含め軟弱地盤上に作られていると考えることができる。

2.3 地盤災害発生危険箇所の抽出

以上のように、とくに丘陵部での地盤災害の発生に関わる誘因として、①盛土部、②高い地下水位を伴う箇所(沢やため池等の埋立て部)、および③ため池や軟弱地盤の分布等が主なものとして考えられる。これら3つの誘因と個々の事例との対応については前述のとおりであるが、さらにその検証として、西宮市夙川付近の地盤災害多発地区を例とする1つの検証の試みを図Ⅲ-8に示す。この図は、当地区の大正12年⁴⁰⁾および平成7年発行の1/10,000地形図の重ね合わせにより谷埋め盛土部、旧ため池等の盛土および軟弱地盤等高い地下水位が想定される箇所の分布を抽出した結果であり、さらに地盤災害箇所¹⁾をトレースしたものである。この結果は少なくとも今回の地震に伴う地盤災害の発生箇所をかなり表現できており、上記の誘因として挙げたいくつかの条件の妥当性を示す結果と考える。さらに、この図は3つの誘因を前提とした一種のハザードマップと考えることができ、同様な地震に伴う地盤災害危険箇所の一次抽出資料として有効と考えられる。

なお、ここに抽出されたすべての場所で地盤災害が発生するのではなく、その他の条件、例えば、盛土材料の吟味や転圧条件、あるいは排水処理等の施工条件により、その発生は防ぐことが可能である。この点で、上記の抽出結果は重点調査範囲の把握のための資料と位置付けるべきものと考えている。

3. ま と め

以上のように、兵庫県南部地震に伴う地盤災害は直接的には地震動を原因とするが、被害箇所にはいくつかの誘因的な条件があり、その組み合わせが災害発生の有無あるいはその程度を分ける主な要因となったと考えられる。その系統的な検討は今回の地震被害の教訓として、今後の地震対策に生かすべき情報と考えることができる。

今回の兵庫県南部地震による主な地盤災害は次のように分類される。

- ①六甲山系を中心とする急斜面の崩壊
- ②丘陵地を中心とした斜面崩壊
- ③海岸埋立て地を中心とした液状化地盤

①について：六甲花崗岩地帯の東側の芦屋断層と六甲山の主稜線に囲まれた地域の比較的開析の進んだ河川に沿った地域に分布が集中する傾向で特徴付けられる。また、その分布は当該地区に分布する活断層の分布と必ずしも一致していないことにも注目する必要がある。これらの特徴と、さらに今回の地震による災害箇所数については、地震動の規模を考えると一般的な地震災害より少ないと考えられる等については今後の問題と考える。

②について：前項に述べたようにその多くは、人工改変、特に地下水位の高い沢地形を埋めた盛土造成地に集中することがわかる。また、前述の過去の地震災害でも同様な発生原因が指摘されていることから、これらの条件は一般的に地震時に発生する地盤災害の重要な誘因であると考えられる。前述のような地形条件の抽出は比較的簡便に地震時の地盤災害危険箇所を抽出できるという意味で有効であり、特に都市化の進んだ地域には応用しうる手法であると考えられる。

一方、今回の地震においては、すべての盛土が地すべりや崩壊・変動をしたわけではなく、全く被害を受けていないものも含めさまざまな被害規模や形態が見られた。これらの事実は、発生の有無の差を生じたほかの要因が存在することを示唆するものである。例えば、同様な地形・地質条件でも適切な排水設備や施工を行えば、地震時にも十分耐える構造物が構築しうることを示唆していると考えられる。このような点から、上記の抽出条件は現状では地盤災害危険箇所を抽出するための一次的なふるい位置付けられる。その精度の向上や適用範囲に関する検討は今後の問題と考える。

以上を踏まえ、今後さらに具体的に検討を進めるべき課題としては以下の項目があると考えられる。

- 1) 盛土材料、排水処理工等の施工条件と発生の有無

の対応に関する調査と整理

2) 上記の検討を踏まえたうえでの簡便なハザードマップの作成とその応用

③について：沖積低地や海岸埋立て地との位置的な対応、埋立て材料の物性や力学特性、圧密状態あるいは埋立地の施工法等のいくつかの要因がその発生に関係するものとする。特に人工地盤としての埋立て地については材料や施工法が大きく関与し、さらに水平、垂直方向への不均質性の把握が重要と考えるが、その検討に必要な情報を当調査委員会では調査しきれていないのが現状であり、他機関の調査成果等を含め、総括的な人工地盤としての問題を整理する必要があると考える。

参 考 文 献

- 1) 日本応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会第三分科会 (1995. 12)：地震と地盤災害—兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書，巻頭口絵，pp. 282～315.
- 2) 国際航業 (1995. 2)：阪神大震災被災マップ，社内技術資料.
- 3) 地質調査所 (1995)：兵庫県南部地震による都市地域の地すべり分布図 (未公表).
- 4) 国土地理院 (1995. 4)：平成7年度兵庫県南部地震災害現況図 (第Ⅱ版).
- 5) 姉地震予知総合研究振興会 (1995. 8)：兵庫県南部地震地盤変状図.
- 6) 建設省土木研究所砂防部 (1995. 3)：平成7年兵庫県南部地震による山腹崩壊，斜面崩壊 (速報)，新砂防47-6.
- 7) 佐藤一幸 (1995. 3)：砂防設備の被害，砂防学会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.
- 8) 中筋章人，郡 典宏 (1995)：兵庫県南部地震における斜面崩壊の実態，砂防と治水 第104号.
- 9) 水山高久・西田顯郎 (1995. 5)：兵庫県南部地震による山腹崩壊 (続報)，新砂防48-1.
- 10) 沖村 孝 (1995. 7)：兵庫県南部地震による六甲山系の斜面崩壊，第30回土質工学研究発表会資料.
- 11) 沖村 孝 (1995. 3)：兵庫県南部地震による山腹崩壊の概要，砂防学会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.
- 12) 奥西一夫 (1995. 3)：六甲山地の斜面崩壊災害，京都大学防災研究所平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究報告書.
- 13) 安江朝光 (1995. 9)：兵庫県南部地震における斜面災害，地すべり対策技術協会第21回地すべり対策技術講習会講演集.
- 14) 落合博貴・北原 曜 (1995. 5)：平成7年兵庫県南部地震による山地崩壊，新砂防48-1.
- 15) 丸井英明 (1995. 3)：兵庫県南部地震に伴う山地の崩壊に関するコメント，砂防学会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.
- 16) 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋 (1995)：兵庫県南部地震による都市地域の斜面変動—人工地形改変に伴う都市型斜面災害—，阪神大震災中間報告会予稿集—人工改変と地盤災害—pp. 112～118，日本応用地質学会.
- 17) 藤田 崇・横山俊治・佐野正人 (1995)：兵庫県南部地震に伴う斜面変動の地質特性 (未発表).
- 18) 川辺孝幸・六甲団体研究グループ (1995)：1995年兵庫県南部地震に伴う西宮市仁川百合野町の斜面災害について，日本地質学会兵庫県南部地震特別ポスターセッション発表要旨.
- 19) 佐々恭二・福岡 浩ほか (1995)：兵庫県南部地震によって発生した高速地すべりについて，平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究 (文部省科研費総合研究 (A) 研究成果報告書)，pp. 112～118.
- 20) 横山俊治・藤田 崇・菊山浩喜 (1995)：宝塚ゴルフ場の斜面変動，環境地質シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集，pp. 97～118.
- 21) 松山紀香・吉岡敏和 (1995)：1995年兵庫県南部地震によって発生した宅地開発地域の斜面災害，シンポジウム阪神・淡路大震災と地質環境論文集，pp. 117～120.
- 22) 藤田和夫・笠間太郎 (1982)：大阪西北部地域の地質，地域地質研究報告 (5万分の1図幅)，地質調査所，112p.
- 23) 平野昌繁 (1995)：兵庫県南部地震緊急報告会地質環境からみた阪神大震災と活断層，日本地質学会.
- 24) 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，49, 2, pp. 77～84.
- 25) 三田村宗樹・大阪市立大学阪神大震災学術調査団 (1995)：1995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，pp. 209～214.
- 26) 藤田 崇 (1987)：大阪湾の埋め立て，地域の地質6，近畿地方，共立出版，211 p.
- 27) 楡井 久・楠田 隆ほか (1995)：瞬間的な地層破壊型の液状化現象，シンポジウム阪神・淡路大震災と地質環境論文集，pp. 137～142.
- 28) 石原研而・安田 進・原田健二 (1995)：阪神・淡路大震災特集 (第4回)，土質特性と地盤の挙動，土木学会誌，Vol. 80 pp. 50～53.
- 29) 軽部大蔵・田中泰雄・川谷 健 (1995)：神戸大学工学部兵庫県南部地震緊急被害調査報告書第2報，神戸地盤と臨海埋立地と液状化，pp. 42～55.
- 30) 溝口昭二 (1995)：地震時の液状化現象と予測のための地質調査，関西地質調査業協会平成7年技術研修会資料，pp. 1～30.
- 31) 日本応用地質学会阪神大震災調査委員会第三分科会 (1995. 5)：地震動と地下水の挙動—阪神大震災中間報告会—人工改変と地盤災害—予稿集，pp. 126～131.
- 32) 北郷 繁・土岐祥介・中村耕次・八坂時夫・鈴木輝之 (1969)：1968年十勝沖地震による火山灰および砂地盤の沈下，土質工学会北海道支部技術報告資料9，pp. 11～21.
- 33) 東北大学理学部地質学古生物学教室 (1979)：1978年宮城県沖地震に伴う地盤現象と災害について，東北大地質古生物研報，80，pp. 1～97.
- 34) 水野雄三・笹島隆彦・杉本義昭 (1993)：1993年釧路沖地震における港湾・漁港・空港の被害，土と基礎，41, 6, pp. 17～20.

- 35) 西川純一・高橋光昭 (1993) : 1993年釧路沖地震における道路・鉄道・河川堤防の被害, 土と基礎, 41, 6, pp. 11-16.
- 36) 西川純一・鎌田拓司・加治昌秀 (1995) : 1994年北海道東方沖地震における道路・鉄道・河川堤防の被害, 土と基礎, 43, 4, pp. 7-10.
- 37) 武田 覚・和泉孝夫・坂本 容 (1995) : 1994年北海道東方沖地震における住宅地, ライフラインの被害, 土と基礎, 43, 4, pp. 15-18.
- 38) 那須誠 (1993) : 各種構造物の地震被害と砂質土地盤の構造の関係に関する研究, 応用地質, Vol. 34, No. 3, pp. 120-133.
- 39) 岩見義男編 (1980) : 神戸の地盤, 神戸市.
- 40) 清水靖夫編 (1995) : 明治前期・昭和前期 神戸都市地図, 柏書房.

Ⅳ. 地震による地下水の変動

Groundwater Fluctuations caused by the Earthquake

Key words : 地下水の変動 groundwater fluctuations, 地震 earthquake, 地下水の計測と管理 monitoring and management of groundwater, 水供給計画 water supply plan

Abstract

Data on various hydrological and geochemical fluctuations caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake were accumulated. We reported fluctuations of the relatively shallow groundwater at the Nuruyu area, the Northern Awaji Islands, and those of the deeper one at the regional (about 300 km × 300 km) scales. Then, we briefly reviewed the precursory geochemical changes in groundwater.

Groundwater gushed out soon after the earthquake at around the Nuruyu and Nojima-Tokiwa areas, which are situated to the east of the Nojima fault, and then has dried up within the several months. There has been no sign of the recovery of groundwater level in wells one year after the earthquake. The water springing out at the hanging wall side along the Nojima fault seemed to be moved from the eastern mountainous area where groundwater has dried up.

Groundwater in deep underground also fluctuated by the earthquake and their spatial distribution seemed to be related to the distance and the direction from the epicenter of the earthquake. Temperature increase at several hot springs has also been observed after the earthquake.

The investigation of the groundwater fluctuations is important not only for the prediction of earthquakes but also for the engineering geological activities, such as planning water supply for the mountainous villages, monitoring and solving groundwater pollution problems, and evaluating long-term stability of deep underground environments. We proposed several plans to monitor and manage data on groundwater fluctuations both in usual times and at earthquakes. We also showed the recommended countermeasure for the fluctuations of hot springs, and pointed out the importance to prepare water supply plans for the places where the drops of water levels have been observed by the previous earthquakes.

はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震に関しては、さまざまな検討がなされてきており、当委員会第三分科会でも地震前後の地下水挙動に着目し整理を行ってきた¹⁾。このほかにも、電力中央研究所地震被害調査グループ²⁾、田中ほか³⁾、西村ほか⁴⁾、佐藤ほか⁵⁾、遠田

ほか⁶⁾、大阪市立大学阪神・淡路大震災学術調査団地下水班⁷⁾、電力中央研究所兵庫県南部地震検討グループ⁸⁾などによって地震に伴う地下水変動に関する報告がなされている。また、藤森ほか^{9),10)}は余震域の直上にある新神戸トンネル内の地殻変動観測所での湧水量を、佐藤ほか⁵⁾は淡路島の地下水挙動と静岡県2箇所の地下水観測井の地下水位変動を報告している。さらに、地下水の

地球化学的検討に関しては佐藤・波毛¹¹⁾, IGARASHI *et al.*¹²⁾, TSUNOGAI and WAKITA¹³⁾らが報告している。

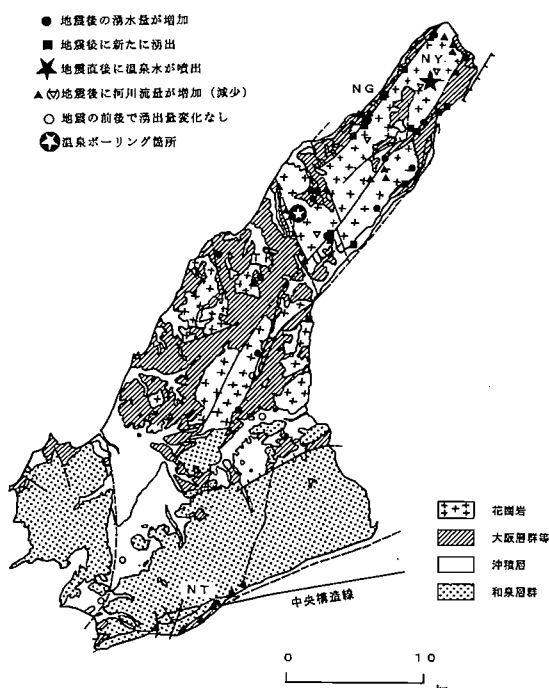
本編では、日本応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会¹⁾の整理の結果の概要とその後の検討の結果について述べるとともに、地震前後の地下水の変動に関してどのような点に注意し対策を講ずるべきかについて第三分科会としての提案を行う。

1. 浅層地下水の変動

本章では、浅井戸の変動や沖積層等からの湧水を対象とした浅層地下水について議論する。温泉水や深井戸の変動および岩盤からの湧水を対象とした深層地下水の変動に関しては次章で議論する。ただし、実際には両者を原位置において区分することやデータを両者に振り分けることは困難であり、ここで用いた区分は便宜的なものである。本章では、特に、浅層地下水の変動の例として、淡路島北部のぬる湯近傍の変動について議論を行う。

ぬる湯地点は、淡路島北部の山間部にあり（図Ⅳ-1, NY 地点）、北東-南西方向に延びる高度200~300 m で定高性のある山地部に位置している。ぬる湯地点では、地震直後に地下水の噴出現象が認められ、また、ぬる湯の南西約3.5 km の常磐ダム右岸側でも地震直後に地下水の噴出現象が認められている（図Ⅳ-2）¹⁾。ぬる湯周辺の大谷池から谷山ダム貯水池にかけての水田・斜面からは、その後も多くの湧水が認められた¹⁾。これらの湧水は、地震直後には多量の水を湧出していたが、その後漸減し、地震発生約3週間後の2月9日には湧水地点の半分程度はすでに湧出を終えており、また、約4か月後の5月10日にはすべての湧水は涸れている¹⁾。

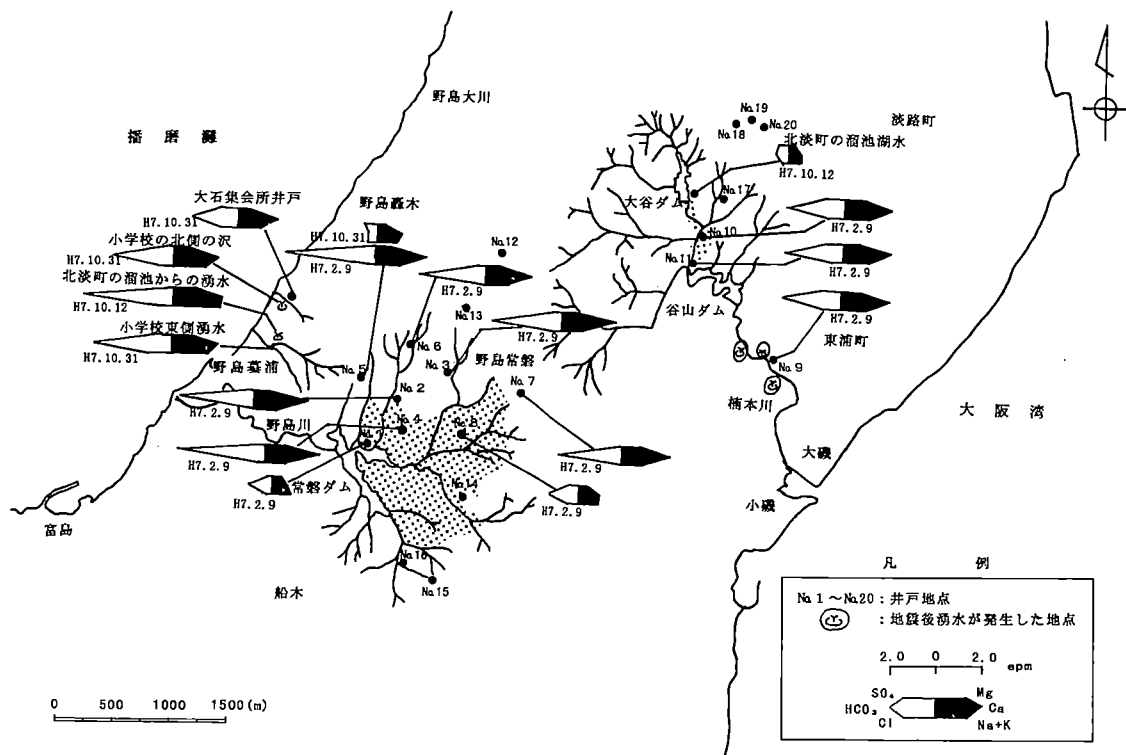
この地域および常磐ダム周辺地域では、いくつかの井戸で地震前後の地下水位の変動の調査がなされている（図Ⅳ-2；図Ⅳ-3）。これらの井戸では、地震前の井戸の水面の深さが計測されていなかったために、その値は聞き取り調査になっている。その後、5月10日時点での地下水位と10月12日時点での地下水位（一部井戸）の計測が行われている。また、地震直後の水位上昇の有無についても調査がなされている¹⁾。ここでは、調査を行った多くの井戸で地震直後の水位上昇が報告されている。また、すべての井戸において地震前に比べて5月10日時点での地下水位は低下している（図Ⅳ-3）。その低下量は、平均的には常磐ダム周辺では3 m 以上、谷山ダム周辺では7 m 程度、大谷ダム周辺で3 m 以上となっている。その後、10月12日時点では、No. 10と



図Ⅳ-1 淡路島における兵庫県南部地震前後の地下水挙動。
近畿地方土木地質図に佐藤ほか⁵⁾のデータを加筆。

No. 11の2つの井戸では地下水位が回復しつつあるが、まだ地震以前の地下水位までは回復していない（図Ⅳ-3）。また、計測したそれ以外の井戸では地下水位の回復は見られない。

ところで、地震後に谷山ダム下流約300 m の河川および沢部で多量の湧水が新たに発生しており（図Ⅳ-2）、また、常磐ダム北西約1 km の野島小学校裏の地点からも新たに地下水の湧出が始まったことが記載されている（図Ⅳ-1; NG 地点）²⁾。したがって、このような地下水の変動に関しては、現象を山間部地域のみで考察することは困難であり、より広域にわたる総合的な地下水調査を行う必要がある。特に、野島小学校裏では、花崗岩類よりなる岩盤中の亀裂から湧水が見られ、湧水の電気伝導度は370~470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (10月31日計測)である（図Ⅳ-4；表Ⅳ-1）。これらの湧水地点での流域面積は0.04~0.2 km^2 程度と狭く、流域が花崗岩類のみで構成されているにもかかわらず、その電気伝導度はかなり高い値を示し、比流量も大きな値を示している（図Ⅳ-5；表Ⅳ-1）。また、地下水の主要化学成分の分析結果を見ると、本地点からの湧水は、他の地域で流域が花崗岩のみと考えられる地点からの湧水に比較して、各成分の含有量が有意に高くなっている（図Ⅳ-2）¹⁾。この



図Ⅳ-2 常磐ダム、谷山ダム周辺の地下水などの水質分析結果（農林水産省資料に現地調査結果を追加）。網かけの領域は、地震直後に地下水の噴出現象が認められた地区を示す。

結果は、地震直後の常磐ダム近傍の値とよく似ていると見ることも可能であろう（図Ⅳ-2）。常磐ダムの集水域には、海成泥岩・砂岩・石灰岩からなる岩屋層上部層が分布しており¹⁴⁾、ダム周辺の地震直後の地下水の化学成分の特徴がこれらの地層を通ってきた地下水によって説明されるとすれば、野島小学校裏の湧水の特徴は、それが、地形的な集水域のみでなく東部の山間部に分布している神戸層群中を通ってきた可能性を示唆しているのかも知れない。No. 5の井戸の水質分析の結果では、地震後10か月程度たった10月31日の井戸水の主要化学成分の含有量がかなり低くなっており、山間部の地下水が移動したことを間接的に示しているとも捉えられる。断層により被圧されていた地下水が、野島断層の活動によりバルブ¹⁵⁾が外され、西方に移動したために特定の場所に大量の地下水湧出が起り、一方では地下水の枯渇が生じた可能性が考えられる。野島小学校裏の湧水とNo. 5の井戸のトリチウムを測ることにより、地下水の年代を推定することを試みたが、採水時期が地震後かなりたった時期であったためか、これらの水の年代値の有意な違いは認められなかった。ちなみに、大阪市立大学

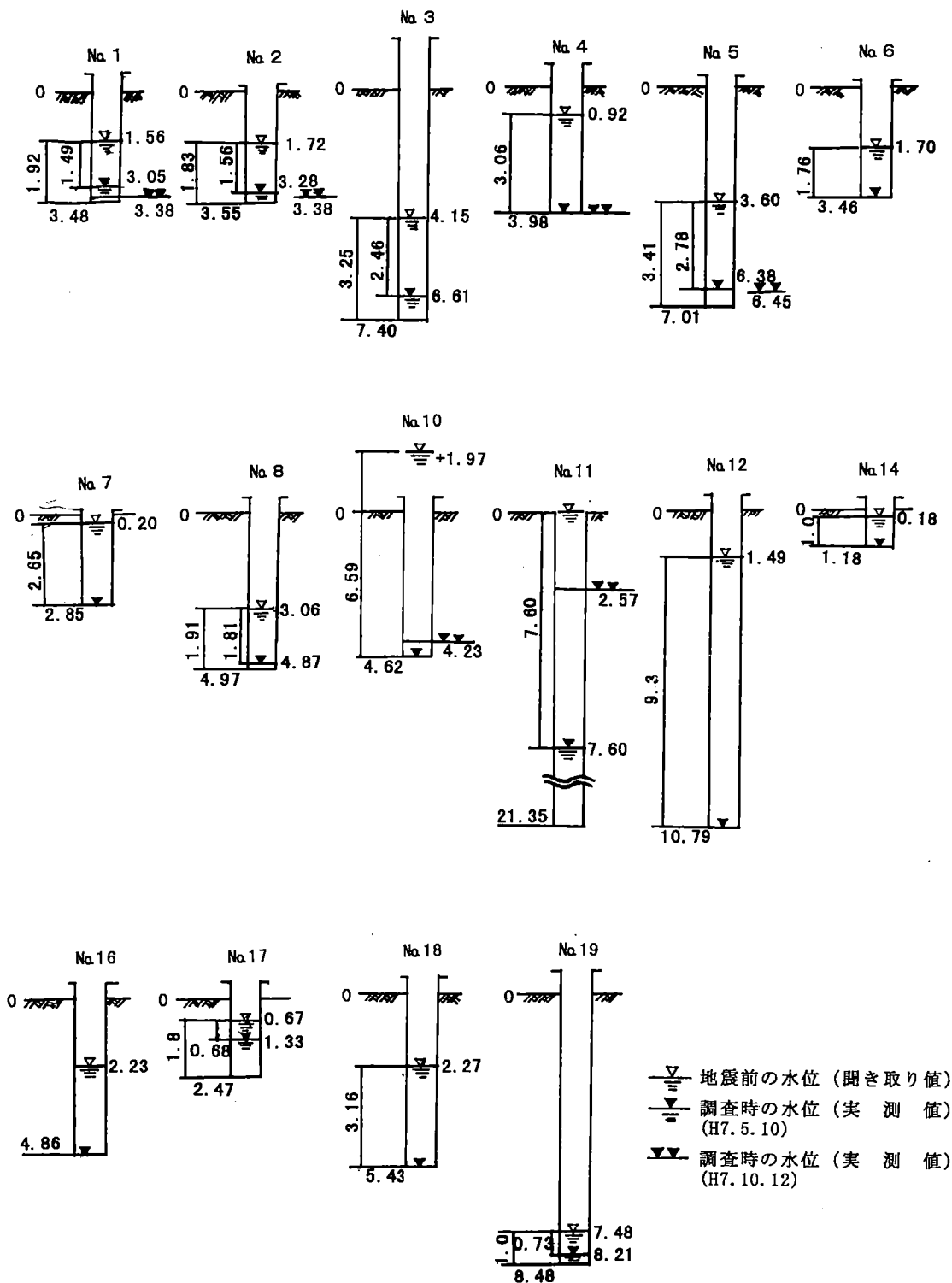
表Ⅳ-1 野島小学校周辺の流量状況

流域区分は図Ⅳ-5に示されている。(H7.10.31)

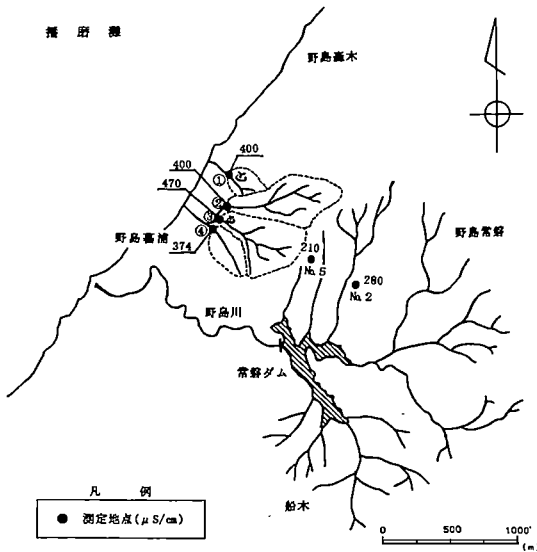
流域区分	①	②	③	④
流域面積 (km ²)	0.04	0.19	0.17	0.06
水温 (°C)	17.1	17.3	18.0	18.0
電導度 (μS/cm)	400	400	470	374
流量 (m ³ /分)	0.50	0.050	0.70	0.50
比流量 (l/s/km ²)	208	4	69	139

阪神・淡路大震災学術調査団地下水班⁷⁾によっても同様の推論がなされている。

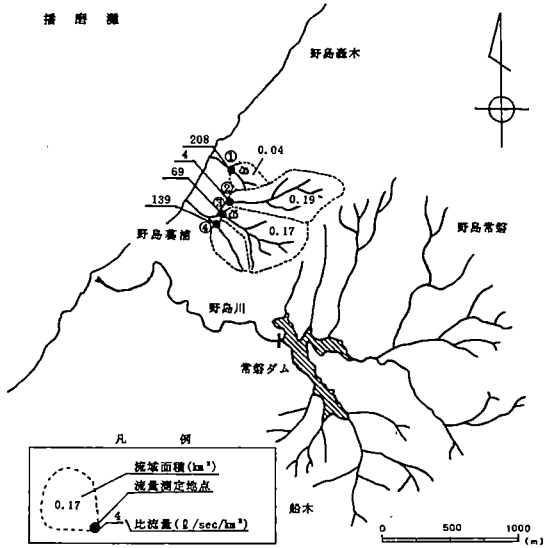
ぬる湯近傍におけるこのような地震後の地下水位低下は、現地での聞き取り調査によると、1946年の南海道地震の時にも経験されており、その時は、井戸水を地震以前の時のように使用できるようになるまでに約1年かかったとのことである。今回の地震においても、約



図Ⅳ-3 常磐ダム、谷山ダム周辺における地震前後の地下水位の変動（農林水産省資料に現地調査結果を追加）。
井戸の位置は、図Ⅳ-2に示されている。



図Ⅳ-4 野島藁浦地区周辺（野島小学校裏）の湧水の電気伝導度分布。



図Ⅳ-5 野島藁浦地区周辺の河川の比流量。

10か月たっても地下水位の回復がそれほど見られないことから、本地域の地下水は、地震に伴って一時的に（比較的長期にわたって）水位を低下させるような挙動を示すようである。

2. 広域地下水の変動

本章では、広域の地下水変動についてとりまとめる。データが1,000 m級のボーリング孔の地下水位や自噴量や岩盤中からの湧水等を主とすることから、ここで対象とする地下水は、深部岩盤中に賦存される地下水と考えられるが、浅層地下水も一部含まれているものと考えられる。

2.1 淡路島における地下水挙動

地震直後において、淡路島各地において湧水期であるにもかかわらず、河川流量が急激に増加したり、湧泉の湧出量の増加や白濁などが報告された。現地調査により得られたデータは図Ⅳ-1に整理されている。このうち顕著なものは前節にまとめられているが、それ以外にも地層境界をなす断層沿いからの湧出が認められている¹⁾。また、淡路島の最南端の南淡町には北側の白亜紀の堆積岩類と南側の三波川変成岩類との境界をなす中央構造線が分布するが、構造線の北側に源を発する河川の流量が地震直後に約10倍まで増加したことが報告されている⁸⁾（図Ⅳ-1；NT地点）。

2.2 広域地下水挙動

本節では、主として深井戸、温泉井戸を中心に地震前後の地下水位の変動に関する広域的範囲（300×300 km）における現地調査や、電話による情報収集などの調査結果について整理する。データ収集の基本的考え方は遠田ほか⁶⁾、電力中央研究所兵庫県南部地震検討グループ⁸⁾を参照されたい。

口絵-5に遠田ほか⁶⁾による信頼度Ⅰおよび信頼度Ⅱのデータをプロットしたものを基図とし、佐藤ほか⁵⁾、KING *et al.*¹⁶⁾、西村ほか⁴⁾のデータを加筆、修正したものを示している。この図から、以下の特徴が挙げられる。

a) 震源域から約200 kmの広域にわたり地下水が異常な挙動を示している。

b) 震源付近は湧出量の増大や新たな湧出などが認められる。

c) 震源から離れた丹後半島や紀伊半島の先端部、四国の北東部で温泉の湧出量が増大しているのに対し、紀伊半島中部から大阪平野および丹波山地等では変化無しか、もしくは湧水量や河川流量が減少したり貯水池水位が低下したりしている。

d) 湯村温泉、白浜温泉などでは、泉温の上昇が見られ、また四国の中央構造線沿いの温泉では、温泉水の白濁や黒濁が認められる。

e) 城崎温泉では地震から3日遅れで泉温の上昇が認められている⁶⁾。

こうした地下水挙動を説明するためのモデルとして西村ほか⁴⁾, KING *et al.*¹⁶⁾, 電力中央研究所兵庫県南部地震検討グループ⁸⁾は断層モデルから推定される地殻歪変化との対応を検討している。しかし、今回のデータを見るかぎり、地下水挙動の地域特性は地震の初動分布や断層モデルに基づく体積歪分布等とあまり一致していないようにも見える^{1),8)}。これについては、今後断層モデルの改良を行うとともに、新たな応力歪-地下水連成解析手法の開発が必要とされよう。

2.3 連続観測結果

今回の地震の前後の地下水位・水温の連続観測がいくつかの地点で行われている^{4)-6),9),10),16),17)}。詳細については、個々の論文を参照されたい。

3. 地下水の水質変化

地震前後の地下水の化学的な性質の変化の把握は、地下水中のラドンガスの挙動観測によって予知に成功したとされるタシケント地震（1966年）や中国での例に見られるように、地震予知の観点からも重要な課題である¹⁸⁾。また、地化学的条件の変化は地下深部環境の安定性の問題や長期にわたる物質の隔離性や物質移行の評価の観点からも重要である。

今回の地震に伴っては、佐藤・波毛¹¹⁾, 角皆・脇田¹⁸⁾, TSUNOGAI and WAKITA¹³⁾によって地下水の化学組成に関する議論がなされており、また、佐伯ほか²⁰⁾, IGARASHI *et al.*¹²⁾によって地下水中のラドン濃度の連続観測結果が公表されている。

4. ま と め

今回の兵庫県南部地震に伴って震源域のみならず、かなりの広域にわたって地下水が異常な挙動を示したことが明らかになってきた。震源域近傍の山間部では、浅層に存在していると思われる地下水が、一時的に急激な噴出・湧出し、その後徐々に湧水量・地下水位を減少・低下させ、多くの地点で井戸枯れを長期にわたって起こすような挙動を示している。また、それに伴って移動した地下水が、かなり離れた地点から湧出したものと思われ、地震に伴って地下水が大きく移動していることが推定された。また、比較的深部に存在していると思われる地下水や温泉水では、震源域からの距離に応じて、湧水量や水位の増加・上昇や減少・低下が特徴的なパターンを示すことが明らかとなり、温泉水の温度なども地震の前後で変化することが示された。

このような地震時の地下水挙動は、地震の予知と言った観点からの意義とともに、地震時における生活用水

・農業用水等の水資源確保、温泉水等の地熱資源の挙動評価、異常出水に伴う地表環境への影響、地下構造物の維持管理や地震時の液状化に伴う地下構造物の安定性、地下水汚染の問題、超長期にわたる深部地下水の安定性の評価、といったさまざまな観点からも重要な検討課題であると考えられる。

しかしながら、今回我々は、地下水にかかわる現象の一部をかいま見たのみであり、その包括的な理解をすることは現状では困難である。その最も大きな理由は、地下水が地震・潮汐・気圧変化等さまざまな擾乱に対してどのように反応するかに関する検討を系統的に行ってこなかったことにあると思われる。このような観点から今後早急に検討すべき課題は以下のようなものであると考える。

〈平常時における地下水計測〉

平常時における地下水位変動を経時的に計測する井戸を設定しデータの取得を行うとともに、そのデータを適切に管理し、要請がある場合には、自由にデータを公表するようなシステムを作ることが重要であると考えられる。平常時における地下水位変動は、被圧地下水では気圧・潮汐・地球潮汐の影響を受けて起こるものであると考えられており、そのような変動から逆に帯水層特性を知るための方法がすでに確立されている²¹⁾。松本・高橋²²⁾は、地震時に地下水位の変化が大きくなる井戸は、平常時の気圧・潮汐・地球潮汐等の影響による地下水位変動も大きいことを報告している。このような点から、平常時における経時的な計測を行うことによって、地震時の地下水位の変動の大小をより適切に理解することが可能になることが期待される。また、広域地下水挙動の単純なモデル化^{4),8),16)}で地下水挙動の地域特性をうまく説明できない理由の一つとして、帯水層の特性を考慮していないことも考えられることから、地震のような現象の深部地下水の長期安定性に与える影響を適切に評価するためにも、平常時の経時的なデータ取得は重要であろう。

〈地震時における地下水変動データの収集・管理〉

地震時には、今回の地震に限らず過去の多くの地震で地下水位の変動が起こったことが報告されている²³⁾。しかし、多くの場合、一時的にデータの収集を行い、記載をするまでしかされておらず、その後貴重なデータが利用されなくなっているのが実情であろう。これは、とりもなおさず、個々の現象の意味を物理的に理解することができなかったためであると考えられる。今回の検討から、完全に整理された結果を我々は得ることはできていないが、少なくともどのような所から情報の提供を

受けられるかを知ることができたことは意味があることであろう。今後は、平常時と同様に、地震時における変動のデータを一元的に収集するシステムを構築し、できるだけ早い時期に広範なデータを得ることができるようになることが望まれる。現地調査を行うに当たっては、水位・水質・湧水量・濁りの有無等のデータを地震発生後現地の状況に応じてできるだけ速やかに取得するとともに、その後の変化に関するデータを適当な間隔毎に得ることも必要であろう。また、今回の事象で見られたように、ある地点で起きている現象がその周辺だけの問題ではなく、もう少し大きな水の循環であることも考えられることから、地形・地質や広域水文・水理学的な検討を現地で常に行うことが不可欠であろう。

〈温泉での地下水変動に対する対応〉

温泉等においては、一時的に水位が低下・上昇するような現象が地震に伴って広い範囲で起こる²⁴⁾が、今までの経験では、このような変動は一般に数か月程度で地震以前の状態に戻るようである。したがって、基本的には大きな問題になることはないと思われるが、水質が変化している可能性があることから、変動があった地点に関しては、温泉水の分析を平常時よりも密に行うことよいと思われる。

〈地震後の水資源の確保の計画〉

水資源の確保に関しては、地域毎の特性があるために、一概に対策はたてられないと思われるが、少なくとも過去に、地震に伴って地下水位が低下しているような地域では、地震時の緊急的な水確保のための対策を考えておくことが必要であろう。例えば、平常時は地下水を利用するものの、緊急時のための貯水施設の計画や、他の地域からの水の導入の可能性等について、災害対策の中で積極的に考えていくことが望まれる。

いずれにせよ、地震に伴って地下水がどのように挙動し、それがどのように推移していくかについて理解をさらに深めるとともに、平常時には地下水はどのような挙動をしているかに関する知見をしっかりとまとめておくことが今後必要となると思われる。そのためには、地震時にどのようなデータをどのような手法を用いて、どのような地点で、どれだけの密度で取得することが必要なのかに関して検討するとともに、平常時にも意味のあるデータを取得する手段を考えることが重要であろう。

地下水変動現象に対する認識を持ち、モニタリングに関する検討、データの収集を行うシステムに関する議論を行い、観測を早急に始めることが今回の地震に伴う知見を今後に活かすために望まれている。

参 考 文 献

- 1) 日本応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会 (1995) : 兵庫県南部地震—地質・地盤と災害—報告書, pp. 316-343.
- 2) 電力中央研究所地震被害調査グループ (1995) : 1995年兵庫県南部地震被害調査速報, 電力中央研究所報告, U94042, 133p.
- 3) 田中和広, 千木良雅弘, 宮川公雄, 馬原保典, 長谷川琢磨 (1995) : 兵庫県南部地震における地下水挙動調査結果, 1995年日本地下水学会春期講演会講演要旨, pp. 8-11.
- 4) 西村 進, 小泉尚嗣, 北川有一, 浅田照行, 赤松 信 (1995) : 兵庫県南部地震前後の地下水・温泉水の変化, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, pp. 121-124.
- 5) 佐藤 努, 松本則夫, 高橋 誠, 佃 栄吉 (1995) : 1995年兵庫県南部地震に伴う地下水変動—淡路島の湧水および静岡県内の地下水観測, 「1995年1月17日兵庫県南部地震」調査速報会記録, pp. 59-60.
- 6) 遠田晋次, 田中和広, 千木良雅弘, 宮川公雄, 長谷川琢磨 (1995) : 兵庫県南部地震に伴うコサイスミックな地下水挙動, 地震, Vol. 48, pp. 547-553.
- 7) 大阪市立大学阪神・淡路大震災学術調査団地下水班 (1996) : 兵庫県南部地震の温泉を含む地下水への影響, 柴崎達雄ほか (編) : 大震災 そのとき地質家は何かをしたか, 東海大学出版会, pp. 133-147.
- 8) 電力中央研究所兵庫県南部地震検討グループ (1996) : 1995年兵庫県南部地震における断層, 地震動, 被害に関する調査研究, 電力中央研究所報告, U29, 106p.
- 9) 藤森邦夫, 山本剛靖, 大塚成昭 (1995) : 六甲高尾観測室における兵庫県南部地震の関連する湧出量変化, 地震学会予稿集, A68.
- 10) 藤森邦夫, 山本剛靖, 石井 紘 (1995) : 1995年兵庫県南部地震に関連した地殻変動と涌水量変化, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 148-153.
- 11) 佐藤 努, 波毛康宏 (1995) : 淡路島の地下水変化—1995年兵庫県南部地震—, 地震学会予稿集, A66.
- 12) IGARASHI, G., SAEKI, S., TAKAHATA, N., SUMIKAWA, K., TASAKA, S., SASAKI, Y., TAKAHASHI, M. and SANO, Y. (1995) : Ground-water anomaly before the Kobe Earthquake in Japan, Science, Vol. 269, pp. 60-61.
- 13) TSUNOGAI, U. and WAKITA, H. (1995) : Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan, Science, Vol. 269, pp. 61-62.
- 14) 水野清秀, 服部 仁, 寒川 旭, 高橋 浩 (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), 90p.
- 15) SIBSON, H. (1980) : Implication of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence, Tectonophysics, Vol. 211, pp. 283-293.
- 16) KING, C.-Y., KOIZUMI, N. and KITAGAWA, Y. (1995) : Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake, Science, Vol. 269, pp. 38.
- 17) 重富國宏 (1995) : 逢坂山観測所における兵庫県南部地震前後の地下水位変化, 地震学会予稿集, A67.
- 18) IGARASHI, G. and WAKITA, H. (1995) : Geochemical

- and hydrological observations for earthquake prediction in Japan, *Jour. Phys. Earth*, Vol. 43, pp. 585 - 598.
- 19) 角皆 潤, 脇田 宏 (1995) : 1995年兵庫県南部地震前の地下水の化学組成の変化, 月刊地球, 号外 No. 13, pp. 190 - 193.
- 20) 佐伯雄司, 五十嵐丈二, 佐野有司, 高畑直人, 済川 要, 田阪茂樹, 佐々木嘉三, 高橋 誠 (1995) : 1995年兵庫県南部地震前の西宮における地下水中ラドン濃度の変動, 月刊地球, 号外 No. 13 pp. 194 - 199.
- 21) VAN DER KAMP, G. and GALE, J. E. (1983) : Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains, *Water Resourc. Res.*, Vol. 19, pp. 538 - 544.
- 22) 松本則夫, 高橋 誠 (1993) : 地震に伴う地下水位変化検出のための時系列解析—静岡県浜岡観測井への適用—, 地震, Vol. 45, pp. 407 - 415.
- 23) 日本応用地質学会阪神大震災調査委員会第三分科会 (1995) : 「阪神大震災」中間報告会—人工改変と地震災害—予稿集, pp. 126 - 131.
- 24) 川辺岩夫 (1991) : 地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震, Vol. 44, pp. 341 - 364.

地震断層・活断層関係の用語について

小出 仁*・櫻井 孝**

Technical Terms Related to Surface Ruptures and Active Faults

Hitoshi KOIDE* and Takashi SAKURAI**

1. ま え が き

1995年1月の兵庫県南部地震の際に淡路島北西部に地震断層が出現したため、地震断層や活断層についての社会的関心が高まり、緊急課題としてその調査・研究が進められつつある。しかし、地震断層や活断層はまだ多くの人々に十分理解されているとは言えない。理解が不十分であると、無視されたり、あるいは逆に過剰反応も起こりがちである。地震断層や活断層という言葉の社会的影響は既に大きくなっているだけに、その実体をきちんと明らかにしていく必要がある。活断層研究は発展途上の学問分野であるので、用語も十分定着していないものもあるが、地震断層・活断層関係の主要な用語について簡単に解説し、整理を試みた。なお、地震断層・活断層に関して詳しくは、多くの解説書が出版されており^{1)~5)}、本誌でも別にもっと詳しい解説がなされている^{6),7)}。また、「新編 日本の活断層——分布図と資料」⁸⁾の解説が参考になる。本解説もこれらの文献に多くを負っている。

2. 地表地震断層

大きな地震は、地下の断層の一部の破壊を引き金にして、破壊が断層沿いに伝播して、断層の両側の地盤が急に互いにずれ動くことにより発生する。地震の震源となった「震源断層」(earthquake source fault)の活動が地表にまで伝播し、地表に地割れを生じたものが「地震断層」(earthquake ruptures)である。地表に生じた地

割れ群であることを明確に示すため、「地表地震断層」ともいう。「地震断層」と「震源断層」が、混同されることがあるため、「地表地震断層」という言葉を使う人が最近多くなっている。以後、本文では「地震断層」という用語は、「地表地震断層」という用語から「地表」を省略したものとして用いることにする。地震の震動の結果により二次的に生じた地割れ(地すべり、崩落、液状化によるもの)は(地表)地震断層に含めない。

「地震断層」を英語に直訳すると earthquake fault になるが、英語ではむしろ surface ruptures や surface fault break あるいは surface faulting と表現されることが多い。地表地割れとか地表断層運動という意味になるので、地震に伴う地割れだけでなく、断層のクリープによる地割れも含むことになる(米国のサンアンドレアス断層の一部等では、クリープ creep 運動といって、両側の岩盤がずるずるとずれ動き、地震がないのに地割れが生じる)。

最近では、余震分布・波形解析・地殻変動解析から「震源断層」のモデルが推定できるようになっている。異なる方法で推定された震源断層と地表地震断層は多くは大局的に矛盾しないものの、それぞれの推定方法により多少の違いがある。地表地震断層と震源断層は全く別のものと考える人もいる。大きな地震の震源(実は破壊開始点)は、地下十数キロメートル以上の深さにあり、地表から1ないし2キロメートル程度の浅部は岩盤強度が低いので地震発生にはほとんど寄与していないと考えられる。しかし、真正の地表地震断層は震源断層の延長であり、その形態や動きをよく反映していると思われる。観測の方法が異なれば、それぞれ震源断層の一面を見ているのであり、それらの情報を総合して震源断層の

* 工業技術院地質調査所 Geological Survey of Japan

** 鉄道総合技術研究所 Railway Technical Research Institute

実像を明らかにするのは今後に残された大きな課題である。

大きな地震が起きると、地表にさまざまな「地割れ」(fissure, crack)が発生する。地割れは、地震動により物質境界付近に発生したり、地震動に誘発された地すべりや液状化の効果でも発生する。このような地震動の結果として発生した地割れは、震源断層と直接には関係がないので注意しなければならない。強い地震動による二次的割れ目地震断層に含める考え方もあるが、地震が発生した震源断層の断層運動とそれに関連した地殻変形に関わる割れ目のみを地震断層に含めるべきである。

震源断層の地表への現れである地震断層も、実際は、ずれによる明瞭な断層破断面として地表に現れることはむしろ稀であり、雁行状の小割れ目群や開口地割れや地面の盛り上がり (pressure ridge) や陥没 (sag) を含む屈曲し、かつ断続的な地割れ群として現れることが多い (見かけから mole track と呼ばれる)。地表付近の軟質な被覆層が厚いと、顕著な割れ目が生じず、とう曲 (flexure) として現れることもある。地震断層が分岐したり、共役な断層が派生することもある。また、本体と考えられる地震断層からかなり遠くに孤立した副断層 (subsidiary fault) が派生することもある。地震断層がこのような複雑な現れ方をするのは、浅部の軟質な堆積層の厚さ等の地形・地質要因によるところが大きいが、震源断層自体の複雑さも表していると思われる。地震が発生した原因となった震源断層の運動と周囲の地殻の変形に起因する地割れやとう曲は、地震断層として扱われる。とう曲や地表の変状も震源断層の性質を反映しているので、地割れに劣らず重要である。

地震断層の付近は、通常は震動も強烈であるため、震動の結果による二次的割れも多く発生しやすい。また、断層自体は活動していなくても、破碎帯による地盤の弱部になっているなどのため、地震動により生じた地割れも断層沿いに多い傾向がある。地表地震断層に重なって地すべりが発生していることもしばしばある。

これらの地震に伴うさまざまな地変を見分けるには、まず第一に現場における観察が重要である。比較的小規模な地すべりに伴う地割れ等は、地割れの分布・形状と地割れに囲まれた地盤の変位方向などから現場で見分けることができる。地すべり岩塊は重力により最大傾斜方向にすべり、地割れは地すべり岩塊を囲むように出現するので、地形に応じて割れ目の方向やずれが変化する。これらの震動の結果生じた二次的地割れを現場で分別する必要がある。しかし、大規模な地すべりなどでは、局所的な地割れの形状だけでは見分けられないことがあ

る。震源断層が直接地表に現れた地表地震断層であることを確かめるには、地割れの広域的な分布パターンや地形・地質構造・地震データ・地殻変動等を総合的に判断しなければならない。そのためには、個々の地割れの分布・形状および両盤の変位のセンスや量を定量的に計測し、正確に記載する必要がある。とう曲や地表の隆起・沈降等の変状も記載する。それらの局地的な正確な記載を広い範囲で集積することにより、広域的なテクトニックな変動に伴う地割れであるか否かの判定が可能になる。

地表地震断層の調査の目的は、地震を発生する断層、すなわち震源断層の特性を明らかにすることである。そのためには震源断層を反映する地表地震断層の地割れと他の地割れを明確に区別する必要がある。地震後の二次災害を防ぐためには、将来数千年も動かないであろう地震断層より、今後数年にわたり注意が必要な地すべりの地割れの調査の方がむしろ重要なのであるが、地震の性質を明らかにするためには地震断層を正確に識別することが重要である。震源断層に関連する地割れか、あるいは震動の結果生じた二次的地割れか判定が困難な「疑わしい地割れ」は地表地震断層とは区別し、しかし地表地震断層の場合と同様にその分布・形状・両盤の変位について詳細に記載するべきである。正確な記載があれば、後に地震に関する知見が増大したときに見直すことが可能になる。

3. 活断層

活断層 (active fault) は、「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を、活断層という」と定義される。この定義は曖昧で、誤解を生みやすいが、現状ではこれ以上に適切な定義がない。要は、「将来も活動することが推定される断層」ということにあるが、将来も活動することを推定する根拠が、地形・地質的証拠により示される「最近の地質時代に繰り返し活動した」ことに現状では限定されているため、この言葉を前につけても事実上同じことになる。

「活動する」とは、断層あるいは断層帯を境として両側の岩盤がずれ動くことである。前述のように、外国では地震を伴わずにずれ動く (クリープ運動) 断層があるが、日本の断層では、地震直後の短期間を除き、クリープ運動を起こしている断層は知られていない。繰り返し活動したということは、繰り返し地震を起こしたことを意味する。過去の活動による地形の食い違いが残る活断層は、過去の地表地震断層の名残りである。すなわち、日本では、活断層が存在すれば、過去にそこで地表地震

断層を生じるような浅い大きな地震（いわゆる直下型地震）が何回も発生し、将来も発生する可能性が高いと考えなければならない。

調査記録に残っている明治以後に出現した地表地震断層のうち、震源断層の直接の地表延長と考えられ、かつ地形に活動の痕跡を残した断層のみを表-1に示した。このような地表地震断層が同じ場所で繰り返し発生する（累積性）ことにより、活断層と認定できるような特異な地形（活断層地形）の連なりが形成される。これらの地震断層はいずれも既存の活断層にはほぼ沿って出現しているので、累積性があり、活断層地形の発達過程をこれらの地震断層が示していると考えられる。松地地震断層や福井地震断層も震源断層を反映する立派な地震断層であるが、とう曲とか小地割れ群にとどまるうちは、地形にあまり痕跡が残らないため除外した。最大変位量は、水平成分、鉛直成分それぞれの最大値を示したので、両者は同一地点での値ではない。地形に残る地表地震断層が現れた最小の地震は、三河地震のマグニチュード (M) 6.8である。9件の地震中の8件までが $M7$ 前後 ($M6.8$ から $M7.3$ まで) であり、濃尾地震のみが $M8$ 級の巨大地震である。

同じ断層が繰り返し活動し、将来も活動するためには、断層をずれ動かす地殻の広域応力状態がその間変わっていないことが前提になる。「最近の地質時代」とは、地殻の広域応力場が現在とほぼ同じとみなせる期間を意味することになる。「日本の活断層」⁹⁾では、第四紀を「最近の地質時代」としているので、最近200万年程度の間に繰り返し活動したと思われる断層が活断層としてリストアップされている。しかし、第四紀に関する研究が進んでくると、第四紀後期とそれ以前では地殻の応力状態が若干変化し、50万年以上前に活動した断層は必ずしも現在活動する可能性があるとは言えないことがわかってきた。そのため第四紀後期すなわち最近50万年程度、あるいは約12万年前の最終間氷期以降に活動を繰り返した証拠を持つ断層のみを活断層とするようになりつつある。

断層のずれの量や向きを知ることのできる目印を断層変位基準という。断層変位基準は、段丘面・尾根・谷や地層などの地形・地質学的証拠であるが、地表地震断層では道路などの人工物も使える。形成年代 (T) のわかる断層変位基準によって断層の累積変位量 (D) が求められると、平均変位速度 (long-term slip rate) が $S=D/T$ により算出される。平均変位速度は通常ミリメートル/年で表す (メートル/千年としても同じ数になる)。通常の活断層は常時は全く動かず、間欠的にたま

に活動するだけであるので、断層運動の繰り返しの間隔を再来間隔 (recurrence interval) と呼ぶ。再来間隔は地震発生間隔でもあり、平均変位速度よりむしろ重要であるが、平均変位速度の方が求めやすいので、断層の活動度は平均変位速度で表す。しかし、活断層は間欠的に動くので、通常の速度の概念と異なることに注意が必要である。

活断層は、活動度によりA級、B級、C級の3ランクに分ける。A級活断層は、1ミリメートル/年以上の平均変位速度を持つ主要な活断層で、日本で100本程度見つけられている。B級活断層は、1ミリメートル/年未満かつ0.1ミリメートル/年以上の平均変位速度を持つ断層で、「日本の活断層」⁹⁾に約800本と最も多く記載されている。C級活断層は、0.1ミリメートル/年未満の平均変位速度を持つ断層で、B級活断層より見つけられている数は少ないが、これは日本の平均的な浸食速度より1桁も変位速度が小さいため、断層変位地形が残りに難いためと考えられる。したがって、C級活断層は見出されていないものが多数あると思われる。

活断層を見つける第一の手がかりは地形である。空中写真の実体視により、地形の微妙な起伏も詳しく読み取ることができ、しかも上空から見るような広い視野で観察できるようになって、多数の活断層が発見されるようになった。「日本の活断層」⁹⁾では活断層であることが確実なものを、確実度Ⅰとし、確実さにより確実度Ⅱ、Ⅲとランク分けをしている。堆積平野などは軟質の堆積物に覆われて基盤に断層があっても地表には明瞭な変形が現れないので、活断層を見つけ難い。日本の大都市は堆積平野にあるので、地震防災上このような伏在断層が大きな問題である。しかし、物理探査法の発達により、堆積平野部や海底の断層の調査が進みつつある。

活断層の実体を定量的に明らかにするためには、ボーリング調査やトレンチ掘削調査が不可欠である。日本の主要活断層の活動履歴を明らかにするため、地質調査所等によりトレンチ掘削調査が系統的に進められている。トレンチ調査や歴史地震等により、断層の最終活動時期が t 年前、平均地震発生間隔が R 年とわかると、活断層からの地震発生危険度を示す指数 t/R が求められる。MATSUDA (1977)⁹⁾は、 t/R が0.5以上の活断層を「要注意断層」(precaution fault) とした。

トレンチ掘削による断層の活動履歴調査により、活断層からの地震発生の仕方が詳しく解明されつつある。しかし、地震発生の間隔のばらつきや地震発生年代推定の誤差により、活断層調査による地震発生予測には数百年の誤差がある。実際、 t/R が既に1以上になっている活

表-1 活断層地形を成長させた地表地震断層 (明治以降, 内陸)

No	地 震	年 月 日	M	断 層 名 (活動度)	断層長 (km)	最大変位量(m)	
						水平成分	鉛直成分
1	濃尾	1891.10.28	8.0	濃尾地震断層系 (A)	80	左 8.0	南西 4.0
2	陸羽	1896. 8.31	7.2	千屋・川舟断層 (B)	40	0 ?	東 3.0
3	北丹後	1927. 3. 7	7.3	郷村断層系 (B~C)	>20	左 2.6	西 1.2
4	北伊豆	1930.11.26	7.3	北伊豆断層系 (A)	30	左 3.5	西 2.4
5	鳥取	1943. 9.10	7.2	鹿野・吉岡断層 (C)	12	右 1.5	南 0.8
6	三河	1945. 1.13	6.8	深溝断層系 (C)	20	右左1.3	南西 2.0
7	伊豆半島沖	1974. 5. 9	6.9	石廊崎断層 (B)	>5.5	右 0.5	南西 0.3
8	伊豆半島近海	1978. 1.14	7.0	稲取大峰山断層 (C)	>4	右 1.2	南西 0.4
9	兵庫県南部	1995. 1.17	7.2	北淡地震断層系 (A)	>10.5	左 2.1	南東 1.4

断層もある。この誤差を小さくすることが活断層調査の有用性を高めるために必要である。

長大な活断層系の場合、いくつかの区間 (セグメントと言う) に分かれて、ある時は単独のセグメントだけが動いて地震を起こしたり、ある時は複数のセグメントが一緒に動いて大きな地震を発生するという複雑な挙動をする。活断層系の中で、地震発生の単位となるセグメントを見分けること (セグメンテーション問題と言う) が重要な課題になっている。

他方、濃尾地震のように、複数の活断層が一緒に動いて巨大な地震を起こすこともある。複数の活断層群が一緒に動くことにより起こしうる最大の地震を知ること (グルーピング問題という) は、防災上特に重要である。一つの大地震を起こすことがある断層群を一つの断層系

として考えることができる。

松田 (1990)¹⁰⁾は、5 km 以内に近接する活断層は一緒に動いて大きな地震を発生する可能性があるとして活断層群をグループ分けし、そのうち合計の長さが10 km 以上になる活断層のグループを「起震断層」(seismogenic fault) とした。起震断層の全体の長さから、その起震断層の起こす最大地震を推定する。さらに、20 km 以上の長さを持つ起震断層を主要起震断層とし、全国で A 級の活動度の主要起震断層27本、B 級の活動度の主要起震断層77本をリストアップしている¹¹⁾。

工学関係では「活断層」の代わりに、第四紀に活動した証拠のある断層を意味する「第四紀断層」(Quaternary fault) という用語を用いることがある。「活断層」の定義では「最近の地質時代」の長さが決められていない

が、「第四紀断層」では約200万年と決められている。しかし、「第四紀断層」には、最近約200万年間に一回でも活動した断層はすべて含まれるので、「活断層」よりかなり広い範囲の断層を含むことになる。そのため、施設の耐用年数を考慮して、工学的なスパンで将来活動する恐れのある断層を「要注意な第四紀断層」とする。

原子力施設の耐震設計¹²⁾では、歴史地震や活動度の高い活断層から発生する可能性のある地震のうち、敷地に与える影響のもっとも大きい地震を設計用最強地震、それを上回る地震で活断層や地震地体構造に基づく地震と $M=6.5$ の直下型地震のうち敷地に与える影響のもっとも大きい地震を設計用限界地震という。最重要な原子力施設は、設計用最強地震に耐えるとともに、設計用限界地震に対しても安全機能を失わないだけの「ねばり」を持つことが要求されている。設計用最強地震を発生すると想定される断層を S1 相当断層、設計用限界地震を発生すると想定される断層を S2 相当断層と呼ぶ¹³⁾。具体的には、A 級活断層であって、1 万年前以降に活動したもの、または地震再来間隔 1 万年未満のものを S1 相当断層、それ以外を S2 相当断層とする。また、B・C 級活断層であって、5 万年前以降に活動したもの、または地震再来間隔 5 万年未満のものを S2 相当断層とし、それ以外は震源断層として考慮しない。また、歴史地震や微小地震観測により活動性が顕著に認められるものも S1 相当断層とされる。A 級活断層の再来間隔は 1 万年未満と考えられるので、この基準に基づけば事実上すべての A 級活断層が S1 相当断層に認定されることになる。

最近では、原子力施設やダム以外の構造物の耐震設計にも活断層を考慮するようになりつつある¹⁴⁾。例えば、構造物の供用期間中に 1~2 度発生する確率を有する地震動（レベル 1 地震動）に対しては構造物が損傷しないこと、および陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動（レベル 2 地震動）に対しては、構造物が損傷しても重要な構造物では早期に修復可能な程度、それ以外の構造物でも構造物全体が崩壊しないことを原則としている。このレベル 2 地震動について、内陸活断層を考慮し、震源断層の近傍の強震動について再評価することが土木学会から提言されている¹⁴⁾。

活断層であるかどうかの判定には、最近10万年程度以内に形成された地形や若い堆積物の変形が判断材料になる。これらのデータは、ほとんど地表および地表から

数メートルから数十メートル以内で得られる。このため、地表の地形・地質調査やトレンチ調査が活断層判定の有効な手段になっている。手がかりとなる地形や若い堆積物が浸食や人工的改変によって失われていたりすると、活断層であるか否かの判定が困難になる。断層内物質の解析や応力測定や地下ガス・地温等により、断層の活動性を評価するための研究開発もなされているが、地形・地質以外に信頼できる活断層判定法は未だ開発されていない。現状では、深部の断層が活動的か否かを判定するには、地震そのものを待つ以外にはないが、地震が発生していないから将来も活動しないとは言えない。したがって、活断層は本来地表を含むごく浅所でしか認識することができない。しかし、活断層は過去に累積された地表地震断層の痕跡であり、将来の震源断層を予告するものであるため、その調査が重要である。活断層については未解明・未開発の分野が多く、多くの研究要素が残されている。

参 考 文 献

- 1) 小出 仁、山崎晴雄、加藤碩一 (1984) : 地震と活断層の本, 第 3 版, 国際地学協会, 123p.
- 2) 宇津徳治 (1987) : 地震の事典, 朝倉書店, 568p.
- 3) 島崎邦彦、松田時彦 (1994) : 地震と断層, 東京大学出版会, 240p.
- 4) 松田時彦 (1995) : 活断層, 岩波新書, 242p.
- 5) 池田安隆・島崎邦彦・山崎晴雄 (1996) : 活断層とは何か, 東京大学出版会, 220p.
- 6) 日本応用地質学会研究特別委員会 (1987) : 防災地質の現状と展望, 応用地質, 第28巻特別号, pp. 84-133.
- 7) 豊蔵 勇・岡田篤正 (1996) : 活断層アラカルト (I), 応用地質, Vol. 37, No. 2, pp. 130-138.
- 8) 活断層研究会 (1991) 新編 日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会, 437p.
- 9) MATSUDA, T. (1977) : Estimation of future destructive earthquakes from active faults on land in Japan. J. Phys. Earth, Vol. 25, Suppl., pp. 251-260.
- 10) 松田時彦 (1990) : 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研彙報, 65, pp. 289-319.
- 11) 松田時彦 (1995) : 陸上活断層の活動時期の表, 活断層研究, Vol. 13, pp. 1-13.
- 12) 電気技術基準調査委員会 (1987) : 原子力発電所耐震設計技術指針, 日本電気協会, 896p.
- 13) 土木学会原子力土木委員会 (1985) : 原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法報告書, 土木学会.
- 14) 土木学会 (1996) : 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 土木学会誌, 81, 2 号前付, pp. 1-10.

阪神・淡路大震災調査委員会名簿

〔幹事会〕

委員長	小島 圭二	(東京大学)
副委員長	田川 弘義	(㈱竹中土木)
委員	石川 浩次	(中央開発㈱)
〃	井上 大栄	(㈱電力中央研究所)
〃	江川 良武	(㈱国際建設技術協会)
〃	大島 洋志	(国際航業㈱)
〃	小出 仁	(通産省工業技術院地質調査所)
〃	田中 芳則	(東洋大学)
〃	藤田 崇	(大阪工業大学)
〃	三谷 哲	(㈱熊谷組)
幹事長	柴田 祐啓	(電源開発㈱)
幹事	大野 博之	(応用地質㈱)
〃	緒方 信一	(中央開発㈱)
〃	土屋 彰義	(サンコーコンサルタント㈱)
〃	原口 強	(復建調査設計㈱)
〃	皆川 潤	(㈱ダイヤコンサルタント)

〔第一分科会：地震動と活断層〕

主査	田中 芳則	(東洋大学)
委員	飯星 茂	(大成建設㈱)
〃	宇田 進一	(㈱建設技術研究所)
〃	大塚 康範	(応用地質㈱)
〃	熊木 洋太	(建設省国土地理院)
〃	櫻井 孝	(㈱鉄道総合技術研究所)
〃	清水 国夫	(日本工営㈱)
〃	中尾 健児	(川崎地質㈱)
〃	中川 康一	(大阪市立大学)
〃	中村 康夫	(建設省土木研究所)
〃	波田 重熙	(神戸大学)
〃	日吉 直	(㈱ダイヤコンサルタント)
〃	平野 昌繁	(大阪市立大学)
〃	古部 浩	(㈱間組)
〃	三谷 哲	(㈱熊谷組)
〃	村橋 吉晴	(㈱阪神コンサルタンツ)
〃	横井 和夫	(㈱横井調査設計)
〃	林 愛明	(神戸大学)

〔第二分科会：地盤・地震動と構造物〕

主査	井上 大栄	(㈱電力中央研究所)
委員	石川 浩次	(中央開発㈱)
〃	磯部 一洋	(通産省工業技術院地質調査所)
〃	岩尾雄四郎	(佐賀大学)
〃	内瀬戸信彦	(八千代エンジニアリング㈱)
〃	内館 彬	(㈱アイ・エヌ・エー)
〃	江川 良武	(㈱国際建設技術協会)
〃	小坂 和夫	(日本大学)
〃	佐野 正人	(サンコーコンサルタント㈱)
〃	田中 眞吾	(神戸大学)
〃	中川 康一	(大阪市立大学)
〃	中山 俊雄	(東京都土木技術研究所)
〃	藤田 崇	(大阪工業大学)
〃	藤田 元夫	(㈱ミュー技研)
〃	古谷 正和	(川崎地質㈱)
〃	三室 俊昭	(東電設計㈱)
〃	三田村宗樹	(大阪市立大学)
〃	横山 俊治	(川崎地質㈱)
〃	吉田 鎮男	(東電設計㈱)

〔第三分科会：地震動と地盤災害〕

主査	大島 洋志	(国際航業㈱)
委員	新井 節	(国際航業㈱)
〃	石橋 弘道	(スイモンリサーチ㈱)
〃	魚住 誠司	(㈱ダイヤコンサルタント)
〃	門田 俊一	(㈱フジタ)
〃	上出 定幸	(梶谷エンジニアリング㈱)
〃	木谷日出夫	(㈱鉄道総合技術研究所)
〃	田中 和広	(㈱電力中央研究所)
〃	田中 耕平	(防災科学技術研究所)
〃	徳永 朋祥	(東京大学)
〃	中村 浩之	(東京農工大学)
〃	藤田 崇	(大阪工業大学)
〃	星野 実	(建設省国土地理院)
〃	宮島 吉雄	(農林水産省構造改善局)
〃	村上 広史	(建設省国土地理院)
〃	渡辺 邦夫	(埼玉大学)

本特集の執筆者

序 文	小島 圭二	4 章	江川 良武
第Ⅰ編		5 章	井上 大栄
はじめに	田中 芳則	第Ⅲ編	
1 章	大野 博之		大島 洋志
	日吉 直		木谷日出男
2 章	熊木 洋太		上出 定幸
3 章	日吉 直		魚住 誠司
4, 5 章	皆川 潤		新井 節
第Ⅱ編		第Ⅳ編	
はじめに	井上 大栄		大島 洋志
1 章	石川 浩次		徳永 朋祥
	佐野 正人		宮島 吉雄
2 章	石川 浩次		田中 和広
3 章	石川 浩次		石橋 弘道
	中川 康一		

R〈学協会著作権協議会委託〉
本誌（書）からの複写許
諾は，学協会著作権協議会
（〒107 東京都港区赤坂9-
6-41，☎ 03-3475-4621，
Fax 03-3403-1738）から
得てください。

兵庫県南部地震

平成8年10月5日印刷

——応用地質学からの視点——

平成8年10月10日発行

本書は応用地質第37巻第4号の特集の内容を別途印刷したものである。

編集発行者

©日本応用地質学会
阪神・淡路大震災調査委員会
東京都千代田区神田駿河台2-3-14

御茶の水SDビル4F 郵便番号 101

電話 03-3259-8232, FAX 03-3259-8233

郵便振替 00190-7-8684

印刷

小宮山印刷工業株式会社

東京都新宿区天神町78 郵便番号 162

電話 03-3260-5211(代)

The January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu Earthquake

**—from the Viewpoint of
Engineering Geology—**

1996

Introduction	(3~4)
I Crustal Movement and Seismic Faulting	(5~45)
II Earthquake Motion: Geology and Structure Damage	(46~93)
III Actual Circumstances and Geological Conditions of Ground Disasters ...	(94~106)
IV Groundwater Fluctuations caused by the Earthquake	(107~114)

Technical Terms Related to Surface Ruptures and Active Faults	(115~119)
---	-----------

Japan Society of Engineering Geology

2-3-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101, JAPAN