

## 1-1 はじめに

阪神大震災調査委員会を平成7年1月25日に発足以降、委員ならびに幹事諸氏の献身的な調査活動が継続し、ここに震災調査報告書をまとめるに至った。この報告書は、解説編と資料編から構成されており、調査活動の段階から出来るかぎりこの歴史的地震を忠実に後世に伝えることを目的と編纂されたものである。これにより、今回の大震災から学び、究明を要する地盤工学上の問題が浮き彫りにされてきた。淡路では野島断層が動いたが、神戸地域ではいったいどの断層が活動したのであろうか。大阪湾域の活断層や基盤岩の深度等の深部地下構造はどうなっているのか。なぜ、深度7の領域が帯状となったのだろうか。ポートアイランドなど人工埋立地盤を中心に、広範囲にわたり液状化が発生し、それによる被災も少なくない。ところが一方では、液状化によるのか、激しい衝撃もなく家がゆっくりと揺れ、軽微な被害ですんだという話もある。ポートアイランドにおけるdownhole (vertical) array 記録によると、水平動は地表に近づくにつれ減衰している。これは中間層の液状化によるとされている。液状化は罪のみであるのであろうか。地震直後、衝撃的な上下動が今回の直下型地震の特徴であるとの指摘がなされた。その影響について、一部で精力的に検討されていようであるがその成果が期待される。これらとの関連から、免震基礎構造は考えられないのであろうか。また、直下型地震時の斜面崩壊のメカニズムはどうなのであろうか。また、地下構造物はなぜ耐震性に優れているのであろうか。

以上のように、地盤に関する解決すべき多くの問題があり、これらに答えることが我々の責務ではなからうか。以下順次問題を整理してみよう。

## 1-2 どの断層が動いたのか？ 六甲山は高くなったか？

ほぼ東西方向に圧縮を受けている大阪湾周辺域には多くの活断層がある<sup>1-1)</sup>。藤田は、断層活動により六甲山は隆起し、一方大阪湾は沈降していると述べている<sup>1-2)</sup>。したがって、地震によってこのような地形ができたと考えなければならない。京都大学理学部の尾池和夫教授は、くしくも1月8日の神戸新聞のコラム「正平調」に紹介されているように、“西南日本は二十数年の間地震の空白域になっており、京阪神には活断層も多いから、いつM7級が起こってもおかしくない”と警鐘をならしていた。しかし、大多数のものは、近畿には地震が少ないと考えていたから、今回の地震はまさに晴天の霹靂であった。

今回の地震で、図1-1に示す淡路島の野島断層は動いたが、それに続いて本土の須磨断層、諏訪山断層、芦屋断層が動いたのかどうかはまだ明かにされていない<sup>1-3)</sup>。

一方、余震域からは、本土の断層も深部では確実に動いたのではないかとされている。藤田は、六甲山は平均すると約1mm/年で隆起していると述べている。むろん、隆起は地震により階段的に生じるだろうから、今回の地震で六甲山は一体どれほど高くなったのであろうか。十数cm高くなったとの報告もあるが、地盤の水平変位のみならず、岩盤部の鉛直変位すなわち標高の変化を調べることで、いずれの断層が活動したかが特定できないものだろうか。“六甲山は高くなったのか？”を設問の1つとしたい。

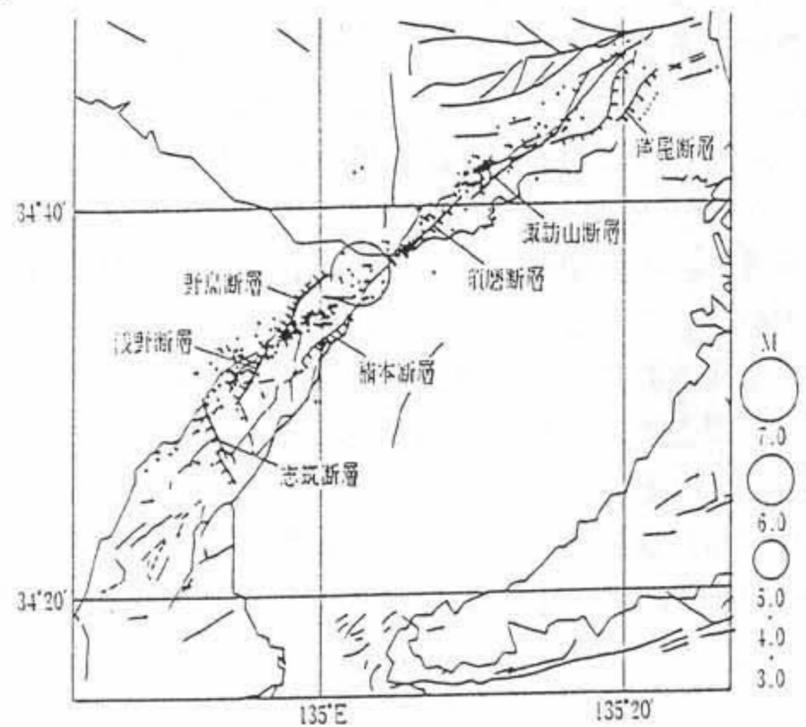


図1-3 活断層と余震域<sup>1-3)</sup>

## 1-3 深部地下構造はどうなっているのか？

図1-2は、神戸、大阪地域の地質図である<sup>1-4)</sup>。沖積層、段丘層、大阪層群また基岩である花崗岩等から成っている。神戸では、海岸までの狭い帯状の地域で花崗岩から段丘層さらには沖積層と激しく変化している。

また、大阪湾岸も埋立による人工地盤の多い地域であり、ポートアイランドは、現在第2期工事で沖への展開が行なわれている。

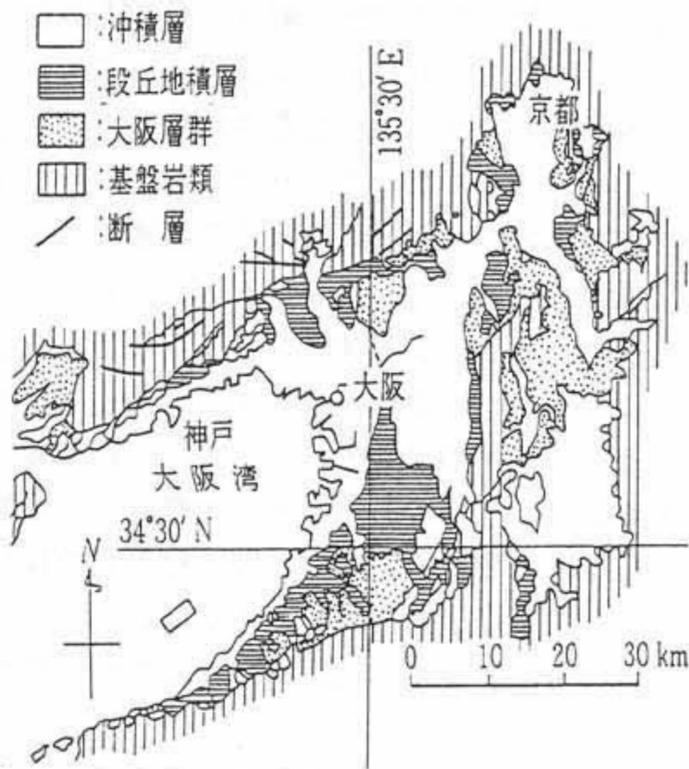


図1-2 京阪神地域の第四紀層の分布<sup>1-4)</sup>

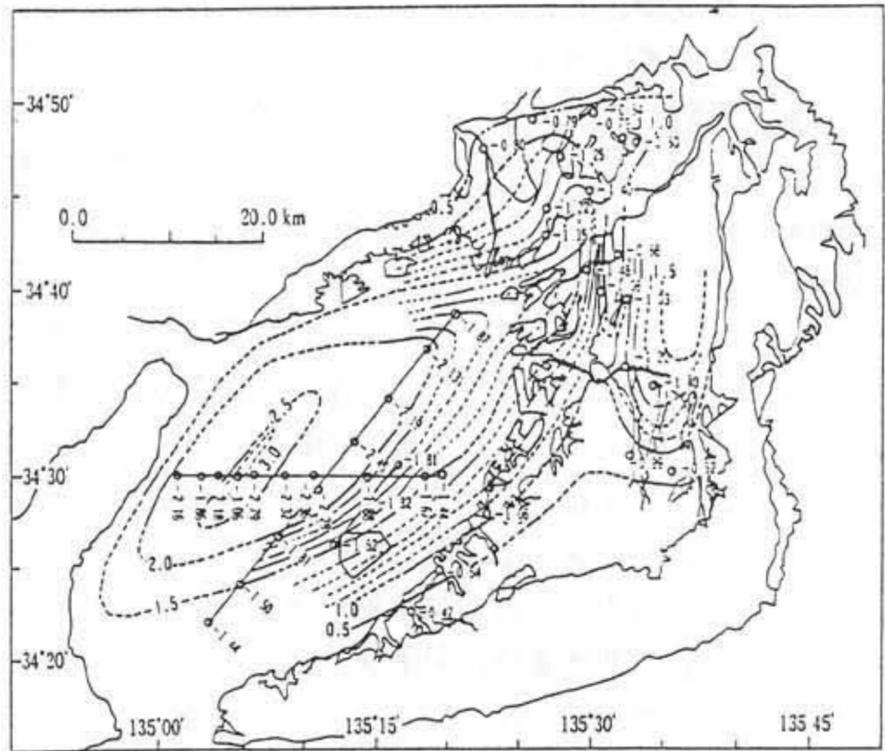


図1-3 大阪盆地基盤岩等深度図<sup>1-5)</sup>

大阪湾域で、基盤岩（花崗岩）の深さはどの程度であろうか。図1-3は基盤岩の等深度線を与えており<sup>1-5)</sup>、これによると最も深い場所で3,000m程度になる。六甲山の標高は900mあり、ポートアイランドでは-1,500mと推定されているから、たかだか数kmで基盤岩には2,500mの高低差があることになる。次の“震度7の領域はなぜ帯状となったのか？”の原因究明に対しても深部地下構造を明らかにすることが大切である。兵庫県、神戸市、地質調査所等多くの機関が神戸地域の地質構造と地盤の調査を進めている。図1-4は、兵庫県の「阪神地域活断層調査委員会」<sup>1-6)</sup>による神戸市東灘区の地下構造の調査結果である。これによると、堆積層の厚さは、山裾で400～1,000m、海岸付近で1,200～1,900mに達している。また、震度7の帯の直下には断層は認められない。いずれにしても、詳細な地震動を解析するためには、深部地下構造を含め、質の良い地盤情報が必要であると痛感される。

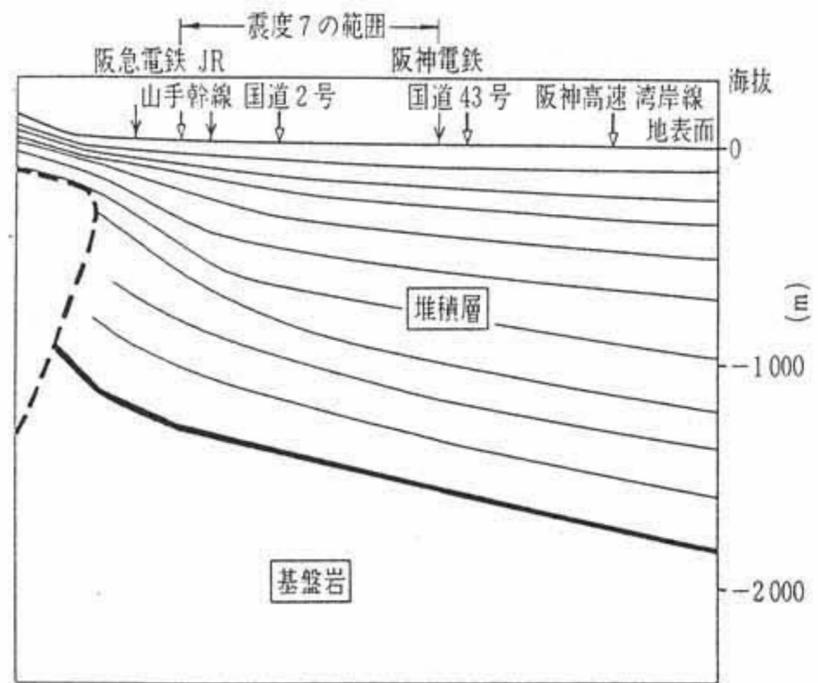


図1-4 神戸市東灘区の深部地下構造<sup>1-6)</sup>

#### 1-4 震度7の領域はなぜ帯状となったのか？

図1-5は、周知の震度7の領域を示すものである。なぜこのような帯状となったのであろうか。今回の地震の教訓を今後の他地域の地震による被災予測に生かすためにも、この原因を解明することが、非常に重要である。その原因として諸説あるが、まだ決着はついていない。

第1は、震度7の帯の直下に今回の地震断層があるという説である。しかしながら、余震域は震度7の領域より北にずれており、また、図1-4からも地震断層は直下に



図1-5 震度7の分布（気象庁による）

はないのではとの見解が主流である。すでに述べたように、神戸、阪神間の深部地下構造の把握はこの点からも大切である。

第2は、旧河川や湿地帯等の埋立で地盤が悪かったという説である。ところで、沖積粘土層や砂層の厚い海岸や人工地盤の震度が小さいのはどうしてであろうか。究明を要する課題である。

第3は、震度7の領域は主として低位段丘層に上にあつて、JR沿いであり、その線形の選択時を考慮すると地形と関連しているのではないかという説である。

第4は、図1-6のように沖積層が山手に向かい薄くなる、すなわち浜辺で波が増幅するように、地震波もこのような地盤構造では増幅するという、いわゆる渚現象によるという説である。

さて、第5は、図1-7に示す、焦点効果（凹レンズ）によるとする説である。中川は<sup>1-7)</sup>、大阪の上町断層近傍の深部地下構造を図1-7(a)に示すように仮定し、地震波が水平面に対して60°で上部の層に入射すると屈折して、地表のある領域に地震波が集中することを示した。図1-7(b)は、上町断層と●で今回の地震で被害の顕著であった場所を示しているが、断層の西側沿いに帯状に●が分布していることがわかる。もちろん、今回の地震で上町断層は動いていないが、地下構造によっては焦点効果説が成立する可能性は大いにあろう。神戸・阪神地区でも図1-4に示したように断層により基盤は急激に深くなつており、この影響は大いに考えられる。

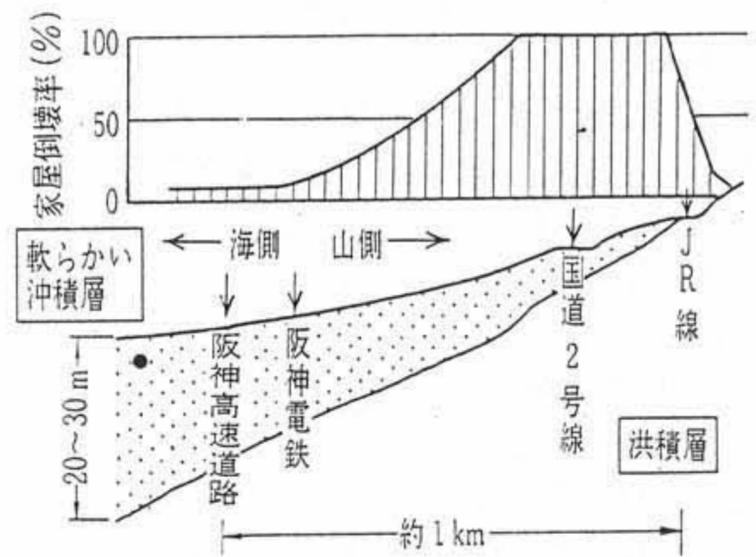


図1-6 家屋倒壊率と地質構造

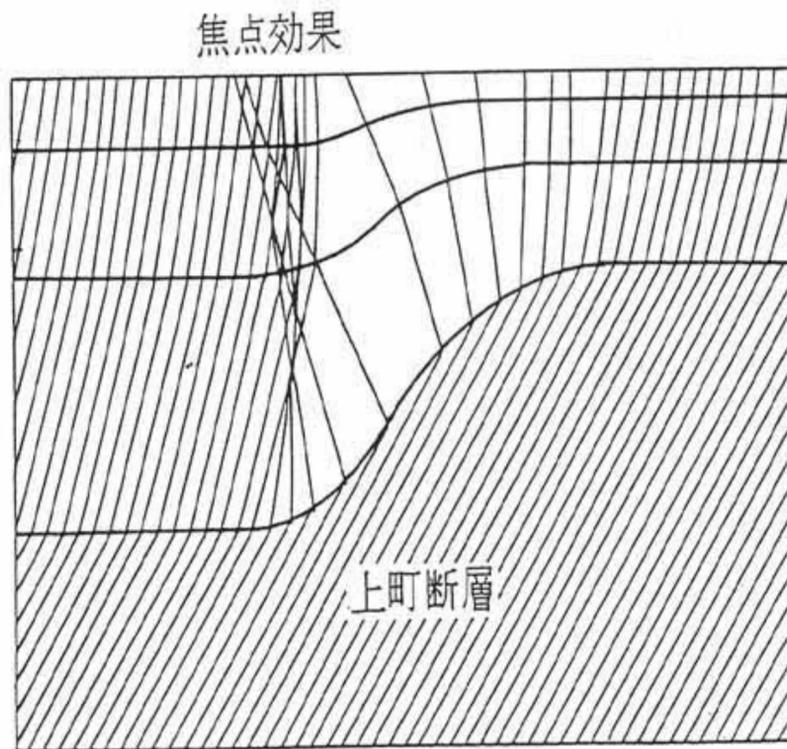


図1-7(a) 地震波動の焦点効果<sup>1-7)</sup>

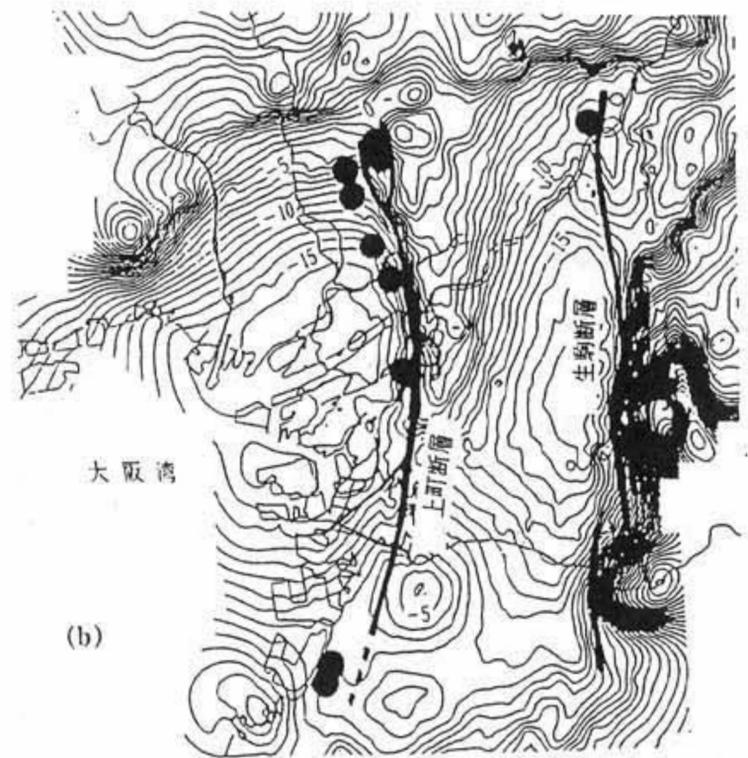


図1-7(b) 焦点効果と大阪上町断層<sup>1-7)</sup>

以上のように多くの説が考えられているが、むしろ単独の説のみによる必要はなく、諸説の複合による可能性も高い。いずれにしても説明が待たれる。

### 1-5 ポートアイランドにおいてなぜ水平動は減衰し、上下動は増幅したのか？ 液状化は罪のみか？

神戸市開発局は、ポートアイランドにおいて地表面、地下16m、32mおよび83mに地震計を設置して、見事に異なる深度での水平ならびに上下地震動加速度波形をとることに成功した。図1-8は、G.L.-0mとG.L.-83mのNS方向の水平動成分および上下動（UD）成分を示している。なお、深度83mにおける生の記録

は地震計の方向が設置の際ずれていたと判定され、岐阜大学の杉戸ら<sup>1-8)</sup>はその補正を行っており、図1-8は補正されたものである。

この記録から、非常に興味ある事実が判明した。まず、NS方向の水平動をみると、地下83mにおける最大加速度は527galであるが、地表では341galと減衰しており、周期も長くなっている。一方、上下動は、187galから556galへと増幅している。この事象をどのように説明できるのだろうか。岐阜大学の岡グループは<sup>1-9)</sup>、弾塑性構成式を用いて地盤の液状化とこれら波形の解析を行なった。その結果、地下10m～20mの間の埋立土と沖積砂が液状化することを示すと同時に、この液状化により水平動は減衰することを明かにするとともに、上下動は、 $p$ 波と捉えかつ水面下の地盤がわずかに不飽和であると仮定することで増幅することを説明することに成功している。

昭和39年の新潟地震以来、液状化の弊害は広く宣伝され、対策手法が検討されてきた。液状化の害を認めるのは当然であるが、罪のみで功はないのであろうか。ポートアイランドでは、多数の杭基礎を有する建物があるが、被災した建物は皆無に等しいと言われている。上述の水平動が減衰したことによる、免震効果があったのではなのだろうか。

九州諫早のスパン18mの石積みの眼鏡橋が河川改修で移築されたときの話である<sup>1-10)</sup>。中央の基礎を調べたところ、図1-9のような構造が現われた。その基礎は、周辺の砂利層に幅4.6m、深さ1.0m、奥行き6.0mのトレンチが掘られ、長さ1.2mの松杭52本とその周りはヘドロで埋められていたとのことである。まさに、免震基礎構造ではなかろうかと著者は述べている。先達の叡知に感銘するとともに免震基礎構造の原形として検討に値すると考える。思いを広くすると、液状化を制御・活用する工夫があるのかも知れない。

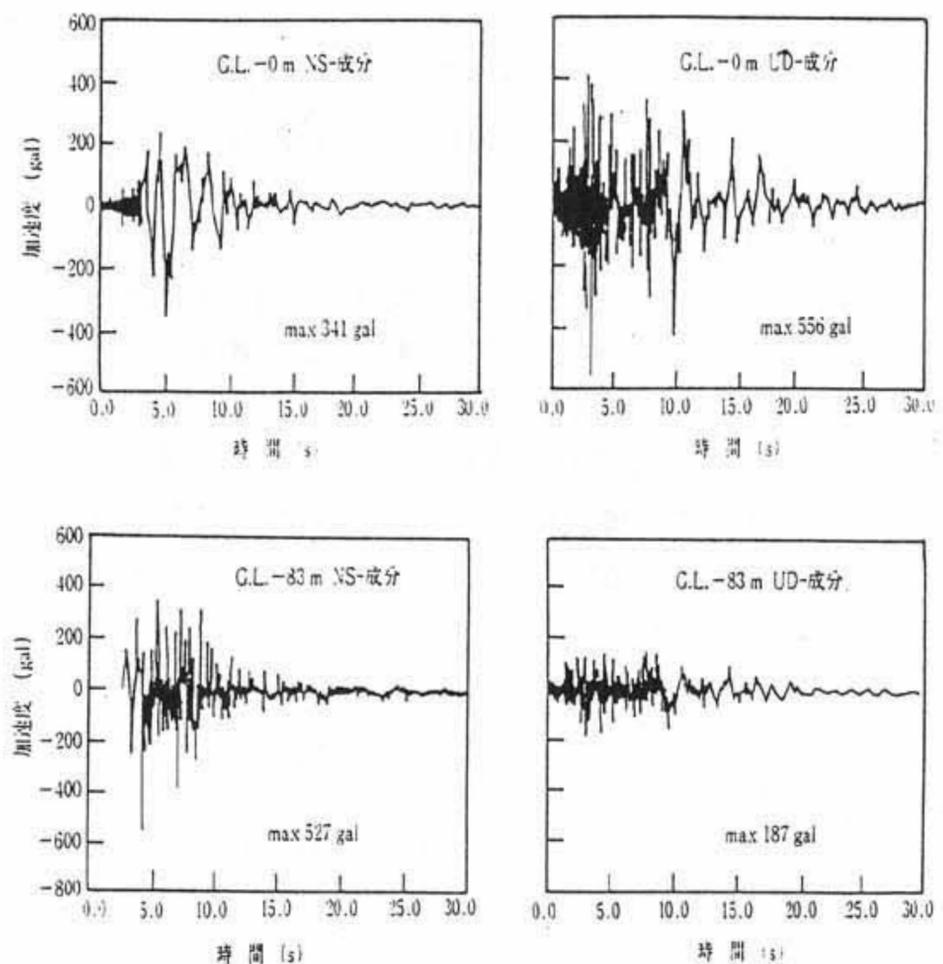


図1-8 ポートアイランドの鉛直アレー観測記録 (神戸市開発局によるもの。G.L.-83mの水平波形は杉戸ら<sup>1-8)</sup>により方向補正)

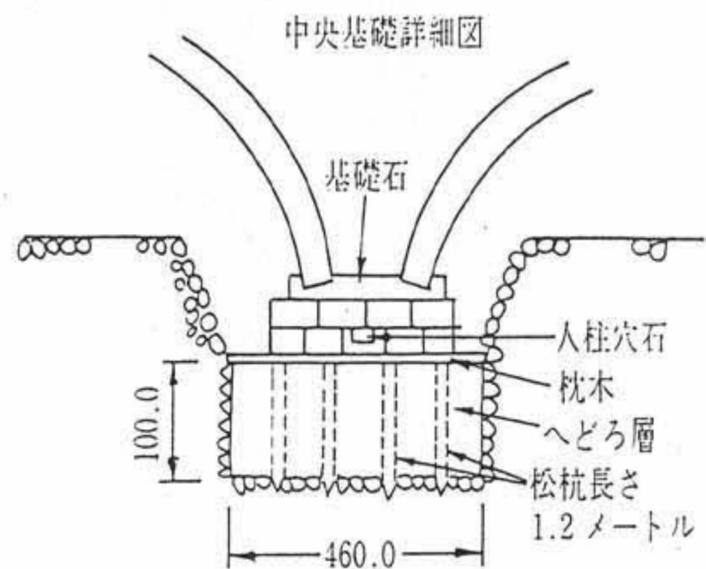


図1-9 諫早石積み眼鏡橋の中央基礎構造<sup>1-10)</sup>

## 1-6 衝撃的上下動の影響はどうであったのか？

今回の直下型地震の特徴として、”衝撃的に大きな縦ゆれがきた後、激しい横揺れとなった”との、多くの証言がある。この衝撃的な上下動の影響は一体どうであったのか、一部では精力的に検討されているが、まだその途上のようなものである。2つの物体が衝突すると物体内に応力波が発生し、その応力によって物体が破壊することがある。その典型的な例は、岩石の引張り強度を求めるためにホプキンソン(Hopkinson)の棒試験を応用する実験である。これは、岩石の棒を糸で水平にぶら下げ、その一端を叩くと応力波が岩石棒中を伝播して、境界で反射して引張り応力が発生することで、その大きさによっては岩石が引張り破壊するというものである。図1-10に示す、棒BCに物体が速度 $V_0$ で衝突すると物体中には応力波が発生し、次式で与えられる押し引き(圧縮・引張り)の応力が発生する。

$$\sigma = E\varepsilon = E \cdot v / c_0$$

ここに、 $\sigma$ は応力、 $E$ はヤング率、 $\varepsilon$ はひずみ、 $v$ は質点速度、 $c_0$ は波速である。

$v = V_0$ として、コンクリートのヤング率と弾性波速度を導入すると、 $v = V_0 = 10 \text{ kine}$  (10 cm/sec) で  $\sigma = 10 \text{ kgf/cm}^2$  , 100 kine (100 cm/sec) で  $\sigma = 100 \text{ kgf/cm}^2$  との圧縮・引張り応力が発生することになる。

地震波の伝播過程においても、地盤と構造物との衝突が生ずるわけであるから、条件さえ整えば、地中の杭や地上の柱で同様な引張り破壊が生じて不思議ではない。小野<sup>1-11)</sup>は、” 衝撃的突き上げのRC橋脚への影響” と題する報告で、平均的なT型橋脚では上部工に20程度の入力で、柱に輪切り状のひび割れが発生すると述べている。また、泉<sup>1-12)</sup>の” 見逃されている衝撃的地震動” との見解はまさしく当を得た問題提起であり、この観点からの検討が必要であることは言うまでもない。

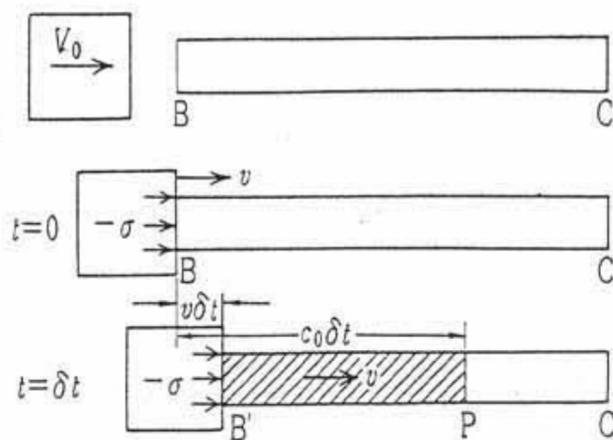


図1-10 衝撃による応力波

### 1-7 直下型地震時の斜面崩壊のメカニズムは？

今回の地震でも、幾多の斜面崩壊が生じた。34名の尊い人命を奪った西宮市仁川地区の地すべりは広く知られた代表的な事例である。この仁川の地すべりと宝塚市蔵人のゴルフクラブ内の地すべりは、比較的規模も大きく、高速でかつ移動距離の長い地すべりであったようである<sup>1-13)</sup>。一方、六甲山を中心に多数の山腹崩壊がみられた。直下型地震による、高速地すべりや山腹崩壊の発生機構はまだ明かではない。先に述べた衝撃的な地震動を念頭に置いた多面的な検討が必要であろう。

### 1-8 地中構造物は耐震性に優れているのか？

今回の地震では、地下構造物も被災した。神戸高速鉄道の大開駅はコンクリート製の中柱が圧壊し、道路の陥没により” 地下構造物の安全神話の崩壊” とのキャッチフレーズで大きく報道された。大開駅の地下2階のみのホーム階は、かぶりが4.8m、高さ7.2m、幅17mであり、地下1階をもつ部分のかぶりは1.9mと浅くなっている。被災は、かぶりの大きい地下2階のみの区間が激しく、地震動に対しては中途半端なかぶり深さがあるのかもしれない。

神戸市営地下鉄も三宮駅や上沢駅でコンクリート柱が損傷を受け、一時不通となった。三宮地区は今回の地震で激しく被災した地域である。JR三宮駅に隣接するサンチカタウンは我国最初の地下街の1つとして有名であるが、今回の地震の被害は、ショーウインドのガラス2枚が割れただけであった。また、建設途上の関電のシールドトンネルは、何らの損傷もみられなかった。地下構造物は、地上構造物に比較すれば耐震性に優れていると言えようが、衝撃的な上下動の影響も含めた地下構造物の耐震性の検討がその方法論ともども必要である。

### 1-9 調査委員会の全体像

今までにも述べてきたとおり、事実を直視することにより、「なぜこのような激甚災害となったのか？」を分析解明し、「今後、このような災害を軽減もしくは防御するいはどのようにすればいいのか？」と言うことに対し、地盤工学の観点から解答を得ることが、本調査委員会の役割であると考えられる。そのため、この一年間、出来るかぎりの震災の事実を記録し、以後の分析に供しうる資料および情報の収集を行うことを基本方針として調査を行ってきた。予想を超えた地震動であり、多くの構造物が破壊したが、一方では無傷であった構造物も見られる。したがって、調査にあたり留意した点は、破壊した構造物は当然のことではあるが、無傷の構造物にも焦点をあてることであり、それが今後の耐震基準・設計基準等の見直しや対策の立案

に有為な知見を与えてくれるものと考える。

調査範囲は関西一円とし、地盤災害の立場から学術調査を行った。調査テーマおよび調査結果のまとめ方は3部構成を基本としている。調査は各テーマ毎におかれた主査を中心として、関係各機関から御参加いただいた特別委員と緊密な連絡をとりながら進められた。3部構成の内容は、第I部が震災の地形、地質、地震学的背景、第II部が被害の全体像、第III部が災害情報のインテグレーションである。以下に簡単に各部の構成内容と調査テーマを述べる。

### 1 震災の地形、地質、地震学的背景

兵庫県南部地震の地震学的特徴を詳しく記述するとともに、激甚災害をもたらした地形・地質学的背景をまとめる。テーマは以下の6つである。

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 1. 歴史地震環境          | 2. 地震の発生記録, 地震パラメータ |
| 3. 近畿における変動地形と地殻応力 | 4. 災害地質・地形          |
| 5. 大阪盆地の地下構造と地盤特性  | 6. 強震記録             |

### 2 被害の全体像

地震による被害の全貌と特徴を地盤工学の観点からまとめる。テーマは以下の11項目である。

- |                        |             |
|------------------------|-------------|
| 7. 阪神大震災の全体像           | 8. 地盤震動特性   |
| 9. ウォーターフロント           | 10. ライフライン  |
| 11. 丘陵・山地（特に斜面崩壊, 地滑り） | 12. 地下空間    |
| 13. 構造物基礎              | 14. 土構造物    |
| 15. 建物                 | 16. 施工中の構造物 |
| 17. 液状化と地盤変状           |             |

### 3 災害情報のインテグレーション

災害情報を系統的に収集し、整理・統合を行う。調査テーマは、以下の2項目である。

- |                     |                  |
|---------------------|------------------|
| 18. 写真測量, デジタルマッピング | 19. 災害情報のデータベース化 |
|---------------------|------------------|

調査過程には上述のような分類にしたがって調査活動が行われたが、報告書をまとめるにあたっては、学術的に考慮して目次のような分類となった。

## 1-10 おわりに

地盤関連の問題をトピックス的に論じた。現時点で最も大切なことは、地盤ならびに構造物の被災状況をできるだけ詳細に記録することであり、また、無傷の構造物の記録も重要である。これらに基づきあらゆる角度から総合的に分析し、学び今後に活かしてこそ今回の地震から教訓を得たといえよう。本調査委員会でもまとめた報告書（解説編・資料編）が、阪神大震災で起こった事実を忠実に示し、今後多くの研究者の研究材料として活かされていくことを期待する。最後ではあるが、阪神大震災調査委員会の委員および幹事諸氏、また調査にご協力をいただいた諸機関と関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1-1) 藤田和夫：大阪をめぐる四大活断層，資料集，断層研究資料センター，1993.
- 1-2) 藤田和夫：変動する日本列島，岩波新書 306，1985.
- 1-3) 吉川澄夫・伊藤秀美：1995年兵庫県南部地震の概要，月刊地球，号外，1995.
- 1-4) （社）土質工学会関西支部：関西地盤，1992.
- 1-5) 岩崎好規ら：大阪盆地構造とその形成史，関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シン

- ポジュウム, 土質工学会関西支部, 1993.
- 1-6) 兵庫県「阪神地域活断層調査委員会」資料, 1995.
  - 1-7) 中川康一: 兵庫県「阪神地域活断層調査委員会」資料, 1995.
  - 1-8) 杉戸真太, 岡 二三生, 八嶋 厚: Japan-US joint seminar 資料, Kyoto Univ., 1995.9.15.
  - 1-9) 岡 二三生, 八嶋 厚: Japan-US joint seminar 資料, Kyoto Univ., 1995.9.15.
  - 1-10) 山口祐造: 石橋は生きている, 葦書房有限会社, 1992.6.
  - 1-11) 小野紘一: 衝撃的突き上げのRC橋脚への影響, 土木学会誌, Vol.80, 11, pp.37-38, 1995.
  - 1-12) 泉 博充: 見逃されている衝撃的地震動, 土木学会誌, Vol.80, 11, p.38, 1995.
  - 1-13) 佐々恭二, 他: 兵庫県南部地震によって西宮市仁川で発生した高速地すべりについて, 阪神大震災地盤震害第1回ワークショップ, 地盤工学会阪神大震災調査委員会, 1995.4.

## 2. 1 史料による近畿中部の地震と震災の調査

京都大学大学院理学研究科 尾池和夫

### 2. 1. 1 はじめに

近畿中部は内陸活断層の密集する西南日本内帯の中にあり、活断層の運動で形成された盆地や平野に都市が発達した。そのような固体地球表層の地域的特徴と、それを形成する力学的メカニズムを理解し、過去の断層運動と地震動による表層の現象を把握し、1995年兵庫県南部地震の発生のしくみを理解するための基礎資料とし、かつ今後の近畿中部の地震防災対策を進める基盤を整備することを目的として、地震史料を調べた。

京阪神と周辺地域には約1500年の歴史資料があり、地震に関する記載が長期間にわたって存在する。この地域の特定の地震に関連する資料や調査研究の成果はいくつか出版されているが、すべての地震を系統的に収集したものはない。史料を活用するため、過去の地震および地震にともなう自然現象や震災に関する記載を収集整理して、現在データベースを作成しつつある。とくにまだ理科年表などに整理されていない無被害または小被害の地震のデータをも追加収集している。このデータベースをもとにして、過去の京阪神と周辺地域の地震発生の性質を調べ、地震活動に関する定量的モデルを確立することがこの作業の目的である。その成果を、京阪神と周辺地域における地震発生の可能性を長期的な視野で検討するために活用したいと考えている。その際、予測可能なことと不可能なことを分け、かつ予測の精度や限界を明らかにすることを重視する必要がある。

データベースそのものは現在まだ整理中であるが、とりあえず被害を出したような比較的規模の大きな地震に関する部分は整理できている。それをもとに史料を検索してみると、例えば、1996（平成8）年は、市民の地震防災意識を高めることを目的とした事業を実施するのに適した節目の年であることがわかる。1996年は、1995年兵庫県南部地震から1年、1976年の今世紀世界最大の震災（死者約24万人）となった唐山地震から20年、1946（昭和21）年の南海地震から50年、1896（明治29）年の三陸地震津波から100年、1596（慶長元）年の地震から400年であり、さらに1096年の南海トラフの巨大地震から900年に、それぞれあたっている。このような節目の年に、都市の地震防災をいろいろの立場から考えてみることも有意義であろう。

### 2. 1. 2 日本の地震史料

1891（明治24）年の濃尾地震をきっかけに、翌年、震災予防調査会が発足した。その仕事の一つに、日本の地震史を編集する仕事があった。田山実が、この仕事を受け持ち、「日本地震資料目録」を1899年に、続いて1903年には、1201ページからなる「大日本地震史料」をまとめた。これらには416年から1865年までの地震に関する原典が掲載されている。

しばらくたって、武者金吉が地震史料の収集を行い、1941年から1943年にかけて「増訂大日本地震史料」全3巻を出版した。謄写版刷りの本であった。その続きの第4巻は、1951年、毎日学術奨励金で刊行され、これで全部で4000ページほどの原史料がまとめて読めることになった。

次いで宇佐美龍夫が1973年ころから古文書の収集を始め、その成果は1981年から1994年までに、全21冊、1万6812ページの「新収日本地震史料」として東京大学地震研究所から刊行された。これには、新しく収集された史料に、上記の田山実や武者金吉の収集した地震も年月日と場所の情報が加えられていて、それらが時刻順に掲載されているので使いやすい。この史料の各冊の内容は別表に示したようになっており、現在も都司嘉宣らによって収集と編集が続けられている。

また宇佐美龍夫は、自ら探し出した史料を加えて、「日本被害地震総覧」という435ページの本を出版した。これらの史料のおかげで日本の地震活動の様子が約1500年前から長期間にわたってわかり、日本の地震の起こる仕組みを考える上で貴重な情報が提供されることとなった。このような史料をもとにして被害を出した主な地震を簡単にまとめたのが理科年表の「日本の被害地震の表」であり、上記のように長年にわたって整理された史料をもとに作られた精度の高いデータである。

1500年ほどの長期間の史料のおかげで、日本列島の地震活動について多くの大切なことがわかった。最も規模の大きな現象の一つは、南海トラフの巨大地震の繰り返しである。100年ちょっとの時間間隔でマグニチュード8クラスの巨大地震が南海トラフで起こる。南海トラフは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの端にある西南日本の下へ沈み込んでいるプレート境界である。

最近の南海トラフの巨大地震は、1944年と1946年に起こった。合計8回の南海トラフの大規模な活動が今までにわかっている。南海トラフの巨大地震は、東海道沖と南海道沖に同時期に起こる。間隔は2年だったり、ほぼ同時だったりするが、どうやらいつも東に先起こって、西に後で起こるようである。

京都とその周辺地域の有感地震回数の変化を調べた結果によると、京都での有感地震は、797年から史料に現れる。その回数を数えると、数10年の間どんどん増えたことがわかる。これは、歴史がしだいに詳しくなったというよりも、887年の南海トラフの巨大地震の前に内陸の活動度が高まっていくことを示していると考えた方がよい。887年の巨大地震の後では、また京都での有感地震の回数が少なくなることからそれは言える。868年には兵庫県の山崎断層がずれて大地震を起こしたこともわかっている。827年の京都で初めての被害地震の記録も、そのような活動度の高まりを示す出来事の一つであったと思われる。

その後も、南海トラフの巨大地震のたびに、数の大小の差はあるが、数10年前から京都と周辺地域での有感地震の数が増えていることがわかった。

明治時代に入ってまもなくからは、気象台による観測報告が残されている。大阪では1884年、京都では1885年、彦根では1894年、奈良では1920年から、それぞれ有感地震の報告があり、大阪管区気象台によって、1989

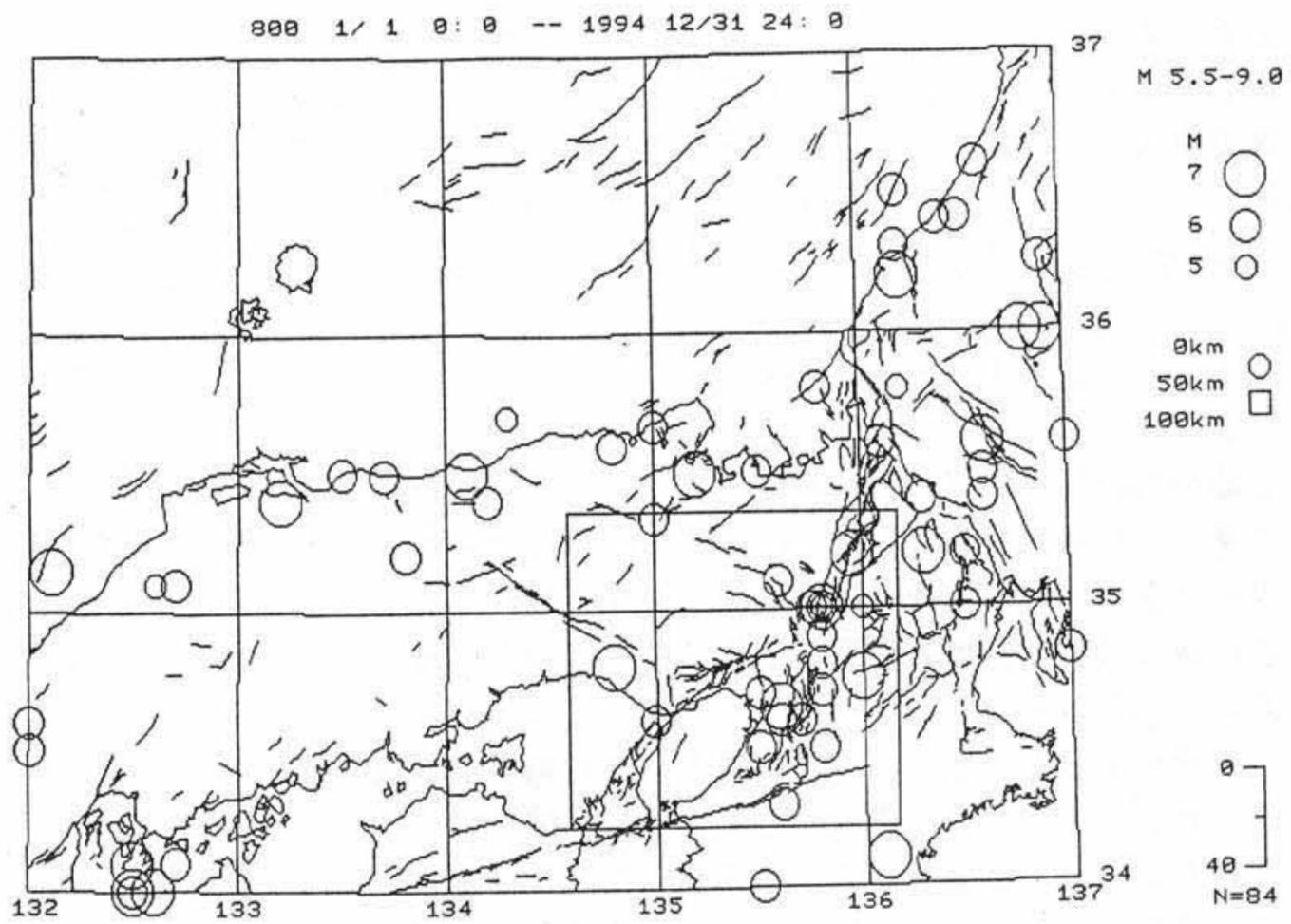


図2. 1. 1 近畿と周辺の被害地震の分布 (800年~1994年)

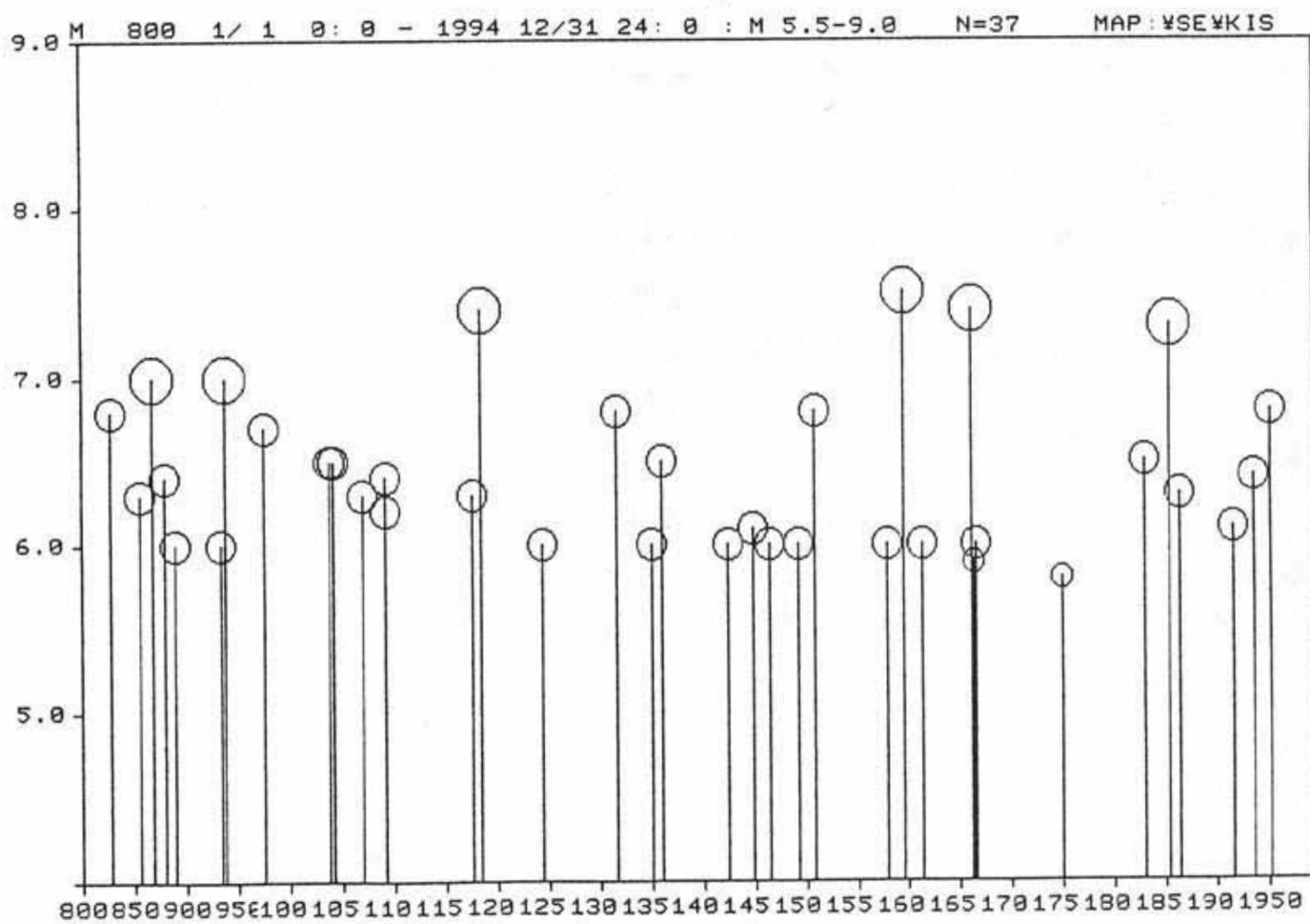


図2. 1. 2 京阪神地域 (図2. 1. 1の枠内) の時系列 (800年~1994年)

年までのデータがコンピュータ・ファイルに収められている。その後のデータも大阪管区気象台の月報に報告されている。

震源要素を含む地震の表は1885年以後の主な地震に関して宇津徳治の表があり、1926年以後は気象庁の日本の地震の表がある。これらはいずれも石川有三らが開発したSEIS-PCのデータとして配付されている。

## 2. 1. 3 近畿中部の被害地震

近畿中部の被害地震のデータベースでは、京都、大阪、奈良、滋賀、兵庫の地域に発生した被害地震、あるいはこれらの地域でも被害を出したり、強く揺れた大規模地震の記事を、理科年表（国立天文台編）、地震の事典（宇津徳治総編集）および新編日本被害地震総覧（宇佐美龍夫）から、抜き書きしたものをベースにしている。この場合、理科年表の記事をもとにし、同一の地震に関して、その他2つの資料から記述を補い、理科年表にない地震も同様に補った。資料の不足からよくわかっていない地震も、上記の地域に関係があると考えられるものは、今後の新たな史料の発見を期待して掲載した。今後さらに資料から上記にもれている被害地震を追加してデータベースを完成する予定である。

被害地震のデータベースから近畿中部と周辺地域の地震の分布図を図2. 1. 1に示し、京阪神地域（図の枠内）の地震を選んで時系列を図2. 1. 2に示す。この地域では、M6以上の地震がどの時代にもほぼ同じような頻度で起こっていることがわかる。M6以上の地震はこの地域で平均するとほぼ35年に1回の割合で起こることになる。

このデータベースの中から近畿中部の地震活動の歴史の大略を見るために、近畿中部で震災をもたらせた主な地震について年代順に以下に紹介する。M6. 5以上と推定された地震を中心に列挙してあるが、兵庫県南部地震の発生に関係する可能性のある地震は、やや小さい規模のものも挙げてある。

416年 8月23日（允恭 5年 7月14日）遠飛鳥宮付近（大和）の地震：「日本書紀」に「地震」とあるのみ。被害の記述はないが、わが国の歴史に現れた最初の地震の資料である。（允恭天皇の皇居は遠飛鳥宮〈奈良県明日香村か〉。陵は大坂府南河内郡。）

599年 5月28日（推古 7年 4月27日、M7）大和の地震：倒潰家屋を生じた。「日本書紀」にあり、地震による被害の記述としてはわが国最古のもの。「…地動、舎屋悉破、則令四方、俾祭地震神」。（推古天皇の皇居は豊浦宮と小墾田宮〈共に奈良県明日香村〉。）

684年11月29日（天武13年10月14日、M 8.25、津波：10～20m程度）土佐その他南海・東海・西海地方の地震：山崩れ、河湧き、家屋社寺の倒潰、人畜の死傷多く、津波来襲して土佐の船多数沈没。土佐で田苑50余万頃（約12km<sup>2</sup>）沈下して海となった。南海トラフ沿いの巨大地震と思われる。

734年 5月18日（天平 6年 4月 7日）畿内・七道諸国の地震：民家倒潰し圧死多く、山崩れ、川塞ぎ、地割れが無数に生じた。

827年 8月11日（天長 4年 7月12日、M6.8）京都の地震：舎屋多く潰れ、余震が翌年 6月まであった。

856年（斉衡 3年 3月、M6.3）京都の地震：京都およびその南方で屋舎が破壊し、仏塔が傾いた。

868年8月3日（貞観10年 7月 8日、M7）播磨・山城の地震：播磨諸郡の官舎・諸定額寺の堂塔ことごとく頽れ倒れた。京都では垣屋に崩れたものがあった。山崎断層の活動による。

887年 8月26日（仁和 3年 7月30、大津波）諸国（主として西日本太平洋側）の地震：京都で諸司官舎および東西両京の民家の倒壊あり、圧死者多数。五畿七道諸国で官舎破損多し。津波あり、溺死者多数。摂津の国で浪害が最もひどかった。余震 8月末まで続く。南海トラフ内側のM8級の巨大地震とみられる。

938年 5月22日（天慶 1年 4月15日、M7）京都・紀伊の地震：宮中の内膳司頽れ、死 4。舎屋・築垣倒れるもの多く、堂塔・仏像も多く倒れる。高野山の諸伽藍破壊。余震多く、8月 6日に強震があった。

976年 7月22日（貞元 1年 6月18日、M6.7以上）山城・近江の地震：両京で屋舎・諸仏寺の転倒多く、死50以上。近江の国府・国分寺・関寺（大津市）で被害。余震が多かった。余震 7月末まで続く。7月13日地震のため改元。

1096年12月17日（永長 1年11月24日、M8級、津波：4～6m程度）畿内・東海道の地震：大極殿小破、東大寺の巨鐘落ちる。京都の諸寺に被害があった。近江の勢多橋落ちる。津波が伊勢・駿河を襲い、駿河で社寺・民家の流失 400余。余震が多かった。東海沖の巨大地震とみられる。

1099年 2月22日（康和 1年 1月24日、M8級、津波）南海道・畿内の地震：興福寺・摂津天王寺で被害。土佐で田千余町みな海に沈む。津波があったらしい。南海道沖のM8級の巨大地震とみられる。

1185年 8月13日（文治 1年 7月 9日、M7.4）近江・山城・大和の地震：京都特に白河辺の被害が大きかった。社寺・家屋の倒潰破壊多く死多数。宇治橋落ち、死 1。三井寺金堂回廊倒れ、比叡山でも被害が大きかったらしい。琵琶湖の水北流し水位下がり、後日旧に復した。田 3町淵となる。余震 9月末までに約 230回に及んだ。8月12日の余震も強かった。

1317年 2月24日（文保 1年 1月 5日、M6.5～ 7）京都の地震：これより先1月3日京都に強震、余震多く、この日大地震。白河辺の人家悉く潰れ、死 5。諸寺に被害、清水寺出火。余震が 5月になっても止まなかった。5月半ばまで地震多し。1317年 2月22日の地震と併せて群発地震か。

1360年11月22日（正平15年10月 5日、M7.5～ 8、津波：4～6m程度）紀伊・摂津の地震：4日に大震、5日に再震、6日の六ツ時過ぎに津波が熊野尾鷲から摂津兵庫まで来襲し、人馬牛の死が多かった。

1361年8月3日（正平16年 6月24日、M8級、津波：10～ 20m程度）畿内・土佐・阿波の地震：摂津四天王寺の金堂転倒し、圧死 5。その他、諸寺諸堂に被害が多かった。津波で摂津・阿波・土佐に被害、特に阿波の雪（由岐）湊で流失1700戸、流死60余。余震多数。南海トラフ沿いの巨大地震と思われる。

1498年 9月20日（明応 7年 8月25日、M8級、津波：10～20m程度）東海道全般の地震：紀伊から房総にかけての海岸と甲斐で振動大きかったが、震害はそれほどでもない。津波が紀伊から房総の海岸を襲い、伊勢大湊で家屋流失 1千戸、溺死 5千、伊勢・志摩で溺死 1万、静岡県志太郡で流死 2万 6千など。南海トラフ沿いの巨大地震とみられる。

1510年 9月21日（永正 7年 8月 8日、M6.5～7）摂津・河内の地震：摂津・河内の諸寺で被害。大阪で潰死者があった。余震が70余日続く。

1520年 4月 4日（永正17年 3月 7日、M7以上、津波：2m前後）紀伊・京都の地震：熊野・那智の寺院破壊。津波があり、民家流失。京都で禁中の築地所々破損した。

1596年 9月 5日（慶長 1年閏 7月13日、M7.5）畿内の地震：、京都では三条より伏見の間で被害が最も多く、伏見城天守大破、石垣崩れて圧死約 500。諸寺・民家の倒潰も多く、死傷多数。堺で死 600余。奈良・大阪・神戸でも被害が多かった。余震が翌年 4月まで続いた。

1605年2月3日（慶長 9年12月16日、M8級、津波：10～20m程度）東海・南海・西海諸道の地震：ほぼ同時に 2つの地震が連発した可能性。『慶長地震』：地震の被害としては淡路島安坂村千光寺の諸堂倒れ、仏像が飛散したとあるのみ。津波が犬吠崎から九州までの太平洋岸に襲撃して、八丈島で死57、浜名湖近くの橋本で 100戸中80戸流され、死多数。

紀伊西岸広村で1700戸中 700戸流失、阿波宍喰で波高 2丈、死1500余、土佐甲ノ浦で死 350余、崎浜で死50余、室戸岬付近で死 400余など。ほぼ同時に二つの地震が起こったとする考えと、東海沖の一つの地震とする考えがある。

1662年 6月16日（寛文 2年 5月 1日、M7.5）山城・大和・河内・和泉・摂津・丹後・若狭・近江・美濃・伊勢・駿河・三河・信濃の地震：比良岳付近の被害が甚大。滋賀唐崎で田畑85町湖中に没し潰家1570。大溝で潰家1020余、死37。彦根で潰家 1千、死30余。榎村で死 300、所川村で死 260余。京都で町屋倒壊 1千、死 200余など。諸所の城破損。江戸・長崎で有感。余震12月まで続く、大規模な地震でM7.5あるいはそれ以上か。比良断層系、または花折断層から発生したという見方がある。

1707年10月28日（宝永 4年10月 4日、M8級、津波：最大 30m以上）五畿・七道の地震：『宝永地震』：わが国最大級の地震の一つ。全体で少なくとも死 2万、潰家 6万、流出家 2万。震害は東海道・伊勢湾・紀伊半島で最もひどく、津波が紀伊半島から九州までの太平洋沿岸や瀬戸内海を襲った。

津波の被害は土佐が最大。室戸・串本・御前崎で 1～2m隆起し、高知市中西部の地約 20km<sup>2</sup>が最大2m沈下した。遠州灘沖および紀伊半島沖で二つの巨大地震が同時に起こったとも考えられる。

近畿地方内陸部でも震害は大きく、潰家大和郡山で 468、柳本 690、奈良65。大坂では津波による橋や船の被害も多かった。潰家 500余～約1800〔約 8千～1万 6千世帯〕、死 500余〔打たれ死3600～7千、水死 1万 2千〕。落橋30～50。

徳島県下では波高 5～7m、牟岐死 110余、浅川 140余。高知県沿岸では推定

波高 5～8〔25〕m、潰家約 5千、流失家屋約 1万 2千、死者行方不明併せて約 2800。種崎では一木一草も残らず死 700余、宇佐死 400、須崎死 300、久礼死 100余。

瀬戸内海では、高松領内で潰家約 950、円亀領内で 413、福山（含鞆）60など。山陰では杵築〈大社町〉の潰家 130が目立つが、ここは、1946年南海地震のときも被害が目立った。九州佐伯潰約 100、推定津波波高約 3m、流失約 400、死22。日向天領で潰家 440、死 1。

道後温泉 145日止まり、湯ノ峯・山地・龍神・瀬戸・鉛山の湯が止まった。室戸岬 1.5m隆起し、津呂・室津では大型船入津が不可能になった。高知市の西隣では約20k m<sup>2</sup>が最大 2m沈下、船で往来したという。串本 1.2m、御前崎 1～2m隆起

この地震の激震地域、津波来襲地域は、安政元年11月 4日東海地震と、11月 5日南海地震を併せたものによく似ている。M8級の二つの巨大地震がほとんど同時に起こったのかもしれない。

1819年 8月 2月（文政 2年 6月12日、M7.3）伊勢・美濃・近江の地震：近江八幡で潰家82、死 5。木曾川下流では香取（多度町）で40軒全滅、金廻では海寿寺潰れ圧死70。名古屋・犬山・四日市・京都などのほか、金沢・敦賀・出石・大和郡山などでも被害。

1830年 8月19日（天保 1年 7月 2日、M6.5）京都および隣国の地震：洛中洛外の土蔵はほとんど被害を受けたが、民家の倒潰はほとんどなかった。御所・二条城などで被害。京都での死 280。上下動が強く、余震が非常に多かった。

鳴動あるいは弱い前震で始まった。上下動が強かったらしい。京都や亀山〈亀岡〉で被害が多かった。二条城本丸大破、御所破損、堂社仏閣・御殿・表通りの町屋の倒壊は少ない。石垣・築地の崩れ、門・塀・端々の民家の倒壊多く、壁・瓦・庇の落下が多い。

西本願寺 1尺ほど傾く。愛宕山の坊 2、3〔を残して〕崩潰。京都で死 280、地割れあり、泥噴出、宇治川通りの堤防割れる。伏見で町屋の倒壊あり。淀で城の櫓・石垣破損、領内で潰 4。大津で潰 6、死 1。

丹波亀山で崩家41、死 4。高槻・茨木被害なし。出雲・美作で有感。余震は非常に多く、翌年 1月までに 635回以上。

1854年 7月 9日（安政 1年 6月15日、M7.3）伊賀・伊勢・大和および隣国の地震：【伊賀上野地震】 6月12日ころから前震があった。15日 0～2時ころ本震、6～8時ころ最大余震があったようだが、地域によっては、ほぼ同じように感じ、四日市付近などでは後者を強く感じたようである。

伊賀上野から奈良・大和郡山にかけての地域で被害が著しく、伊賀上野町方で全壊 460余、死 130、郷方で全壊1400～1800、死 460余、奈良で全壊約 500、死 60余〔300余〕、大和郡山全壊約 150、死 120～130。

四日市でも被害多く、全壊 300～400、死70～80、焼失60余、焼死約60。木曾川、町屋川、朝明川、鈴鹿川などの土手に裂け目ができたり、沈下したところが多かった。紀伊半島沿岸の住民は津波の心配をしたという。

木曾馬籠付近で往還を損じた。宮津でかなりゆれ、広島有感。上野の北方で西南西―東北東の方向に断層を生じ、南側の長さ約1km、幅約200mの地域が最大1.5m沈下したという。木津川断層系から発生した地震と考えられる。

1854年12月23日（安政1年11月4日、M8級、津波：10～20m程度）東海・東山・南海諸道の地震：『安政東海地震』：被害は関東から近畿に及び、特に沼津から伊勢湾にかけての海岸がひどかった。津波が房総から土佐までの沿岸を襲い、被害をさらに大きくした。この地震による居宅の潰・焼失は約3万軒、死者は2千～3千人と思われる。

沿岸では著しい地殻変動が認められた。地殻変動や津波の解析から、震源域が駿河湾深くまで入り込んでいた可能性が指摘されており、すでに100年以上経過していることから、次の東海地震の発生が心配されている。

1854年12月24日（安政1年11月5日、M8級、津波：最大30m以上）畿内・東海・東山・北陸・南海・山陰・山陽道の地震：『安政南海地震』：東海地震の32時間後に発生、近畿付近では二つの地震の被害をはっきりとは区別できない。被害地域は中部から九州に及ぶ。津波が大きく、波高は串本で15m、久礼で16m、種崎で11mなど。地震と津波の被害の区別が難しい。

死者数千。室戸・紀伊半島は南上がりの傾動を示し、室戸・串本で約1m隆起、甲浦・加太で約1m沈下した。

大阪湾北部で推定波高約2.5m、大阪で津波が木津川・安治川を逆流し、停泊中の船多数〔8千とも〕破損し、橋々をこわし、死者700余〔約400、2千、3千、7千などの説もあり〕。

紀州沿岸熊野以西大半流失。紀州領（勢州領分を含む）潰破損家1万8千余、流失約8500、流死約700。広・湯浅推定波高4～5m、併せて全壊約20、流失家屋300余、死約60。紀伊田辺領潰250余、流失530余、死24。袋港で約7m。津波は北米沿岸に達した。

松山領で城中・町家・百姓家合計潰半潰約1500、丸亀で潰50。加古川潰約80、広島で潰22、岡山町方潰半潰89、死1。出雲杵築〈大社〉辺で潰150、この地区は1707年宝永地震、1946年南海地震などでも被害が大きかった。

高知市付近は約1m沈下し浸水、上ノ加江付近で約1.5m、甲ノ浦で1.2m沈下、室戸岬で1.2m隆起。〈和歌山県〉加太で1m沈下、串本で約1m隆起。湯ノ峯温泉、道後温泉止まり、翌年2～3月ころから出はじめる。紀伊鉛山湾の温泉も止まり、翌年5月ころから冷水が出はじめ、翌々年4月ころ旧に復した。紀伊有田郡横浜村では10月中旬から汐の干満が常ならなかった。また、10月下旬から小地震を感じた。

1864年3月6日（元治1年1月28日、M6.3）播磨・丹波の地震：加古川上流の杉原谷で家屋が多く破壊したという。六甲の地震：六甲山東手に地割れ。幅3尺、長20町。深さまちまち。地震のためという。『西灘村史』に載せるのみ、疑わしきか。

1909年8月14日（明治42年8月14日、M6.8）滋賀県姉川付近の地震：『江濃（姉川）地震』：虎姫付近で被害が最大。滋賀・岐阜両県で死41、住家全壊978。

姉川河口の湖底が数十 m深くなった。

1916年11月26日（大正 5年11月26日、M6.1）神戸の地震：死 1。付近に軽い被害があった。有馬温泉の泉温 1°C上がる。

参考：明治32<1899>年 7月、有馬温泉付近で鳴動がしきりに起こり、その前37°Cだった温泉が、翌日10月には47.9°Cになった。

1925年5月23日（大正14年5月23日、M6.8）但馬北部の地震：『北但馬地震』：円山川流域で被害多く、死 428、家屋全壊1295、焼失2180。河口付近に長さ 1.6 km、西落ちの小断層二つを生じた。葛野川の河口が陥没して海となった。

1927年3月7日（昭和 2年 3月 7日、M7.3、津波：50cm以下）京都府北西部の地震：『北丹後地震』：被害は丹後半島の頸部が最も激しく、淡路・福井・岡山・米子・徳島・三重・香川・大阪に及ぶ。全体で死2925、家屋全壊 12584。郷村断層（長さ18km、水平ずれ最大2.7m）とそれに直交する山田断層（長さ 7km）を生じた。測量により、地震に伴った地殻の変形が明らかになった。

1936年 2月21日（昭和11年 2月21日、M6.4）大阪・奈良の地震：『河内大和地震』：死 9、家屋全半壊 148。地面の亀裂や噴砂・湧水現象も見られた。

主として、大阪－奈良県境山地を挟んで、奈良盆地と大阪府南河内郡東部に瓦の落下、壁の破損、土塀・築地塀の崩壊、道路・堤防の亀裂、墓石転倒などの被害を生じた。

1944年12月 7日（昭和19年12月 7日、M8級、津波：10～ 20m程度）東海道沖の地震：『東南海地震』：静岡・愛知・三重などで合わせて死・不明1223、住家全壊 17599、半壊 36520、流失3129。このほか、長野県諏訪盆地でも住家全壊12などの被害があった。

津波が各地に襲来し、波高は熊野灘沿岸で 6～8m、遠州灘沿岸で 1～2m。紀伊半島東岸で30～40cm地盤が沈下した。

1946年12月21日（昭和21年12月21日、M8級、津波：10～ 20m程度）南海道沖の地震：『南海地震』：被害は中部以西の日本各地にわたり、死1330、家屋全壊 11591、半壊 23487、流失1451、焼失2598。津波が静岡県より九州にいたる海岸に来襲し、高知・三重・徳島沿岸で 4～6mに達した。

室戸・紀伊半島は南上がりの傾動を示し、室戸で 1.27m、潮岬で 0.7m上昇、須崎・甲浦で約 1m沈下。高知付近で田園15km<sup>2</sup>が海面下に没した。

1949年 1月20日（昭和24年 1月20日、M6.3）兵庫県北部の地震：震央に近い照来町で土蔵の屋根の移動、壁の落下。温泉町で家屋傾斜数戸。浜坂町で微小被害があり、余震少数。

1952年7月18日（昭和27年7月18日、M6.8）奈良県中部の地震：『吉野地震』：震源の深さ60km。和歌山・愛知・岐阜・石川各県にも小被害があった。死 9、住家全壊20。春日大社の石灯籠1600のうち 650倒壊。

1995年 1月17日（平成 7年 1月17日、M7.2）兵庫県南部の地震：死者6308。

## 2. 1. 4 1596年9月5日（旧暦慶長元年閏7月13日）の地震

前章の被害地震の中で特に、1596年9月5日（慶長元年閏7月13日）の地震は、有馬－高槻構造線で発生した地震であると推定されるもので重要である。このことは1995年度の地質調査所のトレンチ掘削調査の結果確認されたものである。有馬－高槻構造線の活動履歴が明らかになると、兵庫県南部地震の発生の仕組みの理解が一段と進むと考えるが、その考察は活断層の調査報告が整理され発表されるのを待って行いたいと思っている。

ここでは、この地震による被害の分布を推定するために、あまり厳密ではないが、役立ちそうな記述を史料から順不同で列挙してみると、次のようになる。

(1) 山城、摂津、和泉などの諸国、地大いに震い、その中でも京都三条から伏見に至るまでの震害が最もはなはだしく、伏見城の天守は大破し、石垣が崩壊し、死傷者がすこぶる多かった。堺も震害はなはだしく、死者600余人に及んだ。

(2) 京都の家屋が倒れ死者数知れず、鳥部野の煙がとだえることがなかった。東寺の食堂、中門、講堂、灌頂院、南大門、北八足門、東小門、鐘楼が倒れた。

(3) 京都の大仏の本尊が大破し左手が崩れ落ちた。諸大名の屋敷にも倒れたものが多かった。大山も崩れ、大路も破裂した。

(4) 天龍寺ことごとく倒れ、嵯峨二尊院、大覚寺門跡、御殿以下が倒れた。

(5) 東福寺の二（仁）王門が顛倒。本堂は地震前に東へゆがんでいたのが、地震で元にもどった。

(6) 上京は少し損じ、下京は四条がことのほか損じ、280余人の死者を出した。

(7) 三十三間堂は少しゆがんだ。

(8) 大山崎はことのほか損じ、家はことごとく崩れ、死者は数知れず。

(9) 八幡の在所、ことごとく家が崩れた。

(10) 兵庫県の在所が崩れ出火し、ことごとく燃え、死者は数知れず。

(11) 近江から関東は地動がなかったという。

(12) 大阪の町屋はほとんど崩れ、死者は数知れず。

(13) 愛宕山坊中にも倒壊あり。

(14) 近江栗田郡、葉山村で川が破烈し泥水が湧出して半日に及んだ。人家多く損じ、死者14人。

(15) 兵庫では震災をこうむり、津波も襲って、ほとんど全滅した。

(16) 向島では石垣や家をゆり込んだ。

(17) 須磨の福祥寺の本堂など倒壊。

(18) 京師の死者4万5千。

(19) 有馬温泉が熱湯に急変し入浴できなくなった。25年後にも卵をゆでることができた。

(20) 唐招提寺では、戒壇、僧堂などがことごとく倒れ、金堂などが破壊した。

(21) 津国、丹波、播州、大和、山城、近江、和泉、河内は一段はなはだしく

揺れた。

(22) 有馬で湯屋と民家が大破し温泉変じて熱泉となる。

(23) 滋賀県栗東町に液状化。

(24) 泉涌寺、清水寺にはほとんど被害がなかった。

これらの記述から被害の分布を見ると、有馬－高槻構造線の活動による地震と考えるのが自然であると言える。また、寒川旭によると、1596年頃の噴砂の跡は、京都市南部から兵庫県南部にわたって分布している。

京都市での史料に長期間余震の記事が見られることから、震源断層は京都市に近いところまで延びていたと考えられる。このような問題を考える資料として、慶長の地震の余震のことを紹介しておく。

1596年9月5日の地震のあとの有感地震を、今までに京都の史料から発見されたもののすべてについて、月別に数えると次のようになる。要するに、そのほとんどが京都での有感余震の回数であると考えてよい。

表2.1.1 慶長地震と兵庫県南部地震の余震回数の変化の比較

慶長伏見地震の余震回数		兵庫県南部地震の余震回数	
1596年		1995年	
9月	27回以上	1月	230回
10月	30回	2月	39回
11月	25回	3月	18回
12月	25回	4月	23回
翌年1月	11回	5月	20回
2月	5回	6月	20回
3月	8回	7月	5回
4月	2回	8月	3回
5月	1回	9月	16回
6月	3回	10月	6回
7月	2回	11月	5回
8月	2回	12月	4回
9月	3回		
10月	1回		

慶長の地震の余震では震度4と推定されるものが1回、震度3が17回ある。表中1596年9月の27回以上というのは、「地震休まず」という日が3日、「たびたび」という日が1日含まれていて、10月以後の回数から見て100回以上揺れた可能性が高い。

兵庫県南部地震の有感余震回数を表の右側に記入してある。そのうち最大震度

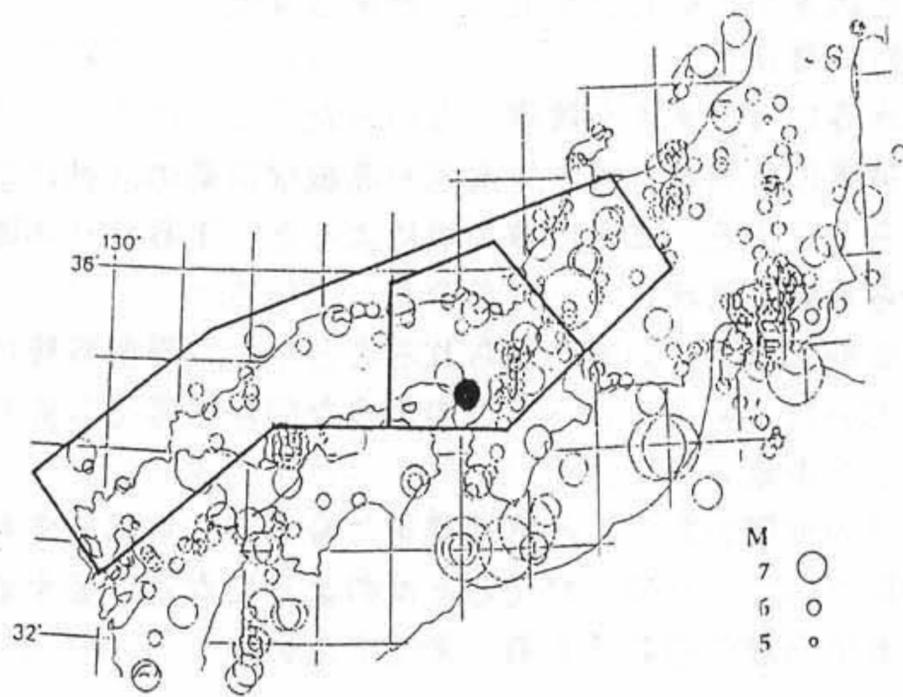


図2. 1. 3 西南日本の被害地震分布

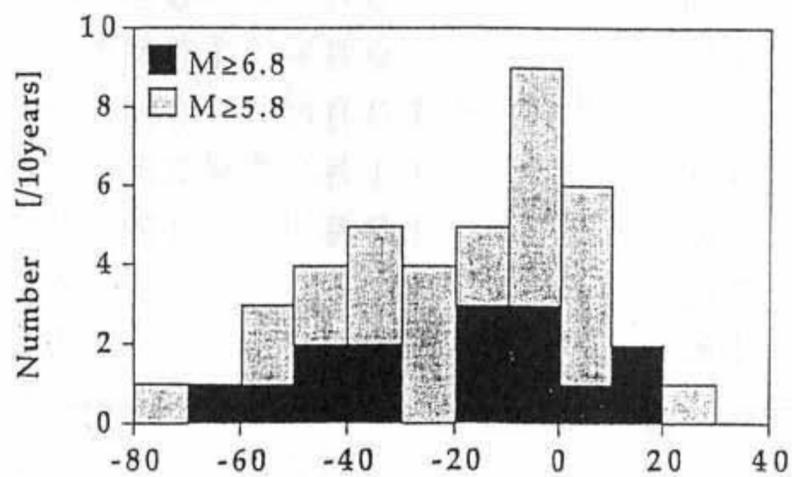
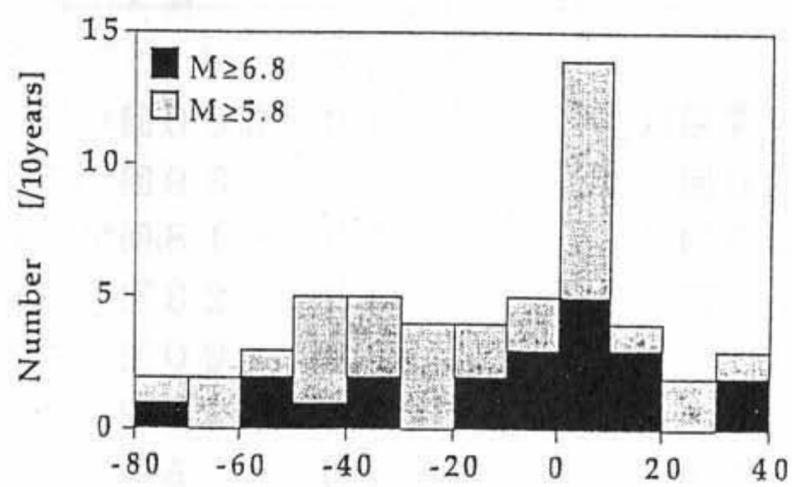


図2. 1. 4 南海トラフの過去8回の巨大地震前後の、重ね合わせによる西南日本内帯(図2. 1. 3の大きい枠内)の地震活動変化のパターン(上)と近畿中部地域(同じく小さい枠内)の地震活動変化(下)

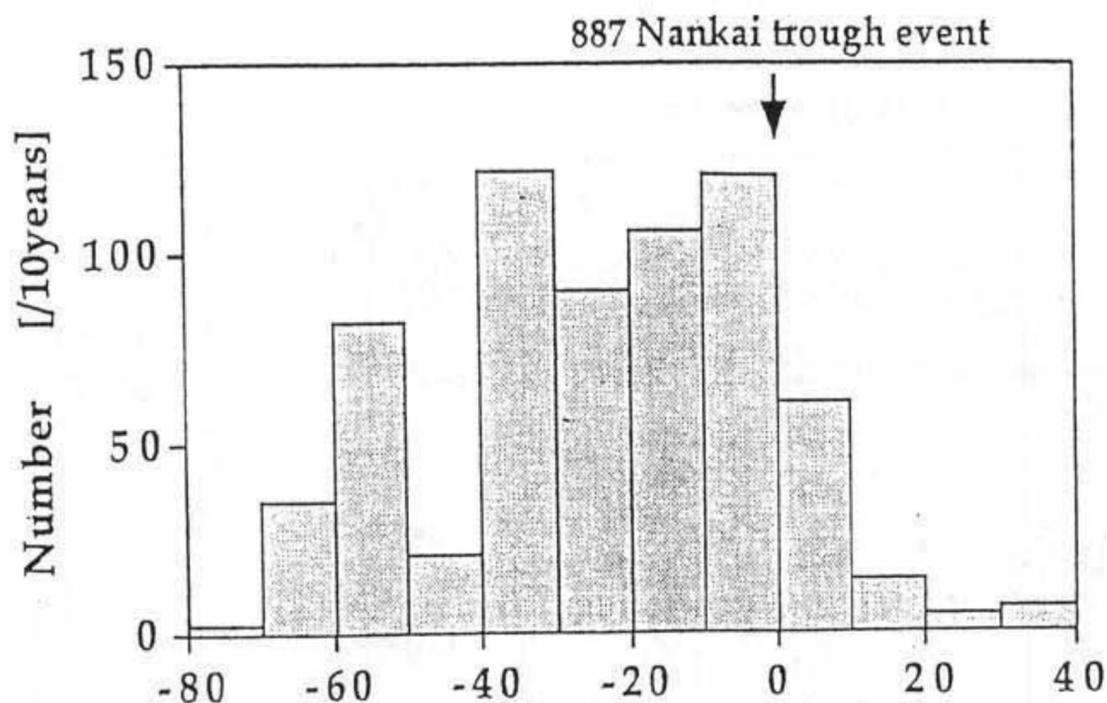


図2. 1. 5 平安時代初期の南海トラフの巨大地震（887年）  
前後の京都での有感地震数の変化

4の地震が10回、最大震度3の地震が42回ある。この場合は、各地の震度のうち最大震度が1以上のものを数えてあるから、慶長の地震のときのように京都市内だけの観測と比べると、余震の活動度が同じであっても、有感地震回数も震度ごとの回数も、ともにかなり多くなる。両者の余震の回数の変化を比べると、慶長の地震は京都市の真下ではないが比較的京都市に近い活断層帯で発生したと推定する1つの根拠になる可能性がある。

なお、この地震に関しては、「古地震探求」（萩原尊禮編著、1995）にも詳しく考察されている。

## 2. 1. 5 西南日本の地震活動の特徴

地震の史料から検出された比較的規模の大きな地震のデータをもとに地震の時空間分布を調べた結果、西南日本内帯の地震活動には活動期と静穏期が見られ、活動期は南海トラフのプレート間巨大地震の約50年前から約10年後まで続く傾向があることがわかっている（例えば、堀・尾池、1995）。その結果を図2. 1. 3および4に示す。このような活動期と静穏期の繰り返しは、データの質の良い過去500年ほどにわたってかなり明瞭に見られ、またそれ以前の史料からも同じ傾向が見られる。比較的小規模の地震に関しても史料から可能な限りの地震の記載を集めてみると、やはり地震発生数の多い活動期と少ない静穏期が大地震のそれらに対応して現れていることがわかる（図2. 1. 5）。

活動期と静穏期ができる仕組みを考えるための仮説がいくつかありうる。西南日本内帯の地震が主として太平洋プレートとユーラシアプレートとの総体運動で起こるとすると、あるいはアムールプレートの東進で起こるとすると、東西方向

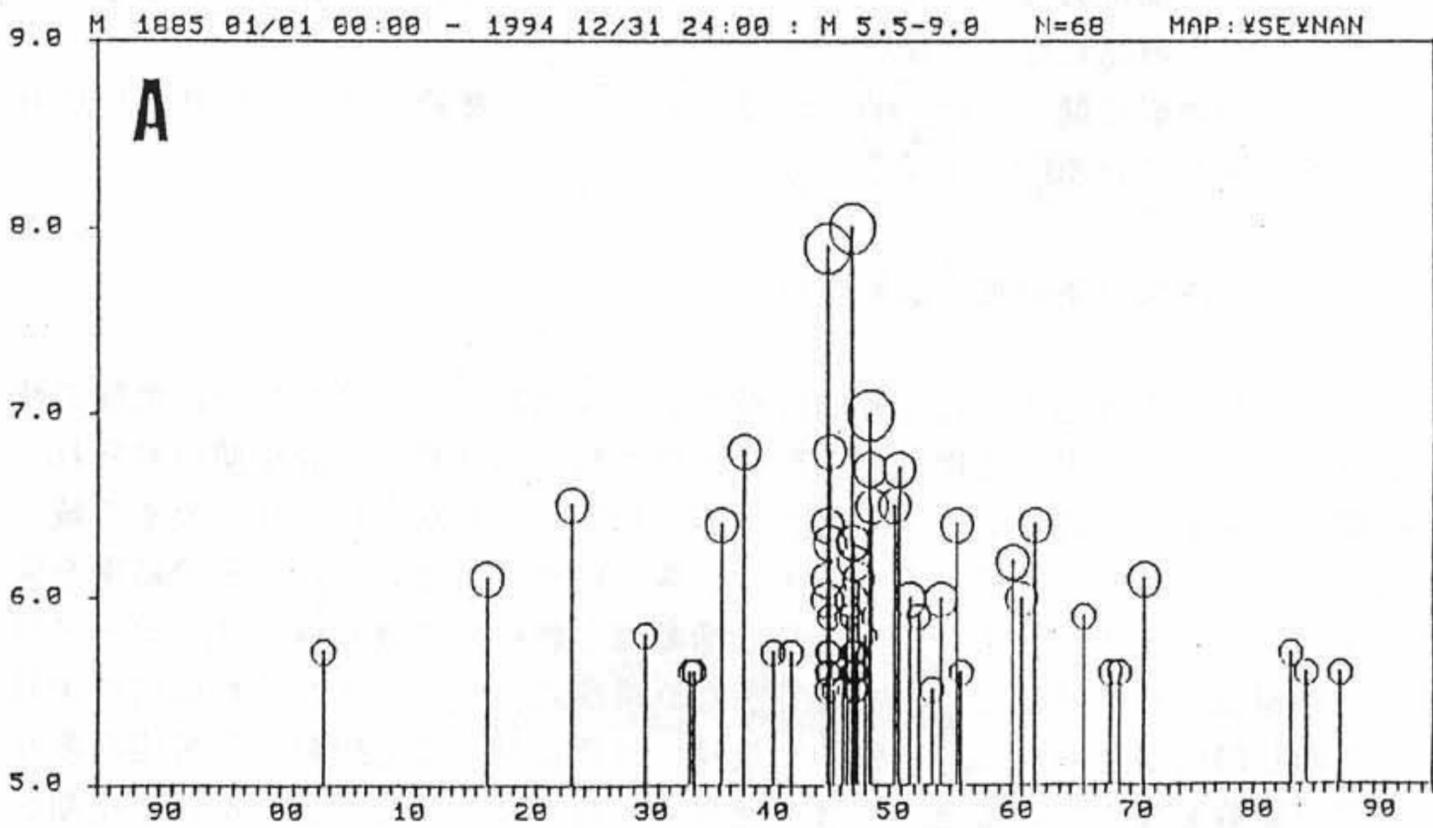
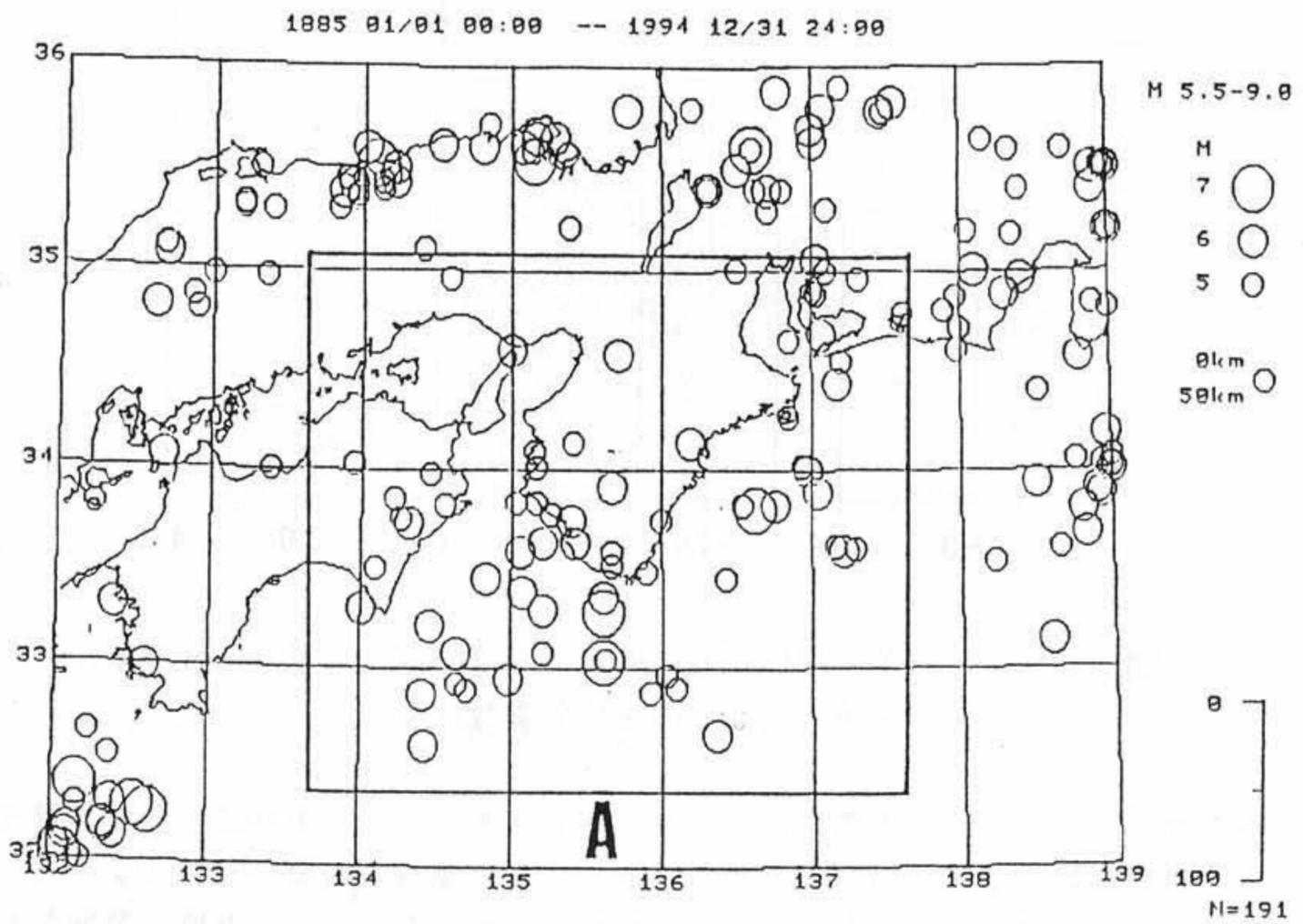


図2. 1. 6 南海トラフの巨大地震（1944年と46年）前後の西南日本外帯の地震活動変化

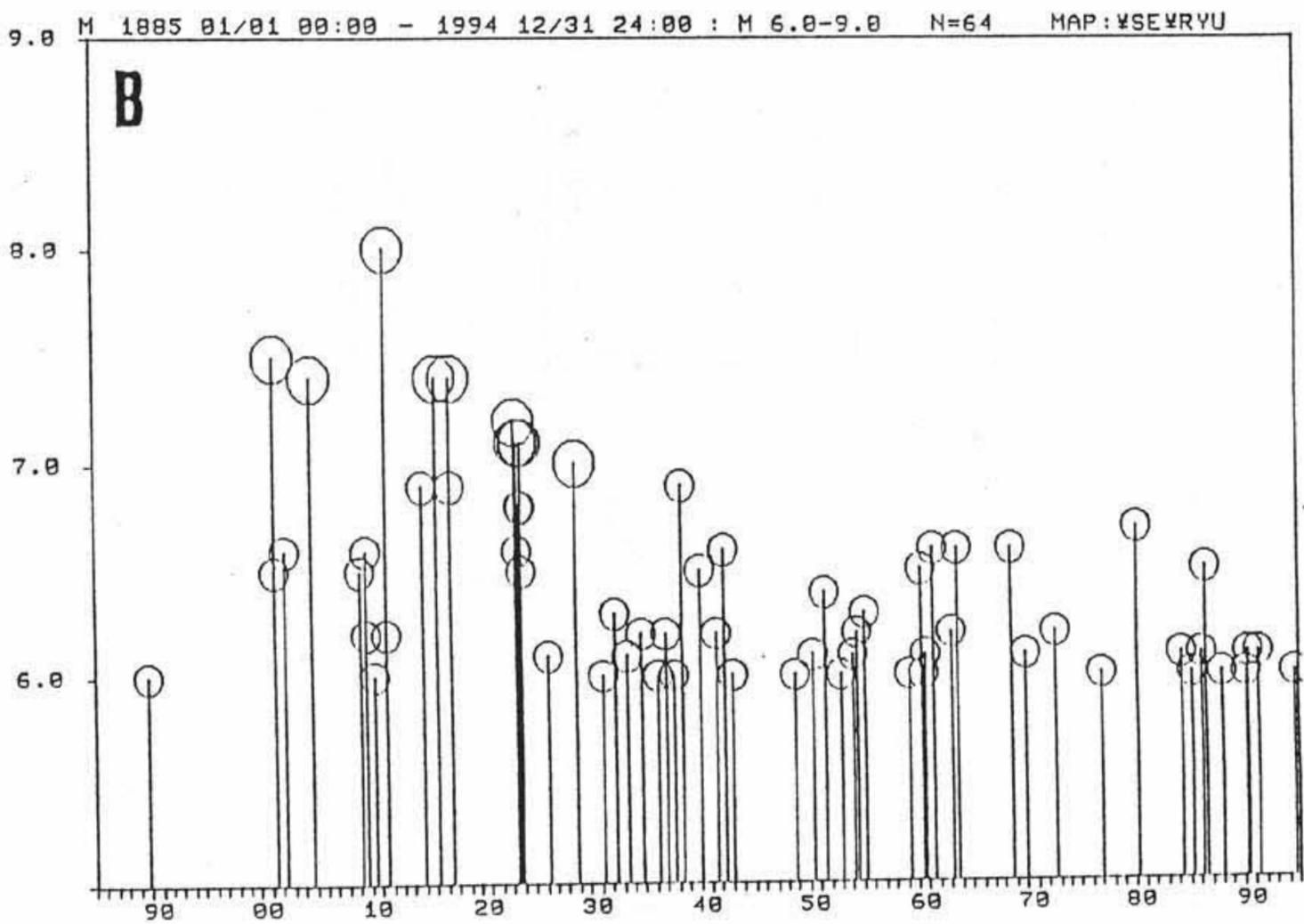
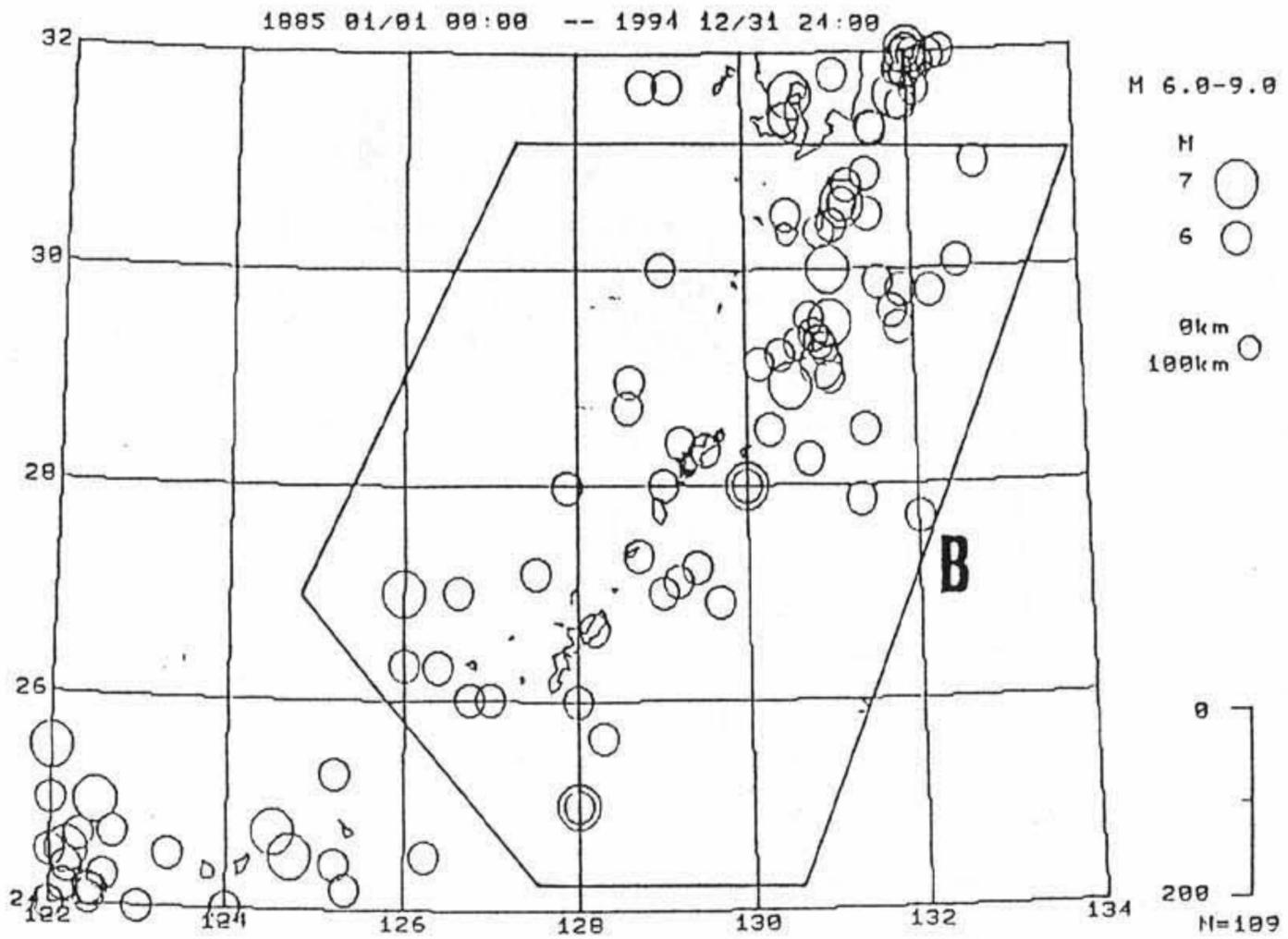


図2. 1. 7 琉球海溝地域の地震活動変化

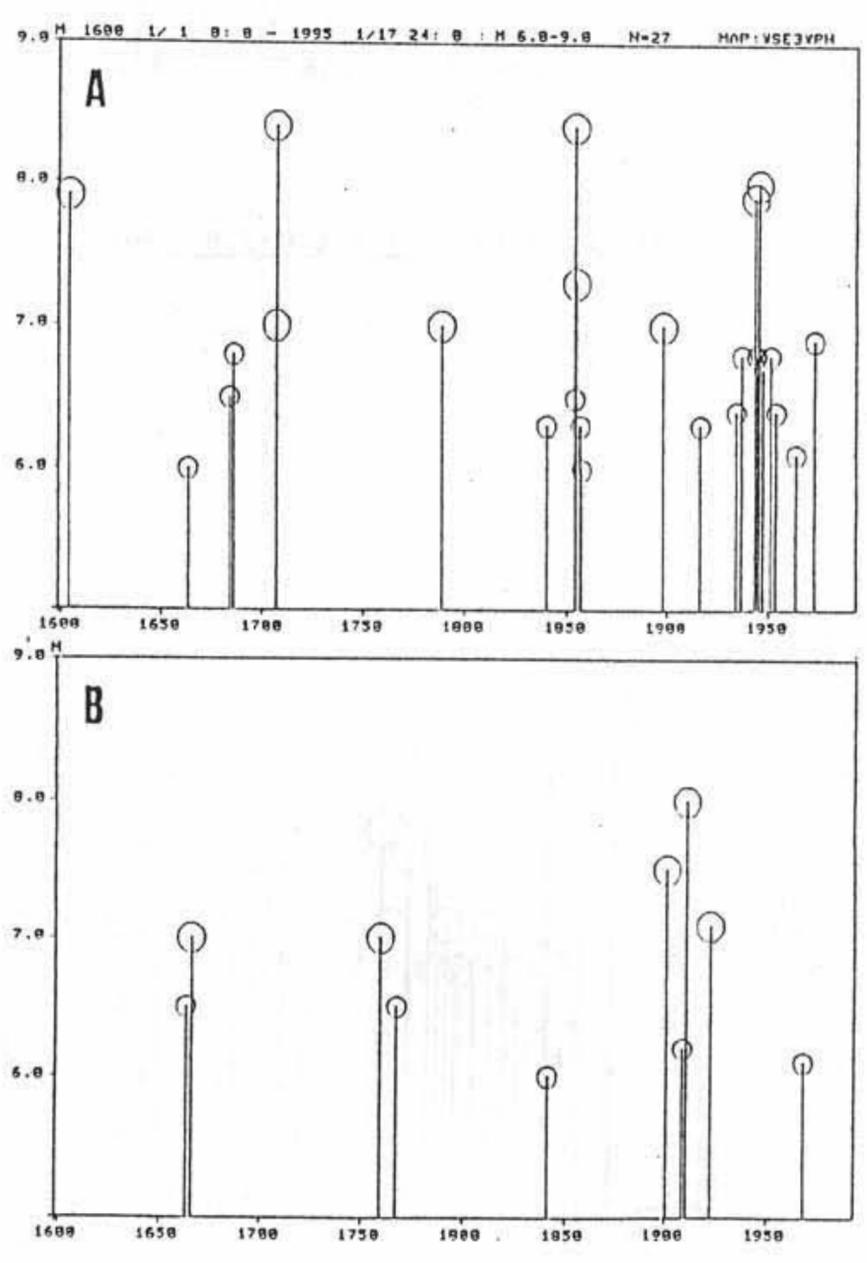
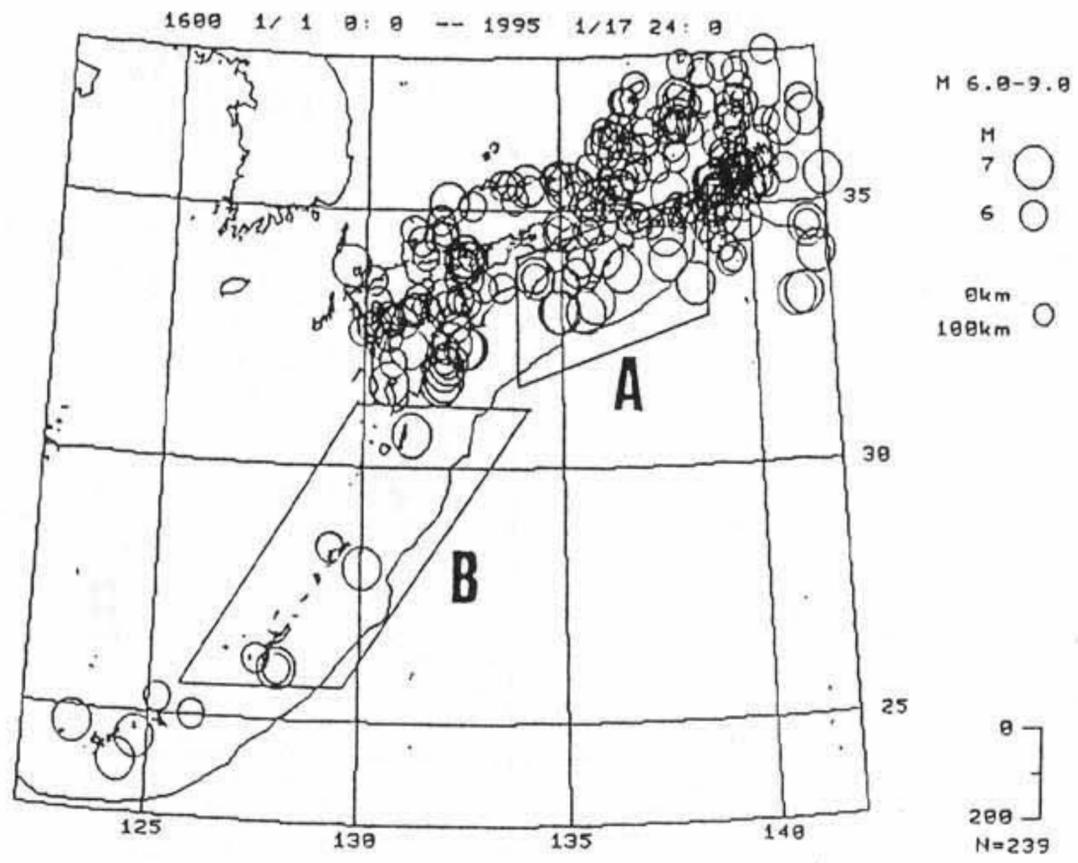


図2. 1. 8 西日本の歴史地震分布（上）と南海トラフ（A）および琉球海溝（B）の地震時系列の比較

の圧縮力が内帯の応力場を支配していることになるが、この場合には、南海トラフの巨大地震の発生によって南北あるいは北西－南東方向の圧縮力が減少して内帯の差応力が大きくなり、南海トラフの巨大地震の直後に内帯で多くの地震が集中的に起こり、その後一時的に活動度を低下させて静穏期ができると考えることになる。一方、南海トラフからの圧縮力が西南日本内帯の地震を起こす場合があるとすると、兵庫県南部地震のような東西方向の圧縮場による地震ではなく、例えば有馬－高槻構造線や中央構造線に右ずれを発生させるような北西－南東方向の圧縮力を主とする応力場になると考えられ、南海トラフの巨大地震の直前にそのようなタイプの地震が内帯に起こると考えられる。

西日本のさらに広域の活動を見ると、近代の計測データから南海トラフの巨大地震の発生の前後に数10年の活動期が西南日本外帯に見られ(図2. 1. 6)、さらに西の琉球海溝に沿う地域でも巨大地震の前後に活動期があり(図2. 1. 7)、南海トラフと琉球海溝の活動期のピークには数10年のずれがあることがわかる。このような傾向は歴史資料のデータからも同じように読みとることができる(図2. 1. 8)。また、これらの地域の間にある日向灘付近では頻度の高い大地震の発生が見られ、上記の両側の地域の活動期のピーク近くで大地震が起こる傾向がある。

## 2. 1. 6 今後の課題

西南日本の大地震の活動期には、以上のように西南日本内帯、外帯、琉球海溝地域、日向灘地域というように地域ごとにずれがあり、それぞれの活動期と静穏期を見きわめつつ、その仕組みを探っていくことが重要であろう。このような長期間の地震活動のデータを、GPSによる地殻変動のデータなどと総合して、地震活動の長期的予測の前提となる日本列島の力学的構造のシミュレーションを実現することが必要である。

地震史料を今後の震災軽減対策に活かすためには、被害の内容を細かく分析して地域的な分布を求めることが必要である。表層の地下構造が把握できて、過去の地震を発生させた活断層帯がわかると、被害の分布と突き合わせながらその地震による強震動の分布を再現させながら研究することも可能になる。地震の長期的予知の重要課題である活断層の履歴の調査を進めることが必要であるが、その場合にも過去の地震による被害分布を詳しく把握しておくことは重要である。

地震災害や津波災害は、大地震が起こるたびに同じように出現することはなく、現象は個性を持っている。繰り返し時間間隔の比較的短い、南海トラフのようなプレート境界の巨大地震に関しては、過去数回の事例があり、大局的には同じような現象が起こっているとしても、例えば各地の津波の波高が異なっている場合が多い。内陸の活断層帯は固有地震の繰り返し時間が、短い場合でも数100年であり、過去の同じ活断層の固有地震の事例に学ぶことはできない。災害の質や規模を支配する社会構造も急激に変化しており、その点から考えても同じ場所での災害の再現性は低い。したがって、史料収集は過去の事例を知るためだけに終

わることなく、現象の発生する仕組みを理解するための研究資料として活かしていくことが重要である。

一方、例えば、震源断層から比較的遠い地域にも発生する地盤の液状化の場合には、同じ場所で再液状化することが多いこともわかっており、過去の震災の地域的特徴を把握して、地下構造などの研究を進めておくことが震災対策のために重要となる場合もある。

震災の調査結果は、次の大地震の際の震災軽減に役立てなければならないが、そのためには、その分析結果を広く市民に知ってもらうことが必要である。一般に、学術研究の成果が市民の知識として普及するには数10年の歳月が必要であるが、次の大地震の震災軽減のためには自然に普及するのを待っては間に合わない。震災の軽減に直接関係する知識となる研究成果が短期間に市民の知識になるように、正確かつ迅速に普及する方法も、研究者は調査・研究と同時に考えていかなければならないと思う。

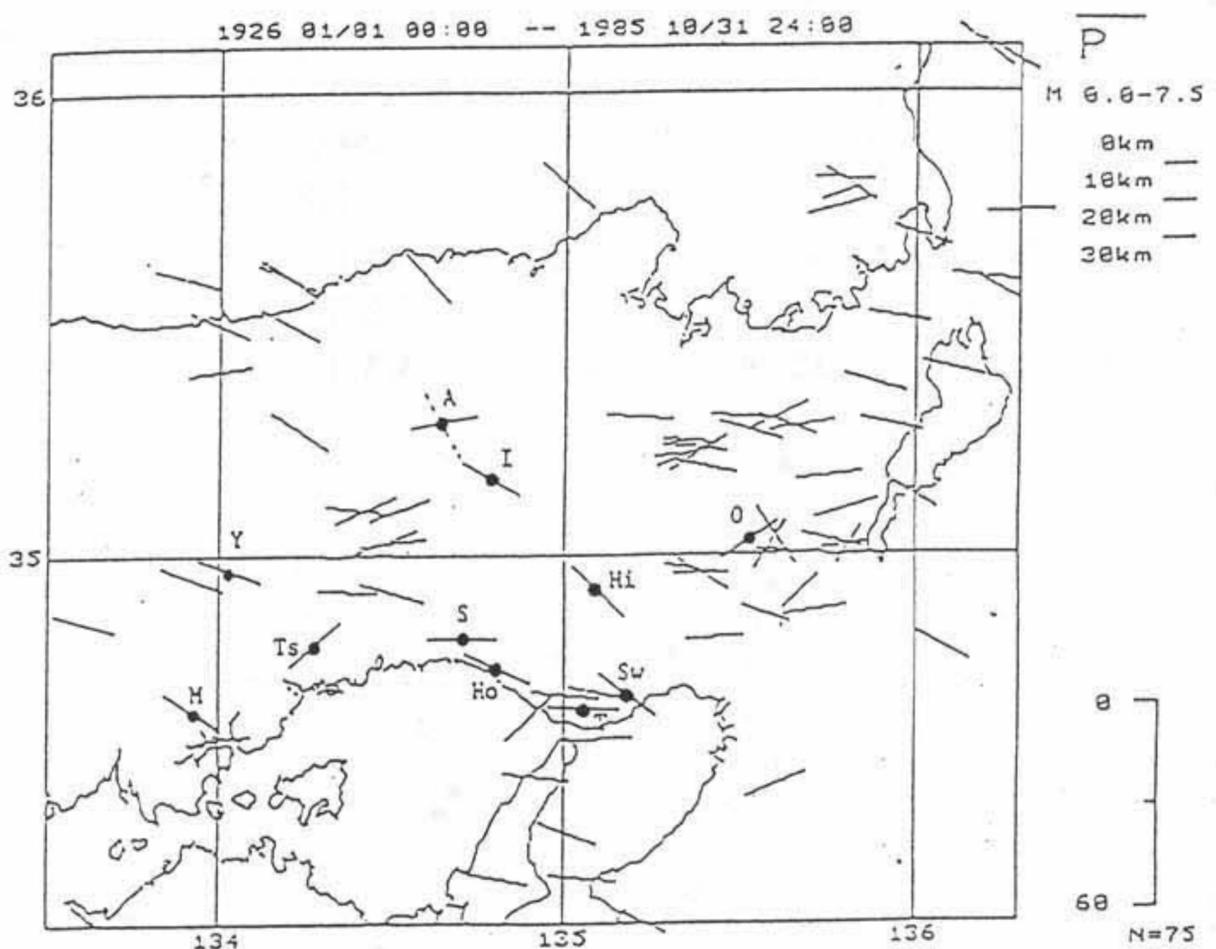
## 2.2.1 地殻応力

(田中 豊)

地殻活動の源である地殻応力の測定は、地震エネルギー蓄積の状況とその推移を知る唯一の方法であるが、調査測定は、ようやく端緒についたばかりであった。しかし、近畿北西部は、国内でも比較的密に測定がなされていた。1978年の測地審議会の建議に基づき、1979年度より始まる第4次地震予知計画から、地震発生機構の基礎的研究のため、地殻応力測定が実施されることになった。大学西日本グループ(西日本地殻応力調査班)は京大理学部地球物理学教室が中心となり、京大工学部資源工学教室、山口大工学部、熊本大工学部などの協力を得て、主として近畿地方を中心に現場応力測定を実施してきた。当初は、応力解放法(8素子ゲージ法、16素子ゲージ法、)を用い、1984年からは3次元水圧破碎法との比較測定を、鉱山の坑道や長大トンネルなどで実施した。その後、西日本調査班は地表からの鉛直ボーリング孔で水圧破碎法による測定を行ってきた。地震予知事業費による地殻応力測定は第6次(1989~1993年度)まで続けられた<sup>1)2)</sup>。その間37回、19カ所で各種の測定をおこなった。第7次計画で現場地殻応力測定を実施しているのは科学技術庁防災科学技術研究所だけである。

3次元応力状態：地表付近で地殻の応力は地形の影響をうけ、主応力軸が傾くことが多いが、地震発生機構解析から求めた起震応力軸も、地域によっては、上部地殻で傾いている場合がある。地殻3次元応力測定には3方向のボーリング孔が必要で、深部の3次元応力状態を地表から決定することは困難である。

水圧破碎法では、主応力軸の一つは鉛直であると仮定し、鉛直応力が最大圧縮応力、中間主応力、最小主応力のときそれぞれ、正断層型、横ずれ断層型、逆断層型とする。浅い部分で逆断層型、その下部で横ずれ型の場合が多い。近畿中北部では鉛直応力が中間主応力である横ずれ型応力状態が卓越するが、近畿北東部では水平応力が強く、逆断層型の地震も発生し、時には正断層型地震も起きることがある(図-2.2.-1参照)。



地殻水平主応力軸の地域分布：測定された水平主応力方向は、他の地球科学的成果から推定されるテクトニックな応力方向とよく一致する。特殊な場合以外は深さにより方位は変わらない。

(図-2.2.-1)。

地殻応力の深度分布：地殻応力は深さとともに増大する。鉛直応力は理

図-2.2.-1 近畿地方北部の原位置応力測定による水平最大主応力方位(太線)と地震P軸の水平面投影(SEIS-PCによる) 下図は地震P軸、T軸の東西鉛直断面投影

A: 明延、Hi: 平木、Ho: 宝殿、I: 生野、M: 万成、O: 大谷、S: 城見台 Sw: 六甲諏訪山、T: 高塚山、Ti: 土橋、Y: 柵原

論的かぶり圧  $\rho gZ$  ( $\rho$ :密度、 $g$ :重力加速度、 $Z$ :深度) にほぼ等しい。水平最大 ( $\sigma_{h1}$ )、最小 ( $\sigma_{h2}$ ) 主応力が直線的に増加するとき、応力値は  $\sigma = C + \alpha Z$  で表される。勾配  $\alpha$  は、地域によって異なるが時間と共に変化する可能性がある。1984年西日本地殻応力調査班は西日本標準応力勾配<sup>1)</sup>を決めた。この勾配は、防災科学技術研究所が、関東・東海地域で水圧破碎法により求めた各応力勾配のほぼ平均に等しい。水平平均応力 ( $\sigma_m$ ) 勾配、剪断応力 ( $\tau_h$ ) 勾配は計算から求められた。近畿中北部の応力勾配は測定を開始した1978年頃でも関東東海地域に比べて低かったわけではない<sup>3)</sup>。

地殻上層部の応力の異常分布：地殻が均質な場合、応力値は深度 20km 程度までは直線的に増大すると期待された。しかし、測定例が増えるに従って、必ずしもそうではないことが判ってきた。構成岩盤の岩質の違い、断層、亀裂、破碎帯の性質、岩脈の存在が、応力集中や解放、あるいは流動変形を起こすためと考えられる。足尾における防災科技研の深度 2000m までの測定では破碎帯(断層)近傍の剪断応力は極めて低い値を示すがそれ以外の部分は高い剪断応力が作用していることが明らかになった<sup>4)</sup>。岡山市万成で測定した結果によれば、深さ 200m 付近に古い固結した断層があり、ここで応力値が急激に高まり、以深は高応力状態となり、とくにアブライト岩脈部で高く、均質花崗岩部で低いという結果が得られている。また、兵庫県宝殿の熔結凝灰岩体での測定では、ほぼ 20m 間隔にある亀裂部分で応力値が下がっていると推定される<sup>5)</sup> (図-2.2.-2)。

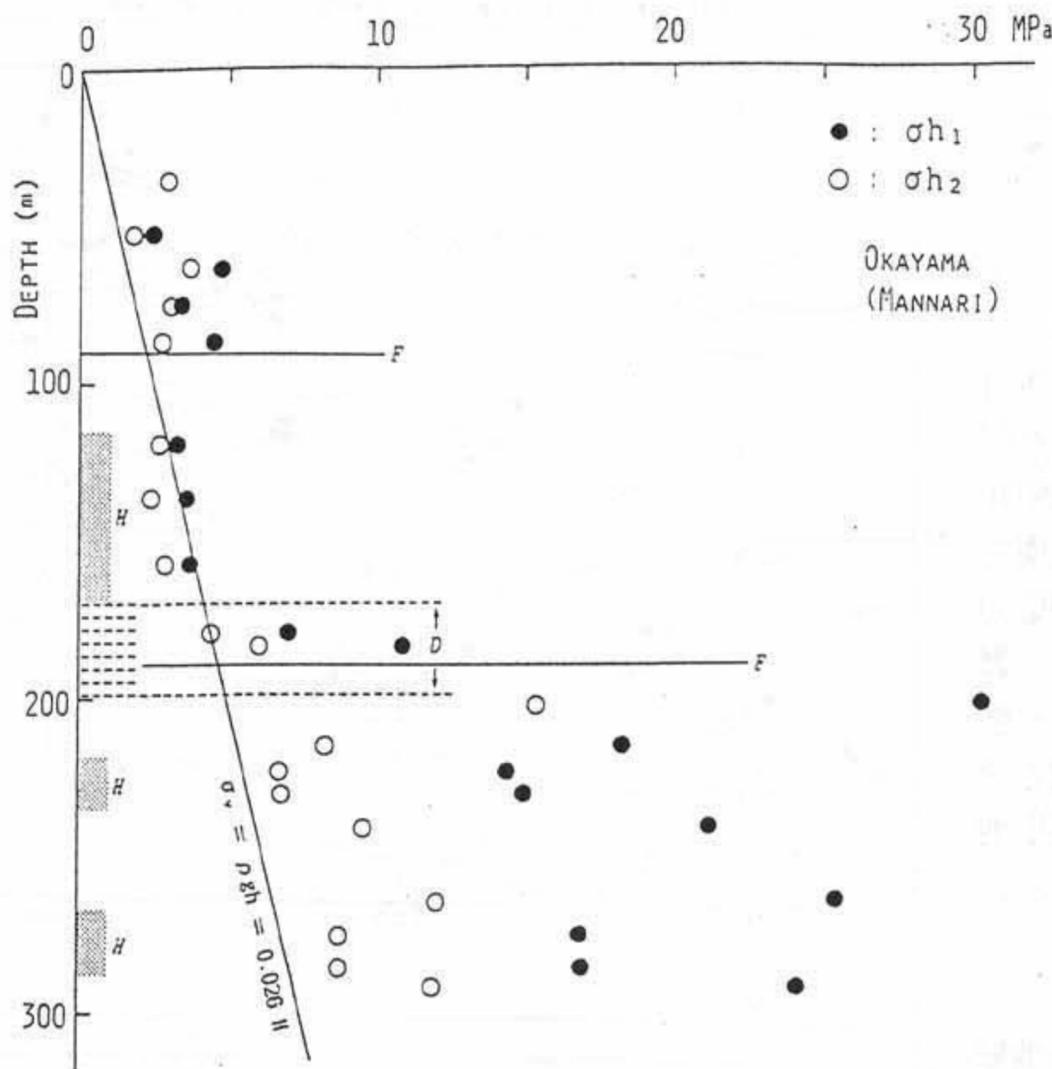


図-2.2.-2 岡山市万成の応力値の深さ分布

平均応力に対する剪断応力の比  $\mu_m$ ： 応力状態を示す一つの方法として  $\mu_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$  で表すのが有利である。これは、すべり面における法線応力に対する剪断応力の比  $\mu_f$  とは異なる。ある特定の既存のすべり面を仮定する時は、測定値から  $\mu_f$  を計算すればよい。  $\mu_m$  が増加し内部摩擦係数  $\mu$  との間に  $\mu_m \geq \tau_c \cos \phi / Z \alpha_m + \mu \cos \phi$  の関係となった時すべり破壊が発生する。  $\tau_c$  は粘着力 (cohesion)、  $\alpha_m$  は平均応力  $\sigma_m = (\sigma_{h1} + \sigma_{h2}) / 2$  の深度勾配、  $\phi$  は内部摩擦角 ( $\mu = \tan \phi$ ) である。なお、Byerlee (1978) によれば、  $\sigma_n < 200\text{MPa}$  の場合  $\mu = 0.85$ 、  $200\text{MPa} < \sigma_n < 2\text{GPa}$  の場合  $\tau_c = 50\text{MPa}$ 、  $\mu = 0.6$  という結果が得られているが、一般に  $1.0 > \mu > 0.5$  と考えられている。もし、各応力値が深度に関し直線的に増加し、地表における値  $C$  が無視できるならば、  $\mu_m$  は深さにより変わらず、深度勾配を  $\alpha_{h1}$ 、  $\alpha_{h2}$  とすると  $(\alpha_{h1} - \alpha_{h2}) / (\alpha_{h1} + \alpha_{h2})$  となる。したがって各深度における測定から求められる  $\mu_m$  の値はほぼ等しくなり、別地点の測定結果と応力状

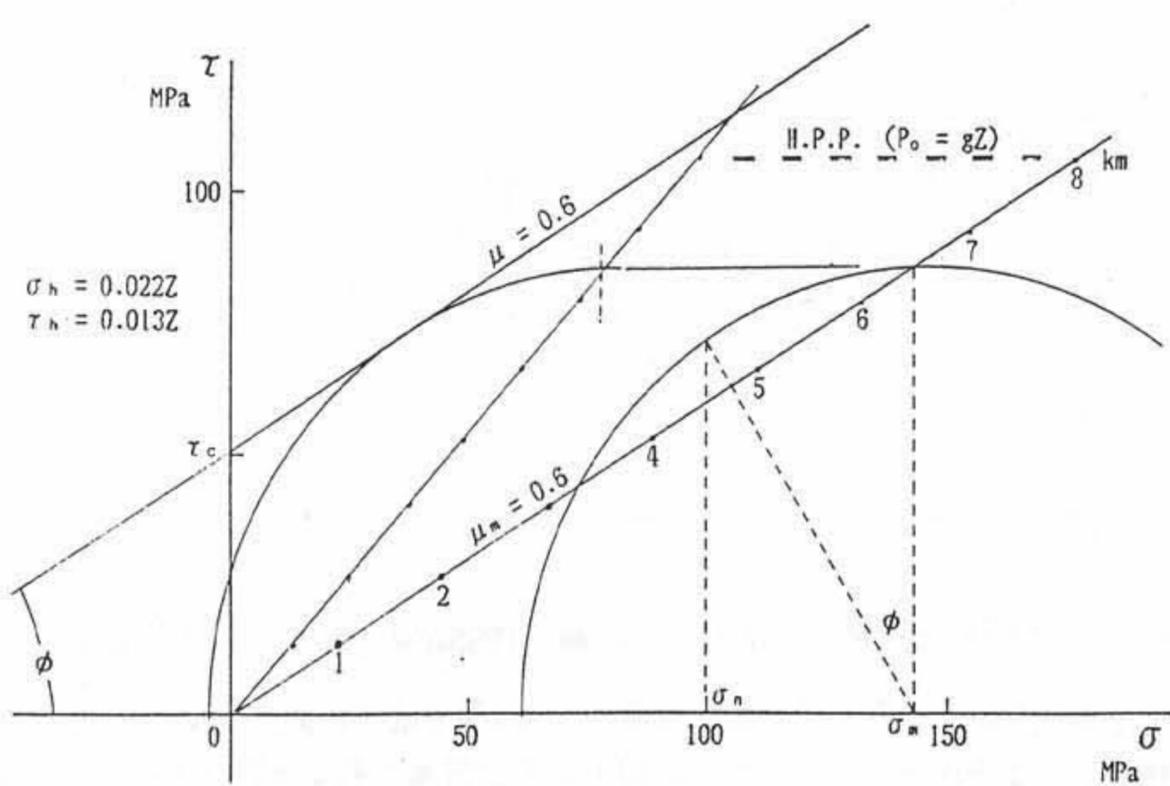


図-2.2.-3  $\tau_c = 50\text{MPa}$ 、 $\mu = 0.6$  と仮定し、測定された $\mu_m$  が 0.6 であれば静水圧的間隙水圧があれば約 6.5km ですべり破壊が起こることを示す。

態を比較するのに好都合である。 $\mu_m$  は応力状態の地域差を知り、あるいは、地震発生危険度を推定するのにも有効である(図-2.2.-3)。水誘発地震の場合には、間隙水圧を考慮すれば、その発生危険度を知ることができる。1980年代前半の近畿北部9カ所の $\mu_m$ の値は最小二乗法によれば 0.28 であった。万成の測定結果では、200m以浅では $\mu_m=0.25$  以下であったが、以深では、0.3から0.4の間に増加した。兵庫県南東部平木鉱山の1985年の測定では0.4以下であったが、1989年の測定では0.4を越えた(図-2.2.-4, -5, -6)。

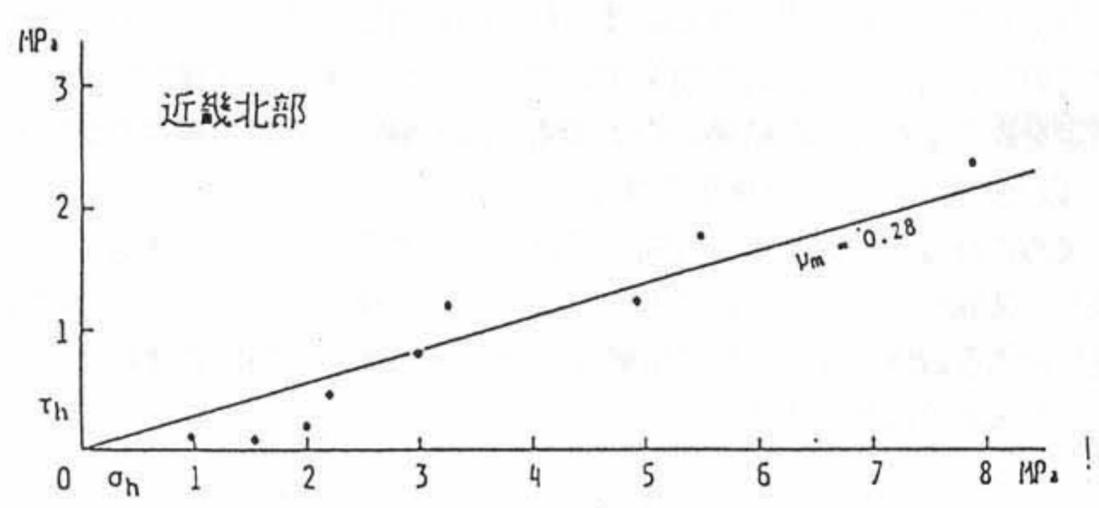


図-2.2.-4 近畿北部9測定点の $\mu_m$  (1985年までの測定結果)

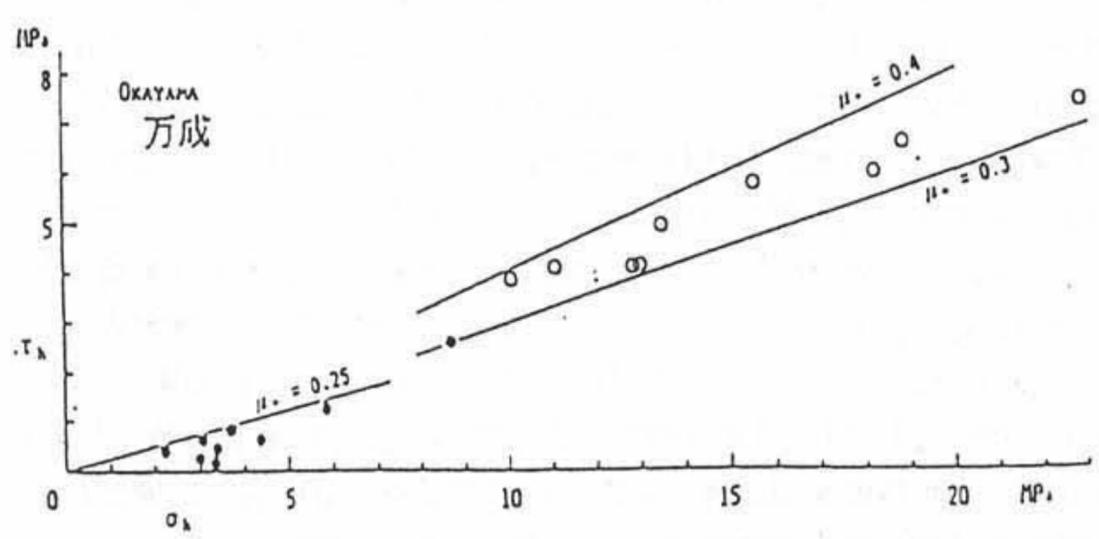


図-2.2.-5 万成の測定結果から求めた $\mu_m$  ●: 200m 以浅

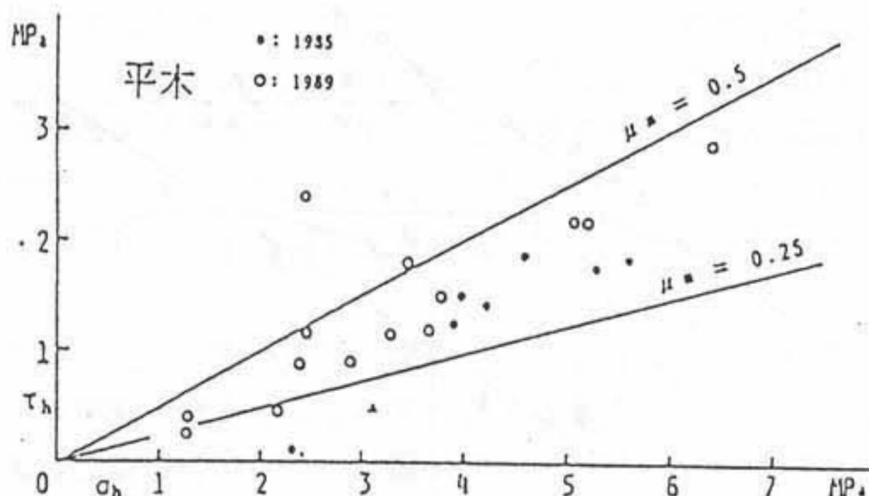


図-2.2.-6 平木の測定結果から求めた $\mu_m$  ●：1985年測定 ○：1989年測定

地殻応力変化：万成花崗岩中の応力測定結果は、深度200m以深ではきわめて高応力下にあることを示している。しかし、剪断応力はそれほど大きくない。岡山県下は日本で最も地震活動の少ない地域であり、また地殻変動も国土地理院の測地測量による過去100年間の集積水平歪変化量も小さく、安定地塊である丹波山地とほぼ等しい。したがって、高応力下でも応力変化は小さく、安定しているものと考えられる。一方、地殻活動の活発な地域は応力の増減が激しいと考えられる。応力変化がどのような型で行われているか、応力深度勾配が変わるのか、深さに無関係に一樣に増大するかは明らかではない。しかし、鉛直応力は当然のこと、水平最小主応力は余り変化しないと推定される。

応力変化の測定方法；歪変化は繰り返し測量、あるいは連続観測により求めることができる。これに現場弾性定数を用いて、応力変化を計算できるが、観測あるいは測定される歪変化の中には非弾性変形、あるいは不連続変位も含まれるので直ちに応力変化とは言えない。重要なのは、絶対応力値の変化である。応力解放法や現場コア試料による岩石試験からでは同一地点での応力変化を求めることは不可能で、現在のところ、同一ボアホール内での水圧破碎による3次元応力測定による以外にはない。3次元測定において3方向のボーリング孔で測定して得られるのは、6つの応力成分であって、同じ亀裂を再開口しても解析により、3次元の主応力値、主応力方向を決定することができる。試験的に神戸市六甲諏訪山実験坑で3次元応力測定を繰り返し行った結果、約1年間7回の測定で、同じ亀裂を開口してもほとんど変化はなく、0.5MPa以上の変化があれば検出できることがわかった。しかし、鉛直1本のボーリング孔で亀裂再開口により求められるのは既存亀裂方向とそれと直交する方向の応力成分であって、主応力方向が変化している場合、2成分だけでは主応力方向、主応力値を決定できない。この場合、応力の再測定のために新しい亀裂を作る以外にない。乾式破碎法で三方向の亀裂を開口させれば、3成分歪計と同様に、水平面内主応力を求めることができる。

兵庫県南部地震前後の応力変化：1) 平木鉱山で測定された絶対応力変化；平木（神戸北北西約20km）で1978年に京大理・工学部が地表下108mの坑内で応力解放法により応力測定を行った。1985年には同和工営（株）が坑内の鉛直ボアホール内で水圧破碎法により測定を実施した。1989年2月と4月にはそれぞれ地表から鉛直70mと斜下方向25m 2本のボアホールにおいて、応力深度分布と3次元応力の測定がなされた。1992年12月には1978年と同一地点で3次元水圧破碎測定が行われた。兵庫県南部地震後の1995年3月には防災科学技術研究所により、1992年と同じ地点で同一方法により測定が実施された。応力変化を検出するについて、測定点も測定方法も異なるために、 $\mu_m$ の変化により示した（図-2.2.-6）。 $\mu_m$ は徐々に増加している傾向がある。1989年4月の測定は地表から25mで、表層部は亀裂などのため、剪断応力が低いので除く必要がある。1994年末には $\mu_m$ の値は0.6に達していたと推定される。 $\mu = 0.6$ でも静水圧的間隙水圧が加われば地下6.5km付近ですべり破壊が発生する。1995年1月17日兵庫県南部地震の横ずれ断層変位のため応力は降下し、1995年3月の測定で $\mu_m$ は0.2までさがった（図-2.2.-7）。2) 宝殿における絶対応力の変化；兵庫県南部高砂市宝殿採石場では熔結凝灰岩中に地表からのボーリングにより1982年に応力解放法、1986年に水圧破碎法と応力解放法の比較測定、1988年に100mの鉛直ボアホールで水圧破碎測定が実施された。兵庫県南部地震発生後の1995年5月には、同じ100mボアホールで

防災科学技術研究所により水圧破碎法による再測定が実施された。宝殿における $\mu_m$ の変化は明瞭ではなく、1988年の測定以後、応力値に変化がなかった可能性もある。また、平木と同様 $\mu_m$ が1995年の兵庫県南部地震で0.6に達していた可能性もある。しかし、宝殿では地震前に比べて地震後、主応力方向が回転していたことは事実であろう。地震断層の変位による応力再配分があり、応力は降下したが、NW-SE走向の山崎断層系に左横ずれを発生させやすい主応力方向に変わったものと考えられる。なお、宝殿でも平木と同様に、主応力方向の周期的変化がみられる(図-2.2.-8)。

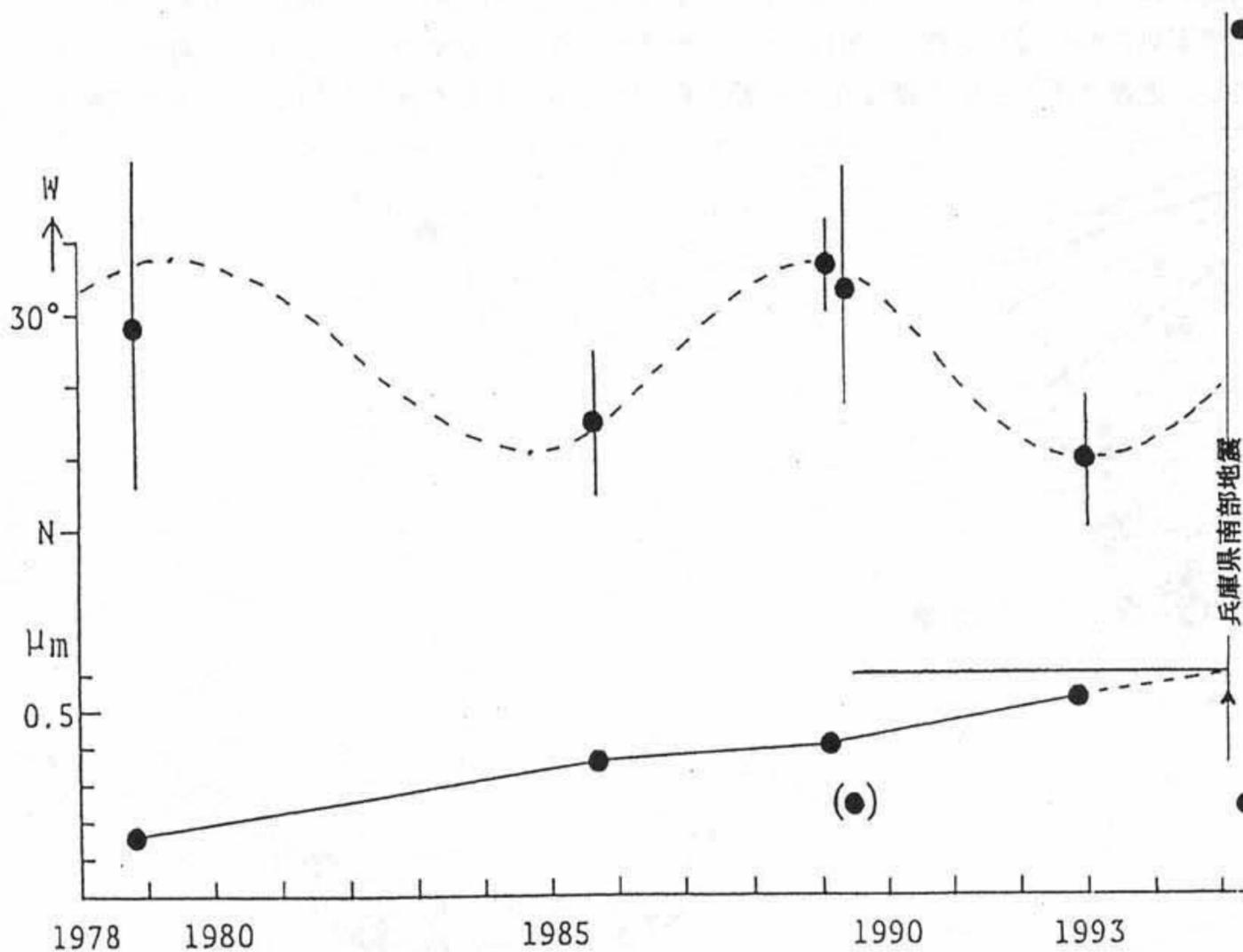


図-2.2.-7 平木における $\mu_m$ および主応力方位の時間的変化

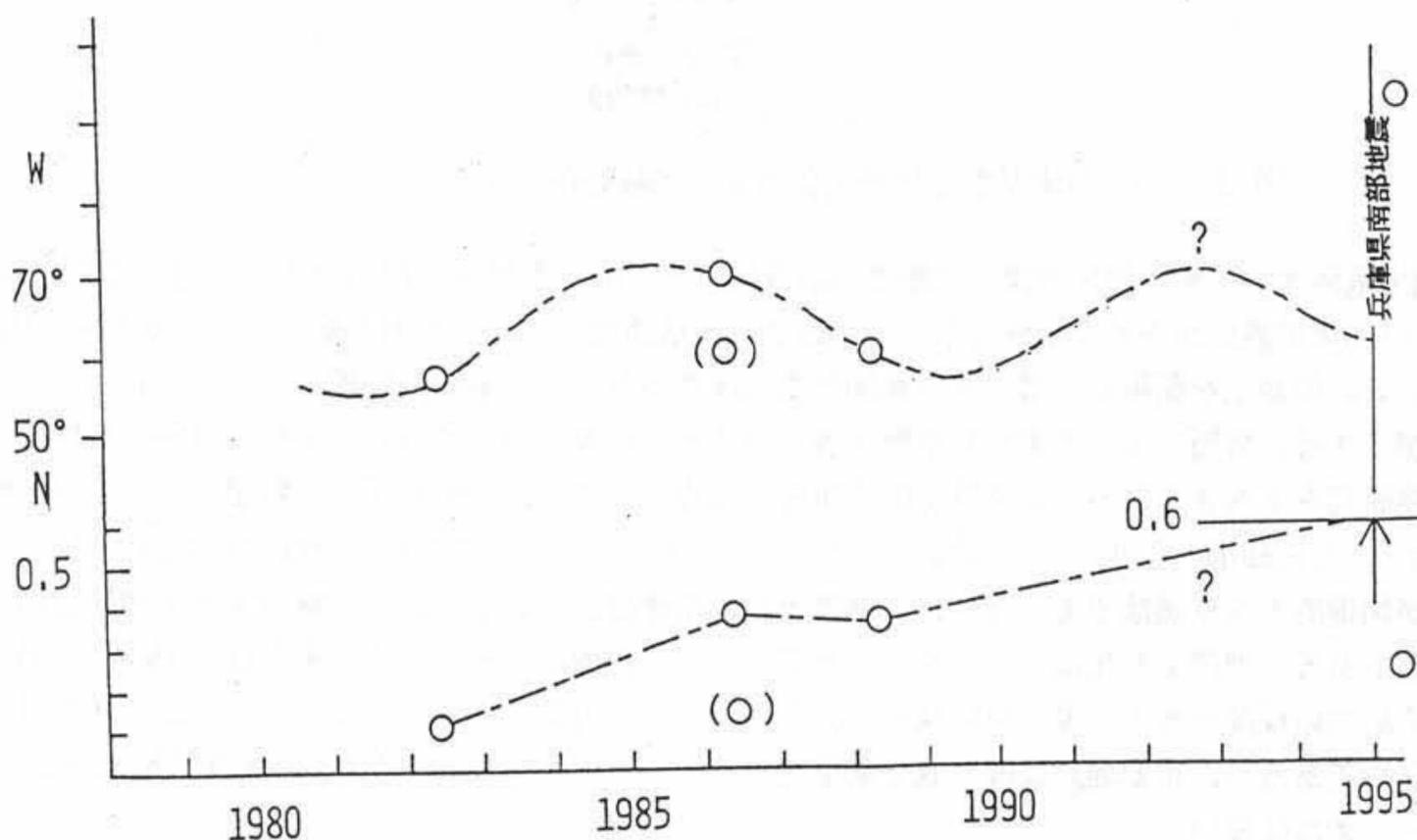


図-2.2.-8 宝殿における $\mu_m$ および主応力方位の時間的変化

平木も宝殿も 最大圧縮応力方位は測定誤差を越える周期的変化を示している。京都上賀茂地学観測所観測坑で観測された1939~1984年間の傾斜変化には、NW-SE成分にほぼ10年周期の変動がみられる<sup>8)</sup>

9)。この周期的変動が平木の主応力方向の変化にも現れていると仮定して、1979年に山があり、1984年に谷があるとして測定値を疑似周期的曲線で結ぶと図の点線のようなになる。主応力方向変化の原因として3つのプレートの相互作用が考えられる<sup>7), 8)</sup>。近畿北部は太平洋プレートとフィリピン海プレートの2つのプレートの圧縮力を受けている。プレートの沈み込み速度の変化により圧縮力は変化する。太平洋プレートからの距離は遠いので周期的変化は減衰しほぼ東西性の一定圧縮応力が残る。フィリピン海プレートの境界は近いので、北西方向への周期的圧縮応力の変化を合成すると、主応力方向は約20°の角振幅で周期的に変化することになる。上賀茂の傾斜変動の周期性も同じ原因によるものであろう。1993年以後紀伊半島のやや深い地震と南海トラフの地震が活発化し始めた。フィリピン海プレートの圧縮応力が増大し、近畿北部の主応力軸は北東-南西系の断層が右ずれを起こしやすい方向に回転を始めた。

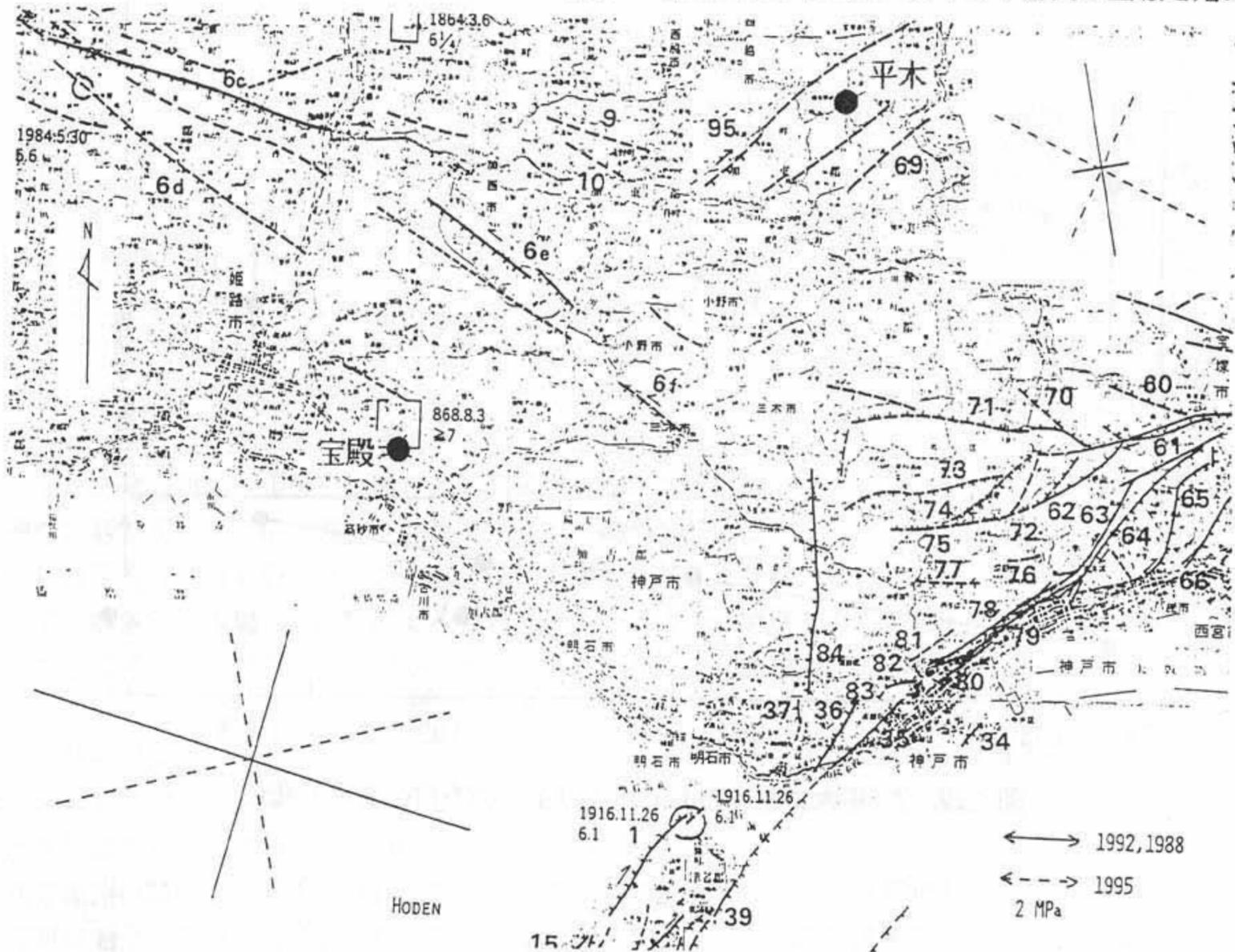


図-2.2.-9 兵庫県南部地震前後の主応力軸変化(平木、宝殿)

地震発生危険度の予測：歴史地震と活断層の調査により、直下型被害地震の発生を予想することができるが、±100年の誤差がある。危険であると予想される活断層の周辺数カ所で絶対応力の繰り返し測定を実施し、 $\mu\text{m}$  の変化を監視し、増大する範囲と増大速度が判れば、場所、規模とおよその時期を予測することができる。断層によってすべり摩擦係数 $\mu$ が変わる可能性があるから、すべり破壊の条件について、別途研究をすべきである。ある特定の活断層の監視のためには、測定値から断層の走向方向の剪断応力( $\tau_f$ )と法線応力( $\sigma_n$ )を求め、その比 $\mu_f = \tau_f / \sigma_n$ の時間変化を観測した方がよい。地震発生が物理的すべり破壊であるならば、地震予知の基礎は応力と歪と応力の解放を示す地震活動の測定・観測である。地殻歪変化は、GPSと歪計による連続観測によるが、応力測定は1000m程度のボアホールで応力の深度分布を一等三角点なみの分布で全国的に展開すべきである。地下深部開発地域選定にも役立つであろう。重要地点は繰り返し測定をし、同一ボアホール内で歪計の連続観測により短期の変化をとらえればよい。

地震後平木と宝殿で応力の再測定が行われたが、神戸市諏訪山及び岡山市万成でも前回と同じボアホールで再測定が実施される予定である。防災科学技術研究所は淡路島野島断層付近の平林、岩屋および西宮市甲山西麓で応力測定を行うほか、地質調査所、大学でも今回の地震断層近傍で、水圧破碎法により測定を実施する計画がある。

参考文献

- 1) 田中 豊：地震予知研究シンポジウム、p.199-212、(1987)
- 2) 西日本地殻応力調査班：地震予知連絡会会報、第51巻、p.703-711、(1994)
- 3) Tanaka, Y. : J. Phys. Earth, Vol. 34, Suppl., p.57-70、(1986)
- 4) 池田隆司・塚原弘昭・小村健太郎：地質ニュース、488号、p.37-42、(1995)
- 5) 田中 豊：物理探査、Vol. 45、p.484-502、(1992)
- 6) 田中 豊：第14回西日本岩盤工学シンポジウム論文集、p.13-19、(1993)
- 7) 田中 豊：京大防災研年報、第36号B-1、p.279-290、(1993)
- 8) 田中 豊：京大防災研年報、第37号B-1、p.273-280、(1994)
- 9) 田中 豊：平成7年資源・素材関係学協会合同秋季大会資料〔P〕地殻応力測定、(1995)

1) 活断層の概説

近畿地方には活断層が数多く発達し、多方向に延びている(図 2.2-10)。その活動様式は逆断層型と横ずれ断層型であり、大規模な活断層は地形境界部に沿って延長している。また、琵琶湖や大阪平野・大阪湾などのような沈降性の低地の下にも、埋没した活断層もある。

多様式(型)の活断層が高密度に発達する中部・近畿地方は、日本列島のみならず、世界的にみても特異である。その原因はいくつかのプレートが交差ないし衝突するという、大きな歪の蓄積場であるからであり、それは活断層や隆起・沈降などの地殻運動で解消されている。

中部地域から近畿地域になると、活断層の延長方向や分布形は徐々に異なり、山地は相対的に低くなるが、盆地や平野の沈降量は大きくなり、堆積物の厚さが増してくる。地形の境界線もより明瞭となる。

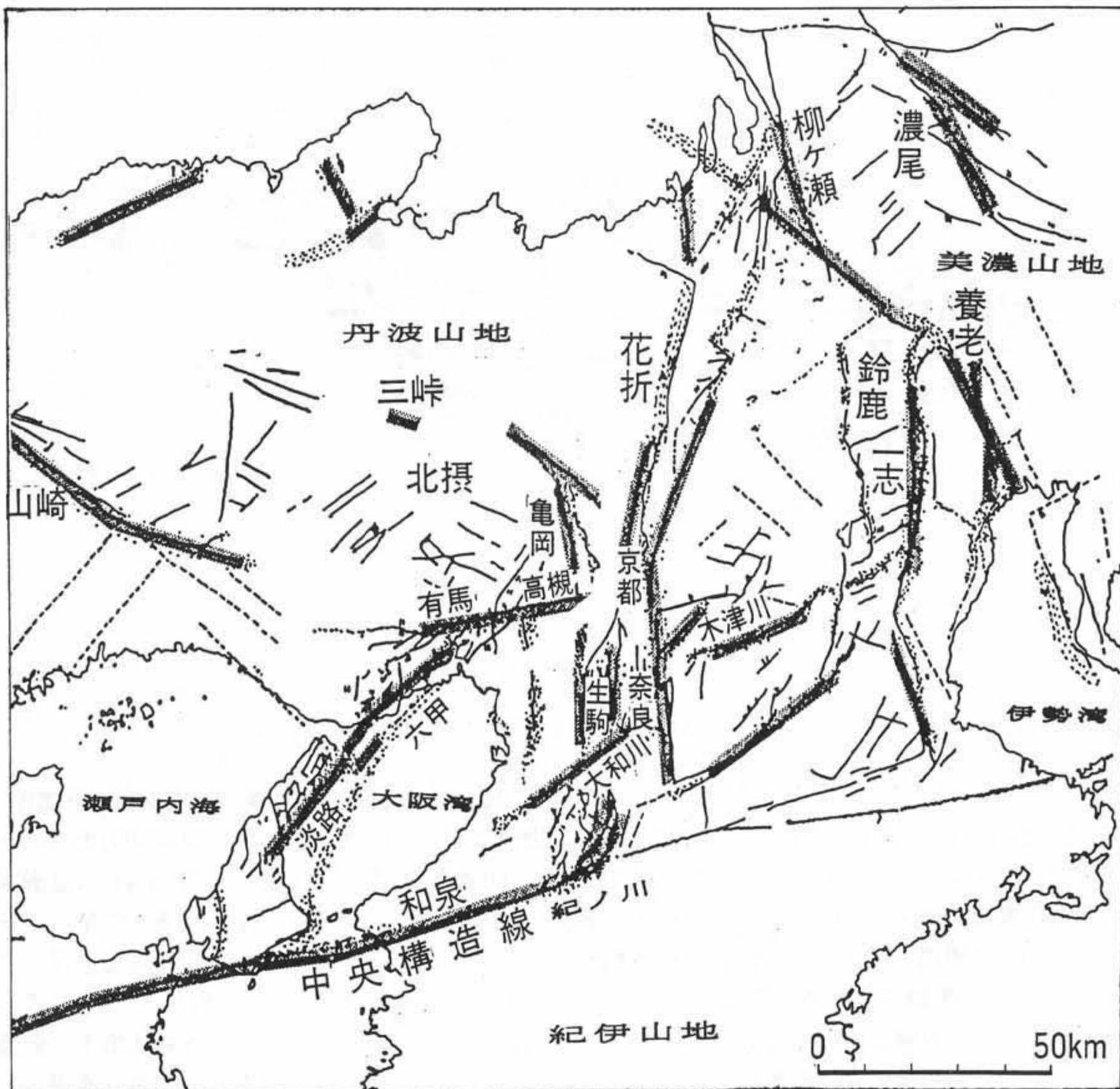


図2.2-10 近畿地域の主な活断層系

近畿地方土木地質図解説書による図を部分的に修正し、活断層を新資料により一部追加した。

近畿地方の中央には、中央構造線を底辺とし、南西端を淡路島南部に、南東端を伊勢湾南部に、琵琶湖北部を頂点とした三角形の地域がある(図 2.2-10)。この北東縁は敦賀湾から伊勢湾に延びる断層系であり、北西縁は野坂山地-比良・比叡山地-六甲山地-淡路島を連ねる山地とその東南側の活断層系である。

こうした断層系に囲まれた地域は、起伏が激しく、地形の変化が著しい。断層線付近の段丘面や第四紀層も激しく変形しており、新期の地殻運動が活発な地域として、近畿三角帯と提唱されてきた (Huzita, 1962)。

この三角地帯の北東方には美濃山地が、北西方には丹波山地が大きな塊りとなって配置し、これら山地の頂部には隆起準平原状の地形が残されている。中央構造線の南方には、外弧隆起帯に属する高起伏の紀伊山地が位置しているが、この内部には活断層や短波長の活傾動などはみられず、中央部を中心として第四紀後期にも曲隆するような地殻運動が進行している。

近畿地域全体では、北東-南西方向の断層系と、北西-南東方向の断層系が顕著に発達する。前者は右ずれ、後者は左ずれ運動を主とした横ずれ断層である。また、近畿三角帯の内部には、養老山地、鈴鹿山脈、生駒-葛城山地といった南北方向に延びる比較的急峻で細長く連なる地壘性山地がある。これらの一方、または両側は活断層で限られ、その内側は第四紀後期にも隆起している。また、大和高原(笠置山地)や布引山地などの丘陵性山地では比較的穏やかな隆起運動が継続している。上述のような活断層の配置や運動様式からみて、近畿三角帯付近は東西方向からの水平圧縮力が卓越した広域地殻応力場におかれていることを示唆している。

これら山地に取囲まれた低地には、琵琶湖を中心とした低地域や、伊勢平野から伊勢湾、京都-奈良盆地、大阪平野などの沈降地帯がある。このような山地と盆地が交錯する地域であるので、日本のベイスン・アンド・レンジ地帯ともよばれている。山地と低地との境界は、概して南北方向と東西方向に延び、それは活断層の走向にほぼ一致している。こうした両方向の活断層が複雑に交差し、山地や盆地は斑状模様をなして配置している。

近畿三角帯では、山地を構成する基盤岩石と、丘陵・台地・低地を構成する第三紀-第四紀の地層はしばしば断層で接している。こうした断層に起因した地形は比較的明瞭である。主要な地形・地質境界線に沿って、変位量や変位速度の大きな活断層が走り、第四紀の地層や地形面の変位・変形も鮮明に現れている。しかし、比高の大きな断層崖麓域は新期の扇状地や崖錐で覆われている場所も多く、長期間に及ぶ人工改変も伴われているので、活断層の詳しい位置や断層の構造などが十分に判明していない所もかなりある。

## 2) 琵琶湖西岸域から六甲・淡路島-中央構造線地域の活断層の概観

近畿三角帯の北西縁をなす、琵琶湖西岸域から六甲・淡路島地域の断層は一連の右ずれ活断層系であり、その一部が今回の地震時に動いた(図 2.2-11)。とくに、花折断層・琵琶湖西岸断層系、有馬-高槻構造線、六甲-淡路島断層系、中央構造線活断層系は地震断層の範囲に関連し、今後の地震発生予測の上で重要であるので、これらの性質を概述する。

### a) 琵琶湖西岸-花折断層系

琵琶湖の西岸に沿って大規模な活断層群があることは、地形・地質的な調査でよく判っている。また、琵琶湖の湖底では、各種の音波探査とボーリング調査が実施され、湖底に厚く堆積している地層の年代や変形構造が解明され、湖底の活断層や西岸の活断層に関する各種の詳しい調査も行われている。こうした調査で、琵琶湖は西側に沈降の軸をもつ構造的な堆積盆であり、その西縁には延長約 60km の逆断層系がほぼ南北方向に連なっている。

1662(寛文 2)年の地震(M=7.6)では湖西の田畑が沈降し、多くの家屋が倒壊した。この時に生じた沈下の様子は古地図にも記載され、近年行われてきた考古学的な調査でも、液状化現象や沈水遺跡として現れた。この地震は琵琶湖西岸断層系の活動とみなされる。

花折断層は丹波山地と比良山地の間を走る直線状谷に沿って延び、北北東-南南西方向に 45km にわたって延びる活断層である。北半部で実施されたトレンチ調査によれば、千年前以降の新しい活動が認められた。南端部に位置する京都盆地では、2,000 年前頃に生じた活動以降には、新たな動きは確認されておらず、微小地震の空白域と共に注目される。

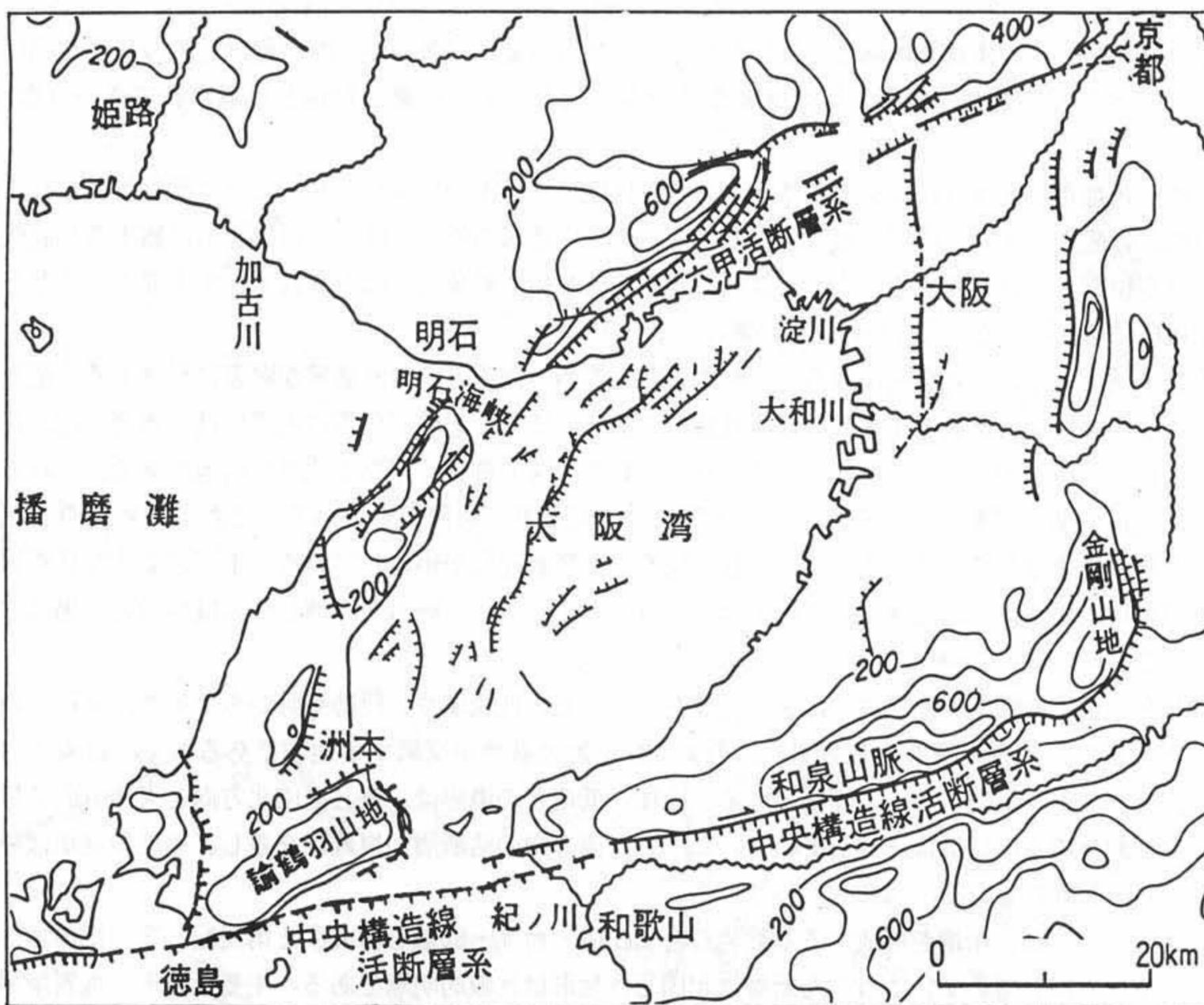


図2.2-11 六甲山地・大阪湾周辺の活断層

水野ほか(1990)に中央構造線や活断層を追加し、海上保安庁水路部(1995)や岩淵ほか(1995a)が探査した大阪湾内の海底活断層を記入した。

b)有馬-高槻構造線

有馬-高槻構造線は、六甲山北麓の有馬温泉から高槻市付近まで地形・地質的に明瞭に追跡され、東部では北上がり、西部では南上がりである。この活断層系に沿っていくつもの断層が連なり、右横ずれの変位地形が伴われると共に、中部・東部では幅数 km・地表深度数 10m 程度の地溝帯がみられる。山地と平野の間の地形境界部に沿って、長さ約 44km の活断層系として連続する。段丘面や段丘崖を横切る変位地形から、千年につき 2~5 m の右横ずれ平均変位速度が求められている。反射法地震探査でも、基盤岩石と堆積物を境する大規模な断層や地溝帯をなす地下構造が明らかにされ、また、地震発生後に行われたトレンチ発掘調査によって、慶長伏見桃山地震(1596年)に対応する地表変位が数カ所で確認された。

c)六甲-淡路島断層系・大阪湾断層

六甲山地の南北両側には、活動度の高い大規模な断層が密集している。六甲東部では、上下成分を伴った活断層が並走し階段状地形を形成している(図2.2-15)。

六甲山地-大阪盆地の断面でみると、約 100 万年前に堆積したとみられる大阪層群の海成粘土層(Ma1)が約 1,000m の上下変位を示し、その平均変位速度は 1m/103 年に達する。しかも、第四紀後半になって、その速度は増加してきた傾向をもつ。個々の断層の右ずれ及び上下平均変位速度は B 級であるが、並走する活断層を含めた断層運動の総和は A 級であるといえる。

六甲の断層群は、これらを斜断する山陽新幹線六甲トンネルや、南北に横断する自動車トンネル、さらに水道トンネルの掘削によって、地下の断層破碎帯の様子までよく判っている。

諏訪山断層に沿う断層崖地形は新鮮であり、山麓線は東北東-西南西方向へ直線状に連なる。この断層崖を横切って流下する河谷はいくつも系統的に山麓部で右横ずれ屈曲する。このもっとも新しい運動が、

山陽新幹線の「新神戸駅」が建設される際に観察され、旧生田川の河床礫層が破碎帯を伴う花崗岩類と接触し、引きずりを受けて切断されていた。こうした諸特徴から、諏訪山断層は右横ずれであり、完新世に繰り返して活動してきた活断層と判明していた。

大阪湾西部では、エアガン反射法探査が実施され、淡路島の東方沖合約 15km の位置に著しい活断層の記録が現れた（岩崎ほか、1994）。これは「大阪湾断層」と命名され、基盤岩石が西側で約 1,000 m 上昇し、完新統と思われる最上位の地層まで変形させている（藤田、1990）。地震後に実施された海上保安庁水路部の調査でも、ほぼ同じ場所でこの断層を捉え、北東-南西方向に約 30km 連続する大断層であることが確認された。この断層も大規模な活断層帯であり、六甲-淡路島隆起帯と大阪盆地とを境する最重要の構造であることが判ってきた。

#### d) 丹波山地の活断層、とくに山崎断層系

有馬-高槻構造線以北から西方にかけての丹波山地では、北東-南西方向の右ずれ断層系と、北西-南東方向の左ずれ断層系が共役関係で分布している。とくに顕著な活断層として山崎断層系をあげることができる。

山崎断層系は北西-南東方向に直線状に延び、総延長は 80km に及ぶ。丹波山地の地形を大きく 2 つに分断し、南西側が約 200m 低い。ほぼ全線にわたって、左横ずれの断層運動を示す、小さな谷や尾根の屈曲がみられ、この中央部を中国縦貫自動車道が断層線にほぼ一致して走る。

山崎断層系東部に属する安富断層では、安富町安志西南方の沖積谷底においてトレンチ発掘調査が行われた。このトレンチ法面下部層は断層で切断されているが、上部層は変位を受けていない。地層の C 14 年代測定や土器片の時代鑑定から、最新の断層運動は 8 世紀後期から 12 世紀の間に起こり、これは 868 年の播磨地震 ( $M \geq 7.0$ ) による可能性が大きい。それ以前にも 2 つの先行する運動が認められた。活動間隔は短くても約 1,000 年であるが、長ければ 2,500 年程度とみなされる。最近岡山県大原町でもトレンチ調査が行われ、ほぼ同じような結果が得られた。

山崎断層系に沿って現在でも微小地震が数多く発生しているが、1961 年 ( $M5.9$ ) と 1984 年 ( $M5.6$ ) には中規模地震が起こり、一部地域で震度 IV に達して被害が生じた。このように山崎断層系は歴史的大地震が発生し、現在でも微小地震の集中度が高いので、地震予知のテストフィールドに選定され、各種の測定が継続されてきた。

#### e) 中央構造線活断層系

四国から淡路島南端を経て和泉山脈南側に至る地帯に中央構造線活断層系が延びる。これは日本列島の陸上部では最長の活断層であり、変位速度も大きい（岡田、1992）。この活断層系に沿う至る所に右横ずれの変位地形が認められ、これが第四紀後半の主要な動きである。横ずれの平均的な変位速度は、四国中～東部では千年につき 7m 程度の値をもつが、紀伊半島や四国の西部などでは、その数分の 1 以下となる。

この右横ずれに伴われた上下変位は、場所によってその向きや変位量が異なる。上下方向の平均変位速度は横ずれの 10 分の 1 程度以下である。各所に断層崖や低断層崖がみられ、これらの方が一般には確認されやすいので、中央構造線は上下ずれの断層と誤解されてきたのである。

最近、四国の数カ所でトレンチ掘削調査が行われ、過去 1 万年程度の活動履歴が解明されてきた（岡田、1992）。それらによれば、いずれの法面でも、断層は地表の耕土層を除く最上部の地層まで切断し、完新世まで活動を繰り返している。断層面はどこでも高角度で、ほぼ垂直である。活断層の活動間隔は千年か千数百年程度であり、四国東部では弥生時代以降に少なくとも 2 回の活動が認められた。最新の動きは中世以後であり、16 世紀以降とみなされる。これは前述した 1596 年慶長伏見桃山地震 ( $M \geq 7.5$ ) である可能性が大きい。

### 3) 兵庫県南部地震の地震断層

兵庫県南部地震は、淡路島北東方を震央とする  $M7.2$ 、深さ約 14km の直下型大地震であり、これを引き起こした明瞭な地震断層が淡路島北西部の野島断層沿いに現れた（図 2.2-12）。さらに、やや不明瞭な地震断層も淡路島北東側の造成地や六甲山地域の一部でも出現した。こうした地震断層の性質を解明すること

は、地震現象の本質を理解する上で基本的に重要である。

淡路島に現れた地震断層は、多くの調査研究がすでに発表されている（荒井ほか、1995；栗田ほか、1995；林ほか、1995；中田ほか、1995；太田・堀野、1995；鈴木ほか、1995；原口ほか、1995 など）。細部での相違はあるものの、野島断層を主とする地震断層の位置や動き方・変位量についてはほぼ見解が一致している。淡路島東側の造成地に現れた灘川断層や六甲山地域と南麓の地震断層についても成果が公表されている。また、余震活動や測地学的調査結果からみて、六甲山地南麓の活断層も少なくとも地下では動いたとみなされる（図2.2-13）。

兵庫県南部地震時に地表で確認された地震断層（系）を重要なものから順に解説する。

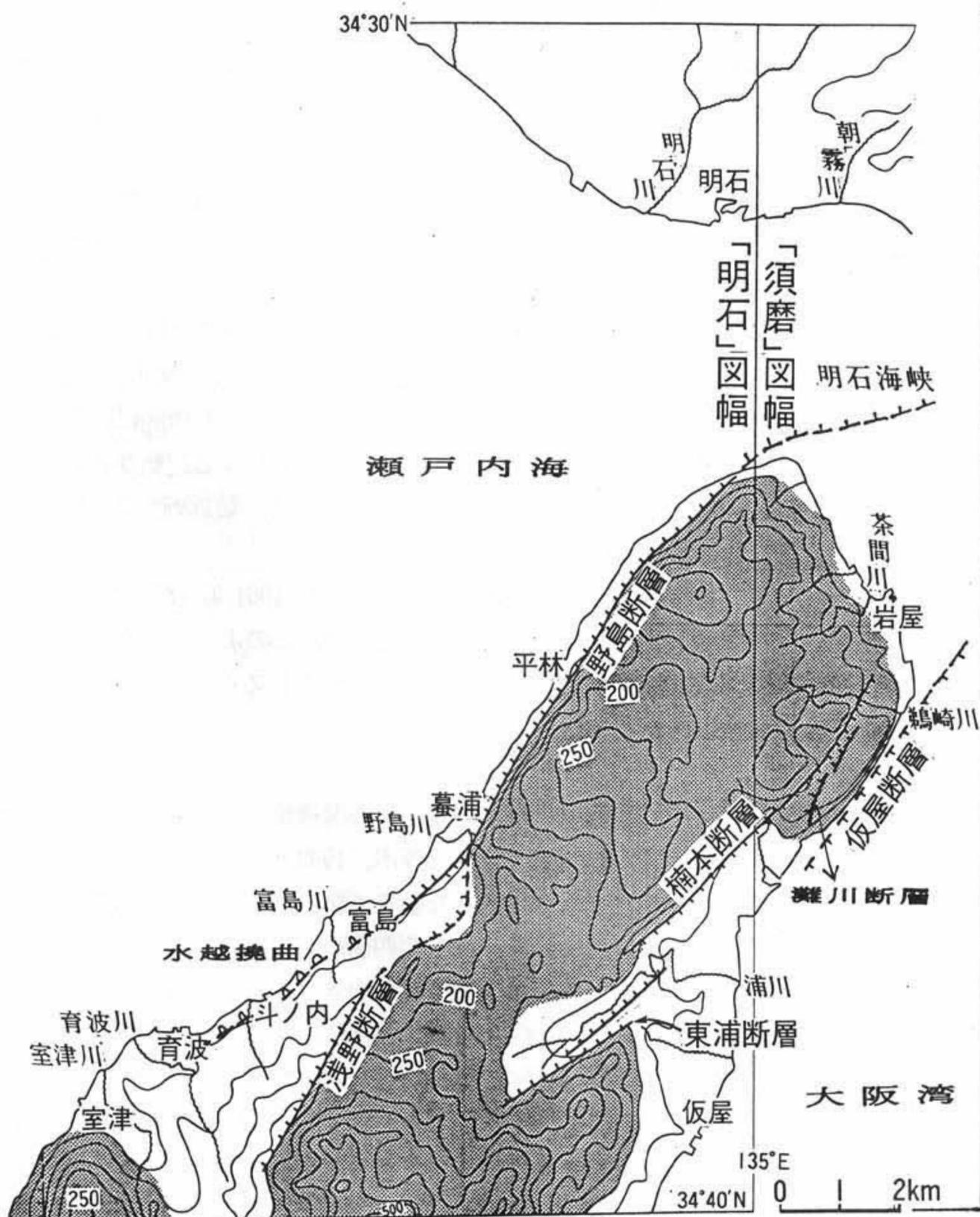


図2.2-12 淡路島北部の活断層

水野ほか(1990)に活断層や活褶曲を追加。等高線(50m間隔)は谷埋法(幅500m)による接峰面図であり、アミ掛け部は山地域。

a) 野島断層系

兵庫県南部地震の発生源となった地震断層が、発生直後に淡路島北部の北西側で発見され、明瞭な地表変位を伴ったために、とみに注目されてきた。北淡町北部の江崎灯台付近から同町中心部の富島にかけて、北東-南西走向の地震断層が延長 10km 強の間で確認され、詳しい位置・様式・変位量などが明らかにされ

てきた。

この主要部は、池辺編(1961)、寒川ほか(1979)、水野ほか(1990)、活断層研究会(1991)が記載していた野島断層と一致しており、その再活動によって今回の地震が発生したことが明らかにされた。

この断層はどこでも右横ずれが卓越し、上下方向の変位も伴われていた。その変位量は大部分の場所で右横ずれ1~2mであり、南東側の隆起は0.5~1mであった。野島断層中央部の平林では、右横ずれが2.1m、南東側の隆起が1.2mで、それらを合わせた総変位量は2.4mに達した(中田ほか、1995)。ここは最大変位量が観察された地点である。断層面の傾斜は野島平林や小倉などで約70~80°SEであり、東(山地)側へ高角度に傾き下がる。南西端部の北淡町梨本では、部分的に北西上がりであるが、他ではどこでも南東側が隆起していた。

地震断層は墓浦の南で2条に分岐する(皆川ほか、1995; 栗田ほか、1995b)が、主断層は野島断層の一般走向を保ったまま南西方向へ延びて、富島市街地南方の水越撓曲部(水野ほか、1990)に至る。この梨本付近の断層は、変位量がやや小さく、北西側の隆起を示す。しかし、分岐点から約1kmの小倉になると、右横ずれが1.4mで、南西側隆起が0.5mを示すようになる。

多くの調査者は地震断層を富島南方まで記載しているが、林ほか(1995)は南西方向にさらに志筑断層北部まで追跡し、わずかの右ずれと10数cm以下の上下ずれを報告している。

墓浦の南から折ヶ谷池に向かって南北方向に分岐した地表断層は、やがて南西方向に向きを変えていく。地表では花崗岩と大阪層群を境する地質境界線である(中田ほか、1995; 皆川ほか、1995)。この断層も右横ずれであり、相対的に南東側の山地側が上昇する上下成分を示すが、これらの変位量は水平・上下変位ともせいぜい20cm程度であり、副次的な断層である。

この北東延長は明石海峡に入る。開裂した基盤岩石が地震後に海底で発見された。その位置はほぼ野島断層の延長部に一致しており、地震断層は海峡部に延びたとみなされる。海上保安庁水路部が地震後に実施した音波探査でも断層が確認されているが、複雑な海底地形や基盤岩石の露出などで記録の解読が難しいために、その延長は充分解明していない(海上保安庁水路部、1995; 岩淵ほか、1995ab)。

明石海峡を横切って明石大橋が建設中であるが、橋台や主ケーブルなどは地震発生時に完成していた。陸地部にある橋台の間が全体として約1.1m延びた。2本の橋脚(主塔)のうち、淡路島側のものは南西へ約0.9m、神戸側のものは東へ約0.2m、それぞれ移動し、わずかの上下変位も生じた。こうした測定結果でも野島断層は明石海峡部に延長しており、そこでも右ずれの変位が起きたとすれば、両側の橋台や橋脚が延びた説明ができる(溝上ほか、1995)。

#### b) 灘川断層系

淡路島北部東岸「灘山地区」では、丘陵性山地を削って大規模な造成が行われ、長さ2.5km・幅0.5kmの採石跡地では厚さ数10m以上の上載岩石がすでに除去されている。この敷地の西側法面や南北両側法面に、雁行状に配列する灘川地震断層系が現れた。この全長は約1.6kmであり、上下変位量は10cm~20cmである。その多くは東(海)側の相対的隆起であり、高角逆断層状を呈し、3~5cm程度の右横ずれも伴う。これらの断層を横切って多くの小規模トレンチ掘削が行われ、基盤岩石内での性状確認の調査が行われている。いずれの断層も幅数m以内の断層破碎帯や、数10cm以内の粘土帯を伴い、既存の断層が再活動したといえる。どの断層線も直線性が高く、高角度の断層面が観察される。地質は花崗閃緑岩と塩基性岩類であり、その境界付近で変位が主に生じている(兵庫県企業庁、1995)。この付近には、第四紀層がなく、第四紀に動いたかどうかの認定は露頭では直接判定できない。しかし、軟弱な断層破碎帯や粘土帯・地形表現が伴われているので、微弱な動きとしては第四紀にあった可能性が高い。

楠本・仮屋の両断層は西側山地が隆起し、右ずれであるが、今回の地震では動いていない。しかし、造成地の中を走る灘川断層系は、地形的に推定される山側隆起の動きとは逆に海側が隆起している。また、造成地のみで観察されることから、大規模な岩体(荷重)除去に伴う応力開放と、大地震という外的な応力とが加わって、地殻の隆起(リバウンド)が生じ、断層変位が誘発された可能性が高いと指摘されている(兵庫県企業庁、1995)。右ずれを伴うことから、このような動きは広域圧縮応力場のもとで生じたとみなされる。

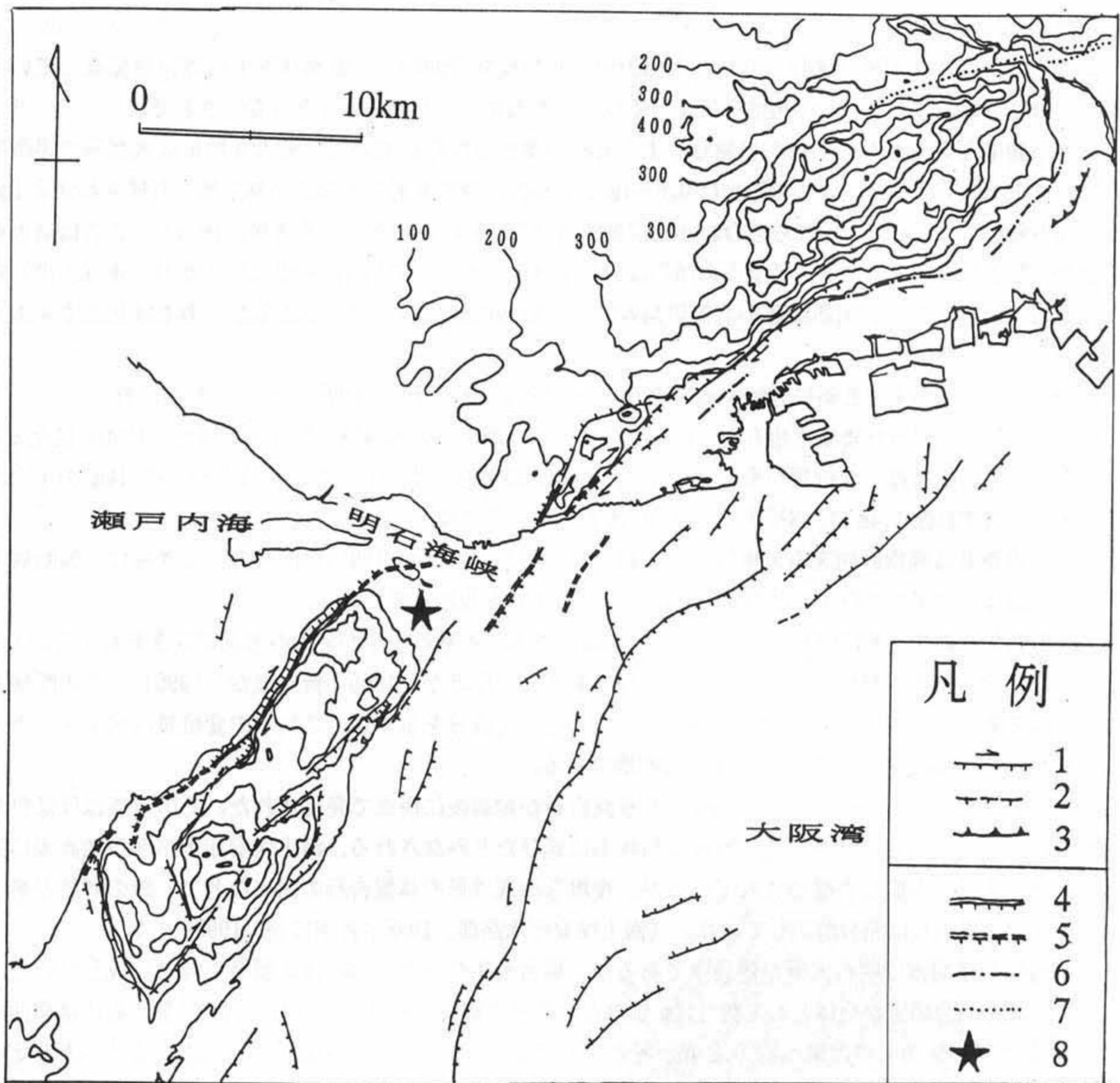


図2.2-13 六甲山地－淡路島北部と周辺海底の主要活断層と地震断層

陸上部は幅500mの谷埋法による接峰面等高線(100m間隔)、海底部の等深線(100m)を記入。

凡例、1：活断層(第四紀後期；ケバ側は低下)、2：推定及び埋没活断層、3：逆断層、4：地表地震断層(确实)、5：地表地震断層(不确实－推定)、6：震源断層(不确实－推定)の可能性がある活断層、7：微弱な動きがみられた活断層、8：本震の震央

#### c) 横尾山断層

六甲山地の南西端にある鉢伏山(252.8m)西側は地形・地質的に明瞭な横尾山断層で限られている(藤田・前田、1984)。断層の通過位置は現在では広く土地造成がなされ、自然状態は不明瞭になっているが、JR塩屋駅付近からこの通過位置(走向： $N20^{\circ}E$ )に沿って、多数の亀裂や家屋の破壊が認められた(桜井、1995ab)。この地表の割れ目は山に入って1本に収れんし、海岸線から約1.5kmの地点で消滅している。桜井(1995c)は割れ目の配置から断層面が東側へ傾斜し、見かけ上「正断層」をなす地表表現は地下の震源断層からこの断層と須磨断層とに分岐したもので、本質的には西側が突き上げられたと考えている。

塩屋台放水路トンネルはNATM工法による水路トンネルであり、全長1442mに達する。このほぼ中央部で横尾山断層を横切るとは、地震の前から判明していた。まさに断層の位置で、トンネルの北側が東方へ約8.5cm右ずれ状にずれを生じた(神戸大学工学部、1995)。

#### d) 須磨断層

鉄拐山－鉢伏山山塊の東側は須磨断層で限られ、断層崖が連なる(藤田・前田、1984)。その山麓の段丘面を変位させる低断層崖がみられる。国道2号線に沿う水準点の改測結果では、須磨断層沿いに数10cm

の撓曲状変形が生じた。地表で明瞭な食違いが連続的に生じた訳ではないので、狭義の地震断層ではないが、測地的に検出された地震断層として注目される。なお、この断層以西は西方へ徐々に低下し傾動している。こうした変動は明石海峡北岸に沿って発達する海成段丘面の高度分布から指摘されている変位(藤田・前田、1984)と調和的である。

#### e) 海底断層

明石海峡の東部海底には、海上保安庁水路部が実施した音波探査によって、垂水沖断層や須磨沖断層の存在が指摘された。これらは地震前の探査記録では、最上位層に変位が認められなかったが、地震後に行われた探査では最上位層にも変位が解読され、今回の地震で活動した海底地震断層とされている(岩渕ほか、1995ab)。垂水沖断層の延長は陸上部の須磨断層に、須磨沖断層はいわゆる「震災の帯」の南西延長部にあるので、大被害を発生させた震源地震断層とも関連して、今後の検討が必要である。

#### f) 六甲山地南側低地の地震断層

六甲山地域でも地震断層が出現したであろうと予想して、多くの研究者が現地を調査した。六甲山地南麓や山地内の断層が調べられたが、明瞭な食違いはどこにも検出されていない。

とくに被害の大きかった神戸市街地やその東部周辺地域では、これまでの調査によっても、明瞭な断層変位は認められていない。しかし、数 10cm 程度以下の変位をもつ、地震断層が既存の活断層や埋没断層に沿って現れたとする見解もある(平野・藤田、1995; 平野・波田、1995; 宮田ほか、1995)。しかしながら、これらは地すべりや液状化現象に伴われた地表変形であり、断層変位でないとする見方もあり(栗田ほか、1995b)、見解の一致をみていない。

24 時間営業のコンビニエンスストアでは、防犯ビデオが設置されており、その記録から地震動の挙動が六甲山南側低地で捉えられている。この解析から、山地南縁といわゆる「震災の帯」との間に沿って、水平方向の動きを異にさせた地震断層線が推定される(菊地、1995)。この北東端は甲陽断層付近までと図示されており、他の資料との検討を要する。

### 4) 第四紀後期活断層の再検討(地形面の変位・変形を主として)

六甲山地域では、米軍によって撮影された空中写真(縮尺約 1 万分の 1)があり、第二次大戦後の地形改変がさほど大きくない時期の地形状態が判る。詳しい地形図類(縮尺 2,500 分の 1、1 万分の 1)と併せて、変位地形の検討が可能である。これら資料を使用し、現地調査を加えて、当域の活断層が再検討され、都市圏活断層図(縮尺 2 万 5 千分の 1)として国土地理院から刊行予定である。鈴木ほか(1996)も震災地域において詳しい現地踏査を行い、次のような事実を見いだした。すなわち、第四紀における活動歴がある活断層も、中期以前にしか活動していない断層と、後期にも活動を繰り返している断層とがあり、後者は段丘面を明瞭に変形させている。

#### a) 淡路島の活断層(野島断層・楠本断層・東浦断層など)

淡路島北西部の地形的変換線に沿って、野島断層はほぼ北東-南西方向に延長する。地質的には、花崗岩類と中新世以降に堆積した神戸層群・大阪層群とが接する境界面となっているが、藝浦付近から南西方向では、神戸層群や大阪層群中の水越撓曲部に延びる(図 2.2-12)。

野島断層に沿って、急斜面(=断層崖)下部に傾斜変換線が伴われているが、一部に右横ずれの尾根や河谷の系統的屈曲がみられる。また、段丘面を変位させる低断層崖から、南東側の山地が隆起していることが判る。

野島断層の崖麓域では、大阪層群と基盤岩石とが断層関係で接する露頭が数カ所で観察されるが、いずれの場所でも逆断層的な見かけを呈していた。北淡町平林では、いくつかの段丘面や段丘崖を横切って変位地形が発達している。平均変位速度が求められ、右ずれでは千年につき 0.9~1.0m、同じく上下方向では 0.4~0.5m と見積られている。

楠本断層は淡路島北部東縁を北東-南西方向へ約 6km 延びる活断層である。その北半部は山地中を走り、鞍部列や直線状谷が連続する。南半部は比高 150m 前後の断層崖地形を伴い、山麓で逆断層状の露頭が確認されている。全線を通して、右ずれの河谷・尾根の変位が認められ、北西側が隆起している(図 2.2-12)。

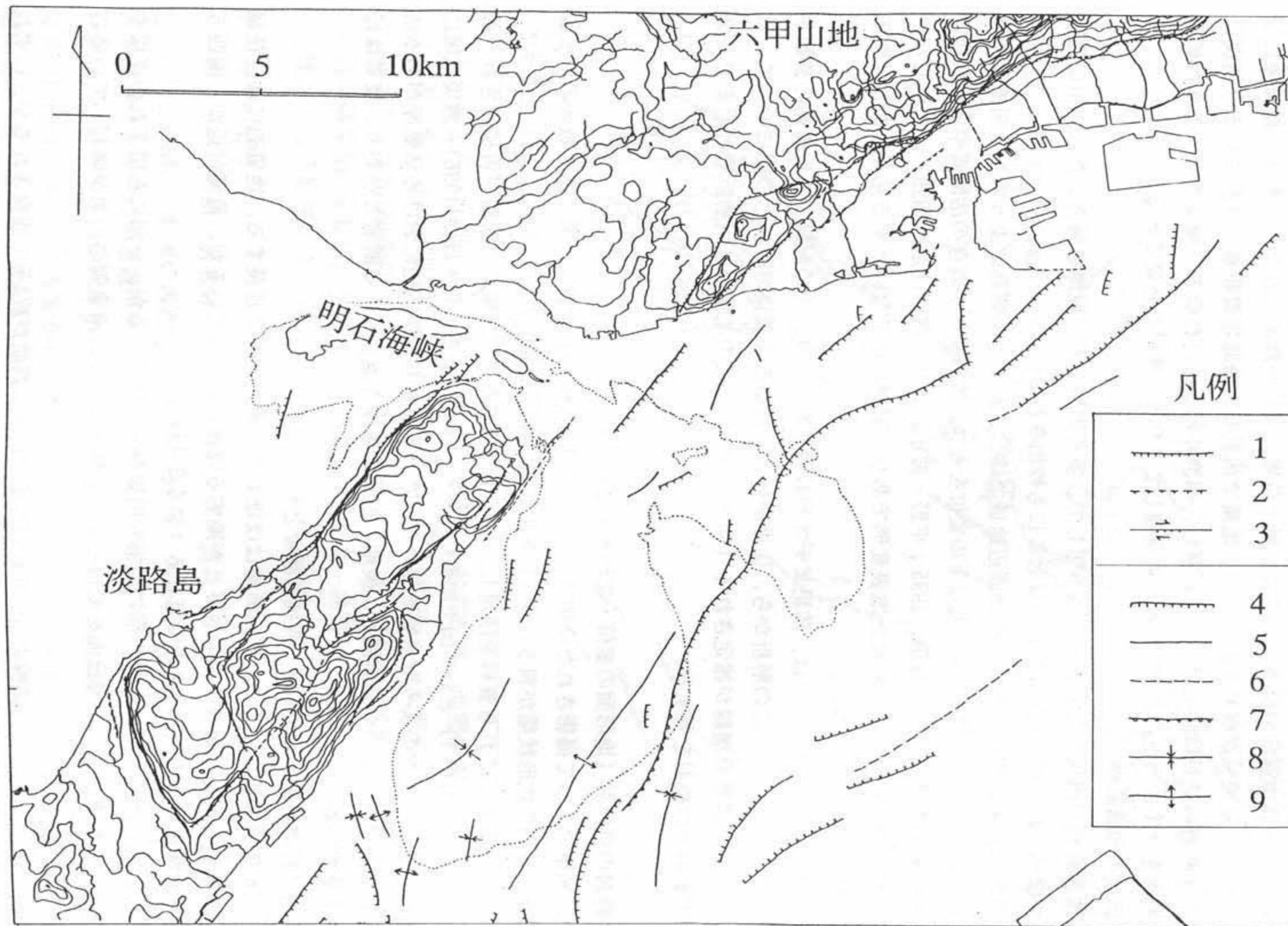


図2.2-14 六甲山地南西部-淡路島北部と周辺海底の活断層

陸上部は幅500mの谷埋法による接峰面等高線(50m間隔)である。海底部は海上保安庁水路部(1995)による等深線(50m・100m)と活構造を記入した。

凡例、1：活断層(第四紀後期；ケバ側は低下)、2：推定及び埋没活断層、3：横ずれの方向、4：海底断層、5：上下変位が不明の断層、6：上下変位が不明で連続性に乏しい断層、7：撓曲、8：向斜軸、9：背斜軸。

東浦断層は北東-南西方向へ 3km 以上にわたって延び、南東側山地と北西側の丘陵・台地を分ける。鞍部列や右ずれ河谷が明瞭であり、さらに南西方は山地の中に入って野田尾断層へと延長するので、これを含めた総延長は 13km になる (図 2.2-14)。最近行われた発掘調査では、約 400 年前の動きが確認された。

志筑断層には中規模の地形として明瞭な断層崖がみられるが、山麓の小規模な変位地形は不鮮明である。この西側 0.5~1km を並走する低断層崖が認められ、逆断層を示す平面形をなし、これが第四紀末期には活動的とみられる (図 2.2-14)。

一方、神戸層群や大阪層群最下部を切断する中持断層や久野々断層には、明瞭な活断層地形はみられない (水野ほか、1990)。また、浅野断層・育波断層など (高橋ほか、1992) も第四紀後期の動きは不明瞭である。

#### b) 六甲山地南部の活断層 (諏訪山-会下山断層・須磨断層)

諏訪山・会下山断層は六甲山地中部の南東麓を限る一連の活断層である (図 2.2-15)。山陽新幹線「新神戸駅」から灘区長峰台までの山麓線は北東-南西方向へ一直線に延び、至る処で段丘面を切断するとともに、これを横切る河谷が系統的に右横ずれしている (活断層研究会、1981; 杉村、1981; 松山・岡田、1991)。段丘面の形成年代が充分判明していないので、それを開析する谷の横ずれ量は判るものの、信頼できる平均変位速度を求めることは困難である。

神戸海洋気象台や神戸大学附属病院のある大倉山は中位段丘面に位置するが、この北縁は会下山断層で切断されており、北向きの低断層崖で限られている。この段丘面は頂部では凸状のふくらみをもつが、南 (下流) 側でその傾斜を増している。末端でも凸状に急傾斜し、沖積低地面に移る。縄文海進時の海食作用で修飾されているとしても、段丘面の変形や長く直線状に延びる崖線を伴っていることから、本質的には撓曲崖 (元町撓曲) と推定される (鈴木ほか、1996)。これを横切る反射法地震探査でも断層が確認されている。

なお、兵庫区湊川付近は北側を南落ちの長田断層で限られており、会下山断層との間は地溝状凹地となっている。両断層は右横ずれが卓越した活断層であるので、この低地は一種のプルアパート盆地 (pull-apart basin) とみなされる。

前述のように、須磨断層も山麓を限る明瞭な断層であり、段丘を切断している。この北東部の高取山南東麓は、大阪層群よりなる丘陵であり、変位地形は不明瞭である。

#### c) 六甲山地北東部を斜走する断層 (大月・五助橋・渦ヶ森・芦屋断層)

これらの断層は六甲山地の東部を北東-南西方向に斜断するようにして走る (図 2.2-15)。大月断層は地形的に明瞭な鞍部や線状構造地形を伴い、系統的な河谷の右横ずれが認められる。その南西部にあたる神戸市灘区鶴甲や長峰台では、中位段丘面に覆われ、変位地形が見られないので、第四紀末期以降の動きはその部分ではないようである。しかし、この中部や東部は、侵食作用の激しい山地中を通過し、指標となる段丘面や第四紀層が欠如するので、第四紀末の動きについては判定できない。

五助橋断層や渦ヶ森断層は直線状に走り、断層面もほぼ直立している。これらは大阪層群中部亜層群までを切断し、両側の山地は 200~300m の高度差がある。地形的にも明瞭な傾斜変換部があるが、断層線を覆う段丘面あるいは崖錐面には変位が認められない (図 2.2-16)。

芦屋断層の中部は走向が南北に近く、この両端は北東-南西方向となる。断層線はかなり弯曲しており、上盤側にあたる西側地塊は東高西低の地形・地質状態を示すことから、北西から南東へ突き上げる逆断層とみなされる (藤田・笠間、1982)。花崗岩類が大阪層群中部亜層群までへ衝上する露頭 (45~80° NW) が観察されている。200~300m の高度差を伴い、地形的にも明瞭な傾斜変換部がみられるが、断層線を横切って分布する段丘面や崖錐面には、南西端部を除いて変位がみられない (図 2.2-16)。

#### d) 六甲山地東縁・南縁の活断層 (甲陽断層・西宮撓曲・塩尾寺断層・岡本断層)

甲陽断層は大阪層群中部亜層群から段丘堆積物までを切断する断層である。北西側から南東側へ突き上げる逆断層であることは露頭で確認されている (藤田・笠間、1982、図 2.2-15)。

西宮市の関西学院大学付近に発達する上ヶ原段丘は約 30m、北側を東流する仁川沿いの低位段丘は約 10m、この断層により上下に変位している (鈴木ほか、1996)。甲陽園南側の松風町でも低位段丘面が明瞭に食

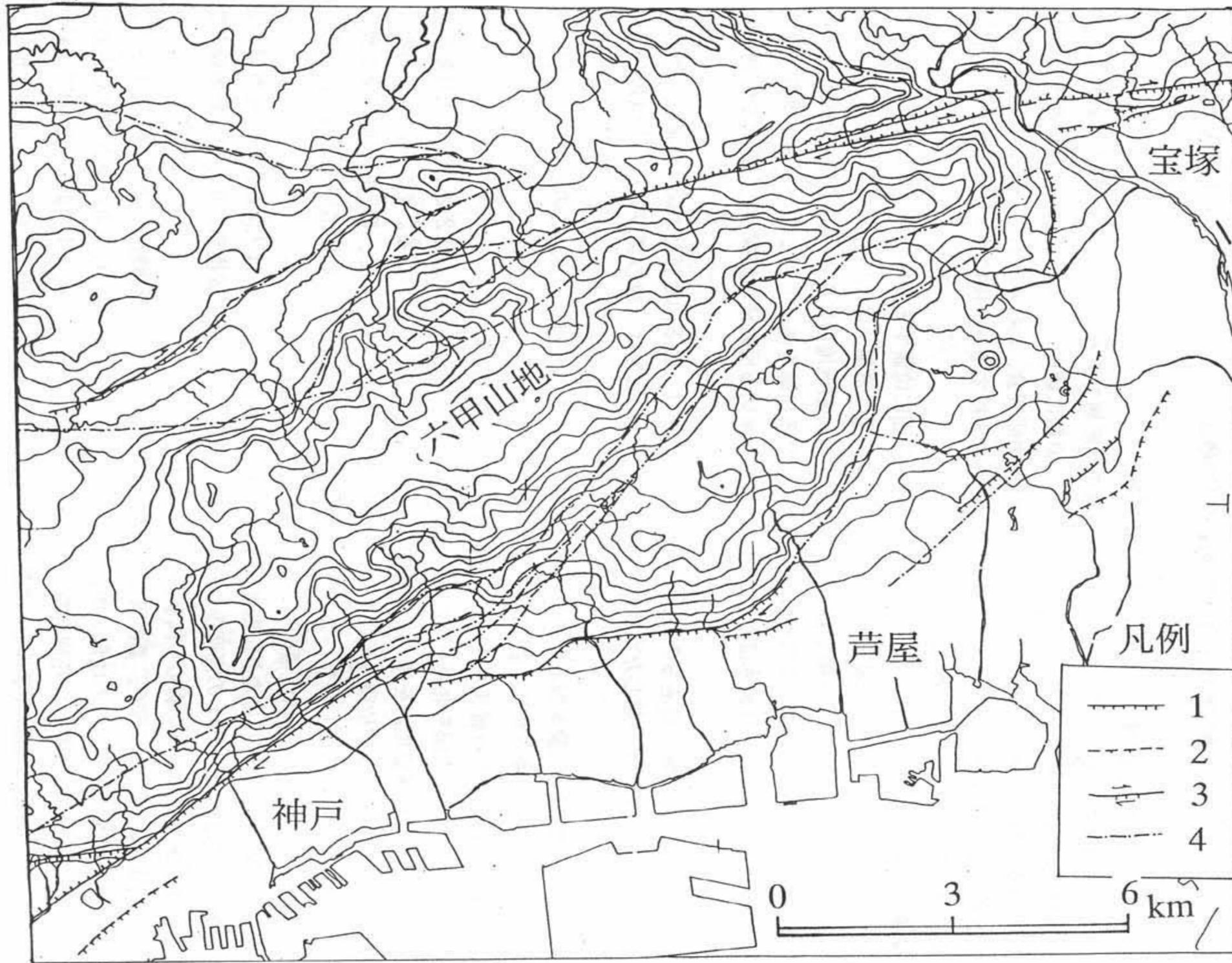


図2.2-15 六甲山地東半部の活断層

等高線(50m間隔)は幅500mの谷埋めによる。凡例、1：活断層(第四紀後期；ケバ側は低下)、  
2：推定及び埋没活断層、3：横ずれの方向、4：第四紀断層。

い違っており、第四紀末期における断層活動は顕著である(図2.2-16)。

上ヶ原段丘は扇状地性の段丘面であり、六甲山地から南東方向に傾斜していたはずであるが、その末端部が膨らみ、山地側に傾斜した場所もある。その傾斜部には副次的な逆向き低断層崖も認められる。西宮市満池谷付近の段丘面は南東側に凸状にたわむ。このような変形に対して鈴木ほか(1996)は西宮撓曲と名付け、それをもたらした断層は段丘の南東付け根を北東-南西方向に走ると推定した。この推定線は多少弯曲するものの、低地面との間に明瞭な不連続部として連なる。

この中・南西部の位置はほぼ藤田・笠間(1982)の伊丹断層に一致するが、北東部は西宮市門戸厄神から甲東園に延び、その位置が異なる。新幹線橋脚の被害が著しかった六甲トンネル東出口付近はこの位置にあり、震度Ⅶの地帯の北西縁に相当する。

塩尾寺断層は宝塚市武庫山から宝梅・野上にかけて、南北方向へ約2km連なる(藤田・笠間、1982)。宝松苑・宝梅付近の中位段丘面は、東流する河川が形成した扇状地面であるが、その平坦面は西側へ傾斜している。この逆傾斜した段丘面は、その東麓を走る逆断層に起因した傾動によるものと考えられる。南方は逆瀬川河床付近から不明となる。

岡本断層は、神戸市灘区岡本から北本山へかけての山麓線を走る。ここでは山地が急傾斜を保って低地で終わるが、この山麓線はほぼ直線状に4kmにわたって東西に連なる。この東方延長に神戸女子薬科大学や甲南女子大学があり、鞍部列や右ずれ屈曲した河谷がみられる(松山・岡田、1991)。高座川付近までは右ずれ北上がりの活断層地形が伴われるが、これより北東の芦屋断層には、段丘面形成以降の動きは認められない。

この西方は西岡本の中位段丘面南縁を通り、阪急「みかげ駅」北側へ延びる。岡本断層は反射法地震探査によっても、明瞭な地下地質の不連続として現れており、この南北を境に堆積層の基底が700m以上も食い違っている。

#### e) 六甲山地南側低地の活断層

神戸港付近の沖積低地の下には、ボーリング調査や音波探査で明らかにされた活断層が指摘されている(藤田・笠間、1983)。それらは和田岬断層や摩耶断層であり、これら断層を挟んで、約10万年前に堆積した海成粘土層(Ma12)が上下方向に約30m食い違っている。こうした変位は表層地質の中では穏やかな撓曲構造として表現されており、断層地形は地表面にはほとんどみあたらない。これら両断層の上下変位だけみても、千年につき0.3m程度の平均変位速度をもつので、横ずれを考慮すると、その変位速度はかなり大きい。

低地や海域の活断層は、それらを横切る反射法地震探査・音波探査・ボーリング調査などが実施されており、現在解析中である。これらの調査から判明した断層の連続性や延長方向、累積性や深部構造なども、堆積年代や変位量の算出と共に解明されてくるであろう。

### 5) 地震断層と活断層との関係

地震発生域全体の活断層配置やその特徴を概観し、地形や地質との関係を検討する。まず、野島断層について吟味し、次に、六甲山地南縁や東縁の地震断層と活断層の関係を考察する。

#### a) 地震発生域の一般的特徴と隆起域

横ずれ断層では、一般に断層線は両端に近づくと徐々に弯曲し、左ずれではS字状に、右ずれでは逆S字状になり、進行方向の先端部が隆起する(図2.2-17上左;松田、1967)。これは長さ数m以下の雁行亀裂をなす短い断層でも、数km以上の長い断層でも基本的には同じである。兵庫県南部地震によって生じた地震断層は、現地観察・測定や測地学的資料でも横ずれが卓越し、その進行部が隆起するような動きであった。淡路島北部では、野島断層の東側は南へ最大2.5m移動し、1.5m程度隆起した(星野ほか、1995)。六甲山地では、全ての三角点は北東方向へ移動し、数10cm程度の相対的な隆起が生じた(岡田、1996)。

淡路島断層帯では、北東-南西方向の活断層がとくに発達し、右横ずれの動きが卓越している。六甲山地東半部は東北東-西南西方向の有馬-高槻構造線(六甲断層)と北東-南西方向の六甲断層帯に挟まれた地壘性山地であるが、その東部が一番高く、西側に徐々に低くなる。こうした動きに伴われて形成された

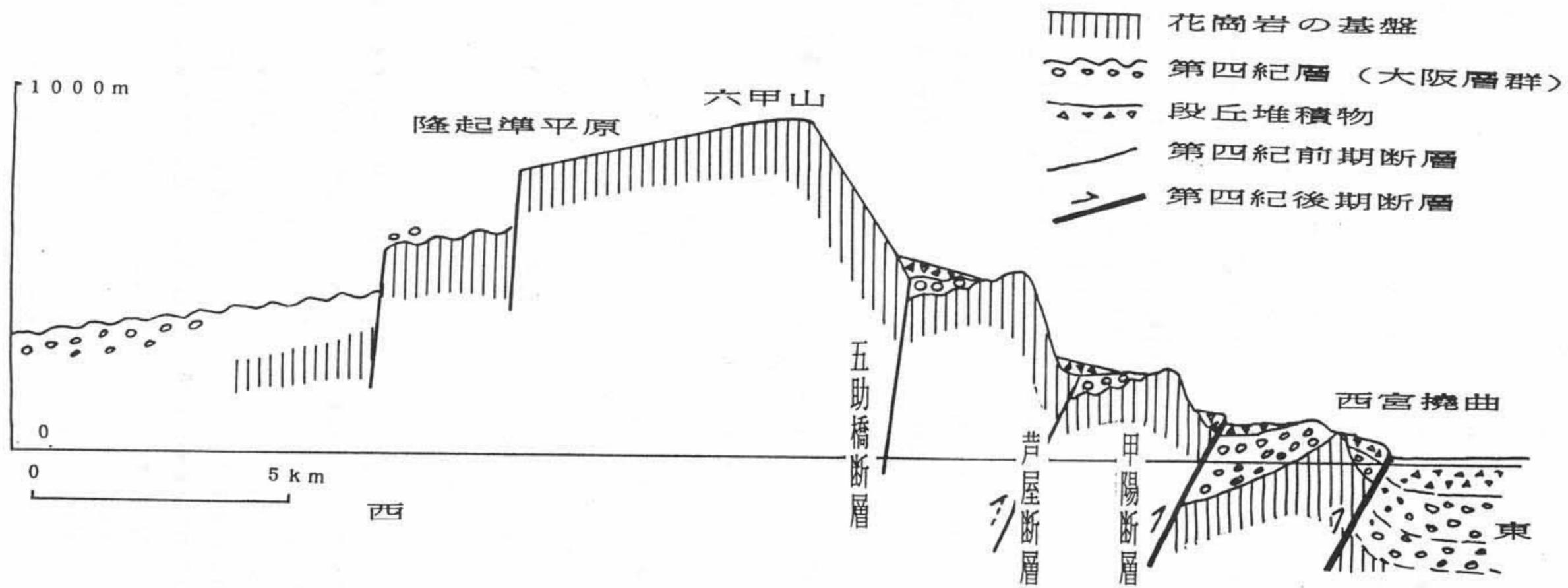


図2.2-16 六甲山地の東西断面と断層の移動模式図  
中村ほか(1995)を改変.

圧縮隆起部は、一種のプレッシャーリッジであり、活断層に挟まれた上昇部とする見解も出されている（中村・松田・守屋、1995）。

#### b) 野島断層の性質

野島地震断層は、概して直線状に1本の断層線として延びるが、明石海峡部から富島まで大局的にみると、S字状に大きく弯曲する。

既述のように、北淡町平林で求められた野島断層の平均変位速度は、右ずれで千年に約1m、南東側隆起で約0.5mである（水野ほか、1990）。その付近での今回の地震による変位量は右ずれ約2m、上下ずれ約1.3mである。したがって、野島断層の活動間隔を約2千年とすれば、これらの値は合理的に説明できる。

北淡町梨本の沖積河谷底で行われたトレンチ発掘調査によれば、約400年前頃に亀裂を伴う微弱な動きがみられたものの、今回の地震に先行する確実な変位は約2,000年前に生じており、ほぼ同様の活動間隔が得られた（鈴木ほか、1996）。

野島断層の横ずれ累積変位量を検討する。北淡町梨本一小倉においては、大阪層群相当層よりなる丘陵がかつてあったが、現在では造成されて自然の地形は判らない。土地造成前の空中写真や地形図を使用して変位地形を検討してみると、野島断層や分岐断層などの地震断層に沿って、断層鞍部や河谷・尾根の300mに及ぶ屈曲が認められ、右ずれ累積変位量を示唆する。

これに対して、分岐断層に沿う右ずれは数10m程度であり、数本の尾根や河谷に沿って系統的な屈曲がみられるが、それらの地形表現は微弱である。第四紀後期の動きは継続しているが、野島断層に比べて相対的に弱い。

野島断層崖の地形から、250mに及ぶ上下変位量が考えられる。これは山頂部に広がる侵食平坦面形成以後のことである。反射法地震探査によれば、断層崖西側には大阪層群が数百m程度堆積しているのので、その堆積前や堆積中以降では断層崖比高を大きく上回る上下変位量に達した。以上述べたような動きが2千年間隔で発生すれば、野島断層に沿う数百m程度の右ずれや上下変位も第四紀後半の数10万年で十分に形成され得ることになる。

#### c) 六甲山地南部の地震断層と活断層

神戸市街地から芦屋・西宮・宝塚へ延びる活断層（第四紀後期断層）に沿って、地表面で直接に観察・測定できるような地震断層は検出されていない。六甲山地南側では第四紀層は1~2kmに達するほど厚く堆積し、人工構造物の被覆も多い。地すべりや液状化現象による亀裂や地表変形は低地の至るところで発生し、深部に起因した変位変形との区別を難しくしている。こうした低地では、地下10数km付近を中心として震源地震断層が生じたとしても、地表地震断層として連続的に明瞭な食違いが現れるとは限らない。

六甲山地南側で数多くの反射法地震探査が兵庫県や地質調査所などの機関で実施されてきた。それらの成果は現在も解析途中のものが多いが、その成果の一部がすでに公表されている（遠藤、1995）。山麓線や一部の震災の帯に沿って、活断層の存在が明らかにされた。激震地帯の全線に沿って伏在活断層がある訳ではないが、これに沿った地帯や北側に並走して、段丘面を変位させるような活断層が存在する。激震そのものは、こうした活断層に起因して発生したが、近接して帯状に延びる厚い新期堆積層によって地震波動の増幅や複合が起こり、震度VIIの激震地帯が現れたのであろう。

こうした地震断層の位置を菊地(1995)はコンビニ店のビデオ記録から指摘しているが、幅数km程度の誤差を伴うので、実際の活断層に該当させるのは難しい。諏訪山一會下山断層は被害も相対的に少なく、微小な亀裂も確認されていない。被害分布や測地的な変動・第四紀後期の活動性などからみて、動いた可能性が残されている断層としては、須磨断層・元町撓曲・和田岬断層・岡本断層・甲陽断層などである（図2.2-17）。

今回の地震動を発生させた地震断層を六甲山地南麓域で最終的に究明・特定するためには、より多くの測地的な成果や地下地質資料の収集をまって、結論すべき重要課題と考える。

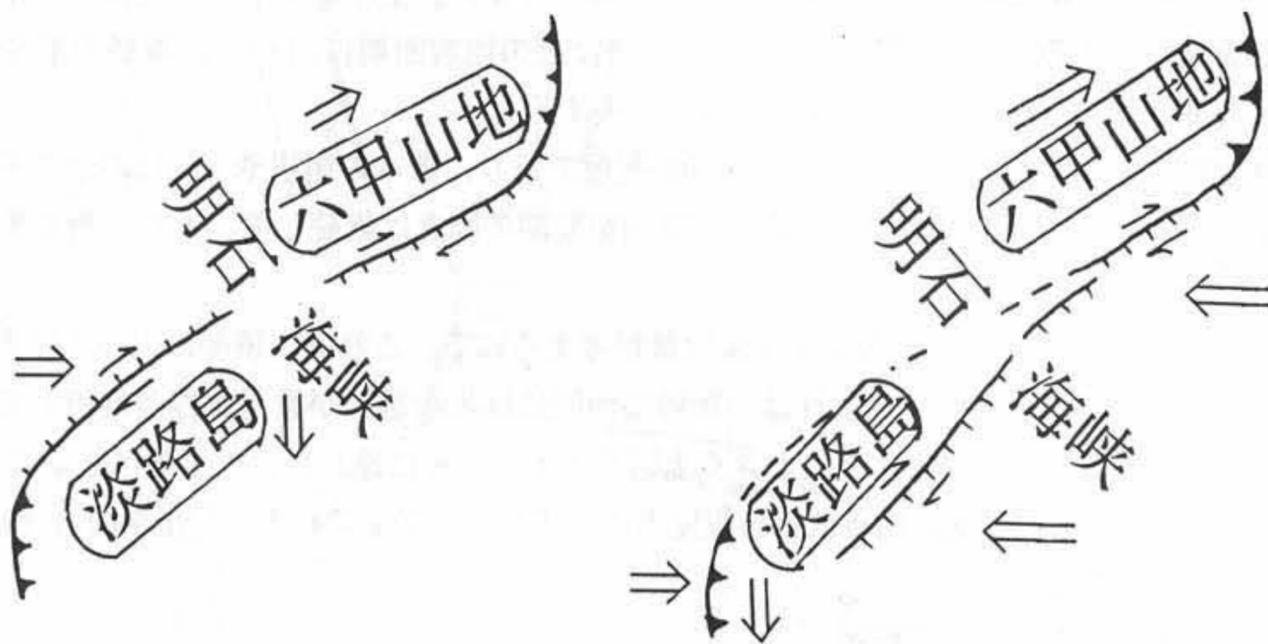
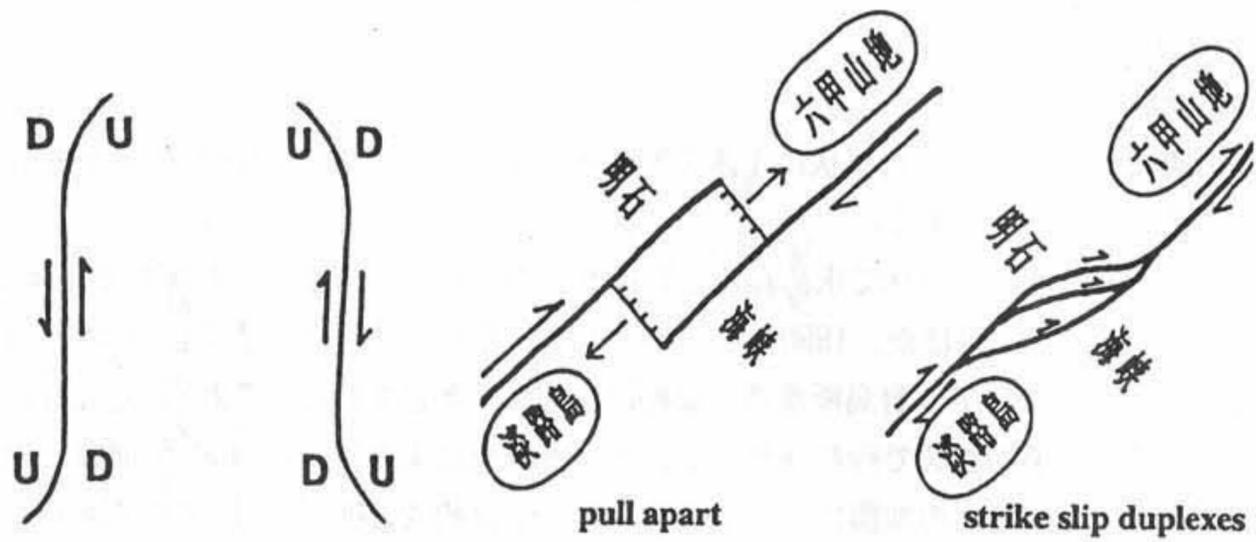


図2.2-17 横ずれに伴う隆起・沈降（平面図）

上左：横ずれ断層の末端部の弯曲の仕方によって、左ずれ（左）ではS字状、右ずれ（右）では逆S字状となる。U、Dはそれぞれ隆起域、沈降域を表す（松田、1967）。上右：明石海峡のテクトニクスを説明する解釈図（宮内ほか、1995）。

下：明石海峡を含む両側山地と断層の動き方（模式平面図）。

#### 6) 地震断層・活断層の要約

a) 六甲山－淡路島は活断層に挟まれて隆起・傾動してきた地壘性山地である。六甲山地は六甲南縁の断層帯に沿う右横ずれ運動によって形成された圧縮部であり、淡路島北部もほぼ同様な成因をもつ隆起域である。

b) 六甲－淡路島断層帯には、多くの活断層がみられるが、それらの中でも第四紀中頃以前に活動を停止したものと、段丘面を切断し後期にも活動を繰り返している活断層がある（図 2.2-17）。地震断層となった野島断層や六甲南麓の活断層などは後者に属する。

c) 野島断層の詳細位置・変位地形・活動間隔・累積変位量・地下構造などが明らかになってきた。比高250mを越す断層崖を伴う野島断層は、大阪層群の堆積－平坦化作用以後に急激に活動し、第四紀末期では約2千年間隔で運動を繰り返してきた。野島断層の右ずれや上下変位総量は少なくとも300m程度に達する。

d) 淡路島北東端にみられる緩斜面は山頂の侵食平坦面の連続であり、それが傾動している。明石海峡は侵食作用によって削剥された凹地ではなく、基本的には六甲山地と淡路島山地との間の構造的な変換点である（図2.2-17下）。

e) 淡路島と六甲山地は今回現れた地震断層を挟んで対極的な位置関係にある。両山地は右横ずれの進行

部が隆起するように配置しており、その中間に非隆起部の明石海峡が存在する。こうした横ずれ断層運動に伴って、淡路島や六甲山地は隆起や傾動を受けながら第四紀後半に成長してきた(図2.2-17下左)。

f) 今回の地震では、淡路島西側の野島断層が動き、六甲山地南麓の伏在活断層へと延びた。淡路島東側の東浦断層は歴史時代の大地震に関連した動きをもつ。六甲山地では淡路島東側の活断層帯も低地に連続しており、これらを合わせ考えると従来考えられていた以上に激しい地震活動を想定する必要がある。なお、淡路島では、東西を両側を縁どる活断層が交互に活動しながら、中央部を隆起させてきた(図2.2-17下)。

g) 六甲山地の南-東麓では、新しい動きをもつ活断層が低地側に位置する。山地の成長とともに活断層が周辺へと移動し、より新期の活断層が低地側に発生してきた。六甲-淡路島断層系の運動の進行とともに、山地は隆起・傾動しながら、その位置や形を変えてきたようである(図2.2-16)。

h) 六甲山地南部の地震断層としては、横尾山断層と須磨断層が活動した。地形・地質的に明瞭な長田断層や諏訪山-会下山断層は活動していない。震災の激しかった地域の直下や北側に沿って活動した可能性がある断層として、元町撓曲や西宮撓曲下の断層・岡本断層・甲陽断層などがあり、これらは第四紀後期の活動も活発である。今後、さらに多くの資料を解析して今回の地震断層の特定を行うとともに、将来予測に向けての努力が必要である。

#### 引用文献(ABC順)

- 荒井良祐・伊藤谷生・宮内崇裕・狩野謙一・村田明広・山北 聡・長谷川修一・澤田臣啓(1995):野島断層に沿う地表断層変位と地質構造. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、21-24.
- 粟田泰夫・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(1995a):1995年兵庫県南部地震で淡路島に出現した地震断層. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、11-14.
- 粟田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・木村克己(1995b):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、486、16-20.
- 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. 「阪神大震災」中間報告会-人工改変と地震災害-予稿集, 日本応用地質学会,55-71.
- 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, 36,51-61.
- 平野昌繁・波田重熙(1995):六甲山地東南部の断層の活動と変位地形. 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会ほか「阪神大震災」学術調査団,24-27.
- 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、77-84.
- 星野 実・村上広史・鈴木勝義・水越博子・山後公二・田中耕平(1995):1995年兵庫県南部地震による淡路島野島断層周辺の地表面3次元変位(中間報告). 「阪神大震災」中間報告会-人工改変と地震災害-予稿集, 日本応用地質学会,122-125.
- Huzita, K. (1962): Tectonic development of the Median zone (Setouchi) of Southwest Japan, since the characteristic structure of central Kinki area. J. Geosci. Osaka City Univ., Vol. 6, 103-114.
- 藤田和夫・笠間太郎(1982):大阪西北地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 112頁.
- 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図幅), 地質調査所, 115頁.
- 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図幅), 地質調査所, 101頁.
- 藤田和夫(1990):大阪湾岸の地質. 日本建築構造技術者協会, Structure, 36,25-29.
- 兵庫県企業庁(1995):淡路島国際公園都市灘山地区耐震調査報告書. 65頁.

- 池辺展生編(1961):17万分の1兵庫県地質鉱産図及び同説明書. 兵庫県, 171頁.
- 岩渕 洋・春日 茂・殻田昇一・沖野郷子・志村栄一・長田 智(1995a):大阪湾西部の活断層. 海洋調査技術, 7, 11-19.
- 岩渕 洋・春日 茂・殻田昇一(1995b):兵庫県南部地震による海底変動の調査. 地質ニュース, 490, 44-49.
- 岩崎好規・香川敬生・澤田純男・松山紀香・大志万和也・井川猛・大西正純(1994):エアガン反射法地震探査による大阪湾の基盤構造. 地震, 46, 395-403.
- 海上保安庁水路部(1995):明石海峡及び大阪湾西部(海底地質構造図:1/100,000).
- 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, 437頁.
- 菊地正幸(1995):兵庫県南部地震の震源断層. 科学, 65, 569-572.
- 神戸大学工学部(1995):兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第1報). 81頁.
- 林 愛明・井宮 裕・宇田進一・飯沼 清・三沢隆治・吉田智治・靖松保貴・和田卓也・川合功一(1995):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, 104, 113-126.
- 松田時彦(1967):地震の地質学. 地震II, 20, 230-235.
- 松山紀香・岡田篤正(1991):空中写真判読による六甲山地南麓部の活断層詳細図—試作例—. 活断層研究, 9, 69-92.
- 皆川 潤・大槻憲四郎・日吉 直・松井和夫・青野正夫(1995):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—人工改変と地震災害—予稿集, 日本応用地質学会, 22-37.
- 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 13, 38-46.
- 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, 90頁.
- 宮内崇裕・伊藤谷生・荒井良裕・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—地形・地質・地震のテクトニックな関連性. 日本第四紀学会主催「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」, 35-36.
- 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, 日本地質学会ほか「阪神大震災」学術調査団, 28-29.
- 中村一明・松田時彦・守屋以智雄(1995):火山と地震の国. 新版日本の自然1, 岩波書店, 371頁.
- 中田 高・蓬田 清・尾高潤一郎・坂本晃章・朝日克彦・千田 昇(1995):1995年兵庫県南部地震の地震断層. 地学雑誌, 104, 127-142.
- 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, 104, 143-155.
- 岡 義記・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, 90, 93-409.
- 岡田篤正(1992):中央構造線活断層系の活動区と分割試案. 地質学論集, 40, 15-30.
- 岡田篤正(1995a):六甲—淡路島活断層系と兵庫県南部地震. 地理, 40(4), 86-97.
- 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 13, 99-107.
- 岡田篤正(1996):兵庫県南部地震の地震断層と六甲—淡路島活断層系. 兵庫県南部地震と地形災害, 古今書院(印刷中).
- 寒川 旭・岡 義記・八木浩司(1979):淡路島の活断層. 日本地理学会予稿集, 64-65.
- 櫻井 孝(1995a):神戸側での断層と被害について. 「阪神大震災」中間報告会—人工改変と地震災害—予稿集, 日本応用地質学会, 38-54.
- 櫻井 孝(1995b):兵庫県南部地震によって現れた横尾山断層近傍の地山変状状況. 応用地質, 36, 63-68.
- 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, 36, 40-49.
- 杉村 新(1981):六甲山周辺の活断層. 兵庫県震災対策調査報告書. 1-26, 兵庫県.
- 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):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, 34-51.

- 鈴木康弘・渡辺満久・吾妻 崇・岡田篤正(1996):六甲-淡路島活断層系と 1995 年兵庫県南部地震-変動地形学的・古地震学的研究と課題-。地理学評論、投稿中。
- 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.

## 2-3 災害地形・地質

主査 大阪工業大学 藤田 崇

### 2-3-1 まえがき

大阪湾を中心とする大阪盆地は、周囲を標高数100～1,000m級の山地（北に六甲山地・北摂山地、東に生駒山地・金剛山地、南に和泉山地）に囲まれた典型的な盆地地形を呈している。当盆地は沖積低地を中心として周囲に段丘が、さらに山地との間には標高100～200m程度の丘陵地が発達している。今回の地震の被害地である阪神間の諸都市や淡路島はこのような大阪盆地の北部あるいは西部に位置している。

各々の地形は、それを構成している地質と非常によく対応しており、盆地周辺の山地が大阪盆地の基盤をなす花崗岩類などから構成されているのに対して、丘陵地が大阪層群、段丘が上部洪積層の分布地域にあっている。一方、大阪湾の地下には基盤岩を覆って最大3,000mに達する新第三紀末以降の未固結堆積層（大阪層群、完新統）が分布していることが知られており（岩崎ほか、1994）、さらに未固結堆積層は、大小の断層によってさまざまに変位を受けている。そのうち、規模の大きな断層はおおむね地形境界に対応するといった特徴があげられる。

このような現在みられる地形や地質構造は、主に第四紀以降の広域応力場のもとに進行した地殻変動によって形成されたものであり、したがって活断層運動や地震活動とも密接にかかわるものである。兵庫県南部地震の際、明瞭な地震断層として現れた野島断層をはじめ六甲断層系はこのような活断層群であり、この現象が現在の変動の一側面をあらわしている。地震の最大の被災地である六甲山の山麓地域はこのような断層群が発達し、地下深部構造を規制するとともに、地表の地形ならびに表層地質環境に重大な影響を与えており、地震災害の様相を複雑にした。

現在、阪神地域および淡路島を主として大阪盆地周辺の地質構造は、山地から丘陵地周辺を中心におおむね明らかにされつつあり、さらに最近、反射法地震探査や深層ボーリング調査が広く行われるにおよんで、地表地質ならびに地下の地質構造についても次第に明らかにされつつある。今後地震予知あるいは防災対策をすすめるにあたって、第四紀に形成された地質構造の解明と地表地質の形成過程は、基本的かつ有効な情報である。

この報文は、阪神地域の地形の特徴とこれまで大阪盆地周辺で行われた地質調査、ボーリング調査、物理探査の結果を集約して震災地域の地震時の地盤災害に関係する地表地質環境を述べたものである。各項はそれぞれの専門家の執筆による原稿を藤田がとりまとめたものであり、文献は多少の重複はあるが各項ごとにまとめた。また、都市域の伏在断層と地盤災害の意義を考慮して神戸地域の断層問題を取り上げた。これら原稿の選択・構成・文責などすべての責任は藤田にある。

### 2-3-2 神戸および阪神間の地形分類

#### (A) 山麓の堆積地形の研究とその編年

まず阪神間の低地の地形分類を記述する前に、筆者らが行ってきた山麓の堆積地形の編年の成果について概観する。

兵庫県域南半から西方の中国地方一帯の山麓には緩傾斜の発達が顕著である。筆者は野村らとともに兵庫県下南半を中心に山麓に分布する緩傾斜、麓屑面・扇状地の形成環境とその機構を調査し、その編年を行ってきた。その結果、このような緩斜面地形が第四紀後半の気候環境の変化にともなう水文環境の変化につれて形成された崖錐・麓屑面・扇状地であることを明らかにした。また、これらの山麓に分布するこれらの緩斜面のさらに下流側に展開する緩扇状地についても、その形成が最終氷期以降の同様の環境変化を受けて数次にわたり形成されたものであることを明らかにしてきた<sup>※1)</sup>。

さらに、以上のような山麓の堆積地形の年代確定については、従来、関西・近畿地方には第四紀後半、地形編年に利用できる火山灰は無いものとされていた通説に挑戦し、積極的にそれらの検出につとめた。その結果、それらが当地域にも多種分布していることがわかり、地形の年代確定に大きく寄与することになった。なお、これらの緩斜面の編年に用いた火山灰の分布と年代は次の通りである<sup>#2)</sup>。

その結果は図2-3-1、図2-3-2、図2-3-3にまとめられる<sup>#3)</sup>。すなわち図2-3-1、図2-3-2は山麓部の地形配置の模式的な平・縦断面図であり、図2-3-3は同じく麓屑面・扇状地の発達模式図である。図2-3-1についてみれば、山地に近接して崖錐部があり、ついで、I面（最終間氷期以前）、II-1面（氷期前半）、II-2面d部（氷期後半土石流扇状地部）、II-2面f部（氷期後半扇状地部）、III面（晩氷期扇状地）、IV面（後氷期扇状地）が高所から低所へ、山体から順次離れて、より古いものを開析してより低所に新しい地形が形成されることを示している。図2-3-2ではそれらの山麓における縦断方向の堆積地形の配列、重なり方を見たものである。図2-3-2ではまた、この緩斜面地形の縦断面をまとめて見る形になるが、しばしば山麓の緩斜面地形が凹型を示しているように見えるのは、これらのこの地形を接線状に眺望して判断していることによる。

図2-3-3は、各堆積地形の発達模式図である。最終間氷期以前の氷期に、山地部に働いた凍結融解作用・岩石落下・斜面ほ行などの周氷河作用によって生産され、移動し、堆積した岩屑が構成する、I面に相当する緩斜面がまず山麓部最高所に形成された。最終間氷期にはそれらの堆積物は風化され、また浸食される。最終氷期前半にはI面と同様の周氷河作用によってII-1面が形成された。最終氷期中の亜間氷期の温暖期には浸食作用が進行し、ついで最終氷期後半期には前半と同様、周氷河作用によってII-2面が形成された。ただ、この時期、山体との位置関係やその場所の水文環境の違いによって、崖錐・土石流扇状地・扇状地と異なったタイプの地形が異なった部分に形成された。晩氷期の気候の温暖化とともに降水量の増加があり、より上流側の麓屑面や扇状地の堆積物は浸食され、より下流側により広い、より緩やかな扇状地が形成された。これがIII面であり、後氷期になって温暖多雨な環境下において線的浸食が卓越する時期となり、上流では開析が、下流では堆積が進行し、より緩勾配の扇状地、IV面が形成された。

また、各地形の形成年代を特徴づけるテフラは同図に記載の通りで、それらは各堆積地形の構成層中に層として挟在されているものを取りあげている。

#### (B) 神戸における山麓緩斜面の分類

前項で検討したことを念頭に引き神戸・阪神間の山麓の堆積地形、扇状地についてみることにする。前述で考察した場所は、中国山地近傍という、どちらかといえば地殻変動的には静穏な場所で、かつ流紋岩地域を中心にした検討結果であった。神戸・阪神間はそれとは異なり、その脊山としての六甲山地域は、地殻変動はより激しく、また風化した花崗岩地域を舞台にするものであるため、現象はより顕著に、扇状地はより分化した形で現れてくるものと考えられる。

神戸・阪神間の地形分類としては1977年2～3月の作成した田中（1977）のものがある。それは六甲山地及びその周辺地を対象に、1/25,000のスケールで、昭和40年当時のシロクロ空中写真、土地条件図等を参考にして地形区分を行った。その結果を簡略化したものは、六甲山の地理等に載せたが、より詳細なものは沖村（1995）の報告に使われたものである。今回それらに基づき、さらに1948年の米軍撮影の空中写真（1/10,000）を使って再区分したものが別図である<sup>#4)</sup>。

六甲山地南麓の低地について地形区分をおこなうと、それらの結果は表2-3-1のようである。低地の地形は丘陵・台地・扇状地・沖積低地・砂州・自然堤防等からなる。扇状地は前述のような研究を通じ、扇状地の形状・配置・形成期には規則性があることが判っており、その調査経験からの類推及び市域における調査事例、たとえば田中（1992）等から、形成時期別に5～6に区分できる。

地形区分は付図上では便宜的に数字で示しているが、それらは下記のような部分である。また、それらの地形の一般的な構成層も併せて記述した。

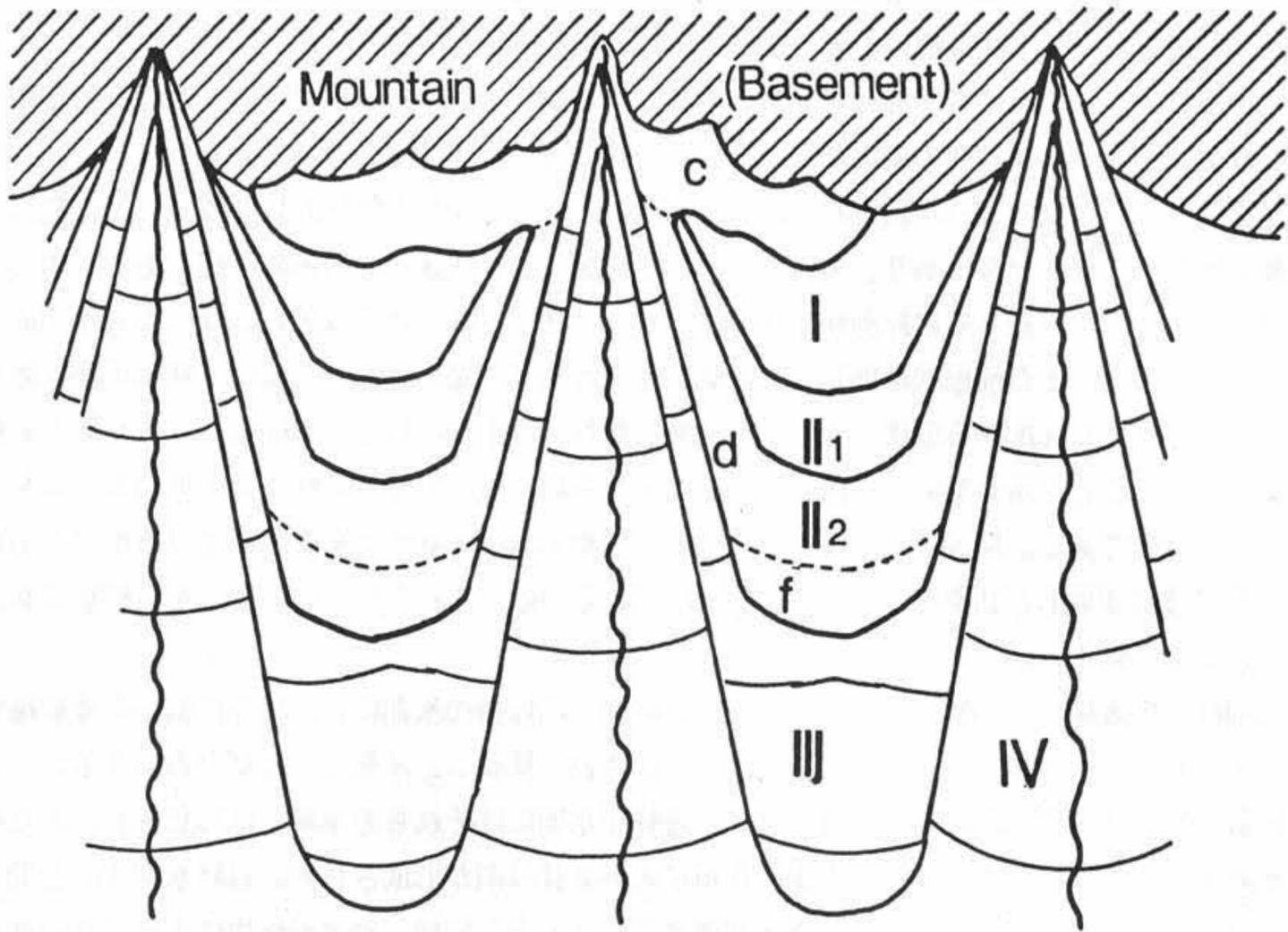


図 2-3-1 山麓部の地形配置模式平面図  
破線は同一地形区分での地形界を示す。

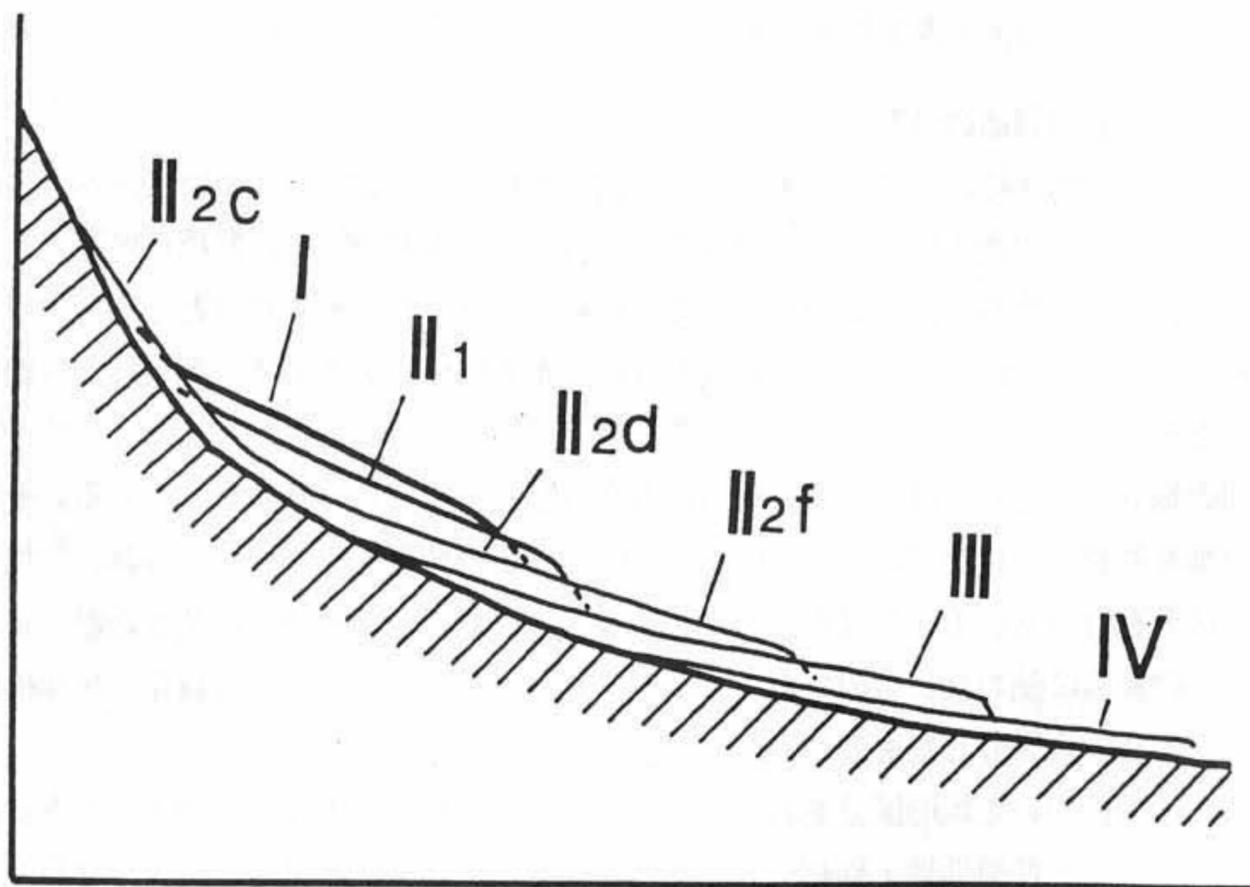


図 2-3-2 山麓部の地形配置模式断面図  
破線は被覆関係のあることを示す。

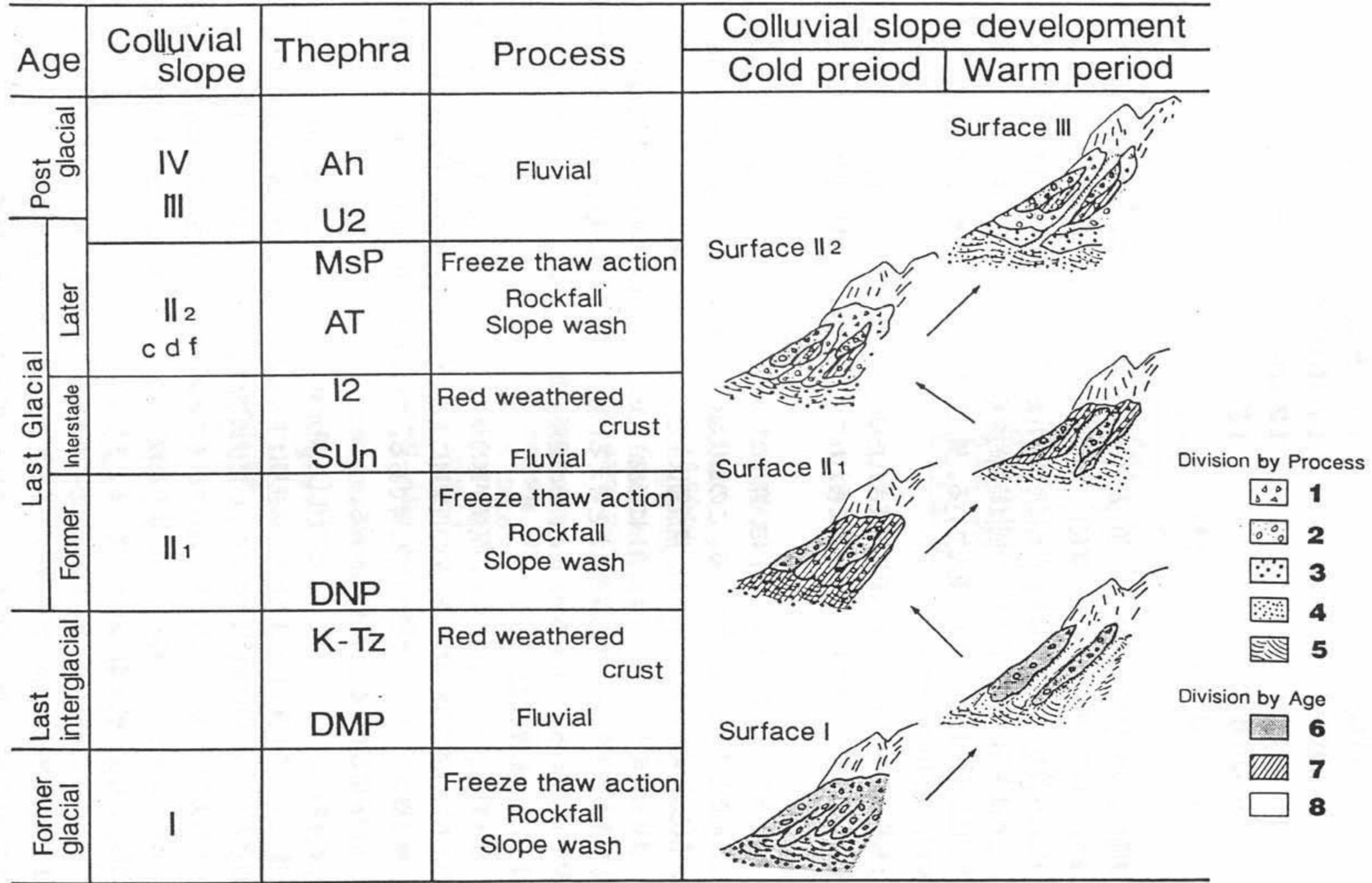


図 2-3-3 麓屑面の発達模式図

1. 崖錘部    2. 土石流部    3. 扇状地部    4. 扇状地  
5. 形成中の扇状地    6. I面    7. II<sub>1</sub>面    8. II<sub>2</sub>面

表 2-3-1 六甲山南麓低地の地形区分

1 丘陵および開析扇状地	8 自然堤防・天井川
2 扇状地-1	9 三角州
3 扇状地-2	10 沿海低地・河川沿い低地
4 扇状地-3	11 後背低地
5 扇状地-4	12 砂州
6 扇状地-5	13 人工改変地
7 旧河道・開析谷・谷底平野	

(1) 丘陵および開析扇状地（段丘化扇状地）：第三紀（180 万年以前）の堆積になる砂岩・粘板岩（未固結）地域で構成されている。現在はそれらが隆起し、開析を受けて、丘陵化している部分である。

開析扇状地部分は20～30万年頃あるいはそれ以前に形成されたと考えられる扇状地群であるが、現在は段丘化している。これはさらに細分できるが、今回は時間的余裕がなかったため、省略している。神戸西部のものほど、高度は低く、また人工改変が進んでいる。構成層は主として砂礫層と、その基盤としての第三系の砂岩・粘板岩（未固結）である。

(2) 扇状地-1：最終氷期（7～8万年頃）以前に形成された扇状地群である。この扇状地も上流部は段丘化しているが、その場所の条件により新しい扇状地に被われているときもある。構成層は主として砂礫層である。

(3) 扇状地-2：最終氷期前半（6～4万年前頃）に、寒冷な気候環境下において、山地内の土砂生産の多さを反映して形成されたと考える、扇状地である。この扇状地も上流側で段丘化しているが、その場所の条件により新しい扇状地に被われるときもある。構成層は主として砂礫層である。

(4) 扇状地-3：最終氷期後半（3～1.5万年前頃）に形成された。この扇状地も寒冷な気候環境下において、山地内の土砂生産の多さを反映して形成されたと考える比較的に急傾斜の扇状地である。一部その場所の条件により段丘化している場合もあるが、また、その場所の条件により新しい扇状地に被われるときもある。構成層は主として砂礫層である。

(5) 扇状地-4：晩氷期（1.5～0.6万年前頃）の気候が寒冷から温暖に向かう時期、降水量が次第に増加する頃、上流側のより古い扇状地を浸蝕した土砂の再堆積による地形として、その下流側により緩傾斜で広く形成された。構成層は主として砂礫層および砂層である。この扇状地より古いものは海岸近くでは開析を受け、多少とも段丘化しているという特徴がある。

(6) 扇状地-5：後氷期（0.6万年以降）気候が温暖化し、降水量の増える時期に、5と同様、上流側のより古い扇状地を侵蝕してその下流側に形成された。構成層は主として砂礫層および砂層、場所によりシルトなどの細粒物質が入る。六甲山南麓にはさらに新しい扇状地が部分的には形成されているようである。この場合も、上流側のより古い多くの扇状地を侵蝕して、その下流側に形成された。構成層は場所により、砂礫・シルト・砂あるいはそれらの互層となるが、より細粒質のものが優先する。また、上流域の地質によって、扇状地の形状、勾配、構成層に違いがでてくると予想される。

(7) 旧河道・開析谷・谷底平野：上記各期の扇状地の形成の際の最終期の河道あるいは氾濫原部分を指し、この部分には河道放棄後の細粒質の物質、砂・シルトあるいは粘土などの堆積もあることが予想される。また、同時代の形成された低地もこの分類にいれている。構成層は砂礫層・砂層・シルト層などよりなる。

(8) 自然堤防・天井川：河川の洪水氾濫の際に流路外付近に堆積する物質によって形成された流路沿いの高まり、およびその反復によって河道と堤防が周辺の低地に比べ著しく高い状態で続いている河川を言う。構成物は主として均質な中粒砂よりなる場合が多い。

(9) 三角州：河川の最下流部に形成される低地である。構成層は砂・シルト・粘土等の細粒物よりなる。

(10) 沿海低地・河川沿い低地：上記のいずれにも属さない低地をこの範疇に入れた。構成層は砂・シルトなどよりなる。

(11) 後背低地：上記の天井川および後述の砂州の背後にある低地を指す。構成層は砂・シルト・粘土等の細粒物よりなる。

(12) 砂州：沿汀流により運搬されてきた砂層が堆積して形成した、海岸沿いの微高地をいう。

(13) 人工改変地：人工的に改変された場所を指す。構成層は改変された場所の特性により異なる。低地に関係しては、丘陵部・開析扇状地部に広い。

### (C) 山麓低地の地形区分とその地盤特性の明確化に向けて

以上における各地形分類ごとの構成層の記述は、あくまで、県下とはいえ、他地域における事例からの推測である。今後、この神戸地域にある既存の豊富なボーリング資料を通じて、そのそれぞれの地形分類ごとの構成層、その厚さ、粒度構成等、地盤としての特性を明らかにする必要がある。

一般に、地形区分を行うことは基本的には形状のほかに、形成の営力・構成物・形成年代を考慮してなされる故に、同質の構成層の広がり、その厚さ等、各種の地盤に関する情報を含んでおり、地盤の考察にとって非常に有効なものと考える。その情報を正確に読み取ることにより、応用的な側面は大きくなる。

(田中真吾)

### 注ならびに参考文献

注1) 県域及びその近辺の緩斜面の研究には以下がある。

田中真吾(1981)：赤穂の自然環境。赤穂市史第一巻、0~108

田中真吾(1982)：国土調査 土地分類基本調査 篠山(5万分の1)地形分類図ならびに同説明書、13-21、兵庫県をこう矢として。由良・鳴門海峡(1984)、三田(1985)、生野(1987)、山崎(1988)、佐用・坂根(1989)、上郡(1990)、播州赤穂・姫路・坊勢島・寒霞溪(1992)の各図 幅などに区分。

田中真吾ほか(1982)：杉原川流域の山麓緩斜面の形成機構ならびに形成年代について——兵庫県南半部の麓屑面の研究、第一報——。地理学評論、55巻、525~548。

田中真吾(1984)：淡路南部低地の地形発達——第四期末紀の気候変化との関連において——。神戸大学紀要、「論集」34号、109~134。

田中真吾(1986)：兵庫県・多紀連山地域の麓屑面。地理学評論、59巻、261~275。

田中真吾(1990)：播磨における麓屑面研究史。TAGS、筑波応用地学談話会、2、72~76。

注2) 年代決定に用いた火山灰類は、注1)の諸文献のほか、以下に詳述している。

田中真吾・野村亮太郎(1988)：赤穂上部火山灰の再検討。赤穂市史編纂専門委員会編：赤穂市史第七巻、283-287。

野村亮太郎・田中真吾(1988)：兵庫県東部の山間低地に発見された大山起源の火山灰層。第四紀研究、24巻、301-307。

野村亮太郎・田中真吾(1987)：兵庫県南部のU2火山灰層——その対比と地形編年上の意義——。神戸大学教養部紀要、論集、第39号、1~20。

野村亮太郎・田中真吾(1990)：兵庫県千種町の麓屑面堆積物の<sup>14</sup>C年代、日本の第四紀層の<sup>14</sup>C年代(172)。地球科学、44巻3号、159~161。

野村亮太郎・田中真吾(1992)：兵庫県東部に降下した後期更新世以降のテフラ。

注3) 緩斜面地形の形成機構と形成年代を総括的に述べたものとして下記がある。

田中真吾(1987)：近畿における地形学的編年に関する覚書(1)——特に山麓における堆積地形の編年と流域地形変化モデルの組み立てに向けて——。神戸大学文化学年報、第6号、1-25。

田中真吾・野村亮太郎(1992)：中国山地東部における後期更新世の山地堆積地形とその形成機構。地理学評論(Ser. A)、第65巻、180-194。

田中真吾(1994)：播磨の地形の成り立ちと特色。田中真吾編著 播磨の地理 自然編、61-130。

注4) 神戸近辺について

田中真吾編著(1984)：神戸の地理 風土と暮らしを読む。神戸新聞出版センター、222p。

田中真吾(1988)：断層崖下の扇状地。65~70。

田中真吾編 六甲山の地理——その自然と暮らし。神戸新聞総合出版センター、297p。

田中真吾(1992)：神戸市灘区赤松町遺跡の地形。「赤松町遺跡発掘調査報告書」、淡神文化財協会赤松町遺跡調査団

### 2-3-3 表層地質の特性

#### (A) 地質概要

震災地域を含む大阪盆地周辺は、これまで多くの研究者によりさまざまな見地から地質調査が行われており、現段階では必ずしも一致した見解が示されていない。そのことを念頭において当地域の地質の概要は以下のようにまとめられる。

現在の地殻変動の観点からみれば、当地域の地質は基盤岩類と被覆層に大別される。基盤岩類は過去の造構応力場で形成されて現在は固結した地層あるいは岩体である。一方被覆層は、基盤岩上を覆って堆積した未固結ないし軟岩状の地層であり、力学的にみて、基盤岩が現在の造構応力を直接反映した挙動をとるのに対して、被覆層は直接造構応力の影響を反映せず、基盤の挙動を反映した変形をうける。

このような観点からみると、大阪盆地の基盤を構成する地質体としては、花崗岩類のほか、盆地の北側にはジュラ紀付加体とされる丹波層群や白亜紀後期の火山砕屑岩類を主とする有馬層群が、盆地の南側には白亜紀末期の和泉層群が分布している。また、これら中生代白亜紀までに形成された基盤岩上には、古第三紀に神戸層群、新第三紀中新世には二上層群が形成されたが、現在これらの地層は断片的に分布するにすぎない。このような第三紀層は、基盤と被覆層の中間的な性質を持つものであるが、ここでは第四紀地殻変動を浮きぼりにさせるため、大阪層群堆積開始時期との時間間隔がおよそ 1,000 万年もあり、現在とは異なった造構応力場で形成されたと考えられる第三紀層も基盤岩類に含めた。

基盤岩を覆う被覆層は、鮮新世末以降第四紀の大阪層群ならびに完新統である。地盤工学の立場からは、慣用的に大阪層群と上部洪積層、沖積層と大別されている。ここでは一応この慣用的な区分に従うことにする。大阪層群は、およそ 300 万年前から堆積を始め、テクトニックな観点から下部・中部・上部の三つの亜層群に分けられている (Huzita and Kasama, 1982)。大阪層群および上部洪積層、沖積層の形成時期、特徴は表 2-3-2 に示す通りである。

大阪層群下部亜層群は、淡水成の堆積層のみから構成されているが、中部亜層群以上の地層は、淡水成の地層の中に周期的に海成の地層が挟まれている。海成粘土層は、下位から Ma-1、Ma0、Ma1、……Ma13 と命名されており、Ma-1 層の堆積時期がおよそ 120 万年前であり、以後 10 万年程度の時間間隔をもって Ma13 層まで順次形成されてきた。このうち、Ma-1~Ma5 までは中部亜層群、Ma6~Ma10 までは上部亜層群、Ma11~Ma12 までは上部洪積層、Ma13 が沖積層に相当する。従来の主な研究成果に基づいて阪神-淡路地域の断層系とその地質断面図を作成した (図 2-3-4、図 2-3-5)。大阪層群は、これらの断面図に示すように盆地周辺の丘陵部では地表に露出しているが、大阪盆地では地下に伏在し上部洪積層、沖積層に覆われている。また、上部洪積層が直接地表にあらわれているところは段丘地形を形成している。

大阪盆地の基盤岩は、従来は漠然と盆状の分布が推定されていたが、大阪湾を縦横断する音波探査 (岩崎ほか、1994) によってかなり具体的イメージがつかめるようになった。これによると基盤の深度は、大阪湾の東側 (大阪側) で 1,500m、西側 (淡路島側) で最深 3,000m と、全体として西に傾斜する。阪神地域沖の基盤深度は、2,000~2 千数百 m 程度と、大阪市域の低地部の 1,400m よりも深い。尼崎、西宮、芦屋、神戸の沿岸部は、西に傾動する基盤盆地の北縁に当たり、東から西へと基盤は次第に深くなっていると推定される。

一方、南北方向で考えてみると、阪神地域の北側には基盤隆起山地が連なっており、沿岸部の深い基盤との間には、ちょうど市街地となっている低地~丘陵の地下で基盤深度の大きなギャップを想定せざるをえず、そのギャップは西へゆくほど大きくなるはずである。阪神地域の地下地質の最も顕著な特徴は、この基盤岩の大きなギャップの存在であり、このギャップの位置・規模・センスが被覆層の分布・構造を規制しており、平面的な地震動の強弱分布を生じた地質的背景となっている。

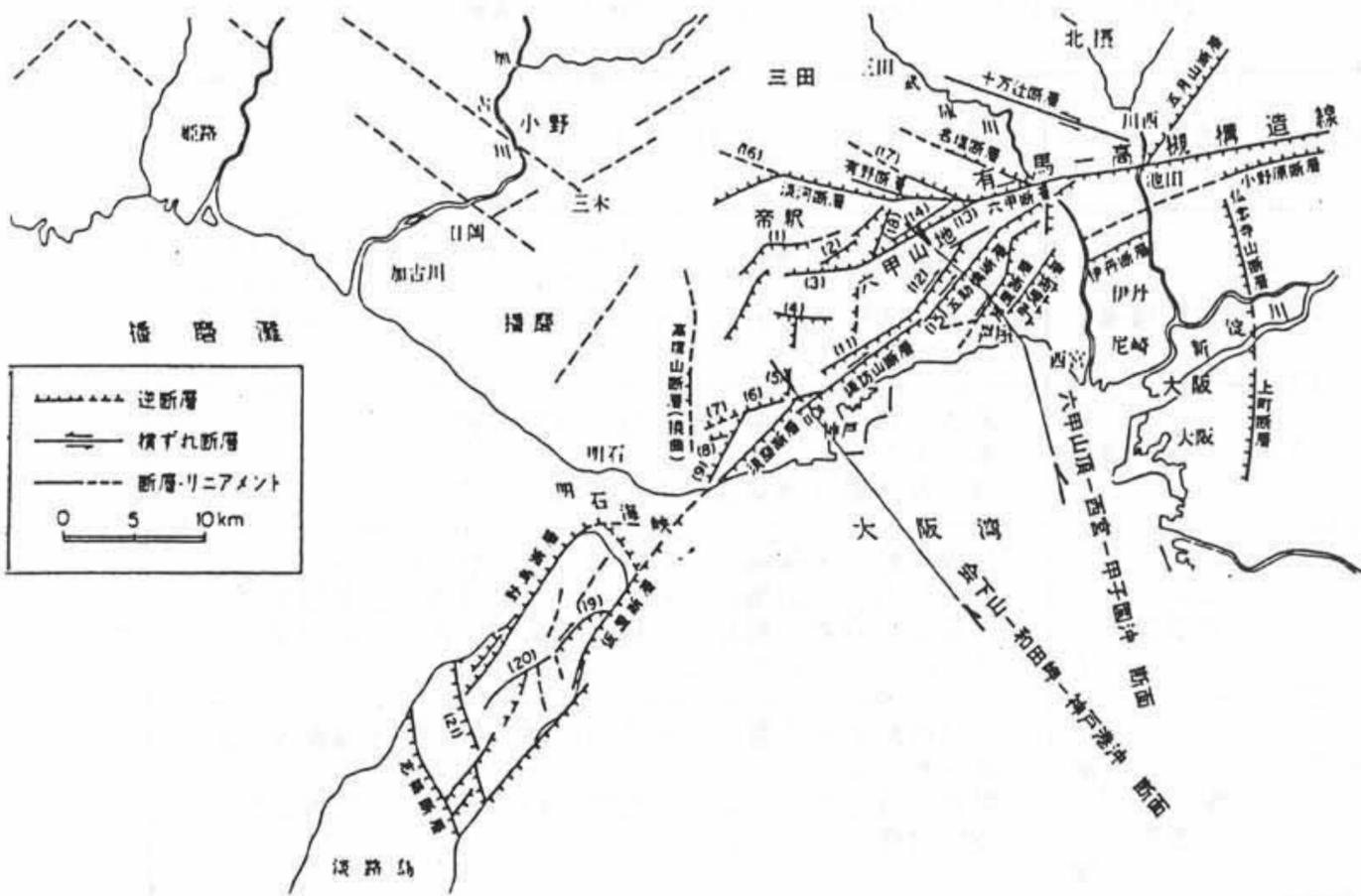


図 2-3-4 六甲山地・淡路島北部の断層系  
 図 2-3-5の断面線の位置を示す。

地質断面図凡例

地質時代		地質区分
第四紀	完新世	沖積層
	更新世	上部洪積層
		上部亞礫群
新第三紀	中新世	中部亞礫群
	鮮新世	下部亞礫群
古第三紀		神戸層群
白亜紀		花崗岩類

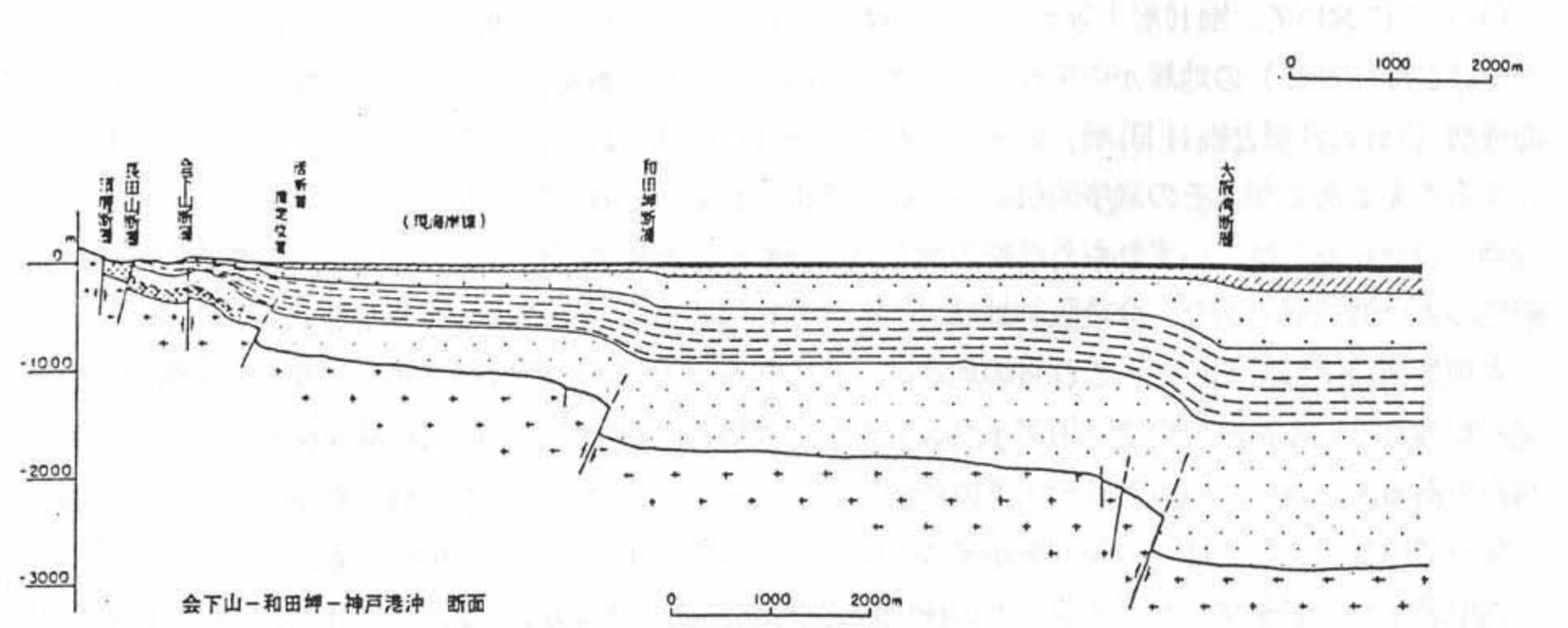
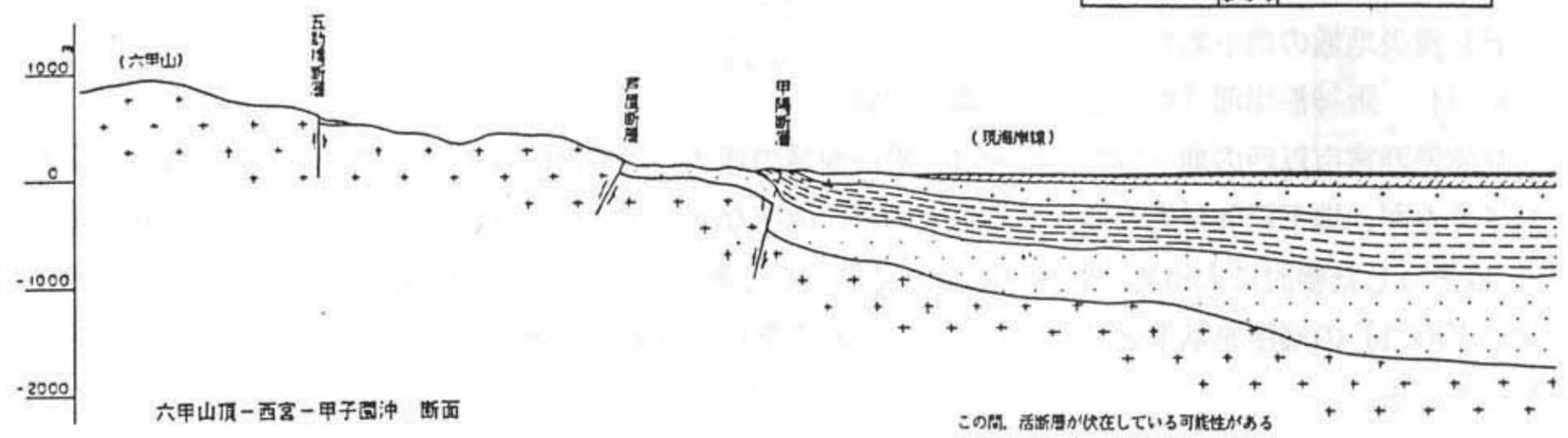


図 2-3-5 神戸・阪神地域の模式地質断面図

表 2-3-2 大阪盆地周辺の被覆層（第四系）の概要

地質時代		絶対年代 (万年)	地質区分	地質の特徴
第 四 紀	完新世	1	沖積層	軟弱な粘性土層，ゆるい砂・砂礫層からなり，沖積低地，微高地（砂堆，砂州，自然堤防等），扇状地などを形成する。その他，大阪湾岸を取り囲むように人工の埋立地が形成されている。
		(2)		
	更新世	13	上部洪積層	海成の粘土・砂層と淡水性の砂礫・砂・粘土層が交互にあらわれる。 砂・砂礫層は通常構造物支持層となる。
		(20)		
		(60)		
鮮新世	70	中部 亜層群	海成の粘土・砂層と淡水成の砂礫・砂・粘土層が交互にあらわれる。 現在山地となっている基盤の小起伏面上にまで海成粘土層が分布している。	
	(120)			
新第三紀	170	下部 亜層群	淡水成の砂礫・砂・粘土の互層からなり，海成層はみられない。粘性土は一般に固く締まり軟岩状を呈する。 現在山地となっている基盤の小起伏面上にも，わずかながら残存している。	
		(300)		

大阪層群堆積以前は，基盤岩類が長期にわたって浸食され，小起伏面を形成していた。

(B) 震災地域の地下地質

B-1) 阪神沿岸部（地下250m）の地下地質

兵庫県西宮市以西の地下地質の情報は、沿岸海域の埋め立てや湾岸高速道路建設の調査によって蓄積されてきたが、地下250m付近までの地層について、厳密な層序学的検討が行われた例はまだ少ない。図 2-3-6 はそうした検討によって明らかになった標準となる断面であり、大阪市港区のOD-1（大阪深層ボーリングNo.1）の層序を基準とし、さらに火山灰層や微化石（層序・堆積環境）によって層序区分と対比を行っている。

OD-1において、Ma10層上限までが大阪層群（Ikebe, N. et al., 1970）、Ma12層を含む1サイクル（厳密には2サイクル）の地層が中位段丘堆積層（古谷、1978）である。その間には、Ma11層とさらに2層の海成層（Ma11(2)層とMa11(3)層）が挟在される（Furutani, M., 1989）。これら3層を高位段丘堆積層に対比する考えもあるが、その層序的位置づけは未解決である。大阪層群のMa9層、Ma10層（27万年前）とMa12層（13万年前）は、いずれも外洋性の海生微化石や暖温帯植物花粉化石を産出し、温暖期に堆積した連続性のよい海成層であり、今後阪神地域の地下地質を解明する際に鍵層となる地層である。

阪神地域沿岸部において、これらの地層は、西に向かってしだいに層厚と伏在深度を増す傾向を示し、現在知られている情報の中で六甲アイランドが最も地層が厚い。これは前記の基盤深度の推定と一致した傾向である。しかし、六甲アイランドの西側にあるポートアイランドでは、Ma11層やMa12層は10～20m 浅くなっている、ここでは逆の傾向を示すようになり、基盤のギャップを予想させる。

六甲アイランドやポートアイランドの中位段丘堆積層と完新統の間には、25,730±630～14,050±280y. BPの年代を示す低位段丘堆積層が20～25mの厚さで分布し（Furutani, M., 1989）、これらが不淘汰堆積物から成ることからみても、この時期の堆積盆地の沈降と後背地である六甲山地の隆起が著しかったことがうかがえる。

### B-2) 西宮～伊丹地域の地下地質

図 2-3-6の甲子園沖から北へ各地層の分布を追跡してゆくと、地下の Ma9層～Ma12層はゆるい傾斜でしだいに深度を減じ、Ma12層は尼崎市北部・伊丹市・川西市南部で地表に姿を表し、伊丹台地を形成する中位段丘堆積層（過去に伊丹礫層と伊丹粘土層と呼ばれていた）に連続する。これらの地域の低地では、ゆるく傾斜するMa12層を覆って礫層（過去に伊丹礫層と呼ばれていた）と完新統がオーバーラップする。神戸地域と比較すると、当地域の陸上低地部ではMa12層に大きな構造的変位は認められず、完新統は縄文海進の堆積物である厚い海成層を挟在する1サイクル（厳密には下位の礫層も含めて2サイクル）からなり、比較のおだやかな分布と堆積様相を示す。

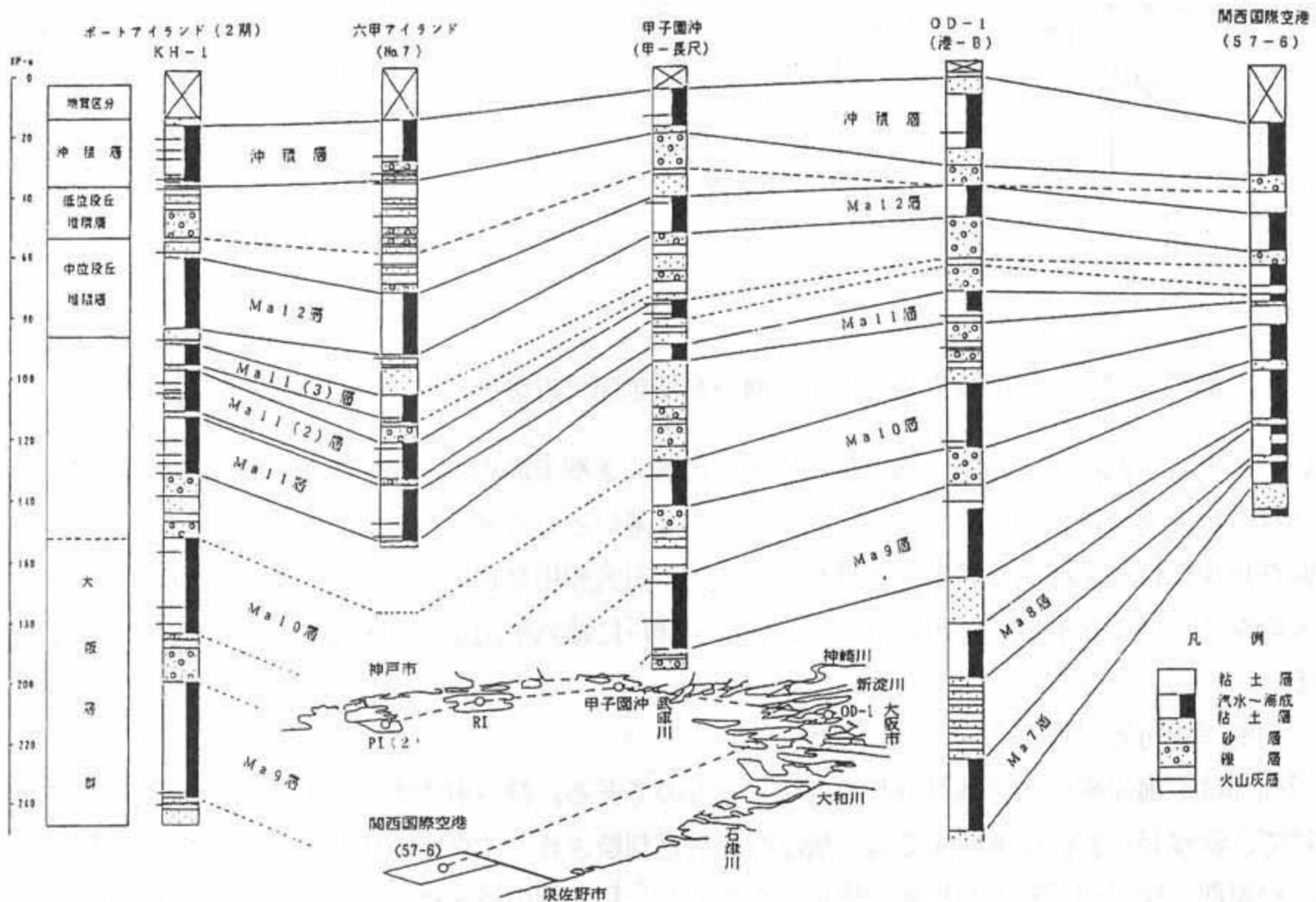


図 2-3-6 大阪湾沿岸部地下の地層対比図

### B-3) 芦屋～神戸の地下地質

#### ① 沿岸部埋立地（地下100m）の地下地質

図 2-3-6の層序区分に基づいて、西宮～神戸の沿岸部埋立地の地下約100mまでの地層の連続を推定（細部の層序区分は未確認）したものが図 2-3-7である。本図の断面線の方位は、大阪湾北部の輪郭に沿って東より、大阪は北西、尼崎～西宮西部は西北西、西宮東部～神戸は東西～西南西へと変化している。地下に分布する地層は、Ma12層（中位段丘堆積層中部層）、中位段丘堆積層上部層、低位段丘堆積層ならびに完新統である。

Ma12層は、大阪港から尼崎東部（北西方向の断面）ではほぼ水平に分布するが、尼崎西部以西の地域（東西～西南西方向の断面）では、甲子園沖、六甲アイランドとポートアイランドの間、和田岬の3地区で西へ緩く東へ急な撓曲構造を示しながら、大局的には西へ傾斜する。

Ma12層より上位の地層は、甲子園沖を境として、東側では完新統下部もしくは更新統最上部の礫層（難波累層下部層）がMa12層をほぼ水平に覆っているのに対して、西側では中位段丘堆積層上部層や低位段丘堆積層が厚く発達し、対照的な様相を示す。低位段丘堆積層は、中位段丘堆積層の背斜凹部を埋めるように分布するが、大阪南港にも分布する（古谷ほか、1992）ことから甲子園沖以東でも本来Ma12層を厚く覆

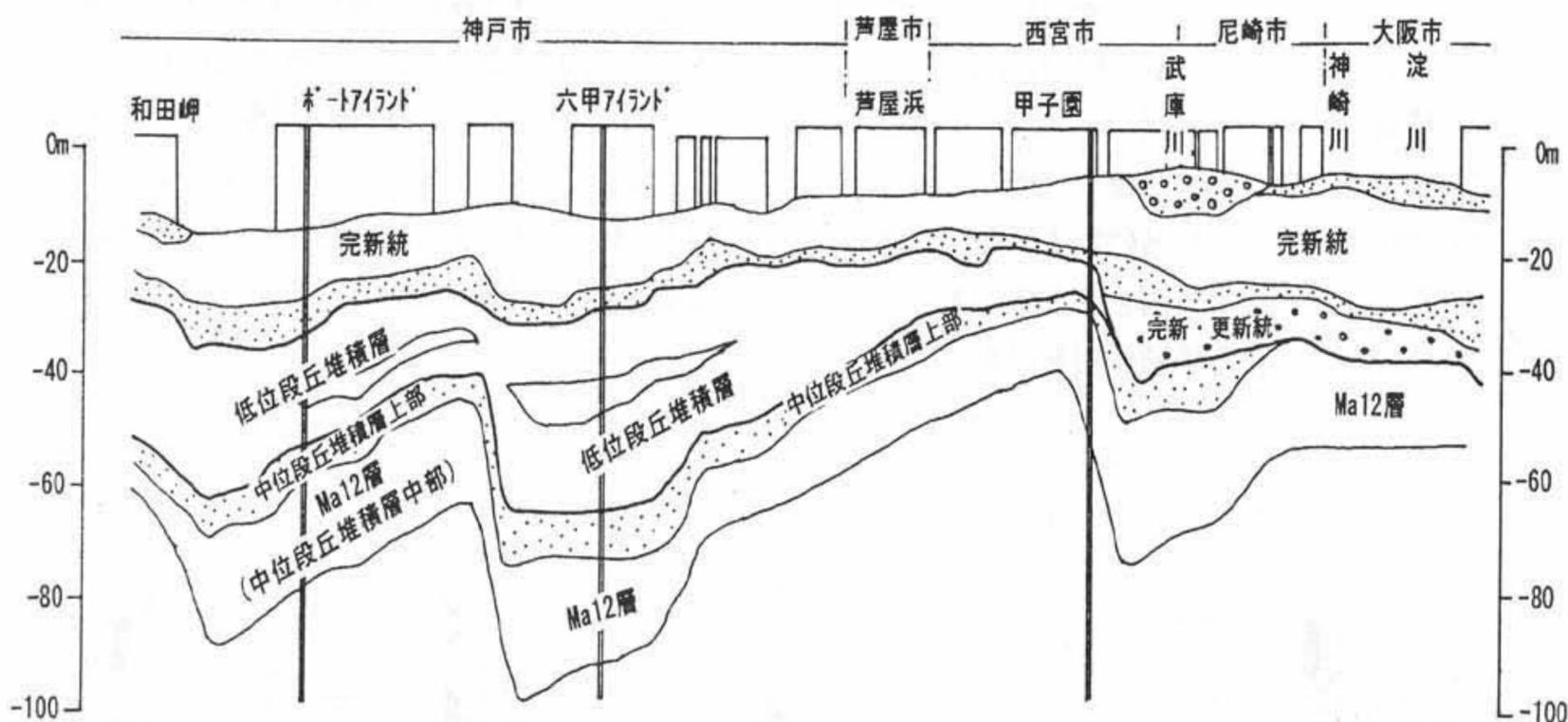


図 2-3-7 沿岸部埋立地地下の地層分布推定図 (近畿地方建設局、1980 を基に作成)

っていたと考えられる。この際、低位段丘堆積層と難波累層下部層の層序区分が特に重要である。

いっぽう、完新統は、甲子園沖以東で厚く、以西で薄いという全く逆の分布傾向を示している。これは、甲子園沖以東には、武庫川、猪名川・神崎川、淀川、旧大和川など大阪平野にそそぐ大河川が集中し、更新世末に深く広い谷を形成したのに対して、西宮～神戸には六甲山からそそぐ小河川しかないためと解釈される。

## ② 旧海岸線付近 (地下40m) の地下地質

図 2-3-8は旧海岸線に沿う地質分布を推定したものである。神戸市中央区の西半部と東灘区から西宮市にかけて、深度15～30m に連続する海成層はMa12層と判断され、中央区で背斜構造を呈する。この背斜構造は、沿岸部 (図 2-3-7) のMa12層の構造からすると、和田岬の撓曲構造の軸部に連続すると推定される。中央区以東も同じく沿岸部の情報からMa12層の連続は波線のように推定される。

中位段丘堆積層上部層や低位段丘堆積層ならびに完新統の層序区分は今の所指標になるものがなく未確立であるが、岩相からすると図 2-3-8のような分布が推定される。

完新統の基底は起伏に富み、埋積谷をなす部分では深度15m付近に谷底がある。西宮市東半部で完新統の基底が深くなるのは、沿岸部の場合と同じである。完新統は、下位より礫層、砂層、粘土層、砂層、礫層よりなり、最上部の礫層は扇状地性堆積物である。完新統の粘土層は、中央区や西宮市に分布するが、いずれも層厚は5m程度であり、完新統はほとんど砂層よりなる。分布の形態として、完新統は複数の河川の侵食地形の谷を埋めて谷壁にアバットして分布し、深い谷の場合に粘土層が発達する場合と、埋積低位段丘を薄く覆っている場合に分けられる。Ma12層の構造との関係からみると、同層の向斜部に完新統が厚い傾向がある。

完新統、とくに粘土層が阪神地域においてどのように分布するのかは、地震動の伝播や地表振動の軟弱地盤による増幅など地震被害との関係から見ても注目される。図 2-3-9は阪神沿岸部～低地の完新統に挟在する粘土層 (いわゆる沖積粘土層) の層厚分布 (土質工学会関西支部、1995) である。完新統の基底深度分布については層序区分の点で錯誤が生じやすいが、粘土層の厚さにはその懸念は少ない。完新統の粘土層は、沿岸部の埋立地で層厚が5m以下となっており、低地の地下には厚い粘土層は分布しないことが類推される。

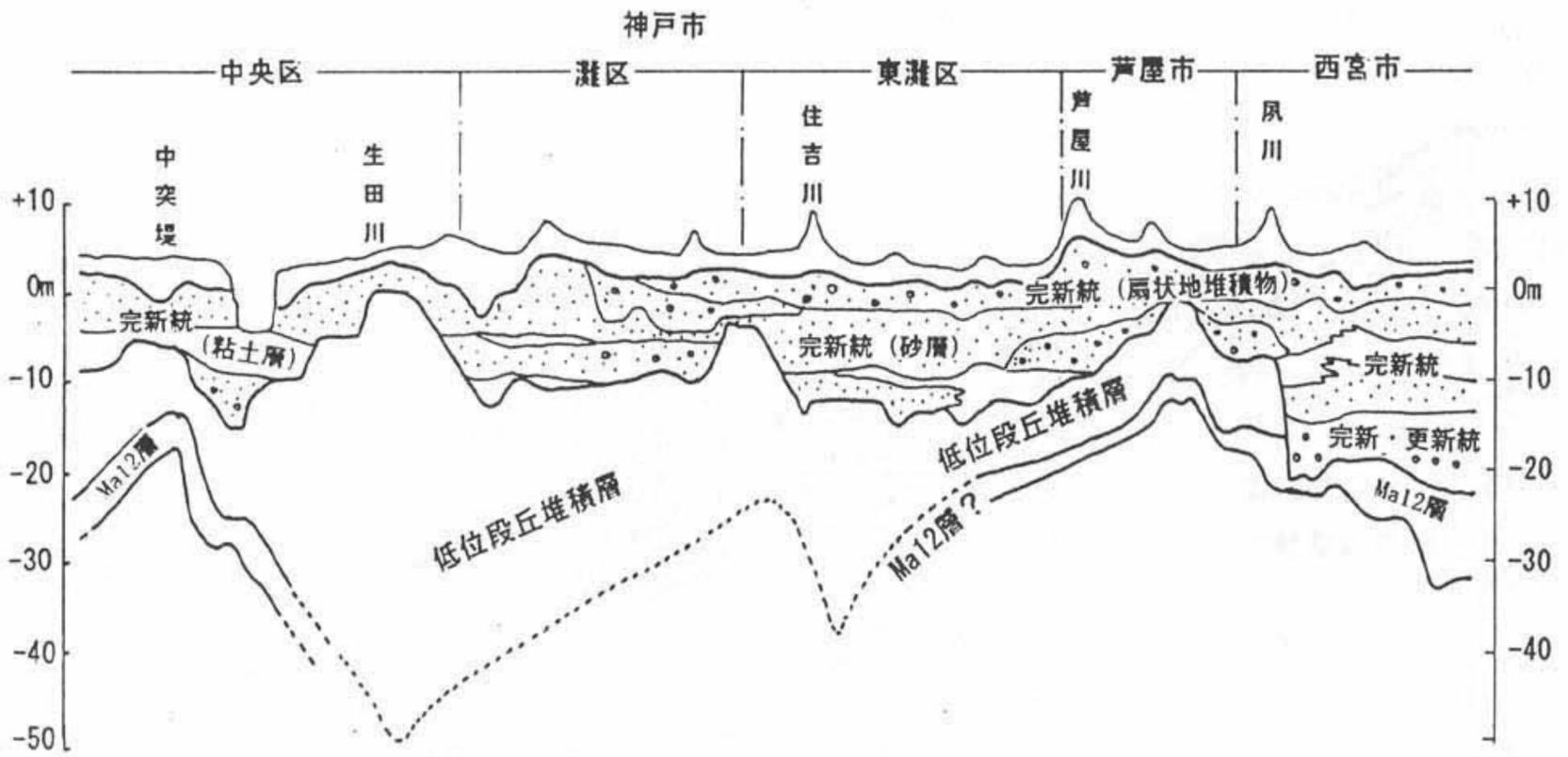


図 2-3-8 旧海岸線付近地下の地層分布推定図 (阪神高速道路公団、1985 を基に作成)

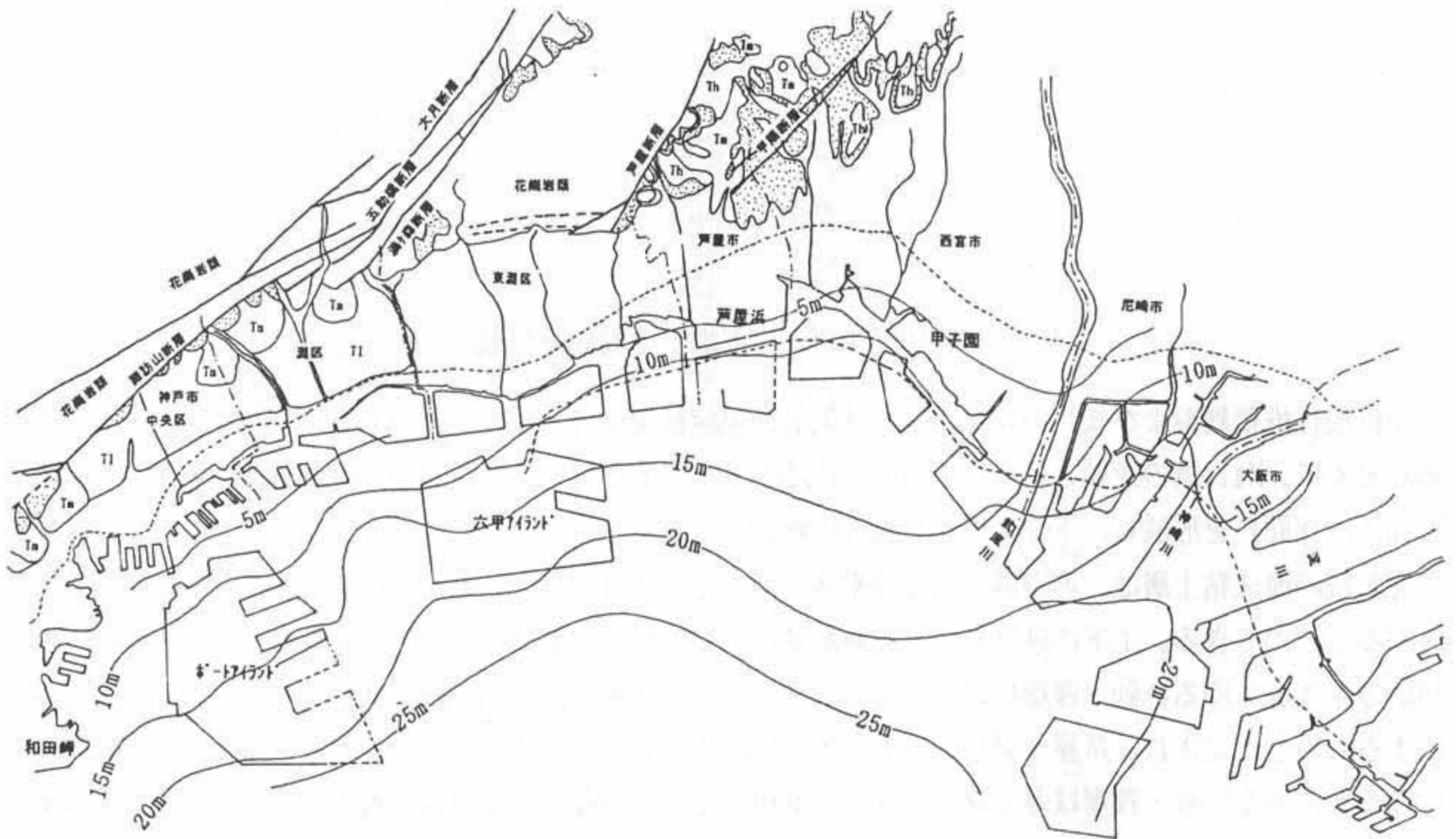


図 2-3-9 完新統粘土層の分布推定図 (土質工学会関西支部、1955を基に作成)

T1 : 低位段丘 Tm : 中位段丘 点線部 : 大阪層群

### ③ 神戸市東部の地下地質

図 2-3-10は、六甲アイランドから神戸市東部の市街地にかけて南北方向の地下地質状況を概念的に示したものである。六甲アイランド地下の深度 70m以深にはMa12層が分布し、これを覆って中位段丘堆積層上部 (厚さ13m)、低位段丘堆積層 (厚さ27m)、完新統 (厚さ10~17m) および埋立人工土 (厚さ20m) が分布する。

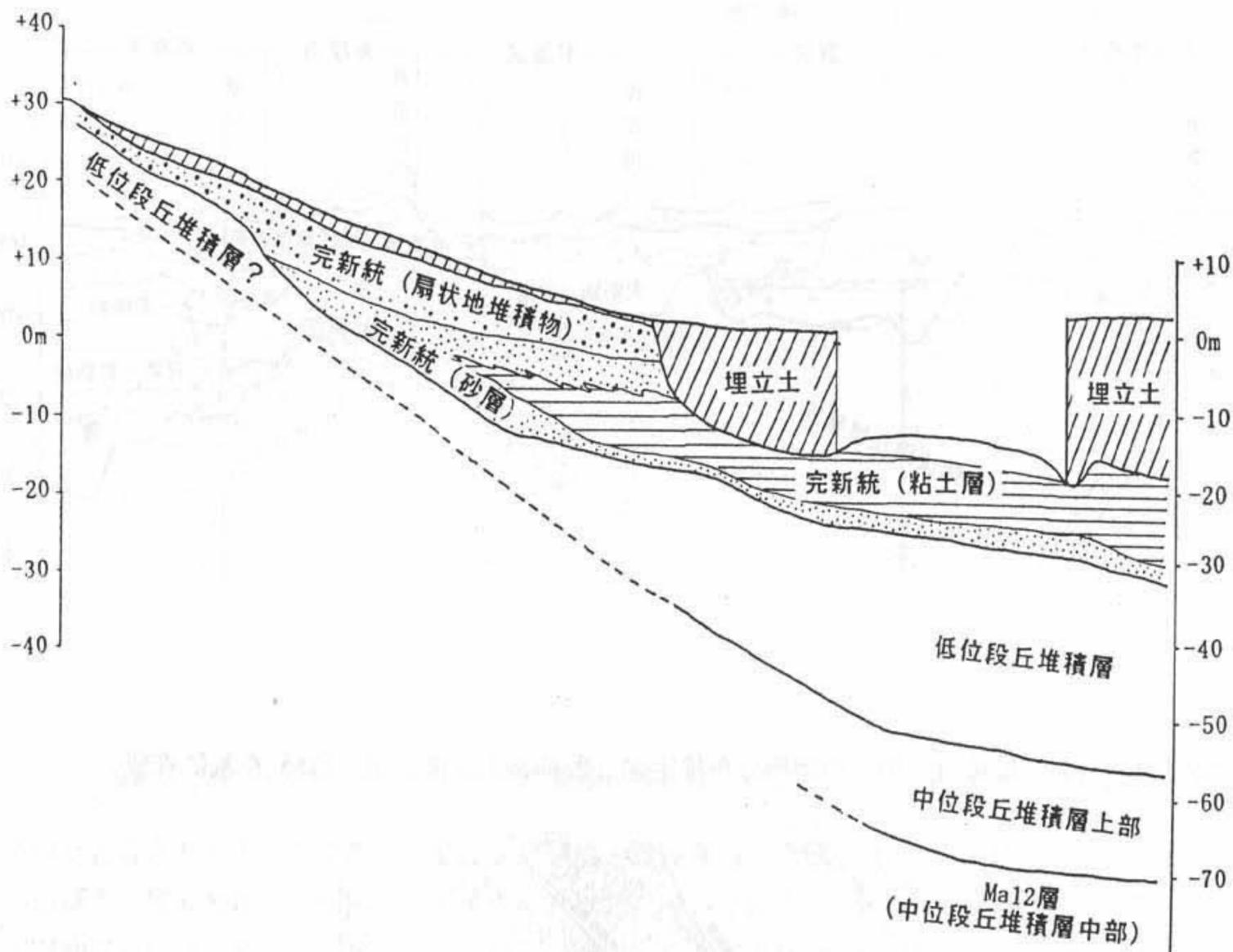


図 2-3-10 神戸市東部地下の地層分布概念図

中位段丘堆積層および低位段丘堆積層の陸側への連続状況はほとんど不明であり、今後の調査が待たれる。とくに、Ma12層の連続とともに、沿岸部に厚く分布する低位段丘堆積層が陸側の地表でどのような地形面（段丘面）を形成し、下位の地層を覆うのかに興味もたれる。

完新統の海成粘土層は、埋立地では浚渫や盛土によって攪乱されているが、標高 -3m付近まで陸側に追跡することができる。上下の砂層を含む完新統は標高+10m付近まで分布すると推定され、上位を厚さ 7~10m の不淘汰でゆるい砂・礫層によって覆われる。この砂・礫層は、完新統上部の扇状地性堆積物を主体にするものと推定され、芦屋~神戸の緩傾斜地形部の表層地質の特徴である。ただし、標高 20~30m付近になると、ゆるい砂・礫層は薄くなり、ある程度締まった砂・礫層と薄い粘土層の互層が地表近くに表れる。この互層が沿岸部から連続してくる低位段丘堆積層であり、低位段丘面を形成している可能性がある。同じく、その背後には、Ma12層層準を含む中位段丘堆積層が段丘を形成するものと考えられる。

#### ④ 神戸市中央部の地下地質

この地域の層序区分の基準は、ポートアイランドII期（ポートアイランドの沖合に造成中の人工島）内の深度250mの調査ボーリング（KH-1）である。図 2-3-11に示すように、ここでは下位よりMa9層、Ma10層、Ma11層、Ma11(2)層、Ma11(3)層、Ma12層の各海成層や10数層の火山灰層の特徴が詳しく把握されている（谷本ほか、1993）。その中で、特に暖温帯植物花粉化石を多産するMa9層、酸性の火山灰層を挟在し火山ガラスを多く含むMa11層、サルスベリなど特徴的な花粉化石を産し連続が追跡しやすいMa12層（中位段丘堆積層（上町累層）中部相当層）は鍵層となる。Ma12層の上位には、中位段丘堆積層上部に相当する海成~汽水成の地層と、これを不整合に覆って亜寒帯植物花粉化石を産出しアイラ火山灰層を挟在する低位

段丘期の堆積物（富田累層）には厚さ14mの海成層を挟在する完新統が分布する。

Ma12層を沖側から陸側へ追跡すると、図 2-3-12のように、ポートアイランドII期やポートアイランドではほぼ水平であるが、旧海岸線の神戸港第四突堤付近で本層は急激に深度と層厚を減ずる。この間のMa12層下限の深度差は約40mである。同じ構造を海岸部に沿う走向方向の断面（図 2-3-8）で見ると、Ma12層の下限深度は深度40mから20mへと変化する。Ma12層の急傾斜に伴って、低位段丘堆積層相当層は薄くなり削剥されて、完新統がオーバーラップする。図 2-3-12の左端に示すように、完新統の粘土層は砂層に移化し、砂層は間に礫層を挟みながら標高10m付近にまで分布している。これは阪神地域の海岸低地の完新統の分布様相の一例であり、図 2-3-10の場合と違って扇状地堆積物に覆われていない点が特徴である。

以上のような各地層の分布状況からみると、浅層部の地層の分布や岩相は、ベースとなっているMa12層の分布・構造に支配されている点が指摘される。つまり、地表に近い数10mの深さの地層の分布・岩相を区分・追跡し、立体的な表層部の地質分布を明らかにするには、Ma12層の追跡が欠かせない作業となる。

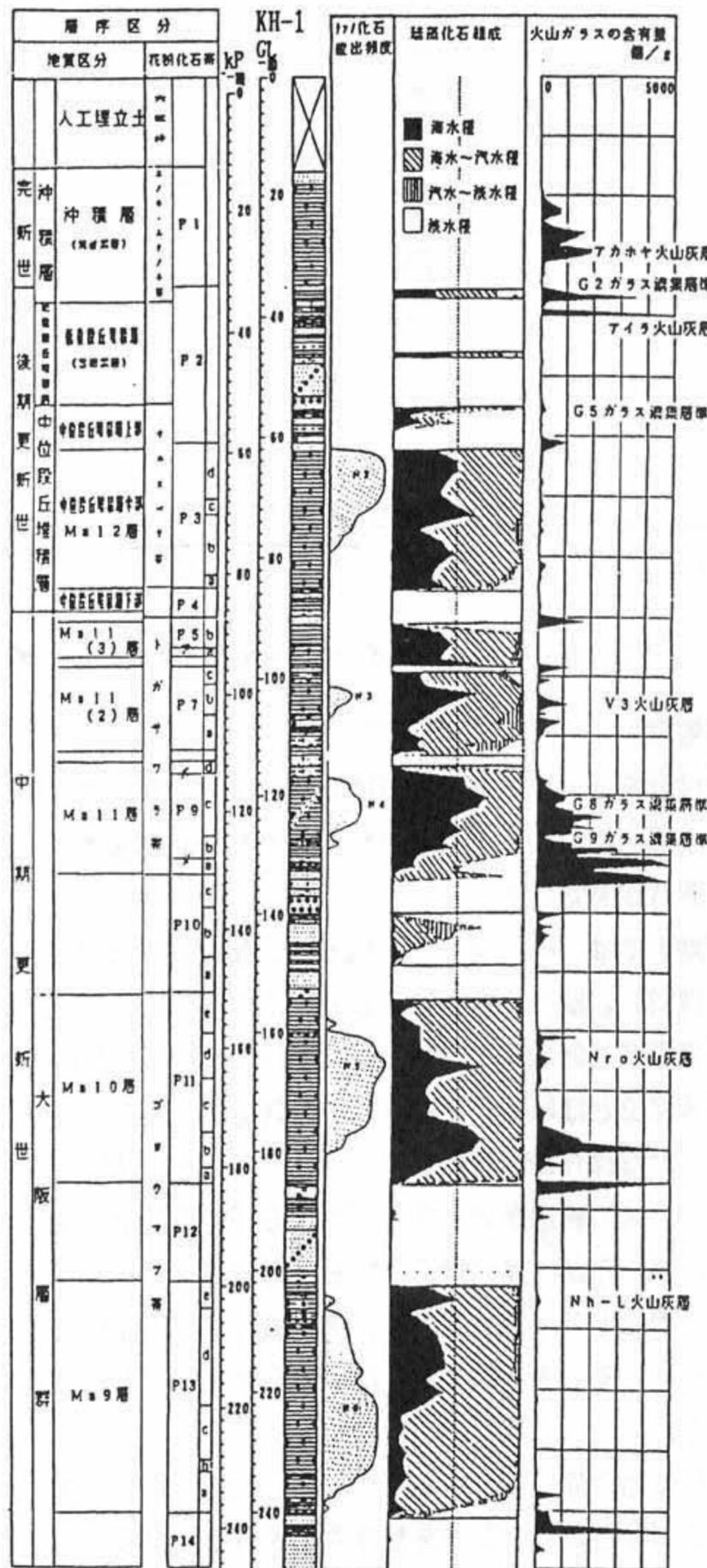


図 2-3-11 KH-1の層序 (谷本ほか、1993)

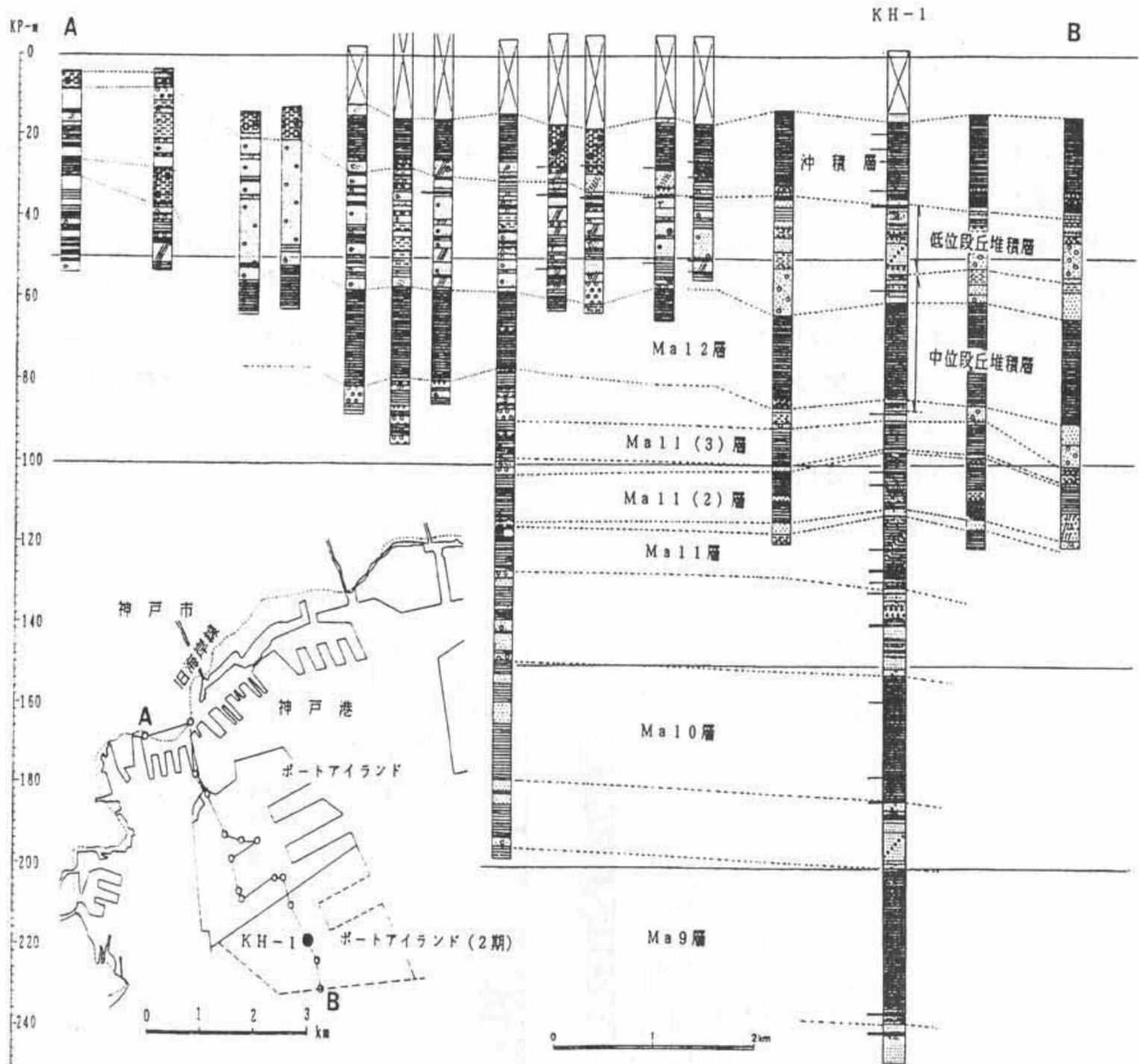


図 2-3-12 ポートアイランド～第四突堤の南北断面

### (C) 地下の地質構造 (考察)

前記の神戸港第四突堤付近を通過するMa12層の撓曲構造は、従来その位置・連続方向や構造の特徴が不明であったが、大阪層群上部～中位段丘堆積層の地層を大きく変位させている意味で注目すべき構造であり、その連続性と履歴に興味をもたれる。

神戸港南西部の和田岬地下では、Ma12層などの地層に20数mの変位がみられるとして「和田岬断層」と名付けられた(藤田ほか、1983)。既存の資料によると、この付近にはみかけ上東落ちの撓曲構造(断層ではない)があり、この間で深度300mの地層が180m、深度100mの地層が40m程度の深度変化がある。この変位規模は第四突堤付近の地層変位とほぼ同じであり、この構造は一連のものである可能性がある。最近、神戸地域で多くの陸上反射法地震探査が行われているが、そのうち、神戸市中央区の東端付近の測線(脇浜第2測線)で類似規模・センスの構造がとらえられている(遠藤ほか、1995)。さらにその中間の測線でもこの構造がとらえられ、これらが一連の構造である(図 2-3-13)ことがほぼ確実となってきた。

一方、六甲アイランドとポートアイランドの間の撓曲構造は、深度300mの地層が250m、深度100mの地層が80m程度の深度変化であり、その平面的連続性は未知であるが、上記の撓曲構造と同じ連続方向をもつのではないかと予測される。

神戸地域において、堆積盆地の輪郭を形作る須磨断層や諏訪山断層が東北東～西南西の連続方向をもつものに対して、中位段丘堆積層など新しい地層を変位させている上記の構造は北東～南西方向であり、異なる位置と方向をもっている。

そしてこの構造は、図 2-3-7の沿岸部埋立地の推定図に表れているように、大局的には西へ傾動する基

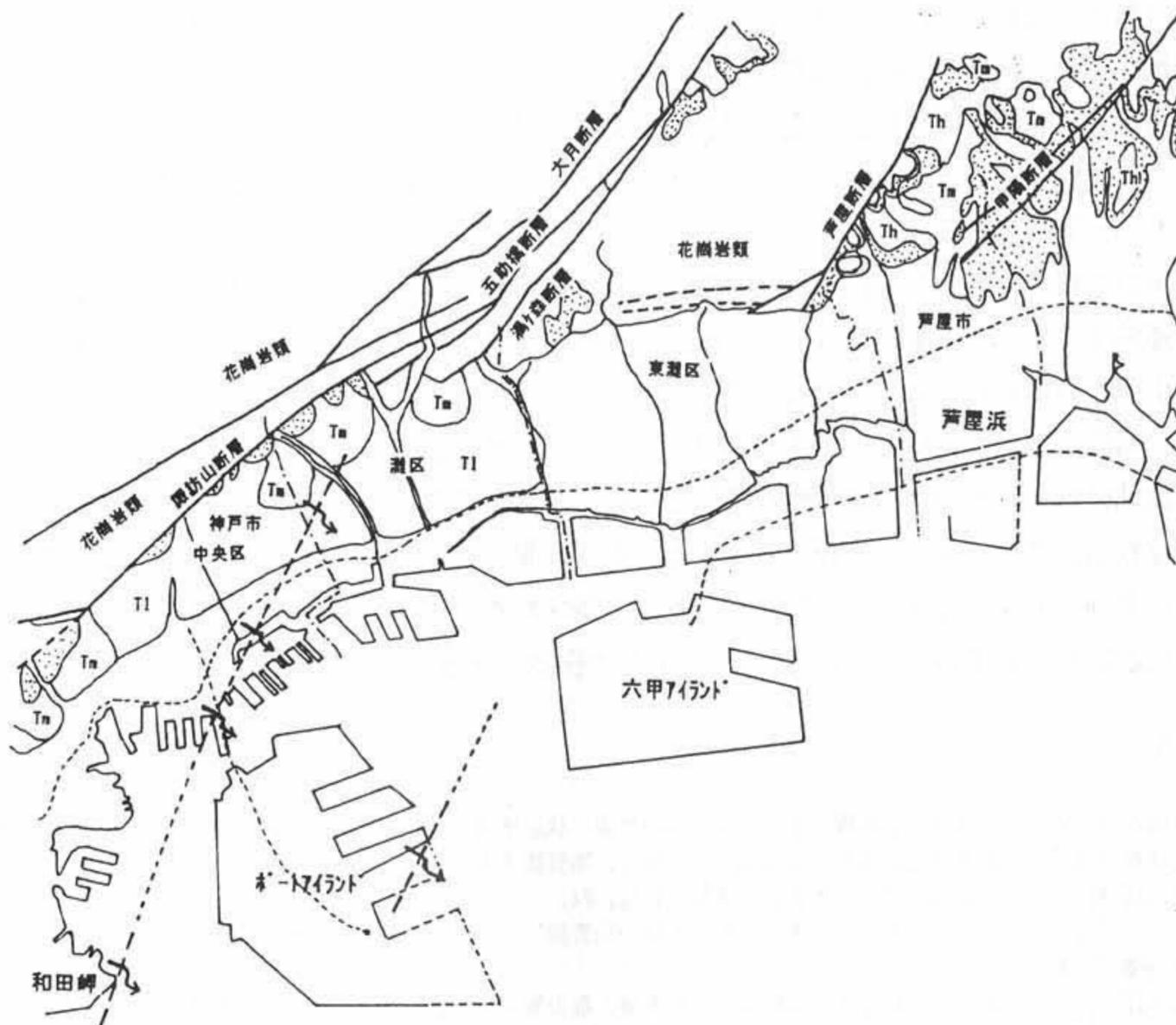


図 2-3-13 六甲山地の断層の位置とMa12層の急傾斜構造推定図  
 T1 : 低位段丘 Tm : 中位段丘 点線部 : 大阪層群

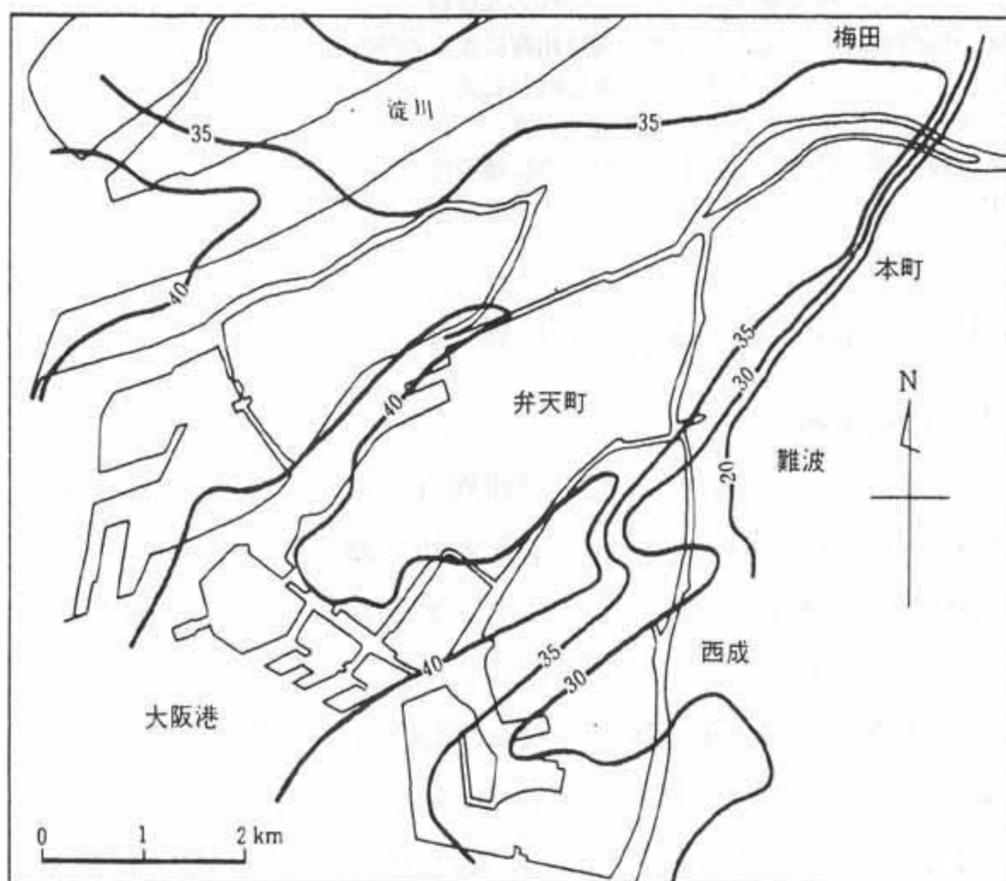


図 2-3-14 西大阪平野地下のMa12層の撓曲構造 (「新編大阪地盤図」、1991)

盤構造であり、その西縁部において被覆層は少なくとも3地区で「のこぎりの刃」状の東に急な撓曲構造を示し、この部分では基盤の逆断層の存在が推定される。こうしたセンスの被覆層の構造ならびに基盤断層は、大阪湾西部で推定されている「大阪湾断層」およびそのさらに西側に推定される断層と軌を一にす

るものである。これらの断層は六甲断層系との関連が問題となるが、現在調査中である。

阪神地区の沿岸部のMa12層の撓曲部において、もう一つ重要なことは、図 2-3-7をみて読み取れるように、低位段丘堆積層までも構造的変位がおよんでいる可能性が高いということであり、さらに完新統にまでおよぶ可能性もある。これらの点は、今後のボーリング、トレンチなどの注意深い調査によって明らかになるものと期待される。

大阪平野を縦断する仏念寺山～上町撓曲構造（基盤断層という意味で上町断層と呼ばれている）はほぼ南北に連続するが、西大阪平野におけるMa12層の撓曲構造は図2-3-14のように、位置・方向とも異なり、北東～南西方向に延びている。大阪平野において、このMa12層の撓曲構造は、その北側には完新統が厚く堆積し、南側は砂層が主体で層厚も薄いなど、低位段丘堆積層や完新統の分布・岩相に影響を与えている。

堆積盆地の輪郭を作った基盤の断層構造とは別に、盆地内の新しい地層を変位させているアクティブな構造が存在し、これが神戸と大阪で符合することには興味がいられる。大阪湾を含む大阪堆積盆地内にはこれらと同じセンスの構造が複数存在すると予察される。神戸と大阪のこれらの変位速度は、Ma12層の堆積年代が13万年とすると、平均1.5～3m/1万年程度である。（古谷正和・佐野正人・藤田 崇）

## 引用文献

- 遠藤秀典ほか（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。阪神大震災中間報告会、日本応用地質学会。  
藤田和夫ほか（1983）：須磨地域の地質。地域地質研究報告、地質調査所。  
古谷正和（1978）：大阪平野西部の上部更新統。地質学雑誌、84。  
古谷正和ほか（1992）：湾岸線南伸の地質構造。関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集、土質工学会関西支部。  
古谷正和（1995）：阪神地区の地盤特性。地盤からみた阪神大震災緊急報告会資料、全国地質調査業連合会編。  
Furutani, M. (1989): Stratigraphical Subdivision and Pollen Zonation of the Middle and Upper Pleistocene in the Coastal Area of Osaka Bay, Japan. Jour. Geosci., Osaka City Univ., 32.  
阪神高速道路公団・土質工学会関西支部（1985）：道路建設のための地質調査要領。  
Ikebe, N. et al. (1970): Quarternary geology of Osaka with special reference to land subsidence. Jour. Geosci. Osaka City Univ., 13.  
岩崎好規ほか（1994）：エアガン反射法地震探査による大阪湾の基礎構造。地震第2輯、46。  
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。  
地盤（土質）工学会関西支部（1995）：海底地盤—大阪湾を例として。  
近畿地方建設局（1980）：大阪湾岸道路計画調査地質調査報告書。  
久保田隆二ほか（1995）：地震基盤の構造変化による地震波の伝播特性について。物理探査学会第93回学術講演論文集。  
谷本喜一ほか（1993）：ポートアイランド（第2期）の地質構成。第28回土質工学研究発表会。

## 2-3-4 神戸地域の活断層に伴う地盤の変状災害

### (A) 市街地域の伏在断層の意義

兵庫県南部地震によって、淡路島では明瞭な地震断層（とくに野島断層）が出現して、それに沿う右横ずれ変位量は最大約2メートルに達し、変位地形もきわめて顕著である。一方、神戸側の六甲山地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、地震発生後早い時期にこれらの断層は動いていないとの考えが表明されている（熊木ほか、1995など）。

しかしながら、今回の地震による六甲山地の断層の活動とそれに伴われる都市構造物の変位あるいは変状を調査すると、山麓部あるいは丘陵部分において盛土地盤など地盤特性に対応した変状が生じている一方で、市街地部分では10cmオーダーの横ずれを伴う道路などの都市構造物の変位が既存の断層上あるいはその近傍で生じ、被害を与えているのが随所で認められる。このような変位地形・地盤の変状を基に、神戸地域における断層の活動が地震活動・地殻変動に対する変位・変状データの整合性からも、地震に伴って活動した断層の変位が神戸側でもきわどく地表に到達していた可能性が高く、淡路と神戸側が東西主圧力のもとでの変位・変形として一貫性を持つことを示した（平野・波田、1995c）。

それについてとくに強調したいのは、このような機会においてのみ都市部（あるいは沖積地）における

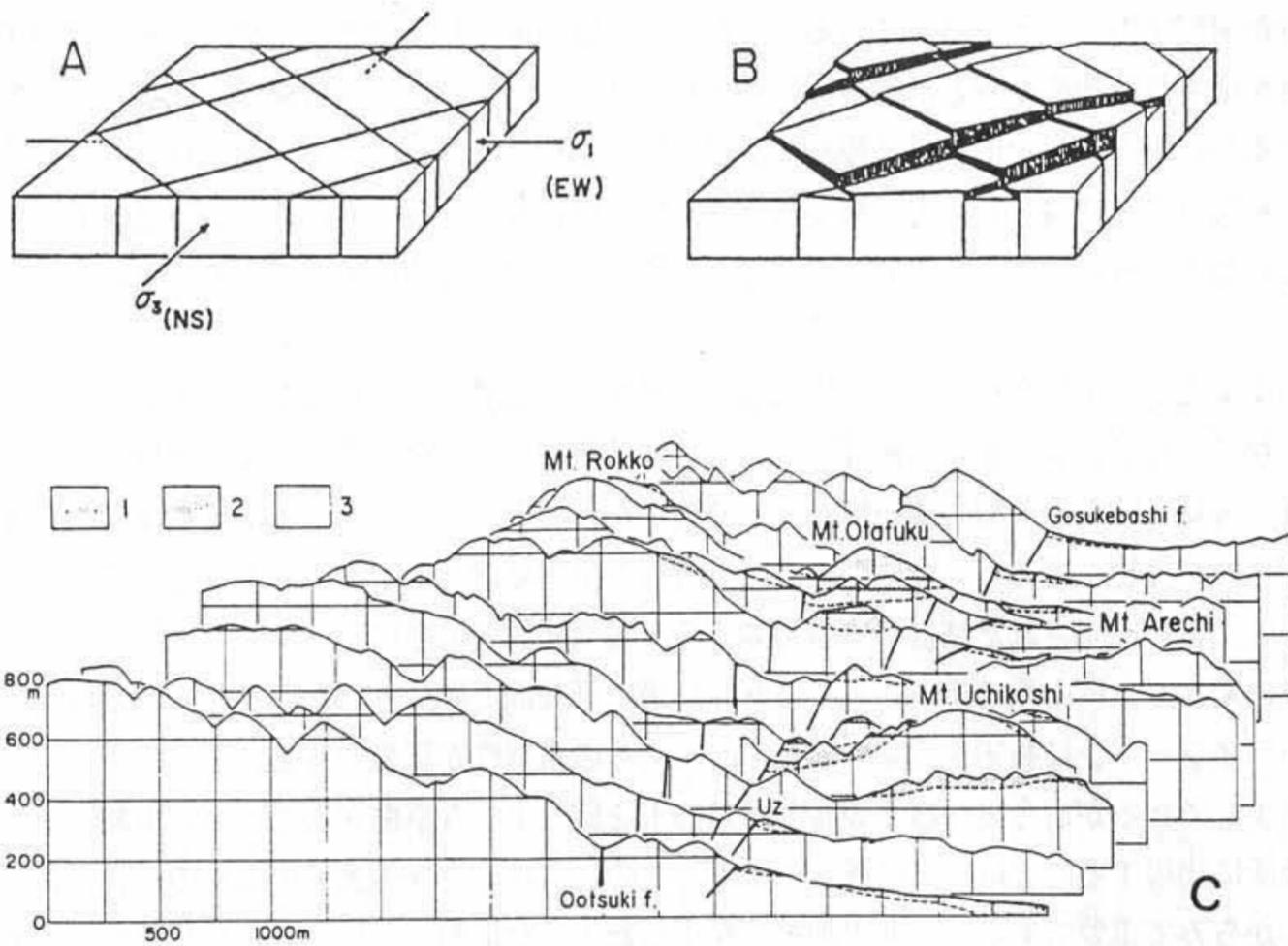


図2-3-15 六甲山地の断裂系の解析にもとづく六甲山地の形成過程を示す概念図と垂直変位の大きい断層崖にみられるペア断層の例 (AとB、平野、1971; C; HUZITA et al., 1971による)

Aは東西主圧力による横ずれ共役断層系と菱形ブロックの形成、Bは共役断層系の一部とくに北東-南西方向の断層にそう垂直変位による断層崖の形成とブロックの傾動、Cは垂直変位の大きい北東-南西方向の断層崖にみられる前面の逆断層とその背後のほぼ垂直ないし高角正断層の組合せ (五助橋・渦ヶ森断層と大月断層の場合) を示す。

層群の海成粘土の不連続部にもとづき、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、それらを推定断層として表示した (図2-3-16)。さらに笠間・岸本 (1974) は、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いえない。

この後に作成されて、現在もしばしば引用される1/20万の活断層分布図 (活断層研究会、1980・1991) では、有馬-高槻構造線や伊丹断層など、その後明らかにされたものが追加され、六甲の断層が横ずれ活断層であるとの認識も定着した。しかし、沖積層下に存在する断層については問題を残して、笠間・岸本 (1974) による市街地下の推定断層は、海底部分にある神戸市の和田岬断層を除き、活断層として採用されていない。

六甲山地の活断層系を東西主応力のもとで形成された共役横ずれ断層群としてとらえた場合、共役セットをつくるのは北東-南西方向の右横ずれ断層と西北西-東南東方向の左横ずれ断層で、これらに沿っては横ずれ変位地形が認められる場合もある。それに対して、南北方向のものと東西 (若干反時計回り) 方向のものはやや特殊であって、神戸西部の丸山衝上や芦屋断層北部の南北の部分および南部の東西の部分などは、いずれも断層崖の解析が進んでいて地形的にも必ずしも新鮮な活断層とはいえない。有馬-高槻構造線についても、それを東西性の単一の断層とみるかぎり、同様の疑問が生じる。また、大きな垂直変位を伴う低角衝上 (スラスト) といわれる断層においても、図-14に示したように断層面は地下で急傾斜となることが多く (HUZITA et al., 1971)、必ずしもその走向に直交する方向に最大圧縮力を想定することはできない。したがって一口に活断層といっても、今回の地震を起こした東西圧縮の場におけるこのような断層の方向性や傾斜に対応した特性に対する配慮が必要である。

六甲山地の断層群による垂直変位量は山地の東南側で2,000m以上におよぶが、これは単一の断層による

断層の追跡が可能である、という点である。しかも、位置の確認精度は極めて高い。そしてそのようにして検出された横ずれ断層の位置と活動の程度、さらには被害の特異性は、4象限型発震機構をもつ直下型地震に対する今後の都市防災にとって極めて重要な情報となる。また、多くの地下埋設物を有する市街地における断層調査の方法論としても、横ずれを主とする構造物の系統的変位のもつ意義は大きい。地盤特性に対応した地すべりに代表される変状も、むしろ断層変位との関連においてより合理的な位置づけが可能である。

阪神間の市街地に従来知られていた六甲山地に発達する活断層群の延長部が伏在する可能性は震災後の調査で明らかにされている。また、前述のように大阪湾断層のような規模の大きい断層の存在が明らかにされており、海域と陸域の断層の連続性が問題であるが、この解決にあたっては都市域の地盤変位の系統的な記載がきわめて重要である。今回の地震でも被害の集中域が六甲断層系およびその延長部と関係が深いことが、地震後に実施された諸機関の被害調査の詳細な検討とともに、その後の克明な現地調査に基づけば、地盤の変状が六甲山系で確認されていた諸断層の延長部で確認された。それらの変状部では、地下浅所に多いライフラインに被害を与えており、改めてその重要性が認識できる。

繰り返すようであるが、今後地震が阪神間の諸都市を襲うような事態が起これば、地盤の変状が今回とほぼ同じ場所に出現することは十分に推定できる。このことは大きな地震時の地盤の変位の再現性を意味し、防災面からみて重要である。今回の地震で発生したような地盤の変位の詳細な記載が次に発生するかもしれない地震時の地盤の変位の推定に有用であることは疑いない。詳細な地盤の変位の記載とその総括図の作成は今後の震害推定のための一種のハザードマップとして有意義であり、ことに、ライフラインとされる上下水道・電気・ガス等の諸施設の震害予想図として最適となることを考慮し、ここに神戸地域の活断層を述べておきたい。

#### (B) 既存の活断層とその評価

活断層問題に関連して六甲山地の断層系の研究史に概略ふれるなら、総括的なそれは上治(1937・1938)による1/50,000地質図による表示に始まるとみてよい。そこでは、六甲山地を横切る胴切り断層の存在に加えて、丸山衝上に代表される第三紀層神戸層群に花崗岩が衝上するスラストの存在が明らかにされ、造山時階説にもとづく六甲山地の形成史の一端が明確になった。

第2次大戦後、西宮地域の地質調査(藤田ほか、1959)にはじまり、六甲山地周辺地域の地質調査が進められ、その結果もまた1/50,000の地質図にまとめられているが(HUZITA et al., 1971)、そこには詳細な断層の分布が示された。それはのちに「神戸市および隣接地域の地質図」(藤田ほか、1976)として出版され(一部は後出の図2-3-18参照)、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。

この段階において、六甲の断層の本質はスラストとしてとらえられており、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基盤岩が衝上する「活断層」である。さらに、沖積層と基盤山地の境界となる地形的にも特に顕著な諏訪山断層が扇状地礫層を切っていることも確認され、かつそれらが直線的にのびるといふ横ずれ断層に固有の特質を持つことも図上に示された。ただしこの段階では、横ずれ断層という認識は必ずしも明確ではなかった。

さて、1970年代の初頭における研究の大きな進歩は、造構応力場の性質に関するものである。六甲山地の断層および節理の研究にもとづき平野(1971)は、中部日本について松田(1967)が指摘したと同様に、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、その一部にそう垂直変位によるペアとなる断層と断層崖の形成を説明した(図2-3-15)。これと相前後して近畿地方における東西圧縮については、田中ほか(1972)による鶴甲斜坑における測地学的観測や、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た。

その後とくに問題となる市街地部分については、笠間・岸本(1974)がボーリングデータにおける大阪

ものではなく、何本かの断層にそう変位の累積の結果であり、単一の断層による垂直変位量は数100mにとどまっている。したがって、松岡（1995）のいうように五助橋断層にそう約 2kmの右横ずれ変位を考えるなら、単一の断層に沿ってはむしろ水平変位のほうが大きくなる場合があり、神戸地域における今回の断層の活動を評価するに当たっては、この点についても配慮すべきである。

### （C）兵庫県南部地震による市街地の断層活動と地盤の変位

今回の地震によって、神戸地域の地表には顕著な変状が生じており、それらは何らかの形で永久的変位をもたらしている。変位は物質の移動の結果であるが、「側方流動」という用語は地盤構成物質の横方向への動き一般に対するものであるから、ここで問題とする都市構造物の系統的変位を生じさせる断層運動の結果をも含む。

地表に生じた永久的変位の中で、とくに一定のセンスをもった系統的な道路などの人工構造物の水平変位が、神戸地域では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」の市街地部への延長上で認められ、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。このような系統的変位は、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の市街地でまず右横ずれのものがまず注目され（平野・藤田、1995）、ついで西北西-東南東方向の左横ずれのものが確認された（平野・波田、投稿中 1995a）。

これら都市構造物の系統的変位は、水平変位のセンスが断層の走向に対応して一定していること、発生位置が断層線上あるいはその近くに配置するという地理的特質を有すること、尾根や谷あるいは道路・河川をしばしば斜めに横切って延長すること、が基本的特性である。このような特性により、これらの水平変位を中立点のまわりの振動（いわゆる地震動）による変位がたまたまランダムかつ永久的に残ったものとするには余りにも系統的である。したがって、それをもたらしたのは東西圧縮のもとでの特定方向への水平変位を伴う包括的な意味での「断層の活動」である、と考えざるを得ない。その意味では、これらは tectonic な起源をもつ「造構変位 (tectonic off-set)」であり、いわば現代の「変位地形」である。

一般に「変位地形」というとき、地質時代における変位の累積性が問題となり、さらに六甲山地山麓の最大2,000mに達する厚い堆積物があるお基盤の変位が地表に達するかどうか、という互いに関連する問題がある。しかし、最大これだけの変位は何本かの平行した断層群によって分担されており、かつ個々の断層については甲陽断層のようにそれは明瞭に大阪層群上部を切っており、あるいは笠間・岸本（1974）によって神戸市域の地下に推定された六甲山地の断層の南西延長部はそれを変位させているので、厚い堆積層といわれているものの大部分には地質時代を通じて変位が累積してできた断層がすでに存在していたわけである。したがって、これまでに累進的変位を行なわず今回はじめて変位を行なった堆積層部分というのは、地表付近の沖積層最上部にすぎない。この地域の沖積層最上部は、歴史時代に入って条里制が施行されるなどおよそ1,000年にわたる人工改変を受けていて本来の地形的特徴が失われている場合も多いが、それでも旧地形図（明治の1/20,000複製版など）を見ると、ここに示した活動した断層上またはその近傍で河川あるいは尾根の系統的横ずれが認められる場合がある。

さらに変位の地表への伝播については、堆積層が比較的厚く断層変位が直接地表に達しにくいと考えられるころでも、基盤の断層変位がその上の神戸層群あるいは大阪層群を切る複数の断層を通じて上方に伝えられたと考えることができる。したがって、軟弱な堆積物の性質あるいはその中における断層面の分岐に依存するいわば ductile smoothing がおこって、変位は若干ならかになりあるいは平行した断層に分配されることがあっても、それが地表を覆う都市構造物という各種の継目をもつ脆い物体に伝えられ、いわば brittle edging のかたちで地表に現代の「変位地形」としての都市構造物の系統的変位が生じるに至ったと考えられる（平野・波田、投稿中 1995b）。

図 2-3-16 大阪層群海成粘土の不連続部にもとづく神戸地域市街地部分における推定断層  
(笠間・岸本、1974による)

六甲山地内の北東-南西方向の断層（とくに甲陽断層、芦屋断層）の延長部が、  
沖積層分布地を斜めに走る可能性が指摘されている。

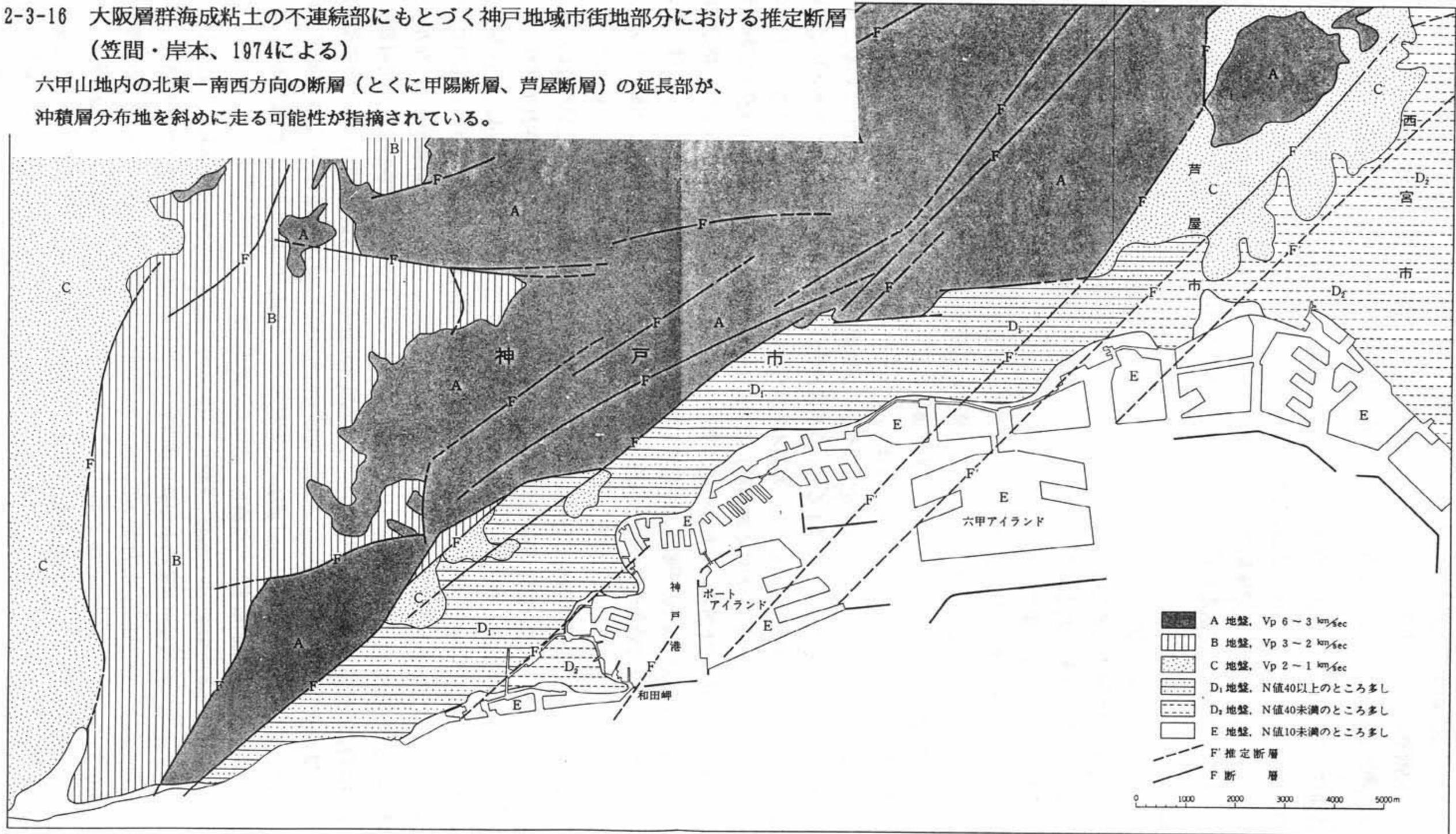
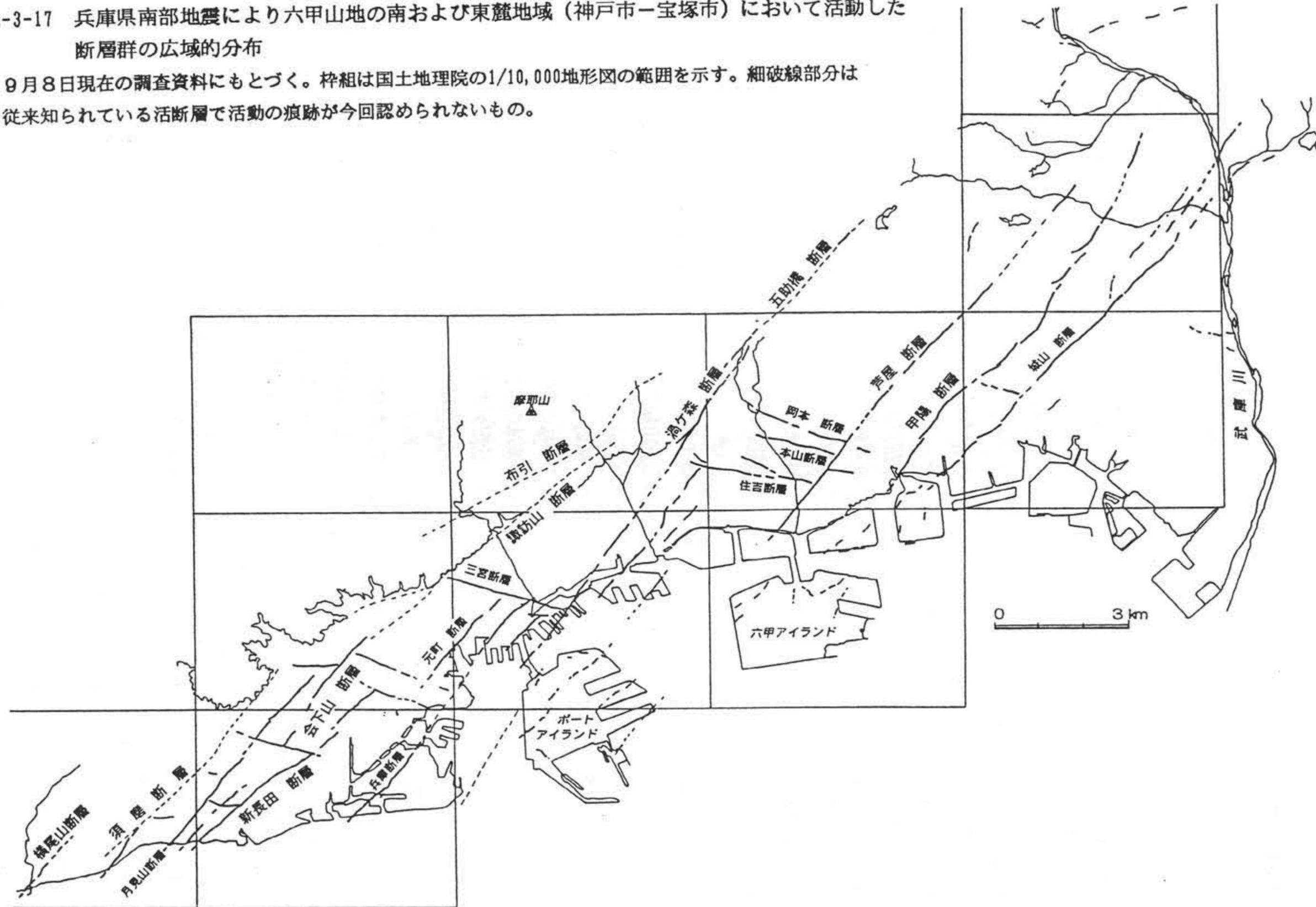


図 2-3-17 兵庫県南部地震により六甲山地の南および東麓地域（神戸市—宝塚市）において活動した断層群の広域的分布

9月8日現在の調査資料にもとづく。枠組は国土地理院の1/10,000地形図の範囲を示す。細破線部分は従来知られている活断層で活動の痕跡が今回認められないもの。



このような「造構変位（広義の変位地形）」を連ねる線として、市街地直下にある「活動した断層」を認知することができる。このような意味で神戸地域で活動した断層の分布図を、平野・波田（1995a・b）などにもとづき図2-3-17に示す。それは、北東-南西方向の右横ずれ断層群と、西北西-東南東方向の左横ずれ断層群からなる。六甲山地東南部の市街地部分について、既知の活断層と今回活動した断層の関係を示したのが図2-3-18である。

変位量は、断層とは種々の角度で交わる都市構造物のみかけの水平変位量としてまず扱うが妥当であるが、それは神戸側では量的には10cmオーダー（1~30cm）であり、淡路島におけるものより1桁小さく、空中写真判読では変位は一般に検出できない。断層と道路がせまい角度で交わる場合には、小さな変位がかなり長い区間にわたって分散して生じている場合があるが、変位のセンスは系統的である。変位は、とくに北東-南西方向の右ずれ断層について、北東の標高の大きい山地部分で不明瞭となる。

垂直変位については、2つの理由によって慎重な対応が必要となる。すなわち、都市域には各種の地下埋設物あるいは地下構造物があり、強い地震動によってそれに関連した局所的な裏込め土の圧密沈下や構造单元ごとの固有の共振現象がおこり、みかけの垂直変位が生じている場合が多い。もうひとつは地すべりで、標高差あるいは傾斜のあるところでは地盤の下方への移動が発生しているが、その頭部および末端部では一般に相応の垂直変位が見られ、円弧状の滑落部の追跡ができて滑落ブロックの左右側方における対をなす右ずれと左ずれが確認できる場合にはそれを除外できるので問題がないが、それが判然としない状況においてたまたま発見された垂直変位を断層変位と結びつけて評価することは問題を伴う。六甲山地の断層が本質的には横ずれ共役断層であるという他に以上のような理由で、都市域においてはもっぱら系統的な水平変位を対象とし、地下構造に関係なく系統的な垂直変位が確認できる場合にのみそれを検討の対象とするのが妥当である。

六甲山地東部において系統的な右横ずれ変位を伴うのは、芦屋断層・五助橋断層と渦ヶ森断層・甲陽断層・城山断層（新称）など、神戸市街地西部では会下山断層南西部・新長田断層（新称）・横尾山断層などで、北東から南西に走る断層またはその一部である。この系統の中には沖積層下にあつて必ずしも従来の地質図に記載のないものもあり、港湾部を斜めに横切っているものもあることがわかった。これらは、山地内におけるベア断層と同じく時に平行して認められ、系統的変位が互いに乗り移る場合もある。さらにこれらは、余震の主たる分布域の示す地下の破壊領域の延長方向（溝上ほか、1995；平田1995など）に対して、淡路島におけると同様の右ステップの雁行状配列をとる。

これらと共役セットをつくる住吉断層（新称）などの左横ずれ断層は、右横ずれ断層から派生するかのとき位置関係にあることが多く、右横ずれ断層に較べて一般に連続性は良くない。しかしそれは、被害の激しい地域とそうでない部分の境界となっていたり、右横ずれ断層に伴われる系統的な変位がそれを境に途切れる場合があり、変位量がやや大きいこともある。いずれにせよ、このような市街地部分の地下にある複数の共役断層の活動によって被害は生じており、さらに地盤特性や建築物の強度も関係していることは被害調査の資料を詳細に検討すれば明かであり、いわゆる震災の帯（嶋本ほか、1995）の地下に長大な活断層が存在することは最近の調査でも判明した。

活断層との関係でいえば、山地部のそれについて必ずしも明瞭な系統的変位は認められず、例外は小起伏山地を通過する甲陽断層のみである。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、住吉川にほぼ平行していることもあつて山地部において必ずしも確実な右ずれ変位は確認できない。しかし、これらの市街地への延長部には系統的な右ずれ変位が配列するので、変位の地表への伝播において山地部の市街地に対する標高差の問題も影響しているかもしれない。

なお、とくに顕著な変位地形をともなう諏訪山断層・布引断層においては、その直上での明瞭な変位は今回認められない。諏訪山、したがって諏訪山断層、の名称の由来である諏訪神社の石鳥居も、損傷を受けていない。また、杉谷と神戸高校付近、さらに春日野墓地と追谷墓地では、墓石はごく一部しか倒壊せず、震度は4以下ということになる。

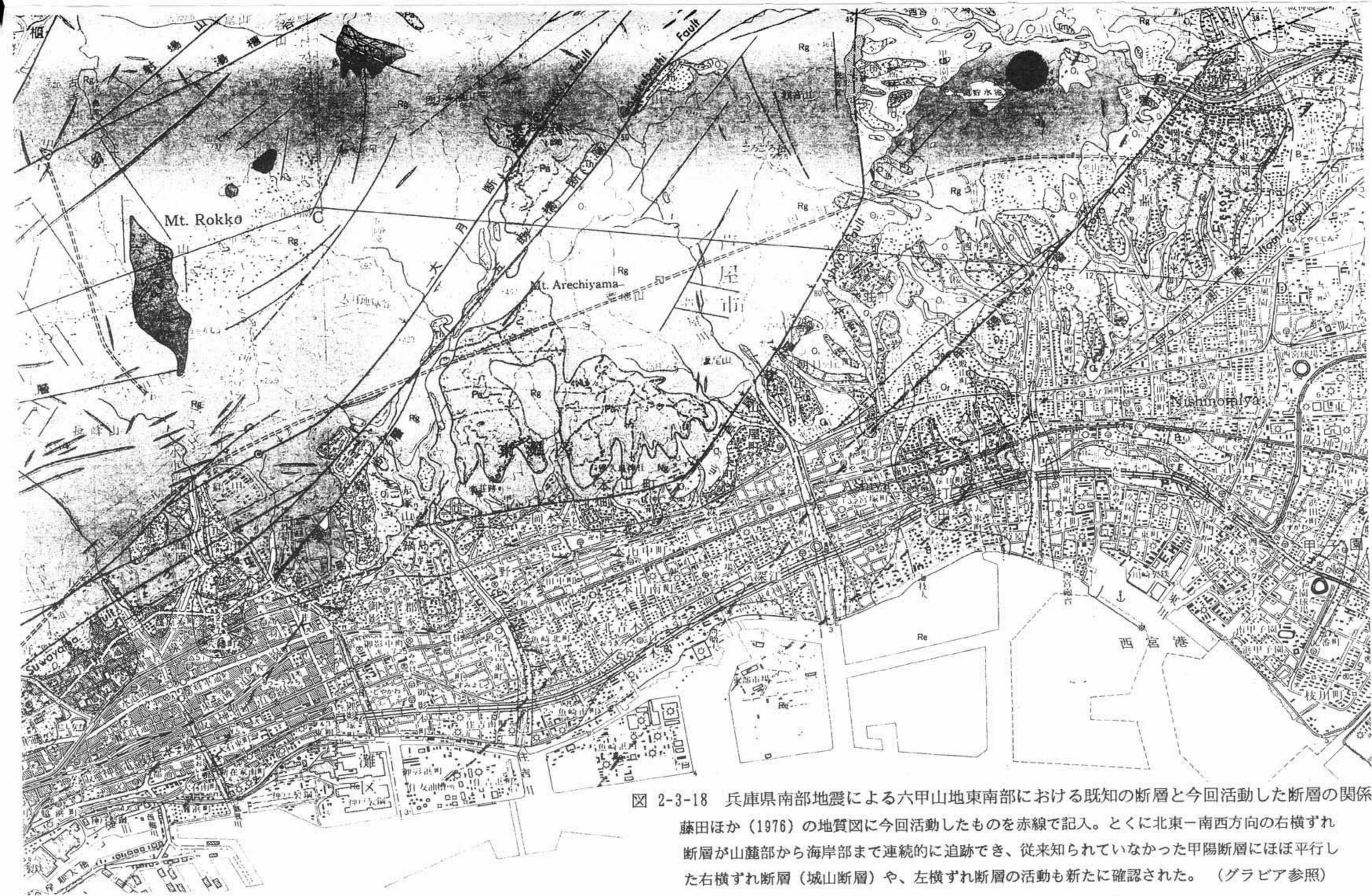


図 2-3-18 兵庫県南部地震による六甲山地東南部における既知の断層と今回活動した断層の関係  
 藤田ほか（1976）の地質図に今回活動したものを赤線で記入。とくに北東-南西方向の右横ずれ  
 断層が山麓部から海岸部まで連続的に追跡でき、従来知られていなかった甲陽断層にほぼ平行し  
 た右横ずれ断層（城山断層）や、左横ずれ断層の活動も新たに確認された。（グラビア参照）

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AA級の圧挫損傷が見られたといい、それ以外にも損傷箇所がいくつもあったという。横尾山断層を横切る塩屋川放水路トンネルが右横ずれしている事実(三田村、1995)をあわせ考えると、新幹線トンネルの通る標高あるいはその構造からみて、断層運動による損傷を受けつつも変位には至らなかったというのが実状ではないだろうか。このような強い地下構造物があると、系統の変位が途切れたり平行する別の断層に乗り移る場合が多い。

(平野昌繁・波田重熙・藤田 崇)

## 引用文献

- 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.地質雑、77巻、257-263.
- 平野昌繁・藤田 崇(1995):1995年阪神大震災に伴う地盤災害—とくに断層にそって変位地形について—.地球科学、49巻、77-84.
- 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、24-27.
- 平野昌繁・波田重熙(1995b):神戸市街地西部の断層の活動と変位地形.シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、79-84.
- 平野昌繁・波田重熙(1995c):淡路島との比較からみた兵庫県南部地震による神戸地域の断層の活動.第5回環境地質シンポジウム論文集、87-92.
- 平野昌繁・波田重熙(投稿中a):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.
- 平野昌繁・波田重熙(投稿中b):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.
- 平田 直(1995):1995年兵庫県南部地震の余震活動.地球、号外No13、63-70.
- 藤田和夫・笠間太郎・市原 実・粉川昭平(1959):東六甲周辺の地史と地形発達史、西宮市史、第1巻別刷、11-316.
- HUZITA, K., T. KASAMA, M. HIRANO, T. SHINODA, and M. TANAKA-YAMASHITA (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).
- HUZITA, K., Y. KISHIMOTO, and K. SHIONO (1973): Neotectonics and seismicity in the Kinki Area, Southwest Japan. Jour. Geosci., Osaka City Univ., vol. 16, 93-124.
- 藤田和夫・笠間太郎・田中(山下)操・平野昌繁・篠田竹外(調査および編集)(1976):神戸市および隣接地域地質図(改訂第三版)
- 藤田和夫・笠間太郎(1982):大阪西北地域の地質、地域地質研究報告(1/5万地質図幅).地質調査所、112p.
- 藤田和夫・笠間太郎(1983):神戸地域の地質、地域地質研究報告(1/5万地質図幅).地質調査所、115p.
- 藤田和夫・前田保夫(1984):須磨地域の地質、地域地質研究報告(1/5万地質図幅).地質調査所、101p.
- 笠間太郎・岸本兆方(1974):神戸と地震.神戸市総務局・土木局、48p.
- 活断層研究会(編)(1980):日本の活断層.東大出版会、363p.
- 活断層研究会(編)(1991):新編日本の活断層.東大出版会、439p.
- 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変.1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録、51-52.
- 松田時彦(1987):地震の地質学.地震2、vol. 20、230-235.
- 松岡 篤(1995):六甲山地の断層系と1995年兵庫県南部地震における断層変位.シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、75-78.
- 三田村宗樹(1995):1995年兵庫県南部地震における土木構造物被害と阪神地域の地盤構造のいくつかの問題点。「阪神大震災」中間報告会—人口改変と地震災害—、予稿集(日本応用地質学会)、105-111.
- 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、38-46.
- 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、121-122.
- 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、29-41.
- 上治寅治郎(1937):六甲山塊の地質と構造.地学雑誌、第584号、481-497.
- 上治寅治郎(1938):六甲山塊地質図.日本地図協会.

## 2-3-5 人工改変地盤(盛土、埋立地盤、旧溜池)

### (A) 埋立地盤

阪神間の沿岸部はそのほとんどが埋立地であって、埋立地内での液状化現象が水際線構造物にも大きく影響している。そのほとんどの変形は、護岸ケーソン部分が海側への回転を伴いながら数mも側方移動し、その背後が1~3m陥没している形態である。埋立地の角の部分よりも護岸直線部分の中央部がより大きくはらみ出しているのが確認される。

これら被害を受けた護岸のほとんどが、重力式護岸であったのに対して、鋼管セル型岸壁の耐震構造を

もった摩耶埠頭第1突堤西側護岸は全く無被害であった(今本ほか、1995)。また、防潮堤は不等沈下によってブロック間に隙間ができてその機能を失い、防波堤は、1~2m沈下したものもある。

埋立地中央部においては、広範囲に地盤沈下が発生した。これは、液状化というよりはむしろ、それまで緩い状態にあった埋立土砂が、地震動によって締固められるゆりこみ沈下によるものであろうとされていて(諏訪ほか、1995)、地表面は側方への流動現象や不等沈下はほとんどみられず、ほぼ均等な沈下を示している。杭基礎を採用した建物の抜け上がり量から、ポートアイランドでは、多くの箇所約50cm(最大70cm)の沈下が確認された。このため、埋設管の各建物との接合部が設計値以上の変位を被り破壊した。しかし、ポートアイランドや六甲アイランドの人工島の中央部に位置する都市機能部は、圧密沈下促進のためのサンドドレーンや締固め工法などの地盤改良がなされていたこともあって顕著な液状化は発生せず、沈下量も10~15cm程度にとどまっている(森本・Orense、1995)。

ポートアイランド埋立地内に設置された地震計のNS成分記録では、深度79m地点での678.8galに対して、深度28mの543.6galの最大加速度は約20%程度小さくなっていて液状化などによって、沖積層下部あるいは天満層のせん断剛性の低下が起こっているらしいとされている(岩崎、1995)。従来の工学的基準より深い深度における地盤の動的非線形特性や液状化の可能性についての検討が必要であろう。

これらの被害は、大小に関わらず尼崎以西の沿岸地域で共通して現れた被害状況である。旧海岸線との対応をみると、大阪南部に至るまで、顕著に液状化現象の現れた箇所が、江戸期の干拓地や明治以降の埋立地であり、人工地盤であることがわかる。埋立土砂表層部は、重機による締固めが行われるものの、水中部は、海上から投棄された状態のまま、ほとんど締固めの効果がないため、今回の地震で大きな沈下現象が発生した。特に第二次大戦後の埋立地は、大きな地震動を受けておらず、今回の地震でその影響が大きくでたものとみられる。

大阪付近では、江戸期の干拓地がそれほど大きな被害を受けていない。加わった地震動が神戸地域と比較して相対的に小さかったことに加えて、干拓から100年以上の時間を経過してきた効果と、それまでに昭和の南海地震をはじめとする過去のいくつかの地震動を経験してきた結果として、戦後の新しい埋立地に比べ若干の強度増加があった可能性もある。

## (B) 盛土地

内陸部の盛土地は、鉄道路線沿いの盛土および山麓宅地造成盛土でそのほとんどが占められている。その多くは山麓部に沿って、沖積谷部を埋めるか、あるいは斜面の平面確保を行う目的で片切片盛の施工が行われている。地震時の崩壊や亀裂集中地域が丘陵周辺の盛土地域や傾斜地(多くの場合小規模な盛土地域であることが多い)に分布している(三田村ほか、1995;田結庄、1995)。特に多くの犠牲者を出した仁川百合野町の崩壊地は、新旧の地形図の比較から明らかに盛土地域であることがわかり、今回の地震では、その盛土部分が崩壊している(志岐ほか、1995)。今回の地震で崩壊したり、亀裂が集中したりした盛土地域の多くは、比較的施工年度の古いものが多いとみられる。

盛土地は、多くの場合、谷部を埋めて造成を行った場所であり、盛土の下部には地下水脈が形成されやすくなる。このような箇所で強い地震動が加わると、地下水の水圧が異常に増加し、その周辺土砂の強度低下をひき起こし、それが極端な場合には盛土の崩壊を招く。仁川の例はこの代表例であり、被害までには至らなくとも、多少なりとも滑動し、住宅に被害を与えた箇所が多い。地震後の湧水の発生や表流水増加等の変化もその要因となっているようであるが、これらの被害地周辺での定量的な変化を記録した資料は見られない。

盛土斜面が地震動による割れ目の形成段階で終わるか、最終的な崩壊に至るかは、盛土下部あるいはその下位の軟質層(谷埋め沖積層や表土層)の存在に大きく依存しているのではないかと見られている(横山ほか、1995)。顕著な地表面変形や亀裂集中部は切り盛り境界付近であって、両側の地盤の振動特性の違いやそこを利用した分離面の形成の容易さなどが挙げられよう。いずれの盛土被害も過去の地すべり地

形が認められない箇所が発生していて、強い震動を被ったことにより地形・地質素因と宅地化による人工改変が結びついて災害に至ったものとされている（三田村ほか、1995；環境地質委員会、1995）。

これらの盛土地の被害分布は、ほぼ断層線の南側にやや離れて分布している。これを断層活動によるものと見るか、地下構造のギャップに伴う震動集中の結果と見るか現在意見が分かれるところである。いずれにしても、断層線直上だけが地震時に被害が集中するわけではなく、断層線の周囲の軟弱な被覆層が特に厚い箇所では、その被害がかなりの幅を持って発生することに注目すべきであろう。

### （C）旧溜池・旧河道

西宮市の内陸部ではいくつかの地点で液状化被害が確認される。この地域の丘陵地周辺では亀裂集中地域や地盤の変状も多数確認された。溜池を埋めて公共施設が建設されている例も多く。学校施設の多くが、液状化現象や重力的な地表面の変形によって、緊急時の避難箇所になっていたにもかかわらず使用不能となっている。

新旧の地形図の比較から、これらの場所のほとんどが沖積谷や溜池跡地であった箇所であることがわかる。明治18年の旧地形図では、丘陵地には開析谷が発達し、そこに多くのため池が点在していることがわかる。周辺には水田が広がり、これらのため池が、灌漑用の貯水池として活用されていた。近年、水田は宅地化し、その消滅とともに灌漑用水の需要も減少して、多くのため池が埋め立てられていった。その埋立の際、ため池の軟弱な堆積物の除去や、谷埋めの沖積層の地盤改良がなされ、管理の行き届いた盛土施工がなされていけば、このような被害は軽減されていたと思われる。しかし、噴砂構成物の多くが盛土材でなく、ため池や谷埋めの沖積層を構成していたと見られる還元状態の砂であったことから、このような軟弱な地層が除去されないまま盛土がなされているところが多いようである。

淀川河川堤防の崩壊は、多くの場合、堤防盛土部が、旧河道跡や後背湿地部分に位置している箇所被害程度が大きい。このような箇所では、堤外地側にも構造物被害や地盤変状が現れていて、堤内地だけでなく堤外地側でも液状化現象が確認される。また、守口市域では、淀川旧河道沿いに家屋損壊被害が集中している。

地震動に対して内陸で敏感に影響を受ける地盤がため池や旧河道を埋め立てた人工地盤であることが、今回の地震でも明らかになった。これは、今回の地震だけでなく、従来の大きな地震でしばしば確認されてきた現象である（今村ほか、1988；若松ほか、1992）。今後これを契機に、このような人工地盤の再検査やその工法の見直しと、その特性を充分考慮した防災対策の見直しが検討されることが必要であろう。

（三田村 宗樹・上出定幸）

### 引用文献

- 今本博健・黒田勝彦・後藤芳顯・長井正嗣（1995）：港湾・空港・河川グループ調査報告。阪神大震災緊急報告会資料、土木学会、78-83。
- 今村遼平・足立勝治（1988）：空中写真で見た液状化現象—新潟地震を例として—。地質学論集、27号、71-94。
- 岩崎好規（1995）：1995年兵庫県南部地震の地震動と京阪神の地盤。「阪神大震災」緊急合同報告会資料集、日本応用地質学会関西支部、1-21。
- 環境地質委員会（1995）：兵庫県南部地震による六甲山地東縁部の地震被害と地形・地盤条件。シボソウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、107-110。
- 三田村宗樹・大阪市立大学阪神大震災学術調査団（1995）：1995年兵庫県南部地震による地形の人工改変。シボソウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、209-214。
- 森本 巖・R. Orense（1995）：1995年兵庫県南部地震における液状化と被害。国際数理地質学会1995年会講演予稿集（セッションVI）、日本情報地質学会、39-40。
- 志岐常正・三田村宗樹・藤原重彦・池田 碩（1995）：西宮市仁川百合野町における崩壊。地震と震災、国土問題研究会、177-182。
- 諏訪靖二・浜田晃之・田淵俊幸（1995）：兵庫県南部地震によるウォーターフロント構造物の被害。1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録、日本第四紀学会・第四紀研究連絡委員会、75-80。
- 田結庄良昭（1995）：神戸長田地域の地震災害と地質・地盤との関係。シボソウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、149-154。
- 若松加寿江・吉田 望・田蔵 隆・鈴木信久（1992）：1990年フィリピン・ルソン島地震。地質と調査、第1号、10-17。
- 横山俊治・藤田 崇・菊山浩喜（1995）：1995年兵庫県南部地震で発生した宝塚ゴルフ場の斜面変動。シボソウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集、97-102。

執筆者（執筆順）

藤田 崇（大阪工業大学）  
田中真吾（神戸大学(名誉教授)）  
古谷 正和（川崎地質（株））  
佐野正人（サンコーコンサルタント(株)）  
平野昌繁（大阪市立大学）  
波田重熙（神戸大学）  
三田村 宗樹（大阪市立大学）  
上出定幸（梶谷エンジニア(株)）

## 2.4 大阪盆地の地下構造と地盤特性

中川 康一 (大阪市立大学理学部)

佐野 正人 (サンコーコンサルタントK.K.)

### 2.4.1 はじめに

大阪盆地は、西に大阪湾をいだし、周囲を標高数 100 ~1,000m 級の山地 (北に六甲山地・北摂山地, 東に生駒山地・金剛山地, 南に和泉山地) に囲まれた典型的な盆地地形を呈している。当盆地は、沖積低地を中心として周囲に段丘が、さらに山地との間には標高 100~200 m 程度の丘陵地が発達している。

各々の地形は、それを構成している地質と非常によく対応しており、盆地周辺の山地が大阪盆地の基盤をなす花崗岩類などから構成されているのに対して、丘陵地が大阪層群、段丘が上部洪積層の分布地域にあっている。一方、大阪湾や大阪平野の地下には基盤岩を覆って最大 3,000 m に達する新第三紀鮮新世末期 (およそ 300 万年前) 以降の未固結堆積層 (大阪層群, 上部洪積層, 沖積層) が分布していることが知られている<sup>1),2)</sup>。さらに未固結堆積層は大小の断層によって様々に変位・変形を受け、そのうち規模の大きな断層は概ね地形境界に対応するといった特徴があげられる。

このような現在みられる地形や地質構造は、主に第四紀以降の広域応力場のもとに進行した地殻変動によって形成されたものであり、したがって活断層運動や地震活動とも密接にかかわるものである。兵庫県南部地震の際、明瞭な地震断層として現れた野島断層もこのような活断層のひとつであり、この現象が現在の地殻変動の一側面をあらわしていると考えられることができる。

現在、大阪盆地周辺の地質構造は、山地から丘陵地周辺を中心に概ね明らかにされてきており、さらに最近、反射法地震探査や深層ボーリング調査が広く行われるにおよんで、地下に伏在している構造についても次第に明らかにされつつある。今後地震予知あるいは防災対策をすすめるにあたって、第四紀に形成された地質構造の解明は、基本的かつ有効な情報となる。

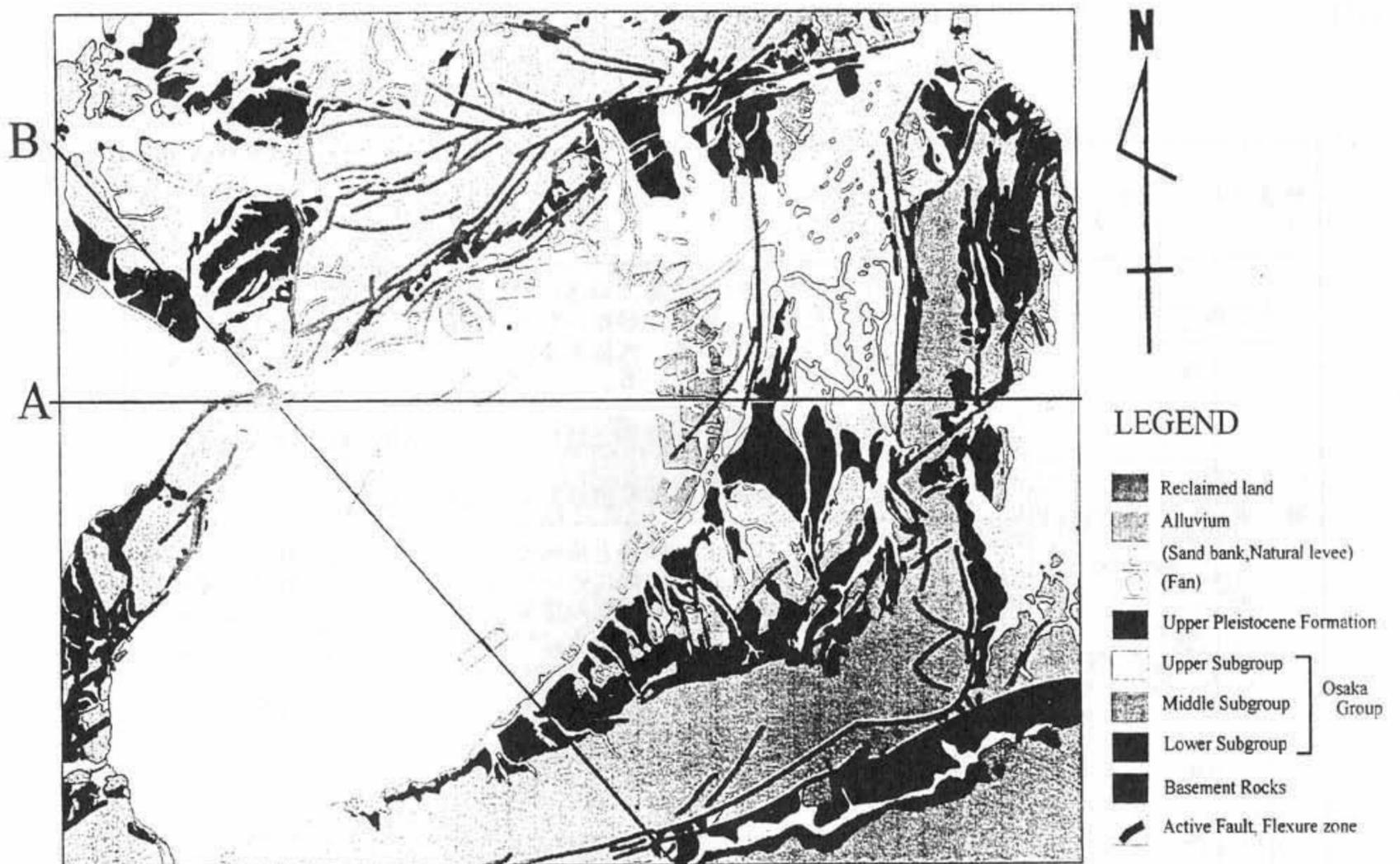
### 2.4.2 地質概要

大阪盆地周辺は、これまで多くの研究者により様々な見地から地質調査が行われてきた。これらのうち、主な研究成果に基づいて地質図、地質断面図を作成した (第 2.4.1, 2 図)。

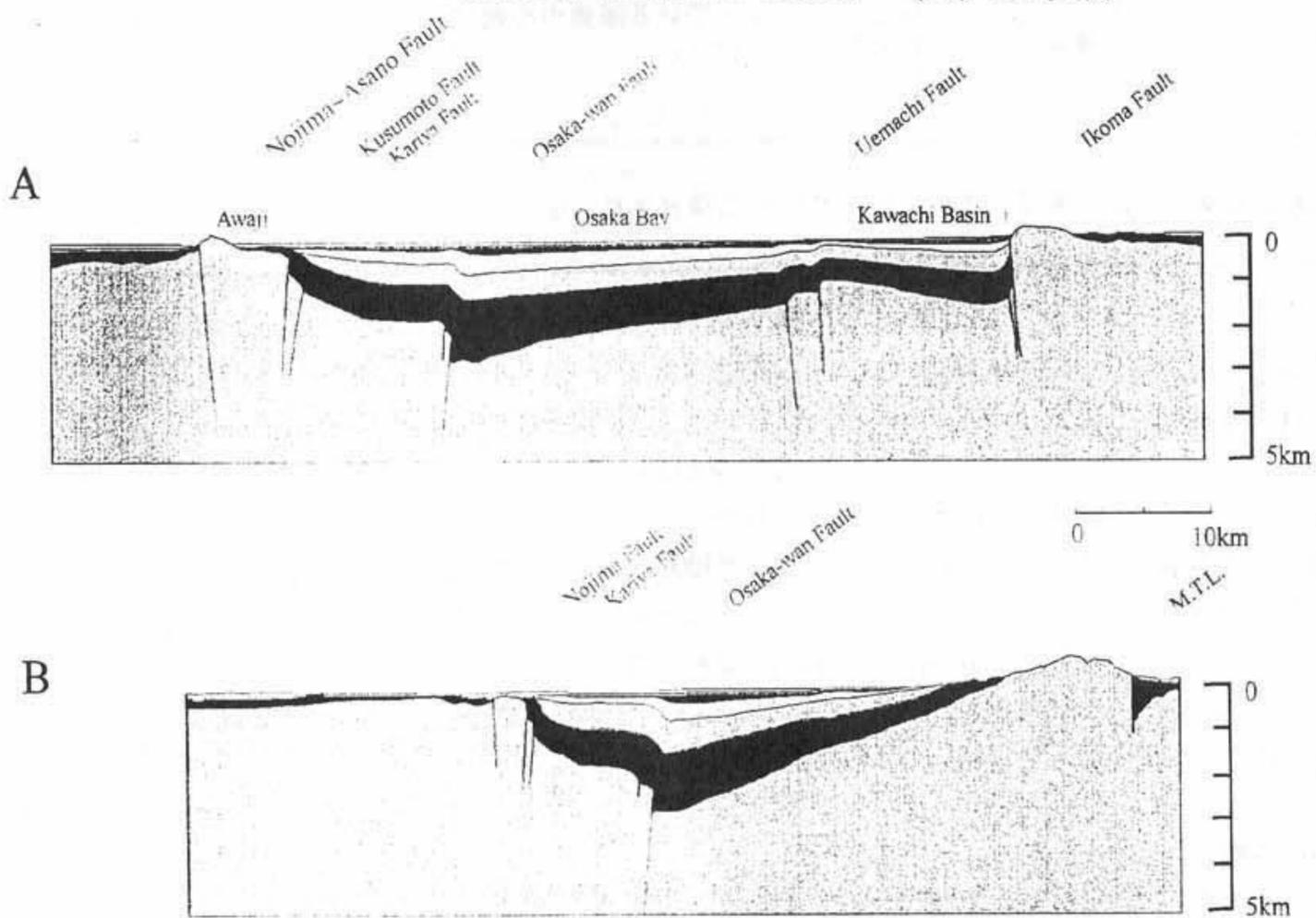
当地域の地質は、現在の地殻変動を念頭においた場合、基盤岩類と被覆層に大別して考えるとわかりやすい。ここでは、基盤岩類は過去の造構応力場で形成された地層あるいは岩体であり、現在は固結して岩石となっているものを対象とする。一方被覆層は、基盤岩上を覆って堆積した未固結ないし軟岩状の地層であり、力学的にみた場合、基盤岩が造構応力を直接反映した挙動をとるのに対して、被覆層には直接造構応力が作用するわけではなく基盤の挙動を反映した変形をうけるという違いがある。このような目で分けると、当地域の基盤は白亜紀に形成された花崗岩類、被覆層は第四紀 (正確には新第三紀鮮新世末) 以降に堆積した大阪層群、上部洪積層、沖積層に大別される。

大阪盆地の基盤を構成する岩石としては、花崗岩類のほか、盆地の北側には丹波層群 (ジュラ紀付加体) や有馬層群 (白亜紀後期の火山砕屑岩類) が、盆地の南側には和泉層群 (白亜紀末期の海成堆積岩) が分布している。また、これら中生代白亜紀までに形成された基盤岩上には、古第三紀に神戸層群 (海成~淡水成の堆積岩)、新第三紀中新世には二上層群 (火山岩・火山砕屑岩) などが形成されたが、現在これらの地層は断片的に分布するにすぎない。このような第三紀層は、基盤と被覆層の中間的な性質を持つものと考えられるが、ここでは第四紀地殻変動を浮きぼりにさせるため、大阪層群堆積開始時期との時間間隙が約 1,000 万年もあり、現在とは異なった造構応力場で形成されたと考えられる第三紀層を基盤岩類に含めた。

基盤岩を覆って分布する大阪層群は、およそ 300 万年前から堆積を始めた地層であり、千里丘陵をはじめ当層群のほとんどの分布地域では詳しい層序が研究されている<sup>3)</sup>。大阪層群は、層序的に上位から大阪層群上部、下部、最下部に区分されている<sup>4)</sup>。一方で、テクトニックな観点からは三つの亜層群 (下部亜層群, 中部亜層群, 上部亜層群) に分けられている<sup>5)</sup>。活断層問題を取りあげるにあた



第 2.4.1 図 大阪盆地周辺の地質図。(グラビア参照)



第 2.4.2 図 大阪盆地周辺の地質断面図。(グラビア参照)

っては、後者のほうが適切であると考え、ここでは亜層群による区分を用いた。さらに、大阪層群の上には段丘を構成する地層として段丘層、沖積低地から河川ぞいの低地を構成する地層として沖積層が分布する。段丘層については、高位、中位、低位に分けられていることが多いが、高位段丘層とされているものの多くは大阪層群上部亜層群の可能性が高く<sup>9)</sup>、また中・低位段丘についても全ての地域で層序的な対比が十分できていない。そのため、ここでは高位段丘層を大阪層群上部亜層群に含め、中・低位段丘層は一括して上部洪積層（上部更新統）として区分した(第2.4.1表)。

第2.4.1表 大阪盆地周辺の被覆層

地質時代		絶対年代 (万年)	地質区分	地質の特徴	
第 四 紀	完新世	1	沖積層	軟弱な粘性土層、ゆるい砂・砂礫層からなり、沖積低地、微高地（砂堆、砂州、自然堤防など）、扇状地などを形成する。その他、大阪湾岸を取り囲むように人工の埋立地が形成されている。	
		(2)			
	更 新 世	後 期	13	上部洪積層	海成の粘土・砂層と淡水性の砂礫・砂・粘土層が交互にあらわれる。 砂・砂礫層は通常構造物支持層となる。
			(20)		
		中 期	上部 亜層群	大 阪 層 群	海成の粘土・砂層と淡水性の砂礫・砂・粘土層が交互にあらわれる。山地に近い地域では全体的に砂礫層が優勢となる一方で、現在の堆積盆地より外側（内陸地域）にまで広く分布している。
(60)					
前 期	中部 亜層群	70	大 阪 層 群	海成の粘土・砂層と淡水成の砂礫・砂・粘土層が交互にあらわれる。 現在山地となっている基盤の小起伏面上にまで海成粘土層が分布している。	
		(120)			
新 第 三 紀	鮮新世	170	下部 亜層群	淡水成の砂礫・砂・粘土の互層からなり、海成層はみられない。粘性土は一般に固く締まり軟岩状を呈する。 現在山地となっている基盤の小起伏面上にも、わずかながら残存している。	
		(300)			

大阪層群堆積以前は、基盤岩類が長期にわたって浸食され、小起伏面を形成していた。

大阪層群下部亜層群は、淡水成の堆積層のみから構成されているが、中部亜層群以上の地層は、淡水成の地層の中に周期的に海成の地層が挟まれている。海成粘土層は、下位から Ma-1, Ma0, Ma1, …, Ma13 と命名されており、Ma-1 層の堆積時期がおおよそ 120 万年前であり、以後 10 万年程度の時間間隔をもって Ma13 層まで順次形成されてきた。このうち、Ma-1～Ma5 までは中部亜層群、Ma6～Ma10 までは上部亜層群、Ma11～Ma12 までは上部洪積層、Ma13 が沖積層に相当する。

大阪層群は、第2.4.1図、第2.4.2図に示すように盆地周辺の丘陵部では地表に顔を出しているが、大阪盆地では地下に伏在し上部洪積層、沖積層に覆われている。また、上部洪積層が直接地表にあらわれているところは段丘地形を形成している。このような地形・地質の分布は、次の項で取りあげる活断層運動と密接にかかわっている。

### 2.4.3 活構造の特徴

大阪盆地周辺は、鮮新世末期以降の広域応力場で極めて大きな変動をこうむってきた。その結果、大阪湾は沈降し 3,000 m に達する厚い堆積物がたまり、一方では六甲山が 1,000 m 近い山地となっ

た。このような変動を受け持ってきた最も大きな構造要素が活断層である。

大阪盆地周辺には、第2.4.1図に示したように多くの活断層が存在している。そのうち淡路島から六甲山地、北摂山地につながる北東-南西方向の山地と大阪盆地との境界付近は、最も活断層が集中したゾーンといえる。この地域に位置するおもな活断層としては、野島断層、仮屋断層、須磨断層、諏訪山断層、五助橋断層、甲陽断層、有馬-高槻構造線などがあげられる。これらの断層は、第2.4.2図にも示されているように何れも逆断層であるが、同時に右横ズレ成分を持つものが多い<sup>6)</sup>。六甲山地の断層系をはさんで西側(明美丘陵)では、全体にゆるやかに西側に傾動する構造となり、六甲山地南東側とは際立った違いがみられる。

大阪盆地の東側、生駒山地との境界には南北性の生駒断層がある。この断層は、垂直変位量が2,000 mに達する逆断層であり、生駒断層をはさんで隆起した東側(奈良盆地側)にも、規模の小さな南北性逆断層がほぼ等間隔で発達している。このうち、生駒断層は大阪層群上部亜層群を大きく変位させているのに対して、奈良盆地側の活断層では大阪層群上部亜層群の変位はほとんどみられなくなる(写真2.4.1)。このことから、生駒断層は現在でも活動的であるのに対して、奈良盆地側の活断層は現在は活動が停止したかあるいは活動性が極めて低くなっていると考えられる<sup>7)</sup>。

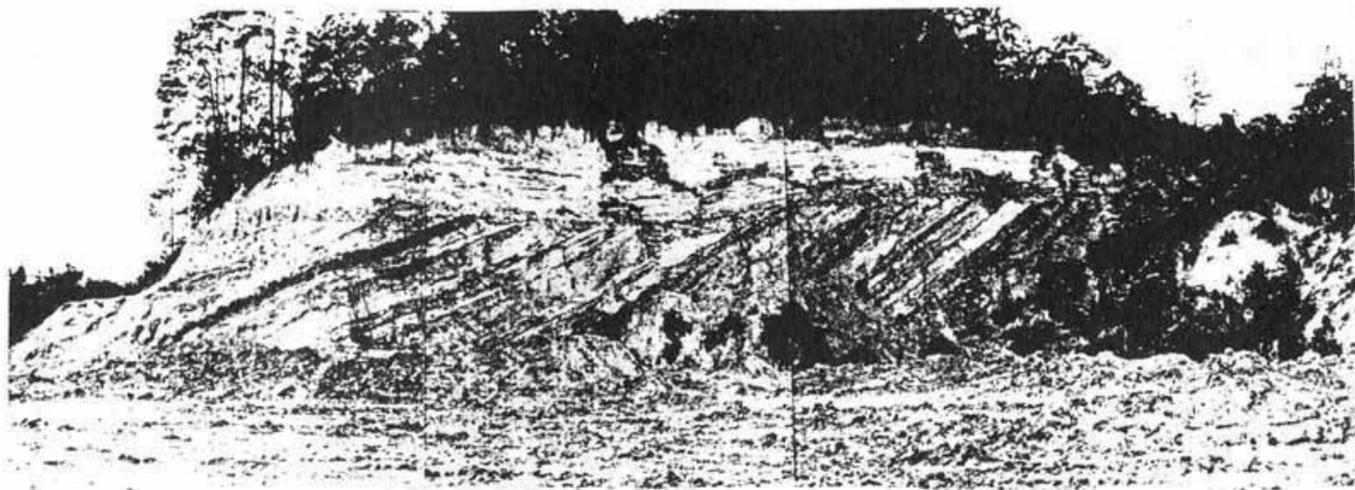


写真1 大阪層群中部亜層群と上部亜層群との傾斜不整合(奈良盆地側の活断層露頭, 奈良県僧坊)  
大阪層群中部亜層群(Ma1層をはさんでいる)は30°前後傾斜しているが、その上位にのる大阪層群上部亜層群はほぼ水平であり断層変位はみられない。

大阪盆地の南側には、大阪層群が分布する丘陵、上部洪積層が分布する段丘が広がっている。さらに、丘陵の南側には和泉層群からなる和泉山脈が東西にのびている。当地域でも、基盤と大阪層群の境界あるいは大阪層群中に活断層は発達しているが、いずれも変位量はそれ程大きくはない。この地域の特徴は、第2.4.2図のB断面に示されるように、基盤表面、大阪層群とも大阪湾断層に向かって見事に北西側に傾動している点があげられる。

以上は大阪盆地周辺に見られる活構造の特徴であるが、大阪湾あるいは大阪盆地の地下にも大規模な活構造が伏在している。現時点ではまだその詳細が明らかにされたとはいいがたいが、ほぼその全体像は浮かび上がってきた。そのひとつは、淡路島から六甲山地にかけての活断層系と平行して走る大阪湾断層である。

反射法地震探査により、この断層が大阪層群の見事な撓曲構造を伴い、基盤岩の落差が1,000 mに達することが明らかにされた<sup>8)</sup>。基盤中の断層の詳しい形状までは読み取れないが、基盤の断層と被覆層の変形を論じた実験結果<sup>9)</sup>を参考にすると、大阪層群の撓曲パターンからみて基盤岩では高角度(70~80°程度)の逆断層であろう。被覆層である大阪層群の変形は基本的に撓曲構造であり、断層で切られて大きく変位している様子は見受けられない。このような大規模な大阪湾断層であるが、その南西側及び北東側(神戸・阪神地域側)への連続性については、現在のところ詳しくはわかっていない。第2.4.1図の断層トレースは、ボーリングデータ<sup>10)</sup>や、音波探査結果<sup>11)</sup>を参考に推定したものである。

もうひとつは、大阪市内の真中を南北に走る上町断層であり、これも落差800 mに達する逆断層であり、大阪湾断層と良く似た形態を示している<sup>12), 13)</sup>。これらの断層はいずれも、大阪層群上部亜層

群を大きく撓曲させ上部洪積層、沖積層にまで影響を及ぼしており、現在なお活動的な断層であるといえる。

#### 2.4.4 第四紀地殻変動

大阪層群の基底すなわち基盤表面は、概ね平坦といってよいほどの小起伏面を形成していたことは、これまでの地質調査や大阪湾の反射法地震探査の結果からも明らかである<sup>8)</sup>。

それでは新第三紀末期以降、大阪盆地はどのような過程を経て厚い被覆層を堆積させ、また現在見られる起伏の大きな地形を形成させたのであろうか。以下、藤田・笠間<sup>5)</sup>を参考に、第四紀の地殻変動の特徴についてとりまとめる。

##### 1) 鮮新世末～更新世前期の前半 (およそ 300 万年～ 120 万年前)

###### ——東西性の基盤褶曲と大阪層群下部亜層群の形成——

新第三紀鮮新世の後半になると、南北圧縮の広域応力場が支配的になり東西性のゆるやかな基盤褶曲運動がはじまり、大阪盆地を含む領家帯一帯はほぼ東西に延びる沈降地域となり広大な淡水域が出現した。

この時期を通じて沈降運動はゆるやかに進行し、最大 1,000 m 以上にも達する大阪層群下部亜層群が継続的に堆積した。

##### 2) 更新世前期の前半～更新世中期初頭 (およそ 120 万年～60 万年前)

###### ——南北性の基盤褶曲と大阪層群中部亜層群の形成——

更新世前期の前半になると、広域応力場が南北から現在につながる東西圧縮に変わった。そのため、これまで東西性の沈降地域であった大阪盆地周辺地域には、新たに南北性の基盤褶曲運動が生じ、これまでの沈降地域のなかにも隆起に転じる所とさらに沈降が継続する所がわかれてきた。また、この頃から周期的に海域が広がるようになり、海成層を挟む大阪層群中部亜層群が堆積した。

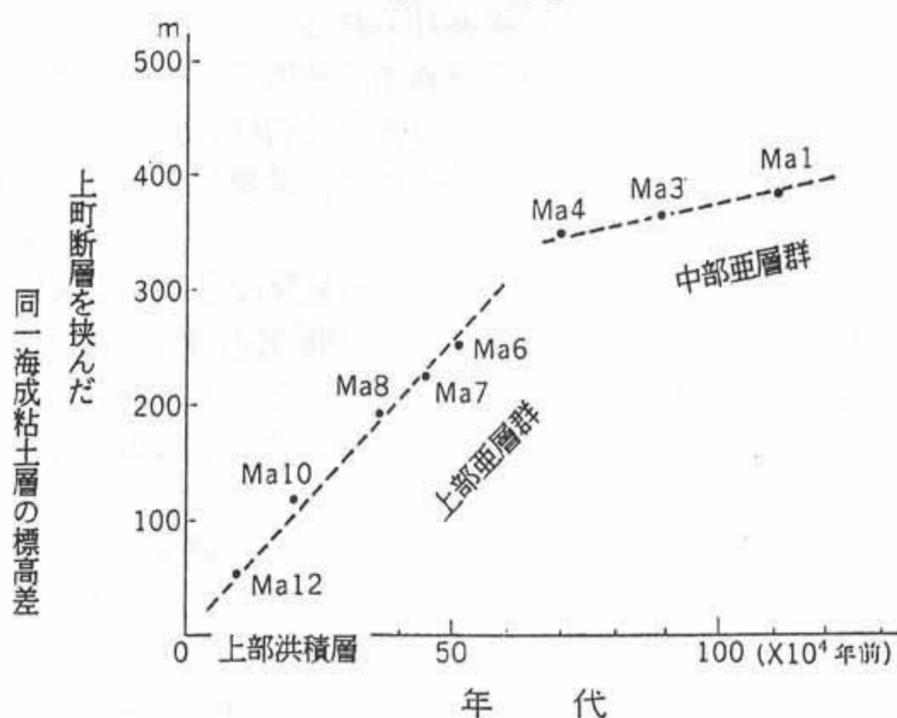
淡路島をはじめ、六甲山地や生駒山地など現在みられる大阪盆地周辺の山地は、この頃から隆起を始めた。活断層もこの頃に活動を始めたとみられるが、変動は比較的ゆるやかに進行し、断層変位はそれ程大きくなかった。

##### 3) 更新世中期以降 (およそ 60 万年前～現在)

###### ——大阪層群上部亜層群の形成と断層地塊運動——

更新世中期以降も引き続き東西性の広域圧縮応力場が支配的であるが、南北性の褶曲的な要素の大きな変動から断層変位の卓越する変動 (断層地塊運動) へと変化してきた。

上町断層を例にとると、断層を挟んでの海成粘土層の変位量から、Ma6 堆積時以降急速に変位速度が大きくなったことがわかる (第 2.4.3 図)。この頃 (およそ 60 万年前以降) から、上町断層、大阪湾断層や大阪盆地周辺の活断層が顕在化し、六甲山地をはじめとする大阪盆地周辺



第 2.4.3 図 上町断層の変位の推移 (藤田・笠間)<sup>9)</sup>。

山地の隆起が著しくなり、現在見られる地形・地質構造が形成された。

#### 2.4.5 大阪盆地周辺における活断層問題

兵庫県南部地震は、大阪盆地周辺の第四紀地殻変動の一端があらわれた現象であり、この現象を正しく評価することが、第四紀地殻変動の解明のみならず今後の地震予知、地震対策をたてる上でも重要である。

この地震では、様々な測地学的手法を用いた地震時の変動の様子が明らかにされおり、地震によって淡路島北部は概ね南方へ、六甲山地は北東へ移動していることが示された<sup>14)</sup>。

これは、野島断層-六甲山地南麓の活断層系が活動したことを示すものである。しかし、地震断層として現れ、しかも断層変位が詳細に把握できる野島断層はともかく、被害の集中した神戸側すなわち六甲山地周辺の活断層系については、地下に伏在しているものも含め数多くある活断層のうち、どの断層が活動したのか現時点でははっきりと解明されたわけではない。その理由としては、地下で生じた断層変位が地表まで達しなかったのか、断層上を未固結層が厚く覆っていたため地表に明瞭な断層変位が生じなかったのか、などがあげられる。一方、地震による被害は、“震災の帯”と称される狭いゾーンに集中している。このゾーンは、六甲山地南麓部と臨海部に挟まれた細長い地域であり、地形的には上部洪積層の分布する段丘の南端から完新世扇状地にあたっており、沖積層の厚くなる海岸地域には及んでいない。震災の帯の原因についても諸説があり、主なものとしては、直下に伏在する活断層が活動したとする説、地下構造（伏在する活構造など）が原因とする説、表層部の地盤特性が原因とする説に大別される。実際にはこれらの要因が複合したものと考えられるが、今後の防災対策を講じる上でもさらに詳しい原因の解明が望まれる。

地震予知あるいは防災対策に向けて必要な地質情報としては、大地震を引き起こす活断層自体にかかわるものと、地震波を伝える媒体としての地盤の特性にかかわるものに大きく分けられる。その中で活断層にかかわる情報は、直下型大地震を引き起こす活断層の位置のほか、活動時期や活動規模が予測できる情報、一方、地盤特性にかかわる情報としては、地下構造と地盤の動的特性があげられる。ここでは、大阪盆地の地質構造の締めくくりとして、大阪盆地周辺の活断層にかかわる問題点を整理する。

##### 1) 地下に伏在している活断層

当地域には大阪湾断層、上町断層など地下に伏在する活断層が知られている。しかしこの他にも、今回地震被害を被った神戸市街地直下にも活断層が伏在している可能性が高い。この位置を第6図の断面で示すと淡路島から六甲山地にかけて延びる活断層系と大阪湾断層の間にあたる。これらについては、今年度、兵庫県、地質調査所、海上保安庁などが反射法地震探査やボーリング調査を実施しており、近い将来にその位置や規模などが明らかにされるであろう。

##### 2) 今後大地震を引き起こす活断層

当地域の活断層は、更新世中期以降に断層運動が活発化した断層と、更新世中期以降はほとんど活動した形跡がみられないものに分けられる可能性がある。大阪湾断層や上町断層は前者であり、今回動いた野島断層も前者である。生駒断層も前者にあたるが、奈良盆地周辺の断層の多くは後者にあたっている。したがって当地域では、将来大地震を引き起こす活断層は、更新世中期以降に断層運動が活発化した断層に限定できる可能性が高い。現在その判別の出来ていない断層についても、今後解明すべきであろう。そのためには、大阪層群上部亜層群や上部洪積層などの層序区分の精度を高めるとともに、どこでそれらの地層が変形を受けているのかを詳しく調べる必要がある。

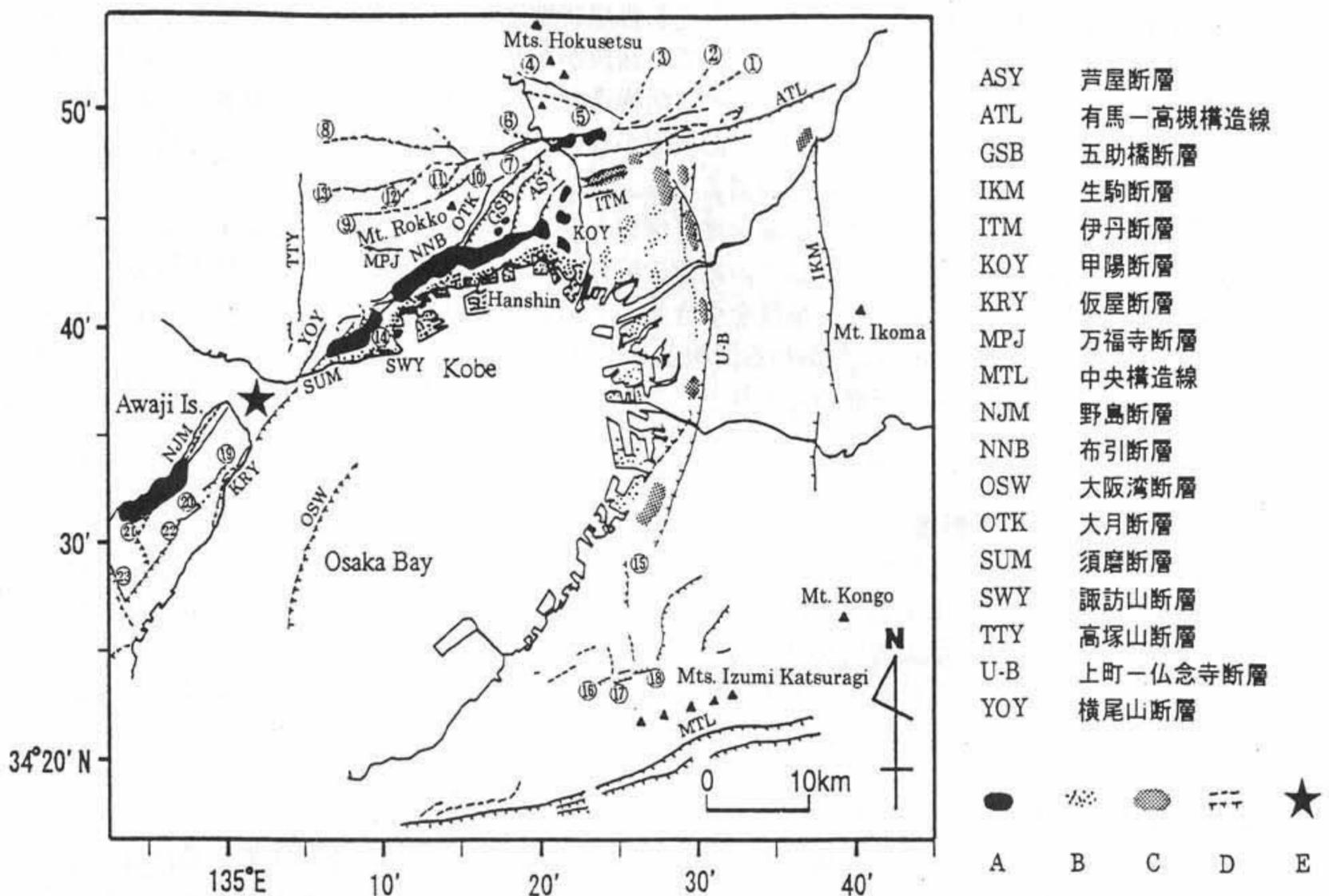
#### 2.4.5 大阪盆地の基盤構造と地盤特性

近畿地方のテクトニックな応力場は微小地震の発震機構や地山応力の解析からほぼ東西であることが分かっているが、新しい時代の断層の動きはこの応力場に規制されたものとなっている。主要な断

層の方向はN-S, NE-SW, ENE-WSWであるが、この地域においてはN-S方向が特徴的であり、逆断層を形成している。これらの断層の多くは沖積低地と丘陵・山地の境界部にあり、地形や地質構造の形成と非常に大きく関わっている。

今回の地震では地震被害分布が地質構造と大きく関連しているらしいことが明らかにされつつあるが、地震災害という観点からは、2種類の地質構造特性を把握する必要がある。そのうちの1つは能動的な場としての地質構造、すなわち地震を発生させる可能性のある活断層の位置と活動に関する特性（活動度や発震機構など）である。もう1つは地表面の応答に関する地下構造特性で、深部地下構造からごく表層の地盤構造までのいわゆる波動伝搬を規制する物性分布構造である。第2.4.4図には断層、震度VII、液状化被害の分布の他、構造物被害の特殊な帯状の分布などを示した。

近畿地方で現在みられる基盤構造の形成時期についてはその萌芽を中期中新世（約1500万年前）に求めることができるが、地形にも反映した、現在みられる基本的な構造は今から約50万年前に最盛期を迎えた「六甲変動」によって形成されたと考えられている。先新第三紀（約2600万年以前）の基盤はこの変動によって大きく変位し、多くの場所でその特徴的な形態を観察することができるが、平野



第2.4.4図 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。断層の名称，1: 馬場断層，2: 箕面断層，3: 五月山断層，4: 十万辻断層，5: 中山断層，6: 名塩断層，7: 六甲断層，8: 有野-淡河断層，9: 山田断層，10: 湯槽谷断層，11: 射場山断層，12: 古々山断層，13: 柏尾谷，14: 会下山断層，15: 坂本，16: 神於山断層，17: 内畑断層，18: 若樫断層，19: 楠本断層，20: 東浦断層，21: 育波断層，22: 妙見山北西，23: 志筑断層。

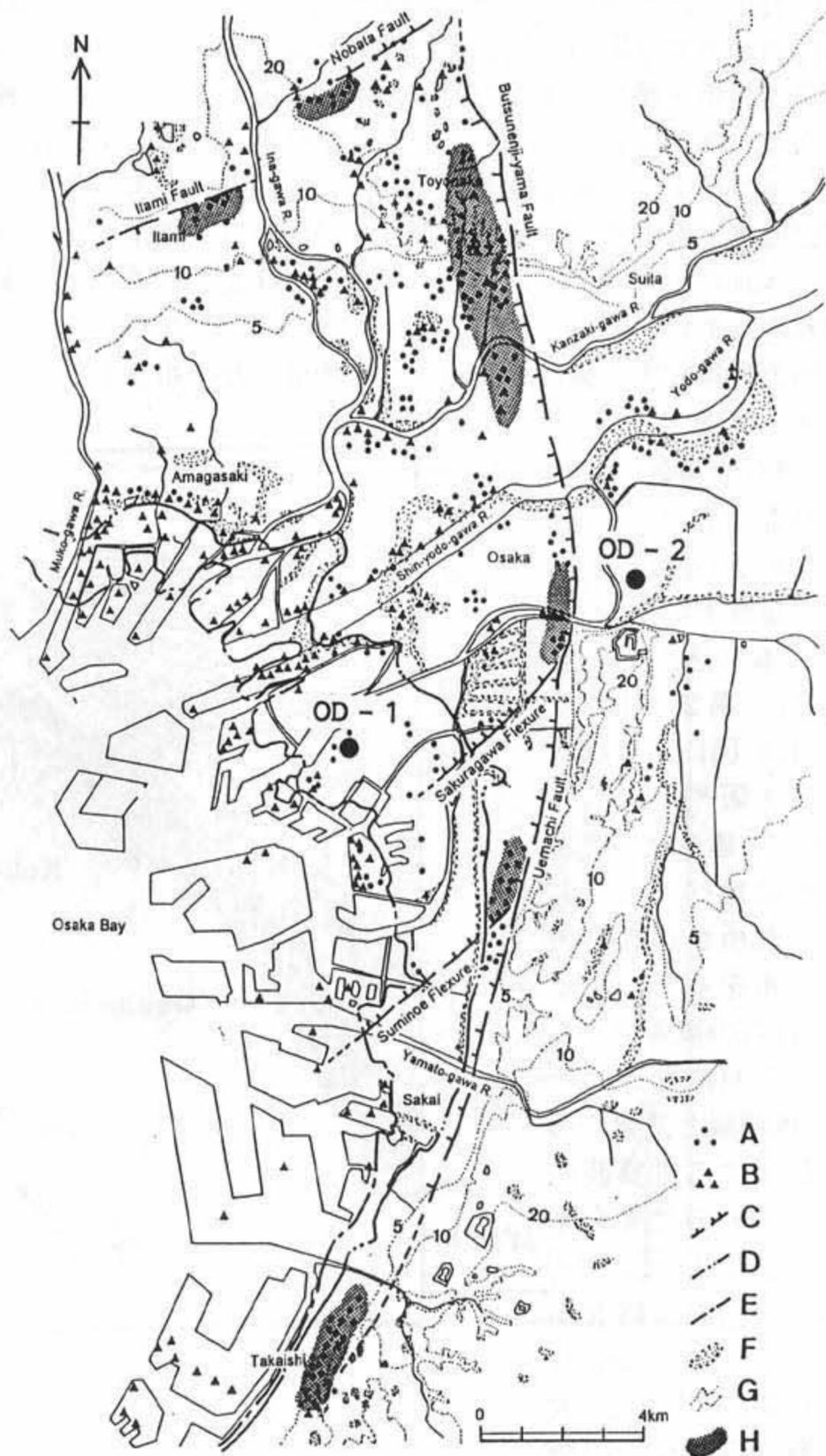
や丘陵の地下では不明となっている場合が多い。

今回の地震では淡路島や神戸・阪神地区では広域にわたって、甚大な液状化の被害がもたらされたが、特にポートアイランドや六甲アイランドの人工島ではおびただしい沈下や岸壁の流動破壊が目立った。

マスコミの報道では、その大部分が特に震害の著しかった神戸・阪神地区に集中し、その周辺部の被災状況はあまり知られていない。大阪とその周辺域もまた典型的な都市地盤であるが、神戸・阪神地区に比べると被害の程度はかなり低かったものの、それでも大阪湾岸部一帯、特に明治以降の埋立地や、神崎川および淀川の堤防、河川敷などでは噴砂や沈下などを伴って観察された(第2.4.5図)。被害が集中した所の地盤条件としては、海岸や河川沿いの軟弱地盤、干拓地、旧河川や池の埋立地、盛土、断層沿いなどが挙げられる。大阪では一般に、家屋や構造物の損壊は比較的大きな規模の液状化や側方流動などの地盤被害に付随して生じているが、これらとは全く無関係に分布している場合もある。

海岸部では液状化や側方流動が多くみられ、顕著な被害は神戸から大阪湾岸の北部一帯にかけて分布している。軽微なものまで含めると、南は、岸和田市まで追跡できる。淀川の河口より以北の湾岸部は尼崎、西淀川一帯が液状化と側方流動の著しい地域となっているが、淀川の河口付近にも顕著な被害が現れ、左岸はほぼ2kmにわたって堤防の破損が続いた。さらに右岸では十三大橋付近が約500mにわたって、北方に約40cm位流動し、不等沈下を起こしている。このような被害は淀川大橋の北詰め付近や中之島の東部にも見られるが、ほとんどが旧淀川の流路と非常によく一致を示している。また神崎川や旧淀川の河口部一帯で見られる液状化の分布はこれらの河川によって形成されたデルタ部に対応している。淀川左岸堤防の大規模な崩壊はちょうどこのデルタの縁にあっている。

淀川より南の湾岸部では、港区の築港に大きな被害が見られ、天保山では、大規模な液状化・側方流動被害が大きく現れた。さらに大正区では鶴町に、



第2.4.5図 大阪とその周辺の被害の分布 (大阪市立大学阪神大震災学術調査団, 1995)。 A: 液状化地域, B: 家屋損壊地域, C: 断層, D: 江戸期(1680年前後)の海岸線, E: 明治18年(1885年)の海岸線, F: 旧河川跡, G: 地形等高線, H: 液状化・側方流動によらない家屋の損壊ゾーン。

住之江区では南港の一部で流砂現象が認められた。

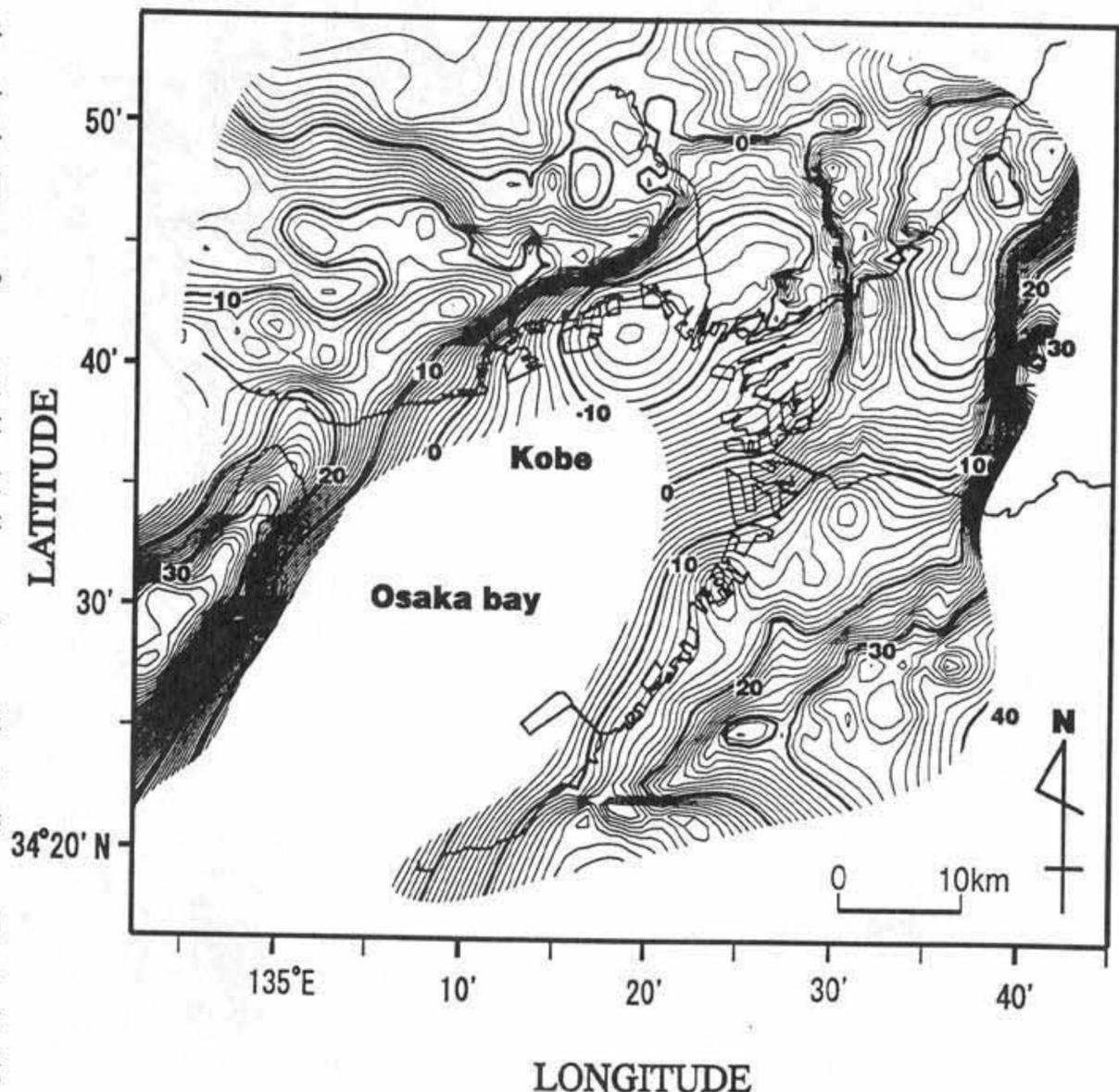
家屋の損壊による被害は大阪でもかなり多く見られた。宝塚市周辺は被害の非常に大きい地域であったが、これらはまた川西市や池田市へと東の方にも分布している。特に震源から遠く離れている豊中市でも全壊家屋が多く見られ、その倒壊数は500軒を越えた。大阪ではこの地区の被害が最も大きい。これらの被害の集中している部分は特に南北方向に伸びているという特徴がある。

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、堺筋の一部に南北に細長く伸びた被害集中域が存在する。三越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1km位にわたって見られ、道路も数cm沈下した所が何カ所も見られた。このような変状はすぐとなりの御堂筋や谷町筋、その他の所では見られていない。

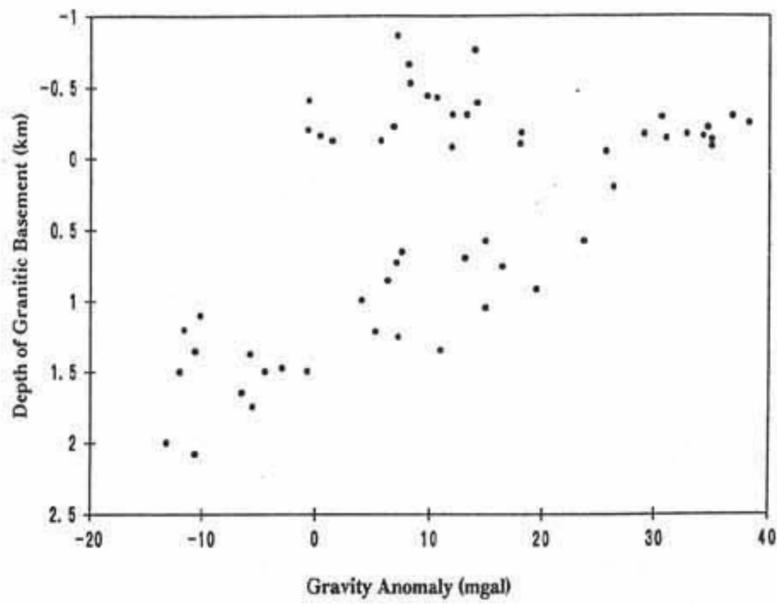
上町台地では地震による被害はほとんどなく、棚の上のものもほとんど動かなかったようである。さらに南の方では堺市や高石市に全壊家屋こそなかったもののかなりの被害が出た。これより以南では、泉大津市・岸和田市でも若干の家屋の被害が認められたが軽微であったといえる。堺方面ではやはり南北方向に被害が目立ち、浜寺船尾町あたりから東羽衣を経て加茂に至る北北東-南南西の細長いゾーン（巾2~300mで長さ約3kmにおよぶ）に被害が集中した。しかし、隣の段丘堆積物上にある家屋にはほとんどその被害が見られていない（第2.4.5図参照）。今回の地震による液状化の被害は図に示されるように、ほとんどが埋立地に代表される人工地盤域に集中していて、自然地盤域にあまり観察されていない。

今回の地震被害におけるもう一つの特徴的な分布として、断層近傍に被害が集中していることが多くの地点で観測されている。既存の複数の活断層が活動したというみかたもあるが、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多い。第2.4.4図や第2.4.5図に示されるように大阪やその周辺において、建造物の被害が周りに比べて特に大きかった所が細長く帯状の分布を示しているが、これらの被害分布を説明する可能な原因として、堆積層と基盤の形態に起因する地震波の屈折と反射の効果を挙げることができる。

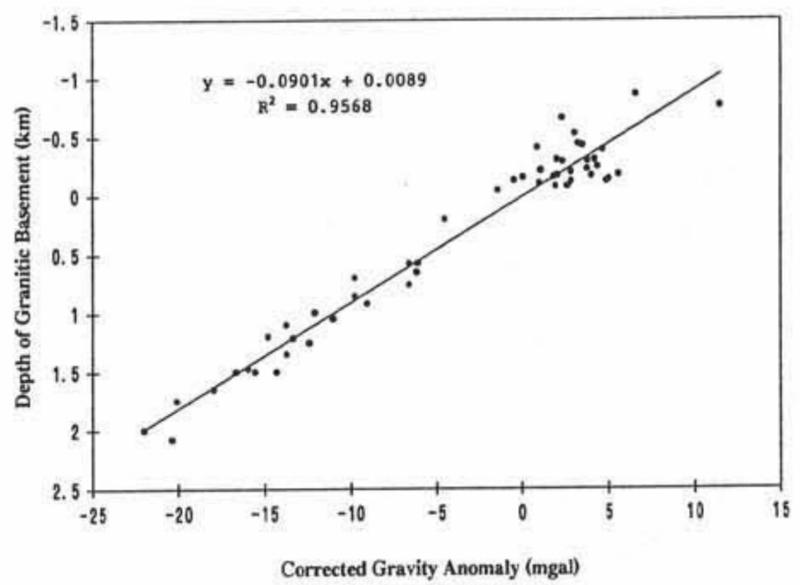
基盤構造の概略を知る手がかりの1つとして重力異常図がある。大阪平野の基盤構造の概略が最近重力異常から見積もられている<sup>17)</sup>。第2.4.6図は大阪平野を中心とした地域のブ



第2.4.6図 大阪盆地周辺のブーゲ異常の分布図（コンターの間隔は1mgal）。



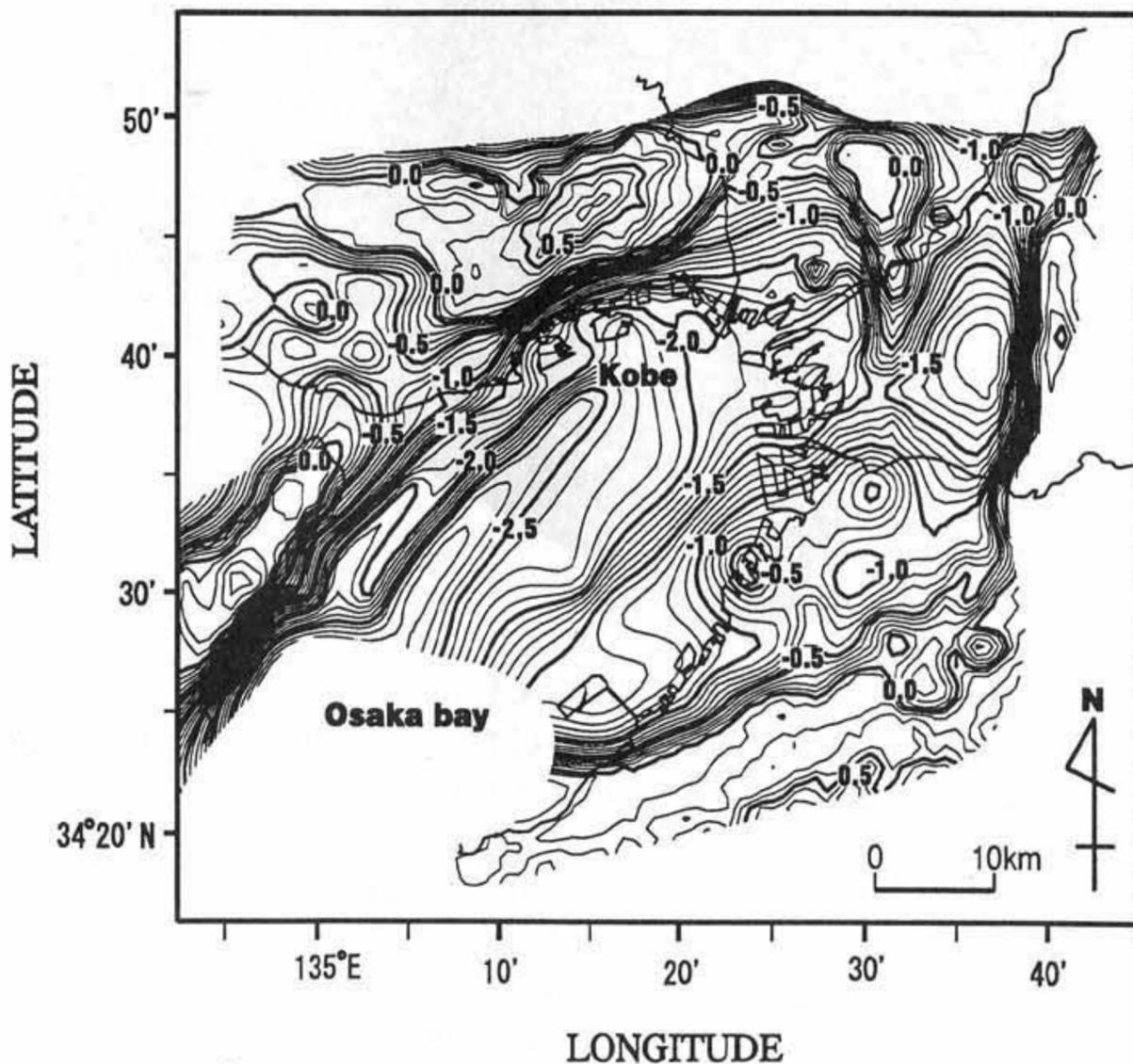
第 2.4.7 図 基盤岩の深度とブーゲ異常の関係。



第 2.4.8 図 基盤岩の深度と広域的影響を除いた後のブーゲ異常値との関係。

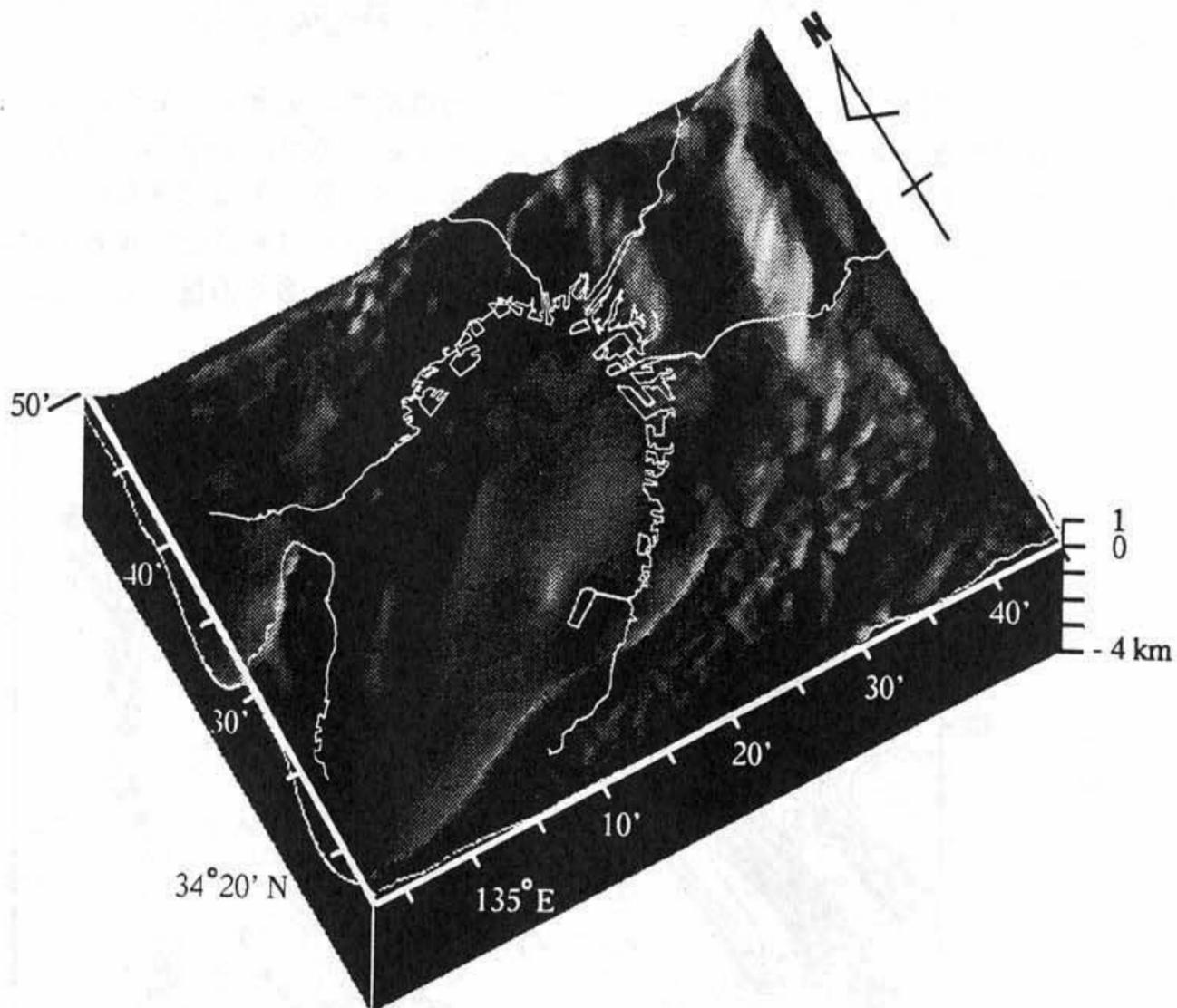
ーゲ異常図である。この図でコンターの混んでいるところは断層、主として活断層に一致していることに注意する必要がある。ブーゲ異常は地下の密度構造を反映するが、一般的な手法では重力異常図から地下構造を推定するには自由度が多く、一義的に構造決定することはできない。

しかしながら、前述したように、近畿トライアングルの地質構成はそれほど複雑ではなく、大阪平野地下の先新第三紀からなる基盤の主要な部分は花崗岩であって、多くの場合その上に 300 万年前以



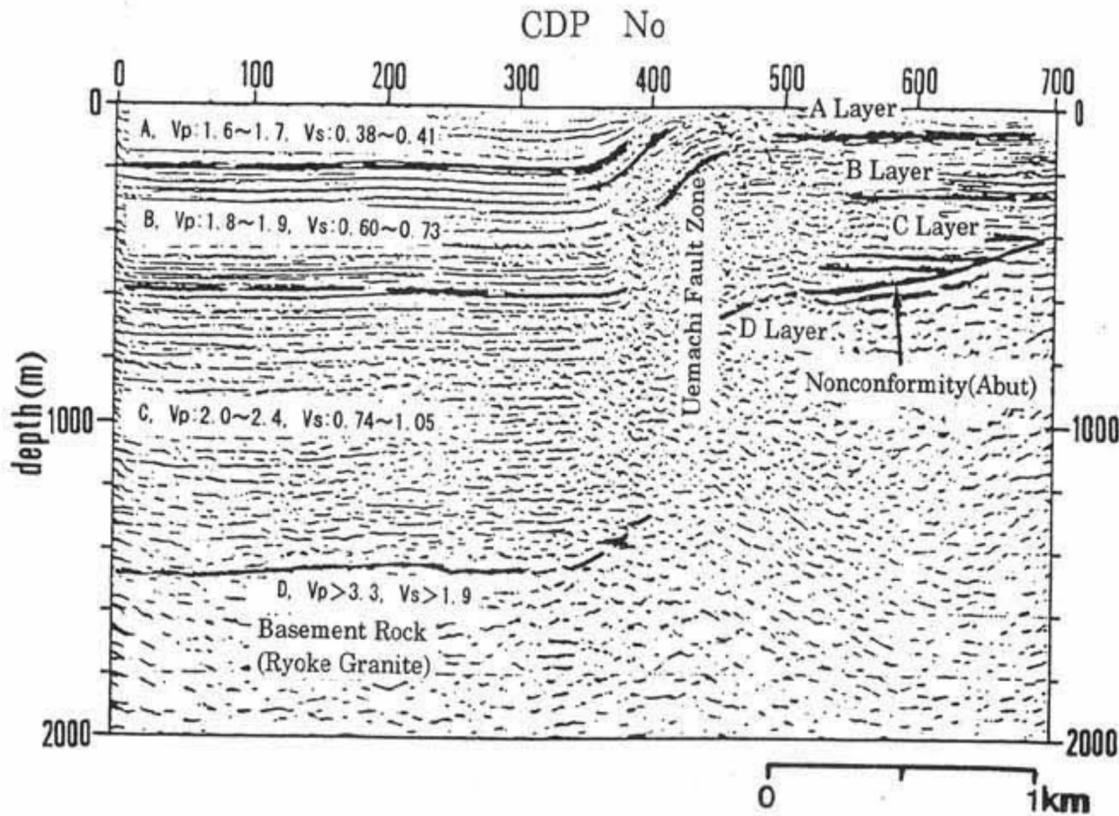
第 2.4.9 図 大阪堆積盆地の基盤岩深度分布 (単位は km)。ボーリング資料、反射法地震探査および地表調査のデータを用いて重力異常値から計算。

降の比較的軽くて軟らかい堆積物からなる地層が被覆されているために、全体として2層構造モデルを適用できることが期待される。これまで多くの反射法による地下構造探査や深層のボーリング掘削が行われて、基盤深度に関する情報がかなり得られている。これらのデータおよび地表にみられるデータと重力異常(ブーゲ異常)との間の関係は第2.4.7図に示されるようになりばらつきがあるが、これらのばらつきの大部分はより深いところの広域的な構造を反映していると考えられるために、これらのばらつきが最小になるようにして、広域的な異常を見積もった。ブーゲ異常から広域の異常を差し引けば被覆層の厚さによる異常が得られるのでこの関係を第2.4.8図に示した。したがって、通常行われる重力解析を経ずして基盤岩深度分布を得ることができるが、内捜法として実用価値があるであろう。このようにして得られた基盤岩深度分布図を第2.4.9図に示そう。なお、大阪湾内には使える重力測定値はまだない。第2.4.10図は鳥瞰図によるイメージである。ここで得られた図は断層構造を考慮していないので実際にはこれらのデータは重力3次元解析の初期モデルとして用いられることによってより信頼性のある3次元地下構造図が得られることになる。



第2.4.10図 大阪堆積盆地の基盤岩深度分布のレリーフイメージ。

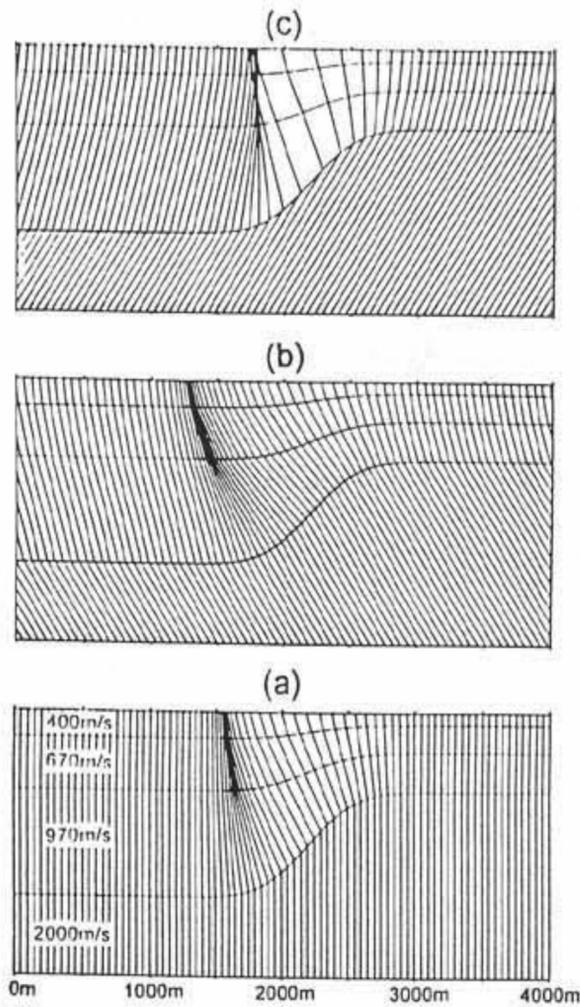
断層近傍の基盤岩形態に関連して、上町断層を横切る淀川の河川敷におけるP波とS波の反射法地震探査実験が行われている<sup>17),18)</sup>。第2.4.11図はこれらの結果について、P波断面を基に解釈を加えたものである。断層による基盤の正確な変位形態がわからないので適当に形を仮定した。第2.4.12図はその反射断面をモデルに入射角 $\alpha$ を0度、または $\pm 30$ 度のS波を入射した場合のフォーカシングの効果をみたものである<sup>19)</sup>。いずれも断層帯の西側に波線の集中するゾーンがあることがわかる。P波の場合においてもあまり違いがなく、地震波は光の場合と同様に、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。第2.4.13図は基盤にある角度で入射したSH波が被覆層内でどのように屈折するかをや、定量的に計算した結果を示したものである。(a)は同様の地下構造のモデルに、明石海峡の地下10km付近から地震波が到来したと考え、基盤への入射角を $40^\circ$ (鉛直方向から)とした場合のSH波の伝播経路を直線群で示している。境界面が湾曲していること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、真上ないしすぐ東側では波線のまばらな領域ができているこ



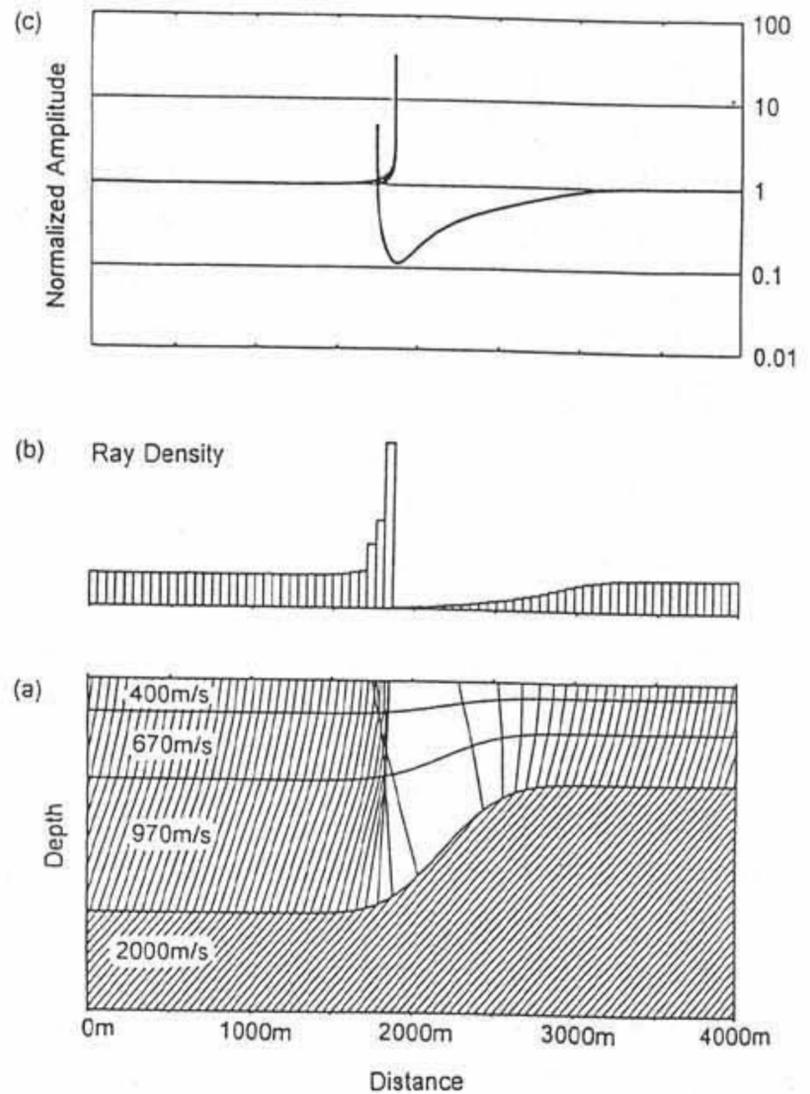
第 2.4.11 図 上町断層を横切る深度断面解釈図 (淀川河川敷における P 波と S 波の反射法地震探査の結果から)。

とがわかる。(b)は地表に到達する波線の粗密の程度を棒グラフで示したものである。図の両端の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みられる。その東側では広い範囲にわたって波の到着の少ない領域がみられる。SH 波の振幅の結果を (c)に示すが、ここでは多重反射の効果は計算されていない。基盤側で一定面積を横切る波線群は、(a)

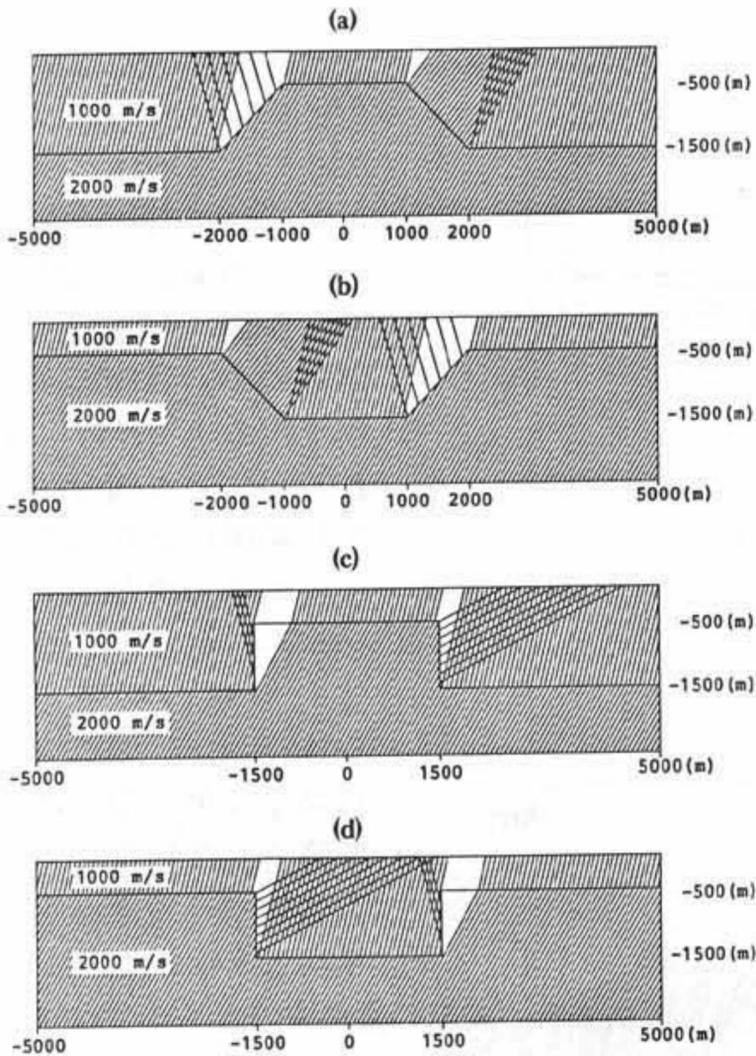
でみられるように狭い領域に集中したり、広い領域に拡大したりする。波線の集中するところではエネルギーが集中して振幅が大きくなる。逆に、波線が広がるところでエネルギーが拡散して振幅が小さくなることわかる。なお、これらの効果は波長が被覆層の厚さに比べて十分に小さい場合 (高周波に相当) に成り立つものである。



第 2.4.12 図 屈折 S 波の波線経路。速度構造は (a)に示す。入射角は (a):  $\delta = 0^\circ$ , (b):  $\delta = -30^\circ$ , (c):  $\delta = 30^\circ$ 。



第 2.4.13 図 基盤入射角が  $40^\circ$  の場合の 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。



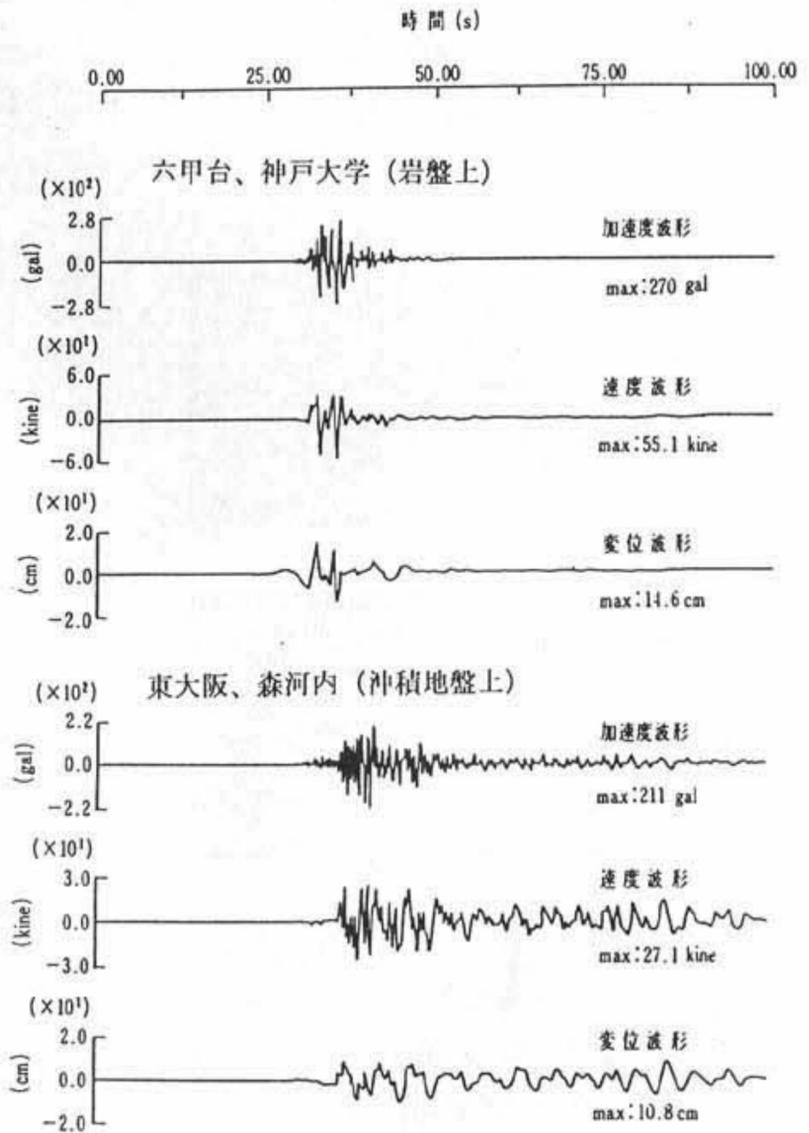
第 2.4.14 図 地溝状構造の場合の波線の集中と分散。基盤入射角:40°。

### 2.4.6 都市の震害特性

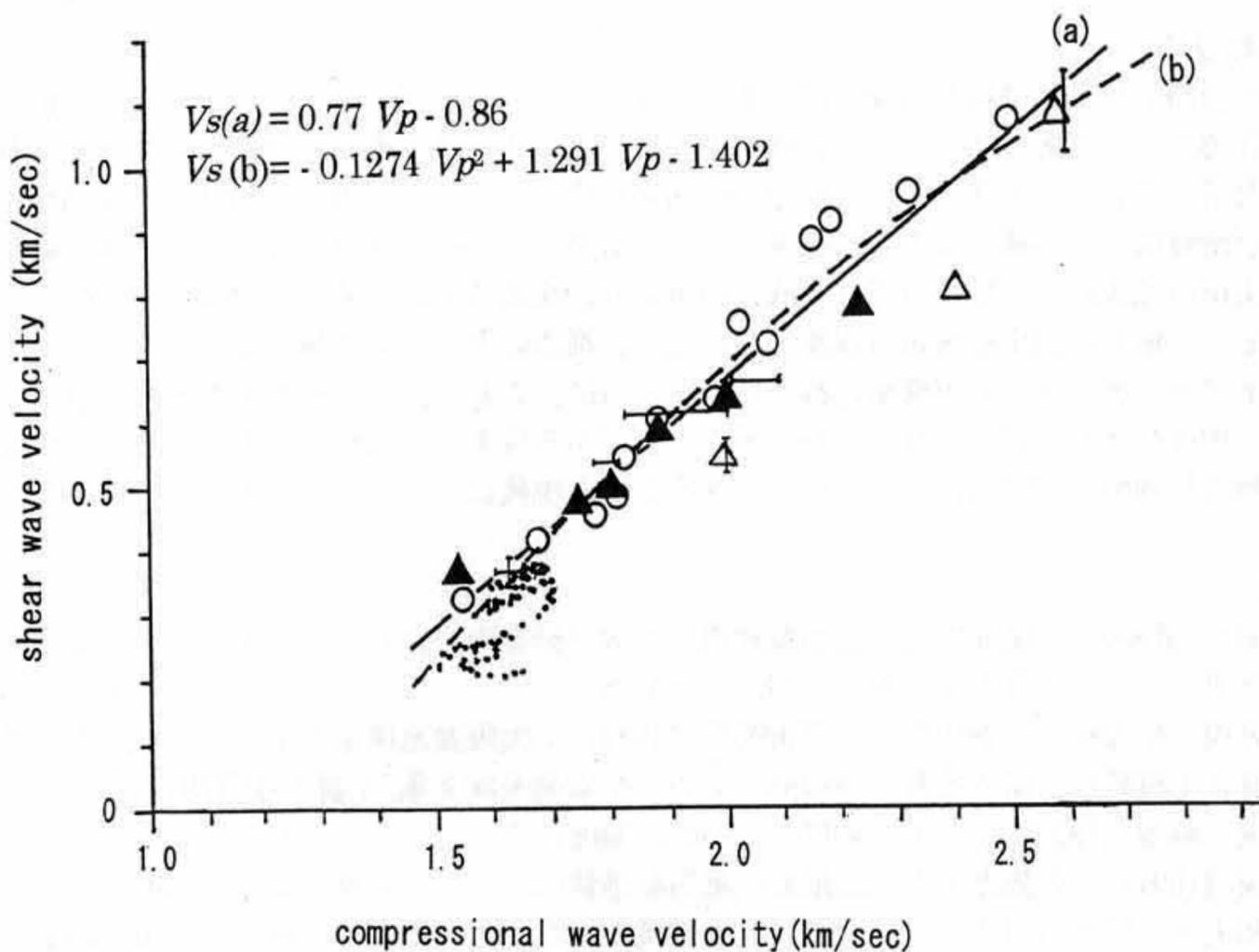
日本の主要な都市の大部分は、沖積低地と呼ばれる新しい軟弱な地層の上に形成され発展してきた。そこは都市が立地するための多くの条件が備っているからである。水平で平坦な土地、農耕に適した土壌、豊富な水資源、交通の便等が産業都市の形成に必要な要素となっていたであろう。わが国の都市地盤の大きな特徴は、日本列島自体がプレート境界に隣接していることから常時巨大地震の発生にさらされていること、隆起・沈降等の構造運動の激しい活動的な場となっており、平野内あるいは平野と丘陵・山地との境界にある活断層の活動によって、直下型地震の発生頻度も高いことが挙げられる。

大都市を載せている沖積低地は分厚い軟弱地盤からなっていて、地震工学的には地震動増幅、レンズのように地震波が集中するフォーカシングや長周期表面波による地震動が持続するなどの深刻な問題がある。さらに、旧河川の堆積物や三角州、海岸の砂からなる地盤では液状化や側方流動等の地盤災害問題が挙げられる。第 2.4.15 図は岩盤上における地震動と軟弱地盤上

グラブと呼ばれる凹地状の構造の場合、いずれの場合も凹地の中央部に波線の集中がみられ、特に垂直に近い壁をもつグラブではその中央部に激しいエネルギーの集中が予想される(第 2.4.14 図)。これは有馬-高槻構造線付近にみられる顕著な被害がこのような効果によって引き起こされた可能性が大変高いことを示している。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、特に被害が激甚であった低地の震度Ⅶのゾーンは、重力異常からみると、その下の基盤は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非常に高い(第 2.4.4、2.4.10 図参照)。このゾーンの形成がフォーカシングや全反射による影響もその一因として考えられる。ここでは重要なまとめとして、今回の地震では特に埋立て地や盛土などの人工的な地盤と深部地下構造と関連して、断層をはさんだ低地側の近傍に多くの被害が集中したことを挙げるができる。



第 2.4.15 図 岩盤上と軟弱地盤上の地震波形のちがい(関西地震観測研究協議会)。

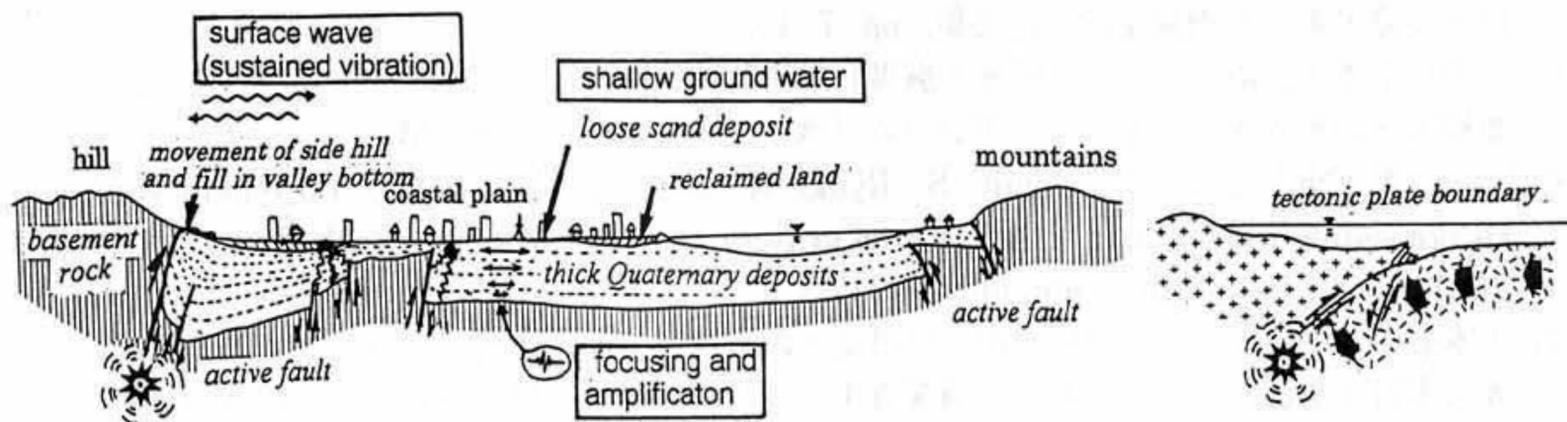


第 2.4.16 図 大阪平野における P 波速度と S 波速度の関係丸印と三角印は反射法による速度解析，線分は反射法による P 波速度と微動計測からのレイリー波逆解析による S 波速度，点は P-S 検層のデータ。

のものとの違いの例を示す。岩盤上の波形は大変単純で、短時間で振動が終わるのに対し、平野中央部の軟弱地盤上ではいつまでも振動が続いているという性質があると同時に、地震動そのものの振幅が深部の岩盤よりも増幅されて増大するという特性を持つ。

これらの地震動の予測には、地震波速度を含めた地層の物性分布が不可欠となる。陸上部でこれまで得られた反射法地震探査の結果、レイリー波の分散からの逆解析<sup>20), 21)</sup>および精密 P-S 検層の結果<sup>22)</sup>から得られた縦波速度と横波速度の関係を第 2.4.16 図に示した。通常の P 波による反射法地震探査の結果から横波速度分布を見積もるときに参考になるであろう。

日本の大都市を構成している自然の地盤は大きな地震災害に見舞われやすい性質があることを述べたが、今回の地震では、さらに人工的な地盤に重大な被害が集中した。都市が発達すると人口が増え、住み心地のよい便利な土地が不足するために、多くの土地が造成されてきた。海や湖が干拓され、河川や池も埋立てられ、さらに丘陵や山地が開拓され広い盛土地盤が形成されてきた。阪神地区はこれの典型的なところである。今回の地震ではこのような人工地盤におびただしい液状化、側方流動、地すべりや崩壊、大規模な亀裂の発生、振動の増幅などによるいろんな地盤災害が集中した。第 2.4.17 図に典型的な都市地震動被害要素についての例<sup>23)</sup>を模式的に示す。



第 2.4.17 図 都市地盤構造と震害要素<sup>(25)</sup>。

#### 2.4.7 おわりに

「阪神・淡路大震災」は典型的な都市直下型地震によって引き起こされたものである。地震そのものはごく普通のものであったが、都市特有の地盤構造と都市の構造そのものによって、未曾有の都市災害につながっていったと結論づけられる。今回の地震によって、日頃の防災意識の高揚をはじめ、活断層及び地盤構造の詳細な調査、各種構造物の設計基準の的確な見直しなどが最重要な課題となって浮かび上がってきた。関西地方では平成元年頃より、全国でも珍しく、自治体、公営企業、大学などが協力して、地下に関する情報の収集にのりだし、都市防災のための貴重なデータベースや地震動観測ネットワーク・システムが構築されている。さらに、これを活用するための各種の研究協議会が結成され、地道な活動が続けられるなか、多くの価値ある成果が得られている。この度の貴重な教訓を今後の都市計画や都市防災に十分に活かすことが現代に生きる私たちの責務であろう。

#### 引用文献

- 1) 中川康一 (1990) : 関西の大深度地盤調査—大阪平野を中心にして—, 関西の大深度地盤特性講演シンポジウム, 土質工学会関西支部, pp.63-88.
- 2) 岩崎好規・松山紀香・香川敬生・澤田純男 (1992) : 大阪盆地構造とその形成史, 関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集, 土質工学会関西支部, pp. 119-126.
- 3) 市原実 編著 (1993) : 「大阪層群」, 創元社 340p.
- 4) 市原実 (1991) : 大阪とその周辺地域の第四紀地質図, アーバンクボタ, No. 30.
- 5) 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.
- 6) 佐野正人 (1980) : 奈良盆地北部の地質構造, 奈良～京都地域の開発と応用地質学的諸問題, 日本応用地質学会関西支部, pp. 13-25.
- 7) 活断層研究会 (1980) : 「日本の活断層」, 東京大学出版会, 439p.
- 8) 岩崎好規・香川敬生・澤田純男・松山紀香・大志万和也・井川 猛・大西正純 (1994) : エアガン反射法地震探査による大阪湾の基盤構造, 地震, 2輯, 46巻, pp. 395-403.
- 9) Tsuneishi, Y. (1978) : Geological and Experimental Studies on Mechanism of Block Faulting, Bull. Earthq. Res. Inst., vol. 53, pp. 173-242.
- 10) 大阪湾海底地盤情報の活用に関する研究委員会 (1995) : 「海底地盤—大阪湾を例として—」, 406p.
- 11) 岩瀧洋・春日茂・打田明雄・穀田昇一・沖野郷子・志村栄一・長田智 (1995) : 兵庫県南部地震震央域周辺の活断層と海底変動, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, pp. 85-90.
- 12) 吉川宗治・町田義之・寺本光雄・横田裕・長尾英孝・梶原正章 (1987) : 反射法地震探査による大阪市内の深部構造調査, 地震学会講演予稿集, No.2, B31, pp. 114-119.
- 13) 関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会 (1992) : 関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集, 土質工学会関西支部, 160p.
- 14) 多田堯 (1995) : 1995年兵庫県南部地震の地殻変動と測地学的断層モデル, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, pp. 7-10.
- 15) 三田村宗樹・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団 (1995) : 1995年兵庫県南部地震による地盤被害と地形の人工改変, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, pp. 209-214.
- 16) Inoue, N., Nakagawa, K., Senda, S., Ryoki, K., and Shichi, R. (1995): Basement structure of Osaka sedimentary Basin inferred from gravity anomaly, abstract, Tech. Prog., on Int. Assoc. Math. Geol., 1995 Ann. Conf., pp.245-247.
- 17) 山本栄作・中川康一・三田村宗樹・戸田茂・西田智彦・寺田祐司・宇田英雄・横田裕 (1992) : 大阪平野中央部における反射法地震探査 I—淀川 (十三～柴島) 測線—, 平成4年度研究発表会

講演論文集, 日本応用地質学会, 185-188.

- 18) 中川康一・三田村宗樹・原田俊之・白方邦博・横田 裕(1993): 大阪平野におけるS波バイブロサイス地震探査, 物理探査学会第88回学術論文集, 418-423.
- 19) Shiono, K., Nakagawa, K., Mitamura, M., Masumoto, S., and Irikura, K.(1995): Focusing of seismic ray along the Uemachi fault, - Damages in Osaka area caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquakes and subsurface geologic structure, Jour, Phys. Earth(submitted).
- 20) Horike, M. (1985): Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the s-wave velocity structure down to the basement in urbanized area, Jour. Phys. Earth., Vol. 33, pp. 59-96.
- 21) 青木義彦・尾崎昌弘・辻本厚詞・堀家政則・竹内吉弘 (1990) : 大阪平野のS波速度構造推定, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 341-344.
- 22) Iwasaki, Y., (1988): In-situ seismic velocity and its relationship with soil characteristics in Osaka Bay, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, Geotech. Special Pub. No. 20, ASCE, pp. 290-304.
- 23) Nakagawa, K., Mitamura, M. and IWASAKI, T.Y. (1995) : Influence of ground characteristics on shaking and liquefaction resistance in major cities in Japan.-Geological condition and geotechnical problem of subsurface formation and their relation to seismic hazard in the alluvial Plain-, Outline of papers of the 4th Japan/United States Workshop Urban Earthquake Hazard Reduction , pp.259-262.