汚水枳の水平剪断から推定した 1995 年兵庫県南部地震による神戸市街地の 撃力分布*

Distribution of impulsive force from deformed house inlets in Kobe during the 1995 Southern
Hyogo Prefecture Earthquake*

Abstract

苦瓜泰秀* 宮田隆夫**

Yasuhide Nigauri and Takao Miyata***

1997年7月17日受付.

1997年11月25日受理

* 神戸大学大学院自然科学研究科地球惑星科学専攻.

Division of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science and Technology,
Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku,
Kobe 657-8501, Japan

** 神戸大学理学部地球惑星科学科.

Department of Earth and Planetary Sciences,
Faculty of Science, Kobe University,
Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-8501,
Japan

The 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake (MJMA 7.2) hit an urban area between Kobe and Osaka where the strong disaster took place. We investigated the co-seismic dislocation of the 1,277 house inlets, having an inside diameter of 35 cm, within the urban area of Kobe in order to determine the orientation of ground motion and the degree of impulsive force inferred from them. We obtained (1) the remarkable orientations of northwest-southeast perpendicular to the northeast-striking fault, and (2) the characteristic pattern, distributing as spots and lines, of large impulsive force. These orientations support the right-lateral fault movement beneath the urban area of Kobe. On the other hand, whereas the spots were found on valley floors, back marshes, deltas and mountain slopes, the lines appeared on the present and old channels and the southwestward extension along the known active faults in the Rokko mountains. Some of the latter were confirmed beneath Kobe by the reflection seismic surveys of Hyogo Prefecture and others after the earthquake. To investigate co-seismic dislocated house inlets is significant in understanding the strong motion and the subsurface fault movement of the urban area.

Key words : the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake, ground motion in the urban area of Kobe, subsurface horizontal shear from deformed house inlets, impulsive force

はじめに

「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」は、1995年1月17日午前5時46分頃、明石海峡の地下16kmを震源(気象庁, 1997)とし、マグニチュード(MJMA)は7.2であった。この地震による被害は甚大で、6,400名を超える死者を出し、ライフライン・交通網の破損など長期にわたって都市の機能を麻痺させた。

本震発生から10時間以内の余震(根本ほか, 1995)は、本震の震央の北東側約30kmから、南西側約20kmにわたって帯状に分布している。また、本震の発震機構は東西圧縮下での横ずれ断層型を示している(吉川・伊藤, 1995)。この2点より震源断層は北東-南西方向の右横ずれ断層であると推定された。その方向の右横ずれ変位を示す地震断層は淡路島に確認されたが(中田ほか, 1995)、神戸側には明瞭な地震断層は現れなかった。

菊地(1995a)によると、遠地実体波の解析から震源過程は

3つのサブイベント(明石海峡直下と神戸側に2つ)に分けられ、断層破壊は、明石海峡から北東と南西の両側に進み神戸側ではさらに2つのサブイベントが発生したと考えられている。一方、入倉(1995)は強震動記録の線形波形インバージョンの解析にもとづいて、3つのサブイベント(明石海峡直下と淡路島の浅いところ、および神戸側のやや深いところ)が生じ、断層破壊が震源から淡路方向(南西方向)に約20kmおよび神戸方向(北東方向)に約30km伝播したと推定した。両者の解析は神戸の直下で断層破壊が生じたことを示している。

阪神地域に震災の帯(神戸市から芦屋市・西宮市にかけて分布する幅約2kmの带状被害集中域、嶋本, 1995)をもたらした原因については、(1)市街下の伏在断層の活動(例えば、嶋本, 1995; 池田ほか, 1995; 前田・宮田, 1995; 宮田・前田, 1996; 平野・波田, 1996)、(2)地形と地盤の違いによる地震動(例えば、吉岡ほか, 1996)、(3)地震波のフォーカシング(例えば、中川ほか, 1995; 入倉, 1995; 林・川瀬, 1996; 源栄・永野, 1996)と3つの主要要因が考えられている。さらに(1)の本地震で活動した伏在断層については、「震災の帯」

* 日本地質学第103年学術大会(仙台, 1996)、日本地質学会第6回環境地質学シンポジウム(東京, 1996)にて一部講演。

Fig. 1. Location map. a) Location of the study area. b) Position of examined house inlets. Dots indicate house inlets. a~d: Location of house inlets in Fig. 3.

の真下の活断層（あるいは活撓曲）（例えば、嶋本，1995；池田ほか，1995；渡辺・鈴木，1996）と，複数の既存の活断層を南西方向に延ばしたもの（例えば，宮田・前田，1996；平野・波田，1996；横倉ほか，1997）との大きく2つの見解がある。「震災の帯」における被害の様子は必ずしも一様ではないので，この地域の詳細な地震動の分布を明らかにしていく必要がある。

他方，市街地の地盤に関する地震被害の要因として液状化が指摘されている（例えば，Hamada et al., 1995；楡井ほか，1996；藤田ほか，1996）。Hamada et al. (1995) によると，液状化に伴う大規模な地盤変状は，大部分明治後期～大正期の旧海岸線よりも南のより新しい埋め立て地に発生した。さらに，楡井ほか（1996）・藤田ほか（1996）は液状化・流動化現象が主に旧海岸線（1885年の海岸線）から海側の埋め立て地だけではなく，旧河口や河川下流の一部水域や池を埋め立て

た地域や自然堤防斜面，旧河道，盛土の地域で引き起こされたことを指摘した。著しいライフラインの被害の解析は，地盤の液状化・流動現象を明らかにするうえでも重要である。

兵庫県南部地震による被害の分布を客観的に表すには，規格が一定でかつ数多く分布する素材を計測する必要がある。このような観点から，神戸市街地に広く分布する本地震で変形した汚水樹を選んだ。我々は，主に1995年10月から神戸市内（Fig. 1）に分布する汚水樹1,277個を調べて地表部に加わった衝撃力の程度を明らかにしたのでここに報告し，さらにその分布特性を地形・地盤の影響と断層運動の両面から考察する。汚水樹は地震後ライフラインの修復が進められるなかで，修復に時間がかかり，地震後しばらくたってからでも地震時の変形を調べることができた。汚水樹のほかにもマンホールや井戸が著しく変形した（神戸市下水道局，1995；藤田ほか，1996）が，広域的に解析されるには至っていない。

Fig. 2. a) A structure of house inlet. b) Model of horizontal shear for a house inlet. Δp : Impulsive force, A, ρ : Area and density of back filling, d : Depth between the ground surface and shear surface, s : Dislocation amount of a house inlet. The upper part moved s at the depth d due to Δp .

汚水樹の変形

神戸市の内径 35 cm の公道用汚水樹は、一部の地域（例えば、湾岸地域の工業地帯や三宮の南側など）を除いてほぼ市街地全域に分布している。この汚水樹は各家庭からの汚水が下水道の本管に流れ込む途中に設けられている。鉄製の蓋がしてあり、中は厚さ 3.2 cm のコンクリート製の管を鉛直方向に積み重ねた構造である (Fig. 2a)。汚水樹の管は、上部（長さは設置条件によって異なる）と、下部（長さ 38.5 cm）に分かれる。汚水樹の最下部には下水管および各家庭につながる取付管が接続してある。汚水樹を構成する管のジョイントは、モルタルで接続されているので、地震動のような強い衝撃が加わると容易にずれる構造をしている。Fig. 3a は変形していない汚水樹を上から見たものである。

我々が測定した汚水樹の変形は、上部と下部の管の間のずれである (Fig. 3b)。Fig. 4 は測定した汚水樹のずれの大きさを、深さの区分ごとに記号をかえて示した。ずれの量は平均で 1.3 cm であり、最大は 10 cm であった。なお、ずれしている上部-下部接合部の深さは 40~60 cm が多い (Fig. 5)。中には汚水樹の管が割れて破壊されているもの (Fig. 3d) もあり、大きな衝撃力が加わったことが予想される。しかし、汚水樹が変形を起こした深さは一様ではなく、ずれの量だけで衝撃力の大きさを比較することは困難であるので、本論では次章で述べる解析方法を使って、汚水樹の変形を評価した。

なお汚水樹のほかにもこの近傍の井戸で、井戸を構成する円筒状の枠がずれた変形を観察することができた。したがって、汚水樹に見られた変形は、単に汚水樹だけではなく、汚水樹、井戸を含む土塊の変形としてとらえる必要がある。しかし、変形した井戸は数は少なく、定量的かつ広域的な解析には至らなかった。

解析方法

地震時に水平剪断を受けて、汚水樹はその周辺にある土塊とともに変形したとみなされる（例えば、横山ほか, 1997）ので、まず汚水樹を含む土塊の水平剪断を静的な変形モデル

で考える。土塊に水平な剪断応力 (σ_s) が作用すると、地表における剪断歪 γ が深さ D でゼロとなる剪断変形が引き起こされる。この場合、土塊の剛性率を G とおくと、剪断応力は $\sigma_s = G \cdot \gamma / D$ で表わされる。しかし、ここでは D をそれぞれの水平剪断を受けた汚水樹で決定することは困難であり、かつ、兵庫県南部地震において神戸市街地に短時間にパルス状の震動が作用したと指摘されている（頼綱, 1996）ので、次のような動的な変形モデルを考えた。

Fig. 2b は汚水樹を中心としたある大きさの系を示す。この系において、汚水樹とその周辺にある土塊をとともに動かし、汚水樹（内径 35 cm）とそれを取り巻く埋め戻し土の領域（直径 70 cm）にずれをもたらした水平力 (F) を考える。水平剪断は汚水樹のつなぎ目に発生しているので、剪断面の上部および下部にある汚水樹と埋め戻し土をそれぞれ上部構造、下部構造と呼ぶことにする。上部構造が動く直前の水平力の釣り合いを考えると、水平力は $F = cA + \mu mg$ と表わされる。ただし、 c は汚水樹および埋め戻し土の強度定数（強度定数は、圧縮力が作用しないときでも存在する接触面に沿った単位面積当たりの接着力）であり、 μ は埋め戻し土（砂・礫）の摩擦係数（約 0.7, 嘉門・浅川, 1988）、 g は重力加速度である。 A は汚水樹の設置に必要な面積（直径 70 cm の円）から樹の空洞部の面積（直径 35 cm の円）を差し引いた面積 ($2.9 \times 10^3 \text{ cm}^2$) であり、 m は移動した上部構造に相当する汚水樹および埋め戻し土の質量である。汚水樹は上部の管と下部の管とがモルタルで接続されているので、その結合力は無視でき、またその周囲は砂・礫からなる接着力のない埋め戻し土なので $c=0$ と近似できる。したがって、 F は μmg で表わされる。

ここで水平力 (F) の大きさを直接求めたいが、 F は時間の関数であり、その時間についての情報が得られないので難しい。しかし水平力の時間変化が明らかになっていない場合でも、 F が加わる前後の汚水樹の状態を測定すれば、運動量の変化である力積 (Δp) を使って議論することは可能である。力積は力が時間 $t=0$ から $t=\tau$ まで加わったとすれば、

$$\Delta p = \int_0^\tau F(t) dt \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 3. Photographs of house inlet. The inside diameter is 35 cm. a : undeformed, b : deformed at the joint, c : deformed at the head and the joint, d : destroyed.

Fig. 4. Original data of deformed house inlets.

Fig. 5. Frequency histogram of depth of dislocated house inlets.

で与えられる。我々は汚水桝の変形を起こした力を力積〔(1)式において $\tau \rightarrow 0$ 〕に換算して、汚水桝の変形を評価した。なお極めて短い時間 τ に加わった力積は、撃力 (impulsive force) と呼ばれる。力積 (Δp) は運動量の変化であるから、上部構造の質量 (m) と与えられた初速度 (v_0) の積で表される。さらに変位量を s とすると、エネルギーと仕事の関係 ($1/2 m v_0^2 = \mu m g s$) より、

$$\Delta p = m v_0 = m \sqrt{2 \mu g s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。(2)式において、汚水桝の蓋の質量は ($0.18 \times 10^5 \text{ g}$) で、埋め戻し土の質量に比べて十分小さいので、 m は汚水桝および埋め戻し土の体積と密度 ($\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$) の積で近似できる。さらにその形状が管状であるので、体積は汚水桝の設置に必要な面積 (A) と地表面から汚水桝がずれた面までの深さ (d) の積で表わされる。したがって、 m は d に比例し、 d によって m の値が異なる。例えば、 d が 30 cm の場合には $1.7 \times 10^5 \text{ g}$ 、また d が 60 cm の場合には $3.4 \times 10^5 \text{ g}$ となる。

次に、(2)式の重力加速度 (g) は一般に上下動によって変化するので、神戸海洋気象台、本山、尼崎で観測された地震波形データ (岩崎, 1995; 気象庁, 1996) を用いて、上下動の与える影響を考察する。水平動の変位記録において最大のパルスが現われている時に汚水桝が変形したと仮定すると、その時における上下方向の加速度は、どの地点も 200~250 ガルの範囲に含まれている。また、岩崎 (1995) によると、震源域近くでは強震動特性に硬質地盤 (段丘) と軟弱地盤 (沖積低地) の最大地震動としての差が余り認められないので、ここでは上下動が汚水桝の変形にもたらした影響は調査地域において一様であるとして、解析を進めた。

以上のように ρ , A , μ は個々の汚水桝においてほとんど一定とみなすことができるので、結局、 Δp はずれた面までの

Fig. 6. Plots of depth (d) versus dislocation (s) of house inlet. ●: Deformed joint. ○: Deformed head. Hyperbola: Relationship of depth (d) and dislocation (s) under the same values of impulsive force. Shaded zone: Movement range of subsurface material assumed from the dislocated house inlets.

深さ (d) と変位量 (s) の平方根の積 ($d\sqrt{s}$) に比例する。 $d\sqrt{s}$ は、汚水桝の上部構造にかかった単位面積当りの撃力の程度を示していることになり、系の大きさには依存しない。これは同じ撃力が加われば浅いものほど大きくずれることを示しており (Fig. 6)、蓋の部分の大きなずれ (Fig. 3c) と調和している。本論文では、汚水桝の規格が一定であるので、 $d\sqrt{s}$ によって、撃力 (Δp) の値を比較した。

結 果

1,277 個の汚水桝を調査した結果、変位が確認されたのは 592 個である。Fig. 7a は汚水桝が受けた撃力を 500 m 四方ごとに平均して数値計算によってコンターを描かせた図である。一方、Fig. 7b はより詳細な分布を見るために、Fig. 7a を参考にしながら隣り合う汚水桝間の撃力の数値は線形に変化するとして、描いたコンターマップである。

Fig. 7a. Impulsive force map, averaged every 500m square. Figures in a legend are the range of $d\sqrt{s}$ [$\text{cm}^{3/2}$] which is in proportion to the impulsive force. d : Depth of dislocation of house inlet from the ground surface, s : Dislocation amount of house inlet. Fault lines are ones shown by Huzita and Sano (1996).

まず撃力の分布の特徴について述べる。本地域の山地と海岸の間には、震災の帯が中央区の一部を除き連続して横たわるが、汚水樹の変位の調査から推定される撃力の分布は震災の帯の中で一様ではなく程度に差があることを示している。神戸市西部では撃力の大きいところは点々と分布する。その分布の延びの方向は山麓に平行である。神戸市東部は全体に数値が大きく、その分布は複雑な形状をしている。撃力が大きいと判断された汚水樹が集中する地域には次のものが挙げられる (Fig. 7b)。西部地域では山陽西代駅とJR 新長田駅周辺 (Fig. 7bの地域1) 会下山町周辺 (地域2) である。東部地域では、JR 灘駅周辺から北東に延びる地域 (地域3)、都賀川河口からJR 六甲道にかけての地域 (地域4)、田中町周辺 (地域5)、魚崎周辺 (地域6)、深江北町周辺 (地域7) がある。

また、 $d\sqrt{s}$ の数値が $100 (\text{cm}^{3/2})$ 以上の汚水樹の下部構造に対する上部構造の動いた方向をまとめると Fig. 8 のようになる。Fig. 8 から汚水樹の動いた方向は北西方向が最も卓越し、これ以外にも南東方向や北東方向、南西方向が卓越する。

考 察

1. 撃力のスポット状分布と地形・地盤

撃力の数値が大きかった地域と地質・地形との関係を考察する。その前に、本調査地域の地質と地形の概要について述べる。

藤田・笠間 (1983, 1984) によると、本地域の地質は大阪層群のほかに、神戸層群、上部洪積層、沖積層、埋め立て土砂などから構成される。神戸層群は、調査地域西部の山麓にごく限られて分布し、主に泥岩層、砂岩・礫岩層、凝灰岩層からなる。大阪層群は、六甲山地の山麓線に沿って高位段丘面を形成し、主に砂礫層、砂層、シルト・粘土層からなり、火山灰層および泥炭層をはさむ。中位段丘層は更新世後期の海進にともなう海成粘土層 (Ma12) とその後の海退に伴う非海成の砂礫層からなり、シルト層、粘土層などをはさむ。低位段丘層も同様に主に砂礫層からなり、シルト層、粘土層、始良火山灰 (AT) 層などをはさむ。沖積層は海岸平野を広く覆って分布し、主に粗粒の陸成堆積物 (砂礫層) や、完新世の海進に伴い汀線付近に堆積した砂質粘土層、縄文海進の海面上昇によって形成された粘土層、その後の海面の低下に伴い陸上河川から流入し、汀線付近に堆積した砂層からなる。さらに、山と海が近いこと、複数の小規模な河川から押し出された扇状地堆積物・土石流堆積物と沖積層とが複雑な指交関係を示すのが特徴である。

六甲山地南麓を北東-南西方向に走る活断層として、須磨断層、諏訪山断層、会下山断層、五助橋断層、芦屋断層、甲陽断層などが知られている (例えば、藤田・笠間, 1983; 藤田・笠間, 1984; 藤田・佐野, 1996)。それらの断層で区切られた花崗岩の基盤からなる断層地塊は相対的に南東側が落ち、花崗岩の基盤の上に主に大阪層群や沖積層が厚く堆積しているため、不整形地盤 (例えば、源栄・永野, 1996) と呼

Fig. 7b. Impulsive force map. White rectangular: Area of high impulsive force.

Fig. 8. Orientation of house inlet dislocation. Data are the direction of dislocated house inlets, showing the impulsive force of more than 100 ($\text{cm}^{3/2}$).

ばれてる。

他方、吉岡ほか（1996）によると、神戸の市街地の地形（Fig. 9）は、北の主に花崗岩の基盤からなる六甲山地と、その山麓に形成された更新世後期の扇状地段丘、完新世扇状地、後背湿地・三角州、自然堤防などで特徴づけられる。またこれらは国土地理院（1965, 1966）の、沖積段丘、扇状地、扇状地性低地、自然堤防にそれぞれ当たる。さらに、上記の扇状地には浸食作用により削られた部分があり、国土地理院（1996）や田中・沖村（1996）は、旧河道や谷底平野として詳細に示した。このような地域は、砂・シルト・粘土などの細粒の堆積物からなり、地層の圧密が進んでいない（田中・沖村, 1996）、軟弱地盤地域を形成している。

地域1は、2つの扇状地の末端部にあたる。そのうち撃力の数値が80以上となる所は、吉岡ほか（1996）の区分した2つの完新世扇状地の末端部に位置し地盤は良いとはいえない。またこの場所は明治18年の地形図に基づく、池と水田で軟弱地盤地域である（田結庄, 1995）。地域2は、一般に地盤は良いが、高位扇状地段丘として周囲より起伏をもつ地形をなしているため、震動が増幅された可能性がある。地域5は周囲を完新世扇状地に囲まれている。さらに住吉川と天上川の旧河道がいくつも完新世の扇状地を開析している。地域6は後背湿地と扇状地の末端部で、地下水位が高いことが予想される。楡井ほか（1996）によれば地域6の東半分において地盤の液化化が起こったとされている。以上のように、地域1, 2, 5および6の大きな撃力の原因は、主として地形・地盤の影響が大きいと推定される。

一方、地域3, 4は、扇状地や自然堤防にあたる。一般に扇状地や自然堤防は地盤は良い。地域3は低位扇状地段丘上に位置し、そのうち数値80以上の所は、扇状地に刻まれた開析谷の分布とほぼ一致している。さらに地域3の数値40以上の北東-南西方向の分布形状は地形区分とは斜交している。地域4の特に数値の大きい所の分布は、後背湿地や、開析谷の分布に類似しているが、自然堤防の上でも数値が大きい。地域3, 4の大きな撃力の原因は、地域3の地形区分に沿わな

い撃力の分布や、地域4で地盤が良いとされる自然堤防の上でも撃力が大きいことから、地盤・地形の要因だけで説明するのは困難である。

地域7は、Fig. 9では完新世扇状地と区分され、また国土地理院（1996）では晩氷期後の扇状地と氾濫平野・海岸平野と区分されているが、藤田ほか（1996）では自然堤防間低地と区分されており吉岡ほか（1996）とは評価が異なる。このように地形区分が異なっているので、撃力と地盤の関係についてはさらに検討を加える必要がある。

2. 撃力の線状分布と伏在断層との関係

Fig. 7bにおいて、数値が40以上撃力の分布を見てみると、線状につながったものが見られる。その伸びの方向は、北東-南西方向（例えば、地域3、御影山手とその南西方向にあたる地域、住吉南町とその北東方向にあたる地域）、南北方向（例えば、都賀川、住吉川、天上川に沿う地域）、北西-南東方向（例えば、地域5から北西に伸びる地域）がある。このような線状の分布を示す要因として、断層、河川、旧河川のような線状の地質、地形条件が考えられる。上にあげた地域3を除く北東-南西方向の線状分布と、南北方向の分布は、河川や旧河道の分布（田中・沖村, 1996）によく調和している。

兵庫県南部地震後、反射法地震探査等で明らかとなった神戸市街地の伏在断層（藤田・佐野, 1996）をFig. 7a上に示した。宮田・前田（1996）も同様な走向の伏在する断層が存在する可能性を指摘している。それらの伏在断層の地表への投影位置は、平野・波田（1996）が示した断層位置とは、一致する部分もあるが、位置のずれた部分も見られる。Fig. 7bの地域3は、反射法地震探査（遠藤ほか, 1995；藤田・佐野, 1996）によって、五助橋断層の南西方向に伏在断層が存在することが明らかとなった。撃力が大きい所は五助橋断層（渦ヶ森断層に伸びる：杉村, 1981による）の南西延長に沿って出ているように見える。地域3のなかで数値が40以上の撃力の線状分布は、Fig. 9に示した地形区分と斜交している。

一方、甲陽断層については、系統的な右横ずれ変位が見られたこと（平野・波田, 1996）、電柱の倒れ方（宮田・前田, 1996）、ガンマ線探査（藤谷, 1996）、反射法地震探査（遠藤ほか, 1995）などに基づく甲陽断層が南西方向にさらに伸びている可能性が高く、その伏在断層は地域7を通る位置と推定される。甲陽断層の南西延長の伏在断層に沿って、撃力が大きく出ているように見える。南東-北西方向の線状分布は、共役断層（平野・波田, 1996）と平行しており、これらと関係があるのかもしれないが、共役断層についての深部の情報がまだ十分得られていないので、今後の課題である。

撃力が大きなところの分布と、平野・波田（1996）が示した北東-南西方向の複数の断層とは、一部では一致しているが、数100m位置がずれているところも見られる。宮田・前田（1996）によると、電柱が大きく傾いた場所が、六甲山から伸びる活断層の神戸市街地への南西延長上や、それに平行する北東-南西方向に線状に複数現れている。また、北海道大学が開発した方法を応用してアンケート調査によりまとめ

Fig. 9. Topographic division map of the Kobe-Ashiya area, modified after Yoshioka et al. (1996). Rectangular : Area of high impulsive force in Fig. 7 b.

られた震度分布図（高田，1996）において，調査密度の濃い東灘区の震度7の分布が北東-南西につながるのが見られる。上記の汚水樹の変形から推定される撃力の線状分布は，このように異なったものを対象とした調査でも類似した傾向として現れている。

3. 汚水樹のずれの卓越方向と地震動との関係

Aki (1968) 以来，直下で横ずれの断層の破壊が進行した際に伴う，地表における地震動の変位は，断層に直交する成分が大きいことが判明してきている。額額（1996）は，兵庫県南部地震のような横ずれ断層の破壊による地震では，震源断層近傍において，断層破壊の伝播に伴う地震動の指向性の効果により，断層に垂直な震動が卓越することを示した。今回の兵庫県南部地震の震源メカニズムは遠地実体波のインバージョンによって明らかになり，神戸市街の直下にあたる第3サブイベントの震源メカニズムは右横ずれである（菊地，1995 a）。さらに菊地（1995 b）はコンビニエンスストアの防犯カメラのビデオ映像の解析により，神戸市街地では，地面はまずS波の到着により北西方向に動き，続いて断層の動きを反映して北東方向（A型）あるいは南西方向（B型）に動いたことを明らかにし，地下に右横ずれの断層破壊が北東方向に進行したと指摘した。そして震源断層は，A型の動きを示した位置と，B型の動きを示した位置の間を通ると推定され，北東から東北東の走向をもち，中央区の中山手通と浪花町の間，神戸大学の南を通りさらに東方へ走ったと考えている。入倉（1995）によると，観測された地震動の軌跡からも，震源断層の方向をN50°Eとするとどの記録も断層に直交方向の成分が平行方向の成分よりも卓越しており，神戸市の市街下で右横ずれの断層破壊が進行したと考えられる。その位

置は，地下で右横ずれ断層が破壊した時に生じる理論地震動が，断層面をはさんで回転方向が変わることから，観測された地震動の粒子運動を解析することにより推定されている。菊地（1995 b）と入倉（1995）によって推定された震源断層は，ほぼ同じ位置を示し，両者の解析は神戸市街地の直下で断層破壊があったことを示唆している。

Fig. 8によると，汚水樹のずれた方向は北西方向が最も卓越し，他に南東方向と北東，南西方向も見られる。汚水樹のずれの卓越方向は上記の強振動記録やコンビニエンスストアの床の動きと調和的であり，神戸市街地下の断層運動に伴う地震動を反映していると考えられる。兵庫県南部地震より4か月後に起こった1995年ネフチェゴルスク地震でも，生木が，右横ずれ成分をもつ地震断層と直交方向に倒れた報告がある（嶋本ほか，1996）。これは地震断層のごく近傍（40 m幅）に集中しており，地震断層の直上には強震動が集中することを示していると判断される。このような現象をとらえるには，高密度の調査が必要であり，汚水樹の調査はその一手法であると考えられる。また，先に述べたように，六甲山地に存在するいくつかの活断層の南西延長部では，反射法地震探査等により地下に伏在断層が推定されており（藤田・佐野，1996），その断層面を地表へ投影した付近に現われた相対的に強い撃力の線状分布は，断層近傍に集中する強震動をとらえている可能性が大きいと考えられる。

一方，藤田ほか（1996）は5段積みマンホールブロックがまちまちのずれをもつことを指摘している。しかし，神戸市下水道局（1995）によると，マンホールブロックが上位ほど同じ方向に大きくずれていることが報告されており，地震時におけるマンホールの水平方向のずれについては，地盤特

性との関係を含めてさらに検討する必要がある。

ま と め

本研究で明らかになったことは次の(1), (2)である。

(1) 1995年兵庫県南部地震に伴う汚水樹の変形の解析に基づく、撃力の大きかった地域の分布パターンは、スポット状あるいは北東-南西方向の線状を示す。スポット状の分布を示す撃力の数値の大きな所は一般的に地形や地盤の影響が大きく、微地形区分とも対応している。一方、線状の分布を示す撃力の大きな所は、市街下に存在する伏在断層に沿って分布しているように見える。

(2) 汚水樹のずれの方向は、北西方向が最も卓越し、この方向は地震を起こした北東-南西方向の横ずれ断層とほぼ直交する。このような汚水樹のずれの方向は地下の断層破壊をよく反映しているといえる。

以上のことから、今後の震災軽減のためには地下構造、地盤の特性だけではなく、伏在断層の運動特性も含めた対策を立てることが望ましいと思われる。

謝 辞

汚水樹の変形モデルとその解析については、大阪市立大学理学部中川康一教授に目を通していただき有益な助言をいただいた。また、神戸大学理学部寛楽磨博士には波形記録についてご教示いただいた。汚水樹の構造についての資料は、神戸市建設局下水道部からいただいた。記して謝意を表します。

文 献

- Aki, K., 1968, Seismic displacement near a Fault. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 5359-5376.
- 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, 兵庫県神戸市及び芦屋市における伏在断層と基盤構造. *物理探査*, **48**, 439-450.
- 藤田至則・川辺孝幸・角田史雄・山岸猪久馬・熊井久雄・高野武男・野村 哲・野田貴洋・斎藤明郎・斎藤辰馬, 1996, 芦屋川流域の市街地における地震災害—液状化災害の防災に関する提言—. 大震災〜そのとき地質家は何をしたか, 東海大学出版会, 43-68.
- 藤谷達也, 1996, 神戸東部市街地の地表ガンマ線探査. *地震* **2**, **49**, 285-293.
- Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K., 1995, *The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, liquefaction, ground displacement and soil condition in Hanshin Area*. Association for Development of Earthquake Prediction, 194 p.
- 林 康裕・川瀬 博, 1996, 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価. *日本建築学会構造系論文集*, no. 481, 37-46.
- 平野昌繁・波田重熙, 1996, 六甲山地東南部の断層の活動と変位地形. *地質環境と地球環境シリーズ3*, 阪神・淡路大震災—都市直下型地震と地質環境特性, 東海大学出版会, 101-121.
- 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 p.
- 藤田和夫・笠間太郎, 1984, 大阪西北部の地質. *地域地質研究報告* (5 万分の1図幅), 地質調査所, 112 p.
- 藤田和夫・佐野正人, 1996, 阪神・淡路大震災と六甲変動“震災の帯”をもたらした埋没大地形. *科学*, **66**, 793-805.
- 池田安隆・東郷政美・澤 祥・加藤茂弘・隈元 崇, 1995, 墓石のずれから推定される初動分布と伏在地震断層の挙動. 「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, 45-46.
- 入倉孝次郎, 1995, 兵庫県南部地震の震源断層, 強震動と被害の特徴. *物理探査*, **48**, 463-489.
- 岩崎好規, 1995, 阪神・淡路大震災と地盤. 平成7年度講話会, 阪神・淡路大震災のそこが知りたい—斜面崩壊の分布とその特徴—, 地盤工学会関西支部, 5-16.
- 嘉門雅史・浅川美利, 1988, 土の種類とせん断強さ. *新体系土木工学16 土の力学* (I), 社団法人土木学会, 235-238.
- 菊地正幸, 1995 a, 遠地実体波による震源のメカニズム. *月刊地球*, 号外 No. 13, 47-53.
- 菊地正幸, 1995 b, 兵庫県南部地震の震源断層. *科学*, **65**, 569-572.
- 気象庁, 1996, 強震観測報告平成7年1995年. 気象庁, 66 p.
- 気象庁, 1997, 地震月報平成7年1月. 気象庁, 106 p.
- 神戸市下水道局, 1995, 下水道の被害状況と復旧. 阪神・淡路大震災における下水道復旧の記録, 8-32.
- 額田一紀, 1996, カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震. *科学*, **66**, 93-97.
- 国土地理院, 1965, 1:25,000 土地条件図 (大阪西北部). 国土地理院.
- 国土地理院, 1966, 1:25,000 土地条件図 (神戸). 国土地理院.
- 国土地理院, 1996, 1/10,000 地震防災土地条件図 (微地形) 芦屋. 国土地理院.
- 前田保夫・宮田隆夫, 1995, 神戸-西宮間における活断層の観察. 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, 43-44.
- 宮田隆夫・前田保夫, 1996, 地盤変状からの潜在活断層. *地質環境と地球環境シリーズ3*, 阪神・淡路大震災—都市直下型地震と地質環境特性, 東海大学出版会, 135-146.
- 源栄正人・永野正行, 1996, 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析—兵庫県南部地震における「震災の帯」の解釈—. *日本建築学会構造系論文集*, no. 488, 39-48.
- 中川康一・大阪市立大学阪神大震災学術調査団, 1995, 大阪周辺地域での震害と地盤構造. 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 92-108.
- 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**, 143-155.
- 根本泰雄・片尾 浩・鈴木英之進・入倉孝次郎, 1995, 1995年兵庫県南部地震発生10時間以内の余震分布. *日本地震学会講演予稿集*, 1995年度秋季大会 (静岡大), A 34.
- 楡井 久・楠田 隆・古野邦雄・佐藤賢司・酒井 豊・香村一夫・風岡 修・香川 淳・森崎正昭, 1996, “震災の帯”を挟めた地層破壊. *地質環境と地球環境シリーズ3*, 阪神・淡路大震災—都市直下型地震と地質環境特性, 東海大学出版会, 186-207.
- 嶋本利彦, 1995, “震災の帯”の不思議. *科学*, **65**, 195-198.
- 嶋本利彦・渡辺満久・鈴木康弘・A.I. ボーザリン・M.I. ストレリー・ツォフ・E. ロゴージン, 1996, 1995年ネフチェゴルスク地震の地震断層と被害. *地質雑誌*, **102**, 894-907.
- 杉村 新, 1981, 兵庫県震災対策調査報告書—六甲山周辺の活断層. 兵庫県, 26 p.
- 田結庄良昭, 1995, 神戸市街地西部地域の地震災害と地質・地盤との関係. 構造地質研究会夏の例会講演要旨集, 34-40.
- 高田至郎, 1996, 上水道配水管被害特性の定量的分析. 平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 平成7年度文部省科学研究費研究成果報告書, 第3編 121-134.
- 田中眞吾・沖村 孝, 1996, 建築物被害の状況と地形—とくに神戸市東部から阪神間について—. 兵庫県南部地震と地形災害, 古今書院, 82-94.
- 渡辺満久・鈴木康弘, 1996, 神戸・西宮市街地内の活断層と震災の帯. *地震予知連絡会会報*, **56**, 553-556.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進, 1997, 反射法地震探査結果による神戸-芦屋周辺の断層構造. *地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集*, 49.
- 横山俊治・菊山浩喜・田中英幸・海谷叔伸, 1997, 1995年兵庫県南部地震による盛土の地表変状の原因. *構造地質*, **42**, 51-61.
- 吉川澄夫・伊藤秀美, 1995, 1995年兵庫県南部地震の概要. *月刊地球*, 号外 No. 13, 30-38.

吉岡敏和・宮地良典・寒川 旭・下川浩一・栗田泰夫・水野清秀・
奥村晃史・井村隆志・佃 栄吉・松山紀香, 1996, 1995 年兵庫

県南部地震に伴う神戸・阪神地区の被害と六甲断層系の活動. 地調
月報, 47, 5-22.

(要 旨)

苦瓜泰秀・宮田隆夫, 1998, 汚水桝の水平剪断から推定した 1995 年兵庫県南部地震による神戸市街地の撃力分布. 地質雑, 104, 199-209. (Nigauri, Y. and Miyata, T., 1998, Distribution of impulsive force from deformed house inlets in Kobe during the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 104, 199-209.)

1995 年兵庫県南部地震 (MJMA 7.2) による神戸市内の地面の動きの方向と撃力の大きさを見積もるために, 神戸市街地に分布する 1,277 個の内径 35 cm の汚水桝を調査した. 得られた結果は, 次の (1), (2) である. (1) 汚水桝の動いた方向は北西-南東方向が卓越する. (2) 大きな撃力を受けた地域はスポットあるいは線状の分布を示す. (1) の方向は北東走向の六甲断層系に垂直方向であり, それらの方向は神戸市街地の地下での右横ずれの震源断層の破壊を反映していると考えられる. (2) のスポット状の分布は, 谷底, 後背湿地, 三角州, 山地斜面に見られるのに対し, 線状の分布は河道・旧河道沿いおよび六甲山の既知の活断層の南西延長上に位置する. 活断層の南西延長に現われた線状分布は, 地震後の反射法地震探査で判明した市街下の伏在断層の地表への投影位置とも一般に調和する.