

地質学論集 第51号 67-77ページ, 1998年3月
Mem. Geol. Soc. Japan, No. 51, p. 67-77, March 1998

1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向

Collapse direction of wooden buildings by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

松田高明*
 竹村厚司**

*Takaaki Matsuda**
*and Atsushi Takemura***

1997年1月17日受付.

1997年5月17日受理.

* 姫路工業大学理学部地学研究室.
 Department of Geology, Faculty of Science, Himeji
 Institute of Technology, Shosha 2167, Himeji, Hyogo
 671-2201, Japan.

** 兵庫教育大学自然系地学教室.
 Geoscience Institute, Hyogo University of Teacher
 Education, Yashiro-cho, Kato-gun, Hyogo 673-1415,
 Japan.

Abstract

Several hundred thousand wood buildings were damaged in the Kobe to Hanshin area and the northern Awaji Island by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. The areas in which more than several percent of wood buildings were collapsed, were mostly restricted within a narrow belt, 1 to 2 km in width. Large parts of the belt did not coincide with the well-known active faults and with distribution of a particular geographic features. Various kinds of geomorphological features, such as alluvial plain, fan and terrace were included in the belt.

We have observed collapse directions of more than 2600 wood buildings in the seriously damaged belt to estimate shock directions of the earthquake in the hypocenter region. Predominant collapse directions of the wood buildings were observed, although the directions were different place by place. Three large and two small blocks (A to E Blocks) were identified in the Kobe and Hanshin area as follows, in terms of the predominant collapse directions. A Block : from Suma to the JR Kobe station, B Block : from Sannomiya to Ashiya, C Block : from Nishinomiya to Takarazuka, D Block : from Motoyama to Ashiya along the northern margin of B block, and E Block : eastern part of Takarazuka. More than 70 % of the collapsed buildings in A, B and C block were tilted to southeast, north and west, respectively. D Block had mixed collapse directions to north, west and northwest, and E Block did to both west and east. In Awaji Island, similar predominant collapse directions were observed, although the number of buildings observed is small. These predominance of the collapse directions likely implies that most collapsed buildings were simultaneously damaged by a strong pulse wave in early stage of the earthquake and that the shock direction was opposite to the collapse direction.

Key words : Hyogo-ken Nanbu Earthquake, collapsed wooden buildings, collapse direction, shock direction

はじめに

兵庫県南部地震（1995年1月17日, $M=7.2$ ）は、近代都市を襲った直下型地震であり、直下型地震に関する様々な種類の観測結果が我が国で初めて多く残された。ここで記録されたことは震源域で起こる様々な現象を含んでおり、地震発生時の断層に沿った岩石破壊の様子などを議論する上での重要な資料となり、また、将来の防災都市造りにも大きな影響を与えるであろう。この地震では淡路島北西部に野島地表地震断層が現れたが（中田ほか, 1995; 栗田ほか, 1995; Lin and Uda, 1996）、淡路島北部と同じように大きな被害が発生した六甲山南麓部では、地表地震断層は現れなかった（吉岡ほか, 1996;

竹村, 1997a など）。しかし、その本震・余震の震源の分布から、六甲山南麓から淡路島北部にかけての六甲断層系の一部（野島断層・須磨断層・諏訪山断層・五助橋断層など）が活動したものと判断されている（片尾・安藤, 1995; 菊池, 1995a）。

この地震の大きな被害は、淡路島では野島断層に沿った地域と津名町に集中し、六甲山南麓から東麓にかけては主に幅2 km以下の狭い帯状の地域に集中しており（中央開発株式会社, 1995など）、いわゆる「震災の帯」（嶋本ほか, 1995）を形成している。この帯が生じた原因については、潜在活断層説（嶋本ほか, 1995; 宮田ほか, 1995; 波田・宮田, 1996など）・放射された地震波の伝搬経路の違いによるフォカッシング効果（入倉,

1995; 中川, 1996)・地形および地表直下の地質の性質(高橋, 1996; 田中・沖村, 1996; 池田, 1996)などがあげられ, 様々な議論がなされている。

「震災の帯」中の地震動の大きさと方向を明らかにすることは, 地震発生時の岩石破壊の様子や, 活動した活断層の位置を推定する上での重要な資料になるだけでなく, 建築物などの建設にあたっての防災面に大きな貢献をなすと考えられる。今回の地震の震源域における地震動記録は, 数は少ないが強震動計の記録として残されている。また, 本震後集中して取られた余震の記録から, 本震の震動を復元する試みがなされている(入倉, 1995)。これらにより, 本震時における「震災の帯」中の震動方向と大きさが推定されている。しかし, 強震計の記録は数が限られていることや, 余震記録からのシミュレーションによる復元がまだ2次元モデルであり, 本震が3つのイベント(菊池, 1995b; Kamae & Irikura, 1995)からなるような今回の地震の実際の姿を近似しているのかという疑問も残されている。この点を補うためには, 本震時に実際に起こった現象と比較する必要がある。

筆者らはこのような観点から, 震源域における地震動の震動方向を知る目的で, 木造家屋の倒壊の分布と方向の調査を淡路島北部から宝塚市にかけて地震直後から行ってきた。同様の試みが多くの研究者によって行われている。たとえば, 墓石の倒壊方向(菊山・横山, 1995; 菊山ほか, 1996), 墓石に残された擦痕(澤ほか, 1996), コンビニエンスストアのビデオカメラの記録(菊池, 1995c)などの検討が行われ, 地震断層の位置の推定などに用いられてきた。筆者らが木造家屋に調査対象を絞ったのは, できるだけ同じ基準で, 被災地全体の様相を比較するためである。今回の地震では, 多くの木造家屋の倒壊が起こり, 6,000人を越す亡くなられた方の大部分がそれらの倒壊家屋の下敷きになられたものであり, 今回の地震災害の最も大きな特徴がここにあった。

本調査の結果, 木造家屋は地域ごとに一定の方向に倒壊しているものが極めて多いことがわかった。これは地震時にパルス的な大きな震動があったことを物語るものであり, 家屋の倒壊方向を検討することでその震動方向を推定することができるものと考えられる。また, このようなパルス的な震動による災害は直下型地震の特徴と考えられ, 従来建物の倒壊のメカニズムとして考えられていた共振による破壊だけでなく, パルス的な震動に対する対策を立てる必要があることを強く示している。

著者らは地震当初から, すぐに消えてしまう可能性のある現象をすばやく正確に記録することを念頭において調査を行った。同時に, 地域によるデータの偏りを避けるために, 可能な限り広い地域にわたって共通の基準で調査し, 客観的・統計的に記録することを心がけた。本研究の概要は松田・竹村(1995)に報告したが, ここでは調査結果をさらに詳しく報告し, 木造家屋の卓越した倒壊方向を生じた原因について考察する。なお, 調査結

果を詳細に示したルートマップは別に報告を準備する(松田・竹村, 1997)。

木造家屋の倒壊様式と調査方法

地震直後に筆者の一人, 松田が最も被害の大きかった地域の一つである神戸市灘区で行った予備調査では, 初めは墓石と電柱の倒壊方向に注目したが, 顕著な傾向がみられなかった。また電柱は電線の影響を受けている可能性があるようにみえたので, 調査対象としなかった。しかし, 南北の通りは細い路地であっても通れるのに, 東西の路地の多くが倒壊した家屋によって通行不可能であるものがあつたことから, 木造家屋の多くが一定の方向(ここでは北方向)に倒壊していることに気付いた。その後, 我々が行った長田区・須磨区の予備調査でも家屋の倒壊に卓越した方位が見られ, そこでは多くの家屋が南東へ倒壊していた。そこで筆者らはこの現象が地震の震動方向を示している可能性があると考え, 家屋の倒壊方向を記録した。

調査期間は, 予備調査も含めて, 1月19日から約1ヶ月間にわたった。木造家屋の倒壊とその方向の分布を知るために, 今回の震災で木造家屋の倒壊が多くみられた淡路島北部から宝塚にわたる範囲で調査を行った(Fig. 1)。調査においては1 km以下の間隔で調査ルートを設定し, 倒壊家屋の多い地域などではできるだけ密に調査を行うようにした。神戸市須磨区から宝塚にいたる調査ルートをFig. 2 a, bに示す。筆者らの間で調査基準に差がでないように基本的な調査方法を統一した後, 松田が神戸市王子公園付近から宝塚市までの間を, 竹村が神

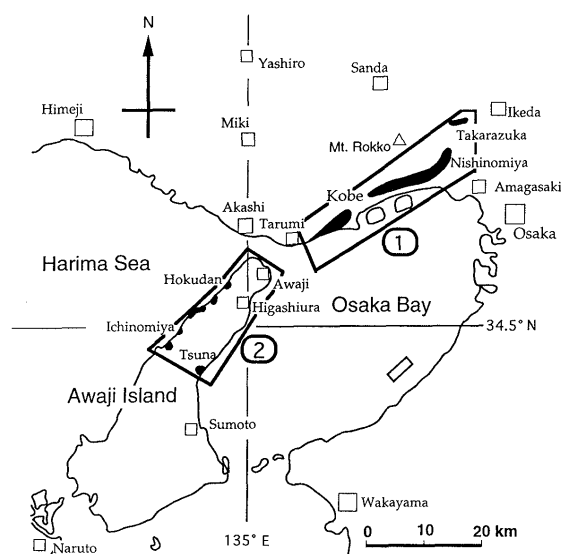


Fig. 1. Index map. Solid areas show the distribution of collapsed wood buildings by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. 1 and 2: investigated areas (1: Kobe and Hanshin areas, 2: northern Awaji Island).

戸市垂水から王子公園までと淡路島北部・宝塚東部を調査した。

木造家屋の倒壊の様式には一定のパターンが見られた (Fig. 3, 4a). とくに Fig. 3 に示したように, 二階建ての家屋が二階以上がそのまま残され, 一階が横から押された形で, 倒れたものが多かった. 一階建ての家屋も, 二階建てほど倒壊の割合は多くはなかったが, 倒れていた場合には屋根は壊されておらず, 住居部分が横から押される形で倒壊したものが多かった. どちらの場合も, 家屋の土台部分がちょうど「足払い」を受けた形で倒壊していた. そのため, 一階部分の柱および壁の傾き方から, 多くの家屋の倒壊方向を容易に決めることができた (Fig. 4b). 今回の地震で, 地震発生時に木造家屋の一階にいた人が多く亡くなられたのは, このような家屋の倒壊パターンに原因があると考えられる.

本調査では, Fig. 2 に示したルート沿いで倒壊した全ての家屋の倒れた方向を記録した. ただし, 急斜面上, あるいは石垣上の建物で, 地滑りや斜面崩壊によって倒れたと考えられるものについては除外した. 調査対象はほとんど民家であるが, 一部に木造の寺社・商店も含まれている. 倒壊方位を明確に記録するために, 完全に倒壊した家屋と一階が大きく傾いた家屋のみを対象とした. したがって本調査での「倒壊家屋」は, 他の調査に

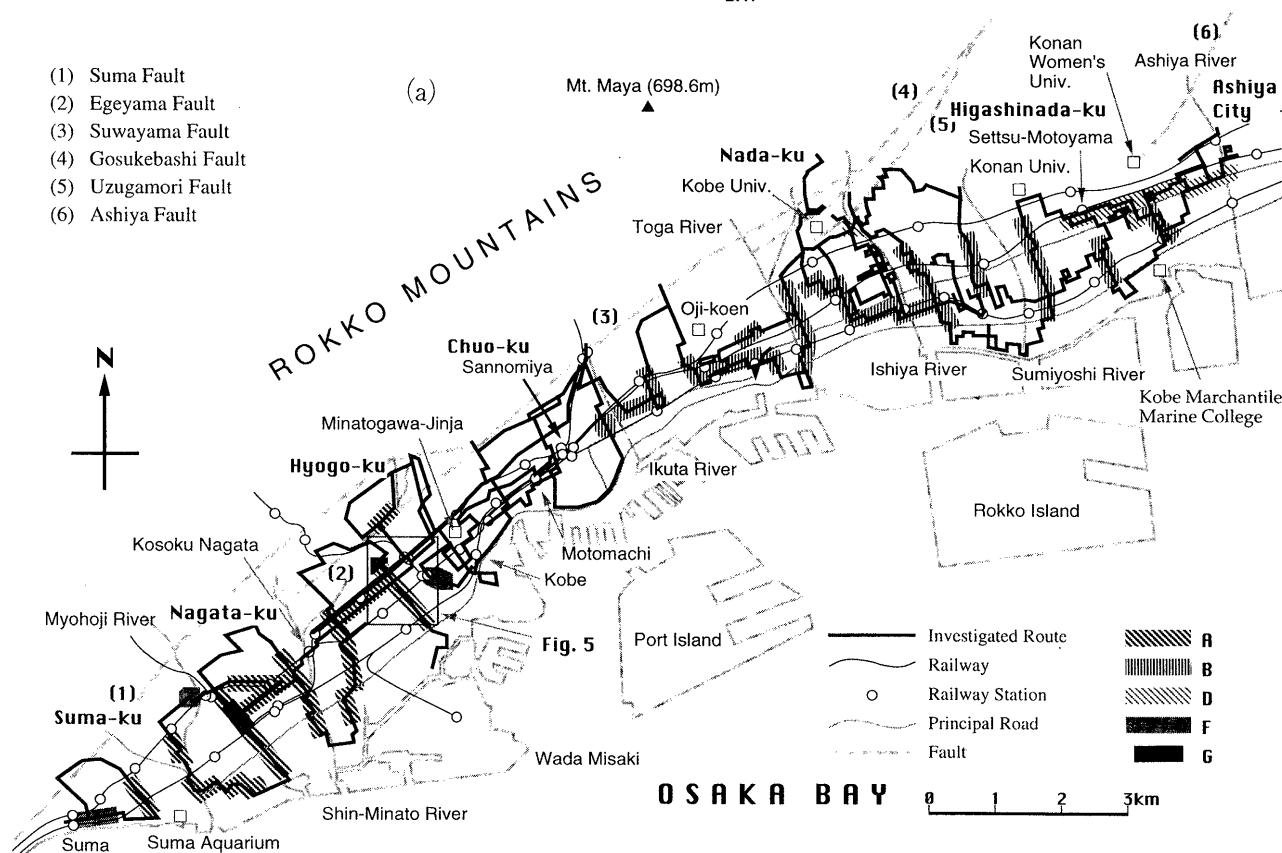


Fig. 2. Investigated routes of collapse direction of wood buildings in Kobe and Hanshin areas. A to F show predominant collapse directions of wood buildings; A: southeast, B: north (north-northwest), C: west, D: mixed directions to north, north-west and west. E: east and west, F others. (a): Kobe City, (b): Ashiya, Nishinomiya and Takarazuka Cities

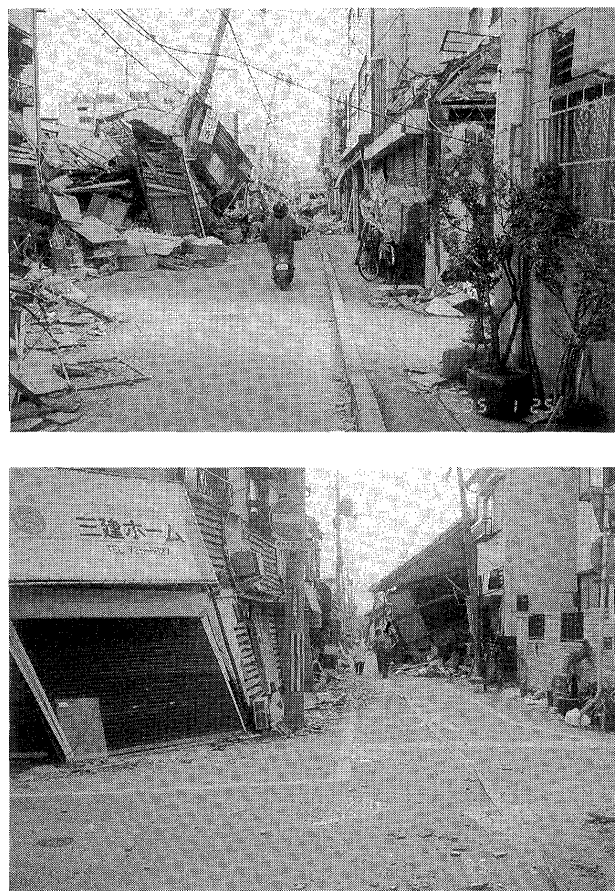


Fig. 3. Photographs of typical collapsed wood buildings. Upper : The first floor of the building on the road was entirely collapsed, although the second floor left its original shape. The first floor of the left side building was tilted to the same direction as that of the collapsed building on the road. Lower : Notice that the buildings collapsed on the road came mostly from the left side.

における「全壊」や「半壊」とは定義が異なっている。

上記のように木造家屋の倒壊方向は、一階の柱や壁の倒れた方向によって決定した。ただし実際の調査においてはこの方位を厳密に測定することは困難であった。被害地域には無数の瓦礫が散乱し、時には道路をふさぎ倒壊家屋に近づけないこともあった。そのため精度は悪いが、倒壊方向は家屋の面する道路の方向を基準として測定した。ほとんどの家屋は街路の向きに平行あるいは直交するように建てられており、倒壊方向も街路の向きに平行かあるいは直交する場合が多かった。

本研究では淡路島から宝塚の範囲で、倒壊の分布に留意しながら、約2,640戸の木造家屋の倒壊方向を観察した。調査の実例として Fig. 5 に神戸市街西部の兵庫区・中央区の湊川公園―新開地付近のルートマップを示す。実際の調査では、この図に示すように一軒ごとの倒壊方向を地図上に記録した。この図においても湊川―新開地南西の兵庫区の被害が極めて大きかった地域では、家屋の倒壊方向に卓越した方向（この場合には南東）があることが明らかである。

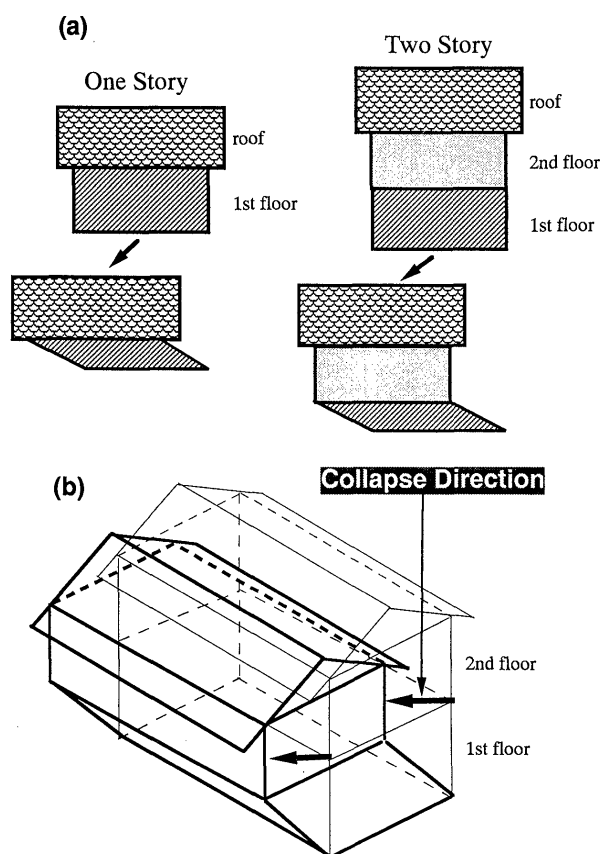


Fig. 4. (a) Collapse pattern of wood buildings by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Many wood buildings were collapsed in a manner of "tripped up". (b) observed collapsed direction.

倒壊の分布と方向

六甲山南麓・東麓の神戸市須磨区から宝塚市にかけての市街地では、約2,500戸の家屋の倒壊方向を記録することができ、卓越する倒壊方向を知ることができた。六甲山南・東麓の顕著な倒壊地域と地域ごとの倒壊方向を Fig. 6 に示す。しかし、淡路島においては調査時（1月末から2月始め）にはすでに多くの倒壊家屋が取り除かれてしまっており、集落ごとに卓越した倒壊方向は見られたものの（Fig. 7）、計数できた個数は全部で170戸と少なかった。

ここでは、本調査の結果判明した倒壊家屋の分布と倒壊方向について詳述する。

倒壊家屋の分布

木造家屋が多く見られた地域は、淡路島では一宮町の郡家・尾崎、北淡町の室津・育波・斗ノ内・富島・野島・葦浦、および津名町志筑の各集落であった。一宮町江井や東浦町・淡路町岩屋などでは、家屋の倒壊はほとんど認められなかった。

六甲山南・東麓の神戸～阪神地域では、木造家屋が数%以上が倒壊した地域は、神戸市須磨付近から宝塚市

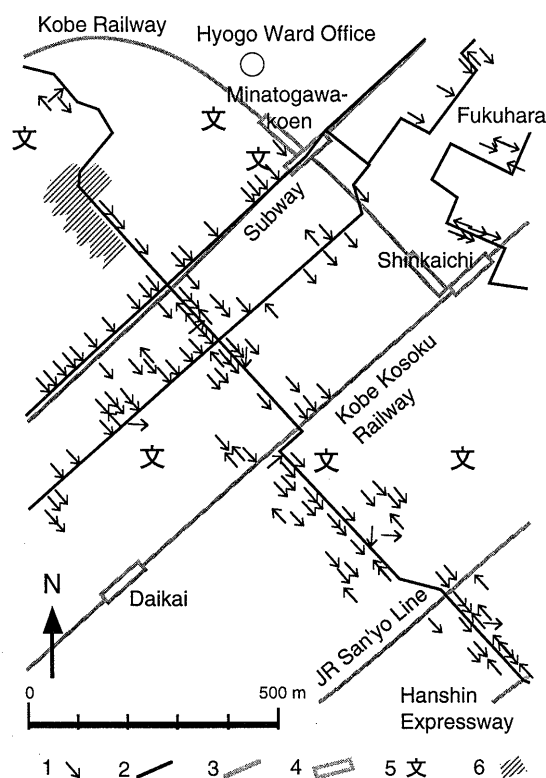


Fig. 5. Route map around Minatogawa-koen, Hyogo-ku, Kobe City. The locality is shown in Fig. 2 (a). 1: collapse direction of wood buildings, 2: streets, 3: railways, 4: railway stations, 5: schools, 6: burned area.

にかけて幅1～2 kmの断続した細長い帯を形作っている (Fig. 1, 6). 須磨以西の垂水や明石市では、家屋の倒壊はほとんど見られなかった。また、兵庫区東部から中央区にかけての湊川神社を中心とした福原～元町にかけての地域や、宝塚市南部の仁川～逆瀬川付近では、木造家屋の倒壊が少なく、被害の比較的小さい「帯のほころび」的な地域となっている。Fig. 6の湊川公園付近のルートマップを見ても、湊川公園～新開地の南西方では木造家屋の倒壊がおびただしく観察されたのに対し、北東の福原付近から湊川神社周辺にかけては、古い木造家屋が数多くあるにもかかわらず、倒壊はさほど見られなかった。したがって木造家屋の倒壊地域は、この「帯のほころび」(淡路島北端部、神戸市福原～元町付近、および宝塚市南部)を間に挟んで、主に次の4つの地域に大別できた (Fig. 1)：淡路島北西部 (北淡町・一宮町)、神戸市須磨～湊川公園付近、神戸市三宮～西宮市甲東園、宝塚市宝塚駅付近～山本。

木造家屋の被害地域が顕著な帯状をなしている状況は、極めて大きな被害が出た神戸・芦屋市街地において明瞭に認められた。本調査では倒壊率については統計的な調査を行っていないが、倒壊した家屋の数は、六甲山麓側の山沿いの地域や海岸付近で明らかに少なく、両者の間で多い。湊川公園以西の神戸市西部では、木造家屋

の倒壊は、山側の山陽電鉄・地下鉄付近から阪神高速の間で極めて多く、より山側や海岸付近では古い木造家屋も多いものの、あまり倒壊は見られない。神戸市東部から芦屋市にかけても、木造家屋の倒壊は、およそJR線付近から阪神高速付近の間で顕著に見られ、山側の丘陵地や浜側の海岸付近ではより少ない (Fig. 6)。同様の調査が遠藤ほか (1996) により行われ、同様の結論を得ている。

木造家屋の倒壊方向

六甲山南・東麓では、Fig. 2, 6に示すように、卓越した木造家屋の倒壊方向が地域ごとに見られた。その顕著な倒壊方向により、この地域を3つの大きなブロックと2つの小ブロックの計5ブロックに識別できた。大きなブロックを西からA, B, Cブロックと名づける。Cブロックは、倒壊家屋の少ない部分を挟んで2分される。Bブロックの北東側には細長いDブロックが識別できた。調査地北東端にはEブロックを設けた。AブロックとBブロックの間には、倒壊の少ない地域 (福原～元町付近)が見られた。A～Eのブロックごとに計数した倒壊家屋の方向別の割合をTable 1に示す。次に各ブロックごとの特徴を記す。

Aブロック：須磨～湊川公園付近

このブロックは、ほぼN50°E方向に延びている。市街地もほぼこの方向に延びており、主な街路は約N50°Eと約N40°Wの格子状をなす。倒壊した木造家屋の約90%が南東～北西方向に倒れていたが、その内、南東方向が70%以上と圧倒的に多く、北西方向は20%弱であった (Table 1)。さらに被害が極めて大きかった長田区から兵庫区にかけての高速長田駅～湊川公園駅間では、約80%の家屋が南東方向に倒壊していた。ただし道路が東西に延びている須磨駅付近では、南に近い向きに倒壊している家屋が目立った。被害の比較的少なかった地域では、方向性はあまり顕著ではなかった (竹村・松田, 1995)。Fig. 5のルートマップはこのブロックの北東端にあたる。このブロックの卓越した倒壊方向は、須磨断層の伸びと直交する方向である。

Bブロック：三宮～芦屋川付近

このブロックは、N70°～75°E方向の延びを示す。神戸・芦屋市街地の主な街路は、三宮から西宮市夙川まではほぼ阪急電車以南の地域で約N70°Eと約N20°Wの格子状となっている。Bブロック全体で、85%が南北方向 (厳密には北北西～南南東)に倒れていたが、その内70%強が北へ向かって倒れており、10%強が逆に南に倒れていた (Table 1)。このブロックに卓越した北への倒壊方向は、この地域の北を走る五助橋断層や芦屋断層などの走向とは大きく斜行する。

Cブロック：西宮～甲東園および宝塚

このブロックの延びは、西宮市香櫨園付近から甲東園付近まではほぼ北東～南西方向である。孤立する宝塚地域は甲東園のほぼ真北にあたる。先に述べたように、宝

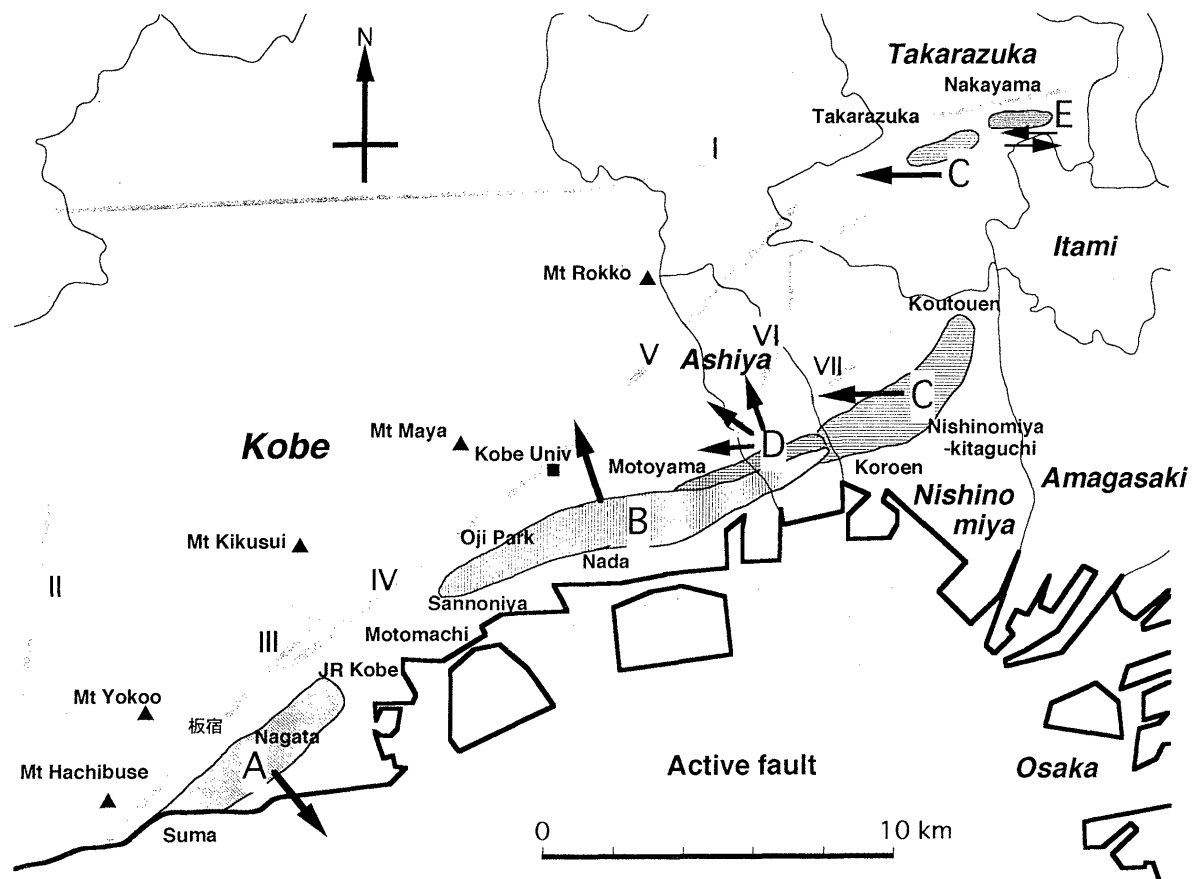


Fig. 6. Distribution of five blocks (A to E) identified by the predominant collapse directions (arrows) of wood buildings in the Kobe and Hanshin areas. More than 70% of collapsed wood buildings were tilted to a particular direction in A, B and C blocks. This fact likely implies that the buildings were simultaneously collapsed by a large pulse wave in these blocks. I: Arima-Takatsuki Tectonic Line, II: Takatsukayama Fault, III: Suma Fault, IV: Suwayama Fault, V: Gosukebashi Fault, VI: Ashiya Fault, VII: Koyo Fault.

塚市南部の仁川から逆瀬川付近にかけては家屋の倒壊は少ない (Fig. 1, 6). 西宮市の夙川から甲東園にいたる地域では、街路はほぼ東西と南北に走っている。宝塚付近では街路の方向には顕著な規則性はみられない。このブロックでは、倒壊家屋の内10%強が北に倒れていたが、約75%が西に向かって倒れていた (Table 1). この卓越する方向はこのブロックの西を北東方向に走る芦屋断層や甲陽断層の走向とは、約45度斜行する。

D ブロック：摂津本山～芦屋川

このブロックは、Bブロックの北側に沿ってほぼ東西に延びており、JR線と国道2号線に挟まれた狭い帯状の地域である。街路はBブロックと同様、約N70°Eと約N20°Wの格子状である。ここでは、約40%が北に倒れており、40%弱が西に倒れていた。また、北西向きも約15%見られた (Table 1)。

E ブロック：宝塚市東部～山本

このブロックは、Dブロックの北東端から東に向かって延びる小面積の地域である。調査した倒壊家屋数は少

ないが、東西両方にはほぼ同じ割合で倒れていた。

淡路島北部の調査結果を Table 2 に示し、地域ごとの卓越した倒壊方向を Fig. 7 に示す。全体として計測数はさほど多くないが、集落ごとにほぼ卓越した倒壊方向が認められる。淡路島の播磨灘沿いの西海岸では、一宮町の郡家から北淡町の野島墓浦間で顕著な倒壊が見られ、全体としては東向きの倒壊方向を示す。ただし詳細を見ると集落ごとに向きは異なり、郡家・尾崎の南東方向から徐々に北向きに変化し、富島・墓浦の北東へと変わっていくように見える。甚大な被害が生じた富島・墓浦での家屋の倒壊方向は、ほぼ野島断層の走向に平行に近い。津名町志筑では観察できた家屋数は少ないが、北西に倒れていたものが多かった。このように淡路島でも、地域ごとに倒壊方向に顕著な違いがあるのが認められた。

Table 1. List of observed collapsed wood buildings in the Kobe and Hanshin areas. No : number of buildings observed. Values show ratios (percent) of collapsed buildings in each area. Localities of the blocks are illustrated in Fig. 6.

Block	No	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
A	794	<1	3	2	72	<1	2	1	18	Suma~Minatogawa jinja
B	928	72	<1	1	<1	13	<1	8	5	Sannoniya~Ashiyagawa
C	481	12	<1	5	<1	<1	1	74	6	Ashiya~Takarazuka
D	239	40	<1	1	0	3	1	37	16	Motoyama~Ashia(north)
E	24	4	0	58	0	0	0	33	4	East of Takarazuka

Table 2. List of observed collapsed wood buildings in the Awaji Island. N : number of buildings observed.

	Hokudan-cho						Ichinoniya-cho				Total of western corst	Tsuna-cho				
	N.-Hikiura		Toshima		Tonouchi		Ikuha		Murotsu			Ozaki		Gunge		Shizuki
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NE	16	64	19	40	4	31	0	0	4	15	0	0	0	0	43	28
E	2	8	15	31	6	46	8	62	8	30	1	10	4	24	44	29
SE	1	4	6	13	0	0	0	0	10	37	8	80	10	59	35	23
S	2	8	1	2	0	0	0	0	3	11	0	0	0	0	6	4
SW	3	12	6	13	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	10	7
W	0	0	0	0	3	23	5	38	1	4	0	0	0	0	9	6
NW	1	4	1	2	0	0	0	0	1	4	0	0	3	18	6	4
Total	25		48		13		13		27		10		17		153	
															20	

考 察

木造家屋の倒壊の分布について

木造家屋の倒壊が見られるなどの大きな被害は細長い帯状の地域に集中したが、この帯の分布は、従来から知られていた六甲山周辺の活断層の分布とは多くの地域で一致していない。淡路島での被害分布はほぼ野島断層とその延長に沿っているが、地表では富島付近より北東でのみ明瞭な断層変位が現われている（栗田ほか，1996など）。六甲山南・東麓では地表には地震断層は現われず、また三宮から芦屋・西宮にかけての「震災の帯」は、従来知られている活断層の伸びの方向とは異なっている。地震後の兵庫県による地震調査では、神戸・芦屋市街地の地下に活断層が発見されており（藤田，1996），また活断層の存在を示唆する地形的な特徴の存在も指摘されている（鈴木ほか，1996）。しかし、これらの活断層が存在したとしても、それらが兵庫県南部地震の際に活動したかどうかは不明である。また、道路の舗装の亀裂の詳細な調査が行われ、神戸・芦屋市街地では、東西方向

に延びた2本の亀裂の分布の帯が見いだされた。その内、内陸側の亀裂の帯に圧縮性の地形変位が現われた可能性が指摘されている（竹村，1997a, b）。さらに、亀裂の分布と形態から、神戸市街地西部の長田・兵庫区では、「震災の帯」の直下に伏在する活断層が走る可能性が指摘されている（竹村，1997a）。しかし、これらの亀裂と断層変位との関連性については、現時点では明確ではない。

本研究の被害の帯には、三角州・自然堤防・扇状地・段丘など様々な地形の地域が含まれている（池田，1996；田中・沖村，1996）。地形分布と被害分布との間に相関があるという見解もあるが（高橋，1996），地形により被害の状況が異なっているのは、家屋の倒壊率が50パーセントを越す地域にのみ当てはまるという指摘もあり（池田，1996），地形の違いによる被害の程度の差については共通の認識がまだ得られていない。しかし、「震災の帯」がある特定の地形に限られているわけではない。したがって、「震災の帯」を生じた主要因が、地表地盤やそれを反映している地形の影響にあるとは考え

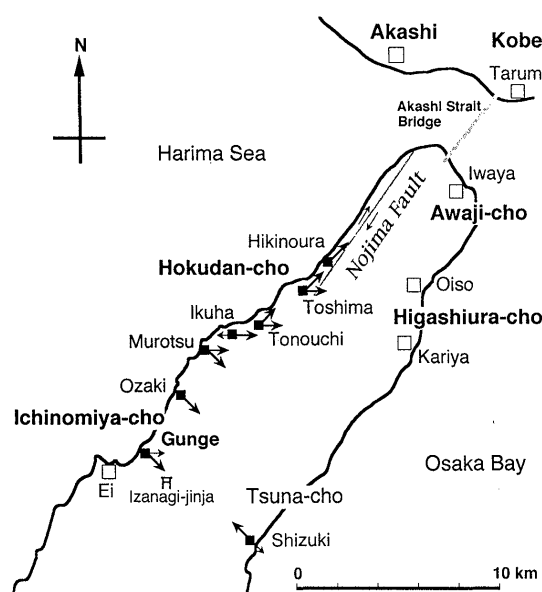


Fig. 7. Collapse directions of wood buildings in the north Awaji Island. Arrows show the main collapse directions.

にくく、より深所の地質構造の影響にあると考えられる。

この帯の中には比較的被害の少なかった「帯のほころび」地域を3カ所挟んでいる。西側のそれは明石海峡を含んでいるので不明な点もあるが、淡路島北端の淡路町岩屋などでは比較的被害が小さく、「帯のほころび」があるものと判断される。他の2つ、神戸市元町付近と宝塚市南部の存在は明瞭である。「震災の帯」の成因に関しては様々な議論があるが、この問題を考える場合には、「震災の帯」だけでなく、被害の少なかった地域の成因をも考慮する必要があると思われる。

卓越する倒壊方向を生じた原因

先に述べたように、兵庫県南部地震によって倒壊した家屋は、広い地域にわたって一方向に倒れ、その方向は地域ごとに異なっていた。このような現象が生じた原因にはいくつかの可能性が考えられる。しかし、次に述べることから判断して、地表にパルス状の強い地震動が現れ、それにより多くの家屋が同一方向へ倒れたものと考えられる。

建築物の倒壊が、周囲の家の建て込み具合に影響される可能性がある。三方を隣接する家屋などに囲まれており、残りの一方が道路に面している場合などは、道路の方に倒れやすいと直感的には考えられる。しかし、これについては、次のような事実で否定できる。先に述べたように、震災直後にBブロックで、南北方向の道路では多くの場合倒壊した建物に妨げられずに通行することができたが、東西方向の道路ではしばしば通り抜けるのに困難を生じた。Aブロックでも同様のことが観察できた。このことは次のような現象の反映している：Bブロックでは、南北方向の道路に面しており、他の3方を隣接す

る家屋に囲まれている家屋が、道路方向ではなく、隣家のある北方向に多く倒れていた。また、東西方向の道路に面している家屋では多くが北方向に倒れていたが、道路の南側だけでなく、北側の家屋の多くも隣家のある北へ倒壊していた。これらは、倒壊方向が、周囲の家屋の有無に影響されていないことを示す。その実例は、Fig. 3に示すような実際の倒壊例や、Fig. 5のルートマップから読みとることができる。

家屋の形態が、倒壊方向に影響しているかもしれない。細長い長方形の床型をした家屋であれば、長辺に直交する方向へ倒れやすいかもしれない。また、正方形に近い家屋であっても、方向により壁と窓の比が異なるなど構造的な違いがあれば、弱い方向へ倒れやすいとも考えられる。しかし、次のような事実から、このことも今回の地震では倒壊方向に大きな影響をもたらさなかったものと考えられる。一つは、倒壊した家屋の中に床の対角線方向に倒壊していたものが少なからず見られたこと。また、長方形の床をもつが長軸方向の異なる家屋が、一つの地域で同一方向に倒れていたこと。これらは、家屋の倒壊方向が各家屋の形態・構造に強く依存していないことを示すものと考えられる。

傾斜地に建てられており、地滑りや宅地の崩壊によって崩壊したと考えられる家屋は、調査からは省いた。しかし、神戸市街地は全体として南に傾斜しており、それが家屋の倒壊方向に影響しているかもしれない。しかし、この影響は次のようなことから、小さいものと考えられる。Aブロックの南東方向という卓越した倒壊方向は、このブロックの主要な道路に対して直行する方向に当たる。またBブロックでは倒壊方向は北方向が卓越しているが、これもこのブロック内の主な道路の方向に対して直交する方向である。神戸の東西方向の道路は多くがほぼ等高線に沿った形で作られており、道路の方向と相関がある現象は多くの場合地形に関係している。Aブロックにおいては、木造家屋の倒壊方向が地形の最大傾斜の方を向いているように見える。しかし、Aブロックの被害の甚大な地域はそのほとんどが低平な沖積地であり、地形の傾斜はほとんどないに等しい。また、Bブロックでは地形的に高い方（六甲山側）へ向かって多くの家屋が倒れており、南へ傾斜している扇状地においても、傾斜のない沖積地においても、卓越した倒壊方向は同じ北向きである。C、Dブロックでは、倒壊方向は地形の傾斜とのあいだには関係が見られない。したがって、家屋の卓越した倒壊方向は、地形の微傾斜とも相関がないものと考えられる。

Fig. 3, 4に示したように、今回の地震では、多くの木造家屋が「足払い」を受けた形で倒壊した。このことは倒壊をもたらした地震動の水平成分が大きかったことを示している。もし、横揺れが続いている間に、木造家屋が徐々に倒壊していったのであれば、その震動方向に沿ったお互いに逆向きの2方向にほぼ等しい割合で倒壊してよい。しかし、震源から最も離れたEブロック

でのみ、そのような傾向は観察された。今回のようなある地域で卓越した倒壊方向が見られたことは、倒壊方向とは逆向きの大きな震動で多くの木造家屋が一気に倒壊したか、大きな損傷を受けたことを示すものと考えられる。六甲山南・東麓では、須磨から宝塚にかけて、木造家屋の倒壊方向が南東（Aブロック）から北（Bブロック）、西（Cブロック）と順次変わっているが、これは倒壊をもたらした大きな震動の方向が、北西、南、東と異なっていたことを示している。また、淡路島西岸においても、郡家から墓浦にかけて、主要な倒壊方向が南東から東、北東へと変化している。ここでは、倒壊をもたらした強い震動方向は北西、西、南西であったものと推定される。

地震の際の木造家屋の倒壊のメカニズムとしては、家屋の固有振動の周期（0.3～0.6秒）と地盤の卓越振動の周期が一致した場合、建造物が地震動に共振し、倒壊にいたることが知られている。例えば、長野地震や新潟地震などで木造家屋の最も大きな被害がでた地域は、地盤の常時微動が0.4秒前後の周期をもつ地域に一致した（金井, 1968）。しかし、今回の地震で家屋の倒壊方向に顕著な方向性が見られたことは、家屋の倒壊の原因として衝撃的な地震動を考えた方が説明しやすい。また後述するように、兵庫県南部地震においては、神戸市内の強震計で1～2秒と長いパルス状のS波の周期が観測されており（久田・山本, 1995; 頼瀬, 1996）、木造家屋の倒壊が共振によるものとは考えにくい。観察例が少ないため一般化は難しいが、鉄骨造りの建造物も木造家屋と同方向に一階が傾いている例も、市街地で観察された。また、東灘区で倒壊した阪神高速道路神戸線は北向きに倒れたが、長田区で傾斜した阪神高速道路の高架は南東向きに傾いていた。これらは周囲の木造家屋の倒壊方向と全く同一である。木造家屋とは構造の異なったこれらの建築物の倒壊も、パルスの地震動によって説明できるのかも知れない。

今回の地震の震動記録は、数は少ないが強震計の記録として残されている。その特徴は、海溝部で起こる地震から伝わってきた地震動と異なり、震動時間が約10秒程度と短いこと、周期1～2秒程度の大きなパルス波が見られることである（久田・山本, 1995; 頼瀬, 1996）。このようなパルス波は、カリフォルニア地域の直下型地震では1970年代からよく知られていた現象であり（例えば、Archuleta, R. J., 1984; Hartzell, S., 1989）、Heaton et al. (1995) にまとめられている。このパルス波の振幅は、横ずれ断層では地震断層に平行な方向では振幅が小さく、直交する方向で極端に大きくなる傾向がある。

Aブロックと淡路島の中央部（志筑～一宮）では、家屋の倒壊方向から推定された大きな震動方向は、活動したと考えられる断層（須磨断層・野島断層）およびその延長に対して直交する方向であり、パルス波の最初の震動方向と一致する。Bブロックの振動方向は、諏訪山断層や五助橋断層の走向方向の直交方向とやや斜行し、A

ブロックとは反対方向である。強震計による神戸市直下の破壊に対応する地震動の観測記録（入倉, 1995）は、振動方向が厳密に地震断層に直交するとは限らず、かなりの幅を持っていることを示している。また、壁の傾いた方向を用いて倒壊方向決めたことによる誤差もあるかもしれない。したがって、家屋の倒壊方向から求めた地震動の方向が、パルス波によることを否定するものではないと考えられる。Bブロックでの家屋の倒壊をもたらした強い震動方向は強震計で認められる1周期のパルス波の後半の震動方向であり、このブロックでは1つのパルス波の前半よりも後半の方が加速度が大きかったことを示しているかもしれない。C、D、Eブロックおよび淡路島の墓浦から育波にかけての地域の振動方向については、今のところ単純には説明できず、断層の破壊速度などを考慮して今後さらに検討する必要がある。

現在のところ、筆者らは類似の現象を過去の被害地震の記録には見いだしていない。しかし最近の例では、嶋本ほか（1996）はサハリンの1995年ネフチェゴルスク地震において、やや観察例は少ないものの、地表地震断層に沿ってそれに垂直な一方向に樹木が倒れていることを報告している。また、兵庫県南部地震直後の1995年新潟県北部地震でも、家屋や墓石が一方向に倒れたという報告もある（新潟県福島潟地震調査グループ, 1995）。これらの事例は、直下型地震においては、震源断層の近傍でパルス波の影響が強く、非対称的な地震動による被害が現われることを示している可能性がある。また兵庫県南部地震による家屋の倒壊が、これらのパルス波によって引き起こされたとすると、「震災の帯」は、このパルス波の影響が強かった地域であると考えることができる。

ま と め

1. 1995年兵庫県南部地震によって倒壊した木造家屋の分布と倒壊方向を、淡路島北部から宝塚市にかけて調査した。
2. ほとんどの木造家屋は、土台が「足払い」を受けた形で一階が倒壊しており、一階の柱や壁の倒れた方向を家屋の倒壊方向として調査した。
3. 淡路島で顕著な木造家屋の倒壊が見られたのは、北西岸の一宮町郡家から北淡町野島墓浦までの集落と、東岸の津名町志筑であった。
4. 六甲山南・東麓では、木造家屋が多数倒壊した地域は、神戸市須磨地区から宝塚市にかけて全体に幅1～2kmの細長い断続した帯を形成している。そのうち、神戸市の福原～元町近辺と宝塚市南部の仁川～逆瀬川付近では、家屋の倒壊はあまり見られず、「帯のほころび」となっている。
5. これらの被害地域では、ある一方の向きに全倒壊家屋の70%以上が倒れている場合が多く、その方向は地域により異なっていた。すなわち、須磨～湊川公園では南東、三宮～芦屋では北、西宮～宝塚では西に多く

の家屋が倒れ、摂津本山から芦屋の山側では、北・西・北西の三方向が卓越していた。

6. 宝塚市東部と淡路島では調査した戸数はさほど多くないが、宝塚東部では東西両方に倒壊しているものが多く認められた。淡路島では集落ごとに卓越した方位が観察され、西海岸では全体として東向きの方位を示すが、北東から南西の集落へと、倒壊方向が徐々に時計回りに回転している傾向を示す。
7. このような家屋倒壊の卓越方向が認められることは、倒壊方向とは逆向きの大きな震動で、多くの木造家屋が一気に倒壊したことを示している。このような大きな震動は、直下型地震の際に震源断層の近傍でしばしば観測されているパルス波による可能性がある。

謝 辞

神戸大学理学部の乙藤洋一郎教授には、神戸市から阪神間の調査に際し貴重なご助力を得た。同じく神戸大学内海域教育研究センターの井口博夫博士には、淡路島の調査に関しご協力を得、被害状況に関し貴重な情報を提供していただいた。大阪府立大学の伊藤康人博士、東北大学理学研究科の大槻憲四郎教授、京都大学理学研究科の竹村恵二博士には本論文をまとめるにあたって、有意義な助言をいただいた。兵庫教育大学の徳山 明教授・西村年晴教授には終始一貫して援助・助言を賜った。以上の方々に感謝の意を表する。

文 献

- Archuleta, R. J., 1984, A faulting model for the 1979 Imperial Valley Earthquake. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 4559-4585.
- 栗田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・木村克己・奥村晃史・佃 英吉, 1995, 1995年兵庫県南部地震で淡路島に出現した地震断層. 日本地質学会環境地質研究会編, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 11-14.
- 中央開発株式会社, 1995, 1995年兵庫県南部地震阪神大震災災害調査報告書. 中央開発株式会社技術本部, 東京, 51p.
- 遠藤秀典・村田泰章・ト部厚志, 1996, 平成7年兵庫県南部地震による神戸市・芦屋市・西宮市における家屋の被害分布. 地調月報, **47**, 67-78.
- 波田重熙・宮田隆夫, 1996, 地盤はどう動いたのか. 科学, **66**, 98-104.
- Hartzell, S., 1989, Comparison of seismic wave form inversion results for the rupture history of a finite fault: application to the North Palm Springs, California, Earthquake. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 7515-7534.
- Heaton, T. H., Hall, J. F., Wald, D. J. and Halling M. W., 1995, Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake. *Science*, **267**, 206-211.
- 久田嘉章・山本俊六, 1995, ノースリッジの地震動(類似点と相違点). 第23回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 93-100.
- 藤田和夫, 1996, 近畿トライアングルと六甲変動. 日本地質学会環境地質研究会編「阪神・淡路大震災」, 東海大学出版会, 2-16.
- 池田 碩, 1996, 阪神大震災と地形条件. 兵庫県南部地震と地形災害, 日本地形学連合編, 95-109.
- 入倉孝次郎, 1995, “震災の帯”をもたらした強震動. 科学, **66**, 86-92.
- 片尾 浩・安藤雅孝, 1995, 兵庫県南部地震前後の地殻活動. 科学, **66**, 78-85.
- Kamae, K and Irikura, K., 1995, A fault rupture model of the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake (MjMA=7.2) estimated by the empirical Green's function method. *Jour. Natural Disaster Sci.*, **16**, 31-40.
- 金井 清, 1968, 地震動・地盤振動. 金井 清・田治見宏・大沢販・小林啓美編「建築構造学大系1, 地震工学」, 彰国社, 東京, 9-49.
- 菊池正幸, 1995a, 1995年1月17日兵庫県南部地震の震源メカニズム. 「阪神大震災」緊急合同報告会資料集, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, 117-120.
- 菊池正幸, 1995b, 遠地の地震記録による震源メカニズム. 「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, 17-20.
- 菊池正幸, 1995c, 兵庫県南部地震の震源断層-防犯カメラが記録した地震動をよむ. 科学, **65**, 569-572.
- 菊山浩喜・横山俊治, 1995, 墓石・灯籠の転倒から見た1995年兵庫県南部地震の地震動. 日本地質学会環境地質研究会編, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 91-96.
- 菊山浩喜・横山俊治・中垣幸恵・柏木健司, 1996, 墓石・灯籠の転倒調査から推定される1995年兵庫県南部地震の地震動. 土と基礎, **44-2**, 42-44.
- 額部一起, 1996, カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震. 科学, **66**, 93-97.
- Lin, A. and Uda, S., 1996, Morphological characteristics of the earthquake surface ruptures on Awaji Island, associated with the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake, *Island Arc*, **5**, 1-15.
- 松田高明・竹村厚司, 1995, 兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向と分布. 日本地質学会環境地質研究会編, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 181-186.
- 松田高明・竹村厚司, 1997, 1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊様式と倒壊方向. 人と自然, **8**, 159-174.
- 宮田隆夫・洪 景鵬・前田保夫, 1995, 神戸市街地の隠れた活断層. 日本地質学会環境地質研究会編, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 45-48.
- 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.
- 中川康一, 1996, 深部地下構造と被害. 日本地質学会環境地質研究会編「阪神・淡路大震災」, 東海大学出版会, 257-269.
- 新潟県福島県地震調査グループ, 1995, 1995年新潟県北部地震の被害について. 地質雑誌, **101**, XI-XII (口絵).
- 澤 祥・池田安隆・東郷正美・加藤茂弘・隅元 崇, 1996, 地震動による墓石の移動と伏在断層の挙動. 中川ほか編「阪神・淡路大震災」, 東海大学出版会, 147-156.
- 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, 日本地質学会・日本応用地質学会・関西地質調査業協会・断層研究資料センター・大阪市立大学「阪神大震災」学術調査団, 121-122.
- 嶋本利彦・渡辺満久・鈴木康弘・A. I. コズーリン・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.
- 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年兵庫県南部地震の地震断層—変動地形学的・古地震学的研究と課題—. 地理学評論, **69A-7**, 469-482.
- 高橋 学, 1996, 土地の履歴と阪神・淡路大震災. 地理学評論, **69A-7**, 504-517.
- 竹村厚司, 1997a, 1995年兵庫県南部地震による神戸・芦屋市街地の舗装の亀裂. 地質雑誌, **103**, 21-35.
- 竹村厚司, 1997b, 兵庫県南部地震後の神戸・芦屋市街地における亀裂調査について. 兵庫教育大紀要, **17**, 61-73.
- 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, 日本地形学連合編, 82-94.
- 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)

松田高明・竹村厚司, 1998, 1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向. 地質学論集, 第51号, 67-77. (Matsuda, T. and Takemura, A., 1998, Collapse direction of wooden buildings by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 51, 67-77)

1995年兵庫県南部地震によって倒壊した木造家屋の分布と倒壊方向を, 淡路島北部と六甲山南・東麓で調査した. 木造家屋の倒壊は, 幅1~2kmの帯状の地域に一部を除いて集中した. この帯は, 淡路島では野島断層とその延長上に沿って分布したが, 六甲山南・東麓では知られていた活断層の分布とは一致していない. また, 特定の地形の分布とも一致していない. 倒壊した木造家屋の多くは, 横から押しつぶされた形で一階が傾いていた. このような家屋の倒壊方向を約2,800棟で測定した. その結果, 70%以上の家屋が地域ごとに同一方向へ倒れていることがわかった. この倒壊方向の卓越性は, 地震時の初期に倒壊方向とは逆向きのパルス波が発生し, 多くの家屋が「足払い」を受けたために一地域で同一方向へ倒壊したことを示していると考えられる. 卓越した倒壊方向は, 六甲山南・東麓では, 西から東へ南東・北・西と変化した, その原因は検討課題である.