

アンケート調査による 兵庫県南部地震の大阪府域の震度分布

鶴来雅人¹・澤田純男²・入倉孝次郎³・土岐憲三⁴

¹正会員 工修 財団法人大阪土質試験所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)
²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
³理博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
⁴フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

本研究では、大阪府全域を対象としてアンケート震度調査を実施し、1995年兵庫県南部地震の詳細な震度分布を求めた。得られた震度分布の信頼性を確認するため、地震観測記録から算出される計測震度との比較および他機関が実施したアンケート震度調査結果との比較を行なった。その結果、太田方式によるアンケート震度は計測震度で補正する必要があることが明らかとなった。そこで、本調査結果に対しても補正を行い、信頼性の高い震度分布を得た。さらに、震度分布から見かけの震源、伝播経路およびサイト特性を分離し、断層破壊伝播による指向性の影響、震度の距離減衰特性、サイト特性による高震度あるいは低震度域を明らかにした。

Key Words : seismic intensity, questionnaire survey, The 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Osaka prefecture, directivity

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震では、神戸市から芦屋市、西宮市にかけての地域と、宝塚市と淡路島の一部で震度7と判定された。この震度7は、1948年福井地震後に「木造家屋の倒壊率30%以上をもたらす揺れの強さ」として定められたものであり、今回が初めての適用であった。過去の地震と比較すれば、この兵庫県南部地震では数多くの観測記録が得られたが、震度7の領域内では観測記録は非常に少ない。また、大阪府内においても気象庁や関西地震観測研究協議会¹⁾などの諸機関が地震観測を行なっているが、広範囲の詳細震度分布を得たり、局所的な地震動特性の違いを抽出するほどには地震観測網は充実していない。

一方、太田ほかによって開発されたアンケート調査により震度を算出する手法²⁾(以下「太田方式」と呼ぶ)は詳細な震度分布が得られることから、最近の被害地震ではほとんど調査が行なわれている^{例えは3)~7)}。また、村上、鏡味⁸⁾により修正メルカリ震度階への適用がなされたことにより、海外においても実施されるようになってきた^{例えは9)}。さらに、太田方式が抱える問題点である調査票の配付や

回収の困難さを克服する目的で、コンビニエンスストアを対象とした調査の試み¹⁰⁾もなされている。これらの調査は単に震度分布を求めるにとどまらず、その結果に基づく震度予測式の作成¹¹⁾や Seismic Microzonation への適用^{12), 13)}など、その工学的利用が検討されている。

そこで本研究では、大阪府全域を対象として太田方式によるアンケート震度調査により1995年兵庫県南部地震本震時の震度分布を調査した。得られた結果の信頼性を確認するため、府内で実施されている地震観測の記録から得られる計測震度との比較、および他機関による兵庫県南部地震のアンケート震度調査結果との比較を行った。これらの検討結果から、太田方式によるアンケート震度は地震観測記録を用いて補正する必要があることが明らかとなった。そこで本調査においては、得られたアンケート震度を補正した上で、大阪府域の震度分布を求めた。さらに、得られた震度分布の特徴を明らかにする目的で、見かけの震源、伝播経路およびサイト特性に分離した。

2. 調査概要

アンケート調査は府内の公立、私立高校の2年生および府職員を対象に行なわれた。調査実施時期は1996年1月～2月である。配付枚数は約100,000枚、回収数は75,339枚、有効調査票数は62,081枚であった。

アンケート震度調査では、回答者が地震時に居た場所を特定する必要があるが、本調査では澤田ほかの調査¹⁴⁾に倣い、調査票にメッシュ分割を表示した地図を添付し、回答者が地震時にどのメッシュに居たかを回答してもらうことにより震度分布が比較的簡単に把握できるようにした。メッシュ分割は行政管理庁告示¹⁵⁾によって定められた第3次地域区画のメッシュ分割に倣った。このメッシュ分割は国土地理院発行の2万5千分の1の地形図を縦横10等分したものに相当し、その大きさは東西が約1.1km、南北が約0.9kmである。この方法では、間違っ隣りのメッシュを選んだり、メッシュの境界付近の場合はどちらかのメッシュが選ばれるため、解像度はメッシュの大きさの2～3倍と考えられる。なお、本論文で用いるメッシュ番号は同告示によって定められた方法に基づいた番号である。

兵庫県南部地震における実際の被害状況と太田方式の質問項目、回答選択肢項目を検討してみると、回答者が選択に際し戸惑う質問がある。具体的には、太田方式の質問番号17「家(建物)には、なんらかの被害がありましたか。」に対し、最も被害の大きい選択肢は選択肢番号7「家の傾きが目立った」である。兵庫県南部地震では大阪府内においても府北部の豊中市を中心として家屋の全壊、半壊などの大きな被害が発生している。そこで、回答者が躊躇なく選択できるよう、選択肢番号8「被害が甚大で修理不能」なる選択肢を追加した。なお、本論文ではこの選択肢の震度係数は選択肢番号7と同じ値を用いて震度の算出を行なった¹⁶⁾。

なお、本論文では太田方式における気象庁震度階への変換式によって得られた震度を「アンケート震度(I_q)」と称している。また、本論文で用いる大阪府内の行政区等の位置については付図を参照されたい。

3. アンケート震度分布

1メッシュあたりの有効調査票数が極端に少ない場合は、1枚の回答に震度が大きく左右される。これを避けるため太田方式では経験的に1km²あたり20枚～30枚の有効調査票数が理想的としている。

図-1.1に本調査における各メッシュ毎の有効調査票数を示す。図中空白の地域は有効調査票が3枚に満たない地域である。これより市街地では20枚以上の有効調査票が得られているが、他府県に近い山間部では20枚未満のメッシュが多く存在することがわかる。既往のアンケート震度調査では、配付枚数の限界から1地区あるいは1メッシュに3枚以上の有効調査票がある場合について集計されている例がほとんどである。また、人が居住していないと思われる山地部も含めた府全域に対する集計可能領域の割合は、有効調査票を20枚以上とすると約50%であるのに対し、有効調査票を3枚以上とすると約70%となる。そこで、本論文では広範囲の震度分布を把握するため3枚以上の有効調査票があるメッシュについて集計することとした。なお、1メッシュ内の最多有効調査票数は401枚である。

算出した各メッシュ毎の平均震度分布を図-1.2に示す。震度6となったメッシュはなく、震度5を越える地域が以下のように分布している。

●震度5強

・豊中市、池田市、大阪市西淀川区の一部

●震度5弱

・府北部(豊中市全域、池田市、吹田市、箕面市、茨木市、高槻市など)

・大阪市内西北部(西淀川区、此花区など)

・府南部の湾岸域や内陸部の一部

兵庫県南部地震では断層破壊伝播による指向性(Directivity)の影響が指摘されている^(例えば17)が、このアンケート調査結果でも、震度5強あるいは震度5弱の領域が豊中市から高槻市にかけて、つまり震源から断層破壊伝播方向と同じ北東方向にかけて広がっており、Directivityの影響が顕著に現われている。また、堺市北西部、松原市、藤井寺市付近に周辺地域と比較して震度が低い領域が広がっている。なお、府全域の約60%のメッシュが震度4であり、大阪管区気象台の位置するメッシュでもアンケート震度4と気象庁発表と同じ震度を示している。

なお、本調査では第2章で示したとおり、太田方式の質問番号17「家(建物)には、なんらかの被害がありましたか。」の質問に対する選択肢として、選択肢番号8「被害が甚大で修理不能」なる選択肢を追加したが、この選択肢を選んだ回答者は76名であった。この76名の回答者が地震時に居た場所の分布は、豊中市18名、大阪市西淀川区6名、吹田市5名、高槻市5名などとなっており、アンケート震度の高震度域と対応している。これは、この選択肢の追加が、「震度5を越える高震度領域でアン

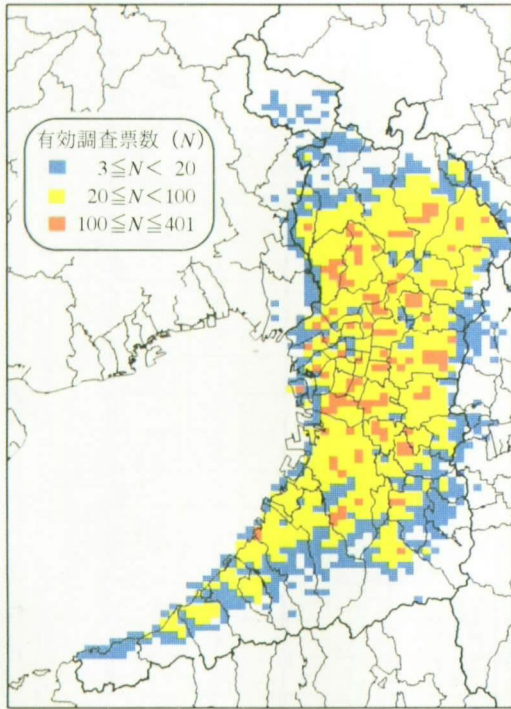


図-1.1 有効調査票数の分布

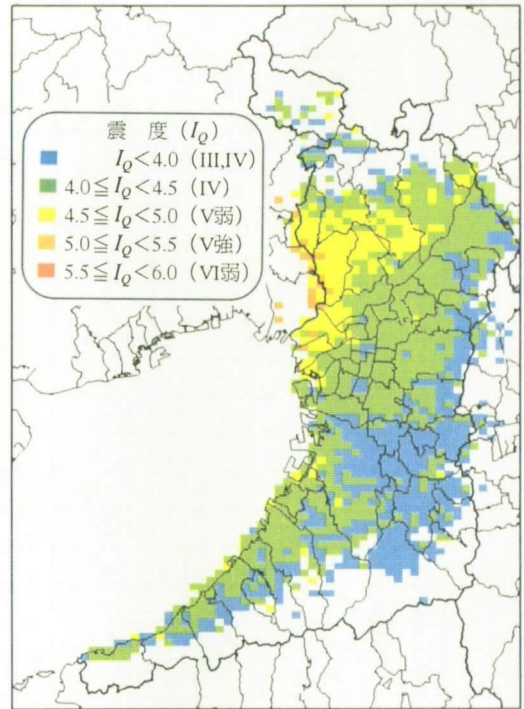


図-1.2 アンケート震度分布

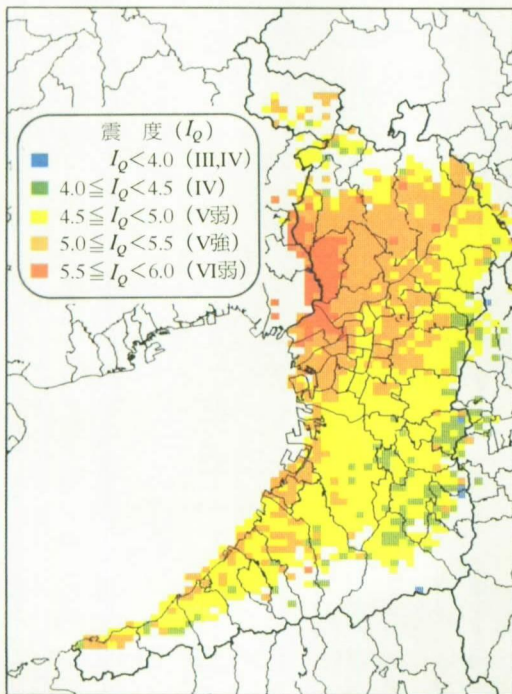


図-1.3 補正アンケート震度分布

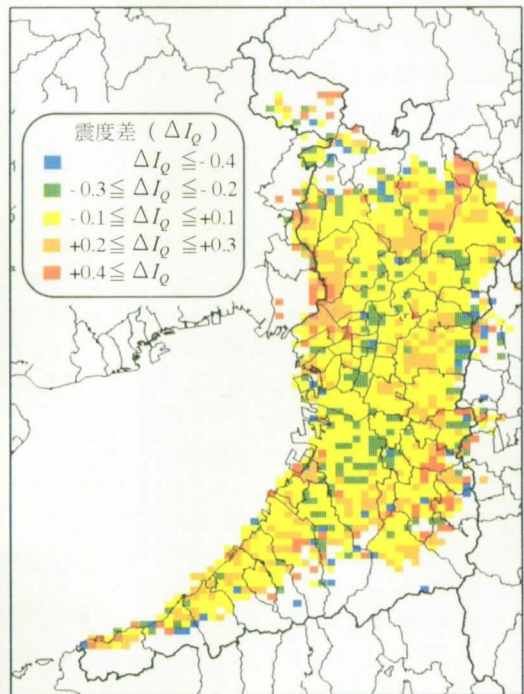


図-1.4 平均震度との差 (ΔI_0) の分布

表-1 アンケート震度と計測震度の比較

地震計 設置地点	メッシュ 番号	アンケート 集計枚数	アンケート震度		計測震度	震度差
			平均値	標準偏差		
大阪市阿倍野区松崎町	51357461	105	3.9	0.3	4.9	-1.0
大阪市中央区法円坂町	52350411	82	3.9	0.4	4.5	-0.6
大阪市西区千代崎町	51357399	36	4.4	0.7	5.1	-0.7
大阪市福島区吉野町	52350327	135	4.6	0.4	5.4	-0.8
堺市東湊町	51356377	84	4.0	0.4	4.8	-0.8
東大阪市稲葉町	52350409	129	4.1	0.3	5.1	-1.0
東大阪市本庄町	52350418	34	4.2	0.7	5.1	-0.9
東大阪市森河内東町	52350415	40	4.2	0.6	5.3	-1.1
吹田市山田北町	52351461	45	4.6	0.6	5.3	-0.7
八尾市東老原町	51357428	45	3.9	0.5	4.7	-0.8
和泉市室堂町	51355357	17	4.0	0.9	4.5	-0.5
藤井寺市古室町	51356478	32	3.7	0.6	4.5	-0.8
大阪狭山市岩室町	51355493	38	4.0	0.6	4.6	-0.6
四条畷市蔀屋新町	52350580	42	4.2	0.6	5.2	-1.0
忠岡町馬瀬	51355372	32	4.2	0.7	5.1	-0.9
阿武山	52352435	23	4.4	0.9	4.5	-0.1
信貴山	51357511	51	3.8	0.5	3.6	0.2

ケートに基づく気象庁換算震度が全般に低く見積もられる傾向にある。」¹⁸⁾という太田方式が抱える問題点を改良する方法の1つとして可能性のあることを示すものであると考えられる。

4. 計測震度との対応

大阪府内では関西地震観測研究協議会など諸機関が地震観測を行っている。そこで、得られた観測記録から気象庁の計測震度を求める方法¹⁹⁾に倣い震度を算出し、この観測点を含むメッシュで得られたアンケート震度との対応を調べた。その結果を表-1および図-2に示す。表-1中、震度差は、

$$(\text{震度差}) = (\text{アンケート震度の平均値}) - (\text{計測震度})$$

で求めている。図-2からわかるように、岩盤観測点である信貴山観測点付近と阿武山観測点付近におけるアンケート震度と計測震度はほぼ一致しているが、その他の観測点付近におけるアンケート震度は計測震度に比べて小さく、平均的に0.8程度の差が認められる。つまり、

$$(\text{計測震度}) = (\text{アンケート震度}) + 0.8$$

となる。図-2に上式で示される関係を表す直線を併せて示した。この図からわかるように、0.8とい

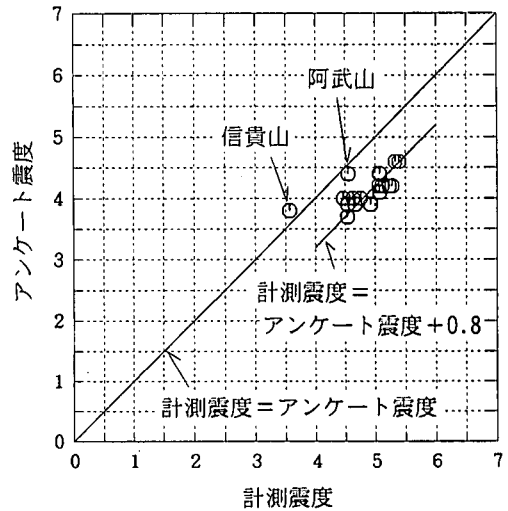


図-2 アンケート震度と計測震度の関係

う平均的な差を考慮すればアンケート震度と計測震度との対応が非常に良い。また、阿武山観測点は地震観測用の坑道内に、信貴山観測点は住居のある地域からかなり離れた岩盤上に地震計が設置されているため、同じメッシュ内でも地震観測点とアンケート震度を求めた地域では地盤条件がかなり異なっている可能性がある。これがこれらの地点にお

いて、他の地点と傾向が異なる原因となったことも考えられる。

アンケート震度が計測震度より0.8程度小さいという結果は、1996年10月19日に日向灘で発生した地震を対象としたアンケート調査結果²⁰⁾でも得られている。一方、計測震度とアンケート震度の間には大きな差はなく調和的である、との検討結果も報告されている²¹⁾。

なお、従来のアンケート震度算定手法の改定案が太田ほかにより提案されているが¹⁸⁾、これは震度5.5を越える高震度領域に対して改善を図る手法であるため、本検討で得られた震度分布および計測震度との差には大きな影響を及ぼさない。また、高田ほか²²⁾は震度係数を見直す方法でアンケート震度算定手法の改定案を検討しているが、これについても同様である。

5. 他機関による調査結果との比較

兵庫県南部地震については、本調査のほかにも神戸大学²³⁾や大阪市立大学²⁴⁾、²⁵⁾により太田方式によるアンケート震度調査が実施された。これら調査の概要を以下に示す。

●神戸大学による調査

- ・調査地域…神戸市や西宮市をはじめとする兵庫県内の7市2郡
- ・調査対象者…中学1年生の父兄、教職員
- ・調査実施時期…1995年8月～1996年2月
- ・集計調査票数…14,910枚

●大阪市立大学による調査

- ・調査地域…九州を除く西日本一帯
- ・調査対象者…高等学校の教師、生徒
- ・調査実施時期…1995年2月、1995年11月
- ・集計調査票数…約20,000枚

本調査では私立学校や府職員も対象としているため大阪府以外の地域においても若干のデータが得られている。また、太田方式の高震度域での適用性を検討するため、神戸市においても追加調査を実施している。この追加調査の概要を以下に示す。

- ・調査地域…神戸市東灘区本山地区
- ・調査対象者…小学生父兄
- ・調査実施時期…1996年3月
- ・集計調査票数…震度6域で168枚、震度7域で165枚

したがって、下記および図-3に示した地域において神戸大学や大阪市立大学による調査対象地域と重複しており、調査結果の比較が可能である。

- ・宝塚市東部の川西市境に近い地域 (Aゾーン)

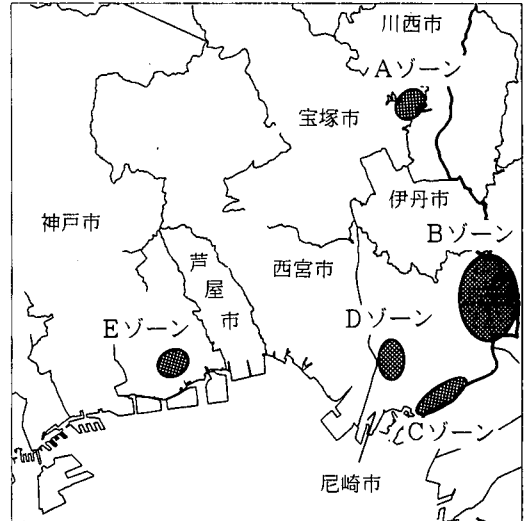


図-3 本調査結果と他機関による調査結果の比較が可能な地域

- ・尼崎市北東部から中東部にかけての大阪府境に近い地域 (Bゾーン)
- ・尼崎市南東部の大阪府境に近い地域 (Cゾーン)
- ・尼崎市西部の武庫川に近い地域 (Dゾーン)
- ・神戸市東灘区本山北町付近 (Eゾーン)

さらに、表-1に示した地震観測点の一部については、大阪市立大学によってもその周辺で調査が実施されており、調査結果の比較が可能である。

そこで、本調査のメッシュ分割から該当する町丁を選定し、神戸大学や大阪市立大学によるアンケート震度と比較した。その結果を示したものが表-2および図-4である。

これより、本調査によるアンケート震度は神戸大学によるそれよりすべての地域で小さくなっていることがわかる。その震度差は0.1～1.4でばらつきが大きい。また、大阪市立大学によるアンケート震度との差は、最大で1.0程度の差が見られるものの、特にどちらの結果が大きいという傾向は見られず、さらに地震観測点においてはほぼ一致している。

本調査と神戸大学による震度差、大阪市立大学によるそれがいずれも小さい地域は、

- ・尼崎市杭瀬本町
- ・同市大庄北町、同市西立花町・神戸市東灘区本山付近 (震度7領域)

であるが、これらと同一ゾーンにおいても震度差が大きいケースも見られ、地域的な特徴は認められない。

同じ方式の調査を実施しているにも関わらず、なぜこのような違いが発生するののかの原因の詳細は

表-2 本調査と他機関調査によるアンケート震度の比較

対象地域			本調査		神戸大学による調査			大阪市大による調査				
			震度	集計 枚数	震度	集計 枚数	震度差	震度	集計 枚数	震度差		
Aゾーン	宝塚市	花屋敷荘園町	5.3	4	5.4	6	0.1	4.8	2	-0.5		
		雲雀丘町	4.1	3	4.5	4	0.4~0.6	5.3	4	1.2		
		雲雀丘山手町			4.7	4						
Bゾーン	尼崎市	次屋町	5.1	6	5.5	18	0.4~0.6	5.2	2	0.1		
		浜町			5.7	21						
		神崎町	5.2	14	5.8	7	0.6~0.8	5.0	7	-0.2		
		戸之内町			6.0	11						
		若王子町	5.0	4	5.7	20	0.7	5.0	27	0.0		
		小中島町			5.7	14						
		額田町	4.5	4	5.6	4	1.1~1.4	4.8	37	0.3		
		弥生ヶ丘町			5.9	5						
		瓦宮町	5.4	5	5.9	11	0.5~0.6	5.3	12	-0.1		
		東園田4丁目			6.0	3						
		東園田1丁目			5.8	7	1.0~1.2	5.1	15	0.3		
		東園田5丁目	4.8	10	5.7	9						
		東園田6丁目			6.0	6						
				食満町	4.9	10	5.5	19	0.6~0.7	5.7	2	0.8
				田能1丁目			5.6	3				
				東園田2丁目	5.1	16	5.9	5	0.7~0.8	5.2	5	0.1
				椎堂町			5.8	5				
				田能3丁目	4.8	3	6.0	6	1.0~1.2	5.2	5	0.4
				田能4丁目			5.8	5				
Cゾーン	尼崎市	杭瀬本町	4.9	80	5.1	5	0.2	4.8	10	-0.1		
		杭瀬南新町	4.6	5	5.6	14	1.0~1.4	5.0	4	0.4		
		東大物町			6.0	5						
		大物町	4.7	11	5.4	13	0.7	4.7	10	0.0		
Dゾーン	尼崎市	大庄北町	5.4	4	5.8	25	0.3~0.4	5.3	3	-0.1		
		西立花町			5.7	33						
		大庄西町	5.2	3	5.7	37	0.5	4.3	2	-0.9		
Eゾーン	神戸市	本山付近(震度6域)	5.3	168	5.7	18	0.4	5.8	39	0.5		
	東灘区	本山付近(震度7域)	6.0	165	6.1	15	0.1	5.8	55	-0.2		
地震観測点	大阪市阿倍野区松崎町		3.9	105	-	-	-	3.9	60	0.0		
	大阪市西区千代崎町		4.4	36	-	-	-	4.5	49	0.1		
	大阪市福島区吉野町		4.6	135	-	-	-	4.5	58	-0.1		
	東大阪市稲葉町		4.1	129	-	-	-	4.0	25	-0.1		
	東大阪市森河内東町		4.2	40	-	-	-	4.4	31	0.2		
	四条畷市部屋新町		4.2	42	-	-	-	4.2	87	0.0		
	阿武山		4.4	23	-	-	-	4.3	19	-0.1		

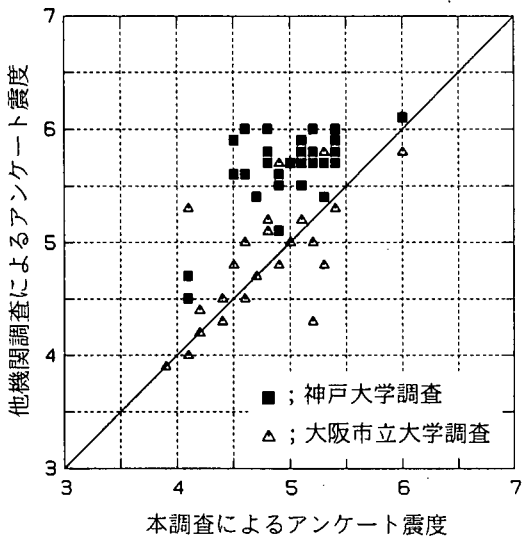


図-4 本調査と他機関調査によるアンケート震度の比較

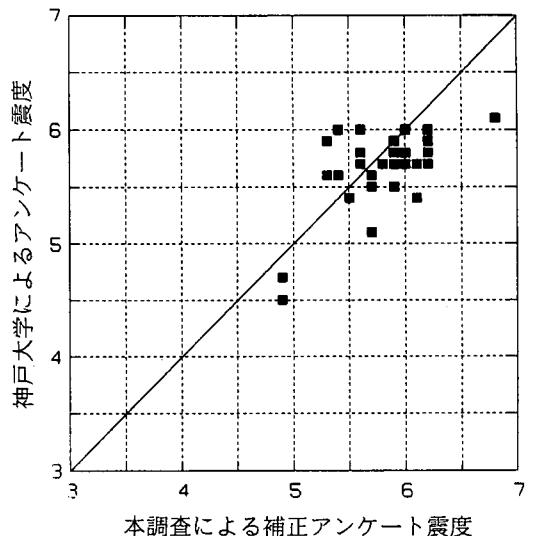


図-5 本調査による補正アンケート震度と神戸大学によるアンケート震度の比較

明らかではないが、若干の考察を加えることとする。まず、実施時期については、神戸大学による調査と大阪市立大学による調査とでは大きな違いはない。一方、主な調査対象者は、神戸大学による調査は中学生父兄、大阪市立大学による調査および本調査では高校生であり、調査対象者がこのような調査結果の差の要因の一つであることが考えられる。

以上の検討から、本調査結果は大阪市立大学の調査結果と同等であるが、神戸大学による調査結果とは整合しないことがわかった。しかし、前章における検討から、本調査によるアンケート震度は0.8を加える補正を行うことにより、計測震度とほぼ一致することが明らかとなっている。一方、神戸大学の結果は震度6.0程度以下の範囲では計測震度とほぼ一致している²²⁾。そこで、この補正を行った本調査によるアンケート震度（以下、「補正アンケート震度」と呼ぶ）と神戸大学によるアンケート震度の比較を図-5に示す。この補正を行うことにより、本調査結果と神戸大学による調査結果はほぼ整合することがわかる。すなわち、神戸大学によるアンケート震度が大きいのではなく、本調査と大阪市立大学によるアンケート震度が観測記録から計算される計測震度と比べて小さいものと考えられる。

6. 地震観測記録で補正されたアンケート震度分布

前章までの検討によって、地震観測記録から得られる計測震度とアンケート震度が良く対応する調

査と、本調査のように計測震度と差が生じた調査結果があることがわかった。すなわち、アンケート震度調査は調査対象者などの諸条件によって結果が変化する可能性があると言える。一方、計測震度は最も客観的な震度の指標と考えられるので、太田方式のアンケート震度調査は地震観測記録から得られる計測震度によって補正する必要があると考えられる。

そこで、図-1.2に示したアンケート震度分布に0.8を加える補正を行った。得られた補正アンケート震度分布を図-1.3に示す。補正前には震度5強であった豊中市、池田市、大阪市西淀川区では震度6弱に、震度5弱であった府北部域などでは震度5強になっている。なお、補正アンケート震度が6強となったメッシュは兵庫県内に5メッシュ、大阪市内に1メッシュ存在する。

各メッシュ毎に得られた補正アンケート震度調査結果を表-3に示す。同表ではメッシュ番号の上4桁が「5135」のメッシュを前半に、「5235」のメッシュを後半に収めた。掲載項目は、

- ・メッシュ番号の下4桁 (No.)
- ・有効調査票数 (N)
- ・補正アンケート震度の平均値×10 (M)
- ・補正アンケート震度の標準偏差×10 (σ)

の4項目である。

7. アンケート震度分布に見られるみかけの震源、伝播経路およびサイト特性

地震動が震源特性、伝播経路特性、サイト特性から説明できることは良く知られている。震源特性とは、地震の規模を表す地震モーメント、断層破壊伝播による指向性 (Directivity)、地震波の放射特性 (Radiation Pattern)、断層破壊の不均一性などである。伝播経路特性は震源からの距離減衰と媒質の内部減衰や散乱減衰などであり、サイト特性は堆積層による地震動の増幅特性や地盤の不整形性による影響などである。本章ではアンケート震度分布にこれらの影響がどのように現れているかについて考察する。

既往の研究では、アンケート震度からサイト特性を評価する試みがいくつかなされている^{12)~14)}。これらの研究では、対象地点における震央距離あるいは震源距離に対する「平均震度」とアンケート震度との差をサイト特性の指標としている。この「平均震度」として、鏡味ほか¹²⁾や澤田ほか¹⁴⁾は対象とする地震について得られたアンケート震度の距離減衰特性から得られる平均的な震度を、宮崎、秋吉¹³⁾は太田、鏡味による震度のアテニュエーション式²⁶⁾から得られる震度を用いている。このとき、これらの検討は次の2点を前提条件としている。

- ①地震動は点震源から等方的に放射される。すなわち中小規模の地震を対象としている。
- ②対象地域内の距離減衰特性は場所によらず一定である。

これに対し、兵庫県南部地震に対する大阪府域では、上記②の条件は満足すると考えられるが、①の条件については、断層長さが 50km 程度と長く、さらに断層破壊伝播による指向性などにより、府内全域が同じ震源特性の影響を受けているとは言えない。つまり、平均的な距離減衰関係との震度差は震源とサイトの両方の特性に依存していると考えられる。したがって、本論文ではまず、府域全体を対象として震度の距離減衰特性の平均像を求め、これを見かけの伝播経路特性と考える。次に断層破壊伝播による指向性の影響がブロック内でほぼ同等と考えられる十数ブロックに府域を分割し、すべてのブロックでの距離減衰は見かけの伝播経路特性と等しいとして、各ブロック毎の震度のレベルを求め、これを見かけの震源特性とする。さらに見かけの震源特性と伝播経路特性から求められる平均的な震度とアンケート震度との差を見かけのサイト特性と見なした。

府域の分割は以下に示す方法で行なった。

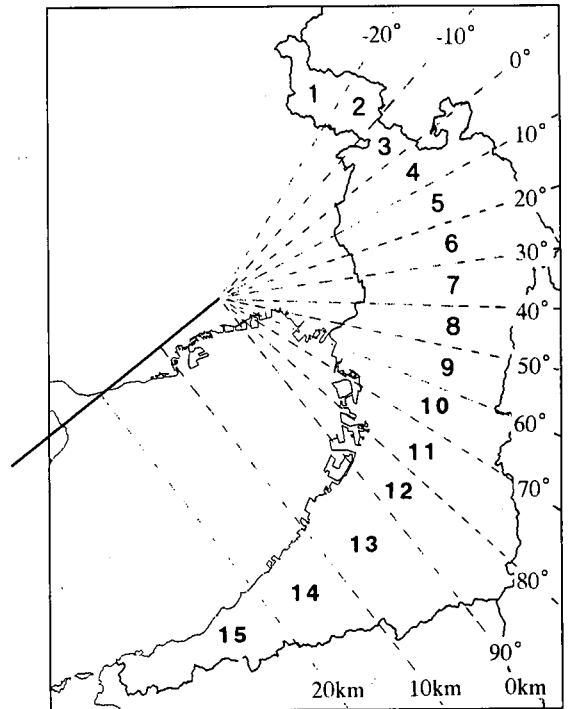


図-6 ブロック分割図

まず、兵庫県南部地震の断層モデルを設定する。ここでは経験的グリーン関数重ね合わせ法^{27), 28)}を用いたフォワードモデリングによる検討結果²⁹⁾を参考に、気象庁発表の震央位置から N53E へ 24km, S53W へ 11km の大きさとし、傾斜角を 90° とした。続いて、この断層線の東端と各メッシュの中心を結ぶ線とこの断層線の北東方向延長線との角度 (θ) に応じ、

$$\theta \leq -20^\circ$$

を「ブロック 1」とし、

$$-20^\circ < \theta \leq 90^\circ$$

の範囲を 10° 毎の計 12 ブロックに分割する。ここで角度は、断層線の北東方向延長線から時計回り方向をプラス、反時計回りをマイナスとして表示している。さらに、 θ が 90° を越える府南部域については、ブロック 12 との境界線からの距離 (D) に応じて、

- ・ブロック 13 $0\text{km} < D \leq 10\text{km}$
- ・ブロック 14 $10\text{km} < D \leq 20\text{km}$
- ・ブロック 15 $20\text{km} < D$

の 3 ブロックに分割する。こうして得られたブロック分割図を図-6 に示す。図中太線は設定した断層線、破線はブロック境界線、強調数字は各ブロック番号を示している。なお、本章では補正アンケート震度を用いて検討を行う。

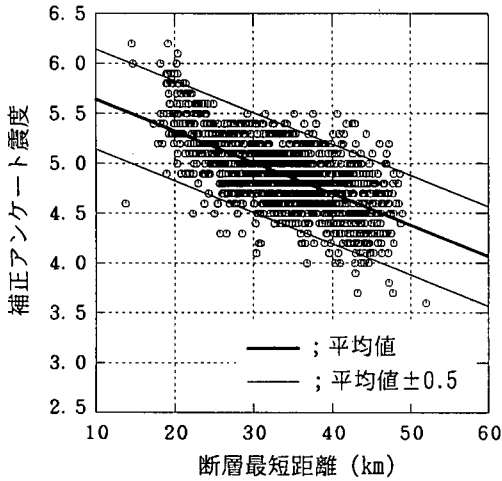


図-7 補正アンケート震度の距離減衰特性

表-4 各ブロック毎の平均オフセット値

ブロック番号	オフセット値	ブロック番号	オフセット値
1	5.8390	2	5.7572
3	5.6746	4	5.8959
5	6.1941	6	6.1672
7	5.9939	8	5.9045
9	5.8743	10	5.7879
11	5.7347	12	5.8574
13	5.9330	14	5.8843
15	5.8595	-	-

ブロック番号

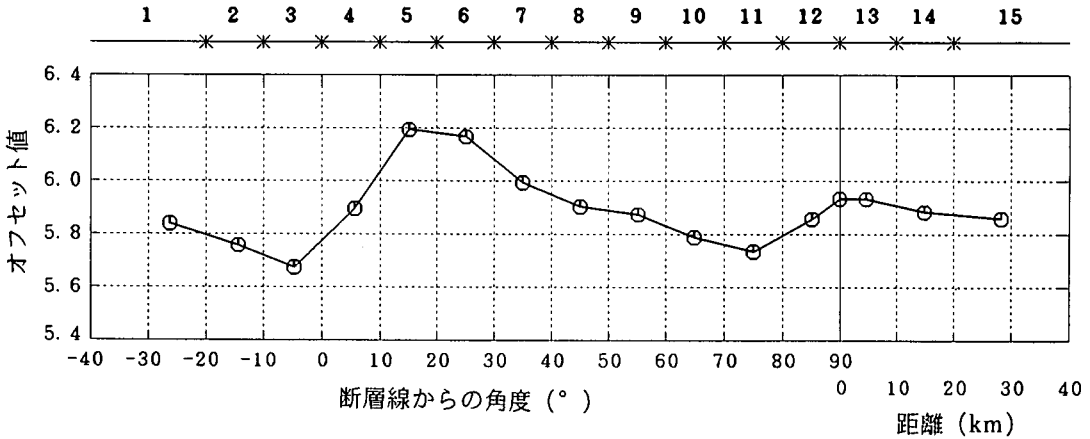


図-8 断層線からの角度あるいはブロック12とブロック13の境界線からの距離とオフセット値の関係

(1) 距離減衰特性

図-7に府全域を対象とした断層最短距離 (X) と補正アンケート震度 (I_{ϕ}') との関係を示す。ここで、断層最短距離は各メッシュの中心から断層線までの最短距離である。最小二乗法により得られるこれらの平均的な関係は次式となり、図-7中、太線で示される。

$$I_{\phi}' = -0.0315 X + 5.9562$$

なお図中、細線は上式で得られる $I_{\phi}' \pm 0.5$ の線である。

これより、断層からの最短距離が同じでも、震源特性あるいはサイト特性の影響により1.0程度の震度差が見られることがわかる。

(2) 震源特性

分割した各ブロック毎の距離減衰特性を、距離に係る係数を府域全体に対して得られた値 (-0.0315) と同一、つまり

$$I_{\phi}' = -0.0315 X + (\text{平均オフセット値})$$

として、オフセット値を求めた。得られた各ブロック毎の平均オフセット値を表-4に示す。各ブロック毎の距離減衰特性のオフセット値の違いは各ブロックにおける震源特性の違いと考えることができる。

このオフセット値と断層線からの角度あるいはブロック12とブロック13の境界線からの距離との関係を示したのが図-8である。ただし、角度 90° におけるオフセット値は、断層線からの角度 (θ) が

$$87.5^\circ < \theta \leq 92.5^\circ$$

の範囲に位置するメッシュについて、別途その距離減衰特性を求め、これより得られた値「5.9343」を採用した。

これより断層線からの角度が 20° 付近でオフセット値は最大となることがわかる。これは、断層破壊伝播による指向性の影響を顕著に示すものと考えられる。ここで角度が 20° の方が 0° の場合よりやや大きいのは、ブロック1～ブロック4の地域は比較的地盤の良いところが多く震度が小さかったと推定されることが考えられる。また、オフセット値は角度が 90° 付近で極大となっている。これは、地震波の放射特性に拠るものと考えられる。

一方、角度が -5° 付近でオフセット値は最小となっている。これは前述したように地盤が比較的良好なので震度が小さかったため、すなわちサイト特性を分離しきれなかったことによるものと考えられる。

(3) サイト特性

(1) および (2) で得られた特性から各メッシュ毎に対応する断層最短距離 (X) に対する平均震度を次式より算出した。

$$\begin{aligned} (\text{平均震度}) = & -0.0315 X \\ & + (\text{各メッシュのオフセット値}) \end{aligned}$$

ここで、各メッシュのオフセット値は、断層線との角度あるいはブロック12とブロック13の境界線からの距離に応じて、図-8に示したオフセット値を内挿あるいは外挿することによって求めた。

得られたアンケート震度とこの平均震度との差がサイト特性を表していると考えられる。この差の分布を示したのが図-1.4である。これより、平均震度より0.4以上高い震度となった地域が

- ・豊中市、池田市、大阪市西淀川区、高槻市、島本町など府北部域の一部
- ・府南部の山地と平野の境界部
- ・府南部の湾岸の一部

に見られる。また、0.2ないし0.3高い震度となった地域が

- ・豊中市、大阪市西淀川区、茨木市、高槻市
- ・軟弱な地盤が広がっている東大阪市の一部

に集中的に見られる。これに対し、平均震度より0.4以上低い震度域が、

- ・上町台地（洪積地盤）の一部
- ・生駒山地

に見られる。また、全体的に平均震度より高震度域となっている府北部域において、吹田市に広がっている千里丘陵（洪積地盤）ではほぼ平均震度に等し

いという特徴的な結果が得られた。

8. おわりに

本論文では、大阪府域を対象として太田方式によるアンケート震度調査を行ない、1995年兵庫県南部地震本震時における震度分布を明らかにした。得られた成果を以下に示す。

- ①兵庫県南部地震本震時の大阪府全域の震度分布を求めた。その結果、高震度域が府北部に集中して見られること、堺市北西部、松原市、藤井寺市などではその周辺地域に比べ震度の低い地域が広がっていること、が明らかとなった。
- ②地震観測網の観測記録から得られる計測震度とアンケート震度との対応関係を検討した結果、岩盤観測点を除いてアンケート震度は計測震度より0.8程度小さく評価されていることが明らかとなった。しかし、この点を補正すれば計測震度との対応が非常に良いことがわかった。
- ③本調査と他機関による調査が重複して実施された地域について、そのアンケート震度を比較した。その結果、神戸大学によるアンケート震度は本調査によるそれより若干大きいことがわかった。一方、大阪市立大学によるアンケート震度は、多少ばらつきはあるものの、本調査結果と同等であることが明らかとなった。また②で示した計測震度との平均的な差を考慮すれば、神戸大学によるアンケート震度と整合性のある結果が得られることが明らかとなった。
- ④太田方式によるアンケート震度調査は、調査対象者などの諸条件により結果が変わる可能性があるため、地震観測記録から求められる計測震度との比較により結果を補正する必要があることがわかった。本検討では上記②の結果を踏まえ、アンケート震度に0.8を加えることにより兵庫県南部地震の大阪府域における補正アンケート震度分布を求めた。
- ⑤兵庫県南部地震では断層破壊伝播による指向性の影響が指摘されている。そこで、府域を震源特性の影響がブロック内でほぼ同等と考えられる十数ブロックに分割し、距離減衰式におけるオフセット値を各ブロック毎に求めた。その結果、この値はあらかじめ設定した断層破壊方向 (N53E) から時計回りに 15° 付近で極大、 75° 付近で極小となり、再び 90° 付近で極大値を示すことがわかった。これは、主に断層破壊伝播による指向性および放射特性に起因するものと考えられる。
- ⑥さらに⑤の結果を利用して、各メッシュ毎に平均

的な震度を求め、これと本調査による震度との差を取ることにより見かけのサイト特性の影響を抽出した。これより、府北部域、東大阪市の一部、湾岸部、山地と平野の境界部に平均的な震度より大きい地域が見られる。これに対し、上町台地や生駒山地の一部では平均的な震度より低震度域となっていることがわかった。

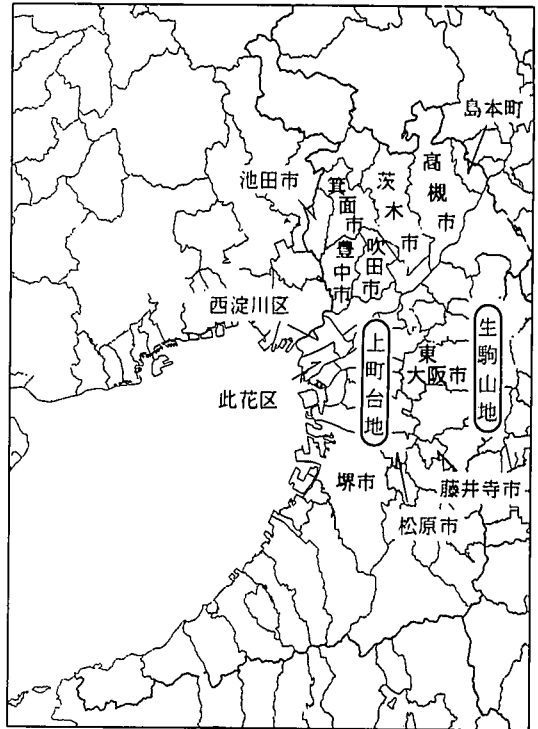
謝辞：アンケート調査は大阪府生活文化部防災計画室（現消防防災安全課）、同土木部土木監理課、同教育委員会、神戸市立本山第1小学校の全面的な協力により実施した。鏡味洋史北海道大学教授、村上ひとみ北海道大学助手（現山口大学助教授）にはアンケート調査項目の設定に関しご教授頂いた。高田至郎神戸大学教授、中川康一大阪市立大学教授には神戸大学および大阪市立大学が実施したアンケート震度調査結果の使用を快く了承して頂いた。また、本研究の一部は関西ライフライン研究会（座長：亀田弘行京都大学教授）の活動の一端として行なったものである。さらに、計測震度算出にあたっては、気象庁、京都大学地震予知研究センター、関西電力株式会社、大阪ガス株式会社、関西地震観測研究協議会による観測記録を用いた。以上の方々、機関ならびにアンケートに回答頂いたすべての方々にお礼申し上げます。

付録

本論文中で用いた大阪府内の行政区等の位置を付図に示す。

参考文献

- 1) Toki, K., Irikura, K. and Kagawa, T.: Strong motion records in the source area of the Hyogoken-Nanbu earthquake, January 17, 1995, Japan, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 16, No. 2, pp. 23-30, 1995.
- 2) 太田 裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ: アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, No. 92, pp. 241-252, 1979.
- 3) 荏本孝久, 鏡味洋史, 望月利男: 釧路市内の震度分布と被害, 第21回地震震動シンポジウム, pp. 49-60, 1993.
- 4) 鏡味洋史, 岡田成幸: 1993年1月15日釧路沖地震の北海道内高域震度分布調査, 日本建築学会1993年度大会学術講演梗概集B, pp. 9-10, 1993.
- 5) 高井伸雄, 鏡味洋史, 岡田成幸: 1993年7月12日北海道南西沖地震の市町村別震度調査, 日本建築学会1994年度大会学術講演梗概集B, pp. 305-306, 1994.



付図 論文中で用いた大阪府内の行政区等の位置

- 6) 天国邦博, 鏡味洋史, 榎永幸介: 1994年北海道東方沖地震における釧路市の震度分布調査, 日本建築学会1995年度大会学術講演梗概集B-2, pp. 23-24, 1995.
- 7) 鏡味洋史, 高井伸雄: 1994年10月4日北海道東方沖地震・1994年12月28日三陸はるか沖地震の高密度震度調査, 日本建築学会1995年度大会学術講演梗概集B-2, pp. 25-26, 1995.
- 8) 村上ひとみ, 鏡味洋史: アンケートによる高密度震度調査法の修正メルカリ震度階への適用, 地震2, Vol. 44, pp. 271-281, 1991.
- 9) Toshinawa, T. and Berrill, J. B.: Questionnaire of intensity in Christchurch, New Zealand, for the 1994 Arthur's Pass earthquake, *Annual Meeting of Seismological Society of Japan*, No. 2, p. 253, 1994.
- 10) 大堀道弘, 奥田 暁, 若松邦夫, 安井 譲: コンビニエンスストアを対象としたアンケート震度調査の試み - 1994年10月4日北海道東方沖地震を例として -, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 478, pp. 71-79, 1995.
- 11) 岡田成幸, 宮川忠芳, 太田 裕: 高密度震度調査にもとづく地域内震度予測式の構成 - 札幌市を例として -, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 348, pp. 11-17, 1985.

- 12) 鏡味洋史, 岡田成幸, 高井伸雄: アンケート震度調査に基づく北海道の地震危険度マップ, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.139-144, 1994.
- 13) 宮崎雅徳, 秋吉 卓: アンケート震度調査による表層地盤特性の抽出と Seismic Microzonation への適用性, 土木学会論文集, Vol.495, pp.119-126, 1994.
- 14) 澤田純男, 小野和雄, 岩崎好規: 1990年1月11日滋賀県中部地震の滋賀県内の震度分布調査, 第46回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, pp.30-31, 1991.
- 15) 行政管理庁: 統計に用いる標準地域メッシュおよび標準メッシュコード, 行政管理庁告示第143号, 1973.
- 16) 鏡味洋史, 村上ひとみ: 私信
- 17) 土岐憲三, 後藤洋三, 江尻諺嗣, 澤田純男: 兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, Vol.80, No.9, pp.32-43, 1995.
- 18) 太田 裕, 小山真紀, 中川康一: アンケート震度算定法の改訂 -高震度領域-, 自然災害科学, Vol.16, pp.307-323, 1998.
- 19) 震度問題検討会: 計測震度の算出方法, 震度問題検討会検討結果最終報告, 1995.
- 20) 尻無濱昭三, 宮崎雅徳, 榎崎秀樹, 梅田慎一: 日向灘で発生した地震(1996年10月19日)のアンケート震度調査による精密震度分布図と計測震度との比較, 日本建築学会1997年度大会学術講演梗概集B-2, pp.47-48, 1997.
- 21) 中村 操, 野越三雄, 山本佳史, 山田 真: 計測震度とアンケート震度の関係, 日本地震学会1996年度秋季大会予稿集, A52, 1996.
- 22) 高田至郎, 上田直樹, 田中良英: 計測震度に対応する新しいアンケート震度の算定手法, 土木学会平成10年度関西支部年次学術講演会講演概要集, I-29, 1998.
- 23) 神戸大学工学部建設学科土木系教室耐震工学研究室兵庫県南部地震アンケート調査分析グループ(代表高田至郎, 嘉島崇志): 兵庫県南部地震に関するアンケート調査 -集計結果報告書-, 1996.
- 24) 中川康一, 根本泰雄, 井上直人, 千田智志, 岡本健太郎, 三田村宗樹, 升本真二, 柴山元彦, 領木邦浩, 辻江賢次: 兵庫県南部地震の広域アンケート震度調査(1) -調査結果の概要とマイクロゾーニング-, 1998年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, p.384, 1998.
- 25) 中川康一, 井上直人: 私信
- 26) 太田 裕, 鏡味洋史: 震度分布の簡易予測法-アンケート調査からの成果を利用して-, 第15回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp.281-282, 1978.
- 27) Hartzell, S.H.: Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 28) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 29) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.500, pp.29-36, 1997.

(1998.1.22 受付)

DISTRIBUTION OF SEISMIC INTENSITY IN OSAKA PREFECTURE DURING THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE BASED ON QUESTIONNAIRE SURVEY

Masato TSURUGI, Sumio SAWADA, Kojiro IRIKURA and Kenzo TOKI

A questionnaire survey is carried out to investigate the distribution of seismic intensity in Osaka prefecture during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. The results are compared with the measured seismic intensity calculated from the observed records and the questionnaire seismic intensity resulted by other surveys in the overlapped regions. It is concluded that the questionnaire seismic intensity needs to be corrected using the observed strong motions. The reliable distribution of the seismic intensity is obtained by adding 0.8 to the questionnaire seismic intensity. The effects of source, path, and site characteristics on the seismic intensity distribution are also examined.