

# 西宮市におけるGISを利用した地震被害と 地形、地盤との関係分析

碓 井 照 子\*

GIS Analysis of the relationship between disaster damage and landform  
in Nishinomiya city

Teruko Usui

## はじめに

本研究は、阪神淡路大震災直後から京都大学防災研究所の亀田研究室と碓井研究室の共同研究成果をベースに国土地理院の2種類のデジタル地形分類を利用して筆者が地形と地震被害の関係をGISで詳細分析した結果をまとめたものである。西宮市における震災の帯の成因と伏在活断層からの距離別被害分析に関しては、すでに「第四紀研究」に発表した、(碓井、2000)本稿で使用した地震被害のデジタルデータは、碓井研究室と亀田研究室で共同作成したものである。また、この分析で使用したデジタル地形分類図は、3種類ある。一つは、前述した共同研究のデータベースに地震工学の立場から大地形分類図を作成したものである。より、詳細な分析をするため、国土地理院が作成した2種類の地形分類図も使用した。

国土地理院は、震災後、地形や土地条件と地震被害の関係を分析するため、被災地域の6図葉(長田、三宮、六甲アイランド、芦屋、西宮、1:10000)について、GISを利用した詳細なデジタル地震防災土地条件図を作成した。学識経験者による地震防災土地条件調査検討委員会(委員長:沖村孝、神戸大学工学部土地造成工学)が組織され、地形分類図や旧土地利用図、斜面崩壊場所や等高線等がデジタル化された。(国土地理院、1996)この国土地理院の研究では、2種類のデジタル地形分類図が作成されている。一つは①低地の地形分類に重点を置いた地形区分図と②地形形成年代に重点をおきながら、空中写真判読や現地調査により田中眞吾が作成した微地形分類(1997)にもとづくものである。後者はこの報告書では微地形分類図と呼んでいる。紙地図として国土地理院が発行した地震防災土地条件図は、この2種類の地形分類を合成したものである。地震防災土地条件図では、山地、丘陵、台地に関しては、主に田中の地形発達史による地形分類を、低地に関しては立地条件による地形分類を重視しており、全体としては、この2種類の地形分類を融合した分類図になっている。

国土地理院では、この2種類のデジタル地形分類図と建物被害から地形と地震被害に関して分  
平成14年9月27日受理 \*文学部地理学科

析した。①被災地域の占める割合は、緩扇状地でもっとも多く、扇状地がつぎに多い。緩扇状地をピークに海側、山側に被害率が減少し、震度7地域とおおむね重なる。②台地上の浅い谷で被害棟率が高い。また、自然堤防や砂州・砂堆は、谷底平野・氾濫平野や海岸平野・三角州に比べてやや高い被害率を示す。③微地形分類と建物被害においては、段丘、扇状地とも形成年代の新しい地域ほど被災地域の占める割合が高いが、これ以外の被害傾向もあり漠然としている。つまり、この研究では、地形と建物被害の関係に関して上記のような特性は見られたが、地形と建物被害に強い相関があるとは断定していない。

阪神淡路大震災の研究では、関東大震災以降定説になっていた軟弱な地盤である沖積低地における建物地震被害との強い相関が見られず、海洋性型地震と直下型地震における建物被害の相違は明確になったといえる。この問題を解決するためには、より詳細な分析が必要である。本研究の目標は、活断層等に起因する直下型地震において地盤/地形と地震被害の関係をGISにより分析することにある。

## 1.2 深層地盤構造による地震動増幅特性と地形分類

兵庫県南部地震では、東北東にのびる幅1-2kmの帯状の被害激甚地域がみられた。この要因については帯直下での伏在断層（嶋本ほか、1995、平野ほか、1995）をはじめ基盤の段差構造による地震波の増幅の干渉や断層破壊の進行方向に依存する地震動特性であるdirectivity効果による被害拡大（篠崎、1995、入倉、1996、山中、1998）などが注目され、地下の深層地盤構造も考慮した地盤分類がなされるようになった。深層地盤構造が地震被害と地盤条件分析で注目されることは、これまでより地震被害分析において地形条件の重要度が増したと言えよう。深層地盤構造は、日本の盆地縁辺部や海岸平野、河川平野などの山麓部に見られる傾斜変換線下の断層（活断層も含む）などに影響する場合が多く、これらの地質構造的な違いは、地表面に多様な地形として現象化している場合が多い。断層にそって形成された構造谷や旧河道、山麓部の傾斜の急な扇状地群などである。若松ら（1998、pp.1077~1082）は大阪平野における短周期微動観測から微動の水平上下スペクトル比（微動H/V）よりサイズミックゾーンニングの可能性を示唆した。その中で、H/V比のスペクトル形状による5つのタイプ（岩露頭型、山地境界型、洪積層型、沖積層型、埋めたて型）を分類し、山地境界型などが地下の地質構造を反映した地盤分類であるとした。

震災の帯の被害激甚地域に関する研究成果では直下型地震の場合には、断層破壊の進行方向に依存する地震動特性であるdirectivity効果の重要性が指摘されている。このdirectivity効果によるパルス波は、地震断層直行方向の狭い範囲に生じ、激甚被害をもたらすといわれており、このパルス波が、深部不整形地盤構造で生じた場合にはさらに増幅され、キラーパルスといわれる強震動が生じる。筆者は、西宮地域の伏在活断層（西宮撓曲）をはじめ、1:25000都市圏活断層図に記載された3本の活断層から200mの帯状地域をGISのバッファ分析で作成し、200m幅の帯状地域毎に建物や地下埋設管（配水管と給水管）及び道路変状について距離別被害比率をGIS分析した。（碓井、2000）その結果①建物被害に関しては西宮撓曲の下盤にあたる沖積層側に断層から1km程度のところに建物被害全壊率が戦前の木造家屋で90%、木造家屋70%、全建物60%、中高層のRC構造建物（50%）を越すピークが見られ僅か2kmの範囲で半減する全壊率の急減が見られた。これらは

恐らくキラーパルスと呼ばれる強震動が、堆積層側で不整形地盤によるエッジ効果や或いはフォーカシング効果により狭い範囲で被害が増幅されたことを示している。直下型地震の地震断層からの建物被害に関する距離減衰関数は、海洋型地震の距離減衰関数とは異なる特性を有する。

地下の地質構造を本質的に反映していると考えられる地形分類の重要性は、地震被害想定においてもその社会的意義が評価されると考えられ、表層地盤だけでなく、深層地盤を考える上でも地形分野は重要である。

### 1.3 人工構造物の差異と地震被害

兵庫県南部地震における構造物被害は、一般家屋と地下埋設管とは異なった傾向を示すといわれている。(岩井ほか、1996) 特に地下埋設物は地表付近の地盤条件が被害分布に大きく影響し、(亀田ほか、1996) 局地的な表層地盤の影響を強く受け、(渡辺ほか、1998) 地震動の大きさに直接関係すると考えられる。このように上下水道の埋設管被害などは、地盤変状である道路上の亀裂や陥没などの分布と関係が深く、軟弱な表層地震の影響が直接的に被害に関係づけられるが、建物被害は、地盤改良、建物の耐震構造により被害が低減される場合も多く、建設年代、建築構造を考慮して被害分析をしなければならない。

前述した3つの分析視点をベースに西宮市における地震被害と地盤条件を地形分類の視点から分析する。

### 1.4 3種類のデジタル地形分類図とGIS分析

本研究で利用した地形分類は、山地、丘陵地、宅造地、沖積平野、臨海部軟弱地盤地帯、埋立地という一般的な地形分類に対応した、概略的な大地形分類と数値地図10000(西宮市)をベースに国土地理院が作成した低地の土地条件分類に重点を置いた地形区分、これは、基礎資料として2万5千分の1の土地条件図である大阪西北部、神戸(1966年発行)と大阪西北部(1983年発行)、仮製2万分の1地形図、地盤高線を利用し、米軍作成の1万分の1の空中写真判読結果から作成されたものである。いまひとつは、地形形成年代に重点をおきながら、空中写真判読や現地調査により田中眞吾が作成した微地形分類(1997)にもとづくものである。

本研究では、筆者が区分した大地形分類図と国土地理院の協力のもとに前述した2種類のデジタル地形分類図を利用している。3種類のデジタル地形分類図とは、①地盤を反映した大地形分類、②低地の土地条件をベースにした地形分類図、③地形形成年に重点をおいた地形分類図の3種類である。

## 2. 地下埋設管被害と地盤条件と地形分類の関係

### 2.1 地盤変状と道路被害

地盤条件を反映した大地形分類として「山地」、「丘陵地」「沖積平野」、「臨海部軟弱地盤地帯」、「埋立地」の5種類に地形を区分した。「山地」は六甲花崗岩や甲山安山岩が卓越する地域を、「丘陵地」は大阪層群とこれを覆う中位段丘、高位段丘が卓越する地域、「平野」は沖積層が広が

る地域、「埋立地」は地図で埋立地と表記されている部分を区分した。「山地」と「丘陵地」の境界領域や、「丘陵地」と「沖積平野」の境界領域における段丘上の住宅地は宅地造成が行われているものと考え、特に「造成地（宅造地）」という分類を設けて解析を行った。（岩本ほか、1997）また、表層地質を詳細にデータベース化するために、西宮市教育委員会から提供された767本（146地点）のボーリングデータを用いた。（月岡ほか、1997）それを基に、地表面から15～20m程度の深さまでの地盤の軟弱さを表す指標として亀田の $S_n$ 値を計算した。（亀田、1990） $S_n$ 値は、 $-0.6 \sim -0.2$ 程度でよく締まった地盤、 $-0.2 \sim 0.2$ 程度で普通の地盤、 $0.2 \sim 1.0$ 程度で軟弱地盤とされている。

つぎに兵庫県南部地震における道路の被害状況をGISで地図化し、地下埋設管の被害分布図を作成した。（亀田、1997）西宮市より提供された道路被害状況図をもとに、京都大学亀田研究室と奈良大学碓井研究室が共同作業をし、道路の修理箇所を整理して、国土地理院の数値地図10000に道路被害状況箇所を線ベクトルで入力した。（亀田他、1997）図1の道路被害状況図は何らかの道路修理を行った場所を示している。道路面に変状が現れることは、液状化による地盤の変状、傾斜地における地盤移動など地盤震動による地盤破壊が生じたことを意味し、上水道の管路網における配水管の被害箇所に影響したと考えられる。

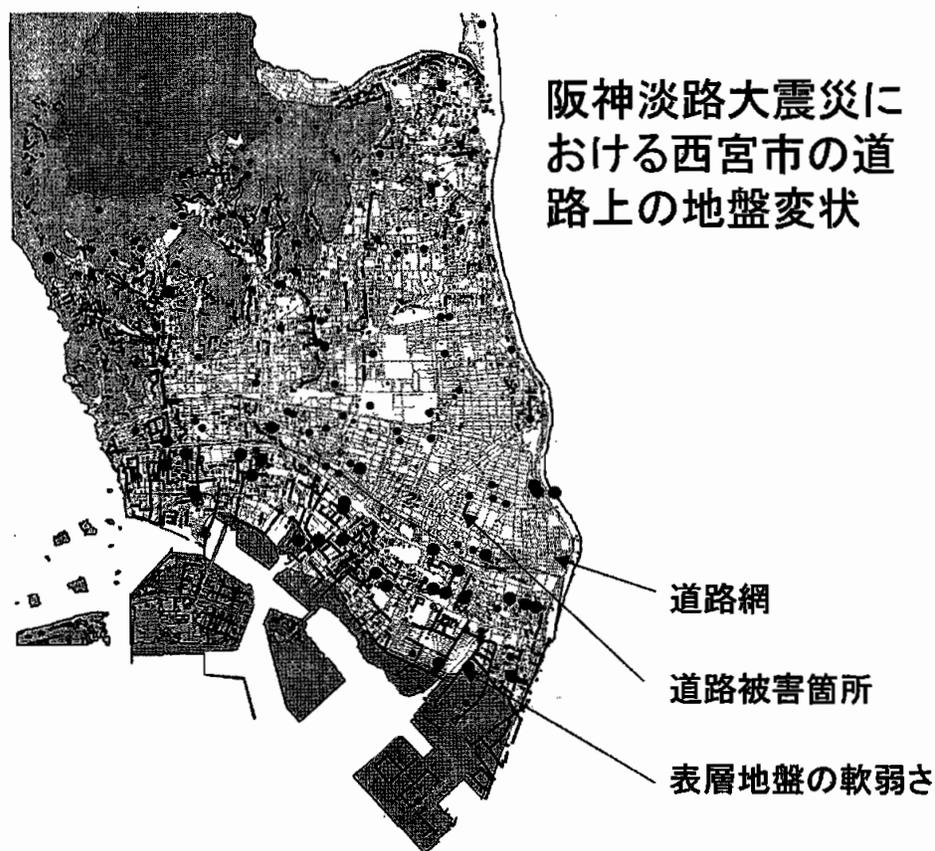


図1 阪神大震災における西宮市の道路上の地盤変状  
京大防災研亀田研究室との共同研究成果より

表1 西宮図副一万分の1における道路上の被害（地盤変状）

土地条件分類	道路上の被害 総道路延長m	道路上の 被害箇所総数	道路上の被害総道 路延長の標準偏差	道路上の被害 道路長平均値m
海岸平野・三角州	26227	812	46	32
旧河道	687	27	35	25
旧水部	29	2	3	15
後背湿地	4594	146	39	31
砂州・砂堆	4258	176	25	24
山地斜面	4865	201	23	24
自然堤防	4136	231	29	18
人工斜面	8	1		8
扇状地	10948	367	38	30
台地・段丘	1116	48	24	23
谷底平野・氾濫平野	4336	137	32	32
天井川の微高地	3861	123	35	31
内水面	139	2	76	69
氾濫平野	7808	455	24	17
埋立地	4949	41	75	116

道路上の被害箇所の長さ

## 2.2 配水管被害と軟弱地盤

上水道の管路網については、1/500の上水道管路網図を基に管径200mm以上の配水管幹線管路と阪神水道企業団の管路網を線ベクトルで入力した。図2には、道路被害箇所、配水管の被害箇所と液状化の発生地域（埋立地）が示されている。配水管被害箇所は、西宮市水道局によって配水・給水管の修繕工事が行われた場所などが記された1/500の水道管図を基に、配水管工事のみを抜き出して点ベクトルで場所を入力した。配水管の修繕箇所は1,035箇所であり、配水管被害の内容は、西宮市水道局から提供された修繕派遣カードを基にした。なお、修繕箇所および修繕内容は1995年7月5日現在のデータである。（月岡・藤本ほか、1997）被害箇所は丘陵地と沖積平野の境界部分（宅地造成が多く行われている地域）と沖積平野の海岸部に多い。図3、はSn値の分布も示しているが、軟らかい地盤を表す $Sn \geq 0.2$ の点の分布は、道路被害箇所および配水管の被害分布とかなり深い関係を示す。一方、被害箇所と液状化の発生地点を比較すると、大規模な液状化が発生した明治（1870年）以降の埋立地にはほとんど被害がないことがわかる。特に西宮浜・甲子園浜・鳴尾浜などの埋立地では管の布設が比較的新しく、あらかじめ耐震継手付きダクタイル鋳鉄管などの耐震管を採用している場合の多いことが理由と考えられる。配水管の被害の場合は、丘陵地と沖積平野の境界部分の、地形変遷部の帯状部分の宅地造成を行ったと考えられる地域と海岸側の臨海部軟弱地盤地帯で被害率が高く、耐震管の普及により、液状化地域には目立った被害は見られない。

## 2.3 給水管被害の特徴

給水管の被害箇所の分布を図4に示す。給水管破損箇所の分布も、北東から南西にのびる丘陵地帯から臨海部軟弱地盤地帯を経て埋立て地へと広がっており、配水管よりは沖積平野部にも全体的に被害箇所が見られる。丘陵地帯の沖積平野と丘陵地が複雑に入り組んでいる地域では、特

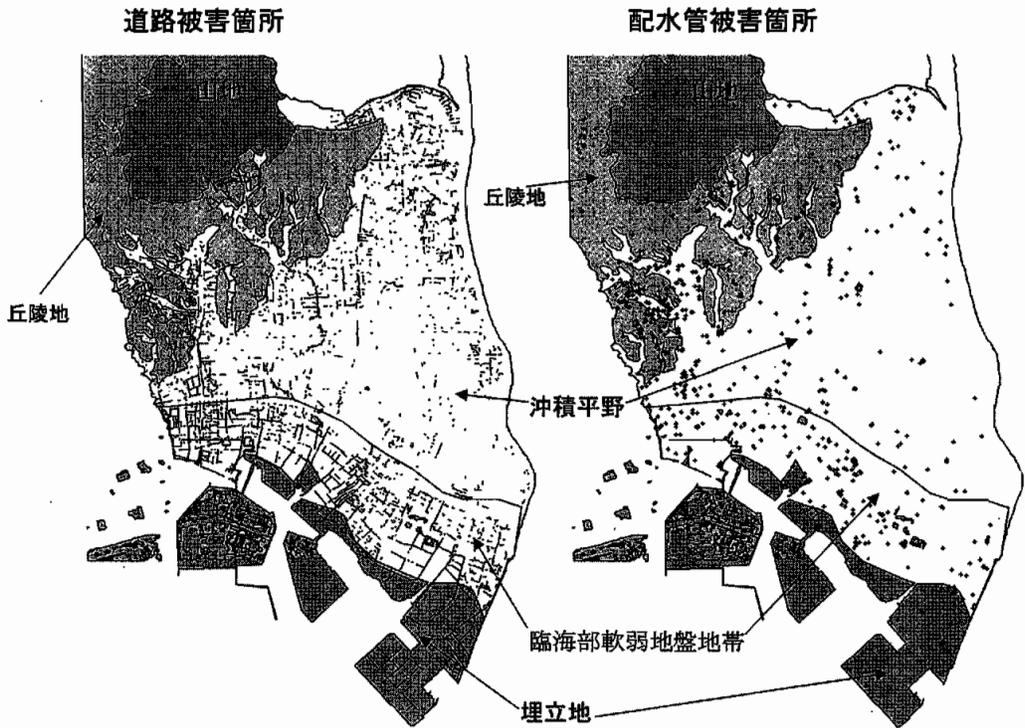


図2 大地形分類と道路被害、配水管被害の関係

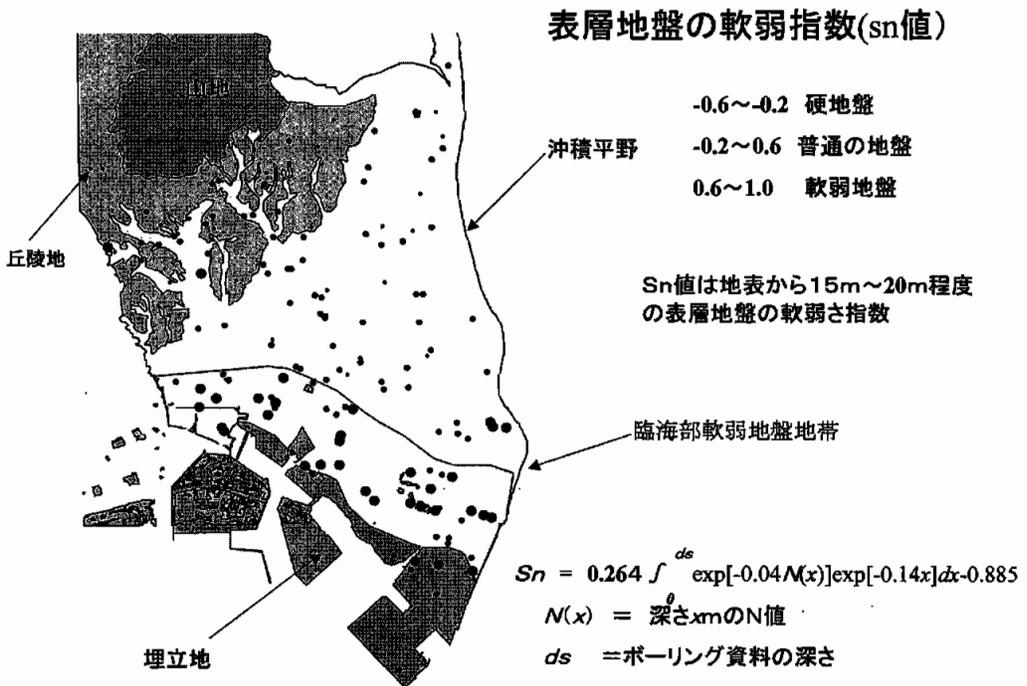


図3. 大地形分類と表層地盤の軟弱指数

配水管被害箇所

給水管被害箇所

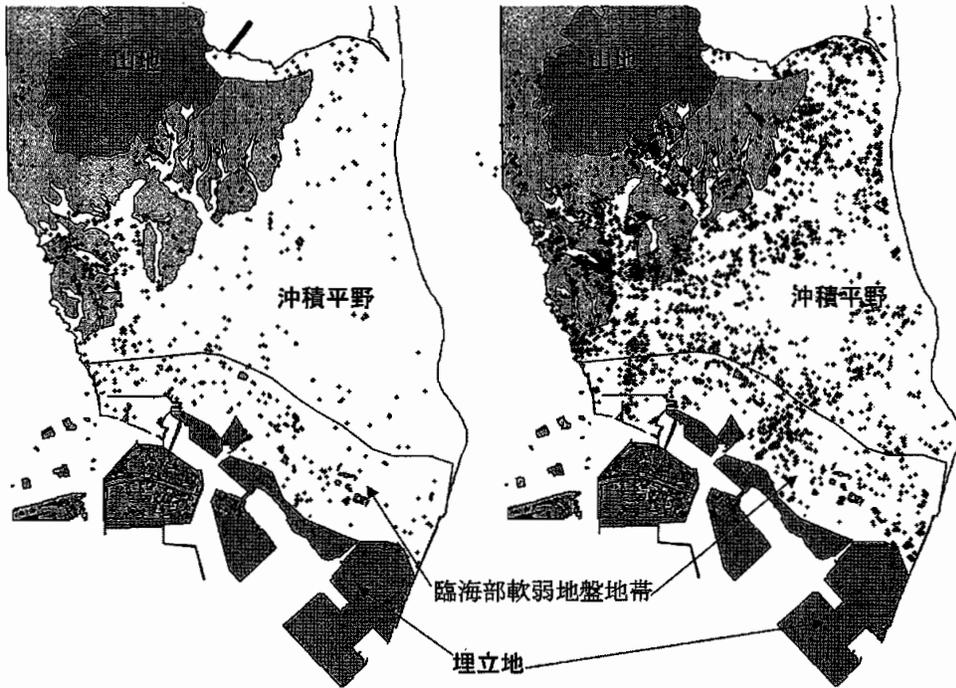


図4. 大地形分類と配水管被害、給水管被害の関係

に被害が集中していることがわかる。配水管と給水管の被害を比較すると、全体的には類似しているが、給水管被害は配水管被害に比べて沖積平野での被害の広がりが大きく、沖積平野と丘陵地の複雑に入り組んだ地域では、密集度が更に高いことがわかる。これは、配水管よりも末端の埋設管である給水管が家屋との関係も深く、後述する家屋被害の分布との影響が配水管よりも深い。また給水管には耐震性の低い硬質塩化ビニル管が用いられる場合が多く、配水管被害に比べて給水管被害の範囲が拡大していると考えられる。

2.4 配水管被害と地形分類

地下埋設管の被害分布のうち、配水管の被害は道路変状地域と一致しており、高い相関がみられる。これは、地下埋設管の被害が、地表面付近の地盤変状に起因する場合が多く、表層地盤の影響を受けやすいからである。本稿では地表から30mまでのSn値をもとめ、海外低地の軟弱地盤にこれらの被害が顕著に発生したことを前節で分析した。ここでは、低地の土地条件を考慮して地形分類をした国土地理院の地震防災土地条件図を利用し、GISで配水管被害箇所とのオーバーレイを行った。低地の地形は、谷低平野、氾濫平野、後背湿地、海外平野・三角州、埋立地などに分類され、図5は配水管網、配水管被害箇所を地形分類図に重ねて表示したものである。また、図5の地形分類図の地形単位毎に配水管網の総延長(m)を地形分類項目毎にGISで集計し、その地片内の配水管破損箇所数を計算した。GISにより配水管網1km当たりの配水管被害率を地形単位毎に計算した。表2は、地形分類毎に配水管被害率の平均を示したものである。図5と表

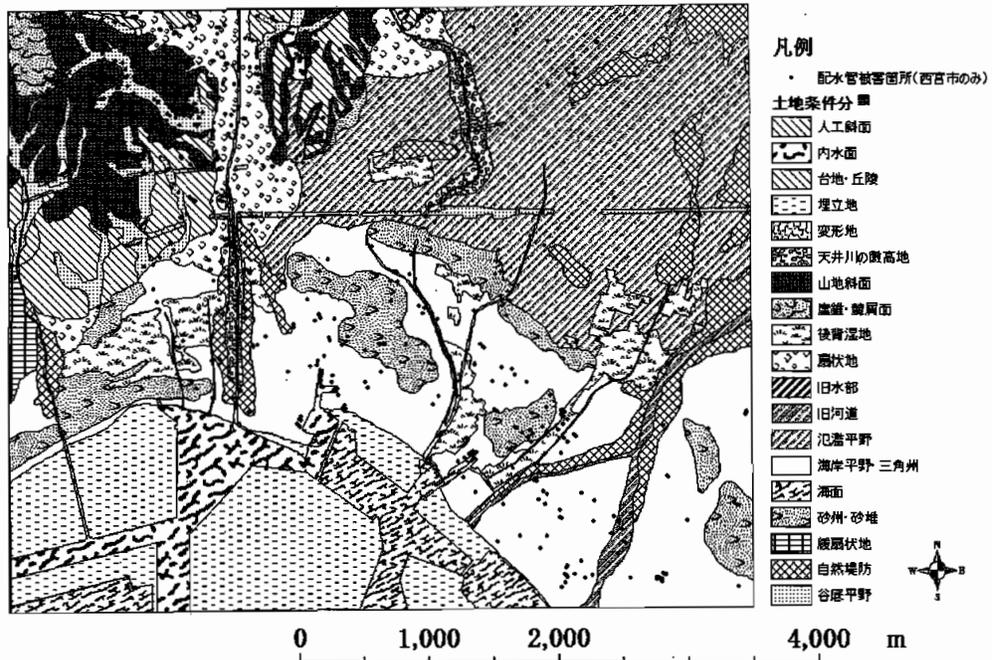


図5. 土地条件別地形分類と配水管被害の関係

表2 地形分類別配水管被害率

	上水道管路 延長合計 (m)	上水道配水管 路数合計	配水管被害 箇所数合計	上水道管路延長km当り 配水管平均被害率 $c \times 1000 / a$	上水道管路延長km当り 配水管平均被害率 標準偏差
	a	b	c		
埋立地	16911	186	1	0.06	
内水面	2513	94	5	8.45	10.17
海岸平野・三角洲	2583133	33832	153	2.26	4.04
砂州・砂堆	184193	2823	34	0.64	0.72
氾濫平野	3848547	44368	47	0.01	
自然堤防	55625	1348	22	0.38	0.08
旧河道	33258	574	7	0.21	
後背湿地	49399	1425	24	1.42	1.31
天井川の微高地	27694	453	15	4.11	6.32
扇状地	555733	16376	97	4.12	7.86
谷底平野	210550	8216	86	8.41	13.38
台地・段丘	27334	893	27	2.69	2.81
山地斜面	461741	16518	78	1.99	2.20

地震防災土地条件分類別配水管被害率 被害率=配水管被害箇所数\*1000/上水道管路延長 (m)

2 から配水管の被害数が最も多いのは、海岸平野・三角洲の153箇所であるが、配水管網1km当たりの被害率では谷底平野、内水面が高い。配水管被害率が1.0以下は氾濫平野・自然堤防、旧河道、砂州・砂堆などの表層地盤としては比較的硬いSn値からも普通の地盤に分類される箇所である。配水管被害率が1.0をこえる地形は扇状地、台地、段丘などの比較的固い地盤と海岸平野、後背湿地、谷底平野、内水面などの軟弱地盤に二分される。前者は深層地盤構造に起因する

地震動の最も強い地域であり、台地・段丘でも宅地造成をする際に行われる地形改変地域の盛土地盤に被害が集中していると考えられる。その中でも沖積平野と丘陵地の境目にあり、宅地開発で人工改変された地域でとくに被害が高い。つまり、前述した震災の帯の地域で地震動の強い地域であっても地形的な要因で被害が増大しているといえる。また、後者は軟弱地盤地域に該当している。軟弱地盤である埋立地に配水管被害が少ない理由は、埋め立て地で利用されている配水管に継手付きダクタイル鋳鉄管の耐震管が使用されているからである。本研究では、西宮市10000分の1の土地条件図から11種類の地形分類と配水管被害との関係を分析したが、亀田らは、大地形分類に関して、外的基準を配水管1km当たり被害比率とし、説明変数として道路被害率、液状化の有無、地盤の軟弱さ、地形、地下水位を選び、数量化理論I類で解析した結果、地形と道路被害率の寄与が高いことも実証した。(月岡ほか、1997) また、磯山ほか(1998、pp.3175-3180)は、配水管の地震被害推定式がだしたがここでも地形の寄与率は高い。

以上の結果より、図6に示したように配水管の被害には地形の影響も大きく、谷低平野などの地盤の軟弱地域と硬い地盤ではあっても台地・段丘など盛土地盤の宅地造成地、そして、扇状地や天井川の微高地など地盤は比較的固いが震災の帯地域に当たる強震動地域、内水面などの沿岸部の軟弱地盤地域で被害率が高くなっていることが統計的にGIS分析で明らかになった。

上水道管路延長km当り配水管平均被害率

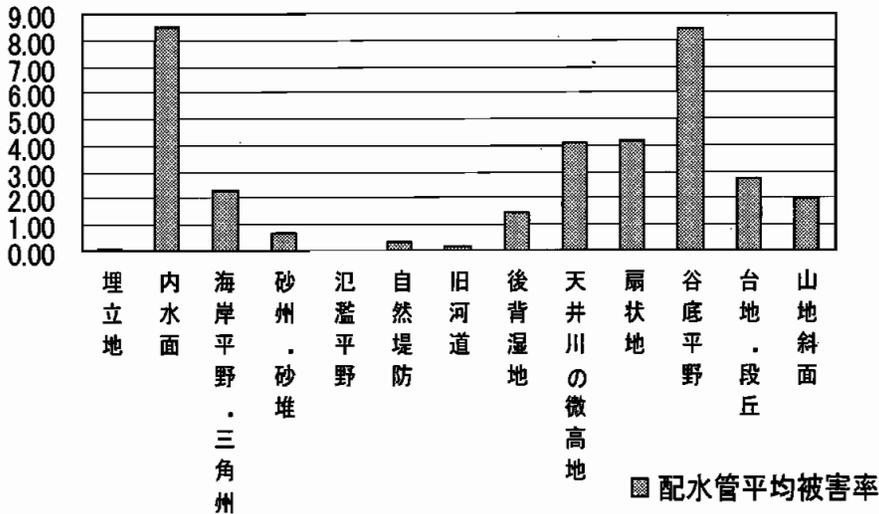


図6. 地形分類と配水管平均被害率との関係(平均被害率=配水管被害箇所数×1000/上水道管路延長(m))

### 3 建物被害と地盤条件と地形分類の関係

#### 3.1 建物構造別被害

西宮市については、神戸市や芦屋市とは異なり、建物被害データと家屋台帳データが住所代表

点(碓井、1998)でリンクされていたため、建物建築年代・構造別にGISを利用した詳細な分析が可能である。西宮市から提供された建物被災判定データ(西宮市の建物被害判定では「無被害」はない)によると、155,435件の全建物データのうち、独立の棟数が124,308棟で、建物の棟数別に全壊26,761棟(全棟の22%)、半壊24,043棟(同19%)、一部破損73,504棟(同59%)である。西宮市の木造建物は67,698棟で全建物数の54%を占め、全壊・半壊を合わせた被害棟数は全木造棟数の56%を過半数に達する。鉄筋コンクリートと鉄骨鉄筋コンクリートを含むコンクリート系建物棟数は、35,539棟で全建物数の29%で、軽量鉄骨を含む鉄骨造建物は8%(9,557棟)となっている。その他の建物には、れんが、コンクリート・ブロック、木質プレハブ、軽量鉄骨プレハブ、鉄筋プレハブなどが含まれ、11,514棟で全建物数の9%である。(岩井ほか、1996)。西宮市の全壊建物(26,761棟)の内、22,842棟(85%)は木造系建物であり、建物被害は木造系建物に集中している。又、木造系建物(67,698棟)の内、木造瓦葺構造は52,140棟で77%に達し、木造系建物の大半は在来工法の木造瓦葺であった。木造在来工法にはストレート葺き、亜鉛鉄板葺き、トタン葺き、金属板葺き、陸屋根、ルーフィングが含まれるが、木造在来工法建物(67,698棟)のうち、わずかに23%を占めるに過ぎない。全壊建物の分布は震災の帯びに沿って北上しているが、ほぼ市域全域に分布している。

### 3.2 建物年代別被害

建築学においては、建築基準法(1950)の制定や1971年の建築基準法施行例改正(鉄筋コンクリート柱の帯筋間隔規程の強化)、1980年の新耐震設計法と呼ばれる許容応力度設計法、保有水平耐力設計法の実施を規程した耐震規程の施行(1981)などが建物構造に反映されるゆえ、建築年代区分をする場合が多い。木造においてもほぼ10年間隔で構法が変化するため、建築年次を1951年以前、1952年～1961年、1962年～1971年、1972年～1981年、1982年から1991年、1992年以降の6区分とした。岩井らとの共同研究成果(岩井ほか、1996)をまとめると、①西宮市の木造被害率は、古いほど被害率が高く、その傾向は1960年代まで線形的な関係にある。②木造家屋の建設年代は、1960年代や1970年代の高度成長期に多く、戦災で焼失し建築後20～30年程経ったものが量的に多い。しかし、築後40年から50年を経た戦前の古い建物も他の構造に比べると数多く存在する。③鉄筋コンクリートや鉄骨鉄筋コンクリート構造などのコンクリート系建物の棟数は1981年の新耐震設計以前のものが60%あり、被害は古い年代の建物に多い。しかし、1960年代に建設されたものが比較的高い全壊率を示している。また④鉄骨造建物も1960年代での半壊以上の被害が過半数を占めている。

特に木造建物被害は建設年度と強い相関があり、木造在来工法の建物は、古いほど倒壊しやすいと言える。したがって、地形や地盤条件と建物被害との関係を分析するには、構造別、年代別に篩をかけ、建物被害を検討する必要がある。

### 3.3 建物の固有周期と地盤条件

地震による被害の様相は、複雑である。これは、地震動による地震の震幅、加速等などの震動特性が地盤の種類によって異なり、多様な被害現象を呈する。地盤固有の振動特性にみられる卓

越周期が、地震動を増幅させ、建造物の固有振動と共振するからである。つまり、家屋などの建造物は、それぞれに固有な振動周期を持っているゆえに、地震動に対して地盤の卓越周期と建造物の固有周期が一致する場合には共振現象が起こり、被害が著しく高くなる。

関東大震災時には木造2階建て家屋の固有周期0.7秒と沖積層の卓越周期(0.6~0.8秒)が共振し、多大の被害をもたらしたが、土蔵は沖積層での被害が少なく、洪積層台地で被害が急増した。土蔵は構造上の剛性が強く、固有周期は0.2~0.3秒と短く、洪積層台地の卓越周期0.3秒と共振したからである。鉄筋コンクリート系建物は、木造家屋ほど単調ではなく、建物の振動減衰性を考慮しなければならない。従来、沖積層の卓越周期は0.3秒よりも長いと言われ、沖積層においては木造家屋の被害が多いというのが定説であった。また、地盤が軟弱であるほどその家屋被害は大きくなると言われてきた。阪神・淡路大震災以前には、①強硬な地盤での卓越周期は0.1~0.2秒が多い。②洪積層台地の卓越周期は0.2~0.4秒、③沖積層の卓越周期は0.3~0.7秒が多いが、周期の分散が高い、④厚い軟弱層、埋立地、沼地などでは、周期は概して不規則であるが0.2~1.0秒の広範囲にわたる場合が多いということは一般的に言われてきたことである。しかし、阪神・淡路大震災では、木造家屋の被害が、比較的地盤が固い扇状地や台地上にも多く見られ、震災の帯びとして特異な形状を示したのである。

阪神・淡路大震災では、アレイ状の強振動観測が実施されたが、帯状の被害集中地域の内、東灘区の卓越周期は0.5秒程度で木造住宅や中低層鉄筋コンクリート建造物の固有周期に一致し地震動が増幅されたとしている。また、海岸近くの埋立地や沖積層の厚い地域で被害が少ない理由として軟弱地盤の強振動に対する非線形挙動により、地振動の増幅が小さかったとも言われている。入倉(1995)、大場(1996)は、神戸市と西宮市の常時微動観測結果から、山地、丘陵地、沖積地盤、埋立地の卓越周期は、0.3秒~0.5秒、0.8秒から1.2秒、2.5秒前後に見られ、地震被害の大きい地盤では、0.3秒から0.5秒の卓越周期がみられたとしている。しかし、早川ら(1996)は、武庫川中流域の常時微動観測から、沖積層の卓越周期が、0.1秒から1.5秒にわたり、武庫川の左岸と右岸の表層地盤構造に大差はないが、建物被害は著しい相違があり、表層地盤の増幅効果だけでなく、より構造的な地質構造の相違も加味した3次元の増幅効果等の研究を示唆している。又、赤松ら(1996)も深層基盤構造が与える建物被害との関係を分析し、地下構造の急激な落ち込みが被害増大につながったとしている。

一方、木造建造物の固有周期と建物年代との関係について、岩崎ら(1998)によると、1945年以前の建造物の固有周期は0.6秒、1946年から1960年は(同、0.5秒)、1961年から1970は(同、0.45秒)、1971~1980(同、0.35)、1981年以降(同、0.25)である。以上をまとめると、西宮市における地震被害激甚地域における地盤の卓越周期は0.5秒前後で、最も共振しやすい建造物は、古い建造物1960年以前の建造物ということになる。そこで本稿では、木造瓦葺建造物で1951年以前の古い建造物のみを対象に全壊率を計算し、地盤条件と地形分類との関係を分析した。ここでは、表層地盤における卓越周期と建造物の固有周期をあらかじめ最も増幅しやすい木造瓦葺在来構造に絞り、全壊率の分布が地形条件の違いによりどのように異なるかを調べたのである。従来の研究が、建造物を構造的・年代的に分類せず、建造物自体の多様性を内包したまま分析する傾向が強かったが、本稿ではこれらの建造物自体に潜む多様性を分析から除外している。

### 3.4 木造瓦葺在来構造の被害と地形の関係

表3は、低地の土地条件を考慮した地形分類の地形単位毎の木造瓦葺建物の全棟数、全壊数、全壊率を建物年代別に示したものである。どの年代においても谷底平野・氾濫平野の建物数(9980棟)が多く、木造瓦葺建物(32777棟)の30%が谷底平野に立地している。継いで多いのが海岸平野の25%(8057棟)で3番目は自然堤防(3899棟、12%)、砂州・砂堆(3612棟、11%)、扇状地(2357棟、7%)、後背湿地(1661棟、5%)、台地・段丘(1056棟、3%)である。年代的にこの傾向は変わらないが、1962年～1971年に建築された建物(8606棟)が26%で最も多く、次に1972年～1981年の建物(7212棟)が多い。1951年以前に建築された全建物(6996棟)は、3番目に多く木造瓦葺総数の21%であり、高度成長期に多数の木造瓦葺建物が建設されたこと、戦前の建物が震災を免れて多く、現存しているといえる。全壊率についてみてみると木造瓦葺家屋全体の全壊率は、46.5%であり、年次を遡る毎に線形的に増加し、戦前の木造瓦葺建物の全壊率は、66.4%である。地形分類別には、扇状地(73.9%)天井川の微高地(73.7%)、台地丘陵(61.6%)が高く、海岸低地(28.6)、砂州・砂堆(29.8%)との比率が低い

表3 建築年代別木造瓦葺建物全壊数と全壊率(低地の土地条件重視)

木造瓦葺建物全壊棟数						(棟)
建築年代	～1951	1952～1961	1962～1971	1972～1981	1982～	総数
海岸平野・三角洲	733	675	519	198	179	2304
砂州・砂堆	343	309	243	77	106	1078
後背湿地	128	139	279	120	38	704
旧河道	18	6	18	4	2	48
自然堤防	627	327	540	210	182	1886
天井川の微高地	95	66	116	37	25	339
谷底平野・氾濫平野	1859	1023	1815	885	345	5927
扇状地	490	274	442	288	247	1741
台地・丘陵	238	65	142	136	70	651
崖錐・麓斜面						0
山地斜面	116	109	175	120	37	557
総数	4647	2993	4289	2075	1231	15235

木造瓦葺建物全壊率(地形分類別全壊棟数/地形分類別全木造瓦葺全棟数\*100) (%)

建築年代	～1951	1952～1961	1962～1971	1972～1981	1982～	総数
海岸平野・三角洲	45.1	37.1	28.3	10.8	19.1	28.6
砂州・砂堆	46.0	33.1	27.1	13.8	22.2	29.8
後背湿地	74.9	47.3	49.8	26.6	20.5	42.4
旧河道	16.5	8.2	22.5	3.8	5.9	12.0
自然堤防	71.6	45.5	52.0	27.1	37.2	48.4
天井川の微高地	76.6	79.5	84.1	62.7	44.6	73.7
谷底平野・氾濫平野	79.8	68.7	65.1	38.3	32.5	49.4
扇状地	88.1	77.0	68.0	63.4	72.4	73.9
台地・丘陵	80.4	62.5	59.2	52.5	44.6	61.6
崖錐・麓斜面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
山地斜面	71.6	53.2	45.9	30.3	25.0	43.1
総数	66.4	49.3	49.8	28.8	31.7	46.5

資料：地形分類は、国土地理院が作成し、地震防災土地条件図としてデジタル化したもの  
建物被害データは西宮市提供の家屋台帳データをGISで集計

表4は、地形発達史を考慮した地形分類の地片単位毎の木造建物の全棟数を、全壊数、全壊率を建物年代別にしめたものである。崖・急斜面の被害率が最も高いが、扇状地においては、最も新しく形成された最終氷期前が最も高く、古くなるにつれ全壊率が低くなる傾向が見られる。段丘に関しては、サンプル数が少ないこともあり、山手三面が最も高い被害率を示す。

また、低地においては、谷底平野での全壊率が高い。これらの傾向は、扇状地においても地形発達のには、新しい地盤が堅固でない扇状地に全壊率が高く、谷底平野の軟弱地盤に被害が多いという従来からの被害と地形の関係を示している。しかし、表3では、全壊率の高かった天井川、自然堤防、砂州では、48.4%の全壊率を示し、それほど全壊率は、突出していない。2種類の地形分類を見るとその分類基準が異なるため、単純に比較することは困難である。

表4 建築年代別木造瓦葺建物全壊数と全壊率（地形発達史重視）

木造瓦葺建物全壊数						(棟)
建築年	～1951	1952～1961	1962～1971	1972～1981	1982～	総数
河成平野・氾濫原・沖積平野	2387	1593	2367	1095	472	7914
天井川・自然堤防・砂州	1441	903	1004	408	462	4218
谷底平野	450	315	569	315	197	1846
扇状地5（晩氷期後）	33	31	71	38	7	180
扇状地4（晩氷期）	16	5	20	11	5	57
扇状地3（最終氷期後半）	27	30	52	28	19	156
扇状地2（最終氷期前半）	44	27	32	18	12	133
扇状地1（最終氷期前）	34	7	21	18	15	95
段丘3（山手3面）	116	25	51	52	20	264
段丘2（山手2面）	30	9	11	11		61
段丘1（山手1面）						
崖・急斜面	15	20	35	32	16	118
山地・丘陵	54	28	56	49	6	193
総計	4647	2993	4289	2075	1231	15235

木造瓦葺建物全壊率（地形分類別全壊棟数／地形分類別全棟数＊100）

建物建築年次	～1951	1952～1961	1962～1971	1972～1981	1982～	総数
河成平野・氾濫原・沖積平野	63.5	45.6	47.0	24.5	22.8	42.0
天井川・自然堤防・砂州	64.9	49.4	48.3	28.7	39.6	48.4
谷底平野	84.3	73.4	68.2	47.8	58.3	66.1
扇状地5（晩氷期後）	75.0	57.4	53.8	29.5	21.9	46.0
扇状地4（晩氷期）	84.2	55.6	50.0	52.4	33.3	54.8
扇状地3（最終氷期後半）	62.8	78.9	69.3	45.9	43.2	59.8
扇状地2（最終氷期前半）	73.3	79.4	48.5	48.6	33.3	57.1
扇状地1（最終氷期前）	77.3	63.6	67.7	46.2	60.0	63.3
段丘3（山手3面）	82.9	61.0	62.2	64.2	40.8	67.2
段丘2（山手2面）	93.8	64.3	47.8	29.7	0.0	53.0
段丘1（山手1面）			0.0		0.0	0.0
崖・急斜面	75.0	80.0	81.4	65.3	47.1	69.0
山地・丘陵	70.1	28.6	33.1	23.1	9.4	31.1
総計	66.4	49.3	49.8	28.8	31.7	46.5

資料：地形分類は田中眞吾の地形分類図を国土地理院が微地形分類としてデジタル化したもの  
建物被害データは西宮市役所提供の家屋台帳データよりGISで集計。

### 3.5 重回帰分析による道路被害と建物被害における地形との関係分析

道路被害に関係する配水管等の埋設管の被害は、表層地盤の軟弱性に影響することはすでに分析した。また、建物などについては、むしろ地盤の固い扇状地や段丘上において被害が見られた。これは、伏在活断層に起因する強震動の影響もあるが、配水管と建物被害では、地形との関係において、対照的な違いが見られる。ここでは、この関係を明確にするため、図7から図9に示したように100Mメッシュをかけ、その中の道路被害率、配水管被害率、建物被害率、Sn値を計算し、重回帰分析を行った。その結果が、表5と図10である。

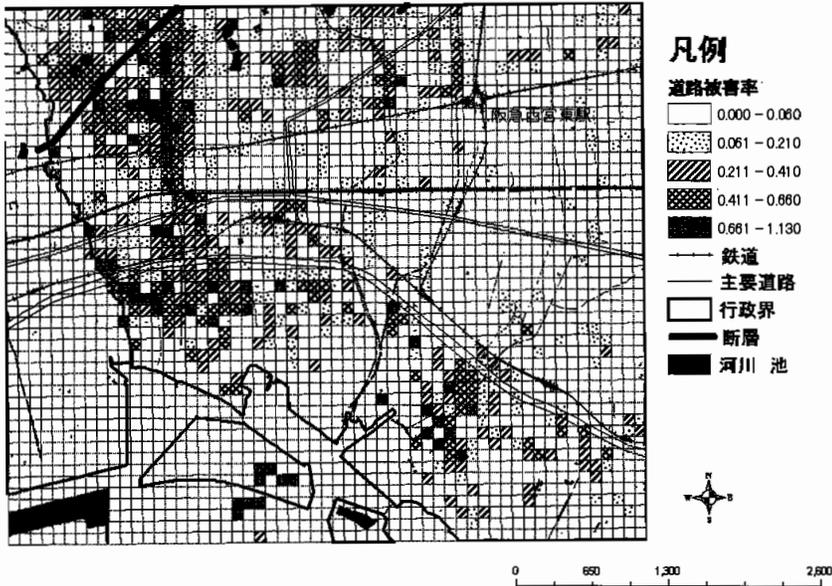


図7. 道路被害と100mメッシュ

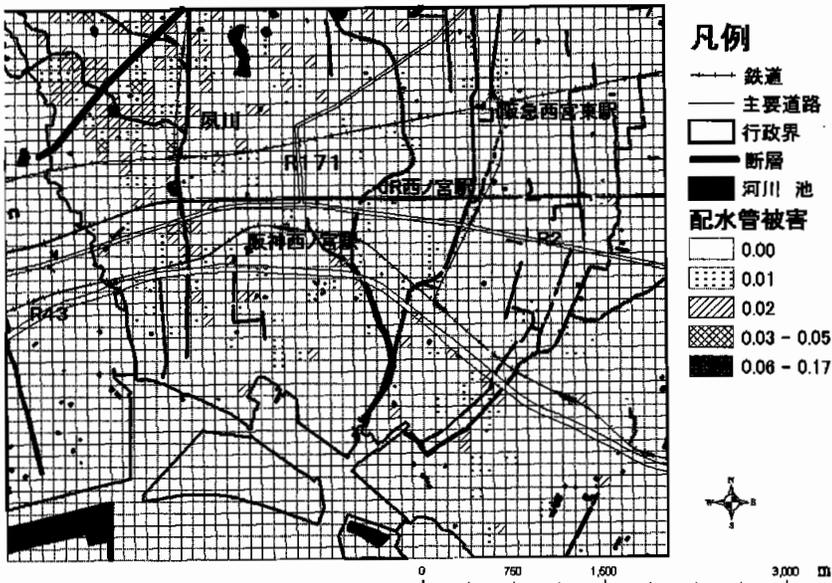


図8. 配水管被害と100mメッシュ

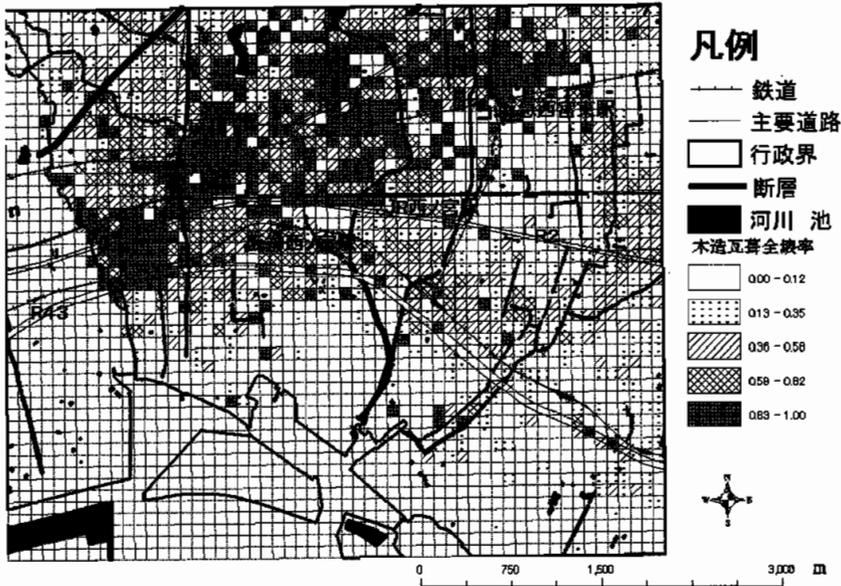


図9. 木造瓦葺全壊率100mメッシュ

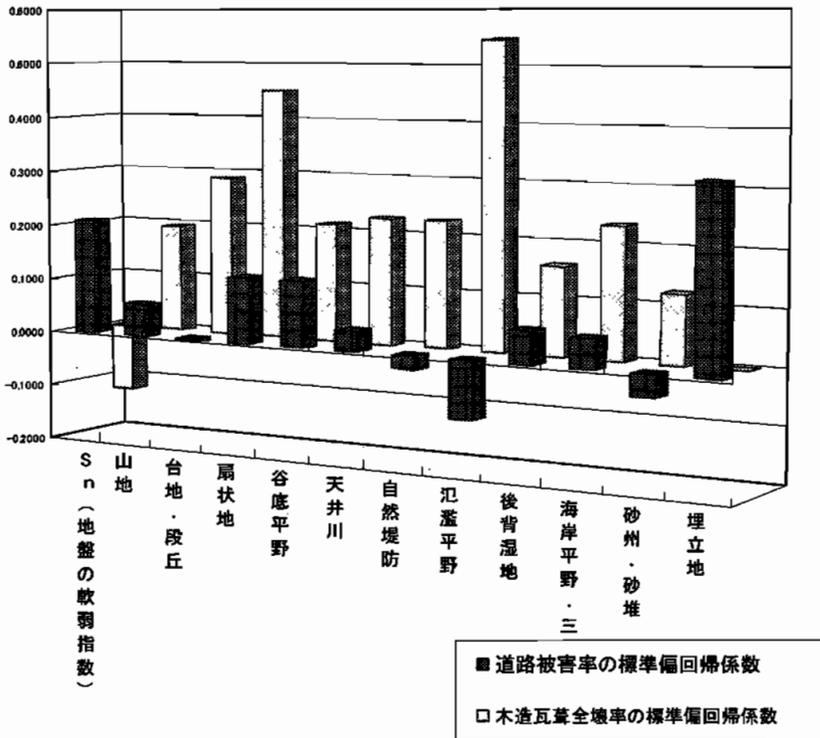


図10. 木造瓦葺全壊・道路被害と地形との関係における重回帰分析

表5 木造瓦葺全壊・道路被害と地形との関係における重回帰分析

## 木造瓦葺建物全壊と地形との関係(重回帰分析)

重回帰式	目的変数		木造瓦葺全壊率						
説明変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	F値	有意差判定確率	判定マーク	T値	標準誤差	偏相関	単相関
sn(地盤の軟弱指数)	-0.3085155	-0.120278947	14.30387	0.000162353	[**]	-3.78205	0.081574	-0.10247	-0.26402
山地	0.25489035	0.195115775	8.470391	0.00366903	[**]	2.910394	0.087579	0.079022	-0.0244
台地・段丘	0.4333682	0.287849547	23.37473	1.48617E-06	[**]	4.834742	0.089636	0.130556	0.10725
扇状地	0.45672993	0.450331252	28.8846	9.04224E-08	[**]	5.37444	0.084982	0.144839	0.171752
谷底平野	0.22812596	0.227723607	7.21059	0.007336381	[**]	2.685254	0.084955	0.072943	-0.07158
天井川	0.14552663	0.121715641	2.831415	0.092668459	[ ]	1.682681	0.086485	0.045783	-0.15586
自然堤防	0.5123978	0.226951499	26.99774	2.35047E-07	[**]	5.195935	0.098615	0.140124	0.094129
氾濫平野	0.32200485	0.212172099	12.92853	0.000352593	[**]	3.595627	0.089555	0.097467	0.020538
後背湿地	0.3687124	0.546125696	19.60593	1.02863E-05	[**]	4.427858	0.083271	0.119733	0.206288
海岸平野・三角州	0.18241792	0.233365116	4.74522	0.029552595	[*]	2.178352	0.083741	0.059227	-0.24097
砂洲・砂堆	0.22598971	0.158192735	6.507415	0.010852254	[*]	2.550964	0.08859	0.069313	-0.06337
定数項	0.26075768					3.193124	0.081662		

## 道路被害と地形との関係(重回帰分析)

重回帰式	目的変数		木造瓦葺全壊率						
説明変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	F値	有意差判定確率	判定マーク	T値	標準誤差	偏相関	単相関
sn(地盤の軟弱指数)	0.450897	0.209694	34.67237	4.94E-09	[**]	5.888324	0.076575	0.159806	0.318253
山地	0.063659	0.058935	0.763404	0.382424	[ ]	0.87373	0.072859	0.024014	-0.01656
台地・段丘	-0.00686	-0.00353	0.006934	0.933648	[ ]	-0.08327	0.08237	-0.00229	-0.04339
扇状地	0.11661	0.118724	2.675298	0.102154	[ ]	1.635634	0.071293	0.044923	0.064489
谷底平野	-0.0261	-0.023	0.13129	0.717156	[ ]	-0.36234	0.072031	-0.00996	-0.06067
天井川	-0.04376	-0.03837	0.37293	0.541516	[ ]	-0.61068	0.071666	-0.01679	-0.05543
自然堤防	0.059789	0.036875	0.595703	0.44036	[ ]	0.771818	0.077465	0.021215	0.007141
氾濫平野	0.159448	0.119459	4.495912	0.034162	[*]	2.120357	0.075199	0.058196	0.063574
後背湿地	-0.07441	-0.10335	1.0964	0.295249	[ ]	-1.04709	0.071063	-0.02878	-0.29886
海岸平野・三角州	0.032485	0.053061	0.231702	0.630344	[ ]	0.481354	0.067487	0.013233	0.095374
砂洲・砂堆	0.07411	0.058365	1.031815	0.309918	[ ]	1.015783	0.072958	0.027916	0.046149
埋立地	0.470325	0.321512	39.57634	4.28E-10	[**]	6.290973	0.074762	0.170427	0.354807
定数項	0.223277					3.274283	0.068191		

このことからいえることは、道路被害や配水管被害などは、地盤の軟弱性に影響され易いことがわかる。したがって地形的には、埋立地や谷底平野で被害率が高い。また、建物は、扇状地や台地などの強振動の震災の帯地域に被害が高く出たことを示している。しかし、氾濫平野(沖積平野)に関しては、分類基準が異なるため、建物被害は高いが、道路被害は低い。

## 4. まとめ

地震被害に関しては、直下型地震の地震動に起因する建築物の被害特性、神戸地域の表層地盤や深層地盤の構造、地震による伏在断層の想定などが地震被害に多大な影響を与えているからである。それゆえ本研究では、①建物の構造や建築年代による被害特性、②構造物被害と地盤構造

の違い、③重回帰分析による地形と被害との計量化などを試みた。

その結果、道路被害と配水管被害は高い関係を示し、地盤の軟弱さに起因した被害状況を示すこと。建物被害に関しては、活断層のDirectivity効果により、断層から2KMの範囲では高い倒壊率をしめすが、その中でも新しく形成された扇状地などのほうが被害確率が高いことがわかった。

### 参考文献

- 赤松純平、尾上謙介、斎藤秀雄、慈道充、西村敬一、盛川仁、澤田純男、土岐憲三、香川敬生、香川一夫、古野邦雄、佐藤賢司（1996）：大阪盆地縁辺部・六甲山系周辺の深層基盤構造：藤原悌三代表「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（総合研究A）研究成果報告書、pp.2の90-97
- 大場新太郎 兵庫県南部地震の激基地域における微動特性（1996）：藤原悌三代表「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（総合研究A）研究成果報告書、pp.2の84-89
- 入倉幸次郎（1995）兵庫県南部地震の強震動の特徴：藤原悌三代表「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6年度文部省科学研究費（総合研究A）研究成果報告書、pp.103-138
- 岩井哲、亀田弘行、碓井照子、盛川仁（1996）1995年兵庫県南部地震による西宮市の都市施設被害のGISデータベース化と多重分析、GIS理論と応用、4-2、pp.63-73
- 岩崎好規、諏訪靖二、山本浩司、濱田晃之（1998）阪神大震災における木造家屋被害と地盤条件：第10回日本地震工学シンポジウム、第1分冊、第10回日本地震工学シンポジウム運営委員会 pp.79-82
- 岩本淳、亀田弘行、岩井哲、碓井照子（1997）阪神・淡路大震災における西宮市域の水道管被害に関するGIS分析：総合防災研究報告、2、京都大学防災研究所総合防災研究部門、pp.1-43
- 碓井照子他（1998）阪神・淡路大震災におけるGISの利活用、都市計画、都市計画学会 pp.33-36
- 亀田弘之、神田仁、杉戸真太（1990）震害要因とその経年的影響に基づく上水道の耐震健全度評価：『構造工学論文集 vol.36』、pp.813-825
- 亀田弘行、岩井哲、碓井照子、盛川仁（1996）西宮における都市基盤施設被害のGIS展開と多重分析：藤原悌三代表（1996）「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6年度文部省科学研究費（総合研究A）研究成果報告書、pp.5-76-95
- 碓井照子（1996）GISによる阪神・淡路大震災の時系列災害データベースの作成と復興過程の研究：藤原悌三代表「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（総合研究A）研究成果報告書。5-96-104
- 建設省建築研究所（1996）『平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書』、p.723
- 建設省建築研究所（1999）『平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書 第1編 中間報告書以降の調査分析結果』、p.303（付録は被害データのCD-ROM）
- 建設省国土地理院（1996）『GISにおける空中写真情報等の利用技術に関する基礎的調査作業』：建設省国土地理院、p.141
- 篠崎祐三（1995）神戸市の地盤と地震被害に関する研究：藤原悌三代表「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6年度文部省科学研究費（総合研究A）研究成果報告書、pp.210-228

- 嶋本利彦、川本英子、堤昭人、大友幸子（1995）：兵庫県南部地震の被害分布と推定地震断層：藤原悌三代表『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6年度文部省科学研究費（総合研究A）研究成果報告書、pp.92-97
- 鈴木三四郎・工藤一嘉（1998）動的応答解析に基づく兵庫県南部地震の木造建物被害の検証：第10回日本地震工学シンポジウム論文集 第1分冊 pp.231-326
- 高田至郎（1996）上水道配水管の被害特性：藤原悌三代表（1996）『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（総合研究A）研究成果報告書、pp.121~134
- 月岡和紀、藤本護、亀田弘行、岩井哲、碓井照子、盛川仁（1996）兵庫県南部地震による西宮市の都市施設被害のGISデータベース化と多重分析：京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告、別冊第20号
- 平野正繁、波田重熙（1995）六甲山地の地形構造と兵庫県南部地震地震による断層の活動：『兵庫県南部地震と地形災害』、日本地形学連合、古今書院、pp.7-27
- 渡辺俊樹・伊藤信一・山田浩二、1998「深部地盤構造の影響を反映した表層地盤の応答解析」第10回日本地震工学シンポジウム、第1分冊pp.1153-1158、第10回日本地震工学シンポジウム運営委員会
- 早川清・松井保・江川典聰・尾儀一郎、1998「神戸地域における常時微動の卓越周期分布と地盤特性」第10回日本地震工学シンポジウム 第1分冊pp.1129-1134
- 碓井照子（2000）阪神淡路大震災における西宮市における活断層からの距離別分析、第四紀研究、39-4、pp.375-388

### Abstract

In this paper, we used 2 kinds of digital land form classification maps which covered Hanshin awaji disaster area. One is land form classification based on the land form unit of low land area, another is based on the history of land form. We analyzed the relationships between the land form and ground structure with the damage levels of houses or buildings by Hyougoken Nanbu earthquake in Nishinomiya city, Kobe prefecture. These damage database is made by DIMA-GIS as mentions above

The levels of seismic damages for active faults is influenced by the properties of wooded houses or steel buildings and soil ground or structure ground under the Nishinomiya city.

Therefore, the followings are analyzed by this paper.

- (1) the character of seismic damage by the houses or building structures and construction year
- (2) the relationship between the seismic damage with soil or under ground structures
- (3) the multi dimension regression model for land form and seismic damage level

As the results,

- (1) Road damage and water pipe damage showed high correlation corresponding to the ground structure.
- (2) The seismic huge damage ratio of Japanese wooded houses and right steel frame buildings was showed inside 2km from active faults line by the near-field strong ground motion caused by directivity effects.