

地理情報システムを用いた兵庫県南部地震の震害分析

鹿島 石井 晃*, 諸井孝文**, 永田 茂*
石田 寛*, 大保直人*

兵庫県南部地震の際の神戸市の建物被害、死者の発生状況を地理情報システムを用いて分析した。ここでは、神戸市の地震動強さ分布、地形・地質情報、家屋・建物の被害分布、火災延焼、死者分布など、数値化された地図データを地理情報システム上で処理することにより、各要因間の相関分析を実施した。さらに、既存の地震被害想定方法を用いた神戸東灘区の地震被害想定を行い、想定結果と実際の被害の相互比較により、今後の課題を整理した。

1. はじめに

1994年のノースリッジ地震では米連邦緊急事態管理庁(FEMA)によって、地震時における地理情報システム(GIS)の本格的な利用が開始された。FEMAはGISを用いて数値地図データを処理することにより、広域にわたる各種の被害情報や分析結果を可視化情報として提供することに成功し、その後の国内外における災害時マネジメント、被害分析や予測の方法に対して多くの影響を与えている¹⁾。

一方我が国では、それまでにも一部の地方自治体や研究者によってGISを応用する試みは行われていたが、地震災害関連では被害予測結果の表示など限定的な利用に留まっていた^{2)~6)}。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の直後、日本建築学会近畿支部と日本都市計画学会関西支部⁷⁾、建設省国土地理院⁸⁾、神戸大学土木教室⁹⁾、民間企業などによって複数の地震被害マップが構築された。これらの一部は、数値地図に展開され、復興計画の支援や各種被害分析に利用され始めており、我が国の地震災害の分野におけるGISの本格的な利用に向けた第一歩となった。

本報告では、建設省国土地理院が作成した「平成7年兵庫県南部地震被害現況図」(以下では被害現況図と呼ぶ)⁸⁾の中から神戸市の東灘区、灘区、

中央区、兵庫区、長田区、須磨区、垂水区に関する被害データをデジタル化し、GISによる被害分析を通して今後の被害予測や防災計画立案の資料とするものである。具体的には、まず地震動と建物被害、建物被害と人的被害に関する相互分析を実施する。次に、既往の地震被害想定方法を用いた被害想定を行い、実際の被害状況との相互比較により、今後の課題を整理する。なお、本報告では神戸市東灘区の結果を中心に示しているが、その他の地域を含めた結果に関しては別の場で発表する予定である。

2. 被害データベースの作成

(1) 建物被害データベース

建物被害に関しては前述の通り複数の機関から被害マップの形で公表されている。特に、国土地理院によって作成された被害現況図は、震災直後の空中写真および兵庫県、日本都市計画学会関西支部・日本建築学会近畿支部などの調査結果を基に作成されたものであり、データの信頼性が高いものと考えられる。さらに、家屋、建物、道路、鉄道、橋梁、斜面、護岸などの被害や地震火災など被害全般を収録しており、完成度の高いものとなっている。著者らは、以上の要因を評価して被害現況図を基礎データとする被害データベースを構築した。

被害データベースの構築に当たっては、1、2階の家屋、建物の大きな破損(倒壊)と軽微な破損(部分損壊)、3階以上の建物の大きな破損(倒壊)と軽微な破損(部分損壊)さらに焼失範囲の情報を市販の住宅地図データに含まれる建物形状(ポ

キーワード：地理情報システム、地震被害分析、
地震被害想定

* 鹿島技術研究所, 0424-89-7077

** 鹿島小堀研究室, 03-5561-2423

リゴン) に属性データとして入力する方法を用いた。表-1には、各区ごとにデータベースの概要を示している。なお、データベース化した建物棟数は、住宅地図データの精度の問題などから震災前の実際の棟数とは必ずしも一致していないことを明記しておく。

図-1は、被害データベースに含まれる個々の被害をGISで処理して作成した町丁目ごとの家屋、建物の倒壊率(全ての倒壊棟数/全棟数)を示しており、図-2は町丁目ごとの家屋、建物の部分損壊率(全ての部分損壊棟数/全棟数)を示している。また、図-3は、火災が発生した町丁目を示している。

(2) 人的被害データベース

図-4に一町内あたりの死亡率(町内の人口に対する死者数の割合)を示す。データとしては、朝日新聞大阪版3月5日朝刊に掲載された亡くなられた方々の名簿を用いた。名簿には5,475名が記載され

ているが、このうち住所の特定できた5,251名(うち神戸市は3,784名)について示してある。人口は平成2年度国勢調査による夜間人口を用いている。表-2には、作成したデータベースのうち神戸市における総数を示す。

3. 被害の分析

以下では、被害データベースとGISを用いて、東灘区に関する建物および人的被害の分析結果を示す。

(1) 地表面加速度分布

土岐ら¹⁰⁾は兵庫県南部地震で観測された各地の最大加速度を分析し、等価震源距離に基づく距離減衰式を提案している。この距離減衰式は、対象地域に関して断層線の延長方向と直行方向の2つの領域に分けられており、さらに地盤に関しては道路橋示

表-1 建物被害データベース

区名	データベース化した建物棟数	1,2階の家屋、建物		3階以上の建物		焼失建物
		大きな破損	軽微な破損	大きな破損	軽微な破損	
東灘区	31,384	13,550	2,726	408	477	387
灘区	29,003	11,277	4,940	212	182	456
中央区	23,222	4,306	3,980	874	769	58
兵庫区	31,937	12,714	6,862	174	215	901
長田区	39,349	19,798	5,795	190	170	3,505
須磨区	32,952	9,891	2,946	55	95	1,034
垂水区	42,246	18	3,219	0	0	0
合計	230,093	71,554	30,468	1,913	1,908	6,341

表-2 人的被害データベース

区名	総人口	死者数
東灘区	190,220	1,285
灘区	129,578	847
中央区	116,279	181
兵庫区	123,919	410
長田区	136,884	741
須磨区	188,008	301
垂水区	235,254	7
北区	198,443	8
西区	158,960	4
神戸市合計	1,477,545	3,784



図-1 町丁目ごとの家屋、建物の倒壊率分布(1, 2階および3階以上の家屋、建物の大きな破損)

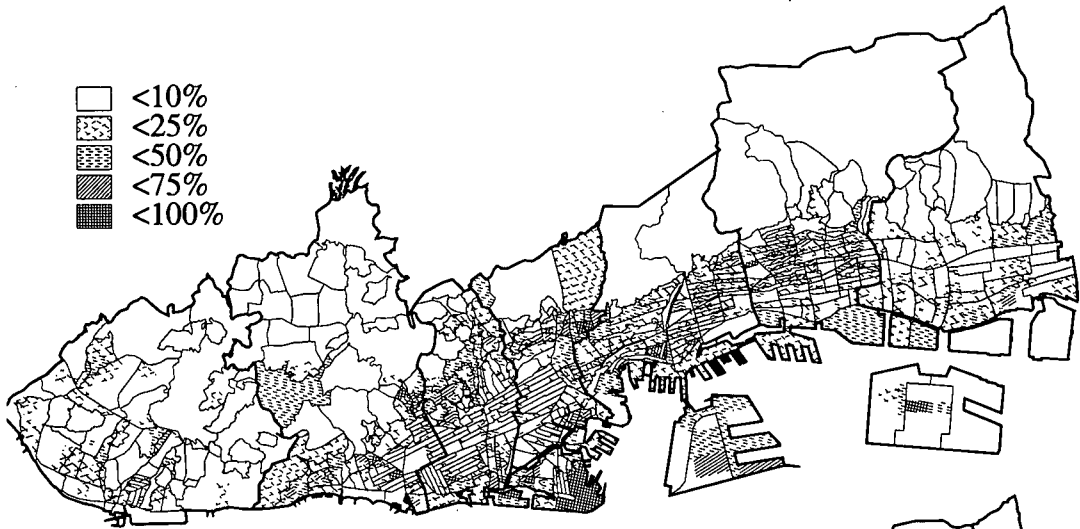


図-2 町丁目ごとの家屋、建物の部分損壊率分布
(1, 2階および3階以上の家屋、建物の軽微な破損)

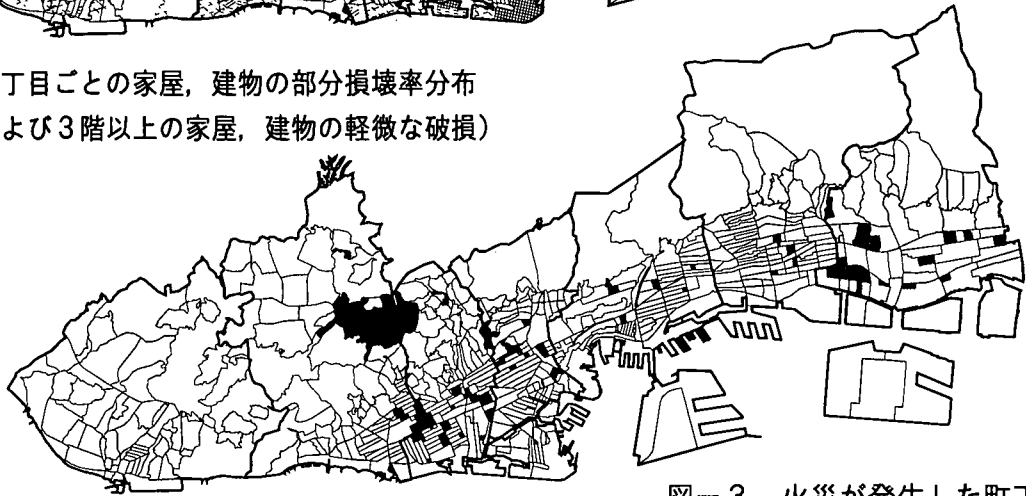


図-3 火災が発生した町丁目

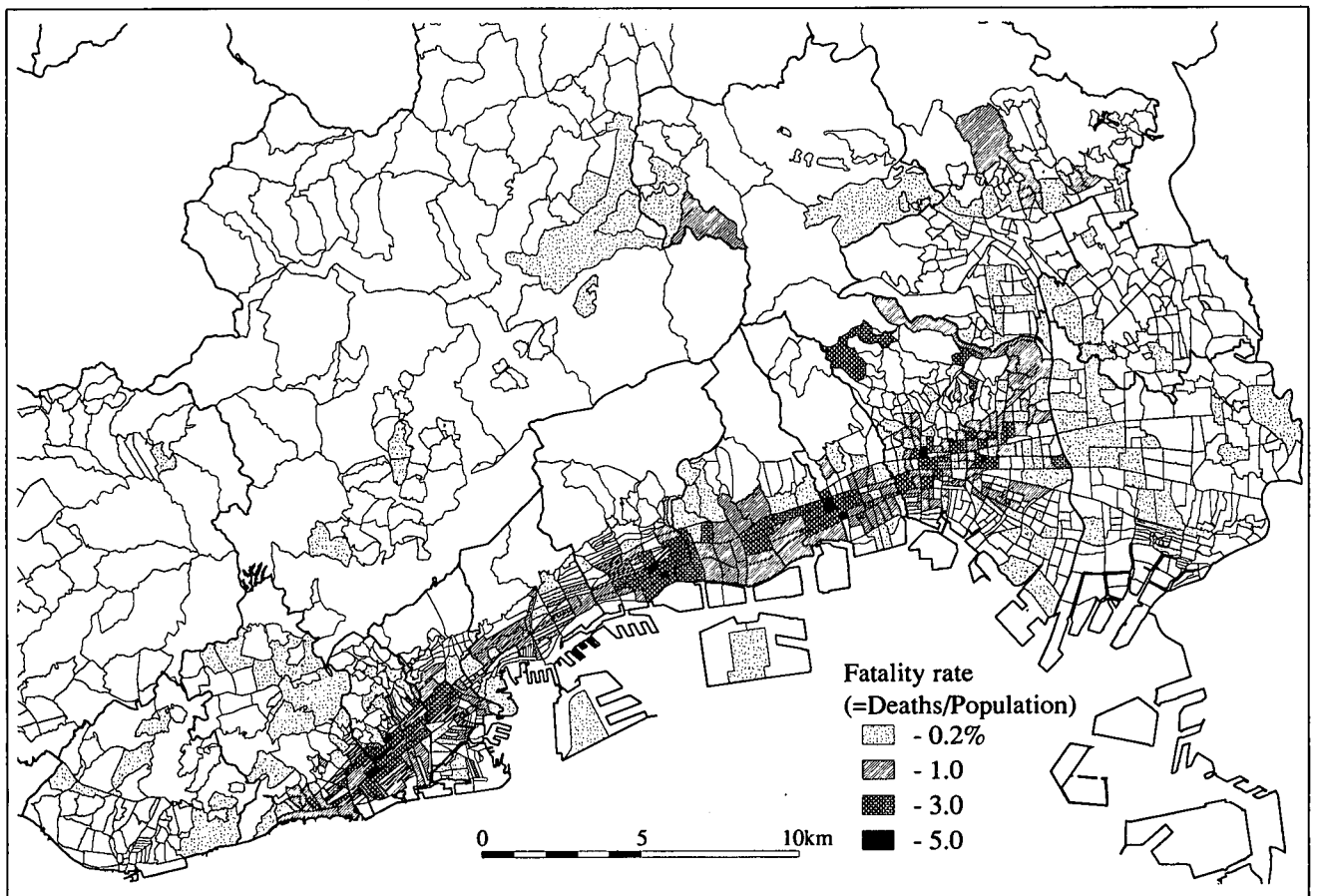


図-4 大字界ごとの死亡率分布

方書に規定されるI種地盤に相当する硬質地盤(Stiff), IIおよびIII種地盤に相当する軟弱地盤(Soft)に分けて提案されている。今回対象としている神戸市の7つの区では、垂水区の一部を除く全域が断層線の延長方向に属している。

図-5は、断層線の延長方向の領域に関して、StiffとSoftの水平最大加速度の距離減衰特性を示したものである。この図には、距離減衰式の妥当性を示す情報として、地盤種別ごとの観測値を一緒に図示している。図-6は、この距離減衰特性を用いて神戸市の水平最大加速度分布を推定した結果である。水平最大加速度分布の推定に当たっては、表層地質図¹¹⁾をもとに先四紀地盤と洪積地盤の一部をStiff、洪積地盤の一部、沖積地盤、埋立地盤をSoftとした。なお、この図には神戸市内の各観測点における観測値を参考に示した。

(2) 建物被害

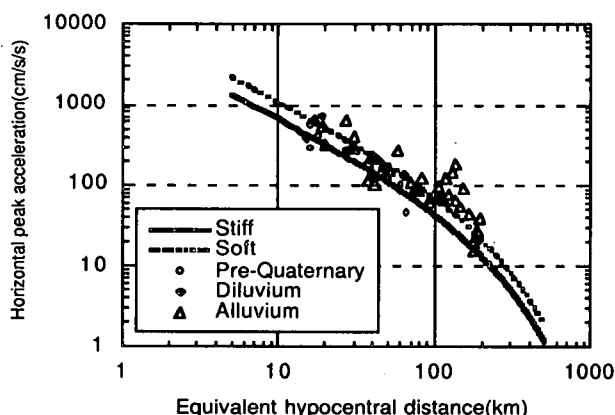


図-5 水平最大加速度の距離減衰特性

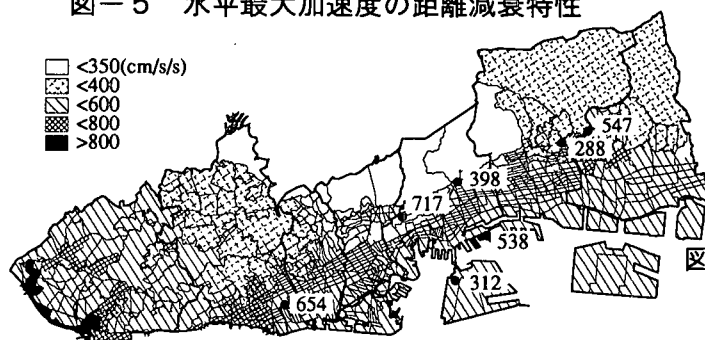


図-6 地表面の水平最大加速度分布(神戸市)

今回の地震被害を形容する際によく使われる言葉として「被害の帯」があるが、東灘区の建物被害でもこの傾向は顕著に見られる。東灘区では、全家屋、建物の56%に相当する約1万7000棟が被害を受けているが、これらは阪急線の南側の国道43号線

(阪神高速神戸線)までの約幅2kmの帯に集中している。この帯状の範囲の地盤は沖積層に分類されており、帯の北側の洪積地盤や南側に位置する埋立地の被害を上回っている。図-7と図-8は、この傾向を示す具体的なデータであり、東灘区の町丁目ごとの家屋、建物の倒壊率分布および阪急線からの距離と家屋、建物の倒壊率および死亡率の関係を示している。これらの図から明らかなように、この範囲の町丁目の多くで家屋、建物の倒壊率が75%以上となっていることがわかる。

図-9は、建物被害データベースと(1)で推定した地表面の水平最大加速度分布を用いて作成した、水平最大加速度に対する被災家屋、建物の密度

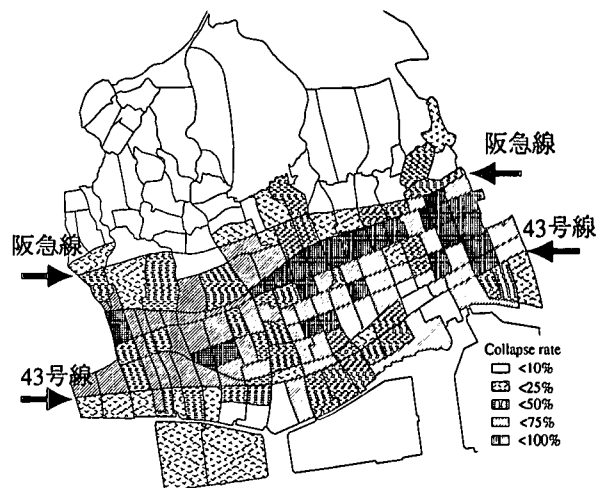


図-7 東灘区の町丁目別の家屋、建物倒壊率の分布

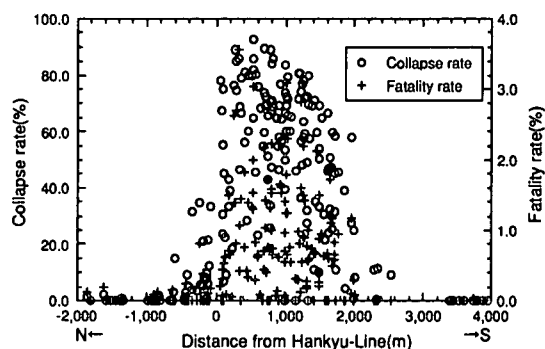


図-8 阪急線からの距離と町丁目別被害率の関係

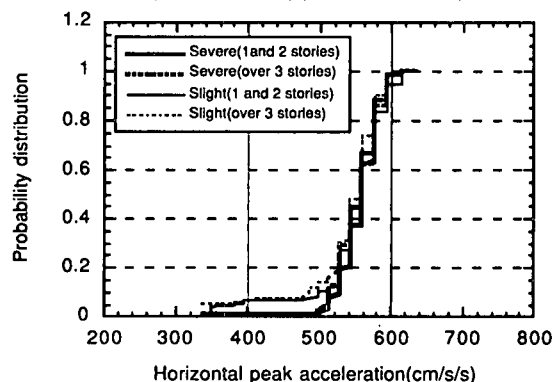


図-9 東灘区における被災家屋、建物の分布関数

分布を積分した分布関数である。この図では、実線が1, 2階の家屋、建物の大きな被害と軽微な被害の確率分布関数を表しており、点線が3階以上の建物のそれを示している。地表面加速度が約350~500cm/s²で軽微な被害が発生し始め、500~600cm/s²にほとんどの被害が集中していることがわかる。今後、構造種別のデータベース化を進めることにより、さらに詳細な fragility の評価を進める予定である。

(3) 人的被害

兵庫県南部地震は5,504名の死者・不明者をもたらした。東灘区ではそのほぼ1/4にあたる1,337名の死者が発生した(兵庫県警, 5月)。人口1千人あたりの死者数も7人を超え、ここでは最大の人的被害が生じている。図-10には、町丁目別の死亡率を示す。死者数は町丁目単位で住所が特定できた1,282名の方々を用いている。建物被害と同様に幅1~2kmの被害の帯が認められ、震災死が建物倒壊と密接に関連していることがわかる。

図-11は、町丁目ごとにプロットした倒壊建物数と死者数の関係である。データベース上の建物棟数は、住宅とオフィスビル、独立住宅と集合住宅の区別がない。倒壊棟数を建物総数で割った倒壊率と死者数を人口で割った死亡率の関係を図-12に示す。両図ともばらつきがみられるものの、大まかにみて倒壊数と死者数には線形から二次の相関、倒壊率Cと死亡率Fは $F=a \times C^b$ の関係にあることが示唆される。

今回の震災では高齢者の人的被害が特に顕著であり、死者の53%が60歳以上であった^{1,2)}。図-13の神戸市および東灘区の年齢ごとの死亡率についてみると、15~64歳の死亡率に対して、65歳以上では5~6倍、4歳以下では約1/2となっている。高齢者の脆弱性とともに、乳幼児の死亡率が神戸市では比較的小さかったことがわかる。図-14には65歳以上の死亡率分布を示す。死者全体よりさらに高い死亡率が被害の帯全域に現れている。

本データによれば、東灘区において死者20名を超えた町丁目のうち、65歳以上の死亡率の最大は本庄町1丁目の14.7%、最小は隣り合う深江北町2丁目の2.3%であった。一方、建物棟数でみた倒壊率は両地域とも9割程度で大差がない。このことから、人

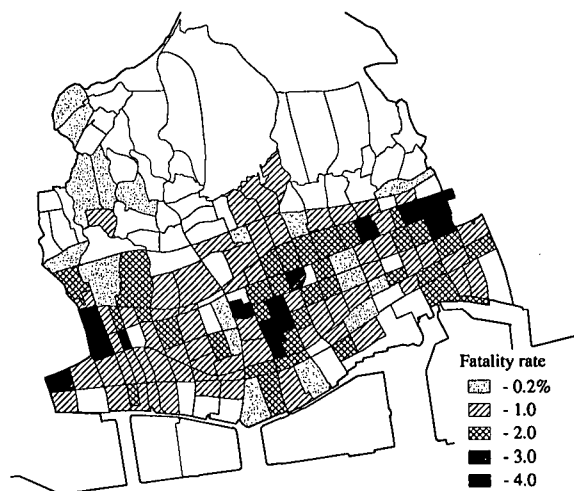


図-10 町丁目別の死亡率の分布

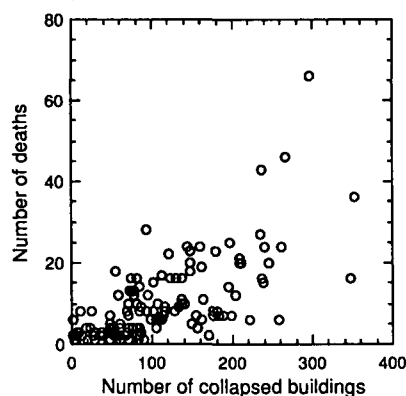


図-11 倒壊建物棟数と死者数の関係

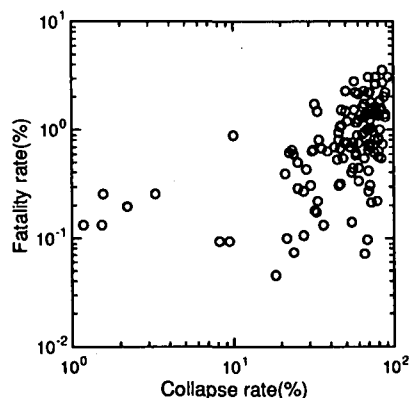


図-12 倒壊率と死亡率の関係

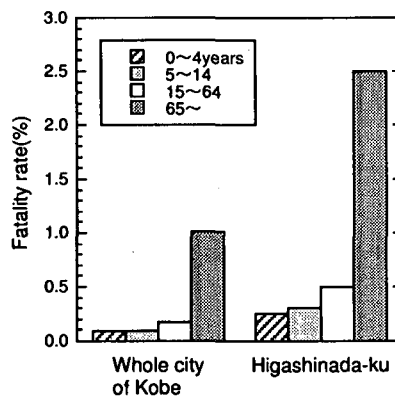


図-13 神戸市全域と東灘区の年齢別死亡率

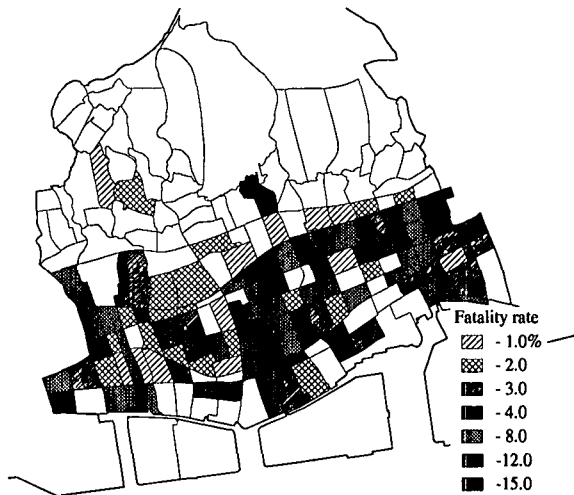


図-14 高齢者（65歳以上）の死亡率分布

的被害と建物被害の関係を町丁目などマイクロな単位で評価するには、被害率との単純な相関ばかりでなく住宅の性能や居住形態についての詳細な調査が必要である。

4. 被害シミュレーション

現状の地震被害想定手法に関する今後の課題の抽出を目的として、建物被害データベースに含まれる個々の建物データを用いた被害想定を実施し、被害状況の再現を試みた。なお、ここでは神戸市東灘区の建物の被害危険度、延焼危険度の結果について示す。

(1) 建物の被害危険度

建物は地震時の挙動および耐力の違いから、木造建物とS造、RC造、SRC造などの非木造建物に分けて考える必要があるが、現状のデータベースにはこれらの情報が入っていないため、階数と床面積から構造を類推した。

木造建物の地震時被害状況を左右する保有耐力は、弾塑性変形性能に大きく起因すると考えられている。そこで、構築した被害データベースに含まれる個々の木造建物位置（固有周期は全て0.45秒と仮定）、固有周期と耐力の関係式、地盤種別ごとに推定した加速度応答スペクトル¹³⁾を用いて塑性率を計算し、塑性率が4以上8以下を部分損壊、8以上を倒壊とした。また、非木造建物については、個々の非木造建物位置（建築年代は無視し、階数は住宅地図の情報を用いた）、地盤種別ごとに推定した加速度応答スペクトル¹³⁾から求めた1階部分の層せん断力係数を階数別の保有せん断耐力の統計値¹⁴⁾

と比較することによって、被害危険度を判定している。具体的には耐力比（層せん断力係数/保有せん断耐力の統計値）を求め、耐力比が2以上4以下を部分損壊、4以上を倒壊とした。

以上の手法により個々の建物ごとの被害推定を行い、倒壊と推定された建物について町丁目単位で倒壊率を算定した。図-15は、推定した建物倒壊率と被害現況図の倒壊率（大きな被害の割合）とを比較したものである。本シミュレーションでは、構造種別が類推情報であるために、被災範囲を推定するとどまった。

(2) 建物の延焼危険度

火災発生時に建物が延焼する要因として、建物構造、建物密集度、建物床面積、風向、風速などが挙げられる。このような要因を考慮した代表的な延焼拡大モデルとして、今回の解析では堀内モデル¹⁵⁾を用いた。このモデルは、隣接する建物の延焼着火時間、建物内部の燃え抜け時間、延焼限界距離から火災の延焼状況を再現するものである。なお、延焼対象は木造建物のみと仮定し、非木造建物は不燃とした。

ここでは、東灘区内で実際に火災の発生した甲南町および魚崎北町の一区画を抜き出して、延焼シミュレーションを行った。気象条件は当日の状況を考慮して無風とした。

図-16に延焼被害の現況図とシミュレーションによる燃え止まり結果を並べて示す。延焼の状況を見ると、シミュレーション結果は現況図とほぼ同じ延焼面積となり、良好な対応がみられる。ただし、延焼方向については若干の違いが生じた。

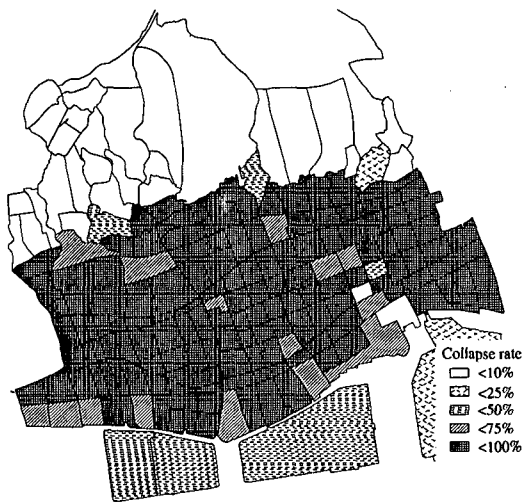
(3) 今後の課題

今回のシミュレーション結果から、詳細な表層地盤地質データ（メッシュデータの場合は少なくとも200m程度のメッシュ）の作成と、地盤地質分類に対応した地震動の推定を行う必要のあることを確認した。また、被害推定では街の発達過程の情報を含んでおり、復旧・復興活動の単位ともなる町丁目単位のシミュレーションを理想と考える。

建物の延焼危険度については、解析モデルに地震による建物の倒壊状況や木造建物の延焼度合いのばらつきや非木造建物の延焼モデルなどを考慮することにより、シミュレーションの精度を上げることが

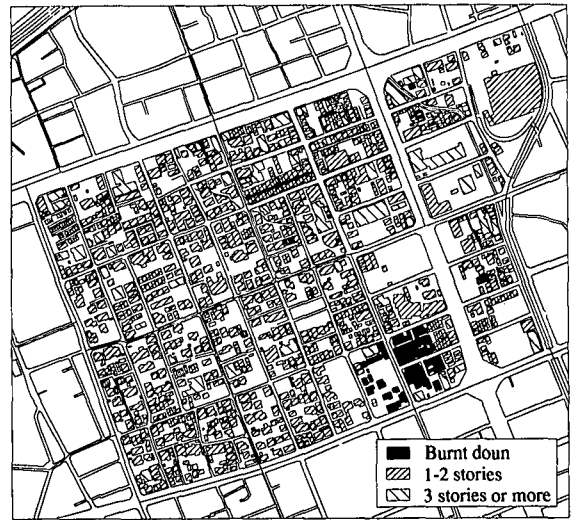


(a) 被害現況図

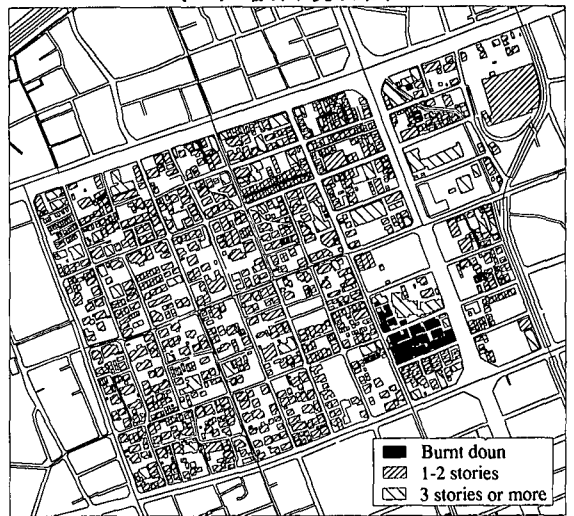


(b) シミュレーション結果

図-15 東灘区の家屋，建物の倒壊率分布



(a) 被害現況図



(b) シミュレーション結果

図-16 東灘区の延焼被害

できる。

5. おわりに

兵庫県南部地震の際の建物および人的被害について数値地図データベースを構築し、GISを用いた被害分析および被害シミュレーションを行った。結果をまとめると次のようになる。

(1) 国土地理院の被害現況図と市販の電子住宅地図を用いて神戸市の建物および人的被害データベースを構築した。

(2) 東灘区の家屋，建物の大きな被害は阪急線の北側約2kmの幅に集中していることをGISを用いた解析から定量的に示した。また，東灘区の家屋，建物被害は沖積地盤上に集中しており，地表面の水平最大加速度が500～600cm/s²の地域に集中している

ことを明らかにした。

(3) 東灘区の人的被害の分析を行った結果，大まかにみて倒壊数と死者数には線形から2次の関数で表される相関関係，倒壊率Cと死亡率Fについては $F=a \times C^b$ の関係にあることがわかった。

(4) 被害シミュレーションより，詳細な表層地盤地質データの作成と，地盤地質分類に対応した地震動の推定を行う必要のあることを確認した。また，被害推定では町丁目単位が理想と考えられる。

(5) 延焼解析モデルについては，地震による建物の倒壊状況や木造建物の延焼度合いのばらつきや非木造建物の延焼モデルなどを考慮することにより，シミュレーションの精度を上げることができる。

謝辞 本研究の基となった被害現況図の作成者であ

る建設省国土地理院の方々に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 永田茂：ノースリッジ地震における地理情報システムの利用実態，第50回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，土木学会，pp.194-195，1995年9月。
- 2) 例えば東京都防災会議：東京における地震被害の想定に関する調査研究，1992年9月。
- 3) 長谷川，永田，片山，山崎：微視的地域情報を用いた地震被害ポテンシャルの定量的評価に関する研究，第47回年次学術講演会講演概要集，第1部門，土木学会，pp.32-33，1992年9月。
- 4) 立川，永田，片山，山崎：微視的地域情報を用いた地震被害ポテンシャルの定量的評価-II 麻布・弦巻・墨田地域の比較検討-I，第48回年次学術講演会講演概要集，第1部門，土木学会，pp.12-13，1993年9月。
- 5) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，pp.51-56，1993年5月。
- 6) 松岡昌志，翠川三郎，若松加寿江：国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測，日本建築学会構造系論文報告集，第452号，pp.39-45，1993年10月。
- 7) 大西一嘉：阪神・淡路大震災とGISの活用，第4回Zmapユーザー会講演概要集，(株)ゼンリン，pp.1-11，1995年8月。
- 8) 建設省国土地理院：平成7年兵庫県南部地震被害現況図(第II版)全21面，国土地理院技術資料D・1-No.322，1995年4月。
- 9) 神戸大学工学部土木系教室(代表：高田至郎)：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書第1報，1995年2月，第2報，1995年3月。
- 10) 土岐憲三，後藤洋三，江尻譲嗣，澤田純男：兵庫県南部地震の震源特性と地盤振動特性，土木学会誌，Vol.80，No.9，pp.32-43，1995年9月。
- 11) 通産省工業技術院地質調査所：1:50,000地質図大阪西北部，神戸，須磨，1983年3月。
- 12) 国土庁：防災白書 平成7年度版，1995年9月。
- 13) S. Ohno, M. Takemura, M. Niwa and K. Takahashi: Intensity of Strong-Motions on Pre-Quaternary Stratum and Surface Soil Amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, submitted to J. Phys. Earth., 1995.
- 14) 山口寛久，中埜良昭，村上雅也，岡田恒男：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能一年代別，用途別，層数別の構造耐震指標の分布の検討-I，昭和63年度日本建築学会関東支部研究報告集<構造系>，pp.157~160，1988年11月。
- 15) 堀内三郎，小林正美：都市防災計画のシステム化に関する研究(Ⅰ)，日本建築学会論文報告集，第258号，pp.123~129，1977年8月。

ANALYSIS OF DAMAGE DUE TO HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

Akira ISHII, Takafumi MOROI, Shigeru NAGATA, Hiroshi ISHIDA and Naoto OHBO

Damage to buildings and fatalities in the city of Kobe due to the Hyogo-ken Nanbu earthquake are analyzed using a geographic information system(GIS). Digital map data such as the distribution of earthquake motion intensity, topographical and geological information, the distribution of damage to houses and buildings and the distribution of fatalities are processed using the geographic information system to analyze spatial correlations between factors. To identify future tasks related to existing methods of predicting earthquake damage, the methods are used to predict earthquake damage in Kobe's Higashi-nada ward and the prediction is compared with actual damage caused by the Hyogo-ken Nanbu earthquake.

地理情報システムを用いた地震被害予測事例

鹿島建設（株）	技術研究所	水越 熏
	同	石田 寛
	同	永田 茂
	同	小檜山雅之
東京海上火災保険（株）		松本 優

地震リスクを正しく認識し、地震防災対策の適切な選択を行うには、将来の大地震による都市の被害状況をできるだけ定量的に予測する技術を持つことが重要である。この観点から、筆者らは GIS（地理情報システム）を用いた地震被害の面的な予測手法の研究を進めてきた。本稿では、筆者らが開発した 2 つの地震被害予測の事例を紹介する。一つは日本全国を対象とする地震損害評価システムを用いた広域の地震被害予測の例であり、もう一つは 1km 四方程度の比較的狭い市街地を対象としたよりきめ細かい地震被害予測の例である。前者は地震被害のマクロ予測、後者はミクロ予測といえる。地震被害の予測技術は GIS の活用により近年急速に進歩しつつあるが、まだまだ多くの課題を残している。文末では、震害予測技術の高度化及び活用に向けての今後の課題について私見を述べる。

地理情報システムを用いた地震被害予測事例

鹿島建設（株） 技術研究所 水越 薫
 同 石田 寛
 同 永田 茂
 同 小檜山雅之
 東京海上火災保険（株） 松本 優

1. はじめに

都市機能や社会構造の高度化・ネットワーク化が進むにつれて地震被害の形態も多様化し、二次・三次被害への波及の様相も複雑化している。このことは都市の被害想定をますます難しくし、人々の地震リスクに対する正しい認識を阻害し、結果として地震防災対策の適切な選択を困難なものにしている。この問題を解決するには、将来の大地震による都市の被害状況をできるだけ定量的に予測する技術を持つことが不可欠である。

筆者らは、上記の観点から地震被害の広域的な（面的な）予測手法の研究を進めてきた。近年急速に普及したGIS（地理情報システム）は、地震被害のように広範囲に同時多発的に発生する地震被害の予測に適したコンピュータソフトである。しかし、GISを使えば直ちに被害予測ができるわけではない。地震の想定から地震動強さ（震度、最大加速度、最大速度、SI値など）の分布、地盤の液状化、地震動や液状化による構造物・ライフライン施設の被害、火災の発生と延焼拡大、人的被害、さらには物的・人的被害から波及する様々な社会・経済的影響を定量的に予測するためのモデル化が必要である。そのためには、幅広い分野での研究成果の中から適切な要素技術の評価精度のバランスを考慮して選び出し、統合することが求められる。その際、予測に必要なデータベース（地盤データ、構造物データ、社会・経済データ等）の入手可能性を考慮することも重要である。予測に用いる評価手法は被害予測の目的によっても当然異なったものになる。

本稿では、筆者らが行ったGISによる地震被害予測の2つの事例を紹介する。一つは損害保険業務を支援するために開発した日本全国を対象とする地震損害評価システムによる広域の地震被害予測の例であり、もう一つは1km四方程度の比較的狭い市街地を対象とするよりきめ細かい地震被害予測の例である。前者は地震被害のマクロ予測、後者はミクロ予測といえる。

2. 全国を対象とした地震被害のマクロ予測

日本全国を対象とした損害保険会社向けの建物損害予測システム¹⁾では、想定地震の設定や予測結果の表示がパソコン用のGISを用いて対話形式で行える。本システムの構成を図-1に、損害評価の概略フローを図-2に示す。本システムでは、標準地域メッシュ²⁾の3次メッシュ（約1km×1km）を単位として地震動強さ（ここでは地表最大加速度を尺度とする）を評価し、地盤の液状化危険度を評価した上で地震動及び液状化による建物被害率と地震火災による焼失率を算定する。そして、これらを保険契約データとリンクさせることにより想定地震による支払保険金額を算定する。以下に予測手法の概要と予測結果の例を示す。

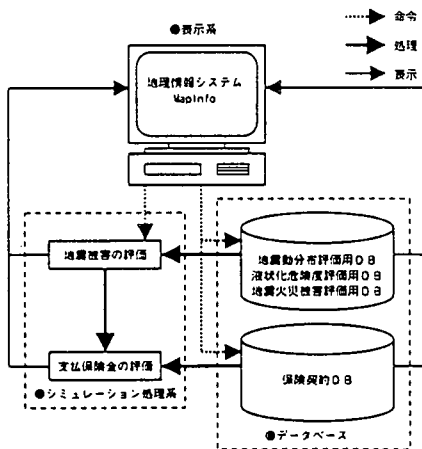


図-1 地震損害評価システムの構成

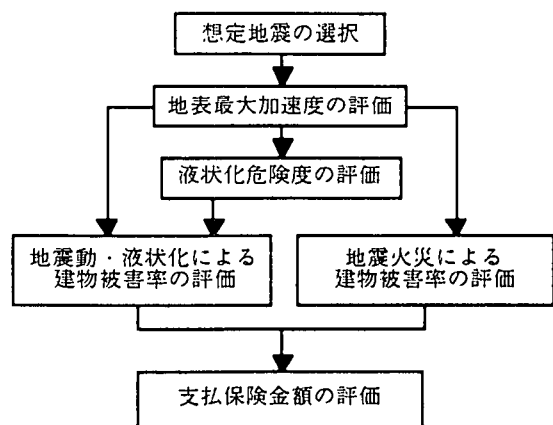


図-2 地震損害評価の概略フロー

(1) 地表最大加速度分布の評価

本システムでは点震源と面震源の2種類の震源モデルを用いることができ、歴史地震および活断層のデータベースから表示画面（図-3）上で震源を任意に選択することにより想定地震を設定することができる。各メッシュごとに、まず工学基盤（せん断波速度で300m/sec程度以上の地盤）での最大加速度を距離減衰式を用いて評価する。これに表層地盤の増幅率を乗じて地表面での最大加速度を求める。本システムでは、翠川ら³⁾による1987年千葉県東方沖地震（M6.7）を対象とした表層地質・地形分類による地震動強さ分布のシミュレーション結果を参考にして、表-1のような表層地質・地形分類別の増幅率を仮定した。

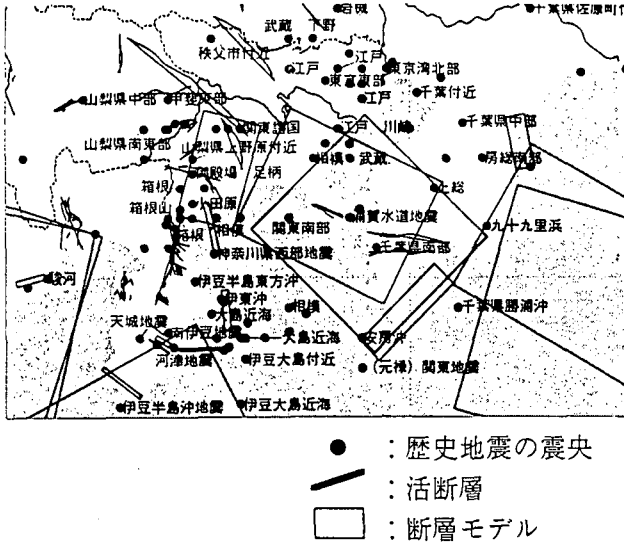


図-3 想定地震の設定画面

表-1 表層地盤による最大加速度増幅率

地質年代	地形分類	最大加速度増幅率
第三紀以前	山地	1.00
	丘陵地	1.45
洪積世	丘陵地	1.86
	ローム台地	1.78
	砂礫台地	2.14
沖積世	扇状地	1.74
	三角州	2.24
	砂州・自然堤防	2.34
	埋め立て地	2.34

(2) 液状化危険度の評価

本システムでは、三浦ら⁴⁾及び翠川・松岡ら^{5), 6)}の研究に基づき、評価地点の河川及び海・湖沼からの離岸距離と標高差をもとに液状化危険度を定性的に判定する方法を採用した（図-4参照）。判定手法は、まず国土数値情報の地形分類ごとに液状化限界加速度を設定し、地震時の地表最大加速度がこれを超える場合は河川及び海・湖沼からの離岸距離と標高差から表-2のように液状化危険度を判定する。

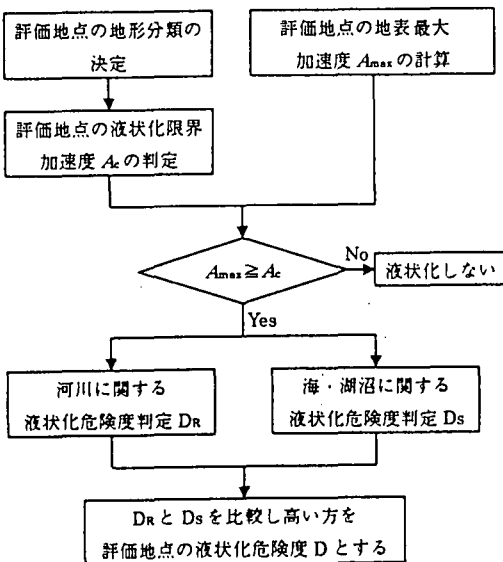


図-4 液状化危険度判定フロー図

表-2 液状化危険度の判定の考え方

		離岸距離L		
		$L < L_1$	$L_1 \leq L < L_2$	$L_2 \leq L$
標高差H	$H < H_1$	危険度大		危険度小
	$H_1 \leq H < H_2$	危険度中		
	$H_2 \leq H$			

(3) 地震動・液状化による建物被害の評価

建物の被害予測には地震動強さと建物被害率（建物総棟数に対する被害棟数の比率）の関係であるフラジリティ曲線（被害関数あるいはバルナラビリティ関数ともいう）を用いる。本システムのフラジリティ曲線の例を図-5に示す。これらは、1995年兵庫県南部地震及び近年の5つの被害地震の調査データ^{7)・8)・9)}を用いて建物被害率と地表最大加速度との関係を構造種別（木造/非木造）及び被害レベル（一部損以上/半損以上/全損）別に回帰して求めたものである。

地盤の液状化が生じた場合の建物被害は、上記の地震動による建物被害率に補正係数を乗じて評価する方法を用いている。補正係数は、兵庫県南部地震における液状化発生地域での建物被害データ¹⁰⁾より評価した。

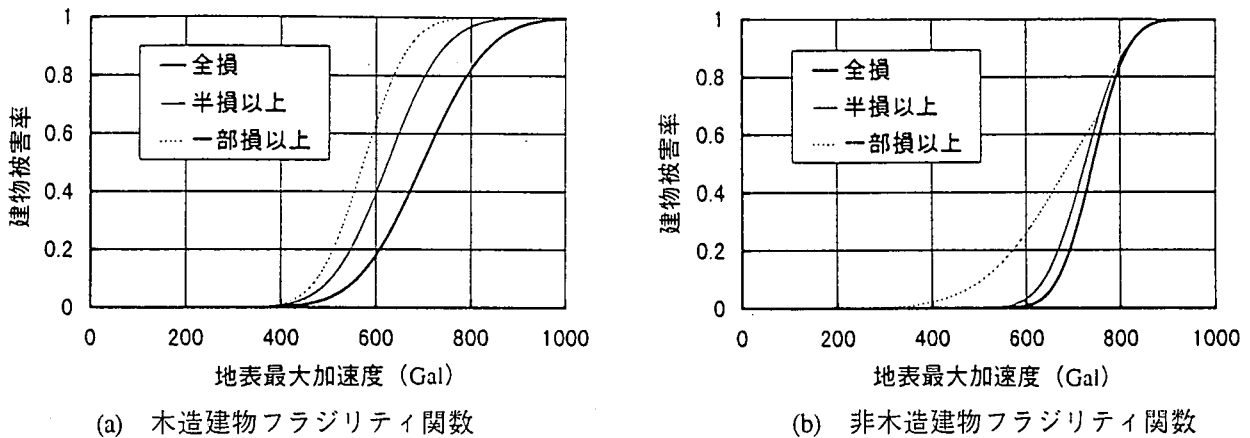


図-5 建物フラジリティ関数の例

(4) 地震火災による建物被害の評価

地震火災による建物焼失率（建物総棟数に対する焼失棟数の比率）の評価フローを図-6に示す。建物焼失率を評価するには、まず地震による出火件数を地表最大加速度と出火要因件数（住宅、飲食店など、出火の要因を持つ用途別建物棟数）から求め、このうち延焼火災に発展する件数（拡大火災件数）を推定する。出火件数の推定には東京消防庁¹¹⁾による出火要因別、地表最大加速度別、発生時間帯別の出火確率を用いる。この出火件数にはほやや小損を含むため、ここでは兵庫県南部地震の火災被害データ^{12)・13)}を回帰して求めた出火件数と拡大火災件数の関係式から拡大火災件数を評価した。

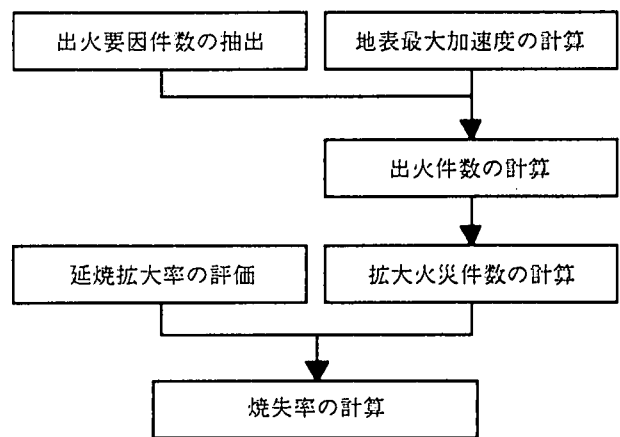


図-6 建物焼失率の評価フロー

次に、拡大火災件数に延焼拡大率を乗じて建物焼失率を評価する。延焼拡大率は拡大火災件数1件あたりの焼失率であり、対象地域の建物隣棟間隔や木造率に依存するものであるが、これらの統計データが整備されている地域は限られている。そこで本システムでは、全国どこでも利用可能な国勢調査と事業所統計調査のメッシュデータ¹⁴⁾をもとに延焼危険性に関する地域特性を指標化し、実際に延焼危険度の評価ができる地域と対比して延焼拡大率を求める金子ら¹⁵⁾の方法を用いた。

(5) 評価事例

図-7~10に1995年兵庫県南部地震を想定地震とした場合の被害評価結果を図示する。出火時間帯は東京消防庁による方法¹¹⁾では夏または冬の昼または夜を想定しており、ここではより大きな出火件数が予想される冬の日の夜を想定した。また、上記地震による実際の被害率分布図として図-11に町丁目ごとの低層建物（2階建て以下）の全壊率¹⁶⁾（木造全損率とほぼ同等とみなせる）を示す。

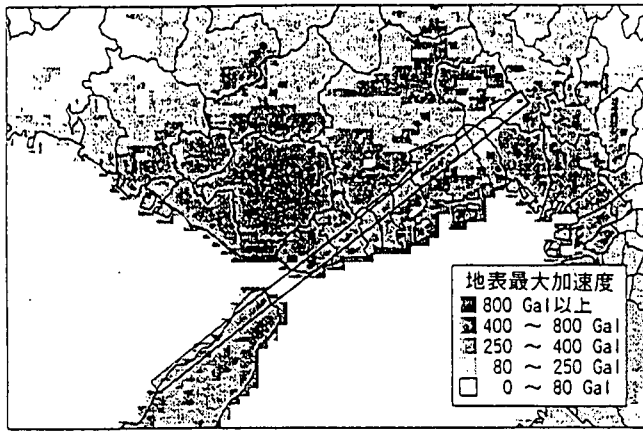


図-7 地表最大加速度分布 (計算)

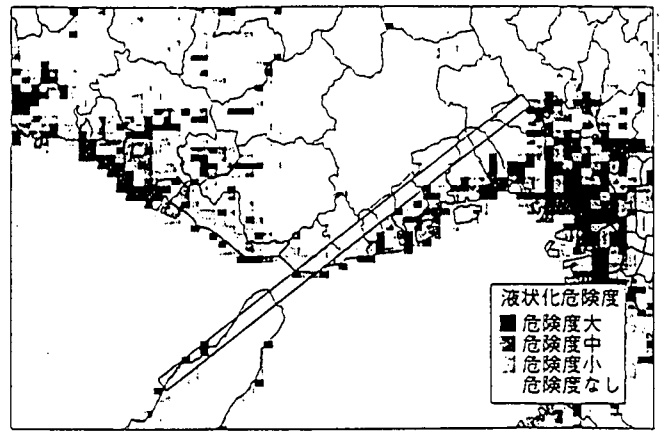


図-8 液状化危険度分布 (計算)

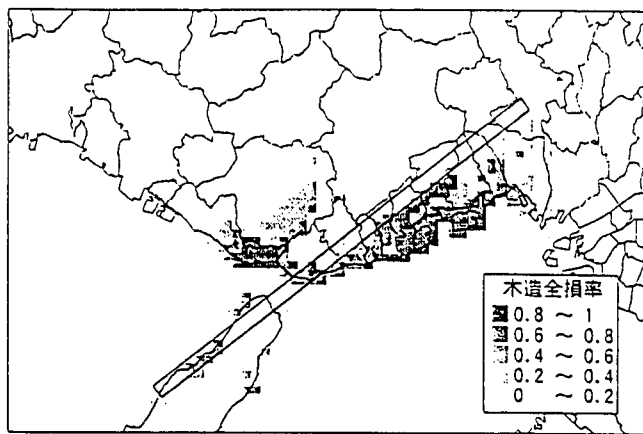


図-9 木造建物全損率分布 (計算)

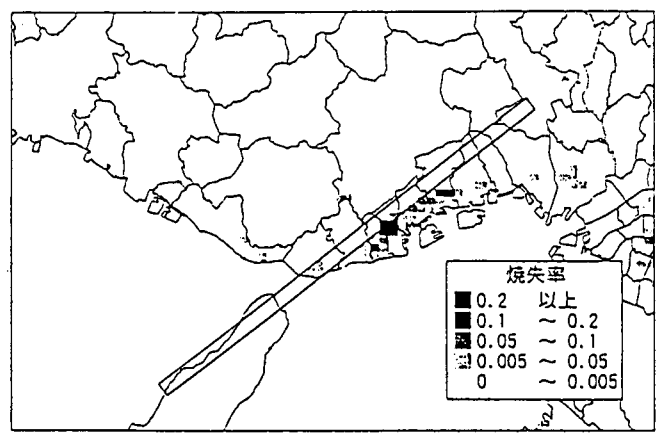


図-10 建物焼失率分布 (計算)

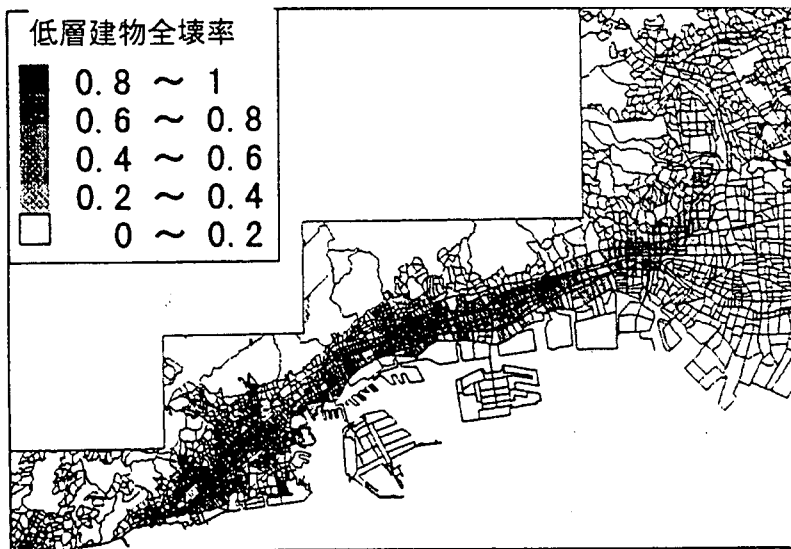


図-11 兵庫県南部地震での低層建物全壊率¹⁶⁾

注) 低層建物全壊率：低層建物の総棟数に対する「全壊または大破」¹⁶⁾と判定された低層建物棟数の比率。

木造全損率について計算結果（図-9）と実際の被害率分布（図-11）を比較すると、臨海部等で計算の方が過大評価となっている。この原因としては、臨海部に顕著に見られた液状化等による表層地盤の非線形性を本システムでは考慮していないため、臨海部での地表最大加速度が実際より大きく評価されたためと考えられる。また、建物 fragility 曲線の作成に用いた被害データのサンプル数が少ないことによる誤差の影響もあり、今後、広範な被害統計データを補うことで評価精度の向上を目指す必要がある。

3. 市街地を対象とした地震被害のマイクロ予測

東京のある市街地（面積約 2.3 km²）を対象に、以下のような手法で地震被害予測を行った。

まず、対象地点から半径 150 km 程度の領域に存在するプレート境界や活断層の地震活動度を過去の地震歴データから確率的に評価する。次に、距離減衰式を用いて対象地点の工学基盤での最大加速度とその年超過確率との関係（ハザード曲線）を評価する。これから任意の再現期間に対する地表最大加速度の発生期待値が評価できる。次に、想定再現期間に対応する最大加速度振幅をもつ入力時震動を設定し、地域内のボーリングデータに基づく地盤モデルを用いて 1 次元波動論による地震応答解析を 100 m メッシュごとに行った。その結果を GIS の機能を用いて面的に補間し、地表面での最大加速度分布を求めた。図-12 は、再現期間 500 年に対する地表最大加速度の分布である。地盤条件の差による局地的な地震動強さの変化が評価されている。

次に、その地域にある建物の被害発生確率を fragility 曲線⁸⁾を用いて 1 棟ごとに評価する。この場合は、図-5 に示した fragility 曲線の縦軸を被害発生確率として用いている。図-13 は、再現期間 500 年に対する木造建物の大破発生確率を評価した例である。中破以上、小破以上の発生確率についても同様の評価ができる。なお、本事例での大破、中破、小破は、それぞれ前章の事例の全損、半損、一部損にほぼ相当する。

さらに、ダメージファクター（建て替え費用に対する損害額の比）の概念^{17)、18)}を用いて 1 棟ごとの建物被害による損害額を概略評価した。すなわち、各被害レベル（無被害、小破、中破、大破）に対応するダメージファクター DF_1 、 DF_2 、 DF_3 を表-3 のように仮定し、1 棟ごとのダメージファクターの期待値 $PDF(x)$ を下式により評価した。

$$PDF(x) = DF_1 \cdot P_1(x) + DF_2 \cdot P_2(x) + DF_3 \cdot P_3(x) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x は地表最大加速度であり、 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ 、 $P_3(x)$ は fragility 曲線から求められる小破、中破、大破の発生確率である（図-14 参照）。得られた $PDF(x)$ に建物の床面積から概略評価される建物の建て替え費用を乗じて損害額を求める。

この地区では、上記の他に液状化ポテンシャル、ライフライン（電気、上水道、ガス、電話）の被害、火災被害、人的被害についても評価を行っているが、紙面の都合で割愛する。



(再現期間 500 年)

図-12 地表最大加速度の分布



(再現期間 500 年)

図-13 木造建物の大破発生確率

表-3 被害レベルに対応するダメージファクター

被害レベル	ダメージファクター
無被害	0.0
小破	$DF_1=0.15$
中波	$DF_2=0.50$
大破	$DF_3=1.00$

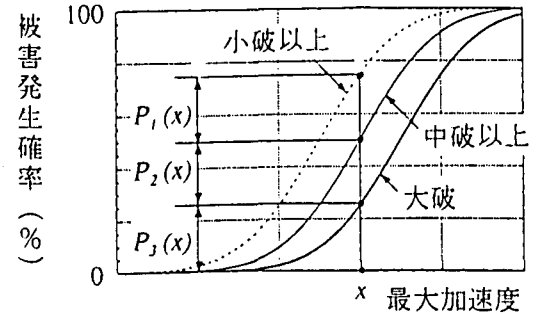


図-14 各被害レベルの発生確率

4. 結び

本稿では、評価対象のサイズの異なる2つの地震被害予測の事例を紹介した。地震の予知が難しい現状を考えると、突然襲来することを前提とした震災への備えが必要である。そのためには、地震被害の予測に基づいた適正なリスク評価が前提となる。地震被害を予測する技術は、GISの活用により近年急速に進歩しつつあるが、まだまだ多くの課題を残している。その一つは、確率的な評価手法の確立である。地震被害の予測には各評価段階で様々な不確定要因を含んでおり、最終的な予測結果がどの程度のばらつきを持つものであるかを定量的に示すことは不可欠である。もう一つの課題は、地震被害の時空間的な連鎖構造のモデル化である。GISは空間的な被害予測には適しているが、時間的な被害の波及予測には別の手法が必要となる。そして、さらなる課題として、予測結果を対策につなげるインターフェース技術の開発が挙げられる。人々は地震被害の大きさだけを考慮して地震防災対策を決めるのではなく、平常時の生産活動や他の様々なリスクとのバランスの中で判断を下す。その観点から最適な地震防災対策の選択のための意思決定支援技術の研究が進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 小檜山、水越、石田、永田、金子、小磯、上田、松本、矢代、大金；GISを活用した広域地震被害評価システムの構築、鹿島技術研究所年報、第46号、1998.9.
- 2) 建設省国土地理院、数値地図ユーザーズガイド、(財)日本地図センター、1992.
- 3) 翠川、松岡、作川；1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価、日本建築学会構造系論文報告集、第442号、1992、pp.71-78.
- 4) 三浦、杉山、坪井、幸原；液状化危険地域の簡易推定法、第9回日本地震工学シンポジウム論文集、1994、pp.1015-1020.
- 5) 松岡、翠川、若松；国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測、日本建築学会構造系論文報告集、第452号、1993、pp.39-45.
- 6) 翠川、松岡；国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査、第48巻、第6号、1995、pp.519-529.
- 7) 早坂、水越、石田、田上、高田、嘉島；兵庫県南部地震による建物被害の分析 その1 研究概要と建物属性分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996、pp.1-2.
- 8) 嘉島、高田、水越、石田、田上、早坂；兵庫県南部地震による建物被害の分析 その2 建物フラジリティ曲線、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996、pp.3-4.
- 9) 童、山崎、佐々木、松本；被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係、第9回日本地震工学シンポジウム論文集、1994、pp.2299-2304.
- 10) (社)日本水道協会、1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、1996.
- 11) 東京消防庁、地震時における地域別の総合出火危険予測と対策、1987.
- 12) 鈴木、松原、1995年兵庫県南部地震後10日間の出火状況、消研輯報第49号、1995.
- 13) 神戸大学(室崎他)、阪神・淡路大震災時の火災の延焼状況調査報告書、1995.
- 14) 総務庁統計局、地域メッシュ統計の概要、(財)日本統計協会、1994.
- 15) 金子、佐藤；地域特性を考慮した都市火災シミュレーションの提案、日本火災学会平成8年度研究発表会梗概集、1996、pp.80-83.
- 16) 建設省建築研究所；平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、1996.
- 17) Applied Technology Council; Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13), 1985.
- 18) Risk Management Solutions, Inc.; NIBS Earthquake Loss Estimation, National Institute of Building Sciences, 1995.

図-11の地図は建設省建築研究所が建設省国土地理院の承認を得て、同院発行の数値地図10000(総合)を複製したCD-ROMデータに基づいて作成したものである。(承認番号 平8総複、第26号)。