

リスクカーブを用いた市区町村別建物地震リスク評価手法について

若浦 雅嗣*・小丸 安史*・清水 智*・早川 譲**

Seismic risk evaluation on buildings in municipalities using risk curves

Masatsugu Wakaura*, Yasushi Komaru*, Satoshi Shimizu* and Yuzuru Hayakawa**

Abstract

This paper shows methods for calculation and evaluation of risk curves with the exceedance probability in 30 years regarding building damage. For the calculation, building data with 250m mesh are estimated in consideration of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and loss functions of wooden and non-wooden buildings were set. We have constructed a methodology considering the spatial correlation of dispersion of earthquake hazards and dispersion based on the planer extension of municipalities using the seismic activity model in the National Seismic Hazard Maps for Japan. Furthermore, from the evaluation of calculated risk curves, we show the relation between the characteristic of risk and the shape of risk curves.

Keywords: Risk Curve, Spatial Correlation, Risk Management

(要 旨)

全国地震動予測地図¹⁾における地震活動モデルを用いて、市区町村単位の地震動による建物被害（全壊棟数）に関する30年超過確率のリスク分析を行った。分析にあたっては、日本全国の250 mメッシュ単位の建物データを推定するとともに、木造・非木造建物の全壊率の被害関数を設定し、地震ハザードの面的な拡がりに基づくバラツキの空間的な相関を考慮する手法を取り入れることによってリスクカーブを作成し評価を行った。また、リスクカーブの形状によるリスク特性の考察を行った。

キーワード: リスクカーブ, 空間相関, リスクマネジメント

* 応用アール・エム・エス株式会社 ** 応用地質(株)震災復興本部

* OYO RMS Corporation

** OYO Corporation Earthquake Disaster Prevention Division

1. まえがき

全国地震動予測地図¹⁾における確率論的地震動予測地図(確率論的地震ハザード評価)を用いて、建物・構造物の被害予測を含めた確率論的な地震リスク分析が可能である。確率論的な地震リスク分析のアウトプットの一つとして、リスクカーブが挙げられる。リスクカーブは、地震ハザードカーブの微分とロスカーブ(被害関数)の積和によって得ることができる。ロスカーブ(被害関数)については、その目的に応じた関数を用いることにより、地震による建物の損壊棟数や損失資産額、さらには死者数や重傷者数等の様々なリスク分析が可能となる。

これまでも全国地震動予測地図¹⁾を利用した地震リスク評価に係る研究成果が発表されている。例えば、能島ほか(2010)²⁾では、計333断層の震度曝露人口と地震発生確率との関係を「P-PEX関係」として表し、これに基づいて地震リスクカーブを求めている。また、小丸ほか(2010)³⁾では、確率論的地震動予測地図による震度ハザードカーブを用いて、全国を対象に地震動の揺れによる全壊棟数および死者数の発生期待値を算定し、現在と将来時点のリスク評価を行っている。

本稿は、2012年時点での日本における建物データを推定し、全壊率の被害関数を用いることによって、市区町村単位での建物の全壊棟数被害リスクカーブを作成した。作成にあたっては、地震動の不確実性の空間的相関を考慮する形で250mメッシュから市区町村単位へ統合を図った。また、作成されたリスクカーブの活用について考察した。

2. 建物データの設定

地震リスク分析に用いる日本全国を対象とした建物棟数データの設定内容について説明する。

2.1 方針

建物棟数の設定は以下の通りとした。

- 250mメッシュ単位でハザード評価が行われた全国地震動予測地図¹⁾に基づきリスク分析をするため、建物棟数データも250mメッシュ単位のデータとする。
- 地震リスク分析は建物構造、建築年代により大きな影響を受ける。そこで、建物棟数データは各メッシュに建物構造および建築年代区分の属性をもつデータとする。
- 現状での地震リスクの分析とするため、東日本大震災による建物分布の変化を反映したデータとする。

2.2 データの設定方法

2.2.1 設定手法の概要

図-1に建物棟数データ設定のフローを示す。建物分布は大井ほか(2010)⁴⁾による「全国建物分類データベース」を利用した。このデータは、250mメッシュ単位で建物1棟ごとに250mメッシュコード、構造、階数、用途、延床面積の属性が与えられたデータである。

このデータに対し、建築年代区分を与え、構造・建築年代区分別建物棟数データを作成した。なお、「全国建物分類データベース」は2011年に発生した東日本大震災前に整備されたデータである。東日本大震災では津波により約12.9万棟の建物が流出・全壊した⁵⁾だけでなく、約5万戸の仮設住宅が設置された^{6).7).8).9)}。

この数字は、被災地の中心であった岩手県・宮城県・福島県の建物棟数約275.8万棟の約6.5%を占めており、250mメッシュや市町村単位のリスク分析結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで、東日本大震災による津波被害や仮設住宅の設置状況を踏まえ建物分布を補正した(津波以外の揺れや液状化による建物全壊棟数は少なく、リスク分析に対する影響は軽微であることから本稿では補正をしていない)。また、床面積30m²未満の建物は対象外とし、構造は木造、非木造の2区分としてリスク評価用の建物データを作成した。

2.2.2 建築年代区分の設定

建築年代区分の設定は、2008年10月に実施された住宅・土地統計調査¹⁰⁾による市区町村毎の木造非木造別建築年代別住宅数の比率を現在の建築年代区分の比率として適用し、木造、非木造ごとにメッシュ内の建物棟数を振り分けた。なお、設定した建築年代の区分は、1960年以前築、1961～70年築、1971～80年築、1981～90年築、1991～2000年築、2001～2010年築、2011年以降築の7区分である。

2.2.3 東日本大震災による建物分布の補正

東日本大震災による建物分布の補正は以下の通りである。

- 津波によって建物が流出・全壊したエリアの建物棟数はゼロとした。また、建物の流出・全壊したエリアは、国土交通省都市局によって実施された津波市街地復興支援調査結果のデータを利用した⁵⁾。
- 仮設住宅は文献^{6).7).8).9)}から設置戸数とその位置を整理し、仮設住宅1戸を1棟、構造は木造、建築年代区分は2011年以降築として、建物棟数データに加えた。

2.3 設定した建物棟数データの概要

設定した250mメッシュ毎建物棟数データを図-2に示す。また、設定した建物データの特徴は以下の通

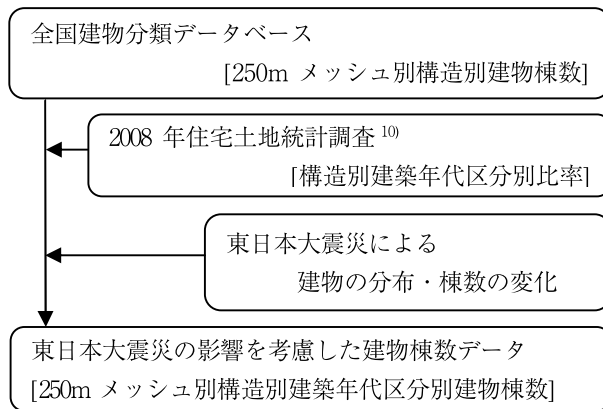


図-1 建物データ設定の流れ
Fig. 1 Flow of setting building data.

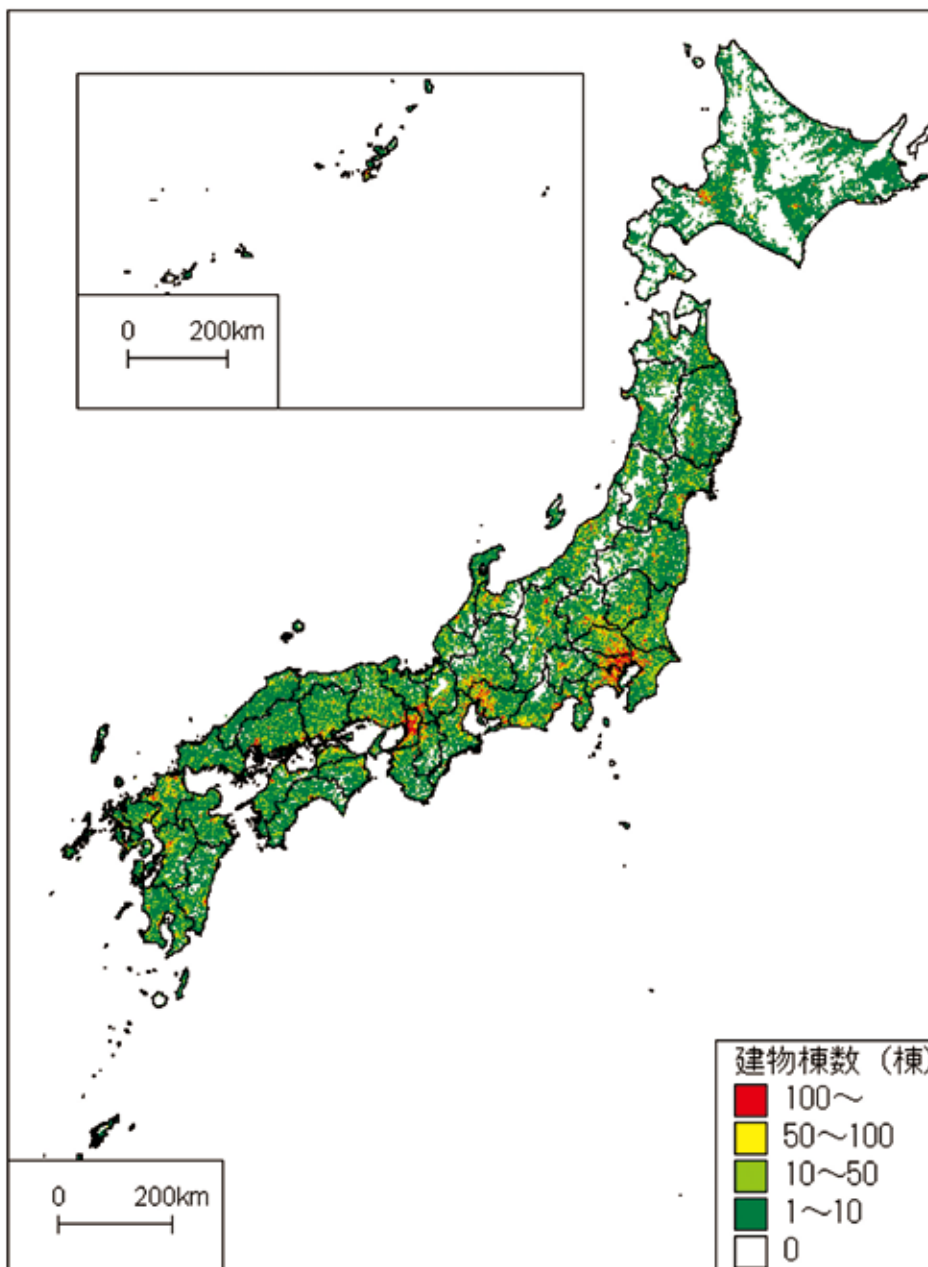


図-2 250 m メッシュ毎の建物棟数 (単位: 棟)
Fig. 2 Number of buildings per 250 m mesh.

りである。

- 日本全国の建物全棟数は約 4,897 万棟で、そのうち木造建物が約 82%、非木造建物が約 18% を占める。
- 木造建物は都心部を除く地域全体に分布しているが、非木造建物は都市部に集中している。
- 1981 年建築基準法改正以前の旧建築基準法に基づく 1980 年以前築の構成比が高い地域は西日本に多く、日本全体では 1980 年以前築の建物は全建物の約 39% を占める。

3. 建物被害関数の設定

建物の地震リスク評価に用いた被害関数について説明する。

3.1 方針

建物の被害関数は、以下の方針で設定した。

- 日本国内で提案されている既往の被害関数を対象とする。
- 全国地震動予測地図¹⁾の地震ハザード評価に対応できるように、被害関数は最大速度-建物全壊率あるいは計測震度-建物全壊率の関係式を用いる。

被害関数は、過去の被害地震の最大速度および計測震度の分布と地震発生当時の住宅分布を推定して、候補となる複数の被害関数で全壊棟数を算定、実態と最も整合する被害関数を選定する。

3.2 木造建物の被害関数の選定

日本国内では相対的に耐力が弱い建物は木造建物が大多数を占めており、実質的に地震による建物被害の規模は木造建物の被害で概ね決まる。したがって、木造建物の被害関数の選択が重要となる。

木造建物の被害関数には、1995 年に発生した兵庫県南部地震の被害に基づく被害関数が多く提案されている。また最近では、実際の木造建物の耐力分布に基づく被害関数も提案されている。そこで、これらの代表的な木造建物の被害関数を候補として選定することとした。具体的には下記に示す 2 つの関数である。

- 村尾・山崎 (2000)¹¹⁾による被害関数—1995 年兵庫県南部地震による神戸市灘区の被災度調査に基づいた地表最大速度 (PGV) をパラメータとする建築年代別被害関数。
- 中嶋・岡田 (2008)¹²⁾による被害関数—木造住宅の耐力分布から導出される計測震度をパラメータとする建築年代別被害関数。木造住宅の耐力分布は全国 3 万棟のデータによる建築年代別の平均的な分布に基づいている。

なお、非木造建物の被害関数は中央防災会議 (2004)¹³⁾で採用されている計測震度をパラメータとする被害関数を用いた。

3.3 被害の検証

3.3.1 検証対象とした地震

検討対象とした地震は、住宅の全半壊棟数が 1,000 棟を超えた下記の 5 地震とした。

- 1) 1995 年兵庫県南部地震 (M7.3)
- 2) 2000 年鳥取県西部地震 (M7.3)
- 3) 2004 年新潟県中越地震 (M6.8)
- 4) 2007 年能登半島地震 (M6.9)
- 5) 2007 年新潟県中越沖地震 (M6.8)

3.3.2 検証用住宅建物データ

日本国内で 5 年ごとに整備されている住宅・土地統計調査¹⁴⁾から推定される市区町村別の建築年代別の住宅棟数データと、同じく 5 年ごとに整備されている国勢調査¹⁵⁾の 1 km メッシュ別の人口データから、1 km メッシュ単位で建築年代別の木造、非木造の住宅棟数を推定した。その際、それぞれの被害地震の発生時期に近い統計年次のデータを使用している。

3.3.3 検証用地震動分布

各被害地震の地震動分布は、各地の観測データをもとに、1 km メッシュ単位で面的に予測した。なお、表層地盤の影響は、空間補間法で考慮した。また、観測点が存在しない断層近傍については、地震動が大きくなるように、各地震の観測点での基盤地震動より最小 2 乗法で推定した距離減衰式をトレンド成分とした simple Kriging 法を用いた。なお、simple Kriging 法の計算プログラムは、防災科学技術研究所川崎ラボラトリより公開された“rasmo”のコード¹⁶⁾を一部修正して使用した。推定した地震動分布の例として、1995 年兵庫県南部地震の PGV 分布を図-3 に示す。

3.3.4 検証結果

各被害地震について、上記に示した被害関数をもとに、1 km メッシュ単位で木造住宅の全壊棟数を予測し、実際の住家被害¹⁷⁾と比較した (表-1)。この結果によると、村尾・山崎 (2000)¹¹⁾による予測値は、兵庫県南部地震の実被害と整合するものの、他の 4 地震は中嶋・岡田 (2008)¹²⁾による予測値の方が実被害に比較的近い結果が得られている。これは、兵庫県南部地震の被害に基づく被害関数は地域の建物耐力の影響を強く受けていることが要因の一つとして考えられる。よって、全国平均の耐力分布に基づき被害関数を設定している点、および耐震化による耐力向上の影響を直接被害関数に反映できる点も踏まえて、本稿で適用する被害関数は中嶋・岡田 (2008)¹²⁾による被害関数の方法を用いることとした。

3.4 リスク評価に用いる全壊率関数

前節での検討を踏まえ、2012 年時点の地震リスク分析に用いる全壊率関数を木造ならびに非木造建物について設定する。

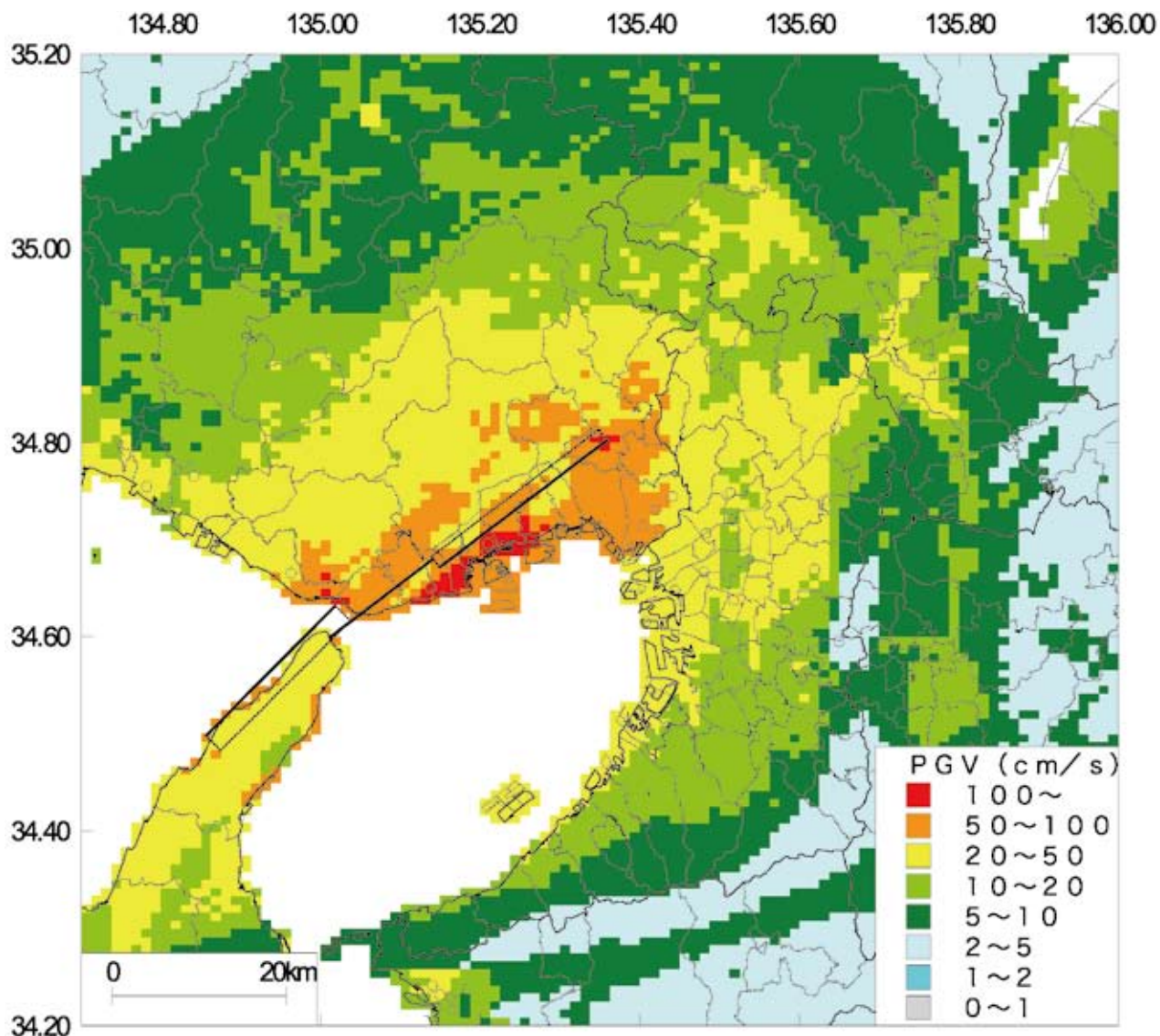


図-3 1995年兵庫県南部地震のPGV分布

Fig. 3 PGV distribution in 1995 Hyogo-ken-Nanbu Earthquake.
 (○は強震観測点, 観測点の値は, 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集¹⁸⁾による)

表-1 各被害地震の住宅全壊棟数の被害実数と予測値の比較

Table 1 Comparison of actual and predicted numbers of completely collapsed buildings in 5 selected earthquakes.

発生日	地震名	実被害棟数	予測値	
			村尾・山崎 (2000)	中嶋・岡田 (2008)
1995/01/17	兵庫県南部	104,906	96,264	54,372
2000/10/06	鳥取県西部	435	913	512
2004/10/23	新潟県中越	3,175	10,108	5,550
2007/03/25	能登半島地震	686	2,248	1,335
2007/07/16	新潟県中越沖地震	1,331	9,183	5,351

* 実被害棟数は消防庁¹⁷⁾による

3.4.1 木造建物の全壊率関数

本稿で用いる木造建物の全壊率関数を設定する。中嶋・岡田(2008)¹²⁾による被害関数は、計測震度を入力する関数式になっているが、ここでは以下のように地表面最大速度(PGV)から求める形とした。

$$Lw_{\lambda, \xi, E} = \Phi_{\lambda, \xi} \{ \ln(s) \}, s = \{ (I_E - a) / b \}^{1/c}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{I \cdot II} = 2.68 + 1.72 \log PGV & (2) \\ I_{III} = 2.002 + 2.603 \log PGV - 0.213 (\log PGV)^2 & (3) \end{cases}$$

ここで、(1)式の $\Phi_{\lambda, \xi} \{ \cdot \}$ は住宅の耐震評点分布について、平均が λ 、標準偏差が ξ の正規累積分布関数で表したもので、 λ と ξ は年代区分に応じて設定される。2012年時点のリスク評価における年代区分は1960年以前、1961～70年、1971～80年、1981～90年、1991～2000年、2001～2010年、2011以降の7区分で、パラメータの設定にあたっては、中嶋・岡田(2008)¹²⁾による全国平均の年代別パラメータの値にその後の経年劣化の影響を考慮して表-2の通りとした。(1)式の s はある計測震度 I に対して一定の損傷度を被る建物の耐震評点で、所定の耐震評点を閾値としてそれより低い耐力の建物はすべて全壊と考える。本稿では全壊に相当する損傷度として中嶋・岡田(2008)¹²⁾で提示されている損傷度0.6のパラメータを使用し、 $a = -0.88746$ 、 $b = 7.807897$ 、 $c = 0.086492$ とした。また、地震調査研究推進本部(2010)¹⁹⁾では、海溝型地震のうち震源断層を特定できる地震をカテゴリーI、海溝型地震のうち震源断層を特定しにくい地震をカテゴリーII、活断層など陸域と海域の浅い地震をカテゴリーIIIと分類しており、(1)式の s の等式の I の添字 E は地震カテゴリーの種別(I・II/III)を表す。PGVから計測震度への変換は地震カテゴリー毎に異なり、地震調査研究推進本部(2010)¹⁹⁾と同様に、地震カテゴリーI・IIの地震は翠川ほか(1999)²⁰⁾による(2)式、地震カテゴリーIIIの地震は藤本・翠川(2005)²¹⁾による(3)式をそれぞれ用いる。図-4には7つの年代別の木造建物の全壊率関数を示す。

3.4.2 非木造建物の全壊率関数

中央防災会議(2004)¹³⁾では、兵庫県南部地震での西宮市、鳥取県西部地震における鳥取市、芸予地震における呉市の建物被害データをもとに、年代別の非木造建物の全壊率曲線を設定しており、これに基づき以下の通り設定する。

$$Lc_{\lambda, \xi, E} = \Phi_{\lambda, \xi}(I_E) \quad (4)$$

非木造建物の全壊率関数の年代区分は、1970年以前、1971～80年、1981以降の3区分である。表-3に年代区分別のパラメータを、図-5に3つの年代区

分別の全壊率関数を示す。

4. 市区町村単位でのリスクカーブの作成手法

2で設定した250mメッシュ建物棟数データをもとに、全国の市区町村において30年超過確率に対応したリスクカーブを作成する。市区町村単位のリスクカーブを作成するにあたり、市区町村の拡がりに基づくバラツキを考慮したリスクカーブを算定するには、後述するように個別の震源の情報(震源位置、地震規模、発生確率)が必要である。そこで、地震ハザードの評価については、個別震源の情報が示されている地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図¹⁾の地震活動モデル(モデル1)に基づいてハザードを評価する。また、地震動の値にはバラツキが存在し、それらは地震のタイプや距離によって異なる。よって、それらの不確実性を分散としてモデル化しリスクカーブを作成する。なお、不確実性の評価という点では建物被害のバラツキも考えられるが、それらをモデル化するためには、例えば建物被害のバラツキと地震動のバラツキの関係等を明確にする必要があり、現時点ではいくつかの解決すべき課題が多い。そこで、本稿においては、地震動のバラツキに焦点をあてて評価を行う(建物被害のバラツキについては将来的な課題とした)。

4.1 被害の評価

確率論的地震動予測地図における地表最大速度(PGV)は、距離減衰式を用いてマグニチュードなどの震源の特性と震源断層までの距離から評価される地震動強さの中央値と、評価式に含まれるばらつきを考慮することにより行われ、地表最大速度(PGV)のばらつきの分布形状が対数正規分布に従う確率変数として仮定されている。そのため、その地表最大速度を変換して求める全壊率も確率変数を考慮する必要がある。ここで、確率変数の変換が線形であれば、元の確率分布の分布形をそのまま変換することで、確率変数の統計量を求めることができる。しかし、本稿で設定した被害関数は非線形であり、理論的には変換後の全壊率に従う確率分布もしくはその確率密度関数は、変換前と異なる分布形状となる。さらに、変換の関数が複雑なため解析的にその確率密度関数を求めることも困難である。そこで、全壊率の確率変数について、その平均と分散(標準偏差)を近似的に求め、それらに従う確率分布を仮定することを考える。全壊率関数が地表最大速度(PGV)の関数であり、地表最大速度(PGV)が対数正規分布を仮定していることから、全壊率は地表最大速度(PGV)分布のパラメータである中央値とバラツキ(標準偏差)に依存することになる。そこで、メッシュの地表最大速度(PGV)分布の中央値・標準偏差と全壊率分布の平均・標準偏差の関係を関数化し、各メッシュにおいて与えられた地表最

表-2 木造建物被害関数年代区分別パラメータ
Table 2 Loss function parameters of wooden buildings separated by age.

年代	λ	ξ
～1960	-0.77713	0.7046
1961～1970	-0.60273	0.5579
1971～1980	-0.41913	0.5335
1981～1990	-0.20353	0.5125
1991～2000	-0.05051	0.4809
2001～2010	-0.02951	0.4809
2011～	-0.01796	0.4809

表-3 非木造建物被害関数年代区分別パラメータ
Table 3 Loss function parameters of non-wooden buildings separated by age.

年代	λ	ξ
～1970	6.93	0.500
1971～1980	7.05	0.540
2081～	7.50	0.600

*実被害棟数は消防庁¹³⁾による

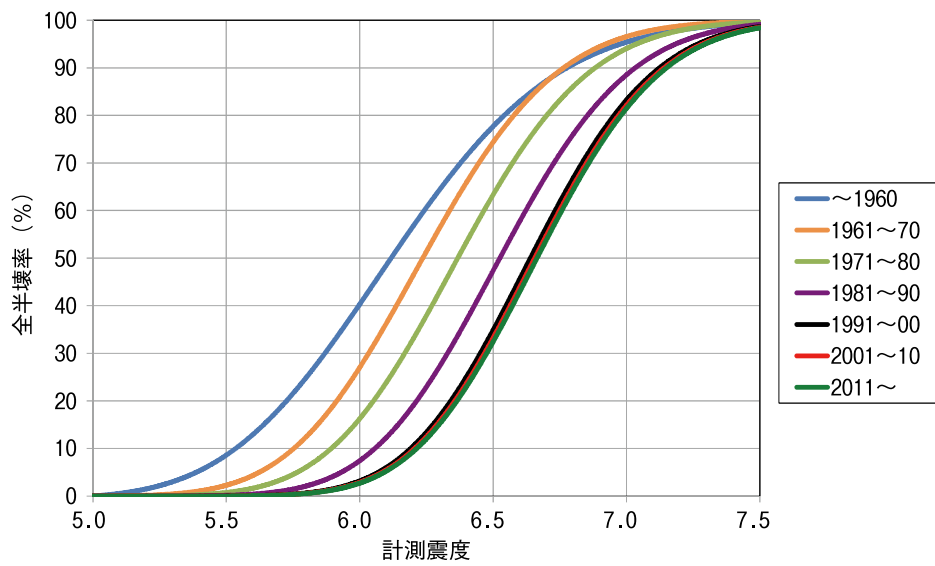


図-4 木造建物全壊率関数
Fig. 4 Rate of complete collapse of wooden buildings.

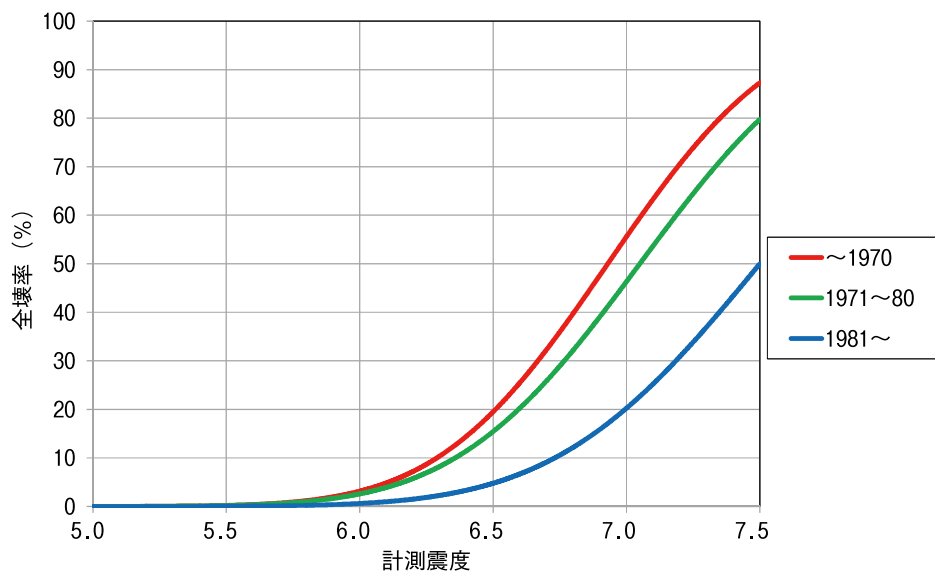


図-5 非木造建物全壊率関数
Fig. 5 Rate of complete collapse of non-wooden buildings.

大速度 (PGV) の中央値と標準偏差値をその関数に与えることで、全壊率平均・標準偏差を求め、そこから確率分布を仮定することとする。

4.2 メッシュ別の全壊率平均と全壊率標準偏差を求める関数

全壊率の平均・標準偏差と地表最大速度 (PGV) 中央値・標準偏差値の関係については、地表最大速度 (PGV) 中央値、標準偏差別に、それぞれモンテカルロ・シミュレーションを行い確率変数としての関係を考察する。シミュレーションの方法は以下の通りである。

- ①想定される地表最大速度の値 $g\mu_i$ と標準偏差 $g\sigma_j$ について、それぞれ $N(\log(g\mu_i), g\sigma_j)$ に従う N 個の正規乱数を発生させ、確率変数としての地表最大速度 (PGV) を表す数列 $g_{i,j,n}$ とする。なお、 $g\mu_i$ については想定される地表最大速度の範囲として $i=1, 2, \dots, 390$ (計 390; 単位: cm/s), また、 $g\sigma_j$ については確率論的地震動予測地図における距離減衰式におけるばらつきの範囲をカバーする形で $j = 0.14, 0.15, 0.16, \dots, 0.22, 0.23, 0.24$ (計 11) とした。
- ② $g_{i,j,n}$ を全壊率関数 $L_v(g_{i,j,n})$ の数列に変換する。ここで、 v は木造・非木造×年代区分 (木造は 7 区分、非木造は 3 区分) ×地震カテゴリー区分 (I II or III) 計 20 パターンの被害関数の種別を表す。
- ③ $L_v(g_{i,j,n})$ の数列について i, j, v ごとに平均 $\mu_{i,j,v}$ と標準偏差 $\sigma_{i,j,v}$ を求める。

次に、地表最大速度 (PGV) 値 $g\mu_i$ ・地表最大速度 (PGV) 標準偏差 $g\sigma_j$ と、全壊率平均 μ ・全壊率標準偏差 σ の関係について、被害関数種別 (k) 別に地表最大速度 (PGV) 値 $g\mu_i$ と地表最大速度 (PGV) 標準偏差 $g\sigma_j$ の関数となるように $Z_k(g\mu_i, g\sigma_j)$ を構築する。 $Z_k(g\mu_i, g\sigma_j)$ の構築にあたっては、柔軟な形状を表現できるような平滑化スプラインによる関数形の当てはめを行った。

4.3 メッシュ別全壊率の市区町村への統合

市区町村別リスクの分析にあたっては、250 m メッシュごとに評価された全壊率を統合する必要がある。また、標準偏差については、メッシュ間の空間相関を考慮して計算を行った。統合の考え方は以下の通りである。

4.3.1 空間相関の評価

空間相関の関数 $\rho(h_{ij})$ について説明する。地震動の空間相関については、距離減衰式の残差成分が確率場を構成するものとしてモデル化される。神原・高田 (1996)²²⁾ は、兵庫県南部地震の観測データを用いて、最大加速度の空間的な相関特性を分析し、高田・下村 (2003)²³⁾ は台湾集集地震記録を用いて、最大加速度ならびに最大速度の空間的な相関特性を分析している。また、林ほか (2006)²⁴⁾ は応答スペクトルの空間

的な相関特性について分析している。確率場においては、空間相関 ρ は地点間の距離に依存して減少する空間相関関数 $\rho(h)$ として表現される。そしてこれらの研究においては指数関数を当てはめた以下の形式で表現されている。

$$\rho(h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{\varphi}\right)\right] \tag{5}$$

ここで、 h は地点間距離、 φ は相関の及ぶ範囲に応じたパラメータである。なお、 φ については、[19] を参照して 20 km (20,000 m) とした。図-6 は $\varphi = 20,000$ m とした場合の距離 h (単位: m) と相関関数 $\rho(h)$ の関係を示したものである。

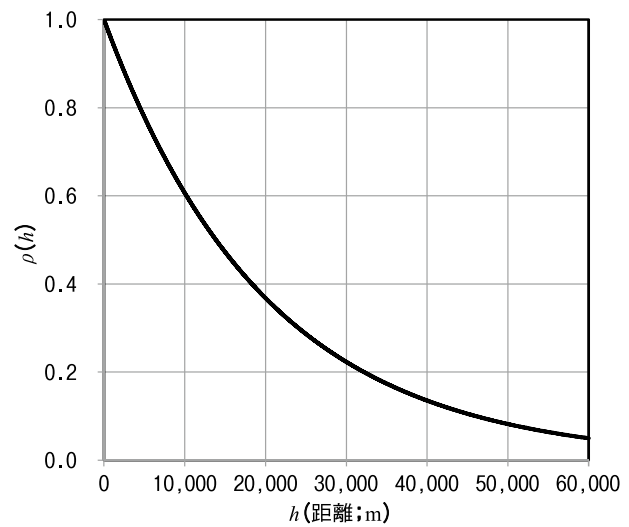


図-6 空間相関関数
Fig. 6 Curve of the spatial correlation function.

4.3.2 メッシュ別全壊率の統合について

統合された p 個のメッシュの全壊率の平均 M については、メッシュ i の全壊率の平均を μ_i とすると、確率変数の和の公式から、

$$M = \sum_{i=1}^p w_i \mu_i \tag{6}$$

となる。ここで、 $w_i = n_i / \sum_{i=1}^p n_i$ (ただし、 n_i はメッシュ i の建物棟数) である。

一方、統合された p 個のメッシュの標準偏差 S については、メッシュ i の全壊率の標準偏差、距離に依存した (5) 式と (6) 式の w_i を用いて

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^p (w_i \sigma_i)^2 + 2R}, \quad R = \sum_{i=1}^p \sum_{j=i+1}^p w_i \sigma_i w_j \sigma_j \rho(h_{ij}) \tag{7}$$

となる。なお、 R については、関連する全ての 250 m メッシュの組み合わせについて、その距離と標準偏差値を掛け合わせる計算が必要となるが、それを忠実に

実行すると膨大な計算量を要することになる。そこで、有意に説明できる変量を選択し、以下の重回帰式を市区町村ごとに推定して求めることとした。

$$\hat{R} = a_0 + a_1 S_m + a_2 S_s + a_3 \sum_{i=1}^p (w_i \sigma_i)^2 \quad (8)$$

ここで、 S_m は対象メッシュの標準偏差 ($w_i \sigma_i$) 間の平均値、 S_s は対象メッシュの標準偏差 ($w_i \sigma_i$) 間の標準偏差であり、 R を説明するのに有意と考えられる変数から、AIC (Akaike's Information Criterion) による変数選択により最も有意となった変数である。なお、係数 a_0, a_1, a_2, a_3 の推定にあたっては、市区町村毎に、最も大きな地震動を与える地震について、その影響範囲の 250 m メッシュについて、実際に (7) 式による相関関数の計算を行い、これをサンプルとして最小二乗法によって求めた。当てはまりについては、いずれの市区町村においても重相関係数は全市区町村の約 99% で 0.95 以上で、最も小さいところでも 0.87 である。

4.4 リスクカーブの作成

4.4.1 全壊率分布の仮定

不確実性を考慮したリスクカーブの構築にあたっては、超過確率を求めることができるリスク変量の確率分布を特定する必要がある。本稿では、以下の理由からベータ分布を採用する。

- 様々な形の分形状を柔軟に表現できる。
- 確率変数の範囲が [0,1] で無限値をとらないことから全壊率を直接表現できる。
- 平均と変動係数 (Coefficient of variation) から分布形状が一意に決まる。

ベータ分布は確率密度関数が次式となる確率分布で、

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx} \quad (9)$$

形状を特定するパラメータ α と β は、その確率変数の平均を θ 、分散を η とすると、

$$\alpha = \frac{(1-\theta)}{\left(\frac{\eta}{\theta}\right)^2} - \theta, \quad \beta = \frac{\alpha(1-\theta)}{\theta} \quad (10)$$

によって求めることができる。

4.4.2 全壊率分布の計算

全国地震動予測地図¹⁾の地震活動モデルの震源区分ごとに複数の震源地震 (本稿ではそれらの個々の地震を「イベント」と呼ぶ) が存在する。そのため、全壊率の分布はそれらのイベント毎に以下のステップで求める。

① イベント (l) による地震動が予測される市区町村内の全ての 250 m メッシュ m において地表の計測震度を求める。具体的には確率論的地震動予測地図の

手法に従い、距離減衰式を用いてマグニチュードなどの震源特性と震源断層までの距離から地表での最大速度の中央値 $g\mu_{l,m}$ と評価式に含まれるバラツキ (標準偏差) $g\sigma_{l,m}$ を求める (工学的基盤面での最大速度を評価し、表層地盤による最大速度の増幅率を乗じることによって求める)。

② 4.2 の関数 $Z_k (g\mu_{l,m}, g\sigma_{l,m})$ を用いて、250 m メッシュ別全壊率平均値 $\mu_{l,m,k}$ と全壊率標準偏差値 $\sigma_{l,m,k}$ を求める。

③ 250 m メッシュ別全壊率平均値 $\mu_{l,m,k}$ と全壊率標準偏差値 $\sigma_{l,m,k}$ を (6) 式と (7) 式を用いて統合し、 $M_{l,k}$ と $S_{l,k}$ を求める。

④ 統合値 $M_{l,k}$ と $S_{l,k}$ を、当該市区町村における全棟数に対する構造 (木造・非木造)・建築年代別の棟数の割合 \tilde{w}_k を用いて以下の通り集計し震源地震別全壊率平均 \tilde{M}_l 、震源地震別全壊率標準偏差 \tilde{S}_l を作成する。

$$\tilde{M}_l = \sum_k \tilde{w}_k M_{l,k}, \quad \tilde{S}_l = \sum_k \tilde{w}_k S_{l,k} \quad (11)$$

⑤ 震源地震別全壊率平均 \tilde{M}_l 、震源地震別全壊率標準偏差 \tilde{S}_l から (10) 式を用いて震源地震別の全壊率分布 $B_l (\alpha, \beta)$ (ベータ分布) のパラメータ α, β を求める。

4.4.3 リスクカーブの作成方法

リスクカーブ $EP(x)$ は、以下によって求められる。

$$EP(x) = 1 - \prod_l \{1 - p_l(x; t)\} \quad (12)$$

ここで、 $P_l(x; t)$ は震源地震 l によって t 年間に少なくとも 1 回全壊率 x を超過する確率で以下の通りである

- 発生確率が t 年間で回数 u 回の BPT 分布 $BPT_l(t, u)$ に基づく場合:

$$P_l(x; t) = BPT_l(t, u) \cdot [1 - B_l(\alpha, \beta)]^u \quad (13)$$

- 発生確率が単位期間 (t) 発生頻度 γ_l のポアソン分布に基づく場合:

$$P_l(x; t) = 1 - \exp\{-\gamma_l \cdot t \cdot B_l(\alpha, \beta)\} \quad (14)$$

5. 作成したリスクカーブの概要

以下リスクカーブの結果を示すとともに、それによるリスク特性について考察する。

5.1 リスクカーブの計算結果

リスクカーブの計算結果として、リスクカーブから読み取った各市区町村における 30 年超過確率 26%, 3%, 0.1% の全壊棟数と全壊率の分析結果を市区町村別に色分けして図-7, 図-8 に示す。対象となる市区町村数は 1,886 である。それぞれ超過確率が小さくなるにつれて全壊棟数および建物全壊率の値が大きくなるのがわかる。また、東海から紀伊半島、四国南岸にかけてこれらの値が大きくなる原因は、南海トラフ

の地震による影響を反映したものである。一方、糸魚川静岡構造線、中央構造線に沿って値が大きくなる傾向も見られる。なお、図-9にはリスクカーブをもとに、各市区町村別の全壊棟数、全壊率の30年期待値を示した。

5.2 リスク特性の把握

主要な市区におけるリスクカーブの形状を整理した結果を図-10に示す。この図は、縦軸を30年超過確率、横軸を全壊率としたリスクカーブである。ここで主要な市区とは、都道府県庁が所在する行政区である(ただし、東京都は千代田区を代表とした)。

この図から、地域によってリスクカーブの形状が異なることがわかる。そこで、それらの特長を把握するためにリスクカーブの形状に基づく分類を試みた。分類にあたっては、混合正規分布を用いたクラスタリングを行った。具体的には、形状を定量化するために、リスクカーブ上の0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.03, 0.003の超過確率値(全壊率)をベクトルデータ \mathbf{x} とし、 \mathbf{x} が以下の平均 $\boldsymbol{\mu}$ 、分散 Σ の p 次元混合正規分布に従って D 個の Type に分類されると仮定する。

$$p(\mathbf{x}; \boldsymbol{\pi}_d, \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d) = \sum_{d=1}^D \pi_d \phi(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d), \quad (15)$$

$$\pi_d > 0, \sum_{d=1}^D \pi_d = 1,$$

$$\phi(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p |\Sigma|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \right\}$$

この時、与えられたデータ \mathbf{x} が Type d に属する確率 (posterior) が

$$p(d|\mathbf{x}; \boldsymbol{\pi}_d, \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d) = \frac{\pi_d \phi(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d)}{\sum_{d=1}^D \pi_d \phi(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d)} \quad (16)$$

で与えられ、 $p(d|\mathbf{x}; \boldsymbol{\pi}_d, \boldsymbol{\mu}_d, \Sigma_d)$ を最大にする d をデータ \mathbf{x} の分類 Type と関連付ける。パラメータの推定にあたってはEMアルゴリズム²⁵⁾を用いた。なお、本稿ではリスクを3つ ($D=3$) に分類することを試みた。

図-11に全国の市区町村のリスクカーブを分類し、その分類別にリスクカーブを示す。なお、分類された市区町村のそれぞれの数は、Type1が766、Type2が552、Type3が568であった。それぞれのTypeの特徴とそのリスク特性を整理すると以下の通りであり、リスクカーブの形状によって各市区町村の地震リスクの特性を把握することができる。

Type1: リスクカーブの縦軸と横軸に囲まれる面積は期待値(リスク量)の大きさを表す。よってリスク

量の比較では3つのTypeの内、Type1が最も小さい。

Type2: 地震リスク量としてはType1とType3の中間にあり中程度と位置付けられる。

Type3: 幅広に立ち上がる形状が特徴的である。ここから、比較的大きな被害が高い確率で発生することが示唆される。

図-12は、全国の市区町村をこれらのType別で整理した結果を示したものである。Type3の市区町村は日本列島の太平洋側に多く分布していることが分かる。これは、南海トラフの地震の影響が大きく関与していることが示唆される。このように地域ごとに影響の大きな震源区分が想定される。そこで、各市区町村について、リスクカーブから計算される震源区分別の期待値の比較で最も影響を与える(最も期待値の大きい)震源区分をType別に図-13~図-15に示した。Type1については、活断層が特定されていない陸域で発生する地震(以下、「陸域」の地震という)と主要活断層による地震が影響を及ぼしている市区町村が多い。一方、Type2, 3は南海トラフの地震と主要活断層による地震が影響を及ぼしているエリア(市区町村)が多い。南海トラフは広域に影響を及ぼす海溝型地震であり、陸域の地震や主要活断層による地震については、その市区町村の近傍にどのような被害をもたらす震源があるかどうかによる。したがって、リスクカーブの形状も、Type1では、陸域の地震や主要活断層による地震といった震源域によって影響を受ける地域的な特色を表したリスク形状であることが推察される。一方、Type3は南海トラフの地震の影響を受けている地域が多いことが推察される。

さらに、南海トラフの地震と主要活断層による地震について震源区分別のリスクカーブを作成し、Type別にどのような違いがあるか、それらの中から代表的な市区町村を選び比較する。

南海トラフの地震については、市区町村全体のリスクカーブで、Type1に分類された京都市北区、Type2に分類された岡山市北区、Type3に分類された静岡市葵区を比較した(図-16)。これらの行政区は、その区内に影響を及ぼす震源区分間の期待値の比較で、南海トラフの地震が最も影響の大きい行政区であるが、図-16から分かるように、同じ南海トラフの地震のリスクカーブでも形状が異なる。ここから、震源距離や地盤状況等により、同じ震源区分であってもリスク量やその特性が大きく異なるのがわかる。

一方、主要活断層による地震については、市区町村全体のリスクカーブで、Type1に分類された福岡市博多区、Type2に分類された長野市、Type3に分類された奈良市を比較した(図-17)。これらの行政区は、その行政区内に影響を及ぼす震源区分間の期待値の比較で主要活断層による地震が最も影響の大きい行政区であるが、それぞれ主要活断層による地震の特性が大きく表れている。例えば、ここで比較した3つの

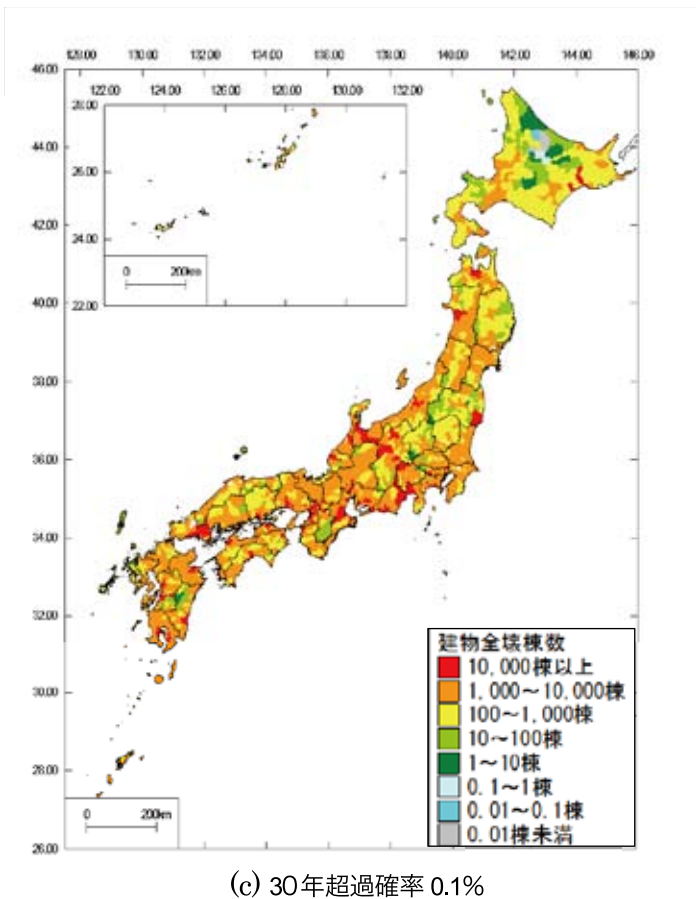
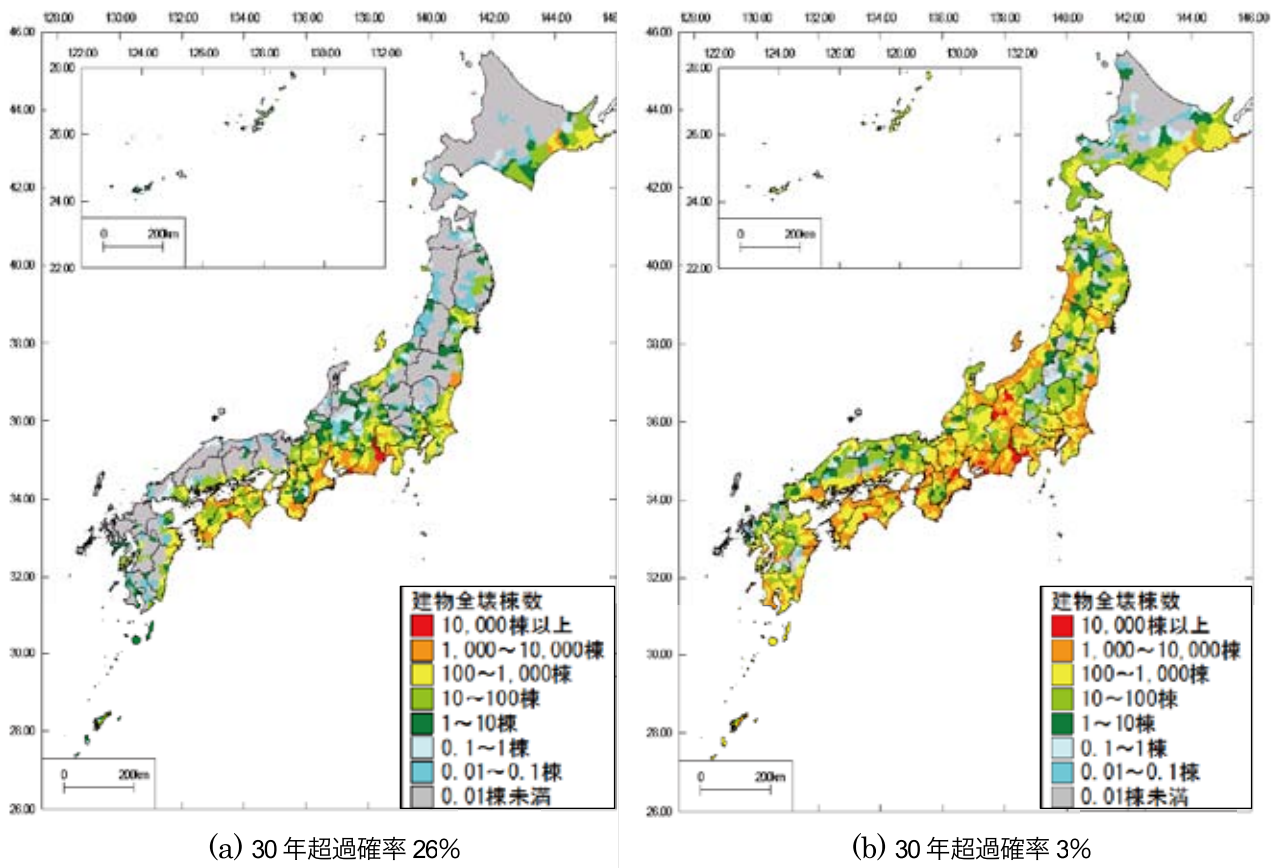
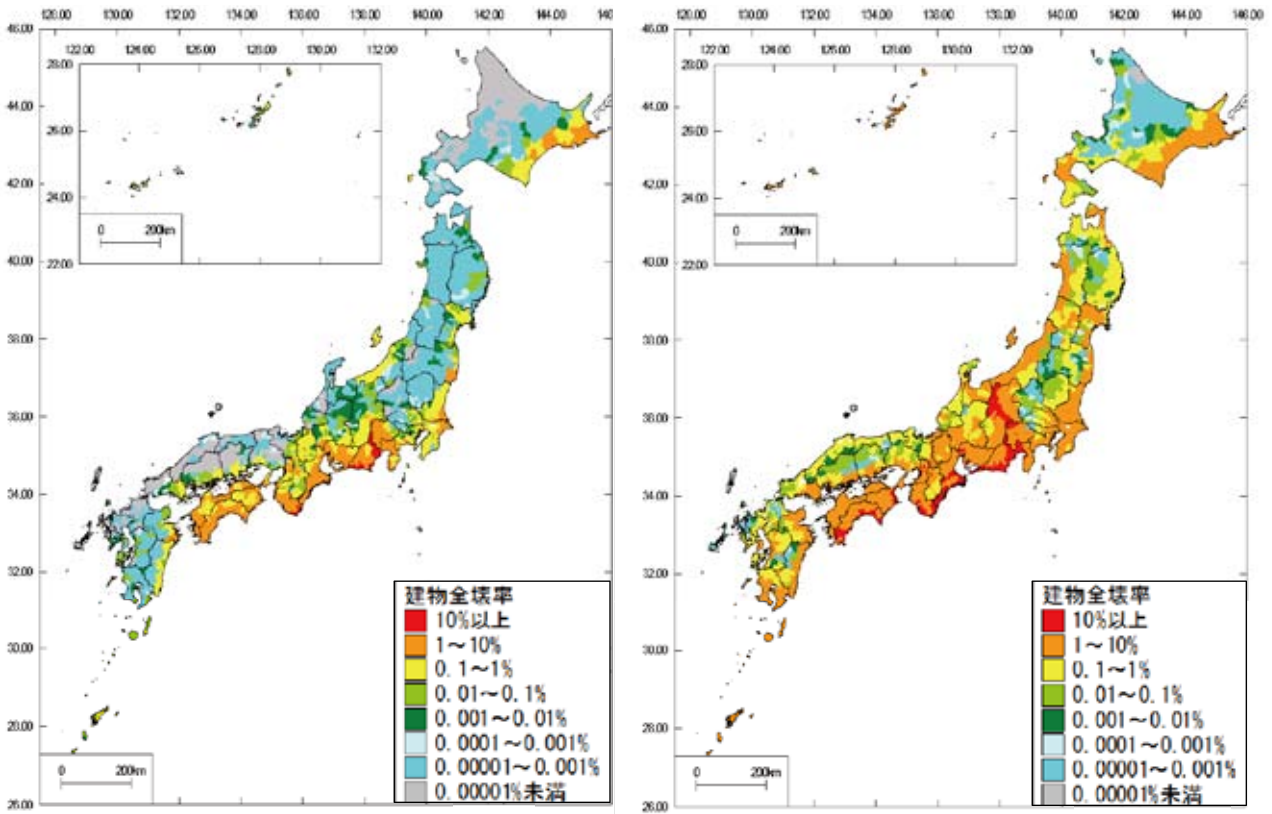


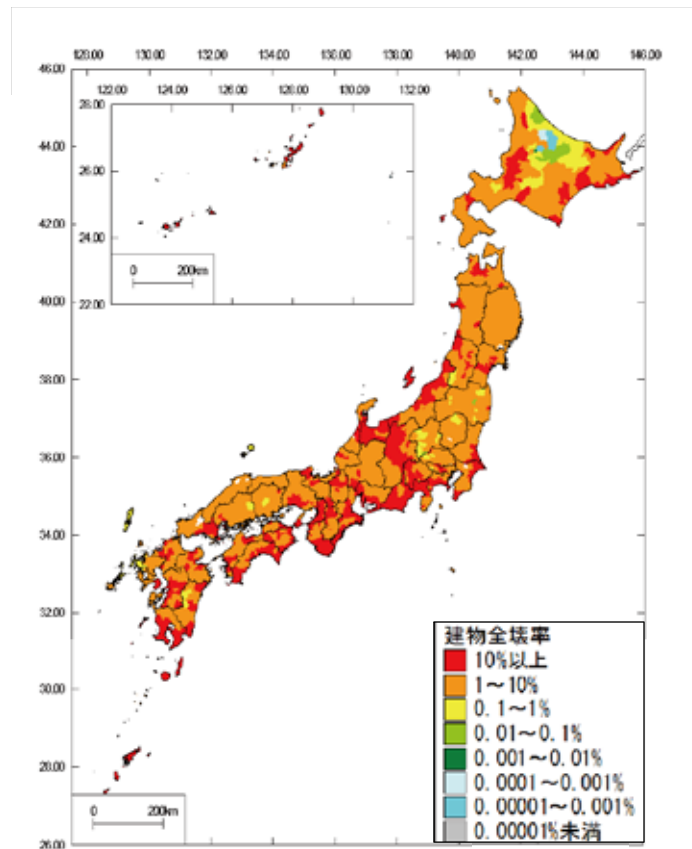
図-7 リスクカーブから読み取った30年超過確率の全壊棟数

Fig. 7 Numbers of completely collapsed buildings estimated from selected exceedance probabilities of the risk curve.



(a) 30年超過確率26%

(b) 30年超過確率3%



(c) 30年超過確率0.1%

図-8 リスクカーブから読み取った30年超過確率の全壊率

Fig. 8 Rates of completely collapsed buildings estimated from selected exceedance probabilities of the risk curve.

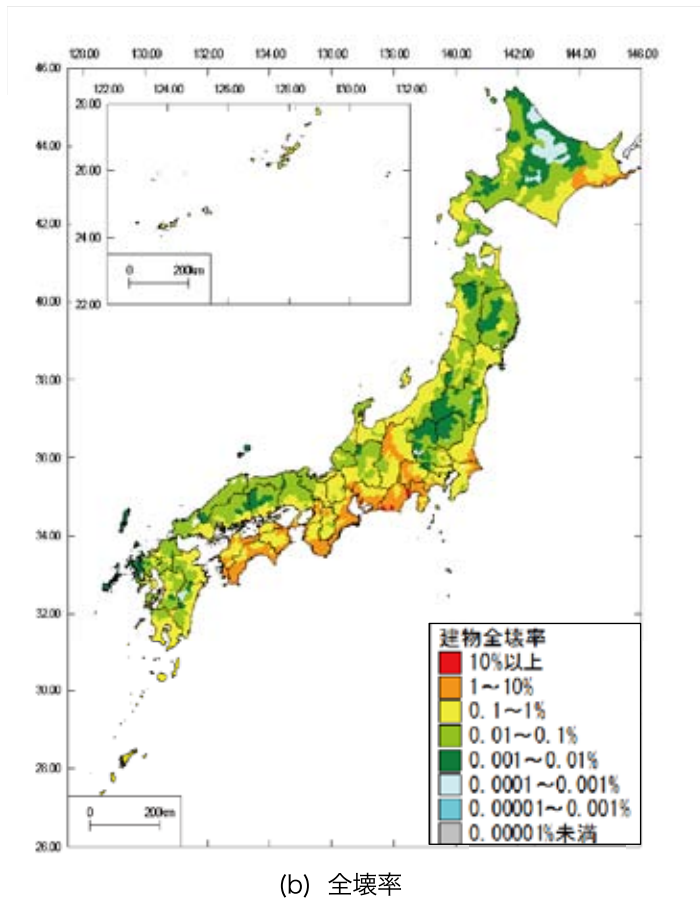
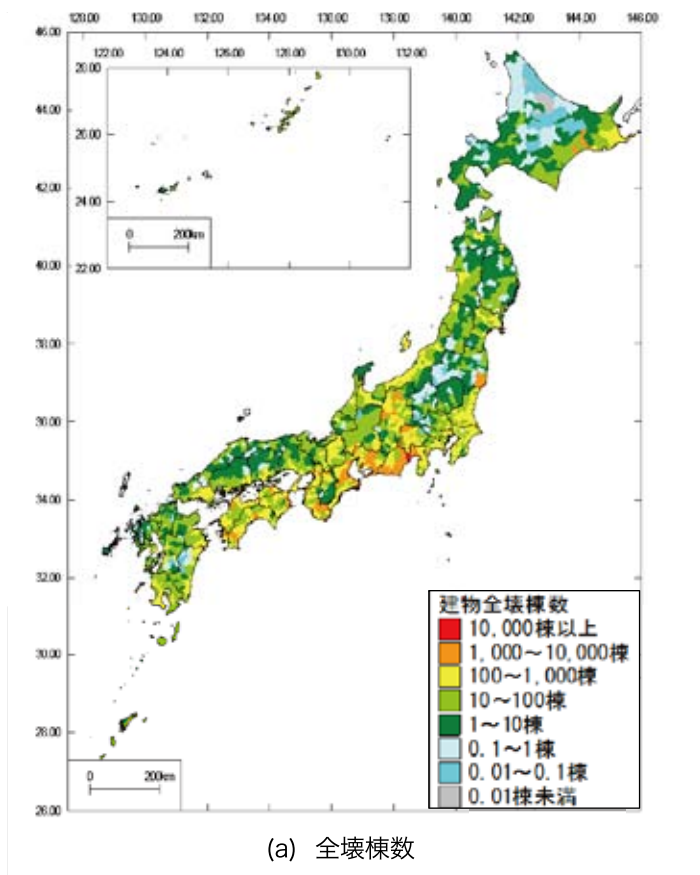


図-9 リスクカーブから算出した30年期待値
 Fig. 9 Loss expectations of completely collapsed buildings estimated from the risk curve.

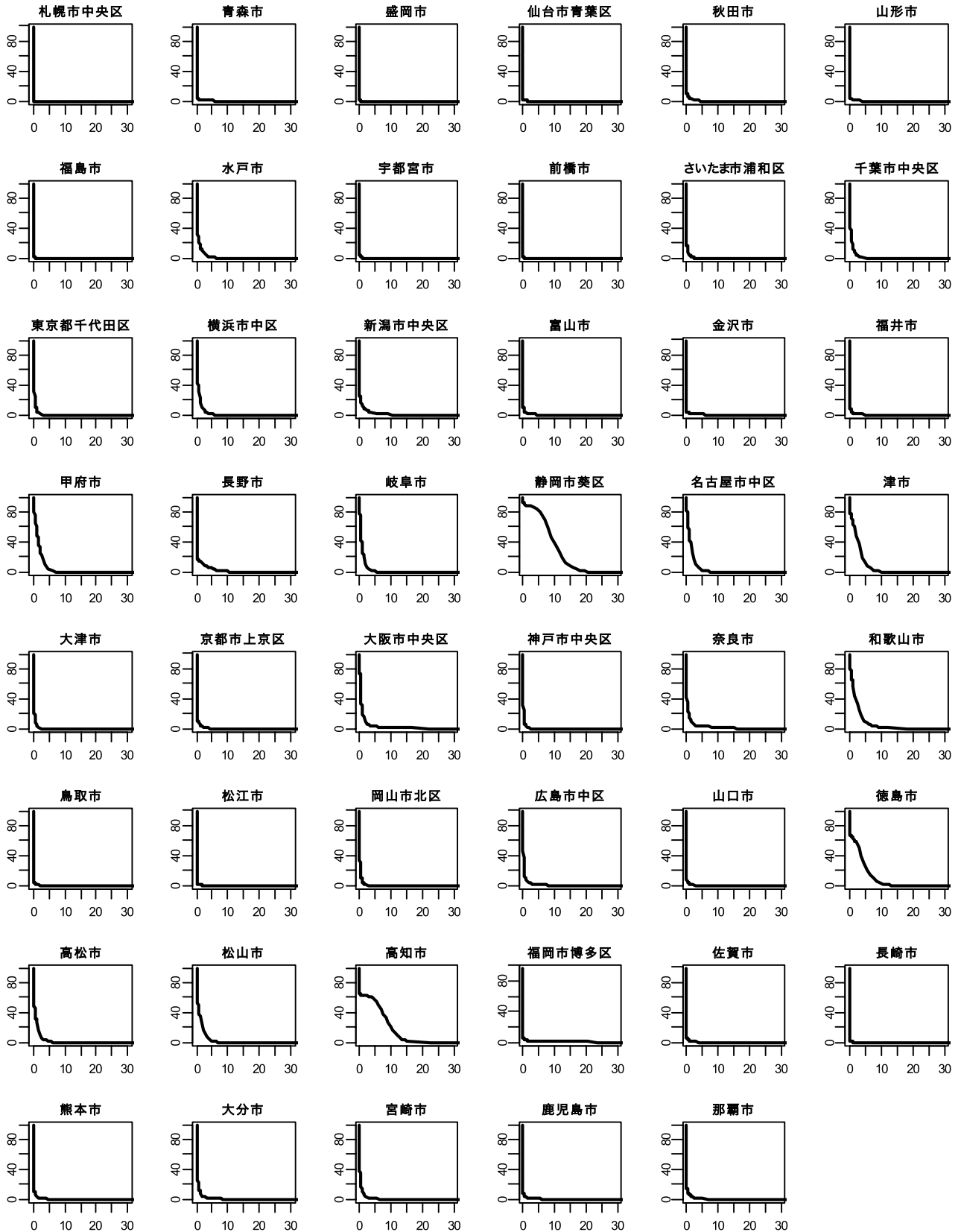


図-10 主要市区のリスクカーブ形状

Fig. 10 Risk curves for main cities and wards.
縦軸：超過確率 (%), 横軸：全壊率 (%)

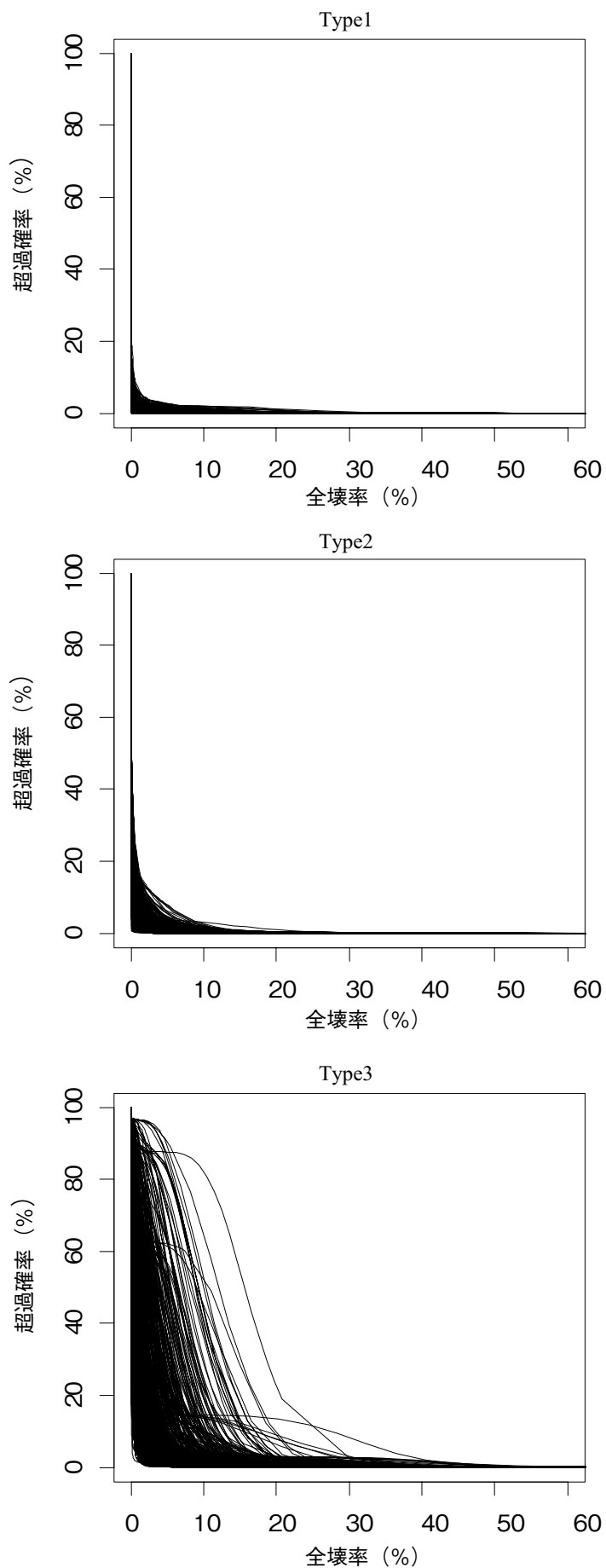


図-11 分類されたリスクカーブ
 Fig. 11 Classified risk curves.

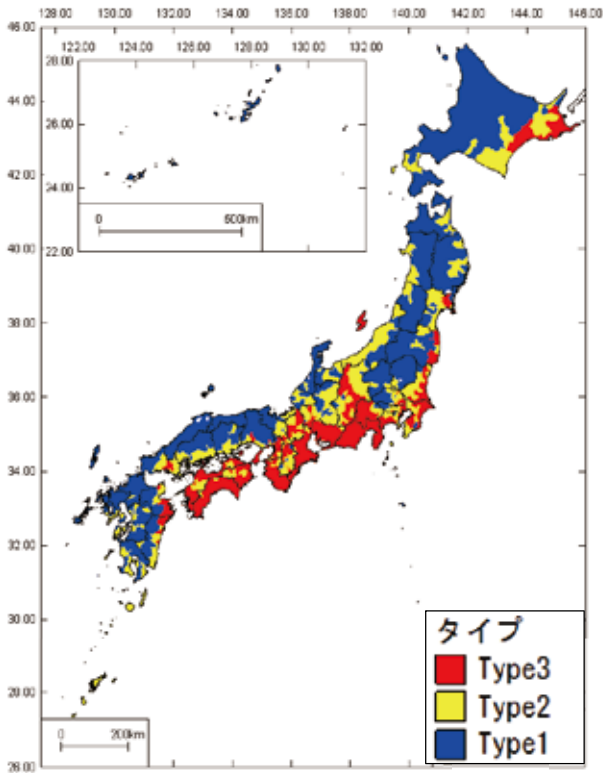


図-12 各市区町村におけるリスクカーブのタイプ
Fig. 12 Map of municipalities classified by types of risk curve.

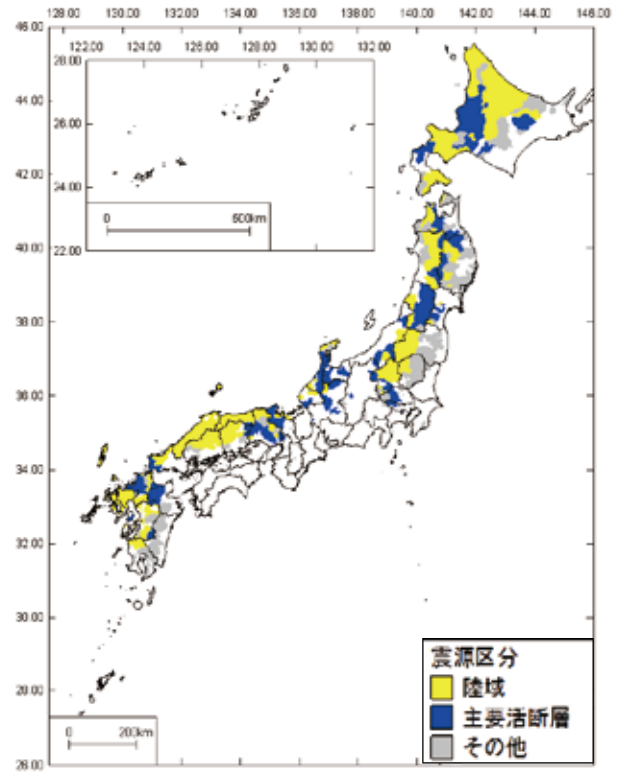


図-13 Type1において影響の大きい震源区分
Fig. 13 Earthquake sources contributing to Type 1.

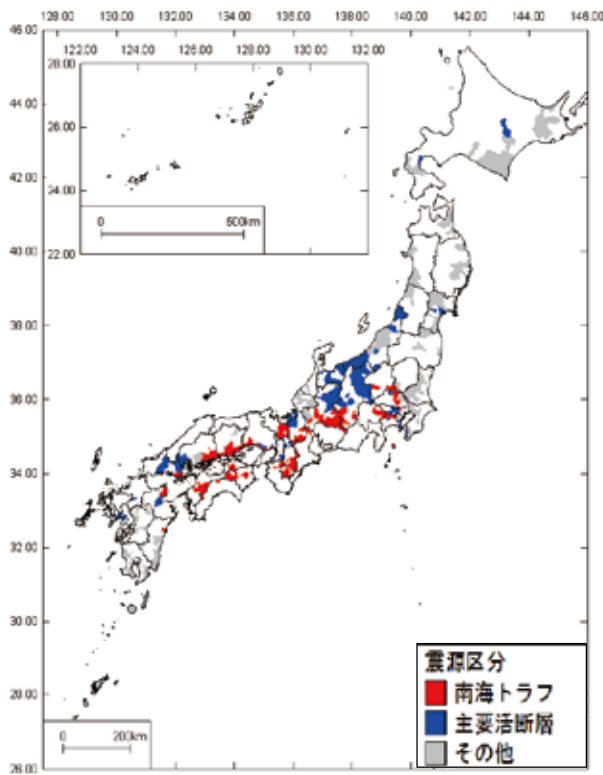


図-14 Type2において影響の大きい震源区分
Fig. 14 Earthquake sources contributing to Type 2.

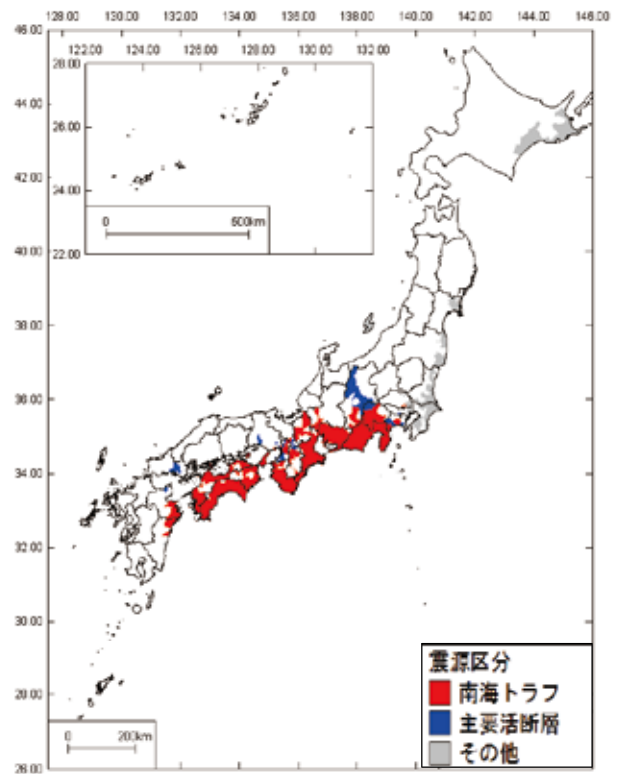


図-15 Type3において影響の大きい震源区分
Fig. 15 Earthquake sources contributing to Type 3.

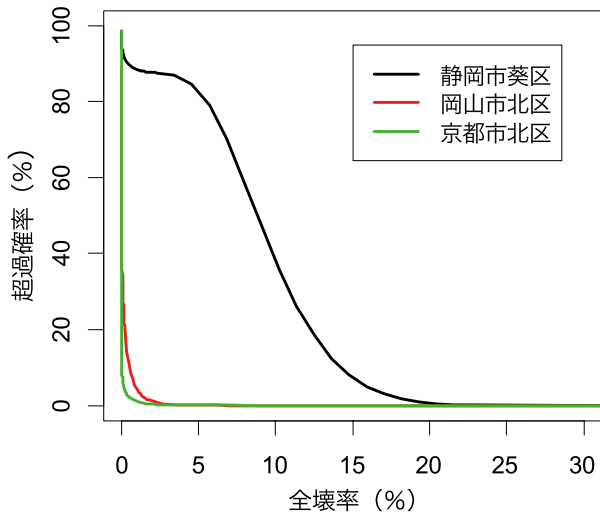


図-16 市区町村別南海トラフの地震のリスクカーブ
Fig. 16 Risk curves for three cities in Nankai Trough Earthquake.

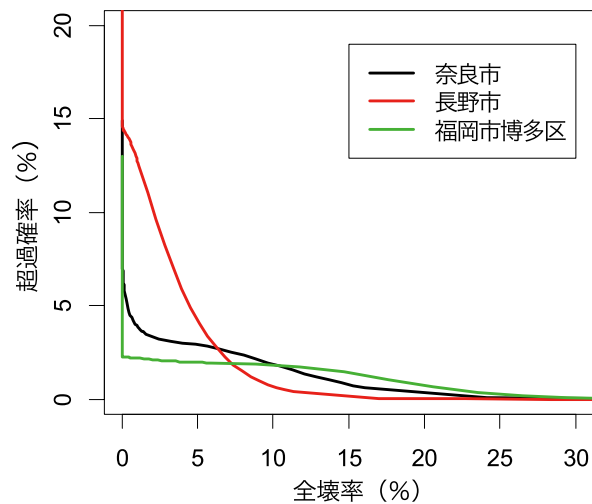


図-17 市区町村別主要活断層による地震のリスクカーブ
Fig. 17 Risk curves for three cities in earthquakes from major active faults.

行政区で全壊率の大きさを比較した場合、超過確率5%で見た時、長野市、奈良市、福岡市博多区の順であるのに対し、超過確率1%で見た時は、福岡市博多区、奈良市、長野市の順となり、想定する超過確率（再現期間）によってその順位が異なる。ここから、想定する超過確率によって対策の手法を変える必要があることが示唆される。すなわち、どのレベルの超過確率で議論するかは、対策の予算や計画遂行レベルの違いにより異なることが考えられるが、仮に超過確率を切迫の程度と見るならば、その切迫性つまり確率の高い場合と低い場合とで、何をどこに配分するか、例えば即効性のある施策をどこに集中的・短期的に実行するか、あるいは、ある程度の時間的余裕の中で広範に底上げが図れるような対策をどこに施すか等、予算や施策の内容に差をつける必要が出てくるかもしれない。

また、逆に、どのレベルの被害を想定するかによって、どの市区町村から対応すべきか、あるいは、どのような施策によって、どの程度の想定被害を軽減する効果が期待できるか等、市区町村の対策内容を個別に分けて検討することも必要となるかもしれない。このようにリスクカーブによって個別地震のリスク特性を把握することで、その市区町村における想定地震の選定にあたり有用な情報を見出すことができるものと考えられる。

6. まとめ

本稿においては、全国の市区町村を対象に地震動による建物の全壊棟数被害に関する30年超過確率のリスクカーブを作成した。作成にあたって、まず、大井ほか(2010)⁴⁾による「全国建物分類データベース」を用いて、2012年時点の構造・建築年代区分別建物棟数データを作成した。次に、既往研究において提案されている被害関数から、過去の地震被害の検証を踏まえて被害関数を設定した。リスクカーブの作成においては、全国地震動予測地図¹⁾における地震活動モデルを用い、地震ハザードの分散について、その空間的な相関を考慮して評価を行った。さらに、リスクマネジメントという視点から、リスクカーブによるリスク特性の把握に関する手法を示した。さらに、想定地震の選定等、対策のための有用な情報提供ツールとしての可能性を示した。

本稿はリスクカーブ活用の1つの方向性を示したに過ぎない。厳密に言えば、全壊率のバラツキも考慮する必要もある。計算手法の精緻化や、リスクカーブを用いた評価方法についてもより実務的な観点から改善を要するものと考えられる。これら点については今後の研究課題としたい。なお、本稿は評価のフレームワークを示したものである。示された結果は、推定されたデータと一定の仮定において示されたもので、それ自体は絶対的な意味を持つものではないことに留意されたい。

謝辞

本稿は独立行政法人防災科学技術研究所による「災害リスク情報プラットフォームの開発に関する研究」の一環として行われたものをまとめたものである。被害関数の検証においては、気象庁、防災科学技術研究所によるK-NET、KiK-netの強震波形データを利用させていただいた。本稿執筆にあたり助言を頂いた関係各位に謝意を申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) 地震調査研究推進本部:全国地震動予測地図
〈http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/〉 [閲覧日2013年12月1日].
- 2) 能島暢呂・藤原広行・森川信之・石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一(2010):震度曝露人口による活断層の地震リスク評価, 日本地震工学会論文集, **10**, (2), 22-40.
- 3) 小丸安史・清水智・藤原広行・河合伸一・森川信之・松山尚典・早川讓(2010):全国地震動予測地図のハザード情報に基づく建物被害リスクおよび人的被害リスクの試算, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 2584-2591.
- 4) 大井昌弘・石橋圭太・藤原広行(2010):地震リスク評価のための全国建物分類データベースの開発, 第13回日本地震工学シンポジウム, 1708-1715.
- 5) 国土交通省都市局(2012):津波被災地復興手法検討調査(とりまとめ).
- 6) 岩手県:急仮設住宅の建設に係る進捗状況について
〈<http://www.pref.iwate.jp/view.rbz?of=1&ik=0&cd=31658>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 7) 宮城県土木部住宅課:東日本大震災関連情報
〈<http://www.pref.miyagi.jp/juutaku>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 8) 福島県土木部建築総室:東日本大震災に関する住宅支援等のお知らせ
〈<http://www.pref.fukushima.jp/kenchiku/04topix/oshirase2-2.html>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 9) Actiz:東日本大震災仮設住宅設置情報
〈http://www.actiz.jp/kasetu/index.html/?pref_id=04〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 10) 総務省統計局:平成20年住宅・土地統計調査
〈<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/index.htm>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 11) 村尾修, 山崎文雄(2000):自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, **527**, 189-19.
- 12) 中嶋唯貴・岡田成幸(2008):時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定, 日本建築学会構造系論文集, **623**, (2), 79-86.
- 13) 中央防災会議(2004):首都直下地震に係る被害想定手法について
〈<http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/index.html>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 14) 総務省統計局:国勢調査
〈<http://www.stat.go.jp/data/index.htm>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 15) 総務省統計局:住宅・土地統計調査
〈<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/kekka.htm>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 16) 防災科学技術研究所川崎ラボラトリー(2007):文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 公開ソフトウェア
〈<http://www.kedm.bosai.go.jp/japanese/daidaitoku/software.html>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 17) 消防庁:災害情報〈<http://www.fdma.go.jp>〉 [閲覧日2013年4月1日].
- 18) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会・日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会(1996):1995年兵庫県南部地震強震記録資料集.
- 19) 地震調査研究推進本部(2010):全国地震動予測地図2010年版.
- 20) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄(1999):計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, **1**, 51-56.
- 21) 藤本一雄・翠川三郎(2005):近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, **7**, 1-6.
- 22) 神原浩・高田毅士(1996):地震動強度のマクロ空間相関特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 225-226.
- 23) 高田毅士・下村哲人(2003):台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, **565**, 41-48.
- 24) 林 孝幸・福島 誠一郎・矢代 晴実(2006):地震動のスペクトル強度の空間的な相関に関する研究, 地域安全学会梗概集, **18**, 103-106.
- 25) A. Dempster, N. Laird and D. Rubin (1977): Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, Journal of the Royal Statistical Society B, **39**, 1-38.