

地震リスクの移転と自己負担

中村孝明

正会員 工博 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 4-5-1 幸伸ビル新宿 3F)

地震リスクは損失の期待値で代表されるものの、ばらつきをもった確率分布によって示される。一方、地震リスクの軽減策として保険や証券化等によるリスク移転が行われる。そこでは、免責 (deductible) や上限等 (limit) によるリスクの層分化が行われるため、被保険者が負担すべきリスクの確率分布は多様な形をとる。このため、損失期待値の軽減だけを見てリスク移転の効果を論じることは危険である。本報は、確率関数の層分化というテクニックを使い、被保険者ならびに保険会社の地震リスクの確率分布を求める方法を紹介し、適用性の検討と共に、その必要性を論ずる。

Key Words: earthquake risk, risk transfer, insurance, probability maximum loss

1. はじめに

地震被害は確定的に定められない事象、すなわち蓋然事象の積み重ねにより起こると考えることができ、被害推定は一貫して確率・統計的なアプローチが採られている^{1)~3)}。従って被害推定結果すなわち地震リスクは平均値 (損失期待値) で代表されるものの、ばらつきをもった確率分布によって示されることになる。このため、リスクの軽減等実質的なリスク管理を行うには、平均値のみならずばらつきの大きさを踏まえた検討が重要となる。一方、地震リスクの軽減策として保険や証券化等によるリスク移転が行われる。そこでは、免責 (deductible) や上限等 (limit) によるリスクの層分化が行われるのが通常である。このため、主体者 (被保険者) あるいは保険会社等が負担すべきリスクの確率分布は多様な形をとることとなり、損失期待値の軽減だけを見てリスク移転の本質的な効果を論じることは危険と考えられる。リスク移転の際の層分化の方法によっては、損失期待値の軽減量が同じであっても、主体者にとってのリスク負担は質的に異なることになる。主体者は、この点を十分踏まえ、リスク移転の範囲や是非を判断する必要がある。

そこで本報では、地震リスクの移転に伴う確率分布の多様性を考慮できる自己負担リスクの評価方法について示すと共に、適用性について検討を行う。

2. 地震リスクの評価方法

(1) 被害要因と Fragility Curve

地震被害は、液状化被害、構造被害、設備被害など、

様々な被害要因の組み合わせによって説明できる。例えば、液状化は発生しなかったが震動による軽微な構造被害が発生し、かつ設備が中程度の被害を受けた。また、液状化も構造被害も発生しなかったものの、設備が甚大な被害を受けた、などである。様々な被害要因の組み合わせによって起こる被害の状態を、ここでは被害形態と呼ぶこととする。地震により発生する被害形態は様々であるが、実際に発生する被害はその中の一つに他ならない。しかし、どのような被害形態となるかは断定できず、確率論的な立場からそれぞれの可能性は確率の大きさを以て示すことができる。このため、被害形態は排反な事象の集合として網羅的に扱うことが必要となり、その確率の総和は 1.0 となる。また、各被害要因の発生確率は、地震損傷度曲線 (SFC: Seismic Fragility Curve) と呼ばれる一価関数によって求めることができる。この関数は建物や施設、あるいは設備機器固有の脆弱性を示すもので、通常、対数正規分布の累積として記述される。SFC ならびに被害形態の評価については、文献^{1)~3)}を参照されたい。

(2) 脆弱性評価の不確実性

地震動の大きさ x を条件に各被害形態 i の発生確率 $P(c_i | x)$ ならびに対応する損失額 c_i から損失確率関数を求めることができる。これを連続的に扱ことで地震動 x の条件付損失確率密度関数 $p(c | x)$ を記述することができる。 $p(c | x)$ は x に対して図-1 のように示される。ここで、 $p(c | x)$ の c についての平均値と 90%非超過値 $c_{0.90}$ を各 x について求め、これを x の関数と考えると、同図に示す $\bar{c}(x)$ と $c_{0.90}(x)$ のようになる。前者

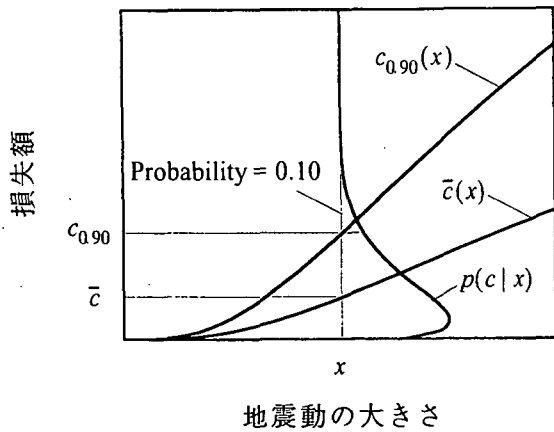


図-1 地震動の大きさを条件とした損失確率関数

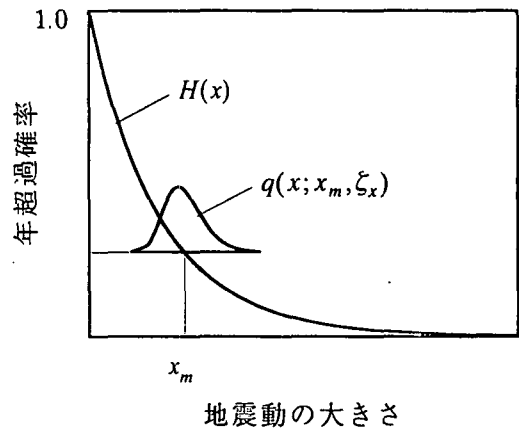


図-2 地震ハザード曲線と地震動の不確実性

$\bar{c}(x)$ を地震損失関数と呼ぶことが多い。また、後者 $c_{0.90}(x)$ を最悪の損失として扱う場合が多く、地震保険や不動産証券化における耐震性能の評価に利用されている。

(3) 地震動の不確実性の扱い

地震動の大きさを表す指標としては、地表面最大加速度 (PGA: Peak Ground Acceleration) や最大速度 (PGV: Peak Ground Velocity)、計測震度等がある。本報では地震動の大きさ x を PGA と考え、その年間発生確率は、図-2 に示すサイトにおける地震ハザード曲線 $H(x)$ により評価する。

地震動の大きさ x は、距離減衰式の誤差ならびに表層地盤の増幅特性の推定誤差、地震危険度の設定に関する不確実性などから、図に示すようにばらつきを伴っている。距離減衰式の誤差を考えると、その分布は推定式そのものが対数形をしているため、対数正規分布が適当とされている。また、Campbell⁹⁾は、観測データからも対数正規分布を支持しており、本報では、 x は中央値が x_m 、対数標準偏差が ξ_x の対数正規分布 $q(x; x_m, \xi_x)$ に近似できるものとする。したがって、距離減衰式等の誤差を考慮した損失額の確率密度関数 $p(c | x_m)$ は次式により求めることができる。

$$p(c | x_m) = \int_0^{\infty} p(c | x) q(x_m, \xi_x) dx \quad (1)$$

但し、以降で用いる $p(c | x)$ は、すでに(1)式により距離減衰式の誤差を考慮したものとする。

損失額 c の年超過確率を求めるには、 $p(c | x)$ 及び x の年間確率密度関数 $h(x) = -dH(x)/dx$ を用いることで c を変数とした年超過確率関数 $G_c(c)$ を求めることができる。これはリスクカーブと呼ばれている。

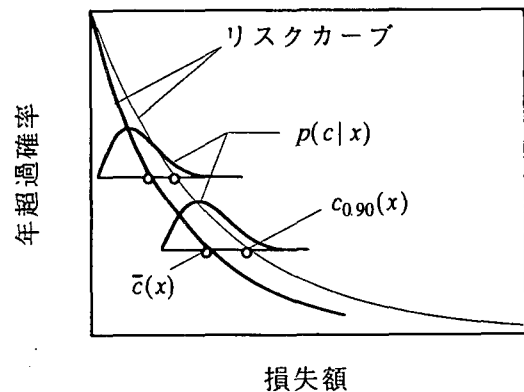


図-3 リスクカーブ

$$G_c(c) = \int_0^{\infty} h(x) \int_c^{c_{max}} p(y | x) dy dx \quad (2)$$

ここに、 c_{max} は建物の全損に相当する新規再調達価格である。

一方、 x を条件とした損失確率関数の平均値 $\bar{c}(x)$ ならびに 90%非超過値 $c_{0.90}(x)$ (図-1) と地震ハザード曲線 $H(x)$ (図-2) を使い、変数変換により損失額と年超過確率 (ここでは累積確率の意) の関係を求めることができる。これもリスクカーブの一種であり、その一例を図-3 に示す。なお、現実の問題では、同図に示す各損失確率関数 $p(c | x)$ は、上下限値が設定できる β 分布に近似するのが妥当であるとする。この点については、数学的な便宜上 ATC-13⁹⁾ も支持する結果を出している。この場合 90%非超過値に対応する損失額は、 x を条件に次式を満たす値 $c_{0.90L}$ として求められる。

$$\int_0^{c_{0.90L}} f_c(c; r, q | x) dc = 0.90 \quad (3)$$

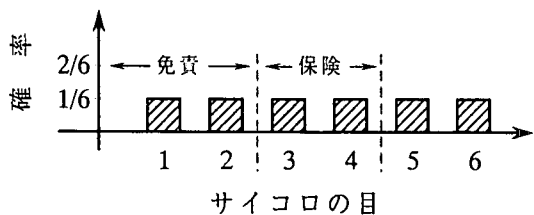


図-4.a 全体の損失確率関数 (ケース I)

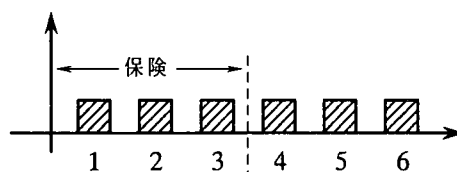


図-5.a 全体の損失確率関数 (ケース II)

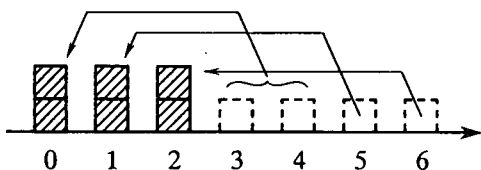


図-4.b 主体者の損失確率関数 (ケース I)

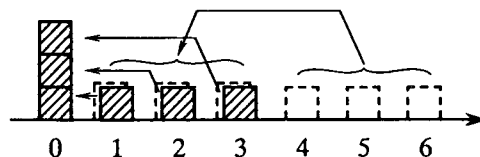


図-5.b 主体者の損失確率関数 (ケース II)

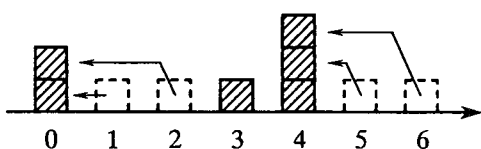


図-4.c 保険会社の損失確率関数 (ケース I)

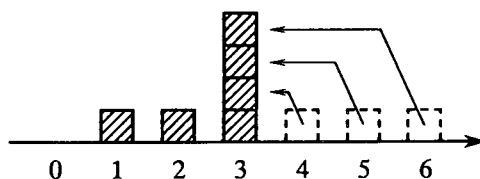


図-5.c 保険会社の損失確率関数 (ケース II)

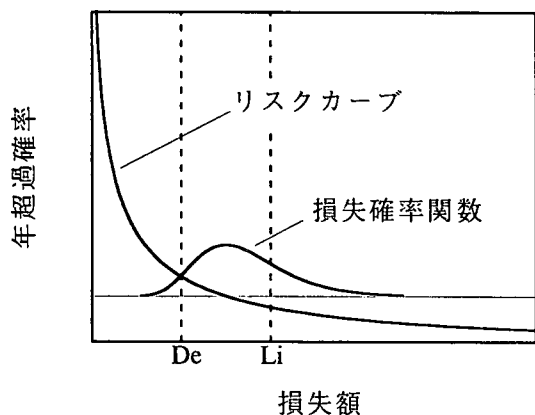


図-6.a リスクカーブと損失確率関数

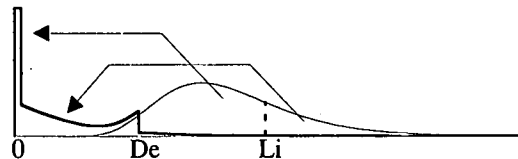


図-6.b 主体者の損失確率関数

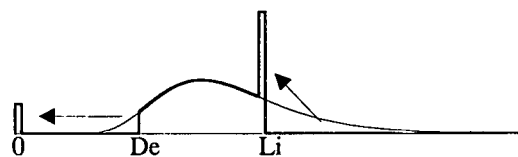


図-6.c 保険会社の損失確率関数

ここに、 $f_c()$ は β 分布を表し、そのパラメータ r, q は $p(c|x)$ の平均値 μ_c ならびに標準偏差 σ_c から次のように求められる。

$$r = \frac{(1 - \mu_c)(\mu_c - \mu_c^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2} \quad (4)$$

$$q = \frac{\mu_c(\mu_c - \mu_c^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2} \quad (5)$$

一方、リスクカーブに加え年間当たりの地震リスク、すなわち年間損失期待値も情報として重要である。これは保険の純保険料に相当するもので、保険会社にとっては特に必要な情報である。年間損失期待値 c_r は、次式

によって求められる。

$$c_r = \int_0^{\infty} \bar{c}(x)h(x)dx \quad (6)$$

以降、簡単のために年間損失期待値は年損失額、また当該建物の再調達価格で除した場合は年損失率と略記する。

3. 地震リスクの移転

保険等による地震リスクの移転では、保険会社の経費

やリスクの効率的な管理を目的に、免責や上限等によるリスクの層分化が行われる。いわゆるレイヤーである。ここではサイコロを例に、層分化によるリスク移転の考え方について解説する。そして、地震による自己負担リスクの評価方法について説明する。

(1) リスク移転の考え方

サイコロの出た目の数だけ損失を被ると考える。すなわち、1の目が出れば1万円、2の目が出れば2万円を支払うものとする。これを確率関数で示したのが図4.aで、損失の期待値は3.5万円となる。横軸は支払い金額で縦軸はその確率である。ここで主体者は、2万円以下を免責とし、4万円以上の損失については4万円まで支払われる保険を考え、これをケースⅠとする。保険に加入したことで、主体者は3ならびに4の目が出た場合、支払う必要はなくなり、その分0円の確率が2/6となる。また、4万円まで保険でカバーされていることから、5ならびに6の目が出た場合は、余剰分の1万円と2万円を支払うことになる。これを確率関数で示したのが図4.bである。対する保険会社の確率関数は、1と2の目が出れば支払う必要はなく、その分0円の確率が2/6となり、5、6の目の場合は4万円まで支払うことから4万円の確率は3/6となる(図4.c参照)。主体者ならびに保険会社の損失期待値は1.0万円と2.5万円であり、主体者は3.5万円の損失を保険により1.0万円まで下げることができたことになる。一方、比較のため、免責はなく、3万円以上の損失については3万円まで支払われる保険を考える。これをケースⅡとし、図5.a, b, cにそれぞれの確率関数を示す。ケースⅠと比較して主体者の損失期待値は1.0万円と同値であるが、主体者が負担する確率関数は異なっている。ケースⅡの場合、1/6の確率で3万円を損失する可能性があるものの、ケースⅠは最大でも2万円までである。また、損失0円の確率は、ケースⅠは2/6であるのに対しケースⅡは3/6と大きくなり、安全性が増している。このように、損失の期待値が同じであってもリスクの内容や構成が異なっていることが分かる。どちらのケースを選ぶかは、主体者の裁量に委ねられることになるが、リスクの構成あるいは内容を明示することは、意思決定における実質的な検討に必要であると考えられる。

(2) 地震リスクの移転方法

リスクカーブを例とし、ばらつきを考慮したリスク移転の評価方法について示す。図6.aに示すように任意の年超過確率を条件とした損失確率関数を抽出する。図のように保険加入の範囲(De~Li)を設定すると、上述したリスク移転の考え方により、主体者ならびに保険会社の損失確率関数は、図6.b, cに示すようになる。そし

表-1 被害要因ならびにSFC情報

被害要因	被害モード	耐力中央値 (Gal)	ζ [※]	損失率
構造被害	無被害	-	-	0.00
	軽微	600	0.4	0.05
	中破	800	0.4	0.10
	大破	1200	0.4	0.30
電力設備被害	倒壊	1600	0.4	1.00
	無被害	-	-	0.00
給排水備被害	被害有	900	0.4	0.07
	無被害	-	-	0.00
空調設備被害	被害有	500	0.4	0.04
	無被害	-	-	0.00
備品・電算機被害	被害有	700	0.4	0.11
	無被害	-	-	0.00
	被害有	500	0.4	0.06

※ ζ は対数標準偏差

表-2 年損失率

	年損失率 (%)		
	東京	大阪	鹿児島
全体	0.0815	0.0450	0.0047
主体者	0.0325	0.0172	0.0033
保険会社	0.0490	0.0278	0.0014

て、数値演算により、それぞれの平均値ならびに90%非超過値に対応する損失額を求めることができる。これを任意の年超過確率を条件とした損失確率関数全てに対して行えば、主体者ならびに保険会社の平均値や90%非超過値に対応する損失額のリスクカーブならびに年損失額を求めることができる。

4. シミュレーションによる適用性の検討

東京に所在するオフィスビルを対象に、リスク移転による損失確率関数ならびに年損失率を評価し、本手法の適用性について検討する。また、地震危険度の地域性の影響を見るため、大阪、鹿児島に所在する同種の建物について比較する。なお、地震動指標はPGAとし、地震ハザード曲線は建築学会の荷重指針⁹⁾を参照し、表層地盤の増幅特性は一律1.2倍とした。また、距離減数式等の誤差は対数標準偏差0.4とし、損失額は新規再調達価格で除した損失率で示すこととする。表-1に対象建物の被害要因ならびにSFC情報を示す。以上の条件より、東京に所在する建物のリスクカーブは図-7のよう

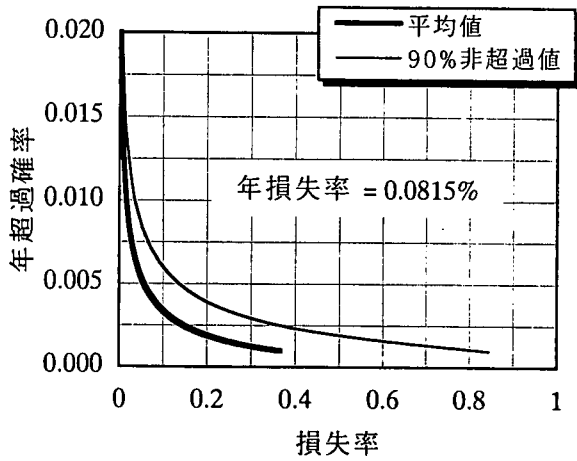


図-7 東京に所在する建物のリスクカーブ

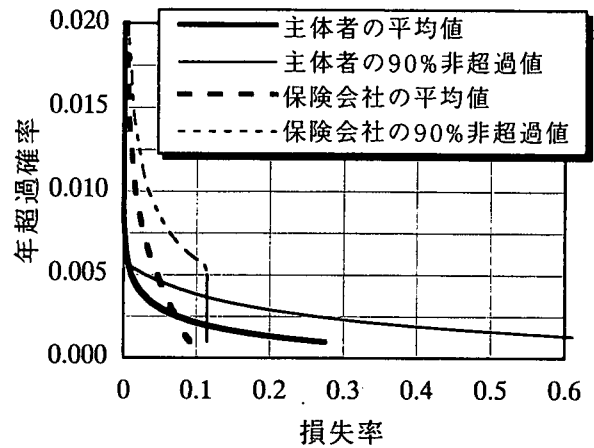


図-8.a 東京に所在する建物のリスクカーブ (ケース1)

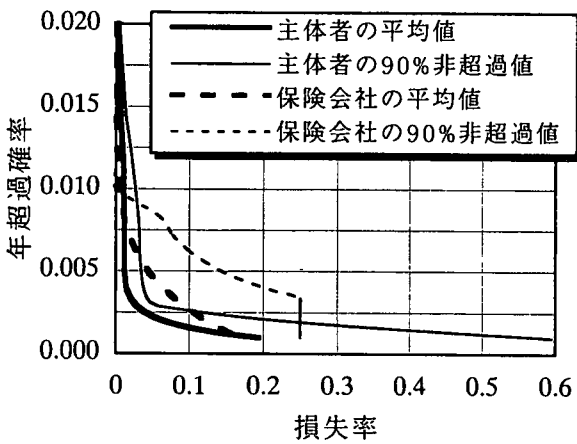


図-8.b 東京に所在する建物のリスクカーブ (ケース2)

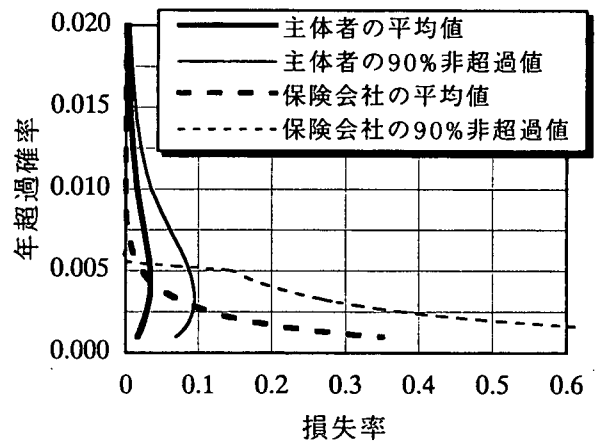


図-8.c 東京に所在する建物のリスクカーブ (ケース3)

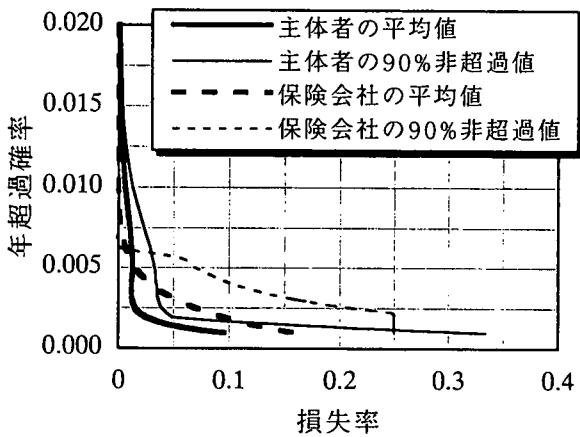


図-9.a 大阪に所在する建物のリスクカーブ (ケース2)

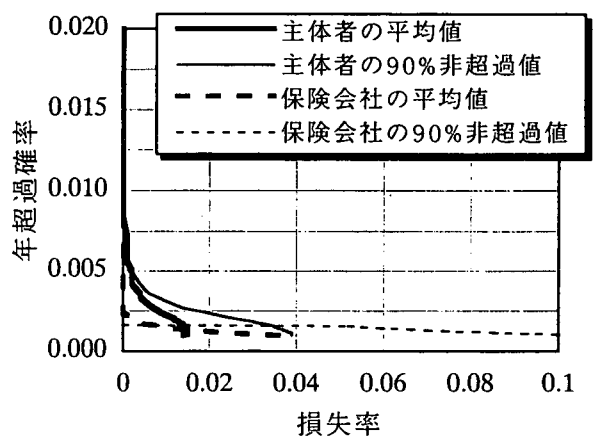


図-9.b 鹿児島に所在する建物のリスクカーブ (ケース2)

になる。また、年損失率は0.0815%である。

地震保険によるリスク移転の方法として、損失率で $De \sim Li$ が0.0~0.115 (ケース1, 免責なし), 0.05~0.25 (ケース2), 0.14~1.0 (ケース3, 上限なし) の3ケースを

考える。これら3ケースの年損失率は、主体者が0.0325%、保険会社が0.049%と全て同じ値である。図-8.a, b, cに各ケースの主体者ならびに保険会社の負担する平均値、90%非超過値に対応するリスクカーブをそれぞれ示す。

ケース1の保険会社の90%非超過値を見ると、 L_i が0.115であるため、これ以上の損失をカバーする必要がない分頭打ちになっている。一方の主体者は、発生頻度の高い（比較的小さい地震）地震では保険会社が大半をカバーするため、主体者が損失を被る可能性は殆どない。ところが、発生頻度の低い大地震では、 L_i があるため自己負担が大きくなる。ケース2の場合、ケース1と同様に L_i が0.25で保険会社の頭打ちが現れている。ケース3では、主体者の平均値ならびに90%非超過値は共に、発生頻度の低い大地震領域で低減している。これは、大地震の場合、大きな損失が発生する可能性が高いため損失確率関数は図中右の方に現れ、 De 以下すなわち自己負担すべき損失が少なくなることが理由である。反面、 L_i を設けていないために大地震領域では保険会社の負担が増大する。ケース1~3を全体的に比較すると、各ケースとも年損失率は同じであるが、層分化の方法によって全く違ったリスク配分となることが分かる。主体者にとってはケース3が最良であり、保険会社にとってはケース1が最良となる。現実的にはケース2が妥当と思われるが、層分化の方法によって異なるリスク負担の構成や内容を明示できる本手法は、主体者にとって実質的かつ有益なリスク情報を提供することができる。また、保険会社にとっては、再保険などのリスク管理や保険商品の開発に貢献できる。

次に、地震危険度の地域性の影響を見るため、東京、大阪、鹿児島に所在する同種の建物を比較する。リスク移転の方法は一律ケース2とする。図-9.a, bに大阪、鹿児島に所在する建物の主体者ならびに保険会社の負担する平均値、90%非超過値に対応するリスクカーブをそれぞれ示す。また、年損失率を表-2にまとめて示す。図-9.a, bより、大阪の場合は、東京のリスクカーブ（図-8.b）と類似の傾向を示しているものの、鹿児島の場合は発生頻度の高い小地震による主体者の負担が相対的に大きい。同地域は地震危険度が低く、また、損失率0.05以下が免責になっているため、この部分の主体者の負担が大きくなっている。表-2の年損失率を見ても、東京、大阪は保険会社の方が大きいものの、鹿児島は主体者の方が大きい。このように、地震危険度の地域性によって、同じ層分化であっても主体者が負担するリスクは質、量共に異なる。これは、保険会社においても同じことが言え、地震危険度の地域性を踏まえ、かつ層分化によって異なるリスクの内容を考慮した検討が重要である。

5. まとめ

地震リスクの軽減策としてリスクの移転に着目し、ば

らつきを踏まえたリスク移転の考え方と自己負担リスクの評価方法を示した。また、層分化によって異なるリスクの質的な問題や地震危険の地域性について若干の検討を行った。結果として以下のようにまとめることができる。

- ① 層分化の方法によって異なるリスク負担の構成や内容を明示できる。
- ② 主体者にとって実質的かつ有益なリスク情報を提供することができる。
- ③ 保険会社にとっては、再保険などのリスク管理に貢献できる。
- ④ 地震危険度の地域性によって、同じ層分化であっても主体者が負担するリスクは質、量共に異なる。
- ⑤ 保険会社においては、地震危険度の地域性を踏まえ、かつ層分化によって異なるリスクの内容を考慮した保険商品の検討が可能となる。

一方、日本には責任の所在を明確にすることを好まない慣習があり、これがリスクを自らコントロールすることに不慣れな国民性を造る結果になったと考えることができる。ところが、規制緩和や情報公開が求められている今日、裁量と共に課せられる責任の明確化というこれまで不得手であった意識改革を迫られている。個人、法人を問わず自ら抱えるリスクを認知し、カバーできるリスクの限界を見極めた責任ある意思決定が求められることになろう。それには、実質的なリスク情報が容易に提供される仕組みを整備し、また様々なリスク軽減策による効果を明示できる情報開示の工夫を考えていかなければならない。本報は、このような背景のもと、リスク情報の一般化を目指す著者の研究の一端を紹介したもので、リスクを認知し、自らの責任で管理するという健全な社会への移行の一助となれば幸いと考える。

参考文献

- 1) (株) 篠塚研究所, 東京海上火災保険 (株), Seismic Risk Management 方法論及び適用例, (1995), p.48.
- 2) 中村孝明, 水谷守, 地震リスクマネージメントにおけるイベントツリー解析, JCOSSAR'95, (1995), pp.75-80.
- 3) 水谷守, 小倉桂治, 中村孝明, 中村政則, 木村雄一, 地震リスクマネージメント(SRM)手法による地震対策の定量評価 その1 地震リスクマネージメント手法の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, (1996), pp.99-100.
- 4) Cambell, K.W., Near-source Attenuation of Peak Ground Acceleration, Earthquake Spectra, Vo.1, (1981), pp.2039-2070.
- 5) Federal Emergency Management Agency, Earthquake Damage Evolution Data for California, ATC-13, (1985), p.492.
- 6) (社) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, (1993), p.512.

A SEISMIC RISK TRANSFER CONSIDERING THE CHARACTERISTICS OF PROBABILITY DISTRIBUTION

Takaaki NAKAMURA

A stochastic and statistic approach is generally applied for seismic disaster estimation. Therefore the seismic disaster estimation, in other words the seismic risk can be provided not by a deterministic value but in form of probability distribution with a mean value and a coefficient of variation.

A risk transfer by taking out a seismic insurance policy is sufficiently effective to mitigate the seismic risks, In other to evaluate the effectiveness of mitigation due to the risk transfer, only the reduction of central value such as mean value or median is usually studied. The change of standard deviation and skewness is not taken into account, though they are quite important to indicate the characteristics of probability distribution.

In this paper the risk transfer method considering the characteristics of probability distribution is proposed and its applicability is discussed.