

地震リスクの証券化に関する数理解析

矢代 晴実¹・福島 誠一郎²

(受付 2002 年 2 月 14 日 ; 改訂 2002 年 6 月 17 日)

要 旨

自然災害リスクについては、保険引受能力(保険キャパシティ)の収縮及び引受条件の厳しさにより、従来の保険によるリスクの移転には限界があり、営業損益等の幅広いリスク補填を得るためにも金融市場の大きさを利用してリスクの経済的処理を資本市場から得ようとする動きがある。本研究では、地震リスクの資本市場移転手法として証券化を取り上げ、地震データの統計的な処理を実施し、証券化に必要な項目のための数理解析手法を提案し、リスク移転の効果をリスクヘッジ側及びリスクテイク側の両者の観点から評価できることを示した。さらに、東京都内に一様に存在する 73 棟の建物(資産)からなるポートフォリオにこの手法を適用し、地震リスク証券化におけるリスクカーブ、PML、年期待補填額等を整理した。

キーワード：建物(資産)群、地震リスク、地震データベース、リスク移転、リスクの証券化、モンテカルロ法。

1. はじめに

リスクファイナンスに関しては、近年、リスクの複雑化や多様化に対応して、企業を中心に従来の保険機能に加え、より金融的な機能・性格を盛り込んだリスクの処理が広く行われるようになってきている。特に自然災害リスクについては、保険引受能力(保険キャパシティ)の収縮及び引受条件の厳しさにより、従来の保険によるリスクの移転には限界があり、さらに営業損益等の幅広いリスク補填を得るためにも金融市場の大きさを利用してリスクの経済的処理を資本市場から得ようとする動きが活発になりつつある。また、その手段として自然災害リスクのデリバティブや証券化商品によりリスクの処理が実施されている。

日本においても、1997 年に南関東の地震リスクが証券化され、1998 年には日本全体を対象とした風災リスクの証券化も実施されている。その後、地震による営業停止に伴う利益損失を補填するための地震リスクの証券化や地震デリバティブの発行も行われている。さらに、金利スワップの方法を用いた地震リスクの資本市場への移転や、損害保険会社間での地震リスクや風災リスクのスワップが行われている(Swiss Re(2001), Canabarro et al.(1998))。また、阪神淡路大震災を受けて、日本建築学会「保険制度と危機管理調査研究特別委員会」においても、金融工学の知識を応用して将来の災害に備える資金の確保を検討するという事で、複数の自治体による災害時のリスクスワップを提言の中で言及している(神田(2001))。

¹ アジア防災センター(東京海上火災保険株式会社から出向)〒651-0073 兵庫県神戸市中央区脇浜海岸通 1-5-1 IHD ビル 3 階

² 東電設計株式会社：〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3

以上のような動向・背景から、今後はリスクファイナンスとしての地震リスクの証券化・デリバティブがより一層進展すると考えられる。

債券を発行する際には、リスクの定量化手法とその結果を目論見書に記載することが求められ、また、定量的結果を基にして格付け機関は格付けを決定している。しかしながら、後述するグリッドや元本没収率に関しては、確立された設定方法はないのが実態である。グリッドの設定方法と元本没収率及び年利回りの関係が証券化における重要ポイントであり、これらをどのように定量的に設定するのかが、証券化等のリスクの資本市場移転への課題である。

本研究は、地震リスクの資本市場移転手法として証券化を取り上げ、地震データベースの統計的な処理を実施し、証券化に必要な項目の定量的な評価手法を示すことを目的とする。

2. 証券化による地震リスクの移転の仕組み

筆者のひとりが関係した南関東の地震リスクの証券化を例に、その仕組みを概説する。

この証券化は、額面 1 億ドルの債券を発行し、一定規模以上の地震の発生の有無によって償還額が変動するものである。南関東エリアに図 1 に示すような 2 つの範囲を設定して、その内側を震源とする地震が今後 10 年に発生するかどうかをトリガーとしている。外側のグリッドは元本保証のない債券、内側のグリッドは元本保証が一部含まれる債券で、表 1 に示すようにマグニチュードの大きさによって元本没収率を変えている。なお、本研究では、このような地震発生を位置を限定する領域をグリッドと称する。

証券化の場合、マグニチュードを支払基準の数値(インデックス)とすると、実際に発生した損失額と証券化の商品によって回収できる金額に差(ベースリスク)が発生する。しかし、実際の損失額をインデックスとすると、投資家や資本市場では馴染みがうすく、わかりにくい。そこで、リスクの透明性や商品内容のわかりやすさのため、地震の特定地域における一定のマグニチュード(気象庁発表)といった客観性の高いインデックスを用いることが多い。

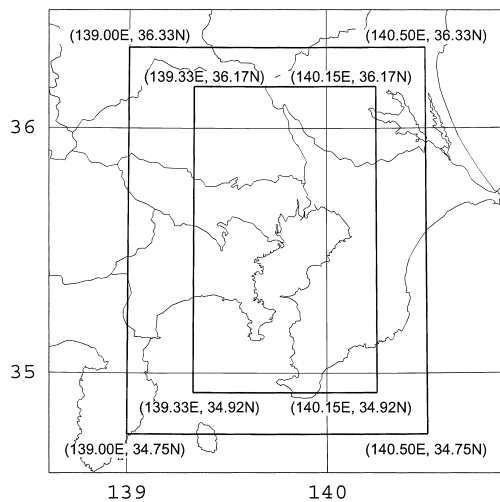


図 1. 地震リスクの証券化で用いられたグリッド。

表 1. マグニチュードと元本没収率の関係 .

マグニチュード	元本没収率 (%)	
	内側のグリッド	外側のグリッド
7.1	25	0
7.2	40	0
7.3	55	25
7.4	70	44
7.5	85	63
7.6	100	81
7.7 以上	100	100

3. 地震リスクの評価手法

3.1 地震リスクによる損失

地震による損失の大きさとその発生確率の関係は、例えば図 2 のように表される。同図はリスクカーブと呼ばれ、横軸は損失額を、縦軸は損失の年超過確率(当該損失額を超過する損失の 1 年あたりの発生確率)を表す。地震動の強さが大きいほど年超過確率が小さくなるため、地震による損失も、その値が大きいほど年超過確率が小さくなる。

図中の損失額 A は最大損失と考えられるもので、損失評価の対象とする建物(資産)全ての損失の和がこれに相当する。図中の損失額 B は、予想最大損失(PML: Probable Maximum Loss)と呼ばれるもので、所与の年超過確率に対応する損失額である。参照する年超過確率の与え方は様々であるが、供用年間のリスクの発生確率から与えることが多い。例えば、「50 年間に 10%」の記述に対応する年超過確率は 0.002105(再現期間 475 年)となる。また、リスクカーブ、X 軸、Y 軸の 3 者で囲まれる面積は、損失の年間期待値(以下、年期待損失)に相当する。

以上のように、損失の指標は様々であり、評価主体によって取るべき値は異なる。例えば、損害保険のように再保険機能を利用して評価主体が多数の物件を抱える仕組みを構築すれば、大数の法則により実際の損失は期待値に近く、また変動も小さいことから、損失としては年

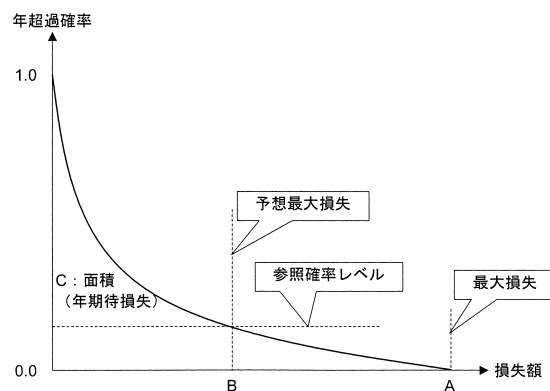


図 2. 損失の大きさと発生確率の関係 .

待損失を考えればよい．評価主体が建物のオーナーである場合には大数の法則が成立せず，リスク回避の観点から，期待値よりも大きな損失を考えざるを得ない．

一方，過度に高額な損失を考えることは，場合によっては非現実的に小さな発生確率のリスクを考えることとなり，リスクの処理に要する費用も高額となり合理的ではない．

従って，リスクの処理においては，リスク回避の観点から期待値以上の損失を考えること，過度に大きな損失の評価は不合理であること，の 2 つを勘案して損失の大きさを評価する必要がある．本研究では，この条件に合致するものが前述の PML であり，損失の大きさと発生確率の関係を表す「年超過確率-損失額関係」であるリスクカーブの評価がリスクマネジメントの鍵であると考えている．

3.2 個別建物(資産)のリスクカーブ

個別建物(資産)のリスクカーブは，建物位置における地震動強さの確率分布，所与の地震動強さに対する損失の大きさ，の 2 つから求めることができる．これを示すのが図 3 である(図 2 と図 3 では軸の方向が異なっている)．

建物位置における地震動強さの確率特性は地震ハザードカーブで表される．地震ハザードカーブは地震動強さ a と当該強さを超過する地震動の年間発生確率 $H(a)$ との関係を示すもので，地震動強さ x の確率密度関数を $f_H(x)$ とした場合に次式で表される．

$$(3.1) \quad H(a) = \int_a^{\infty} f_H(x) dx$$

一方，所与の地震動強さに対する損失の大きさは，所定の強さ(最大加速度)の地震動に対する建物損失を表すもので，横軸に地震動強さ，縦軸に損失額を取ったロス関数で表される．ロス関数は，地震動強さと建物がある損傷に達する損傷確率との関係を表すフラジリティカーブと，地震動を受けた建物の被害形態を建物の小破，中破，大破，倒壊などの被害モードと損失の関係を表す被害関数から求められる．

被害モード i に対する建物の加速度耐力(地震動による建物耐力を地震動加速度で表したも

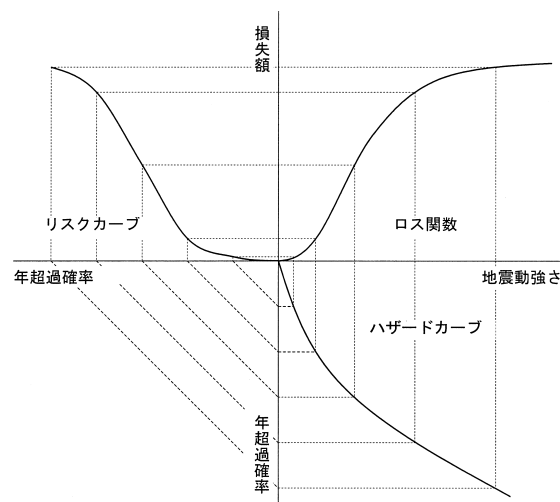


図 3. 個別建物のリスクカーブの評価．

の)の確率密度関数を $f_F(x, i)$ とすると、地震動強さ a に対する条件付き損傷確率 $F(a, i)$ は次式で表される。

$$(3.2) \quad F(a, i) = \int_0^a f_F(x, i) dx$$

被害モード i とそれに対する損失額 $C(i)$ との関係を表したものが被害関数で、次式に従ってフラジリティカーブと組み合わせることでロス関数 $L(a)$ が得られる。

$$(3.3) \quad L(a) = \sum_{i=1}^{n-1} C(i) \{F(a, i) - F(a, i+1)\} + C(n)F(a, n)$$

ここで、 n は被害モードの個数である。また、被害モードは i の数値が大きいくほど、大きな被害を示している。

3.3 建物(資産)群のリスクカーブ

(1) ポートフォリオ解析の必要性

前項では、個別建物(資産)のリスクカーブが、地震ハザード評価とロス関数評価の2つの評価から求められることを示した。ところで、建物(資産)群(以後、ポートフォリオ)のリスクを評価する場合、次のような理由により、個別建物の PML の足し合わせからポートフォリオの PML を評価することができない。

1つの理由は、個々の建物(資産)の損失は完全相関ではないことによる。議論を簡単にするため、建物(資産)を2棟とし、その損失の密度関数を正規分布とする。建物(資産)Aと建物(資産)Bの損失をそれぞれ L_A 、 L_B とし、その平均と標準偏差を μ_A 、 μ_B 及び σ_A 、 σ_B とする。また、ポートフォリオの損失を L_P 、その平均と標準偏差を μ_P 、 σ_P とする。

これらの変数は、以下のように関係付けられる。

$$(3.4) \quad \mu_P = \mu_A + \mu_B$$

$$(3.5) \quad \sigma_P^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + 2\rho\sigma_A\sigma_B$$

ここで、 ρ は L_A と L_B の相関係数である。

$\rho = 1$ の場合、

$$(3.6) \quad \sigma_P^2 = (\sigma_A + \sigma_B)^2 \rightarrow \sigma_P = \sigma_A + \sigma_B$$

となる。これは個々のばらつきの単純和が全体のばらつきに等しく、リスク分散の効果が現れないことを示すものである。

個別建物(資産)の PML を足し合わせてポートフォリオの PML とすることは、最大損失の同時発生を考えることに等しく(3.5)式において $\rho = 1$ とすることである。現実的には、建物(資産)間の損失は完全相関ではないことから、これは PML を過大評価することに繋がる。

もう1つの理由は、建物(資産)が多地点に存在するため、地震ハザードカーブが1つに定まらないことによる。仮に年超過確率が同一であっても、被害を与える地震が異なるため、損失を足し合わせることに意味がなくなるからである。このことは、図3に示した方法では、ポートフォリオのリスク評価は行えないことを示唆している。

(2) ポートフォリオ解析手法

ポートフォリオ解析手法については、地震工学の分野で、石川 他(2000a, 2000b)、中村・中村(2000)、諏訪 他(2001)、兼森(1999)などの手法が存在するが、そのいずれもがシナリオ地震による損失評価を基本としている。

最も単純なものでは、複数のシナリオ地震を想定し、それらが発生したという前提で損失を求めている。この手法は確定論的なもので、地震発生確率という概念はない。従って、リスクカーブを求めることはできないが、反面、地震が確定しているために、詳細な検討が可能になるという利点も存在する。

一方、確率論的な方法は、多数のシナリオ地震を想定し、損失とシナリオ地震の発生確率からリスクカーブを求めるもので、本研究でもこの手法を採用した。ただし、本研究では、個別建物の地震リスク評価と整合性を取るために、図 3 に示した評価手法との連続性を考え、地震ハザード解析で用いている要素地震をシナリオ地震としている。

本手法の手順を図 4 に示す。同図でイベントとあるのは、マグニチュードや破壊面の分布に対応した様々な地震の一つ一つである要素地震のことである。筆者らが採用している地震活動域モデル(Annaka and Yashiro (2000))は、2 タイプの地震活動域を想定しており、図 4 の手順のイベント発生において、タイプに応じて発生の方法を変えている。

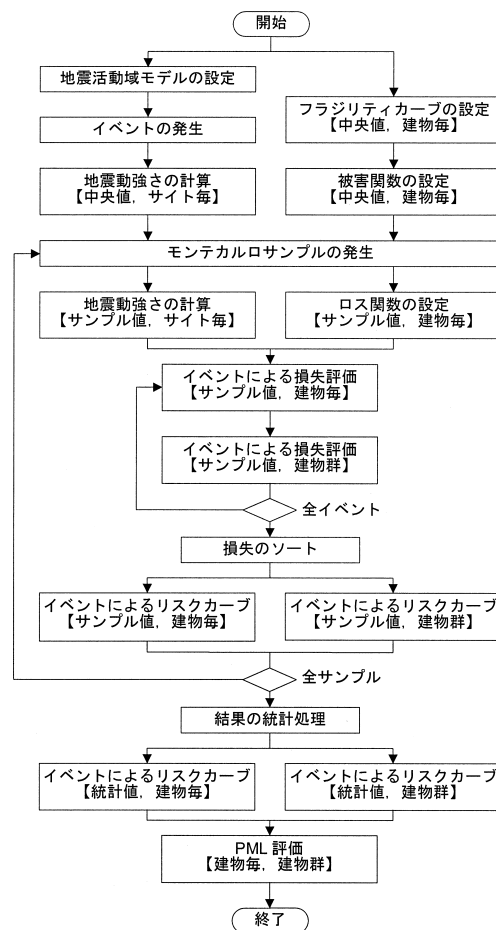


図 4. ポートフォリオのリスク解析の手順。

1つは、地震活動域に対し破壊面が設定できるもので、マグニチュードに応じた発生頻度と破壊面が与えられるものである。これは、プレート境界地震や活断層地震に対応するものである。

地震活動域のもう1つのタイプは、中規模の地核内地震に対応するもので、破壊面が設定できないものである。このタイプの場合には、地震活動域を所定の大きさのグリッドに分割し、それを地震破壊面とする。以上を表したものが図5である。

イベントが確定されたならば、それによる当該サイトでの地震動評価を行いロス関数と組み

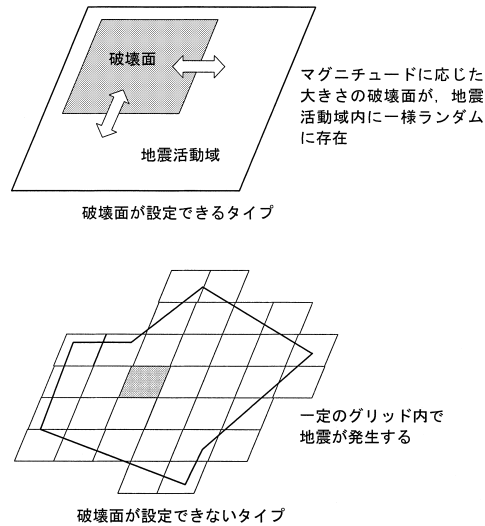


図5. イベントの発生方法。

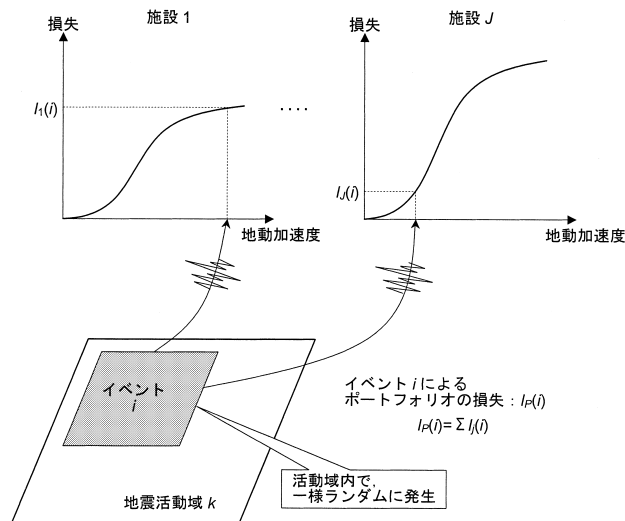


図6. イベントによるポートフォリオの損失の計算。

合わせることで、イベントによる損失を求めることができる。イベントと当該サイトの地震動との関係は、経験式(距離減衰式)で与えられる。これを示すのが図 6 である。同図で示されるように、1 つのイベントに対し、各建物の条件付き損失が求められる。これを全ての建物について足し合わせたものが、ポートフォリオの条件付き損失である。

所与の損失レベルを超過するような条件付き損失を与えるイベントの発生頻度の総和が、その損失レベルの年超過頻度となる。例えば地震発生をポアソン過程と仮定することで、年超過頻度から年超過確率への変換を行うことができる。

ところで、距離減衰式にはばらつきがあり、マグニチュードと距離が確定しても地震動の大きさは一意には定まらない。そこで本手法では、数値解析(モンテカルロシミュレーション)により損失の確率分布を評価することとした。ポートフォリオ解析手法の手順(図 4)に示したモンテカルロサンプルの発生はこのためである。なお、モンテカルロサンプルは、地震動の大きさだけでなく、 fragility 曲線の中央加速度耐力や被害関数の値についても発生させている。これらは各評価における不確実性を反映するためである。本論文で用いるモンテカルロシミュレーションは、試行回数 200、乱数発生 0~1 の擬似乱数、乱数間の相関は独立として行っている。

モンテカルロシミュレーションは計算時間は要するものの、各要因のばらつきやそれらの相関の評価において、過度の単純化や不合理な仮定を導入する必要がないという利点がある。また、そのために結果に対する信頼感も高い。

3.4 リスク処理の組み込み

(1) リスク処理の反映方法

リスク評価がリスクカーブによりされた後に行われる、そのリスクの処理を組み込んだポートフォリオ解析手法の枠組みを図 7 に示す。基本的な考え方は、イベント i によるポートフォリオの損失 $l_P(i)$ にリスクの処理を行い、処理後の損失を基にリスクカーブを評価するという

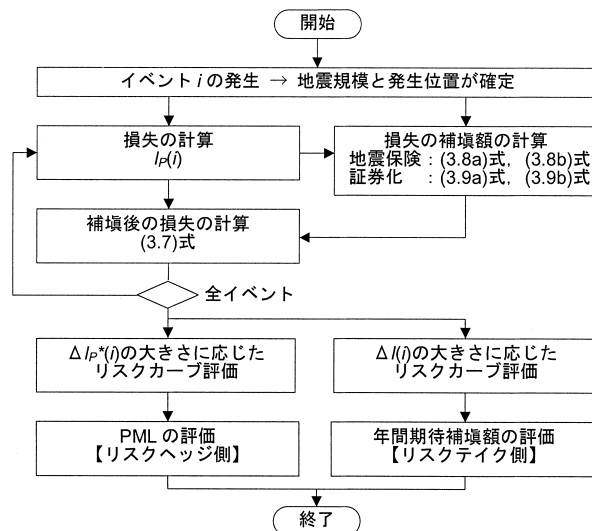


図 7. リスク処理を伴うリスク評価の枠組み。

ものである．これを示すのが下式である．

$$(3.7) \quad l_P^*(i) = l_P(i) - \Delta l(i)$$

ここで、 $l_P(i)$ は処理前の損失、 $l_P^*(i)$ は処理後の損失、 $\Delta l(i)$ は損失の補填（リスク処理）である．

個々の損失に対するリスク処理の方法は様々であるが、例えば、処理前の損失の関数として損失の補填を評価することが考えられる．これは、地震を担保する保険に相当し、損失の補填は以下のように表される．

$$(3.8a) \quad \Delta l(i) = \min[l_u, f_1(l_P(i))] \quad (l_P(i) > l_0)$$

$$(3.8b) \quad \Delta l(i) = 0 \quad (l_P(i) \leq l_0)$$

ここで、 l_0 は免責額、 l_u は引受限度額である．また、 $f_1(\cdot)$ は保険金を規定する関数である．

一方、地震リスクの証券化では、所定のグリッド内で地震が発生した場合に限り、地震のマグニチュードの関数として損失の補填を評価する．これは以下のように表される．

$$(3.9a) \quad \Delta l(i) = f_2(M(i)) \times C \quad (M(i) \geq M_0)$$

$$(3.9b) \quad \Delta l(i) = 0 \quad (M(i) < M_0)$$

ここで、 $M(i)$ はイベント i のマグニチュード、 C は元本、 M_0 は補填の対象となる最小マグニチュードである、また、 $f_2(\cdot)$ は元本没収率を規定する関数である．

(2) 地震発生位置とグリッドとの関係

地震リスクの証券化では、所与のグリッド内で地震が発生した場合に損失を補填する．グリッド内で地震が発生したかどうかの判断は、点震源とその他（線震源並びに面震源）で扱いを違えた．点震源については単純に、震源位置がグリッド内にあるかどうかで判断を行う．解析では、破壊点の数を有限にするため地震活動域を微小格子に分割し、格子の中央点を震源位置とする．

一方、線震源あるいは面震源の場合、破壊領域全体がグリッドに含まれないことが考えられる．破壊開始点は破壊領域内で一様ランダムであるとする、当該破壊面で地震が発生した場合に、その損害が補填されるのは、破壊開始点がグリッド内にある場合に限られる．

本研究では、破壊開始点がグリッド内にある確率を補填確率 p と呼び、 p を補填額に乗じることで破壊領域の広がりの効果を考慮する． p の評価は下式による．

$$(3.10a) \quad p = L_{ovl} / L_{rpt} \quad (\text{線震源の場合})$$

$$(3.10b) \quad p = A_{ovl} / A_{rpt} \quad (\text{面震源の場合})$$

ここで、 L_{rpt} は破壊領域の長さ、 L_{ovl} はグリッド内の破壊領域の長さ、 A_{rpt} は破壊領域の面積、 A_{ovl} はグリッド内の破壊領域の面積である．なお、点震源の場合、震源がグリッド内であれば $p = 1$ 、格子外であれば $p = 0$ となる．

以上を示すのが図 8 である．

4. 数値解析

4.1 諸条件の設定

(1) 対象ポートフォリオ

東京都内に一様（緯度・経度で 0.05° 刻み）に分布した 73 棟の建物（資産）群を対象ポートフォ

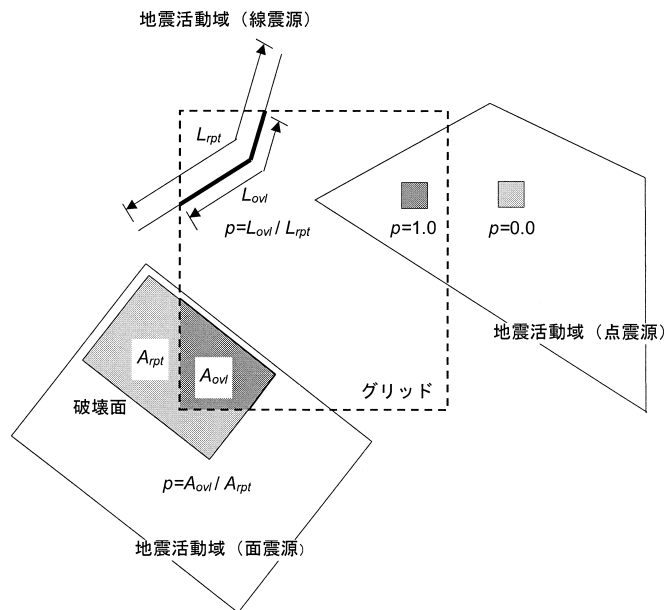


図 8. 震源とグリッドの位置関係と補填確率の関係 .

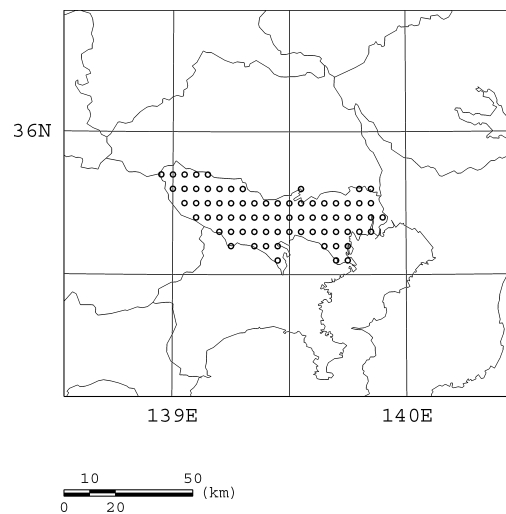


図 9. 建物(資産)群の配置 .

リオとして設定した．建物(資産)価格は 1 棟 100 と設定し，総建物(資産)価格 7300 とした．建物(資産)群の配置を図 9 に示す．

(2) 建物の脆弱性

建物の脆弱性カーブは対数正規分布であると仮定し，ばらつきを表す対数標準偏差と脆弱性カーブ上の 1 点を定めることで，その中央加速度耐力を設定した．なお，フラジ

表 2. 被害程度別のフラジリティと被害率.

被害程度	フラジリティカーブの特性値		被害率 (%)
	中央値 (Gal)	対数標準偏差	
小破	200	0.4	5
中破	600	0.4	10
大破	1000	0.4	30
倒壊	1400	0.4	100

リティカーブを対応させる被害程度は、小破、中破、大破、倒壊とした。

対数標準偏差については中村・中村(2000)のものを採用した。フラジリティカーブ上の点は、現行の1次設計と2次設計がそれぞれ小破、大破に相当し、標準せん断力係数に対応した最大加速度($C_0 = 0.2$ に対して 80 gal, $C_0 = 1.0$ に対して 400 gal)が入力した場合に損傷確率が1%になると仮定した。中破と倒壊に関しては、加速度耐力値が等間隔になるように値を設定した。

建物のフラジリティカーブの特性値を表2にまとめる。

なお、このように求めた加速度耐力値は建物1階の応答に対応するものであるが、建築学会(1998)により表層の増幅特性を1.5とし、また、林(1998)より表層の最大加速度に対する建物応答加速度の最大値の比を0.7と仮定することで、表2に示した値を工学的基盤位置のものと読み替えることとした。

表層の増幅特性や相互作用により建物のフラジリティカーブは多様に変化するが、このような単純化を行っても本研究の本質が失われることはないと考えた。

(3)被害率の設定

被害額は、建物(資産)価格に被害率(建物(資産)価格に対する損失の比)を乗じて求める。被害率の値については、中村・中村(2000)を参照し、小破5%、中破10%、大破30%、倒壊100%とした。これらについても表2にまとめた。

(4)地震環境

地震環境については Annaka and Yashiro(1998)を用いた。同文献では、日本列島全体について地震活動域モデルを設定しており、大地震発生活動域と中小地震発生活動域に大別している。これらの活動域を図10に、地震活動モデルの諸元を表3に示す。

距離減衰式についても同文献に従い、以下の安中式を採用した。

$$(4.1) \quad \log A = 0.61M + 0.00501h - 2.203 \log(d) + 1.377$$

$$d = (\Delta^2 + 0.45h^2)^{0.5} + 0.22 \exp(0.699M)$$

ここで、 A は最大加速度、 Δ は震央距離、 h は震源深さ、 M はマグニチュードである。距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、自然対数で0.5と設定した。

(5)グリッドの設定

グリッドが大きいほど当該施設のリスク移転の可能性が増すが、過度に大きい場合には本来のリスクヘッジの目的から外れることになる。即ち、単なるハイリスク・ハイリターン金融商品となる可能性が否定できない。また、同様に、リスクヘッジしたいポートフォリオと離れた地点にグリッドを設定することも、リスクマネジメントの観点からは適切でない。一方、グリッドが小さくなると、本来のリスクヘッジがなされない危惧も出てくる。

本研究では、グリッドの大きさの設定方法に関する知見を得るため、グリッドの大きさをパラメータとして解析を行い、グリッドの大きさとリスク移転の関係を検討することとした。

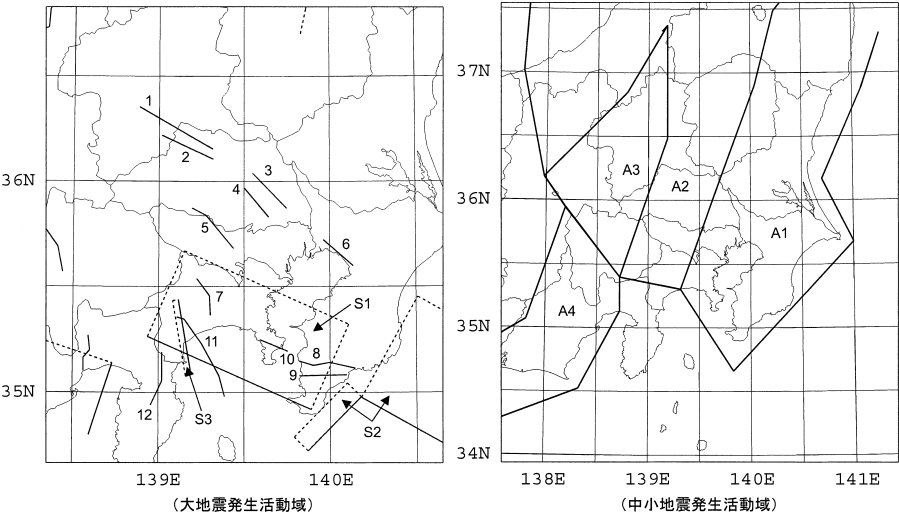


図 10. ポートフォリオ周辺の地震発生活動域 .

表 3. 地震発生活動域モデルの諸元 .

	活動域番号	最大 M	発生間隔	備考
大地震 発生活動域 (一様分布)	1	7.0-7.6	1182	活断層地震
	2	6.9-7.3	5212	
	3	7.0-7.4	79283	
	4	6.8-7.2	5931	
	5	7.1-7.5	8710	
	6	6.8-7.2	5676	
	7	6.9-7.3	7239	
	8	7.1-7.5	2842	
	9	7.0-7.4	2639	
	10	6.6-7.0	1365	
	11	7.5-7.9	1625	
	12	7.1-7.5	877	
	S1	7.8-8.2	200	プレート地震
	S2	7.8-8.2	1000	
	S3	6.8-7.2	73	
中小地震 発生活動域 (指数分布)	活動域番号	M の範囲	a 値	b 値
	A1	5.0-7.0	2.344	0.9
	A2	5.0-7.0	4.235	0.9
	A3	5.0-7.0	1.645	0.9
	A4	5.0-7.0	3.344	0.9

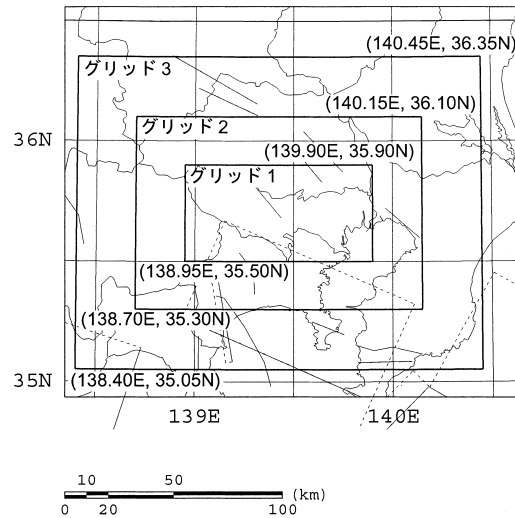


図 11. 設定したグリッド.

設定したグリッドを図 11 に示す．グリッド 1 はポートフォリオに接するように設定したものの，グリッド 2 はグリッド 1 よりおおそ 20 km 外側を通るもの，グリッド 3 はグリッド 1 よりおおそ 50 km 外側を通るものである．

(6) 元本没収率の設定

地震リスク証券化では，地震が発生しなければ証券購入元本は満額償還されるが，地震が発生した場合は，マグニチュードの大きさに従い償還額を減額することになる．元本に対する償還額の比を 1 から引いたものが元本没収率になる．元本没収率はマグニチュードの大きさの関数として与えられる．マグニチュードが大きいほど一般には被害が大きく，従って元本没収率も大きめに設定することが必要である．また，元本没収の対象となるマグニチュードの範囲についても検討が必要である．

なお，元本没収率についても，グリッドの場合と同様，ヘッジされるリスクの大きさとリスクヘッジに要する費用とのトレードオフの関係があり，徒に没収率を大きくすることは避けるべきである．

元本没収率 $f_2(\cdot)$ は，図 12 に示すような 3 パターンを設定した．ケース a は， $M = 6.9$ から 25%の補填が生じ $M = 7.4$ で最大補填額 100%に達する．ケース b とケース c も，各々 $M = 7.1 \sim 7.6$ ， $M = 7.3 \sim 7.8$ の間で同様に没収率が変化する．

(7) 元本

元本は，債券の発行額(募集額)となり，その元本の大きさもパラメータとして扱った．証券化によるリスク移転の優位性として，地震保険では引き受けられないような巨大損失まで引受可能なことが挙げられる．ここでは，リスク移転のない場合のポートフォリオ解析を行って PML を評価し，その値に基づいて元本を設定した．リスク移転のない場合のリスクカーブを図 13 に示す．なお，モンテカルロシミュレーションのケース数は，評価する超過確率を考慮して 200 とし，他の条件は前述したものを採用した．

得られたリスクカーブの年超過確率 $1/475$ に対応する損失を PML とした．リスク移転の無い場合の PML は 249.38 であった．これは総建物価格の 3.42%に相当する．地震保険では力

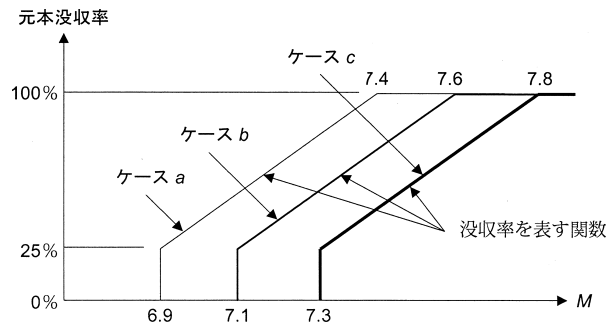


図 12. 設定した元本没収率.

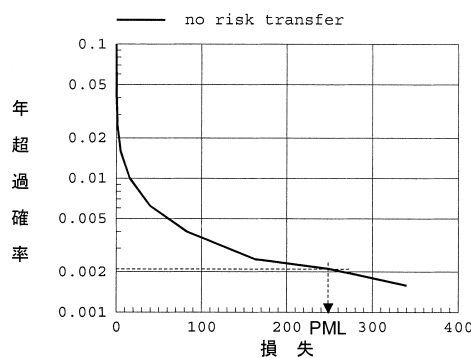


図 13. リスク移転のない場合のリスクカーブと PML.

バーできない損失を補填することを念頭に置き、元本の大きさを 292 と 730 に設定した。これらは総建物価格の 4%、10%に相当する。

4.2 解析結果

(1) PML の比較

表 4 に、解析結果の一覧を示す。表の数値は、上段がポートフォリオの PML、中段がリスク移転による PML の低減(リスク移転の無い場合の PML から上段の値を引いたもの)、下段が年期待補填額である。モンテカルロシミュレーションのケース数はリスク移転のない場合と同様に 200 とした。

同表によれば、グリッドが大きいくほど、あるいは元本没収率が大きいくほど PML が小さくなること、その反対に、年間期待補填額が大きくなることわかる。

(2) グリッドの大きさの影響

図 14 に、グリッドの大きさをパラメータとした場合のリスクカーブの変化を示す。上図はポートフォリオのリスクカーブ(リスクヘッジ側)であり、下図は補填額のリスクカーブ(リスクテイク側)である。元本は総建物価格の 4%、元本没収率は図 12 のケース b とした。リスクヘッジ側のリスクカーブの内、細い実線はリスク移転の無い場合のリスクカーブであり、リスク移転がリスクカーブに与える影響を検討することができる。

グリッドが大きいくほど、当該グリッド内で発生する地震が増える(あるいは図 8 に示した補填確率が 1 に近づく)ことから、同一補填額に対する超過確率が増大する。このことはリスク

表 4. PML 評価結果の一覧 .

元本	元本 没収率	項目	グリッド		
			1	2	3
総建物価格 × 0.04	ケース a	PML	124.78	78.61	73.86
		PML の低減	124.60	170.77	175.52
		年期待補填額	2.46	5.92	9.76
	ケース b	PML	122.09	86.25	81.62
		PML の低減	127.09	163.13	167.76
		年期待補填額	1.49	2.89	4.55
	ケース c	PML	123.31	91.93	91.15
		PML の低減	126.07	157.45	158.23
		年期待補填額	1.17	1.85	2.44
総建物価格 × 0.1	ケース a	PML	69.42	46.32	36.76
		PML の低減	179.96	203.06	212.62
		年期待補填額	6.15	14.79	24.36
	ケース b	PML	71.41	55.05	52.56
		PML の低減	177.97	194.32	196.82
		年期待補填額	3.73	7.23	11.38
	ケース c	PML	71.73	71.49	71.49
		PML の低減	177.65	177.89	177.89
		年期待補填額	2.93	4.61	6.09

テイク側のリスクカーブから読みとることができる．リスクテイク側の損失の最大値は元本で 292 となる．グリッド 3 では，損失はこの値に達しているのに対し，グリッド 1 及びグリッド 2 では，この値に達していない．このことは，特にグリッド 1 で顕著である．

各グリッド内で生じる地震のマグニチュードの分布を図 15 に示す．補填額への寄与はマグニチュードが大きいものほど高い．ケース b では M7.6 で最大没収率となり，図 15 における M7.8～8.2 の地震の発生頻度の違いが補填額の差となって現れたものと考えられる．グリッド 2 と 3 ではそれ程大きな差はなく，グリッド 1 と 2 では比較的大きな差があることも，図 14 と整合する．

リスクヘッジ側のリスクカーブを比較すると，グリッド 2 とグリッド 3 では，リスクカーブがほぼ等しいのに対し，グリッド 1 ではリスクの低減度合いが小さい．このことは，グリッドの大きさとしてはグリッド 2 で十分であり，グリッド 3 までグリッドを広げても，リスクヘッジの観点からは効果的でないことを示している．

このことはグリッドの設定に関して重要であり，リスクヘッジ側にとって，必要かつ十分なグリッドが存在することを示すものである．

図 14 と同様に，グリッドの大きさをパラメータとした場合のリスクカーブの変化を図 16 に示す．図 14 との違いは元本の大きさで，総建物価格の 10%(=730)である．

リスクテイク側のリスクカーブの差については図 14 と同様の傾向となっている．これは，補

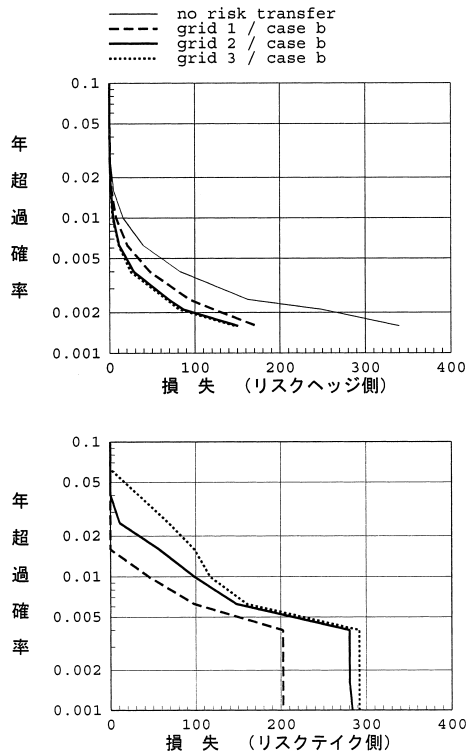


図 14. リスクカーブに与えるグリッドの大きさの影響(元本を総建物価格の 4%とした場合)。

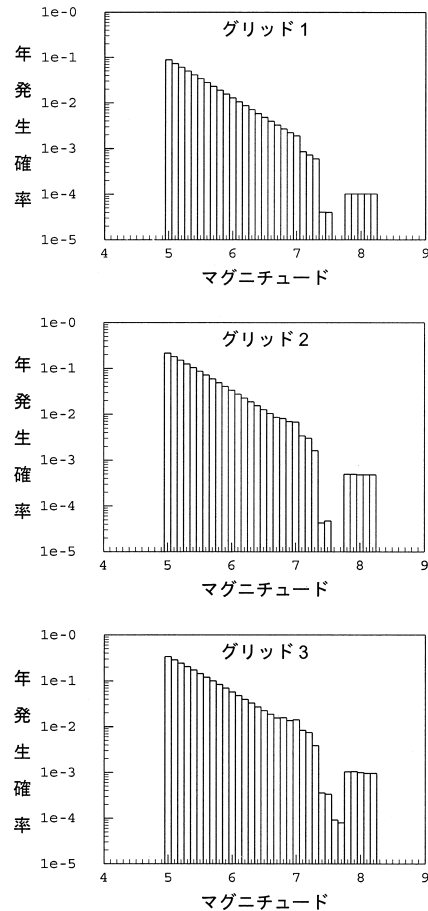


図 15. グリッド内で生じる地震のマグニチュード分布。

填に関わる地震そのものはグリッドと没収率のみに関係し、元本とは独立であることによるものである。

リスクヘッジ側のリスクカーブについても、グリッド 1 では損失の低減が十分ではなく、またグリッド 3 ではグリッドを広げた効果が現れないという結果は、図 14 と同様である。

(3) 元本没収率の影響

図 17 に、元本没収率をパラメータとした場合のリスクカーブの変化を示す。グリッドについては、図 14 と図 16 からグリッド 2 が必要十分であると判断し、これを採用した。補填額の最大値は総建物価格の 4%(=292)とした。

リスクテイク側の損失の最大値はどのケースでも同じで、これは前述したように、M7.8~8.2 の地震が支配的であり、このマグニチュードレベルでは、どの場合でも元本没収率は 100%となるからである。

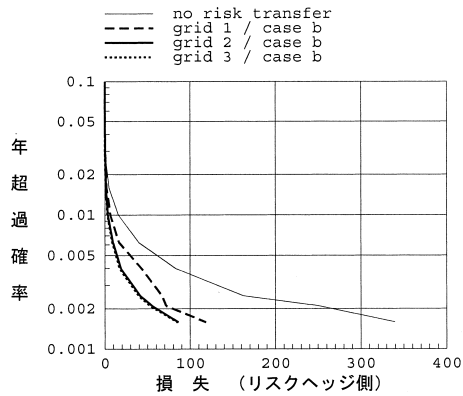


図 16. リスクカーブに与えるグリッドの大きさの影響(元本を総建物価格の10%とした場合)。

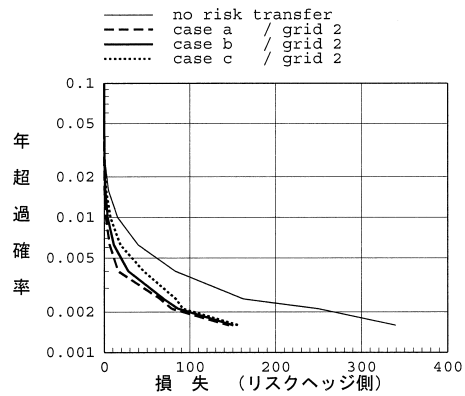


図 17. リスクカーブに与える元本没収率の影響(元本を総建物価格の4%とした場合)。

これに対し、M7.8 以下では元本没収率に差が生じ、リスクテイク側の損失も異なったものとなる。

リスクヘッジ側のリスクカーブを比較すると、年超過確率 0.002 以下では損失に差はないが、0.002 以上では明瞭な差が現れる。これは上述した補填額の差によるものである。

元本を変えた場合のリスクカーブの比較を図 18 に示す。図 14 と図 16 の関係と同様、リスクテイク側のリスクカーブは元本の差がそのまま現れている。

リスクヘッジ側のリスクカーブについても図 17 と同様の傾向にあるが、年超過確率が 0.002 以下でも、各ケースについて若干ではあるが差異が見られる点が異なる。これは、損失の補填額が大きいと、相対的に中規模地震による損失の寄与が大きくなり、補填額の差が現れやすくなったことによると考えられる。

グリッドを広げた場合にも損失の補填額は大きくなるが、この場合には「遠方で生じる地震による被害」に対して補填されるため、損失が大きくなる「近傍の地震による被害」の補填には繋がらない。このことが、図 14 と図 16 においてグリッド 2 とグリッド 3 に大きな差異が生じない理由であり、元本没収率の影響とグリッドの大きさの影響の差異であると考えられる。

(4) リスクコストと PML の低減率

リスクを処理する場合には、一般にコストが必要になり、ここでは、これをリスクコストと呼

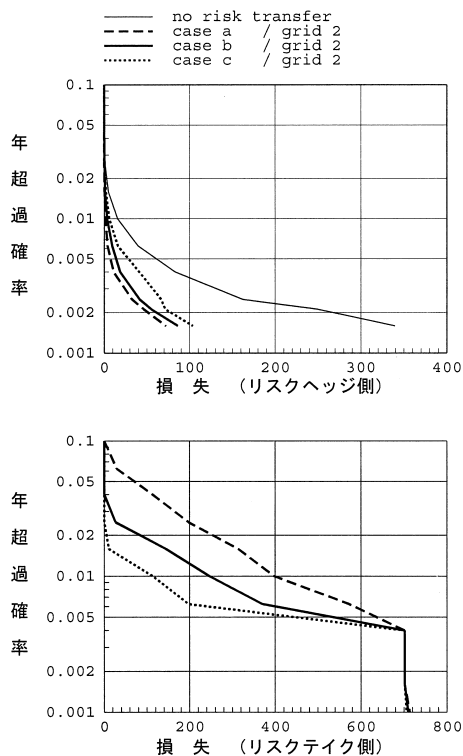


図 18. リスクカーブに与える元本没収率の影響
(元本を総建物価格の 10%とした場合)。

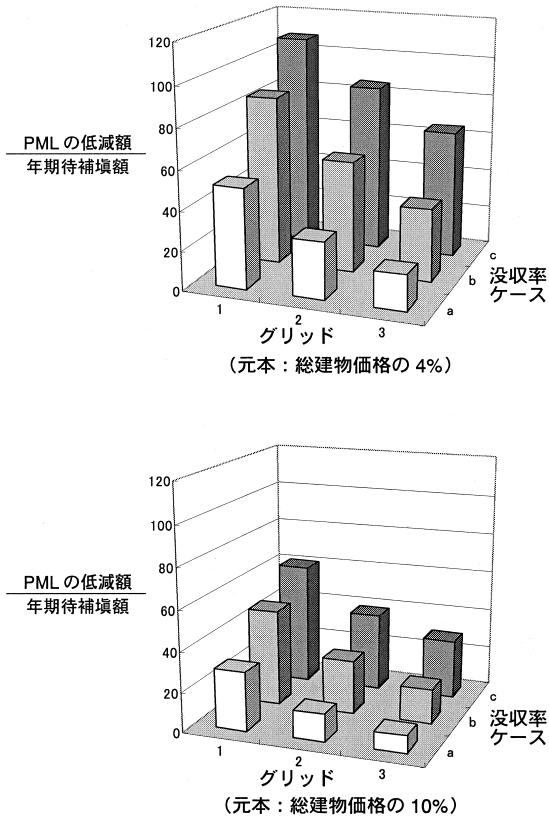


図 19. リスクヘッジの効率の比較。

ぶ。リスクを処理しようとするとき、目的とするリスクヘッジが可能な範囲内で、極力リスクコストを低く抑えることが、リスクヘッジ側にとっての合理的なリスクマネジメントに繋がる。

本研究では、リスク処理の合理性の尺度として、年期待補填額に対する PML の低減額の比を用い、表 4 に示した解析結果についてリスクヘッジの効率を検討した。年期待補填額は必ずしもリスクコストと同一ではないが、年期待補填額が高いほど証券化における利息の増大に繋がることから、リスクコストを代表する指標として採用した。図 19 に、リスクヘッジの効率について整理した結果を示す。

棒グラフの値が大きいくほど効率が良いことを示しており、グリッドが小さいほど、あるいは、補填の対象となる最小マグニチュード M_0 が高いほど、効率が良いことが伺える。したがって、目的とするリスクヘッジが可能な範囲内であるならば、グリッドが小さく M_0 が高いものが好ましい。

また、元本が小さい方が効率的であることも同図から読みとれる。これは、元本が大きくなると損失の補填額も大きくなり、中規模地震に対しても、ある程度大きな補填がなされるためである。

なお、表 4 の「総建物価格 $\times 0.04$ 」「ケース a, グリッド 3」と表 4 の「総建物価格 $\times 0.1$ 」「ケー

ス_c, グリッド 1」を比較すると, 年期待補填額と PML の低減額ともに, 同程度の大きさとなっている。元本の大きさが異なった場合でも, グリッドや元本没収率の設定如何で, 同等のリスクヘッジを行える可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究では, 地震リスクの資本市場移転手法として証券化を取り上げ, 地震データの処理及び証券化に必要な項目の数理解析手法を提案し, リスク移転の効果を, リスクヘッジ側及びリスクテイク側の両者の観点から評価できることを示した。さらに, これを東京都内に一様に存在する 73 棟の建物(資産)からなるポートフォリオに適用し, 地震リスク証券化におけるリスクカーブ, PML, 年期待補填額等を整理し, 以下の結論を得た。

- 1) グリッドの大きさは PML(年超過確率 1/475 に対応する損失)に大きく影響する。グリッドが大きいほど PML の低減も大きい, ある程度の大きさでその効果は頭打ちとなる。
- 2) 補填の対象となる最小マグニチュードは, リスクカーブの内, 年超過確率で 0.002 以上の損失に寄与するが, PML に与える影響は比較的小さい。
- 3) グリッドが小さいほど, あるいは, 補填の対象となる最小マグニチュードが高いほど, リスクヘッジの効率が低い。目的とするリスクヘッジが可能な範囲内であるならば, このような組み合わせが好ましい選択となる。
- 4) 元本の大きさが異なっている場合でも, グリッドや元本没収率の設定により, 同等のリスク移転を実施することが可能である。

参 考 文 献

- Annaka, T. and Yashiro, H. (1998). A seismic source model with temporal dependence of large earthquake occurrence for probabilistic seismic hazard analysis in Japan, *Risk Analysis* (eds. C. A. Brebbia and J. L. Rubio), 233–242, WIT Press, Southampton, U.K.
- Annaka, T. and Yashiro, H. (2000). Uncertainties in a probabilistic model for seismic hazard analysis in Japan, *Risk Analysis II* (ed. C. A. Brebbia), 369–378, WIT Press, Southampton, U.K.
- Canabarro, Eduardo, Anderson, Richard R., Finkemeier, Markus and Bendimerad, Fouad (1998). *Analyzing Insurance-linked Securities, Fixed Income Research*, Goldman Sachs, New York.
- 林 康裕 (1998). 兵庫県南部地震による被害率曲線, 1998 年度日本建築学会災害部門 PD 資料, 15–20.
- 石川 裕, 武田正紀, 奥村俊彦, 林 康裕, 掛川秀史 (2000a). 建物の地震リスクの評価法, 日本建築学会技術論文報告集, 11, 275–278.
- 石川 裕, 奥村俊彦, 武田正紀 (2000b). 複数建物の集積地震リスクの評価, JCOSSAR2000 論文集, 205–208.
- 神田 順 (2001). 自然災害低減のための危機管理と保険制度に関する提言, 建築雑誌, 5 月号, 21–23.
- 兼森 孝 (1999). 定量的リスク分析法——リスクカーブ法——, 土と基礎, 47(1), 27–30.
- 建築学会 (1998). 『建築物荷重指針・同解説』, 日本建築学会, 東京。
- 中村孝明, 中村敏治 (2000). ポートフォリオ地震予想最大損失額 (PML) 評価, 日本リスク研究学会誌, 12(2), 69–76.
- 諏訪 仁, 野畑有秀, 関松太郎 (2001). 兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建物の地震リスク評価に関する研究, 日本建築学会技術論文報告集, 12, 41–46.
- Swiss Re (2001). Capital market innovation in the insurance industry, *Swiss Re SIGMA Series*, No. 3, Zürich.

An Analysis for Securitizing of Seismic Risk

Harumi Yashiro

(Asian Disaster Reduction Center; The Tokio Marine and Fire Insurance Co., Ltd.)

Sei'ichiro Fukushima

(Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

In recent years, some risk analysis methods have been proposed for quantitative evaluations of risk. However although it is important for carrying out effective risk management, the treatment of quantified risk has not been considered sufficiently. This paper proposes a seismic portfolio analysis method considering the effect of risk transfer such as securitization, which has been adopted to the portfolio of 73 buildings in Tokyo. Through its application, the following findings are obtained: the grid has a relatively large effect on the PML (probable maximum loss) although the forfeiture rate of principal does not, risk transfer is more effective from the viewpoint of investment for risk with a smaller grid and a higher trigger level that is the minimum magnitude for forfeiture, and some combinations of grid and forfeiture rate can be identical to each other regardless of principal.

Key words: Portfolio of buildings, risk management, seismic risk, risk transfer, securitization of risk.