

## 7章 ポートフォリオを対象に効用関数を用いた地震保険料の検討

### 7.1 序

地震リスク評価の主な目的は、複数ある代替案の中から最も効果的な地震リスク対策案を選択するための判断材料を提示することである。地震リスク対策は、リスク低減とリスク転嫁に大別される。リスク低減は、新築建物では耐震性能を向上させるため制震構造や免震構造の採用、既存建物では耐震補強などを実施することである。一方、リスク転嫁は地震保険に代表されるように、保有リスクを第三者に移転することである。

リスク低減では、耐震性能を高めるための初期投資が必要となるので、対策費用に供用期間中の損失額を加えた地震ライフサイクルコストを定義し、対策案の費用対効果をライフサイクルコストの観点から評価する研究が行われている。例えば、佐藤ら<sup>1)</sup>は、従来の歴史地震データに基づく確率モデルに活断層データによる確率モデルを組み合わせた地震危険度解析を開発し、さらに地盤増幅係数、損失費用モデルを考慮して総費用最小化による最適信頼性を算定するまでの一連の設計荷重算定フローを提案している。神田ら<sup>2)</sup>は、新築費用に地震時における期待損失費用を加えて総費用を定義し、限界状態設計の枠組のなかで総費用最小化原則を用いた最適信頼性指標を定式化している。この中で、安全性を高めるための新築費用の増加は比較的容易に定量化され、地震危険度の低い地域では、その上昇率も小さくなることが示されている。

リスク転嫁では、地震保険の引き受け能力に限界があるため、最近では、リスクの証券化やリスクスワップなど代替的リスク移転手法に関する研究も行われている。例えば、福島ら<sup>3)</sup>は、地震保険はその引受能力の減少および引受条件の厳しさによりリスク移転の手法としては限界があるため、地震リスクの資本市場移転手法として新たに証券化を取り上げ、証券化に必要な項目の定量的な評価手法を提案し、リスク移転の効果をリスクヘッジ側と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ている。矢代ら<sup>4)</sup>は、代替的リスク移転(ART)手法としてリスクスワップを取り上げ、自治体における地震災害復旧費用の調達、事業体の地震災害復旧資金、運転資金調達を目的として、リスクスワップの役割および成立条件を整理している。その結果、地震リスクスワップが成立する条件は、地震危険度の差に影響され、地震危険度の差が大きいほど条件設定の範囲が狭くなることなどが示されている。

さらに、地震ライフサイクルコストを評価するとき、従来からのリスク低減のみならず、リスク移転も考慮した検討も行われている。福島ら<sup>5)</sup>は、ライフサイクルコストを最小化することを条件とした期待総費用最小化に基づき、耐震性能レベルを向上させるリスク低減のみならずリスク移転（地震保険と地震リスクの証券化の2種類を設定）も考慮して、25棟の建物からなるポートフォリオを例に検討を行っている。そ

の結果、リスク低減とリスク移転を組み合わせることで、これらを単独で適用するよりもライフサイクルコストが低減でき、また供用年数により採用すべきリスクマネジメント手法が異なり、供用年数が長いほどリスク低減が有利になり、逆に供用年数が短いほどリスク移転が有利になることが示されている。諏訪ら<sup>6)</sup>は、地震リスクマネジメントの手段として、耐震建物、免震建物、耐震建物に住宅向けの地震保険を付保した3ケースを設定して、建物の地震ライフサイクルコストを比較検討している。その結果、地震ライフサイクルコストは、耐震建物に地震保険を付保しても耐震建物とほぼ同等か高くなり、供用期間が長くなるに従い、新築費用は耐震建物よりも高いが免震建物が最も地震ライフサイクルコストを安くできることを示している。

地震保険を考慮した地震ライフサイクルコストをより精度高く評価するには、受け取る保険金に対して支払う保険料の設定が重要になる。日本の地震保険は、住宅向けと企業向けに大別される。住宅向けの地震保険は、保険会社の再保険を国が負担する形になっているが、企業向けの地震保険は保険会社がさらに再保険会社に依頼することが多い。従って、現状の企業向けの地震保険では、給付反給付の原則は成立せず、支払う保険料が受け取る保険金よりもかなり割高になっている。この原因として、地震被害の発生確率や支払い件数にバラツキが大きく、保険会社がリスク回避をしようとする傾向が強いことが考えられる。現状では、地震保険料を年損失期待値の係数倍で設定する方法<sup>5)</sup>もあるが、係数倍することによるリスク回避の程度や安全性の向上については定量的に検討されていない。

地震リスクのバラツキを減少させる一手法として、ポートフォリオ（複数建物）を対象とした地震リスク評価法が提案されている。中村ら<sup>7)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクの特長として、多数の建物を対象にすることにより大数の法則により不確実性の低下を期待できること、および地震被害は広域的な相関を持つため、同時に被害を受けないだけの距離を置いた建物を対象とする、いわゆるリスク分散による効果があることを指摘している。

ところで、ポートフォリオを対象とした地震リスクを評価するとき、建物間における損失発生の相関性が重要になる。一般的に、ポートフォリオの地震リスクを評価するときは、損失発生の相関性を独立と仮定するケースが多いが、伝播特性のバラツキなど、完全に独立と仮定できない場合も存在する。このため、諏訪ら<sup>8)~10)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクを評価するときには、個々の建物における損失発生の相関性が重要であることを指摘し、損失発生が完全相関と独立の2種類を設定して、損失発生の相関性がポートフォリオ地震リスク曲線に与える影響を定量的に評価している。林ら<sup>11)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクを評価するとき、建物の配置状況のほかに地震動強度の空間的な相関性があることを指摘している。このため、距離減衰式から計算した地震動強さの不確定性を、地震間のバラツキと地震内のバラツキに分離し、地震内

のバラツキは離間距離に応じた相関を与えて、ポートフォリオ地震リスクの比較を行っている。このように、ポートフォリオを対象とした地震リスクは評価されているが、地震動評価に伴う不確定要因を分離した上で、不確定要因による相関性を考慮した検討は行われていない。

7章では、地震リスクのバラツキを低減させる一手法として、ポートフォリオを対象とした地震リスクに着目し、相関性を考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を構築する。まず、地表面最大速度の推定に伴う不確定要因を、震源特性、伝播特性、地盤特性に分離し、2地点間における地表面最大速度の相関性を、震源特性を完全相関、伝播特性を2地点間における離間距離による相関係数、地盤特性を独立にモデル化して、地震に対するポートフォリオの損失分布を評価する。つぎに、地震リスク対策としてリスク転嫁に着目し、保険会社のリスク回避の傾向を効用関数を用いてモデル化し、効用関数に基づいた地震保険料の評価法を構築して、個別建物とポートフォリオを対象に地震保険料を計算する。さらに、地震リスク曲線を用いて効用関数と年超過確率の関係を求め、両者の関係について評価する。

## 7.2 ポートフォリオの地震リスク評価法

地表面最大速度の評価をする際の不確定要因を、震源特性、伝播特性、地盤特性の要因に分離し、建物間の損失発生の相関性を評価するとき、不確定要因の相関性を以下のようにする設定する。

- ・震源特性のバラツキ：完全相関
- ・伝播特性のバラツキ：2地点間における離間距離による相関性
- ・地盤特性のバラツキ：独立

### 7.2.1 建物間における損失発生の相関性

伝播特性のバラツキは、2地点間の離間距離により任意の相関性を有するため、建物*i*と建物*j*の損失発生の相関係数を評価する必要がある。このため、地震損失曲線を評価する際の建物の耐力は、建物間で互いに独立であると仮定し、地震損失曲線 $SL(V)$ を対数正規分布を用いて近似する。

$$\Phi\left(\frac{\ln V - \lambda_L}{\zeta_L}\right) = SL(V) \quad (7.1)$$

ここに、 $\lambda_L$ ：地震損失曲線の対数平均値

$\zeta_L$ ：地震損失曲線の対数標準偏差

このとき、 $SL(V)=0.5$ となるときの最大速度を $V_1$ とすると、地震損失曲線の対数平均値 $\lambda$ は(7.2)式より求められる。

$$\lambda_L = \ln V_1 \quad (7.2)$$

一方、 $SL(V)=0.1$ となるときの最大速度を $V_2$ とすると、地震損失曲線の対数標準偏差は(7.3)式より求められる。

$$\zeta_L = \frac{\ln V_2 - \lambda}{\Phi^{-1}[SL(V_2)]} \quad (7.3)$$

つぎに、建物*i*と建物*j*に対して、損失発生に対する限界状態関数 $Z$ は(7.4)式、(7.5)式となる。

$$Z_i = \frac{L_i}{V_i} \quad (7.4)$$

$$Z_j = \frac{L_j}{V_j} \quad (7.5)$$

ここに、 $L$ ：建物の損失率 ( $0 \leq L \leq 1$ )

$V$ ：地表面最大速度

(7.4)式と(7.5)式において、両辺の自然対数をとると、

$$\ln Z_i = \ln L_i - \ln V_i \quad (7.6)$$

$$\ln Z_j = \ln L_j - \ln V_j \quad (7.7)$$

ここで、 $Y=lnZ$ ,  $R=lnL$ ,  $Q=lnV$  と置換すると、確率変数  $Y, R, Q$  は正規分布に従うことになる。

$Y_i$  と  $Y_j$  の相関係数は、地表面最大速度が互いに相関を有するため、(7.8)式より計算される。

$$\begin{aligned} \rho[Y_i \cdot Y_j] &= \frac{E[(Y_i - \mu_{Yi})(Y_j - \mu_{Yj})]}{\sigma_{Yi} \times \sigma_{Yj}} \\ &= \frac{E[Y_i \times Y_j] - \mu_{Yi} \times \mu_{Yj}}{\sigma_{Yi} \times \sigma_{Yj}} \\ &= \frac{E[(R_i - Q_i)(R_j - Q_j)] - (\mu_{Ri} - \mu_{Qi})(\mu_{Rj} - \mu_{Qj})}{\sqrt{\sigma_{Ri}^2 + \sigma_{Qi}^2} \times \sqrt{\sigma_{Rj}^2 + \sigma_{Qj}^2}} \\ &= \frac{E[Q_i \cdot Q_j] - \mu_{Qi} \times \mu_{Qj}}{\sqrt{\sigma_{Ri}^2 + \sigma_{Qi}^2} \times \sqrt{\sigma_{Rj}^2 + \sigma_{Qj}^2}} \end{aligned} \quad (7.8)$$

従って、

$$\rho[Y_i \cdot Y_j] = \frac{\rho_{QiQj}\sigma_{Qi}\sigma_{Qj}}{\sqrt{\sigma_{Ri}^2 + \sigma_{Qi}^2} \times \sqrt{\sigma_{Rj}^2 + \sigma_{Qj}^2}} \quad (7.9)$$

ここで、変換した変数を戻すと、

$$\rho[\ln Z_i \cdot \ln Z_j] = \frac{\rho_{ViVj}\zeta_{Vi}\zeta_{Vj}}{\sqrt{\zeta_{Li}^2 + \zeta_{Vi}^2} \times \sqrt{\zeta_{Lj}^2 + \zeta_{Vj}^2}} \quad (7.10)$$

地表面最大速度  $V_i$  と  $V_j$  は対数正規分布に従うので、相関係数  $\rho_{ViVj}$  は(7.11)式で与えられる<sup>12)</sup>。

$$\rho_{ViVj} = \frac{\ln(1 + \rho_{ViVj}V_iV_j)}{\zeta_{Vi} \times \zeta_{Vj}} \quad (7.11)$$

ここに、 $V_v$  : 地表面最大速度の変動係数

従って、損失発生に対する限界状態関数の相関係数は、(7.11)式を(7.10)式に代入することにより評価される。

$$\rho[\ln Z_i \cdot \ln Z_j] = \frac{\ln(1 + \rho_{ViVj}V_iV_j)}{\sqrt{\zeta_{Li}^2 + \zeta_{Vi}^2} \times \sqrt{\zeta_{Lj}^2 + \zeta_{Vj}^2}} \quad (7.12)$$

## 7.2.2 ポートフォリオの損失分布

まず、地震が発生したとき、ポートフォリオの損失分布の平均値と標準偏差を求める。

地震 E の条件付き建物 j の損失分布の平均値は、(7.13)式から求められる。

$$\mu c_j = \int_0^{C_{Bj}} \{c \times f_j(c|E)\} dc \quad (7.13)$$

ここに、 $C_{Bj}$ ：建物 j の新築費用

ここで、 $f_j(c|E)$ は、地震 E の条件付き建物 j の損失分布の確率密度関数であり、地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数  $f_j(c|v)$ を、地震 E の条件付き地表面最大速度の確率密度関数  $f_j(v|E)$ で重み付け積分することで求められる。

$$f_j(c|E) = \int_0^{\infty} \{f_j(c|v) \times f_j(v|E)\} dv \quad (7.14)$$

$$\text{ここに、 } f_j(c|v) = \frac{1}{B(q, r)} \times \frac{C^{q-1} \times (C_{Bj} - C)^{r-1}}{C_{Bj}^{q+r-1}} \quad (7.15)$$

$C_B$ ：新築費用

$B(q, r)$ ：ベータ関数

$$f_j(v|E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_{Vj} V} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln V - \lambda_{Vj}}{\zeta_{Vj}} \right)^2 \right] \quad (7.16)$$

$\lambda_{Vj}$ ：建設地 j における地表面最大速度の対数平均値

$\zeta_{Vj}$ ：建設地 j における地表面最大速度の対数標準偏差

$$\lambda_{Vj} = \ln(a_j) + \ln(V_{0j}) \quad (7.17)$$

$a_j$ ：建設地 j における基準地盤に対する速度増幅率

$V_{0j}$ ：建設地 j における基準地盤の最大速度

$$\zeta_{Vj} = \sqrt{\zeta_{e_j}^2 + \zeta_{t_j}^2 + \zeta_{a_j}^2} \quad (7.18)$$

$\zeta_{e_j}$ ：建設地 j における震源特性の対数標準偏差

$\zeta_{t_j}$ ：建設地 j における伝播特性の対数標準偏差

$\zeta_{a_j}$ ：建設地 j における地盤特性の対数標準偏差

ここで、震源特性、伝播特性、地盤特性の対数標準偏差は、表 6.5 と同様に表 7.1 で設定する。

表 7.1 対数標準偏差の設定

震源特性 $\zeta_e$	伝播特性 $\zeta_t$	地盤特性 $\zeta_a$
0.4	0.23	0.4

つぎに、震源特性のバラツキのみを対象としたとき、地震Eの条件付き建物jの損失分布の標準偏差は、(7.19)式から求められる。

$$\sigma_{e_j} = \sqrt{\int_0^{C_{Bj}} \{(c - \mu c_j)^2 \times f_{e_j}(c|E)\} dc} \quad (7.19)$$

$$\text{ここに、 } f_{e_j}(c|E) = \int_0^{\infty} \{f_j(c|v) \times f_{e_j}(v|E)\} dv \quad (7.20)$$

$$f_{e_j}(v|E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{ej}V} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln V - \lambda_{vj}}{\zeta_{ej}}\right)^2\right] \quad (7.21)$$

また、伝播特性のバラツキのみを対象としたとき、地震Eの条件付き建物jの損失分布の標準偏差は、(7.22)式から求められる。

$$\sigma_{t_j} = \sqrt{\int_0^{C_{Bj}} \{(c - \mu c_j)^2 \times f_{t_j}(c|E)\} dc} \quad (7.22)$$

$$\text{ここに、 } f_{t_j}(c|E) = \int_0^{\infty} \{f_j(c|v) \times f_{t_j}(v|E)\} dv \quad (7.23)$$

$$f_{t_j}(v|E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{tj}V} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln V - \lambda_{vj}}{\zeta_{tj}}\right)^2\right] \quad (7.24)$$

同様に、地盤特性のバラツキのみを対象としたとき、地震Eの条件付き建物jの損失分布の標準偏差は、(7.25)式から求められる。

$$\sigma_{a_j} = \sqrt{\int_0^{C_{Bj}} \{(c - \mu c_j)^2 \times f_{a_j}(c|E)\} dc} \quad (7.25)$$

$$\text{ここに、 } f_{a_j}(c|E) = \int_0^{\infty} \{f_j(c|v) \times f_{a_j}(v|E)\} dv \quad (7.26)$$

$$f_{a_j}(v|E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{aj}V} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln V - \lambda_{vj}}{\zeta_{aj}}\right)^2\right] \quad (7.27)$$

ポートフォリオを対象とした損失Tは、個別建物の損失  $C_j$  ( $j=1 \sim m$ ) の和より求められる。

$$T = \sum_{j=1}^m C_j \quad (7.28)$$

ここに、 $m$ ：ポートフォリオを構成する建物の総数

従って、地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布の平均値 $\mu_T$ は、(7.13)式の地震Eの条件付き建物 $j$ の損失分布の平均値を用いて求められる。

$$\mu_T = \sum_{j=1}^m \mu c_j \quad (7.29)$$

ここに、 $\mu c_j$ ：地震Eの条件付き建物 $j$ の損失分布の平均値

また、地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布の標準偏差 $\sigma_T$ は、(7.19)式、(7.22)式ならびに(7.25)式の地震Eの条件付き建物 $j$ の損失分布の標準偏差を用いて求められる。

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{ \sigma_{ei} \times \sigma_{ej} \} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{ \rho_{ij} \times \sigma_{ti} \times \sigma_{tj} \} + \sum_{i=1}^m \sigma_{ai}^2} \quad (7.30)$$

ここに、 $\sigma_e$ ：震源特性のバラツキによる損失分布の標準偏差

$\sigma_t$ ：伝播特性のバラツキによる損失分布の標準偏差

$\sigma_a$ ：地盤特性のバラツキによる損失分布の標準偏差

(7.30)式において、 $\rho_{ij}$ は建物 $i$ と建物 $j$ における損失発生の相関係数であり、(7.12)式より求められる。

$$\rho_{ij} = \frac{\ln(1 + \rho_{tij} V_{ti} V_{tj})}{\sqrt{\zeta_{Li}^2 + \zeta_{Lj}^2} \times \sqrt{\zeta_{Lj}^2 + \zeta_{Lj}^2}} \quad (7.31)$$

ここに、 $\rho_{tij}$ ：2地点間の離間距離による相関係数

$\zeta_L$ ：地震損失曲線の対数標準偏差

$\zeta_t$ ：伝播特性の対数標準偏差

$V_t$ ：伝播特性の変動係数

(7.31)式において、伝播特性の変動係数 $V_t$ は、伝播特性の対数標準偏差 $\zeta_t$ を用いて(7.32)式より求められる。

$$V_t = \sqrt{\exp(\zeta_t^2) - 1} \quad (7.32)$$

地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布を、ポートフォリオを構成する建物の新築費用  $C_{Bj}$  ( $j=1 \sim m$ ) の和  $C_M$  を上限値としたベータ分布でモデル化<sup>13)</sup> する。このとき、地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布の確率密度関数  $f(t|E)$  は、(7.29)式のポートフォリオの損失分布の平均値  $\mu_T$  と、(7.30)式のポートフォリオの損失分布の標準偏差  $\sigma_T$  を用いて求められる。

$$f(t|E) = \frac{1}{B(q, r)} \times \frac{t^{q-1} \times (C_M - t)^{r-1}}{C_M^{q+r-1}} \quad (7.33)$$

$$\text{ここに、 } C_M = \sum_{j=1}^m C_{Bj} \quad (7.34)$$

$$q = \frac{(\mu_T - C_M)}{C_M} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_T \times (\mu_T - C_M)}{\sigma_T^2} \right\} \quad (7.35)$$

$$r = -\frac{\mu_T}{C_M} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_T \times (\mu_T - C_M)}{\sigma_T^2} \right\} \quad (7.36)$$

このとき、地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布の期待値  $E[T|E]$  は、(7.33)式の地震Eの条件付きポートフォリオの損失分布の確率密度関数  $f(t|E)$  を用いて求められる。

$$E[T|E] = \int_0^{C_M} \{t \times f(t|E)\} dt \quad (7.37)$$

一方、地震Eの条件付き90%非超過確率に相当する損失  $T_{0.9}$  は、(7.38)式を満足するよう  $T_{0.9}$  を逆算することで求められる。

$$\int_0^{T_{0.9}} f(t|E) dt = 0.9 \quad (7.38)$$

考慮される全ての地震  $E_i$  ( $i = 1 \sim N$ ) に対して、地震Eの条件付きポートフォリオ損失額  $t$  の超過確率  $P(T > t|E)$  は、考慮したいずれかの地震でポートフォリオ損失額  $t$  が超過しても対象となるので、地震  $E_i$  ごとにポートフォリオ損失額  $t$  の超過する事象の和事象として評価される。

$$\begin{aligned} P(T > t|E) &= \Pr ob[(T > t|E_1) \cup (T > t|E_2) \cup \dots \cup (T > t|E_N)] \\ &= 1 - \Pr ob[\overline{(T > t|E_1) \cup (T > t|E_2) \cup \dots \cup (T > t|E_N)}] \\ &= 1 - \Pr ob[(T < t|E_1) \cap (T < t|E_2) \cap \dots \cap (T < t|E_N)] \end{aligned} \quad (7.39)$$

ここで、地震  $E_i$  ( $i = 1 \sim N$ ) の発生が互いに独立であると仮定すると、地震Eの条件付きポートフォリオ損失額  $t$  の超過確率  $P(T > t|E)$  は、(7.40)式より求められる。

$$P(T > t | E) = 1 - \prod_{i=1}^N \{1 - \Pr ob[T > t | E_i]\} \quad (7.40)$$

ここに、N：考慮される地震の総数

つぎに、地震発生を定常ポアソン過程でモデル化すると、地震E<sub>i</sub>の年発生確率  $\Pr ob[E_i]$  は、(7.41)式より求められる。

$$\Pr ob[E_i] = 1 - \exp(-\nu_i) \quad (7.41)$$

ここに、 $\nu_i$ ：地震E<sub>i</sub>の年平均発生率

以上により、ポートフォリオ損失額tの年超過確率  $P(T > t)$  は、(7.40)式と(7.41)式を用いて求められる。

$$\begin{aligned} P(T > t) &= 1 - \prod_{i=1}^N [1 - \{\Pr ob[T > t | E_i] \times \Pr ob[E_i]\}] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \left\{ \left( \int_{C_M}^t f(t | E_i) dt \right) \times (1 - \exp(-\nu_i)) \right\} \right] \end{aligned} \quad (7.42)$$

ここで、 $f(t | E_i)$  は地震E<sub>i</sub>の条件付きポートフォリオの損失分布の確率密度関数であり、(7.33)式より求められる。

### 7.3 効用関数を用いた地震保険料の評価法

地震保険は、住宅向けとこれ以外の企業向けに大別される。住宅向けの地震保険は、保険会社の再保険を国が負担する形になっているが、企業向けの地震保険は保険会社がさらに再保険会社に依頼することが多い。従って、現状の企業向けの地震保険では、(7.43)式に示す給付反給付の原則<sup>14)</sup>は成立せず、支払う保険料が受け取る保険金よりも割高になる傾向がある。

$$C \geq \frac{n}{N} \times Z \quad (7.43)$$

ここに、C：支払う地震保険料

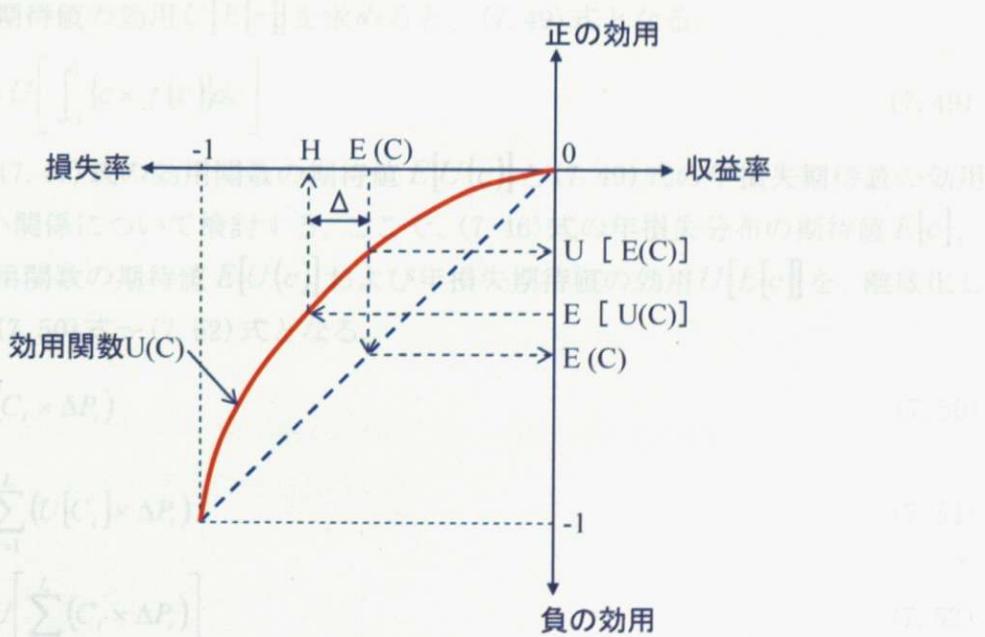
Z：受け取る地震保険金

N：地震保険の加入者数

n：地震保険の支払い数

この原因として、地震被害の発生確率や支払い件数にはバラツキが大きく、保険会社がリスク回避をする傾向が強いことが考えられる。このため、リスク回避の傾向を効用関数を用いてモデル化し、地震リスクプレミアムに関して評価する。

地震リスクプレミアムを、リスク回避指向を表現した効用関数<sup>14)~17)</sup>を用いて評価する。収益率を正で、収益を得ることによる効用を正で、また損失率を負で、損失を得ることによる効用を負で表現する。地震リスクは、損失のみが生じる純粋リスクなので、損失率および効用とともに負で表現される。ただし、損失率 C は  $-1 \leq C \leq 0$  で、効



(7.52)式において、効用関数の形を(7.53)式のを参考構成す

用関数の値域は $-1 \leq U(C) \leq 0$ となるように基準化する。リスク回避をするため、同額だけ損失が減少することよりも、同額だけ損失が増加することを重視するため、限界効用遞減の法則<sup>14) ~ 16)</sup>が成立する。従って、効用関数 $U(C)$ の形状は、図7.1に示すように上に凸となる。リスク回避型であるとき、効用関数 $U(c)$ は、(7.44)式と(7.45)式の条件を満足する<sup>16)</sup>。

$$\frac{d}{dc}U(c) \geq 0 \quad (7.44)$$

$$\frac{d^2}{dc^2}U(c) \leq 0 \quad (7.45)$$

地震による年損失分布の期待値 $E[c]$ は、年損失分布の確率密度関数 $f(c)$ を用いて計算される。

$$E[c] = \int_{-1}^0 \{c \times f(c)\} dc \quad (7.46)$$

また、地震リスクを保有することによる効用関数の期待値 $E[U(c)]$ は、(7.47)式より求められる。

$$E[U(c)] = \int_{-1}^0 \{U(c) \times f(c)\} dc \quad (7.47)$$

効用関数の形状が上に凸であるため、必ず $U(C) > C$ が成立する。従って、(7.46)式と(7.47)式の大小関係は(7.48)式となる。

$$E[U(c)] \geq E[c] \quad (7.48)$$

一方、年損失期待値の効用 $U[E[c]]$ を求めるとき、(7.49)式となる。

$$U[E[c]] = U \left[ \int_{-1}^0 \{c \times f(c)\} dc \right] \quad (7.49)$$

このとき、(7.47)式の効用関数の期待値 $E[U(c)]$ と(7.49)式の年損失期待値の効用 $U[E[c]]$ の大小関係について検討する。ここで、(7.46)式の年損失分布の期待値 $E[c]$ 、(7.47)式の効用関数の期待値 $E[U(c)]$ および年損失期待値の効用 $U[E[c]]$ を、離散化して表現すると(7.50)式～(7.52)式となる。

$$E[c] \approx \sum_{i=1}^L (C_i \times \Delta P_i) \quad (7.50)$$

$$E[U[c]] \approx \sum_{i=1}^L (U[C_i] \times \Delta P_i) \quad (7.51)$$

$$U[E[c]] \approx U \left[ \sum_{i=1}^L (C_i \times \Delta P_i) \right] \quad (7.52)$$

(7.52)式において、効用関数の形状が上に凸であるため、(7.53)式の不等号が成立す

る。

$$U\left[\sum_{i=1}^L (C_i \times \Delta P_i)\right] \geq \sum_{i=1}^L U[C_i \times \Delta P_i] \quad (7.53)$$

一方、 $\Delta P_i$  が  $0 < \Delta P_i < 1$  の範囲にあるので、(7.54)式の不等号が成立する。

$$U[C_i \times \Delta P_i] \geq U[C_i] \times \Delta P_i \quad (7.54)$$

ここで、(7.54)式を  $i=1 \sim L$  まで合計すると、(7.55)式となる。

$$\sum_{i=1}^L U[C_i \times \Delta P_i] \geq \sum_{i=1}^L (U[C_i] \times \Delta P_i) \quad (7.55)$$

従って、(7.53)式と(7.55)式を用いて、(7.56)式の不等号が成立する。

$$U\left[\sum_{i=1}^L (C_i \times \Delta P_i)\right] \geq \sum_{i=1}^L (U[C_i] \times \Delta P_i) \quad (7.56)$$

離散化された状態の(7.56)式を、(7.51)式と(7.52)式を用いてもとに戻すと、(7.57)式となる。

$$U[E[c]] > E[U(c)] \quad (7.57)$$

(7.57)式において、両者の差がリスクプレミアム  $\Delta$  となる<sup>14) ~ 17)</sup>。(7.57)式の両辺を等値にするため、リスクプレミアム  $\Delta$  を用いると、

$$U[E[c] - \Delta] = E[U(c)] \quad (7.58)$$

となる。ここで、(7.58)式をリスクプレミアム  $\Delta$  に対して求めると、(7.59)式が求められる。

$$\Delta = E[c] - U^{-1}[E[U(c)]] \quad (7.59)$$

(7.59)式において、

$$H = U^{-1}[E[U(c)]] \quad (7.60)$$

とすると、 $H$ がいわゆる確実性等価となる。リスク回避型であるとき、確定的な損失  $H$  は、ばらつきを伴う損失期待値  $E[c]$  よりも大きい、すなわち損失を大きく見積もることになる。

このとき、効用関数を用いた地震保険料  $RE$  は、年損失期待値  $E[c]$  に(7.59)式のリスクプレミアム  $\Delta$  を加算することで定義する。

$$RE = |E[c]| + \Delta \quad (7.61)$$

## 7.4 地震保険料の検討

### 7.4.1 解析条件

#### (1) 離間距離による相関係数

7.2 節では、2 地点間における伝播特性のバラツキを、離間距離による相関係数を用いて評価することにした。しかし、現状では、離間距離による相関係数を解析的に評価することは難しく、ある特定の地震に対して高密度に観測された強震記録に基づいた回帰式が作成されている。高田ら<sup>18)</sup>は、1999 年の台湾集集地震で得られた高密度な観測記録を用いて、地震動強さの平均減衰特性からの偏差量の空間相関モデルを提案している。このとき、司・翠川の速度距離減衰式を用いた場合、2 地点間の離間距離に応じた相関係数  $\rho_{tij}$  を、(7.62) 式で提案している。

$$\rho_{tij} = \exp\left(-\frac{h}{28.1}\right) \quad (7.62)$$

ここに、 $h$  : 2 地点間の離間距離(km)

図 7.2 基準地盤に対する相関係数

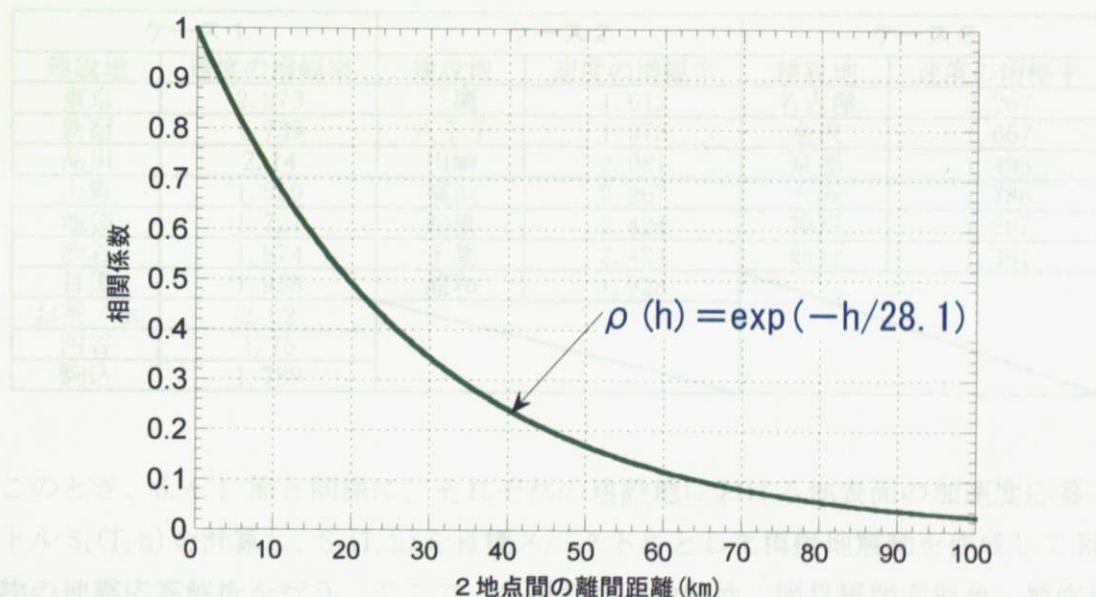


図 7.2 離間距離による相関係数

#### (2) 建設地および建物モデルの設定

ポートフォリオを構成する建設地として、離間距離による相関性がポートフォリオ地震リスクに与える影響を検討するため、表 7.2 に示した 3 ケースを設定する。

$$U(c) = -(-C)^{\alpha} \quad (\text{ただし、} c < 0)$$

このとき、係数  $\alpha$  (ただし、 $c < 0$ ) が大きくなるほど、リスク回避の傾向が強くなる。ここで、損失率と効用の関係を、係数  $\alpha$  をパラメトリックに変化させて図 7.3 に示す。

表 7.2 ポートフォリオの設定

	離間距離による 相関性の影響	地域	建設地
ケース 1	大	東京	東京, 新宿, 品川, 上野, 池袋, 渋谷, 目黒, お茶の水, 四谷, 駒込の計10棟
ケース 2	中	首都圏	東京, 新宿, 品川, 三鷹, 八王子, 川崎, 横浜, 船橋, 千葉, 浦和の計10棟
ケース 3	小	全国	東京, 横浜, 千葉, 浦和, 名古屋, 金沢, 京都, 大阪, 神戸, 仙台の計10棟

このとき、基準地盤に対する速度増幅率は、国土数値情報を用いた手法<sup>19)</sup>により表 7.3 のように設定する。

表 7.3 基準地盤に対する速度増幅率

ケース 1		ケース 2		ケース 3	
建設地	速度の増幅率	建設地	速度の増幅率	建設地	速度の増幅率
東京	2.273	三鷹	1.612	名古屋	2.267
新宿	1.739	八王子	1.373	金沢	1.667
品川	2.14	川崎	2.081	京都	1.495
上野	1.859	横浜	2.267	大阪	1.786
池袋	1.727	船橋	2.424	神戸	1.667
渋谷	1.874	千葉	2.424	仙台	1.361
目黒	1.958	浦和	1.928		
お茶の水	2.02				
四谷	1.76				
駒込	1.789				

このとき、6.4.1 節と同様に、それぞれの建設地における地表面の加速度応答スペクトル  $S_A(T, h)$  を計算し、 $S_A(T, h)$  を目標スペクトルとした模擬地震動を作成して RC 造建物の地震応答解析を行う。ここで、各層の復元力特性、限界層間変形角、補修費用は、全ての建設地に対して、6.4.1 節で設定した値を同一に用いる。

### (3) 効用関数の設定

効用関数  $U(c)$  の形状としては、さまざまな形が考えられるが、リスク回避指向の条件を満足する関数として(7.63)式を設定する。

$$U(c) = -(-C)^\alpha \quad (\text{ただし, } c < 0) \quad (7.63)$$

このとき、係数  $\alpha$  (ただし、 $\alpha > 1$ ) が大きくなるほど、リスク回避の傾向が強くなる。ここで、損失率と効用の関係を、係数  $\alpha$  をパラメトリックに変化させて図 7.3 に示す。

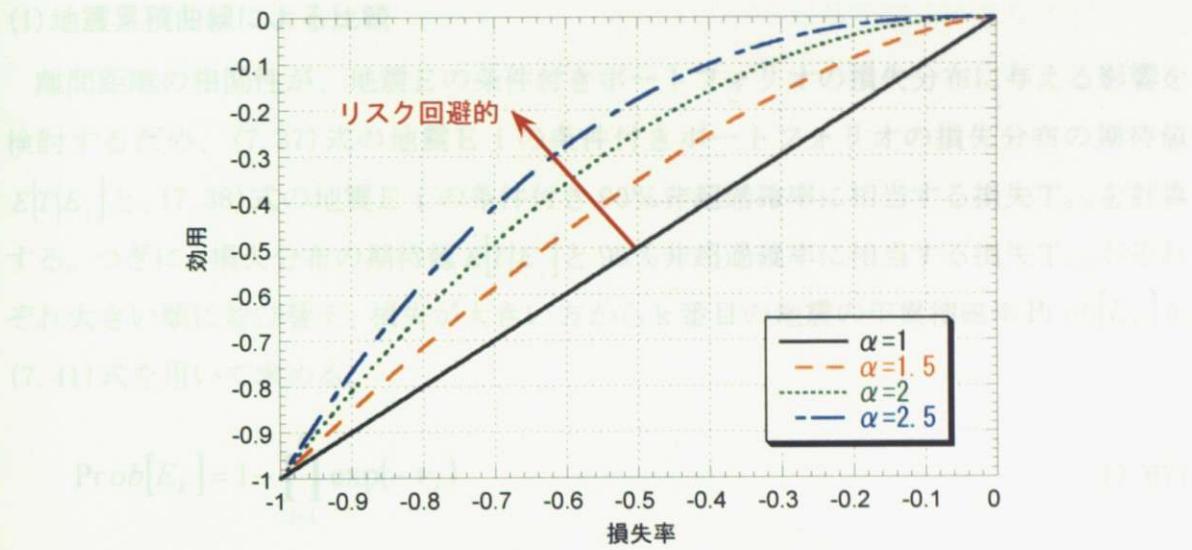


図 7.3 効用関数の設定

#### 7.4.2 離間距離による相関性の影響

離間距離による相関係数を評価するとき、1999 年の台湾集集地震における高密度な観測記録に基づき作成された回帰式<sup>18)</sup>を用いている。このため、回帰式まわりのバラツキも大きいため、離間距離による相関係数のバラツキが、ポートフォリオの地震リスク評価に与える影響について検討しておく必要がある。このため、離間距離による相関係数が、独立と完全相関のケースについても評価する。このとき、ポートフォリオを対象とした損失分布の標準偏差  $\sigma_T$  は、独立、完全相関、離間距離の各ケースに対して(7.64)式～(7.66)式より計算される。

$$\cdot \text{独立} : \sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{\sigma_{ei} \times \sigma_{ej}\} + \sum_{i=1}^m \sigma_{ti}^2 + \sum_{i=1}^m \sigma_{ai}^2} \quad (7.64)$$

$$\cdot \text{完全相関} : \sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{\sigma_{ei} \times \sigma_{ej}\} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{\sigma_u \times \sigma_y\} + \sum_{i=1}^m \sigma_{ai}^2} \quad (7.65)$$

$$\cdot \text{離間距離} : \sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{\sigma_{ei} \times \sigma_{ej}\} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{\rho_{ij} \times \sigma_u \times \sigma_y\} + \sum_{i=1}^m \sigma_{ai}^2} \quad (7.66)$$

ここに、  
 $\sigma_e$ ：震源特性のバラツキによる損失分布の標準偏差  
 $\sigma_t$ ：伝播特性のバラツキによる損失分布の標準偏差  
 $\sigma_a$ ：地盤特性のバラツキによる損失分布の標準偏差  
 $m$ ：ポートフォリオを構成する建物総数

## (1) 地震累積曲線による比較

離間距離の相関性が、地震  $E_i$  の条件付きポートフォリオの損失分布に与える影響を検討するため、(7.37)式の地震  $E_i$  の条件付きポートフォリオの損失分布の期待値  $E[T|E_i]$  と、(7.38)式の地震  $E_i$  の条件付き 90% 非超過確率に相当する損失  $T_{0.9}$  を計算する。つぎに、損失分布の期待値  $E[T|E_i]$  と 90% 非超過確率に相当する損失  $T_{0.9}$  がそれぞれ大きい順に並び替え、損失が大きい方から  $k$  番目の地震の年累積確率  $Prob[E_k]$  を、(7.41)式を用いて求める。

$$Prob[E_k] = 1 - \prod_{i=1}^k \exp(-\nu_i) \quad (7.67)$$

ここに、 $\nu_i$ ：地震  $E_i$  の年平均発生率

このとき、地震  $E_k$  の条件付きポートフォリオの損失分布の期待値  $E[T|E_k]$  と地震の年累積確率  $Prob[E_k]$  の関係、ならびに地震  $E_k$  の条件付きポートフォリオの損失分布の 90% 非超過確率に相当する損失  $T_{0.9}$  と  $Prob[E_k]$  の関係を、ケース 1～ケース 3 に対して図 7.4 に示す。図中には、離間距離による相関性が、独立と完全相関の場合も併せて示している。離間距離による相関係数が変化しても、損失分布のバラツキのみが変動するので、ポートフォリオの損失分布の期待値  $E[T|E_k]$  は、全てのケースに対して完全に一致している。一方、ポートフォリオの損失分布の 90% 非超過確率に相当する損失  $T_{0.9}$  を見ると、離間距離による地震累積曲線は、独立のそれとほぼ一致していることがわかる。また、離間距離によるバラツキの減少が期待できない完全相関の場合でも、離間距離による相関性を設定した場合との差異は小さく、両者の差異が大きくなるのは地震の年累積確率が約 1/500 以下の領域である。

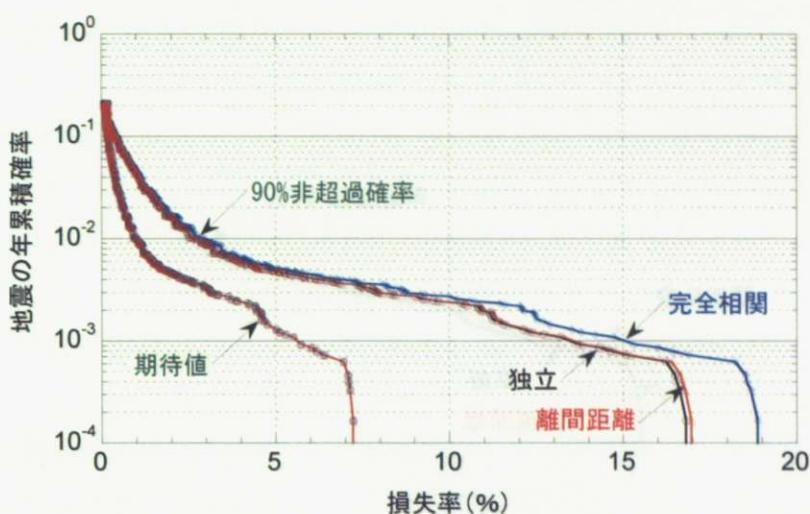
ところで、震源特性と伝播特性の対数標準偏差は、震源特性の対数標準偏差を 0.4 に設定して、伝播特性の対数標準偏差を (6.5) 式から求めた。しかし、震源特性と伝播特性の対数標準偏差は、地震のタイプや伝播経路の特性により変動する可能性がある。このため、震源特性と伝播特性の対数標準偏差を、

- ・震源特性の対数標準偏差： $\zeta_e = 0.23$

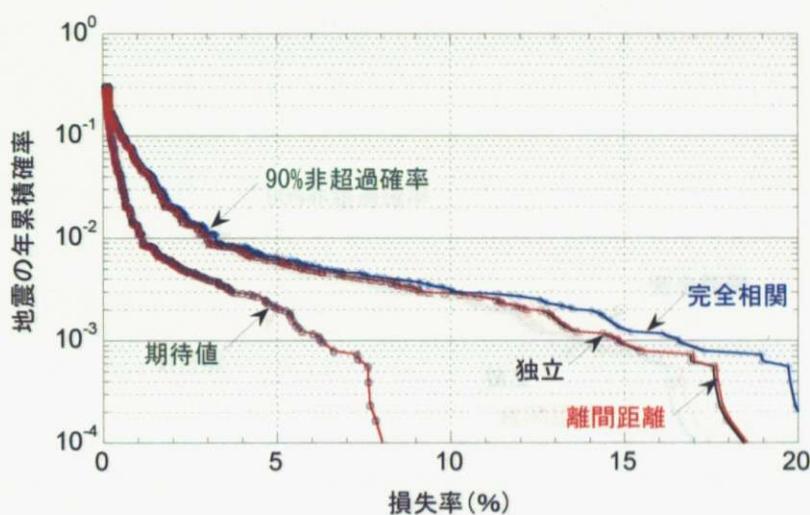
- ・伝播特性の対数標準偏差： $\zeta_t = 0.4$

に設定し、ケース 1～ケース 3 に対して地震累積曲線を評価すると図 7.5 となる。伝播特性の対数標準偏差を 0.23 から 0.4 に設定したので、離間距離と完全相関の地震累積曲線の差異が図 7.4 と比較して大きくなっている。また、ケース 1 とケース 2 では、離間距離と独立の地震累積曲線の差異も、地震の年累積確率が約  $10^{-3}$  以下の領域では

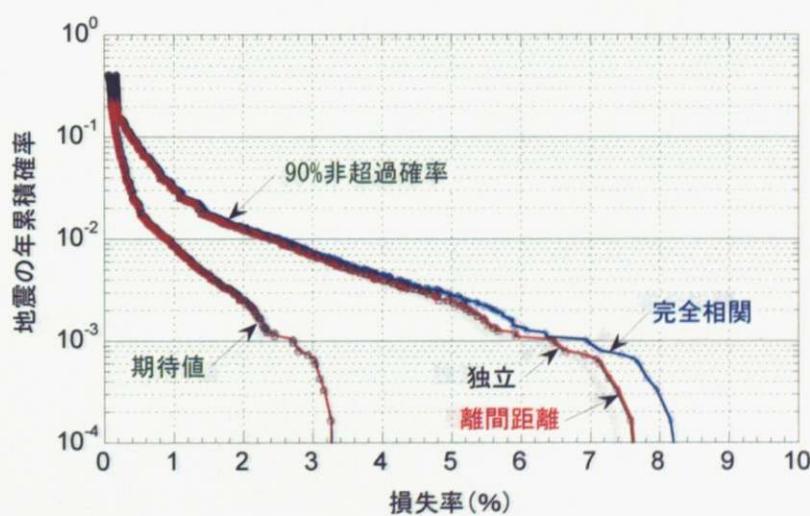
大きくなる傾向が見られる。従って、ポートフォリオの地震累積曲線を評価するときは、とくに地震の年累積確率が小さい領域において、離間距離による相関性の設定が重要になるといえる。



(a) ケース 1

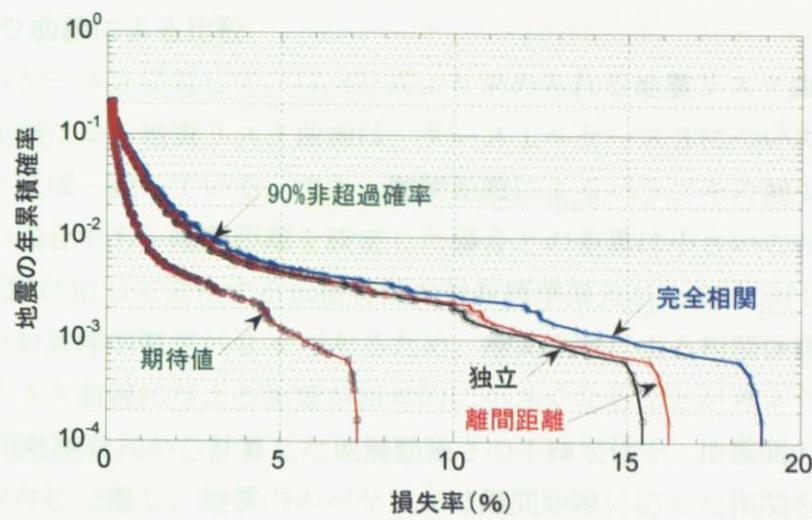


(b) ケース 2

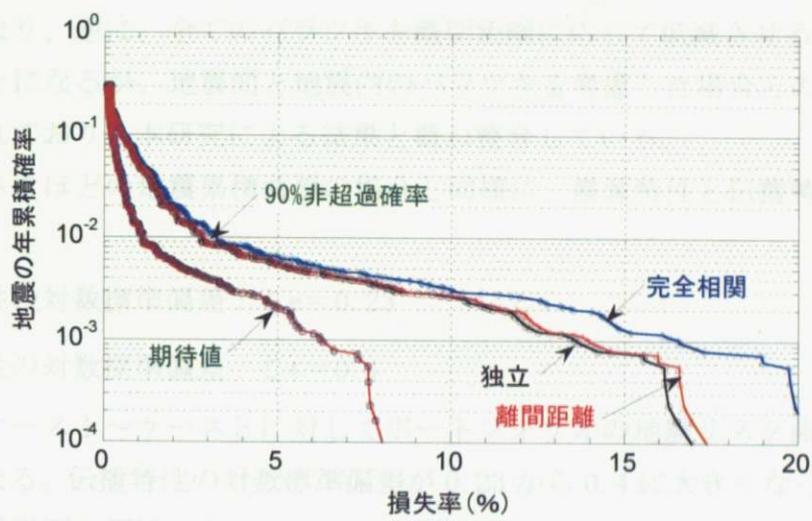


(c) ケース 3

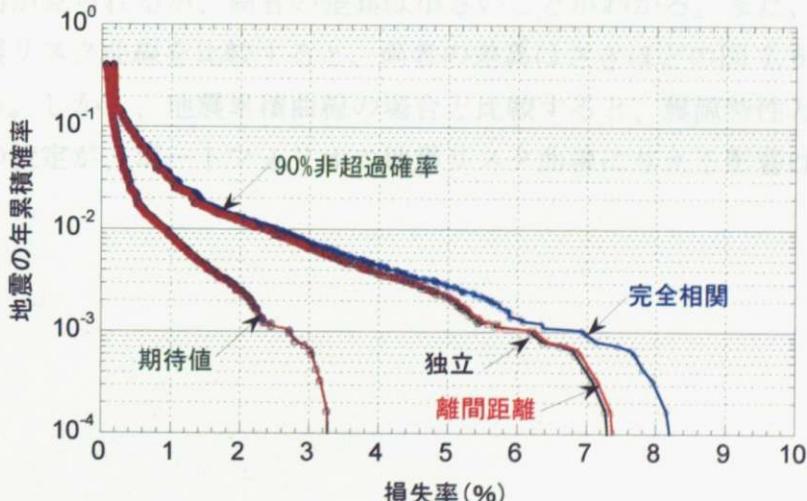
図 7.4 ポートフォリオを対象とした地震累積曲線の比較  
(震源特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.4$ , 伝播特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.23$ )



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図 7.5 ポートフォリオを対象とした地震累積曲線の比較  
(震源特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.23$ , 伝播特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.4$ )

## (2) 地震リスク曲線による比較

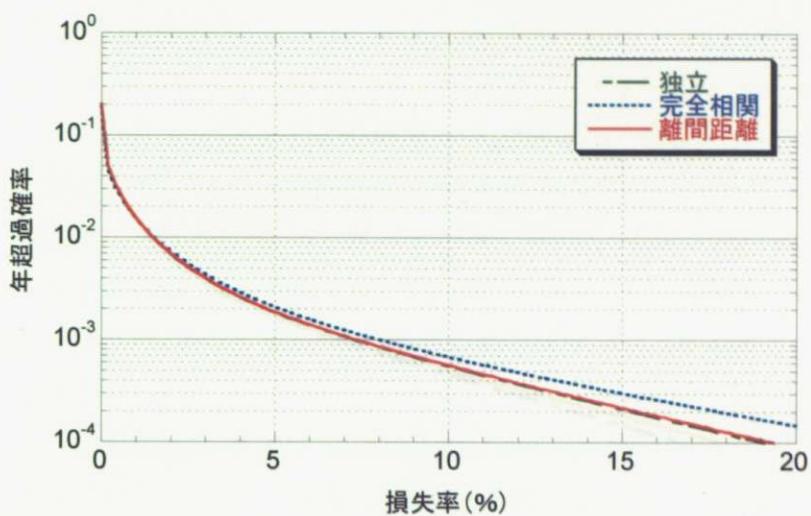
ケース1～ケース3に対して、(7.42)式より求められる地震リスク曲線を図7.6に示す。離間距離による地震リスク曲線は、ケース1～ケース3について、独立の地震リスク曲線とほぼ一致している。また、離間距離によるバラツキの減少が期待できない完全相関の場合でも、離間距離を設定した場合との差異は小さいことがわかる。これは、離間距離に応じて変化する伝播特性の対数標準偏差が0.23に対して、震源特性と地盤特性の対数標準偏差が0.4であるため、離間距離による相関係数がポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響が相対的に小さくなることが考えられる。一方、林ら<sup>11)</sup>も、距離減衰式から計算した地震動強さの不確定性を、地震間のバラツキと地震内のバラツキに分離し、地震内のバラツキは離間距離に応じた相関を与えて、ポートフォリオ地震リスクの比較を行っている。完全相関を仮定すると、PMLを過大評価することになり、逆に、全てのバラツキを離間距離に応じて低減させるとPMLを過小評価することになるが、地震間と地震内のバラツキを考慮した場合との差異は小さいことが示されており、本研究による結果と概ね整合している。

つぎに、さきほどの地震累積曲線の場合と同様に、震源特性と伝播特性の対数標準偏差を、

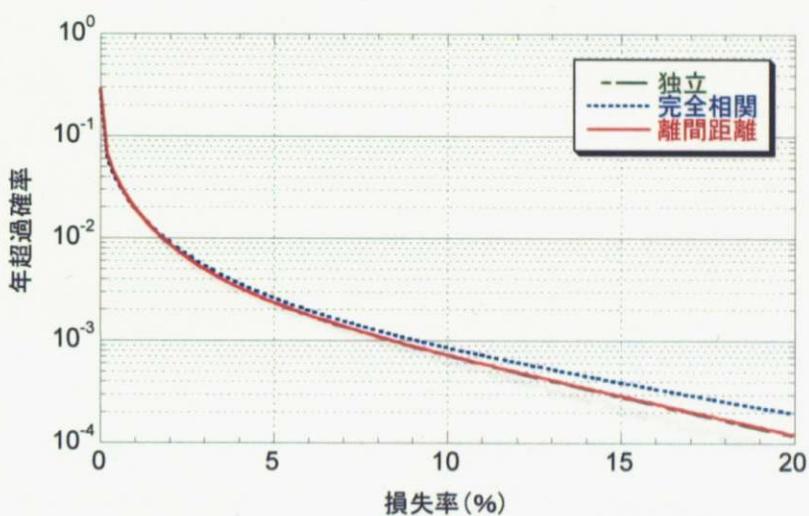
- ・震源特性の対数標準偏差： $\zeta_e = 0.23$

- ・伝播特性の対数標準偏差： $\zeta_t = 0.4$

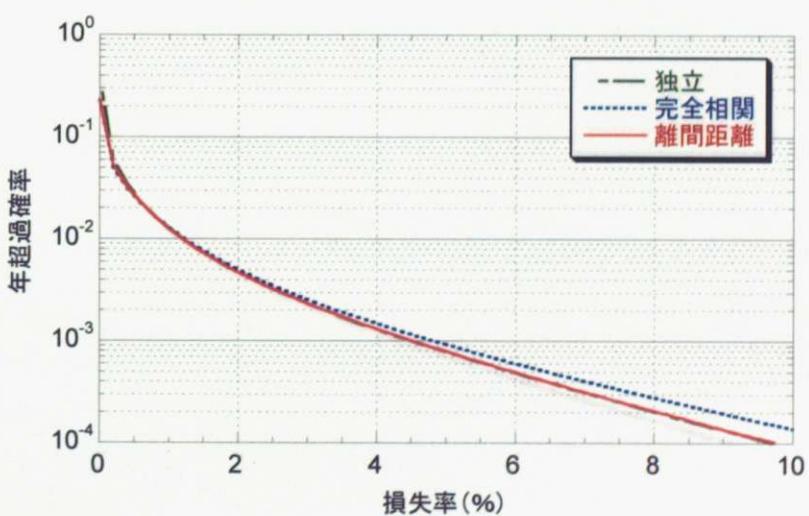
に設定し、ケース1～ケース3に対してポートフォリオの地震リスク曲線を評価すると図7.7となる。伝播特性の対数標準偏差が0.23から0.4に大きくなつたので、年超過確率が $10^{-3}$ 以下の領域において、独立と離間距離による損失率が図7.6より若干小さくなる傾向が見られるが、両者の差異は小さいことがわかる。また、完全相関と離間距離の地震リスク曲線を比較すると、両者の差異はさきほどの図7.6の結果より若干大きくなる。しかし、地震累積曲線の場合と比較すると、震源特性と伝播特性の対数標準偏差の設定が、ポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響は小さいことが確認された。



(a) ケース 1

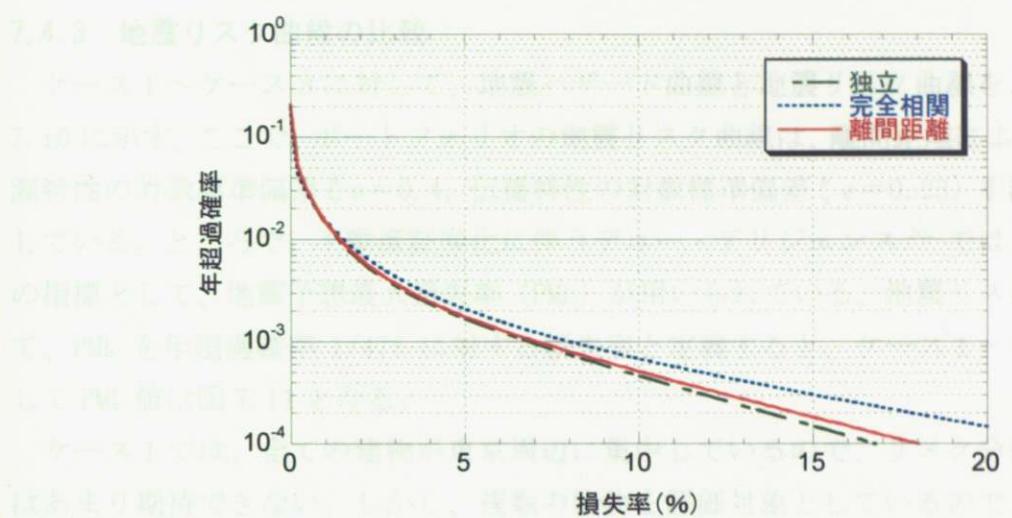


(b) ケース 2

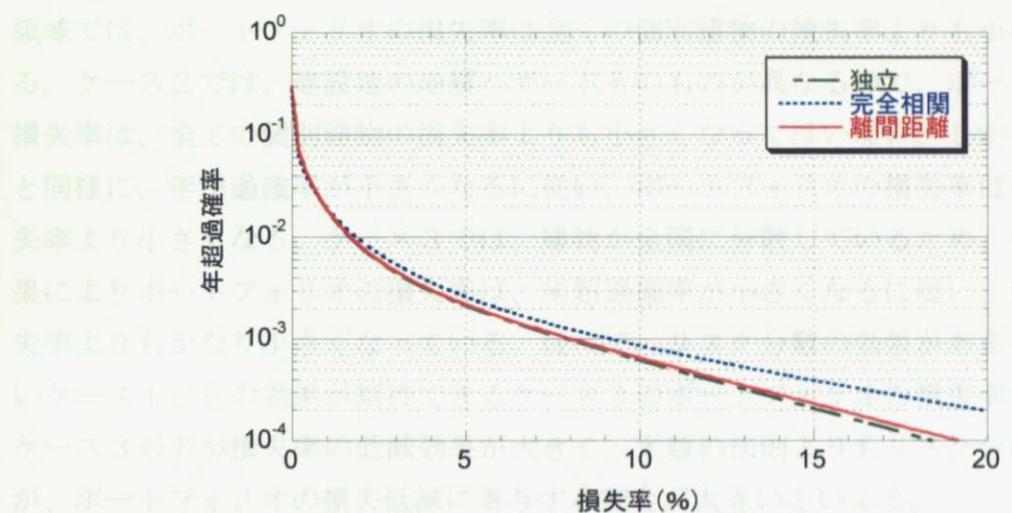


(c) ケース 3

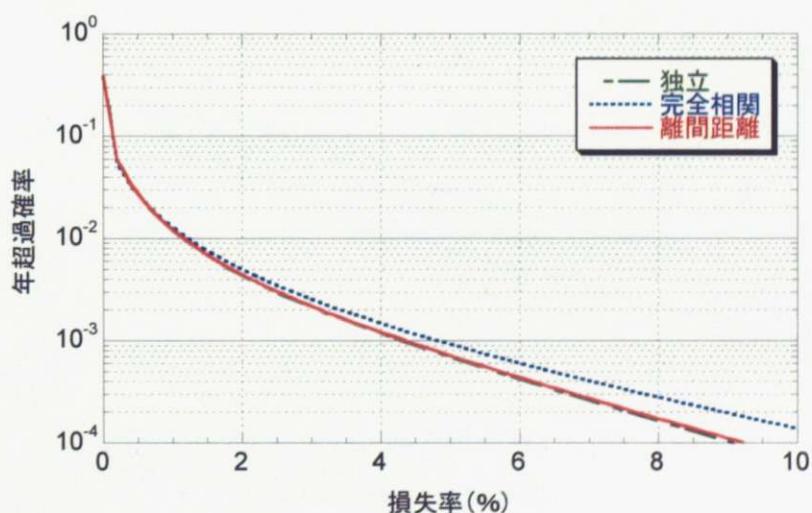
図 7.6 ポートフォリオを対象とした地震リスク曲線の比較  
(震源特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.4$ , 伝播特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.23$ )



(a) ケース 1



(b) ケース 2



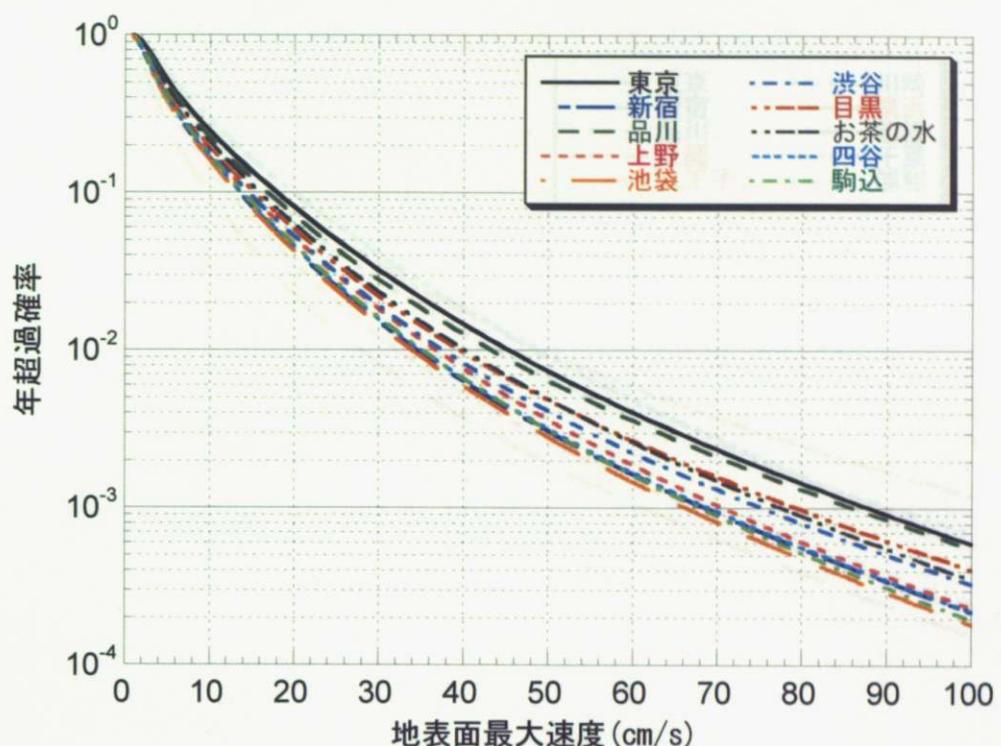
(c) ケース 3

図 7.7 ポートフォリオを対象とした地震リスク曲線の比較  
(震源特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.23$ , 伝播特性の対数標準偏差  $\zeta_e = 0.4$ )

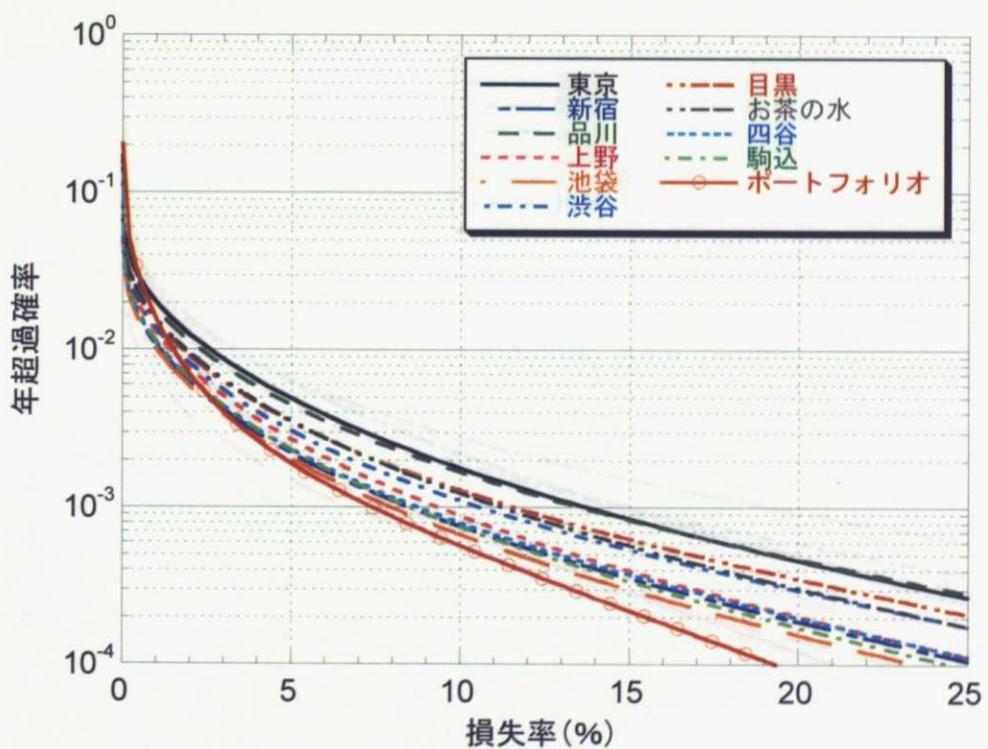
### 7.4.3 地震リスク曲線の比較

ケース1～ケース3に対して、地震ハザード曲線と地震リスク曲線を、図7.8～図7.10に示す。ここで、ポートフォリオの地震リスク曲線は、離間距離による相関性（震源特性の対数標準偏差 $\zeta_e=0.4$ 、伝播特性の対数標準偏差 $\zeta_e=0.23$ ）を設定して評価している。ところで、不動産証券化に伴うデュー・デリジエンス<sup>20)</sup>では、地震リスクの指標として、地震予想最大損失率（PML）が用いられている。地震リスク曲線において、PMLを年超過確率1/475に対する損失率と定義すると、ケース1～ケース3に対してPML値は図7.11となる。

ケース1では、全ての建物が東京周辺に集中しているので、リスク分散による効果はあまり期待できない。しかし、複数の建物を評価対象としているので、大数の弱法則が成立して地震リスク曲線のバラツキは小さくなり、年超過確率が約1/500以下の領域では、ポートフォリオの損失率は全ての個別建物の損失率よりも小さくなっている。ケース2では、建設地の地震ハザードそのものが異なるので、ポートフォリオの損失率は、全ての個別建物の損失率よりも小さくなってはいない。しかし、ケース1と同様に、年超過確率が小さくなるに従い、ポートフォリオの損失率は個別建物の損失率より小さくなる。ケース3では、建物が全国に分散しているため、リスク分散効果によりポートフォリオの損失率は、年超過確率が小さくなるに従い、個別建物の損失率よりもかなり小さくなっている。従って、リスク分散の効果があまり期待できないケース1とその効果が期待できるケース3のポートフォリオの損失率を比較すると、ケース3の方が損失率の低減効果が大きく、大数の法則よりもリスク分散による効果が、ポートフォリオの損失低減に寄与する割合が大きいといえる。

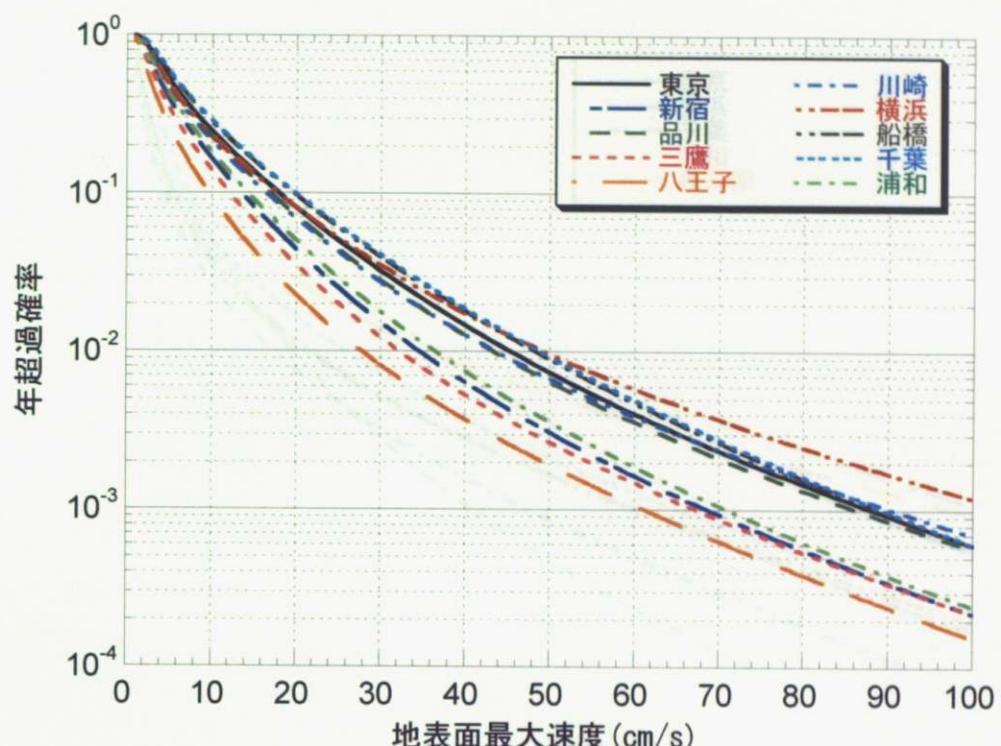


(a) 地震ハザード曲線

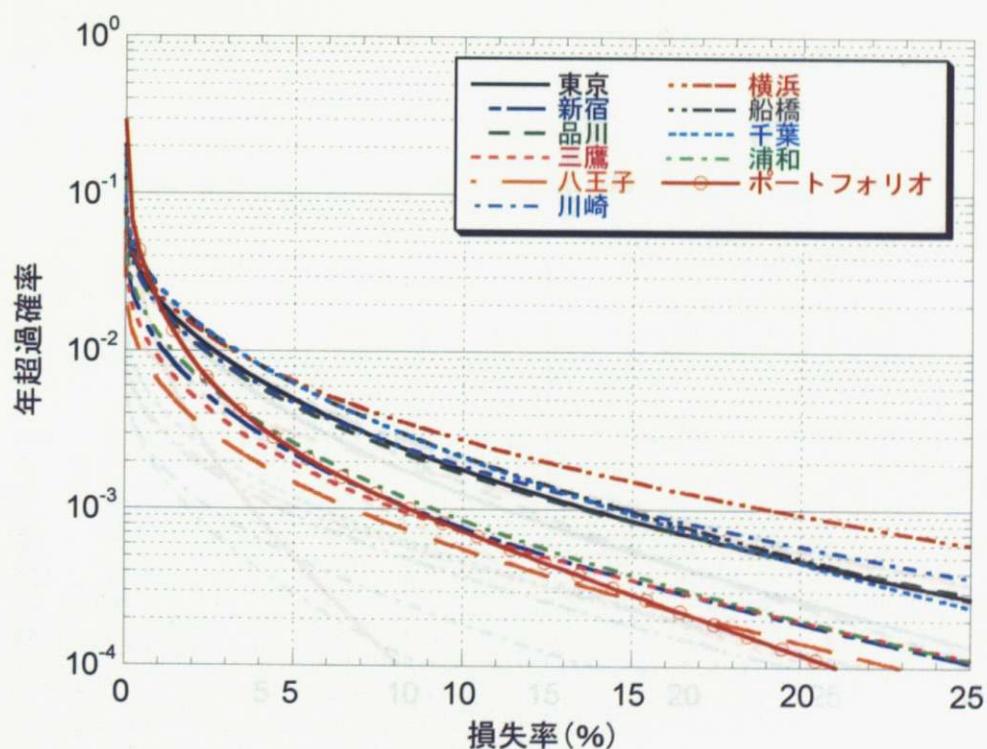


(b) 地震リスク曲線

図 7.8 地震ハザード曲線と地震リスク曲線（ケース 1）

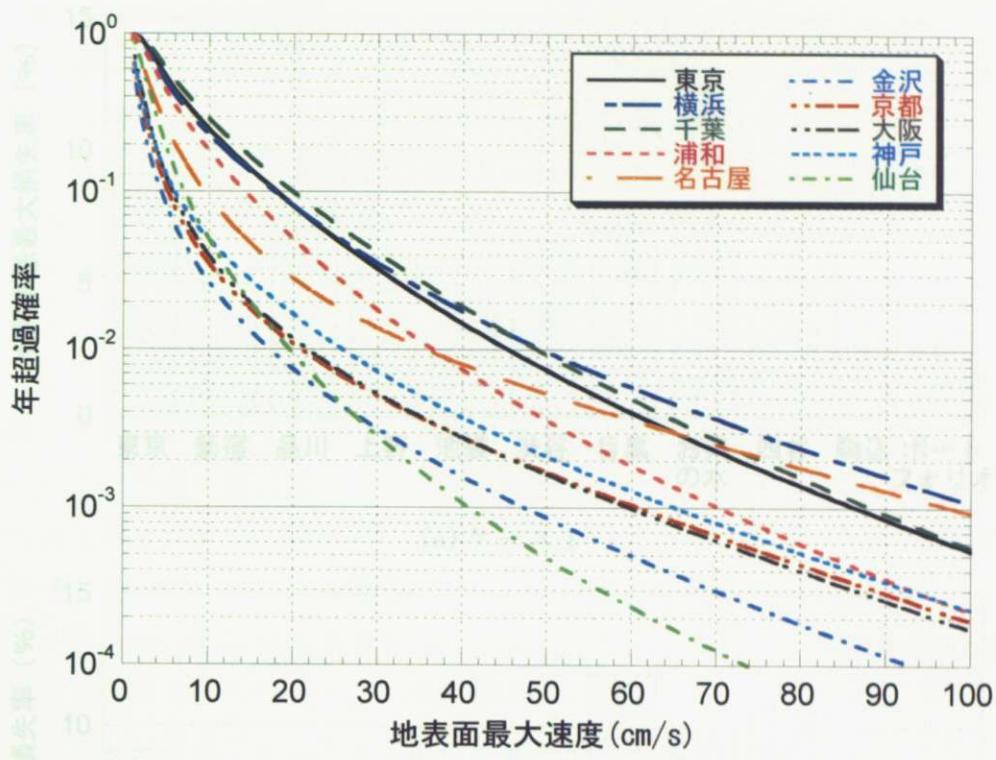


(a) 地震ハザード曲線

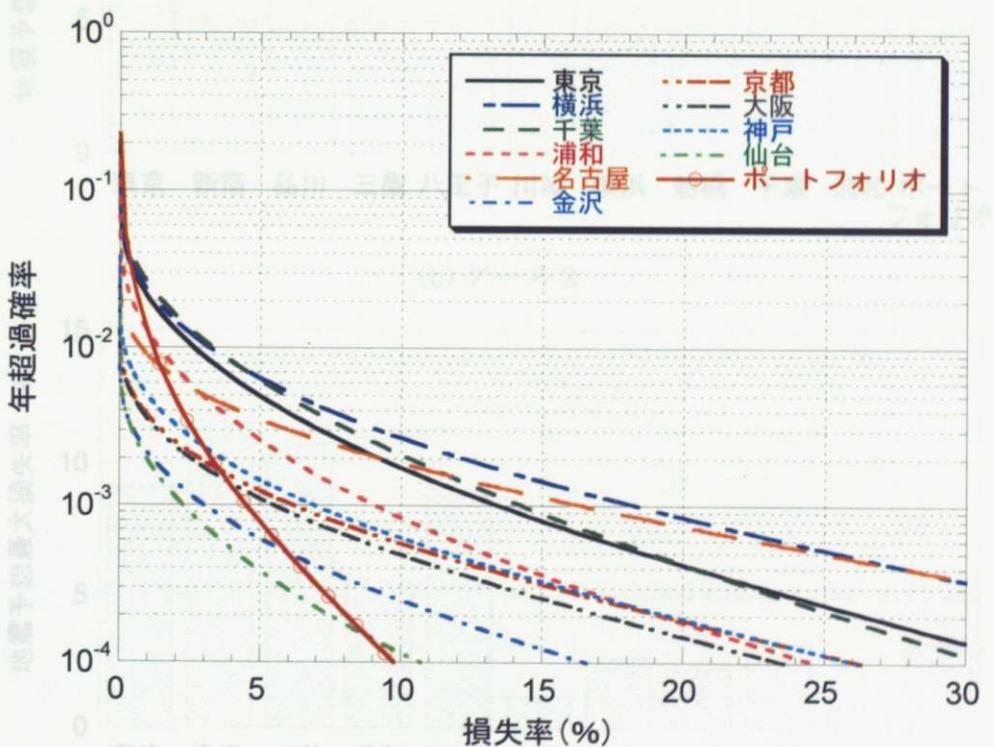


(b) 地震リスク曲線

図 7.9 地震ハザード曲線と地震リスク曲線（ケース 2）

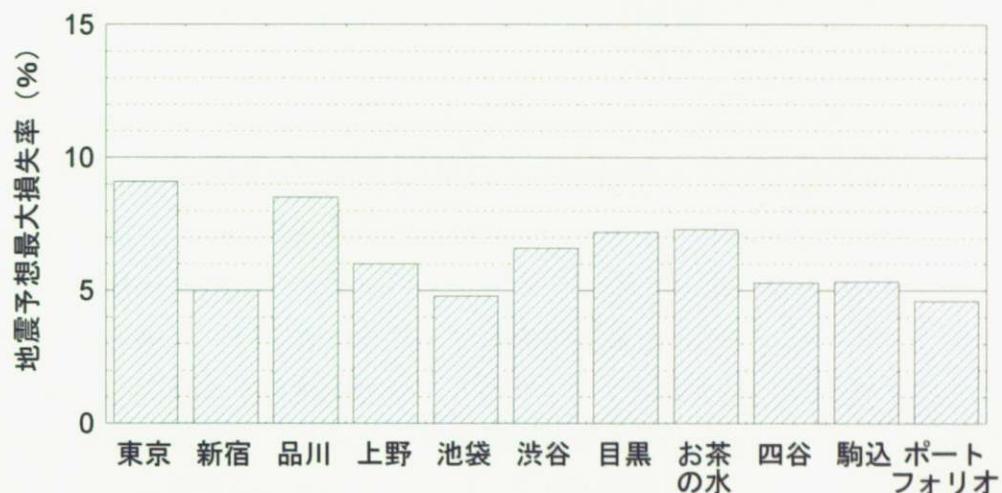


(a) 地震ハザード曲線

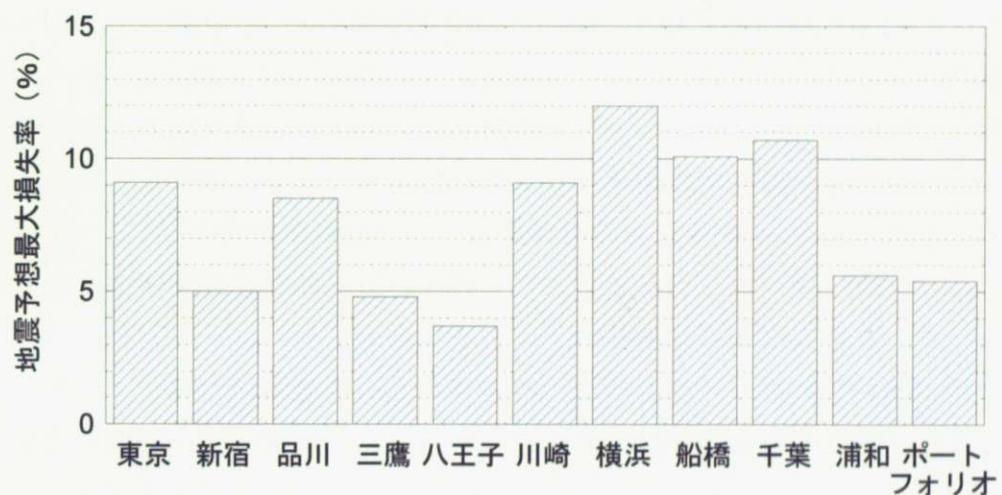


(b) 地震リスク曲線

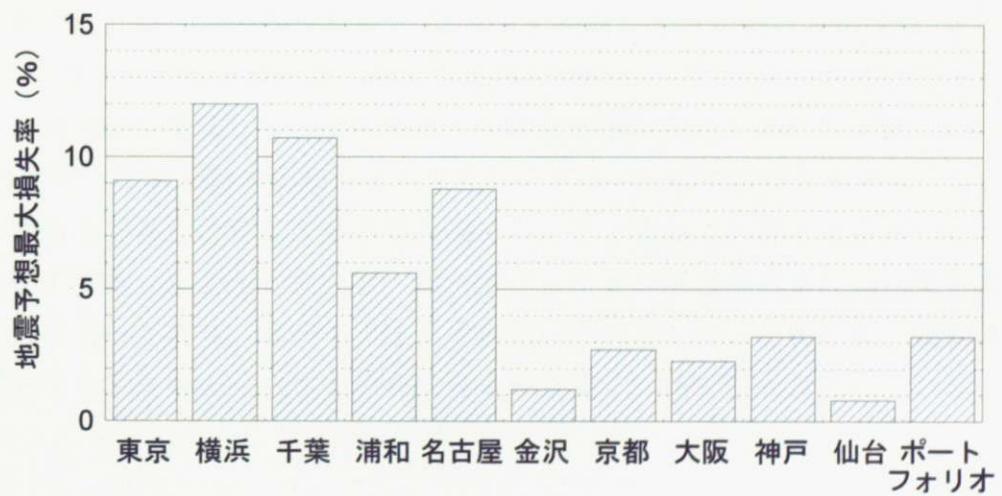
図 7.10 地震ハザード曲線と地震リスク曲線（ケース 3）



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図 7.11 地震予想最大損失率(PML)の比較

#### 7.4.4 地震保険料の検討結果

リスク回避の傾向が効用関数を用いてモデル化されたので、リスク回避の程度を示す効用関数の係数  $\alpha$  と(7.61)式の地震保険料の関係を、図7.12に示す。ここで、地震保険料は、年損失期待値で基準化している。効用関数の係数  $\alpha$  が大きくなるに従い、地震保険料も高くなる傾向が見られるが、ポートフォリオでは全てのケースにおいて、地震保険料は個別建物よりも低くなっていることがわかる。これは、ポートフォリオの地震リスク曲線は、個別建物よりも年損失期待値まわりのバラツキが小さいので、損失期待値との乖離から計算されるリスクプレミアムが小さくなるためである。また、効用関数の係数  $\alpha$  が大きくなると、地震保険料が急激に高くなる建物も見られる。この原因として、年損失期待値は小さいが、年損失期待値まわりのバラツキが相対的に大きいためと考えられる。従って、年損失期待値まわりのバラツキが小さいほど地震保険料が安くなる傾向は、効用関数を用いた手法で定量的に説明できる。

つぎに、図7.8～図7.10の地震リスク曲線において、損失額を年損失期待値で基準化して表現すると、図7.13となる。個別建物とポートフォリオの地震リスク曲線を比較すると、ポートフォリオの方が個別建物よりも年損失期待値まわりのバラツキが小さいにも拘わらず、年損失期待値に対する損失額の比率が約10以下の領域においては、ポートフォリオの年超過確率が個別建物よりも大きくなっている。建物の損失分布の形状は、図6.8に示したように、正規分布のように期待値に対して左右対称ではなく、期待値に対して分布形に歪があるためである。このため、年損失期待値に対する損失額の比率が比較的小さい領域では、ポートフォリオの年超過確率が個別建物より大きくなっていると考えられる。

ところで、リスクプレミアムを考慮して地震保険料を設定することは、年損失期待値よりも予め大きい損失額を設定して、リスク回避をしていることになる。このため、図7.12における年損失期待値に対する地震保険料と、図7.13における年損失期待値に対する損失額を等値して、効用関数と年超過確率の関係を求めるところ7.14となる。図7.14より、効用関数の係数  $\alpha$  を大きくしてリスク回避の程度を高めることは、年超過確率の値を小さく設定して安全性を高めることと等価であることがわかる。また、効用関数の係数  $\alpha$  を固定したとき、ポートフォリオの年超過確率は個別建物のそれよりも大きくなってしまい、ポートフォリオと同一の効用を得るために、個別建物では年超過確率をより小さく（すなわち、安全率を高く）設定しなければならないことがわかる。

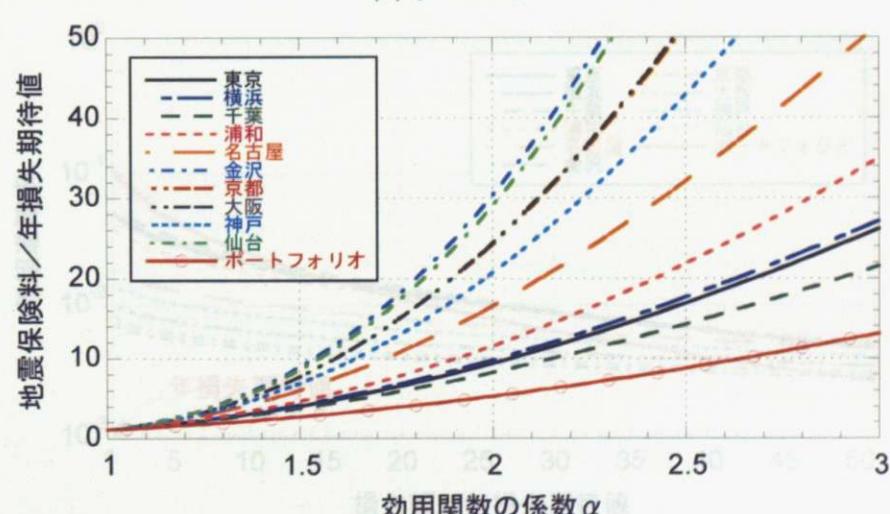
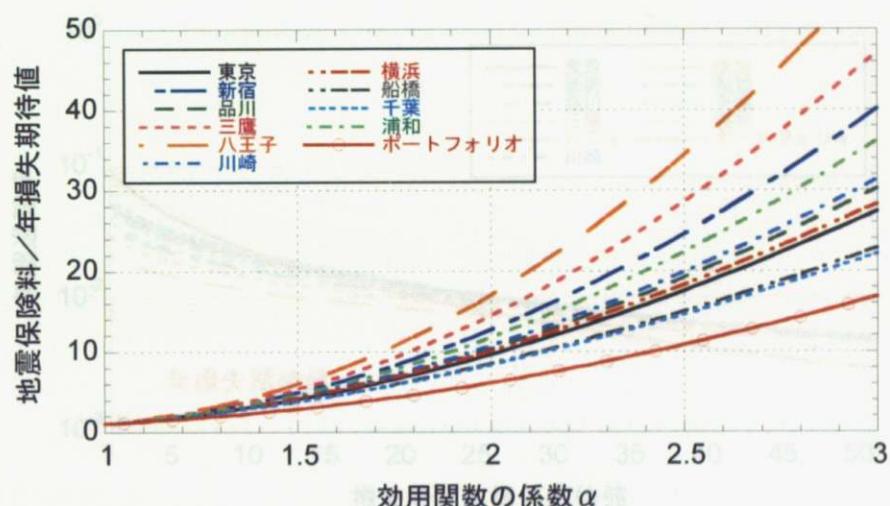
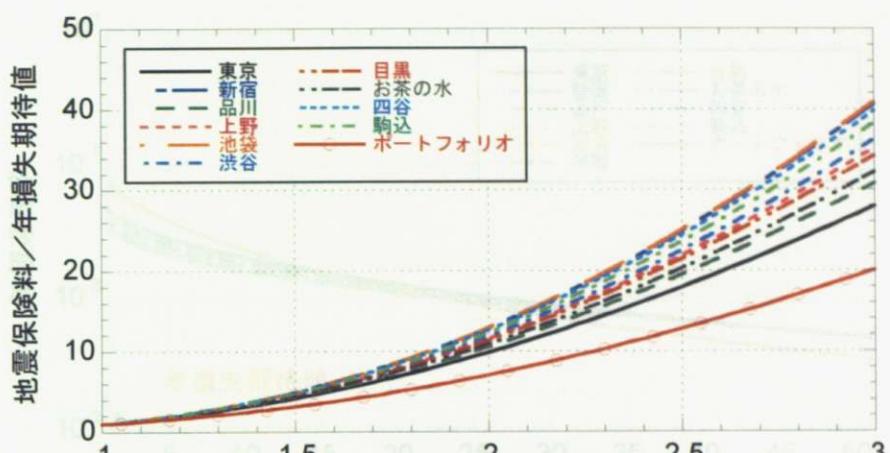
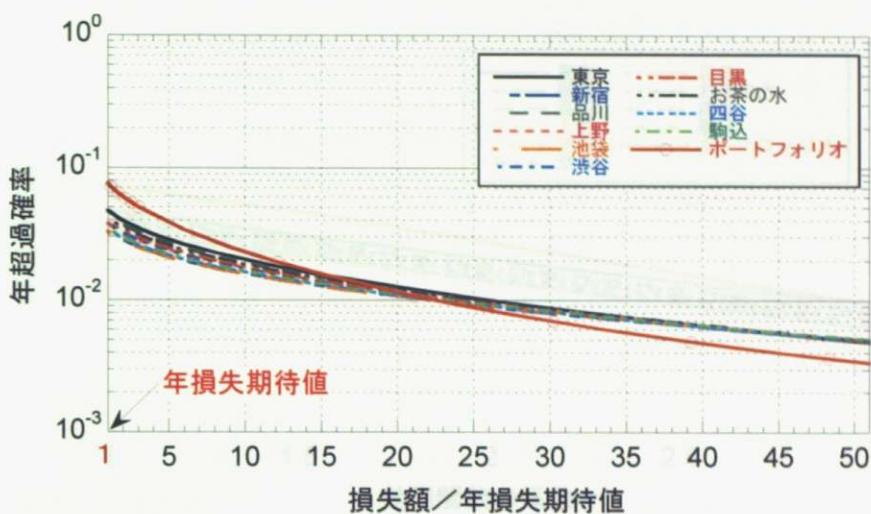
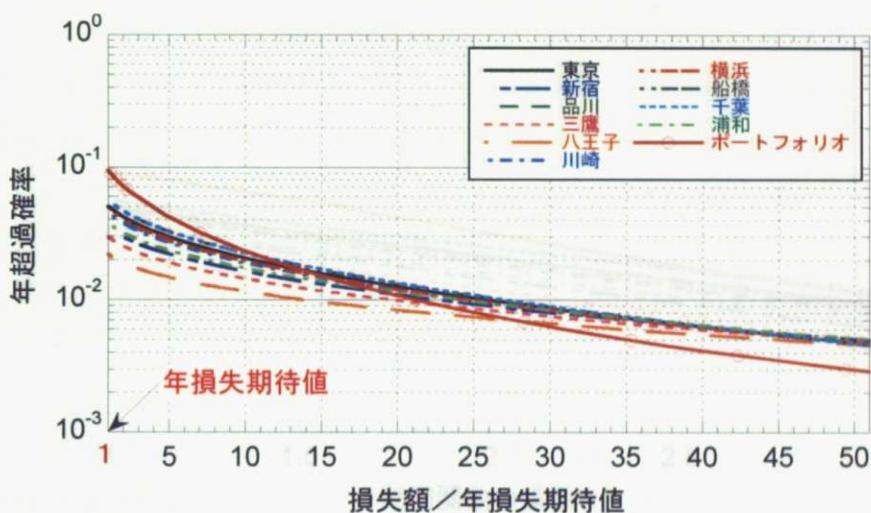


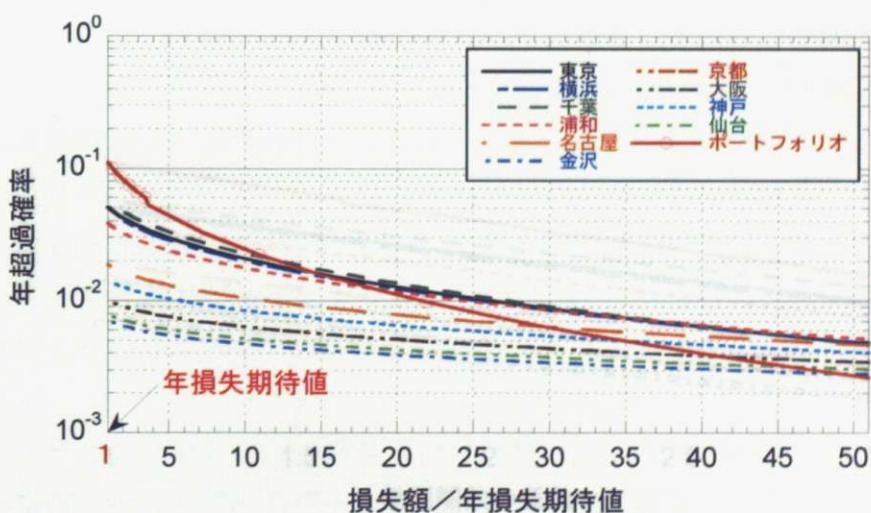
図 7.13 年損失期待値  
図 7.12 効用関数と地震保険料の関係



(a) ケース 1

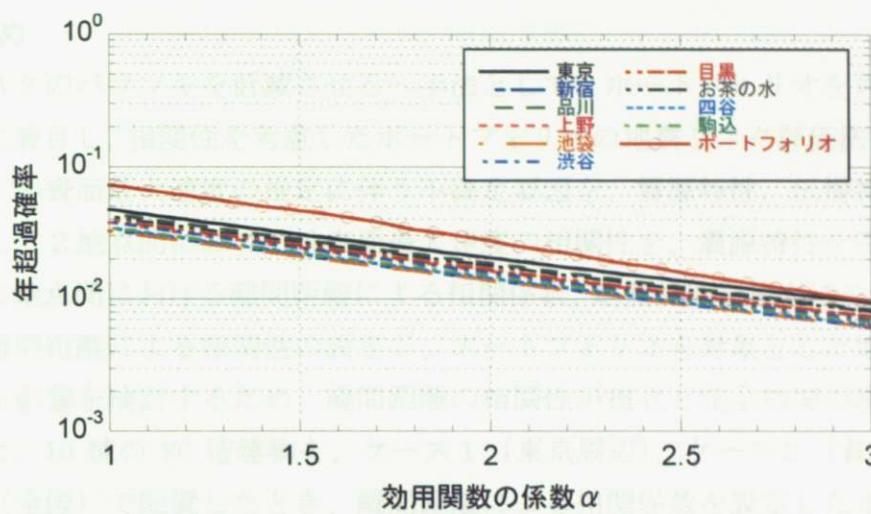


(b) ケース 2

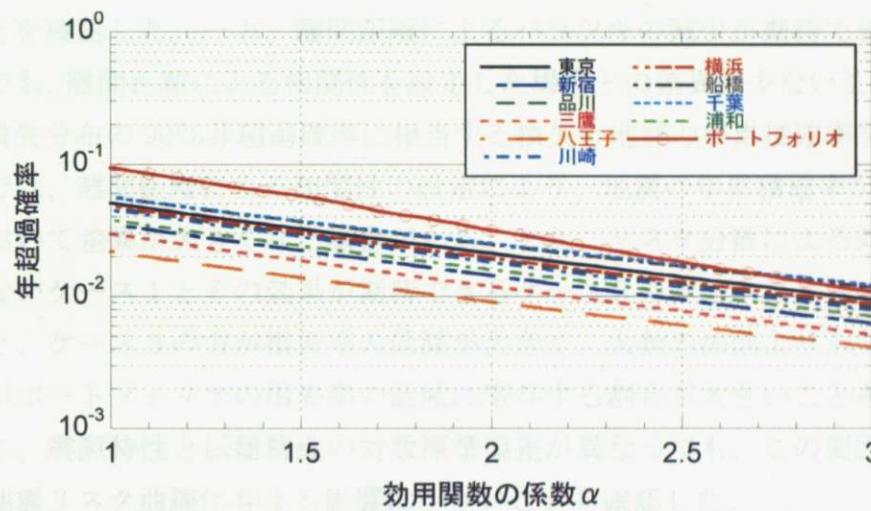


(c) ケース 3

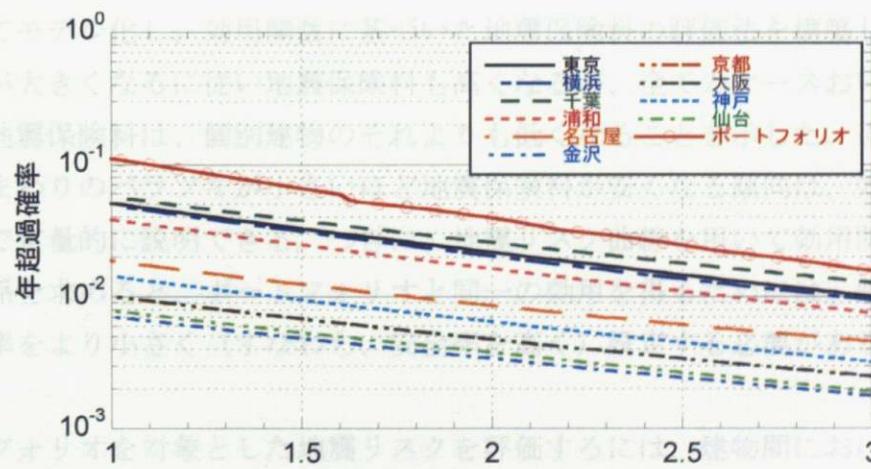
図 7.13 年損失期待値で基準化された損失額と年超過確率の関係



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図 7.14 効用関数と年超過確率の関係

## 7.5 まとめ

地震リスクのバラツキを低減させる一手法として、ポートフォリオを対象とした地震リスクに着目し、相関性を考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を構築した。このとき、地表面最大速度の推定に伴う不確定要因を、震源特性、伝播特性、地盤特性に分離し、2地点間における地表面最大速度の相関性を、震源特性を完全相関、伝播特性を2地点間における離間距離による相関係数、地盤特性を独立にモデル化した。ここで、離間距離による相関性の設定が、ポートフォリオを対象とした地震リスク評価に与える影響を検討するため、離間距離の相関性が独立と完全相関の場合についても検討した。10棟のRC造建物を、ケース1（東京周辺）、ケース2（首都圏周辺）、ケース3（全国）で配置したとき、離間距離による相関係数を設定したポートフォリオの地震リスク曲線は、全てのケースにおいて、独立の地震リスク曲線とほぼ一致していることを確認した。一方、離間距離によるバラツキの減少が期待できない完全相関の場合でも、離間距離による相関性を設定した場合との差異は少ないと示した。ただし、損失分布の90%非超過確率に相当する損失と地震の年累積確率を示した地震累積曲線では、離間距離による相関性の設定により、地震の年累積確率が約 $10^{-3}$ 以下の領域において差異が大きくなる場合がある。また、リスク分散による効果があまり期待できないケース1とその効果が期待できるケース3のポートフォリオの損失率を比較すると、ケース3の方が損失率の低減が大きく、大数の法則よりもリスク分散による要因がポートフォリオの損失率の低減に寄与する割合が大きいことを示した。さらに、仮に、震源特性と伝播特性の対数標準偏差が異なっても、この要因がポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響は小さいことを確認した。

地震リスク対策としてリスク転嫁に着目し、保険会社のリスク回避の傾向を効用関数を用いてモデル化し、効用関数に基づいた地震保険料の評価法を構築した。効用関数の係数が大きくなるに従い地震保険料も高くなるが、全てのケースにおいてポートフォリオの地震保険料は、個別建物のそれよりも低くなることを示した。従って、年損失期待値まわりのバラツキが小さいほど地震保険料が安くなる傾向は、効用関数を用いた手法で定量的に説明できる。つぎに、地震リスク曲線を用いて効用関数と年超過確率の関係を求めると、ポートフォリオと同一の効用を得るためにには、個別建物では年超過確率をより小さく（すなわち、安全率を高く）設定する必要があることを示した。

ポートフォリオを対象とした地震リスクを評価するには、建物間における損失発生の相関性が重要になる。震源特性と伝播特性の対数標準偏差が異なっても、この要因がポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響が小さいことを確認したが、今後はさらに高密度な強震観測記録を用いて、地盤特性の相関性も考慮したポートフォリオの地震リスク評価法が課題となる。

## 7章の参考文献

- 1) 佐藤一郎, 平川 倫生, 神田 順: 活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 145-150, 1998
- 2) 神田 順, 平川 倫生: 限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 39-46, 1999
- 3) 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 地震リスクの証券化における条件設定に関する解析, 日本建築学会計画系論文集, 第555号, pp. 295-302, 2002
- 4) 矢代 晴実, 福島 誠一郎, 都築 充雄: 地震リスクスワップの成立性と条件設定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第586号, pp. 107-114, 2004
- 5) 福島 誠一郎, 矢代 晴実: リスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp. 197-204, 2003
- 6) H. Suwa and M. Seki : A Comparison of seismic life cycle costs on earthquake resistant Building versus base isolated building, World Sustainable Building Conference (SB05), pp. 189, 2005
- 7) 中村 孝明, 中村 敏治: 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, pp. 69-76, 2000
- 8) 諏訪 仁, 野畑 有秀, 関 松太郎: 複数建物の地震リスク特性に関する検討, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 434, 2002
- 9) H. Suwa, S. Yoshida, A. Nobata and M. Seki : Portfolio Seismic Risk Assessment for Buildings, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), pp. 224-225, 2002
- 10) H. Suwa, A. Nobata and M. Seki : Evaluation of Portfolio Seismic Risk due to Different Allocations of Multiple Buildings, First International Conference of Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering (CUEE), pp. 393-400, 2004
- 11) 林 孝幸, 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第600号, pp. 203-210, 2006
- 12) 伊藤 学, 亀田 弘行, 黒田 勝彦, 藤野 陽三 共訳: 土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 1988
- 13) 篠塚 正宣, 中村 孝明, 望月 智也: 極値統計理論を用いた地震時最大予想損失額の評価手法の提案, JCOSSAR論文集, pp. 25-32, 2000
- 14) 多々納 裕一, 高木 朗義 編著: 防災の経済分析 リスクマネジメントの施策と評価, 刊草書房, 2005
- 15) 篠塚 正宣, 中村 孝明: アセット・マネジメント 確率統計手法による資産管理運用,

鹿島出版会, 2003

- 16) 野口悠紀雄：金融工学、こんなに面白い，文春新書, 2000
- 17) 松原望：計量社会科学，東京大学出版会
- 18) 高田 肇士, 下村 哲人：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, 第565号, pp. 41-48, 2003
- 19) 藤本 一雄, 翠川 三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 2003
- 20) 建築・設備維持保全推進協会 (BELCA) : デュー・デリジェンスとエンジニアリングレポート, pp. 97-104, 2004

## 8章 結論

兵庫県南部地震における地震被害データを有効活用して、RC造建物の損傷クライテリアの設定、建築設備の被害率曲線の作成、建物の補修費用ならびに補修期間の評価を行い、これらの成果に基づき建物の地震リスク評価法を構築した。つぎに、離間距離による相関性を考慮したポートフォリオ地震リスク評価法を提案し、効用関数を用いて地震保険料を評価した。2章～7章の成果を要約すると、以下のようになる。

2章では、兵庫県南部地震における地震被害データを用いて作成されたRC造建物の被害率曲線に基づき、被害率曲線を再現できるようにRC造建物の損傷クライテリアを評価した。RC造建物を基礎固定のせん断質点系にモデル化し、構造耐震指標の統計値を用いてRC造建物群モデルをモンテカルロ法により作成する。兵庫県南部地震における地震動に対して、RC造建物群モデルを対象に地震応答解析を行い、応答層間変形角の分布を求める。RC造建物の損傷指標として限界層間変形角を採用し、限界層間変形角の分布も対数正規分布でモデル化し、両者の関係から信頼性理論に基づき損傷確率を計算した。このとき、兵庫県南部地震におけるRC造建物の被害率曲線から求められる被害率と、解析的に求められた損傷確率を等値することにより、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差を評価した。この結果、限界層間変形角の中央値は、建築年代や建物階数により若干異なるが、小破で1/53～1/41、中破で1/24～1/14、大破で1/20～1/12であることを示した。一方、限界層間変形角の対数標準偏差は、建築年代や建物階数により異なり、0.18～0.79程度となった。RC造建物の被害率曲線を再現するよう求められた限界層間変形角の中央値は、構造実験から得られる値と比較して大きい、すなわち限界層間変形角の中央値を過大評価していることがわかる。この原因として、RC造建物群モデルを対象に地震応答解析を行う際に、建物と地盤との相互作用による入力低減効果が考慮されていないことや、RC造建物の耐力には耐力評価式では十分に考慮されていない余力があること、などが考えられる。しかし、求められた損傷クライテリアは、兵庫県南部地震におけるRC造建物の被害率曲線を再現している点において、限定的ではあるが建物の地震損傷度評価に用いることができる。ただし、これらの損傷クライテリアは、兵庫県南部地震以外の地震被害に対して検証されておらず、他の地震被害への適用可能性は今後の検討課題である。

3章では、地震後においても機能性が要求される建築設備を対象に、兵庫県南部地震で被災した156棟の建物に対する建築設備の地震被害データを用いて、その耐震性能を被害率曲線に基づき検討した。建築年、構造形式、建物階数の相違が被害率曲線に与える影響を評価すると、建築年別では、軽微な被害では建築年による差異はあまり見られないが、重大な被害では、全ての建築設備に対して、1983年以降の中央値が1982年以前よりも大きくなっている。構造形式別では、RC造建物よりもS造建物の中

央値が小さく、S 造建物の方が建築設備の被害が発生しやすい傾向が見られる。建物階数別では、建物階数が高くなるにつれて、被害率曲線の中央値が全般的に減少する傾向がある。これは、兵庫県南部地震における地震動の卓越周期により、階数の高い建物ほど被害が大きかったことに対応していると考えられる。

4章では、兵庫県南部地震で被災した 27 棟の建物を対象に、建物の補修費用について統計的分析を行った。新築費用に対する工事別の補修費用の平均値は、被災度レベルにほぼ関係なく、仕上げ工事費で約 0.3、設備工事費で約 0.2 ならびに躯体工事費で約 0.1 程度であることがわかった。また、工事別の補修費用の変動係数を比較すると、設備工事費が大きくて小破で約 1.8、中破で約 1.5 程度となっている。つぎに、構造形式や建物用途による工事別の補修費用について検討した。構造形式では、小破と中破の躯体工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方が安く、これは、小破の S 造建物では主要な構造部分に被害が生じていないことに対応している。一方、小破と中破の設備工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方が高くなり、RC 造建物よりも S 造建物の方が地震被害を受けやすいことが考えられる。また、建物用途では、各工事別の補修費用に有為な差異は見られないことを確認した。さらに、最尤法により補修費用の分布を回帰すると、建物全体では、ほぼ全ての工事種類に対して対数正規分布の適合性が良いが、構造形式別ではガンマ分布の方が適合性の良い工事種類の多いことがわかった。

5章では、兵庫県南部地震で被災した 62 棟の建物を対象に建物の補修期間を調査し、まず、兵庫県南部地震における地表面最大速度と建物の補修期間の関係を評価した。しかし、地表面最大速度と補修期間の関係はバラツキが大きく、地表面最大速度のみの指標を用いて建物補修期間を予測することは難しいことを確認した。このため、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途と補修期間の関係について検討した。建物階数と補修期間には、明確な関係は見られない。延べ床面積と補修期間の関係は、バラツキがあるものの新築建物の施工期間と同様に、延べ床面積が大きくなるに従い補修期間も漸増する傾向がある。延べ床面積と補修期間の関係にバラツキが見られる原因として、同一の被災度でも建物の破壊形式が異なることや、補修工事よりも業務を優先させた事例があることなど、が考えられる。また、構造形式の相違による補修期間の差異は少ない。一方、事務所の補修期間は、集合住宅よりも長くなる傾向があり、住人の生活を考慮して優先的に復旧工事を行ったと考えられる。以上の検討結果をもとに、建物用途（事務所、集合住宅ならびにその他）別に、延べ床面積を用いて建物の補修期間を予測すると、地震被害データと回帰式との残差が小さくなることを示した。

6章では、2章～5章で得られた成果に基づき、建物の地震リスク評価法を構築した。まず、建物の地震応答解析を行い、2章で求められた RC 造建物を対象とした損傷クライテ

リアに基づき、各層の地震損傷度曲線を評価する。ただし、2章で求められた損傷クライテリアは、兵庫県南部地震以外の地震被害に対して検証されていないので、限定的に使用可能であることに注意を要する。4章で求められた建物の補修費用を用いて、地震損傷度曲線から計算される損傷確率に補修費用を乗じて建物の地震損失曲線を評価する。さらに、5章で求められた建物の補修期間を設定し、建物の地震補修期間曲線を提案した。また、RC造10階の建物を対象に、地震リスクの評価例を示した。

7章では、地震リスクのバラツキを低減させる一手法として、ポートフォリオを対象とした地震リスクに着目し、相関性を考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を構築した。地表面最大速度の推定に伴う不確定要因を、震源特性、伝播特性、地盤特性に分離し、2地点間における地表面最大速度の相関性を、震源特性を完全相関、伝播特性を2地点間における離間距離による相関係数、地盤特性を独立にモデル化した。ここで、離間距離による相関係数の相違が、ポートフォリオを対象とした地震リスク評価に与える影響を検討するため、離間距離の相関係数が独立と完全相関の場合についても検討した。10棟のRC造建物を、ケース1（東京周辺）、ケース2（首都圏周辺）、ケース3（全国）で配置したとき、離間距離による相関係数を設定したポートフォリオの地震リスク曲線は、全てのケースにおいて、独立の地震リスク曲線とほぼ一致していることを確認した。一方、離間距離によるバラツキの減少が期待できない完全相関の場合でも、離間距離による相関性を設定した場合との差異は少ないことを示した。ただし、損失分布の90%非超過確率に相当する損失と地震の年累積確率を示した地震累積曲線では、離間距離による相関性の設定により、地震の年累積確率が小さい領域において差異が大きくなる場合もある。また、リスク分散による効果があまり期待できないケース1とその効果が期待できるケース3のポートフォリオの損失率を比較すると、ケース3の方が損失率の低減が大きく、大数の法則よりもリスク分散による要因がポートフォリオの損失率の低減に寄与する割合が大きいことを示した。さらに、仮に、震源特性と伝播特性の対数標準偏差が異なっても、この要因がポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響は小さいことを示した。つぎに、地震リスク対策としてリスク転嫁に着目し、保険会社のリスク回避の傾向を効用関数を用いてモデル化し、効用関数に基づいた地震保険料の評価法を構築した。効用関数の係数が大きくなるに従い地震保険料も高くなるが、全てのケースにおいてポートフォリオの地震保険料は、個別建物のそれよりも低くなることを示した。従って、年損失期待値まりのバラツキが小さいほど地震保険料が安くなる傾向は、効用関数を用いた手法で定量的に説明できる。つぎに、地震リスク曲線を用いて効用関数と年超過確率の関係を求めると、ポートフォリオと同一の効用を得るためにには、個別建物では年超過確率をより小さく（すなわち、安全率を高く）設定する必要があることを示した。

今後の検討課題として、以下の内容が考えられる。

- ・ 建物の地震損傷度の評価精度をさらに高めるため、地盤の強震観測記録のみならず、建物の強震観測記録をさらに充実させて、建物の地震応答を再現できる建物モデルの構築や、建物被害を模擬できる損傷クライテリアの設定が必要となる。
- ・ 建築設備の耐震性能は、地震後において建物の機能性を維持するために重要であり、構築された被害率曲線の兵庫県南部地震以外の地震被害への適用性を検討する必要がある。また、建築設備の被害率曲線を作成するとき、建築年、構造形式、建物階数別に評価したが、今後は、建築年、構造形式、建物階数の各指標と建築設備の被害率の関係を、順序ロジットモデルを用いて総合的に検討する必要がある。
- ・ 建築設備の被害率曲線が、兵庫県南部地震における建築設備の地震被害データを用いて作成された。しかし、最近の地震被害では、内装・外装材や天井などの非構造部材の被害が数多く報告されている。このため、建築設備のみならず、非構造部材を対象とした地震損傷度評価法について検討する必要がある。
- ・ 建物の補修費用を分析するとき、今後は、延べ床面積、構造形式、建物用途の各指標と補修費用の関係を重回帰分析により検討する必要がある。また、兵庫県南部地震で被災した建物を対象に補修費用を統計的に検討したが、建物数が 27 棟と限定されているため、提案された補修費用を事前分布に設定して、新たに地震被害データが得られたときには、ベイズ確率を用いて更新していく必要がある。
- ・ 建物の補修期間を予測するとき、地表面最大速度、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途の各指標と補修期間の関係を、重回帰分析により検討する必要がある。また、地震時における建物の補修期間は、建物の重要度、建設地周辺におけるインフラ施設の復旧状態など、5章で考慮した要因以外にも影響を受けると考えられる。今後、建物の補修期間を予測するときは、これらの要因を組み込み、評価モデルをさらに改良していく必要がある。
- ・ ポートフォリオを対象とした地震リスクを評価するには、建物間における損失発生の相関性が重要になる。震源特性と伝播特性の対数標準偏差が異なっても、この要因がポートフォリオの地震リスク曲線に与える影響が小さいことを確認したが、今後はさらに高密度な強震観測記録を用いて、地盤特性の相関性も考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を検討する必要がある。
- ・ 本論文の研究成果は、安全・安心なまちづくり計画、耐震補強の実施や地震保険の加入へのインセンティブにつながると考えられる。このとき、デューデリジェンスにおける地震予想最大損失率（PML）が、投資家などに対して広く浸透しているように、地震リスク情報を一般の人々に対してわかり易く説明できるリスクコミュニケーションの手段が必要となる。

本論文では、1995年1月17日の兵庫県南部地震における地震被害データを利用して、確率論的アプローチにより建物の地震損失評価法を構築した。従って、地震損失評価法の適用範囲は限定されるが、研究成果は建物の地震リスク評価法に有効活用されるものと期待する。

## 発表論文リスト

### 1. 発表論文

No	発表論文名	掲載紙	発行年	共著者
1	梁降伏型骨組の耐震信頼性評価に関する一手法	第3回構造物の安全性・信頼性に関するシンポジウム (JCOSSAR) pp. 425-430	1995	鈴木 哲夫 野畠 有秀 勝俣 英雄
2	エネルギー入力率に基づく必要耐力の推定に関する一手法	構造工学論文集 Vol. 43B pp. 523-530	1997	野畠 有秀 鈴木 哲夫
3	A Study of the Influence of Energy Input Rate on Inelastic Response	International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR) pp. 1729-1732	1997	野畠 有秀 鈴木 哲夫
4	積層ゴムの鉛直剛性低下を考慮した高層免震構造物のロッキング振動	構造工学論文集 Vol. 44B pp. 231-236	1998	関 松太郎 寺村 彰
5	兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建築物の地震リスク評価に関する研究	日本建築学会技術報告集 第12号 pp. 41-46	2001	野畠 有秀 関 松太郎
6	Portfolio Seismic Risk Assessment for Buildings	International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) pp. 224-225	2002	吉田 伸一 野畠 有秀 関 松太郎
7	複数建物の地震リスク特性に関する検討	第11回日本地震工学シンポジウム pp. 434	2002	吉田 伸一 野畠 有秀 関 松太郎
8	兵庫県南部地震補修における建物の補修費用に関する統計的評価	構造工学論文集 Vol. 50B pp. 149-154	2004	関 松太郎

9	Evaluation of Portfolio Seismic Risk due to Different Allocations of Multiple Buildings	First International Conference on Urban Earthquake Engineering Center for Urban Earthquake Engineering (CUEE) Tokyo Institute of Technology pp. 393-400	2004	野畠 有秀 関 松太郎
10	A Comparison of seismic life cycle costs on earthquake resistant building versus base isolated building	The 2005 World Sustainable Building Conference (SB05) pp. 189	2005	関 松太郎
11	兵庫県南部地震の被害データを用いた建物補修期間の統計的検討	構造工学論文集 Vol. 53B pp. 311-316	2007	神田 順

## 2. 受賞

No	発表論文名	掲載紙	発行年	共著者
1	「限界状態設計法を活用した構造設計－木質系オフィスビルの提案－」で推奨作品受賞	日本建築学会設計競技 (技術部門)	1999	橋本 康則 福本 早苗 藤井 正則 和田 安弘

## 謝辞

本論文は、筆者が、東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻博士課程ならびに株式会社大林組技術研究所で取り組んで参りました、建物の地震リスク評価法に関する研究をまとめたものです。

神田順教授（東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻）には、博士課程在学中に、貴重なご指導とご助言を賜り、本論文を完成させることができました。深く感謝申し上げます。

本論文の審査にあたり、鬼頭秀一教授（東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻）、高田毅士教授（東京大学大学院工学系研究科建築学専攻）、中埜良昭教授（東京大学生産技術研究所）、丸山祐造准教授（東京大学空間情報科学研究センター）には、貴重なご助言を戴くことができ、本論文の完成度を高めることができました。重ねて感謝申し上げます。

富澤稔名誉教授（東京理科大学）には、筆者が、東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程在学中に、建物の耐震信頼性評価法に関するご指導戴き、建物の地震リスク評価法に関する研究の礎となりました。深く感謝申し上げます。

武田寿一博士（大林組技術研究所・元所長）、表祐太郎博士（大林組技術研究所・前所長）、汐川孝氏（大林組技術研究所・所長）、鈴木哲夫博士（大林組技術研究所・元副所長）には、研究者としての有り方などについて、貴重なご教示を数多く賜ることができました。関松太郎博士（大林組技術研究所・前室長）には、建物の地震リスク評価法に関する研究をすすめるにあたり、上司としてご指導戴くとともに、博士課程入学の機会を与えて戴きました。勝俣英雄氏（大林組技術研究所・室長）や佐野剛志氏（大林組技術研究所・グループ長）には、さまざまご支援ならびにご配慮を戴き、本論文を完成させることができました。野畠有秀博士（大林組技術研究所・室長）や吉田伸一氏（大林組原子力本部・グループ長）には、地震ハザード評価法に関して、地震データやプログラムのご提供、ならびに貴重なご助言を戴きました。このほかにも、技術研究所の緒先輩方、同僚の研究員の方々から、さまざまご厚意とご支援を戴きました。心より感謝申し上げます。

2007年9月  
諏訪 仁