

地震と火災を考慮した建物のリスクマネジメント

Building Risk Management for Earthquakes and Fires

日 下 彰 宏 石 田 寛 鳥 澤 一 晃

要 約

建物は地震、火災、台風などさまざまな災害に晒されているが、こうした災害リスクを効率的に管理するには、あらゆるリスクの全容を見比べ全体としてバランスのよい措置をとることが望ましい。しかしながら、これまでは同一建物で異なる災害に対する対策案を総合的に評価することはあまり重視されてこなかった。本報では、性質の異なる災害リスクを同時に考慮して災害対策を検討するために、リスク曲線を使った意思決定フレームを提案する。また、代表的な災害として地震と火災を取り上げ、両者に対するリスク曲線の評価方法や代表的な対策の種類とその性格を示す。例題として、11階建て事務所ビルを想定して、地震と火災に関するリスクマネジメントの事例解析を行い、火災対策として自動火災報知設備とスプリンクラ、地震対策として耐震補強を候補として、災害対策の組合せについて優先順位を決定した。この例では、保守的な意思決定規範に従うほど大きな費用をかける対策の優先順位が高くなり、意思決定者がリスクを嫌忌する度合いと望ましい防災対策との関係が定量的に示された。

目 次

- I. はじめに
- II. 災害対策に関する意思決定問題の定式化
- III. リスク曲線
- IV. ケーススタディ
- V. おわりに

I. はじめに

情報技術の進展により社会活動が高密化したことや、企業の社会的責任を追求する社会気運の高まりなどによって、企業が抱えるリスクが、ときには存続にすら影響を与えかねないほど増大している。こうした社会情勢に押されるように、古くからリスクとして認識されてきた地震、火災、台風、豪雪・豪雨、津波・高潮、河川氾濫など各種の災害に関しても、人命や建物・財産に関わるリスク評価や、それらの被害を低減あるいは回避するための対策技術について多数の研究・開発が蓄積され、実施事例も増えてきた。しかしながら、災害対策はそれぞれ異なる分野の研究者・技術者が携わってきたこともあり、現状において災害リスク評価や対策案の採否は、それぞれの災害について個別に検討されることがほとんどで、リスクマップ¹⁾など、定性的な比較を行うツールは提案されているが、トータルリスクを減少させるとの観点から災害リスクを定量的に比較し、災害対策が選定されることは少ない。

一方、リスクマネジメントにおいて、耐震補強のように物理的な減災を目指すリスク・コントロールと対をなす、損失を金銭によって補おうとするリスク・ファイナンスの分野では、さまざまな災害のみならず、これまで分離して扱うことが一般的であった災害や事故など損失だけが発生する可能性のある「純粋リスク」と、利益、

損失ともに発生する可能性のある「投機リスク」を、敢えて同列に扱うことで効率よくリスクマネジメントする技術²⁾も開発されており、災害リスクを総合的見地から扱う必要性は高まっている。

このような現状に対し、筆者らは、既往の研究³⁾において、同一建物に対し、それぞれ評価した地震と火災のリスク曲線を重書きすることで異なる災害を同列に比較することを提案した。本研究では、この手法を展開し、建物が被る可能性のある災害それぞれについてリスク曲線の評価し、さらにこれらを統合したリスク曲線に基づいて、災害対策案の優先順位を決める手法を提案する。また、地震リスク曲線と火災リスク曲線の具体的な評価方法を述べ、試算例として既存の中層RC造事務所ビルの地震と火災を対象とした災害対策の選定問題を示す。ここでは、代表的な地震対策・火災対策の種類や性質を整理するとともに、これらの対策を実施したときのリスクを評価し、ミニマックス原理に従って対策案の優先順位を決定する。

II. 災害対策に関する意思決定問題の定式化

災害対策を実施すれば確実に費用が発生するが、将来に発生する損失は小さくなると推測されるものの、その損失の大きさを事前に確定的に知る方法はないし、またそもそも災害が発生するかどうかにも不確定である。このように不確定性を伴って複数の状況が想定され、判断が結果の生起確率に影響を与える意思決定問題には、意思決定樹(decision tree)⁴⁾を用いた分析が便利である。意思決定樹とは、問題に関係する要素を判断(decision)、事象(event)、結果(consequence)に分類し、その関係を樹形(tree)で表現することで、意思決定問題を視覚的に理解するための図的表現であり、判断の選択肢(alternative)ごとに事象の分岐に与えられた確率に従って結果の期待値をとり、期待値を最大(最小)とする選択肢を選ぶこ

キーワード：リスク管理，災害対策，地震，火災，
意思決定，統合，優先順位

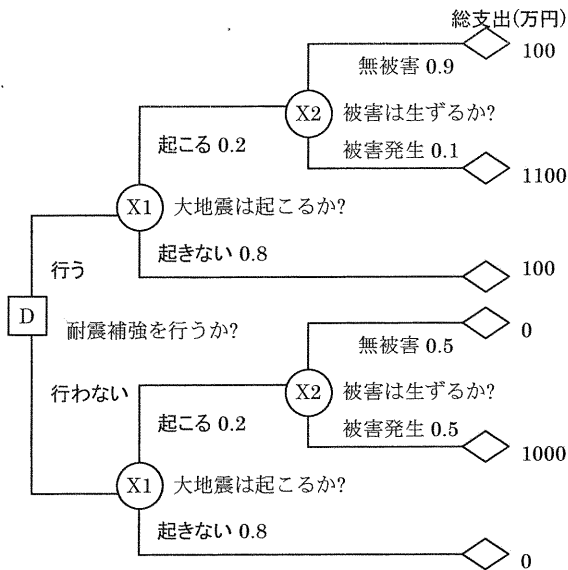


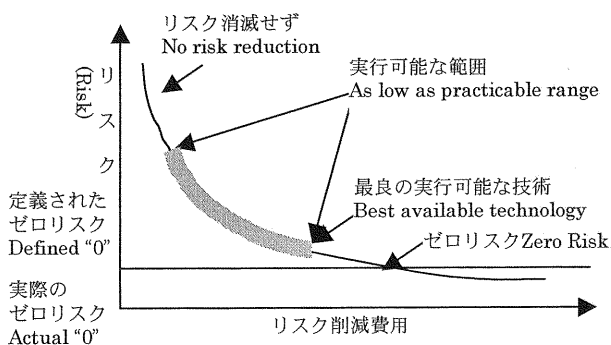
Fig.1 Example of Decision Tree

とで意思決定問題を解く。意思決定樹の例として、「今後50年間を
考えて建物の耐震補強をすべきか否か」という意思決定問題を示す。

ここでは、簡単のために、50年間に大地震は1回起こるか否かであり、大地震が起こる確率は20%、また大地震が起きたときには無被害（損失0万円）か、被害（損失1000万円）が発生するかのいずれかで、耐震補強をしたとき無被害90%、被害発生10%に対し、耐震補強をしなかったときはそれぞれ50%の確率で生ずるものとする。また、耐震補強にかかる費用を100万円とする。

この問題の意思決定樹をFig.1に示す。ここで、判断は「耐震補強をするか」、選択枝は「耐震補強をする」「耐震補強しない」、事象は「地震の発生」と「被害の有無」、結果は補強費用も含めた支出全体である。事象の確率には「地震の発生」のように選択の影響を受けないものと「被害の有無」のように選択の影響を受けるものがあることに注意したい。この問題の意思決定は、選択枝それぞれについて、各結果とその確率を掛けて足しあわせて期待値を計算すると、「耐震補強をする」とときには120万円、「耐震補強しない」とときには100万円となり、支出は小さい方がよいから耐震補強をしないことが合理的な判断となる。

さまざまな災害対策を考慮したリスクマネジメントに、このような意思決定樹を適用する場合には、選択枝は災害それぞれに対する

Fig.2 Image of "Zero" Risk⁷⁾

対策の組合せとなる。また、災害が発生したときの結果（損失）は原因となったペリルの大きさや発生状況、建築の管理状況や災害時の対応によってさまざまな状況を考える必要がある。こうした結果の多様性に対し、考え得る限りのシナリオを多数設定する方法⁵⁾もあるが、後述のリスク曲線を用いれば発生し得る損失を連続量で表現することができる。本研究では、対象の状況の詳細に立ち入らずにリスク評価を行うため後者の表現を採用し、上記の例題における事象 X2（被害の発生）が被害程度も含めて無限個の結果に分岐すると考えた。このとき、損失の期待値は、後述の「Ⅲ. リスク曲線」にあるようにリスク曲線を積分することで計算できる。

また、災害対策に関する意思決定では、結果の不確実性に加え、災害による損失が稀にしか起こらないが、発生したときには大きな損失になり得るという性質も考慮しなければならない。つまり、小さな損失は利益との相殺、積立金の取り崩しなどで対処できるが、損失が大きくなれば、新規の借入れ、資産の売却など、より痛みの大きな手当てが必要になるため、損失の絶対値と財務への影響度合いは線形関係になく、意思決定者は大きな損失をより避けたいと考える（risk averse）のが一般的である。こうした意思決定者の選好を表現するのに効用関数⁶⁾を用いることもあるが、確実性等価（certainty equivalent）⁴⁾による意思決定者の選好の定量化は必ずしも容易ではない。本研究では、建物の詳細に立ち入らずに各々の災害のリスク評価を行うことを前提にしているので、意思決定規範についても比較的簡単に導入できるミニマックス決定方式（minimax decision procedure）を用いる枠組みとした。ミニマックス決定方式とは、最も悪い状況を想定して、そのときの利得を最大化（損失を最小化）させるような選択を行う戦略で、ゲーム理論では、相手の意図よりも相手の能力の把握に基礎をおいた戦略とされている⁶⁾。災害を対象にする場合、自然の意図を汲み出すことができないとするならば、この原理に従う意思決定は合理的といえるが、「最悪」を厳密に考えると、どの対策をとっても全損を被る可能性がゼロでないことから、現実的な意思決定では「最悪」とみなせる、すなわち意思決定を行う上で可能性をゼロとみなす確率を定める必要がある。この閾値は絶対的なものではなく、危険の大きさや危険が及ぶ影響、対策に必要な費用などさまざまな要素によって決定され、むしろ、閾値を決めることが意思決定の重要な要素といえる。Fig.2は、リスク削減とそれにかかる費用との関係⁷⁾を示したもので、現実のゼロ（actual "0"）にたどり着くには無限の費用がかかってしまうため、実際には技術的に実行可能な改めて定義したゼロ（define "0"）を設定し、さらに費用との兼ね合いから実行可能な範囲（as low as practicable range）を絞り込み、ミニマックス決定方式をとることになる。また、意思決定樹を用いたミニマックス決定方式による意思決定では、「最悪」とみなすレベルを超える確率で生ずる最大の損失を選択枝ごとに計算し、その損失が小さい選択枝を合理的な選択とする。

Ⅲ. リスク曲線

1. リスクの表現手段

JISにおけるリスクの定義は、ISO/IEC Guide73⁸⁾において提案された「事象の発生確率と事象の結果の組合せ」となっているが、そのほかにも、事象の発生確率とその影響の大きさの積⁹⁾、損失額

の期待値⁹⁾や資産価値の変動量¹⁰⁾などを「リスク」とする分野もあり必ずしも一意に定まっているわけではない。また、JIS の定義を採用するにしても、異なる災害のリスクを比較・統合するには、評価対象とする「結果」が指示する内容を比較可能な同一の表現で表すことが不可欠であり、その表現はリスクマネジメントの意思決定者の選好を反映できるものでなければならない。本研究では、意思決定者として事業活動を営む個人または法人の責任者を想定し、災害の「結果」を「意思決定者が営む事業の財務に対する負の影響の金銭価値」（以下、簡単に損失）で評価するものとした。また、損失とその発生確率の組合せを表現する手段は、評価対象期間における損失の最大値がその値を超える確率（超過確率）を示すリスク曲線を用いることにした。リスク曲線は損失の確率分布関数の補関数であり、損失が評価期間に一回だけ生ずると仮定すれば、リスク曲線を積分すれば損失の期待値が得られる¹¹⁾。

災害に起因するリスク曲線の具体的な評価法は、それぞれの分野で研究・開発されているが、以下では地震と火災について、本研究で採用したリスク曲線の評価法について述べる。

2. 地震リスク曲線

地震リスク曲線は一般に次の手順で評価される^{11), 12)}。まず、評価対象の建設地に影響を及ぼし得る地震を引き起こす震源について、地震のマグニチュードとその生起確率をモデル化する。続いて、想定した地震各々に対して、距離減衰式などを用いて建設地における地震動強さを推定し、地震動強さ X の超過確率（ハザード関数） $H(x)$ を評価する。一方、評価対象の耐震性能を地震動強さと建物の地震被害との関係をフラジリティ曲線¹²⁾、被害率関数¹³⁾と呼ばれる関係 $F_D(D > d | X = x)$ を用いて表現する。 $F_D(D > d | X = x)$ は、地震動強さが x であるときに、被害 D （あるいはその金銭換算値）が d よりも大きくなる確率である。これらを次式のように積分すれば、被害 D （あるいはその金銭換算値）が d よりも大きくなる確率、すなわち、リスク曲線の評価できる。

$$P(D > d) = \int P(D > d | X = x) dH(x) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、(1) 式の右辺は、 $H(x)$ が連続値として表現されているときには、 $\int P(D > d | X = x) \frac{dH(x)}{dx} dx$ 、離散値で表現されているときには、 $\sum P(D > d | X = x) \{H(x + \Delta x) - H(x)\}$ を表す。以下では $H(x)$

は連続的に表現されているとして議論を展開するが、離散値の場合でも微分を差分に置き換えるなどして考えれば特に違いはない。

本研究では、(1) 式右辺について対象性を考えることで得られる¹⁵⁾ (2) 式を考える。

$$P(D > d) = \int H(x) dP(D > d | X = x) \quad \dots \dots \dots (2)$$

また、(2) 式の入力の強さを表す X のかわりに建物の最大応答 S を用い、それにあわせてハザード関数 $H(x)$ を建物の最大応答の確率分布 $F_S(s)$ の補関数で置き換える。 $F_S(s)$ の評価には、文献 14 の手法を用い、対象建物を完全弾塑性の復元力特性をもつ一質点系でモデル化し、震源モデルと応答スペクトルの距離減衰式と地盤特性

を考慮した地表面応答スペクトルのハザード関数に対して等価線形法を用いて最大応答 S が s を超えない確率として求める。

一方、耐震性能を表す $dP(D > d | S = s)$ (X を S と書き替えることに注意) については、次のように評価できる。まず、リスク曲線に用いる横軸として補修費用の再調達価格に対する比率であるダメージファクタ（以下、DF）を用いるために、(3) 式の d を df と書き換える。続いて、 df と最大変形角 s の関係 $df = f(s)$ を定量化する。ただし、この関係には不確実性があるので、これを考慮するために確率変数 Θ を導入して、 df と s の関係に(3)式を仮定する。

$$DF = f(s, \Theta) \quad \dots \dots \dots (3)$$

また、 Θ の確率密度関数を $f_\Theta(\theta)$ とする。ここで、(2) 式の

$dP(D > d | S = s)$ （ここでも x を s に書き替える）は、応答が $S = s$ であるときに $DF = df$ となる確率なので、(3) 式の逆関数である

$$S = f^{-1}(df, \Theta) \quad \dots \dots \dots (4)$$

を用いて得られる s を、(2) 式の x と考えたときには、

$dP(D > d | S = s) = f_\Theta(\theta) d\theta$ となる。すなわち、

$$P(DF > df) = \int \{1 - F_S(s)\} f_\Theta(\theta) d\theta \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 s は $s = f^{-1}(df, \theta)$ を満たす応答変形

続いて、 $DF = f(s, \Theta)$ の評価方法として、RC 造を対象とした例を示す。まず、例えば「RC 造建物の被災度判定区分¹⁶⁾」などを参考に、補修を必要とする被害レベルを定義し、被害レベルそれぞれに対して補修費用を算定する。一方、被害レベルそれぞれに対応する変形能力の限界値（変形能力）の統計値を実験データ^{例えば 17)}をもとに評価する。ここでは、仮に被害レベルとして、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの三つのレベルを考え、補修費の再調達価格に対する比（DF）をそれぞれ x_I 、 x_{II} 、 x_{III} ($0 \leq x_I < x_{II} < x_{III} \leq 1$)、変形能力の期待値をそれぞれ μ_I 、 μ_{II} 、 μ_{III} とする。さらに、各被害レベルの変形能力に完全相関を仮定し、変形能力の期待値と DF の関係をベータ分布で補間する。ここで、ベータ分布を選ぶ理由は、DF=0, 1 に対応する塑性率をそれぞれ塑性率の上下限として 0~1 の範囲で連続的に分布する関数を容易に設定できるからである。

定義域を (a, b) とするベータ関数は(6)式で表されるから、被害レベルⅡ、Ⅲに対応する変形能力をそれぞれ $\alpha \cdot \mu_I$ 、 $\beta \cdot \mu_I$ とすれば、 $a=0$ 、 $b=\beta \cdot \mu_I$ であることを考慮して、(7) 式のようになる。

$$f(r) = F_X \left(\frac{r-a}{b-a} \right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{ここで、} F_X(x) = \int_B \frac{1}{B} x^{s-1} (1-x)^{t-s-1} dx$$

$$B = \frac{\Gamma(r)\Gamma(t-r)}{\Gamma(t)}, \quad \Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$$

$$F_X\left(\frac{1}{\beta}\right)=x_I, \quad F_X\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)=x_{II} \quad \cdots \cdots (7)$$

(7) 式を連立し、 $\alpha = \mu_{II} / \mu_I$ 、 $\beta = \mu_{III} / \mu_I$ として t 、 r について解けば、すべてのパラメタが定まる。また、 $f_{\theta}(\theta)$ は被害レベル I に対応する変形能力の確率密度関数である。

3. 火災リスク曲線

火災リスク曲線は、地震リスク曲線に比べて最近になって行われるようになったリスク評価法で、これまで大きく分けて 2 通りの手法が提案されている。

一つは、文献 18 のように評価対象の室配置や消防設備の有無などに基づいて、多数の火災シナリオを作成し、これらのシナリオに発生確率を割り当てたモデル化に対してモンテカルロ・シミュレーションを行って損失の大きさとその発生確率の関係を評価するものである。もう一方は、建物に関する詳細な設計情報は用いず、評価対象を建物用途や建築構造（木造、防火構造、準耐火構造など）で分類し、過去の火災に関する統計データを利用してリスク曲線を評価する統計的手法¹⁹⁾である。前者は特徴としては、火災リスク曲線に建物個別の状況を詳しく反映できるが、反面、多数の火災シナリオを作成し、防火対策の成否確率や隣室への延焼確率などを合理的に設定するのにコストがかかること、またこれらの精度が評価結果の精度に影響することが挙げられる。後者はその逆に比較的簡易にリスク評価ができるが、建物固有の特徴を反映した評価が難しい。

本研究では、地震リスク評価において、建物を一質点系に縮約した構造モデルを用いるなどどちらかといえば大略的な性状をとらえる評価を行うことを考慮し、火災リスク評価についても詳細なシミュレーションではなく、後者の統計値に基づくリスク評価手法²⁰⁾を採用した。

リスク評価に用いた基データには、1995 年 1 月から 2003 年 3 月までに発生した 491,764 件の火災について消防組織法に基づき消防庁長官に提出される火災報告のデジタルデータ(以後、火災データとする)で、データ項目の詳細は文献 21 に示されている。

評価手順は、これらの火災データを建物用途ごとにまとめ、焼損面積が 0 m² でないデータについて、焼損面積の建物延床面積に対する比（以下、焼損率とする）を算出し、これを昇順に並べて焼損率の累積度数分布をつくる。この累積度数を該当するデータの全数で除せば、焼損が発生したという条件付きの焼損率の確率分布関数 $F_{Dd}(d_f|f)$ が得られる。ここで、 D_f は焼損率、 f は焼損の発生を示す。 $F_{Dd}(d_f|f)$ に焼損の発生確率を掛ければ、焼損率の確率分布関数を得ることができる。ここでは、焼損発生確率を、年間出火率 × 焼損面積が 0 m² でないデータの数/全データ数とした。年間出火率は、建物用途ごとのストックが明確な防火対象建物を対象としたデータに基づく年間出火率として、消防白書に記載される建物用途ごとの年間出火件数を当該用途の防火対象物数で除した値とした。なお、防火対象物の数は当該用途の建物数よりも少ないため、ここで用いた出火率は現実をやや大きめに見積もっていると考えられるが、火災データには火災を起こしていない建物に関する情報は掲載されておらず、そのほかの統計においても、とくに非住宅建物については、建物ストックの情報が欠落しており、非住宅建物の建物棟数あ

たりの年間出火確率を正確に求めることは困難である。文献 22 は、施設数ベースの出火率を評価することの限界について述べるとともに、建物用途に応じて、例えば旅館・ホテルであれば客室数あたり、百貨店であれば売り場面積、もしくは従業員数あたりといった指標をとることが合理的であると指摘している。

また、複数年間を対象とした火災リスク曲線を算出するときには、1 年あたりの焼損が年間確率で生ずるポアソン過程に従うと仮定して求めた。すなわち、 m 年間における最大焼損率の確率分布 $F_{Df,m}(d_f|f)$ を、 m 年間に n 回焼損が発生する確率 $P_{n,m}$ と焼損が発生したという条件付きの焼損率の確率分布関数 $F_{Dd}(d_f|f)$ を用い、同じ建物で起こった火災でも各火災の焼損率は互いに統計的に独立であると仮定して得られる(8)式で計算した。火災リスク曲線は(8)式の補関数として与えられる。

$$F_{Df,m}(d_f,m) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{n,m} \{F_{Dd}(d_f|f)\}^n \quad \cdots \cdots (8)$$

4. 複合リスク曲線

l 種類の災害を考慮し、対象期間におけるそれぞれの災害によるリスク曲線が $R_i(x)$ ($i=1,2,\dots,l$) で評価された場合、いずれかの災害で生ずる損失の超過確率 $R(x)$ は次式で求めることができる。

$$R_X(x) = 1 - \prod_{i=1}^l \{1 - R_i(x)\} \quad \cdots \cdots (9)$$

地震と火災を考えたときの複合リスク曲線は、地震リスク曲線を $R_{EQ}(x)$ 、火災リスク曲線を $R_{Fire}(x)$ とすれば、(10) 式で表される。

$$R(x) = R_{EQ}(x) + R_{Fire}(x) - R_{EQ}(x)R_{Fire}(x) \quad \cdots \cdots (10)$$

複合リスク曲線を作成するときには、各々のリスク曲線が表す損失について、整合性がとれているように注意する必要がある。今回、研究対象とした地震と火災については、地震リスクが、ダメージファクタ=補修費/再調達価格で表現されるのに対して、火災リスクが、焼損率=焼損面積/延床面積で表現されている。厳密に考えれば、火災による損失を補修するための費用と再調達価格の比率は必ずしも一致せず、例えば、壁だけが焼け焦げて床が燃えない場合は焼損率がゼロと評価される、煙でいぶされた被害や消火に伴う水濡れによる被害が含まれない、補修は新築よりも割高であるなどの点を考えれば、損失を焼損率で代表させた火災リスクは、地震リスクが示す内容に比べて、同じ被害に対して一般に小さめの値を示すものと考えられるが、現状では厳密な意味における火災による損失を簡易に評価することができないため、ここでは焼損率の超過確率をもって、地震リスクと同等のものを表すとして議論を進めることとした。

IV. ケーススタディ

前章までに述べた意思決定問題の例題として、RC造事務所ビルの地震と火災対策に関する意思決定問題を扱う。

1. 対象建物

対象建物の概要を以下に示す。

構造：鉄筋コンクリート造

用途：事務所

規模：地上 11 階建て，延床面積 8800 m²

再調達価格：18.7 億円

設計：1969 年に施行されていた法制に従った設計

2. 対策前のリスク評価

(1) 地震リスク

対象建物の敷地には，文献 14 で扱われた Fig.3 に示す地震活動域が影響を及ぼすものとした。また，地盤条件は同文献において，S-3 として示されるもの，建物モデルは B-3 系列とされるもののうち，せん断力係数が 0.2 のモデルで評価されるものとした。このとき応答変形角の 50 年超過確率を Fig.4 に示す。一方，建物の変形性能は，DF=0.16, 0.43, 1.00 となる三つの被害レベル I, II, III に対して，塑性率の限界値をそれぞれ平均値 0.64, 1.47, 2.00, 変動係数をすべて 0.4 の対数正規分布でモデル化した。

以上の条件に対して(5)式で評価した地震リスク曲線(破線)を Fig.5 に示す。なお，同図中にはこのあと述べる火災リスク曲線(細実線)，複合リスク曲線(太実線)も描かれている。

(2) 火災リスク

火災リスク曲線は，Ⅲ.3 節で述べた火災データにおいて，以下の条件でデータを抽出して評価した。

- ・ 建築火災
- ・ 爆発を除く
- ・ 構造区分：防火構造，耐火構造，または準耐火構造（非木造）
- ・ 建物用途：事務所の性格を有するもの及びその付属別棟建築物，中分類の複合建築物または中分類の各項目に該当しない建築物
- ・ 消防設備の設置状況：スプリンクラと自動火災報知設備について該当なし，あるいは政令による設置対象であるが設置なし

消防設備について，スプリンクラと自動火災報知設備の条件を設定した。これは，1969 年当時に比べて現在の法制で設置義務が厳しくなっている設備として，11 階以上のスプリンクラ，3～8 階の自動火災報知設備があり，本ケーススタディでは建設当時の法制を最低限満足しているが現行の法規には適合しない，既存不適格である建物を想定しているからである。

上記の条件のもとに抽出されたデータは 4,168 件で，焼損面積が 0 m²でないデータは 1,671 件であった。年間出火率は，Table 1 に示す消防白書に記された事務所用途（防火対象物）の建物数と火災件数を参考に，0.0022 回/年とし，評価対象期間における火災の最大発生回数は 3 回とした。

以上の条件で評価した火災リスク曲線（焼損率=DF とした 50 年超過確率）が Fig.5 に細実線で示されている。

(3) リスクの統合化

地震リスク曲線と火災リスク曲線を（10）式により統合化して Fig.5 に太実線で示した。DF=1 で火災リスク曲線と複合リスク曲線の超過確率が一致するのは，地震リスクを評価する際に，変形能力が対数正規分布することを仮定しているため，地震を原因として DF=1 となる確率が 0 と評価されるからである。

3. 災害対策

建物を対象とした地震・火災に対する主な対策を Table 2 に整理した。ここに示すように，ハードウェアによる対策は，地震，火災のいずれに対しても建物自体の補修費用や什器や生産設備など建物

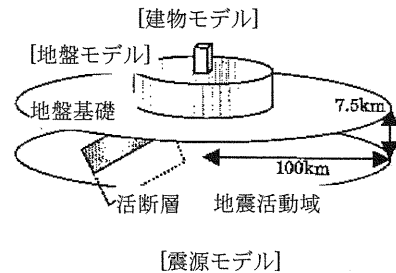


Fig.3 Model of Sources, Ground, and Building¹⁴⁾

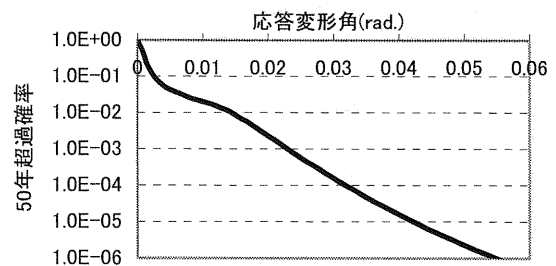


Fig. 4 Excess Probability of Maximum Drift Angle in 50 Years¹⁴⁾

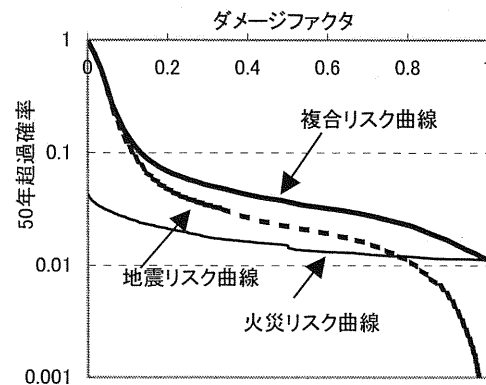


Fig. 5 Risk Curve

Table 1 Fire Breaking Rate of Office Building

年	1999	2000	2001
対象数*	376,916	382,956	392,074
出火件数	835	833	862
出火件数 / 対象数	0.222%	0.218%	0.220%

*消防法施行令（昭和 36 年政令第 37 号）別表第 1（十五）項に該当する建物の数

Table 2 Summary of Measures for Earthquake and Fire

災害	被害の分類		ハードウェアによる対策	ソフトウェアによる対策
地震	直接損失	・建物被害・設備被害 ・什器・備品の破損	・各種の耐震補強 (耐震壁増設, 制震・免震装 置の採用等) ・什器・備品の固定	該当せず
	間接損失	・人的被害 ・利益機会の喪失等		・避難訓練, 安全教育, 震災対応計 画 ・施設の分散配置, 備蓄
火災	直接損失	・建物被害・設備被害 ・什器・備品の破損	・防火設備の増設 (延焼防止, 避難安全確保)	・消防計画策定・防火管理者任命 ・自衛消防隊の組織
	間接損失	・人的被害 ・利益機会の喪失等		・避難訓練, 安全教育 ・施設の分散配置, 備蓄

Table 3 Table of Options

番号	地震対策	火災対策
①	現状維持	現状維持
②	耐震補強	現状維持
③	現状維持	自火報
④	現状維持	自火報+スプリンクラ
⑤	耐震補強	自火報
⑥	耐震補強	自火報+スプリンクラ

自火報：自動火災報知設備

収容物・設備の被害の、いわゆる直接損失を減ずる効果がある。一方、ソフトウェア対策は、地震に対しては直接損失を減ずる効果よりも施設の再稼働を早めたり人的被害の軽減を狙うものであるのに対し、火災に対しては、間接損失はもちろんのこと、出火の可能性を減らし、また出火した場合にも初期消火を効果的にするなど直接損失を減らす効果も期待できる。このためか既存建物に対する火災対策として防火設備を増設するなどのハードウェアによる対策を施した事例はほとんどないが、ここでは、慣例にとらわれず合理的なリスクマネジメントを目指し、地震対策として耐震補強、火災対策として、3～8階の自動火災報知設備の設置、もしくは自動火災報知設備に加え11階にスプリンクラを設置の二つを選択肢とし、現状維持も含めて、Table 3に示す合計6ケースの組合せについてリスクの削減効果を比較した。ここで、火災対策としてスプリンクラ単独の増設を考へないのは、火災データにおいて、自動火災報知設備が設置されておらず、かつスプリンクラが設置されているケースが皆無であるため、火災リスク曲線が評価できないこと、そしてこのような対策は現実的ではないと考えられるからである。

耐震補強は靱性を増加させる対策を想定し、簡単のために強度はそのまま、被害レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲを被るときの限界値となる塑性率が期待値1.7、3.0、5.1に向上するものとした。ただし、変動係数は0.4でかわらないものとした。

火災リスクについては、以下のデータで評価した。自動火災報知設備のみを設置する場合は、スプリンクラについて：該当なし、もしくは政令による設置対象で設置なし、自動火災報知設備について：政令による設置対象であるか否か、使用の有無に係らず設置ありとしたもので該当データ数1,663件、自動火災報知設備、スブ

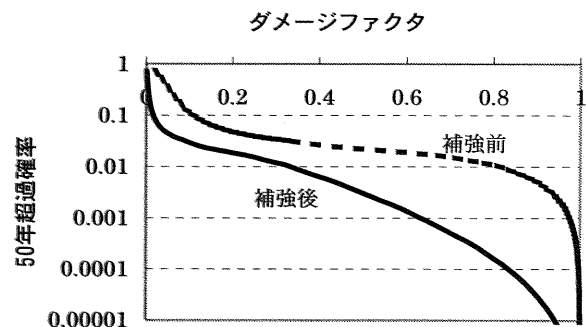


Fig. 6 Reduction of Seismic Risk by Retrofit

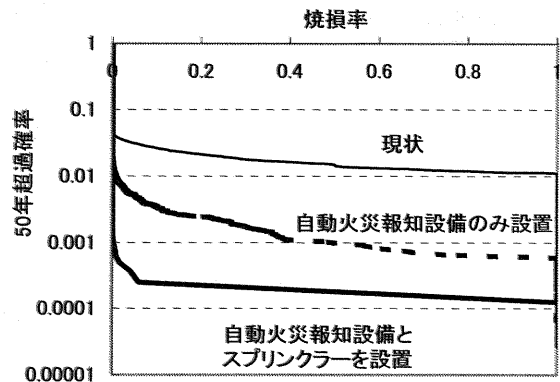


Fig. 7 Reduction of Fire Risk by Additional Facilities

リンクラをともに設置する場合は、スプリンクラ、自動火災報知設備それぞれについて：政令による設置対象であるか否か、使用の有無に係らず設置ありとしたもので、該当データ数290件である。また、出火率は消防設備を設置しても変わらないものとした。

Fig. 6, 7にそれぞれ耐震対策と火災対策を施したときの、それぞれのリスク曲線の変化を示す。両図から、対策を施すことによってそれぞれのリスクが大きく低減されることが見て取れる。ただし、ここで作成した火災リスク曲線は上で述べた条件に適合する火災データを整理したものに基づき、設定した以外の条件については反映されないことに注意しなければならない。例えば、自動火災報知設備を設置したときの火災リスク曲線と基となるデータは、自動火災

報知設備が設置されていることは保証するが、それ以外の条件をつけていないため、自動火災報知設備が設置された建物は、そうでない建物（現状の火災リスク曲線のもとになったデータ）に比べて、そのほかの消防対策がなされている可能性が高いと想像できる。したがって、上記の手法で作成したリスク曲線を比較して得られる対策の効果は、検討対象とした対策を単独に施した効果よりも大きく見積もられすぎている可能性がある。

続いて、これらの対策がトータルリスクに及ぼす影響をみるために6種類の対策案について複合リスク曲線を計算しFig.8に示した。

Fig.8 から定性的な特徴として以下が見て取れる。

- ①比較的小さい損失は耐震補強により、比較的大きい損失は火災対策により発生確率が抑えられる。
- ②地震対策を行わず、火災対策だけを行った場合、自動火災報知設備を設置した場合とさらにスプリンクラも設置した場合はほとんど差がみられない。

①については、Fig.5 に示されるように、現状のトータルリスクが、比較的小さい損失は地震リスクにより、比較的大きい損失は火災リスクにより支配されているので、それぞれの領域を支配する災害について対策を施すことが効果的となることを示している。また、②については、地震対策を行わない場合、自動火災報知設備を設置するだけで、火災リスクは地震リスクに対して相対的に十分小さくなるので、それ以上の対策をしてもほとんど効果がないことを表している。また、先に述べたように、ここで評価した火災リスクは地震リスクに比べて全体的に過少評価されている可能性があるが、仮に火災リスクがより正確に見積もられた場合、Fig.5 において、火災リスク曲線が相対的に右上に移動する。それに伴い複合リスク曲線も変化し、地震リスクに比べて火災リスクの影響が大きい範囲はより高頻度低レベルの被害にまで増大するが、全体的な傾向に変化はない。

4. 災害対策案の優先順位

対策案⑥は、リスク低減効果は高いが、対策費用も大きくかかるため、すべての場合においてこの対策が合理的とは限らない。ここでは、対策費用を含めた総支出に対して、意思決定者の方針を反映した対策の優先順位を決定する意思決定問題として、ミニマックス原理に基づく「最悪」の程度を50年間の超過確率で表現し、超過確率ごとに対策の優先順位を決定した。

対策にかかる費用は以下のように想定した。まず、耐震補強にかかる費用は文献 23 を参考に柱の炭素繊維巻補強を想定し、直接工事費用として $878(\text{千円}) \times 128(\text{本}) = 1.12(\text{億円})$ とした。また、文献 25 によれば、耐震補強工事では直接工事費に加え、①仮設工事費、②諸経費、解体工事費、④仕上復旧工事費が必要であり、またテナントなどが入居しているときには、⑤テナント移転費用が発生する。これらの費用は条件により大きく異なるが、直接工事費と同程度が平均的であることを参考に、耐震補強工事が行われた場合には火災対策の有無に関わらず直接補強工事費に加え、1 億円を上乗せした。

火災対策については、既存建物への増設はほとんど行われていないため、費用は新築時の単価²⁴⁾を参考に算出した。すなわち、自動火災報知設備は $4,295(\text{円}/\text{㎡}) \times 800(\text{㎡}) \times 6(\text{階分}) \times 3(\text{更新2回分を含む}) = 0.63(\text{億円})$ 、スプリンクラは $4,700(\text{円}/\text{㎡}) \times 800(\text{㎡}) \times 1(\text{階分}) \times 3(\text{更新2回分を含む}) = 0.12(\text{億円})$ とした。ま

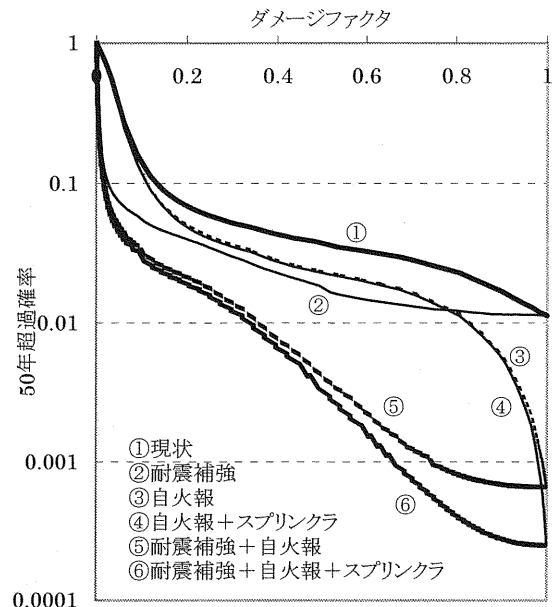


Fig. 8 Comparison of Risk Curves by Disaster Measures

Table 4 Summary of Earthquake and Fire Measures

対策案 番号	総工費 (億円)	期待 支出額 (順位)	最大支出額			
			50年間に於ける超過確率			
			50%	10%	5%	1%
①	0	3.33 (1)	1.23 (1)	4.86 (4)	11.78 (6)	37.40 (5)
②	2.12	3.38 (2)	2.31 (2)	3.17 (1)	6.88 (3)	39.60 (6)
③	1.58	4.40 (5)	2.81 (3)	5.43 (5)	8.91 (4)	31.87 (3)
④	2.09	4.87 (6)	3.32 (5)	6.50 (6)	9.42 (5)	32.38 (4)
⑤	3.15	3.84 (3)	3.29 (4)	3.90 (2)	5.03 (1)	16.21 (2)
⑥	3.57	4.13 (4)	3.63 (6)	4.09 (3)	5.14 (2)	15.61 (1)

金額の単位はすべて億円、()の数字は順位を表す

た、消防設備には維持保全費用として、自動火災報知設備、スプリンクラそれぞれに $800(\text{千円}/\text{年}) \times 50(\text{年}) = 0.4(\text{億円})$ 、 $600(\text{千円}/\text{年}) \times 50(\text{年}) = 0.3(\text{億円})$ を見込んだ。耐震補強が行われなかったときの間接費用は、工事の必要な階数を考慮して、自動火災報知設備の単独のときには $1.0 \times 6/11 = 0.55(\text{億円})$ 、スプリンクラと自動火災報知設備の両方を設置するときには $1.0 \times 7/11 = 0.64(\text{億円})$ とした。

Table 4 に、各対策を施したときの期待支出額と50年間の超過確率を50%、10%、5%、1%にしたときの最大支出額、またそれぞれの意思決定規範を採用したときの優先順位をまとめた。ここで、最大支出額とは、(対策費用) + (直接損失額) + (間接損失額) と

し、間接損失額は直接損失額と同額と仮定したので、(対策費用) + (直接損失額) × 2 で計算した。また、対策費用は対策時点で発生する費用であるのに対し、災害による損失は評価期間のある時点で発生する(発生しないかもしれない)費用であることから、災害による損失に関しては、金利による割引を考慮すべきであるが、ここでは簡単のためこの影響を無視しているため、相対的に災害による損失の影響を大きめに見積もった評価であることを指摘しておく。Table 4 では、各意思決定規範で優先順位が1位となった対策のセルを灰色で示した。Table 4 から、期待損失額を最小化するのは、対策案①の「なにもしない」ことで、もし意思決定者が確率的に中立(risk neutral)であれば対策をせず現状を維持することを支持することになる。しかしながら、通常的意思決定者はリスクに対して嫌忌的(risk averse)であり、意思決定規範としてミニマックス原理における最悪の状況を表す50年間超過確率を50%→10%→5%→1%と小さくすると、すなわち、より保守的な意思決定規範に従うことを意味し、優先順位1位となる対策は、①→②→⑤→⑥とより大きな対策費をかけることが合理化されることがみてとれる。また、火災対策は地震対策に比べて費用はかからないが、本例題では50年間超過確率が50%または10%といった比較的高い超過確率で評価する場合には、地震による損失が支配的なため、火災対策を単独で用いる対策の優先順位は低い。

V. おわりに

複数の災害を考慮したリスクマネジメントの枠組をまとめた。また、地震リスクと火災リスクの評価方法について述べた。ケーススタディとして11階建RC造事務所ビルを対象に、地震対策として耐震補強を、火災対策として自動火災報知機とスプリンクラの増設を選択肢とした災害リスクマネジメント問題を扱った。ここでは、期待損失額を最小化する対策が「なにもしない」ことであっても、意思決定者はリスクに対して嫌忌的(risk averse)であることを考慮し、意思決定規範としてミニマックス原理における最悪の状況を表す50年間超過確率を50%→10%→5%→1%と保守的な意思決定規範に従うにつれ、合理的とされる対策はより大きな対策費をかける手厚い対策に変化することを定量的に示した。

謝 辞

火災リスク曲線の評価にあたっては、株式会社イーアールエスの佐藤博臣氏、村井裕樹博士にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) The Economist Intelligence Limited and MMC Enterprise Risk Inc ; Enterprise Risk Management, Implementing new solutions, 2001.
- 2) ニコラ・ミザーニ ; 保険リスクの証券化と保険デリバティブ, シグマベイスキャピタル, 2000.
- 3) 日下彰宏, 佐藤博臣, 石田寛, 村井裕樹 ; 同一建物における地震リスクと火災リスクの比較, 日本建築学会大会梗概集, B-1 分冊, (2004), pp.265-266.

- 4) K. T. Marshall and, R. M. Oliver ; Decision making and forecasting, McGraw-Hill Inc, 1995.
- 5) 阿知波正道, 水谷守 ; 地震損害保険ポートフォリオ算定手法, 株式会社損保ジャパン・リスクマネジメント・ウェブサイト http://www.sjrm.co.jp/rm_teryo/02.pdf, 2005.
- 6) 松原望 ; 現代人の統計 4 新版意思決定の基礎, 朝倉書店, 1985.
- 7) 日本リスク研究学会編 ; リスク学事典, TBS プリタニカ, 2000.
- 8) International Organization for Standardization, and International Electrotechnical Commission; Guide 73 リスクマネジメントー用語集ー規格において使用するための指針, 2002.
- 9) 古屋俊輔 ; リスクマネジメントに関する総説, 土と基礎, 51-10, (2003), pp.1-7.
- 10) D.G.ルーエンバーガー ; 金融工学入門, 日本経済新聞社, 2002.
- 11) 兼森孝 ; リスク分析, 土木学会誌, vol.85, (2000), pp.13-17.
- 12) 星谷勝, 中村孝明 ; 構造物の地震リスクマネジメントーリスクを定量的に分析し, 損失を抑える手法とは, 山海堂, 2002.
- 13) 石田寛 ; 被害率関数と損傷度関数の関係について, 日本建築学会大会梗概集, B-2 分冊, (2001), pp.111-112.
- 14) 石田寛, 源栄正人 ; 地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルに基づく建築構造物の地震リスク評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, (2004), pp.23-30.
- 15) P.トフークリステンセン, M.J.ペイカー, 津津義定 ; 構造信頼性, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1986.
- 16) 国土交通省住宅局建築指導課監修 ; 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 建築防災協会, 2001.
- 17) 建設省建築研究所, 大変形下における鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する資料集 (その1~3), 建築研究資料, No.21, 建築研究所, 1978.
- 18) 掛川秀史ら ; 建築物のライフサイクル火災リスクに関する研究 その1からその3, 平成15年度日本火災学会研究発表会概要集, (2003), pp.324-335.
- 19) 村井裕樹, 鈴木恵子, 栗岡均, 志田弘二, 佐藤博臣 ; 焼損面積の分布特性に関する考察 防火対策の火災損害抑止効果に関する統計分析その1, 平成15年度日本火災学会研究発表会概要集, (2003), pp.336-339.
- 20) 日下彰宏, 佐藤博臣, 石田寛, 村井裕樹, 同一建物における地震リスクと火災リスクの比較, 日本建築学会大会梗概集, B-1 分冊, (2004), pp.265-266.
- 21) 防災行政研究会 ; 10 訂版 火災報告取扱要領ハンドブック, 東京法令出版, 2005.
- 22) 野崎洋之, 小林裕 ; 統計データに基づく火災リスク評価手法について, 平成16年度日本火災学会研究発表会概要集, (2004), pp.350-351.
- 23) 河部誠, オーナーから見た耐震改修, 建築防災, No.288, (2002), pp.33-35.
- 24) 中野美奈, 油野健志, 湯谷孝夫, 室崎益輝 ; 防火対策の設置と信頼度が避難安全性と防火コストに及ぼす影響, 日本建築学会計画系論文集, 第 516 号, (1999), pp1-7.