

第3章 地震危険度指標の算出例

本章では、地震危険度指標を“地震リスクの大きさを定量的に表わす量”と定義した上で、各種地震危険度指標を算出するための定量的な地震リスク分析方法について概説する。

3.1. 地震リスク分析の基本的考え方

地震リスク分析は、将来起きるであろう大地震が保有資産にもたらす経済的な損失の大きさとその発生確率を分析するものである。ここでの発生確率は、目的とするものが経済的損失であるので、単に地震の発生確率だけでなく、損失予測の不確実性を含めた損失の発生確率であることが望ましい。

地震リスク分析は、基本的に将来の予測であるから、少なからず不確実性 (Uncertainty) が含まれる。特に地震リスクの場合、ハザードの対象が不均質な地盤・地殻でその構造や性状を十分把握することが難しいこと、大地震発生の再現期間は数十年から数万年と人の歴史と比較して極めて長く、現象を解明するために必要なデータ量が必ずしも十分でないことなどから、地震リスクの大きさを高い信頼性をもって予測することは難しく、不確実性はその他のリスクと比べて一段と大きいといわざるを得ない。例えば、地震の規模、発生場所、発生時期について高い信頼性をもって予測することは地震学の最新の知見をもってしても困難であり、また、発生した地震が分析対象所在地にどの程度の地震動をもたらすかを正確に予測することも難しい。さらに、予測した地震動に対して保有資産にどのような被害が予想され、これがいくらの損失をもたらすかについても、決して実被害額と予想被害額が一致すると言い切ることが出来ないであろう。地震リスク分析においては、算出した予測結果に少なからず不確実性が含まれていることを認識した上で、最終的な分析結果の中に不確実性を合理的に取り込むことが不可欠といえよう。

さて、想定地震による損失額を予測する手法には、極めて高度な手法から簡便な手法まで様々な方法がある。どのような手法を採用するかは、分析の目的、使用できる情報量、許容される分析費用などに依存する。例えば、原子力発電設備を対象とする場合は、地震被害により重大事故が発生した時には設備の被害のみならずその周辺にも深刻な影響を及ぼすので、 10^{-8} 以下の発生確率が議論される。このように高い信頼性が要求される分析においては、最新の知見と技術を駆使した詳細で高度な分析手法が必要となる。また、より多くの情報も必要であり、情報収集コストも含めて分析費用は多額なものとなる。

一方、商業用ビルを対象とした不動産取引や証券化のための地震リスク分析においては、ビルの収益性に対して地震リスクが大きなインパクトになるか否かを確認することを目的とするものであり、必ずしも原子力発電設備のような高い信頼性を要求されるものではない。また、分析にかけられる費用についても制約があり、商業用ビルの地震リスク分析で

は比較的簡便な方法が用いられるのが一般である。さらに、損害保険会社が保有する地震保険に関する地震リスク分析の場合、分析対象建物数は数万棟から数百万棟に及ぶ膨大な数となる。このような膨大な数の建物を分析対象とするポートフォリオ地震リスク分析においては、個別に詳細な分析を行うことは、費用と時間の点から見ても現実的ではない。また、個別分析に使用できるほどの情報量は通常得られないのが実情である。このようなポートフォリオ分析では、必要最小限の基本情報を使用し、各範疇別に平均的な建物の地震時脆弱性を仮定した簡易な分析手法が用いられる。ただし、極めて多数の建物の地震被害損失総額は、個々の予想損失額を加算する事から求められるが、分析対象数が多ければ多いほど加算結果は平均値に近づくこととなり、結果的にポートフォリオ分析結果として得られる予想損失額の信頼性は向上する。(3.7節 ポートフォリオ地震リスク分析の例)

本稿では、様々な分析手法のうち、図 3-1 のフローチャートに示す、実用的に用いられている比較的簡便な地震リスク分析手法を紹介する(文献 15)。紹介する方法論は、大小多数の想定地震を設定することにより日本全域の地震活動度を表現する「地震活動度モデル」、個々の想定地震が発生した際に分析対象地での地震動の大きさを予測する「地震動予測モデル」、その地震動が分析対象物にもたらす被害損失額を予測する「被害損失予測モデル」、さらに得られた多数の想定地震による予想損失額からリスクの大きさを算定する「リスク算定モデル」から構成される。

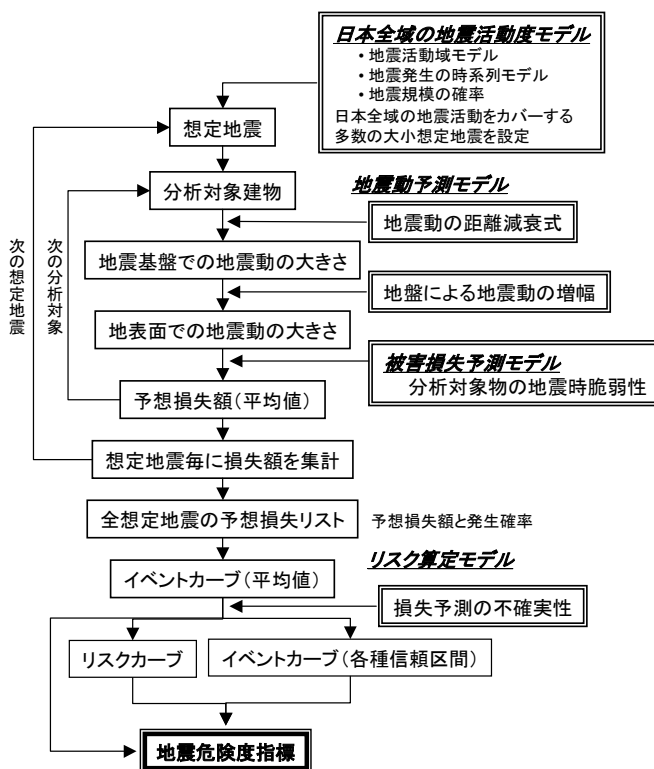


図 3-1 地震リスク分析フローチャート

3.2. 地震活動度モデル

地震活動度モデルは、日本全国に所在する分析対象に被害を与える可能性のある大小の想定地震を多数設定して、日本全域の地震活動度を表現するものである。最大規模の想定地震だけでなく中小規模の想定地震も含めるのは、地震規模が小さくとも、分析対象が震源に近ければ、分析対象に大きな被害をもたらす可能性があるためである。それぞれの想定地震には、マグニチュード、震源位置、および発生確率が設定される。

想定地震の震源モデルとして、線震源モデル、面震源モデルおよびランダム地震域モデルなどが用いられる。

線震源モデルは、活断層に適用されるモデルである。マグニチュードは、松田（1975）による断層の長さとの関係式などから設定する。大規模な活断層については、断層を分割して中規模な想定地震を設定する場合もある。発生確率は、活断層調査で報告されている活動度、平均変位速度、前回活動時期などから推定し、設定する。地震動の距離減衰式を用いて分析対象地での地震動の大きさを予測する際に用いる震源距離は、分析対象地から断層線への最小直線距離を用いる。

面震源モデルは、プレート境界で起きる巨大地震に適用される。地震動予測の際の震源距離は、面から分析対象地までの最小直線距離を用いる。

ランダム地震域モデルは、活断層やプレート境界の巨大地震以外の地震活動に適用される。ランダム地震域モデルの設定に際しては、過去の地震データや地震地体構造の研究結果を参照して、地震活動がほぼ一様とみなせる複数の地震域に区分する。個々の地震域内では規模別の地震発生頻度は同一で、地震の発生場所はランダムであるとしてモデル化する。それぞれの地震域においては、既存の地震研究成果から、最大マグニチュードが設定される。また、被害が起きる可能性がある最小の地震規模という観点に立って、マグニチュード 5.0 程度が最小マグニチュードとして設定される。こうして、それぞれの地震域において、最大から最小まで複数のマグニチュードの地震が想定される。地震の規模別の発生確率は、過去に発生した地震データを使って、Gutenberg-Richter 式を使って推定する。ところで、設定されるそれぞれの地震域は、一般にある程度の広さを持っている。その地震域の中のどこで地震が発生するかによって、被害の大きさは著しく異なってくる。ランダム地震域モデルにおいては、地震域内での地震の発生場所はランダムと定義している。これは、地域内に複数の線震源モデルあるいは面震源モデルを複数配列し、地域全体の地震の発生確率を配列したそれぞれの想定地震に配分することによって表現される。（図 3-2 参照）

こうして、日本全域での大小さまざまな被害地震の発生を表現するモデルとして、少なくとも数千個以上の想定地震が設定され、地震リスク分析に用いられる。

地震保険調査研究資料（文献 16）にこの種の地震活動度モデルが紹介されている。このモデルでは、プレート境界の巨大地震（面震源、東海～南海地震と関東地震）、活断層（線震源、113 の主要起震断層と 145 の起震断層）およびランダム地震域を使ってユーラシアプレート内の地震、太平洋プレート上面付近の地震、フィリピン海プレート上面付近の地震をモデル化している。参考までに、図 3-3 に代表的なモデルを示した。

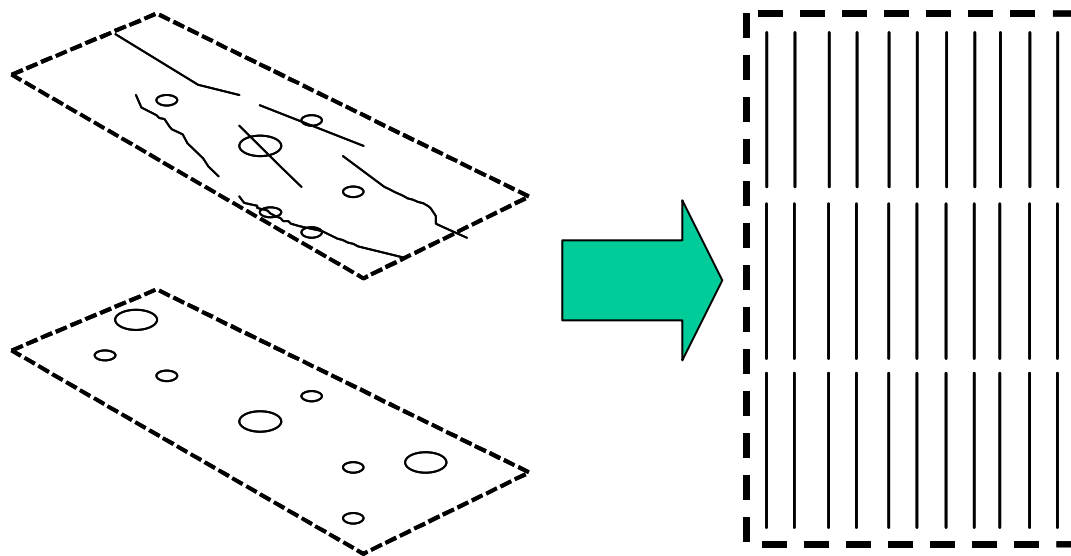


図 3-2 ランダム地震域モデルの概念

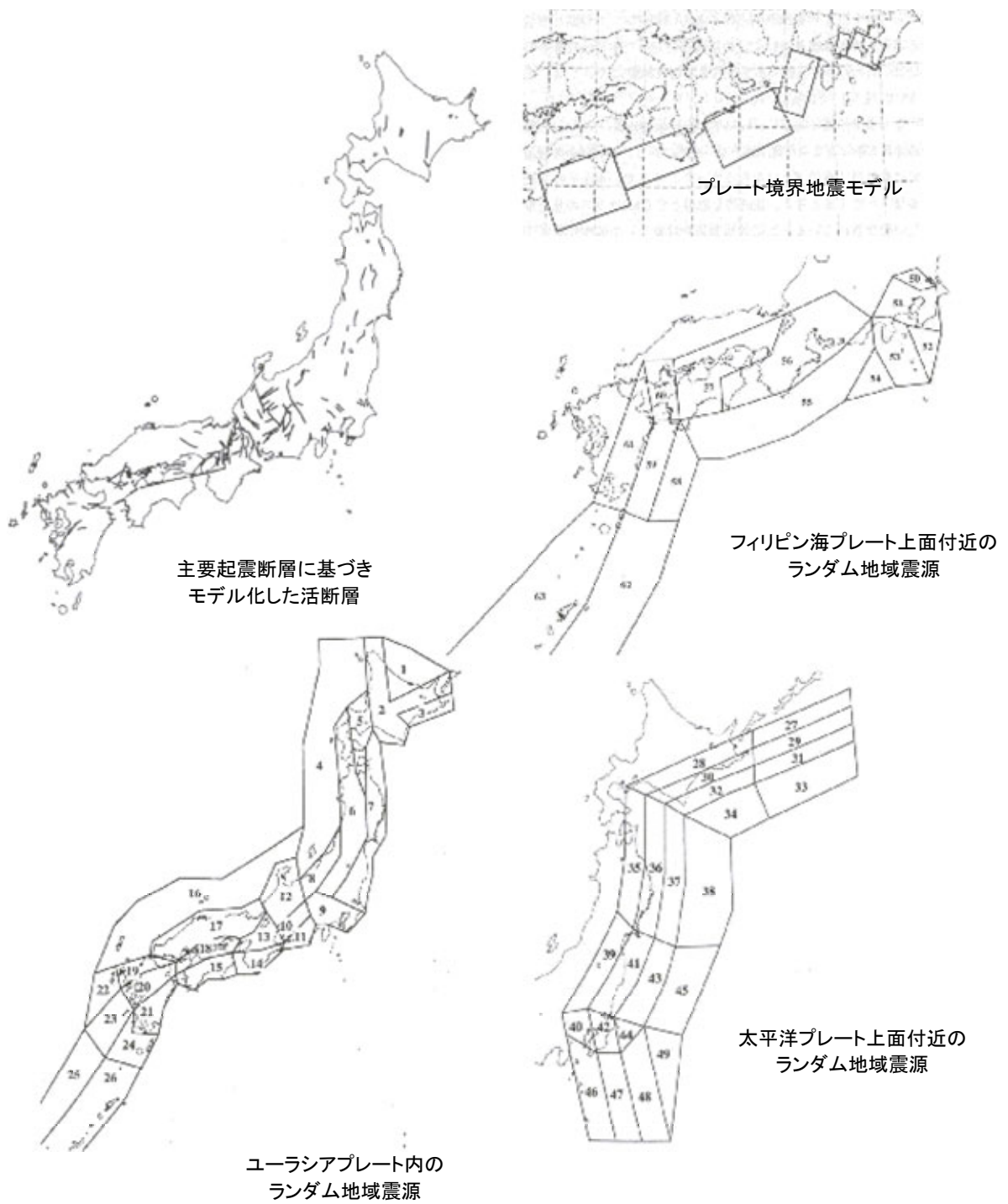


図 3-3 地震活動域のモデル化の例 (損害保険料率算定会 2000)

3.3. 地震動予測モデル

地震動予測モデルは、想定地震が分析対象地にもたらす地震動の大きさを予測するモデルである。地震動の大きさの予測は損失予測を目的とするものであり、損失予測モデルとの関連で地震動の大きさを表わす量が決められる。地表最大加速度（PGA, Peak Ground Acceleration）、地表最大速度（PGV, Peak Ground Velocity）あるいは計測震度などが一般に用いられる。

地震動の大きさを予測する過程は、図 3-4 に示した地震動の伝播過程を表す概念図に基づいて、二つのステップに大別される。一つは、基盤面における地震動の大きさを予測する過程、もう一つは表層地盤の地震動の増幅を考慮して地表面での地震動の大きさを予測する過程である。

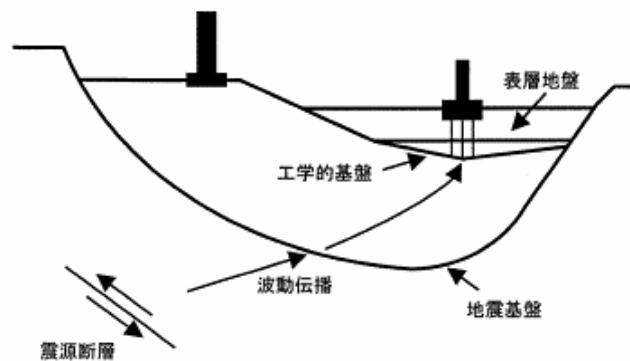


図 3-4 地震動伝播過程の概念図

基盤面での地震動予測には、マグニチュードと震源距離をパラメータとする地震動の距離減衰式が用いられる。ここで、基盤面としては、多くの距離減衰式が工学的基盤面を対象としていること、また表層地盤の地震動の増幅を考慮する際に表層地盤の情報が必要となるが、工学的基盤以浅の地盤情報は比較的入手しやすいこと、などを事由に、S 波速度 400m/sec~600m/sec のいわゆる工学的基盤面を対象とするのが一般的である。地震動の距離減衰式は、様々な式が提案されている。それぞれ特徴があるが、地震活動度モデルや損失予測モデルとの関連もあり、過去の地震被害データを使った予測モデルの検証作業を通じて、適切な距離減衰式を選定することが望ましい。モデルによっては、地震のタイプ別に複数の距離減衰式を適用して、予測と実際の乖離を小さくすることを試みているものもある。

距離減衰式の一例として、Fukushima and Tanaka (1991) の式をあげれば、以下の通りである。(文献 17)

$$\log_{10} A_{\max} = 0.51M_j - \log_{10}(R + 0.006 \cdot 10^{0.51M_j}) - 0.0034R + 0.59$$

- ただし、
- Amax : 観測点での平均的な地表面水平最大加速度 (gal)
 - R : 観測点から震源断層までの最短距離 (km)
 - Mj : 気象庁マグニチュード

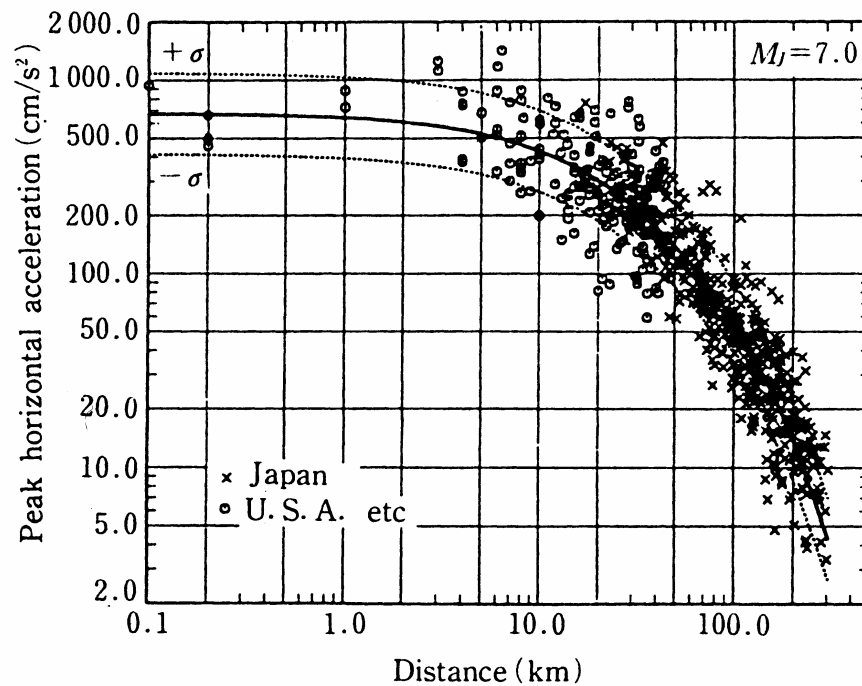


図 3-5 水平最大加速度の距離減衰曲線とデータ値 (Fukushima and Tanaka 1991)

図 3-5 には、距離減衰式から算出される距離減衰曲線と観測データ値を示したが、同図に示すように予測値と実際の観測データ値には然るべきバラツキが見られる。このバラツキが予測の不確実性であり、最終的なリスク量算定に際してはこの不確実性が定量的に評価され分析結果に反映される。

さて、表層地盤の地震動の増幅特性を考慮して、予測した工学的基盤面での地震動の大きさから地表面での地震動の大きさを予測する方法としては、重複反射理論に基づく等価線形手法が地震動評価の際に一般によく用いられている。しかしながら、重複反射理論に基づく方法では、詳細な表層地盤の S 波速度構造とその動的特性に関する情報が必要なこと、また解析に必要な地震波形に多様性があることなどから、情報量に制約のある地震リスク分析では重複反射理論に基づく方法はあまり用いられず、もっと簡便な方法が用いられる。例えば、翠川・松岡は、深度 30m までの平均 S 波速度をパラメータとして、地盤による地震動増幅率を設定する方法を提案し、この方法論に基づき、国土数値情報を利用して微地形区分、標高データ、河川からの距離から表層地盤の S 波速度を推定した。これから広範囲な地域における各地盤の地震動増幅率を設定し、地震動予測を行っている (文献 18)。参考までに国土数値情報を使って関東・東海地域の表層地盤の地震動増幅率を設定した例を図 3-6 に示す。このような簡便な方法論が地震リスク分析では一般に用いられている。

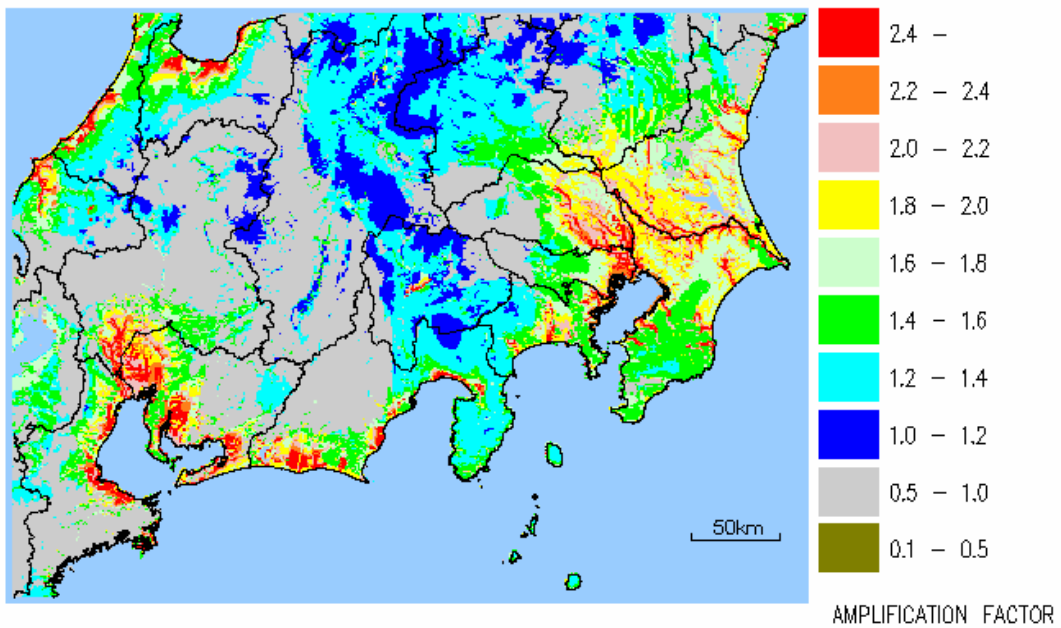


図 3-6 国土数値情報を用いて設定した表層地盤の地震動増幅率分布の例（翠川・松岡 1995）

3.4. 損失予測モデル

地震リスク分析において、地震による損失は、保有資産が地震被害を受けた場合に現状復帰するために必要となる費用として定義されるのが一般的である。古いビルが被害を受けた場合、復旧に際して併せて古い設備を新しい設備に更新する場合も多いが、更新の程度は所有者の判断に依存し、寓意性が大きいため、あえて古い設備もそのまま現状復帰するものと仮定している。よって、地震損失の予測においては、建物などの分析対象資産を現時点で購入あるいは建設するために必要な価額、すなわち再調達価額をベースに算定する。予想損失額の算定に際しては、分析対象資産の地震時脆弱性を分析評価し、この結果

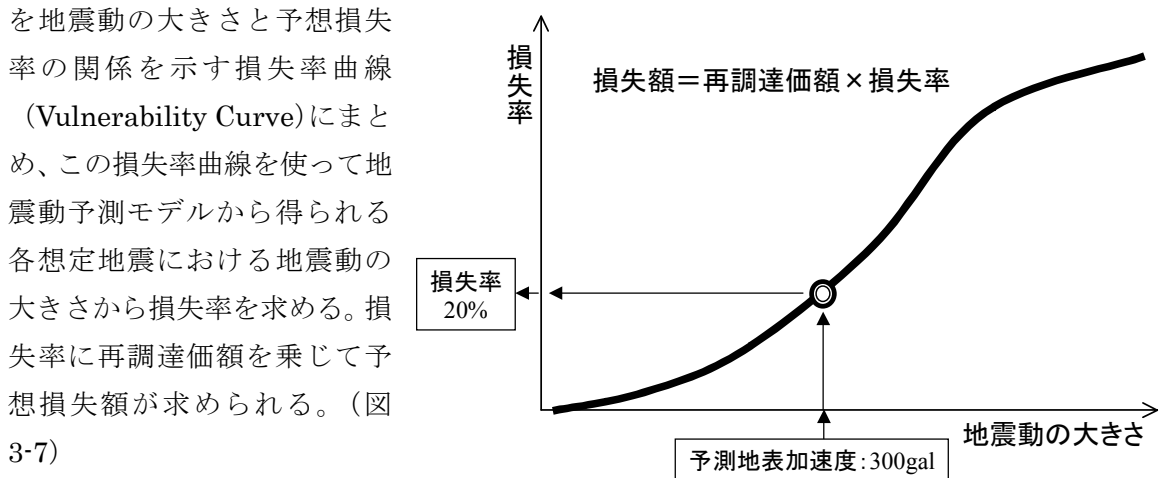


図 3-7 損失率曲線の一例

損失予測の方法には、解析的方法と統計的方法の 2 種類がある。一般に、様々な不確実性を考慮しつつ、地震による損害額を解析的に求めることは困難である。例えば建物被害を考える時、建物は極めて多数の部材や設備で構成されており、想定しうる被害状況は多岐多様にわたり、これらすべての想定被害を網羅し、かつこれらすべての組み合わせを考えて予想損失額を推定するには、多大な手間と費用が必要となる。損失額の予測は、基本的に過去の地震被害データを利用した統計的な手法を利用して行われることが一般的である。

多数の保有資産を対象としたポートフォリオ地震リスク分析では、建物・施設に関する必要最小限の情報を用いた分析手法が多く用いられる。この際使用される被害損失予測モデルは、主として被害データの統計分析結果を利用して作成されるモデルである。これは、様々な地震による建物被害統計データを分析して、損傷度合いと関連の深い建物の基本情報（例えば構造種別や建築年など）を抽出し、被害統計分析手法を用いて基本情報で分類した損失率曲線を作成するものである。その一例を示せば、東京都の地震被害想定調査（1997）では、兵庫県南部地震での被害事例から、加速度と建築年代別木造家屋被害率の関係が求められている。ここで、各損傷程度の建物被害損失の大きさ（平均的損失率）を全壊 100%、半壊 50%、一部損壊 10%と仮定して、損傷程度ごとにその被害率と平均的損失率を乗じ、さらにそれらを合計すれば、その種の建物の損失率（平均値）が得られる。表 3-1 には、S36～S55 年築造家屋の被害率データを例にして、この算出過程を示した。図 3-8 はこの結果をグラフ化したものである。

表 3-1 各損傷程度の建物被害率から建物損失率を求める一例

地表最大 加速度	被害率(東京都 1997)				各損傷程度建物の損失率			平均 損失率 (合計)
	全壊	半壊	一部 損壊	無被害	全壊 (×100%)	半壊 (×50%)	一部損壊 (×10%)	
150gal	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
200gal	0.0%	0.1%	0.3%	99.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%
250gal	0.2%	0.7%	1.8%	97.4%	0.2%	0.3%	0.2%	0.7%
300gal	0.7%	2.0%	5.4%	92.0%	0.7%	1.0%	0.5%	2.2%
350gal	1.7%	5.0%	13.4%	80.0%	1.7%	2.5%	1.3%	5.5%
400gal	3.3%	10.0%	26.6%	60.0%	3.3%	5.0%	2.7%	11.0%
450gal	6.1%	18.3%	48.9%	26.7%	6.1%	9.2%	4.9%	20.2%
500gal	8.9%	26.6%	64.5%	0.0%	8.9%	13.3%	6.4%	28.6%

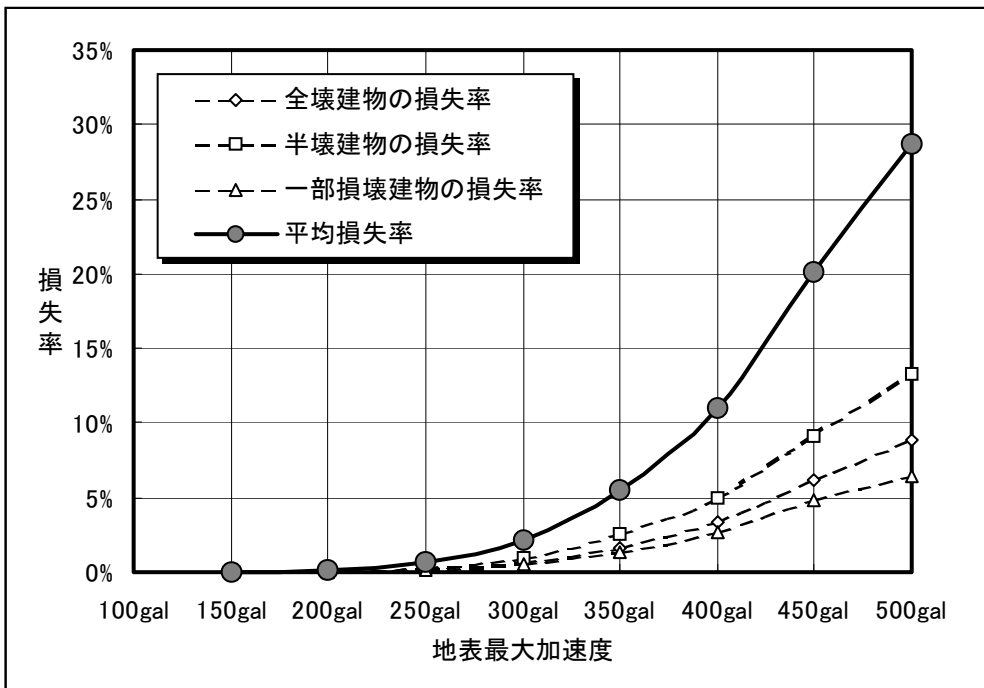
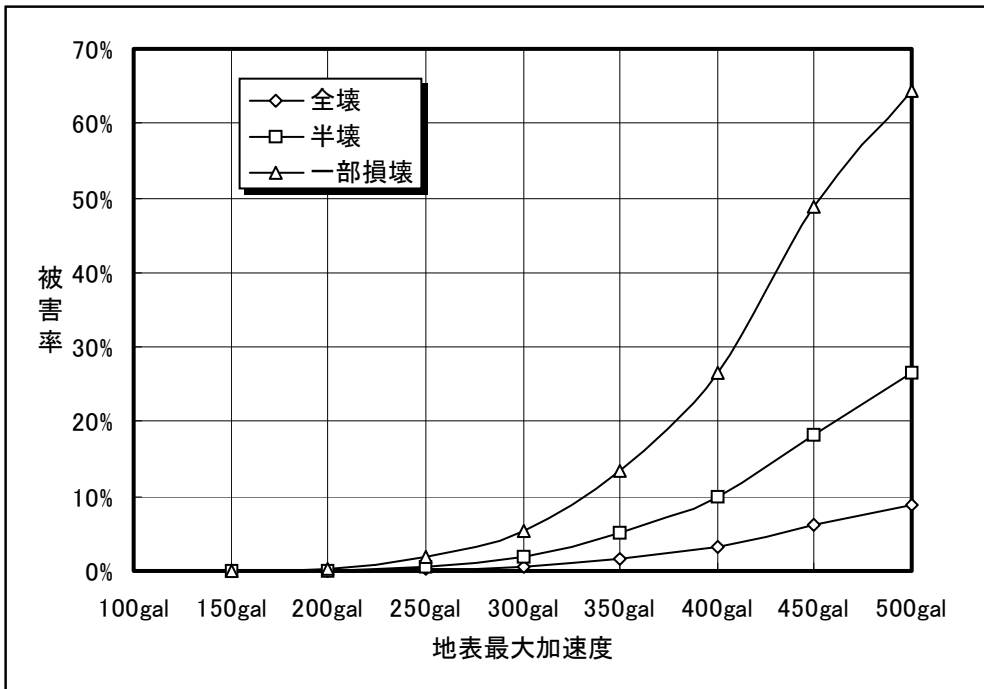


図 3-8 各損傷程度の建物被害率から建物損失率を求める一例

中村（2001）は、上記の方法と基本的に同様な考え方のイベントツリーによる予想損失額算出方法を提案している（文献 19）。その一例を図 3-9 に示す。同図において、リスクあるいは損失期待値と記されているものが、ここでいう予想損失額（平均値）に相当する。この方法論においても、イベントツリーの各分岐の確率や各被害形態の損失の大きさは、主として被害統計データを用いて求められる。

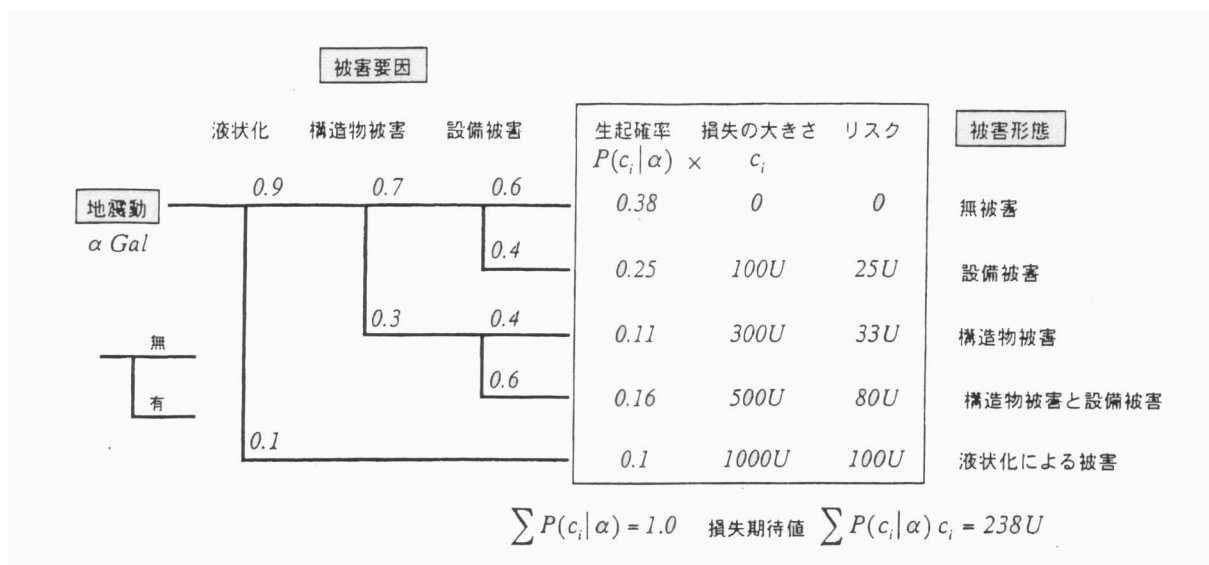


図 3-9 地震リスク評価におけるイベントツリーの一例（中村 2001）

建物個別の耐震性能を考慮した分析が必要な場合は、統計的手法と地震工学的手法を組み合わせた方法論が用いられる。例えば、文献 20（2001）では、建物の応答計算手法を取り入れた方法を提案している。この方法では、まず、図 3-10 に示すように、建物構成要素を、水平力により損傷を受ける構造部材、変形により損傷をうける非構造部材、加速度により損傷をうける非構造部材の 3 種類に分類する。次に、図 3-11 に示すように、建物の応答計算を行って、建物の階層ごとに水平力、変形量、加速度値を計算し、これから各部位の損失額を算出、これらを合計して建物全体の予想損失額を求める。ここで、建物の応答計算結果から各部位の損失額を求める際には、被害統計データが利用される。

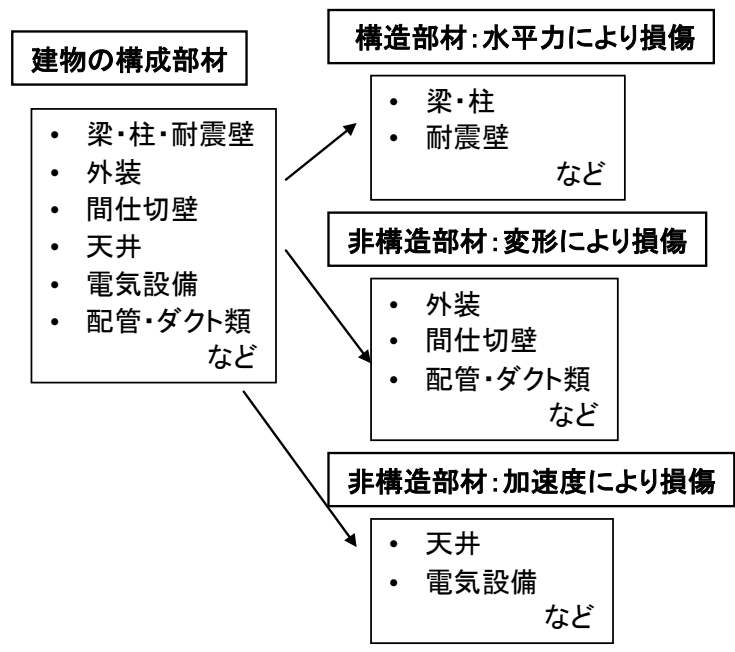


図 3-10 建物構成要素の分類 — 建物地震損失予測の方法

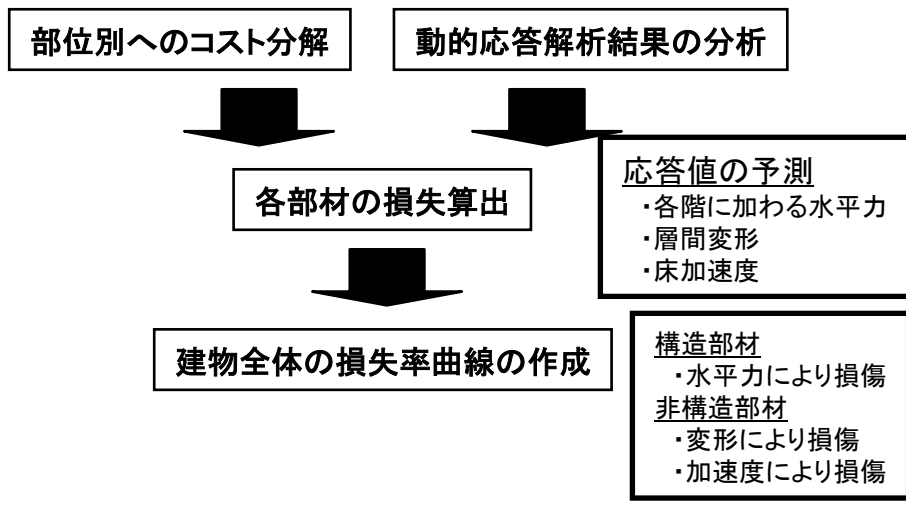


図 3-11 損失率曲線の作成方法 — 建物地震損失予測の方法

3.5. 定量的リスク評価方法 —超過確率曲線—

地震活動度モデルで設定した多数の想定地震に対して、地震動予測モデルおよび地震損失予測モデルを用いて分析対象物の予想損失額を求めれば、各想定地震による予想損失額とその発生確率に関する一覧表が得られる。この予想損失額一覧表を損失額の大きい順に並べ替え、損失額上位から順に想定地震の発生確率の累積確率、すなわち超過確率を計算する。図 3-12 に示すように、予想損失額を横軸に、年超過確率を縦軸にとって描いた曲線がイベントカーブである。年超過確率は、図 3-12 に示すごとく、イベントを損失額の大きい順に並べ、大きい順にその年発生確率を累積した年間の累積確率を意味する。

イベントカーブの右下先端は、予想される最大の損失を表わす。図 3-12 の例でいえば、最大の損失は 108 億円となる。イベントカーブのそれぞれの値、例えば図 3-12 の例では年超過確率 1%で 52 億円と読み取れるが、これは「1 年間のうちに 52 億円以上の損失が生じる確率は 1%」という意味である。ちなみに、 Σ (予想損失額×年発生確率) で算出される値が、年間期待損失額 (年間平均損失額) である。

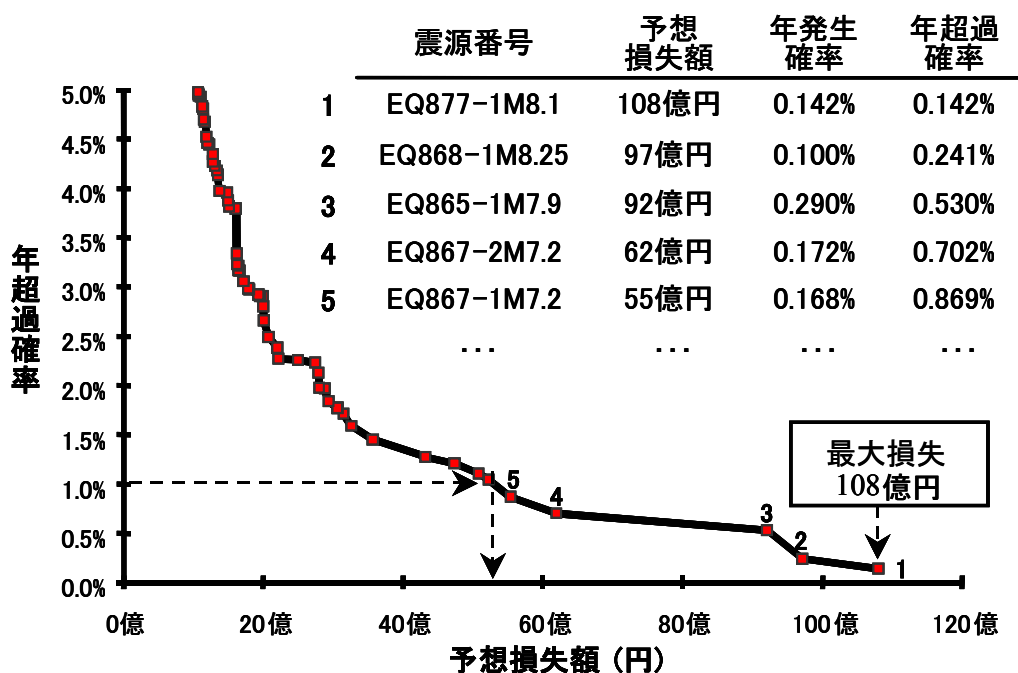


図 3-12 イベントカーブの作成

3.6. 損失予測の不確実性の取り扱い

損失予測の結果得られる予想損失額には大小の予測誤差、すなわち不確実性が含まれている。例えば、地震損失については、想定地震に関わる不確実性（地震発生メカニズム、震源位置、地震の規模、発生確率など）や想定地震による対象物の損失予測過程に関わる不確実性（地震動の距離減衰、地盤の増幅度特性、液状化の発生、建物の脆弱性評価、等々）が予測誤差の要因として挙げられる。一般に地震動の発生に関わる不確実性と、地震動による損失予測の部分の不確実性の2つに大きくは分けられるが、このうち、後者については、図 3-13 に示すようなベータ確率分布で表現されることが多い。また、損失予測計算においては、平均値をベースにするのが一般的であるが、安全側を考えて予想損失を大きめに評価する必要がある場合、90 パーセンタイル損失額が用いられることが多い。90 パーセンタイル損失値でリスク評価をする場合は、イベントカーブにおいて、平均損失値のかわりに 90 パーセンタイル損失値を用いることとなる。（図 3-14）

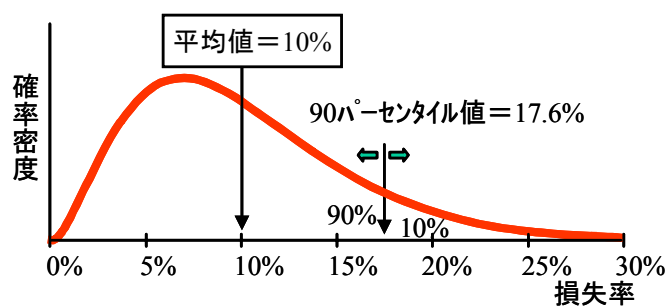


図 3-13 損失予測の不確実性をあらわすベータ確率分布

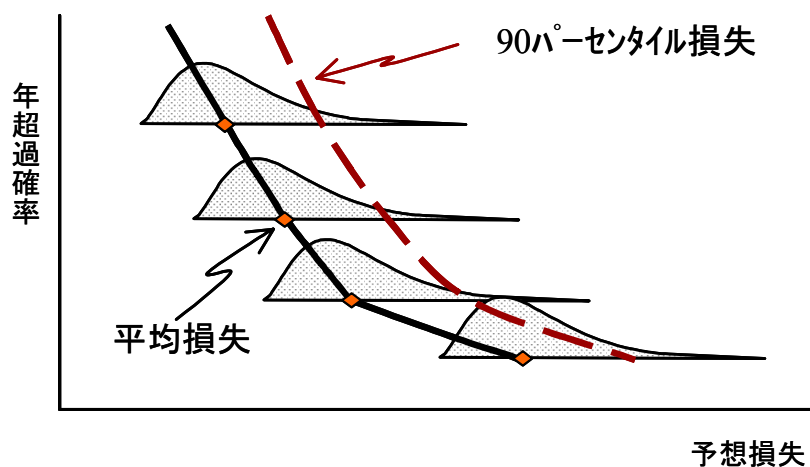


図 3-14 90 パーセンタイル損失のイベントカーブ

さて、イベントカーブにおける予想損失の意味を改めて考えてみよう。イベントカーブの縦軸の超過確率は想定地震の発生確率から算出したものである。したがって、イベントカーブにおいては、地震の発生確率に関しては確率論的なアプローチがなされているものの、損失額の予測に関しては平均値あるいは安全側を考えた 90 パーセンタイル値というようにある一定レベルの信頼区間に限った評価になっている。地震リスクを経済面のリスクとして考えるのであれば、求める確率は地震の発生確率ではなく経済損失の発生確率でなくてはならない。リスクカーブは、イベントカーブに損失予測過程の不確実性を織り込んで、予想損失額とその損失額が生じる超過確率の関係を示す曲線とすることを意図するものである。

リスクカーブの算出方法を図 3-15 に模式的に示す。同図には、それぞれの想定地震における平均予想損失額とその予測誤差分布が示されている。ここで、ある損失額 X の超過確率を求めてみよう。それぞれの想定地震において損失額 X 以上の損失が生じる確率は、同図の予測誤差分布においてハッチで示した部分である。この確率をすべて足し合わせた確率 $EP(X)$ が損失額 X 以上の損失を生じる超過確率となる。

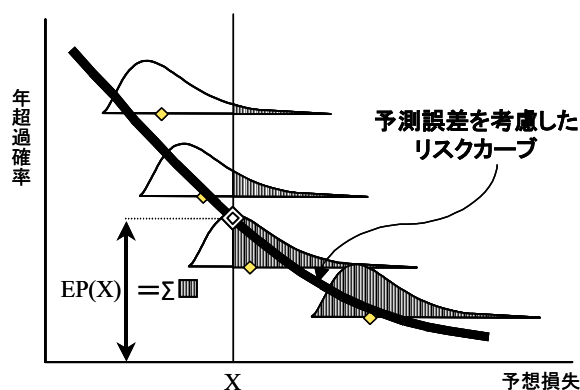


図 3-15 リスクカーブの作成方法

これを数式で表わせば、下式の通りである。

$$EP(x) = \sum_i \{\lambda_i \times P_i(x, \bar{x}, \sigma)\}$$

- ここで、
- x : 損失額
 - $EP(x)$: 損失額 x に対する年超過確率
 - λ_i : イベント i の年間発生確率
 - P_i : イベント i における予想損失 x の超過確率
 - \bar{x} : 平均損失
 - σ : 標準偏差

この手順を予想損失額の軸上で繰り返して、同図に示す「予測誤差を考慮したリスクカーブ」が得られる。

図 3-16 に、平均損失のイベントカーブ、90 パーセンタイル損失のイベントカーブおよび予測誤差を考慮したリスクカーブを比較した例を示す。本例は、不確実性の小さいポート

フォリオ分析における例であるが、リスクカーブは、ほぼ平均損失のイベントカーブに沿ったカーブとなり、大きな損失額の部分で不確実性が含まれていることを反映して、末広がり（右側へ開く）の形状を示している。年超過確率の小さいところで比較すれば、リスクカーブの損失額は平均損失のイベントカーブより大きく、また 90 パーセンタイル損失のイベントカーブより小さい損失額となる。図 3-17 は、不確実性の大きさの違いがリスクカーブにどのような形状の変化をもたらすかを見る目的で、同一の平均値のイベントカーブに不確実性が比較的大きい場合と比較的小さい場合のリスクカーブを比較した図である。同図に示すように、不確実性が大きいリスクカーブは平均値のイベントカーブとの乖離が大きくなる。特に年超過確率の小さい部分で予想損失がより大きくなる。地震リスクの場合、年超過確率 1%以下の低い確率での財務的インパクトの大きさが問題となるが、上記の特性は不確実性が大きい場合リスクを大きめに見る必要があるという従来の考え方に合致している。 図 3-17 の横軸は、予想損失率となっているが、予想損失率は評価対象物の予想損失額を再調達価額で割った比率のことである。イベントカーブおよびリスクカーブでは、その目的によって、予想損失額か予想損失率のいずれかを使用している。

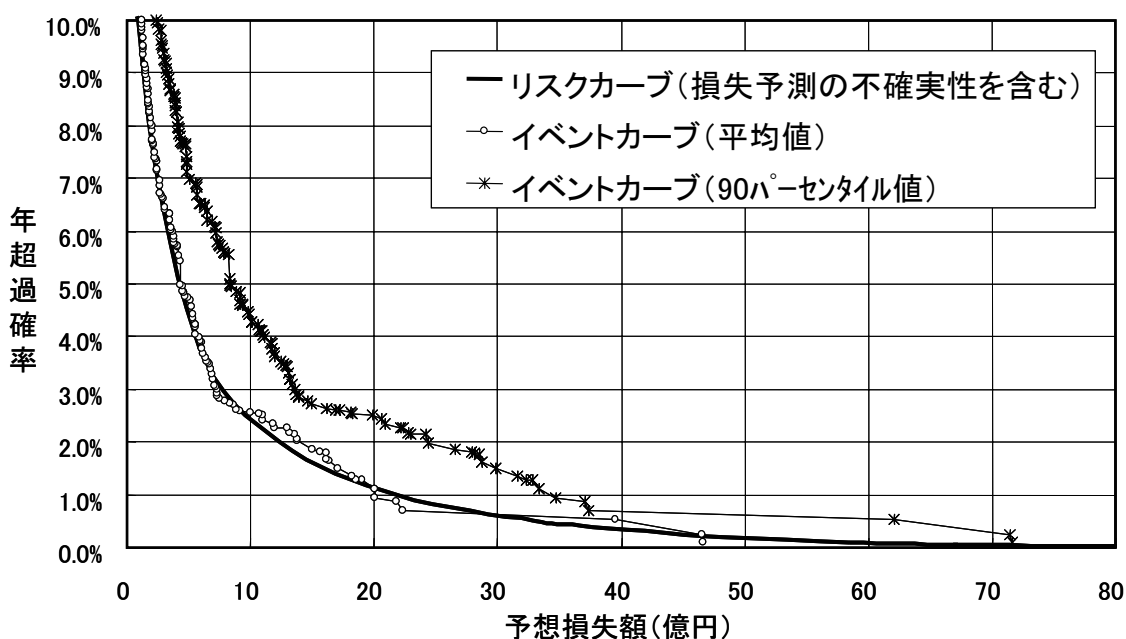


図 3-16 各種イベントカーブとリスクカーブの比較

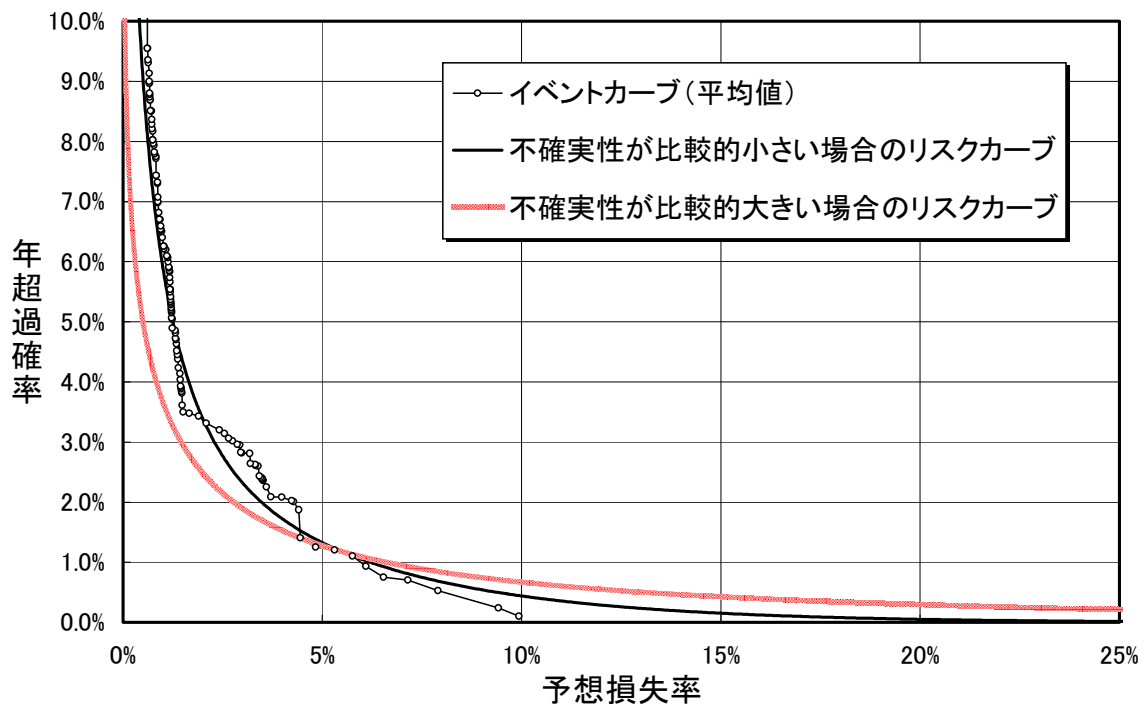


図 3-17 不確実性の大きさとリスクカーブ

3.7. ポートフォリオ地震リスク分析

ポートフォリオ地震リスク分析とは、複数の資産（ポートフォリオ）を対象にポートフォリオ全体の地震リスクの大きさを分析するものである。分析方法は、図 3-1 のフローに示したように想定地震ごとに分析対象の予想損失額を集計して各想定地震による予想損失額を求めればよく、基本的には個別資産の分析と同様である。ただし、不確実性の評価に関しては、多数の個別データを加算していくと次第に平均値に近づくという統計原則を反映させた配慮が必要である。その基本的な考え方は以下の通りである。

多数の対象物を足し合わせて全体の損失額を算出する場合、標準偏差値についても合算が行われる。統計理論によれば、足し合わせるものが互いに完全に（100%）相関がある場合、合算した後の標準偏差も単純加算となる。すなわち、下式で与えられる。

$$\sigma_{TC} = \sum_{i=1}^N \sigma_i$$

ここで、

σ_{TC} : 100%相関のある事象の合算後の標準偏差

σ_i : 個々の事象の標準偏差

N : 事象の総数

一方、互いに独立した事象を合算する際の標準偏差は、下式のとおりとなる。

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}$$

ここで、 σ_{Π} : 100%独立な事象の合算後の標準偏差
 σ_i : 個々の事象の標準偏差

予測値は平均値を中心にしてばらつくが、それぞれのばらつきに100%相関があるとはいえないし、また100%独立であるともいえない。多くの部分は独立であるが相関する部分も含まれるというのが実際であろう。ポートフォリオ地震リスク分析における標準偏差の加算に際しては、独立と相関の割合を経験的に決めて、下式に用いて標準偏差を合算する。

$$\sigma_T = (1-k) \sum_{i=1}^N \sigma_i + k \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}$$

ここで、k : 独立事象の割合

上記の方法で標準偏差を加算する時に不確実性がどの程度小さくなっていくかを理解するために行った一つの試算結果を図3-18に示す。この試算では、独立事象の割合を80% (k=80%)、相関事象の割合を20%として、すべての建物で資産額が同額、予想平均損失率はすべて10%、変動係数もすべて1.4 (標準偏差14%)と仮定した。加算するにつれて損失予測の確率密度分布が次第に狭まり、不確実性が小さくなっていく様子が理解できよう。

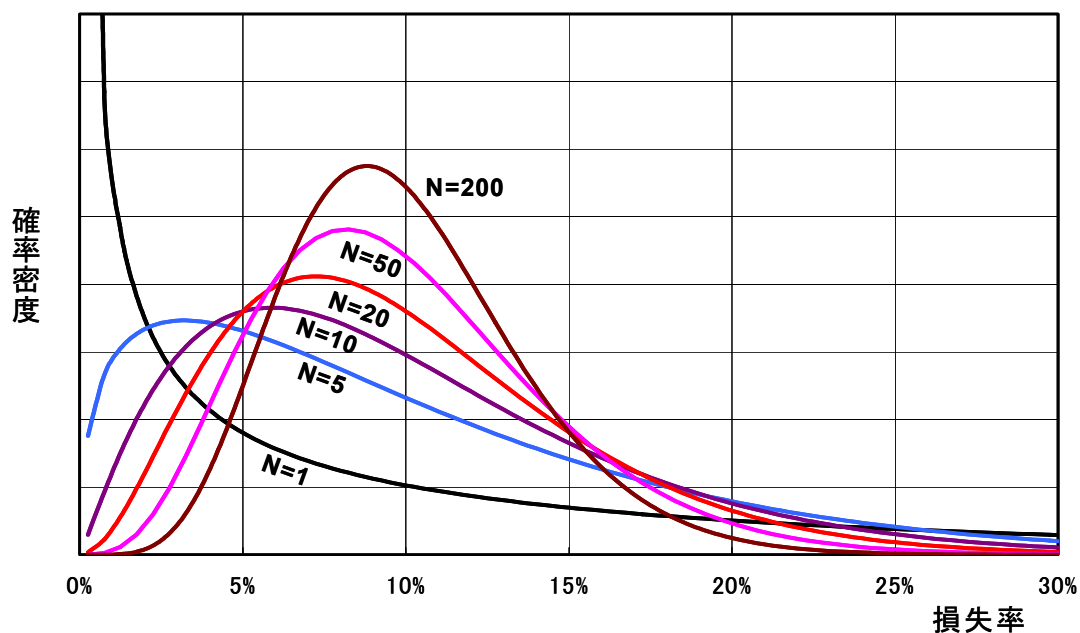


図 3-18 加算による不確実性の変化を示す一例