

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
環境学専攻社会文化環境コース

平成 17 年度

修士論文

地震保険を利用した  
建築構造物の地震リスクマネジメント

2006 年 1 月提出  
指導教員 神田 順 教授

46818 岡村 祥子

## 目次

## 序章

- 0.1. はじめに . . . . . 1
- 0.2. 地震保険制度の現状 . . . . . 4
- 0.3. 既往の研究 . . . . . 11
- 0.4. 研究の目的 . . . . . 12

## 第1章 地震保険制度

- 1.1. 基本料率設定の概念 . . . . . 13
- 1.2. 基本料率の算定手法 . . . . . 15
- 1.3. 地震ハザード . . . . . 17
- 1.4. フラジリティ関数 . . . . . 20
- 1.5. リスクカーブと年期待被害率 . . . . . 24
- 1.6. 地震危険度に基づく地震保険料の提案 . . . . . 26
- 1.7. 地震火災 . . . . . 28
- 1.8. 保険手数料 . . . . . 29
- 1.9. 算出された保険料率と現状保険料率の比較 . . . . . 30
- 1.10. 基本料率に関わる他の要因 . . . . . 32
  - 1.10.1. 加入限度額
  - 1.10.2. 支払い限度額
  - 1.10.3. その他免責事項
  - 1.10.4. 再保険制度
- 1.11. まとめ . . . . . 39

## 第2章 総費用最小化原理と地震保険

- 2.1. 総費用最小化原理 . . . . . 40
- 2.2. 地震保険の役割 . . . . . 43
- 2.3. まとめ . . . . . 44

## 第3章 コスト上昇係数に関する検討

- 3.1. コスト上昇係数について . . . . . 45
- 3.2. 既往の研究 . . . . . 46
- 3.3. 評価手法 . . . . . 48
- 3.4. 各係数の影響評価 . . . . . 49
  - 3.4.1. 構造部材の占める割合

---

3.4.2.	部材変化量	
3.4.3.	部材の原単位変化量	
3.5.	まとめ	53
<b>第4章 地震リスクマネジメント</b>		
4.1.	地震保険料と総費用最小化の原理	54
4.2.	耐震診断指標 $I_s$ 値と荷重係数	56
4.3.	保険加入率と再保険料	59
4.4.	地震保険の効果とパーセンタイル値	61
4.5.	総費用最小化原理の適用	65
4.6.	リスク意識レベルと最適設計点	68
4.7.	まとめ	72
<b>第5章 地震リスクマネジメントシステムの提案</b>		
5.0.	はじめに	73
5.1.	入力条件	74
5.2.	数値モデルと最適設計荷重	76
5.3.	感度解析	80
5.3.1.	地震ハザード	
5.3.2.	脆弱関数	
5.3.3.	補修費用	
5.3.4.	再保険制度	
5.4.	まとめ	100
<b>第6章 地震リスクマネジメントシステムの利用 それぞれについてどんな効果。</b>		
6.1.	はじめに	101
6.2.	建築主にとってのリスク	102
6.2.1.	パーセンタイル値とリスク	
6.2.2.	最適設計荷重	
6.3.	システム利用による効果	107
6.4.	まとめ	108
<b>第7章 まとめ</b>		
7.1.	おわりに	109
7.2.	今後の展望	110

参考文献	111
付録	115
謝辞	131

## 序章

## 0.1 はじめに

日本では世界でも有数の地震大国であるといわれる。図 0.1<sup>1)</sup>は 1970 年から 1990 年までの間に実際に発生した地震の震央分布で、地形の特徴にも影響を受けるものの、ほぼ日本全国のあらゆる地域で地震が発生している様子がわかる。

1995 年 1 月に発生した阪神大震災は非常に多くの被害をもたらした。死者 6,433 名、行方不明者 3 名、負傷者 43,792 名、家屋の全半壊 24 万軒（世帯としては約 44 万世帯）、地震による火災での全半焼約 6,200 軒超であり、災害救助法適用は兵庫県内 10 市 10 町にのぼった。これをきっかけにして、日本全国で多くの人が地震の危険性を強く認知することとなり、そのことは、地震保険の加入率向上、建物の耐震性を重視した各企業の販売戦略など、様々な部分に現れてきた。とくに最近の免震機能を備えた高層マンションの隆盛は、都市部における大地震の可能性を人々が強く意識している表れであるとも感じられる。阪神大震災から今年で 11 年になるが、大震災発生以前に比べて人々の地震に対する考え方はだいぶ変わってきているといえる。またここ最近でも、2004 年 10 月には新潟県中越地震、2005 年は 3 月に福岡県西方沖地震、7 月には千葉県北西部を震源とする大地震が発生するなど、地震への関心はまた更に高まってきている傾向にある。

大地震が発生して被害が実際に生じたことをきっかけにして人々の危険意識が大きくなり、それが月日を経るごとに低下していく、そしてまた地震が発生したときに再認識する、という流れは、変えることのできない心理的な問題である。その中で、地震国に住む者としては、実際の地震危険性を的確に認識し、ふさわしいレベルでのリスク認識を持つことが非常に重要なことであると言える。

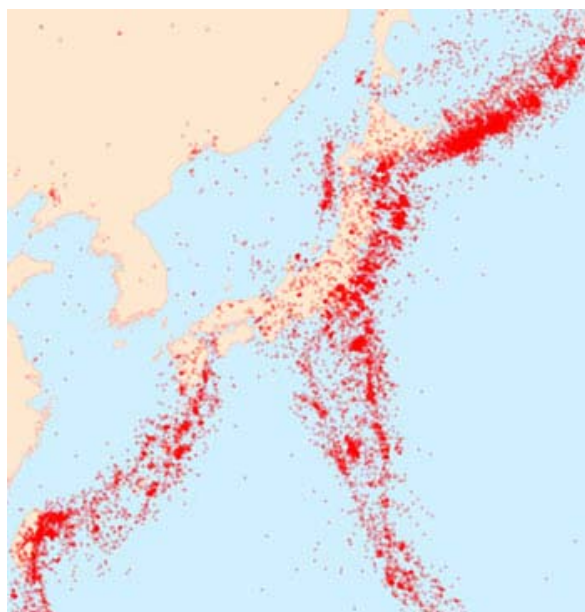


図 0.1 1970 年から 1999 年の間に発生した地震の震央分布（M4.5 以上：●）

地震による被害に対する対策として、まず第一に建物の耐震性向上が挙げられる。しかしこれには一定額の支出を必要とし、現実にはなかなか実施しづらいのが実状である。

それに対し、いつ大地震による大被害をうけるかわからない状態において、個人がそのリスクをコントロールしようとしたときに最も身近で効果的であると考えられるのが、住宅に対する地震保険への加入である。毎年ある一定額の保険料を支払う必要はあるが、保険に加入していれば万一大地震が発生して自分の住む家が倒壊してしまった場合でも、それ相応の金額を補償されるため、もとの生活に戻ることが比較的容易に達成されるだろう。しかし、過去に起きた実際の震災においては、地震保険に入っていなかったという人が毎回かなりの数にのぼっている。阪神大震災では、地震が起こるほんの数ヶ月前に新築一戸建ての家を建てたものが、地震によって全壊し、住む場所を失って住宅ローンだけが残ったという例が何件も報告された。またそうした人の場合、後にまた新しい家を建てるために住宅ローンを組む必要があり、また仮設住宅を出て後に賃貸で暮らすとしても、もとの家の住宅ローンと現在住む家の家賃とを2重に支払い続けていかなければならないという非常に厳しい状況におかれる事になった。このような、地震後の不安定な社会状態を回避するためにも、地震保険の制度はとても重要な役割を果たしているものであることがわかる。

現在運用されている地震保険制度は、その公共性の高さから、政府による再保険システムを保険金支払いの裏付けとして運用されている。詳細は「地震保険に関する法律」を中心にした法令に制定されており、この法令では、保険の対象、補償する損害、保険金の支払方法、加入方法、保険金額などが規定されている。すなわち、同じ保険制度でも、生命保険や火災保険のように、民間企業が独自に採算性を考慮して設定した保険商品ではなく、利益を度外視した、福祉的な意味合いの強い保険制度になっていると言える。

しかし現在の地震保険制度は、火災保険の特約としてのみ運用されており、加入できる額や支払い制度も限定的であるなど、地震危険度を十分反映した仕組みになっていないばかりかその補償がかなり限定的であるという問題点がある。そのような制度に対して、全国での加入率平均も未だ全住宅の2割に達していない現状であるが、地震リスクを回避するための手法として、地震保険の有効性は非常に明確である。個人が能動的に行える最も親近で有効な地震への対処法として、制度の充実と普及は高い重要性を持っていると言える。

ところで、実際に大地震が発生した場合、政府は被災した国民に対して、しばしば給付金や仮設住宅設営、衣料・食料の提供など、多くの救済措置を講じる必要があり、また被害を受けた公共交通機関やインフラストラクチャーの整備、街の復興など、多額の費用が投入されることになる。阪神大震災の例では、被災地域の支援、復興に国が出費した総額

は約 4 兆円とされ、また地方公共団体も含めると、合わせて約 10 兆円規模の公費が投入された。しかしながら、これらは全額が直接被災者に給付されたわけではない。個人が受けた被害については、一時見舞金などは支払われたものの、それは被害額の一部でしかなく、多くの人々が被災後困難な生活を強いられることになった。そうした被害はその大部分が住宅への被害であったと報告されている<sup>2)</sup>。

そのような状況を考えると、たとえばもし阪神地域の住宅所有者が全員地震保険に加入していたとしたら、政府は公的援助に加えて地震保険の保険金支払いに多額の出費を行わなければならないことになる。現実には、阪神地域における当時の地震保険加入率は 3%であったというから、このことはほとんど政府にとって問題にはならなかったが、逆に当時は住宅所有者にとって大きな打撃となった。

保険という制度は非常に明確で、わかりやすい制度ではあるが、単純な保険契約を締結するだけではこれを安定して運用することができない。保険会社 1 社だけでリスクを請け負ってしまえば不測の事態に対処できないため、複数の保険会社が合同したり、また請け負った保険をさらに再保険会社にリスク転嫁したりと、様々なリスクコントロールの上に成り立っているものである。政府という一団体のみが、また特に被害のばらつきが大きいくリスクの高い地震保険を請け負うという制度自体が、すでに限界に達しているのではないかと推察される。

地震リスクの厳然とした存在と、それに対する対策の必要性から、まずは建物の耐震補強および新築建物の高い耐震性を確保することに加え、地震保険制度の有効性とその可能性から、更なる地震保険制度の充実と展開、そして加入の促進が望まれている。



## 0.2 地震保険制度の現状

### ・地震保険の概要

政府による地震保険は現在、加入可能な保険金額が火災保険金額の30%～50%、また、巨大な損害が発生したときに保険金の支払いを確保するため、1回の地震による保険金総支払額が、5兆円（平成17年10月現在）と定められている。

地震保険料率は、損害保険料率算出機構によって算出された基本料率を元に設定される。そしてその公的な性質から、地震保険に関しては保険会社としての利潤は考慮せず、保険金として支払われた後の余剰金は責任準備金として全額を積み立てることが義務付けられている。

実際に地震が発生した時、保険加入者には、被害レベルごとに段階的に、保険加入額に対して一定割合の額が支払われることになっている。支払われる保険金の額は、政府による地震保険の場合、表0.1のように設定されている。<sup>3)</sup>

表0.1 政府地震保険において、地震時に支払われる保険金額の設定

損害の程度	支払保険金
全損	地震保険金額の100%
	(時価額が限度)
半損	地震保険金額の50%
	(時価額の50%が限度)
一部損	地震保険金額の5%
	(時価額の5%が限度)

表0.2 地震保険における被災度レベルの定義

全損	
建物:	建物の主要構造部である軸組(柱、はり等)、基礎、屋根、外壁等の損害の額が、その建物の時価額の50%以上になった場合、または焼失あるいは流失した部分の床面積が、その建物の延床面積の70%以上になった場合
家財:	家財の損害額が家財の時価額の80%以上になった場合
半損	
建物:	建物の主要構造部である軸組(柱、はり等)、基礎、屋根、外壁等の損害の額が、その建物の時価額の20%以上50%未満になった場合、または焼失あるいは流失した部分の床面積が、その建物の延床面積の20%以上70%未満になった場合
家財:	家財の損害額が家財の時価額の30%以上80%未満になった場合
一部損	
建物:	建物の主要構造部である軸組(柱、はり等)、基礎、屋根、外壁等の損害の額が、その建物の時価額の3%以上20%未満になった場合
家財:	家財の損害額が家財の時価額の10%以上30%未満になった場合

またここで、全損・半損・一部損という被害レベルに関しては、図 0.2 のように定義されている。4)被害レベルについては地震時にいくつかの団体によって行われているが、地震保険関連以外にも、国土交通省、自治体、日本建築学会などによっても被災度判定が行われ、それらはそれぞれ異なる定義のもとに被害尺度をいくつかに分類して判定している。

さらに、地震による巨額の損害が発生した時には政府によって保険金が支払われるよう、保険会社は政府による再保険に加入する形で地震リスクをを請け負っている。一回の地震による被害額に応じて、保険金を支払う主体とその負担割合が変わり、被害総額が支払い限度額である 5 兆円を超過した場合には、総支払額が 5 兆円になるように個人に対する支払額が一定割合ずつ減額されることになっている。災害時の支払いシステムは図 0.2 のとおりである。

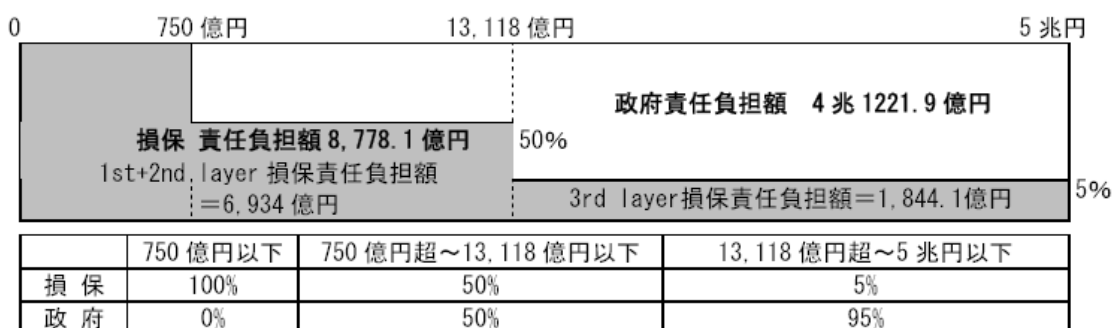


図 0.2 再保険支払い分担 4)

これに対して、政府とは独立して独自に運営されている地震保険として、日本農業協同組合（以下では農協とする）による建物更生共済がある。これは、火災保険と地震保険、他の災害による被害の保険を全て含めた形の保険制度である。この場合、地震時に支払われる補償金は政府による地震保険と同様、建物再調達価格の 50%分までで、保険料（この共済では掛金と呼ぶ）は全国一律、契約期間中に無被害だった場合は満期時に掛金として支払った分の約半額が返金される仕組みになっている。また、地震時の支払額は、[復旧するために要する額（損害の額）] ÷ 2 × 共済加入割合 + [臨時費用共済金] + [残存物とりかたづけ費用共済金] として、被害レベルに対する段階的な額の補償ではなく、ほぼ実際の損害額に基づいて計算された補償額と、加えて瓦礫の撤去費用や短期間分の生活費なども補償される。ただし、政府の地震保険制度とは違って、火災による被害分も含まれていることや、支払いの条件や対象が違うため容易に比較することはできないが、保険料の率にして 10 倍程度の料率に設定されている。しかし、農協の場合は農業を営む家庭と関係が深く信頼性が高いこと、また被害にあったときの支払い態度が良い、などの特徴があり、特に農村部においては、政府の地震保険ではなく農協の共済に加入している建物も多い。

しかし、この共済制度についても政府の地震保険と同様の問題点が指摘される。実際に

地震被害が発生したときに受け取れる保険金の額や、農協全体での支払い準備金の額など、被害額のばらつきが大きくリスクが大きい地震という事象を扱う保険として、両者が抱える問題点であるといえる。

政府の地震保険では、上で述べたような制度に基づいて、現在日本全国での地震保険加入率は、18.5%（2005年3月現在）<sup>5)</sup>となっている。その推移は図0.3に示したとおりである。

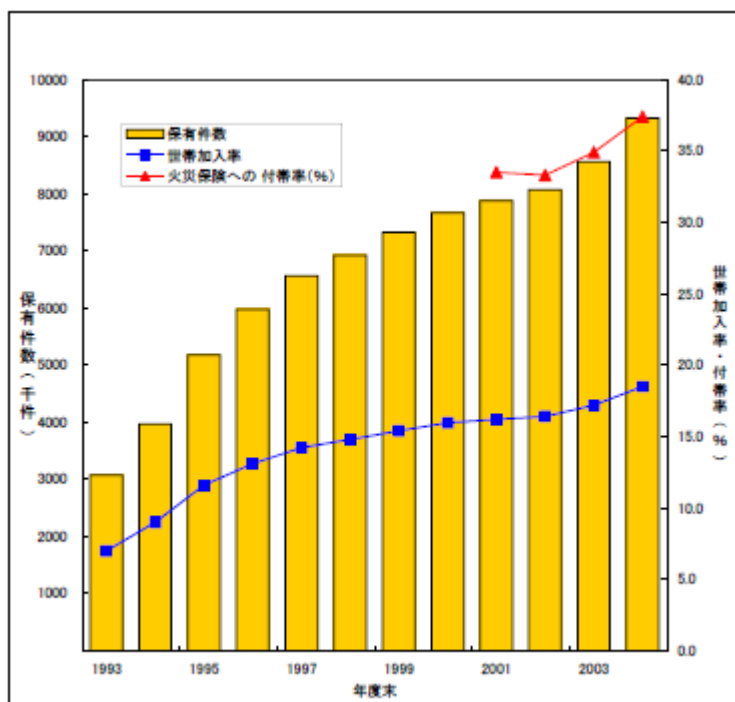


図0.3 地震保険の世帯加入率および保有件数の推移<sup>5)</sup>

ところで、2005年10月に全国共済農業協同組合連合会が発表した資料によると、政府による地震保険ではなく農協の建物更生共済に加入している人が農村部を中心に相当数おり、地震被害に関する保険に加入している人は、政府によるものと合わせると、全国で34.1%程度である<sup>6)</sup>ことがわかっている。両方の地震保険加入率を合算した状態での世帯加入率と、農協の共済に対する世帯加入率の全国分布を表0.3に示す。先に述べたような点から、農協の建物更生共済と政府による地震保険と必ずしも同等のものとして比較することはできないが、この数字を見ると、半数には満たないものの1/3程度の住宅が何らかの補償を得られる状況にあるということがわかる。しかし、ここに示されているように、地震危険度の高い東京・大阪や南海地域において未だ加入率が低く、特に関東などの都市部を中心とした大地震が起きた際には多くの人々が被害を受けた上で補償を得られないという状態になることが予想される。そうした点から考えると、共済の加入率を加えた状態でも、現在のところその加入率は十分とはいえない。

表 0.3 政府及び農協による地震保険を合わせた地震保険加入率

	合計加入率	共済のみ加入率
島根	55.5	41.9
福井	55.3	41.4
静岡	53.3	26.3
高知	51.2	28.1
岐阜	49.7	28.0
山梨	49.7	28.6
長野	49.3	37.8
愛知	47.5	15.0
三重	46.9	25.2
鳥取	46.7	30.0
徳島	44.7	25.3
新潟	44.4	29.2
鹿児島	42.9	24.0
富山	42.8	31.0
香川	42.0	21.9
福島	41.2	28.0
山形	41.1	29.4
山口	40.9	23.8
和歌山	39.6	21.4
宮城	39.3	14.4
秋田	39.3	27.7
石川	38.7	24.8
滋賀	38.7	25.4
愛媛	38.3	21.3
広島	38.3	15.9
宮崎	37.4	19.3
岩手	37.2	26.6
熊本	37.0	18.2
岡山	36.6	22.5
佐賀	33.3	25.7
大分	33.0	16.7
神奈川	32.3	5.4
青森	32.0	17.1
千葉	31.5	7.3
奈良	31.3	14.2
茨城	30.7	13.1
東京	30.3	2.2
栃木	30.1	15.1
群馬	29.9	19.0
埼玉	29.0	8.5
兵庫	27.1	11.6
福岡	26.8	9.1
長崎	25.9	18.8
京都	25.7	10.2
大阪	25.4	3.6
北海道	21.4	2.8
沖縄	10.2	2.4

農協が提供している建物更生共済の場合は火災や風水害に対する補償、また被害時の見舞金などが大きな部分を占めており、地震に対する補償そのものについて議論することが難しいことから、本研究では、政府による地震保険制度を元にして、地震保険料等に関する検討を行うものとする。

#### ・地震保険に関わる状況と制度の変遷

日本において、最近起きた大震災としては、1995年1月17日の阪神大震災、2004年10月の新潟県中越地震、2005年3月の福岡地震などがある。この中で最も被害が大きかったのは阪神大震災であるが、そのとき日本全体での被害は約10兆円<sup>2)</sup>とされるが、このうち、建築物に対する被害は約5兆8000億円であり、住宅に対して政府による地震保険から保険料が支払われたのは、780億円であった<sup>7)</sup>。支払われた保険料は、当時設定されていた支払い限度額1兆8000億円には達しなかったものの、それは当時阪神地域において人々が地震は発生しないと考えていたためにその地震保険加入率が極端に低かったためである。当時の加入率が3%であったとされていることから考えると、もし100%の世帯が地震保険に加入していた場合、保険支払額は2兆6000億円にのぼり、優に支払い限度額を超えていたことがわかる。ましてや、同規模の地震が今後東京で発生した場合、被害総額は112兆円<sup>8)</sup>、阪神大震災と同様の割合で被害が発生するとすれば、家屋への被害額は

30兆円に達することになる。いまだ地震保険加入率は2割を超えていない状況ではあるが、それでも、現在の支払い限度額を超える可能性は十分あり、その場合は限度額に応じた保険料支払いの減額が行われ、被災者は十分な補償を得られないことになるだろうと予想されている。

2005年4月、地震保険による支払い限度額が4.5兆円から5兆円に上方修正された。これは地震保険加入率の増加に伴う措置であるが、実際のところ民間金融機関及び政府によって、大地震時の支払いのために確保されている準備金は、民間で7100億円、政府で9500億円とされており、合計して約1.66兆円が確保されているのみである。これは、図0.2による支払いの仕組みを元に考えると、現在民間では支払い最大額の約81%、政府では支払い最大額の約23%が確保されているのみということになる。この準備金の額は、毎年合計で約550億円ずつ増加してきているが、支払い限度額に達するまでにはまだ55年以上かかり、それ以前に大地震が発生した場合は、政府が相当額の国債を発行して対応することになると考えられる。また民間金融機関としては、何らかの手段で資金を確保し、支払いに当てる必要が出てくるだろう。そのような状況は、保険引き受け側である金融機関および政府にとって大きなリスクであり、したがって、保険料率が単純に地震被害額の期待値によって設定されるべきものでないことを示しているとも言える。

次の図0.4に、地震保険制度の変遷を示す。

		改 定 年 月 日												
		S41.6.1 (創設)	S47.5.1	S50.4.1	S53.4.1	S57.4.1								
再保険スキーム	政府負担分													
	損害保険会社負担分													
1回の地震等により支払われる保険金の総支払限度額 政府負担限度額 損害保険会社負担限度額		3,000 億円	2,700 億円	4,000 億円	3,400 億円	8,000 億円	6,775 億円	1兆 2,000 億円	1兆0,162.5 億円	1兆 2,250 億円	1兆 1,837.5 億円	1兆 5,000 億円	1兆2,715 億円	2,285 億円
火災保険とのセット方法		住宅総合保険・店舗総合保険(いずれも「月掛」を含む)、月掛住宅保険・月掛商工保険に自動的にセット加入。			左記のほか長期総合保険と建物更新保険に原則セット加入が可能となる。		左記のほか普通火災保険・住宅火災保険・田地保険(いずれも「月掛」を含む)、簡易火災保険・火災相互保険・満期長長期保険に任意によるセット加入が可能となる。		左記と同じ		地震保険の対象となる火災保険契約には原則セット加入(S55.7.1実施)。			
契約限度額	建 物	90万円		150万円		240万円		左記と同じ		1,000万円 (S55.7.1実施)				
	家 財	60万円		120万円		150万円		左記と同じ		500万円 (S55.7.1実施)				
その他の主な事項	対象物件	「居住の用に供する建物」と「生活用財産(家財)」												
	火災保険契約に対する割合	30%												
	補償内容	全損のみ補償												
料 率	建物・家財同一料率、等価は3等地制、構造は木造・非木造別で料率は0.60~5.00の6区分													
		構造・目的別 0.50~4.80の20区分 (S55.7.1実施)												

		改 定 年 月 日											
		H6.6.24	H7.10.19	H9.4.1	H9.4.1	H11.4.1	H14.4.1	H17.4.1					
再保険スキーム	政府負担分												
	損害保険会社負担分												
1回の地震等により支払われる保険金の総支払限度額		1兆 8,000 億円	1兆5,250 億円	3兆 7,000 億円	3兆1,974.5 億円	3兆 7,000 億円	3兆1,974.5 億円	4兆 1,000 億円	3兆4,891.3 億円	4兆 5,000 億円	3兆7,526.7 億円	5兆 13,118 億円	4兆1,221.9 億円
火災保険とのセット方法		S57.4.1と同じ											
契約限度額	建 物	S57.4.1と同じ											
	家 財	S57.4.1と同じ											
その他の主な事項	対象物件	S57.4.1と同じ											
	火災保険契約に対する割合	S57.4.1と同じ											
	補償内容	一部損以上補償 (H3.4.1実施)											
料 率	構造・目的別 0.35~4.75の16区分 (H3.4.1実施)												
		構造・目的別 0.50~4.30の8区分 (H8.1.1実施)											
		構造・目的別 0.50~3.55の9区分/建費年割別(10%)・耐震等級別(10~30%)導入(H13.10.1実施)											

図 0.4 政府地震保険制度の変遷<sup>4)</sup>

地震という極めて不確定性の高い事象について保険制度を確立するためには、そのリスクの大きさを十分考慮した上で、保険の支払い制度との関係から保険料率を設定する必要があることがわかる。さらに、場合によっては地震保険全体が支払い限度額を超え、支払われる保険料が減額されるというようなシステムは、加入者にとって、その可能性や危険性を十分理解しないままに負わされるリスクであり、ほかの保険制度と比較しても非常に異質な条件となっている。こうしたことが、政府が税金によって地震被害に対応しようとすることによって生じる問題であるとするれば、そのような限定項目を排除した形での保険制度も提案することができると考えられる。

### 0.3 既往の研究

地震保険の制度に関しては様々な視点から、地震リスクへの対応に有効な新しい地震保険の提案がなされている。

地震保険制度が政府によって確立されたのは昭和41年である。それ以降何度か保険料率や支払い制度の体系が改正されてきたが、最近になって、より効果的で、また国全体としての地震リスクを低減させるための耐震改修を促進するような地震保険のあり方、などが提案されてきている。

中嶋ら<sup>9)</sup>は、公的支援に依存せず、住民同士の相互扶助によって耐震補強を進めるようなインセンティブを与える共済として、「共助」のシステムを提案している。このシステムでは、加入者が一度負担金を支払い、万一被災した場合には補償を受領できる仕組みを提案しており、これによれば、今後起こりうる最大規模の地震でも対応が可能で、また耐震改修も促進されるとしている。また吉村ら<sup>10)</sup>は、地震予知情報を利用して、既存不適格住宅に耐震補強を行った場合の効果を検証し、耐震補強を促進させる案を提案している。

地震保険制度は現在一般的な木造および非木造住宅を対象としているが、Kandaら<sup>11)</sup>は、最近増加傾向にある免震マンションに対する地震保険についての提案を行った。ここでは免震装置を導入したマンションについてその損失費用を算出し、一般の建物との比較および免震建物に対する地震保険料の評価を行った。

また、地震リスクは地震保険以外にも、証券化をはじめとする金融商品の対象となる。Richard J.Roth,Jr.<sup>12)</sup>は、保険ビジネスにおいて地震を取り扱うことの有効性について総合的に議論し評価した。さらに、岡田<sup>13)</sup>は証券化に関わるデューデリジェンスのために効果的な建物の損傷度評価手法を提案し、また矢代ら<sup>14)</sup>は実際に証券化を行った場合の地震リスクの影響評価について数的解析を行うなど、地震リスクを金融に直接関連付けて行われる研究も増えてきている。

これに対して、建物の供用期間における総費用を算出し、これが低減されるような建物の設計条件をより望ましいとする考え方がある。その基本となるのが総費用最小化の原理であり、これは、建築物の総費用(総期待費用)を初期建設費用(建設費、保守費込み)と、破壊した場合の損失費(人的・物的損失および補償費用、撤去費用、営業損失費用、再構築費用など)の期待費の和として考え、その和が最小となる点を最適点とする方法である。これに基づく構造性能の設定に関しては、今までさまざまな視点から研究が行われてきた。<sup>15)16)</sup>さらに、高橋ら<sup>17)</sup>は耐震性能の向上が総費用に与える影響を具体的な例を挙げて求め、地震リスクマネジメントを行う効果を検証した。



#### 0.4 研究の目的

3節で示したように、建物の持つ被害率と基本料率に対応していない現状は、地震保険のあり方として決して望ましいものではなく、また耐震補強のインセンティブも働かない。従って、基本料率を建物の年期待被害率より求める必要がある。

さらに、そのようにして設定された地震保険制度を利用することにより、地震リスクマネジメントを行って適切な建築構造設計を行う手法を提案する。

# 第 1 章 地震保險制度

## 1.1 保険料設定の概念

地震保険料の基本料率は、各都道府県ごとに一定の率が定められているが、これは各都道府県の地震危険度と地震動による損害の大きさ、発生確率を元に、シミュレーションによって求められている。その手法としては、「過去 500 年間に発生した約 400 の地震被害地震データを基礎として地震保険の純保険料率を算出している」<sup>18)</sup>とされ、純保険料は、対象とする建物の地震による年期待損失額の期待値に相当する値と定められている。現在用いられている料率は平成 13 年に改定されたもので、それぞれ木造・非木造、構造性能のレベルによって図 1.1 のように段階別に設定されている。

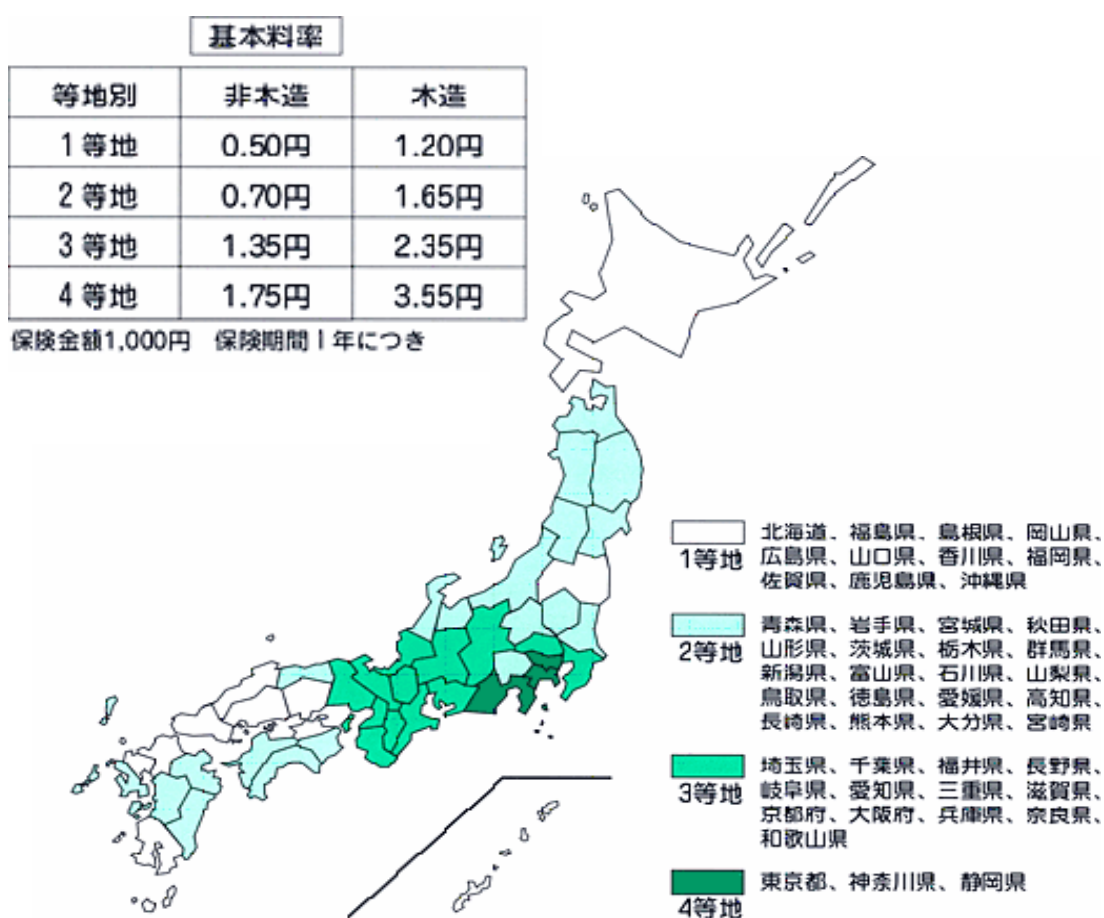


図 1.1 現行地震保険基本料率<sup>3)</sup>

またこうした地域による格差に加え、耐震性能が現在の建築基準法が定める最低基準に合致している場合、すなわち既存不適格建物でない場合には、図 1.1 に示す額の 1 割引、また建築基準法に定める耐震性能の 1.25 倍の性能がある場合は 2 割引、1.5 倍の性能がある場合には 3 割引にするという規定がある。これは、耐震性能が向上することによってある

程度年期待損失額が下がるという事実に基づいて定められたものであるが、実際に耐震性能が 1.25 倍、1.5 倍になった建物の年期待損失額の低さと比べると、その割引率はかなり低いといえる。

現在の地震保険体系には序章で指摘したように様々な問題が存在しており、その自由度の低さや基本料率の高さにより、十分な国民の同意を得られないでいるといえる。

本章では、保険料の設定原理に忠実に則った形での保険料設定を旨とし、保険料に関わるあらゆる要因について、その特性、実態および保険料に与える影響についての評価を行う。そのようにして検討された全ての事項について考慮し、以下に示す手法を用いて算出したものを保険料としたものが、本来あるべき地震保険の姿であるとして、これを新しい保険制度として提案する。また、地震保険の効果を様々な立場の建築主それぞれが得るためには、各々が必要とする保険契約のあり方を比較的自由に選択することができるようにすべきであり、そのようなシステムにすることで地震保険の活用やそれに伴う地震リスクへの対応意識が高まると考えられる。従って、提案する地震保険としては、なるべく幅広い形での保険契約設定に対処できるように、様々な視点からの検討を行うことを主眼とする。

## 1.2 地震保険料の算定手法

1.1 節で述べたように、地震保険料の純保険料は、「地震による建物被害額の期待値」として計算される。具体的な計算方法としては、地震の発生確率および地震が発生した時に建物にどのくらいの被害が発生するかをシミュレーションし、その状況での保険金支払額を、保険契約の支払い条件に従って計算して求め、1年間での期待値として表したものである。

本研究では、建物被害額の算出において、プログラミング言語 MATLAB®を使用してプログラムを作成し、対象地点、建物種類、耐震性能ごとに純保険料を求め、そこから地震保険料の基本料率相当となる値を計算する。純保険料算出の手法を以下に示す。

地震ハザードは、対象地点における地震動強さ  $v$  と年超過確率  $\Pr(v)$  の関係を示したものであり、年発生確率  $f(v)$  と超過確率  $\Pr(v)$ 、供用期間  $T$  年における超過確率  $\Pr_T(v)$  との間には以下のような関係がある。

$$\Pr(v) = 1 - \int_0^v f(v) dv \quad (1.1)$$

$$\Pr_T(v) = 1 - \{1 - \Pr(v)\}^T \quad (1.2)$$

ここで示された地震動強さ  $v$  に対して、その強さの地震が発生した時に建物が被害を受ける確率を被害レベル軽微・小破・中破・大破・倒壊ごとにプロットし、地震動強さ  $v$  と被害発生確率  $P_{fi}$  の関係を連続的に示したものがフラジリティ関数と言われる。これは建物の種類および耐震性能を表す耐震性能指標  $I_s$  値の値によって異なる関数である。被害のレベルごとに以下のような式で表される。

$$P_{fi}(v, I_s) = \Phi\left(\frac{(\ln(v) - \lambda_i(I_s))}{\zeta_i}\right) \quad (1.3)$$

これら地震ハザードとフラジリティ関数の関係を基にして、新たに地震被害率（建物が無被害の場合を 0、大破以上になった場合を 1 とする）と地震動年超過確率の関係を連続的に示したものが、リスクカーブと呼ばれる。このリスクカーブは、対象となる建物に関して、発生確率  $\Pr(v)$  を持つ地震動強さ  $v$  による被害率  $L(v, I_s)$  を示したものとなり、この関係を元にして年被害率期待値を求めることができる。 $L(v, I_s)$  は、式(1.2)および式(1.3)を踏まえて式(1.4)のように求められ、これを用いて純保険料  $E_L(I_s)$  は、式(1.5)のように求められる。ただしここで、地震の被害レベルに対する保険金の支払い規定、すなわち  $L_i$  の値は、政府による地震保険の支払い条件（表 0.1）に基づくものとして、 $L$  および  $E_L$  を算出する。

$$L(v, I_s) = \sum_{i=1}^4 (P_{fi}(v, I_s) - P_{fi+1}(v, I_s)) L_i + P_{f5}(v, I_s) L_5 \quad (1.4)$$

$$E_L(I_s) = \int_0^{\infty} f(v) L(v, I_s) dv \quad (1.5)$$

以上をフローチャートにまとめたのが、図 1.2 である。

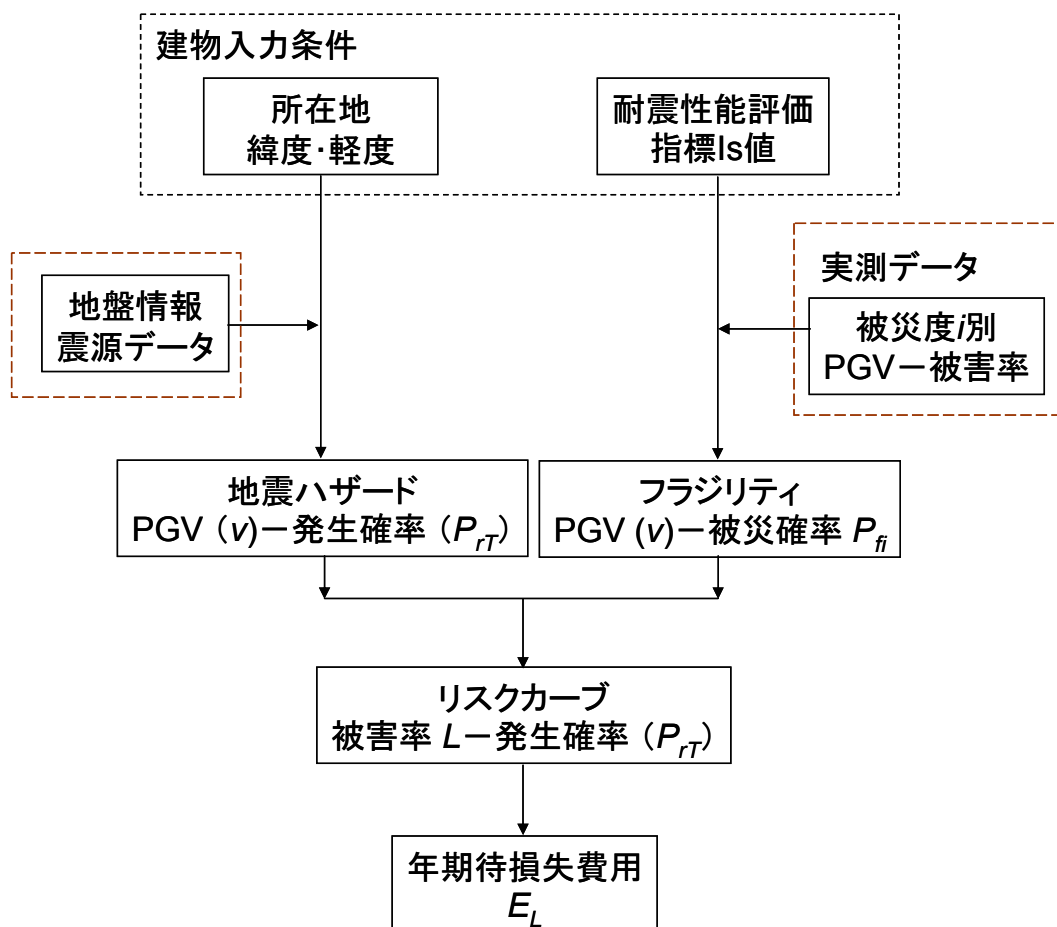


図 1.2 年期待損失費用算出のフローチャート

次節以降で、地震ハザード、脆弱性関数に関する詳細な内容について紹介し、1.6 節で具体的な地震保険料の値についての評価を行う。

### 1.3 地震ハザード

まず各地それぞれの地震危険度を表すのが地震ハザードである。これは、対象地点における地震動の強さを確率論的手法に基づいて評価したもので、その結果は、横軸を最大速度（PGV：Peak Ground Velocity）等の地震動の強さ、縦軸を年超過確率等とした地震ハザード曲線によって表されることが多い。東京における、評価期間 50 年の地震ハザードカーブの例を図 1.3 に示す。これは、本研究で使用した地震ハザード作成プログラム<sup>19)</sup>によって作成したものである。

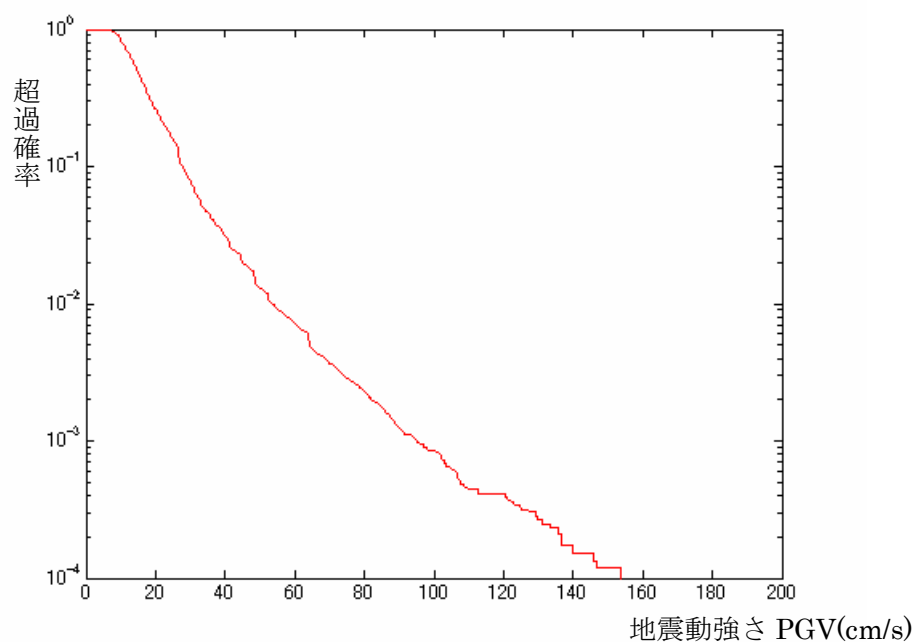


図 1.3 東京における地震ハザードカーブ(評価期間 50 年)

地震動強さの評価に関する手法は年々技術や情報の進歩によって精度を増している。国による地震ハザード評価としては、(独)防災科学技術研究所（以下、防災科研とする）の地震災害対策推進本部による特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」によって、2005年3月に「全国を概観した地震動予測地図」<sup>20)</sup>が作成された。その成果はウェブサイト「地震ハザードステーション」<sup>21)</sup>において公開され、誰でも容易に特定地点における地震ハザードデータを得ることができるようになっている。

また、地震ハザードに関する研究は数多く進められてきており、本研究では、研究室における建物の耐震性能に関する研究その成果として作成された「建物の耐震性能評価」システム<sup>22)</sup>（以降では SSWEB とする）の断層・歴史地震・バックグラウンド地震に関するデータと計算手法を用いて、これに基づいた地震ハザードカーブ作成プログラムによって得られた地震動強さデータを元に、地震ハザードカーブの作成を行った。SSWEB はインタ

一ネットのウェブサイト (<http://ssweb.k.u-tokyo.ac.jp>) としても公開されており、建物の所在や条件を入力することによって地震危険を算出することができるようになっている。

本研究で設定した主な計算条件は以下の通りである。

- ・震源・断層：松田の起震断層  
萩原の地体構造区分  
プレート境界型地震
- ・地盤増幅率：GIS データ
- ・最大値動速度  $v(\text{cm/s})$  に対する距離減衰式：安中式<sup>23)</sup>

最短距離に対する安中式

$$\log_{10} v = C_m M + C_h H - C_d \log_{10} \{R + C_1 \exp(C_2 M)\} + C_0$$

$$C_m = 0.725, \quad C_h = 0.00318, \quad C_d = 1.918, \quad C_0 = -0.519, \quad C_1 = 0.334, \quad C_2 = 0.653$$
(1.6)

ここで、 $M$  はマグニチュード、 $H$  は震源深さあるいは断層中心の深さ(km)、 $R$  は断層面から建物位置への最短距離(km)である。

これに対して、防災科研による主な計算条件は以下の通りである。

- ・震源・断層：内陸の固有地震  
海溝型地震  
その他の地震
- ・地盤増幅率：GIS データ
- ・S波速度 600m/s 相当の硬質地盤上における最大速度  $v(\text{cm/s})$  に対する距離減衰式  
：司・翠川式

$$\log_{10} v_{b600} = 0.58M + 0.0038H + d - 1.29 - \log_{10} (R + 0.0028 \times 10^{0.50M}) - 0.002R \quad (1.6)$$

d = 地震のタイプ別係数：地殻内地震  $d=1.0$   
プレート間地震  $d=-0.02$   
プレート内地震  $d=0.12$

ここで、 $M$  はマグニチュード、 $H$  は震源深さあるいは断層中心の深さ(km)、 $R$  は断層面から建物位置への最短距離(km)である。

このようにして得られたハザードカーブには、防災科研が示しているハザードカーブに比べて、南海地震の影響が強く出ているという違いが見られる。しかし防災科研によるハザードデータは超過確率  $10^{-2}$  までのデータまでしか提供されておらず、本研究で必要とする地震危険度の評価には不十分であるといわざるを得ない。そして、目的とする地震保険料率体系およびリスクマネジメント手法の提案においては、どちらか一方の手法を用いたとしても全体の議論としては問題が無いと考え、SSWEBのデータを使用した。



日本における主要な 8 都市におけるハザードカーブを求めたものを、図 1.4 に示す。ここではそれぞれの特徴を捉えるため、評価期間 1 年に対するものを示した。ここから、東京では小さい PGV に対する発生確率が大きく、大阪と名古屋、高松では大きな PGV に対する発生確率が大きくなっており、札幌と仙台では全体的に地震危険度が低いという特徴が読み取れる。

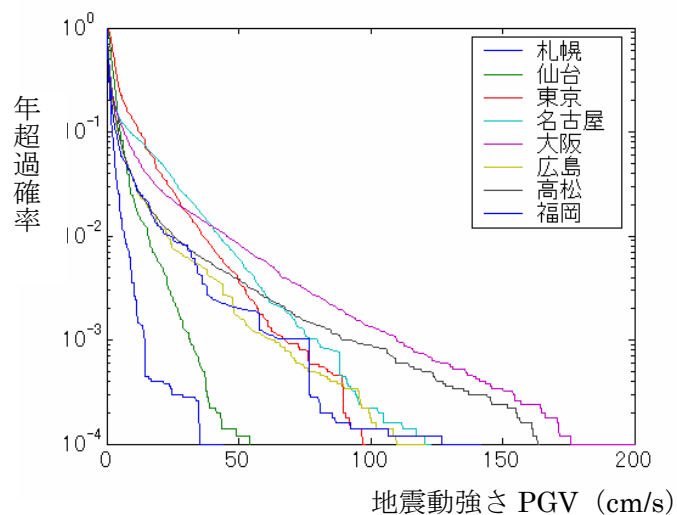


図 1.4 主要 8 都市における地震ハザードカーブ

## 1.4 フラジリティ関数

フラジリティ関数は、地震動が発生したときの、地震動強さに対する建物の壊れやすさを発生確率で表した関数であり、建物被害(率)関数、損傷度関数などとも呼ばれる。被害の状態としては数段階の被害レベルについて関数が求められ、それぞれのレベルに対する超過確率と、地震動強さ PGV の関係を示したものが、フラジリティカーブと呼ばれる。フラジリティ関数は、実際に地震被害が発生したときに、建物が受けた地震動強さとその建物の被害程度を調査し、それを元に関数を近似することによって求められる。

RC 造建物のフラジリティカーブの例を図 1.5 に示す。ここでいう被害率とは、調査対象の中で PGV がある値となるような地震力を受けた建物のうち、小破・中破・大破などそれぞれの被害レベルに対応する被害が起こった建物数の割合を表したものである。被害レベルは、図 1.5 においては 5 段階に設定されたものを示したが、これは調査対象や定義によって異なり、小破・中破・大破の 3 段階、もしくは中破・大破の 2 段階のみで構成されたフラジリティ関数も多く提案されている。その場合、分類されていないほかの被害レベルについては、下位の被害レベルのなかに非超過確率という形で含まれていることになる。

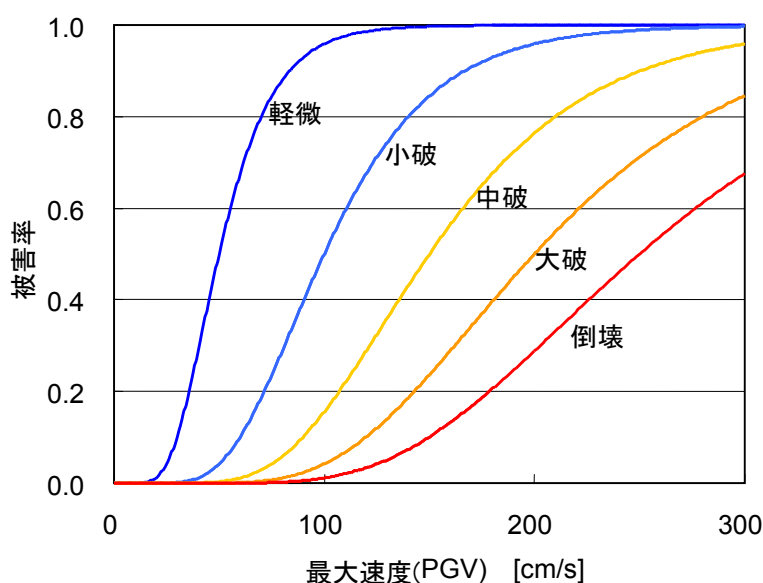


図 1.5 RC 造建物のフラジリティカーブの例

フラジリティ関数は一般的に標準正規分布の累積分布関数の形で表される。具体的な係数に関してはこれまで数多くの地震被害データに基づいて様々な観点から提案がなされてきており、それぞれ定義や使用したデータ、適応範囲が異なるためにどれを用いるかについては十分な検討が必要である。RC 建物のフラジリティとしては、1995 年の阪神大震災の建物被害に基づく関数として宮越ら<sup>24)</sup>山崎ら<sup>25)</sup>によるものなどがある。信頼性の高いフラジリティ関数はこの震災による被害調査以降求められたものであるが、この後に起きた

鳥取県西部地震や新潟県中越地震の被害調査からも同様にフラジリティ関数が求められ、ある程度の地域性は見られるものの、おおむね同様の値によって評価できることが確認されている。

ところで先にあげた例では、どれも同一の地震被害を調査の対象としているものの、被害レベルの定義として、建設省による被災度区分<sup>26)</sup>や自治体の被災度判定などさまざまな定義に基づいたデータを使用している。その基準は、建物の居住性に対する被害に基づくものと建物の構造への被害に基づくもので、だいたいの値が違っており、またどの基準も評価者の主観による影響を除去しきれないため、あいまいさが含まれている。そのため提案されるフラジリティ関数として、どれも異なる係数から成る式が導かれている。これらのフラジリティ関数の違いを比較したものを図 1.6 に、その係数を表 1.1 に示す。

ここで提案されている関数は、全年代における平均的な耐震性能を持つ建物を対象とし、最大値動速度 PGV に対する、大破以上の被害が発生する確率を表したものである。ただしフラジリティ関数の式は式(1.3)のとおりである。

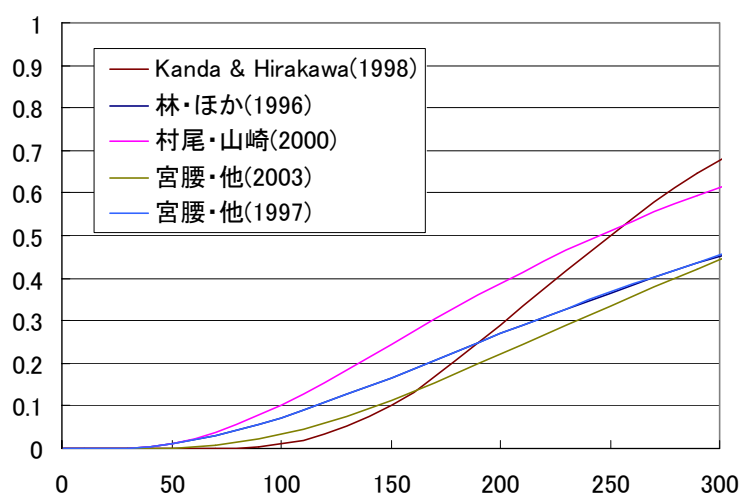


図 1.6 提案されているフラジリティ関数の例

表 1.1 フラジリティ関数における係数の比較

	$\lambda$	$\xi$
Kanda & Hirakawa(1998)	5.3	0.40
林・ほか(1996)	6.4	0.70
村尾・山崎(2000)	5.5	0.71
宮腰・他(2003)	5.8	0.65
宮腰・他(1997)	5.8	0.82

岡田ら<sup>27)</sup>は、これらの定義の違いをまとめ、独自に客観的な指標となる **Damage Index** を提案した。判定基準による違いを示すため、これを図 1.7 に表す。これを見ると、たとえば「大破」など同じ言葉を用いていても視点によってその表す意味が異なっており、使用するフラジリティ関数がどの定義に基づいて算出されたものであるかを十分見極める必要があることがわかる

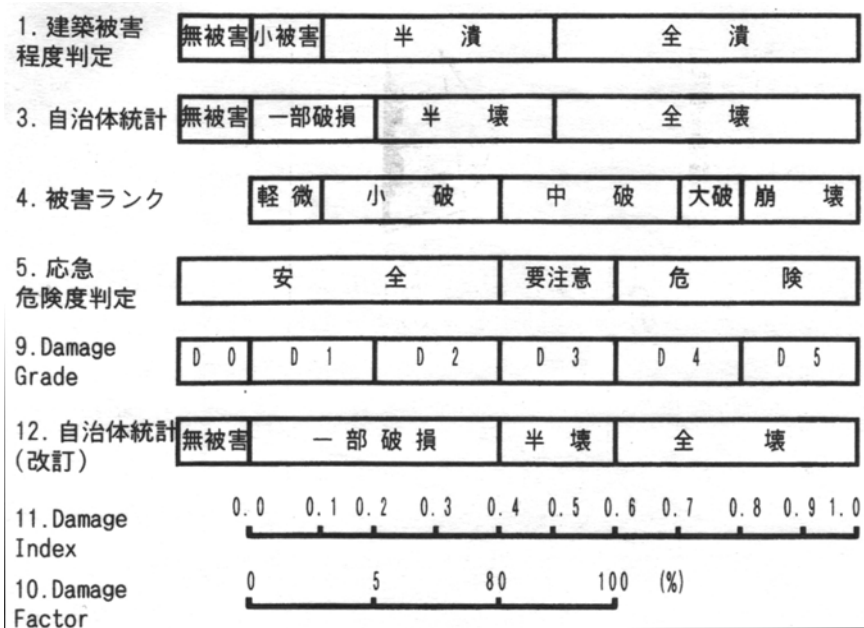


図 1.7 被害尺度の比較

また、建物の特性を分類してフラジリティ関数を求めると、それぞれの特徴が現れることがわかっている。ここでいう建物の特性とは、建物の構造種別のほかに、建築年代、階数、またはそうした構造的特性を一つの指標で判定した、耐震性能診断値  $I_s$  である。図 1.8 に、建築年代別に求めたフラジリティの例を示す。

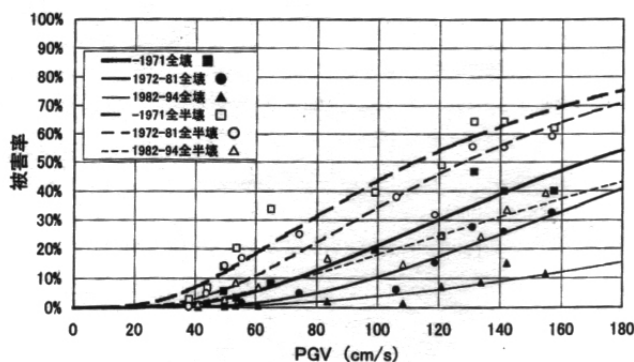


図 1.8 建物の条件ごとに分類したフラジリティ関数の例<sup>27)</sup>

本研究では、主に地震保険制度における基本料率の設定に関して、建物被害のデータを利用することを考えており、また建物それぞれの耐震性能によるフラジリティの違いも検討項目に入れる必要があることから、林ら<sup>28)</sup>による、耐震性能指標  $I_s$  値を式中にパラメータとして含むフラジリティ関数を用いることとした。その関数は以下の式のとおりである。

$$P_{fi}(v, I_s) = \Phi\left(\frac{\ln(v) - \lambda_i(I_s)}{\zeta_i}\right) \quad (1.7)$$

$$\begin{cases} \lambda_i(I_s) = \ln(V_{0i} \cdot I_s / I_{s0}) \\ \zeta_i = 0.6, \quad I_{s0} = 0.4 \end{cases}$$

$$V_0 = 50(i=1), 100(i=2), 150(i=3), 200(i=4), 250(i=5)$$

ここで、 $\Phi$  は累積標準正規分布を表し、 $i=1,2,3,4,5$  はそれぞれ軽微・小破・中破・大破・倒壊の被害レベルを示す。

式(1.7)で用いる耐震性能指標  $I_s$  値は、耐震診断を行うことによって求めることができる値である。現在建てられている建物における  $I_s$  値は一定の分布を持っており、その平均値は約 0.55、対数標準偏差が 0.416<sup>29)</sup>と求められている。

また、RC 以外の構造による建物についてもそれぞれ耐震性能指標を用いたフラジリティ関数が提案されている。本研究では、今まで提案されてきているそうしたフラジリティ関数の中で、RC に関するものが最も信頼性が高いと思われることから、RC の建物に関してを中心に検討を行うが、木造や S 造に関しても、同様のフラジリティ関数を使用することによって、同様にして、地震保険および地震リスクマネジメントの手法を適用することができる。しかし現在のところ、木造および S 造に関して、式(1.7)と同等の信頼性を持つ、耐震性能指標を利用したフラジリティ関数は現在のところ提案されていない。ここでは、林ら<sup>28)</sup>の用いた手法を参考にして、RC の耐震性能指標  $I_s$  とほぼ同等の意味を持つ、木造住宅の耐震精密診断<sup>30)</sup>に基づく総合評点を  $I_w$  として求めたフラジリティ関数の例を以下に示す。これは、木造建築物の耐震診断の評点と被災度に関するデータを用いて、その関係と提案する式が良く適合するように、式中の係数を決定したものである。

$$P_{fi}(v, I_w) = \Phi\left(\frac{\ln(v) - \lambda_i(I_w)}{\zeta_i}\right) \quad (1.8)$$

$$\begin{cases} \lambda_i = \ln(V_{0i} \cdot I_w / I_{w0}) \\ \zeta_i = 0.4, I_{w0} = 0.8 \end{cases}$$

$$V_0 = 65(i=1), 120(i=2), 165(i=3), 220(i=4), 270(i=5)$$

式(1.8)において、 $\Phi$  は累積標準正規分布であり、 $v$  は最大値表面速度 PGV、 $i$  は式(1.7)と同様の被害レベルを示す。

## 1.5 リスクカーブと年期待被害率

1.3節および1.4節に示した地震ハザードと fragility を用いて、建物のリスクカーブを求める。

リスクカーブを表す関係式は、1.2節で概説したとおり、地震被害率  $L(v)$  と地震動年超過確率  $\text{Pr}(v)$  の関係を示したもので、式(1.1)および式(1.4)により、 $v$  を媒介変数としてその関係が得られる。これをグラフに表したものがリスクカーブである。図1.9は、日本の主要8都市における年損失率に関するリスクカーブを求めたものである。

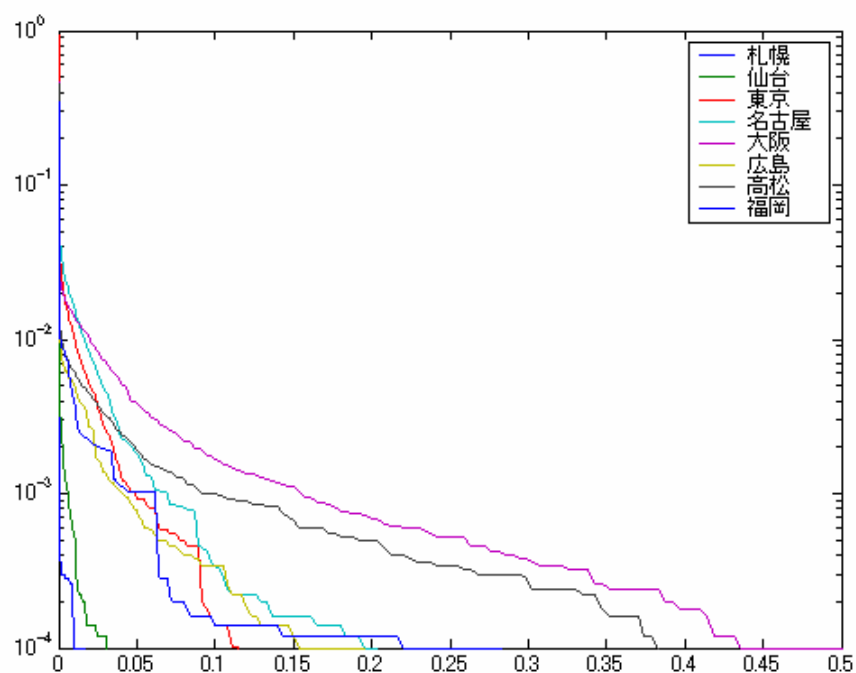


図 1.9 主要 8 都市におけるリスクカーブ

そして、式(1.5)により、建物の再調達価格に対する年期待損失額の割合である、年期待損失率が求められる。

このようにして得られた結果が、リスクカーブにおいてどのような関係にあるかについて見てみる。図1.10は、リスクカーブ上に、対象地点における年期待損害率に相当する点をプロットしたもので、表1.2に年期待被害率の値を示す。

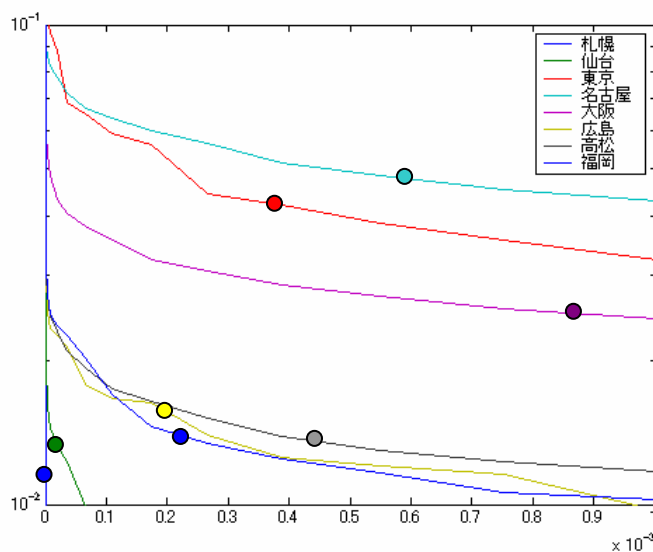


図 1.10 リスクカーブと年期待被害率  $E_L$

表 1.2 各都市における年期待被害率  $E_L$

$\times 10^{-3}$

	札幌	仙台	東京	名古屋	大阪	広島	高松	福岡
被害額期待値	0.003	0.081	0.267	0.449	0.273	0.057	0.177	0.204

ここから、札幌や高松などのように、一定以上の被害率に対する超過確率が  $10^{-2}$  より低い、すなわちリスクカーブの立ち上がりが  $10^{-2}$  を下回っているような地域と、東京や名古屋のように、発生確率が  $10^{-2}$  を上回っている地域では、後者のほうが、年被害被害率、ひいては地震保険料の基本料率が、高めに設定されていることがわかる。これはすなわち、そうした地域では、支払っている地震保険料相当の被害が起きる確率が他の地域に比べて低く、供用期間中に地震があまり発生しなかった場合には、実際の地震被害に比べて地震保険料の負担が大きくなっているものの、大地震が他の地域より発生しやすく、それが発生した場合には大きな被害を蒙る可能性が高いため、地震保険加入の効果が現れやすいとも言える。

したがって、地震保険に加入しようとする人が毎年支払う保険料の額を重視するか、万一の場合の被害、すなわちリスクの分散を重視するかと、どういうリスクカーブを持つ地域の建物であるかという関係によって、保険料の持つ意味が違ってくると言える。

## 1.6 地震危険度に基づく地震保険料の提案

1.5において、年期待被害率を求め、それが地震保険料の基本料率に相当する額となることを示した。ここではそれに基づいて、実際に地震保険料を設定する方法を提案する。

今までの議論から、基本料率に関わる要因は以下の点であることがわかる。

- ・地震ハザード（対象地点）
- ・脆弱リティ（構造種別・耐震性能）

地震保険として最も合理的な保険料には、これらの要因を全て評価に入れた上で年期待被害率を計算し、これをもとに基本料率を決定するべきである。

ここでは、年期待被害率が上記の要因である建物の条件とどのような関係にあるかを示す。図 1.11 は、それぞれの条件の下で求められた年期待被害率を表したものである。

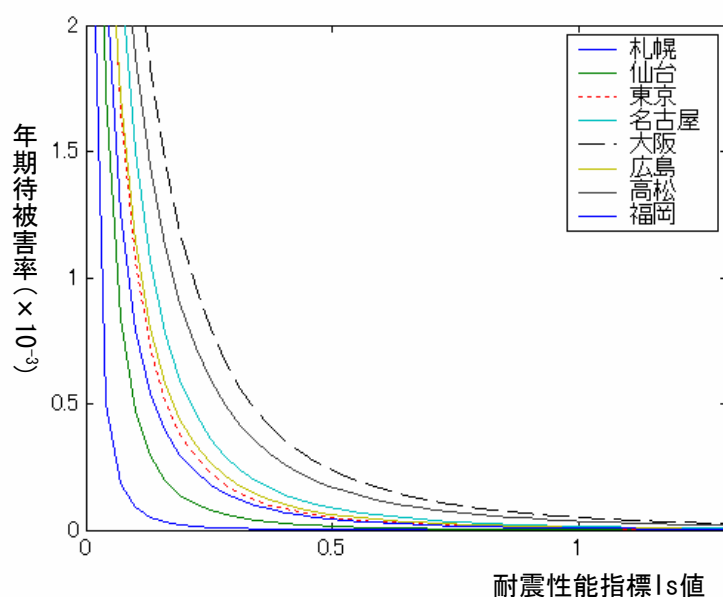


図 1.11 耐震性能指標  $I_s$  値と年期待被害率の関係

全国での、新耐震の基準で建てられた 82 年以降の建物における平均的な  $I_s$  値は 0.6 である<sup>31)</sup>。これが 1.5 倍の耐震性能を持った時、 $I_s$  値は同じく 1.5 倍になると考えると、 $I_s = 0.9$  となり、このとき東京における建物の例では、年期待被害率は約 0.56 倍、したがって地震保険料の基本料率も 0.56 倍にすることができることがわかる。それに対して、現在の地震保険制度では耐震性能が 1.5 倍になったときの保険料の割引率がいくらであるかを比較してみる。現行建築基準法での耐震規準を満たした建物であるだけで基本料率から 1 割引、耐震性能がその 1.5 倍になったときに 3 割引であるから、1.5 倍の耐震性能を持った建



物の基本料率は、基準を満たした建物のその  $0.7/0.9=0.78$  倍になることがわかる。これを比較すると、基準より強めに設計された建物の実現している耐震性の向上が、地震保険料の中に十分反映されておらず、耐震改修や高耐震性の建物建設を促進させる制度になっていないと言える。逆に言うと、これが十分反映されるような保険料設定が実現できれば、地震保険制度は、耐震改修ひいては国全体としての建物の被害リスクの低減を推進させる一助となることができる。

## 1.7 地震火災

地震保険の補償対象には、地震によって発生した火災による建物の焼失、損害も含まれている。したがって現行の地震保険料と比較するためには、1.6で求めた年期待被害率に加えて、地震火災の影響も考慮しなければならない。

地震火災の発生状況に関しては、地震が発生した時の時間帯や風向きなどが大きく影響するため、それらの条件を十分考慮したシミュレーションにより火災被害の率などが求められる。具体的な手法や結果についてはいくつかの論文や研究機関によって確立されている。東京都が行った、東京における都市直下型地震における被害想定では、冬季の平日夕方6時ごろに北西の風6m/秒が吹いている状況において地震火災の被害が最大となり、そのとき都心地域を取り巻く密集市街地において、焼失家屋が37万8千棟、焼失市街地が9600haに達すると推定された。<sup>32)</sup>こうした研究の結果、東京など木造・密集家屋の多い地域で被害が大きく、そうでない地域で被害が小さくなることがわかっている。

本研究では、地震火災の影響が地震保険による保障の中で占める割合から、地域の特性による差が期待値としてそこまで大きくないと判断し、地震火災の地震保険全体に占める割合を全国一律に一定割合として、地震保険料率を設定するものとする。ここで目黒ら<sup>33)</sup>によって示されている地震火災のみの保険における保険料を見てみると、従来の地震保険の場合に比べて約3.2%の保険料率になるという結果を得られている。1.5節で示している地震被害の期待値 $E_L$ と、それに地震火災による被害の期待値 $L_f$ を加えると、地震保険全体での年被害率期待値 $L_T$ は、以下のように表される。

$$L_T = E_L + L_f \quad (1.9)$$

## 1.8 保険手数料

以上のような要因を考慮した結果、対象となる建物の年期待総被害額  $L_T$  が算出されることになり、これが保険料の純保険料率に相当する値となる。そしてさらに、実際の保険料率  $Ins$  は、ここに事務・調査手数料  $J$  を加えたものとして以下のように設定されることになる。

$$Ins = L_T + J \quad (1.20)$$

この手数料  $J$  については、会社や保険商品の性質によっても様々に異なるものである。地震保険に関しては、日本地震再保険株式会社<sup>34)</sup>のデータより、保険の基準料率を構成している純保険料と付加保険料が7:3になっていることがわかる。しかしここには保険会社の利益が含まれていないことから、本研究では他の保険に関するデータを用いることとし、保険会社の決算資料<sup>4)</sup>から、純保険料と付加保険料の比がほぼ1:1というデータを用いるものとする。したがって、地震保険の基本料率を、式(1.20)ではなく、以下のように設定することとする。

$$Ins = L_T \times S \quad S = (1+1) / 1 \quad (1.21)$$

ここで  $S$  は、純保険料率に対する保険料率の倍率を表す。

この基本料率算出の式や倍率  $S$  の値に関しては、地震保険に関するより詳細なデータが得られた場合にはそれに合わせて検討しなおすことが望ましい。

### 1.9 算出された保険料率と現状保険料率の比較

先に示す検討事項を全て含めると、年期待総被害率  $L_T$  が求められ、そこに手数料を加えた保険料率を計算することができる。これを求める式は、今までの計算式をまとめて以下のように表すことができる。

$$Ins = (E_L + L_d) \times S \quad (1.22)$$

$$E_L(Is) = \int_0^{\infty} f(v)L(v, Is)dv$$

$$L(v, Is) = \sum_{i=1}^4 (P_{fi}(v, Is) - P_{fi+1}(v, Is))L_i + P_{f5}(v, Is)L_5$$

式(1.22)に基づいて算出された保険料率を、現状の地震保険における基本料率と比較すると、次の表 1.3 および図 1.12 のようになる。ここで、対象とする建物の耐震性能については、調査結果から全国における耐震性能指標  $I_s$  値の平均値が  $I_s=0.6$  であるとして、この値を用いて年期待被害率を求めた。

表 1.3 現在の地震保険料率と、年期待損失額に基づく保険料率

	保険金額1000円に対する保険料(円/年)							
	札幌	仙台	東京	名古屋	大阪	広島	高松	福岡
現状の保険料	0.500	0.700	1.750	1.350	1.350	0.500	0.500	0.500
被害額期待値	0.006	0.022	0.391	0.590	0.860	0.198	0.435	0.208

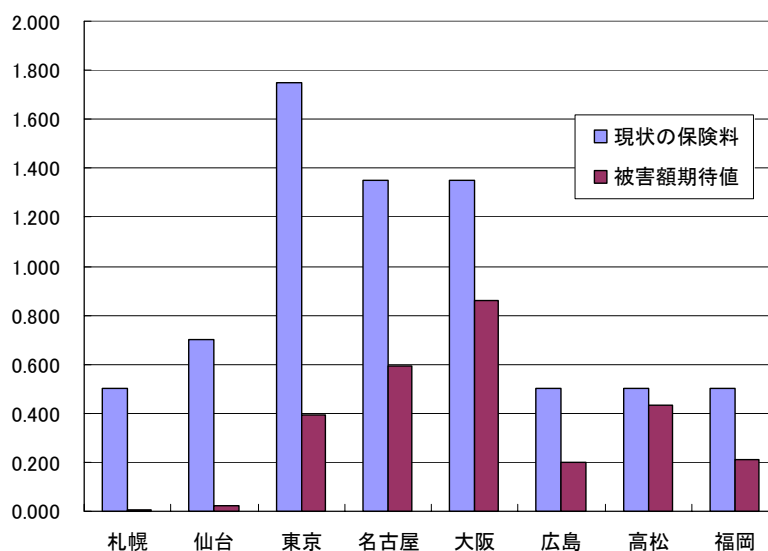


図 1.12 主要 8 都市における、提案された基本料率と現行基本料率との比較(棒グラフ、数値を棒の頂点に明記したもの)

表 1.3 から、いくつかの特徴的な事柄が読み取れる。まず、建物の年代別の期待損害率と保険料率を比較すると、現行建築基準法による建物の損害率は以前のものに比べて 4~5 分の 1 になっていることがわかるが、実際の保険料の設定では 1 割引となっている。また、地域ごとに見てみると、福岡に比べて東京や大阪における保険料率の高さが目に付く。この様に、現行基本料率では地震リスクの違いを適切に評価していない点が指摘される。

したがって、適切な地震保険料設定のためには、年代や耐震性に応じた適当量の割引制度が必要であると言える。

## 1.10 基本料率に関わる他の要因

地震保険の基本料率は、地震による建物被害率の期待値がそのままの数値で設定されているわけではない。

### 1.10.1 加入限度額

現在地震保険には、地震保険に加入できる額を、火災保険で加入している額の30%~50%とするという制限が設けられている。すなわち、地震が起きて地震保険に加入している建物が倒壊した場合にその加入者は、最大で建物の建設費用の半額分を自己負担しなければならないことになる。実際には、再び住宅を建てるために住宅ローンを組むということで、倒壊した住宅の住宅ローンがまだ返済し終わっていなかった場合、二重ローンに悩まされる可能性があるということになる。また、ローンを組める状況に無い場合、支払われた半額分の保険金は当面の暮らしを維持するために使われるという場合も多い。

しかし、野口ら<sup>35)</sup>による地震リスク・地震保険に対するアンケートの結果によると、地震保険に加入する時、ほとんどが保険金は「新しい建物を確保するための資金」として使用することを望むことがわかっており、保険制度としては、建物建設費の100%相当の保険に入れるような制度にするべきであることが望ましいと言える。

そこで、加入限度額を50%と定めることの利点はどこにあるのかという点について考えてみる。現在地震保険の加入状況は、表1.4のとおり、加入件数が約950万件、平均加入保険金額750万円である<sup>5)</sup>。保険に加入している建物が、都道府県ごとの住宅密度<sup>36)</sup>にしたがって全国に分布していると仮定して、加入建物全体を建築ポートフォリオとした時のリスクカーブを求めてみる。ここで、各建物の設置場所における地盤増幅係数は、SSWEBにある値のうち最も近い地点のものを用いた。また、加入限度額の規制がなくなった場合にどうなるかを見るため、平均加入保険金額が現在の倍になった場合のリスクカーブも求め、これらを比較する。図1.13に、都道府県ごとの仮定した加入建物数を密度[件/k<sup>2</sup>]で表したものを、図1.14に、得られたリスクカーブを示す。

表 1.4 地震保険の加入状況

加入件数		933万件
平均保険金額	建物	903万円
	家財	318万円
	計	739万円
合計保険金額		68兆9500億円

	宅地(km <sup>2</sup> )	世帯加入率(%)	世帯数(千世帯)	加入世帯/宅地
北海道	985	17.1	2,278	395.5
青森	281	11.8	504	211.6
岩手	294	8.8	475	142.2
宮城	378	23	832	506.2
秋田	241	8.9	388	143.3
山形	242	7.9	376	122.7
福島	414	11.1	686	183.9
茨城	639	15.9	984	244.8
栃木	404	13.2	666	217.6
群馬	387	9.1	691	162.5
埼玉	622	19.3	2,470	766.4
千葉	682	23.1	2,164	733.0
東京	555	26	5,371	2516.1
神奈川	570	24	3,318	1397.1
新潟	437	12.2	792	221.1
富山	226	8.2	356	129.2
石川	178	11.6	407	265.2
福井	154	11.6	258	194.3
山梨	158	19.3	308	376.2
長野	440	8.3	756	142.6
岐阜	327	19.3	678	400.2
静岡	525	23.7	1,279	577.4
愛知	781	28.7	2,523	927.1
三重	322	18.7	635	368.8
滋賀	207	11.7	439	248.1
京都	210	13.7	1,015	662.2
大阪	496	19.2	3,455	1337.4
兵庫	541	14.3	2,035	537.9
奈良	141	15.8	485	543.5
和歌山	137	15.8	380	438.2
鳥取	102	13.6	200	266.7
島根	128	8.8	257	176.7
岡山	330	12.2	690	255.1
広島	340	20.3	1,096	654.4
山口	259	12.1	582	271.9
徳島	124	15.8	288	367.0
香川	167	17.4	364	379.3
愛媛	214	14.6	565	385.5
高知	95	18.2	319	611.1
福岡	595	16.6	1,907	532.0
佐賀	144	6.3	278	121.6
長崎	189	5.9	543	169.5
熊本	301	17.3	645	370.7
大分	199	12.2	452	277.1
宮崎	225	15.4	437	299.1
鹿児島	343	16.2	714	337.2
沖縄	129	7.1	440	242.2

図 1.13 仮定した地震保険加入建物密度 [件/k m<sup>2</sup>]

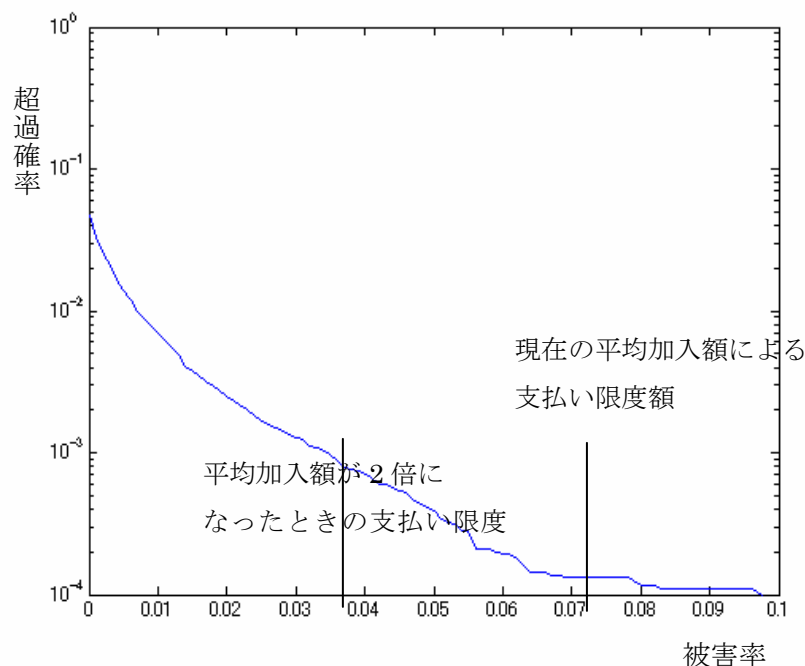


図 1.14 全国に散らばる建物群によるリスクカーブ(評価期間 50 年)

ここで、建物は都道府県内にランダムに配置されるものとし、それぞれの耐震性能は平均的な耐震診断値を持つ木造家屋と RC 造建物を、実際の木造と RC 造の比率<sup>36)</sup>に従って 3 : 2 で分布させたものとした。それぞれの対象地点における地震ハザードは全て個別に計算したものである。ただし、950 万件全てを配置して計算を行うことは非常に長い時間を必要とし、また計算に使用する機器の性能も相当なものが必要があることから、全国に 10000 件分を配置してその被害額を計算し、これを 950 倍して実際の加入件数に合わせた。これは、極めて狭い地域に存在する 950 件の建物群に関しては、その被害状況がほぼ従属的であると考えられると判断したものである。従って図 1.14 の結果は詳細な値まで信頼性の高いものではないことに注意が必要である。

得られた図 1.14 の結果から、平均加入額が倍になった場合は、ほぼ純粋に超過確率に対する被害額が増加することが読み取れる。従って保険料と支払い保険金の関係を考えると、期待値として見たときには  $Ins = (E_L + L) \times S$  であるから、平均加入額に関係なく同じ状況になっており、加入限度額という規制は影響してこない。

両者の大きな違いとして見えるのが、保険金支払額の絶対値の大きさである。万一大地震が発生して大きな被害が出た場合、今後 50 年のうちに、現在確保されている準備金の額を超える確率が、今の倍額加入された場合には約 0.12% から約 0.80% へと増大することになる。すなわち、地震保険制度が現在カバーできる範囲の中で、より多くの加入者により確実な補償を得られるようにするため、加入限度額が設定されているということがわかる。



## 1.10.2 支払い限度額

加入限度額と対のような形で地震保険契約の中に設定されているのが、支払い限度額である。これは、大地震によって極めて大きな被害が発生し、もし支払うべき保険金の額が「支払い限度額」として設定されている額を超えてしまった場合には、実際に払われる保険金は支払い限度額に応じて減額された分のみ支払われる、という規定である。今の地震保険は政府が税金を使ってバックアップする形で運用されているため、大地震による被害では多くの税金から保険金が払われることになるが、支払える額には限度があるということである。

具体的な数値については、図 0.4 に示されている通りである。支払い限度額は、「現在では政府と民間保険会社での支払い合計にして 5 兆円と設定されている。

1.10.1 でも見たように、現在のシステムでは、支払い保険金の額が支払い限度額を超える確率が 0.12%程度となっている。ところで、実際にそのような状況になる可能性を考えると、全体での被害が巨額なものになるというのはすなわち大都市圏において地震が発生したような状況が想定される。つまり加入者がどのような地域に住んでいるかによって、例えば都市部などは、実際の地震危険度とは全く別に、保険金の不払いが行われるというリスクを抱えていることになる。居住する地域という、自分ではなかなかコントロールできない要因によって、他にはないリスクを負わされる一方、保険料としては地震危険度に沿った額を支払わなければならないというのは合理的ではない。

また、政府の側としても、年々この支払い限度額のレベルを上げてきていることは先にも述べたとおりである。しかし、その設定の根拠を加入者数に基づく想定される最大損失とし、実際に確保されている準備金が 1.66 兆円程度である現状でこのような額の設定を行うということであれば、その額の大小を前もって設定することの意味はほとんど無いと言って良いのではないだろうか。

このような状況を鑑みると、地震保険制度としてはこの支払い限度額を設定しなくてもよいような形のシステムにすべきであると考えられる。ただし、実際には支払い限度額の設定がなくなることによって、保険会社や政府の側としてはある種のリスクを負うことになることから、それを保険料に反映することは必要になってくるだろうと思われる。

## 1.10.3 その他免責事項

現在の地震保険に設定されている制限事項は以上の 2 節に述べたが、より自由度の高い地震保険制度を確立するためには、保険金の支払いシステムなどのバリエーションによって、より入りやすい契約条件の追求も必要になってくる。

ここではその一例として、低い保険料に抑えたままで、大きなリスクを回避するという地震保険の特性を生かす、「小破」以下の被害に対しては保険金が支払われず「中破」以上の被害を受けた場合にのみ支払われるという条件について検討を行う。地震被害のほとんどは5%分の保険金が支払われる小破の事例であることから、これを支払い対象外とした場合、保険料は非常に安くなり、かつ本当に必要な場合には十分な補償が得られるというシステムが提案できると考えられる。

中破以上の被害を受けた場合のみ保険金が支払われる場合について、保険料を算出する。ここでは、式(1.4)および式(1.5)を次のように変えて、年期待被害率の計算を行うことになる。

$$L'(v, Is) = \sum_{i=3}^4 (P_{fi}(v, Is) - P_{fi+1}(v, Is))L_i + P_{f5}(v, Is)L_5 \quad (1.23)$$

$$E_L(Is) = \int_0^{\infty} f(v)L'(v, Is)dv \quad (1.24)$$

このようにして求めた年期待被害率と、小破も考慮した場合の年期待被害率を比較した結果は、以下の表のようになる。

表 1.5 考慮する被害レベルによる年期待被害率の違い

	$\times 10^{-3}$							
	札幌	仙台	東京	名古屋	大阪	広島	高松	福岡
単純期待値	0.003	0.081	0.267	0.449	0.273	0.057	0.177	0.204
小破除外	0.001	0.013	0.057	0.120	0.131	0.023	0.121	0.100

ここから、5%程度の被害では支払われないが、大きな被害を受けた場合には保険金が支払われるようなシステムにすると、保険料を約30%に抑えることができることがわかる。

例えばこのように、全く異なる支払いの仕組みを提案することによって、建築主のリスクに対する考え方と保険料支払いとの新たな関係が生まれ、それによって新たな加入者を得る可能性があることを示した。

#### 1.10.4 再保険制度

保険には様々なリスクを対象にしたものがあるが、それらはどれも、非常に稀ながら、支払うべき保険金の額が極端に大きくなることで、保険会社に深刻な損害を与えかねない危険性を孕んでいる。そのような、保険商品全体としてのリスクを分散させるため、他の保険会社、再保険会社と契約し、その保険商品全体、またはその支払い条件の一部に対して更に保険を掛けてリスクを転嫁させることがありこれを再保険と呼んでいる。再保険の

掛けられたものが更に再保険に加入する、再々保険も保険の種類によっては成立している。

再保険制度の具体的な手法としては、保険契約した全リスクをある割合で分割し、保険会社と再保険会社が分割した割合に応じて、被害が発生したときに毎回比例的に保険金を負担する比例型と、そうではなく、損害額に一定の値を設定して、その値を超えた場合は超過分を再保険会社が、超過しなかった場合の全額と、超過したときの指定額以下の部分の額を保険会社が、それぞれ支払う非比例型とがある。図 1.15 に、両者の概念図を示す<sup>37)</sup>。

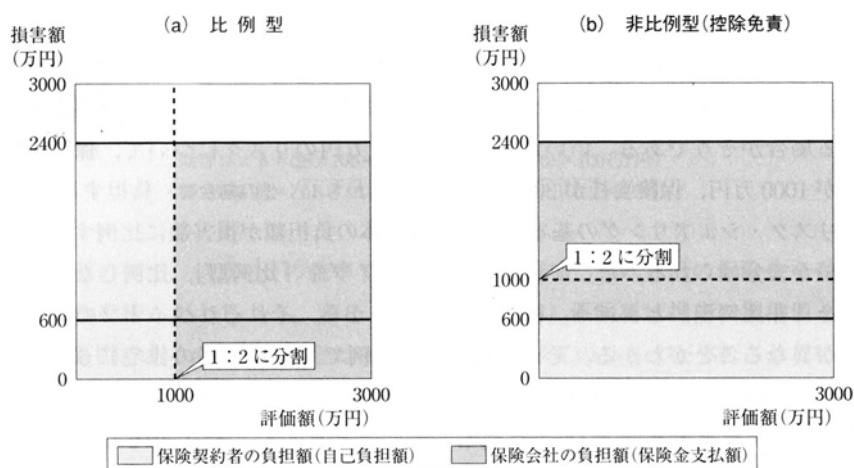


図 1.15 再保険制度の概念図

現行の地震保険制度においては、民間保険会社と政府の間に日本地震再保険株式会社が入って再保険業務を行っている。図 1.16 はそれを説明した図である<sup>34)</sup>。全体としては、地震保険の基本は民間保険会社が引き受け、大地震が起きた際など、民間保険会社の保険金支払い限度を超過する部分について、政府が再保険を引き受けているという形になっている。

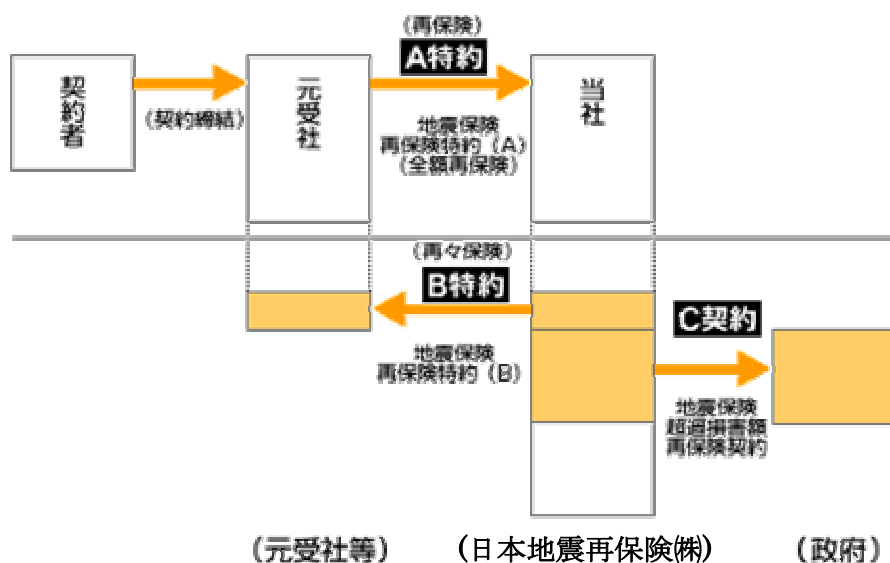


図 1.16 現行地震保険の再保険制度概要

1.8.2 節および 1.8.3 節において、現行の地震保険に設定されている加入限度額・支払い限度額の問題について指摘したが、図 1.16 を見ると、これらが設定されなければならない原因がどこにあるかが見えてくる。すなわち、政府は地震リスクの一部、それもよりリスクの大きな一部を引き受けているが、これに関して再々保険契約によって他にリスクを転嫁するというを行っていないことが、政府の側として支払い限度額を設定しなければならない原因となっていると考えられる。この点について、地震保険は「公共性が高い」<sup>18)</sup>としているが、むしろここに政府が介入することによって、地震保険の、制度としての自由度や充実度が失われているという点も否定できないのではないだろうか。

現在政府が再保険として引き受けている地震リスクをさらに再々保険にまわす、もしくは相当の再保険料を付加した額を地震保険料として設定することを条件に、支払い限度額という規定を廃止する、という選択肢が考えられる。

## 1.11 まとめ

以上のように、年期待損失額を基にした地震保険料の料率算定を行った。地震保険に関わるさまざまな要因について検討し、現在研究成果として出されている最新の地震リスク評価システムを用いて計算を行ったところ、手数料の額などまだ不確定な要因はあるものの、現在設定されている保険料率が、実際の危険度に比べて高めであるということ、また耐震性能の違いを十分に反映していないことなどが確認された。

このことから、本来あるべき保険料の値としては、本章で提案したような手法を用いて、より実際のリスクに見合った料率に設定されるべきであると考えます。

## 第2章 総費用最小化原理と地震保険

## 2.1 総費用最小化原理

耐震性能のレベルによって変化する初期建設費用と保険料の総和であるライフサイクルコストを考え、これを最小化する点を最適耐震性能と設定する、総費用最小化の考え方を示したのが、図 2.1 である。

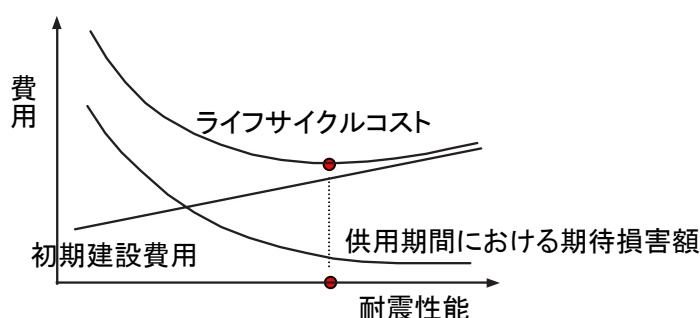


図 2.1 総費用最小化の概念

この概念については既に基本的な考え方および定式化がなされている。以下にその概要を示す。

まず総期待費用  $C_T$  は、維持費や価値の変動は考慮しない形で以下のように表される<sup>15)</sup>。

$$C_T = C_I + \sum_i P_{fi} C_{fi} \quad (2.1)$$

ここで  $C_I$  は初期建設費用、 $P_{fi}$  は供用期間中に建物が地震によって被害レベル  $i$  の被害を受ける確率、 $C_{fi}$  は被害レベル  $i$  の被害時に想定される損失費用である。設計荷重については、地震荷重・積雪荷重・風荷重などがあるが、ここでは地震荷重以外の影響は小さいものとして、地震荷重のみについて考える。

初期建設費用  $C_I$  は、設計荷重効果  $r_0$  に対してほぼ線形の関係を示すことがわかっており、次式で表される。

$$C_I = C_0 \left\{ 1 + k \left( \frac{r_0}{\mu_Q} - 1 \right) \right\} \quad (2.2)$$

ここで、 $r_0$  は設計荷重効果、 $\mu_Q$  は荷重効果  $Q$  の平均値、 $C_0$  は設計荷重が  $r_0 = \mu_Q$  となる時の初期建設費用、 $k$  がコスト上昇係数である。コスト上昇係数は、式(2.2)より、初期建設費用を、 $r_0 = \mu_Q$  となる時の初期建設費用  $C_0$  で規準化したときの傾きとして求められることがわかる。さらに設計荷重効果  $r_0$  は、荷重効果  $Q$  の平均値  $\mu_Q$ 、荷重係数  $\gamma$  を用いると次式で表される。

$$r_0 = \gamma \cdot \mu_Q \quad (2.3)$$

また、荷重効果を  $Q$ 、耐力を  $R$  とした時にこれらの確率分布が対数正規分布に従うとす

ると、超過確率  $P_f$  はこれに対応する信頼性指標  $\beta$  で次式のように表される。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_Q}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_Q^2}} \quad (2.5)$$

ここで  $\Phi(x)$  は標準正規分布であり、 $\lambda_R$  と  $\zeta_R$  はそれぞれ  $\ln(R)$  の平均値と標準偏差、 $\lambda_Q$  と  $\zeta_Q$  はそれぞれ  $\ln(Q)$  の平均値と標準偏差である。

破壊時損失費用  $C_F$  は、規準化係数  $g$  を導入して

$$C_F = g \cdot C_0 \quad (2.6)$$

で評価できるものとする。以上を図1に示す。

荷重係数  $\gamma$ 、総費用が最小化されたときの最適信頼性指標  $\beta_{opt}$  が、次式で表されることがわかっている<sup>16)</sup>。

$$\gamma = \exp(\beta \cdot \alpha_Q \cdot V_Q) \quad (2.7)$$

$$\beta_{opt} = -\alpha_Q V_Q + \sqrt{(\alpha_Q V_Q)^2 + 2 \ln\left(\frac{g}{\sqrt{2\pi k} \alpha_Q V_Q}\right)} \quad (2.8)$$

ここで、 $V_Q$  は供用年間最大荷重の変動係数であり、 $\alpha_Q$  は次式で表される分離係数である。ただし  $\alpha_Q$  については一定値を取ることがおおく<sup>38)</sup>、本研究では  $\alpha_Q = 0.85$  とする<sup>15)</sup>。

$$\alpha_Q = \frac{\zeta_Q}{\zeta_R^2 + \zeta_Q^2} \quad (2.9)$$

式(1.7)より最適設計荷重  $\gamma_{opt}$  は次式で与えられる。

$$\gamma_{opt} = \exp(\beta_{opt} \cdot \alpha_Q \cdot V_Q) \quad (2.10)$$

このようにして、建物の初期建設費用と期待損害額を最小化するという形での最適設計荷重の求め方はすでに提案されており、この考え方に基づいて今までの研究は行われてきているが、ここで用いている損害額は、期待損失額という形で代表値が与えられているものの、実際にはばらつきを含んだ不確定のものである。それに対して、ここでは保険料率という確定的な値を用いているため、保険手数料分費用は高くなるが、確実なリスクマネジメントが行えることになる。

ただし、そのような考え方が適用できるのは、地震保険が建物被害全額を補償するシステムである場合に限られる。そうでない場合には、初期建設費用、加入分の保険料と、非



加入分のばらつきを含んだ期待損害額の和が、ライフサイクルコストとすることによって、検討を行うことができる。

さらに、建築構造における総費用最小化原理を用いた設計荷重設定法に関して、この原理を利用して総 CO<sub>2</sub> 排出量の最小化を図る試みがなされてきている。最適設計荷重を決定する上で重要となるのが、荷重に対する費用・排出量の変化を表すコスト上昇係数  $k$  である。 $k$  の評価には複数の要素が影響しているが、その中で部材単価および原単位、構造物の特性による影響についての評価が 1 つの課題となっている。これについては地震保険に関する検討とは別のことであって、保険の考え方を考慮に入れることは考えられていないが、環境的視点を取り入れることが求められている場合には、総 CO<sub>2</sub> 排出量の最小化を考えてみた時に、選択しようとしている設計条件が CO<sub>2</sub> に関してどのレベルであるのかという形での検討も必要であると考えられる。

## 2.2 地震保険の役割

地震保険に加入した場合と加入しない場合ではどのように地震リスクが変わるのだろうか。図 2.1 に示したのは、耐震性能の違いによる地震被害額の分布と、それに対して第 1 章に示したような手法で年期待損失額に基づいて算出された地震保険料とを比較したものである。

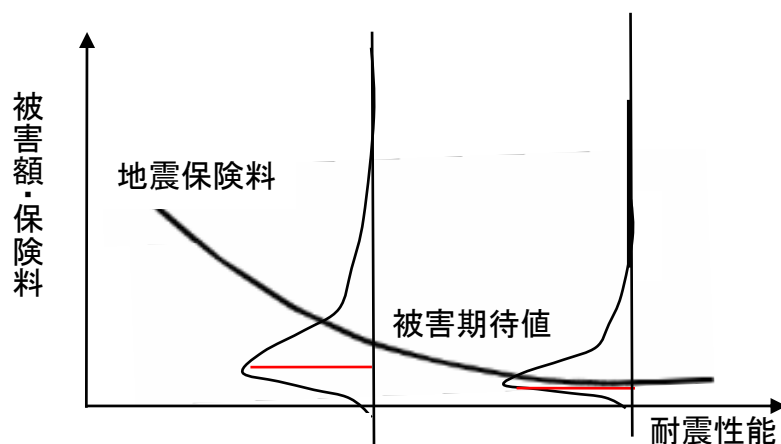


図 2.1 耐震性能に応じた被害額と地震保険料率の比較

ここからわかるのは、地震保険に入った場合、入らなかったときには生じたかもしれない大被害を、地震保険料率レベルの値に固定化させることができるということである。すなわち、自然災害の中でも最も大きいとされる、地震被害額が持つばらつき、地震保険に加入することで小さくすることができるということである。

一方で、地震保険料には手数料が含まれていることから、地震被害の期待値と比較すると、保険料のほうが約 2 倍も高い値に設定されている。そうした料率設定に対して、地震被害期待値レベルでの評価を求める人にとっては保険に加入するということは期待値より高い額を支払わなければならないので受け入れられないだろう。しかし現実に多くの保険商品が存在していることから考えると、人々は、保険料の額と、期待値よりも高いレベルでのリスクを比較し、そのときに保険料の額がリスクに対して妥当かもしくは安いと判断して保険に加入しているのだと考えることができる。

したがって、保険への加入を含めた、供用期間における総支払い費用を考えるに当たっては、今までの期待値のみに特化した議論ではなく、高いレベルでのリスクと地震保険料を比較し、その妥当性や有効性を評価する必要があることがわかる。

### 2.3 まとめ

以上のことから、建物の地震リスクマネジメントを行うには総費用に関する議論が必要であること、また地震保険に関する検討を行うにあたっては、その際に、期待値による評価ではなく、さまざまなリスクレベルに対する地震保険料の妥当性や総費用の値を求め、比較するという考え方をすべきであることがわかった。

次章以降ではこのことを踏まえ、総費用最小化の考え方に基づいた地震リスクマネジメントについて、その具体的な手法や、関連する事柄についての評価を行う。

### 第3章 コスト上昇係数に関する検討

### 3.1 コスト上昇係数

2章において、総費用最小化の原理を適用した時に、最適設計荷重  $\gamma_{opt}$  が、最適信頼性指標  $\beta_{opt}$  を用いて以下のように表されることが示され、

$$\beta_{opt} = -\alpha_Q V_Q + \sqrt{(\alpha_Q V_Q)^2 + 2 \ln\left(\frac{g}{\sqrt{2\pi k} \alpha_Q V_Q}\right)} \quad (3.1)$$

$$\gamma_{opt} = \exp(\beta_{opt} \alpha_Q V_Q) \quad (3.1)$$

このことから、最適信頼性、最適設計荷重を決定する主な要因は  $\ln\left(\frac{g}{k \cdot V_Q}\right)$  であることがわかっている。ここで  $\alpha_Q$  は分離係数、 $V_Q$  は荷重効果の変動係数、 $g$  は規準化損失係数である。

これら3変数の性質は以下の通りである。

$g$  は、先に述べたように破壊時損失費用の規準化係数であり、建物の損害をどの程度の重みを持って捉えるかを表している。建物が破壊した時の損失は、新築時であれば初期建設費用に同じであり  $C_F = C_I \cong C_0$  より  $g=1$  となるが、建物を使用している間に建物内に付加される物品などにより、破壊時の損失費用は初期建設費用より大きなものになっていく。その程度を表したのが  $g$  であるが、これをどのように評価するかは難しく、その値は建築主の考え方によるものであるといえる。

また  $V_Q$  は、供用期間における最大荷重のばらつきを表す係数で、地域ごとに求められたデータから決定される規定の値である。

それに対し  $k$  は、設計荷重と初期建設費用の関係を表すコスト上昇係数で、建物の構造・立地等の条件によって定まるものである。

### 3.2 既往の研究

3.1 で示した3変数のうち、コスト上昇係数に関してはその値が設計の結果によって決まってくることから、いくつかの研究がなされている。

まず基本的な研究としては、神田ら(1994)<sup>39)</sup>によって中層から超高層の5種類の建物における試設計に基づいて、初期建設費用の増加割合が示されたものがある。ここで試設計されている建物モデルは、RC造中層純ラーメン、RC造中層有壁ラーメン、S造中層、SRC造高層、S造超高層である。超高層を除く4種については、初期建設費用が設計荷重に対して線形に増加し、その傾きがほぼ一定となることと、一次設計の標準せん断力が  $C_0=0.2$  の時の初期建設費用を1として規準化した時のコスト比が、以下の式のように示されている。

$$\text{コスト比} = 0.48045C_0 + 0.90693 \quad (3.3)$$

さらに、その結果を元に Khaled(1996)<sup>40)</sup>は、コスト上昇係数  $k$  が地表面加速度の50年最大値  $\bar{Q}$  を用いて

$$k = \frac{\bar{Q}}{4000} \quad (3.4)$$

と表されるとしている。そのほか、佐藤(1998)<sup>38)</sup>が建物の平均的な応答倍率が2.5程度であることに基づき、荷重効果の平均値  $\mu_Q$  を用いて  $k$  を次式の形で表している。

$$k = \frac{\mu_Q}{10000} \quad (3.5)$$

以上の研究においては、 $k$  をその地域の地震危険度によって一定値に定まる値として扱っている。

また、筆者ら<sup>41)</sup>による研究では、コスト上昇係数は式(3.5)の値を基準としながらも、階高、スパン、階数および建物の規模に従って、次式のように、それぞれ比例的に変化することを確認している。

$$k' = \frac{f'}{f} \cdot \frac{H'}{H} \cdot \frac{L'}{L} k \quad (3.6)$$

ここで、評価対象の建物におけるコスト上昇係数  $k'$  に対し、 $k$  は基準となる建物におけるコスト上昇係数、 $f, f'$  は基準建物と対象建物の階数、 $H, H'$  は平均階高、 $L, L'$  は平均スパン長さである。

このようにして、コスト上昇係数の値は建物条件によって一定量変化するものの、ある一定規模の建物に関しては、式(3.5)による値を適用することができるものとしている。

その上で、本章では、本研究で総費用最小化の原理を適用するにあたり、設計および計算法によってその値や精度が変わってくるコスト上昇係数  $k$  について、事前にその性質や特徴を把握することを目的とし、上記のようなコスト上昇係数に関する検討結果も踏まえ

つつ、新たにコスト上昇係数の値に関わる各種の要因についてその評価を行う。

ここでは、コスト上昇係数の値そのものに関するものではなく、値の算出に用いるデータの精度に基づく、コスト上昇係数  $k$  の値の精度、ばらつきの大きさに関する評価を行うものとする。また、評価にあたり、総費用最小化の原理の関連する様々な分野への適用も視野に入れておくことが有効である考えられることから、総費用のみならず総 CO<sub>2</sub> 排出量、総消費エネルギー量などを対象とした場合の総負荷量最小化に関する議論として検討を行うこととする。

### 3.3 評価手法

まず、コスト上昇係数の基本として、建物の初期建設費用（または初期建設時の消費エネルギー量、CO<sub>2</sub>排出量など。以下初期負荷量とする） $E_T$ をどのように算出するかが問題となる。初期負荷量と、部材単価または原単位との関係を考え、これを一般化して考えると、その値は次式で与えられる。

$$E_T = \frac{1}{p} \sum_i u_i m_i \quad (3.7)$$

ここで、 $p$ は建物全体の初期負荷量に対して躯体由来の負荷量が占める割合、 $i$ は鉄筋・コンクリートなどの部材種類、 $u_i$ は部材単価または原単位、 $m_i$ は部材量である。

式(3.7)および式(2.2)より、 $E_T$ の増加率であるコスト上昇係数 $k$ は、荷重効果の平均値 $\mu$  $Q$ を基準状態として以下のように表されることがわかる。

$$k = \frac{\left\{ \sum_i m_i u_i - \sum_i m_i u_i \right\} p}{\sum_i m_i u_i} \frac{\mu_Q}{\mu_Q - \mu_Q} \quad (3.8)$$

式(3.8)における各種の係数は、コスト上昇係数 $k$ の値を算出するために用いるデータであり、それぞれある程度のばらつきや、設計による値の変化が起こりうるものである。そうした係数値の変化がコスト上昇係数自体にどの程度影響を与えるかについて、 $p$ 、 $u_i$ 、 $m_i$ それぞれに関して、次節以降で評価を行う。



### 3.4 各係数の影響評価

それぞれの係数を変化させて負荷量を計算し、初期負荷量を最小化するような最適荷重係数  $\gamma_{opt}$  の値への影響を、コスト上昇係数  $k$  への影響として評価する。ここでは、躯体負荷の割合  $p$ 、荷重効果  $\mu_Q$  ( $\gamma=1$ ) の基準状態に対する部材量の増加率  $a_j (= \frac{m_{1j}}{m_j})$ 、原単位  $u_j$  について検討する。

#### 3.4.1 構造部材の占める割合

式(3.8)において、部材量・部材量増加率が一定であるとして、 $p$  が  $p'$  になったときの  $k$  の値  $k'$  と比較すると、

$$k' - k = \frac{(a-1)\mu_Q}{(\mu_{Q_1} - \mu_Q)} (p' - p) \quad (3.9)$$

となる。ここで構造部材総量の増加率を  $a$  とした。 $p$ 、 $a$  の値が固定である範囲内においては、 $k$  が  $p$  と線形関係にあることがわかる。

$p$  の値は何の負荷量について評価するかによって異なる。

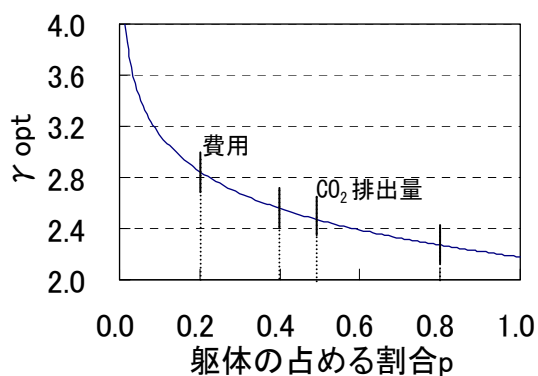


図 3.1 躯体の割合  $p$  と  $\gamma_{opt}$  の関係

図 3.1 のように建設費用では  $p=0.3$  程度、排出  $\text{CO}_2$  量では  $p=0.5 \sim 0.8$  とされる<sup>42)</sup>。従って  $\text{CO}_2$  排出量の場合は、 $\gamma_{opt}$  の値に 8.2% の幅があり、同様に費用に関して評価するとさらに  $p$  の影響度は高くなっている。

また  $p$  の値は、 $E_T$  および  $g$  の設定の影響を大きく受ける。すなわち、地震による被害修復時の期待負荷量  $E_F$  が  $E_F = g \cdot E_0$  で表されることから、 $p$  は  $g$  に追従する変数であり、その設定によって  $\gamma_{opt}$  への影響度が変化する。 $\gamma_{opt}$  に対する  $g$  と  $p$  の影響を表したのが図 3.2 である。ここから、 $g$  を大きくすると、すなわち被害時期期待負荷量を大きくすると  $\gamma_{opt}$  は大

きく、 $p$  の影響度は小さくなるという関係があることがわかる。 $g$  が  $g=2.0$  から  $g=10.0$  になる場合、 $p=0.3$  では  $\gamma_{opt}$  は 22.6%増加する。

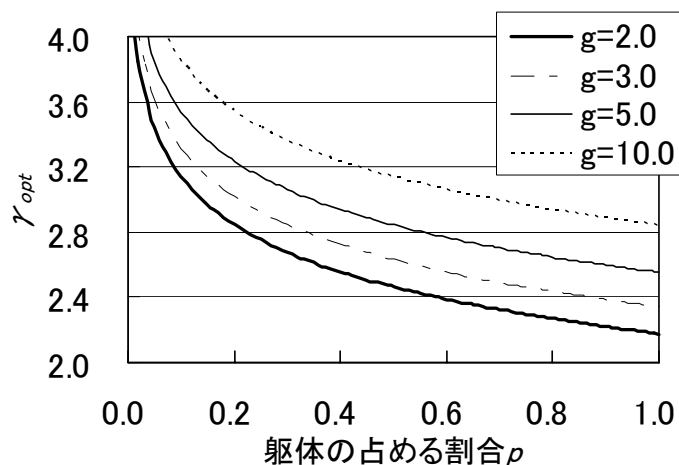


図 3.2  $p, g$  と  $\gamma_{opt}$  の関係

### 3.4.2 部材変化量

ある1部材  $j$  の増加率  $a_j$  は、鉄筋、コンクリートなど部材種類によってそれぞれ異なる値を持つ。

1つの部材における増加率のみ変化させたときの  $k$  に対する影響は、変化後の  $k$  の値  $k'$  と比較すると、

$$k' - k = \frac{m_j u_j p}{\sum m_j u_j} \frac{\mu_Q}{\mu_{Q_1} - \mu_Q} (a'_j - a_j) \tag{3.10}$$

と表される。部材の  $m_j u_j$ 、すなわち建物における負荷量の大きい部材に関して、その増加率の変化が  $k$  により大きな影響を与えることがわかる。

部材の増加量を27種類の建物について調べ、それぞれ表3.1のようになっている<sup>39)41)</sup>ことを考慮すると、増加率の  $\gamma_{opt}$  への影響は図3.3のようになる。ここで図3.3における実線は、1つの部材に関して  $a$  を変化させて他の部材は固定としたもの、点は、全ての部材において  $a$  を変化させたものである。主要な1部材の増加率が  $a=1.1$  のときと  $a=1.4$  のときで  $\gamma_{opt}$  の値として10.9%の差が、さらに全ての部材の増加率が変化すると19.7%の差が出ている。

表 3.1 各部材における部材量増加率の最大・最小値

	鉄筋	コンクリート	鉄骨	地業
最小値	1.052	1.041	1.061	1.081
(構造形式)	(SRC)	(S低層)	(S低層)	(S低層)
最大値	1.402	1.310	2.037	1.275
(構造形式)	(S中層)	(RC中層)	(S高層)	(RC中層)

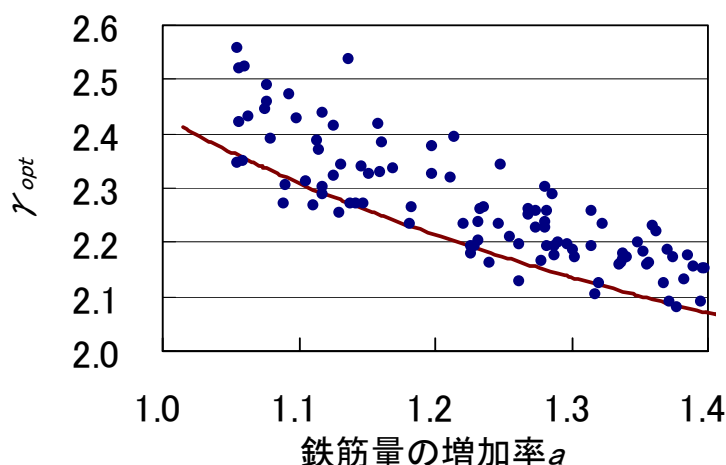


図 3.3 鉄筋量増加率と  $\gamma_{opt}$  の関係

S 造及び SRC 造では、鉄筋増加率  $r$ 、コンクリート増加率  $c$ 、鉄骨増加率  $s$  について、 $r = -1.25 - 2.38c + 5.05s$  の関係があり、これを適用すると  $\gamma_{opt}$  の値の範囲をさらに特定することができる。

いずれにせよ、 $\gamma_{opt}$  に最も大きな影響を与える部材の変化率についての検討が最重要となっている。

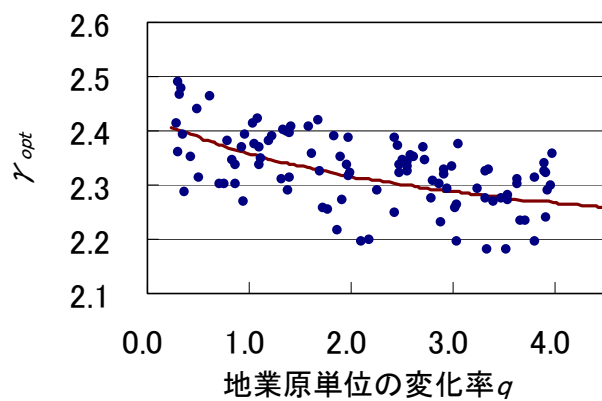
### 3.4.3 部材の原単位変化量

1 部材  $j$  に対する原単位を変化させ  $u_j' = q_j u_j$  にすると、

$$k' - k \cong \frac{m_j p (a_j - 1)}{\sum m_i u_i + (u_j' - u_j) m_j} \frac{\mu_Q}{\mu_{Q_1} - \mu_Q} (u_j' - u_j) \quad (3.11)$$

となる。 $m_j$  および  $a_j$ 、すなわち増加量の大きい部材に関して、原単位の値の違いが結果により大きな影響を与えることがわかる。

原単位の体系として LCA 指針<sup>43)</sup>、建築研究所<sup>44)</sup>によるものを用い、その値の違いを変化率として影響を評価した。LCA 指針による原単位を基準としたとき、建築研究所による原単位の値には、エネルギー量で 0.37 倍～3.03 倍、CO<sub>2</sub> 排出量で 0.49 倍～4.22 倍の違いがあった。CO<sub>2</sub> 排出量について原単位の影響を表したのが図 3.4 である。

図 3.4 原単位の変化率と  $\gamma_{opt}$  の関係

ここから、主要な原単位が 1.0 倍から 4.0 倍の範囲で変化すると  $\gamma_{opt}$  の値として 3.9% の差が、全ての部材の原単価が同様に変化すると 13.2% の差が出ることがわかった。

### 3.5 まとめ

この章では、環境負荷評価における、原単位とコスト上昇係数、最適設計荷重係数についてその関係を明らかにし、影響を評価した。原単位の項は部材単価にも適用でき、これによって総費用、総 CO<sub>2</sub> 排出量等について同一の関係式の中で関係を明確化することができた。

その結果から、規準化損失係数  $g$  などによる最適荷重係数への影響に比べて、原単位の影響は小さいと言える。

また、躯体の負荷割合  $p$  については、 $g$  との関係を考慮しつつ、条件に合わせたよりの確かな値の設定法を確立していく必要がある。

## 第4章 地震リスクマネジメント

## 4.1 地震保険料と総費用最小化の原理

### ・地震保険の位置づけ

第1章で検討したような、地震保険制度に関わるさまざまな要因について考慮した上で、第2章で紹介した、総費用最小化の原理にこれを適用することを考える。そのために、まず図2.1のグラフ上で地震保険がどのような位置づけとなるかについて検討する。

総費用の概念を示す図2.1の図を、図4.1として再掲する。

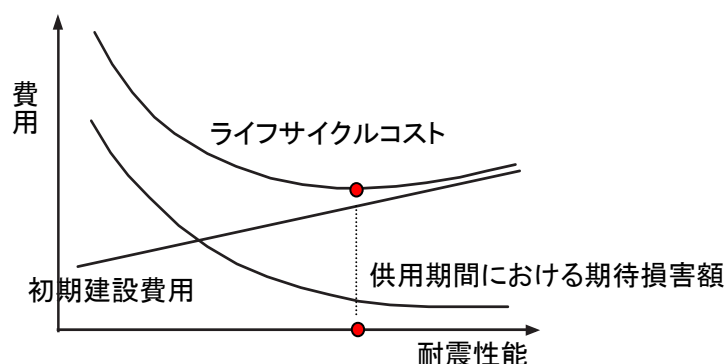


図4.1 総費用最小化の概念図

地震保険を考慮しない場合、総費用  $C_T$  は、以下のような式で表される。

$$C_T = C_I + C_F \quad (4.1)$$

$$C_F = \sum_i C_{fi} \cdot P_{fi} \quad (4.2)$$

ここで、各パラメータは式(2.1)と同じである。

それに対し、地震保険を考慮した場合、総費用  $C_T$  は、以下のような式で表される。

$$C_T = C_I + C_F + Ins - Cr_F \quad (4.3)$$

$$Cr_F = \sum_i Cr_{fi} \cdot P_{fi} \quad (4.4)$$

ここで、 $Ins$  は地震保険料、 $Cr_F$  は地震時に地震保険によって補償される額を表している。

地震発生時に地震保険によって補償される額  $Cr_F$  は、理想的にこれを期待値で評価しているとすれば、すなわち、地震保険料率を決定する時に用いた算定式と全く同じ式(1.5)を元に計算されることがわかる。先に示したように、地震保険料は単純に地震による被害だけでなく、地震火災による被害に関する補償も含めて計算されているため、地震時被害額  $C_I$  および地震時補償額  $Cr_F$  に関しても本来ならば地震火災による被害額期待値  $L_f$  も考慮すべきであると言える。しかし後に述べるように、地震保険加入によるリスクマネジメント

に関して検討を行うにあたっては、地震リスクを中心に議論をするべきであり、また現在では十分な精度で地震火災のリスクやその損害額のばらつきなどを評価することが難しいため、以降の議論においてはこれを除外したかたちで進めるものとする。

図 4.1 に示したライフサイクルコストは、地震保険を考慮せずに期待値のみの議論から得られた関係であることから、これは地震保険に全く加入しなかった場合の総費用を表していることになる。

もし、地震保険に建物再調達価格の全額分加入している場合、 $Ins$  は地震時被害額の期待値を基にした額であるから第 1 章で示した手法で求められ、 $C_E$  は  $C_E = C_T$  を満たす値となる。したがって、地震保険に全額分加入した場合には、式(4.1)における  $C_T$  よりも、地震保険手数料分だけ増額された値が総費用であるということになる。

また、地震保険に建物再調達価格の半額分だけ加入した場合を考えると、式(4.3)において  $Ins$  が  $C_T$  の半分の値に手数料を加えた値、 $C_E$  はちょうど  $C_T$  の半額分支払われることになり、結果としてこの場合の  $C_T$  の値は、式(4.1)における  $C_T$  よりも、全額分地震保険に加入した時の半分の地震保険手数料分、増額された値になっているということになる。

#### ・初期建設費用

これから初期建設費用と被害時損失費用について具体的な値を用いて評価を行っていくにあたり、重要な数値となるのが、初期建設費用の額である。第 3 章において、初期建設費用は荷重係数が上がるごとにコスト上昇係数の値に従って増加していくことを示したが、その規準となる数値に関してもまた、何らかのデータに基づいて仮定しておく必要がある。ただし、実際に具体的な建物を対象にして評価を行う場合には個別に初期建設費用は計算されるものであるから、ここで示す数値は本研究における今後の議論で用いるためのものであることを注記しておく。

初期建設費用の額については、統計データや試設計の結果という形で、いくつかのデータが挙げられている。ここでは、地震保険の対象が住宅であることを考慮して、文献<sup>45)</sup>に提示されている数値を用いる。これによると、平均的な RC 造建物における初期建設費用は約 25 万円/m<sup>2</sup>であり、これが建築基準法レベルの建物における初期建設費用である。東京の場合でそれが荷重係数  $\gamma = 2.2$  相当であることから、コスト上昇係数  $k \doteq 0.05$  とすれば、 $\gamma = 1.0$  における初期建設費用  $C_{I0}$  は、 $C_{I0} = \frac{1}{1 + 0.05(2.2 - 1)} \cong 23.5$  (万円/m<sup>2</sup>)となる。

従って本研究では、以降の議論において、 $C_{I0} = 23.5$  (万円/m<sup>2</sup>)として総費用などの値を求めるものとする。



## 4.2 耐震診断指標 $I_s$ 値と荷重係数

第1章において、提案する地震保険料の算出方法を示し、ある特定の  $I_s$  値を持つ建物についての保険料率の例を示したが、ここでは4.1で示したような耐震性能の違いによる影響について評価するため、耐震性能と地震保険料の関係についての定式化を行う。

$I_s$  値を変数とした状態で保険料を算出すると、次式のようになる。

$$Ins = \int_0^{\infty} f(v)L(v, I_s)dv \times S \quad (4.5)$$

ここで、 $L(v, I_s)$ は地震動強さ  $v$  に対する被害率、 $f(v)$ は地震動強さ  $v$  の年発生確率、 $S$ は保険手数料である。また、1.9では地震火災の影響も含めた地震保険料を算出したが、今後は地震リスクマネジメントに特化した議論を行うため、地震保険制度の中に特に地震火災については含めないものとする。

式(4.5)に基づいて料率を求めたときの結果は、図1.11に示されている。

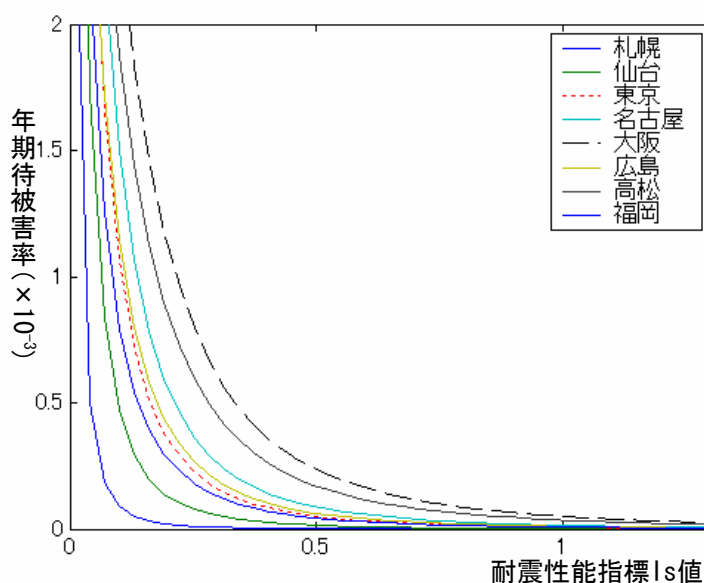


図 4.2 耐震性能指標  $I_s$  値と保険料率(再掲)

このとき、対象地点は東京、構造種別はRC造である。

地震保険には手数料が含まれているものの、その主要部分としては年期待被害率であり、耐震性能に対して、4.1節における  $C_F$  と同様の関係性を持っていることがわかる。そこで、式(4.1)に地震保険料を代入し、総費用として評価するため、現在  $I_s$  の関数となっている保険料率を、荷重係数の関数に変換する必要がある。

ここでは  $Is$  値と荷重係数の値を比較するため、供用期間中における  $Is$  値ごとの倒壊確率と、荷重係数ごとの終局限界状態の超過確率を求め、それらを同等として値の比較を行う。

荷重効果を  $Q$  とし、耐力を  $R$  とした時、これらの確率分布が対数正規分布に従うとすると、終局限界状態を供用期間中に超過する確率  $P_f$  およびそれに対応する信頼性指標  $\beta$  が、以下のように表されることは第2章で示したとおりである。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_Q}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_Q^2}} \quad (4.7)$$

ここで、設計荷重効果を  $r_0$ 、荷重係数を  $\gamma$  としたとき、これらは荷重効果  $Q$  の対象地域における平均値  $\mu_Q$  を用いて次式のように表されることがわかっている。

$$r_0 = \gamma \cdot \mu_Q \quad (4.8)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+V_Q^2}} \exp(\beta \cdot \alpha_Q \cdot V_Q) \quad (4.9)$$

$$\alpha_Q = \frac{\zeta_Q}{\zeta_R^2 + \zeta_Q^2} \quad (4.10)$$

ここで、 $V_Q$  は荷重効果  $Q$  の変動係数、 $\alpha_Q$  は分離係数であり、 $\zeta_Q$  は  $\ln(Q)$  の変動係数である。

荷重効果  $Q$  すなわち地震動強さ  $PGV$  の変動係数  $V_Q$  と、 $\ln(Q)$  すなわち  $\ln(PGV)$  の変動係数  $\zeta_Q$  に関しては、地震ハザードを求める地震動シミュレーションの結果から求められ、それぞれ以下のような値になっている。

表 4.1 荷重効果  $Q$  の変動係数  $V_Q$  および  $\ln(Q)$  の変動係数  $\zeta_Q$

	仙台	東京	名古屋	大阪	福岡
$V_Q$	0.840	0.641	0.581	0.618	0.788
$\zeta_Q$	0.541	0.489	0.495	0.592	0.663

さらに、 $\alpha_Q$  はおよそ  $\alpha_Q = 0.85$  とされ、 $\beta$  は式(4.7)によって求められる。これらの数値を用いると、供用期間中における終局限界状態の超過確率  $P_f$  を算出することができる。例えば東京において、短期設計荷重のせん断力係数  $Co = 1.0$  に相当する荷重係数は、 $\mu_Q = 448(\text{cm/s})^{38}$  から  $\gamma = 2.21$  となり、

$$P_f = \Phi(-\beta) = 0.0010 \quad (4.11)$$

であると求められる。

一方、 $I_s$  値ごとの倒壊確率は、対象地域の地震ハザードおよび倒壊のフラジリティ関数を用いて次式のように求められる。

$$\text{Pr}_{f5} = \int_0^{\infty} f(v) \cdot P_{f5}(v, I_s) dv \quad (4.12)$$

ここで、 $\text{Pr}_{f5}$ は建物が倒壊（被害レベル  $i=5$ ）する年超過確率、 $f(v)$ は地震動強さ  $v$ の年発生確率、 $P_{f5}(v, I_s)$ は、地震動強さ  $v$ に対してある  $I_s$  値を持つ建物が倒壊する確率である。式(4.12)を用いて東京における  $I_s$  値ごとの倒壊確率を求めると、下表のようになる。

表 4.2 東京における、 $I_s$  値と供用期間中の倒壊確率の関係

$I_s$ 値	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
倒壊確率	1.05E-01	1.29E-02	3.13E-03	9.81E-04	3.52E-04	1.38E-04	5.80E-05	2.57E-05

式(4.12)と表 4.2 より、荷重係数  $\gamma = 2.21$  相当の建物の終局限界状態を超える確率は、 $I_s = 0.35$  相当の建物の倒壊確率に等しいということがわかる。

ここで、求められた  $I_s = 0.35$  という値が、全国における  $I_s$  値の平均値である  $I_s = 0.6$  に比べて 6 割程度の値になっている点については、 $P_f$ の定義が、設計において解析的に求められる限界状態の超過確率であって、実際には地震の入力方向や建物の個々の部分における実際の強度など、諸条件により、実被害調査から得られた倒壊確率よりも高く計算されていることによるものであると理解できる。

また、フラジリティにおける  $I_s$  値の扱いが以下のような形になっていることから、 $I_s$  値が係数倍されたときには耐震性能も係数倍されていることになり、 $I_s$  値と  $\gamma$  は線形関係になっていることがわかる。

$$P_{fi}(v, I_s) = \Phi \left( \frac{(\ln(v) - \lambda_i(I_s))}{\zeta_i} \right) \quad (4.13)$$

以上のように得られた結果から、設計荷重係数  $\gamma$  と  $I_s$  値の間には、式(4.14)のような関係があるものとして、総費用に保険料の値を含めて議論することができる。

$$\gamma = I_s \cdot \frac{2.21}{3.5} \quad (4.14)$$

### 4.3 保険加入率と再保険料

1.10 節において、現在の地震保険制度で設定されているいくつかの制限事項の実態と、それがどのように保険料率に反映されるものであるかについて示した。

ここでは、より自由な保険契約条件の設定を実現するために、再保険制度を利用して、加入限度額、支払い限度額という規定を廃止した新たな保険体系の構築について提案する。

地震危険度のもつ、ばらつきの大きさという特性から考えると、再保険の仕組みとしては、ある程度以上の大地震発生により保険金支払額が一定の額を超えるような部分についてのリスク分散を行う、図 1.15 における非比例型の再保険契約が効果的であると考えられる。

また、地震保険を政府の税金投入に頼らず、独立したシステムとして運用できるようにするために、再保険契約において、実際に行われている他の保険における再保険と同等の再保険料徴収を行うことで、現行の地震保険に指摘される問題点を改善するように設定する必要がある。

具体的な保険料設定方法は以下の図 4.3 の通りである。

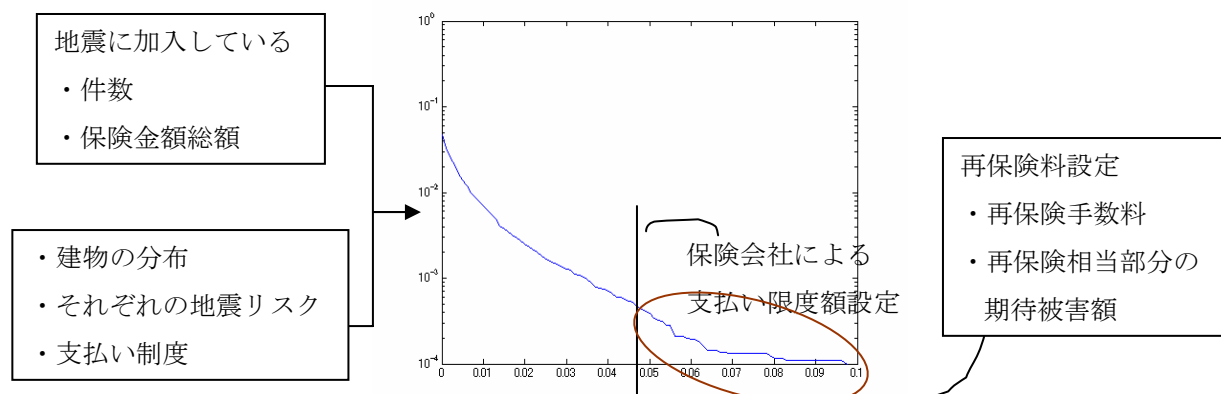


図 4.3 再保険システムの概要

以上のように考えると、現在地震保険に加入している件数やその加入額によって再保険の対象となるリスクの大きさが変化してくることがわかる。またこの場合、一件ごとに、その加入割合が高いほど保険会社にとってより多くのリスクを負わせることになる。このことから、リスクの大きさに応じた保険料を支払うように設定すると考えれば、保険料は、単純に全体を再保険加入分だけ高く設定するのではなく、より多く加入する場合には再保険分を多く負担させ、加入割合が相対的に十分低い場合には再保険料の分が保険料に加算

されないという形の保険料設定が最も合理的であると言える。またその対象地域ではほとんど大規模な震災が発生する可能性が無いような物件に関しては、建物の建設費用全額分を加入したとしても、再保険料分の割り増しがないという状況も考えられる。

従って、保険料の設定においては、今までその計算に用いてきた地震ハザード、フラジリティ関数および手数料のほかに、対象地域での大災害の発生確率と、保険に加入する割合を考慮した、再保険料を含めて料金を算出することになる。

再保険に関わるリスクの分析では、1.10 節で評価したのと同様の手法により、加入している保険対象物件全体としての地震リスクを、一件ごとの加入割合ごとに計算し、図 4.3 のシステムに基づいて再保険料を計算する。

このとき再保険料には、再保険の対象となるリスクの期待値に対して、保険と同じように手数料が掛けられるが、保険の場合と比べてそのリスクの大きい分かなり高めに設定されている。その値の内訳としては、高いリスクを引き受けても他の保険商品とリスクヘッジできるように、高度なリスク評価や資金運用の検討がなされていることが挙げられる。そのため、保険の場合では手数料の倍率として  $S=2$  という値を示したが、再保険の場合には、再保険手数料による倍率  $S_r$  を、 $S_r=5.0^{46)}$  として再保険料を設定する。

以上を踏まえて、プログラムを用いたシミュレーションにより再保険料を計算した結果が表 4.3 である。ここでは対象地域を主要 8 都市とし、保険の加入割合ごとに設定される再保険料を、再保険に加入しなかった場合に保険料として算出される値で規準化した形で表した。

表 4.3 対象地域および加入割合ごとの、再保険料の値  
(再保険に加入しない時の保険料で規準化)

	保険加入割合					
	0	30	50	70	90	100 %
札幌	1.00	1.19	1.45	1.74	2.03	2.19
仙台	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04	1.05
東京	1.00	1.25	1.26	1.47	1.70	1.68
名古屋	1.00	1.05	1.17	1.30	1.46	1.55
大阪	1.00	1.18	1.48	1.47	1.71	1.82
広島	1.00	1.05	1.13	1.23	1.35	1.41
高松	1.00	1.07	1.17	1.14	1.26	1.31
福岡	1.00	1.06	1.15	1.27	1.26	1.30

ここで、加入件数は 950 万件、平均建物建設費は 1500 万円、保険会社側の支払い限度額(再保険へのリスク転嫁を始める額)は現在準備金として確保されている 1 兆 5 千億円とした。平均建物建設費は、50%まで加入できる現状で約 750 万円であることから、最高加入額は 1500 万円であるとの推定を元に設定したものである。

#### 4.4 地震保険の効果とパーセンタイル値

##### ・地震保険に加入することの意味

地震保険は、地震が発生した時に支払われる損害額が平均的にどの程度の額であるかを示す期待値に基づいて、基本料率が決められている。これは、地震により被害を受ける多数の建物の存在を前提としたもので、それら全ての建物における平均値を求めたものであるから、個々の建物がその期待値相当の被害を受けるという意味ではない。このことは、地震保険のカバーできない部分に関して、実際地震が発生した場合に問題となってくる。

すなわち、地震が発生したとき、もし対象の建物の建設費用全額分を地震に入っていれば、被害分が全て保険によって補償され、結果として建設主は、初期建設費用と毎年の保険料のみを支払っていればよいということになるが、現在の地震保険のように半額までしか保険に入れない場合、被災時に、最大で建物の建設費用の半額分を損害として受けることになる。もし地震保険に全く入っていなかった場合は、新しく住宅を確保する費用全額を再び支払わないといけないことになる。

地震被害と地震保険に関して、期待値のみの議論を行うことは不可能である。なぜなら、地震保険には地震被害の期待値に手数料を含めた地震保険料率を支払う必要があるため、建物の供用期間中の期待値だけを比較した場合には、地震保険に入ったほうが、手数料分だけ余計に支払うことになるからである。しかし実際に保険制度が成立していることから考えると、加入者側は、建物に起こりうる地震被害の期待値ではなくもう少し高いレベルでの被害額と、手数料を含めた保険料率とを比較し、保険に有利性を見出して加入していることがわかる。

このことと地震被害の持つ特性から、地震保険に入るということは、地震時に受ける大きな損害というリスクを、毎年多少の額ずつ保険会社に支払うことによって回避するということであると言える。

地震保険にはこのような意味があるということを確認した上で、建築主が地震保険に入るべきか入らないでよいかということを判断するためには、地震保険に加入することが、どのくらいのレベルのリスクを回避させることになるのか、またその効果が保険料率分の額を支払うに見合うものであるか、について検討するべきであると考えられる。

そこで本研究では、前章までである一定の条件の元に設定した地震保険の基本料率を元にして、それぞれの建築主にとっての、この地震保険の有効性について検討を行う。

##### ・地震時補償費用とパーセンタイル値

図4.4に示したのは、ある地震危険度を持った建物に対して、発生し得る被害額（必要補修費用）の分布を示したものである。

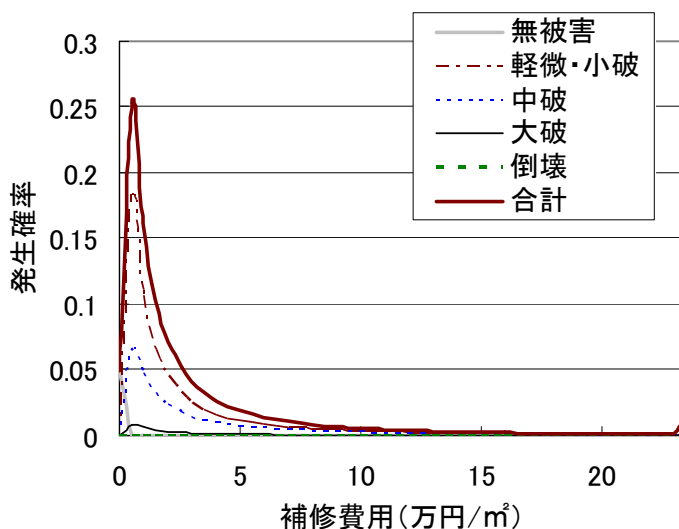


図 4.4 建物に発生する被害額の分布

これは、神田ら<sup>47)</sup>によって調査された、阪神大震災における建物の補修費用のデータを被害レベルごとにまとめたものを利用して得られた補修費用の分布に、ある地震動強さに対するそれぞれの被害レベルの発生確率をかけて、累積したものである。これを対数正規分布で近似する。得られた対数平均値と対数標準偏差は表 4.4 の通りである。

表 4.4 補修費用データの対数平均値と標準偏差

	軽微・小破	中破	大破
$\lambda$	0.12	0.53	0.55
$\xi$	1.43	1.62	1.61

ここに、井上<sup>48)</sup>の手法に倣って倒壊時の補修費用を再調達費用に相当する 23.5 万円/m<sup>2</sup>、無被害時の補修費用は 0 円/m<sup>2</sup>として、合計 5 段階に関する補修費用の分布を累積して図 4.4 のような分布を求めることにした。表 4.4 の係数を用いて、まずそれぞれ被害レベルにおける補修費用の分布が式(4.15)で近似される。

$$P_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi\lambda}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\xi^2}\right\} \quad (4.15)$$

ここで、 $P_i(x)$ は被害レベル  $i$  において、被害額  $x$  となる確率である。

さらに、図 4.4 の算出法を式で表すと以下のようなになる。

$$P(x) = \sum_i \left\{ P_i(x) \cdot \int_0^{\infty} f(v) \cdot P_f(v, I_s) dv \right\}$$

ここで、 $P(x)$ が、補修費用  $x$  となる確率を表している。

そこで、図 4.4 において、この分布におけるパーセンタイル値を求め、それらの値を指標として、リスクマネジメントの効果の評価する手法を提案する。

$x$ パーセンタイル値は、対象とする建物について、供用期間中にその値以下である確率が  $x\%$  であるような値を指す。地震被害の場合、いわゆる期待値はだいたい 75 パーセンタイル値と同等であり、90 パーセンタイル値、95 パーセンタイル値はそれより大きな値となる。ここでは、図 4.4 の分布を累積分布に直し、 $x\%$ に相当する値を読んでそれを  $x$ パーセンタイル値とするという手法で、 $x$ と  $x$ パーセンタイル値との関係を得る。

ところで、実際に図 4.4 に示した損害費用の分布を元にパーセンタイル値を求めると、無被害および倒壊の部分で分布が不連続になっているため、対象とするパーセント値がそれらの不連続部分のどちらの領域に属するかによって、算出される損害額の値が不連続な形で出てくることになる。これを実際に示したのが下の図 4.5 である。しかしこのようにある値を前後に確率が激変するということは不自然であるため、ここでは図 4.4 のような分布を作成するごとにこれを更に対数正規分布に近似し直してから、パーセンタイル値の算出を行うものとする。

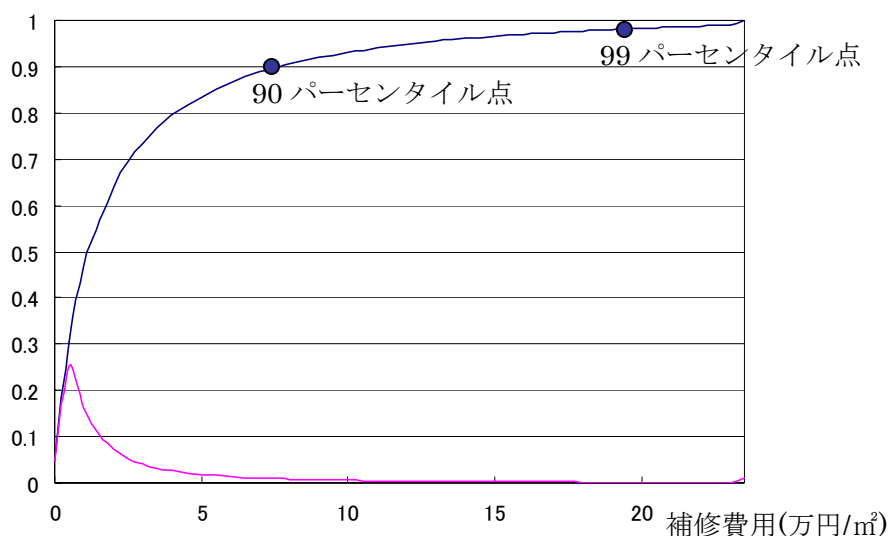


図 4.5 補修費用の累積分布と  $x$ パーセンタイル値の関係

対数正規分布で近似し直した後に、被害額のパーセンタイル値を求め、4.2 で示した耐震性能と保険料率のグラフと地震時被害額のパーセンタイル値を比較したものが、下の図 4.6 である。



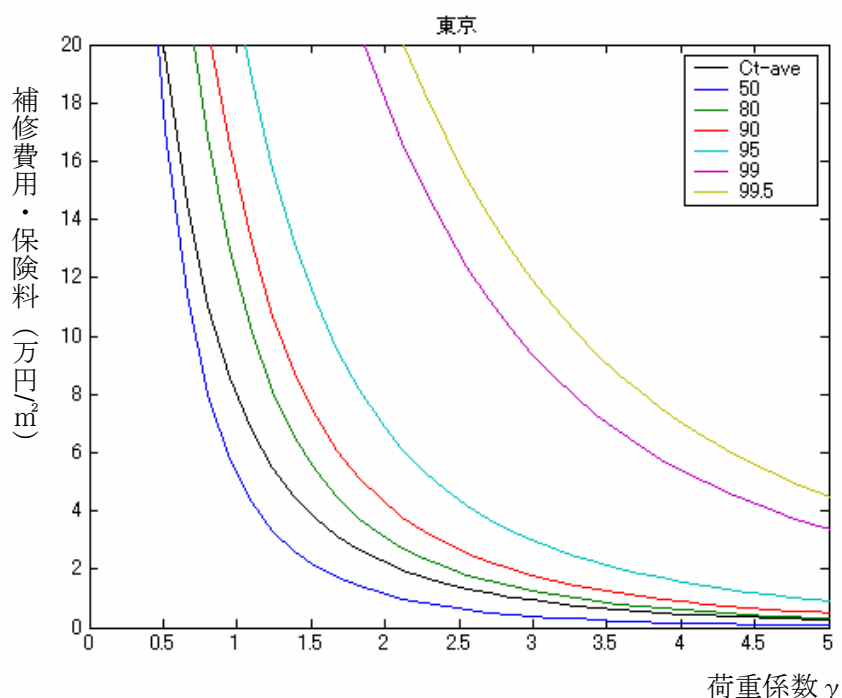


図 4.6  $x$ と  $x$ パーセンタイル値の関係(近似後), 保険料率との比較

図 4.6 において, 保険料率のグラフは, 地震保険に 100% 加入した場合に必要な費用,  $x$ パーセンタイル値のグラフは, 地震保険に加入しなかった場合に受けるかもしれない損害額を, 発生確率と共に示したものと考えられる。したがって, たとえば 50 パーセンタイル値に注目してその値をなるべく小さく抑えようと考えた場合には, 地震保険料率のほうが額が大きいことから, その場合は地震保険に加入しないほうが良いということになり, 90 パーセンタイル値に注目した場合には逆に, 地震保険に加入したほうが良いということになる。

このように, どのレベルのパーセンタイル値に注目するかによって, この地震保険に加入すべきか否かが判断されるということがわかる。

現在の地震保険を見てみると, その保険料率は東京において, 本研究で提案している保険料率の 4~5 倍に設定されている。図 4.6 を見てみると, その程度の料率に相当するのはおよそ 95 パーセンタイル点における値であることがわかる。すなわち, 現在の地震保険に加入している約 18.5% の人は, 95 パーセンタイル点もしくはそれ以上のレベルのリスク意識を持っており, そのレベルについて地震リスクを評価した結果, 地震保険料を妥当なものだと判断して, 地震保険に加入しているのだと考えることができる。

#### 4.5 総費用最小化原理の適用

4.1における総費用最小化の原理に、地震保険を利用した時の支払い保険料を加えて総費用を求め、どのような保険制度の利用の仕方が総費用を最小化するかという観点から、最適設計のあり方を考える。保険料率は第1章の手法を用いて基本料率を算出し、本章に示したような条件で、保険契約条件ごとに定まる保険料を計算するものとする。保険料算出に関わる要因は以下の3点である。

- ・対象地域の地震ハザード (1.3)
- ・建物の fragility関数 (1.4)
- ・保険の加入割合と再保険料

総費用に関してその期待値の計算方法は、式(4.2)のとおりである。地震保険に加入しない場合の総費用の期待値を表したものが次の図4.7である。

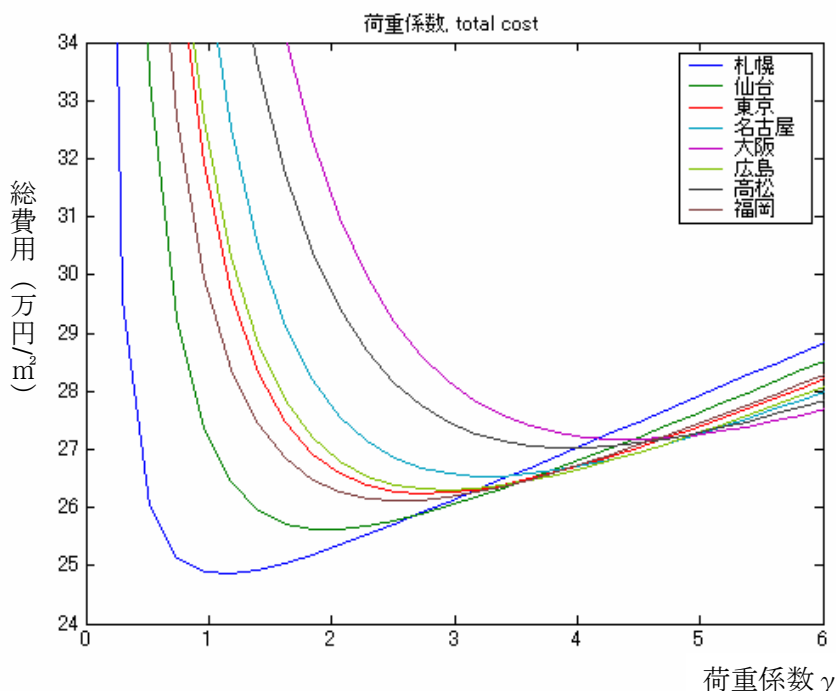


図 4.7 主要8都市における荷重係数と総費用の関係

それに加え、4.4節で提案したようなパーセントイル値の評価を行う場合には、総費用  $C_T$  に代わり、注目するパーセントイルレベルで予想される被害額と初期建設費用、保険料の合計を予想最大費用  $C_{Te}$  が、次式のような形で求められる。

$$C_{Te} = C_I + C_F \Big|_{per=x} + Ins - Cr_F \Big|_{per=x} \quad (4.16)$$

すなわち、総費用  $C_T$  を最小化する点を最適設計点として導出する総費用最小化の原理に

対し、注目するレベルでの予想される最悪の被害額  $C_{Te}$  をなるべく低減するような、保険加入条件と設計耐震性能を導出するという考え方を提案するものである。

式(4.16)によって求められる予想最大費用と、耐震性能、をパーセンタイル点ごとに示したのが次の図 4.8 である。ここではまず地震保険に加入しない場合のパーセンタイル値について予想最大費用を算出した。

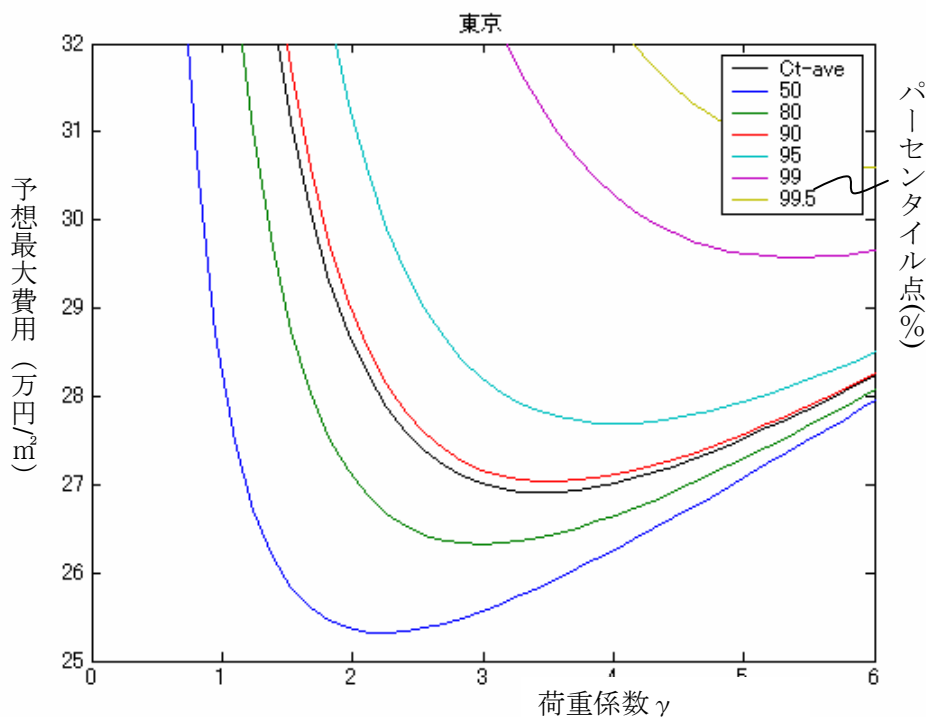


図 4.8 東京における予想最大費用と耐震性能, パーセンタイル点の関係

図 4.8 において、総費用最小化原理と同じように考えると、期待値程度、すなわち 80 パーセンタイル値程度のレベルで地震リスクの評価を行おうと考える人にとって、最適な設計荷重係数  $\gamma_{opt}$  はおよそ 3 程度になるが、それよりもっと高いレベルでのリスク回避を行いたいと考える人にとって、例えば 95 パーセンタイル値程度のレベルで見た場合には、最適な設計荷重係数  $\gamma_{opt}$  はおよそ 4.5 程度となる。

これに対して、地震保険制度を利用した場合の予想最大費用と耐震性能をパーセンタイル点ごとに見てみたのが、次の図 4.9 である。

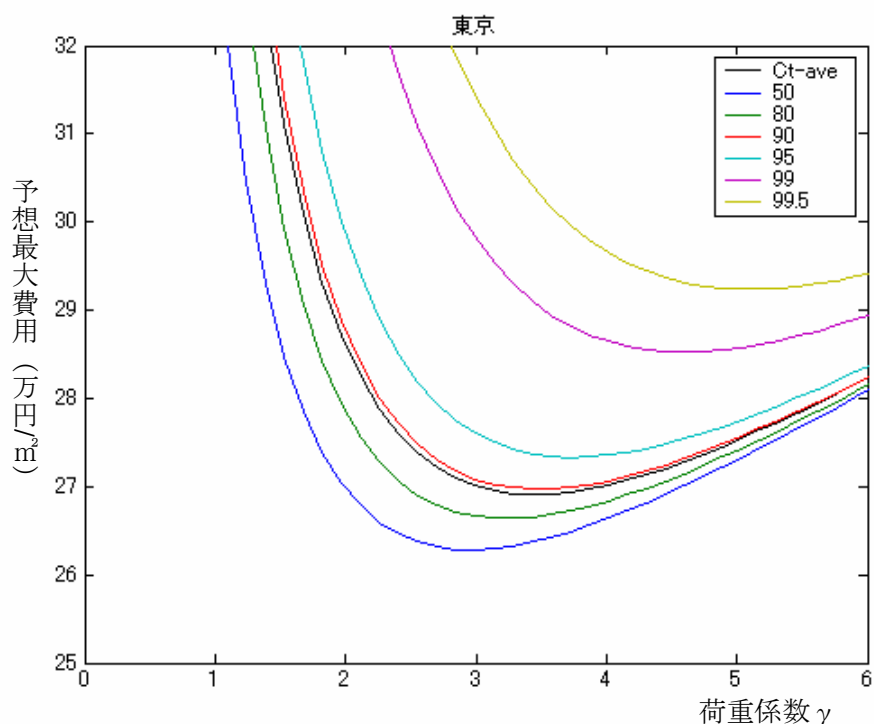


図 4.9 地震保険に 50%加入した場合の、東京における  
 予想最大費用と耐震性能、パーセンタイル点の関係

図 4.9 では、地震保険に加入した分最大予想費用の値が図 4.8 に示された期待値にちかづいて、被害値のばらつきが低減されている効果が確認される。この場合、80 パーセンタイル値程度のレベルで評価する人にとって  $\gamma_{opt}$  はおよそ  $\gamma_{opt}=3.3$  程度になるが、95 パーセンタイル値程度のレベルで評価した場合には、 $\gamma_{opt}$  はおよそ  $\gamma_{opt}=3.8$  程度となる。

さらに、それぞれにおいて最小化された予想最大費用の値を見てみると、図 4.8 では 95 パーセンタイル値に対して 27.8 (万円/m<sup>2</sup>) 程度であったものが、図 4.9 では 27.2 (万円/m<sup>2</sup>) 程度と低減されており、両者を比較すると地震保険に 50%加入したほうが全く加入しない場合に比べて望ましい状況にあるといえる。

#### 4.6 リスク意識レベルと最適設計点

4.5節において示した予想最大費用の考え方に基づいて、対象地点、構造種別、地震保険加入率とパーセンタイル点に関するそれぞれの条件ごとに、それらがどのような関係にあるかについて、得られた結果を示す。図4.8と図4.9では保険加入割合ごとのグラフを示したが、建築主のリスク意識によって求められる予想最大費用  $C_{Te}$  を最小化するという考え方に基づき、ここではパーセンタイル値ごとの、保険加入割合によって変化する  $C_{Te}$  の値をグラフに表す。

このときの設定条件は以下の通りである。

対象地点：東京 (35.63N 139.75E)，保険手数料倍率  $S=2.0$ ，再保険手数料倍率  $Sr=5.0$ ，  
保険会社支払い限度額=1.5兆円，加入件数950万件，平均保険金額=1500万円

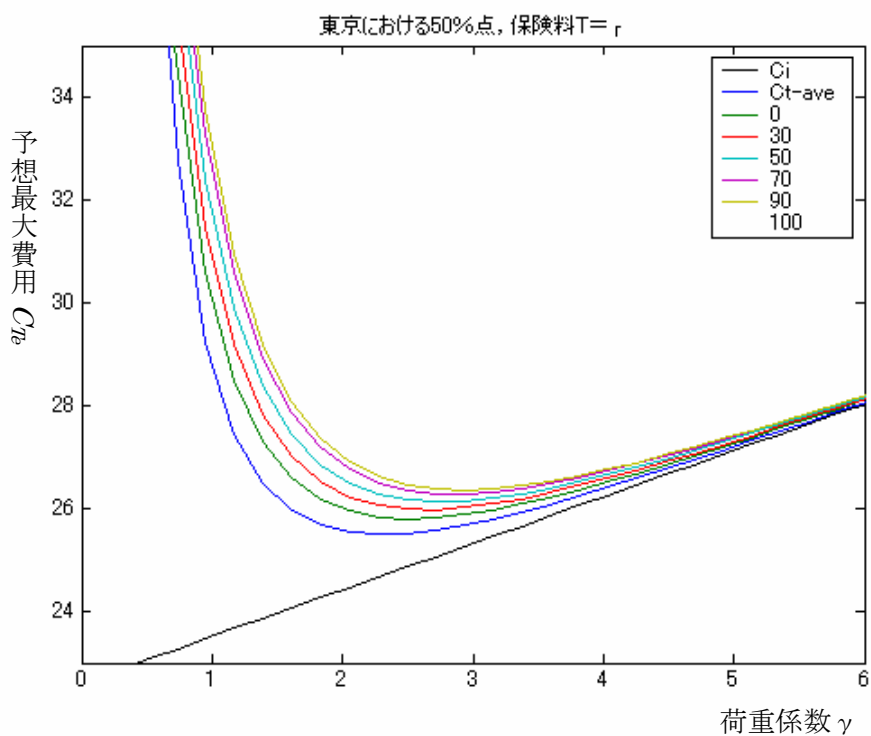


図4.10 東京における50パーセンタイル値による  $C_{Te}$

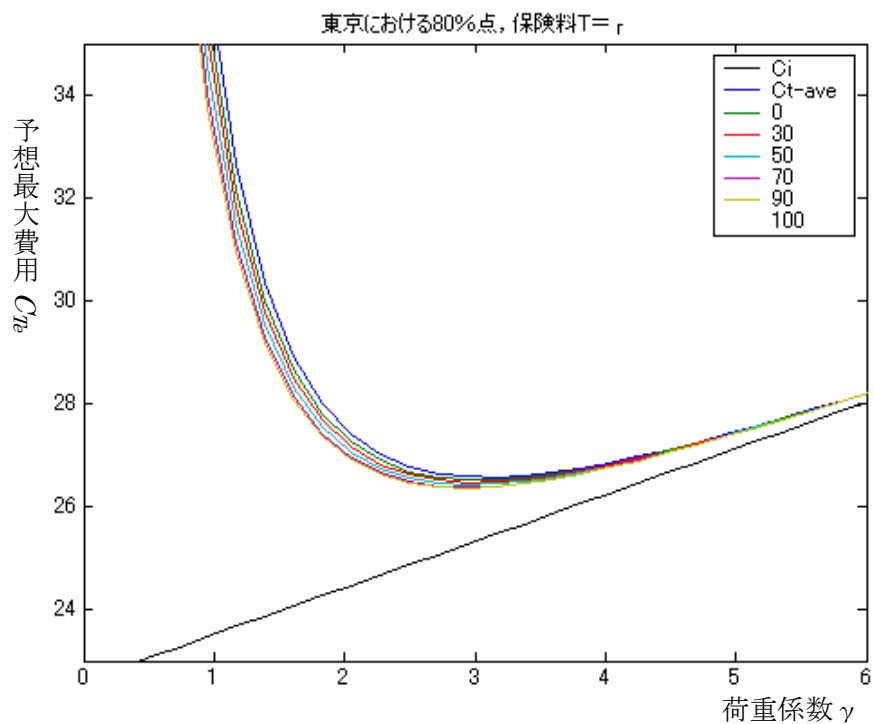


図 4.11 東京における 80 パーセンタイル値による  $C_{Te}$

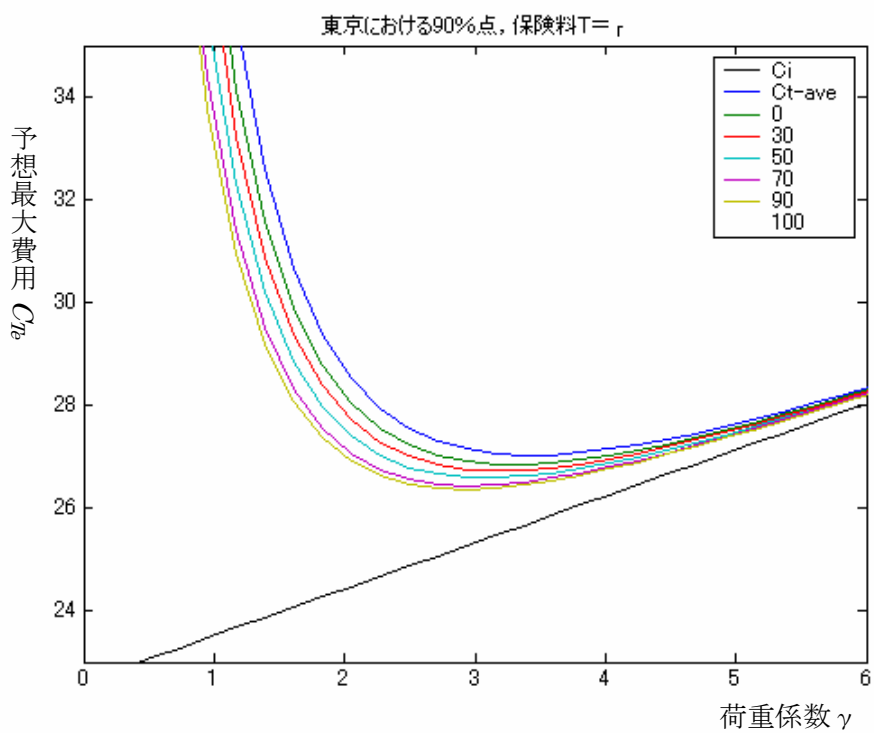


図 4.12 東京における 90 パーセンタイル値による  $C_{Te}$

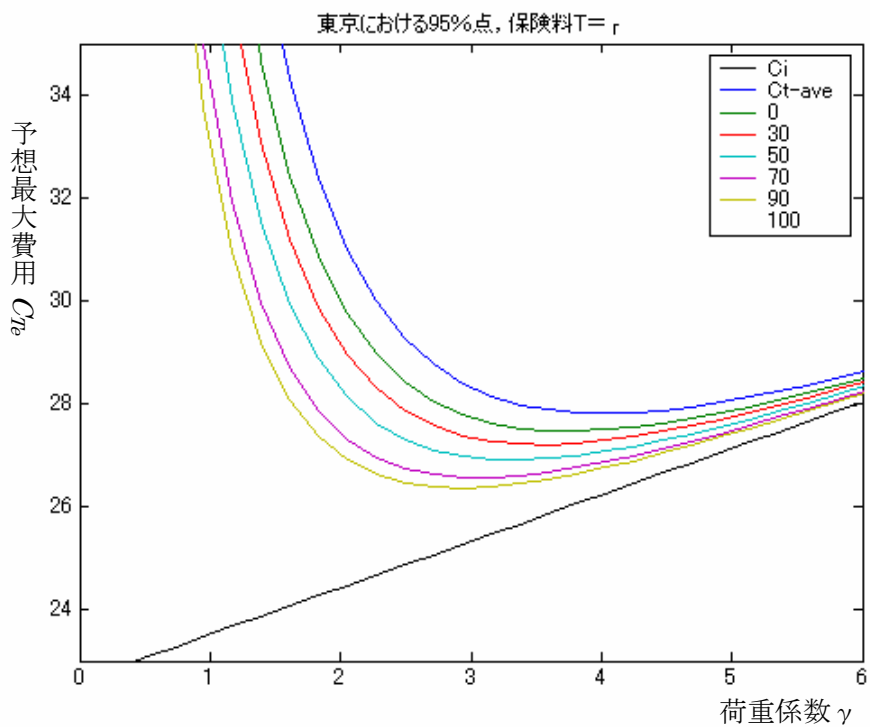


図 4.13 東京における 95 パーセンタイル値による  $C_{Te}$

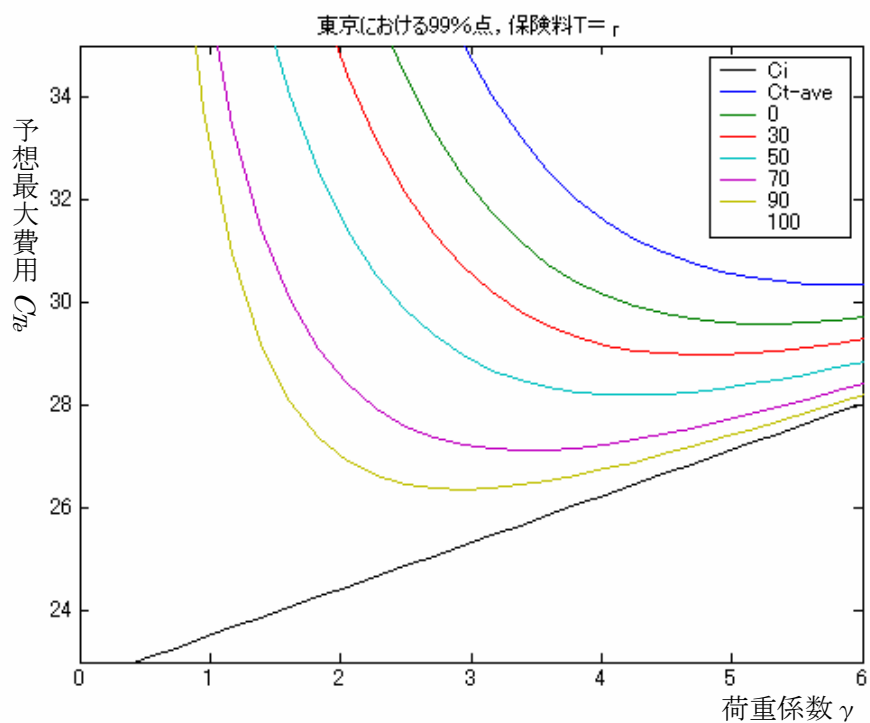


図 4.14 東京における 99 パーセンタイル値による  $C_{Te}$

これらの結果から、それぞれのリスク意識レベルに応じた予想最大費用が求められ、保険加入割合をいくらに設定した場合にもっとも  $C_{Te}$  が小さくなるかを読み取れば、そのリスク意識レベルに対する最適設計耐震性能（荷重係数  $\gamma$ ）と、最も効果的な保険加入割合の値を導出することができる。



#### 4.7 まとめ

本章では、総費用最小化の原理を元に、地震保険に加入した場合の予想費用に基づいて評価することにより最適設計点を見出す手法を提案した。

## 第5章 地震リスクマネジメントシステムの 提案

## 5.1 はじめに

これまでの議論により、対象地点、構造種別、地震保険加入率とパーセンタイル点に関する条件ごとに地震保険料を算出することができることが確認された。そしてそれによって4.6節に示したグラフが作成され、そこに総費用最小化の原理を適用することによって、設定された条件それぞれの場合における予想最大損失額を最小化するような点が、最適設計点として求められることがわかった。

本章では、こうした結果をまとめることで、地震保険を利用した上で地震リスクマネジメントを行う手法の提案を行うことを目的とする。

また、提案した手法による最適設計点の結果が、入力する諸条件によってどのような影響を受けるかについても検討を行うことで、得られた結果の意味や、これを適用することの効果についての分析を行う。

### 5.1 入力条件

ここに示した、評価の元になる各条件のうち、建築主の側ですでに決定している事項は、対象地点、パーセンタイル点と、しばしば構造種別である。ここでは構造種別も規定条件として扱うことにすると、まず建築主にとって、建物を建てる地点と大まかな構造種別（これらは入力条件となる）は決まっている状態で、どの程度の耐震強度に設定したらよいか、そして地震保険に加入すべきなのか、こういった条件なら加入する意味があるのか、といった点（これらが求めたい事項である）を、建築主が持つ地震リスク意識（これも入力条件の一つとなる）に基づいて、4.4節で示したようなパーセンタイル値の考え方をを用いて導出することが、地震リスクマネジメントの観点から、最も合理的で定量的な評価として提案される。

ここで提案する地震リスクマネジメントシステムを、建築主が決定する建物入力条件、建築主側の条件と、既知として使用する実測データとに分類して、導かれる最適保険加入額、荷重係数を求めるフローとそれらの関係を示したのが次の図 5.1 である。

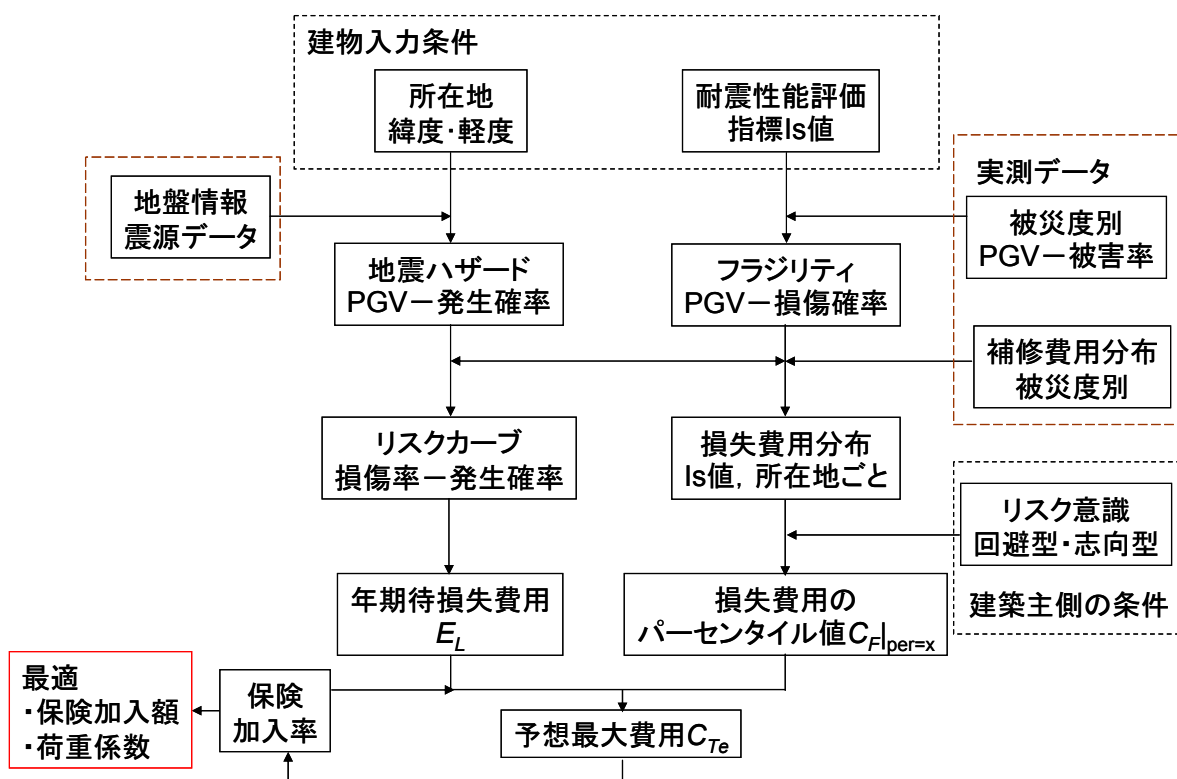


図 5.1 地震リスクマネジメントシステムの概要

第4章では、耐震性能、パーセンタイル値と保険加入割合両方を変数として、それぞれに対する予想最大損失の最小化として示したが、それに対し本章では、図5.1に示した手法に従い、パーセンタイル値を固定とした条件で、保険加入割合と耐震性能を決定する方法をリスクマネジメントシステムとして提案するものとして位置づけられる。

## 5.2 数値モデルと最適設計荷重

5.1 節に述べたように、本章で提案する地震リスクマネジメントの手法では、4.8 節で示した結果の中からパーセンタイル値ごとに予想最大損害額を比較し、それが最小化される点を、入力条件に対する解として導出するという方法をとる。図 4.10 から図 4.14 に、対象地域を東京、構造種別を RC 造とした場合における、予想最大費用  $C_{Te}$  とパーセンタイル値、荷重係数に対する関係を示した。これに対して、それぞれにおいて  $C_{Te}$  を最小化する点を示すグラフを図 5.2 から図 5.7 に表す。このとき、設定条件は以下の通りである。

対象地点：東京 (35.63N 139.75E)，保険手数料倍率  $S=2.0$ ，再保険手数料倍率  $S_r=5.0$ ，  
 保険会社支払い限度額=1.5 兆円，加入件数 950 万件，平均保険金額=1500 万円

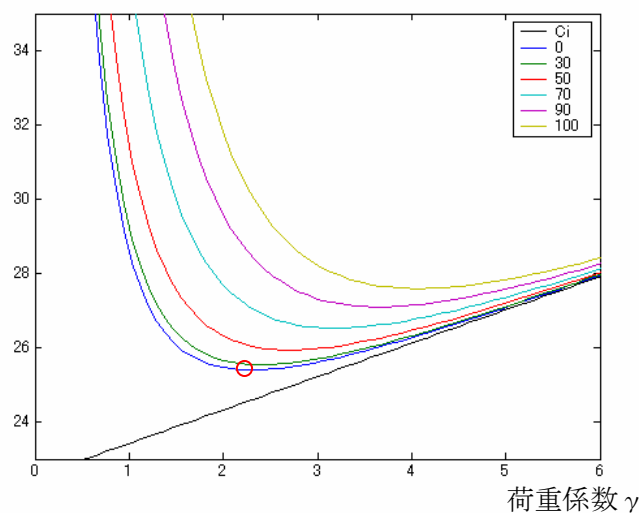


図 5.2 50 パーセンタイル点における予想最大費用

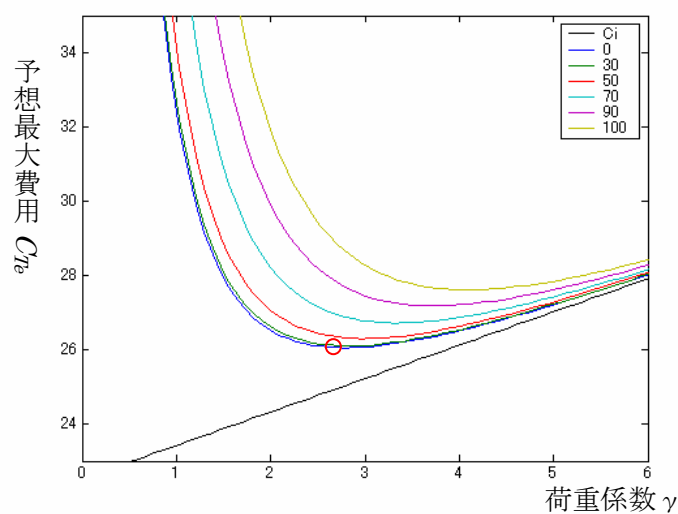


図 5.3 70 パーセンタイル点における予想最大費用

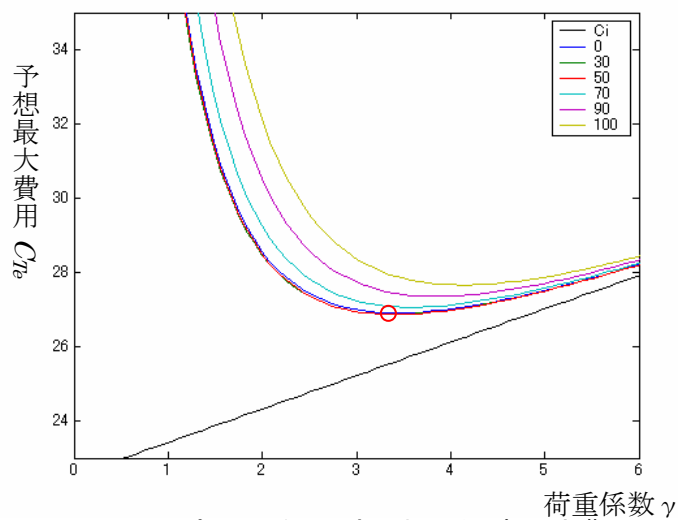


図 5.4 90 パーセンタイル点における予想最大費用

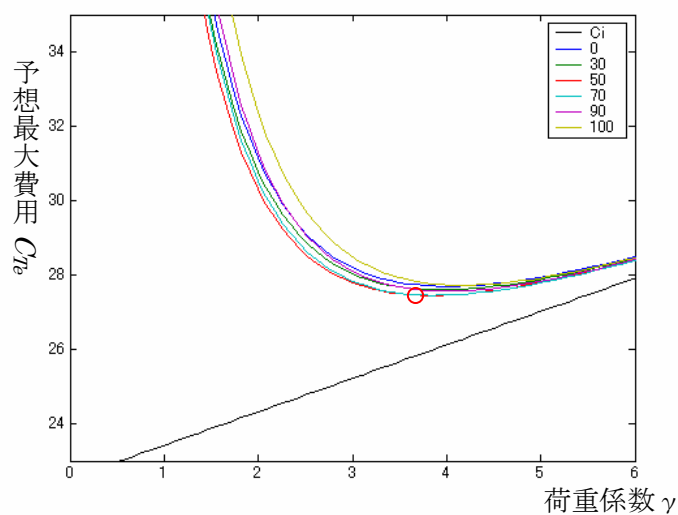


図 5.5 95 パーセンタイル点における予想最大費用

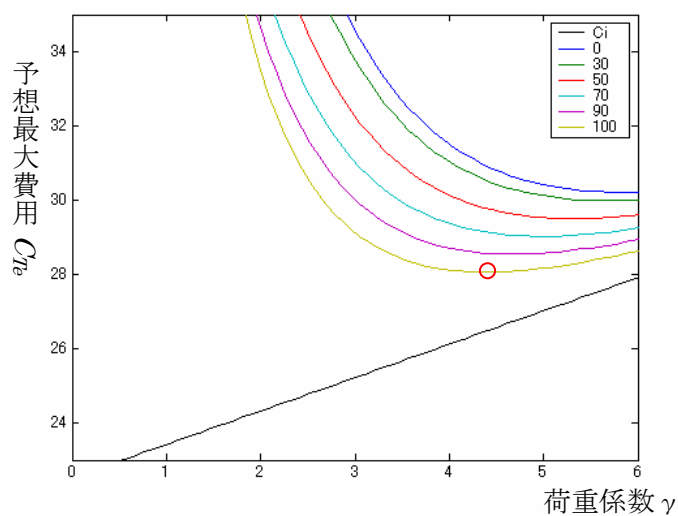


図 5.6 99 パーセンタイル点における予想最大費用

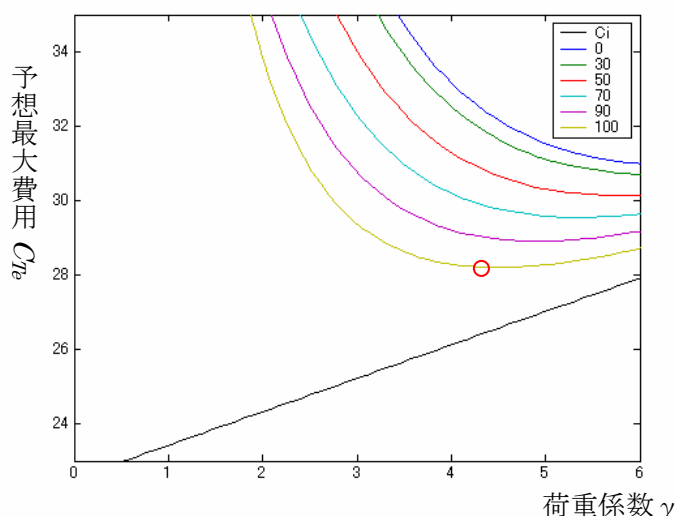


図 5.7 99.5 パーセンタイル点における予想最大費用

ここでは、50, 70, 90, 95, 99, 99.5 パーセンタイル値レベルのリスク意識を持つ場合について検討したものを示している。

それぞれの条件に対して、予想最大損害額が最小化される点が存在する。たとえば 50 パーセンタイル値に注目すると、保険に加入しない場合に最も予想最大費用が小さくなるが、70 パーセンタイル値に注目したときは 30%分保険に加入する場合、95 パーセンタイル値以上に注目すると、100%分保険に加入する場合が、それぞれ費用を最も低く抑えられることがわかる。

例えば 50 パーセンタイル値の場合では、今後 50 年に起こる確率が 50% あるような被害、東京で言うと震度 5 弱の地震動が発生する程度の確率で起こる被害について、それが起こったときに効果があるような条件設定をしておけばよいと考える人の場合であるが、その程度の被害については起こったとしても大したことはなく、むしろ地震保険は手数料などを考えると実際の地震被害額期待値より割高なので、入らないほうがよいという結論が示されており、保険には入らないが、その中で最も合理的なレベルでの耐震性能として、設計荷重係数  $\gamma = 2.23$  にすることを提案している。この場合では、もし実際にそれより大きい震度 6 や 7 などの地震動レベルの被害が起きてしまった場合については、地震保険に入っていないので自分で被害を全て受けることになるというリスクを孕んでいる。しかしそのリスクを回避するという効果に対して、その場合支払うべき地震保険料が妥当でないと判断したということだと理解される。逆に言えば、そうしたリスクに対して、地震保険料の額が妥当でないと感じるような人のリスク意識が、50 パーセンタイル値レベルのリスク意識であるということもできる。

一方、95 パーセンタイル値の場合では、今後 50 年に起こる確率が 5% 程度の被害、東京



で言うと震度 6 強の地震動発生する程度の確率で起こる被害について、それが起こったときのことを考えて設計値を決めたいという人の場合だが、震度 6 強レベルの被害になると相当な額になると予想されるため、これを回避するために支払う保険料の額のほうが確実に割安であると判断され、保険に 100%加入すべきであることが提案される。またその条件において、支払う保険料と建物の建設費用とを足した額が最も低く抑えられるのは、設計荷重係数 $\gamma=3.75$ の時であることを示している。この場合、実際には供用期間中に震度 6 強レベルの被害は発生しない可能性も 95%あるわけだが、保険料という多少の出費はしても万一の時を考えて安心を買いたいと考える人が、このレベルのリスク意識を持った人であると考えられる。現在の地震保険における支払い条件と保険料率から考えると、この地震保険に加入している人の場合は、これと同等以上のリスク意識の持ち主であると推定される。

このように図 5.2 から図 5.7 に示したグラフを用いて、注目するパーセンタイル値ごとに、最も適当と考えられる地震保険加入割合を求め、また同時にその最小化された最大費用を実現するような耐震性能レベルも求めることができることがわかった。

ここではさらに、以上の結果をまとめて、パーセンタイル点、保険加入割合と、予想最大費用の関係を 1 つのグラフで表し、三者の関係を俯瞰する。図 5.8 がこれを 3 次元で示したものである。このとき、上記のように導出される最適設計点および最適保険加入割合も、このグラフから読み取れるようになる。また、図 5.9 は最小化点の位置や数値を見易くするために、図 5.8 を平面に直したものである。

どちらも  $x$  パーセンタイル点に関しては対数軸とした。ただしここでは、90 パーセンタイル点=0.1, 99 パーセンタイル点=0.01 というように、 $x$  の値を超過確率に直し、それに対して対数軸を取ってある。これは、パーセンタイル点に相当する被害の程度に対して、 $x$  の値が対数的に変化するためである。

そして、それぞれのパーセンタイル値ごとに、求められる最適設計点を図中に示した。ここから保険加入割合が求められ、最適設計荷重係数については、図 5.2 から図 5.7 に戻って対応する点を求めることになる。

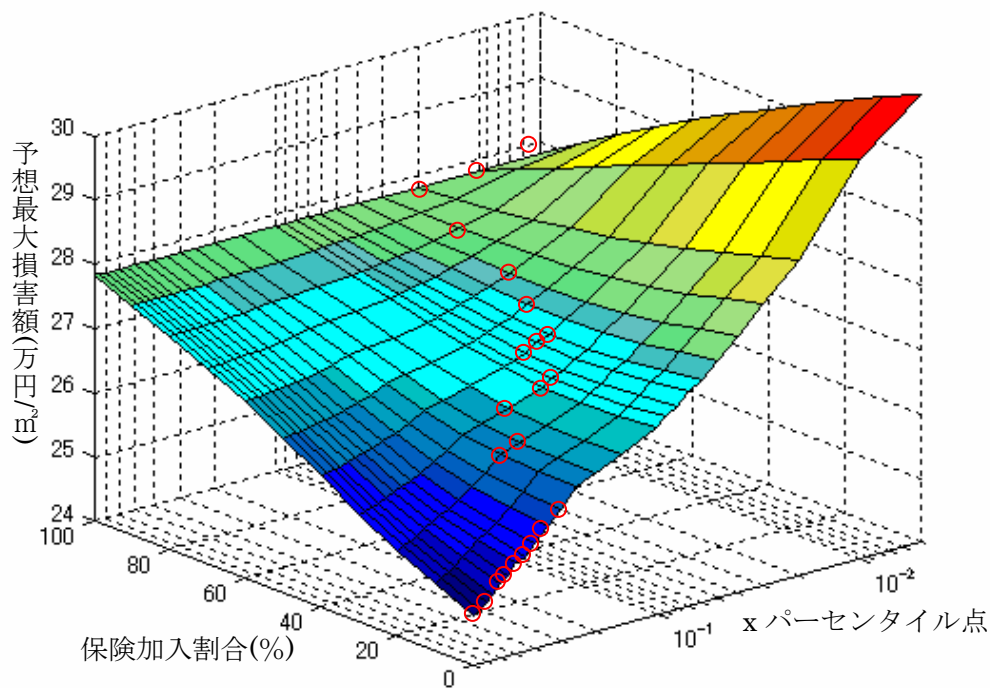


図 5.8 パーセンタイル点, 保険加入割合に対する予想最大被害額 (3D)

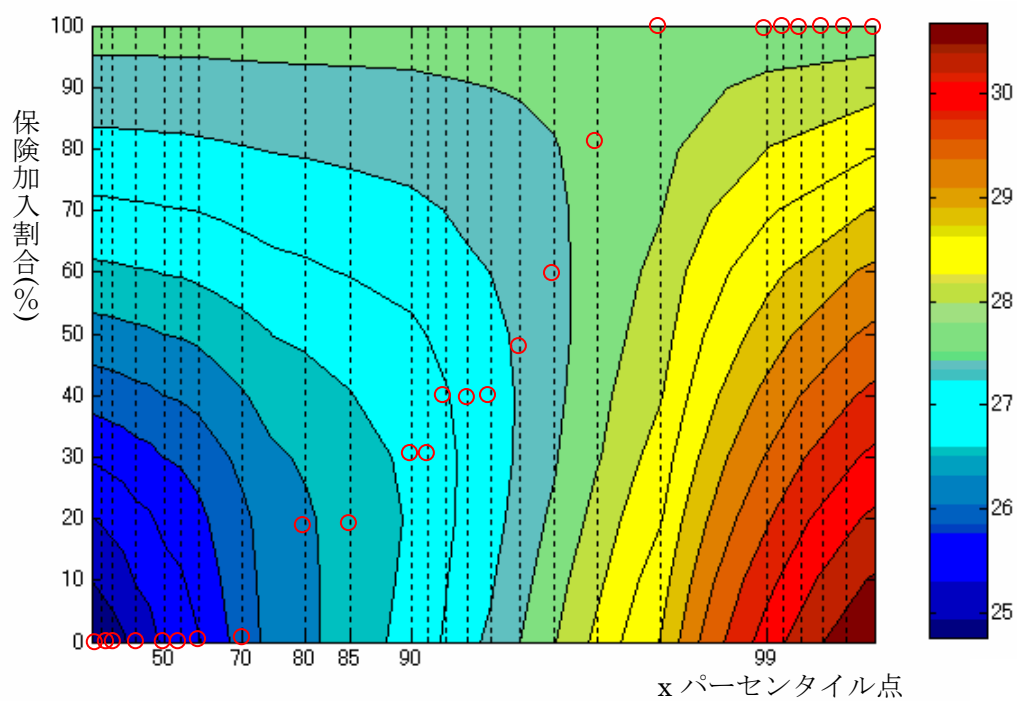


図 5.9 パーセンタイル点, 保険加入割合に対する予想最大被害額 (2D)  
および, 最小化点

ここから、98 パーセンタイル値以上のリスク意識を持つ建築主は保険に 100%加入してリスクを回避すべきであり、また 70 パーセンタイル値以下のリスク意識を持つ建築主は保険に入らないほうがその人にとっての総費用を最小化できる。そしてそのちょうど中間的なリスク意識を持つ建築主の場合は、保険料とリスクの大きさについて十分検討した上で、提案されているような保険加入および耐震性能設定について判断する必要がある。

### 5.3 感度解析

5.2 節で示された、予想最大費用を最小化する点に関する結果に、各パラメータがどのように影響しているかについて評価し、それによって、得られた結果とそれぞれの条件との関係を把握する。ここで評価するのは、図 5.1 に示された「実測データ」に関する項目である。本節には、データの精度向上に伴う値の変化や新しく設定条件を変化させたときにそれぞれが結果に与える影響について解析を行うとともに、図 5.8 および図 5.9 に示した三者の関係に関して、より明確な理解を促す目的がある。

#### 5.3.1 地震ハザード

地震ハザードの影響は、日本全国の各地域においてそれぞれ地震ハザードが異なり、またそれぞれが特徴を持っていることから、ここでは、地域ごとに得られる最適設計荷重・地震保険加入割合について、ハザードの特性と共に評価を行う。

地震ハザードは 1.3 節に示したように、対象地点における地震動の強さを表すもので、最大速度 PGV と、その年超過確率の関係によって表現されている。本研究で採用した対象地点は、札幌・仙台・東京・名古屋・大阪・広島・高松・福岡の 8 都市である。

図 5.10 に、全国の主要 8 都市における、PGV の年超過確率を示したハザードカーブを再掲する。

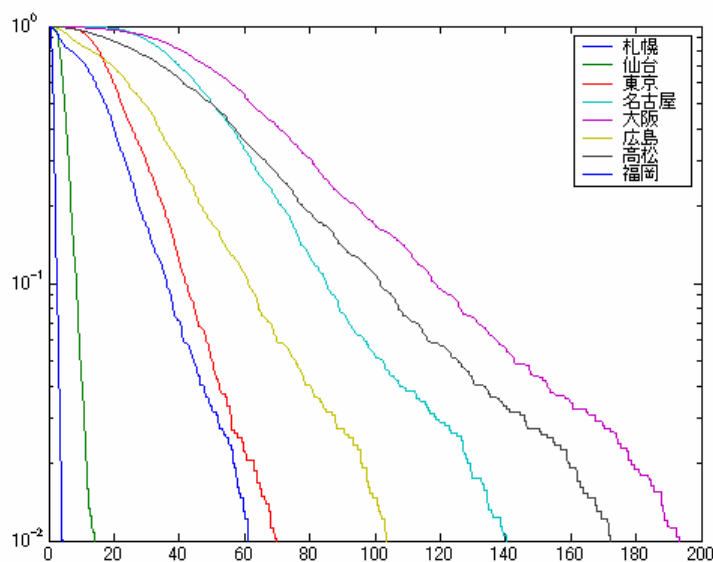


図 5.10 全国主要 8 都市における評価期間 50 年の地震ハザードカーブ

ここでは、ハザードカーブの形に特徴のある、仙台・東京・大阪・広島について、最大

費用最小化の結果を比較する。これらは、地震危険度が全体的に低い仙台，中間的な東京，地震被害期待値では東京とほぼ同額ながら大きな地震動については東京より高確率となっている大阪，という特徴を持つことから選択したものである。

それぞれの都市について得られた結果を，図 5.11 から図 5.18 に示す。

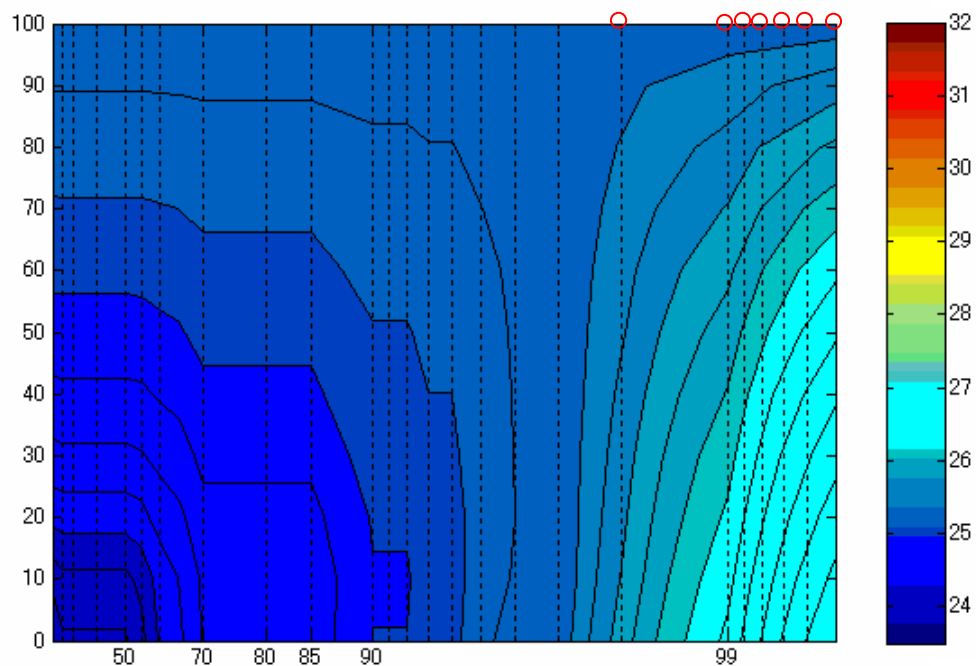


図 5.11 札幌における，保険料率による最大費用のパーセンタイル値

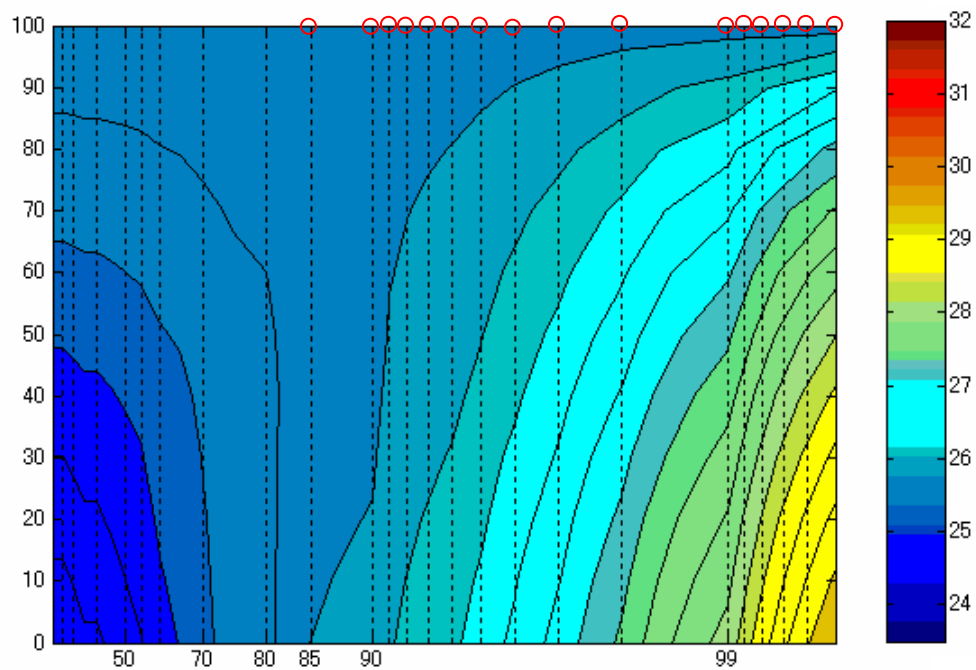


図 5.12 仙台における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値

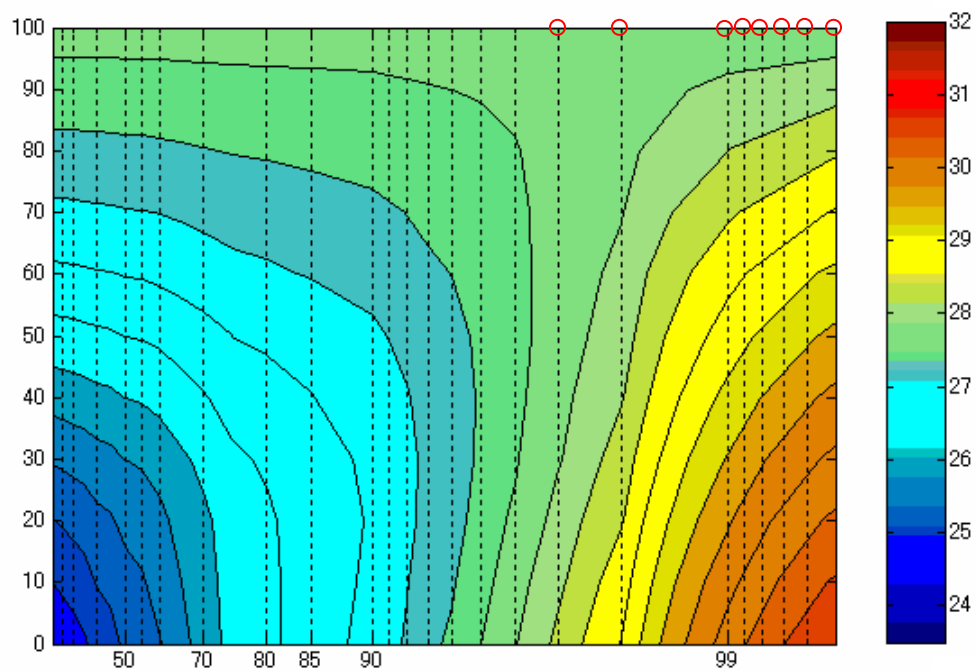


図 5.13 東京における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値

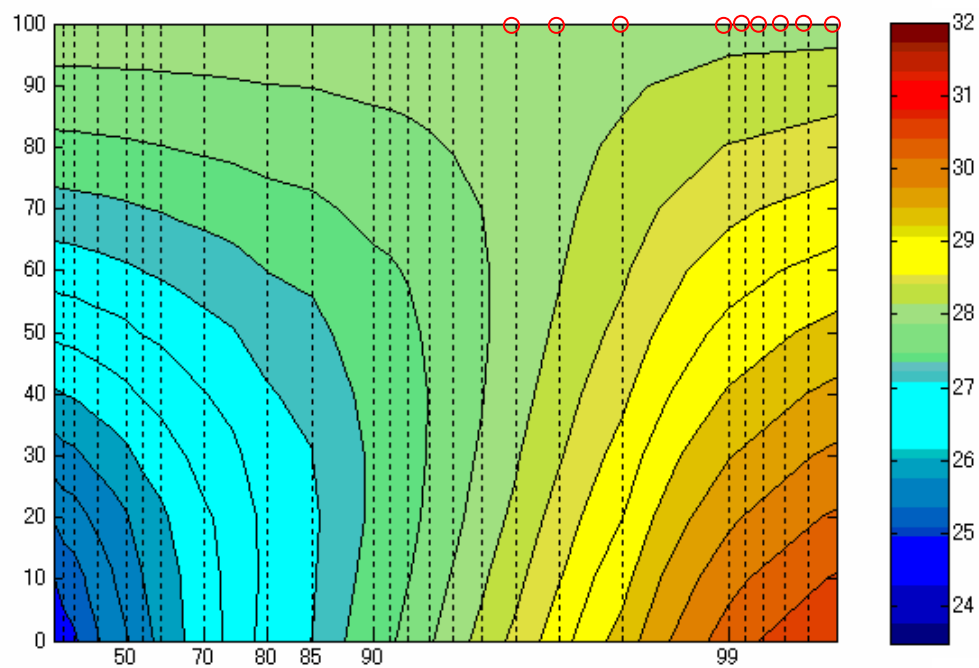


図 5.14 名古屋における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値

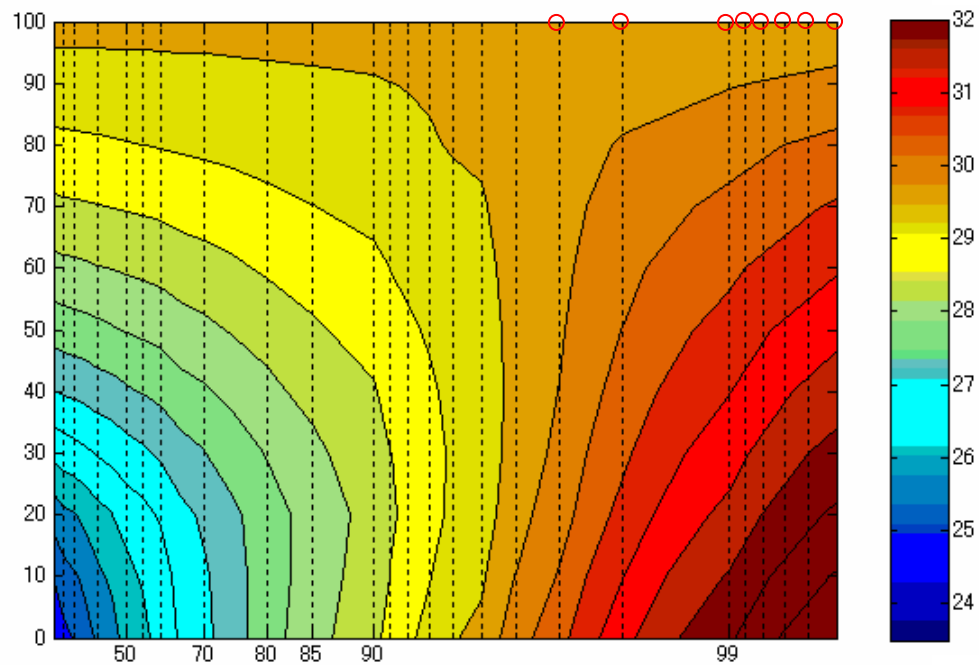


図 5.15 大阪における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値

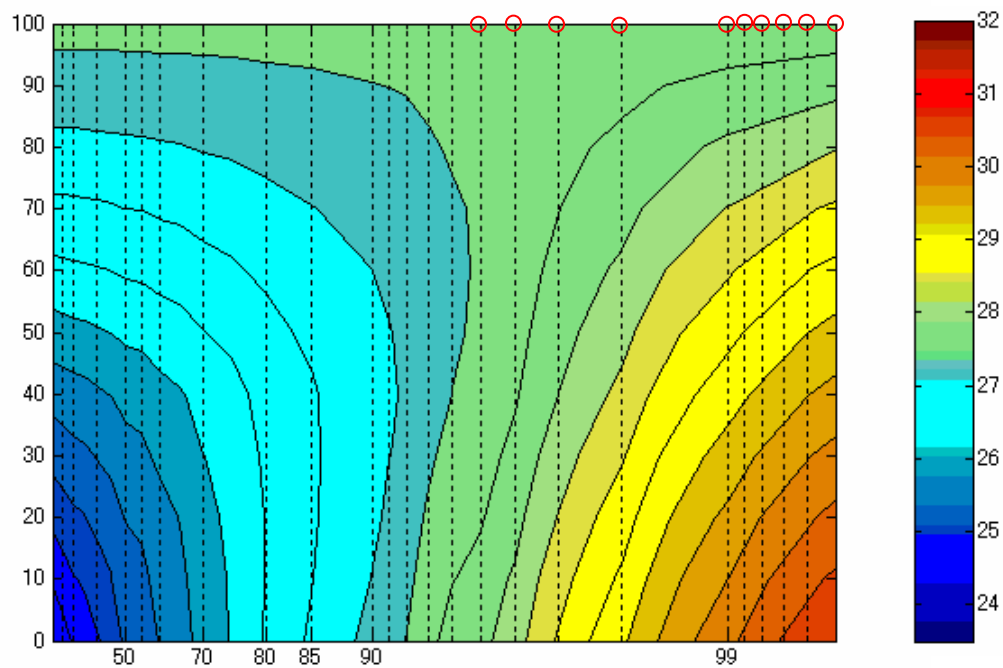


図 5.16 広島における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値

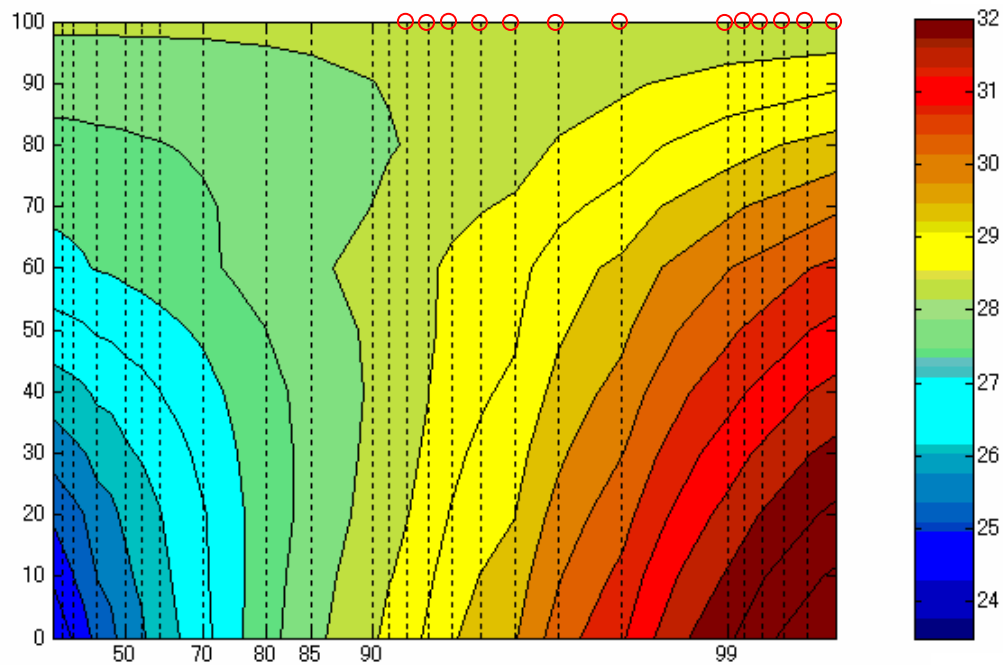


図 5.17 高松における, 保険料率による最大費用のパーセンタイル値



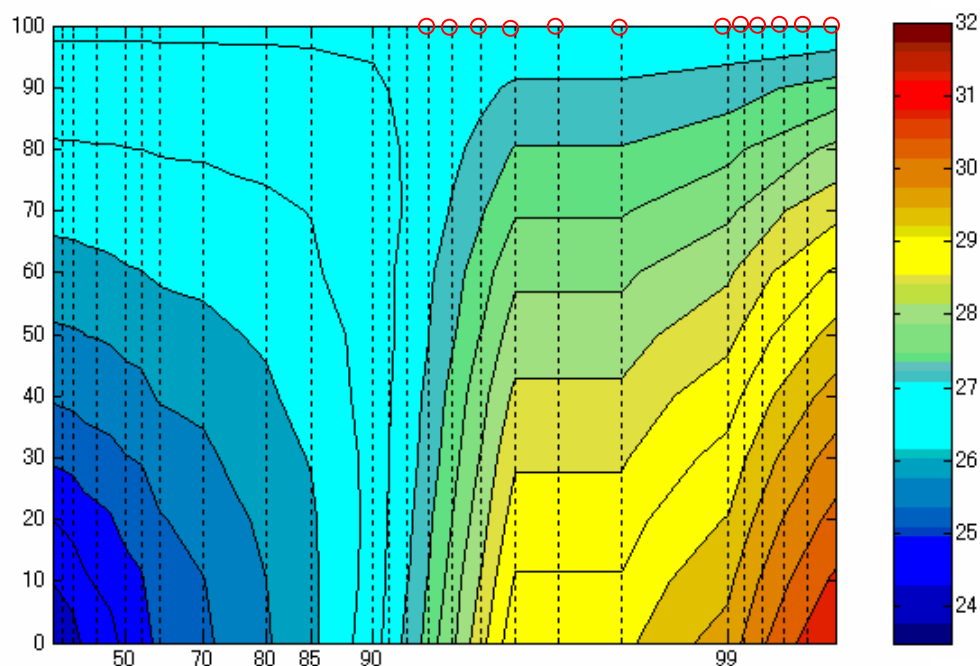


図 5.18 福岡における、保険料率による最大費用のパーセンタイル値

以上に示した図より、地震ハザードの特徴による最適保険加入割合への影響が読み取れる。この2次元グラフにおいて、保険加入率0%となっている場合のうち、場所によって異なるが、70～80パーセンタイル値が、保険手数料などを含めない、総期待費用を表している。また、保険加入割合100%となる部分は、保険手数料を含めた形での最大費用の期待値を表しており、パーセンタイル点に関わらず一定となっている。ここの値を比較することで、各地における地震リスクの絶対値を比べることができる。

まず札幌と仙台を比較してみると、両者はどちらも地震リスクが小さく、全体的に最大費用が他所に比べて低くなっていることがわかる。その中で、仙台では85パーセンタイル点のレベルまで、100%保険に加入すべきと結論付けられ、98パーセンタイル点未満は100%保険に加入すると保険料の高さ故に最大費用が高くなってしまいう札幌と比べると、保険料が地震リスクに対して割安に設定されていることがわかる。

これは、仙台と札幌のハザードの持つ特徴の違いからきていると考えられる。図5.10を見るとわかるように、札幌では大きな地震動強さが発生する確率がほとんどなく、超過確率 $10^{-4}$ のレベルにおいてもPGVが5(cm/s)以下にとどまっているのに比べ、仙台では少し大きめの地震動が発生する確率があり、その値は $10^{-4}$ のレベルで見ると札幌の約3倍である。すなわち、保険料は札幌の1.4倍程度でありながら、高いパーセンタイル点になるにつれて地震リスクが増大していく仙台においては、地震被害のばらつきを低減する地震保険

制度の効果が高く、リスク回避型の人々にとって、より強く地震保険の効果が得られるということになる。

こうした関係について、各対象地点の地震ハザードカーブの傾きと切片の値を媒介にして、何パーセンタイル点まで100%の地震保険加入が推奨されるか、また何パーセンタイル点以下では保険に加入するべきでないという結果が得られるのかについて、検討を行う。ここでは、地震ハザードを Frechet 分布に近似し、その係数と、境界となる  $p$  パーセンタイル点の値  $p_{max}$  および  $p_{min}$  の関係についてみる。

Frechet 分布は以下の式(5.1)のように表される。

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{c}{x-\varepsilon}\right)^\gamma\right] \quad \varepsilon < x < \infty \quad (5.1)$$

この式が、地震ハザードの関数によく適合することが知られており、ここで地震動強さ PGV の値  $v$  が、年超過確率に基づく値  $x$  を用いて式(5.1)によって近似することができる。そのときの係数の値<sup>49)</sup>と、図 5.11 から図 5.18 において求められた、境界となる  $p_{max}$  および  $p_{min}$  を表 5.1 において比較する。

表 5.1 Frechet 分布における係数と、境界を与えるパーセンタイル点

	c	$\gamma$	E	$p_{max}$	$p_{min}$
仙台	0.455	2.88	0.23	85	70
東京	0.66	2.34	0.25	97	75
大阪	0.303	2.06	0.37	98	75
福岡	0.199	2.51	0.24	93	80

ここで、Frechet 分布において、 $\gamma$  が傾き、 $c$  が絶対値の大きさを表しており、 $\gamma$  が大きいほど、発生確率に対する PGV の値の変化が大きく、 $c$  が大きいほど、期待値としての地震リスクの値については保険料の額が高いということになっている。

その点に注目すると、先に述べたように、 $\gamma$  が大きいほど地震保険料が高レベルの地震リスクに対して比較的安く設定されることになるため、 $p_{max}$  が小さく、 $\gamma$  が小さいほど  $p_{max}$  が大きくなるのが、表 5.1 でも確認された。

### 5.3.2 フラジリティ関数

フラジリティが地震動による建物の壊れやすさを示す関数であることは前に示した通りである。そこにおいて、耐震性能の違いは式(1.7)中の  $I_s$  を変化させることで考慮されているが、実際の建物においては、全てが式(1.7)に示されたとおりの性質を持つわけではなく、パラメータとして用いている値と真値との間にはある程度のばらつきがあることがわかっ

ている。また、フラジリティ関数は、1.4節で示したように、元となるデータやその評価手法の違いによっていくつもの提案式が示されており、本研究ではそのうち1例を採用して地震リスクの評価を行っている。したがって、フラジリティ関数の違いが結果に与える影響について評価することは、一例として5.2式で得られた結果の有効性について検討すること、および提案式を採用することの是非について検討することに繋がると言える。

ここでは、フラジリティ関数のもつパラメータの値について、2通りの観点から評価した。

まず、今まで用いてきたRC造建物のフラジリティに対して、木造建物に関する地震被害データを元に導かれた関数を用いる。

提案されたフラジリティ関数は、式(1.8)に示されたとおりであり、これを以下に示す。

$$P_{fi}(v, Iw) = \Phi\left(\frac{\ln(v) - \lambda_i(Iw)}{\zeta_i}\right) \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} \lambda_i = \ln(V_{0i} \cdot Iw / Iw_0) \\ \zeta_i = 0.4, Iw_0 = 0.8 \end{cases}$$

$$V_0 = 65(i=1), 120(i=2), 165(i=3), 220(i=4), 270(i=5)$$

これを用いて評価を行った場合の結果を、元のフラジリティ関数を用いて得られた結果と比較して図5.20と図5.21に示す。参考のために、フラジリティカーブを図5.19に示す。このフラジリティは、どちらも平均的な耐震性能 ( $I_s=0.6$ ,  $I_w=0.8$ ) の建物のフラジリティを表したものである。

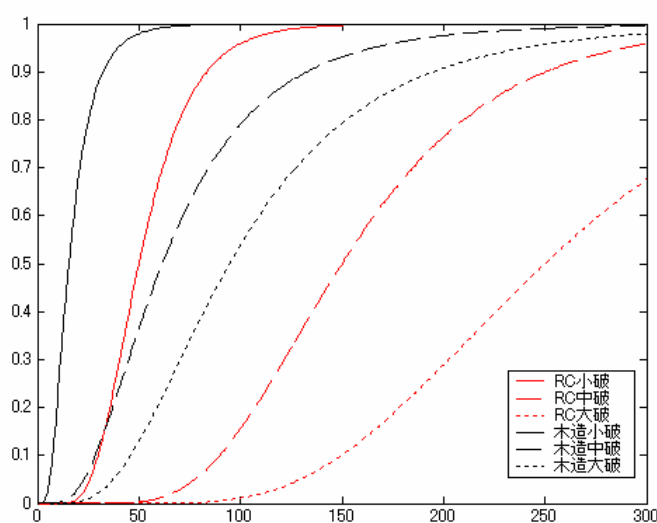


図 5.19 木造および RC 造建物におけるフラジリティの比較

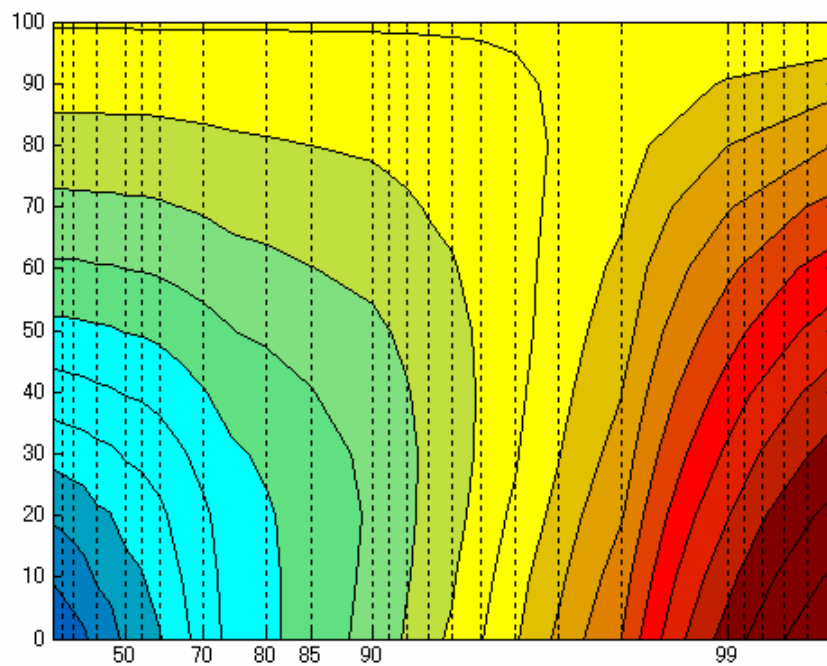


図 5.19 木造建物における, 最大費用のパーセンタイル値

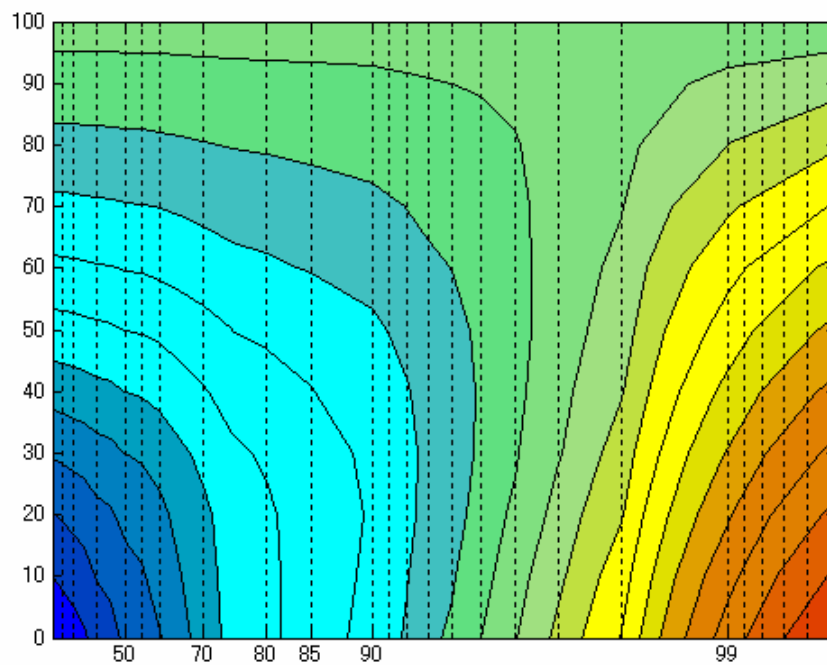


図 5.20 RC 造建物における, 最大費用のパーセンタイル値

次に、免震建物の fragility 関数に関して評価を行う。免震建物は、建物の中に免震支承、ダンパーなどの免震装置を挿入して建物と地面を切り離し、地震の揺れが直接建物に伝わらないようになっているほか、装置によって建物の固有周期が極端に長く設計されている。日本における大地震の周期の主成分が 0.1~2 秒であることから、それ以上の固有周期を持たせることによって、周期の同期を防ぎ、建物の揺れを軽減しようという考え方に基づくものである。これによって、免震建物は一般の建物に比べて、比較的小さい地震動においては建物全体が大きくゆっくりと揺れ、地震被害がほとんど発生しないように設計されている。しかし、設計時の想定を超えた大きな地震動が発生した場合には、免震の機能が限界に達し、建物全体が崩壊するということが起こりうる。

ここでは、Kanda ら<sup>11)</sup>によって提案された免震建物の fragility 関数を用いるものとする。用いた fragility 関数を以下に示す。

$$P_{fi}(v, Is) = \Phi\left(\frac{\ln(v) - \lambda_i(Is)}{\zeta_i}\right) \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} \lambda_i(Is) = \ln(V_{0i} \cdot Is/Is_0) \\ \zeta_i = 0.6, \quad Is_0 = 0.4 \end{cases}$$

$$V_0 = 100(i=1), 200(i=2), 200(i=3), 200(i=4), 250(i=5)$$

式(5.3)によると、免震建物の場合、倒壊の確率は一般の建物と変わらないものの、それ以下の被害に関しては全体的に確率が低くなっている。免震建物と一般建物の fragility を比較したものを図 5.21 に示す。

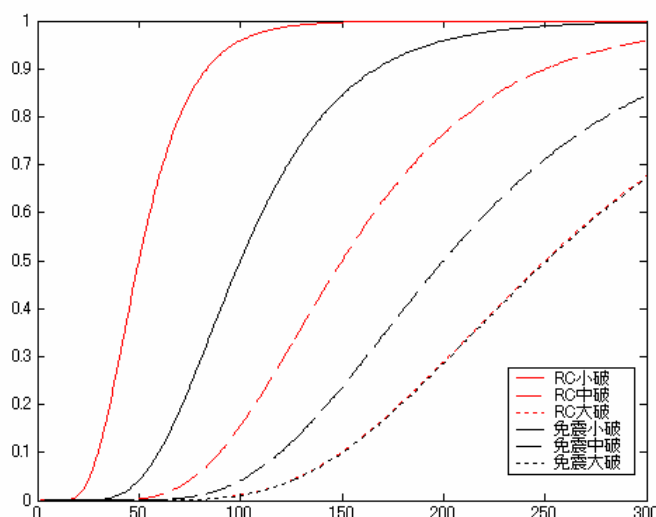


図 5.21 免震および一般の RC 造建物における fragility の比較

これを用いて評価を行った場合の地震リスクマネジメントの結果を，元の脆弱性関数を用いて得られた結果と比較して図 5.22 と図 5.23 に示す。

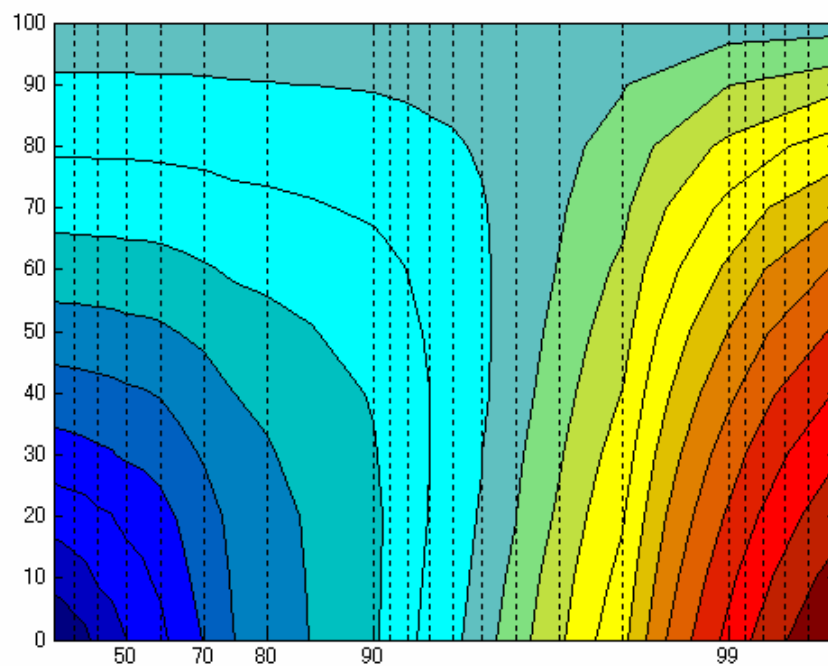


図 5.22 免震建物における，最大費用のパーセンタイル値

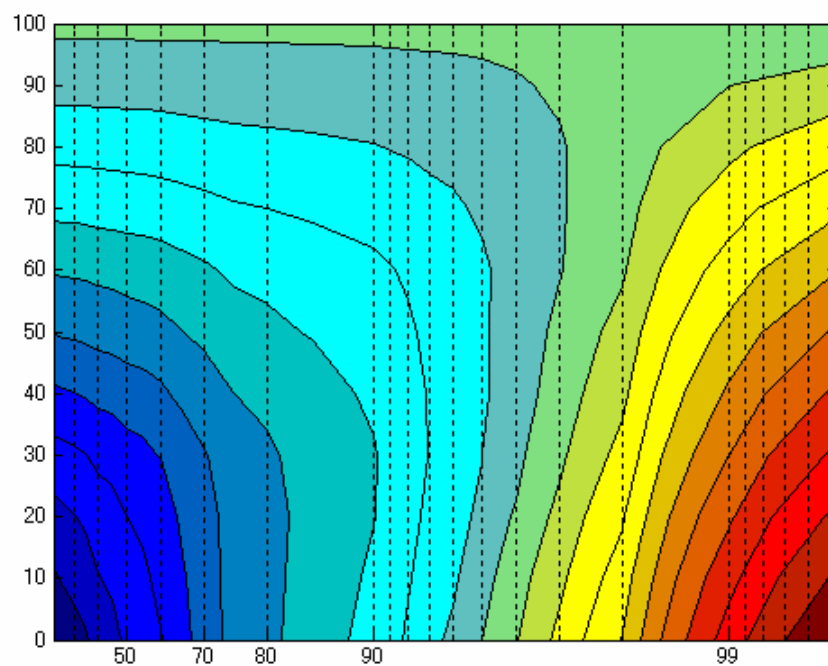


図 5.23 一般の建物における，最大費用のパーセンタイル値

以上の結果より、算出される地震被害額が全体的に小さくなっているような場合には、保険加入割合や設定耐震性能の違いによる最大費用への影響が表れにくくなることがわかる。これは、地震被害額が小さくなることによって、再保険の対象となる地震リスクの割合が小さくなることや、地震保険料の額に大きな違いが表れなくなる事によるものと考えられる。すなわち逆に言うと、耐震性能の違いが地震被害額として影響を受けやすいような建物の場合には、ここで提案するような地震リスクマネジメントを適用する効果が大きいと言える。

### 5.3.3 補修費用

地震によって被害が発生した時の補修費用については、4.4節において示したような手法で検討を行っているが、ここで利用した値は、阪神淡路大震災における限定された地域の数百のデータに基づいている。これは必ずしも一般的な建物の被害に関するデータを代表しているとは言えず、その平均値や標準偏差、分布系については、より詳細な調査データによって改善されるべきものである。本研究で用いたデータの問題点として、大破以上のデータ数が少ないこと、軽微および倒壊の建物に関する詳細なデータ整理がされていないことなどが挙げられる。

こうしたデータが今後充実されることによって、それぞれの被害区分に応じた補修費用のデータは、より区分ごとの特徴を現した分布を示すであろうことが期待されることから、ここでは、補修費用の分布に関するパラメータの値を変化させた場合の、最適設計荷重への影響について評価する。ただし、被害区分ごとの補修費用に関して、平均値は得られているデータと同等の関係性を持つと考えられることから、その標準偏差に関してのみパラメータ値の影響を調べるものとする。

6.2節で使用したパラメータと、今回検討するパラメータを比較したものを以下の表 5.2 に示す。

表 5.2 補修費用の分布に関するパラメータ値

	$\lambda$	$\xi$	
		オリジナル	比較
小破	2.74	1.50	0.75
中破	4.45	1.50	0.75
大破	4.57	1.50	0.75

このようなパラメータの設定によって得られる補修費用の分布を、オリジナルのものと比較して図 5.24, 25 に示す。

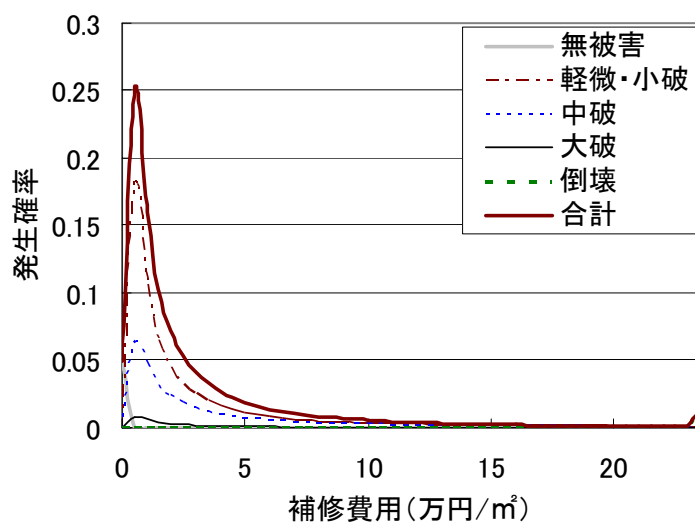


図 5.24 オリジナルの場合の補修費用分布

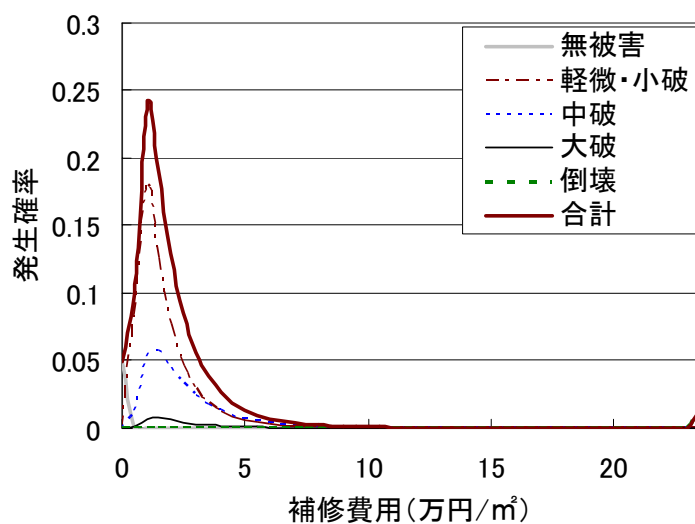
図 5.25  $\zeta$  を変更した場合の補修費用分布

表 5.2 の値を用いて得られた、最適設計荷重・地震保険加入割合に関する地震リスクマネジメントの結果を、元のパラメータによるものと比較して図 5.26, 27 に示す。



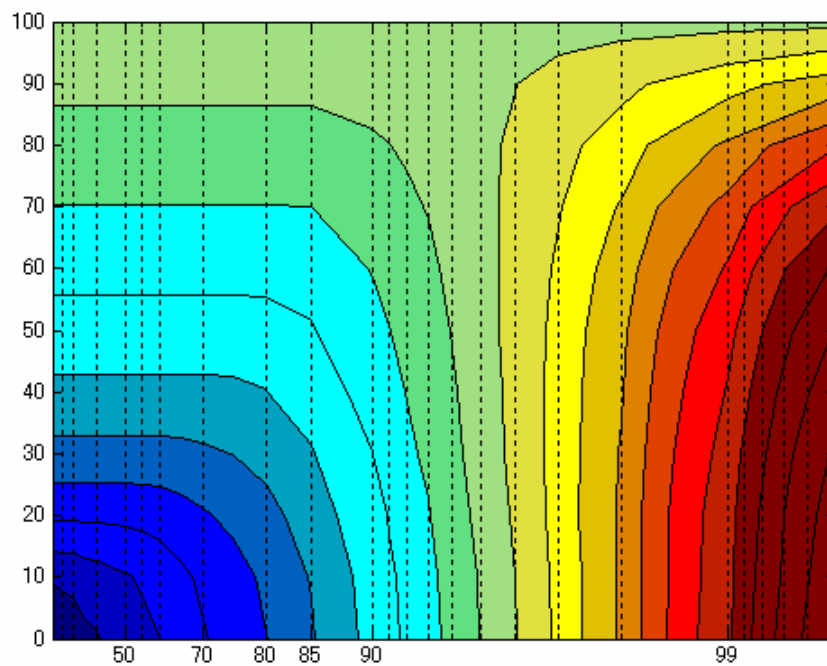


図 5.26  $\zeta=0.75$  とした補修費用分布により求められる, 最大費用のパーセンタイル値

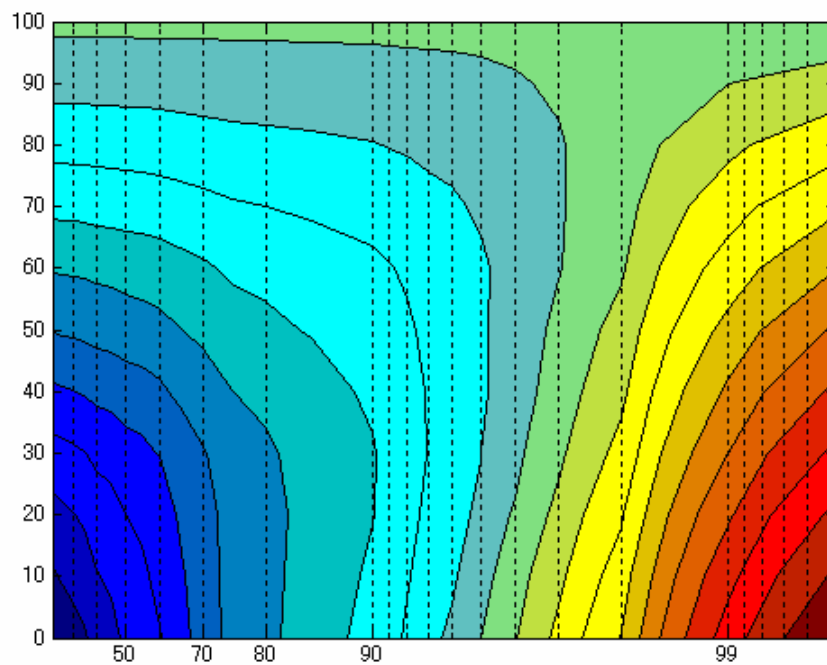


図 5.27 元の補修費用分布により求められる, 最大費用のパーセンタイル値

#### 5.3.4 再保険制度

一般にさまざまな分野における保険商品に関してはどれも、保険会社の経営に影響を与えるようなことがないよう、大きな被害が出た場合の保険会社側のリスクを分散させるために、その場合の補償を再保険によって賄うシステムを導入している。その手法と効果については1.10節および4.3節において議論したとおりであるが、本研究では、その中から現実の状況に最も近いものとしてある1つの設定条件を採用して、4.3節において保険料率の設定を行った。

しかしその設定に関しては、金融業界を取り巻く状況の変化や、また単純な再保険制度ではなく、リスクを証券化するなど他の手法の採用によって様々に条件を変える可能性もあることから、そうした手法の違いによる影響についても定量的に評価する意味があると考えた。ここでは、再保険制度設定に関わるパラメータをそれぞれ変化させてその影響を調べるものとする。

再保険制度に関わるパラメータのうち主要なものとして、ここでは支払い限度額・再保険手数料について検討を行う。

4.3節において設定した規定のパラメータ値は、支払い限度額  $L=1.5$  兆円、再保険手数料=再保険の対象とする地震被害期待値の5倍、となっている。また計算条件として、全国における地震保険の加入件数950万件、平均加入保険金額1500万円として設定した。

##### ・支払い限度額

支払い限度額  $L=5$  兆円となった場合と、規定の条件の場合とを比較する。ここで5兆円とは、現在政府の地震保険において設定されている支払い限度額と同額である。ただし現在実際にはそれだけの準備金は確保されておらず、それだけの額が確保されるにはあと50年以上はかかるとされている。したがってこの値には現状では現実性がないが、あと50年後の状況として、または何らかの制度の変遷によって、準備金の額がそのレベルに達した場合にどうなるかということが示される。また、支払い限度額という設定条件が、得られる最大費用の値にどのように影響しているかを把握することができる。

得られた結果を示したのが下の図5.28、29である。

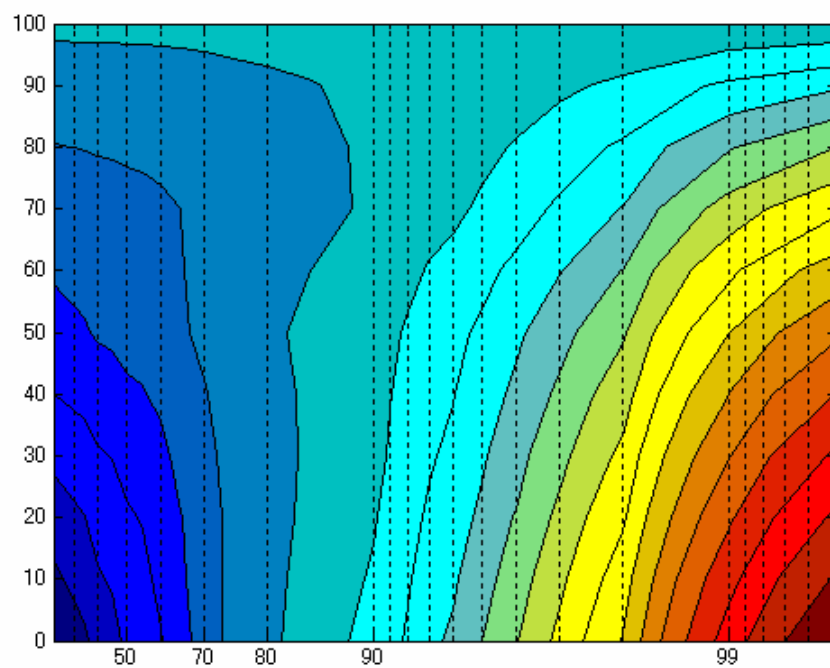


図 5.28 支払い限度額  $L=5$  兆円の場合の、最大費用のパーセンタイル値

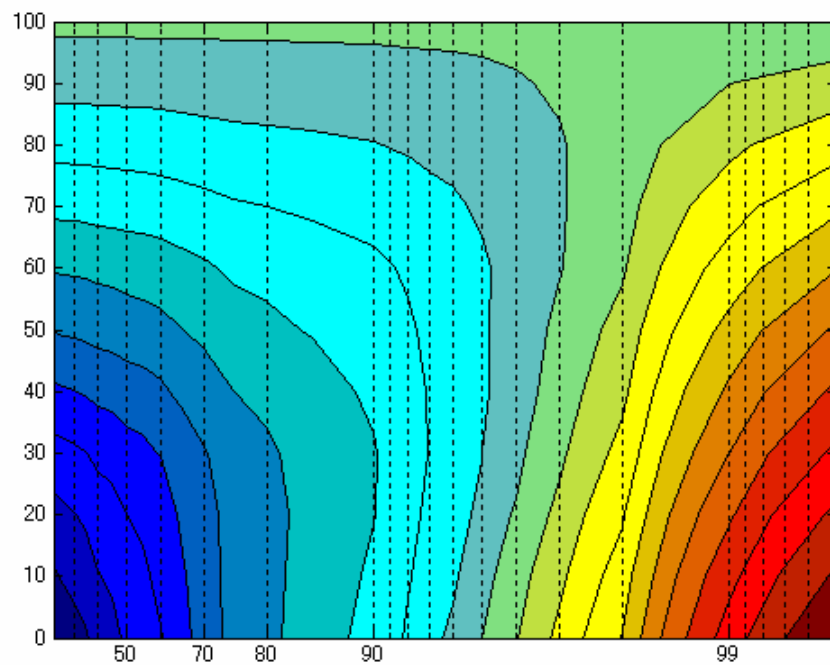


図 5.29 支払い限度額  $L=1.5$  兆円の場合の、最大費用のパーセンタイル値

$L=5$  兆円になることで、再保険の対象となる分が減るため、規定の条件よりも保険料率が全体的に安く設定されていることがわかる。また、5兆円まで保険でまかなわれるとすると、再保険相当分が減るためその分、保険加入割合が高くなっても保険料がそれほど高くなり、したがって保険に高割合加入しやすくなる。そのため、 $p_{max}$ が、 $L=1.5$  兆円のときに比べて低くなっていることがわかる。

#### ・再保険手数料

リスク分散に関わる市場が拡大し、多くの引き受け手が得られるようになれば、手数料は現在よりも下がるのが期待される。ここでは、再保険手数料が現在設定している  $S_r=5.0$  から  $S_r=2.0$  に変わった場合の影響を調べる。

得られた結果を示したのが下の図 5.30 である。

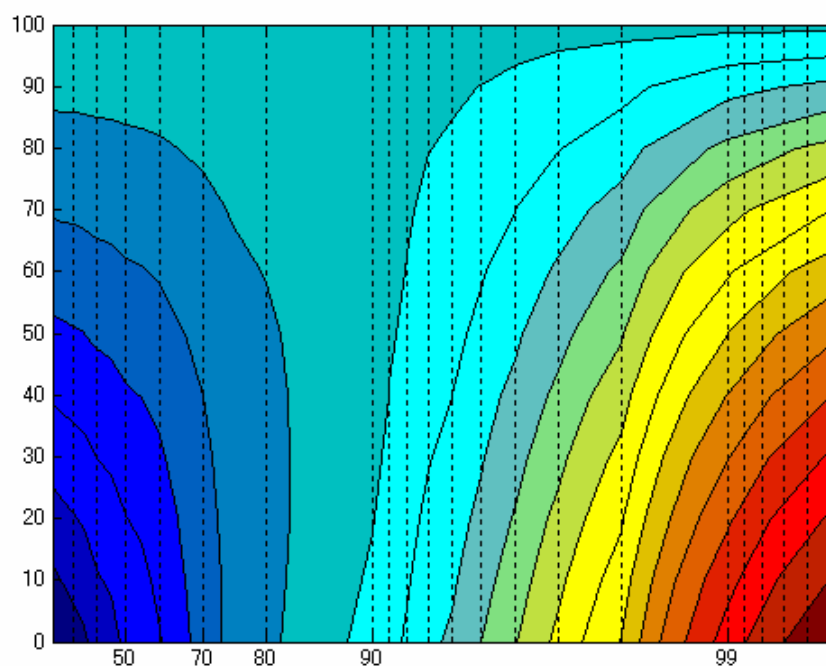


図 5.30 再保険手数料倍率が  $S_r=2.0$  の場合の、最大費用のパーセンタイル値

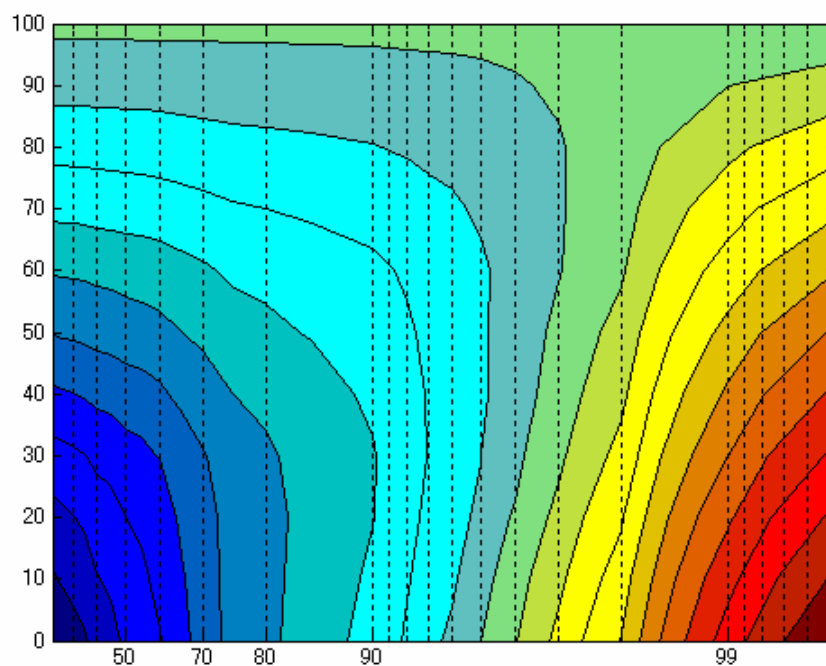


図 5.31 再保険手数料の違いによる結果への影響

ここで、基本となる保険の手数料倍率が  $S=2.0$  であることから、再保険手数料を  $Sr=2.0$  にするという事は、支払い限度額を高く設定したときと同じような状態になっていると言える。

$Sr$  が下がったということから当然ながら保険料率も全体として下がっていると考えられ、その様子が図 5.30 において確認される。そしてまた、支払い限度額  $L$  を高く設定したときと同様に、 $p_{max}$  が低い値になることがわかった。

## 5.4 まとめ

本章では、地震保険を利用した場合における建物の総費用を、建築主のリスク意識レベルに基づいて、それぞれの条件を踏まえて最大費用として算出し、それが最小となるような点を最適設計点とする考え方による地震リスクマネジメントを提案した。

この手法に従って最適設計点を求めると、地震リスクに対する意識のほとんどない人の場合であっても、現在建築基準法で定められている耐震性能のレベル、東京において荷重係数 $\gamma=2.2$ 相当、と比べて高い耐震性能をもつ建物を建てるのが、結果的に建物のライフサイクルにおける必要費用を最小化することがわかった。また、地震被害の期待値よりも高いレベルでの地震リスクも考慮しようとするリスク回避型の人が地震リスクマネジメントを行った場合には、さらに高い耐震性能を選択し、その上で自分のリスク意識に見合った程度の地震保険に加入することによって、より高い安全性を実現することが効果的であるという提案がなされる。

また、このようにそれぞれの条件に基づいて導かれる最適設計点の結果は、提示される地震保険制度や建物の構造特性によってある程度影響をうけることが5.3節において確認された。しかしその変化の度合いについては、多少の値の違いによって全体的な関係、たとえば99パーセンタイル点について評価した場合はたとえどれほど設定条件が変わっても地震保険に100%加入することが推奨されるといった結果、にまでは影響を与えないこともわかった。

図5.1に示したようなさまざまな条件設定について、これらに関わるデータや計算法はより実状を反映した形にしていくことが望ましいが、そうした結果の小さな変化にとらわれることなく、地震リスクに対するより正しい理解とリスク意識の向上によって、自分がいま家屋に住むことにより持っている地震リスクを低減していくという考え方を持つことが重要である。

## 第6章 地震リスクマネジメントに基づく 地震保険利用

## 6.1 はじめに

第5章において、新しい保険制度を利用した地震リスクマネジメントの手法について提案した。ここではそれを利用してリスクマネジメントが行われた場合、地震保険制度として、現在と比較してどれだけのリスクを受けることになるのか、また加入者にとって、示された最適設計点はどのように受け止めることができるのか、といった点について考察する。



## 6.2 建築主にとってのリスク

本研究での地震リスクマネジメントにおいては、4.4節で提案したパーセンタイル点という考え方を導入している。これは、地震リスクを単純に期待値で評価するのではなく、大きな被害の可能性についてもその発生確率とともに段階的に評価しようということを用いた考え方である。高いパーセンタイル点の値に注目してこれをコントロールしようと考え人はリスク回避型、逆に低いパーセンタイル点までしか考えなくて良いとする人はリスク志向型であると言える。

しかしこのパーセンタイル点については、なかなか自分のリスク意識レベルが何パーセンタイル値に相当するのかわかりにくい。定義については4.4節に示したとおりであるが、ここでは、発生確率  $x\%$  ということがどのような状態であるかについて、他の事例と比較的に示した上で、リスク意識のレベルを設定する考え方について述べる。

また、リスクマネジメントを行うことによって、提案された設計条件を実現することが建築主にとってどのような意味を持つのかについて、現実的な金銭感覚や考え方とともにその事例を示す。

### 6.2.1 パーセンタイル値とリスク

#### ・リスクコミュニケーション

リスクマネジメントを行う際にしばしば問題となるのが、専門家ではない人が、発生確率に関して定量的な認識を持つことができないという点である。「50年間で起こる確率が0.01%程度の事象」と言われても、それがどの程度の危険性を持つのかについて理解することができない。しかしこうした確率に関する正しい理解はリスクについて考える上で重要な要素であり、今までもさまざまな研究によってその理解の向上に関する提案、一般の人々のリスクに対する感覚の分析などが行われてきた。

Lichtenstein ら<sup>50)</sup>は、多数の非専門家に対して、それぞれの事象がどの程度の確率で起こるかを推測させるアンケート調査を行った。ここではまず被験者に、自動車事故による年間の死者数を教える。被験者はその人数を手がかりとして、ガンによる死亡、航空事故による死亡など、その他の事例での年発生人数が何人であるかという質問に答えるという形での調査が行われた。ここで被験者が答えた人数は、対象の事象について人々が主観的に判断した主観的リスクの大きさを表し、これを実際的人数である客観的リスクと比較することによって、人々が持っているリスクに対する感覚のずれを顕在化させる試みである。ここで得られた結果を次の図6.1に示す。



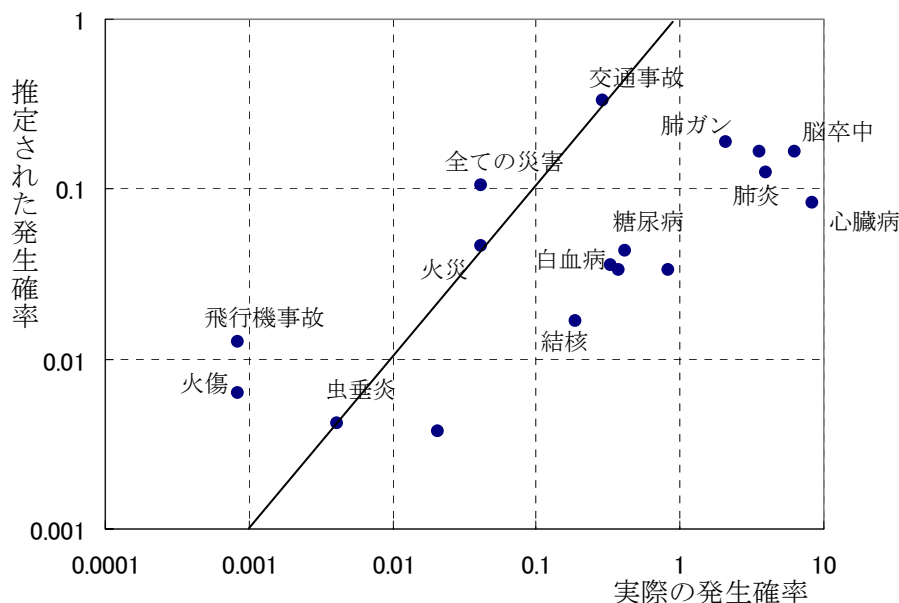


図 6.2 事故・災害・疾病による死亡発生確率(50 年間あたり)

実際の発生確率が小さいものほど稀な事象であるが、しかし飛行機事故のように発生したときの危険性が高く認識されるようなもの場合は特に、発生確率が大きく推定される傾向にあるとされている。

こうした事象に対する自分のリスク意識と、90 パーセンタイル・99 パーセンタイル点というレベルを比較してみて、建物の安全性としてどの程度のものを必要とするかということを考える必要がある。

### ・地震の発生確率

地震リスクについて考えるときには、やはり地震自体の発生確率を参考にするのが一番単純な比較の方法である。ここでは、人々が持っている、「震度 X の地震が起こりそうか、起こらなさそうか」といった感覚を用いて、パーセンタイル点というレベルについての理解を促すための考え方を示す。

建物の耐震性や防災に関する話をするとき、しばしば耳にするのが「震度 7 の地震が来ても大丈夫のように」といった表現である。これは、実際に地震が起こったときに自分の家は倒れてほしくないという気持ちから出てくる表現であると考えられるが、いままで議論してきたように、建物が壊れるか壊れないかは確率的な部分が大きく、基準法の最低レベルで建てられた建物に対して、起こった震度 5 強程度であってもその建物の一部分に集中的に地震動が作用した場合は壊れることもあるし、また逆のこともある。したがって、

絶対に建物が倒れないということは、本来は言う事ができない。それに対して、実際に断言できる程度の信頼性を持った言い方にすると、「震度7の地震が起きたとき、倒壊する確率は5%です」という表現になる。

また、昨今建物の耐震性が問題になり、しばしば聞くようになったのが「震度6強の地震で倒壊の可能性がある」という表現である。これも非常に誤解を招きやすい言い方で、建築構造や地震に関する専門的な知識を持たない人々は、この表現から「震度6強の自身きたらこの建物は倒壊する」というふうに解釈してしまう。そのようにして、実際には「可能性がある」というのは「10%程度の確率で」というような意味であるということが理解されないまま、地震リスクに対する誤解が深まっていくという状況にあるのが現実である。これはまさに Tversky による framing の効果であり、こうした誤解を生まないためにも、リスクに関する啓蒙を広く行っていく必要がある。

このように、まず建物の強度について、それが確率的な表現の対象となるものだとすることを理解した上で、「今後50年間における損失費用の90パーセンタイル値」がの意味をうまく伝える必要がある。

表6.1に示したのは、1.3節の計算結果を元に求めた、評価期間50年間でのPGVの発生確率である。

表 6.1 東京における最大地動速度と震度のパーセンタイル値

パーセンタイル点	50	70	80	90	95	99
PGV(cm/s)	27	36	42	49	62	110
震度	5強	5強	6弱	6弱	6強	7

これを見ると、90パーセンタイル値が震度6弱、99パーセンタイル値が震度7となることがわかる。こうしたデータを用いることによって、その地域に住む人が感覚的に理解している「震度6弱の地震動が発生する可能性」や「震度7の地震動が発生する可能性」と、どれだけのリスクに対して評価を行うかというリスク意識とを結びつけることができると考えられる。

ところで、1.5節に示したように、建物の被害確率を表すリスクカーブは、PGVの発生確率を用いて求められており、リスクカーブのy軸にあたる被害率は、複数の地震被災建物における被災度を期待値で表したものである。このことから、建物の被災度に関するパーセンタイル値は、地震動強さに関するパーセンタイル値と連動しているということになる。したがって現状においては、地震動強さのパーセンタイル値と補修費用の分布を利用して求めたパーセンタイル値とは異なるものの、地震被害調査において被災度が補修費用をそのまま反映した形で得られたとしたら、両者の値の期待値は、一致することになる。

### 6.2.2 最適設計荷重係数・保険加入率

第5章において提案された設計点では、最適設計荷重係数として $\gamma=3$ や $\gamma=4$ といった値が、また、地震保険に何%加入すべきかという値が示された。ここでは、この最適設計荷重係数や地震保険加入割合の値が、実際に建築主にとってどのような意味を持つかについて考える。

第2章で示した総費用最小化の原理において、荷重係数が大きくなるにつれて増加する初期建設費用について、コスト上昇係数 $k$ の値を用いてこれを評価した。ここから、大きな荷重係数に設定することは、それだけ初期建設費用として高い費用を支払う必要があることを意味する。それに対して、実際に建築主が建物を建てようとするときにしばしば最重要視するのが、建設費用である。

そのことを考えると、これまで示した最大費用と最適設計荷重の関係には特に評価する値や結果に制限を設けなかったが、建築主が支払える限度額として提示した値以上の初期建設費用にはならないような条件の下で、最適設計点を提案するという必要性も出てくる。

同時に、保険加入率についても同様のことが言える。自分はかなりのリスク回避型であると考えて99パーセントイル点での最大費用を最小化しようと考えたものの、提案された保険加入率100%分の保険料が、毎年支払う金額として、年収に対して高額すぎると感じるような状況も多く発生すると考えられる。

このように、地震リスクに関係なく存在する支払い可能な金額の限度については、事前にそれ以上の値を必要とするような条件は結果から排除して、実現可能な条件の範囲において最大費用の評価を行うことも、より現実的で達成可能な結果を得るために効果的なことであると言える。

### 6.3 システム利用による効果

本研究で提案した地震リスクマネジメントの手法を用いることによって、いくつかの効果的な結果が得られることが推定される。

まずは、はじめに地震保険料の設定において特に注目した、地震保険制度における制限をなるべく無くすということと、実際に地震リスクに見合った保険料設定を行うということに関してである。

提案した地震保険料の設定が行われれば、支払い限度額によって支払われる保険金が減額されることもなく、また加入した分がそのまま支払われるので、満額加入しておけば万一地震によって家が倒壊した場合にも、支払われた保険金を使ってすぐに被災前の生活に戻ることが容易である。そして、その地震保険制度自体が政府の財源によっていないことから、政府の財政を圧迫することなく、独立に保険事業として成立させることができている点が大きな違いになっている。

さらに、こうした地震リスクマネジメントを行うことが普及することにより、現在日本中に数多く存在している、耐震性能の低い既存不適格建物の耐震改修促進や、また新たに建てられる建物も高い耐震性能をもつ建物が増えることが期待される。これは、4.6節で示されたように、たとえ最も低いリスク意識を持ち地震保険に全く加入しない建築主であっても、東京、大阪、名古屋など地震リスクが比較的高い地域においては、最適設計点における設計荷重が建築基準法に定められた最低基準を上回っていることに基づくものである。

リスク意識の低い建築主にたいして、こうした地震リスクマネジメントの必要性を理解してもらうのは困難なことではあるが、今回提案した手法の有効性は、こうした点からも確認される。

#### 6.4 まとめ

本章では、第5章で提案した地震リスクマネジメントの手法を用いて実際に地震リスクの評価と建物の性能設定を行おうとした場合、リスク意識という考え方、最適設計点として提示される値がそれぞれ建築主にとってどのような意味を持っているのかについて検討した。

実際に、提案した手法を利用するためには、本章で検討したような事項についても考慮に入れ、地震リスクそのものが持つ意味についても理解を深める必要があると言える。

## 第7章 まとめ



## 7.1 おわりに

本研究では、現状の地震保険制度について検討し、この制度が持つ効果や役割について評価した上で、問題点の存在について指摘し、それらを改善するような新しい地震保険制度について、地震保険料の観点から提案を行った。

そして、提案した地震保険料を元にして、地震保険制度を利用した場合の地震リスク評価法について考え、これらの関係に基づく地震リスクマネジメントの体系を提案した。

建築主のリスク意識という点に関しては、確率という視点での議論が一般の人々には受け入れ辛い事から、提案した手法の実際の適用にはまだ困難な部分もあるが、今まで地震リスクを全て期待値という形で計算して示してきており、地震被害のばらつきに関しては十分検討を行ってこなかったことに対し、パーセンタイル点における値を求めることで、見えなくなっていた地震リスクの部分についても定量的な評価を行ったという点で一定の成果があったと考える。

## 7.2 今後の展望

本研究で使用した各実測データは、どれもここ十数年のうちに展開し、実用レベルになってきたものばかりである。そのため、地震ハザード、フラジリティ、補修費用の分布など、今後更に新たな観測データや評価手法が確立されることによって、本提案もより精度の高い議論が行えるようになると期待される。

とくにフラジリティに関しては、今回、詳細な検討には至らなかったものの、木造の耐震診断値を用いたフラジリティの式の提案を行った。これに関しては、耐震診断結果のわかっている木造建物の被害データが十分ではなかったため、その信頼性は高くないのが問題である。建物の数としては木造家屋のほうがRC造建物よりも多いため、全年代のものから年代別や階数別などによるものまで、木造建物のフラジリティとして提案されている式の数もRC造のものよりも圧倒的に多い。それにもかかわらず耐震性能ごとの式が実用レベルに至っていないのは、そもそも木造家屋の耐震診断が進んでいないことが一因であると考えられる。このことは、ひいては地震リスクに対する意識がまだ住民の間に高まっていないということであり、第6章でも述べたように、一般の人々の間に地震リスクに対する意識を高めることが、まず第一に求められている。

**参考文献****序章**

- 1) 損害保険料率算出機構, ”<http://www.nliro.or.jp/index.html>”,
- 2) 澤田康幸, 清水谷論, 「阪神淡路大震災による被害に対して人々はどうか」, COE Discussion papers, 2005.9.
- 3) 損害保険料率算出機構, 「火災保険標準保険約款集・地震保険標準保険約款集」, 2005.5.
- 4) 社団法人 日本損害保険協会, ”<http://www.sonpo.or.jp/index.html>” .
- 5) 損害保険料率算出機構編纂, 「地震保険統計」, 2005.12
- 6) 野島淳, 「地震の補償 34%が加入」, 朝日新聞 1 面, 2005.10.17.
- 7) 日本地震再保険株式会社, ” <http://www.nihonjishin.co.jp/top.html>” .
- 8) 内閣府中央防災会議, 中央防災会議報告書「首都直下地震対策に係る被害想定結果について」, 2005.3.30.
- 9) 中嶋朋子, 吉村美保, 目黒公郎, 「住家の耐震補強を誘導する新しい共済システムの提案」, 日本地震工学会大会梗概集, 74-75, 2005.
- 10) 吉村美保, 目黒公郎, 「長期地震予知情報を利用した既存不適格住宅の耐震補強促進案について」, 土木学会地震工学研究発表会, 2001.8.
- 11) J.Kanda and K.Nishijima, 「Aspects of Insurance Premium for Residential Houses against Seismic Risk in Japan」, 2005.
- 12) Richard J.Roth,Jr., 「What are the Principles of Insuring natural Disasters?」, Earthquake Basics Brief No.3, 1997.4.
- 13) 岡田成幸, 「デューデリジェンスのための建物耐震診断結果を利用した損傷度評価関数」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 25-28, 2002.8.
- 14) 矢代晴実, 福島誠一郎, 「地震リスクの証券化に関する数理解析」, 統計数理, 第 50 巻 第 2 号, 259-278, 2002.
- 15) Kanda, J., Ellingwood B, 「Formulation of Load Factors Based on Optimum Reliability」, Structural Safety, vol.9, No.3, pp.197-210, 1991.
- 16) 平川倫生, 「耐震安全性を考慮した目標信頼性の設定」, 東京大学大学院 1996 年度修士論文.
- 17) 高橋雄司ら, 「地震リスク・マネジメント技術を活用した地震対策の効果検証」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, 51-74, 2005.9.

**第1章**

- 18) 損害保険料率算出機構, 「日本の地震保険」, 2005.9.

- 19) 西島一欽, 「建築物ポートフォリオ最適設計のための多地点自然災害危険度解析モデル」, 東京大学大学院 2002 年度修士論文.
- 20) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 「全国を概観した地震動予測地図」, 2005.3.
- 21) 地震ハザードステーション, ” <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>” .
- 22) 建物構造性能評価, ” <http://ssweb.k.u-tokyo.ac.jp/>” .
- 23) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹, 「気象庁 87 型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案」, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 161-164, 1997.
- 24) 宮越淳一, 林康裕, 渡辺宏一, 田村和夫, 「1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価」, 構造工学論文集 Vo.43B, 269-276, 1997.3.
- 25) 村尾修, 山崎文雄, 「自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数」, 日本建築学会構造系論文集 第 527 号, 189-196, 2000.1.
- 26) 建設省住宅局建築指導課監修, 「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針」, 日本建築防災協会, 1-111, 1991.
- 27) 岡田成幸, 高井伸雄, 「地震被害調査のための建物分類と破壊パターン」, 日本建築学会構造系論文集 第 524 号, 65-72, 1999.10.
- 28) 林康裕, 鈴木祥之, 宮越淳一, 渡辺基史, 「耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示」, 地域安全学会論文集 No.2, 2000.11.
- 29) 山口寛久, 中埜良昭, 村上雅也, 岡田恒夫, 「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震性能」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1988.
- 30) 山口修由, 「木造建築物の耐震診断の評点と被災度の関係」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 133-134, 2004.8.
- 31) 栗山利男, 望月利男, 荏本孝久, 「既存非木造建築物の耐震性能の分布に関する調査研究 その 1: 構造耐震指標 (I<sub>s</sub> 値) の建設年代・階数・用途別分布」 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, 7-8, 1997.9.
- 32) 東京都, 「東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書」, 1997.8.
- 33) 目黒公郎, 国吉隆博, 吉村美保, 「建物の耐震補強を促進させるための新しい地震保険制度の検討」, 日本地震工学会・大会梗概集, 78-79, 2005.
- 34) 日本地震再保険株式会社, ” <http://www.nihonjishin.co.jp/top.html>” .
- 35) 野口悟史, 西島一欽, 崔恒, 高田毅士, 神田順, 「一般住宅所有者の地震リスク・地震保険に対する予備意識調査「建物の構造性能評価システム」を用いたアンケート」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, 253-254, 2004.8.
- 36) 総務省統計研修所編集, 「日本の統計」, 総務省統計局, 2005.
- 37) 下和田功, 「リスクと保険」, 有斐閣ブックス, 2004.4.

**第 2 章**

38) 佐藤一郎, 「経済性を考慮した設計用地震荷重算定手法の提案」, 東京大学大学院 1998 年度修士論文.

**第 3 章**

39) 神田順ほか, 「最適信頼性に及ぼす経済要因の影響評価」, 日本建築センター平成 5 年度研究助成報告書, No.9313, 1994.5.

40) Ahmed, K. A., 「Uncertainty Analysis of Design Seismic Load in Japan」, 東京大学大学院 1996 年度修士論文.

41) 岡村祥子, 神田順, 「建築構造の総期待費用最小化におけるコスト上昇係数の推定」, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, 237-238, 2004.8.

42) 神田誠一, 「環境負荷を考慮した最適設計荷重の決定法」, 東京大学大学院 2001 年度修士論文

43) 日本建築学会, 「建物の LCA 指針」, 1999.11.

44) 建築研究所, 「建築のライフサイクルエネルギー算出ソフトウェア建築 LCA Ver.3.0」, 2001.3.

**第 4 章**

45) 華表良介, 「建築構造における社会的総費用と環境負荷を考慮した構造性能評価」, 東京大学大学院 2003 年度修士論文.

46) Munich Re Group, 「Annual review:Natural catastrophes 2004」, 2005.

47) 神田順ほか, 「損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重」, 1998.6.

48) 井上超, 「耐震補強による地震期待損失額の低減」, ハザマ研究年報, 15-19, 2002.12.

**第 5 章**

49) Jun Kanda, 「Application of an Empirical Extreme Value Distribution to Load Models」, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 99, Number 4, 1994.7.

**第 6 章**

50) Lichtenstein, S., Slovic, P., Fischhoff, B., Layman, M., Combs, B., 「Judged frequency of lethal events.」, Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 4, 551-578, 1978.

51) Tversky, A., Kahneman, D., 「The framing of decisions and the psychology of choice」 Science, 211, 453-458, 1981.

- 52) 辻本誠, 江本哲也, 広田すみれ, 「バックグラウンドリスクとリスク認知」, 平成8年度 建設省総合プロジェクト「新建築構造体系の開発」目標水準分科会 (財団法人 国土開発技術研究センター)報告書, 1998.4.

## 付録

- semilog\_hazard\_exact.m
- fragility.m
- earth\_loss.m
- earth\_loss\_Is.m
- earth\_loss\_re\_ins.m
- earth\_loss\_Is\_inkus.m
- final\_3Dgraph.m



```
semilog_hazard_exact.m
```

```
-----  
% HAZARD_analysis 結果描画プログラム  
% y 軸対数グラフ。
```

```
clear y x yhist;  
hazard_surface=load('hazard_surface50.dat');  
  
x=0 : 10^-1 : 500;  
for i=1:8;  
    yhist(:,i)=(histc(hazard_surface(:,i), x)/length(hazard_surface));  
    y(:,i)=ones(length(yhist),1)-cumsum(yhist(:,i));  
end  
  
figure(1)  
semilogy(x, y)  
axis([0 200 10^-4 1]);  
legend(building(:,1));
```

```
fragility.m
```

```
% フラジリティ曲線を描くプログラム  
%
```

```
clear x y yhist legend;  
x=[0:1:300];
```

```
lx1=(normcdf((log(x)-log(50))/0.4));  
lx2=(normcdf((log(x)-log(150))/0.4));  
lx3=(normcdf((log(x)-log(250))/0.4));  
lx=0.05*lx1+0.5*lx2+lx3;
```

```
lr1=(normcdf((log(x)-log(100))/0.4));  
lr2=(normcdf((log(x)-log(200))/0.4));  
lr3=(normcdf((log(x)-log(251))/0.4));
```

```
figure(2)
```

```
plot(x,lx1,'-r', x,lx2,'-r', x,lx3,'r',x,lr1,'-k',x,lr2,'-k',x,lr3,'k')
```

```
%plot(x,lx)
```

```
legend('RC 小破','RC 中破','RC 大破','免震小破','免震中破','免震大破',0)
```

```
axis([0 300 0 1]);
```

```
earth_loss.m
```

```
-----  
% HAZARD_analysis を利用した, 期待損害額, 確率分布作成プログラム  
% 地点(8 点)ごとに分布が作成される。
```

```
clear x y yhist;
```

```
building=building_load;  
hazard_surface=load('hazard_exact50.dat');  
d=1;  
x=0:d:500;  
for i=1:8  
    yhist(:,i)=(histc(hazard_surface(:,i), x)/length(hazard_surface));  
    y(:,i)=ones(length(yhist),1)-cumsum(yhist(:,i));  
    count=i  
end
```

```
%フラジリティの変数定義
```

```
g1=log(50);  
g2=log(150);  
g3=log(250);  
zeta=.4;
```

```
lx1=0.05*(normcdf((log(x)-g1)/zeta)-normcdf((log(x)-g2)/zeta));  
lx2=0.5*(normcdf((log(x)-g2)/zeta)-normcdf((log(x)-g3)/zeta));  
lx3=1.0*(normcdf((log(x)-g3)/zeta));  
lx=lx1+lx2+lx3;  
next_data=[lx; yhist'];  
%save('earth_loss.dat', 'next_data', '-ascii');
```

```
figure(1)  
semilogy(lx, y)  
axis([0 0.5 10^-4 1]);  
legend(building(:,1));
```

```
clear y;
```

```
for i=1:8  
    y(:,i)=cumsum(yhist(:,i));  
    count=i  
end
```

```
exp_loss=lx*yhist
```

```
earth_loss_Is.m
```

```
-----
% HAZARD_analysis を利用した, Is 値に対する期待損害額(純保険料) 計算プログラム
% 地点(8 点)ごとに分布が作成される。
```

```
%
%% RC 造 %%
```

```
clear x y yhist Ci;
```

```
building=building_load;
```

```
hazard_surface=load('hazard_exact50.dat');
d=1;
x=0:d:500;
for i=1:8
    yhist(:,i)=(histc(hazard_surface(:,i), x)/length(hazard_surface));
    count=i
end
```

```
%フラジリティの変数定義
```

```
Iw0=0.4;
zeta=.6;
```

```
n=300;
Iwma=6.0; %評価する Is の最大値
Iwmi=0.01; % 最小値
```

```
Iww=[Iwmi:(Iwma-Iwmi)/n:Iwma];
```

```
% Co=1.0 は Is 値いくつ相当か
```

```
eIs=0.35
Co=Iww/eIs;
Coma=Iwma/eIs;
Comi=Iwmi/eIs;
```

```
%設定された Vo はいくつか
```

```
Vo1=50;
Vo2=100;
Vo3=150;
Vo4=200;
Vo5=250;
```

```
% 初期建設費用 C0, 破壊時損失費用 100%=C0*2
% 保険手数料倍率を T とする。
```

```

C0=23.5;
T=2.0;

for i= 1 : n+1
    Iw=Iwmi+(Iwma-Iwmi)/n*(i-1);
    g1=log(Vo1*Iw/Iw0);
    g2=log(Vo2*Iw/Iw0);
    g3=log(Vo3*Iw/Iw0);
    g4=log(Vo4*Iw/Iw0);
    g5=log(Vo5*Iw/Iw0);

    lx1=C0*2*0.05*(normcdf((log(x)-g1)/zeta)-normcdf((log(x)-g2)/zeta))*T;
    lx2=C0*2*0.1*(normcdf((log(x)-g2)/zeta)-normcdf((log(x)-g3)/zeta))*T;
    lx3=C0*2*0.3*(normcdf((log(x)-g3)/zeta)-normcdf((log(x)-g4)/zeta))*T;
    lx4=C0*2*0.5*(normcdf((log(x)-g4)/zeta)-normcdf((log(x)-g5)/zeta))*T;
    lx5=C0*2*(normcdf((log(x)-g5)/zeta))*T;
    lx=lx1+lx2+lx3+lx4+lx5;

    Iw
    exp_loss(i,:)=lx*yhist;
    exp_loss(i,:)

    clear lx
    %next_data=[lx; yhist];
    %save('earth_loss.dat', 'next_data', '-ascii');

end

% Ci のグラフを付け加える。 m =  $\mu Q$ @それぞれの地点, r0=荷重係数, kk=コスト上昇係数

m=[83 233 417 566 970 492 784 383];
kk=m/10000;

for l=1:8
    r0=980*Co/m(l);
    Ci(l,:)=C0*(1+kk(l))*(r0-1);
end

%荷重係数に対する純保険料もしくは総費用の描画
figure(1)
%plot(r0, exp_loss)
plot(r0, exp_loss+Ci)
axis([0 6 22 50]);
legend('building(:,1)');
title('荷重係数, total cost');

```

```
r0ave=r0;
Cfave=exp_loss;
Ctave=exp_loss+Ci;

%Is 値に対する純保険料もしくは総費用の描画
figure(2)
plot(Iww, exp_loss)
%plot(Iww, exp_loss+Ci)
axis([Iwmi Iwma 10^-4 10^-2]);
legend(building(:,1));

%必要であれば総費用を最小化する点の値, 荷重係数が求められる。
sortdata=ones(8,1);
sortdata(:,:)=[];
for j=1:8
    getdata=sortrows([exp_loss(:,j)+Ci(j,:) r0]);
    sortdata=[sortdata; getdata(1,:)];
end
```

```
earth_loss_re_ins.m
```

```
-----  
% HAZARD_analysis を利用した，期待損害額，再保険手数料算出プログラム  
% 地点(8点)ごとに，再保険利用時保険料の，期待値に対する倍率が計算される。  
% 支払い限度額を設定した上での再保険制度利用についての検討。
```

```
clear x y yhist Lx;
```

```
% 全国に散在する建築ポートフォリオデータをロードし，全保険加入物件のポートフォリオロス  
計算す
```

```
る。
```

```
hazard_surface=load('hazard_simple_port1.dat');
```

```
building=building_load;
```

```
N=8;
```

```
%L_ratio=全国地震保険加入済住宅の被害率（全住宅が全壊した状態=1.0）
```

```
for j=1:length(hazard_surface)
```

```
clear x;
```

```
x=hazard_surface(j,:);
```

```
lx1(j,:)=0.05*(normcdf((log(x)-log(50))/0.4)-normcdf((log(x)-log(150))/0.4));
```

```
lx2(j,:)=0.5*(normcdf((log(x)-log(150))/0.4)-normcdf((log(x)-log(250))/0.4));
```

```
lx3(j,:)=1.0*(normcdf((log(x)-log(250))/0.4));
```

```
lx(1,j)=sum(lx1(j,:))+sum(lx2(j,:))+sum(lx3(j,:));
```

```
L_ratio(1,j)=lx(1,j)/size(hazard_surface,2);
```

```
count=j
```

```
end
```

```
%加入件数 J 件，Cp=全額加入時の各戸平均加入額。
```

```
%限度額 LI を超える部分が，再保険に充てられる。
```

```
J=950*10000;
```

```
Cp=1500*10000;
```

```
LI=15000*10000*10000;
```

```
%再保険費用は，ポートフォリオの普通の期待値を reins 倍したものとし，その限度額を超える部  
分は
```

```
%さらに再々保険に充てる。デフォルトでは1段階のみ計算するものとする。
```

```
reins=5;
```

```
R=1;
```

```
%主要都市 (P) における単純期待値
```

```
P=[1,14,19,49,63,82,88,90];
```

```
d=0.01;
```

```

x=0:d:3.0;

for j=1:N
    i=P(1,j);
    Lx(:,j)=lx1(:,i)+lx2(:,i)+lx3(:,i);
end
for j=1:N
    yhiste(:,j)=histc(Lx(:,j),x)/length(Lx);
end
exp_losse=x*yhiste

% 1 件当たり加入額 C 円。
% per は、検討する保険加入割合 (%)

per=0:10:100;
S=length(per);

for c=1:S
    p=per(c);
    C=Cp*p/100;

    L(1,:)=lx(1,:)/size(hazard_surface,2)*J*C;
    exp_losso(1,1)=0;
    Re=zeros(R,length(L));
    H=ones(1,length(L));
    Re(1,:)=L(1,:);

    e=0.001;
    for n=1:R
        %xo = exp_losso(1,n) : e : 1.0;
        %for l=1:length(L)
        %    Le(1,l)=max(0,Le(1,l)-exp_losso(1,n));
        %end
        for j=1:length(L)
            if Re(n,j) >= LI
                Re(n+1,j)=Re(n,j)-LI;
                H(1,j)=H(1,j) + Re(n+1,j)/Re(1,j)*(reins-1);
            end
        end
    end
end

%補正係数 H を使って、各地の中心地におけるリスクカーブを示す。
for j=1:N
    i=P(1,j);
    Loss(:,j)=lx1(:,i).*H'+lx2(:,i).*H'+lx3(:,i).*H';

```



```
end

%補正後のリスクカーブ, 期待値
for i=1:N
    yhist(:,i)=histc(Loss(:,i), x)/length(Loss);
    y(:,i)=ones(length(yhist),1)-cumsum(yhist(:,i));
end

% 描画
figure(1)
semilogy(x, y)
axis([0 1.0 10^-4 1]);
legend(building(:,1));

exp_loss(c,:)=x*yhist;
bai_loss(c,:)=exp_loss(c,:)/exp_losse;
count=c
end

Hover1=0;
for t=1:length(H)
    if H(t) > 1
        Hover1=Hover1 + 1;
    end
end

bai=bai_loss';
%データを利用する場合は以下でセーブし, earth_loss_Is_inspgv.m などを実行する。
save('earth_loss_re_ins.mat','bai_loss','exp_losse','per');
%save('earth_loss_re_insbai.dat','bai','-ascii');

%再保険による補償が必要になった件数を表示する。
Hover1
```

```
earth_loss_Is_inskus.m
```

```
-----  
% HAZARD_analysis を利用した, Is 値に対する期待損害額計算プログラム  
% 地点(8 点)ごとに分布が作成される。  
% 被害額のパーセンタイル値が計算される。  
% 補修費用の分布に基づく。  
%  
%%損害率は, 大破・中破・小破それぞれの実際の補修額データを用いて求める。  
%%無被害・倒壊はそれぞれ補修額を再調達価格の 0, 100%とする。  
  
%% RC 造 %%  
  
clear;  
  
building=building_load;  
  
% 求めるパーセンタイル点の位置を複数指定する。  
percent=[20:5:90 91:1:98 99 99.5];  
  
%再保険の影響 (変数 bai_loss) を入れるときはここでデータを load する。  
%このデータは, earth_loss_re_ins.m によって得られる。  
load('earth_loss_re_ins.mat');  
  
% 保険加入割合 ins による値を計算するので ins を指定する。  
% earth_loss_re_ins.mat を上で使用するとき, 中に per が入っているので  
% これを使用できる。  
% ins=0:10:100;  
ins=per;  
  
% PGV データをロードし, 累積分布に直す。  
hazard_surface=load('hazard_surface_exact50.dat');  
d=1;  
x=1:d:500;  
for i=1:8  
    yhist(:,i)=(histc(hazard_surface(:,i), x)/length(hazard_surface));  
    y(:,i)=cumsum(yhist(:,i));  
    count=i  
end  
  
%フラジリティの変数定義。  
lw0=0.4;  
zeta=.6;  
  
n=500;  
lwma=6.0; %評価する Is の最大値
```

Iwmi=0.01; % 最小値

Iww=[Iwmi:(Iwma-Iwmi)/n:Iwma];

% Co=1.0 は Is 値いくつ相当か。Is=0.35 が  $\gamma=1$  相当なら、eIs=0.35 とする。

eIs=0.35;

Co=Iww/eIs;

Coma=Iwma/eIs;

Comi=Iwmi/eIs;

%設定された Vo はいくつか

Vo{1,1}=50;

Vo{2,1}=150;

Vo{3,1}=200;

Vo{4,1}=250;

% 初期建設費用 C0, 破壊時損失費用 100%=C0\*2 小数点 1 桁まで。

C0=23.5;

%各被害による補修額の分布(対数正規分布の自然対数平均値と自然対数標準偏差)を入れる。

dl=0.1;

lo=0.1:dl:C0;

%%%無被害

hm0=0; hs0=0;

hd0=[1 zeros(1,length(lo)-1)];

%%%軽微・小破

hm1=log(2.6); hs1=1.50;

hd1=lognpdf(lo, hm1, hs1)\*dl;

%%%中破

hm2=log(3.5); hs2=1.50;

hd2=lognpdf(lo, hm2, hs2)\*dl;

%%%大破

hm3=log(5.0); hs3=1.50;

hd3=lognpdf(lo, hm3, hs3)\*dl;

%%%倒壊

hm4=C0; hs4=0;

hd4=[zeros(1,length(lo)-1) 1];

% 保険料の手数料はいくらか。T=2.0 とは、保険料金=期待値\*2 の意味。

T=2.0;

% Loss の値を計算する。

loss=cell(8,1);

```

for i=1:8
    loss{i,1}=zeros(n+1,length(lo));
end

for m=1:8

for i= 1 : n+1
    Iw=Iww(i);

    g1=log(Vo{1,1}*Iw/Iw0);
    g2=log(Vo{2,1}*Iw/Iw0);
    g3=log(Vo{3,1}*Iw/Iw0);
    g4=log(Vo{4,1}*Iw/Iw0);

    lx0=ones(1,length(x))-normcdf((log(x)-g1)/zeta);
    lx1=(normcdf((log(x)-g1)/zeta)-normcdf((log(x)-g2)/zeta));
    lx2=(normcdf((log(x)-g2)/zeta)-normcdf((log(x)-g3)/zeta));
    lx3=(normcdf((log(x)-g3)/zeta)-normcdf((log(x)-g4)/zeta));
    lx4=(normcdf((log(x)-g4)/zeta));

    for s=1:length(x)
        loss{m,1}(i,:)=loss{m,1}(i,:) + yhist(s,m) * (lx0(1,s)*hd0 + lx1(1,s)*hd1/sum(hd1) +
        lx2(1,s)*hd2/sum(hd2) + lx3(1,s)*hd3/sum(hd3) + lx4(1,s)*hd4);
    end

    Iw
end

exp_loss(:,m)=loss{m,1}*lo';
Lxc{m,1}=cumsum(loss{m,1},2);

end

graph=cell(8,1);
% ○%点の被害額
for i=1:8
    for q=1:length(percent)
        for j=1:n+1
            k=1;
            per_loss(q,j)=0;
            while Lxc{i,1}(j,k)<=percent(q)/100
                per_loss(q,j)=lo(k);
                k=k+1;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    end
    graph{i,1}=per_loss;
end

for s=1:length(ins)
    for i=1:8
        graph_ins{i,s}=graph{i,1}*(1-ins(s)/100) + repmat(exp_loss(:,i)', length(percent), 1)

*(ins(s)/100)*bai_loss(s,k)*T;
        end
    end

percent

% Ci のグラフを付け加える。 m =  $\mu Q$  @ それぞれの地点, r0 = 荷重係数, kk = コスト上昇係数
M=[83 233 417 566 970 492 784 383];
kk=M/10000;

for l=1:8
    r0=980*Co/M(l);
    Ci(l,:)=C0*(1+kk(l))*(r0-1);
end

fid=fopen('building');
for i = 1 : 8
    savedata{i,1} = fgetl(fid);
end

% グラフは基本的に 1 地点(p)に関して, O%点考慮, ごとにグラフ化。
% グラフを表示したい場合は, 以下のうち%%となっている部分のコメントアウトを外す。
% p = 対象地点の行番号 (東京なら p=3)
p=3;

% グラフ内に表示する, O%加入, のラインを選択する。変数 ins のうち採用する値の列番号を
per とする

。
% 採用数を変える時は, plot の対象項目数も増減させること。
per=[1 2 4 6 8 10 11];

for j=1:length(percent)

```

```

%%    figure(j)    %%

% earth_loss_Is.m を動かした後に clear せずにやれば、期待値データを重ねられる。
%%plot(r0, Ci(p,:), '-k', r0, exp_loss(:,p)+Ci(p,:), '-k', r0, graph_ins{p,1}(j,:)+Ci(p,:),
r0, graph_ins{p,2}(j,:)+Ci(p,:), r0, graph_ins{p,3}(j,:)+Ci(p,:), r0, graph_ins{p,4}(j,:)+Ci
(p,:), r0, graph_ins{p,5}(j,:)+Ci(p,:), r0, graph_ins{p,6}(j,:)+Ci(p,:))
    %%

% 初期建設費用と総費用
%plot(r0, Ci(j,:), r0, graph{j,1}+repmat(Ci(j,:),6,1))

%%axis([0 6 23 35]);    %%
%%legend('Ci','Ct-ave','0','30','50','70','90','100');    %%
%%title([building{p,1}, 'における', num2str(percent(j)), '%点, 保険料 T=' , T, ']);    %%

%final_3Dgraph でデータを使用するため、最大費用を最小化した点に関するデータを data に入れ
る。
    sortdata=ones(8,1);
    sortdata(:,:)=[];
    for r=1:length(ins)
        getdata=sortrows([(graph_ins{p,r}(j,:)+Ci(p,:))' r0]);
        sortdata=[sortdata; getdata(1,:)];
    end

savedata{j,1}=[ins' sortdata];
clear sortdata
end

percent
data=zeros(1,3);
for i=1:length(percent)
%    percent(i);
    data=[data; savedata{i,1}];
end

% 以下でデータを保存し、これを用いて final_3Dgraph.m で最終的にグラフ化する。
save('earth_loss_Is_inspgv.mat', 'data', 'percent', 'ins');

```

```
final_3Dgraph.m
```

```
-----  
-----  
% 予想最大費用のデータ (earth_loss_re_ins.m→earth_loss_Is_inkus.m によって得られ  
たもの)  
% を 3D グラフ化して、それぞれの○%点考慮、ごとに、最小となる保険加入率および最  
小化された  
% 総費用の値を表示するプログラム。
```

```
clear;
```

```
% percent と ins,結果データをロードする。  
load('earth_loss_Is_inspgv.mat');
```

```
data=data(2:length(data),:);
```

```
% グラフ作成用にデータを並べ替える  
graph_lfx=ones(size(percent))-percent/100;  
graph_lfy='ins';  
for j=1:length(percent)  
    graph_lfz(:,j)=data((j-1)*length(ins)+1:j*length(ins),2);  
end
```

```
% 各パーセントごとに最小化される総費用と、対応する荷重係数を求める。
```

```
data=[data(:,2:3) data(:,1)];  
for j=1:length(percent)  
    temp=sortrows(data((j-1)*length(ins)+1:j*length(ins),:));  
    min_data(j,:)=temp(1,:);  
end  
min_data=[percent' min_data]  
save('earth_ins_opt.dat','min_data','-ascii');
```

```
% グラフ描画 3D  
figure(1)  
surf(graph_lfx, graph_lfy, graph_lfz)  
plot3(min_data(:,1), min_data(:,4), min_data(:,2))
```

```
axis([0.005 0.8 0 100 24 30])
set(gca,'XScale','log', 'XDir', 'reverse')

% グラフ描画 2D
figure(2)
contourf(graph_lfx, graph_lfy,graph_lfz,20)
set(gca,'XScale','log', 'XDir', 'reverse', 'XGrid', 'on', 'Layer', 'top')
set(gca,'XTick', [0.01 0.1 0.15 0.2 0.3 0.5], 'XTickLabel','99|90|85|80|70|50')
set(gca,'Clim',[23.5 32])
```



## 謝辞

まずはじめに、本論文を作成するにあたり、貴重なご意見を頂きました熱心なご指導を下さった神田順先生に、厚くお礼を申し上げます。先生には卒業論文を作成した学部4年のときから今まで、様々な分野についての興味深い事柄を学ばせて頂きました。先生ご自身が幅広い視野を持って、研究のみならず対外的な啓蒙活動や交流に力を入れて来られた様子は、私にとっても大変良い刺激になり、研究活動に対する姿勢や物事の考え方についても多くのことを教えていただきました。研究を進めるにあたっては、なかなか道筋をつけられないでいる私に的確な指摘と助言を下さり、そのおかげで論文を形にすることができたのだと思っております。この2年間、このように素晴らしい環境を与えてくださったことに、心から感謝しております。

高田先生には、研究室会議やお会いした折に、その時々で的確なアドバイスや励ましの言葉を頂きました。また、研究の参考にと目に留まった文献を渡して下さったりなど、いつも気にかけて貰っているという思いは、私にとって大きな励みとなりました。本当にありがとうございました。

また崔先生、岩崎さんから研究室会議を通して頂く鋭い意見は、研究を進める上でいつも良い指針となりました。どうもありがとうございました。

そして研究室の先輩方には、お忙しい中ご指導を頂いたり、また資料集めを手伝っていただいたりなど、大変お世話になりました。喜々津さんには、お仕事中に無理を言って、貴重な資料をわざわざ送って頂きました。この論文の一部は頂いた資料がなければ決してまとめることのできなかつたものです。また西嶋さんには、海外留学中にも関わらず何度もメールを送らせていただき、非常に重要なプログラムを使わせていただきました。西嶋さんに頂いたこのプログラムがなければ、この研究はほとんど進まなかつたと言っても過言ではありません。お二人にはご迷惑をおかけしましたが、快く手助けをして頂き、ありがとうございました。

ドクターの野口さん、金さんは、同じ研究室のメンバーとして、先輩として、私に大きな刺激を与えて下さいました。畑さんには研究に関する相談を毎週のようにさせていただき、そのたびにいつもの的確なアドバイスを頂きました。中間発表前、煮詰まっていた私に畑さんが指導して下さったことは、この論文を作成する上で本当に大きな力となりました。唯一の同期である曾我君には、居心地の良い研究室の環境を作ったり時には愚痴をこぼしたりと、共に研究を進めていく同士としていつも元気をもらっていました。須藤君、元井君、そして高田研究室の方々は、日々の生活を通して私に色々な良い刺激を与えてくれました。

最後になりましたが、私たちの研究室生活を支えてくださった高橋さんに、心からお礼を申し上げます。