

# 耐震補強推進のための地震リスクファイナンスモデル

## Seismic Risk Finance Model for Retrofitting Promotion of Low Earthquake-Resistant Structures

山中 久幸 HISAYUKI YAMANAKA

山田 哲也 TETSUYA YAMADA

谷垣 正治 MASAHARU TANIGAKI

建築事業企画部 山岸 邦彰 KUNIAKI YAMAGISHI

耐震性の劣る建物の耐震補強は、防災上の緊急の課題となっている。しかし、耐震補強費用の投資効率の不確定性のため、耐震補強はあまり進んでいない。投資効率の不確定性は、地震発生の不確定性に起因する。本論文では、この不確定性を平準化できるデリバティブの手法を用い、建物所有者が耐震補強費用を調達するモデルを提案した。また、一定期間に地震が発生しなかった場合、耐震補強費用は投資家が負担し、地震発生時には所有者は耐震補強費用以上の額を投資家に支払うモデルの妥当性を確認した。

**キーワード**：地震リスクマネジメント、耐震補強費用、リスクファイナンス、デリバティブ、プレミアム

Retrofit of low earthquake-resistant structures is expected for social safety. However, the uncertainty of investment efficiency of retrofit expenses may cause hesitation to retrofit for house owners. In this paper, a new derivative model based on the probability of earthquakes is proposed, which can finance retrofit expenses and level the uncertainty of expenses of the owners during life-cycle of the structures. The possibility of the promotion of seismic retrofit is shown by applying the proposed finance model.

**Key Words**: Seismic Risk Management, Seismic Retrofit Expenses, Risk Finance, Derivative, Premium

### 1. 序論

日本が直面しているリスクの一つに地震災害がある。地震災害は、過去の被害例から分かるように建造物の破壊・地盤の崩壊などにより人間の生活に甚大な影響を及ぼすものである。建設業界は、このリスクに対し安全な社会基盤を形成する重要な社会的使命を有しているといえる。この認識の下、建設業に関わる技術者は、耐震構造技術の発展に多くのエネルギーを費やし、免震・制震・耐震技術をはじめ、既存の建物の耐震改修技術などを開発してきた。これらの技術には、高い耐震性に加え、事業や居住の継続を妨げないこと、短工期または簡単な工法が求められ、継続的に技術開発を進めてきた。このような技術開発成果の適用により、補強上の技術的課題を克服し、耐震補強の需要・促進を図ることが期待される。

しかし、現実には新耐震設計基準を満足しない既存不適格建物が多数存在し、大規模地震が発生した場合、甚大な被害が予測されているにも関わらずこれらの建物の耐震補強があまり進んでいない。社会の安全性を高める

ためには、工学的な技術の発展と同時に、当該技術が活用される社会全体の仕組みにも着目する必要がある。すなわち、自然科学に基づく工学的な技術開発に加え、社会科学に基づく制度の開発を進めることにより、技術開発成果のより広い展開を可能にすると思われる。

本論は、耐震補強の推進により、より安心できる社会を形成するための手段として、従来の工学的解決方法の枠を超え、資金調達などの金融面に着目することにより、工学的な技術開発成果をより広く活用できる可能性を模索するものである。

### 2. 背景

#### (1) 耐震補強推進の必要性と課題

兵庫県南部地震（1995年）後、10年以上を経て、その間にも鳥取県西部地震（2000年）、芸予地震（2001年）、十勝沖地震（2003年）、新潟県中越地震（2004年）、福岡県西方沖の地震（2005年）など全国で被害地震が発生し、さらに2005年に発覚した耐震偽装事件などを契機として、近年地震リスクや建造物の耐震性について

ての関心は極めて高い状況にある。特に新耐震設計法に準拠していない建物に対する耐震対策は喫緊の課題である。

兵庫県南部地震の建物被害を年代別に分析した結果、1981年以前に建築された新耐震設計基準以前の建物の被害が大きいことが報告されている。これら既存不適格建物の存在は、今後発生する地震の被害を考えた場合、大きな社会問題として捉えられている。

兵庫県南部地震後、耐震補強を推進する目的で、1995年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」が施行された。しかしながら、既存不適格建物の耐震改修は未だ十分に進んでおらず、2006年1月には建築物の耐震改修の促進に関する法律の一部を改正する法律が施行された。本改正は、平成17年に国土交通省で開催された「住宅・建築物の地震防災推進会議」で提言された「既存建物の耐震化率を現状の75%から10年後には90%に引き上げ」の推進力になることを期待されている。さらに本会議の提言では、自治体による促進事業として、ローン、税制、助成制度などの支援策の必要性を示しており、各種地震リスクマネジメント手法の有機的活用が期待されている。

「住宅・建築物の地震防災推進会議」資料によると、耐震改修促進法の対象となる特定建物（3階以上かつ1,000m<sup>2</sup>以上で多数の者が利用する用途のもの）で耐震改修が必要なものは9万棟（平成15年時点推定値）存在し、住宅に関しては1,150万戸（平成15年時点推定値）の既存不適格建築物の存在が示されている。平成15年度までに、住宅に関して、地方公共団体が自ら実施または補助等を行った耐震診断は約17万戸あるのに対し、耐震改修に至ったものは約3,500戸と少ない。補助によらないものを含めると平成10年から平成15年までの6年間で約32万戸の耐震改修を実施していると推計されている。「住宅・建築物の地震防災推進会議」の提言では、今後10年間で、約100万戸の住宅の耐震改修を目標としており、従来の2～3倍のペースで耐震改修を実施しなければならない計算になる。

住宅の量的拡大から安全性や品質の向上に重点を置いた政策の推進のため、2006年6月8日に住生活基本法が公布・施行された。この中で、上記検討項目が、良質な住宅ストックの形成と将来への継承のための目標として掲げられている。このように、既存不適格建物の耐震性向上のために、計画目標を定めた後、具体的な実施が求められる段階に来ているといえる。

最近の被害地震の発生や行政が公表する被害想定が契機となり、地震リスクに対する社会的な認識は高まっている。今後10年間で耐震化率を増加させるためには、リ

スク意識を高めると同時に、それを具体的な行動に移すためのさまざまな制度が必要になる。このためには、最初に行政の意識と個々の居住者の意識を分析し、その特性を把握することが重要である。

過去に耐震改修が十分に進んでこなかった理由を、居住者の意識調査結果<sup>1)</sup>から分析した。この調査によると、耐震補強費用に対する資金の不足が耐震補強の推進を妨げていることが分かる。これが、リスクとしての認識があるにも関わらず現実の行動に繋がらない主要因である。また、他の金銭的支出との比較において、その優先順位が低い位置付けになっている。将来に備える幾つかの支出要因のうち、耐震補強の動機になる巨大地震の発生確率は、他の要因の発生確率に比べ分りにくい面があり、支出に備える効果を比較した場合、優先度が低くなっていると考えられる。

今回の耐震改修促進法の改正は、特定建物の耐震化に対して行政側が指導・助言に努め、指導に従わない場合は公表するなどの規定が盛り込まれている。また、これらの規定の強化に合わせて、政府は、耐震改修に対する税の優遇措置などを行い、耐震改修を今後促進することを図っている。

これらの制度変更により耐震改修が促進されることを期待するものであるが、資金的問題に関しては、税の優遇制度のみで解決するのか、その効果は不明である。建物所有者にとっては、耐震補強に資金を投じることが、過大な負担にならないような仕組みをさらに提案していくことが必要と考えられる。

## （2）地震リスクマネジメント制度の分類

リスクの制御を図るリスクマネジメントは、リスクを回避・軽減するリスクコントロール並びに移転・保有するリスクファイナンスに分類される<sup>2)</sup>。地震リスクマネジメントにおいて、リスクコントロールの方法として、耐震性能が高い構造（免震・制震など）の採用、耐震補強の実施などがあり、構造技術以外では、窓ガラス対策・昇降機の安全対策・室内家具の固定などの実施が考えられる。また、リスクファイナンス手段は、地震保険・再保険制度を始めとし、金融工学を適用した金融オプションや証券化の手法を用いたり、金融機関と被災時の融資に関する特別な契約を締結する方法などがある。さらにリスクコントロールとリスクファイナンスを組み合わせた自治体による各種補助金制度・減税制度・TIF(Tax Increment Financing)などが知られている<sup>3)</sup>。

この分類のほかに、既存の地震リスクマネジメント制度に対しては、制度実施の主体として公共と個人（市場原理に基づき行動する主体）という分類が考えられる。

公共による制度として、防災投資・補助金・税金控除・災害見舞金などが挙げられる。市場原理に基づく制度を個人が活用する例として、保険・自己資金による診断・補強・金融機関との提携などが考えられる。また既往の研究<sup>1)</sup>でも、地震リスクマネジメントを公助、共助、自助という観点から分類し、各手法の望ましいあり方について分析している。

地震による被害は、他の災害に比べ、不確実性が大きく、被害額が巨大化し被害地域が集中する傾向がある。その影響は公共財産から私有財産に亘り、被害の危険負担も公共と個人の境界が明確でない一面がある。そのような状況で公共と個人がどのように地震リスクに対処すべきかなど、その役割分担を検討することは、地震リスクマネジメント制度の設計に当たり有用なことといえる。公共の制度と市場原理による制度の組合せ如何により、社会全体の地震リスクの低減の程度は変わると思われる。最適な組合せは、社会の損失を最小化するものであり、その際の費用を考慮した便益評価によって選択されることになる。

### (3) リスクファイナンス技術

地震リスクマネジメントの一つの方法として、リスクを移転・保有するリスクファイナンス手法がある。これは、主に地震後の復旧のための資金を調達する手段として位置付けられている。

その代表的なものが、地震保険である。「住宅・建築物の地震防災推進会議」においても、地震保険の活用推進策を提言している<sup>4)</sup>。しかし、その加入率は、損害保険料率算定機構の調査の結果、平成14年度末で16.39%に留まっている。加入率の増加のため、耐震診断結果に基づく耐震等級割引制度や地震保険料の所得控除制度などが提案されている。しかし、地震リスクは、被害規模が大きいこと、発生時期・頻度の予測が難しいこと、災害が広域になることなどの特性を持つため、民間の力だけでは保険として成立しない面があり、政府の力や再保険などによる更なるリスクの分散が必要になると言われている。経済の仕組みが複雑かつ高度化している今日において、住宅のみならず産業施設に被害が生じると、経済に与える影響はさらに拡大し、保険制度だけでは金額的にも時間的にも満足のいく復旧資金を調達できないことが推測される。

これらの問題を解決するために生まれたものが、金融工学を活用した代替的リスク移転（ART）である。その代表的なものとして、リスクの証券化（キャットボンド）・デリバティブ取引などが挙げられる。金融工学の発達により、契約に基づき機動的に巨額の資金を確保す

ることが可能になってきている。

リスクの証券化とは、地震発生時に事業の復旧継続に必要な資金調達額を設定し、その資金の原資を証券化により多数の投資家から調達する方法である。災害が発生しない場合は債権の元本と利息分を償還し、発生した場合には元本は償還されずに復旧費用として没収される仕組みであり、投資家にとってはハイリスクハイリターンの商品に位置付けられる<sup>2)</sup>。

デリバティブを活用した金融技術として、よく知られている例は、株価や為替のオプション取引、そして最近では天候デリバティブが良く聞かれる。天候デリバティブは、ある将来時点での価格や気温・降水量・積雪量などを指標として、想定した価格や物理値を基準として売側と買側の間で取引契約を結ぶものである。金融工学を駆使することにより、各種のデリバティブ商品の開発が可能になってきている<sup>5)</sup>。

リスクファイナンス技術は、今日のような高度な経済社会においてのみ活用可能なものであり、また開発可能なものといえる。このような技術を、耐震補強という従来からのリスクコントロール技術と組み合わせることにより、新しいリスクマネジメントモデルの構築の可能性があると思われる。

次章では、デリバティブの考え方にに基づき、地震が発生する確率と発生しない確率に着目し、発生した時の費用および損失と発生しない場合の費用（耐震補強費用等）を分析し、リスクを平準化するモデルの一例を提案する。

## 3. 地震リスクファイナンスモデル

### (1) 提案モデルの概要

提案モデルは、リスクコントロールとリスクファイナンスを組合せた地震リスクマネジメント手法に位置付けられる。リスクコントロールとしては耐震補強を実施し、リスクファイナンスとして金融工学の技術の一つであるデリバティブの手法を活用し、両手法を融合している点に特徴がある。デリバティブは金融投資商品の一つであり、その商品の買い手と売り手が存在する。両者の間には契約に基づく状況に応じた権利義務の行使が行われる。デリバティブの買い手はプレミアムを売り手に支払い、金銭の授受に関する契約上の権利を購入する。この仕組みを活用して、耐震補強を必要とする者（通常、建物所有者）はデリバティブの売り手になり、買い手からプレミアムを受け取る。そして、建物所有者はこのプレミアムを耐震補強費用に充当する点が、提案モデルの大きな特徴である。

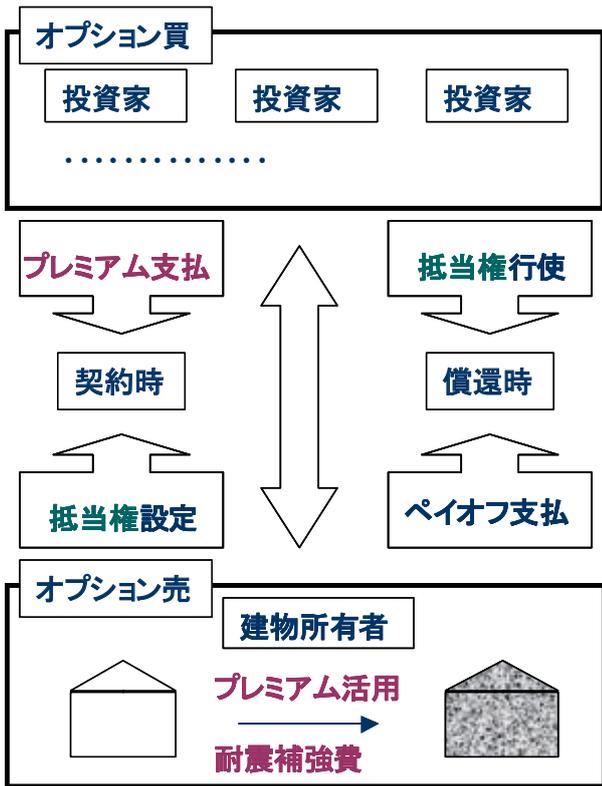


図-1 提案モデルの概念

図-1に提案モデルの概念を示す。図の上枠はオプションの買い手になる投資家を示し、下枠はオプションの売り手になる建物所有者を示している。この両者の間で、契約時に投資家から建物所有者へのプレミアムの支払いおよび建物所有者は将来のペイオフに対する担保として耐震補強の対象になる建物に対して抵当権を設定する。プレミアムを受け取った建物所有者は、それを利用して耐震補強工事を行うことができる。

ペイオフとは、図-2に示すような、オプションの買い手と売り手間の将来の支払額に対する契約上のルールを表す(破線)。本図の例は、横軸にハザード指標を縦軸に売り手の支払額(ペイオフ)を表すものである。ハザード指標として地震規模を表すマグニチュードを用いた場合には、契約に基づく特定期間内の特定地域に発生した地震のマグニチュードの大きさに応じて、売り手から買い手に支払われる額を示すことになる。買い手は、売り手にプレミアムを支払うことによりペイオフを受け取る権利を得ることができる。プレミアムは、売り手および買い手の期待値が中立になるように設定されるため、プレミアムを考慮したペイオフは実線のようになる。

契約期間内に契約に基づく地震が発生した場合、建物所有者は投資家に対しペイオフの支払義務が生じる。この場合、建物所有者が支払い困難な状況にある場合には、抵当権を行使してペイオフ相当額を受け取るようになる。

## ペイオフ

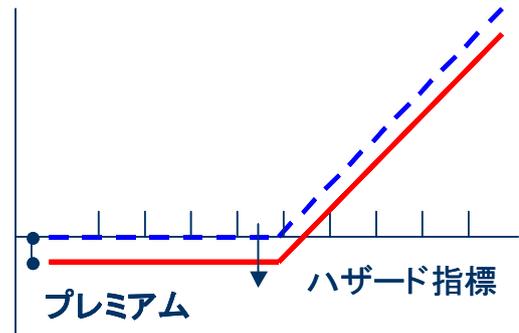


図-2 ペイオフ曲線

この仕組みは、通常建物所有者が負担する耐震補強費を投資家に転嫁することを意図したものである。ここでデリバティブを適用することにより、ペイオフのルールに基づき、建物所有者は小規模な地震が発生した場合には耐震補強費の全部または一部を投資家に転嫁することができ、逆に大規模な地震が発生した場合には、プレミアム(耐震補強費用の全部または一部)よりも高いペイオフの支払義務が生じることになる。建物の立地条件による地震リスクを確率的に扱い、デリバティブを適用して、建物所有者が保有する耐震補強の投資リスクを軽減することが可能になる。ペイオフのルールは、建物の立地や補強性能などの諸条件によって変わるため、建物ごとに設計することになる。

## (2) 設計手順

提案モデルを設計・活用するに当たり、建物ごとに地震リスクや耐震補強に関する特性を把握する必要がある。ここでは、提案モデル実現のために必要になる分析検討項目と手法を手順に沿って示す。図-3に設計の流れを表す設計手順を示す。

### ①耐震補強対象建物の特定

提案モデルを適用する建物の立地、建築年、構造、用途、所有者、権利関係等を特定する。

### ②地震ハザードの特定

立地条件に基づき、当該建物の地震リスクを評価する。地震ハザードは、一般に震度、地表面速度、地表面加速度、マグニチュードなどを確率的に表現することによって示される。提案モデルにおける地震ハザードは、建物の被害率の算定のみならずペイオフの指標として重要な意味を持つ。特にペイオフの支払条件に直接影響を与えるため、できる限り客観性が高く把握しやすい指標にする必要がある。ここでは、一定の地域内に発生する地震のマグニチュードをペイオフの指標とする。

図-4に評価方法を示す。立地点(対象建物)を中心に一定の範囲を定め、その範囲に含まれる各地震活動域の

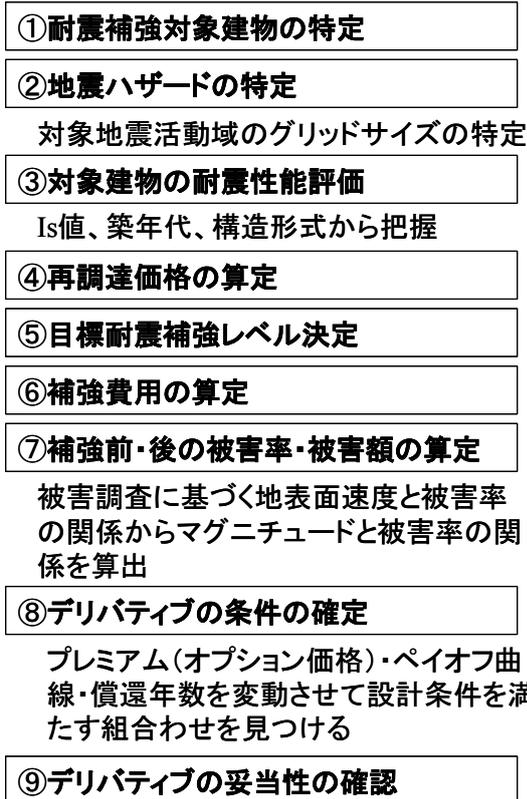


図-3 提案モデル設計手順

諸元に基づきマグニチュードごとの発生頻度分布を求め、その結果から当該範囲内のマグニチュードと年発生確率を求める方法である<sup>6)</sup>。立地点を中心とした範囲の大きさは任意であるが、各活動域が対象建物の地震被害に与える影響を考慮して設定する必要がある。

### ③対象建物の耐震性能評価

既存建物の耐震性能は、一般に財団法人日本建築防災協会出版の耐震診断基準によって評価される。耐震補強をするためには、まず耐震診断を行い、その結果に基づいて耐震補強の設計を行う。診断の結果、「要補強」と判定された建物が、提案モデル適用の対象候補となる。耐震性能は、先の耐震診断基準に基づき、構造耐震指標(Is値)で評価されることが多い。Is値は、想定される地震に対して必要な耐力・エネルギー吸収量に対する現建物の耐力・エネルギー吸収量の比を表すものである。この数値が、0.6以上であれば、倒壊または崩壊する危険性が低いと判断されるが、それ以下の場合、それらの危険性が高いと判断される。Is値が0.6以下の建物は、0.6以上になるように何らかの補強をすることになる。

### ④再調達価格の算定

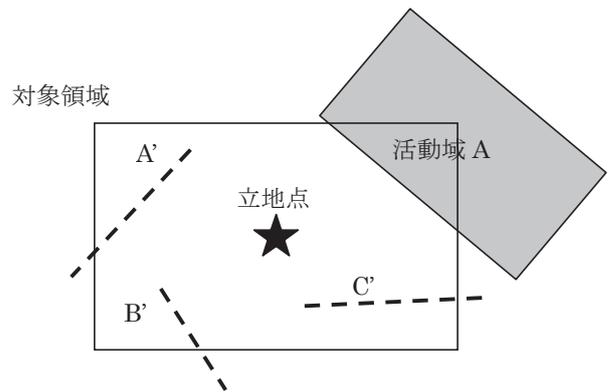


図-4 地震ハザード評価方法

再調達価格とは、同じ効用の建物を建設しようとした場合に要する費用の総額をいう。再調達価格の求め方は、要求される精度に応じて種々あるが、最も正確な方法は、対象建物の見積書から算定する方法である。見積書がない場合は、再度見積もりを取るか、一般的な同規模の建物から類推して算出する。地震リスク評価を行う場合の再調達価格は、被害レベルを個別に把握できる部位別(躯体・設備・内装・外装・基礎など)に分けて考える方法がある。それぞれに要する費用を算出して、総和を取ることにより再調達価格を求める。

### ⑤目標耐震補強レベルの決定

③で述べたように、Is値が0.6以下の建物は補強のレベルを検討する必要がある。耐震診断基準によれば、Is=0.6を満足すれば一定の耐震性を有することになるが、所有者の要求に応じて任意の耐震レベルを設定する(性能設計)こともできる。建物の目標とする耐震補強レベルは、必要な耐震性能を設定し、補強費用・使い勝手の変化・施工方法・施工期間などを考慮して決定される。

### ⑥補強費用の算定

⑤の目標耐震補強レベルを満足するための補強費用を算定する。この費用を基準として提案モデルのプレミアムを設計する。

### ⑦補強前後の被害率・被害額の算定

建物の被害率は、過去の震害調査結果から、築年、構造形式、階数などに基づき算定される。被害率は、一般的に地表面加速度や速度との関係で示されているが、提案モデルでは、②に示したように地震ハザードとしてマグニチュードを用いているため、設定域内のマグニチュードと被害率の関係を求める必要がある。

このためには、各地震活動域で発生する地震のマグニチュードと対象構造物立地点での地表面加速度(または速度)の関係を、既往の距離減衰式から推定し、各マグ

ニチュードごと（例えば 0.1 ごと）に、対象領域内のすべての地震活動域を考慮した対象構造物立地点での地表面加速度（または速度）の確率分布を特定する必要がある。前述のとおり地表面加速度（または速度）と被害率は震害調査結果から関連付けることができることから、この確率分布を利用して対象領域内のマグニチュードと被害率の関係を把握することが可能になる。被害額は、各部位の再調達価格に各被害率を乗じて計算する。

被害率は、補強前後の耐震性能のレベルに基づき算定し、被害額に換算した場合の差額を把握しておく。

⑧デリバティブの条件の確定

⑦までの情報に基づき、必要な耐震補強費用をプレミアムで賄うことを前提に、補強前後の被害額の差額の幅を考慮して、ペイオフの関係（図-2のペイオフ曲線の形状）、償還年数を変動させ設計条件を満たす組合せを確定する。

⑨デリバティブの妥当性の確認

デリバティブは金融商品の一つであり、売り手と買い手が存在して初めて成立するものである。上記の設計手順は、売り手である建物所有者の立場で説明したものである。金融商品として成立するためには、買い手の立場から、他の投資対象や金融商品と比較して一定の妥当性を有することを確認する必要がある。

4. パラメトリックスタディ

提案モデルの設計に影響を与えると考えられる種々のパラメータについて、その特性を分析した。建物固有のパラメータとして、立地点、被害率、被害額があり、提案モデル固有のパラメータとして、地震発生対象領域、ペイオフ曲線の形状、償還期間がある。ここでは、提案モデル固有のパラメータについて検討した。パラメトリックスタディを行うに当たり、変動因子以外の条件は、以下のものを標準として扱っている。

- i 立地点：立地K（東京都内）
- ii 地震発生対象領域：100km 四方
- iii 補強前建物（被害額，被害率）
  - 構造耐震指標（ $I_s=0.2$  レベル）
  - 被害率曲線は文献7)による
  - 被害レベルと被害額の関係は地震保険の評価に準拠する
- iv 補強後建物
  - 構造耐震指標（ $I_s=0.6$  レベル）
  - 被害率曲線は文献7)による
  - 被害レベルと被害額の関係は地震保険の評価に準拠する

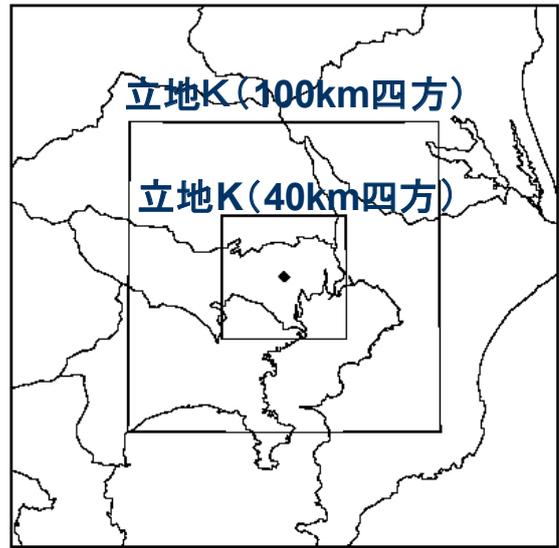


図-5 地震発生対象領域

v 償還年数（10年）

vi ペイオフ曲線

図-2の形状を仮定

トリガーマグニチュード 5

勾配 0.08（単位マグニチュード当たりの被害額（再調達価格比換算）の割合）

(1) 地震発生対象領域

提案モデル固有の項目として、ペイオフの契約の対象になる震源が存在する領域（地震発生対象領域）がある。文献6)に、この領域の大きさ（文献6)の表現では、「グリッド」）はリスク移転の妥当性に影響を与えることが示されている。ここでは、図-5に示すように立地点Kに対する地震発生対象領域を100km 四方と40km 四方と想定した場合、発生確率がどのように変化するかという観点で比較している。

図-6に解析結果を示す。この結果、領域が大きくなると対象となる活動域が多くなるため、発生マグニチュードに対する年超過確率は大きくなるのがわかる。ただし、立地点から離れた活動域が含まれるため、距離減衰により立地点での加速度（または速度）は小さくなる傾向も有する。

図-7に100km 四方と40km 四方の場合を比較した結果を示す。両者のプレミアムは、それぞれ0.049、0.010である。100km 四方のほうが、対象領域が大きいため同じマグニチュードが発生する確率は大きくなる。その結果、プレミアムは狭い範囲を対象にした場合よりも大きくなる。被害額を比較すると、100km 四方のほうが被害額は大きくなっている。本スタディの場合、対象領域を拡大した結果、大規模地震の原因となる活動域が含まれ被害額が増加したと考えられる。

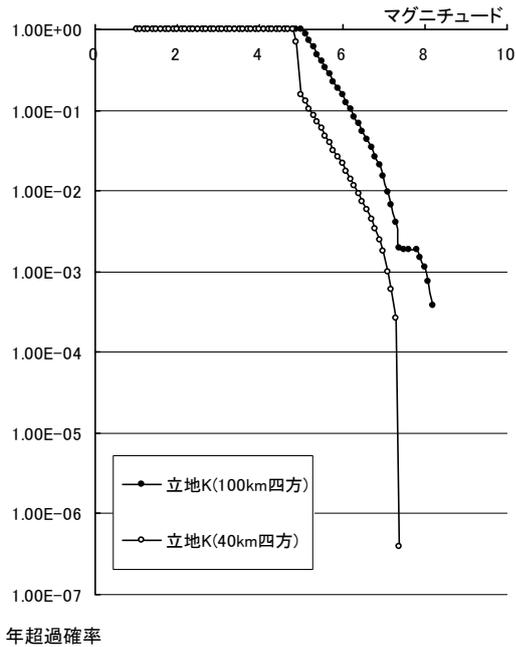


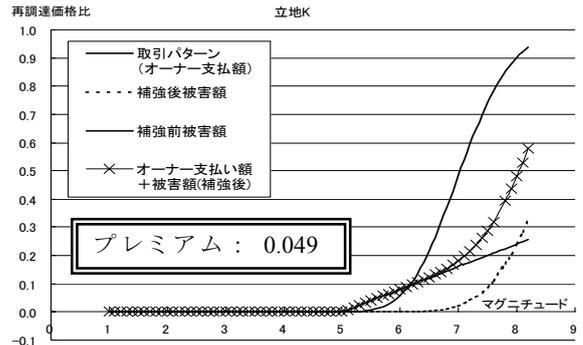
図-6 地震発生確率

また、両ケースとも、補強前の被害額と比較した場合、マグニチュード5～6の範囲で提案モデルを適用した場合（×マーク）の支出が大きくなっており、この部分で妥当性に欠ける部分がある。ただし、ペイオフ曲線は任意に設定可能であるため、ペイオフ曲線を変動させることにより妥当な条件を満足することは可能といえる。

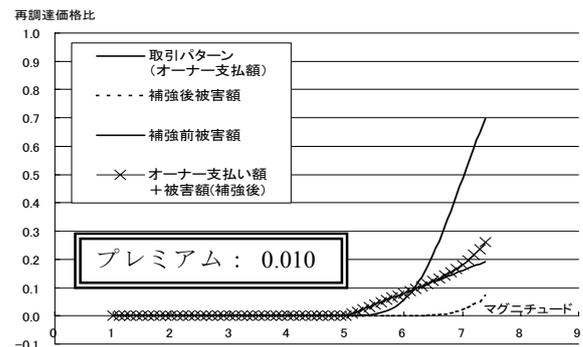
(2) ペイオフ曲線

ペイオフ曲線とは、デリバティブの売り手と買い手の間で結ぶ支払条件に関する契約を図化したものである。提案モデルの場合、図-8に示すように横軸をマグニチュード、縦軸を支払金額（対象建物の再調達価格比）で表しており、発生マグニチュードに応じて支払い金額が変わる条件としている。このペイオフ曲線はデリバティブを考えるうえで各種のものが考えられるが、ここでは、トリガーマグニチュード（以下、TMと表す）を境界値として、それ以下の場合には買い手の投資金額は没収され、それ以上の場合には、償還金を得る場合に限定して説明する。ここでは、簡単のためペイオフ曲線の形状は、直線を仮定する。

図-8では、ペイオフ曲線を特定する2つのパラメータ（トリガーマグニチュード、勾配）を定義している。TMは、先に述べたように、投資金額を没収される場合と償還を受ける場合の境界値を表すマグニチュードである。図-8の例では、TMが4.0と5.0の場合を示している。契約期間中に発生した最大規模マグニチュードがTM以下の場合に投資金額は没収される。



a) 100km 四方



b) 40km 四方

図-7 建物所有者の支出の比較  
(地震発生対象領域の違い)

トリガーマグニチュードの違い

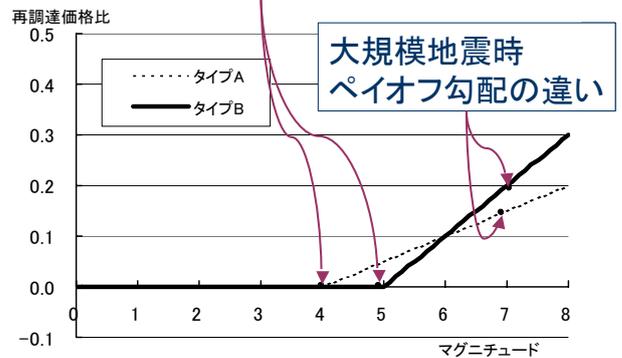
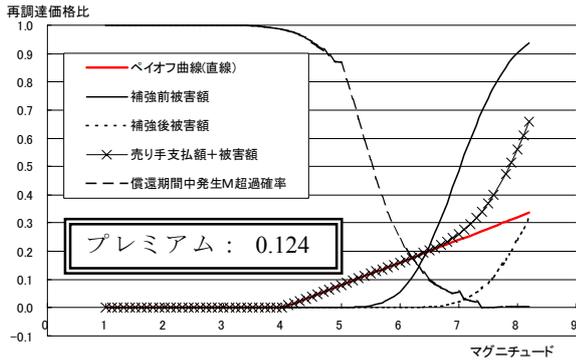


図-8 ペイオフ曲線

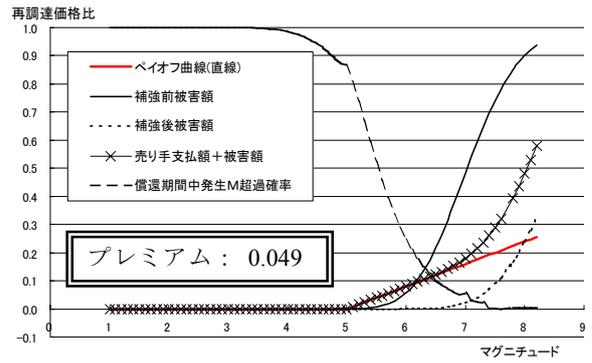
勾配とは、TM以上の地震が発生した場合の規模に応じた償還額を決定付けるペイオフ曲線の傾きを表す。

図-8の例では、勾配が急なタイプBは、緩やかなタイプAに対して地震規模の増加に対して支払額の増加割合が大きくなる。

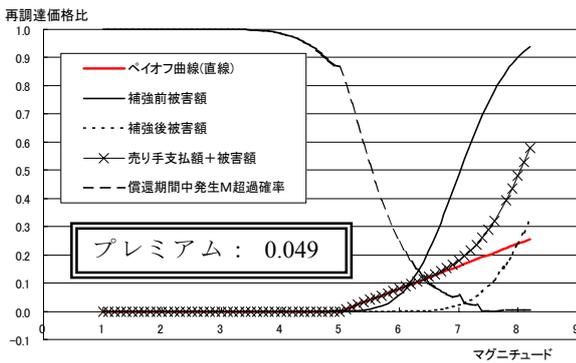
ペイオフ曲線は、売り手と買い手の期待値を一致させるように定義される。横軸を発生マグニチュードにした場合、マグニチュードが大きくなるに従い発生確率が小さくなるという特性を考慮して決定される。プレミアム



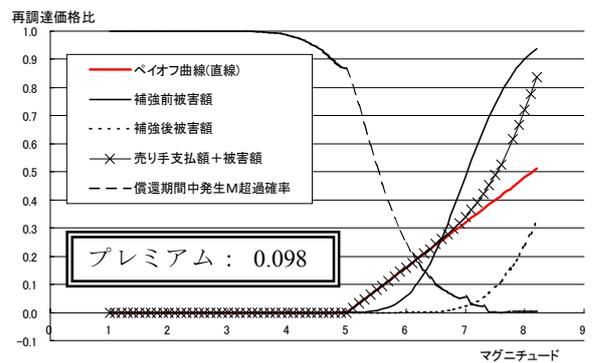
a) トリガーマグニチュード 4.0



a) 勾配 (0.08)



b) トリガーマグニチュード 5.0



b) 勾配 2倍 (0.16)

図-9 建物所有者の支出の比較

(ベイオフ曲線トリガーマグニチュードの違い)

図-10 建物所有者の支出の比較

(ベイオフ曲線勾配の違い)

を一定とした場合、TMが大きくなるほど、ペイオフの勾配は大きくなる傾向を持つ。また、TMを小さくし、勾配を上げると高いプレミアムを設定することが可能になる。この特性に基づき、必要な耐震補強費用を得るためのプレミアムを決定し、TM、勾配を変化させて適切なペイオフ曲線を設計し、提案モデルに基づくデリバティブ金融商品が開発されることになる。

図-9にTM4.0と5.0の場合の建物所有者の支出の比較を示す。この場合のそれぞれのプレミアムは、0.124と0.049である。TMが小さいほうが、建物所有者がペイオフを支払う可能性が高いため、それを受け取る投資家の支払うプレミアムも大きくなる。建物所有者は受け取ったプレミアムを耐震補強費用として用いるのが提案モデルの特徴である。TMを小さくすれば、地震発生時の支払は大きくなるが、より高額な耐震補強費用を得ることができることが分かる。

図-10にペイオフ曲線の勾配を変化させた場合の建物所有者の支出の比較を示す。勾配は、b)はa)の2倍にしている。この場合のプレミアムはそれぞれ0.049と0.098であり、勾配の比率と比例してプレミアムも増加する。

ペイオフ曲線のTMと勾配は、プレミアムと補強前の被害額との関係に大きく影響を与える。TMを小さくし、勾配を大きくすれば、プレミアムは大きくなり、より多くの耐震補強費用を期待することができるが、逆にTM以上の地震が発生した場合には、より多くのペイオフの支払が生じることになる。プレミアムと耐震補強による被害の低減割合およびペイオフを勘案しながら提案モデルを設計する必要がある。

### (3) 償還期間

提案モデルのハザード指標は、一定期間内に一定範囲の場所で発生する最大マグニチュードを用いている。償還期間とは、契約上の一定の期間であり、その期間に発生する最大マグニチュードからペイオフ曲線に基づく権利行使が行われる。図-11に償還期間と最大マグニチュードの関係を模式的に示す。ここでは、例として10、20、30年の償還期間を設定し、最初の10年間は地震が発生せず、10年～20年目の間にマグニチュード5が発生し、20年目～30年目の間にマグニチュード7が発生した場合を仮定する。この場合、償還期間10年の場合、地震が発生していないので、図中のペイオフ曲線のマグニチ

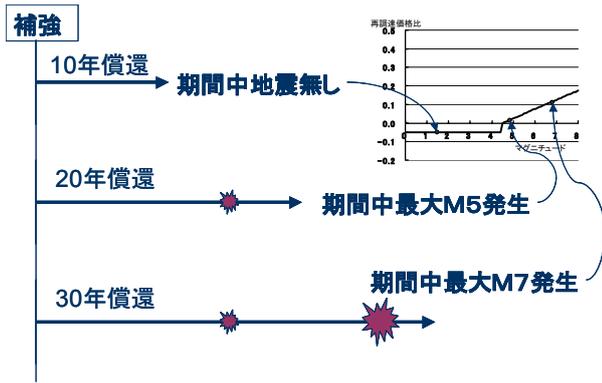


図 -11 償還期間とペイオフの関係

ュード0の場合の支払額の償還になる。すなわち、その場合は投資額が没収されることを意味する。また、償還期間が20年の場合、マグニチュード5が最大マグニチュードになるため、ペイオフ曲線のマグニチュード5の支払額（再調達価格の0.01）が償還されることになる。また、償還期間が30年の場合、マグニチュード7が最大マグニチュードになるため、ペイオフ曲線のマグニチュード7の支払額（再調達価格の0.1）が償還されることになる。なお、本例では、各償還期間に対して同じペイオフ曲線を用いて説明しているが、実際にはペイオフ曲線も変動する点に留意する必要がある。

一般的に償還期間が長くなるほど、より大規模な地震が発生する可能性は高まるため、プレミアムは大きくなる傾向を示す。

## 5. 考察

地震リスクマネジメントの手法として、リスクコントロールの一手法である耐震補強を、デリバティブ金融商品を用いたリスクファイナンスによる資金調達で推進するモデルを提案した。提案モデルの構造と影響因子について分析し活用の可能性を検討した。提案モデルによるデリバティブ金融商品は、種々のパラメータの設定により、売り手（建物所有者）は必要な耐震補強費用を買い手（投資家）からプレミアムとして受け取ることができるが、一般的な傾向として、地震リスクが高く耐震性が低い建物、すなわち耐震補強を必要とする建物に対して設計するほど、より大きな耐震補強費用を調達することが可能になる。

より多額の補強費用を必要とする建物所有者は、耐震補強を実施しなかった場合、地震発生時には多額の被害に直面するリスクを保有し、一方、耐震補強を自ら実施した時、地震が発生しなかった場合、耐震補強費用が無駄になるという投資リスクに直面することになる。これ

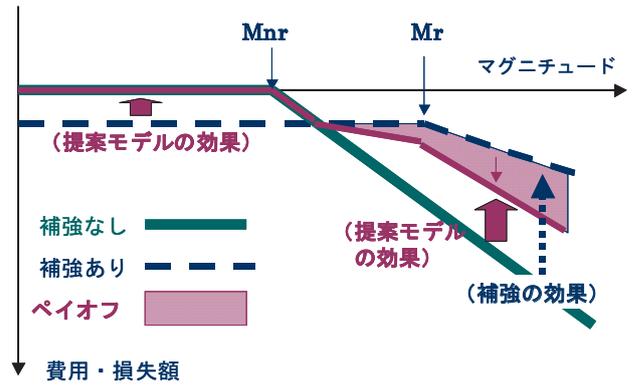


図 -12 費用対便益の平準化の概念

らのリスクに対して本デリバティブ金融商品を活用することにより平準化することが可能になる点が、提案モデルの効果（費用対便益）の本質といえる。図-12に提案モデルによる費用対効果の平準化の概念を示す。縦軸は、建物所有者の効果を表し、マイナス側は、損失（負の効果）を意味する。横軸はマグニチュードで、地震規模を表す。図中の実線は、無補強の場合、破線は補強した場合の被害関数を模式的に示したものである。無補強の場合は、マグニチュード  $M_{nr}$  以上になると被害が増加する。補強した場合は、マグニチュード  $M_r$  以上になると被害が増加することを表す（ $M_{nr} < M_r$ ）。それぞれ、 $M_{nr}$ 、 $M_r$  以下の場合、無補強の時、損失は0であるが、補強している場合は、補強費用分が損失となる。比較的規模の大きい地震が発生した場合は、耐震補強が有効に機能して、図中右側にあるように被害の減少分が補強の効果として認識される。ただし、提案モデルを適用した場合、契約に基づく支払（ペイオフ）が生じるため、被害減少分とペイオフの差額が実質の損失低減分になる。また、小規模の地震しか発生していない場合は、提案モデルの活用により、補強費用の自己負担が投資家に転嫁されるため、提案モデルの効果が認識されることになる。このように、提案モデルを活用することにより、マグニチュードの大きさによる損失額の変動を抑制してリスクを平準化できることが分かる。

## 6. まとめ

本論の検討の結果を以下に示す。

- ①工学的技術を普及させるために、その工学的知識を社会科学分野に活用する必要性を示した。その例として、耐震補強技術を普及するための資金調達手段を目的とするデリバティブを提案した。
- ②提案モデルの特性・設計法の妥当性をパラメトリックスタディにより明らかにした。

③提案モデルが、耐震補強が必要な建物所有者の有する地震リスクを平準化する機能を有することを示した。

我々は、サステナブルな都市システムの構築を目指し、地震に強い都市にするために検討すべきこととして、1981年に建築基準法に定められた耐震設計基準（新耐震設計基準）を満足しない既存不適格建物に対する補強の推進の重要性に着目した。2005年に国土交通省の下で、住宅・建築物の地震防災推進会議が設置され、建物の耐震化促進のための提言がなされ、2006年6月に住宅の量的拡大から安全性や品質の向上に重点を置いた政策の推進のために住生活基本法が公布・施行された。同法に基づき「良質な住宅ストックの形成および将来世代への承継」を目標とした「住宅の品質または性能の維持および向上」のための具体的な施策として、平成27年度までに新耐震設計基準適合率を75%から90%にする目標を挙げている。このような行政的な背景からも、耐震補強を従来以上に推進するための制度開発の社会的意義は大きいと認識し、本ファイナンスモデルの研究を進めた。

研究内容は、耐震補強推進の阻害要因を、地震リスクの不確実性に伴う資金調達の手機減退と捉え、資金調達手段として金融工学を適用したリスクファイナンス手法の開発に主眼を置いた。本手法のポイントは、建物所有者がデリバティブを投資家に売却し、その際に投資家から受け取るプレミアムを耐震補強費として利用できる点である。本手法を、個別建物を対象とし、バックグラウンド地震を想定した場合に適用し、提案モデルの特性を検証した。

提案モデルは、耐震補強に必要な額に相当するプレミアムを設定した場合、耐震補強をしない場合の被害額が、耐震補強済の場合の被害額とデリバティブのペイオフを加えた額を下回るという条件下で成立する。検証の結果、この条件は、建物の立地や耐震性という個別の要因の下、デリバティブを設計する際の契約上のペイオフ曲線の形状を調整することによって満足されることが分かった。

本論では、工学的技術の活用を拡大させるための社会科学分野との融合の試みとして、構造工学に基づく耐震補強技術を普及させるための金融工学に基づく資産調達手段の適用の可能性について示した。さらに詳細な検討および異なる適用例は、文献8)に示されている。また、地震リスクに適応するマネジメントとして、異種の技術を組み合わせることによって新しい付加価値を生むことが分かった。地震のように発生確率は低い、その損害が甚大であるリスクに対しては、個々のマネジメン

トのみでは限界がある。複数の地震リスクマネジメント制度を組み合わせ、社会全体として対応していく必要がある。なお、紙数の関係で地震リスクマネジメント制度の分類・比較については十分に示すことができなかったが、これらについては文献8)を参照して頂きたい。

**謝辞：**本研究は、東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センターにおいて平成17年4月から平成19年3月まで開催された「サステナブル都市システム研究委員会 防災ワーキング」での活動の成果をまとめたものである。本ワーキングにおいて、貴重なご指導・ご意見を頂きました東京大学生産技術研究所の目黒公郎教授および吉村美保助手、地震発生頻度データをご提供頂いた東電設計株式会社の福島誠一郎様、提案モデルの改良に向けて議論を深めることができた本ワーキングの委員の皆様へ感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 吉村美保：脆弱建物の耐震化対策へのインセンティブ導入方法に関する研究，東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター（ICUS），2005.9
- 2) 多々納裕一／高木朗義編著：防災の経済学，勁草書房，pp.6-11,2005
- 3) 新井伸夫，矢代晴美，福島誠一郎：都市の防災・復興における市場原理を活用した資金調達の提案，総合論文誌「災害からの復興と防災フロンティア」，日本建築学会，第2号，pp.100-105,2004.2
- 4) 「住宅・建築物の地震防災推進会議」提言の概要 [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070610\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/07/070610_.html)
- 5) 刈家武昭，小暮厚之：金融工学入門，東洋経済新報社，p104,2002
- 6) 福島誠一郎，矢代晴美：地震リスクの証券化における条件設定に関する解析，日本建築学会計画系論文集，第555号，pp.295-302,2002.5
- 7) 林康裕：耐震診断結果を利用した地震リスク表示の試み，シンポジウム「耐震診断・耐震補強の現状と今後の課題」，pp.37-42，建築学会関東支部，2000
- 8) サステナブル都市システム研究委員会（RC39）防災WG 平成18年度報告書，東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター（ICUS），2007.3