

存続可能性を制約条件とした自然災害保険システムの設計方法に関する研究*

Designing Natural Catastrophic Insurance Schemes under Constraints of Insurers' Sustainability*

グエン フク ディン**・多々納 裕一***・岡田 憲夫****

By Nguyen Phuc Dinh**・Hirokazu TATANO***・Norio OKADA****

1. はじめに

地震等の自然災害は、その発生頻度は小さいが、一度それが発生した場合の被害は甚大なものとなる。この種の自然災害が発生した後、復興・復旧のための資金が十分に確保されないと、経済成長経路の下方シフトが生じ、永続的な影響（レベル効果）として残留することとなる。このような2次的経済的被害を軽減し、災害後の復興を円滑に進めるためには自然災害に対する金銭的な備えを事前に講じておくことが大変重要である。

大数の法則が成立するような特徴を持つリスクに関しては、保険数理的にフェアな保険料（損害の期待値と等しい保険料率）を徴収し、保険カバー率も100%となる保険がパレート効率的となる。さらに、自由参入、完全情報等の条件が成り立つ完全競争下の経済においては保険市場の均衡によりこのような保険が自発的に供給されることになる。しかしながら、自然災害、とりわけ地震のような災害では、被害が集散的に発生するため、大数の法則の成立の条件である事象発生の独立性が本質的に侵されている。このため、保険数理的にフェアな保険料率を採用した保険では、大地震のような大規模災害を引き金に同時に生じる巨額の被害に対して、保険金が満額支払われなくなる可能性が十分にあり、保険システムそのものが持続可能ではなくなる。したがって、地震保険の提供に際しては伝統的な保険学の理論を単純に適用することは適切ではない。さらに、地震保険には保険学で伝統的に取り扱われてきた問題、たとえば、逆選抜やモラルハザードなどの問題にいかに対処するかという問題も重要な課題として残されている。

小林・横松はこの種のリスクを2段階のくじとして表現し、そのリスクファイナンスの方法を理論的に検討している¹⁾。しかしながら、現実には保険システムの持

続可能性を考慮した保険構造（料率とカバー率の組み合わせ）を求めるための具体的な方法論に関しては検討されていない。

一方、シミュレーション技術の発達によって、想定地震を与えた場合の地震被害予測の精度は高まってきている。また、震源の活動間隔や規模に関する調査研究も蓄積されてきており、地震シナリオの生起確率についても研究が進められている²⁾。このような状況下で、個々の地域の地震リスクの評価が可能となりつつある。また、シミュレーション技術の発展によりそれを用いたリスク評価を行うことにより、そこから得られる知見を適切に反映した保険構造の設計が可能となる。実際の地域を対象として検討することは実際上極めて重要であると考えられる。また、逆選抜の問題をできるだけ回避するためには地域ごと、対象ごとに保険料率はきめ細かに検討されなければならない。しかしながら、この種の問題は、多数の次元を持つ制御変数を有する確率制約を有する計画問題となり、実際のシステムを対象として問題の解を求めることは容易ではない。

本研究では、自治体により公的な地震保険が提供されている状況を想定し、地域ごとに異なる地震リスクに応じた保険料率およびカバー率を求める問題を対象として検討を加える。具体的には、保険システムの存続可能性を制約条件とする社会的厚生最大化問題として公的保険構造の設計問題を定式化する。次いで、地震被害シミュレーションとこの数理計画モデルとを結合したハイブリッド設計モデルを構成する。さらに、そのモデル解法として確率重勾配法³⁾を用いることを提案し、実際に兵庫県を対象とした実証分析を通じてその有効性を検証する。以下、2. では本研究の基本的な考え方を述べ、3. で保険構造のモデル化を示し、4. でハイブリッドアプローチによる解法モデルを提唱し、5. で対象地域に実証分析を行い、最後に6. において分析結果と今後の課題を述べる。

2. 本研究の考え方

(1) 保険市場の問題点

自然災害ではよく見られる強い集中性(時間、場所)や

*キーワード：防災計画、計画手法論、災害リスクファイナンス

** 学生員、工修、京都大学大学院工学研究科

(〒606-8317 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5070)

*** 正員、工博、京都大学 防災研究所

(〒611-0011 宇治市五ヶ庄、TEL: 0774-38-4308)

**** 正員、工博、京都大学 防災研究所

(〒611-0011 宇治市五ヶ庄、TEL: 0774-38-4038)

連鎖性（地震によって生じる火災など）によってリスクの独立性が本質的に侵され、損失の発生に強い相関性が見出されることが少なくない。この種の保険を提供することは、保険会社としては経営が破綻するリスクを負うことになる。このため、自然災害は戦争などと並んで損害保険の免責条項とされる場合も少なくなかった。

また、自然災害はその生起頻度自体が少ないため、保険料率の設定の基礎となるリスク評価のためのデータが極端に少ないという問題もあり、市場を通じた効率的な保険の供給は困難であるとみなされていた。しかしながら、実際には、伝統的な保険市場においても、災害リスクを保険でカバーするための仕組みが機能してきた。元受け保険会社が引き受けたリスクを、再保険会社が空間的に分散化することによって、低頻度で大規模な被害が補償されてきたのである。

人類のすべてが同時に被害を被るようなカストロフを想定するならそれでも困難であるが、多くの災害は少なくとも空間的には限定された広がりの中で発生する。多くの災害は、一つの国や地域内に被害がとどまるのである。このため、再保険市場を通じて特定の国や地域のリスクを世界中の国々に分散化すれば、理論上は災害リスクに関しても十分な補償を提供しうる効率的な保険システムが成立しうる。

1980年代までは、概ねこのようなシステムによって災害のリスクのファイナンスが行われてきた。しかしながら、1990年代に入って、高額な補償を必要とする災害の頻発によって、いくつもの保険会社や再保険会社が破綻し、再保険料も大幅な上昇を見せた。

また、再保険が利用可能な災害の規模は意外と小さい。Froot⁷⁾によれば、1つの再保険プログラムで補償される最大の保険金額は概ね5億ドル程度である。また、Dohtyらの研究⁸⁾によると、元受保険業界が支払う保険金総額が150-200億ドルを上回る自然災害に対する再保険市場は存在しないと報告されている。このような状況から、大きな災害のカバーのために再保険を利用することがあまり容易ではないことが窺える。このことから、再保険需要が増加したというよりはむしろ、これらの損失の補填のために再保険市場に資金不足が生じ、かつ、リスクプレミアムが上方修正されたために供給の減少が生じたためであると考えられている。

このような1990年代の再保険料の高騰が契機となって、伝統的な再保険のみに依存することなく、災害リスクを分散化するための仕組みとして、災害保険の証券化等の代替的手段が検討され、実際に市場で取り引きされるようになってきた。

しかしながら、災害証券など代替的リスク移転手段の市場規模はそれほど大きくない。Swiss Re. の推計によれば、概ね99年における災害証券の残高は25億ドルと再保

険市場に代替するほどの規模には成長していない。

（2）日本における災害リスクのファイナンス

保険料率の算定は、過去467年間(1498年から1964年まで)に起こった主要な320地震を対象として、その際の被害を再現し、被害率の期待値を求めて純保険料が算定されている²⁾。この際、地域によるリスクの違いは4段階に分類され、保険料率の差も平準化されている。このような料率導入のねらいは、日本に居住する家計がほぼ同等の保険料率を支払うことで地震保険の普及を促進するねらいがあった。しかしながら、このような保険料の平準化は、よりリスクの低い世帯から、よりリスクの高い世帯に所得移転をすることに他ならず、リスクの低い世帯が保険に加入する動機を削ぐ逆選抜を起こさせる可能性がある。このことは地震災害リスクの認知の問題ともあいまって、地震保険の普及を阻害する要因となっていたとも指摘できる。

阪神大震災は、死者数が6000人を上回り、被害額も10兆円と推定される巨大な被害をもたらした。しかしながら、地震保険からの支払額は780億円にとどまっている。地震保険とは異なるが、JA共済が提供する建物更生共済からの支払額が1092億円あり、合わせて1800億円強程度の補償があったが、全体の被害額に比べると十分な補償がなされたとは言えない。これは、阪神大震災の時点における地震保険の付保率（地震保険を購入している世帯数÷全世帯数）が全国で7%、兵庫県では3%とわずかな世帯しか付保していなかったことによるものである。現在は、12.6%（1996年6月現在）の世帯が地震リスクに対して保険を保有しているが、その普及率はまだ十分とは言えない。この結果から見て、逆選抜の現象が生じていた可能性を否定できない。

（3）本研究における問題意識

現在特に日本で求められているようなリスク細分型の料率設定等に用いるのには課題も少なくない。日本における地震のリスクは高く、保険料率は比較的低い。にもかかわらず、保険が普及せず損失の少なからぬ部分を被災者がみずから抱えなければならない事態を放置すれば、大規模災害後の復興は極めて困難なものとなろう。このような事態を防ぐためにも、より効率的な保険システムの導入が不可欠であると考えられる。このためには、逆選抜の問題を軽減し、個人々が自身で負うリスクの程度に応じた保険料率の設定が必要であろう。このためには、シミュレーション技術の利用は不可欠である。

近年、シミュレーション技術の発達に伴って、自然災害によって生じる被害の予測が比較的高い精度で可能となり、自然災害のリスク評価が可能となってきた。大規模な自然災害は希少現象であり、生起頻度は少ない。このことはリスク評価に際して、統計分析を用いる際にデ

ータ不足をもたらしていた。シミュレーション技法の発達は希有な現象を計算機上で模擬実験することでこのデータ不足の問題に一定の解決をもたらしたのである。近年は、シミュレーションによるリスク評価を専門とする企業も登場し、この種のサービスが市場を通じて提供されるようになり、自然災害リスクのファイナンスが可能とする技術的な基盤が提供されるようになってきたのである。

このように自然災害のシミュレーションは、リスク評価や政策分析に広範に用いられている。しかしながら、保険料率を細分化し、保険料率やカバー率を効率的な水準に定めるためには、克服すべき課題が存在する。たとえば、日本で現在利用されている地震被害を再現するシミュレーションの多くは、震源のタイプや位置、地震の規模等の条件を入力した上で、地震動の強度やゆれの大きさ等を再現し、建物やライフラインの損傷程度、人的被害等を予測するものがほとんどである。このため、ある地域の地震リスクを評価するために、リスクカーブを求めようとするだけで大変な作業と計算が必要となる、つまり、想定しうる地震シナリオを多数用意し、それらに対して一つ一つシミュレーションを行った上で初めて被害の確率分布が求まり、リスクカーブが描けることになる。

また、カバー率や保険料率等の保険構造を詳細にある程度狭い面積を持った地域ごとに設定しようとする、保険構造の代替案自体多数の次元を持つことになる。このため、多数の地震シナリオを考慮し、かつ、多数の代替案の中から望ましい案を選択することが必要となる。これは現代の計算機をもってしてもそれほど容易なことではない。そして、このような計算を可能とするような計算技術が求められている。

Y.M. Ermoliev他³⁹⁾は、確率歪勾配法 (Stochastic sub-gradient Method) を開発し、地震や洪水のシミュレーションと組み合わせることで、自然災害リスクに対する保険の設計を可能とする方法を開発した。これらの研究は上述の計算技術上の問題点を克服する可能性を与えるものである。しかしながら、彼らの研究では保険カバー率を代替案とし、災害準備基金を最大となるような代替案が求められていたり、保険システムの存続可能性の分析に主眼が置かれていたり、本研究で問題とするような社会的な厚生問題を議論していない。更に、保険の供給可能性を左右する再保険の考慮もなされていない。

そこで、本研究では現実の地域の地震リスクを対象として、保険そのものの存続可能性を制約条件として考慮した上で社会的厚生を最大化するような保険構造を求めるための方法論を提示し、実際に兵庫県を対象とした実証分析を通じてその有効性を検証することを目的とする。この際、数値計算方法としては Ermolievら³⁹⁾と同様に確

率歪勾配法を用いて現実の地域を対象としたシミュレーションモデルを、それを用いたリスク評価を行いながら保険構造の代替案を絞り込むこととする。また、再保険市場の問題点を意識しながら、再保険を導入した場合の効果を併せて分析することとする。

3. 保険構造のモデル化

対象地域内の各々の地区に $j = 1 \dots m$ と番号を付けて表すこととし、地震シナリオを $\omega = \{\omega_t, t = 0 \dots T-1\}$ で定義する。地震シナリオ ω_t は t 年における各々の地震断層の活動 (内陸断層、プレート断層) 場所、地震の起こる時間や規模である。 ω は T 年間分のシナリオで、確率空間 $\omega \in (\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ に従う。

いま、災害準備金を R^t とすると

$$R^{t+1}(\omega) = R^t(\omega) + \Pi + N(S^t(\omega)) - S^t(\omega) - M^t \quad (1) \\ t = 0 \dots T-1, \omega \in \Omega$$

と書ける。

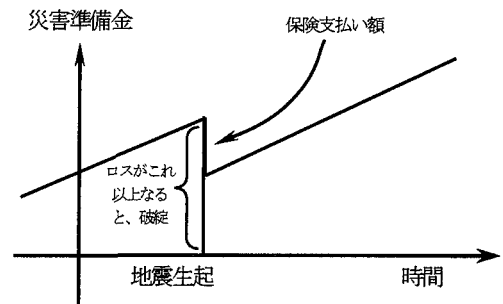


図1 災害準備金と破綻

ここで、 R^0 を災害準備金の初期値、 Π を各年に公的地震保険が得る保険料の総額、 $S^t(\omega)$ を支払保険金額、 M^t を再保険料とする。、災害準備金は保険料収入 Π によって、図1のように年々蓄積されるが、年々 M^t だけ再保険会社に支払わなければならない。そして、災害が起こったときにはこの災害準備金から保険金額 $S^t(\omega)$ を保険加入者に支払わなければならないが、 $N(S^t(\omega))$ だけの金額が再保険会社から支払われる。ただし、 Π や M^t は地震シナリオによらず、事前に決められた額である。

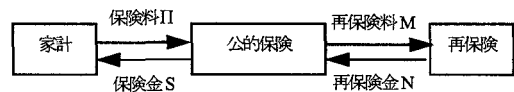


図2 想定する災害保険スキーム

再保険スキームとしては様々なオプションが存在するが、ここでは、共同保険 (コインシュランス) の形の再

保険でレイヤーの上限がない場合を取り上げることとする。すなわち、再保険会社が公的地震保険に支払う保険金額 $N(S^t(\omega))$ は次のように決定される。

$$N(S^t(\omega)) = \begin{cases} 0 & (S^t(\omega) < N_0) \\ \alpha(S^t(\omega) - N_0) & (S^t(\omega) \geq N_0) \end{cases} \quad (2)$$

図 3 のように、 N_0 はあらかじめ決められた閾値で、保険金請求額がこの値を超えた場合には、その請求額の一定割合 α が再保険会社によって補填されることが取り決められているものとする。

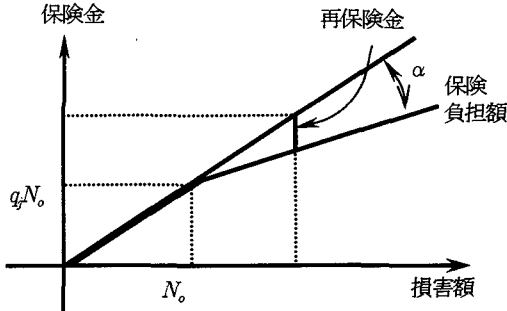


図 3 再保険スキーム

また、再保険料は再保険会社が引き受けるリスクに依存するものとし、保険数理的に公正な保険料に付加率 γ をかけた水準に定まっているものとする。すなわち、再保険料は

$$M^t = \gamma E[N(S^t(\omega))] \quad (3)$$

と設定する。ここで、 γ は付加率であり、本研究では $\gamma = 2.0$ と設定した。公的地震保険が被害関数 $L_j^t(\omega)$ に対し、保有する保証のカバー率を $\{0 \leq q_j \leq 1, j = 1 \dots m\}$ とする。ここで、保険金額 $S^t(\omega)$ は以下の関係を満たす。

$$S^t(\omega) = \sum_{j=1}^m L_j^t(\omega) q_j \quad (t = 0 \dots T-1) \quad (4)$$

一方、地域 j に住む世帯の純所得 $x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega))$ は以下のように定義する。

$$x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega)) = y_j^t - \pi_j q_j g_j - (1 - q_j) l_j^t(\varepsilon^t(\omega)) \quad (5)$$

ここで、 y_j^t は代表的個人の(粗)所得、 π_j はプレミアム率 (= 保険料/保険金) である。 g_j は地域 j の個人平均資産額である。従って、地域 j に居住する代表的個人が支払う保険料は $\pi_j q_j g_j$ となる。 $l_j^t(\varepsilon^t(\omega))$ は一世帯当たりの損害額であり、地震被害シミュレーションにより与えられる保有資産の損傷度 ε (全損 ($\varepsilon = 3$)、半損 ($\varepsilon = 2$)、一部損 ($\varepsilon = 1$)、無損 ($\varepsilon = 0$)) に依存して次式で与えられる。

$$l_j^t(\varepsilon^t(\omega)) = \begin{cases} g_j & (\varepsilon^t(\omega) = 3, \text{全損}) \\ 0.5g_j & (\varepsilon^t(\omega) = 2, \text{半損}) \\ 0.05g_j & (\varepsilon^t(\omega) = 1, \text{一部損}) \\ 0 & (\varepsilon^t(\omega) = 0, \text{損害なし}) \end{cases} \quad (6)$$

式(5)は代表的個人の純所得 $x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega))$ が平常時には所得 y_j^t から保険料 $\pi_j q_j g_j$ の差として与えられ、災害時にはこれに損害額 $l_j^t(\varepsilon^t(\omega))$ から受け取り保険金額 $q_j l_j^t(\varepsilon^t(\omega))$ を差し引いた自己負担被害額 $(1 - q_j) l_j^t(\varepsilon^t(\omega))$ を控除した値として、得られることを示している。

いま、第 t 期における代表的個人の効用を純所得 $x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega))$ の関数 $u(x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega)))$ として与える。この地域の各期の厚生水準がベンサム型社会的厚生関数である期待効用の和 $W(q, \pi)$ で与えられるとしよう。地震シナリオ ω 及び保険制度 (q, π) を所与とした場合の地域の条件付厚生水準 $w(q, \pi, \omega)$ は地域内の総効用の現在価値として次式で与えられる。

$$w(q, \pi, \omega) = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{j=1}^n \sum_{\varepsilon=0}^3 n_j^t(\omega, \varepsilon) u(x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega))) \quad (7)$$

ここで、 r は社会的割引率、 n_j は地域 j の人口である。

このとき、地域の厚生水準は $w(q, \pi, \omega)$ の期待値 $W(q, \pi) = Ew(q, \pi, \omega)$ として与えられる。ここで、 E は地震シナリオ ω に関する期待値オペレータである。

本研究では保険制度が持続可能な範囲内で住民の厚生を最大化するような保険制度の設計問題を考える。すなわち、保険金が不払となるリスクに制約を加えることで、保険制度の持続可能性に関する条件を満たした上で、社会的厚生を最大化するようなカバー率とプレミアム率 (q, π) を求めようとするものである。すなわち、次のような数理計画モデルを定式化する。

計画問題 (I)

$$\text{目的関数 } W(q, \pi) = Ew(q, \pi, \omega) \rightarrow \max \quad (8)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq q_j \leq 1, 0 \leq \pi_j \leq 1, \quad (9)$$

$$P\{\tau(q, \pi, \omega) < T\} \leq \beta \quad (10)$$

ここで、式(10)は保険システムの持続可能性を保証するために与えた制約である。保険システムが持続可能であるという条件を $\forall t \in [0, T]$ に対して $R^t(q, \pi, \omega) > 0$ であることとして定義しよう。いま、保険存続期間 $\tau(q, \pi, \omega)$ を次式によって定義すれば、

$$\tau(q, \pi, \omega) = \min[t : R^t(q, \pi, \omega) < 0, t > 0] \quad (11)$$

となる。

本研究では保険制度の持続可能性を式(10)のようにあらかじめ定められた計画期間 $[0, T]$ を通じて、保険金の不払いが生じる確率 β を下回るという条件を表している。

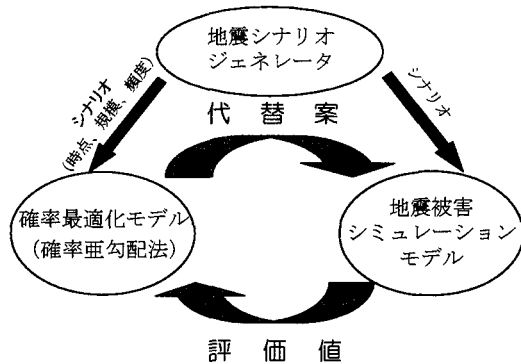


図4 ハイブリッド計画モデル

地域の厚生水準を上げようとする、保険料率を下げ、保険カバー率を上げることが必要であるが、こうした状態では保険会社の災害準備金が不足し、保険システムの破綻確率が上昇する。このように地域の厚生水準と保険システムの持続可能性との間にトレードオフの関係がある。そこで、本研究では保険持続確率 β を直接設定する代わりに、ラグランジュ乗数 c を設定して間接的に保険システムの持続可能性に関する条件を考慮する。すなわち、 $-c$ を重みとして拡張した目的関数を含む以下のような多目的最大化問題(II)を分析の対象とすることとする。

緩和計画問題 (II)

$$W(q, \pi) = \mathbf{E}\{w(q, \pi, \omega) - c\chi(\tau(q, \pi, \omega))\} \rightarrow \max \quad (12)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq q_j \leq 1, 0 \leq \pi_j \leq 1 \quad (13)$$

ただし、 $\chi(\tau(q, \pi, \omega))$ は以下のように定義される関数である。

$$\chi(\tau(q, \pi, \omega)) = \begin{cases} 1 & (\tau(q, \pi, \omega) \leq T) \\ 0 & (\tau(q, \pi, \omega) > T) \end{cases} \quad (14)$$

4. ハイブリッドアプローチによる解法モデル

本研究は図4に示すように地震被害モデルと最適確率モデルで構成されるハイブリッド計画モデルによって最適解を求める。まず、代替案と地震シナリオから地震被害シミュレーションによって地域厚生水準という評価値を得ることができる。次に、この値と地震シナリオから最適確率モデルによって、代替案を更新していく。この代替案がまだ最適でなければ最適解を得られるまで繰り返し計算によって、代替案を更新していくことになる。

以下はシミュレーションによる地震シナリオ生成、地震被害シミュレーションと確率最適化モデルについて説明する。

(1) シミュレーションによる地震シナリオ生成

本研究ではシミュレーションによる地震シナリオ生成は奥村ら³⁾の研究により、プレート境界地震や断層地震の平均活動間隔や活動期のばらつきで地震発生時期のシナリオを求める。

地震活動間隔は対数正規分布やポアソン分布に従う再生過程でモデル化される。プレート地震や最新活動時期が明確な断層地震は活動間隔が対数正規分布に従い、最新活動時期が不明確な断層地震は活動間隔がポアソン分布に従うとする。本研究ではそれぞれの分布に従う確率事象をモンテカルロシミュレーションによって生成した。

(2) 地震被害シミュレーション

上記計画問題では、地震シナリオの生起確率と各シナリオに応じた被害額を被害対象ごとに算定することが必要である。上述したように本研究では奥村ら³⁾の研究に基づき地震シナリオに関しては、活断層等の地震ハザードを特定し活動に伴う地震の規模を与えるとともに、その活動時期に関しても、活断層については再生過程（対数正規分布、指数分布）、プレート境界地震に関してはポアソン過程として生起確率を与えることとした。被害額の算定に際しては、シミュレーションモデル⁹⁾を用いて、各シナリオに応じた被害額を地域ごとに算定することとした。

このようにして与えられる情報をもとにして、上記計画モデルを解くわけであるが、このモデルは、確率制約を含み微分不可能な関数を有しており、また期待値で定義する項もあり、シナリオや次元数が多数存在するため、代替案を更新する度に全シナリオに対し、計算を行うような通常の数理計画法では求解は困難である。

(3) 確率歪勾配法

そこで、本研究では、この難点を確率歪勾配法³⁾を用いて解決する。確率歪勾配法は解の改善方向を求めるのにシナリオを部分的にしか用いない。さらに、差分計算自体は一つの方向を定めるのに数回のみが必要となる。簡単にするためにように上述の計画問題を、 $x = (q, \pi)$ 、 $f(x, \omega) = w(x, \omega) - c\chi(\tau(x, \omega))$ と再定義する。

確率歪勾配法では、代替案更新方向は以下の式で計算できる。ここで $h^k \in \{h \in R^n \mid -1 \leq h^i \leq 1, i = 1 \dots n\}$ となる一様乱数ベクトルを考え、更新方向 ξ^k を次式で与える。

$$\xi^k = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \frac{f(x^k + \Delta_k h^i, \omega^{k,i}) - f(x^k, \omega^{k,0})}{\Delta_k} h^i \quad (15)$$

ここで、 R 、 Δ_k はパラメーターである。式(15)では一つの改善方向を求めるのに R 回分のシナリオ

$\omega^{k1} \sim \omega^{kR}$ を用いるだけでよく、すべてのシナリオを用いる必要はない。ただし、 ξ^k が許容方向となっている保証はないので次式の許容領域 X への射影 Π_X を用いて、解を更新する必要がある。

$$x^{k+1} = \Pi_X [x^k + \rho^k \xi^k] \quad (16)$$

Π_X の与え方としてはいくつかの代替の方法があるが、ここでは写像関数 $\Pi_X(y) \stackrel{\text{def}}{=} \arg \min \{\|y - x\|^2 : x \in X\}$ を用いよう。

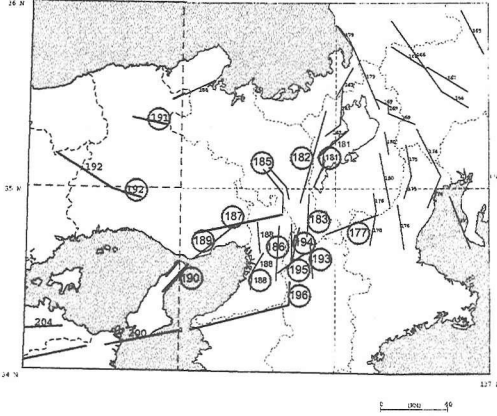


図 5 対象地震断層 (○で囲んだ断層)

式(16)の中の ρ^k はステップサイズである。このステップサイズ ρ^k は次の条件が満たすとき、 x^k は最適解に収束することが証明されている³⁾。

$$\rho_k \geq 0, \sum_{k=0}^{\infty} \rho_k = \infty, \sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{E} \left(\rho_k \Delta_k + \frac{\rho_k^2}{\Delta_k} \right) < \infty \quad (17)$$

以上の理論に基づいて、確率歪勾配法を用いたアルゴリズムを示せば、以下ようになる。

Step 1. 初期解 (q^0, π^0) を与え、イテレーション回数を $k=0$ とする。 $h^{ki} \in \{h \in R^n | -1 \leq h^j \leq 1, j=1 \dots n\}$ を満たす一様乱数 h^{ki} を発生させ、確率歪勾配 ξ^k を次式によって求める。

$$\xi^k = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \frac{f(x^k + \Delta_k h^{ki}, \omega^{ki}) - f(x^k, \omega^{k0})}{\Delta_k} h^{ki}$$

Step 2. X への射影 Π_X を用いて、解を更新する。

$$x^{k+1} = \Pi_X [x^k + \rho^k \xi^k]$$

Step 3. 解が収束していれば、停止。そうでなければ、ステップサイズを更新し、 $k = k+1$ とし Step 1 へ

以上示してきたような方法を用いることで、現実の地域に対する保険構造を実用的な計算速度で設計することが可能となるものと考えられる。次章では、兵庫県を対象地域として、実証分析を通じて本方法の有効性に関して検討する。

5. 対象地域と実証分析

実証分析としては公的地震保険の設計問題を取り上げる。このために、市区町村ごとのリスク評価や人口、取得等の特性を把握する必要がある。そして、図 5 に示すように兵庫県に影響を及ぼす可能性のある地震断層として 16 活断層を調べ、さらに、プレート断層 (南海地震) も考慮入れて、あらゆる地震活動パターンを 10 万シナリオとして求めた。

そして、シミュレーションモデル⁹⁾を用いて、各シナリオに応じた被害額を地域ごとに算定することとした。図 6 では花折断層帯による地震の被害額を示すものである。

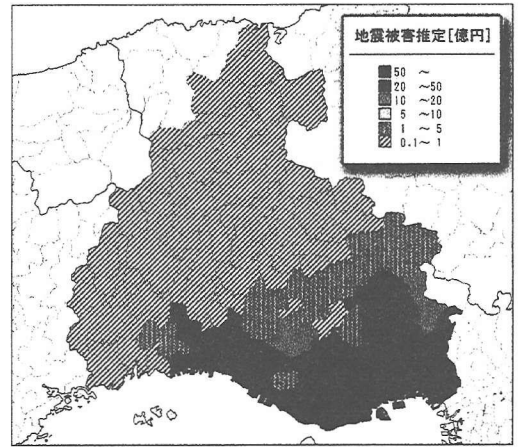


図 6 六甲断層による地震の被害額

再保険に関しては本研究では被保険額が 1.5 兆円以上になると再保険負担割合を 50% と設定している。図 7 図 8 はそれぞれ再保険を導入しないケースと導入したケースの収束過程を表している。グラフでは拡張目的関数 (問題 (II) における目的関数) が計算回数 (イテレーション) と共に増大し、徐々に安定した最適値に到達することが分かる。同時に保険破綻確率も徐々に下がり、最終的な最小破綻確率を示した。この問題は $95 \times 2 = 190$ 次元の操作変数を持つような大規模な関数であるが、数千程度のイテレーションで求解できるという結果となっている。

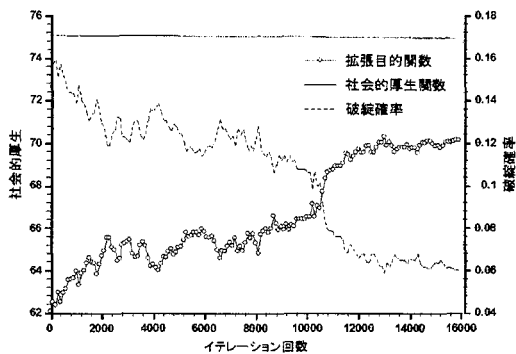


図 7 再保険を導入しないケースの最適計算

再保険の有無や保険料率・カバー率等の保険構造の違いによる地震による損害の住民への帰着構造を検討するために、各々の保険構造に対応したリスク曲線¹、社会的厚生、保険システムの破綻確率について計算を行った。

表 1 各保険構造の比較 (再保険がないケース)

	現行保険	公正な保険	最適化保険
社会的厚生比	1.00000	1.00035	0.99851
不払い確率(%)	16.26	51.56	6.00

※注：分析対象期間である100年間に保険システムが破綻する確率を示している。表中の6.00%は再現期間では1600年に対応する。また、向う100年以内に地震が発生する確率は約95%である。また、厚生水準を比較するために、現行保険厚生水準をベースに比較する。

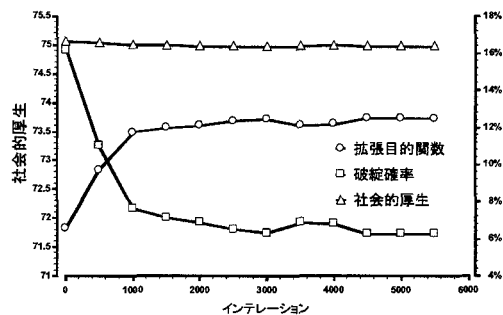


図 8 再保険を導入したケースの最適化計算

表 1 には再保険を導入していないケースにおいて各保険構造の社会的厚生と保険破綻確率を示している。最適化計算によって、保険破綻確率を現行の16.26%から6.0%まで減少させても、社会的な厚生を大きく損なうこ

¹ 小さな損害額ことどまる確率の高いケースから巨額の損害に至る確率の低いケースまで、様々な地震シナリオの発生確率と損害額を算定し、これらの関係をグラフ化したものがリスク曲線である。横軸はカバーしない損害額を、また縦軸にはある損害額を超過する損害が生ずる可能性を超過確率として表している。リスク曲線より右側よりリスクにさらされない(カバーされる部分)を意味しているため、リスク曲線が左下にシフトされるほど保険システムがよりよく機能することが分かる。

とのない保険システムが設計され得ることが示された。そして、図 9 より、最適化によりリスクカーブが左下にシフトしたことが読み取れる。最適化した保険は保険カバー率平均は47.7%で、保険料率平均は8.3%である。

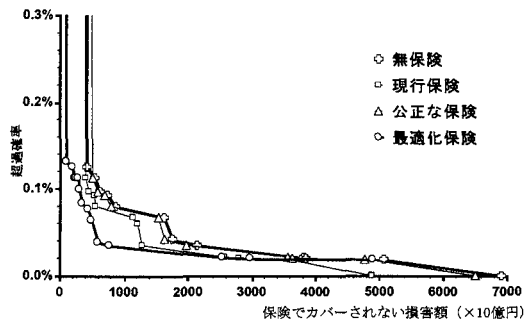


図 9 第 50 年における各保険制度のリスクカーブ (再保険未導入)

再保険を導入した時の各保険の50年目におけるリスク曲線は図 10 である。この場合も保険不払確率を6.0%となるように最適計算を行った。再保険のないケースと比べ、保険カバー率が向上することが分かった。保険料率もほとんどの地域において減少する傾向が見られ、現実に適用できるような料率になってきていることが読み取れる。平均値で見ると平均保険カバー率は49.9%、平均料率は7%である。再保険を導入しない時と比べてカバー率がわずかに増加、料率は減少した。

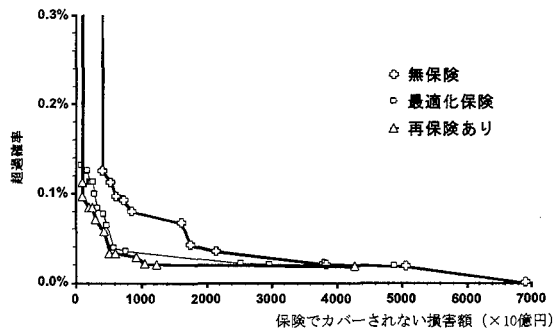


図 10 第 50 年における各保険制度のリスクカーブ (再保険導入済み)

6. 結論

本研究は大量の法則が成立しない条件下で、しかも次元数の多い計画問題を解くための地震被害シミュレーションと確率最適化モデルとのハイブリッド計画モデルを構築するとともに、保険構造の設計問題を対象に実証分析を行った。さらに、この計画問題は非常に決定変数の多い問題となるが、確率垂勾配法を適用することで、十分実用に耐えうるモデル解法が構成される。実際、兵庫県における設計問題でも、パーソナルコンピュータを用

いて十分計算可能なレベルの解法となっていることが確認された。

実証分析の結果から、保険システムの破綻のリスクを大きく改善し、かつ再保険が導入されていない場合でも、社会的厚生が現行の地震保険の場合に比べてさほど減少しないような保険システムが設計されることが示された。同じ破綻確率での比較を通じて、再保険を導入したケースと導入していないケースとを比較すると保険料率は再保険の導入に伴って減少するという傾向が読み取られた。このケースでは再保険料率を保険数理的に公正な保険料の2倍という高い水準に設定したが、それでも、再保険の導入によって、地域全体の社会厚生が向上することが示されている。自然災害保険等の集散的なリスクに対する保険料は保険数理的に公正な保険料に加えて破綻のリスクを防ぐための付加料率が必要であると言われていたが、これを裏付ける結果となっている。

また、本研究では公的地震保険に関しても完全な規制下にある場合を想定しており、自由な保険市場を通じた災害保険の提供に関しては分析を行っていない。このような保険市場を活用し、社会的に効率的な保険を提供することのできる制度を設計するための間接的な誘導施策に関しては今後研究を進展させていく予定である。政府による再保険の補償制度等はおそらくこの種の機能を果たしようと考えている。

これらの点に関しても今後検討を進めて行きたいと考えている。

謝辞：本稿を作成に当たり、資料調査や貴重なご意見を、

頂いた損害保険料率算定会機構の坪川氏、並びに佐伯氏に多大なご協力とアドバイスを得ました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林 潔司・横松 宗田：カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価、土木学会論文集 No.639 IV-46, pp.3 9-52., 2000.1
- 2) 日本地震再保険会社：家計地震保険制度と地再社 30年の歩み, pp12, 1997.3
- 3) 奥村 俊彦・石川 裕：活断層の活動度から推定される平均変位速度に関する検討、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、第一部 (B)、pp.554-555, 1998
- 4) Y. M. Ermoliev, *Numerical Techniques for Stochastic Optimization*, Springer-Verlag, pp141-168, 1988.
- 5) T. Ermoliev, *The Role of Financial Instruments in Integrated Catastrophic Flood Management*, ILASA.
- 6) Froot, Kenneth A. and Paul G. J. O'Connell: *On the Pricing of Intermediated Risk*, National Bureau of Economic Research, 1996.
- 7) Kenneth A. Froot: *The Financing of Catastrophe Risk*, Wharton School. The University of Chicago Press, 1998
- 8) Doherty, N.: *Financial innovation in the management of catastrophe risk*, mimeo, Wharton School, University of Pennsylvania, 1997.
- 9) 佐伯 琢磨 著：地震による被害住民の生活再建にかかわる経済被害の評価に関する研究。東京工業大学学位論文, 2002.

存続可能性を制約条件とした自然災害保険システムの設計方法に関する研究*

グエン フク ディン**・多々納 裕一***・岡田 憲夫****

地震のような大規模な自然災害では、大数の法則が成立しない。この条件下では保険数理的に公正な保険料率では公的地震保険が破綻するリスクが大きい。このため、リスクを分担する必要があるが、地域ごとに独立な代替案を求めることとなり、解の次元数がそれだけに増え、通常の計画法では解けない。本研究は大数の法則が成立しない条件下で、しかも次元数の多い計画問題を解くための地震被害シミュレーションと確率最適化モデルとのハイブリッド設計モデルを構築するとともに、保険構造の設計問題を対象に実証分析を行う。実際に兵庫県を対象とした実証分析を通じてその有効性を検証することとする。

Designing Catastrophic Insurance Schemes under Constraints of Insurers' Sustainability*

By Nguyen Phuc Dinh**・Hirokazu TATANO***・Norio OKADA****

The law of large number does not work well for catastrophic risks like great earthquake. Insurance companies which provide insurance based on accuracy fair insurance may face high possibility of insolvency. Therefore, there is a need to share risk to every different area which makes insurance structure contain too much dimensions which can not be solved by ordinary mathematical programming methods. This paper shows the way how to create a hybrid design model which consists of earthquake damage simulation and stochastic optimization calculation to solve the above problem. A numerical experiment illustrates its applicability for real world problem by designing earthquake insurance structure of the pilot area.
