

# 持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 Catastrophic Insurance Schemes under Constraints of Insurers' Sustainability\*

グエン フク デイン\*\*・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場合に、十分な復興・復旧のための資金が確保されないと、経済成長経路の下方へのシフトが生じ、持続的な影響として残留することとなる（レベル効果）。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、被害が集合的に発生するため、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単純に伝統的な保険学での理論を適用することは困難である。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

2)。しかしながら、現実に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）を求めるための方法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た。また、震源の活動間隔や規模に関する調査や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。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。このようなシミュレーションモデルを用いたリスク評価の知見を適切に反映した保険構造の設計が可能性を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。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付きの確率計画法の問題となり、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、保険システムの持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<sup>3)</sup>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。

## 2. 保険構造のモデル化

対象地域内の各地域を  $j = 1 \dots m$  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  $\omega_t$  は  $t$  年における地震の発生の有無、その位置、規模を特定するものであり、 $\omega$  は  $T$  年間分のシナリオである。

\*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)

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。ここで、 $R^0$  を災害準備金の初期値、 $\Pi$  を各年に保険会社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  $\Pi$  によって年々蓄積されるが、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、 $\Pi$  や  $M^t$  は地震シナリオによらない。

また、

再保険会社が支払う（再）保険金額  $N(S_i^t(\omega))$  は次のように設定される。

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

再保険料は  $M^t = \gamma \mathbf{E}[N(S^t(\omega))]$  と設定する。ここで、 $\gamma$  は付加率であり、本研究では  $\gamma = 2.0$  と設定した。保険会社が被害関数  $L_j^t(\omega)$  に対し、保有する保証のカバー率を  $\{0 \leq q_j \leq 1, j = 1 \dots m\}$  とすると、保険金額  $S^t(\omega) = \sum_{j=1}^m L_j^t(\omega) q_j, t = 0 \dots T - 1$  となる。

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  $x_j^t(q_j, \pi_j, \varepsilon^t(\omega)) = y_j^t - \pi_j q_j g_j - (1 - q_j) l_j^t(\varepsilon^t(\omega))$  となる。ここで、 $y_j^t$  は代表的個人の（粗）所得、 $\pi_j$  はプレミアム率である。 $g_j$  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  $\varepsilon$  (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。

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

この地域の厚生水準をベンサム型社会的厚生関数とし、期待効用の和で与れば、地域の厚生水準は

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

となる。ここで、 $r$  は社会的割引率、 $n_j$  は地域  $j$  の人口である。

自治体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を設計するものとしよう。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} \quad & W(q, \pi) = \mathbf{E} w(q, \pi, \omega) \longrightarrow \max \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq q_j \leq 1, 0 \leq \pi_j \leq 1, \\ & P\{\tau(q, \pi, \omega) < T\} \leq \beta \end{aligned} \quad (I)$$

$$\text{ただし、} \tau(q, \pi, \omega) = \min[t : R^t(q, \pi, \omega) < 0, t > 0]$$

この際、計画モデル (I) の確率制約をラグランジェ緩和を実施し、確率制約にラグランジェ乗数を乗じて目的関数に加えて緩和計画問題を構成できる。

緩和計画問題 (II)

$$\begin{aligned} W(q, \pi, \omega) = \mathbf{E}\{w(q, \pi, \omega) - c\chi(\tau(q, \pi, \omega))\} \longrightarrow \max \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq q_j < 1, 0 \leq \pi_j \leq 1 \quad (II) \\ \text{ただし} \quad & \chi(\tau_\omega) = \{1 : \tau_\omega \leq T; 0 : \tau_\omega > T\} \text{ と定義する。} \end{aligned}$$

### 3. シミュレーションベース解法

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。本研究では奥村ら<sup>6)</sup>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<sup>5)</sup>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、上記計画問題を解くわけであるが、このモデルでは、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。

そこで、本研究では、この難点を確率垂勾配法<sup>3)</sup>を用いて解決しようと試みた。確率垂勾配法は解の改善方向を求めるのにシナリオを部分的しか用いない。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。簡単化のために、 $x =$

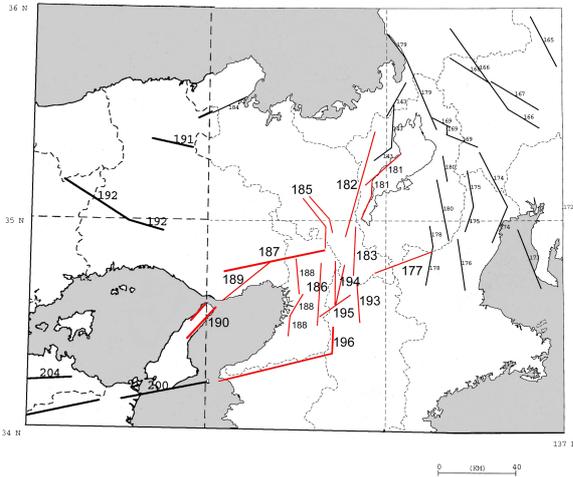


図-1 対象地域

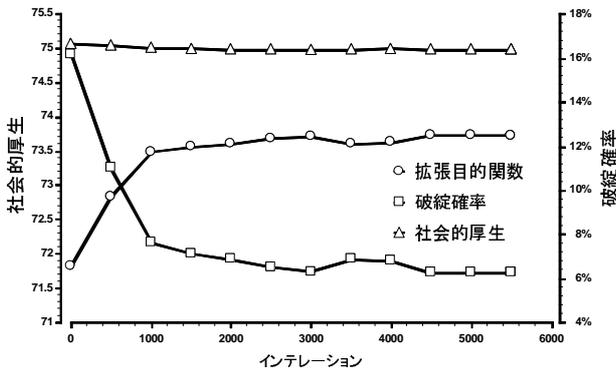


図-2 再保険導入したケースの最適化計算

$(q, \pi), f(x, \omega) = w(q, \pi, \omega) - c\chi(\tau(q, \pi, \omega))$  と再定義する。確率垂勾配法では、代替案更新方向は以下の式で計算できる。ここで  $h^{ki} \in \{h \in \mathbb{R}^n \mid -1 \leq h_j \leq 1, j = 1, \dots, n\}$  なる一様乱数ベクトルである。

$$\xi^k = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \frac{f(x^k + \Delta_k h^{ki}, \omega^{ki}) - f(x^k, \omega^{k0})}{\Delta_k} h^{ki} \quad (4)$$

$X$  への射影  $\Pi_X$  を用いて、解を更新する。解が収束するまで繰り返し計算を行う。

$$x^{k+1} = \Pi_X[x^k + \rho^k \xi^k] \quad (5)$$

ここで、写像関数は  $\Pi_X(y) \stackrel{\text{def}}{=} \operatorname{argmin}\{\|y - x\|^2 : x \in X\}$  を用いた。

ただし、 $\rho^k$  はステップサイズであり、次の条件が満たされるとき、 $x^k$  は最適解に収束することが証明されている<sup>3)</sup>。

$$\rho_k \geq 0, \sum_{k=0}^{\infty} \rho_k = \infty, \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{E}(\rho_k \Delta_k + \frac{\rho_k^2}{\Delta_k^2}) < \infty$$

#### 4. 対象地域と実証分析

本研究の最適過程では地震断層や住民所得情報等が知っていれば最適保険構造設計を行えるが、実証

分析のために対象地域は兵庫県内の95市区町村としている。対象地域の兵庫県に被害を及ぼしうる15の活断層等の地震ハザード<sup>5)</sup>を特定し、それぞれの再現周期を考慮した上で向こう100年間の地震シナリオを10万件設定した<sup>6)</sup>。その上で、これらのシナリオそれぞれに応じた地震被害の発生状況を反映した最適保険構造を設計する。

本研究では再保険は被保険額が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-2は再保険を導入したケースの収束過程を表している。インテレーション回数が3000ぐらい以降は拡張目的関数値が安定し大幅な改善が認められることが分かる。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、3000程度のインテレーションで求解できるという結果となっている。

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<sup>1</sup>、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、保険破綻確率が現行の16.26%から設定通り6.00%に大きく減少したことが分かった。そして、図-3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0.477%で、保険料率平均は8.311‰である。

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-4である。この場合も保険不払確率を6%となるように最適計算を行った。再保険のないケー

<sup>1</sup> 小さな損害額に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カーブである。軸には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。このグラフからどの程度の損害がどの程度の確率で発生するかを数値で知ることができる。リスクの全体像を定量的かつ視覚的にもわかりやすく表現している点がこのリスクカーブの特徴である。また、無保険時のリスクカーブに保険された時のリスクグラフを載せると、いくらかリスクカーブが左にシフトされることが分かる。これは同じ超過確率において有保険時の方が損害額が保険金によって補われたからである。また、同確率のそれぞれの損害額の比率で保険会社はどのぐらいの割合で保険可能かもこのリスクカーブから理解できる。

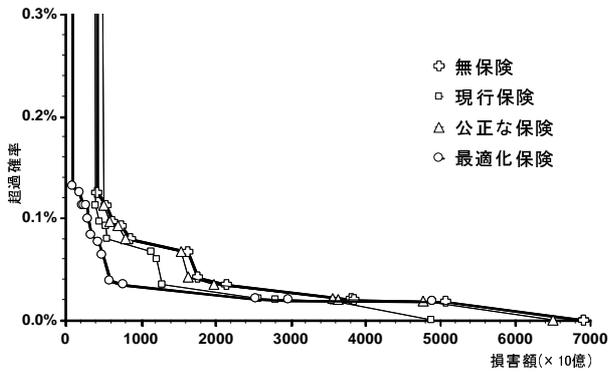


図-3 第50年における各保険制度のリスクカーブ

表-1 各保険構造の比較 (再保険のない場合)

	現行保険	公正な保険	最適化保険
不払確率 (%)	16.26	51.56	6.00

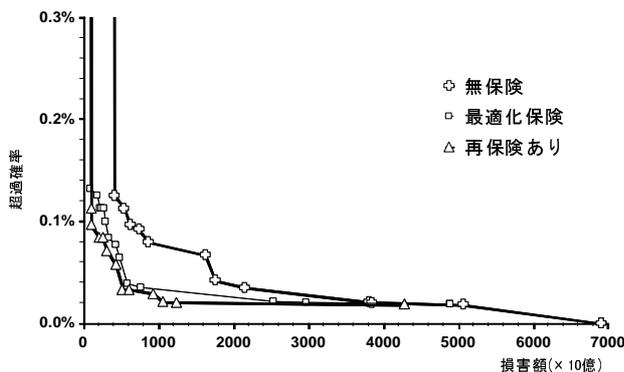


図-4 第50年における各保険制度のリスクカーブ

と比べ、保険カバー率とリスク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6.988‰である。再保険を導入しない時と比べてカバー率が増大、料率が減少した。

## 5. 結論

本研究では、大数法則が成り立たない条件下でも提唱した保険設計モデルで、兵庫県を対象に実証分析を通じて提案した手法の有効性を確認した。また、確率歪勾配法を適用することで、十分実用に耐えうる手法として構成し得たと分かった。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。

再保険が導入されていない場合でも、社会的厚生は現行の地震保険の場合に比べて若干減少するが、保険システムの破綻のリスクは大きく改善されることが分かった。再保険を導入したケースでは同じ破綻確

率水準での比較を通じて、再保険を導入したケースは再保険のないケースと比べて保険カバー率が増加する傾向が読み取れた。再保険料率を保険数理的に公正な保険料水準の2倍としたがそれでも、再保険を導入することによって、地域全体の社会厚生も増加している。自然災害保険等の集合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となる。これは再保険は保険システム自体の破綻リスクを軽減し、付加料率を軽減させる働きがあることがこの結果から見出された。

また、本研究では保険会社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。この点を克服していくためには、市場を活用し、保険会社に社会的に効率的な保険を提供するインセンティブを与えるような間接的な誘導施策が重要であろう。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うると考えている。この点についても今後検討を進めていくことが重要であろうと考えている。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 小林 潔司・横松 宗田：カストロフ・リスクと防災投資の経済評価、土木学会論文集 2000-01 No.639 IV-46、pp.39-52.
- 3) Y. M. Ermoliev, *Numerical Techniques for Stochastic Optimization*, Springer-Verlag, pp141-168, 1988.
- 4) Froot, Kenneth A. and Paul G. J. O'Connell: *On the Pricing of Intermediated Risk*, National Bureau of Economic Research, 1996.
- 5) 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.
- 6) 奥村 俊彦・石川 裕 (1998): 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.