

耐震補強工事に対する助成額検討手法の提案と簡易補強工事への応用

EXAMINATION OF FINANCIAL SUPPORT SYSTEM FOR RETROFITTING AND APPLICATION TO SIMPLE RETROFITTING

廣井悠*、小出治**、加藤孝明***
U HIROI, Osamu KOIDE, Takaaki KATO

Retrofitting of existing houses is the most urgent problem. In this paper, we examined financial support system for retrofitting of existing houses. Concretely, We thought about price of the furtherance with care to the following matters. 1. Decision making structure of inhabitants, 2. Suspicion of evaluation only by economic rationality, 3. The evaluation considered uncertainty.

Keywords : *earthquake resistance retrofitting, simple retrofitting, financial support system for retrofitting, operations research*
耐震補強、簡易補強、助成制度、オペレーションズ・リサーチ

1. はじめに

東海・東南海・南海地震や首都直下地震の発生が危惧されている現在においてもなお、わが国の戸建木造住宅の約4割(約1000万戸)はいまだ耐震性が不足しているといわれており、数ある防災政策のなかで木造住宅の耐震化は最重要課題と位置づけられている。こうした状況を鑑み、国は10年で耐震化率を90%にするという具体目標を地震防災戦略の中で明らかにし、また静岡県、横浜市などをはじめとした地方自治体も様々な耐震補強推進策を積極的に実施している。なかでも耐震診断や耐震補強に関する補助や融資の制度は現在多くの自治体で行われており、特に静岡県は最大約60万円と高額な助成制度を定めているが、それでも戸建住宅の耐震性確保は期待通りの進捗を見せてはいない。この理由としては、(1)補強工事の価格の高さ、(2)居住者の自宅倒壊に対するリスク認知の低さ、(3)建築事業者に関する不安感、(4)耐震補強工事の質に対する信頼性の低さ、(5)補強工事に対する手間や日常生活への支障、などが一般に挙げられる。特に(1)については、静岡県に居住する補強工事を選ばない者の約20%が価格の高さを理由にするなど、行政の助成制度がありながらもいまだに耐震補強推進の大きな壁となっていることが明らかになっている[1]。居住者の耐震補強工事に関する阻害要因はこれ以外にも様々なものが考えられるが、たとえそれがどのような心理的・経済的状況から生起するものであれ、限りある資源量という制約条件のもとで地震時の倒壊被害を可能な限り減ずるという立場は行政の普遍的方針と見てよい。よって、現在なされている補

強工事に対する助成制度の妥当性の検証やその額に関する議論、またすでに各自治体で行われ始めている割増助成、簡易耐震補強への助成などの計画案を検討することはきわめて重要と考えられる。

一方、耐震補強工事の制度面に関する既存研究は、近年数多く発表されている。なかでも目黒ら(2001)は「しかるべき耐震補強をすませた建物が被災した場合、建て直しを含めた補修費用の一部を行政が負担する」という補償制度を提案し、シミュレーション結果より行政サイドからも住民サイドからもメリットのある制度であることを証明している[2]。また吉村ら(2002)は確定的に10000棟に対して助成が行われると仮定した上で、様々な助成制度のシナリオごとに公的費用軽減効果を算出し、費用対効果の観点から各制度の効果を比較している[3]。これら以外にもリスク認知を高める方法(耐震診断ローラー作戦)や信頼性を確保するためのしくみづくりなど様々な手法が現在試みられている。これらの研究はどれも耐震補強推進策を論じたものであり(1)-(5)の課題を少なからず解決しうる有益な研究といえよう。しかし、現実に行政が耐震補強工事に対し助成をする場合、どれほどの額にすればよいのか、また割増助成や簡易補強工事への助成をどの程度行った方がよいのかに関して議論した研究はいまだなく、それらを明らかにするための方法論は現在のところ確立していない。その結果、助成額を検討する際に予算制約などの条件や非科学的な意思決定によって助成額が決められていることも数多く、耐震補強工事の進捗を大きく支配する一因とみられる助成制度の検討は十分にされているとは、現状では言いがたい。本研究は以上の問題意識を背景として 1)住民の選択行動を考慮した助成額の検討、2)不確実性を考慮した評価手法、3)経済的効率

*東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 助教・工修

**東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 教授・工博

***東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 助教・工博

Assistant Professor, Dept. of Urban Engineering, Faculty of Engineering,
The University of Tokyo, M. Eng.

Professor, Dept. of Urban Engineering, Faculty of Engineering,
The University of Tokyo, Dr. Eng.

Assistant Professor, Dept. of Urban Engineering, Faculty of Engineering,
The University of Tokyo, Dr. Eng.

のみならず被害量の最小化も視野に入れた多目的最適化への展開、
 4) 得られた助成制度案に対する公平性の検討、の4点に留意しつつ、客観的な助成額の検討手法を提案し、簡易補強や割増助成などを代表とするいくつかの助成制度のマクロ的な定量評価手法の構築を目指すものである。

2. 耐震補強工事に対する助成額検討手法の提案

2.1 行政の期待総支出の最小化

本章では耐震補強工事に対する助成額を求めるための方法論を提案するが、そのためには補強工事に対し行政が総額でどれほどの助成をするかを知る必要がある。これは住宅1棟あたりの助成額と補強工事を行う住宅数の積で求めることができるが、一般に1棟あたりの助成額が多ければ多いほど耐震補強工事を行う人は増えると考えられるため、補強工事の選択行動を考慮しなければならない。そこで、耐震補強工事の価格を一律に c 万円、耐震性の不足している木造住宅の耐震性能を k としたうえで、木造住宅世帯主の耐震補強選択確率 $q(c, k)$ を定義する。耐震補強工事をしない住宅には助成をする必要がないため、耐震補強工事に対する助成額を x 万円、木造住宅の耐震性能分布を $f(k)$ とすることで対象領域における助成額の総和を以下(1)式で示すことが可能となる。

$$\int_0^{\infty} x \cdot q(c-x, k) f(k) dk \quad \dots(1)$$

次に、行政が耐震補強工事に対し x 万円の助成をした際の地震被害を算出する。ここで耐震補強工事を行った住宅は地震によって全壊しないとし、耐震性能 k の住宅が全壊する確率を地震動の大きさ m を用いて $p(k, m)$ とすると、地震動が m とみなせる領域における全壊確率は(2)式で示される。

$$\int_0^{\infty} (1-q(c-x, k)) f(k) p(k, m) dk \quad \dots(2)$$

議論を簡単にするため、木造住宅居住者の耐震補強工事選択確率は価格 c と助成額 x の影響のみ受けると仮定する。すると、前者(1)式は助成額 x に関する増加関数となり、後者(2)式は助成額 x に関する減少関数となる。これは助成額 x の多寡によって助成額の総和と住宅の全壊確率がそれぞれ逆に増減することを意味する。自力復興の原則があるとはいえ、実際にひとたび住宅被害が発生すると行政は瓦礫撤去や生活再建・仮設住宅の建設などに膨大な資金を必要とするため、これにより事前対策に投入するための資金と地震後に必要となる資金との間にはトレードオフ関係が想定される。

一般に、地震によって倒壊する建物が少なければ少ないほど、行政が用意する地震後の支援金は多くを必要としない。したがって、地震によって倒壊する可能性の高い住宅に対し多額の助成をし、耐震補強を誘導することができれば、地震被害を少なくすることが可能となり、その分被害を受けた住宅に対して手厚い支援を行うことが可能となるであろう。すなわち補強工事に対する助成額を増額することで、安全で被災者に優しい社会を同時に実現する可能性がある[4]。ただし、いつ発生するか確定しない地震に対して過敏になるあまり、あまりに高額な助成をしすぎることもまた現実的な施策とはいえない。すなわち被害を極力抑え、また過剰過ぎることのない助成制度を行政は策定する必要があり、総じてその意思決定は困難であることが多い。この問題意識に基づき、本節では不足すぎず

た過剰過ぎない助成額、つまり地震後の行政支出をみずえた最適な助成額を明らかにすることを目的とする。このためには、前出のトレードオフ関係を助成額 x について解けばよい。これは、具体的に(2)式に倒壊住宅1棟あたりの事後補償額 a をかけた地震後支援額と(1)式の和である $S(x)$ を助成額 x について最小化することを意味する。これより、ある地震動 m が想定される場合の行政の経済収支を最小化する助成額を求めることが可能となり、それは(3)式で示される。

$$\text{Min} \left[a \int_0^{\infty} (1-q(c-x, k)) f(k) p(k, m) dk + \int_0^{\infty} x \cdot q(c-x, k) f(k) dk \right] \quad \dots(3)$$

具体的な最適解を得るためには(3)式の変数に適切な数値を考慮する必要がある。そのため、耐震補強工事の選択行動と被害関数については(4),(5)式のように $q(c, k)$ および $p(c, k)$ を定義した[5],[6]。 $q(c, k)$ に関しては補強工事に関する選択行動を非集計ロジットモデルによって分析し、最尤推定法によってパラメータを推定しており、データとして静岡県で行われたアンケートデータを用いている。 $p(k, m)$ は地震動 m を V (PGV) と、耐震性能 k を I_w 値と読み替えている。なお[6]より $V_0 = 88.3$, $\zeta_w = 0.12$, $I_{w0} = 0.823$ となる：

$$q(c, k) = (1 + \exp[0.008c - 1.305])^{-1}, \quad \dots(4)$$

$$P_w(V) = \Phi(\ln V - \ln(V_0(I_w/I_{w0}))/\zeta_w). \quad \dots(5)$$

次に住宅の耐震性能分布を求める。ここには実データを用いる必要があるため、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合のデータ(サンプル数7736棟)を用い、その評点分布から確率密度関数を求めた(ここではその後の計算量の負荷も考慮し2次の多項式近似による推定を用いた)。その結果、図1に示される分布型(釣鐘分布)が得られる。この近似は $R^2 = 0.826$ となり、あてはまりは総じて良い。しかし、これは耐震診断結果及び補強工事の見積りから得られたデータであるため、データの母集団に何らかのバイアスが予想され、得られた分布型に対して一般性を完全に保証するものではない。また、今後耐震補強工事の進捗によってはこの分布型が変化する可能性も十分に考えられる。そこで、ここではさらに2つの分布型を加え、それぞれ一様分布、2極分布と名づけ、分析を試みる。2極分布は上記の推定によって求められた釣鐘分布と一様分布に対し線対称とする関数型で示している。また[3]を参考とし、係数 $a = 1300$ と仮定した。その結果、これらの耐震性能分布におけるPGVと助成額の関係は図2の如く示される。

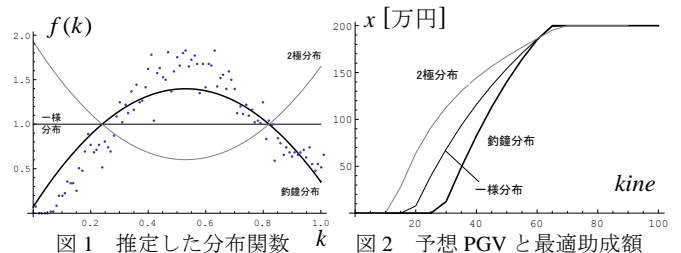


図1 推定した分布関数 $f(k)$ 図2 予想PGVと最適助成額

これにより、確定的にある地震動が発生すると判明したときの最適助成額を明らかにすることができた。これは、東南海・南海地震など周期的に必ず発生するとみられる地震に対して備える場合、有益な知見となりうる。しかし、総じて地震現象は不確実性をもつことが知られている。よって政策の空振りなどを考慮するなど、実際に計画案策定の意思決定に利用する場合は、地震現象を確率的に捉

えた上で助成額を検討する必要がある。従って、ここで地震動 m の発生確率を $h(m)$ と定義し行政の期待総支出最小化問題の定式化を行った。その結果が以下(6)式である。

$$\text{Min}_x \left[a \int_0^\infty \int_0^\infty (1 - q(c - x, k)) f(k) h(m) p(k, m) dk dm + \int_0^\infty x \cdot q(c - x, k) f(k) dk \right] \dots (6)$$

ここでは簡単のため、 $h(m)$ に関しては Hazard Curve として Logistic 関数を仮定し、J-SHIS(確率的地震動予測値図)によって公開されている Hazard Curve データを用いて係数を推定した。その結果、静岡県静岡市及び東京都新宿区についての最適助成額は表 1 の如く示される。なお、図 3 及び図 4 は静岡県および東京都における両者の比較である。なお、東京都においては境界付近でやや近似式がずれるため、今後よりよい推定手法の検討が望まれる。

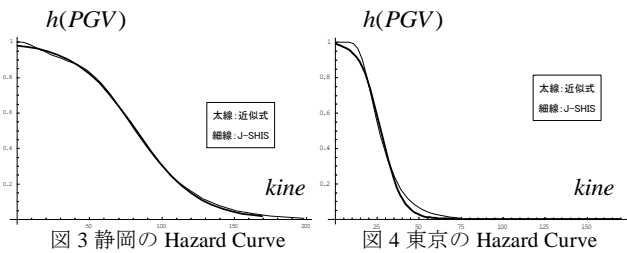


表 1 不確実性を考慮した耐震性能分布と最適助成額 x^*

静岡県		東京都	
分布型	助成額 x^*	分布型	助成額 x^*
一様分布	197.21 万円	一様分布	0 万円
釣鐘分布	165.66 万円	釣鐘分布	0 万円
2 極分布	200 万円	2 極分布	24.96 万円

表 1 から、行政の最適助成額は耐震化率という指標だけでなく耐震性能の分布型によって異なり(図 1 の分布型はすべて耐震化率が同一である)、そして著しい地域性を有していることなどがわかる。特に静岡県においては耐震補強の助成額を 165.66 万円という高額にせねば最適解が得られない。これはいかに静岡県が地震の危機に曝されているか、またひとたび大地震が発生すれば莫大な事後の支援額がどれほど必要とされるか、さらには現実的問題として助成制度のみでは十分な被害の軽減が不十分であることなどを示唆している。

2.2 多目的最適化への展開

前節で、事前対策に投入する資金と地震後に被害を受けた住宅に支援する金額の総和を最小化する最適助成額 x^* を求めた。ところが、これは金銭的尺度を唯一の評価基準としたものでしかなく、耐震補強工事への助成を政策ではなく経済的投資行動とみた場合の最適解という意味しか持たないことは自明である。当然のことながら、地震現象は甚大な人的被害を伴うからこそ憂慮すべき最重要課題となっているのであり、地震発生にともなう被害量を考慮に入れて議論を進めなければ、それがいかに適切になされたものであろうと実際問題とかけ離れた空論となり得る恐れが十分にある。もちろん、ごく限られた状況によっては人命損失をなんらかの方法で金銭的損失に代替したのち計算することも可能である。しかし、どのような方

法であっても人命と金銭は本質的に比較不可能なものであり、経済的収支といった一つの指標のもとで定義された最適化問題により得られた解をそのまま現実の計画案として解釈することはできない。そこで、本節ではこれら計画案を人的被害と経済的収支の両面から評価することを試みたい。すなわち、複数の評価基準の同時最適化(多目的最適化)を行うわけである。この問題はいわゆる多目的計画となり、その解の集合は図 5 の如くパレート最適集合として表される。

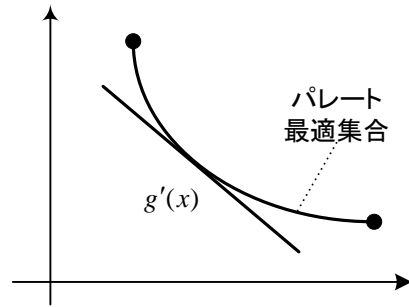


図 5 パレート最適集合の傾き

パレート最適集合は、ある目的関数の値を改善するためには少なくとも他の 1 つの目的関数の値を悪化しなければならない優秀な計画案の集合を表しており、この概念は多目的な指標を持って最適化問題を取り組む際のとりあえずの目標とみてよい。ここで、人的被害の多寡は全壊建物数に比例すると仮定する。その上で横軸に経済的損失の和 $S(m, c, x)$ (事前対策の費用+事後補償にかかる金額)を、縦軸に地震による被害量 $H(m, c, x)$ を設け(ともに 1 棟あたりで単位は万円)、各分布型において助成額 x を 0 万円から 200 万円まで変化させ(以降はこれを提案集合と呼ぶ)その概形を描いたものが図 6, 7 である。実際の耐震性能分布は釣鐘型にきわめて近い概形を呈しているため、この分布型を例にする。図 6 においては助成額が $x=0$ から $x=x^*$ までの計画案集合はそれ以外の計画案に支配されることとなり、結果として $x^* < x < 200$ なるパレート最適集合が得られる。表 1 より静岡県の x^* は 165.66 万円であるから、もし耐震補強工事に対する助成額が $x < 165.66$ 万円であった場合、その助成額を $x=x^*$ 、つまり 165.66 万円まで引き上げることは、行政の経済的支出および地震時の被害量をもとに最小化する理想的な計画案とみてよい。 $x^* < x < 200$ なる計画案集合のなかから実際の助成額を決める場合は、この集合の中からさらなる尺度をもってして状況に応じた最適解を導き出せばよいことになる。ただし、実際には事前対策と事後補償に投入する資金の性格は大きく異なる(事前対策に費やす 1 億円と事後補償に費やす 1 億円は同じ金額でもその意義や実現性は大きく異なる)ことを考慮すると、単純に両者の線形和をもって経済的指標として一元化することは実現性の面で多少問題がある。そこで、この最適化問題に事前対策として行政が投入できる資金量なる制約条件を課すこととする。この制約条件は図 6, 図 7 の各直線で示され、その式は事前対策費用の限界投入量を対象住宅数で割った金額 C [万円]を用い、 $y = x - C$ と定義される。このような制約条件を設けることで、予算制約も考慮した最適助成額の範囲を規定することができる。ここでは仮に $C=100$ としよう。すると、図 6 において、パレート最適集合 $x^* < x < 200$ はプロット曲線と制約

条件式の交点である $x = x^{**}$ を上回ってしまい、現実的でない解と解釈される。すなわち、最適助成額は一意に $x = x^{**}$ となる。他方、図7に関しては、計画案全てがパレート最適集合となるが、 $y = x - C$ なる制約条件の存在により $0 < x < x^{**}$ がパレート最適集合となる。ちなみに、このパレート最適集合の接線の傾き $g'(x)$ (図5参照)の絶対値はその接点における人的被害と経済的投資量の比率となることは自明であり、これはパレート最適集合のなかから更に解を絞り込む際の指標にはなりうるが、このような防災計画の費用対効果水準を一意に定めることに対しては(特に規範的な意味において)議論の余地があることに注意する必要がある。

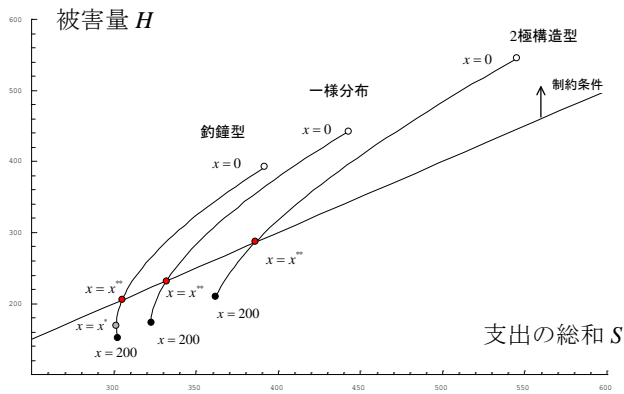


図6 パレート最適解(静岡)

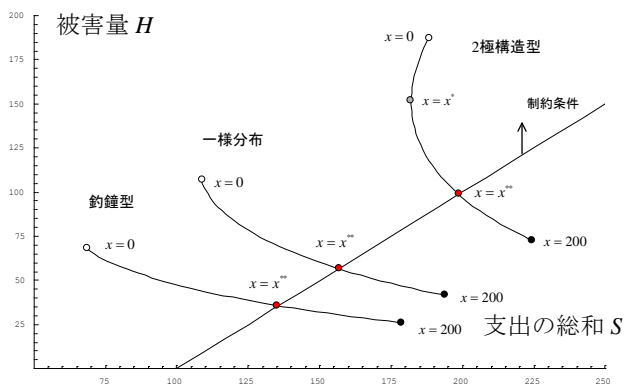


図7 パレート最適解(東京)

以上より、適切な耐震性能分布および地震ハザード関数、地震後の支援金額が与えられるという条件下において、耐震補強工事に対する助成額(あるいはその範囲)を得るための方法論を確立することができた。今回は、補強工事に対する助成額という一律の指標のみで成り立つ計画案をもってパレート最適を求めたが、その計画案を構成する指標が複数であっても同様にパレート最適集合を求めることが可能となる(ただし指標が複数になると、支出の総和と被害量を表す状態集合は(図中の曲線)2次元平面で表されることになる)。

3. 割増助成および簡易補強工事への応用

3.1 耐震性能の低い住宅に対し、割増助成を行う計画案

前章までの記述により、結果的にある想定のもとでの最適助成額およびパレート最適集合を得ることが可能となった。これにより任意の耐震性能分布や地震ハザードのもとで、客観的に助成額を把握することが可能となる。ところが、事前対策に投入可能な資源量の

制約や地震の発生確率や規模などによっては結果的に得られた最適解が人的被害の軽減に最大限つながらない可能性も十分に考えられる。よって、本章ではいままで一元的に取り扱ってきた助成額および補強の程度にある程度の自由度を持たせ、限られた制約条件下で可能な限り被害を抑止するような計画案について検討する。

一般に、脆弱な住宅をできるだけ安全な住宅に導くことが建物被害を減ずるための有効であると感覚的に考えられる。そこで、はじめに住宅の耐震性能によって助成金額を変えるという計画案を仮に提案することとする。これは公平性の観点で多少の問題点はあるが、結果的に後述する簡易耐震補強に関する議論に資する可能性もあるため、あえてそれらの現実的問題は捨象して分析に臨むこととする。具体的な最適化手法はこれまでとおなじものとするが、その助成額 x_w についてはその応用可能性を考慮し、総合評点が $0.7 \leq I_w < 1.0$ の住宅は $(1-b)x$ 、 $0.4 \leq I_w < 0.7$ の住宅は x 、 $I_w < 0.4$ の住宅は $(1+b)x$ とし、 b を $[0,1]$ の範囲で変化させることでその効果を探ることとする。すると、この場合の助成額最適化は以下(7)式のように定式化することができる。

$$\text{Min}_x \left[a \int_0^1 \int_0^1 (1-q(c-x_w, I_w)) f(I_w) h(v) p(I_w, v) dI_w dv + \int_0^1 x_w \cdot q(c-x_w, I_w) f(I_w) dI_w - \text{const} \right] \dots (7)$$

先述の考察と比較を容易にするため、基本的な仮定などはこれまでと同様のものとしよう。すなわち、補強工事の価格を $c = 200$ 、地震動を最大 100kine とし、また住宅の総合評点分布 $f(I_w)$ を実データに最も近い釣鐘型分布(図1)とする。するとその概形は係数 b によって図 8,9 の如く表される。なお、制約条件式は図 8,9 とともに $y = x - 75$ としている。図 6,7 と同じくこれらの図において横軸は経済的尺度を、また縦軸は被害量を代替する。図 8,9 においては b を 0, 0.5, 1 の3種類とし曲線を用いて計画案の効果を表したが、これを連続的に可変とすることにより、計画案 $[x, b]$ の結果である状態集合は x および b の定義域を境界条件とする面集合であらわされる。図 8,9 を概観すると、どちらの地域においても b が大きくなるにしたがって制約条件式と各曲線の交点は原点寄りに移動する。これは同一な制約条件の下では b の増加に伴い行政総支出並びに被害量双方が同時に減少することを意味しており、住宅の耐震性能によって助成金額を変えるという計画案は、どのような予算制約下においても、従前の議論において仮定していた「助成金額は住宅の耐震性能にかかわらず一律に設定する」という方針を完全に支配することが示される。これより予算制約下において、住宅の耐震性能に応じて助成金額を変えることは行政総支出・被害量を共に減じうる有効な計画案であると考えてよい。また図 8,9 において、制約条件を示す任意の直線と曲線の交点の縦軸上の差異はそのまま住宅の総合評点によって助成額の割合 b を変えた場合の軽減被害量となる。これは同一制約条件下での議論であるため、耐震性能に応じた助成を行うことによる被害量の軽減と解釈してよい。これ以外にもその他分布型を検討することにより b が増加するにしたがって、すなわち住宅の耐震性能に応じて助成額を割増すればするほど、地震発生時の被害量を軽減することができ、その差分は住宅の分布が2極分布に近づくほど、また地震リスクが高いほど大きいことがわかった。これは、限られた資源量を最大限に活用して最大多数の最大幸福を実現するという立場においてはきわめて有用な知見となる。

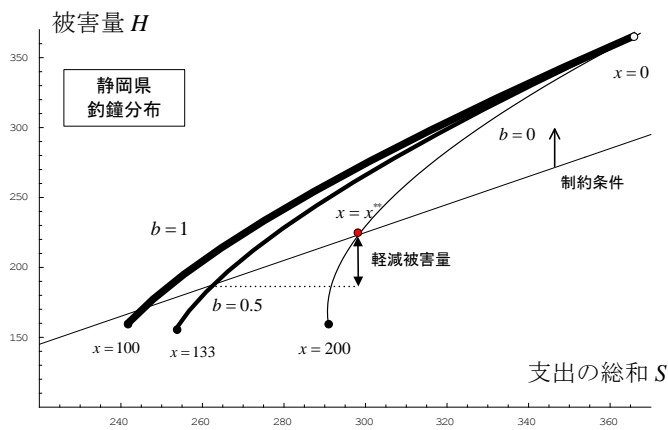


図8 割増助成のパレート最適解(静岡県)

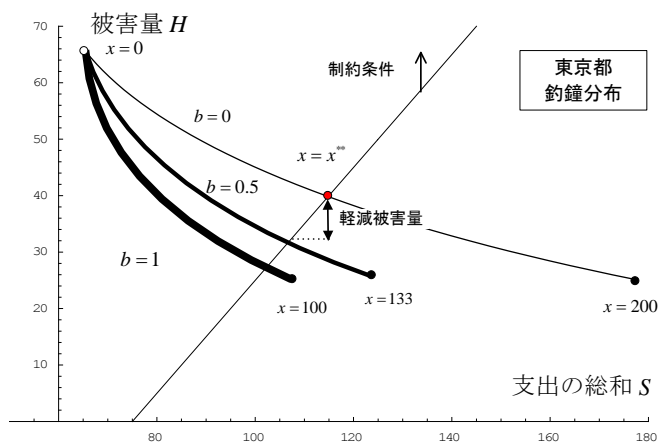


図9 割増助成のパレート最適解(東京都)

3.2 簡易補強工事への応用

前節で得られた結論より、住宅の耐震性能によって助成金額を変えると計画案が有効であるということが明らかとなった。そこで次に可能な限り被害を抑止する計画案として、簡易補強と一般に呼ばれることが多い「耐震基準を下回る補強工事」に注目する。これは基準の耐震性能を要件にすることで費用がかさみ、それによって補強工事を選択しない(できない)人のセーフティネットとなる可能性を秘めている。また、この簡易補強によって補強工事のなされる住宅は、住宅倒壊の危険性が極めて高い住宅であることが予想され、人的被害の軽減に直接的に結びつく対策となる可能性もある。さらに、これは耐震補強工事を選択できないことによって認知的不協和というある種の諦めの心理に陥っている人々に対して代替案を提案する、つまり選択の可能性を大幅に広げることも期待される[1]。もちろん、建築基準法に適合しない住宅への公金注入という点に議論の余地はあるが、「人命を守る」というパターンリズムからの立場も最大限に利用し、普通の耐震補強工事だけではなく簡易的な耐震補強工事に対する助成を行うことで、限られた資金のもとで建物被害を最大限抑えるような計画案をこれより分析する。比較を容易にするため、基本的な設定は前節に倣い、そのうえで普通の耐震補強に対する助成額を x_1 、簡易耐震補強に対する助成を x_2 とし、ここで新たに住宅の耐震補強金額をその評点によって異なるもの(総合評点 I_w が 0.7~1.0 の住宅の耐震補強が c_1 、0.7 未満の住宅の耐震

補強が c_2 、簡易耐震補強が c_3)と仮定する。すると、 I_w が 0.7~1.0 の住宅が耐震補強をする確率は $q_1(c_1 - x_1)$ と表せ、また I_w が 0.7 未満の住宅が耐震補強および簡易耐震補強する確率はそれぞれ $q_2(c_2 - x_1, c_3 - x_2)$ 、 $q_3(c_3 - x_2, c_2 - x_1)$ と表せる。また簡易補強した住宅は必ず評点が 0.7 になるものとする、この場合の最適解は以下のように表すことができる。この式を解くことで、このなかで最も被害が最小になるべき x_1 と x_2 の解の組み合わせを探ることが可能となる。

$$\begin{aligned} \text{Min}_x \left[\int_0^{0.7} \int_{0.7}^1 (1 - q_1(c_1 - x_1)) f(I_w) h(v) p(I_w, v) dI_w dv + \int_0^{0.7} q_3(c_3 - x_2) f(I_w) h(v) p(0.7, v) dI_w \right. \\ \left. + \int_0^{0.7} (1 - q_2(c_2 - x_1, c_3 - x_2) - q_3(c_3 - x_2, c_2 - x_1)) f(I_w) h(v) p(I_w, v) dI_w dv \right] \\ \left. + \int_{0.7}^1 x_1 \cdot q_1(c_1 - x_1) f(I_w) dI_w + \int_0^{0.7} (x_2 \cdot q_2(c_2 - x_1, c_3 - x_2) + x_3 \cdot q_3(c_3 - x_2, c_2 - x_1)) f(I_w) dI_w \right] \end{aligned} \quad \dots(8)$$

ここで狩谷ら(2005)より耐震補強工事の価格 c_1 、 c_2 、 c_3 をそれぞれ $c_1 = 94.1$ 万円、 $c_2 = 284.4$ 万円、 $c_3 = 167.3$ 万円とし[7]、[4]より「住宅は壊れるかもしれないが生命が助かる程度の簡易補強」をここでの簡易補強と読み替えて、ロジットモデルの最尤法により確率 $q_2(c_2 - x_1, c_3 - x_2)$ 、 $q_3(c_3 - x_2, c_2 - x_1)$ をパラメータ推定することで図 10-13 を得ることができる。

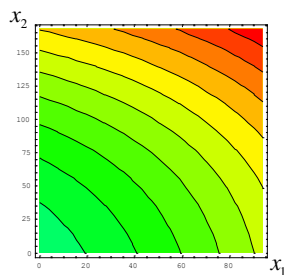


図10 地震動10kine

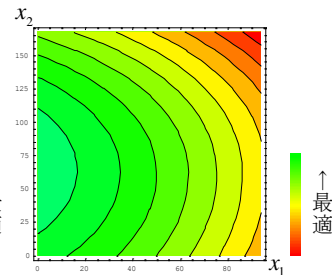


図11 地震動25kine

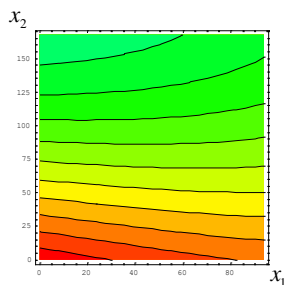


図12 地震動50kine

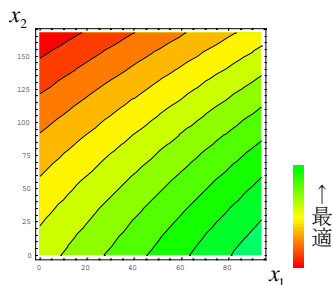


図13 地震動100kine

ここでははじめに Hazard Curve を考慮せず、地震動の大きさごとの評価を行っている。対象とする地震動はそれぞれ 10kine、25kine、50kine、100kine とした。また横軸は普通の耐震補強に対して助成する金額 x_1 であり、縦軸は簡易補強に対して助成する金額 x_2 である。図中の色は事前・事後の行政総支出 $S(x)$ を赤から緑に色分けしたものであり、緑色に近い方が最適解に近いという解釈となる。等高線はその総和が等しくなる x_1 と x_2 の組み合わせを意味する。これらの図は地震規模の大小で両者の解の組み合わせが大きく変化することを示している。地震動が 25kine、50kine のケースは簡易耐震補強が効果を発する好例といえ、簡易耐震補強工事による助成は大きな意味を持つ。他方、100kine の場合は(簡易補強工事をした住宅も壊れてしまうほどの地震動のため)簡易補強に対する助成よりも普通

の耐震補強に対する助成を重視したほうが経済的効率はよい。また当たり前のことであるが地震動が Okine の場合は補強工事そのものが効率的でないという結論が得られる。これらは直感的にも理解できることであるが、このように簡易耐震補強に対する助成は、想定される地震動の大小によってはその効果が正反対になってしまうことも十分に考えられる。その部分が簡易補強工事に対する議論の難しさである。

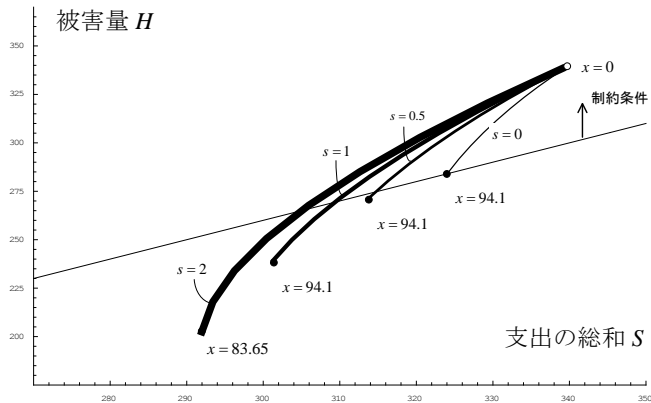


図 14 簡易補強工事への助成の効果(静岡)

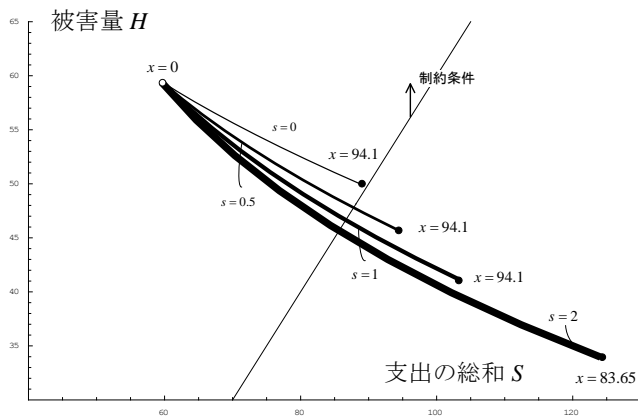


図 15 簡易補強工事への助成の効果(東京)

この2種の相反する解釈を一度に取り扱う場合は、これまで仮定したように Hazard Curve データを用いて地震現象を確率現象とみるのがよい。また、これだけでは自由度が大きすぎ最適化の結果の解釈が困難となる可能性があるため、 x_1 と x_2 の間に $x_2 = sx_1$ なる関係を定義し、この係数 s の値によって助成の効果を探ることを試みる。この s が 1 と等しい場合は簡易補強にも耐震補強と同じ程度の助成を行う、すなわち補強の程度に因らず助成金額は一律であるということを表している。また s が 0 ということは、簡易補強に助成を行わないという計画案となる。この最適化をはかることで、結果的に静岡県静岡市と東京都新宿区における簡易耐震補強の助成制度に対するマクロ評価が可能となり、その結果は図 14-15 として示される。なおこれらの図は双方とも制約条件を $y = x - 40$ で与えた。この図においてもやはり、係数 s が大きくなればなるほど制約条件と曲線との交点(すなわち制約条件下での最適解)が順々に支配されているのが見てとれる。これより本稿で想定した条件においては、簡易補強の本来の目的であった人的被害の軽減のみならず、倒壊被害及び

行政の期待総支出を減ずるという意味においても、簡易補強に対する割増助成はきわめて有効な計画案として解釈することが可能となる。

4. 耐震補強を推進するための計画案の公平性に関する検討

前章までの検討より耐震補強工事における最適な助成額を検討し、また助成額に自由度を持たせることによる効果的な助成制度のありかたを提案した。これにより、パレート最適集合を満たす助成額および割増助成や簡易補強への助成が、行政総支出および被害量を同時に軽減する理想的な計画案であることが明らかになった。しかし、このパレート最適化によって得られた解集合は、必ずしも公平な分配を保障するものではない[8]。そもそも前出のように、ひとたび災害が生起すれば、被災者生活再建支援法による生活再建のための現金支給、仮設住宅建設費用、がれき撤去作業費などの莫大な支出がその被害量に応じて発生し、そしてこれは都市空間における災害に対する脆弱性に応じて著しく増減することもまた自明である。したがって事前対策のありかたは事後補償の多寡に影響するとみてよく、パレート最適集合に到達するまでの過程においては、個人住宅の耐震補強工事に行政が金銭的助成を行うことは「人的被害の軽減」だけでなく事前対策と事後補償にかかる資金の総和を減らすことができる。効率性を社会的な望ましさの唯一の指標とするのなら、耐震補強工事に対する助成はこれにより正当化される。しかし、これは計画案の対象間の格差を考慮していないという計画案として重大な問題がある。具体的には、助成制度という政策によって、自助努力によってどの程度であれ既に耐震性を確保した居住者と(より多くの)助成制度を利用することができる人に対しては自ずと相対的な利害関係が生じることになり、その結果その効率的な助成制度は必ずしも社会的に望ましい計画案とならない状況を危惧している。よって最後に本章で、先で論じた「効率的」な各助成制度を公平性の視点も加えて見つめなおし、その是非を論じることとする。

一般に公平性や格差といった概念は Bergson, Samuelson が提案した社会的厚生関数の他に、ローレンツ曲線、ジニ係数によって定量化化されることが多い。しかし今回は、その利便性も考慮し、前者の社会的公正関数を用いることとする。はじめに、計画案の対象者を n 人とし、個人 i の効用を u_i 、社会厚生水準を w とすると(ともに $\in R$)、一般的な社会的厚生関数 $W: R^n \rightarrow R$ は(9)式の如く示される。また、(9)式的具体的な形は Bentham 型、Rawls 型、Nash 型など様々なものが考えられているが、今回は(10)式で示される Nash 型社会的厚生関数を用いる。これは Bentham 型の社会的公正関数は功利主義の立場から定義されているため、公平性を議論することができないこと、また Rawls 型は最も効用値の低い個人が対象となるため、前章の結論がそのまま公平な計画案という結果を得られることが自明であることによる。

$$w = W(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad \dots(9)$$

$$w = \prod_{i=1}^n u_i \quad \dots(10)$$

これより具体的な定式化を行う。耐震補強工事に対する助成金は耐震補強工事にしか用いることはできないため、個人 i の効用 u_i は「地震による家屋倒壊を免れる確率」をただ1つの指標とみなしても一般性を失わない。ここで、耐震補強をしたのに壊れることはな

いものと考え、地震によって家屋倒壊を免れる確率は耐震補強しないで壊れる確率の補集合そのものとなるため、助成金 x における個人 i の利益は(11)式で示される(ただし耐震性能個人 i の住宅の脆弱性を k_i とする)。また、社会厚生関数である(10)式の両辺の対数の絶対値を取ることで、社会的厚生関数の対数は以下(12)式のように示される。

$$\int (1-h(m)p(k_i,m)(1-q(c-x,k_i)))dm \quad \dots(11)$$

$$\log[w] = \int_0^1 f(k) \cdot \log \left[\int (1-h(m)p(k,m)(1-q(c-x(k),k)))dm \right] \cdot dk \quad \dots(12)$$

ここで、具体的な数値は前章と同じものを使い、(12)で示される社会厚生関数の計算を行った。すると、助成額 x 及び割増助成の程度 b によって公平性は下図 16,17 の如く示すことができ、図 6-9,14,15 と比較することで計画案の公平性を図ることが可能となる。これより、Nash 型の社会厚生関数が正しく公平性を考慮して社会的な望ましさを表現しているものと仮定すれば、助成額の割増制度を中途半端に実現することは公平性の点から望ましくないこと、また図 16,17 を比較することで、割増制度による不平等は地震被害の地域差よりもきわめて小さいことなどがわかる。

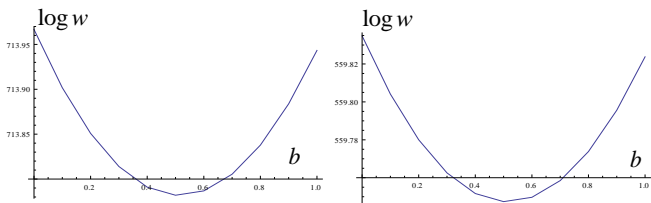


図 16 割増助成の公平性(静岡) 図 17 割増助成の公平性(東京)

5. おわりに

本稿は 1)住民の意思決定構造を考慮した助成額の検討、2) 不確実性を考慮した評価手法、3) 経済的効率のみならず、被害量の最小化も視野に入れた多目的最適化への展開、4) 得られた助成制度案に対する公平性の検討、という 4つの視点から、これまで確たる意思決定の方法論をもたなかった耐震補強の助成額について考察を行ったものである。その結果、文中で想定した条件下のもとではあるが、具体的な助成額を知るための方法論を確立できたことが本研究のエートスといえる。また、それ以外にも概括して以下に示す結論を得ることができた。

1. これまでは天下りの補強工事の棟数を与えるなどして助成制度の効果測定を行っていたが、その棟数の補強工事が実現するか否かについては議論がされてこなかった。本研究ではこの問題意識を背景とし、新たに住民の選択行動も考慮した耐震補強工事助成額の検討を行うことができた。これは実際の耐震性能分布及び被害関数を考慮したある程度実用的な数値となっているため、提案される、もしくは本研究の検討手法を用いて得られる助成制度案がどれほど利用され、それによって耐震補強工事がどの程度進捗するかに関する予測も行うことができる。またこれは被害量と経済的尺度双方を考慮した多目的最適化であり、事前対策に関する金銭的な制約条件や地震現象の不確実性も考慮したものである。よってここで得られた

結論は、正しい住宅の耐震性能分布が得られればそのまま行政の意思決定に利用することができる可能性を秘めている。

2. 補強工事に対する最適な助成額は多分に地域性や耐震性能分布の影響を伴うものであり、地域の実状にあった助成額・助成制度を確立することが必要という結論が得られた。それゆえ、本稿で提案した簡便な意思決定手法が有用なものとなる可能性もある。

3. 耐震性能の低い住宅に対して割増助成を行うことは、行政の期待総支出および地震被害を同時に減ずる有効な計画案であることがわかった。また、その際に課題となるであろう公平性の問題に対しても検討を加え、その程度を定量的に表した。

3. 簡易耐震補強に対する助成制度の効果は地震動に大きく依存することはこれまでも感覚的に知られていたが、本研究ではさらに地震を不確実性の伴う確率現象とらえ MiniSum 型の最小化問題を解いた。それにより本研究で想定した条件のもとでは、簡易耐震補強工事に対する割増助成はその主目的である人的被害だけでなく、倒壊被害及び行政の期待総支出軽減に大きな効果がある、という結論が得られた。

4. 本研究では、木造住宅居住者の耐震補強工事への阻害要因の 1つである「工事費用の高さ」を取り上げ、その課題を解決しうる有効な手段として、行政からの助成金に焦点を絞り、議論したものである。その結果、静岡県で約 165 万円もの助成額が妥当との結果を得た。これは、現実的には今回取り上げた行政からの助成金のみでは十分な被害の軽減が不十分であることなどを示唆しており、都市空間の脆弱性を解決するためには各種様々な手法を組み合わせる必要があることを示している。工事費用の高さの問題を解決する手法だけに限っても、税金や保険金の控除など助成金以外のインセンティブを与えるなど様々な解決策が考えうる。よって、意思決定構造をもととして適切に意思決定者を分類し本研究の手法を援用することで、助成金以外の制度設計にも資するものと考えられる。

本稿では、行政を主体とした耐震補強工事に対する助成額の最適化問題を対象とした。これは、これまで確たる基準で決められてこなかった助成額をマクロ的な視点から方針付けを与え、またそれらの相互評価を可能にする、萌芽的研究と位置づけられる。耐震性能分布や地震発生確率といった地域特性をいかした助成制度の確立が期待される。ただし本研究を実用的なものにするためには、まだ多くの問題点を残していることも事実である。よって、本研究で得られた知見を用いてさらに現実的な制度設計を実現するためには、先に述べた問題のほか、より正しい耐震性能分布や被害関数を得ること、耐震補強工事の選択確率をより現実的な形で記述することなどの点が課題となる。特に、本研究では居住者の選択行動を非集計ロジットモデルによる定式化を通してその表現を可能としたが、このモデルで行動を予測できるのは、意思決定者のごく一部であることが予想され、効用関数にも様々な形が考えられる。また今回は被害量を住宅倒壊としたが、何らかの方法で人的被害を算出することで、簡易補強の一番の目的である人的被害軽減効果についても議論できるに違いない。これらはごく近い将来において解決しなくてはならない課題であるが、本稿はそのワンステップとして議論をすすめたものである。

謝辞

本研究をすすめるにあたって、独立行政法人・防災科学技術研究所、および日本木造住宅耐震補強事業者協同組合のデータを利用して頂きました。皆様方に深甚なる敬意を表します。

参考文献

- 1) 廣井悠, 廣井脩(2007): 住宅の耐震補強を例とした情報伝達のあり方に関する研究, 災害情報, No.5, pp95-107.
- 2) 目黒公郎, 高橋健(2001): 「既存不適格建物の耐震補強推進策に関する基礎研究」, 地域安全学会論文集, No.3, pp.81-86.
- 3) 吉村美保, 目黒公郎(2002): 「公的費用の軽減効果に着目した木造住宅耐震補強助成制度の評価」, 地域安全学会論文集, No.4, pp.247-254.
- 4) 廣井悠, 小出治, 加藤孝明(2006), 「ランダム効用理論に基づく住宅の耐震補強に関する選択行動分析」, 地域安全学会論文集, No.8, pp89-97.
- 5) 梅村幸一郎, 山崎文雄(2002): 「横浜市の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築」, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.109-116.
- 6) 永松伸吾, 秦康範(2003): 「住宅被害の軽減策の推進と事後補償の充実～両立可能な制度の提案～」, 地域安全学会論文集, No.5, pp.353-362.
- 7) 狩谷のぞみ, 村尾修, 熊谷良雄, 糸井川栄一(2005): 「実データに基づく耐震補強費用の実態と耐震性能向上効果」, 地域安全学会論文集, No.7, pp.263-272.
- 8) Amartya Sen, 志田基与師[監訳](2000): 「集合的選択と社会的厚生」, 勁草書房.
- 9) 村尾修, 山崎文雄(2002): 「震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した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, No.555, pp.185-192.
- 10) 堀江啓, 林春男, 田中聡, 長谷川浩一, 牧紀男, 沖村孝(2003): 「地震による木造建物の損傷度を反映する被害関数の構築」, 地域安全学会論文集, No.5, pp123-132.
- 11) 小檜山雅之, 山崎文雄(2003): 「耐震診断データに基づく木造建物の被害関数-加速度応答スペクトルによる一部損壊以上の被害評価-」, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.137-144.
- 12) 吉村美保, 目黒公郎(2005): 「自治体による保証に基づく既存住宅の耐震補強奨励制度に対する住民意識の分析」, 地域安全学会論文集, No.7, pp.35-42.
- 13) Averbakh, I. and Berman, O. (1997): 「MiniMax regret p-center location on a network with demand uncertainty」, Location Science, 5(4), pp.247-254.
- 14) 司 宏俊, 翠川三郎 (1999): 「断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式」, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp.63-70.
- 15) 松岡昌也, 翠川三郎 (1993): 「国土数値情報を利用した広域震度分布予測」, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 447 号, pp.51-56.