耐震補強工事に対する助成額の検討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****

By U HIROI**・Osamu KOIDE***・Takaaki KATO****

１．はじめに

東海・東南海・南海地震や首都直下地震など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 割はいまだ耐震性が不足しているといわれ，数ある防災対策の中でも木造住宅の耐震化は最重要課題となっている．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明らかにし，また静岡県，横浜市など地方自治体も様々な耐震補強推進策を行っているが，それでも戸建住宅の耐震性確保は期待通りに進んでない．一方，耐震補強工事を選択するか否かは意思決定者の属性や選択肢の特性によって大きく異なることが予想され，特に地震時の住宅倒壊の被害がもっとも大きそうな集団は耐震補強実施率が低いことが予想されている．この理由に関しては様々な研究がなされているが，たとえその意思決定構造がどのようなものであれ，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，すでに各自治体で行われ始めている割増助成などの政策の使い分けは今後をにらむうえで必要な議論であるに違いない．本研究は，耐震補強の制度面に関するいくつかの既存研究 [1)－3)] の流れをくみ，新たに 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，の 3 点 に留意し，最後に現在その有効性が叫ばれつつある簡易補強に対する助成制度について分析するものである．

*キーワーズ：防災計画、計画手法論

**非会員、工修、東京大学大学院工学系研究科

（東京都文京区弥生2-11-16工学部9号館602、

TEL03-5841-7255、FAX03-5841-7327）

***会員、工博、東京大学大学院工学系研究科

（東京都文京区本郷7-3-1工学部14号館910、

TEL03-5841-6274、FAX03-5841-6274）

２．助成額の最適化に関する方法論の展開

はじめに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 としその分布を $f(k)$ とする．このもとで，耐震補強工事に対する助成額をx 万円とし，木造住宅世帯主の耐震補強選択確率を $q(c,k)$ とすると，助成制度対象領域における助成額の総和は以下(1)式で示される．

$$\int_0^\infty x \cdot q(c-x,k) f(k) dk \qquad \cdots(1)$$

他方，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 とみなせる微小領域において，全壊確率である(2)式が求められる．

$$\int_0^\infty (1-q(c,k)) f(k) p(k,m) dk \qquad \cdots(2)$$

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c とx の影響のみ受けると仮定する．つまり，耐震補強工事選択の如何は意思決定者の経済負担のみに依存すると考えるのである．このやや強い仮定をおいたとき，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とが予想される．すなわち助成額x の多寡によって両者はそれぞれ逆に増減することとなり，これによって事前対策に投入する資金と地震後の支援として必要となる資金との間にトレードオフ関係が想定されるのである．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考えた場合，適切な被害関数 $p(k,m)$ の解釈により，(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$S(x)$ をx について最小化することが可能となる．ここで$q(c,k)$ および $p(k,m)$ を以下のように定義した [1),4)]．その結果が以下(3)式および(4)式である(ただし$q(c,k)$ に関しては耐震補強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いる．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た [1)]． $p(k,m)$ 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，$V_0 = 88.3$，$\zeta_{I_w} = 0.12$，$I_{w0} = 0.823$ と

なる[4])：

$$q(c,k)=(1+\exp[0.008c-1.305])^{-1}\,, \qquad \cdots(3)$$

$$P_{iw}(V)=\Phi(\ln V-\ln(V_0\,(I_w/I_{w0}))/\zeta_{I_w})\,. \qquad \cdots(4)$$

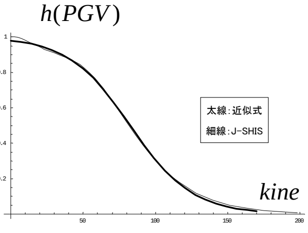
その結果下式(5)を満たす x が，ある地震動 m が想定される場合の行政の経済収支を最小化する助成額となる．

$$\underset{x}{\mathrm{Min}}\left[a\int_0^\infty(1-q(c-x,k))\,f(k)\,p(k,m)dk+\int_0^\infty x\cdot q(c-x,k)\,f(k)\,dk\right] \qquad \cdots(5)$$

ここで地震動 m の発生確率を $h(m)$ と定義することで，以下(6)式で示される行政の期待総支出最小化問題が定式化され，最適助成額 x を求めることができる．

$$\underset{x}{\mathrm{Min}}\begin{bmatrix}a\int_0^\infty\int_0^\infty(1-q(c-x,k))\,f(k)h(m)\,p(k,m)\,dkdm\\+\int_0^\infty x\cdot q(c-x,k)\,f(k)\,dk\end{bmatrix} \qquad \cdots(6)$$

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．また係数 $a=1300$ と仮定した[2]．図 1 及び図 2 は静岡県および東京都における両者の比較である．



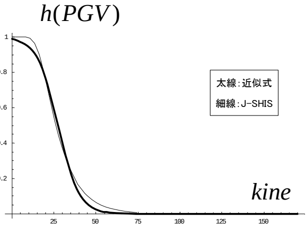
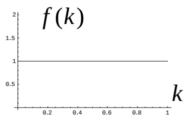
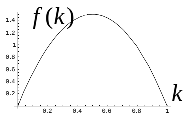


図 1 静岡の Hazard Curve　図 2 東京の Hazard Curve





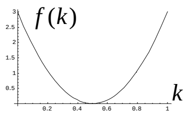


図 3 一様分布　図 4 釣鐘型分布　図 5 2 極分布

住宅の耐震性能分布を正確に知ることは難しい．そこでこれらに関しては，図 3-図 5 の如き典型的な分布型を用意し，それぞれを一様分布，釣鐘分布，2 極分布と名づけた．さらに，政策評価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るべく，複数の評価基準の同時最適化(多目的最適化)を行った．この問題はいわゆる多目的計画となり，その解の集合は多目的な指標を持って最適化問題を取り組む際の目標であるパレート最適集合として表されとして示される．ここで簡単のため今までと同じく建物全壊のみを考え，また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 万円まで変化させその概形を描いたものが図 6，図 7 である．ここで，例えば図 7 においてもしある地域における耐震性能分布が 2 極構造型であった場合，先の最適助成額 $x=x^*$ から $x=0$ までの政策案はそれ以外の政策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．すなわち，もし耐震補強工事に対する助成額が $x<x^*$ であった場合，その助成額を $x=x^*$ 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ともに最適化する理想的な政策案とみてよい．$x^*<x<200$ なる政策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，事前対策と事後補償に投入する資金の性格がやや異なる以上，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困難である．つまり「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味合いは全く異なる」との認識を考慮するわけである．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 $y=x-C$ となる．ただし，この C は住宅 1 軒あたりに事前対策費用として投入できる予算制約であって，限界投入量を対象住宅数で割ったものとなる．このような制約条件を設けることで，各分布形における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．図 7 において，2 極型に関しては，前節で求めた値 $x=x^*$ と，プロット曲線と制約条件式の交点である $x=x^{**}$ の範囲が助成額の最適集合となり，釣鐘型・一様分布においては $x=x^*$ が $x=0$ を下回るため，$x=0$ から $x=x^{**}$ までの範囲が最適集合となる．他方，図 6 の各分布に関しては前章で求めた最適値 $x=x^*$ が制約条件との交点 $x=x^{**}$ を下回り，予算制約上の都合から経済的指標を基準とした最適化がはかれない状況になっている．よって，$x=x^{**}$ なる点が最適助成額となる．以上より，適切な耐震性能分布および地震ハザード制約，復興に必要な支援金が与えられるという条件下において，耐震補強工事助成額のパレート最適集合，すなわち優秀な政策案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政策案をもってパレート最適を求めたが，その政策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．このパレート最適という考え方は防災分野における最適化問題を扱う場合，きわめて有用な概念であるものと考えられる．

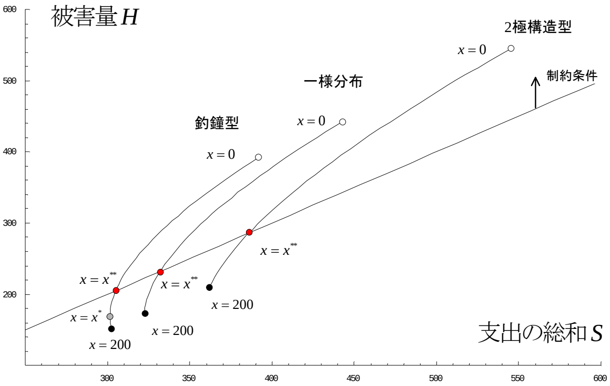


図 6　 パレート最適解(静岡)

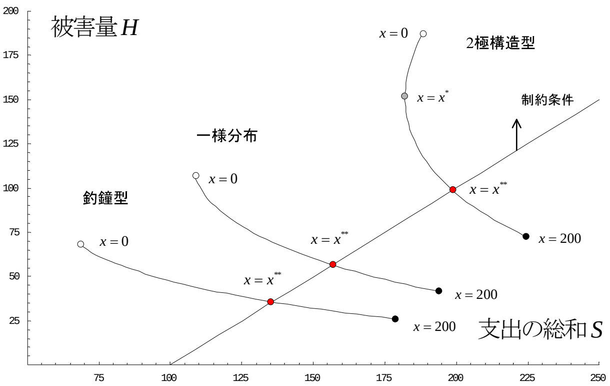


図 7　パレート最適解(東京)

4．簡易補強工事への応用

ここでは比較を容易にするため，基本的な設定は前章に倣うこととする．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 7.0 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 になるものとすると，この場合の最適解は(7)式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できるのである．ここで補強工事の価格 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，「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」をここの簡易補強と読み替え $q_2(c_2-x_1,c_3-x_2)$， $q_3(c_3-x_2,c_2-x_1)$ をロジットモデルによるパラメータ推定することで図 8-11 を得ることができる[1),5)]．

$$\mathop{\mathrm{Min}}_{x}\left[\begin{array}{l} a\int_0^{\infty}\{\int_{0.7}^{1}(1-q_1(c_1-x_1))f(I_w)h(v)p(I_w,v)dI_w+\int_0^{0.7}q_3(c_1-x_1)f(I_w)h(v)p(0.7,v)dI_w \\ +\int_0^{0.7}(1-q_2(c_2-x_1,c_3-x_2)-q_3(c_3-x_2,c_2-x_1))f(I_w)h(v)p(I_w,v)dI_w\}dv \\ +\{\int_{0.7}^{1}x_1\cdot q_1(c_1-x_1)f(I_w)dI_w+\int_0^{0.7}(x_2\cdot q_2(c_2-x_1,c_3-x_2)+x_3\cdot q_3(c_3-x_2,c_2-x_1))f(I_w)dI_w\} \end{array}\right] \quad \cdots(7)$$

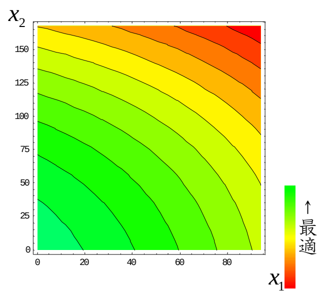


図 8　地震動 10kine

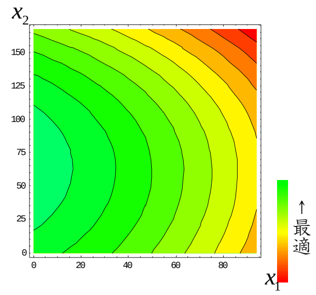


図 9　地震動 25kine

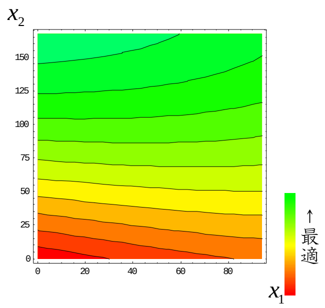


図 10　地震動 50kine

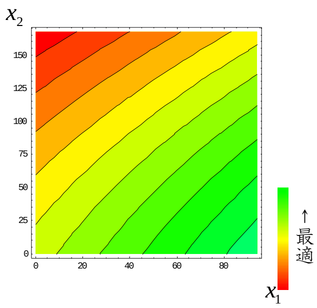


図 11　地震動 100kine

はじめに，Hazard Curve を考慮せず，地震ごとの評価を行う．ここで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．また図中の色は事前・事後の行政総支出の総和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．等高線はそれら総和が等しくなる x_1 と x_2 の組み合わせを意味する．これらの図により，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が明らかとなった．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ということが明らかとなる．他方，100kine の場合は簡易耐震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く，また当たり前のことであるが地震動が 0kine 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といえよう．

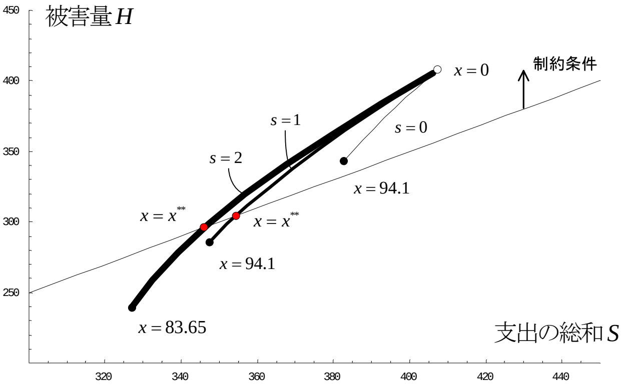


図 12　簡易補強工事への割増助成の効果(静岡)

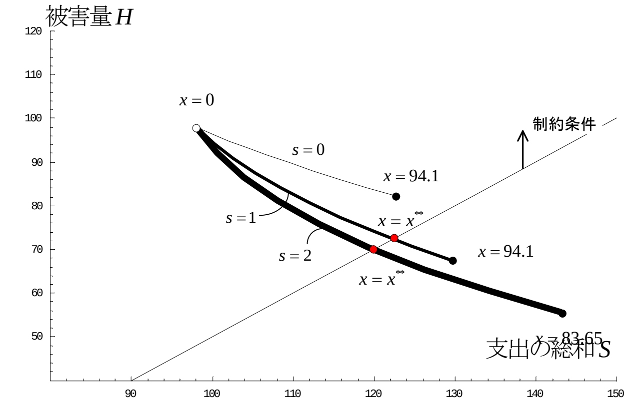


図 13　簡易補強工事への割増助成の効果(東京)

さて，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ことが必要とされる．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 と等しい場合は割増助成を行わない，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，簡易補強そのものに助成を行わないという政策案となる．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評価を得ることができ，その結果が図 12-13 として示される．なおこれらの図に限り，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政策案として解釈することが可能となる．

５．おわりに

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．これによって，これまで確たる基準で決められてこなかった助成額に何らかの方針付けを与えることができたとともに，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．本研究で得られた知見を用いてさらに現実的な政策提言を行うためには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をはじめとしたたくさんの課題が残されているが，これらはごく近い将来における今後の課題としたい．

参考文献

1）廣井悠，小出治，加藤孝明：「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，pp89-97，2006.

2）目黒公郎，高橋健：「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.81-86，2001.

3）吉村美保，目黒公郎：「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.35-42，2005.

4）梅村幸一郎，山崎文雄：「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.109-116，2002.

5）狩谷のぞみ，村尾修，熊谷良雄，糸井川栄一：「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.263-272，2005.

6）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.

7）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.