

不確実性下における構造性能意思決定問題の影響因子に関する研究

下田 祥
指導教員 高田 毅士 教授

1. 序論

1.1 研究背景

近年、耐震リスク等建築物の構造性能の確率論的な評価が活発に行われ、様々な応用研究が行われている。しかし、実際にそうした研究成果と実際の利用との間には、格差があるように感じられる。例えば、兵庫県南部地震で大きな被害が観測された既存不適格木造住宅の耐震性能については、リスク評価という観点からも危険性・耐震化の効果の可視化が、主として期待値計算によって行われているが、実際に耐震化に結びついていないとは言えない現状がある。鳥澤ら¹⁾は対話による調査の中で耐震化に対する意識構造を「意識レベル」「行動レベル」の2段階に分解し、耐震化に結びつかない理由として危険性の認知の欠如・またきっかけがないといった点を挙げている。しかし、神奈川県横浜市にて行われた耐震診断利用者に対するアンケート²⁾を見てみると、耐震診断で危険性を認知し、機会があるにも関わらず耐震診断をしないという選択を行った割合は少なくない。防災行動に至らなかった理由を分析すると、耐震化が経済的・状況的に不可能である群を除けば「効果・意義が感じられない」という回答が多数であった。期待値という観点で見れば、効果はあることは先に述べたとおりである。

以上からリスク評価結果を利用した構造性能決定を行うに当たって、人々は従来の研究では取り上げられていない方法・観点で意思決定を行っている可能性がある。心理学分野の研究で、不確実な結果をもつ投資においては、結果や初期費用のスケールが小さい場合は投資を好み、大きくなる場合はリスク回避的になること³⁾や、確率の低いものはより低く、高いものはより高く見積もるバイアスがかかるという報告⁴⁾もある。つまり、不確実性下での満足度の高い意思決定についてはより多角的な視点を持って取り組まなければならない必要があるといえる。

1.2 研究概要と目的

本研究では、既存不適格木造住宅の耐震補強案選定問題を例題として、地震被害など不確実性を有する事象に対する人々の意思決定について、特に金融工学・行動経済学で発達した期待効用理論を用いて考察する。

その為にまず、期待される補強と災害時損失の総費用を最小化する建物強さを耐震診断評点によって算出する。その後期待効用理論によってモデル化し、2つの心理指標についての考察を行う。最後にそのモデルに従って、今まで考慮されてこなかった影響因子の影響をアンケートによって測る方法も試験的に作成する。今回は影響因子として、意思決定者が保有する資産額と、地震動強さの確率分布(PGV)を取り上げ、その影響を評価する。それらを通じて、不確実性下での建築構造性能意思決定問題をより多角的な視点で取り扱うための手法を作成する。

2. 期待総費用最小化による最適補強点評価

2.1 地域ごとの地震ハザードカーブの作成

J-SHIS のハザード評価結果(平均ケース,30年)⁵⁾に基づいて、各評価地点のハザードカーブを作成した。地表最大速度 PGV に関する確率分布関数を対数正規分布と仮定すると、地域ごとのパラメータは表1のようになる。

表1: 主要10都市ハザード係数

都市名	対数平均値	対数標準偏差	都市名	対数平均値	対数標準偏差
福岡市(福岡)	1.78	0.57	甲府市(山梨)	3.65	0.52
高知市(高知)	3.31	1.12	新宿区(東京)	2.98	0.40
大阪市(大阪)	3.01	0.55	新潟市(新潟)	1.89	0.57
津市(三重)	3.52	0.59	仙台市(宮城)	2.79	0.46
静岡市(静岡)	4.22	0.46	札幌市(北海道)	1.67	0.53

2.2 評点・期待損失額に対応するフラジリティ曲線作成 (1)建物耐力⁶⁾

1995年の兵庫県南部地震の際に行われた数多くの地震被害調査により、建物の耐力分布は下の(1)式の対数正規分布に従うことが報告されている。

$$f_R(r) = \frac{1}{r\zeta_R\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln r - \lambda_R}{\zeta_R}\right)^2\right] \quad (1)$$

(2) 耐震診断評点と PGV との関係⁷⁾

境らの報告より、PGVによる計測震度 I_{PGV} と木造住宅のベースシア係数 C_y との関係は(2)のように表現できる。

$$I_{PGV} = 4.64 + 1.14 \log C_y \quad (2)$$

I_{PGV} と PGV との関係は対数の関係を持つことが知られている。⁸⁾耐震診断評点 E が C_y に比例するものとする(3)式が得られる。

$$PGV \propto E \quad (3)$$

村尾、山崎の木造住宅被害関数⁹⁾(表2)を用いる。このデータと評点に対する調査データ¹⁰⁾(表3)を対応させることで以下の式を得る。

$$PGV = k \cdot E \quad (k_{全壊} = 173, k_{全半壊} = 105) \quad (4)$$

(3)式の関係を用いれば、各耐震診断評点において木造住宅が全壊もしくは全半壊する際の最大地動速度の平均値が導き出される。対数標準偏差を表3から得ることで、各耐震診断評点について木造住宅の全壊時、全半壊時のフラジリティ曲線が導出される。

表2: 年代別被害関数係数⁹⁾

	木造住宅全壊時		木造住宅全半壊時	
	対数平均値	対数標準偏差	対数平均値	対数標準偏差
1950以前	4.36	0.41	3.66	0.67
1950~1959年	4.44	0.35	3.97	0.49
1960~1971年	4.45	0.34	4.02	0.46
1972~1981年	4.73	0.38	0.25	0.40
1982~	5.12	0.50	4.61	0.47
	4.51	0.41	4.07	0.51

表3: 年代別耐震診断評点¹⁰⁾

年	A	B×C	D×E	F	診断数
	地盤・基礎	建物の形・壁の配置	筋かい・壁の割合	老朽度	
1950年以前	0.63	0.78	0.71	0.90	1,630
1950~1959年	0.70	0.80	0.89	0.90	1,538
1960~1971年	0.75	0.84	0.98	0.91	5,591
1972~1981年	0.76	0.86	1.13	0.93	15,773
1982~	0.82	0.86	1.38	0.97	20,150

(3) 期待損失額別フラジリティ曲線の導出

ここで利用した被害関数の被害度区分は自治体調査の定義によるもので、全壊とは建物時価の50%以上の損壊、また半壊は20~50%の損壊である。ここで表3における全壊を期待損失額が住宅価値全体の75%以上、全半壊を35%以上の損失と設定し、その他の損失額に対するフラジリティ曲線はパラメータを線形補完することによって求めることとする。2.2(2)を用いて、各評点に対応した期待損失額ごとのフラジリティ曲線を算出することができる。

2.3 損傷確率の算出

2.1~2.2 において地動速度と建物の耐力はともに対数正規分布に従うものと仮定した。地動速度の確率変数・耐力をそれぞれ R, S とすると式(5)で余裕 G が定義される。

$$G = \ln R - \ln S \quad (5)$$

R, S がともに対数正規分布をなすとき、 G は正規分布となる。 R, S の対数平均値、対数標準偏差 ζ_R, ζ_S を用いて、 G の対数平均値 μ_G と対数標準偏差 ζ_G は式(6)で表される。

$$\begin{aligned} \mu_G &= \lambda_R - \lambda_S \\ \sigma_G &= \sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2} \end{aligned} \quad (6)$$

すると建物の損傷確率 $P(G < 0)$ は式(6)で表される⁶⁾。

$$\begin{aligned} P(G < 0) &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{g - \mu_G}{\sigma_G}\right)^2\right] dg \\ &= \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

2.4 期待総費用の算出⁷⁾

補強コストに対する評点上昇度 E_i は(8)式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_i &= E_a - E_b \\ E_i &= 0.85 \cdot \ln(C) - 11.69 (E_b < 0.7) \end{aligned} \quad (8)$$

$$E_i = 1.45 \cdot \ln(C) - 19.48 (0.7 \leq E_b < 1.0)$$

ここで、 E_a :補強後の評点、 E_b :補強前の評点、 C :耐震補強費用(万円)

木造住宅の平均的資産価値を 1500 万円に設定する。2.1,2.2,(7)式より各耐震診断評点の期待損失額発生確率が算出される。

また(8)式より補強費用も合わせて考えると期待総費用 C は(9)式で表わすことができる。

$$C_T = C_l + C_r \quad (9)$$

ここで、 C_l :期待損失費用、 C_r :耐震補強費用(8)式を最小化するような補強策とその期待総費用を各地域・各初期評点に対して算出する。また図4に静岡県静岡市初期評点 0.5 での C_l と C_r の関係を示す。この場合は実線における最小点の評点 1.3 が最適補強評点に当たる。

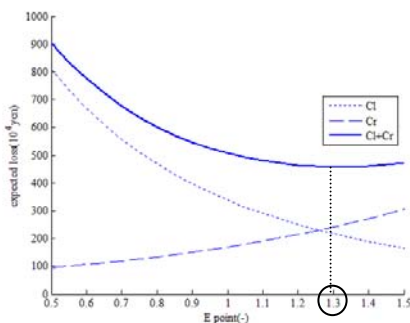


図1.期待総費用算出モデル(静岡県静岡市初期評点 0.5)

2.5 結果と考察

表4に主要10都市での最適補強点と期待総費用を示す。初期評点は0.5としたが、ハザードが大きい静岡や高知などの地域では補強を行うことが望ましいという結果が出た。これは境ら⁶⁾の報告と一致する。

表4.主要10都市における最適補強評点と期待総費用(初期評点 0.5)

	最適補強点(-)	期待総費用(万円)
福岡市(福岡)	0.50	170
高知市(高知)	1.05	337
大阪市(大阪)	0.75	193
津市(三重)	1.00	261
静岡市(静岡)	1.30	422
甲府市(山梨)	1.05	275
新宿区(東京)	0.70	181
新潟市(新潟)	0.50	170
仙台市(宮城)	0.65	178
札幌市(北海道)	0.50	169

3. 期待総効用最大化による最適補強点評価¹¹⁾

3.1 期待効用理論を用いる目的

地震に対する防災投資の意思決定に関連する要素について、2つの特徴に着目する。1つ目は、不確実な地震による損失と確実な初期費用をどう対応付けるか、2つ目は地震の持つロングテールな発生確率分布に対する認知のバイアスである。期待効用理論、特に SWU モデル (Subjectively Weighted Utility model)⁴⁾ではこれら2つの因子を別個に表現することができるため、これを用いる。リスクに対する態度は心理指標 γ によって、意思決定時の情報としての確率に関するバイアスについては心理指標 α によって表現する。詳細については後述する。

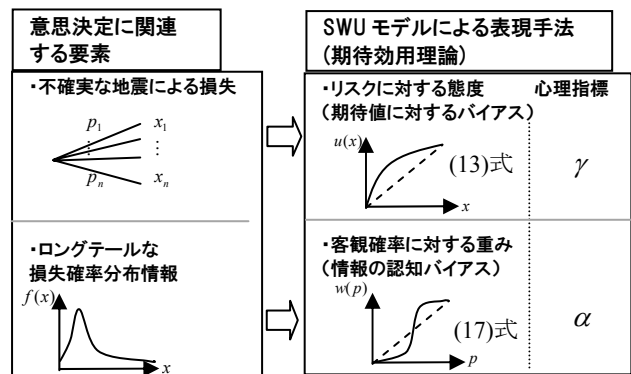


図2.期待効用理論によるモデル化(SWUモデル)

3.2 算出モデル詳細

意思決定者が選択できる代替案の集合を $A = \{a, b, \dots\}$ とする。意思決定者が代替案 $a \in A$ を選択したときに、結果 x_i が得られる確率を p_i 、代替案 $b \in A$ を選択したときに、結果 x_i が得られる確率を q_i とし、起こりうるすべての結果の集合を $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ とする。また X 上の効用関数を $u: X \rightarrow R$ とするとき、代替案 a, b, \dots を採用したときの期待効用は U_a, U_b はそれぞれ(10)式のように表現される。

$$U_a = \sum p_i \cdot u(x_i), U_b = \sum q_i \cdot u(x_i), \dots \quad (10)$$

このとき $u(x)$ を単属性効用関数といい、0 から 1 の範囲の値をとる正規化された関数となっている。人間の選択における規範は期待効用仮説より、

$$a \succ b \Leftrightarrow U_a > U_b, a \sim b \Leftrightarrow U_a = U_b \quad (11)$$

となる。ここで $a \succ b$ とは「 a が b より好ましい」ことを表し、 $a \sim b$ は「 a と b が無差別である」ことを表している。ここで期待損失額に関する効用 U_l 、補強費用に関する効用 U_r はそれぞれ(12)式で表わされる。

$$\begin{aligned} U_l &= \sum p_i \cdot u(C_{li}) \\ U_r &= 1 \cdot u(C_{ri}) \end{aligned} \quad (12)$$

期待総効用は初期コスト,期待損失額を属性に持つ多属性効用関数として以下のように表現できる.

$$U = k_l U_l + k_r U_r \quad (k_l + k_r = 1.0) \quad (13)$$

この(13)式が住宅利用者の意思決定関数となる. ここで,各効用関数と重み係数は,以下のように設定する¹²⁾.

$$u_l(x) = \frac{1}{1 - e^{-\gamma x}} (1 - e^{-\gamma x}) \quad (\gamma \geq 0) \quad (14)$$

$$u_r(x) = x \quad (15)$$

$$k_l = \frac{\max(x_l)}{\max(x_l) + \max(x_r)}$$

$$k_r = \frac{\max(x_r)}{\max(x_l) + \max(x_r)}$$

ここで γ はリスク嫌悪係数であり,値が高いほど期待値を初期費用に対して低く見積もる.つまり投資に消極的な心理を表す. $\gamma=0$ のとき期待値と初期費用を同等にみる.

確実性効果の影響の導入として,SWUモデルを導入し,(12)式を式(16)のように書き換える.

$$U = k_l \sum w(p_i) \cdot u(x_i) + k_r U_r \quad (16)$$

$$w(p_i) = \frac{\omega(p_i)}{\sum \omega(p_i)} \quad (17)$$

$$\omega(p_i) = \frac{p_i^\alpha}{p_i^\alpha + (1 - p_i)^\alpha}$$

ここで α は確率感度係数である. α は1のとき $w(p)$ が客観確率 p に等しくなる.この値が1より高ければ,確実性効果と呼ばれる高い確率をより高く,低い確率をより低く見積もるといふ効果が大きくなる.1より低くなればその逆となる.1より高くなった場合は地震動確率分布のすそ野の部分を無視する傾向が表現できる.

式(16)により,地震動による被害に対するリスク態度と確率の情報に対するバイアスの影響が表現できた.この関数のパラメータはリスク嫌悪係数 γ ,確率感度係数 α となり,それぞれリスク態度と認知バイアスの影響を示すパラメータとなる.

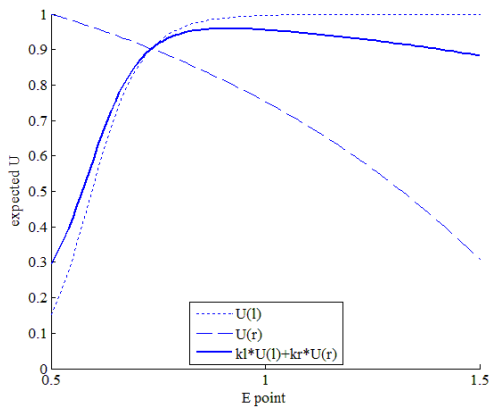


図3:総期待効用算出モデル
(静岡県静岡市:初期評点 0.5, $(\alpha, \gamma) = (2.5, 5)$)

3.3 結果と考察

図3の総期待効用算出モデルでは最適点は0.74と算出される.先の期待総費用最小化と比較すると評点にして0.56程度低くなる.図4に γ と α の違いによる最適点の変化を示す. γ の増加によって初期費用を期待損失よりも重視し,補強に消極的になる効果が見られた.また α の増加によって確率が低いのが被害の大きい部分を軽視することによって補強の価値を低く見積もる効果が見られる. γ が期待総効用モデルに緩やかに影響を及ぼすのと比較して α の変化によって期待総効用モデルは急激に変化し,ステップ関数のような形となる.

かに影響を及ぼすのと比較して α の変化によって期待総効用モデルは急激に変化し,ステップ関数のような形となる.

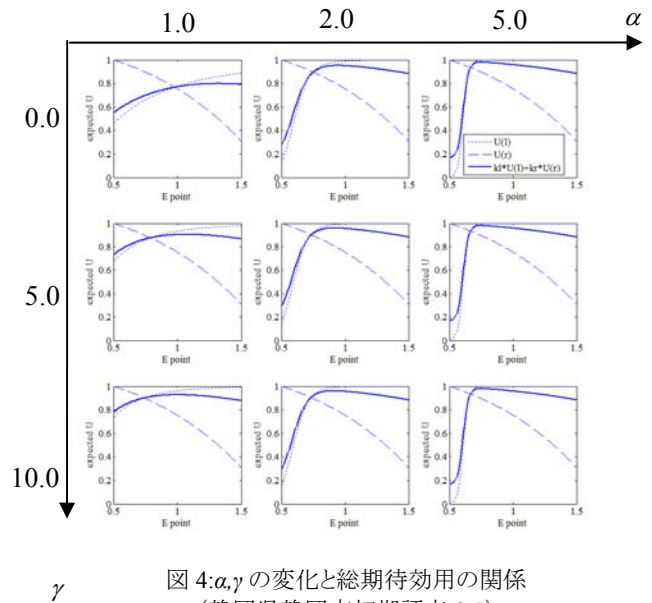


図4: α, γ の変化と総期待効用の関係
(静岡県静岡市初期評点 0.5)

4. アンケートによる意識構造調査

4.1 問題設定

3.2で作成したモデルを用い,アンケートを通じて,想定される影響因子が意思決定へ及ぼす影響を測定する.先のモデル化により,今回はリスク態度と確率情報に対する認知的バイアスをそれぞれ γ, α で表した.それぞれに対応する影響因子を想定することで,その影響因子の影響を γ, α の変化によって評価することとする.

リスク態度に影響を及ぼす因子として,今回は保有資産を影響因子の一つとする.もう一つの問題設定パラメータは,認知的バイアスの変化をとるために地震動の生起確率密度を変化させる.そのパラメータとして地動速度の平均値 μ_{PGV} を用いる.

アンケートの対象者・実施方法,質問内容の概要を表5にまとめる.質問は回答者の負担を考え,全て選択型とした.表5中の質問口において与えた情報は,補強コスト,平均損失額,標準偏差に加えて,損失の95%非超過値(PML)の定義の1つに近い,さらに自治体調査の被害度区分ごとの生起確率を与えた.

表5.アンケート実施概要

項目	内容
対象者	東京都の理系大学生・大学院生 男性17名 女性5名
質問構成	イ)効用関数を特定する質問(3問) ロ)情報を与えて実際に防災投資案を選択する質問(9問) ハ)求める確率に関する情報を答える質問(1問) ニ)防災投資において重視する効果を答える質問(6問) ホ)個人の情報に関する質問(3問)
問題設定の構成	A)地震動発生確率分布の変化 分布形のPGV平均を,25,50,75,100,125(kine)と変化させた。 B)保有資産の変化 初期状態として持っている保有資産を750,1500,3000,6000,10000(万円)と変化させた。

4.2 パラメータ特定手法

計算手法の概要を図5に示す.まず,Step1においては中点連結定理により,効用関数の1/4点,1/2点,3/4点を特定した.今,式(16)によって最適補強点 E_b が γ と α の関数として表現されているのでStep2,3において,各条件における γ と α を評価した.

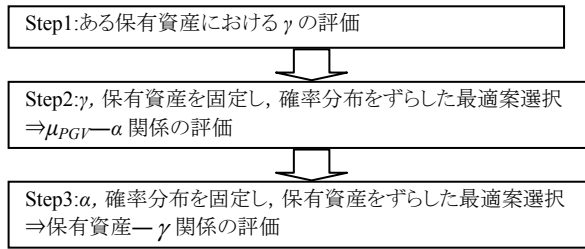


図 5. α, γ の評価手順

4.3 結果と考察

心理指標 γ, α の平均値と問題設定の対応を表 6,7 に示す。 γ の平均値 μ_γ について見ると保有資産額が増加するにつれ、値が減少傾向にあり、リスク中立に近づく傾向が見える。(表 6) しかし、 α の平均値 μ_α に関しては傾向がつかめない。(表 7)

表 6. μ_γ と保有資産の関係

保有資産(万円)	750	1,500	3,000	6,000	10,000
μ_γ	7.85	2.86	3.28	2.44	3.07

表 7. μ_α と μ_{PGV} の関係

$\mu_{PGV}(\text{kine})$	25	50	75	100	125
μ_α	2.09	2.35	1.63	2.32	3.22

意識変化のタイプを把握するために、各横軸に条件設定・縦軸に心理指標 γ, α をプロットした時のグラフの概形タイプ別に分類してみたものが表 7, 図 6, 7 である。

γ は 7 割弱が減少型に分類され、その形は指数関数のような形となった。つまり保有資産が増加すれば、補強費用と期待値を同等にみる態度へと急速に近づく態度が確認された。 α については、増加型が多かったものの γ ほどの傾向は見られなかった。増加型では μ_{PGV} が小さいとき確率にバイアスがかからない選択を行い、 μ_{PGV} が大きいほど、確率の高いものをより高く、低いものをより低く見積もるといったバイアスがかかった選択を行うという直感的には分かりにくい結果となり、確率情報のとらえ方の傾向には別の考え方が必要であると考えられる。

表 7. α, γ の関数形内訳

	γ	α
増加型(increment type)	9.1%	50.0%
減少型(decrement type)	68.2%	0.0%
山型(mountain-shaped)	13.6%	22.7%
谷型(V-shaped)	0.0%	22.7%
水平型(flat type)	9.1%	4.5%

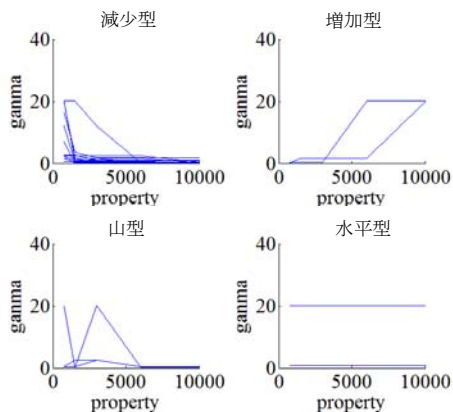


図 6. 関数形別・保有資産額- γ 対応

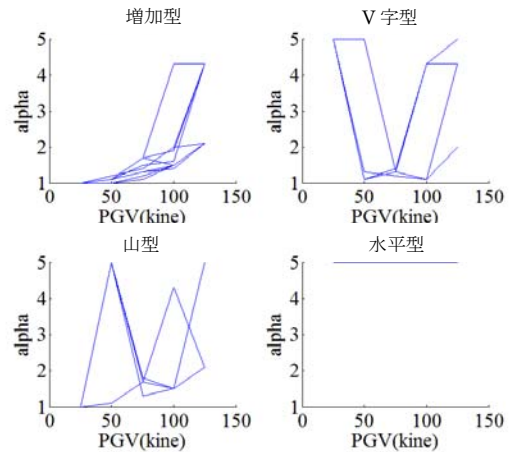


図 7. 関数形別・ μ_{PGV} - α 対応

また、 α についてはタイプの偏りが γ ほどは見られなかった。これは γ, α 特定のための質問時に回答者に与えた情報に関して、 γ では保有資産のみが変化した(図 5.Step3)のと比較して、 α においては、 μ_{PGV} の変化に伴い、情報すべてに影響が出るため(図 5.Step2)、個人がどの指標を重視したかや、考え方に大きな影響を受けるためだと考えられる。

5. まとめ

不確実性下での構造的な意思決定問題をより多角的な視点で考えるために、モデルケースとして既存不適格木造住宅耐震補強問題に対し、期待効用理論モデルを適用し、保有資産や確率分布の違いが意思決定に及ぼす影響を評価した。そのことを通じて、不確実性下での意思決定の影響因子について、ある程度定量的に把握する手法を確立した。取り上げた影響因子について述べると、保有資産については、保有資産の増加に伴って意思決定が指数関数的に期待的な考え方に近づく傾向が見られた。 μ_{PGV} については強い傾向は見られなかった。

今後の課題としては、現実的に決定を行う年齢層を対象とした場合・今回との違いに関する分析や、回答者に与える情報の与え方についての研究が挙げられる。

【謝辞】

アンケート回答に快く協力していただいた 2009 年度東京大学工学部建築学科 3 年生の方々に対し、深謝いたします。

【参考文献】 1) 鳥澤一晃, 水越熏他: リスク評価に基づく地震防災投資に関する研究. 鹿島技術研究所年報. 第 51 号. 2003. 9. 30 2) 横浜市木造住宅耐震事業耐震診断利用者アンケート実施報告: 横浜市まちづくり調整局建築企画課. 2008 3) Kahneman, D. and Tversky, A.: Prospect Theory; An Analysis of Decision under Risk. Econometrica, 47(3), 263-291 1979 4) Karmarkar, U.S.: Subjectively Weighted Utility: A Descriptive Extension of the Expected Utility Model. Orga. Behav and Human Performance, 21, 61-72 1978 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 確率論的地震動予測地図ハザードデータ. [http:// www.j-shis.bosai.go.jp/](http://www.j-shis.bosai.go.jp/) 6) 平岩良之, 高田毅士: 2 つの建物の同時破壊確率における相関性の影響, 日本建築学会大会講演梗概集 B-1 2006.9 7) 境有紀, 飯塚裕暁: 実際の被害と対応する地震動強さ指標を用いた既存不適格木造建物の耐震補強における費用対効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 2006.9 8) 翠川三郎他: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集 1 pp55-56 1999.11.10 9) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく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, 第 527 号 10) 關脇介: 旧精密診断から見る既存住宅の耐震性能 建築技術 2005.2 pp104-106 11) 田村他: 計測自動制御学会: 効用分析の数理と応用 1997 12) Alfredo HS Ang, Wilson H. Tang: 土木・建築のための確率・統計の応用 1988