

# 対策間の相互作用を考慮した防災対策行動予測モデルの提案

## Suggestion of Decision Making Models for Disaster Measures concerning These Interactions

○廣井 悠<sup>1</sup>, 小出 治<sup>1</sup>, 加藤 孝明<sup>1</sup>

U HIROI<sup>1</sup>, Osamu KOIDE<sup>1</sup> and Takaaki KATO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院 工学系研究科 都市工学専攻

Department of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

In this paper, we assumed that disaster measures were a behavior of the individual resident's selection and have some purposes, generally. So, we constructed the decision making models concerning multipurpose risks, and analyzed it. Concretely, we applied Analytic Hierarchy Process, Binary Logit Model and Mixed Logit Model and constructed differential equation models for selection for disaster measures in the long period. The result of this research will be able to be used for the real number forecast and the policy assessment for inner districts risk.

**Key Words :** differential equation model, logit model, evaluation of policy, disaster measure

### 1. はじめに

自然災害の極めて多い我が国において、安全な都市空間の実現は言うまでもなく重要な課題である。安全な都市形成を目的とする防災まちづくりは、関東大震災以降「都市基盤整備」-「都市防火区画の形成」と変遷を遂げつつ、延焼遮断帯の整備などのハード整備を精力的に行ってきた。また特に 1995 年の阪神・淡路大震災以降からは、都市防火区画内の甚大な倒壊被害を問題意識として「地区レベルの対策」という新たな防災まちづくりの概念が積極的に叫ばれてきた<sup>1)</sup>。ところが今日に至っても都市の安全化は万全であるとは言いがたい状況にある。なかでも戸建住宅の耐震性確保は、国が 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、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打ち出しているが、全戸建木造住宅の約 4 割(約 1000 万戸)ははまだ耐震性が不足しているとみられるなど遅々として進んでいない。また戦後復興の区画整理を受けることなく数十年存在し続ける木造密集市街地は、いまなおミニ戸建の形で再生産されて続けており、これらの地域も防火の観点から不安視される。阪神大震災において浮き彫りとされたインナーシティの安全性確保は、震災から 10 年以上経った今もいまだ解決の見えない問題であり、密集市街地の整備なども遅々として進まず、自助という名の市街地更新にその一部を頼らざるを得ない現状がある。

これには様々な原因が考えうるが、防災まちづくりの変遷に伴い一部の対策主体が遷移(主に行政から住民へ)したにもかかわらず、都市の防災性向上を目的とした(地震被害に関する)人間行動の記述およびそれに基づく計画案の議論が十分にされなかったこともその一因となろう。これにより現在行われている様々な施策が、現実には人間不在(或いは一方通行)の計画案となってしまう可能性もある。都市が人間の活動の帰結そのものであるとするならば、個人の選択行動の集積が現在のイ

ンナーシティにおける脆弱性を引き起こしたものと換言でき、それゆえ防災に対するミクロな人間行動を把握することは安全都市の形成を目標とするうえで必須の前提といえる。それゆえ筆者らは、個人・世帯ベースの意思決定行動を分析する非集計分析を防災対策行動の予測手法に援用し、より行動的な視点に立脚した分析フレームを確立することが、都市空間の脆弱性に対し改善の糸口を見出す契機になると考えた。以上が本研究の着想に至った経緯である。

### 2. 研究の視座

研究の視点と特徴を明確にすべく、研究分野における本稿の位置付けを以下に記す。本研究の最終的な目標は効率的に自助を誘導しうる計画案の策定手法を明確にすることである。防災対策を行う主体が多様性に富み、価値観や情報の不完全性を含めた個人の状況・属性が行動のふるまいを色濃く規定すると考えられる以上、この目的の達成には防災行動を行う主体の属性や効用を選択行動に反映することが必要となる。それゆえ選択行動の記述には詳細な行動予測を実現しうるミクロ的非集計分析が有用となろう。しかしこの手法で防災行動を記述する際は後述に示すいくつかの課題を解決せねばならない。

非集計分析の代表的なものにランダム効用理論(以下、非集計 LogitModel と呼称する)がある。これは観測された行動とその因果要因との関係性を関数型表現することにより行動のモデル化を目指す質的选择モデルで、交通行動の分析などにおいて既に実用化されている。これは、人間の行動原理や意思決定構造に対して少ないデータ量のもとでも高い妥当性を持つ、統計的な吟味によく耐える、政策のインパクトを数値的に把握できる、という優れた長所に起因する。これにより個人の意思決定行動は選択確率という形で量的に把握されうるが、この防災分野への応用はいくつかの研究にあるのみで<sup>1), 2), 3)</sup>、現実の計画案に十分利用されているとはいえない(一連の研

究は参考文献<sup>4)</sup>に詳しく、本研究はその流れをくむものである。また離散的選択モデルを用いた研究も既にいくつか存在する<sup>5),6)</sup>。これを筆者らは、行動の記述の妥当性を大きく左右する防災行動の持つ特性に由来するものとみている。

#### (1) 選択肢の効用に対する不確実性

多くの場合防災対策の効用は(行動しない場合を含め)不確実性を伴い、また個々の選択肢に対して意思決定者は完全情報を有さない。それゆえ防災行動の意思決定は量的な把握の困難な意識、感覚、リスク認知などに多分に依存し、意思決定者の状況や主観に色濃く左右されるものと考えられる<sup>7)</sup>。ゆえにその選択は多基準かつある種の先入観や偏見を含んだ定性的なものであると推測される<sup>2)</sup>。

#### (2) 選択肢の多様性と類似性

防災行動の目的は災害被害の減少ただひとつであるが、その目的を達成するための手段は様々である。よって意思決定者はその個人属性や地域属性を踏まえ、どの手段が効率がよいかを主観的に判断し決定する。その過程で意思決定者が類似性の高い選択肢を扱う可能性も高く、そしてそれぞれが相互に影響を及ぼすことも想像に難くない。これより防災対策の効果に対する相互作用を非集計的に取り扱う必要性が示唆される。

#### (3) 防災行動の稀少性

防災行動はその多くが稀少性(非日常性)を伴い、また少なくない費用負担を必要とする。これより防災対策の行動プロセスにおいて行動意図と行動生起の間に時間的ギャップが想定され、防災対策行動の主体が即座に行動を生起するとは必ずしも言えない現状がある(これは災害現象の稀少性も同様)。それゆえ行動の記述にあたって行動の契機や動学的概念を無視することはできない。

#### (4) 意思決定方略の多様性

一般的な行動モデル上では、意思決定者は選択肢を加重加算型(選択肢を評価基準の重みとの線形和で評価)で評価するが、特にリスク下における行動においては、必ずしも実際の意思決定方略がそのような形で行われることが保証されない。

#### (5) 選択肢集合の不完全性

意思決定者は、実行可能な全ての選択肢に関して完全情報を必ずしも有しているわけではない。これより、行動の主体が取りうる手段のなかから最も効用の高いものを選択するミクロ経済学的分析の大前提が疑問視される。

したがって筆者らの見解は以下の如くまとめられる。通勤交通などは一般に「意思決定者は(主に日常の経験などを通し)選択行動の選択肢集合とその効用をよく認識し、合理的選択(効用最大化)を行っている」という前提を仮定し、適用が成功している<sup>3)</sup>。他方、本研究で対象とする防災行動は上述の特性による影響が強く、交通計画分野で仮定された大前提が防災分野で成立する保証はない。さらに課題(1)-(5)を解決する方法(その計量手法も含めて)が確立していない。それが防災分野で十分に非集計 **LogitModel** が駆使されない理由と解釈している<sup>4)</sup>。

本研究の根源的目標を効率よく達成するにはミクロ的な防災行動のモデル化が有用であることは上で述べたが、これらの扱いが不十分ではその有用性よりも分析手法の妥当性確保が大きな問題となり、その実用化は机上の空論となりうる。本研究は以上を背景とし、防災対策行動に付き纏うこれらの特性をモデル上で緩和しうる新しい行動モデリングの構築を一義的な目的とする。ただし本研究は(1)-(5)に示した課題全てを解決するものではなく、

(1)-(3)に示す課題の解決に専念することとした。(4),(5)の解決は近い将来の課題である。

これより以下の如き構成で論を進める。3章では本研究で用いるモデルの枠組みを概説する。このもとで、4章において多基準な防災対策行動のモデル化を試み課題(1)を解決し、5章で家屋の改造に関するランダムパラメータモデルの構築により課題(2)の解決をはかる。次いで6章で行動が生起する契機にポアソン過程を想定し微分方程式モデルを構築することで課題(3)を解決し、具体的に有用な防災対策行動モデルの構築を目指す。

### 3. 防災対策行動モデルの定式化

行動意思決定モデルの古典的な先行研究に **S-O-R** モデルがある。これは消費者の行動を、消費者の生活体(organism)を媒介とした刺激(stimulus)とそれに対する反応(response)に還元して把握するものであり、消費者の内面における反応過程を説明する目的で用いられる社会心理学のパラダイムに基づいた行動理論である。代表的なものとして **Howard&Sheth** のモデル、**Bettman** のモデル、**EBM** モデルなどがあるが、これらはどれも「態度→意図→行動」という3段階の構成要素からなる基本フレームで購買行動の記述を試みたものである。

地震防災対策(以降では防災対策)に関する人間の行動原理も同じく、所与の状況をもととして、刺激を覚知し、それに対して反応する **S-O-R** の形で定式化が可能と考えられる<sup>8)</sup>。本研究は防災研究の実用的性格を踏まえ、これらを参考として図1の如き防災対策に関する人間行動の基本図式を想定した。ベースは上記の基本フレームに従い、「態度(本論ではこれを評価と呼称する)→意図→行動」とし、意思決定者の防災対策に対する評価を決める要素に災害リスクの認知および防災対策の選好特性を設定した。ここでの評価は態度理論におけるそれと同じく、感情的成分・認知的成分・行動的成分を構成要素としたある対象においての主観的傾向とする。古典的態度理論においては、態度のみが行動を規定する要因であるとされてきたが、近年では限定的な説明力しか持たないことが明らかとなっている。そこで、評価と行動の間に中間的な心理要因として、行動意図を定義した。これは行動予備軍とも言うべきものを想定しており、何らかの契機に応じて行動が生起される心理的状態量を意味する。ここでは評価と収入・年齢などの個人特性により行動意図が規定されるとしている。また最終的な行動の結果は、防災対策の評価値を循環的に規定する<sup>6)</sup>。

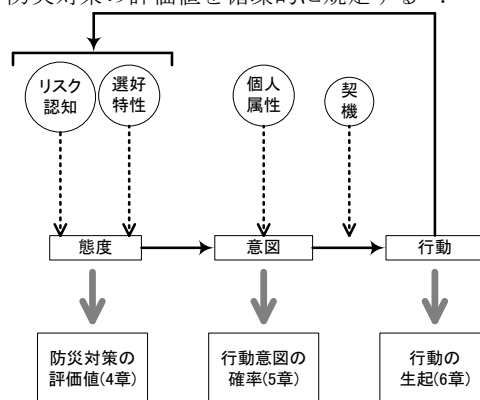


図1 防災対策に関する人間行動の基本図式

本研究はこの行動意思決定プロセスを定量化するため、

図 1 に示す「評価→意図→行動」の枠組みに階層分析法, 非集計 Logit Model, 微分方程式をそれぞれ当てはめる.

分析に先立ち, 本研究で用いたデータを概説する. 4,5 章では以下に示されるアンケート調査結果を利用した. また 6 章では平成 10 年度住宅・土地統計調査<sup>9)</sup>, 静岡県耐震補強補助制度の利用者経年データ<sup>10)</sup>, 地震保険契約者経年データ<sup>11)</sup>を用いた. アンケート調査は東京都, 静岡県の持ち家世帯主およびそれに属するものの防災対策に関する選好の把握をインターネット調査によって試みたものであり, 主な概要は表 1, および図 2-5 のごとく表される. なお本調査は筆頭著者が調査主体の 1 次データで, はじめにスクリーニング調査として 14238 名の調査対象母集団(東京都・静岡県に居住するインターネットリサーチシステム KNOTs 会員)から持ち家の世帯主またはそれに準ずる者 1219 名を図 1 の年齢階層別に均等になるようランダム抽出したものである<sup>6)</sup>. また意思決定者の選好を探る上で, 各選択肢に対する回答者の最低限の理解をはかる必要がある. これより調査にあたって, 例えば耐震補強に対する選好を尋ねる際は, 「自宅に対する防災対策として, 耐震補強といわれる方法があります. この方法は, 建築物の基礎や壁を補強することで地震による倒壊から自宅を守るもので, 改修の規模にもよりますが大体 100~300 万円程度かかることが知られています。」程度の簡単な説明を行った. 地震保険など他対策についても同様である<sup>7)</sup>. アンケート調査の詳細な結論は他文献に譲ることとし, 図 2-図 5 に回答者の基本属性を簡単にまとめた. 回答者の性別・年齢は図 2 のように, また住宅の構造と建築年は, 図 3 のようになっており, 昭和 57 年以降の木造住宅居住者が多い(ただし建築年代・構造が不明な回答者を除いて集計). また年収は図 4, 貯蓄は図 5 のごとく表され, 家族構成は 78.7%が既婚で家族と同居している.

表 1 用いたアンケートデータの概要

対象者	持家の世帯主またはそれに属する者1219名
調査エリア	東京都および静岡県
調査機関	2008年4月11日~2008年4月18日
調査実施方法	インターネット調査
調査主体	東京大学工学部都市工学科 関澤研究室
調査委託機関	株式会社リサーチセンター
回収状況	回収数938サンプル(76.9%)

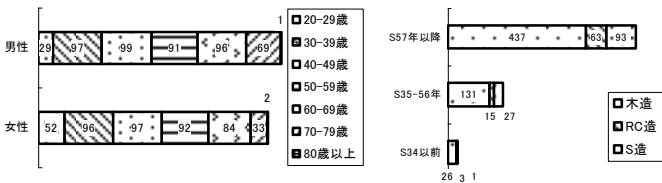


図 2 対象者の性別・年齢

図 3 対象者の住宅構造・建築年

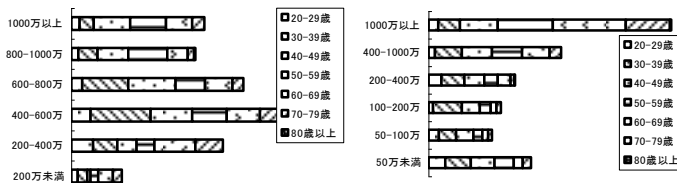
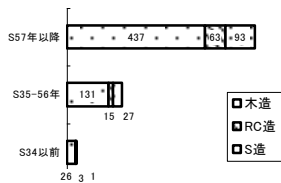


図 4 対象者の年齢別年収

図 5 対象者の年齢別貯蓄



#### 4. 防災対策の評価値の計量化

はじめに個人の防災対策に対する評価値を求める. 好みなどの定性的評価は一般に SD(Semantic Differential)構

成法により潜在的心理量として計量される<sup>12), 13)</sup>. これは多段階の数値軸を用いて様々な形容詞対に対する反応を求め, 因子分析によってその妥当性を検証する手法である. 本章でもこれにない防災対策に関する評価の計量化を試みるが, そのときは防災対策の多様性に注意を払う必要がある. 一般に地震災害を軽減するための手段は様々であり, それらは何らかの評価基準を充足する手段に過ぎない. これは多くの場合, 地震火災, 家屋倒壊, 被災後の生活など多種多様な地震災害をどのように減じようか意思決定者はそれぞれの基準に基づいて判断し, 行動が生起されるものと考えられるからである. よって本章では, これらの目標をどの程度解決しうるかに対する価値判断により, 意思決定者の防災対策に関する態度が計量されるとみなして分析する.

はじめに, ある意思決定者が防災行動に期待する評価基準の集合  $I (A_1, A_2, \dots, A_i \in I)$  とその基準を解決する手段の集合  $J (B_1, B_2, \dots, B_j \in J)$  を定義する. ここで手段  $B_k$  が複数の評価基準集合  $J$  をどの程度達成するかを指標を対策案に関する評価値と定義する. Fishbein による多属性態度モデルによると, 基準  $i$  の相対的重要度  $a_i$ , 手段  $j$  がどの程度その基準を解決しうるかの指標  $b_{ij}$  を定義することで手段  $B_j$  の評価は  $c_j = \sum_i a_i \cdot b_{ij}$  と表される(図 6).

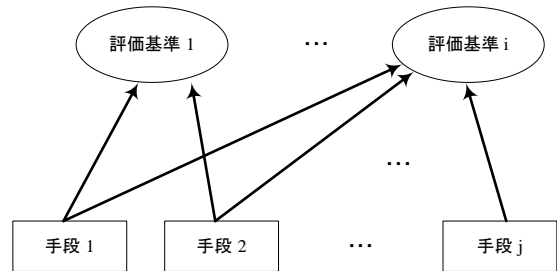


図 6 評価基準と手段の関係

消費者行動などを扱う場合は図 6 の関係が一般的とされるが, 多種多様な地震災害は, 評価基準それぞれが従属関係にあるものも多く<sup>8)</sup>, 評価  $c_j$  を  $a_i$  と  $b_{ij}$  の線形結合のみで表すことは難しい. また, 防災対策に関する評価は各人の置かれた状況に大きく依存するのに加え, 量的に把握することの困難な意識や感覚も大きく影響するものと推測される. そこで意思決定者の防災対策に関する評価を図 7 の如く構造化し, 評価基準に関する重要度  $a_i$  を集合  $I$  に関してペア比較した一対比較行列  $D$  を用いて各防災対策の評価値  $c_j$  を求めた. 一対比較行列  $D$  の要素  $d_{i_1, i_2}$  はその定義より  $i_1$  を基準として  $i_2$  を評価した比となるため,  $d_{i_1, i_2} \cdot a_{i_2}$  は  $i_2$  が自分自身を  $a_{i_2}$  と評価したときの  $i_1$  の評価値である.  $i_1$  は自身以外の全ての  $I$  において同様にその評価を受けた結果が  $a_{i_1}$  となるため, 最小化問題を解くことにより両者の比尺度のばらつきを最小化する  $a_i$  が得られる. これはフロベニウスの minmax 定理より行列  $D$  の主固有ベクトルとなることが証明されているため,  $D$  の最大固有値に対する固有ベクトルを用いることで評価基準集合の重要度ベクトルを計量化することができる. これは, ある評価基準の重要度  $a_i$  と  $\sum_{i=1}^n a_{i_1} w_i / (n-1)$  の誤差を最小化し, 全体の均衡をはかったものとして計算していることになる<sup>9)</sup>. 本研究では図 7 の構造をもとにして以上の階層分析法を援

用し態度指標の定量化を目指した。その際の  $a_i$ ,  $c_j$  の平均値は表 2 のようになった。この  $c_j$  を計量化した防災対策  $j$  の評価値(態度指標)とする。

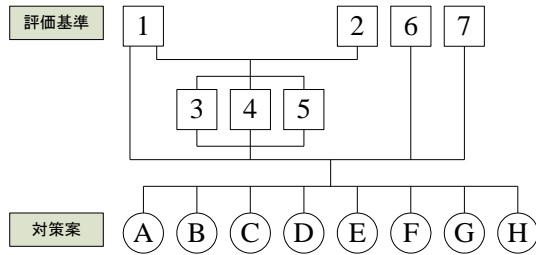


図 7 態度レベル計量化のため想定した階層構造

以下に図 7 の構造を概説する。評価基準集合  $I$  には家族を含めた生命の危機、被災後の生活、自宅の倒壊、自宅の火災被害、地震被害に対する漠然とした不安、の代表的な地震火災リスク 5 種類とし、それに定量評価の困難な防災対策の手続きや情報収集などの手間を加えた 6 種類とした。また自宅の倒壊、自宅の火災被害、地震災害に対する不安感、はそれぞれ家族を含めた生命の危機、被災後の生活と従属関係にあると考えられるため、これらの相互関係のマトリクスを用いて評価基準の重みを修正した(内部従属法)。他方、対策集合  $J$  は家具の固定、耐震補強、簡易補強、保険、消火器、不燃化、防災訓練への参加、家屋の建て替えとした。重要度を求める際には演算が煩雑な固有値法ではなく、簡便な幾何平均法を用いた。また対策案の数が 8 種類と多いため、一対比較を行うと調査対象者の負担もふえ、論理的矛盾が起こりやすくなる。そこで分析における対策案集合を柔軟に取り扱うことも視野に入れ、絶対比較法を用いることで問題の解決をはかった<sup>(10)</sup>。一対比較、絶対比較ともに 5 段階評価である。これにより、(多分に定性的な)人間の主観的判断である防災対策に関する評価値が求まった。

表 2 評価基準の重要度・対策の評価値の平均値

評価基準	重要度平均
1. 家族を含めた生命の危機	0.218
2. 被災後の生活	0.155
3. 自宅が倒壊しない	0.134
4. 自宅が火災被害にあわない	0.140
5. 地震被害に対する漠然とした不安感	0.109
6. 金銭的負担の大きさ	0.108
7. 防災対策の手続きや情報収集などの手間	0.077
対策案	重要度平均
A. 家具の固定	0.196
B. 耐震補強	0.213
C. 簡易補強	0.158
D. 地震保険	0.166
E. 消火器	0.165
F. 不燃化	0.185
G. 防災訓練への参加	0.170
H. 家屋の建て替え	0.228

## 5. 行動意図の計量化

次に非集計 LogitModel を用いて、この指標をひとつの要因とした行動意図レベルの定量評価を行う。行動意図の計量化に経済学的アプローチである非集計 LogitModel を用いる理由は、本研究の目的が意思決定行動の解明よりも防災行動の予測と集計化に重点を置くことによる<sup>(11)</sup>。ここで意思決定者  $k$  の効用関数の確定項は表 2 で示される各対策の評価値、個人属性の線形和とした。本研究で用いる図 1 の分析フレームを所与とせず Logit Model ありきで評するならば、これは効用関数の質的な項に定性的な感覚情報を数値化する階層分析法を用い、モデルの再現性を高めたものと解釈される。選択肢の選考特性

は、定量化の難しいものに関しては評価指標のみを用いるが、耐震補強や地震保険などの選好特性は金銭的負担を具体的にアンケートなどで量的に把握することができる。そこで、不燃化・耐震補強・簡易補強・地震保険に関しては、金銭的負担を評価基準からはずして評価値を再度計量化し、具体的な金額を効用関数の確定項の 1 つと捉えた。

### (1) 二項 LogitModel を用いた分析と計画案評価

以下に非集計 Logit Model の教科書的な説明を記述する<sup>(14)</sup>。この手法は、意思決定者が与えられた選択肢集合の中から最も効用の高い選択肢を選ぶ期待効用仮説に、意思決定者の巡り合わせや気分などの観測不可能な要因(ランダム)も考慮に入れたものと端的に説明される。このため本研究においても、選択肢  $j$  に対する確定的な効用  $V_j$  の他に確率的に変動する効用(誤差項)  $X_j$  を定義し、それにガンベル分布を仮定することで意思決定者の考える真の効用を推定する。はじめに、ある個人の選択肢集合  $J$  のうちの選択肢  $j$  を選ぶ効用および個人が  $j$  番目の選択肢を選ぶ確率  $p_j$  を次のように表現する。

$$U_j = V_j + X_j \quad \dots(1)$$

$$p_j = \text{Prob}\{U_j \geq U_{j'} \mid j, U\} \quad \dots(2)$$

$$(j=1,2,\dots,J)$$

ここで確率変数  $X_{j_1}$  と  $X_{j_2}$  は互いに独立であるとし(全  $j_1 \neq j_2$ )、位置母数  $\alpha_j$ 、尺度母数  $1/\lambda$  のガンベル分布に従うと仮定する。すると累積分布関数  $F_j(x_j)$  並びに確率密度関数  $f_j(x_j)$  (3),(4)式の如く表されるため(ただし  $-\infty < x_j < \infty$ )、選択肢 1 を選ぶ確率  $p_1$  は(5)式のように示される(ただし、選択肢 1 および選択肢 2 の二項モデルを考える)。

$$F_j(x_j) = \exp\{-\lambda(x_j - \alpha_j)\} \quad \dots(3)$$

$$f_j(x_j) = \lambda \exp[-\lambda(x_j - \alpha_j)] \cdot \exp[-\exp[-\lambda(x_j - \alpha_j)]] \quad \dots(4)$$

$$p_1 = \text{Prob}\{U_1 \geq U_2\} \\ = \text{Prob}\{V_1 + X_1 \geq V_2 + X_2\} \\ = \text{Prob}\{X_2 \leq X_1 + V_1 - V_2\} \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1) \cdot \text{Prob}\{X_2 \leq x_1 + V_1 - V_2\} dx_1 \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1) \cdot F_2(x_1 + V_1 - V_2) dx_1 \quad \dots(5)$$

ここで(5)式にガンベル分布の累積分布関数及び確率密度関数を代入し、積分計算を行うと以下の如く表される；

$$p_1 = \int_{-\infty}^{\infty} [\lambda \exp[-\lambda(x_1 - \alpha_1)] \exp[-\exp[-\lambda(x_1 - \alpha_1)]] \\ \cdot \exp[-\exp[-\lambda(x_1 + V_1 - V_2 - \alpha_2)]]] dx_1 \\ = \int_{-\infty}^{\infty} [\lambda \exp[-\lambda(x_1 - \alpha_1)] \\ \cdot \exp[-\exp[-\lambda x_1 (\exp[\lambda \alpha_1] + \exp[-\lambda(V_1 - V_2 - \alpha_2)])]]] dx_1 \\ = \frac{\exp[\lambda(V_1 + \alpha_1)]}{\exp[\lambda(V_1 + \alpha_1)] + \exp[\lambda(V_2 + \alpha_2)]} \quad \dots(6)$$

特に、 $x_1$  と  $x_2$  が同一のガンベル分布に従うものとした場合は( $\alpha_1 = \alpha_2$ )、さらに簡単に

$$p_1 = \frac{\exp[\lambda V_1]}{\exp[\lambda V_1] + \exp[\lambda V_2]} \quad \dots(7)$$

なる選択確率が得られる。係数の推定は実際の選択結果によって得られるパラメータ  $\delta_{ij}$  と(7)式による選択確率よりなる尤度関数(8)式を最大とする最尤推定法で求まる。なお、 $L^*$  の最大化は  $L$  の最大化と等価であることより実際の計算には(9)式を用いた。

$$L^* = \prod_{k \in K} \prod_{j \in J} p_{jk}^{\delta_{jl}} \quad \dots(8)$$

$$L = \ln L^* = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \delta_{jk} \cdot \ln p_{jk} \quad \dots(9)$$

これに先述のアンケートデータをあてはめ、係数とその Hessian 行列を求めることで係数の有意確率およびモデル全体の自由度調整済尤度比を求めた。アンケートによる選択結果は、「自宅が災害に非常に弱い住宅であると分かったとき、あなたは対策を行いますか」との仮想的な質問をすることで Vulnerability を事前に想定している。使用した言語は、Mathematica6.0 であり、ニュートン・ラプソン法を用いてプログラムを作成している。

表3 各対策のパラメータと自由度調整済尤度比(1)

説明変数	家具の固定	防災訓練の参加	消火器の購入	地震保険の加入
対策の評価値	4.415**	9.634**	7.423**	2.924**
対策の金銭的負担	-	-	-	-1.241**
年齢(歳)	0.033	0.009	0.0412*	-0.008
年収(万円)	0.000765*	0.0006*	0.00027	0.0006**
地震に対する不安感	0.1426*	0.0859*	0.0199	0.068**
定数	-0.56	-1.6537*	-0.7292	0.944**
自由度調整済尤度比	0.407	0.200	0.204	0.242
説明変数	耐震補強工事	簡易補強工事	住宅の不燃化	住宅の建て替え
対策の評価値	2.910**	3.126**	2.545**	1.524**
対策の金銭的負担	-0.014**	-0.018**	-0.015**	-
年齢(歳)	0.0158*	0.018*	0.0218**	-0.004
年収(万円)	0.00051**	0.00027*	0.0005**	-0.05
地震に対する不安感	0.0085	-0.022	0.0125	0.001**
定数	0.980**	1.092**	0.837**	-1.028**
自由度調整済尤度比	0.225	0.197	0.202	0.086

表4 各対策のパラメータと自由度調整済尤度比(2)

説明変数	耐震補強工事	簡易補強工事	住宅の不燃化	地震保険の加入
対策の評価値	2.698**	2.490**	2.240**	1.362**
対策の金銭的負担	-0.016**	-0.017**	-0.017**	-1.778**
年齢(歳)	0.012	0.007	0.023**	-0.019*
年収(万円)	0.0003*	-0.0008	0.0005**	0.0002
地震に対する不安感	0.062*	-0.019	0.039**	0.041*
定数	0.273*	0.721**	0.571**	-0.021
自由度調整済尤度比	0.194	0.144	0.214	0.307

表5 各対策のパラメータと自由度調整済尤度比(3)

説明変数	耐震補強工事	簡易補強工事	住宅の不燃化	地震保険の加入
対策の評価値 (リスク認知による修正)	0.1623*	0.3000	0.3635*	0.448
対策の金銭的負担	-0.015**	-0.017**	-0.017**	-1.354**
年齢(歳)	0.015	0.010	0.025**	-0.020*
年収(万円)	0.0003*	-0.0009	0.0005**	0.0002*
地震に対する不安感	0.008*	-0.075	0.056**	0.051
定数	0.604**	1.045**	0.854**	0.206
自由度調整済尤度比	0.180	0.134	0.207	0.303

個人属性として年齢、年収、地震に対する不安のみをモデルに組み込んだ<sup>(12)</sup>結果が表3であり、また自宅の Vulnerability を仮定せず現在置かれている状況下で対策の意向を聞いたデータで最尤推定を行ったものが表4である。ところで、現在の状況下における選択行動は対策主体が認識する各自の Vulnerability に大きく依存することも考えられる。そのため地震災害に対する認識リスクと許容リスクを表2の評価基準1-5に対し10段階評価で質問し、その差を正規分布上で間隔尺度に修正したのち(系列範疇法)、対策案の評価指標  $b_{jk}$  との線形和をとり防災対策に対する態度指標を計量化した。それが表5となる<sup>(13)</sup>。各表において係数が5%有意水準を確保できたものは\*、1%有意水準を確保できたものは\*\*としている。金銭的負担と同じく、階層分析法によって得られた対策

の評価値はどれも1%有意水準を確保しており、本研究の手続きの妥当性および有用性が証明される。他方、地震に対する不安感や年齢は5%水準を確保できなかったものもある。これは効用関数として線形を仮定したことによりその一因があるものと考えられ、何らかの閾値を設定してダミー変数とみなし、セグメントの分割を試みることでさらなる精度の向上が期待される。自由度調整済尤度比は通常0.2-0.3以上で良い結果とされているが、唯一、家屋の建て替えはきわめて尤度比が低くなった。これは家屋の建て替えが、地震防災以外に多くの目的、評価基準を有することに起因するものとみられる。他方、同じくその目的が地震防災のみに限らない、消火器の購入や防災訓練、家屋の不燃化は尤度比0.2を越え、モデルの適合性は比較的良好とみてよい。地震保険、耐震補強などの地震災害に特化した防災対策は、総じて当てはまりはよく、特に家具の固定は0.407と極めて高い尤度比が得られた。

各パラメータについて概観する。一般に年収、年齢、地震に対する不安感が高いほど防災対策を選択しやすくなる傾向が読み取れる。勿論、対策の評価値や金銭的負担の係数も正および負の符号をとる。地震保険に関しては年齢の係数が負となり、高齢ほど地震保険を好まない傾向を示唆しているが、総じてこれら係数の符号条件は合理的に解釈されうる。他方、簡易補強に関しては尤度比が0.2を下回るなど低く、また地震に対する不安感、年収に至っては一部が負の係数を持つなど感覚的に違和感を覚える。これは簡易補強の選択要因に耐震補強工事や不燃化(場合によっては地震保険)などの対策が影響を及ぼしている、という仮説により解釈されよう。すなわち、簡易補強工事の選択の背後に耐震補強工事の選択が潜在することより、地震に対する不安が大きく、また収入が多いほど簡易補強工事の選択から耐震補強工事の選択に行動意図が遷移し、結果的に係数の符号が負になっているものと見なせる。これは耐震補強、不燃化にも同様の影響が懸念される。つまり、地震に対する不安が小さく年収の低い意思決定者は、耐震補強工事から簡易補強工事に向けて行動意図の遷移が行われているとも推測されうる。一般に家屋の改造は、その金銭的負担の大きさやそれらのもつ特徴により、短期間に複数回行う対策ではない。よって各対策案を独立な選択行動として定義することには疑問が残るのである。これは2章の課題(2)を示唆する結果と言え、家屋の改造に関する選択行動を防災対策別に精度高く記述することは困難であり、また妥当とは言えず、それぞれの影響を加味した総合的なモデル構築が期待される。この課題は次節で解決をはかる。実際に防災対策行動を把握する際は個人の対策に関する評価値、選択肢特性及び個人属性から定義される個人属性ベクトルと表4-6により示されるパラメータベクトルの内積を求めればよく、図7の構造で計量化をはかった対策の評価値の援用により、ある個人属性ベクトルを所与とした多様な防災対策行動の把握が可能となった。これは、効率的な計画立案や自助の誘導を促しうる公助と共助のあり方をさぐるための基礎的な知見とみてよい。防災まちづくりの一部においてその主体は個人、もしくは地域へと遷移しつつあるが、耐震補強や不燃化などの金銭的負担の高い防災対策に関してはやはり個人の努力のみでは困難である。そのため、自助や共助を最大限誘発させる公助のありかたを探索しておく必要がある。よって次に、これまで得られた結果を用いた自助による防災行動を促すべき計画案の評価手法を検討する。ここ

ではその「計画」をやや狭義に捉え、耐震補強、簡易補強、不燃化、地震保険に対する金銭的助成額の弾力性に関し考察を行う。図 8-11 は耐震補強、不燃化を 300 万円、簡易補強を 200 万円、地震保険を年間 3 万円としたときの<sup>15), 16), 17)</sup>、金銭的助成による選択率の挙動を示したものである(各防災対策を独立に行うかどうかの 2 項選択である)。図中の横軸は助成額であり、縦軸が意図レベルでの選択確率(以降選択率とする)である。ただし、金銭的負担以外の個人の属性ベクトルはその平均値を用いた。図 8-11 において、太線は住宅の危険性を仮定せずに個々人の判断で選択を行ったもの(現実：表 4 を用いる)であり、細線は住宅の危険性を仮に仮定したもの(仮想：表 3 を用いる)である。

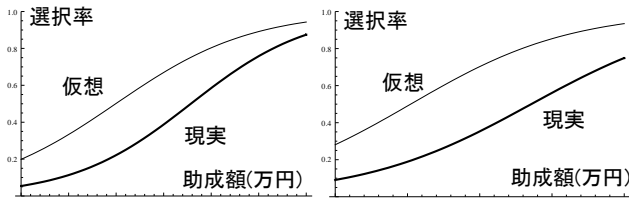


図 8 耐震補強の選択率

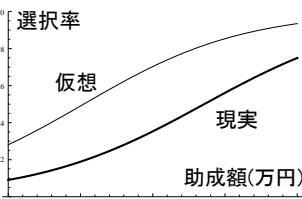


図 9 簡易補強の選択率

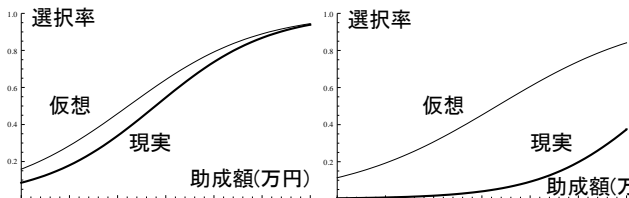


図 10 不燃化の選択率

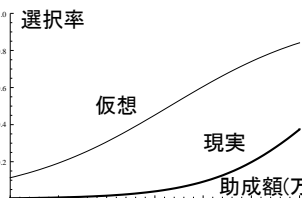


図 11 地震保険の選択率

以下に結果の解釈を記述する。図 8-11 とも住宅の危険性を仮定している方が選択率は高く、助成額の増額に伴い選択率が上昇する。また多額な助成額のもとでもなお防災対策を行わない主体の存在も注視に値し、この傾向は特に地震保険において顕著となる(地震保険の金銭的負担が最大限低減しても実際は半数以下の選択率にとどまる)。これは対策が必要とする金銭以外の負の効用(実行する手間、補強工事を行った際の日常生活に与える影響)によるものと推察される<sup>14)</sup>。また図 11 原点付近の挙動から現段階で地震保険への加入を意図している意思決定者の少なさが読み取れる。これは地震保険加入者が現在のままでは頭打ちに近づいているものと解釈できる<sup>15)</sup>。ところで、一般に家屋の火災に対する脆弱性はその構造から容易に認識できる。よって図 10 における両曲線の差異の小ささは容易に理解できるが、図 11 において両者の差はきわめて大きい。実際の選択行動は太線に準ずると考えられるが、両曲線の差は自宅のリスク認識の違いそのものであり、危険性の高い住宅については自宅の危険性を客観的に把握することで、選択確率が飛躍的に高まるものと推測される。よって図 11 からは地震保険の加入推進における金銭的負担の軽減や他計画案との効果的な組み合わせの必要性が示唆されるが、耐震診断、防災教育など自宅の脆弱性の認知をたすける解決策も有効であろう。特に耐震診断は耐震補強工事の選択を導くのに有効とされ、かつ実際それが一義的な目的であるが、自宅の脆弱性を認識すると言う点で地震保険の加入を促す副次的効果も期待される。

図 8-11 で用いた関数型(表 3.4)は意思決定者のリスク認知、選好特性を対策の評価値として計量し、それに選

択肢特性、個人属性を加えて Logit Model を構築したものである。よって、適切な対策の評価値さえ得られれば仮想的な対策、計画案に対しても行動予測を試みる事ができよう。本稿で具体例の紹介は避けるが、防災対策の定性的な改良や新しい対策の行動予測を行う場合、これまでの手法でその概要を把握することが可能となる<sup>16)</sup>。

## (2) 排他的選択への展開(ランダムパラメータモデル)

前節で課題を残した、類似性を伴った家屋改造に関する防災対策の選択行動予測手法を以下に記述する(つまりここで 2 章の課題(2)を解決する)。一般に家屋の改造を短時間に複数回行う意思決定者は少なく、各対策案を独立な選択行動としてみなすことの妥当性は確保されない。これより、耐震補強の価格低減に伴う簡易補強の選択確率減少など、計画案が相互に影響を及ぼすモデルの構築が望まれる。そこで上述の対策のうち、耐震補強、簡易補強、不燃化に関してはこれらのどれか 1 種類しか選択できないものと約束し、モデルの立式を試みる。複数の選択肢から 1 種類を選ぶ行動の記述もやはり非集計 Logit Model(多項 Logit Model)が便利であるが、これには IIA 特性と呼ばれる類似性の高い選択肢を過大評価する問題が広く指摘されており、これよりモデル上で任意の 2 つの選択確率の比率が他の選択肢の効用から影響を受けないという非現実的な性質を呈する。これは選択肢間相互に独立の同じ確率項の分布型を仮定していることが原因であるが、防災行動選択のような類似性の高いと思われる選択肢が複数想定される問題においては、致命的な欠点となり得る。この問題を緩和する方法のひとつに Probit Model を用いる方法があるが、これは効用関数の誤差項を多重正規分布に従うとしたものであるため Logit Model の如き解析的表現が困難で、多重積分の数値的演算より膨大な計算時間が懸念される。その他にも Nested Logit Model と呼ばれる選択肢間のネスト構造を前提としたモデルが用いられることがあるが、そのためにはネスト構造をア・プリオリに決定する必要があるため、ネスト構造の妥当性に課題を残すほか、選択肢誤差項の分散値が異なる場合などより現実的な類似構造を取り扱うことはできない。特に耐震補強と簡易補強、不燃化、地震保険などは複雑なネスト構造が予想され、IIA 特性が選択肢集合全体に根付いていると考えられる場合に適切な分析手法とはいえない。したがって、本研究ではこれらの解決に、新たに選択肢間の類似性を考慮したランダムパラメータ Logit Model を構築した。これはよりよい IIA 特性の緩和を目的としたモデル構築で、第 2 章課題(2)の解決に有用なものと考えられる。

はじめに、Logit Model のパラメータを各主体によってランダムに変動するとし、一般形を次式で与える(ただし  $X_{j,k}$  を意思決定者  $k$  の選択肢  $j$  に関する説明変数ベクトル、 $\alpha$  をランダムパラメータベクトル、 $G(\alpha, \omega)$  を母数ベクトルを  $\omega$  とした  $\alpha$  の同時分布関数ベクトルとする)。 $\alpha$  のランダム性により、IIA 特性は緩和されている。

$$p_{j,k} = \int \frac{\exp[\alpha^T \cdot X_{j,k}]}{\sum_j \exp[\alpha^T \cdot X_{j,k}]} \cdot G(\alpha, \omega) \quad \dots(10)$$

次に選択肢間の類似性を意思決定者ごとに表現するため、確率項  $X_{j,k}$  を選択肢間の相関関係によって記述する項  $\eta_{j,k}$  と、選択肢・個人間で相互独立する項  $\varepsilon_{j,k}$  に分割し、確率効用  $U_{j,k}$  を以下のように定義する。

$$U_{j,k} = V_{j,k} + \eta_{j,k} + \varepsilon_{j,k} \quad \dots(11)$$

ここで定義した効用の確率項には、効用の確定項  $V_{j,k}$  に含まれる変数以外の要因や、 $V_{j,k}$  を線形和とみなしたことによる真の効用との誤差、説明変数の測定誤差、そして選択肢の誤差項間の異分散性・選択肢間の相関などが全て含まれる。ここで  $\varepsilon_{j,k}$  は通常の Logit Model と同じく各選択肢間で独立かつ同一な連続的確率変数とし、その分布型にガンベル分布を想定する。他方、 $\eta_{j,k}$  は選択肢  $j$  に関する特性変数ベクトル  $Z_j$  と確率変数ベクトル  $\mu$  の積とし、 $\eta_{j,k} = \mu \cdot Z_j$  とする。ここで前節と同じく期待効用仮説を約束し、確率変数ベクトル  $\mu$  の各要素を独立かつ同一の確率分布  $f(\mu, \omega)$  と仮定することで(12)式が得られる。

$$p_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[V_{j,k} + \mu \cdot Z_j]}{\sum_j \exp[V_{j,k} + \mu \cdot Z_j]} \cdot f(\mu, \omega) d\mu \quad \dots(12)$$

選択肢  $i$  に関する特性変数ベクトル  $Z_i$  は、選択肢  $i$  とその他の選択肢との類似度を使用すればよい。ここでは前章で得られた各評価基準の重みと金銭的負担額を要素とするベクトルを  $J$  について Pearson の相関係数を算出し、0-1 の値となるよう変換して、類似度指標とみなす。なお、確率変数ベクトル  $\mu$  の要素は全て平均 0、分散  $\omega^2$  の正規分布で示されるとしており、 $\omega$  は最尤推定の結果推定されるパラメータ値である。上記の如く選択肢間の類似度を効用関数の中に設定し、そのパラメータが確率分布に従うような入れ子構造を仮定することで、Logit Model の行動原理に伴う意思決定者の嗜好の異質性を表現することが可能となり、より精度の高い分析が期待される。なお選択確率  $p_{j,k}$  は積分が閉じた形になっていないため、最尤推定を行うためにはシミュレーションにより近似的に選択確率を求める必要がある。ここでは計算負荷軽減のため、Halton 数列を用いて擬似乱数を発生させ、以下(13)式を定義し、1 万件の計算からなる  $\tilde{p}_{j,k}$  を最大化するパラメータ推定を行った(ただし  $R$  は試行回数、 $L_{j,k}(\mu_r)$  は  $r$  番目の対数尤度とする)。その結果が表 6 である。これ以降は 1980 年以前に建築された木造住宅に居住する意思決定者のみを対象とした。

$$\tilde{p}_{j,k} = \frac{1}{R} \sum_r L_{j,k}(\mu_r) \quad \dots(13)$$

ここでは前節で 1% 有意水準が確保できなかった説明変数を除外し(但し簡易補強以外)、対策の評価値、金銭的負担、定数、年齢、年収の 5 種類を効用の確定項と定義した。その結果、自由度調整済尤度比は 0.207 となり、多項 Logit Model による自由度調整済尤度比が 0.152 であることを考えるときわめて良い結果が得られたといえる。他方、各変数の有意確率はあまりよくないが、非集計分析においては  $t$  値が 1.5 程度をこえていれば概ねよいとされ、専らモデルの実用面から説明変数の採択基準が定められることが多いため、これがモデルの有用性を損うものではないと考える。続いて、符合を含めた係数の概要を述べる。説明変数ベクトルが異なるため、表 3 と一概に比較はできないが、対策の評価値は耐震補強工事については極めて大きい値となり、簡易補強と不燃化はその値が小さく有意とはならなかった。これはモデルに類似度指標を取り入れたこと、対策の評価値を線形結合により一元化を試みたことなどによるものと考えられる。

また、簡易補強工事については係数全てが負となっている。これは簡易補強を高く評価している人は耐震補強工事をより高く評価しており、結局簡易補強工事が防災対策を評価していない人(その簡易性ゆえ)より好まれることを示唆している。また住宅の不燃化は耐震補強や簡易補強に比べ価格弾力性がきわめて低いこと、それゆえ不燃化はより高収入の意思決定者に好まれており、その影響で耐震補強工事の年収に関する係数の符号が負になっていることも特筆に価する。

表 6 各対策のパラメータと自由度調整済尤度比(4)

説明変数	耐震補強工事	簡易補強工事	住宅の不燃化
対策の評価値	3.688**	-0.2526	0.3496
対策の金銭的負担	-0.008*	-0.009*	-0.002*
年齢(歳)	0.021	-0.018	0.019
年収(万円)	-0.001*	-0.001*	0.007*
定数	-0.233	1.019**	-2.556**
自由度調整済尤度比	0.207		

上述の手法によって複数の選択肢間の類似性を考慮したランダムパラメータモデルが構築され、短期間では複数回行うことの考えにくい家屋改造に関する防災対策の、意図レベルにおける選択確率をより適切な形で求めることができた。これより住宅の不燃化に関する価格弾力性は低く、また簡易補強の説明変数ベクトルに対する係数が定数項を除いて総じて負になるなど興味深い知見が多数得られた。これは属性ベクトルによる耐震補強、簡易補強の住み分けが対策主体の選択行動上なされていることを意味し、この結果を斟酌した推進策・計画案の実現が強く期待される<sup>(17)</sup>。さらに各変数を有意なものとするために、年齢や年収に関する線形でない適切なダミー変数の想定や、図 7 の構造の精査、および意思決定者のセグメント分けによる複数のモデル式の構築が望まれよう。また、より適切な類似度指標の定義もよい結果をもたらすものとする。この点は近い将来の課題である。

次にここで構築したランダムパラメータ Logit Model を用い、耐震補強、簡易補強、不燃化の(狭義の)計画案について述べる。それぞれの対策の価格ベクトルをモデル式に挿入することでそれぞれの対策の選択率が求まるが、ここでそれぞれに等しく金銭的助成をしたときの選択率の挙動を把握したい。そこで耐震補強、簡易補強の価格をそれぞれ 300 万円、200 万円とし<sup>15), 16)</sup>、また不燃化の価格もそれに準じ 300 万円と規定して<sup>17)</sup>、選択肢間の類似性を考慮したうえで金銭的助成額と選択率の関係を表したものが図 12, 13 である(表 6 の最尤推定と同じく耐震補強、簡易補強、不燃化、何も行わないの 4 種類の選択肢で排他的選択を質問した結果を用いている)。ただし前者は全意思決定者、後者は年収 1500 万円以上の高収入の意思決定者を対象とした。また、耐震補強を太線、簡易補強を細線、不燃化は灰線であらわしている。助成の増額に伴って耐震補強、簡易補強の選択率が増加するのは図 8.9 と同様であるが、不燃化の選択率は助成額に関して減少関数となっている。また簡易補強の選択は、図 9 と比べる限り、価格に対しきわめて鈍感である。これは助成額の増額に伴い、簡易補強と不燃化の選択者が(不燃化と簡易補強双方と類似性の高い)耐震補強に選択の遷移が行われていることを意味する。不燃化にのみ金銭的助成を行うと不燃化の選択率が増加するのは表 6 より自明であるが、同時に耐震補強に対し助成を行うとその増加率を越えて不燃化から耐震補強へと選択行動の遷移が生起する。これより不燃化を促進すべき地区において耐震補強の助成を行うことで、不燃化の促進が停滞

することも推測され、地域の実情に即した総合的な計画案の必要性が示唆される。また高収入の意思決定者が総じて不燃化を好むことは表 6 から読みとれるが、価格負担の減少に伴い選択行動の遷移現象が同様に確認できる(とはいえ、その低減率は図 12 ほど大きくない)。以上が図 12,13 から得られる知見である。

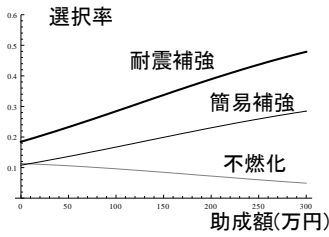


図 12 価格と選択率(1)

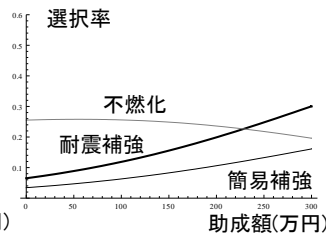


図 13 価格と選択率(2)

この結果により実際の選択行動において選択の遷移が発生していると断定するのは幾分急であり、そのためにはより詳細な現状把握、もしくは意志決定者のセグメント化が必要とされるが、実際に簡易補強を検討する際、耐震補強の選択が意識化レベルに潜在することは想像に難しくなく、アンケートデータをもとにした非集計分析上でその傾向が確認されたことは今後の計画立案をにらむうえで重要な知見とみてよい。したがって防災対策に対して助成額を検討する場合、表 3-5 に従う独立な 2 項選択を前提とした分析のみでなく、これら複数の選択肢も視野に入れた(さらには IIA 特性を可能な限り緩和せしめる)総合的な計画案が望まれる。また、地震保険と耐震補強、簡易補強、もしくは地震後の生活再建支援策を前提とした対策の選択分析を明らかにすることで、より有用な知見を得られる可能性もある。これは前章で扱った階層分析法により容易にその実現が期待できるが、ここでは近い将来の課題として据え置くこととする。

## 6. 微分方程式モデルによる行動確率の計量化

前章までで意図レベルにおける防災行動モデルを定式化し、これを用いた(狭義の)計画案の評価手法を検討した。これらの知見の活用により、より適切な防災対策行動の把握と円滑に行動変容を促すための計画立案が期待される。しかし、この分析により得られた確率はあくまで各防災対策を行おうと意図している確率であり、現実には彼らが防災対策を実行するためには災害のもつ稀少性などにより、資金の形成や何らかの外的ショックなどをきっかけとして行われることが多いことに注意する必要がある<sup>(18)</sup>。また一般に都市の脆弱性を解決するには長い時間を伴うことが予想され、1つの対策手法で全ての課題が瞬時に解決するという事は考えにくく、その過程における各対策相互の影響も無視できない。つまり、都市の防災性向上には契機の到着を含めた動学的な取り扱いと、長期的かつ総合的な視点が必要不可欠となる(2 章課題(3)より)。よってここでは図 1 に示される行動生起レベルの分析を通して、長期的視点のもと総合的に関連する施策の中で、どのように計画案の組み合わせをはかるかに関する数理的ケーススタディを記述する。具体的には、各計画案を実施した際に、地域の防災性能がどのように変化するかについて前章までで得られた行動意図確率をもとにシミュレートし、また Markov 連鎖を援用した連立微分方程式モデルを構築することで、より詳

細な把握を試みる。

はじめに簡単のため取りうる対策を耐震補強、簡易補強、地震保険の 3 種のみとし、図 14 の如き状態遷移図を想定する。ただし状態量は表 7 の如く定義される。4.5 章で得られた防災対策行動の確率は、あくまでも行動意図の確率であり、行動を起こそうと思いついている意思決定者の確率に過ぎない。しかし(図 1 の循環プロセスを含め)図 14 の遷移確率を求める際には、実際に防災対策を行う確率も得ねばならない。よってここで簡単のため、行動意図集団が実際の行動を起こすための契機が等しくポアソン過程に従うと考えた(実際に行動意図から行動に遷移するための契機は、外生的に到着するショックなどのみではなく、対策を実行するための資金の形成など様々な要因が考えられるが、それらをポアソン過程に従うという強い仮定をここでおいた)。すると、ごく短い微小時間において 2 度の状態量の変化は起こらないものと仮定した場合、状態量  $m$  から  $n$  の間における微小時間  $\Delta t$  における契機の回数は  $\lambda_{mn} \cdot \Delta t$  と表され、その時間内における遷移確率  $P_{mn}$  は  $P_{mn} = \lambda_{mn} p_{mn}$  と表せる。この遷移確率をもって反復計算を繰り返すことにより防災対策行動モデルによる行動予測が可能となる。これは地域の防災性能をあらかじめ把握し、地域の実情を踏まえたより適切な計画立案に有用と考えられる<sup>(19)</sup>。

表 7 想定した状態量

状態量	状態
1	何もしていない
2	簡易補強のみをしている
3	耐震補強のみをしている
4	地震保険に入っているのみ
5	地震保険・簡易補強をしている
6	地震保険・耐震補強をしている

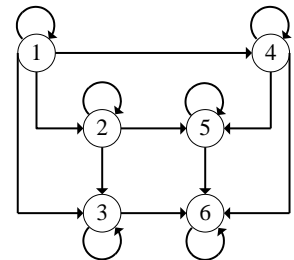


図 14 状態遷移図の概要

これを用いた反復計算でも当初の目的は達成できるが、より詳細に挙動を把握するために微分方程式系による記述を試みる。確率の定義より規格化条件及び Chapman-Kolmogorov 方程式は以下で示せる(ただし  $0 \leq t < \infty$ )。

$$\sum_{m=1}^{\infty} P_{mm}(t) = 1, p_{mm}(t) \geq 0 \quad \dots(13)$$

$$p_{mn}(t+s) = \sum_{v=1}^{\infty} p_{mv}(t)p_{vn}(s) \quad \dots(14)$$

ここで時刻  $t$  に系が状態量  $m$  をとる確率分布

$$q_m[t] \equiv P\{X(t) = m\}, \sum_{v=1}^{\infty} q_v[t] = 1 \quad \dots(15)$$

は、初期分布  $q_m[0]$  と遷移確率  $P_{mn}$  の集合、すなわち推移確率行列と初期条件の積で表される。

$$q_m[t] = \sum_{v=1}^{\infty} P_{mv}[t] \cdot q_v[0] \quad \dots(16)$$

ここで  $P_{mn}(t)$  を  $t=0$  において連続のものと仮定すると、有界収束定理により  $P_{mn}(t)$  は  $t \geq 0$  で連続であることが導かれる。これより時刻  $t+\Delta t$  における遷移確率を求めることができる。

$$P_{mn}(t+\Delta t) = \sum_{v=1}^{\infty} P_{mv}(t)P_{vn}(\Delta t) \quad \dots(17)$$

時刻  $t$  に系がどのような状態量を持つか知るためには、上式を変形して微小時間  $\Delta t$  で除せばよい。すると、Kolmogorov の前向微分方程式および後向微分方程式よ



り、状態量を示す行列  $Q[t] = [q_1[t], q_2[t], \dots, q_n[t]]^T$  は以下のように変形が可能となる(ただし行列  $P$  は  $P_{mm}$  を要素とする遷移確率行列である)。

$$Q[t + \Delta t] = PQ[t] \cdot \Delta t \quad \dots(18)$$

$$\frac{Q[t + \Delta t] - Q[t]}{\Delta t} = (P - I)Q[t] \quad \dots(19)$$

$$Q'[t] = (P - I)Q[t] \quad \dots(20)$$

$$Q[t] = \exp[t(P - I)] \cdot Q[0] \quad \dots(21)$$

これにより、所与の初期状態量のもとで対策の実施度、ひいては地域の防災性能を予測することが可能となる。

具体的に実例を示そう。簡単のため単位時間内における契機の回数を、平成 10 年度住宅・土地統計調査<sup>9)</sup>、静岡県耐震補強補助制度の利用者経年データ<sup>10)</sup>、地震保険契約者経年データ<sup>11)</sup>から推定した。これは(21)式を 1 次の項まで Maclaurin 展開して対策実行者の経年データで推定したものである<sup>(20)</sup>。ここで行動意図の確率は前章までで得られたパラメータを用いており(ただしデータは昭和 57 年以前建築の木造住宅のみとした)、57 年以前の木造住宅が耐震補強をする際は必ずこの制度を利用するという強い制約を課している。また簡易補強工事の実データを得るのは困難であることから、簡易補強に関しては耐震補強工事と同じ契機の到着率を仮定した。すると下の如く各ケースにおいて、57 年以前の木造住宅居住者が地震の住宅の脆弱性を認識しているとき、その状態量の経年予測は図 15-20 のように示され(ただし太線は耐震補強、中線は簡易補強、細線は地震保険の選択率となる)、10 年後の状態量は下表 7 のように推測される。

図の概要を考察する。ケース 2 は簡易補強が安価となった場合の意思決定者の挙動を示したものである。簡易補強の魅力が高まった(価格負担を抑えた)ことにより、耐震補強選択者と地震保険選択者が減少している。簡易補強選択者が耐震補強を選択する確率はごく微小であるため、このまま定常状態となる。簡易補強は命を守るセーフティネットとしてはきわめて有効と考えられるものの、十分な住居の安全性を約束するものではない。したがってこの分析の限りでは、簡易補強を住宅補修の 1 ステップと捉え、最終的に耐震補強・建て替えへ誘導させるための計画立案が必要不可欠といえる。ケース 3 は地震保険の価格が大幅に減少した場合の挙動を示したもので、図には示していないが一時的に地震保険のみの選択者(状態量 4)が増加し、その後彼らが簡易補強、耐震補強を選択したのち定常状態に達する。結果的に、地震保険の魅力が上がると簡易補強の選択が増え、また耐震補強の選択もやや増す。この理由は、昭和 57 年以前建築の木造住宅に居住している地震保険選択者は耐震補強、特に簡易補強の選択が地震保険非加入者より多いことがあげられる。これは既存研究<sup>2)</sup>でも同様の傾向が確認されているが、今回の分析では地震保険の選択と耐震補強、簡易補強の選択に共通する意思決定者の属性を加味したものではないことに留意する必要がある、更なるモデルの改善が望まれる<sup>(21)</sup>。ケース 4 は耐震補強工事を 170 万円にした場合のケーススタディである(これは TOKAI-0 の補助額とほぼ等しい)。耐震補強工事の価格負担低減より、地震保険の加入者が大幅に減っている。実際アンケートデータを概観すると、耐震補強や簡易補強を行っている意思決定者は地震保険への加入に関する選好がきわめて弱い。これは地震保険の持つ特性の考慮により納

得されるが、耐震補強や簡易補強を行った住宅も被災する可能性が十分にある以上、何らかの措置を確保すべきであろう。これより補強工事をした意思決定者に対し地震保険の魅力が高める制度の必要性が示唆される。そこでケース 5 として、ケース 4 の想定に加え、耐震補強した住宅に対しては地震保険を 0.5 万円にする計画案を考察した。その結果図 18 および表 7 より、耐震補強済の住宅に関して地震保険の魅力が高めることは、地震保険の加入者を減らさずに耐震補強工事の円滑な進捗を可能とする(すなわち負の相互作用を防ぐ)好例であることが明らかとなった。

1. 耐震補強 200 万円, 簡易補強 150 万円, 地震保険 3 万円,  $Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , (図 15)
2. 耐震補強 200 万円, 簡易補強 20 万円, 地震保険 3 万円,  $Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , (図 16)
3. 耐震補強 200 万円, 簡易補強 150 万円, 地震保険 0.5 万円,  $Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , (図 17)
4. 耐震補強 170 万円, 簡易補強 150 万円, 地震保険 3 万円,  $Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , (図 18)
5. 耐震補強 170 万円, 簡易補強 150 万円, 地震保険 3 万円,  $Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  で耐震補強した住宅に対しては地震保険を 0.5 万円にする, (図 19)
6. 耐震補強 170 万円, 簡易補強 150 万円, 地震保険 3 万円,  $Q[0] = [0.75, 0, 0, 0.25, 0, 0]^T$ , (図 20)

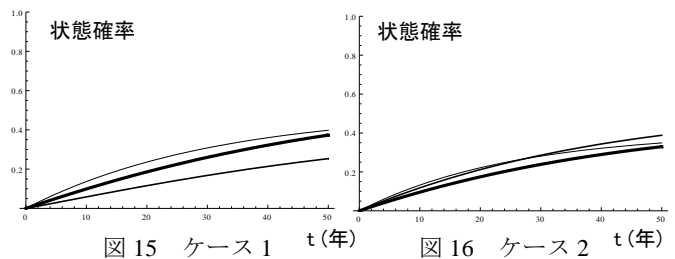


図 15 ケース 1

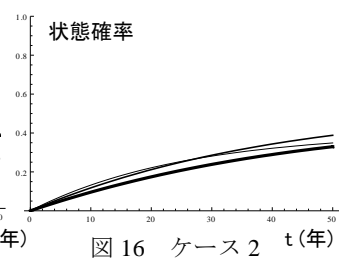


図 16 ケース 2

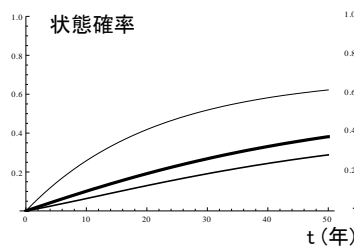


図 17 ケース 3

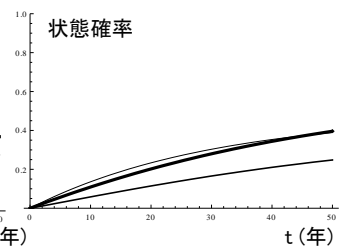


図 18 ケース 4

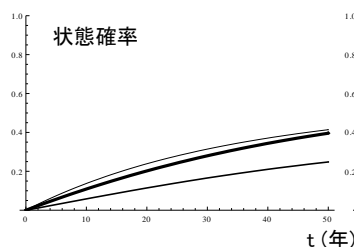


図 19 ケース 5

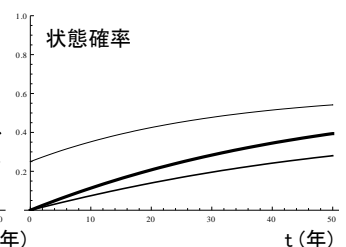


図 20 ケース 6

表 7 脆弱な住宅の 10 年後の状態量

状態量	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
耐震補強	9.90%	9.58%	10.13%	10.91%	10.91%	11.37%
簡易補強	5.86%	11.79%	6.35%	5.83%	5.83%	7.46%
地震保険	13.68%	13.21%	25.80%	13.60%	13.75%	35.20%

ケース 6 は初期分布として、25%が地震保険を既に選択していた場合である(2007 年現在、静岡県において約

25%が地震保険に加入している)。これは現在の状況下で、老朽住宅居住者が自宅の危険性を認識するという条件のもとでマクロ的に地域の防災性がどのように推移するかの一例として解釈することができる。この結果現在脆弱な住宅は、居住者が自宅の脆弱性を認識したとしても、81.17%は10年後も家屋の補強は行わずそのまま、そのうち66.12%は地震保険にも未加入であることが予測される<sup>(22)</sup>。

## 7. おわりに

本研究は、都市空間における地区レベルの防災性能向上の停滞を問題意識とし、都市の(面的)安全性確保の一助となることを期待して防災対策行動のモデル化を議論したものである。2章に示した各課題を可能な限り解決し、特に対策間の相互作用に焦点を当て記述力の高い有用なモデルを(そのプロセスも含めて)構築したことが最大の特徴である。その過程で得られたいくつかの知見を将来的な展望と課題も含め、以下に記す。

1. 防災対策をリスクを解決する手段の一つと位置付け、様々な対策を多基準のもと一元的に取り扱う意思決定モデルを構築した。これは既存の対策のみならず、階層分析法による適切な対策の評価値を所与として、新たな防災対策の評価および予測を可能とする。
2. 防災対策行動に非集計分析を適用するにあたって、(その量的把握の難しさより)モデルの高い再現性を損なわせる意識や感覚といった意識レベルの選択要因を階層分析法によって計量化し、非集計分析の一変数として利用した。これより対策の定性的な評価値が選択行動に色濃く影響を及ぼしていることを実証し、モデルの再現性が飛躍的に高まった。
3. 類似度指標を考慮したランダムパラメータ **Logit Model** を構築し、家屋の改造に関して適用した。これにより、ある選択肢の選好の変化が他の選択肢に及ぼす影響を加味し、**IIA** 特性も解決しうる新たな対策の評価手法が確立された(類似性解決の兆しがみられた)。この成果を用いることで、計画案の組み合わせを対策間の相互作用に留意しつつ検討することが可能となる。
4. 災害の稀少性、一部対策の費用の高さによる行動意図と行動の生起との時間的ギャップをポアソン到着する契機を定義することによりモデルに組み込み、防災対策行動の動学的記述を試みた。これは家屋の劣化・補修や防災対策行動の歩留まりなど、長期的視野に基づいてはじめて論じうる(もしくは議論に値する)テーマに対し新たなアプローチの可能性を示唆する萌芽的な評価手法といえる。
5. 本研究は防災行動の量的な把握とその評価に焦点を絞ったため図1のフレームを所与のものとして分析を行ったが、**Logit Model** の援用により対策の評価値のウェイトを逆推定することでより詳細な評価の把握を実現することもできる。これは特に **Hazard** 認知や **Vulnerability** の認知が対策の評価にどのように影響を及ぼすかについて有用な知見となり得る。

本稿は2章の課題(1)-(3)を解決すべく新たなモデルの構築に焦点を当て議論を行い、今後の防災分野における非集計分析の利用を助けるものである。これは個人属性の格差の存在、多様な対策案(およびその組み合わせ)の評価、助成や動機付けなど行動変容の促進、限りある制

約のもとでの効率的な計画案検討<sup>(23)</sup>などの時代的、技術的要素に因應するものと期待され、実務的意義も大きいと考えられる。モデル式の妥当性や有用性をアンケートデータおよびその統計量から論じたが、現実の選択行動が本研究で提案されるモデルのみで全て表されることは当然なく、また本研究で構築したモデル分析を用いて全意志決定者の行動を再現できるわけではない(本研究は対策主体の平均的な行動を叙述したものである)。特に本研究を有用なものにするためには、防災上脆弱性を有すると思われる木造密集地域に居住している主体の行動に関してその妥当性を示す必要がある。したがってここで得られた知見を用いて現実的な計画案の提言を行うためには各モデルの有用性を前提とした上で、セグメント分割やダミー変数の導入、さらなる説明変数の採用など詳細な分析が必要とされるが、本研究はそのためのワンステップとしての位置づけであり、課題(4),(5)の解決と同じく近い将来の課題とする。

## 謝辞

本研究の内容に有益なご助言を下さいました都市防犯研究センターの菅田寛様に心より御礼申し上げます。また本論の改訂にあたり、査読者の方々からは貴重なアドバイスを頂きました。ここに深甚なる謝意を表します。

## 補注

- (1) 地区レベルの防災まちづくりは阪神大震災を直接的なきっかけとして発案された概念というわけでは必ずしもないことをここに補足する。
- (2) 防災行動における心理的作用として知られる正常化の偏見や認知的不協和なども広義にこれに含められよう<sup>8)</sup>。
- (3) その前提を限定的なものと捉えて議論している既存研究も数多く存在する<sup>13)</sup>。
- (4) 離散選択モデルが防災分野で頻繁に適用されない理由として、防災行動の目的が限定されているがゆえ離散選択モデルが対象とする質的選択として考える必要性が小さいから、等々も考えうる。
- (5) ただしこの循環プロセスは、6章にて記述している。
- (6) ただし30-60代以外は、十分な数を確保することができず、図1の如き人数となった。
- (7) 詳しい説明は回答者負担も斟酌し、最低限のものに留めた。例えば、地震保険が火災保険金額の半分しか支払われないこと、消火器の設置は火災損失の防止や低減に効果的だが損壊に対しては効果がないこと、また防災訓練や家具の固定に関する詳しい説明などは補足していない。
- (8) 例えば、生命の危機は家屋の倒壊と従属関係にあるものと考えられよう。
- (9) 一対比較行列は非負の正方行列となるため、ペロン・フロベニウスの定理より最大固有値に対する正の固有ベクトルが常に存在し、解の存在条件は常に成立する。
- (10) 要因5種類以上、対策案4種類以上であれば、絶対比較法の方が回答者の負担が少なく、精度の高い分析ができるとされているが、本例はこれにあてはまる。
- (11) 経済学分野の先行研究では非集計 **Logit Model** を用いて態度(評価)レベルを分析した研究も多いが、この手法で用いられる効用は行動が第一義的に存在しそこから演繹されるものである。他方、態度は行動とは無関係に存在しうる心理量と解釈される。よって両者の定義より1.態度は個人間の比較が可能であるが効用は本質的に不可能であ

る、2.効用のみが行動を規定する要因であるのに対し態度は効用を規定する一要因に過ぎない、などの相違点が認識されうる<sup>13)</sup>。それゆえ本研究では態度(評価)を効用そのものとするよりも行動を規定する一因子とみなし、その態度を含んだ効用関数をもって非集計 LogitModel を構築することにより意図レベルにおける指標を定量化した。

- (12) ここでは簡単のため本文の如く効用関数を定義したが、防災対策の選択と地震に対する不安(Hazard 認知)の線形性を疑問視する既存研究も存在するため<sup>2)</sup>、説明変数の取捨選択は注意を払う必要がある。
- (13) 表4と表5の差異について言及すれば、認知リスクと許容リスクを組み込むことでかえって尤度、係数の有意性が小さく、総じて再現性が低くなる。この理由として、両リスクの差分量は防災対策の選択行動に及ぼす影響が小さいこと(或いは別の説明変数との多重共線性が顕著なこと)、または本文に示した計量化が適切でなかったことなどに糸口が見出せる。この検討は今後の課題である。
- (14) もちろん非集計分析の推定精度に由来する影響も無視できないが、対策の実行に伴う手続きや手間を懸念する意思決定者が多いのも事実である。表2は平均値であるが、評価基準をクラスター分析することにより地震不安の低い意思決定者は総じて手間を重要視する傾向が伺えた。
- (15) 事実、静岡県において地震保険加入者数はここ3年伸び悩んでおり、意思決定者のリスク認識が地震保険加入の推進に必須であることを示唆している。
- (16) 一般に非集計 LogitModel の係数推定には600以上のサンプルが必要とされているため、その選択行動の把握は多少の費用と手間が必要となる。しかし本研究で提案する分析手法の援用より、保証つき耐震補強<sup>18)</sup>、地震保険付き耐震補強、防災ベッド、耐震・不燃同時補強<sup>17)</sup>など、一般に認識されている防災対策を質的に改良したものの選択行動の記述が容易に可能となる。
- (17) 対策主体が常に耐震補強、簡易補強、不燃化を選択肢集合として考慮していることが議論の大前提となる。
- (18) アンケート調査に「耐震補強を行う」と回答する行為と、実際の耐震補強の行動の間には自ずと時間的(或いはその他の)ギャップが生じることは想像に難くない。
- (19) これは定常性(推移確率が時刻に依存しない)および Markov 性(推移確率が過去の状態量や経路に依存しない)、非可逆性(地震保険などをやめない)を前提としたものである。
- (20) 本来は(21)式を行列の対角化することで解析解を導出すべきであるが、そのためには行列  $(P-I)$  の固有ベクトルが非零であるという強い仮定を満たす必要があるため、このような計算法を用いた。これは初期の状態においては得られた結果の蓋然性を著しく損なわせるものではない。
- (21) 既存研究<sup>2)</sup>では防災訓練参加や避難所確認、食料や水の用意などから説明される防災意識なる潜在変数が定義され、共分散構造分析によって地震保険の加入の有無を表す説明変数の係数が耐震補強工事の選択に対し負の符号を持つという結果を得ており、ここでの結論は必ずしも一般性を有したのではないと推察される。
- (22) ただしここでは建て替えを考慮していないので実際は多少過小評価と考えられる。本来なら建て替えを何らかの形でモデルに組み込むべきであるが、課題(2)のとおり、耐震補強を選択する上で建て替えの存在こそが選択肢間

の負の相互作用を及ぼしているものと推察され、また本研究のフレームは防災目的以外に多基準の効用を有する建て替えの選択行動を妥当性を保ちながら記述しようものではない。よってここではその重要性を認識しつつも、あえて建て替えを考慮せず分析を試みた。

- (23) 例えば、本研究の成果を援用することで地震前と地震後の総行政支出を最小化しうる耐震補強の助成額などを明らかにすることもできる<sup>19)</sup>。

## 参考文献

- 1)高木朗義：防災投資の簡便な便益計測法に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.17，pp195-204，2000。
- 2)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，pp89-97，2006。
- 3)榊原弘之，村上ひとみ：地震後の住宅再建への影響要因と支援制度の効果に関する分析，第1回防災計画研究発表会アブストラクト，pp14，2006。
- 4)多々納裕一，高木朗義(編著)：防災の経済分析，勁草書房，2005。
- 5)奥村誠，塚井誠人，下荒磯司：避難勧告への信頼度と避難行動，土木計画学研究・論文集，No.18，pp311-316，2001。
- 6)松田曜子，多々納裕一，岡田憲夫：CVMを用いた自然災害リスクに対する家計のリスクプレミアムの計量化，土木計画学研究・論文集，Vol22，No.2，pp325-334，2005。
- 7)損害保険料率算出機構：建物耐震性能等の実態に関する調査研究，損害保険料率算出機構，2003。
- 8)東京大学新聞研究所：災害と人間行動，東京大学出版，1982。
- 9)総務省統計局：平成10年度住宅・土地統計調査，1998。
- 10)静岡県：プロジェクト TOKAI-0の平成19年度の実績，静岡県耐震ナビ，<http://www.taishinnavi.pref.shizuoka.jp/index.html>，2008。
- 11) 損害保険料率算出機構：地震保険都道府県別世帯加入率の推移，損保協会 HP，[http://www.sonpo.or.jp/archive/statistics/syumoku/pdf/index/kanyu\\_jishin.pdf](http://www.sonpo.or.jp/archive/statistics/syumoku/pdf/index/kanyu_jishin.pdf)，2007。
- 12)岩下富彦：SD法によるイメージの測定，川島書店，1983。
- 13)藤井聡，中山昌一郎，北村隆一：習慣解凍と交通政策：道路交通シミュレーションによる考察，土木学会論文集，No.667/IV50，pp85-102，2001。
- 14)土木学会土木計画学研究委員会：非集計モデルの理論と実際，土木学会，1996。
- 15)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。
- 16)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。
- 17)長谷見雄二：密集地区の面的整備に資する既存建物付加型防耐火補強技術の開発，平成17-18年度建設技術研究開発助成制度研究成果報告書，2007。
- 18)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。
- 19)廣井悠，小出治，加藤孝明：耐震補強工事に関する行動分析と助成額の最適化，地域安全学会梗概集，No.22，pp.33-38，2008。

(原稿受付 2008.5.24)

(登載決定 2008.9.13)