



南山大学オープンリサーチセンター 2008年第2回公開研究会

都市防災計画とOperations Research

-意思決定論的見地からみた安全な都市空間の形成手法-

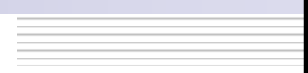
東京大学大学院 工学系研究科
都市工学専攻 助教

廣井 悠

2008.07.26 (土)



- 自己紹介
- 研究の背景
- 研究紹介
- 防災のORとは?



1. 自己紹介

□ 自己紹介

ひろい ゆう
廣井 悠

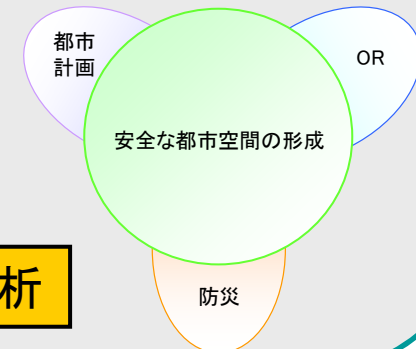


所属: 東京大学 工学系研究科 都市工学専攻(関澤研究室) 助教

- ・2003.03 慶応大学理工学部管理工学科卒業(栗田研究室)
- ・2003.04 慶応大学大学院理工学研究科修士課程入学
- ・2005.03 慶応大学大学院理工学研究科修士課程修了
- ・2005.04 東京大学大学院工学研究科都市工学専攻博士課程入学(小出研究室)
- ・2007.03 東京大学大学院工学研究科都市工学専攻博士課程中途退学(2年次)
- ・2007.04 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻助教 (現在に至る)

都市計画学会, 建築学会, 土木学会
火災学会, 地域安全学会, 災害情報学会
災害復興学会, 自然災害学会, OR学会

都市防災計画・防災のOR・都市防災解析

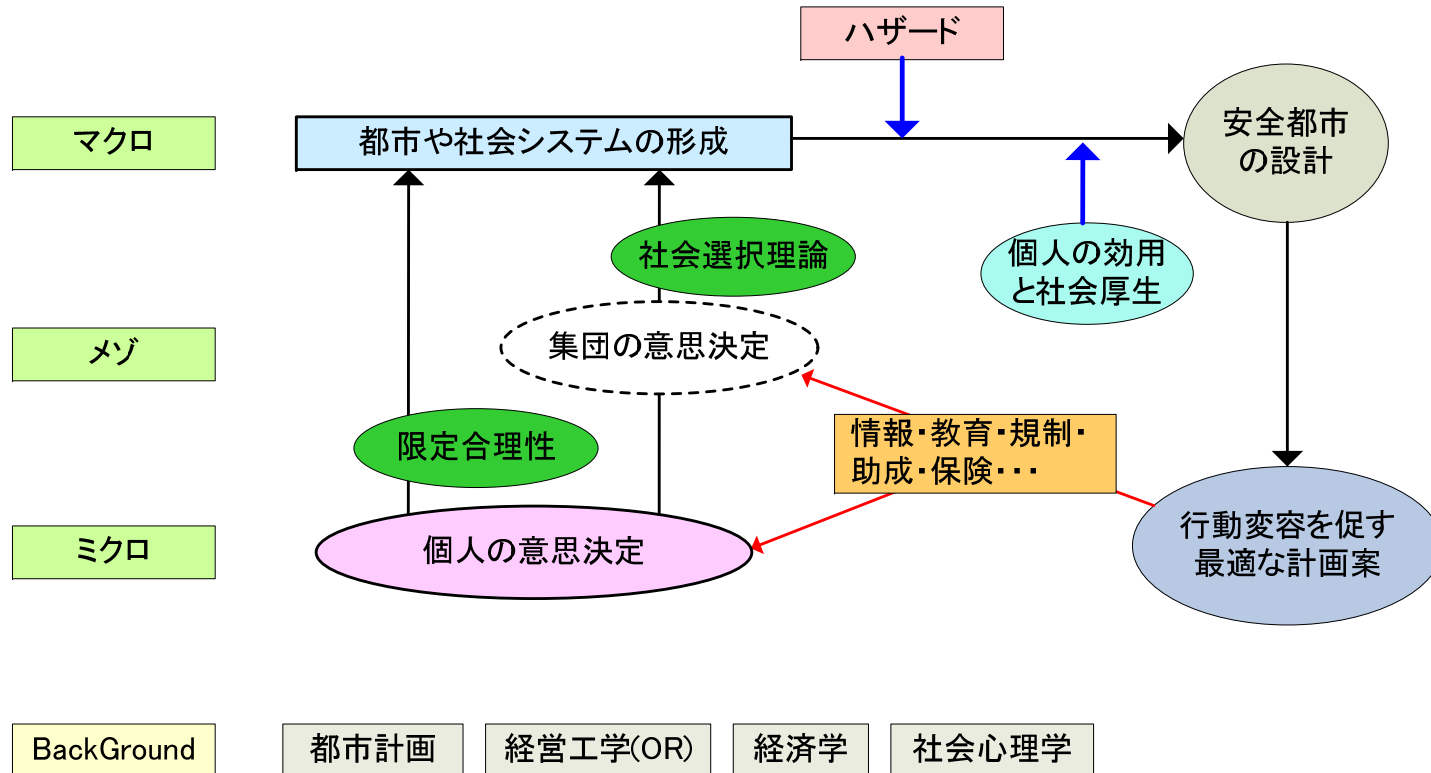




□現在の取り組み

6.防災行動のモデリングとマネジメント

本日の内容





2.研究の背景

□ 防災まちづくりの変遷

1. 都市基盤整備

- 幹線道路や河川・公園の整備
- 安全な広域避難場所の確保



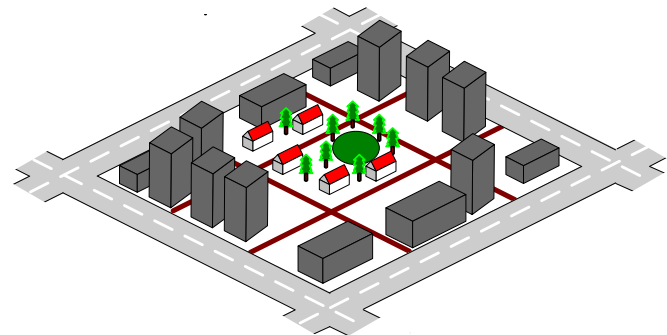
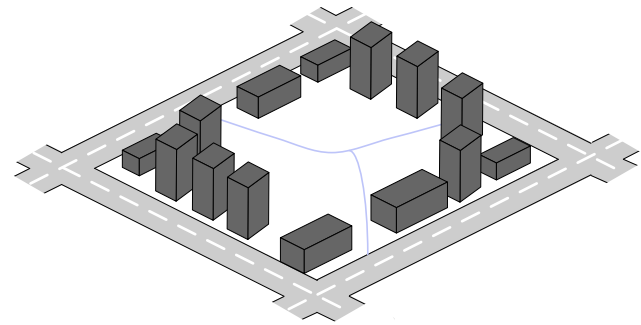
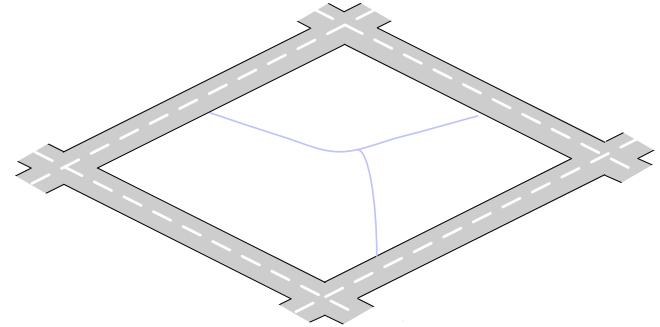
2. 都市防火区画の形成

- 幹線道路沿道建物の不燃化
- 延焼遮断帯の整備



3. 地区レベルの対策

- 生活道路等の拡幅整備
- 老朽住宅の建替え促進





□ 「人間行動に関する議論」とは!?! -古典的先行研究-

消費者行動に関する代表的なモデル
消費者行動論(1960-)

S-Rモデル/S-O-Rモデル

S-Rモデル: 消費者の行動を刺激とそれに対する反応に還元して把握する

S-O-Rモデル: 消費者の生活体をこれに含め, 消費者の内面における反応過程を説明する

- Howard&Shethモデル
- Fishbeinによる多属性態度モデル
- Engel,Blackwell&Miniardモデル

$$A_0 = \sum_{i=1}^n B_i a_i$$

A_0 : 対象 O に関する態度

B_i : 対象 O が属性 i と結びついている確からしさ(信念 i の強さ)

a_i : 属性 i の評価

n : 対象 O の属性の数

Stimulus

Organism

Response

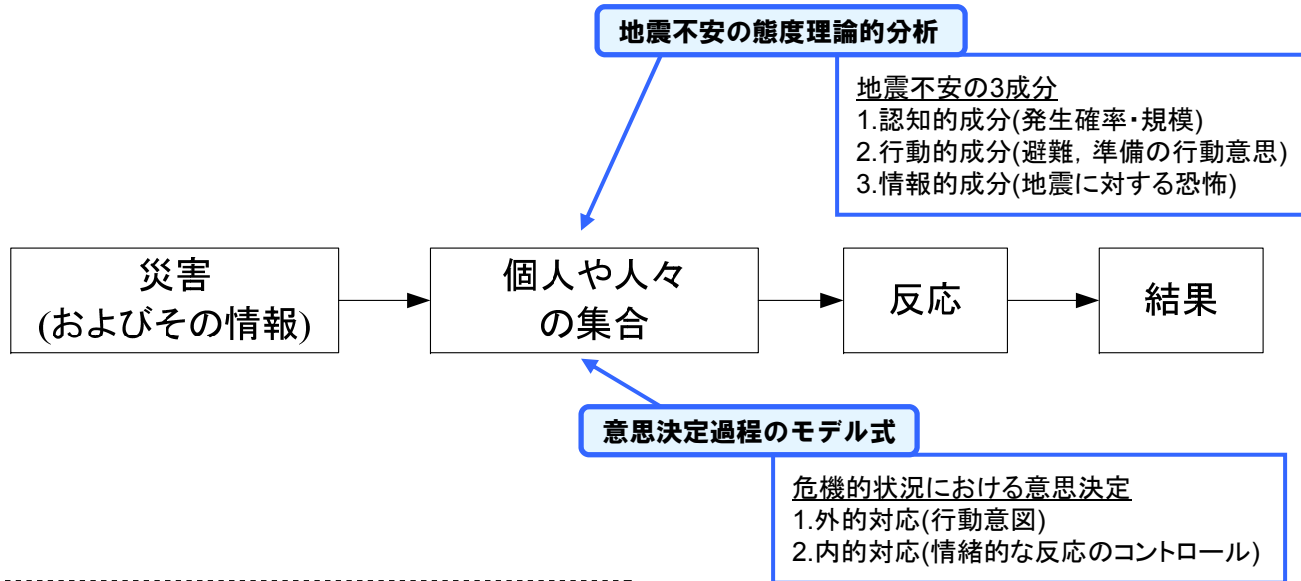
地震リスクに関しても同じく, 所与の状態をもととして刺激を知覚し, それに対して反応するS-O-Rの形で意思決定のモデル化が思考された



□ 災害と人間行動に関する先行研究

災害に関する人間行動研究の基本図式

災害と人間行動(1982)



1. はじまりは石橋先生の東海地震説(1976)
2. パニック研究(パニックのコントロール)
3. 正常化の偏見
4. 災害情報・防災教育への応用

直後対応は災害情報学的見地から
解決が試みられるも
事前対策はあまり考えられていない



□ 研究の出発点

事前対策における意思決定行動を分析し
防災まちづくりの計画案にいかす必要性

□ 本研究で明らかにしたいこと(少し範囲を絞って)

耐震補強工事促進に関する計画案をどのように設計・評価すればよいか!?

Question/Hypothesis

Answer

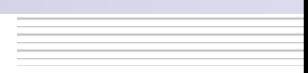
- 1.耐震補強の意思決定行動はどのようなモデルで再現されるか?
- 2.その結果, 都市空間の脆弱性はどのように移り変わるか?
- 3.耐震補強工事に対する助成額はいくらがよいか?
- 4.より被害軽減につながる計画案はあるのか?





3. 研究紹介

-住宅耐震性の確保を例とした
都市空間の脆弱性に関する
モデリングとマネジメントの方法論-



3.1 現状分析

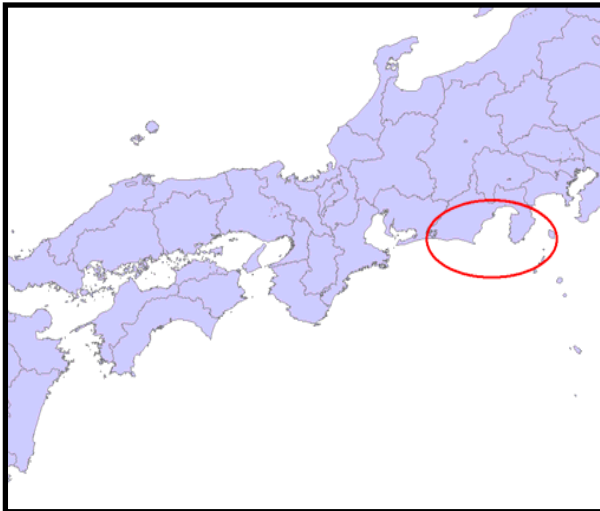


□ 代表的な地震について

a. 東海地震

b. 東南海・南海地震

c. 中防3連発



M8.0

■ 駿河湾トラフで周期的に発生する
海溝型地震

項目	死者数
揺れによる被害	約6700人
津波による被害	約1400人
急傾斜地崩壊による被害	約700人
火災の被害	約600人
合計	約9200人

今後30年以内の発生確率・・・87%

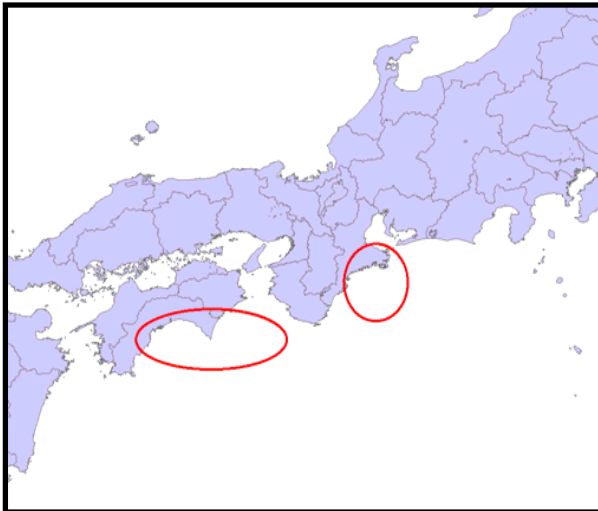


□ せまりくる大地震

a. 東海地震

b. 東南海・南海地震

c. 中防3連発



M8.4

■ 南海トラフで周期的に発生する
海溝型地震

項目	死者数
揺れによる被害	約6600人
津波による被害	約8600人
急傾斜地崩壊による被害	約2100人
火災の被害	約500人
合計	約17800人

今後30年以内の発生確率・・・**50-60%**

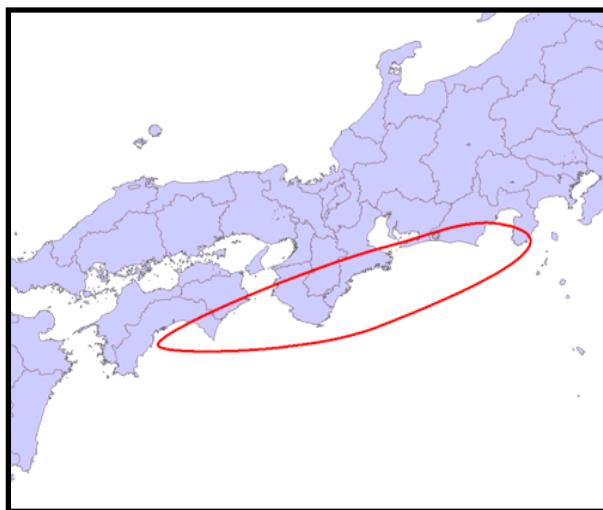


□ せまりくる大地震

a. 東海地震

b. 東南海・南海地震

c. 中防3連発



■ 東海・東南海・南海地震が連動し同時に発生することも予想される

M8.7

項目	死者数
揺れによる被害	約14300人
津波による被害	約10000人
急傾斜地崩壊による被害	約2800人
火災の被害	約1100人
合計	約27000人

□ 地震防災戦略の理想と現実

これらの地震発生確率を受け、内閣府は以下の目的で地震防災戦略を策定

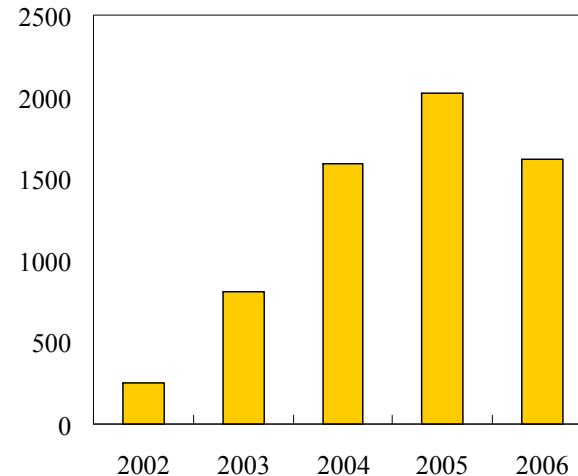
今後10年間で地震による死者数・経済被害額を**半減**！

理想

- 1.住宅・建築物の耐震化
- 2.居住空間内の安全性確保
- 3.外部空間の安全性確保

全国の住宅の耐震化率
75%→90%を目指す

現実

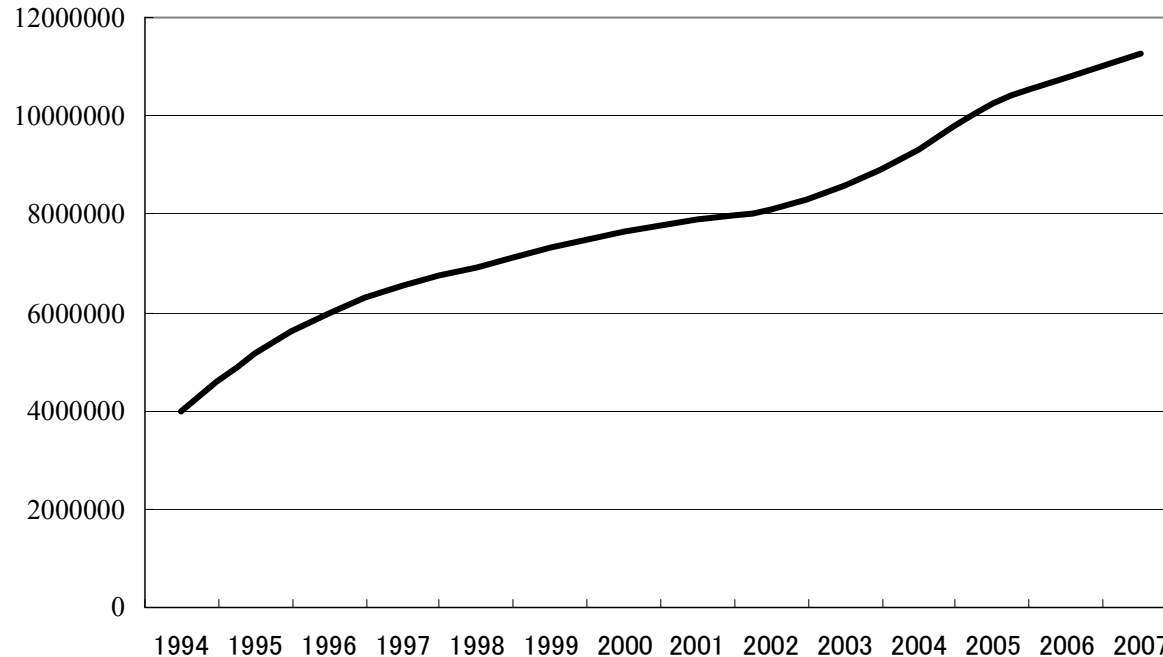


耐震補強の進捗(静岡県)

※静岡県の耐震性不足
の住宅は約34万戸

□ ちなみに地震保険は

地震保険加入者は年々増加傾向



- ・耐震補強(リスクコントロール: リスクの低減としての役割)
- ・地震保険(リスクファイナンス: 防災対策でカバーできないリスクに対応)

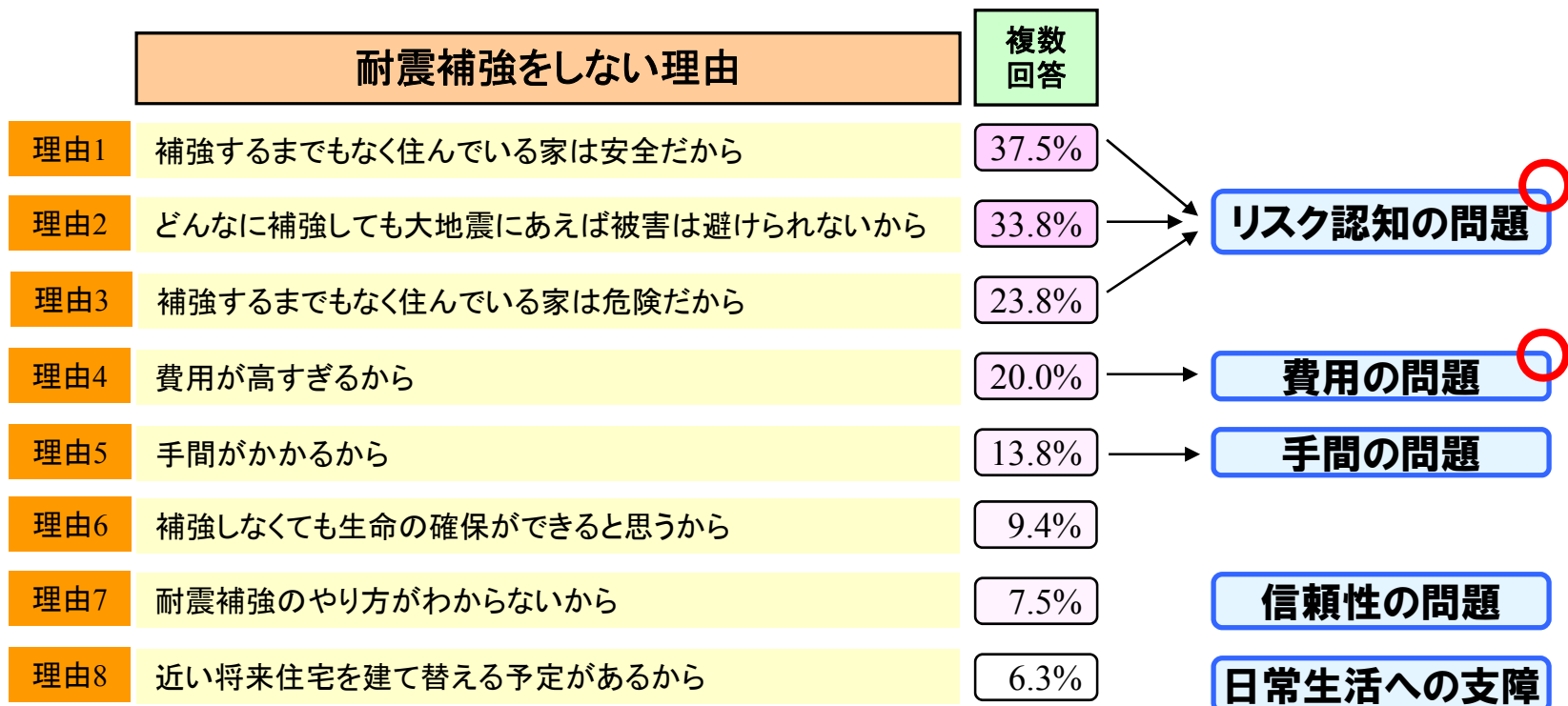


□ みんなの疑問

どうして耐震補強は
こんなにも選択されないのか？

耐震対策の現状分析

□ 耐震補強工事の阻害要因 (静岡県で行ったアンケート)



耐震補強をすすめるためには、これらの課題をひとつずつ解決していくことが重要

耐震対策の現状分析

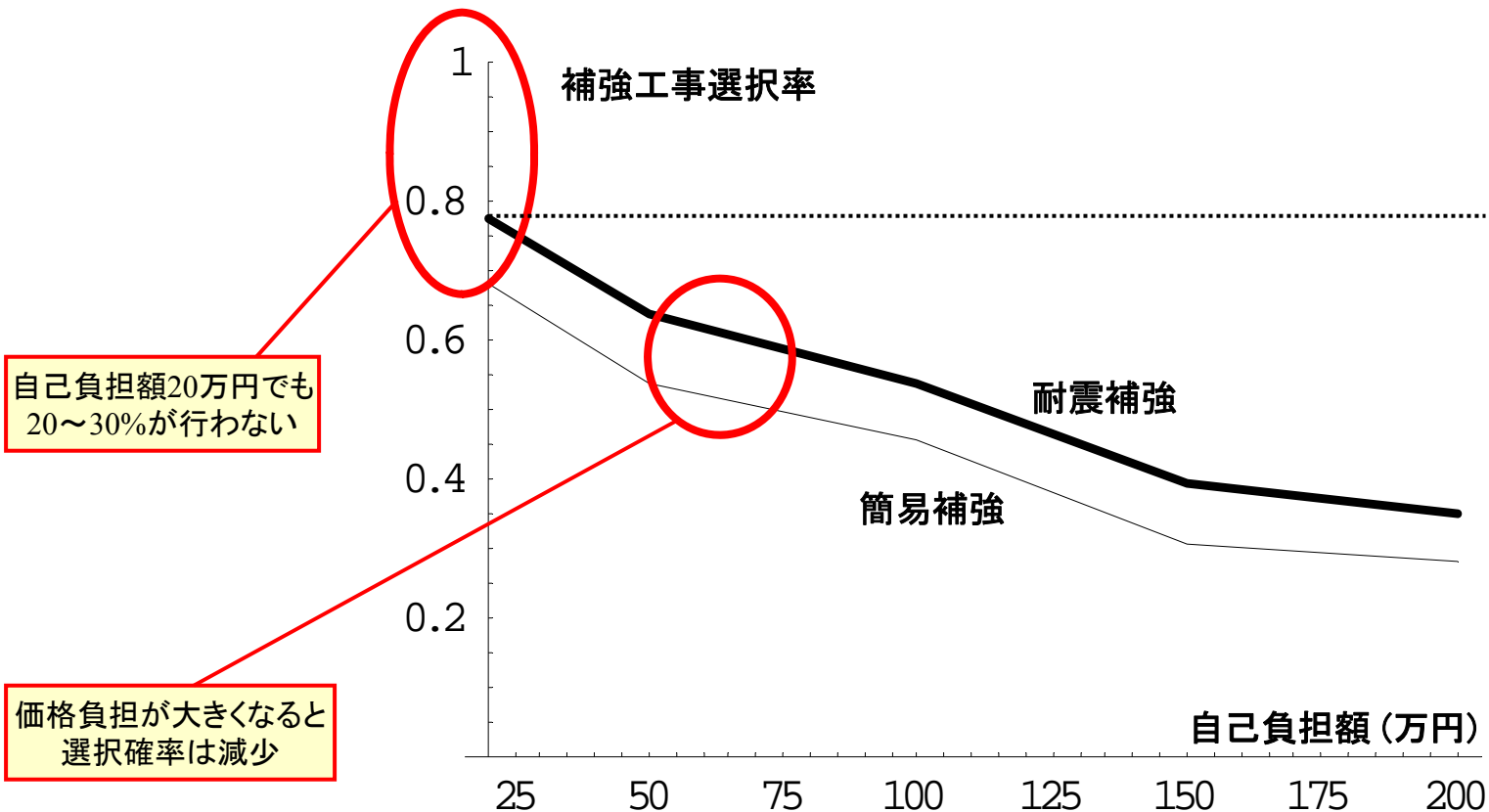
□ 個人属性ごとの阻害要因を調べる

耐震補強をしない理由		全体	老朽住宅 居住者	年収 400万以下
理由1	補強するまでもなく住んでいる家は安全だから	37.5%	7.1%	18.4%
理由2	どんなに補強しても大地震にあえば被害は避けられないから	33.8%	33.3%	44.7%
理由3	補強するまでもなく住んでいる家は危険だから	23.8%	52.4%	34.2%
理由4	費用が高すぎるから	20.0%	40.0%	34.2%
理由5	手間がかかるから	13.8%	14.3%	18.4%
理由6	補強しなくても生命の確保ができると思うから	9.4%	11.9%	7.9%
理由7	耐震補強のやり方がわからないから	7.5%	7.1%	5.3%
理由8	近い将来住宅を建て替える予定があるから	6.3%	14.3%	5.3%

個人属性によって耐震補強工事の阻害要因は大きく異なる

□ 耐震補強工事の選択行動分析 -費用の問題-

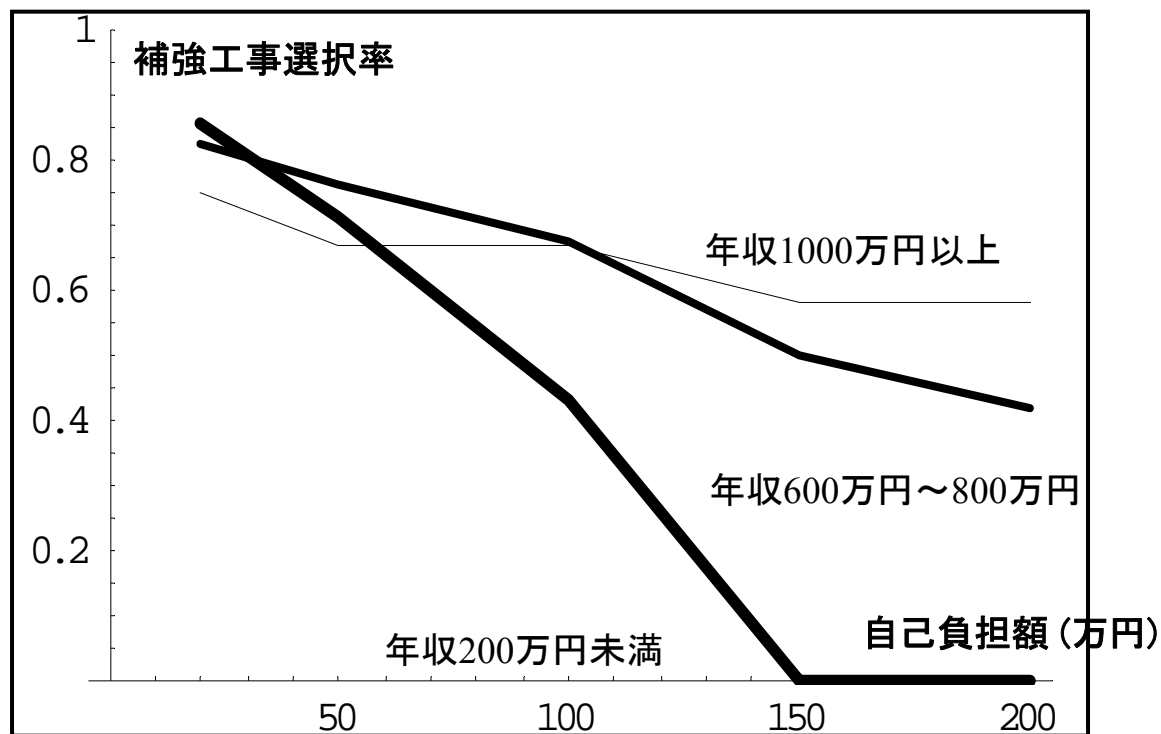
自宅の耐震性が不足していると判明した場合、工事をしますか？





□ 耐震補強工事の選択行動分析 -費用の問題-

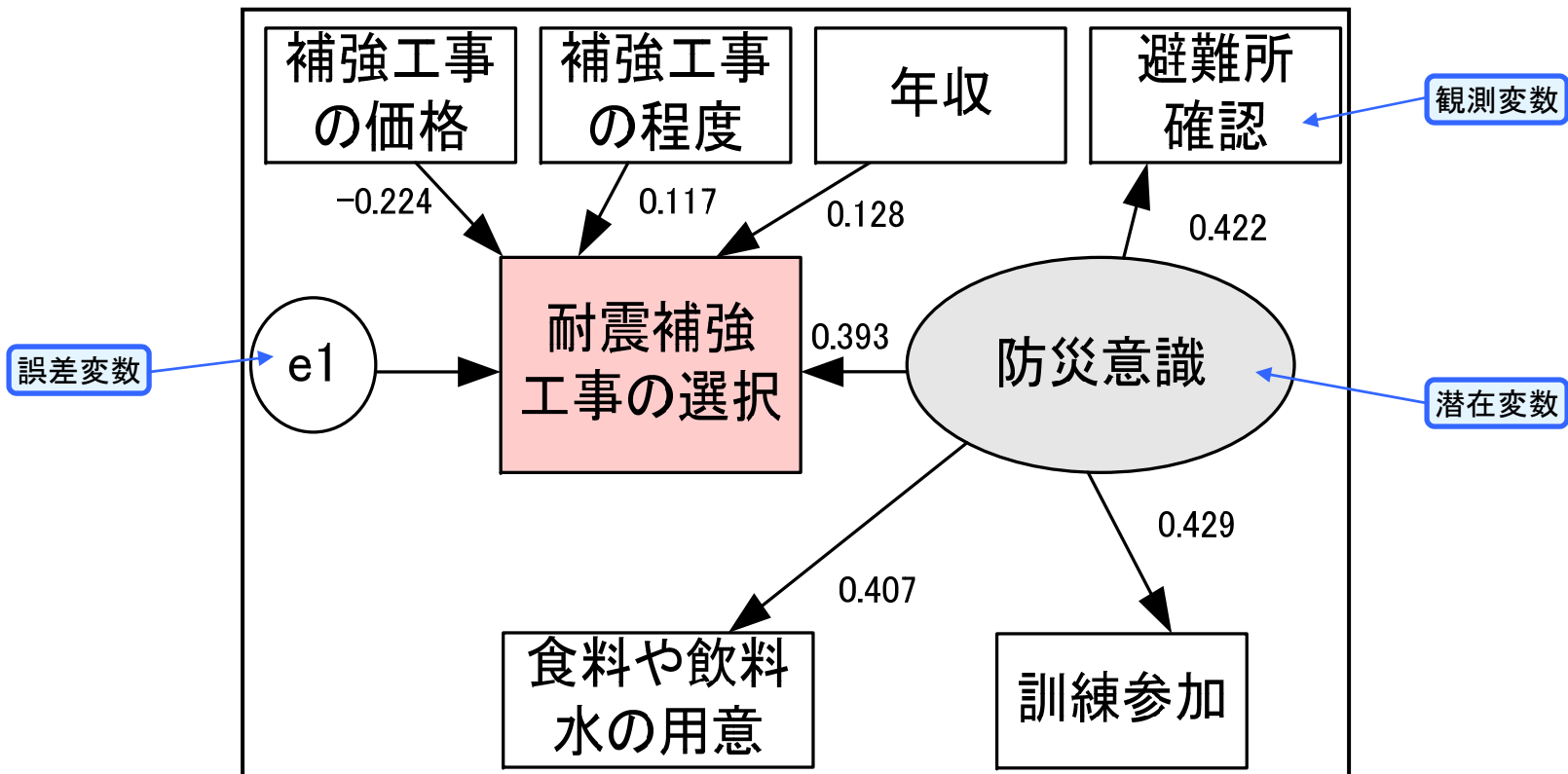
年収による選択行動の大きな差異



分散分析の結果, 年収600万円以上と600万円未満できわめて有意な差
=個人属性ごとの多様なメニューの必要性

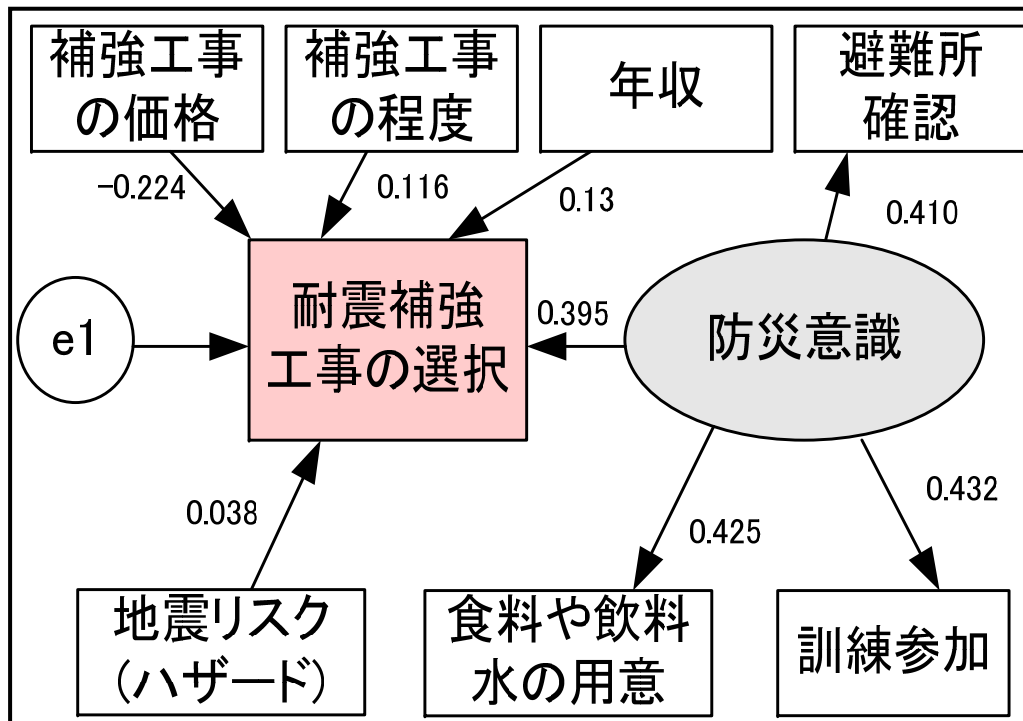
□ 耐震補強工事選択のモデル化を試みる

共分散構造分析を用いた分析



RMSEA(1自由度あたりの真の分布との乖離)=0.089
あてはまりは割とよい

□モデルにリスク認知を入れてみる



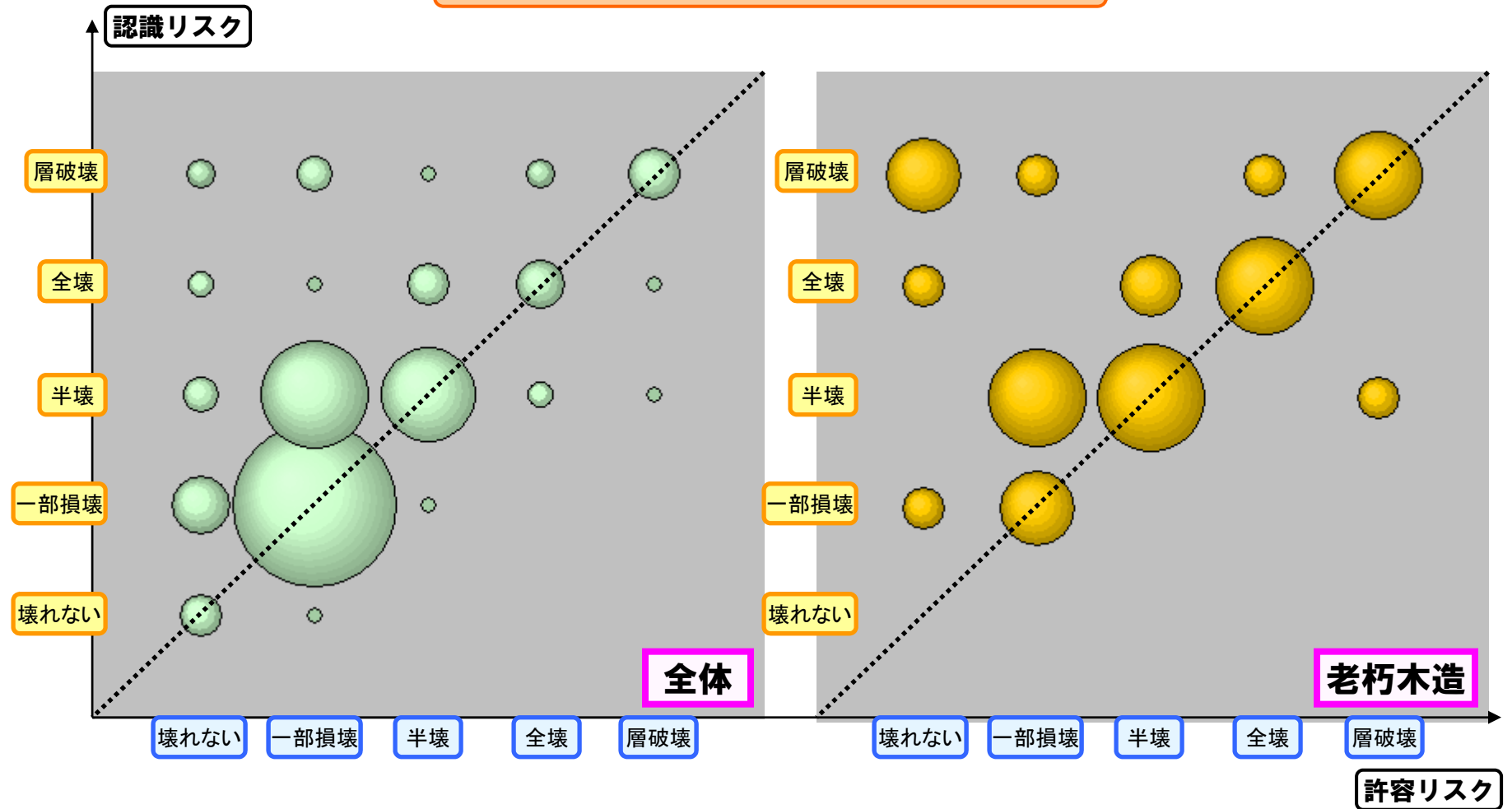
「災害リスク」を組み込んだら
あてはまりが極めて悪くなった
RMSEA=0.089
↓
RMSEA=0.520

居住者のハザードリスク認知と防災対策実行の間には線形でない複雑な関係
リスク認知をモデルに入れる際は注意が必要

耐震対策の現状分析

□ 認識しているリスクと許容できるリスクを調べた

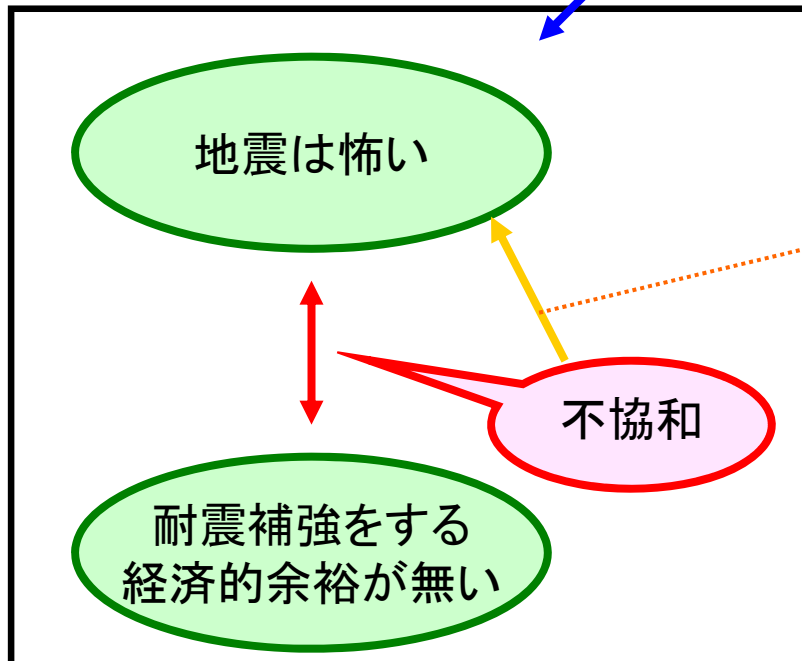
両者のバランスが取れている人が多い



□ 防災行動を妨げる心理的要因

1. Normalcy Bias
2. 日本人特有の災害観
3. 認知的不協和

心理的に相容れない2つの認知を
持っている時に生じる
心理的にアンバランスな状態



不協和を解消したいがあまり
リスク認知を軽くしてしまう
(知識としてのリスク認知は持っている)



リスク情報伝達・防災教育の限界

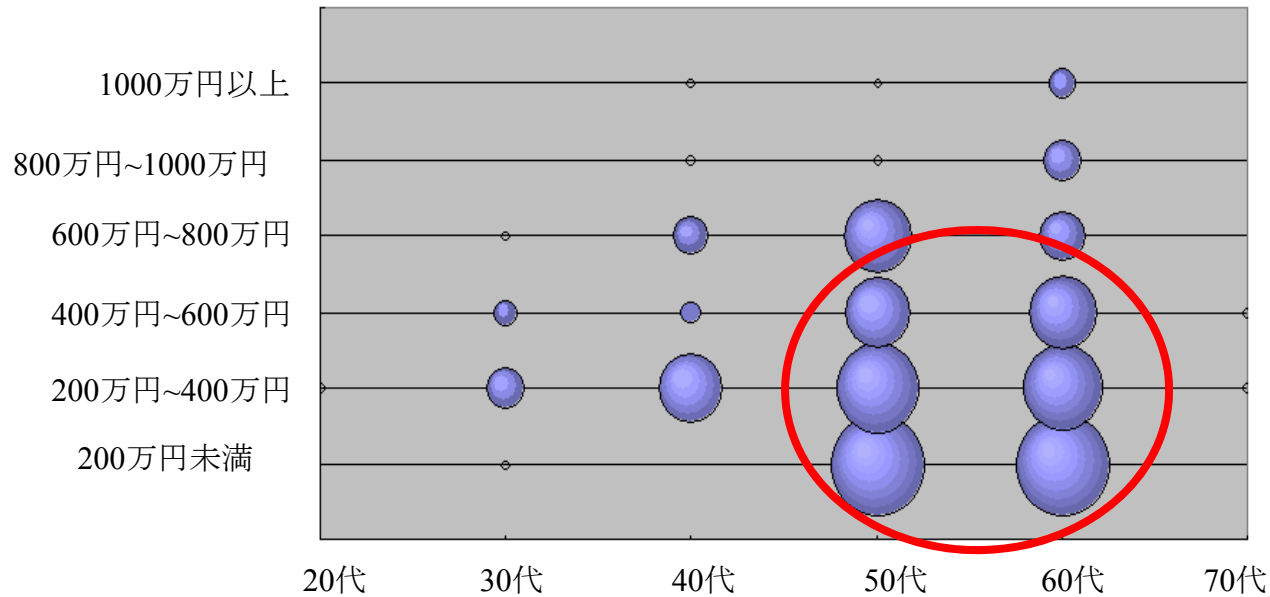
耐震対策の現状分析

□ どんなに補強しても被害は避けられないという人に注目

耐震補強をしない理由		複数回答
理由1	補強するまでもなく住んでいる家は安全だから	37.5%
理由2	どんなに補強しても大地震にあえば被害は避けられないから	33.8%
理由3	補強するまでもなく住んでいる家は危険だから	23.8%
理由4	費用が高すぎるから	20.0%
理由5	手間がかかるから	13.8%
理由6	補強しなくても生命の確保ができると思うから	9.4%
理由7	耐震補強のやり方がわからないから	7.5%
理由8	近い将来住宅を建て替える予定があるから	6.3%

無限大の耐力を持つ住宅を造ることができない以上
この認識はある意味正しい

□ 被害は避けられないと回答した人の内訳

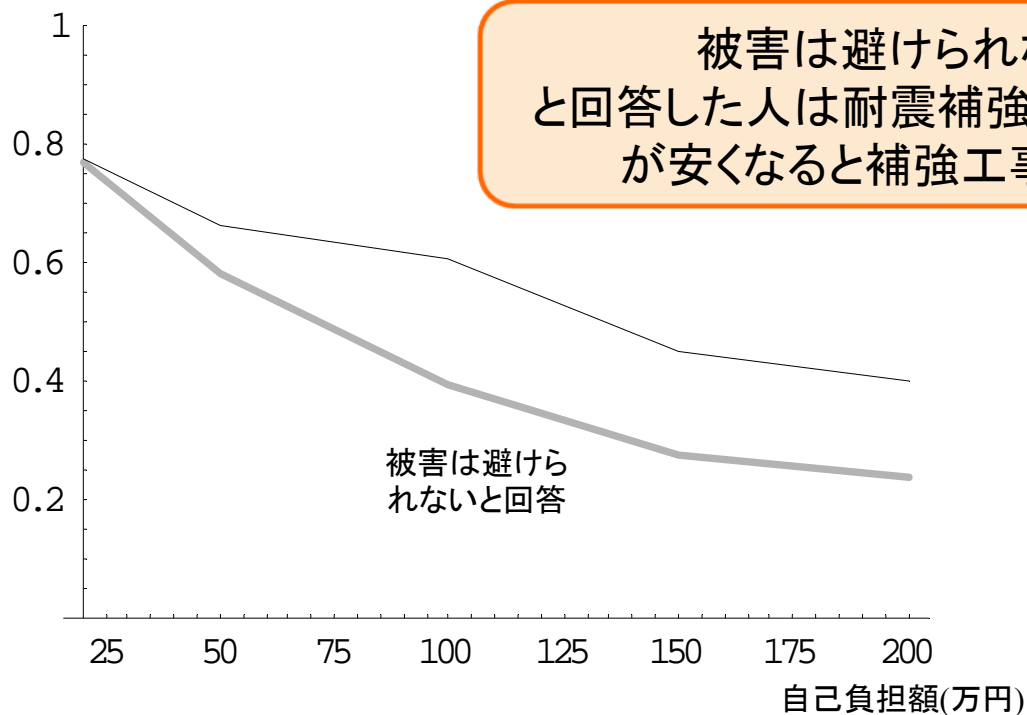


被害は避けられないと回答した人は年収が低い高齢者が多い
認知的不協和状態!?



□ 被害は避けられないと回答した人の補強工事選択

耐震補強選択確率



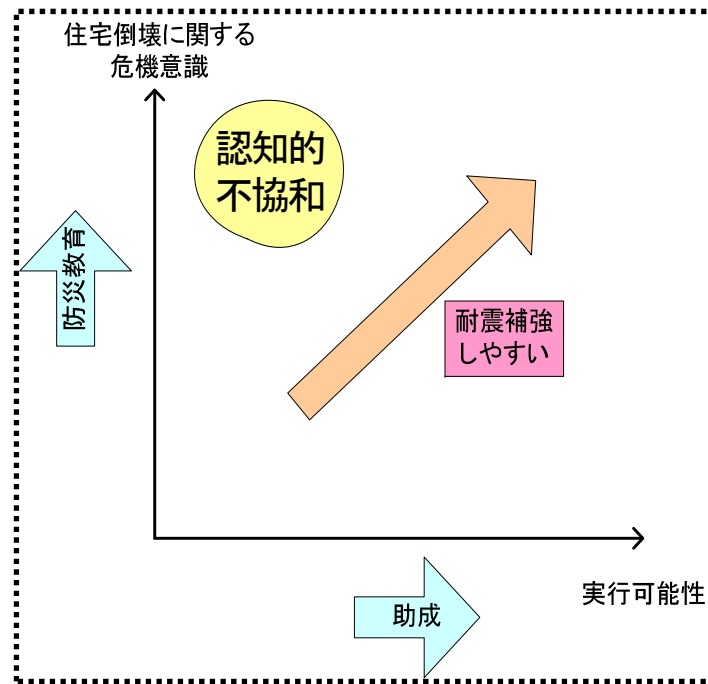
被害は避けられないと回答した人は耐震補強工事の金額が安くなると補強工事をする

被害は避けられないと回答

統計的に述べているわけではないのでただの仮説にすぎないがこのような人たちが居るかもしれないことは、認識しておくべき!!

□ 認知的不協和に陥っている人たちに対して

地震リスク認知が低いのが問題ではなく
実行可能性が低いことが問題



彼らに対しては地震リスクの伝達だけではなく同時に実行可能性を上げることが重要

研究のまとめ: その1

防災行動の分析

耐震補強工事を行う際の意思決定構造を調査

わかったこと

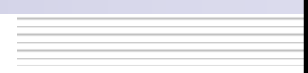
- 耐震補強工事に関する阻害要因が明らかになった
- 価格弾力性は意思決定者の属性に大きく影響されることがわかった
- リスク認知をモデルに導入する際は注意が必要
- リスク下における行動を分析する際は認知的不協和・正常化の偏見という心理現象についても注意が必要

耐震補強に関する意思決定研究のパラダイム

	「意思決定のため」の規範理論	「意思決定について」の記述理論
1. 意思決定者が抱えている問題そのものを議論	具体的な耐震化事例の整理と是非の検討	耐震化の阻害要因の分析
2. 意思決定行為に共通の規則やパターンを見出す	多属性効用理論の前提としての研究	耐震化の意思決定分析
3. 適切な決定の支援を議論する	耐震補強に関する支援の正当化や制度設計	適切な支援額など Decision Aidに関する研究

既存研究

これまでのほなし



3.2

行動モデリングと 予測手法の確立



□ 耐震補強工事の行動モデリング

耐震化するか否かは、不確実性下での選択行動と考えることができる



ランダム効用理論のあてはめ

ランダム効用理論(非集計ロジットモデル)

交通工学における経路選択の推定などで実際に多用されている

1. 個人の行動は必ずしも合理的選択行動に厳密に従わない
2. 利用可能な選択肢特性についての完全情報を皆が有していない
3. 巡り合わせなどの不確定な要素もある程度考慮に入れたい



□ ランダム効用理論による補強工事選択率の導出

ある個人の”選択枝の集合(choice set)”が J 個の要素からなるものとし、これを

$$C = \{1, 2, \dots, J\}$$

で表すものとする。そして

U_j = [その個人が選択枝 J を選ぶ時の効用] とする。ここで、

個人は効用が最も大きい選択枝を選ぶ

と約束する。ただし、この効用は次のような 2つの項の和で表されるものとする。

$$U_j = V_j + X_j$$

V_j = 確率的に変動しない確定項

X_j = 確率的に変動する確率項

効用の確率項は位置母数 α_j
尺度母数 $1/\lambda$ の
ガンベル分布(Gumbel distribution)
に従うとする

$$F_j(x_j) = \exp[-\exp[-\lambda(x_j - \alpha_j)]]$$

$$f_j(x_j) = \lambda \exp[-\lambda(x_j - \alpha_j)] \exp[-\exp[-\lambda(x_j - \alpha_j)]]$$

すると $J=2$ のとき
選択枝1を選ぶ確率は

$$\frac{\exp[\lambda V_1]}{\exp[\lambda V_1] + \exp[\lambda V_2]}$$

□ 効用関数の特定化

効用関数の特定には
不確実性下の意思決定理論である**期待効用仮説**を想定
すると耐震補強する場合の期待効用は

$$V_{\text{耐}} = \overbrace{\text{耐震補強を行う嬉しさ}}^a + \underbrace{(\text{地震の起こる確率})}_{q} \times \underbrace{(\text{自宅が倒壊しない嬉しさ})}_b$$

と線形で表され、居住者が耐震化を選択する確率 $P_{\text{耐}}$ は

$$P_{\text{耐}} = \frac{e^{\lambda(a+qb)}}{e^{\lambda(a+qb)} + 1} = \frac{1}{1 + e^{\lambda(-a-qb)}}$$



□ 効用関数の中身

期待効用仮説をベースとして効用関数を定義したが
その中の変数である

耐震補強を行う嬉しさ

地震が起こると思う確率

自宅が倒壊しない嬉しさ

は補強メニューや個人属性によって様々

選択肢特性によるもの	個人属性によるもの
自己負担額	貯蓄もしくは収入
耐震補強の程度	危険性の認識度
工事の際の日常生活の支障	世帯主の年齢
耐震補強奨励制度の有無	建築物の築年数
税制の優遇措置	地震保険加入の有無
	耐震診断の有無
	住宅の種類
	家族・高齢者の有無



□ パラメータの推定方法

$$L^* = \prod_{k \in K} \prod_{j \in J} p_{jk}^{\delta_{j1}}$$

を最大とする最尤推定法でモデルのパラメータを推定する

※ただし L^* の最大化は $\ln L^*$ の最大化と考えられる

$$L = \ln L^* = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \delta_{jk} \cdot \ln p_{jk} \text{ を最大化}$$

アンケートデータよりHessian行列を求め
係数の有意確率, 自由度調整済尤度比を求める

耐震補強工事選択の行動モデルを構築



□ 一番単純な分析結果

補強工事の価格のみが確定項の場合

$$V_{\text{耐}} = ac + b$$

係数	効用の確定項名	パラメータ	有意確率
a	自己負担額	-0.008	0
b	切片	1.305	0

得られた選択確率

$$q(c) = \frac{1}{1 + \exp[0.008c - 1.305]}$$

□ パラメータの推定と結果

ここでは**年収600万円以上**，**600万円未満**にデータを分けて推定

年収600万円以上

係数	効用の確定項名	パラメータ	有意確率
b	自己負担額	-0.007	0
d	切片	0.423	0.143
e	防災訓練参加の有無	0.631	0.022
f	災害時要支援者の有無	0.362	0.199
g	耐震補強工事の程度	0.609	0.016

年収600万円未満

係数	効用の確定項名	パラメータ	有意確率
b	自己負担額	-0.008	0
d	切片	0.309	0.243
e	防災訓練参加の有無	0.539	0.013
f	災害時要支援者の有無	0.781	0.162
g	耐震補強工事の程度	0.507	0.019

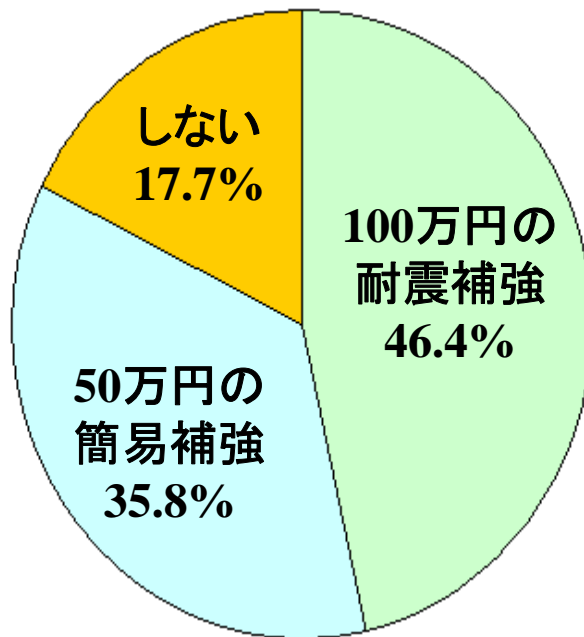
自己負担150万円 → 100万円の助成
600万円以上→7.5%の増加 **600万円未満→9.7%の増加**

「防災訓練に参加するようになる」までの防災教育
600万円以上→90.1万円の助成と等価 **600万円未満→67.3万円の助成と等価**

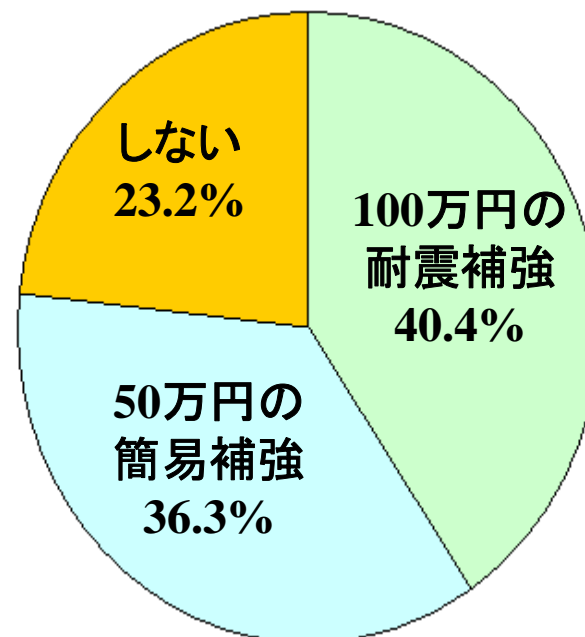
□ パラメータの推定と結果

人は 100万円の耐震補強 と 50万円の簡易補強 どっちを選ぶ!?

年収600万円以上



年収600万円未満



防災行動のモデリング

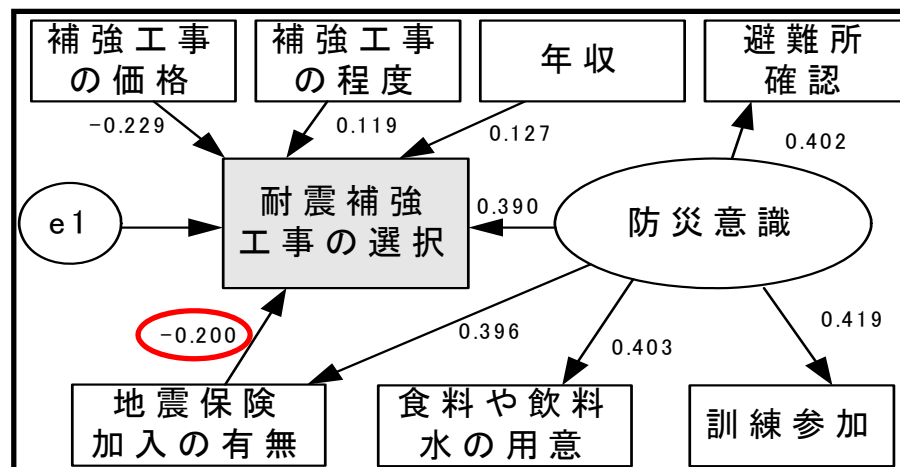
□ 地震保険加入者はどのような選択行動をするか？

「地震保険加入の有無」を効用関数の要素として新たに追加しパラメータ推定

非集計ロジットモデル

係数	効用の確定項名	パラメータ	有意確率
b	自己負担額	-0.008	0
d	切片	0.689	0
e	防災訓練参加の有無	0.485	0.002
g	耐震補強工事の程度	0.531	0.001
h	地震保険加入の有無	-0.332	0.036

共分散構造分析



地震保険の加入は耐震補強の選択を妨げている(ように見える)

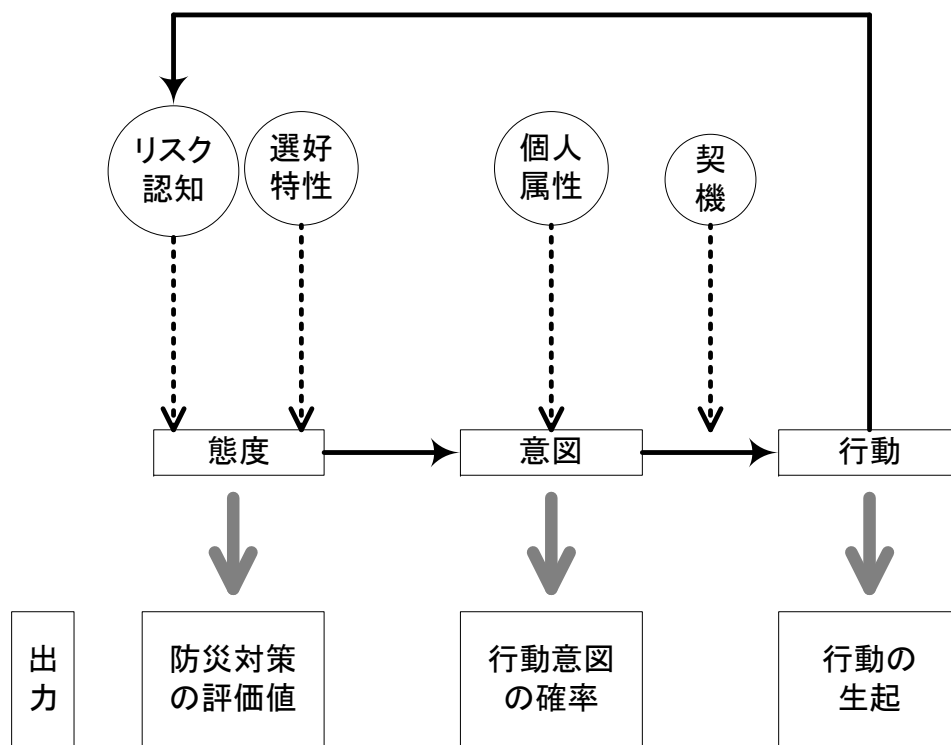
因果関係かただの相関かは不明であるがこれ以外にも数多の防災対策が相互に影響を及ぼしあっているのでは!?

そこで意思決定モデルの拡張を試みる



□ 防災対策に関する意思決定モデルの拡張

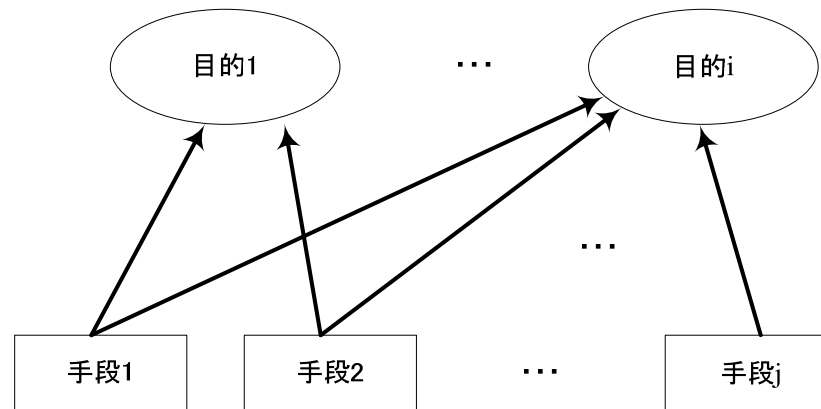
防災対策に関する選択行動を以下の3段階に分類して把握する



はじめに態度の計量化を目指す

□ 防災に関する選択行動研究の特徴

防災対策はそれ自身が「目的」となるわけではなく
対策をした後の(予想される)状態量の変化こそが真の目的である
+地震防災に関する目的は様々であり、相互に従属関係にあるものも多い

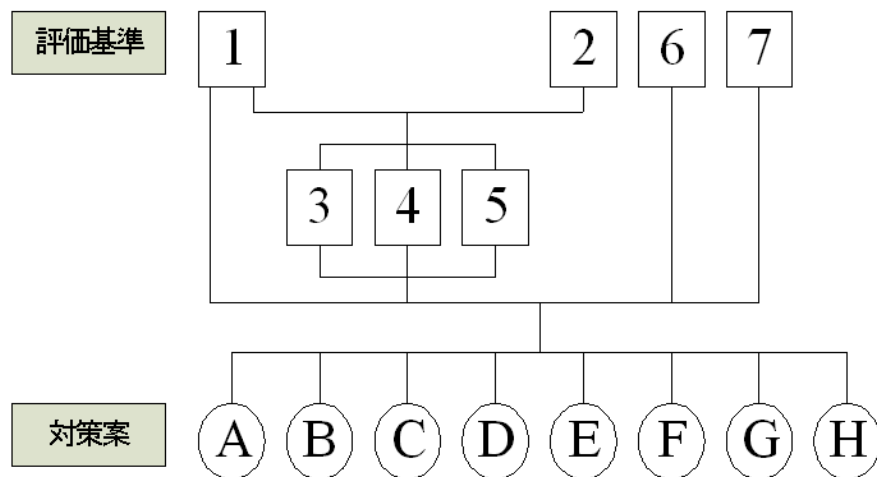


目的と手段の関係図

態度を定量化する際は地震防災対策の目的の多様性を考慮に入れた計量手法が必要

□ AHPを用いた態度の計量手法

想定した評価基準と対策

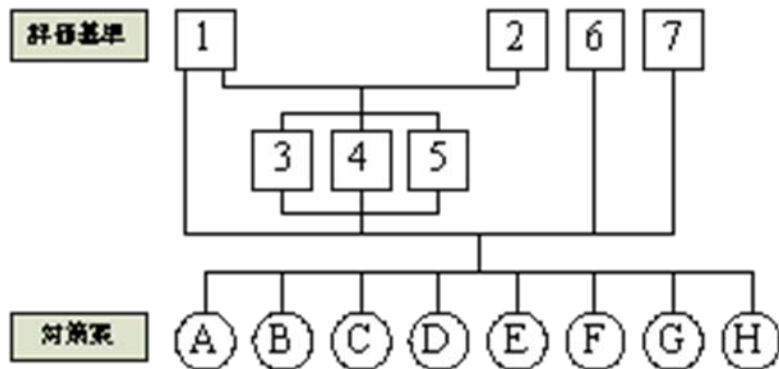


評価基準	
1	家族を含めた生命の危機
2	被災後の生活
3	自宅が倒壊しない
4	自宅が火災被害にあわない
5	地震被害に対する漠然とした不安感
6	金銭的負担の大きさ
7	防災対策の手続きや情報収集などの手間
対策案	
A	家具の固定
B	耐震補強
C	簡易補強
D	地震保険
E	消火器
F	不燃化
G	防災訓練への参加
H	家屋の建て替え

データとして2008年4月に行われたアンケート調査を用いる(木造住宅居住者のみ)



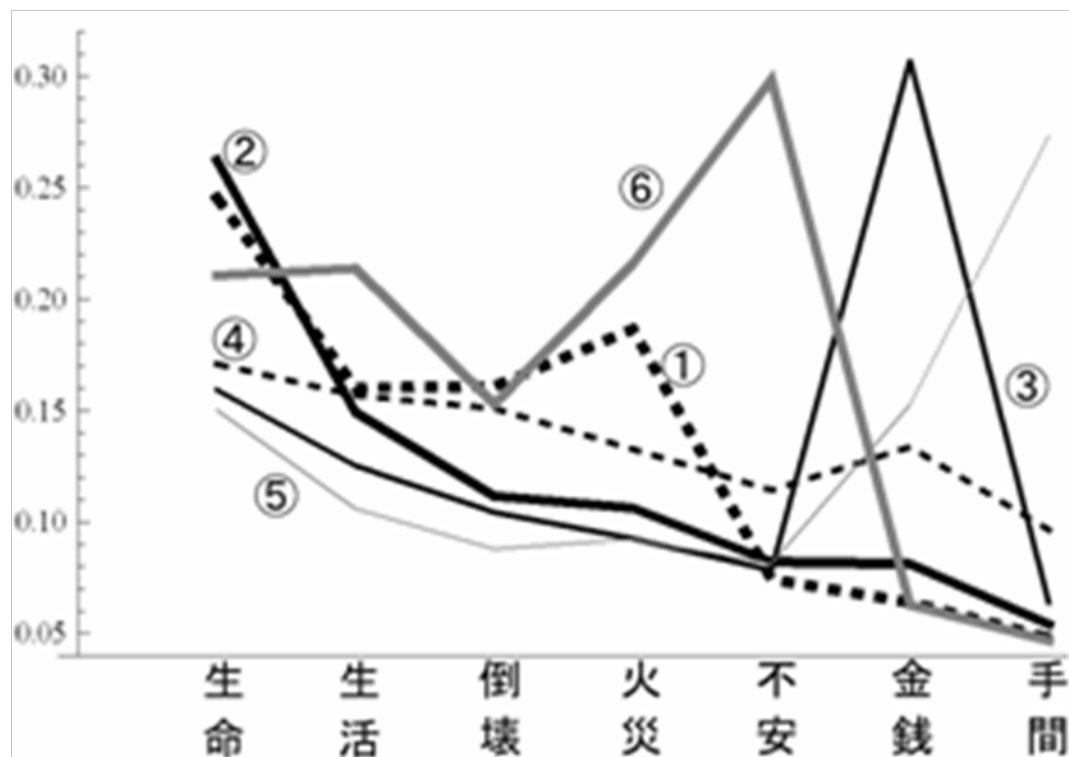
□ 計量した態度指標



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



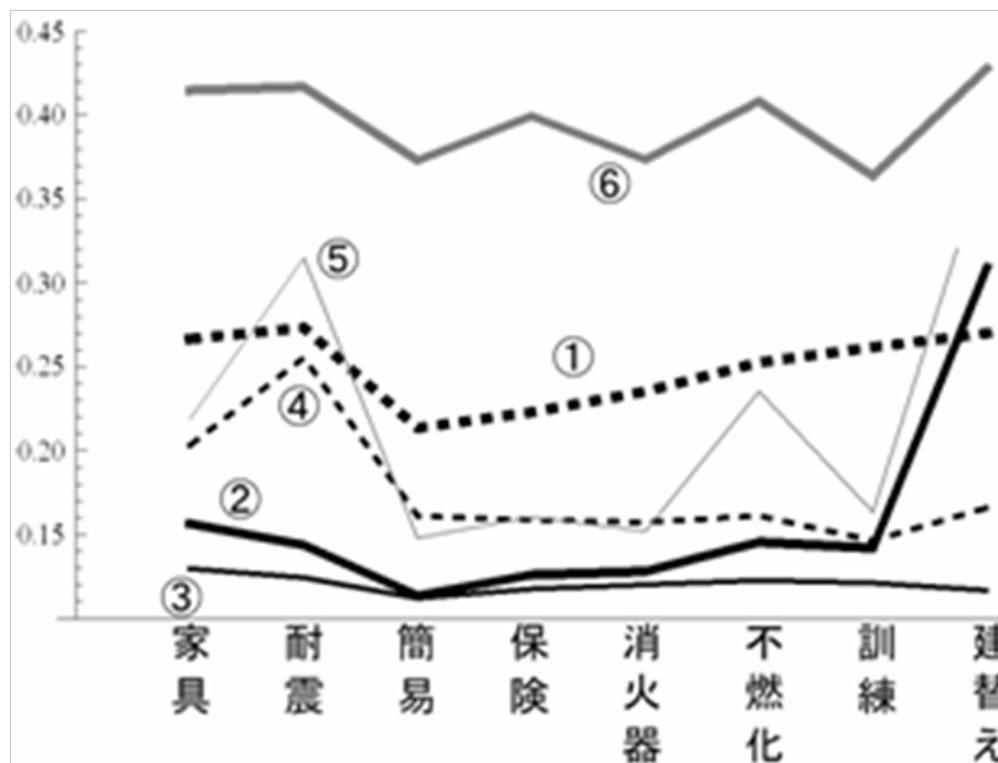
□ 態度指標による評価基準のクラスター分析



	1	2	3	4	5	6
回答者率	23.56%	29.96%	7.04%	22.17%	7.04%	10.23%
高齢者率	32.58%	22.06%	18.18%	31.25%	37.88%	51.04%
年収600万円以下率	43.89%	47.33%	51.52%	50.96%	51.52%	62.50%
昭和57年以前住宅率	21.74%	21.18%	37.04%	27.50%	24.24%	35.00%
木造住宅率	79.26%	74.54%	80.95%	73.60%	78.95%	68.13%
不安(平均)	7.36	7.00	7.08	6.87	5.77	7.16



□ 態度指標による対策案のクラスター分析



	1	2	3	4	5	6
回答者率	12.15%	13.33%	38.70%	14.29%	13.43%	8.10%
高齢者率	30.70%	29.60%	25.62%	30.60%	30.16%	53.95%
年収600万円以下率	47.37%	46.40%	50.14%	52.24%	50.79%	47.37%
昭和57年以前住宅率	22.81%	25.60%	15.98%	21.64%	30.95%	27.63%
木造住宅率	69.30%	81.60%	71.35%	73.13%	65.87%	73.68%
不安(平均)	7.27	7.46	6.68	6.88	8.02	7.70



□ 計量した態度指標は有用か？ -検定結果-

手段	家具の固定	耐震補強	簡易補強	地震保険
p値	0.000	0.003	0.033	0.002
手段	消火器	不燃化	防災訓練への参加	家屋の建て替え
p値	0.000	0.009	0.000	0.081

態度指標の検定結果

良好

それでは「態度」だけで行動意図の指標となりうるか？

家具の固定	耐震補強	簡易補強	保険
54.7%	59.5%	67.8%	55.7%
消火器	不燃化	訓練	建て替え
61.9%	68.1%	70.1%	60.4%

態度指標の判別分析

やや不満



□ 補足：集団的意思決定への展開 -記述モデルから規範的アプローチへ-

集団的防災行動の意思決定はどのようにしてはかればよいか？

最大限コンフリクトジレンマを解消する意思決定を求める

$$\min_E \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (r_i (\sigma_{ij} x_{ij} - e_j)^2) \right] \quad \sum_{i=1}^m e_j = 1$$

を満たす集団案ベクトル $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ を求めればよい

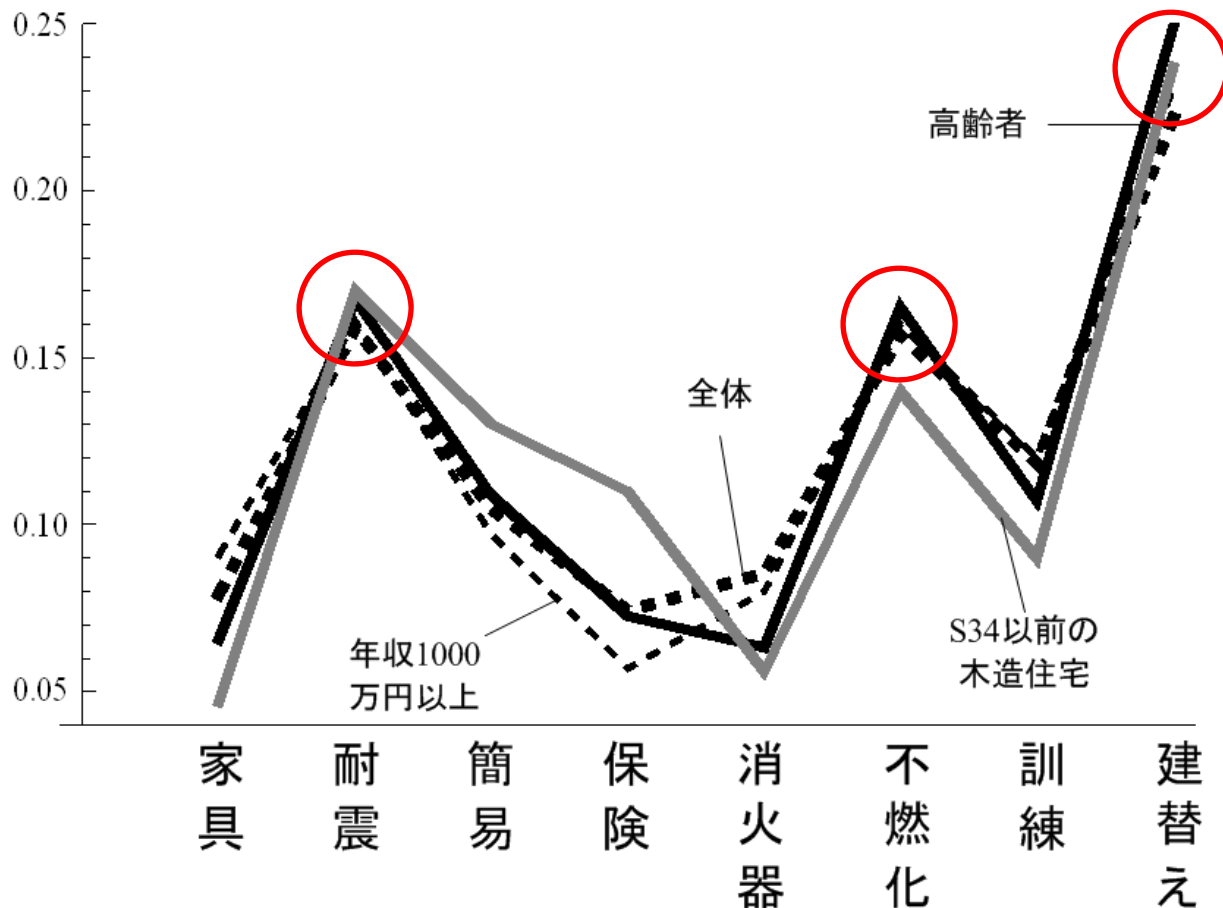
r_i : 個人*i*の地震対策行動に関する重要度

x_{ij} : 個人*i*の対策*j*に関する評価値

σ_{ij} : 個人*i*が対策*j*を行っていれば0そうでなければ1



□ 補足：集団的意思決定への展開 -記述モデルから規範的アプローチへ-

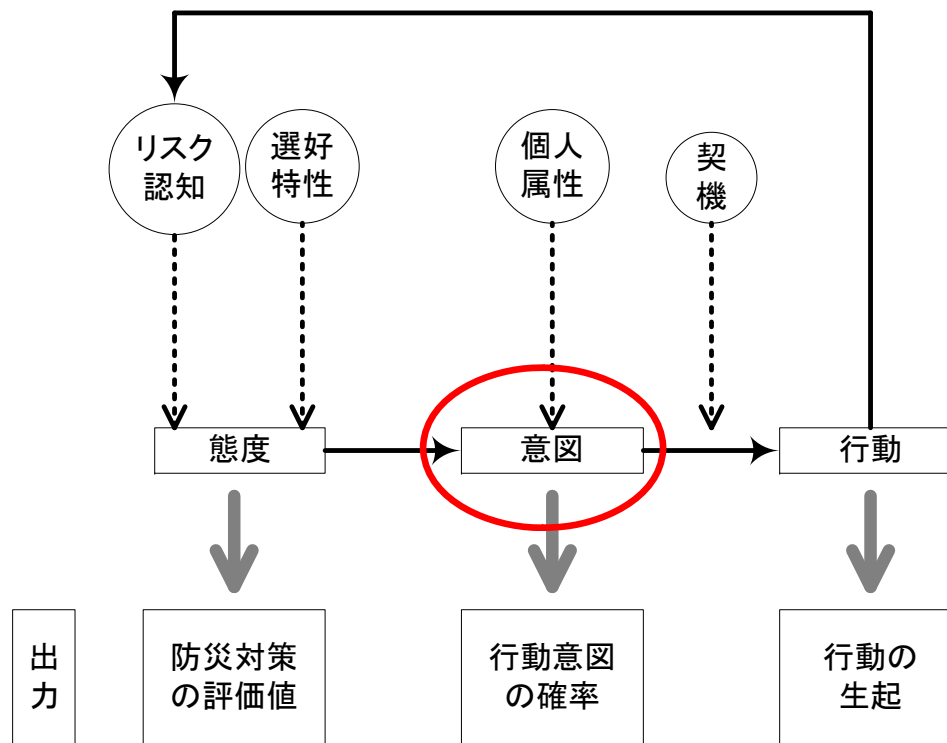


建替え・耐震補強・不燃化などが求められている



□ 防災対策に関する意思決定モデル

防災対策に関する人間行動の基本図式



次に、得られた態度指標をもとにして意図レベルの計量化を目指す



□ 意図レベルの計量手法

対策をするか否かは、不確実性下での選択行動と考えることができる



ランダム効用理論(非集計ロジットモデル)のあてはめ

1. 個人の行動は必ずしも合理的選択行動に厳密に従うわけではない
2. 利用可能な選択肢特性についての完全情報を皆が有しているわけではない

効用の確定項を、対策を行う場合は $V_1(x, y, \dots)$ とし、しない場合は $V_2(x, y, \dots)$ とする。その上で、確率項 ε がガンベル分布に従うとすると耐震化をする確率 P_1 は

$$P_1 = \frac{e^{\lambda\{V_1(x, y, \dots)\}}}{e^{\lambda\{V_1(x, y, \dots)\}} + e^{\lambda\{V_2(x, y, \dots)\}}}$$



□ 効用関数の設定

効用関数を以下のように設定する

$$V_1 = a_1 \cdot \text{対策の評価値} + a_2 \cdot \text{金銭的負担} + a_3 \cdot \text{年齢} + a_4 \cdot \text{年収} \\ + a_5 \cdot \text{地震に対する不安感} + \text{定数}$$

すると、防災対策を選択する確率 P_1 は以下の如くなる。

$$P_1 = \frac{e^{\lambda V_1}}{e^{\lambda V_1} + 1} = \frac{1}{1 + e^{-\lambda V_1}}$$

防災行動のモデリング

□ 意図レベルの分析結果

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	4.4152**	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	2.91**	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



□ リスク認知を入れたモデリング

$$V_1 = a_1 \cdot \text{対策の評価値} \cdot (\text{許容リスク} - \text{認識リスク}) + a_2 \cdot \text{金銭的負担} + a_3 \cdot \text{年齢} + a_4 \cdot \text{年収} + a_5 \cdot \text{地震に対する不安感} + \text{定数}$$

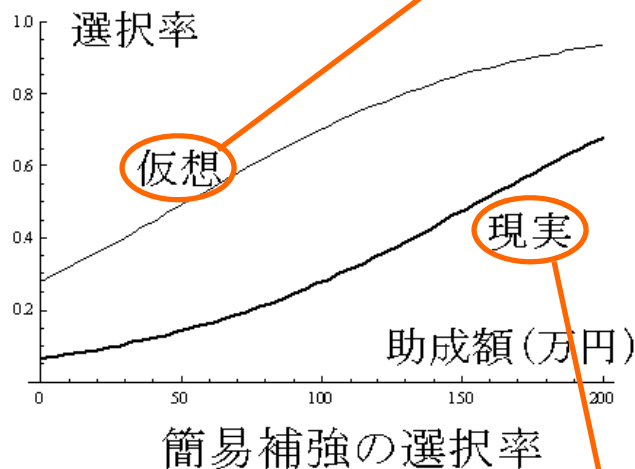
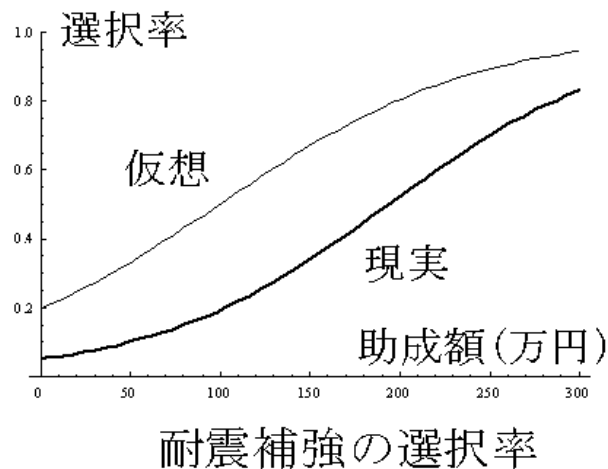
各評価基準の認識リスクと許容リスクを10段階評価で答えてもらい
その差を正規分布上で間隔尺度に修正したのち評価値を計算

説明変数	耐震補強工事	住宅の不燃化
対策の評価値 (リスク認知による修正)	0.1623*	0.3635*
対策の金銭的負担	-0.015**	-0.017**
年齢(歳)	0.015	0.025**
年収(万円)	0.0003*	0.0005**
地震に対する不安感	0.008*	0.056**
定数	0.604**	0.854**
自由度調整済尤度比	0.180	0.207

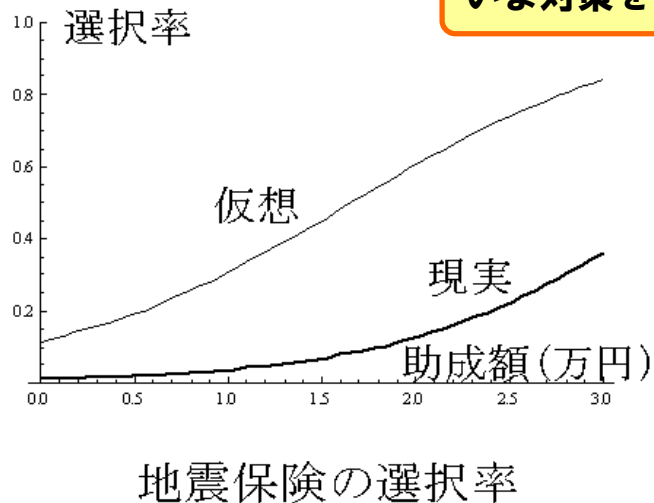
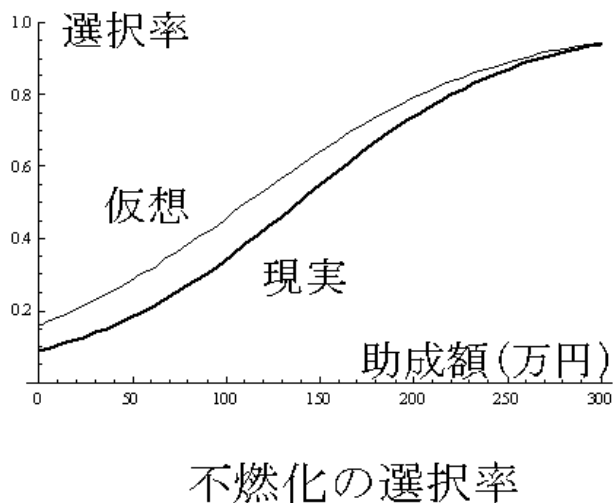


□ 選択確率と助成金額の関係

もし住宅が災害に弱いと判明したら対策を行いますか



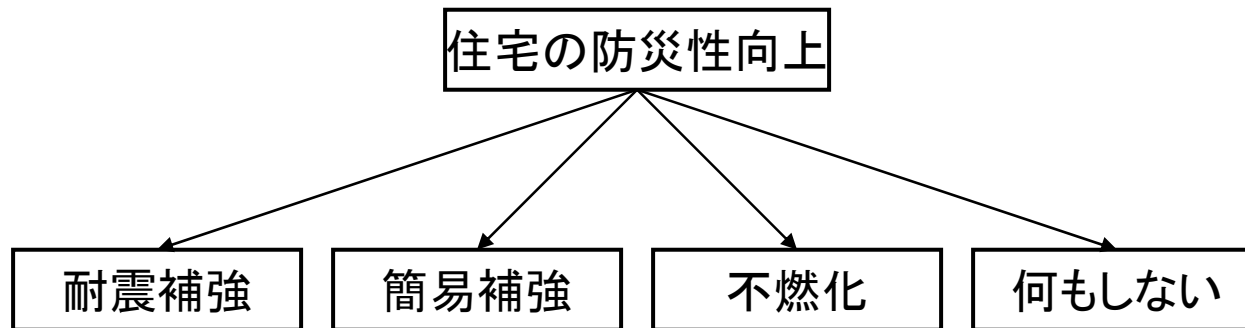
いま対策を行いますか





□ 家屋の改造は排他的選択行動!?

一般的に家屋の改造を何回もする人はいない



1個しか選ばない = 各選択肢が相互に影響を与える



□ 家屋の改造は排他的選択行動!?

ランダムパラメータロジットモデルを構築する

$$U_{j,k} = V_{j,k} + \eta_{j,k} + \varepsilon_{j,k}$$

選択肢・個人間で相互独立する項

選択肢間の相関関係によって記述する項

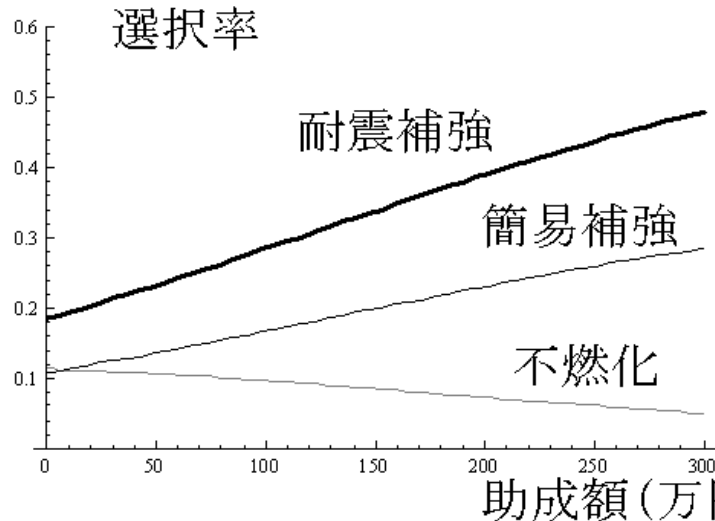
$$P_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[V_{j,k} + \mu \cdot Z_j]}{\sum_J \exp[V_{j,k} + \mu \cdot Z_j]} \cdot f(\mu, \omega) d\mu$$

$\eta_{j,k} = \mu \cdot Z_j$
 μ は確率変数ベクトル
 Z_j は選択肢間の類似度

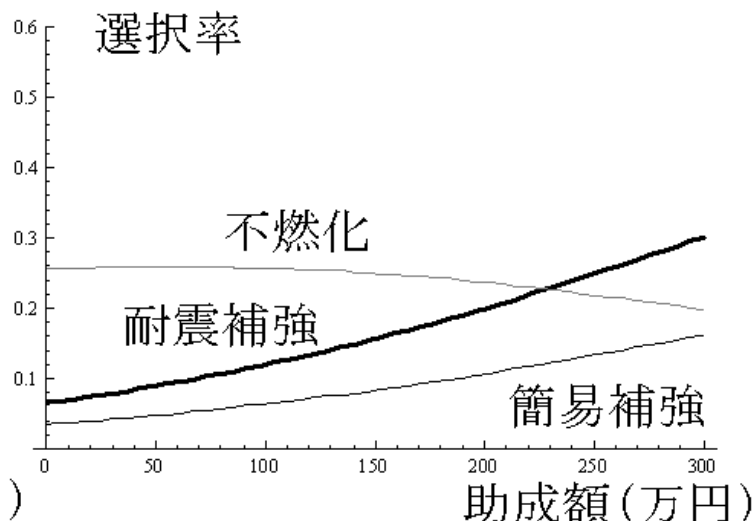


□ 家屋改造に関するランダムパラメータロジットモデル

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		



価格と選択率



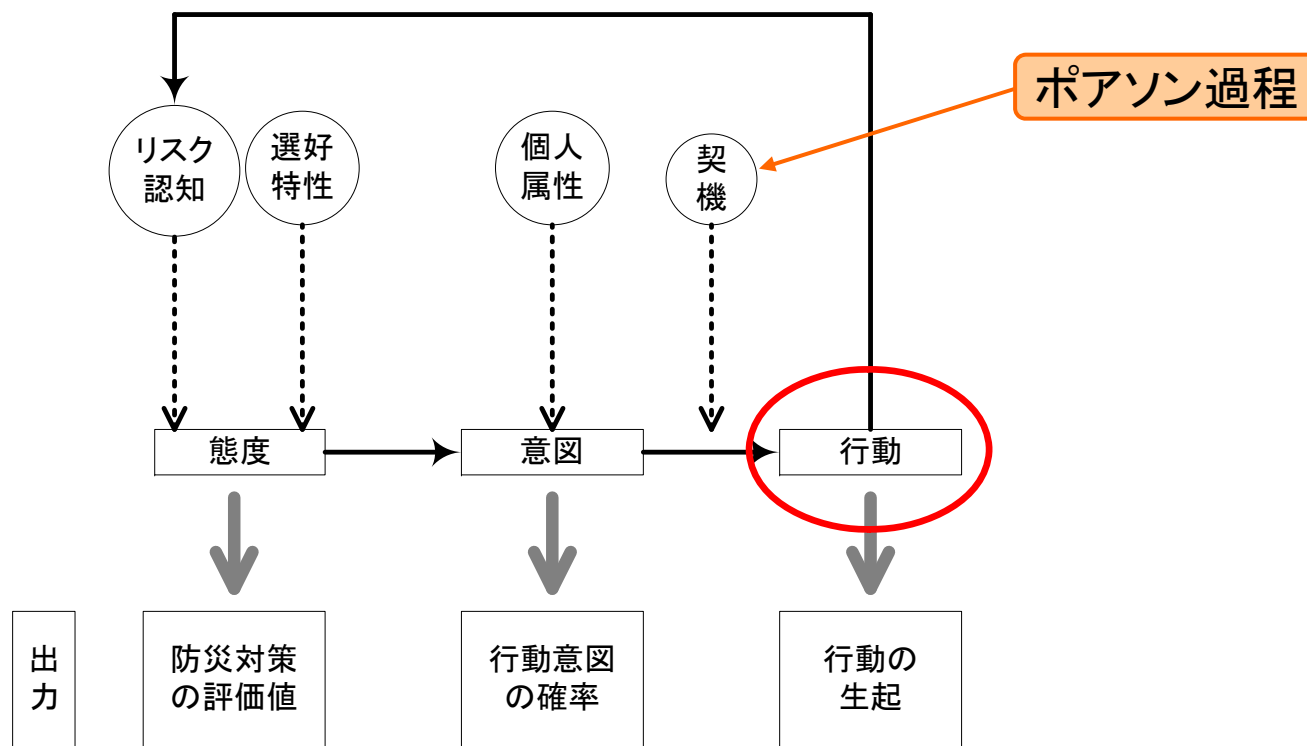
価格と選択率(1500万以上)

助成額が増すほど不燃化から耐震補強に選択が遷移する



□ 防災対策に関する意思決定モデル

以上の議論により意図レベルの計測ができた



得られた意図レベルの選択確率をもとにして行動確率の計量化を行う



□ 防災行動のマクロ的予測モデル

以下の状態遷移図を想定する

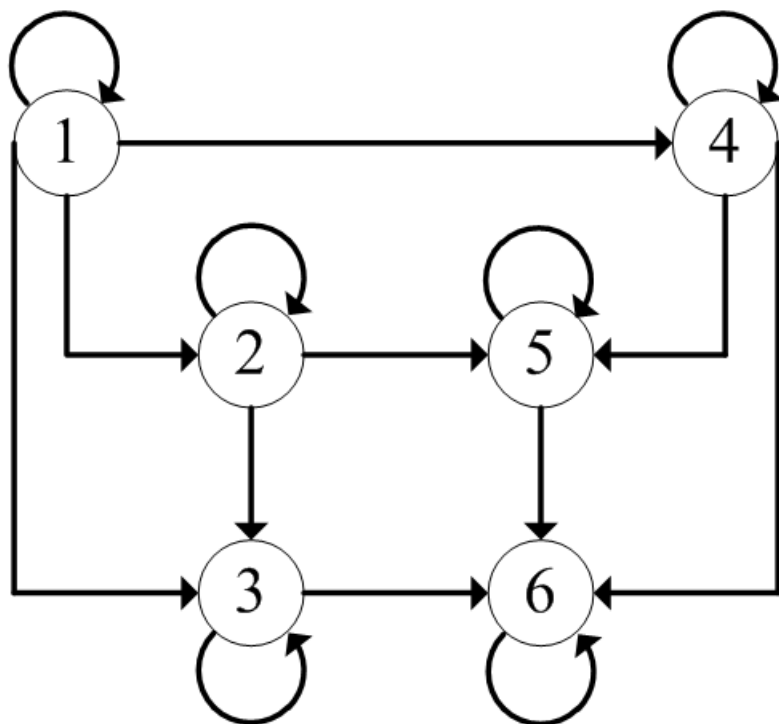


図 15 状態遷移図の概要

表 5 想定した状態量

状態量	着色	状態
1	黒線(細)	何もしていない
2	黒線(中)	簡易補強をしている
3	黒線(太)	耐震補強をしている
4	灰線(細)	地震保険に入っている
5	灰線(中)	地震保険・簡易補強
6	灰線(太)	地震保険・耐震補強

$q_s[t]$: sの時刻tにおける状態確率

$$Q[t] = [q_1[t], q_2[t], \dots, q_n[t]]^T$$

P_{mn} : 状態mからnへの遷移確率(意図)

□ 防災行動のマクロ的予測モデル

微小時間 λ_{mn} における状態mからnへの遷移確率(行動)を

$$P_{mn} = \lambda_{mn} p_{mn}$$

P : 遷移確率行列

このMarkov連鎖を連立微分方程式モデルに拡張
(Kolmogorovの前向・後向微分方程式)

$$Q[t + \Delta t] = PQ[t] \cdot \Delta t$$

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

$$Q'[t] = (P - I)Q[t]$$

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

p_{mn} はそれぞれ
Logit分析で求めた



□ 微分方程式系による予測

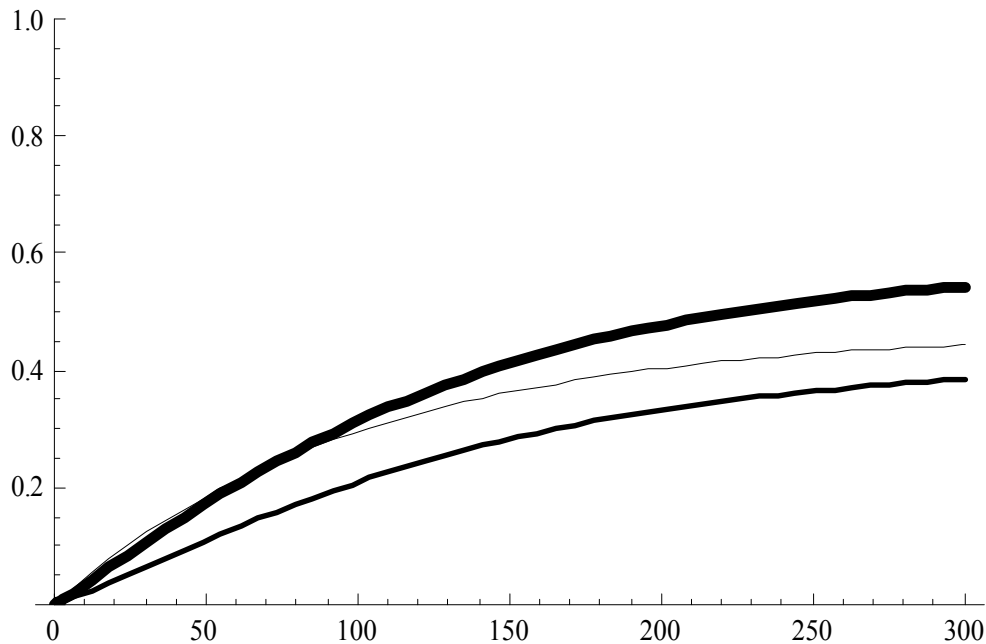
現状が続くと
どのような未来が予測できるか?



□ 微分方程式系による予測

ケース1:現状のまま

太線:耐震補強
中線:簡易補強
細線:地震保険



$$Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\lambda_{mn} = 1/100$$

耐震補強300万円

簡易補強200万円

地震保険3万円/年



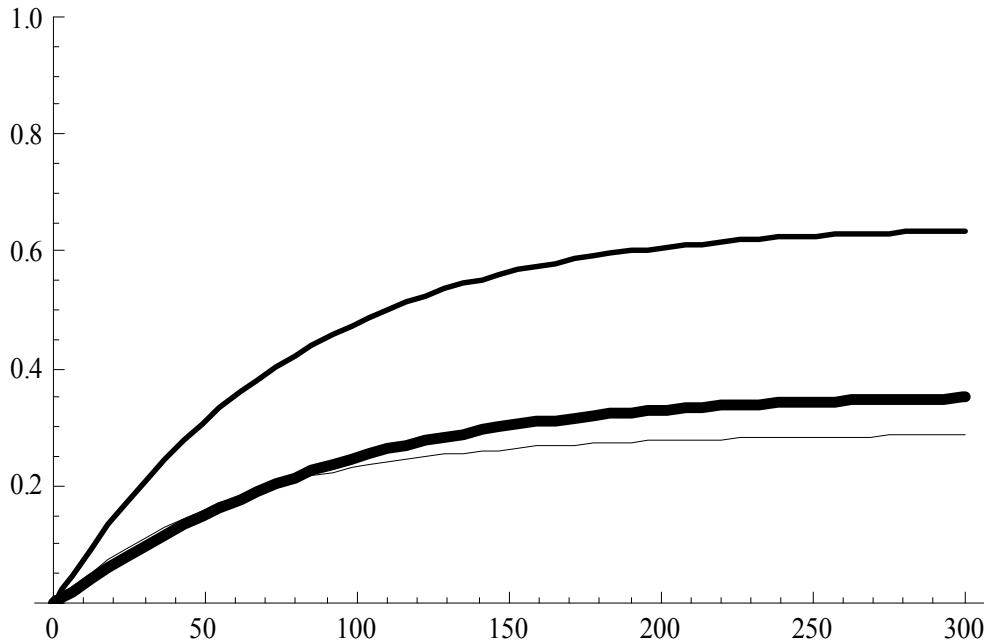
□ 微分方程式系による予測

簡易補強が安価になると
どのようになるか?

□ 微分方程式系による予測

ケース2:簡易補強の価格が50万円に

太線:耐震補強
中線:簡易補強
細線:地震保険



$$Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\lambda_{mn} = 1/100$$

耐震補強300万円

簡易補強50万円

地震保険3万円/年

簡易補強が↑, 耐震補強・地震保険は↓



□ 微分方程式系による予測

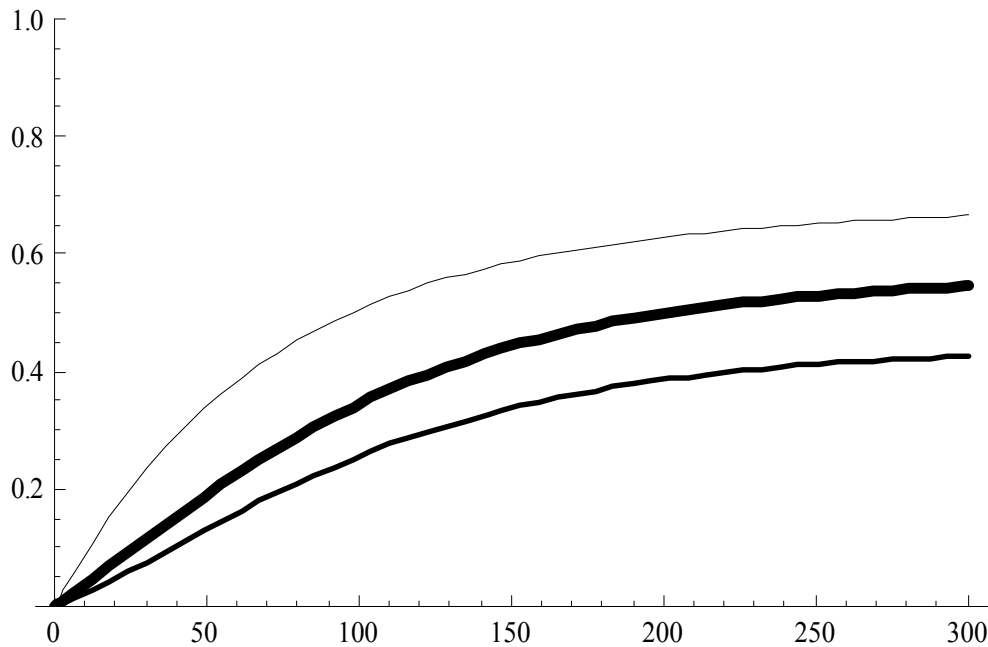
地震保険が安価になると
どのようなになるか?



□ 微分方程式系による予測

ケース3:地震保険が5000円/年に

太線:耐震補強
中線:簡易補強
細線:地震保険



$$Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\lambda_{mn} = 1/100$$

耐震補強300万円

簡易補強200万円

地震保険5千円/年

地震保険・簡易補強が↑, 耐震補強は↓



□ 微分方程式系による予測

中越・能登など地震が起こると
地震保険の加入率は増加するが耐震補強は進まない現実



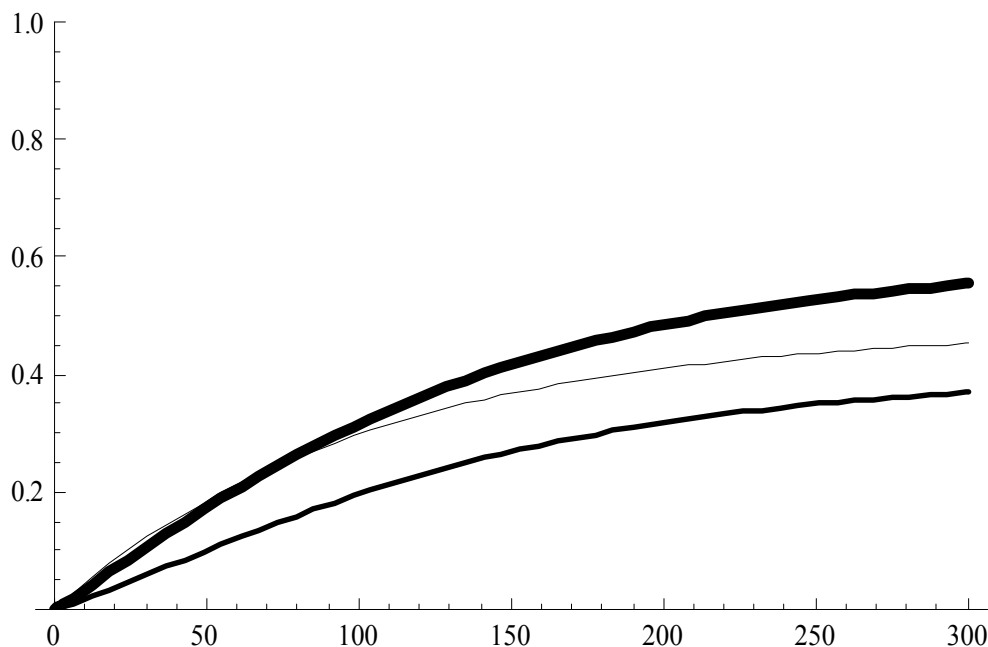
地震に対する不安が高まると
どのようになるか？



□ 微分方程式系による予測

ケース4:地震に対する不安感を高める

太線:耐震補強
中線:簡易補強
細線:地震保険



$$Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\lambda_{mn} = 1/100$$

耐震補強300万円

簡易補強200万円

地震保険3万円/年

(微妙に)地震保険が↑, 耐震補強・簡易補強は↓

地震リスク認知が上がっても耐震補強はしないで地震保険をしてしまう



□ 微分方程式系による予測

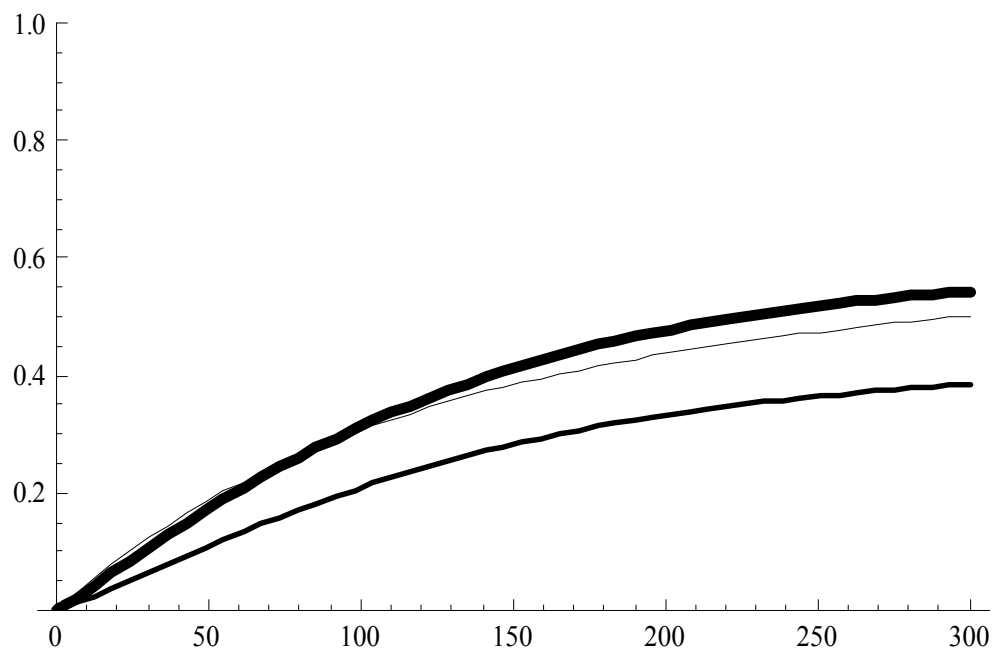
何かいい方法はないか？



□ 微分方程式系による予測

ケース5:耐震補強した建物の地震保険を2000円に

太線:耐震補強
中線:簡易補強
細線:地震保険



$$Q[0] = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\lambda_{mn} = 1/100$$

耐震補強300万円

簡易補強200万円

地震保険3万円/年

耐震補強・簡易補強はそのまま、地震保険が↑

研究のまとめ: その2

防災行動のモデリング

ランダム効用理論を用いて耐震補強に関する住民の意思決定モデルを構築

成果と課題

- 政策のインパクトを定量的に把握することが可能となる
- 属性の異なるグループに対してきめ細かい対応を可能とする
- 計画案の組み合わせを論じることができる
- 他の防災対策との関係を考慮することができる
- 市街地の脆弱性が今後どのように推移していくかを把握することができる
- 認知的不協和・限定合理性を考慮したモデリングが必要では!?
- 排他的選択でなくてもある防災対策が別の対策の効果に影響を与える

耐震補強に関する 意思決定研究のパラダイム

	「意思決定のため」 の規範理論	「意思決定について」 の記述理論
1. 意思決定者が抱えている問題 そのものを議論	具体的な耐震化事例 の整理と是非の検討	耐震化の阻害要因 の分析
2. 意思決定行為に 共通の規則や パターンを見出す	多属性効用理論の 前提としての研究	耐震化の 意思決定分析
3. 適切な決定の支援 を議論する	耐震補強に関する 支援の正当化や 制度設計	適切な支援額など Decision Aidに 関する研究

既存研究

これまでののはなし



3.3

市街地の脆弱性管理

-都市計画のはたす役割と求められる制度設計-




□ ここでは

ここでは金銭的助成に焦点を絞る



□ 助成に関する議論

社会的な望ましさを最大にする制度設計はいかなるものか？

Question	Hypothesis/Answer
<ol style="list-style-type: none">1. 行政にとっての最適な助成額は？2. 「最適」とは何で評価すべきか？3. 脆弱な住宅に対する割増助成は？4. 簡易補強に対する金銭的助成は？	



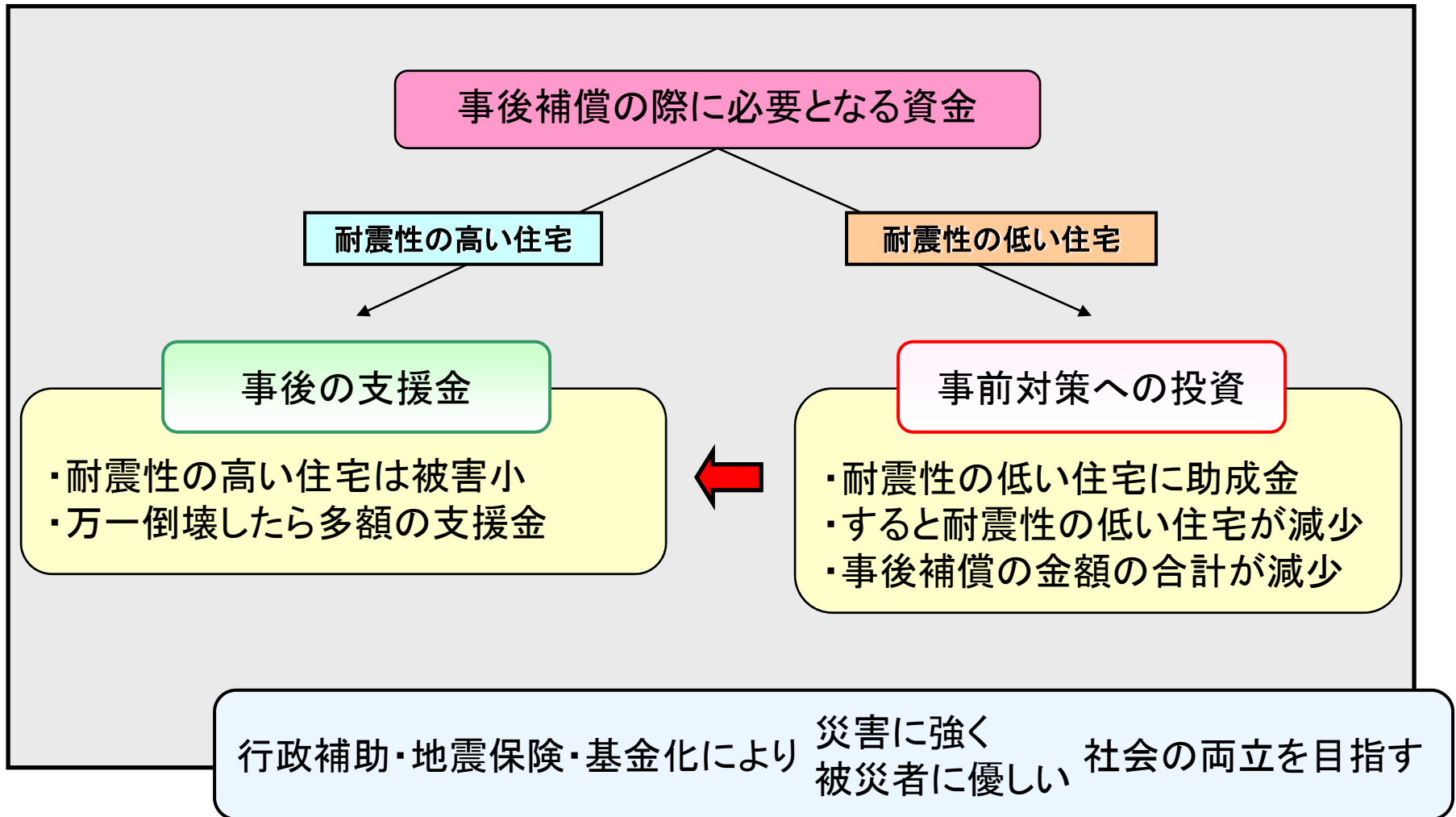
□ いざ地震が起きて大きな被害が発生すると

事後補償・生活再建によって
かなりの行政支出が見込まれる

ただし、その大部分は住宅が壊れなければ
必要とならない資金



□ 住宅倒壊に関する行政支出のメカニズム





□ 行政支出を最小にするような最適化

耐震補強工事に対する助成額を x 万円とすると
その計画案を施行した後の行政の総支出 S は

住宅が倒壊したら
支援金を渡す

耐震性の低い住宅に
助成金を渡す

$S =$ 事後補償にかかる支出 + 事前対策にかかる支出

$$a \cdot \int_0^{\infty} (1 - q(c - x, k)) f(k) p(k, m) dk + \int_0^{\infty} x \cdot q(c - x, k) f(k) dk$$

この和を最小にする x^* が最適助成額となる

ただし $a \cdots$ 1棟あたり補償額 $f(k) \cdots$ 耐震性能 k の住宅の密度関数
 $q(c, k) \cdots$ 耐震性能 k の住宅が価格 c の補強工事を選択する確率
 $p(k, m) \cdots$ 耐震性能 k の住宅が大きさ m の地震によって倒壊する確率

これらの適切な値を得ることで具体的な助成額の評価が可能となる



□ 補強工事の意思決定構造を把握 ($q(c, k)$ を求める)

非集計ロジットモデルを用いて57年以前建築の木造住宅居住者の耐震補強工事選択分析を行い、補強工事の選択確率を以下のように求めた。

効用関数の確定項

選択肢特性によるもの	個人属性によるもの
自己負担額	貯蓄もしくは収入
耐震補強の程度	危険性の認識度
工事の際の日常生活の支障	世帯主の年齢
耐震補強奨励制度の有無	建築物の築年数
税制の優遇措置	地震保険加入の有無
	耐震診断の有無
	住宅の種類
	家族・高齢者の有無

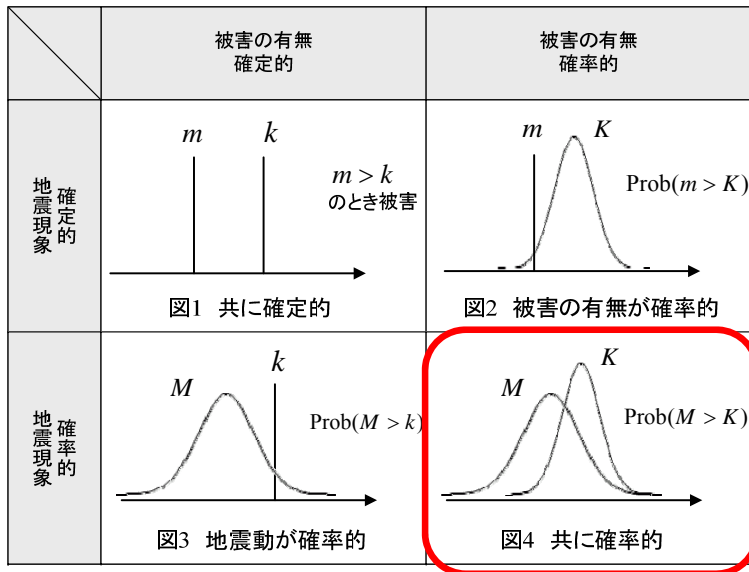
得られた選択確率

$$q(c, k) = \frac{1}{1 + \exp[0.008c - 1.305]}$$



□ 住宅の倒壊率 $p(k, m)$ を求める

ある耐震性能の住宅が倒壊する確率は以下のように
標準正規累積確率分布を用いて表されることが知られている



$$P_{iw}(V) = \Phi\left(\frac{\ln V - \ln\left(V_0 \frac{I_w}{I_{w0}}\right)}{\zeta_{I_w}}\right)$$

梅村, 山崎(2002)

I_w … 構造耐震指標(耐震性能)

で, 1.0以上の住宅が耐震性があるとみなされる. 下限は0.0

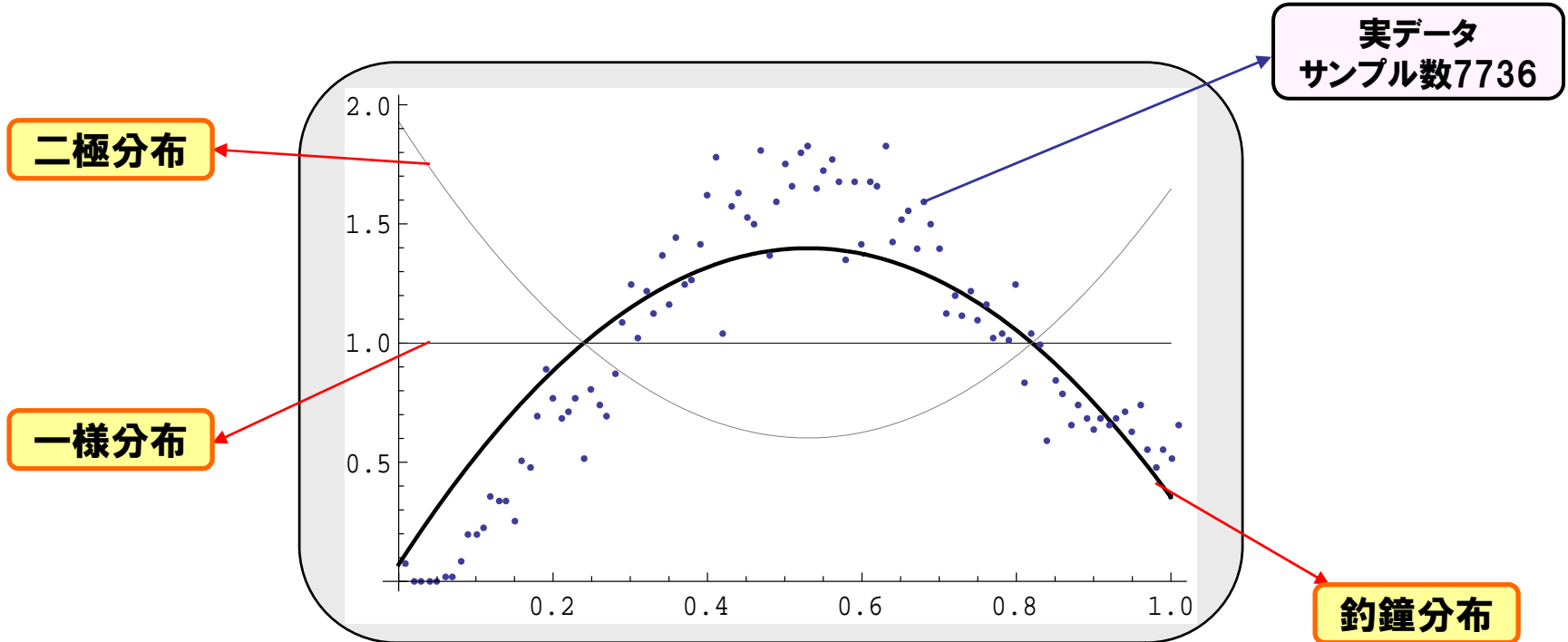
V … 地表面最大速度PGV(kine)

地表面での地震動の最大速度(cm/s). 震度6強で60~100kine



□ 耐震性能分布 $f(k)$ を知りたい

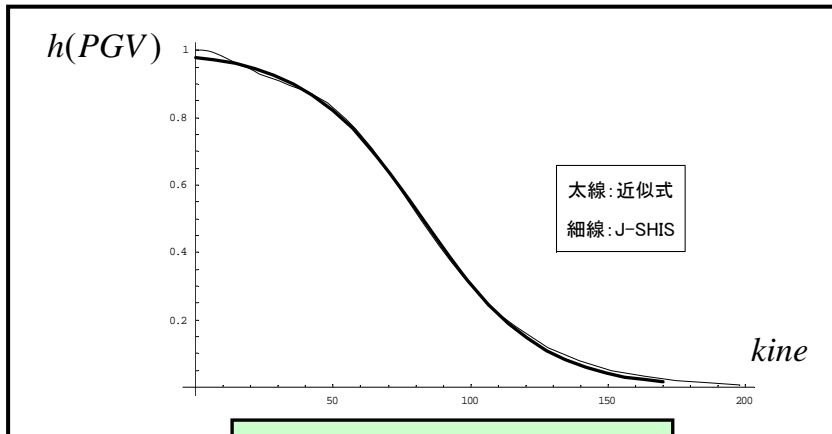
日本木造住宅耐震補強事業者協同組合のデータを用いて分布型を推定



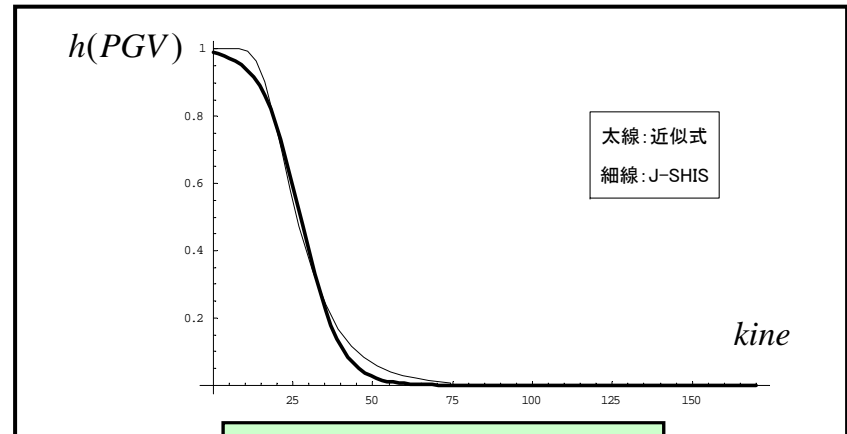
□ 地震の発生確率を考慮する

「必ず地震が来る」のであれば耐震補強を行うのは当然である
不確実性を考慮することで「政策の空振り」を斟酌した意思決定を行う

確率論的地震動予測を用いてhazard関数を近似



静岡のハザードカーブ



東京のハザードカーブ

地震の発生を確率現象として捉えた上で
事前・事後の行政支出総和を最小にするような最適な助成額の検討



□ 行政支出を最小にする最適化問題

その他の仮定

- (1) 同一の地震動に襲われる微小領域を対象領域に限定
- (2) 補強工事の額は一律に200万円とする
- (3) 事後補償の額は固定し、耐震補強をした住宅は被害を受けない
→耐震性の低い木造住宅のみを対象

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

これを満たす x^* が最適助成額となる

結果

静岡県		東京都	
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

これだけ助成をすれば行政支出(事後補償+事前対策)が最小化



□ 素朴な疑問:No.1

行政総支出を最小にする計画案は
最適な計画案なのだろうか?

- 防災計画は経済的投資行動か?-
- 人命と金銭は本質的に比較不可能なのでは?-
- 現在の都市の脆弱性はそもそも「効率性」の結果-

□ 多目的最適化問題への展開

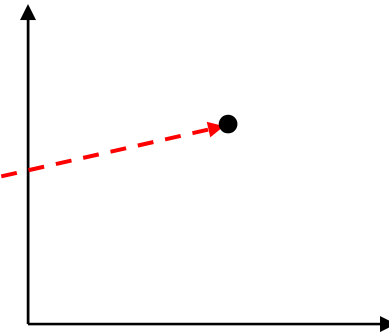
横軸に設定

$$S = \text{事後補償にかかる支出} + \text{事前対策にかかる支出}$$

被害量に比例すると仮定した上で, 縦軸に設定

このように平面を定義すると
「 x 万円の助成を行う」という計画
案は平面上のただ1点で表される

事後補償総額 H [万円]



支出の総和 S [万円]



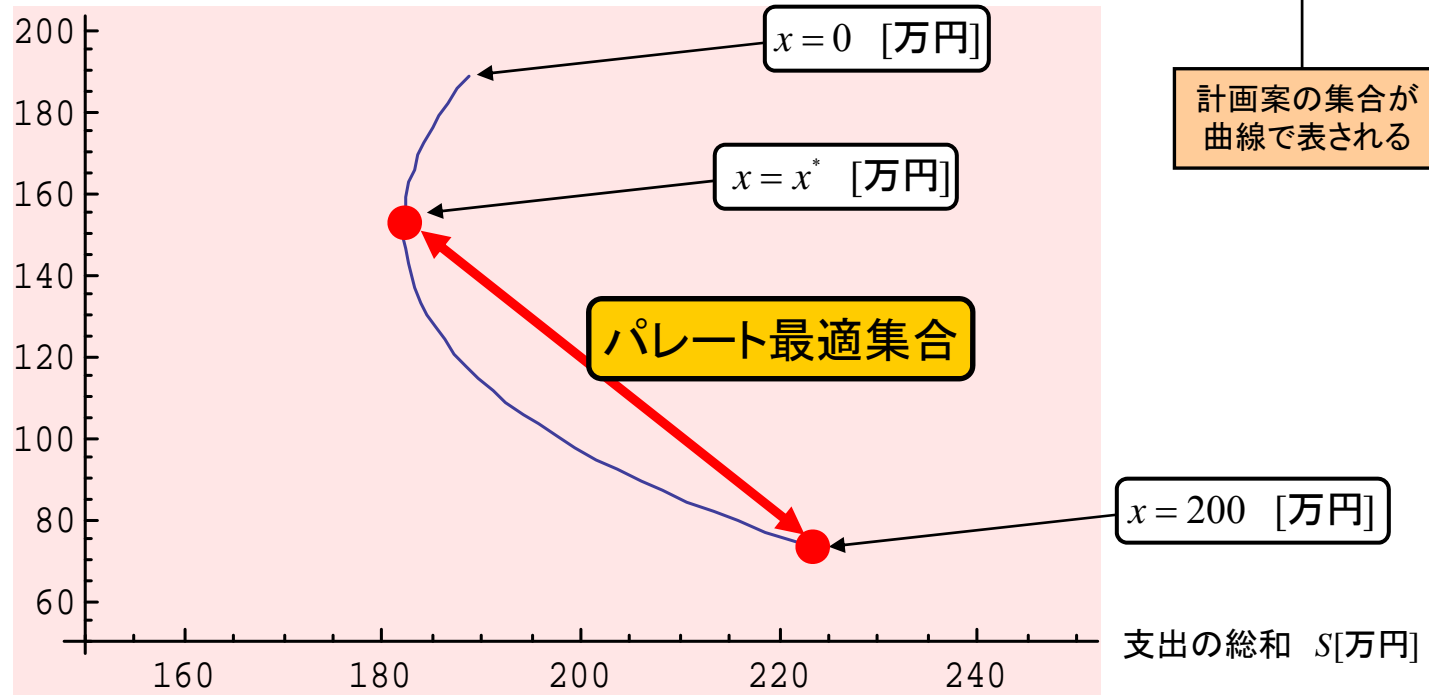
□ 被害量と行政支出総和の同時最適化

パレート最適集合

1つの指標を改善するためにはもう1つの指標を改悪せねばならない優秀な解の集合のこと

計画案の集合が
曲線で表される

事後補償総額 H [万円]



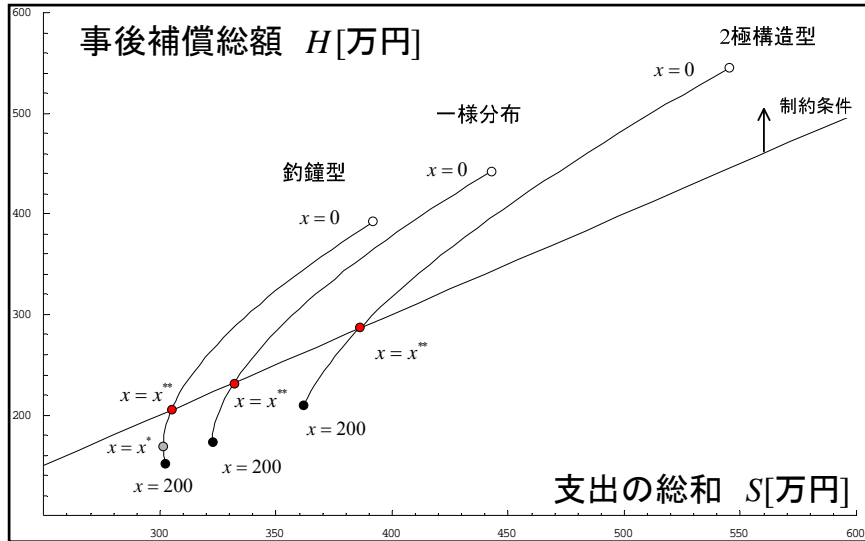
x^* はパレート最適解のうち一番被害の大きい解

防災行動のマネジメント

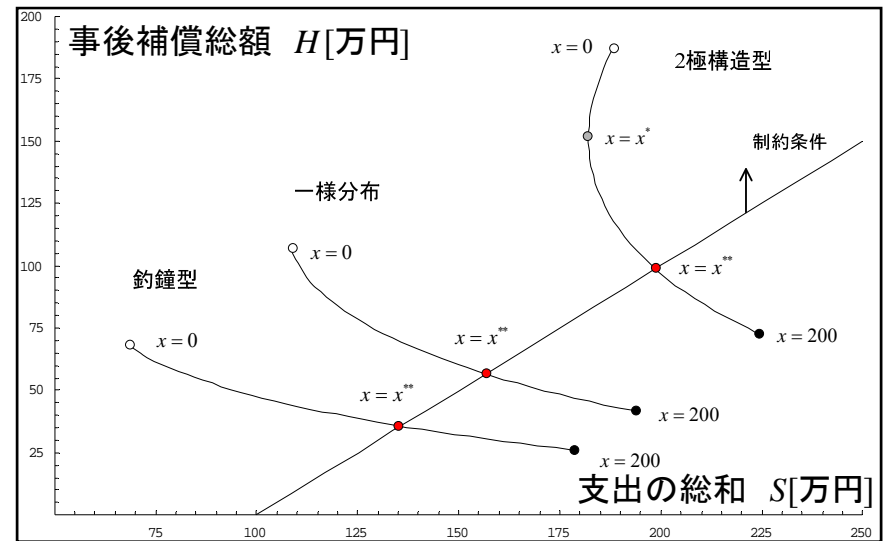
静岡と東京のパレート最適解の比較

これに制約条件(事前対策に関する予算制約)を加味することで与えられた条件下での最適助成額集合 X が求まる

ここでは制約条件を1棟につき100万円としている



静岡のパレート最適集合



東京のパレート最適集合

静岡は制約条件と計画案の交点のパレート最適
東京は要検討



□ 素朴な疑問: No.2

限られた制約条件のもとで
最大限効果を発揮する
計画案はあるか?



□ 人的被害の軽減に最大限繋げるための制度設計

助成額の渡し方に自由度を持たせる

計画案(1): 脆弱な住宅に対する割増助成

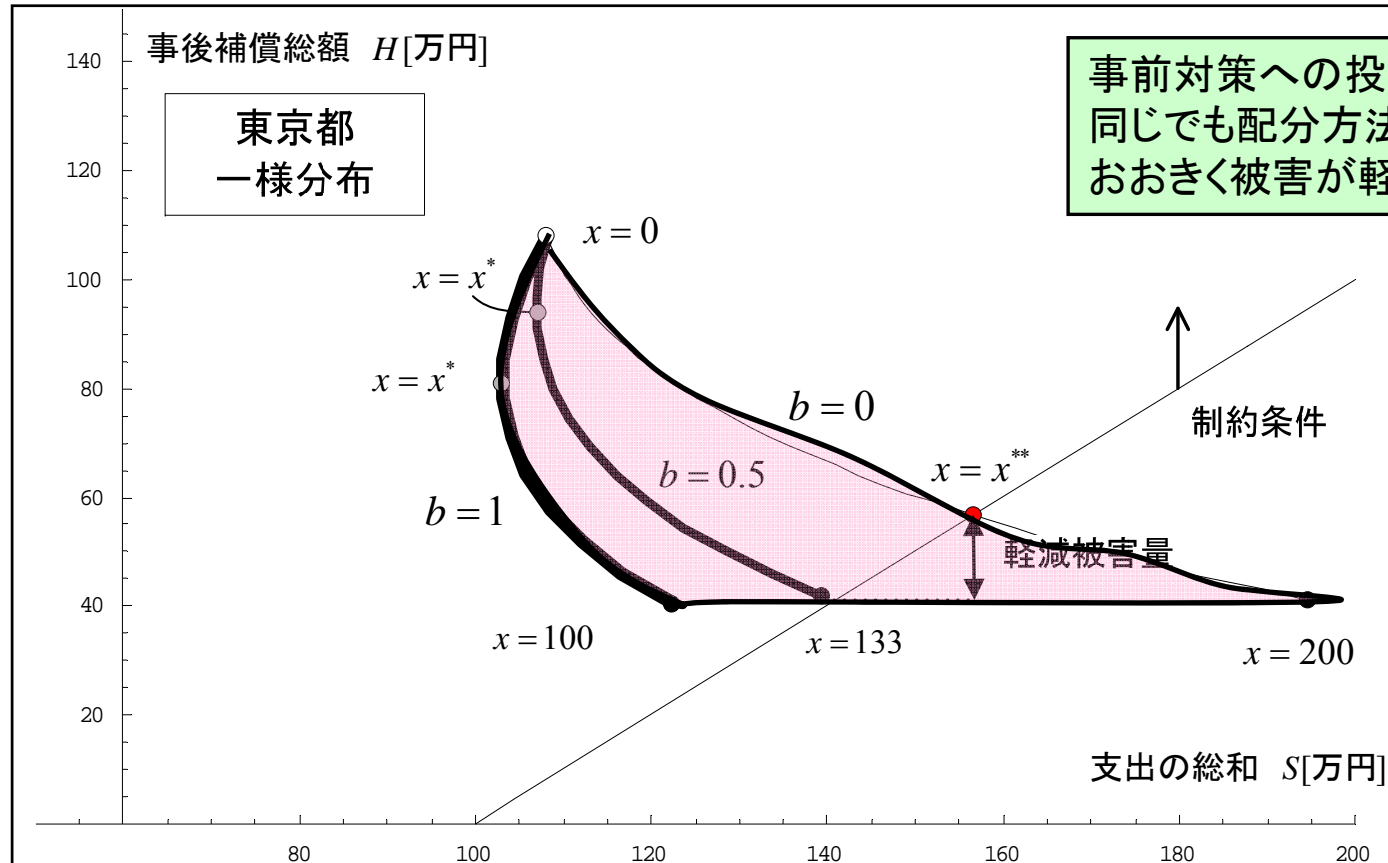
耐震評点が	$I_w < 0.4$	の住宅は	$(1+b)x$	万円の助成
	$0.4 \leq I_w < 0.7$	の住宅は	x	万円の助成
	$0.7 \leq I_w$	の住宅は	$(1-b)x$	万円の助成

計画案(2): 簡易補強への助成

中途半端だが最低でも人命だけは助かるような簡易補強



□ 住宅の耐震性能に応じて助成額をかえた場合



$b > 0$ ならば、この割増助成は常にパレート最適

脆弱な住宅に対する割増助成は行政支出の総和及び被害量の軽減効果がある



□ 簡易補強工事に対する助成額の最適化

耐震補強の助成額を x_1 万円, 簡易補強の助成額を x_2 万円とすると

$$S = \text{耐震補強にかかる事前支出} + \text{簡易補強にかかる事前支出}$$

$$S = \text{補強工事しなかった住宅の被害} + \text{簡易補強したけど壊れた住宅の被害}$$

この和を最小にする x_1^* , x_2^* が最適助成額となる

ここで

$$f(k) = \text{一様分布} \quad q(c, k) = \frac{1}{1 + \exp[0.008c - 1.305]} \quad p(I_w, V) = \Phi\left(\frac{\ln V - \ln(V_0 \frac{I_w}{I_{w0}})}{\zeta_{I_w}}\right)$$

$c_1 = 94.1$ 万円 (総合評点が0.7以上の住宅の耐震補強工事の価格)

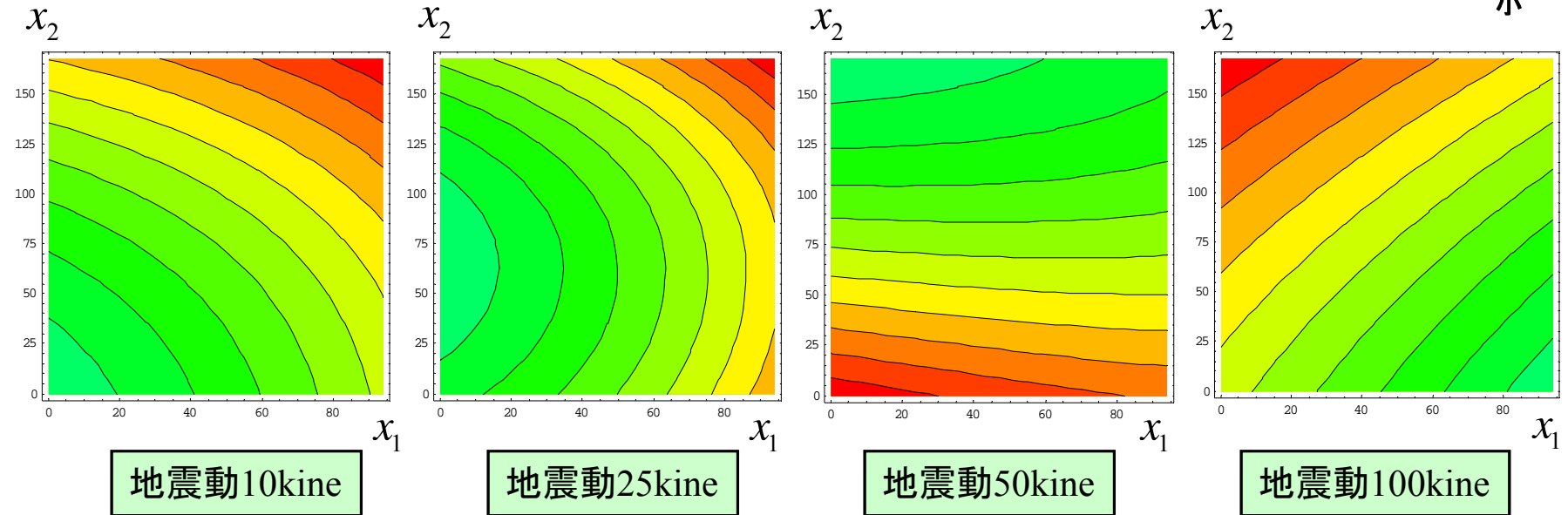
$c_2 = 288.4$ 万円 (総合評点が0.7未満の住宅の耐震補強工事の価格)

$c_3 = 167.3$ 万円 (総合評点が0.7未満の住宅の簡易補強工事の価格)



□ 簡易補強工事に対する助成額の最適化

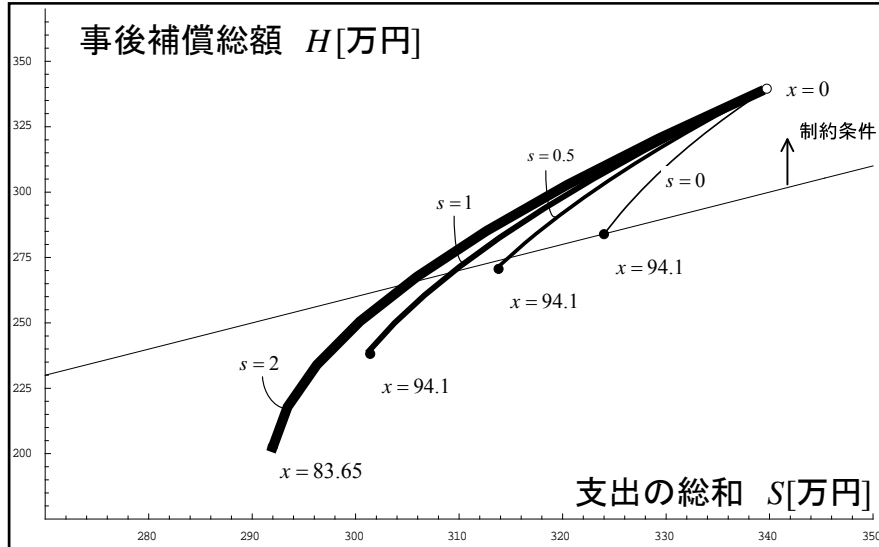
↑ 行政総支出小
↑ 行政総支出大



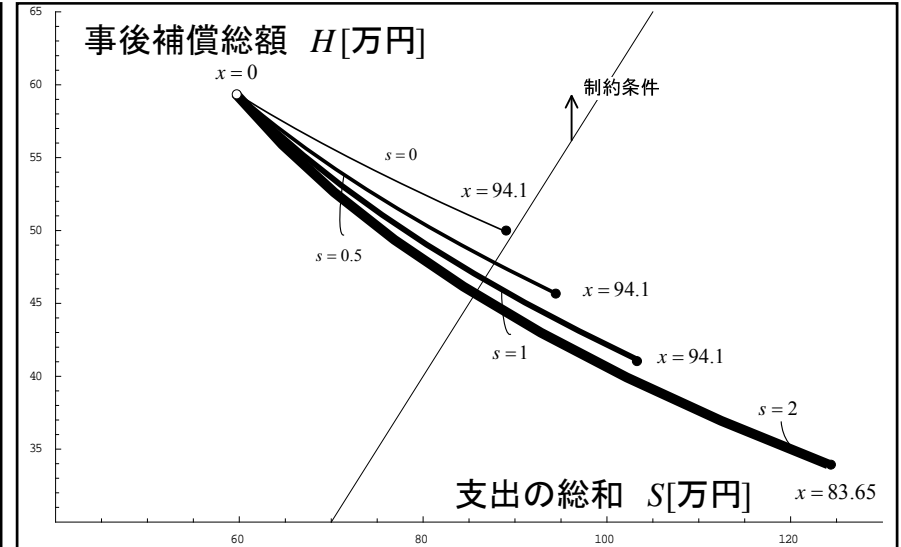
想定される地震動の大小で
簡易補強工事助成に対する解釈が変化

□ 簡易補強に対して助成した場合の多目的最適化

簡易補強の助成額を、普通の補強の助成額 x_1 の s 倍とすると



静岡のパレート最適解



東京のパレート最適解

「簡易補強に対して助成を行う」という計画案は
倒壊被害および行政の期待総支出を減らすという意味でも効率的である



□ 素朴な疑問:No.3

-社会的選択-
その計画は本当に公平なものか?



□ 効率性と公平性の問題

社会厚生関数の導入

社会にとって有益であること、およびその水準

$$W : R^n \rightarrow R$$

u_i : 個人 i の効用

$$w = W(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad \frac{\partial w}{\partial u_i} > 0$$

社会的厚生

社会厚生関数

これにより公平性も考慮に入れた社会的選択の是非を検討する



□ 社会厚生 of 様々な解釈

Bentham型: 社会厚生は個人の効用和と等しい(功利主義)

$$W = \sum u_i$$

Rawls型: 社会厚生は最小の効用水準を持つ人の効用に等しい(maxi-min原理)

$$W = \text{Min}[u_i]$$

Nash型: 社会厚生は個人の効用の積に等しい(平等主義)

$$W = \prod u_i$$

個人は現状から他の状態に移行した場合の効用の増加分を重視する



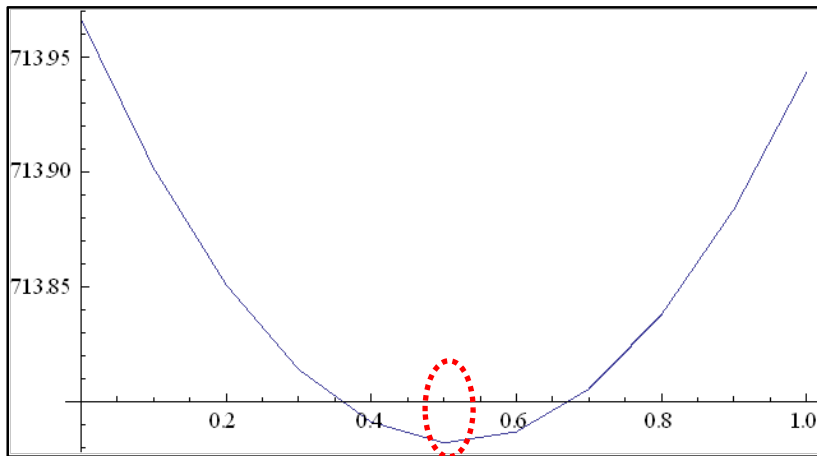
各個人の効用の増加分の積を最大化することが望ましい交渉の解である

□ Nash型社会厚生関数による検討

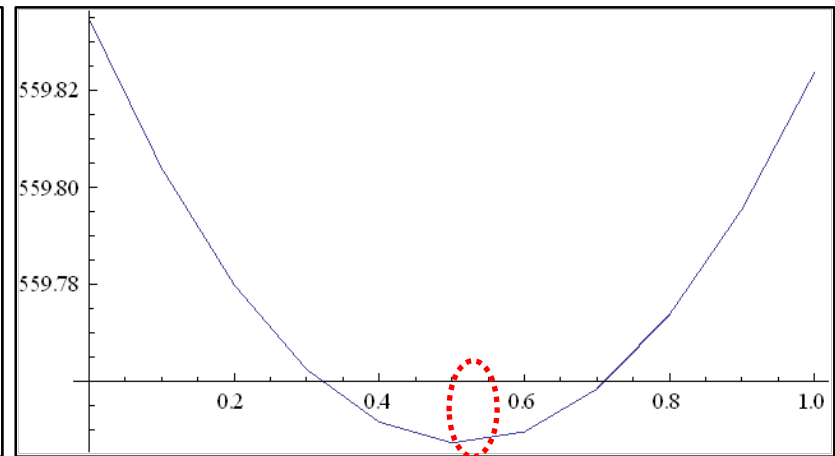
u_i : 各個人が地震による家屋倒壊を免れる確率

$$u_i = \int (1 - h(m)p(k_i, m)(1 - q(c - x_{Iw}, k_i)))dm$$

社会厚生関数の対数をとることで計量可能



静岡の社会的厚生



東京の社会的厚生

↓
最適

$b = 0.5$ くらいがもっとも社会的望ましさを最適にする割増率

研究のまとめ: その3

防災行動のマネジメント

意思決定行動を考慮した都市防災の計画案評価手法を耐震補強を例として構築

成果

- 耐震補強工事に関する助成額を定量的に決定する方法論を得られた
- 住宅の耐震性能分布によって計画案のあり方は大きく異なる
- 地域(地震ハザード)によっても計画案のあり方は大きく異なる

本研究の仮定のもとでは

- 静岡県は耐震補強工事助成額をより増額するとよい(現在は30万円)
- 脆弱な住宅に対する割増助成は地震被害・行政総支出をともに減ずる
- 簡易補強工事に対する助成も地震被害・行政総支出をともに減ずる

耐震補強に関する 意思決定研究のパラダイム

	「意思決定のため」 の規範理論	「意思決定について」 の記述理論
1. 意思決定者が抱えている問題 そのものを議論	具体的な耐震化事例 の整理と是非の検討	耐震化の阻害要因 の分析
2. 意思決定行為に 共通の規則や パターンを見出す	多属性効用理論の 前提としての研究	耐震化の 意思決定分析
3. 適切な決定の支援 を議論する	耐震補強に関する 支援の正当化や 制度設計	適切な支援額など Decision Aidに 関する研究

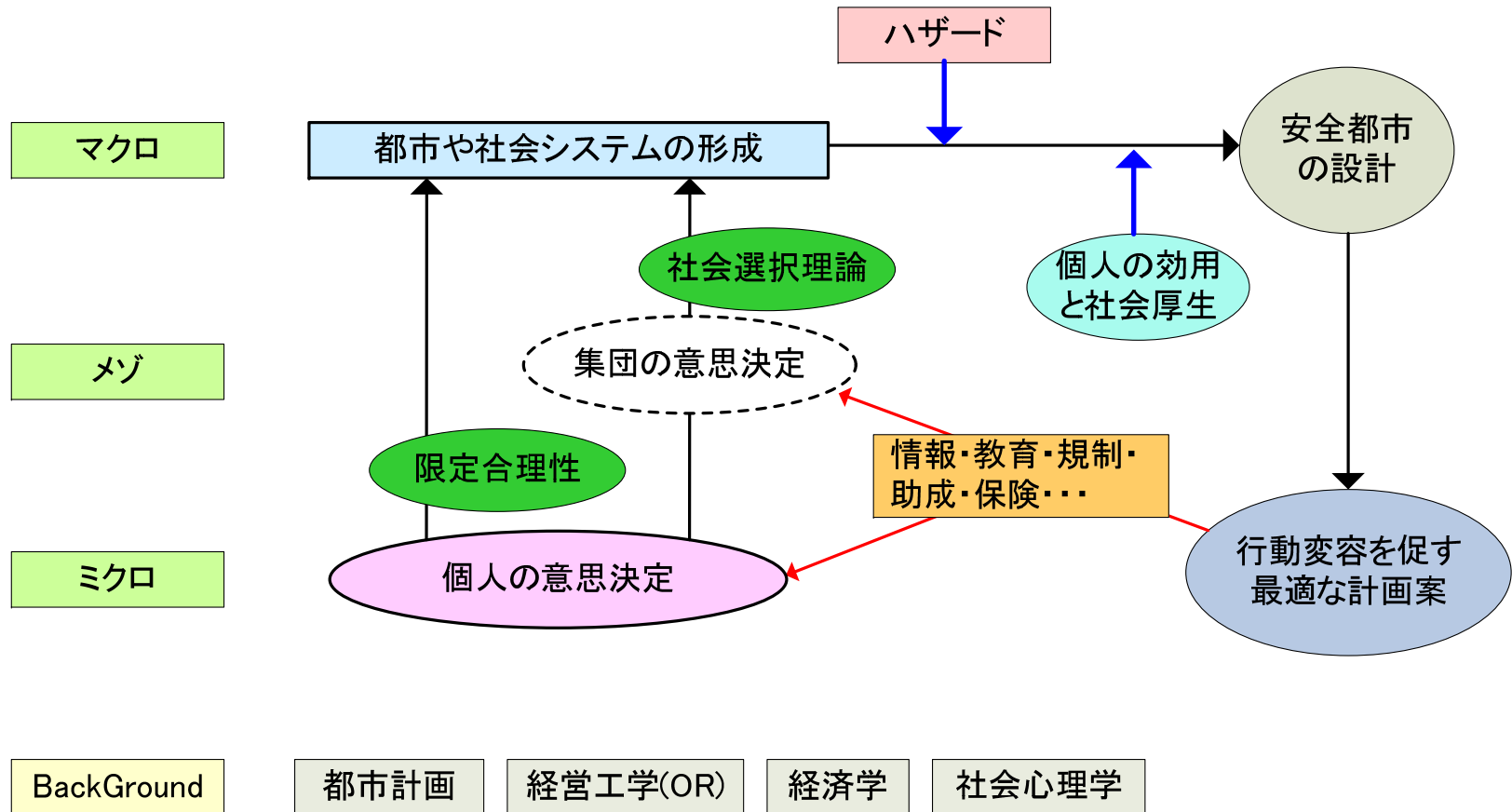
既存研究

必要!

これまでのほなし

研究のまとめ

耐震補強を例とした防災行動のモデリングとマネジメント





□ 都市防災とORにおける諸問題(≡個人的悩み)

- 防災とORの共通点(親和性)
 - ・「意思決定」を扱う
 - ・定量評価の必要性
- 防災とORの相違点
 - ・実学としての防災研究
 - ・ミクロな因果関係の積み上げ
 - ・ひとつのモデルは万能ではない
- 防災研究者の陥り易い誤り
 - ・防災は目的関数?制約条件?
 - ・問題把握の難しさ
 - ・問題の所有者は一体誰?
 - ・本当の評価指標は何なのか?