

IV-278 耐震診断を考慮した老朽家屋の修繕に関する意思決定のモデル分析

京都大学防災研究所 正員 ○岡田 憲夫 京都大学工学部 学生員 土屋 哲  
 山口大学工学部 正員 榊原 弘之 京都大学防災研究所 正員 多々納 裕一

1 はじめに 阪神・淡路大震災における主要な被害の一つに老朽木造家屋の倒壊があげられる。震災以降、老朽家屋の修繕の促進を目的として自治体による耐震診断補助制度が導入されている。本研究ではまず木造家屋を所有し、かつそこに居住する者（以下所有者）の修繕に関する意思決定モデルを構築し、耐震診断が意思決定に及ぼす影響について分析する。続いて地震時に老朽家屋の被害（倒壊）が周辺地域へもたらす負の外部性を仮定した上で、政府のとする補助策について基礎的な考察を行う。

2 家屋所有者の効用の定義 所有者の効用は所得と家屋の質に依存するとし、家屋の質は構造的安全性（以下安全性） $s$ と居住快適性（以下居住性） $q$ から成るとする。まず安全性を以下のように定義する。安全性には「良（ $s = g$ ）」、「不良（ $s = b$ ）」の2種類があり、この違いは平常時には居住性に何の影響も及ぼさないものとする。地震発生時に「不良」である家屋は必ず倒壊（ $s = d$ ）してしまい、「良」である家屋は倒壊しないものとする。微小時間  $\Delta t$  内に「良」から「不良」へ遷移する確率を  $\pi \Delta t$  とし、地震が再帰時間  $\gamma$  の指数分布に従うとすれば、家屋（意思決定時点  $t = 0$  における履歴を  $h$  とする）が時刻  $t$  において「良」、「不良」、及び  $t$  までに地震が起こり家屋が倒壊してしまっている確率はそれぞれ

$$\begin{aligned} P_{gg}(t+l) &= e^{-\pi(t+l)}, \\ P_{gb}(t+l) &= \frac{\pi(e^{-\gamma(t+l)} - e^{-\pi(t+l)})}{\pi - \gamma}, \\ P_{gd}(t+l) &= 1 - \frac{\pi e^{-\gamma(t+l)} - \gamma e^{-\pi(t+l)}}{\pi - \gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここに  $l (> 0)$  は、安全性に関する最新の確定情報が得られてから  $t = 0$  までの時間であり、

$$l = \begin{cases} h & (\text{修繕・診断なし、家屋に地震経験なし}) \\ \delta & (\text{修繕・診断なし、家屋に地震経験あり}) \\ 0 & (t = 0 \text{ で修繕または診断をした場合}) \end{cases}$$

である。次に居住性については、その時間変化が確定的に予測可能であるとす、時刻  $t$  において  $q$  が次式で表されるとする。

$$q(t+h) = e^{-\alpha(t+h)} \quad (2)$$

ここに  $\alpha$  は居住性の低下パラメータである。

これより、所有者の効用関数を次式で定義する。

$$u_1(t) = \begin{cases} y_1(t) + v_1(q(t)) & (s(t) = g, b) \\ 0 & (s(t) = d) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $y_1(t)$  は時刻  $t$  での所有者の所得である。以下  $v_1(q(t))$  を部分効用と呼ぶ。

以上をふまえると、余命  $T$  の所有者の期待生涯効用  $U_1$  は次のように定式化される。

$$U_1 = Y_1 + V(T, h, l|g), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V(T, h, l|g) &= \int_0^T \{P_{gg}(t+l) + P_{gb}(t+l)\} v(q(t+h)) e^{-\beta t} dt \end{aligned} \quad (5)$$

ここに  $Y_1 = \int_0^T y_1(t) e^{-\beta t} dt$  である。また、 $\beta$  は時間割引率である。 $V(T, h, l|g)$  は、 $t = 0$  において余命  $T$  の所有者が履歴  $h (> 0)$  の家屋を修繕せず、安全性に関して時刻  $t = -l$  を最新情報が得られた時刻として居住し続けた場合の期待生涯部分効用を意味する。

3 修繕、診断に関する意思決定モデル 本研究では、家屋の修繕を安全性と居住性の両面において完成時と同様の状態に変化させる行為として、また耐震診断をその時点における安全性を確定させる行為として定義する。修繕、診断に要するコストをそれぞれ  $C_R, C_I$  とし、これらは一定値であるとする。所有者の意思決定が  $t = 0$  においてのみ行われるものとし、「修繕（診断）を現在行う」、「修繕（診断）は生涯行わない」の2通りであるとすると、それは次のようになる。まず所有者は耐震診断を受けるか否かを決定する。診断を受けた場合、「良」、「不良」のいずれかの判定が下される。これは所有者の意思には依存しない。続いて診断結果をもとに家屋の修繕を行うか否かを決定する。一方耐震診断を受けなかった場合には、所有者は自家屋の安全性について確定的な情報を持たずに修繕に関する意思決定を行う。これまでの諸定義より、本モデルにおいて所有者の意思決定とそれに対応する期待生涯効用は

1. 耐震診断を受けずに家屋の修繕を行う

$$U_1^{(R)} = Y_1 - C_R + V(T, 0, 0|g)$$

2. 耐震診断を受けず、家屋の修繕も行わない

$$U_1^{(0)} = Y_1 + V(T, h, l|g)$$

3. 耐震診断を受けて、「良」の結果の下では修繕は行わず、「不良」の結果の下では修繕を行う

$$U_1^{(I)} = P_{gg}(l) \{Y_1 + V(T, h, 0|g)\} + P_{gb}(l) U_1^{(R)} - C_I$$

のいずれかになる。ここに、「良[不良]の診断結果の下に家屋の修繕を行う[行わない]」という所有者は1.[2.]を選択

キーワード：耐震診断、負の外部性

京都大学防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄，TEL 0774-38-4035，FAX 0774-38-4044）

するため、診断受診時の修繕に関する意思決定は3.のケースのみに限定されるのである。

$$\max\{U_1^{(R)}, U_1^{(0)}, U_1^{(I)}\} \quad (6)$$

所有者の意思決定は式(6)で表される。これより、耐震診断がない時に修繕をすることの純価値は  $U_1^{(R)} - U_1^{(0)}$  ( $= V(T, 0, 0|g) - V(T, h, l|g) - C_R$ ) で、耐震診断を受けること  
の純価値は  $U_1^{(I)} - \max\{U_1^{(R)}, U_1^{(0)}\}$  で、それぞれ表される。時間要素パラメータ  $T, h$  と純価値の関係に着目することにより、この2式に関して、所有者の修繕や耐震診断に関する意思決定領域とその境界の概形は図1のようになることが分かる。また、以下のことが明らかになった。

- 耐震診断がない時に家屋を修繕することの純価値は  $T, h$  それぞれに対して単調増加であり、図1・破線を境界として領域I、IIで正、領域III、IVで負である。
- 耐震診断を受診することの純価値は領域II、IIIにおいて正となり、領域IIIでは  $T, h$  それぞれに対して単調増加である。しかし、領域IIでは  $T, h$  それぞれに対して単調減少となる。ここで、領域I[IV]のように  $T, h$  が十分大きい[小さい]場合、所有者は、余命をまっとうする間に地震に遭って家屋が倒壊してしまう確率が高い[低い]と考え、コストを負担してまで診断を受けようとする意思は薄い。換言すれば、所有者が家屋の修繕を行った場合と行わなかった場合の、それぞれに対する期待生涯効用の差が小さければ小さいほど診断を受ける価値は高くなり、期待生涯効用の差がゼロとなる所(図1・破線上)で最大となる。

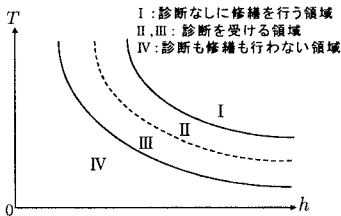


図1 時間要素パラメータと意思決定の関係

4 補助政策に関する基礎的考察 地震時における木造老朽家屋の倒壊は、(i)火災の広がり、(ii)文化財としての損失、の例のように、負の影響を周辺地域へ継続的に及ぼすことがある。このような負の外部性を仮定して、所有者の意思決定と社会的に最適な状況との間にかい離が起こりうることを説明する。いま十分な耐震性を持つ家屋に居住する周辺地域住民を考え、彼らの効用が所得と老朽家屋の安全性から成るものとし、その効用関数を次式で定義する。

$$u_2(t) = \begin{cases} y_2(t) + v_2 & (s(t) = g, b) \\ y_2(t) + v_2 - k & (s(t) = d) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 $y_2(t)$  は時刻  $t$  での周辺住民の所得である。また  $v_2, k$  は正の定数であるとする。これより周辺住民の期待生涯効用  $U_2$  は次のように表される。

$$U_2 = Y_2 + V_2 - k \int_0^T P_{id}(t+l) e^{-\beta t} dt \quad (8)$$

$$\text{ここに、} Y_2 = \int_0^T y_2(t) e^{-\beta t} dt, \quad V_2 = \int_0^T v_2 e^{-\beta t} dt,$$

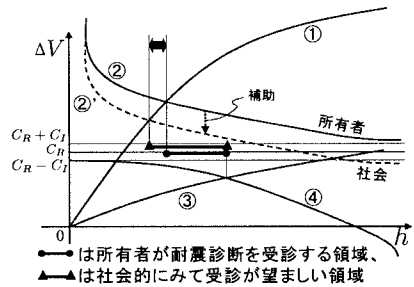
$$i = \begin{cases} b & (\text{「不良」の診断結果の下修繕しない時}) \\ g & (s = b \text{ となる時以外}) \end{cases}$$

である。式(8)第3項より、周辺住民の効用は老朽家屋の倒壊確率に依存する。したがって、所有者が家屋の修繕(または耐震診断)を行うことは周辺地域住民にとっても社会全体にとっても望ましい。逆に、社会的に見て耐震診断を受けることが望ましいにもかかわらず、所有者が、自身の合理的な判断として診断も修繕も行わない状況が起こることを表しているのが図2(両矢印部分)である。

老朽家屋の所有者に対して修繕(または耐震診断の受診)を促し社会を望ましい方向へ誘導させるために政府が補助策をとるものとする。ここでは耐震診断への補助と修繕への補助を想定し、両政策が所有者の意思決定に及ぼす影響についての比較を行った。その結果は以下の通りである。

- 耐震診断への補助では、 $C_I$  が小さくなり①、②の交点が  $h$  軸負の向きに、③、④の交点が  $h$  軸正の向きに移動し、診断受診領域が広がる。
- 修繕への補助では、 $C_R$  が小さくなり①、②の交点、③、④の交点ともに  $h$  軸負の向きに移動するが、①と③の傾きの関係から、③、④の交点の方が①、②の交点より大きく移動するため、診断受診領域が狭まる。

特に後者では、曲線③、④の交点が  $h$  軸負の向きに移動するために、修繕を行う必要のない家屋まで修繕されてしまう状況が起こりうる。その分のロスが診断補助策に比べて効率性に欠けている。



- ①:  $V(T, 0, 0|g) - V(T, h, 0|b)$  ②:  $C_R + C_I / P_{gb}(h)$
  - ②': (式②)  $-k w \int_0^T (P_{bd}(t) - P_{gd}(t)) e^{-\beta t} dt$
  - ③:  $V(T, 0, 0|g) - V(T, h, 0|g)$  ④:  $C_R - C_I / P_{gg}(h)$
- $w$  は所有者に対する周辺住民の比を表す

図2 受診領域の違い(地震経験のない家屋)

5 おわりに ここでは未来の時点での所有者の意思決定については考慮していない。今後の課題として、「何年後に家屋の修繕(あるいは診断)を行う」といった時間軸に沿った意思決定や決定自体を留保する意思決定留保行動を想定して分析をすすめた。