

豪雨災害時における状況の再定義を考慮した 動的離散選択モデルによる 住民の避難意思決定分析

長坂 奈月¹・藤原 章正²・力石 真³

¹学生会員 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: m213999@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島大学准教授 大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

近年、台風や線状降水帯による豪雨災害の激甚化により、多くの人が被害を受けている。特に、平成 30 年 7 月豪雨災害においては逃げ遅れによる被災が散見され、適切な避難行動を適切なタイミングで促すことの重要性がますます高まっている。災害時の避難意思決定に関する分析や心理学的仮説の検証は個々の研究で行われているが、多くの研究が静的な分析に限られており、時間変化する状況と人々の意思決定タイミングについて動的な分析を行った例は多くない。そこで、本研究では認知心理学分野での研究において、逃げ遅れの原因として指摘されている「正常化への偏見」をもとに人々の意思決定段階を細分化し、避難に関する情報や個人属性等が及ぼす影響について、動的離散選択モデルを用いて平成 30 年 7 月豪雨災害時の住民の意思決定の分析を行う。

Key Words: *evacuation behavior, decision-making, redefinition of the situation, dynamic discrete choice model*

1. はじめに

わが国における台風や線状降水帯による豪雨災害の激甚化は近年ますます進んでおり、多くの人が被害を受けている¹⁾。その中でも平成 30 年 7 月に西日本で発生した豪雨災害は、とりわけ被害が大きく、後に内閣府の避難勧告等に関するガイドライン²⁾の改正の 1 つのきっかけとなった。この豪雨災害では、広島県、岡山県、愛媛県をはじめとする西日本を中心に、全国的に広い範囲で記録的な大雨が観測され、広島県を含む 1 府 10 県に特別警報が発表された³⁾。また、大雨に伴い河川の氾濫や土砂崩れも発生し、日本全国で死者 224 人、行方不明者 8 人、負傷者 459 人という大きな犠牲を出した。広島県は最も被害が大きく、死者は 109 人、行方不明者 5 人、負傷者 139 人であった⁴⁾。本災害の特筆すべき特徴は、避難の判断遅れを起因とした逃げ遅れによる被災が目立った点である。災害後に内閣府によって取りまとめられた

防災白書によると、やはり適切な避難行動はほとんど実施されておらず、指定避難所への立退避難割合はわずかに 0.5%程度であったことなどが自治体により報告されている⁵⁾。一方で、避難勧告や大雨特別警報等の災害関連情報、ハザードマップ等で事前に被災の可能性が示唆されていたことも確かである。最も降雨が激しかったとされる 7 月 6 日の前日にあたる 5 日には、気象庁による大雨についての臨時会見が行われている⁶⁾。それにもかかわらず、逃げ遅れによる被災が顕著であったという事態を受け、災害時の避難促進、特に逃げ遅れの発生要因やそれを防ぐための政策に関して様々な議論がなされている⁷⁾⁸⁾。今後、ますます豪雨災害が頻発するようになるであろうことを踏まえると、こうした研究を推し進めることは急務といえる。本論文では、災害時における住民の避難意思決定に影響を与える要因の分析を行うとともに、それらが逃げ遅れの発生にどの程度寄与しているのかを探ることを目的とする。

2. 既往研究

(1) 災害心理学

既往研究において、災害心理学の分野からも逃げ遅れに関して様々なバイアスが指摘されている¹⁰⁾。その中でも、正常化の偏見(Normalcy bias)は顕著に表れるものの一つとされている。正常化の偏見は、非常時においてリスクを過小評価してしまう傾向のことである¹¹⁾。Konoら¹²⁾は、この正常化の偏見が「実際に自分自身が被害を受ける可能性」と「避難行動が過剰反応となってしまう可能性」の認知的不協和¹³⁾によるものであると指摘している。また、廣井¹⁴⁾は、リスク認知の特性から災害を「突発災害」と「進行災害」の2つに分類している。地震やそれに伴う津波などの突発災害は、目に見えてわかる減少や衝撃が最初に発生するため、正常化への偏見は働きづらいとされている。一方で、危険が徐々に高まる豪雨災害や土砂災害といった進行災害では、正常化への偏見が働きづらいとされており、平常時から非常時へと状況認識を変えることが難しい。池田¹⁵⁾は、この状況認識の変化を「状況の再定義」と呼称しており、ひとたび正常化の偏見が活性化されると、災害に関する情報を繰り返し得たとしたとしても状況の再定義を行うことが難しくなると指摘している。加えて、池田は「スクリプト」の保有が状況の再定義に必要なことも指摘している。スクリプトとは、特定の状況下で利用できる判断や行動の束のことであり、スクリプト所有者は非所有者に比べてより少ない情報から比較的正しい推論を行うことができるとされている¹⁶⁾。これらの心理学的観点から、本研究では災害時の住民の避難意思決定に関して、以下の2つの仮説を置く。

- 1) 災害時の避難意思決定には「状況の再定義」段階が存在する。
- 2) 避難の意思決定は、スクリプトが利用可能になった段階以降、行なわれやすくなる。

なお、本研究におけるスクリプトとは、過去の災害の経験や、他人から避難を呼びかけられるなどの社会的な要因のことを指す。

(2) 数理モデル

災害時での避難意思決定に関する分析において、その意思決定の異質性から、数理モデルには現象の説明力が強く求められている。佐藤ら¹⁰⁾は、Akerlof & Dickensの津波避難モデル¹⁸⁾をベースに、情報入手確率や被害確率などを導入し、不確実性の高い状況下での避難意思決定を表現した。及川・片田¹⁹⁾は、エントロピーモデルを構築し、状況の判断を意思決定として含む避難先選択モデルを提案している。しかし、これらの研究では、心理学的

な現象を記述することには成功しているものの、実証分析との接続が課題であり、逃げ遅れの要因を実際の行動データから見出すことは難しい。実際の行動データを用いた分析で使用されたモデルとしては、従来の静的選択モデルである Multinomial logit model^{20) 21) 22)}や Nested logit model²⁰⁾、Latent class model²³⁾、Ordered logit/probit model^{24) 25)}などがある。一方で、Pelらは災害時の意思決定問題において、動学モデルによる分析の必要性を訴えている²⁶⁾。動学モデルによる分析では、時間軸を考慮することが可能であり、豪雨後の最終的な意思決定だけでなく、時間的に変化する周囲の状況と意思決定の変動をモデリングできる。つまり、逃げ遅れ等の避難タイミングについて分析したい場合は時間軸を考慮することが重要であるといえる。時間軸を考慮した研究としては、Fu & Wilmotの Sequential binary logit model²⁷⁾、Rustの Dynamic discrete choice model²⁸⁾をベースとした分析^{29) 30) 31)}などがある。しかし、これらの分析では各タイミングでの人々の意思決定は避難または非避難の二項選択として記述されており、時間軸とともに状況の再定義フェーズを考慮した研究は、筆者の知る限り存在しない。

そこで、本研究では前節で説明した意思決定の仮説について、時間軸を考慮することが可能である Rust(1987)の動的離散選択モデルを用いて、平成30年7月豪雨災害時の住民の避難に関する意思決定の分析を行う。本研究の貢献は、避難に関する意思決定のボトルネック(避難の効用が低いために避難を選択しないのか、もしくは状況の再定義が進まないが故に避難を選択できないのか)の解明である。

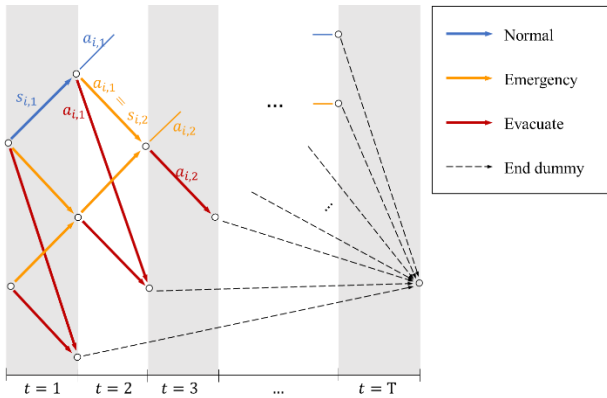
3. 定式化

(1) 意思決定フロー

本研究では定式化にあたり、避難までの意思決定において個人が置かれる状態と選択可能な行動との間に表-1で示すような関係を仮定する。まず、状況の定義が平常時のとき、個人はそのまま状況の定義を変更しない(Normal から Normal)か、または状況の再定義を行うか(Normal から Emergency)を選択することができる。なお、この際、状況の再定義と避難を同時選択することも可能である(Normalから Evacuate)。次に、状況の再定義を経て非常時の認知に遷移した場合、避難する(Emergency から Evacuate)か、避難せずそのまま待機する(Emergency から Emergency)かを選択できる。避難に遷移、または避難を選択しないまま有限期間の上限 $t = T$ に到達した場合、マルコフ遷移過程における吸収状態を表す、効用0の End Dummyを確率1で選択する。これらの状態遷移が繰り返される様子を図-1に示す。

表-1 意思決定フローの接続条件

状態 $s_{i,t}$ (行動決定前)	行動 $a_{i,t}$	状態 $s_{i,t+1}$ (行動決定後)
	Normal	Normal
Normal	Emergency	Emergency
	Evacuate	Evacuate
Emergency	Emergency	Emergency
	Evacuate	Evacuate
Evacuate	End dummy	End dummy



注) は全く同じダミーリンクとみなす

図-1 各個人の遷移の様子

(2) 動的離散選択モデル

離散有限期間 $t = 1, 2, \dots, T$ の間、状態 $s_{i,t}$ を観察し、集合 $A(s_{i,t})$ の中から行動 $a_{i,t}$ を選択する行動を繰り返す個人 i を仮定する。この時、個人 i が t 期に得られる総効用は、状態変数 $s_{i,t}$ および行動 $a_{i,t}$ の関数として、式(1)のように表せる。

$$\sum_{\tau=0}^{T-t} \beta_i^\tau u(s_{i,t+\tau}, a_{i,t+\tau}) \quad (1)$$

$\beta_i \in (1,0)$ は、 τ により終端時刻まで $T-t$ 回乗じられる時間割引率であり、 $\beta_i = 0$ のとき、次期の効用（瞬時効用）のみが考慮され、 $\beta_i = 1$ のとき瞬時効用と時期以降で得られる効用（将来効用）の重みが同一となる。

ここで、各個人が任意の選択肢を選んだ時、次期に遷移する状態に関する予測が 1 次のマルコフ過程に従うとする。個人 i が t 期において状態 $s_{i,t}$ を観察し、行動 $a_{i,t}$ を選択したとき、次の $t+1$ 期に状態が $s_{i,t+1}$ となる確率（信念）を遷移確率と呼ぶが、本研究における遷移確率は表-1 で示される行動 $a_{i,t}$ と次期の状態 $s_{i,t+1}$ の接続条件に等しい。接続条件 δ の定義は式(2)のとおりである。本研究では、状態 $s_{i,t}$ において行動 $a_{i,t}$ を選ぶと、自動的にただ 1 つの次期の状態 $s_{i,t+1}$ に移行する。よって簡略化の

ため、以降の定式化では $a_{i,t}$ の記述を省略する。

$$\delta(s_{i,t+1}|s_{i,t}, a_{i,t}) = \begin{cases} 1, & a_{i,t} \in A(s_{i,t}) \\ 0, & a_{i,t} \notin A(s_{i,t}) \end{cases} \quad (2)$$

次に、意思決定者は割引期待効用の和である式(1)の期待値を最大化するように、次期の状態 $s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,T}$ を決定すると仮定する。これは、個人 i が動的計画 (Dynamic Programming) 問題を解くことと等しく、価値関数 $V(s_{i,t})$ を用いて、以下の目的関数と制約条件で記述できる。

$$V(s_{i,t}) = \max_{s_{i,t+1} \in A(s_{i,t})} \mathbb{E} \left[\sum_{\tau=0}^{T-t} \beta_i^\tau u(s_{i,t+\tau+1}|s_{i,t}; \theta) \right] \quad (3)$$

さらに、瞬時効用の効用関数 $u(s_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta)$ は、確定項 $v(s_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta)$ と誤差項 $\mu \epsilon(s_{i,t+1})$ に加法分離可能である、という仮定をおき、Bellman の最適性原理および Bellman 方程式を用いて、価値関数が再帰的になるような形で表すと、

$$V(s_{i,t}) = \mathbb{E} \left[\max_{s_{i,t+1} \in A(s_{i,t})} \{v(s_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta) + \beta_i V(s_{i,t+1}) + \mu \epsilon(s_{i,t+1})\} \right] \quad (3)$$

ここで、誤差項 $\epsilon(s_{i,t+1})$ が平均 0 の IID ガンベル分布に従うと仮定すると、式(4)の $\max \{\cdot\}$ の中身も IID ガンベル分布に従う。一般化極値分布の特性から、価値関数 $V(s_{i,t})$ は式(5)のように書き換えることができる。

$$V(s_{i,t}) = \begin{cases} \mu \log \sum_{s_{i,t+1} \in A(s_{i,t})} \delta \cdot e^{\frac{1}{\mu} \{v(s_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta) + \beta_i V(s_{i,t+1})\}} & s_{i,t+1} \neq \text{End dummy}, \\ 0 & s_{i,t+1} = \text{End dummy} \end{cases} \quad (5)$$

また、IID ガンベル分布を仮定したことにより、状態 $s_{i,t}$ において個人が次期の状態 $s_{i,t+1}$ を選択する確率は、式(6)のようにロジット型で記述することができる。

$$p_i(s_{i,t+1}|s_{i,t}) = \frac{e^{\frac{1}{\mu} \{v(s_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta) + \beta_i V(s_{i,t+1})\}}}{\sum_{s'_{i,t+1} \in A(s_{i,t})} e^{\frac{1}{\mu} \{v(s'_{i,t+1}|s_{i,t}; \theta) + \beta_i V(s'_{i,t+1})\}}} \quad (6)$$

よって、対数尤度関数は以下の式(7)で表せる。 N はサンプル数である。

$$LL(\beta, \theta) = \ln \prod_{i=1}^N \prod_{t=1}^T p_i(s_{i,t+1}|s_{i,t}) \quad (7)$$

(3) 推定法

動的離散選択モデルの推定では、まず価値関数の解を算出するため、不動点を求める必要がある。不動点求解

とパラメータ推定を同時に行う方法は、Rust²⁸⁾によって提案されている、価値関数の不動点求解とパラメータ更新を交互に行う Nested Fixed Point Algorithm (NFXP)や、Aguinegabiria and Mira³²⁾が提案した、疑似尤度関数を用いることで繰り返しの不動点求解が不要となり計算負荷が小さい Nested Pseudo Likelihood algorithm (NPL)がよく知られている。これらの推定方法は無限時間の仮定の下、不動点解があるノルムが収束するまで繰り返し計算を行う方法によってのみ求解可能な場合に有用である。本研究では有限時間を仮定するため、収束を待つ必要が無く、後ろ向き帰納法による有限回の繰り返し計算で不動点の求解が可能である。よって、本研究では後ろ向き帰納法を用いて価値関数を算出する。

(4) 効用関数の設定

本研究における効用関数は、表-1 で示した意思決定フローに従い、以下のとおり設定した。

$$v(\text{Normal}|\text{Normal}) = \theta_1 \text{female} + \theta_2 \text{old} + \theta_3 \text{live} \quad (8)$$

$$v(\text{Emergency}|\text{Normal}) = \theta_4 \text{warn} + \theta_5 \text{experience} + \theta_6 \text{called} \quad (9)$$

$$v(\text{Evacuate}|\text{Normal}) = \theta_7 \text{warn} + \theta_8 \text{experience} + \theta_9 \text{called} + \theta_{10} \text{others} \quad (10)$$

$$v(\text{Emergency}|\text{Emergency}) = \theta_{11} \text{own} + \theta_{12} \text{alone} \quad (11)$$

$$v(\text{Evacuate}|\text{Emergency}) = \theta_{13} \text{warn} + \theta_{14} \text{experience} + \theta_{15} \text{called} + \theta_{16} \text{others} \quad (12)$$

まず、平常時からの選択について、状況認識を変更しない行動の効用関数 $v(\text{Normal}|\text{Normal})$ には、式(8)のとおり女性ダミー female 、60歳以上の高齢者ダミー old 、豪雨災害当時の居住年数 live を導入した。次に、平常時から非常時へと状況を再定義する行動の効用関数 $v(\text{Emergency}|\text{Normal})$ では、式(9)のとおり、大雨特別警報の受け取りダミー warn 、過去の災害経験ダミー experience 、避難に関する他人からの呼びかけダミー called を設定した。さらに、平常時から、状況の再定義と避難を同時に意思決定する行動の効用関数 $v(\text{Evacuate}|\text{Normal})$ においては、式(10)のとおり、 warn 、 experience 、 called に加えて、他人の避難行動目撃ダミー others を取り入れた。

状況の再定義後の行動の効用関数について説明する。状況の再定義後は、非避難(Emergency)か避難(Evacuate)を選択することができる。非避難の効用関数 $v(\text{Emergency}|\text{Emergency})$ には、式(11)のとおり、持ち家ダミー own 、一人暮らしダミー alone を設定した。また、避難の効用関数 $v(\text{Evacuate}|\text{Emergency})$ は、式(12)

のとおり、 warn 、 experience 、 called 、 others を導入した。なお、これら5つの効用関数に関して、効用関数ごとに異なるパラメータを設定していることに留意されたい。

本研究では時間割引率を考慮するが、 $\beta_i \in (1,0)$ の条件を満たす必要があるため、推定する際は式(13)のようにロジット変換された形で代わりに γ を推定する。加えて、時間割引率を構造化することによって、個人間での時間割引率の異質性を表現する。よって時間割引率 β_i は、定数項部分 γ_{const} およびハザードマップ確認ダミー map とそのパラメータ γ_{map} から構成されているものとした。

$$\beta_i = \frac{\exp(\gamma_{\text{const}} + \gamma_{\text{map}} \text{map})}{1 + \exp(\gamma_{\text{const}} + \gamma_{\text{map}} \text{map})} \quad (13)$$

(5) 時間変化する説明変数

ここで、時間によって値が変動する説明変数について解説する。時間変化するのは、大雨特別警報受け取りダミー warn 、他人からの声かけダミー called 、他人の避難行動目撃ダミー others の3つである。

warn は、各個人の居住地域に大雨特別警報が発令³³⁾されていれば1、そうでなければ0のダミー変数 $\delta_{\text{city}}^{\text{warn}}$ と、個人 i が実際に大雨特別警報を受け取ってあれば1、そうでなければ0のダミー変数 $\delta_i^{\text{receive}}$ を乗じたものである。これによって、地域ごとの大雨特別警報の発令と個人での情報入手の双方が表現できる。

$$\text{warn}_{i,\text{city}} = \delta_{\text{city}}^{\text{warn}} \times \delta_i^{\text{receive}} \quad (14)$$

また、 called は声かけがあった時間帯以降は1となるダミー変数である。同様に、 others についても、該当する時間帯以降は1となるダミー変数である。

4. 分析概要

(1) 対象となるデータ

分析では、2019年4月に広島県によって行われた、「平成30年7月豪雨を踏まえた県民の避難行動に関する調査」の回答データを用いる。調査の詳細を表-2に示す。対象は18歳以上の広島県民で、無作為に抽出された5000人に郵送で配布され、2938の回答を得ている。分析に用いる設問の都合上、最終的な有効回答数は1026となった。アンケートには、個人属性や、過去の災害経験に関する設問に加え、平成30年7月豪雨で最も降雨が激しかった7月6日の前後1日程度(計58時間)の1時間毎の行動(意思決定、避難先、情報入手等)についての設問が含まれている。意思決定については、「1. 近隣の危険の認知」「2. 自分や家族の危険の認知」「3. 避難の決定」「4. 避難開始」「5. 避難終了」の5段階で、本研究では「2. 自分や家族の危険の認知」以降を状況の再

定義(Emergency)状態, 「3. 避難の決定」以降を避難(Evacuate)状態と定義した.

表-2 調査概要

調査方法	郵送調査
調査期間	2019年4月
調査対象	18歳以上の広島県民5000人 (調査実施時点, 無作為抽出)
調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 個人属性 (年齢・性別・同居人数・居住地域等) 過去の災害経験 他人からの声掛け等が発生した時刻 7月5日14時から7月7日23時までの避難に関する意思決定(1時間ごと)

有効回答となった1026人のうち, 調査対象期間内に避難の意思決定を行ったのは344人(34%)で, 非避難を選択したのは682人(66%)であった. また, 状況の定義については, 調査対象期間内に再定義を行った人(のちに避難した人も含む)は722人(70%), 平常時の定義のままであった人が304人(30%)であった. 図-2に, 調査対象期間における時間的な意思決定の移り変わりを示す. 広島県のほぼ全域で降雨が最も激しく, 大雨特別警報がほとんどの地域で発令された6日20時前後を中心に, 状況の再定義や避難の割合が大きく変化していることがわかる. また, 最終的な避難決定率は全体の34%にとどまっていたものの, 70%の人が状況の再定義を行っていたこともわかる. 言い換えると, 状況の再定義をしたにもかかわらず, 避難を選択しなかった人が26%程度存在することが明らかになった.

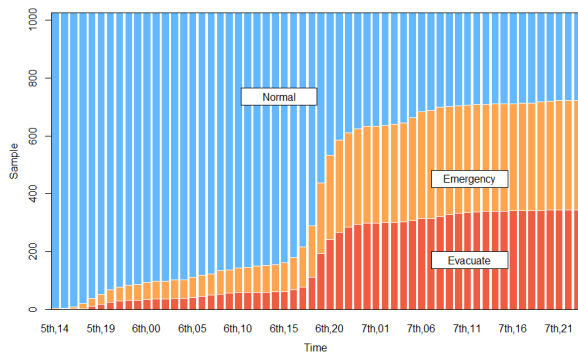


図-2 意思決定の時間的推移

次に, 他人からの声掛けcalledおよび他人の避難行動の目撃othersの時刻について集計した. 図-3は2つの説明変数の累積分布を示している. 最終的には, 1026人のうち, 約半数にあたる530人が他人から避難について声掛けを受けていたことが明らかになった. 他人の避難行動の目撃については, それよりも少なく226人であった. 時間的な変化の傾向としては, どちらも同じような

変化率を示している.

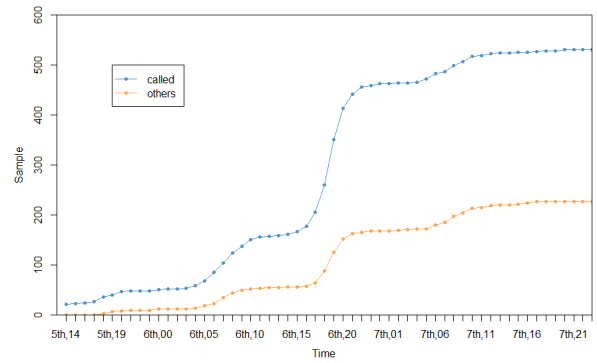


図-3 声掛け及び他人の避難行動目撃の時間的推移

さらに, 他人からの声掛けと避難行動の目撃の両方を経験したサンプル168人において, その時間の差について集計を行った(図-4). この図は(声掛けの時刻)-(他人の避難行動目撃の時刻)のヒストグラムとなっている. 図の左側に位置するサンプルは, 他人の避難行動目撃の方が声掛けよりも早く, 右側は声掛けの方が早い. 図を見ると, 双方が同じタイミングであったサンプルが最も多くなっているが, 一方でやや分布が左側に偏っており, 他人の避難行動の目撃のほうが声掛けよりも早い傾向にあったことが分かった.

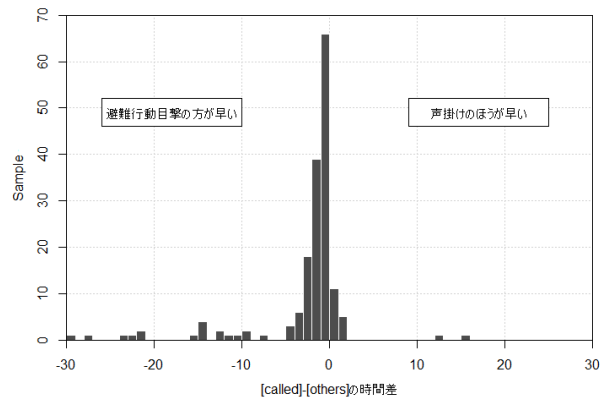


図-4 声掛けと他人の避難行動目撃のタイミングのずれ

5. 分析結果

第3章で定式化したモデルと, 前章で説明した避難行動データを用いて, パラメータ推定を行った. 推定結果を表-3に示す. モデルの尤度比は0.3を超えており, 良好な推定結果が得られたといえる. なお, 初期尤度に関しては, 割引率のパラメータ(構造化部分を含む)のみ推定値で固定し, その他のパラメータを0にして算出した.

表-3 推定結果

パラメータ	推定値	t 値
女性ダミー	-0.0152	-4.693 ***
高齢者ダミー	0.0043	0.995
居住年数[年]	-0.0003	-3.296 ***
持ち家ダミー	-0.0182	-4.766 ***
一人暮らしダミー	-0.0147	-1.643
大雨特別警報ダミー (状況の再定義)	0.3725	2.434 *
大雨特別警報ダミー (避難)	0.5197	4.701 ***
大雨特別警報ダミー (状況の再定義+避難)	-0.6015	-2.696 **
過去の災害経験ありダミー (状況の再定義)	-4.7119	-31.747 ***
過去の災害経験ありダミー (避難)	-4.1933	-32.926 ***
過去の災害経験ありダミー (状況の再定義+避難)	-6.7581	-32.577 ***
他人からの声掛けダミー (状況の再定義)	0.9195	5.213 ***
他人からの声掛けダミー (避難)	1.1228	8.555 ***
他人からの声掛けダミー (状況の再定義+避難)	3.6364	16.132 ***
他人の避難行動目撃ダミー (避難)	-0.5190	-2.257 *
他人の避難行動目撃ダミー (状況の再定義+避難)	0.0261	0.117
γ_{const}	22.0019	46.374 ***
γ_{map}	-7.9981	-7.628 ***
サンプル数	1026	
初期尤度	-7621.492	
最終尤度	-4897.388	
尤度比	0.357	
自由度調整済み尤度比	0.355	

*** p<.001, ** p<.01, * p<.05

まず、 $u(\text{Normal}|\text{Normal})$ の説明変数について、女性ダミーは有意に負の影響を及ぼしている。これは、女性の方が男性よりも平常時の状況定義に留まり続ける効用が低く、これ以外の選択肢を選びやすい傾向にあるということを示している。高齢者ダミーについては、有意な影響を持たない結果となった。また居住年数は、有意に負の影響を及ぼしており、これは、居住年数が長くなるほど平常時に留まる効用が低くなることを表し、女性ダミーと同様の傾向を表している。

次に、 $u(\text{Emergency}|\text{Emergency})$ の効用について考える。持ち家ダミーは、この効用関数に有意な負の影響を及ぼしている。つまり、状況の再定義後は、家を所有していない人の方がより避難を選択しづらいつということである。また、一人暮らしダミーについては、有意な結果を及ぼさなかった。

$warn$, $experience$, $called$, $others$ については、2 つないし 3 つの効用関数 $u(\text{Emergency}|\text{Normal})$,

$u(\text{Evacuate}|\text{Normal})$, $u(\text{Evacuate}|\text{Emergency})$ にそれぞれパラメータだけが違う形で組み込まれている。これらの説明変数については、説明変数ごとに考察を行う。

大雨特別警報ダミー $warn$ は、すべての選択肢に対して有意な影響を及ぼしており、パラメータの値から、状況の再定義 $u(\text{Emergency}|\text{Normal})$ よりも避難 $u(\text{Evacuate}|\text{Emergency})$ に対して、正の方向により強く働いていることが明らかになった。状況の再定義と避難の同時選択 $u(\text{Evacuate}|\text{Normal})$ については、後述する $called$ の影響が強いために、負の方向に働いているものと考えられる。

過去の災害経験ダミー $experience$ については、すべての選択肢で有意に負の影響を及ぼしている結果となった。これは、「経験の逆機能」(Negative effect of past hazard experience³⁴⁾) が発生していると考えられる。この現象は、既存の災害研究でも指摘されており³⁵⁾、本研究の対

象である平成 30 年 7 月豪雨でもそれが働いていると推測される。また、状況の再定義に関する効用である $u(\text{Emergency}|\text{Normal})$ に対するパラメータが他と比べてもより負方向に大きい。このことから、経験の逆機能は、避難フェーズよりも、正常化の偏見が働きやすいとされている状況の再定義の部分でより影響を及ぼしており、過去の災害経験によって、予期形成にバイアスが かかっているという解釈が可能である。この現象を原因とした避難遅れの発生を避けるためには、経験の逆機能が起こりうるということ、住民自身が知識として蓄え、自発的に気付くことができるような防災教育が必要である。

他人からの声掛けダミー *called* については、すべての選択肢に対して有意に正の影響を及ぼしている結果となった。特に、状況の再定義と避難の同時選択 $u(\text{Evacuate}|\text{Normal})$ に対しては、他の 2 つの選択肢よりもかなり大きな影響を持っていることがわかった。これは、周囲の状況を平常時だと思っている個人が、他人から避難について声を掛けられた瞬間、つまりスク립トを入手した瞬間に、急速に避難の効用が高まり、意思決定が進むことを示している。また、大雨特別警報ダミーと比較しても声掛けのほうが避難に関してより効果的であることから、警報は避難のトリガーとしてやや不十分であり、地域住民がそれぞれ個別に声を掛けあうことではじめて避難促進が現実的なものになるということを示唆している。この自他相互救助の概念は、東日本大震災でその効果が明らかになった「津波てんでんこ」の原則とよく似ている。津波てんでんこは、「津波の際はたとえ家族でも、人のことは構わずに一刻も早く逃げろ。」という意味の言い伝えであるが、そこには「誰かが逃げれば、他の人も逃げやすくなり、結果的に周りの命を助けることになる」という意味合いが多分に含まれていることが指摘されている³⁶⁾³⁷⁾。このことから、逃げ遅れ回避のための政策には、やはり津波てんでんこの原則を浸透させることが効果的である可能性がある。

他人の避難行動目撃ダミー *others* に関しては、避難に関係する選択肢の効用 $u(\text{Evacuate}|\text{Normal})$ と $u(\text{Evacuate}|\text{Emergency})$ に組み込まれている。推定結果から、状況再定義後の避難 $u(\text{Evacuate}|\text{Emergency})$ に有意な負の影響が出ていることが確認された。この結果は解釈に窮するところがあり、一般的な認識や声掛けダミーの結果とは逆のものとなっている。これは、基礎集計でも示したように、他人からの声掛けよりも他人の避難行動目撃の方が早い傾向にあったことと、かつ声掛けのタイミングで避難の決定を行った人が多い（声掛けダミーの方が意思決定の変化をよく説明できている）ことが原因の一つとして考えられる。

割引率については、事前にハザードマップを確認して

いた人の方がわずかに将来効用を割り引く傾向にあった。しかし、ロジット変換により $\gamma = 5.0$ のとき既に $\beta = 0.99$ となってしまうことからわかるように、ハザードマップを確認していても $\gamma = 14.0$ であるから、割引率は 1 に限りなく近い値となる。割引率の構造化により局所最適解が増えてしまうことも含め、推定には課題が残る。

6. 結論

本研究では、災害時における住民の避難意思決定において、状況の再定義フェーズが存在すること、またスク립トの入手によって避難が急速に進むことを仮定し、分析を行った。分析結果から、以下のことが明らかとなった。

- i) 平成 30 年 7 月豪雨災害における住民の避難意思決定では、過去の災害経験が避難や状況の再定義に対して負の方向に作用しており、特に状況の再定義の部分により強い負の影響を及ぼしている。
- ii) 他人からの声掛けは、状況の再定義および避難の意思決定に対して、気象警報（大雨特別警報）よりも大きく有意な正の効果を持っており、声掛けにより急速に避難までの意思決定が進む。

これらの知見に基づき、今後起こりうる災害に対する地域防災のための政策に関して、以下のものを提案する。今後、日本では地域住民同士のつながりが希薄になることが懸念されているため、住民が共助の概念や他者避難の推進を意識することが重要である。

- I) 地域住民が、経験の逆機能（前回は大丈夫だったから／前回よりもひどくないから、今回も大丈夫だろうという心理）について認知し、自分の被害予期が間違っている可能性を常に考えられるように教育を行うこと。
- II) 自分が他の人に声掛けを行いながら逃げることで、自分だけでなく他人の命を救うことにもつながるということを人々が認識できるようにすること。

本研究では、モデルの数理的な面でも多くの課題が散見された。動的離散選択モデルにおいては、将来効用の認知に関する仮定が現実的でないという問題点がある。従来の完全情報を仮定した計算ではなく、災害時の不確実性をより表現できるような不完全情報下の計算が可能なモデルの構築が必要である。また、選択肢集合の設定についても改良の余地がある。本研究では避難の意思決定までを選択として取り扱ったが、実際はその先の目的地（友人宅、避難所等）も併せて考慮する必要があるだろう。さらに、モデル推定後も政策の効果を分析するた

めのシミュレーション, およびその手法の開発も必要となってくるであろう。

謝辞: 本研究で用いた「平成30年7月豪雨を踏まえた県民の避難行動に関する調査」の回答データは, 広島県から提供されたものである。また, データの入手やその解釈に当たり, 広島大学大学院人間社会科学科坂田桐子教授から貴重なご意見を伺った。ここに感謝の意を表す。なお, 本研究は JSPS 科研費 JP19H00784 の助成を得たものである。

参考文献

- 1) 内閣府: 令和2年版 防災白書, pp.3-18, 2020.
- 2) 内閣府: 避難勧告に関するガイドラインの改定 (平成30年3月29日), (URL: https://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/h30_hinankankoku_guide-line/index.html, 2022年7月18日閲覧)
- 3) 気象庁: 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等)平成30年(2018年)6月28日~7月8日, (URL: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/20180713.html>, 2022年7月18日閲覧)
- 4) 気象庁: 平成30年度版 消防白書, 特集1 平成30年7月豪雨の被害と対応, (URL: <https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/h30/>, 2022年7月18日閲覧)
- 5) 内閣府: 令和元年版 防災白書, pp.38-39, 2019.
- 6) 気象庁: 西日本と東日本における8日頃にかけての大雨について(2018年7月5日付), (URL: <https://www.jma.go.jp/jma/press/1807/05b/2018070514.html>, 2022年7月18日閲覧)
- 7) 中野瑛登, 中野紗希, 松本拓樹, 中根大輔, 山本航, 塚井誠人: 広島県における西日本豪雨災害の受け止め, 土木学会論文集 B1, Vol. 75, No. 1, pp. 414-428, 2019.
- 8) 河井睦朗: 土砂災害における避難行動—平成30年7月豪雨の経験を踏まえ—, 砂防学会誌, Vol. 72, No. 5, pp. 56-66, 2020.
- 9) 梶谷義雄, 杉浦聡志, 畑山満則, 高木朗義: 災害時の避難行動に対する態度形成と避難実態に関する要因分析: 平成30年7月豪雨を対象として, 自然災害科学, Vol. 39, No. 3, pp. 207-220, 2021.
- 10) Tversky, A., Kahneman, D.: Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, *Science*, Vol. 185, No. 4157, pp. 1124-1131, 1974.
- 11) Omer, H., Alon, N.: The continuity principle: a unified approach to disaster and trauma, *American journal of community psychology*, Vol. 22, No. 2, pp. 273-287, 1994.
- 12) Kono, T., Okuno, M., Yamaura, K.: Regional differences in cognitive dissonance in evacuation behavior at the time of the 2011 Japan earthquake and tsunami, *Natural Hazards*, Vol. 111, No. 1, pp. 139-162, 2022.
- 13) Festinger, L.: A Theory of Cognitive Dissonance, 1957.
- 14) 廣井脩: 土砂災害と避難行動, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 5, pp. 64-71, 1999.
- 15) 池田謙一: 緊急時の情報処理, 1986.
- 16) Schank, R. C., Abelson, R. P.: Scripts, Plans, Goals and Understanding, *Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates*, 1977.
- 17) 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦: 心理的作用を考慮した津波避難開始における意思決定モデルの開発, 土木学会論文集 D3, Vol. 69, No. 2, pp. 64-80, 2013.
- 18) Akerlof, G. A., Dickens, W. T.: The Economic Consequences of Cognitive Dissonance, *The American economic review*, Vol. 72, No. 3, pp. 307-319, 1982.
- 19) 及川康, 片田敏孝: 災害時における情報検索行動を考慮した住民避難行動の記述と避難誘導方策の考察, 災害情報, Vol. 15, No. 1, pp. 1-15, 2017.
- 20) 高田和幸, 藤生慎, 大原美保, 山下倫央, 金野貴紘: 選好意識データを用いた災害時避難行動モデルの推定, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 5, pp. 5_46-5_55, 2016.
- 21) Lim, M. B. B., Lim, H. R., Piantanakulchai, M.: Flood evacuation decision modeling for high risk urban area in the Philippines, *Asia Pacific Management Review*, Vol. 24, No. 2, pp. 106-113, 2019.
- 22) 吉田京香, 安田誠宏, 河野達仁: 高潮災害時の避難行動における認知的不協和に関する研究, 土木学会論文集 B2, Vol. 77, No. 2, pp. 1057-1062, 2021.
- 23) Wong, S. D., Pel, A. J., Shaheen, S. A., Chorus, C. G.: Fleeing from Hurricane Irma: Empirical Analysis of Evacuation Behavior Using Discrete Choice Theory, *Transportation Research Part D*, Vol. 79, pp. 102227, 2020.
- 24) 清重典宏, 熊谷良雄: 水害時における情報伝達と住民初期避難行動の関連分析, 地域安全学会論文集, Vol. 2, pp. 169-178, 2000.
- 25) 柿本竜治, 吉田護: 豪雨時の状況認識を考慮した避難意思決定過程のモデル化, 土木学会論文集 D3, Vol. 75, No. 6, pp. 37-42, 2020.
- 26) Pel, A. J., Bliemer, M. C. J., Hoogendoorn, S. P.: A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, *Transportation*, Vol. 39, No. 1, pp. 97-123, 2012.
- 27) Fu, H., Wilmot, C. G.: Sequential Logit Dynamic Travel Demand Model for Hurricane Evacuation, *Transportation research record*, Vol. 1882, No. 1, pp. 19-26, 2004.
- 28) Rust J.: Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Vol. 55, No. 5, pp. 999-1033, 1987.
- 29) 浦田淳司, 羽藤英二, 柳沼秀樹: 将来効用の動学的異質性を考慮した避難開始選択モデルの構築, 土木学会論文集 D3, Vol. 72, No. 4, pp. 261-277, 2016.
- 30) Urena, Serulle, N., Cirillo, C.: The optimal time to evacuate: A behavioral dynamic model on Louisiana resident data, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 106, pp. 447-463, 2017.
- 31) Rambha, T., Nozick, L. K., Davidson, R.: Modeling hurricane evacuation behavior using a dynamic discrete choice framework, *Transportation Research Part B*, Vol. 150, pp. 75-100, 2021.
- 32) Aguirregabiria, V., Mira, P.: Sequential estimation of

- dynamic discrete games, *Econometrica: journal of the Econometric Society*, Vol. 75, No. 1, pp. 1–53, 2007.
- 33) 広島地方気象台：平成 30 年 7 月 3 日から 8 日にかけての台風第 7 号と梅雨前線による大雨について (2018 年 7 月 8 日付), (URL: https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/pdf/2018_3_hiroshima_1.pdf, 2022 年 9 月 24 日閲覧)
- 34) Shama, U., Patt, A. : Disaster warning response: the effects of different types of personal experience, *Natural Hazards*, Vol. 60, No. 2, pp. 409–423, 2012. (2022. 9. 30 受付)
- 35) 村上啓介, 杉尾哲：平成 17 年台風 14 号時の住民の避難行動と防災意識について, *災害情報*, Vol. 5, pp. 67–75, 2007.
- 36) 矢守克也：「津波てんでんこ」の 4 つの意味, *自然災害科学*, Vol. 31, No. 1, pp. 35–46, 2012.
- 37) 片田敏孝：子どもたちを守った「姿勢の防災教育」, *災害情報*, Vol. 10, pp. 37–42, 2012.