

# 認知的到達不可能性による選択肢集合形成 を考慮した避難滞在場所の動的選択

近藤 愛子<sup>1</sup>・浦田 淳司<sup>2</sup>・羽藤 英二<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学 工学部社会基盤学科 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: kondo@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、従来の避難研究では目的地への到達不可能性は評価されておらず、現実には到達不可能な目的地への避難を予測しかねないという課題を指摘し、認知リスクによる非補償的な選択肢集合形成を組み込んだ動的避難滞在場所選択モデルを構築した。動的モデル構築において将来の選択肢は、災害リスク進展の不確実性を考慮し、選択肢の残留確率を用いて記述した。これらにより、避難滞りに伴う選好と選択肢の縮小の忌避という現実的な意思決定過程を表現する。平成30年7月豪雨における呉市天応地区の行動データを用いてパラメータ推定を行い、提案モデルの妥当性を示した。また、選択肢集合の時間推移や施策シミュレーションにより、避難時の到達不可能性を考慮する重要性を明らかにした。

**Key Words:** *dynamic discrete choice, choice set formation, evacuation behavior, risk perception*

## 1. はじめに

洪水や土砂災害を引き起こす大雨の回数は年々増加傾向にあり、毎年全国各地で自然災害による被害が発生している。豪雨災害においては、一度氾濫や浸水が発生すると、長期の避難生活を強いられる可能性がある。また、降雨は平時にも起こる現象であり、日常との境界が曖昧である故、自宅に留まった例も多い。一方、激しい降雨や氾濫、土石流の発生等により周辺環境や避難経路のリスクは急激に上昇しうる。できるだけ生活しやすい場所に滞在したい、と自宅に留まるうちに、到達可能な選択肢は縮小する。垂直避難ではその先の避難が不可能となる場合が多く、突発的、局所的な災害に対し大きなリスクとなる。各世帯は、望ましい滞在場所としての性質と、避難可能範囲を狭めない空間的立地のトレードオフを考慮した選択を行なっていると考える。

コロナ禍で避難所の密度管理も課題となる中、自治体がホテル避難者の宿泊費を補助する制度が広がっている。公的避難施設の快適性やプライバシーの欠如が避難を妨げている場合有効な手段となるだろう。また、交通弱者や個々の移動可能性を考慮し、集団輸送や交通手段の提供も求められつつある。これらの施策評価には、避難滞

りに伴う選好や到達可能性を考慮できる予測機構が必要である。また、津波避難目的地選択を扱った Parady & Hato(2016)<sup>1)</sup>など既存の避難研究では、目的地の到達可能性は考慮されていないため、従来のモデルでは避難所の増設が避難人口の増加に直結すると評価しかねない。一方それらは多くの世帯にとって到達不可能である可能性は看過されている。

将来の滞在や、選択肢が狭まるリスク評価には将来効用を加味する動的な機構が必要である。避難開始選択研究では、災害の時間変化が選択へ影響を与えることから、時間帯を考慮した Sequential Logit モデル<sup>2)</sup>や Nested Logit モデルで表した研究<sup>3)</sup>などがある。また、最適計画問題においては、安藤ら(2016)<sup>4)</sup>が動学的経路選択を考慮した最適計画に取り組んだ。一方、避難目的地選択研究では Pel et al.(2012)<sup>5)</sup>が動学化の必要性を指摘するものの、筆者らの知る限り動的なモデルの提案はない。

本研究では、豪雨災害における避難の特性を踏まえ、将来も含めた避難滞在、滞在場所の到達不可能性を考慮した選択モデルを提案する。本モデルでは、各世帯の認知リスクに応じ、到達不可能な避難滞在場所は非補償的に排除される。また将来の滞在場所候補は、将来時点に選択肢集合に残留する確率により、危険な候補の効用は

割り引かれて認知される、と仮定する。頻発化、激甚化する気象災害において人的被害を最小限に抑え、防災計画を適切に評価するためには、避難者の選択肢集合と行動原理を動的に、的確に表現するモデルが必要である。提案モデルにより、より現実的な行動の再現を試み、被害低減のための対策を定量的に評価することを目的とする。

本研究の構成を次に示す。2章で、従来の避難目的地選択、選択肢集合を考慮した離散選択モデルについてのレビューを行い、本研究の位置づけを記す。3章では、選択肢集合形成モデルと、これを利用した動的避難滞在場所選択モデルの定式化を行う。4章では、平成30年7月豪雨における呉市天応地区のデータを用いて、実証分析を行う。5章では結論を述べる。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

### (1) 避難目的地選択

避難行動は(1)避難参加・避難開始時刻選択、(2)目的地選択、(3)経路選択の3つの段階に分けられるが、避難研究の多くは(1)を扱っており、目的地選択研究は限定されている<sup>5)</sup>。

ハリケーン避難では、避難先種別選択と目的地ゾーン選択は分けて行われるのが一般的である。Mesa-Arango et al.(2013)<sup>6)</sup>による避難先種別選択では、公的避難所・教会、ホテル、親戚知人宅、その他の中から選択が行われた。Cheng et al.(2008)<sup>7)</sup>は親戚知人宅への避難、ホテル・モーターへの避難を分けて目的地ゾーン選択モデルを構築した。避難先種別選択は滞在の快適性やプライバシーへの選好を代表し、目的地ゾーン選択は長距離移動の忌避、災害地から離れる場所の志向を表す。一方、リードタイムが短い豪雨災害では、避難者がこれらを分離して選択する機構を仮定する的不適切であり、両者のトレードオフを考慮する必要がある。

その他の避難目的地選択研究には津波避難を扱ったParady & Hato(2016)<sup>8)</sup>、地震火災・堤防決壊の複合災害を扱った高田ら(2016)<sup>9)</sup>などがある。いずれもOD距離や標高といった空間特性のみを考慮している。また、飯塚・羽藤(2020)<sup>9)</sup>が動的活動経路選択モデルの記述の中で避難前や立ち寄りの滞りを表現しているが、避難目的地、滞在場所選択の枠組みでは動的モデルの既往研究がない。

### (2) 選択肢集合を考慮した離散選択モデル

選択肢集合を考慮する離散選択モデルはManski(1977)<sup>10)</sup>が提案した二段階モデルに基づいており、全体集合 $G$ から選択肢 $i$ を選択する確率は式(1)と表される。

$$P(i|G) = \sum_{S \in \text{SEG}} P(i|S)P(S|G) \quad (1)$$

$P(S|G)$ は第一段階目の実現可能な選択肢集合 $S$ を抽出する確率を、 $P(i|S)$ は抽出された $S$ から選択肢 $i$ に決定する第二段階の確率を表す。第一段階は非補償的に、第二段階は補償的に選択を行うことから半補償的なモデルと呼ばれる。

Manskiの枠組みに基づく二段階モデルはSwait & Ben-Akiva(1987)<sup>11)</sup>、Basar & Bhat(2004)<sup>12)</sup>のほか複数提案されている。これらは分析者が最終的な選択 $i$ のみを観測することを前提とするが、森川ら(1991)<sup>13)</sup>やKaplan et al.(2011)<sup>14)</sup>は選択肢集合も観測することで効率的な推定方法を提案し、より多くの選択肢を含む選択への適用を可能とした。

交通分野において選択肢集合形成モデルが目的地選択に適用された例は森川ら(1991)<sup>13)</sup>、吉田・原田(1999)<sup>15)</sup>などがあり、避難研究への適用は筆者らの知る限りない。

### (3) 本研究の位置づけ

避難目的地選択研究は既往研究が少なく、また空間特性のみを考慮した静的モデルに限られることから避難先での滞在を考慮できていない。また選択肢集合を評価しない既存の避難研究は目的地への到達不可能性を看過しているが、リスクの急変により到達できる選択肢が動的に変化する災害時に到達不可能性を考慮することは不可欠である。

本研究では将来の滞りも考慮する避難滞在場所の動的選択モデルを提案する。また、認知リスクに基づき到達不可能な避難滞在場所候補を排除する非補償的な選択肢集合形成を組み込む。選択肢集合を考慮した動的離散選択モデルの提案にすることで、より現実的な行動表現を可能とする。

## 3. 避難滞在場所の動的選択モデル

本章では選択肢集合形成を考慮した動的避難滞在場所選択モデルを提案する。災害時の実際の避難行動では、行き先や経路のリスクを考慮し、危険な候補地は選択肢から排除し選択を行なっていると考えられる。通常の補償型の選択のみでは「危険だが滞在効用がとて高い」等、到達不可能な候補地も選択しうる。意思決定者はリスクを許容できる滞り場所候補のみを選択肢として持ち、その中から選択するモデルを提案する。

将来の選択肢も本来は非補償的に限定され選択が行われるが、不確実性が大きい災害時において、意思決定時に将来の選択肢集合は確定的には定まらないだろう。しかし土地の空間的特性や降雨量の推測を元に、非現実的な滞り場所候補から得られる効用は割り引いて行動をす

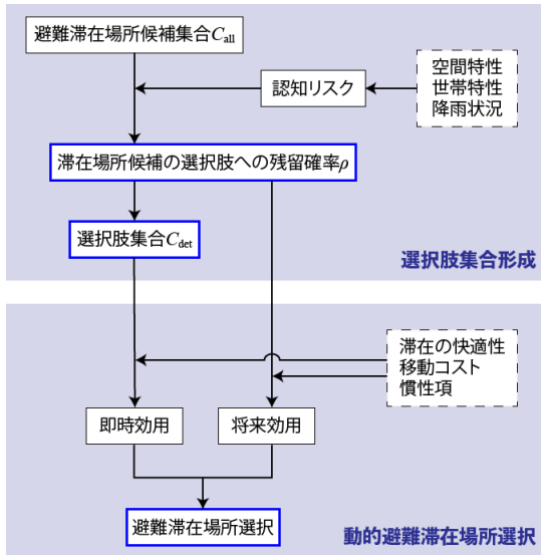


図-1 提案モデルの構成

ると推測し、各滞在場所候補が選択枝に含まれるか否かを確率的に扱う。

図-1に、提案モデルの構成を示した。まず選択枝集合形成モデルにおいて、各滞在場所候補が選択枝集合に含まれる確率 $\rho$ を求める。 $\rho$ は空間特性や世帯特性、降雨状況に応じた認知リスクにより算出される。またこの確率を用いて、到達不可能な滞在場所は排除された選択枝集合 $C_{det}$ を形成する。動的避難滞在場所選択モデルでは、滞在の快適性や移動コスト、慣性項を考慮して選択枝集合 $C_{det}$ の中から選択する。その際将来も加味した選択を行うが、将来の選択枝は確定的には定まらないため $\rho$ を効用に乗ずることで、到達不可能性が高い選択枝への期待が薄まる。

### (1) 選択枝集合形成モデル

森川ら(1991)<sup>13</sup>、Kaplan et al.(2011)<sup>14</sup>を参考に選択枝の観測がある選択枝集合形成モデルを定式化する。認知リスクの指標としてゾーン、経路の2つを考える。リスクは観測されない潜在変数であり、リスクと閾値の両者を構造化する。

状態 $s_t$ を滞在ゾーンと時刻 $t$ により定義する。状態 $s_t$ の世帯 $q$ に対し、指標 $k = \{zone, route\}$ における $s_{t+1}$ の閾値 $\theta_{kqt}$ とリスク $R_{kqt}$ は式(2)と式(3)で表される。

$$\theta_{kqt}(s_t) = \alpha'_k \mathbf{Z}_{kqt}(s_t) + \varepsilon_{kqt} \quad (2)$$

$$R_{kqt}(s_{t+1}|s_t) = \beta'_k \mathbf{G}_k(s_{t+1}|s_t) + \sigma_{kqt} \quad (3)$$

$\mathbf{Z}$ は世帯特性や雨量、 $\mathbf{G}$ はゾーンや経路の空間特性、 $\alpha, \beta$ はパラメータ、 $\varepsilon, \sigma$ は誤差項である。

選択枝集合抽出とゾーンリスクの関係を図-2に示す。リスク $R$ が閾値 $\theta$ を上回る時、 $s_{t+1}$ のゾーンは危険と認知され、選択枝から排除される二値選択モデルである。経路リスクでも同様に考える。 $s_{t+1}$ が $s_t$ の選択枝に残留

する確率 $\rho_q(s_{t+1}|s_t)$ は誤差項 $\sigma - \varepsilon$ に i.i.d.標準正規分布を仮定すると、

$$\rho_q(s_{t+1}|s_t) = \prod_k \Phi(\theta_{kqt}(s_t) - R_{kqt}(s_{t+1}|s_t)) \quad (4)$$

と表される。 $\Phi$ は標準正規分布の分布関数である。次節の滞在場所選択モデルでは、式(4)の確率 $\rho_q$ を用いて世帯・時間ごとの選択枝集合 $C_{det}(s_t)$ を形成する。また、各滞在場所が選択枝に残留する確率として用いる。

### (2) 動的避難滞在場所選択モデル

Fosgerau et al.(2013)<sup>16</sup>による Recursive Logit (RL)モデルの拡張である、時間構造化ネットワークを用いた一般化 RL モデル(Oyama & Hato, 2017<sup>17</sup>)に基づき、非補償的な選択枝集合形成と将来の確率的な選択枝集合を考慮した動的避難滞在場所選択モデルを定式化する。以下に、意思決定を時刻 $t$ にて行う場合の式を示す。

#### a) $t$ 期の効用

状態 $s_t$ から $s_{t+1}$ に遷移する際の即時効用 $u(s_{t+1}|s_t)$ は確定項 $v(s_{t+1}|s_t)$ と誤差項 $\varepsilon$ の和で表される。

$$u(s_{t+1}|s_t) = v(s_{t+1}|s_t) + \varepsilon_{s_t s_{t+1}} \quad (5)$$

状態 $s_t$ の非補償的な選択枝集合を $C_{det}(s_t)$ と記述し、割引率を $\beta$ 、状態 $s_{t+1}$ から得られる将来期待効用を $F(s_{t+1})$ としたとき、 $s_t$ の期待効用 $V(s_t)$ は式(6)と表される。

$$V(s_t) = E \left[ \max_{s_{t+1} \in C_{det}(s_t)} [v(s_{t+1}|s_t) + \beta F(s_{t+1}) + \varepsilon_{s_t s_{t+1}}] \right] \quad (6)$$

誤差項 $\varepsilon$ に i.i.d.ガンベル分布を仮定すると、終端時刻を $T$ として、式(6)は以下のように変形できる。

$$V(s_t) = \begin{cases} \log \sum_{s_{t+1} \in C_{det}(s_t)} e^{v(s_{t+1}|s_t) + \beta F(s_{t+1})} & s_t \neq s_T, \\ 0 & s_t = s_T. \end{cases} \quad (7)$$

#### b) $t + 1$ 期以降の効用

表記の簡便化のため、以降 $t_k = t + k$ を用いる。

$t + 1$ 期以降の選択枝集合は不確実なため、期待将来効用 $F(s_{t_1})$ の算出時には遷移可能性を確率的に扱う。状態 $s_{t_1}$ から $s_{t_2}$ への遷移可能確率 $\rho(s_{t_2}|s_{t_1})$ 、誤差項 $\sigma$ を用いて、状態 $s_{t_1}$ から $s_{t_2}$ への遷移の即時効用 $\tilde{u}(s_{t_2}|s_{t_1})$ を式(8)と表す。

$$\tilde{u}(s_{t_2}|s_{t_1}) = \rho(s_{t_2}|s_{t_1})v(s_{t_2}|s_{t_1}) + \sigma_{s_{t_1} s_{t_2}} \quad (8)$$

状態 $s_t$ からの遷移の全候補を $C_{all}(s_t)$ としたとき、 $s_{t_1}$ から得られる期待将来効用 $F(s_{t_1})$ は

$$F(s_{t_1}) = E \left[ \max_{s_{t_2} \in C_{all}(s_{t_1})} [\rho(s_{t_2}|s_{t_1})\{v(s_{t_2}|s_{t_1}) + \beta F(s_{t_2})\} + \sigma_{s_{t_1} s_{t_2}}] \right] \quad (9)$$

と表され、 $\sigma$ に i.i.d.ガンベル分布を仮定すると、式(10)と

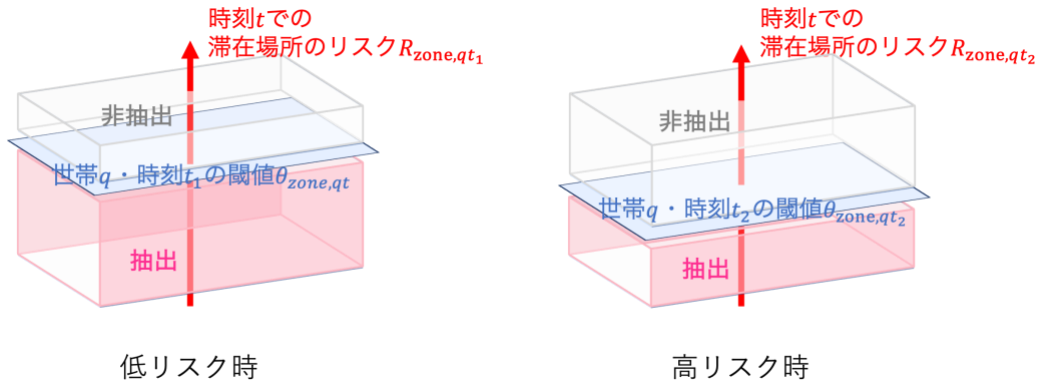


図-2 選択枝集合形成モデルの概念図

変形できる.

$$F(s_{t_1}) = \begin{cases} \log \sum_{s_{t_2} \in C_{\text{all}}(s_{t_1})} e^{\rho(s_{t_2}|s_{t_1})\{v(s_{t_2}|s_{t_1})+\beta F(s_{t_2})\}} & s_{t_1} \neq s_T, \\ 0 & s_{t_1} = s_T. \end{cases} \quad (10)$$

全ての避難滞り場所候補に対し、選択枝集合に含まれる確率 $\rho$ を効用に乗ずる。これにより、非現実的な候補からの効用を割り引き、確率的な選択枝集合形成を表現している。これは Manski(1977)<sup>10</sup>と同様の半補償型の枠組みといえる。

遷移可能確率 $\rho(s_{t+1}|s_t)$ は $s_{t+1}$ が $s_t$ の選択枝集合から棄却されず、選択枝に留まる確率である。Rust(2016)<sup>11</sup>は対象の問題が継続する確率 survival probability について言及し、時刻ごとの変数として定義した。本研究における遷移可能確率 $\rho$ は状態遷移ごとに定義され、survival probabilityの拡張といえる。同様の概念を実際の問題に適用した既往研究は筆者らの知る限り、ライドヘイリングに適用した Urata et al.(2021)<sup>12</sup>のみである。

c) 遷移確率

状態 $s_t$ から $s_{t+1}$ に遷移する確率 $p(s_{t+1}|s_t)$ は誤差項に i.i.d.ガンベル分布を仮定するため、Logit モデルの形式で表される。

$$p(s_{t+1}|s_t) = \frac{e^{v(s_{t+1}|s_t)+\beta F(s_{t+1})}}{\sum_{s'_{t+1} \in C_{\text{det}}(s_t)} e^{v(s'_{t+1}|s_t)+\beta F(s'_{t+1})}} \quad (11)$$

意思決定時には非補償的に選別した選択枝集合を用いるため、 $p(s_{t+1}|s_t)$ の分母は $C_{\text{det}}(s_t)$ に関する和だが、 $F(s_{t+1})$ は式(10)の通り $C_{\text{all}}(s_{t+1})$ に関するログサムであり、通常の再起的な動的計画問題の構造とは異なることに留意が必要である。

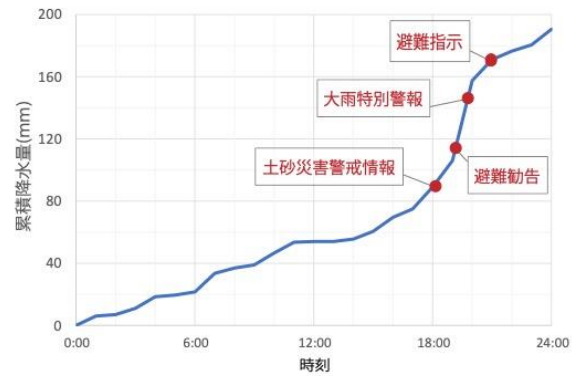


図-3 7月6日呉市の累積雨量と各種災害情報の発令時刻

表-1 調査概要

調査年月	2019年1月
対象地域	呉市天応地区
世帯数	163世帯
調査方法	郵送調査
調査内容	世帯票、住宅票、避難行動票
避難行動票調査項目	7月6日15時から7月7日12時までの行動、当日の警報等の情報入手、当日の他者との連絡の取り合い、避難先の候補

4. 実証分析

平成 30 年 7 月豪雨における呉市天応地区のデータを用いて、前述のモデルによる実証分析を行う。

(1) データ概要

平成 30 年 7 月豪雨は前線及び台風 7 号によって引き起こされた大雨等を指し、西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な大雨となった。本研究で分析対象とした呉市では、12, 24, 48, 72 時間降水量で観測史上 1 位を更

表-2 パラメータ推定結果：選択肢集合形成モデル

		説明変数	パラメータ値	t 値	
ゾーンリスク	閾値	世帯人数	-0.26	-2.99	**
		累積雨量(mm./1000)	-1.90	-3.41	**
	リスク	標高(m./10)	0.30	2.64	**
		川からの距離(m,log)	-0.27	-3.69	**
		天応支所(10)	-0.71	-0.05	
		広島/呉発	1.31	3.16	**
経路リスク	閾値	世帯人数	0.42	3.36	**
		現在の標高(m./100)	-0.20	-2.08	*
	リスク	川渡る-車保有	1.64	4.10	**
		川渡る-車無保有	0.96	2.83	**
		距離(川渡らない)(m,log/10)	1.13	2.35	*
		広島/呉発	-2.29	-3.57	**
		サンプル数		418	
初期対数尤度		-203.75			
最終尤度		-156.93			
		尤度比		0.239	
		修正済み尤度比		0.181	

\*5%有意, \*\*1%有意

表-3 避難滞在所選択モデル最終尤度比較

静的/動的 選択肢集合	静的		動的	
	1. 全候補	2. 候補限定	3. 全候補	4. 候補限定
最終尤度	-257.74	-207.17	-245.14	-198.61

新した<sup>注1)</sup>。図-3は7月6日の呉市の累積雨量<sup>注2)</sup>と各種災害情報の発令時刻<sup>注3)</sup>を示す。20時台に降水量が急激に増加した。

用いる避難行動データは、東京大学復興デザイン研究体、復建調査設計(株)が協力し、呉市が実施したアンケート調査である。その概要を表-1に示す。発災から半年経過した2019年1月に、発災当日の行動や、他者との連絡の取り合い、避難先の候補が調査された。

選択肢集合形成モデルでは、実際に避難した場所以外に候補を検討した世帯を対象に、検討時刻と避難した時刻の二時点のデータを用いた。避難しなかった理由が危険性や移動手段に関わる場合、避難時刻においては選択肢から除外されているとした。一方滞在の快適性の低さが原因の場合避難時刻にも選択肢に含まれていたとした。

動的避難滞在所選択モデルでは、7月6日15時から21時までの行動が得られた127世帯の行動データを分析対象とし、30分ごとに意思決定を行うと仮定した。

## (2) パラメータ推定

避難行動データを用いてパラメータ推定を行い、その

結果を考察する。動的避難滞在所選択モデルで採用した候補集合サンプリングや将来効用の近似については付録を参照されたい。

### a) 選択肢集合形成モデル

まず、3(1)で定式化した選択肢集合形成モデルのパラメータ推定結果を表-2に示し考察する。パラメータは天応支所を除き全て5%有意、ないしは1%有意となり、妥当な符号が得られた。

閾値のパラメータから整理する。ゾーンリスクの閾値は世帯人数の増加、雨量の累積と共に低下する。大人数での滞在を不利に感じ、雨量が累積するとリスクを危険と捉えやすいことを意味する。経路リスクの閾値は世帯人数が少ないとき、意思決定時の標高が高いときに小さい。少人数での移動や、土砂災害等の危険性から山側を発する移動は危険と捉えやすい。

次にゾーンリスクのパラメータに着目すると、標高が高い、川に近い滞在場所はリスクが高い。経路リスクのパラメータでは、川を渡る移動や長距離移動のリスクが高い。尚、車を保有する世帯の方がリスク感度が高い結果となったが、使用データの基礎集計から車無保有世帯

表-4 パラメータ推定結果：動的避難滞在場所選択モデル

説明変数	従来(DRL)モデル		提案モデル	
	パラメータ値	t 値	パラメータ値	t 値
自ゾーン*自宅	2.40	3.04 **	1.81	2.55 *
自ゾーン*自宅以外	2.07	2.52 *	1.48	2.00 *
not 自ゾーン*親戚知人	1.67	3.61 **	1.45	3.15 **
避難所収容人数 (人, ln/10)	0.23	1.67	0.15	1.38
移動距離*車保有(m,ln)	-0.36	-3.25 **	-0.28	-2.73 **
移動距離*車無保有(m,ln)	-0.42	-3.54 **	-0.33	-2.95 **
割引率	0.92	12.34 **	0.90	9.18 **
サンプル数		1651		1651
初期尤度 $LL(0)$		-2859.91		-1373.84
定数項のみ最終尤度 $LL(C)^a$		-312.19		-248.11
最終尤度 $LL$		-245.14		-198.61
修正済み尤度比( $LL(0)$ )		0.912		0.850
修正済み尤度比( $LL(C)$ )		0.196		0.175

\*5%有意, \*\*1%有意

<sup>a</sup>説明変数は自ゾーンダミーのみ, 動的モデルの割引率は推定値

の大半は独居世帯である。その閾値が既に小さいためだと考えられる。

#### b) 動的避難滞在場所選択モデル

次に、動的避難滞在場所選択モデルの推定結果を考察する。4つのモデルの最終尤度比較を表-3に示す。モデル1,2では、静的な多項ロジットモデルを連続的に用いた。モデル1では全候補を同等に扱い、2では非補償的に選択肢集合を形成した後に選択を行った。モデル3,4は将来効用を考慮した動的モデルである。モデル3は選択肢集合を考慮しないDRLモデル、モデル4が3(2)の提案モデルである。静的モデルに比べ、動的モデルでは高い最終尤度が得られた。これにより静的モデルを連続的に扱うのでは不十分であり、将来効用を考慮した選択構造の妥当性が示された。また、提案モデル4が最も最終尤度が高い上、モデル2も3と比較して高い。静的であっても選択肢集合を考慮したモデルが、従来の動的モデルよりも優れる結果は、選択肢集合考慮の重要性を指し示す。

モデル3,4のパラメータ推定結果を表-4に示す。表-4上の定数項のみ最終尤度  $LL(C)$ は、自ゾーンダミーのみを説明変数とし、割引率は推定値で固定し尤度最大化した際の最終尤度である。本研究では時系列上の選択を扱うため、移動せず滞在を選択するサンプルが多い。そのため、滞在パラメータを考慮すると初期尤度からモデル尤度が大きく上がるのは自明である。そこで比較対象として自ゾーンダミーのみのモデルを用いた。説明変数のパラメータを考察する。パラメータの正負は全て妥当であり、避難所収容人数を除き5%、ないしは1%有意とな

った。自ゾーンに留まるパラメータは正で有意であり、自宅が他より高いため自宅滞在の効用が高いことを示す。親戚知人宅への移動も正に有意であるが、自ゾーンに留まるパラメータよりも低く、慣性的な選好が伺える。避難所収容人数は、呉市避難所一覧<sup>注4)</sup>記載の人数を設定した。パラメータは有意ではないが正であり、より大きな避難所が望ましいことを示し、正の外部性が働いている可能性がある。移動距離のパラメータは負で有意であり、長距離の移動の忌避を示す。また、車を保有しない世帯の方が感度が高い。これらの説明変数により、移動距離や将来の選択肢に影響する空間的立地と、滞在の快適性ととのトレードオフ考慮した選択が表現される。

本節では推定結果の考察を行い、静的モデル・従来モデルとの比較から提案モデルの妥当性を示した。リスク下において滞在場所候補の到達可能性を考慮することで、より正確な行動表現が可能となったといえる。

#### (3) モデルシミュレーションによる政策評価

提案モデルと推定パラメータを用いてシミュレーションを行い、その結果を考察する。

##### a) 選択肢集合配分

川沿いに立地する世帯Aの選択肢集合の時間推移の例を図-4に示す。図は、順に16:30, 18:30, 20:30の結果を示し、それぞれの累積雨量は14mm, 33.5mm, 102mmである。図-4の例では選択肢が、すなわち避難可能範囲が雨量の累積とともに狭まっている。呉市で最終的な避難指示が発令されたのは21:05である。その時には多くの世帯の認知リスクは上昇しており、天応のエリア外

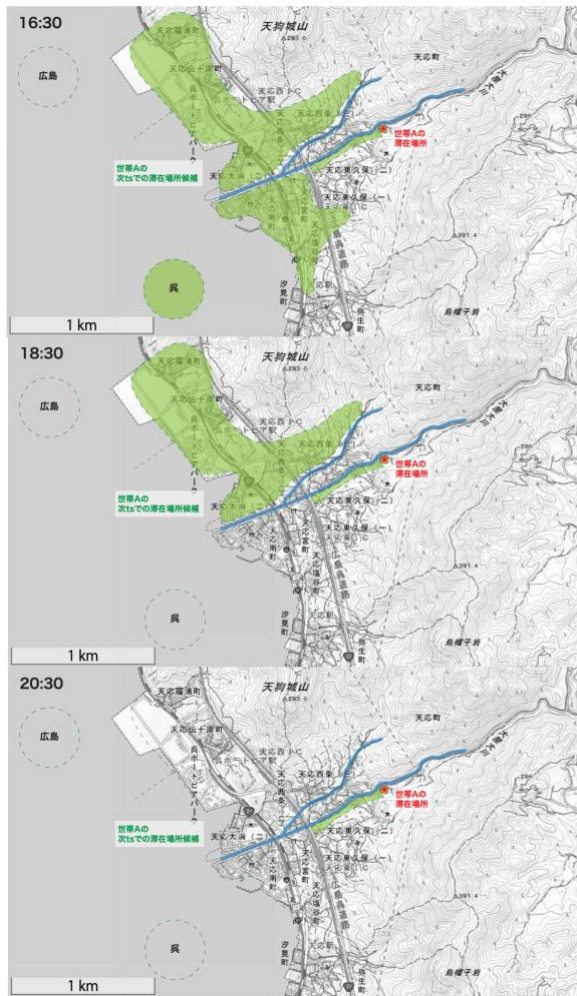


図-4 選択肢集合の時間推移例

表-5 起点ノードに滞在し続けた世帯の割合

実データ	モデルシミュレーション	
	全世帯	車なし独居世帯
滞在率	71.1%	84.9%

への避難先の多くは到達可能性が低く選択肢に含まれなかった可能性がある。

b) 避難滞り場所選択：無政策時

災害当日 15 時にいた場所から、避難滞り場所選択のシミュレーションを行う。まず無政策時、すなわち災害当時の状況を変数とした配分結果について述べる。起点ノードに滞在し続けた世帯の割合を表-5 にまとめた。実データでは 71.1%、提案モデルで 50 回シミュレーションを行った平均が 76.4% となった。滞在が高く算出されているものの、一定の再現力が示された。また、独居世帯は選択肢が少なくなりやすく、車無保有世帯は距離への感度が高く滞在を選択しやすい。車を持たない独居世帯について同様に集計すると 84.9% であった。Welch の t 検定を行うと全世帯の滞在率 76.4% とは統計的に有意な差があり、世帯特性が結果に反映されている。

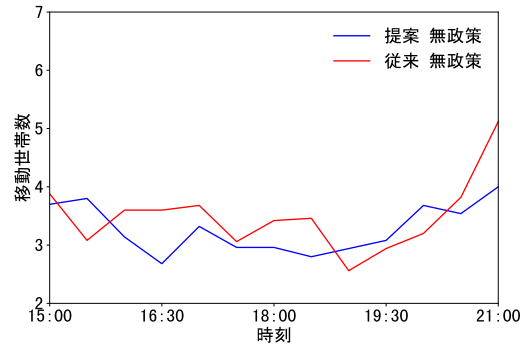


図-5 移動世帯数の時間推移の比較

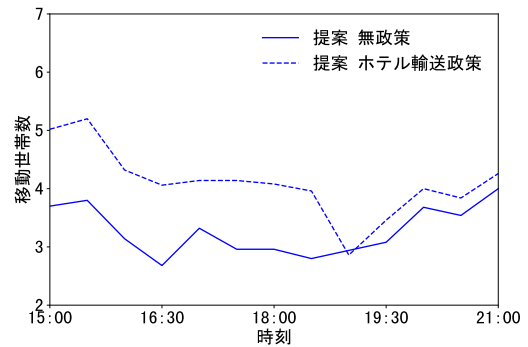


図-6a 移動世帯数の時間推移：提案モデル  
政策有無の効果

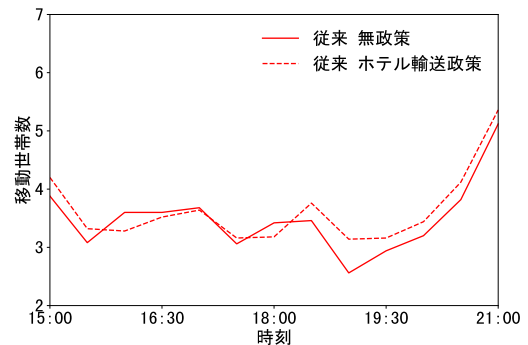


図-6b 移動世帯数の時間推移：従来モデル  
政策有無の効果

図-6 移動世帯数の時間推移：モデル・政策有無比較

選択肢を考慮しない従来の DRL モデルと提案モデルのシミュレーション結果を比較する。50 回ずつシミュレーションを行い、移動世帯数の時間推移の平均を図-5 で比較する。赤線で示した従来モデルでは、移動が高リスクな遅い時間帯に多くの移動が予測されている。推定結果や図-4 の例から、時間経過により選択肢は縮小傾向である。従来のモデルでは到達不可能な滞り場所が排除されないために、非現実的な移動が予測される恐れがある。

c) 避難滞り場所選択：ホテル避難促進政策

宿泊事業者や交通事業者と自治体との災害協定の締結

表-6 条件設定

選択肢集合*	天応支所ゾーンから呉ゾーンが必ず含まれる
距離コスト*	天応支所ゾーンから呉ゾーンの距離パラメータが 0.5 倍
呉ゾーンの効用	避難所収容人数 426 人, 親戚知人宅の性質

\*18:30 以前に適用

が進んでいることを背景に、ホテル避難を促進する政策を考える。地域の避難所である天応支所に早期避難した世帯は呉中心部に立地するホテルへの輸送を受けられる状況とする。政策は住民へ十分に周知されており、ホテルでの滞在は従前の避難所より快適性が高いとし、表-6 のように条件設定した。

実際に上記のような政策が実施された場合、移動コストが低下し快適性も高いホテルに滞在できるため、一定の早期避難促進効果が現れるだろう。

図-6 にて移動回数の時間推移の平均値を比較する。提案モデル図-6a では、施策導入した際の波線のグラフでは、早期の移動世帯数が増加しており、移動促進がみられる。図-6b の従来モデルに着目すると、無政策、政策実施で傾向は変わっていない。従前のモデルでは、目的地への到達不可能性を改善する施策等が評価できないことがわかる。尚、効果の程度については SP 調査等により選好の強さを調査した上で考察する必要がある。

## 5. 結論

### (1) 本研究の成果

本研究では、認知リスクに応じ到達不可能な候補を非補償的に排除した選択肢集合から、次時期の避難滞り場所を選択するモデルを提案した。従来の避難研究で看過されてきた目的地への到達不可能性を考慮した選択構造でより正確な行動表現が可能となった。また、既存の避難目的地選択では空間特性により効用を定義していたが、提案モデルでは滞在性と空間特性とのトレードオフにより選択される。

平成 30 年 7 月豪雨における呉市天応地区の避難行動調査を行い、実証分析を行った。推定の結果、選択肢集合を考慮しない従来の DRL モデルと比較して提案モデルの最終尤度が大きく向上し、提案モデルの妥当性を確認した。また、推定パラメータを用いたシミュレーションを行い、高リスク時の避難が予測されうること、到達不可能性の向上等の政策評価が行えないなど、従来モデ

ルで生じうる問題点を指摘した。

### (2) 今後の展望

本モデルの妥当性をさらに検証するため、他地域の避難行動に対する適用が求められる。複数地域における適用比較により、普遍的な特徴と地域特有の避難や志向性の特徴が分離できるであろう。地域の避難計画に活用していくためには、パラメータの安定性、有効性の確認も不可欠となる。

本研究の発展可能性として世帯間の相互作用の表現が挙げられる。世帯のリスク認知は災害初期にはばらつきが大きい、相互作用により次第に揃っていくと考えられる。このような構造を選択肢集合形成の機構として採用することで多様な行動表現が可能となる。避難移動先の選定においても他世帯との関係性を考えるのが合理的である。相互作用の表現によって、より災害時の実情を表すモデルへの発展が望めるであろう。

謝辞：本研究の避難行動データは、呉市、復建調査設計、東京大学の植田瑞貴氏（当時）の協力により、収集された。ここに謝意を示します。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19H00784 の助成を受けたものです。

## 付録 I 候補集合サンプリング

天応地区での実装においては、2 つの河川（大屋大川、背戸ノ川）により 3 つのエリアにわけ、エリア内で幹線道路、標高差などの空間的障壁でゾーン分けした。滞在場所ゾーン  $i$  の避難滞り場所候補集合  $X_i = \{x_{i,1}, \dots, x_{i,6}\}$  は、自ゾーン、自エリア、他エリア A、他エリア B、広島市、呉市中心部の 6 つである。

各候補には複数のゾーンが含まれるが、候補  $x_{i,k}$  に含まれるゾーンは空間的に類似しており候補ない全てのゾーンを考慮する必要がない。「ゾーン  $i$  から候補  $x_{i,k}$  への遷移」が「ゾーン  $i$  からゾーン  $j$  への遷移」となるようサンプリングを行う。

候補  $x_{i,k}$  に含まれるゾーン集合を  $J_{i,k}$  と記述したとき、 $j \in J_{i,k}$  がゾーン  $i$  の  $k$  番目の候補としてサンプルされる確率  $P_{\text{sample},i,k}(j)$  を、

$$P_{\text{sample},i,k}(j) = \frac{\rho(j|i)}{\sum_{j' \in J_{i,k}} \rho(j'|i)} \quad (11)$$

と定義する。

## 付録 II 将来効用の近似

将来効用は後ろ向き帰納法にて計算される。最終時刻から計算を始めると、実証分析では 6 時間半の将来全てを見通せることになる。不確実性の大きい災害時を扱って

表-6 ステップ数による最終尤度比較

ステップ数	0 (Static)	...	6	7	8	...	13 (Full)
最終尤度	-207.18		-200.02	-198.61	-198.82		-199.39

いるためこれは非現実的な仮定であり，2，3 時間程度しか考慮していないと仮定する。

一方，各世帯は3時間先の効用を0とはせず何らか近似してるはずであろう。3 時間席の将来効用の不確実性を表現する方法として，静的モデルを推定し得られたパラメータにて効用を近似する方法を採用した。その他の方法として mixed logit モデルなど不確実性を表す分布を与える方法がある。

静的モデルでは将来効用として得られるはずの効用も各パラメータに反映されるが災害の進行とともに行動は変化する。そのため4つの時間帯に分けて推定を行う。早期のパラメータには将来効用が多く反映されており，「平時」に近い行動を示すが，後期のパラメータに反映される将来は短く，また「非常時」の行動を表す。

ステップ数 $n$ のモデルを採用したとき，時刻 $t$ で意思決定を行う際の将来効用の近似は

$$F(S_{t+k}) = \begin{cases} \log \sum_{S_{t+k+1}} e^{\rho(S_{t+k+1}|S_{t+k})\{v(S_{t+k+1}|S_{t+k})+\beta F(S_{t+k+1})\}} & k < n, \\ \log \sum_{S_{t+k+1}} e^{\rho(S_{t+k+1}|S_{t+k})\{\bar{v}(S_{t+k+1}|S_{t+k})\}} & k = n \end{cases} \quad (12)$$

のように行う。ここで $\bar{v}(S_{t+k+1}|S_{t+k})$ は即時効用を静的モデルの推定パラメータを用いて計算したものである。ステップ数による最終尤度を表-6 で比較すると，7 で最大であり，これを採用した。7 ステップは3時間半に相当するが，各種雨雲レーダーなども3時間以降は予測が曖昧になることと整合する。

## NOTES

- 注1) 気象庁. 災害をもたらした気象事例 平成 30 年 7 月豪雨 (前線及び台風第 7 号による大雨等), [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun\\_sokuji20180628-0708.pdf](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf), (2022 年 2 月 20 日閲覧)
- 注2) 気象庁. 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2022 年 2 月 20 日閲覧)
- 注3) 呉市災害対策本部. 平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について (第 66 報), <https://www.city.kure.lg.jp/uploaded/attachment/33744.pdf> (2022 年 2 月 20 日閲覧)
- 注4) 呉市情報統計課. 呉市避難所一覧,

<http://linkdata.org/work/rdf1s3507i> (2022 年 2 月 23 日閲覧)

## REFERENCES

- 1) Parady, G. T. and Hato, E.: Accounting for spatial correlation in tsunami evacuation destination choice: a case study of the great east japan earthquake. *Natural Hazards*, Vol. 84, pp. 797-807, 2016.
- 2) Fu, H. and Wilmot, C. G.: Sequential Logit Dynamic Travel Demand Model for Hurricane Evacuation. *Transportation Research Record*, Vol. 1882, pp. 19-26, 2004.
- 3) Gudishala, R. and Wilmot, C. G.: Comparison of Time-Dependent Sequential Logit and Nested Logit for Modeling Hurricane Evacuation Demand, *Transportation Research Record*, Vol. 2312, pp. 134-140, 2013.
- 4) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時空間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適計画モデルの構築, 土木学会論文集, Vol. 72, No. 5, pp. I\_683-I\_694, 2016. [Ando, H., Kurauchi, F., Sugiura, S.: Link-based optimal tsunami evacuation planning model using STEN(Space-time extended network), *Proc. Of JSCE*, Vol. 72, No. 5, pp. I\_683-I\_694, 2016.]
- 5) Pel, A. J., Bliemer, M. C. J. and Hoogendoorn, S. P.: A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, *Transportation*, Vol. 39, pp. 97-123, 2012.
- 6) Mesa-Arango, R., Hasan, S., Ukkusuri, S.V. and Murray-Tuite, P.: Household-level model for hurricane evacuation destination type choice using hurricane ivan data, *Natural Hazards Review*, Vol. 14, pp. 11-20, 2013.
- 7) Cheng, G., Wilmot, C. G. and Baker, E. J.: A destination choice model for hurricane evacuation. In *Proceedings of the 87th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington DC, USA*, pp. 13-17, 2018.
- 8) 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, 2016 年 16 巻 5 号, pp. 46-55, 2016. [Takada, K., Fujiu, M., Ohara, M., Yamashita, T. and Konno, T.: Estimation of Disaster Evacuation Behavior Model using Stated Preference Data, *Journal of JAEE*, Vol. 16, pp. 5\_46-5\_55, 2016.]
- 9) 飯塚卓哉, 羽藤英二: 津波避難データの 2 つの解答バイアスに着目した動的活動経路モデルの推定手法, 都市計画論文集, Vol. 55, No. 3, pp. 682-689, 2020. [Iizuka, T., Hato, E.: Estimation of Dynamic Activity Path Choice Model Correcting the Two Biases of Tsunami Evacuation Data, *Journao of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 55, No. 3, pp. 682-689, 2020.]
- 10) Manski, C. F.: The structure of random utility models, *Theory and Decision*, Vol. 8, pp. 229-254, 1977.
- 11) Swait, J. and Ben-Akiva, M.: Incorporating random constraints in discrete models of choice set generation, *Transportation Research Part B*, Vol. 21, pp. 91-102, 1987.
- 12) Basar, G. and Bhat, C.: A parameterized consideration set model for airport choice: an application to the san francisco bay area, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 38, pp. 889-904, 2004.
- 13) 森川高行, 竹内博史, 加古裕二郎: 定量的観光魅力

- 度と選択肢集合の不確実性を考慮した観光目的地選択分析, 土木計画学研究・論文集, 1991年9巻, pp. 117-124, 1991. [Morikawa, T., Takeuchi, H. and Kako, Y.: Destination choice analysis of vacation trips considering attractiveness of regions and probabilistic choice sets, *Infrastructure Planning Review*, Vol. 9, pp. 117-124, 1991.]
- 14) Kaplan, S., Bekhor, S. and Shifan, Y.: Development and estimation of a semi-compensatory residential choice model based on explicit choice protocols, *The Annals of Regional Science*, Vol. 47, pp. 51-80. 2011.
- 15) 吉田朗, 原田昇: 選択肢集合の確率的形成を考慮した集計型目的地選択モデルの研究, 土木学会論文集, No. 618/IV-43, pp. 1-13, 1999. [Yoshida, A. and Harata, N.: Aggregate destination choice models incorporating probabilistic formation of a choice set, *Proc. of JSCE*, No. 618/IV-43, pp. 1-13, 1999.]
- 16) Rust, J.: Dynamic programming, *The New Palgrave Dictionary of Economics*, pp. 1-26. 2016.
- 17) Urata, J., Xu, Z., Ke, J., Yin, Y., Wu, G., Yang, H. and Ye, J.: Learning ride-sourcing drivers' customer-searching behavior: A dynamic discrete choice approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 130, p. 103293. 2021.

## DYNAMIC EVACUATION LOCATION CHOICE WITH SHRINKING CHOICE SET ACCORDING TO PERCEIVED RISK

Aiko KONDO, Junji URATA and Eiji HATO

Past evacuation studies have overlooked the unreachability of destinations and may predict evacuations to destinations that are unreachable under high risk. To address such issues, we propose a dynamic evacuation location choice model incorporating non-compensatory choice set formation according to perceived risk. To account for the uncertainty in growing disaster risk, future alternatives are multiplied their survival probabilities. These enable us to express a realistic decision-making process of preference associated with staying in evacuated locations and of avoidance of small choice sets. The model performance is confirmed on behavioral data of Tenno, Kure in 2018 heavy rain disaster. The importance to account for unreachability of destinations during evacuations was demonstrated through examining transition of choice sets over time and policy simulations.