

# 来街者の選好特性を考慮した 津波避難誘導システムの提案と効果

一瀬 恭平<sup>1</sup>, 鳩山 紀一郎<sup>2</sup>, 佐野 可寸志<sup>3</sup>, 松田 曜子<sup>4</sup>

1 非会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
Email:s153311@stn.nagaokaut.ac.jp

2 正会員 長岡技術科学大学 産学融合トップランナー育成センター (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
Email:kii@vos.nagaokaut.ac.jp

3 正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
Email:sano@vos.nagaokaut.ac.jp

4 正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
Email:ymatsuda@vos.nagaokaut.ac.jp

## 1. はじめに

### (1) 背景

日本は地震の多い島国であり、それに伴う津波被害を受けてきた。現在も南海トラフで想定されている津波被害が懸念されており、津波防災対策の大きな課題となっている。南海トラフ地震などの津波被害の発生が危惧されている地域では、ハード対策では、津波の威力を低減、または津波を抑え込むための海岸堤防・護岸や防波堤の整備、ソフト対策では、海岸堤防などの効果を考慮した上で、津波浸水想定区域の範囲を示す津波ハザードマップの策定や、津波避難計画の策定などを行っている。しかしながら、これらの対策は主に地域住民を対象とした対策が多く、観光などの目的で一時的に訪れている来街者を対象としたものではない。また、来街者が地域の道路や避難場所などの知識は薄いことが考えられるため、津波発生時に現在いるところから避難することができる避難場所や経路が分からないといった状況にある。

来街者が利用することのできる津波対策の中には津波避難支援アプリケーションがある。現在公

開されている津波避難支援アプリケーションの主な機能としては、災害速報の通知、避難場所のリスト表示、安否確認の送受信機能などがある。また、災害時の避難経路については、最短経路の避難施設へ案内を行う手法をとっている。土地勘のない来街者に避難経路を伝達する場合、経路の情報を伝達する確実性が重要であると考え。そのため、地図と経路を同時に認知でき、身近に所持している可能性の高い携帯端末による情報伝達は有効であると考え。

### (2) 本研究の位置づけと研究目的

津波避難に関する研究では複数あり、山田ら<sup>1)</sup>は、徒歩による津波避難者の行動モデルをモデル化することで、避難圏域を示した。避難施設の選択は避難する方向、距離、施設階数が主な要因として挙げられることを示した。津波避難計画の作成支援という面では、中居ら<sup>2)</sup>の津波避難評価システムの構築が挙げられる。マルチエージェントシミュレーションと呼ばれるシミュレーション手法を使うことで住民の行動をエージェントとした津波避難シミュレーションを実行し、津波避難計画への評価を行うものである。平松ら<sup>3)</sup>の研

究では、東日本大震災において避難者の半数以上が自動車を利用していたという事実から、自動車避難の方針設計について検討を行っている。しかしながら、来街者を対象として津波避難誘導を行う有効的なシステムについては十分に検討されていない。

次に、避難時における経路選択に関する研究では、佐藤ら<sup>4)</sup>の来街者を対象とした口頭のインストラクションや津波避難誘導サインの効果に関する研究を行ったものがある。口頭のインストラクションでは伝えられる情報に限りがあり、目的地としては距離の長さではなく、経路の単純さが望ましいことが分かっている。また、前項の山田ら<sup>1)</sup>の研究では、津波避難者の行動モデルにおける避難施設の選択には避難する方向、距離、施設の階数が主な要因として挙げられることを示した。竹上ら<sup>5)</sup>は、歩行者の経路選択行動に影響を及ぼす要因を「経路長」、「歩行環境」、「空間的方位」、「歩行者属性」とし、その内、歩行者が空間的位置を認識しながら歩いているときの行動特性のことを表す空間的方位に着目し、目的地が自身の進行方向と比較する目的地指向性及び自身の進行方向を保持しようとする方向保持性が行動選択にどのように影響するかを調査し、経路選択モデルを構築した。大佛ら<sup>6)</sup>の研究では、経路選択を「経路長」、「歩行環境」、「空間的方位」、「歩行者属性」に加えて道路の右左折の階数である「ターン回数」が要因であるとし、地図を見た場合における経路選択についてどの要因を重視しているかを調査している。ここでは、グリッド状の道路と複雑に入り組んだ道路で結果が変わり、グリッド状道路ではターン回数と道路幅員の影響が強く、複雑な道路の形状では道路幅員と目印となる施設の影響が強いことが分かった。以上のことから、経路選択は現在の津波避難支援アプリケーションである最短経路による誘導法では、個人の経路選択行動に合わないことが分かる。

以上のようなことから、来街者を対象とした津

波避難を支援するシステムを開発することには一定の意義があるものと考えられる。そして、支援を行うシステムは、不特定多数に情報を確実に伝達し、それが個人に対応した情報である必要があるため、身近に所持しているスマートフォンなどの携帯端末による情報提供が有効であると考えられる。しかしながら、現状既存の津波避難支援アプリケーションでは、避難誘導をする場合の経路探索が最短経路で行われるため、個人の選択に適した経路を選択しておらず、避難時に通る道としては好ましくない道路を案内する可能性がある。そこで本研究では、避難時における来街者の経路選択モデルの推定を行い、それをを用いることで避難誘導を行うシステムの構築をし、その有効性を検証することを目的とする。

## 2. 来街者を対象とした選好の調査・分析

### (1) 調査概要及び項目

本研究では、来街者を対象として津波避難時における経路や避難場所の選好意識について調査する。来街者は地域住民とは違い、被災した場所の道路の状況や避難場所などの避難の行動選択を行うための判断の材料を持っていない。しかしながら、来街者においても確実に逃げるができる以外でも道路状況や避難場所の状態によってはそこへ避難することに対して不安を感じるものである。そのため、単純に最短の避難場所へ最短の経路で誘導することは、来街者にとっても不安のある誘導法であると考えられる。今回は仮想的に2種類の避難ルートを候補として出し、どちらのルートで避難したいと思うかを回答するSP(選好意識: Stated Preferences)調査を実施し、選好意識を明らかにすることで津波避難時における避難経路および避難場所の選択モデルを構築する。

アンケートは、Web アンケートで実施し、調査対象を自力で歩行が可能な人とし、年齢層、性別

ともに均等な人数のサンプルをとった。設問内容は誘導ルートについてどちらが好ましいかをきく二肢選択問題のほか、個人属性として、年齢、性別、居住地方、過去に地震や津波などの災害から避難した経験があるか、自力で歩行が可能か、海へ行く頻度について回答をもらった。

## (2)SP 調査の設計

アンケート調査は実験計画法に基づいて水準値を設定した。変数については、竹上ら<sup>5)</sup>、大佛ら<sup>6)</sup>の研究より、経路選択に影響を与える要因として「経路長」、「歩行環境」、「空間的定位」、「歩行者属性」、「ターン回数」があげられている。また、山田ら<sup>1)</sup>の研究では、避難施設の選択には「避難する方向」、「距離」、「施設の階数」が主な要因であるとされている。以上の既存研究から本研究における要因を選定し、その水準についても設定を行った。表-1 に選定した要因とその水準値を示す。

プロフィールの作成については、実験計画法の内、ペアワイズ法を用いてテストケース生成を行った。表-2 にテストケース生成のパターンについて示す。このテストケースの3因子間網羅率は95.6%であった。

表-1 選定要因と水準値

属性		要因	水準		
高台	道路	避難時間[分]	10		
		ターン回数[回]	8	5	
		狭幅員道路	含む	含まない	
	避難場所	混雑度	混みやすい	混みにくい	
		避難方向[度]	60	30	
津波避難	道路	避難時間[分]	7	4	
		ターン回数[回]	5	2	
		狭幅員道路	含む	含まない	
タワー	避難場所	混雑度	混みやすい	混みにくい	
		避難方向[度]	30	-30	-60

## (3)調査結果

Web アンケート調査の回収結果は320であったが、有効サンプル数は317であった。年齢、性別については偏りが内容に調査を行ったため、均等にサンプルをとることができた。また、居住地方についても人口の多い関東、近畿地方に偏りを見せているが、全地域から回答を収集できた。避難した経験の有るうち、一番多い回答は地震による避難した経験であった。これは津波や洪水といった災害よりも被害に合う可能性のある地域の対象が多いために経験した人が多いと考えられる。また、その他の回答では大雨によって避難したという回答があった。各設問における回答の選択割合を表-3 に示す。

表-2 テストケース生成結果

No.	高台 避難時間	タワー 避難時間	高台 ターン回数	タワー ターン回数	高台 幅員	タワー 幅員	高台 混雑度	タワー 混雑度	高台 避難方向	タワー 避難方向	高台 狭幅員道路	タワー 狭幅員道路
1	10	4	5	2	含まない	含む	混みやすい	混みにくい	30	-60	0	1.456
2	10	4	5	5	含まない	含む	混みにくい	混みやすい	30	-60	0	1.236
3	10	4	5	2	含む	含まない	混みにくい	混みやすい	60	30	1.82	0
4	10	4	8	2	含まない	含む	混みにくい	混みやすい	60	-30	0	1.112
5	10	7	5	5	含まない	含まない	混みやすい	混みにくい	60	-30	0	0
6	10	7	5	2	含まない	含む	混みにくい	混みにくい	60	30	1.95	0
7	10	7	8	5	含む	含まない	混みにくい	混みやすい	60	30	0	1.799
8	10	7	8	5	含む	含まない	混みやすい	混みにくい	30	-30	1.54	0
9	10	4	5	5	含まない	含む	混みにくい	混みやすい	60	30	0	1
10	10	4	5	2	含む	含まない	混みにくい	混みにくい	60	-30	1.76	0
11	10	4	5	5	含まない	含まない	混みやすい	混みにくい	60	30	0	0
12	10	4	8	2	含む	含まない	混みにくい	混みやすい	30	-60	1.48	0
13	10	7	5	2	含まない	含まない	混みにくい	混みやすい	30	-30	0	0
14	10	7	5	5	含む	含まない	混みにくい	混みにくい	30	-60	1.62	0
15	10	7	8	2	含まない	含む	混みやすい	混みにくい	60	30	0	1.799
16	10	7	8	5	含まない	含む	混みにくい	混みにくい	30	-30	0	1.729

表-3 各設問の選択割合

質問番号	ルート①	ルート②
1	74.1%	25.9%
2	91.8%	8.2%
3	69.0%	31.0%
4	90.5%	9.5%
5	69.0%	31.0%
6	86.7%	13.3%
7	70.9%	29.1%
8	55.7%	44.3%
9	85.5%	14.5%
10	56.6%	43.4%
11	42.8%	57.2%
12	71.1%	28.9%
13	91.2%	8.8%
14	66.0%	34.0%
15	59.7%	40.3%
16	87.4%	12.6%

(4)行動選択モデルの作成

Web アンケート調査から得られた結果から、行動選択モデルを作成する。今回は二項ロジットモデルによるモデル式を採用した。

<モデル式>

$$P_n(i) = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in J_n} \exp(V_{jn})} \quad \dots(1)$$

ここで、

$P_n(i)$  : 個人 n が利用可能な選択肢集合 ( $J_n$ ) から選択肢 i を選ぶ確率

$V_{jn}$  : 各選択肢の効用確定項

$V_{in}$  : 選択肢 i の効用確定項

<効用確定項>

$$V_1 = \alpha_1 x_{11} + \alpha_2 x_{21} + \alpha_3 x_{31} + \alpha_4 x_{41} + \alpha_5 x_{51} + \alpha_6 x_{61} + \alpha_7 x_{71} + \alpha_8 x_{81} + \alpha_9 x_{91} + \alpha_{10} \quad \dots(2)$$

$$V_2 = \alpha_1 x_{12} + \alpha_2 x_{22} + \alpha_3 x_{32} + \alpha_4 x_{42} + \alpha_5 x_{52} \quad \dots(3)$$

ここで、

$V_j$  : 選択肢 j を選択したときの効用(j=1 : 高台, j=2 : 津波避難タワー)

$x_{1j}$  : 選択肢 j の避難時間[min]

$x_{2j}$  : 選択肢 j の時のターン回数[回]

$x_{3j}$  : 選択肢 j の時の狭幅員道路(幅員が狭い道路を通る時間)[min]

$x_{4j}$  : 選択肢 j の時の混雑度(1 : 混雑しにくい, 0 : 混雑しやすい)

$x_{5j}$  : 選択肢 j の時の避難方向[°]

$x_6$  : 避難経験の有無(1 : 避難経験有, 0 : 避難経験なし)  $x_7$  : 年齢[歳]

$x_8$  : 性別(1 : 男性, 0 : 女性)

$x_9$  : 歩行レベル(1 : 走ることも可能, 0 : 走ることには不安がある)

$\alpha_1 \sim \alpha_9$  : パラメータ  $\alpha_{10}$  : 定数項

なお、狭幅員道路については、経路中で細街路が含まれている区間の移動時間を基準した。

(5)パラメータ推定結果

表-4 にパラメータ推定結果を示す。調整済み尤度比が 0.2 以上であることから適合率は良いといえる。

パラメータを見ると、避難時間は長くなるほどに効用が下がり、幅員の狭い道路を通る場合は、通らない場合に比べて約 5 倍のマイナスの効用を生み出すことが分かる。避難方向の係数が正であることから海側へ逃げることへの不安感があることも確認できる。避難経験の有無では過去に避難経験がある場合の方が高台へ逃げたいと考える傾向があることが分かる。これは避難した経験から津波避難タワーなどの 1 次避難場所に対する不安が避難経験なしの場合よりも強くある影響であると考えられる。

今回の調査では、高台に逃げたいという傾向が強くみられることが分かった。しかしながら、モデルの精度については固定層による影響についてを考慮し、水準値を変えるなど SP 調査の設計が必要であると考えられる。

表-4 パラメータ推定結果

説明変数	係数	標準偏差	t値
避難時間[分]	-0.104	0.027	-3.852
狭幅員道路[分]	-0.390	0.037	-10.593
混雑度(1:混みにくい)	0.797	0.061	13.053
避難方向[°]	0.012	0.002	6.999
避難経験(1:有)	0.431	0.120	3.582
年齢[歳]	0.016	0.002	6.411
自由度	2536		
調整済み尤度比	0.2301		
的中率	73.3%		

### 3. 避難誘導アプリケーションの構築

津波避難を支援するアプリケーションを作る場合の避難誘導システム部分は、地震災害時に通信回線が切断する可能性を考慮し、携帯端末で経路探索を実行できる形式が望ましい。しかしながら、今回は行動選択モデルを用いた避難誘導システムを用いて実証実験を行うものであり、すべてオフライン上で実行できるようにするには環境構築が困難であるため、本研究では比較的環境構築が容易である手法を用いた。各機械部の機能的役割を図-1に示す。

主な機能はサーバ側と携帯端末などのクライアント側に分けることができる。サーバ側では、経路探索に必要なデータベースの管理、作成した行動選択モデルを利用した経路探索の計算、実験時の避難軌跡を記録するための位置情報の記録機能を実装した。クライアント側では、地図の表示や位置情報の取得の地図としての基本機能に追加して行動選択モデルを利用するために個人属性の入力欄、避難経路の表示をする機能を実装した。そして、サーバ側とクライアント側の通信はサーバ側からは避難経路探索結果を送り、クライアント側では、経路探索のための位置情報、個人属性の送信機能を実装した。



図-1 避難誘導アプリケーションの機能

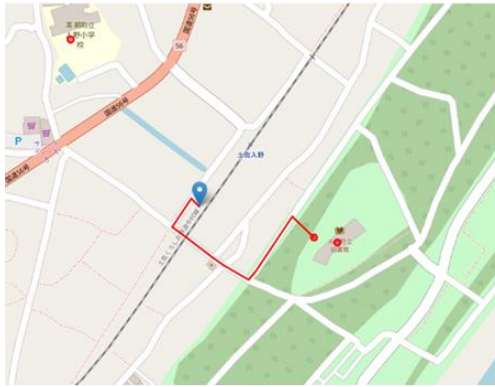
## 4. 実証実験

### (1) 実証実験概要

表-5に実証実験の概要について示す。実証実験は、作成した行動選択モデルを利用した避難誘導法と最短経路による誘導法の2種類の避難ルートを実際に移動してもらい、移動後にアンケート調査を行う。内容は、実際に移動してもらった誘導法のどちらが好ましいかを比較評価してもらう。また、実験中はGPSのログを10秒間隔でサーバに送信することで軌跡の記録を行った。図-2に本手法による誘導法と最短経路による誘導法のルートを示す。最短経路による誘導法では、南東の海側へ320m進んだ先の避難タワーへのルート、本手法による誘導では、北西の山側へ500m進んだ先の高台へ逃げるルートが提示された。

表-5 実証実験の概要

被験者	黒潮町に土地勘のない学生：20名
実験場所	高知県幡多郡黒潮町
実証実験内容	
本手法による誘導ルートと最短経路による誘導ルートを実際に歩き、どちらの誘導法が好ましいか比較評価	
アンケート調査項目	
各避難手法に対して4段階評価を行う。	
避難先までの距離・道路が災害後に通れるか 利用した道路の安心度・避難方向への安心度 道幅の広さ・避難場所が混雑しそうか	



(1) 最短経路による誘導ルート



(2) 本手法による誘導ルート

図 5-1 避難誘導アプリケーションによる誘導経路

## (2) 実験結果

実証実験のアンケート調査の結果、本手法による誘導法が最短経路による誘導法より好ましいと回答した割合は 75%であった。本手法による誘導法を好ましい回答した理由としては、「山側に逃げる事ができる」などの避難方向への安心度が大きく影響している意見が見られた。一方で最短経路による誘導法を好ましいと回答した理由では、「交差点がなかった」、「工事中の場所が近くなかった」など、本手法による誘導では設定していなかった項目が大きな理由となっていた。

一方で、行動選択モデルを今回の各誘導法の避難経路に適用した場合の本手法による誘導法の選択確率は 98.7%であった。これは実証実験の結果と大きく異なるが、これは先ほどのアンケートの結果より、設定していないかった項目が選好の理由となっているものがあり、その影響によって行動選択モデルの選択確率との差が生じたと考えられる。

## 5. 総括

本研究では来街者を対象とした避難誘導を行うシステムについて、選好意識を考慮した行動選択モデルを示し、その有効性を検証した。

選好意識調査ではアンケートを実施し、避難方向、避難時間、避難場所の混雑度、道路幅員は行動選択に影響を与える要因であることが分かっ

た。

行動選択モデルを利用した津波避難誘導アプリケーションを開発し、実証実験を行った。結果、本手法による誘導法が好ましいと回答した人が全体の 75%であった。

今後の課題としては、まず行動選択モデルの再検討がある。実証実験の結果より、今回の行動選択モデルでは設定していなかった要因によって行動選択に影響を及ぼすものがあった。これは、選好意識調査の段階では想定していなかった変数によるものであるため、変数の追加検討、および水準値の再検討が必要であると考えられる。

また、再現性の向上も上げられる。今回のパラメータ推定では、固定層による影響を考慮しておらず、必要以上に高台へ逃げる傾向が表れていることが考えられる。これは、SP 調査の設計の段階において変数の水準プロファイルの組み合わせについて、より一層の検討が必要であると考えられる。

アプリケーションの仕様についても、実装においてはオフラインでも機能するように変更するとともに、利用ユーザーにとって使いやすいデザインを設計する必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 山田崇史, 佐々木雅宏, 岸本達也:「津波避難時の避難施設選択モデルを用いた避難施設圏域の推定 一復興支援調査アーカイブによる仙台市・名取市・岩沼市の分析一」 日本建築学会技術報告集 第 22 巻 第 51 号 2016

- 2)中居楓子, 畑山満則, 矢守克也:「避難計画作成支援を目的とした津波避難評価システムの構築」 情報処理学会研究報告 Vol.2013-IS-124 No.,3 2013
- 3)鳩山紀一郎, 平松大輝:「自動車を利用した津波避難方針設計手法に関する基礎的検討」 交通工学論文集 第1巻 第2号(特集号A) pp.A\_172-A\_178 2015
- 4)佐藤翔輔, 阿部紀代子, 大塚友子, 中川政治, 皆川満洋, 岩崎雅宏, 今村文彦:「来街者の津波避難誘導をねらいにした避難行動・誘導実験とその分析—石巻市中心市街地における事例—」 土木学会論文集 B2(海洋工学) Vol.72 pp.I\_1639-I164 2017
- 5)竹上直也, 塚口博司:「空間的定位に基づいた歩行者の経路選択行動モデルの構築」 土木学会論文集 2006
- 6)大佛俊泰, 田中あずさ:「経路選択に関わる要因分析と歩行者行動のモデル化」 日本建築学会計画系論文集 2017