

# 細街路を含む観光地における 避難誘導に関するシミュレーション研究

佐橋 功一<sup>1</sup>・Jan-Dirk Schmöcker<sup>2</sup>・  
中尾 聡史<sup>3</sup>・Boaz Ben-Moshe<sup>4</sup>・山田 忠史<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 非会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: ksabashi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: schmoecker@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup> 正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: nakao@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup> 非会員 Ariel University (Ariel, 4070000, Israel)  
E-mail: benmo@g.ariel.ac.il

<sup>5</sup> 正会員 京都大学経営管理大学院 (工学研究科併任) (〒606-8317 京都府京都市左京区吉田本町)  
E-mail: yamada.tadashi.2x@kyoto-u.ac.jp

日本のような災害大国において、観光客を避難場所まで適切に誘導することは重要である。そこで、本研究では、細街路が含まれるような観光地における避難誘導施策の計画に資する知見を得ることを目的とした。観光客の避難行動を考慮するにあたって、Virtual Reality を用いた避難行動実験を行い、避難経路選択モデルを推定した。また、推定した経路選択モデルと京都市東山区を模したネットワークを基にシミュレーションを構築し、誘導条件を変更して実行した。その結果、現行の避難誘導計画では、大通りでの混雑や避難場所での収容可能人数の超過が確認された。また、避難誘導条件を変更することで、避難時間や混雑を改善できる可能性が示された。

**Key Words:** Tourists' evacuation planning, Evacuation simulation, Wayfinding, Virtual Reality

## 1. はじめに

我が国は、災害大国と呼ばれるほど、地震をはじめとした自然災害の多い国である。日本のような災害大国で観光を行う限り、観光客が被災することは往々にして起こり得る。特に、地震などの突発的に発生する災害は予測して避けることが難しく、旅行先での観光中に被災することも十分に考えられる。しかし、地震対策の多くは、地域住民に向けてなされているものであり、観光客などの非居住者に対しては対策が不足している。

Villegas et al.<sup>1)</sup>や Wachtel et al.<sup>2)</sup>が指摘するように、観光客は避難場所の所在やそこへの経路を十分に把握していないため、被害を受けるリスクが高い。そして、特に幅員が狭い道路(細街路)が入り組んでいるような観光地では、より迷いやすいものと考えられる。観光客の被害を抑制するためには、避難場所に辿り着いた後の対応だけでなく、混雑が生じやすい災害発生直後における避難行

動への対策も重要であり、避難場所まで観光客を適切に誘導することが求められる。例えば、日本を代表する観光都市である京都市では、避難誘導の指針として「帰宅困難観光客避難誘導計画<sup>3)</sup>」を策定している。この帰宅困難観光客避難誘導計画では、発災直後における観光客の安全確保のために、市から情報を提供する場所として「観光客緊急避難広場」が指定されており、地域商店街の組合などが観光客緊急避難広場までの誘導を担うこととなっている。また、避難誘導の方向と誘導を行う地点についてもあらかじめ詳細に定められている。しかし、その誘導方向と誘導員の配置地点については、十分な検証がなされているとは言い難い。

本研究では、観光客を対象に Virtual Reality (VR) を用いた避難行動実験を行い、避難経路選択モデルを構築する。そして、細街路が含まれるような観光地として京都市東山区を例にとりて避難シミュレーションを行い、避難誘導施策の計画に資する知見を得ることとする。

## 2. 既往研究と本研究での着眼点

地震災害時における観光客の避難行動を取り扱った調査には、以下のものが挙げられる。Sakai et al.<sup>4)</sup>は観光客を対象にアンケート調査を実施し、観光客の避難意識を調査した。結果、経路選択の際の意思決定において、誘導員や標識の指示を重視する傾向のあるグループに大半の観光客が属することを報告している。Sonohara et al.<sup>5)</sup>は全国の国内観光経験者を対象にサンプリング調査を行い、観光客の避難経路選択の傾向を調べたところ、誘導員や標識が示した道が最も重視されたことを報告している。以上の既往研究より、観光客は誘導員や標識が指示する方向に進むと言える。しかし、誘導員が不在の場所で観光客がどの経路を選択するかについては、災害時の実データが乏しいことから、推測が困難である。

都市規模での避難を分析する際、実規模での実験が困難であることから、シミュレーションを用いた分析が行われている。都市規模での観光客の避難誘導を検討するためのシミュレーションとして、Emori et al.<sup>6)</sup>やKinugasa et al.<sup>7)</sup>が開発したシミュレーションが存在する。これらは、観光客の最終避難場所を予め設定したものであり、交差点ごとの経路選択行動を考慮できていない。

上記の既往研究を踏まえた上で、本研究では VR を用いた実験を行い、観光客の避難経路選択モデルを構築するとともに、構築した経路選択モデルを用いて避難シミュレーションを行う。加えて、誘導方向と誘導員配置地点の条件を変更することで避難誘導施策について検討する。特に細街路を含むような観光地において、観光客の避難経路の把握とそれを基にしたシミュレーションからの知見は避難誘導施策を計画する際に重要な示唆を与えるものと考えられる。

## 3. 観光客の滞在人口分布の推計

### (1) 推計対象エリア

避難シミュレーションを行うにあたり、避難者の人口分布を把握する必要がある。そこで、すべての観光客が避難者となると仮定し、滞在人口分布を推計した。

本研究では、京都市東山区内の3次メッシュ2つ分のエリアを推計の対象とした(図-1)。以下、北部の3次メッシュを「北部エリア」、南部のものを「南部エリア」と呼ぶ。推計対象エリア内には清水寺などの寺社仏閣が多数存在し、多くの観光客がこのエリアを訪れる。また、細街路が多く含まれ、歩行者の混雑が発生しやすいエリアである。同時に、幅員の大きな道路も含んでおり、図-1に示した、エリアを南北に通過する①東大路通、②四条通、③五条通が特に幅員の大きな道路として挙げられる。

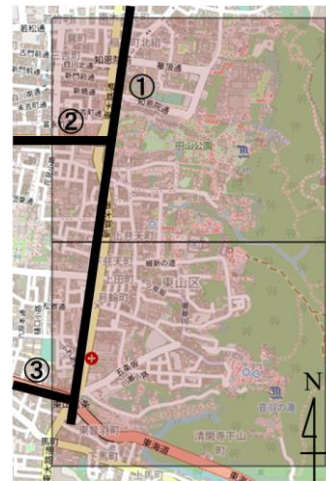


図-1 推計対象エリア

### (2) 推計対象日時

観光客数が多い日・時間帯で災害が発生することが甚大な被害を招く可能性が高いと考えられるため、観光客が特に多く訪れる、紅葉の時期に地震災害が発生したと仮定し、2018年11月23日14時を推計対象とした。

### (3) 滞在人口データの概要

滞在人口分布の推計には、モバイル空間統計と歩くまちアプリのGPSデータの2種類のデータを用いた。

#### a) モバイル空間統計

モバイル空間統計は株式会社ドコモ・インサイトマーケティングから提供されている、携帯電話ネットワークの運用データから生成される人口統計データである。本研究では、京都市東山区内を1km(3次メッシュ)単位で集計した、モバイル空間統計の人口分布統計と訪日外国人動態統計のデータを使用した。

人口分布統計では、国内居住者の人口とその属性が把握可能である。本研究では、10歳階層・男女別と市区町村別によって集計したデータを使用した。集計間隔は1時間ごと(24時間)で、期間は2018年10月17日(水)～2019年1月20日(日)の内、計30日間とした。

訪日外国人動態統計では、訪日外国人の人口が把握可能である。本研究では、調査期間内(各2週間)のデータを6時間ごとに4つの区分に分けて集計されたデータを使用した。集計期間は2018年10月15日(月)～2019年1月20日(日)の内、計8週間(調査期間4つ分)である。なお、本研究で使用した訪日外国人動態統計は、各時間区分における調査期間内のユニーク数であることに留意する必要がある。

#### b) 歩くまち京都アプリのGPSデータ

歩くまち京都アプリは京都高度技術研究所(ASTEM)が開発した、京都市内のバス・鉄道を対象とした経路検索アプリケーションである。本研究では、アプリ利用時

やバックグラウンドで不定期に取得されたGPSデータを用いた。収集されたGPSデータには、取得日時と緯度・経度、MAC アドレス、言語設定（日本語か否か）が含まれる。データの収集期間は、2018年9月1日（土）～2019年2月28日（木）の6ヶ月間とした。

**(4) 国内観光客の滞在人口分布**

国内観光客の滞在人口の推計には人口分布統計が適していると言えるが、人口分布統計の空間解像度は基地局の設置間隔に依存し、京都市東山区の場合は3次メッシュ（約1kmメッシュ）が最小単位である。しかし、避難シミュレーションには、より細かい空間単位での人口分布が必要となるため、GPSデータを用いて3次メッシュ内人口を約100mメッシュ単位で配分した。

まず、サンプル数の少ないGPSデータを滞在人口として用いて問題ないかを確認した。モバイル空間統計の信頼性については既に確認がなされているため<sup>8)</sup>、人口分布統計とGPSデータを比較することで、GPSデータの滞在人口としての信頼性を評価することとした。人口分布統計は滞在時間を考慮したものであるのに対し、不定期に取得されるGPSデータは滞在時間を考慮できないため、1時間ごとの利用者ユニーク数を滞在人口とした。集計の際には、国内居住者を対象とするために、言語設定が日本語であるものを抽出し、人口分布統計と調査期間が一致するデータを用いた。人口分布統計に関しては、年齢・性別の属性ごとに集計されたデータを用いた。単回帰分析を行った結果、GPSデータと人口分布統計の相関は見られたものの、回帰直線の決定係数は高いとは言えなかった（北部エリア：0.536，南部エリア：0.640，n=720）。これは、収集されたGPSデータのサンプル数が少ないことが理由であると考えられる。そこで、30日分のデータを1時間ごとに集約し、再度比較を行った。結果、回帰直線の決定係数が高い値を示した（北部エリア：0.738，南部エリア：0.826，n=24）。このことから、本研究で扱うGPSデータは、期間内のデータをまとめ、サンプル数を確保すれば、国内居住者の滞在人口として扱うことに対して一定の信頼性が得られると言える。

本研究では国内観光客を京都市東山区以外に居住する者であるとみなし、人口分布統計より3次メッシュ内の人口を得た。次に、GPSデータの全収集期間（6ヶ月）を1時間ごとに24のデータにまとめ、100mメッシュ単位の滞在人口分布を作成した。この分布に応じて国内観光客が滞在していると仮定して、国内観光客数を配分することで、国内観光客の滞在人口分布を推計した。

**(5) 訪日外国人の滞在人口分布**

訪日外国人についても、GPSデータを用いて3次メッシュ内人口の配分を行った。ただし、本研究で扱う訪日

外国人動態統計は1時間ごとの人口データではないため、1時間ごとの人口データを推計した上で配分を行った。

まず、訪日外国人動態統計についてもGPSデータとの関係を確認した。GPSデータの集計の際には、訪日外国人を対象とするために、アプリ利用者の言語設定が日本語ではないものを用い、訪日外国人動態統計の集計期間と合致するものを抽出した。また、訪日外国人動態統計は調査期間内のユニーク数であるため、GPSデータも同様に集計し、GPSデータと訪日外国人動態統計との関係について単回帰分析を実施した。結果、回帰直線の決定係数は高い値を示しており（北部エリア：0.936，南部エリア：0.903，n=16），GPSデータを訪日外国人の滞在人口として扱うことに一定の信頼性が確認された。

次に、推計対象日時の3次メッシュ内に滞在する外国人数の分布を推計した。GPSデータについて、訪日外国人動態統計と同様に集計したものに加え、2週間ごとにデータをまとめ、1時間ごとに24の区分に分けた後にユニークな利用者数を集計したものを用意した。これを用いて、6時間ごとの人口を1時間ごとの値に拡大処理した。しかし、この拡大処理によって得られた人口は期間2週間の延べ人数であるため、さらに14日間の日数で除することで推定対象日時の3次メッシュ内人口とした。

3次メッシュ内人口の配分には、訪日外国人について、国内観光客と同様の処理を行った。

**(6) 観光客の滞在人口分布**

国内観光客数と訪日外国人数を合計することで、観光客全体の人口とした。推計した滞在人口分布を図-2に示す。図-2は図-1の形に合わせて作成した、100mメッシュ内の人口を横に10個、縦に20個並べたものである。

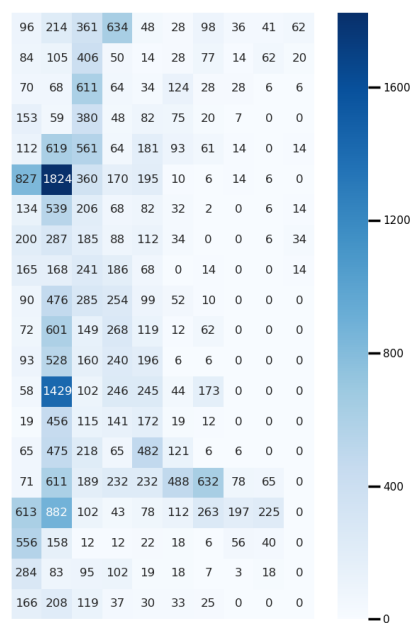


図-2 観光客の滞在人口分布

## 4. 避難経路選択モデルの構築

### (1) 避難行動実験

都市規模での避難シミュレーションには、各交差点における経路選択確率を把握する必要がある。しかし、特に観光客について、避難時の経路選択に関する行動データは乏しく、避難経路選択について把握することは困難である。そこで、観光客に避難行動実験を実施した。

2020年11月21日(土)～23日(月・祝)に清水寺付近の土産物店にて、VRゲームを用いた避難行動実験を行った。52名の被験者を確保し、実験前には研究への協力の任意性と撤回の自由やVRによる人体への影響などについて事前説明を行い、署名による同意を得た上で実験を実施した。また、大規模地震災害の発生直後を想定した避難を行うように説明を行った。

本実験で使用したVRゲームでは、表示されるVR空間(360°写真)にて経路選択を行うことで次のVR空間に移動する。VRゲームの画面例を図-3に示す。スマートフォンを動かし、画面中央部に表示される白点を黄色

矢印に数秒間重ね合わせることで、その矢印の方向に対応した次のスポットが表示され、経路選択が可能になる。VRゲームの構築にあたり、京都市東山区内で撮影した360°写真を用いた。ゲーム内でのネットワークは、図-4に示す通りである。また、避難時の焦りを再現するために、各交差点での経路選択時に時間制限を設け、被験者に対して10秒以内に経路選択を行うよう口頭で指示を行い、VRゲームの画面内に時間制限を表示した。時間制限による影響を把握するために、時間制限を設けないシナリオも用意し、1人の被験者に対して両方のシナリオでの実験を無作為な順番で実施した。また、同一のネットワークを用いて2回VRゲームを行った場合、学習効果が発生すると考えられる。そこで、東山区内から2つのネットワークを用意し、VRゲームを構築した(以下、北部VR・南部VR)。VRゲームの経路選択の開始地点として、北部VRでは⑤、南部VRでは③を設定した(図-3)。終了地点については、複数の場所を設定することとし、京都市が定めている避難場所及びエリア外に通じる場所を終了地点とし、これらに到達した時点で



図-3 VRゲームのスナップショット

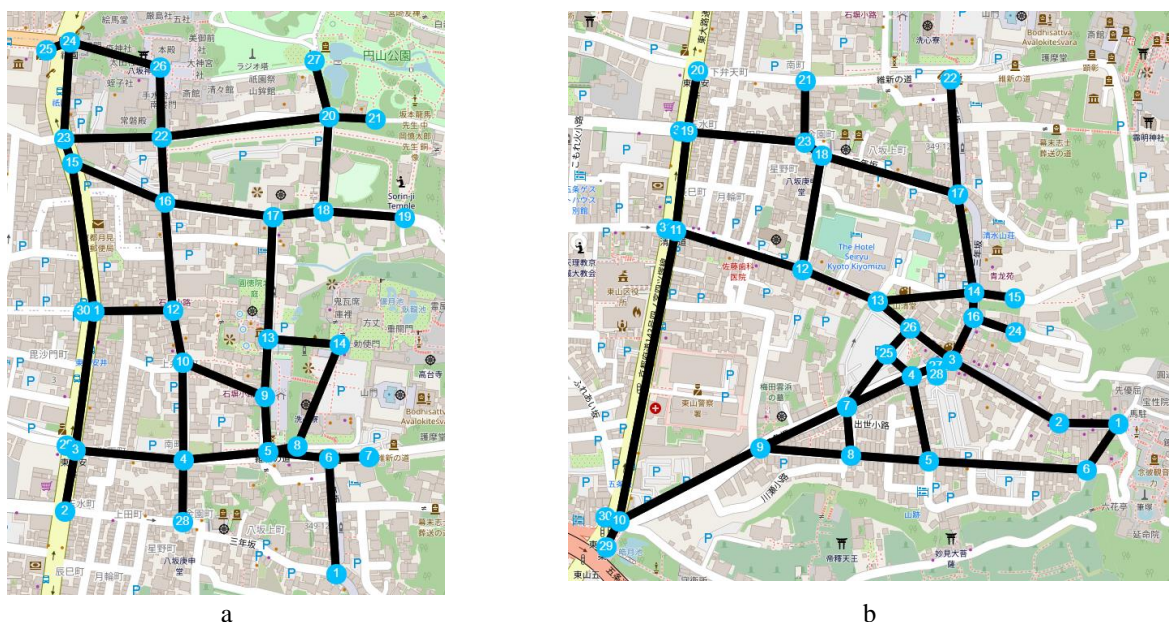


図-4 VRゲーム内ネットワーク (a)北部VR ; (b)南部VR)

VR ゲームを終了した。時間制限のあるシナリオでは、VR ゲームの終了後、各経路選択地点をモニターで辿りながら、各経路選択の判断理由などについて口頭で質疑を行った。時間制限がないシナリオでは、被験者が VR ゲームを行っている最中に聞き取り調査を実施した。

(2) 多項ロジットモデルによる推定

VR ゲーム内の各経路選択で、直進 (Straight) , 左折 (Left) , 右折 (Right) , 後退 (Back) のどの選択が行われたかについて、多項ロジットモデルを用いたモデル推定を行った。推定には、Apollo<sup>9</sup>を R4.0.3 で実行した。被験者が得る効用を次式で定義した。

$$U_{i,n} = V_{i,n} + \gamma_{i,n} + \epsilon_{i,n} \quad (1)$$

$U_{i,n}$  : 被験者  $n$  が選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) から得る効用  
 $V_{i,n}$  : 被験者  $n$  の選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) に関する効用関数の確定項  
 $\gamma_{i,n}$  : 誤差項に含まれる、被験者  $n$  の個別効果  
 $\epsilon_{i,n}$  : 真の攪乱部分

各経路の選択確率は次のように表せる。

$$P_{i,n,s} = \frac{z_{i,s} \exp(V_{i,n} + \gamma_{i,n})}{\sum_j z_{j,s} \exp(V_{j,n} + \gamma_{j,n})} \quad (2)$$

$P_{i,n}$  : 被験者  $n$  が選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) を選択する確率  
 $z_{i,s}$  : 状況  $s$  で選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) が利用可能である場合に 1, それ以外の場合に 0 をとるダミー変数

交差点の形状と交差点への侵入方向別に状況  $s$  を設定することでダミー変数  $z_{i,s}$  が得られ、(2)式の経路選択確率で、道路が平面交差するような交差点だけでなく、三叉路についても取り扱うことが可能である。避難行動実験での聞き取り調査にて、幅員を重視する回答が多く見られたため、幅員を説明変数とし、効用関数の確定項を次のように定義した。

$$V_i = \alpha_i + \beta_w x_{w,i} \quad (3)$$

$\alpha_i$  : 選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) の選択

肢固有定数項

$x_{w,i}$  : 選択肢  $i$  ( $i = \text{Straight, Left, Right, Back}$ ) 方向の経路の幅員

$\beta_w$  : 幅員  $x_{w,i}$  の係数

なお、VR ゲームの開始地点での経路選択においては、どの選択がなされたのか判断することが困難であるため、2 回目以降の経路選択のみを分析の対象とした。また、避難場所に進入するかどうかの選択について、避難場所の入口の幅員を定義することは難しいため、避難場所の入口での経路選択については、分析の対象から除外した。さらに、北部 VR の⑤の交差点は形状が他の交差点とは異なるため、分析の対象から除外することとした。

モデルを推定した結果、Straight が最も選択される傾向にあり、幅員が 1% 有意であった (意思決定者数 : 46, 観測数 : 247) 。なお、幅員については、後述するシミュレーション内ネットワークと同じ値を用いた。次に、経路選択時に時間制限を与えた実験から得られたデータと時間制限を与えなかった実験から得られたデータのそれぞれについてモデルを推定した。結果を表-1 に示す。時間制限ありの方が時間制限なしよりもモデルの当てはまりが良く、幅員の係数が大きかった。また、直進方向が選択される傾向が顕著であった。以上の結果は(2)式のように、被験者の個別効果を考慮したものであるが、考慮しなかった場合でも同様な結果が得られた。したがって、推定した避難経路選択モデルについて、被験者の個人属性が与える影響は小さいものと考えられる。

多項ロジットモデルの推定結果から、観光客の避難時の経路選択において、直進が選択される傾向にあること、幅員が大きい道が選択される傾向にあることが示された。また、時間制限ありの実験から得られたデータの方が時間制限なしの実験で得られたデータよりもモデルの当てはまりが良好であった。これは、経路選択に時間的余裕がある場合では、周囲の環境をより考慮することができるため、幅員で説明できない要素 (周囲の建物、遠方の景色など) が影響したからであると考えられる。同様の

表-1 多項ロジットモデルの推定結果 {Straight, Left, Right, Back} (時間制限別)

説明変数	時間制限あり		時間制限なし	
	係数	t 値	係数	t 値
Straight の選択肢固有定数項	ref.	NA	ref.	NA
Left の選択肢固有定数項	-1.44	-4.35***	-1.47	-4.54***
Right の選択肢固有定数項	-1.41	-4.58***	-0.57	-2.17***
Back の選択肢固有定数項	-2.44	-6.35***	-1.35	-5.37***
幅員 (m)	0.20	4.07***	0.17	3.91***
Log Likelihood (0)	-139.730		-167.587	
Log Likelihood (final)	-88.827		-130.695	
Rho-square	0.364		0.220	
Adjusted Rho-square	0.336		0.196	

\*\*\*:  $p < 0.01$

意思決定者数 : 33, 観測数 : 112 (時間制限あり)

意思決定者数 : 37, 観測数 : 135 (時間制限なし)

理由で、時間制限ありの方が幅員の係数が大きく、直進方向が選択される傾向にあったと推測できる。

## 5. シミュレーションによる避難誘導の検討

### (1) シミュレーションの概要

本研究では、PTV社が提供する歩行マイクロシミュレータ「Viswalk」を用いてシミュレーションを行った。ViswalkはSocial Forceモデルを基に計算を行うが、経路選択確率を別に設定することが可能である。本研究では、ノードとリンクより形成されるネットワークを構築し、各ノードにおける経路選択は設定した確率に基づいて計算を行い、リンク内での歩行者の挙動はSocial Forceモデルによって計算することとした。

シミュレーション開始時点を実験発生時点とし、その直後には誘導員がその配置地点に存在することとした。また、すべての歩行者は誘導員の誘導に従うものとした。シミュレーションを行う時間は3600秒（1時間）とし、3600秒が経過した時点でシミュレーションを終了した。

### (2) Social Forceモデルのパラメータ

ViswalkはSocial Forceモデルを基に計算を行うため、Social Forceモデルのパラメータを設定する必要がある。災害時、すべての避難者が道路内を同方向に移動するとは考え難く、対向流が発生すると考えられる。そこで、Benner *et al.*<sup>10)</sup>が対向流実験より得たViswalkのパラメータを使用することとした。

使用するパラメータが適切であるかどうかを確認するために、実験データとシミュレーションの結果を比較することで簡単な検証を行った。実験データとして、対向

流がある状況で廊下内の歩行者挙動を調査したLiu *et al.*<sup>11)</sup>の調査結果を用いた。Liu *et al.*は同一廊下内に両方向から各100人の歩行者が進入する状況で、歩行者が図-5の斜線部（計測エリア）を通過する時間を計測した。シミュレーションについては、実験を模したものを構築し、計測を行った。まず初めにViswalkのデフォルトのパラメータを用いてシミュレーションを行ったところ、歩行者の滞留が発生し、実験とは異なる結果が得られた。次に、Benner *et al.*のパラメータを用いたところ、歩行者の流れによる列の形成が見られ（図-6）、Liu *et al.*の報告に即した歩行者挙動が確認できた。また、実験では最初の歩行者が計測エリアに進入してから100人の歩行者が通過した時間は24秒、200人の歩行者が通過した時間は約50秒であったのに対し、シミュレーションでは100人の歩行者が通過した時間は19秒、200人の歩行者が通過した時間は46秒であった。以上より、Benner *et al.*が報告しているパラメータを用いた場合、現実の歩行者挙動とは差異が生じるものの、人流や移動時間などについてある程度再現可能であることが確認できた。

### (3) シミュレーションの構築

#### a) ネットワークの構築

本研究では京都市東山区をシミュレーションの対象とするため、東山区を模したネットワークをViswalk内に構築した（図-7）。Viswalkの背景地図内の道路に沿ってネットワークを構築し、各リンクには幅員を設定した。幅員を設定する際、一般財団法人日本デジタル道路地図協会が提供する「全国デジタル道路地図研究用データ」を用いた。全国デジタル道路地図研究用データに幅員の情報の記載のない道路については、背景地図の航空写真

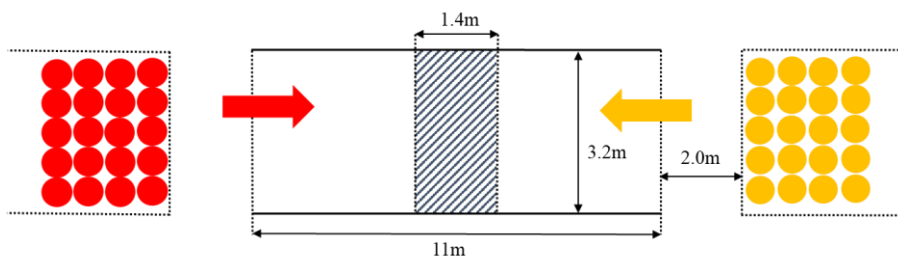


図-5 Liu *et al.*の実験イメージ

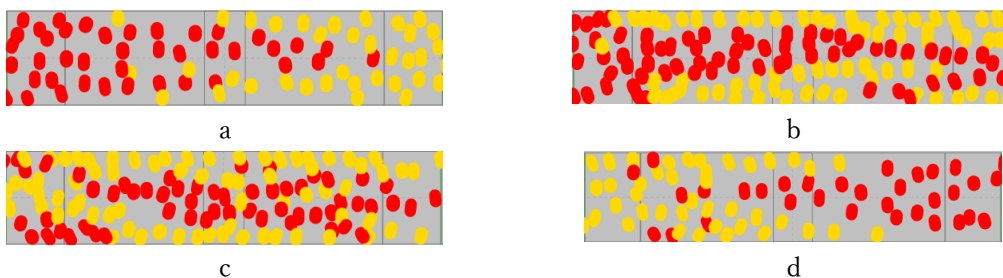


図-6 シミュレーション開始後(a)10秒；(b)20秒；(c)30秒；(d)40秒のスナップショット

を参考に、目視にて幅員を設定した。また、全国デジタル道路地図研究用データでは幅員の値に幅を持たせて道路ごとに区分を設けているため、設定した幅員は、現実の道路とは区分の幅の中で差が生じることとなる。そこで、作成したネットワークと背景地図と比較し、差が大きかった一部の道路については、背景地図の航空写真を参考に幅員を再設定した。

歩行者の最終目的地として京都市が定める避難場所（①大谷祖廟、②祇園甲部歌舞練場前弥栄駐車場、③京都霊山護國神社、④清水坂観光駐車場、⑤清水寺、⑥清水寺門前駐車場、⑦高台寺、⑧円山公園、⑨八坂神社、⑩霊山観音）をネットワーク内に用意し、ネットワーク外に通じるノードも他のノードと区別して最終目的地として設定した。シミュレーション内で、歩行者はこの最終目的地に到達した時点で移動が終了し、シミュレーション内のネットワークから除去される。即ち、最終目的地に到達した歩行者は以後の計算に影響を及ぼさない。

#### b) 歩行者の投入

推計した観光客の滞在人口分布（図-2）に基づいて、シミュレーションへ歩行者の投入を行った。なお、図-1の3次メッシュ2区間分の範囲と図-7のネットワークの範囲が一致している部分の100mメッシュ内人口を歩行者の投入量とした。

シミュレーション内の各リンクに歩行者が発生することとし、対応する100mメッシュ内の各リンクの面積に応じて歩行者数を割り振った。100mメッシュ内にリンクが存在しない場合は、ダミーのリンクを設け、歩行者を投入した。観光客が全員同時に避難を開始するとは考え難いため、災害発生後5分間で9割の観光客が避難を開始し10分間ですべての観光客が避難を開始すると仮定し、シミュレーションに反映させた。

#### c) シミュレーション内の経路選択

歩行者は、投入先のリンク上で最初の経路選択を行う。この際、経路選択確率は両方向の経路に対して等しい値を設定した。ただし、避難場所の最寄りのリンクでは、すべての歩行者が避難場所に向かうものとした。

最初の経路選択以後、各ノードに進入した歩行者は、避難経路選択モデルに基づいて経路選択を行う。避難経路選択モデルは、表-1に示した、時間制限ありの経路選択モデルを使用した。ただし、避難場所の最寄りのノードでは、すべての歩行者が避難場所に向かい、誘導員が存在するノードで避難誘導の指示を受けた歩行者は、以後の経路選択では指示の方向に進むものとした。

### (3) シミュレーション結果

本研究では、誘導条件を変更してシミュレーションを行い、結果を評価した。評価項目として、歩行者の移動時間、各避難場所への到達人数、歩行者密度を用いた。

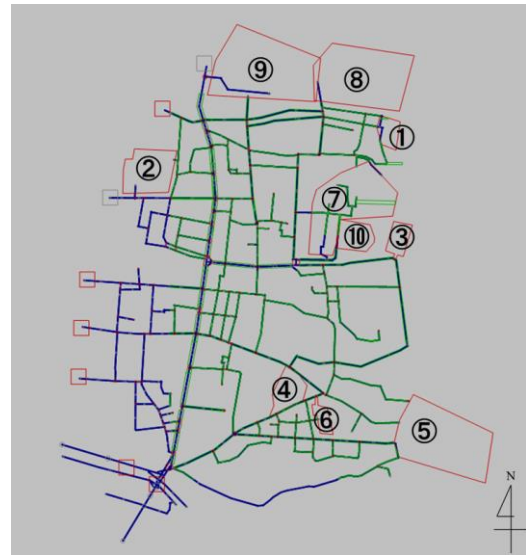


図-7 シミュレーション内のネットワーク

歩行者の移動時間は、歩行者がシミュレーション内のネットワークに発生してから最終目的地に到達するまでの時間とした。なお、シミュレーション終了時点である、シミュレーション開始後3600秒までに最終目的地に到達できなかった歩行者は、発生時点から3600秒までの時間を移動時間とした。また、発生した地点が避難場所の内部であった歩行者に関しては、移動時間を0秒とした。

各避難場所への到達人数の評価の際、高台寺と霊山観音、円山公園と八坂神社は隣接しているため、それぞれ1つの避難場所とみなし、到達人数と収容可能人数との比較を行った。また、京都市の避難誘導計画<sup>3)</sup>によると、東山エリアでは、京都国立博物館に誘導される避難者が一定数存在する。したがって、避難場所への到達人数の評価の際には、京都国立博物館の収容人数との比較も同様に行った。祇園甲部歌舞練場前弥栄駐車場については、避難誘導計画で定められている通り、そこへ避難する者の多くは本シミュレーションで表現したネットワーク外から流入するものであるため、評価対象から除外した。

歩行者密度については、Viswalkで計測された、各ノード内の経験歩行者密度を使用した。なお、経験歩行者密度とは、各歩行者の知覚範囲（半径2m）以内の歩行者密度（人/m<sup>2</sup>）のことを指す。Fruin<sup>12)</sup>の報告によると、歩行者は歩行者密度が1.0（人/m<sup>2</sup>）を超えると通常の歩行速度で歩くことができなくなり、さらに密度が上昇するとすり足に近い歩行となる。特に避難時においては、歩行者密度が高くなると転倒などの危険性が増すと考えられるため、経験歩行者密度が1.0（人/m<sup>2</sup>）を超えた場所を危険であると評価した。本シミュレーションでは、自動車などの影響を考慮しないため、得られた歩行者密度は現実のものと比較した場合、過小に評価されていることに留意する必要がある。

a) 避難誘導を行わなかった場合

誘導員を配置しない条件でシミュレーションを実行した結果、歩行者の平均移動時間は 684 秒であった。移動時間の分布を図-8 に、避難場所への到達人数を表-3 に示す。避難場所の収容可能人数については、京都市より提供を受けたデータを用いた。京都霊山護國神社と清水寺に到達した歩行者が収容可能人数を超過する結果となった。また、投入した歩行者の内、避難場所に到達した歩行者数は全体の 70.4%であった。歩行者密度については、1.0 (人/m<sup>2</sup>) を超えた場所は確認されなかった。

次に、シミュレーション内のランダムシードを変更して、先述したものを含めて計 10 回のシミュレーションを行った。結果、歩行者の平均移動時間の最小値は 670 秒，最大値は 695 秒，平均は 684 秒であった。また、すべてのシミュレーションで、京都霊山護國神社と清水寺に到達した歩行者が収容可能人数を超過する結果となった。したがって、全体の傾向はランダムシードに依らな

いものと考え、以下のシミュレーションでは同一のランダムシードを用いて 1 回のみシミュレーションを実行し、結果を比較した。

避難経路選択モデルによるシミュレーションへの影響を調査するために、避難経路選択モデルを使用せずにシミュレーションを構築し、結果の比較を行った。具体的には、各ノードにおける経路選択について、避難場所の近隣のノードでは避難場所に向かうとし、それ以外のノードでは、等確率で経路を選択することとした。シミュレーションの結果、歩行者の平均移動時間は 1393 秒であった(図-9)。避難経路選択モデルを用いた場合と比較すると、移動時間に大きな差が生じた上、避難場所への到達人数には大きな差が見られた(表-3)。これは、避難経路選択モデルでは幅員の大きな経路が選択され、最終的には東大路通に集中する傾向があるのに対し、経路を等確率で選択する場合は歩行者の収束が発生しないことが原因であると考えられる。

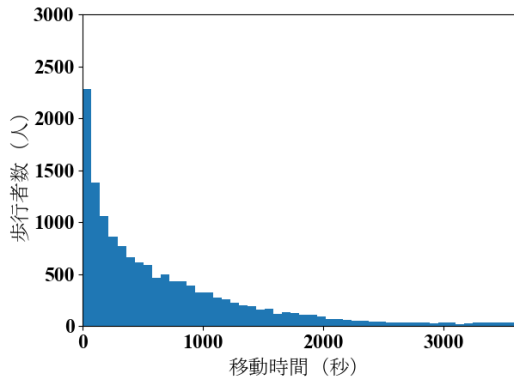


図-8 移動時間の分布 (避難誘導なし)

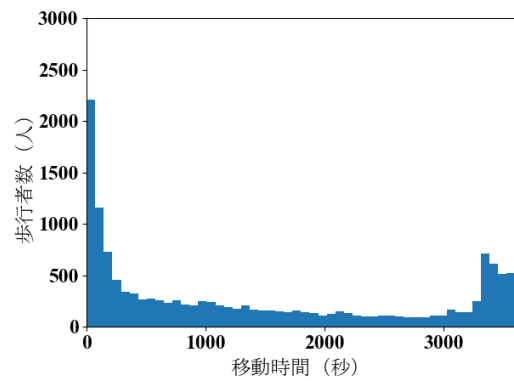


図-9 移動時間の分布 (避難誘導なし，等確率で経路選択)

表-3 各避難場所への到達人数

避難誘導条件	避難誘導なし						
	避難誘導なし	現行の避難誘導計画	ケース 1	ケース 2	ケース 5		
経路選択方法	避難経路選択モデル	等確率で経路選択	避難経路選択モデル	避難経路選択モデル	避難経路選択モデル	避難経路選択モデル	
避難場所	収容可能人数	到達人数	到達人数	到達人数	到達人数	到達人数	
大谷祖廟	1065	125	134	88	88	88	110
祇園甲部歌舞練場前弥栄駐車場	NA	551	1008	327	327	327	189
京都霊山護國神社	550	670	559	289	289	289	368
清水坂観光駐車場	4020	2120	2195	1283	2028	2028	1740
清水寺	740	2035	2333	1910	1475	1475	1620
清水寺門前駐車場	1350	316	476	288	723	723	563
高台寺・霊山観音	10477	1071	1752	2238	2238	2238	2018
円山公園・八坂神社	43786	3118	1126	1489	5443	3260	3684
範囲外 (京都国立博物館方面)	NA	2227	420	5932	1232	3416	3563
範囲外 (京都国立博物館以外)	NA	1826	1535	373	374	373	365
残留	NA	161	2682	3	3	3	0



b) 現行の避難誘導計画に沿った誘導を行った場合

次に、京都市の避難誘導計画<sup>4)</sup>に基づいて誘導員を配置し、誘導を行った条件の下でシミュレーションを行った。なお、誘導員の配置と誘導の方向は図-10 に示す通りである。結果、歩行者の平均移動時間は 466 秒であり、避難誘導がなかった場合に比べて、大幅に移動時間が短縮された(図-11)。避難場所への到達人数は表-3 に示した通りである。なお、図-10 で示したように、ネットワークの南端に京都国立博物館へと誘導する誘導員が配置されているため、南端のノードに到達した歩行者は全員が京都国立博物館に向かったとして、京都国立博物館の収容可能人数との比較も行った。避難場所まで到達した歩行者(京都国立博物館含む)は全体の 97.4% であり、誘導がなかった場合と比較して、大きく増加した。しかし、清水寺で収容可能人数を超過したのに加え、京都国立博物館に約 6000 人の歩行者が向かい、博物館の収容可能人数を大きく超過した。また、⑦高台寺付近と東大路通にて混雑が確認され、経験歩行者密度の最大値は 2.3 (人/m<sup>2</sup>) であった。誘導なしの条件下では混雑が確

認できなかったため、この混雑は現行の誘導方法によって引き起こされたと言える。⑦高台寺への誘導はその入口に向けて道路の両方向からなされており(図-10)、誘導を受けた歩行者が一点に集中したため、混雑が発生したと考えられる。同様の理由で、東大路通上での混雑も誘導によるものと推測できる。

c) 避難誘導の方向を変更した場合

現行の避難誘導条件で確認された問題を解消するために、図-12 に示すように避難誘導方向を変更し、シミュレーションを実行した(ケース 1)。各避難場所への到達人数は表-3 の通りである。京都国立博物館に到達した歩行者数が大幅に減少し、収容可能人数を超過しない結果となった。清水寺に到達した歩行者数も減少したが、依然として収容可能人数を超過した。混雑については、現行の避難誘導条件で確認されたものは解消された。しかし、東大路通上の別の地点において混雑が新たに見られ、経験歩行者密度の最大値は 1.5 (人/m<sup>2</sup>) であった。

ケース 1 の結果を踏まえて、東大路通沿いの混雑抑制を目的として、図-13 のように誘導方向を変更し、シミ

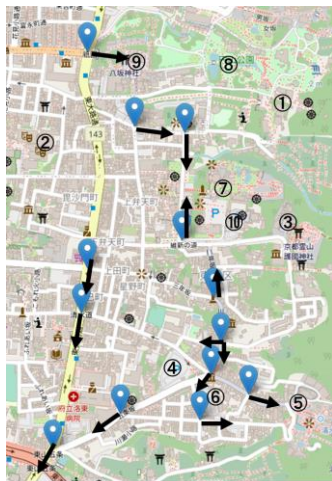


図-10 誘導員の配置と誘導方向(現行の避難誘導計画)  
(①-⑩: 避難場所)

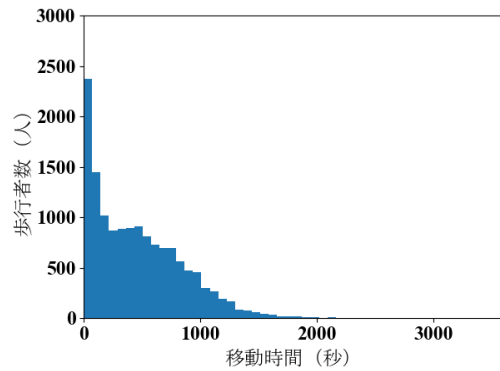


図-11 移動時間の分布(現行の避難誘導計画)

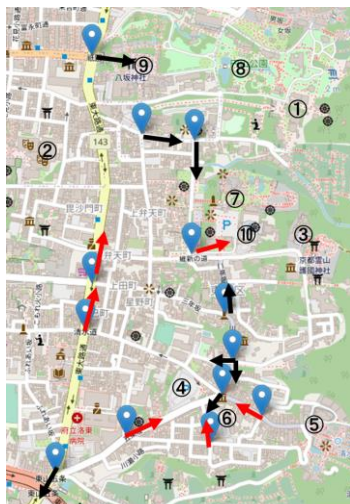


図-12 誘導員の配置と誘導方向(ケース 1)

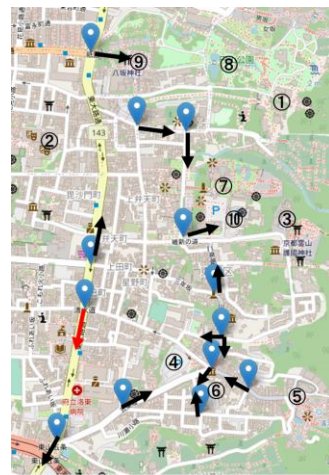


図-13 誘導員の配置と誘導方向(ケース 2)

ュレーションを実行した（ケース 2）．各避難場所への到達人数は表-3の通りである．京都国立博物館に到達した歩行者数はその収容可能人数を上回ったが，その超過人数は現行の避難誘導条件と比較すると大幅に軽減された．また，経験歩行者密度が 1.0 (人/m<sup>2</sup>) を超えた場所は確認できず，混雑の点において良好であったと言える．

d) 誘導員の配置を変更した場合

避難誘導施策の計画では，誘導員の配置場所についても検討を行うことが求められる．そこで，誘導員の配置を変更し，その影響について調べた．なお，誘導方向については現行の誘導計画と同様となるよう設定した．

人口が集中している場所で優先的に避難誘導を行うことが早期の避難完了につながると考え，滞在人口分布を参考に，図-14 のように誘導員を配置し，シミュレーションを行った（ケース 3）．結果，歩行者の平均移動時間は462秒であり（図-15），移動時間が現行の避難誘導条件よりも僅かに減少した．収容人数の超過や混雑については，現行の誘導条件の結果と同様であった．

図-15 に示した誘導員の配置は，その配置の偏りにつ

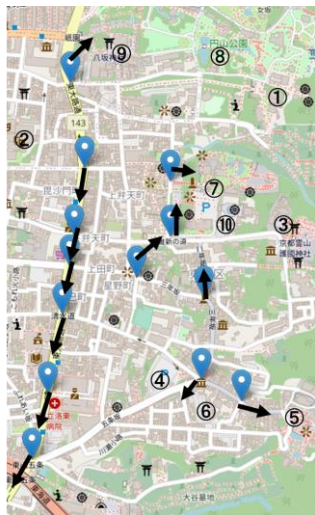


図-14 誘導員の配置と誘導方向（ケース 3）

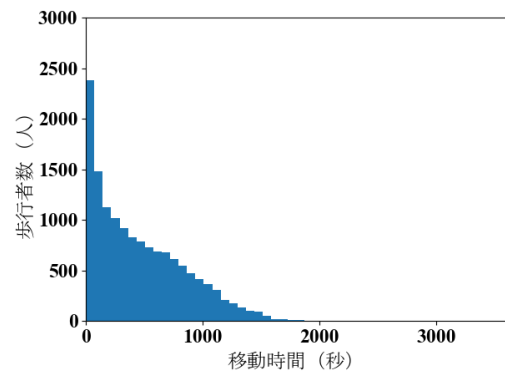


図-15 移動時間の分布（ケース 3）

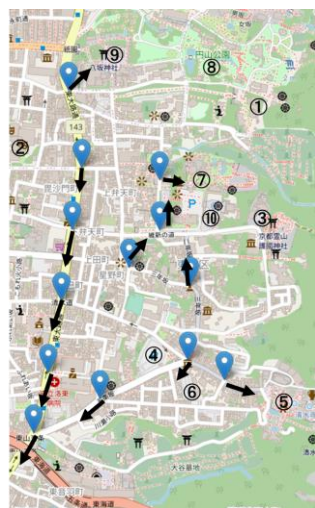


図-16 誘導員の配置と誘導方向（ケース 4）

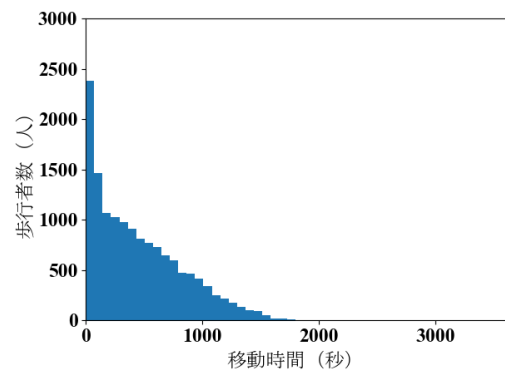


図-17 移動時間の分布（ケース 4）

いては考慮していない．そこで，東大路通に集中している誘導員の配置を図-16 のように変更した（ケース 4）．シミュレーションの結果，歩行者の平均移動時間は 457 秒であった（図-17）．収容人数の超過や混雑については，現行の避難誘導条件と同様であった．

e) 避難誘導方向と誘導員の配置を両方変更した場合

次に，避難誘導方向と誘導員配置を両方変更することで，収容可能人数の超過を抑制しつつ，移動時間を減少させることができるのではないかと考え，ケース 2 の誘導方向とケース 4 の誘導員配置を組み合わせた誘導条件（図-18）でシミュレーションを実行した（ケース 5）．結果，歩行者の平均移動時間は389秒であった（図-19）．収容人数の超過については，京都国立博物館と清水寺に到達した歩行者数が収容可能人数を超過したものの，現行の避難誘導条件と比較すると，その超過の割合は軽減されたものであった（表-3）．また，⑦高台寺と⑨八坂神社の入口にて混雑が確認され，経験歩行者密度の最大値は 1.5 (人/m<sup>2</sup>) であった．



図-18 誘導員の配置と誘導方向（ケース 5）

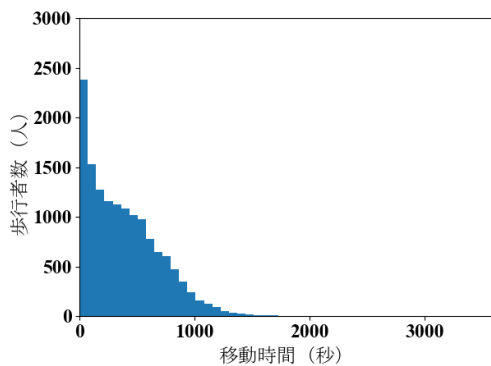


図-19 移動時間の分布（ケース 5）

#### (4) シミュレーション結果に関する考察

避難誘導を行わなかった場合、避難場所まで到達した歩行者は全体の 70.4%に留まり、ネットワークの南端を通過して範囲外に到達した歩行者がすべて京都国立博物館に到達したと仮定しても、その値は 86.0%であった。対して、現行の避難誘導条件では、避難場所に到達した歩行者（京都国立博物館含む）は全体の 97.4%であった。したがって、災害時において、観光客に対して都市規模の避難誘導を行うことは有用であると言える。しかし、避難誘導を行うことによって、混雑の発生や避難場所での収容可能人数の超過が確認された。

避難誘導方向を変更することで、収容可能人数の超過を軽減させ、混雑の発生を抑制することができた。具体的には、現行の誘導条件では清水寺の収容可能人数を大きく超過したが、清水寺付近の交差点において清水寺以外の避難場所へ誘導することで収容可能人数超過の軽減につながった。このことから、避難場所の近隣の交差点であっても、その避難場所へ誘導すると収容可能人数を超過する可能性があると考えられる。また、現行の誘導条件やケース 1 では東大路通において混雑が確認されたことから、東大路通のような幅員の大きな道路であって

も、避難経路として使用することによって危険が生じ得ると考えられる。

また、滞在人口が多いエリアの交差点に優先的に誘導員を配置することで、歩行者の移動時間が僅かに短縮した。しかし、配置地点を分散させた条件の方が移動時間が短かったことから、滞在人口の多い場所に誘導員を配置することが望ましいと考えられると同時に、その配置の偏りには留意する必要があると言える。

ケース 5 では、歩行者の移動時間は最も短く、迅速な避難であった。また、収容可能人数の超過についても一定の抑制効果が確認できた。しかし、ケース 2 の誘導方向を用いたのに反し、ケース 2 では見られなかった混雑が発生した。これは、誘導員の配置を滞在人口が多い交差点に集中させたことで、多くの歩行者が同じ時間に誘導を受け、同時に避難場所の前に到達したためと考えられる。したがって、迅速な避難は望ましいものではあるが、混雑を招く恐れも含んでいる可能性が示唆された。

## 6. 結論

本研究の結果を以下にまとめる。

まず、観光客の避難経路選択モデルについては、直進方向の経路や幅員が大きい経路が選択される傾向にあることが確認された。この傾向は、経路選択時に時間制限を与えた被験者の方で顕著に見られ、時間的余裕のない状況では特に、直進方向と幅員の大きな経路が選択される傾向にあると考えられる。推定したモデルのパラメータは避難シミュレーションなどへの活用が期待できる。

次に、京都市の避難誘導については、避難誘導を行った場合、避難場所への到達人数が誘導を行わなかった場合と比較して大幅に増加したことから、避難場所までの誘導を実施することは有用であると言える。しかし、現行の避難誘導条件では混雑が確認された他、一部避難場所の収容人数を超過した。この混雑の減少・収容人数超過の軽減には避難誘導方向を変更することが有用であると考えられる。具体的には、避難場所である清水寺付近の交差点であっても清水寺以外の避難場所へ誘導することが挙げられる。また、滞在人口が多い場所に誘導員を優先的に配置することで、歩行者の移動時間が短縮することが確認された。しかし、その配置の偏在を考慮した条件の方が移動時間が短かったことから、誘導員の偏在については留意する必要があるだろう。

また、細街路を含む観光地における避難誘導についての知見をまとめると、以下ようになる。

- ・避難場所へ到達する観光客数の観点より、避難場所への避難誘導を行うことは望ましいと言える。
- ・観光客を細街路が多数含まれる場所から大通りに誘導すると、誘導先の大通りで混雑が発生する可能性がある。

・避難場所近隣の交差点であっても、その避難場所へ誘導した場合、収容可能人数を超過する可能性がある。

・滞在人口の多い場所で優先的に避難誘導を行うことで、避難時間の短縮につながる可能性がある。ただし、誘導員配置の偏在には留意が必要である。

以上の知見を実際の細街路を含む観光地での避難誘導施策に活用するためには、特に観光客の滞在人口分布の傾向を把握しておくことが重要であると考えられる。

なお、本研究では、避難シミュレーションに歩行者のみを投入しており、車両などの影響を考慮できていない。

したがって、車両などの影響を考慮することが望まれる。

**謝辞**：本研究の実施に際して、データを提供いただきました、日本デジタル道路地図協会と京都市に謝意を表します。本研究は科学技術振興機構 JST-SICORP (JPMJSC1805) の助成により遂行されたものであることを付記して、ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Villegas, J., Matyas, C., Srinivasan, S., Cahyanto, I., Thapa, B. and Pennington-Gray, L.: Cognitive and affective responses of Florida tourists after exposure to hurricane warning messages, *Natural hazards*, Vol.66, No.1, pp.97-116, 2013.
- 2) Wachtel, G., Schmöcker, J.-D., Hadas, Y., Gao, Y., Nahum, O.E. and Ben-Moshe, B. (In press): Planning for Tourist Urban Evacuation Routes: A framework for improved data collection and evacuation process, *Accepted for publication in Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*.
- 3) 京都市：清水・祇園地域帰宅困難観光客避難誘導計画, ([https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/cmsfiles/contents/000076/76886/keikaku\\_kiyomizugion.pdf](https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/cmsfiles/contents/000076/76886/keikaku_kiyomizugion.pdf))
- 4) Sakai, K., Honda, A., Mongkonkerd, S., Perera, S., Cui, M., Toyoda, Y., Taniguchi, H. and Kanegae, H.: A study on evacuation simulation for guiding tourists in himeji castle based on a survey of tourists' intentions in evacuation after earthquake, *Asean Journal on Hospitality and Tourism*, Vol.13, No.2, pp.137-150, 2014.
- 5) Sonohara, M., Sakai, K., Takahashi, M. and Kaneda, T.: A Study on Agent Modeling of Tourist Evacuation Behaviors in an Earthquake: A Case Study of an Evacuation Simulation of Himeji Castle, *Innovative Approaches in Agent-Based Modelling and Business Intelligence*, pp.189-204, 2018.
- 6) Emori, N., Izumi, T., and Nakatani, Y.: A Support System for Developing Tourist Evacuation Guidance, *Transactions on Engineering Technologies*, pp.15-28, 2016.
- 7) Kinugasa, S., Izumi, T. and Nakatani, Y.: Evaluation of a support system for large area tourist evacuation guidance: Kyoto simulation results, *Paper presented at the Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS)*, 2012.
- 8) 大藪勇輝, 寺田雅之, 山口高康, 岩澤俊弥, 萩原淳一郎, 小泉大輔：モバイル空間統計の信頼性評価, *NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル* Vol. 20, No.3, 2012.
- 9) Hess, S., and Palma, D.: Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application, *Journal of choice modelling*, Vol.32, 2019.
- 10) Benner, H., Lohmiller, J. and Sukennik, P.: Is calibration a straight-forward task if detailed trajectory data is available?, In *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, 2017.
- 11) Liu, X. D., Song, W. G., and Lv, W.: Empirical data for pedestrian counterflow through bottlenecks in the channel, *Transportation Research Procedia*, Vol.2, pp.34-42, 2014.
- 12) Fruin, J. J.: Designing for pedestrians: A level-of-service concept, *Highway Research Record*, Vol.355, pp.1-15, 1971.

?

## SIMULATING EVACUATION OF TOURISTS IN A NARROW URBAN STREET NETWORK

Koichi SABASHI, Jan-Dirk SCHMÖCKER,  
Satoshi NAKAO, Boaz BEN-MOSHE and Tadashi YAMADA

Japan is a county with a lot of natural disasters. Considering tourism in Japan, it is important to guide tourists to safe zones. This research aims to provide city planners information to help planning the route guidance for smooth evacuation. To consider tourists' evacuation behavior, we conducted a Virtual Reality experiment assuming a sudden disaster situation and estimated tourists' route choice based on the experiment. We then constructed an evacuation simulation of the Higashiyama area network of Kyoto, Japan and run the simulation with the estimated route choice and different guidance scenarios. As a result of the simulation, we confirmed that congestion along a main street is likely to occur under current guidance plans and that the capacity of some safe zones might not be sufficient. We show that there is some possibility to reduce evacuation time and overcrowding by better guidance.