

## 混雑度の偏りを考慮した避難所決定手法

梅木 寿人<sup>1,a)</sup> 中村 優吾<sup>1,2</sup> 藤本 まなと<sup>1,b)</sup> 水本 旭洋<sup>1</sup>  
諏訪 博彦<sup>1</sup> 荒川 豊<sup>1,3</sup> 安本 慶一<sup>1,c)</sup>

受付日 2018年5月7日, 採録日 2018年11月7日

**概要:** 地震などの突発的災害発生時において、避難所への速やかな避難は重要な防災・減災対策の1つである。現状、災害時の避難誘導は、現在地から最寄りの避難所へと誘導するものが一般的である。しかしながら、災害発生時に、大多数の人々が特定エリアに偏って集中するような状況下においては、単に最寄りの避難所に誘導するだけでは避難所の収容数の超過を招き、別の避難所への移動を余儀なくされる。結果として、被災者は空きのある避難所へたどり着くまでたらい回しにされ、避難が大幅に遅れてしまう問題が生じる。本論文では、この問題を解決するために、多くの人々が活動している地域を対象として、被災者全体の避難時間を削減することを目的とする避難所決定手法を提案する。具体的には、被災時における被災者の位置情報と各避難所の収容可能数に基づいて、被災者全体の避難時間が短くなるように避難所を決定する。提案手法の有効性を評価するために、京都の祇園祭を想定したシミュレーション環境を構築し、一般的な避難所決定手法である最短経路選択およびランダム選択を適用した場合と提案手法を適用した場合の避難時間を比較した。その結果、提案手法を用いた場合に、最短経路選択と比較して平均避難時間を35.9%削減できることを明らかにした。また、提案手法に従う人が全体の20%であっても、平均避難時間を8.1%削減できることを確認した。この結果から、たとえ一部の人であっても、提案手法に従って避難することによって、全体の避難時間を短縮でき、防災・減災に寄与できることが分かった。

**キーワード:** 避難場所決定, 避難誘導, シミュレーション, 混雑度

## Evacuation Center Determination Method Considering Bias of Congestion Degree on Areas

KAZUHITO UMEKI<sup>1,a)</sup> YUGO NAKAMURA<sup>1,2</sup> MANATO FUJIMOTO<sup>1,b)</sup> TERUHIRO MIZUMOTO<sup>1</sup>  
HIROHIKO SUWA<sup>1</sup> YUTAKA ARAKAWA<sup>1,3</sup> KEIICHI YASUMOTO<sup>1,c)</sup>

Received: May 7, 2018, Accepted: November 7, 2018

**Abstract:** The quick and appropriate evacuation of the disaster victims is one of great concern in the disaster situation. Under the disaster situations, it is general that the victims evacuate from the present location to the nearest evacuation center depending on evacuation guidance. However, in case of the situation that many victims are at biased distribution to specific areas, the guidance to the closest evacuation center concentrates many victims to particular evacuation. As a result, the victims who could not enter the closest evacuation center need to evacuate to other evacuation centers, until accepted. Therefore, the problem occurs that the evacuation of victims is delayed significantly. In this paper, to solve this problem, we propose an evacuation center determination method aimed at reducing the evacuation time of the whole victims. Specifically, the proposed method determines an evacuation center so that the evacuation time of all victims becomes short based on the location information of victims and the capacity of evacuation centers. To evaluate the effectiveness of the proposed method, we compared our proposed method with the shortest route selection method and random selection method, by using the simulation study assuming the situation of the Gion festival in Kyoto. As a result, when using the proposed method, we showed that the average evacuation time can be reduced to 35.9% compared with the shortest route selection method. Also, we confirmed that the average evacuation time can be reduced to 8.1% even if victims who follow the proposed method is 20% of the total. From these results, even if victims who follow the proposed method is a part of the total, we showed that our method can reduce the overall evacuation time, and contribute to disaster prevention.

**Keywords:** decision evacuation location, evacuation induction, simulation, congestion

## 1. はじめに

近年、日本各地において、地震などの突発的大規模災害が頻発しており、それにとまなう建物の倒壊や火災によって、多数の人命が失われている。このような災害に対して、地震に強い建物づくりや災害時の救急マニュアルの作成、各市町村が提供するハザードマップなど、様々な減災・防災対策が講じられている [1]。対策の1つとして、的確な避難誘導によって、被災者が迅速に避難できる環境を整備することが重要である。大規模災害時には、被害の中心地（地震の震源地など）だけでなく、被災地から距離が離れた場所においても、適切な避難誘導が求められる。たとえば、東日本大震災の際には、震源地である宮城県から遠く離れた首都圏にもかかわらず、交通インフラに障害が生じたり、JR 駅構内への立ち入りが禁止されるなどの影響により、約 400 万もの人々が自宅やホテルなどに帰ることのできない帰宅困難者<sup>\*1</sup>となった [2]。

現状の避難誘導は、警備員などの指示により被災者を最寄りの指定避難所へと誘導することが一般的となっている。しかしながら、たとえば京都のような観光地では、各エリアの混雑度は異なり、人々は観光地の中でも複数の人気エリアに偏って分布している場合が多い。一方、避難所の配置は、住民の数や来訪者の数に基づいて設計されているものの、季節や時間帯によって生じる混雑度の偏りは考慮されていない。そのため、被災者を単に最寄りの指定避難所へと誘導するだけでは、混雑地域の避難所の収容数の超過を招き、避難所への入所が拒否された被災者は、再び異なる避難所に移動しなければならないという避難所のたらい回し問題が発生する。その結果、被災者の避難行動に大幅な遅延が生じることとなる。

本研究では、この問題を解決するため、混雑度の地理的偏りを考慮した避難所決定手法を提案する。提案手法では、災害発生時における各所での混雑度情報が取得可能であると想定し、被災者の避難完了までの時間を削減することを目的に、各被災者に対して避難すべき避難所と避難経路を提示する。具体的には、各避難所の収容数と被災者の位置情報および各避難所への距離などを考慮し、各被災者に対する避難所および避難経路を決定する。

提案手法の有効性を調べるため、京都の祇園祭を想定したシミュレーション環境を構築し、一般的な避難所決定手

法である最短経路選択およびランダム選択を適用した場合と、提案手法を適用した場合の避難時間を比較した。その結果、提案手法を用いた場合、最短経路選択の結果と比べて、平均避難時間を 35.9%削減できることが分かった。また、提案手法に従う人の割合を変化させ平均避難時間を比較した結果、提案手法に従う人が全体の 20%であっても、最短経路選択の結果と比べて、平均避難時間を 8.1%削減できることを確認した。

本論文は、以下の 6 章で構成される。2 章では、現状の防災・減災対策および関連研究について述べ、3 章で本研究で対象とする災害時の想定環境、災害時避難計画問題についての前提条件および問題設定について述べる。4 章では、提案手法である混雑度を考慮した避難所決定手法について述べ、5 章で提案手法の有効性を示すための評価実験について述べる。最後に、6 章で本論文の結論を述べる。

## 2. 防災・減災対策と関連研究

本章では、現状の防災・減災対策および本研究における関連研究についてまとめ、本研究の位置付けを明確にする。

### 2.1 現状の防災・減災対策

近年、我が国では、地震や洪水など予期せぬ自然災害が頻発することから、建物の耐震化やスーパー堤防の整備など、様々な災害対策が講じられている。本研究で対象とする災害時の避難行動に関連する対策として、国土交通省や各地方自治体において、災害発生時の避難所の場所や被害予測などを表示するハザードマップが制作・配布されている [3]。また、被害情報を収集し、それらの収集した情報をリアルタイムに GIS (Geographic Information System) 上に表示するもの [4] や、シミュレーションによる災害の被害予測を可視化するもの [5] など、既存のハザードマップを拡張したシステムも開発されている。しかし、ハザードマップを使用した場合、避難所の場所や被害予測情報は確認できるが、避難所や道路の混雑状況の把握や移動時間などの見積もりは非常に困難なため、避難すべき避難所の場所や避難所までの避難経路は被災者の感覚で決定する必要がある。そのため、周辺の住民がいつせいに避難を開始した場合に、一部の被災者は、道路の混雑や避難所のたらい回しなどに巻き込まれる可能性がある。

### 2.2 関連研究

災害発生時の情報共有 [6] や避難経路の提示 [7], [8], [9] など、被災者の避難行動支援を目的とした研究が数多く行われている。鈴木ら [10] は、アンケート調査から得られた被災者の行動特性を基に津波発生時の被災者の避難経路選

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

<sup>2</sup> 日本学術振興会特別研究員  
Japan Society for the Promotion of Science, Research Fellowship for Young Scientists, Chiyoda, Tokyo 102-0083, Japan

<sup>3</sup> JST さきがけ  
JST PRESTO, Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

a) umeki.kazuhiro.uf7@is.naist.jp

b) manato@is.naist.jp

c) yasumoto@is.naist.jp

\*1 自宅が遠隔なため、帰宅をあきらめる人々や、いったん徒歩で帰宅を開始したものの途中で帰宅が困難となり、保護が必要になる人々のこと。

択モデルを構築している。構築したモデルを用いたシミュレーション結果から、周辺住民がいっせいに1カ所の避難所に最短経路で避難する場合、周辺道路で大混雑が発生することが分かっている。中島ら [11] は、リアルタイムに避難所の収容数や道路の危険度を把握し、携帯端末を用いて被災者の避難誘導を行うシステムを提案している。このシステムでは、被災者は目的の避難所に到着する前に避難所が満員になったことを把握できる。しかし、避難所の収容数を考慮した避難場所の決定までは行っておらず、個々の被災者に対して最も近い避難所に最短経路で誘導するため、たらい回しに巻き込まれる可能性が高い。

Oomes ら [12] は、複数の災害対応組織が収集した災害情報を用いて災害規模を可視化しつつ、各災害対応組織の情報共有を支援するネットワークシステムを構築している。また、Fitriani ら [13] は、リアルタイムに被災者間で情報共有を行うことで災害情報を収集し、通行可能道路から最適な避難経路を提供する経路支援システムを構築している。さらに、村木ら [14], [15] は、被災者の行動特性に加えて、被災者の周辺知識や、避難誘導用標識や避難誘導者の指示を考慮したマルチエージェントモデルを構築している。これらの手法では、避難所の決定方法については対象としておらず、また、避難所が溢れた際のたらい回しや被災地内における被災者の位置の偏りなど最終的な避難完了時間に影響を与える要素については考慮されていない。

大西ら [16], [17] は、屋内における避難時の精緻な歩行速度モデルを構築しており、通路の道幅や前方の人までの距離を基にした速度・加速度を利用することで、避難訓練を5%の誤差で再現している。しかし、本研究で対象とするような避難所の収容数を考慮した避難場所の決定や避難経路を決定するモデルまでは作成していない。また、Murotsu ら [18] は、屋内における火災発生時の避難経路探索を対象に、通路の混雑状況を考慮した経路選択手法を提案している。この手法では、被災者をグループ単位で表現し、避難グループごとに各通路の混雑状況を基に最終的な移動時間が最短になる経路を選択できる。しかし、この手法は屋内の避難誘導を対象としているため、本研究で対象としている屋外の避難誘導に関しては取り組まれていない。

### 2.3 本研究の位置付け

上で述べたとおり、これまで様々な防災・減災対策がとられているものの、被災者の地理的分布の偏り（災害発生時の被災者の位置の偏り）を考慮した災害対策は見当たらない。また、様々な避難シミュレーション研究が検討されているが、避難所が溢れた際のたらい回しや被災地内における被災者の位置の偏りなど最終的な避難完了時間に影響を与える要素については考慮されていない。本研究では、災害発生直後の被災地において、被災者の位置分布の偏りを考慮した避難所決定手法を提案することを目的とする。

## 3. 災害時避難計画問題

本研究の目的は、災害発生直後の被災地において、被災者の位置分布の偏り（位置情報）と避難所の収容可能数を考慮した避難場所決定手法により、被災者全体の避難時間を最小化することである。本章では、本研究で対象とする災害時の想定環境、災害時避難計画問題についての前提条件、そして問題設定についてそれぞれ述べる。

### 3.1 想定状況

本研究では、東日本大震災発生時のような、災害により自宅への帰宅が困難な被災者が多く発生した帰宅困難状況を想定する。帰宅困難状況においては、被災者にとって、安全が確保でき、かつ1泊以上宿泊できる施設が必要となる。本研究においては、各自治体が指定している「緊急指定避難場所」と「指定避難所」[19]のうち、宿泊が可能な「指定避難所」を被災者の避難所と定義する。

各指定避難所には、施設の規模に応じて被災者の収容可能人数が定められている。そのため、すべての被災者が最寄りの避難所に移動した場合には、避難所が被災者を収容しきれなくなり、避難所に到着したにもかかわらず他の避難所に改めて移動せざるを得ない状況が生じる可能性がある。本研究では、すべての被災者が最寄りの避難所に移動しただけでは、上記の問題により総移動時間が増加するような状況を想定する。なお、本研究では、津波などの2次災害発生の可能性のある状況や通信インフラが断絶するような状況は想定しない。

### 3.2 前提条件

関連研究で述べたとおり、被災地内における被災者の位置分布の偏りと避難所の収容可能人数両方を考慮した避難方法は検討されていない。しかし、近年では、スマートフォンの普及、および、様々なIoTデバイス・センサの登場によってリアルタイムに人の位置情報や道路の混雑状況を計測可能になりつつある [20], [21]。したがって、本研究では、災害発生時の被災者の位置分布（エリアごとの混雑度）を把握できるものとして問題を設定する。

対象地域の被災者たちはスマートフォンなどの通信端末を所持しており、災害発生直後には各被災者の通信端末を介してそれぞれの位置情報を収集できるものとする。また、被災者は、スマートフォンにインストールされた避難所決定アプリにより、避難経路および避難所情報を取得できるものとする。避難所決定アプリは、被災者の位置や周辺の混雑度情報（他の被災者の位置情報）を基に避難先を決定する。本研究は、以上のような避難所決定システムが普及していることを前提とする。

### 3.3 問題設定

本研究で対象とする問題は、避難所へ避難するすべての被災者について、総避難時間を最小化するように各避難者の避難所を決定する問題である。被災者の集合を  $I$ 、避難所の集合を  $J$  とし、被災者  $i \in I$  の初期位置が分かる場合、避難所  $j \in J$  への最短経路が避難経路  $r_{ij}$  として一意に決定されるとする。被災者  $i$  の避難所  $j$  までの避難移動距離を  $|r_{ij}|$  として表す。また、被災者  $i$  が避難所  $j$  へと避難するかどうかを 2 値変数  $x_{ij}$  で表す。被災者  $i$  が避難所  $j$  へと避難する場合、 $x_{ij}$  の値は 1 となり、避難しない場合は 0 となるものとする。

被災者  $i$  は、避難所の集合  $J$  の中から 1 つの避難先を決定しなければならない。すべての被災者が受けるこの制約を式 (1) で表す。

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I \quad (1)$$

避難所  $j$  が避難先になっている被災者の集合を  $I_j$  ( $I_j \subseteq I$ ) と表す。避難所  $j$  には、被災者の収容可能人数が定められており、これを定数  $C_j$  と表記する。各避難所は収容可能人数を超えて被災者を受け入れられないものとする。そのため、避難所  $j$  へ避難する被災者  $I_j$  の人数  $|I_j|$  は、収容可能人数  $C_j$  以下でなければならない。この制約を式 (2) で表す。

$$|I_j| \leq C_j, \forall j \in J \quad (2)$$

内閣府の調査 [22] によると、半径 1m 以内に存在する人数が 1.5 人未満の場合、人は一定の歩行速度で移動できるが、1.5 人以上になると周辺の人の影響で歩行速度が低下し、さらに、6 人以上になると著しく歩行速度が低下することが分かっている。本問題では、上記の調査 [22] で求められた人の移動速度のモデルを基に、任意の時間  $t$  における被災者  $i$  の歩行速度  $v(u)$  を式 (3) のように定義する。

$$v(u) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} v_0 & (n_{ij}^t < 1.5) \\ v_0 - (0.2 \times n_{ij}^t - 0.4) & (1.5 \leq n_{ij}^t < 6) \\ \frac{v_0 - 0.5}{n_{ij}^t} & (6 \leq n_{ij}^t) \\ 0 & (u = |r_{ij}|) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $u$  は被災者の避難経路  $r_{ij}$  上の移動距離、 $t$  は被災者が避難を開始してから距離  $u$  に移動するまでに掛かった時間、 $n_{ij}^t$  は  $t$  における被災者  $i$  の半径 1m 以内に存在する被災者の人数、 $v_0$  は被災者の標準歩行速度 [m/s] をそれぞれ表す。調査 [22] において、標準歩行速度として 4,000 [m/h] ( $\approx 1.1$  [m/s]) という一意な値が用いられているが、現実的には年齢や身長などによって標準歩行速度は異なるため、一意な値とはせず被災者ごとに異なる値が与えられるものとする。また、移動距離  $u$  が避難移動距離  $|r_{ij}|$  と一致する場合、被災者が避難所に到着したと見なし、

速度  $v(u)$  を 0 とする。避難者  $i$  の初期位置から避難所  $j$  までの移動時間を  $t_{ij}$  とする。 $t_{ij}$  を次のように定義する。

$$t_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^{|r_{ij}|} \frac{1}{v(u)} du \quad (4)$$

上記の制約を満たしながら、被災者  $i$  の避難時間  $t_{ij}$  の合計値を最小化することが本問題の目的である。よって、本問題の目的関数を以下の式 (5) で定義する。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ij} \quad (5) \\ & \text{subject to} \quad (1) \ (2) \end{aligned}$$

次章では、上記の問題を解決する手法を提案する。

## 4. 混雑度を考慮した避難所決定手法

3 章で述べた問題は組合せ最適化問題であり、被災者の数  $|I|$ 、避難所の数  $|J|$  に応じて、可能な組合せの数は指数的に増加する。そのため、最適解を求めようとすると長い計算時間を要するが、災害時での利用を考えた場合、災害発生時にすぐ避難すべき避難所が指示できなければならない。我々は、現実的に採用可能なアルゴリズムについて検討するため、計算時間の短いヒューリスティックなアルゴリズムを提案する。

ヒューリスティックなアルゴリズムとして、「全被災者の中で最小の避難予想時間  $t_{ij}$  を持つ被災者  $i$  から順に避難先を避難所  $j$  と決定していく」アルゴリズムや、「全被災者の中で最大の避難予想時間  $t_{ij}$  を持つ被災者  $i$  から順に、その  $i$  における最短避難時間の避難先を避難所  $j$  と決定していく」アルゴリズムなどが考えられる。後者のアルゴリズムでは、極端に避難時間が長くなる被災者を減らし、被災者間の避難時間の分散を小さくすることができる。

ここで、現実的に採用可能なアルゴリズムを検討するにあたり、計算時間に加え、被災者の受託容易性を考慮する。たとえば、避難所の目の前で被災したにもかかわらず、その時点で避難可能な目の前の避難所ではなく、別の避難所へ避難するように指示された場合、被災者はその指示を受け入れ難いと考えられる。そこで我々は、最小の避難予想時間  $t_{ij}$  を持つ被災者  $i$  の避難先を避難所  $j$  と決定する手法を提案する。

図 1 に、提案手法のフローチャートを示す。3.2 節において述べたように、避難所決定システムでは、災害が発生した直後の各被災者の位置を把握している。そして、収集した被災者の位置情報と、各避難所の位置情報および収容可能人数から表 1 のような避難予想時間表を作成する。避難場所の決定処理では、まず、(1) 避難予測時間表の中から予測避難時間  $t_{ij}$  が最も短い被災者と避難所を探索し、避難先の避難所と避難する被災者を決定する。次に、(2) 避難先として決定された避難所の現在の収容人数が収容可能人数を超過していないかを確認し、超過しているのなら、避難

表 1 被災者の避難所ごとの避難予想時間表の例

Table 1 Example of evacuation prediction time table for each evacuation center of victims.

	避難所 $j_1$ ( $C_j = 2$ )	避難所 $j_2$ ( $C_j = 1$ )	避難所 $j_3$ ( $C_j = 1$ )
被災者 $i_1$ の予測避難時間 $t_{i_1j}$ [sec]	40	10	20
被災者 $i_2$ の予測避難時間 $t_{i_2j}$ [sec]	30	15	15
被災者 $i_3$ の予測避難時間 $t_{i_3j}$ [sec]	25	20	40
被災者 $i_4$ の予測避難時間 $t_{i_4j}$ [sec]	20	25	10

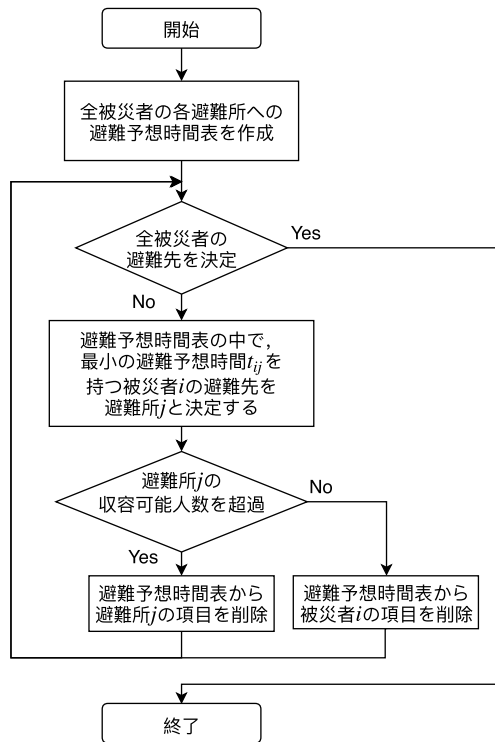


図 1 提案手法のフローチャート

Fig. 1 Flowchart of proposed method.

予測時間表から避難所  $j$  の列を削除する。(3) 避難先と避難する被災者が決定したら、避難予測時間表から避難先が決定された被災者  $i$  の行情報を削除する。以上の(1)~(3)のステップを全被災者の避難先が決定するまで繰り返す。

表 1 は、4 人の被災者と 3 つの避難所が存在している状況を想定して避難予想時間表を作成した例を表している。この例では、避難所  $j_1$  の収容可能人数は  $C_j = 2$ 、避難所  $j_2$ 、避難所  $j_3$  の収容可能人数は  $C_j = 1$  であり、被災者  $i_1 \sim i_4$  は、被災地内に一様に初期位置が設定されている。表 1 に対して、すべての被災者に最短経路探索を適用した場合には、避難所  $j_2$  を選択する被災者が 2 人存在するため、たらい回しが発生する。しかし、表 1 に提案手法を適用した場合、避難所  $j_1$  へ被災者  $i_3$  と被災者  $i_4$  が避難し、避難所  $j_2$  へ被災者  $i_1$  が避難し、避難所  $j_3$  へ被災者  $i_2$  が避難することで、たらい回しが発生せずに、被災者全体の避難時間が短くなる。

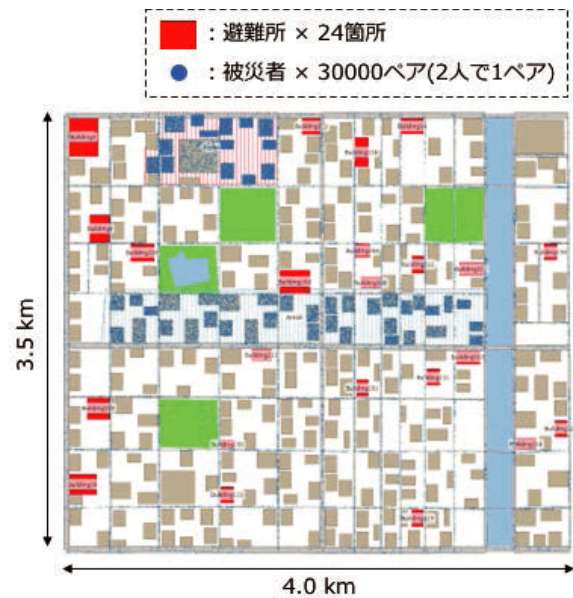


図 2 Scenargie のシミュレーションマップ

Fig. 2 Simulation map of Scenargie.

## 5. 評価実験

本章では、提案手法の効果を評価するため、シミュレーションを用いた比較実験を行う。実験環境を説明したのち、比較手法と評価指標について述べる。

### 5.1 実験環境

提案する避難所決定手法を評価するため、システム解析・評価のためのシナリオ生成・管理フレームワーク Scenargie [23] と、そのマルチエージェントシミュレーションモジュールを使用した。本シミュレーションを実行した PC は、CPU : Intel Core i7-2700K 3.50 GHz, メモリ : 8 GB, OS : CentOS である。

表 2 はシミュレーションのパラメータであり、図 2 は本実験で使用するシミュレーションマップである。本マップは、混雑する観光地の一例として、京都の祇園・四条周辺を想定し、3.5 km × 4.0 km の広さで作成している。道路幅は、実際の道路幅を参考に、5–45 [m] に設定している。

避難所は、京都市が公開している避難所の場所および収容可能人数に基づいて、24 カ所を設定している [24]。公開されている避難所の収容可能人数は、数日間の生活を前提

表 2 シミュレーターのパラメータ設定表  
Table 2 Parameter setting of simulator.

マップサイズ	3.5 km × 4.0 km
道路幅	5–45 [m]
避難所数	24 カ所
被災者数	30,000 ペア
標準歩行速度	1.0–1.5 [km/h]

としているためそれほど多くない。しかし、本論文で対象とする安全確保のために一時的に被災者を収容するだけならば、収容可能人数を超えて避難可能である。この想定は、東日本大震災において、東京などで帰宅困難者が多数発生した際、200 人の収容可能人数の避難所に 1,000 人から 2,000 人の被災者が一時的に避難していた例が多数報告されていることに基づいている。したがって、公開されている避難所の収容可能人数の 10 倍を避難可能人数の上限として設定する。結果として、約 7 万人が避難可能である。

混雑状況は、1 日に 9 万人が集まる京都の祇園祭を参考に設定している。図 2 に示すマップは、京都の祇園祭で使用される広さの 3 分の 2 に該当するため、マップ上には、合計 6 万人 (9 万の  $2/3 = 6$  万人) の被災者が存在すると設定している。また、京都市の調査によると観光客の同行者数は 2 人が最も割合が高いため [25]、本シミュレーションにおいては、2 人がペアで避難すると仮定する。したがって、図 2 のマップ上には、合計 3 万の被災者ペア (合計人数 6 万人) を配置する。

各被災者の標準歩行速度は 1.0–1.5 [km/h] とし、式 (3) で定義した歩行速度に基づいて、各シミュレーション時刻 (毎秒) において、各被災者が歩行している道路の混雑度 (同一道路上に存在する他の被災者の数の多寡) に応じて、被災者の歩行速度を変化させる。

被災者の初期配置は、祇園祭の巡行や屋台の場所などを参考に、図 2 のマップの上部と中央部分のエリアに 20,000 人ずつ集中して配置した。また、残りの 20,000 人はマップの全体に一様に分布して配置した。

## 5.2 比較手法およびシナリオ

提案手法の有効性を評価するために、(1) 最短経路探索および (2) ランダム選択による避難場所決定を含め、以下の 3 つの手法を比較する。

- (1) 最短経路探索による避難所決定
- (2) ランダム選択による避難所決定
- (3) 混雑度を考慮した避難所決定 (提案手法)

提案手法については、被災者の一部が指示に従わなかった場合も比較対象とする。具体的には、提案手法で、指示に従わない被災者の割合を、20%、40%、60%、80%と変化させたシナリオを比較対象とする。各手法・シナリオの詳細について述べる。

### 5.2.1 最短経路探索による避難所決定

最短経路探索による避難所決定では、それぞれの被災者は、まず最寄りの避難所を避難先場所として決定し、避難先へと最短経路で移動する。被災者がたどり着いた避難所がすでに収容可能人数を超えていた場合、たどり着いた避難所を除いて最短経路探索をやり直し、再度別の避難所へと移動する。被災者が避難所にたどり着き、避難所の状態が収容可能であった場合、避難所に収容され、避難完了とする。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

### 5.2.2 ランダム選択による避難所決定

ランダム選択による避難所決定では、それぞれの被災者は避難対象場所の中からランダムに避難先場所を決定し、決定した避難先へと最短経路で移動する。被災者がたどり着いた避難所がすでに収容可能人数を超えていた場合、たどり着いた避難所を除いてランダム選択をやり直し、再度別の避難所へと移動する。被災者が避難所にたどり着き収容可能だった場合には、避難所に収容され避難完了とする。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

### 5.2.3 混雑度を考慮した避難所決定

災害発生時の混雑度を考慮した避難所決定では、災害発生直後 (シミュレーション開始時) の混雑状況 (被災者の配置) を考慮し、避難所を決定する。避難所の決定方法は、4 章で説明したとおりであり、被災者は決定された避難先へ最短経路で移動する。各被災者の予測避難時間は、処理時間短縮のため、被災者の位置と各避難所の位置の直線距離および標準歩行速度に基づいて計算する。

また、被災者の一部が指示に従わなかった場合、それらの被災者は最短の避難所に避難するものとする。また、指示に従わなかった被災者が原因で、指定された避難所に入らなかった被災者は、最短の避難所を避難先として決定し直し、避難行動を行う。

## 5.3 評価指標

提案手法を含めた 3 つの手法を評価するため、評価指標を設定する。評価指標としては、平均避難完了時間  $T_{esc}$  を採用する。平均避難完了時間  $T_{esc}$  は、災害発生後から被災者全員が避難完了したときの各被災者の避難時間  $t_{ij}$  の平均である。災害時における平均避難完了時間の遅延は、2 次被害の拡大など被害の拡大につながる事が考えられる。そのため、平均避難完了時間はできるだけ短いことが望ましい。また、各被災者が負担する避難コストは、できるだけ差がないほうが好ましい。このことを確認するため、各被災者の避難時間  $t_{ij}$  の標準偏差を確認する。

## 5.4 実験結果

表 3 に、各手法・シナリオにおけるシミュレーション結果を示す。また、図 3 は、各手法・シナリオごとの避難完

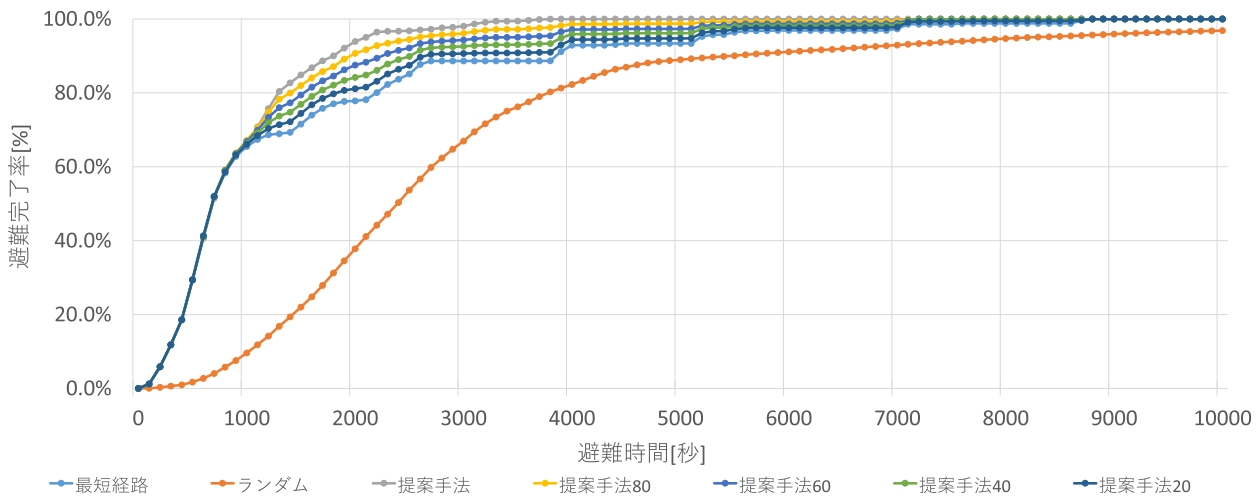


図 3 各手法ごとの避難完了率の時間変化

Fig. 3 Time variation of evacuation completion rate for each method.

表 3 各比較手法・シナリオにおける実験結果表

Table 3 Experimental result in each method and scenario.

手法	平均避難時間 [秒]	避難時間の標準偏差
最短経路	1,398.7	1,657.2
ランダム	3,047.2	2,712.8
提案手法	891.3	641.6
提案手法 (80%)	987.7	937.3
提案手法 (60%)	1,083.3	1,146.1
提案手法 (40%)	1,173.7	1,303.6
提案手法 (20%)	1,276.8	1,483.5

了率の累積分布を示している。最短経路探索による避難所決定手法に基づく平均避難時間は 1,389.7 秒、ランダム選択による避難所決定手法に基づく平均避難時間は 3,047.2 秒、災害発生時の混雑状況を考慮した避難所決定手法（提案手法）に基づく平均避難時間は 891.3 秒である。この結果から、提案手法により平均避難時間が最も短くなることが確認できる。

また、標準偏差についても、最短経路探索による避難所決定手法が 1,657.2 秒であるのに対して、提案手法は、641.6 秒と最小になっていることが確認できる。このことから、各被災者の避難時間のばらつきにおいても、提案手法が最も良いことが確認できる。

被災者全員の避難完了までの最大避難完了時間も、最短経路探索による避難所決定手法が 8,805 秒、ランダム選択による避難所決定手法が 34,890 秒であるのに対し、提案手法では 3,890 秒と大幅に短縮されており、被災者にとって有用な手法であることが確認できる。

次に、提案手法に対して、避難指示に従う人の割合を 80% から 20% に変化させた場合のシナリオについての結果を述べる。表 3 に示すとおり、避難指示に従う人の割合が減少するごとに、平均避難時間および標準偏差が大きくなることが確認できる。しかしながら、避難指示に従う人の

割合が 20% であっても、最短経路探索による避難所決定手法やランダム選択による避難所決定手法による平均避難時間よりも短く 1,276.8 秒である。これは、20% の被災者がこの提案手法に基づいて避難するだけでも、平均避難時間短縮の効果があることを示している。これらのことから、我々の提案手法は、混雑度に偏りがある地域で発生した大規模災害の避難所誘導に有効であると考えられる。

また、図 3 において最短経路探索による避難所決定手法に着目すると、避難完了率の変化が階段状に変化することが確認できる。これは、到着した避難所の収容人数が最大人数に到達していたために、再度別の避難所への移動が発生しているためと考えられる。一方、提案手法では、滑らかなグラフとなっており、たらい回しが発生せず効率的な避難が実施できていることが確認できる。

### 5.5 提案手法の課題

実験結果より、提案手法の有効性が示されたが、課題も存在する。第 1 に、提案手法では、災害発生時の混雑度の偏りは考慮しているが、災害発生時の道路の混雑度や避難開始後に動的に変化する混雑度を考慮できていない点がある。避難所に近い順に避難先を決定していく場合、後で決定される被災者ほど、混雑に巻き込まれ、避難時間が長くなる可能性が高くなる。より正確に予測避難時間を算出するには、災害発生時の道路の混雑度や動的に変化する混雑度も考慮した避難所決定手法の開発が必要となる。

第 2 に、提案手法はヒューリスティックな手法であり、最適な手法となっていない点がある。本論文では、現実的に採用可能な手法として単純に避難所に近い人から避難所を決定する手法を採用しているが、より平均避難時間を短くする手法や、被災者の受諾容易性を考慮しつつ被災者間の避難時間の分散を減らす手法などについても検討する必要がある。

第3に、被害状況に応じた避難所変更に対応していない点があげられる。災害が発生した場合、事故などにより道路が寸断されることなどが想定される。本シミュレーションでは、このような災害状況の変化は考慮できていない。時々刻々と変化する災害状況に合わせた避難所変更については、その状況収集方法も含めて検討課題である。

## 6. まとめ

本論文では、観光地などの人が集中するエリアにおいて災害が発生した際に、被災者の避難完了時間を削減することを目指し、混雑度を考慮した避難所決定手法を提案した。提案手法では、すべての被災者が最寄りの避難所に避難すると収容数を超過してしまい他の避難所への移動を余儀なくされるという問題に対処するため、被災者ごとの避難時間および避難所の収容人数に基づいて避難所を決定するというアプローチをとった。提案手法の有効性を確認するため、京都の祇園祭を想定したマップでシミュレーションを行い、一般的な避難所決定手法であるランダム選択、最短経路選択および提案手法を適用した場合とを比較した。その結果、提案手法が、最短経路選択やランダム選択の結果と比べ、避難時間の最大値や平均避難時間を削減できることを明らかにした。また、提案手法に従う被災者が全体の20%であっても、効果があることを明らかにした。

今後は、5.5節において指摘したとおり、動的に変化する混雑度や避難状況に合わせて、より効率的な避難場所を決定できる手法について検討する。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP26220001, JP16H01721, JP16H02914 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 内閣府：防災情報のページ，平成29年版防災白書，内閣府（オンライン），入手先 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/pdf/H29.honbun.pdf>)（参照2017-06-23）。
- [2] 廣井 悠，関谷直也，中島良太，藁谷峻太郎，花原英徳：東日本大震災における首都圏の帰宅困難者に関する社会調査，地域安全学会論文集，Vol.15，pp.343–353（2011）。
- [3] 国土地理院：ハザードマップ，国土交通省国土地理院（オンライン），入手先 (<http://www.gsi.go.jp/hokkaido/bousai-hazard-hazard.htm>)（参照2017-06-23）。
- [4] 佐藤 瞳，柴田義孝，内田法彦：GISを利用したリアルタイムハザードマップシステム，情報処理学会第74回全国大会講演論文集，Vol.2012，No.1，pp.597–599（2012）。
- [5] 越村俊一：リアルタイム津波浸水・被害予測と災害情報の配信：G空間防災システムとLアラートの連携による減災力強化，情報管理，Vol.59，No.12，pp.822–828（2017）。
- [6] Trono, E.M., Fujimoto, M., Suwa, H., Arakawa, Y. and Yasumoto, K.: Generating pedestrian maps of disaster areas through ad-hoc deployment of computing resources across a DTN, *Computer Communications*, Vol.100, pp.129–142（2017）。
- [7] Tsunemine, T., Kadokawa, E., Ueda, Y., Fukumoto, J., Wada, T., Ohtsuki, K. and Okada, H.: Emergency urgent communications for searching evacuation route in a local disaster, *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2008)*, pp.1196–1200, IEEE（2008）。
- [8] Kasai, Y., Sasabe, M. and Kasahara, S.: Congestion-aware route selection in automatic evacuation guiding based on cooperation between evacuees and their mobile nodes, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol.2017, No.1, p.164（2017）。
- [9] Komatsu, N., Sasabe, M., Kawahara, J. and Kasahara, S.: Automatic evacuation guiding scheme based on implicit interactions between evacuees and their mobile nodes, *GeoInformatica*, Vol.22, No.1, pp.127–141（2018）。
- [10] 鈴木 介，今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，自然災害科学，Vol.23，No.4，pp.521–538（2005）。
- [11] 中島 悠，椎名宏徳，服部宏充，八横博史，石田 亨：マルチエージェントシミュレーションを用いた避難誘導実験の拡張，情報処理学会論文誌，Vol.49，No.6，pp.1954–1961（2008）。
- [12] Oomes, A.: Organization awareness in crisis management, *Proc. International Workshop on Information Systems on Crisis Response and Management (ISCRAM)*（2004）。
- [13] Fitrianie, S. and Rothkrantz, L.J.: Dynamic Routing during Disaster Events, *ISCRAM 2015: Proc. 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management Conference*, CIEM/University of Agder（2015）。
- [14] 村木雄二，狩野 均：マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性，情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決（MPS），Vol.2004，No.130，pp.69–72（2004）。
- [15] 村木雄二，狩野 均：地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル，人工知能学会論文誌，Vol.22，No.4，pp.416–424（2007）。
- [16] 野中陽介，大西正輝，山下倫央，岡田 崇，島田敬士，谷口倫一郎：大規模な避難シミュレーションのための歩行速度モデルの精緻化，電気学会論文誌C，Vol.133，No.9，pp.1779–1786（2013）。
- [17] 大西正輝，山下倫央，星川哲也，佐藤和人：人の流れの計測とシミュレーションによる避難誘導方法の伝承—新国立劇場における避難体験オペラコンサートを例に，人工知能学会研究会資料SIG-KST-026-06（2015）。
- [18] Murotsu, H., Fujimoto, M., Suzuki, T., Ebara, H., Wada, T. and Okada, H.: A novel evacuation route search algorithm for route distribution of evacuees groups in fire disasters, *Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC 2014)*, pp.182–188, IEEE（2014）。
- [19] 内閣府：防災情報のページ，指定緊急避難場所の指定に関する手引き，内閣府（オンライン），入手先 (<http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/pdf/shiteitebiki.pdf>)（参照2017-08-23）。
- [20] Chan, A.B., Liang, Z.-S.J. and Vasconcelos, N.: Privacy preserving crowd monitoring: Counting people without people models or tracking, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2008)*, pp.1–7, IEEE（2008）。
- [21] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones, *2013 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp.193–200, IEEE（2013）。
- [22] 内閣府：防災情報のページ，帰宅行動シミュレーション結果について，内閣府（オンライン），入手先 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/>)



- pdf/sanko03.pdf) (参照 2017-06-23).
- [23] Scenargie: Space-Time Engineering, LCC, available from <http://www.spacetime-eng.com/en/index.html>.
- [24] 京都市：京都市指定避難所一覧, 京都市 (オンライン), 入手先 <http://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/cmsfiles/contents/0000109/109137/Kyoto.Shelter291201.pdf>) (参照 2018-01-25).
- [25] 京都市：京都観光総合調査平成 27 年 (2015 年 1 月から 12 月), 京都市 (オンライン), 入手先 [https://kanko.city.kyoto.lg.jp/chosa/image/kanko\\_chosa27.pdf](https://kanko.city.kyoto.lg.jp/chosa/image/kanko_chosa27.pdf)) (参照 2018-01-25).



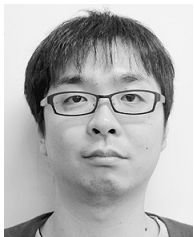
梅木 寿人

2016 年熊本高等専門学校専攻科電子情報システム工学専攻卒業。2018 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程修了。ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。現在、西日本電信電話株式会社に勤務。



中村 優吾 (学生会員)

2015 年函館工業高等専門学校専攻科生産システム工学科修了。2017 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程修了。同年同大学博士後期課程在学中。エッジコンピューティングに関する研究に従事。



藤本 まなと (正会員)

2009 年関西大学工学部卒業。2015 年同大学大学院博士課程後期課程修了。博士 (工学)。同年より奈良先端科学技術大学院大学助教。高齢者見守り、行動認識、位置推定に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



水本 旭洋 (正会員)

2009 年近畿大学工学部卒業。2014 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。2016 年より同大学博士研究員。博士 (工学)。現在、同大学特任助教。ユビキタスコンピューティングに関する研究に従

事。IEEE 会員。



諏訪 博彦 (正会員)

1998 年群馬大学社会情報学部卒業。2006 年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士後期課程修了。博士 (学術)。2014 年 10 月より奈良先端科学技術大学院大学助教。社会情報システムに関する研究に従事。



荒川 豊 (正会員)

2001 年慶應義塾大学理工学部卒業。2006 年同大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。同大学院特別研究助教、九州大学大学院システム情報科学研究科助教、フランクフルト大学およびドイツ人工知能研究所客員研究員

を経て、2013 年より奈良先端科学技術大学院大学准教授、現在に至る。2016 年より情報処理学会関西支部「行動変容と社会システム研究会」主査および JST さきがけ研究員、一般社団法人ブロードバンド推進協議会理事等を兼務。センサと AI を駆使した行動認識および行動変容に関する研究に従事。IEEE, ACM 各会員。



安本 慶一 (正会員)

1991 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995 年同大学大学院博士後期課程退学。博士 (工学)。2011 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。