

災害時の混雑情報を考慮した避難所決定手法の提案

梅木 寿人^{1,a)} 中村 優吾^{1,2} 藤本 まなと¹ 水本 旭洋¹ 諏訪 博彦¹ 荒川 豊^{1,3} 安本 慶一^{1,b)}

概要：地震などの突発的災害発生時において、被災者による自主的な安全確保や情報収集は重要な防災・減災対策の一つである。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り、被災者の迅速かつ確かな避難行動が重要である。しかしながら、京都のような人口密度の高い観光地では、多くの人々が一斉に避難を開始するため、避難経路の混雑や避難所の収容数超過を招き、結果として被災者の避難行動が遅れてしまうという問題が発生する。本論文では、このような問題を解決するため、観光地や大都市など多くの人々が活動している混雑地域を対象とし、全ての被災者の避難にかかる所要時間の総和を最小化することを目的とした新たな避難所決定手法を提案する。具体的には、避難所の収容数を考慮するために複数ナップサック問題を解き、避難先を決定する。その後、シミュレーションにより経路上での混雑を再現することで、混雑を考慮した避難時間を推定する。最後に、推定結果から全ての被災者の避難時間の総和を小さくするような避難先の再決定を行う。シミュレーションを繰り返し実行することで準最適解を得る。本稿では、京都の祇園祭を想定したマップに一般的な一般的な避難所決定手法を適用した場合と、本提案手法を適用した場合とを比較する。提案手法を用いた結果は、最短経路選択やランダム選択の結果と比べると避難時間の最大値や平均避難時間を減少できることがわかった。

KAZUHITO UMEKI^{1,a)} YUGO NAKAMURA^{1,2} MANATO FUJIMOTO¹ TERUHIRO MIZUMOTO¹
SUWA HIROHIKO¹ YUTAKA ARAKAWA^{1,3} KEIICHI YASUMOTO^{1,b)}

1. はじめに

近年、日本各地において、地震等の突発的大規模災害が頻発しており、それに伴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。その中でも、一次災害発生後の人的被害を抑えるための防災対策として、自治体が主導する企業・住民参加型の避難訓練や災害に強い街づくりに向けた取り組みが各地で推し進められている [1]。特に、人的被害を抑えるには、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（地震の震源地等）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。例えば、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関わらず、交通インフラに障害が生じ、約 400 万もの人々が自宅などに帰ることのできない帰宅困難者となった [2]。現状の避難誘導は、多数の帰宅困難者が発生した場合、警備員等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、東京や京都、大阪のような人口密度の高い都市や、数多くの観光客が特定エリアに集中する主要な観光地等を想定した場合、多くの人々が一斉に避難を開始することで、予期せぬ非常に大きな混雑が各地点で発生し、その影響により避難完了時間の大幅な遅延が予想される。たとえ混雑を回避して避難所にたどり着いたとしても、既に誘導された避難所の収容数が大幅に超えていることから、避難所への入所が拒否され、再び異なる避難所に移動しなければならないなど、避難所のたらい回し状態に陥る可能性もある。

以上の点を考慮すると、大規模災害時において被災者の避難誘導計画を立てる際には、災害による直接的な被害に加えて、人の行動によって引き起こされる人災も考慮する必要がある。避難時間の長さが二次災害の危険に直結する

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

² 日本学術振興会特別研究員
JSPS Fellow

³ JST さきがけ
JST PRESTO

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

b) yasumoto@is.naist.jp

大規模災害において、避難時間短縮のために時々刻々と変化する混雑情報を考慮した最適な避難誘導が求められている。上記のように、被災の中心地から離れていた場所における避難誘導にも解決すべき重要な課題が存在している。しかし、被災中心地を対象にした研究は数多く行われているが [3], [4], [5], [6], 被害の中心地から少し離れた場所を避難誘導の対象地として設定している研究は数少ない。

近年、混雑情報を提供するサービスや、様々な IoT 機器を使った混雑度計測方法が複数提案されている [7], [8], [9], [10]。これらの手法によって、人の移動に伴う各所の混雑およびその変化が把握できるようになり、将来的には災害時においても各所の混雑度がリアルタイムに取得できるようになることが期待されている。一方、IBM は人工知能 Watson を使い、京都の祇園祭終了後の人々の移動を、気象の変化なども考慮したシミュレーションにより先読みすることで、バスの増便数の決定などに役立てる取り組みを行っている。近い将来、平常時や災害時においても将来発生するであろう各所での混雑度を予測できれば、経路誘導の効率化に利用できる可能性がある。

本研究では、混雑地域で発生した大規模災害を想定し、避難所の収容数および各所での混雑度予測に基づい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、全ての被災者の避難完了までの時間の総和を最小化することを目的に、各被災者に対して、避難所と経路を提示する。各避難所の収容数と、混雑度から取得可能な各エリアの人の数、各エリアから避難所への距離などを考慮し、複数ナップサック問題 [11] を解くことで、各被災者に対する避難所・経路を決定する。災害時には人が一斉に避難行動を始めるため、災害発生直後の混雑度を考慮したとしても、指示された避難所・経路に沿った人々の移動によって新たな混雑が発生する可能性がある。この問題に対処するため、人々が指定された避難所に指定経路で移動の様子と、移動によって起こる新たな混雑をシミュレーションで再現することで、各被災者の避難完了時間を予測し、全ての被災者の避難完了時間の総和が小さくなるように避難所・経路を変更する。予測結果の被災者の避難完了時間の総和が最小になるまで繰り返すことで、被災者にとって最適な避難所を決定する。本稿では、京都の祇園祭を想定したマップにて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、最短経路選択を適応した場合と、本提案手法を適応した場合とを比較し、提案手法の評価を行った。提案手法を用いた結果は、最短経路選択やランダム選択の結果と比べると避難時間の最大値や平均避難時間を減少させることがわかった。

2. 関連研究

我が国では、地震や洪水など予期せぬ様々な自然災害が

発生することから、建物の耐震化やスーパー堤防の整備などの多種多様な災害対策が行われている。我々が対象とする災害時の避難行動に関連する対策として、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国土交通省や各地方自治体で制作・配布されている [12]。また、被害情報を収集し、被害情報をリアルタイムに GIS 上に表示するもの [13] 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 [14] といった既存のハザードマップを拡張したシステムなども開発されている。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を確認することはできるが、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困難なため、避難所や避難経路の決定は被災者の感覚で決める必要がある。そのため、周辺の住民が一斉避難を開始した場合に、道路の渋滞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。

災害発生時の情報共有や避難経路の提示など、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。鈴木らは [3]、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、周辺住民が一斉に 1 か所の避難所に最短経路で避難する場合、周辺道路で大渋滞が発生することがわかっている。Oomes ら [4] 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。Fitriani ら [5] 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。上記の手法では、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災害発生時の混雑状況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も考慮されていない。

観光地では、道路の渋滞予測や大規模なイベントなどへの利用のためにリアルタイムな混雑情報収集に対する需要が高まっている。近年では、BLE [7] や Wi-Fi スキャナ [8]、レーザーレンジファインダ [9] などのデバイスを設置するだけで周辺の混雑状況を計測する手法や、スマートフォンを用いて歩行中の周囲の人流を計測する手法 [10] が提案されている。また、Yahoo! 地図の「混雑レーダー」や Agoop が提供する「混雑マップ」といったサービスも提供され始めており、今後各所での正確な混雑度を計測・提供するシステムが普及することで、屋内外問わず災害発生時の通路上の混雑状況を容易に取得できるようになると考えられる。

本研究では、災害発生時、観光地や大都市など多くの人々が活動している混雑地域における避難誘導を対象に、道路上の混雑状況を考慮して、避難者が複数の避難場所候補の中からより短時間で避難場所に到達できる避難場所の決定

手法を提案する．先行研究 [15] にて，提案する避難所決定手法について検討を行った．そこで得られた知見より，京都祇園祭りを想定したマップを作成し，提案する避難所決定手法の評価を行う．

3. 混雑を考慮した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，避難行動によって発生する道路の混雑状況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，まず，本研究で対象とする災害時の想定環境について述べ，混雑度を考慮した災害時避難計画問題についての前提条件を示した後，本問題の問題設定を行う．

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状況を想定する．このような状況においては，被災者は安全を確保しつつ1泊以上宿泊できる施設が必要となる．そのため，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」[16]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，全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関わらず他の避難所に改めて移動する必要がある可能性がある．本研究では，全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．

災害時においては，被災者がある特定の道路に集中し，混雑のため歩行速度が極端に低下することが考えられる．その結果として，避難場所決定時に想定した避難時間よりも実際の避難時間が長くなることが考えられる．本研究では，上記のような被災者の避難状況に応じて，道路の混雑状況が変化し，被災者の移動速度が動的に変化するような状況を想定する．本研究では，津波などの2次災害が発生す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

関連研究で述べた通り，災害発生時の混雑状況を考慮した屋外における避難方法は検討されていない．従来手法では，災害発生時の混雑状況がわからない前提のため，混雑度を考慮した最適な避難場所を決定できなかった．しかし，近年では，スマートフォンの位置情報サービスの普及，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混雑度を計測可能になりつつある [17], [18]．し

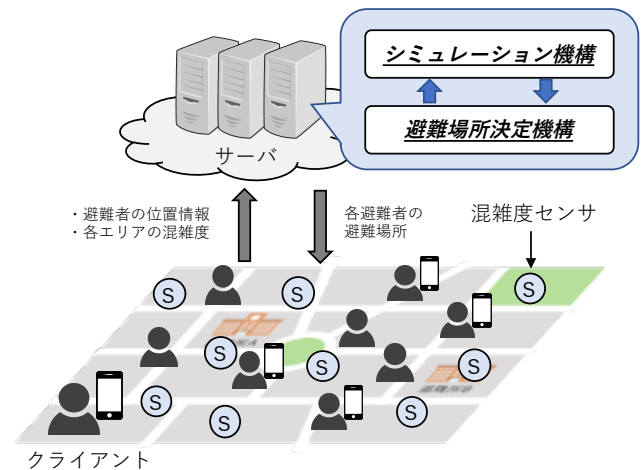


図1 前提とする避難誘導システムの概要

たがって，本研究では，災害発生時の混雑は計測できるものとして問題を設定する．

また，我々の先行研究 [15] では，図1のような避難所決定システムを提案している．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．対象地域の道には混雑度センサが設置されており，適宜道の混雑情報が収集される．避難所決定システムは，被災者の位置や周辺の混雑情報を元に避難先を決定し，各被災者は通信端末にて避難経路を取得できる．本研究では，上記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，避難所へ避難する全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 $i \in I$ の初期位置がわかる場合，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．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 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．

被災者 i は，避難所の集合 J の中から一つの避難先を決定しなければならない．この制約を式 (1) と表し，全ての被災者 $i \in I$ が式 (1) に定義する制約を受ける．

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

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。

$$|I_j| \leq C_j, I_j \subseteq I \quad (2)$$

内閣府の調査 [19] 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することができるが、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わかっている。本問題では、上記の調査 [19] 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。

$$v(u) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} v_0 & (n_{ij}^t < 1.5) \\ v_0 - (0.2 \times n_{ij}^t - 0.3) & (1.5 \leq n_{ij}^t < 6) \\ \frac{v_0 - 0.9}{n_{ij}^t} & (6 \leq n_{ij}^t) \\ 0 & (d_{ij}^t = |r_{ij}|) \end{cases} \quad (3)$$

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 [19] 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、一意な値とはせず各被災者に異なる値が与えられるものとする。

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。

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

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。

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

本章では、上記の問題を解決する手法を提案する。

4. 混雑状況を考慮した避難所決定手法

本章では、災害発生時における混雑度状況を考慮した避難所決定手法を提案する。避難所決定手法として、(1) 避難所の収容数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所決定方法と、(2) 道路混雑度を考慮した避難所決定方法の 2 つを提案する。

4.1 避難所の収容数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所決定方法

3 章で述べた通り、混雑状況に偏りがある場合は、単に最寄りの避難所に避難することは最適な避難所選択にはならない。この問題を解決するため、我々は問題 1 を複数ナップサック問題 (multiple knapsack problem: MKP) として考える。

各避難所をナップサックと捉える。各避難所には収容人数が存在する。この収容人数を各ナップサックに避難可能な避難者数とする。そのため、1 つの避難所に避難できる被災者の最大人数は収容人数となる。加えて、各避難所に避難する各被災者 i の避難時間は t_{ij} 秒と推定される。この時、式 (5) を最小化するように複数ナップサック問題を解くことにより、被災者全体の平均避難時間を最小化する避難所を決定する (提案手法 1)。これにより、災害発生時の混雑状況の偏りを考慮した避難所を決定する。

4.2 道路混雑度を考慮した避難所決定方法

提案手法 1 において、各被災者の避難時間 t_{ij} 分は避難所までの距離のみから推定されるため、避難開始後の被災者の移動に伴う動的な混雑状況が考慮されていない。被災者の移動に伴う動的な混雑状況の変化は、各被災者が避難する避難所によって変化するため、事前に把握することは困難である。そこで、我々は被災者の避難行動をシミュレートすることによって動的に変化する混雑状況を仮想的に再現し、その結果に基づいて避難所の再決定を行う方法を提案する。

まず、提案手法 1 に基づいて決定された避難所までの避難時間をシミュレートする。このとき、避難経路の混雑度を考慮した歩行速度に基づいて、避難時間を算出する。その結果、混雑状況によって避難時間が遅延することが考えられる。この遅延時間を考慮した避難時間に基づいて再度複数ナップサック問題を解き、再度シミュレーションを実施する。このプロセスをすべての被災者の避難所が変化しなくなるまで繰り返すことにより、被災者全体の平均避難時間を最小化する避難所を決定する (提案手法 2)。これにより、動的に変化する混雑状況を考慮した避難所を決定する。

5. 混雑を考慮した避難所決定手法の評価

本章では、提案手法の効果を実験環境で行う。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、マルチエージェントシミュレータ Scenargie[20] 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

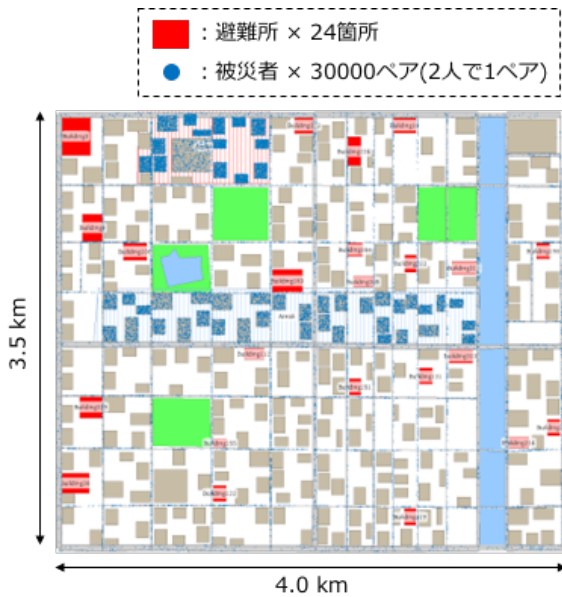


図 2 Scenargie のシミュレーションマップ

3.50 GHz, メモリ: 8GB, OS: CentOS である。表 1 に、シミュレーションのパラメータを示す。

図 2 に、本実験にて使用するシミュレーションマップを示す。本マップは、混雑する観光地の一例として、京都の祇園・四条周辺を想定して作成している。混雑状況は、一日に 9 万人が集まる京都の祇園祭を参考に想定している。道路幅は、実際の道路幅を参考に、5–45[m] に設定している。図 2 に示すマップは、京都の祇園祭で使用される広さの三分の二に該当するため、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想定する。また、京都市の調査によると観光客の同行者数は二人が最も割合が高いため [21]、本シミュレーションにおいては、二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。

避難所は、京都市が公開している避難所の場所や収容可能人数に基づいて、24 箇所を設定している [22]。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としているためそれほど多くない。しかし、本稿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。実際、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 1000 人から 2000 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。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ため、図 2 上の被災者は全て避難所に避難でき、マップ範囲外に避難することはないものとする。

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 20000

表 1 シミュレータのパラメータ設定表

避難所数	24 箇所
被災者数	30000 ペア
標準歩行速度	3.0–5.0 [km/h]
マップサイズ	3.5km × 4.0km
道路幅	5–45[m]

人ずつ集中して配置した。また、残りの 20000 人はマップの全体に様に分布して配置した。

なお、各被災者の歩行速度は、シミュレータの仕様により、式 (3) にて定義した歩行速度ではなく、各被災者が歩行している道路の混雑度 (同一路路上に存在する他の被災者の数の多寡) によって変化する。

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 4 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) 避難所の収容数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所決定方法 (提案手法 1)
- (4) 道路混雑度を考慮した避難所決定方法 (提案手法 2)

提案手法 2 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 2 にて、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。被災者が辿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。被災者が避難所に辿り着き、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。被災者が辿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。被災者が避難所に辿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。

表 2 比較手法・シナリオごとの実験結果表

手法	平均避難時間 [秒]	避難時間の標準偏差
最短経路	1152.0	1628.8
ランダム	1560.3	1255.8
提案手法 1	643.2	589.2
提案手法 2	587.4	532.8
提案手法 2 (20%)	621.8	617.2
提案手法 2 (40%)	688.1	780.1
提案手法 2 (60%)	778.1	948.4
提案手法 2 (80%)	898.6	1196.2

5.2.3 避難所の収容数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所決定方法

災害発生時の混雑状況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、4.1 節で説明した通りであり、被災者は決定された避難先へ最短経路で移動する。

5.2.4 道路混雑度を考慮した避難所決定方法

動的に変化する混雑度状況を考慮した避難所決定では、各被災者の避難行動によって変化するであろう混雑度状況を考慮し避難所を決定する。避難所の決定方法は 4.2 節で説明した通りであり、被災者は決定された避難先へ最短経路で移動する。

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れなかった被災者は、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 4 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時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。加えて、避難時間に影響を及ぼす要因として、各時間における混雑度を確認する。混雑度は、各被災者の各時間帯における混雑総量 C_{total} で表す。

5.4 実験結果

表 2 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。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 1152.0 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 1560.3 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 1)に基づく平均避難時間は 643.2 秒、動的に変化する混雑状況を考慮した避難所決定手法(提案手法 2)に基づく平均避難時間は 587.4 秒である。この結果から、動的に変化する混雑状況を考慮した提案手法 2 が、最も平均避難時間を短くす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 1628.8 秒であるのに対して、提案手法 2 は、532.8 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 2 が最も良いことが確認できる。

次に、提案手法 2 に対して、避難指示に従わない人の割合を 20% から 80% 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 2 に示す通り、避難指示に従わない人の割合が増加するごとに、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、避難指示に従わない人の割合が 80% 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 898.6 秒である。これは、20% の被災者がこの提案手法 2 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、我々が提案した動的に変化する混雑状況を考慮した避難所決定手法(提案手法 2)は、混雑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。

図 3 は、各手法・シナリオごとの避難完了率の累積分布を示している。また、図 4 は、各手法・シナリオごとの混雑総量の時間変化を示している。避難完了率の累積分布については、基本的に避難開始直後に急速に増加し、時間の経過とともに、増加率が緩やかになっていることが確認できる。また、混雑総量の時間変化については、避難開始直後に急速に増加し、その後時間の経過とともに減少することが確認できる。

ここで、最短経路探索による避難所決定手法に着目すると、避難完了率および混雑の時間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 2 では、別の避難所への再移動が発生しないため、滑らかなグラフとなっている。

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 8976 秒、ランダム選択による避難所決定手法が 13984 秒であるのに対し、提案手法 2 では 2752 秒と大幅に短縮されており、全ての被災者にとって有用な手法であることが確認できる。

6. まとめ

本稿では、観光地等の人が集中するエリアにおいて災害

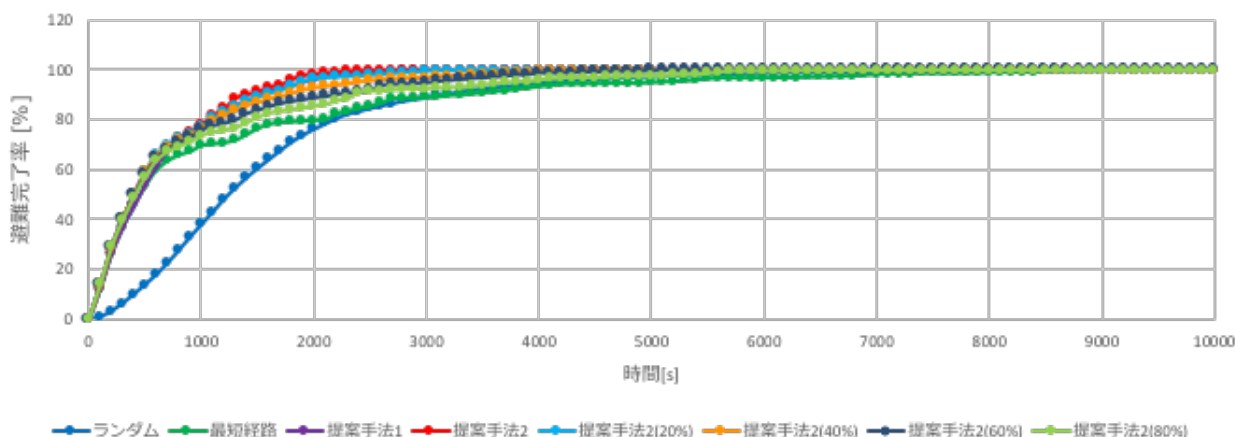


図 3 各手法ごとの避難完了率の時間変化

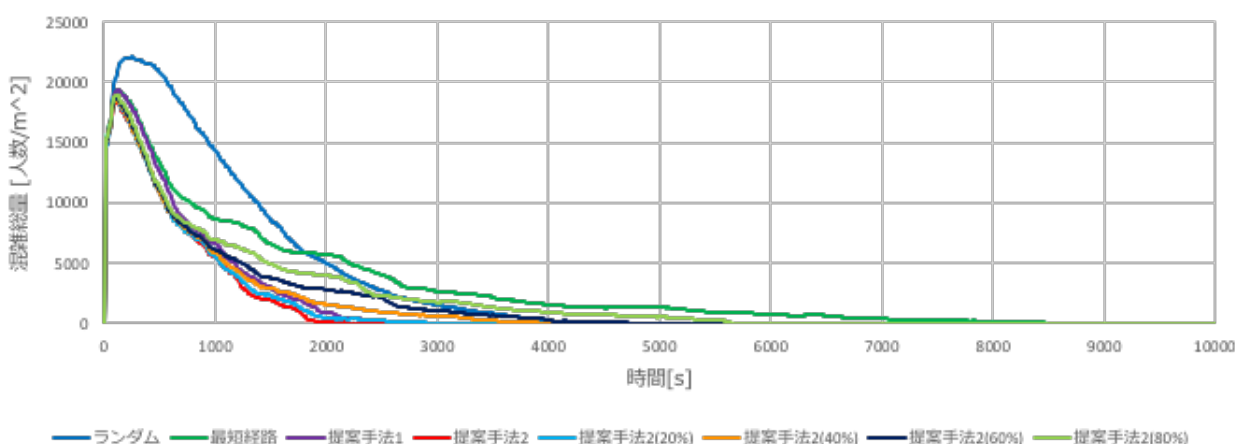


図 4 各手法ごとの混雑総量の時間変化

が発生した際に、全ての被災者の避難完了時間の総和を最小化することを目指した避難所決定手法を提案した。提案手法では、全ての被災者が最寄りの避難所に避難すると収容数を超え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、複数ナップサック問題により避難所を決定するというアプローチを取った。また、避難経路上で発生する道路の混雑による避難完了時間の大幅な遅延を避けるため、経路上での混雑度をシミュレーションで再現し、各被災者の避難完了時間を予測することで、避難時間の総和が短縮されるよう避難所を再決定する。提案手法の有効性を確認するために、京都の祇園祭を想定したマップにて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、最短経路選択を適応した場合と、本提案手法を適応した場合とを比較し、提案手法の評価を行った。提案手法を用いた結果は、最短経路選択やランダム選択の結果と比べると避難時間の最大値や平均避難時間を減少できることがわかった。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 26220001, 16H01721,

16H02914 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] 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).
- [4] Oomes, A.: Organization awareness in crisis management, *Proceedings of the international workshop on information systems on crisis response and management (ISCRAM)* (2004).
- [5] Fitriani, S. and Rothkrantz, L. J.: Dynamic Routing during Disaster Events, *ISCRAM 2015: Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management Conference, Kristiansand, Norway, 24-27 May 2015*, CIEM/University of Agder (2015).
- [6] Zheng, Y.-J., Chen, Q.-Z., Ling, H.-F. and Xue, J.-Y.: Rescue wings: Mobile computing and active services support for disaster rescue, *IEEE Transactions on Services*

- Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 594–607 (2016).
- [7] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones, *Pervasive computing and communications (PerCom), 2013 IEEE international conference on*, IEEE, pp. 193–200 (2013).
- [8] Weppner, J., Bischke, B. and Lukowicz, P.: Monitoring crowd condition in public spaces by tracking mobile consumer devices with wifi interface, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, ACM, pp. 1363–1371 (2016).
- [9] 樋口雄大, 山口弘純, 東野輝夫: 測域センサと近距離無線通信を併用した高精度屋内測位, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 5, pp. 1489–1498 (2016).
- [10] 西村友洋, 樋口雄大, 山口弘純, 東野輝夫: スマートフォンを活用した屋内環境における混雑センシング, 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 12, pp. 2511–2523 (2014).
- [11] 竹岡貴裕, 山田武夫: 固定費つき複数ナップサック問題の近似解法と厳密解法, 数理解析研究所講義録, Vol. 1548, pp. 99–106 (2007).
- [12] 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).
- [13] 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, 全国大会講演論文集, Vol. 2012, No. 1, pp. 597–599 (2012).
- [14] 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).
- [15] 梅木寿人, 中村優吾, 水本旭洋, 藤本まなと, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一ほか: 混雑地域における災害発生時の避難場所決定手法に関する一検討, 第 25 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, Vol. 2017, pp. 138–144 (2017).
- [16] 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).
- [17] Chan, A. B., Liang, Z.-S. J. and Vasconcelos, N.: Privacy preserving crowd monitoring: Counting people without people models or tracking, *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, IEEE, pp. 1–7 (2008).
- [18] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones, *Pervasive computing and communications (PerCom), 2013 IEEE international conference on*, IEEE, pp. 193–200 (2013).
- [19] 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).
- [20] Scenargie: Space-Time Engineering, LCC, <http://www.spacetime-eng.com/en/index.html>.
- [21] 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> (参照 2018-01-25).
- [22] 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).