

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

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

概要：様々な災害が起こる我が国において、避難訓練・誘導は重要な防災・減災対策の一つである。しかし、現在の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であり、多くの人が一斉に避難する状況において、避難所の収容数超過や避難所への経路上で発生する混雑による避難の遅延については考慮していない。本稿では、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、避難所の収容数、経路上の混雑度を考慮し、全ての人の避難にかかる所要時間の総和を最小化することを目指した避難誘導手法を提案する。提案手法では、災害発生時の各エリアの混雑度（人の数）が既知であると仮定し、それぞれの人に対する避難場所および経路を提示する。避難所の収容数を考慮するため、複数ナップサック問題を解くことで、初期避難所を決定し、シミュレーションにより、経路上での混雑を再現し混雑を考慮した避難時間を推定する。全ての人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い、シミュレーションを繰り返すことで準最適解を得る。提案手法のシミュレータ上での実現方法と提案手法の性能評価シナリオについて検討結果を報告する。

1. はじめに

我が国では、かねてから、地震などの一次災害や、地震後の火災などの二次災害被害が多く、災害被害情報を元に多くの防災対策が講じられている。中でも、一次災害後の人的被害を抑えるための防災支援に関する取り組みが多数行われており、自治体が主導する企業・住民参加型の避難訓練や、来訪者の多い大都市では、災害に強い街づくりに向けた取り組みが進められている [1]。特に人的被害を抑えるためには、住民の迅速かつ確かな避難行動が重要であることが認識されている [2]。

多くの人々が集中する大都市や観光地においては、ひとたび大規模災害が発生すると、夥しい数の人々が一斉に避難するため、避難・誘導など通常の訓練では予期できない混雑が発生する可能性がある。特に、多くの人々が特定エリアに集中する観光地では、混雑による避難完了時間の大幅な遅延が予想される。避難時間の長さが2次災害の危険に直結する大規模災害においては、避難時間の短縮は解決すべき重要な課題である。しかしながら、現状では、人々は最寄りの避難所に避難することが多く、避難所の収容数や、多数の人が同時に避難する際に生じるであろう経路上での混

雑とそれに伴う避難完了時間の遅延が考慮されていない。避難時間短縮のため、これらを考慮した最適な避難誘導が求められている。

近年、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 [3][4][5][6]。これらの手法によって、人の移動に伴う各所の混雑度およびその変化が把握できるようになり、災害時においても、将来的には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て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 [7]。災害時においても、シミュレーションにより将来発生するであろう各所での混雑度を予測できれば、避難誘導の効率化に利用できる可能性がある。

本稿では、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誘導手法を提案する。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、全ての避難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、各避難者に対して、避難場所と経路を提案する。各避難所の収容数を考慮するため、混雑度から取得可能な各エリアの人の数と各避難所の収容数、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 [8] を解くことで、

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 DC1
JSPS Research Fellow

各避難者に対する初期避難所・経路を決定する。しかし、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、人々が指定した避難所に指定経路で移動する様子をシミュレーションで再現し、移動によって起こる新たな混雑を再現し、各避難者の避難完了時間を予測する。そして、全ての避難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。これを繰り返すことで、準最適解を得る。以上の提案手法をマルチエージェントシミュレータを用いて実現する方法について検討した結果を述べる。

さらに、提案手法を評価するため、大規模マルチエージェントシミュレーションによる性能評価方法について検討した結果を報告する。

2. 関連研究

本節では、災害時の避難行動に関連する先行研究について述べる。

我が国では、地震や洪水など様々な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様々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災害対策として、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 [9]。また、収集した被害情報をリアルタイムに GIS 上に表示するハザードマップ [10] 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システム [11] などが開発されている。しかし、ハザードマップでは、避難所の場所や避難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、移動時間などを把握することはできないため、避難所や避難経路の決定は避難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。

災害発生時の避難行動の評価や経路決定の支援を目的とした研究が古くから行われている。鈴木らは [12]、アンケート調査から得られた避難者の行動特性を基に、津波発生時の避難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分かっている。また、村木ら [13][14] は、避難者の行動特性に加えて、避難者の周辺知識や、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。上記の手法では、避難場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。

中島ら [15] は、リアルタイムに避難所の収容数や道路の

危険度などを把握し、携帯端末を用いて避難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、避難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知ることができる。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、個々の避難者に対して最も近い避難所に最短経路で誘導するため、避難所から離れた避難者ほど渋滞に巻き込まれたあげく、たらい回しになる可能性が高い。

上記の手法では、避難場所までの最短経路を導出しているが、道路の道幅や混雑状況により渋滞が発生することで、最短距離であっても、最短時間で避難所に到達できるとは限らない。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、避難場所や避難経路を決定するモデルまでは作成していない。藤本ら [18][19] 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、避難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度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、屋内の避難誘導を対象としているため、屋外の避難誘導に適用することはできない。

近年では、BLE や WiFi スキャナ [4][5]、レーザーレンジファインダ [6] 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 [3] 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いる。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。

そこで本研究では、災害発生時の屋外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。

3. 提案手法

本研究では、災害発生時における混雑度状況を考慮した避難場所決定手法を提案する。本節ではまず災害発生時における問題設定を行い、その問題の中で用いる避難場所決定手法について述べる。避難場所決定手法として、(1) 災害発生直後の混雑度を考慮した避難場所決定方法と、(2) 災害発生後に動的変化する混雑状況を考慮した避難場所決定方法の 2 つを提案する。

3.1 問題設定

関連研究で述べた通り、災害発生時の混雑状況を考慮し

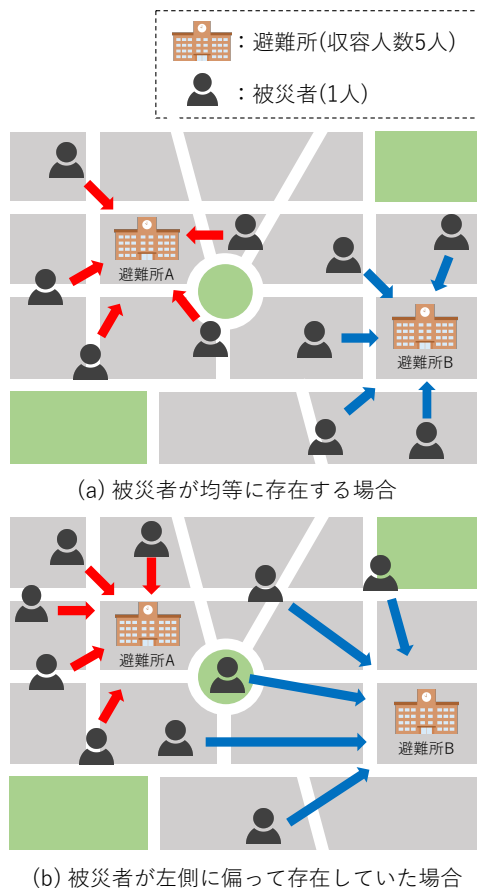


図 1 想定するシチュエーション

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することができなかった。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することが可能になりつつある。そのため、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、安全な避難先を確保する観点から、各自治体は、洪水、津波等の災害の種類ごとに、災害の危険が及ばない施設又は場所として、「避難対象場所」または「指定緊急避難場所」と「指定避難所」を指定している [20]。指定緊急避難場所は体育館や公民館、高台にある公園や広場などの緊急に避難する施設又は場所を示し、指定避難所は避難した居住者等が災害の危険がなくなるまで一定期間滞在し、又は災害により自宅へ戻れなくなった居住者等が一時的に滞在する施設を示す。本稿での「避難所」は、一時的に避難者を受け入れ可能かつ、防災上安全である場所として取り扱うため、指定緊急避難場所と指定避難所の両方を区別せずに「避難場所」と呼ぶ。

例えば、図 1 のような状況を想定する。避難所 A と避難所 B があり、それぞれの収容人数が 5 人とする。被災者が 10 人であり地図上に均等に存在する場合は、基本的に各

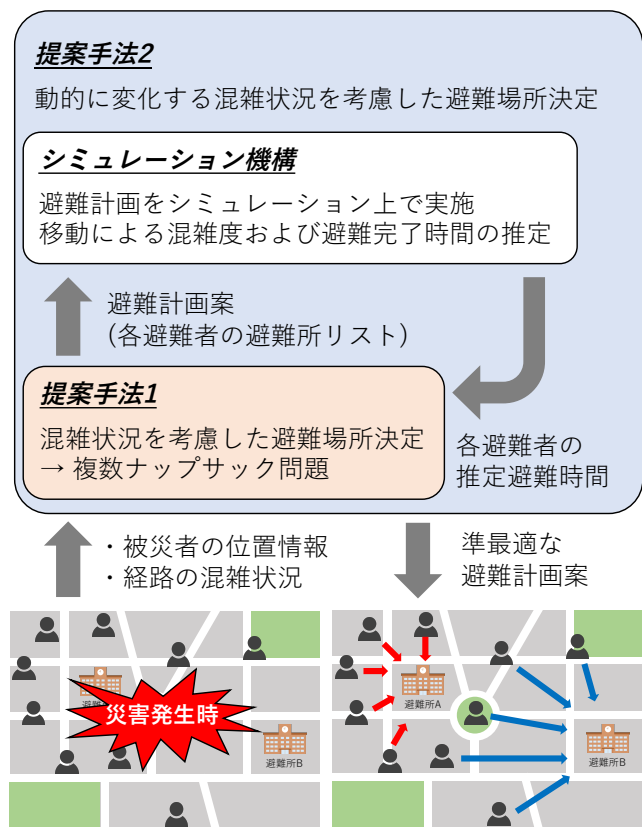


図 2 提案手法の概要

被災者は最寄りの避難所に避難することが望ましいと考えられる (図 1 (a)). しかしながら、地図の左方向に混雑が集中していた場合、全員が最寄りの避難所に避難すると収容数を超えてしまい、溢れた避難者が次の避難所への移動を余儀なくされる。従って、この場合、避難所 A と避難所 B の間に存在する被災者らは、避難所 A ではなく避難所 B へ避難することが、全体として避難時間の短縮につながると考えられる (図 1 (b)). このように、混雑度が把握できるならば、各避難者の避難所までの最短距離 (時間) だけではなく、他の避難者の避難距離 (時間) も考慮して避難する場所を検討する必要がある (問題 1)。

加えて、避難開始後、混雑状況は各避難者の避難行動に合わせて時々刻々と動的に変化する。そのため、避難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。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。この問題に対応するためには、災害発生後の混雑状況を考慮して避難場所を決定する必要があるが、災害発生後の混雑状況は各被災者の行動によって動的に変化するために事前に予測することは困難である。そのため、動的に変化する混雑状況を考慮して避難する場所を検討する必要がある (問題 2)。

本研究では、前述の 2 つの問題を解決する手法を提案する。

3.2 災害発生時の混雑状況を考慮した避難場所決定手法

3.1 節で述べた通り、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場所選択にならない。この問題を解決するために、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。

図 1 で示した通り各避難所には、収容人数が存在する。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。この時、各被災者 i は災害発生時にいた場所から避難する避難所まで避難するために t_i 分 (避難時間) がかかる。この時、各避難所に避難する被災者の避難時間の総和 $\sum t_i^{*1}$ を最小化することで、被災者全員が避難し終わるまでの時間を最小化する。

3.3 動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所決定手法

問題 2 については、3.1 節で述べた通り、動的に変化する混雑状況を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場所の再決定を行う方法を提案する (図 2)。

3.2 節においては、災害発生時の情報に基づいて最短経路に基づく避難時間を推定し、複数ナップサック問題を解く。しかしながら、混雑状況によって避難時間は遅延することが考えられる。シミュレーションを行うことにより、混雑による遅延時間を考慮した避難時間をフィードバックすることができる。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場所が変化しなくなるまで繰り返すことで、動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所を決定することとする。

3.4 システムの実現例

本提案システムは、図 3 に表すように、シミュレーションを実行するサーバ、クライアント端末 (ユーザ端末)、混雑度計測システムから構成される。クライアント端末を持つ避難者は自身の位置情報をサーバに送信する。また、混雑度推定システムは、各所に設置された混雑度センサにより各エリアの混雑度 (人の数) を計測しサーバに送信する。サーバは収集した混雑度を基に各エリアの避難者を配置し、シミュレーションを行うことで避難場所を決定する。その後、クライアント端末に対して避難場所を送信し、避難者に避難場所を提示する。

4. シミュレーションによる避難場所決定の例

本章では、シミュレーションにより避難完了時刻を求める方法について、例を挙げて説明する。各避難者の避難完

了時間を予測するためには、各避難者の避難先の決定、各避難者の避難所への移動、各地点における混雑度 (道ごとの人口密度 (人/ m^2)) の計測と混雑度に応じた移動速度の変化 (歩行速度の変化など) をシミュレータ上に再現する必要がある。混雑度の計測が可能であり、用途に応じて独自の人の行動モデルを組み込むことができるマルチエージェントシミュレータとして、Scenargie[21] が利用可能である。以降では、Scenargie を用いた場合の、提案手法の実現方法を検討する。

4.1 シミュレーションの構成例

シミュレーションのフィールド例として、図 4 のような格子状の街を想定してマップを作成する。なお、Open Street Map のデータを取り込み、任意の観光地をシミュレーションのフィールドに設定することも可能である。複数の建物の中に被災者が避難すべき避難所を 4 つ設定し、

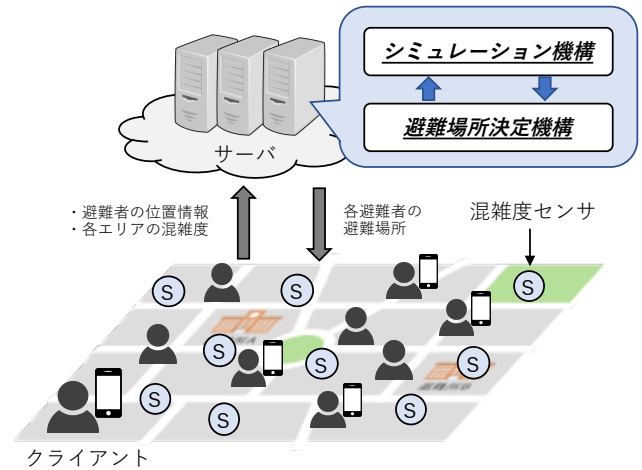


図 3 提案システムの概要

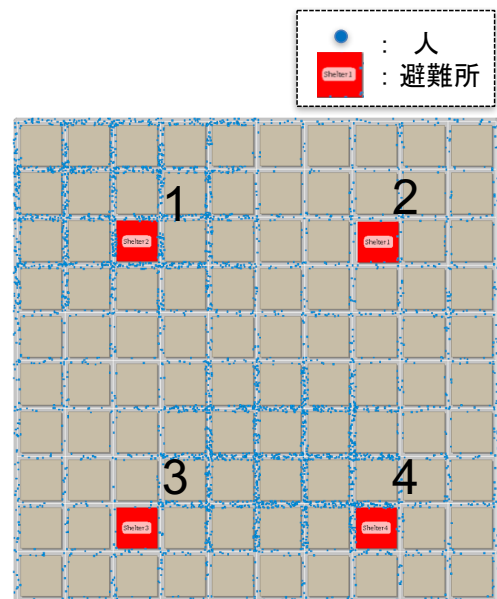


図 4 Scenargie のシミュレーションマップ

*1 これを被災者の中での避難時間の最大値とすることで、避難時間の偏りを解消することも可能。

それぞれ主要道路クラスの道幅 (20m, 1人/1平米) として道幅を設定する。また, それぞれの道については, $1人/m^2$ を超えないよう人の進入を制限する。今回の例においては, 簡単のため, 自動車等は存在しないと想定し, 被災者は歩道だけでなく, 車道も使用して避難行動を実施するものとする。また, 内閣府が混雑度とそれに応じて変化する被災者の歩行速度変化について調査している (表1) [22]。本研究では, 表1の設定で避難者の歩行速度を決定する。

図4のマップ上には合計4000人の避難者が存在し, 避難者全員が避難できるように4つの避難所の収容数はそれぞれ1000人とする。避難者は図4のマップ左上と中央下の 5×4 ブロックのエリアに1000人ずつ集中しており, 残りの2000人は一様に分布しているものとする。

上記で述べた避難者の分布において, 提案手法1 (3.2節), 提案手法2 (3.3節) を適用した場合, どのように避難場所が決定するのかについて述べる。

- (1) 各被災者 i について災害発生時の混雑度を考慮して各避難所への避難予測時間を算出する。(表2:1行目)
- (2) (1)の結果を元にシミュレーションを行うことで, 各避難者が複数ナップサック問題の解答に従った結果の避難完了時間を取得する。
- (3) (2)で行ったシミュレーションにて得られた避難完了時間を元に(1)で求めた各避難所への避難予想時間を更新する。(表2:2行目)
- (4) (3)で更新した各避難所への避難予想時間表を元に, 2から再度繰り返す。
- (5) 全避難者の避難完了時間について準最適解を得られるまで(4)を繰り返し, 得られた準最適解の避難場所決定を動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所として, 避難者に提供する。

5. 提案手法の評価方法

本節にて, 評価するシナリオについて説明するとともに, 評価指標について述べる。

5.1 評価シナリオ

評価シナリオとして, 以下の4つを考える。

- (1) 最短経路探索による避難場所決定
- (2) ランダム選択による避難場所決定
- (3) 災害発生時の混雑状況を考慮した避難場所決定 (複数ナップサック問題)
- (4) 動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所決定 (複数ナップサック問題+シミュレーション)

提案手法((3),(4))に加えて, 提案手法の有効性を評価するために, (1)最短経路探索による避難場所決定および, (2)ランダム選択による避難場所の決定と比較する。これらの詳細について, 以下で説明する。

5.1.1 最短経路探索による避難場所決定

最短経路探索による避難場所決定では, それぞれの被災者は, 最寄りの避難場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, たどり着いた避難場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。被災者が避難場所に辿り着き, 避難場所の状態が収容可能であるまで繰り返し, 収容可能だった場合には, 避難場所の収容可能人数を一つ確保して避難完了とする。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

本シナリオは, 一般的なシナリオと考えている。通常, 各地域では避難所(学校や公共施設など)が決まっており, その場所を示す看板などが設置されている。そのため, 被災者はそれらの看板を頼りに最寄りの避難所に移動すると考える。

5.1.2 ランダム選択による避難場所決定

ランダム選択による避難場所決定では, それぞれの被災者は避難対象場所の中からランダムで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, たどり着いた避難場所を除いてランダム選択をやり直し, 再度別の避難場所へと移動する。被災者が避難場所に辿り着き, 避難場所の状態が収容可能であるまで繰り返し, 収容可能だった場合には, 避難場所の収容可能人数を一つ確保して避難完了とする。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

避難シミュレーションにおいては, ルールに基づく避難方法よりも, 時としてランダム(ルールなし)のほうが効率が良いことがある。そのため, ランダム選択による避難シナリオを設定している。ランダム選択による避難シナリオは, シミュレーションするたびに結果が変わるため, 一定数繰り返した場合の最良結果を比較対象とする。

5.1.3 災害発生時の混雑状況を考慮した避難場所決定

災害発生時の混雑状況を考慮した避難場所決定では, 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, 避難場所を決定する。避難場所の決定方法は, 3.2節で説明した通りであり, 被災者は決定された避難先へと最短経路で移動する。このシナリオでは避難所の収容人数による避難場所の再選択は発生しないため, 被災者はたどり着いた避難場所の収容可能人数を一つ確保して避難完了となる。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

本シナリオは, 問題1のみを解決したシナリオである。これは, 動的に変化する混雑状況が考慮できないとしても, 災害発生時の混雑状況だけは考慮できる場合の避難場所決定シナリオとして設定している。

5.1.4 動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所決定

動的に変化する混雑度状況を考慮した避難場所決定で

表 1 想定するシミュレーションマップにおける混雑度と歩行者速度の対応

混雑度 d [人/ m^2]	1.5 未満	1.5 ~ 6	6 以上
歩行速度 v [m/時]	4000	$-800 \times d + 5200$	$400 \times 6 / d$

表 2 被災者 i の避難経路ごとの避難予想時間表

避難所 No.	避難所 1	避難所 2	避難所 3	避難所 4
シミュレーション繰り返し回数 T_0 における被災者 i の予測避難時間 [min]	40	10	20	30
シミュレーション繰り返し回数 T_1 における被災者 i の予測避難時間 [min]	40	25(更新)	20	30
シミュレーション繰り返し回数 T_2 における被災者 i の予測避難時間 [min]	40	25	40(更新)	30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

は、各避難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場所を決定する。避難場所の決定方法は 3.3 節で説明した通りであり、被災者は決定された避難先へと最短経路で移動する。このシナリオでは避難所の収容人数による避難場所の再選択は発生しないため、被災者はたどり着いた避難場所の収容可能人数を一つ確保して避難完了となる。すべての被災者が避難完了となった時点で終了とする。

本シナリオは、問題 1 および問題 2 を解決したシナリオである。動的に変化する混雑状況をも考慮した避難場所決定により、他のシナリオと比較して提案手法がどの程度効果的になるのかを比較するために設定している。

5.2 評価指標

提案手法を含めた 4 つのシナリオを評価するために、2 つの評価指標を設定する。1 つ目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経過時間の平均である。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。例えば、被災者が 1000 人いた場合、通常避難（避難支援情報なし）では、 T_{esc} が 120 分かかり、提案手法による避難（避難場所・経路推薦）では T_{esc} が 100 分だった場合、提案手法によって平均避難完了時間が 20 分短縮ができたものと評価することができる。

2 つめは、被災地全体の混雑度総和 C_{total} を採用する。 C_{total} は災害発生後から避難完了時間 T_{esc} までの単位時間（1 秒）あたりで計算した被災地混雑度の総和である。被災地全体の混雑度総和（道ごとの混雑度の総和）は避難完了時間に影響すると考えられる。また、混雑が発生することは、2 次被害のリスクを高めると考える。そのため、同じ避難完了時間であったとしても、混雑度は低いことが望ましい。また、混雑度の低下は、避難完了時間を短くすると考える。そこで、他の手法（後述）と提案手法にとで比較し、提案手法による混雑度総和 C_{total} の削減程度を評価する。

6. おわりに

本稿では、観光地等の人々が集中するエリアにおいて災害が発生した際に、全ての避難者の避難完了時間の総和を最小化することを目指した、避難場所決定手法を提案した。提案手法では、全ての避難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る。また、避難所に至る経路上で発生する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避難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示すために、現実的なシナリオに沿ったシミュレーション実験を行う必要がある。時間の経過とともに避難者が増加していく場合や避難所間で収容数が大きく異なる場合など、幾つかの異なる条件下でシミュレーションを行うことを検討している。

今後、京都の観光エリアをモデル化し、現実に近い人の分布、避難所の位置および収容数、実際の道路網等を設定した大規模マルチエージェントシミュレーションを行い、提案手法の有効性を評価していくことを予定している。

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] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 寺田翔太, 出来寛祥, 白井裕子: 第8回コロキウム講演録, 早稲田大学(オンライン), 入手先 (http://www.leading-sn.waseda.ac.jp/wp-content/uploads/2015/06/archive_ver7s.pdf) (参照 2017-06-23).
- [8] 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, *数理解析研究所講究録*, Vol. 1548, pp. 99–106 (2007).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 中島悠, 椎名宏徳, 服部宏充, 八槇博史, 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).
- [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] 鈴木達也, 村上達也, 藤本まなと, 和田友孝, 榎原博之, 岡田博美: 非常時緊急救命避難支援システム (ERESS) におけるリアルタイム協調型避難路探索方式の検討 (情報ネットワーク), *電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報*, Vol. 112, No. 209, pp. 105–110 (2012).
- [19] 藤本まなと, 鈴木達也, 室津裕樹, 榎原博之, 和田友孝, 岡田博美, 飯田幸雄: 突発的災害時における避難グループの経路分散のための避難経路探索法 (情報ネットワーク), *電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報*, Vol. 114, No. 207, pp. 87–92 (2014).
- [20] 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).
- [21] Scenargie: Space-Time Engineering, LCC, <http://www.spacetime-eng.com/en/index.html>.
- [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).