

NAIST-IS-MT1651020

修士論文

避難シミュレーションの反復による動的混雑状況の再現に基づいた災害時の最適避難場所決定手法

梅木 寿人

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

梅木 寿人

審査委員：

安本 慶一 教授	(主指導教員)
笠原 正治 教授	(副指導教員)
荒川 豊 准教授	(副指導教員)
藤本 まなと 助教	(副指導教員)
水本 旭洋 特任助教	(副指導教員)

避難シミュレーションの反復による動的混雑状況の再現に基づいた災害時の最適避難場所決定手法*

梅木 寿人

内容梗概

災害時には被災者の迅速かつ的確な避難行動が重要であると認識されている。現状の避難誘導は、現在地から最寄りの避難所へと誘導する方法が一般的であるが、京都のような多くの観光客で賑わう観光地で多くの人々が一齐に避難を開始すると、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、被災地として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指した避難場所決定手法を提案する。災害発生直後の混雑状況を考慮して避難経路を決定しても、避難指示に従って多くの人が一斉に避難することで新たな混雑が生じ、避難時間を遅延させる。その結果、混雑に巻き込まれて最寄りの避難所に避難するより、混雑に巻き込まれずに少し遠い避難所に避難したほうが早く避難できる状況が発生する可能性がある。混雑状況は人の動きによって時々刻々と変化していくため、災害発生直後に正確な避難時間の見積もりをすることは非常に困難である。提案手法では、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。これらのステップを繰り返し実行することで準最適な避難場所を得る。評価実験として、京都の祇園祭を想定したマッ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1651020, 2018 年 3 月 15 日.

プに一般的な避難場所決定手法を適応した場合と，提案手法を適応した場合を比較した．結果として，最短経路選択に基づく平均避難時間 1152 秒，ランダム選択の平均避難時間 1560 秒に対して，提案手法に基づく平均避難時間を 587 秒にまで短縮できた．

キーワード

避難場所決定，災害マネジメント，シミュレーション，混雑推定，複数ナップサック問題

Semi-optimal evacuation shelter determination method in disaster situations through iterations of evacuation simulations with dynamic congestion reproduction*

Kazuhito Umeki

Abstract

In the event of a disaster, it is recognized that quick and appropriate evacuation behavior of affected people is important. The current evacuation guidance is generally a method of guiding from the current location to the nearest evacuation center. However, when many people start evacuation at the same time in a popular sightseeing area where there are many tourists like Kyoto, the congestion of evacuation routes and excessive accommodation of shelter happen, and as a result, the evacuation behavior of the victims is delayed. In this thesis, we propose an evacuation location determination method that aims to minimize the total time required for evacuation of all affected people when a disaster happens, targeting congested areas with many people such as popular sightseeing areas and large cities. Even if the victim decides the evacuation route and shelter considering the congestion situation immediately after the occurrence of a disaster, it causes new congestions and delays the evacuation time when starting to evacuate at once in accordance with the evacuation direction. As a result, there is a possibility that evacuation to shelters that are a little far away without being caught up in congestion can evacuate more quickly than being caught up in

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651020, March 15, 2018.

congestion and evacuating to the nearest shelter. Since the congestion situation changes dynamically depending on the movement of people, it is very difficult to estimate the exact evacuation time immediately after the occurrence of a disaster. In the proposed method, to consider the number of people that shelters can accommodate, we solve the Multiple Knapsack Problem(MKP) to determine the evacuation destination of each evacuee. Then, we estimate evacuation time considering congestion by simulating the congestion on the route by simulation. Finally, the evacuation destination is predetermined so as to reduce the total sum of the evacuation time of all evacuees from the estimation result. By repeating these steps, we get a semi-optimal evacuation destination of each evacuee. As an evaluation experiment, we compare the case where the general shelter decision method is applied to the map assuming the Gion festival in Kyoto and the case where the proposed method is applied. As a result, the average evacuation time based on the proposed method could be reduced to 587 seconds from 1152 seconds of the shortest route selection and 1560 seconds of random selection.

Keywords:

Decision evacuation location, Disaster management, Simulation, Congestion Estimation, Multiple Knapsack Problem

目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究目的と提案内容	2
1.3 論文の構成	3
2. 関連研究	4
2.1 現状の防災・減災対策	4
2.2 災害時の避難誘導・支援	4
2.3 混雑度情報推定手法	5
2.4 本研究の位置付け	6
3. 混雑を考慮した災害時避難計画問題	7
3.1 想定状況	7
3.2 前提条件	9
3.3 問題設定	9
4. 混雑状況を考慮した避難場所決定手法 (提案手法)	13
4.1 提案手法を用いて解決する問題	13
4.2 避難所の収容可能人数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所 決定方法	13
4.3 道路混雑度を考慮した避難所決定方法	16
5. 混雑を考慮した避難場所決定手法の評価	19
5.1 実験環境	19
5.2 比較手法およびシナリオ	20
5.2.1 最短経路探索による避難所決定	21
5.2.2 ランダム選択による避難所決定	22
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	22

5.2.4	道路混雑度を考慮した避難所決定方法	22
5.3	評価指標	23
5.4	実験結果	23
5.4.1	たらい回しによる避難遅延に関する検証	23
5.4.2	比較手法・シナリオごとの実験結果	27
6.	結論	32
	謝辞	35
	参考文献	37

図 目 次

1	想定するシチュエーション	8
2	避難誘導システムの概要	10
3	Scenargie のシミュレーションマップ	20
4	たらい回しの数ごとの人数分布と平均避難完了時間	24
5	最短経路探索の各エリアのたらい回し回数ごとの人数	25
6	各比較手法のたらい回し回数ごとの人数	27
7	各手法ごとの避難完了割合の時間変化	28
8	各手法ごとの混雑総量の時間変化	29
9	各手法ごとの各エリアごとの改善率	30

表 目 次

1	被災者の避難所ごとの避難予想時間表の例	15
2	被災者 i の避難経路ごとの避難予想時間表	18
3	シミュレーターのパラメータ設定表	21
4	比較手法・シナリオごとの実験結果表	26

1. 序論

1.1 研究の背景

近年，日本各地において，地震や豪雨等の突発的災害が頻発しており，それに伴う浸水や，建物の倒壊によって，多くの人の命が失われている．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．

先行研究として，地震等の突発的災害を対象として，地域一帯の通信使用不可，一部道路の交通不可の状態の災害を前提とした避難誘導や情報共有の研究を行ってきた [2, 3, 4]．それらの研究から得られた知見として，通信等に障害が生じていない場合でも解決すべき問題が存在するということがわかった．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場所（東京都，千葉県，埼玉県等の首都圏）にも関わらず，交通インフラの障害や，JR 駅構内への立入禁止などが原因で，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となった [5]．文献 [5] によると，この場合における帰宅困難者の定義は「自宅が遠隔なため，帰宅をあきらめる人々や，一旦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」となる．帰宅困難者は災害発生直後において自身の身の安全を確保するため，徒歩での帰宅を試みたり，ビル等へ一時的に避難しようとするが，運良く避難できたとしても，災害による停電や断水等の影響で衛生面での問題が生じ，安定した生活を送れる環境ではない可能性も十分に想定できる [6]．また，避難途中で二次災害への巻き込まれや，最悪の場合，死に至る可能性も否定できないため，大多数の被災者や帰宅困難者を一時的にでも収容可能な指定避難所に誘導し，安全確保できる環境を提供する必要がある．

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、多くの人々が一齐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生じることが考えられる。たとえ混雑を回避して避難所にたどり着いたとしても、すでに誘導された避難所の収容可能人数を大幅に超えていることから、避難所への入所が拒否され、異なる避難所への移動を余儀なくされるなど、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。したがって、避難時間の長さ二次災害の危険に直結する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。しかし、これまで災害による直接的な被害を対象にした研究は数多く行われているが [7, 8, 9]、人の行動によって引き起こされる人災を考慮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 機器を用いた混雑度計測方法が複数提案されている [10, 11, 12, 13]。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、京都の祇園祭修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 [14]。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。

1.2 研究目的と提案内容

本研究では、混雑地域で発生した大規模災害を想定し、避難所の収容可能数および各所での混雑度予測に基づいた避難場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。各避難所の収容可能数と、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 [15] 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、支持された避難所・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する様子と、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。被災者の避難完了時間の総和が最小になるまでシミュレーションを繰り返すことで、被災者にとって最適な避難所を決定する。

本研究では、京都の祇園祭を想定したマップにて大規模マルチエージェントシミュレータ Scenargie¹を用いてシミュレーション実験を行い、一般的な避難場所決定手法である、ランダム選択、最短経路選択を適用した場合と、提案手法を適用した場合を比較し、提案手法の評価を行った。ランダム選択に基づく平均避難時間が 1560 秒、最短経路選択に基づく平均避難時間が 1152 秒であるのに対して、提案手法に基づく平均避難時間を 587 秒にまで短縮することができた。また、被災者全員の避難完了までの最大避難完了時間も、最短経路が 8804.7 秒、ランダム選択が 34889.6 秒であるのに対し、提案手法では 2752 秒にまで短縮できた。

1.3 論文の構成

以下に、本論文の構成を述べる。2 章では提案手法に関連する既存研究や関連研究を取り上げる。3 章では、提案手法を適応する問題設定について詳述し、4 章では提案する避難場所決定手法について述べる。5 章では、提案手法をマルチエージェントシミュレータ Scenargie を用いた評価実験の結果を述べる。最後に、6 章にて結論および今後の課題について述べる。

¹Space-Time Engineering, LCC,<http://www.spacetime-eng.com/en/index.html>

2. 関連研究

本章では、本研究に関連する既存研究について述べる。第一節に、日本において現在取り入れられている防災・減災対策について述べる。第二節に、災害時の避難誘導に関する既存研究について述べる。第三節に、本研究に関連する混雑情報収集に関する既存研究について述べる。最後に、本研究の位置付けを述べる。

2.1 現状の防災・減災対策

我が国では、地震や洪水など多種多様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様々な災害対策が行われている。本論文にて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により制作され、配布されている [16]。また、収集した被害情報を実時間で GIS 上に表示可能なリアルタイムハザードマップ [17] やシミュレーションによる災害時被害予測を可視化するシステム [18] 等が開発されている。しかし、ハザードマップにおいては、避難所の場所や災害被害予測情報などが確認できるため非常に有用ではあるものの、避難所や道路の混雑状況といった動的情報は把握できないため、避難すべき避難所や利用すべき避難経路の決定は被災者の感覚によって決定する必要がある。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は極めて高い。

2.2 災害時の避難誘導・支援

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 [19]、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。また、村木ら [20][21] 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。Oomes ら [7] 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。Fitrianie ら [8] 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。また、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。

2.3 混雑度情報推定手法

観光地では、リアルタイムに混雑度情報を収集することに対する需要が高まっている。渋滞度の推定は、都市部の人々の存在や行動を把握する技術であり、渋滞予測や道路や大規模なイベントなどに利用されている。Song ら [22] はスマートフォンで撮影された人の群集の画像から対象地域の人物密度を推定する方法を提案した。Nishimura ら [23] はスマートフォンの加速度センサから推定した「歩きやすさ」と「群衆の音」に基づいて人の密度を推定する手法を提案した。Weppner ら [24] は観測された Bluetooth または Wi-Fi の MAC アドレスの数に基づいて周囲の人の密度を推定する方法を提案した。Chan ら [25] は時間、事象などの状況に応じて複数の群衆分布パターンが存在すると仮定することにより、時間的および空間的に分散した人の密度の観測値を蓄積することにより、群衆分布のパターンを学習する方法を提案した。このように、観光地に設置したカメラや、観光客の携帯端末から収集したデータなどから混雑度を推定する研究は数多く存在するが、プライバシーの問題や、観光客の携帯端末所持率に依存することなど、課題も多い。

日高らは満足いく旅行計画の作成を実現するため、観光情報を収集するシステムを開発しており [26]、その一環として、Bluetooth Low Energy (BLE) を用いてリアルタイムに混雑度を推定するシステムを作成している [27]。作成した混雑度推定システムは、2つの BLE 送受信端末を1ペアとして任意の場所に設置し、そ

の端末間の BLE の RSSI 強度分布を観測することで、任意の場所の混雑度を 3 つの分類 (Low, Medium, High) で推定できる。この機構は BLE 送受信端末を設置するだけで混雑度を推定することが可能であるため、既存研究の問題である観光客の携帯端末所持率に依存することはない。また、BLE の RSSI 信号強度のみを観測して混雑度を推定しており、プライバシーの問題も発生しないため、観光地に設置するのに最適であると考えられる。

2.4 本研究の位置付け

2.1 から 2.3 節にて述べた通り、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。そのため、本研究では、対象地域の混雑情報は収集できるものであると考える。本研究では、地震などの被災地から少し離れた場所を対象として、各地の混雑情報を収集・利用し、避難完了時間が最小になるように各被災者の避難場所・経路を決定し、提供する避難場所決定手法を提案する。

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および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。第一節では、本研究で対象とする災害時の想定環境について述べる。第二節では、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す。最後に、本研究における問題設定を行う。

3.1 想定状況

本研究では、東日本大震災発生時のような、災害により交通インフラ等が一時的に停止し、自宅への帰宅が極めて困難な被災者が多数発生した状況を想定する。このような状況において、第一に被災者は安全を確保しつつ、1泊以上宿泊できる施設に避難することが極めて重要となる。本研究では、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」[28]のうち、宿泊が可能な「指定避難所」を被災者の避難先対象となる避難所と定義する。

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。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、全ての被災者が最寄りの避難所に一斉に避難した場合、避難所の収容可能人数を大幅に超過した結果、全ての被災者を収容しきれなくなる恐れがある。そのため、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しなければならない、いわゆる避難所のたらい回しが発生する可能性が高い。本研究では、このように全ての被災者が最寄りの避難所に移動し、上記の問題により避難までの総避難時間が増加するような状況を想定する。

図1に想定するシチュエーションの例を示す。地図上には避難所Aと避難所Bの2つの避難所があり、各避難所の収容人数は5人とする。また、被災者は10人いると仮定する。このような状況において、図1(a)に示すように、被災者が地図上に比較的均等に存在する場合、基本的に各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ため、被災者は最寄りの避難所へと避難する。この場合、各被災者が最寄りの避難所A、避難所Bにそれぞれ避難したとしても、

避難所 A と避難所 B は収容可能人数を超過しないため、短い避難時間で被災者全員を避難所に収容できる。一方、図 1 (b) に示すように、地図上の左側に被災者の分布が偏り混雑が集中している場合、図 1 (a) と同様に全被災者が最寄りの避難所に避難すると仮定すると、避難所 A の収容可能人数を大幅に超過してしまい、溢れた数人の被災者が異なる避難所（避難所 B）への移動（たらい回し）を余儀なくされる。したがって、避難所のたらい回しの影響により、被災者全員を避難所へ収容するのに多くの時間を費やす必要があり、結果的に避難時間が増大する。この問題を解決するには、図 1 (b) 場合、避難所 A と避難所 B の間に存在する何人かの被災者を、避難所 A に避難させるのではなく、避難所 B へと避難させることが、全体として避難時間の短縮につながると考えられる。言い換えれば、被災者の分布の偏りに応じて、収容する避難所を上手く分散させることが避難時間を短縮させるキーポイントであると考えられる。このように、被災者全体の避難時間を最小化したい場合は、個人のみの避難時間（距離）を考慮するのではなく、他の被災者の避難時間（距離）も考慮して避難場所を検討する必要がある。

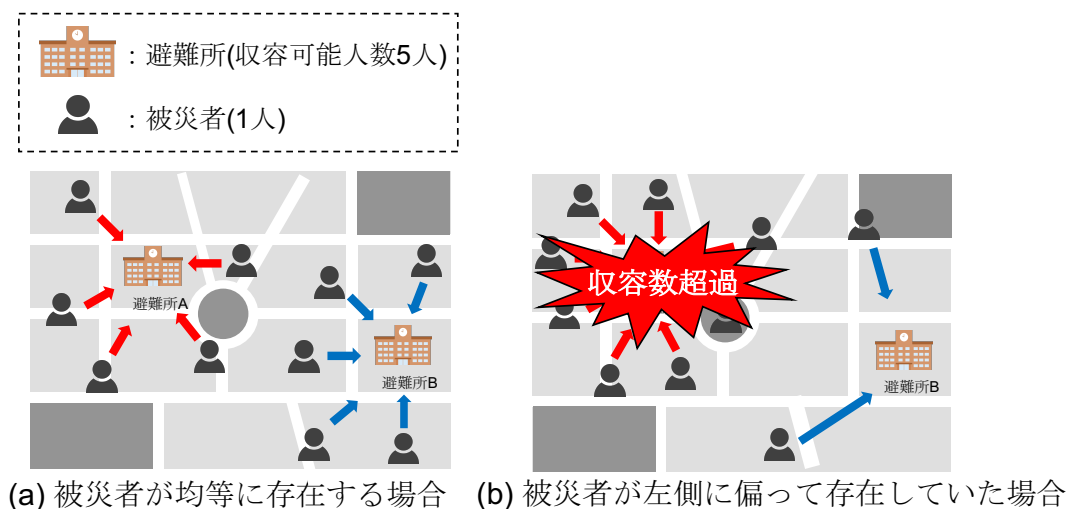


図 1 想定するシチュエーション

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，津波などの二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 [24, 25]．したがって，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，本研究では，図 2 のような避難所決定システムを提案する．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．対象地域の道には混雑度センサが設置されており，リアルタイムに道の混雑情報を収集する．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，全被災者の各避難所への避難の是非の集合を X_{IJ} とし，被災者 i が避難所 j へと避難するかどうかを $x_{ij} \in X_{IJ}$ で表す．被

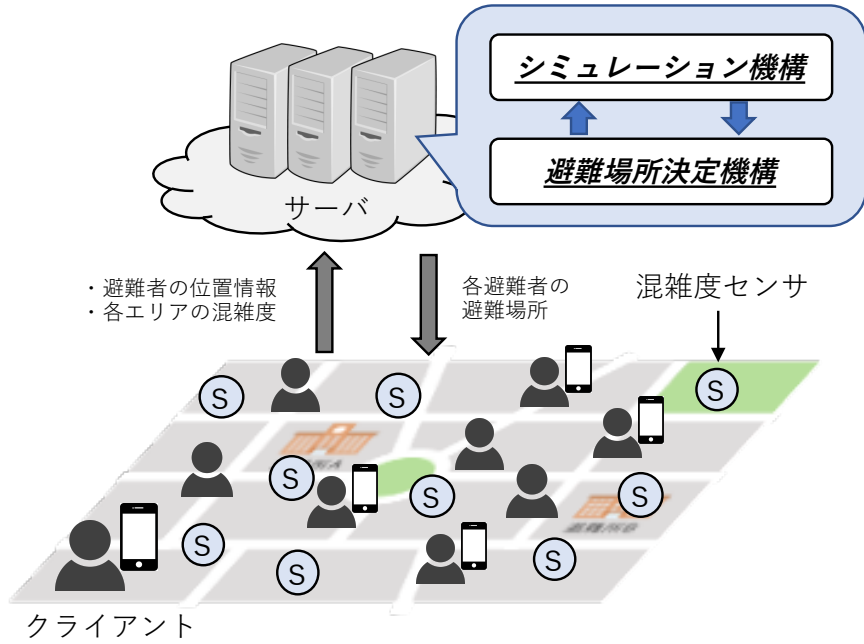


図 2 避難誘導システムの概要

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 [29] 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わかっている。本問題では、上記の調査 [29] 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。

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

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 [29] 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。

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

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。

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

本章にて、災害発生直後の被災地の想定状況と、対象地域における前提条件について述べた。その後、本研究で対象とする災害発生時の混雑地域における避難

所決定問題について数式を用いて設定した。次章では，本章で設定した災害発生時の混雑地域における避難場所決定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場所決定手法 (提案手法)

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場所決定手法を提案する。第一節にて、提案手法を用いて解決する問題について、まとめる。第二節にて、避難場所決定手法1として、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について説明し、第三節にて、避難場所決定手法2として、道路混雑度を考慮した避難所決定方法について説明することで、2つの避難場所決定手法1, 2を提案する。

4.1 提案手法を用いて解決する問題

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、全ての被災者が最寄りの避難所に一斉に避難した場合、避難所の収容可能人数を大幅に超過した結果、全ての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しなければならない、いわゆるたらい回しが発生する可能性が高い(問題1)。また、全ての被災者が一斉に避難した結果、多くの人々が混み合う大きな混雑が道路上に発生し、その混雑の影響で避難行動が遅延する可能性がある(問題2)。本研究では、このように全ての被災者が最寄りの避難所に移動し、上記の問題1, 問題2により避難までの総避難時間が増加するような状況を想定する。

4.2 避難所の収容可能人数と被災者ごとの避難時間を考慮した避難所決定方法

4.1 節で述べた通り、数多くの人々が特定のエリアに集中する混雑状況で災害が発生した場合、単に最寄りの避難所に避難することで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して捉え、それぞれの収容可能人数をナップサックの収納可能数と考える。そのため、ある避難所 j に避難できる被災者の最大人数

Algorithm 1 提案手法 1 の擬似コード

Input: I : 被災者の集合, J : 避難所の集合, $VTable$: I 行 J 列の避難予測時間表
, C_J : 避難所 J の収容可能人数の集合

Output: X_{IJ} : 避難先決定リスト

```
1:  $VTable \leftarrow SortAscByShelter(VTable)$  // 避難所 (列) ごとに昇順ソートする.
2: while  $|I| > 1$  do
3:    $i, j \leftarrow GetMinimumEvacuationTime(VTable)$  //  $VTable$  から最小の避難予測時間の被災者  $i$  と被災者  $j$  の組み合わせを取得する
4:    $X_{i,j} \leftarrow 1$  // 被災者  $i$  の避難先を避難所  $j$  に決定
5:    $VTable \leftarrow RemoveVictim(VTable, i, I)$  //  $VTable$  と  $I$  から被災者  $i$  を削除
6:    $C_j \leftarrow C_j - 1$ 
7:   if  $C_j = 0$  then
8:      $VTable \leftarrow RemoveShelter(VTable, j, J)$  //  $VTable$  と  $J$  から避難所  $j$  を削除
9:   end if
10: end while
```

は収容可能人数 C_j となる。加えて、避難所 j 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。

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 j まで避難するために t_{ij} 秒 (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 $\sum t_i^2$ 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。次に、提案手法 1

²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。

表 1 被災者の避難所ごとの避難予想時間表の例

	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

を適用した際の避難場所決定の順序について述べる．

アルゴリズム 1 に，提案手法 1 の擬似コードを示す．3.2 節にて述べたように，前提として災害が発生した直後，被災者の各位置をシステムは収集する．次に，収集した被災者の位置情報と，各避難所の位置情報から表 1 のような避難予測時間表を作成する．そのため，アルゴリズム 1 における Input(初期入力)として，被災者の集合 I と，避難所の集合 V ，表 1 のような I 行 J 列の避難予想時間表， $VTable$ 避難所 J の収容可能人数の集合 C_j が与えられるものとする．アルゴリズム 1 の 1 行目に示す $SortAscByShelter(VTable)$ は $VTable$ を各列 (各避難所) で昇順に避難予測時間を並び替えることで，表の一番上の要素が各避難所の最短避難予測時間になるように表を作り返す．次に，3 行目の $GetMiniEvacuationTime(VTable)$ は昇順ソートされた避難予測時間表の各避難所の最小避難時間を比較し，その中で最短の避難時間となる被災者 i と避難所 j の組み合わせを取得する．4 行目にて被災者 i の避難先を避難所 j と決定し，5 行目にて避難予測時間表 $VTable$ と被災者の集合 I の中から被災者 i の情報を削除する．6 行目にて避難所 j へと被災者 i を収容したことを表すため，収容可能人数 $C_j - 1$ を行う．6 行目の処理を行った結果，避難所 j の収容可能人数 C_j が 0 になった場合，避難所 j は収容限界に達するため，7 行目にて避難予測時間表 $VTable$ と避難所の集合 J のなか避難所 j の情報を削除する．これを 2 行目に示すように被災者の数 $|I|$ が 0 人以下になるまで繰り返すことで，各被災者の避難所への避難先決定リスト X_{IJ} を求める．また，アルゴリズム 1 では各被災者の避難場所を決定するための計算量が被災者数 $V = |I|$ ，避難所数 $S = |J|$ とした場合 $O(S^2V \log SV)$ になる．

表 1 に示している被災者の避難所ごとの避難予想時間表を例にして考えると、提案手法 1 は次のような手順で避難場所を決定する。避難所 j_1 の収容可能人数 $C_j = 2$ 、避難所 j_2 、避難所 j_3 の収容可能人数 $C_j = 1$ として設定しており、被災者 $i_1 \sim i_4$ は、マップ上に一様に分布しているものと設定している。まず、(1) 避難予想時間表の中から予測避難時間 t_{ij} が最も小さな被災者の避難先を避難所 j とする。(2) 避難先として決定された避難所 j 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、避難予想時間表から避難所 j の列を削除する。(3) 避難予想時間表から、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。

また、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ている。表 1 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二人存在するため、たらい回しが発生する。しかし、表 1 に提案手法 1 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。

4.3 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

Algorithm 2 提案手法2の擬似コード

Input: I : 被災者の集合, J : 避難所の集合, $VTable$: I 行 J 列の避難予測時間表
, C_J : 避難所 J の収容可能人数の集合

Output: X_{IJ} : 避難先決定リスト

```
1:  $pat \leftarrow 0$  // 反復回数 T-1 の平均避難時間  $pat$  の初期化
2:  $cat \leftarrow 0$  // 反復回数 T の平均避難時間  $cat$  の初期化
3:  $ir \leftarrow 0$  // 改善率  $ir$  の初期化
4:  $X_{IJ} \leftarrow algorithm1(I, J, VTable, C_J)$  // 提案手法1により避難先を決定
5:  $VTable, pat \leftarrow SimulateEvacuation(X_{IJ})$  // 提案手法1に基づく避難のシミュレーションを実行 (反復回数  $T_0$ )
6: while  $|ir| > 0.5$  do
7:    $X_{IJ} \leftarrow algorithm1(I, J, VTable, C_J)$  // 提案手法1により避難先を決定
8:    $VTable, cat \leftarrow SimulateEvacuation(X_{IJ})$  // 反復回数 T
9:    $ir \leftarrow \frac{pat-cat}{pat} \times 100$ 
10:   $pat \leftarrow cat$ 
11: end while
```

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。次に、提案手法2を適用した際の避難場所決定の順序について述べる。

アルゴリズム2に、提案手法2の擬似コードを示す。まず、アルゴリズム2はアルゴリズム1と同じく、Input(初期入力)として、被災者の集合 I と、避難所の集合 V 、表1のような I 行 J 列の避難予想時間表、 $VTable$ 避難所 J の収容可能人数の集合 C_J が与えられるものとする。アルゴリズム2の4行目にてアルゴリズム1を元に避難先リスト X_{IJ} を取得する。次に、5行目の $SimulateEvacuation(X_{IJ})$ は取得した X_{IJ} を用いてシミュレーションを行い、平均避難時間 pat を取得し、実際の避難時間結果を避難予測時間表 $VTable$ に表2:2行目のように作り直す。7行目にて、作り変えた避難予測時間表 $VTable$ を元に避難先リスト X_{IJ} を再度求め、8行目にて求め直した X_{IJ} を用いて1度目の反復シミュレーションを行い、平均避難時間 cat を取得し、実際の避難時間結果を避難予測時間表 $VTable$ に表

表 2 被災者 i の避難経路ごとの避難予想時間表

	避難所 j_1	避難所 j_2	避難所 j_3	避難所 j_4
繰り返し回数 T_0 における被災者 i の予測避難時間 [sec]	40	10	20	30
繰り返し回数 T_1 における被災者 i の予測避難時間 [sec]	40	25(更新)	20	30
繰り返し回数 T_2 における被災者 i の予測避難時間 [sec]	40	25	40(更新)	30
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

2:3 行目のように作り直す．9 行目にて，反復シミュレーションによって平均避難時間がどれだけ短縮できたかを示す改善率 ir を求める．以上の手順を改善率の絶対値 $|ir|$ が 0.5 以下になるまで繰り返し実行し，混雑を考慮した避難先決定リスト X_{IJ} を求める．

表 2 に示してい被災者 i のシミュレーションの反復回数 T_0 から T_2 の各避難所 j への避難予想時間表を例にして考えると，提案手法 2 は次のような手順で避難場所を決定する．まず (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. 混雑を考慮した避難場所決定手法の評価

本研究は、観光地や都心部といった人口密度が高い場所を対象として、混雑情報を考慮した避難場所決定手法を提案している。本章では、提案手法の有効性を評価するため、シミュレーションを用いた比較実験を行う。第一節にて、実験環境を説明したのち、第二節にて、比較手法および手法ごとのシナリオについて説明する。第三節にて、評価指標について説明し、最後に、実験結果とその考察を説明する。

5.1 実験環境

提案する避難場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 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 : 128GB, OS : Ubuntu である。表 3 に、シミュレーションのパラメータを示す。

図 3(左) に、本実験にて使用するシミュレーションマップを示し、図 3(右) に、シミュレーションマップ上に人が偏っているエリアを図示したマップを示す。

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 3 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 [30]、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 3 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、23 箇所を設定している [31]。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、

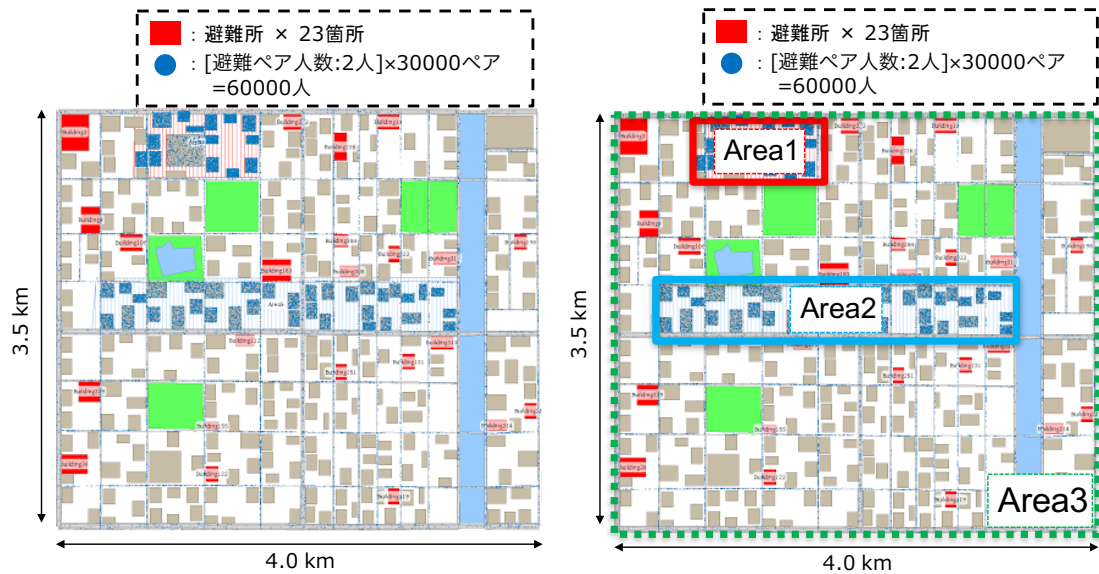


図 3 Scenargie のシミュレーションマップ

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 3 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 3(右) のマップ上の Area1 と Area2 に 10000 ペア (20000 人) ずつ集中して配置した。また、残りの 10000 ペア (20000 人) は Area3(マップの全体) に一様に分布して配置した。

なお、各被災者の歩行速度は、シミュレーターの仕様により、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（同一道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。

表 3 シミュレーターのパラメータ設定表

避難所数	23 箇所
被災者数	30000 ペア
標準歩行速度	1.0~1.5 [m/s]
マップサイズ	3.5km × 4.0km
道路幅	5~45[m]

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。被災者における最寄りの避難所として、自身の位置から各避難所までの直線距離で比較した時に、一番小さな直線距離である避難所が選ばれる。その後、自身の位置から決定された避難所までの経路をダイクストラ法で算出し、被災者は算出した最短経路で避難する。また、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。

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、4.2節で説明した通りであり、被災者は全避難所への直線距離の中で、一番距離が短い避難所が避難先として決定され、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4.3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。

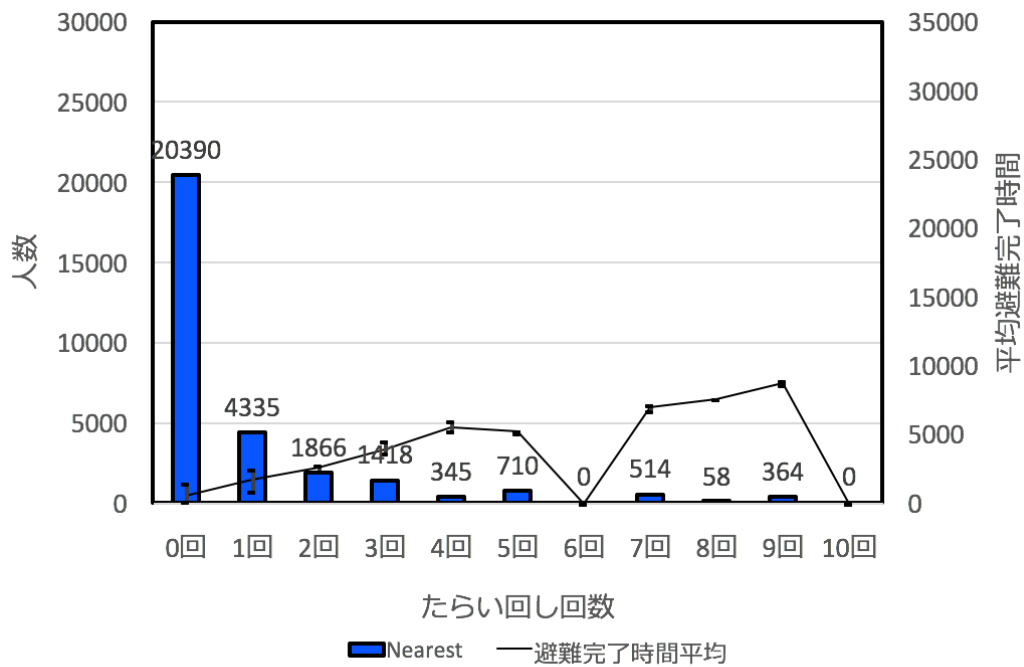
5.3 評価指標

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。

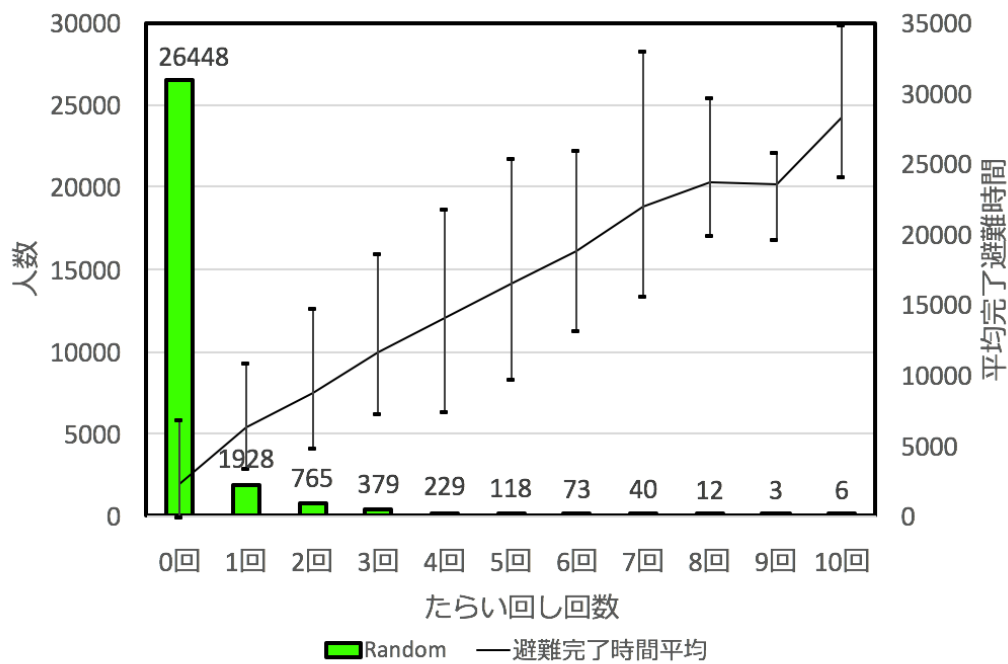
5.4 実験結果

5.4.1 たらい回しによる避難遅延に関する検証

図4は、最短経路探索(図4(a))・ランダム探索(図4(b))を避難場所決定手法とした場合の、たらい回し回数ごとの人数分布(主軸)と平均避難完了時間(第二軸)を示す。図4における避難完了時間のグラフは、平均時間と、高低線の下上に、各たらい回し回数における最大避難完了時間と最小避難完了時間を示している。たらい回しの回数に着目すると、最短経路探索による避難場所決定手法では30000人の被災者のうち、9610人、すなわち全体の32.03%もの人が一度以上たらい回しされており、ランダム探索による避難場所決定手法では30000人の被災者のうち、3553人、すなわち11.84%もの人が一度以上たらい回しされていることがわかる。これは最短経路探索による避難場所決定手法では、最寄りの避難所に避難するが、図3に示すように人が集中して配置されているエリアがあった場合(図3(右)のArea1やArea2)、そのエリア周辺の避難所の収容限界人数を超過することで、多くの人がたらい回しされてしまうことが考えられる。また、ランダム探索による避難場所決定手法では、マップ上の避難所へ均等に避難するため、最短経路探索に比べて、たらい回しされる人数が最短経路探索に比べて、少なくなっていると考えられる。



(a) 最短経路探索



(b) ランダム探索

図 4 たらい回しの数ごとの人数分布と平均避難完了時間

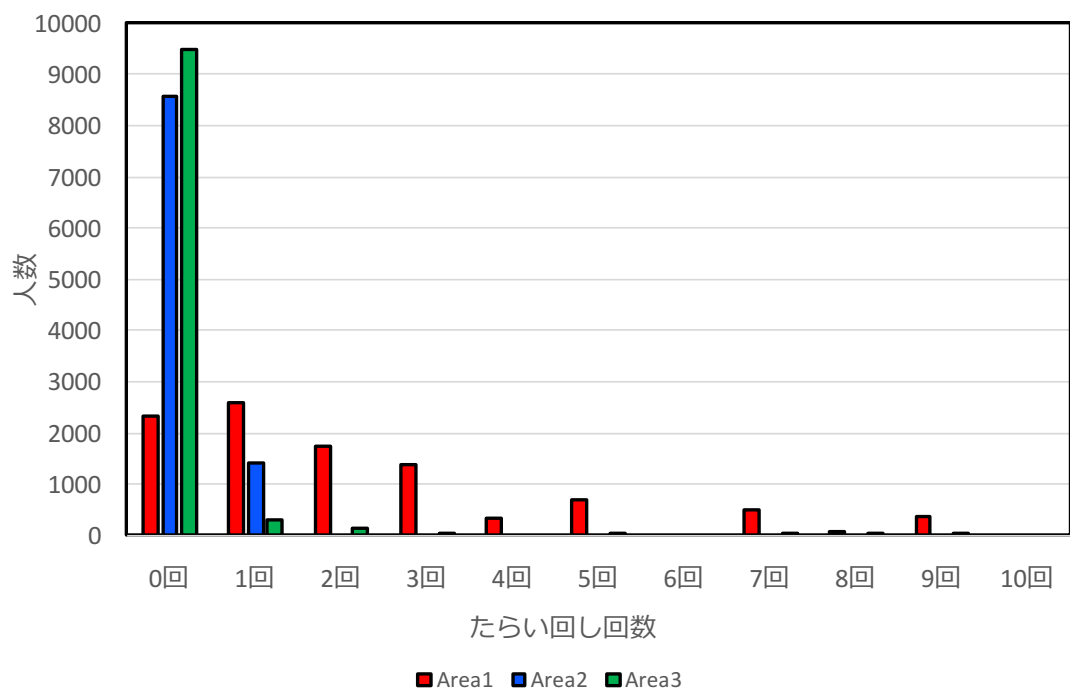


図 5 最短経路探索の各エリアのたらい回し回数ごとの人数

平均完了避難時間に着目すると、最短経路探索、ランダム探索共に、たらい回し回数が多くなるほど平均避難時間も増加する傾向にある。この時、最短経路探索とランダム探索のたらい回し回数ごとの平均避難時間の増加率が異なる。これは、最短経路探索は最寄りの避難所から避難していくのに対し、ランダム探索は避難場所決定は避難先として遠く離れた避難所を避難先として決定することもあるため、たらい回しの影響以上に遠回りによる避難行動の遅延が全体の避難時間をお仕上げている。

図 5 は、最短経路探索において、図 3(右) にある Area1,Area2,Area3 ごとのたらい回し回数の人数を表している。マップ上中央に人が集中して分布する Area1 では、一度以上たらい回しされている人数 7672 人に対し、マップ中央に人が集中して分布する Area2 では、一度以上たらい回しされている人数 1428 人、マップ全体に一樣に人が分布している Area3 では、一度以上たらい回しされている人数は 510 人である。

表 4 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	計算時間 [秒]
最短経路	1389.7	1657.2	2045
ランダム	3047.2	2712.8	6038
提案手法 1	891.3	641.6	1072
提案手法 2	844.1	613.2	42320
提案手法 2 (20%)	987.7	937.3	55347
提案手法 2 (40%)	1036.7	991.8	20235
提案手法 2 (60%)	1125.6	1115.4	18486
提案手法 2 (80%)	1240.8	1357.9	20690

エリアごとの平均避難時間で比較すると、Area1 における平均避難完了時間 2899 秒に対して、Area2 における平均避難完了時間 699 秒、Area3 における平均避難完了時間 570 秒とたらい回しの回数が多い Area1 の平均避難完了時間が他のエリアに比べて長くなっていることがわかる。Area1 に集中する人は、Area2 に比べて、偏るエリアの面積が小さい、かつ、集中するエリアの周辺 (1km 圏内) の避難所数が Area1 が 6 箇所、Area2 では 14 箇所と差があるため、Area1 の人は Area2 の人に比べてたらい回しが発生しやすく、それが原因で平均避難完了時間が長くなっていると考えられる。

図 6 は、ランダム探索と最短経路探索、提案手法 (1) knapsack のたらい回しの回数と、回数ごとの人数を表している。4.2 節で述べたように、knapsack は各避難所の収容可能人数を超えないように避難場所を決定する手法である。そのため、提案手法 (1) はたらい回しを発生させないような避難場所決定手法であり、図 6 の knapsack による避難場所決定の結果を見ても、たらい回しが発生していない。したがって、提案手法 (1) はランダム選択と最短経路探索における問題を解決できることを明示している。

以上の結果から、たらい回しの多さが避難時間の遅延の原因の一因であることは明らかであるため、提案手法によってたらい回しをなくすことが、被災者全員の総避難時間の最小化を目指す場合に有効であるといえる。

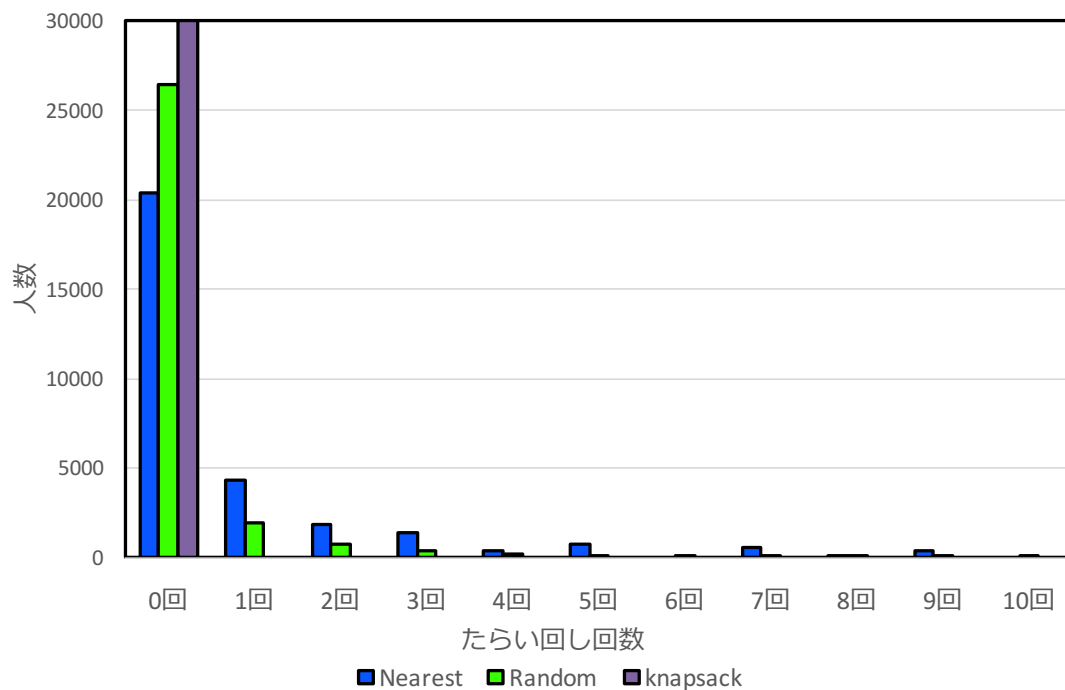


図 6 各比較手法のたらい回し回数ごとの人数

5.4.2 比較手法・シナリオごとの実験結果

表 4 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場所決定手法に基づく平均避難時間は 1389.7 秒，ランダム選択による避難場所決定手法に基づく平均避難時間は 3047.2 秒，災害発生時の混雑状況を考慮した避難場所決定手法（提案手法 1）に基づく平均避難時間は 891.3 秒，動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所決定手法（提案手法 2）に基づく平均避難時間は 844.1 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場所決定手法が 1657.2 秒であるのに対して，提案手法 2 は，613.2 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。

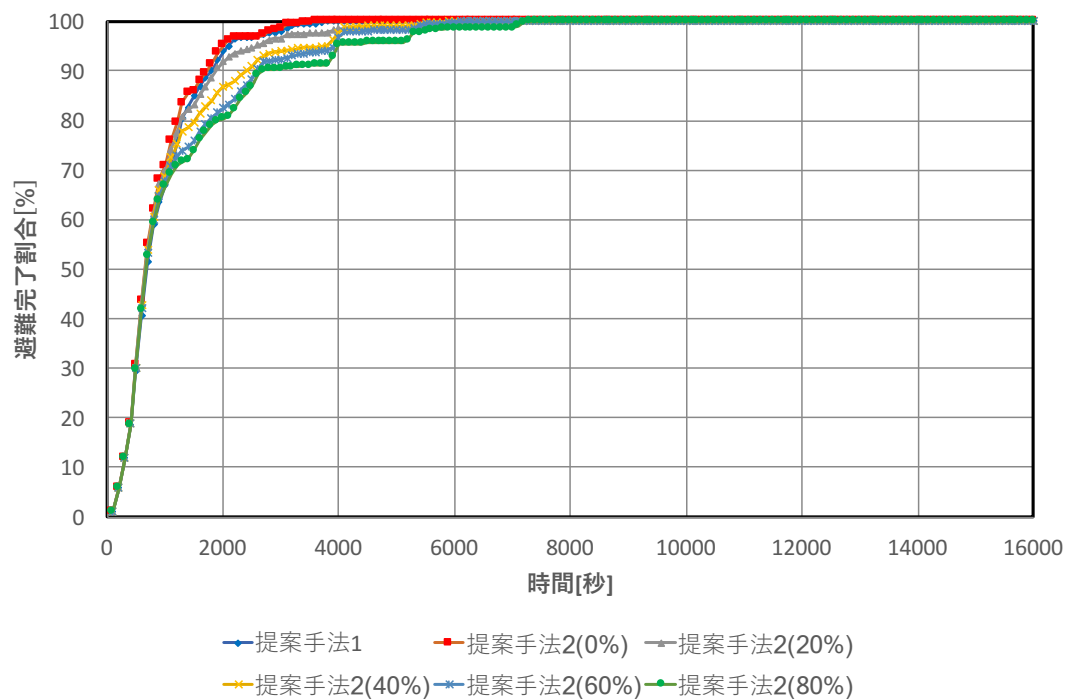


図 7 各手法ごとの避難完了割合の時間変化

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4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場所決定手法やランダム選択による避難場所決定手法による平均避難時間よりも短く120.8秒である。これらのことから、提案した動的に変化する混雑状況を考慮した避難場所決定手法（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7は、各手法・シナリオごとの避難完了割合の累積分布を示している。また、図8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。避難完了割合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

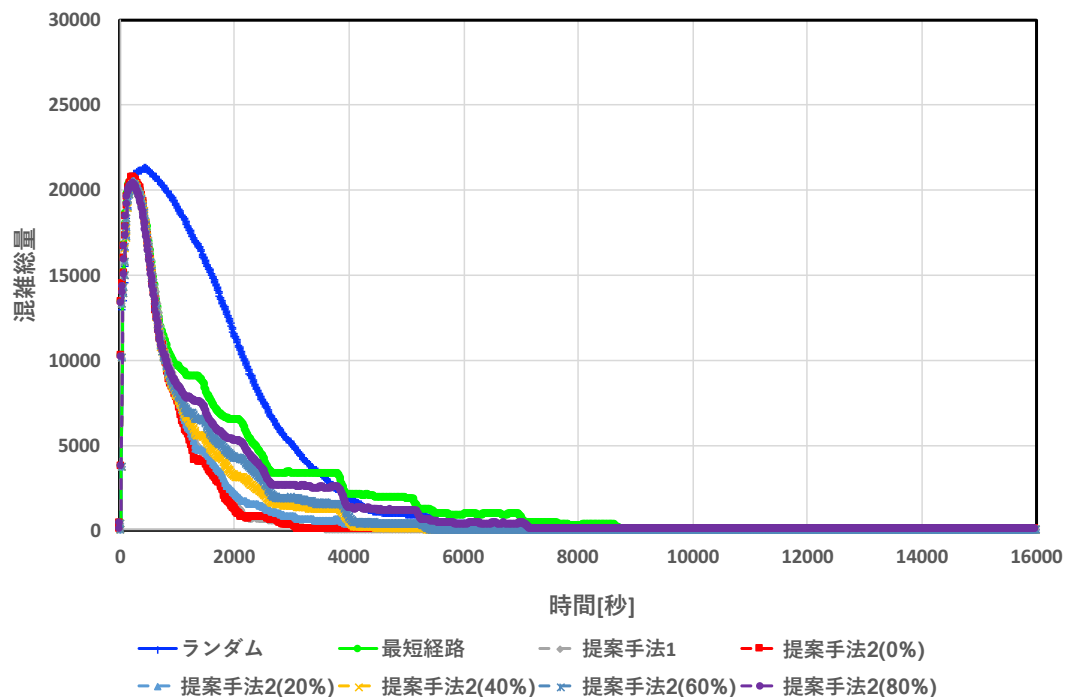


図 8 各手法ごとの混雑総量の時間変化

することが確認できる。

ここで、最短経路探索による避難場所決定手法に着目すると、避難完了割合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、5.4.1 節に述べたように、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、すなわち、たらい回しが発生しているためと考えられる。ランダム探索による避難場所決定手法に着目すると、最短経路探索に比べてゆるやかに避難完了割合が増加していることが確認できる。これは、5.4.1 節に述べたように、ランダム探索によって、自分の位置から遠い避難所を選択した結果、たらい回しの影響以上に、単純な移動時間が長いことが原因だと考えられる。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場所決定手法が 8804.7 秒、ランダム選択による避難所決定手法が 34889.6 秒である

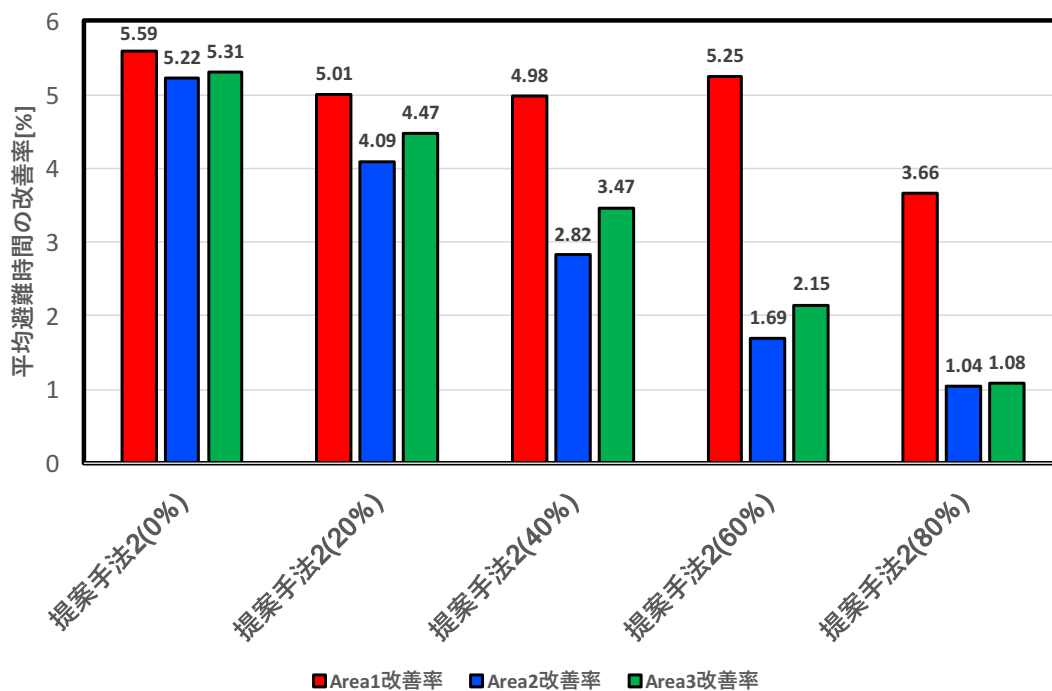


図 9 各手法ごとの各エリアごとの改善率

のに対し、提案手法 2 では 3672.2 秒と大幅に短縮されている。また、平均混雑総量に着目すると、提案手法 2 の 551.2 に対して、ランダム探索は 1384.5、最短経路探索は 1013.6 となっている。したがって、提案手法 2 は避難行動によって生じる混雑を削減しつつ、避難時間を大幅に短縮できることから、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。計算時間に着目すると、最短経路探索 2045 秒、ランダム探索 6038 秒に対し、提案手法 1 は 1072 秒と約半分程度にまで削減している。提案手法 1 にてたらい回しが発生しないため、計算時間が削減できていると考えられる。しかし、提案手法 2 の計算時間は 42320 秒と非常に大きな時間となっており、これは提案手法 2 は複数回シミュレーションを繰り返して実行するため、他の手法に比べて計算時間が非常に長くなっていると考えられる。

次に、異なる環境条件 (周りの避難所の数等) で人を偏らせた Area1,2,3 において、シミュレーション反復による避難時間の短縮度合いを比較することで、どの

ような条件における反復が避難時間の短縮に有効かを考察する．図9は，シミュレーション反復の際，避難指示に従わない人の割合を0%,20%,40%,60%,80%と変化した場合の平均避難時間の改善率を比較した結果を示す．ここでの改善率とは，シミュレーション反復前(提案手法1)の平均避難時間から，シミュレーション反復後(提案手法2)の平均避難時間への短縮率を示し，式6のように定義する．

$$\text{改善率} = \frac{(\text{反復前の平均避難時間} - \text{反復後の平均避難時間})}{\text{反復前の平均避難時間}} \times 100 \quad (6)$$

提案手法2(0%)において改善率はArea1:5.59, Area2:5.22, Area3:5.31とあまり大きな差を見られないが，提案手法2(80%)において，Area1:3.66, Area2:1.04, Area3:1.08となった．提案手法2(0%)と提案手法2(80%)の改善率の変化で比較すると，Area1は1.93減少したのに対し，Area2は4.18, Area3は4.23と大きく減少している．以上のことから，Area1のようなたらい回しが多く発生するような場所の場合，Area2,3と比べてシミュレーション反復による改善が大きくなる傾向が示唆された．そのため，今回の実験シナリオではシミュレーション反復による改善が大きくみられないが，異なる実験環境によってはシミュレーション反復の効果が大きくなることが期待できる．

6. 結論

本論文では、観光地等の人が集中するエリアにおいて災害が発生した際に、道路上の混雑や避難所の収容可能人数を考慮して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場所決定手法を提案した。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過してしまい他の避難所への移動を余儀なくされる、いわゆるたらい回しという問題に対処するため、提案手法(1)では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。次に、全ての被災者が一斉に避難を開始することによって発生する混雑に被災者が巻き込まれることで、避難行動が遅延するという問題を解決するため、提案手法(2)では提案手法(1)を用いて避難所の収容可能人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。次に、提案手法では、(1) 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、避難先を決定し、(2) 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し、(3) 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。これらの(1)から(3)ステップを繰り返し実行することで準最適な避難場所を得る。また、提案手法では混雑地域における各スポット・道路上の混雑情報はリアルタイムに収集できるものと想定しており、実際に混雑度推定システムを構築・動作実験を行うことで、リアルタイムな混雑情報収集の実現可能性を確認している [27]。

提案手法の有効性を検証するため、評価実験として、京都の祇園祭を想定したマップに一般的な避難場所決定手法を適用した場合と、提案手法(2)を適用した場合を比較する。結果として、最短経路選択に基づく平均避難時間 1152 秒、ランダム選択の平均避難時間 1560 秒に対して、提案手法に基づく平均避難時間を 587 秒にまで短縮できた。また、提案手法(2)によって決定された避難経路を全ての被災者が指示通りに避難することは考えにくいため、提案手法(2)を適用した時に、被災者の中で指示に従わない人の割合を 20%から 80%まで変化させた場合のシミュレーションを行った。結果として、ランダム探索の平均避難時間 3047.2 秒や、最短経路探索の平均避難時間 1389.7 秒に対して、指示に従わない人が 20%の平均避難時間 621.8 秒、40%の平均避難時間 688.1 秒、60%の平均避難時間 778.1

秒，80%の平均避難時間 898.6 秒となった．したがって，以下に，評価実験から得られた知見を箇条書きで述べる．

- 提案手法 (1) の結果から，混雑地域で発生した大規模災害の避難場所誘導において，たらい回しを発生させないことで平均避難時間を短縮できることを明示した．
- 提案手法 (2) の結果から，混雑地域で発生した大規模災害の避難場所誘導において，避難経路上の混雑を考慮して避難場所を変更するだけで，平均避難時間を短縮できることを明示した．
- 被災者全体の 20%が提案手法 (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を明示した．
- したがって，提案手法は混雑地域で発生した大規模災害の避難場所誘導に有効であると明示した．
- 提案する避難場所決定手法は，京都などの観光地や東京や大阪などの人口密度の高い場所，すなわち，たらい回しが発生することや，避難行動によって大きな混雑が発生する地域では避難時間の短縮に有効である．しかし，災害の影響による通信障害の発生や，対象地域の道路の通行不可，混雑センサの破損などが発生した場合は避難時間の短縮は困難である．

残された課題として，提案する避難場所決定手法を様々なシナリオに適用し，有効であるシチュエーションや，有効でないシチュエーションを検討し，提案手法が避難時間を最も短縮できる要素 (周辺の避難所の数や，道の幅，人の偏り状況など) の調査を行う必要がある．次に，提案手法 1 にて，本研究における複数ナップサック問題は，各被災者 (品物) は各避難所 (ナップサック) ごとに避難時間 (価値) が異なる，という点から一般的な複数ナップサック問題をそのまま適用することができないため，独自アルゴリズムで用いて解いている．具体的には，一般的な複数ナップサック問題は品物の価値が一定のため，とある品物 2 つをそれぞれナップサック A とナップサック B に入れた場合，それぞれの品物を入れ替えても価値の総和は変化しない，しかし，本研究で取り扱う複数ナップサック問題

は、被災者の避難時間は被災者の位置から避難所の距離に応じて変化するため、ある被災者2人をそれぞれ避難所Aと避難所Bに避難させた場合、2人の避難先を入れ替えると避難時間の総和は変化する。(被災者2人から避難所A,Bへの距離はそれぞれ異なることとする。)したがって、一般的な複数ナップサック問題と比べて、本研究で取り扱う複数ナップサック問題は、多くの組み合わせを考慮する必要があるため、一般的な複数ナップサック問題をそのまま適用せずに、独自アルゴリズムで解いている。そのため、一般的な手法と比較し、本研究における複数ナップサック問題を評価する必要がある。また、現状の提案手法は、避難場所のみしか決定していないため、避難先が決定した場合経路も一意に決定される。そのため、さらに混雑を解消した避難経路誘導を実現するため、混雑に応じた経路決定を実装していく必要がある。

また、現在は避難場所を決定するために非常に多くの時間が必要となっている。そのため、実際の災害時における運用方法として、計算時間の短縮方法などを検討する必要がある。具体的には、観光地等の人口密集地では、出店やスポットごとの人口分布を事前に収集することが可能であると考えられ、災害発生前に人口分布情報を収集し、その情報に基づいて事前にシミュレーションを行う。次に、災害が発生した直後の人口分布、事前にシミュレーションしておいた人口分布を照らし合わせ、一致するような人口分布のシミュレーション結果を用いて避難経路を計算することで、災害発生直後の計算時間短縮が期待できる。しかし、具体的な要件定義などを行えていないため、実用化に向けてさらなる調査・検討が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご多用の中にも関わらず、一張一弛の御指導頂きました安本慶一教授に、厚く御礼申し上げます。研究テーマの立ち上げ時から、研究活動において未熟な私に対し、どんなにご多用であろうと、熱心に相談に乗って頂き、数多くの御助言を賜りました。さらには、本研究の進行において本筋から逸れないように幾度も御指摘を頂きましたほか、多数の共同研究にアサインしてくださり、自らの研究活動のみでは体験できない貴重な経験をさせてくださいましたこと、重ねてお礼申し上げます。

笹原正治教授には、ご多用の中にも関わらず論文審査委員を引き受けて頂き、貴重な御意見を賜りました。また、中間発表の際には、現実的なシミュレーションシナリオや計算時間への的確な御指摘や御助言をくださり、自らの研究を見直す契機となりました。心より感謝申し上げます。

荒川豊准教授には、原稿作成や発表練習の際に、柔軟な思考での的確な御指導及び鋭い御助言を頂きました。それらの御指摘や、御意見は、自らの研究の根本的な部分を見直す契機となりました。心より感謝申し上げます。

藤本まなと助教には、本研究と共同研究を進めるにあたり、的確な御指導および御助言を頂きました。締切に対する姿勢や、原稿執筆、スケジュールの組み立て方等、自身に足りない研究に対する様々な考え方・進め方を教えていただきました。さらに、私が研究の方向性に迷った時には、暖かく相談にのってくださり、自身で考えるべきことには、ヒントのみを提示するなど、常に私の成長を第一に考えた熱心な御指導をして頂きました。また、常日頃から自身の体調等へのご配慮まで賜りましたこと、心より感謝申し上げます。

諏訪博彦助教には、本研究と共同研究を進めるにあたり、的確なご指摘および御助言を頂きました。研究について考えるときのコツや、説明し、説得させる際に必要なことなど、多くのことを教えていただきました。さらに、私が研究の方向性に迷ったときには、研究背景から研究のアイデアまで、的確かつ素早くアドバイスを頂きました。また、自身の研究の実験データの考察等について、ご指導していただきました。厚く御礼申し上げます。

水本旭洋特任助教には、学生に非常に近い立場から、研究の方針や進め方、さ

らには基本的な考え方に関して相談に乗って頂けました。研究テーマ立ち上げの時から二年間、些細なことから重大なことまで、熱心に御指導や御助言を頂きました。常日頃から様々なことに対して深く考え、積極的に議論していく姿勢からは、自身に最も足りていない研究への情熱を感じ、自身の研究を進める上では、常にその姿勢を見習わせていただきました。心より感謝申し上げます。

博士後期課程1年の中村優吾氏には、研究を通じて丁寧なご指導をいただきました。密に連絡ができていなかった際でも、真摯に研究の方向性や、進め方について暖かく相談にのっていただき、沢山のアドバイスを頂きました。また、自身が多忙の中にも関わらず、論文執筆の際には、必ず熱心な御指導や御助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

金岡恵事務補佐員、山内奈緒事務補佐員、小川恵理事務補佐員には、毎月の出張や学会の手続きを含む事務処理等、非常に柔軟にご対応くださり、研究生活を支えて頂きました。謹んで感謝申し上げます。

研究生活においては、様々な研究への活発な議論や実験への御協力、また、私生活においても、気軽に相談にのって頂いたことや、様々なご助言を頂いた、日高真人氏をはじめとする本学ユビキタスコンピューティングシステム研究室の皆様は深く感謝申し上げます。最後に、今日までの学生生活を様々な面から支えてくださった祖父母、父母に御礼申し上げます。

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.
- [2] Edgar Marko Trono, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Generating pedestrian maps of disaster areas through ad-hoc deployment of computing resources across a dtn. *Computer Communications*, Vol. 100, pp. 129–142, 2017.
- [3] Jovilyn Therese B Fajardo, Keiichi Yasumoto, Naoki Shibata, Weihua Sun, and Minoru Ito. Disaster information collection with opportunistic communication and message aggregation. *Journal of information processing*, Vol. 22, No. 2, pp. 106–117, 2014.
- [4] Toshiki Yamasaki, Tomohiro Kitamura, Ken Komaki, Koki Matsumoto, Tomotaka Wada, Manato Fujimoto, and Kazuhiro Ohtsuki. Development of prototype system using ios terminals for emergency rescue evacuation support system (eress). In *Parallel Processing Workshops (ICPPW), 2016 45th International Conference on*, pp. 7–15. IEEE, 2016.
- [5] 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.
- [6] 末次忠司, 橋本雅和. 災害時における停電の社会的影響と対応策. 水利科学, Vol. 55, No. 5, pp. 104–113, 2011.
- [7] AHJ Oomes. Organization awareness in crisis management. In *Proceedings of the international workshop on information systems on crisis response and management (ISCRAM)*, 2004.
- [8] Siska Fitrianie and Leon JM Rothkrantz. Dynamic routing during disaster events. In *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.
- [9] Yu-Jun Zheng, Qing-Zhang Chen, Hai-Feng Ling, and Jin-Yun Xue. Rescue wings: Mobile computing and active services support for disaster rescue. *IEEE Transactions on Services Computing*, Vol. 9, No. 4, pp. 594–607, 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] Jens Weppner and Paul Lukowicz. Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones. In *Pervasive computing and communications (PerCom), 2013 IEEE international conference on*, pp. 193–200. IEEE, 2013.
- [12] Jens Weppner, Benjamin Bischke, and Paul Lukowicz. Monitoring crowd condition in public spaces by tracking mobile consumer devices with wifi interface. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, pp. 1363–1371. ACM, 2016.
- [13] 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.
- [14] 寺田翔太, 出来寛祥, 白井裕子. 第8回コロキウム講演録.
- [15] 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.
- [16] 国土地理院. ハザードマップ.
- [17] 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.

- [18] 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1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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Hongquan Song, Xuejun Liu, Xingguo Zhang, and Jiawei Hu. Real-time monitoring for crowd counting using video surveillance and gis. In *Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2012 2nd International Conference on*, pp. 1–4. IEEE, 2012.
- [23] Tomohiro Nishimura, Takamasa Higuchi, Hirozumi Yamaguchi, and Teruo Higashino. Detecting smoothness of pedestrian flows by participatory sensing with mobile phones. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 15–18. ACM, 2014.
- [24] Jens Weppner and Paul Lukowicz. Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones. In *Pervasive computing and communications (PerCom), 2013 IEEE international conference on*, pp. 193–200. IEEE, 2013.
- [25] Antoni B Chan, Zhang-Sheng John Liang, and Nuno Vasconcelos. Privacy preserving crowd monitoring: Counting people without people models or tracking. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, pp. 1–7. IEEE, 2008.

- [26] Masato Hidaka, Yuki Matsuda, Shogo Kawanaka, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. A system for collecting and curating sightseeing information toward satisfactory tour plan creation. In *The Second International Workshop on Smart Sensing Systems*, pp. 1–6. IWSSS, 2017.
- [27] Kazuhito Umeki, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Real-time congestion estimation in sightseeing spots with ble devices. In *Pervasive computing and communications (PerCom), 2018 IEEE international conference on*. IEEE, 2018.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 京都市. 京都観光総合調査 平成 27 年 (2015 年 1 月から 12 月).
- [31] 京都市. 京都市指定避難所一覧.