

博士論文

混雑度・災害弱者・家族構成を考慮した
避難所決定シミュレーションに関する研究

田中 智基

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 安本 慶一

ユビキタスコンピューティングシステム研究室 (情報科学領域)

2024年3月15日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

田中 智基

審査委員：

主査	安本 慶一	(情報科学領域 教授)
	笠原 正治	(情報科学領域 教授)
	諏訪 博彦	(情報科学領域 准教授)
	松田 裕貴	(情報科学領域 助教)
	藤本 まなと	(大阪公立大学 大学院情報学研究科 准教授)

混雑度・災害弱者・家族構成を考慮した 避難所決定シミュレーションに関する研究*

田中 智基

内容梗概

地震等の突発的な災害時において、被災者の安全確保に向けた対策は必須の課題である。帰宅困難者及びそれらの数に相当する被災者の安全を確保するため、避難所の提供、避難所に対し被災者の適切な分配、誘導は災害対策の最も基本的な方針である。

避難所の決定の問題は、収容可能人数を制約とし被災者の避難時間を最小化することが目的化される。その中で、帰宅困難者を対象とし、被災者の位置情報を取得できる前提の下、ナップサック問題の考えを利用し、ヒューリスティックに避難先を決定する手法が存在する。しかしながら、避難状況は移動中の混雑や、被災者自身の属性、特徴、社会的関係が大きく影響することが考えられ、帰宅困難者の対策においてもそれらの問題が指摘されている。

本研究は、被災者の発生に伴う複数の問題に対応するため、上記の避難所決定手法をベースラインとした新たな避難所決定手法の提案をする。また、提案する手法はそれぞれ効果を検証するため、30,000人規模の避難を想定したシナリオのマルチエージェントシミュレーションを実施し、避難完了時間などを測定し、既存手法と比較した。本論文で取り扱う課題は以下の通りである。

課題1は避難行動によって発生する道路上の混雑及びその影響を緩和できるように避難所を決定すること、課題2は高齢者や身体障害者などの災害弱者が避難行動中に被る身体的負荷を軽減が可能となるように避難所を決定すること、課題

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 博士論文, 2024年3月15日.

3は家族の世帯構成員が離れている状態で構成員同士を避難所に合流させることを目的とする。

課題1に対しては、混雑の影響を推定する手段としてシミュレーションを利用し、その結果を反映した上で避難所の再決定を行う。この手順を反復することで、移動中の混雑とその影響を軽減した避難所決定の解を出力している。全体避難完了時間を約12%削減し、移動中の平均混雑度数が24%から32.5%、最大混雑度数が24.2%から57.8%減少する結果が得られた。

課題2に対しては、被災者を健常者と災害弱者の2つに分類し、尚且つ被災者が指示に従わない行動する可能性を想定する。これにより、災害弱者への優先性と避難所の割り当て人数に制限を設けた上で避難所の決定を行う。更に、シミュレーションを活用することでたらい回しが発生する避難所を特定し、避難所に訪れる人数の想定に合わせて制限する手法を提案する。実験の結果、健常者による避難指示に対して一定の貢献が担保される場合において、災害弱者の避難時間を下回ることが可能になると伺えた。

課題3に対して、ベースラインの手法を複数人ごとで避難所を決定するように拡張し、世帯ごとの避難所までの予想避難時間について、異なる複数の設定を考案し、それぞれの設定による避難完了時間結果を比較した。考案した設定は一般的な避難方針にて採用されている「自宅に近い場所に集まる」を参考にした「自宅基準時間設定」を基準として、被災者の分布に応じた複数のパターン「最大避難時間設定」「最小避難時間設定」「平均避難時間設定」の4つとなる。世帯構成データを用いたシミュレーションを行った結果、「自宅基準設定」と比較して「平均避難時間設定」で平均避難完了時間が約23%、「最大避難時間設定」で全体避難完了時間が約22%削減する結果となった。一方、ベースラインである個人ごとの避難所決定と比較した場合、提案手法は全体避難時間が63%以上増加するのに対し、ベースラインの手法は複数の構成員を持つ世帯の集合率が約23.6%であるという、避難完了時間と世帯集合のトレードオフの関係が伺えた。

本論文の最後にて、上記の3つの研究の結果を受け、避難所決定計画、位置情報技術を利用した避難システムの活用における課題や展望について考察する。

キーワード

災害避難計画，道路混雑度，災害弱者，世帯構成，ヒューリスティックアルゴリズム，ナップサック問題，マルチエージェントシミュレーション，スマートシティ

A Study on Simulations for Evacuation Shelter Selection Methods Considering Congestion, the Disaster Weak, and Household Compositions*

Tomoki Tanaka

Abstract

In sudden disaster situations like earthquakes, providing shelter sites and assigning evacuees to shelters properly are fundamental policies to keep such evacuees safe.

In many studies, the problem of deciding on shelters is often formulated to minimize the evacuation time of evacuees with the constraint of shelter capacities. Among them, there is a method that heuristically determines shelters for evacuees using the idea of knapsack problems under the assumption that the location information of evacuees can be obtained. However, evacuation situations are highly affected by other factors such as traffic congestion or attributes, and social relationships of evacuees, which are also related to the problem of those who are unable to return home in disaster situations.

In this thesis, I propose new shelter selection methods to tackle multiple issues of such evacuees using the abovementioned method as the baseline. To evaluate the effectiveness of the proposed methods, multi-agent simulations for the evacuation scenarios of around 30,000 people are executed and the methods are compared by measuring multiple indications including the evacuation time.

This thesis addresses the three following issues. Issue 1: selecting shelters to reduce evacuation time alongside mitigating congestion on roads and its effect during an evacuation, Issue 2: assigning the disaster weak such as the elderly and the disabled people

*Doctoral Dissertation, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 15, 2024.

to shelters properly to moderate burdens that they will get, Issue 3: Gathering family members from distant places at the same shelters.

To address Issue 1, simulations perform the function of estimating congestion on roads. Then the proposed method selects shelters based on the estimation. By repeating this procedure, a congestion-aware solution for the shelter selection will be derived. As a result of the simulation experiment, the overall evacuation time was reduced by 12%. The decrease rate of the average congestion degrees was from 24% to 32.5% and that of the maximum congestion degree was 24.2% to 57.8%.

About Issue 2, evacuees are clustered into "healthy people" and "the disaster weak" and the existence of evacuees who do not follow evacuation instructions is assumed. The proposed method not only gives priority to the disaster weak but also restricts the assigning numbers of evacuees to shelters. Moreover, utilizing simulations to detect which shelters will be crowded and how the disaster weak will be refused by shelters due to evacuees' selfish behavior. Then, the assigning numbers of shelters are set by the simulation result. As a result of the experiment, the evacuation time of the disaster weak can be reduced with sufficient contribution of healthy people to instructions.

Regarding Issue 3, the baseline heuristic shelter selection algorithm is redeveloped for assigning groups to shelters instead of single evacuees. Then I present the multiple settings for the estimated evacuation time of households to shelters. They include "the Home-based time setting", which is inspired by strategies that many organizations adopt, and three location-aware settings, "the maximum time setting", "the minimum time setting" and "the average time setting". As the result of simulations utilizing synthesized population data, the average evacuation time was reduced by approximately 23% in the average time setting and the overall evacuation time was moderated by around 22% in the maximum time setting compared to the home-based time setting. As the other finding, compared to the baseline method, the proposed method increases the overall evacuation time by more than 63%. At the same time, the success rate in family-gathering of households with multiple members was approximately 23.6% in the previous method.

The last part of this thesis discusses how disaster management and evacuation systems with location-based technologies should be operated in response to the findings of the studies above.

Keywords:

evacuation strategies, road congestion, the disaster weak, household composition, heuristic algorithm, knapsack problem, multi-agent simulations, smart city

目次

1. 序論	1
2. 関連研究	7
2.1 避難誘導, 避難所選択	7
2.2 混雑が与える影響	9
2.3 災害弱者の存在	10
2.4 家族などの社会的関係と災害対策	11
2.5 本研究の位置づけ	12
3. ベースとなる避難所決定手法とシミュレーション方法の設定	14
3.1 前提, 想定環境	14
3.2 避難所決定の基本手順	14
3.3 シミュレーションシステムの仕様	17
3.3.1 シミュレーション環境設定	17
3.3.2 シミュレーション上の被災者エージェントの行動	18
4. シミュレーションの反復を用いた混雑度緩和を目的とした避難所決定手法	21
4.1 課題要件	21
4.2 混雑度を考慮した避難所決定手法の提案	21
4.2.1 前提シミュレーションの実施	22
4.2.2 シミュレーションの反復	23
4.3 評価実験	24
4.3.1 評価シナリオ	24
4.3.2 避難所, 収容可能人数	25
4.3.3 初期配置	25
4.3.4 比較手法	27
4.3.5 評価指標	28
4.4 実験結果	29
4.4.1 避難完了時間	29

4.4.2	総混雑度数	33
4.4.3	シミュレーション繰り返し回数	35
4.5	結果からの考察	35
4.6	本章のまとめ	37
5.	災害弱者支援を目的とした避難行動推定に基づいた避難所決定手法	38
5.1	課題要件	38
5.2	提案手法	40
5.2.1	手法の構成	40
5.2.2	Fixed-Rate Reduction Method(FRM)	41
5.2.3	Simulation-based Reduction Method(SRM)	42
5.3	評価シミュレーション	45
5.3.1	エージェントの行動	45
5.3.2	評価対象	46
5.4	実験結果	46
5.4.1	平均避難完了時間	47
5.4.2	避難完了率推移	50
5.5	結果と考察	53
5.6	本章のまとめ	54
6.	世帯構成員同士の合流を目的とした避難所決定	56
6.1	課題要件	56
6.2	手法手順	56
6.2.1	自宅基準時間設定 (GHKP-Home)	59
6.2.2	最大避難時間設定 (GHKP-Max)	59
6.2.3	最小避難時間設定 (GHKP-Min)	59
6.2.4	平均避難時間設定 (GHKP-Average)	59
6.3	評価手順	60
6.3.1	対象シナリオ	60
6.3.2	世帯構成	61

6.3.3	被災者の分布, 初期位置	62
6.3.4	評価指標	65
6.4	実験結果	65
6.4.1	平均避難完了時間	66
6.4.2	全体避難完了時間	67
6.4.3	集合率	69
6.5	結果と考察	69
6.5.1	被災者の位置情報	70
6.5.2	集団の考慮	70
6.6	本章のまとめ	71
7.	考察	73
7.1	各手法の効果と活用案	73
7.2	課題の複合化に対する手法同士の統合	74
7.3	動的な避難計画に向けて	75
7.4	被災者分配の優先順位	75
7.5	被災者の行動心理を考慮した避難所決定	77
7.6	提案手法の課題	77
7.6.1	通信インフラの確立	78
7.6.2	道路ネットワークの可便性	78
7.6.3	システムの運用環境	79
8.	結論	79
	謝辞	81
	参考文献	82
	研究業績	97

目 次

1	章構成	6
2	祇園全体図	24
3	避難開始時点での被災者の分布	26
4	被災者の分布の変遷	26
5	被災者の分布の変遷	27
6	平均避難完了時間比較	29
7	平均避難完了時間 20 セット比較 (HKP vs CAHKP)	30
8	全体避難完了率推移	31
9	全体避難完了時間 20 セット比較	32
10	総混雑度数比較推移比較 (ケース 1, HKP vs CAHKP)	33
11	平均総混雑度数比較 (HKP vs CAHKP)	34
12	最大総混雑度数比較 (HKP vs CAHKP)	35
13	FRM のフローチャート	41
14	SRM のフローチャート	43
15	全被災者の平均避難完了時間	47
16	健常者のみの平均避難完了時間	48
17	災害弱者のみの平均避難完了時間	49
18	避難完了率推移 (全被災者が指示に従う)	50
19	避難完了率推移 (健常者の一部が指示に従わない)	51
20	避難完了率推移 (全ての健常者が指示に従わない)	52
21	生駒市全体図	61
22	流動人口データ内ユーザーの移動距離の分布	63
23	エージェントの行動開始地点の決定フローチャート	64
24	平均避難完了時間比較	66
25	全体避難完了時間比較	67
26	全体避難完了率推移	68

表目次

1	被災者と避難所による避難時間行列の例	16
2	ソート後の避難時間行列の例	16
3	被災者と避難所による避難時間行列の例	23
4	被災者と避難所による避難時間行列の例	39
5	災害弱者が存在する場合の予想避難時間行列の例	39
6	被災者と避難所による避難時間行列の例	42
7	変数定義	44
8	世帯に関する変数の定義	57
9	HKP 手法による世帯構成員の合流成功率	69

1. 序論

日本国内は、例年、地震や台風などの自然災害の被害を受けやすい環境に置かれている。災害発生時は建物の倒壊、道路の封鎖、死傷者が出るなどの甚大な被害を受けることになる。近年は、気候変動の影響により、自然災害の更なる頻発化も懸念されている [1]。災害の発生は突発的であり、正確な予測が難しいため、被災者の安全を確保し適切な避難を可能にするために、発生前と発生後の対策が重要である。政府及び各地方行政も防災白書をはじめ、各避難方針マニュアルを作成して、防災意識の啓発をしている。災害について国内を取り巻く環境の激しい変化を受けて、令和5年防災白書では、とりわけ次のような対策課題を明示している [1]。

- 自然災害の激甚化・頻発化
- 防災・減災インフラの整備等による災害への対応力の向上
- 人口の大都市部への集中と高齢化の進展
- 国民の防災意識の変化、自助・共助の取組の進展
- グローバル化に伴う外国人の増加
- デジタル化等情報伝達手段の変化

予期せぬ災害の発生は、「帰宅困難者」を生むことがある。東日本大震災発生時、東北地方での甚大な被害に加え、首都圏である東京では鉄道等の交通機関の運行停止により、約515万人の帰宅困難者が発生し、駅や道路などで人流の混雑を引き起こす事態となった [2, 3]。歩行者が道路上に溢れている状態は、移動による2次被害の可能性を持ち、被災者側も家族との連絡、安否確認を必要とし、それらは行動の意思決定にも影響する。この東日本大震災の事例以後、内閣府や人口が集中する都市部らを主導に帰宅困難者の対策が進められている [4]。

災害発生時の被災者の安全を確保する手段として、避難場所の提供と的確な被災者の誘導は最も重要な事項である。特に、帰宅困難者に対しては、帰宅が可能な

なるまでの一時的に滞在が可能な場所が必要となる。より効率的、避難誘導を実現するため、通信技術を活用することで避難誘導システムの開発やスマートフォン避難誘導アプリを使った支援方法の確立などが広く進められている [5, 6]。更に、IoT, ICT 技術の発展を背景とし、仮想空間と物理空間を融合したシステムにより経済発展と社会問題解決の両立を図る、Society 5.0 [7] やスマートシティ計画が推進されている [8, 9]。スマートシティは、都市内にセンサー等を張り巡らし、センサーより実空間上のデータを IoT や ICT 技術を用いて収集、分析を行い、分析結果を基にフィードバック仕組みとなり、より質の高いサービスの提供や社会課題の解決を目指す。また、実世界をデジタル空間上に再現する技術としてデジタルツインが注目されている。デジタルツインは現実世界のモノや環境などの情報を仮想空間上に再現し、仮想空間上でシミュレーション、事象の分析、検証を可能とし、それらを活用することで、実世界での対象の制御や作業の効率化が得られるメリットがあるとされている。このようなスマートシティ、デジタルツインの技術の効果の一つとして、災害時の避難誘導への応用が期待されている [10]。被災者の位置情報の把握、行動を予測、混雑の推定がより高い精度で可能になることで、効果的な避難指示が行えることが期待される。

指定避難所には収容可能人数が設けられており、避難行動時には被災者が避難所に集中、また都心部や混雑が見込まれる地帯では、訪れる被災者全てを避難所に収容することが困難になる。収容人数を超過すると、たらい回しにより被災者に移動の負担を課し、避難時間の遅延を引き起こすことになる。このたらい回しの問題を防止するため、避難所への誘導には収容可能人数に収まるように、被災者を割り当てなければならない。避難場所の決定及び被災者や車両の割り当てを扱う研究では、避難時間の最小化を目的とした避難所と被災者の整数計画問題として定式化されることが多い [11, 12]。そのような避難所を決定する研究の中で、帰宅困難者を念頭に置き、混雑が予想される地域での歩行者の避難所までの誘導を対象にした、梅木らのナップサック問題の考えを利用し定員を避難所をヒューリスティックに決定する手法 [13] が存在する。この手法は、被災者の位置情報を端末より取得し、避難所の定員をナップサックの容量、避難所までの避難時間をアイテムの重さと捉え、ヒューリスティックに選択することで、たらい回しを防

止し、全ての被災者を最寄りの避難所へ割り当てるよりも短い時間で全体の避難を完了させることが可能となる。

しかしながら、この手法の避難所決定問題にて、入力する要素として考慮されているのは、避難所の定員、避難開始時の位置情報のみである。そのため、上記に挙げられるような災害全般或いは帰宅困難者の問題にて、被災者の行動に影響するとされる「歩行者の移動による混雑」や「被災者自身の特性」については考慮されていない。特に、「災害弱者」「要支援者」として表されるように、年齢や身体能力による歩行速度、行動可能範囲の差が存在し、帰宅困難者の対策においても災害弱者に対する支援の重要性が説かれている [14, 15]。加えて、家族等との安否確認情報の手段の確保や、被災者同士が持つ社会的関係が避難行動に与える影響についても指摘されている。このように帰宅困難者対策に関して、被災者自身の行動や特性に起因する課題は複数存在するが、既存研究の避難所決定手法によるヒューリスティックな手順は、被災者ごとに異なる災害時の立場や突発的に生じる被災状況に起因する問題への対処が困難となる。

本研究では、被災者の発生に伴う複数の問題に対処するため、各問題に対応した避難所決定手法を考案し、それらによる避難効率について評価することを目的とする。そのために、観光地における帰宅困難者を対象とすることを想定し、第4章では「歩行者の移動による移動中の混雑の緩和」、第5章にて「災害弱者が被る避難移動による負担の軽減」、一般住民の日常生活範囲内での世帯ごとの避難を想定し、第6章にて「離れている世帯構成員同士の合流」をそれぞれ問題の対象とする。各問題に対応した避難所決定手法は、具体的には、既存研究であるナップサック問題による避難所決定手法をベースラインとし、新たな避難所決定手法の提案のための3つの研究課題は以下の様に示される。

- 課題1: 都心部など人口が集中する場所での避難行動時に発生する避難経路上の混雑とその影響の緩和するように被災者を避難所に割り当てる。
- 課題2: 高齢者や身体障害者に代表される災害弱者の避難行動時の負担を軽減する必要がある。災害弱者に対して優先的に避難先を決定する手段が有効と考えられるが、指示に従わない被災者の影響が懸念される。

- 課題3: 家族の構成員が離れている状態で被災した際に、分散している世帯構成員同士をどの避難所にて合流できるように割り当てるべきか。

帰宅困難者及びそれに相当する数の被災者を対象にした避難誘導、避難所決定を扱うにあたり、本研究はシミュレーションをベースとした避難所決定手法の提案、評価を行う。防災研究の分野においては、災害の発生は正確な予測が困難であり、また、大規模の人数による避難について実際の訓練を行うことも非常に困難となる。そのため、災害発生時の被害規模の再現や避難計画の試行、有効性を評価する手段として、シミュレーションは広く用いられている技術である [16, 17]。各課題にて、約 30,000 人規模の避難時を想定したマルチエージェントシミュレーションを実施し、各手法による避難効率の精度の評価を行う。

課題1への対処として、シミュレーションを活用し、避難移動中に発生する移動経路上の混雑とそれに伴う避難時間の遅延の推定を事前に行う。このシミュレーションによる推定結果を避難所決定に反映し、避難先の再決定を行う。このプロセスを繰り返すことで、混雑の影響を反映した避難所決定の準最適解を出力する手法を提案した。祇園祭を対象にした避難シミュレーションを行い、避難完了時間と移動経路上の混雑度を減少させる効果もたらされた。初期条件を変更して 20 回シミュレーションした結果、混雑度数の減少率は平均混雑度数で 24% から 32.5%，最大混雑度数では 24.2% から 57.8% となった。

課題2では高齢者や子供、身体障害者などの身体的要因により健常者と比較して避難行動が困難となる者を「災害弱者」として取り扱う。災害弱者の優先に加え、指示に従わない被災者が発生することを想定した上で、避難所に割り当てる人数に一定の割合の制限をすることにより、超過する人数混雑する避難所を避けた決定する手法 (Fixed Reduction Method) と、事前にシミュレーションを活用することで、人数超過が発生する可能性が高い避難所を特定し、割り当てる人数を制限する手法 (Simulation-based Reduction Method) を提案した。シミュレーションを行った結果、避難完了時間は健常者の貢献具合が満たされる場合にて、災害弱者の避難完了時間の削減が可能となることが確認された。

課題3については、避難所決定問題を異なる大きさのアイテムを扱うナップサック問題、複数人のグループごとに割り当てるように再構成し、世帯に対する避難

所への予想避難時間の設定パターンを複数考案した。具体的には一般的に採用されている避難方針を参考とした「自宅基準時間設定」、被災差の分布に応じた「最大避難時間設定」「最小避難時間設定」「平均避難時間設定」の計4つであり、各パターンでの避難完了時間の比較を行った。「自宅基準設定」を基準とすると、「平均避難時間設定」で平均避難完了時間が約23%、「最大避難時間設定」で全体避難完了時間が約22%減少した。更に、ベースライン手法での避難完了時間と世帯構成員の合流の成功率を計測し、個人ごとに割り当てる場合と集団ごとに割り当てる場合の差を評価した。世帯構成を考慮しない決定法では、全体避難完了時間が1時間20分以上短い一方で、合流成功率は平均で23.6%となり、避難完了時間の削減と世帯構成員の合流の2つの目的のトレードオフ関係が確認された。

本論文は、これらの成果をまとめたものであり、構成は以下の通りである。2章では、避難誘導や避難シミュレーション、各課題で挙げた避難行動に影響する要因に関する災害対策方針や既存研究をまとめ、本研究の位置づけを明らかにする。3章では、本論文にて提案する手法の基礎となるナップサック問題の考えを利用した避難所決定手法の詳細について説明する。4章では、混雑度の緩和を目的とした避難所決定手法、収集されたデータに対して提案手法を適用した際の行動認識結果について述べる。5章は、災害弱者の身体的負担を軽減する6章は、家族構成を考慮し、世帯構成員同士の合流を目的とした避難所決定手法について説明する。7章にて、3つの研究課題の結果を基に、避難所決定や避難支援対策に必要な要件について考察を行い、8章にて、本論文をまとめる。図1にて、本論文の章の全体図を示す。

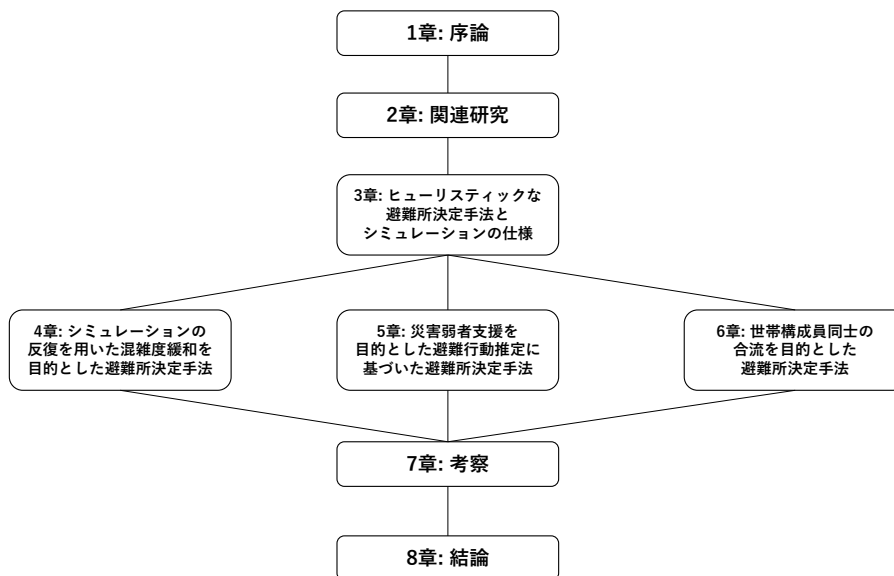


図 1: 章構成

2. 関連研究

本章では、避難行動、避難支援についての対策や調査及びそれらに関する研究をまとめる。避難誘導や避難所選択手法に加え、前章で示した課題ごとに避難行動に影響する要因、それらに対するアプローチをそれぞれ説明する。その後、既存研究に対する本論文の位置づけを明らかにする。

2.1 避難誘導，避難所選択

地震や水害など多様な自然災害に備えるため、国土交通省より発行されている災害対策マニュアル [18] をはじめ、各地区ごとでの避難訓練の実施、ハザードマップの作成、公開による対応がされている [19, 20]。災害時の避難支援の研究は、インターネットを介さない災害時の通信システムの開発 [21] や避難マップの作成 [22, 23]、救助システム [24]、災害規模の可視化 [25]、災害の情報収集 [26]、通信インフラが使えない場合での、アドホック通信を利用した情報共有システム [27] などの多岐にわたるアプローチがされている。

災害時の被災者の安全確保、人的被害の抑制のための手段として、被災者を避難所等の安全な場所への的確な誘導や避難経路の提示 [28, 29]、避難所の開設が一般的である。Fitirianie らはダイクストラアルゴリズムを用いて、被災者間の情報共有を行いながら最短避難経路を提示するシステムを提案している [30]。Zhang らは AR デバイスを用いた屋内での混雑を考慮した避難ルート探索の方法を提案している [31]。Komatsu らはスマートフォンを用いた自動避難誘導方法を提案している [32]。この手法では表示された経路と実際の経路の差より通行止めの区間を自動で推定し、経路を再計算する仕組みとなっている。Wang らは火災や洪水、毒ガスなどの流動的な障害を考慮した救急隊に対する経路決定手法を提案している [33]。

避難所は被災者が一時的な安全確保又は長期的な生活の拠点となる。避難所の数、位置の最適化の手法は避難計画の一環として広く研究されている。Praneetpholkrang らは多目的最適モデルを構築し Epsilon-constraint 法とニューラルネットワークを融合した避難場所の配置を行う手法を提案している [34]。Kongsom-

saksakul らは洪水時の避難所定員の制約下の下，2段階構造の避難所割り当てのモデルを提案している [12]．決定モデルは意思決定側と被災者側で構成されており，意思決定側は避難時間を最小化するように避難場所の数と位置を決定し，被災者側は避難場所を選択する．Amideo らは避難所配置と避難誘導の最適化に関して，既存の避難計画問題の研究について行った調査，分析より着目すべき課題の方向性としてを示している [35]．Nappi らは被災者を移送や一時的に避難させる際の基準や考慮すべき点について立地，最適な分散，安全性，インフラ設備，プライバシーなどの点でまとめている [36]．さらに，Nappi らは災害時の避難計画の意思決定支援のための一次避難所の選択や立地の複数の基準による決定モデルを提案している [37]．Chanta らは洪水被害時の避難場所の選定を最適化する手法を提案している [38]．

また，災害時の避難行動の再現，避難計画の検証の方法としてマルチエージェントシミュレーションは非常に有効な技術として広く用いられている [39]．Bangate らは社会的結合や時空間的要因を投影した被災者行動のモデルを構築している [40]．Makinoshima らは，並列計算による都市規模の地域におけるマイクロシミュレーションを実現している [41]．このシミュレーションモデルでは小さい範囲での被災者の混雑の測定，及び都市の解析の計算時間の削減を可能としている．Chu らは都市部住人の避難計画の最適化モデルのシミュレーションフレームワークを提案している [42]．Lee らは，災害時の意思決定問題を定式化し，問題を解くためのマルチエージェント強化学習アルゴリズムを提案している [43]．

GPS 機能を持つスマートフォン等の普及により，位置情報の取得，推定が可能となり [44]，ビッグデータを活用した避難誘導や安否確認などが立案されている．近年注目されているスマートシティやデジタルツインに関する技術 [45] は，実世界からの位置情報を取得し，避難指示をより効率的に行えることが期待されている．スマートシティ技術の災害対策における活用法として，徳島県美波町では地区一帯に IoT デバイスによるセンサー網が構築され，住民に対して，警報受信や家族の位置情報がリアルタイムで把握できるアプリや通信機能付き IoT 装置の配布を行う事例もある [46]．地域社会の情報の効率的な収集，分析を可能とするシステムは，住民や行政とのかかわり方も含め，その導入，運用の方法，有り方に

ついて検討が進められている [47].

多くの避難所決定の問題では被災者を最寄りの避難所へ移動させる傾向がある。しかし、被災者が一斉に最寄りの避難所に集まることで、避難所の定員を超過し、被災市がたらい回しにされる問題が発生する。これに対し、梅木らは被災地内の被災者の偏在状況を考慮した避難所決定手法を提案している [13]。この手法は本研究のベースラインであり、第3章にて詳細を説明する。

2.2 混雑が与える影響

東日本大震災の事例の様に、都心部などの人口密集地は災害発生時にて、交通インフラの障害等により大量の帰宅困難者が発生する可能性が高い。内閣府による首都直下地震発生時の被害想定でも、昼12時の東京都と近隣の3県にて約650万人の帰宅困難者が出ると考えられており [48]、自宅に戻ることが困難となった歩行者が道路上や近隣の建物付近に集中することで、混雑による群衆事故などのリスクは高くなる。内閣府では帰宅行動について調査、シミュレーションを実施し、地震発生時に首都圏の道路ネットワーク上にて歩行者が帰宅行動をすることで、どこでどのような問題が生じるか及びそれらの問題に対する対策についてまとめている [49, 50]。調査の中では、道路上の人口密度によって歩行速度は変化することが指摘されており、特に混雑度が $5.25 \sim 6$ [人/m²] で群衆の圧力と心理的ストレスが大きくなり、1m² 辺りの人数が6人以上になるとラッシュアワーの満員電車の状態に近くなり、群衆なだれの危険性が生じる。シミュレーションの結果として、交通容量の低下、移動が不可能になる可能性、移動による身体的及び精神的負荷を引き起こすことが指摘されている。

混雑の緩和、道路交通の渋滞を回避するために、リアルタイムの混雑度推定システムが求められている。Song らによるスマートフォンで撮影した群衆写真から混雑度を推定する方法や [51]、Nishimura らの加速度器やスマートフォンから取得した歩行の動きや環境音より交通の流れ具合を推定するシステム [52]、Weppner らの Wifi/Bluetooth 機器を用いた人口密度の推定 [53, 54] など、多様な機器を用いた手法が提案されている。Chan らはプライバシーを保護しながら群衆の監視を行うシステムを開発している [55]。このシステムでは群衆のパターンを Gaussian

回帰モデルにより学習する特徴を持っている。このようなカメラやデバイスのデータを用いた混雑推定システムは数多く提案されている一方、プライバシーの問題や所持率による制限がある。Hidakaらは観光地などを対象にしたBLEを用いたリアルタイム混雑度推定システムを提案している[56, 57]。この手法では特定の危機に依存せず、設置コストや消費エネルギーを抑えたものとなっている。

Kasaiらは、道路上の混雑度を考慮した自動避難経路選択法を提案しており、通信インフラが利用可能又は不可能な場合において、最短経路を選択する時と比較して平均及び最大避難時間を短縮が可能となることを示している[58]。廣井らは首都圏を対象にした大都市避難シミュレーションを行い、道路ネットワーク上の混雑度を表す危険度指標を提案している[59]。Chenらは深層学習を利用したスマートシティ環境下での混雑度予測モデルの構築しており、既存の学習モデル以上の予測精度を發揮している[60]。Bellochiらは混雑反応拡散モデルに基づいた大規模都市ネットワーク上の混雑を再現するモデルを開発している[61]。

2.3 災害弱者の存在

災害発生時には、高齢者や子供、身体障害者を例に、身体能力の問題により避難行動が困難になる「災害弱者」が存在する。「災害弱者」は自身に危機が迫っている状態で、それを察知する、適切な行動を取る、情報を受け取ることが不可能或いは困難になる者を指し、健常者以上に死傷などの被害を受ける確率が非常に高い。東日本大震災発生時では、被災地となった岩手、宮城、福島での死亡者の60%以上は60歳以上の高齢者が占めており、身体障害者の死亡率は全体の死亡率の2倍であった[62]。更に、2019年台風19号では災害による死者の内、高齢者の割合が全体の約65%、2020年7月豪雨では約79%であった[63]。主要な先進国では少子高齢化が進行しており[64, 65, 66, 67]、日本国内については、その傾向は顕著なものである。2022年時の65歳以上の割合は29.0%であり、今後さらに増加し、2070年には38.7%に達することが見込まれる[68]。2021年5月には災害対策基本法が改訂され、「避難行動要支援者の避難行動支援に関する取組指針」各市町村での個別避難計画の作成目標、避難行動要支援者の名簿・個別避難計画の作成・更新の努力義務化などの規定が創設された[69]。このように、災

害弱者に対する支援は面において重要な項目とされている。

災害弱者を対象にした研究では，McGuire らによる障害を持つ高齢者数の推定を行うためにシステムの活用方法を調査している [70]。Arai らは障害者に対して救援者を割り当てるエージェントモデルを提案している [71]。このモデルでは道路状況や救援者の精神状態，障碍者の種別，避難所までの到達可能性を考慮して，どの救援者が誰を救助しに行くかを決定する。Sang らも身体障害者を救助するボランティアを決定するための組み合わせオークションを利用した意思決定モデルを提案している [72]。屋内環境を対象とした災害弱者を考慮したマルチエージェントモデルの構築は数多く行われている [73, 74]。Christensen らはエージェントモデルを使用して，屋内環境における災害弱者の存在の避難時間への影響を示しており [75, 76]，身体障害者が避難時に負担を受けやすいこと，そのような被災者を避難計画の上で考慮することの重要性を説いている。

2.4 家族などの社会的関係と災害対策

突発的な災害の発生時にて，家族や知人と離れている状態で被災する可能性は高い。家族や親しい相手の存在など，被災者自身が持つ他社との社会的関係もまた災害時の行動，災害の危機に面した際の，被災者の反応や意思決定 [77, 78] に影響を与えると考えられている。Mawson は災害時の社会的関係性と被災者の行動の関連性を強く指摘している [79]。Mawson が提唱する理論では，脅威の有無と親しい人間が近くにいるかどうかで災害に対する被災者の感じ方は 4 つのパターンに分類される。近くに家族などの親しい人間がいない場合，被害の大きさに関わらず，脅威に対して著しく不安に感じやすいとされている。Taylor も，他者と集合することは危険な状況下で最も基本的な対処方法であると位置付けている [80]。この集合の行動は人を落ち着かせるなど生物学的にも精神的にも大きな効果があるとされる。Jacob らの研究では災害や社会的について誤解を検証する中で被災者の身体的及び精神的な健康への影響を最小化するため，家族同士を合流させることを最優先する必要があると述べている [81]。Sadri らは人の社会的ネットワークが避難行動の意思決定や災害の情報伝達に影響するかを検証している [82]。Katzilieris らは世帯の反応やについて調査している [83]，危険の感知や

年齢、情報収集の試みが意思決定に影響すると示している。Dashらは避難行動を決定する際に子供や高齢者の存在などの家族構成による影響を指摘している[84]。Hasanらも暴風時の世帯の避難意思決定に影響する要因として、世帯の位置や家族構成などを挙げている[85]。

避難時の群衆行動は、被災者個人ごとの行動が複雑に関係し、被災者の生存率に大きく影響するものとして、シミュレーションにおける世帯や集団での避難のモデル化や群衆移動の効果について、数多く研究されている[86]。Haghaniらは集団の大きさやストレス度合いが集団行動に与える影響について調べており[87]、屋内実験を行うことで、これらの要因が移動前行動、意思決定の時間、出口の選択に対して、大きな影響することが示されている。Xieらは群衆行動の影響について、集合行動のモデルの構築とシミュレーションを行っており、集団が大きくなることで避難完了時間の削減に繋がる結果を示している[88]。

Liuらは家族を迎えに行くことや合流するような行為に影響する要因を分析し、様々な避難状況で親が子を迎えに行く確率を予測するモデルを提案している[89]。またLiuらは世帯による合流と移動手段を交通シミュレーションに取り込み、避難効率や交通の状態の推定をより容易にする手法を示している[90]。Murrayらは観測される世帯行動と既存の避難行動モデルとの誤差を減少させる手法を提案している[91]。世帯構成員はそれぞれ探し合い一つになって避難を行うことを想定して線形計画法により合流地点と迎えに行く構成員を決定する仕組みとなる。Liらは病院内での集団避難のシミュレーションを行っている[92]。

内閣府や地方自治体、その他非営利組織などが発行している災害避難マニュアルでは、世帯構成員が離れている状況への備えとして、安否確認方法の把握、家族同士で予め話し合っただけ避難場所や待ち合わせ場所、移動経路を決めることを推奨しているケースが多い[93, 94, 95, 96, 97, 98, 99]。

2.5 本研究の位置づけ

上記の関連研究で示されるように、それぞれの課題は災害対策において広く認知され、各行政の対応方針の発令や被災者の行動に関する調査やシミュレーションモデルの研究が数多く為されている。しかしながら、上述した3つの課題のい

ずれにおいても，都市部など混雑地域に発生すると考えられる帰宅困難者及びそれらと同規模の被災者に対して収容可能人数のある避難所に割り当てる問題と関連付けられた研究は少ない。

本研究は上記で示した3つの避難行動に影響を与える要因にそれぞれに対応した避難所決定手法を提案する。具体的には，課題を設定し，避難完了時間の削減と同時に目的を満たす避難所決定問題の解を出力する手法を考案する。

3. ベースとなる避難所決定手法とシミュレーション方法 の設定

本章では、本研究のそれぞれの課題にて提案する手法に共通する想定環境設定、ベースラインとなる「混雑の偏りを考慮した避難所決定手法」の詳細、実行する避難シミュレーションの仕様について述べる。

3.1 前提，想定環境

本研究で扱う災害状況の対象は、帰宅困難者が発生した場合などの、被災者が安全確保のために避難所へ向かうことを余儀なくされる状況である。避難所は各自治体が定めている「指定避難所」の事を指し、一定期間の滞在が可能であり、それぞれ収容可能人数が設けられているものとする。前提として、被災者はスマートフォン等のデバイスを所持し、避難支援用のアプリが搭載されているものとする。被災者に対する避難所の指定や避難経路の提示は避難所決定システムが行い、アプリを通して被災者に避難先と経路が通知される。被災者はシステムの指示に従って目的地となる避難所へ歩いて向かう。避難所側の被災者の受け入れは到着した順に行うものとする。本研究における手法の提案、実行するシミュレーションはそのようなシステムが普及、正常に作動することを前提とする。

3.2 避難所決定の基本手順

避難所決定を行うにあたり、被災者の現在地から最も近い避難所へ誘導することが一般的な方針として考えられている。これに対し、本研究では「混雑の偏りを考慮した避難所決定手法」がベースラインとなっている。この手法では、次のような状況を想定している。被災者が不均等に偏在している場合では、全ての被災者が最寄りの避難所へ向かうと、避難所が到着する被災者の数が、避難所の定員を超過する可能性がある。その為、一部の被災者が他の避難所へたらい回しにされる問題が発生する。結果として、安全な場所への避難するまでの時間を多く要することになり、全体の避難の遅れに繋がる。従って、被災者の位置情報、分

布状況，避難所までの所要時間，避難所の定員これらを統合的に考慮した上で，避難所の割り当てを行う必要がある。

このたらい回しによる避難の遅延を防ぐため，梅木らはナップサック問題の考えを参考に被災者の位置情報と避難所の定員を考慮した避難所決定アルゴリズムを提案している [13]。アルゴリズム 1 は手法の手順を示したものである。(以降，HKP 手法と呼ぶ。)

Algorithm 1 HKP(Heuristic Knapsack Problem) 手法の手順

Input: I : 被災者の集合, J : 避難所の集合. $TMatrix$: 被災者と避難所による避難時間行列, C_j : 避難所 j の定員

Output: X_{IJ} : 避難所決定リスト.

```
1 :  $TMatrix \leftarrow SortArc(TMatrix)$ 
2 : while  $|I| > 0$  do
3 :  $i, j \leftarrow GetMinimumEvacuationTime(TMatrix)$ 
4 :  $X_{IJ} \leftarrow 1$ 
5 :  $TMatrix \leftarrow RemoveEvacuee(TMatrix, i, I)$ 
6 :  $C_j \leftarrow C_j - 1$ 
7 : if  $C_j = 0$  then
8 :  $TMatrix \leftarrow RemoveShelter(TMatrix, j, J)$ 
9 : end if
10 : end while
```

HKP 手法のアルゴリズムは被災者の集合 I ，避難所の集合 J ，被災者と避難所による予想避難時間行列 $TMatrix$ ，各避難所の定員の情報 C_j を入力とし，各被災者ごとに避難先が割り当てられた避難所決定リストを出力とする。予想避難時間行列には，各被災者が全避難所に対して到着するまでの所要時間が記されており，行列の要素数は「被災者数」×「避難所数」で表される。

表 1: 被災者と避難所による避難時間行列の例

	避難所 1(定員 2 人)	避難所 2(定員 1 人)	避難所 3(定員 1 人)
被災者 1	40 分	10 分	20 分
被災者 2	30 分	15 分	15 分
被災者 3	25 分	20 分	40 分
被災者 4	20 分	25 分	30 分

表 1 は予想避難時間行列の例である。避難時間行列は避難所を基準とし、予想避難時間が短い順にソートされる。表 1 をソートした後が表 2 となる。

表 2: ソート後の避難時間行列の例

避難所 1(定員 2 人)	避難所 2(定員 1 人)	避難所 3(定員 1 人)
20 分 (被災者 4)	10 分 (被災者 1)	15 分 (被災者 2)
25 分 (被災者 3)	15 分 (被災者 2)	20 分 (被災者 1)
30 分 (被災者 2)	20 分 (被災者 3)	30 分 (被災者 4)
40 分 (被災者 1)	25 分 (被災者 4)	40 分 (被災者 3)

避難時間行列より被災者の目的地となる避難所を順番に決定していく。この手法は 3 行目に示すように、避難時間行列の要素の中で最も短い避難時間の組み合わせから順に決定する。表の例を取ると、被災者 1 と避難所 2 の組は全ての組み合わせの中で最も短い予想避難時間である 10 分。従って被災者 1 の目的地は避難所 2 と決定される。これにより、避難先が決まった被災者は候補から削除される (アルゴリズム 5 行目)。この時、決定された避難所の定員に達した場合、同時に、避難所 2 は定員に達するため、避難所 2 に関係する組も候補から外される。以上が 1 人の被災者が避難所に決定される 1 ステップとし、これを未決定の被災者がいなくなるまで継続する。例では、残った被災者と避難所の組の内、被災者 2 と避難所 3 までの予想避難時間 15 分が最小であるため、次の決定先となる。その後、被災者 4 が避難所 1 へ、最後に被災者 3 が避難所 1 へと割り当てられ、避難

所決定は終了する。以上の手順を以て、避難所決定のプロセスの流れとなる。システムがこの手順により被災者に避難先を指示し、その指示に被災者が従うことで、被災者を全て最寄りの避難所へ向かわせるよりもたらい回しを発生させることなく、全体の避難完了時間の削減が可能となる。

HKP手法は、問題に対して最適解を出力する手法とは異なり、「重さの値が小さいものから決定する」というヒューリスティックな手順を行う。緊急時において、即急な指示が必要となり、避難先が被災者に受け入れやすいものであるかが問題となる。被災者が目の前に避難所がある状況で、システムより遠方の避難所を指定されたとしても、その避難所に向かいにくいと考えられる。そのため、尚且つ計算時間が少ないことが要求されると同時に、受託可能性を満たすものとして採用している。

3.3 シミュレーションシステムの仕様

避難所の割り当て、避難誘導を目的とするシステムや計画の有効性を測定する手段として、マルチエージェントシステムによるシミュレーションが広く用いられている。ここでは、本研究にて使用するマルチエージェントシミュレーションシステムの基本的な仕様について説明する。

3.3.1 シミュレーション環境設定

本研究における実験では、Space Time Engineeringが提供しているシミュレーションフレームワークソフトウェア「Scenargie」[100, 101]及び拡張モジュールである「Scenargie Base Simulator」「Scenargie Multi-AgentExtension Module」「Scenargie VisualLab」を使用した。シミュレーションを実行したPC環境は以下のとおりである。

- OS : CentOS Linux7
- メモリ : 125.7 GiB
- CPU : Intel Core i7-6850K CPU @ 3.60GHz × 12

ソースコードは C++ で書かれており、本研究の避難所決定アルゴリズムのモジュールはエージェントの行動用のファイル内に組み込まれている。対象となる地域の GIS データを Openstreetmap¹ と国土地理院² より取得、e-stat³ より境界データを Scenargie Visual Lab 上にインポートしている。

3.3.2 シミュレーション上の被災者エージェントの行動

シミュレーション上にて、被災者を表すエージェントは開始地点から目的地となる避難所へ道路に沿って、徒歩で向かうものとする。一般的な歩行者の標準歩行速度は複数の調査、研究 [102, 103] を参考に以下の様に定める。

$$v = 1.0 \sim 1.5 \text{ [m/s]}. \quad (1)$$

しかしながら、第 2 章で説明した様に、歩行者が道路上に複数人集まることで渋滞が発生し、移動が困難になることが考えられる。従って、シミュレーション上においても、道路上に混雑度に応じた実歩行速度を求める必要がある。Fruin の研究⁴ 及び先述の内閣府実施のシミュレーション調査 [50] によると、歩行者の移動は道路上の混雑度によって変化することが指摘されており、歩行速度は道路上の人口密度によって以下の様に変化するとされている。

- 混雑度 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 未満の場合: 歩行者は自由歩行が可能。
- 混雑度 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 以上, $6 \text{ 人}/\text{m}^2$ 未満の場合: 線形的に歩行速度は下がる。
- 混雑度 $6 \text{ 人}/\text{m}^2$ 以上の場合: 移動可能な混雑度として限界に達し、群衆移動の停止を引き起こす。

上記の設定を基に被災者の実歩行速度を求めるにあたり、被災者個人ごとを対象にして、以下の変数を設定する。

¹<https://www.openstreetmap.org/>

²<https://www.gsi.go.jp/>

³<https://www.e-stat.go.jp/>

⁴<https://www.gkstill.com/Support/crowd-flow/fruin/Fruin3.html>

- v_i : 被災者 i の標準歩行速度
- V_i : 被災者 i の実歩行速度
- p_i : 被災者 i がいる道路の混雑度

道路混雑度を表す変数 p_i は次のように求める。

$$p_i = \frac{\text{同一道路上の人数}}{\text{道路面積 [m}^2\text{]}} \quad (2)$$

道路面積の値は Openstreetmap より取得された数値をシミュレーション内にて反映している。先述の歩行速度と道路混雑度の関係より、被災者の実歩行速度は以下のように変数を利用して算出される。

$$V_i = \begin{cases} v_i & (p_i < 1.5) \\ v_i - (v_i - 0.1) * \frac{p_i - 1.5}{4.5} & (1.5 \leq p_i < 6) \\ 0.1 & (6 \leq p_i) \end{cases}$$

被災者エージェントの実歩行速度はシミュレーションのタイムステップ毎に上記の式に従って算出され、道路上の混雑度に伴って動的に変化する。

被災者は避難所決定システムより目的地となる避難所が伝えられ、避難所まで最短距離で移動する。避難所に到着した際、その避難所が定員に達していなければ、避難所側は無条件で被災者を受け入れるものとし、被災者は避難を完了したとされる。避難所が既に定員に達している場合、その避難所に入ることを断念し、避難行動を再開する。行動を再開した地点より最も近い別の避難所まで最短距離で移動し、避難所に入ることに成功するまで行動し続ける。全ての被災者が避難を完了した際、シミュレーションを終了する。

以上が避難所決定の基本的な手順と本研究にて実行するマルチエージェントシミュレーションの仕様の説明となる。上記にて説明した避難所決定手法は避難開始時に位置情報取得し、各被災者毎に避難所を割り当てていく仕組みとなる。しかし、この手法について、「避難開始後に避難所までに要する時間が予想と変わる可能性」「被災者は全て同等の性質を持っているものとして考慮されている」「個

人ごとに決定するため，被災者の集団性が考慮されていない」これらの点は先述した3つの課題に大きく影響すると言える。

次章より，この手法をベースラインとし，設定した3つの研究課題に対応した新たな避難所決定手法について，手法の内容と評価実験の結果を説明する。

4. シミュレーションの反復を用いた混雑度緩和を目的とした避難所決定手法

本章では、課題1「移動中に発生する混雑の影響」に対処するため、基本手法を拡張し、避難時間の削減と同時に混雑度の緩和を目的とする手法を提案する。

4.1 課題要件

帰宅困難者が発生する際、道路上の混雑は被災者の歩行速度の著しい低下或いは身動きが不可能になる状況を引き起こすことが指摘されている [50]。これにより、避難所まで到着するのに想定したよりも長い時間を実際に要する可能性がある。しかしながら、HKP手法では避難開始時点での被災者の位置情報、避難所までの所要時間のみを避難所決定に利用しており、避難開始後にどの道路、地帯にて混雑、避難時間の遅延が発生するかを考慮していない。したがって、混雑度及び移動中の混雑による影響を緩和するため手法の改良が必要である。

4.2 混雑度を考慮した避難所決定手法の提案

被災者が常に移動することで、道路環境の状況は動的に変化するため、混雑度の正確な推定は困難である。しかしながら、被災者の振る舞いやその効果は、シミュレーションを利用することで推定が可能である。従って、シミュレーションによるプロセスを加えた新たな避難所決定手法 Congestion-aware HKP 手法 (CAHKP 手法) を本章にて提案する。以下に本手法の要点を示す。

- HKP 手法を適用したシナリオのシミュレーションを行い、その避難時間結果を避難所決定に反映させる。
- 混雑の影響を反映した上で、避難所を再決定する。
- 上記のプロセスを反復することで、混雑を緩和する避難所決定の準最適な解を出力する。

Algorithm2 は CAHKP 手法の手順を示したものである.

Algorithm 2 CAHKP 手法の手順

Input: I : 被災者の集合, J : 避難所の集合. $TMatrix$: 被災者と避難所による避難時間行列, C_j : 避難所 j の定員

Output: X_{IJ} : 避難所決定リスト.

```
1 :  $X_{IJ} \leftarrow COP(I, J, TMatrix, C_j)$ 
2 :  $TMatrix, T_{I0} \leftarrow SimulateEvacuation(X_{IJ})$ 
3 :  $AGAIN \leftarrow TRUE$ 
4 :  $N \leftarrow 0$ 
5 : while  $AGAIN$  do
6 :  $N \leftarrow N + 1$ 
7 :  $X_{IJ} \leftarrow COP(I, J, TMatrix, C_j)$ 
8 :  $TMatrix, T_{IN} \leftarrow SimulateEvacuation(X_{IJ})$ 
9 :  $AGAIN \leftarrow FALSE$ 
10 : for  $i < |I|$  do
11 :  $r_i \leftarrow \frac{T_{iN} - T_{iN-1}}{T_{iN-1}}$ 
12 : if  $|r_i| > 0.01$  then
13 :  $AGAIN \leftarrow TRUE$ 
14 : end if
15 : end for
16 : end while
```

4.2.1 前提シミュレーションの実施

CAHKP 手法も, HKP 手法と同様に被災者と避難所に関する情報を入力とする. 最初の段階として, HKP 手法によって避難所を決定し, 被災者が避難所へ向かうシミュレーションを行う. シミュレーション上にて, 被災者エージェントの歩行速度は道路上の混雑によって減速する. そのため, 避難所決定の際に推計した避難時間と実際にかかった避難時間に差が生じることになる. シミュレーションに

よる避難時間の変化を利用して、予想避難時間行列を新たに作成する。アルゴリズム2の2行目で示されているように、避難時間行列の被災者から避難所までの所要時間はシミュレーション上にて要した時間に数値が更新される。

表 3: 被災者と避難所による避難時間行列の例

	避難所 1	避難所 2	避難所 3
シミュレーション 1 回目	40 分	10 分	20 分
シミュレーション 2 回目	40 分	25 分 (更新)	20 分
シミュレーション 3 回目	40 分	25 分	40 分 (更新)
:	:	:	:

表 3 は被災者個人に対する避難所までの予想避難時間の更新の例を示したものである。1 回目の決定で避難所 2 まで 10 分と予想されたが、実際には 25 分かかったとする。それにより、新たに更新された予想避難時間行列では避難所 2 への予想避難時間は 25 分に変更される。

4.2.2 シミュレーションの反復

先述のシミュレーションの結果より更新された避難時間行列を基に、HKP 手法の手順で再び各被災者の避難先を決定し、シミュレーションを実行する。表 3 の例では、2 回目の避難所決定で被災者は避難所 3 に決定されたとする。そして 2 回目のシミュレーションの結果、予想避難時間行列の避難所 3 までの時間は 40 分へと更新されている。避難先を決定し、シミュレーションで決定後の混雑発生の時間が計測され、その影響を反映した上で避難所の再決定を行う。この流れを繰り返すことで混雑を回避するような避難所決定の準最適解が出力される。この繰り返しは、避難完了時間の差が収束するまで続けられる。各被災者には避難完了時間の変化率を表す変数 r_i が与えられ、 N 回目のシミュレーションでの避難完了時間と $N-1$ 回目の避難時間結果によってアルゴリズム 2 の 11 行目で示すように求められる。全ての被災者の避難完了時間の変化率 r_i が 0.01 より小さい、すなわ

ち1%未満となった時、シミュレーションの繰り返しが停止され、その時の手法の結果とし、手法全体のプロセスは終了する。

4.3 評価実験

提案手法の評価のため、マルチエージェントシミュレーションによる実験を実施した。実施したシミュレーションのシナリオについての詳細を説明する。

4.3.1 評価シナリオ

大規模の人数による混雑が発生しやすい観光地の場面の一例として、京都の祇園祭を評価シナリオの対象とした。祇園祭の期間中は、例年7月17日と24日にそれぞれ前祭と後祭が開催され、2019年の来場者数は複数の報道 [104, 105, 106, 107] によると、前祭に120,000人、後祭に30,000人とされる。本研究では後祭の日に地震が発生したシナリオを想定し、シミュレーション上には30,000人分のエージェントを配置する。図2はシミュレーションマップの全体像となる。

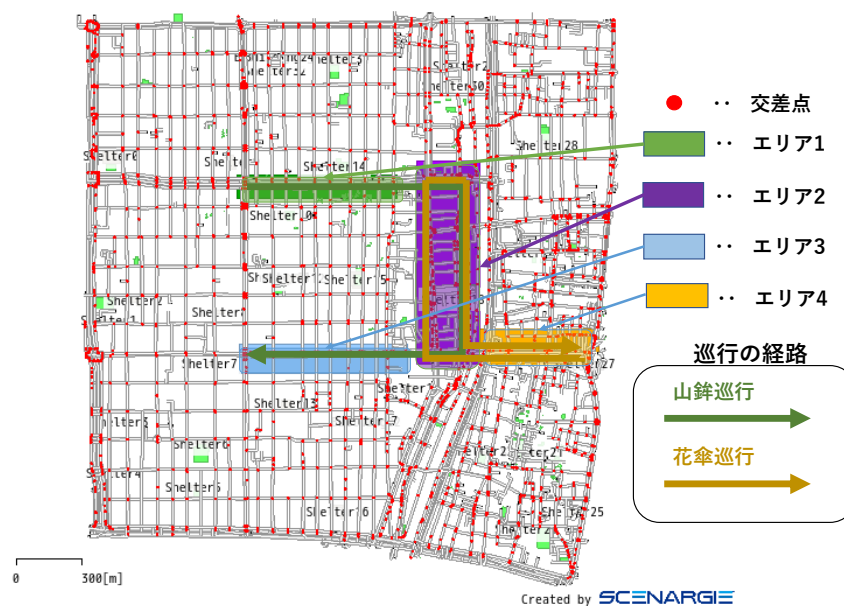


図2: 祇園全体図

4.3.2 避難所，収容可能人数

京都市避難所マップを参考に，該当する地域に存在する避難所計 32 箇所をシミュレーション上に設置した．しかし，東日本大震災発生時，帰宅困難者を一時的に避難させるため，本来の定員の 5～10 倍の数の人数が滞在していたという事例がある．この事例を参考とし，本シミュレーションにおいても避難所の定員は実際の収容可能人数の 5 倍を設定する．避難所の定員は合計 54,385 人となり 30,000 人の被災者は最終的にいずれかの避難所に収まることになる．

4.3.3 初期配置

後祭では，巡行が開催され，訪問客の多くは巡行の観覧の為に経路沿いに集まることが想定される．巡行には，山鉦巡行，花傘巡行の 2 つがあり，それぞれの経路は図 2 に示した通りである．この経路を基準にマップ上に 4 つのエリアを設定し，被災者を以下の 5 グループに分類する．

- グループ 1：4,000 人 エリア 1 より行動開始
- グループ 2：8,000 人 エリア 2 より行動開始
- グループ 3：4,000 人 エリア 3 より行動開始
- グループ 4：4,000 人 エリア 4 より行動開始
- グループ 5：10,000 人 マップ上のランダムな地点より行動開始

エリア 2 は二つの巡行の経路が重なる地帯の周辺にはとりわけ多くの訪問客が集まると仮定している．被災者は行動を開始した後，決定された避難所に最短距離で移動する．

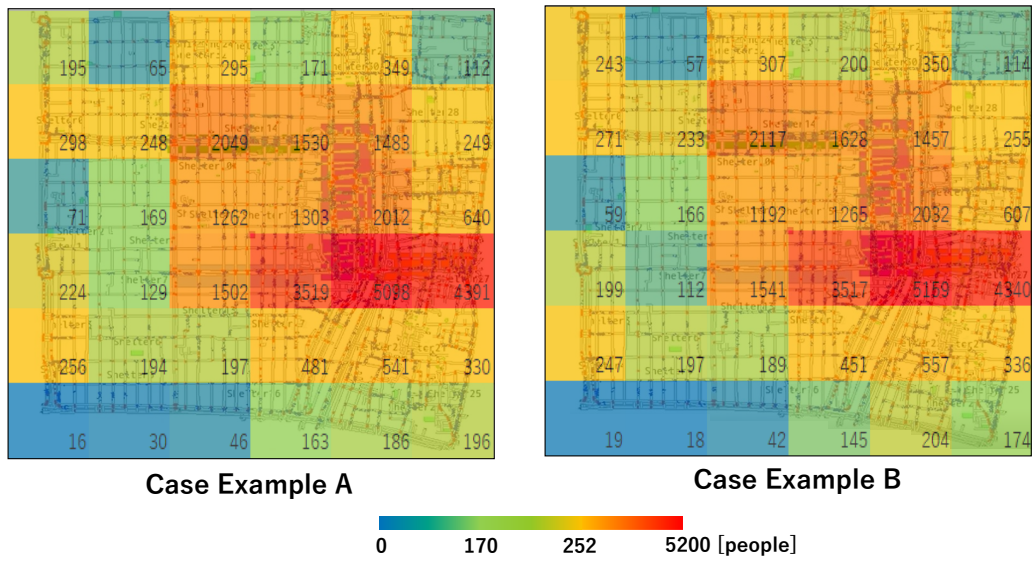


図 3: 避難開始時点での被災者の分布

図 3 は避難開始時点でのシミュレーションマップ上での被災者の分布について 2つの例を表したものである。

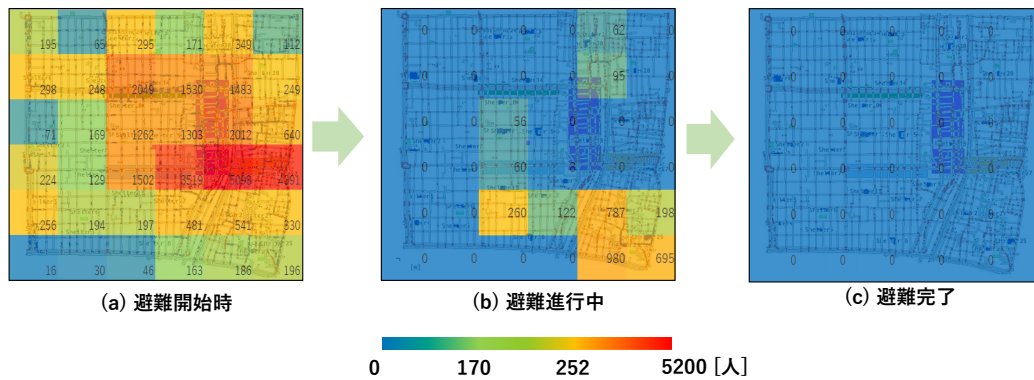


図 4: 被災者の分布の変遷

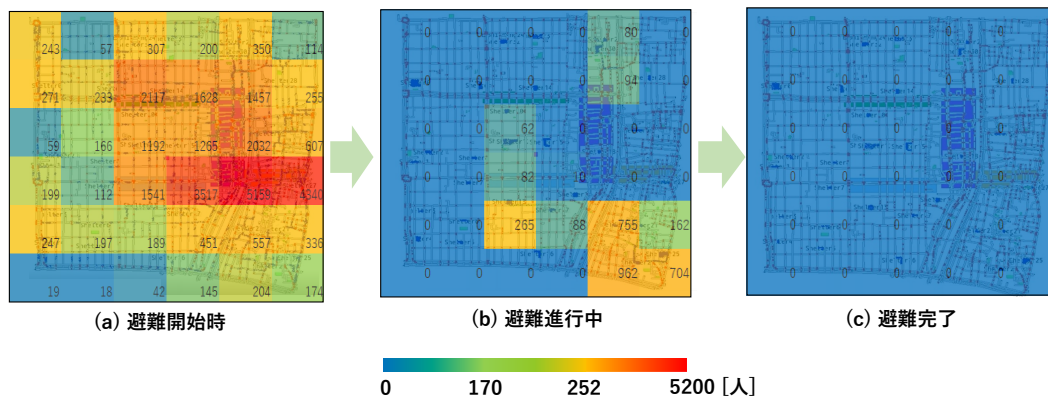


図 5: 被災者の分布の変遷

図 4 と 5 は図 3 で示した道路上の人口密度が、避難が進行するにつれてどのように変化するかを表したものである。避難開始時は図 4-(a) と 5-(a) に表すように、偏在している状態となる。4-(b) と 5-(b) にて避難が進行している状態を表している。4-(c) と 5-(c) は避難が完了した時点のものであり、道路上に被災者は存在しない。

4.3.4 比較手法

先述した被災者の初期配置について異なる配置 20 ケースを作成し、これらのケースに以下の比較する避難所決定手法を適用した場合のシミュレーションを実施する。

- 最短避難所選択手法: 全ての被災者は現在地より最も近い避難所へ向かう。到着した避難所が定員に達している場合、その地点より最も近い避難所へ移動し、避難を完了するまで続ける。

- **HKP 手法:** ベースライン手法。システムは被災者の位置情報を取得し、避難所を決定する。システムより決定された避難先に被災者は最短距離で移動する。「混雑が考慮されていない避難所決定の解」とする。
- **CAHKP 手法:** 本章の提案手法。先述の通り、シミュレーションの繰り返しを行い、繰り返しが終了した時点での避難所の決定解が、被災者の目的地となる。

また、CAHKP 手法について指示に従わない被災者が発生した場合についても避難完了時間の測定を行う。従わない被災者は最寄りの避難所と異なる避難所に割り当てられた者からランダムで一定の割合で発生し、避難開始時にシステムより決定された避難所に向かわず、代わりに現在地を基準に最寄りの避難所へ向かう。従わない被災者の発生割合を 20, 40, 60, 80% の 4 つのパターンで設定し、シミュレーションを実施する。

4.3.5 評価指標

それぞれの避難所決定手法、パターンにおける避難効率を比較するため、避難完了時間と道路上の混雑度の推移を評価指標としてを設ける。被災者が避難所に入ることが出来た場合、その被災者は「避難を完了した」と見なし、避難所に入った時間を「避難完了時間」とする。全ての被災者が避難を完了するまでを測定し、以下を手法の評価指標とする。

- 平均避難完了時間: 全ての被災者の避難完了時間を平均した値。
- 全体避難完了時間: 全ての被災者が避難を完了した時の時間
- 全体避難完了率推移: 経過時間ごとに避難を完了した被災者の割合を計測

避難所決定の問題において、避難時間の最小化を目的としている。本実験においても短時間での避難の完了を効率の高さと考え、

指標としてより短い時間で避難を完了することが良いとされる。従って、各手法の避難効率の精度評価は、より短い時間で避難を完了させられるかを基準とする。

加えて，提案手法を適用することによる避難行動中の道路混雑度の変化についても計測を行う．混雑度を表す指標として，第3章で説明した被災者の歩行速度の計算に使用した各被災者に割り当てられる混雑度数 p_i を採用する．シミュレーションマップ内の道路上に存在する被災者の混雑度数 p_i の総和を道路上の混雑度指数とし，これを10秒ごとに全被災者の避難が完了するまで観測する．

4.4 実験結果

4.4.1 避難完了時間

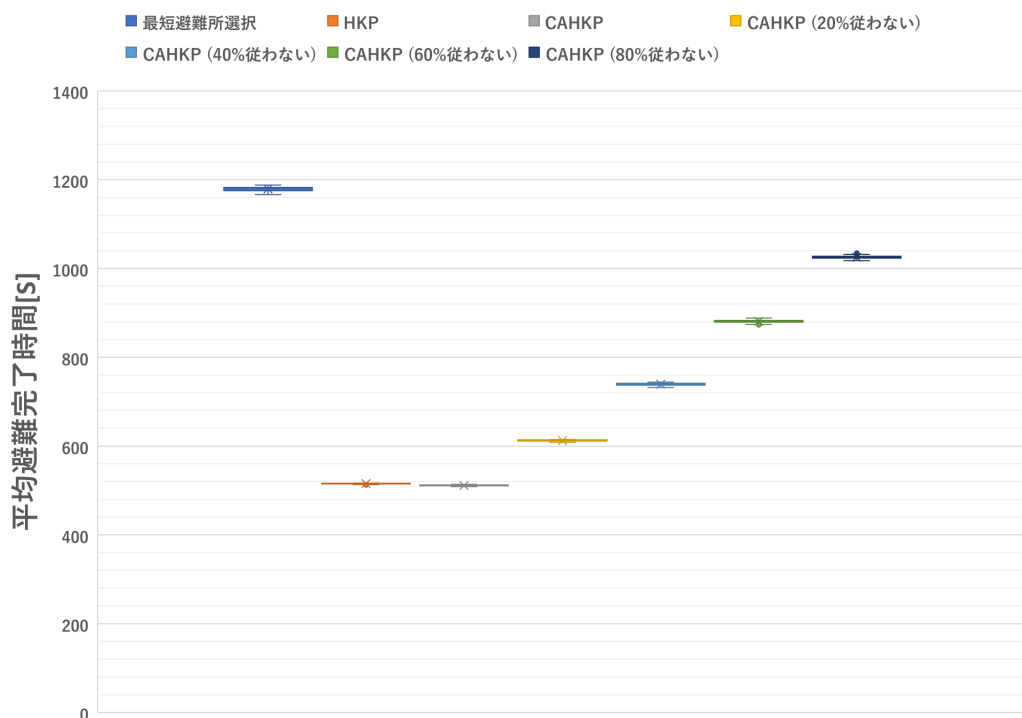


図 6: 平均避難完了時間比較

図6は各避難所決定パターンでの平均避難完了時間を表したものである．最短避難所選択手法での結果は1155.05秒となり全パターンの中でも最大となった．HKP手法での平均避難完了時間は541.46秒であり，最短避難所選択手法の半分以

下の結果となった。CAHKP手法の平均避難完了時間は全ての被災者が指示に従った場合では535.51秒となり、HKP手法と比較すると、約1%程である。CAHKP手法について、被災者の一部が従わないパターンで測定すると、従わない被災者の割合が増加する程、平均避難完了時間は上昇する結果となった。従わない割合が20%では平均避難完了時間が643.54秒、80%では1023.88秒となった。

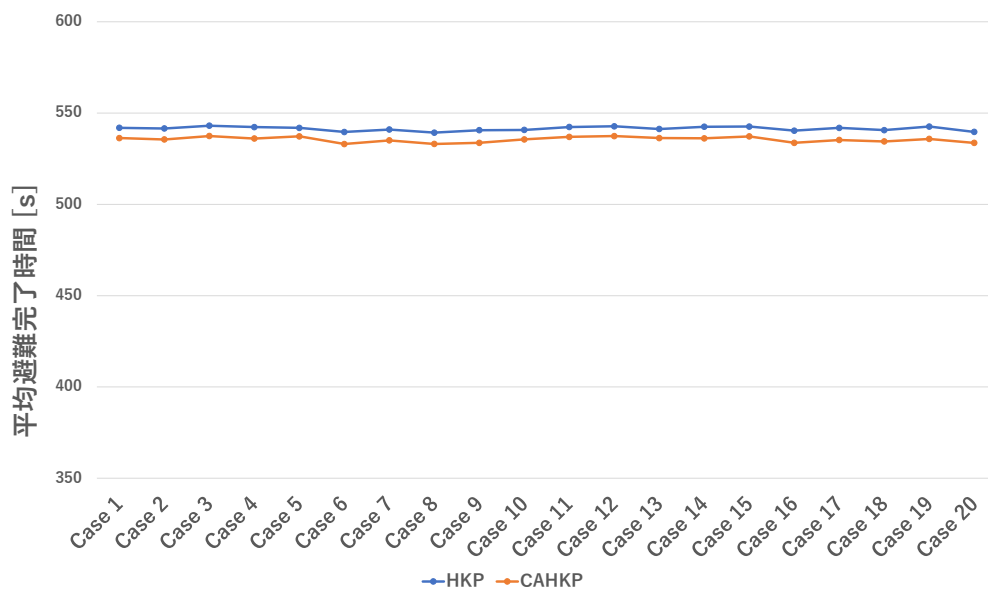


図 7: 平均避難完了時間 20 セット比較 (HKP vs CAHKP)

図 7 は HKP 手法と CAHKP 手法の 20 セットでの平均避難完了時間を比較したものである。全てのケースにて平均避難完了時間の減少が確認され、t 検定により両者の差は有意であると言える。(t(19)=41.49, **p <.001)

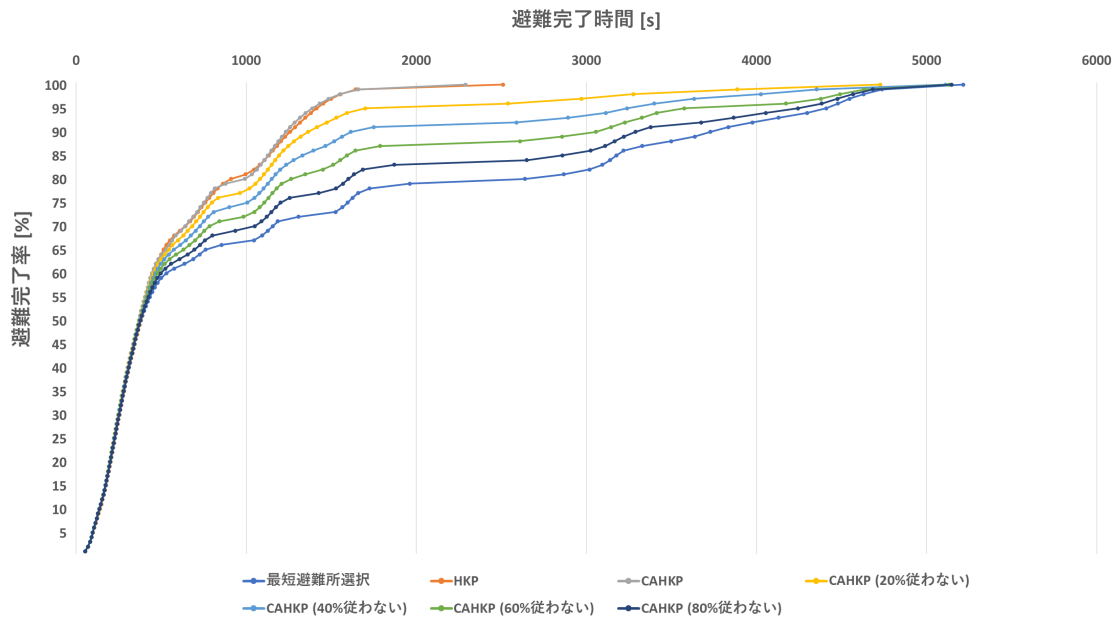


図 8: 全体避難完了率推移

図 8 は全体避難完了率の推移を表したものである。最短避難所選択手法では全ての被災者が避難を完了するまで平均して 5,216 秒かかった。HKP 手法の全体避難完了時間が 2,509 秒だったのに対し、CAHKP 手法では 2,209 秒となり、HKP 手法と比較して約 12% 減少する結果となった。HKP 手法と CAHKP 手法はいずれも 1,650 秒以内に 99% の被災者の避難を完了させている。従わない被災者の数が存在すると避難完了時間の結果は延び、数が増加する程より避難完了時間は長くなる。従わない被災者の割合が 20% の場合、2,000 秒以下で 95% の被災者の避難が完了する一方、従わない割合が 80% の場合では 17% の被災者が 2,000 秒以内に避難完了不可能となった。最短避難所選択手法では 2,000 秒以内に避難完了できる被災者の割合は 80% を下回る。

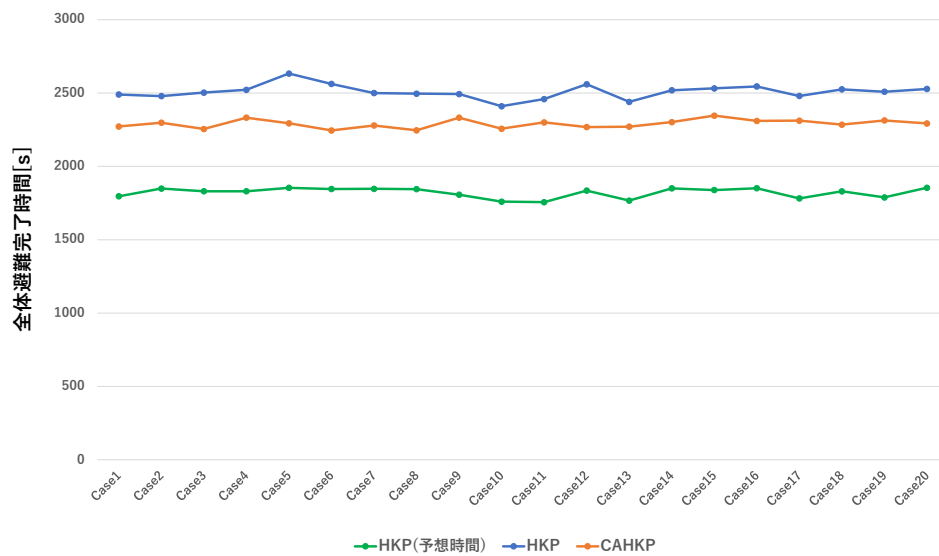


図9: 全体避難完了時間20セット比較

図9は全20ケースでのHKP手法とCAHKP手法の全体避難完了時間、及び時点での混雑を考慮しない予想全体避難完了時間を示したものである。HKP手法とCAHKP手法の間の全体避難完了時間の減少は全てのケースで確認され、t検定により差は有意であると言える ($t(19)=18.62$, $**p < .001$)。CAHKP手法は予想避難時間との差をHKP手法と比較して31.6%縮めている。

4.4.2 総混雑度数

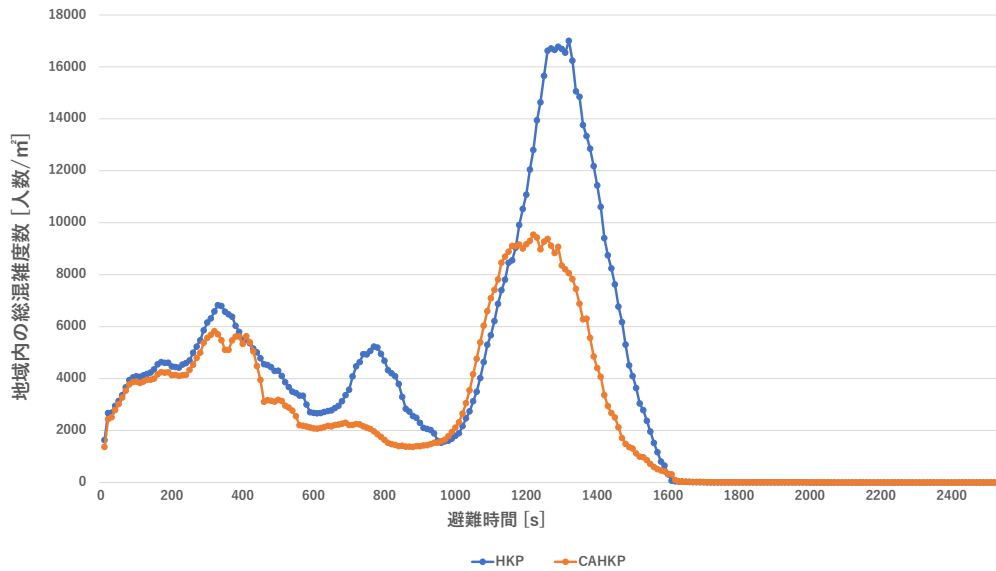


図 10: 総混雑度数比較推移比較 (ケース 1, HKP vs CAHKP)

図 10 はケース 1 にて 10 秒ごとに総混雑度数の総和を HKP 手法と CAHKP 手法で測定したものである。CAHKP 手法は避難開始から完了までを通して、総混雑度数の上昇が HKP 手法よりも少なく、尚且つその値も小さい結果となった。HKP 手法では 1320 秒にて総混雑度数が最大の 17,005.8 人/m² に達する。対して CAHKP 手法では総混雑度数の最大値が 1220 秒にて 9,542.3 人/m² となった。

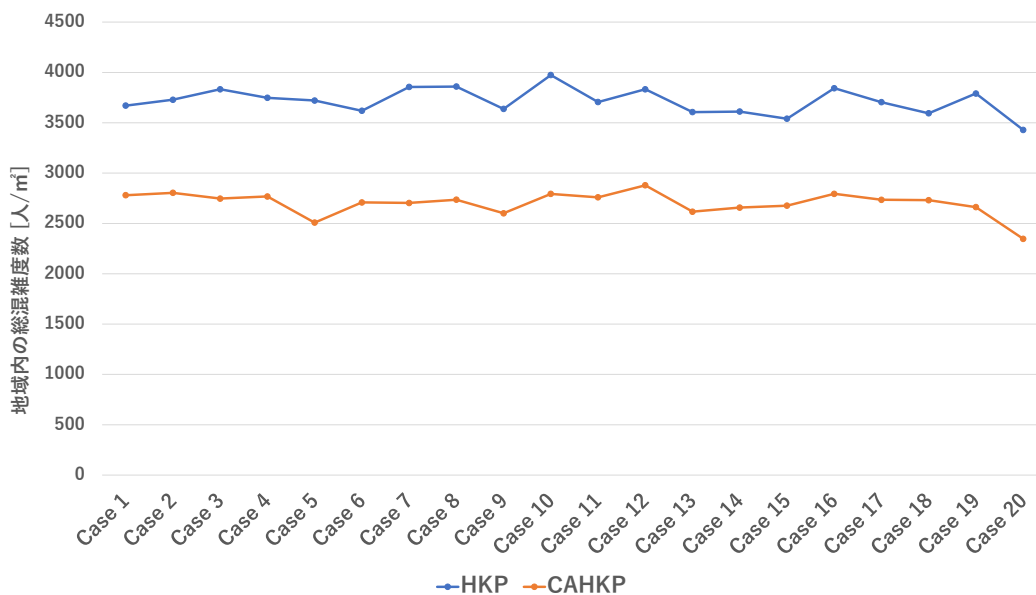


図 11: 平均総混雑度数比較 (HKP vs CAHKP)

図 11 は 20 ケースにて避難開始から完了までの 10 秒ごとの総混雑度数を平均した値を HKP 手法と CAHKP 手法について測定したものである。HKP 手法での範囲は 3429.3 人/m² から 3974.5 人/m² となり，一方 CAHKP 手法での範囲は 2347.1 人/m² から 2878.9 人/m² となる。20 ケースでの平均総混雑度数の減少率は，24% から 32.5%となった。

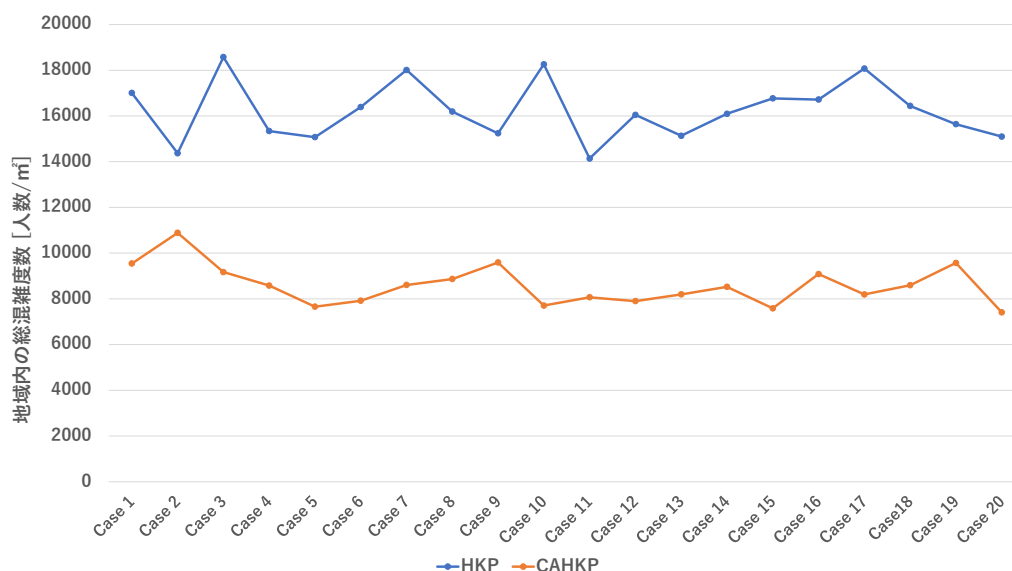


図 12: 最大総混雑度数比較 (HKP vs CAHKP)

図 12 は 20 ケースにて避難開始から完了までの混雑度数の最大値を測定したものである。1250 秒から 1350 秒の間で発生し，HKP 手法による最大混雑度数は $14,367 \text{ 人/m}^2$ から $18,575.9 \text{ 人/m}^2$ ，CAHKP 手法では 1,120 秒から 1,240 秒の間にて，混雑度の最大値に達し，値の範囲は 7409.3 人/m^2 から 10877.5 人/m^2 となった。各ケースでの最大混雑度の減少率は 24.2% から 57.8% であった。

4.4.3 シミュレーション繰り返し回数

CAHKP 手法が避難時間結果を出力するまでシミュレーションを繰り返した回数は全 20 ケースにて最大 48 回で実験環境上での計算時間が約 128 分となった。一方，最小の繰り返し回数は 22 回で計算時間が 61 分であった。

4.5 結果からの考察

本章で提案した手法は，移動中の混雑及びそれによって引き起こされる遅延の軽減を新たな目的とし，HKP 手法にシミュレーションの段階を加えることで，混

雑の影響を避難所決定に反映させる仕組みを取っている。避難完了時間の結果を見ると、HKP手法とCAHKP手法の差は全体避難完了時間では約12%である一方、平均避難完了時間では約1%と非常に小さい。CAHKP手法のシミュレーションを繰り返す中で、一部の被災者は最初のシミュレーション時よりも遠い避難所へ割り当てられる場合があるため、平均避難完了時間の差が小さい要因となったと考えられる。一方で、道路上の混雑度の減少率は著しく、CAHKP手法によって、移動中の総混雑度数の平均値、最大値をそれぞれ平均で約47%減少させる結果となった。避難完了時間と総混雑度数の結果を統合すると、CAHKP手法はHKP手法とほぼ同等かわずかに短い時間で、混雑の負担が少ない避難を可能にしていると考えられる。混雑を考慮していない予想避難完了時間と実際に要した避難完了時間との差に着目すると、CAHKP手法は混雑発生による避難完了時間の遅延を約31.6%削減している。

実験シナリオのような、観光地や集団行事に被災した場合、混雑が想定される場面では、帰宅困難者が発生し、訪問客が避難先を探すために移動し、それに伴う混雑によって二次被害を受ける可能性は非常に高い。行政や公的機関が避難指示の発令、避難システムの運用を行うことが想定される。このようなシステムによる混雑推定や避難移動のシミュレーションのデータを行事の主権団体などに提供し、訪問客に非常用の情報を提供することで、提案手法が有効になる。より人数が多い大都市などにおいても、各地区ごとに分担してシステムを利用することで、全体に対する避難支援が可能であると言える。

本章の提案手法は、評価実験にて設定したシナリオの全ての被災者の配置パターンにおいて、シミュレーションの繰り返しが収束した。しかしながら、異なる実施環境にて、提案手法のシミュレーションが収束しない又は収束するまで、多くの繰り返し回数を要する可能性がある。実運用の際、迅速な避難指示を発令が可能となるためには、シミュレーションを実行することによる計算時間の増加の影響を考慮する必要がある。従って、指示を行うシステムの性能、対象となる被災環境、被災者の人数や分布に応じて、シミュレーションが収束する条件、繰り返す回数の上限について検討が必要である。

4.6 本章のまとめ

本章では、避難行動中の道路上の混雑を軽減を可能とする避難所決定手法、Congestion-aware Heuristic Knapsack Problem(CAHKP) 手法を提案した。ベースラインとなる HKP 手法にシミュレーションを用いた混雑を推定し、シミュレーションの結果を基に避難所を再決定する手順を追加した。この手順を繰り返すことで、混雑を考慮した避難所決定の解を出力することが可能となった。混雑が想定される祇園祭を例にした実験結果から、シミュレーションを用いることによる混雑の影響の推定した上での被災者の誘導がより迅速且つ円滑な避難を可能とする効果をもたらすことが確認された。

5. 災害弱者支援を目的とした避難行動推定に基づいた避難所決定手法

本章では、課題2「災害弱者が被る身体的負荷の軽減」に対応した避難所の決定手法の構成及び手法のシミュレーション評価について述べる。

5.1 課題要件

災害時において、高齢者や子供、身体障害者は健常者以上に避難行動を取ることが困難になる「災害弱者」と位置付けられる。災害弱者にとって、時間の移動は身体的及び精神的に多大な負担となる。そのため、被災者全体の被害の最小化を求めるにあたり、災害弱者に対する支援は重要なものであると考えられている。自然災害の突発性故に、市街地等にて帰宅困難者になる者には、高齢者や子供、身体障害者などの災害弱者も含まれ、避難場所が必要となる状況は十分に考えられる。実際の内閣府や各市政による帰宅困難者対策についても、高齢者や身体障害者等を念頭に置き、避難可能となる施設の提供や誘導の必要性が明記されている[4, 15, 108]。本章ではこれらを踏まえた上で、帰宅困難者発生状況下にそれらの災害弱者が存在するシナリオを想定する。

避難所を決定する問題として考慮する際、災害弱者の避難先が短い避難時間で到達できることが望ましい。3章で示したHKP手法は予想避難時間が短い被災者と避難所の組み合わせを優先的に決定する。一方で、避難所までかかる時間が大きい被災者の決定は後に回される問題が生じる。災害弱者は歩行速度が低いなど身体能力の制限があるために、避難所に到着するまでの時間は、健常者よりも多く要することが想定される。しかしながら、災害弱者と健常者が共に存在する状況にて、HKP手法を適用すると、両者の能力差が考慮されていないため、災害弱者の決定先は遠方の避難所に決定されやすくなる。表4は健常者と災害弱者が共にいる場合に生成される避難時間行列の例である。

表 4: 被災者と避難所による避難時間行列の例

	避難所 0(定員 1 人)	避難所 1(定員 2 人)	避難所 3(定員 2 人)
被災者 1(健常者)	5 分	20 分	30 分
被災者 2(健常者)	15 分	10 分	30 分
被災者 3(健常者)	25 分	15 分	25 分
被災者 4(災害弱者)	60 分	65 分	85 分
被災者 5(災害弱者)	70 分	50 分	90 分

上記の例では、被災者 4、被災者 5 が災害弱者であり、それぞれ避難所 0 と避難所 1 が最も近い避難所となる。HKP 手法の手順では避難時間が短い組み合わせから優先的に決定されるため、最初に健常者である被災者 1 が避難時間行列の中で最も小さい 5 分となる避難所 0 に決定される。次に同じく健常者である被災者 2、被災者 3 の順で避難所 1 に割り当てられる。健常者が先に決定され、その後、災害弱者である被災者 4、被災者 5 が最も遠い避難所 2 に決定されることになる。

表 5: 災害弱者が存在する場合の予想避難時間行列の例

避難所 0(定員 1 人)	避難所 1(定員 2 人)	避難所 3(定員 2 人)
5 分 (被災者 1(健))	10 分 (被災者 2(健))	25 分 (被災者 3(健))
15 分 (被災者 2(健))	15 分 (被災者 3(健))	30 分 (被災者 1(健))
25 分 (被災者 3(健))	20 分 (被災者 1(健))	30 分 (被災者 2(健))
60 分 (被災者 4(弱))	50 分 (被災者 5(弱))	85 分 (被災者 4(弱))
70 分 (被災者 5(弱))	65 分 (被災者 4(弱))	90 分 (被災者 5(弱))

従って、HKP 手法の手順では、避難時間を多く要する被災者の決定が後に回されやすくなることにより、災害弱者に対して大きな負担を課すことに繋がる。

先述の手順の中で災害弱者が被る負担を軽減する手段として、災害弱者を優先的に避難所へ割り当てることが考えられる。しかしながら、全ての被災者が指示に従うとは限らない。予め指定された避難所にたどり着いたにも関わらず、一部の被災者が指示に従わなかったことにより、定員に達し、別の避難所への移動を余儀なくされる。災害弱者にとってたらい回しは大きな身体的負担に繋がり、全体の避難の遅れを生じさせる。

以上を踏まえて、提案する手法が考慮すべき要件を次のように示す。

- 災害弱者に対して身体的負荷が少なくなるように、決定される避難所は避難時間が短くなるようにする。
- 被災者が指示に従わない可能性を考慮し、たらい回しの発生回数を減らすことや、たらい回しの影響が少なくなるように被災者の避難先を決定する

これらの要件に対応した次項より避難所決定手法を提案する。

5.2 提案手法

5.2.1 手法の構成

本章での課題に向けた避難所決定手法について、災害弱者の身体的負荷、避難完了時間を削減することを目的とする。被災者が指示に従わない行動を取り、尚且つ混雑が発生する状況では、避難所には許容できる人数以上の被災者が集まると仮定する。定員を超過する被災者の数を見越して、避難所に決定される被災者の人数を収容可能人数より少なく設定する。避難所に決定する人数の制限を設けた上で、災害弱者を優先、健常者を後にする順で、HKP手法のプロセスにて各被災者の避難先となる避難所を決定する。

この決定可能人数の制限方法について、本章では2つのパターン、Fixed-rate Reduction Method(FRM)とSimulation-based Reduction Method(SRM)を提案する。前者は全ての避難所に対して割り当てる人数を一定の割合に抑え、後者はシミュレーションを利用し、混雑が見込まれる避難所を特定し割り当てる人数の制限を設ける。以下、それぞれの手法についての詳細を説明する。

5.2.2 Fixed-Rate Reduction Method(FRM)

全ての避難所に対して一律に割り当てる人数に制限を設ける手法として Fixed-rate Reduction Method(FRM) を提示する。図 13 にて手法の手順の流れを示している。

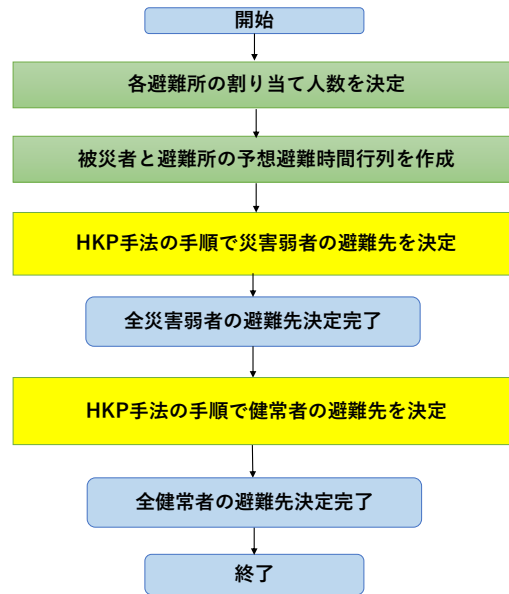


図 13: FRM のフローチャート

最初の段階として、予め避難所に割り当てる被災者の人数、決定可能人数を設定する。避難所 i の収容可能人数を A_i 、避難所の決定可能人数 C_i 、減少率を r ($0 \leq r < 1$) と表し、これらの変数により決定可能人数は次の式にて表される。

$$A_i = C_i \times (1 - r) \quad (3)$$

また、対象となる全ての被災者の避難先が決まるよう、決定可能人数を設定するとき、全て避難所の決定可能人数の合計が全被災者の数を下回らないようにしなければならない。したがって、以下の条件を満たす必要がある。

$$\sum_{i=1}^n A_i \geq E \quad (4)$$

E は被災者の数， n は避難所の数を示している。

決定可能人数が設定された後，被災者の避難所決定に移る．この手法では，災害弱者が優先的に避難所に割り当てられる．表 5 を例にとると，表 6 の様にソートされる．

表 6: 被災者と避難所による避難時間行列の例

避難所 0(定員 1 人)	避難所 1(定員 2 人)	避難所 3(定員 2 人)
60 分 (被災者 4(弱))	50 分 (被災者 5(弱))	85 分 (被災者 4(弱))
70 分 (被災者 5(弱))	65 分 (被災者 4(弱))	90 分 (被災者 5(弱))
5 分 (被災者 1(健))	10 分 (被災者 2(健))	25 分 (被災者 3(健))
15 分 (被災者 2(健))	15 分 (被災者 3(健))	30 分 (被災者 1(健))
25 分 (被災者 3(健))	20 分 (被災者 1(健))	30 分 (被災者 2(健))

表 6 に示すように，災害弱者がソート後のリストの上部分に移動している．HKP 手法の手順により，災害弱者の避難所が先に決定される．災害弱者の避難先が決定された後，残った健常者の避難先が決定される．

5.2.3 Simulation-based Reduction Method(SRM)

先述の FRM では，制限率の値が上がることにより，被災者に対して避難所の割り当てできる数が不足する問題が生じる．加えて，混雑の度合いも各避難所によって異なる．これを解消するため，Simulation-based Reduction Method(SRM)を提案する．この手法では，シミュレーションを活用することで，被災地域内で著しく混雑が予想される避難所を特定し，決定可能人数の調整を行う．図 14 は SRM の手順を表したフローチャートとなる．

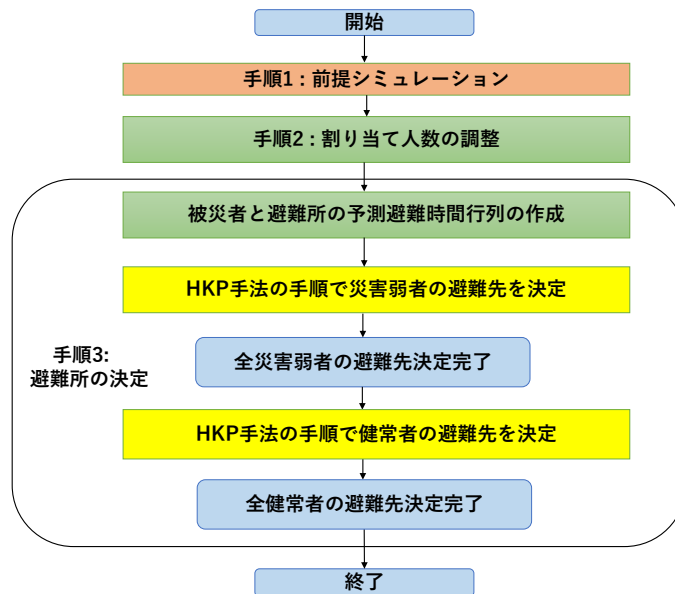


図 14: SRM のフローチャート

ステップ 1: 前提シミュレーションによる混雑が予想される避難所の特定

この段階では、シミュレーションを利用して、被災者が指示に従わないことによって、どれ程の災害弱者が負担を被るかを測る。想定し得る最悪の状況として「避難所の決定可能人数に制限を設けず、災害弱者を優先的に避難所に割り当てるが、健常者は全員指示に従わない」シナリオのシミュレーションを実施する。指示に従わない健常者はシステム側から指示された避難所に関わらず、現在地から最寄りの避難所へ行くとする。このシミュレーションを行うことで、どの避難所にてたらい回しが発生し、その避難所で何人の被災者がたらい回しされたかを数値として把握することが出来る。

ステップ 2: 決定可能人数の設定

シミュレーションの結果より、避難所周辺の健常者や避難所に決定された健常者の数について、以下の変数を設定する。

表 7: 変数定義

変数	定義
C_i	避難所 i の収容可能人数
A_i	避難所 i に割り当てられる被災者の人数の最大値
n_i	避難所 i を最寄りとする健常者の数
d_i	前提シミュレーションにて、避難所 i が最寄りであり、 尚且つ避難所 i に避難先を決定された健常者の数
r	従わない健常者の想定割合 ($0 \leq r < 1$)
E	全被災者数
s	全避難所数

上記の変数より、前提シミュレーションにて災害弱者がたらい回しにされた避難所を対象として、避難所の決定可能人数 A_i を算出する。その前段階として、以下の二つの健常者に関する式を立てる。

- $C_i - A_i$: 避難所 i の決定可能人数を減らす数、及び指示に関わらず来ることが想定される健常者の数
- $n_i - d_i$: 避難所 i を最寄りとするが、前提シミュレーションにて、避難所 i に決定されなかった健常者の数

上記の二つの式と、表 8 にて定義した従わない健常者の想定割合を表す変数 r によって、以下の等式がたてられる。

$$C_i - A_i = ((n_i - d_i) + (C_i - A_i)) * r \quad (5)$$

上記の式を元に A_i は次のように求められる。

$$x = C_i - (n_i - d_i) * \frac{r}{1 - r} \quad (6)$$

$$A_i = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (else) \end{cases}$$

また，FRM の場合と同様，決定可能人数については以下の条件式を満たす必要がある．

$$\sum_{i=1}^n A_i \geq E \quad (7)$$

ステップ 3: 避難所の決定

FRM で説明したように，避難所の上限を設けている状態で，再度 HKP 手法と同手順で避難所の決定を行う．この時，災害弱者が優先的に決定され，健常者は全ての災害弱者の避難先が後に行われる．

5.3 評価シミュレーション

手法の評価のシナリオは前章と同様，京都の祇園祭，後祭のケースを扱う．このケースでは前章とは異なる点として災害弱者となるエージェントが存在する．この災害弱者の割合については次のように求める．京都観光調査では京都市の観光客のうち，60 歳以上が 44% を占めており [109]，更に総務省の人口推計 [110] では 60 歳以上の人口が約 4,363 万人，その中の約 40% にあたる 75 歳以上の人口となる．60 歳以上の訪問客が全体の 44% であるとするならば，換算して 70 歳以上の高齢者を 17% 存在すると推計する．これに加え，9 歳以下の小児や身体障害者を災害弱者に含めるものとする．これらを考慮して，本実験では災害弱者を訪問者全体の 20% であると仮定し，6,000 エージェントをその対象とする．

5.3.1 エージェントの行動

健常者と災害弱者では，身体能力に差があるため，歩行速度は大きく異なる．森下らが行った歩行速度の測定結果 [111] をもとに，健常者と災害弱者それぞれ

の標準歩行速度を以下の様に設定する.

$$v = \begin{cases} 1.0 \sim 1.5[m/s] & (\text{健常者}) \\ 0.4 \sim 0.7[m/s] & (\text{災害弱者}) \end{cases}$$

指示に従わない被災者の行動については第4章で行ったものと同様に, エージェントは最寄りの避難所を探す行動をし, それらは健常者のエージェントから一定の割合で発生するものとする.

5.3.2 評価対象

提案手法の精度評価として, 最短避難所選択手法, ベースラインである HKP 手法, FRM と SRM を適用した場合にて, それぞれの避難完了時間を比較する. 指標となるのは, 平均避難時間, 全体避難完了時間, 避難完了率推移である. 更に, これらの評価指標は被災者の区別として, 被災者全員, 健常者, 災害弱者ごとの結果を測定する. 従わない健常者の割合を 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% の 6 パターンの設定で. FRM の決定可能人数の減少率を 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, SRM の従わない健常者の想定割合 r について, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 に設定し各避難所決定手法と割合のパターンは被災者の初期位置, 従わない健常者が異なる 20 セットでシミュレーションを行い, それらの平均を各パターンの結果とする.

5.4 実験結果

各手法パターンを適用した避難完了時間の結果を指標ごとに以下に示す.

5.4.1 平均避難完了時間

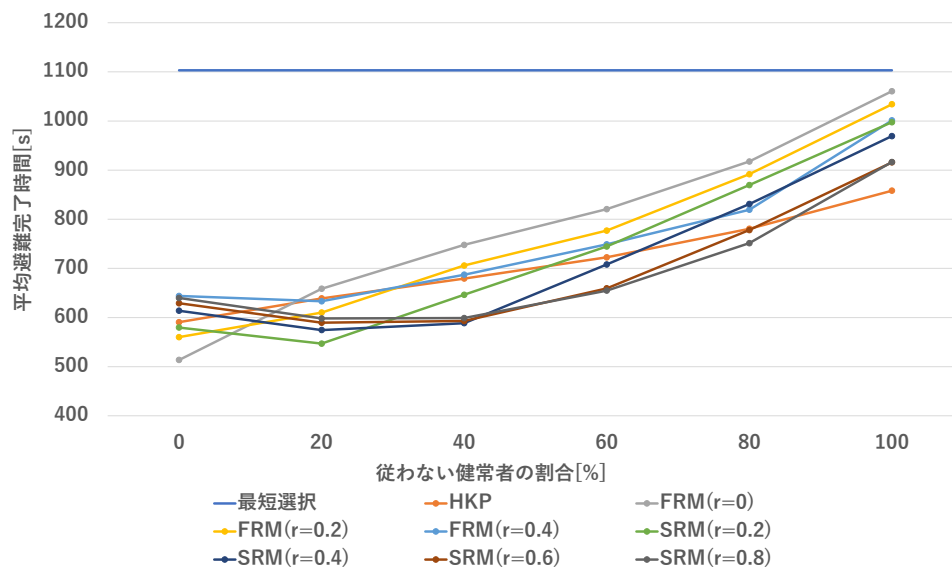


図 15: 全被災者の平均避難完了時間

図 15 は被災者全員分の避難完了時間の平均を表したものである。最短避難所選択のケースでは平均避難完了時間は 1103.2 秒となり、全てのケースにおいて最大となった。避難所の定員に制限を設けることなく、災害弱者に優先性を持たせたパターン (FRM($r=0$)) にて、全ての被災者が従った場合、平均避難完了時間は最小の 513.7 秒となった。しかしながら、従わない健康者が存在することで、平均避難完了時間は急激に上昇し、 $r=0.2$ のパターンで上昇率は約 28% となる。全ての健康者が従わないパターンでは、平均避難完了時間は 1,060 秒となり、最短避難所選択手法の結果に近づく。HKP 手法は平均避難完了時間の上昇は緩やかであり、全ての被災者が従う場合では 590.5 秒、健康者が全て従わない場合では 858.1 秒となった。

一方、FRM($r=0.4$) と SRM については、平均避難完了時間の変化は上記のものと大きく異なる。一定の従わない健康者が出ること全体平均避難完了時間が減少する。これは、健康者が最寄りの避難所へ向かうことに起因する。SRM 手法で従わない健康者の想定を高く見積もったパターン ($r=0.6, 0.8$) は特定の避難所

の定員を制限している。従わない健常者の割合が同じ場合を比較すると HKP 手法より平均避難完了時間を下回っている。FRM にて減少率 r の値を 0.6 又は 0.8 に設定するパターンは、避難所の決定可能人数の合計が全被災者の数を下回るため、決定不可能となった。これは後述する他の指標の結果についても同様である。

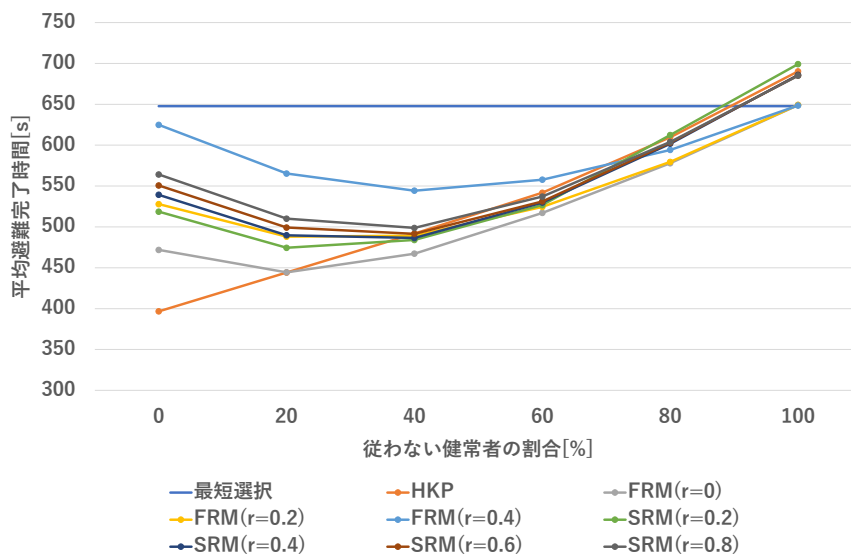


図 16: 健常者のみの平均避難完了時間

図 16 は健常者の平均避難完了時間を表したものである。HKP 手法では、全ての被災者が従った場合で、平均避難完了時間は最小の 396.6 秒となった。従わない健常者が割合が上がるにつれ、平均避難完了時間も増加し、全被災者が従わない場合では、平均避難完了時間は 690.2 秒であった。最短避難所選択手法での平均避難完了時間は 647.6 秒であった。提案手法、FRM と SRM は従わない健常者の割合が 0% から 20% へ上がる時、平均避難完了時間は減少している。提案手法にて決定される避難所は、健常者の最寄りの避難所よりも遠くなる傾向にある。FRM と SRM での従わない健常者が増加と平均避難完了時間の変化は全被災者のものと近い結果となった。

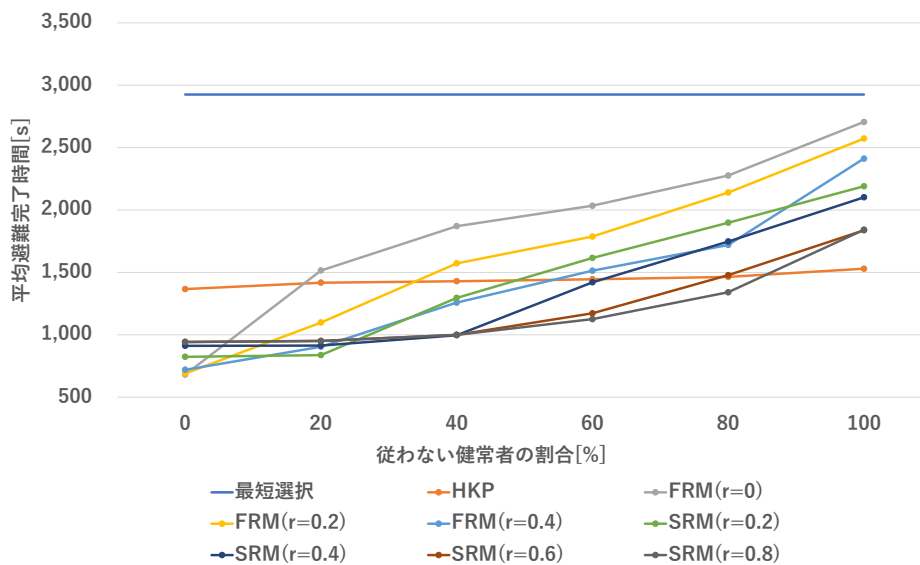


図 17: 災害弱者のみの平均避難完了時間

図 17 は各パターンでの災害弱者のみの平均避難完了時間を表したものである。全ての被災者が指示に従った場合、平均避難完了時間は最小の 681.1 秒となった。しかしながら、避難所の決定可能人数に制限がなければ、従わない健常者の割合が 20% となった場合で、平均避難完了時間は約 2.2 倍に増加した。HKP 手法での結果は、従わない健常者の割合の上昇に対して、平均避難完了時間の増加は非常に緩やかであった。全ての被災者が指示に従えば、災害弱者の平均避難完了時間は 1,366.1 秒、全ての健常者が従わない場合では 1,529.8 秒であった。

5.4.2 避難完了率推移

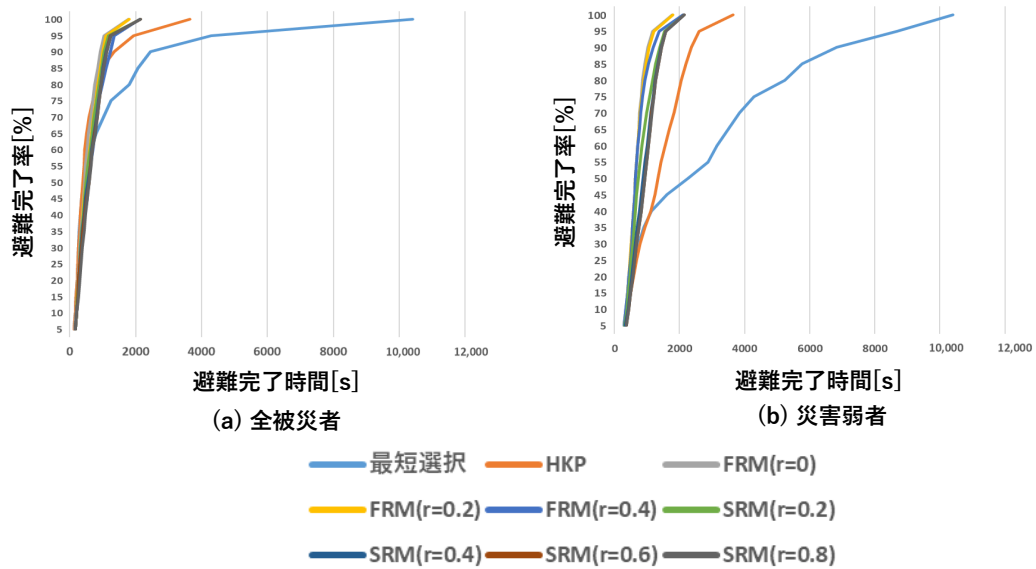


図 18: 避難完了率推移 (全被災者が指示に従う)

図 18 は全ての被災者が指示に従った場合の、全被災者と災害弱者のみで避難完了率の推移を表したものである。災害弱者へ優先的に避難所へ決定することが災害弱者の早期避難に大きな効果が出る結果となった。HKP 手法で全ての被災者が避難を完了するまでに 3,646 秒を要しているのに対し、FRM, SRM では 1,780 秒から 2,150 秒で避難を完了している。

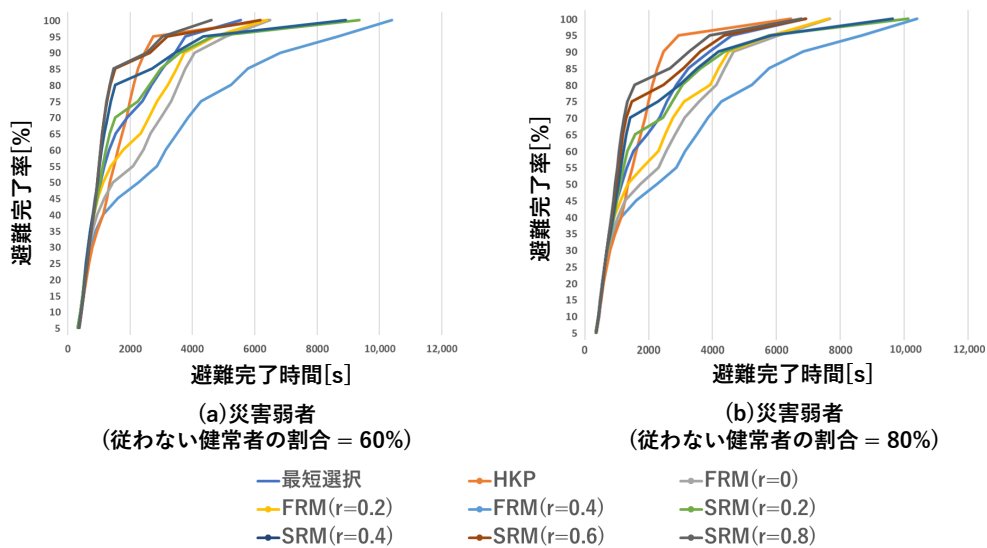


図 19: 避難完了率推移 (健康者の一部が指示に従わない)

一方、指示に従わない健康者がいる場合、結果は大きく異なる。図 19 は従わない健康者の割合が 60% 及び 80% の場合での、各避難所決定手法パターンの災害弱者のみの避難完了率の推移を表したものである。FRM と SRM は避難所の決定可能人数の制限が全くない或いは小さい時、災害弱者の避難完了率は HKP 手法と比較して大きく後れを取る結果となった。

(a) 従わない健康者の割合が 60% である時、FRM($r=0$) では HKP 手法と比較して、50% 以上の災害弱者が避難に遅れが生じている。決定可能人数の減少度 r を 0.2 または 0.4 に設定した FRM では、より多くの災害弱者を早く避難させることが出来るが、30% 以上の避難完了時間が増加することになる。SRM について、想定割合が上がるにつれ、2,000 秒以内で避難可能となる災害弱者の数が増加する。想定割合が 0.2 の時は 70%、0.4 では 80% の災害弱者の早期避難が可能となる。想定割合が 0.8 では全被災者は最も短い 4,617 秒で避難を完了している。

(b) 従わない健康者の割合が 80% である時、FRM と SRM の両方で一定数の災害弱者の避難の遅れが確認された。FRM では HKP 手法と比較して 40% 程の災害弱者の避難が遅れることになる。SRM では想定割合が 0.2 や 0.4 の場合、約 30% の災害弱者の避難時間が増加した。想定割合が 0.6 の場合では 75%、0.8 では 80%

の災害弱者の早期避難が可能となる。HKP手法での全体避難完了時間が6,461秒で最小となり、SRM($r=0.8$)の6,782秒とSRM($r=0.6$)の6,920秒が後に続いた。

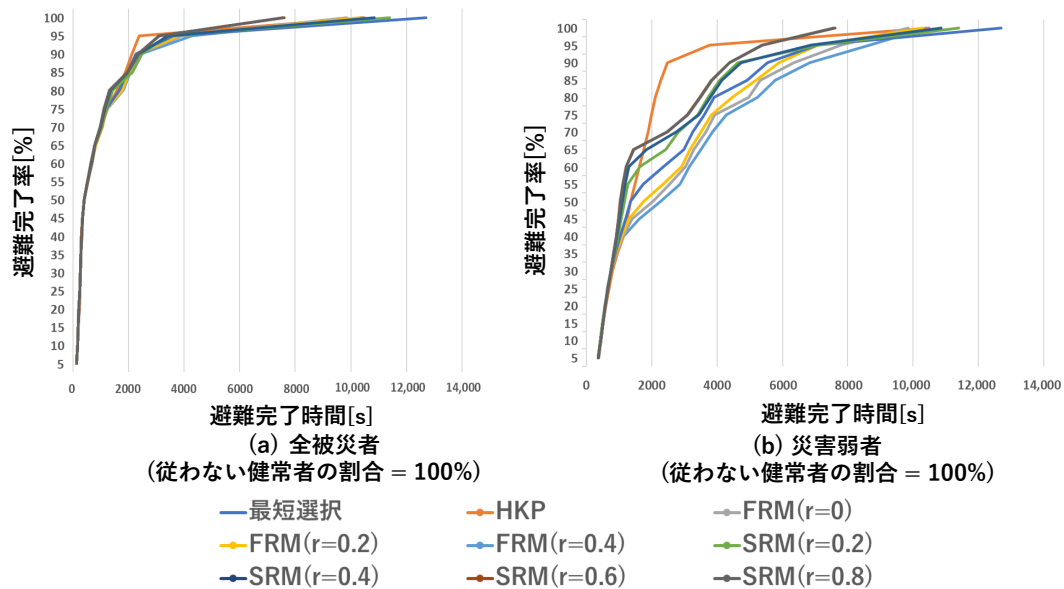


図 20: 避難完了率推移 (全ての健常者が指示に従わない)

図 20 は全ての健常者が従わなかった場合の全手法の避難完了率の推移を全被災者と災害弱者のみで計測した結果を表している。避難所に決定可能人数の制限を設けていないFRM($r=0$)では、同時間でのHKP手法と比較すると、災害弱者の避難完了率は圧倒的に低くなり、50%以上の災害弱者の避難完了時間が著しく増大した。一方、SRM($r=0.6, 0.8$)の場合、65%の災害弱者を早期避難させることができるが、それ以外の人数がたらい回しにより避難完了時間が遅れることになった。全体の避難完了について見ると、SRMは想定割合が0.6では7,616秒、0.8では7,557秒で全被災者の避難が完了しており、HKP手法の10,503秒より短い結果となった。

5.5 結果と考察

本章での手法は、災害弱者の支援を目的とし、尚且つ避難指示について、健常者の一部が従わない行動を取った場合に災害弱者が被る負担を想定した上で、避難所決定を行った。避難に時間を多く要する被災者が不利となる点はベースラインとなる手法の欠点であり、災害弱者に対する優先的な避難所決定はこの問題に対処するものである。これらに対し、FRMとSRMの2つの避難所決定手法を提案した。シミュレーションを事前に行い、混雑が見込まれる避難所を特定し、決定可能人数の制限をする。避難所を決定することで混雑を想定して、被災者を分散させるようにしている。その結果、SRMはFRM以上に災害弱者の避難完了時間の削減の効果をもたらしている。被災者が指示と異なる行動を取ったとしても、SRMは従わない健常者の規模が想定を超えない範囲にて、災害弱者の平均避難完了時間の削減、早期避難できる災害弱者の数の増加させることが可能となった。想定割合が0.8の場合にて、十分な定員の制限を特定の避難所に行った際、災害弱者の平均避難完了時間をHKP手法のものより低く抑えることが可能となり、従わない健常者が80%存在する時でも、80%の災害弱者が早期避難が完了となった。一方で、残りの約20%の災害弱者の避難は遅れ、全体避難完了時間はHKP手法の結果より高く出ている。これらの結果より、災害弱者の避難を迅速に進めるには、健常者側の避難指示に対する協力が十分得られるかが影響すると考えられる。

提案手法は災害弱者の避難完了時間が短くなるように避難所を決定しているが、その一方で健常者の避難先は最寄りの避難所より遠い場所に決定されやすくなるため、健常者の避難完了時間は増加する。このように、災害弱者へ優先性を持たせることで健常者に対して負担を課すことになる。そのため、災害弱者と健常者の差を縮められるかの手段を考える必要がある。更に、避難所の決定可能人数に制限を設ける手法は、対象地域内の被災者の数に対して、人数制限下においても避難所の収容可能人数が十分に確保されることが条件になる。

エージェントシミュレーションは災害の被害予測に広く用いられている技術である [112, 42]。被災者の複雑な行動の観測を可能とする津波の避難シミュレーションモデル [112] や避難計画の立案を目的とした住民の避難モデルの提案がさ

れている。一方，本研究で取り扱った大型の行事の訪問客のように，その場所に対する土地勘が少なく，避難指示とは異なる行動を取る可能性がある。被災者の属性や避難指示が行き届いているかが指示に対して協力的になるかに影響する。本章のシミュレーション実験を通して，避難に要する時間，どれ程の災害弱者がたらい回しにされるかを，手法とパラメータ設定を変えながら，異なるパターンで検証した。このようなシミュレーションのデータは，行事の主催団体や行政，警察等に提供することで，実際の避難計画の立案や誘導員，警備の配置の策定への活用が考えられる。避難指示を行う側は，本章の提案手法を適用し効果的な避難誘導を実現するためには，事前シミュレーション又は実用時にて，従わない健全者の想定割合及び避難所に割り当てる人数の制限を適切に設定しなければならない。この設定方法については，各区画内に分布する被災者の人数を推定，周辺の被災者の数と避難所の定員及び位置関係を比較することによる超過人数の多寡，シミュレーションを実行することによって得られる避難完了時間結果の遷移が主な判断基準になる。更に，被災者側の避難指示に対するどのように行動するかについて，複数のパターンを想定することで，「従わない健全者」が発生した場合の対処が可能になると言える。

5.6 本章のまとめ

本章では，災害弱者の支援を目的とした避難所決定手法 1) Fixed-rate Reduction Method と 2) Simulation-based Reduction Method の 2 種類を提案した。それぞれの手法は，従わない健全者が存在することを想定した上で，避難所に決定する人数を制限した上で，災害弱者を優先した避難所決定を行う。決定可能人数の制限の方法は 2 つの手法で異なり，前者は全ての避難所に対して一律の割合で適用，後者はシミュレーションの結果を基に混雑が想定される避難所を特定し，訪れる被災者の人数を基に制限する数を設定する。それぞれの手法について，災害弱者が存在するシナリオにて避難先を決定，シミュレーションを行い，避難完了時間を HKP 手法と比較した結果，下記の知見が示された。

- 指示に従わない健常者が存在する場合，災害弱者に優先性を持たせるのみの手法 (FRM($r=0$)) では，災害弱者がたらい回しにされ，避難完了時間が大幅に増加することになる。
- FRM について，避難所の決定可能人数の制限を設けた場合，災害弱者の避難完了時間の削減が可能となるが，制限の割合が非常に大きい場合，避難所の決定が不可能となる。
- SRM は従わない健常者の数が想定を下回る場合，ベースラインの HKP 手法と比較して，災害弱者の平均避難時間の削減，より多くの災害弱者の早期避難が可能となる。

6. 世帯構成員同士の合流を目的とした避難所決定

本章では、課題3「世帯構成員が離れている状態において構成員同士をどのように避難所で合流させるか」に対して、手法を対応させるようにした。提案する手法の詳細と、手法を適用させて場合の結果について説明する。

6.1 課題要件

突発的な災害の発生時にて、家族の構成員が外出しているために、構成員同士が別々の場所で被災する可能性が大いにある。このような状態は家族の安否確認、被災者の行動や心理状態に影響を及ぼすと考えられている。従って、被災者同士の社会的関係を考慮した避難指示が必要となる。世帯ごとに対して避難指示は多くの場合、家族同士で予め自宅付近を基準とし避難先を決めておくことを推奨している。しかし、自宅付近から遠く離れている場所で被災した場合、予め決めた避難所までの到着時間は大幅に長くなる。

HKP手法及び課題1,2に対して提案した手法はいずれも個人ごとの被災者に対して避難所を決定しており、被災者同士の関係性を考慮したものではない。世帯構成員同士が離れている状態ではそれぞれが別々の場所へ割り当てられることになる。

本章にて提案する手法は、複数人で構成される団体に対して避難所を決定するよう世帯構成員が同一の避難所にて合流させることを制約とした上で、より短い時間で被災者を避難完了させることを目的とする。

6.2 手法手順

これまで説明した避難所決定手法、ベースラインのHKP手法、4章のCAHKP手法、5章のFRM、SRMはいずれも1ステップごとに単一の被災者に対する避難所割り当て、アイテムの重さが均一となるナップサック問題を解いていた。それに対し、本章にて提案する手法は、避難所に割り当てる対象は「世帯」、複数人で構成されるグループ、すなわち重さの異なるアイテムをナップサックに入れ

る問題を扱うことになる。そのため、アイテムの重さに当たる予想避難時間を世帯ごとに設定しなければならない。表 8 は変数の一覧である。

表 8: 世帯に関する変数の定義

変数	定義
e_i	被災者 i
H_k	世帯 k
n_k	世帯 k の構成員の数
t_{ij}	被災者 i の避難所 j までの予想避難時間
t'_{kj}	世帯 k の避難所 j までの予想避難時間

上記の変数を設けた上で、新たな避難所決定アルゴリズム Group Heuristic Knapsack Problem(GHKP) 手法を構築する。Algotirhm3 は GHKP 手法の手順の流れを示したものである。

Algorithm 3 GHKP 手法の手順

Input: I : 被災者の集合, H : 世帯の集合, J : 避難所の集合. $TMatrix$: 被災者と避難所による避難時間行列, C_j : 避難所 j の定員

Output: X_{HJ} : 避難所決定リスト.

```
1 :  $TMatrix \leftarrow Convert(TMatrix)$ 
2 :  $TMatrix \leftarrow SortArc(TMatrix)$ 
3 : while  $|H| > 0$  do
4 :  $h, j \leftarrow GetMinimumEvacuationTime(TMatrix)$ 
5 :  $TMatrix \leftarrow RemoveEvacuee(TMatrix, h, j)$ 
6 : if  $C_j \geq n_k$  then
7 :  $X_{kj} \leftarrow 1$ 
8 :  $TMatrix \leftarrow RemoveShelter(TMatrix, j, J)$ 
9 :  $C_j \leftarrow C_j - n_k$ 
10 : if  $C_j = 0$  then
11 :  $TMatrix \leftarrow RemoveShelter(TMatrix, j, J)$ 
12 : end if
13 : end if
14 : end while
```

避難所決定前に行う処理として, Algorithm 3 の第 1 行目にて示されている, 予想避難時間行列の変換である. ここでは, 各世帯の避難所までの予想避難時間を算出することで, [被災者] \times [避難所] の避難時間行列は [世帯] \times [避難所] の行列へと変換される.

世帯 k に対する避難所 j までの予想避難時間 t'_{kj} は世帯 k に所属する各構成員の避難所までの所要時間を基に算出する. この時間の算出方法について以下の 4 つのパターンを提示する.

6.2.1 自宅基準時間設定 (GHKP-Home)

最初に、多くの自治体で採り入れられている避難方針を参考に、被災者が土地勘がある場所や予め決めておいた場所へ向かいやすいものと仮定する。それに従い、自宅地点から避難所までの時間を世帯の予想避難時間としている。

$$t'_{kj} = \text{TimeFromHomeToShelter}_{kj} \quad (8)$$

6.2.2 最大避難時間設定 (GHKP-Max)

自宅基準時間設定とは異なり、構成員の現在地を反映する設定を考案する。この設定では、最も避難に時間を要する構成員を基準とするものであり、世帯 k の構成員の中で避難所 j までの予想避難時間の最大値が世帯 k から避難所 j に対する世帯予想避難時間 t'_{kj} として以下の式のように算出される。

$$t'_{kj} = \max_{e_i \in H_k} t_{ij} \quad (9)$$

6.2.3 最小避難時間設定 (GHKP-Min)

構成員の内、避難所までの予想避難時間が最も小さい値が世帯の予想避難時間と設定される。避難所に最も近い構成員が先に場所を確保し、残りの構成員が後から集まる。世帯予想避難時間の式は以下のように表される。

$$t'_{kj} = \min_{e_i \in H_k} t_{ij} \quad (10)$$

6.2.4 平均避難時間設定 (GHKP-Average)

世帯内の避難時間の総和を減少させることを考え、予想避難時間の平均を世帯の避難時間と設定する。

$$t'_{kj} = \frac{1}{n_k} \sum_{e_i \in H_k} t_{ij} \quad (11)$$

以上のいずれかのパターンによって、各世帯ごとの避難所までの予想避難時間が算出され、行1で示すように「世帯」×「避難所」の避難時間行列が生成される。その後、同様に順で各世帯の目的地となる避難所が決定される。この時、HKP手法が個人ごとに避難所を決定するに対し、GHKP手法は1ステップに複数人を割り当てる必要がある。行6で示すように、避難所の空き定員が世帯構成員人数以上であるかを確認する必要がある。

6.3 評価手順

本章の手法の制度を評価するためのシミュレーションの設定、比較する手法パターンについて説明する。

6.3.1 対象シナリオ

当手法の効果を測定するのに適した状況として、世帯の情報の把握が可能であり、一定数の人口を持つ一都市での災害発生時を評価のためのシナリオとして設定する。ここでは、その一例として、奈良県生駒市全域にて生駒断層地震が夕方時に発生した際のシナリオを用いて検証を行う。図21は対象となる生駒市のシミュレーション上の図全体を表したものである。

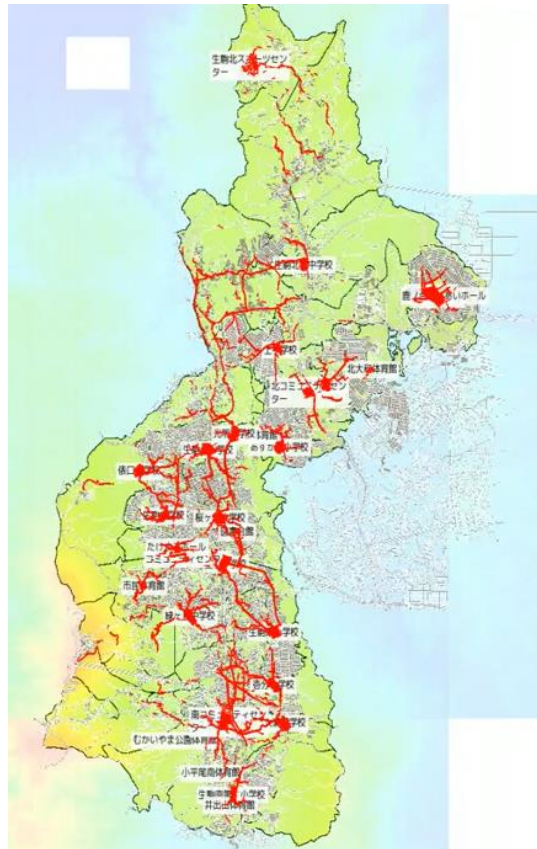


図 21: 生駒市全体図

市の作成するデータでは地震発生時には市全域で 32707 人の被災者が出ると想定され、各避難所を中心とした区域ごとに想定被災者数が割り振られている。指定避難所は市内に計 32 箇所存在し、各避難所の定員は実際の収容可能人数をシミュレーション上で設定している。

6.3.2 世帯構成

シミュレーション上にて、被災者同士の世帯関係を表現するために、本研究では作成された合成人口データを参照することで対処をする。合成人口データは、国勢調査、国、都道府県、市町村の統計を基に、対象地域と同規模数の人口及び世帯の情報を仮想的に構築したデータである。データには各住人の住所の位置(緯

度, 経度), 個人番号, 世帯番号, 年齢などの情報が含まれている。対象となる生駒市のデータより, 32,707 人分を抽出, 各世帯の構成人数は 1~8 人とし, 区域ごとの人数を合わせて, 住人のデータセットを作成した。また, 合成人口データの使用条件に基づき, 異なる 10 セットの構成パターンより, データセットをそれぞれ作成し, シミュレーションを実施した。

6.3.3 被災者の分布, 初期位置

生駒市より提供されたデータに基づき, 各町毎の住人の数を設定する。ここで, 実際の被災状況を想定して, 自宅地点から避難を開始する場合と自宅の外から行動する場合でエージェントの初期位置が決定される。先述の合成人口データに含まれる住人の住所に相当する緯度, 経度情報を用いて, シミュレーションのマップ上に該当する地点を被災者が行動を開始する自宅地点と設定する。一方, 自宅外から避難行動を開始する被災者を再現することについて, 日常的に人が自宅からどれほどの距離の場所へ外出することが多いかについての情報が必要になる。そこで, この実験では Agoop⁵より提供される流動人口データを利用する。このデータは匿名化された位置情報をスマートフォンより収集したものであり, 本実験では, 奈良県の 31,429 人分, 2021 年 2 月 21 日から 27 日のデータを使用する。外出距離の推定のため, シナリオの時間帯に近い 17 時, 自宅にいたことが想定される 3 時の位置情報を参照する。それぞれの時間での位置同士の距離を個人の外出距離と考える。

⁵<https://www.agoop.co.jp/>

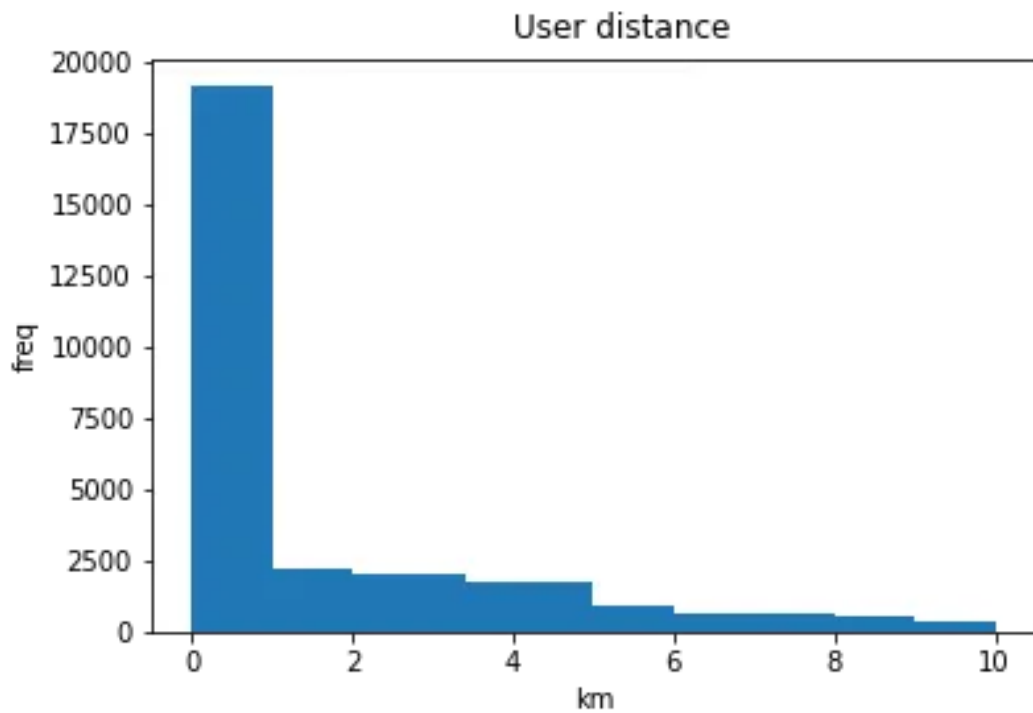


図 22: 流動人口データ内ユーザーの移動距離の分布

図 22 は対象地域内のユーザーの移動距離の分布を表したものである。対象のデータでは 0.5km 以下のユーザーは 55.62% である。この分布を参照し、エージェントが行動を開始する地点を決定する。

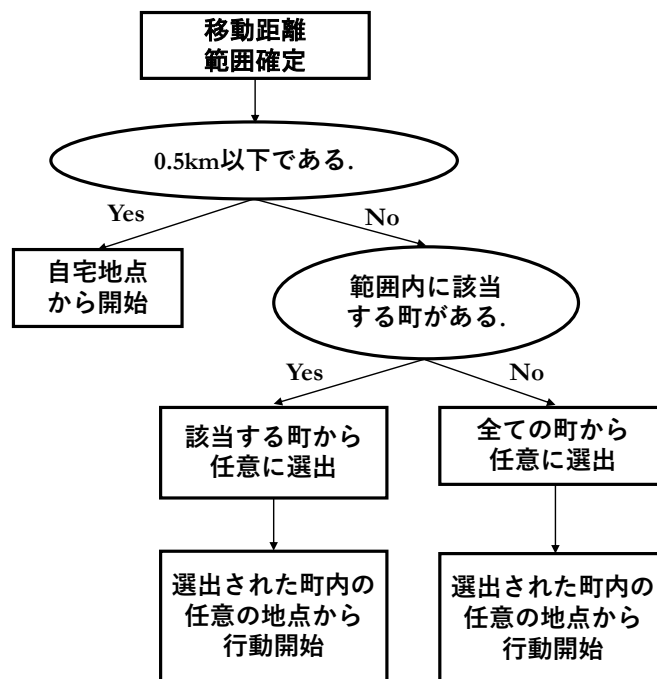


図 23: エージェントの行動開始地点の決定フローチャート

図 23 は被災者エージェントのシミュレーション上の行動開始地点を決定するプロセスを表したフローチャートである。移動距離の割合分布より各エージェントの移動距離が決定され、移動距離 0.5km を基準とし、条件を満たす区域、行動開始地点が選択される流れである。移動距離が「0.5km 以下」の場合、合成人口データの緯度、経度で表される自宅となる地点から行動を開始する。一方、「1km～2km」「3km～4km」などのそれ以外の距離の場合、異なるプロセスを経て、自宅外の行動開始地点が決定される。e-stat の境界データより、市は町毎の全 118 区分で分割され、被災者エージェントの自宅地点がある区域を中心として移動距離に該当する町を探索する。候補の中から任意に選ばれた区域内に存在する任意の地点から行動する。該当する区域が存在しない場合、全ての区域を対象にランダムで選ばれ、選ばれた区域内の任意の地点より行動を開始する。

6.3.4 評価指標

手法の評価には先述した手法と同様，平均避難時間，避難完了時間，避難完了率推移を用いる．10種類の異なる合成人口データ生成したデータセットよりシミュレーション上にエージェントを配置し，各避難所決定パターンを適用する．また，HKP手法によって被災者を個人ごとに避難所を割り当てた場合についても，避難完了時間を計測し，GHKP手法の結果と比較する．更に，HKP手法による避難所決定について，同世帯の構成員同士が同じ避難所に合流に成功したかどうかについても評価する．全世帯での集合成功率を gh ，単身世帯を除いた2人以上の構成員がいる世帯での集合成功率を gh' とし，

$$gh = 100 * \frac{S}{N} [\%] \quad (12)$$

N は全世帯数， S は合流に成功した世帯数である．
単身世帯を除いた集合度を次のように表す．

$$gh' = 100 * \frac{S'}{N'} [\%] \quad (13)$$

N' は単身世帯を除いた全世帯数， S' は合流に成功した単身世帯以外の世帯数である．

世帯ごとに避難所を決定するGHKP手法では，世帯構成員同士は必ず同じ避難所に合流するため， gh 及び gh' は100となる．

6.4 実験結果

シミュレーションを実施し，各手法，設定における被災者の避難完了時間及び世帯合流成功率の結果を示し，比較する．

6.4.1 平均避難完了時間

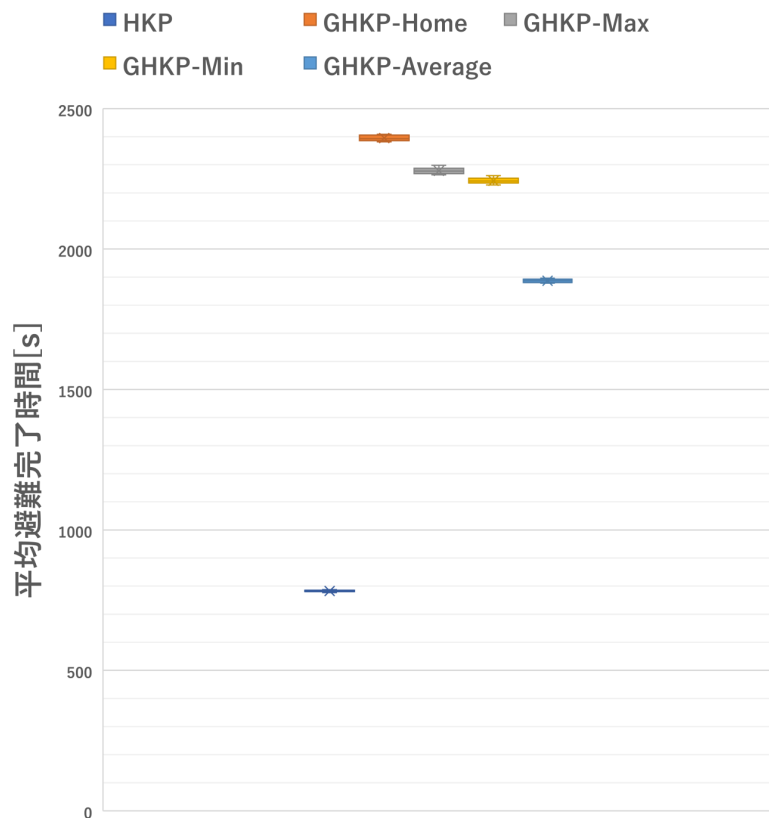


図 24: 平均避難完了時間比較

図 24 は各避難時間設定パターンの平均避難完了時間を表したものである。図に示すように、個人ごとに避難所を決定する HKP 手法が全ての中で平均避難時間が最小の結果となり、範囲は 776.73 秒から 787.91 秒であった。世帯ごとの避難所決定 GHKP 手法のパターンの中で比較すると、平均避難時間設定 GHKP-Average にて、その範囲は 1,878.93 秒から 1,896.51 秒となった。

6.4.2 全体避難完了時間

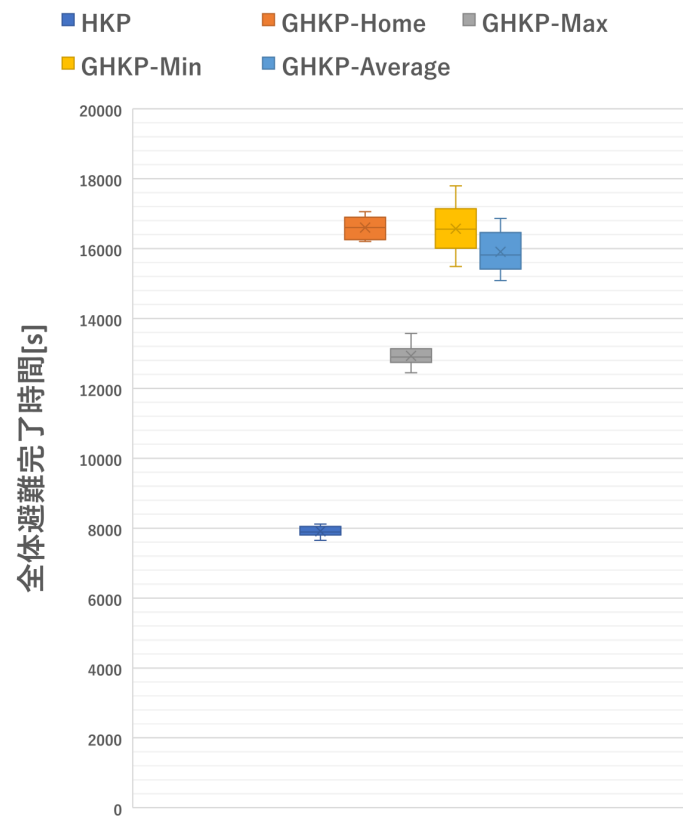


図 25: 全体避難完了時間比較

図 25 は各避難時間設定パターンの全体避難完了時間を表したものである。平均避難完了時間と同様、HKP 手法では他のパターンよりも短く、10セットでの範囲は7,649秒から8,119秒となり、平均は7,911.9秒という結果となった。GHKP-Maxのパターンにおいて全体避難完了時間が最小となり、範囲は12,444秒から13,574秒であった。10セットでの平均は12,929.6秒となった。

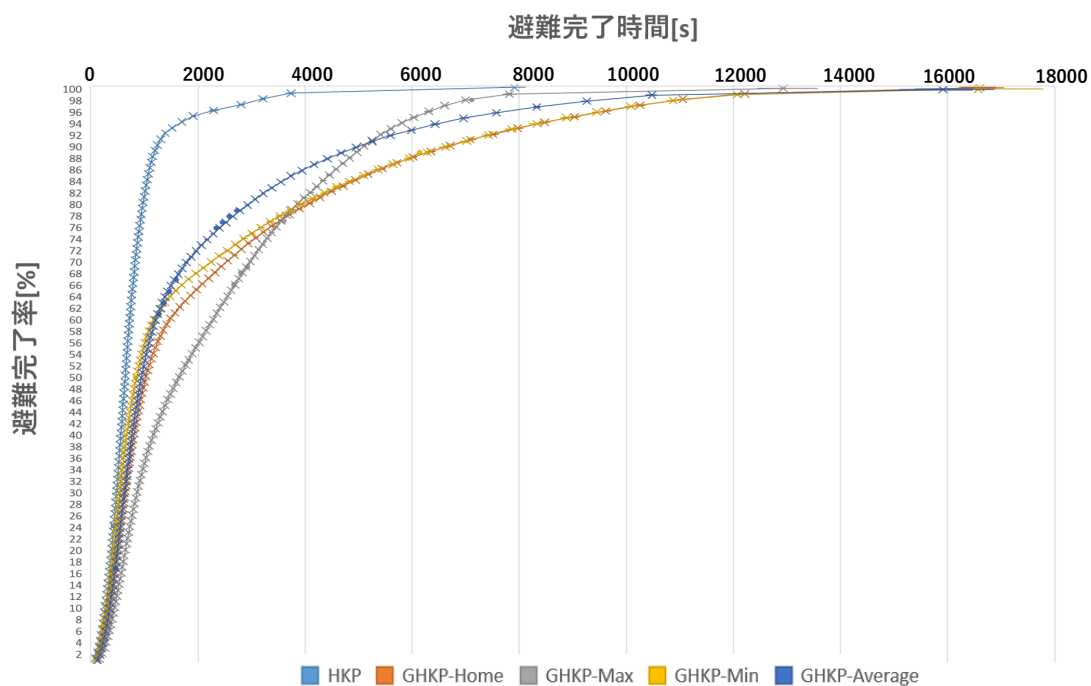


図 26: 全体避難完了率推移

図 26 は全被災者の避難完了率の推移を表したものである。HKP 手法は GHKP 手法のいずれの設定よりも避難完了率の時間ごとの上昇率が高く、GHKP-Max は先述の通り全被災者を避難するまでの時間が他のパターンよりも早い一方、避難の初期段階での避難完了率の上昇率は一番低い結果となった。3,510 秒頃に避難完了率が 77% に達するまで、他のパターンの避難完了率を下回っている。GHKP-Average は約 4,900 秒頃にて、HKP 手法を除いたパターンの中で最も高い避難完了率 90% に達する。

6.4.3 集合率

表 9: HKP 手法による世帯構成員の合流成功率

Set	N [世帯数]	S [世帯数]	S' [世帯数]	gh [%]	gh' [%]
1	14010	6314	2343	45.06	23.33
2	14123	6463	2426	45.76	24.05
3	14089	6394	2303	44.74	22.82
4	14209	6598	2456	46.43	24.39
5	14081	6345	2367	45.06	23.42
6	14123	6425	2334	45.49	23.26
7	14058	6312	2366	44.89	23.39
8	14170	6459	2372	45.58	23.52
9	14301	6625	2470	46.32	23.34
10	14287	6624	2391	46.36	23.78

表9はHKP手法を適用した場合にて、世帯構成員が全員が同じ避難所に合流することに成功した割合を各セットごとに示したものである。全世帯を対象都市、全ての構成員が同じ避難所での合流に成功した割合は44.89%~46.43%であり、10セットの平均は45.57%となった。一方、単独世帯を除いた2人以上の構成員がいる世帯での合流成功率は22.82%~24.39%であり、10セットの平均は23.67%となった。

6.5 結果と考察

実験の結果より、GHKP手法の各予想避難時間設定パターン同士、GHKP手法とHKP手法の間にて、避難完了時間や世帯構成員の集合率に大きな差が生じた。被災者同士を制約が存在することにより、平均避難完了時間及び全体避難完了時間の増加を引き起こすこととなった。一方、GHKP手法同士の結果では、離れている世帯構成員同士を合流させる際に、重視すべき点が考察される。

6.5.1 被災者の位置情報

多くの自治体などで採用されている「自宅の位置を基準として避難場所を決定する」避難指示方針を参考にしている「自宅基準時間設定 (GHKP-Home)」は被災者の現在地が考慮されないパターンとなる。この設定と比較すると、被災者の現在位置情報を把握し、その地点からの時間を反映している GHKP 手法の他の設定は、より短い避難完了時間の結果を出している。特筆する点として、最大避難時間設定 (GHKP-Max) では全被災者の避難を全設定の中で最小の時間で完了させる一方で、最小避難時間設定 (GHKP-Min) は避難完了時間が平均、全体共に非常に長くなる結果となった。最大避難時間設定は最も避難に時間がかかる構成員を中心としており、ヒューリスティックな手順が適用されることで避難時間が極端に長くなることを防いでいる。反対に最小避難時間設定では、避難所から最も遠い構成員の影響が非常に小さい。この性質は自宅基準時間設定にも共通するものであるため、両者との避難完了時間の結果の差は小さい。しかしながら、最大避難時間設定は初期段階における避難完了率の増加具合が他のパターンより低い欠点がある。これに対し、平均避難時間設定 (GHKP-Average) では平均避難完了時間は GHKP 手法の中で最も低く、全体の避難完了率推移の結果では早期段階で他のパターンよりも多くの被災者を避難させている。被災者の位置情報を把握し尚且つ複数人のグループを合流させるにあたり基準とする被災者の選択が重要な課題となると考えられる。

6.5.2 集団の考慮

個人ごとに被災者の避難先を決定する HK 手法について、世帯構成員の合流が可能となるかを検証した結果、複数の構成員を持つ世帯で、全員が同じ避難所で合流することに成功したのは僅か約 23.6%程であった。一方、GHKP 手法は同じ世帯の構成員同士を同じ避難所に決定する制約が存在することで、平均避難完了時間は 2.4 倍以上、全体避難完了時間で 63%以上増加する結果となった。世帯合流率の促進と避難完了時間の削減、2つの結果を総合すると、両者の間のトレードオフの関係が伺えるものだった。避難時間が短縮が求められる場合と時間がある程度の確保が可能である場合にて、

実際の地震発生時のケースにおいても、家族を捜索や救助する行動は被災者を危険に晒す場合があることが考えられている。Yun らが東日本大震災時の避難行動を調査しており、死亡の要因となった行動として「他人を助けに行く (22.4%)」, 「救助の仕事 (13.9%)」, 「家族や親戚を探しに行く (9.7%)」を挙げている [113]. Lindell らが 2009 年のサモア沖地震にて行った調査でも、家族を探したり、他人を助けに行く行為は避難の遅れを生じさせることが指摘されている [114]. また、岩手県、三陸地方を中心に伝えられている「家族や知人と集まる前に個人ごとで移動することが迅速な避難に繋がり、被害を最小限に抑えられる」という方針も存在する [115] [116].

上記の調査と本章でのシミュレーション結果を考慮すると、家族などの集団を合流させる方針は、避難の遅延や死傷者の増加を引き起こすなどの欠点が存在する。「避難完了時間の削減」と「世帯構成員の合流」の二つの目的を十分に満たすことを目指す場合、より有効な決定プロセスが要求されると考えられる。具体的に、一定の時間での合流させる世帯の割合に制限をした上で避難所を決定する、「世帯」×「避難所」による避難時間行列を生成する際の予想避難時間の設定を一律の基準で算出する代わりに各世帯に分散状況に適した算出方法などが考えられる。

6.6 本章のまとめ

本章では、世帯構成員が離れている状況を想定し、複数人の集団ごとに避難所に割り当てる避難所決定手法 Group Heuristic Knapsack Problem(GHKP) 手法を考案した。この手法の世帯ごとの予想避難時間について、異なる 4 つのパターン「自宅基準時間設定 (GHKP-Home)」「最大避難時間設定 (GHKP-Max)」「最小避難時間設定 (GHKP-Min)」「平均避難時間設定 (GHKP-Average)」を提示した。世帯構成のデータを用いて生駒市を例にした避難シミュレーションを行い、HKP 手法も加えて実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 被災者の現在地情報を活用した設定、とりわけ避難所から最も遠い構成員の影響を大きく受ける「最大避難時間設定」と「平均避難時間設定」は、一

一般的な「自宅を中心にした場所に集まる」方針を反映した「自宅基準時間設定」と比較して、それぞれ全体避難完了時間、平均避難完了時間の削減させることが可能となった。

- 全ての世帯構成員を同じ避難所に手合流させる手法では、避難完了時間の著しい増加が見られた一方、被災者を単一に割り当てる **HKP** 手法では合流が可能となる複数人世帯は平均して 23.6%程になり、避難完了時間の削減と世帯構成員の合流のトレードオフの関係が示唆された。

7. 考察

本章では、これまで行った3つの避難所決定手法の結果を踏まえ、提案手法による効果とそれらをより広い避難シナリオにおいて適用、拡張する方法について考察する。同時に、本研究の避難所決定システムが持つ課題や避難所決定システムを設計、実運用するために求められる要件について述べる。

7.1 各手法の効果と活用案

本研究では、課題1: 避難移動中の混雑の緩和、課題2: 災害弱者の支援、課題3: 世帯構成員の合流を設定し、それぞれの課題に対応するためにベースラインとなる避難所決定手法を拡張させた新たな避難所決定手法を示した。マルチエージェントシミュレーションにより提案した手法をベースライン手法と避難完了時間等の結果を比較した結果、課題1については避難完了時間と避難経路上の混雑度数の減少、課題2では指示に従う健常者の数が避難所決定時の想定範囲内である場合での災害弱者の避難完了時間の削減、課題3では構成員の位置情報を把握することで避難完了時間の増加を抑制できること、避難完了時間の削減と世帯構成員の合流の2つの目的のトレードオフ関係が示された。

課題2と課題3については、特に、被災者自身の特徴、属性に起因する問題の解決を目的としたものである。両者の課題で扱った避難所決定問題には被災者の属性に関する制約が存在しており、ベースライン手法を基準とした際、それぞれの設定した目的と「避難完了時間の削減」が互いに相反する関係、又は限られた条件下で目的が達成される結果が確認された。上記の結果はそれぞれの課題に対応する手法にて、課題2では「避難所に割り当てる人数の制限の割合」、「従わない健常者の割合」、課題3では「世帯の内、基準とする構成員によって変化する世帯に対する避難所までの予想避難時間」、以上のパラメータの値を変更させて複数の避難所決定パターンを提示、各パターンでの避難完了時間の変化を測定することで得られた。

このように、それぞれの課題にて、被災者属性や避難行動に関する要因について、シミュレーション上での推定方法、各種パラメータの設計を行った。各設定

について複数のパターンでの避難所決定のシミュレーションを行うことにより、避難完了時間にどれ程の影響があるか、任意の時間内にて収容できる被災者の人数を推定することが可能である。シミュレーションのパラメータ設定の方法、計測された避難時間結果等に関する情報を、行政や自治体などに提供することで、災害発生前の避難計画の立案及び発生後の避難指示の意思決定での活用が期待できる。具体的な例として、災害発生に備えた訓練、事前シミュレーション、災害発生時にて任意の時間内にて避難所に収容可能な災害弱者の数や世帯構成員の合流可能性の判断や支援する目的対象の達成基準を定めるのに有効となると考えられる。事前の避難シミュレーションを実行することにより、被災地域のどの地点で混雑が発生するかの確認にも繋がり、被災者のたらい回しや避難時間の遅延の計測を行うことにより、避難所の開設や被災者の受け入れるタイミングの決定、被災者をどのような順番で誘導させるか、そのための誘導員の配置案に関する行政或いは行事の主催者側の計画に本研究の手法が貢献することが期待される。更に日や時間毎の対象地域内の人口分布状況を参照した特定の期間や時間帯に合わせたシミュレーションの設計、避難誘導方針の策定、その他、課題1で示したようなシミュレーションを反復する手順を取ることで、混雑を緩和した上での避難所決定パターンを示すことも可能となる。

7.2 課題の複合化に対する手法同士の統合

本研究では、帰宅困難者に関連する複数の問題に対して、個別に課題を設定、各課題で避難所決定手法を提案したが、実際の避難状況では示した問題が複合化することが想定できる。本研究で扱った課題を中心とした例では、災害弱者が介護者と同伴しているケースが考えられ、これに対して課題2による災害弱者の優先と課題3で示した複数人ごとの単位での避難所決定を統合する方法が求められる。具体的な手順として、世帯から見た避難所までの予想避難時間は、移動可能距離の問題を考慮した上で災害弱者を中心とした時間が設定され、災害弱者がいる世帯を優先的に避難所に決定された後、残る世帯について課題3で示した手法を適用することが考えられる。

7.3 動的な避難計画に向けて

課題1と課題2で扱った祇園祭を例とした観光客を含めた行事など混雑した都心部にて災害が発生する場合は、リアルタイムに位置情報を取得し避難所の場所を提示するシステムは非常に有効になるが、地域住民を対象にした避難計画においても、本研究で扱った課題の内容の活用が考えられる。地方行政や自治体が主導する避難計画では、住民について住所や年齢、世帯構成などの情報をベースに、避難誘導や避難所の開設が行われる。しかし、災害の発生は突発的であるため、普段生活している土地勘のない場所にて被災するといった不測の事態も考えられる。課題3は自宅周辺以外の場所で被災することを想定し、住人の自宅位置の情報ベースだけでなく、現在地の情報をより効率的に取得、活用した手法を提案し、位置情報を反映することの有効性を示した。加えて、課題1で示したようなシミュレーションの反復により、より効率的な方策へと収束させるられることも期待できる。本研究にて扱った帰宅困難者発生時の災害対策、平時の訓練だけでは困難な状況に対してエージェントシミュレーションが有効となり、同時にシミュレーションと位置情報技術により、市町村と住民又は観光客によるデジタルツインの構築、災害避難システムへの応用も期待できる。一方、いずれのケースにおいても、有効的な避難誘導を実現するために、シミュレーションは被災者行動の予測や実環境との誤差の最小化が課題となる。そのため、システムの開発と同時に、都市の住民、更には観光客なども含めた災害発生時の自治体のアクセスを強固なものとするための啓発や訓練が要求される。

7.4 被災者分配の優先順位

災害時要支援者を対象に、重症度などに応じて、避難所へ搬送優先順位を決定するトリアージの概念がある。このトリアージの問題に関係するものとして、本研究では災害弱者に対する優先性(課題2)や世帯構成員が分散している状態でどの構成員を基準として避難所までの避難時間を見積もるか(課題3)に着目した。

本研究のベースライン及び提案した手法にて採用している避難所決定のアルゴリズムは避難所に近い被災者から順に決定するヒューリスティックな手順を踏ん

でいる。この手順は、第3章で言及した様に、被災者の指示に対する受託性や計算時間の短縮化のメリットがある一方、避難完了時間について全体最適性を担保するものではなく、加えて5章で示したように、避難に時間がかかる被災者が避難所決定にてより遠方の避難所に決定されやすくなる問題点が存在する。より短い時間での避難効率の向上のために決定アルゴリズムの手順の改良について検討する余地があるが、災害の種類、人口内の災害弱者の比率、発生時の被災者の分布の仕方によって、避難所の割り当ての際に優先すべき要件も変化する。課題2の結果が示すように優先性を設けることが有効になるケースの条件を把握しなければならない。

災害弱者についても、各個人の身体能力や情報取得能力などの差によって、災害時に受ける被害の深刻度が異なり、それに伴い避難誘導での優先度も変わる。災害弱者の段階の設定、段階ごとの対応について考慮した決定も必要になる。本研究では、課題2にて健常者と比較して身体的に行動が不利となる被災者を災害弱者と位置付け、「健常者」と「災害弱者」の2つに被災者を分類した。しかし、災害弱者に該当する被災者の要因には身体的要因だけでなく、外国人を例に情報を得る能力が関係することが指摘されている。平成3年度防災白書では、以下の条件が定義されている [117]。

- 自分の身に危険が差し迫った時、それを察知する能力がない、または困難な者。
- 自分の身に危険が差し迫った時、それを察知しても適切な行動を取ることができない、又は困難な者。
- 危険を知らせる情報を受け取ることができない、または困難な者。
- 危険を知らせる情報を受け取ることができても、それに対して適切な行動をとることができない、または困難な者。

上記で示した広義の条件に該当する災害弱者に対応するためには、負担の大きさや内容に応じて、さらに多くの段階や区分を設け、各段階に応じて避難誘導の優先順位を検討する必要がある。

又、先述した様に、高齢者や身障者は避難行動時に介護者や同居する家族を同伴する場合が非常に多い。そのため、課題3で扱った複数人の割り当てに関して、災害弱者本人だけでなく、その家族や付き添う支援者、集団の人数を考慮した決定への発展が必要になると言える。

7.5 被災者の行動心理を考慮した避難所決定

本研究での避難所決定手法は避難開始時に全被災者に対して目的地となる避難所を提示し、被災者がシステム側からの指示に従うことで全体の避難をより短い時間で完了することが可能となる。しかし、実際の避難時にて全ての被災者が指示に従うとは限らない。課題2では「指示に従わない被災者が存在すること」による災害弱者の避難にどれ程の遅延が生じるか、さらに、そのような状況下においても災害弱者の避難完了時間を削減が可能となるような避難所決定手法を提案した。

課題1, 2では避難先の指示を行った後の被災者の挙動による影響を把握するためにシミュレーションを利用し、その影響を緩和するために避難所決定手法に新たなプロセスを追加した。課題3においても被災者同士の社会的関係の影響について取り上げているが、世帯構成員同士の合流或いは避難完了時間の最小化のどちらを優先するか、各世帯で異なることが考えられる。

本研究で行ったシミュレーション上でのエージェントの行動パターンは指示に従って避難所に向かう或いは指示に従わず最短の避難所を探す、被災者の区分によって歩行速度が異なるといった仕様になっている。より精度の高い被災者の行動の再現をするため、被災者側の指示を受けて、行動の選択などの意思決定のシミュレーション上の反映、及び意思決定予測が今後の焦点となる。

7.6 提案手法の課題

本論文では、ナップサック問題の考えを利用した避難所決定手法をベースラインとし各課題に対応した手法を提案した。しかし、精度や実現可能性については

既存手法，提案手法で共通する課題点が複数存在する．以下はそれらについて詳細に説明する．

7.6.1 通信インフラの確立

本研究にて，提案，説明した避難所決定手法はいずれも避難支援システムと被災者が持つデバイスとの通信，位置情報の取得が可能であることが前提となっている．しかしながら，実際の災害時では，通信機器が正常に作動しない，故障することで通信障害が起きる可能性が高い．そのため，通信状況が不安定，デバイスとの通信が途絶される場合，避難所決定システムの利用は不可能となる．また，システムを適用する地域内にて通信回線の状態の差によって，避難指示の伝達速度に影響が生じ，指示側が想定する避難行動がされない場合がある．このような回線の状態を考慮し，課題2のような避難所の割り当て人数の制限を改良した対処法が考えられる．

7.6.2 道路ネットワークの可便性

災害時の被害の一つとして，建物の倒壊や道路の通行止めの発生が含まれる．本研究での避難所決定システムは災害が発生した直後，避難を開始した時点での被災者の位置情報と道路情報を基に避難所と避難経路が決定される．平常時に通行可能な道路が不通となった場合，被災者は移動経路又は避難先の変更，想定よりも避難完了が遅れるなどの影響を受ける．そのため，本研究で扱った避難所決定手法は避難行動の途中時にて状況に応じた経路や避難場所の指示が不可能である．この問題の対処方法として，道路環境上の障害物の発生を反映し，課題1で行ったシミュレーションの反復を適用することで，災害発生時の道路網の状態変化を考慮して避難時間の推定を行う方法が考えられる．また，災害弱者，特に身体障害者に関しては，段差などの移動が不可能な場所が存在するため，避難所までの誘導には一意的ではない経路選択も同時に求められる．

7.6.3 システムの運用環境

本論文で説明したマルチエージェントシミュレーション実験では約 30,000 人規模の被災者数，対象となる環境は都市部の一画，或いは一市全体のシナリオを想定したものであり，被災者とシステムは常に通信が可能な状態となっている．よりシステムの実用的な運用について，地域ごとに設置可能なセンサ数，避難指示を行うためのアプリケーションの配布，サーバーの構築といったシステム面に加え，住民や来場者の人数や年齢，世帯情報，地形の特性を考慮した検証を行い，それぞれの場面に適した手法の確立が必要である．

8. 結論

本論文は，帰宅困難者の発生時などの大規模な数の被災者を収容可能人数を持つ割り当てる問題について，避難行動に影響する要因の「移動中の混雑」「災害弱者の存在」「世帯構成員の合流」に着目し，それぞれ3つの課題を設定した．これに対し，ベースラインとなるナップサック問題の考えを用いた避難所決定アルゴリズムより，各課題に対応した新たな手法を提案した．提案した手法は，それぞれ約 30,000 人規模の避難シナリオのマルチエージェントシミュレーションを実行し，避難完了時間を含めた避難効率の精度評価を行った．

課題1では，シミュレーションにて混雑発生の再現を行い，その結果を反映した避難所の再決定を繰り返すことで移動中の混雑とその影響を軽減する避難所決定の解を出力する Congestion-aware Heuristic Knapsack Problem 手法を提案した．シミュレーションの結果，全体避難完了時間を約 12%，避難経路上の混雑度数を平均で 24%から 32.5%，最大値で 24.2%から 57.8%減少させる効果が得られた．

課題2では，災害弱者の優先的に決定するだけでなく，指示に従わない健常者が発生することを想定し，避難所に割り当てる人数の制限を行った．割り当てる人数の制限には，1) 全ての避難所に対して一律の割合の制限を適用する Fixed-rate Reduction Method と，2) シミュレーションを行い，たらい回しにされる災害弱者が発生することが想定される避難所に対して，訪れる被災者の人数の想定に合わせた制限を行う Simulation-based Reduction Method を提案した．実験の結果，提

案した手法は健常者の指示への貢献が一定数担保される場合において，災害弱者の避難完了時間の削減が可能となることを明らかにしている．

課題3では，複数人の集団ごとに避難所に割り当てる **Group Heuristic Knapsack Problem** 手法を考案し，世帯に対する避難所までの予想避難時間について複数のパターン「自宅基準時間設定」「最大避難時間設定」「最小避難時間設定」「平均避難時間設定」を提示している．各パターンにおける避難完了時間の比較を行った結果，「平均避難時間設定」において平均避難完了時間が約 23%，「最大避難時間設定」において全体避難完了時間が約 22%減少し，構成員の現在地情報の反映による避難時間削減の効果が確認された．更に，ベースライン手法での避難完了時間と世帯構成員の合流の成功率を計測し，個人ごとに割り当てる場合と集団ごとに割り当てる場合の差を評価した．世帯構成を考慮しない決定法では，全体避難完了時間が1時間20分以上短い一方で，合流成功率は平均で 23.6%となり，避難完了時間の削減と世帯構成員の合流の2つの目的のトレードオフ関係が確認された．

本研究にて行ったシミュレーションの結果が，災害の様々な事例にて適用，応用され，今後の避難計画立案の参考となることを期待し，本論文を締めくくる．

謝辞

本研究を進めるにあたり、安本慶一教授には、研究全般、論文添削にて多大なるご指導・ご助言を賜りました。また、充実した研究環境の整備など、研究活動を手厚くご支援いただきました。感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

笠原正治教授には、ご多忙の中、論文審査委員を引き受けてくださった上で、様々なご助言をいただきました。感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

諏訪博彦准教授には、本研究を進めるにあたり、手法の設計、シミュレーションシステムの設定、シナリオ構成に関してご指導・ご助言をいただき、研究をはじめとした質問や相談に丁寧に回答してくださいました。また、生駒市とのプロジェクトの立ち上げやシミュレーションにて使用した人口データ等の入手など、多方面より協力をいただきました。感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

松田裕貴助教には、本研究を進めていく中で、深く議論に参加していただき、非常に有益な助言をいただきました。また、生駒市とのプロジェクトや研究室生活の面でも多大なご協力をいただき、感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

大阪公立大学の藤本まなと准教授には、研究に関する相談や論文執筆の基礎や表現方法、論文添削など多大なご指導、ご助言、ご協力をいただきました。感謝の意を表すとともに、心より厚く御礼申しあげます。

金岡恵事務補佐員、山内奈緒事務補佐員には、学会や出張に関する事務処理を始め、研究生生活の様々な場面でご支援いただきましたこと、謹んで感謝申し上げます。

研究室生活を共に過ごしたユビキタスコンピューティングシステム研究室の同輩、後輩には非常にお世話になりました。心より感謝申し上げます。

最後に、今日まで学生生活を様々な面から支えてくださった両親をはじめ、家族に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 内閣府：令和5年度防災白書. available online from https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/pdf/r5_tokushu1_2.pdf (accessed 2024-1-30).
- [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] 廣井悠. 帰宅困難者の広域的移動が避難行動に与える影響の定量的把握—首都圏における大都市避難シミュレーションを用いた検討—. 横幹, Vol. 17, No. 2, pp. 54–59, 2023.
- [4] 内閣府. 大規模地震の発生に伴う帰宅困難者対策のガイドライン. available online from https://www.bousai.go.jp/jishin/kitakukonnan/pdf/kitakukonnan_guideline.pdf (accessed 2024-1-30).
- [5] Erol Gelenbe and Fang-Jing Wu. Large scale simulation for human evacuation and rescue. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 64, No. 12, pp. 3869–3880, 2012.
- [6] Min Zhou, Hairong Dong, Petros A Ioannou, Yanbo Zhao, and Fei-Yue Wang. Guided crowd evacuation: approaches and challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, Vol. 6, No. 5, pp. 1081–1094, 2019.
- [7] Cabinet Office : The 5th Science and Technology Basic Plan . available online from https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5basicplan_en.pdf (accessed 2024-1-30).
- [8] 首相官邸. 日本のスマートシティ sdgs など世界が抱える課題を日本の society5.0 で解決. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keikyou/pdf/smart_city_catalog.pdf. [Avalable online; accessed 2024-1-30].

- [9] 内閣府・総務省・経済産業省・国土交通省スマートシティ官民連携プラットフォーム事務局. スマートシティガイドブック. https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/01_scguide_1.pdf. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [10] 国土交通省: デジタルツインを活用した避難誘導による行動変容検証事業. available online from <https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/content/001601053.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [11] Hanif D. Sherali, Todd B. Carter, and Antoine G. Hobeika. A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 25, No. 6, pp. 439–452, 1991.
- [12] Sirisak Kongsomsaksakul, Chao Yang, and Anthony Chen. Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 4237–4252, 2005.
- [13] 梅木寿人, 中村優吾, 藤本まなと, 水本旭洋, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一. 混雑度の偏りを考慮した避難所決定手法. *情報処理学会論文誌*, Vol. 60, No. 2, pp. 608–616, 2019.
- [14] 内閣府. 帰宅困難者等に係る対策の参考資料. available online from <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/sanko02.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [15] 東京都防災ホームページ. 東京都帰宅困難者対策ハンドブック. available online from https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/001/369/202303.pdf (accessed 2024-1-30).
- [16] Noor Akma Abu Bakar, Noridayu Hashim, Afrig Aminuddin, Siti Zakaria, and Mazlina Majid. Towards effective evacuation procedures in disaster manage-

- ment (dm): Simulation modelling and governance strategies. *Journal of Governance and Integrity*, Vol. 6, pp. 483–494, 05 2023.
- [17] Azin Fathianpour, Barry Evans, Mostafa Babaeian Jelodar, and Suzanne Wilkinson. Tsunami evacuation modelling via micro-simulation model. *Progress in Disaster Science*, Vol. 17, p. 100277, 02 2023.
- [18] 国土交通省. <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/olympic/en/index.html>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [19] 国土地理院. ハザードマップポータルサイト. <https://disaportal.gsi.go.jp/>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [20] Chao Zhou, Ying Cao, Xie Hu, Kunlong Yin, Yue Wang, and Filippo Catani. Enhanced dynamic landslide hazard mapping using mt-insar method in the three gorges reservoir area. *Landslides*, Vol. 19, No. 7, pp. 1585–1597, 2022.
- [21] Manato Fujimoto, Seigi Matsumoto, Edgar Trono, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Effective application distribution system for internet-less communication during disasters. *Sensors and Materials*, Vol. 32, p. 79, 01 2020.
- [22] Edgar Marko Trono, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and K. Yasumoto. Generating pedestrian maps of disaster areas through ad-hoc deployment of computing resources across a dtn. *Comput. Commun.*, Vol. 100, pp. 129–142, 2017.
- [23] Edgar Marko Trono, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, Mineo Takai, and Keiichi Yasumoto. Disaster area mapping using spatially-distributed computing nodes across a dtn. In *2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 1–6. IEEE, 2016.
- [24] 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.

- [25] A. Oomes. Organization awareness in crisis management dynamic organigrams for more effective disaster response. *Proceedings of ISCRAM 2004*, pp. 63–68, 01 2004.
- [26] Jovilyn Therese 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, pp. 106–117, 04 2014.
- [27] Shohei Taga, Tomofumi Matsuzawa, Munehiro Takimoto, and Yasushi Kamabayashi. Multi-agent base evacuation support system using manet. In Ngoc Thanh Nguyen, Elias Pimenidis, Zaheer Khan, and Bogdan Trawiński, editors, *Computational Collective Intelligence*, pp. 445–454, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [28] Vania Campos, Renata Bandeira, and Adriano Bandeira. A method for evacuation route planning in disaster situations. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, pp. 503–512, 2012. Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, September 2012, Paris.
- [29] Takehiro Tsunemine, Eisuke Kadokawa, Yuji Ueda, Junya Fukumoto, Tomotaka Wada, Kazuhiro Ohtsuki, and Hiromi Okada. Emergency urgent communications for searching evacuation route in a local disaster. In *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 1196–1200, 2008.
- [30] S Fitrianie and LJM Rothkrantz. Dynamic routing during disaster events. In LA Palen, T Comes, M Buscher, and AL Hughes, editors, *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, pp. 1–9. ISCRAM, 2015. Harvest; ISCRAM 2015, Kristiansand, Norway ; Conference date: 24-05-2015 Through 27-05-2015.

- [31] Zeyu Zhang, Hangxin Liu, Ziyuan Jiao, Yixin Zhu, and Song-Chun Zhu. Congestion-aware evacuation routing using augmented reality devices. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2798–2804, 2020.
- [32] Nobuhisa Komatsu, Masahiro Sasabe, Jun Kawahara, and Shoji Kasahara. Automatic evacuation guiding scheme based on implicit interactions between evacuees and their mobile nodes. *GeoInformatica*, Vol. 22, No. 1, pp. 127–141, 2018.
- [33] Zhiyong Wang and Sisi Zlatanova. Safe route determination for first responders in the presence of moving obstacles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 1044–1053, 2020.
- [34] Panchalee Praneetpholkrang and Sarunya Kanjanawattana. A novel approach for determining shelter location-allocation in humanitarian relief logistics. *International Journal of Knowledge and Systems Science*, Vol. 12, pp. 52–68, 04 2021.
- [35] A Esposito Amideo, Maria Paola Scaparra, and Kathy Kotiadis. Optimising shelter location and evacuation routing operations: The critical issues. *European Journal of Operational Research*, Vol. 279, No. 2, pp. 279–295, 2019.
- [36] Manuela Nappi and João Souza. Disaster management: hierarchical structuring criteria for selection and location of temporary shelters. *Natural Hazards*, Vol. 75, , 02 2015.
- [37] Manuela Nappi, Vanessa Nappi, and João Souza. Multi-criteria decision model for the selection and location of temporary shelters in disaster management. *Journal of International Humanitarian Action*, Vol. 4, , 12 2019.
- [38] Sunarin Chanta and Ornurai Sangsawang. Shelter-site selection during flood disaster. *Lect. Notes Manag. Sci*, Vol. 4, pp. 282–288, 2012.

- [39] Aoife Lillian Elizabeth Hunt. *Simulating hospital evacuation*. PhD thesis, University of Greenwich, 2016.
- [40] Julius Bañgate, Julie Dugdale, Carole Adam, and Elise Beck. A review on the influence of social attachment on human mobility during crises. 05 2017.
- [41] Fumiyasu Makinoshima, Fumihiko Imamura, and Yoshi Abe. Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 83, pp. 36–50, 2018.
- [42] Hao Chu, Jia Yu, Jiahong Wen, Min Yi, and Yun Chen. Emergency evacuation simulation and management optimization in urban residential communities. *Sustainability*, Vol. 11, p. 795, 02 2019.
- [43] Hyun-Rok Lee and Taesik Lee. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *European Journal of Operational Research*, Vol. 291, No. 1, pp. 296–308, 2021.
- [44] 山本佳世子. 災害対策および感染症対策における位置情報の利活用と課題. *計画行政*, Vol. 44, No. 3, pp. 57–62, 2021.
- [45] 三宅陽一郎, 清田陽司, 柴崎亮介. 特集:「スマートシティと ai の新展開」特集「スマートシティと ai の新展開」にあたって. *人工知能*, Vol. 37, No. 4, pp. 401–403, 2022.
- [46] 竹口幸志ほか. スマートシティ施策の比較:「個別分野注力型」と「共創型まちづくり」の分析. *鳴門教育大学研究紀要*, Vol. 36, pp. 312–323, 2021.
- [47] 並木志乃, 越塚登. 地域の課題解決と共助を支援するネットワークの構築. *情報学研究: 学環: 東京大学大学院情報学環紀要*, Vol. 102, pp. 1–20, 2022.
- [48] 内閣府. 首都直下地震の被害想定と避難者・帰宅困難者対策の概要について. available online from https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/1/pdf/shiryoku_2.pdf (accessed 2024-1-30).

- [49] 中央防災会議. 首都直下地震避難対策等専門調査会報告. available online from <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/siry03.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [50] 内閣府. 帰宅行動シミュレーション結果について. available online from <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/sanko03.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [51] Hongquan Song, Xuejun Liu, Xingguo Zhang, and Jiapei Hu. Real-time monitoring for crowd counting using video surveillance and gis. In *2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, pp. 1–4, 2012.
- [52] Tomohiro Nishimura, Takamasa Higuchi, Hirozumi Yamaguchi, and Teruo Higashino. Detecting smoothness of pedestrian flows by participatory sensing with mobile phones. pp. 15–18, 09 2014.
- [53] Jens Weppner and Paul Lukowicz. Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones. pp. 193–200, 03 2013.
- [54] Jens Weppner, Benjamin Bischke, and Paul Lukowicz. Monitoring crowd condition in public spaces by tracking mobile consumer devices with wifi interface. pp. 1363–1371, 09 2016.
- [55] Antoni Chan, John Liang, and Nuno Vasconcelos. Privacy preserving crowd monitoring: Counting people without people models or tracking. 06 2008.
- [56] 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. *The Second International Workshop on Smart Sensing Systems (IWSSS' 17)*, 8 2017.
- [57] Kazuhito Umeki, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Real-time congestion estimation in sightseeing spots with ble

- devices. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 430–432, 2018.
- [58] Yuki Kasai, Masahiro Sasabe, and Shoji Kasahara. 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, , 10 2017.
- [59] 廣井悠, 大森高樹, 新海仁. 大都市避難シミュレーションの構築と混雑危険度の提案. *日本地震工学会論文集*, Vol. 16, No. 5, pp. 111–126, 2016.
- [60] Gen Chen and Jiawan Zhang. Applying artificial intelligence and deep belief network to predict traffic congestion evacuation performance in smart cities. *Applied Soft Computing*, Vol. 121, p. 108692, 2022.
- [61] Leonardo Bellocchi and Nikolas Geroliminis. Unraveling reaction-diffusion-like dynamics in urban congestion propagation: Insights from a large-scale road network. *Scientific Reports*, Vol. 10, , 03 2020.
- [62] Shigeo Tatsuki. Old age, disability, and the tohoku-oki earthquake. *Earthquake Spectra*, Vol. 29, pp. S403–S432, 03 2013.
- [63] 厚生労働省. 高齢者・障害者等のような配慮者に関する防災と福祉の連携について. <https://www.mhlw.go.jp/content/12300000/001075647.pdf>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [64] Joseph A Califano Jr. The aging of america: Questions for the four-generation society. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, Vol. 438, No. 1, pp. 96–107, 1978.
- [65] Eleni Kanasi, Srinivas Ayilavarapu, and Judith Jones. The aging population: demographics and the biology of aging. *Periodontology 2000*, Vol. 72, pp. 13–18, 10 2016.

- [66] T. V. Ha and D. B. Hoang. Toward an active aging society: An it model to engage the aging population. In *2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 375–380, 2019.
- [67] Productivity Commission: An Ageing Australia Preparing for the Future. available online from <https://www.pc.gov.au/research/completed/ageing-australia/ageing-australia-overview.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [68] 内閣府. 令和 5 年度版高齢社会白書 高齢化の状況. available online from https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/s1_1_1.html (accessed 2024-1-30).
- [69] 内閣府: 避難行動要支援者の避難行動支援に関する取組指針の改定 (令和 3 年 5 月) . available online from <https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagyousei/youengosya/r3/pdf/shishin0304.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [70] Lisa C McGuire, Earl S Ford, and Catherine A Okoro. Natural disasters and older us adults with disabilities: implications for evacuation. *Disasters*, Vol. 31, No. 1, pp. 49–56, 2007.
- [71] Kohei Arai and Tran Xuan Sang. Decision making and emergency communication system in rescue simulation for people with disabilities. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 3, pp. 77–85, 2013.
- [72] Tran Xuan Sang. Multi-criteria decision making and task allocation in multi-agent based rescue simulation. *Japan Graduate School of Science and Engineering, Saga University, Japan*, 2013.
- [73] Jeongin Koo, Yong Seog Kim, Byung-In Kim, and Keith M Christensen. A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-

- rise building evacuation. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 2, pp. 408–417, 2013.
- [74] Jeongin Koo, Yong Seog Kim, and Byung-In Kim. Estimating the impact of residents with disabilities on the evacuation in a high-rise building: A simulation study. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 24, pp. 71–83, 2012.
- [75] KM Christensen, Mohammad Sadra Sharifi, and Anthony Chen. Considering individuals with disabilities in a building evacuation: An agent-based simulation study. In *92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*, pp. 11–13, 2013.
- [76] Keith Christensen and Yuya Sasaki. Agent-based emergency evacuation simulation with individuals with disabilities in the population. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 11, No. 3, p. 9, 2008.
- [77] Shih-Kai Huang, Michael K Lindell, Carla S Prater, Hao-Che Wu, and Laura K Siebeneck. Household evacuation decision making in response to hurricane ike. *Natural Hazards Review*, Vol. 13, No. 4, pp. 283–296, 2012.
- [78] Maryia Markhvida, Brian Walsh, Stephane Hallegatte, and Jack W Baker. Well-being loss: a comprehensive metric for household disaster resilience. 2019.
- [79] Anthony R Mawson. Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster. *Psychiatry*, Vol. 68, No. 2, pp. 95–113, 2005.
- [80] S.E. Taylor. Affiliation and stress. *The Oxford Handbook of Stress, Health, and Coping*, 01 2012.
- [81] Binu Jacob, Anthony Mawson, Marinelle Payton, and John Guignard. Disaster mythology and fact: Hurricane katrina and social attachment. *Public health reports (Washington, D.C. : 1974)*, Vol. 123, pp. 555–66, 09 2008.

- [82] Arif Mohaimin Sadri, Satish V Ukkusuri, and Md Ashraf Ahmed. Review of social influence in crisis communications and evacuation decision-making. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, Vol. 9, p. 100325, 2021.
- [83] Konstantinos Katzilieris, Eleni I. Vlahogianni, and Haizhong Wang. Evacuation behavior of affected individuals and households in response to the 2018 attica wildfires: From empirical data to models. *Safety Science*, Vol. 153, p. 105799, 2022.
- [84] Nicole Dash and Hugh Gladwin. Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household. *Natural hazards review*, Vol. 8, No. 3, pp. 69–77, 2007.
- [85] Samiul Hasan, Satish Ukkusuri, Hugh Gladwin, and Pamela Murray-Tuite. Behavioral model to understand household-level hurricane evacuation decision making. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 5, pp. 341–348, 2011.
- [86] Jia Liu, Yun Chen, and Yong Chen. Emergency and disaster management–crowd evacuation research. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 21, p. 100191, 12 2020.
- [87] Milad Haghani, Majid Sarvi, Zahra Shahhoseini, and Maik Boltes. Dynamics of social groups’ decision-making in evacuations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 104, pp. 135–157, 07 2019.
- [88] Wei Xie, E.W.M. Lee, Tao Li, Meng Shi, Joe Ruifeng Cao, and Yuchun Zhang. A study of group effects in pedestrian crowd evacuation: Experiments, modelling and simulation. *Safety Science*, Vol. 133, , 10 2020.
- [89] Sirui Liu, Pamela Murray-Tuite, and Lisa Schweitzer. Analysis of child pick-up during daily routines and for daytime no-notice evacuations. *Transportation research part A: policy and practice*, Vol. 46, No. 1, pp. 48–67, 2012.

- [90] Sirui Liu, Pamela Murray-Tuite, and Lisa Schweitzer. Incorporating household gathering and mode decisions in large-scale no-notice evacuation modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 107–122, 2014.
- [91] Pamela Murray-Tuite and Hani Mahmassani. Model of household trip-chain sequencing in emergency evacuation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1831, , 08 2003.
- [92] Yi Li, Chunxia Lu, and Jiangang Jin. Simulation of a pediatric hospital in evacuation considering groups. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 107, p. 102150, 2021.
- [93] 内閣府防災情報のページ. 防災 qa. <https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h20/11/question.html>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [94] Sendai City. Where is my refuge area(evacuation centers)? <http://www.city.sendai.jp/koryu/foreignlanguage/en/refugearea/index.html>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [95] Iwate Prefecture. What should we do when a disaster occurs? https://www.pref.iwate.jp/kenkei/_res/projects/project_kenkei/_page_/003/000/028/s_saigai_english.pdf. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [96] Nagasaki City. Disaster prevention. <https://www.city.nagasaki.lg.jp/kokusai/930000/933000/60208093/p029486.html>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [97] Minato City. Home evacuation guidebook for use in an emergency. https://www.city.minato.tokyo.jp/azabukyoudou/bousai-anzen/bousai/documents/minatokuazabubousai_en.pdf. [Available online; accessed 2024-1-30].

- [98] Osaka City. A guide for living in osaka/preparing for accidents and emergencies. https://www.city.osaka.lg.jp/contents/wdu020/enjoy/en/content_a.html. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [99] Habitat for Humanity. Family evacuation plan habitat ready: Disaster preparedness for homeowners. <https://www.habitat.org/our-work/disaster-response/disaster-preparedness-homeowners/family-evacuation-plan>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [100] Mineo Takai, Yasunori Owada, and Kaoru Seki. A comparative study on network simulators for its simulation ieee802. 11 medium access control (mac) models. In *16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and ServicesITS AmericaERTICOITS Japan, 2009*.
- [101] Mineo Takai, Jay Martin, Shigeru Kaneda, and Taka Maeno. Scenargie as a network simulator and beyond. *Journal of Information Processing*, Vol. 27, pp. 2–9, 2019.
- [102] Richard W Bohannon and A Williams Andrews. Normal walking speed: a descriptive meta-analysis. *Physiotherapy*, Vol. 97, No. 3, pp. 182–189, 2011.
- [103] Lakshmi Devi Vanumu, K Ramachandra Rao, and Geetam Tiwari. Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review. *European transport research review*, Vol. 9, pp. 1–13, 2017.
- [104] 京都新聞, 社説: 相次ぐ祭り中止 疫病退散へ雌伏の時だ 2020年4月23日. <https://www.kyoto-np.co.jp/articles/-/228391>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [105] 毎日新聞, 祇園祭の山鉾巡行、58年ぶり中止 京の夏に響かぬ「コンコンチキチン」の音 2020年4月20日. <https://mainichi.jp/articles/20200420/k00/00m/040/125000c>. [Available online; accessed 2024-1-30].

- [106] 朝日新聞, 京都・祇園祭の山鉾巡行が中止へ 感染拡大で 58 年ぶり 2020 年 4 月 17 日. <https://www.asahi.com/articles/ASN4K413KN4KPLZB00B.html>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [107] 日経新聞, 京都・祇園祭、山鉾巡行中止へ 感染拡大防止で 2020 年 4 月 17 日. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZ058168340X10C20A4000000>. [Available online; accessed 2024-1-30].
- [108] 千葉県. 千葉県 帰宅困難者・滞留者対策に関する基本的指針. available online from <https://www.pref.chiba.lg.jp/bousai/saigaitaisaku/kitaku-shien/documents/kihontekishishin.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [109] 京都市. 京都市観光調査総合調査 令和元年. available online from <https://www.city.kyoto.lg.jp/sankan/cmsfiles/contents/0000271/271655/honsatu.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [110] Statics Bureau of Japan(Japanese). available online from <https://www.stat.go.jp/data/jinsui/pdf/202001.pdf> (accessed 2024-1-30).
- [111] 森下朔, 水口竜一, 金井純子, 馬場俊孝. 要介護者の避難行動速度. 自然災害科学 J.SENDS, pp. 397–406, 2019.
- [112] Erick Mas, Anawat Suppasri, Fumihiko Imamura, and Shunichi Koshimura. Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 34, No. 1, pp. 41–57, 2012.
- [113] Nam Yi Yun and Masanori Hamada. Evacuation behaviors in the 2011 great east japan earthquake. *Journal of Disaster Research*, Vol. 7, pp. 458–467, 08 2012.
- [114] Michael Lindell, Carla Prater, Chris Gregg, Emma Apatu, Shih-Kai Huang, and H. Wu. Households' immediate responses to the 2009 american samoa earth-

quake and tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 12, pp. 328–340, 06 2015.

[115] Alexandra Buylova, Chen Chen, Lori A Cramer, Haizhong Wang, and Daniel T Cox. Household risk perceptions and evacuation intentions in earthquake and tsunami in a cascadia subduction zone. *International journal of disaster risk reduction*, Vol. 44, p. 101442, 2020.

[116] Nobuo Mimura, Kazuya Yasuhara, Saeki Kawagoe, Hiromune Yokoki, and So Kazama. Damage from the great east japan earthquake and tsunami - a quick report. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 16, pp. 803–818, 10 2011.

[117] 奥田博子. 在宅難病療養者とその家族の災害対策. *保健医療科学*, Vol. 70, No. 5, pp. 488–494, 2021.

研究業績

本論文に関する業績

学術論文誌

1. Tomoki Tanaka, Yuki Matsuda, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto: Evacuation Shelter Decision Method Considering Non-cooperative Evacuees to Support the Disaster Weak, Sustainability, Vol.13, No.9, p.5106, May. 2021.
－ 5 章に対応
2. Kazuhito Umeki, Tomoki Tanaka, Yugo Nakamura, Manato Fujimoto, Teruhiro Mizumoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto: Large-scale Evacuation Shelter Selection Method Iterations of PEdestrian Simulations with Dynamic Congestion Reproduction, IEEE Access, Vol.10, pp.89387-89401, August. 2022.
－ 4 章に対応
3. Tomoki Tanaka, Yuki Matsuda, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto: The Effectiveness of Shelter Selection for Gathering Family Members, IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics: SYSTEMS(査読中).
－ 6 章に対応

国内会議

1. 田中智基, 松田裕貴, 藤本まなと, 諏訪博彦, 安本慶一, “被災者行動の不確実性を考慮した災害弱者のための避難所決定手法の提案,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2020) シンポジウム論文集, pp. 778-784, オンライン開催, 2020年6月.
－ 5 章に対応

2. 田中智基，松田裕貴，諏訪博彦，安本慶一，“世帯構成員の集合を考慮した避難所決定手法の検討，”マルチメディア，分散，協調とモバイル（DI-COMO2023）シンポジウム論文集，，2023年7月.

－ 6章に対応