

博士論文

避難所に着目した  
効率的な避難誘導と運営計画に関する研究

清水 仁

2022年3月10日

奈良先端科学技術大学院大学  
先端科学技術研究科 情報科学領域

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情報科学領域に  
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

清水 仁

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)

諏訪 博彦 准教授   (副指導教員)

# 避難所に着目した 効率的な避難誘導と運営計画に関する研究\*

清水 仁

## 内容梗概

災害の多い日本では、被災者の安全確保のために適切に避難所を提供することが重要である。しかし災害には地震、津波、台風など様々な種類と特性があり、事前に避難所の割当や運営方法を全て決定することは困難である。そこで近年発展したIoT 技術を活用し、被災状況に適応した避難誘導と運営計画を実現することが期待される。特にスマホの普及により被災者の位置情報取得や被災者への情報配信が現実的となった。ただしスマホは災害時に全被災者が利用可能とは限らないため、誘導指示を伝達する手段としては不完全と考えられる。そこで本研究では全被災者を誘導対象とすることを目指し、誘導の拠点として避難所に着目する。さらに災害対策の研究分野においては、災害発生直後の対応策と比較して復興期の検討が不十分であり、特に避難所を施設本来の用途で利用再開する際の困難が指摘されている。そのため本研究では、A：災害発生時に避難所に到着した被災者を、迅速に適切な避難所まで誘導する、B：復興期に避難所を集約および閉鎖するために、宿泊している被災者を移転させる、という2つの研究課題に取り組んだ。研究課題 A に関して、避難所に到着した被災者に対して、その避難所で受け入れるか別の避難所に向かうように指示を出す、という誘導手段を想定して、被災者個人を識別して誘導する個人誘導問題と、識別せずに誘導する集団誘導問題の2種類の問題設定を定式化した。これらの問題に対して、最小費用流を用いて移動時間または移動距離を最短にする割当手法を提案し、京都市街地を想定した人流シミュレーション実験を行い、提案手法が3つの評価指標（たらい回し回数、平均移動時間、避難完了時間）を既存手法より最大63%改善することを示した。研究課題 B に関して本論文では、避難所の運営にコストがかかり、避難所間の移動も被災者にコストが発生する、と

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻博士論文, NAIST-IS-DT2021019, 2022年3月10日.

いう状況を想定して、両コストの総和を最小化する避難所計画問題を定式化した。定式化の際には、被災者一人ずつに変数を割り振ると、変数の数が多大となりメモリ不足で計算不能となる課題が生じる。そこで、帰宅時刻が共通の被災者を同一のグループとして人数を表す変数を導入することで、被災者が3万人を超える場合でも高速に計算可能とした。また、過去の災害時のデータから推定した移転コストを用いて生駒市での地震を想定したシミュレーション実験を実施し、帰宅時刻を未知としたベースラインと比較して、帰宅時刻を既知として最適化した提案手法が、運営コストを約30%削減することを示した。

#### キーワード

災害シミュレーション, 整数線形計画問題, 避難所計画問題

# A Study on Efficient Evacuation Guidance and Operation Scheduling Focusing on Disaster Shelters\*

Hitoshi Shimizu

## Abstract

In Japan, where disasters occur frequently, it is important to provide appropriate shelters to ensure the safety of disaster evacuees. However, there are various types and characteristics of disasters, such as earthquakes, tsunamis, and typhoons, and it is difficult to determine in advance all the evacuation shelters and their operation methods. Therefore, it is expected to realize evacuation guidance and management plans adapted to the disaster situation by utilizing IoT technology that has been developed in recent years. In particular, the widespread use of smartphones has made it possible to acquire location information of disaster evacuees and distribute information to them. However, since smartphones are not always available to all evacuees at the time of a disaster, they are considered to be incomplete as a means of transmitting guidance instructions. In this study, I aim to provide guidance to all disaster evacuees and focus on evacuation shelters as a base for guidance. In addition, in the research field of disaster countermeasures, the study of the recovery period is insufficient compared to the countermeasures immediately after the occurrence of a disaster, and the difficulty in resuming the use of evacuation shelters for their original purpose has been pointed out. In this study, I addressed two research questions: (A) how to quickly guide evacuees who arrive at evacuation shelters to appropriate evacuation shelters, and (B) how to relocate evacuees who are staying at evacuation shelters in order to consolidate and close them during the recovery period. For research topic (A), I formulated two types of

---

\*Doctor's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT2021019, March 10, 2022.

problems: one is the individual guidance problem, in which individual evacuees are identified and guided, and the other is the group guidance problem, in which evacuees are guided without identification, assuming the guidance method of instructing evacuees who arrive at an evacuation shelter to accept them at that shelter or go to another shelter. I formulated two types of problem settings. For these problems, I proposed an allocation method that minimizes the travel time or distance using the minimum cost flow, and conducted a human flow simulation experiment in the urban area of Kyoto. The results showed that the proposed method improved the three evaluation indices (number of turnovers, average travel time, and evacuation completion time) by up to 63% over the existing method. For research topic (B), this paper formulates Evacuation Shelter Scheduling Problem that minimizes the sum of both costs, assuming a situation in which the operation of shelters is costly and the transportation between shelters is also costly to the evacuees. In the formulation, if variables are assigned to each disaster evacuee, the number of variables becomes so large that calculation becomes impossible due to lack of memory. To solve this problem, I introduced variables that represent the number of people in the same group of disaster evacuees who share the same time of return home, enabling high-speed calculations even when the number of disaster evacuees exceeds 30,000. In addition, simulation experiments were conducted for an earthquake in Ikoma City using relocation costs estimated from past disaster data, and it was shown that the proposed method, which was optimized with the return time known, reduced operating costs by about 30% compared to the baseline method with the return time unknown.

**Keywords:**

Disaster Simulation, Integer Linear Programming Problem, Evacuation Shelter Scheduling Problem

# 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

災害の多い日本では、被災者の安全確保のために適切に避難所を提供することが重要である。しかし災害には地震、津波、台風など様々な種類と特性があり、事前に避難所の割当や運営方法を全て決定することは困難である。そこで近年発展した IoT 技術を活用し、被災状況に適応した避難誘導と運営計画を実現することが期待される。特にスマホの普及により被災者の位置情報取得や被災者への情報配信が現実的となった。ただしスマホは災害時に全被災者が利用可能とは限らないため、誘導指示を伝達する手段としては不完全と考えられる。そこで本研究では全被災者を誘導対象とすることを目指し、誘導の拠点として避難所に着目する。

災害業務管理の研究は、対象となる段階によって 4 種類に分類できる：①軽減、②準備、③対応、④復興である。研究課題 A (3 章) は③対応に該当し、研究課題 B (4 章) は④対応に該当する。とくに災害時の④復興段階の研究は、軽減、準備、対応の各段階に比べてまだ不十分であり、今後必要とされる分野である [15, 2]。また、避難所を施設本来の用途で利用再開する際の困難も指摘されている [86]。そのため本研究では、A：災害発生時に避難所に到着した被災者を、迅速に適切な避難所まで誘導する、B：復興期に避難所を集約および閉鎖するために、宿泊している被災者を移転させる、という 2 つの研究課題に取り組んだ。

研究課題 A に関して、避難所に到着した被災者に対して、その避難所で受け入れられるか別の避難所に向かうように指示を出す、という誘導手段を想定して、被災者個人を識別して誘導する個人誘導問題と、識別せずに誘導する集団誘導問題の 2 種類の問題設定を定式化した。これらの問題に対して、最小費用流を用いて移動時間または移動距離を最短にする割当手法を提案し、京都市街地を想定した人流シミュレーション実験を行い、提案手法が 3 つの評価指標（たらい回し回数、平均移動時間、避難完了時間）を既存手法より最大 63% 改善することを示した。

研究課題 B に関して本論文では、避難所の運営にコストがかかり、避難所間の移動も被災者にコストが発生する、という状況を想定して、両コストの総和を最小化する避難所計画問題を定式化した。定式化の際には、被災者一人ずつに変数を割

り振ると、変数の数が多大となりメモリ不足で計算不能となる課題が生じる。そこで、帰宅時刻が共通の被災者を同一のグループとして人数を表す変数を導入することで、被災者が3万人を超える場合でも高速に計算可能とした。また、過去の災害時のデータから推定した移転コストを用いて生駒市での地震を想定したシミュレーション実験を実施し、帰宅時刻を未知としたベースラインと比較して、帰宅時刻を既知として最適化した提案手法が、運営コストを約30%削減することを示した。

## 1.2 避難場所と避難所、および二つの研究課題の関連性

日本では現在、おおまかに「緊急避難場所」と「避難所」の2種類の避難場所が指定されている。「緊急避難場所」は、災害の種類ごとに指定されており、災害の危険から緊急的に逃れるための場所である。一方、「避難所」は家屋の倒壊などにより自宅で生活できなくなった被災者が一定期間滞在するための場所である。

したがって、災害発生直後に被災者の自宅が危険にさらされた場合は、「緊急避難場所」に向かい、その後、自宅で生活できない状態になった場合には、「避難所」に向かうことが想定されている。「緊急避難場所」と「避難所」の両方に指定されている施設も多いが、2013年（平成25年）に改正された災害対策基本法は、明確に区別して市町村長が指定することを要求している<sup>1</sup>。

---

<sup>1</sup>災害対策基本法等の一部を改正する法律（平成25年法律第54号）



	洪水	土砂 災害	高潮	地震	津波	大規模な 火事	内水 氾濫	火山 現象
指定緊急避難場所 (箇所)	68,961	64,141	20,823	82,798	37,051	39,497	37,569	10,003
想定収容人数 (万人)	12,420	13,419	5,866	23,624	8,381	16,569	7,427	2,280

表 1.1: 指定緊急避難場所の指定状況. 令和 3 年版防災白書より引用.

西暦	和暦	指定避難所数
2014年	平成26年	48,014
2015年	平成27年	54,354
2016年	平成28年	65,330
2017年	平成29年	70,947
2018年	平成30年	75,895
2019年	令和元年	78,243
2020年	令和2年	79,281

表 1.2: 指定緊急避難場所の指定状況. 平成 27 年版から令和 3 年版までの防災白書より引用.

緊急避難場所は表 1.1 のように、災害の種別ごとに指定されている。大規模な火事に対しては、日本の人口を超える収容人数が確保されている。このように収容人数が十分に大きい場合には、災害から安全を確保して身を守るために、緊急避難場所への避難時間が短いことが重要である。たとえば津波が発生したときに高台にある緊急避難場所に避難する際は、津波到着までの時間が限られているためなるべく短い移動時間であることが望ましい。一方、避難所への避難については、災害後ある程度安全が確保されてから移動することを仮定できるため、多少避難時間が長くても危険は大きくならない。

しかし災害の副次的な被害として、災害のために交通機関が停止して、いわゆる帰宅難民が発生する場合がある。帰宅難民は災害の危険から緊急的に逃れる必要はないが、当日中に自宅に到着することができないため、避難所での宿泊を希望することが想定される。この場合は、被災者は災害後に直接避難所に向かうことになる。表 1.2 のように、災害対策基本法が改正された 2013 年以降に避難所は増加しているものの、都市部や観光地では発生する被災者が住民の数を超えることが想定される。そして、定員を超える被災者が到着した場合には、避難所が被災者を受け入れることができなくなり、たらい回しが発生する。このときの課題を 3 章で検討する。

帰宅難民は自宅が倒壊したわけではないので、交通機関が復旧すると生活可能な

自宅に帰宅することが期待される。一方で、家屋が倒壊した被災者については、避難所に一定期間滞在する場合がある。後者のように、避難所の被災者がある程度の長期に渡って滞在する場合の避難所運営についての課題を4章で検討する。

以上のように、3章で検討する避難所割当問題と4章で検討する避難所計画問題では、その対象となる被災者が異なる。そのため、3章で提案する避難所割当を実行した後に、4章で提案する避難所計画を実行する、というケースは一見すると考えにくいと思われる。しかし、2つの問題を統一的に検討できるかについては、5.5章で再度考察する。

### 1.3 研究課題 A: 避難所割当問題の背景

2011年3月に発生した東日本大震災<sup>2</sup>では交通機関が停止する等の影響により多くの帰宅困難者が発生した。東京都外から都内へ通勤・通学する推計人数は2020年で290万人にも上り[93]、電車が停止した場合にはバス、路面電車、自動車などの手段では容量が不足して、災害発生当日に全員が帰宅することは困難となる。一般に大都市での災害発生時には混乱を避けるために「むやみに移動を開始しない」ことが推奨され[94]、滞在可能な待機場所がない帰宅困難者を一時滞在施設に収容する必要がある[95]。東日本大震災のときの首都圏の帰宅困難者は515万人と推計され[62]、都内1030施設が9万人以上の帰宅困難者を受け入れた[87]。

帰宅困難者対策が必要になるのは、大都市圏に限定されない。たとえば秋田県では観光客等が災害発生時に無事に帰宅できるように、ガイドラインを作成している[69]。また京都市では1日当たり平均14万人の観光客と約24万人の通勤・通学者が訪れるため、最大約39万人の帰宅困難者が発生すると推定され[53]、一時滞留場所の確保などの対策が検討されている。長期滞在の観光客であれば宿泊施設への滞留が可能であるが、宿泊施設から離れて被災する場合や日帰客の場合には、避難所等の一時滞在施設に収容することが想定される。このように観光客が多数訪れる都市では、滞留旅客対策が重要となる。

しかし一時滞在施設の受入可能人数には限界があるため、その定員を超えないように避難所に被災者を割り当てることは、重要な課題である。これまで静的な人口

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/2011\\_T%C5%8Dhoku\\_earthquake\\_and\\_tsunami](https://en.wikipedia.org/wiki/2011_T%C5%8Dhoku_earthquake_and_tsunami)

分布に基づいて避難所が整備されてきた。しかし人口分布は昼夜やイベントで大きく変化する。この昼夜人口のギャップによって、東日本大震災時の東京では大量の帰宅困難者が避難所の収容人数を大幅に上回り、収容しきれずに別の避難所へ避難する、いわゆる「たらい回し」が発生している。ここで、本論文では「たらい回し」を、被災者が到着した避難所で収容されずに異なる避難所に誘導されること、と定義する。また、たらい回しの回数は、同一被災者について複数回発生した場合、発生の都度カウントするものとする。

災害によって避難すべき住民は異なり避難所の被災状況も異なる。そのため全ての状況を想定しつくすことは困難であり、事前に住所ごとに住民を避難所を割り当てるだけでは、たらい回しの発生を十分に抑制できない。しかし、スマートフォンの普及や人流計測技術の発展により、リアルタイムの人流の推定・予測は現実味を帯びてきている [43]。また個人の歩行速度も技術的に計測可能となっている [22, 3]。これらの計測技術で取得した災害時の人流に基づいて避難所割当を決定できれば、たらい回しの発生を抑制して被災者を効率的に避難所へ誘導することが可能となる。

これまでに、被災者をエージェントとしたマルチエージェントシミュレーションを用いて、たらい回しを回避する避難誘導を実現する試みがおこなわれてきた。既存研究 [66] では、携帯端末のアプリを通じて避難所の位置や経路を被災者個人に随時伝達することを想定する。そして避難所からあふれた被災者を別の避難所へ誘導する際に、空席を予約状態にすることでたらい回しを回避する。しかし既存手法には、被災者を逐次的に最近傍の避難所に割り当てるという性質から、必ずしも移動時間や移動距離について最適解を得られないという問題がある。また、被災者への誘導指示を伝達するために、災害発生後に通信網が利用可能であることと、被災者が携帯端末を所持していることを前提としている。

一方、災害発生後に通信網が利用不能になることを想定して、基地局に接続していない携帯端末で被災者を誘導する手法も提案されている [26]。この手法は、避難所までの道路の通行可否情報を被災者の携帯端末同士で交換することで誘導経路を推薦する。しかしこの手法も、被災者が携帯端末を所持していることを前提としており、携帯端末を所持していない被災者には適用できない。

これに対して本論文では、最小費用流問題のアルゴリズムを用いて移動距離また

は移動時間を最小にする割当を求める手法を提案する。提案手法では、被災者または避難所をノードに対応させ、移動距離または移動時間をエッジのコストに対応させた有向グラフを構成する。そして被災者の移動速度が時刻に依存せず一定という仮定の下で、避難所の定員という制約条件を満たす最小費用流を求めて全被災者を避難所に割り当てる。また、被災者への誘導指示を任意の地点で伝達できることを前提とせず、到着した避難所でのみ次に向かうべき避難所を指示する手段を検討する。この手段は、通信網と携帯端末が利用不能な状況でも実行可能であり、地方自治体等による多様な被災者を対象とした避難誘導に適していると考えられる。ただし、避難所で指示を伝達される前の被災者の行動を制御できずたらい回しを完全には回避できないため、発生回数の削減を目指す。

提案手法は問題を単純化したモデルでの最適解を求めるため、混雑による遅延や避難経路の選択等が性能に影響を与えられと考えられる。そこで提案手法で求めた割当に対応する誘導を人流シミュレーション上で実行し、平均移動時間等の評価指標について既存手法と比較評価する。

## 1.4 研究課題 B: 避難所計画問題の背景

自然災害時に緊急に必要な避難所は、被災者の方々の避難の負担を最小限にするように設置される。前節で説明したように、避難所とは、災害時に被災者が一時的に宿泊し、安全を確保するための施設である。東日本大震災では 47 万人以上が避難を余儀なくされたため、日本の各都市には多くの避難所が設置されている。例えば、東京都では、避難地域から 3km 以内に避難所を整備するというガイドラインを策定した。その結果、2014 年から 2020 年までに避難所の数は、日本全国で 48,014 箇所から 79,281 箇所へと 65 % 増加した<sup>3</sup>。また近年は COVID-19 の影響で、多くの地方自治体がソーシャルディスタンスを考慮 [34] して、避難所の定員を減らしている。このような状況では被災者が避難する際の困難を避けるために、避難所の数をさらに増やす必要がある。

しかし、災害の規模が大きくなればなるほど、避難所の運営には二次的な負担もかかる。例えば、学校が避難所になっている場合、授業が再開されても被災者が

<sup>3</sup><http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/index.html>

残っていると教育活動に支障をきたす。また、避難所での生活が長引けば長引くほど、被災者の生活再建や震災からの回復が遅れる。避難所運営の負担は、金額に換算することができる。大塚ら [83] は、阪神・淡路大震災の際に避難所となった施設の賃貸料をもとに、避難所の運営費は 106.6 億円だったと試算した。<sup>4</sup> 仮設住宅への入居などが進んで被災者数が減少した場合、残った被災者を少数の避難所に集約して運営コストを削減することも可能である。しかし中平 [86] の報告によると、残った被災者の移転は、自宅近くの避難所を離れる負担や、授業再開の障害とされて非協力的な人がいたことなどから困難であった。すなわち、避難所間の移動は、被災者に大きな精神的負担を強いることになる。

このような状況下で、被災者と他の住民の双方にとって受け入れ可能な解決策を見つけるためには、全員が帰宅するまでの累積コストを考慮する必要がある。そこで本論文では、FLP (Facility Location Problem: 施設配置問題) [8, 12] を時間的に拡張し、被災者が全員帰宅するまでの間、避難所の運営コストと被災者の移動コストを最小化するように被災者を避難所に割り当てる「避難所計画問題」を定式化する。この二次計画問題を直接解くことは困難であるため 0-1 整数計画問題に変換する。この問題を解くことで、どの避難所を閉鎖し、どの避難所に残りの被災者を移動させるかを決定し、被災者が徐々に帰宅する際のコストを最小化できる。また、このような定式化では、実際には支払いが行われていないため、過去のデータから移転コストを計算することは困難である。この問題を解決するために実際の災害時の被災者数と避難所数に基づいて移転コストを推定する方法を提案する。そして推定した移動コストを用いて、阪神大震災と生駒市の震災の事例に対して、シミュレーション実験によって提案手法の効果を評価する。さらに最適化の結果を分析することで、新規の避難所の位置や規模を決定するための有用な知見をも得られると考えられる。

---

<sup>4</sup>1995 年 1 月 17 日、兵庫県南部を震源とするマグニチュード 6.9 の大地震が発生した。神戸市を中心に大きな被害を受けた。約 300 件の火災が発生し、6400 人以上の方が亡くなった。 [https://en.wikipedia.org/wiki/Great\\_Hanshin\\_earthquake](https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Hanshin_earthquake) (accessed June 14, 2021).

## 第2章 関連研究

避難所への避難誘導や運営計画は、災害の種類、避難手段、目的関数や制約条件の種類、貢献の種類（理論的、応用的）など、災害業務管理（DOM）の様々な側面で研究されてきた [4]。例えば、避難所の適合性 [23]、避難所や避難経路の火災リスク [1, 10]。ペットや高齢者の利便性 [24]、などが災害対策の対象として評価されている。

### 2.1 組合せ最適化による避難所割当

ネットワーク上での最速避難問題は、Ford ら [13] が最初に解法を提案して以来、長年検討されてきた。当初提案された手法では、道路容量を考慮して時間拡大ネットワークを構成する。しかしこの手法には、大規模な道路網に適用した場合に計算時間が多大となるという課題がある。そのため加藤らは、この問題に対して近似解法を提案した [41, 89]。また笹らは同様の問題に対して、ボトルネックに着目して簡便な解を求める手法を提案した [55]。これらの手法は、被災者が一定速度で移動可能な道路の交通量を制約条件として、避難完了時間を最速とするために、何人の被災者がどの経路でどの避難所に避難するべきかを計算できる。しかし、移動すべき経路を全被災者に伝達することは困難である。本論文3章の避難誘導では、避難所において避難所のみを伝達する、という伝達方法に限定するため、問題設定が異なる。

瀧澤らは避難所の割当問題に ZDD [30] を適用し、想定被災者数と避難所の収容者数を考慮して、事前に住所を避難所に割り当てる方法を提案した [42, 70]。この手法を用いると、避難経路が交差しない等の制約を満たす割当を求めることができる。しかし、観光地などで住民以外の被災者が多く存在して人数が変動する状況は考慮されていない。

一方、人数が時々刻々変動する観光客を対象とした避難所割当問題について、梅木らは最寄の避難所から逐次的に割り当てる、というヒューリスティック手法で良好な結果が得られることを示した [66]。しかしこの手法は、被災者を逐次的に最近傍の避難所に割り当てるという性質から、十分な性能が得られない場合がある。第

3章の避難所割当問題の設定に適用した場合の [66] の手法については、3.3 節で説明する。

## 2.2 整数計画問題による避難所割当

本論文の3章および4章と同様に、避難所割当を整数計画問題として扱う研究はこれまでもあり、様々な定式化が提案されている。Sherali ら [36] は、避難計画問題 (EPM: evacuation planning model) を非線形混合整数計画問題として定式化して、厳密解法とヒューリスティック解法の両方を提案した。避難所の定員制約を満たすように避難する時間を最小化することを目的としている。しかし、避難所の運営コストは考慮しておらず、目的関数に含まれていない。

Swamy ら [39] はバス避難問題 (BEP: Bus Evacuation Problem) を計画のフレームワークとして再定義し、ニューヨーク市を舞台にハリケーンからの避難をシミュレーションした。Chen ら [7] は三段階階層配置モデルを提案して、時間発展を考慮しながら避難効率と予算制約のトレードオフを検討した。4章の避難所計画問題は Chen ら [7] の研究を拡張したものになっており、被災者の減少を考慮しつつ、被災者の負担の大きさを過去の災害から推定し、運営コストとのトレードオフを自動的に調整する。

## 2.3 最小費用流による割当問題の解法

有向グラフ  $G = (V, E)$  において、各辺  $e \in E$  の容量  $u_e > 0$  およびコスト  $c_e$  が与えられ、各頂点  $v \in V$  の流出量  $b_v$  が与えられたとき、総費用  $\sum_{e \in E} c_e x_e$  が最小となる各辺のフロー  $x_e$  を求める問題を、最小費用流問題とよぶ [72]。ただし、容量と流出量について以下の制約条件を満たすものとする。

$$\begin{aligned} \sum_{v \text{ から流出する } e} x_e - \sum_{v \text{ へ流入する } e} x_e &= b_v, & v \in V, \\ 0 \leq x_e &\leq u_e, & e \in E. \end{aligned}$$

最小費用流問題を効率的に解くアルゴリズムとして、これまでに容量スケールリング法、負閉路消去、最短路繰り返し法などが知られている。[72] では、割当問題を最



小費用流問題に変換して効率的に解く方法が紹介されている。3章の提案手法は、この手法を避難所割当問題に適用する。

## 2.4 施設配置問題

施設配置問題 (FLP: facility location problem) は、移動コストと運営コストの和を最小化する問題として定式化されて研究されてきた [45, 19, 8, 12]。施設配置問題は、組合せ最適化の基本的な問題の一種であり、利用者の需要を満たすように施設の候補地から設置位置を決定する。FLP には、容量制約がある問題 (CFLP: capacitated facility location problem)[35, 12, 25] と容量制約がない問題 (UFLP: uncapacitated facility location problem)[46] の2種類がある。本研究の4章で提案する Essp で  $T = 1$  とすると、CFLP に一致する。

$N$  を被災者集合とする。  $M$  を避難所集合とする。全ての被災者はいずれかの避難所に避難する。避難所  $m$  の定員を  $C_m$  とする。全被災者が収容できるように、 $\sum_{m \in M} C_m \geq |N|$  とする。  $d_{mn}$  を被災者  $n$  が避難所  $m$  に避難する際の避難コストとする。  $f_m$  を避難所  $m$  を運営する際の運営コストとする。本来の用途として利用できない機会損失に対応させるため、運営コストは収容する被災者数に依存しないと仮定する。

ここで、被災者  $n$  が避難所  $m$  に収容されることを示す指示変数  $x_{mn}$  を導入する。また、避難所  $m$  を運営することを示す指示変数  $y_m$  を導入する。このとき、避難コスト  $\sum_{m \in M} \sum_{n \in N} d_{mn} x_{mn}$  と運営コストの和  $\sum_{m \in M} f_m y_m$  を最小化する割当  $x_{mn}$  と  $y_m$  を求める問題が施設配置問題 (FLP) である。 [8]

施設配置問題 (FLP)

$$\text{Minimize} \quad \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} d_{mn} x_{mn} + \sum_{m \in M} f_m y_m \quad (2.4.1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N} x_{mn} \leq C_m y_m, \forall m \quad (2.4.2)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mn} = 1, \forall n \quad (2.4.3)$$

$$x_{mn}, y_m \in \{0, 1\} \quad (2.4.4)$$

FLP の研究の歴史は長く、Weber [45] や Hotelling [19] まで遡ることができる。FLP の応用範囲は広く、店舗や工場や倉庫などの位置を決定する問題が典型的であるが、病院や消防署や学校やゴミ焼却場の配置などにも適用される [12]。また文書要約のタスクに用いられる例もある [60]。

時間的に拡張された FLP もこれまでに提案されていて、たとえば動的施設配置問題 (DFLP: dynamic facility location problem) では変動する需要を扱う [44, 31]。また、需要以外の要素が確率的にふるまう問題も検討されている [33, 9]。多段階無容量制約施設配置問題 (MSUFLP: multi-stage uncapacitated facility location problem) は、多段階に施設を経由する経路を検討するためのモデルを定式化した問題である [25]。避難所の配置についてもいくつかの数理モデル [41, 42] が提案されているが、別の避難所に被災者が移転するコストを考慮したモデルは、本研究の 4 章で提案する避難所計画問題 Essp [37] が初めてである。

## 2.5 マルチエージェントシステムにおける整数計画問題

マルチエージェントシミュレーションは、防災の研究でよく使われる [28]。本論文の 3 章で用いた人流シミュレータはマルチエージェントシミュレーションの典型例であるが、4 章の避難所計画問題 Essp も、一種のマルチエージェントシミュレーションの最適化問題とみなせる。一般に、マルチエージェントの最適化問題は、整数線形計画 (ILP) 問題に変換できる。例えば、マルチエージェント経路探索 (MAPF) 問題 [38] では、問題を ILP に変換することで解決する手法 [49] が提案された。このような変換により、「最大/平均移動時間」「最大/平均移動距離」の 4 種類の目的関数を最小化できる。しかし [49] には、Essp の個人ベースの定式化と同様に、変数が個々の動きの軌跡に対応しているため、エージェントの数が多いほど計算時間が長くなるという問題がある。

本研究の Escp の定式化は、個人ベースの移動をグループベースの移動に変換して計算時間を短縮する。そのため、様々なマルチエージェント最適化問題へ適用範

囲を拡大できる可能性がある。

## 2.6 線形計画問題のソルバー

今から 70 年程前に線形計画問題が誕生して以来、コンピュータの性能向上とアルゴリズムの改良に伴い、計算可能な問題の規模は拡大を続け [6]、応用範囲も広がっている。そのためこれまでに様々な汎用ソルバーが開発されてきた [64]。商用ソルバーとしては本研究で用いた Gurobi[17] だけでなく、CPLEX[11] もよく用いられる。オープンソースのソルバーとしては SCIP[16] がよく用いられる。

## 2.7 人流シミュレータ

これまでに多くの人流シミュレータが開発されており、商用の人流シミュレータ [40, 56] もある。また、歩行者機能が追加されたオープンソースの交通流シミュレータ SUMO[29] を、人流シミュレータとして用いることもできる。人流シミュレータの特徴として、空間的な粒度と時間的な粒度が重要である。また、空間の構造として、ネットワーク型の道路網 [48] を採用するか、メッシュ型の空間 [81] を採用するかによっても、用途が大きく異なってくる。

人流シミュレータの用途も多様であるが、本研究のような避難シミュレーションは主要な用途の一つである。大規模災害は発生頻度が低く、計測結果を利用することが難しいため、建物や都市の安全性をシミュレーションで評価する場合に利用される [75]。また、イベントの際の雑踏警備のためにも人流シミュレータが用いられる [67]。さらに、テーマパークなどの混雑した状況を分析するためにも人流シミュレータが利用される [79, 78]。近年は人流の計測技術の発達したため、より現実に近いシミュレーションを実現するためのデータ同化技術も開発されている [59, 77, 71, 84]。

## 2.8 スケジューリング問題

オペレーションズ・リサーチの分野では、最適なスケジュールの作成を目的として幅広い研究の蓄積がある [92]. スケジューリングは適用する分野ごとに個別の要件が必要であり、対象ごとに問題設定や定式化が異なるため、独自に発展してきた。たとえば病院の看護師の勤務表を作成する用途では、看護師のスキルや看護の質が重視され、ナーススケジューリングとして研究されている [85]. また、航空会社の乗務員のスケジューリング [51] では、勤務により乗務員の位置が変化するために連続して常務できるフライトの系列を見つけるように問題を分割するなどの工夫がなされる [47]. 本論文も避難所を対象としたスケジューリングを扱うため、一般的なスケジューリング問題の技術が適用できる [50]. それに加えて、避難所の運営に必要なとなる制約や考慮すべき目的関数を検討することが、既存のスケジューリング問題との差分となる。

### 第 3 章 避難所割当問題

本章では研究課題 A として、避難所割当問題について検討する。災害業務管理の中では③対応のフェーズに対応する。災害発生直後に被災者を避難所に割当て、避難所の定員オーバーによるたらい回しの発生を抑制することを目指す。1.3 節でも述べたように、本論文では「たらい回し」を、被災者が到着した避難所で収容されずに異なる避難所に誘導されること、と定義する。また、たらい回しの回数は、同一被災者について複数回発生した場合、発生の都度カウントするものとする。

#### 3.1 避難所割当問題の問題設定

本節では、[66] の問題設定を参考にして、避難所割当問題を定義する。論文中の記号の定義を表 3.1 に示す。

$N$  人の被災者と  $M$  個の避難所がある。各避難所には、定員  $C_m$  が設定されている。最終的に全被災者を避難所に収容できるように、 $\sum_m C_m \geq N$  とする。すなわち全被災者を収容できない  $\sum_m C_m < N$  の状況は本論文の検討対象外とする。各被災者には、最高速度  $v_n^{\max}$  が設定されている。避難所  $m$  から避難所  $m'$  までの

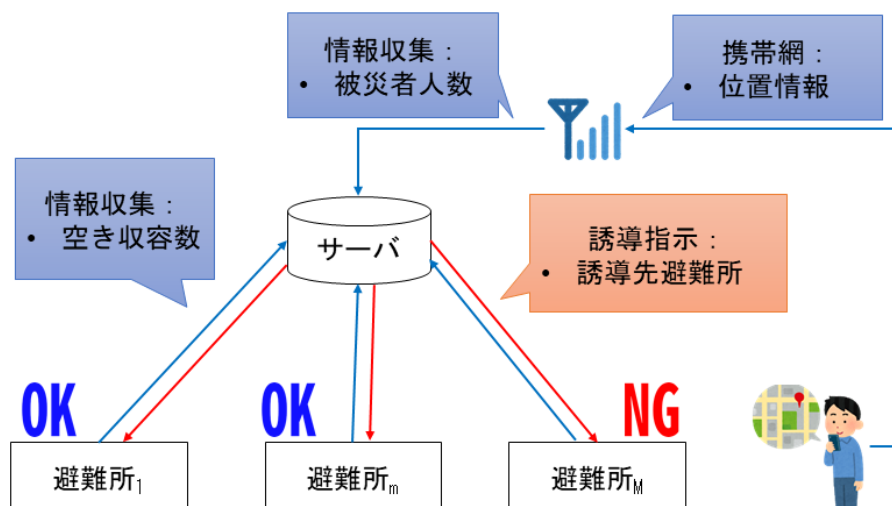


図 3.1: 提案システムの概要.

表 3.1: 避難所割当問題の記号の定義

記号	定義
$N$	被災者数: $n \in \{1, \dots, N\}$
$M$	避難所数: $m \in \{1, \dots, M\}$
$C_m$	避難所 $m$ の定員
$R_m$	避難所 $m$ に割当済みの被災者数
$I_m$	災害発生時に避難所 $m$ に向かう被災者集合
$i_m$	避難所 $m$ での被災者の到着順 $i_m \in \{1, \dots,  I_m \}$
$\tilde{m}(n)$	災害発生時に被災者 $n$ が向かう避難所
$v_t^n$	時刻 $t$ における被災者 $n$ の移動速度
$v_n^{\max}$	被災者 $n$ の最高速度
$\rho_t^n$	時刻 $t$ における被災者 $n$ の前方の人口密度
$\tau_n$	被災者 $n$ が避難所に到着するまでの移動時間
$d_{mm'}$	避難所 $m$ から避難所 $m'$ までの最短距離
$\ell_n$	被災者 $n$ が避難完了までに移動する距離
$x_{mm'}$	避難所 $m$ から避難所 $m'$ まで誘導する被災者数
$y_{\tilde{m}(n)m'}^n$	避難所 $m$ で被災者 $n$ を 避難所 $m'$ まで誘導することの指示変数
$z_{i_m m'}^m$	避難所 $m$ に $i_m$ 番目に到着した被災者を 避難所 $m'$ まで誘導することの指示変数

移動にかかる距離を  $d_{mm'}$  とする．災害発生時に避難所  $m$  に向かう被災者の集合を  $I_m$  とする．ただし  $\sum_m |I_m| = N$  である．また，被災者  $n$  の最寄の避難所を  $\tilde{m}(n)$  とする．

避難所割当問題における被災者の行動を図 3.2 にフローチャートで示す． $N$  人の被災者は，災害発生 (①) の直後に最寄の避難所  $\tilde{m}(n)$  に移動する (②) [66]．避難所に到着した被災者は，2 種類のうちいずれかの誘導指示を受け取る (③)．誘導指示の誘導先が当該避難所 (④) であれば，到着した避難所に収容される (⑤)．た

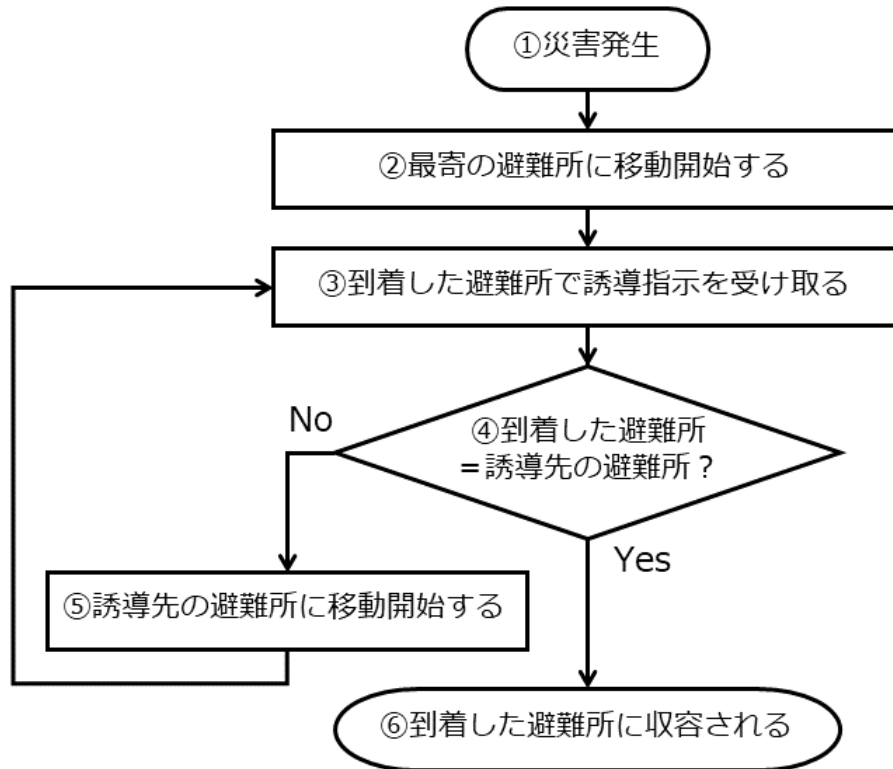


図 3.2: 避難所割当問題における被災者の行動のフローチャート. ③の誘導指示は, 個人誘導問題では  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$ , 集団誘導問題では  $z_{i_m m'}^m$  である.

だし, 定員に達した避難所は, 被災者を受け入れることができない. 誘導指示の誘導先が別の避難所 ( $M - 1$  箇所のいずれか) であれば, 被災者は誘導指示に従って移動を開始する (⑤). 全ての被災者が避難所に受け入れられるまで③から⑤を繰り返す. 災害発生から避難所収容までの被災者  $n$  の移動時間を  $\tau_n$  としたとき, 平均移動時間  $\frac{1}{N} \sum_n \tau_n$ , 避難完了時間  $\max(\tau_n)$ , たらい回し回数の 3 種類の指標を最小化することを目的とする.

本論文では以下の 2 パターンの問題設定を検討する.

**個人誘導問題** 被災者個人を識別可能な場合であり, 個人の最高速度  $v_n^{\max}$  と, 避難所に向かう被災者集合  $I_m$  を既知とする. また避難所  $m$  において到着する被災者一人ずつに異なる誘導内容を伝達可能とする. 被災者  $n$  への誘導を  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  で表す.  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n = 1$  のとき被災者  $n$  を避難所  $\tilde{m}(n)$  から避難所

$m'$  に誘導することを表し、 $y_{\tilde{m}(n)m'}^n = 0$  のとき誘導しないことを表す。また、被災者  $n$  を避難所  $\tilde{m}(n)$  に受け入れる場合は、 $y_{\tilde{m}(n)\tilde{m}(n)}^n = 1$  とする。個人誘導問題では  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  を求める。

**集団誘導問題** 被災者個人を識別不能な場合である。避難所においてメガホンや看板などで誘導するときには、一人ずつの誘導の運用が困難と考えられる。また、個人の最高速度  $v_n^{\max}$  や避難所に向かう被災者集合  $I_m$  を取得することが困難な場合も考えられる。そこで、個人の最高速度  $v_n^{\max}$  を未知とし、避難所に向かう被災者の人数  $|I_m|$  を既知とする。また、避難所  $m$  に到着した被災者のうち避難所  $m'$  に誘導する人数を  $x_{mm'}$  で表す。さらに、避難所における誘導内容の変更回数を最小にする制約を課す。すなわち避難所  $m$  に  $i_m$  番目に到着した被災者を避難所  $m'$  に誘導することを  $z_{i_m m'}^m$  で表すと、 $k_1 < k_2$  で  $z_{k_1 m'}^m = z_{k_2 m'}^m = 1$  のとき、 $k_1 < i_m < k_2$  を満たす任意の  $i_m$  について  $z_{i_m m'}^m = 1$  とする。ただし  $i_m \in \{1, \dots, |I_m|\}$  である。この制約により、避難所における誘導内容の変更回数が最小となる。集団誘導問題では  $z_{i_m m'}^m$  を求める。

避難所間での効率的な誘導を実現するために、図 3.1 のようなシステム導入を想定する。避難所を運営する地方自治体等が、被災者のスマホ等 GPS 端末の位置情報を収集する等の方法で、収容所に向かう被災者人集合  $I_m$  または人数  $|I_m|$  を取得する。また、各避難所に割当済みの被災者数  $R_m$  を常時サーバに収集することで、各避難所の空席の数が取得可能とする。サーバにて誘導指示 ( $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  または  $z_{i_m m'}^m$ ) を決定し、避難所に対して誘導指示を配信する。配信のタイミングは、災害発生から被災者が避難所に到着するまでに完了するものとする。各避難所では配信された誘導指示に従って、到着した被災者に向かうべき避難所を伝達する。一般に被災者の多くがスマホ等 GPS 端末を所持していても個人情報保護の観点から通常時は  $I_m$  や  $|I_m|$  の入手が困難であるが、災害時は人命を重視してシステムに提供されることを想定する。

1.1 章で述べた通り、[66] の問題設定では災害発生時点で被災者に対して携帯端末のアプリを通じて避難所を指定する、という誘導手段を想定していたが、本論文では誘導先を被災者に通知するタイミングを、被災者が避難所に到着した時点のみに変更した。避難所における誘導であれば、携帯電話網が破壊されて被災者端末



に情報を配信できない場合でも、集団誘導問題で得られた誘導内容を伝達可能、というメリットが考えられる。また、避難所が満員の状態でなくても、別の避難所への誘導を可能とした。この変更により、後から到着する被災者のために避難所のスペースを確保することができる。

## 3.2 提案手法

[66] が指摘するように、被災者の避難所への割当は、可能な組合せの数が膨大となるため、最適解を求めるために膨大な時間がかかるように思える。また、道路容量制約を考慮した最速避難問題では、2.1 章で述べたように計算量が多大になる。しかし一旦混雑による影響を無視して被災者の移動速度を常に  $v_t^n \approx v_n^{\max}$  と近似すると、移動時間または移動距離を最短にする割当を、最小費用流 [27] の問題として効率的に計算できる。

被災者  $n$  の移動距離  $l_n$  を、誘導に依存しない最寄の避難所までの移動距離  $l_n^0$  と、誘導に依存する最寄の避難所から収容される避難所までの移動距離  $\hat{l}_n$  に分解する： $l_n = l_n^0 + \hat{l}_n$ 。すると、被災者  $n$  の最寄の避難所以降の移動時間  $\hat{\tau}_n$  を、 $\hat{\tau}_n \approx \frac{\hat{l}_n}{v_n^{\max}}$  と近似できる。 $\sum_m C_m \geq N$  であるため、適切に誘導すると被災者あたり最大 1 回の誘導で収容できる。

### 3.2.1 移動時間最短法

個人誘導問題では  $v_n^{\max}$  が既知であるため、移動時間  $\hat{\tau}_n$  の総和を  $\sum_n \sum_{m'} \frac{y_{\tilde{m}(n)m'}^n d_{\tilde{m}(n)m'}}{v_n^{\max}}$  と近似できる。これを最小化する提案手法を移動時間最短法 (MINTR: Minimum Time Reservation) とよび、アルゴリズム 1 に沿って手順を説明する。まず、図 3.4(a) の有向グラフ  $G = ((O, P, G, D), E)$  を構成する。 $P_n \in P$  のノードは被災者  $n$  に対応し、 $G_m \in G$  のノードは避難所  $m$  に対応する。 $O$ (Origin) から  $P$ (Person) への辺  $(O, P_n)$  には、容量 1 人、コスト 0 を設定する。また、辺  $(P_n, G_{m'})$  には、容量 1 人、コストとして移動時間  $\frac{d_{\tilde{m}(n)m'}}{v_n^{\max}}$  を設定する。ただし  $C_m > I_m$  となる避難所から別の避難所への誘導を回避するために、 $\tilde{m}(n) = m'$  の辺はコストを  $-L$  ( $L$  は十分大きな値) とする<sup>1</sup>。 $G_m$  から  $D$

---

**Algorithm 1** MINTR

---

Input:  $C_m, d_{mm'}, I_m, v_n^{\max}$ .Output:  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$ .

- 1 図 3.4(a) の有向グラフを構成する.
  - 2 最小費用流の解  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  を求める
  - 3 各避難所に  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  を配信する.
  - 4 避難所は  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  に従い到着した被災者を誘導する.
- 

(Destination) への辺  $(G_n, D)$  には, 容量  $C_m$ , コスト 0 を設定する. この有向グラフの最小費用流問題を解き  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  を得る. 避難所  $\tilde{m}(n)$  では到着した被災者  $n$  に割り当てた誘導  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  を伝える. この手法 MINTR は被災者の避難所間の移動時間の総和  $\sum_n \hat{\tau}_n \approx \sum_n \hat{\ell}_n / v_n^{\max}$  を最小にする.

### 3.2.2 移動距離最短法

集団誘導問題では  $v_n^{\max}$  が未知であるため全被災者で共通と仮定し, 最寄の避難所以降の移動距離の総和

$$\sum_n \hat{\ell}_n = \sum_m \sum_{m'} \sum_{i_m} z_{i_m m'}^m d_{mm'} = \sum_m \sum_{m'} x_{mm'} d_{mm'}$$

を最小にする手法を提案する. ここで  $x_{mm'}$  は避難所  $m$  から避難所  $m'$  に誘導される人数である. この手法を移動距離最短法 (MINDR: Minimum Distance Reservation,) とよびアルゴリズム 2 に沿って手順を説明する. まず, 図 3.4(b) の有向グラフ  $G = ((O, S, G, D), E)$  を構成する.  $S_m \in S$  と  $G_{m'} \in G$  のノードは避

---

<sup>1</sup>誘導回数が多くても移動距離が長くない例を図 3.3 に示す. 避難所 A,B,C があり, A で 1 名の被災者があふれ, C に 1 名の空席があり, 満員の B が A から C への誘導経路上にある状況を想定する. A→C の 1 回の誘導 3.3(a) と, 3.3(a) を分割した A→B と B→C の 2 回の誘導 3.3(b) は, 移動距離が同一となる. MINDR で同一の避難所への誘導のコストを 0 (避難所間の距離) とすると, 図 3.3(a) と図 3.3(b) がともに最適解となり, 図 3.3(b) のように誘導回数が最小ではない解が得られる場合がある. MINTR でも同様の問題が発生する場合がある. 一方, 同一の避難所への誘導のコストを  $-L$  とすると, 誘導回数が最小の解のうち時間または距離が最小の解が得られる. 実験では MINTR と MINDR ともに  $L = 10000$  とした.

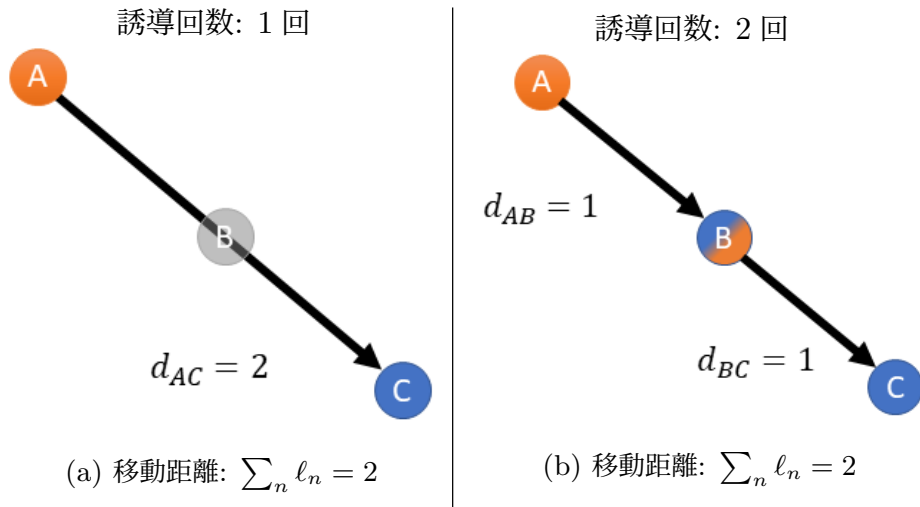


図 3.3: 誘導回数が増加しても移動距離が同一となる例. 赤丸は被災者があふれる避難所 ( $C_m < |I_m|$ ), 青丸は定員に余裕がある避難所 ( $C_m > |I_m|$ ) を示す.

避難所  $m$  に対応する.  $O$  (Origin) から  $S$  (Start) への辺には, 容量  $I_m$ , コスト 0 を設定する. また,  $S_m$  から  $G_{m'}$  (Goal) への辺には, 容量  $|I_m|$ , コストとして避難所間の距離  $d_{mm'}$  を設定する. ただし MINTR と同様に,  $m = m'$  の辺はコストを  $-L$  とする<sup>1</sup>. 最後に,  $G$  から  $D$  (Destination) への辺には, 容量  $C_m$ , コストは 0 を設定する. この有向グラフの最小費用流問題を解き, 避難所  $m$  から避難所  $m'$  に誘導される人数  $x_{mm'}$  を得る. この避難所割当人数に従って, 先に到着した人から, 近い誘導先を割り当てる (MINDR-N (Nearest)), または遠い誘導先を割り当てる (MINDR-F (Furthest)) ことで,  $z_{i_m m'}^m$  を得る. この手法は被災者の移動距離の総和  $\sum_n \hat{\ell}_n$  を最小にする.

避難所  $m$  から最も近い避難所は, 避難所  $m$  自身である. そのため  $C_m < |I_m|$  となる避難所では, MINDR-N では先着順に定員に達するまで被災者を収容し, 満員になった後に到着した被災者を別の避難所に誘導する. 一方 MINDR-F は逆に, 後から来る被災者が全員収容できるようになるまで, 先に到着した被災者を別の避難所に誘導し続ける. また MINTR では到着順を考慮せずに  $y_{\hat{m}(n)m'}^n$  を決定するため, 避難所が満員になる前に別の避難所に誘導する場合があります.

---

**Algorithm 2** MINDR-N/F

---

Input:  $C_m, d_{mm'}, |I_m|$ .

Output:  $z_{i_m m'}^m$ .

- 1 図 3.4(b) の有向グラフを構成する.
  - 2 最小費用流の解  $x_{mm'}$  を求める.
  - 3  $x_{mm'}$  と  $d_{mm'}$  を用いて, 先に到着した人から, 近い誘導先を割り当てる (MINDR-NEAREST), または遠い誘導先を割り当てる (MINDR-FURTHEST) ことで  $z_{i_m m'}^m$  を求める.
  - 3 各避難所に  $z_{i_m m'}^m$  を配信する.
  - 4 避難所は  $z_{i_m m'}^m$  に従い到着した被災者を誘導する.
- 

---

**Algorithm 3** MINDR-V

---

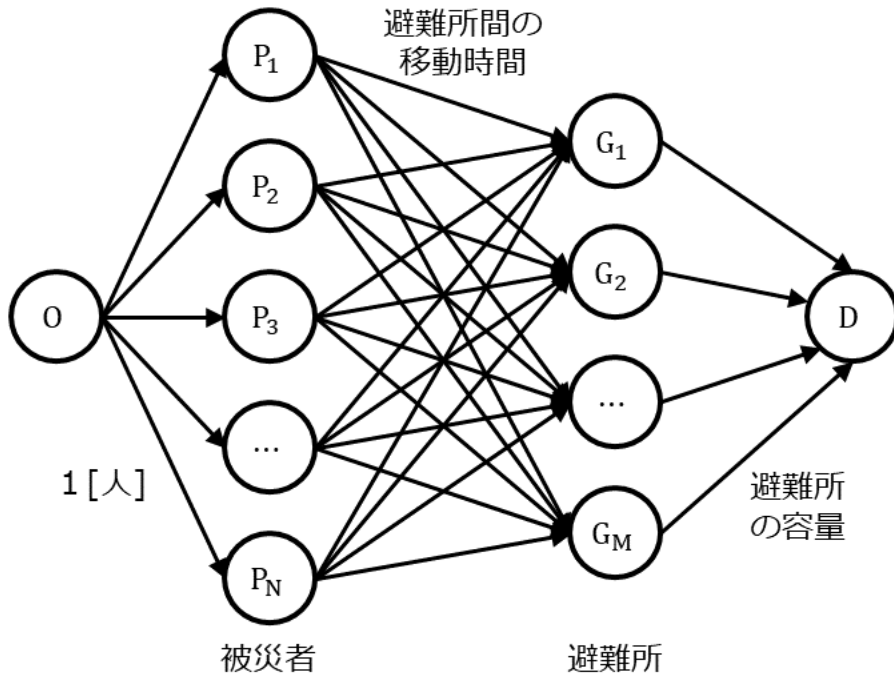
Input:  $C_m, d_{mm'}, |I_m|$ .

Output:  $z_{i_m m'}^m$ .

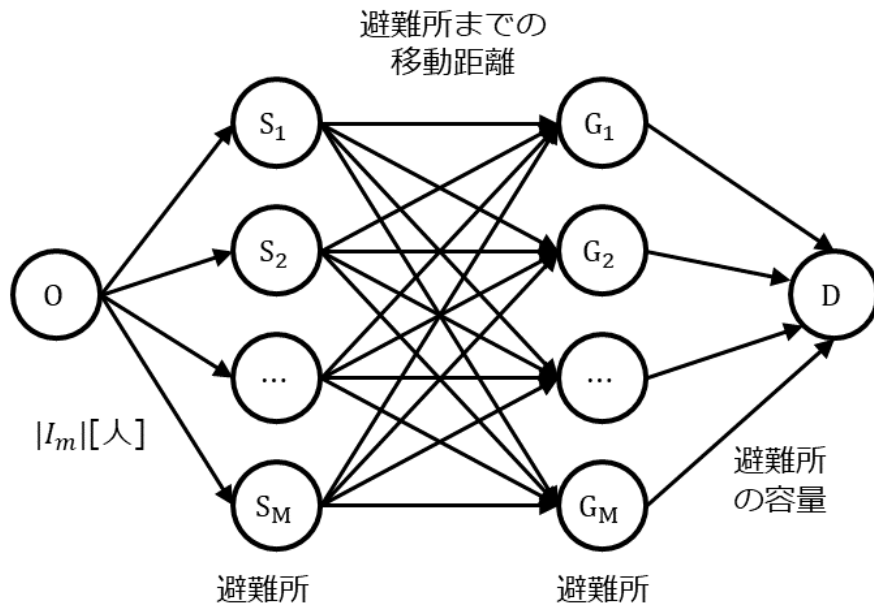
- 1 図 3.4(b) の有向グラフを構成する.
  - 2 最小費用流の解  $x_{mm'}$  を求める.
  - 3  $x_{mm'}$  と  $d_{mm'}$  と  $v_n^{\max}$  を用いて, 移動速度の大きい人から, 遠い誘導先を割り当てることで  $z_{i_m m'}^m$  を求める.
  - 3 各避難所に  $z_{i_m m'}^m$  を配信する.
  - 4 避難所は  $z_{i_m m'}^m$  に従い到着した被災者を誘導する.
- 

### 3.2.3 移動距離最短法の個人誘導問題への適用

移動速度が既知の個人誘導問題に対しても, 移動距離最短法を適用することが可能である. また, 個人誘導問題であれば速度が既知であるため, 速度に基づいて誘導先の避難所を決定することができる (アルゴリズム 3). そこで, 速度の速い被災者から順に, 遠い誘導先の避難所を割り当てる手法を用意して, MINDR-V (Velocity) と名付ける. また, 個人誘導と集団誘導の区分と MINDR-V の位置づけを, 図 3.5 に示す.



(a) 移動時間最小の場合.  $P_n$  のノードは被災者に対応し,  $G_m$  のノードは避難所に対応する.



(b) 移動距離最小の場合.  $S_m$  と  $G_m$  のノードは避難所に対応する.

図 3.4: 最小費用流を求めるために構成する有向グラフ

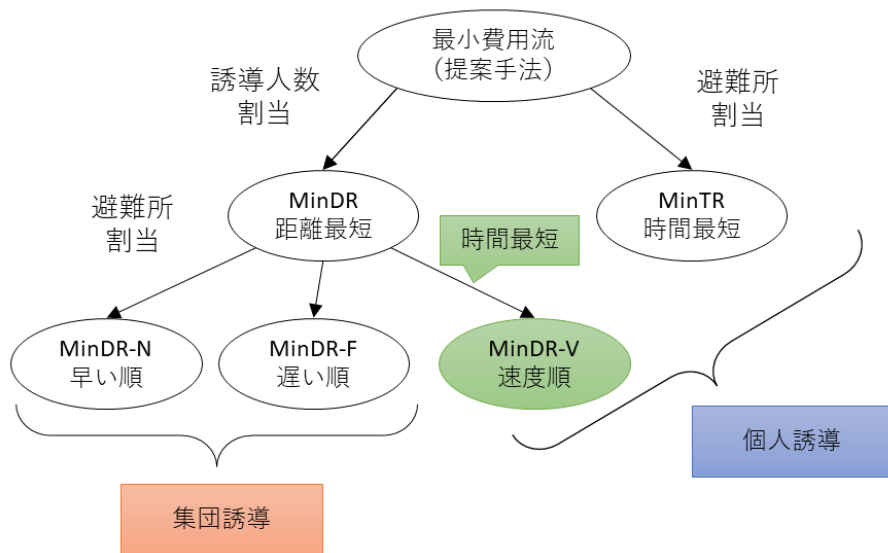


図 3.5: 個人誘導と集団誘導の区分.

### 3.3 避難所割当問題の実験

3.2章で示した提案手法は移動時間または移動距離を最小化するものの、MINTRにおける移動時間は、混雑による遅延を考慮しておらず、混雑で移動速度が低下すると計算した値より大きくなる。また、MINDRにおける移動距離は、避難所間を最短経路で移動した場合の距離であり、被災者が最短経路以外を選択すると計算した値より大きくなる。そこで本章では提案手法で求めた誘導をシミュレーション上で実行し、平均移動時間などを評価する。

#### 3.3.1 人流シミュレータ

実験には、独自仕様の人流シミュレータを用いた。シミュレータ上の歩行者は、ネットワーク状の道路網を出発点から目的地まで移動する。歩行者  $n$  の最高移動速度  $v_n^{\max}$  は平均 1.2m/s、標準偏差が 0.2m/s の正規分布から生成した値（ただし 0.5m/s 以下は除外する）に設定した。また、時刻  $t$  における歩行者  $n$  の移動速度  $v_t^n$  は、最高速度  $v_n$  と、前方の道路の人口密度  $\rho_t^n$  に依存する以下の式で決まる [74]。

$$v_t^n = \begin{cases} v_n^{\max} & (0 \leq \rho_t^n < \frac{1.8}{v_n^{\max} + 0.3}) \\ \frac{1.8}{\rho_t^n} - 0.3 & (\frac{1.8}{v_n^{\max} + 0.3} \leq \rho_t^n < 6) \\ 0 & (\rho_t^n \geq 6). \end{cases}$$

たとえば、人口密度が 6 人/m<sup>2</sup> 以上であれば、歩行者は停止する。歩行者は、必ずしも全員が同一経路を選択しないという状況を再現するために、現在地点よりも目的地に近い交差点を経路長の逆数に比例した確率で逐次的に選択する。シミュレータ上では、1 秒単位で被災者の位置を更新する。

#### 3.3.2 シミュレーション実験設定

##### 京都市街地の道路網と避難所

先行研究 [66] の実験条件を参考にして、日本の京都の中心部 1.5km 四方の領域の道路網を対象とする。道路網データは国土地理院のサイト [63] からダウンロードし、道幅の約 1/4 の幅の歩道網を作成した。京都市の避難所の情報 [52] を用いて、

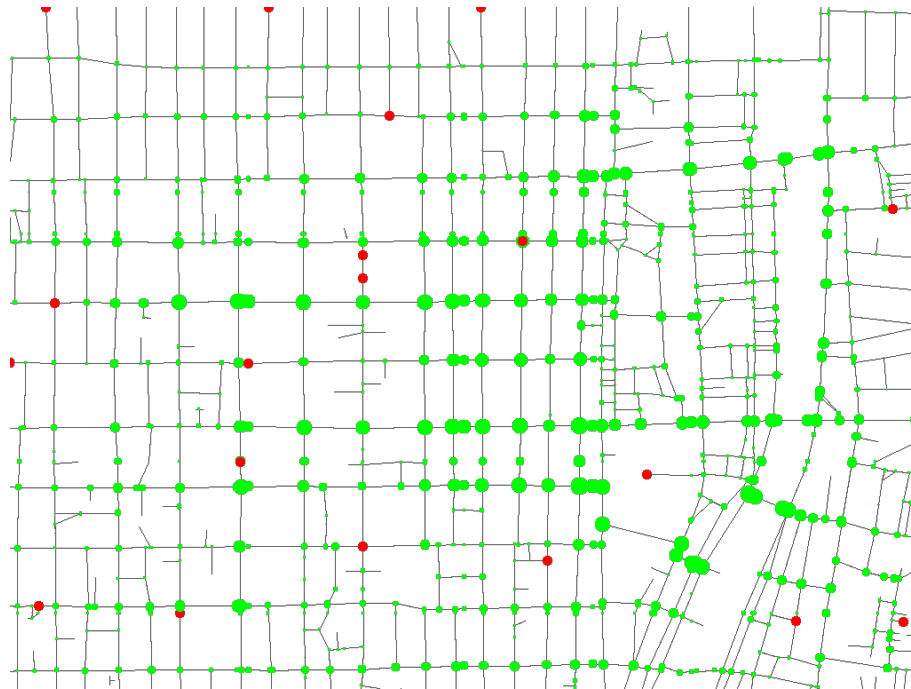


図 3.6: 避難シミュレーションに用いる京都市街地の道路網. 赤点は避難所の位置を示す. 緑点の大きさは被災者の出現確率に比例する.

その道路網上に  $M = 19$  個の避難所の位置 (図 3.6) と定員  $C_m$  を設定した. 定員の範囲は  $140 \leq C_m \leq 679$  であった.

#### 生駒市広域の道路網と避難所

移動距離が大きな場合での性能を評価するために, 生駒市のほぼ全体を含む道路網を対象とする. 生駒市の避難所の情報 [80] を用いて, その道路網上に  $M = 30$  個の避難所の位置 (図 3.7) を設定した. ただし単純化のため定員は  $C_m = 500$  に固定した.

#### 被災者の設定

シミュレーション開始時の被災者の位置は, 中心部のほうが人口が多いことを想定して, 道路網の交差点の中心性に比例する確率で選択されるものとする (図 3.6). 京都市街地の道路網では, 媒介中心性 [14] に比例する確率とした. 媒介中心性と



は、各ノードを通過する全ノード間の最短経路の本数に比例する値で、ネットワーク中の重要なノードの値が大きくなる。生駒広域の道路網はノード数が多く計算時間がかかるため、[交差点の次数]-2 の二乗に比例する確率とした。すなわち、三叉路の多い郊外よりは四叉路の多い都市部での発生確率を高く設定した。

京都市街地の被災者の人数は、避難所の定員の合計 ( $\sum_m C_m = 6136$  人) を超えない値に設定した<sup>2</sup>。一方、生駒市広域の被災者の人数は、15000 人に固定した。

同一人数の被災者を 10 セット作成して、それぞれに各手法を適用した。実験結果は 10 セットの平均値を示す。被災者は、シミュレーション開始時に最寄の避難所に移動を始める。また、被災者が誘導に従う確率（受諾率）は 100% とし、誘導を指示された時点から誘導先に移動開始するものとした。

---

<sup>2</sup>定員合計を超える被災者数  $N > 6136$  に対しては、 $\sum_m C_m \geq N$  となるように [52] の定員を定数倍した値を  $C_m$  として設定することで、各手法が実行可能である [66]。

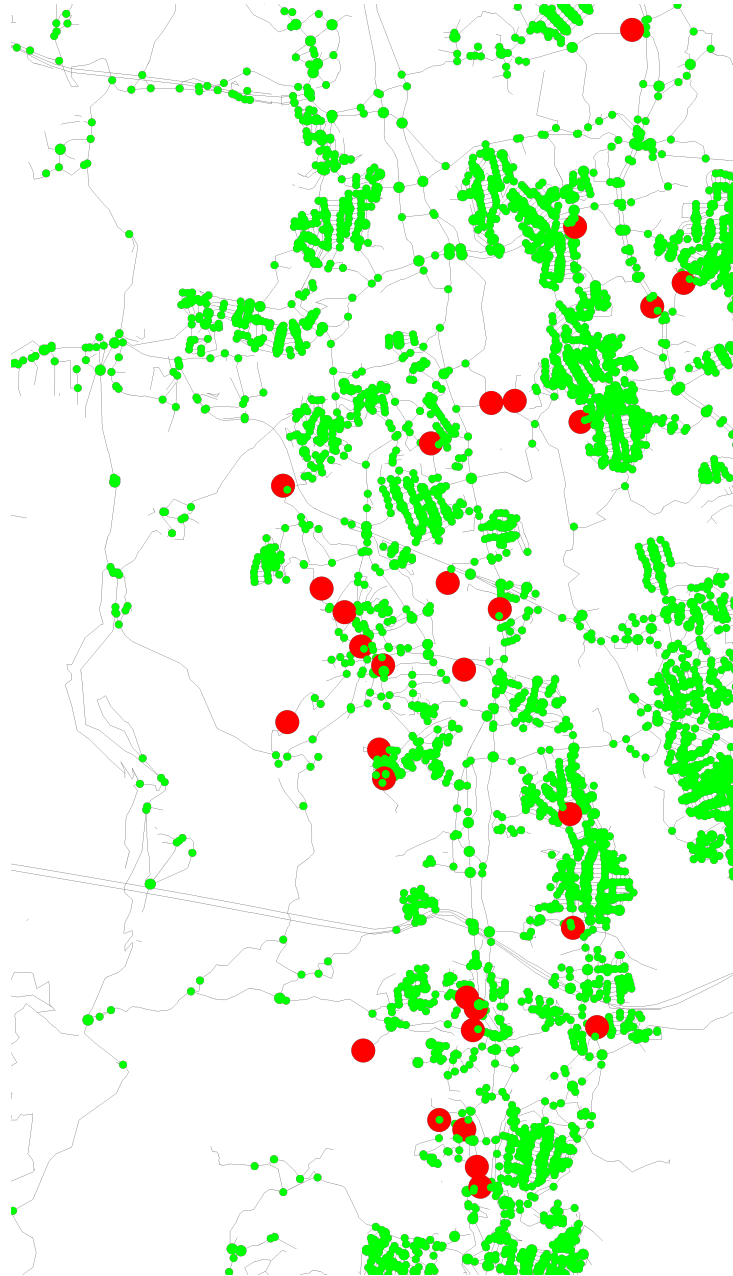


図 3.7: 避難シミュレーションに用いる生駒市広域の道路網. 赤点は避難所の位置を示す. 緑点の大きさは被災者の出現確率に比例する.

---

**Algorithm 4** SEQN

---

- 1 避難所の割当済人数  $R_m$  を 0 で初期化する.
  - 2 被災者  $n$  が避難所  $m$  に到着したとき,
  - 3 **if**  $R_m < C_m$  **then**
  - 4 避難所  $m$  に収容.
  - 5  $R_m \leftarrow R_m + 1$
  - 6 **else**
  - 7  $R'_m < C'_m$  のうち  $d_{mm'}$  が最小の避難所  $m'$  に誘導する
  - 8 **end if**
  - 9 被災者全員を避難所に収容するまで 2~8 を繰り返す.
- 

### 3.3.3 避難所割当問題の比較手法

性能評価のベースラインとして、逐次的に最近傍の避難所に誘導する逐次最近傍法 (SEQN: Sequential Nearest) を考える。SEQN は、定員に達するまでは到着した被災者を収容し、定員に達した後は定員に達していない最寄の避難所に被災者を誘導する (アルゴリズム 4)。この手順は、避難所の空きの有無のみを把握できる場合に、避難所が取りうる行動と考えられる。被災者が避難所に収容された時点で避難所の割当済人数  $R_m$  を更新する点が特徴である。

また、[66] の手法を 3.1 章の問題に適用するとアルゴリズム 5 の手順となり、これを比較手法とする。この手法は被災者を逐次的に定員に達していない最近傍の避難所に割り当てて、割当が重複しないように予約をするという特徴を持つため、本論文ではこの手法を、逐次最近傍予約割当法 (SEQNR: Sequential Nearest Reservation)、または既存手法と呼ぶ。被災者に誘導指示をした時点で避難所の割当済人数  $R_m$  を更新する点が特徴である。SEQNR は、避難所が満員になるまでたらい回しをしないため、誘導指示される人数は最小となる。また、誘導先の容量を予約するため、受諾率が 100% の場合には一人当たりの誘導回数は最大でも 1 回であり、たらい回しの回数が最小となる。

本来 SEQN と SEQNR は災害発生時に被災者が避難所に到着するタイミングで誘導指示を決定する手順である [66]。しかし、3.1 章で定義した個人誘導問題に対

---

**Algorithm 5** SEQNR

---

- 1 避難所の割当済人数  $R_m$  を 0 で初期化する.
  - 2 被災者  $n$  が避難所  $\tilde{m}(n)$  に到着したとき,
  - 3 **if**  $R_{\tilde{m}(n)} < C_{\tilde{m}(n)}$  **then**
  - 4 避難所  $\tilde{m}(n)$  に収容.
  - 5  $R_{\tilde{m}(n)} \leftarrow R_{\tilde{m}(n)} + 1$
  - 6 **else**
  - 7  $R_m < C_m$  の避難所のうち  $d_{\tilde{m}(n)m}$  が最小の避難所  $m$  に誘導する ( $y_{\tilde{m}(n)m}^n = 1$ ).
  - 8 誘導先の避難所  $m$  について  $R_m \leftarrow R_m + 1$
  - 9 **end if**
  - 10 被災者全員を避難所に収容するまで 2~9 を繰り返す.
- 

する性能を評価するため、一度シミュレーション上で逐次的に誘導先を決定し、そのとき実行された割当を  $y_{\tilde{m}(n)m'}^n$  とした。

### 3.3.4 避難所割当問題の評価指標

先行研究 [66] を参考に、以下の 3 種類の指標で誘導手法を評価する。どの指標も小さいほどよい。

- 平均移動時間：  $\frac{1}{N} \sum_n \tau_n$
- 避難完了時間：  $\max(\tau_n)$
- たらい回し回数： 被災者が避難所に到着したとき別の避難所に誘導される回数

### 3.3.5 避難所割当問題の実験環境

避難所割当問題の実験は、Intel(R) Core(TM)i7 1065G7 1.50GHz の CPU, 16GB のメモリを搭載した計算機を用いた。また、最小費用流の解を求めるために、

Python のライブラリ NetworkX[18] を利用した。ただし NetworkX で用いる容量スケールリングアルゴリズムでは、エッジのコストが整数である必要がある。そこで本実験においては、MINTR では秒単位、MINDR ではメートル単位で切り捨て数値を丸めた。

## 3.4 避難所割当問題の実験結果

### 3.4.1 性能評価

#### 京都市街地の道路網

まず、混雑や迂回を考慮せず、誘導に従った場合に被災者が最寄の避難所以降に移動する距離の平均値  $\frac{1}{N} \sum_n \hat{\ell}_n$  を表 3.2 に示す。  $N = 1000$  では被災者全員を最寄の避難所に収容できるため、移動距離の平均は全手法で 0 となる場合がある。  $N \geq 4000$  では、移動距離を最小とする MINDR が、SEQNR や MINTR よりも小さい、という妥当な結果となった。

次に、被災者が受ける誘導回数の平均値を表 3.3 に示す。  $N \leq 2000$  では各手法に差がない。  $N \geq 3000$  では、SEQNR、MINTR、MINDR が同一の誘導回数となった。 SEQNR の誘導回数は最小であり、提案手法も同様にたらい回し発生を抑制することを確認した。

被災者の人数を変化させたときの平均移動時間を表 3.4 に示す。  $N = 1000$  のときはたらい回しがほとんど発生しないため各手法の差は小さい。しかし  $N \geq 2000$  では、MINTR が平均移動時間について、最良の結果となった。  $N$  が大きいほど他の手法との差は大きく、  $N = 6136$  では SEQNR と比較して平均移動時間を 15.9% 削減した。また MINDR-V も MINTR に近い性能が得られた。集団誘導の MINDR-N と MINDR-F では、MINDR-F のほうが平均移動時間が小さい。一方、MINDR-F と個人誘導の MINDR-V を比較すると、MINDR-V の平均移動時間が 5% 程度小さく、集団誘導よりも個人誘導のほうが平均移動時間を短縮できることを示唆している。提案手法 MINTR、MINDR-N、MINDR-F、MINDR-V は全て、既存手法 SEQNR よりも平均移動時間が小さかった。

被災者の人数を変化させたときの避難完了時間を表 3.5 に示す。平均移動時間と同様に、  $N = 1000$  のとき各手法の差は小さいが、  $N \geq 2000$  では、MINTR と MINDR-V の性能が良好で、  $N \geq 5000$  では MINDR-V が最良であった。  $N = 6136$  では MINDR-V は SEQNR と比較して避難完了時間を 63% 削減した。集団誘導 MINDR-F と比較すると、個人誘導 MINDR-V は避難完了時間を 31% 短縮した。避難完了時間についても、提案手法 MINTR、MINDR-N、MINDR-F、MINDR-V は全て、既存手法 SEQNR を上回る性能が得られた。

集団誘導である MINDR-N と MINDR-F を比較すると、平均移動時間と避難完了時間の両方について、MINDR-F のほうが平均値と標準偏差が小さい。これは、移動速度が遅い被災者は避難所への到着も遅い傾向があるため、MINDR-F が到着順に遠い避難所に割り当てた結果、 $v_n^{\max}$  の小さい被災者の誘導先が近い避難所になり、全体として移動時間が平準化されつつ短縮できていると考えられる。性能だけでなく社会的な観点からも、移動速度が遅い傾向にあると考えられる高齢者や子供に対して近くの避難所が割り当てることになる MINDR-F のほうが、理解が得られやすいと考える。

表 3.2: 誘導に従った場合に被災者が移動する距離の平均値  $\frac{1}{N} \sum_n \hat{\ell}_n$ . 被災者を 10 セット生成して評価したときの平均値を示す. 単位はメートル. また, MINDR-N と MINDR-F と MINDR-V は同一の値となるため, まとめて MINDR として記載した. 太字は最良の結果.

$N$	移動距離			
	SEQN	SEQNR	MINTR	MINDR
1000	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>
2000	<b>38.43</b>	<b>38.43</b>	<b>38.43</b>	<b>38.43</b>
3000	169.25	130.57	<b>128.31</b>	<b>128.31</b>
4000	422.94	270.31	265.57	<b>265.50</b>
5000	635.95	397.88	394.56	<b>393.90</b>
6000	871.91	557.56	546.53	<b>545.30</b>
6136	911.31	590.99	581.47	<b>579.50</b>

表 3.3: 被災者が誘導指示を受ける回数の平均値  $\frac{1}{N} \sum_n \mathbb{1}(y_{\tilde{m}(n)}^n = 0)$ . 被災者を 10 セット生成して評価したときの平均値を示す. 単位は回. また, MINDR-N と MINDR-F と MINDR-V は同一の値となるため, まとめて MINDR として記載した. 太字は最良の結果.

$N$	誘導回数			
	SEQN	SEQNR	MINTR	MINDR
1000	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
2000	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>
3000	0.29	<b>0.23</b>	<b>0.23</b>	<b>0.23</b>
4000	0.64	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>
5000	0.97	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>
6000	1.33	<b>0.44</b>	<b>0.44</b>	<b>0.44</b>
6136	1.38	<b>0.45</b>	<b>0.45</b>	<b>0.45</b>



表 3.4: 被災者数  $N$  を変化させたときの平均移動時間. 太字は最良の結果. 平均移動時間  $\pm$  標準偏差. 単位は秒. 標準偏差は 10 回試行の平均値.

$N$	SEQNR	MINTR	MINDR-N	MINDR-F	MINDR-V
1000	<b>251.0</b> $\pm$ <b>126.6</b>	<b>251.0</b> $\pm$ <b>126.6</b>	<b>251.0</b> $\pm$ <b>126.6</b>	<b>251.0</b> $\pm$ <b>126.6</b>	<b>251.0</b> $\pm$ <b>126.6</b>
2000	290.5 $\pm$ 199.1	<b>281.0</b> $\pm$ <b>151.1</b>	290.5 $\pm$ 199.1	285.3 $\pm$ 146.0	<b>281.0</b> $\pm$ <b>151.1</b>
3000	401.1 $\pm$ 385.5	<b>351.1</b> $\pm$ <b>233.3</b>	396.3 $\pm$ 370.9	371.9 $\pm$ 229.7	<b>351.1</b> $\pm$ <b>233.3</b>
4000	539.1 $\pm$ 552.3	<b>457.8</b> $\pm$ <b>359.9</b>	536.9 $\pm$ 550.4	493.0 $\pm$ 367.4	457.8 $\pm$ 360.0
5000	663.0 $\pm$ 673.7	<b>565.3</b> $\pm$ <b>456.4</b>	656.5 $\pm$ 647.9	599.6 $\pm$ 459.2	565.6 $\pm$ 453.4
6000	834.0 $\pm$ 848.6	<b>700.0</b> $\pm$ <b>575.5</b>	817.7 $\pm$ 789.4	744.0 $\pm$ 573.8	703.8 $\pm$ 565.6
6136	870.9 $\pm$ 885.3	<b>730.5</b> $\pm$ <b>597.2</b>	853.4 $\pm$ 806.1	776.0 $\pm$ 585.8	734.9 $\pm$ 576.9

表 3.5: 被災者数  $N$  を変化させたときの避難完了時間. 太字は最良の結果. 避難完了時間  $\pm$  標準偏差. 単位は秒.

$N$	SEQNR	MINTR	MINDR-N	MINDR-F	MINDR-V
1000	<b>807.9</b> $\pm$ <b>80.6</b>	<b>807.9</b> $\pm$ <b>80.6</b>	<b>807.9</b> $\pm$ <b>80.6</b>	<b>807.9</b> $\pm$ <b>80.6</b>	<b>807.9</b> $\pm$ <b>80.6</b>
2000	1346.6 $\pm$ 154.9	<b>857.2</b> $\pm$ <b>84.7</b>	1346.6 $\pm$ 154.9	879.4 $\pm$ 90.5	860.3 $\pm$ 82.0
3000	3024.0 $\pm$ 254.4	1350.7 $\pm$ 54.1	2777.9 $\pm$ 223.5	1540.4 $\pm$ 154.3	<b>1348.6</b> $\pm$ <b>53.3</b>
4000	3331.3 $\pm$ 250.8	<b>1677.1</b> $\pm$ <b>48.6</b>	3351.0 $\pm$ 280.4	2372.7 $\pm$ 375.0	1690.2 $\pm$ 57.1
5000	4287.9 $\pm$ 403.8	1917.7 $\pm$ 34.4	3638.5 $\pm$ 305.5	2574.7 $\pm$ 237.5	<b>1897.7</b> $\pm$ <b>40.5</b>
6000	5599.4 $\pm$ 335.3	2256.8 $\pm$ 35.0	4366.3 $\pm$ 372.5	3051.2 $\pm$ 256.5	<b>2073.6</b> $\pm$ <b>61.4</b>
6136	5499.7 $\pm$ 318.7	2364.4 $\pm$ 41.7	4170.7 $\pm$ 271.1	2956.5 $\pm$ 268.7	<b>2054.5</b> $\pm$ <b>72.0</b>

表 3.6: 最小費用流で求めた避難所間移動の距離／時間と，シミュレーションでの避難所間移動の距離／距離との差分（一人当たり）

手法	距離（メートル）			時間（秒）
	MINDR-N	MINDR-F	MINDR-V	MINTR
1000	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
2000	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.6 ± 0.0
3000	2.0 ± 0.5	1.9 ± 0.5	2.0 ± 0.6	3.7 ± 0.4
4000	5.2 ± 0.4	5.1 ± 0.4	5.1 ± 0.5	7.1 ± 0.4
5000	7.4 ± 0.4	7.5 ± 0.4	7.5 ± 0.4	12.0 ± 1.1
6000	9.3 ± 0.4	9.3 ± 0.5	9.3 ± 0.4	14.5 ± 0.5
6136	10.5 ± 0.4	10.5 ± 0.5	10.5 ± 0.4	15.7 ± 0.4

#### 生駒市広域の道路網

ここまでは京都市街地の道路網を用いてシミュレーション実験を行った。次に生駒市広域の道路網を用いて同様の実験を行い，避難所間の距離が大きくなったときの影響を評価した結果を表 3.7 に示す。ただし，提案手法の中で性能と計算時間のバランスがよかった MINDR-F と，ベースラインとした SEQN のみを比較する。

京都市街地の道路網と同様に，生駒市広域の道路網でも提案手法はベースラインの性能を上回った。また計算時間も 15000 人に対して 1 分以内であり，災害発生時にリアルタイムで使用可能な長さであった。

#### 性能評価のまとめ

以上の実験により，最小費用流によって避難所割当を求める提案手法（MINTR, MINDR-N, MINDR-F, MINDR-V）が，既存手法と同等の誘導回数のまま避難所までの平均移動時間を短縮することを確認した。

表 3.7: 生駒市広域の道路網で行った避難誘導の性能評価.

手法	SEQN	MINDR-F
平均避難時間	68 分 13 秒	36 分 03 秒
避難完了時間	854 分 40 秒	139 分 41 秒
平均たらい回し回数	2.20 回	0.48 回
最大たらい回し回数	12 回	1 回
計算時間	-	58 秒

表 3.8: コンピュータ上で計測した計算時間. 単位は秒.

$N$	SEQNR	MINTR	MINDR
1000	0.10	3.71	0.22
2000	0.19	18.93	0.38
3000	0.27	65.50	0.57
4000	0.34	181.27	0.72
5000	0.41	417.65	0.90
6000	0.51	795.46	1.06
6136	0.52	804.67	1.05

### 3.4.2 避難所割当問題の計算時間

また, 最小費用流問題に対する容量スケールリングアルゴリズムの計算量は強多項式時間アルゴリズムを用いると  $\mathcal{O}((m \log n)(m + n \log n))$  である [32]. ここで  $n$  は頂点の数,  $m$  は辺の数である. MINTR では  $\mathcal{O}(n) = \mathcal{O}(N + M) = \mathcal{O}(N)$ ,  $\mathcal{O}(m) = \mathcal{O}(NM)$  であり, これを代入すると  $\mathcal{O}((NM \log N)(NM + N \log N))$  である. また, MINDR では  $\mathcal{O}(n) = \mathcal{O}(M)$ ,  $\mathcal{O}(m) = \mathcal{O}(M^2)$  であり, これを代入すると  $\mathcal{O}(M^4 \log M)$  である.

各手法を実行したときの計算時間を表 3.8 に示す. MINTR では, 被災者数の 2

乗にほぼ比例した。また、MINDR では、被災者数にほぼ比例した。計算量のオーダーから外れる結果となったが、これはプログラム中にオーバーヘッド部分が多いためと考える。

### 3.4.3 避難所割当問題の考察

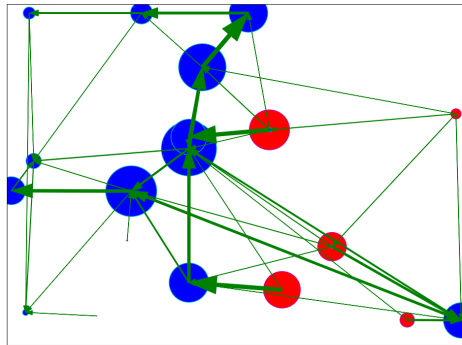
図 3.8 に、 $N = 6136$  のとき各手法によって別の避難所に誘導された様子の一例を示す。災害発生時は被災者が道路網の東側に偏っているが避難所は西側に多いため、全手法で東の避難所から西の避難所へ多数の被災者が誘導されている。最も誘導の発生が多かった SEQN (図 3.8(a)) では、誘導先となった避難所 (青丸) から出ていく誘導 (緑矢印) があり、同一被災者に複数回のたらい回しが発生している。SEQN 以外の 3 手法はどれも同一被災者の複数回のたらい回しを回避できているが、図 3.8 では誘導の矢印の本数が異なっている。たとえば SEQNR (図 3.8(b)) の東端の赤丸の避難所から 4 本の緑矢印が出ているが、MINTR (図 3.8(c)) では 3 本、MINDR (図 3.8(d)) では 1 本である。このことは、各手法の特徴に由来している。

SEQNR は誘導のタイミングによって誘導先が変化するため、緑矢印の本数が多くなる。近隣の避難所はその近くの避難所からあふれた被災者で次々と満員になっていき、最終的には西端の避難所への誘導が発生して移動距離が長くなっている。一方 MINDR は、近い避難所間で誘導元と誘導先のペアを成立させるため、SEQNR よりも移動距離が短くなっている。

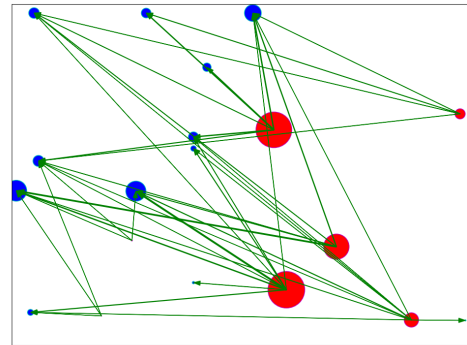
MINTR は被災者の移動速度を考慮して個別に避難所を割り当てるため、誘導先が移動距離を最小にする避難所ペアに限定されず、緑矢印の本数は MINDR よりも多くなる。しかし MINDR-F と同様に、移動速度が速い被災者を遠くの避難所に割り当て、移動速度が遅い被災者を近くの避難所に割り当てることで、全体の移動時間を短縮していると考えられる。

## 3.5 避難所割当問題のまとめ

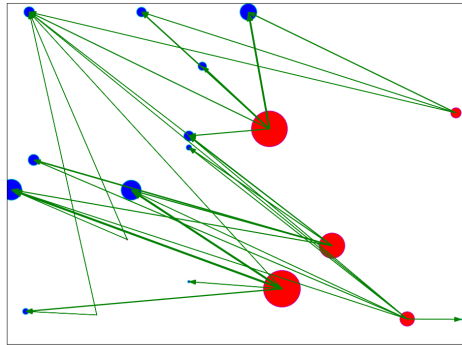
避難所計画問題に関する本論文の貢献は以下の 3 点である：



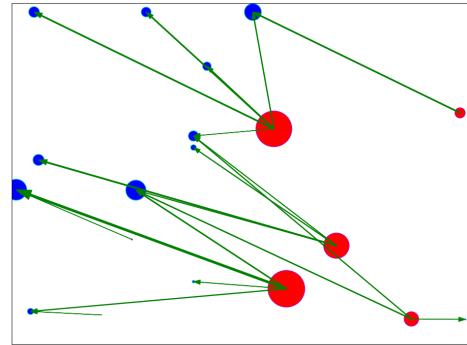
(a) SEQN



(b) SEQNR



(c) MINTR



(d) MINDR

図 3.8:  $N = 6136$  において各手法によって別の避難所に誘導される様子. (a)~(d) の長方形で囲まれた領域は, 図 3.6 の地図で示した領域に対応する. 移動元となった避難所を赤丸, 移動先となった避難所を青丸で示し, 丸の大きさは誘導回数に比例する. 緑矢印は誘導の方向を示し, 線の太さは誘導回数に比例する.

- 避難所で被災者に誘導先を直接指示する状況で, 被災者個人を識別して誘導する個人誘導問題と, 個人を識別せずに誘導する集団誘導問題の, 2 種類の避難所割当問題を定式化した.
- 上記 2 種類の避難所割当問題に対して, それぞれ最小費用流を用いた割当手

法を提案した。

- シミュレーション実験によって、提案手法の性能が既存手法を上回ることを示した。

本論文では、被災者が到着した避難所で次に向かうべき避難所を誘導指示する手段を検討した。これは、現実的には災害時に通信網と携帯端末が利用不能な状況が多いと想定したためであるが、仮に全被災者が利用可能であれば、避難所を携帯端末経由で指示する手段 [66] に提案手法のうち MinTR を適用することで、たらい回し回数や移動距離をさらに削減できる。ただし、MinTR は計算時間が従来手法よりも多大となるため、適用の際には計算量の削減が課題となる。

本論文の問題設定では、全被災者が同時に避難を開始することを想定し、避難所に向かう被災者  $I_m$  または被災者数  $|I_m|$  を既知とし、受諾率を 100% に固定した。実際の災害発生時には、指示に従わず想定外の避難所に向かう被災者や、避難開始が遅れる被災者 [73] もいると考えられ、仮定が成立するとは限らない。しかし、避難開始のタイミングは移動距離に影響を与えない。また、受諾率が 100% 未満の場合には、避難所を予約する手順が含まれる全ての手法の性能が悪化する。さらに、 $I_m$  や  $|I_m|$  が想定と異なる場合には、避難状況に合わせて入力を更新して提案手法を複数回実行することで、その時点で最適な誘導内容の計算が可能である。そのため仮定が成立しない場合でも、各手法の性能の傾向は 3.3 章の結果と同様になると考える。

今回の実験条件では、被災者が誘導される距離の平均値が 1km 未満 (表 3.2) となるようなエリア 1 種類を用いた。都市部の道路網としては一般的な形状と考えられるため、多くの都市の道路網においても同様の結果が得られるだろう。しかし人口が少ない地域などで、災害時に移動が困難なほど避難所間が長距離の場合には、現実的な時間で避難完了しない可能性がある。また仮に、避難所間が等距離 (星型ネットワークのように  $d_{mm'}$  が一定) に配置されていれば手法間の性能差が小さくなるし、道路網にボトルネックがある場合には混雑が生じて性能に悪影響を及ぼすことも考えられる。したがって、導入時には対象のエリアでシミュレーション評価をする必要があるだろう。

提案手法 MINDR として、MINDR-N と MINDR-F と MINDR-V の 3 種類を検討したが、 $x_{mm'}$  から  $z_{i_m}^m$  を求める方法は他にも考えられる。また、個人誘導

問題に MINDR を適用して、先着順以外のルールで避難所を割り当てることも可能である。たとえば  $v_n^{\max}$  が大きい順に遠くの避難所を割り当てれば、MINTR に近い手順となり平均移動時間の短縮が期待できる。一方 MINTR は、被災者 6000 人以上に対して実行すると 10 分以上かかり、災害発生時にリアルタイムで運用するには計算時間が問題となる。そのため、高速な MINDR を改良して性能向上させることが、今後の方向性として有望と考える。



## 第 4 章 避難所計画問題

本章では研究課題 B として、避難所計画問題について検討する。災害業務管理の中では④復興のフェーズに対応する。災害発生後に避難所に宿泊する被災者が減少する状況で、避難所を運営する負担と被災者が移転する負担の、両者を軽減することを目指す。

避難所は、災害時に家を失ったり、家に戻れなくなったりした被災者をサポートする施設である。小学校などの施設は避難所として利用されることが多いため、災害後の復興に向けて通常の教育活動を再開するためには、適切なタイミングで避難所を閉鎖する必要がある。避難所を閉鎖する時期を決定するために、他の避難所に移転する人の負担を考慮して移転費用や運営費用を最小化する避難所計画問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem) を提案する。しかし、変数の数は被災者の数に比例するため、被災者が多数の場合その計算には膨大な計算資源が必要となる。そこで、避難所閉鎖問題 (Evacuation Shelter Closing Problem) を提案する。この問題は、被災者を表す 2 値変数を整数に変換することで、整数変数の数が被災者の数に依存しなくなり、多数の被災者のための避難所の最適な運営計画をより効率的に計算できる。

### 4.1 避難所計画問題の例

図 4.1(a) は、避難所スケジューリング問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem: ESSP) の一例である。避難所 A の収容人数は 3 人、避難所 B の収容人数は 2 人である。避難所の運営コストはそれぞれ 600 と 400 である。時間ステップの最大値は  $T = 2$  である。被災者 1 と 2 は、100 のコストで避難所 A に避難することができる。また、被災者 3 は、 $t = 0$  で災害が発生したときに、100 のコストで避難所 B に避難することができる。被災者は最も近い避難所に移動すると仮定する。他の避難所への避難は無視する。避難の結果、 $t = 1$  の時点で避難所 A と B の両方を開放する必要がある。帰宅時刻が  $\tau_1 = 1$  である被災者 1 は、 $t = 2$  の時点では避難所を必要としない。また、避難所 A と B には空きがある。したがって、 $t = 2$  までに、被災者 2 は避難所 B に、被災者 3 は避難所 A に移転できる。

しかし、移設費用は 500 かかる。被災者 2 を避難所 B に移動させれば、避難所 A を閉鎖することができ、運用コストと移動コストを最小限に抑えられる。このように、避難と移転を同時に考慮できるので、災害時にどの避難所を閉鎖するかを決められる。

しかし、「Essp」では、被災者の位置や移動を表す二値変数を使用するため、変数の数は被災者数に比例する。多くの人々が避難していると、計算に膨大なスペースが必要となる。そこで避難所閉鎖問題 (Evacuation Shelter Closing Problem) を提案する。この問題では、避難段階を考慮しない。 $t = 0$  の時点で全員が既に避難所に入っていて  $t = 0$  の時点で稼働している避難所は所与とする。このように問題を分離することで、高速な解法を適用できる。図 4.1(b) では、 $t = 0$  において避難所 A には、 $t = 1$  で帰宅する人が 200 人、 $t = 1$  で帰宅する人が 100 人いる。 $t = 1$  で帰宅する人が 200 人、 $t = 2$  で帰宅する人が 100 人、合計 300 人の被災者がいる。避難所 B には、 $t = 2$  で帰宅する 50 人の被災者がいる。ESCP では 2 進数の変数ではなく、被災者の人数を表す整数の変数を使う。被災者の中で帰宅時刻が共通している人の数を表す。その結果、変数の数は被災者の数ではなく、グループの数に依存する。被災者の数は図 4.1(a) の約 100 倍にもなるが、ほぼ同じ数の変数で問題を表現できる。したがって、被災者が多い場合でも、最適な避難所の運営計画を得られる。被災者が多い場合には、Essp よりも効率が良いことを実験的に確認した。最後に、約 3 万人の被災者がいる現実的な環境でシミュレーション実験を行い、最適な避難所のスケジューリングを分析した。

## 4.2 避難所計画問題の定式化

避難所の運営計画については、2 章で説明した FLP を逐次的に適用することで、解を求めることができる。さらに FLP を時間的に拡張して、帰宅時刻が既知のときに、累積コストが最小となるような避難所の割り当てを見つける問題を定式化する。本章では、[37] の研究に基づいて ESSP を説明する。表 4.1 に記号の定義を示す。

表 4.1: 避難所計画問題の記号の定義

記号	定義
$N$	被災者のインデクス集合. $n \in \{1, \dots,  N \}$
$N_t$	時刻 $t$ に避難所に滞在する被災者のインデクス集合.
$N_m^t$	初期位置が $m$ の被災者のうち時刻 $t$ で避難所に残る被災者数.
$M$	位置のインデクス集合. $m \in \{1, \dots,  M \}$
$M_t$	時刻 $t$ に運営可能な避難所のインデクス集合.
$\tilde{m}_t(n)$	時刻 $t$ に被災者 $n$ がいる位置.
$L$	施設種別のインデクス集合. $l \in \{1, \dots,  L \}$
$C_m$	避難所 $m$ の定員.
$T$	考慮する時刻の最大値. $t \in \{0, \dots, T\}$
$\tau_n$	被災者 $n$ の帰宅時刻.
$f_m$	避難所 $m$ を 1 時間ステップ運営するためのコスト.
$d_{tmm'}$	位置 $m$ から位置 $m'$ へ時刻 $t$ から時刻 $t+1$ に移動するためのコスト.
$x_{tmn}$	被災者 $n$ が時刻 $t$ で位置 $m$ にいることを示す変数.
$\bar{x}_{tm}$	時刻 $t$ で位置 $m$ にいる被災者数.
$\bar{x}_{tm}^\tau$	時刻 $t$ で位置 $m$ にいる帰宅時刻 $\tau$ の被災者数.
$y_{tm}$	避難所 $m$ を時刻 $t$ に運営することを示す変数.
$z_{tmm'n}$	被災者 $n$ が時刻 $t-1$ から $t$ で位置 $m$ から $m'$ に移動することを示す変数.
$\bar{z}_{tmm'}$	時刻 $t-1$ から $t$ で位置 $m$ から $m'$ に移動する被災者数.
$\bar{z}_{tmm'}^\tau$	時刻 $t-1$ から $t$ で位置 $m$ から $m'$ に移動する帰宅時刻 $\tau$ の被災者数.
$U_\ell$	施設種別 $l$ が避難所として占有された日数.
$s_{m\ell}$	避難所 $m$ が施設種別 $l$ であることを示す変数.
$\alpha$	避難コストの移転コストに対する比率.
$p_m$	位置 $m$ の二次元座標.

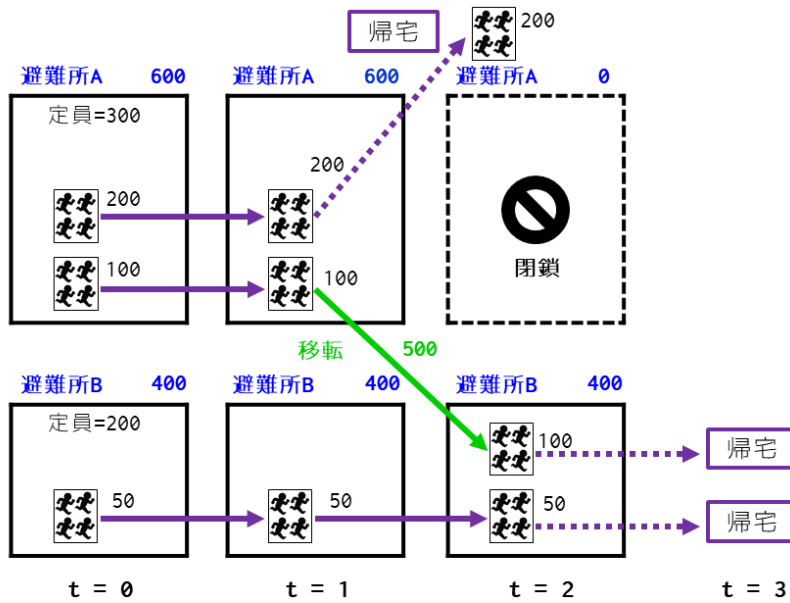
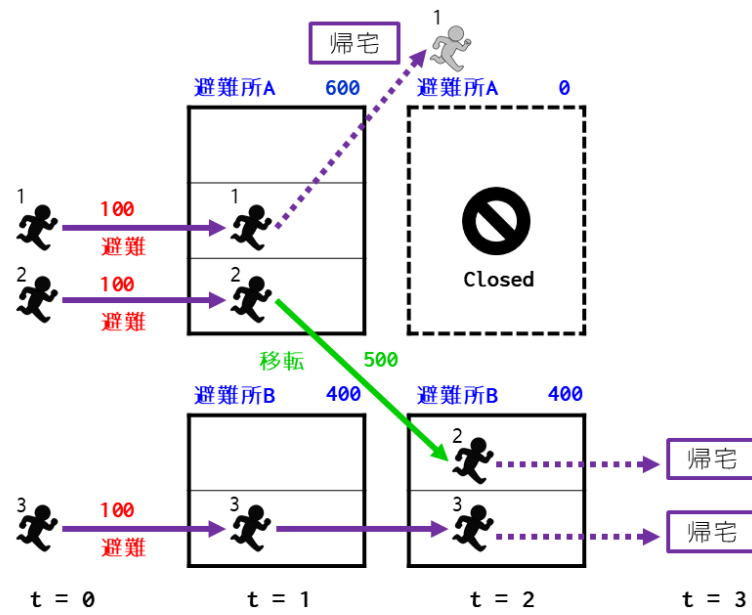


図 4.1: ESSP と ESCP の例. (a) の ESSP では, 被災者の初期位置は避難所以外でもよい. (b) の ESCP では, 被災者の初期位置は避難所に限定される.

被災者の集合を  $N$  とする。移動の始点と終点になりうる災害時の被災者の位置の集合と避難所の位置の集合を統一的に扱うため、 $M$  を両者の和集合とし、被災者は災害時に  $M$  のいずれかの場所にいるものとする。被災者  $n$  は避難所に  $\tau_n$  ステップ滞在した後に帰宅するものとする。この論文では、 $\tau_n$  を帰宅時刻と呼ぶことにする。災害発生直後には一般的に  $\tau_n$  を知ることは困難であるが、ここでは既知の値であると仮定する。また、 $T = \max_n \tau_n$  とする。時間は離散化された整数  $t \in \{0, \dots, T\}$  で表される。ここで、 $t = 0$  が災害の始まりである (図 4.1(a))。  $t = 0$  の時に災害が発生した後、被災者は避難所に移動します。  $t = 0$  で災害が発生すると、被災者は  $t = 1$  までに避難所に移動し、そこに留まる。その後、 $\tau_n = 1$  の被災者  $n$  は帰宅する。他の被災者は、必要に応じて別の避難所に移動し、 $t = 2$  まで滞在する。これらの手順は繰り返されるものとする。被災者  $n$  の時刻  $t$  における位置を  $t$  時点での被災者  $n$  の位置を  $\tilde{m}_t(n)$  と表記する。避難所が  $m$  の位置に設置できる場合、最大で  $C_m$  人の被災者を収容できる。それ以外の場所では、避難所の候補にならない場所は、 $C_m = 0$  とする。避難所にはすべての被災者を収容できるように  $\sum_{m \in M} C_m \geq |N|$  を仮定する。

時間  $t$  に位置  $m$  から  $m'$  に移動すると、移動コスト  $d_{tmm'}$  が発生する。また、任意の 2 つの場所間の移動は、1 つの時間ステップで完了するものとする。ここで、 $t = 0$  のときの移動コストを「避難コスト」と呼ぶ。  $t > 0$  での移動コストを「移転コスト」と呼ぶことにする。ここで、FLP と同様に変数  $x_{tmn}$  を導入し、 $t$  の時点で被災者  $n$  が避難所  $m$  に収容されるかどうかを示す。また、変数  $y_{tm}$  を導入し、時刻  $t$  に避難所  $m$  を運営するかどうかを示す。

この問題は、逐次的に以下の FLP を解くことで、避難所への避難費用と避難所の運営費用の両方を考慮した割当を求められる。

逐次 FLP (SEQFLP)

$$\text{Minimize} \quad \sum_{m \in M_t} \left( \sum_{n \in N_t} d_{t\tilde{m}_t(n)m} x_{tmn} + f_m y_{tm} \right) \quad (4.2.1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N_t} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall m \in M_t \quad (4.2.2)$$

$$\sum_{m \in M_t} x_{tmn} = 1, \forall n \in N_t \quad (4.2.3)$$

$$x_{tmn}, y_{tm} \in \{0, 1\}, \quad (4.2.4)$$

where  $N_t = \{n \in N \mid \tau_n > t\} \quad (4.2.5)$

$$M_0 = M \quad (4.2.6)$$

$$M_t = \{m \in M \mid y_{(t-1)m} = 1\} \quad (4.2.7)$$

$$\tilde{m}_t(n) = \arg \max_m (x_{(t-1)mn}). \quad (4.2.8)$$

しかしこの FLP は、被災者の帰宅時刻を考慮していない。そのため被災者がやがて帰宅し始めその数が減ってくると、どの避難所を閉鎖して被災者をどの避難所に移転させればコストが最小になるかを決定できない。

上記の FLP の設定の中で、被災者  $n$  が時刻  $t$  から  $t+1$  までに、位置  $m$  から  $m'$  に移動するかどうかを  $x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n}$  で示すことができる。すなわち  $x_{(t-1)mn} = 1$  かつ  $x_{tm'n} = 1$  であれば移動することを示し、 $x_{(t-1)mn} = 0$  または  $x_{tm'n} = 0$  であれば移動しないことを示す。これを使うと以下のように、0-1 整数計画問題 (Binary Quadratic Programming: BQP) として表現できる [20]。この定式化を BQP 避難所計画問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem: BQP) とよぶことにする。

#### BQP 避難所計画問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem: BQP)

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} d_{tmm'} \sum_{n \in N} x_{(t-1)mn} x_{tm'n} \right. \\ & \left. + \sum_{m \in M} f_m y_{tm} \right) \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{n \in N} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall m \quad (4.2.10)$$

$$\sum_{m \in M} x_{tmn} = 1, \forall t \leq \tau_n \quad (4.2.11)$$

$$\sum_{m \in M} x_{tmn} = 0, \forall t > \tau_n \quad (4.2.12)$$

$$x_{t=0,mn} = \begin{cases} 1, & m = \tilde{m}_0(n) \\ 0, & m \neq \tilde{m}_0(n) \end{cases} \quad (4.2.13)$$

$$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (4.2.14)$$

$$x_{tmn}, y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (4.2.15)$$

式 (4.2.9) は目的関数で、被災者の移動コストと避難所の運営コストの和を最小化する。式 (4.2.10) は、閉鎖された避難所には被災者が滞在できず、運営される避難所にも定員を超えた被災者は滞在できない制約である。ただし、災害発生時にはまだ被災者は避難所に収容されていないため、 $t = 0$  ではこの制約を適用しない。式 (4.2.11)(4.2.12) は、帰宅時刻まで被災者はいずれかの避難所に滞在する制約である。式 (4.2.13) は、被災者  $n$  の災害発生時の位置  $\tilde{m}_0(n)$  を所与とする制約である。式 (4.2.14) は、閉鎖した避難所を再度運営しない制約である。施設本来の用途で使用を再開した後に、再度避難所を設営するのは困難と考えられるためにこの制約を導入した。

この BQP は商用ソルバーで解を得ることができるが、実験の 4.7.2 節で示すように、計算時間が長く性能が低い。そこで  $x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n}$  の代わりに、被災者  $n$  の時刻  $t$  から  $t+1$  の間の位置  $m$  から  $m'$  までの移動の有無を示す変数  $z_{tmm'n}$  を導入して、0-1 整数線形計画問題に変換できる。変数  $z_{tmm'n}$  を導入して、BQP を 0-1 整数計画問題 [20] に変換することを提案する。 $z_{tmm'n} = x_{tmn} \times x_{(t+1)m'n}$  となるように式 (4.2.22), (4.2.23), (4.2.24) を追加すると、目的関数は式 (4.2.16) のように一次式となる。以下の定式化を LP (線形) 避難所計画問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem: ESSP) とよぶ。

LP 避難所計画問題 (Evacuation Shelter Scheduling Problem: ESSP)

$$\text{Minimize} \quad \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} d_{tmm'} \sum_{n \in N} z_{tmm'n} + \sum_{m \in M} f_m y_{tm} \right) \quad (4.2.16)$$

$$\text{Subject to } \sum_{n \in N} x_{tmn} \leq C_m y_{tm}, \forall m, \forall t \geq 1 \quad (4.2.17)$$

$$\sum_{m \in M} x_{tmn} = 1, \forall t \leq \tau_n \quad (4.2.18)$$

$$\sum_{m \in M} x_{tmn} = 0, \forall t > \tau_n \quad (4.2.19)$$

$$x_{t=0,mn} = \begin{cases} 1, & m = \tilde{m}_0(n) \\ 0, & m \neq \tilde{m}_0(n) \end{cases} \quad (4.2.20)$$

$$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (4.2.21)$$

$$z_{tmm'n} \geq x_{(t-1)mn} + x_{tm'n} - 1 \quad (4.2.22)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{(t-1)mn} \quad (4.2.23)$$

$$z_{tmm'n} \leq x_{tm'n} \quad (4.2.24)$$

$$x_{tmn}, y_{tm}, z_{tmm'n} \in \{0, 1\} \quad (4.2.25)$$

$$\text{Given } \tilde{m}_0(n). \quad (4.2.26)$$

式 (4.2.16) は目的関数で、被災者の移動コストと避難所の運営コストを最小化する。式 (4.2.17) は定員の制約で、閉鎖されている避難所には被災者が滞在できないし、運営されている避難所には定員を超える被災者は滞在できない。ただし、災害発生時 ( $t = 0$ ) には、まだ避難所に収容される前であるため、この制約は適用されない。式 (4.2.18) と式 (4.2.19) は、被災者が帰宅するまではいずれかの避難所に収容される制約である。式 (4.2.20) は、災害発生時に被災者  $n$  が位置  $\tilde{m}_0(n)$  にいる制約である。式 (4.2.22), (4.2.23), (4.2.24) は、被災者  $n$  が移動前に移動元の位置にいて、移動後に移動先の位置にいる制約であり、 $z_{tmm'n} = x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n}$  に相当する。式 (4.2.21) は、一度閉鎖した避難所を再び運営しない制約である。以上の定式化を E SSP とよぶ。



### 4.3 ESSP の課題と避難所閉鎖問題の定式化

被災者数が大きくなるにつれて、ESSP の計算量は増大する．変数  $x_{tmn}, y_{tm}, z_{tmm'n}$  の数は、それぞれ  $T|M||N|, T|M|, T|M|^2|N|$  であり、 $x_{tmn}, z_{tm}$  はどちらも  $|N|$  に比例する．さらに、 $M$  には避難所の位置だけでなく  $N$  人の被災者の震災発生時の位置を含む．そのため、もし全被災者の位置が異なるなら  $|M| > |N|$  であり、 $z_{tm}$  は  $|N|^3$  よりも早く増大する．これらの事実のために、空間計算量を非現実的なものとなる．

そこでまず、被災者の初期位置がいずれかの避難所の位置に一致する状況を検討する．現代では被災者は災害発生時に向かうべき避難所が一般的に事前に決められていることを考えると、妥当な仮定と思われる．この仮定によって、 $t = 0$  で  $|M| \ll |N|$  のとき大幅に変数の数が削減される．次に整数変数  $\bar{x}$  と  $\bar{z}$  を導入して定式化を変形する．これらの変数はそれぞれ、避難所に滞在する被災者数と避難所間を移動する被災者数を表す．

$$\bar{x}_{tm}^\tau = \sum_{n \in N} (x_{tmn} \times \mathbb{I}(\tau_n = \tau)) \quad (4.3.1)$$

$$\bar{z}_{tmm'}^\tau = \sum_{n \in N} (z_{tmm'n} \times \mathbb{I}(\tau_n = \tau)). \quad (4.3.2)$$

$x_{tm}^\tau$  と  $z_{tmm'}^\tau$  の変数の数はそれぞれ、 $T^2|M|$  と  $T^2|M|^2$  となる．すなわち、もし  $T < |N|$  であれば変数の数は減少する．式 (4.3.1) と (4.3.2) は、 $\tau$  について和をとると元の変数と対応する．

$$\sum_{\tau=1}^T \bar{x}_{tm}^\tau = \sum_{n \in N} x_{tmn} \quad (4.3.3)$$

$$\sum_{\tau=1}^T \bar{z}_{tmm'}^\tau = \sum_{n \in N} z_{tmm'n}. \quad (4.3.4)$$

また、 $z_{tmm'n} = x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n}$  であるから、

$$\bar{z}_{tmm'}^\tau = \sum_{n \in N} (x_{(t-1)mn} \times x_{tm'n} \times \mathbb{I}(\tau_n = \tau)) \quad (4.3.5)$$

$$\sum_{m \in M} \bar{z}_{tmm'}^\tau = \sum_{n \in N} (x_{tm'n} \times \mathbb{I}(\tau_n = \tau)) = \bar{x}_{tm'}^\tau \quad (4.3.6)$$

$$\sum_{m' \in M} \bar{z}_{tmm'}^\tau = \sum_{n \in N} (x_{(t-1)mn} \times \mathbb{I}(\tau_n = \tau)) = \bar{x}_{(t-1)m}^\tau. \quad (4.3.7)$$

以上の式を用いて、式 (4.2.16) - (4.2.26) を以下のように変形する。

グループ化避難所閉鎖問題 (Evacuation Shelter Closing Problem: ESCP)	
Minimize	$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} d_{tmm'} \sum_{\tau=t}^T \bar{z}_{tmm'}^\tau + \sum_{m \in M} f_m y_{tm} \right) \quad (4.3.8)$
Subject to	$\sum_{\tau=t}^T \bar{x}_{tm}^\tau \leq C_m y_{tm}, \forall t \geq 1 \quad (4.3.9)$
	$\sum_{m \in M} \bar{z}_{tmm'}^\tau = \bar{x}_{tm'}^\tau, \forall t < \tau_n \quad (4.3.10)$
	$\sum_{m' \in M} \bar{z}_{tmm'}^\tau = \bar{x}_{(t-1)m}^\tau, \forall t < \tau_n \quad (4.3.11)$
	$y_{tm} \leq y_{(t-1)m} \quad (4.3.12)$
	$\bar{x}_{tm}^\tau, \bar{z}_{tmm'}^\tau \in \mathbf{Z}_{\geq 0} \quad (4.3.13)$
	$y_{tm} \in \{0, 1\} \quad (4.3.14)$
Given	$\bar{x}_{t=0,m}^\tau. \quad (4.3.15)$

式 (4.3.8) は目的関数で、被災者の移転コストと避難所の運営コストを最小化する。式 (4.3.9) は閉鎖した避難所が被災者を収容できず、運営している避難所でも定員を超える被災者を収容できない制約である。ただし災害発生直後は定員以上の被災者が最寄の避難所に到着することを想定するため、 $t = 0$  ではこの制約を適用しない。式 (4.3.10) は、避難所に滞在する被災者数とその避難所に移転する被災者数と滞在し続ける被災者数の合計とする制約である。式 (4.3.11) は、前の時刻に避難所にいた被災者数とその避難所から移転する被災者数と滞在し続ける被災者数の合計とする制約である。式 (4.3.10) と式 (4.3.11) の組み合わせることで、帰宅時刻前の被災者数が移転前後で変化しない制約となる。式 (4.3.12) は、一度閉鎖した避難所を再度運営しない制約である。式 (4.3.15) は、災害発生時の被災者の人数、位置、帰宅時刻が所与とする制約である。

以上の最適化問題の解は、変数を変換する前の ESSP と一致する．この最適化問題も汎用整数計画問題ソルバーで解ける．この定式化を，ESCP(避難所閉鎖問題 Evacuation Shelter Closing Problem) とよぶ．

ESSP から ESCP への変換と同様に，以下の  $\bar{x}$  と  $\bar{z}$  を導入して，

$$\bar{x}_{tm} = \sum_{n \in N} x_{tmn} \quad (4.3.16)$$

$$\bar{z}_{tmm'} = \sum_{n \in N} z_{tmm'n}. \quad (4.3.17)$$

式 (4.2.1) - (4.2.8) の SEQFLP にも以下の式 (4.3.18) - (4.3.25) のように変換できる．

<u>グループ化逐次 FLP(SEQFLP)</u>		
Minimize	$\sum_{m \in M} \left( \sum_{m' \in M} d_{tmm'} \bar{z}_{tmm'} + f_m y_{tm} \right)$	(4.3.18)
Subject to	$\bar{x}_{tm} \leq C_m y_{tm}, \forall t \geq 1$	(4.3.19)
	$\sum_{m \in M} \bar{z}_{tmm'} = \bar{x}_{tm'}$	(4.3.20)
	$\sum_{m' \in M} \bar{z}_{tmm'} = \bar{x}_{(t-1)m}$	(4.3.21)
	$y_{tm} \leq y_{(t-1)m}$	(4.3.22)
	$\bar{x}_{tm}, \bar{z}_{tmm'} \in \mathbf{Z}_{\geq 0}$	(4.3.23)
	$y_{tm} \in \{0, 1\}$	(4.3.24)
Given	$\bar{x}_{t=0,m}$	(4.3.25)

#### 4.4 移動コスト推定問題

避難所計画問題の問題設定は，移動コストと運用コストを適切に設定することで，汎用の整数線形計画ソルバーを用いて最適に解ける．運営コスト  $f_m$  は，施設の賃貸料から見積もることができる [83] が，被災者の移動コスト  $d_{tmm'}$  は，金銭の支払

いがいないため、過去のデータから判断することは難しい。

一方で、施設タイプ  $l$  別の占有日数  $U_\ell$  の履歴が報告されている [83]。施設タイプとは、小学校や公園など、避難所の本来の用途によって分類されている (表 4.2)。避難所  $m$  がタイプ  $l$  であるか否かを示す変数  $s_{ml}$  を導入する。そして、解の  $y_{tm}$  から  $\hat{U}_\ell$  の推定値を算出する。

$$\hat{U}_\ell = \sum_{t=0}^T \sum_{m \in M} y_{tm} s_{ml}. \quad (4.4.1)$$

この  $\hat{U}_{ell}$  を使って、移動コストを見積もることができる。

遠方の避難所に移転することは負担が大きいと考えられるため、ここでは距離に比例すると仮定する。

$$d_{tmm'} = \lambda \|\mathbf{p}_m - \mathbf{p}_{m'}\|, \forall t > 0, \quad (4.4.2)$$

ここで、 $\mathbf{p}_m$  は、 $m$  の位置の座標であり  $\|\mathbf{p}_m - \mathbf{p}_{m'}\|$  は、位置  $m$  と  $m'$  の間のユークリッド距離である。

以上の設定を用いて、 $N_t, M, \tilde{m}_0(n), C_m, \tau_n, f_m, \mathbf{p}_m, \alpha, U_\ell, s_{ml}$  がわかっているとき、 $\lambda$  を推定する問題を「移動コスト推定問題」と名付ける。移動コストを推定することで、避難効率と運営コストのバランスを自動的に調整できる。

## 4.5 移動コスト推定問題の手法

「移動コスト推定問題」については、アルゴリズム 6 に示すように、 $\lambda$  を推定する手法を提案する。

まず、過去災害において避難所が SEQFLP の手順で運営されたことを仮定する。そして、訓練データセットで観測された  $U_\ell$  に最も適合する  $\lambda$  を選択する。 $\hat{U}_\ell$  と  $U_\ell$  の平均二乗誤差

$$\text{MSE} = \frac{1}{L} \sum_{\ell \in L} (U_\ell - \hat{U}_\ell)^2, \quad (4.5.1)$$

を、 $\lambda$  の適合度を評価する損失関数として用いる。

訓練データから推定された移動コストのパラメータ  $\hat{\lambda}$  を用いて、ESSP の最適解を線形計画法の汎用ソルバーを用いて求めることができる。

---

**Algorithm 6** 移動コスト推定問題に対する提案手法

---

入力:  $\lambda$  の候補集合,

$N_t, M, \tilde{m}_0(n), C_m, \tau_n, f_m, \mathbf{p}_m, \alpha$  for estimation,

$U_\ell, s_{ml}$  for evaluation,

出力:  $\hat{\lambda}$

- 1: **for**  $\lambda$  in 候補集合 **do**
  - 2: データセットに SEQFLP を適用して  $x_{tmn}, y_{tm}, z_{tmm'n}$  の解を得る.
  - 3: 得られた  $y_{tm}$  から (4.4.1) と (4.5.1) で MSE を計算する.
  - 4: **end for**
  - 5: MSE を最小とする  $\lambda$  を  $\hat{\lambda}$  として選択する
  - 6: **return**  $\hat{\lambda}$
- 

## 4.6 避難所計画問題の実験

### 4.6.1 避難所計画問題の実験概要

本節ではまず、阪神大震災 [5] の記録を参考にしたデータセット HANSHIN を用いて、移転コストのパラメータ  $\lambda$  を推定する。推定の際には SEQFLP モデルを仮定して、実際の記録に最も適合する値を求める。次に、生駒市の震災被害の想定を参考にしたデータセット IKOMA を用いて、提案手法の効果を評価する。評価の際には推定したパラメータ  $\lambda$  を適用して最適解を求めて、他の手順よりも目的関数を小さくできることを示す。

### 4.6.2 データセット HANSHIN

阪神大震災で被害の大きかった神戸市全9区の位置を図4.2の地図に示す。避難所数と運営コストは、2つの先行研究 [83, 97] を参考に設定した(表4.2)。災害発生時は定員を超える被災者が避難所に収容されていたが、文献からは実質的な定員が見つからなかったため、施設の平均床面積 [83] に比例した定員を設定した。被災者数と被災者の帰宅時刻は、阪神大震災で避難所に宿泊した被災者数 [76, 97] に比例して減少するように、表4.3に示す通り設定した。また、避難所が運営された

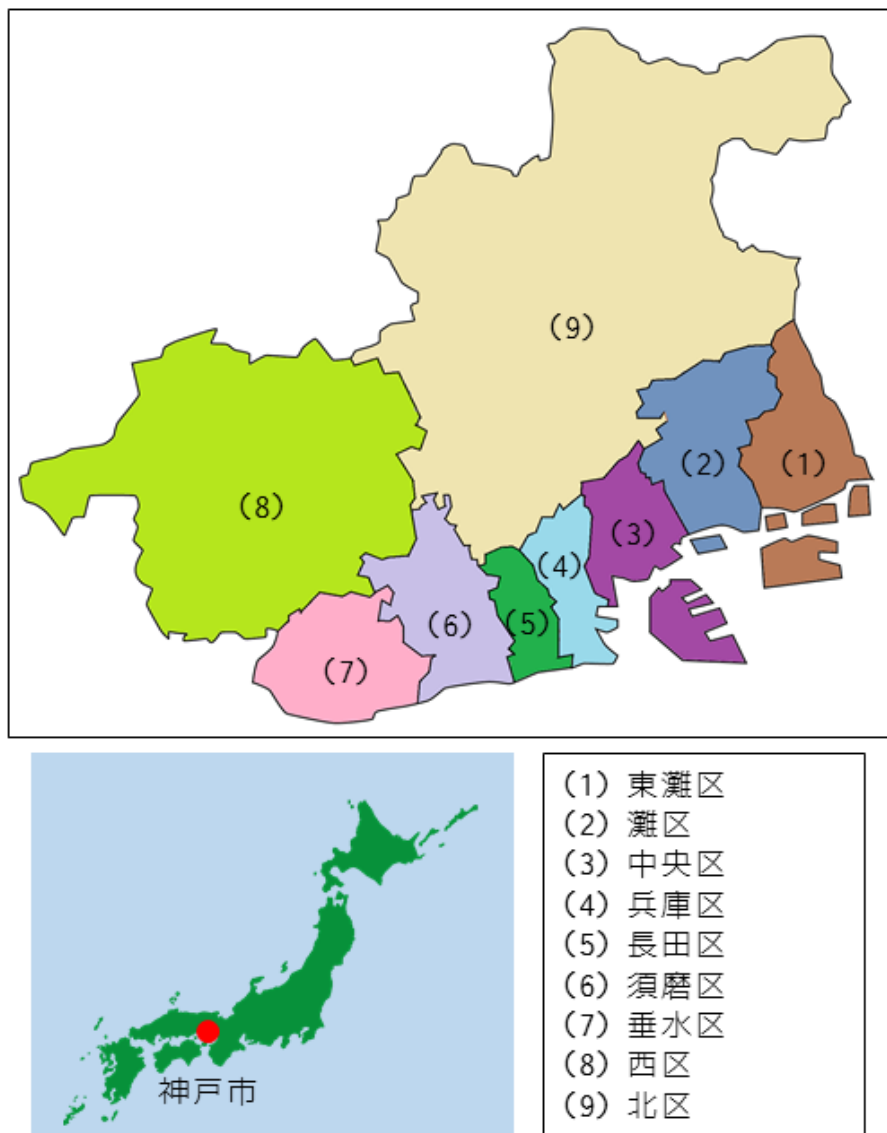


図 4.2: 阪神大震災で被害の大きかった神戸市の9つの区.

期間（震災発生の 1995 年 1 月 17 日から神戸市が全避難所を閉鎖した 8 月 20 日まで）が対象となるように，時間ステップを一カ月， $T = 7$ とした．被災者は  $t = 0$  で避難所に収容されていて，他の区の避難所へは移転しないものとした．また全ての区で移転コストのパラメータ  $\lambda$  は同一と仮定した．

表 4.2: データセット HANSHIN の避難所の設定. 運営コスト  $f_m$  の単位は [千円/月] で, 先行研究 [83] に従って設定した. 神戸市の区ごとの避難所数は先行研究 [97] を参考にした. 避難所の定員は施設の平均床面積 [83] に比例して設定した.

施設タイプ $\ell$	全区共通			避難所数 $ M $								合計	
	運営コスト $f_m$ [千円/月]	定員 $C_m$ [人]	占有日数 $U_\ell$ [日]	東灘	灘	中央	兵庫	長田	須磨	垂水	西		北
保育所/幼稚園	1,110	90	4,353	8	5	5	5	7	7	7	2	4	50
小学校	5,490	840	19,882	30	18	20	19	27	26	25	7	16	188
中学校	5,280	840	7,437	11	7	8	7	10	10	10	3	6	72
高校	6,660	880	4,652	6	4	4	4	6	6	5	2	4	41
大学	3,690	790	788	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8
公的施設 (小)	1,350	80	14,866	30	26	20	27	19	4	5	2	7	140
公的施設 (中)	5,730	120	9,406	16	14	10	14	10	2	3	1	4	74
公的施設 (大)	8,940	310	2,749	5	4	3	4	3	1	1	0	1	22
民間施設 (小)	2,790	80	9,783	2	14	24	19	3	12	0	0	0	74
民間施設 (大)	13,740	130	388	0	1	1	1	0	1	0	0	0	4
公園	210	210	7,736	3	4	5	2	5	1	0	0	0	20
合計	-	-	82,040	112	98	101	103	91	71	57	17	43	693
区の面積 (km <sup>2</sup> )				34	33	29	15	11	29	28	138	240	552

表 4.3: 左：阪神大震災の避難所数と被災者数の推移 [97, 76]. 右：データセット HANSHIN の各区の被災者数の設定.

阪神大震災 [76]		被災者数 $ N_t $											
日付	避難所数	被災者数	$t$	東灘	灘	中央	兵庫	長田	須磨	垂水	西	北	合計
1995/1/17	497	202,043	0	60,114	27,017	28,683	22,672	39,888	17,407	2,966	906	2,390	202,043
1995/2/17	527	106,050	1	31,553	14,180	15,055	11,901	20,937	9,137	1,557	476	1,255	106,051
1995/3/17	442	62,604	2	18,626	8,370	8,887	7,026	12,360	5,394	919	281	741	62,604
1995/4/17	391	42,330	3	12,594	5,659	6,009	4,751	8,357	3,647	621	190	501	42,329
1995/5/17	361	31,132	4	9,262	4,162	4,419	3,494	6,146	2,682	457	140	369	31,131
1995/6/17	314	21,609	5	6,429	2,889	3,067	2,425	4,266	1,862	317	97	256	21,608
1995/7/17	283	16,748	6	4,983	2,239	2,377	1,880	3,306	1,443	246	75	198	16,747
1995/8/17	222	8,491	7	2,526	1,135	1,205	953	1,676	732	125	38	100	8,490



定員の 90% で  $t = 0$  の全被災者を収容できるように、避難所の定員を表 4.2 のように設定した。避難所の位置  $p_m$  は文献から調査できなかったため、区の面積と同じ面積の正方形上にランダムにプロットして決定した。被災者の帰宅時刻は位置に依存することも考えられるが、本研究では単純化するため独立して設定した。移転コストは式 (4.4.2) で設定した。データセットは 10 個生成して実験に用いた。

#### 4.6.3 データセット Dataset: IKOMA

評価実験では、生駒市 (図 4.3) の想定する地震災害の最悪ケースのシナリオに基づいて、現実の災害に近い設定で提案手法を評価した。

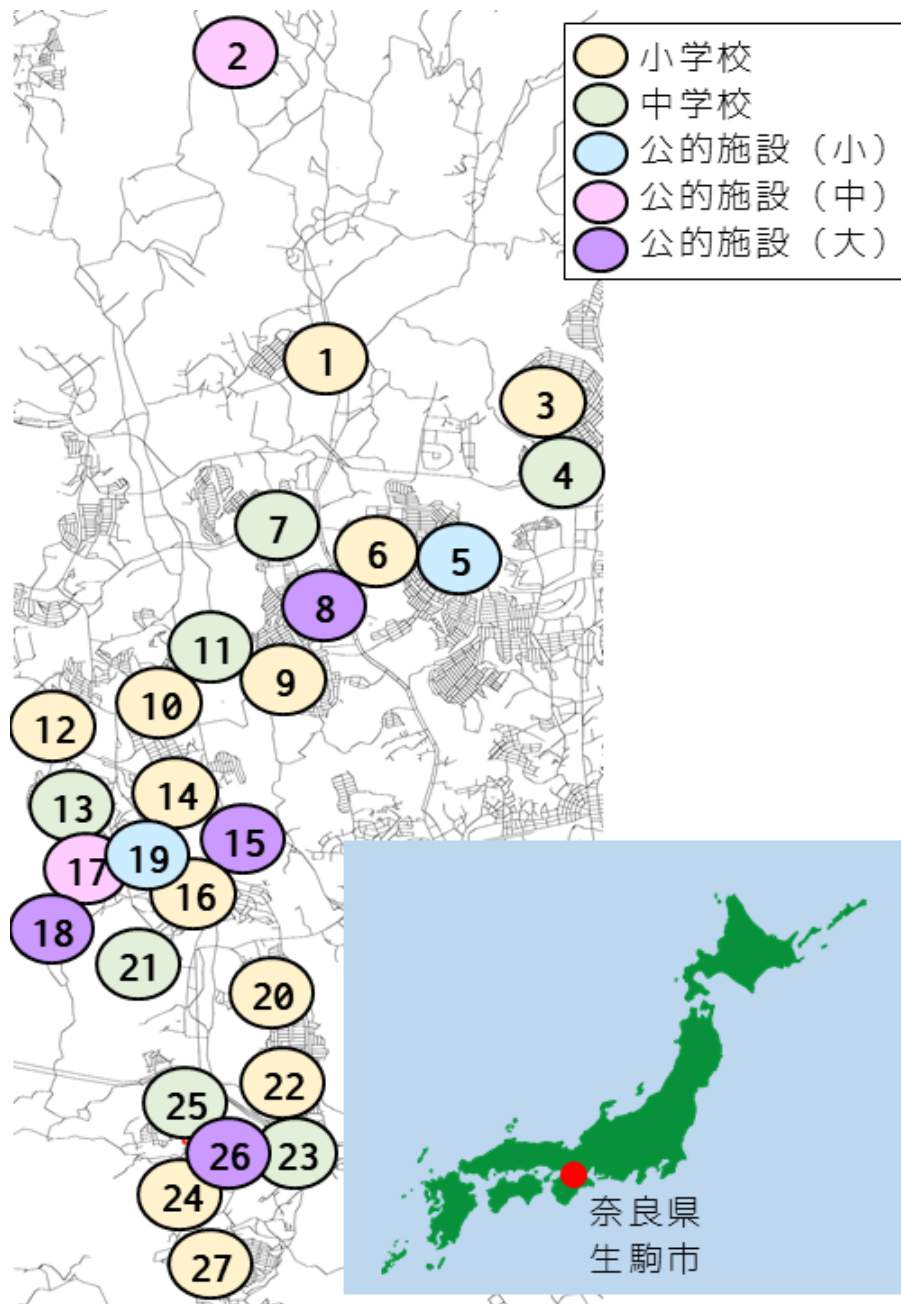


図 4.3: 右側：奈良県生駒市の日本地図上での位置．左側：施設種別ごとに色分けした生駒市の避難所の位置．

表 4.4: データセット IKOMA の設定.

$m$	施設種別	$f_m$ [千円/月] 運営コスト	$C_m$ [人] 定員	被災者数 $N_m^t$								
				$t=0$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	小学校	5490	1530	1682	883	522	354	261	182	142	74	0
2	公的施設 (中)	57300	760	397	209	124	85	64	46	37	21	0
3	小学校	5490	1550	1292	679	402	273	202	142	111	59	0
4	中学校	5280	1530	1292	679	402	273	202	142	111	59	0
5	公的施設 (小)	13500	160	161	85	51	35	27	20	17	11	0
6	小学校	5490	1840	764	402	238	162	120	85	67	36	0
7	中学校	5280	2260	622	327	194	132	98	69	55	30	0
8	公的施設 (大)	8940	2170	895	470	278	189	140	98	77	41	0
9	小学校	5490	1540	1103	579	342	232	171	120	94	49	0
10	小学校	5490	1730	2247	1180	697	472	348	243	190	99	0
11	中学校	5280	1530	1522	799	472	320	236	165	129	67	0
12	小学校	5490	1900	1204	632	374	254	188	132	104	55	0
13	中学校	5280	2040	2026	1064	629	426	314	219	171	89	0
14	小学校	5490	1580	1619	850	502	340	251	175	137	71	0
15	公的施設 (大)	8940	1030	719	378	224	152	113	80	63	34	0
16	小学校	5490	2240	2481	1303	770	522	385	269	210	109	0
17	公的施設 (中)	5730	980	908	477	282	191	141	99	78	41	0
18	公的施設 (大)	8940	1120	691	363	215	146	108	76	60	32	0
19	公的施設 (小)	1350	310	644	339	201	137	102	72	57	31	0
20	小学校	5490	1670	1853	973	575	390	288	201	157	82	0
21	中学校	5280	1950	2284	1199	708	479	353	246	192	99	0
22	小学校	5490	1580	1474	774	458	311	230	161	126	66	0
23	中学校	5280	1730	1026	539	319	217	161	113	89	48	0
24	小学校	5490	1480	1002	526	311	211	156	109	85	45	0
25	中学校	5280	1520	1007	529	313	212	157	110	86	45	0
26	公的施設 (大)	8940	1270	1233	648	383	260	192	134	105	55	0
27	小学校	5490	1400	559	294	174	118	88	62	49	27	0
合計	-	152760	40400	32707	17180	10160	6893	5096	3570	2799	1475	0

避難所の運営コストは、既存研究 [83] に基づいて表 4.4 のように設定した。左側は避難所の運営コストと定員を示し、右側は当初避難所にいた被災者のうち各時点で滞在している人数を示す。運営コストは先行研究 [83] に従った。また、定員は施設で規定されている値を設定した。被災者数の帰宅時刻は、阪神大震災の被災者の減少に比例するように設定した [76, 97]。一カ月を時間単位として、 $T = 7$  とした。初期位置が  $m$  の被災者のうち時刻  $t$  で避難所に残る被災者数を  $N_m^t$  とする。すると、帰宅時刻が  $\tau$  の被災者のうち時刻 0 で初期位置が  $m$  にいる人数は  $x_{t=0,m}^\tau = N_m^\tau - N_m^{\tau+1}$  となる。4.7.3 節の実験で用いたデータは、この  $x_{t=0,m}^\tau$  に比例した確率で被災者  $N$  人分のデータをサンプリングして生成した。データセット HANSHIN と同様に、被災者の帰宅時刻は単純化のため位置に依存せず独立して設定した。

#### 4.6.4 避難所計画問題の比較手法

実験では、提案手法も含めて以下の手法を比較した。

- 避難所閉鎖問題: ESCP  
本論文の 4.3 節で提案した手法である。式 (4.3.8) – (4.3.15) を整数線形計画問題として解く。
- Binary Quadratic Problem: BQP  
BQP は式 (4.2.9) – (4.2.15) を二次計画問題として解く手法である。
- 避難所計画問題: ESSP  
式 (4.2.16) - (4.2.26) を用いて ESSP を解く。ESSP は計算量が大きいため、 $N < 700$  でのみ ESCP と比較した。
- 逐次 FLP: SEQFLP  
逐次的に FLP を適用する SEQFLP は、被災者の帰宅時刻が未知の場合に適切な手順であると考えられるため、ベースラインとして SEQFLP を用いた。ただし、被災者の帰宅時刻が既知の場合には、SEQFLP の解は移転させる被災者を一意に決定しないため、解の人数に合致するようにランダムに被災者を選択して割り当てた。
- No Move モデル: NOMOVE

式 (4.3.8) で  $f_m = 0$  とすると, 運営コストを無視して移転コストの下限が求められる. この手順を NoMove とよぶ.

- Bin-Packing モデル: BINPACK

式 (4.3.8) で  $d_{tmm'} = 0$  とすると, 移転コストを無視して運営コストの下限が求められる. この手順を BINPACK とよぶ.

#### 4.6.5 実験環境

図 4.8 の実験については, CPU が Intel(R) Core(TM) i7-6850K 3.60GHz, メモリが 64GB の計算機を用いた. 本章のその他の実験については, CPU が Intel(R) Core (TM)i7-1065G7 1.50GHz, メモリが 16GB の計算機を用いた. 整数線形計画法のソルバーとして Gurobi[17] を用いた.

## 4.7 実験結果

### 4.7.1 移動コストの推定

データセット HANSHIN を用いて、 $\lambda$  を変化させたときの式(4.5.1) の損失関数を図 4.4 の緑線で示す。青実線は運営コストの平均値を示し、青点線は運営コストの実績値を示す。

$\lambda = 10$  のとき損失関数は最小となり、データに最も適合した。そのときの運営コスト

$$\sum_{t=0}^{T-1} \sum_{m \in M} y_{tm} f_m. \quad (4.7.1)$$

は実績値（106.6 億円）に近い値であった。

一方、同じデータセットに対して、NOMOVE を適用すると運営コストが実績よりも超過し、BINPACK を適用すると運営コストが実績よりも過少となる。以上の結果から、阪神大震災では SEQFLP のような手順で避難所が運営されていたと仮定する。 $\lambda = 10$  は被災者一人が 1km の距離を移転する際に一万円の負担感が生じていることに相当する。この金額は、移転する被災者に対して補償すべき額と考えることもできるだろう。

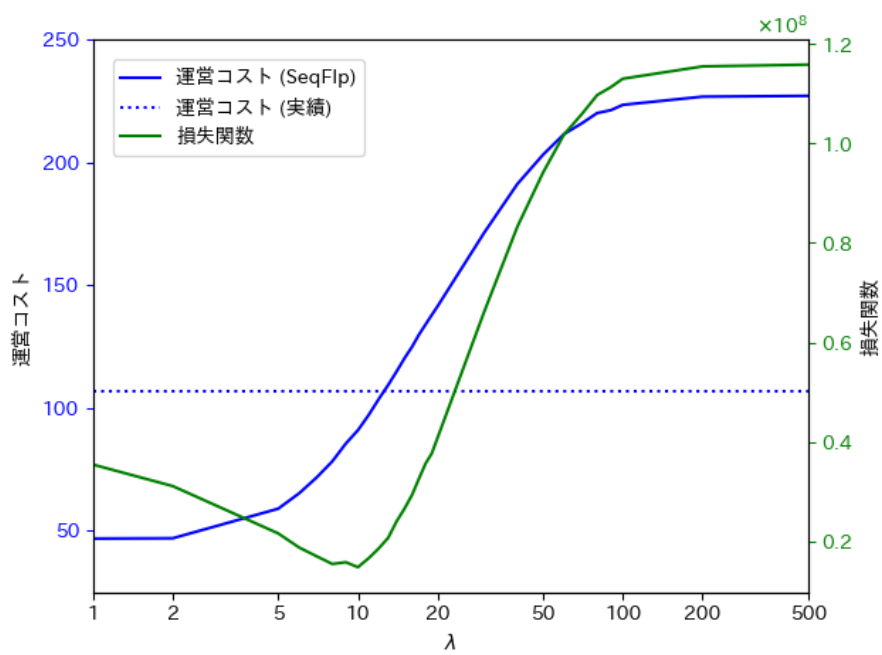


図 4.4: データセット HANSHIN を用いた移転コスト ( $\lambda$ ) の推定.

#### 4.7.2 避難所計画問題の性能評価

データセット HANSHIN と IKOMA に対する性能評価の実験結果を、それぞれ図 4.5(a) と図 4.5(b) に示す。移転コストは  $\hat{\lambda} = 10$  に固定した。全手法について目的関数の内訳を示している。

ベースラインとした SEQFLP と比較して、NOMOVE は移転コストが小さいが運営コストが大きい。BINPACK は運営コストは小さいが移転コストが大きい。一方、ESSP は目的関数を最小化するため、HANSHIN の SEQFLP では 91.8 億円だった運営コストを、63.2 億円 (31% 減少) にまで減少させた。また、IKOMA の SEQFLP では 4.9 億円の運営コストを、3.5 億円 (29% 減少) にまで減少させた。これらは帰宅時刻が事前にわかっているならば、ESCP を用いることで、30% 程度の避難所の運営コスト削減が期待できることを示す。



図 4.5: シミュレーション実験における目的関数とその内訳 (移転コストと運営コスト), および, 被災者の移転コストと移転回数. 移転回数は  $\sum_{t=1}^T \sum_m \sum_{m' \neq m} z_{tmm'}$  である. 太字は各行で最良の値を表す. 最下行に 1 回試行ありの計算時間を示す. HANSHIN は 5 回試行, IKOMA は 10 回試行の平均値を示した.  $\hat{\lambda} = 10$  に固定した. 移転コストは移転回数に比例せず, 移転の距離に比例することに注意されたい.

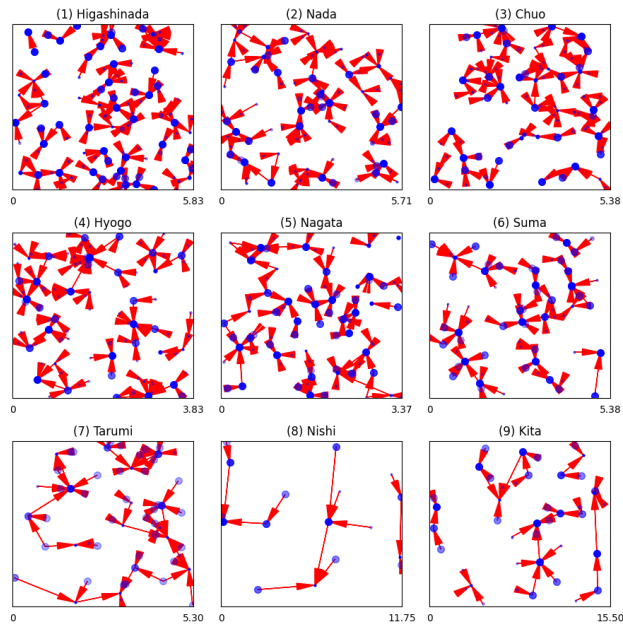
(a) データセット HANSHIN の結果.

手法	SEQFLP	NoMOVE	BINPACK	ESCP (提案手法)
目的関数 ( $\times 10^3$ )	10648.1 $\pm$ 126.6	22765.4 $\pm$ 0.0	64509.3 $\pm$ 1568.2	<b>7401.1</b> $\pm$ <b>84.5</b>
運営コスト (億円)	91.8 $\pm$ 1.3	227.7 $\pm$ 0.0	<b>45.9</b> $\pm$ <b>0.0</b>	63.2 $\pm$ 0.7
移転コスト ( $\times 10^3$ )	1466.2 $\pm$ 0.0	<b>0.0</b> $\pm$ <b>0.0</b>	62086.0 $\pm$ 0.0	1091.0 $\pm$ 0.0
移転回数	39072.6 $\pm$ 1010.3	<b>0.0</b> $\pm$ <b>0.0</b>	232546.0 $\pm$ 0.0	20682.4 $\pm$ 514.6
計算時間 (秒)	<b>4.6</b> $\pm$ <b>0.3</b>	8.0 $\pm$ 0.1	44308.0 $\pm$ 47.8	72078.7 $\pm$ 43.3

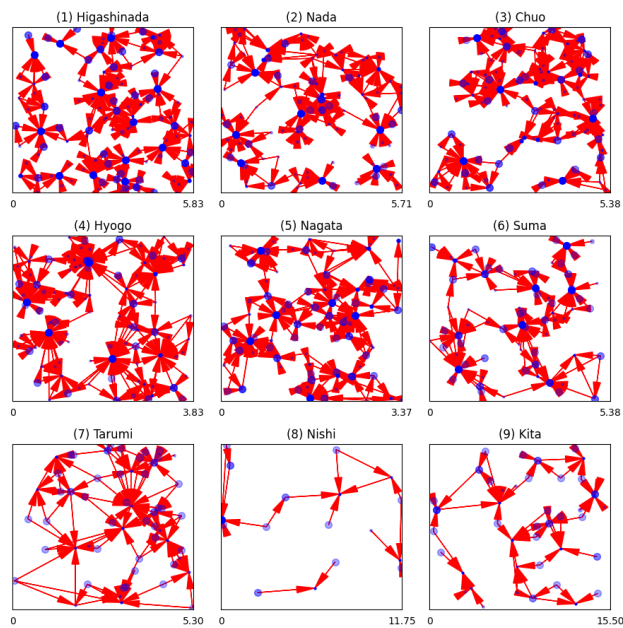
(b) データセット IKOMA の結果.

手法	SEQFLP	NoMOVE	BINPACK	ESCP (提案手法)
目的関数	576827.0 $\pm$ 6928.6	1222120.6 $\pm$ 31.1	1528664.2 $\pm$ 106043.7	<b>408014.4</b> $\pm$ <b>6266.4</b>
運営コスト (億円)	4.9 $\pm$ 0.1	12.2 $\pm$ 0.0	<b>2.9</b> $\pm$ <b>0.0</b>	3.5 $\pm$ 0.1
移転コスト	87066.2 $\pm$ 0.0	<b>13.4</b> $\pm$ <b>0.0</b>	1224952.9 $\pm$ 0.0	53829.1 $\pm$ 0.0
移転回数	8259.0 $\pm$ 186.4	<b>12.1</b> $\pm$ <b>9.2</b>	29591.7 $\pm$ 1008.3	3610.6 $\pm$ 236.8
計算時間 (秒)	<b>0.1</b> $\pm$ <b>0.0</b>	<b>0.1</b> $\pm$ <b>0.0</b>	27.7 $\pm$ 12.5	8831.4 $\pm$ 360.9

ベースライン SEQFLP と提案手法 ESCP での避難者の軌跡を図4.6 に示す。青色の円は避難所を表す。青丸の大きさは避難所の容量を表し、青が濃いほど稼働期間が長いことを示す。赤い線は避難所間の移動を表し、線の太さは移動した人の数を表す。神戸市の9つの区は、それぞれ同じ面積の正方形に対応する。正方形の右下には、一辺の長さがキロ単位で表示されている。出発地の避難所と目的地の避難所を結ぶ赤い矢印を比較すると、最適解では、避難者はより小さな容量の避難所に移されることが多いことがわかる。一般的に、避難所での長期滞在には、生活のためのかさばる設備が必要となり、運用コストが高くなる。しかし、今回の実験結果から、たとえ容量が小さくても、低コストで長期的に運営できる避難所を、周囲の避難所からアクセスしやすい場所にいくつか配置することが有効な対策であると考えられる。



(a) SEQFLP



(b) ESCP

図 4.6: データセット HANSHIN に提案手法を適用して得られた解で, 発生する移転の様子.  $\lambda = 10$  に固定した.

表 4.5: 各避難所に割当てられた被災者数. 運営中の避難所を灰色の網掛けで示す.

$m$	$f_m$	$C_m$	SeqFLP							Escp (proposed)																									
			$t=0$	1	2	3	4	5	6	7	$t=0$	1	2	3	4	5	6	7																	
1	5490	1530	1682	883	646	439	325	228										1682	1116	409															
2	5730	760	397	209														397																	
3	5490	1550	1292															1292	1550	1440	1272	1008	784	617	331										
4	5280	1530	1292	1358	804	546	404	284	222									1292																	
5	1350	160	161															161																	
6	5490	1840	764	1284	761	518	385	272	395	546								764	825																
7	5280	2260	622															622																	
8	8940	2170	895															895																	
9	5490	1540	1103	579														1103																	
10	5490	1730	2247	1180	697													2247	1171																
11	5280	1530	1522	799	814	1024	755	528	413									1522	1530	1530	912	518													
12	5490	1900	1204	632														1204																	
13	5280	2040	2026	1541	1285	871	643	450	353									2026	2040	1275	837														
14	5490	1580	1619	1228	726													1619	1053																
15	8940	1030	719															719																	
16	5490	2240	2481	1332	788	1151	851	918	719	561								2481	2240	2240	2197	2240	2061	1606	822										
17	5730	980	908															908																	
18	8940	1120	691															691																	
19	1350	310	644	310	183													644	310	310	310	310													
20	5490	1670	1853	973	575													1853																	
21	5280	1950	2284	1562	923	625	461											2284	1416	777															
22	5490	1580	1474	1496	872	984	727	890	697	368								1474	1580	659															
23	5280	1730	1026															1026																	
24	5490	1480	1002															1002	829																
25	5280	1520	1007	1520	1086	735	545											1007	1520	1520	1365	1020	725	576	322										
26	8940	1270	1233															1233																	
27	5490	1400	559	294														559																	

IKOMA データセットを用いた性能評価の実験結果を表 4.5(b) に示す。ベースラインである SEQFLP と比較すると、NoMOVE は移転コストが小さいが運営コストが大幅に大きい。BINPACK は運営コストが小さいが移転コストが大幅に大きい。一方、ESCP は目的関数が最小となり、運営コストは BINPACK より大きいものの移転回数は SEQFLP と同程度に小さい。SEQFLP の運営コストは 4,910,000 だが、ESCP の運営コストは 3,630,000 であった。すなわち、ESCP は被災者の帰宅時刻を計画に用いることによって、データセット IKOMA での運営コストを 1,280,000 (26%) だけ削減できる。

運営コスト削減の様子を詳細に調べるため、各時刻における SEQFLP と ESCP の避難所数と被災者数の推移を表 4.5 に示す。ESCP は SEQFLP よりも早期に、被災者を少数の避難所に集約することが確認できる。

SEQFLP と ESCP の運営コストの推移を図 4.7 に示す。被災者数の推移（黒点線）と比較すると、SEQFLP（青線）の運営コストは減少速度が小さいが、ESCP（赤線）の運営コストは減少速度が大きく、 $t = 1$  から  $t = 4$  の期間では赤線が黒点線を下回っている。 $t = 1$  から  $t = 6$  の期間で ESCP の運営コストは SEQFLP を下回った。 $t = 7$  では被災者が少ないため、目的関数の中で運営コストの割合が大きくなり、両者が似たような解を出力したものと考えられる。

### 4.7.3 計算時間

#### データセット IKOMA での実験結果

図 4.8(a) に、ESSP と ESCP の計算時間を示す。横軸が被災者数  $N$ 、縦軸が計算時間（秒）を表す。ESSP は  $N > 700$  でメモリ不足で計算不能となった。一方 ESCP は、 $N = 32707$  でも約 3 時間で最適化可能を完了した（表 4.5(b)）。 $N = 600$  において、ESCP は ESSP の 268 倍高速な計算時間だった。

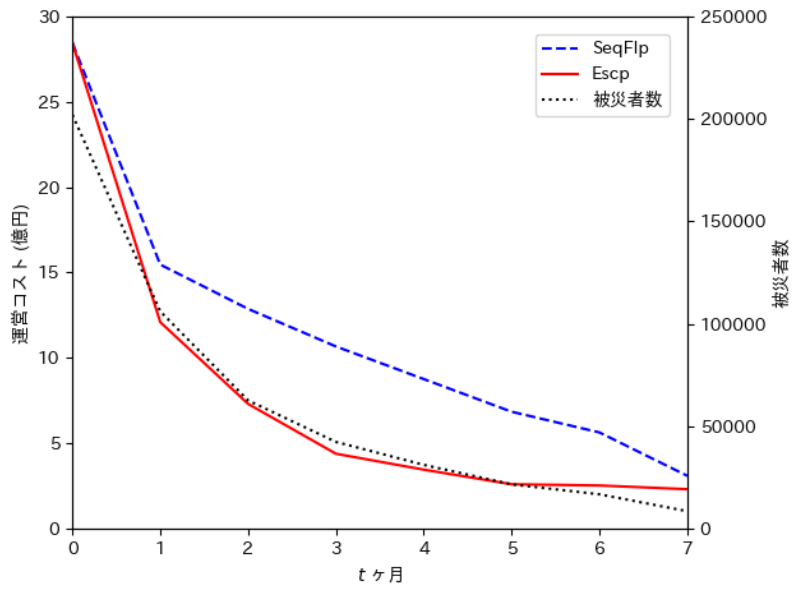
図 4.8(b) に ESCP の計算時間を示す。ESCP の空間計算量は被災者数  $N$  に依存しないものの、 $N = 30000$  までほぼ  $N$  に対して線形に計算時間が増加している。図 4.8(b) の右縦軸で示すコストでわかるように、被災者数が少ないときは運営コストの割合が小さい。そのため最適解が用意に見つかるので、空間計算量にかかわらず計算時間が短くなったと考える。

## 4.8 避難所計画問題のまとめ

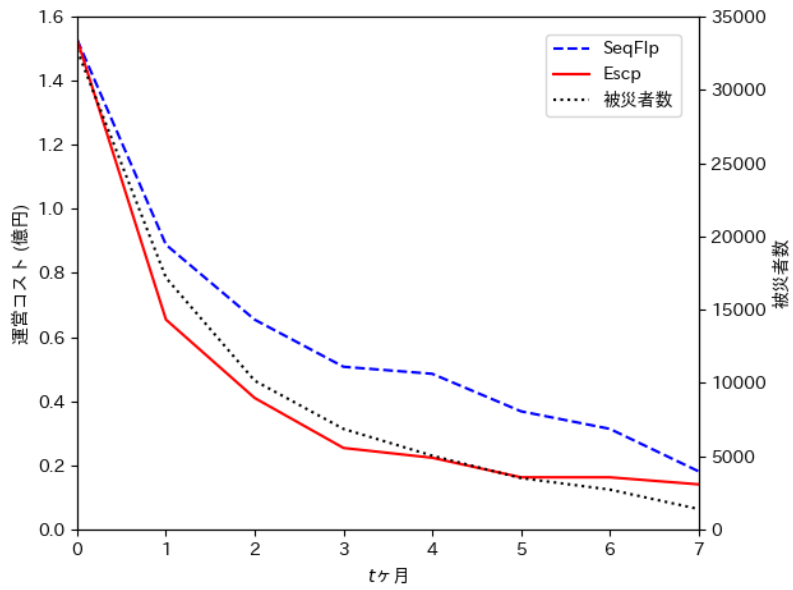
被災者が順次帰宅することによる避難所の閉鎖を考慮した避難所計画問題を定式化した。また、被災者の移動コストを推定する手法を提案した。阪神大震災を想定したシミュレーション実験では、提案手法により 33.7 億円の運営コスト (32%) を削減できることを示した。なお、提案手法は、避難・移転・運用コストのすべてを削減することを保証するものではなく、コストの和を最小化することを目的とする。ここでは、被災者数の減少のみを考慮したが、自然な拡張として被災者数の増加にも対応できる。

本章では、避難所計画問題 ESSP、およびその特殊ケースとしての避難所閉鎖問題 ESCP を定式化し、解法を提案した。データセット IKOMA でのシミュレーション実験によって、ESCP は  $N = 600$  において ESSP の 268 倍高速であり、ESSP では不可能だった  $N > 30000$  のインスタンスも、ESCP では求解できることを示した。得られた解では、被災者の帰宅時刻が不明なベースラインよりも、運営コストが 1.4 億円 (29%) 削減された。

提案手法はコストの和を最小化するため、それぞれのコストがベースラインからの削減が保証されるわけではないことに注意されたい。ESCP では避難所間を移転すべき被災者数を決定できるが、どの被災者が実際に移動するかは別の方法で決定する必要がある。個人の負担の大きさは移転の有無に影響されるため、グループ内で被災者を公平に選択する必要がある。また、本章では被災者が減少する場合のみを考慮したが、被災者が増加する場合にも容易に拡張可能である。

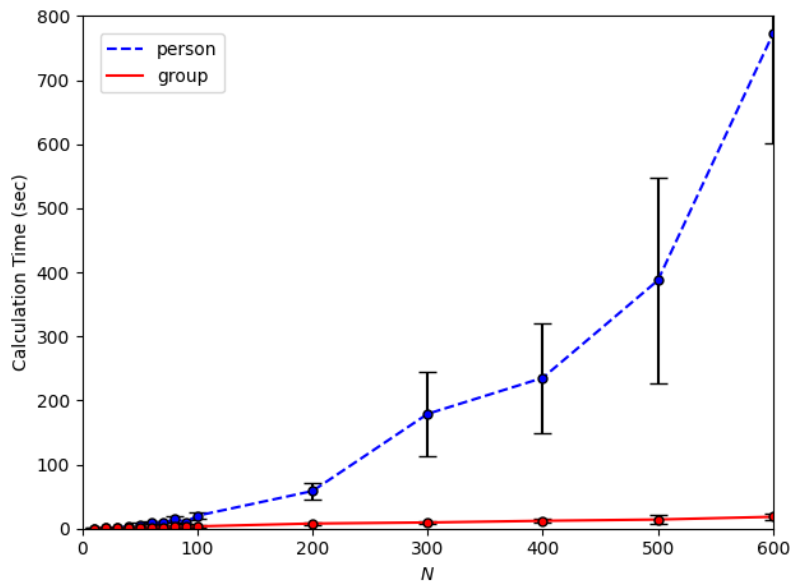


(a) HANSHIN

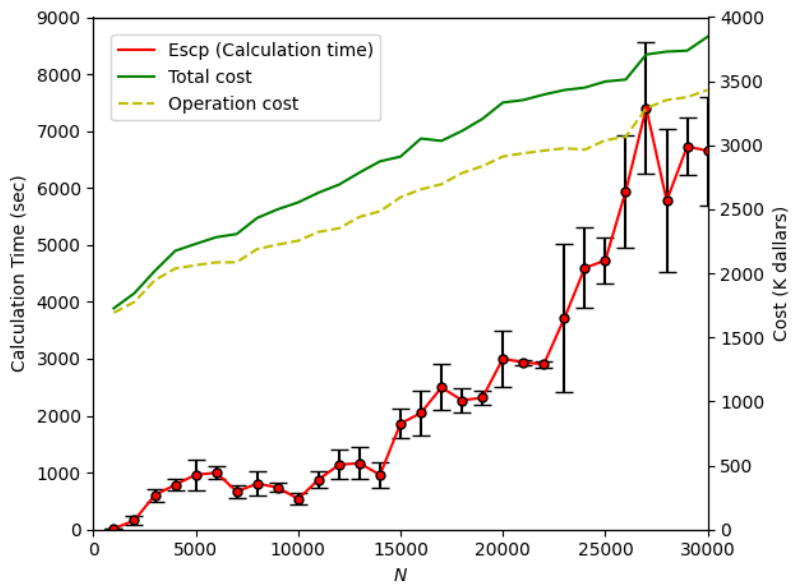


(b) IKOMA

図 4.7: 被災者数と運営コストの推移. 横軸が時刻  $t$  で, 左縦軸が運営コスト, 右縦軸が被災者数を示す.



(a)  $N \leq 600$ : 10 回試行.



(b)  $N \geq 1000$ : 3 回試行. 左縦軸は計算時間を示し, 右縦軸は解の運営コストと総コストを示す.

図 4.8: 被災者数  $N$  (横軸) を変化させたときの計算時間. 平均値を折れ線グラフで示し, エラーバーで標準偏差を示す.



## 第5章 考察および今後の展望

本研究の今後の展望として、おおまかに2つの方向性が考えられる。一つ目は、対象となる災害を、より具体化していく方向である。二つ目は、開発した手法を、より一般化していく方向である。

一つ目の具体化では、災害対策の技術を社会実装する際に、できるだけ具体的な利用シーンを想定することが重要である。災害の種類は多く、対象となる地域の特性によっても、考慮すべき要素は異なる。しかし様々な災害種別や災害のフェーズに対して、本研究のような組合せ最適化の技術が適用できる課題は多いと思われる。そのような課題に一つずつ取り組んで、できるだけ想定外をなくしていくことが、災害対策として意義のある方向となる。

一方で、二つ目の一般化として、手法を改良していくために、できるだけ汎用的に利用できる機能を追求することも重要である。具体的な課題に取り組む中で開発した機能は、汎用的に利用できる技術へと昇華させることが期待される。具体的な対象に取り組みながら、汎用的な技術を開発することで、二つの方向性を両立させる研究が求められる。

以降では、本論文では扱わなかった要素と、扱うために必要な検討項目について、考察と今後の展望を述べる。

### 5.1 避難誘導の手段

第3章で用いた避難シミュレーションでは、全被災者が災害発生と同時に最寄の避難所に向かい、避難誘導には100%の確率で従う、と仮定した。しかし、現実にはこれらの仮定が成立することは難しく、被災者が誘導を受諾する確率は誘導手段によっても影響を受けると考えられる。1.3節で述べたように、本研究では到着した避難所において被災者に誘導先を伝達する手段を検討した。この手段では、情報伝達の場所が避難所の所在地であるという点しか想定しておらず、具体的な手段としては、スタッフの音声や看板 [65]、あるいはデジタルサイネージ [61] などが利用可能である。誘導が受諾されやすい手段を適切に選択することが、実用化の際に重要となる。

一方、情報伝達の場所を避難所に限定しなければ、避難誘導の伝達について、様々な手段が提案されている。たとえば [88] は、タクシーを媒体した避難誘導システムを提案している。また、夜間の避難誘導のために懐中電灯型の投影装置が提案されている [82]。さらに、スピーカを多数配置することにより、音で避難誘導する手法も提案されている [90]。

## 5.2 避難誘導モデルの精密化

前節で述べた誘導手段の受諾率を設定できれば、既存研究 [66, 57] のように指示通りに行動する被災者の確率を固定的な受諾率として設定して、シミュレーションを実行できる。しかし避難誘導に従うかどうかは、誘導手段だけでなく誘導指示の内容にも依存すると考えられる。たとえば遠方の避難所への誘導は近所の避難所への誘導よりも受諾率が低くなるだろう。また、頑固であれば他人からの指示を聞かない、というように、受諾率は被災者の性格にも依存するだろう。さらに、誘導に対して避難開始のタイミングが被災者によって異なる場合 [73] もあるが、このような受諾タイミングは固定的な受諾率では表現できない。避難誘導シミュレーションをより精密にするためには、以上のような要素を考慮したモデルを用いる必要がある。

ただし、被災者の避難行動モデルを複雑にするだけでは、災害対策のためのシミュレーションの精密化として十分とは言えない。現実の誘導が被災者にどれだけ受諾されたかを観察して、シミュレーションに反映する必要がある。本研究では避難所への避難について検討したが、災害が発生して危険が切迫した際に利用する「避難場所」への避難では、避難時間を正確に再現することがより重要となる。たとえば東日本大震災では、災害前に地方自治体が指定した避難所以外に避難する被災者行動が報告されている [96]。このような現実をモデルに反映することで、シミュレーション精度の改善が期待できる。また、[73] のモデルは津波に対する避難行動データでパラメータを推定しているが、避難行動は災害の種別にも依存すると考えられる。より精度の高い避難シミュレーションを実現するためには、それぞれのケースの観測データに適合させた避難行動モデルを用意して、シミュレーションを実行する必要がある。

### 5.3 避難シミュレータによる混雑分析

第3章で用いた人流シミュレータは、被災者の位置と移動速度をログに出力する。そのため、ログから避難誘導時の混雑状況を分析できる。たとえば、人口密度が高い道路や移動速度が低下している道路をヒートマップ上で可視化して把握できる。また、交差点の累積通過人数の時間推移をグラフ表示することで、滞留人数の増減を確認することができる。そこで危険なレベルの混雑が想定される場合には、警備員や誘導員を派遣し、被災者に待機や迂回を指示することができる。

本論文の提案手法では向かうべき避難所を指示するが経路は指定しないため、複数の誘導で共通の経路が選択される場合には想定外に混雑する可能性がある。避難所に向かう経路も合わせて指定する誘導方式も考えられるが、誘導策の候補が多くなるため最適化は困難となる。また、被災者は必ずしも指定された経路を理解し、誘導に従うとは限らない。被災者に経路を提示する方法も合わせて検討する必要があるだろう。

### 5.4 運営計画モデルの改善

避難所計画問題で扱った ESCP モデルを現場に導入するためには、以下の2つの課題に取り組み具体化する必要がある。1つ目の課題は、対象となる災害の種類や緊急度に合わせて、避難のための交通手段 [39]、ペットや高齢者のための特別な施設 [24]、などの要素をモデルに取り入れることである。2つ目の課題は、被災者の帰宅時刻の推定である。例えば、交通機関の復旧時期や仮設住宅の建設時期を予測することで、推定が可能になると考えられる。本論文では被災者の帰宅時刻が既知と仮定したが、この問題は提案手法を適用する上で非常に重要である。

一方で、ESCP を汎用的に使われるモデルとするためには、より効率的な計算方法の開発する必要がある。ESCP では変数の数が被災者の数に依存しなくなったとはいえ、数万人規模の避難計画を作成するには数時間かかるため、実用化のためにはさらに改善の余地がある。短時間で精度の高い解を得るためには、ヒューリスティック解法も考慮する必要があるだろう。

## 5.5 避難所モデルの統合

1.2 節で述べたように、第 3 章では被災者として帰宅難民を想定したのに対して、第 4 章では被災者として震災などで自宅が倒壊した人を想定した。しかし、交通機関の復旧状況によっては、帰宅難民の帰宅時刻が被災者によって異なり、宿泊すべき日数が異なることも考えられる。この場合は、宿泊施設を移動する負担を考慮して、避難誘導と運営計画を連続して実行する場合もありうる。

避難誘導と運営計画は、どちらも組合せ最適化の技術を適用して最適解を求めるというアプローチは共通している。また、被災者をグループ化する前の定式化では、避難と移転を統一的に扱うことができる。また、避難所に収容する前の被災者であっても、災害発生時に近隣にいる被災者を同一のグループとみなせば、計算量を抑制することができるだろう。したがって一定の条件のもとで、第 3 章と第 4 章の避難所モデルは統合可能と考える。もし 2 つの避難所モデルを統合することができれば、避難所の避難誘導と運営計画のためのシステム導入のコストを抑制でき、導入後の運用も容易になることが期待できる。

## 5.6 避難所モデルの拡張

1.1 節で述べたように、災害対策には本論文で扱った③対応と④復興、以外に、①軽減と②準備、の段階がある。そして避難所に関しては、②準備の段階で避難所の設置位置を決定する問題も重要である。本論文では避難所の位置を既知として検討したが、3 章の避難誘導でも、3 章の避難所運営でも、提案手法による性能向上は避難所の位置に依存する。

避難所の位置を決定するためには施設配置問題を用いることができる。一般に施設配置問題には、(I) 解析的モデル、(II) 連続型モデル、(III) ネットワークモデル、(IV) 離散型モデル、の分類がある [12, 91]。災害前の準備段階でも避難所の位置の候補が所与であれば、本研究の第 4 章と同様に、(IV) 離散型モデルを用いて整数計画問題として定式化できる。たとえば [91] によると、被災者の住所から避難所の位置までの移動距離の総和を最小化するように施設の位置を決定する問題は、 $p$ -メディアン問題として定式化されている。また、被災者の住所から避難所の位置までの移動距離の最大値を最小化するように施設の位置を決定する問題は、 $p$ -セン

ター問題として定式化されている。

一方、平面または空間上で任意の位置に施設を配置可能な問題には、(I) 解析的モデルと (II) 連続型モデルを用いることができる。たとえば [54] では解析的モデルを用いて、施設の数を決める問題を扱っており、「最適施設数は都市人口の  $2/3$  乗と都市面積の  $1/3$  乗に比例する」という最適施設数の原理が紹介されている。異なる都市で避難所の数を比較する際にも、このような議論を適用することが可能と思われる。

また、本論文 3 章で検討した避難所間の避難誘導を実施する場合には、避難所間の距離を小さくすることで、たらい回しの際の移動距離を短縮できる。しかし、もし被災者収容人数を一カ所に集中させると、避難所間の距離は小さくなるものの、被災者の住所から避難所の位置までの移動距離が増加してしまう。1.3 節でも述べたように、たらい回しの本質的な原因は昼夜人口のギャップにあることを考慮すると、昼間人口と夜間人口などの複数パターンで、妥当な移動距離となるような設計をすることが現実的と考える。

## 5.7 類似課題への適用

本研究の 4 章における ESSP や ESCP の定式化は、避難所以外にも適用できる形式である。たとえば通信サービスにおいては、ユーザに設備を割り当ててサービスを提供する形態が一般的であり、コストを時系列の累積で考慮する必要がある場合が多い。このようなサービスのユーザ数変動する状況 [68] では、コストを最小化するために ESCP のような定式化が有効となる。

また人流分析の分野においても、人数の増減を考慮せずに人の移動のみを考慮するモデルで、人流を推定する手法が提案されている [21, 58]。本論文の ESCP のようなモデルをベースに人流推定することで、人数が増減するデータにも対応可能となる。したがって本研究の成果は、人流分析技術の対象領域を拡大につながることが期待できる。

## 第 6 章 結語

第 3 章では、避難所割当問題を検討した。避難所に向かう被災者の人数または移動速度を既知として、避難所で次に向かうべき避難所を提示して被災者を誘導する「個人誘導問題」と「集団誘導問題」を定式化した。それぞれに対して最小費用流を用いた解法を提案した。提案手法では、避難のための移動時間または移動距離の総和が最小となるように、最小費用流を用いて被災者と避難所との割当を求める。シミュレーション実験によって、提案手法がたらい回しの回数削減と移動時間の短縮に有効であることを示した。

第 4 章では避難所計画問題を検討した。まず、避難所を利用する被災者の帰宅時刻を既知として、運営コストと移動コストの和を最小化する整数線形計画問題を定式化した。また、被災者をグループ化して変数を削減することで、効率的に計算する手法を提案した。さらに、神戸市および生駒市を想定したシミュレーション実験を行うことで、提案手法の有効性を確認した。

今後、本研究の技術をさらに発展させる所存ではあるが、本論文がこの災害対策や人流分析の研究分野の発展に貢献することを願いつつ、ここで筆をおくことにする。

## 謝辞

安本先生には、入学の際には社会人ドクター課程に迎え入れていただき、入学後はなかなか進捗がない状況でも温かく見守っていただき、随所に貴重なアドバイスをいただきありがとうございます。諏訪先生には、母校への入学の機会を与えていただき、研究生活全般で様々な相談にのっていただきありがとうございます。松田先生には、研究環境や生駒駅前での展示でお世話になりました。同じ社会人博士課程として机を並べて研究した吉田さんと、避難シミュレーションと一緒に研究した田中君には、孤独になりがちな研究生生活に元気をもらいまして、ありがとうございます。また、秘書の金岡さん、山内さんをはじめ、2年間ユビ研でお世話になったスタッフと学生の皆様に大変感謝しております。

笠原先生には副指導教員を引き受けていただき、中間発表と公聴会では貴重なご意見とコメントを賜りありがとうございます。笠原研の原先生には人流誘導について関連研究を教えていただいたり、議論させていただき感謝しております。

NTT コミュニケーション科学基礎研究所の皆様には感謝します。事業会社の一社員だった私に研究の機会を与えてくださった上田さん、人流シミュレーション研究の入口に立たせてくださった納谷さん、研究の方向を考えるとときにいつも貴重なアドバイスをいただいた澤田さん、なかなか進まない進捗を上司かつ共同研究者として見守ってくださった藤野さん、共著者として国際会議に参加するなど研究の楽しさを教えてくださった岩田さん、社会人博士課程の入学を快く許可していただいた山田所長、その他多くの方々にお世話になりました。業務と並行しての博士課程でご迷惑をかけることもあったと思いますが、今後はこの経験を活かして恩返ししていきたいと思っております。ありがとうございます。

奈良先端科学技術大学院大学の修士課程から NTT 西日本への就職を勧めていただいた当時の指導教官の石井信先生に感謝いたします。当時の論理生命学講座でお世話になった方々にも改めて感謝いたします。その後、約10年間のNTT西日本での業務経験と、そのうち3年間ほどを過ごしたNTTネットワークサービスシステム研究所での実用化開発では、研究の大切さを実感しました。NTTグループ内の各職場でお世話になった方々に感謝いたします。

これまで育ててくれた両親に感謝します。家事と育児について叱咤激励してくれた妻と、元気に成長してくれた子供たちに感謝します。

## 出版リスト

### 論文誌

### 主著

1. 清水仁, 岩田具治, 諏訪博彦, 安本慶一, "最小費用流を用いた避難所間の誘導," 電子情報通信学特集号 (2022年3月号) 学生論文特集「和文論文誌 D」
2. 清水仁, 松林達史, 藤野昭典, 澤田宏, "アンケートに基づく遊園地シミュレーションによる来園者余剰の最大化," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 104, No. 3, pp. 172-183, 2021.
3. 清水仁, 松林達史, 納谷太, 澤田宏, "遊園地におけるアトラクション選択モデルとそのパラメータ推定手法," 人工知能学会 (2019年9月号) 特集論文「知能創発とネットワーク」
4. 清水仁, 松林達史, 納谷太, "混雑飽和状態の遊園地における待ち時間削減手法のシミュレーション評価," 人工知能学会 Vol.32, No.5 特集論文「エージェント技術とその応用 2017」

### 共著

1. Tomoharu Iwata, Hitoshi Shimizu, Naoki Marumo, "Probabilistic Pedestrian Models for Estimating Unobserved Road Populations," IEEE ITS, 2020
2. 松林 達史, 清武 寛, 幸島 匡宏, 戸田 浩之, 田中 悠介, 六藤 雄一, 塩原 寿子, 宮本 勝, 清水 仁, 大塚 琢馬, 岩田 具治, 澤田 宏, 納谷 太, 上田 修功, "人流における学習型誘導技術のデータ同化," 人工知能学会 (2019年9月号) 特集論文「知能創発とネットワーク」
3. Tomoharu Iwata, Hitoshi Shimizu, Futoshi Naya, Naonori Ueda, "Estimating People Flow from Spatio-temporal Population Data via Collective Graphical Mixture Models," ACM Transactions on Spatial Algorithms



and Systems (TSAS) Volume 3, Issue 1, Article No.2, 2017.

## 国際会議

### 主著

1. Hitoshi Shimizu, Hirohiko Suwa, Tomoharu Iwata, Akinori Fujino, Hiroshi Sawada, Keiichi Yasumoto “Evacuation Shelter Scheduling Problem.” HICSS2022
2. Hitoshi Shimizu, Takanori Hara, Tomoharu Iwata “Deep Reinforcement Learning for Pedestrian Guidance.” PRIMA2020
3. Hitoshi Shimizu, Tatsushi Matsubayashi, Akinori Fujino, Hiroshi Sawada “Theme Park Simulation based on Questionnaires for Maximizing Visitor Surplus.” AAMAS2020
4. Hitoshi Shimizu, Tatsushi Matsubayashi, Yusuke Tanaka, Tomoharu Iwata, Naonori Ueda, Hiroshi Sawada, "Improving route traffic estimation by considering staying population," PRIMA2018

### 共著

1. Takuma Otsuka, Hitoshi Shimizu, Tomoharu Iwata, Futoshi Naya, Hiroshi Sawada, Naonori Ueda, “Bayesian Optimization for Crowd Traffic Control Using Multi-Agent Simulation,” IEEE ITSC 2019
2. Tomoharu Iwata, Hitoshi Shimizu, "Neural Collective Graphical Models for Estimating Spatio-temporal Population Flow from Aggregated Data," AAAI2019
3. Naonori Ueda, Futoshi Naya, Hitoshi Shimizu, Maya Okawa, Tomoharu Iwata, Hiroshi Sawada, "Real-time and Proactive Navigation via Spatio-temporal Prediction," Proc. of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2015) Workshop

## 国内会議

### 主著

1. 清水仁, 諏訪博彦, 岩田具治, 藤野昭典, 澤田宏, 安本慶一, “避難所計画問題の定式化と効果推定” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2021 シンポジウム)
2. 清水仁, 諏訪博彦, 安本慶一, “被災者の減少を考慮した避難所割当問題” 2021 年度 人工知能学会全国大会 (第 35 回) (JSAI2021)
3. 清水仁, 岩田具治, “商品検索の検索ログを用いたマルチタスク学習” 2020 年度 人工知能学会全国大会 (第 34 回) (JSAI2020)
4. 清水仁, 岩田具治, 丸茂直貴, 藤野昭典 “通過人数の観測と移動速度を考慮した人流データ同化法” 第 64 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 20)
5. 清水仁, 松林達史, 藤野昭典, 澤田宏 "アンケートに基づく遊園地シミュレーションによる来園者余剰の評価" 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2019 (JAWS2019)
6. 清水仁, 松林達史, 藤野昭典, 澤田宏 "遊園地シミュレーションにおける許容限界モデル" 2019 年度人工知能学会全国大会 (第 33 回), 2019
7. 清水仁, 大塚琢馬, 岩田具治, 澤田宏, 納谷太, 上田修功 "ベイズ的最適化を用いた最適集団誘導探索" 第 21 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2018) 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 284, IBISML 2018-57, pp. 99 - 104
8. 清水仁, 松林達史, 田中悠介, 岩田具治, 澤田宏, "滞在人数を考慮した経路別人数の推定, " 2018 年度人工知能学会全国大会 (第 32 回), 2018
9. 清水仁, 松林達史, 納谷太, 澤田宏, "遊園地における待ち時間を考慮したアトラクション選択行動モデルとそのパラメータ推定手法, " 人工知能学会 合同研究会 第 12 回 SIG-DOCMAS 研究会 (2017)

10. 清水仁, 大塚琢馬, 岩田具治, 澤田宏, 上田修功, "人流シミュレーションにおけるエージェントパラメータの推定," 第 20 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2017), D2-50, (2017)
11. 清水仁, 松林達史, 納谷太, "混雑飽和状態の遊園地における待ち時間削減手法のシミュレーション評価, " 人工知能学会 合同研究会 第 11 回 SIG-DOCMAS 研究会 (2016)

#### 共著

1. 原崇徳, 清水仁, 岩田具治"人流誘導のための深層強化学習の報酬設計" 第 22 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2019)
2. 松林達史, 清武寛, 幸島匡宏, 戸田浩之, 田中悠介, 六藤雄一, 塩原寿子, 宮本勝, 清水仁, 大塚琢馬, 岩田具治, 澤田宏, 納谷太, 上田修功, "人流交通流における学習型誘導技術のデータ同化" JWEIN+NetEco2018 合同研究会 (2018)

## 参考文献

- [1] Luís Alçada-Almeida, Lino Tralhão, Luís Santos, and João Coutinho-Rodrigues. A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas. *Geographical analysis*, Vol. 41, No. 1, pp. 9–29, 2009.
- [2] Nezih Altay and Walter G Green III. Or/ms research in disaster operations management. *European journal of operational research*, Vol. 175, No. 1, pp. 475–493, 2006.
- [3] Moustafa Alzantot and Moustafa Youssef. Uptime: Ubiquitous pedestrian tracking using mobile phones. In *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 3204–3209. IEEE, 2012.
- [4] 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.
- [5] Shigeaki Baba, Hiroshi Taniguchi, Seiki Nambu, Shuhei Tsuboi, Kenzo Ishihara, and Shuichi Osato. The great hanshin earthquake. *The Lancet*, Vol. 347, No. 8997, pp. 307–309, 1996.
- [6] Robert E Bixby. Solving real-world linear programs: A decade and more of progress. *Operations research*, Vol. 50, No. 1, pp. 3–15, 2002.
- [7] Zhifen Chen, Xiang Chen, Qiang Li, and Jin Chen. The temporal hierarchy of shelters: a hierarchical location model for earthquake-shelter planning. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 27, No. 8, pp. 1612–1630, 2013.
- [8] Gérard Cornuéjols, George Nemhauser, and Laurence Wolsey. The uncapacitated facility location problem. Technical report, Cornell University Operations Research and Industrial Engineering, 1983.
- [9] Isabel Correia and Francisco Saldanha-da Gama. Facility location under uncertainty. In *Location science*, pp. 185–213. Springer, 2019.

- [10] João Coutinho-Rodrigues, Lino Tralhão, and Luís Alçada-Almeida. Solving a location-routing problem with a multiobjective approach: the design of urban evacuation plans. *Journal of Transport Geography*, Vol. 22, pp. 206–218, 2012.
- [11] IBM ILOG Cplex. V12. 1: User’s manual for cplex. *International Business Machines Corporation*, Vol. 46, No. 53, p. 157, 2009.
- [12] Mark S Daskin. What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, Vol. 55, No. 4, pp. 283–294, 2008.
- [13] Lester R Ford and Delbert Ray Fulkerson. Constructing maximal dynamic flows from static flows. *Operations research*, Vol. 6, No. 3, pp. 419–433, 1958.
- [14] Linton C Freeman. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, pp. 35–41, 1977.
- [15] Gina Galindo and Rajan Batta. Review of recent developments in or/ms research in disaster operations management. *European journal of operational research*, Vol. 230, No. 2, pp. 201–211, 2013.
- [16] Gerald Gamrath, Daniel Anderson, Ksenia Bestuzheva, Wei-Kun Chen, Leon Eifler, Maxime Gasse, Patrick Gemander, Ambros Gleixner, Leona Gottwald, Katrin Halbig, Gregor Hendel, Christopher Hojny, Thorsten Koch, Pierre Le Bodic, Stephen J. Maher, Frederic Matter, Matthias Miltenberger, Erik Mühmer, Benjamin Müller, Marc E. Pfetsch, Franziska Schlösser, Felipe Serrano, Yuji Shinano, Christine Tawfik, Stefan Vigerske, Fabian Wegscheider, Dieter Weninger, and Jakob Witzig. The SCIP Optimization Suite 7.0. Technical report, Optimization Online, March 2020.
- [17] LLC Gurobi Optimization. Gurobi optimizer reference manual, 2021.
- [18] Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult, and Pieter J. Swart. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In Gaël Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman, editors, *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, pp. 11 – 15, Pasadena, CA USA, 2008.
- [19] Harold Hotelling. Stability in competition. *The Economic Journal*, Vol. 39,

- No. 153, pp. 41–57, 1929.
- [20] Shinji Ito and Ryohei Fujimaki. Optimization beyond prediction: Prescriptive price optimization. In *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 1833–1841, 2017.
  - [21] Tomoharu Iwata, Hitoshi Shimizu, Futoshi Naya, and Naonori Ueda. Estimating people flow from spatiotemporal population data via collective graphical mixture models. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS)*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–18, 2017.
  - [22] Noriaki Kakiuchi and Shunsuke Kamijo. Pedestrian dead reckoning for mobile phones through walking and running mode recognition. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pp. 261–267. IEEE, 2013.
  - [23] Bandana Kar and Michael E Hodgson. A gis-based model to determine site suitability of emergency evacuation shelters. *Transactions in GIS*, Vol. 12, No. 2, pp. 227–248, 2008.
  - [24] Ayberk Kocatepe, Eren Erman Ozguven, Mark Horner, and Hidayet Ozel. Pet-and special needs-friendly shelter planning in south florida: A spatial capacitated p-median-based approach. *International journal of disaster risk reduction*, Vol. 31, pp. 1207–1222, 2018.
  - [25] Yury Kochetov. Facility location: Discrete models and local search methods., 2011.
  - [26] 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.
  - [27] Bernhard Korte, Jens Vygen, B Korte, and J Vygen. *Combinatorial optimization*, Vol. 2. Springer, 2012.
  - [28] Chris J Kuhlman, Achla Marathe, Anil Vullikanti, Nafisa Halim, and Pallab Mozumder. Increasing evacuation during disaster events. In *Proceedings of*

- the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2020.
- [29] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wießner. Microscopic traffic simulation using sumo. In *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018.
- [30] Shin-ichi Minato. Zero-suppressed bdds for set manipulation in combinatorial problems. In *Proceedings of the 30th international Design Automation Conference*, pp. 272–277, 1993.
- [31] Stefan Nickel and Francisco Saldanha-da Gama. Multi-period facility location. In *Location science*, pp. 303–326. Springer, 2019.
- [32] James B. Orlin. A faster strongly polynomial minimum cost flow algorithm. *Operations Research*, Vol. 41, No. 2, pp. 338–350, 1993.
- [33] Susan Hesse Owen and Mark S Daskin. Strategic facility location: A review. *European journal of operational research*, Vol. 111, No. 3, pp. 423–447, 1998.
- [34] World Health Organization (WHO) Regional Office for the Western Pacific. Disaster evacuation shelters in the context of covid-19, 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/336856>.
- [35] Philip Robers and Leon Cooper. A study of the fixed charge transportation problem. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 2, No. 2, pp. 125–135, 1976.
- [36] 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.
- [37] Hitoshi Shimizu, Hirohiko Suwa, Tomoharu Iwata, Akinori Fujino, Hiroshi Sawada, and Keiichi Yasumoto. Evacuation shelter scheduling problem. In *55th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2022)*.

IEEE, IEEE, 2022.

- [38] Roni Stern, Nathan R Sturtevant, Ariel Felner, Sven Koenig, Hang Ma, Thayne T Walker, Jiaoyang Li, Dor Atzmon, Liron Cohen, TK Satish Kumar, et al. Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks. In *Twelfth Annual Symposium on Combinatorial Search*, 2019.
- [39] Rahul Swamy, Jee Eun Kang, Rajan Batta, and Younshik Chung. Hurricane evacuation planning using public transportation. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 59, pp. 43–55, 2017.
- [40] 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.
- [41] Atsushi Takizawa, Masaki Inoue, and Naoki Katoh. An emergency evacuation planning model using the universally quickest flow. *The Review of Socionetwork Strategies*, Vol. 6, No. 1, pp. 15–28, 2012.
- [42] Atsushi Takizawa, Yasufumi Takechi, Akio Ohta, Naoki Katoh, Takeru Inoue, Takashi Horiyama, Jun Kawahara, and Shin-ichi Minato. Enumeration of region partitioning for evacuation planning based on ZDD. In *11th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management 2013 (ISORA 2013)*, pp. 1–8. IET, 2013.
- [43] Masayuki Terada, Tomohiro Nagata, and Motonari Kobayashi. Population estimation technology for mobile spatial statistics. *NTT DOCOMO Technical Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 10–15, 2013.
- [44] Tony J Van Roy and Donald Erlenkotter. A dual-based procedure for dynamic facility location. *Management Science*, Vol. 28, No. 10, pp. 1091–1105, 1982.
- [45] Alfred Weber. *Theory of the Location of Industries*. University of Chicago Press, 1929.
- [46] Ling-Yun Wu, Xiang-Sun Zhang, and Ju-Liang Zhang. Capacitated facility location problem with general setup cost. *Computers & Operations*



- Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1226–1241, 2006.
- [47] Yassine Yaakoubi, François Soumis, and Simon Lacoste-Julien. Structured convolutional kernel networks for airline crew scheduling. *arXiv preprint arXiv:2105.11646*, 2021.
- [48] Tomohisa Yamashita, Takashi Okada, and Itsuki Noda. Implementation of simulation environment for exhaustive analysis of huge-scale pedestrian flow. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 2, pp. 137–146, 2013.
- [49] Jingjin Yu and Steven M LaValle. Optimal multirobot path planning on graphs: Complete algorithms and effective heuristics. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 5, pp. 1163–1177, 2016.
- [50] 茨木俊秀. 組合せ最適化とスケジューリング問題: 新解法とその動向. 計測と制御, Vol. 34, No. 5, pp. 340–346, 1995.
- [51] 花岡伸也. 航空機材スケジューリング問題へのアプローチ. 土木計画学研究・講演集, No. 29, 2004.
- [52] 京都市. 指定避難所一覧. <https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/cmsfiles/contents/0000132/132312/hinansyoR20801.pdf> (2017年4月4日公開, 2021年1月7日アクセス).
- [53] 京都市. 大規模災害時における観光客等帰宅困難者対策, 2020. <https://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/page/0000076886.html> (2020年8月4日掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [54] 栗田治. 都市と地域の数理モデル—都市解析における数学的方法. 共立出版, 2013.
- [55] 笹圭樹, 鈴木勉. 道路容量制約下での避難場所割当の変更による津波避難時間短縮効果. 都市計画論文集, Vol. 49, No. 3, pp. 543–548, 2014.
- [56] 兼田敏之ほか. *artisoc* で始める歩行者エージェントシミュレーション, 2010.
- [57] 西川憲明, 廣川雄一, 山田武志, 印南潤二, 浅野俊幸. 避難指示への応諾性を考慮した段階的避難の有効性評価. 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 10, No. 2, pp. 47–57, 2018.
- [58] 戸田浩之. 都市における人流の理解と予測. 応用物理, Vol. 90, No. 8, pp.

- 481–487, 2021.
- [59] 野田五十樹. 人流シミュレーション：0. 編集にあたって. 情報処理, Vol. 58, No. 7, pp. 568–569, jun 2017.
- [60] 高村大也, 奥村学. 施設配置問題による文書要約のモデル化. 人工知能学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 174–182, 2010.
- [61] 市之瀬克己, 森島小央里, 高橋友一. 避難シミュレーションを用いたサイネージによる避難誘導効率の検証. 人工知能学会全国大会論文集, Vol. JSAI2017, pp. 3I2OS13b1–3I2OS13b1, 2017.
- [62] 国土交通省. 平成24年版首都圏白書, 2011. [https://www.mlit.go.jp/hakusyo/syutoken\\_hakusyo/h24/h24syutoken\\_.html](https://www.mlit.go.jp/hakusyo/syutoken_hakusyo/h24/h24syutoken_.html) (2011年6月掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [63] 国土地理院. 国土地理院ウェブサイト. <http://cyberjapandata.gsi.go.jp>(2020年3月29日アクセス).
- [64] 今野浩. 線形計画法の歴史 (特集 はじめよう線形計画法). オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan: 経営の科学, Vol. 64, No. 4, pp. 204–208, 2019.
- [65] 三輪多恵子, 山口満. 避難所における情報提供を目的としたピクトグラム の作成. *Bulletin of Toyohashi Sozo University*, No. 23, pp. 1–9, 2019.
- [66] 梅木寿人, 中村優吾, 藤本まなど, 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, feb 2019.
- [67] 上田修功. 時空間予測技術に基づく先行的集団最良誘導. 応用統計学, Vol. 45, No. 3, pp. 87–102, 2016.
- [68] 福家秀紀. 固定電話網 (pstn) から ip 網への移行に当たっての課題. 情報通信学会誌, Vol. 36, No. 1, pp. 61–74, 2018.
- [69] 秋田県. 「観光客等の防災対策」ガイドライン, 2015. <https://www.bousai-akita.jp/uploads/user/system/File/guidelines/kankoukyaku.pdf> (2015年3月掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [70] 瀧澤重志. ZDD を用いた小地域単位の避難所割当案の高速列挙・抽出手法. 都市防災研究論文集 = Annual journal of urban disaster reduction research,

Vol. 1, pp. 69–74, nov 2014.

- [71] 重中秀介, 大西正輝, 山下倫央, 野田五十樹. データ同化を用いた大規模人流推定手法. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 101, No. 9, pp. 1286–1294, 2018.
- [72] 梅谷俊治. しっかり学ぶ数理最適化. 講談社, 2020.
- [73] 浦田淳司, 羽藤英二, 柳沼秀樹. 将来効用の動学的異質性を考慮した避難開始選択モデルの構築. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 4, pp. 261–277, 2016.
- [74] 印南潤二, 正垣隆祥, 笈文彦, 福井潔, 山田武志. 群集シミュレーション手法を活用した大規模ターミナル駅周辺の避難誘導情報の施策検討. 第 45 回 土木計画学研究・講演集, p. 8. 土木学会, 2012.
- [75] 高橋彰, 安福健祐, 阿部浩和. 避難シミュレーションを用いた大規模地下街津波浸水対策の避難誘導計画の評価. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 86, No. 786, pp. 2104–2114, 2021.
- [76] 神戸市民生局. 平成 7 年 兵庫県南部地震神戸市災害対策本部 民生部の記録, 1996. <http://www.lib.kobe-u.ac.jp/directory/eqb/book/4-265/html/pdf/8-11.pdf> (1996 年 2 月発行, 2021 年 4 月 19 日アクセス).
- [77] 大西正輝. 人流シミュレーション: 7. 混雑環境における群衆計測-シミュレーションとの融合を目指して-. 情報処理, Vol. 58, No. 7, pp. 594–597, jun 2017.
- [78] 清水仁, 松林達史, 藤野昭典, 澤田宏. アンケートに基づく遊園地シミュレーションによる来園者余剰の最大化. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 104, No. 3, pp. 172–183, 2021.
- [79] 清水仁, 松林達史, 藤野昭典, 澤田宏. テーマパーク問題の新展開 (特集 実問題へのアプローチ: 数理システムユーザーコンファレンスから). オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan: 経営の科学, Vol. 66, No. 1, pp. 6–11, 2021.
- [80] 生駒市. 指定避難所一覧. <https://www.city.ikoma.lg.jp/0000000979.html>  
(2021 年 2 月 24 日更新, 2021 年 12 月 1 日アクセス).
- [81] 柳澤大地, 西成活裕. 渋滞学のセルオートマトンモデル. 応用数理, Vol. 22, No. 1, pp. 2–14, 2012.

- [82] 彩秀菜大塚, 晃司塚田. 夜間の避難誘導を支援する懐中電灯型避難情報投影システムの提案. 第 82 回全国大会講演論文集, 第 2020 巻, pp. 57–58, feb 2020.
- [83] 大塚和徳, 越山健治. 災害時に利用される空間コスト算定に関する研究. 日本都市計画学会関西支部研究発表会講演概要集, Vol. 14, pp. 121–124, 2016.
- [84] 松林達史, 清武寛, 幸島匡宏, 戸田浩之, 田中悠介, 六藤雄一, 塩原寿子, 宮本勝, 清水仁, 大塚琢馬, 岩田具治, 澤田宏, 納谷太, 上田修功. 人流における学習型誘導技術のデータ同化. 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 5, pp. wd-F1–11, 2019.
- [85] 池上敦子. ナース・スケジューリング—問題把握とモデリング—(シリーズ: 最適化モデリング 3). 近代科学社, 2018.
- [86] 中平遥香. 阪神・淡路大震災における学校避難所の研究 ～「記憶」と「記録」を継承するために～. 神戸新聞総合出版センター, 2019.
- [87] 朝日新聞. 大震災、都内の帰宅困難者は9万人以上 首都圏白書, 2011. <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201106140148.html> (2011年6月14日掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [88] 小林直輝, 達也, 佐藤翔輔. 避難シミュレーションにおける局所的情報を扱う避難誘導システムの提案. 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 23–31, 2021.
- [89] 加藤直樹, 瀧澤重志. 最速避難計画のモデリングと解法. オペレーションズ・リサーチ, pp. 437–442, 2015.
- [90] 三好哲也. 音走査による積極的避難誘導システムにおける方向定位特性. 日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集, Vol. 34, pp. 24–26, 2018.
- [91] 田中健一. 数理最適化入門 (4): 施設配置の数理モデル (チュートリアル). 応用数理, Vol. 23, No. 4, pp. 178–183, 2013.
- [92] 田中俊二. 組合せ最適化問題とスケジューリング. システム/制御/情報, Vol. 64, No. 6, pp. 200–206, 2020.
- [93] 東京都. 東京都の統計: 東京都昼間人口の予測, 2020. <https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/tyosoku/ty20rf0000.pdf> (2021年1月13日アクセス).

- [94] 東京都. 東京都防災ホームページ:帰宅困難者対策ハンドブック, 2020. <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/bousai/1000031/1001369.html> (2021年1月13日アクセス).
- [95] 内閣府(防災担当). 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, 2015. [http://www.bousai.go.jp/jishin/kitakukonnan/pdf/kitakukonnan\\_guideline.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/kitakukonnan/pdf/kitakukonnan_guideline.pdf) (2015年3月掲載, 2021年1月13日アクセス).
- [96] 荒木裕子, 坪井塑太郎, 北後明彦. 平野を有する沿岸部での未指定避難所の発生傾向に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 85, No. 768, pp. 361–370, 2020.
- [97] 熊谷良雄. 地震発生後の避難と対策. 安全工学, Vol. 34, No. 3, pp. 185–191, 1995.