

避難時間短縮のための道路幅最適化問題における変数削減手法 Variable reduction methods in road width optimization problems for reducing evacuation times

大坪靖典¹⁾²⁾ 丹羽了³⁾²⁾ 西田遼²⁾ 大西正輝²⁾
Yasunori Otsubo Ryo Niwa Ryo Nishida Masaki Onishi

1 はじめに

大規模災害による被害を最小限にするにあたり、避難を迅速に行うための避難戦略の策定が不可欠である。最大震度7を記録した能登半島地震では、多くの人々が倒壊した家屋の下敷きになり命を落とした。石川県によると、能登半島地震の死者の約9割の死因が家屋倒壊だったことが判明している[1]。こうした地震による人的被害を最小限にするためにも、大規模な地震が発生した際には一刻も速い避難が求められる。東北地方太平洋沖地震の影響を受け、車による避難の必要性も考えられているが、主要駅などの人口集中地区では依然として徒歩での避難が推奨されている。そのため、本論文では徒歩での避難に着目する。

人口集中地域では一度に多くの人々が移動するため、混雑が発生する恐れがある。混雑の解消は迅速な移動につながるため、逃げ遅れによる人的被害を軽減できる。したがって混雑の緩和は災害対策の観点から極めて重要である。混雑の緩和に効果的な方法には、情報提示や誘導により群集の移動に介入する「群集制御」と、群集が移動しやすいように出口の配置や経路の幅を変更する「空間設計」の2つが存在する[2]。

「群集制御」に関する過去の研究として、標識や誘導員、スマートフォンやロボットなどを用いた誘導手法[3,4]や、避難所の割り当てに関する研究[5-7]などが挙げられる。これらの研究は通常状況下での誘導に加え、緊急避難時を想定しているものも多く存在する。しかし、緊急避難時には情報や状況が不確実であり、避難者の行動も予測しにくくなるため、異なるアプローチが求められる場合がある。一方で、「空間設計」は予防的な対策として、大規模災害時の緊急避難にも一定の効果が期待できるといった特徴がある。したがって本論文では、歩行者の避難経路の道路幅を拡張するという「空間設計」に焦点を当てた混雑の緩和を検討する。具体的には、図1のような歩道の拡張を考える。図1は、現状の歩道幅と拡張後の歩道幅を比較したイメージ図であり、拡張によって一度に通行可能な人数が増加し、混雑が緩和される様子を表している。一般的に、道路幅が広いほど同時に通過可能な人数が多くなるため、混雑緩和に貢献できる。一方で、道路幅の拡張は費用が掛かるため、拡張の際にはコスト制約も考慮する必要がある。

「空間設計」に着目した関連研究を紹介する。Tanejaら[8]は近年増加する施設内で発生する群集事故を軽減するために、コスト制約下で道路容量の増加を決定する問題を二段階最適化問題として定式化している。上位問題では、避難経路を道路ネットワークと見立て、経路幅

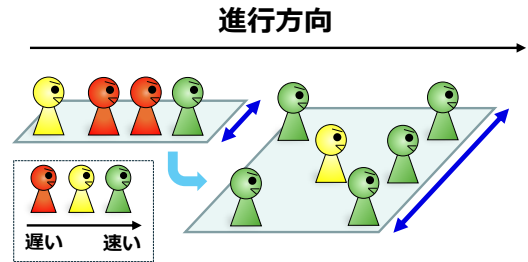


図1 拡張のイメージ

の容量増加による効率的な避難を検討した。その際に、全体の容量変更量が従来の道路ネットワークと等しくなるような制約を設けた上で最適化を行った。下位問題では、上位モデルで再設計された道路ネットワークにおける、個々の避難者の経路選択行動モデルを提案した。このとき、時間、距離、安全性などの要因を「効用」と定義し、効用最大化を経路選択の基準としている。実験の結果、全体の避難時間が大幅に下回ったため、モデルを使用して再設計したネットワークの有効性が示された。また、避難者の数が増加した際や、避難経路の一部が使用不可能になった際にも円滑な避難が可能になるなど、再設計したネットワークの堅牢性も示された。一方で、Tanejaらの方法は施設内からの避難を想定しており、本研究の対象である都市全体などの大規模ネットワークにモデルを適用すると、避難経路の組み合わせが膨大になり最適化が困難になると考えられる。したがって、このような大規模ネットワークに適用する場合、避難経路の選択肢を絞り込むなどの工夫が必要となる。

以上の背景を踏まえ本論文では、人口集中地区における道路幅最適化問題を解決する際に障害となる、道路幅変更を行う経路の選択肢を削減する変数削減手法を提案する。具体的には、道路ネットワーク情報とシミュレーション実行時に取得される避難者の座標情報を使用し、混雑状況を考慮して道路幅変更を行う経路の選択肢を削減する。実験では、東京駅周辺のマップにおいて避難者の初期人数や配置が異なる2つのシナリオを使用し、群集シミュレータと最適化アルゴリズムを用いて拡張を行う道路を探索する。そして道路幅変更を行う経路の選択肢を、削減した場合と削減しない場合で最適化結果を比較し、変数削減手法の妥当性について考察する。

本論文は次のように構成される。2節では、本論文で提案する最適化の流れを説明した上で、対象とする道路幅最適化問題を定式化し、提案手法である変数削減手法を説明する。3節では実験地域、データの詳細、実験設定について示す。4節では異なる2つのシナリオにおいて実験した結果をそれぞれ説明し、5節では拡張上限幅の違いによる最適化結果の違いについて考察する。最後に6節で本論文の結論、今後の展望について述べる。

- 1) 金沢大学。University of Kanazawa.
- 2) 産業技術総合研究所。National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).
- 3) 筑波大学。University of Tsukuba.

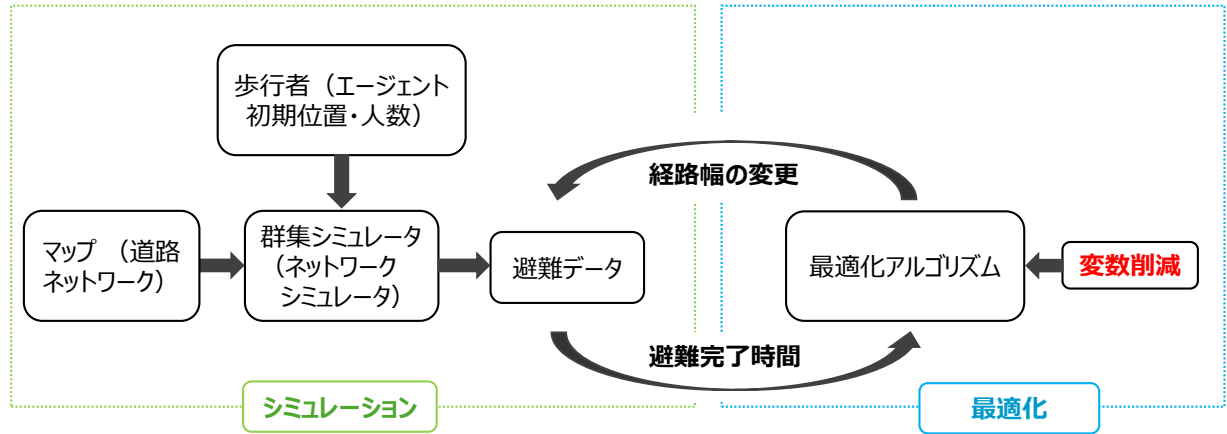


図2 群集シミュレーションによる最適化のフロー

2 道路幅最適化手法

本節では、最初に本論文で提案する最適化の流れを説明する。次に道路幅最適化問題の定式化および提案する変数削減手法について述べる。

2.1 最適化の流れ

群集シミュレーションを活用した避難経路拡幅量の最適化の流れを図2に示す。本論文の目的である避難時間が短縮される道路ネットワークは、2つの処理を繰り返すことで獲得する。1つ目は群集シミュレーションを用いた目的関数値の算出、2つ目は最適化アルゴリズムを用いたパラメータの生成と目的関数値の評価である。ここで、群集シミュレーションの入力は避難経路、経路幅などの道路ネットワーク情報やエージェントの人数、初期配置といった歩行者情報である。出力は1秒ごとの歩行者の座標や速度などの移動情報となる。また、これらの出力から算出した、避難開始時刻から避難者全員が避難所に到達するまでの経過時間が全体の避難完了時間であり、この指標を目的関数とする。決定変数は道路ネットワーク内の避難経路の拡幅量である。提案手法は2つ目の最適化パートにおいて、最適化アルゴリズムを用いて道路ネットワークの経路幅を設定する際に適用される。

2.2 道路幅最適化問題の定式化

本節では本論文で設定する道路幅最適化問題の定式化について説明する。説明にあたり、本論文において以下の変数を定義する。

- f : 群集シミュレータ,
- x_i : 道路ネットワーク内における i 番目の経路,
- y_i : i 番目の避難者に設定するシナリオ,
- n : 全経路数,
- l_{x_i} : x_i の経路長,
- w_{x_i} : x_i の拡幅量,
- $w_{x_i}^{\max}$: x_i の拡幅上限値,
- g_x : x を単位面積変更する際に発生するコスト,
- B : 道路ネットワーク再設計の総コスト,
- B_{\max} : 道路ネットワーク再設計の総予算

道路幅最適化問題は、避難完了時間を最小にする拡幅経路および拡幅量を見つける問題である。したがって道路の拡幅の最適化問題は以下のように定式化できる。

$$\min f(w_x, y), \quad w_x \in \mathbb{Z}, y \in Y \quad (1)$$

subject to

$$0 \leq w_x \leq w_x^{\max}, \quad w_x^{\max} \in \mathbb{Z} \quad (2)$$

$$B \leq B_{\max} \quad (3)$$

式(1)に関して、決定変数は任意の経路 x_i の拡幅 w_{x_i} と、 i 番目の避難者に設定するシナリオ y_i である。問題を簡単にするため、拡幅量 w_{x_i} は整数値とする。また、避難者のシナリオとは、避難者の避難開始地点の座標情報や避難速度、どのルートを選択して避難するかといった避難行動などの総称であり、各避難者のシナリオは個別に設定可能である。すべての避難者のシナリオ集合を Y と定義する。

ここで、本問題における目的関数を全体の避難完了時間 T とする。一般的に、群集制御の目的関数は主に効率性と安全性の2種類で評価されることが多い。効率性には移動時間や流量などが用いられ、安全性には群集の密度などの混雑度に関連する指標が用いられる。本研究では、避難者の行動を直接制御しないこと、一刻も早い避難を目的としていることから、効率性を重視して避難所への避難完了時間を目的関数とする。目的関数には個人視点の評価と全体の視点の2つがあるが、本研究では全体の避難完了時間を目的関数とする。全体の避難完了時間 T は避難開始時刻から避難者全員が一時避難場所に到達するまでの経過時間であり、以下の式で定義される。

$$T = D_N - O_1 \quad (4)$$

ここで、 O_i , D_i は i 番目の避難者の出発時刻および到着時刻、 N は避難者の総数である。

式(1)の最適化にあたり、本問題では式(2),(3)の制約条件を設定する。式(2)に関して、任意の経路 x_i における拡幅量 w_{x_i} は上限値を設ける。拡幅上限値 $w_{x_i}^{\max}$ は対象とする道路ネットワークや避難者数などに応じて変更することが求められる。また、式(3)で与えられる道路ネットワーク再設計の総コスト B は、経路の単位面積を

変更する際に発生するコストと拡張した総面積の積で表される．具体的には，

$$B = \sum_{i=1}^n g_x l_{x_i} w_{x_i} \quad (5)$$

となる．ここで，本問題では現実的な範囲内で最適化を行うため，道路ネットワーク再設計の総コスト B の上限となる B_{\max} を設定する．最適化を行う際にはこれらの条件を満たすよう注意する必要がある．また，拡張工事の総コストが B_{\max} 内に収まるように拡張する経路を選定した場合における，拡張対象の経路 x の集合を X_{\max} と定義する．

本論文で提案する変数削減手法とは，決定変数である拡張 w_{x_i} を行う経路 x_i の候補数を削減する手法である．

2.3 変数削減手法

本節では，道路ネットワーク情報を用いて拡張する経路の候補数を削減する方法を説明する．具体的には，道路ネットワークを Chain 構成グラフに変換する手法と，混雑を考慮した拡張経路の選定手法について説明する．そして最後に入力経路数であるパラメータ w_x の設定方法を説明する．

2.3.1 道路ネットワークの定義

まず，道路ネットワーク構造をリンクとノードの集合からなる無向グラフと定義する．すなわち，ノードの集合を V ，リンクの集合を E として，道路ネットワークを無向グラフ $G = (V, E)$ と表現する．

図3に道路ネットワークの例を示す．この例をもとに具体的に説明する．任意の道路ネットワーク内の全リンク数を $|E|$ とすると，任意のリンクは $e_i (1 \leq i \leq |E|)$ と表現できる．これらの各リンクには経路幅が再現されており，この経路幅を変更することで混雑が緩和できる．シミュレーション時にはこの $|E|$ 本のリンクが決定変数となる．ここで決定変数の数はリンクの総数となるため，最適化において効率的な探索を行うためには変数であるリンクの数を減らす必要がある．

2.3.2 Chain 構成グラフの生成

本論文の問題設定において，全体の避難時間を短縮するためには避難時に混雑する可能性のあるリンクを拡張するのが効果的である．さらに混雑しているリンクの一部分のみの拡張では効果が薄いと考えられる．そこで本論文では，リンクを拡張する際に，隣接するリンクを一定数まとめて拡張する．この処理により，探索可能性を損なわずに変数を削減できるため，最適な道路ネットワークを効率的に探索可能となる．

変数削減にあたり，グラフ G の部分グラフ $H = (V, C)$ を考える．リンク e を複数個まとめたものを $c \in C$ とする．ここで c は Chain の頭文字であり， C は c の集合である．図3の道路ネットワークを Chain でまとめると図4のように表現され，任意の Chain はリンク e と同様に $c_i (1 \leq i \leq |C|)$ と表現できる．ここで $|C| < |E|$ であるから，入力経路数を一定数削減できる．

本論文では大規模なネットワークを想定しており，この処理を手作業で行うと効率が悪い．そこで図5に示すアルゴリズムを用いて効率的に削減する．

まず，全リンク数 $|E|$ ，全ノード数 m の道路ネットワークにおいて，すべてのノード V についてリンクの接続数 d を調べる．そしてリンクの接続数が $d_i = 2$ であ

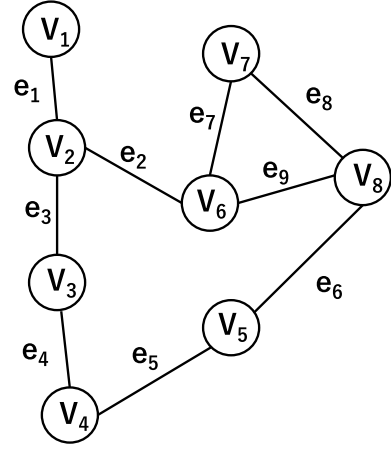


図3 従来の道路ネットワーク構造

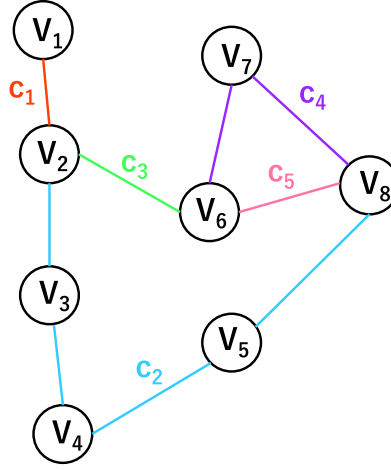


図4 変更後の道路ネットワーク構造

るノード V_i について，そのノードに接続されているリンクすべてが同じ Chain で表現されているかを調査する．このとき，すべてのリンクが同じ Chain で表現されていないときは新たな Chain として設定する．この処理を $d = 2$ であるすべてのノードに対して行うことで Chain のみで構成された道路ネットワーク $H = (V, C)$ を作成できる．

2.3.3 混雑を考慮した拡張経路の選定

次に，グラフ H のリンク集合 C の中で，混雑する可能性のあるリンクに着目する．Chain の集合 C の中には，避難時に使用しない Chain も存在しており，それらの Chain を拡張しても避難時間の短縮につながらない．そこでシミュレーションを実行し，そのログから避難に使用されない Chain を調査しすべて削減する．この新たな Chain の集合を Sub-Chain とすると，Sub-Chain $C' (|C'| < |C|)$ となるため，拡張する経路の候補数をさらに削減できる．

2.3.4 パラメータ設定方法

最後に，入力経路数であるパラメータ w_x の設定方法を説明する．本研究の問題設定では， n 個のパラメータ $w_{x_1}, w_{x_2}, \dots, w_{x_n}$ の拡張量を同時に設定すると，拡張する経路数が適正範囲をはるかに超えてしまう．このとき制約条件 (3) を満たす必要があるため，すべてのパラ

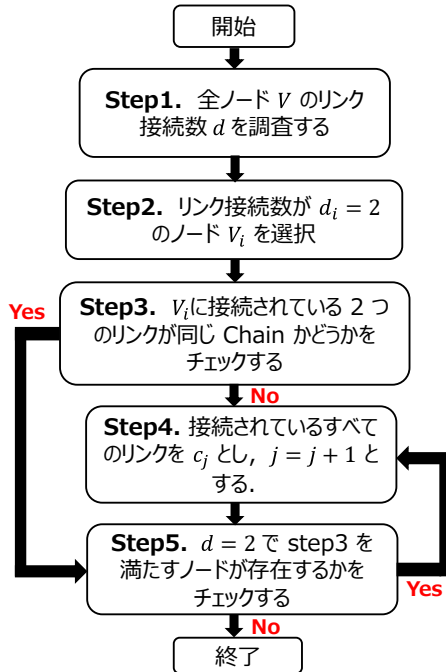


図5 使用するアルゴリズム

メータを同時に設定する手法はその設定に非常に時間がかかる。そこで図6のようにパラメータを設定する。まず、すべてのパラメータ w_x を0に設定する。次に、 $w_x \neq 0$ を満たす任意のパラメータ $\exists w_i$ を選択し、 w_{x_i} を式(2)の範囲内(0を除く)の値に設定する。そして拡張総コスト B を計算し、総予算 B_{\max} を超えないか判定する。この処理を制約条件を超えるまで繰り返し、超過直前のパラメータを採用することで、効率的に生成可能領域内にパラメータを設定することが可能になる。

3 実験設定

実験では、東京駅周辺のマップにおいて避難者の初期人数や配置が異なる2つのシナリオを使用し、群集シミュレータと最適化アルゴリズムを用いて拡張を行う道路を探索する。そして避難経路の選択肢を、削減した場合と削減しない場合で最適化結果を比較する。

3.1 対象とする群集移動

実験では、東京駅周辺での歩行者の避難所への避難移動を対象とする。群集移動は群集シミュレータである CrowdWalk を用いて再現する[9]。CrowdWalk は群集の移動を再現する1次元歩行者モデルを使用しているため大規模で高速なシミュレーションを実行可能である。また、シミュレーションは1回の実行にあたり約1分程度かかり、シミュレーションを 10^3 オーダー数直列で行う場合、その処理に数日かかってしまう。そこで本研究では、シミュレーション実験を効率的に管理可能な、実験ワークフロー管理フレームワークである Waffle [10] を使用し、並列処理で実験を行った。これにより約250のシミュレーションの並列処理が可能となり、従来では数日かかる処理を約2時間ほどに短縮した。

大規模な災害が発生した際、基本的に避難者は避難所までの最短経路を目指すことが考えられる。シミュレーションに当たり、避難者を想定したエージェントの避難行動を以下のように設定する。

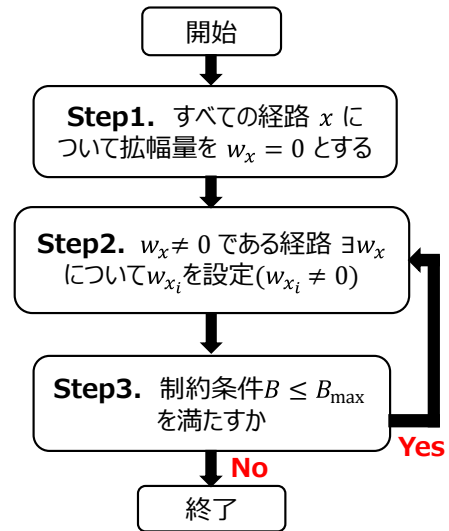


図6 パラメータの生成方法

- 全避難者は避難開始時に最近傍の避難所とその最短経路を把握している
- 全避難者は避難開始時に最近傍の避難所を目指す
- 全避難者は避難所までの最短経路を選択する
- 目指す避難所が収容人数を超えた場合、その時刻に受け入れ可能な最近傍の避難所を再選択する

3.2 最適化の設定

まず、本研究で使用するマップを紹介する。本研究では東京駅の周辺地域を対象とする。この地域におけるシミュレータのマップ環境を図7に示す。マップは避難経路となる歩道を示すリンクと、リンクの交差点を示すノードにより構成される。図7において、リンクは黄色、ノードは青点、避難所は赤点で示している。避難所は市区町村の防災ホームページ等を参照して、避難所の位置と最大収容人数をシミュレータ上に実装している[5]。シミュレータのマップ環境は OpenStreetMap (OSM) と呼ばれるオープンデータとして活用可能な2次元地図情報データベースのデータを用いて構築し、リンクは実際の歩道の幅員が再現されている。本研究で使用する東京駅周辺の道路ネットワークは、1,064個のノードと1,287本のリンクから形成される。

次に、実験で使用するデータについて説明する。シミュレーションを実施するにあたり、携帯電話端末から取得される位置情報に欠損値補完を施した、連続的な位置情報データを使用する。また、避難所の位置と最大収容人数は、市区町村の防災ホームページ等を参照してシミュレータ上に反映されている。本研究では、避難者の初期人口分布として、2021年9月1日(水)の12時と、2021年9月4日(土)の12時に取得された2つのGPSデータを使用する。初期人口分布数はそれぞれ12,860人および6,081人である。

また、本研究の問題設定における制約条件の策定に不可欠な g_x と B_{\max} に関して、単位面積拡張コスト g_x を46,183円、総コスト B_{\max} を61,978,095円と設定する¹⁾。

1) 千代田区の公式ホームページに掲載されている『歩道の設置・拡張整備』の過去5年間の決算情報と、千代田区道路公園課に聞き取り調査で取得した実際の拡張工事の費用を参考にした。 <https://www.city.chiyoda.lg.jp/koho/kuse/zaise/jigyo-cost/index.html>

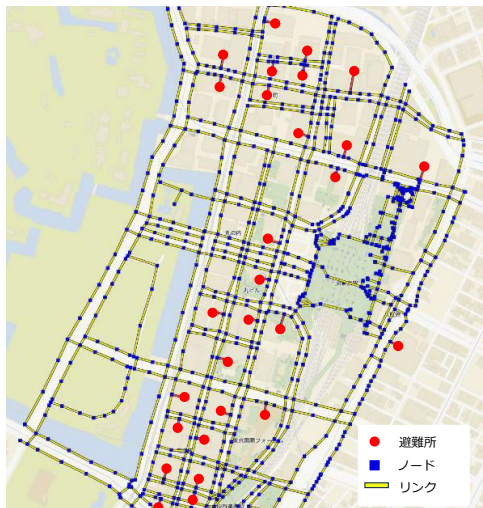


図7 使用するマップ

表1 シミュレータの入力パラメータ

対象リンク	全経路数 n	拡幅上限値 w^{\max}
E	1287	3
E	1287	5
C	653	3
C	653	5
C'	544 / 533	3
C'	544 / 533	5

3.3 評価指標

次に評価指標を説明する。本論文では、避難経路数の組み合わせの多さに着目しその数を削減する手法を提案した。したがってその評価指標は、最適な道路ネットワークを構築する時間と、その最適化の達成度とする。これらは目的関数である全体の避難完了時間 T の変化推移をもとに評価する。

3.4 実験で使用する入力経路数

実験は以下の3つを入力経路数 x として検証を行った。

1. Link: $x \in E$ ($|E| = 1287$)
2. Chain: $x \in C$ ($|C| = 653$)
3. Sub-Chain: $x \in C'$ ($|C'| = 544, 533$)

ここで、 E, C, C' はそれぞれ道路ネットワーク内で対象とするリンクの集合である。2021年9月1日（水）の12時のシナリオにおけるSub-Chainの総数を $|C'| = 544$ 、2021年9月4日（土）の12時のシナリオにおけるSub-Chainの総数を $|C'| = 533$ としている。以降よりそれぞれのシナリオを平日、土曜日のシナリオとして区別する。初期人口分布にかかわらず $|E|$ 、 $|C|$ は一定である。また、拡幅量は $w_{x_i}^{\max} = 3$ と $w_{x_i}^{\max} = 5$ の2パターンを評価した。評価したシミュレーションのパラメータを表1に示す。実験では表1に示した6パターンのパラメータを2つのシナリオに適用させる。

4 実験結果

実験結果を図8、9に示す。平日の結果を図8、土曜日の結果を図9に示す。横軸は試行回数、縦軸は全体の避難完了時間を示している。それぞれRandom-Searchの一回の評価回数は2000回とし、5回の目的関数値の

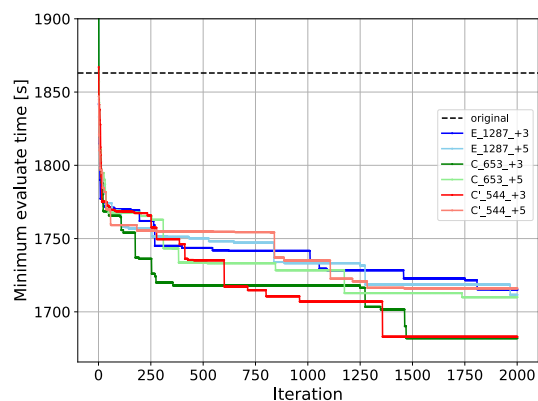


図8 平日の目的関数値の推移

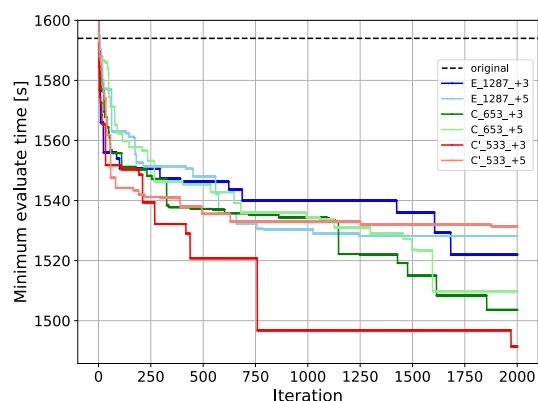


図9 土曜日の目的関数値の推移

推移の結果の平均値を算出している。各ラベルについて、「original」は経路幅の変更のない (default) シナリオを使用した際の全体の避難完了時間であり、また例えば「E_1287_+3」は表1の1行目のパラメータで最適化をした結果となる。また、表2に各手法の評価回数 $2000 \times 5 = 10000$ 回における最良の目的関数値を示している。これらの結果から、拡幅上限値 w^{\max} が3のときに提案手法が最適化の効率を高め、効果的であることが明らかになった。一方、拡幅上限値 w^{\max} が5のときは、提案手法の効果が見られなかった。

まず、 w^{\max} が3である場合を比較する。図8、9から、全体的な傾向として、パラメータ数 n が少なくなるほど最終的な指標が短縮できていることがわかる。また、平日、土曜日ともに評価回数が1000回以降の指標は n が少ないほど常に小さくなるという結果となった。また、表2を比較した際にも、指標は n が少ないほど小さくなるという結果が得られた。これらのことから、提

表2 各パラメータにおける目的関数値

対象リンク	拡幅上限値 w^{\max}	平日 [s]	土曜日 [s]
E	3	1669	1479
E	5	1694	1504
C	3	1639	1490
C	5	1675	1476
C'	3	1634	1475
C'	5	1681	1510

案した変数削減法は w^{\max} が 3 である場合において、全体の避難時間の短縮につながる経路をより効率的に探索できることがわかる。

一方で、 w^{\max} が 5 である場合については、上記と同様の結果は得られなかった。最終的な指標については、図 8 においては評価対象の 3 つの手法において大きな差がなかった。また、図 9 においては、 n が最小の「C_533_ + 5」が比較対象の 3 つの中で最も指標が大きいという結果になった。表 2 についても、 n が最も小さい手法の指標が最小とならず、 n と指標の相関が得られなかった。

5 考察

本節では拡張上限値 w^{\max} を増加させた際に、最適化の効率が向上しなかった原因を考察する。この原因として以下の 3 つが考えられる。

(1) 拡張上限値と拡張する経路総数のトレードオフ性

まず、最適化のバランスが変化したことが原因として考えられる。本論文における道路幅最適化問題において、式 (3) より拡張容量の上限が設定されているため、拡張上限値 w^{\max} と拡張する経路総数 $|X_{\max}|$ はトレードオフの関係にある。ここで、目的関数である全体の避難完了時間 T に対する各変数の影響度を考えると、経路総数 $|X_{\max}|$ の方が拡張上限値 w^{\max} よりも高いと考えられる。これは多くの経路が拡張されることで混雑緩和可能な箇所が増え、全体の避難完了時間の短縮に寄与する可能性が高くなるからである。このような状況下において、拡張上限値 w^{\max} を増加したため目的関数に与える影響が相対的に低下し、最適な道路ネットワークを探索しづらくなったことが原因として考えられる。

(2) 過剰な拡張による道路ネットワークの均等性の低下

次に、過剰な拡張により、道路ネットワーク全体の混雑緩和が困難になったことが原因として考えられる。拡張上限値 w^{\max} を必要以上に大きく設定した場合、混雑が解消される経路幅以上に拡張する可能性が高くなるため、他の経路の拡張に回す容量が限られる。つまり、一部の経路に拡張リソースが過剰に配分され、道路ネットワーク内で発生するすべての混雑箇所に対する拡張が不均等に行われたことが原因として考えられる。

(3) 過剰な拡張によるボトルネックの発生

最後に、過剰な拡張によるボトルネックの発生が原因として考えられる。拡張の目的は避難者のスムーズな移動による混雑の緩和であるが、経路を過剰に拡張すると逆に周囲の経路との経路幅の差が広がってしまう。このとき隣接する経路間において、経路幅の差がありすぎると経路移動時にボトルネックが発生しやすくなることが最適化を妨げていると考えられる。CrowdWalk の仕様上においてもこのボトルネックが発生しやすくなるよう再現されているため、過剰な拡張は混雑緩和を妨げてしまうと考えられる。

6 まとめ

本論文では、人口集中地区における大規模災害対策において、変数の削減が道路幅の最適化に効果的かどうかを検証した。具体的には、全体の避難完了時間を目的関数、避難経路の拡張量を決定変数とした道路幅最適化問

題を避難行動として設定し、提案した変数削減手法が全体の避難完了時間の短縮に効果的かを 2 つのシナリオで検証した。そして、得られた実験結果から、変数削減手法は全体の避難完了時間が短縮される道路ネットワークをより高速に探索することを明らかにした。

今後の課題として 3 点考えられる。まず、経路の拡張上限値は道路ネットワークに応じて適切に設定する必要がある。各避難経路における拡張上限値をより細分化して調査することで、各経路に最も適した拡張量を設定できると考えられる。次に、複数の最適化手法を用いて最適化結果を比較することも求められる。本論文では最適化手法として Random Search を用いたが、ベイズ最適化や CMA-ES などの異なる最適化手法でも同様の結果が得られるのかを確認する必要がある。また、本論文では特定のマップ環境や日程、初期人口分布を用いて実験を行ったが、場所や季節、時間帯によって最適化結果が異なる可能性がある。そのため、複数の地域や時間帯の初期人口分布に対して提案手法を適用し、分析を行う必要がある。これらの課題に取り組むことで、提案手法の有効性と汎用性をさらに高めることが期待される。

参考文献

- [1] 産経新聞社. 進まぬ耐震化、被害拡大要因か 能登半島地震 死因 9 割「家屋倒壊」全国で同様の懸念. <https://www.sankei.com/article/20240202-HOXOITC4G5L3L66MHMSRYWU/>. Accessed: 2023-06-01.
- [2] 西田 遼, 重中 秀介, 加藤 優作, and 大西 正輝. 群集シミュレーションによる歩行空間設計と制御に関する研究動向. 人工知能学会論文誌, 37(2):J-LB1_1-16, 2022.
- [3] 小檜山雅之 and 金子みなみ. ロボットを用いた効果的な屋内避難誘導—被験者実験とエージェントモデルシミュレーション—. 地域安全学会論文集, 22:1-10, 2014.
- [4] Min Zhou, Hairong Dong, Bin Ning, and Fei-Yue Wang. Recent development in pedestrian and evacuation dynamics: Bibliographic analyses, collaboration patterns, and future directions. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 5(4):1034–1048, 2018.
- [5] 武田 芽依 and 大西 正輝. 広域避難誘導における追従行動を考慮した評価指標の提案. 電子情報通信学会技術研究報告, 123:7-12, 2024.
- [6] Walter J. Gutjahr Mahdi Mostajabdaveh and F. Sibel Salman. Inequity-averse shelter location for disaster preparedness. *IIEE Transactions*, 51(8):809–829, 2019.
- [7] Takanori Hara, Masahiro Sasabe, Taiki Matsuda, and Shoji Kasahara. Capacitated refuge assignment for speedy and reliable evacuation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 2020.
- [8] Lakshay Taneja and Nimesh B. Bolia. Network redesign for efficient crowd flow and evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, 53:251–266, 2018.
- [9] 山下 倫央, 副田 俊介, 大西 正輝, 依田 育士, and 野田 五十樹. 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用. 情報処理学会論文誌, 53(7):1732–1744, 07 2012.
- [10] Takami Shunki, Onishi Masaki, and Noda Itsuki. Waffle: A flexible framework for large-scale social simulation experiment. コンピュータソフトウェア, 40(3):3_29-3_49, 2023.