

〈一般研究課題〉 人流データを用いたシミュレーションに基づく
避難計画モデル

助成研究者 名古屋工業大学 武藤 敦子



人流データを用いたシミュレーションに基づく 避難計画モデル

武藤 敦子
(名古屋工業大学)

Evacuation planning model based on simulation using human flow data

Atsuko Mutoh
(Nagoya Institute of Technology)

Abstract :

In recent years, we have seen many large-scale disasters such as earthquakes, and overflows of shelter capacity often occurred due to the day-night population gap at the time of the Great East Japan Earthquake. Therefore, it has become an important issue to allocate shelters in consideration of the day-night population gap (diurnal variation). In the shelter assignment problem, the use of zero-suppressed dichotomous decision graphs (ZDD) makes it possible to enumerate all patterns of shelter assignment. Studies using ZDD evaluated the distance to the shelter and the capacity factor, but did not consider the dwell time on the travel route, and used the fixed number of evacuees. In this study, we add an evaluation index using a network flow simulation method in order to take into account the number of people who stay in shelters along travel routes. In addition, we propose a method for obtaining shelter allocation that takes into account the diurnal variation in the number of people staying in shelters using stay history data for all time segments. In our experiments, we used three evaluation values: distance, occupancy rate, and evacuation completion time, and confirmed the effectiveness of the method through experiments using real environments.

1. はじめに

近年、地震などの大規模な災害の発生が多く見られ、南海トラフ地震が30年以内に発生する確

率は 70-80%と言われている [1]. このような災害に備え、地震に強い建物づくりや災害時の救急マニュアルの作成、各市町村が提供するハザードマップなど、様々な減災、防災対策が講じられている [2]. しかし、災害が発生した際にどこに避難すればよいか分からない住民が多いことが東日本大震災で明らかになり、災害が発生したときの避難所はどこか、安全な避難経路はどこかなどを、確認しておくことが大切になってきている [3][4]. また、東日本大震災の際には、昼夜人口のギャップ(日内変動)により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」が発生した [5]. 阪神淡路大震災の際の避難所の空間コストが 100億円程度かかったという試算もあるため [6], 避難所のコストを最小限に抑え、滞在人数の日内変動を考慮して避難所を割り当てることが重要になっている. 従来の避難所割り当てに関する研究 [4] では、ゼロサプレス型二分決定グラフ (ZDD) というデータ構造を用いて避難所の割り当てを行っている. ZDD を用いることで、様々な制約を満たす避難所割り当ての組み合わせを全列挙することが可能になり、厳密解や複数の優れた解を求めることができる. 従来手法では、容量制約や最大移動距離に関する制約を満たす組み合わせを ZDD を用いて全列挙し、その中で収容率の標準偏差と距離の総和が最適な割り当てを求めている. しかし、滞在人数の日内変動と移動経路での滞留が考慮されていないという課題がある. 時間区分によって滞在人数の分布が変化する可能性もあるため、滞在人数の日内変動を考慮しなければ避難所の容量溢れが起き、「たらい回し」に合う被災者がでてしまう. また、避難完了時間の短縮が重要な中で、移動経路での滞留を考慮しなければ、道の混雑によっては避難完了時間が大幅に延びてしまう可能性がある. そこで、本研究では、これらの問題を解決し、滞在人数の日内変動、移動経路での滞留を考慮した避難所割り当て手法の提案を行う. 時間区分ごとの人数データの取得が容易な名古屋工業大学で実験を行い、滞在人数の日内変動、移動経路での滞留を考慮することの有効性を確認する.

2. 提案手法

本手法では、ZDDを用いて避難所割り当てを列挙し、滞在人数の日内変動、移動経路での滞留を考慮した評価値の算出方法により、最適な避難所割り当てを求める.

2.1 提案手法の手順

提案手法は以下の手順で行う.

- (1) 各場所(建物)・交差点・避難所をノード、道路をエッジとし、距離と道幅をエッジの重みとした重み付きグラフ(動的ネットワーク)を構築(図1).
- (2) (1)のグラフから、ZDDを用いて避難所ごとに分割できる部分グラフ(図2)を全列挙.
- (3) (2)で列挙した部分グラフ(割り当て)の中から容量制約を満たす部分グラフを抽出.
- (4) (3)で抽出した割り当ての滞在人数の日内変動・移動経路での滞留を考慮した評価値(距離の総和、収容率の標準偏差、避難完了時間)を算出.
- (5) (4)の評価値による最適な割り当ての出力.

図1は、提案手法の(1)で構築するグラフの例である. ノード0 およびノード3は避難所、ノード1およびノード2は建物・交差点を表している. 図2は、提案手法の(2)で列挙するグラフの例である. 図3のZDDは、提案手法(1)で図1のグラフを構築した場合の提案手法(2)で構築されるZDDで

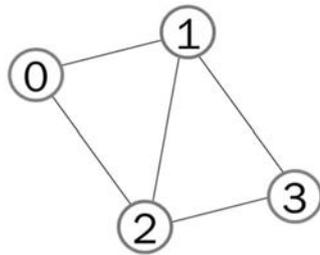


図1 (1)で構築するグラフ

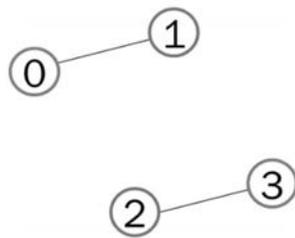


図2 (2)で列挙するグラフ

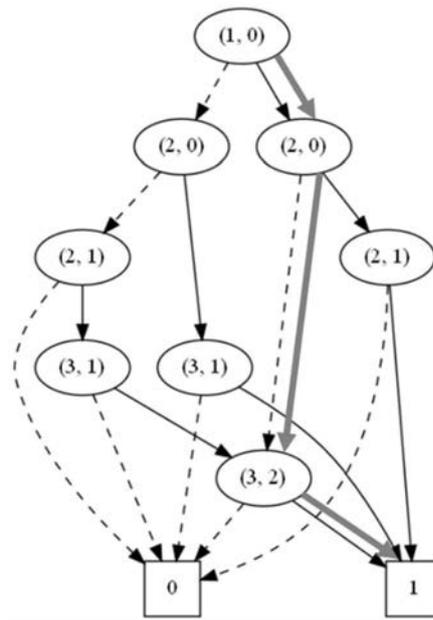


図3 ZDD

ある。どの有向辺にも指されない節点を根節点と呼び、ただ1つ存在する。有向辺を持たない節点を終端節点と呼び、2つ存在する。1の値を持つ終端節点を1-終端節点、0の値を持つ終端節点を0-終端節点と呼ぶ。終端節点以外を分岐節点と呼び、分岐節点は要素の選択に関する場合分けを表す。有向辺のうち実線を選ぶとき、要素を選択することを表し、点線を選ぶとき要素を選択しないことを表す。根節点から1-終端節点までのパスによって、選択された組み合わせを表す[7]。提案手法で用いるZDDの各分岐節点はエッジの選択を表している。(1,0)の分岐節点はノード0とノード1を結ぶエッジを表している。図3の太線パスが表す組み合わせが図2のグラフである。このグラフは、建物のノードに滞在している人を同じ連結成分内の避難所に割り当てることを表している。

2.2 評価値の算出方法

提案手法(4)の評価値の算出方法について説明する。移動経路での滞留を考慮するために、従来手法で用いていた距離の総和と収容率の標準偏差に加え、避難完了時間での評価を行う。ある割り当てでの距離の総和は、各建物から避難所までの距離の和とする。距離は提案手法(3)で抽出したグラフから計算した最短距離を用いる。割り当ての収容率の標準偏差は、すべての避難所集合に対して、避難所に割り当てられた人数と収容可能人数の比の標準偏差のことである。割り当ての避難完了時間は、辞書式最速流により求めた時間である。本研究では、収容率の標準偏差および避難完了時間の計算において時間区分ごとの滞在人数を用いたものに変更する。まず、時間区分ごとの各建物の人数データを用意する。滞在人数の日内変動を考慮するために、収容率の標準偏差と避難完了時間の計算をすべての時間区分で行い、その平均値を求める。そして、求めた収容率の標準偏差および避難完了時間を最適な割り当てを決定する際に利用する。

2.3 3つの評価値による最適な割り当ての決定

従来手法では、距離の総和と収容率の標準偏差をそれぞれ正規化した和を用いて最適な割り当てを求めていたが、提案手法では距離の総和、収容率の標準偏差の平均、避難完了時間の平均をそれぞれ正規化した和を用い、その値が最小となる割り当てを求める。ただし、提案手法(3)において、すべての時間区分において容量制約を満たす部分グラフを抽出する。

3. 実験

実験1として、移動経路での滞留を考慮することの有効性を確認する実験、実験2として、滞在人数の日内変動を考慮することの有効性を確認する実験を行う。

3.1 実験環境

2016年6月3日から2016年12月30日の間に名古屋工業大学の学内で得られたデータを用いる。データは、学内に設置されているBLEビーコンとNitechピロリンというアプリを用いて取得した[8]。本研究では、3時間を単位時間とし、1日のうち9:00から18:00を3つの時間区分に区切ったデータを利用する。なお、全構成員が必ずしも本アプリを利用しているとは限らないため、この人数は、得られたデータを構成員のアプリの使用比率に従って同比率で補正し求めた平均値であり、合計人数は、9:00-12:00 : 2001人、12:00-15:00 : 2062人、15:00-18:00 : 1656人である。

次に、実験を行う名古屋工業大学の環境について説明する。図4が名古屋工業大学のキャンパスマップ、図5が、提案手法(1)で構築するグラフである。中ノードは建物、小ノードは交差点、大ノードは避難所を表している。グラフの構成としては、ノード数は30、エッジ数は61である。ノード数30の内、建物が30、交差点が19、避難所が3である。また、避難所の合計容量は2300人とした。

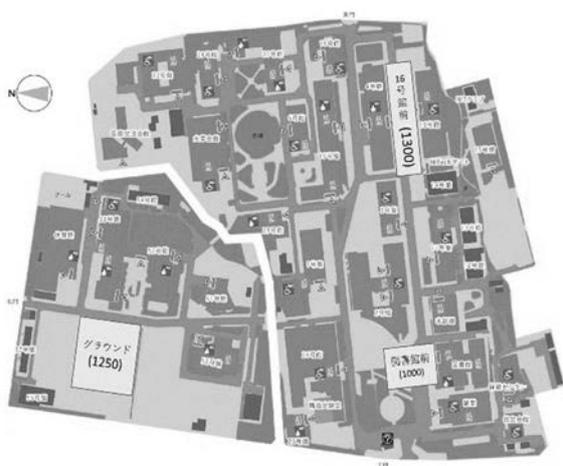


図4 キャンパスマップ

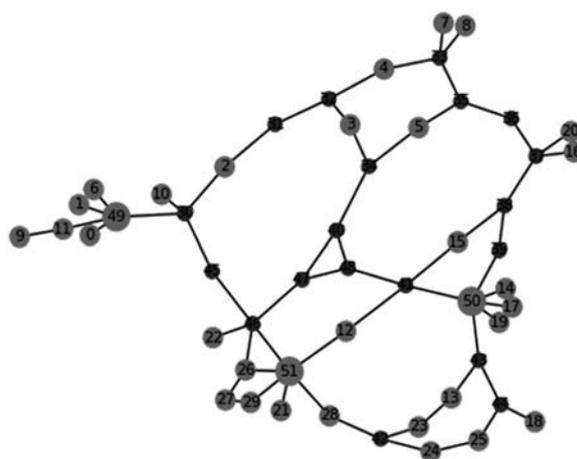


図5 名古屋工業大学のグラフ

3.2 実験方法

3.2.1 実験1

避難完了時間で評価することの有効性を調べるために、距離の総和、収容率の標準偏差のみで評価した割り当て結果と避難完了時間を加えて評価した割り当て結果を比較する。実験1では、滞在人数の日内変動は考慮せず、一つの時間区分の人数のみを利用する。15:00-18:00の時間区分の人数(合計:1656人)を用いる。

3.2.2 実験2

滞在人数の日内変動を考慮することの有効性を調べるために、滞在人数の日内変動を考慮して求めた割り当て結果と考慮していない割り当て結果で比較を行う。滞在人数の日内変動を考慮する場合は、2.3節で説明した評価方法で評価を行う。つまり、すべての時間区分のデータを用い、距離の総和、収容率の標準偏差、避難完了時間の3軸で評価を行う。滞在人数の日内変動を考慮しない場合も、距離の総和、収容率の標準偏差、避難完了時間の3軸で評価を行うが、滞在人数は一つの時間区分のみのデータを用いる。今回は実験1と同様、15:00-18:00の時間区分の人数(合計:1656人)を用いる。求めた2つの割り当てで、時間区分それぞれで実際に避難した場合に評価値や容量溢れがどうなるのかについて調べる。

3.3 実験結果

3.3.1 実験1の結果と考察

従来手法で評価した割り当て結果(図6)とそこに避難完了時間での評価を加えて求めた提案手法での割り当て結果(図7)を比較する。表1がそれぞれの割り当ての評価値である。丸で囲まれた4箇所の割り当てが異なっている。図6を見ると、ネットワークの上部に長い一本道の避難経路ができていることから滞留が発生していると考えられる。そのため、従来手法の避難完了時間の方が遅くなっている。収容率の標準偏差の値については、避難完了時間を加えて評価した方が大きくなっている。しかし、距離の総和の値が同じであることを考慮すると、避難完了時間での評価を加えることで、移動経路での滞留を考慮でき、評価値のバランスが良い割り当てを求めると考えられる。

表1 実験1の結果

	距離の総和	収容率の標準偏差	避難完了時間
従来手法(距離・収容率)	547	0.0012	349
提案手法(距離・収容率・時間)	547	0.0103	304

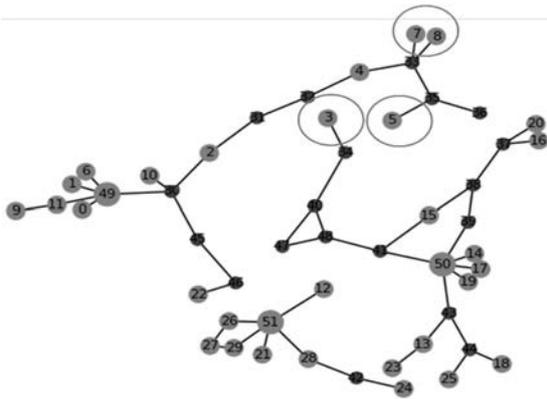


図6 従来手法(距離・収容率)

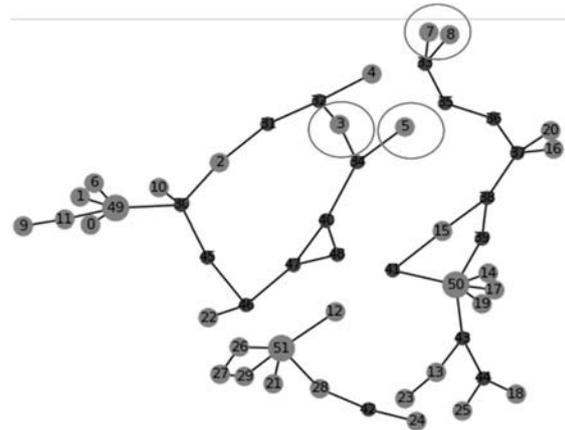


図7 提案手法(距離・収容率・時間)

3.3.2 実験2の結果と考察

表2が実際に避難した場合の評価値，表3が実際に避難した場合の容量溢れである．評価値を比較すると，15:00-18:00の収容率の標準偏差以外，提案手法の方が小さい値になっている．9:00-12:00と12:00-15:00の時間区分で収容率の標準偏差と避難完了時間の値を比べると，滞在人数の日内変動を考慮していない割り当て結果の方が大きくなっている．これは，容量溢れした人数も含めて避難させているため，避難完了時間も延び，収容率の標準偏差の値も大きくなってしまっていると考えられる．また，容量溢れを比較すると，提案手法では0であるが，滞在人数の日内変動を考慮していない割り当てでは，9:00-12:00で77人，12:00-15:00で81人の容量溢れが発生している．以上の結果から，提案手法で求めた割り当ては全ての時間帯において避難所の容量溢れが起きずかつ従来手法に比べて避難完了時間が減少しており，提案手法の有効性が確認できた．

表2 実験2の結果(評価値)

	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00
従来手法(日内変動なし)	(547, 0.175, 296)	(547, 0.148, 307)	(547, 0.010, 304)
提案手法(日内変動あり)	(537, 0.037, 265)	(537, 0.009, 259)	(537, 0.140, 248)

(距離の総和，収容率の標準偏差，避難完了時間)

表3 実験2の結果(容量溢れ)

	9:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00
従来手法(日内変動なし)	77	81	0
提案手法(日内変動あり)	0	0	0

4. おわりに

本論文では，東日本大震災の際に発生した避難所の「たらい回し」を回避するために，全ての時間帯の滞在人数を考慮した避難所割り当て手法を提案した．最適な避難所割り当てとして，(1)より近い避難所へ割り当てること，(2)避難所収容率を平準化すること，(3)滞留を回避した避難経

路で素早く避難できることの3点を評価軸とした。提案手法では、滞在人数の日内変動を考慮するために、時間区分ごとの各建物の人数データを用意し、すべての時間区分での評価を行った。また、移動経路での滞留を考慮するために避難完了時間での評価を行った。そして、提案手法の有効性を確認するために、2つの比較実験を行い、有効性を確認した。一方で、本研究では建物単位での避難を想定した手法となっているが、実際の地方自治体の避難計画においては、避難所の割り当ては建物単位ではなく地域単位となっていることが多く、また、避難経路に関しては建物単位の緻密な計画が必要である。提案手法は、実験で想定した大学内の避難計画のような建物単位で避難所と避難経路を割り当てる避難計画には有効であるが、自治体区域のような地域単位で避難所を割り当てる必要がある場合はそのまま用いることができないため、今後改良が必要である。

参考文献

1. 気象庁：南海トラフに関連する情報(オンライン),
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nteq/index.html>, 2019-04-15.
2. 梅木寿人, 中村優吾, 藤本まなと, 水本旭洋, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一: 混雑度の偏りを考慮した避難所決定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.2, pp.608-616 (Feb. 2019).
3. 首相官邸：避難はいつ、どこに?(オンライン),
<https://www.kantei.go.jp/jp/headline/bousai/hinan.html>, 2019-11-03.
4. 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, 第1巻(2014).
5. 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J105-D, No.3, pp.175-185(2022).
6. 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, 人工知能学会第35回全国大会(2021).
7. 戸田貴久, 斎藤寿樹, 岩下洋哲, 川原純, 湊真一：ZDDと列挙問題ー最新の技法とプログラミングツール, コンピュータソフトウェア, Vol.34, No.3, pp.97-120(2017).
8. 梶岡慎輔, 山本大介, 打矢隆弘, 斎藤彰一, 松尾啓志, 内匠逸：BLEビーコンを用いた位置推定による打刻システムの運用と課題, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-IOT-35, No12, Vol.2016-SPT-20, No12(2016).