

多様な避難者分布に対応できる 津波避難方法の研究

Research on tsunami evacuation methods for various spatial distributions of evacuees

柳澤 智仁*

Tomohito YANAGISAWA

*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

The spatial distribution of evacuees, which varies by day of the week and time of day, has a significant impact on tsunami evacuation. To achieve safe evacuation, it is important to avoid traffic concentration and disperse evacuees. In this study, we propose a method to prepare a set of evacuation routes in advance that can respond to the various spatial distribution of evacuees, and to indicate the use of evacuation routes according to the spatial distribution of evacuees at the moment of tsunami alert. The effectiveness of the proposed method is analyzed using an actual municipality-scale network.

Key Words : tsunami evacuation, optimization, spatial distribution of evacuees

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

2011 年 3 月に発生した東日本大震災では、岩手県・宮城県・福島県の沿岸市町村の住民のうち 56.7%の人々が自動車避難を行い、32.6%の人々が渋滞に直面したことが内閣府のアンケート調査から明らかになっている¹⁾。渋滞の発生は発災時の避難者の空間分布に大きく依存する。しかし、発災後に避難者の空間分布を正確に把握し、交通集中を発生させないような逃げ方を即座に計算し、その経路を避難者に周知することは困難である。

本研究では、多様な避難者空間分布に対応できる少数の避難経路群を事前に準備し周知や訓練を実施しておいた上で、発災時の避難者空間分布に合わせて経路の使い方を指示する「事前経路周知+指示」という方法によりリスク低減と実現性の両立を図る。特に、多様な避難者空間分布に対応できるような周知経路群の準備方法を検討する。

(2) 研究対象地域

本研究では、対象地域として次のような特徴を持つ宮城県亶理郡亶理町を設定した。

- 海岸部は平地部が続き、周辺に高い場所がない
- 海岸部から西側の内陸部までに約 5km 距離があり、徒歩での避難が困難な地域がある

実際亶理町は自動車での避難を考慮した津波避難計画を作成している³⁾が、避難場所までの距離により地域を二分して、遠方にのみ自動車利用を認めており、渋滞などの問題は考えられていない。本研究では、全地域で徒歩避難と自動車避難の両方を選択可能であるという条件のもとで、徒歩と自動車の集中と錯綜がもたらす交通時間の増大をふまえて、避難中の津波遭遇リスクを最小に

する避難方法を計算する。その結果として地域ごとに利用すべき移動手段の割合も内生的に求まる。

(3)使用する最適化モデル

竹居らが開発した歩車 2 モードにおける津波遭遇総リスクの最小化を目的関数とした線形計画モデル²⁾により避難者の初期空間分布を所与として、最適な避難経路を求めることができる。本研究ではこのモデルを、使用経路を事前経路群に限定する、という条件を考慮できるように拡張して用いる。

(4)本研究の分析方針

図1に本研究の分析方針を示す。まず2章で非負値行列因子分解(NMF)を用いて多様な避難者空間分布をパターン分類し、少数の特徴的な空間分布パターンを得る。3章では各パターンの最適避難で使われる経路を絞り込み、避難経路候補を作成する。4章ではこの避難経路候補の中から少数の経路を組み合わせて、特徴が強く表れる代表的な空間分布のケースに対して津波遭遇総リスクや歩車分担率を計算して、本研究で提案する「事前経路周知

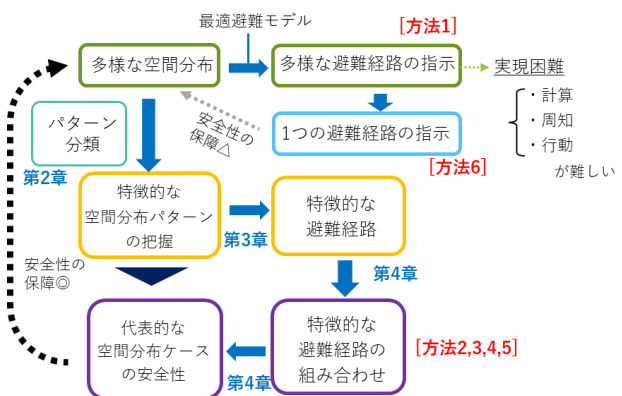


図1 本研究の分析方針

2. 避難者空間分布パターンの分析

(1) 分析データ

DIM(ドコモ・インサイト・マーケティング社)が提供するモバイル空間統計データから、宮城県亶理郡亶理町の500mメッシュ1時間ごとの総滞在人口のデータを使用する。対象期間は、COVID-19の流行以前である2019年1月1日～12月31日(2月19日が欠測のため364日×24時間)の8736時点とする。

(2) 避難者空間分布パターン把握の手法

非負値行列因子分解(Non-negative Matrix Factorization : NMF)を用いて代表的な避難者の空間分布パターンを把握する。

観測ベクトルを並べた行列 X (サイズ $M \times N$)を

$$X \approx W \cdot H \quad (1)$$

を満たす因子負荷量行列 W (サイズ $M \times K$)と因子得点行列 H (サイズ $K \times N$)の積に分解する。成分数は $K=8$ とした。次に、これらの行列を以下のように標準化する。

$$N_k = \sum_m W_{m,k} \quad (2)$$

$$W'_{m,k} = \frac{W_{m,k}}{N_k} \quad (3)$$

$$H'_{k,n} = N_k \cdot H_{k,n} \quad (4)$$

標準化因子負荷量行列 W' は各列の総和が1であり、各成分におけるメッシュごとの滞在人口比を表す。また標準化因子得点行列 H' は、各成分の時間的な出現率の変動を表す。

(3) 避難者空間分布パターンの分類結果

2.(2)で分解した8成分ごとに、標準化因子得点行列 H' の値が最大の時点を表時点と考え、避難者の実数値を得る。次に全時点 l に対して以下のユークリッド距離 d_{kl} を算出し、どの代表時点に最も近いかを分類する。

$$d_{kl}^2 = (H'_{k1} - p_{kl})^2 + \dots + (H'_{k8} - p_{kl})^2 \quad (5)$$

ここで H'_{kn} は代表時点 n の成分 k の因子得点、 p_{kl} は時点 l の成分 k の因子得点を表す。

表1に8つの避難者空間パターンの代表時点(ケース)と最近隣時点の数を示す。ほとんどの時点が平常時(1)(2)(3)の3パターンいずれかに分類され、他の特徴的な空間分布が他の5つのパターンに表れている。例として図2に2019年8月1日～31日の期間中の各時点のパターン分類結果を示す。

3. 避難指示モデルの作成

表1 避難者空間分布パターンの分類結果と時点数

	平常時(1)	平常時(2)	平常時(3)	休日昼	特異日(昼)	特異日(夜)	花火中	花火前後
代表時点	12/11 23:00	12/1 6:00	12/13 3:00	4/20 22:00	4/25 11:00	4/26 1:00	8/15 19:00	8/15 20:00
時点数	4072	2682	1720	34	34	44	2	2

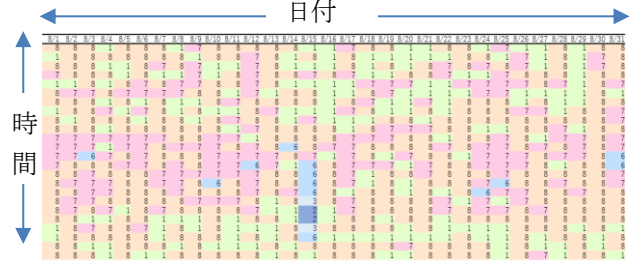


図2 8月1日～31日のパターン分類結果

(1) 最適避難モデルの概説

本研究では、竹居らが開発した最適避難モデル²⁾を拡張して計算を行う。このモデルは自動車と歩行者の2モードを対象として津波遭遇総リスク値を最小化するように自由に経路を選択できる状況を想定している。

交通量を表す変数は以下として定義される。期 t のセル a の流入・流出・滞留する自動車数をそれぞれ u_t^a , v_t^a , p_t^a 、歩行者数を \tilde{u}_t^a , \tilde{v}_t^a , \tilde{p}_t^a と表す。

目的関数は、以下の津波遭遇総リスクである。

$$\min \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ \eta(p_t^a + v_t^a) + (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \} \quad (6)$$

制約条件の詳細は参考文献²⁾に譲る。

(2) 事前経路周知+指示モデルの定式化

次に、事前周知経路群からしか避難経路を選択できない、という状況に合うように定式化を変更する。

まず、避難起点セル $a_0 \in A_0$ からの事前周知経路の集合を J_{a_0} とし、その中の j 番目の避難経路がセル a を通るか否かを表す0-1の定数である $\delta_{a_0,j}^a$ を用意する。

次に新たな操作変数として、避難起点セル a_0 からの j 番目の避難経路を利用する車両数と歩行者数を $w_{a_0,j}$, $\tilde{w}_{a_0,j}$ と定義する。

このとき、各道路セルの車両数、歩行者数について以下の制約式が成立する。

$$\sum_{t=0}^T u_t^a \leq \sum_{a_0 \in A_0} \sum_{j \in J_{a_0}} \delta_{a_0,j}^a \cdot w_{a_0,j} \quad \forall a \in A_R \quad (7a)$$

$$\sum_{t=0}^T \tilde{u}_t^a \leq \sum_{a_0 \in A_0} \sum_{j \in J_{a_0}} \delta_{a_0,j}^a \cdot \tilde{w}_{a_0,j} \quad \forall a \in A_R \quad (7b)$$

式(7)はセル a へ流入する車両数・歩行者数を全ての期で足し合わせたものが、各経路を利用する車両数・歩行者数の合計を上回らないことを表す。

また各避難起点セル a_0 に存在する人数について以下の制約式が成立する。

$$\sum_{j \in J_{a_0}} (\eta \cdot w_{a_0,j} + \tilde{w}_{a_0,j}) = \sum_{a \in O(i)} D^a \quad \forall a_0 \in A_0 \quad (8)$$

式(8)は避難起点セル a_0 の避難者人数と避難起点セル a_0 からの経路の使用人数が等しいことを表す。

事前経路周知+指示モデルは、式(6)を目的関数とする最適避難モデルの制約条件に、式(7), (8)を追加した線形計画モデルとして定式化できる。

4. 事前周知経路群を用いた避難指示の効果

将来起こりうる多様な避難者空間分布に対応できる経路を用意するために、2.(2)で得られた特徴的な8パターンの避難者空間分布に対する最適避難を計算し、利用された経路を列挙する。発災時に起こりうる避難者空間分布はこの8パターンの重ね合わせで実現していると考えられるため、避難指示の際にもこの8パターンに対応できる経路を組み合わせで避難させれば、多様な避難者空間分布に対する安全な避難が実現できると考える。

(1) 避難経路候補の列挙

2.(2)で得られた標準化因子負荷量行列 W' に避難者総数31292人を掛け合わせ、各成分のみで構成される8パターンの避難者空間分布を得る。これを起点セル a の避難者人数 D^a として与え、内陸2か所の町境の峠へ避難する最適避難モデルを解き、各道路セルの総通行者数 SU_a を得る。

次に以下の手順を繰り返し、避難経路候補を列挙する。

- ① 避難起点セル $a \in A_0$ を 1 つ選び、そのセルと接続ノード i を探索する。
- ② ノード i に接続する道路セル $a \in A_R$ のうち総通行者数 SU_a が最大のセル a_{max} を選択する
- ③ セル a_{max} と接続するノード i を探索。
- ④ 操作②③を繰り返す。
- ⑤ 避難場所セルに到達 ($a_{max} \in A_D$) したら、これまで探索してきたセルの総通行者数 SU_a のうち最小値を探索してきたセルの SU_a から減ずる。
- ⑥ ①～⑤の操作を $SU_a = 0 (\forall a)$ となるまで繰り返す。

この操作を8成分の結果すべてに行い、避難経路候補を得る。今回は286本の経路を得た。

(2) 避難経路候補の絞り込み

4.(1)で得られた避難経路候補の中で、似た軌跡の経路は同一の経路とみなし、避難経路候補を絞り込む。絞り込みは次の手順で行う。

- ① 4.(1)で得られた避難経路候補ごとに、通過するセルの津波遭遇リスク値を足し合わせる(この総和を静的リスク値 R_{sta} と呼ぶ)。
- ② R_{sta} の小さい順番に避難経路候補を並び替える。
- ③ 各経路候補で通過するセルのうち、その経路より R_{sta} が小さい経路でも使われているセルの個数を数え、以下の式(9)で重複率を算出する。

$$\text{(重複率)} = \frac{\text{(検討経路より } R_{sta} \text{ が小さい経路でも使われるセル数)}}{\text{(検討経路で使われるセル数)}} \quad (9)$$

- ④ 重複率が小さい(0.6以下)経路のみを避難経路候補として絞り込む。
- ⑤ 起点ごと静的リスク値の低い順に経路番号を付ける。

この結果133本の経路を避難経路候補とした。これらの経路は、起点ごとに1～6本となっている。

(3) 事前経路周知の効果分析

代表時点8ケースについて表2に示す6つの避難方法の結果を比較して事前経路周知の効果を確認する。

表2 分析する避難方法

方法①	最適避難	方法④	2経路周知
方法②	全経路周知	方法⑤	1経路周知
方法③	3経路周知	方法⑥	最短経路避難

本研究で提案する「事前経路周知+指示」という方法として表2の方法②～⑤のように、避難経路候補全てを周知する場合と、1起点からの経路を1～3本に限定して周知する場合の4つの方法を検討する。これらと比較するため、方法①として最適避難モデルに基づく方法①と、避難者全員が最寄りの避難場所に最短経路で避難する方法⑥を取り上げる。なお方法①は、最適化計算を即座に行い各避難者に細かな逃げ方を指示することを必要とするもので、実際には実現できない理想的な方法である。一方で方法⑥は、事前に周知や訓練を一切行わない場合に避難者がとると想定される行動であり、交通集中が避けられない方法である。

図3に代表時点8ケースにおいて、最短経路避難(方法⑥)での津波遭遇総リスクを1とした場合の各方法での津波遭遇総リスクの比を示す。これより、事前経路周知+指示(方法②～⑤)の実施により最短経路避難(方法⑥)の場合に比べ津波遭遇リスクを20%ほど、夏まつりの花火中/花火前後のケースでは60%ほど低減できることが確認できる。また事前周知経路の本数について、多くのパターンで1経路周知(方法③)の場合はリスクの低減効果あまり高くないが、2経路(方法④)・3経路(方法⑤)の場合は全経路周知と同等の低減効果を持つことが分かる。これより、事前周知経路は起点ごとに最低2本用意する必要があることが分かる。

図4に、全経路周知(方法②)において避難起点ごとに指示された自動車利用率の8つの代表時点についての平均値を示す。南東部の避難起点(大畑浜)のように、海岸部でも歩行避難の割合が高い地域がある。また北西部の峠付近の避難起点は自動車避難の割合が高い。この地域

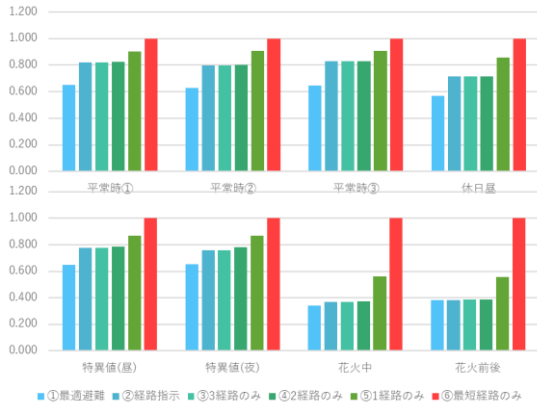


図3 津波遭遇リスク比

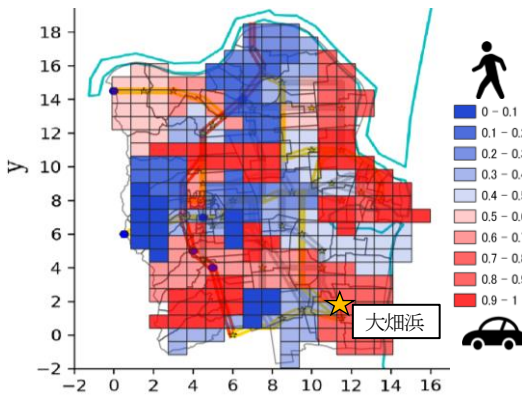


図4 自動車利用率(8成分平均)

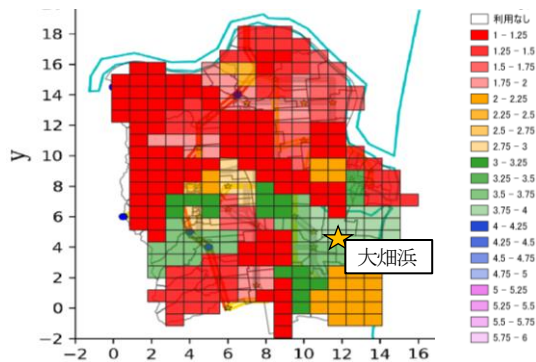


図5 利用経路平均順位(8成分 歩車平均)

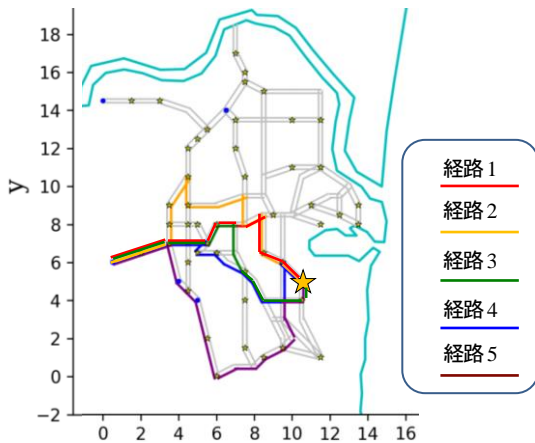


図6 避難経路候補(大畑浜)

東北大学工学研究科土木工学専攻の避難者は海岸側の避難者が避難してくる前に自動車避難を終えていることが確認できた。図5に全経路周知(方法②)において避難起点ごとに指示された経路の順位を示す。図5より、南東部の避難起点(大畑浜)付近は海岸部にもかかわらず指示経路の平均順位が大きく、静的リスクが低い経路を優先して指示していない。これは町の中央部を横断する県道10号が他の起点からの自動車避難者で混雑するため、渋滞を避けるために迂回を指示するからである。具体的には、図6に示す町の南部を迂回する経路5を多く利用させるように指示される。

5. おわりに

津波避難には避難者の空間分布が大きく影響することから、本研究では日時や曜日、イベントなどによって起こりうる避難者空間分布パターンを把握した。そして避難起点毎に避難経路候補を周知しておき、発災時にその経路群の中から利用する経路と移動手段を指示する「事前経路周知+指示」という方法を提案した。

提案手法では、避難者全員が最短経路を避難する場合に比べ津波遭遇リスク値を20%ほど低減できる効果があることが明らかになった。また避難者に周知しておく経路数については、各起点で1本だけでは複数パターンに対応できず、2本以上用意しておくことでリスク低減効果を十分に得られることを明らかにした。また交通集中を避けるため、地域によっては迂回をさせる必要があることも確認できた。こういった地域の避難者には行政側から避難経路について十分に説明し、納得してもらう必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 調査の結果：東日本大震災における地震・津波時の避難に関する実態調査，資料 1-3 住民アンケート調査〔単集計結果〕，内閣府 HP 防災情報のページ，平成 24 年 12 月 21 日公表，
http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chousa1_3.pdf (参照 2023-01-31)
- 2) 竹居 広樹・奥村 誠：津波避難における自動車利用率設定のための基礎的分析手法，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol.74, No.5, I_181-I_189, 2018
- 3) 宮城県亶理郡亶理町，亶理町津波避難計画(令和 4 年 4 月)，亶理町 HP, 2022，
https://www.town.watari.miyagi.jp/common/img/content/content_20220614_162132.pdf (参照 2023-01-31)

(2023年2月1日提出)