

# 多様な避難者分布に対応できる 事前周知経路を用いた津波避難方法

柳澤 智仁<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 非会員 東芝インフラシステムズ株式会社 (〒212-8585 川崎市幸区堀川町 72 番地 34)

E-mail: [tomohito.yanagisawa.s4@dc.tohoku.ac.jp](mailto:tomohito.yanagisawa.s4@dc.tohoku.ac.jp)

<sup>2</sup> 正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S502b)

E-mail: [mokmr@tohoku.ac.jp](mailto:mokmr@tohoku.ac.jp)

最近の津波浸水想定の見直しにおいて、従来の想定よりも早い到達時刻や広い浸水域が示され、自動車を併用した避難が必要とされる地域が少なくないことが再確認された。避難時の安全性を確保する上で、避難者の空間分布によって交通集中箇所が変化することを踏まえて、避難手段や避難経路を適切に指示する必要がある。本研究では、少数の避難経路群を事前に準備して住民への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実際に使わせる経路を指示する「事前経路周知+指示」という方法を用いて、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周知経路群の準備方法を検討する。

**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<sup>1)</sup>から明らかになっている。この中には、徒歩避難でも十分間に合う事例が多く含まれていたと考えられものの、近年発表された最大規模の津波想定<sup>2)</sup>によれば、東日本大震災の津波よりも早い到達時刻や広い浸水域が想定され、自動車を併用した避難が必要となる地域が少なくない。交通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、少数の周知経路群によって多様な避難者空間分布に対応できるようにするための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<sup>3)</sup>を作成しているが、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<sup>4)</sup>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。

なお、計算対象とする道路ネットワークは対象地域内

の 2 車線以上の車道を持つ道路からなる図-1 に示すネットワークであり、互理町の行政区に対応する 67 個の起点セルを設定する。避難先は、同町が指定している逢隈小学校、吉田小学校、互理小学校、互理中学校の 4 か所の指定緊急避難場所及び内陸 2 か所の町境の峠の合計 6 個の避難場所セルである。津波遭遇リスク  $R_t^a$  は、海岸部に近いほど津波に遭遇するリスクが高くなる、という空間的な特徴と、発災後の時間経過に伴いリスクが高くなる、という時間的な特徴を考慮して、東西方向の座標値  $x$  に関するロジスティクス曲線と発災後の経過時間  $t$  に関するロジスティクス曲線の積として、以下のように与える。

$$R_t^a = \frac{1}{1 + e^{(7-x)}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-15)}} \quad (1)$$

#### (4) 本研究の分析方針

図-2 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 章では津波遭遇総リスクの最小化モデルを事前経路群から経路を選ぶという想定に合わせて拡張を行うとともに、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、津波遭遇総リスクの最小化モデルを、事前経路群から経路を選ぶという想定に合わせて拡張を行う。5 章では、3 章で作成した避難経路候補の中から少数の経路を組み合わせ、避難者の代表的な空間分布のケースに対して 4 章のモデルを用いて津波遭遇総リスクや歩車分担率を計算する。これにより、本研究で提案する「事前経路周知+指示」という方法の効果を確認する。

## 2. 避難者空間分布パターンの分析

### (1) 人口分布に関するデータ

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<sup>9)</sup>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<sup>9)</sup>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

$$X \approx W \cdot H \quad (2)$$

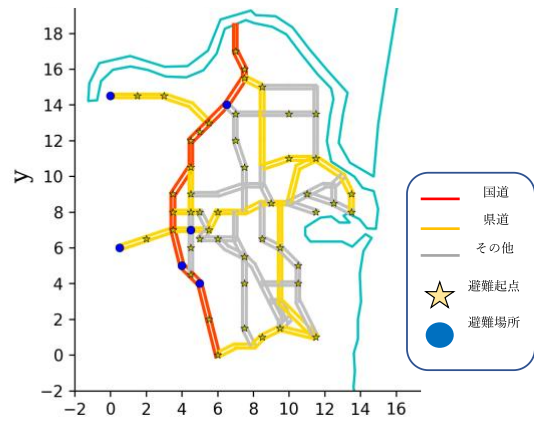


図-1 最適化の対象とするネットワーク

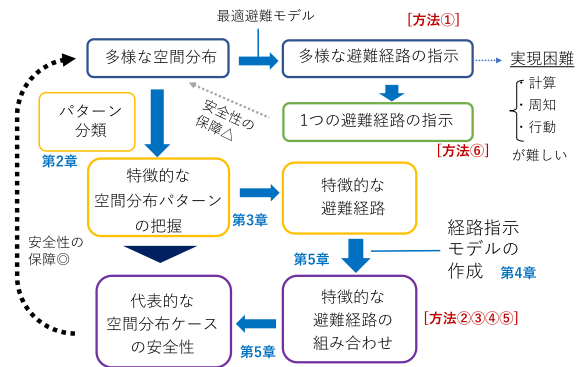


図-2 本研究の分析方針

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。

$$N_k = \sum_m W_{m,k} \quad (3)$$

$$W'_{m,k} = \frac{W_{m,k}}{N_k} \quad (4)$$

$$H'_{k,n} = N_k \cdot H_{k,n} \quad (5)$$

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  $H'$  の値が最大の時点代表時点と考え、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。

$$d_{kl}^2 = (H'_{k1} - p_{kl})^2 + \dots + (H'_{k8} - p_{kl})^2 \quad (6)$$

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(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。空間分布の例として図-3 に平常時(1)、休日昼、および花火中の 3 つの分布を示す。図-4 に日時ごとのパターン分類結果の一例として、8 月 1 日~31 日の各時点のパターン分類結果を示す。

### 3. 事前避難経路群の作成

#### (1) 事前避難経路群の意義

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て避難させれば、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。

#### (2) 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。

#### (3) 避難経路候補の絞り込み

3.(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 3.(1)で得られた避難経路候補ごとに、通過する

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	204	34	44	2	2

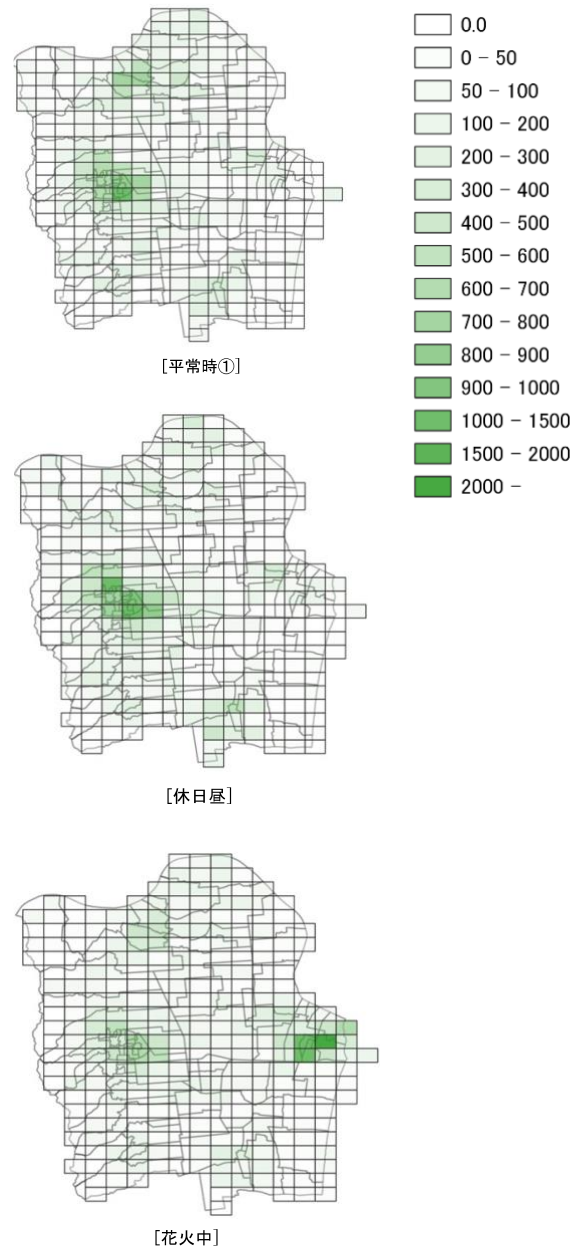


図-3 空間分布パターンの例

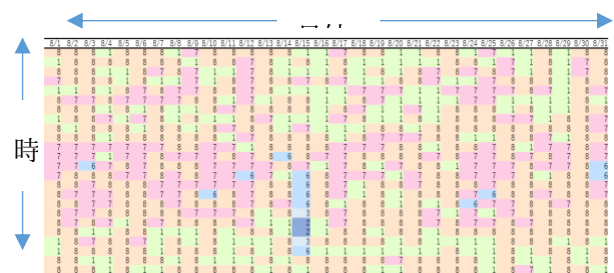


図-4 8 月 1 日~31 日のパターン分類結果

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(7)で重複率を算出する.

$$\text{(重複率)} = \frac{\text{(当該経路より } R_{sta} \text{ が小さい経路でも使われるセル数)}}{\text{(検討経路で使われるセル数)}} \quad (7)$$

- 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.

#### 4. 経路指示モデルの作成

##### (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<sup>4)</sup>を拡張して計算を行う. このモデルは Cell Transmission Model の考え方をベースに, 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.

交通量を表す変数として, 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.

$$\min \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ \eta(p_t^a + v_t^a) + (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \} \quad (8)$$

制約条件の詳細は参考文献<sup>4)</sup>に譲る.

##### (2) 経路指示モデルへの拡張

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.

$$\sum_{t=0}^T u_t^a \leq \sum_{a_0 \in A_0} \sum_{j \in J_{a_0}} \delta_{a_0,j}^a \cdot w_{a_0,j} \quad \forall a \in A_R \quad (9a)$$

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

$$\sum_{t=0}^T \tilde{u}_t^a \leq \sum_{a_0 \in A_0} \sum_{j \in J_{a_0}} \delta_{a_0,j}^a \cdot \tilde{w}_{a_0,j} \quad \forall a \in A_R \quad (9b)$$

式(9)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.

$$\sum_{j \in J_{a_0}} (\eta \cdot w_{a_0,j} + \tilde{w}_{a_0,j}) = \sum_{a \in O(i)} D^a \quad \forall a_0 \in A_0 \quad (10)$$

式(10)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.

経路指示モデルは, 式(8)を目的関数とする最適避難モデルの制約条件に, 式(9), (10)を追加した線形計画モデルとして定式化できる.

#### 5. 事前周知経路群からの避難指示の効果

##### (1) 事前経路周知+指示方法の想定

本研究では, 少数の避難経路群を事前に準備して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」という方法を提案する. **3. (3)**で述べた絞り込みの結果, 起点ごとに 1~6 本の避難経路候補があるが, これらを全て事前に周知する場合を方法②と呼ぶ. また, 住民への説明と理解の容易さを考えれば, 1 起点からの経路を 1~3 本に限定して事前周知を行うことも考えられるため, これらを方法③~⑤と呼ぶ. その際どの経路に限定して周知するべきかが不明であるため, まず方法②の最適化計算を行って各経路が利用される比率を確認し, 方法③~⑤では利用率が高かった順に限定して経路を選ぶこととする.

さらに, これらの提案方法と比較するため, 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. この方法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. 他方, 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.

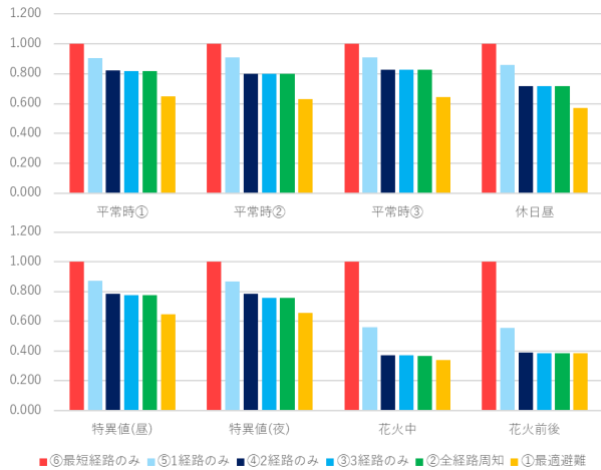


図-5 最適避難に対する津波遭遇リスクの比率

(2) 事前経路周知+指示方法によるリスク値の比較

8つの代表時点における避難者の空間分布をそれぞれ与えた8つのケースに対して、表-2に示した6つの方法で津波総遭遇リスクを最小化する計算を行った。その結果得られた各方法での総リスクの値を最短経路避難(方法⑥)での値に対する比率を用いて図-5に示す。

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があまり高くないが、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。

(3) 指示される内容

8つの代表時点における避難者の空間分布をそれぞれ与えた8つのケースに対して、全経路周知(方法②)において起点ごとに指示された自動車利用率の平均値を図-6に示す。南東部の起点(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起点は自動車避難の割合が高い。この地域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。

同じく、8つの代表時点における避難者の空間分布をそれぞれ与えた8つのケースに対して、全経路周知(方法②)において起点ごとに指示された経路の順位の平均値を図-7に示す。南東部の起点(大畑浜)付近は海岸部に

も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

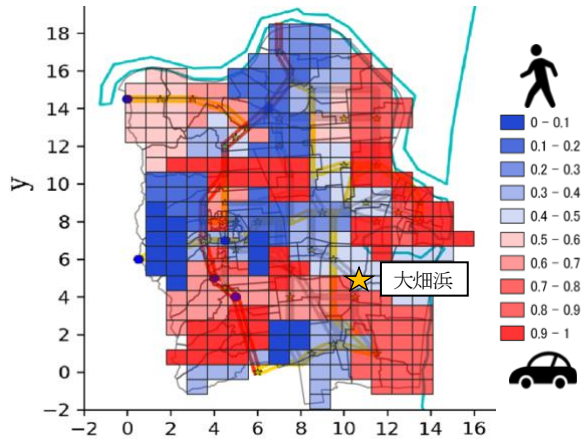


図-6 自動車利用率(8ケース平均)

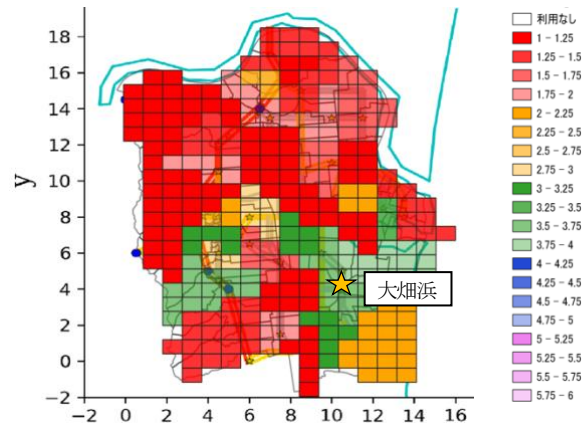


図-7 利用経路平均順位(8ケース歩車平均)

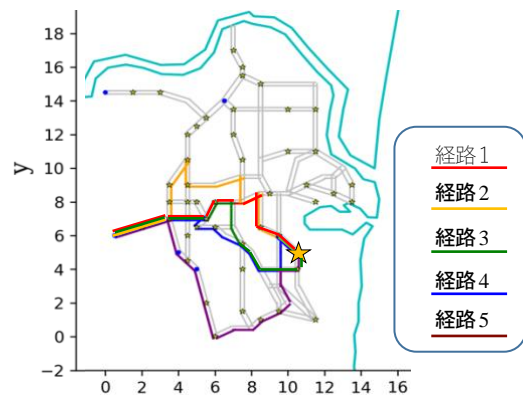


図-8 避難経路候補(大畑浜)

らである。具体的には、図-8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。

## 6. 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。

## REFERENCES

### TSUNAMI EVACUATION METHOD BASED ON PREPARED ROUTE SET, ADAPTIVE TO DIVERSE SPATIAL DISTRIBUTION OF EVACUEES

Tomohito YANAGISAWA, Makoto OKUMURA

Recent revisions of tsunami assumptions indicate that automobile evacuation is required in many regions. In order to ensure safety during automobile evacuation, it is necessary to provide appropriate instructions for means of evacuation and evacuation routes, taking into account that traffic concentration points change depending on the spatial distribution of evacuees. In this study, we aim to achieve both risk reduction and feasibility by using the method of "advance route notification + indication," in which a small number of evacuation routes are prepared and notified to residents, and the routes to be actually used are indicated according to the spatial distribution of evacuees at the time of a disaster. In particular, we will examine how to prepare a set of prepared routes that can adapt to diverse spatial distributions of evacuees.

- 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\\_chousai\\_3.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chousai_3.pdf) (参照 2023-01-31)
- 2) 津波浸水想定の設定公表について，宮城県 HP，2022 年 5 月 10 日公表 <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/miyagi-tsunami-shinsuisoutei-published1.html> (参照 2023-01-31)
- 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\\_2022\\_0614\\_162132.pdf](https://www.town.watari.miyagi.jp/common/img/content/content_2022_0614_162132.pdf) (参照 2023-01-31)
- 4) 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
- 5) NTT ドコモ，モバイル空間統計  
<https://mobaku.jp/about/>(参照 2023-01-31)
- 6) 亀岡弘和：非負値行列因子分解とその音響信号処理への応用，日本統計学会誌，第 44 巻第 2 号，pp383-407, 2015. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jissj/44/2/44\\_383/pdf/charf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jissj/44/2/44_383/pdf/charf) (参照 2023-01-31)