

# 津波避難における 事前経路周知の効果分析

柳澤 智仁<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502)

E-mail: tomohito.yanagisawa.s4@dc.tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502)

E-mail: mokmr@strep.main.jp

安全な津波避難を実現するためには、避難先と避難経路を分散させて交通集中を防ぐことが必要となるが、交通集中の場所が発災時の避難者の空間分布に依存するため、発災後に避難経路情報を伝えて誘導することが不可欠である。本研究は、避難経路情報の与え方の一つとして、複数の被災シナリオに対応できる避難経路群を事前に用意して避難者に周知しておき、発災時にその中から取るべき経路と移動手段を指示するという方法を考える。本研究では、先行研究で開発した最適津波避難モデルを用いて、町村レベルの実地域を対象に事前経路周知の効果进行分析した。計算の結果、最短経路避難時と最適避難時の津波遭遇リスクの差に対して、約 60%改善できること、歩行者のリスクを大きく減少させること、多くの避難起点において事前周知する経路は 1~2 本で十分であることがわかった。

**Key Words:** tsunami evacuation, advance notification of routes, tsunami encounter risk, optimization

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

内閣府による東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート調査<sup>1)</sup>によると、2011年3月に発生した東日本大震災では56.7%の人々が自動車をを用いて避難を行っていたことが明らかになった。長距離の避難を必要とし徒歩では避難が間に合わない地域の避難者や徒歩での避難が難しい要援護者にとって、自動車は大きな役割を担っている。自動車による避難は、混雑が起こっていない状況下にて速やかな避難を可能とするものの、交通集中により渋滞が発生すると、避難途中に津波に巻き込まれる危険性が大きくなる。東日本大震災では浸水地域にて渋滞が発生し、車列ごと津波に流された例も存在する<sup>2)</sup>。また東日本大震災の余震である2012年12月の三陸沖地震や、2016年11月の福島県沖地震では、地震発生直後から沿岸部から内陸部へ向かう幹線道路で渋滞が発生した<sup>3,4)</sup>。

このような交通集中が発生するのは、避難者がどの経路を通過してどの避難場所へ向かうべきかの理解が不十分で<sup>5)</sup>、最寄りの避難場所への最短距離の経路しか認識していなかったり、その場でその経路しか思い浮かばな

ったりした結果であると考えられる。金らによるシミュレーション<sup>6)</sup>では、自動車避難者が最も近い避難場所に向かうという設定では多くの車両が被災するという結果が示されている。

津波からの安全な避難を実現するためには、避難者に避難経路情報を提供し、理解してもらった上で、避難先と避難経路を分散させ、交通集中を防ぐことが必要となる。しかしその避難経路情報の望ましい与え方は確立しているわけではなく、議論が必要である。本研究は、避難情報の与え方の一つとして、避難者の存在場所ごとに、複数の被災シナリオに対応できる避難経路群を事前に用意して避難者に周知しておき、発災時にその中から取るべき経路と移動手段を指示する、という方法を考える。以下では避難者に周知する経路群を事前周知経路群と呼ぶこととする。本研究では、町村レベルの実地域を対象に、このような事前経路周知の効果进行分析する。

本論文の構成は以下の通りである。第1章では本研究の背景と目的を述べた。第2章で本研究の分析対象について紹介し、第3章で事前周知経路群の作成方法について提案する。第4章では計算例から事前経路周知の効果进行分析する。第5章では本研究のまとめと今後の課題を示す。

## 2. 分析対象の設定

### (1) 対象地域の設定

本研究では、対象地域として宮城県亶理郡亶理町を設定した。亶理町は、東日本大震災で海岸線からおおよそ 4km 地点まで津波が到達し、町面積のおおよそ 48%にあたる 35km<sup>2</sup> が浸水した。この経験を踏まえ、亶理町は平成 26 年 2 月に津波避難計画を策定、令和 2 年に改訂した<sup>7)</sup>。この計画は、

- 海岸部は平地部が続いており、周辺には高い場所がないこと
- 海岸部から西側の内陸部まで約 5km の距離であり、徒歩での避難が困難な地域もあること
- 普段から、自動車を主な移動手段としている人が多いこと

などの理由より、自動車での避難を考慮した津波避難計画となっている。この計画では単純に避難場所までの距離によって地域を二分し、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が可能であるという条件のもとで、徒歩と自動車の集中がもたらす交通時間の増大をふまえて、移動中の津波遭遇リスクを最小にする避難方法について分析を行う。その結果として、地域ごとに利用すべき移動手段の割合が求まることとなる。

### (2) 道路ネットワークの設定

本研究では、竹居らが作成した道路ネットワーク(図-1)を用いて分析を行う。このネットワークは車両が双方方向通行できる 2 車線道路を避難可能道路として設定している。避難起点として、亶理町の行政区に対応する 67 個の起点を設定した。避難先としては、同町が指定している逢隈小学校、吉田小学校、亶理小学校、亶理中学校の 4 か所の指定緊急避難場所に加えて、内陸側の自治体に避難するのも有効という考えから内陸 2 か所の町境の峠を含む 6 個の避難場所を設定した。計算条件は特に記述がない限り、先行研究<sup>8)</sup>と同様に設定するものとし、各種パラメータの設定値は付録に記載する。

### (3) 津波遭遇リスクの設定

津波遭遇リスク  $R^a$  は、時間が経過するほど津波が迫ることを示す時間リスクと、海岸部に近いほど津波に遭遇するリスクが高くなる距離リスクの掛け算によって与える。具体的には、津波避難計画では発災時から 45 分後、すなわち 15 期経過後に津波が到達すると想定していることから  $t = 15$  を変曲点と、東日本大震災での浸水地域を参考に、 $x = 7$  を変曲点として、

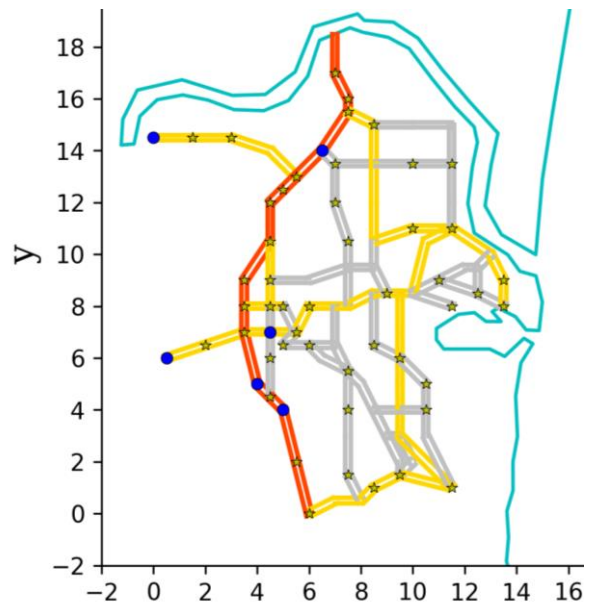


図-1 対象とするネットワーク

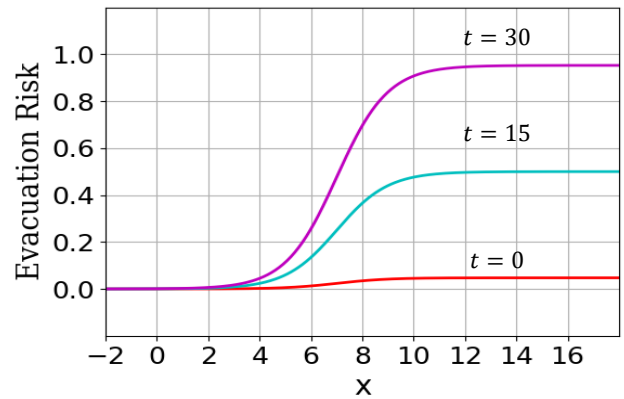


図-2 津波遭遇リスク

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

というロジスティクス曲線として与える。これを図示すると、図-2 のような形状となっている。なお、避難場所は、完全に安全性が確保されていると仮定し、海岸からの距離にかかわらず  $R^a = 0$  とした。

### (4) 被災シナリオの設定

最適な避難経路は、発生する被災シナリオにより変化する。被災シナリオとして、ハザードの特性および避難者の分布を取り上げる。このうち、ハザードの特性については、本研究で対象とする亶理町は宮城県南の平野部であり、海底部の地形を考えると沖合で発生した津波はほぼ海岸線に直交する形で襲来すると考えられる。したがって津波ハザードとしては海岸からの距離に応じた一通りのシナリオを考えれば十分であると考えた。

一方で、避難者の分布は本研究の主題である道路渋滞のパターンに大きな影響を持つ。そこで夜間人口を基本とするケースに加えて、特定の地域の滞在人口が多い場

合を考え、以下のように Scenario1~Scenario 5 を設定した。

- Scenario 1 : 夜間人口
- Scenario 2 : 北部人口 2 倍
- Scenario 3 : 中部人口 2 倍
- Scenario 4 : 南部人口 2 倍
- Scenario 5 : 夏まつり

ここで Scenario 1 の避難人口は表-1 のように与える。Scenario 2, Scenario 3, Scenario 4 は, Scenario 1 からそれぞれ北部 ( $12 \leq y$ ), 中部( $6 \leq y < 12$ ), 南部 ( $0 \leq y < 6$ ) の避難者人口を 2 倍に設定したもので, Scenario 5 は毎年 8 月 15 日に亘理町鳥の海公園で開催されている, 「わたりふるさと夏まつり」を想定し, 会場に近いあぶくま東, 箱根田東, 港町の 3 か所の夜間人口に 6000 人ずつ追加し, 他の行政区の夜間人口は 30% 減少すると設定したものである。

表-1 起点セルの位置と避難人口(Scenario 1)

行政区名	人口(人)	x	y	行政区名	人口(人)	x	y
吉田	109	6	0	駅前東	398	5	8
浜吉田西	961	8.5	1	新町	274	5	8
野地	363	11.5	1	新町北	184	5	8
浜吉田北	782	7.5	1.5	新町中	108	5	8
浜吉田東	287	9.5	1.5	新町南	336	5	8
旭台	895	5.5	2	北城東	716	6	8
上大畑	151	5.5	2	下茨田	2256	6	8
下大畑	623	5.5	2	鳥屋崎	229	11.5	8
中原	198	5.5	2	港町	299	13.5	8
一本松	285	7.5	4	高屋	993	9	8.5
開墾場	265	10.5	4	箱根田東	386	12.5	8.5
北長瀬	663	4.5	4.5	倉庭	438	3.5	9
館南上	327	4.5	4.5	鹿島	1895	4.5	9
館南下	547	4.5	4.5	箱根田西	301	11	9
南長瀬	190	4.5	4.5	あぶくま東	232	13.5	9
南町南	518	4.5	4.5	神宮寺	789	4.5	10.5
大畑浜	132	10.5	5	鷺屋	89	7.5	10.5
新丁	274	7.5	5.5	蔵	177	10	11
上町北	403	4.5	6	あぶくま西	232	11.5	11
上町南	149	4.5	6	上郡	998	4.5	12
南町北	608	4.5	6	榎袋	163	7	12
長瀬浜	459	9.5	6	下郡	1757	5	12.5
祝田西	247	2	6.5	早川	1345	5.5	13
中町	465	5	6.5	十文字村	538	7	13.5
南城東	921	6	6.5	十文字町	154	10	13.5
柴町	224	8.5	6.5	本郷	425	11.5	13.5
祝田南	384	3.5	7	小山	144	1.5	14.5
五日町	170	5.5	7	田沢	199	3	14.5
祝田東	198	5.5	7	牛袋	804	8.5	15
桜小路西	483	3.5	8	上の町	198	7.5	15.5
新井町	443	4.5	8	森房	1144	7.5	15.5
桜小路中	63	4.5	8	中泉	1132	7.5	16
桜小路東	455	4.5	8	今泉	1105	7	17
駅前西	330	5	8	合計	34010		

## (5) モデルの設定

### 1) 先行モデルの概説

本研究では, 竹居らによる先行研究<sup>8)</sup>で開発された最適津波避難モデルに, 指定した事前周知経路群のみを用いるという制約を追加したものをを用いる。

先行モデルは自動車と歩行者の 2 モードを対象とした津波遭遇総リスクを最小化する最適化モデルである。定式化の詳細は, 参考文献<sup>8)</sup>に譲り, ここでは概説にとどめる。

交通量を表す変数は以下のように定義される。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。またネットワークを構成する集合は以下のように定義される。期の集合を  $T$ , セルの集合を  $A$  と, ノードの集合を  $N$  と表す。セルの集合  $A$  は, 避難起点セルの集合  $A_0$ , 避難場所セルの集合  $A_D$ , 道路区間セルの集合  $A_R$  からなる ( $A = A_0 \cup A_R \cup A_D$ )。また, ノード  $i$  の下流側, 上流側で繋がるセルの集合を  $O(i)$ ,  $I(i)$  と表す。

また, 外生パラメータは以下の通りである。

- $R_t^a$  時刻  $t$  におけるセル  $a$  の津波遭遇リスク
- $\eta$  平均乗車人数
- $C^a$  セル  $a$  のフロー容量
- $H^a$  セル  $a$  の収容容量
- $\varepsilon_c^a$  歩行者のフロー容量の自動車に対する比
- $\varepsilon_h^a$  歩行者の専有面積の自動車に対する比
- $\phi^a$  渋滞流と自由流の密度波速度の比
- $\varepsilon^a$  歩行者がセル  $a$  を通過する際の最小所要時間
- $\nu^a$  セル  $a$  の要援護者率
- $\tau$  自動車への乗り込みにかかる期間
- $D^a$  起点セル  $a$  の避難者人数

モデル式は, 以下のように定式化される。

$$\min \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ \eta (p_t^a + v_t^a) + (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \} \quad (2)$$

$$u_t^a + p_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad a \in A \quad (3a)$$

$$\tilde{u}_t^a + \tilde{p}_t^a = \tilde{u}_{t+1}^a + \tilde{p}_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad a \in A \quad (3b)$$

$$u_t^a, \tilde{u}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A_0 \quad (4a)$$

$$v_t^a, \tilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A_D \quad (4b)$$

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{a \in I(i)} v_t^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad i \in N \quad (5a)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \tilde{u}_t^a = \sum_{a \in I(i)} \tilde{v}_t^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad i \in N \quad (5b)$$

$$u_t^a + \varepsilon_c^a \cdot \tilde{u}_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A \quad (6)$$

$$u_t^a + \varepsilon_h^a \cdot \tilde{u}_t^a \leq \phi^a \cdot \{H^a - (p_t^a + v_t^a) - \varepsilon_h^a \cdot (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a)\} \quad (7a)$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T\}, a \in A_R$$

$$0 \leq \phi^a \cdot \{H^a - p_t^a - \varepsilon_h^a \cdot \tilde{p}_t^a\} \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, a \in A_D \quad (7b)$$

$$v_t^a + \varepsilon_c^a \cdot (\tilde{p}_t^a + \tilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, a \in A \quad (8)$$

$$\tilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, \varepsilon^a\}, a \in A_R \quad (9a)$$

$$\tilde{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\varepsilon^a} \tilde{u}_{t-s}^a \quad \forall t \in \{\varepsilon^a + 1, \dots, T\}, a \in A_R \quad (9b)$$

$$v_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, \tau\}, a \in A \quad (10)$$

$$\eta \cdot p_0^a + \tilde{p}_0^a = \begin{cases} D^a \\ 0 \end{cases} \quad \forall a \in A_O, \forall a \in A_R \cup A_D \quad (11)$$

$$u_0^a, \tilde{u}_0^a, v_0^a, \tilde{v}_0^a = 0 \quad \forall a \in A \quad (12)$$

$$(\eta - 1) \cdot \sum_{t=0}^T v_t^a + \tilde{p}_t^a \geq v^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_O \quad (13)$$

$$u_t^a, \tilde{u}_t^a, v_t^a, \tilde{v}_t^a, p_t^a, \tilde{p}_t^a \geq 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, a \in A \quad (14)$$

以上の式(2)~(14)はすべて操作変数の線形関数であるため、先行モデルは線形計画問題となる。

## 2) 事前経路周知モデルの定式化

次に、本研究で想定する複数の事前周知経路からの指定という状況に合わせて、モデルの定式化を変更する。

まず、避難起点セルごとに、複数の事前周知経路群が示される。それを表現するため、避難起点セル  $a_o \in A_O$  からの  $j$  番目の避難経路がセル  $a$  を通るかどうかを表す  $0-1$  の定数として、 $\delta_{a_o,j}^a$  を用意する。

新たな操作変数として、避難起点セル  $a_o \in A_O$  からの  $j$  番目の避難経路を利用する車両数を  $w_{a_o,j}$  と、歩行者数を  $\tilde{w}_{a_o,j}$  と定義する。また避難起点セル  $a_o \in A_O$  からの経路の集合を  $J_{a_o}$  と定義する。

このとき、各道路セルを通行する車両数、歩行者数について以下の制約式が成立する。

$$\sum_{t=0}^T u_t^a \leq \sum_{a_o \in A_O} \sum_{j \in J_{a_o}} \delta_{a_o,j}^a \cdot w_{a_o,j} \quad \forall a \in A_R \quad (15a)$$

$$\sum_{t=0}^T \tilde{u}_t^a \leq \sum_{a_o \in A_O} \sum_{j \in J_{a_o}} \delta_{a_o,j}^a \cdot \tilde{w}_{a_o,j} \quad \forall a \in A_R \quad (15b)$$

すなわち、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  $a_o$  に存在する人数について以下の制約式が成立する。

$$\sum_{j \in J_{a_o}} (\eta \cdot w_{a_o,j} + \tilde{w}_{a_o,j}) = \sum_{a \in O(i)} D^a \quad \forall a \in A_O \quad (16)$$

すなわち、避難起点セル  $a_o$  の避難者人数と避難起点セル  $a_o$  を出発する経路を用いる人数が等しいことを表す。

最終的に事前経路周知モデルは、式(2)を目的関数、式(3)~(16)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。

## 3) 避難距離最小化問題の定式化

避難距離最小化問題は、避難者全員が最寄りの避難場所に避難することを想定したモデルである。

避難距離を最小化する制約は以下のように表される。

$$\sum_{t=0}^T \sum_{a \in A_R} l^a \cdot (\eta \cdot v_t^a + \tilde{v}_t^a) \leq L_{max} \quad (17)$$

これは避難者の避難距離の総和が総避難距離の最小値を上回らないことを示す。

ここで総避難距離の最小値  $L_{max}$  を算出する方法を示す。目的関数は避難者の避難距離の総和で、これを最小化する。

$$\min L_{max} = \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A_R} l^a \cdot (\eta \cdot v_t^a + \tilde{v}_t^a) \quad (18)$$

ここで  $l^a$  はセル  $a$  のセル長である。式(18)を目的関数、式(3)~(14)とする数理計画モデルを解き、避難距離の最小値  $L_{max}$  を算出する。

最終的に避難距離最小化問題は、式(2)を目的関数、式(3)~(14)、(17)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される。

## 3. 事前周知経路群の作成方法

### (1) 避難経路候補の算出方法

事前周知経路群を算出するために、まずはその候補となる避難経路候補を算出する。

まず、48個の起点セルのうち1つを選んで、そのセルのみに避難人口を設定し、最適避難計画モデルを用いて計算を行う。ここで1つの起点セルに与える避難人口が十分小さい場合には、避難者はリスクが最小となる経路を通過して避難を行う。起点セルに設定する避難人口を増加させると、使用中の経路に混雑が発生しリスクが増加するため、次善のリスク値を持つ経路が同時に使われるようになる。起点に設定する避難人口の増加につれて、相互の悪影響が大きくないような複数の経路を順次得ることができる。

なお、実際の避難時には、他の起点セルにも避難者が存在するため、その混雑の影響を受ける。したがってここでの一つのセルでの計算で現れた順に、避難経路が使用されていくわけではない。

今回は、起点セルを1つ選んでそこに町内の総人口と同等となる 34010 人の避難人口を割り当て、他の起点セルには避難者人口を割り当てない(避難人口 0 人と設定)という条件の下で最適避難計画モデルを用いて計算を行った。この結果使用された経路のうち、内陸2か所の町境の峠へ避難する経路のみを抜き出して避難経路候補とする。ここで町境の峠へ避難する経路のみとしたのは、町境の峠に向かう途中の避難場所の容量に空きがある場合は、そこに逃げ込むことも許容すると考えるからである。

(2) 事前周知経路群の絞り込み

3. (1) で得られた避難経路候補は、途中で少しでも異なる道路区間を使うような重複が多い経路も、別の経路として列挙される。その結果、起点によっては経路数が 50 本を超えるなど、この経路候補をそのまま避難者に提示することは困難である。よってこの経路候補の中で似た軌跡の経路は同一の経路とみなし、実際に避難者へ周知する事前周知経路群を絞り込む。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(19)で重複率を算出する。

$$\text{(重複率)} = \frac{\text{(検討経路より } R_{sta} \text{ が小さい経路でも使われるセル数)}}{\text{(検討経路で使われるセル数)}} \quad (19)$$

- ④ 経路候補のうち、重複率が小さい経路のみを事前周知経路群とする。

今回は重複率が 0.6 以下の経路を起点別最適避難経路群として絞り込んだ。

4. 事前経路周知の効果分析

(1) 比較するケースの設定

事前経路周知の効果进行分析するために、事前経路周知・最短経路避難(避難者全てが最寄りの避難場所へ避難)・最適避難(どんな経路を指示することも可能)の3つのケースを想定し計算を行う。

- ・ Case1 : 事前経路周知
- ・ Case2 : 最短経路避難
- ・ Case3 : 最適避難

ここで Case1 は事前経路周知モデルを、Case2 は避難距離最小化問題を解くことで求められる。Case3 は先行研究モデル<sup>9)</sup>を追加の制約を与えずに解くことで求められる理想的な避難方法であるが、各避難者に避難経路、移動手段をリアルタイムに指示できなければ実現できない避難方法である。

(2) 津波遭遇総リスク値の比較

まず地域全体での津波遭遇総リスクを比較する。各被災シナリオにおける、Case3 での津波遭遇総リスクを1とした場合の Case1, Case2 の津波遭遇総リスクの割合は表-2 の通りとなる。

また、事前経路周知を行うことで、Case2 と比べ津波遭遇総リスクをどれだけ改善できたかを表す、改善達成率を以下の式(20)で定義する。

$$\text{(改善達成率)} = \frac{\text{(Case2 のリスク - Case1 のリスク)}}{\text{(Case2 のリスク - Case3 のリスク)}} \quad (20)$$

改善達成率は、値が小さいほど事前経路周知に効果がないことを、値が1に近づくほど小さなリスクで避難が実現できることを表す。

各シナリオにおける地域全体での改善達成率は表-3 の通りとなる。

これより、事前経路周知を行うことで、多くのシナリオで地域全体での津波遭遇総リスクを減少できることが

表-2 津波遭遇総リスクの割合

津波遭遇総リスク値	Case1	Case2	Case3
(1)夜間人口	1.354	2.053	1
(2)北部人口2倍	1.350	1.774	1
(3)中部人口2倍	1.392	1.376	1
(4)南部人口2倍	1.293	2.020	1
(5)夏まつり時	1.130	1.394	1

表-3 改善達成率(地域全体)

	改善達成率
(1)夜間人口	0.664
(2)北部人口2倍	0.548
(3)中部人口2倍	-0.042
(4)南部人口2倍	0.713
(5)夏まつり時	0.670

明らかになった。しかし Scenario3 の場合は津波遭遇総リスクの値が悪化した。これは事前周知経路群を絞り込む際に、リスクの小さい順に重複を考え経路をまとめたため、最短経路避難で用いられた経路が事前集中経路群に含まれていなかったためであると考えられる。

### (3) 交通モード別の津波遭遇リスク値の比較

次に式(20)を用いて、歩行者・自動車の1人あたりの津波遭遇リスク値を比較する。各シナリオにおける交通モード別の改善達成率を表-4に示す。

これより、事前経路周知を行うことで、歩行者1人あたりの津波遭遇リスクを大きく減少できることが明らかになった。また自動車も、基本ケースである Scenario1 を含む3つのシナリオにおいて、歩行者同様に津波遭遇リスクを減少できることが可能になることが明らかになった。これは混雑を避けるために、最短経路ではないがより低いリスクで避難ができる経路を指示できた結果であると考えられる。Scenario2, 3では自動車を利用した場合、津波遭遇リスクはかえって悪化している。これは避難人口が増えたことで、地域全体で安全な避難を実現するために、移動速度の速い自動車に遠回りでも最短経路よりリスクが高い経路を通るように指示したためと考えられる。実際にScenario2, 3では、地域全体で理想的な避難であるCase3における自動車の津波遭遇リスクは、Case2における自動車の津波遭遇リスクを上回っている。

また表-5に示すように、事前経路周知を行うことで、発災時に避難に利用させるべき自動車の割合が増加することが明らかになった。

表-4 改善達成率(交通モード別)

	改善達成率	
	自動車	歩行者
(1) 夜間人口	0.433	0.779
(2) 北部人口2倍	悪化	0.648
(3) 中部人口2倍	悪化	0.238
(4) 南部人口2倍	0.131	0.771
(5) 夏まつり時	0.541	0.740

表-5 各シナリオでの自動車利用率の比較

自動車利用率	Case1	Case2	Case3
(1) 夜間人口	0.344	0.214	0.363
(2) 北部人口2倍	0.327	0.214	0.355
(3) 中部人口2倍	0.325	0.210	0.333
(4) 南部人口2倍	0.349	0.211	0.358
(5) 夏まつり時	0.457	0.208	0.490

### (4) 事前経路周知で使われる経路の特徴

ここではCase1にて、各シナリオ下で実際に利用された経路を分析する。

5つのシナリオに対して、共通して同じ1経路のみが使用される避難起点は48か所のうち10か所、2経路利用される避難起点は20か所存在する。これより多くの避難起点で1~2本の経路を避難者に周知しておけば十分であることが分かる。また5つのシナリオに対して歩車が常に同じ経路を併用する起点は5か所のみであり、歩車に異なる経路を指示することで安全な避難が可能になることも確認された。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、避難者の地震・津波災害時における避難経路の理解が不十分であること、そしてその結果、最短経路に多くの避難者が殺到することで交通集中が発生し、避難中に津波に巻き込まれる危険性が高まることを指摘した。そして、地域全体で安全に避難を行うために、避難者に避難経路情報を提供し理解してもらうことが必要であると主張した。これを踏まえ本研究では、避難経路情報の提供方法の一つとして、複数の被災シナリオに対応できる避難経路群を事前に用意して避難者に周知しておき、発災時にその中からとるべき経路と避難モードを指示する、事前経路周知という方法を提案した。そして、先行研究で開発されたモデルを用いて起点別の避難経路を列挙し、重複の多い経路を1つの経路としてまとめて、避難者に事前に周知しておくべき事前周知経路群を明らかにした。

次に、町村レベルの実地域を対象に、事前経路周知の効果进行分析した。分析の結果、事前経路周知を行うことで、最短経路のみを用いる場合と最適避難できる場合の津波遭遇リスクの差異に対して、60%程度のリスクを改善できた。またモード別には、特に歩行者1人あたりの津波遭遇リスクを大きく減少させる効果がある。また多くの避難起点において事前周知する経路は1~2本で十分であることもわかった。

今後の課題として、今回示した事前周知経路群の経路の利用優先順位の決定基準を示すことが挙げられる。どのようなシナリオの時にどの経路が優先して使用されるのかを明らかにすることで、避難を行う際により安全に避難が可能になると考えられる。また、今回提案した事前経路周知の他にも、指示の分かりやすさと実現可能性、リスク低減効果などのバランスを考えながら、望ましい避難経路情報の与え方を検討していく必要がある。

## 付録 計算条件の設定

町村規模のネットワークでの計算における各種パラメータの設定にを述べる。

単位時間を 1 期=3 分, 自動車と歩行者の自由流速度をそれぞれ 20km/h, 4km/h とし, 道路リンクを最大 1km のセルに等分割する. これにより, 自由流状態では自動車は 3 分間で 1km 走行できるため, 滞留がなければ期  $t$  にセル  $a$  に流入した自動車は期  $t + 1$  にセル  $a$  を流出できる. 道路区間セルの総数は 232 個 (片側 116 個  $\times$  2 車線) である. 48 個の起点セル, 6 個の避難場所セルを合わせ, セルの総数は 286 個となる.

道路区間セルについて, フロー容量  $C^a$  は一般的な自動車シミュレーションで用いられている道路種別毎の数値を参考に, 国道で 100 (台/期), 県道で 90 (台/期), その他道路で 62.5 (台/期) とした. また収容容量  $H^a$  は 1km あたり 150 台とし, セル長に応じて設定した. また歩行者のフロー容量に対する比  $\varepsilon_c^a$  を  $\varepsilon_c^a = 1/6$ , 歩行者の自動車に対する専有面積の比  $\varepsilon_h^a$  を  $\varepsilon_h^a = 1/15$  とし, 渋滞流と自由流の密度波速度の比  $\phi^a$  は,  $\phi^a = 0.9$  と設定した. 歩行者のセル通過最小時間  $\varepsilon^a$  は, セルの長さ (km) を歩行者の歩行速度 (0.2km/3 分) で除し, 端数を切り上げた整数値とした.

自動車への平均乗車人数  $\eta$  は,  $\eta = 2.0$  (人/台) とした. また避難者のうち歩行避難を行えない人の割合を表す要援護者率  $v^a$  を  $v^a = 0.1$  とおいた. また避難起点での自動車への乗り込み時間  $\tau$  は,  $\tau = 1$  期 (= 3 分) とした.

避難場所セルのフロー容量は  $C^a = 90$  とし, 避難場所の収容容量は表-6 のように設定した. 指定緊急避難場所の 4 か所については校庭の面積を基に算出し, 町境の峠については無限大とした. 歩行者は避難場所セルに自由に流入できると仮定した.

表-6 避難場所セルの駐車容量

避難場所	駐車容量	x	y
逢隈小学校	380	6.5	14.0
亘理小学校	320	4.5	7.0
亘理中学校	1351	4.0	5.0
吉田小学校	300	5.0	4.0
町境の峠部①	$\infty$	0.0	14.5
町境の峠部②	$\infty$	0.5	6.0

## 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\\_chousai\\_3.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chousai_3.pdf) (参照 2021-09-30)
- 2) NHK, 証言まとめ, 津波にのみこまれて, 東日本大震災アーカイブス～証言 Web ドキュメント～  
<https://www9.nhk.or.jp/archives/311shogen/summary/evi/01/> (参照 2021-09-30)
- 3) わがこと 防災・減災/第 2 部・車避難のリスク (上繰り返される渋滞/津波の記憶, 焦りに拍車, 河北新報 ONLINE NEWS, 2013 年 01 月 31 日 09:55  
<https://kahoku.news/articles/20130131kho00000000000c.html> (参照 2021-09-30)
- 4) 遠くへ...車で避難『道路渋滞』11 月 22 日・福島県沖地震で課題, 福島民友新聞 みんゆう Net, 2016 年 12 月 11 日,  
<https://www.minyu-net.com/news/sinsai/serial/0509/FM20161211-134397.php> (参照 2021-09-30)
- 5) NHK, “地元の子が命を守った”, 東日本大震災アーカイブス～証言 Web ドキュメント～,  
[https://www9.nhk.or.jp/archives/311shogen/detail/#dasID=D0007010834\\_00000](https://www9.nhk.or.jp/archives/311shogen/detail/#dasID=D0007010834_00000) (参照 2021-09-30)
- 6) 金進英・桑原雅夫・花房比佐友・今井武: 集計・観測データを用いた交通避難シミュレーションの検証, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.47, No.127, 2013
- 7) 宮城県亘理郡亘理町, 亘理町津波避難計画(令和 2 年 4 月), 亘理町 HP, 2020,  
<http://www.town.watari.miyagi.jp/in-dex.cfm/24,42746,c.html/42746/20200212-145624.pdf> (参照 2021-09-30)
- 8) 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

(Received 1, October, 2021)

## ANALYSIS OF THE EFFECTS OF ADVANCE ROUTE NOTIFICATION FOR TSUNAMI EVACUATION

Tomohito YANAGISAWA and Makoto OKUMURA

In order to realize safe tsunami evacuation, it is important to prevent the concentration of traffic by distributing evacuees to shelters and routes. Since the location where the traffic concentration occurs depends on the spatial distribution of evacuees, it is necessary to inform evacuation routes after the disaster occurs. In this study, we consider a method of providing evacuation route information to evacuees by preparing a set of evacuation routes for multiple disaster scenarios in advance and informing them of the routes and means of transportation that they should take when the disaster occurs. We analyze the effects of advance routes notification using the optimal tsunami evacuation model developed in the previous study for a real area at the town and village level. The calculation results show that the risk of tsunami encounter can be improved by about 60% compared to the difference between the shortest route evacuation and the optimal evacuation, that the risk of pedestrians can be greatly reduced, and that one or two routes are sufficient for most of the evacuation starting points.