

津波避難における起点別最適避難経路群の特性分析

Characteristic Analysis of Optimal Routes by Origin for Tsunami Evacuation

柳澤 智仁*

Tomohito YANAGISAWA

*地域計画学/被災地支援研究室（指導教員：奥村誠 教授）

津波災害時に安全な避難を行うためには、避難者の存在場所ごとに津波遭遇リスクの最も小さい避難経路を事前に理解してもらうことが必要である。このとき、発生する被災シナリオによって最適な避難経路は異なるため、複数の経路を提示しておく必要がある。本研究では各避難起点において周知しておくべき避難経路の列挙方法と、それらの経路の利用度や安全性を分析する方法を考察し、実際に宮城県亶理郡亶理町における計算を行った。

Key Words: 津波避難, 起点別避難経路, 利用度, 安全性

1. はじめに

東日本大震災時に多くの人々が自動車避難を行って交通集中が発生し、避難途中に津波に巻き込まれる事態が発生した。このような交通集中が発生するのは、避難者の避難経路の理解が不十分で、最寄りの避難場所への経路しか認識していなかった結果であると考えられる。避難者が安全に避難を行うためには、避難者の存在場所ごとに最短経路ではなく津波遭遇リスクの最も小さい避難経路を理解してもらうことが求められる。このとき、発生する被災シナリオによって最適な避難経路は異なるため、複数の経路を提示しておく必要がある。本研究では竹居ら¹⁾が開発した歩車混合最適避難計画モデルを用いて、各避難起点において周知しておくべき避難経路を列挙する方法と、複数避難経路の利用度や安全性といった特性の分析方法を提案し、宮城県亶理郡亶理町における計算例を示す。

2. 被災シナリオの設定

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ため、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、合計 5 つのシナリオを設定する(表 1)。

3. 起点別最適避難経路群の列挙

避難起点ごとに周知しておくべき避難経路を最適避難経路群と呼ぶ。まず 48 個の避難起点セルのうち 1 つを選び、その起点セルのみに町内夜間人口の(1/4=8,503 人)を割り当て、他の起点セルには避難者を割り当てない。この条件の下で最適避難計画モデルを用いて計算を行い、使用された経路を避難経路候補とする。さらに、重複が多い経路をまとめて 1 つの経路とみなし、起点別最適避難経路群経路群とする。その結果、48 個の避難起点セルごとに 1~10 本程度の経路群が得られた。

表 1 各被災シナリオの設定

シナリオ	夜間人口時との違い
夜間人口	×
町北部の人口2倍	12 ≤ y の人口を2倍
町中部の人口を2倍	6 ≤ y < 12 の人口を2倍
町南部の人口を2倍	0 ≤ y < 6 の人口を2倍
わたりふるさと夏まつり	海沿いに避難人口18,000人付加

4. 起点別最適避難経路群の利用度の分析

複数の最適避難計画において 3 章で列挙した起点別最適避難経路群がどの程度利用されやすいのかを分析する。そのために、起点別最適避難経路群によって最適避難計画を構成する問題を制約条件付きの回帰分析モデルを用いて分析する。セルの集合を A 、避難起点セルと接続しているノードの集合を N_0 、ノード i と接続している避難起点セルの集合を A_i と定義する。またノード i に接続する起点セルからの起点別最適避難経路群の集合を J_i と定義し、ノード i に接続する起点セルからの起点別経路 j を用いて避難する車両台数 $\sigma_{i,j}$ を未知パラメータとおく。

$$\text{minimize } \sum_{a \in A} \left(\sum_{t=0}^T u_t^a - \sum_{i \in N} \sum_{j \in J_i} \delta_{a,i,j} \cdot \sigma_{i,j} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sum_{a \in A_i} \sum_{j \in J_i} \delta_{a,i,j} \cdot \sigma_{i,j} \leq \sum_{a \in A_i} D^a \quad i \in N_0 \quad (2)$$

$$\sigma_{i,j} \geq 0 \quad i \in N_0, j \in J_i \quad (3)$$

ここで、 u_t^a は最適避難計画において期 t にセル a に流入する自動車台数、 $\delta_{a,i,j}$ はノード i に接続する起点セルからの起点別経路 j がセル a を通過するか否かを表す 0-1 の定数、 D^a は起点セル a の避難者人数である。式(1)の第 1 項が最適避難計画における累積通過台数、第 2 項が起点別最適避難経路群での通過台数を表し、その残差二乗和を最小化する $\sigma_{i,j}$ を求める。式(2)は避難者の

初期条件の制約，式(3)は操作変数の非負制約を表す。得られた $\sigma_{i,j}$ から，最適避難計画を起点別最適避難経路の組み合わせのみでどれだけ実現できたかを表す実現率を式(4)で求めることができる。

$$(\text{実現率}) = \frac{\sum_{a \in A_i} \sum_{j \in J_i} \sigma_{i,j}}{\sum_{a \in A_i} D^a} \quad (4)$$

表 2 に示した各シナリオの最適避難計画の実現率の値より，今回の設定のうち 3 つのシナリオでは起点別最適避難経路群によって最適避難計画を 95%以上実現できることがわかる。しかし海沿いに避難者人口が極端に集中する「わたりふるさと夏まつり」の条件では，起点別最適避難経路群のみで最適避難計画を実現することは難しく，周囲の高い建物に避難する垂直避難を併用しながら避難を進める必要があることがわかった。

起点ごとの経路利用度の計算結果より，ほとんどの起点では 1~3 本の経路のみが使われていた。これより，住民にあらかじめ周知しておく経路数は 1~3 本で十分であることがわかった。一例として，各シナリオ下におけるあぶくま東地区からの経路を図 1 と表 3 に示した。なお経路の番号は，5 章で述べる静的リスク値 $SR_{i,j}$ が小さい順に付与している。この地区では町の北部方面へ向かう経路 3 が最も利用され，多くの場合で経路 4 を併用し町の中部へも避難を行うことになる。また夏まつり時には早くから北へ迂回する経路 2 も併用しつつ避難を進める必要がある。なお静的リスク値が低い経路 1 は，多くのシナリオにおいてより内陸の地区の避難者が優先的に避難場所を使用することが有利であり，町の中部に位置するこの地区の避難者には使用させないという結果になった。

5. 起点別最適避難経路群の安全性の分析

経路の安全性は，遭遇する被災シナリオや各リンクの混雑度によって変化する。今回は経路自体の安全性を示す静的リスクと，他経路との影響を示す付加リスクという 2 つの指標を用いて安全性の分析を行う。

経路自体の安全性を評価する指標として各経路で通過するセルの津波遭遇リスク値を足し合わせることで得られる式(5)の静的リスク値 $SR_{i,j}$ を用いる。

$$SR_{i,j} = \sum_{a \in A_i} \delta_{a,i,j} \cdot R^a \quad (5)$$

ここで R^a はセル a の津波遭遇リスク値である。この値は，混雑が起こっていない状況で自動車が各経路を用いて避難する際に受けるリスク値を意味する。4 章に述べたように，表 3 の使用経路番号は静的リスクの小さい順に付与している。あぶくま東地区において経路 1, 2 があまり使われていないことから，静的リスクを考慮するだけでは使用すべき経路を特定しきれないことがわかる。

次にその経路が他経路と重複していることで渋滞の影響を受けやすくなり，危険性が高まっている可能性を表す指標として，式(6)の付加リスク値 $AR_{i,j}$ を用いる。

$$AR_{i,j} = \sum_{a \in A} \delta_{a,i,j} \cdot (\psi_a - 1) \cdot R^a \quad (6)$$

表 2 各被災シナリオの最適避難計画の実現率

想定被災シナリオ	実現率
夜間人口	0.960
北部人口2倍	0.968
中部人口2倍	0.969
南部人口2倍	0.922
わたりふるさと夏まつり	0.884

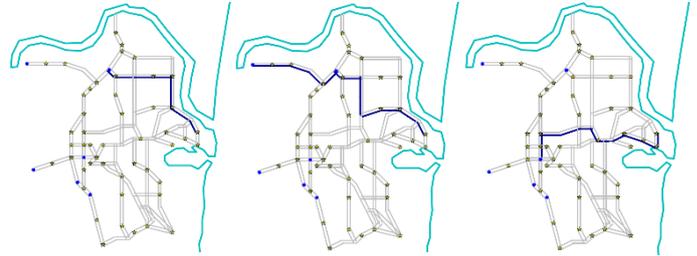


図 1 あぶくま東地区からの経路 2(左), 3(中), 4(右)

表 4 起点からの各シナリオでの使用経路の例

行政区	使用経路番号					経路数
	夜間人口	北部2倍	中部2倍	南部2倍	夏まつり	
あぶくま東	3,4	4,3	3,4	3	3,4,2	3
森房・上の町	2,4	2,4	2	2	2	2
あぶくま西	3,1,4	1	3,4	4	4	3

表 3 起点の静的リスク値と付加リスク値の例

森房・上の町	静的リスク	付加リスク	あぶくま西	静的リスク	付加リスク
経路2	1.558	9.395	経路1	5.157	43.694
経路4	3.724	21.279	経路3	5.966	22.793
			経路4	6.059	42.036

ここで ψ_a はセル a を通過する避難経路が何本あるかを表す数であり， $(\psi_a - 1)$ を掛け合わせた上で通過するセルの津波遭遇リスク値を加算している。

表 4 に 2 つの起点を例として，静的リスク値と付加リスク値を示す。町の内陸部に位置する森房・上の町地区を起点とする場合，静的リスク値・付加リスク値双方が低い順に経路が使われている。一方，海沿いに位置するあぶくま西地区を起点とする場合，既に他の起点からの避難者で渋滞している可能性が大きいため付加リスク値の小さい経路が優先して多く使われている。このように起点の立地によって最適な避難経路の決定方法が異なることが確認された。

6. おわりに

本研究では各避難起点において周知しておくべき複数の避難経路の列挙方法と，それらの経路の利用度や安全性を分析する方法を考察した。今後の課題として，起点別経路の利用優先順位の決定基準を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) 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

(2021 年 2 月 8 日提出)