

# 最適交通計画モデルを用いた 津波避難ルールの策定方法

Assessment of tsunami evacuation rules using an optimal traffic planning model

竹居 広樹\*  
Hiroki TAKEI

\*地域計画学・被災地支援研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

There are municipalities to build a tsunami evacuation plan considering pedestrian-vehicle mixed mode. There have been few studies on evacuation rules in mixed mode so far. In this research, we show a method to assess tsunami evacuation rules either for over-exist or under-exist of vehicles in the affected area, using an optimal traffic planning model. A specific example of evacuation rule assessment was shown through analysis by real municipal scale network.

**Key Words** : tsunami evacuation rule, optimization model, pedestrian-vehicle mixture

## 1. はじめに

東日本大震災において、これまでの想定を上回る範囲が津波に襲われたことから、避難時の自動車利用の許容を要望する声が高まった。これを踏まえ、交通の教則が改訂され、津波避難においてやむを得ない場合の自動車利用が容認された。その一方で、津波からの避難は、渋滞の発生や地震動による道路の破損等の恐れがあるため徒歩で行う原則は保持されている。これらのことから、避難計画を立てる際に自動車の適切な利用方法について議論しておく必要がある。

動的なシステム最適配分問題のモデル化の研究は交通工学の分野で数多く行われているが、そのほとんどが自動車のみを仮定し、混合モードを考慮したものは未だ少ない。混合モードによる避難ルールの策定を行う上で、対象地域に即して明確な根拠に基づくことが望まれる。

本研究では、図1に示す方法で津波避難ルートを策定することを提案する。発災時の状況として、被災エリア内の全住民が避難できるだけの十分な自動車が存在する「車両飽和状況」と、自動車や運転者が不足する「車両不足状況」が想定される。そのそれぞれに対して、起こり得る問題点を列挙し、それを解消するための避難ルールの候補を列挙する。それらの候補ルールに対して、得られる効果の最大値を分析する。この際、歩車の混合を考慮できる最適交通計画モデル、および歩行者を途中で同乗させる「途中乗車」を検討できる3モード最適交通計画モデルを用いて、候補となるルールの効果を定量的に分析し、その結果を根拠に策定すべき避難ルールを検討する。

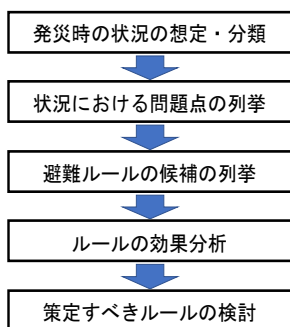


図1 津波避難ルールの策定フロー

ルールの候補を列挙する。それらの候補ルールに対して、得られる効果の最大値を分析する。この際、歩車の混合を考慮できる最適交通計画モデル、および歩行者を途中で同乗させる「途中乗車」を検討できる3モード最適交通計画モデルを用いて、候補となるルールの効果を定量的に分析し、その結果を根拠に策定すべき避難ルールを検討する。

## 2. 発災時に想定される問題点と避難ルール

### (1) 車両飽和状況の問題点と避難ルール

車両が十分に存在する状況で発生する問題点には以下のようなものが挙げられる。

- ① 自動車の過剰な利用による混雑・渋滞の発生
- ② 歩車の混合による歩行者の交通容量の低下
- ③ 道路ネットワークの容量不足による混雑・渋滞の発生

これらの問題点に対する避難ルールの候補として、「自動車利用率の制御」、「歩行者専用化」、「コントラフロー」の3つを挙げる。歩車混合モデルを用いて、これらの候補ルールの効果を分析する。

### (2) 車両不足状況の問題点と避難ルール

車両や運転者が不足している状況で発生する問題点には、以下が挙げられる。

- ④ 避難距離の長い住民への徒歩避難の強制
- ⑤ 徒歩避難が困難な者（要援護者）の被災エリアへの残留

これらの問題点に対する避難ルールとして「途中乗車の許容」を挙げる。3モードモデルを用いて、途中乗車の許容の効果を分析する。

### 3. 最適交通計画モデルの構築

本研究で用いるモデルは、Nie(2011)の Cell-based Merchant-Nemhauser model<sup>2)</sup>の援用したものである。セルの集合 $A$ は起点セル $A_0$ 、道路区間セル $A_R$ 、避難場所セル $A_D$ から構成される。以下、Nie(2011)モデルからの変更点・追加点を中心に解説する。

#### (1) 歩車混合モデルの基本式

Nie モデルを自動車、歩行者の2モードに拡張する。交通量を表す変数を次のように定義する。期 $t$ にセル $a$ に流入、流出、滞留する自動車台数をそれぞれ $u_t^a$ 、 $v_t^a$ 、 $p_t^a$ とおき、同様に歩行者人数をそれぞれ $\widetilde{u}_t^a$ 、 $\widetilde{v}_t^a$ 、 $\widetilde{p}_t^a$ とおく。モード毎に交通量保存則が成り立つ。目的関数は、津波遭遇総リスクとする。

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

津波遭遇総リスク $R_{total}$ は式(1)のように、各時刻、各セルに存在する避難者人数に津波遭遇確率 $R_t^a$ を乗じたものの全時刻、全セルの総和として表す。 $\eta$ は車両1台あたりの平均乗車人数である。

$$u_t^a + \varepsilon_c^a \cdot \widetilde{u}_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A \quad (2)$$

$$u_t^a + \varepsilon_h^a \cdot \widetilde{u}_t^a \leq \phi^a \{ H^a - (p_t^a + v_t^a) - \varepsilon_h^a \cdot (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \} \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A \quad (3)$$

$$v_t^a + \varepsilon_c^a \cdot (\widetilde{p}_t^a + \widetilde{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T\}, \quad a \in A \quad (4)$$

流入制約と流出制約により、歩車混合の影響を表現する。式(2)はフロー容量、式(3)は収容容量によるセルへの流入制約である。 $C^a$ はセル $a$ のフロー容量、 $H^a$ は収容容量であり、 $\varepsilon_c^a$ 、 $\varepsilon_h^a$ は歩車混合の影響を表すパラメータである。 $\phi^a$ は渋滞流と自由流の密度波速度の比を表す。式(4)は流出制約であり、セルに存在する歩行者人数によって自動車のセルから流出できる量が制限されることを意味する。

$$\widetilde{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{0, \dots, \varepsilon^a\}, \quad a \in A_R \quad (5)$$

$$\widetilde{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\varepsilon^a} \widetilde{u}_{t-s}^a \quad \forall t \in \{\varepsilon^a + 1, \dots, T\}, \quad a \in A_R \quad (6)$$

歩行者のセル通過所要時間の制約により、歩車の速度の違いを表現する。 $\varepsilon^a$ は歩行者がセル $a$ を通過する際の最小所要時間である。式(5)は初期から $\varepsilon^a$ 期まで、式(6)は $\varepsilon^a + 1$ 期以降の制約である。 $\varepsilon^a$ はセルの長さに応じた整数値として与える。

$$(\eta - 1) \cdot \sum_{t=0}^T v_t^a + \widetilde{p}_T^a \geq \nu^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_0 \quad (7)$$

式(7)は要援護者率の制約である。 $\nu^a$ はセル $a$ の要援護者率、すなわち、高齢者や怪我人など徒歩避難が困難な人の割合である。徒歩避難が困難な要援護者は運転することも不可能であると仮定している。

4. (2)では、歩車混合モデルを用いて、車両飽和時の自動車利用率の制御、歩行者専用化、コントラフローのルール化の効果分析を行う。自動車利用率の制御は、地域全体の平均自動車利用率をパラメータとして与え、これを変化させることで効果を分析する。歩行者専用化とコントラフローは、最適な区間を歩行者専用化(コントラフロー)区間に設定することにより、ルール化の最大の効果を分析する。

#### (2) 3モードモデルの基本式

モードの種類を運転者、同乗者、歩行者の3モードに拡張し、歩行者から同乗者へのモード変更を可能とするモデルを作成する。自動車1台に対し運転者1人が割り付けられ、自動車台数=運転者数が成立する。同乗者数の変数を $\overline{u}_t^a$ 、 $\overline{v}_t^a$ 、 $\overline{p}_t^a$ と表す。ここでは、3モードモデルを構成する主要な式を解説する。

$$\frac{\overline{u}_t^a + \overline{p}_t^a + \overline{u}_{t+1}^a + \overline{p}_{t+1}^a}{\overline{p}_{t+1}^a + \overline{v}_{t+1}^a + \overline{p}_{t+1}^a + \overline{v}_{t+1}^a} = \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad a \in A \quad (8)$$

$$\overline{p}_t^a + \overline{u}_t^a \geq \overline{p}_{t+1}^a + \overline{v}_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \quad a \in A \quad (9)$$

式(8)は同乗者と歩行者の合計人数に対する交通量保存則であり、セル滞留中の歩行者から同乗者へのモード変更(途中乗車)を認めている。途中乗車により歩行者数が減少する可能性を式(9)により表現する。

$$\overline{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^t \{ (\overline{p}_{t-s}^a + \overline{u}_{t-s}^a) - (\overline{p}_{t-s+1}^a + \overline{v}_{t-s+1}^a) \} \quad \forall t \in \{t+1, \dots, T\}, \quad a \in A \quad (10)$$

式(10)は途中乗車にかかる所要時間の制約である。途中乗車に $t$ 期を要し、その間は同乗者としてセルに滞留することを表している。

$$p_0^a \leq \xi^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_0 \quad (11)$$

式(11)は運転可能率の制約である。 $\xi^a$ は運転可能率、すなわち、起点セル $a$ で自ら運転できる人の割合である。

4. (3)では、3モードモデルを用いて、車両不足時の途中乗車の許容ルールの効果分析を行う。

## 4. 仮想ネットワークにおける分析

### (1) 計算条件の設定

宮城県亘理町を参考にしたネットワーク(図2)を対象として、津波避難ルールの効果を分析する。津波遭遇確率は、時間が経過するほど津波が迫ることを表現する時間リスクと、海に近いほど潜在的なリスクが大きいことを表現する距離リスクの積としてなめらかに変化する値を与える。

以下では車両飽和状況と車両不足状況の両者を想定して分析を行う。それぞれの状況で、要援護者があまり存在しないケース( $\nu^a = 0.1$ )と要援護者が多数存在するケース( $\nu^a = 0.3$ )について分析を行い、要援護者の存在によるルールの効果の違いを確認する。

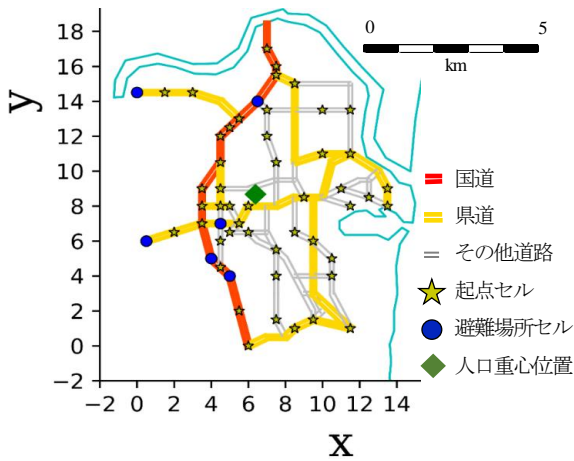


図2 対象とするネットワークと津波遭遇確率

(2) 車両飽和状況における分析

ここでは、車両が十分に存在する状況で候補となるルールの効果を分析する。まず、自動車利用率の制御による効果を分析する。自動車の過剰な利用によるリスクの上昇を抑えるため、最適な自動車利用率を設定する必要がある。適切な自動車利用率の範囲を示し、自動車利用率の最適化によるリスク抑制効果を明らかにする。

平均自動車利用率をパラメータとして感度分析を行った結果、図3のような平均自動車利用率と津波遭遇総リスクの関係が得られる。これより、津波遭遇総リスクを最小化させる自動車利用率の値が1つ存在し、平均自動車利用率がその最適値より小さい場合、海に近い地区から発生する徒歩避難者が逃げ遅れるため、津波遭遇総リスクが大きくなる。逆に平均自動車利用率が最適値より大きくても、自動車による混雑や渋滞の影響が大きくなり津波遭遇総リスクは大きくなる。このように、自動車の利用を限定的に認めることで、総リスクを最小化させることができる。最適な平均自動車利用率は、要援護者少数のケースでは36.3%、要援護者多数のケースでは47.0%である。自動車利用率の制御をルール化する場合、リスクを最小化する平均自動車利用率を目標とすべきだといえる。

この結果から、自動車利用率を適切に制御することによるリスク抑制効果が定量的に把握できる。例えば要援護者少数の場合、全員が自動車を利用して避難した場合 ( $\lambda = 1.0$ )、津波遭遇総リスクは2160となる。自動車利用率を最適値 ( $\lambda = 0.363$ ) に制御することで、総

東北大学工学研究科土木工学専攻  
 リスクを689に抑えることができ、リスクが約32%に抑制できる。要援護者多数のケースでは、徒歩避難ができない要援護者を自動車で避難させる必要があるため、最適な平均自動車利用率が要援護者少数のケース(36.3%)と比べて大きくなる(47.0%)。以上のことから、自動車利用率の制御をルール化する上では、要援護者の存在を考慮に入れる必要があるといえる。

避難場所に近い内陸側と避難距離の長い沿岸部では自動車利用の必要性が異なるため、地区ごとにとるべき自動車利用率の値は異なる。そのため、地区ごとの自動車利用率の望ましい値を確認した上で、各地区の自動車利用率に関する合意形成を目指す必要がある。図4は津波遭遇総リスクが最小となる平均自動車利用率における、各ケースの起点セル毎の自動車利用率である。横軸は各起点セルのx座標値であり、右方ほど沿岸に近いことを表す。図4(a)より、沿岸側の起点セルの自動車利用率は100%に近い値をとっており、内陸側の起点セルでは、沿岸側からの自動車避難者の避難を妨げない範囲で自動車が利用されている。内陸側には要援護者を乗せて避難するのに最小限の自動車利用率に留められるセルが多く存在する。一方、図4(b)では多くの起点セルで自動車利用率の値が要援護者を避難させる最低限の値(0.6)となる。一方で、自動車利用率がそれ未満の低い値をとる起点セルも存在する。これらの起点セルは比較的海から遠く津波遭遇確率の低い起点セルであるため、要援護者を移動させず起点セルに留めるといふ解が最適となる。実際のルール策定の際は、地区が十分に安全であるかど

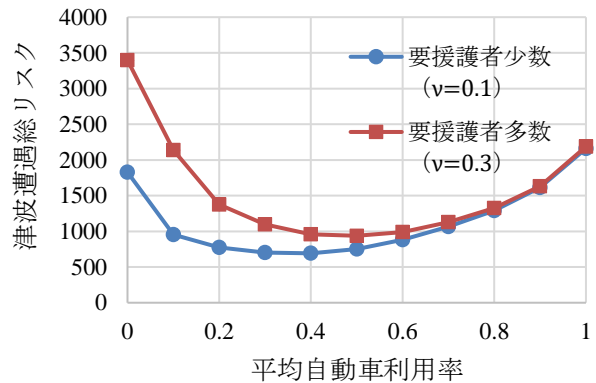
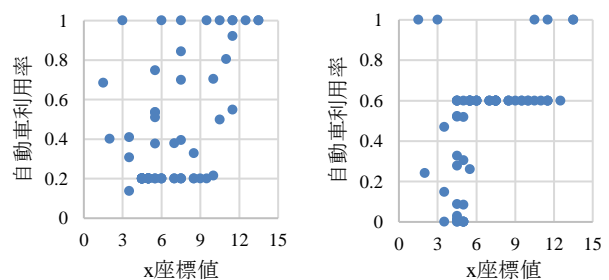


図3 平均自動車利用率と津波遭遇総リスクの関係



(a) 要援護者少数ケース (b) 要援護者多数ケース  
 図4 起点セル毎の自動車利用率

うかを適切に判断し、安全でない場合には安全な場所まで要援護者を含む全避難者が脱出することを条件として与えた上で再度ルールの効果を詳しく検討する必要がある。

次に、歩行者専用化の効果を分析する。ここでは2車線の道路から自動車を完全に排除し、全て歩行者に使用させるというルールを検討する。そこで、歩行者専用化区間を内生的に決定するモデルを構築し、最適な歩行者専用化区間の分布とリスクの低減効果を分析する。図5は要援護者少数のケースにおける歩行者専用化区間の最適分布である。内陸の避難場所に近い道路区間のみが歩行者専用化されている。避難場所付近に人口が集中しており、避難場所に接続する道路が複数存在する場合、1本を歩行者専用化することで歩行者の交通容量が拡大させることができる。

さらに、双方向通行可能な道路を一方通行化させるコントラフローの効果を分析する。歩行者専用化と同様に、コントラフロー区間を最適に設定するモデルにより分析を行う。図6は要援護者少数のケースにおける最適なコントラフロー区間の分布である。沿岸から内陸に向かう道路区間の多くがコントラフロー化される。

歩行者専用化とコントラフローについて、リスクの抑制効果を確認する。自動車利用率の制御のみを行った場合に加え、各ルールを実施する場合の津波遭遇総リスク値を表1に示す。要援護者少数のケースでは歩行者専用化の効果があるが、要援護者多数のケースでは効果が見られない。一方で、コントラフローは両ケースでリスク抑制効果があることがわかる。対象ネットワークは沿岸



図5 歩行者専用化区間の分布 (要援護者少数ケース) 図6 コントラフロー区間の分布 (要援護者少数ケース)

表1 各ケースにおける避難ルール策定時の津波遭遇総リスク

津波遭遇総リスク (A)に対する比	要援護者少数	要援護者多数
自動車利用率の制御 (A)のみ	689 (1.00)	934 (1.00)
(A)+歩行者専用化	583 (0.85)	934 (1.00)
(A)+コントラフロー	425 (0.62)	645 (0.69)

東北大学工学研究科土木工学専攻地域から避難場所までの距離が長く、自動車で避難しなければ間に合わない範囲が広く存在する。一方で、沿岸から内陸に向かう道路の本数が少なく、東西方向の容量が少ない。そのため、コントラフロー区間の設定による自動車の交通容量拡大が最も効果的であるという結果が得られたと考えられる。

### (3) 車両不足状況における分析

車両不足状況では、避難距離の長い住民への徒歩避難の強制や、要援護者が危険なエリアの取り残される等の問題が発生する。このような場合、途中乗車の許容が効果を発揮すると考えられる。途中乗車を許容する場合、全体として津波遭遇総リスクは減少するが、運転者のリスクが上昇する危険性がある。図7に要援護者多数のケースにおける、運転者と非運転者の1人当たりリスクの比較を示す。このケースでは、途中乗車の許容により非運転者の1人当たりリスクが0.48倍に抑えられる一方で、運転者の1人当たりリスクが1.67倍に増加する。途中乗車の許容のルール化は、この運転者のリスク上昇を考慮に入れ、慎重に検討すべきである。

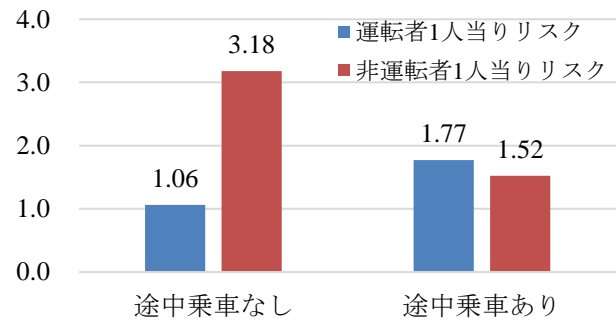


図7 途中乗車の許容の有無による1人当たりリスクの比較 (要援護者多数ケース)

## 5. おわりに

避難ルールの策定に寄与できる根拠となる情報が必要であることを踏まえ、本研究では、発災時の状況に合わせて策定すべき津波避難ルールの候補を示し、最適交通計画モデルを用いてルールの効果分析を行った。さらに、対象地域で策定すべき津波避難ルールを検討した。

### 参考文献

- 1) 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, No.59-03, 2016.
- 2) Nie, Y.: A cell-based Merchant-Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Part B*, Vol.45, No.2, pp.329-342, 2011.

(2019年2月1日提出)