

津波遭遇リスクを最小化する自動車避難計画の策定手法

東北大学 学生会員 ○片岡 侑美子
東北大学 正会員 奥村 誠

1. はじめに

東日本大震災を踏まえ、やむを得ない場合での自動車津波避難が認可されたため、徒歩を原則としてきた自治体の津波避難計画の見直しが必要となっている。

交通工学の立場からは、自由な自動車避難は渋滞を多発し避難に悪影響を及ぼす可能性があるため、渋滞を防ぐように経路指定や信号制御を行うべきだという指摘がある。しかしそれらの議論の前に、既存の避難インフラの限界値に基づきインフラ強化対策の必要性を検討し、実現可能性を見極めた上で避難場所の指定や交通制御の計画を行うことが必要であると考え。

本研究では津波避難計画の目的を、渋滞の緩和ではなく地域住民の総津波遭遇リスクの最小化であると考え。最適避難モデルを利用し、既存避難インフラのもとで計算される解に対する総リスクの限界値と、津波避難計画を策定する自治体が許容できる総リスクの許容値との比較を可能とする。その結果を用いて、許容値が交通制御などのソフトの施策で達成できる範囲にあるか、もしくは避難インフラの改善が必要なかを判断し、施策の方向性が判断できることを示す。

2. 最適避難モデル

本研究の最適避難モデルは、先行研究¹⁾で提案したセルベース交通計画モデルを基本とする式(1)~(11)のような線形計画問題である。3つの内生変数は、単位時間に分割された時刻 t 毎に定義される非負の連続変数で、時刻 t にセル a に流出・流入する車両数の v_t^a, u_t^a と、時刻 t にセル a から流出せずに時刻 $t+1$ まで留まる車両数の p_t^a である。

著者らは、津波避難時においては渋滞や混雑の発生そのものは問題ではなく、それらの結果として車両が危険な場所に留まり、津波との遭遇可能性が高まることが問題と考えている。そのため、最適避難モデルの定式化に当たり、1)津波遭遇リスクの最小化と、2)渋滞・混雑の推移が表現できることの2点に留意した。

1)を実現するために、時刻 t にセル a にいる場合の津波遭遇リスク R_t^a を外生的に与えた。そして、各時刻・セルにいる人数とリスクを掛けた値の全時刻(T)での総計を総リスクと称して式(1)の目的関数とした。 η は一台当りの平均乗車人数であり、所与とする。

2)は式(2)~(6)で実現する。式(2)~(5)は交通量保存則であり、式(6)はセル a への流入台数に関する制約である。式(6)はセル a で収容可能な最大車両数(収容容量 H^a)の中でまだ使われていない容量に比例して流入できることを表し、 δ^a は渋滞流の密度波速度を自由流の密度波速度で割った定数である。滞在車両数 p_t^a が大きくなると、収容容量の制限を受けセル a に流入する車両が減少する(混雑)。これが上流セルの流出車両に影響し、上流セルの滞在車両を増加させ渋滞をもたらす。このようにして、渋滞と混雑の伝播現象を表現している。

式(7), (8)は流入・流出量の容量の制約、式(9)は初期条件を示しており、 D^a は初期の起点セルの車両数である。式(10), (11)は内生変数の非負制約である。

$$\min_{\{v_t^a, p_t^a, u_t^a\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a \cdot \eta(p_t^a + v_t^a) \quad (1)$$

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in \{A \setminus (A_S \cup A_R)\} \quad (2)$$

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

$$p_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (4)$$

$$\sum_{a \in O(i)} u_t^a = \sum_{a \in I(i)} v_t^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A, \forall i \in N \quad (5)$$

$$u_t^a \leq \delta^a (H^a - p_t^a - v_t^a) \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (6)$$

$$v_t^a \leq C^a \quad \forall t = \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (7)$$

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (8)$$

$$v_0^a + p_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad \forall a \in A_R \quad (9)$$

$$0 \leq u_t^a \quad \forall t = \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (10)$$

$$0 \leq v_t^a, p_t^a \quad \forall t = \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (11)$$

A は全てのセルの集合、 A_R は起点セルの集合、 A_S は避難場所セルの集合、 N はノードの集合、 $I(i)$, $O(i)$ はそれぞれノード i の上流側、下流側で繋がっているセルの集合、

キーワード 津波避難, 最適化モデル, Evacuation

連絡先 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502 TEL 022-752-2160

C^a はセル a の流出入可能な最大車両数である。

3. 自動車津波避難計画の策定手法

3.1 対象地域のデータ設定

宮城県亶理郡亶理町を対象とし、同町の津波避難計画²⁾を基に必要値を設定した。本研究では単位時刻を2分、自由流速度を30km/hとし、避難経路となる道路を最大1kmのセルに区切る。9個の起点セル、4個の避難場所セルを含めたセルの総数は256個である。収容容量 H^a はセルの長さを平均車頭間隔(5mと設定)で割り小数点以下を切り捨てた値とした。フローの容量 C^a (単位:台/2分)は一般的なシミュレーションで用いられている道路種別毎の値を参考に、国道を66、都道府県道を60、その他道路を41とした。起点セルのフロー容量・収容容量は共に無限大、避難場所セルのフロー容量は60、収容容量は各避難場所の駐車容量を与え、4カ所の合計は2251台である。避難人口の総和は3389人、自動車保有率0.8であり、全対象人口が避難場所に避難するには平均1.51人/台以上の乗車が不可欠となる。

津波遭遇リスク R_t^a 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与えた。具体的には津波避難計画²⁾を参考として式(12)のようなロジスティック曲線により与えた。避難場所セルの距離リスクをゼロとおいた。

$$\begin{aligned} \text{津波遭遇リスク} &= \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \\ &= \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-23)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}} \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 計算結果

平均乗車人数を1.625~5人の間で変更した上で、モデルから得られた最適解での総リスクを図1に示した。平均乗車人数が大きいほど車両数が小さく、最小リスクが小さくなることからわかる。平均乗車人数が1.625人の場合の計算結果(図2参照)では、後続の車両の避難を早めるため避難場所セルを通り過ぎて遠方に向かう車両が存在した。 $t=26$ 以降は避難車両は動かないが、全ての車両が避難場所セルに収容されず、297台は図2左上のセルに滞留した。これは、一旦左上のセルに行くと、再びリスクの大きいセルを通り避難場所セルに向かうよりも、留まり続けた方が総リスクを小さくできるからである。

3.3 津波避難計画策定方法の提案

自治体が考える津波遭遇リスクの許容値が847(対象人口の25%)と338(10%)の二つのケースを考える。

許容値が847の場合、図1より1台あたり約3人以上乗ると許容値以下になる。平均乗車人数を3人以上にする必要性とともに、最適解から得られる避難先と避難経路の割当情報を住民に確実に周知して、実現の可能性を高めることが課題となる。

許容値が338の場合、図1より平均乗車人数が5人であっても達成不可能であることがわかる。このため、新たに垂直避難できる避難場所の追加や道路の新設・改善などのハード面の施策を検討する必要がある。最適解における双対変数の値は、当該の制約の緩和がもたらす目的関数の改善度合いを示しているため、それらを参考に改善案を検討し、再び最適避難モデルの計算を繰り返すことで、許容値を満足するような避難方法を探索することができる。

以上のような手法で、最適避難計画モデルに基づき、許容値を達成するために最適限必要な施策を知ることが可能であり、効率的な避難計画を策定できる。

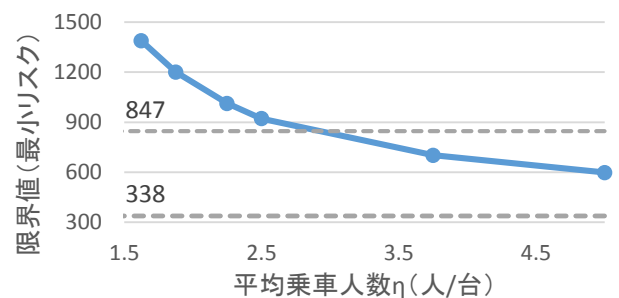


図1. 平均乗車人数ごとの総リスク限界値

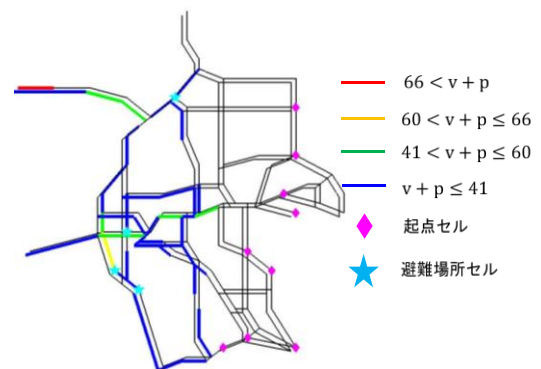


図2. 平均乗車人数1.3人(t=14)

【参考文献】

- 1) 片岡侑美子・奥村誠, 最適避難方向指定のための cell-based 交通計画モデル, 土木計画研究・講演集 CD-ROM, vol.51, No.327, 2015
- 2) 宮城県亶理郡亶理町: “亶理町 津波避難計画(平成26年2月)”, 亶理町 HP, 2015.7