

# 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

Planning Procedure for Automobile Tsunami Evacuation  
to Minimize the Risk of Being Caught by Tsunami

片岡 侑美子\*  
Yumiko KATAOKA

\*被災地支援研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

This study proposes a planning procedure of automobile tsunami evacuation by using a mathematical model to minimize the risk of being caught by tsunami. This linear programming model explicitly describes locations of automobiles at each time in the framework of cell-based traffic model. It will estimate the minimum risk value realized by the present infrastructure such as roads and shelters, and show possible improvements efficient to decrease the risk, based on dual values.

**Key Words** : evacuation, tsunami, optimal model, cell-based network

## 1. はじめに

「交通の教則」において、自動車を利用した津波避難は禁止されていたが、東日本大震災を踏まえ、2012年3月にやむを得ない場合での自動車避難が許容された。しかし、2012年12月に起きた三陸沖地震では、多数の避難車両による渋滞が発生し、道路上で動けなくなり、自由な自動車避難の危険性が露呈した。そのため、自治体では自動車避難を認めるとしても、安全かつ確実に避難できる方策を検討する必要がある。

交通工学の立場では、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ので、渋滞を発生させないように経路指定や信号制御による誘導を行うべきだという指摘がある。しかし交通誘導の議論の前に、既存の避難インフラの限界値を確認し、インフラの強化対策の必要性を検討して、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、津波避難計画の目標は渋滞の防止ではなく、避難者が津波に遭遇するリスクの最小化であるとの考えに基づいた津波避難計画の策定手法を提案する。まず自治体は、類似の自治体を含めたこれまでの被災経験に基づき、津波遭遇リスクの目標値を設定する。次に本研究で提案する総リスクの最小化を図る最適避難モデルにより、既存避難インフラの下での最小リスクを計算する。この値は、既存の避難インフラの下ではどんなにうまく交通を制御したとしてもそのリスク以下にはできない限界値を意味している。この最小リスクの値を自治体の目標値と比較し、目標値が交通制御などのソフトの施策で達成できる領域にあるのか、もしくは避難インフラの改善が必要なのかを判断し、施策の方向性が判断でき

ることを示す。

## 2. 最適避難モデルの構築

### (1) 最適避難モデルの要件と既存研究

本研究では津波避難計画の策定が、初期の段階にあり、どこに避難場所を設けるべきか、誰がどこに避難すべきか、といったことを考える前の段階にあると想定する。仮に、現時点で定められている避難場所の駐車場のみを目的地とする代わりに、さらに遠方の高台や道路上のリスクが低い区間に留まる方が地域全体の総リスクを小さくできるのであれば、それらの場所を避難場所に加えるという変更ができる。つまり目的地の構成 (OD) は所与ではなく、これから変更できると考えている。

また本研究では、津波避難において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津波と遭遇する危険性が大きな場所に車両が留まってしまうことが問題であると考え。また渋滞・混雑の発生を許した方ができる限り安全な側へ車両を詰め込むことができ、総リスクを小さくできる可能性があると考え。

そこで、i) 地点ごとの津波遭遇リスクの導入、ii) 渋滞・混雑の表現、iii) 各時刻・地点での移動中・渋滞中の車両数の明示的な把握の3つ条件を満たすセルベースモデルに着目して、最適避難モデルを構築する。

セルベースの最適避難交通計画モデルの既存研究は多く存在する。Xie et al.<sup>1)</sup>は、交差点における交通流の交差の排除とそれに伴う一方通行化 (コントラフロー) の二つの施策を行った場合の最適避難ネットワークを得る、二段階計画問題を提案した。そこでは目的関数として、総所要時間最小と避難完了時刻最小の二つが使われてい

る. Ben-tal et al.<sup>2)</sup>は目的関数にコストを導入したロバスト最適の動的交通計画問題を提案している. この目的関数は指定した時間までに目的地に着けない車両に対して大きなリスクを与え, 制限時間以内であればコストは単一としているため, 実質的に所要時間最小化を行っていることとなる. 以上のように既存のセルベースの最適避難交通計画問題では, 時々刻々と変化するリスクを目的関数に導入しているものは見当たらない.

一般的なセルベースのシステム交通計画モデルでは, フロー関数の制約条件が不等式で表現されているため, 解の一意性が保証されていないことが指摘されている. また, 目的地に向かう次のセルに空きがあるにもかかわらず次の時間までに車両が動かず同じセルに留まるという **Holding** は, 前の道路が空いているのに動かないでいる状態は運転者の通常の行動パターンでは考えにくく, 解の実現性が失われている可能性があると考えられて, 問題視されている.

本研究のモデルでは必ずしも避難場所を目的地にする必要がなく, あるセルに対してどちらに進むべきかが先験的に決定していないため, 「目的地に向かう次のセルが空いている」という **Holding** の定義が当てはまらない. さらに津波遭遇リスクの最小化を目的とする本研究では, **Holding** が意味のある行動である可能性もある. つまり, リスクの高いところへ車両を向かわせるよりも, リスクの低い地点に留ませた方が全体の津波遭遇リスクが小さくできる可能性がある.

最近では, He et al. (2015)<sup>3)</sup>が **Earliest Arrival Flow (EAF)** を用いた最適動的資源配置問題を提案している. この問題は交通誘導員などの移動可能な資源の最適な配置場所と最適な避難交通流を同時に求める混合整数線形問題である. **EAF** とは, ある時刻までに目的地に到着する交通量を最大とする流量であり, それが指定した全時間帯を通じて成立しているという条件下での問題を考えるもので, **Holding** は発生せず, 解も一意である. **EAF** はリンクをセルに分割していないため, **CTM** より変数が少なくて済む利点がある. Zheng et al. (2013)<sup>4)</sup>は, セルのプロパティが時間的に不変な **CTM** ベースのシステム最適動的交通配分問題の解に対して同じ目的関数値を与える **EAF** が存在することを証明し, **Holding** 問題が回避できることを示している. しかし, この証明の前提として目的関数のコスト係数が単一であることが前提としており, 時間とともに変化する津波遭遇リスクを導入を考える本研究では成り立たない.

## (2) 最適避難モデルの定式化

本研究のモデルの主要な目的は, 避難インフラで到達できる最小リスクを知ることであり, 実際に存在する道

東北大学工学研究科土木工学専攻路ネットワークを簡易に表現できた方がよい. そこで, セルとセルの間をノードで繋ぎ, 流出入量を別々の変数をおくことで, 交差点における複数のセルの接続関係を簡便に表現できる **Cell-based M-N** モデル<sup>5)</sup>を基本とした.

提案するモデルは式(1)-(11)のような線形計画問題であり, 各セルに3つの内生変数を持っている. すなわち, 時刻  $t$  にセル  $a$  から流出・セル  $a$  に流入する車両数をそれぞれ  $v_t^a, u_t^a$  とし, 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  $p_t^a$  とする.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$A$  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,  $C^a$  はセル  $a$  の流入可能最大車両数である.

式(1)で目的関数としている総リスクは, 各時刻に各場所に存在する人数とその時刻における津波遭遇リスクを掛けた値の全時刻 ( $T$ ) での総和である. 時刻  $t$  にセル  $a$  にいる津波遭遇リスクは  $R_t^a$  として時刻毎に変化すると考え, 外生的に与える.  $(p_t^a + v_t^a)$  はセル  $a$  に時刻  $t$  に存在する車両数であり, 一台当りの平均乗車人数  $\eta$  を乗ずると人数となる.

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す.  $\delta^a$  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.

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,  $D^a$  は起点セルの避難車両数である. 式(10), (11)は内生変数の非負制約である.

セル間の移動交通量は前後のセルの交通量で決まるが, 本モデルでは上流側にある交通量しか流出できないことを式(2)-(4)と非負制約で, 下流側のセルの空き容量しか

流入できないことを式(6)と非負制約で表している。滞在車両の $p_t^a$ が大きくなるとセルの収容容量制限によってセル $a$ に流入する車両が減少する。これが上流セルの流出車両に影響し、上流側の滞在車両数を増加させる。このようにして、渋滞と混雑が上流に伝播する現象を表現している。

先述したように、本モデルでは外生的にODを与えていない。通常時の交通は目的地で行う活動に対する派生需要とされるが、津波避難時には津波の遭遇リスクが低い場所へ移動すること自体が目的であり、どこから来た車両をどこに向かわせるかというODは、求められた解に合わせるように事後的に指定すればよい。セルベースモデルで複数の目的地をもつODが外生的に与えられた場合に、multi-commodityとして扱う必要があり、流入時の混合の順序や比率と流出時のそれらが一致しなければ、実際にそのような交通流が実現できないという問題が指摘されている。本モデルはODを与えないSingle-commodityの交通流を扱っているために、上記の問題を回避することができる。

### (3) 方向指定施策を考慮するために拡張

本モデルは各車両が最適なルートを取ることを仮定しているため、実際の状況下での実現性が保証できないという問題がある。このとき、交差点で道路標識や看板を立てて一方のみに避難車両を誘導できれば、実現性が高くなると考える。

このような条件下での最適解を得るため、交差点からの車両が流入できるセルを1つに限定するバイナリ変数 $\varepsilon^a$ をおき、制約条件式(12)~(14)を最適避難モデル(式(1)~(11))に加えて、最適避難方向指定 $\varepsilon^a$ についても最適化することにより、「方向指定あり」のモデルに拡張できる。

$$u_t^a \leq L\varepsilon^a \quad \forall t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (12)$$

$$\sum_{a \in O(i)} \varepsilon^a \leq 1 \quad \forall a \in A \quad (13)$$

$$\varepsilon^a = \{0,1\} \quad \forall a \in A \quad (14)$$

## 3. 自動車津波避難計画の策定手法

### (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<sup>9)</sup>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

東北大学工学研究科土木工学専攻の他道路を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、全員が避難場所セルに避難するには平均1.51人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<sup>9)</sup>を参考として式(15)のようなロジスティック曲線により与えた。また、避難場所セルの距離リスクをゼロとおいた。

$$\begin{aligned} \text{津波遭遇リスク} &= \text{時間リスク}(t) \times \text{距離リスク}(x) \\ &= \frac{1}{1 + e^{-0.2(t-23)}} \times \frac{1}{1 + e^{(x-7)}} \quad (15) \end{aligned}$$

### (2) 計算結果と考察

最適避難モデル(方向指定なし)と最適方向指定を加えたモデル(方向指定あり)から得た最小リスクを図1に示した。「方向指定あり」の方が制約条件を加えているため、最小リスクが大きい。いずれのモデルでも、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のがわかる。これは、平均乗車人数が小さくなる、つまり避難車両が大きくなるにつれて、混雑や渋滞が発生しやすくなり、より多くの人が高リスクの地域に留まる必要が生じるからである。

方向指定なし・平均乗車人数が1.625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以降では避難車両は動かなくなるが、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。

この結果から亶理町では避難場所のみを目的地とせず、避難場所を通り過ぎてより遠くに逃げることを許す方が最小リスクを小さくできるのがわかる。

### (3) 津波避難計画策定手法の提案

今回は自治体の目標値が1017(対象人口の30%)と338(10%)の二つのケースを考える。

目標値が1017の場合、図1の方向指定ありのグラフより、一台当たり5人乗車させ、図3のような交通制御に従わせると目標値が実現できる。しかし、津波避難時に

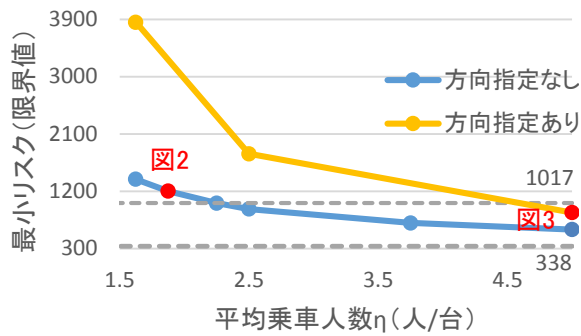


図1. 平均乗車人数ごとの最小リスク

多人数がすぐに集まって乗車することは困難である。もし1台に5人乗車できる見込みが低くても、1台あたり2.25人以上乗り、各車両を最適に誘導できれば目標値が達成できる。

その場合は平均乗車人数を2.25人以上にする必要とともに、最適解から得られる避難先と避難経路の割り当て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。また、住民たちに言葉で伝えるよりも、目的地を標識等で示した方が従いやすいと思われるので、亘理町では内陸に通じる道路に避難看板や避難駐車場を設けることが考えられる。

目標値が338の場合、図3の方向指定なしのグラフでは平均乗車人数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、目標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、目標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、効率的に避難計画を策定できる。

#### 4. おわりに

本研究では、自動車利用を含めた津波避難計画の策定の第一段階として、既存の避難インフラの限界値を知る必要性があると考えた。そこで、総リスクを最小にする最適避難モデルを提案し、得られた最小リスクと自治体が許容できる総リスクの値を比較することで、津波避難計画の方向性を判断できることを示した。

#### 参考文献

1) Xie, Chi, Dung-Ying Lin, and S. Travis Waller. "A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies." *Transportation research part E: logistics and transportation review* 46.3, pp.295-316, 2011

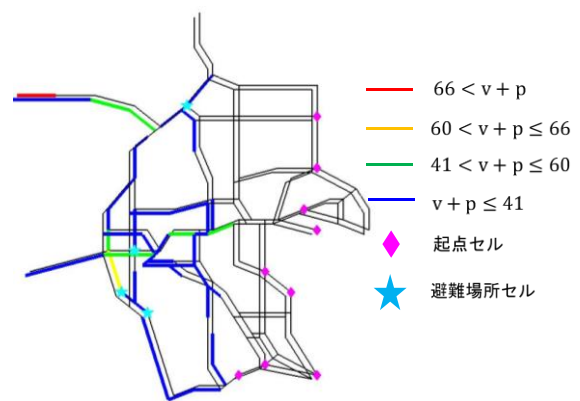


図2. 平均乗車人数1.625人 (t=14)

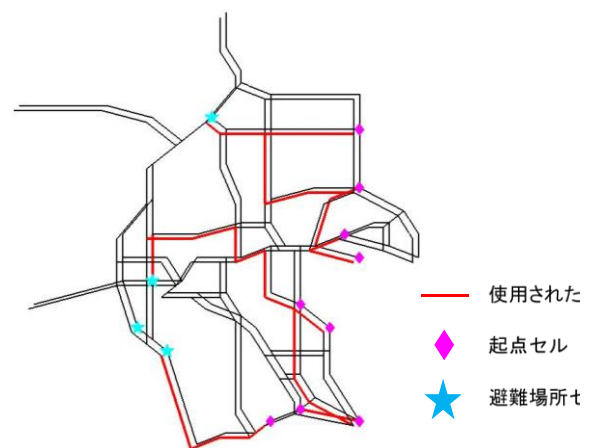


図3. 方向指定あり・ $\eta=5$ で使用されたセル

2) Ben-Tal, Aharon, et al. "Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains." *Transportation research part B: methodological* 45.8, pp.1177-1189, 2011

3) He, Xiaozheng, Hong Zheng, and Srinivas Peeta. "Model and a solution algorithm for the dynamic resource allocation problem for large-scale transportation network evacuation." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (2015).

4) Zheng, Hong, Yi-Chang Chiu, and Pitu B. Mirchandani. "On the system optimum dynamic traffic assignment and earliest arrival flow problems." *Transportation Science* 49.1 (2013): 13-27.

5) Nie, Yu Marco. : A cell-based Merchant–Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Part B: Methodological* 45.2 (2011): 329-342.

6) 宮城県亘理郡亘理町：“亘理町 津波避難計画（平成26年2月）”，亘理町HP，2015.7

(2016年2月2日提出)