

拡張型最適津波避難モデルを用いた途中乗車の効果分析

Effect of on-route car riding analyzed by extended optimal Tsunami evacuation model

爪林 康太*

Kota TSUMEBAYASHI

*地域計画学/被災地支援研究室（指導教員：奥村誠 教授）

本研究では、歩行者から同乗者のモード遷移が可能な拡張型の津波避難最適化モデルを作成し、途中乗車施策が津波遭遇総リスクの低下に与える効果を分析した。途中乗車により、非運転者のリスク値の減少が運転者の増加リスクの4倍超となる可能性を示した。更に、沿岸部への逆移動が可能な経路を残してコントラフロー施策を行うことにより運転者のリスク増加が抑えられ、パレート改善となることを示した。

Key Words: 津波避難, 最適化, 途中乗車, コントラフロー

1. はじめに

沿岸部の徒歩避難が困難な地区に存在する自ら運転できない避難者の安全性を高めるため、自動車を沿岸部へ移動させて途中乗車させ、自動車で輸送する途中乗車施策が効果的である可能性があり、また、実際にも行われてきた。しかし、運転者のリスクの増大が避けられず、パレート改善的な施策でないことがタブー視をもたらし、定量的な効果分析がなされてこなかった。本研究では途中乗車の効果の最大値を把握するため、最適化手法を用いる。先行研究¹⁾²⁾の津波避難に関する最適化モデルを拡張し、途中乗車が津波遭遇リスクの低下に与える効果を分析する。

2. 拡張型最適津波避難モデルの定式化

本研究では避難者を運転者、歩行者、同乗者の3モードに分類し、途中乗車という歩行者から同乗者へのモード間の遷移を許容する。なお、運転者は途中乗降せず、車両数に等しいと考える。期 t のセル a に流入、流出、滞留する人数を順に $u_t^a, v_t^a, p_t^a, \bar{u}_t^a, \bar{v}_t^a, \bar{p}_t^a, \bar{u}_t^a, \bar{v}_t^a, \bar{p}_t^a$ とし、非負の操作変数として扱う。経過時間に応じたセル a の津波遭遇リスク R_t^a を外生的に与え、全避難者の津波遭遇総リスク（以後総リスク）を最小化するモデルを以下のように定式化する。

$$\text{minimize } \sum_{t=0}^T \sum_{a \in A} R_t^a \{ (p_t^a + v_t^a) + (\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a) + (\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a) \} \quad (1)$$

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (2a)$$

$$\bar{p}_t^a + \bar{u}_t^a + \bar{p}_t^a + \bar{u}_t^a = \bar{p}_{t+1}^a + \bar{v}_{t+1}^a + \bar{p}_{t+1}^a + \bar{v}_{t+1}^a$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (2b)$$

$$\bar{u}_t^a \leq u_t^a(\theta - 1), \quad \bar{v}_t^a \leq v_t^a(\theta - 1), \quad \bar{p}_t^a \leq p_t^a(\theta - 1)$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (3a, 3b, 3c)$$

$$u_t^a \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (4a)$$

$$\bar{u}_t^a \leq \bar{C}^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (4b)$$

$$e_1 \cdot u_t^a + \bar{u}_t^a \leq \phi^a \{ H^a - [e_1(p_t^a + v_t^a) + (\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a)] \}$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (5)$$

$$v_t^a + e_2(\bar{p}_t^a + \bar{v}_t^a) \leq C^a \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall a \in A_R \quad (6)$$

$$\bar{v}_t^a = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, \epsilon^a\}, \forall a \in A_R \quad (7a)$$

$$\bar{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\epsilon^a} u_{t-s}^a \quad \forall t \in \{\epsilon^a, \dots, T\}, \forall a \in A_R \quad (7b)$$

$$v_t^a = 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, \tau\}, \forall a \in A \quad (8a)$$

$$\bar{p}_t^a \geq \sum_{s=1}^{\tau} \{ (p_{t-s}^a + u_{t-s}^a) - (p_{t-s+1}^a + v_{t-s+1}^a) \}$$

$$\forall t \in \{\tau+1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (8b)$$

$$p_0^a + \bar{p}_0^a + \bar{p}_0^a = D^a \quad \forall a \in A_o \quad (9)$$

$$p_0^a \leq \xi^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_o \quad (10)$$

$$\sum_{t=0}^T (v_t^a - \bar{u}_t^a) \geq \eta^a \cdot D^a \quad \forall a \in A_o \quad (11)$$

式(1)で $\{\cdot\}$ 内はセル a に存在する人数であり、これに期ごとの津波遭遇リスク R_t^a を乗じ、計算期間 T 内での総和である総リスクを最小化する。式(2)は交通量保存則であり、式(3)は自動車の最大乗車人数 θ による同乗者数に対する制約である。なお、モード遷移として途中乗車と避難場所セルでの降車を許す。式(4)は自動車および歩行者のフロー容量 C^a, \bar{C}^a による流入制約である。式(5)は容量 H^a による流入制約で、混雑の影響を考慮する。 e_1 は歩車の空間占有比である。式(6)は自動車の流出制約であり、歩車の混在による阻害を e_2 で表す。式(7)は歩行者の速度に起因する制約でセルの長さに応じた通過時間 ϵ^a を要することを表す。式(8)は途中乗車に必要な τ 期の間、同乗者が車両を停止していることを保障する。式(9)~(11)は初期制約であり、 D^a は起点セルの避難者人数、 ξ^a は運転可能者の割合、 η^a は徒歩困難者率である。

3. 途中乗車の効果分析

宮城県亘理町を参考に設定したネットワークと外生値を用い、 $\tau = 1$ とにおいて計算を行った。出発時に一回のみ乗車を認めるケースと、途中乗車を認めるケースについて、運転可能者割合 ξ と最大乗車人数 θ に対する総リスク値の計算結果を表1に示す。全体として、 θ と ξ が大きいほど総リスクの値は小さくなる。両者の

積が 1 を超える (表 1 中灰色) と、全員を乗車させるだけの運転者・車両が確保できるため、総リスクの値は θ ごとに一定となる。 θ と ξ の積が 1 を超えない領域では、 ξ が小さく θ が大きいほど途中乗車の効果が大きい。これは、より多くの徒歩避難を余儀なくされる人を自動車で輸送できるようになるためである。表 1 中で最も途中乗車のリスク低下効果が大きかった $\theta = 3, \xi = 0.2$ の場合の途中乗車有無別リスク値の比較を表 2 の左側に示す。また、途中乗車時の各セルの方向別累積通過人数を図 1 に示す。なお、道路は左側通行として図示しており、避難場所セルを青丸で、起点セルを星で示す。

図 1 で内陸向きのセルでは運転者数に比例する同乗者の交通があることがわかる。つまり車両を動かす限り、定員いっぱいの同乗者を乗せている。しかし、逆方向の交通は運転者にのみ存在し、同乗者には現れておらず、空車として次の途中乗車に備える動きであることがわかる。途中乗車が発生した時刻と、その時刻ごとの発生場所の重心の座標 (内陸端からの距離) の変化を図 2 に示す。これより、途中乗車は $t = 5$ 期から始まり、 $t = 9$ 期でピークを迎え、その後、変動しながら次第に減少していることがわかる。また、重心の座標を見ると、途中乗車ははじめ沿岸ではじまり、徐々に内陸へと移っていることがわかる。表 2 より、途中乗車によって運転者のリスクが 1268 増加しているものの非運転者のリスクはその 4 倍超の 5647 減少し、総リスクが 4379 低下していることがわかる。このように運転者と車両が十分存在しない条件下では、途中乗車によって運転者のリスク増加の数倍の非運転者のリスクを減少させることができる可能性がある。一方で、一人当りのリスク値を見ると、非運転者のリスクが減少しているものの運転者のリスクは増加しており、途中乗車施策は単独ではパレート改善とならないことが確かめられる。

運転者のリスク増加を抑えるため、コントラフロー施策を追加で実行することを考える。コントラフロー区間は図 1 で自動車の交通量が一方に偏る経路を参考に図 3 の様に設定する。また、コントラフロー区間のセルは容量 C^a , H^a が 1.5 倍となるが、対向セルは自車両が通行不可能になると仮定した。表 2 の右側に、この時のリスク値の計算結果を付け加えて表した。これより、コントラフロー施策を追加することにより全てのリスク値が改善しており、途中乗車施策のために沿岸に向かう運転者のリスクの増加を抑制できている。一人当りリスクは各モードで低下しており、途中乗車施策とコントラフロー施策を併せて実行することによりパレート改善となることが明らかになった。

表 1: ξ, ω による総リスクの変動

途中乗車無	$\theta=2$	3	4	途中乗車有	$\theta=2$	3	4
$\xi=0.2$	43132	30341	21341	$\xi=0.2$	40916	25962	18072
0.4	37316	24336	17794	0.4	35619	23910	17493
0.6	35867	24336	17794	0.6	35567	23910	17493
0.8	35867	24336	17794	0.8	35567	23910	17493
1.0	35867	24336	17794	1.0	35567	23910	17493



図 1: 各セルの累積通過人数

表 2: 途中乗車/コントラフロー施策によるリスク値の変化

	途中乗車無	途中乗車有	
		コントラフロー無	コントラフロー有
総リスク	30341	25962	17328
運転者リスク	3411	4679	3311
非運転者リスク	26930	21283	14017
運転者一人当りリスク	0.61	0.80	0.52
非運転者一人当りリスク	0.95	0.76	0.51



図 2: 途中乗車の人数と重心の推移



図 3: 設定したコントラフロー区間

4. むすびに

本研究では運転者・歩行者・同乗者の 3 モードを含む拡張型の津波避難モデルを用いて途中乗車の効果を分析した。途中乗車施策によって運転者のリスクは増加するが、その 4 倍超の非運転者のリスクが減少する可能性があることがわかった。さらに、コントラフロー施策を同時に行うことで各モードのリスクが低下し途中乗車施策がパレート改善となることが明らかになった。

5. 参考文献

- 1) 片岡侑美子・奥村誠・金進英：自動車避難計画のための津波遭遇リスク最小化モデル，土木計画学研究・講演集，VOL. 53，CD-ROM，2016
- 2) 竹居広樹・奥村誠：自動車と歩行者の混在を考慮した津波遭遇リスク最小化避難モデル，土木計画学会研究・講演集，VOL. 55，CD-ROM，2017 (2018 年 2 月 6 日提出)