

自動車と歩行者の混在を考慮したライドシェア避難モデル

Optimum Model for Evacuation Traffic with Ride Sharing Considering Mixed Traffic of Vehicles and Pedestrians

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 中内智也 (Tomoya Nakauchi)
 北海道大学大学院工学院 学生員 峪 龍一 (Ryuichi Tani)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

東日本大震災による壊滅的な被害の経験を踏まえ、内閣府は、2012年3月より、やむを得ない場合の自動車を使った避難を認めた¹⁾。自動車での避難は、速やかな避難を可能にする一方、交通量の増加や、歩行者との錯綜による混雑の発生をもたらし、避難完了時間に大きな影響を与える。また、高齢者などの避難弱者の避難行動も大きな問題となっており、東日本大震災において被害が大きかった岩手県、宮城県、福島県の三県での死者数15,812人のうち約66%が60歳以上の高齢者であった²⁾。(図-1 参照)

避難行動の研究は多くされている。片岡ら³⁾は時間帯ごとの交通量を明示的に表現する Cell-based モデルを用いて、津波に遭遇するリスクを最小化するモデルを提案した。この研究の拡張も多く行われ、竹居ら⁴⁾は歩車混在の悪影響を考慮した最適避難モデルを構築し、爪林ら⁵⁾は歩行避難者の途中乗車を考慮した研究を行った。浦田ら⁶⁾は、他者を自動車で避難場所まで送迎する送迎避難行動の動的制御モデルとして定式化し、送迎による避難促進効果と、避難時間遅れの影響の定量的評価を行った。板橋ら⁷⁾は、VRP (Vehicle Routing Problem) モデルを用いて、避難最適化モデルの構築を行った。朝倉ら⁸⁾は、この VRP モデルに、道路や避難場所の容量制約を導入し、モデル拡張を行った。VRP モデルの定式化は、各自動車の決定変数を定義するため、その自動車挙動を明確に扱うことが可能であり、各自動車の経路や乗車人数を求めることができる。また、ライドシェアは高齢者などの避難弱者の避難を援助することに加え、避難に必要な車両数を減少させ、道路混雑の緩和にも貢献する。朝倉ら⁸⁾のモデルは、①リンク移動時間は、交通量に関わらず常に一定とし、さらに、②避難者全員が自動車で避難することを仮定している。

しかし、災害時には、交通量増加による移動時間の増加は大きな問題となっている。また、地域住民全員が自動車で避難する状況は現実的ではない。したがって、本研究では上記の2点の仮定を緩和して、より一般化されたモデルを提案する。

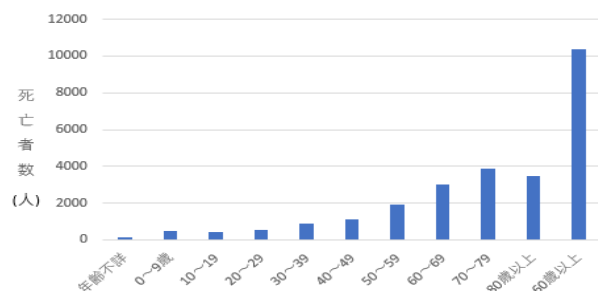


図-1 岩手県、宮城県、福島県での年代別死者数

2. モデルの仮定

本研究において設定した仮定を以下に示す。

- ・避難者は、自動車で避難する人 (ドライバー)、ドライバーにピックアップしてもらう人 (要援護者)、歩いて避難する人 (歩行避難者) のいずれかに分類される。
- ・道路ネットワークはノードとリンクで構成され、ノードは、避難場所ノードと、住宅ノードに分類される。また、リンクは接続する2つのノードによって表現される。
- ・自動車には乗車定員があり、リンク、避難場所にはそれぞれ容量制約がある。
- ・避難者は避難場所ノードに到着後、避難場所ノードから出ることではない。
- ・要援護者は、ドライバーにピックアップされるまで住宅ノードで待機する。
- ・避難者は発災後同時に避難行動を開始する。
- ・ドライバーを含め、1人自動車で乗車するのに、時間 τ を要する。
- ・リンク間の歩行避難者1人は e 台の自動車と同じ混雑効果を自動車交通に与える。
- ・各リンク上の自動車の移動時間は、リンク上の自動車交通量と歩行避難者数の関数として表現される。
- ・各リンク上の歩行避難者の移動時間は、自動車交通量には影響されず、リンク上の歩行避難者数の関数として表現される。
- ・避難場所に最も遅く到着する時刻を避難完了時間と呼ぶ。

3. モデルの定式化

入力変数の定義は以下の通りである。

S	避難場所ノード集合
D	住宅ノード集合
V	ドライバー集合
W	歩行避難者の集合
L	リンクの集合
o_k	自動車 k の起点ノード
n	$D \cup S$ のノード数
τ	避難者1人の乗車に要する時間
p_i	ノード i のドライバーと要援護者の総数
t_{ij}^0	リンク ij の自動車の自由移動時間
$\hat{t}_{ij}^0$	リンク ij の歩行避難者の自由移動時間
c_{ij}	リンク ij の道路交通容量
$\hat{c}_{ij}$	リンク ij の歩行避難者交通容量

l_k	自動車 k の乗車定員
a_i	避難場所ノード i の容量
x_{ij}^k	自動車 k がリンク ij を移動する時に1、そうでない時に0をとる変数
$\hat{x}_{ij}^k$	歩行避難者 k がリンク ij を移動する時に1、そうでない時に0をとる変数
u_i^k	自動車 k がノード i を通過する順序を表す変数。通過しない時は0をとる。
$\hat{u}_i^k$	歩行避難者 k がノード i を通過する順序を表す変数。通過しない時は0をとる。
w_i^k	ノード i から自動車 k に乗車する避難者数
t_{ij}	リンク ij の自動車による移動時間
$\hat{t}_{ij}$	リンク ij の歩行時間時間
z	自動車で避難する避難者（ドライバーと要援護者）の避難完了時間
$\hat{z}$	歩行避難者の避難完了時間
m	すべての避難者の避難完了時間

朝倉ら⁸⁾のモデルを参考に、以下に示す混合線形計画問題としてライドシェア避難モデルの定式化を行った。
(式 (1)-(28))

$$\min \quad m + \beta \left(\sum_{k \in V} \sum_{ij \in L} t_{ij} x_{ij}^k + \sum_{k \in W} \sum_{ij \in L} \hat{t}_{ij} \hat{x}_{ij}^k \right) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{ij \in L} t_{ij} x_{ij}^k + \tau \sum_{i \in D} w_i^k \leq z \quad \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{ij \in L} \hat{t}_{ij} \hat{x}_{ij}^k \leq \hat{z} \quad \forall k \in W \quad (3)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij}^k = \sum_{l=D \cup S} x_{jl}^k \quad \forall j (\neq o_k) \in D, \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in D} \hat{x}_{ij}^k = \sum_{l=D \cup S} \hat{x}_{jl}^k \quad \forall j (\neq o_k) \in D, \forall k \in W \quad (5)$$

$$w_i \leq l_k \sum_{j \in D \cup S} x_{ij}^k \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V} w_i^k = p_i \quad \forall i \in D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} w_i^k \leq l_k \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$w_{o_k}^k \geq 1 \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$u_i^k + 1 - n(1 - x_{ij}^k) \leq u_j^k \quad \forall i \in D, \forall j \in D \cup S, \forall k \in V \quad (10)$$

$$\hat{u}_i^k + 1 - n(1 - \hat{x}_{ij}^k) \leq \hat{u}_j^k \quad \forall i \in D, \forall j \in D \cup S, \forall k \in W \quad (11)$$

$$u_{o_k}^k = 1 \quad \forall k \in V \quad (12)$$

$$\hat{u}_{o_k}^k = 1 \quad \forall k \in W \quad (13)$$

$$n \sum_{j \in D \cup S} x_{ij}^k \geq u_i^k \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (14)$$

$$n \sum_{j \in D \cup S} \hat{x}_{ij}^k \geq \hat{u}_i^k \quad \forall i \in D, \forall k \in W \quad (15)$$

$$n \sum_{i \in D} x_{ij}^k \geq u_j^k \quad \forall j \in S, \forall k \in V \quad (16)$$

$$n \sum_{i \in D} \hat{x}_{ij}^k \geq \hat{u}_j^k \quad \forall j \in S, \forall k \in W \quad (17)$$

$$0 \leq u_i^k \leq \sum_{jl \in L} x_{jl}^k + 1 \quad \forall i \in D \cup S, \forall k \in V \quad (18)$$

$$0 \leq \hat{u}_i^k \leq \sum_{jl \in L} \hat{x}_{jl}^k + 1 \quad \forall i \in D \cup S, \forall k \in W \quad (19)$$

$$\sum_{k \in V} x_{ij}^k + e \sum_{k \in W} \hat{x}_{ij}^k \leq c_{ij} \quad \forall ij \in L \quad (20)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in D} x_{ij}^k \leq a_j \quad \forall j \in S \quad (21)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in L, \forall k \in V \quad (22)$$

$$\hat{x}_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in L, \forall k \in W \quad (23)$$

$$w_i^k \geq 0 \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (24)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^0 \left(1 + \alpha \frac{\left(\sum_{k \in V} x_{ij}^k + \sum_{k \in W} \hat{x}_{ij}^k \right)}{c_{ij}} \right) \quad (25)$$

$$\hat{t}_{ij} = \hat{c}_{ij} \left(1 + \hat{\alpha} \frac{\left(\sum_{k \in W} \hat{x}_{ij}^k \right)}{\hat{c}_{ij}} \right) \quad (26)$$

$$z \leq m \quad (27)$$

$$\hat{z} \leq m \quad (28)$$

目的関数の式 (1) は2つの項からなっている。第1項は、避難完了時間である。第2項は、ドライバーと歩行避難者の総移動時間に $0 < \beta < 1$ を満たす係数(重み) β を乗じたものである。

式 (2) と (3) は、ドライバーと歩行避難者、それぞれの避難完了時間を表す z と $\hat{z}$ の定義を示す。式 (4) と (5) は、ドライバーと歩行避難者それぞれについてのフロー保存則を示す。式 (6) は、各ノードのドライバーと要援護者は、そのノードを通る自動車にのみ乗ることができることを示す。式 (7) は、各ノードにおいて、ドライバーと要援護者全ての人が自動車で避難することを示す。式 (8) は、各自動車の容量制約を示す。式 (9) は、各自動車に最低1人(ドライバー)はその起点ノードから乗ることを示す。式 (10) ~ (19) は、決定変数 u_i^k と $\hat{u}_i^k$ のそれぞれの定義を示す。式 (20) は、リンク ij の容量制約を示す。式 (21) は、避難場所の容量

制約を示す。式 (22) と (23) は、決定変数 x_{ij}^k と $\hat{x}_{ij}^k$ がバイナリ変数であることを示す。式 (24) は、 w_i^k の非負条件を示す。式 (25) と (26) には、自動車や歩行避難者の増加により移動時間が増加する関係を、BPR 関数を用いて示す。式 (27) と式 (28) は避難完了時間を表す m の定義を示す。

4. 計算例

簡単な道路ネットワークを用いて行ったモデルの計算例を示す。本研究では Gurobi Optimizer を用いて数値解を求めた。

図-2 に示す 3 つの避難場所ノード (f, g, h) と 5 つの住宅ノード (a, b, c, d, e) をもつネットワークを対象に、歩行避難者が避難完了時間に与える影響を議論する。ここでは、自動車の自由移動時間 $t_{ij}^0 = 1$ 分、歩行避難者の自由移動時間 $\hat{t}_{ij}^0 = 8$ 分、自動車交通容量 $c_{ij} = 15$ 台、歩行避難者交通容量 $\hat{c}_{ij} = 15$ 人を各リンクに等しく与えた。

また、1 人あたりの乗車時間 $\tau = 1$ 分とした。また、式 (1) の $\beta = 0.01$ 、式 (20) の $e = 0.01$ 、式 (25) の $\alpha = 0.15$ 、式 (26) の $\hat{\alpha} = 0.15$ を与えた。さらに、各避難場所には十分な収容能力があるとした。避難者の総数は 100 人とし、各住宅ノードには 20 人の避難者が存在する。そのうち、要援護者が各住宅ノードに 6 人存在し、残り 14 人のドライバーと歩行避難者の数を変化させた。以上の条件設定において、式 (1) に示した目的関数の値、自動車で避難する避難者の避難完了時間 z と歩行避難者の避難完了時間 $\hat{z}$ の歩行避難者数の関係を図-3、目的式の第 2 項の変化を図-4 に示す。

図-3 より、歩行避難者数が少ない（自動車の数が多い）ときは、歩行避難者の増加（自動車の数の減少）にともない、自動車での避難完了時間と歩行者避難者の避難完了時間はともに増加している。しかし、ある歩行避難者数を越えると、歩行避難者の増加（自動車の数の減少）にともない、自動車での避難完了時間と歩行避難者の避難完了時間はともに減少し、ある点で最小の値をとり、その後は増加した。このことから、住民が不適切に自動車を利用することは、避難完了時間を増大させることが分かった。また、図-4 より避難者の総移動時間は歩行者の増加に伴い、増加傾向にある。

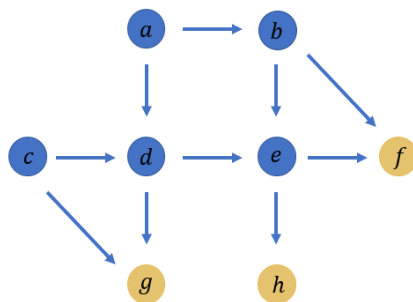


図-2 テストネットワーク

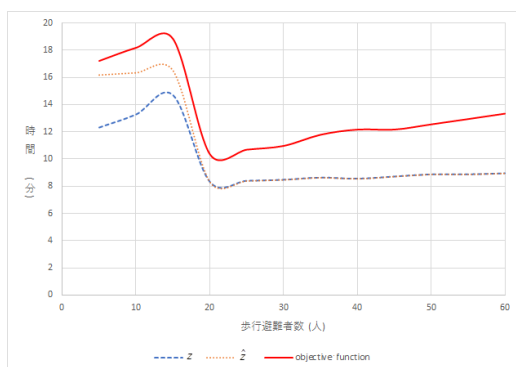


図-3 出力結果

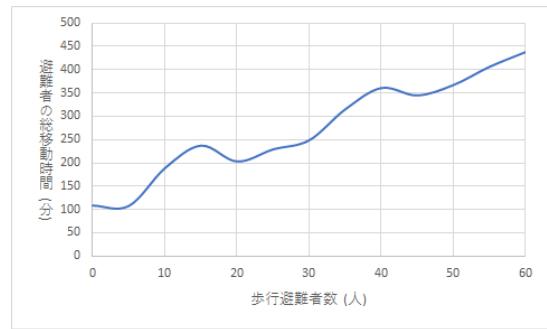


図-4 避難者の総移動時間

5. おわりに

本研究では、自動車と歩行避難者の影響を考慮し、ライドシェア避難モデルを構築した。歩行避難者と自動車の数を変化させて結果を比較し、テストネットワークにおいて、過剰な自動車の利用は避難完了時間の増加をもたらすことを示した。また、本モデルは、各避難者の挙動を知ることができるため、各ノードやリンクの通過時間や通過数を把握することができ、混雑の予測などにも有用である。

今後の課題として、渋滞による移動時間の影響を単純な線形の式ではなく、より現実的に表現することが挙げられる。また、待ち行列を考慮したモデルの構築が望まれる。

参考文献

- 1) 警察庁：交通の方法に関する教則の一部を改正する国家公安委員会告示について、<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kaikaku20120313/gaiyou.pdf> (2018.11.20 閲覧)
- 2) 内閣府：平成 25 年版 高齢社会白書（全体版）、http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2013/zenbun/s1_2_6_07.html (2018.8.4 閲覧)
- 3) 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、土木計画学研究・講演集、Vol.51、CD-ROM、2015
- 4) 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、土木計画学研究・講演集、Vol.53、CD-ROM、2016
- 5) 爪林康太、奥村誠、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、東北大学工学部建築・社会環境工学科、卒業論文集 2018 年 2 月
- 6) 浦田淳司、羽藤英二、津波リスク最小化のための送迎避難交通の最適動的制御とその求解方法、交通工学論文集、第 3 巻、第 3 号
- 7) 板橋遼、朝倉康夫、ライドシェア津波避難における車両割り当て・経路決定モデル、土木計画学研究・講演集、Vol.54、CD-ROM、2017
- 8) Yasuo Asakura, Ryo Itabashi, Optimum Model for Evacuation Traffic with ride sharing, 7th International Conference on Transport Network Reliability
- 9) 溝上障志、松井寛、可知隆、日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発、土木学会論文集、No.401/IV-10, pp.99-107, 1989.