

歩行避難者を考慮した津波発生時における ライドシェア避難モデル

中内 智也¹・峪 龍一²・内田 賢悦³

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区十三条西8丁目）

E-mail:bskrad@eis.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区十三条西8丁目）

E-mail:ryuichitani@eis.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区十三条西8丁目）

E-mail:uchida@eng.hokudai.ac.jp

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。自動車での避難は、速やかな避難を可能にする。一方で、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いる。これらの問題解決に推奨されるのが、ライドシェア避難である。他者をピックアップすることで、避難弱者を援助し、さらに、車両数の減少にも貢献する。

本研究では、朝倉ら¹が提案したライドシェア避難モデルにおける、①リンク移動時間は交通量に関わらず一定である、②避難者全員が自動車で避難する、といった 2 点の仮定を緩和する。これにより一般化されたモデルを提案する。

Key Words : Evacuation, Tsunami, Ride Sharing, Optimal Model

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、やむを得ない場合における自動車を使った避難を認めた²。自動車による避難は速やかな避難を可能にする。しかし、交通量の増加や歩行避難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3県の死者数15,812人のうち約66%が60歳以上の高齢者であった。これらの問題を解決するために推奨されるのが、ライドシェア避難である。一部の避難者が自動車を運転し、その他の避難者をピックアップすることで、避難に必要な車両数を減少させ、道路混雑の緩和に貢献することに加え、避難弱者の避難を援助することができる。

本研究では、朝倉ら¹が提案したVRP（Vehicle Routing Problem）モデルに、交通量の増加に伴う混雑の影響と、歩いて避難する歩行避難者という新しいモードを考慮することで、より一般化されたモデルを提案する。

2. 既往研究と本研究の特徴

これまでに避難行動に関する多くの研究がなされている。浦田ら³は、他者を自動車で避難場所まで送迎する送迎避難行動を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評価を行った。板橋ら⁴はVRPモデルを用いて、最適避難モデルの構築を行った。朝倉ら¹は、このVRPモデルに、道路や避難場所の容量制約を導入し、モデルを拡張した。VRPモデルは、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。朝倉ら¹のモデルは、①リンク移動時間は、交通量に関わらず一定とし、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、災害時には交通量が増加することによる移動時間の増加は大きな問題となる。また、地域住民の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点を緩和し、モデルの妥当性を検証するためにテストネットワークにおける数値計算を行う。

3. 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人自動車に乗車するのに, 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.

4. モデルの定式化

(1) 変数の定義

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 N 番目に通過したとき, $u_i^k = N$ となる変数
\hat{u}_i^k	歩行避難者 k がノード i を N 番目に通過したとき, $\hat{u}_i^k = N$ となる変数
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
m	すべての避難者の避難完了時間

(2) 定式化

朝倉ら¹⁾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.

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

s.t.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

目的関数の式(1)は2つの項からなっている。第1項は、避難者全員の避難完了時間である。第2項は、 $0 < \beta < 1$ を満たす係数 β を乗じたものである。式(1), (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), (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は自動車によって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、各自動車には少なくとも1人（ドライバー）はその起点ノードから乗車することを示す。式(10)~(19)は、決定変数 u_i^k と \hat{u}_i^k のそれぞれの決定変数を示す。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), (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、決定変数 w_i^k の非負条件を示す。

また、各リンク上の自動車と歩行避難者の移動時間は、図-1のように表されるDavidson関数を図-2のように3つにわけて線形近似し、交通量の増加にともない、増加させた。

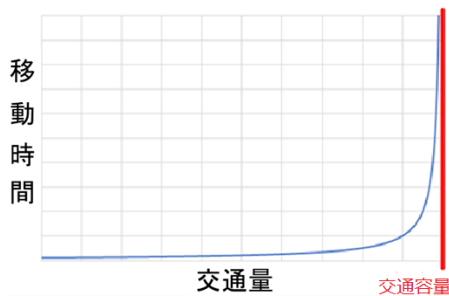


図-1 Davidson関数

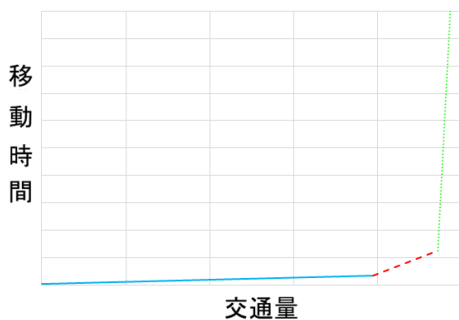


図-2 Davidson関数の線形近似

4. モデルの計算例

簡単なテスト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。

津波避難を想定し、山岳部に位置する避難場所ノード(f)と、海岸線に位置する5つの住宅ノード(a, b, c, d, e)をもつ図-3のネットワークを対象とした。ここでは、自動車の自由移動時間 $t_{ij}^0 = 3$ 分、歩行避難者の自由移動時間 $\hat{t}_{ij}^0 = 12$ 分、自動車交通容量 $c_{ij} = 30$ 台、歩行避難者交通容量 $\hat{c}_{ij} = 30$ 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、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200人とし、各住宅ノードには40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10人存在し、残り30人のうち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、自動車での避難する避難者の避難完了時間を図-4、歩行避難者の避難完了時間を図-5、避難者全員の避難完了時間を図-6に示す。

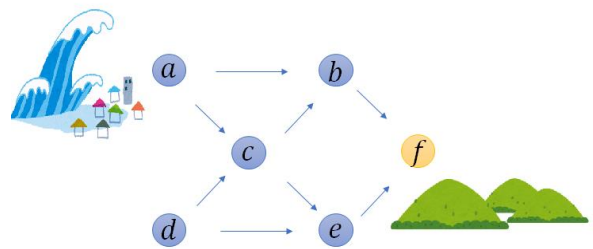


図-3 テストネットワーク

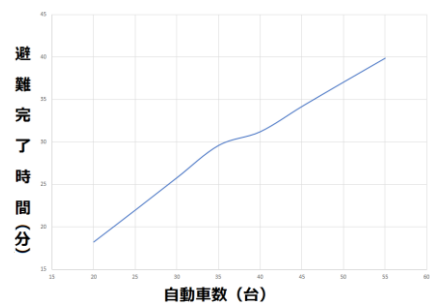


図-4 自動車での避難完了時間

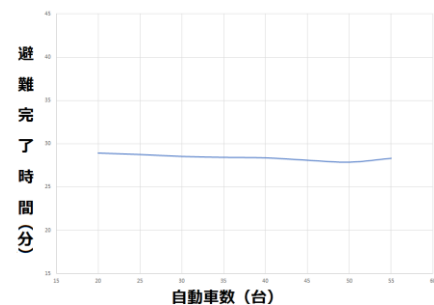


図-5 歩行避難者の避難完了時間

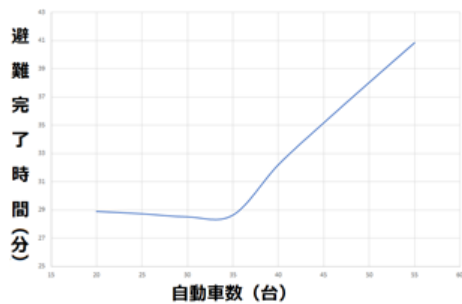


図-6 避難者全員の避難完了時間

図-4より、自動車数の増加に伴い、自動車での避難完了時間は増加傾向にある。また、図-5より、歩行避難者の避難完了時間と自動車数の増加は関係が薄いことが読み取れる。図-6より、自動車数が少ない(歩行避難者の数が多い)ときは、自動車数の増加(歩行避難者数の減少)にともない、避難者の避難完了時間は減少している。しかし、ある自動車数を越えると、自動車数の増加(歩行避難者数の減少)にともない、避難者の避難完了時間は増加した。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。

6. 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。

本研究では、Davidson関数を線形近似して移動時間を表現したが、待ち行列やKinematic Wave理論等を適用し

て表現することにより、より現実的な渋滞状況が表現されると考えられる。これは今後の課題としたい。

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP 17H03318の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Yasuo Asakura, Ryo Itabashi, Optimum Model for Evacuation Traffic with ride sharing, 7th International Conference on Transport Network Reliability
- 2) 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)
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Satomi Aiko, Ryo Itabashi, Toru Seo, Takahiko Kusakabe, Yasuo Asakura, Social benefit of optimal ride-share transport with given travelers' activity patterns, Transportation Research Procedia 27 (2017) 261-269
- 6) 奥村誠, 片岡侑美子, 金進英, 津波遭遇リスクを最小化する自動車避難最適化モデル
- 7) Femke van Wageningen-Kessels, Yufei Yuan, Serge P. Hoogendoorn, Hans van Lint, Kees Vуйk, Discontinuities in the Lagrangian formulation of the kinematic wave model, Transportation Research Part C 34 (2013) 148-161
- 8) Aharon Ben-Tal, Byung Do Chung, Supreet Reddy Mandala, Tao Yao, Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains, Transportation Research Part B 45 (2011) 1177-1189
- 9) Xin Zhang, Gang-len Chang, A dynamic evacuation model for pedestrian-vehicle mixed-flow networks, Transportation Research Part C 40 (2014) 75-92
- 10) 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.

(2019.?? 受付)

TSUNAMI EVACUATION MODEL OF RIDE SHARE CONSIDERING PEDESTRIAN

Tomoya NAKAUCHI, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

After the Great East Earthquake, vehicle evacuation was allowed. Vehicle evacuation can contribute to reducing evacuation time. However, vehicle evacuation causes an increase in traffic volume and congestion. In addition, the evacuation behavior of evacuated vulnerable people such as elderly people is also a problem. Then, ride share evacuation is recommended for solving these problems. Picking up others helps evacuated vulnerable people and contributes to a reduction in the number of vehicles.

In this paper, we propose a more generalized model for the VRP (Vehicle Routing Problem) model proposed by Asakura et al¹⁾ by considering the influence of congestion and a new mode of walk. And, we show calculation example by using test network. As a result, excessive vehicle use bring about increase of evacuation time.