

渋滞の影響を考慮したライドシェア避難モデルに関する研究

The Research of Optimum Model for Evacuation Traffic with Ride Sharing Considering the Effect of Traffic Jam

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 山本翔大 (Shota Yamamoto)
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

東日本大震災の被災状況を受け、内閣府¹⁾は2012年3月に、「交通の教則」において、やむを得ない場合における自動車による避難を許容することとした。自動車による避難は、避難時間を大幅に短縮することが期待される。しかしその一方で、交通量の増加や混雑の発生により、逆に避難完了時間を遅くしてしまうことが懸念されている。そういった懸念への対策のひとつとして、ライドシェア避難がある。

ライドシェアとは、一般のドライバーが、目的地が同じ者を自動車に同乗させて移動する交通手段である。米国等では普及しつつあり、最近では日本でも導入に向けた議論が行われている²⁾。これを災害時における避難に応用するものがライドシェア避難であり、既にいくつかの研究が行われている。

浦田ら³⁾は、送迎による避難支援を行う際の最適動的制御方法を提案した。板橋ら⁴⁾は、Vehicle Routing Problem (VRP) モデルを用いて、ライドシェア避難の最適化モデルを構築した。朝倉ら⁵⁾は、このVRPモデルに、道路や避難場所の容量制約を導入したモデルを提案している。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、その自動車の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。中内ら⁶⁾は、朝倉らのモデルに歩行避難者の要因を考慮するとともに、Davidson関数を用いて混雑の影響を反映させたモデルを提案している。

他にも避難行動モデルを扱う研究は多く存在している。倉内⁷⁾は、時間軸を考慮した最適避難計画モデルを提案した。時間軸を扱った動的な交通流モデルとして、Daganzo⁸⁾が提案しているCell-Transmission Model (CTM)がある。CTMとは、リンクを単位時間で通過できるセルに分割し、各時刻においてどのセルに何台の自動車が存在するかを明示的に表したモデルであり、渋滞を数値計算上で表現することが可能である。奥村ら⁹⁾は、CTMから考案されたCell-based M-Nモデル¹⁰⁾を用いて津波遭遇リスクを最小化するモデルを提案している。この研究の拡張も行われ、竹居ら¹¹⁾は歩車混在の影響を考慮した最適避難モデルを提案している。

中内ら⁶⁾は、混雑の影響を、Davidson関数を線形近似することで表現した。しかし、渋滞が考慮されていないため、リンクの容量にひっ迫する交通量が発生した際には、リンク移動時間が大きく増加するという表現になっている。そこで本研究では、渋滞の影響を考慮することができるCTMを用いて新たなライドシェア避難モデル

を提案する。

本研究における渋滞とは、車両の待ちを考慮した混雑のことを指す。車両の待ちが考慮されていると、容量を超えた場合もひとつ前のセルあるいはリンクで待ってから通行するといった表現が可能となる。

2. 計算手法

本モデルの計算手法を以下に示す。

自由走行時のリンクの所要時間から、移動時間が最小となる交通量を各リンクに割り振る。そこからリンクごとにCTMを適用し、渋滞の影響を考慮した所要時間を求める。続いて、CTMより求められた所要時間から、Fisk¹²⁾により提案された逐次平均法(MSA: Method of Successive Averages)を用いて繰り返し計算をすることでリンク交通量を求める。

CTMのモデル特性上、ひとつのリンク交通量に対して通行する時間帯の違いから複数の通行パターンが存在する。例えば、容量が2台であるセルを一つ含み、残りのセルの容量は4台であるリンクを想定する。このリンクに4台の車両が通行する。4台の交通は2回(2単位時間)に分かれて発生し得るものと仮定する。1回目に0台、2回目に4台の交通が発生する場合と、1回目に2台、2回目に2台の交通が発生する場合とでは、前者は渋滞が発生するため、それぞれの場合における所要時間は異なる。このように、各通行パターンによって各車両の移動時間は異なりうる。

このような交通のパターン全てを考慮して、その中から総避難時間および避難完了時間が最小となる所要時間を採用するものとする。ただし、総避難時間とは、各車両の所要時間の和で表されるものとする。

3. モデルの仮定

- ・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(非ドライバー)のいずれかに分類される。
- ・自動車には乗車定員があり、避難場所にも容量制約がある。
- ・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。
- ・非ドライバーは、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、各住宅ノードで決められた車両数だけ同時に避難行動を開始する。容量を超えている場合は単位時間経過後に出発するものとする。

- ・道路ネットワークはノードとリンクから構成される。
各リンクは、車両が単位時間で通過できる長さのセルに分割される。
- ・交通の流れは、セルごとの流出を表す関数を用いて、各時刻でのセルにおける車両数を求めることによって表現される。
- ・各リンクにおけるセルの数は、そのリンクにおける車両の自由走行時間を、単位時間で除した数に等しい。
- ・各セルには、それぞれ容量が与えられている。
- ・1 人の非ドライバーが自動車に乗り込むのにかかる時間を τ とする。ドライバーが自動車に乗り込む時間は考慮しない。

4. 定式化

入力変数の定義は以下の通りである。

S	避難場所ノードの集合
D	住宅ノードの集合
V	ドライバーの集合
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
F_{ij}	リンク ij におけるセルの集合
n	$D \cup S$ となるノード数
τ	避難者 1 人が乗車するのに要する時間
p_i	ノード i のドライバーと非ドライバーの総数
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 を移動するときに 1、そうでないときに 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。通過しないときは 0 をとる。
w_i^k	ノード i から自動車 k に乗車する避難者の数
t_{ij}	リンク ij における自動車による移動時間
m	すべての避難者の避難完了時間
$y_{f_{ij}}(t)$	時刻 t においてセル f_{ij} に流出する車両数
$n_{f_{ij}}(t)$	時刻 t においてセル f_{ij} に存在する車両数
$N_{f_{ij}}(t)$	セル f_{ij} に存在できる車両数の最大値
$q_{f_{ij}}$	セル f_{ij} に移動する車両数の最大値
δ	後進波速度と自由走行速度の比

朝倉⁹⁾らのモデルを参考に、以下に示す混合整数線形計画問題として、ライドシェア避難モデルを定式化した。

$$\min \left(\sum_{k \in V} \sum_{ij \in L} t_{ij} x_{ij}^k \right) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i \in D} x_{ij}^k = \sum_{l \in D \cup S} x_{il}^k \quad \forall j (\neq O_k) \in D, \forall k \in V \quad (2)$$

$$w_i^k \leq l_k \sum_{j \in D \cup S} x_{ij}^k \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{k \in V} w_i^k = p_i \quad \forall i \in D \quad (4)$$

$$\sum_{i \in D} w_i^k \leq l_k \quad \forall k \in V \quad (5)$$

$$w_{O_k}^k \geq 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in D} x_{ij}^k \leq a_j \quad \forall j \in S \quad (7)$$

$$x_{ij}^k = \{0, 1\} \quad \forall ij \in L, \forall k \in V \quad (8)$$

$$w_i^k \geq 0 \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (9)$$

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

$$u_{O_k}^k = 1 \quad \forall k \in V \quad (11)$$

$$n \sum_{j \in D \cup S} x_{ij}^k \geq u_i^k \quad \forall i \in D, \forall k \in V \quad (12)$$

$$n \sum_{i \in D} x_{ij}^k \geq u_j^k \quad \forall j \in S, \forall k \in V \quad (13)$$

$$0 \leq u_i^k \leq \sum_{j \in L} x_{ji}^k + 1 \quad \forall i \in D \cup S, \forall k \in V \quad (14)$$

$$\sum_{ij \in L} t_{ij} x_{ij}^k + \tau \sum_{i \in D} w_i^k \leq m \quad \forall k \in V \quad (15)$$

Daganzo⁷⁾のモデルを参考に、CTM を以下のように定式化した。

$$y_{f_{ij}}(t) = \{\min\{n_{f_{ij}-1}(t), q_{f_{ij}}, \delta(N_{f_{ij}}(t) - n_{f_{ij}}(t))\}, \quad (16)$$

$$\text{for } 0 \leq n_{f_{ij}}(t) \leq N_{f_{ij}}(t), \quad 0 \leq t \leq m \\ \forall ij \in L, \forall f_{ij} \in F_{ij}$$

$$n_{f_{ij}}(t+1) = n_{f_{ij}}(t) + y_{f_{ij}}(t) - y_{f_{ij}+1}(t) \quad (17) \\ \forall ij \in L, \forall f_{ij} \in F_{ij}, \quad 0 \leq t \leq m$$

5. 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結果を示す。本研究では、MATLAB を用いて数値解を求めた。

図 1 に示すネットワークにおいて、ライドシェア避難による混雑の減少効果を議論する。ネットワークの内訳は、1 つの住宅ノードと 1 つの避難場所ノード、そしてそれぞれのノード間を繋ぐ 2 本のリンクである。ここでは、リンク 1 の自由走行時間は 4 分、リンク 2 の自由走行時間は 3 分、住宅ノードからは 12 人が避難するという条件を与えた。また、1 単位時間あたり最大で 4 人までが自動車で避難を開始し、ライドシェアに参加する非ドライバーは、住宅ノードでピックアップされるのを待ってから避難を開始するものとする。各セルの容量は図 1 中に示す通りである。後進波速度と自由走行速度の比 δ は 0.6 とする。後進波速度とは、下流側から上流側に渋滞が伝わる際の速度のことを指す。

図 2 に目的関数の値、避難完了時間 m と避難に用いられる車両数との関係を示す。

図 2 より、自動車の台数が多い、すなわち非ドライバ

一の数が少ない内はライドシェアに参加する人数が増えるほど総避難時間は減少することがわかる。しかし、非ドライバーの数が増えるにつれて、総避難時間が減少し続けるのではなく、ある値あるいはある領域で最小値をとり、そこから増加傾向に転じることがわかる。

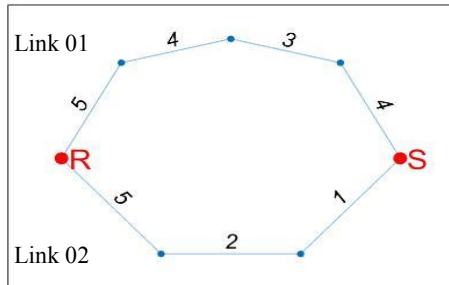


図1 テストネットワーク

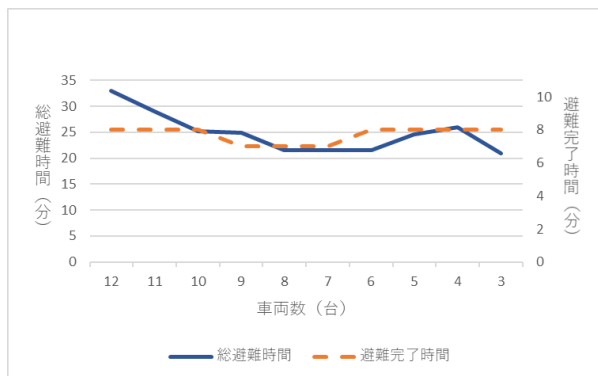


図2 出力結果

6. 考察

上記の計算例より、ライドシェアを行う場合(車両数11台以下の場合)の総避難時間の値は、いずれの台数においても、ライドシェアを全く行わない場合(車両数12台の場合)の値以下であることがわかる。そしてそれは避難完了時間についても同様なことが指摘できる。したがって、避難にライドシェアを取り入れることにより、総避難時間及び避難完了時間が減少するという関係を実現することができた。

また、ドライバーと非ドライバーの割合を変化させたとき、総避難時間及び避難完了時間が変化する傾向を分析することができた。その増減は、車両数が減少することによって減る遅れ時間と、人をピックアップすることによって要する時間のどちらが大きいかにによって決まるものと考えられる。

7. おわりに

本研究では、渋滞の影響を考慮したライドシェア避難モデルを構築した。ドライバーとピックアップしてもらう非ドライバーの割合を変化させて、結果の比較を行った。テストネットワークにおいて、ライドシェア避難が避難時間を減少させることの有用性と、非ドライバーの

人数を変化させたときに、総避難時間及び避難完了時間が変化する傾向を知ることができた。

また、本モデルは単位時間ごとの各セルにおける車両数を把握することができる。そのため、混雑の経時変化を予測できる点、リンク通過時刻に対する制約の付与が可能である点においてもそれぞれ有用であると言える。例えば、一つの避難場所ノードが二つのリンクにつながっているとき、片方は半永久的に使えるリンクであり、もう片方は一定時間が経過した後、浸水によって通行できなくなる、といった条件づけができる。

通常、CTMは整数値を扱うため、容量が異なる別のモード、例えば歩行避難者等の影響を考慮することが難しい。異なるモードが併存するときの渋滞を考慮できるようにすることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 警察庁: 交通の方法に関する教則
<https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm>
(2019.11.10 閲覧)
- 2) 国土交通政策研究所報第65号 2017年夏季、
<http://www.mlit.go.jp/pri/kikanshi/pdf/2017/65-1.pdf>
(2019.11.19 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、pp. 1-10, 2017
- 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) Yasuo Asakura, Ryo Itabashi, Optimum Model for Evacuation Traffic with ride sharing, 7th International Conference on Transport Network Reliability
- 6) 中内智也、峪龍一、内田賢悦、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、第60回土木計画学研究発表会、2019
- 7) 倉内文孝、STEN (Space-Time Extended Network) を用いた最適避難計画モデルの構築、土木計画学研究・講演集、Vol.50、CD-ROM、2014
- 8) Daganzo C. F., The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic, Transportation Research Part B. vol.29B, No.2, pp.79-93, 1995
- 9) 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、土木学会論文集 D3 (土木計画学)、Vol.73, No.5, 2017
- 10) Yu (Marco) Nie, A cell-based Merchant-Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, Transportation Research Part B, 329-342, 2011
- 11) 竹居広樹、奥村誠、歩車混在避難における津波遭遇リスクと交通事故リスク、交通工学論文集、第4巻、第1号 (特集号 A)、2018
- 12) C. Fisk, Some developments in equilibrium traffic assignment methodology, Transportation Research B Vol. 14, pp. 243-256, 1980