

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

板橋 遼¹・朝倉 康夫²

¹学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail: r.itabashi@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

やむを得ない場合での車による津波避難が認められたことで、車避難が防災計画にも取り入れられ、今後の津波災害時にはより多くの人が車避難を行う可能性がある。しかし多くの人が一斉に車で避難すると、渋滞が発生し多くの車が逃げ遅れてしまう恐れがある。そこで本研究では、ライドシェアをすることで限られた台数の車によって行う避難を提案し、ライドシェア避難の最適な経路決定を行うモデルを線形整数最適化問題として定式化した。このモデルは渋滞による遅延を直接的に組み込んだものではないが、その解から遅延の検証や計算を行うために有用となる結果を出力できる。また、本論文では仮定のネットワークへの適用例を示した。

Key Words : *evacuation, ride sharing, tsunami, integer linear programming*

1. はじめに

2012年3月より、津波発生時やむを得ない場合に車で避難することが認められた¹⁾。それ以前より、2003年の十勝沖地震や2011年の東日本大震災でも実際には多くの人が避難に車を用いていたことが分かっている。その理由としては、「車で避難しないと間に合わないと思ったから」「安全な場所まで遠くて、車でないと行けないと思ったから」と回答する人が多くを占めている²⁾。この改正を契機にさらに多くの人が車で津波避難を行うことが見込まれ、また自治体等の避難計画策定においても、ある程度車の利用を前提にするものと想像される。

そこで、本研究では、多くの住民が安全な場所まで車で一斉に津波避難を行う状況を想定する。この時、皆が一斉に避難場所に向かうと、短時間に多くの交通が集中するため、特に容量の小さい道路では混雑・渋滞が発生し、所要時間が大きく増加してしまうリスクがある。東日本大震災の際にも、沿岸地域で津波避難者による交通渋滞が発生しており³⁾、短時間で広範囲に渋滞が拡大していったことがデータ分析により明らかにされている⁴⁾。ハード面での大規模な整備を待たずにこの問題を回避するには、車の台数を減らすことが必要となる。そのための施策として本研究では、ライドシェア(乗り合い)を行い、限られた台数の車に分乗して避難する状況を考える。すなわち、一部の人(ドライバー)のみが車を運転し、その他の人(非ドライバー)はい

ずれかの車にピックアップしてもらって、最終的には全員が安全な場所に避難するのである。ドライバーは避難場所に直接向かうのではなく、時に遠回りをしてピックアップを行いながら避難することになる。これによりそれぞれの車は、遠回りによる走行距離増加やピックアップを行うことに伴い余分に時間がかかる。しかし台数が減ることで混雑が緩和し、旅行時間の減少が見込まれる。ライドシェア避難の効果を検証するためには、このトレードオフに関する分析が必要となる。本研究では、ライドシェア津波避難の計画や効果分析を行うツールとして、ドライバーと非ドライバーの配置を与件とし、最適な避難経路を求めるモデルを提案する。

車を用いた津波避難の最適な経路などを求める最適モデルの研究は、これまでも数多く行われている。片岡ら⁵⁾はCell-basedモデルをベースとして、避難者の津波遭遇リスクの最小化を目的関数とする最適交通配分モデルを構築した。横山ら⁶⁾は、車だけでなく徒歩による避難を考慮した最適化モデルを定式化した。大石ら⁷⁾は避難計画作成のベンチマークとなる避難シナリオの提供のための、規範的な避難行動モデルを構築した。このモデルは家族を迎えに行ってから避難する場合のように、Trip Chainが所与であるピックアップ行動を考慮することが可能となっている。また、津波に限らない避難の研究においては、Murray-Tuite and Mahmassani⁸⁾がピックアップ行動を伴う自動車避難のモデル化を行っている。不特定の相手ではなく家族を迎えに行く行

動を対象として、誰が誰を迎えに行くかを決定し Trip Chain を生成するステップがモデルに含まれている。しかし、家族や身内だけでなく不特定の人たちによるライドシェアを想定し、誰が誰をピックアップするののかということも併せて求める避難最適化モデルの研究はほとんど行われていない。

既往の避難最適化モデルの研究では、リンクに流入・流出する交通量を決定変数としているものが多い。この定式化の利点は、人口・避難者の数が多くなっても比較的計算が容易であることや、旅行時間を交通量の関数として表すことで混雑による遅延を表現しやすいたことが挙げられる。後者については、単位時間当たりの交通量に上限を設けることで遅延を表すモデル⁵⁾⁶⁾⁷⁾や、与件の Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) を用いて平均速度を総交通量の関数として表すモデル⁹⁾などが研究されている。しかし、リンク交通量を決定変数とするモデルは、車ごとに変数が定義されていないため、車 1 台 1 台の動きを詳細に表現するものではない。そのため本研究のように、それぞれの車が誰をピックアップするかを求めるには不向きだと言える。

一方、ライドシェアに関連する研究分野としては Dial-a-Ride Problem (DARP) がある。DARP は輸送経路問題 (VRP, Vehicle Routing Problem) を発展させたもので、複数の人の移動の要望に対して車の割り当てや経路を決定する問題である。DARP についてもこれまでに多くの研究がなされており、Cordeau and Laporte¹⁰⁾ が詳細にまとめているが、高齢者等の日常的な移動手段となるオンデマンド交通を対象とした研究が多く、ライドシェア避難を対象としたものはほとんど存在しない。

VRP や DARP の定式化では決定変数が車ごとに定義されており、1 台 1 台の車の動きを明確に表現できる。この特徴は、ライドシェア避難における各車の経路を求める本研究のモデルに適したものである。本研究ではこの手法を採用し、決定変数を車ごとに定義した整数線形最適化問題として定式化を行う。しかし一方で、この VRP 型の定式化は混雑による遅れ、例えばリンク旅行時間を交通量の関数として表すのが困難である。本研究の最適化モデルでも、ほとんどの既往の VRP の研究と同様に、リンク旅行時間は交通量等に関わらず常に一定であるとする。

本研究の目的は、ライドシェアを活用した最適な津波避難経路を求めるモデルの構築と、モデルを仮想のネットワークに適用して数値計算を行うことである。

本論文の構成は次の通りである。第 1 章では研究の背景と目的を述べた。第 2 章ではモデルを構築する上で前提とする状況の設定や仮定を述べる。第 3 章ではモデルについて詳細に説明する。第 4 章ではモデルを小規模仮想ネットワークに適用して計算し、得られる

結果などの例を示す。最後に第 5 章で結論と今後の展望について述べる。

本研究のモデルから出力される解は、混雑による遅延を無視したものである。しかし、解からは各リンク・ノードの時刻別通過台数などを求めることが可能であるため、その避難を行った際にどの程度の遅延が発生するかなどの分析を行うことが可能だと考えられる。

本モデルは、住民全員が最適な経路に従いピックアップを行って避難することを前提とした規範的なモデルである。現実には、そのような理想的な避難を行うのは困難である。時間帯によって人口の分布なども変化するため、真に最適な避難経路は時々刻々変化する。しかし、災害が発生する前に、ある程度適切であろう避難方法を把握しておくことには意義がある。避難計画作成においては、車の容量やエリアごとのドライバー・非ドライバーの比率は政策シナリオと位置づけることもできる。これらの様々なパターンをインプットとして本モデルに適用することで、よりよい施策の検討に活用できると考えられる。特定の地域におけるライドシェア避難の有効性や、避難に用いる車の比率・配置などを議論するにあたって、有用なツールとなることが期待される。それに基づいて避難シナリオを作成し、住民に周知・要請し避難訓練等を繰り返し行うことで、いざという時により合理的な避難をすることが可能になると考えられる。

2. 仮定

本研究では、沿岸部の道路ネットワーク上に分布している人全員が津波警報等を受けて同時に避難行動を開始し、ライドシェアを行いながら避難場所まで移動する状況を考える。避難場所は複数存在していてもよく、全員がいずれか任意の避難場所に行くものとする。

それぞれの人はドライバーとして車を運転する人と、非ドライバーとして誰かにピックアップしてもらい避難する人に分類される。車を所有していても、避難時に自分の車を使わない人は非ドライバーとして扱う。ここで、各個人の避難への協力姿勢や所有する車の種類などによって、他者をピックアップせず直接避難するドライバーもいると考えられる。本研究では、ライドシェアに協力しピックアップを行うドライバーと、そうでないドライバー双方の存在を仮定する。

同様に、車の容量、すなわち最大乗車可能人数も一律とは限らないと考えるのが自然である。そのため、ライドシェアを行う車についても、車によってピックアップできる最大人数は異なるものとする。

3. モデル定式化

本章では、ライドシェアを行いながら避難場所へと向かう車の避難行動を記述する最適化モデルを定式化する。人や避難場所の配置および、それぞれの人が車を運転するか否か、また何人をピックアップする意思があるか、といった個人属性を与件として、全員の避難経路を出力するモデルである。

(1) 問題設定

最適化モデルの定式化を行う上で前提とする問題設定や仮定を整理する。

- ネットワークのいくつかのノード上に避難場所が存在する。配置は与件とする。
- その他のノードには車を運転する人・しない人が分布している。ノード毎のそれぞれの人口（0 以上）は与件とする。
- 車を運転する人は必ず自分の車を使う。
- 車を運転しない人は、そのノードを経由するいずれかの車にピックアップされる。
- 車を運転する人は時刻 0 で一斉に避難行動を開始し、各車が分担して運転しない人を全員ピックアップしいずれかの避難場所に向かう。
- 各車は同じノードを 2 回以上通らない。
- 全員が避難場所に到達したら避難完了とする。
- 一度避難場所に入った車はその後避難場所から出ることは無い。
- 車の容量（1 以上）は車ごとに与件とする。容量が 1 の場合、誰もピックアップせずに避難することを意味する。
- 各リンクの旅行時間はそれぞれ一定で与件とする。
- 旅行時間に加えて、運転手も含め 1 人乗車するごとに時間 τ が余計にかかるとする。
- 避難完了までの時間を最小化し、複数の解がある場合にはその中で避難時間の総和が最小となる解を最適解とする。

(2) 入力変数と出力変数

定式化において用いる記号の定義を示す。

モデルのインプットとして与えるパラメータは以下の通りである。

- S : 避難場所ノード集合
- N : 避難場所以外のノード集合
- V : 車（を運転する人）の集合
- L : リンク集合
- m : $N \cup S$ の要素数
- c_{ij} : リンク $ij \in L$ の旅行時間
- τ : 1 人の乗車に要する時間

- p_i : ノード $i \in N$ の人口
- l_k : 車 $k \in V$ の容量
- o_k : 車 $k \in V$ の起点ノード

モデルで用いる決定変数は以下の通りである。

- x_{ij}^k : 車 $k \in V$ がリンク $ij \in L$ を移動する時 1, そうでない時 0
- u_i^k : 車 $k \in V$ がノード $i \in N \cup S$ を通過する順序 通過しない時は 0
- w_i^k : ノード $i \in N$ から車 $k \in V$ に乗る人数
- Z : 全員の避難が終了する時刻

u_i^k は、sub-tour の発生、すなわち車 1 台の経路が複数の巡回路に分割されることを防ぐために導入される。車 k の起点ノード o_k に対して $u_{o_k}^k = 1$ とし、ノード i の次にノード j を訪れる時 $u_j^k = u_i^k + 1$ であるとする。また、通過しないノード h に対しては $u_h^k = 0$ とする。

最適化問題を解いて求めた解より、それぞれの車の経路や、非ドライバーがどの車に乗って避難するかといった、各人の避難の動きが得られる。また、それぞれの車の経路が定まれば、その車が各ノード・リンクを通過する時刻や、逆に各ノード・リンクを通過する時刻ごとの台数を求めることができる。

(3) 定式化

本モデルは、以下のような整数線形最適化問題として定式化される。

$$\text{minimize } Z + \beta \sum_{k \in V} \sum_{ij \in L} c_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{ij \in L} c_{ij} x_{ij}^k + \tau \sum_{i \in N} w_i^k \leq Z \quad \forall k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k = \sum_{l \in N \cup S} x_{jl}^k \quad \forall j \in N \ (j \neq o_k) \quad \forall k \in V \quad (3)$$

$$w_i^k \leq p_i \sum_{j \in N \cup S} x_{ij}^k \quad \forall i \in N \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{k \in V} w_i^k = p_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} w_i^k \leq l_k \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$w_{o_k}^k \geq 1 \quad \forall k \in V \quad (7)$$

$$u_i^k + 1 - m(1 - x_{ij}^k) \leq u_j^k \quad \forall i \in N \quad \forall j \in N \cup S \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$u_{o_k}^k = 1 \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$m \sum_{j \in N \cup S} x_{ij}^k \geq u_i^k \quad \forall i \in N \quad \forall k \in V \quad (10)$$

$$m \sum_{i \in N} x_{ij}^k \geq u_j^k \quad \forall j \in S \quad \forall k \in V \quad (11)$$

$$0 \leq u_i^k \leq \sum_{j \in L} x_{ji}^k + 1 \quad \forall i \in N \cup S \quad \forall k \in V \quad (12)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad \forall j \in N \cup S \quad \forall k \in V \quad (13)$$

目的関数の式(1)は2つの項から成っており、第1項は全車が避難場所に至るまでの時間、すなわち避難完了時間を表す。第2項は全車の走行時間の総和である。いずれの項も、混雑の影響を無視した場合の時間を示す。第1項が明確に優先されるようにするため、第2項には $0 < \beta \ll 1$ を満たす係数 β を乗じる。

式(2)は、避難完了時間を表す決定変数 Z を定義している。式(3)は、各ノードにおける車の保存則を表す。式(4)は、各ノードの人はそのノードを通る車にのみ乗れることを表す。式(5)は、各ノードにおいて全ての人がいずれかの車に乗ることを表す。式(6)は、各車の容量制約を表す。式(7)は、各車に最低1人(運転手)はその起点から乗ることを表す。式(8)~(12)は sub-tour 除去のための条件であり、決定変数 u_i^k を定義している。式(13)は、決定変数 x_{ij}^k が 0-1 変数であることを表す。

4. 計算例

ここでは簡易なネットワークを用いてモデルの計算プロセスの例を示す。本研究では数理最適化ソルバー Gurobi Optimizer¹¹⁾ を用いて厳密解の求解を行った。

(1) 条件設定

図-1の4つの避難場所ノードと12個の居住地ノードを持つ4×4ネットワークに適用する。黄色のノードが避難場所、水色のノードが居住地ノードを示す。リンク上の数字は旅行時間、ノード上の数字は通し番号である。

1人当たりの乗車にかかる時間は $\tau = 1$ とする。各居住地ノードの総人口(ドライバー・非ドライバーの合計)を表-1に示す。車の容量は1と4の2種類の存在を仮定する。容量1は誰もピックアップせず運転手だけで逃げる車、容量4は運転手以外に3人を乗せて逃げる車を意味する。ノードごとの非ドライバー・容量1の車を持つドライバー・容量4の車を持つドライバーの比率をインプットとして与える。例えばあるノードの人口が30、非ドライバーの割合が0.6であれば、そのノードに非ドライバーが18人いることになる。

ここでは、各ノード人口は表-1の1パターンとし、ドライバー・非ドライバーの比率を変えた2つのケースについて計算する。ケース1はライドシェアが比較的多く発生し、ケース2はライドシェアが少ない比率の設定とする。ケース1・ケース2それぞれの比率の設

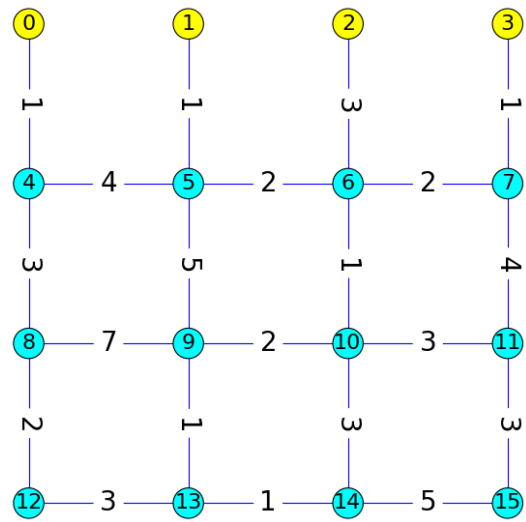


図-1 適用するネットワーク

表-1 各ノードの人口

ノード	人口	ノード	人口
4	20	10	30
5	40	11	70
6	20	12	50
7	40	13	100
8	30	14	50
9	70	15	100

表-2 ケース1: ノード毎の比率設定

ノード	非ドライバー割合	ドライバー割合	
		車容量1	車容量4
4-11	0.6	0.2	0.2
12-15	0.4	0.3	0.3

表-3 ケース2: ノード毎の比率設定

ノード	非ドライバー割合	ドライバー割合	
		車容量1	車容量4
4-11	0.2	0.6	0.2
12-15	0.1	0.6	0.3

定を表-2・表-3に示す。

(2) 計算結果

各ケースの計算結果として、最適解の避難完了時間を表-4に示す。

本モデルでは全ての車の経路や、どのノードで何人ピックアップするかといった情報が解として出力され

表-4 各ケースの避難完了時間

避難完了時間	
ケース 1	12
ケース 2	11

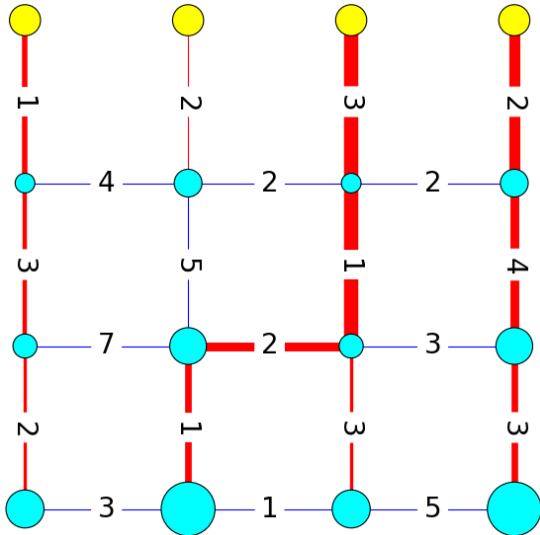


図-2 ケース 1：計算結果

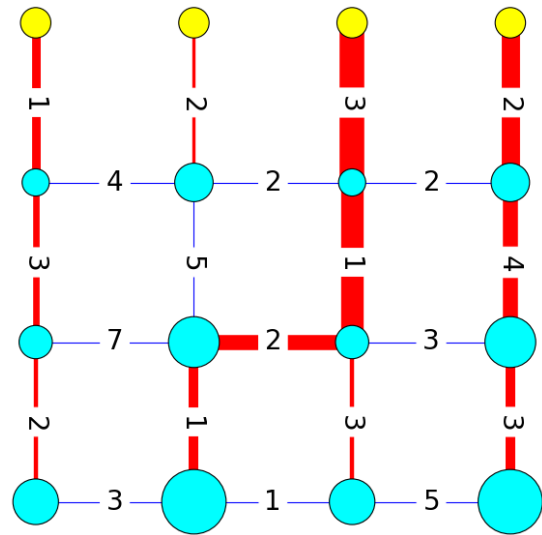


図-3 ケース 2：計算結果

る。紙面の都合上全てを示すことはできないため、最適解における各車の経路をネットワーク上に表示したものを図-2・図-3に示す。居住地ノードの直径は、そのノードから出発する車の台数に比例している。これはインプットのみに依存するものである。赤いリンクは車が通るリンクを示しており、太さは通過台数に比例している。青いリンクは車が通らないリンクを示す。

避難完了時間は、ライドシェアをあまり行わないケース 2 のほうが短くなっている。本モデルは混雑による遅延を考慮していないため、できるだけピックアップを行わず個人で逃げたほうが避難が早くなるためである。どちらのケースも避難に用いられるリンクは同じだが、ケース 1 ではライドシェアが多く行われる分、ケース 2 より各リンクを通過する台数が少なくなっていることが図-2・図-3 から確認できる。

本モデルの解ではケース 2 のほうが早く避難が完了するという結果になったが、実際には道路容量によっては混雑が発生し、ケース 2 のほうが却って避難に時間がかかる可能性も考えられる。そのような分析のため、本モデルの解から各リンク・ノードの時刻別通過台数を導出することも可能である。例として、ケース 1・2 それぞれにおけるリンク 6-2 の時刻別通過台数を図-4・図-5 に示す。

両グラフから、共にピークとなる時刻 5 には、ケース 2 ではケース 1 の 1.5 倍以上の車が通過しているこ

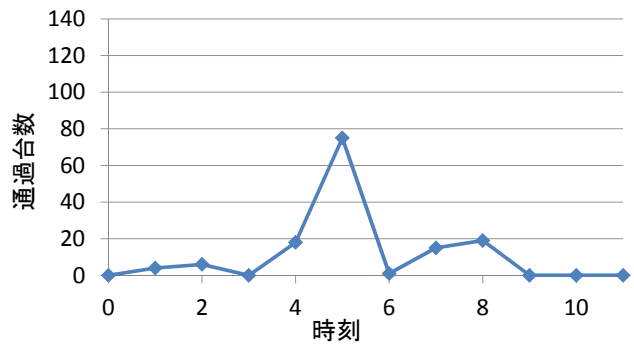


図-4 ケース 1：リンク 6-2 時刻別通過台数

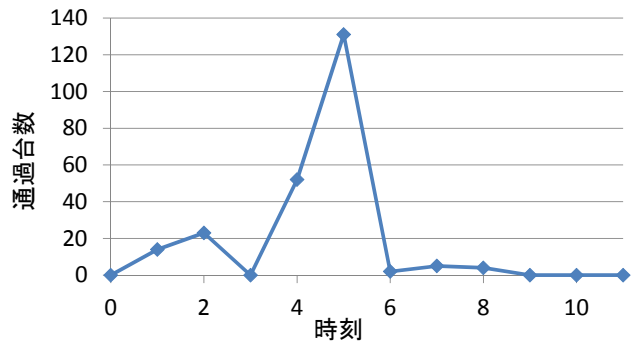


図-5 ケース 2：リンク 6-2 時刻別通過台数

とが分かる。実際のリンク容量などのデータがあれば、これらのグラフのような情報からどこでどの程度の混雑や遅延が発生するか予測でき、実際の避難完了時間などを推測することが可能になると考えられる。

5. おわりに

本研究では、津波避難においてライドシェアを行う状況を仮定し、それぞれの車の最適経路とその際の避

難完了時間を求めるモデルを提案した。ライドシェアする車 1 台 1 台の動きを詳細に表現するため、決定変数を車ごとに定義した整数線形最適化問題として定式化した。また、構築したモデルを仮想ネットワークに適用して計算を行い、得られる結果などの例を示した。

車両が特定のリンクやノードに集中して混雑を発生させることがないような最適経路問題を考える上では、リンクの容量制約を付けることが有効である場合もある。ネットワークを時空間（3次元）表示すると、容量制約を明示的に考慮したモデルを定式化することができる。このモデルの定式化そのものは容易であるが、厳密解を求めることのできる空間スケールは限られている。そこで本研究では敢えてリンク容量制約のない静的なネットワークで最適経路問題を解き、その解を用いてリンク通過台数の分布を求め、生じるであろうリンクでの遅れを検討することにした。

今後の課題としては、より大規模なネットワークや現実の道路ネットワークにモデルを適用し、解の分析やモデルの有用性の検討などを行う必要がある。また、本モデルは混雑を無視して経路を求めている。混雑による待ち時間も含めた避難完了時間を最小化するモデルがより理想的であり、今後研究を進めていくべきものである。本モデルではドライバー・非ドライバーの比率は与件としたが、この比率を決定変数として、最適な比率を決定するモデルも今後検討されるべきものである。

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/kikaku20120313/gaiyou.pdf> (2016.7.16 閲覧), 2012.
- 2) 内閣府: 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ 第 5 回会合資料 3, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/5/pdf/3.pdf> (2016.7.16 閲覧), 2012.
- 3) 朝日新聞: 「避難渋滞、津波被害を拡大 促しても車降りる人少数」(2011.4.1), <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201104010283.html> (2016.7.16 閲覧).
- 4) Hara, Y. and Kuwahara, M.: Traffic monitoring immediately after a major natural disaster as revealed by probe data – a case in Ishinomaki after the Great East Japan Earthquake, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 75, pp. 1–15, 2015.
- 5) 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, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 53, 2016.
- 6) 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画モデル, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 53, 2016.
- 7) 大石雪絵, 桑原雅夫, 大畑長: 規範的避難オペレーションに基づく避難インフラの限界能力評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 53, 2016.
- 8) Murray-Tuite, P. and Mahmassani, H.: Model of household trip-chain sequencing in emergency evacuation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1831, pp. 21–29, 2003.
- 9) Zhang, Z., Parr, S. A., Jiang, H., and Wolshon, B.: Optimization model for regional evacuation transportation system using macroscopic productivity function, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 81, pp. 616–630, 2015.
- 10) Cordeau, J.-F. and Laporte, G.: The dial-a-ride problem: models and algorithms, *Annals of Operations Research*, Vol. 153, No. 1, pp. 29–46, 2007.
- 11) Gurobi Optimization, Inc.: Gurobi Optimizer Reference Manual, <http://www.gurobi.com>, 2015.

(???? ? ? 受付)

OPTIMUM VEHICLE ROUTING AND ALLOCATION MODEL FOR TSUNAMI EVACUATION WITH RIDE SHARING

Ryo ITABASHI and Yasuo ASAKURA