

# 乗り合い行動を考慮した 共有型自動運転車の最適配置問題

中家 碧惟<sup>1</sup>・難波 智也<sup>2</sup>・峪 龍一<sup>3</sup>・内田 賢悦<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 学生非会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: choco0105@eis.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup> 非会員 中央コンサルタンツ株式会社 (〒060-0034 札幌市中央区北 4 条東 1 丁目 2-3)

E-mail: tom-namba@chuoh-c.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 北海道大学大学院助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

<sup>4</sup> 正会員 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

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

近年のカーシェアリングの広がりおよび自動運転技術の発展から、共有型自動運転車 (SAV) の導入可能性について議論が行われている。SAV は複数利用者の OD パターンにより経路を決定するデマンド型の運行形態が想定されており、OD パターンが類似した利用者の乗り合いが発生する。

本研究では動的ネットワークにおける SAV の乗り合い行動を定式化し、ネットワーク内の総移動時間を最小化させる SAV の配置パターンを求めた。SAV はその高い公共性から、システム最適を目指すような運用を想定する。本研究では、各経路の起点に配置される SAV 台数を変数として、利用者需要を満たすように、ネットワーク上流のノードに SAV を配置し、SAV の総移動時間を最小化した。さらに、SAV の車両数にも制約を加え、SAV の総車両数の制約の範囲内で最適化を行った。

**Key Words:** shared autonomous vehicle, ride sharing, link transmission model, system optimum

## 1. はじめに

個人や企業が保有する活用可能な資産の貸出・共有を行うシェアリング事業は、ICT の普及に伴い世界的に拡大している。交通分野も例外ではなく、自動車、自転車、駐車場など様々なものへ導入が進んでいる。

また、このシェアリング事業と自動運転技術を組み合わせた将来的なサービスとして、共有型自動運転車 (Shared Autonomous Vehicle: SAV) の導入可能性についての検討が行われている。SAV は地域で共有された自動運転車両が、複数利用者の予約情報に合わせて経路を決定し、効率的に送迎を行うことが期待されている。類似した OD パターンを持つ利用者が乗り合うことにより、ネットワーク内車両数の削減や利用者の費用負担の削減など、得られる利点が多い。

一方で自動運転技術について、JASO<sup>1)</sup>は、運転自動化なしをレベル 0 として、レベル 0~レベル 5 の 6 段階で定義しており (表-1)、政府<sup>2)</sup>は 2019 年に限定地域での無人自動運転移動サービスの実証を行った。

表-1 自動運転化レベルの定義

	レベル	名称	運用領域
	0	運転自動化なし	
運転支援	1	運転支援	限定的
	2	部分運転自動化	限定的
自動運転	3	条件付き 運転自動化	限定的
	4	高度運転自動化	限定的
	5	完全運転自動化	限定なし

これは運転者の存在を必要としないレベル 4 程度に相当し、レベル 4 の自動運転車両については実現に向けた制度課題の検討段階にある。しかしながらレベル 5 については、交通環境が複雑な一般道では自転車や歩行者への対応が難しく、中長期的な課題として捉えられている。本研究では将来的な SAV の着地点として、レベル 5 の完全自動運転車両を想定し、交通流理論を用いた動的ネットワークでの最適配置問題に取り組む。

SAV の最適配置問題に取り組んだ先行研究として、

愛甲ら<sup>3)</sup>はノード間の移動時間を所与のものとして、SAVの経路決定モデルを提案した。また瀬尾ら<sup>4)</sup>はSAVの運用とインフラ設計に関して包括的な最適化手法を提案した。

交通流理論では、1950年代にLighthill and Whitham<sup>5)</sup>及びRichards<sup>6)</sup>によりKinematic Wave理論が提案され、Newell<sup>7)</sup>がリンク境界における累積流入台数により解を決定する手法を提案した。ネットワークにおける数値計算法としてはDaganzo<sup>8)</sup>により提案されたCell Transmission Model (CTM)がある。CTMはリンクをセルに分割し、時間ステップ毎に各セルの密度とセル間の流量を計算する。一方、Yperman<sup>9)</sup>によって提案されたLink Transmission Model (LTM)は、NewellのLWRモデルの定式化に基づき、リンク境界の累積流入台数から定義したネットワーク拡張であり、CTMよりも低い計算コストで優れた精度を発揮する。また、Han<sup>10)</sup>はLTMを時間的に連続な微分代数方程式系として定式化した。交通流理論と経路発生交通量モデルの組み合わせによる具体的な計算方法はHan<sup>11)</sup>により示されており、本研究のモデル作成の参考とする。

本研究では動的ネットワークにおけるSAVの乗り合い行動を定式化し、そのうえで、ネットワーク内の総移動時間を最小化させるSAVの配置パターンを求めることを目指す。

## 2. 定式化

### (1) 問題設定

モデルはノードとリンクで構成された道路ネットワークを対象とし、ネットワーク内はSAVのみが走行する。SAVは設定した出発ノードから移動を開始し、利用者を目的地へ送迎後に到着ノードに留まるものとする。つまりSAVが道路ネットワークの中を循環するような運行は仮定せず、一方向への運行を想定している。原則として、利用者は全てSAVでのみ移動するものとし、利用者の目標到着時刻を含むODパターンは与件とする。利用者ははじめ、リンク上で待機しているものとし、車両がそのリンクを通過するときに乗車する。また、リンク上を流れる車両はFirst-In-First-Outの原則に従い、追い越しは発生しないものとする。

### (2) 乗り合いの表現

SAVの乗車定員を $\gamma$ 人とする、一つの車両あたり1~ $\gamma$ 人の乗車が考えられる。例として、図-1のネットワークを考える。ノード1を車両の出発地とし、待機リンク{1,2}にノード4を目的地とする利用者が待機している状況を想定する。

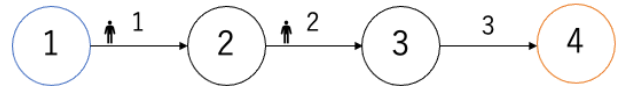


図-1 ネットワーク例

表-2 ネットワーク例における乗車パターン

	リンク 1	リンク 2	リンク 3	計
パターン 1	2	0	0	2人
パターン 2	1	1	0	2人
パターン 3	1	0	0	1人
パターン 4	0	2	0	2人
パターン 5	0	1	0	1人

乗車定員 $\gamma=2$ 人とした場合、各リンクでの乗車人数は表-2が示すような5通りの組み合わせが考えられ、本研究ではこの5通りの乗車パターンをそれぞれ独立した仮想的な経路として扱う。これらの仮想的な経路に発生する交通量を未知変数として、道路ネットワーク全体の移動時間を最小化問題を解くことで、各経路の経路発生交通量及び乗車パターンを求めることができる。

### (3) 記号

本研究で用いた記号を示す。

- $T$  離散化した時刻の集合
- $L$  リンク集合
- $P$  経路集合
- $I$  利用者が待機するリンク集合
- $G$  到着ノードの集合
- $l_i$  リンク $i$ の長さ
- $u_i$  リンク $i$ の Forward Wave 速度
- $w_i$  リンク $i$ の Backward Wave 速度
- $\sigma_i$  リンク $i$ の臨界密度
- $C_i$  リンク $i$ の交通容量
- $\rho_i(t, 0)$  時刻 $t$ におけるリンク $i$ 上端の交通密度
- $\rho_i(t, l_i)$  時刻 $t$ におけるリンク $i$ 下端の交通密度
- $C_p$  経路 $p$ の先頭リンクの交通容量
- $Q$  ネットワーク内総車両数
- $\gamma$  車両の乗車定員
- $n_{p,i}$  経路 $p$ 上のリンク $i$ での乗車人数
- $h_p(t)$  経路 $p$ の起点から時刻 $t$ に発生する交通量
- $d_{i,g}$  到着ノードを $g$ とするリンク $i$ で待機する利用者数
- $f_i^{in}(t)$  時刻 $t$ のリンク $i$ における流入交通量

- $f_i^{out}(t)$  時刻 $t$ のリンク $i$ における流出交通量
- $D_i(t)$  時刻 $t$ のリンク $i$ における Demand
- $S_i(t)$  時刻 $t$ のリンク $i$ における Supply
- $\alpha_{ij}(t)$  時刻 $t$ にリンク $i$ から流出する交通量のうちリンク $j$ に流入する割合
- $p_{ij}(t)$  時刻 $t$ におけるリンク $j$ の交通供給量のうちリンク $i$ から流入可能な割合
- $\lambda_i(t)$  時刻 $t$ にリンク $i$ に流入した車両がリンク $i$ から流出する時刻

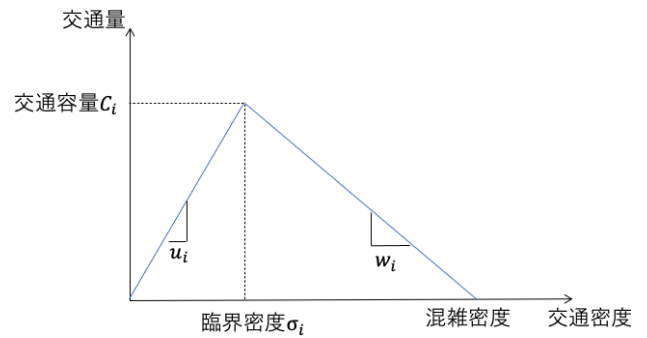


図-2 Fundamental Diagram

(4) 交通流理論

a) Fundamental Diagram の定義

Fundamental Diagram (FD) はすべての車両が一定の速度と間隔を示す交通における、交通量と交通密度の関係を示す。FD は幾つかの理論式が提案されているが、本研究では図-2 に示す三角形型の FD を仮定する。ここで、最大交通量 $C_i$ をリンクの交通容量とし、そのときの交通密度を臨界密度 $\sigma_i$ とする。交通密度が $\sigma_i$ より小さい状態を自由流状態と呼び、そのときの Forward Wave 速度を $u_i$ 、交通密度が $\sigma_i$ より大きい状態を混雑流状態と呼び、そのときの Backward Wave 速度を $w_i$ で表す。

b) リンクモデル

本研究における交通流理論は、Han<sup>10</sup>のモデルに従い、リンク両端のみで計算を必要とする LTM を用いる。リンクモデルにおける式を次に示す。

$$D_i(t) = \begin{cases} C_i & \text{if } \rho_i(t, l_i) \geq \sigma_i \\ f_i(\rho_i(t, l_i)) & \text{if } \rho_i(t, l_i) < \sigma_i \end{cases} \forall i \in L \quad (1)$$

$$S_i(t) = \begin{cases} C_i & \text{if } \rho_i(t, 0) < \sigma_i \\ f_i(\rho_i(t, 0)) & \text{if } \rho_i(t, 0) \geq \sigma_i \end{cases} \forall i \in L \quad (2)$$

式(1)はリンク下端で発生する Demand を FD を用いて求めており、式(2)はリンク上端における Supply を求めている。

c) ジャンクションモデル

理論をネットワークへ拡張するために、ジャンクションにおける境界条件の設定が必要となる。図-3 に流入リンクが  $m$  本、流出リンクが  $n$  本の一般化したジャンクションを示す。このジャンクションにおける境界条件の解法はリーマンソルバーと呼ばれ、写像RSを用いて次のように表される。

$$[f_i^{out}(t), f_j^{in}(t)] = RS[D_i(t), S_j(t)] \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, m$   
 $j = m + 1, m + 2, \dots, m + n$

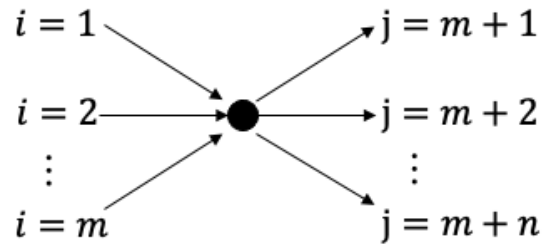


図-3 一般化したジャンクション

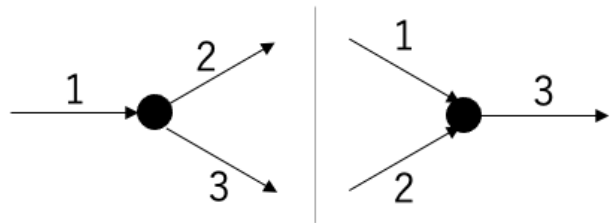


図-4 分流ジャンクション (左) と合流ジャンクション (右)

ここで、リーマンソルバーは次の 3 つの条件を満たす、境界値問題である。

i) 各リンクの制約を満たすリーマン問題の解は、初期境界値問題の解として与えられる。

ii) 流量保存の法則が成立する。

$$\sum_{i=1}^m f_i^{out}(t) = \sum_{j=m+1}^{m+n} f_j^{in}(t) \quad (4)$$

iii) 次の整合性条件を満たす。

$$RS[RS[D_i(t), S_j(t)]] = RS[D_i(t), S_j(t)] \quad (5)$$

具体的なジャンクションの例を図-4 に示す。分流ジャンクションは単一リンクから 2 つのリンクへ分岐するノードであり、合流ジャンクションは 2 つのリンクから単一リンクへ流入するノードを示す。本研究における境界条件を次に示す。

$$f_1^{out}(t) = \min(D_1(t), \frac{S_2(t)}{\alpha_{1,2}(t)}, \frac{S_3(t)}{\alpha_{1,3}(t)}) \quad (6)$$

$$f_2^{in}(t) = \alpha_{1,2}(t) \cdot f_1^{out}(t) \quad (7)$$

$$f_3^{in}(t) = \alpha_{1,3}(t) \cdot f_1^{out}(t) \quad (8)$$

$$\alpha_{1,2}(t) + \alpha_{1,3}(t) = 1 \quad (9)$$

$$0 \leq \alpha_{1,2}(t), \alpha_{1,3}(t) \leq 1 \quad (10)$$

$$f_1^{out}(t) = \min(D_1(t), p_{1,3}(t) \cdot S_3(t)) \quad (11)$$

$$f_2^{out}(t) = \min(D_2(t), p_{2,3}(t) \cdot S_3(t)) \quad (12)$$

$$f_3^{in} = f_1^{out}(t) + f_2^{out}(t) \quad (13)$$

$$p_{1,3}(t) = \frac{D_1(t)}{D_1(t) + D_2(t)} \quad (14)$$

$$p_{2,3}(t) = \frac{D_2(t)}{D_1(t) + D_2(t)} \quad (15)$$

分流ジャンクションの境界条件は車両の分岐率 $\alpha_{ij}(t)$ を用いて式(6)-(10)で表される。式(6)は上流リンクにおける交通量、または下流リンクで受け入れ可能な交通量のうち、小さい方を解としており、リンクの Demand-Supply の制約条件の中で交通量を最大化させている。式(7)-(10)は交通流の保存及び分岐率 $\alpha_{ij}(t)$ の定義を示している。

合流ジャンクションの境界条件は車両の優先率 $p_{ij}(t)$ を用いて式(11)-(15)で表される。式(11)と式(12)は分流ジャンクションと同様に、リンクの Demand-Supply の制約条件の中で交通量を最大化させている。式(13)は車両の保存則を、式(14)と式(15)は優先率の定義を示している。

### (5) SAV 配置モデル

本節では、SAV を配置するノード、台数、経路を決定するモデルを定式化する。また、SAV はその高い公共性から、システム最適に従うと仮定して定式化を進める。まず、経路発生交通量 $h_p(t)$ を式(16)で定義する。経路発生交通量とは、ある時刻 $t$ に、経路 $p$ に流入しようとする交通量を示し、経路 $p$ は利用者の乗車パターンを考慮した仮想的な経路であることに注意が必要である。

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_p(t) \Delta t = Q \quad (16)$$

式(16)は全ての経路及び時刻で発生する交通量がネットワーク内の総車両数と等しいことを示す。

次に式(17)で、道路ネットワーク内のすべての SAV の総移動時間が最小化される状態を解とする SAV 配置モデルとして定式化する。

$$\min \sum_{i \in L} \sum_{t \in T} f_i^{in}(t) (\lambda_i(t) - t) \quad (17)$$

s.t.

$$d_{i,g} = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} n_{p,i} h_p(t) \quad \forall i \in L, \forall g \in G \quad (18)$$

$$0 \leq h_p(t) \leq C_p \quad (19)$$

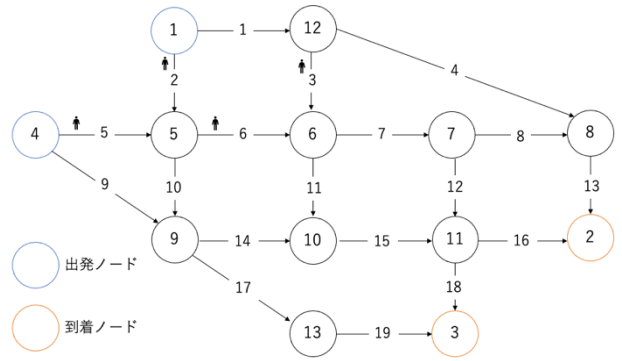


図-5 テストネットワーク

式(17)における $\lambda_i(t) - t$ は時刻 $t$ にリンク $i$ に流入した車両のリンク移動時間を示しており、流入交通量 $f_i^{in}(t)$ との積により、時刻 $t$ にリンク $i$ に流入した車両の移動時間の合計を表している。式(17)では、この移動時間の合計を各リンク、各時刻の総和をネットワーク内の総旅行時間とし、式(18)の利用者旅行需要の制約及び式(19)の経路発生交通量の制約の範囲で最小化する。式(19)の $C_p$ は経路 $p$ における先頭リンクの交通容量を示しており、車両の出発地点での渋滞は発生しないようにした。本問題における未知変数は経路発生交通量 $h_p(t)$ であり、全ての経路 $p$ ・時刻 $t$ における経路発生交通量を求める。

式(17)-(19)では発生交通量 $h_p(t)$ を変数としており、車両数に制約を設けず総移動時間を最小化している。しかし、車両の維持管理費用を考慮すると、少ない車両数での運行が望ましい。そこで、車両数の制約条件として以下の式を追加した場合との比較を行う。

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_p(t) \Delta t = \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in L} \sum_{g \in G} d_{i,g} \quad (20)$$

式(20)の左辺は本モデルで発生する総車両数を示し、右辺は全ての利用者を送迎するための最小の車両数を示す。つまり、式(20)により全ての車両で最大乗車人数を送迎することを示す。

## 3. テストネットワークでの数値計算

### (1) テストネットワークにおける仮定

#### a) 一般的な仮定

本項では数値計算における仮定を示す。本章で使用したテストネットワークを図-5に示す。ネットワークはピーク時間帯において交通流が一方方向である道路ネットワークを想定している。

表-3 利用者のODパターン

待機リンク番号	到着ノード番号	利用者数(人)
2	2	333
2	3	333
3	2	333
3	3	333
5	3	333
5	2	333
6	2	333
6	3	333

表-4 ODパターンを満たす経路

経路番号	移動リンク				
	ノード1→ノード2				
1	1	3	7	8	13
2	1	3	7	12	16
3	1	3	11	15	16
4	2	6	7	8	13
5	2	6	7	12	16
6	2	6	11	15	16
7	2	19	14	15	16
	ノード1→ノード3				
8	1	3	7	12	18
9	1	3	11	15	18
10	2	6	7	12	18
11	2	6	11	15	18
12	2	10	14	15	18
13	2	10	17	19	
	ノード4→ノード2				
14	5	6	7	8	13
15	5	6	7	12	16
16	5	6	11	15	16
17	5	10	14	15	16
	ノード4→ノード3				
18	5	6	7	12	18
19	5	6	11	15	18
20	5	10	14	15	18
21	5	10	17	19	

車両は出発ノードから移動を開始し、到着ノードに到着する。また、到着ノードに到着した車両はその時点で移動を終了する。利用者は待機リンク上に待機し、車両がそのリンクを通過することで乗車する。利用者の OD パターンは与件とし、利用者旅行需要はある時刻から一斉に発生するものとする。各リンク FD の形状は与件とする。車両の定員は 3 人とする。時間ステップは 75 秒とし、計算を行う。

b) ODパターン

利用者の OD パターンを表-3 に示す。待機リンク {2,3,5,6} には、それぞれ 666 人が待機しており、半数が到着ノード 2、半数が到着ノード 3 を目的地にもつ。また、OD パターンを満たす全ての経路は表-4 の 21 通りである。

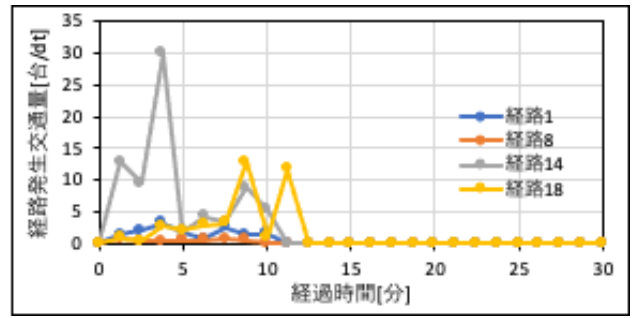


図-6a 経路発生交通量の時間変化（車両制約なし）

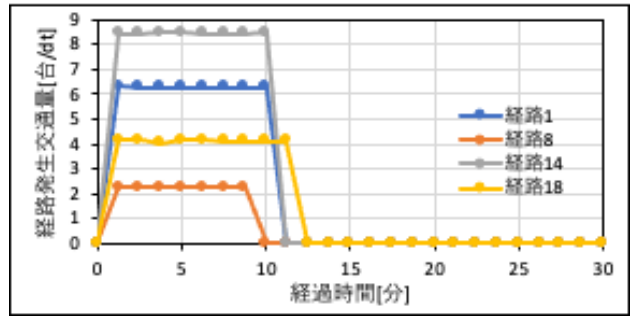


図-6b 経路発生交通量の時間変化（車両制約あり）

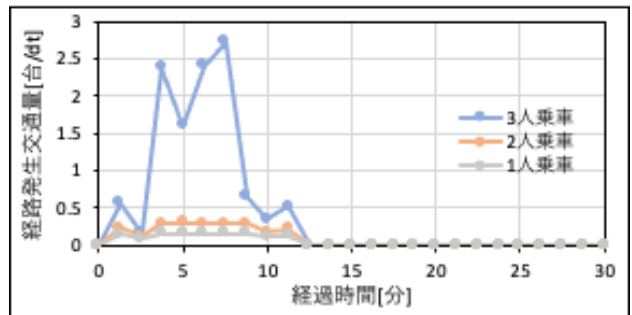


図-7a 経路 1 における経路発生交通量（車両制約なし）

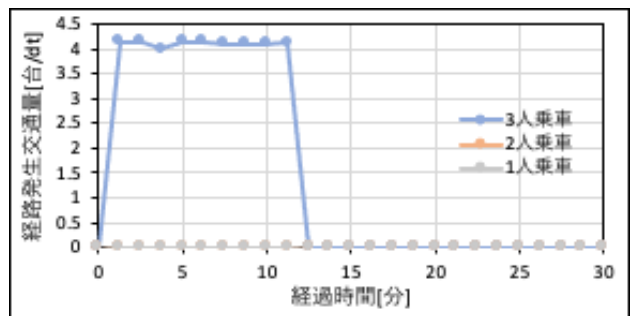


図-7b 経路 1 における経路発生交通量（車両制約あり）

これらの経路から、乗車人数パターンを合わせた仮想的な経路を作成し、経路発生交通量を求める。

(2) 結果

数値計算の結果、各経路及び乗車人数パターンごとの経路発生交通量を求めることができた。経路発生交通量の時間変化を図-6 に示す。

表-5 計算結果の比較

車両制約	車両数 (台)	総移動時間 (時間)	平均移動時間 (分/台)	待機時間 (分/人)	送迎完了時間 (分)
なし	932	217.46	14.00	5.22	19.22
あり	888	186.36	12.59	4.85	17.45

車両数の制約条件の有無に関わらず、車両制約を設けていない方は時間毎の経路発生交通量にばらつきが見られたが、車両制約を設けた条件では、経路発生交通量がほぼ一定であった。また、どちらも計算開始から 12~13 分後まで SAV の出発が行われていることが分かる。

経路 1 の乗車人数に注目した経路発生交通量の時間変化が図-7 である。車両制約なしの条件では、最大乗車人数である 3 人の利用者が乗り合う形での運行が最も多く発生し、次いで 2 人乗車、1 人乗車となった。またこの傾向は他の経路も同様であった。一方で車両数に制約を設けた条件では、全ての車両で 3 人が乗り合い、運行する結果となった。

最後に、表-5 に車両制約の有無による、ネットワーク全体での結果を示す。まず、総車両数は、車両制約なし条件で 932 台となったのに対し、車両制約あり条件では、考える最小値である 888 台となった。また、結果として車両制約あり条件で、総移動時間、平均移動時間、利用者の待機時間、送迎完了時間が短縮された。

#### 4. まとめ

本研究では、SAV の乗り合い行動について利用者旅行需要が一方の動的なネットワークを仮定して定式化を行った。定式化は交通流理論と SAV 配置モデルの組み合わせにより行い、経路発生交通量を未知変数として車両の総移動時間を最小化した。数値計算の結果、車両の総数に制約を設けたモデルが、より効率的な送迎を行うことを示した。

一方で本研究では、利用者の待機リンクはネットワーク上流に限定してあり、また利用者旅行需要が時間毎に

変化する場合についても、検証を行っていない。それらを含め、今後更なる検証が必要である。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人自動車技術会：テクニカルペーパー 自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義，2022.
- 2) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民 ITS 構想・ロードマップ，2021.  
[https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its\\_roadmap\\_20210615.pdf](https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_20210615.pdf) (閲覧日 2022.9.17)
- 3) 愛甲聡美, Thaithakul P., 瀬尾亨, 朝倉康夫：アクティビティパターンを与件としたライドシェア車両の最適割り当て問題，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.73, No.5, pp.1\_1233-1\_1242, 2017.
- 4) 瀬尾亨, 朝倉康夫：多目的線形計画法による共有型自動運転システムの戦略的設計，土木計画学研究・講演集，Vol.61, CD-ROM, 2020.
- 5) Lighthill, M. J. and Whitham, G. B.: On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society A*, Vol.229, No.1178, pp.317-345, 1955.
- 6) Richards, P. I.: Shock waves on the highway, *Operations Research*, Vol.4, No.1, pp.42-51, 1956.
- 7) G.F.Newell: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory, *Transportation Research Part B*, Vol.27, No.4, pp.281-287, 1993.
- 8) Daganzo C.F.: The cell transmission model, part II: network traffic, *Transportation Research Part B*, Vol.29, No.2, pp.79-93, 1995.
- 9) Yperman I, Logghe S and Immers L: The link transmission model an efficient implementation of the kinematic wave theory in traffic networks, *Proceedings of the 10th EWGT meeting and 16th mini-EURO conference advanced OR and AI methods in transportation*, pp.122-127, 2005.
- 10) Ke Han, Benedetto Piccoli, W. Y. Szeto: Continuous-time link-based kinematic wave model: Formulation, solution existence and well-posedness, *Transportmetrica B*, Vol.4, No.3, pp.187-222, 2016.
- 11) Ke Han, Gabriel Eve and Terry L. Friesz: Computing Dynamic User Equilibria on Large-Scale Networks with Software Implementation, *Networks and Spatial Economics*, Vol.19, pp. 869-902, 2019.

(2022. ? . ? 受付)

## Optimum allocation of shared autonomous vehicle considering ridesharing behavior

Aoi NAKAYA, Tomoya NAMBA, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

The spread of car sharing and the development of autonomous driving technology have prompted investigation into the feasibility of introducing shared autonomous vehicle (SAV), which are assumed to operate in a manner in which routes are determined by the OD patterns of multiple users, and ride sharing by users with similar OD patterns arises. In this study, we formulated the ride sharing behavior of the SAVs in a dynamic network and obtained the allocation of the SAVs that minimizes the total travel time in the network. In this study, the total travel time of SAVs was minimized by allocating SAVs to nodes upstream of the network to satisfy users' transportation demand, using the number of SAVs located at the starting point of each route as a variable. Furthermore, the number of SAVs was also constrained, and optimized within the constraint of the total number of SAVs.