

# 市場型混雑管理システム下における 自動運転サービス車両の最適拠点配置

周毅愷<sup>1</sup>・和田健太郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究群 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: s2220424@s.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

本研究は、和田ら<sup>1</sup>が提案したシェア型自動運転車(SAV: Shared Autonomous Vehicle)を効率的に管理するための新しいシステムに対して、SAVの拠点配置を最適化するモデルへの拡張を行う。このシステムは、各道路のボトルネック容量をSAVプロバイダーに分配するためのボトルネック通行権取引市場と、SAVプロバイダーによるモビリティサービス(MS: Mobility Service)の供給と需要をマッチングするMS市場から構成される。本研究ではまず、提案システム導入下の長期的な均衡状態を記述するモデルを構築し、その均衡において効率的な資源配分が達成されることを示す。続いて、グリッド型のネットワークを用いて、数値実験を行い、均衡状態における提案システムの性質を考察する。

**Key Words:** *shared autonomous vehicle, tradable permits, decentralized system, mobility service markets*

## 1. はじめに

現在、道路交通システムに根本的変革をもたらす可能性のある革新的技術が現れつつある。その一つは、Transportation Network Company (TNC) と呼ばれる Uber や Lyft, DiDi 等によって提供される sharing economy 型の “Mobility-as-a-Service” (MaaS) である。もう一つは、(ドライバレス) 自動運転車 (AVs: Autonomous Vehicles) である。前者は、すでに世界的に普及し、消費者の交通行動を、個人所有のクルマによる移動から事業者によって提供されるサービス購入にシフトさせつつある。この大きな流れから、後者の将来的普及は、これらの技術を統合したシェア型自動運転車両 (SAVs: Shared Autonomous Vehicles) という形をとる可能性が高い。

これらの技術は消費者の交通利便性を高め、現在の道路交通システムが抱える様々な問題 (安全性, 効率性, 環境負荷等) を解消すると期待されている。ただし、交通混雑に関しては、正の効果, 負の効果が様々考えられ (道路容量の改善, 駐車場探索の減少, 誘発需要, 空車回送の増加など), 全体としての影響について現時点で明確な結論は得られていない (e.g., Fagnant and Kockelman<sup>2</sup>, Xu et al.<sup>3</sup>, Cohen and Cavoli<sup>4</sup>)。現実的な交通流シミュレーションを用いたケーススタディでは、朝の通勤シナリオにおいて SAVs の導入が混雑を悪化させようという結果も示されている (Levin et al.<sup>5</sup>)。

ただし、これらの技術単独の発展のみでは渋滞の根

本的解決にはならないという点は、明白な事実である。なぜなら、こうした技術には交通需要がボトルネックに集中することを防ぐメカニズムは備わっていないためである。モビリティサービスの市場における動的料金設定 (or “surge pricing”) (e.g., Zha et al.<sup>6</sup>) がこうした渋滞抑制メカニズムとして働くという議論もある。しかし、(a) 各 SAV プロバイダー (e.g., TNC) は自社の利潤を最大化する主体であること<sup>7</sup> (社会厚生を最大化を目指す主体ではない)、(b) 複数プロバイダーがいる場合、単独プロバイダーでボトルネックに対する交通量を制御することは難しいこと、から料金設定による渋滞抑制の担保は困難である。

以上は、SAV 技術を道路交通システムの飛躍的な改善に繋げるためには、SAVs を協調させる適切なスキームが必要であることを示唆している。実際、モビリティサービス市場とそのいくつかの側面に関する研究の関心は高まっているが (例えば、Zha et al.<sup>6</sup>, Hahn and Metcalfe<sup>8</sup>, Hara and Hato<sup>9</sup>, Zha et al.<sup>10</sup>, Wang and Yang<sup>11</sup>, Mourad et al.<sup>12</sup>, およびその参考文献を参照)、モビリティサービスの需給マッチングと交通渋滞の問題を同時に解決しようとする研究は少ない。

Cramton et al.<sup>13</sup> や Beheshtian et al.<sup>14</sup> は、電力市場における先進的な市場設計<sup>15</sup> にインスパイアされた、道路利用市場を提案している。これは、次の2つの市場から構成される：卸売市場と小売市場。卸売市場では、各 TNC は特定の時間帯に特定の道路区間を利用する権

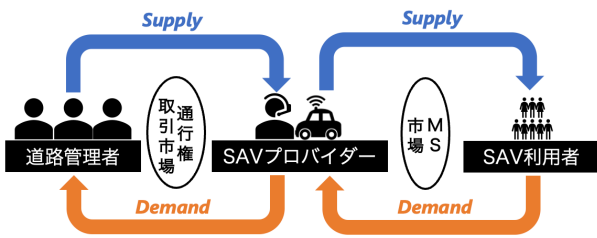


図-1 提案システムの概念的構造

利を購入する。小売市場では、購入した権利を用いて、各 TNC は利用者のモビリティサービスを提供する。このシステムでは、卸売市場で交通混雑を管理でき、モビリティサービス（または TNC）を含む効率的な道路交通システムを構築するための枠組みとして有用な方向性を示していると考えられる。しかし、システムの提案は概念的なレベルに留まっており、その詳細や特性等について具体的な解析はなされていない。

これに対して、和田ら<sup>1)</sup>は渋滞を解消し、シェア型自動運転車を効率的に管理するための新しいシステムを提案した。このシステムは、図-1 に示すように、各道路のボトルネック容量を SAV プロバイダーに分配するためのボトルネック通行権取引市場<sup>16),17),18)</sup>と、SAV プロバイダーによるモビリティサービス (MS: Mobility Service) の供給と需要をマッチングする MS 市場から構成される。和田らの提案システムでは、提案システム導入下の均衡状態を記述するモデルを構築し、その均衡において効率的な資源配分が達成されることを示した。また、提案システムをインプリメントする自律分散的なメカニズムの設計問題を考えた。ただし、SAV の拠点ノード、および、SAV 車両数は固定されているため、SAV の最適拠点配置については考慮されていない。

本研究は、和田ら<sup>1)</sup>が提案した新しいシステムに対して、SAV の拠点ノードにおける SAV 車両数を変数とした拡張モデルを構築し、その均衡において効率的な資源配分が達成されることを示す。これにより、ネットワーク上の SAV の最適拠点配置が可能となる。続いて、グリッド型のネットワークを用いて、数値実験を行うことで、拡張モデルの数値実験を行い、均衡状態における提案システムの性質を考察する。

## 2. 状況設定

ノード集合  $N \ni i$ 、有向リンクの集合  $\mathcal{L} \ni (i, j)$  からなる一般ネットワークを考える。ノード集合には利用者の起点集合  $O \ni o$ 、終点集合  $D \ni d$ 、SAVs の車両基地の集合  $\mathcal{R} \ni r$  が含まれる。また、起終点ペアの集合を  $\mathcal{W} \ni (o, d)$  と書く。リンク  $(i, j)$  の自由旅行時間は  $t_{ij}$ 、その終端に存在するボトルネック容量は  $\mu_{ij}$  と表す。また、利用者の移動を考える時間幅は  $\mathcal{T} \equiv [0, T]$  で表す。

その時間幅でトリップを行う各起終点ペアの利用者総数は  $Q_{od}$  とする。

本研究で考えるシステムには 3 種類の主体が存在する：道路管理者、SAV プロバイダー、(SAV) 利用者。道路管理者はボトルネックでの渋滞を抑制し、ネットワーク上で費やされる総移動費用の最小化を目指す主体である。道路管理者は時間帯別のボトルネック通行権をそのボトルネック容量以下の数発行することで、各リンクへの車両流入フローを抑制する。各 SAV プロバイダーは所有する SAVs を用いてモビリティサービスを提供する主体であり、自社の利潤を最大化するように SAVs の時空間のスケジュールを決定する。各利用者は、MS を利用して対象時間内で 1 回のトリップを行う主体であり、自らの一般化交通費用を最小化するように終点到着時刻と経路を選択する。

システムには 2 種類の市場が存在する：通行権取引市場、MS 市場。通行権取引市場は、時間帯別・リンク別で区別され、SAV プロバイダーはサービスに必要な通行権をそれらの市場を通して取得する。MS 市場についても、提供されるサービス毎に区別され、利用者は自らのトリップに必要なサービスをそれらの市場を通して購入する。なお、これらの市場は完全競争市場であると仮定する。すなわち、SAV プロバイダー・利用者ともにプライステイカーとして行動を行う。

MS サービスの提供方法は様々考えられる。1 つは、利用者の起終点間移動を 1 台の SAV 車両でカバーするものである（1 台の SAV 車両は複数の利用者をカバーできる）。これは、現在の相乗りに対応するサービスの提供方法であるが、全ての利用者にドア・トゥ・ドアサービスを保証するという性質上、SAV 車両の利用効率上の欠点を抱える (i.e., 回送車両が多く発生する可能性がある)。この対極に位置するのが、利用者が複数の車両を乗り継いで起終点を移動する形態である。これは、現在の公共交通による移動と類似したサービスであり、SAV 車両の利用効率は高い。しかし、乗り換えを必要とするためサービスレベルの点でドア・トゥ・ドアのサービスよりその性能は劣る。これらの両極のサービス提供方法の利点を融合した手法として、近年提案されているのが“Modular Transit”という概念である<sup>19)</sup>。これは、自動で連結・切り離し可能な Modular Vehicle<sup>2</sup>を用いることで、乗り換え不要・ドア・トゥ・ドアサービスの両立を目指すものであり、自動運転技術を駆使した道路上での新たな公共交通の可能性と言えるであろう。本稿では、そうした将来を見据えて、Modular SAV を想定したモデリングを行う。このとき、SAVs の運行ルートと利用者経路は独立に扱ってよく、時空間に渡る MS サービスの需要と容量のみバランスされればよい。



$$\begin{cases} \int_0^T \pi_r(t) dt = \gamma & \text{if } S_r > 0 \\ \int_0^T \pi_r(t) dt \leq \gamma & \text{if } S_r = 0 \end{cases}, \forall t (\neq T), r \quad (13)$$

で与えられる。  $v_j^r(t), \pi_r(t)$  は、それぞれ制約条件 (7), (8) に対応するラグランジュ乗数であり、車両基地から時刻  $t$  でノード  $j$  までに到達する場合の最大利潤、時刻  $t$  にプロバイダー  $r$  の SAV 車両 1 台をアクティブにする最大価値 (SAV 車両 1 台あたりの利潤の最大増加分) と解釈できる。このとき、式 (10) は経路選択条件、式 (11), (12) はサービス戦略、式 (13) は SAV 車両保有戦略を表す。

サービス戦略について、式 (11) は、帰還する SAV 車両の利潤の時間変化率  $\dot{v}_r^r(t) - \beta$  が、サービス提供を続ける限界利潤  $\pi_r(t)$  に等しい場合にサービスを行い、限界利潤を下回る場合にサービスを中断/終了することを表す。式 (12) は、限界利潤が正の場合に保有する全 SAV 車両をアクティブにし、ゼロの場合に保有 SAV 車両数以下でサービスを行うことを示す。これらを合わせると次のように表される。

$$\begin{cases} \pi_r(t) = \dot{v}_r^r(t) - \beta, h_r(t) = S_r & \text{if } \pi_r(t), h_r(t) > 0 \\ \dot{v}_r^r(t) = \beta, h_r(t) \leq S_r(t) & \text{if } \pi_r(t) = 0, h_r(t) > 0 \\ \dot{v}_r^r(t) \leq \beta, h_r(t) = 0 & \text{if } \pi_r(t), h_r(t) = 0 \end{cases}, \forall t (\neq T), r \quad (14)$$

SAV プロバイダー  $r$  の総利潤は、SAV 車両 1 台あたりの利潤の最大増加分とアクティブ SAV 車両数の積と SAV 保有コストの差であるから、

$$\begin{aligned} & \int_0^T \pi_r(t) h_r(t) dt - \gamma S_r \\ &= \int_0^T \pi_r(t) h_r(t) dt - S_r \int_0^T \pi_r(t) dt \\ &= \int_0^T \pi_r(t) (h_r(t) - S_r) dt = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

と表すことができる。式 (12), (15) より、SAV 最適拠点配置を考える場合、均衡状態では、常に利潤が 0 の状態となる。ここでは、SAV プロバイダーの自由参入と自由退出が起きることで、SAV 最適拠点配置が最適化されるような長期均衡が達成されるため、利潤が 0 となる。

### (3) 市場清算条件

完全競争市場では、通行権取引市場および MS 市場の需給均衡条件は以下のように表される。

$$\begin{cases} y_{ij}(t) = \mu_{ij} & \text{if } e_{ij}(t) > 0 \\ y_{ij}(t) \leq \mu_{ij} & \text{if } e_{ij}(t) = 0 \end{cases}, \forall t, ij \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{ij}(t) = C y_{ij}(t) & \text{if } p_{ij}(t) > 0 \\ x_{ij}(t) \leq C y_{ij}(t) & \text{if } p_{ij}(t) = 0 \end{cases}, \forall t, ij \quad (17)$$

どちらの式も左辺が需要、右辺が供給を表す。価格が正の場合、需給は一致し、価格がゼロの場合、需要は供給以下となる。

### (4) 均衡状態の効率性

システム導入後の均衡状態における資源配分の効率性を調べるために、社会的総交通費用最小化問題 [EP] を考える。

$$\begin{aligned} \min_{(x, f) \in \Omega_u, (y, h, S, g) \in \Omega_s} & \int_0^T \left\{ \sum_{ij \in \mathcal{L}} \alpha_{ij} x_{ij}(t) + \sum_{od \in \mathcal{W}} w_d(t) f_{od}(t) \right\} dt \\ & + \int_0^T \left\{ \sum_{ij \in \mathcal{L}} d_{ij} y_{ij}(t) + \sum_{r \in \mathcal{R}} \beta h_r(t) \right\} dt + \sum_{r \in \mathcal{R}} \gamma S_r \end{aligned} \quad (18)$$

subject to

$$y_{ij}(t) \leq \mu_{ij}, \quad \forall t, ij \quad (19)$$

$$x_{ij}(t) \leq C y_{ij}(t), \quad \forall t, ij \quad (20)$$

ここで、 $\Omega_u, \Omega_s$  はそれぞれ、利用者の費用最小化問題、SAV プロバイダーの利潤最大化問題の許容領域である。目的関数はネットワーク内で費やされる社会的総交通費用であり、第 1 項は利用者の費用、第 2, 3 項は SAV プロバイダーの費用である。制約条件は、式 (19) が道路容量制約、式 (20) が MS 供給制約である。この社会的総交通費用最小化問題 [EP] の最適性条件と均衡条件が一致することから (証明略)、次の命題が成立する。

**命題 1.** 提案システム導入後の均衡状態は社会的総交通費用を最小化する状態に一致する。

## 4. 数値実験

### (1) 実験条件

#### a) ネットワーク条件

本実験では、1 辺が 8 リンクで構成されるグリッド型ネットワーク (81 ノード、288 リンク) を用いる。ネットワークは、正方形で形作られたネットワークとなっており、交点にノードを生成し、有向リンクは各ノードに最も近いノードを双方に結ぶリンクである。リンク長は各ネットワーク内で全て等しいため、リンクの自由旅行時間についても全て等しく  $t = 1$  と設定する。各ネットワークの時間帯幅  $\mathcal{T}$  は、 $\mathcal{T} = T\delta$  s.t.  $T \in \mathbb{N}$  とし、単位時間  $\delta$  で離散化する。ここで、 $T = 25$  とする。各ネットワークで、全てのリンク旅行時間は等しいため、 $\delta = t$  とすることで、離散化可能である。また、各リンクのボトルネック容量については、時間 1 あたり  $\mu = 30$  とした。

#### b) 利用者条件

利用者は同じ到着希望時間  $\hat{t} = 15$ 、時間価値係数  $\alpha = 40$ 、スケジュール費用関数  $w(t)$  を持ち、 $w(t)$  は以

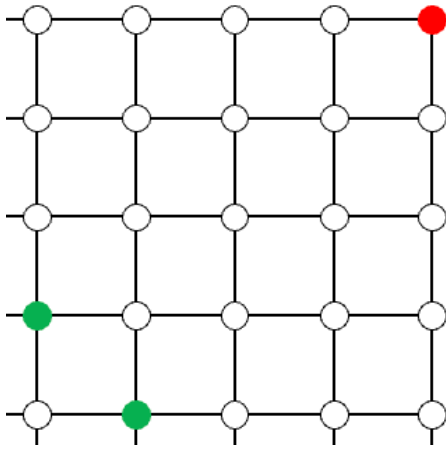


図-2 直行型ネットワークの部分的な起終点ノード

下のように表される.

$$w(t) = \begin{cases} \alpha_e(\hat{t} - t) & \text{if } \hat{t} \geq t \\ \alpha_l(t - \hat{t}) & \text{if } \hat{t} < t \end{cases} \quad (21)$$

ここで,  $\alpha_e = 25$  は早着の時間分を金銭換算する時間価値係数,  $\alpha_l = 50$  は遅着の時間分を金銭換算する時間価値係数である.  $\alpha_e < \alpha_l$  とすることで, 遅着が早着に比べて, 不効用をもたらすことを保証する.

ネットワーク外側の起終点については, 頂点に位置する4つのノード (図-2の赤ノード), ネットワーク内側の起終点については, 中心に位置するノードの上下左右の4つのノード (図-2の緑ノード) とする. すなわち, ネットワークの外側と内側をつなぐ起終点ペアは16となり, これを総利用者数  $Q$  でそれぞれ等分する.

用いる2つの需要パターンは, 「一極集中型」と「分散型」とする. 一極集中型では, 外側から内側の起終点ペアの1方向とすることで, 需要が中心に集まる設定とする. 分散型では, 外側から内側と内側から外側の双方向の起終点ペアとすることで, 需要が全体に分散する設定とする.

本実験では, ネットワーク外側の OD 出発点に入出入りするリンクがそれぞれ2リンクしかないため, 時間1あたりに出発できる利用者数がボトルネック容量分の車両数によって制限されてしまう. そのため, ネットワーク外側の OD 出発点ノードを含むリンクについては, ボトルネック容量を十分大きくした.

c) SAV プロバイダー条件

SAV は同じ車両容量  $C = 4$ , リンク費用  $d = 20$ , アクティブ費用  $\beta = 50$ , 保有費用  $\gamma = 100$  を持つ. SAV 拠点ノードは, 各ネットワークの起終点ノードおよび中心ノードに設定する. また, 外側起終点ノードと最も近い内側起終点ノードの間にも SAV 拠点ノードを設定する. それぞれのネットワークの拠点ノードは図-3における青ノードで表される. ネットワークは対称であ

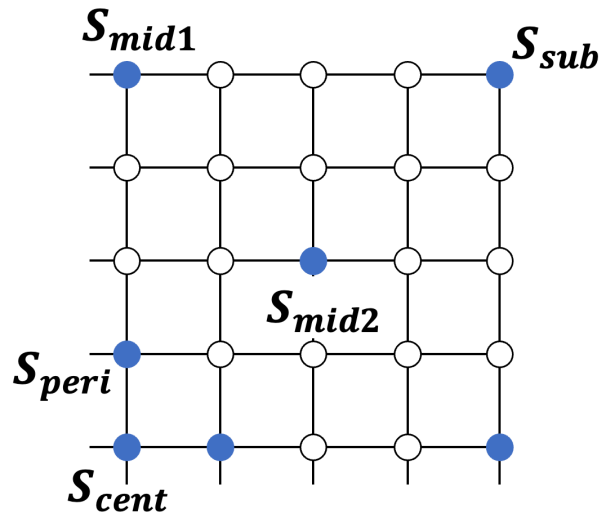


図-3 総利用者数と総 SAV 台数の関係

るため, 対称となる拠点ノードについては, それぞれ  $S_{cent}, S_{peri}, S_{mid1}, S_{mid2}, S_{sub}$  として, まとめて呼ぶこととする.

以降では, 実験結果・考察を記す.

(2) 総利用者数  $Q$  と総 SAV 台数の関係

前節で設定した実験条件のもとで, 総利用者数  $Q$  別に問題 [EP] を解き, その結果により配置される総 SAV 台数との関係性について考える. 両者の関係は, 図-4で表される. 一方向型 OD では,  $Q = 26640$  のとき, 双方向型 OD では,  $Q = 57600$  のとき, 解が infeasible となる.

図-4より, 両者について,  $Q = 20160$  までは, 傾きが  $\frac{1}{4}$  と車両容量の逆数に等しいことから, 利用者 と SAV は1対1の関係で増加する.  $Q = 20160$  を超えると, 両者で, SAV 台数の増加速度が鈍くなるが, 一方向型 OD では, 総 SAV 台数の増加速度の低下が顕著であり, また, ネットワーク内の最大利用可能者数も小さい. すなわち, 一方向型 OD と双方向型 OD では, 双方向型 OD の方が効率的であると推測できる. また, SAV 台数の増加速度が鈍くなる点については, ネットワーク内の道路容量および時間帯幅の制限の両者が要因と推測される. 以降では, 一方向型 OD と双方向型 OD の違いについて, それぞれ考える.

(3) 一方向型 OD

a) 社会的総交通費用の内訳

実験条件で述べた設定について, 総利用者数別に社会的総交通費用の内訳を表したものが表-1である. 社会的費用の内訳については, 前節の式 (18) を利用者の一般化費用, スケジュール費用と SAV プロバイダーのリンク費用, SAV 保有費用の4つとする.

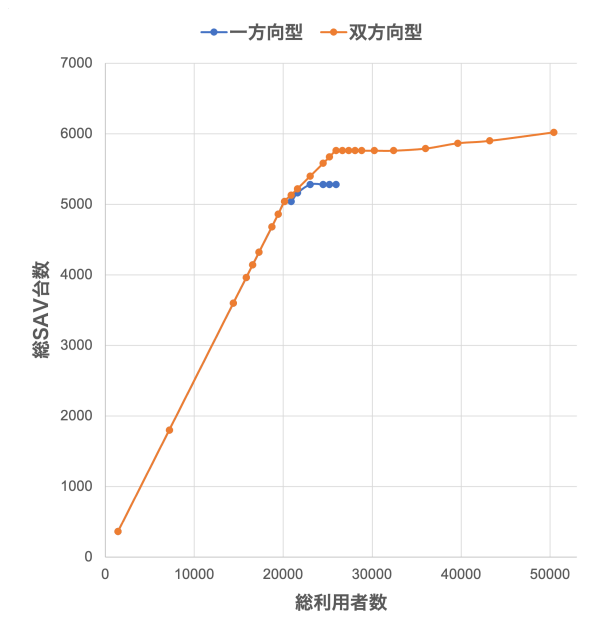


図-4 総利用者数（横軸）と総 SAV 台数（縦軸）の関係

一般化費用とリンク費用に着目すると、どちらについても、総利用者数の増加に比例して費用が増加する。一般化費用について、総利用者数と時間価値の積 ( $Q\alpha$ ) で割ると 8 となる。利用者の最短自由旅行時間は近い OD が 7, 遠い OD が 9 であり、それぞれ同じ利用者だけ存在するため、利用者の平均最短自由旅行時間も 8 となる。このことから、ネットワーク内では、利用者が常に最短経路で移動している。リンク費用について、リンクサービス費用とアクティブな SAV 1 台あたりの費用の和と総 SAV 台数の積 ( $(d+\beta)\sum_{r\in R} S_r$ ) で割ると 15 となる。乗り換えをしない場合の SAV の平均最短自由旅行時間は 16 となるため、利用者が常に最短経路で移動していることから、一部で乗り換えが発生し、回送の割合が減っていることが分かる。

#### b) 他の SAV 拠点配置パターンとの比較

実験条件で述べた SAV 拠点配置パターンとは異なる SAV 拠点配置パターンを 2 つ用意し、社会的総交通費用の内訳の比較を行う。1 つは、SAV 拠点ノードをネットワーク外側にのみ配置した場合（拠点ノードが  $S_{sub}$  のみの場合）とし、もう 1 つは、SAV 拠点ノードを OD ノード上にのみ配置した場合（拠点ノードが  $S_{sub}, S_{peri}$  のみの場合）とする。それぞれの総利用者数別社会的総交通費用の内訳は、表-2, -3 となる。

表-1 と表-2 を比較すると、スケジュール費用とリンク費用で差が生じ、拠点ノードが  $S_{sub}$  のみの場合では、実験条件で述べた SAV 拠点配置パターンに比べて非効率となる。一方、表-1 と表-3 を比較すると、全ての費用について差はないため、拠点ノードが  $S_{sub}, S_{peri}$  のみの場合では、実験条件で述べた SAV 拠点配置パターンと同じ効率となる。すなわち、問題 [EP] の解は一意と

はならない。以降、一方向型 OD の実験結果・考察については、SAV 拠点ノードを OD ノード上にのみ配置した場合（拠点ノードが  $S_{sub}, S_{peri}$  のみの場合）とする。

#### c) SAV の時空間推移と移動分布

ある 1 つの SAV 拠点からの SAV の移動分布と時空間推移を分析することで、SAV 拠点別のネットワークカバー範囲や乗り換え場所について考える。ここでは、総利用者数  $Q = 1440, 14400$  のときを考える。特に、 $Q = 1440$  は、全利用者が到着希望時間に到着する場合となる。グリッド型ネットワークは上下左右で対称であり、かつ、SAV は拠点  $S_{sub}, S_{peri}$  に集約されているため、 $S_{sub}, S_{peri}$  のそれぞれ 1 つを対象にして分析結果を示す。

SAV 拠点ノード別の SAV 移動分布を表す図（図-5, -7, -10, -12）と SAV 時空間推移を表す図（図-6, -8, -11, -13）の見方を説明する。前者では、グリッド型ネットワーク上のリンクを利用した SAV 台数の全時間総和を示しており、赤線が太いほど利用 SAV 台数が多いことを示す。青四角が分析対象の SAV 拠点ノード、赤四角が出発ノード、緑四角が到着ノードである。後者では、グリッド型ネットワークを対象 SAV 拠点の近いリンクから、近づくリンク、遠ざかるリンクの順に横軸に並び、縦軸を時間とすることで、SAV がどれほど遠くまで移動しているかを表す。ここで、リンク 1 あたりの自由旅行時間は 1 であることから、リンクの両端のノードうち、拠点ノードから遠い方のノードと拠点ノードの最短距離を「遠さ」として図中で表現している。青丸は SAV が拠点から離れていること、赤丸は SAV が拠点に近づいていることを表す。それぞれ、円の大きさは、その時間帯にリンクを利用する SAV 台数が多いことを表す。緑の点線は、利用者の到着希望時間 ( $t = 15$ ) を表す。

まず、 $Q = 1440$  の場合について述べる。図-5 より、SAV は出発ノード（拠点  $S_{sub}$ ）から近い到着ノードには到達しているが、遠い到着ノードには到達していないため、どこかで乗り換えが発生している。図-6 でも、出発ノードから近い到着ノードへ向かう SAV では、乗り換えが発生していない一方で、遠い到着ノードへ向かう SAV で乗り換えが発生していることが分かる。図-9 のように、利用者の到着時間が同じであれば、 $dd'$  のような双方向性が発生する区間の中央で乗り換えを行うことで、回送 SAV を減らすことが可能である。より具体的に述べると、設定した一方向型 OD の実験条件では、出発ノードから遠い到着ノードへの OD について、その対称な OD と双方向性が発生する。これにより、出発ノードから遠い到着ノードの OD については、SAV を遠さ 8 まで運ぶことで十分となり、近い到着ノードの最短旅行時間が 14, 遠い到着ノードの最短旅行時間が

表-1 実験条件で設定した拠点ノードパターンの場合における一方型 OD の各社会的費用

総利用者数	一般化費用	スケジュール費用	リンク費用	SAV 保有費用	社会的総費用
1440	460800	0	378000	36000	874800
2880	921600	24000	756000	72000	1773600
4320	1382400	72000	1134000	108000	2696400
5760	1843200	144000	1512000	144000	3643200
7200	2304000	228000	1890000	180000	4602000
8640	2764800	348000	2268000	216000	5596800
10080	3225600	492000	2646000	252000	6615600
11520	3686400	648000	3024000	288000	7646400
12960	4147200	840000	3402000	324000	8713200
14400	4608000	1056000	3780000	360000	9804000
15840	5068800	1296000	4158000	396000	10918800
17280	5529600	1584000	4536000	432000	12081600
18720	5990400	1944000	4914000	468000	13316400
20160	6451200	2376000	5292000	504000	14623200
21600	6912000	2880000	5670000	516000	15978000
23040	7372800	3456000	6048000	528000	17404800
24480	7833600	4104000	6426000	528000	18891600

表-2 拠点ノードが  $S_{sub}$  のみの場合における一方型 OD の各社会的費用

総利用者数	一般化費用	スケジュール費用	リンク費用	SAV 保有費用	社会的総費用
1440	460800	0	378000	36000	874800
2880	921600	36000	756000	72000	1785600
4320	1382400	84000	1150800	108000	2725200
5760	1843200	156000	1528800	144000	3672000
7200	2304000	252000	1906800	180000	4642800
8640	2764800	360000	2301600	216000	5642400
10080	3225600	504000	2679600	252000	6661200
11520	3686400	672000	3057600	288000	7704000
12960	4147200	876000	3435600	324000	8782800
14400	4608000	1104000	3813600	360000	9885600
15840	5088000	1440000	4166400	396000	11090400

表-3 拠点ノードが  $S_{sub}, S_{peri}$  のみの場合における一方型 OD の各社会的費用

総利用者数	一般化費用	スケジュール費用	リンク費用	SAV 保有費用	社会的総費用
7200	2304000	228000	1890000	180000	4602000
14400	4608000	1056000	3780000	360000	9804000
21600	6912000	2880000	5670000	516000	15978000

16 となることから、全体の SAV の平均最短旅行時間は 15 となる。これは、(3)-a) で、表-1 を用いてリンク費用に対して行った考察と合致する。つまり、 $Q = 1440$  では、全利用者が到着希望時間に到着するため、4 つの到

着ノードから等距離な内部、すなわち、図-6 の遠さ 7, 8, および、図-8 の遠さ 1 で乗り換えを行なっている。その他の乗り換えは補助的な役割 (e.g., 出発ノード上の SAV の一部が利用者を 2 回運び出すために、出発ノ

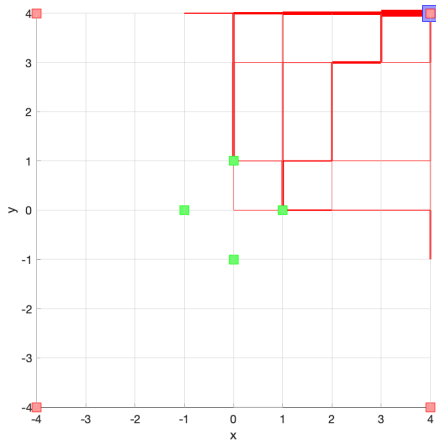


図-5 一方向型 OD ( $Q = 1440$ ) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 移動分布

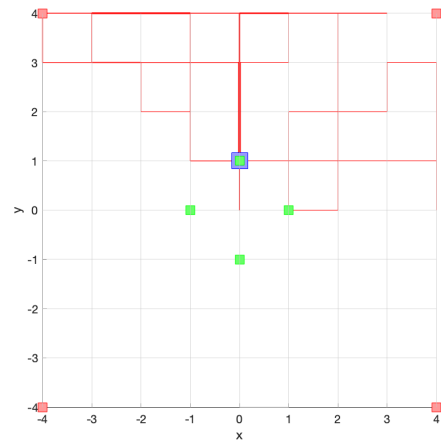


図-7 一方向型 OD ( $Q = 1440$ ) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 移動分布

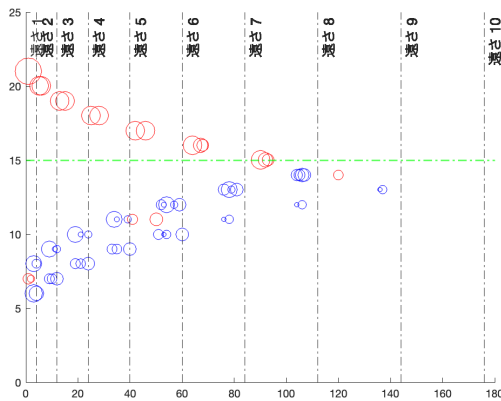


図-6 一方向型 OD ( $Q = 1440$ ) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 時空間推移

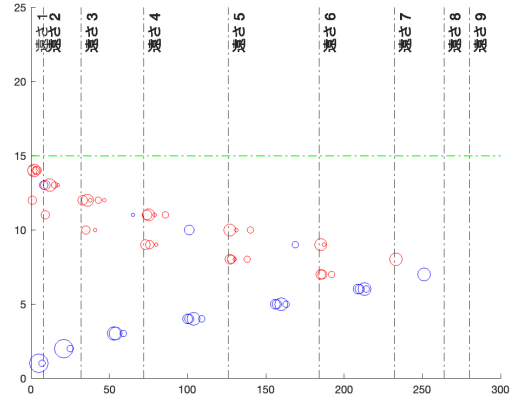


図-8 一方向型 OD ( $Q = 1440$ ) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 時空間推移

ド周辺で乗り換え) を果たしている。

続いて、 $Q = 14400$  の場合について述べる。図-10-13 から、 $Q = 1440$  の場合と比較して、より時空間上の SAV の移動幅が広がっている。時間については、到着希望時間に到着しない利用者が現れることによって、幅が広がる。また、それぞれの利用者が異なる到着時間となることは、乗り換えが必ずしも中央で発生しなくなることを意味するため、SAV の空間上の広がり の要因となっていると推測される。

(4) 双方向型 OD

表-4 より、双方向 OD では、SAV は常に  $S_{peri}, S_{sub}$  上に存在する。つまり、SAV は出発・到着ノード上に存在する。また、表-1、表-5 より、一方向型 OD と双方向型 OD の総利用者数  $Q$  が等しい場合は、双方向型 OD の社会的総交通費用が小さく、効率的である。

ここで、双方向型 OD について、 $Q = 14400$  の場合の SAV 移動分布および時空間推移は、図-14--17 のよ

実線：乗客あり 点線：乗客なし (回送)

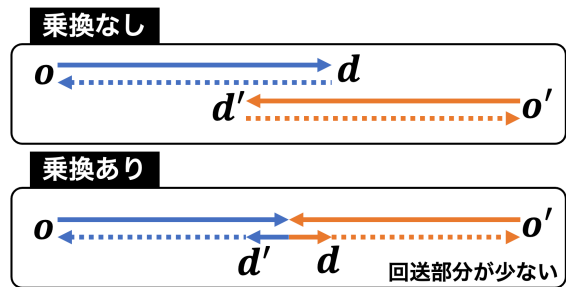


図-9 双方向性による乗り換えイメージ

うになる。SAV 移動分布を表す図-14、-16 より、出発ノードから出た SAV は到着ノードまで辿り着いておらず、乗り換えが発生している。ここで、SAV 時空間推移を表す図-15、-17 より、拠点  $S_{sub}$  の SAV は遠さ 4 前後で、拠点  $S_{peri}$  の SAV は遠さ 3 前後で拠点ノードへと戻る動きをしている。すなわち、 $S_{peri}, S_{sub}$  の中央付近で乗り換えが発生しており、その要因は一方向型 OD の際で述べたように、回送 SAV の減少である。ただし、

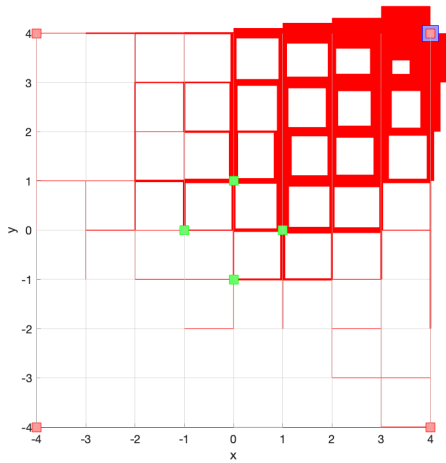


図-10 一方向型 OD ( $Q = 14400$ ) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 移動分布

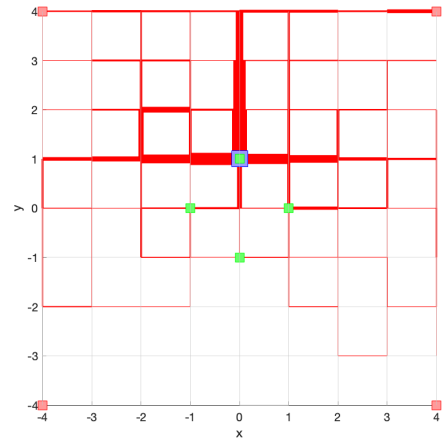


図-12 一方向型 OD ( $Q = 14400$ ) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 移動分布

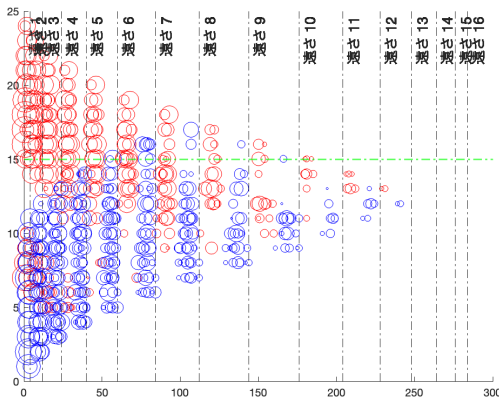


図-11 一方向型 OD ( $Q = 14400$ ) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 時空間推移

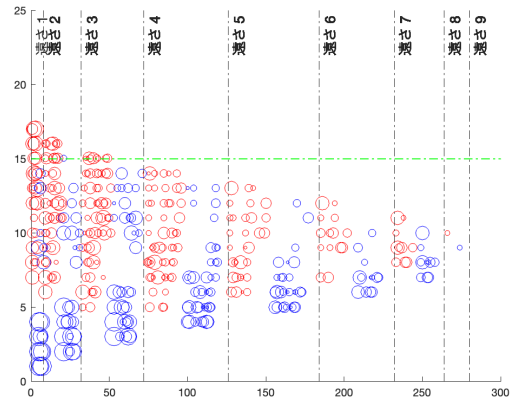


図-13 一方向型 OD ( $Q = 14400$ ) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 時空間推移

表-4 双方向型 OD のときの SAV 拠点ノード別平均最適配分

$Q$	$S_{cent}$	$S_{peri}$	$S_{mid1}$	$S_{mid2}$	$S_{sub}$
7200	0	225	0	0	225
14400	0	450	0	0	450
21600	0	647.5	0	0	657.5

表-5 双方向型 OD のときの社会的総交通費用

$Q$	社会的総費用
7200	3582000
14400	7428000
21600	11556000

一方向型 OD と双方向型 OD では、後者の方が、双方向性が発生する区間が大きいため、より効率的である。

## 5. おわりに

本研究は、和田らが提案したシェア型自動運転車を効率的に管理するためのシステムに対して、SAV 拠点の SAV 車両数を変数としてモデルに加えることで、SAV の最適拠点配置が可能となるように拡張した。その上で、均衡状態において、効率的な資源配分となり、SAV プロバイダーの利潤が 0 となるような長期均衡が達成されることを示した。数値実験では、SAV の最適拠点配置が可能となったことで、一方向型 OD では出発ノード以外にも SAV 拠点ノードが必要であることが実験結果により示された。また、社会的総交通費用の効率化という点では、回送車両を減らすことが重要であり、その点で、利用者の移動が双方向となる必要があるという結果が得られた。本研究では、乗り換えが発生する具体的なノードの特定までは至っておらず、これについては今後の課題となる。

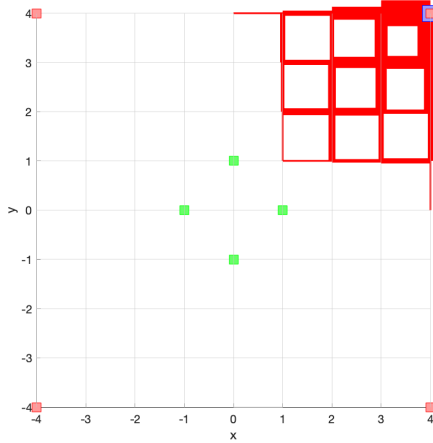


図-14 双方向型 OD (Q = 14400) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 移動分布

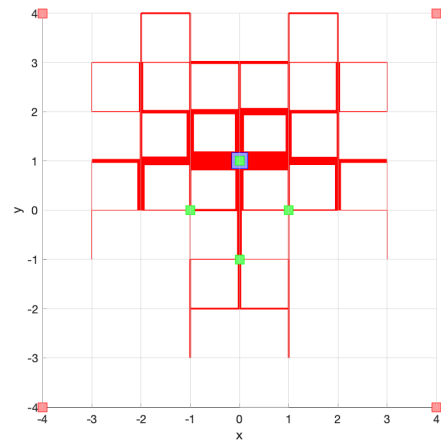


図-16 双方向型 OD (Q = 14400) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 移動分布

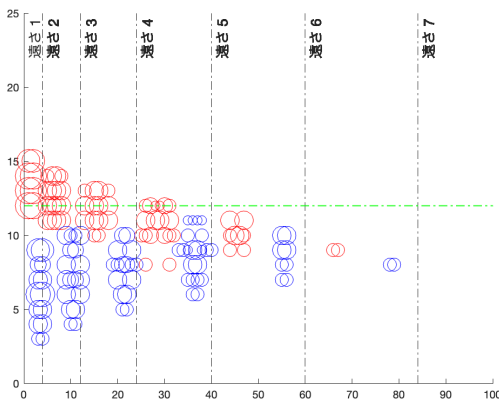


図-15 双方向型 OD (Q = 14400) のとき、拠点  $S_{sub}$  の SAV 時空間推移

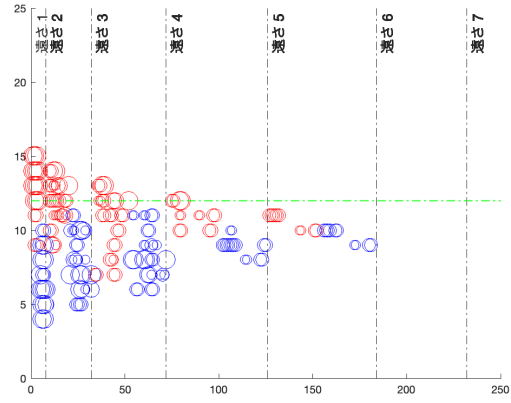


図-17 双方向型 OD (Q = 14400) のとき、拠点  $S_{peri}$  の SAV 時空間推移

**NOTES**

- 注 1) 市場型の渋滞マネジメントの考え方として、著者らはすでに具体的なスキーム「ボトルネック/ネットワーク通行権取引制度」を提案・解析しており<sup>16),17),18)</sup>、それ自体が新しいわけではない。
- 注 2) その例としては、Next Future Transportation Inc. (<https://www.next-future-mobility.com/>) が開発している車両が挙げられる。

**REFERENCES**

- 1) 和田健太郎, 渡邊大樹, 周毅愷, 赤松隆: シェア型自動運転車のための通行権取引制度の自律分散的なインプリメンテーション. 土木計画学研究・講演集, Vol.64, pp.21-01 (CD-ROM), 2021. [Wada, K., Watanabe, T., Zhou, Y. and Akamatsu, T.: Traffic demand management in the era of share autonomous vehicles, *Proceedings of infrastructure planning*, Vol.64, 21-01 (CD-ROM), 2021.]
- 2) Fagnant, D. J. and Kockelman, K. M.: The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.40, pp.1-13, 2014
- 3) Xu, Z., Yin, Y., and Zha, L.: Optimal parking provision for ride-sourcing services. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.105, pp.559-578, 2017

- 4) Cohen, T. and Cavoli, C.: Automated vehicles: exploring possible consequences of government (non)intervention for congestion and accessibility. *Transport Reviews*, Vol.39, No.1, pp.129-151, 2019
- 5) Levin, M. W., Kockelman, K. M., Boyles, S. D., and Li, T.: A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.64, pp.373-383, 2017
- 6) Zha, L., Yin, Y., and Yang, H.: Economic analysis of ride-sourcing markets. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.71, pp.249-266, 2016
- 7) Ferdman, A.: Corporate ownership of automated vehicles: discussing potential negative externalities. *Transport Reviews*, Vol.0, No.0, pp.1-19, 2019
- 8) Hahn, R. and Metcalfe, R.: The ridesharing revolution: Economic survey and synthesis. *More Equal by Design: Economic Design Responses to Inequality*, (Ed. by S. D. Kominers and A. Teytelboym), 2017
- 9) Hara, Y. and Hato, E.: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017
- 10) Zha, L., Yin, Y., and Du, Y.: Surge pricing and labor supply in the ride-sourcing market. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.105, pp.559-578, 2017

*B: Methodological*, 2017

- 11) Wang, H. and Yang, H.: Ridesourcing systems: A framework and review. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.129, pp.122–155, 2019
- 12) Mourad, A., Puchinger, J., and Chu, C.: A survey of models and algorithms for optimizing shared mobility. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.123, pp.323–346, 2019
- 13) Cramton, P., Geddes, R., and Ockenfels, A.: Markets in road use: Eliminating congestion through scheduling, routing, and real-time road pricing.. Working Paper, University of Cologne, 2017
- 14) Beheshtian, A., Richard Geddes, R., Rouhani, O. M., Kockelman, K. M., Ockenfels, A., Cramton, P., and Do, W.: Bringing the efficiency of electricity market mechanisms to multimodal mobility across congested transportation systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019
- 15) Cramton, P.: Electricity market design. *Oxford Review of Economic Policy*, Vol.33, No.4, pp.589–612, 2017
- 16) 赤松隆, 佐藤慎太郎, and Long, N. X.: 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究. 土木学会論文集D, Vol.62, No.4, pp.605–620, 2006. [Akamatsu, T., Shintaro, S. and Long, N. X.: Tradable time-of-day bottleneck permits for morning commuters, *JSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.62, No.4, pp.605–620, 2006.]
- 17) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度. 土木学会論文集D, Vol.63, No.3, pp.287–301, 2007. [Akamatsu, T.: A system of tradable bottleneck permits for general networks, *JSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.63, No.4, pp.287–301, 2007.]
- 18) Akamatsu, T. and Wada, K.: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.79, pp.178–195, 2017
- 19) Zhang, Z., Tafreshian, A., and Masoud, N.: Modular transit: Using autonomy and modularity to improve performance in public transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.141, pp.102033, 2020

(Received September 30, 2022)

(Accepted September 30, 2022)

## AN OPTIMAL LOCATION OF SHARED AUTOMATED VEHICLES UNDER A MARKET-BASED TRAFFIC DEMAND MANAGEMENT SYSTEM

Yikai ZHOU and Kentaro WADA