

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

和田健太郎¹・渡邊大樹²・周毅愷³・赤松隆⁴

¹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

²学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: taiki.watanabe.p3@dc.tohoku.ac.jp

³非会員 筑波大学 理工学群 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: s1711283@s.tsukuba.ac.jp

⁴正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: akamatsu@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、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を提案する。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、この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る。ここでは、均衡条件と等価な最適化問題の適切な分解を通して、各市場に求められる要件や設計方針について考察を行う。

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, 負の効果が様々な考えられ (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 Kockelman¹, Xu et al.², Cohen and Cavoli³)。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

悪化させるという結果も示されている (Levin et al.⁴)。

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.⁵) 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⁶ (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.⁵, Hahn and Metcalfe⁷, Hara and Hato⁸, Zha et al.⁹, Wang and Yang¹⁰, Mourad et al.¹¹)、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.¹² や Beheshtian et al.¹³ は、電力市場に

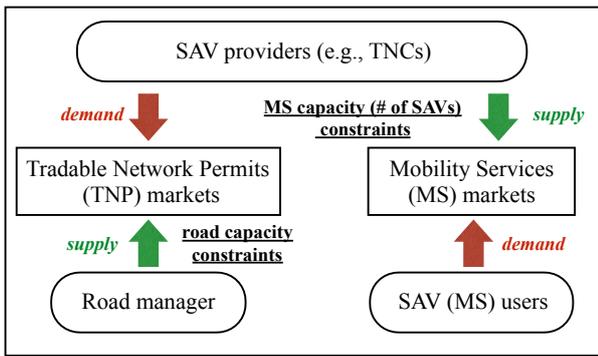


図-1 提案システムの概念的構造

おける先進的な市場設計¹⁴⁾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¹⁾、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。

本研究は、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する。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^{15),16),17)}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、この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る。ここでは、均衡条件と等価な最適化問題の適切な分解を通して、各市場に求められる要件や設計方針について考察を行う。

2. 状況設定

ノード集合 $\mathcal{N} \ni i$ 、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 $\mathcal{O} \ni o$ 、終点集合 $\mathcal{D} \ni d$ 、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 μ_{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、現在の相乗りに相当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¹⁸⁾。これは、自動で連結・切り離し可能なModular Vehicle²⁾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

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^{15),16),17)}、それ自体が新しいわけではない。

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。

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。

3. 均衡状態

システム導入後の均衡状態は、利用者行動の選択条件、SAV プロバイダーの選択行動条件、市場清算条件からなる。以下では、それぞれを順を追って説明する。

(1) 利用者の選択行動

リンク別・時間帯別のサービス価格 $p_{ij}(t)$ を与件としたとき、(代表的) 利用者の費用最小化問題は以下のように与えられる (集計的に表現されているが、各 OD 毎に分解することができる)。

$$\min_{(x,f) \geq 0} \cdot \sum_{ij \in \mathcal{L}} \int_0^T [\alpha t_{ij} + p_{ij}(t)] x_{ij}(t) dt + \sum_{od \in \mathcal{W}} \int_0^T w_d(t) f_{od}(t) dt \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{k \in NO(i)} x_{ik}^o(t) - \sum_{k \in NI(i)} x_{ki}^o(t - t_{ki}) = -f_{oi}(t) \delta_{i,d}, \forall t, o, i \quad (2)$$

$$\int_0^T f_{od}(t) dt = Q_{od}, \forall od \quad (3)$$

ここで、 $x_{ij}^o(t)$ は起点 o を持ち時刻 t にリンク (i, j) に流入する利用者フロー ($x_{ij}(t) = \sum_{o \in O} x_{ij}^o(t)$)、 $f_{od}(t)$ は起終点ペア (o, d) を持つ利用者の時刻 t の終点到着フロー、 α は時間価値、 $w_d(t)$ はスケジュール費用である³、 $\delta_{i,d}$ はクロネッカーのデルタである。

目的関数の第一項はリンクで費やされる一般化費用 (旅行時間とサービス価格) の総和、第二項はスケジュール費用の総和を表している。制約条件 (2) は各ノードでのフロー保存則 (ただし、起点でのものは除く)、制約条件 (3) は OD フローの保存則を表す。この最適化問題の最適性条件は、制約条件 (2)、(3) および

$$\begin{cases} u_j^o(t + t_{ij}) = [\alpha t_{ij} + p_{ij}(t)] + u_j^o & \text{if } x_{ij}^o(t) > 0 \\ u_j^o(t + t_{ij}) \geq [\alpha t_{ij} + p_{ij}(t)] + u_j^o & \text{if } x_{ij}^o(t) = 0 \end{cases}, \forall t, o, ij \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho_{od} = u_d^o(t) + w_d(t) & \text{if } f_{od}(t) > 0 \\ \rho_{od} \geq u_d^o(t) + w_d(t) & \text{if } f_{od}(t) = 0 \end{cases}, \forall t, od \quad (5)$$

で与えられる。 $u_j^o(t)$ 、 ρ_{od} は、それぞれ、制約条件 (2)、(3) に対応するラグランジュ乗数であり、起点から時刻 t にノード j まで到達するための最小費用 (不効用)、ト

³ ここでは、各終点毎に利用者の希望到着時刻は共通であると仮定している。

リップで費やされる均衡 (最小) 費用と解釈すると、式 (4) は経路選択条件、式 (5) は出発時刻選択条件となる。

(2) SAV プロバイダーの選択行動

リンク別・時間帯別のサービス価格 $p_{ij}(t)$ および通行権価格 $e_{ij}(t)$ を与件としたとき、(代表的) SAV プロバイダーの利潤最大化問題は以下のように与えられる (集計的に表現されているが、各 r 毎に分解できる)。

$$\max_{(y,h) \geq 0, g} \cdot \sum_{ij \in \mathcal{L}} \int_0^T [Cp_{ij}(t) - e_{ij}(t) - d_{ij}] y_{ij}(t) dt - \sum_{r \in \mathcal{R}} \int_0^T \beta h_r(t) dt \quad (6)$$

subject to

$$\sum_{k \in NO(i)} y_{ik}^r(t) - \sum_{k \in NI(i)} y_{ki}^r(t - t_{ki}) = -g_r(t) \delta_{i,r}, \forall t, r, i \quad (7)$$

$$h_r(t) = - \int_0^t g_r(t) dt \leq S_r, \forall t, r \quad (8)$$

$$h_r(T) = 0, \forall r \quad (9)$$

ここで、変数 $y^r(t)$ は時刻 t にリンク (i, j) に流入する SAV プロバイダー r の車両フロー ($y_{ij}(t) = \sum_{r \in \mathcal{R}} y_{ij}^r(t)$)、 $h_r(t)$ は時刻 t にネットワーク上に存在するプロバイダー r の (アクティブな) SAV 車両の数、 $g_r(t)$ は時刻 t に車両基地 r に“ネット”で帰還する車両フロー (i.e., 車両基地に帰還する車両から出発する車両を差し引いたもの)、である。また、パラメータ C は車両容量、 d_{ij} はリンク (i, j) のサービスを行うのに必要な費用、 β はアクティブな SAV 車両数に応じてかかるコストの係数、 S_r は SAV プロバイダー r が所有する SAV 車両数を表している。

目的関数の第一項はリンクで得られる利潤の総和、第二項は SAV をネットワーク上で運用する時間にかかる総コストを表す。制約条件 (7) は各ノードでのフロー保存則、制約条件 (8) は SAV 車両数制約、制約条件 (9) は対象時間帯の最後に全ての SAVs が車両基地に到着していることを保証するものである。この最適化問題の最適性条件は、制約条件 (7)–(9) および

$$\begin{cases} v_j^r(t + t_{ij}) = [Cp_{ij}(t) - e_{ij}(t) - d_{ij}] + v_j^r(t) & \text{if } y_{ij}^r(t) > 0 \\ v_j^r(t + t_{ij}) \leq [Cp_{ij}(t) - e_{ij}(t) - d_{ij}] + v_j^r(t) & \text{if } y_{ij}^r(t) = 0 \end{cases}, \forall t, i, r \quad (10)$$

$$\begin{cases} \pi_r(t) = \dot{v}_r^r(t) - \beta & \text{if } h_r(t) > 0 \\ \pi_r(t) \leq \dot{v}_r^r(t) - \beta & \text{if } h_r(t) = 0 \end{cases}, \forall t (\neq T), r \quad (11)$$

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 にノード j までに到達する場合の最大利潤、時刻 t に車両基地 r の SAV 車両 1 台をアクティブにする価値 (利潤の増加分) と解釈することができる。この

とき、式 (10) は、SAV 車両の経路選択条件を表す。式 (11) は、SAV プロバイダーのサービス戦略を表している。すなわち、帰還する SAV 車両の利潤の時間変化率 $\dot{v}_r(t) - \beta$ 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、限界利潤が下回る場合にサービスを中断/終了することを表している。

(3) 市場清算条件

完全競争市場では、超過需要を解消するように価格が調整される。従って、通行権取引市場および MS 市場の需給均衡条件は、それぞれ以下のように与えられる。

$$\begin{cases} y_{ij}(t) = \mu_{ij} & \text{if } e_{ij}(t) > 0 \\ y_{ij}(t) \leq \mu_{ij} & \text{if } e_{ij}(t) = 0 \end{cases}, \forall t, ij \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{ij}(t) = Cy_{ij}(t) & \text{if } p_{ij}(t) > 0 \\ x_{ij}(t) \leq Cy_{ij}(t) & \text{if } p_{ij}(t) = 0 \end{cases}, \forall t, ij \quad (13)$$

いずれの式も左辺が需要を表しており、右辺が供給を表す。そして、価格が正の場合には需給は一致しており、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 (2)–(5), (7)–(13) は、従来の通行権取引制度下の均衡状態を一般化したものである。従って、通行権取引制度の望ましい性質が受け継がれることが期待できる。実際、渋滞費用の内部化により、均衡状態の資源配分は効率的であることを証明することができる。より具体的には、均衡状態は次の等価最適化問題 [EP] を解くことで得ることができる。

$$\begin{aligned} \min_{(x, f) \in \Omega_u, (y, h, g) \in \Omega_p} & \cdot \int_0^T \left\{ \sum_{ij \in \mathcal{L}} \alpha t_{ij} x_{ij}(t) + \sum_{od \in \mathcal{W}} w_d(t) f_{od}(t) \right\} dt \\ & + \int_0^T \left\{ \sum_{ij \in \mathcal{L}} d_{ij} y_{ij} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \beta h_r(t) \right\} dt \quad (14) \end{aligned}$$

subject to

$$y_{ij}(t) \leq \mu_{ij}, \quad \forall t, ij \quad (15)$$

$$x_{ij}(t) \leq Cy_{ij}(t), \quad \forall t, ij \quad (16)$$

ここで、 Ω_u, Ω_p 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総交通費用であり、第一項は利用者の費用、第二項は SAV プロバイダーの運行費用を表している。制約条件はそれぞれ、道路容量制約、MS サービス供給制約である。

4. インプリメンテーション・メカニズム

前章で示したように、本研究で対象とする交通システムは望ましい均衡特性を有している。ただし、シス

テムはサイズが非常に大きく、また、複雑なため、そうした均衡状態を中央集権的なメカニズムで即座に達成することは難しい。従って、均衡状態をインプリメントするための自律分散的なメカニズムを設計する必要がある。メカニズムは、各主体が従うべき行動ルールと市場取引ルールから成り、(a) 主体の行動の自律性、(b) 主体の行動ルールの簡潔性、(c) 個々人の選択の結果として生じる交通状態の安定性、を満たすことが望ましい。以下では、均衡状態と等価な社会的総交通費用最小化問題 [EP] を適切に分解することで、メカニズム設計の方向性を示す。

(1) 問題の分解

均衡に至る不均衡状態を記述するためには、いずれか (or 両方) の市場で超過需要を許す必要がある。つまり、道路容量制約 (15)、MS サービス供給制約 (16) の制約を“緩和”する必要がある。道路容量制約の緩和は不均衡状態における交通渋滞を許すこととなるが、一般ネットワークのそうした状況下で均衡状態に収束するダイナミクスは知られていない¹⁹⁾ (i.e., 性質 (c) を満たすことは難しい)。そのためここでは、MS サービス供給制約をラグランジュ緩和した問題 [Relax-EP] を考える。

$$\begin{aligned} Z(\mathbf{p}) \equiv & \min_{(x, f) \in \Omega_u, (y, h, g) \in \Omega_s} \cdot UC(\mathbf{x}, \mathbf{f}) + PC(\mathbf{y}, \mathbf{h}) \\ & + \sum_{ij \in \mathcal{L}} \int_0^T p_{ij}(t) \{x_{ij}(t) - Cy_{ij}(t)\} dt \quad (17) \end{aligned}$$

subject to Eq.(16)

ここで、 $UC(\mathbf{x}, \mathbf{f})$ は [EP] 目的関数の第一項、 $PC(\mathbf{y}, \mathbf{h})$ は第二項を表す。

この問題 [Relax-EP] は、MS サービス市場の不均衡価格 \mathbf{p} を与件として、2つのサブ問題に分解することができる。1つは利用者に関わるサブ問題 [SP-U] であり、利用者の費用最小化問題 (1)–(3) に厳密に一致する。もう1つは SAV プロバイダーに関わる問題 [SP-P] であり、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \max_{(y, h) \geq 0, g} & \cdot \sum_{ij \in \mathcal{L}} \int_0^T [Cp_{ij}(t) - d_{ij}] y_{ij}(t) dt \\ & - \sum_{r \in \mathcal{R}} \int_0^T \beta h_r(t) dt \\ = & \sum_{r \in \mathcal{R}} \int_0^T \left\{ \sum_{ij \in \mathcal{L}} [Cp_{ij}(t) - d_{ij}] y_{ij}^r(t) - \beta h_r(t) \right\} dt \quad (18) \end{aligned}$$

subject to Eqs. (7)–(9)

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} y_{ij}^r(t) \leq \mu_{ij}, \quad \forall t, ij \quad (19)$$

この問題は SAV プロバイダーの利潤最大化問題によく似ているが、道路容量制約というプロバイダーを跨いだ

制約があるため、それぞれのプロバイダーの問題に分解することはできない。また、目的関数に通行権価格を表す項がない点も利潤最大化問題と異なる。つまり、これは SAV プロバイダーと道路管理者の利潤の総和を最大化する通行権配分問題を表している (SAV プロバイダーの通行権取得費用は道路管理者の収入とキャンセルアウトする)。

(2) 各市場の設計方針

通行権取引市場によりインプリメントすべき問題は、前節で示した問題 [SP-P] である。こうした道路管理者と通行権取得主体の 2 主体の通行権配分問題に対する市場メカニズムは、Wada and Akamatsu^{20,21)} などで提案されており、それらを直接的に適用することも可能である。ただし、従来とここでの問題で決定的に異なるのが、取引主体が (おそらくは) 少数の企業であるという点である。つまり、従来は利用者個人の配分を決定するために比較的単純化された day-to-day のオークション・メカニズムを考えていたが、企業が取引主体であれば one-shot の複雑な取引も十分可能である。また、取引量も集計量であるため効率的な求解が困難な整数計画 (組合せ最適化) 問題を扱う必要性も低い。こうした市場設計の例としては、はじめにでも述べた電力市場¹⁴⁾ があり、ここでの通行権取引市場の設計においても大いに参考になるであろう。

MS 市場ひいてはシステム全体の均衡状態を実現するためには、次のラグランジュ双対問題 [EP-L-Dual] をインプリメントする必要がある。

$$\max_{p \geq 0} Z(p) \quad (20)$$

これは、サブ問題 [SP-U], [SP-P] で決まった MS サービスの需要と供給を清算するように価格を決定する問題である。古典的な tâtonnement 過程はこの問題を劣勾配法で解くことに相当する。しかし、この過程は Walrasian auctioneer と呼ばれる価格調整者を想定する中央集権的なメカニズムであり、本研究の目指す方向性とは異なる (性質 (a) が満たされない)。MS 市場としてより自然なのは、各 SAV プロバイダーが自らのサービスに対して価格をつけ、利用者はサービス内容 (経路や時間帯) や企業別の価格を考慮してサービス選択を行う、というものであろう。こうした分散的な調整プロセスにより問題 [EP-L-Dual] を解くための方法として、Nesterov and Shikhman^{22,23)} は新たな劣勾配法 (quasi-monotone subgradient method) を提案している。この手法が直接的に本稿の問題に適用できるのか、応用として自然か、どのような収束過程を辿るのか等は自明ではないが、有望な方向性であると考えられる。

5. おわりに

本研究は、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。そして、提案システム導入下の均衡状態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、この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、各市場に求められる要件や設計方針について考察を行なった。後半のインプリメンテーション・メカニズムについては、現時点で方向性を示すに留まっているが、発表会ではより具体的な解析結果を報告する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Ferdman, A.: Corporate ownership of automated vehicles: discussing potential negative externalities, *Transport Reviews*, Vol.0, No.0, pp.1-19, 2019.
- 7) 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.
- 8) Hara, Y. and Hato, E.: A car sharing auction with temporal-spatial OD connection conditions, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017.
- 9) Zha, L., Yin, Y., and Du, Y.: Surge pricing and labor supply in the ride-sourcing market, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017.
- 10) Wang, H. and Yang, H.: Ridesourcing systems: A framework and review, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.129, pp.122-155, 2019.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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 sys-

- tems, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019.
- 14) Cramton, P.: Electricity market design, *Oxford Review of Economic Policy*, Vol.33, No.4, pp.589–612, 2017.
 - 15) 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.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) Iryo, T.: Properties of dynamic user equilibrium solution: existence, uniqueness, stability, and robust solution methodology, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol.1, No.1, pp.52–67, 2013.
 - 20) 和田健太郎 and 赤松隆: ネットワーク通行権取引市場のオークション・メカニズム, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.67, No.3, pp.376–389, 2011.
 - 21) Wada, K. and Akamatsu, T.: A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: An auction mechanism with day-to-day capacity control, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.60, pp.94–112, 2013.
 - 22) Nesterov, Y. and Shikhman, V.: Quasi-monotone subgradient methods for nonsmooth convex minimization, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.165, No.3, pp.917–940, 2015.
 - 23) Nesterov, Y. and Shikhman, V.: Distributed price adjustment based on convex analysis, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.172, No.2, pp.594–622, 2017.

(Received October 1, 2021)

(Accepted October 1, 2021)

DECENTRALIZED IMPLEMENTATION MECHANISMS OF TRADABLE PERMIT SYSTEM FOR SHARED AUTONOMOUS VEHICLES

Kentaro WADA, Taiki WATANABE, Yikai ZHOU and Takashi AKAMATSU