

渋滞を解消するモビリティ・サービス市場の メカニズム・デザイン

武田 翼¹・赤松 隆²・渡邊 大樹³

¹非会員 東北大学 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)

E-mail: tsubasa.takeda.t5@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)

E-mail: akamatsu@plan.civil.tohoku.ac.jp

³非会員 株式会社ブレインパッド (〒 106-0032 東京都港区六本木三丁目 1 番 1 号 六本木ティーキューブ)

E-mail: taiki.watanabe@brainpad.co.jp

本研究では、シェア型自動運転車 (SAV) によるモビリティ・サービス (MS) が普及した社会において、交通渋滞を解消し MS の需給マッチングを効率化する新たな交通システムを提案する。提案システムは、SAV プロバイダーに対し道路容量を配分する通行権取引市場と、SAV プロバイダーによって提供される MS を利用者に配分する MS 市場で構成され、これらが互いに連動する市場構造をもつ。本研究ではまず、提案システムの均衡状態において道路容量および MS 容量が最適配分されることを示す。続いて、その均衡状態を達成するための取引メカニズムを提案する。具体的には、提案システムを通行権市場と MS 市場に分解し、それぞれの市場での日々の取引結果に基づき、Day-to-Day でシステム全体を均衡状態へと収束させる。数値実験により、現実的な道路網において、提案メカニズムが 1ヶ月程度で十分均衡状態に収束することが示された。

Key Words: shared autonomous vehicle, mobility service, tradable permits, mechanism design

1. はじめに

近年、自動車のコネクテッド化や自動運転化により、交通渋滞をはじめとする現在の道路交通システムが抱える課題が解決されると期待されている。同時に、個人所有車からシェア型車両による Mobility Service (MS) による移動へと自動車交通の形態がシフトしており、将来的には、ほぼ全ての道路利用者が Shared Autonomous Vehicles (SAV) による MS を利用して移動するようになる可能性が高い。

これら 2つの技術革新を活かし、交通利便性を最大限高めるためには、都市の自動車交通全体を統合的に管理するシステムが必要である。なぜなら、個別の車両や MS 企業が分散的に意思決定をする状況では、交通システム最大の課題である交通渋滞は完全には解消せず、MS の運用にも非効率性が残るからである。まず渋滞は、システム全体の需要が道路容量を上回ることを防ぐために、交通需要を統合的に調整する施策がなければ、解決することができない。また、MS に関して、現在のライドシェアのような少数企業の利潤最大化行動に依るシステムでは、社会全体にとって最も効率よく MS が利用される保証はない。

交通需要管理施策と MS は互いに連関するため同時に扱う必要があるが、既存研究において両者を同時に

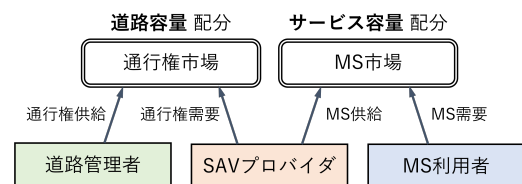


図-1: 提案システムの全体像

考慮した例は少ない。まず、道路容量の配分に関しては、混雑区間の通行に課金し需要の分散を促す“混雑料金制度”や“通行権取引制度¹⁾”が提案されてきたが、これらは個人所有者を前提としている。一方、MS の需給マッチングに関しては、ライドシェア²⁾ や SAV による MS³⁾ に関して研究が進展しているが、これらは MS による混雑の外部性を考慮していない。両者を同時に考慮した研究は、限定的な状況 (静的な交通流⁴⁾、シングルボトルネック⁵⁾) での分析や、数値的分析を伴わない市場デザインの提案⁶⁾ に留まっている。

この背景を踏まえ、本研究では、渋滞を解消し MS を効率的に運用する、図-1 に示すような市場ベースの交通システムを提案する。提案システムでは、通行権取引制度¹⁾ により道路容量を配分する。これは、道路区間に時刻別の通行権を発行し、市場取引を通じて道路利用者に配分する制度である。同時に、交通システム

上の全ての MS 需給をマッチングするプラットフォーム (MS 市場) を導入する。本研究ではまず、提案システムの均衡状態において、社会的最適な道路容量配分/MS 需給マッチングが達成されることを理論的に示す。

続いて、この市場での均衡状態を達成するための取引ルール (メカニズム) を提案する。提案メカニズムは、システムを通行権/MS 市場に分解し、各市場での日々の取引結果に基づき、Day-to-Day でシステム全体を均衡状態へ収束させる。このメカニズムは、均衡状態の等価最適化問題を階層分解し、最適化アルゴリズムで解くことと等価であり、収束が理論的に保証される。

2. 提案システムの状況設定

(1) 時間・空間条件

本研究では、一般ネットワーク上の離散時間 $\mathcal{T} \equiv \{0, 1, \dots, \bar{T}\}$ における動的な交通流を考える。ネットワークの各リンク ij は旅行時間 t_{ij} 、容量 μ_{ij} である。ここで、通行権取引制度の導入により渋滞は発生しないため、旅行時間は一定である。

(2) 提案システムの概要

提案システムでは図-1 に示すように、通行権市場および MS 市場という 2 つの市場で市場管理者、SAV プロバイダ、MS 利用者の 3 主体が取引する。通行権市場では、市場管理者が発行する通行権を複数の SAV プロバイダに配分する。MS 市場は、都市全体の MS 需給を集約しマッチングするプラットフォームである。各 SAV プロバイダがこの市場に MS を供給し、利用者はこの市場で MS を購入する。なお、これらの市場は完全競争であると仮定する。これらの市場は、社会的費用の最小化を目的とする市場管理者が創設・運営する。

(3) SAV プロバイダ

SAV プロバイダは、利用者に MS を提供し、料金収入を得る企業である。本研究では、都市内の利用者起点 1 つにつき、そこを車両拠点とする SAV プロバイダが 1 つ存在し、個々の SAV はその車両拠点から特定の終点到配分時間帯中に 1 回のみサービスを提供すると想定する。

起点が o である SAV プロバイダは、リンク・時刻別の MS 価格が $p^o = \{p_{ij}^o(\tau)\}_{vij,\tau}$ 、通行権価格が $e = \{e_{ij}(\tau)\}_{vij,\tau}$ であるとき、以下の利潤最大化問題を解き、保有する個々の SAV v の経路及び到着時刻を選択する：

$$\max_{(y^v, r^v) \in C^v} \sum_{v \in \mathcal{V}_o} \{(p^o - e)^T y^v - D^v(y^v, r^v)\} \quad (1)$$

$$D^v(y^v, r^v) \equiv (d - \epsilon^v)^T y^v - \hat{\epsilon}^v{}^T r^v \quad \forall v \in \mathcal{V}$$

ここで、 $d \equiv \{d_{ij}\}_{vij}$ 、 $\epsilon^v \equiv \{\epsilon_{ij}^v(\tau)\}_{vij,\tau}$ はそれぞれリンクコストの確定項および誤差項、 $\hat{\epsilon}^v \equiv \{\hat{\epsilon}_n^v(t)\}_{vn,t}$ は利用者に乗せることに対するコストである。また、 $y^v \equiv \{y_{ij}^v(\tau)\}_{vij,\tau}$ および $r^v \equiv \{r_n^v(t)\}_{vn,t}$ はそれぞれ SAV v ごとに定義される流出事故区別リンクフローおよび終点到着フロー (ともに 0-1 変数) であり、 C^v はフロー保存則を満たす (y^v, r^v) 全ての集合である。MS 料金を起点 o ごとに区別するのは、MS 需給を起点別に均衡させ、利用者がトリップの途中で別の SAV に乗り換える必要をなくするためである。

(4) 利用者

利用者は MS を利用して、特定の起終点間を配分時間帯中に 1 回トリップする。利用者は以下の費用最小化問題を時、経路及び到着時刻を選択する：

$$\min_{(x^u, q^u) \in C^u} p^{oT} x^u + C^u(x^u, q^u) \quad (2)$$

$$C^u(x^u, q^u) \equiv (c - \epsilon^u)^T x^u + (s - \hat{\epsilon}^u)^T q^u \quad \forall u \in \mathcal{U}$$

ここで、 $c \equiv \{c_{ij}\}_{vij}$ 、 $\epsilon^u \equiv \{e_{ij}^u(\tau)\}_{vij,\tau}$ はそれぞれリンクコストの確定項および誤差項、 $s \equiv \{s(t)\}_{vt}$ 、 $\hat{\epsilon}^u \equiv \{\hat{\epsilon}_n^u(t)\}_{vn,t}$ はスケジュール遅れ費用の確定項及び誤差項である。また、 x^u, q^u, C^u は、SAV に対する y^v, r^v, C^v と同じように定義される 0-1 のリンクフロー、終点到着フロー、その制約領域である。

3. 均衡状態

提案システムの均衡状態は、以下の 2 条件が同時に成立する状態である：

- (a) 利用者/SAV が最適行動をしている (i.e., $(x^u, q^u), (y^v, r^v)$ がそれぞれ (1),(2) の最適解である)。
- (b) 通行権/MS 市場それぞれで、需給が均衡するように価格が調整される：

$$\mathbf{0} \leq e \perp \mu - \sum_v y^v \geq \mathbf{0}$$

$$\mathbf{0} \leq p^o \perp \sum_{v \in \mathcal{V}_o} y^v - \sum_{u \in \mathcal{U}_o} x^u \geq \mathbf{0} \quad \forall o \in \Omega$$

これらの均衡条件は、フローの物理的制約および需給製薬の下で、社会的費用を最小化する最適化問題 [P] の最適性条件と等価である：

$$[P] \min_{(x, q), (y, r)} \sum_u C^u(x^u, q^u) + \sum_v D^v(y^v, r^v) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_v y^v \leq \mu \quad (4)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}_o} x^u \leq \sum_{v \in \mathcal{V}_o} y^v \quad \forall o \in \Omega \quad (5)$$

このことから、以下の命題が成立する：

命題 1 提案システムの均衡状態では、社会的に最適な道路容量/MS 容量の配分が実現する。

4. [P] の集計的表現

[P] は個々の主体毎に変数が定義される大規模な整数計画問題であるため、現実的な計算時間で解くことはできない。そのため、厳密な市場均衡状態 ([P] の厳密な最適解) を現実的な時間・手続き量で実現する取引ルールも構築できない。

そこで本研究では、0-1 変数を集計・連続化した連続変数により計算できる、近似的な総費用の最小化を目指す。都市交通システムには非常に多くの主体が参加するため集計変数の値は大きく、この連続近似による社会的損失は限定的であると考えられる。

そのために、まず主体の起点ごとに集計した変数

$$(X^o, Q^o) \equiv \sum_{u \in \mathcal{U}_o} (x^u, q^u), \quad (Y^o, R^o) \equiv \sum_{v \in \mathcal{V}_o} (y^v, r^v)$$

を導入し、[P] の目的関数をこれらの変数で定義される値に置き換える。本研究では、利用者/SAV の費用誤差項の集団全体での頻度分布が、各経路ごとに独立かつ同一に、パラメータ θ の Gumbel 分布に従うと仮定する。この仮定の下で、以下の命題が成立する：

命題 2 [P] は以下のような連続最適化問題 [A-P] で近似できる：

$$\min_{(X^o, Q^o), (Y^o, R^o)} \sum_o (\bar{C}^o(X^o, Q^o) + \bar{D}^o(Y^o, R^o)) \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_o Y^o \leq \mu \quad (7)$$

$$X^o \leq Y^o \quad \forall o \in \Omega \quad (8)$$

ここで、 $\bar{C}^o(X^o, Q^o), \bar{D}^o(Y^o, R^o)$ はそれぞれ、集計フロー $(X^o, Q^o), (Y^o, R^o)$ における利用者・SAV の総費用であり、

$$\begin{aligned} \bar{C}^o(X^o, Q^o) &\equiv c^\top X^o + s^\top Q^o \\ &+ \frac{1}{\theta} \left(\sum_{i,j,\tau} X_{ij}^o(\tau) \ln \frac{X_{ij}^o(\tau)}{\sum_i X_{ij}^o(\tau)} + \sum_{d,t} Q_d^o(t) \ln \frac{Q_d^o(t)}{\sum_t Q_d^o(t)} \right) \end{aligned}$$

, $\bar{D}^o(Y^o, R^o)$ も同様に計算される。

5. 提案メカニズム

本章以降では、前章までで定式化した均衡状態 ([A-P] の最適解) を達成する取引ルール (メカニズム) を提案する。メカニズム設計において難しい点は、市場管理者が、主体自身の個人情報である選好情報 (コスト誤差項の値、その分布パラメータ) を詳細に把握することが困難であるという点である。比較的単純な構造の市場であれば、オークション理論を活用することで、市場で

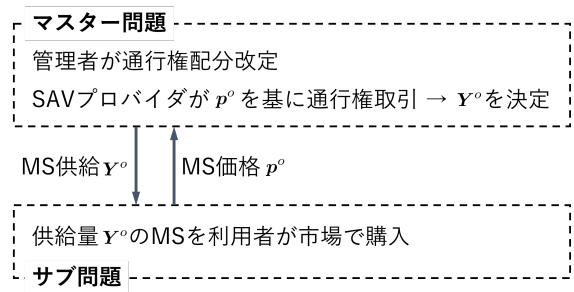


図-2: メカニズムの概要

の入札額等の形で選好情報を取得できる。しかし、提案システムは 2 種の市場が関連する複雑な構造を持つため、選好情報を得ることは難しい。

この課題を解決すべく、提案メカニズムでは、システムを通行権市場と MS 市場に分解し、各市場での日々の取引結果に基づき、Day-to-Day で市場全体を均衡状態へ収束させる。分解された通行権/MS 市場は単純な構造となるため、主体の選好情報を入札として取得し、最適配分を実現できる。そして、均衡状態へ収束させる操作は、市場取引の結果 (価格) のみを利用するため選好情報は必要ない。従って、部分市場で得る情報のみで市場全体の均衡状態を達成できる。

本研究では、このようなメカニズムの 1 つとして、図-2 に示すメカニズムを提案する。このメカニズムでは、SAV プロバイダが表明する需要を基に管理者が通行権配分を改定していき、均衡通行権配分に収束させる。

このメカニズムの手続きは、[A-P] を階層分解した問題を解く最適化アルゴリズムと等価である。具体的には、図-?? に示した 1 日の市場取引の手続きが最適化アルゴリズムの 1 反復に対応しており、この反復を毎日繰り返して通行権配分 Y^o を [A-P] の最適解へ向けて改定していく。

6. メカニズムの実装方法

メカニズムの手続きを具体的に示すため、[A-P] を 2 段階の最適化問題に分解する。

[A-P/Master]

$$\min_{(Y^o, R^o) \in \bar{C}_v^o} \left[\sum_o Z_u^{o*}(Y^o) + \sum_o \bar{D}^o(Y^o, R^o) \right] \left| \sum_o Y^o \leq \mu \right. \quad (9)$$

[A-P/Sub]

$$Z_u^{o*}(Y^o) \equiv \min_{(X^o, Q^o) \in \bar{C}_u^o} [\bar{C}^o(X^o, Q^o) | X^o \leq Y^o] \quad (10)$$

[A-P/Sub] は、MS 供給量 Y^o を与件として、利用者への最適 MS 配分 X^{o*} および価格 $p^{o*}(Y^o)$ (MS 供給制約の最適 Lagrange 乗数) を求める問題であり、利用者の

MS 市場での取引として実装できる。具体的には、MS 利用者内で Y^o の配分を決定するオークションを行うことで、最適な配分と価格 (X^{o*}, p^{o*}) を決定することができる。このオークションは組合せオークションであり、利用者の選好情報を入力額として正しく得られる (i.e., 耐戦略性のある) 詳細なメカニズム設計が必要となるが、本稿ではその詳細については割愛する。

[A-P/Master] はそのまま解釈することは難しいが、目的関数に含まれる $Z_u^{o*}(Y^o)$ を、任意の SAV フロー Y_s^o において“部分線形化”した問題は、SAV プロバイダへの最適通行権配分問題となる。より具体的に示すと、部分線形化問題は以下のように、価格 $p^{o*}(Y_s^o)$ で MS を供給できると予想する SAV プロバイダに対する通行権配分問題となる：

$$\min_{(Z^o, S^o) \in \bar{C}_V^o} \left[\sum_o -p^{o*}(Y_s^o)^\top Z^o + \bar{D}^o(Z^o, S^o) \right] \left| \sum_o Z^o \leq \mu \right. \quad (11)$$

ここで、包絡線定理より導かれる $\nabla Z_u^{o*}(Y^o) = -p^{o*}(Y^o)$ を利用している。

問題 (11) を解く操作は、通行権市場での取引として実装できる。通行権取引も MS 取引と同様に組み合わせオークション市場となるが、通行権の取引は管理者と比較的少数の企業との間で行われることから、同様の構造を持つ電力市場のように、複雑なメカニズムによる市場取引が十分可能である。

これらを活かし、部分線形化アルゴリズムに基づいた以下のようなメカニズムを構築する：

1. 管理者は Day s において $0 \leq \alpha_s \leq 1$ を決め、通行権のうち $\alpha_s \mu$ 枚を通行権市場に供給する。残りの通行権は中央集権的に各 SAV プロバイダに配分する。
2. SAV プロバイダは前日の価格 p_{s-1}^o で MS が完売できると想定して、通行権を落札し、MS 供給量を決定する。
3. 道路利用者は、供給された MS を市場で購入する。

1, 2 が部分線形化法における解の更新に相当する操作、3 がサブ問題を解き最適値関数の勾配を計算する操作に相当する。より具体的には、1, 2 で行う通行権 $\alpha_s \mu$ 枚の市場取引は、通行権供給量および SAV の総台数をそれぞれ α_s 倍して (11) を解くことに相当する。数量定数を全て α_s 倍しているため、この変形問題の解は、(11) の最適解を α_s 倍した $\alpha_s Z_s^o$ となる。そのため、管理者が残りの通行権を前日の配分比率に従って $(1 - \alpha_s) Y_{s-1}^o$ 枚ずつ各 SAV プロバイダに配分すれば、SAV プロバイダの受け取る通行権の数は $\alpha_s Z_s^o + (1 - \alpha_s) Y_{s-1}^o$ となり、1, 2 が解の更新に相当する操作となる。

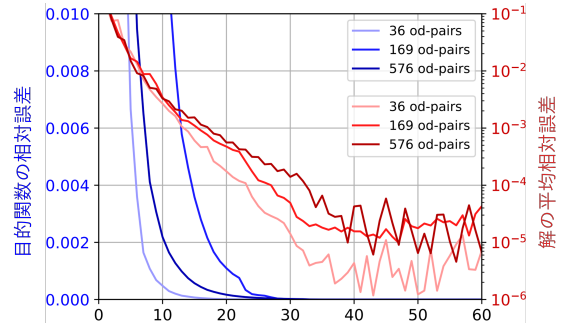


図-3: メカニズムの収束状況

管理者によるステップサイズ α_s の決定は、定数列とするか、次元探索により最適化する。次元探索には目的関数および (11) の解を (市場を介さずに) 管理者が計算できる必要がある。この計算は、主体の選好情報を全く得ていない状態では難しいが、数日分の市場取引の結果 (入札額等) から主体の費用誤差項 ϵ^u, ϵ^v の分布を推定することで、近似的に可能である。

部分線形化法の性質より、以下の命題が成立する：

命題 3 提案メカニズムは、各 Day で必ず社会的費用を前日より減少させ、 $s \rightarrow \infty$ の極限において均衡状態に収束する。

7. 数値計算例

最後に、メカニズムの収束性能を調べる数値実験の結果を図-3に示す。実験は Sioux-Falls ネットワーク (24 ノード, 76 リンク) において、時間帯数を 40 とし、起終点数を 3 種類設定して行った。実験結果から、提案メカニズムは目的関数誤差 $((Z^s - Z^*)/Z^*)$ 、解の平均誤差 $(\|\xi^s - \xi^*\|/\|\xi^*\|)$ 両方の指標で、起終点数によらず最適解に収束している。ここで、 $\xi \equiv (X, Q, Y, R)$ であり、添え字 s は Days での暫定値、* は均衡状態での値を表している。このことから、提案メカニズムは、現実的な道路網において、1ヶ月程度で十分な精度で均衡状態に収束することが明らかとなった。

8. おわりに

本研究では、道路容量と MS 容量の配分を行う 2 つの市場を組み合わせた新たな市場型交通システムを提案し、その均衡状態が社会的費用を最小化することを示した。そして、均衡状態を達成するメカニズムを提案し、その収束性能を明らかにした。

REFERENCES

1) Akamatsu, T. and Wada, K.: Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity, *Trans-*

- portation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.79, pp.178–195, 6 2017.
- 2) Castillo, J. C., Knoepfle, D., Athey, S., Azevedo, E., Bresnahan, T., Einav, L., Gentzkow, M., Johari, R., Levin, J., Snyder, C., Sutherland, R. and Skrzypacz, A.: Surge pricing solves the wild goose chase, *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Economics and Computation*, Vol.1, 2017.
 - 3) Ma, J., Li, X., Zhou, F. and Hao, W.: Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.84, pp.124–141, 11 2017.
 - 4) Chen, X. and Di, X.: Ridesharing user equilibrium with nodal matching cost and its implications for congestion tolling and platform pricing, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.129, pp.103233, 8 2021.
 - 5) Liu, Y. and Li, Y.: Pricing scheme design of ridesharing program in morning commute problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.79, pp.156–177, 6 2017.
 - 6) Beheshtian, A., Geddes, R. 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*, Vol.131, pp.58–69, 1 2020.