

# マルチエージェントシミュレーションを用いた地方都市における 自動運転乗合タクシーの事業性の評価 —群馬県沼田市周辺を対象として— Evaluating the Feasibility of Shared Autonomous Vehicles in Regional Towns, Using a Multi-Agent Simulation

東京大学工学部都市工学科 03-160168 吉川 仁

Technological innovation in both autonomous driving and ridesharing have raised a question about whether shared autonomous vehicles (SAV) would become one of our main means of transportation in the future. Using a multi-agent simulation, this study aims to answer this question in the context of regional towns in Japan by evaluating the feasibility of SAVs from the perspectives of both the SAV suppliers and the agents. The feasibility of peer-to-peer SAVs (P2P-SAV) which make use of privately-owned autonomous vehicles when not in-use is also assessed. Results suggest that while it is highly unlikely for SAVs to achieve profitability while also fulfilling the transportation needs of the agents in multiple scenarios, P2P-SAVs could be feasible even in scenarios with low car ownership rate. However, the overall vehicle kilometers travelled could not necessarily be reduced by ride-sharing as P2P-SAVs have to travel long distances for passenger pick-up even when no passenger is on board.

## 1. はじめに

### 1.1. 本研究の背景

近年、私たちは自動車の自動運転技術の急速な発展を目の当たりにしている。現在の Alphabet 傘下 Waymo となる自動運転車開発プロジェクトを Google が発足させた 2009 年から 10 年が経とうとしているいま、トヨタ自動車やゼネラルモーターズといった大手自動車製造会社もそろって技術開発に着手し、実に多様なプレイヤーがその技術を先へと押し進めている。

同様に、カーシェアリングやライドシェアリングといった自動車をサービスとして利用する形態も急速に普及しており、これは自動運転技術との親和性が高く、ライドシェア自動運転車(Shared Autonomous Vehicle, SAV)の運用に向けても幅広いプレイヤーが動き始めている<sup>1)2)</sup>。SAV は今後の我々の主要な交通手段となる可能性が高いものの、一方で人口密度の低い地域においては SAV を運用するのに十分な顧客数が得られず、サービスを維持できない可能性が高い。SAV の運用が事業的な観点から可能であるかどうかは、今後の都市交通、都市計画の文脈において重要な問題になると思われる。

### 1.2. 本研究の目的

SAV の運用が事業として成立するかどうかは重要な論点であると捉え、本研究では地方都市の一つである対象地域の群馬県沼田市周辺においてその SAV の事業性が存在するか、即ち実際に将来 SAV が導入され市民の足と成り得るかどうかについて検証することを目的とする。

本研究ではこの事業性を、SAV を運営する企業や組織が利益を得ることができるかどうか(採算性)、エージェントが必要最低限のモビリティを確保できているかどうか(利便性)といった観点から評価する。

Fagnant & Kockelman (2018) や Ciari et al. (2015) をはじめとする先行研究の多くは人口密度の高い都市部における各種シェアリングサービスの導入効果を取り扱っており、本研究の対象地域のような人口密度の低い地方都市を対象とした論文は少ない<sup>3)4)</sup>。また、SAV などのシェアリングサービスを実際に運用する企業や組織の立場から、採算性を評価したり最適料金体系を把握するような研究は多くはない。本研究の地方都市における SAV の採算性というテーマは先行研究ではほとんど触れられていないものであると認識している。

## 2. 方法と仮定

### 2.1. 本研究の方法

本研究では MATSim を活用している。MATSim は一日単位のアクティビティをベースとするマルチエージェントシミュレーションを行う、Java によって実装されているオープンソースのフレームワークであり、このフレームワークを筆者が所属する研究室のメンバーが加筆修正を加えたものを使用している<sup>5)</sup>。MATSim では各エージェントが自らの一日のスケジュールを最適化しながら、限られた交通インフラの容量の中で全ての交通流を再現するというループを何度も(本研究では 300 回)繰り返すという操作を行う。このループの概要を図 1 に示す。



図1 MATSimのループの概要<sup>6)</sup>

本研究では対象地域として、空間的に精度の高いパーソントリップ調査（以下 PT 調査）データのある群馬県の中でも、トリップが地域内で完結しているケースが多い群馬県北部にある沼田市および利根郡を取り上げる。

エージェントの行動の元データとして、平成27年度、28年度群馬県 PT 調査で把握されたトリップのうち、対象地域内でトリップが全て完結している1476人のトリップを扱うことにした。これは対象地域の人口の約2.23%にあたるため、それに合わせ道路ネットワークの交通容量を約2.23%に縮小した。なお道路ネットワークファイルはOpenStreetMapのデータをもとに作成した。

## 2.2. シミュレーションにおける仮定

各エージェントは PT データに記載された各トリップを、OD の位置、アクティビティ終了時刻、トリップ開始時刻を固定としてシミュレーション上で行う。最初のループでは PT データに記載された交通手段を使い、以降210回目のループまでは、ループごとに全体の3割のエージェントはランダムで新たな交通手段を用いたスケジュールに変更し、残り7割はそれまでに選択したスケジュールの中からスケジュールの効用に基づいて確率的に次のスケジュールを選択する。続く90回は全てのエージェントが次のスケジュールを確率的に選択する。効用は、アクティビティによって得られる効用と各トリップの際に生じる負の効用の和として算出され、特に後者には、所要時間と費用を説明変数として群馬県 PT 調査の全ての有効データから推定した多項ロジットモデルの効用関数（表1）を使用している。

表1 パラメータの推定結果

変数	係数	t 値
定数項 [自動車]	-2.274	-10.74
定数項 [徒歩]	-0.5740	-4.440
所要時間 [自動車]	-10.24	-4.712
所要時間 [自転車]	-12.48	-15.89
所要時間 [徒歩]	-9.657	-58.38
費用 [自動車]	-0.03195	-3.383
尤度比	0.6920	
自由度調整済み尤度比	0.6897	

本研究のシミュレーションで運用される SAV は同時

に3人のエージェントを輸送することができ、午前0時から次の日の午前3時までの27時間稼働することができる。SAV は対象地域の中でランダムに初期配置され、エージェントのリクエストに応じて道路ネットワーク上を動き、全てのリクエストを完了させると、次の新たなリクエストが割り当てられるまでその場で停止する。

SAV はエージェントからの配車リクエストがあると、以下のルールに基づいて配車される車両と乗車と降車のタイミングのパターンが決定される。各エージェントの待ち時間が30分以内でかつ、目的地到着までの乗車時間が乗車をせずに一人で SAV を利用した際にかかる乗車時間の3倍+20分以下であることを前提条件に、エージェントを迎車、降車させることで余分にかかる時間の和が最小である車両とパターンの組み合わせが選択される。

また、本研究では PAV を保有するエージェントの一部が、自身が使用していない時間帯に他のエージェントに貸し出しをする peer-to-peer SAV (P2P-SAV)についても扱っている。SAV と同様のロジックで配車が行われ、利用者にとっても SAV と同等であるが、稼働する時間帯が貸し出し者が PAV として使用していない時間帯に限定されていること、初期位置が利用開始前に PAV を使用し終えた場所になっていることの2点で SAV とは異なる。

エージェントは SAV (P2P-SAV を含む) の他に徒歩、自転車、PAV (保有している場合のみ。シナリオで設定される保有率に応じて潜在的 PAV 保有者 (後述) に与える)、自動運転ではない自家用車 (現況再現のみ) の交通手段を選択することができる。SAV と自家用自動運転車 (PAV) については、乗車中に作業などができることから、所要時間に対する限界効用をそれぞれ自動車の 3/4、1/2 と仮定し、SAV の待ち時間も所要時間に含めた。徒歩と自転車については出発地点から目的地までの直線距離の1.2倍の距離をそれぞれ4km/h、9km/hで移動するとした。

SAV の料金は、OD 間直線距離に比例する料金と距離に依存しない基本料金の和 (シナリオによって異なる) に、出発の時間帯に応じた係数 (朝6時前か夜10時以降であるトリップについては1.3とし、他の時間帯は1) をかけたものとして設定している。

## 2.3. 評価指標の定義

**SAV の採算性** 収入は発生したすべての SAV トリップの料金の和とし、支出は稼働される SAV 一台ごとに発生する固定費と、移動した距離に応じて発生する変動費の和とする。一台あたりの固定費は、SAV 一台の販売金額

を 300 万円、使用年数を 5 年、一年で発生する維持費を 50 万円とし、それを一日あたりの発生額に換算することで算出する。変動費は、各 SAV が移動した距離について現状のガソリン代を参考に 1km あたり 6.08 円として算出する。P2P-SAV に関しては、本研究では既存のライドシェアリングサービスのビジネスモデルを参考に、各々の P2P-SAV で発生した収入の 75%を車両を貸し出している所有者が、25%を配車サービスを行う企業が獲得できるとし、支出については固定費に加え変動費も全て所有者が負担するとした。

**潜在的な交通弱者** 本研究では現況のトリップを参考に、37 分以下の徒歩または自転車トリップは交通の利便性の観点からみて許容範囲のトリップであるとし、所要時間がそれを超える徒歩または自転車トリップを一度でも行うことになる（OD 固定であるため“行わざるを得なくなる”）エージェントは、その長時間のトリップを実際は行わなくなる可能性があると思われるため、「潜在的な交通弱者」とし、その割合を評価する。

**潜在的な PAV 購入者** SAV を一度でも利用したエージェントがシミュレーションで出力されたスケジュールを毎日繰り返すと仮定した上で、仮に PAV を購入し SAV のトリップをすべて PAV に置き換えた場合にかかる一日あたりの一般化費用が SAV 利用時のそれを下回れば、潜在的に PAV を購入する可能性があると考え、そのエージェントの割合を評価指標とする。前者については、PAV 一台の価格を 200 万円、使用年数を 8 年、一年間に発生する維持費を 35 万円と仮定したときの一日換算された費用を固定費とし、変動費は SAV を仮に一人で利用したときの移動距離 1km あたり 6.08 円として算出する。後者は SAV の料金の和に、乗合により余分にかかる移動時間と待ち時間を 1分あたり 10円として貨幣換算したものを加える（図 2 を参照）。

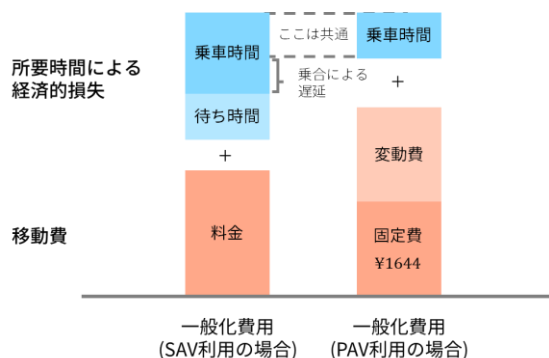


図 2 PAV,SAV 利用時の一般化費用の計算と比較方法

## 2.4. シナリオ設定

本研究では 11 のシナリオでシミュレーションを行い、

全エージェントの PAV 保有率によって 4 つのグループに分類した。グループ A と B は企業保有の SAV を投入、グループ C と D はそれに代えて P2P-SAV を投入したシナリオであり、その中で料金体系に違いを持たせた。

## 3. 結果と考察

PAV 保有者が存在しないグループ A のシナリオ(表 2)では、A2 と A3 の料金体系下が長距離移動者から多くの収入を確保することで高い利益を獲得することができて一方、多くの潜在的な交通弱者と潜在的な PAV 購入者エージェントを発生させてしまっている。料金を安くした A4 では現状並みの潜在的な交通弱者割合の水準を維持できているものの、利益を著しく減らしている為、採算性は確保しにくいと思われる。このように、SAV には明確な採算性と利便性のトレードオフが存在することが確認できた。

表 2 グループ A-SAV 独占グループの結果

シナリオ	A1	A2	A3	A4
PAV 保有率			0%	
SAV 台数			100	
基本料金	¥ 300	¥ 50	-	-
km 毎料金	-	¥ 40	¥ 60	¥ 30
SAV 分担率	31%	48%	54%	77%
SAV 利益	¥ 52,767	¥ 179,466	¥ 250,403	¥ 21,297
乗合発生率	52%	51%	48%	55%
潜在的な交通弱者割合	12%	6%	8%	1%
潜在的な PAV 購入者の割合	2%	4%	9%	0.4%
VKT [km]	11,409	13,082	12,807	17,782

表 3 グループ B-保有率 25%SAV グループの結果

シナリオ	B1	B2	B3
PAV 保有率			25%
SAV 台数		100	50
基本料金	¥ 50	¥ 50	-
km 毎料金	¥ 40	¥ 40	¥ 30
SAV 分担率	31%	23%	47%
SAV 利益	¥ -56,555	¥ 14,353	¥ -33,243
乗合発生率	29%	28%	42%
潜在的な交通弱者割合	5%	6%	2%
潜在的な PAV 購入者の割合	3%	3%	0.5%
VKT [km]	16,189	15,419	19,668

PAV保有者が存在しないシナリオは比較的非現実的である(潜在的PAV購入者も存在している)ため、PAV保有率を仮に25%に引き上げたときの結果を調べるのがグループBの各シナリオ(表3)である。唯一利益を正にすることができているB2では潜在的交通弱者が多く発生しており、その割合が少ないB3では利益を獲得することができない。このようにPAV保有率を全体の1/4程度に引き上げるだけでも、採算性と利便性を両立させるのは困難になってしまうことが分かる。

P2P-SAVが投入されているグループC・Dのシナリオ(表4)では、料金体系が安いC2、D2の2シナリオにおいて潜在的交通弱者の割合が現況再現並みに低くなり、潜在的PAV購入者の割合も低いことから、利便性については確保されていると言える。P2P-SAVは企業型SAVとは違い利用可能時間などに制約があるが、それが利便性にはほとんど影響していないと言える。採算性についてはP2P-SAVに関しては、車両を貸し出しているエージェントが得られる利益の分布を見ることで評価する(図3)。

表4 グループC, D-P2P-SAV グループの結果

シナリオ	C1	C2	D1	D2
PAV保有率	25%		50%	
P2P-SAV台数		100		
基本料金	¥50	-	¥50	-
km毎料金	¥40	¥30	¥40	¥30
SAV分担率	32%	56%	17%	35%
乗合発生率	28%	41%	21%	36%
潜在的交通弱者割合	4%	2%	4%	0%
潜在的PAV購入者の割合	2%	0.2%	3%	0.1%
VKT [km]	16,562	19,922	16,920	19,702

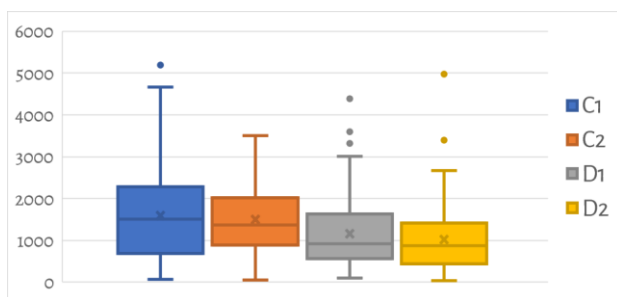


図3 貸し出し者が得られる利益(円)の分布

図3から、各グループで料金を格安に設定しても、大多数の貸し出し者の利益は大きくは変動しないことが分

かる。また貸し出し者のPAVにかかる一日平均コスト(保有・維持による固定費+移動距離に応じた変動費)は2,000円ほどであるが、特にC2では4人に1人はこのコストを貸し出しすることで回収できることになる。このことから、P2P-SAVは格安料金でもそれにより需要が拡大し貸し出し者は多くの利潤が得られることが分かる。

#### 4. 結論と今後の課題

本研究で得られた主要な示唆は以下の3つである。

1. 企業保有型SAV(グループA・B)では、PAV保有者がいない(非現実的な)シナリオでは一つのシナリオでのみ採算性と利便性の両立が図れているが、保有率が25%に上がると両立ができなくなってしまう。
2. P2P-SAVは比較的導入がしやすく、PAV保有率が50%を下回っていても料金体系を安くすれば、保有者が得られる利益をあまり失わずに現況並みの利便性を確保することができる。
3. 今回のシナリオでは、採算性と利便性を確保しつつ、VKTを現況よりも削減できるほどの乗合を発生させるのは難しい。

本研究には、エージェント数の拡大、効用関数の見直し(心理的要素の考慮など)、様々な料金体系の設定、SAVの配置計画といった今後の課題がある。

#### 謝辞

研究を進めるにあたりお世話になった先生方、修士1年の上条君、そしてPT調査データを提供して頂いた群馬県県土整備部都市計画課に深く感謝します。

#### 参考文献

- 1) LeBeau, P., 2018. Waymo starts commercial ride-share service. CNBC News, 5 12.
- 2) Muoio, D., 2016. Uber is wrong to compare its self-driving cars to Tesla's Autopilot — here's why. Business Insider, 19 12.
- 3) Fagnant, D. Kockelman, K., 2018. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas, Transportation, 45:143-158.
- 4) Ciari, F., Balac, M. Balmer, M., 2015. Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand: a test case for Zurich, Switzerland, Transportation, 42:413-433.
- 5) 上条, 羅, トロンコソ パラディ, 高見, 原田, 2019. エージェントベースシミュレーションを用いた自動運転車普及シナリオの評価, 交通工学論文集(特集号), 2019年5巻2号, A\_142-A\_151.
- 6) Horni, A., Nagel, K. Axhausen, K. W., 2016. The multi-agent transport simulation MATSim, London: Ubiquity Press Ltd.