

# 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 Scenario Evaluation of Autonomous Vehicle Spread Using Agent-Based Simulation

東京大学工学部都市工学科 03-160150 上条 陽

This study analyzes the influence of autonomous vehicle (AV) on urban transportation using agent-based simulation. Assuming an AV share of 100%, the modes considered are private AV, car share AV and ride share AV. 8 AV spreading scenarios are defined based on AV use patterns and the dispatch algorithm in the case of sharing AV scenarios. MATSim which features co-evolutionary algorithms is used for the simulations. Findings suggest that even in rural cities highly dependent on cars, AV sharing can result in an increase in total travel distance, a reduction in the number of required vehicles, and relaxation of road congestion.

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

近年、世界的に自動運転を巡る技術開発が活発となり、「官民 ITS 構想・ロードマップ 2017」<sup>1)</sup>においても、2025年を目途に高速道路での完全自動運転システムの市場化を目指すといった戦略が示されており、今後自動運転車 (AV : Autonomous Vehicle) が一層身近なものとなるとともに新技術への期待が高まっていくことは明らかである。

並行して、自動運転技術やそれに基づく新しい交通サービスが人の移動や都市・交通に与える影響に関して、様々な議論がなされている。ポジティブな側面では、例えば、自動車を利用できない人や交通の不便な地域の住民の新たな足になることや、AV がシェアリングの形態で普及すると駐車空間の必要性が減り<sup>2)</sup>、自動車のための空間であった土地をより有効に活用できることが期待されている。反面、従来は自動車を使わずに移動していた人が AV を利用するようになって車両の総走行距離が増大する可能性や、交通不便地域でも便利に住み続けられるようになるがゆえに、多くの自治体を目指す都市のコンパクト化の流れに逆行する影響をもたらす可能性も指摘されている。

こうした影響がどう現れるかは、AV の普及がどのような形態に進むかにもよると考えられる。すなわち、①個人や世帯が保有する形態、②企業などが所有する車両を利用者が使いたい時に借りて使う形態、③企業などが所有しデマンド運行する車両を利用者が乗合で利用する形態、④企業などが所有し定時定路線運行する車両を利用者が乗合で利用する形態、のそれぞれ<sup>3)</sup>が将来どの程度存在し使われるかによって、影響は変わってこよう。しかし、この点に関してどのような未来が訪れるかは不確実性が大きいと、複数のシナリオを設定して分析を行うことが現実的である。

既存研究では、Fagnant and Kockekman<sup>3)</sup>はテキサス州オースティン市を対象に、上記②と③が普及した際の影響をシミュレーションし、いずれのシナリオにおいても1台のAVが従来の自動車10台以上のトリップを代替すること、走行台キロ (VKT : Vehicle-Kilometers Traveled) は②で運用された場合9%程度増加するが、③の場合は増加が5%以下に抑えられることを示した。OECD<sup>2)</sup>はポルトガルのリスボン市を対象に同様に②と③の影響を分析し、②で運用された場合は1台のAVで5台程度を代替しVKTは44%の増加、③の場合は10台程度を代替しVKTは6%の増加と算出している。しかし、これらの研究で行われているシミュレーションは、ネットワークや交通手段選択が大幅に単純化されている点で限界がある。

### 1.2 研究の目的

以上の背景から、本研究では、上記①～③の形態のAVの普及シナリオを複数設定し、それらが地方都市の交通にもたらす影響をエージェントベースシミュレーションに基づき比較・評価することを目的とする。

具体的には、詳細な位置座標情報の付いた平成27・28年度群馬県パーソントリップ調査 (以下「PT調査」) のデータからエージェントを生成し、エージェントベースシミュレーション・MATSimを用いたシミュレーションを行って、AV普及シナリオの評価を行う。また、交通手段選択にはPT調査データから推定したモデルを用いる。評価の観点としては、本研究ではVKTや道路混雑など都市交通への影響に特に着目する。なお、以降では①を自家用AV、②をカーシェアAV、③をライドシェアAVと呼び、②と③をまとめてシェア型AV (SAV) と呼ぶ。

## 2. シミュレーションの諸条件の概要

### 2.1 MATSim の概要

本研究では、ループ毎個人毎に最適化が行われる個別改善型アルゴリズムを特徴に持つエージェントベースシ

ミュレーションである MATSim を用いる<sup>4)</sup>。

各エージェントの「スケジュール」を入力して交通流シミュレーションを実行し、その結果から各エージェントがそのスケジュールで行動する効用を評価する。スケジュール調整では、全エージェントからランダムに選ばれた一定割合（本研究では3割）のエージェントについては前回のスケジュールをランダムに変更して新たなスケジュールを作り、残りのエージェントについては効用の高いスケジュールをロジットモデルに従い選択して、次の入力スケジュールとする。本研究では200回ループを繰り返した。

## 2.2 対象地域と交通ネットワーク

本研究では群馬県北部の沼田市と利根郡周辺を対象地域とした。本研究で用いるサンプルは1,524人であり、抽出率は2.15%である。道路ネットワークはOpenStreetMapから作成した。道路の交通容量はOpenStreetMapの情報を使用している。本研究では個別のサンプルを拡大係数で拡大するのではなく、道路容量に上記の2.15%を掛け合わせることで、道路混雑の状況を擬似的に再現した。

## 2.3 交通手段選択モデル

各エージェントの交通手段選択は多項ロジットモデルで記述された交通手段選択モデルに従って確率的に行われるものとし、現況の自動車、鉄道、徒歩、自転車の選択を説明するモデルを構築した。選択肢は上記の4手段、説明変数は所要時間（単位：時間）と費用（単位：円）<sup>\*3</sup>、ならびに定数項とした。パラメータの推定は、分担率の低い鉄道と自転車に関しても安定したパラメータを得るために、PT調査データの全ての有効サンプル（61,553人、175,989トリップ分）を使用して行った。

表1 交通手段選択モデルの推定結果

変数	係数	t 値
定数項 [自転車]	-2.20	-103.2
定数項 [徒歩]	-0.403	-17.7
定数項 [鉄道]	-4.17	-58.2
所要時間 [自動車]	-4.53	-19.6
所要時間 [自転車]	-4.26	-63.5
所要時間 [徒歩]	-7.52	-102.5
所要時間 [鉄道]	-0.324	-3.24
アクセス・イグレス時間 [鉄道]	-2.57	-27.4
費用 [自動車]	-0.00976	-14.1
費用 [鉄道]	-0.00297	-14.6
尤度比	0.631	
自由度調整済み尤度比	0.631	

推定結果を表1に示す。パラメータはいずれも有意水準1%で有意であり、符号条件や尤度比からも妥当なモデルと判断する。なお、このモデルを用いたシミュレ

ーションの現況再現性は4.1で検討する。

## 2.4 現存しない交通手段の扱い

当然ながら、前節のモデルから現存しないAVの手段選択確率を求めることはできない。本研究では、既存の自動車に比べAVは移動時間をより自由に使えるという点から、基本的には前節の自動車として扱いながら、効用関数の所要時間のパラメータ値を0.5倍にして選択確率を求めると設定をした。また、道路ネットワークを俯瞰した形でAVを制御できるようになって交通が円滑化されると仮定し、自動運転シナリオにおける全ての車両の乗用車換算係数を0.8台と設定した。

本研究ではSAVはリクエスト地点から目的地までDoorToDoorで運行されるとする。料金に関しては、現実の鉄道の料金が1kmあたりおよそ20円であるのに対して、カーシェアAVでは走行距離1kmあたり50円、ライドシェアAVでは乗合による走行距離増が発生するため走行距離に対して料金を課するのではなく、ODの直線距離1kmあたり40円と仮定した。

## 2.5 シェア型AVの配車アルゴリズム

本研究では全てのシナリオにおいてリクエスト地点に近い100台のSAVのうち、そのリクエストによって被るタイムロス車両側とエージェント側に分けて、その重み付き合計時間が最も短いSAVを配車するように設定した。

詳しくは、配車リクエストを出したエージェントAを迎えに行くことで生じるタイムロスを $T_{pickup}$ とし、エージェントAを降ろしに行くことで生じるタイムロスを $T_{dropoff}$ とする。また、エージェントAが目的地に着くまでの時間を $T_{wait\&ride}$ とする。このとき、車両側が被るタイムロスは $T_{pickup}+T_{dropoff}$  ( $\equiv T_{total}$ )となる。一方、エージェントAがリクエストを出してから目的地に着いて降りるまでの間にそのSAVから降車したエージェント（人数を $N_{before}$ とする）の被るタイムロスは、1人あたり $T_{pickup}$ である。また、エージェントAが目的地に着いて降りた後にそのSAVから降車するエージェント（人数を $N_{after}$ とする）の被るタイムロスは1人あたり $T_{pickup}+T_{dropoff}=T_{total}$ である。その上で、シナリオ毎に異なるパラメータとして、車両側のタイムロスにかかる重みを $W_{sav}$ 、エージェント側の重みを $W_{agent}$ とすると、リクエストによって被るタイムロスの重み付き合計時間 $T$ は次式(1)で表される。

$$T = W_{sav} \cdot T_{total} + W_{agent} (T_{wait\&ride} + N_{before} \cdot T_{pickup} + N_{after} \cdot T_{total}) \quad (1)$$

## 3. シナリオの設定

本研究では、現況再現シナリオに加えて、自動運転車が普及した際のシナリオを、地域に何台のどのタイプのSAVを実装するか、配車設定をどうするか、AVの維持コストが著しく上昇するか否かの3項目で分けて設定をした。大きく自家用車グループ、カーシェアグループ、

ライドシェアグループに分けられる。

自家用車グループは以下の2つのシナリオからなる。

- [1] “現況再現シナリオ”
- [2] “自家用 AV シナリオ”

両シナリオの違いは2.4節にて述べたとおりである。なお、以降のシナリオは全て自動運転を用いたシナリオとなり、シナリオ[2]をベースとして説明していくためベースシナリオとも呼ぶ。

カーシェアグループは以下の2つのシナリオからなる。

- [3] “カーシェア低普及シナリオ”
- [4] “カーシェア独占シナリオ”

シナリオ[3]はベースシナリオに100台のカーシェアAVを実装したシナリオであり、シナリオ[4]はベースシナリオに200台のカーシェアAVを実装し、自家用車を除いたものとなる。また、2.5節に述べた配車設定は2つのシナリオとも $W_{sav}$ は0、 $W_{agent}$ は1とした。

ライドシェアグループは以下のシナリオ[5]～[6]と、シナリオ[6]をもとに配車設定を変えたシナリオ[7]～[9]の計5シナリオからなる。

- [5] “ライドシェア低普及シナリオ”
- [6] “ライドシェア独占シナリオ”
- [7] “ライドシェア独占乗合シナリオ”
- [8] “ライドシェア独占乗合台数削減シナリオ”
- [9] “ライドシェア独占ユーザ優先シナリオ”

シナリオ[5]は、ベースシナリオに100台のライドシェアAVを実装したシナリオであり、シナリオ[6]はベースシナリオに200台のライドシェアAVを実装し、自家用車を除いたものとなる。また、2.5節に述べた配車設定は2つのシナリオとも $W_{sav}$ と $W_{agent}$ は1とした。シナリオ[7]は[6]をもとに配車設定を $W_{agent}$ は0とした。シナリオ[8]は[7]をもとにライドシェアAVの台数を100台としたシナリオである。シナリオ[9]は[6]をもとに配車設定を $W_{agent}$ は10とした。

#### 4. 各シナリオの評価結果

##### 4.1 現況再現性の評価

まず本研究で扱った4つの交通手段の分担率について、現況再現シナリオのシミュレーション結果を、入力に使った対象地域のPTデータ集計結果、ならびに群馬県全体の集計結果と比較する(表2)。

対象地域は群馬県に比べて自転車分担率が低く、徒歩分担率が高い。全域のPTデータから推定したモデルを用いたシミュレーション結果は、対象地域より群馬県に近いが、これは後者に引っ張られたものと解釈できる。また、対象地域内の鉄道駅はJR上越線の6駅のみで、鉄道分担率は群馬県と比べても非常に低い。現況再現での分担率はさらに低く、十分に当たっているとは言いが、分担率の低さゆえシミュレーション結果には大きな影響を及ぼさないものと考え、分析を進める。

表2 交通手段分担率の比較

	現況再現 シナリオ	対象地域 PT調査集計	群馬県 PT調査集計
鉄道	0.1%	0.6%	2.1%
自家用車	80.0%	82.3%	76.9%
自転車	9.1%	2.7%	9.2%
徒歩	10.8%	14.4%	11.8%

#### 4.2 自動運転車普及シナリオの評価

##### (1) VKT と混雑度

現況再現シナリオ[1]と比べた際の主要シナリオのVKT増加率と8～9時の混雑度0.5以上のリンク数を表3に、そのうちSAVを用いたシナリオのVKTと、VKTに占める空車走行距離の割合を表4に示す。

自家用AVシナリオ[2]は、免許を保有していないユーザーも自家用AVを利用できるためVKTが5%増加したが、車両制御により交通の円滑性が高まると仮定したため混雑リンク数は減少している。一方、カーシェア独占シナリオ[4]においてはVKTが25%増加し、その要因が空車走行距離にあることが示された。混雑リンク数もAVを用いたシナリオの中では最も悪い結果となった。ライドシェアAVを用いたシナリオについては、乗り合うように配車するシナリオであるほうがいずれの指標も良い結果が得られる傾向を示した。特に混雑リンク数が著しく改善しており、リクエストの多いピーク時に乗り合いのマッチングが最も成立し、交通量削減の効果が大きくなることが示唆される。

表3 VKT増加率と混雑度の比較

シナリオ	VKT増加率	混雑度0.5以上の リンク数
[1] 現況再現	-	190
[2] 自家用AV	5.1%	137
[4] カーシェア独占	24.5%	165
[6] ライドシェア独占	4.6%	37
[7] ライドシェア独占 乗合	-11.2%	24
[9] ライドシェア独占 ユーザ優先	13.8%	40

表4 VKTと空車走行距離割合の比較

シナリオ	VKT (台・万km)	空車走行距離 の割合
[4] カーシェア独占	2.44	22%
[6] ライドシェア独占	2.05	14%
[7] ライドシェア独占 乗合	1.74	8%
[9] ライドシェア独占 ユーザ優先	2.23	17%

##### (2) 1台のSAVが代替するトリップ数

各シナリオにおいてSAVが担ったトリップ数と、地域に実装されたSAVのうち利用されたSAV車両の割合を

表5に示す。

表5 SAVが代替したトリップ数の比較

シナリオ	SAV トリップ数	SAV 車両の 利用率(台/台)
[3] カーシェア低普及	676	78/100
[4] カーシェア独占	3776	191/200
[5] ライドシェア低普及	799	61/100
[6] ライドシェア独占	3912	145/200
[7] ライドシェア独占 乗合	3812	101/200
[8] ライドシェア独占 乗合台数削減	3825	84/100
[9] ライドシェア独占 ユーザ優先	3437	145/200

カーシェア低普及シナリオ[3]とライドシェア低普及シナリオ[5]では1台で約10トリップを代替するに留まったのに対し、その他のシナリオでは20トリップ以上を代替した。よって、車両のシェアリングによる地域のトリップ需要を担う車両数の削減効果は、地方都市においても、乗合によるタイムロスに許容的であれば大きいと期待されることがわかる。

### (3) 乗合による不効用の評価

ライドシェアAVを用いた各シナリオについて、乗合による1トリップ当たり平均走行距離増加率と1人あたり平均効用を表6に示す。

ライドシェアAVの乗合を誘導するシナリオ2つでは乗合による回り道で走行距離が70%以上増加しており、平均効用も低い値を取っている。これは過剰な遠回り効用を下げているのみならずVKT削減効果も低減させていると推察される。

表6 乗合による不効用の比較

シナリオ	1トリップ あたり平均 走行距離 増加率	1人あたり 平均効用
[6] ライドシェア独占	13.7%	-5.25
[7] ライドシェア独占 乗合	74.7%	-6.86
[8] ライドシェア独占 乗合台数削減	71.7%	-6.99
[9] ライドシェア独占 ユーザ優先	5.15%	-5.75

## 5. 結論と今後の課題

本研究では群馬県沼田市・利根郡周辺を対象に、自家用AV、カーシェアAV、ライドシェアAVの3種の交通手段に関する8個の普及シナリオを設定し、それらが都市交通にもたらす影響を分析した。その結果、先行研究にて示された自動運転車のシェアリングによるVKTの増加や、車両数の削減と言った影響を国内の地方都市と

いった異なる条件においても確認することができた。最後に本研究の限界と今後の課題について整理する。

第一に、シミュレーションにおいて現存しない交通手段を扱っていることも相まって、現時点では非常に多くの仮定を置かざるを得ず、シミュレーションによる再現精度の検証が不十分なことが挙げられる。

第二に、本研究では交通手段選択モデルが非常に単純化したものであり、目的別の交通手段選択モデルにするなどモデルの精緻化とともに、この交通手段選択モデルをシミュレーションで利用することの妥当性をより明確に示すことが課題となる。

第三に、本研究ではPT調査の個票トリップデータをそのままエージェントの移動需要として入力したが、そのため対象地域の移動需要が極めて疎に扱われている。本来ならばより高密度にSAVの配車リクエストが発生し、より効率よく乗り合うことや車両を共有することもできると考えられる。よって、アクティビティベースの交通需要モデルを対象地域にて構築し、より多くのエージェントを対象にシミュレーションを行うことが課題となる。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、多くのご助言をいただいた東京大学大学院修士課程2年羅力農様、平成27・28年度群馬県パーソナルトリップ調査のデータを提供していただいた群馬県県土整備部都市計画課に深く謝意を表します。

### 補注

- \*1 現在の交通手段で言うと、①は自家用車、②はカーシェアリング車両、③はオンデマンドバスや乗合タクシー、④は路線バスが、それぞれ自動運転車に置き換わった形態と捉えることができる。
- \*2 「人の輸送のために有料で使うことのできるあらゆる車両と都市内配送車両を含む」と定義されている。
- \*3 自動車の費用は距離に応じた燃料代を、鉄道の費用は実際の運賃を使用した。

### 参考文献

- 1) 内閣官房IT総合戦略室：官民ITS構想・ロードマップ2017, 2017.
- 2) OECD: Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic, International Transport Forum, 2015.
- 3) Fagnant, D. J. and Kockelman, K.: Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas, Transportation, 45, 143-158, 2018.
- 4) Horni, A, Nagel, K and Axhausen, K W: Introducing MATSim, The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, 3-8, 2016.