

トリップチェーンを考慮した移動需要複製データに基づく自動運転サービスの影響分析 —サービス形態と都市構造に関するシナリオ評価—

Impact analysis of autonomous driving services based on synthetic travel demand data considering trip chains: Scenario evaluation of service form and urban structure

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 37-186148 上条 陽

This study analyzes the influence of autonomous driving services on urban transportation using agent-based simulation. The target area is a regional city in the northern part of Gunma prefecture. In order to properly analyze the behavior of shared autonomous vehicles, the travel demand for the entire population was synthesized. By dividing the observed daily schedule into detailed tours, we synthesized destinations and travel modes considering trip chains. Using the synthesized data as input for the simulation, comparative analyses were performed on set of scenarios based on four main axes: 1) the sampling ratio of travel demand used in the simulation, 2) the service form of shared autonomous vehicles, 3) the operation policy for ride-sharing matching and dispatch, and 4) the distribution of residences, work and commerce as indicators of urban structure. As a result, if the whole population is not considered, in the analysis the efficiency and convenience of ridesharing and dispatching will be biased downwards. Analysis results considering the whole population suggest that in the high-density urban structure scenario, the efficiency and convenience of the shared autonomous vehicle (SAV) service, and the difference in convenience of the surrounding depopulated area will increase.

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年、見知らぬ人が一緒に乗車して割り勘で運賃を払う相乗り型デマンド交通手段の検討や運用が国内外で行われており注目を浴びている。海外では、TNC (Transportation Network Company) による uberPool、Lyft Line などのサービスとして実用化されており、国内においては、相乗りタクシーとして 2018 年より実証実験が行われ、政府によって相乗りタクシーに纏わる法律上の規定やルール整備が検討されている。

また、自動運転技術については、官民 ITS 構想・ロードマップ 2019 にて 2020 年までに SAE レベル 4 のサービスの限定地域（過疎地等）での実現を期待すると示されたように、効率的な配車を実現するためのタクシー配車に関わる IT インフラと合わせて開発が続けられている。

中山間地域における自動運転サービス実証実験も日本各地で行われており、相乗りタクシーの規制緩和は、地方において運転手不足が進む中、限られたタクシーを効率よく活用するといった狙いがあることから交通不便の解消という観点からの相乗りや自動運転へのアプローチが検討されている。

そのような地方都市においては、道路が比較的空いており道路混雑が問題になりにくいという点、元来マイカー頼りの生活を送っている人々が多く、従来の自治体によって維持されたバスなどの交通手段の代替として摩擦が生

じないケースも多いことが考えられる。

以上より、今後自動運転技術や一般乗用車サイズの相乗りサービス導入に関する取り組みが地方都市にて期待されており、地域の課題や導入の与える広範な影響を踏まえた上での適切な運用方法の模索や影響分析の枠組みの社会的要請は高まるだろう。

その分析には、配車・相乗りの微細な挙動を捉えるためにエージェントベースシミュレーションを用いたアプローチが一般的である。既往研究として、Fagnant and Kockleman¹⁾、Hörl et al.²⁾ などが挙げられるが、相乗りを含めて比較分析を行ったものは少なく、多くの研究は都心部を対象地域としたものであった。

相乗りとその配車車両・乗降順の決定に関する運用ポリシーについての比較分析で地方中小都市を対象に行った研究は著者の知る限り存在しない。

また、シミュレーションのインプットとなる移動需要について、特に相乗りは利便性やマッチングの効率性が移動需要の密度・時空間的接近性によって変わるため、適切な移動需要を用いることも重要である。PT 調査に類する調査の 2%ほどのサンプルのみを用いた既往研究も多く、移動需要の規模という点で結果が歪められていると捉えられるものも多い。

エージェントベースシミュレーションに用いる移動需要を現況に合わせて再現した既往研究としては、Bösch et al.³⁾、Ziemke et al.⁴⁾が挙げられ、目的、対象地域、入手

可能なデータの種類の質が異なる上に、複製時の目的地の決定方法がそれぞれ異なり、汎用的な枠組みは存在しない。また、既往研究における現況再現性の検証において、平均トリップ長の当てはまりが悪く空間的に精度高く再現されているとは言えない。

(2) 研究の目的

以上の背景から、本研究では地方中小都市である群馬県北部の沼田市と利根郡周辺を対象地域に、まず現況移動需要を再現する。その際に、各エージェントの1日分のスケジュールをツアー単位に分けて、ツアーにおける利用交通手段と目的地の同時選択を行う離散選択モデルを構築することで、目的地間の整合性を取り空間的にも精度の高い複製手法を提案する。

そして、複製データを用いて対象地域にて、door-to-door 運送（以降、D2D）を行う現況のタクシーを完全自動運転化したサービス（以降、カーシェア AVD2D）、カーシェア AV を相乗り可能としたサービス（以降、ライドシェア AVD2D）、停留所間運送を行う現況の需要応答型交通の中でも需要に応じて路線や時刻が任意に変動するダイナミック方式のものを完全自動運転化したサービス（以降、ライドシェア AV 停留所）といった多様なサービス形態が普及した際の影響分析を行う。以降、それらを総称して SAV(Shared Autonomous Vehicle)とも呼ぶ。

また、現況移動需要と小サンプル需要を用いた際の比較分析、配車車両・乗降順序の決定に関する運用ポリシー間の比較分析、移動需要が集中もしくは分散した際の自動運転サービスの効率性変化についても分析を行う。

2. 現況移動需要の再現

(1) 世帯・個人属性・アクティビティパターンの生成

対象地域は群馬県北部の沼田市と利根郡周辺である。

図-1 に示す4次メッシュの集合であり、面積は約933km²である。

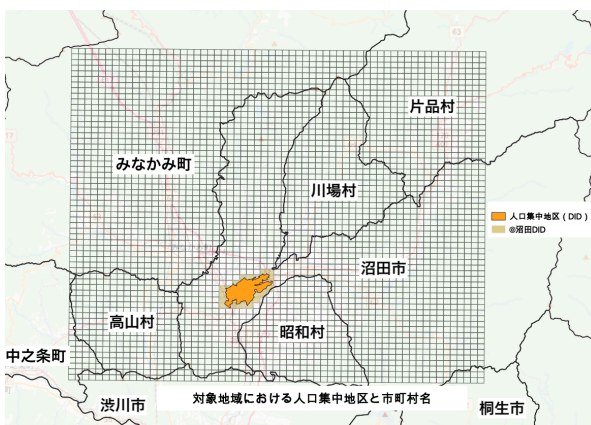


図-1 対象地域を構成する市町村

平成27年国勢調査による500mメッシュ単位の世帯人員別一般世帯数と性・年齢階級別人口を周辺分布とし、世帯人員数の等しい平成27・28年度群馬県PT調査（以降、PT調査）の世帯票データを周辺分布による条件を満たす形で割り付け、対象地域内の一般世帯人数である83,120人、一般世帯数は32,219世帯の生成をする。

次に、4次メッシュ内での世帯の居住座標は次のように与えた。まず、2016年度Zmap TOWN IIの建物データのうち、事業所を除く一般建物が住宅に相当するとした。次に、平成25年住宅・土地統計調査における群馬県の1住宅当たり（平均）延べ面積が109.89m²であることから、各建物の建築面積と階数の積を109.89m²で割った商を、当該建物に入居可能な世帯数の枠とした。4次メッシュ内で各世帯に原則として重複なしで世帯入居枠をランダムに割り振り居住座標が決まる。

83,120人の各エージェントに対し、性・年齢階級、居住地が定めた沼田地域か否か、世帯の自転車保有有無を参照してPT調査の1人分の個人票データ（全483サンプル）のうち、運転免許の有無、年齢、アクティビティパターンを割り付けた。アクティビティパターンとは、全てのトリップとアクティビティの順序、トリップ目的地分類、各トリップとアクティビティの開始時刻の情報である。

(2) 目的地・交通手段の選択

エージェントのアクティビティパターンにおける各目的地には、勤務先>通学先>その他、の順で序列をつけ、複数目的地が同列の場合は合計滞在時間の長い地点の序列を上とした。その上で、各サンプルの1日のトリップチェーンを以下のルールで切り分け、各目的地をPrimary・Sub・寄り道の3種に振り分けた（図-2）。

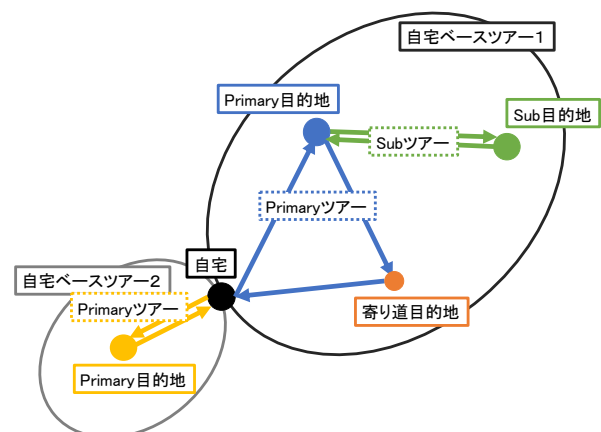


図-2 トリップチェーンの切り分け例

1. 自宅から出て、次に自宅に帰ってくるまでを自宅ベースツアーとする。
2. 各自宅ベースツアー内で最も序列の高い目的地を

Primary 目的地とする。

3. 自宅ベースツアー内で、Primary 目的地から出て次に同地点に戻るまでを Sub ツアーとし、それ以外のトリップを Primary ツアーとする。
4. Sub ツアー内で最も序列の高い地点を Sub 目的地とする。
5. 自宅・Primary 目的地・Sub 目的地間で立ち寄る目的地を寄り道目的地とする。

まず、通学先目的地を割り振る。14 歳以下のエージェンツの通学先は、年齢に基づいて小学校または中学校を自宅メッシュの属する学区に従って一意に定めた。

通学時の Primary ツアーの交通手段は、自宅・通学先の 2 地点間の推定所要時間を説明変数とする交通手段選択 MNL モデルを推定し、モデルに基づき確率的に割り当てた。

他の Primary 目的地・Sub 目的地については、交通手段と目的地の同時選択を扱うネスティッドロジット（以下「NL」）モデルに基づき目的地の属する 4 次メッシュを確率的に定めた。

モデルの推定に先立って、多数のメッシュの中から目的地の選択肢集合を決定する必要がある。本研究においては、Ben-Akiva et al.⁵⁾が整理したサンプリング方法のうち、魅力度と距離抵抗を用いた重力モデルに基づく Importance Sampling を行った。

目的地選択を 500m メッシュ単位での選択にしたため、メッシュ内の該当目的のテレポイント施設数の対数値を規模変数とし、このパラメータを 1 に固定した。勤務先、その他目的の質変数となる従業者数は平成 26 年経済センサスの 4 次メッシュ内全産業従業者数の値を用いた。

寄り道目的地については、前後トリップの直線距離と推定所要時間を用い、目的地メッシュ選択の MNL モデルを構築した。

なお、4 次メッシュ選択後にメッシュ内の該当目的の施設群からランダムに 1 施設を選んで、目的地座標とした。

(3) 複製データの検証

現況移動需要再現後の 5 歳以下外出人口である 65,102 人と、再現時に利用した PT の個人票データである 483 サンプルを比較する。目的地分類ごとの平均トリップ長の比較を表-1 に示す。なお、483 サンプルの平均値は PT データ付帯の拡大係数と 483 サンプルの居住分布の偏りを補正する重み付きの平均値である。

勤務先へのトリップ長が少々過小となり、その他目的のトリップ長が過大となっているが、目的間の大小関係については整合性が取れている。PT データと比較して全

表-1 着目的別のトリップ長分布

目的地分類	483 サンプルの平均トリップ長(m)	複製データの平均トリップ長(m)
勤務先	4884	4575
通学先(小学校)	1229	1410
通学先(中学校)	1124	1510
通学先(高校)	3183	3889
自宅	3545	3883
買い物・レジャー目的地	2641	2817
その他目的地	3130	3789
全目的	3573	3818

体的にトリップ長が少々過大に再現されていることに留意して分析を進める。

3. シミュレーション諸条件の概要

エージェンツベースシミュレーターである MATSim では、各エージェンツが同時に交通流を形成しながら、その交通流における各エージェンツのスケジュール（1 日の活動・トリップパターンや交通手段などが含まれる）の効用が測定される。1 日分の交通流シミュレーションを繰り返しながら、需給の相互作用を捉え進化的アルゴリズムによって最適な交通手段選択群・スケジュール群を探索することで現存しない交通手段の需要を微視的に形成し、その影響分析を行うことができる。以上より本研究の目的に適するため MATSim を用いた。

スケジュールの効用測定に用いた効用関数は、対象地内において観測された PT データのトリップを用いて推定された交通手段選択モデルに仮定を加えた表-2 に示す効用関数を用いた。

表-2 シミュレーションに用いる効用関数

変数	係数
定数項 [自転車]	-2.90
定数項 [徒歩]	-0.661
所要時間 [自動車] (h)	-9.82
所要時間 [自転車] (h)	-9.16
所要時間 [徒歩] (h)	-8.59
費用 [自動車] (円)	-0.0209
定数項 [アクセス・イグレス徒歩]	-0.661
所要時間 [SAV] (h)	-8.84
待ち時間 [SAV] (h)	-6.63
所要時間 [アクセス・イグレス徒歩] (h)	-8.59
費用 [全交通手段] (円)	-0.0209

現存しない SAV に関する仮定として、Steck et al.⁶⁾による自動運転車と自動運転サービスの通勤時利用意向の SP データを用いて推定されたそれぞれの時間価値を参

照して、SAV の乗車時間は現況自動車の9割と設定した。

各自動運転サービスの概要については、Abe⁷⁾による SAV の地方中小都市で採算の取れる運賃設定を参照して運賃を設定した。カーシェア AV は乗車定員1名、運賃は走行距離1kmあたり70円、ライドシェア AVD2D は乗車定員4名、運賃は直線距離1kmあたり60円、ライドシェア AV 停留所は乗車定員10名、運賃は直線距離1kmあたり40円と設定し、ライドシェア AV 停留所における停留所へのアクセス・停留所からのイグレス交通手段は徒歩とした。

4. シミュレーション結果

(1) 100%移動需要と0.8%の比較、運用ポリシーの比較

サンプル率100%の複製データとその複製データから PT データのサンプル数無作為に抽出したサンプル率約0.8%の移動需要を用いたシミュレーションを比較する。その際の SAV サービスはライドシェア AVD2D を使い、運用ポリシーについても同時に相乗り頻度低・中・高の3頻度を比較する。

なお、相乗り頻度低・中・高の3頻度は、配車時の車両と乗降順序の決定に際して乗客と車両の負担する所要時間の重みを、上条ら⁸⁾における“ライドシェア独占ユーザー優先シナリオ”、“ライドシェア独占乗合シナリオ”、“ライドシェア独占乗合台数削減シナリオ”と同じ設定を用い、低・中・高頻度と本研究では呼ぶ。

以上の6つのシナリオの各種総走行台キロ(VKT)を図-3に示す。なお、図中の現況再現シナリオは、現況自家用車を用いたシナリオにおけるVKTである。

現況移動需要であるサンプル率100%となるといずれのシナリオでも空車VKTの割合が減少し、相乗りによる削減VKT(“同じトリップを仮に自家用車で移動した際のVKT”と“ライドシェアAVによるVKT”の差分)が増加した。

相乗り頻度間の比較では、相乗り頻度が低頻度から中・高頻度となると、空車VKTが減少し、相乗りによ

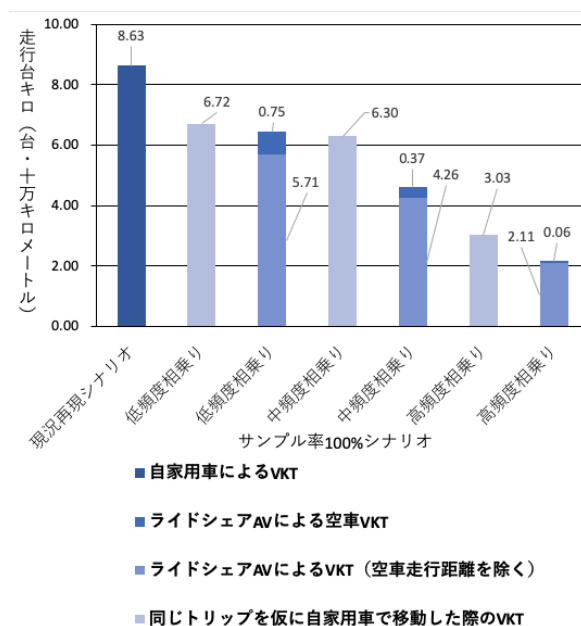
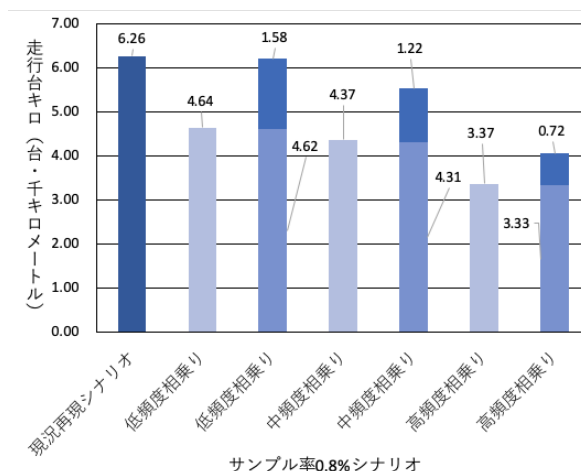


図-3 VKT の比較

る削減VKTが増加した。一方で、次の表-3におけるライドシェアAVの利便性と分担率からわかるように、特に高頻度シナリオでは利便性が悪化したことでライドシェアAVの利用自体が減っていることによるVKT減少の影響もある。

続いて、各シナリオの相乗りの利便性・効率性指標に

表-3 相乗りの利便性と効率性の比較

シナリオ				1 トリップ あたり平均 乗車距離増加率	平均待 ち時間 (秒)	車両1 台に よる平均人 トリップ数/日	ライドシェア AV の分担率
サンプル率	サービス形態	運用ポリシー	都市構造				
複製 0.8%	ライドシェア D2D	低頻度相乗り	現況	2.1%	255	16.8	75.2%
		中頻度相乗り		8.2%	235	16.1	72.4%
		高頻度相乗り		32.3%	403	12.2	54.9%
複製 100%		低頻度相乗り		9.6%	141	54.3	87.2%
		中頻度相乗り		16.9%	139	52.7	84.6%
		高頻度相乗り		67.9%	795	21.1	34.0%

ついてまとめたものを表-3に示す。“1 トリップあたり平均乗車距離増加率”は相乗りによる遠回り率である。

現況の移動需要規模を用いると、遠回り率は少々増加したが平均待ち時間が4割ほど短縮され、SAV 1 台あたりの分担するトリップ数について低頻度と中頻度シナリオでは3 倍弱増加したことから、利便性を保ったまま多くのトリップを分担したことがわかる。

相乗り頻度間の比較では、相乗り頻度が高頻度となると遠回り率と平均待ち時間が増し、著しく利便性が悪くなることがわかった。

以上から、現況の移動需要規模を用いると、移動需要が高まることで利用者の発着が時空間的に近接した効率の良い相乗りマッチングが増え、相乗りの効率性が高まり、利便性も待ち時間の減少などで好影響があった。

相乗り頻度については、頻度を上げると VKT 削減効果はあったが利便性を損なっており、両者のバランスが大事であると言える。

(2) サービス形態と都市構造の比較

都市構造についてのシナリオは、現況に加えて居住・勤務・商業の分布を集中もしくは分散させて移動需要を複製したシナリオを生成し比較した。対象地域を構成する6つの市町村における都市マス・総合計画や現況分布などを参照して、拠点地区を設定し、各分布をその地区へ集中、もしくは拠点地区から縁辺に分散させ、それをインプットに2章における移動需要複製を行い生成された2種類の移動需要を用いたシミュレーションを集中シナリオ、分散シナリオとした。

同時にカーシェア AV、ライドシェア AVD2D、ライドシェア AV 停留所間の比較も行う。なお、ライドシェア AV の相乗り頻度については中頻度を用いた。

以上の組み合わせである9つのシナリオの利便性指標と VKT 指標を表-4に示す。

まず、サービス形態間の比較をすると乗車定員が増すにつれ、相乗りによる遠回り率が発生し増加した。待ち

時間については、増加傾向であるがカーシェア AV とライドシェア AV 停留所を用いたシナリオ間の比較でも1分程度の増加に収まっている。一方で空走距離の割合が減少し相乗りによる VKT 削減が増し、利便性は低下するが環境負荷低減がみられた。

都市構造間の比較をすると分布が分散した際の移動需要であるほど遠回り率、待ち時間ともに増し利便性が悪くなっていること、空走距離比率、相乗りによる削減比率についても VKT が増加する方向で効果が現れている。分散シナリオは平均トリップ長が増すのに加えて、

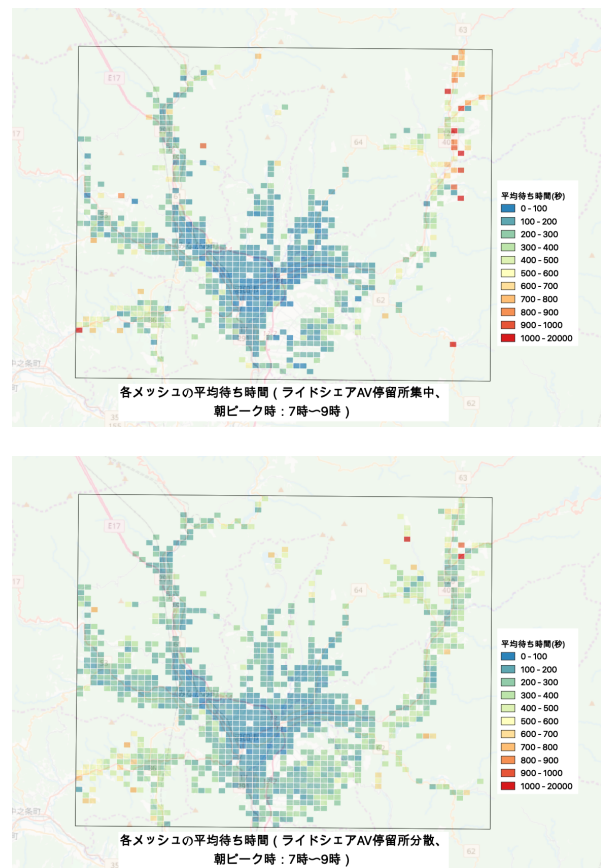


図-4 朝ピーク時の平均待ち時間分布

表-4 利便性指標と VKT に関する比較

シナリオ				1 トリップあたり平均乗車距離増加率	平均待ち時間(秒)	空走距離比率	相乗りによる削減 VKT 比率
サンプル率	サービス形態	運用ポリシー	都市構造				
複製 100%	カーシェア	-	集中	-	107	16.5%	-
			現況	-	117	16.5%	-
			分散	-	153	17.9%	-
	ライドシェア D2D	中頻度相乗り	集中	15.5%	119	7.9%	33.0%
			現況	16.9%	139	8.0%	32.4%
			分散	18.7%	179	8.0%	32.3%
	ライドシェア 停留所		集中	18.1%	145	4.0%	50.4%
			現況	20.0%	174	4.5%	49.1%
			分散	22.6%	217	5.0%	48.5%

空走距離も増え、相乗りによる削減効果も下がることが明らかになった。

続いて、朝ピーク時の平均待ち時間分布について一部のライドシェア停留所集中、ライドシェア停留所分散シナリオを図-4に示す。

ライドシェア AV 停留所に限らず、各サービス形態においても集中シナリオとなると縁辺地域における待ち時間が長くなり、中心市街地における待ち時間が短くなる傾向を示した。従って、中心市街地に集中することで高密度地区にて高利便性サービスを多くの人が享受する一方、縁辺地域における SAV サービスの質は落ちることが明らかになった。

5. 結論と今後の課題

本研究では、相乗りや需要応答型交通をシミュレーションにて扱う際に重要な要素である適切な移動需要の利用に関して、各エージェントの1日のスケジュールをツアーに細分化した上で、各ツアーの目的地と交通手段を同時に選択するネステッドロジットモデルを組み、空間的に精度の高い移動需要再現を行った。

そして、その複製データを用いて、現況移動需要とその0.8%の需要を用いた結果の比較を行い、一部の移動需要のみを用いると空走距離が増え、相乗りによる VKT 削減が減る、SAV サービスの効率性が下がるという負の方向で結果が歪められることがわかった。

相乗り頻度に関する運用ポリシーとサービス形態については、相乗り頻度が増す・乗車定員が増すと VKT 削減が認められたが、一方で乗客の利便性を損なっていることが明らかとなり、トレードオフの関係にあることを示した。

分布が集中、分散と異なる都市構造を与えた際の移動需要を用いた比較では、移動需要が集中するほど利便性と VKT 削減は増し好影響が目立ったが、低密化がさらに進行する縁辺地域にて利便性が損なわれる結果が得られた。

紙面の都合上、煩雑なシミュレーション・運用ポリシーなどにおいて筆者が開発、提案するものは本梗概に載せなかったが、上記に挙げた多様な軸の比較分析を行う枠組みを構築したことも成果に挙げられる。

本研究は、SAV サービスの分析の枠組みを示す、移動需要を再現するなど分析に必要な下準備を行ったことに留まっている。次のステップとして、本研究では既往研究に基づく仮定を置いている SAV 乗車時間の時間価値や相乗りの抵抗感などについて、SP データを収集し、現時点での社会的受容性を明らかにし、より尤もらしく妥

当性のあるシミュレーションを目指す。

慎重な移動需要再現を行ったエージェントベースシミュレーションであるため、エージェント・世帯・集落単位で交通不便の有無や時と場合による利便性の変動などのよりミクロな分析を行うことや、車両の台数や運賃体系など多様な変数において感度分析を行い、頑強な知見を得ることも今後の課題である。

謝辞

平成 27・28 年度群馬県パーソン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と 2016 年度 Zmap TOWN II、2016 年度法人版テレポイントデータを提供していただいた東大 CSIS に深く謝意を表します。また、使用した OpenStreetMap の地図データは OpenStreetMap への協力者の著作物であり、<https://www.openstreetmap.org> から入手したものです。

参考文献

- 1) Fagnant, D. J. and Kockelman K. M.: Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas, *Transportation*, pp.1-16, 2016.
- 2) Hörl, S., Ruch, C., Becker, F., Frazzoli, E. and Axhausen, K.W.: Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for zurich, *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2018.
- 3) Bösch, P. M., Müller, K. and Ciari, F.: The IVT 2015 baseline scenario, *16th Swiss Transport Research Conference*, 2016.
- 4) Ziemke, D., Kaddoura, I. and Nagel, K.: The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transportsimulation scenario based on synthetic demand modeling and Open Data. VSP Working Paper 19-01, TUBerlin, Transport Systems Planning and Transport Telematics, 2019.
- 5) Ben-Akiva, M. and Lerman, S.: *Discrete-Choice Analysis: Theory and Applications to Travel Demand*, pp. 253-275, MIT Press, 1985.
- 6) Steck, F., Kolarova, V., Bahamonde-Birke, F., Trommer, S. and Lenz, B.: How autonomous driving may affect the value of travel time savings for commuting, *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2018.
- 7) Abe, R.: Introducing Autonomous Buses and Taxis: Quantifying the Potential Benefits in Japanese Transportation Systems, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 126, pp. 94-113., 2019.
- 8) 上条陽, 羅力晨, トロンコソ パラディ ジアンカルロス, 高見淳史, 原田昇: 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)*, 第5巻第2号, pp.A_142 ~ A_151, 2019.