

# 自動運転車の普及を見据えたライドシェアのシミュレーション及び自動車交通流変化の推計に関する研究

## A study on simulation of ridesharing and estimation of changes in automobile traffic flow in anticipation of the spread of autonomous vehicles

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 37-206170 中村優希

This thesis clarifies how the traffic situation changes due to changes in the transportation share of mass transit, while taking into account the effects of automated driving (e.g., ride-sharing). The microscopic simulation of ride-sharing revealed that the average number of passengers in SAV (Shared Autonomous Vehicle) grows logarithmically with the increase in the density of SAV users. The macroscopic traffic distribution shows that even if there is a 20% shift from rail to autonomous vehicles in the countryside, there is not much negative impact because of the improved road efficiency and SAV ride-sharing. On the other hand, in the city center and its suburbs, it was shown that even if there is a 10% shift from rail, the negative impact is significant and that the negative impact can appear even with SAV ride-sharing. Looking ahead to the future widespread use of autonomous vehicles, it is necessary to consider policies to maintain the level of service of mass transit and to curb the use of PAVs (Private Autonomous Vehicle) according to these differences in regional impacts.

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

これからの技術革新により自動車の自動運転化が進んでいくと考えられる。現在の自家用車と比べた自動運転車の利点として、移動時間を自由に使えるため移動時間消費に対する抵抗感が少ないこと、渋滞回避や車間距離減少のため道路利用効率が向上すること、自動車を運転できない人も外出しやすくなること、人為的操作ミスの解消による安全性向上などが期待されている<sup>1)</sup>。

現在カーシェアやライドシェアなどといった行為が行われているが、自動運転が普及すれば共有車両を人の手で回送したり共有車両の場所まで別の手段で向かったりする必要がなくなるため、車両の所有から共有への移行がさらに進むと思われる。本研究では、個人や世帯が保有し利用する個人用自動運転車をPAV (Private Autonomous Vehicle) と呼称し、企業などが保有して利用者が使いたい時に予約して借りるシェア型自動運転車をSAV (Shared Autonomous Vehicle) と呼ぶ。

自動運転車には様々な利点があると考えられるが、その一方で懸念も存在する。運転操作不要の自動運転車には、先述のように移動時間に対する抵抗感が減少したり、車を運転できない人も使えるようになったりといった長所がある。しかしそれゆえに、大量輸送機関や徒歩から自動運転車への移行が生じたり、移動が誘発されたりといった影響が考えられる。またSAVであれば利用者間の空車回送や迂回が発生する。これらのことから、道路交通量が増加し<sup>2)</sup>、道路混雑の悪化や環境負荷の増大が懸念されている。その他に人口と都市機能の分散や、大量輸送機関のサービス水準低下や縮小による低廉な移動手段の減少も併せて懸念されている<sup>3)</sup>。

本研究ではこの懸念の中で大量輸送機関から自動運転車への移行による道路交通量増加に着目する。自動運転でない場合は、道路混雑で速度が遅くなると鉄軌道系公共交通利用への移行が発生し、道路交通量のバランスが概ね保たれる。しかし自動運転の場合、運転操作が不要で自由にくつろいだり仕事をこなしたりすることができるため、遅く

なってもあまり効用が低下せず、鉄軌道系公共交通利用への移行が発生しにくいと考えられる。その一方で時間制約の都合から、道路速度が遅くなることで困る人も存在している。また物流効率の悪化も問題となる。また先述のように、自動運転車での移動が増加すると環境への影響も懸念される。このようなことから、自動運転車が普及するまでに、大量輸送機関の輸送シェアを定めて、それを達成するための政策を立案・実行するべきだと言える。

#### 1.2 研究の目的

上述のような自動運転車が普及した社会における大量輸送機関の輸送シェアの目標を定めるにあたって判断材料が必要となる。しかし自動運転車の普及がもたらす影響は複数の要素が絡んでいて、単純なものではない。先述のように自動運転による道路効率向上や、SAVのライドシェアによる輸送効率向上といった効果があるため、鉄道から自動車へ移行する人がある程度いたとしても悪影響がほとんどないことも考えられる。本研究では、自動運転がもたらす効果を踏まえながら、大量輸送機関の輸送シェア変化などのシナリオ毎に交通状況がどのように変化するかを明らかにすることを目的とする。

また自動運転に関わるこのような交通状況を明らかにするためにあたって、道路交通量均衡配分に代表される巨視的な方法では、SAVのライドシェアをどのように設定するかが問題となる。一方でエージェントベースシミュレーションのような微視的な方法では、所要時間やコンピュータの容量等による困難が生じる<sup>4)</sup>。SAVの相乗りは利用者が多いほど効率的だと考えられるため、低いサンプル率でシミュレーションを行った上で単純に拡大して解釈するのは適切ではない<sup>5)</sup>。しかし東京都市圏のように移動者数が多くて広い地域において、100%に近いサンプル率でSAVの相乗りのシミュレーションを行った研究は存在しない。本研究では初めに発着地を限定した微視的なエージェントベースシミュレーションを行い、利用者の時空間的密度によるSAVの平均乗車人数の推移を明らかにする。続いてSAVの1台あたり乗車人数の算出方法を決定する。それを基に相

乗りを考慮した車両トリップOD（以下「VTOD」と記す）を計算し、東京圏で巨視的な交通量配分を行う。このようにして、大都市圏における相乗りを含む自動運転車普及の影響を、現実的な計算負荷や所要時間で推計する。以上をまとめたのが図1である。この微視的手法と巨視的手法を組み合わせる方法を提示することは、本研究のもう1つの目的である。



図1 本研究の流れ

## 2. 相乗りのシミュレーション

### 2.1 シミュレーションの概要

シミュレーションに用いる人の仮想的な移動データを以下のように作成した。対象とするトリップは千葉県松戸市・鎌ヶ谷市から東京都中央区へ向かうものであり、朝の都心への通勤移動を想定している。平成27年国勢調査の4次(500m)メッシュ内人口とZmap TOWN IIの建物データから、出発ゾーンの人口分布を設定し、その中からランダムでシミュレーション対象者を抽出する。出発地は居住地とし、目的地は平成26年経済センサスの4次メッシュ従業員数と座標付き電話帳データベースからランダムで与える。出発時刻は30分の時間枠内で一様分布の乱数として与える。

以上のように設定した通勤者をSAVでできるだけ効率的に運ぶように、MATSimでエージェントベースシミュレーションを行った。具体的には図2、図3のように迂回許容条件の範囲内でSAVの総運転時間が最小となるように配車する。迂回許容条件には配車待ち時間B①と到着遅延時間A①+A②-A③、B①+B②-B③を用いる。

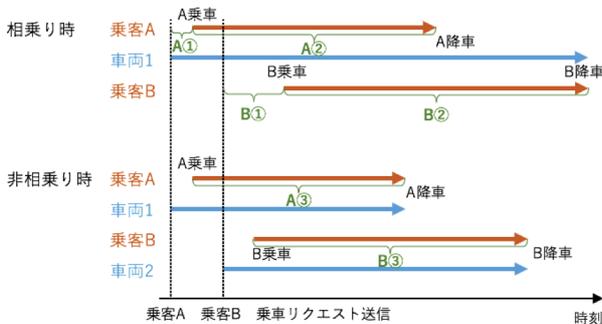


図2 SAV配車の迂回許容条件



図3 相乗りのシミュレーションのイメージ

道路ネットワークはOpenStreetMapから作成した。経路探索の時間を短縮するため、千葉県松戸市・鎌ヶ谷市と東京都中央区の道路は全て含むが、その間の道路は主要道路のみとした。SAVの配置拠点は、出発ゾーンが概ね半径1km圏内となるように、広い公園や学校などに定めた。車両が出払うことがないように、それぞれの拠点には余裕を持った数の車両を配置した。

### 2.2 シミュレーション結果

3章の交通量配分で用いるために、SAVの定員や配車ポリシー、利用者の時空間的密度といった要素と相乗り発生との関係をシミュレーションした。SAVの配車待ち時間の目安を10分、最大到着遅延時間を15分としたもの(図4の迂回許容条件10\_15)と、配車待ち時間の目安を5分、最大到着遅延時間を10分としたもの(図4の迂回許容条件5\_10)の2通りでシミュレーションを行った。定員は4人、6人、8人のほか、満員になることがない100人を設定した。それぞれの条件において、30分の時間枠内で千葉県松戸市・鎌ヶ谷市から東京都中央区へ向かう移動者の数を変化させた時のSAV1台あたり乗車人数の推移を図4に示す。

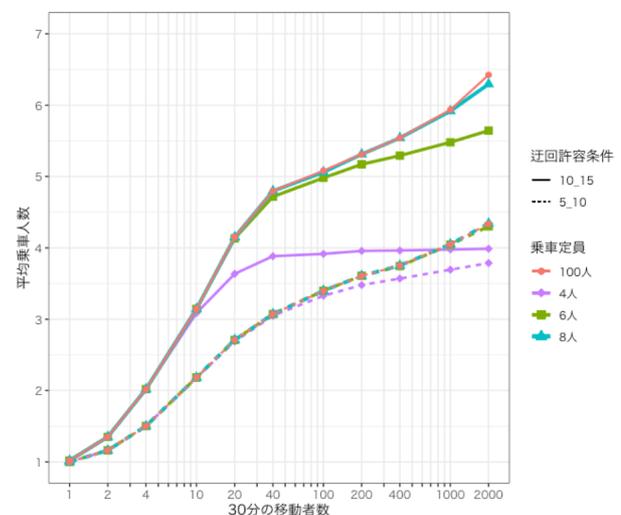


図4 SAV1台あたり乗車人数のシミュレーション結果

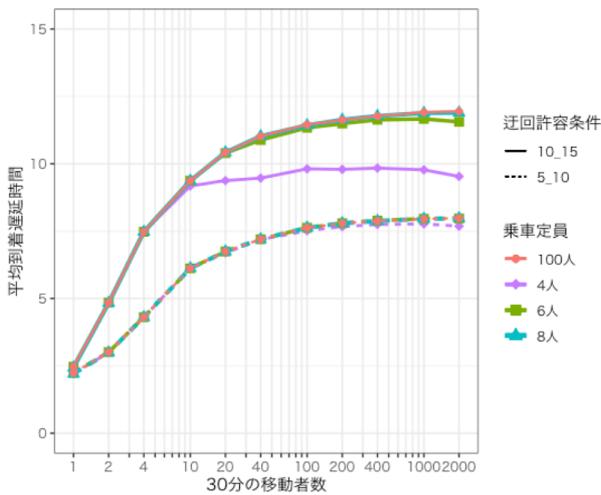


図5 平均到着遅延時間

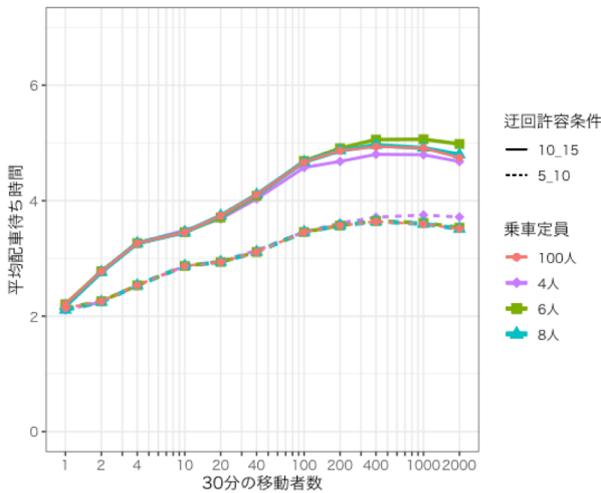


図6 平均配車待ち時間

移動者が多くなると、SAVの平均乗車人数は対数関数的に増加する。増加の割合は一定ではなく、30分あたり移動者数が40人を超えると増加が緩やかになっている。これは図5で示されているように到着遅延時間が基準の値に近づいているため、相乗りのために追加の迂回をすることがそれまでに比べて困難になっていることが原因だと考えられる。しかし30分あたり移動者数が400人を超えると、図4の平均乗車人数の増加が再び激しくなっている。図6を見ると、30分あたり移動者数が400人のあたりで、定員100人の場合の配車待ち時間が増加から減少に転じていることが分かる。移動者が多くなることで走行中の車両も増加するため、エージェントが乗車リクエストを出した時点で既に車両がすぐ近くを走行していたり、他の乗客を乗せるために向かってきていたりすることが増加していると考えられる。30分あたり移動者数が400人を超えると平均乗車人数の増加が再び激しくなるのは、先述のように到着遅延時間の制約のため追加の迂回は難しいが、迂回を追加せずとも新たな乗客を乗せられることが増加するためだと

える。

図4のように、移動者が少ない場合、SAVの乗車定員を増やしても平均乗車人数はほとんど増加しない。定員による平均乗車人数の差が現れるのは、定員なしの場合の乗車人数が定員に近づいてからである。これは迂回許容条件があるため、定員なしであってもそれほど相乗りできないことによるものである。

SAVの配車待ち時間の目安を10分、最大到着遅延時間を15分とした場合と、配車待ち時間の目安を5分、最大到着遅延時間を10分とした場合とでは、平均乗車人数の推移が大きく異なっており、当然ながら前者の方が平均乗車人数は多くなっている。しかし平均乗車人数が定員に近づくとその差は小さくなる。

### 2.3 SAV乗車人数の算出方法の決定

シミュレーション結果を基に、SAVの定員と配車ポリシー、利用者数に応じて平均乗車人数がどのように変化するかを算出する方法を定める。ここで定めた方法は、次の章で道路交通量配分を行う際に用いる。

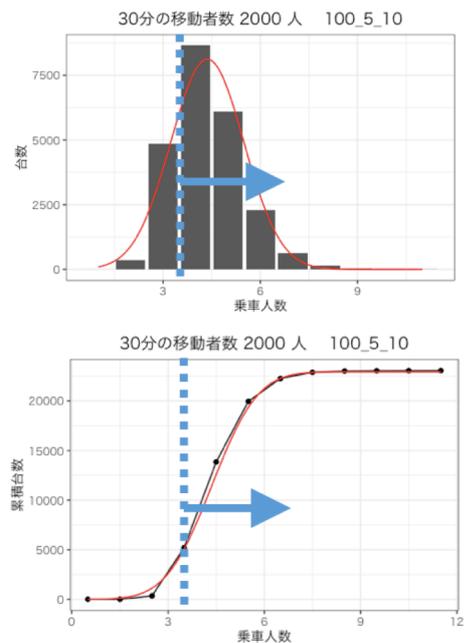


図7 SAVの乗車人数分布の近似結果（赤線）

初めに、定員100人の場合の各車両の乗車人数の平均と標準偏差について、移動者数の変化による推移を近似する。移動者数の対数をとった上で、平均は4次関数、標準偏差は3次関数で近似した。続いて、近似した平均と標準偏差を用いた確率密度関数と累積分布関数を設定し、定員なしの場合の乗車人数分布を図7の赤線のように再現する。最後に、定員がある場合、図7の分布のうち定員を超過する部分（定員が4人であれば青破線より右側）の乗客は定員ちょうどで乗車するものとして処理した上で、総人数と必要台数から平均乗車人数を求める。以上の方法で算出した結果が図8の線である。

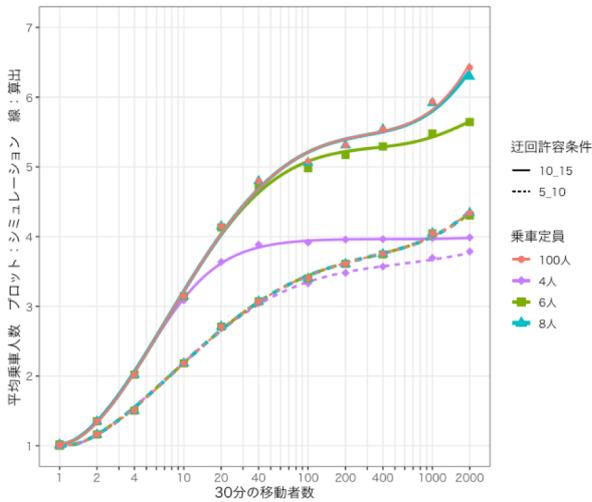


図8 SAV 平均乗車人数の算出結果

### 3. 道路交通量の均衡配分

本章では、巨視的な確定的利用者均衡配分を用いて、自動運転車が普及した東京都市圏における自動車交通流の推計を行い、自動運転車の普及が都市の自動車交通流へ及ぼす影響を検討する。

#### 3.1 前提条件とデータ

均衡配分の対象地域は東京都市圏とする。具体的には平成30年東京都市圏パーソントリップ調査(以下「H30 東京PT」と記す)の調査範囲で、東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県全域と茨城県南部である。通勤や通学のための移動が多く道路が混雑する午前6時から9時までの3時間を対象とする。ゾーン区分はH30 東京PTの中ゾーン単位とする。中ゾーンはほぼ市区町村を単位としているが、周縁部では市町村がいくつかまとめられている場合もある。なお本章の均衡配分において中ゾーン内での移動は扱わず、中ゾーンを跨ぐ移動のみを配分する。道路リンクには都市交通研究室で整備した東京都市圏のリンクを用いる。対象道路は都市間高速道路や都市高速道路、幹線道路を中心としているが、一部の準幹線道路も含んでいる。

本章の均衡配分のうち自動運転車を扱うシナリオでは、既存の自動車が道路上に存在しないため交通が円滑化されると仮定し、道路の交通容量を1.25倍とした。

移動データにはH30 東京PTのOD間交通量を用いる。図9のように現況の他に4つのシナリオを設定する。現況以外の各シナリオについて、鉄道利用者のうちPAVまたはSAVに移行する人の割合を0%から20%まで変化させて、指標の推移を確認する。なお貨物車等のVTODとして、H20 東京PTのVTODを調整したものとH30 東京PTの自動車利用者PTODの差を、不変のものとして加えている。

普通自動車もしくはPAVで移動する人は全員1人乗りとする。SAVの定員は8人とし、同じODペアの人たちのみで相乗りすると仮定する。30分の時間帯毎に、各ODペアのSAV利用者密度に応じてSAV乗車人数の平均を算出する。なおSAV利用者密度は、出発ゾーンと到着ゾーンの面積の積の平方根でSAV利用者数を除することで求める。これに千葉県松戸市・鎌ヶ谷市のゾーンと東京都中央

区のゾーンの積の平方根を乗じて、2章でのSAVによる移動者数に換算する。換算したSAV移動者数から2.3項の方法で平均乗車人数とSAV走行台数を求める。シナリオの設定にあたっては、換算したSAV利用者がシミュレーション上限を上回らないようにしている。

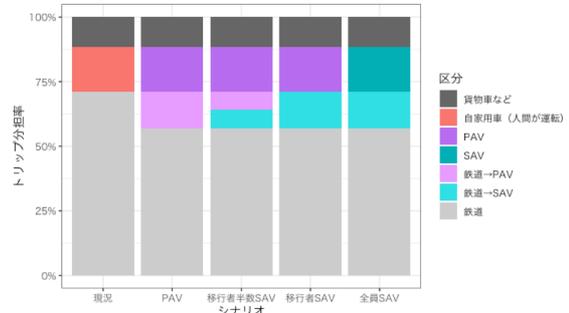


図9 トリップ分担率

(鉄道利用者の20%が自動運転車に移行する場合)

### 3.2 交通量配分結果

配分結果の平均速度を図10に示す。例えば「移行者半数SAV」のシナリオの場合、全域では移行割合10%でも現況速度(黒の一点鎖線)を維持している。しかし都心部では移行割合5%でも現況速度を維持できないという結果になった。

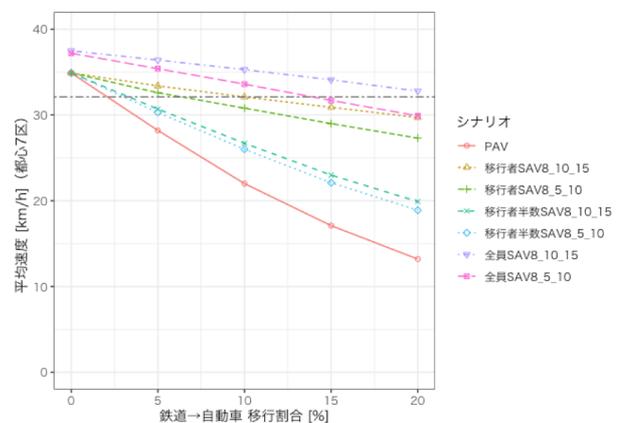
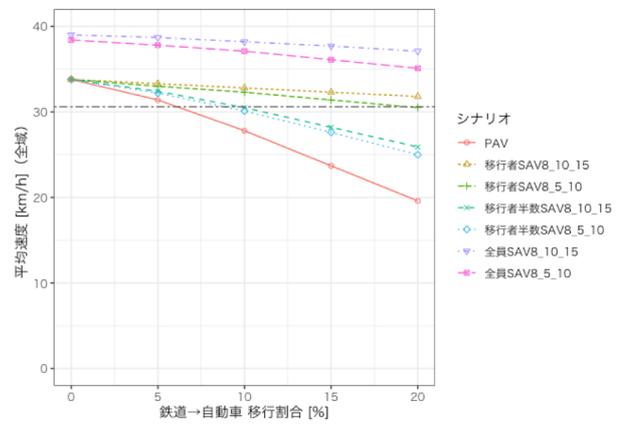


図10 シナリオ毎の平均速度の比較 (全域・都心)

鉄道利用者の 20%が自動車に移行し、そのうち半数が SAV、半数が PAV 利用の場合の平均速度の現況比を図 11 に示す。道路効率向上と相乗りの効果のため、周縁部では平均速度が向上している。しかし東京 23 区とその周辺では平均速度が大幅に低下している。図 12 は鉄道利用者からの移行割合は同じ 20%で、その全員が SAV を利用する場合の平均速度の現況比を示している。図 11 と比べると道路混雑が緩和されていて、速度が現況から 5%以上低下するのは都心周辺のみとなっている。

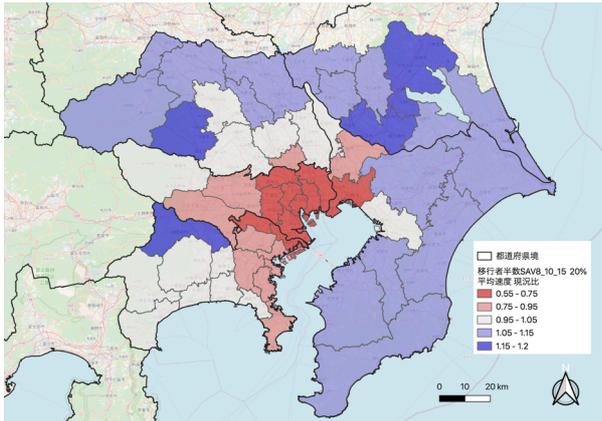


図 11 平均速度の現況比（鉄道利用者の 20%が自動車に移行、うち半数が SAV、半数が PAV 利用）

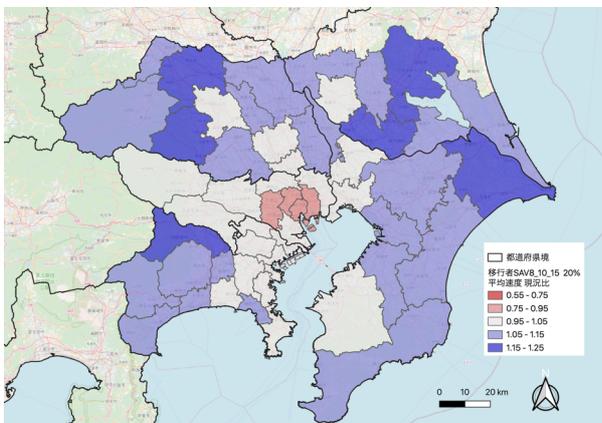


図 12 平均速度の現況比（鉄道利用者の 20%が自動車に移行、その全員が SAV 利用）

続いて現在のガソリン車の環境性能で算出した二酸化炭素排出量を図 13 に示す。「PAV」のシナリオの場合、現況（黒の一点鎖線）と比べて大幅に増加しているため、仮に自動運転車の環境性能が優れていても環境負荷増大が懸念される。一方で SAV を含むシナリオでは二酸化炭素排出量の増加をある程度抑えることができる。

なお SAV が利用される状態を現況と比較とした場合、一般には SAV 利用者の密度が高いほど相乗りが行われて二酸化炭素排出量が削減される。しかし図 13 で移行割合 0%での全域と都心 7 区の車両総走行距離を見ると、都心 7 区では全域と比べて「全員 SAV8\_10\_15」「全員 SAV8\_5\_10」

シナリオの二酸化炭素排出量が現況からあまり削減されていない。都心 7 区でも相乗りは成立しており、平均乗車人数はむしろ比較的多いため、この結果は直観に反する。これは VTOD を固定して扱っている貨物車等によるもので、都心は自動車での移動者数と比べて貨物車の割合が多いことに起因する。本研究では貨物車を精緻に考慮できていないため断言はできないが、自動車利用者が現況とあまり変わらない場合、都心部での相乗りによる道路効率向上は比較的小さい可能性がある。

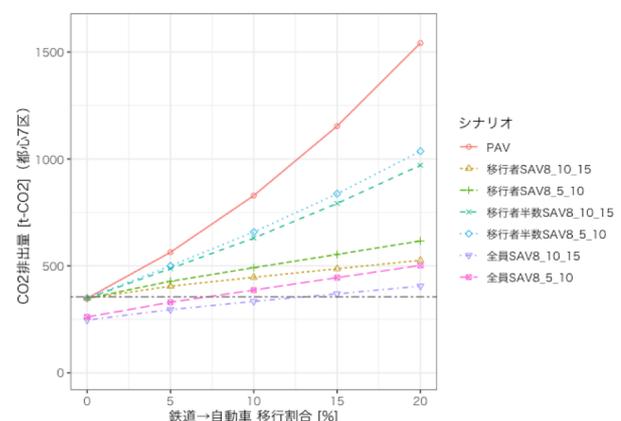
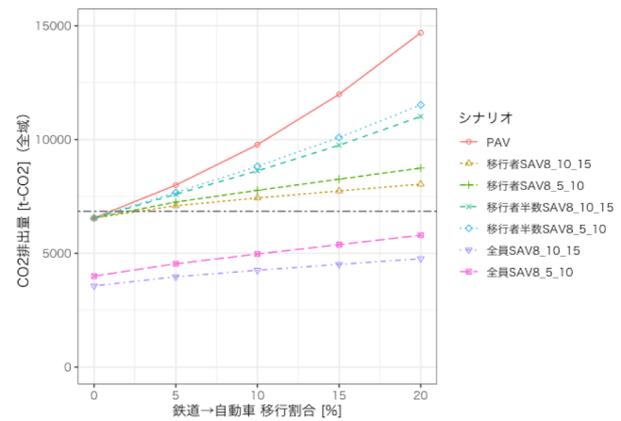


図 13 シナリオ毎の CO<sub>2</sub> 排出量の比較（全域・都心）

以上の結果から考えられる今後の施策の方向性は次の通りである。周縁部では大量輸送機関から自動運転車への移行による道路環境への悪影響はあまりない。しかし鉄道等の大量輸送機関の乗客が減少することで減便され、利便性低下のためさらに乗客が減少するといった負のスパイラルに陥ることで、自動運転車への流出のさらなる増加や、大量輸送機関の消滅もありうる。大量輸送機関が必要であれば負のスパイラルに陥らないようにする手立てを講じるべきである。一方で都心部とその周辺では、大量輸送機関から自動運転車への移行を抑制する取り組みや、自動運転車に流出したとしても PAV を抑制し SAV の相乗りを促進するような施策を集中的に行わなければならない。

なお本章の交通量配分では、都市内の自動車が全て自動運転になることを想定し、自動運転のシナリオでは上述の通り道路容量を 1.25 倍とした。自動運転車が普及する過渡

期においては、これほどの道路容量増加は見込まれず、道路混雑がより悪化することもありうる。

#### 4. 結論と課題・限界

本研究では、微視的なシミュレーションを用いて SAV のライドシェアに関する知見を得て、それを基に巨視的な交通量配分を行った。この方法をとることで、大都市圏における相乗りを含む自動運転車普及の影響を、現実的な計算負荷や所要時間で推計することができた。

相乗りのシミュレーションでは、SAV 利用者の時空間的密度の増加によって、SAV の平均乗車人数が対数関数的に大きくなることが明らかになった。また本研究での運用ポリシーの場合、定員によって平均乗車人数が異なってくるのは平均乗車人数が定員に近い場合のみであり、それ以外にはあまり差が出ないことも示された。これらを踏まえ、満員になることがない場合のシミュレーションを行い、各車両の乗車人数の平均と標準偏差が利用者の時空間的密度によってどのように変化するかを計測した上で、定員がある車両の場合の平均乗車人数を算出するという方法を提示した。

巨視的な交通量配分では、自動運転による道路効率向上と SAV のライドシェアのため、周縁部では大量輸送機関からの移行が 20%程度あるとしても悪影響があまりないことが示された。一方で都心部やその周辺では、鉄道から自動運転車への移行が 10%程度であっても悪影響が大きく、SAV のライドシェアを行っても悪影響が現れうることが明らかになった。今後の自動運転車の普及を見据えると、このような地域ごとの影響の差異に応じて、大量輸送機関のサービス水準を維持したり PAV を抑制したりする施策を行っていく必要があると言える。

本研究の相乗りのシミュレーションでは利用者の時空間的密度と迂回許容時間条件にのみ着目しているため、道路の混雑を考慮していない。同じ迂回経路であっても道路混雑によって所要時間増加は変化する。そのため道路が混雑する場合は相乗りが発生しづらくなり、交通量配分の結果に違いが生じるはずである。この点は本研究で提示した微視的なシミュレーションと巨視的な交通量配分を組み合わせる方法の限界だと言える。

本研究では千葉県松戸市・鎌ヶ谷市から東京都中央区への朝の移動のみをシミュレーションの対象とした。朝のトリップは都心へ向かうものが多数を占めるため本研究ではこのように設定した。しかし環状方向や、都心から郊外へ、近隣のゾーンへ、都心を通過する近郊間など、実際の移動には様々なものがあり、相乗りの成立割合も異なると考えられる。また近郊から都心への移動であっても、場所によって相乗りによる乗車人数が異なることもありうる。このような違いを確認し、交通量配分に繋げる乗車人数算出方法を性質に応じてどのように区別するべきか検討することは、今後の課題の 1 つである。

本研究では OD ペアが同じ人のみが相乗りするものとした。しかし実際には近接するゾーンや途中で通過するゾーンを発着する人と相乗りすることも考えられる。この点はゾーン単位で交通量配分をすることの限界である。

本研究の交通量配分ではゾーンを跨ぐトリップにのみ着目し、ゾーン内で完結するトリップは配分計算に含めていない。またゾーンを跨ぐトリップであっても、SAV の利用者間の空車回送や迂回、PAV の乗降地点から駐車地点までの空車回送といったものは考慮していない。これらの扱いは今後の課題である。

本研究では鉄道から自動車へ移行する割合や SAV の利用率を外生的に与えた。それぞれの移動手段の効用に応じて利用者が移動手段を選択するような交通手段分担モデルを構築して組み合わせることで、施策検討の判断材料としてより相応しいものになると考えられる。

本研究では自動車交通量の配分を行い、自動運転普及による影響がどのように現れるかを示した。これは大量輸送機関の輸送シェア目標を達成するための政策を立案・実行する際の判断材料とすることを目的としている。先述の交通手段分担モデルを組み合わせたり、指標に対する評価基準を定めたりすることで、政策の評価を行えるような仕組みを作り上げることが、今後の重要な課題である。

#### 謝辞

Zmap TOWN II と法人版テレポイントのデータを提供していただいた東大 CSIS と、東京都市圏パーソントリップ調査のデータを提供していただいた東京都市圏交通計画協議会の方々にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Soteropoulos, A., Berger, M., & Ciari, F. (2019). Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies. *Transport reviews*, 39(1), 29-49.
- 2) Hörl, S., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2016). Simulation of autonomous taxis in a multi-modal traffic scenario with dynamic demand. *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung*, 1184.
- 3) Gelauff, G., Ossokina, I., & Teulings, C. (2017). Spatial effects of automated driving: Dispersion, concentration or both. *The Hague: KIM - Netherlands Institute for Transport Policy Analysis*.
- 4) Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2018). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1), 143-158.
- 5) 上条陽, パラディジアンカルロス, 高見淳史, 原田昇. (2019). トリップチェーンを考慮した移動需要複製と複製データを用いた自動運転サービスの影響分析, 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集.