

自律自動運転シェア車両による 地方都市モビリティサービス可能性分析（概要）

研究責任者 筑波大学 システム情報系

准教授 安芸 裕久

共同研究者 筑波大学 システム情報工学研究群

大学院生 渋谷 暢克

1. はじめに

移動の自由の保障は、人が生きていくために必要なことの一つであるが、自家用車への依存が大きい地方都市においては、高齢者等に対する移動手段の確保が大きな課題となっている。地方都市は、大都市に比較して高齢者の割合が高く、都市運営においては高齢者への配慮が欠かせない。従って、地方都市再生を考える上でも、高齢者への移動手段確保が課題の一つと言える。実際に多くの地方都市で、タクシー利用料金の補助といった高齢者への移動手段をサポートする施策が実施されている。

本研究では、その解決策の一つとして、自動運転技術を活用した自律自動運転シェア車両（SAV：Shared Autonomous Vehicle）に着目した。SAVは利用者の呼び出しに応じて迎えに来て、目的地まで送るといった、無人タクシーのようなものである。SAVが従来のタクシーと大きく異なるのは、無人であることだが、その結果、事業者にとっては、人件費が不要であり、地方都市において深刻となりつつある運転手の確保が不要である。利用者にとっても、費用が安いだけでなく、乗車拒否や近距離利用の際のトラブルの心配もなく気軽に利用できる。

地方都市において SAV が普及し、住民の

移動手段として活用されるためには、SAVによるモビリティサービスが利用者にとって安価かつ便利であるとともに、運営者にとっても収益性のある事業となる必要がある。そこで、本研究では、SAVによるモビリティサービスが、地方都市における移動貧困対策となり得る可能性を、事業者および利用者、双方の視点からの分析によって明らかにすることを目的とした。

研究手法としては、電子計算機モデルを構築して SAV 運用シミュレーションを実施し、その結果を各種評価指標により定量的に分析・評価した。特性の異なる複数の地方都市を想定し、日常生活に不可欠な訪問先を想定した。モビリティサービス事業者は、利用者の住宅とそれらの訪問先を移動するサービスを提供する。本研究では、事業者の収益性等を考慮するため、必ずしも対象地域において想定される高齢者の全てのモビリティ需要を満たすことは前提としなかった。シミュレーションにおいては、モビリティ需要数（サービス規模）を変化させ、そのモビリティ需要数を満たすために必要な車両台数や運用費用等の違いを定量的に分析した。

2. 文献調査

SAV に関する研究はいくつか行われており、その多くは都市において自家用車の代替手段やオンデマンド交通サービスとしての可能性を分析したものである。Fagnant ら[1]は、米国テキサス州オースチン市を対象とした SAV に関する研究を行った。交通シミュレーションを行うソフトウェアである MATSim を用いて、中心市街地に SAV を普及した場合の分析を行った。分析結果より、SAV は従来の利用者自らが運転する自家用車の 9.3% を代替できる一方、SAV は車両走行距離を約 8% 増加させることがわかった。但し、複数の利用者が経路の一部または全部において一台の SAV を利用する乗り合いを行えば走行距離を約 8% 低減できる[2]。従来の内燃機関による車両に加え、今後数十年で従来の車両を置き換えると予想される蓄電池式電気自動車 (BEV) は、SAV のベースとして利用することが可能である。Chen ら[3]による分析では、SAV 車両として BEV を用いることで運用費用を大幅に低減でき、オンデマンド交通サービスよりも安くなることがわかった。また SAV を一台導入すれば、自家用車 5-9 台を代替・削減できることが示された。Loeb and Kockelman は[4]、BEV による SAV を用いた乗り合いサービスに関する費用等に関する分析を行った。その結果、BEV は初期費用が課題で、初期費用が低減されない限り、ハイブリッド車の方が BEV より収益性が高いことが示された。但し、BEV は二酸化炭素排出低減効果が大きい。また、サービス提供に要する費用には、車両走行距離と充電時間が大きな影響を与えることもわかった。

地方における SAV を用いたモビリティサービスの利用や運営についても、複数の研

究が行われている。Imhof ら[5]は、市外近郊鉄道やバスが活用されているスイスの農村部における SAV の可能性に関する分析を行った。その結果、既存の公共交通機関を SAV によって完全に置き換えるよりも、両者を組み合わせることが最も費用対効果が高いことが示された。Luo ら[6]は、群馬県を対象として SAV と自家用自動運転車両によるアクセシビリティへの改善に関するケーススタディを行った。SAV 台数、自家用自動運転車両による走行時間、SAV 利用に伴う利用者の費用負担に関する複数のシナリオを想定して分析を行った。Meyer ら[7]も同様に SAV のアクセシビリティへの貢献を分析した。Vosooghi ら[8]は、車両台数 (即ち、事業規模) を変えた場合の実車走行距離や車両稼働状況などの指標を用いて事業運営を分析した。その結果、乗り合い可能な場合は、単独乗車の場合と比較して事業費用を 20% 削減できることが示された。

BEV による SAV を利用したモビリティサービスは、利用者が必要な際に呼び出すだけでなく事前に予約しておくことも想定される。事前に予約すれば、車両の運行効率が向上し、利用者の待ち時間も短縮できて便利である。その実用化には、SAV の航続距離 (蓄電池残量) と充電タイミングを考慮することが重要であり、航続距離と充電インフラの位置は、サービス提供を円滑に行えるか否かに大きく影響する[3]。Ma ら[9]は、線形計画法を用いた電気自動車による SAV 予約・配車システムを開発した。開発したシステムは、決められた車両台数の制約のもとで、全てのモビリティ需要を満たすように、SAV 運用費用を最小化する。Loeb ら[10]は、米国テキサス州オースティン市に

おける電気自動車による SAV の運用シミュレーションを行った。SAV は蓄電池残量が十分な場合にサービスを提供し、蓄電池残量が低下すると自動的に充電ステーションへ向かうという想定をした。シミュレーション結果では、充電ステーションまでの走行と、利用者不在（空車）時の走行とを合わせると、全走行距離の 23% となることがわかり、これら利用者が乗車していない走行の低減が重要であることが示された。

3. 自律自動運転車両によるモビリティサービス

SAV によるモビリティサービスとは、無人タクシーのようなものである。利用者が予約しておく、指定の時刻・場所に SAV が迎えに来て、利用者に乗せて指定の目的地まで送る。その後は、適当な場所で次の利用に備えて待機する。利用者は予約するほか、利用したい時に呼び出すことも可能である。モビリティサービスを提供する事業者は、できるだけ効率よく SAV を運行するために、予約に応じて SAV の運行を最適化

する。

SAV 運行の例を図 1 に示す。本稿では、利用者によるモビリティサービスの利用を「モビリティ需要」、SAV が利用者を迎えることを「モビリティ需要を満たす」と表現する。この図では、3 つのモビリティ需要と 2 台の SAV が示されている。車両 A は駐車場から出発（出庫）し、8 時 15 分に利用者に乗せて目的地へ向かい、目的地には 8 時 30 分に到着した（モビリティ需要 1）。次に、別の利用者のもとへ向かい、8 時 45 分に乗せて 9 時 5 分に目的地へ送った（モビリティ需要 3）。その後、駐車場へ移動（帰庫）した。一方、車両 B は、駐車場から出た後、8 時 20 分に利用者に乗せて 8 時 25 分に目的地へ届け、駐車場へ移動した。

ここで、車両 A と B がどのモビリティ需要へ対応するか、即ち、配車については、モビリティサービス事業者によって決定される。例えば、図 1 の例では、車両 A がモビリティ需要 1 の目的地に 8 時 30 分に着いた後、8 時 45 分にモビリティ需要 2 の迎車場所へたどり着けるかは、移動に要する想定

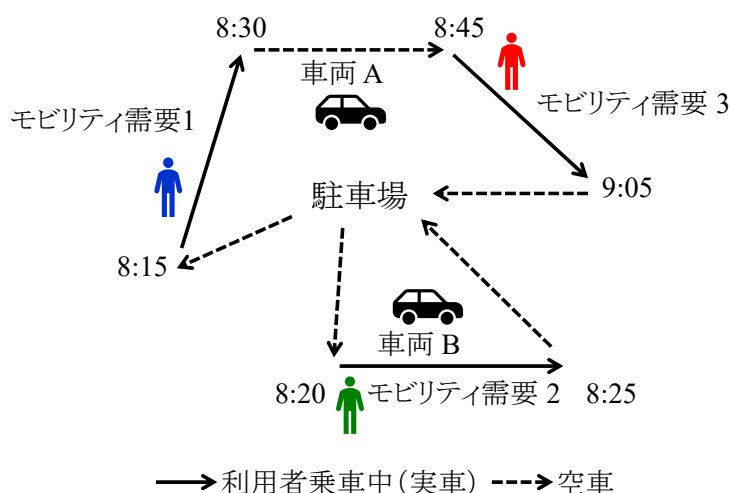


図 1 モビリティサービスにおける需要と配車の例

表 1 対象都市の概要

	人口	高齢者人口	面積 (km ²)	可住地面積 (km ²)
つくば市	229,751	48,240	284	244
上田市	155,761	45,685	552	154
富山市	417,980	123,419	1241	474

時間から判断する。両者の距離と SAV の期待される走行速度から算出するものとした。

4. ケーススタディ

4.1 概要

SAV によるモビリティサービスの可能性を定量的に分析するために、実在の都市を対象としたケーススタディを実施した。モビリティサービスを利用する場合に目的地となり得る代表的な施設を想定し、高齢者がモビリティサービスを利用して自宅から目的地までを往復する場合の SAV の運行を再現する電子計算機シミュレーション (SAV 運行シミュレーション) を行った。モビリティサービスの規模 (モビリティ需要の数) を複数想定した。その結果をもとに各種評価指標を算出し、SAV によるモビリティサービスの実現可能性を定量的に分析・評価した。

4.2 対象都市

4.2.1 概要

分析対象都市として、特性の異なる 3 つの地方都市である茨城県つくば市、長野県上田市、富山県富山市を選定した。各都市の高齢者人口や面積などの概要を表 1 に示す。つくば市は、モータリゼーションの時代に建設され、計画的に整備された大通りが多いことが特徴である。つくばエクスプレス

が開通して東京から通勤圏内となったこともあり人口が増加している。上田市は、長野県 3 番の都市である。周囲を山に囲まれ、面積の 7 割が森林であり、人が住める場所は限られている。富山市は日本海側に位置し、北側に日本海が、南側に北アルプスがあるため、隣接都市とは主に東西方向に往来がある。富山県の県庁所在地であるとともに、北陸地方最大の都市である。市街地における交通に関しては、市内中心部に路面電車が運行されているのが特徴である。3 都市の中では一番規模が大きい、人口に占める高齢者の割合が一番大きい。

4.2.2 モビリティサービス利用時の目的地の想定

高齢者がモビリティサービスを利用して訪問する施設の想定にあたっては、検討対象地域に関する地図や文献を参照し、さらに現地調査により想定データの妥当性を検証・修正した。モビリティサービスは、高齢者が日常生活で利用することを想定していることから、訪問先としては、病院と大型商業施設 (ショッピングモール等) とし、分析対象都市における施設から代表的なものを選んだ。これら訪問先は本研究で実施した SAV 運行シミュレーションにおけるモビリティ需要の目的地とした。本研究では、利用者は自宅から訪問先を往復するものと想定

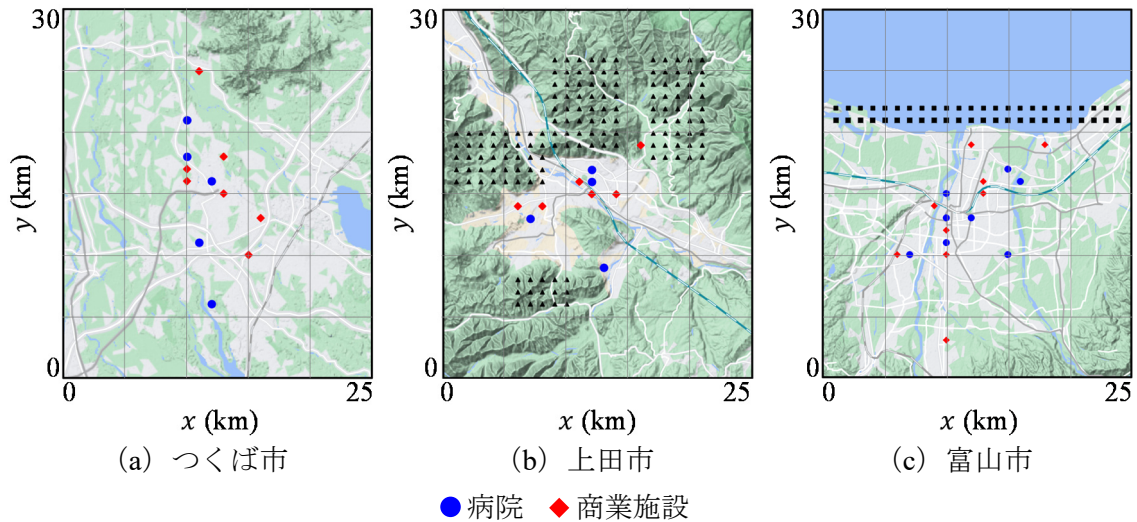


図2 分析対象都市と想定目的地の地理的分布

しているため、モビリティ需要は、利用者の自宅から訪問先または訪問先から自宅の2つとなる。したがって、厳密には、モビリティ需要の目的地は、利用者の自宅または訪問先施設となる。

訪問先となる病院や大型商業施設の位置を、東西 25 km、南北 30 km の範囲の地図にプロットした (図 2)。これら目的地として想定した施設は、つくば市では 6 km×19 km、上田市では 10 km×10 km、富山市では 12 km×16 km の範囲に分布している。

都市の地形や地理的状況を考慮し、需要が出ない山間部や自動車が走れない海域を想定した。上田市では広い範囲に渡って山間部が存在するが、道路が整備されており走行可能である。富山市の北側は海に面しており通行できない。

病院の病床数や商業施設の規模などをもとに、各施設のモビリティサービス利用者の数を想定した。

4.2.3 地方都市現地調査

対象都市の想定データは、現地調査結果

を反映し修正した。対象都市の施設来場者や渋滞発生などの交通状況を確認し、車両を走らせて車両平均走行速度を測定した。施設を訪問し、駐車場の稼働率から高齢者に利用されているか、一日の需要が十分にあるかなどを確認した。富山市においては、公共交通機関を利用した場合についても簡単な調査を行った。なお、つくば市については、研究責任者らの所属機関の所在地であることもあり、研究実施期間中に適宜調査を行った。

現地調査にて計測した走行距離と走行時間から算出した平均速度は、つくば市では 30.6 km/h、上田市と富山市はいずれも 24.0 km/h だった。

4.3 シミュレーションモデル

4.3.1 概要

モビリティサービスにおいて、利用者のモビリティ需要を満たすために必要な SAV 台数を求めることと、SAV の運行を調べるために、配車モデルを構築して SAV 運行シミュレーションを行った。運行シミュレー

ションでは、どの SAV がどのモビリティ需要を満たすのか、SAV が、車庫を出発してから、いつどのモビリティ需要を満たし(利用者を乗せ)て、いつ車庫に戻るか、といったことが求まる。

配車モデルは、モビリティ需要への SAV の最適な割り当て、即ち SAV の配車を決定する。その仮定で、全てのモビリティ需要を満たすために必要な SAV 台数(必要車両台数)を求めることができるとともに、SAV が利用者を乗せていない時間(空車時間)を最小にする。ここで、SAV の全走行距離のうち、実車距離は利用者が乗車した状態での走行距離、空車距離は利用者が乗車していない状態での走行距離である。モビリティ需要が増えると、必要な SAV の台数も増加する。そこで、SAV 台数を最小化する最適な配車を求め、さらに空車時間と空車距離とを最小化するものとした。なお、本研究では、利用者はサービス利用に当たって事前予約を行う、つまり全てのモビリティ需要は事前に確定しているものとした。

4.3.2 配車モデル

モビリティ需要に基づいて SAV 配車を最適化する手順を図 3 に示す。以下の 4 つのステップで、対象都市の仮想地図上にモビリティ需要の出発地と目的地をプロットし、配車条件に従ってモビリティ需要と車両との割り当てを決定する。配車最適化については、数理計画法を用いて二部グラフの辺の重みを最小化する完全一致問題として定式化した。最初は車両 1 台から割り当てを始め、全てのモビリティ需要を満たすことができない場合は、モビリティ需要を満たせるまで車両台数を 1 台ずつ増やしていく。

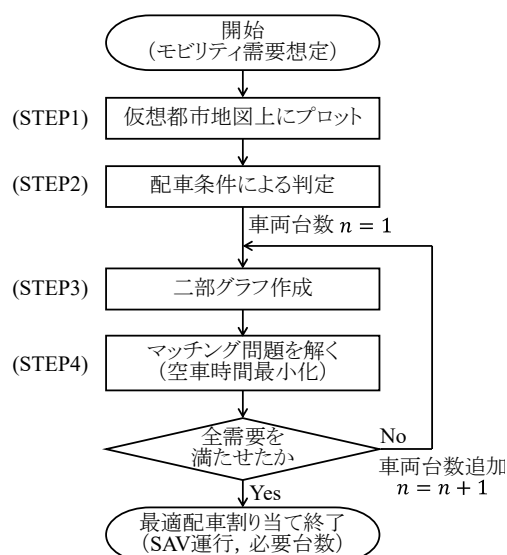


図 3 配車決定の流れ

なお、モビリティ需要は出発地と目的地の位置および出発時刻で示される。例えば、モビリティ需要 i については、出発地 (X_i^{org}, Y_i^{org}) と目的地 (X_i^{des}, Y_i^{des}) および出発時刻 T_i^{org} で表される。

ステップ 1 モビリティ需要の出発地 (X_i^{org}, Y_i^{org}) と目的地 (X_i^{des}, Y_i^{des}) を二次元座標で表現した仮想地図上にプロットした。本研究では地方都市を想定しているため、大都市ほど道路密度が高くなく、必ずしも最短経路で移動できるとは限らない。また、現実的な計算時間で最適解を得るため対象都市を 1 km ごとの格子に分割した。各モビリティ需要の出発地、目的地、経路はこの格子に従って存在するものとした。図 4 に示すように、格子点上に出発地 (X_i^{org}, Y_i^{org}) と目的地 (X_i^{des}, Y_i^{des}) をプロットし、SAV は格子点間の最短経路を走行すると仮定した。

ステップ 2 配車判定条件を用いて、各 SAV のモビリティ需要への割り当て可否を調べる。配車判定条件は、ある時刻におい

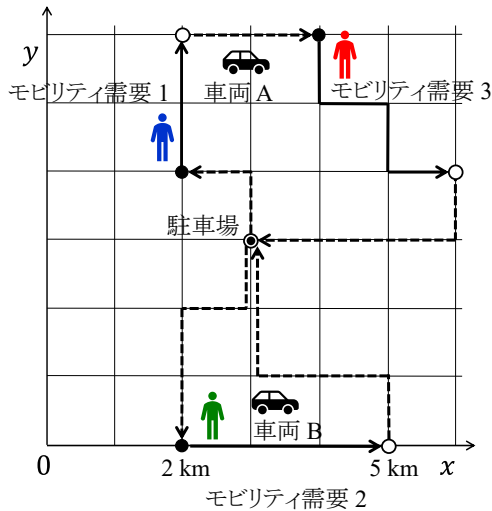


図4 格子状の仮想都市

て、ある SAV が別の場所にいる利用者を指定の時刻まで迎えに行き乗車させ、モビリティ需要を満たせるかを判定するものである。ここで、時刻 t における車両 (SAV) v の位置を (x_v, y_v) 、モビリティ需要 i の出発地と出発時刻を $(X_i^{\text{org}}, Y_i^{\text{org}})$ と T_i^{org} とする。その車両が (x_v, y_v) から時間 $T_i^{\text{org}} - t$ の間に $(X_i^{\text{org}}, Y_i^{\text{org}})$ へ移動できる場合、配車条件は満たされることになる。なお、車両は、利用者を目的地まで送り届けた後は、その場に留まるものとした。車両 v が満たした一つ前のモビリティ需要 j の目的地と到着時刻とを $(X_j^{\text{des}}, Y_j^{\text{des}})$ と T_j^{des} とすると、 $t = T_j^{\text{des}}$ となる。車両の平均走行速度を S^{av} とすると、到着時刻 T_j^{des} は、走行距離と開始時刻により、(1) 式の通りとなる。モビリティ需要 j を満たしてからモビリティ需要 i を満たす場合、車両は $(X_j^{\text{des}}, Y_j^{\text{des}})$ から $(X_i^{\text{org}}, Y_i^{\text{org}})$ まで空車で移動することから、空車距離 $T_{i,j}^{\text{ekt}}$ および空車時間 $T_{i,j}^{\text{evt}}$ は(2)式と(3)式となる。これらから配車条件は(4)式で表され、この式を満たす場合、車両 v は、 $(X_j^{\text{des}}, Y_j^{\text{des}})$ から $(X_i^{\text{org}}, Y_i^{\text{org}})$ へ配車可能である。

$$T_j^{\text{des}} = \frac{|X_j^{\text{des}} - X_j^{\text{org}}| + |Y_j^{\text{des}} - Y_j^{\text{org}}|}{S^{\text{av}}} + T_j^{\text{org}} \quad (1)$$

$$T_{i,j}^{\text{ekt}} = |X_j^{\text{des}} - X_i^{\text{org}}| + |Y_j^{\text{des}} - Y_i^{\text{org}}| \quad (2)$$

$$T_{i,j}^{\text{evt}} = \frac{T_{i,j}^{\text{ekt}}}{S^{\text{av}}} \quad (3)$$

$$T_{i,j}^{\text{evt}} \leq T_j^{\text{des}} - T_i^{\text{org}} \quad (4)$$

ステップ3 各モビリティ需要の出発と到着とを頂点、空車距離を辺の重みに見立てた二部グラフを作成する。二部グラフとは、すべての頂点をAまたはBの2つの集合に分類し、すべての辺はAまたはBのいずれかの集合に属する頂点を結ぶというグラフである。SAVがモビリティ需要 j を満たした後にモビリティ需要 i に割り当てようとする際、配車判定条件が満たされる(割り当て可能な)場合、 $T_{i,j}^{\text{evt}}$ には(2)式で求めた空車距離を代入する。判定条件割り当て条件が成立しない(割り当て不可能な)場合、 $T_{i,j}^{\text{evt}} = M$ (M は無限大に近い有限の数)を代入する。なお、空車時間は空車距離を平均速度で除したものであるから、両者の最小化は同じとなる。

ステップ4 作成した二部グラフの辺の重みの合計を最小化するようにマッチング問題を解き、その後、各モビリティ需要に対する n 台のSAVの最適割り当てを決定する。ここで辺の重みの合計値を最小化することは、全車両の空車距離合計を最小化するということである。 n 台のSAVで全てのモビリティ需要に対応できない場合は、車

両数を1台増やして $n+1$ 台として、ステップ3に戻って新たな二部グラフを作成する。以上の過程を、設定した台数のSAVで全てのモビリティ需要を満たせるまで繰り返す。全てのモビリティ需要を満たした時点で配置最適化が完了し、その時のSAVの台数が最小必要車両台数となる。

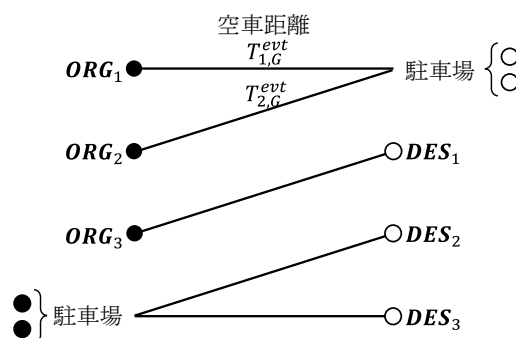


図5 二部グラフ

図1に示すケースを例として、最適化の流れを説明する。図5に示す二部グラフにおいて両側の頂点を結ぶことが車両の割り当てに相当する。最初はSAVを1台とする。ステップ1において格子上にプロットされたモビリティ需要(図4)に対して、配車条件を満たすかどうかを調べる。モビリティ需要1を満たした車両Aは8時30分に目的地に到着する。需要2の出発時刻は8時20分であるため、車両Aは需要2を満たすことができない。そこで、 $T_{2,1}^{evt}$ には M が代入される($T_{2,1}^{evt} = M$)。同様に、 $T_{1,2}^{evt} = T_{2,1}^{evt} = T_{1,3}^{evt} = T_{2,3}^{evt} = M$ となる。モビリティ需要3の出発時刻は8時45分でありモビリティ需要1の到着時刻の15分後である。図4より $T_{3,1}^{ekt} = 2\text{km}$ であるから、 $S^{av} > 8\text{ km/h}$ であれば配車条件($T_{3,1}^{ekt} \leq 15\text{ min}$)を満たし、空車時間は $T_{3,1}^{ekt} = 2/S^{av}$ となる。同様に、車両Bについても、 $S^{av} > 21\text{ km/h}$ であれば配車条件($T_{3,2}^{ekt} \leq 20\text{ min}$)を満たすから、8時25分にモビリティ需要2を満たした後、モビリティ需要3を満たすことができ、空車時間は $T_{3,2}^{ekt} = 7/S^{av}$ となる。2つの空車時間を比較すると、 $T_{3,1}^{ekt} < T_{3,2}^{ekt}$ であるから、車両Aはモビリティ需要3に割り当てられる。以上から、車両Aは駐車場を出た後、モビリティ需要1,3の順に需要を満たすことが決まった。

ここまでで、ある車両およびモビリティ需要1と3のマッチング、ならびに、ある車両とモビリティ需要2,の2つのマッチングのうち、前者が決まった。しかし、ここでは車両は1台のため、モビリティ需要2を満たす車両がなく、全てのモビリティ需要を満たせていない。

そこで、車両を1台増やして2台として、再度、割り当てを行う。今回は、モビリティ需要2を満たす車両が存在し、全てのモビリティ需要を満たせる。以上の結果から、必要車両数は2台(車両A, B)、最小空車時間は $(T_{1,G}^{evt} + T_{3,1}^{ekt} + T_{G,3}^{ekt}) + (T_{2,G}^{ekt} + T_{G,2}^{ekt})$ となる。

4.4 モビリティ需要と想定条件

シミュレーションに用いるモビリティ需要は、4.2.2にて想定した訪問先(目的地)に加えて、国土交通省による道路・街路交通状況調査を用いて出発地および出発時刻を想定した。

国土交通省では、5年ごとに起点・終点(OD)調査を含む道路・街路交通状況調査を全国的に行っている。OD調査はアンケートにより行われ、車種などの車両データや走行距離などの走行データが含まれている。本研究では2015年の調査データ[11]を使用

した。この調査結果には 118 万台の車両に関する 270 万件の走行データが含まれる。

本研究では、地方都市における高齢者の日常的なモビリティ需要を対象としていることから、地方都市における高齢者の平日の生活圏内の買い物や通院を目的とした運行データを対象とした。具体的には、OD 調査データから、「65 歳以上」、「平日」、「(東京, 埼玉, 神奈川, 千葉, 愛知, 大阪) 以外」、「買い物または通院目的」、「自家用乗用車」、「走行距離 $\leq 10\text{km}$ 」のすべての条件を満たすデータを抽出した。シミュレーションには、調査で収集した運転目的、出発・到着時間、走行距離を使用した。

OD 調査データから抽出したデータの走行距離は、モビリティ需要の走行距離に用いた。訪問先から逆算して利用者の住宅の位置を決定した。例えば、OD 調査データのうち、運行目的が通院で走行距離が 5 km のデータの場合、目的地を病院の場所とし、そこから 5km 離れた場所を無作為に選んで出発地とした。

4.5 シミュレーション実施と結果

4.5.1 概要

地方都市における SAV 導入の効果を評価するため、構築した配車モデルを用いて SAV 運用シミュレーションを行った。交通調査データを用いて、地方における高齢者の日常的な移動を想定したモビリティ需要データベースを作成した。データベースからランダムに抽出した 500 件, 1500 件, 2500 件のモビリティ需要データを用いてシミュレーションを 5 回繰り返した。その結果から必要車両台数と空車時間を算出した。5 回のシミュレーション結果の平均値を用いて、

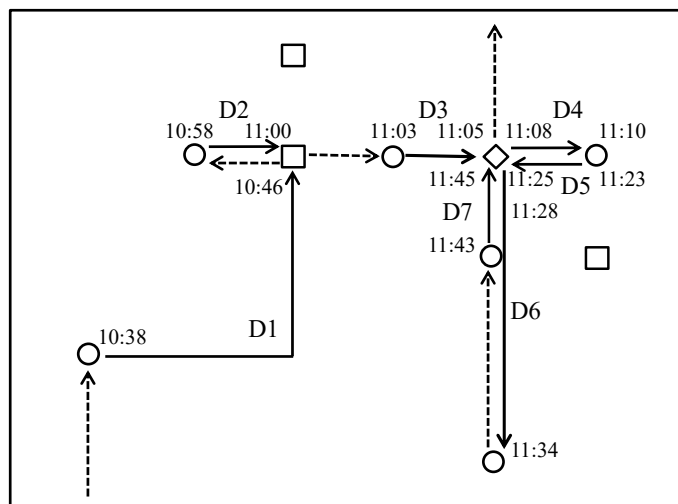
輸送量、サービス費用および利用者の利便性といった各種評価指標を算出し、多角的な定量評価を試みた。なお、モビリティ需要において、出発地と目的地(訪問先)は対象都市における施設分布によって都市ごとに異なるが、出発地と目的地の距離や出発時刻は、交通調査データを用いているため、どの都市においても同じである。

4.5.2 SAV 運用と必要車両台数

SAV 運用シミュレーションによって求められた SAV 運行の様子を例を図 6 に示す。

図 7 は、シミュレーション結果から得られた各都市のモビリティ需要に対する必要車両台数を表示したものである。モビリティ需要 2500 件/日の場合、116–133 台が必要となる。必要台数は富山市が最も多く、次いで上田市、つくば市となった。必要台数が異なる要因は、都市の走行速度と面積である。走行速度が速いほど空車時間が短くなり、配分条件を満たしやすくなることから、必要台数が少なくて済む。つくば市は、他の都市よりも走行速度 S^{av} が速いため、必要台数が少なくなった。必要台数は、モビリティサービスの提供区域が広がるにつれて増加した。面積が大きいと格子点にプロットされたモビリティ需要の出発地と目的地の分布が疎になり、空車距離が大きくなってしまふ。その結果、配分条件を満たすことが難しくなる。富山市は上田市よりサービス提供区域が広いため、必要台数が多いという結果となった。

一台の SAV が一日に対応したモビリティ需要の平均件数を図 8 に示す。つくば市が最も多く、次いで上田市、富山市となっており、都市間の比較からは図 7 に示した必要



実線：利用者乗車（実車），破線：利用者のもとへ移動または出庫／帰庫（空車），

D1～7：モビリティ需要

図 6 SAV の運行の様子（つくば市，モビリティ需要数 2500 件/日）

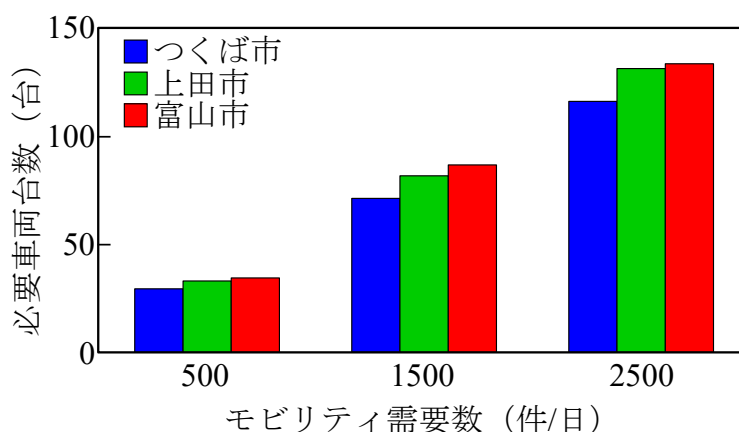


図 7 必要車両台数

車両台数と逆の傾向となった。また、モビリティ需要が多いほど、一台の SAV が対応できるモビリティ需要の数も増える、即ち、規模の経済が認められた。

4.5.3 モビリティ需要充足率による評価

SAV によるモビリティサービスの地方都市での移動貧困問題への解決策としての可能性を評価するために、各都市の SAV が高齢者の外出需要を満たした割合であるモビ

リティ需要充足率を算出し、必要車両台数との関係を分析した。この分析には 2500 件のモビリティ需要を用いた。

モビリティ需要充足率と必要車両台数とを表 2 に示す。モビリティ需要充足率は、一日あたりの利用者数である 1250 人を、各都市の一日あたりの高齢者の外出総件数で割って算出した。一回の外出で 2 件のモビリティ需要（往復）が発生するため、2500 件のモビリティ需要は利用者 1250 人分の外

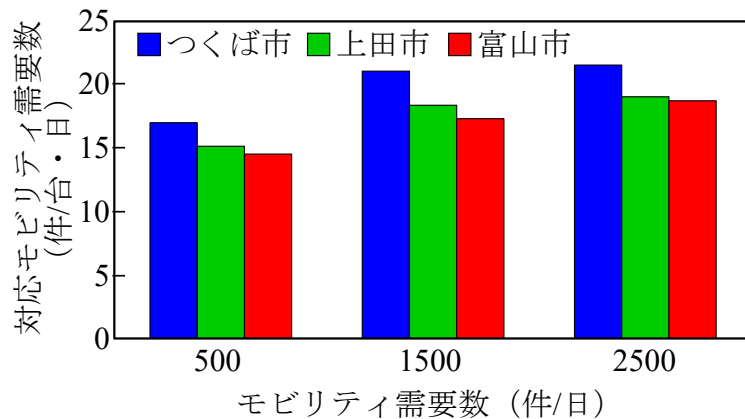


図8 車両一台が満たす一日当たりのモビリティ需要数

表2 モビリティ需要充足率と必要車両台数

	モビリティ需要充足率 (%)	必要車両台数 (台)
つくば市	5.1	116
上田市	5.5	131
富山市	2.0	133

出要求に対応する。対象都市の高齢者の外出頻度は、2日に1回と想定した。モビリティ需要充足率は、つくば市と上田市で高く、高齢者が多い富山市で低くなった。地方都市における路線バスは、モビリティ需要の約3%をカバーしており[12]、つくば市と上田市のモビリティ需要充足率は、それを上回っている。各都市の状況に合わせれば、自家用車やバスを利用できない高齢者の外出の大部分をSAVが満たすことができる。したがって、SAVによるモビリティサービスは、高齢者の移動問題の解決策となり得ることが示された。

4.5.4 車両走行距離

車両一台当たりの平均走行距離と実車率(走行距離における実車距離の割合)を図9

に示す。本研究ではモビリティ需要自体は都市によらず同じデータを与えているため、全車両の実車距離の合計はいずれの都市でも等しくなる。そのため車両台数が少ないほど、一台当たりの実車距離は大きくなる。モビリティ需要が大きいほど実車率が向上し、サービスの効率が高くなる。これは、モビリティ需要が多くなると、一台当たりのサービス提供数が増加しモビリティ需要の密度も高くなるからである。

4.5.5 単位実車距離当たりの運用費用

SAVによるモビリティサービスの事業採算性や利用者にとっての経済的負担を評価するために、単位実車距離当たりの運用費用を試算した。運用費用として車両費用(初期費用と維持費の合計)と運行に要する費用とを考慮し、それを実車距離で除することで単位実車距離当たりの運用費用を算出した。本研究では利用者同士の相乗りを考慮しないことと、近年の車両電動化の流れから、SAVとして乗車定員4~5名のBEVを想定した。

自律型自動運転機能を持つSAVの車両費用は現状のところ明らかでないが、市販の

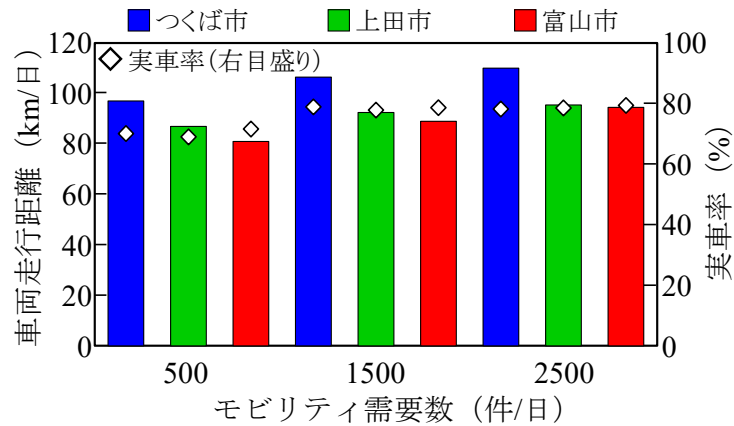


図9 車両走行距離と実車率

BEV より高価となることが予想される。ここでは、一つの例として車両初期費用を 600 万円と仮定した。従来のタクシー車両の寿命を参考に、走行距離 20 万 km で更新されると仮定すると、シミュレーション結果から一日の走行距離は 80–115 km となるから、導入後更新までに約 5 年間使用されることとなる。更新までに要する維持費は、既存 BEV の走行距離 1 km あたりの維持費[13]をもとに 54 万円と仮定した。さらに走行距離 10 万 km で蓄電池を交換するものとし、その交換費用は車両初期費用の 5 分の 1 とした。

運用費用として充電にかかる費用と駐車場賃貸費用とを考慮した。充電にかかる費用は電力量に比例するものとした。市販 BEV の電費と一般的な小売電気料金とを、それぞれ 6.45 km/kWh, 15 円/kWh と想定し、それらから運用費用を車両走行距離 1km あたり 2.32 円と仮定した。充電設備付き駐車場賃貸費用は、地方都市の駐車場料金の相場から 3,000 円/月とした。

SAV によるモビリティサービスは、公共性が高いため、自治体や NPO だけでなく、自治体から民間企業への委託や、民間企業

が収益事業として実施する可能性もある。各自治体では、シャトルバスの運行や高齢者向けタクシーへの補助など、様々な移動貧困対策が行われている。自律走行バスの実証実験を行っている自治体もある[14]。

つくば市を対象として、単位実車距離当たりの運用費用を算出した結果を図 10 に示す。60 円/km 前後という運用費用から、タクシーに対する経済的な優位性が明確に示された。タクシー事業では費用の約 70% を運転手の人件費が占める[15]。一方、SAV によるモビリティサービスでは運転手の人件費が不要となり、運用費用の大部分を車両費が占め、モビリティ需要の増加による規模の経済も認められる。

4.5.6 一般化費用による他の移動手段との比較

SAV によるモビリティサービスに関する利用者にとっての経済的負担と利便性を定量的に評価するために、一般化費用を用いて他の交通機関と比較した。一般化費用とは、外出時の精神的および肉体的負担を定量的に評価するモデルで、交通機関利用時の移動時間、乗り換え回数および運賃など

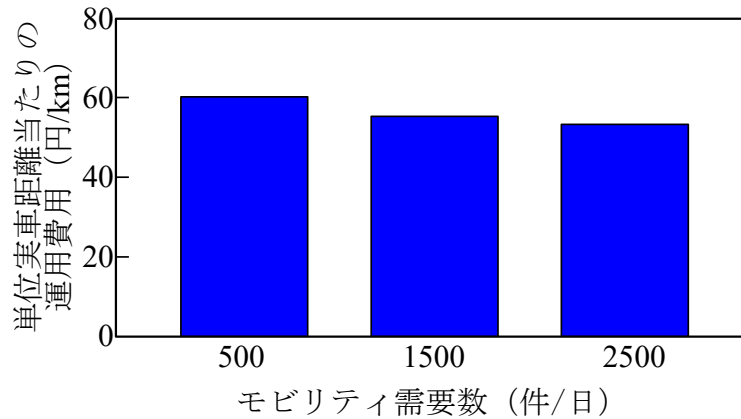


図 10 単位実車距離当たりの運用費用 (つくば市)

の異なる交通手段の負担を、ある交通手段を基準に金銭に換算したものである[16]。一般化費用 G 円は (5) 式で表される。第 1~3 項は移動に関する負担を示し、第 4 項は経済的負担を示している。 λ は移動の負担を費用に換算する係数 (円/分) である。乗車時、待機時、通過時の各交通手段の負担の違いを補正するために、等価時間係数を用いた。

$$G = \lambda \left(\sum \mu_i t_i + \sum \mu_w t_w + \mu_t N \right) + \sum M_i \quad (5)$$

ここでは、代表例として、つくば市を対象に算出した。モビリティ需要数は 2500 件/日とした。一般化費用算出の基準として、平均的な外出時の実車距離は、SAV 運用シミュレーションで用いた平均値から、4 km とした。また、各移動において利用者が感じる負担の地域差は小さいと考え、各移動手段の等価時間係数と換算係数 λ は、アンケート調査に基づいて算出された高齢者に対する値[17]を参考に想定した。SAV の快適性は自家用車と等しいとし、等価時間係数も自家

用車と同じとした。いずれの交通手段においても、待ち時間や乗り換えはないものとした。各交通手段の係数は次の通りとした。

SAV： $\mu_{SAV}=0.875$ ， $M=399$ 円 (モビリティ需要 2500 件のつくば市)。SAV の走行速度は、つくば市の平均走行速度から 30.6 km/h とした。

バス： $\mu_{bus}=1.115$ ， $M=350$ 円 (つくば市のバス事業者の運賃に基づく)。利用者の自宅からバス停までの距離は 300 m，歩行速度は 2.88 km/h とした。バスの平均速度は 12.0 km/h とした。座席は常に確保されていると仮定した。

タクシー： $\mu_{taxi}=1.03$ ， $M=1390$ 円 (ある地域のタクシー料金を参考に想定)。平均走行速度は SAV と同じ 30.6 km/h とした。

換算係数： $\lambda=8.78$ とした。

表 3 に一般化費用の試算結果を示す。利便性、コストともに SAV が最も低くなった。これは、SAV による移動はバス停から歩く

表3 一般化費用の試算結果（つくば市）

	移動	利用料金	合計
SAV	60	214	274
バス	279	350	629
タクシー	71	1390	1461

必要がないため、目的地までの所要時間と等価時間係数の差が小さくなるためである。そのため、バスよりも費用が低くなった。したがって、本研究で想定した車両の初期費用と需要数による検討結果からは、SAVによるモビリティサービスは、高齢者を対象として十分な利便性と経済性を有することが示された。

4.6 ケーススタディまとめ

3つの地方都市を想定し、SAV運用シミュレーションを用いたケーススタディから得られた主な知見は次の通りである。

- ・利用者は事前に予約するという想定もあり、走行距離のうち約80%が実車と、車両運行効率が高い。
- ・116-133台のSAVで、現在、路線バスがカバーしている移動需要に対応できる。その際、一台のSAVで一日当たり14-21件のモビリティ需要に対応する。
- ・運営に要する費用は50-60円/kmであり、タクシー事業と比較して経済的である。利用一回当たりの費用は数百円となる。
- ・一般化費用を用いた分析結果からもSAVの優位性が示された。

以上から、SAVによるモビリティサービスの一般化費用は、地方都市における高齢者の移動手段として十分な可能性がある。

5. まとめ

本研究では、地方都市における高齢者向けSAVによるモビリティサービスの可能性について、SAV運行シミュレーションによるケーススタディを行った。3つの地方都市を想定し、高齢者の日常的な訪問先として、病院と商業施設を想定した。一日当たりのモビリティ需要の数を変化させて、必要車両台数と空車距離を算出し、さらに運営費用や一般化費用といった各種評価指標によって定量的に分析・評価した。その結果、SAVによるモビリティサービスの一般化コストは、地方都市における高齢者の移動手段として十分な可能性があることが示された。

今後は、さらに多くの都市を対象としたケーススタディを行うほか、相乗りや呼び出しによる利用といった様々な利用形態も考慮した分析を行っていく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり国土交通省より交通センサデータの提供を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Fagnant, D.J., Kockelman, K.M., Bansal, P., Operations of shared autonomous vehicle fleet for Austin, Texas, market. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2563(1), 98-106, 2016.
- [2] Fagnant, D.J., Kockelman, K.M., Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared

- autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation* 45, 143–158, 2018.
- [3] Chen, T.D., Kockelman, K.M., Hanna, J.P., Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94, 243–254, 2016.
- [4] Loeb, B., Kockelman, K.M., Fleet performance and cost evaluation of a shared autonomous electric vehicle (SAEV) fleet: A case study for Austin, Texas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 121, 374–385, 2019.
- [5] Imhof, S., Frölicher, J., von Arx, W., Shared autonomous vehicles in rural public transportation systems. *Research in Transportation Economics* 83, 100925, 2020.
- [6] Luo, L., Troncoso Parady, G., Takami, K., Harata, N., Evaluating the impact of autonomous vehicles on accessibility using agent-based simulation —A case study of Gunma prefecture. *Journal of JSCE* 7(1), 100–111, 2019.
- [7] Meyer, J., Becker, H., Bösch, P.M., Axhausen, K.W., Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics* 62, 80–91, 2017.
- [8] Vosooghi, R., Puchinger, J., Jankovic, M., Vouillon, A., Shared autonomous vehicle simulation and service design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 107, 15–33, 2019.
- [9] Ma, J., Li, X., Zhou, F., Hao, W., Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 84, 124–141, 2017.
- [10] Loeb, B., Kockelman, K.M., Liu, J., Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 89, 222–233, 2018.
- [11] 国土交通省, 平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査自動車起終点調査, 2017.
- [12] 国土交通省九州運輸局, 高齢者の移動手段の確保に向けた最近の動きについて, 2019.
- [13] Harto, C., Electric vehicle ownership costs: Today's electric vehicles offer big savings for consumers. *Consumer Reports*, 2020.
- [14] デジタル庁, 茨城県境町における NAVYA ARMA を活用したまちづくりについて, デジタル交通社会のありかたに関する研究会資料, 2022.
- [15] 国土交通省, タクシー事業の現状について, 第 1 回人材確保・育成ワーキンググループ資料, 2014.
- [16] Goodwin, P.B., Generalised time and the problem of equity in transport studies. *Transportation* 3, 1–23, 1974.
- [17] 柿沼将光, 都君燮, 松井寛, 大都市都心部における高齢者の交通行動特性分析と交通負担感の計測 特に高齢者と非高齢者との比較分析を中心として, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 286–287, 2001.