

駐車場需要との関係を考慮した 自動運転車両普及の社会経済評価に関する 一考察

兵動 靖章¹・松島 格也²

¹学生会員 京都大学修士課程 大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: hyodo.yasuaki.88c@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: matsushima.kakuya.7u@kyoto-u.ac.jp

自動運転車両がさらに普及すれば、将来無人状態での移動が広く許容される可能性があり、そのことが家計行動に影響を及ぼしうる。例えば、これまで自家用車で商業施設を訪れていた人が自動運転車両に乗り換えれば、商業施設併設の駐車場を利用せずに施設入口付近で降車することが可能だ。こういった消費者が増えることで駐車場需要は低下し、長期的には駐車場面積の縮小と店舗面積の拡大に繋がる。そこで、本研究では自動運転車両の普及により商業施設の土地利用が変化することを想定し、家計の自動運転車両の普及率を分析する市場均衡モデルを構築し、自動運転車両普及率の変化が社会経済に及ぼす影響について分析した。市場均衡での普及率と社会的最適時の普及率に乖離があることを指摘するとともに、社会的最適に近づけるための政策を提案する。

Key Words: *autonomous vehicles, parking demand, market equilibrium, social welfare*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

近年の技術の進歩はすさまじく、通信の高速化や製品の小型・軽量化など、生活する上でのあらゆる分野の利便性が高まっている。そういった中、特に注目されている分野の一つが、モビリティである。2022年現在、世界中で電動キックボードや電動バイクなどのマイクロモビリティが普及しつつあり、我が国においても導入支援制度やガイドラインの制定などがなされている¹⁾。マイクロモビリティの導入は、これまで電車通勤していた層や自家用車で通勤していた層など様々な層に影響がある。そのため、今後の交通様式を大きく変えうる可能性を秘めており、その利用に適した都市計画が求められるようになるだろう。そして、マイクロモビリティと同様にモビリティ分野で注目されているテーマが、自動運転技術である。自動運転技術を搭載した自動車の導入は、比較的小規模な市場となることが予想されるマイクロモビリティの導入よりも考慮すべき事項が多く、その分導入前から多くの検証が必要となる。実際、自動運転の実用化に向けて国土交通省は基準緩和認定制度を設け、積極的な姿勢を見せている²⁾。

自動車は電車と並び最も一般的な移動手段の一つで

あり、電車と比較して出発時間の束縛がなく、また家から目的地までドア to ドアに近い移動が可能である。一方、免許を要する煩雑な運転操作を利用者自身が行う必要がある点が電車と異なる特徴であった。その運転操作の自動化が実現すれば、利便性は飛躍的に向上する。こういった背景から、最近では研究が進み実際に車両への実装を試みる動きが活発化している。多くの自動車企業の最終目標は、走行中に人的操作を全く必要としない完全自動運転の実現であるが、現時点では段階的に特定条件下での運転の自動化を導入する企業が多い。自動化の程度により自動運転レベルは0から5の6段階に分類される³⁾が、我が国では2022年4月から許可を受けた場合のみレベル4での特定自動運行が可能になった⁴⁾。レベル5である完全自動運転を広く導入することには多くの障壁があり、段階的に乗り越えていく必要がある。

その障壁の一つが、社会整備の問題である。NACTO⁵⁾は、自動運転車両がアメリカの都市に与える悪影響について、次のように述べている。自動運転車両が普及すると、バスや電車などの交通機関の需要が減少し、交通機関のサービスの質が低下する。混雑時の通行料を道路に設定しなければ、混雑が加速して全体的に非効率な移動となる。政府が個人の移動データの保護に関する規制をしておらず、第三者がプライベートな移動

データにアクセスできるようになっている。将来的に自動運転車両専用レーンができると、道路空間を他の用途から奪うことになってしまう。自動運転車両による送迎が増加した結果、駐車場の代わりに路肩で停車する車両が増加し、道路が混雑することになる。

自動運転車両の普及のためには、普及のメリットがこういった障壁を取り除くコストを上回ることが不可欠である。そこで、次に自動運転車両を利用する上でのメリットをあげる。

各消費者が自動運転車両を利用する直接的なメリットは、文字通り運転操作を必要としないことから得られるメリットだ。右折のタイミングや駐車場の探索、渋滞を回避するための道検索など、運転時に行っている多くの選択から解放されるため、走行中の疲労を格段に抑えることができる。実際、運転手のこういった選択のミスが交通事故の主な原因となっているため、自動運転が適切に機能することで多く交通事故を未然に防ぐことができるだろう。また、移動時間を運転操作にあてる必要がないため、メールの確認といった簡単な作業や仮眠など、車内でできることであれば自由に行うことができる。そのため、これまでコストとして捉えていた移動時間を他の活動時間にあてることができ、1日の時間効率性が高まる。

さらに、マクロな視点では、自動運転車両の利用者が増加することによる社会的なメリットが存在する。例えば、複数の車両の走行ルートを一括で制御することによるメリットである。効率的なルート配分を実現し、渋滞を緩和させることができる。また、完全自動運転車両は駐車操作も自動で行うため、利用者はわざわざ駐車場まで行く必要がない。利用者が目的地周辺で下車した後、車両は単体で駐車料の安い駐車場に行き駐車することができる。あるいは共有型自動運転車両を想定すれば、駐車場に向かう代わりに次の利用者のもとへ単体で移動することになるだろう。つまり、一般車両から自動運転車両に移行する人が増加することで、例えば商業地などの多くの人の目的地となるような場所周辺では、駐車場需要が低下することになる。そのため、長期的には駐車場供給側が需要数に合わせて駐車場数を減少させる、あるいは駐車料を変更させるなどして供給の最適化を図るだろう。こういった行動により、土地の利用法が変化するため、その変化が消費者の生活に影響を及ぼすと考えられる。

したがって、本研究では土地利用の中でも特に駐車場の变化に注目し、家計の車両選択の変化による社会的な影響を分析する。自動運転車両の利用者が増加し、駐車場の在り方が変化することにより、自動運転車両の普及はさらに促されるのか、そしてそういった流れ全体が、社会全体に対してプラスの影響を及ぼしうる

のかについて分析する。分析にあたり、まずは既往研究のレビューを次章で行う。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置付け

自動運転車両の導入後の都市計画に関して、特に駐車場に注目した研究は複数見られる。

松中ら⁶⁾は、共有型自動運転車両の普及による社会的便益について、仮想都市を対象とした交通シミュレーションを行った。その結果、人口30万人規模の都市において、共有型自動運転車両の普及により都市内の総車両数と駐車場面積が大きく削減され、サービス普及の可能性が十分にあることを明らかにした。一方、都市内の全ての一般車両の利用者が自動運転車両の利用に転換することを仮定しており、一般車両と自動運転車両が混在する普及途中での結果を得られていないほか、自動運転車両の普及プロセスに関しては言及されていない。さらに、駐車場削減後の土地の活用用途を限定していないため、具体性に欠ける部分がある。

屈⁷⁾は、自動運転車両の市場導入の影響に関して、特に商業地の駐車場数の変化を考慮した検討を行った。自動運転車両の普及により駐車場数が減少すると、土地供給量が増加することにより地代が低下することが想定される。そのため、商業地で販売されている小売財の価格水準も同様に低下し、さらに店舗数増加に伴い種類数も増加する。その結果、商業地に財を購入しに訪れる消費者の効用は上昇していく。屈はこの一連の影響を示すとともに、消費者の所得水準が高く、土地に対する人口が多い地域で自動運転車両の導入が好まれることについても明らかにした。この分析結果は非常に有益である一方で、屈の分析ではそもそも自動運転車両が普及していくことを仮定しており、分析に用いているモデルでは外性的に普及率を与えている。すなわち自動運転車両の普及率と土地利用の変化との関係に関しては不明瞭である。

こういった背景を踏まえ、本研究では自動運転車両の普及率と商業地の土地活用の変化の関係を明確に考慮し、自動運転車両の普及プロセスにまで言及しつつ、普及後に得られる社会的メリットについて、都市経済的な観点から分析する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 自動運転車両の普及により商業地の店舗数が増加するメカニズム

本研究では、自動運転車両が普及することで消費者が多くの財を購入することができることを想定している。このメカニズムは次の通りである。まず、車両の特

徴として、一般車両は目的地周辺に駐車場を必要とするが、自動運転車両は無人走行が可能であることにより必ずしも目的地周辺に駐車場が必要でない。このことを考慮すると、これまで一般車両で商業地を訪れていた消費者が自動運転車両に乗り換えた場合、商業地の駐車場需要が1台分低下することになる。したがって、こういった人が増加する、すなわち自動運転車両が普及すると、商業地の駐車場需要が大きく低下し、駐車場に空きが生まれることになる。土地利用の観点から考えると、この活用されない土地を他の用途にあてることで有限な土地資源を有効に活用することができる。商業地では、その新たな活用用途として新規店舗の出店、あるいは既存店舗面積の拡大など、商業地で販売される財の増加に繋がるような土地活用が最も効果的であると考えられる。

(2) 駐車場の増減による移動時間の変化

商業地は次のような場所を想定する。エリア中央に店舗群が存在し、各店舗で差別化された財を販売している。商業地に訪れた消費者は各店舗を周ることで複数の財を購入することができる。店舗の周辺には駐車場が点在しており、一般車両で訪れた消費者はそこに車両を駐車し、駐車した場所から歩いて店舗群を訪れる。一方、自動運転車両で訪れた消費者は店舗の目の前で下車し、下車後すぐに店舗にアクセスすることができる。残された車両は無人運転で商業地から離れた駐車場に向かい、無料駐車場に車両単体で駐車することができる。

ここで、自動運転車両が普及して駐車場需要が低下した場合を想定する。(1)の議論より、駐車場から店舗へと土地利用の転換が行われるが、アクセス利便性や営業の都合のため、店舗群に最も近い駐車場から店舗用土地に変化していくことが考えられる。その結果、駐車場が相対的にエリア外側に追いやられていくような状況となる。このように変化した時、エリア内の外側の駐車場からエリア中央の店舗群へのアクセス利便性は悪化し、より長い距離を歩くことになる。すなわち、駐車場数が減少し店舗数が増加することで、駐車場から降りて店舗まで歩いていく時の移動時間が増加する。そのため、駐車場を利用する一般車両利用者が不便を感じるようになっていくため、この要素により自動運転車両に移行する人が増加することが予想される。本研究ではこの要素について扱い、明確にモデル内で考慮した上で分析を行う。

(3) 市場均衡と社会的最適

本研究では、分析に先立って都市経済モデルを構築する。その中で2つの市場を考慮する。すなわち、消

費者と小売企業からなる小売市場と、小売店舗と駐車場と地主からなる土地市場である。各市場で各主体の行動を定式化し、その上ですべての主体の最適化行動の式を満たす状況を求める。この状況が市場均衡である。また、各主体の利潤および効用の総和として定義される社会的厚生が最大となる状況についても同様に求める。この状況が社会的最適である。市場メカニズムに任せて状況が変化していった際に社会的最適点に到達するのを確認し、到達しない場合はその到達を妨げている要因を特定し、状況を改善するような政策を提言する。

(4) 自動運転車両の普及に適した都市の特徴の特定

市場均衡と社会的最適の比較後、外部条件を変更した場合の変化について分析する。すなわち、消費者の所得や人口密度など、どういった特徴を持つ都市が自動運転車両の普及に適しているのかを分析し、将来自動運転車両を導入する上での都市の優先順位付けを効果的に行えるようにする。

3. モデルの定式化

(1) 前提条件

本研究で扱うモデルでは、複数の消費者がある商業地を訪れることを想定する。それぞれの条件は次の通りである。消費者は、一つの住宅街に N 人住んでいる。それぞれ独立して生計を立てており、1家計あたり1度の買い物行動あたりに消費可能な所得は I である。商業地は住宅街からやや離れたところに立地しており、住宅街からのアクセスには車両が必要である。商業地内には n 店舗の小売店が出店しており、各小売店はそれぞれ差別化された1種類の財のみを販売する。

(2) 消費者行動

a) 車両選択行動

前節で述べたように、消費者 i は一般車両あるいは自動運転車両のいずれかの利用を選択することができる。消費者の効用 (U_i^M , $M = G$ であれば一般車両の利用を選択した消費者の効用, $M = A$ であれば自動運転車両の利用を選択した消費者の効用を表す) は次のように表すことができる。

$$U_i^G = v^G - \beta t \quad (1a)$$

$$U_i^A = v^A + \varepsilon_i \quad (1b)$$

ここで、 v^G と v^A は商業地を訪れて財を購入することにより獲得できる効用である。一回の買い物行動に対する予算は全ての家計で共通だが、移動手段の選択によって移動費用が変わり財の購入にあてることができ

る金額が変わるため、その効用も移手段によって変化する。詳細は後に説明する。そのほか、 t は一般車両利用者が駐車場に車を停めたあと、歩いて移動して店舗に到着するまでの移動時間であり、 β は時間の金銭評価値を表すパラメーターである。これらは消費者が移動時間の長さから受ける効用を、他の要素と同じ金銭タームで評価するために使用する。さらに、 ε_i は消費者ごとに異質な、新たに登場した商品に対する肯定の度合いを表したものであり、ある確率分布に従って分布しているとす。

消費者は $U_i^G > U_i^A$ が満たされるときに一般車両の所有を選択するため、一般車両の所有を選択する消費者数 N^G は次式で表される。

$$\begin{aligned} N^G &= N \times Pr(U_i^G > U_i^A) \\ &= N \times Pr(E > \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $E = v^G - v^A - \beta t$ である。 ε_i が $[-a, a]$ の連続一様分布に従っていると仮定すれば、一般車両の所有を選択する消費者数 N^G は

$$N^G = \begin{cases} N & (a < E) \\ \frac{N}{2a}(E + a) & (-a < E < a) \\ 0 & (E < -a) \end{cases} \quad (3)$$

と表される。以下、消費者は多様で新商品に対して大きく肯定する層が必ず存在することを想定し、 a が十分大きく $-a < E < a$ が成立する場合について考える。すなわち、 $N^G = \frac{N}{2a}(E + a)$ とする。

また、モデル内の全消費者数が N 人であることから、自動運転車両の利用を選択する消費者数 N^A は

$$N^A = N - N^G \quad (4)$$

で求めることができる。

b) 買い物行動

家計はそれぞれ商業地で財の購入を行い、そこから効用を得る。この効用は次式で表すことができる。

$$v^M = \left[\sum_j (q_j^M)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad 0 < \rho < 1 \quad (5)$$

この効用を規定する関数は Dixit-Stiglitz 型 CES 関数を採用した。この関数の特徴は、効用の大小を決める一要因に、購入可能な財の種類数が含まれており、多くの種類の財を購入できる状況であればあるほど、効用は高まることである。 q_j^M は消費者の小売財 j の購入量を表す。 ρ は財の多様性を選好する度合であり、 $\sigma \equiv \frac{1}{1-\rho}$ と定義すれば、 σ は任意の異なる 2 財間の代替の弾力性を表す。消費者の所得のうち、1 トリップで使える量を I とし、消費者は I すべてを、財の購入とそれに必要な交通費にあてるとする。このとき消費者の予算制

約は次のようになる。

$$\sum_j p_j q_j^G + C^G + p_p = I \quad (6a)$$

$$\sum_j p_j q_j^A + C^A = I \quad (6b)$$

なお、 p_j は小売企業 j の販売する財の価格を表す。 C^G 、 C^A は各移手段を選択した際の 1 回の買い物行動あたりの移動費用を表す。一般車両の選択者は、この移動費用に加えて駐車料金 p_p が発生する。この値は駐車場の管理組織が設定する金額となる。

よって、消費者の効用最大化問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max_{q_j^M} v^M &= \left[\sum_j (q_j^M)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_j p_j q_j^G + C^G + p_p = I & (M = G) \\ \sum_j p_j q_j^A + C^A = I & (M = A) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 小売業行動

小売業を営む企業 j は、商業地の 1 区画を地主から借りる。各企業は差別化された財を販売していると仮定し、独占的競争市場を想定する。企業 j の財の生産量は q_j であり、商業地内には n 店舗が出店しているとすると、商業地全体では $\sum_{j=1}^n q_j$ 個の財が生産されていることになる。

このとき、企業 j が販売に必要な土地投入量を、以下で定義する。

$$l_j = f + m_j q_j \quad (8)$$

ここで、 f は固定土地投入量、 m_j は限界土地投入量を表す。

小売業を営む企業 j の利潤最大化行動は、以下のよう表される。

$$\max_{q_j} \pi_j = p_j q_j - c l_j \quad (9)$$

ここで、 p_j は小売財の販売価格、 c は地代を表す。財の価格は販売量の関数であるため、利潤最大化に関する一階の最適化条件は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_j}{\partial q_j} &= \frac{\partial (p_j \cdot q_j)}{\partial q_j} - \frac{\partial (c \cdot l_j)}{\partial q_j} \\ &= p_j + \frac{dp_j}{dq} q_j - c m_j \\ &= p_j \left(1 + \frac{dp_j/dq_j}{p_j/q_j} \right) - c m_j \\ &= p_j \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_d} \right) - c m_j = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ε_d は需要の価格弾力性を表しており、 $\varepsilon_d = \frac{1}{\rho-1}$ である。したがって、均衡価格は

$$p_{je} = \frac{c m_j}{\rho} \quad (11)$$

となる。なお、小売市場での均衡解は下付き文字 e にて表す。

よって、企業 j の利潤は以下の通りである。

$$\pi_{je} = \left(\frac{cm_j}{\rho} - cm_j \right) q_{je} - cf = \frac{cm_j}{\sigma - 1} q_{je} - cf \quad (12)$$

ここで、市場参入が最も早かった企業を $j = 1$, 最も遅かった企業を $j = n$ とし、それ以外の企業も参入が早い順に若い数字であるとする。 $j = n$ の企業の利潤が正であれば、新たな小売企業 $j = n + 1$ が市場に参入し、新たな財の販売を始める。よって、均衡点では $j = n$ の企業の利潤はゼロとなる。そのため、均衡状態での財の販売量 q_{ne} は以下のように表される。

$$q_{ne} = \frac{f}{m}(\sigma - 1) = \frac{f}{m} \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \quad (13)$$

したがって、均衡状態での土地投入量 l_{ne} は、

$$l_{ne} = f + mq_{ne} = \frac{f}{1 - \rho} \quad (14)$$

である。一方、価格弾力性が全ての財で同一であることに加えて、限界土地投入量が $m_j = m$ で全ての財で共通であるとする、式 (11) より財の価格も同一となる。よって均衡状態では財の生産量、土地投入量も全企業で同一となる。

また、財の供給量と需要量との関係により、

$$q_{je} = N^G q_j^G + N^A q_j^A \quad (15)$$

である。ここで、すべての種類の財が完全に対称的で、価格・需要量ともに同一であることを踏まえると、消費者の財の購入量 q_e^M は、

$$q_e^G = \frac{I - C^G - p_p}{n_e p_{je}} \quad (16a)$$

$$q_e^A = \frac{I - C^A}{n_e p_{je}} \quad (16b)$$

と求められる。式 (15) に式 (16a) と式 (16b) および式 (13) を代入すれば、

$$\frac{f}{m} \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) = N^G \frac{I - C^G - p_p}{n_e p_{je}} + N^A \frac{I - C^A}{n_e p_{je}} \quad (17)$$

となる。式変形により、市場に参入する小売業数 n_e は以下のとおり求まる。

$$n_e = \frac{1 - \rho}{cf} \{ N^G (I - C^G - p_p) + N^A (I - C^A) \} \quad (18)$$

また、均衡点における消費者の買い物効用 v_e^M は、店舗数 n_e を用いて

$$v_e^G = \frac{I - C^G - p_p}{n_e^{(\rho-1)/\rho} p_{je}} \quad (19a)$$

$$v_e^A = \frac{I - C^A}{n_e^{(\rho-1)/\rho} p_{je}} \quad (19b)$$

と求められる。したがって、式 (19a) と式 (19b) に式 (11) と式 (18) を代入し、消費者の間接効用水準は次のよう

に表すことができる。

$$v_e^G = \frac{\rho}{cm} (I - C^G - p_p) \cdot \left[\frac{1 - \rho}{cf} \{ N^G (I - C^G - p_p) + N^A (I - C^A) \} \right]^{-\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (20a)$$

$$v_e^A = \frac{\rho}{cm} (I - C^A) \cdot \left[\frac{1 - \rho}{cf} \{ N^G (I - C^G - p_p) + N^A (I - C^A) \} \right]^{-\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (20b)$$

(4) 駐車場管理組織

業地内の駐車場はすべて公営であるとし、一括して同一組織が管理している。管理にあたって利潤の最大化は行わない。また、消費者が商業地を訪れる際、駐車場を必要とするのは一般車両の利用者のみであるため、自動運転車両の駐車は考えず、設置する駐車場の台数は商業地に訪れる一般車両数に合わせるものとする。1 台分の駐車場を配置するには h の土地が必要となり、駐車場の運営にあたり地代を主とする費用が発生する。当該組織は、この費用分を収入として得る必要があるため、固定の駐車料 p_p を設定し、不足分を税込で補うものとする。すなわち、当該組織の利潤は税込を除くと以下のように表される。

$$\pi_p = p_p N^G - ch N^G \quad (21)$$

(5) 地主

店舗と駐車場として利用する土地一体を 1 人の地主が所有している。総土地供給量は決まっており、供給量を変動させることはできない。一方、店舗の土地需要量と駐車場の土地需要量は変動的であるため、商業地の 2 用途の割合が変化することになる。また、自動運転車両は道路を循環もしくは商業地から離れた別の場所に駐車することを想定するため、駐車場は商業地に訪れる一般車両の利用者分だけを用意する。そのため、店舗用途に利用可能な土地の供給量は以下の式で表される。

$$L_r = L - l_p \quad (22)$$

ここで、 L_r は店舗用の土地供給量を、 L は商業地全体の土地供給量を、 l_p は駐車場用の土地供給量を表す。各店舗の土地需要量は式 (14) より、

$$l_j = \frac{f}{1 - \rho} \quad (14)$$

であり n 店舗分の需要が存在するから、需給バランス

により以下の式が成立する。

$$\sum_{j=1}^n l_j = L_r$$

$$\frac{1}{c} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} = L - hN^G$$

$$c = \frac{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)}{L - hN^G} \quad (23)$$

地主は式 (23) を満たすように地代を設定する。

4. 分析結果

(1) 市場均衡

定式化したモデルを用いて、モデル全体の市場均衡を求めることができる。ここで、市場均衡とは、各主体が自身の利潤あるいは効用を最適化させるような行動を取り合うときに、その条件を満たすような環境のことである。すなわち、小売市場と土地市場において、以下の式を全て満たす。

・消費者行動

$$N^G = \frac{N}{2a}(v^G - v^A - \beta t + a) \quad (3)$$

$$N^A = N - N^G \quad (4)$$

$$v^G = \frac{I - C^G - p_p}{n_e^{(\rho-1)/\rho} p_r} \quad (19a)$$

$$v^A = \frac{I - C^A}{n_e^{(\rho-1)/\rho} p_r} \quad (19b)$$

・小売企業行動

$$p_{je} = \frac{cm}{\rho} \quad (11)$$

$$q_{je} = \frac{f}{m}(\sigma - 1) = \frac{f}{m} \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \quad (13)$$

$$n_e = \frac{1 - \rho}{cf} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \quad (18)$$

・土地市場

$$c = \frac{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)}{L - hN^G} \quad (23)$$

したがって、市場均衡では、上記の 7 式を同時に満たす N^G^* , N^A^* , v^G^* , v^A^* , p_{je}^* , n_e^* , c^* が存在する。

モデル内には N 人の消費者、 n 店舗の小売企業、駐車場管理組織、地主の 4 種類の主体が存在し、駐車場管理組織は固定駐車料から得られる収入を、地主は市場メカニズムによって定まった地代を収入とする一方、その他の主体はそれぞれ最適化行動をとる。

市場均衡では、次の条件をすべて満たしている。 N 人の消費者は全員、一般車両と自動運転車両のうち自身にとって最適な方を選択して商業地に訪れ、商業地では自身の所得内で最大限に満足できる買い物を行う。商業地には n 店舗の小売企業が入居しており、それぞ

れの店舗は需要があるだけの量の財を販売する。また、店舗および駐車場として利用される商業地一体の土地は不在地主が管理しており、市場メカニズムにより定まった地代から得られる利潤を得る。

市場均衡として想定される車両の利用割合は次の 2 つに大別できる。それは、端点解であるいずれか 1 車両のみの状況と、内点解である 2 車両共存の状況である。1 つ目に関して、モデル内の消費者全員が同一の種類の車両を選択する状況である。すなわち、従来通り一般車両の所有を選択する状況、あるいは全消費者の自動運転車両への移行が完了した状況である。この状況となる理由は、どの消費者も同じ車両利用の方が自身にとって最適な選択であると判断したためである。消費者の効用は買い物による効用、駐車場からの移動時間による効用、自動運転車両の利用による効用の 3 つの効用に分けられるが、それらのバランスにより一方の車両選択に偏った場合である。2 つ目に関して、消費者間で選択する車両が 2 つに分かれる状況である。モデル内で消費者ごとに異なる効用として、新製品に対する肯定の度合いを含めているため、この効用の大きさの違いにより、2 グループに分かれていることになる。ちょうどこのグループの境界に位置する人に関しては、どちらの効用もほぼ同じ大きさであり、僅かな差により一方を選んでいるといえる。この均衡の安定性を評価するためには、市場均衡から僅かに移動した状況との比較をすればよい。仮にこの境界に位置する消費者が僅かに効用の低い方の車両を選択した時と比較した時、その行動により商業地内の店舗数は増加し、駐車場からの移動時間は短縮される。このメリットと、そのほかの要素を考慮することで、安定均衡か不安定均衡かを判断することができる。

ここで、上式で定義した均衡問題を解析的に解くことは困難であり、数値例を用いて上の 7 式を満たすような N^G^* , N^A^* , v^G^* , v^A^* , p_{je}^* , n_e^* , c^* を求める。まず、安定性の評価を行うため、以下に数値解析の一例を示す。

a) ケース 1

具体的な設定は、 $F = 0.0$, $I = 15,000.0$, $L = 100,000.0$, $N = 20,000$, $T = 300.0$, $b = 0.010$, $f = 20.0$, $h = 3.0$, $m = 0.050$, $a = 10.0$, $\beta = 0.20$, $\rho = 0.80$, $C^G = 2,000.0$, $p_p = 500.0$, $C^A = 4,000.0$ とした。図-1 に、各効用と自動運転車両移行率との関係を、図-2 に消費者の総効用と自動運転車両移行率との関係を、図-3 にその他の内生変数と自動運転車両移行率との関係を表す。図-1 より、財の購入により得られる効用 v^M は車両選択によらず、自動運転車両の利用者が増加すればするほど高まっていくことが確認できる。この理由は図-3 で確認することができる。自

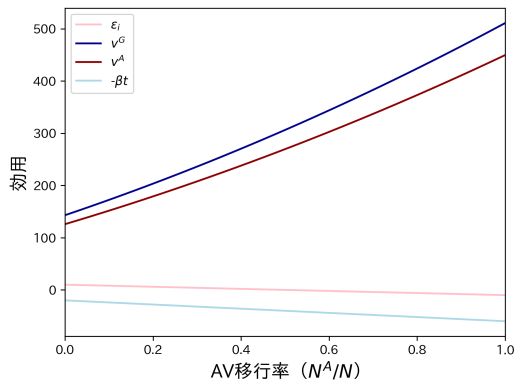


図-1 効用の大小

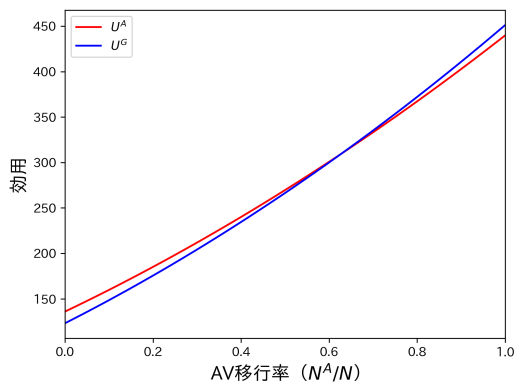


図-2 利用車両別の効用

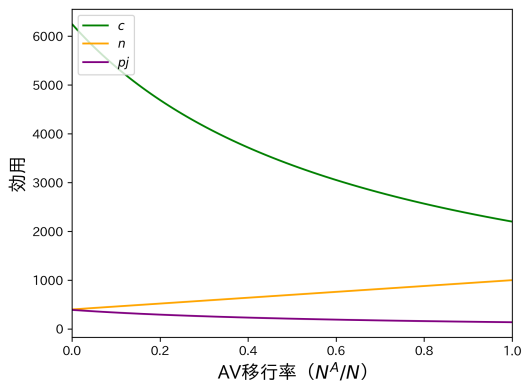


図-3 内生変数の変化

自動運転車両の利用者が増加すると、駐車場数が減少し、店舗数が増加する。さらに、地代が低下して小売財価格も低下するため、消費者が一定所得内で購入可能な財のバラエティが増加する。商業地に訪れる消費者は全員このメリットを享受することができるため、車両選択によらずグラフは右上がりとなる。一方、この効用は常に一般車両の利用者の方が高くなっている。これは、消費者の所得は全員共通である一方で自動運転

車両の利用価格は一般車両の利用価格よりも高く、財の購入にあてられる所得は常に一般車両の利用者の方が高いためである。そのため、店舗数が増えることによるメリットも一般車両の利用者の方が大きく受けることができ、2つの効用差は自動運転車両の利用者が増加するほど拡大していく。

一方、各消費者の総効用は、買い物による効用に加えて、駐車場からの移動時間による効用と自動運転車両の利用による効用がある。消費者は各車両を選択した時に獲得できる効用を比較し、車両選択を行うため、総効用の大小関係と比較することで選択行動を分析することができる。図-2より、自動運転車両への移行が進んでいくと、消費者の利用車両別の総効用はある点でその大小関係が逆転することが確認できる。この交点は $\frac{N^A}{N} = 0.627325$ の時である。 $0 < \frac{N^A}{N} < 0.627325$ の範囲では消費者は自動運転車両を選択する動機を、 $0.627325 < \frac{N^A}{N} < 1.0$ の範囲では消費者は一般車両を選択する動機を持つ。したがって、 $\frac{N^A}{N} = 0.627325$ となる状況が市場均衡として求まる。また、市場均衡の状況から自動運転車両の利用者が僅かに増加した時、図-2より一般車両の効用が高く、自動運転車両の利用者が減少する方向に力が働く。そのため、この市場均衡は安定的であると評価することができる。

したがって、ケース 1 では、自動運転車両の導入初期であっても特に新しい政策を導入する必要はなく、自動運転車両を導入すれば市場メカニズムによっておよそ 6 割の人口に普及して落ち着くようになる。逆に、6 割の人口に普及した後、さらに自動運転車両への移行率を高めるためには、補助金の導入など、自動運転車両の利用者にとって有利となる政策の導入、もしくは駐車料の増加や税金の導入など、一般車両の利用者にとって不利となるような政策を導入する必要がある。

b) ケース 2

別のケースを考える。ケース 1 と近い状況で比較するために極力共通の外生変数を与えることにする。変更する外生変数は、 $b = 0.015$ 、 $\beta = 0.4$ である。すなわち、消費者の時間価値が高く、駐車場数の減少による店舗アクセスの利便性悪化の効果がより大きい場合を想定する。図-5より、グラフの交点が左にシフトしていること、そして2つの効用の大小関係が交点前後で逆転していることが確認できる。この交点は $\frac{N^A}{N} = 0.110995$ の時である。 $0 < \frac{N^A}{N} < 0.110995$ の範囲では消費者は一般車両を選択する動機を、 $0.110995 < \frac{N^A}{N} < 1.0$ の範囲では消費者は自動運転車両を選択する動機を持つ。このケースでは、自動運転車両の導入初期であっても一般車両の利用効用の方が相対的に高いため、仮に自動運転車両を導入しても、市場原理に従って普及していくことはない。一方、導入初期の補助金の導入など

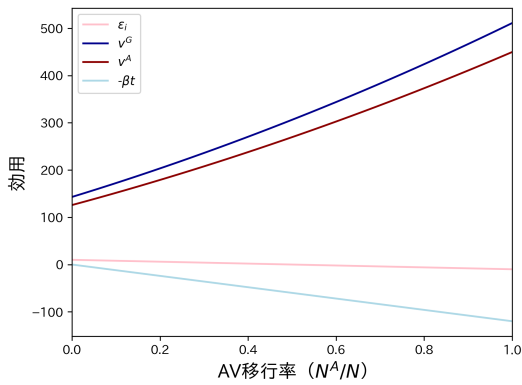


図-4 効用の大小

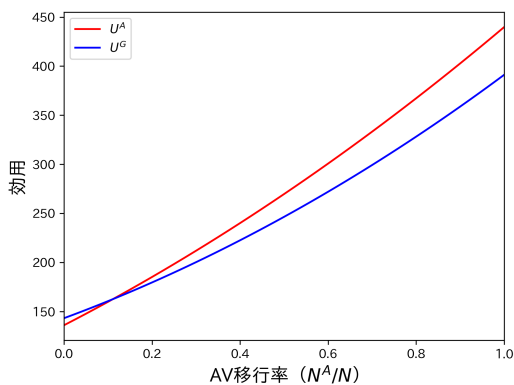


図-5 利用車両別の効用

の政策で交点まで利用者数を増加させることに成功すれば、その後は自然に普及が進行していき、いずれ消費者全員が自動運転車両を利用する状況になる。

したがって、これら2つのケースから、次のことが明らかとなった。一般車両から自動運転車両に移行する人が増加していくと、商業地内の店舗数が増加することに加えて小売財価格が低下し、また駐車場から店舗までのアクセスも不便になっていく。こういった変化が消費者の車両選択を変える原因となる。消費者が駐車場から店舗までのアクセス利便性をあまり重視しないケースでは、自動運転車両への移行途中で安定的な市場均衡が得られ、適切な政策導入のタイミングはある程度移行が進行してからとなる。一方、消費者が駐車場から店舗までのアクセス利便性を重視するケースでは、移行途中で不安定な市場均衡が得られる。また、自動運転車両の導入初期に移行する人は自然には現れず、政策により何らかの動機をつくり出す必要がある。よって、適切な政策導入のタイミングは導入初期となる。つまり、土地利用の変化は消費者の車両選択に影響することを確認した。

(2) 市場均衡と社会的最適の乖離

市場均衡については、前節で説明した。社会的最適とは、モデル内の全主体の効用および利潤の和である社会的厚生が最大となるような状況のことを指す。図-6に、ケース1での社会的厚生を示す。以下、特に断りがない限りケース1のような安定解の場合を考え、代入する数値もケース1のものを使用する。図-6の黒線が

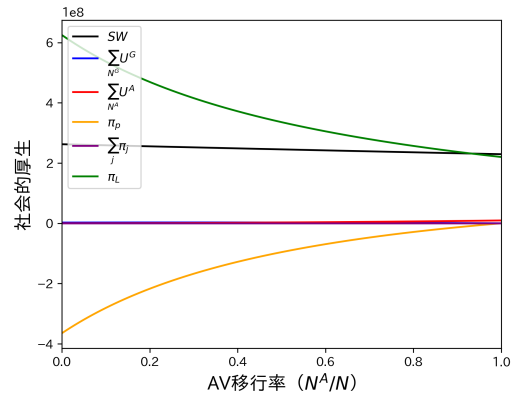


図-6 ケース1の社会的厚生

社会的厚生の変化を示しており、 $\frac{N^A}{N} = 0.0$ の時に最も高く、 $\frac{N^A}{N} = 1.0$ の時に最も低くなっていることが確認できる。すなわち、市場均衡である $\frac{N^A}{N} = 0.627325$ の時には社会的厚生は最大化されていない。これは、規模の経済による効果が大いことを表している。自動運転車両を利用する消費者が増えれば増えるほど、商業地で販売される財のパラエティが豊かになり、消費者の効用が高まる。逆に、一般車両を利用する消費者が増えれば増えるほど、駐車場が多くなり店舗までのアクセスが容易になる上に、駐車場管理組織の駐車料による収入が増加する。このように、消費者全員が一方の車両を利用することによるメリットが他の要素を卓越するため、社会的最適時には全員が一方の車両を利用するような状況となる。特にこのケースでは、駐車場数が最も多く、店舗までのアクセスが最も容易であるため、全員が一般車両を利用する状況が社会的最適となる。

(3) 自動運転車両の利用料の変化に対する社会的厚生の変化

今後、自動運転車両の研究が進み、技術も進歩することにより、将来的には自動運転車両を、より低価格で利用することができるようになると考えられる。そこで、車両価格に対する社会的厚生の大きさを確認することで、今後社会的厚生がどのように変化していくかを可視化することができる。図-7に市場均衡時の自動運転車両の利用価格と消費者の車両選択割合の関係を、

図-8に社会的最適時の自動運転車両の利用価格と消費者の車両選択割合の関係を示す。図-7より、市場均

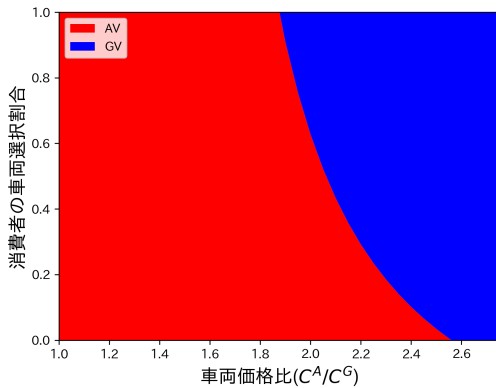


図-7 自動運転車両の利用価格が変化した時の市場均衡時の消費者の車両選択割合の変化

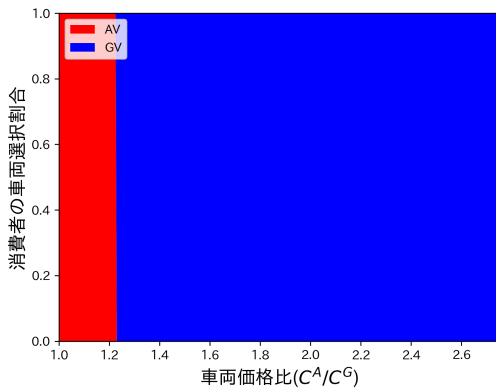


図-8 自動運転車両の利用価格が変化した時の社会的最適時の消費者の車両選択割合の変化

衡時には、自動運転車両の利用価格が低下するほど多くの消費者が自動運転車両を利用していくことが見てとれる。しかし、図-8より、社会的厚生が最大となる時には、自動運転車両の価格がいくらであれ、全消費者が同一の車両を選択していることが分かる。すなわち、技術の進展などの理由により自動運転車両の利用価格が低下していった場合、市場原理にしたがって消費者は徐々に一般車両から自動運転車両へと移行していくが、社会的厚生を考慮すると、社会全体で望ましいのはある価格まで安くなった時に一度に全員が移行するような状況である。この場合、自動運転車両を普及させた上で社会的厚生を最大化させるためには、自動運転車両の価格を一般車両の価格の1.23倍ほどにまで抑えることが必要となる。

5. モデルの拡張

上記の分析では、グラフの横軸を自動運転車両の価格にして、その他の変化を追跡したが、他の要素についても検討する余地がある。例えば、人口密度を横軸にすることで、こういった土地特性を持つ地域でより自動運転車両が普及するのかが確認することができる。

ここでは、特徴の異なる複数都市を比較し、こういった環境が自動運転車両の普及にふさわしいのか、そしてこういった環境が社会的厚生が上昇しやすいのかに触れる。そのためこれまで所与の条件としていた、人口や土地供給量、所得などを変化させることにより、市場均衡の変化を観察する。図-9と図-10に、土地面積に対する人口の割合を横軸にとった場合の変化を示す。

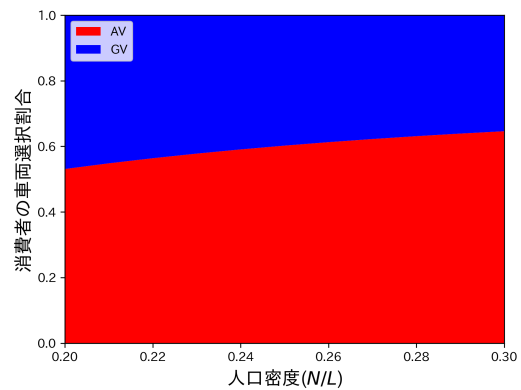


図-9 市場均衡時の車両選択割合

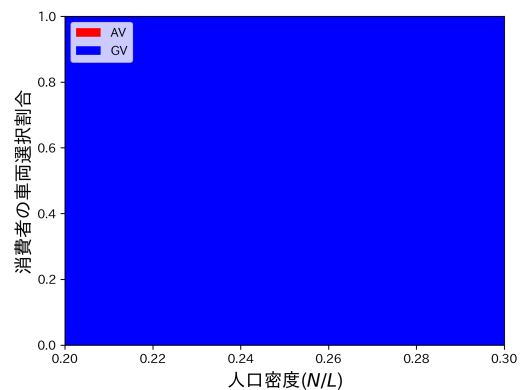


図-10 社会的最適時の車両選択割合

図-9から確認できる通り、市場均衡では、土地面積に対する人口が増加すれば、自動運転車両を選択する消費者の割合が高まる一方、その上昇率はゆるやかになってゆく。これには次の2つの要素が主に関係している。すなわち、人口増加により小売財の新たな需要が生まれるため、小売店舗数が増加し、消費者がより多くの種類の財を購入することができるという要素と、人口増加によって駐車場として必要な土地が増加するため、

結果的に店舗面積が縮小して店舗数が減少するという要素である。この 2 つの真逆の影響のバランスにより店舗数が決定される。また、人口が増加するにつれて駐車場を多く設置するため、駐車場から小売店舗までのアクセスが比較的容易になり、移動時間が短縮されることが想定される。こういった影響により、図-9 のような車両選択割合となる。すなわち、人口増加初期には前者の効果が卓越して自動運転車両を利用する消費者が増加してゆくが、徐々に後者の効果が大きくなっていき、駐車場増加のメリットを享受する一般車両利用者の減少率が低下する。

一方、図-10 のように、社会的最適時は人口密度に関わらず、全消費者が一般車両を利用するような状況となる。すなわち、自動運転車両を普及させた状態で社会的最適を実現させるにあたって、人口規模は無関係である。

次に、所得が変化した時の車両選択割合を観察する。図-11 と図-12 に、所得の変化を横軸にとった場合の変化を示す。

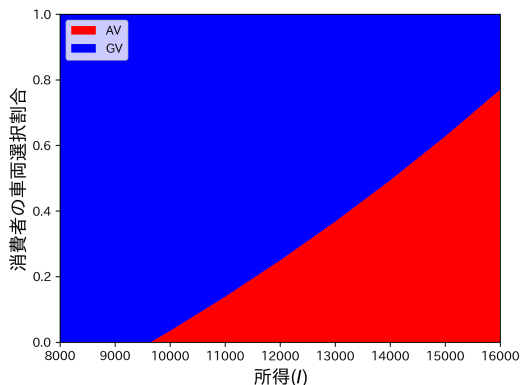


図-11 市場均衡時の車両選択割合

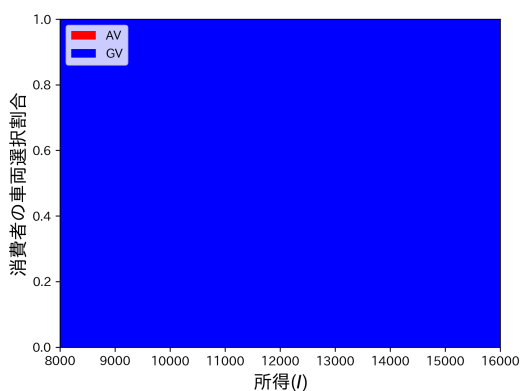


図-12 社会的最適時の車両選択割合

図-11 のように、市場均衡では、消費者の所得が増加するにつれて、自動運転車両を選択する消費者が増加

する。所得が増加すると、余裕ができる分移動コストにあてられる所得も増加するため、相対的に高価な自動運転車両を選択してもより高い効用を得る消費者が増加する。

一方、図-12 のように、社会的最適時は消費者の所得に関わらず、全消費者が一般車両を利用するような状況となる。すなわち、自動運転車両を普及させた状態で社会的最適を実現させるにあたって、消費者の所得は無関係である。これは、政府が補助金を導入して消費者の所得を増加させると、市場メカニズムにしたがって自動運転車両の利用者は増加する一方、社会的最適は実現しないことを意味する。

以上の議論により、自動運転車両が普及したうえで社会的最適を実現させるためには、自動運転車両の価格を低価格に抑える必要があることが分かる。これには、自動運転車両の生産を行う会社への補助金により車両販売価格自体を下げる政策、あるいは自動運転車両を利用する消費者に対して、割引などの支援を行うような政策などが考えられる。

6. おわりに

本研究では、将来自動運転車両が広く普及した際に駐車場需要が変化する可能性がある点に着目し、自動運転車両の普及率と商業地の土地利用の変化の関係を分析するために、小売市場と土地市場を想定した均衡モデルを構築した。さらにその変化を通じた社会的厚生の変化を分析した。消費者の時間価値と、駐車場削減による移動時間短縮効果の大小により、市場均衡の安定不安定が変化し、それぞれ別のアプローチで自動運転車両を普及させていくことが求められる。また、市場均衡点と社会的最適点は一致せず、分析に用いたケースでは、市場均衡は 2 車両とも利用者が存在する時に、社会的最適は 1 車両のみの利用者が存在する時点で実現することを突き止めた。さらに、消費者の所得や人口規模が上昇する、あるいは自動運転車両の利用価格が低下することにより、自動運転車両の利用者が増加していくことが明らかになった一方で、自動運転車両を普及させた上で社会的厚生を最大化させるためには、これらのうち自動運転車両の利用価格低下のみが関係しており、一定の価格まで抑えることができれば可能であることが明らかになった。

本研究は、今後様々な発展が可能である。第一に、本研究では駐車場需要の変化と駐車場数の変化を同一視しているが、実際は需要の変化が発生することで、まずは駐車場所の探索時間が変化し、駐車場内での待ち時間が変化して消費者の車両選択にも影響が出ること

が考えられる。したがって、状況を段階的に考慮できるモデルが求められる。第二に、本研究では駐車場から店舗までの移動時間を考慮しているものの、住宅地から商業地までの移動に関しては考慮していない。一消費者が車両選択を変更することで、移動中の時間活用方法が変化し、効用が大きく変わる可能性があり、また多くの消費者が車両選択を変更することで、道路に混雑度の変化が生じ、効用が大きく変わる可能性がある。こういった効用の変化により、道路環境が変化することが考えられるため、自動運転車両の普及を分析するにあたって大きく貢献することができるかもしれない。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21K04288 の助成を受けたものです。

REFERENCES

- 1) 国土交通省：超小型モビリティについて, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000043.html, 最終閲覧 2022. 09. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Cho- kogata-mobirithi Ni Tsuite*, accessed 2022. 09.]
- 2) 国土交通省：自動運転の実証実験・実用化について, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr7_000045.html, 最終閲覧 2022. 09. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Jido-unten No Jissho-jikken & Jitsuyoka Ni Tsuite*, accessed 2022. 09.]
- 3) SAE: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/, accessed 2022. 09.
- 4) 警視庁：令和 4 年法律第 32 号, <https://www.npa.go.jp/laws/kaisei/houritsu.html>, 最終閲覧 2022. 09. [National Police Agency: *Reiwa 4-nen Houritsu Dai 32-gou*, accessed 2022. 09.]
- 5) NACTO: BLUEPRINT FOR AUTONOMOUS URBANISM, *National Association of City Transportation Officials*, 2017
- 6) 松中亮治, 大庭哲治, 住川俊多: 都市交通シミュレーションを用いた共有型完全自動運転車両の普及による社会的便益に関する研究, 日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol. 55, No. 2, 2020. [Matsunaka, R., Oba, T. and Sumikawa, S.: Analyzing social benefits obtained from the spread of Shared Autonomous Vehicle using urban traffic simulation, *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 55, No. 2, 2020.]
- 7) Qu Zhuoran: Adoption of autonomous vehicles with the decrease in parking spaces at shopping areas, *Master's Thesis Department of Engineering Kyoto University*, 2020.

(Received ?)

(Accepted ?)

A STUDY ON SOCIO-ECONOMIC EVALUATION OF AUTONOMOUS VEHICLES DIFFUSION WITH PARKING DEMAND

Yasuaki HYODO and Kakuya MATSUSHIMA

As autonomous vehicles become more widespread, unattended travel may be widely accepted in the future, and this could have an impact on household behavior. For example, if people who used to visit a shopping center by general vehicles switch to autonomous vehicles, they can get off near the entrance of the shopping center without using the parking lot attached to the center. This increase in the number of such consumers will lower the demand for parking spaces, and in the long run, it will lead to a decrease in parking space and an increase in store space. Therefore, this study assumes that the diffusion of autonomous vehicles will change the land use of commercial area. We constructed a market equilibrium model that analyzes the diffusion rate of autonomous vehicles among households. We analyzed the socioeconomic impact of changes in the diffusion rate of automated vehicles. We point out that there is a gap between the diffusion rate in market equilibrium and the one at the social optimum. Finally we propose policies to bring the rate closer to the social optimum.