

駐車場需要を考慮した自動運転車両選択行動に関する研究

兵動 靖章¹・松島 格也²・須崎 純一³

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

³正会員 京都大学教授 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: susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

近年、人工知能技術や通信技術の発達により、自動運転車両の近い将来での実用化が期待されている。自動運転車両の利用は、従来の一般車両の利用と比較して移動中の安全性や自由時間の確保といった面において優れており、その利点が自動運転車両の普及を促しうる。さらに、自動運転車両が普及することにより必要とされる駐車スペースが減少するため、駐車に要する時間や周辺の土地利用の変化も、自動運転車両の選択行動に影響する可能性がある。本研究では、自動運転車両の普及に伴う駐車場需要の変化を通じてさらに自動運転車両の普及が促進されるメカニズムを説明する均衡モデルを構築し、自動運転車両の普及要因となりうる要素の影響を分析した。その結果、自動運転車両価格の低下、消費者の所得の増加、移動時間の金銭評価値の上昇、小売財の多様性に対する選好の度合の上昇といった要因が自動運転車両の普及を促す可能性があることを明らかにした。

Key Words: *autonomous vehicles, parking space, choice model*

1. はじめに

自動運転車両とは、人間が運転操作をせずとも自律的に走行する車両のことである。車両は自動化の程度や条件によりレベル0からレベル5まで段階が分けられており、レベル0が従来の一般車両、レベル5が完全自動運転車両を指す¹⁾。以降特別な注釈がない限り自動運転車両はレベル5のものを想定する。

自動運転車両の普及は、我々の生活に多くの影響をもたらす。例えば、運転操作が自動化されるため、運転に関わるリスクを利用者が負担しなくて良くなる。利用者は移動中の運転操作から開放され、移動時間を他の作業に活用することができる。

また、自動運転車両はその特性から電力を主な原動力とすることが予想されるため、車両利用のためのランニングコストが抑えられ、車両メンテナンスも簡単になることが考えられる。ガソリンを全く必要としない完全な電気自動車であれば、利用者は定期的にガソリンスタンドに訪問する必要がなく、自宅で充電することも可能になるであろう。

さらに、自動運転車両は交通状況に応じた最適なルートを探索できる上に、普及することで急ブレーキや急ハンドルなどの危険な走行を行う車両が減少するため、道路全体でより円滑な交通状況が実現する。そのため、交通移動を行う総車両数が増加しない限り、これまでに

発生していた道路上の渋滞が緩和される可能性がある。

加えて、自動運転車両は駐車操作を車両単体で行う能力があるため、利用者を実地での最寄り降ろした後、無人状態で移動して遠方の駐車場に駐車したり、家の駐車スペースに戻ったりすることが可能である。したがって、目的地周辺の駐車場を必要としないという特徴がある。このことから、一般車両から自動運転車両に乗り換える消費者が多いほど、目的地周辺の駐車場設置数が減少する可能性があることが考えられる。駐車場数が減少すると、駐車場に利用されていた土地を他の用途で利用できるようになる。例えば、商業地の駐車場数が減少した場合、それまで駐車場として利用されていた土地に新規の小売店が立地し、商業地で販売される財の種類数および個数が増加することが考えられる。したがってその場合、消費者はより多くのラインナップから自身の購入する財を選択することができるようになる。このように、多くの消費者が一般車両から自動運転車両に乗り換えることで、消費者全体にとってより望ましい状態が実現できることになる。

また、消費者と駐車場管理組織の間には駐車場の需給関係が成り立っており、需要量と供給量を互いに把握した上で自身の行動を行うため、一方の行動が他方の行動に影響をおよぼす。したがって、駐車場の供給量

が増加すれば、駐車場を必要とする一般車両を選択する消費者が増加し、逆に駐車場の需要量が増加すれば、駐車場管理組織は駐車場設置数を増加させるというポジティブなフィードバックメカニズムが存在する。

本研究では、一般車両から自動運転車両に選択を変更する消費者が増加することにより周辺環境が変化すれば、さらに多くの消費者が自動運転車両を選択するようになるというメカニズムを示す。そのために、商業地へ買い物トリップを行う消費者と、商業地の駐車場を管理する組織、そして商業地で財の販売を行う小売企業の3つの経済主体が存在する市場均衡モデルを構築し、商業地の駐車場設置数の増減を通して消費者の車両選択割合の変化を分析する。

以下、2. では、従来の既往研究と本研究の立場について言及するとともに、車両の選択要因となる自動運転車両の特徴、およびモデル内で発生するフィードバックメカニズムの説明を述べる。3. では、消費者と駐車場管理組織と小売業の3主体における均衡モデルを構築する。構築したモデルを用いて商業地の土地市場を含めた分析を行うことで、土地利用の変化を考慮した消費者の車両選択割合を示した上で、消費者の車両選択に対する各要素の影響を明らかにする。4. では、本研究のまとめを行い今後の課題を提示する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往研究の概要

1. で説明したように、自動運転車両は目的地周辺の駐車場を必要としないため、自動運転車両の利用が普及すると、結果的に目的地周辺では駐車場需要が減少する。この特徴に関して複数の研究がある。

近年カーシェアサービスの登場により、車両を個人が所有するのではなく、複数人で共有するという選択肢が生まれ、注目されている。この流れを踏まえ、Wenwen 等は共有型の自動運転車両の導入を仮定し、利用者が目的地の同じ人同士の相乗りを希望するかしないか、また、交通渋滞を抑制する観点から政府が無人移動の許可時間を制限するかしないか、といった様々な条件での駐車場需要の量や空間的分布の変化を調査した²⁾。他者との相乗り希望者が増加するほど、一度に利用される自動運転車両数は少なく抑えられるため、駐車場需要も減少する。また、自動運転車両は利用者を降ろした後に車両単体で交通移動を行うため、ある時点の道路上の総車両数を増加させることになる。よって、自動運転車両の利用者増加が駐車場需要を減少させる一方で、道路上の車両数の増加を引き起こす。そのため、車両単体での移動時間の規制が必要であり、その規制度合いにより駐車場需要は大きく変化する。このよう

に、駐車場需要と他の要素との関係を示しており、その上で十分に駐車場需要を削減することのできるシナリオを示した。

また、同じく Wenwen 等は自動車がある型から共有型に移行する過程における駐車場需要の推移を示した³⁾。すなわち、所有型一般車両、共有型一般車両、所有型自動運転車両、共有型自動運転車両の4つを想定し、所有型一般車両から共有型自動運転車両に移行する最中の、これらが混在する移行期での駐車場需要の変化を調査した。その結果、移行が進むにつれ商業地から住宅地への駐車場需要のシフトが発生することや、路上駐車大幅に増加すること、また大きな交通渋滞を引き起こす可能性があることを示した。

しかし、これら Wenwen 等による一連の研究では、利用者の選択行動のみに焦点が当てられており、駐車場供給側の行動が説明されていない。駐車場供給側の行動も考慮した均衡モデルの枠組みを提案した研究として、屈⁴⁾がある。そこでは、駐車場需要が減少することによって引き起こされた駐車場数の減少が消費者におよぼす効果を分析している。1. で説明したように、商業地の駐車場需要が減少すると、駐車場数が減少し、それまで駐車場として利用していた土地を小売店舗に用いることができる。すると、既存店舗の小売財の陳列スペースを拡大したり、複数の新規店舗を立地させたりすることができる。したがって、商業地全体でより多くの財を販売できることになる。このような小売業の行動の変化により商業地がより魅力的になれば、消費者の行動に影響するフィードバックメカニズムが機能する可能性がある。分析の結果、駐車場数が減少すると、消費者の効用が車両選択によらず全体的に高まることが示されている。したがって、消費者が車両の選択を変更する動機を持たず、駐車場需要の減少を通じた自動運転車両の普及は説明されていないことが課題であった。商業地における駐車場需要の減少が消費者の自動運転車両選択行動におよぼす影響を分析するためには、土地利用の変化が選択行動におよぼす要因を明示的に考慮する必要がある。

(2) 一般車両と自動運転車両の選択要因

一般車両と自動運転車両のいずれかを選択する問題に直面する消費者を考えよう。当該消費者が自動運転車両を選択する要因は2つに大別される。

1つ目は、直接利用者の運転行動に働きかける要因である。自動運転車両は、運転操作に人間を必要としないという点で一般車両と異なる。そのため、自動運転車両を選択すると移動中の運転操作から開放され、移動時間を他の作業に活用することができる。また、アクセルとブレーキの踏み間違いや、目視による確認の不

十分といった人的要因による運転操作ミスがなくなるため、より優れた安全性を確保することができる。さらに、自動運転車両は駐車操作も車両単体で実行する能力があるため、利用者を目的地の最寄りで降ろした後、車両のみで移動して遠方の駐車場に駐車したり、家の駐車スペースに戻ったりすることが可能である。したがって、目的地周辺の駐車場を必要とせず、周辺に駐車場のない場所へのアクセスも可能となる。

2つ目は、周辺環境の変化を通じて選択行動に影響する要因である。前述の通り、自動運転車両が普及すれば、目的地周辺の駐車場が不要となる。そのため、自動運転車両の利用者が増加すると、目的地周辺の駐車場需要が減少し、駐車場として利用していた土地を別の用途にあてることができる。例えば商業地の場合、駐車場を減らして小売店の出店数を増やすことができ、消費者はより多くの品数から選択して購入することができるようになる。すなわち、目的地の魅力が増すこととなり、消費者は目的地を訪問することで以前より多くの効用を得ることができる。さらに、土地だけではなく、労働力に関しても同様のことがいえる。バスやタクシーなどの交通サービスに自動運転車両を導入すると、運転手が不要となるため、運転のために必要であった労働力を他の目的にあてることができる。

したがって、自動運転車両を選択する消費者が増加することで、消費者が運転の自動化による恩恵を直接受けられるとともに、企業は土地および労働力を他の目的に使用することができるようになる。

ここで、例えば自動運転車両が未導入の地域に自動運転車両を導入し、移手段の選択肢として自動運転車両が追加されるといったケースや、すでに自動運転車両が導入された地域で、自動運転車両の価格が低下するといったケースのように、何らかの要因で消費者の車両選択行動に変化が生じたとする。すると、車両選択の変化により駐車場需要が変化し、ひいては周辺環境への変化にも繋がる。例えば駐車場の設置数が減少することで、ある小売店の最寄りに設置されていた駐車場がなくなり、当該店舗の訪問時には別の駐車場を利用せざるを得なくなった結果、駐車場から小売店までの移動距離が長くなるといった変化が生じる。その結果、駐車場を必要とする一般車両の利用者にとってはより不利な状況になるため、相対的に自動運転車両がより有利な選択肢となる。このように消費者は変化した周辺環境の中で最適な選択を行うため、さらに車両選択行動が変化することが予想される。したがって、駐車場需要の変化は、周辺環境の変化を通して車両選択行動を変化させるフィードバックメカニズムが機能する可能性がある。

(3) 自動運転車両選択者数へのフィードバックメカニズム

一般に、市場に参加する主体の間でお互いの行動がそれぞれ相手の行動に影響をおよぼす相互作用がある場合、はじめにとった行動変化が更に加速してより大きな変化をもたらすポジティブフィードバックメカニズムが機能する。例えば、松島ら⁵⁾は、タクシー市場を対象として、サービスの需要や供給が増加すれば、さらに多くの顧客やタクシードライバーが市場参入するというポジティブなフィードバックメカニズムが働くことを示した。

本研究で想定する自動運転車両の選択行動においても、自動運転車両利用者の増加が、商業地の駐車場供給行動を通じてより多くの自動運転車両利用者をもたらすというポジティブフィードバックメカニズムが機能する。

何らかの要因により自動運転車両を選択するが増えた状況を想定しよう。自動運転車両は目的地周辺で駐車することなく移動することができるため、自動運転車両利用者が増加すれば目的地において必要とされる駐車場スペースが減少する可能性がある。駐車場スペースが減少すれば、一般車両選択者が目的地において駐車場を見つけにくくなるため、一般車両がより選択しにくくなるであろう。

このように、消費者の車両選択行動と駐車場スペース設定行動との間には、自動運転車両を選択する消費者の増加が、目的地における駐車場の設置行動を通じてさらに自動運転車両の選択者の増加を促すという、ポジティブなフィードバックメカニズムが機能する。

(4) 分析方針

本研究では、前節で説明した自動運転車両選択者数と目的地における駐車場需要との間にはたらくポジティブなフィードバックメカニズムを明示的に考慮した均衡モデルを構築し、自動運転車両の選択に影響をおよぼす要因と消費者の選択行動との関係を分析する。分析を通じて、上記のポジティブフィードバックメカニズムが機能することを説明すると共に、自動運転車両の普及に影響をもたらす要因についてとりまとめる。次章以降では、具体的な均衡でモデルを構築し分析を進めることとする。

3. モデルの定式化

(1) モデルの前提条件

想定する都市の略図を図-1に示す。図-1のように、住宅地と商業地の2地域からなる都市を考える。この都市には N 人の消費者が居住しており、1消費者あたり

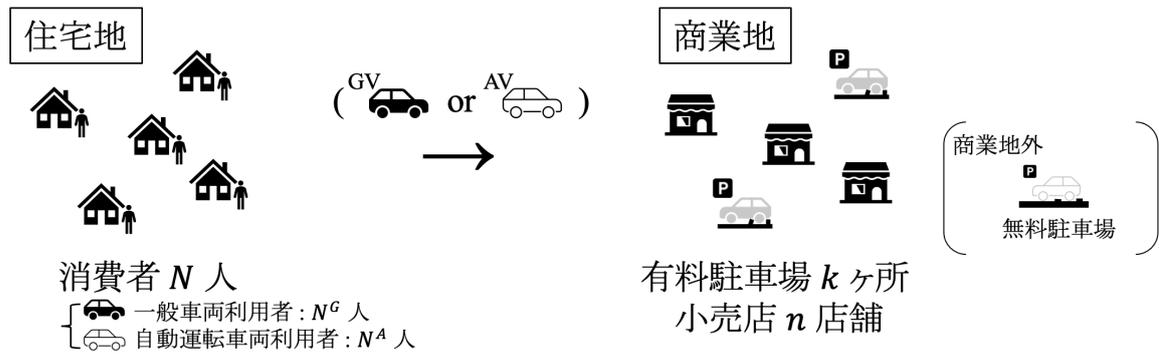


図-1 想定する都市

1 台の車両を所有しているとする。全ての消費者は住宅地に居住しており、財を購入するために商業地を定期的に訪問する。商業地には独占的競争市場環境下で財の販売を行う小売店が立地している。家計は、自動運転車両と自動運転でない一般車両のいずれかを所有することを選択する。一般車両を選択する場合、比較的安価に購入することができる一方、商業地を訪問する際には近隣の駐車場に自ら駐車する必要がある。他方、自動運転車両を選択するためには比較的高価な初期導入に費用を負担する必要がある一方、商業地を訪問する際には最寄り自動運転車両を降りて小売店を訪問することができる。目的地で乗客を降ろした自動運転車両は商業地外にある無料の駐車スペースに自ら移動し、当該消費者が住宅地に帰宅する際に再度小売店で消費者を迎え、住宅地に戻るとする。

商業地では、商業地を訪問する消費者が利用するための駐車場を、ある管理組織が独占的に運営している。当該組織は自らの利潤を最大にするように商業地内の駐車場数を決定し、駐車場を設置する。駐車場管理組織が設置する駐車場が多ければ多いほど、一般車両を利用する消費者にとっては駐車場から小売店までの移動距離が小さくなる。したがって、駐車場設置数が増えれば増えるほど、一般車両を選択する家計が増加し、反対に一般車両の利用者が増えれば増えるほど、駐車場管理組織はより多くの駐車場を設置する。そのため、一般車両を選択する消費者数と駐車場管理組織が設置する駐車場数との間には、ポジティブなフィードバックメカニズムが機能する。

また、土地を投入要素として生産を行う小売業を想定し、商業地における土地を駐車場と小売店で配分する土地市場均衡を想定する。

モデル内の消費者の所得は消費者によらず I で一定とし、消費者は所得のすべてを財の購入とそれに必要な交通費に費やすとする。自動運転車両の所有コストと一般車両の所有コストが異なるため、予算制約を考えると、車両の選択が消費者の財の購入額に影響する。

(2) モデル

a) 消費者行動モデル

消費者 i が一般車両 (G , 以降上付き添え字 G は一般車両を示す) を所有する場合、1 回商業地を訪問するトリップを行うことにより獲得する効用を U_i^G として次式で定義する。

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

ここに v^G は商業地で財を購入することにより得られる効用であり、購入する財の量と種類数により決定される。車両選択により財の購入に当てられる金額が変わるが、この項については後に詳しく説明する。 C^G は 1 トリップあたりで換算した一般車両の所有コスト、 p_p は駐車場管理組織 (p , 以降下付き添え字 p は駐車場管理組織を示す) の定める駐車料金、 t は駐車場から商業施設までに要する時間、 β は移動時間の金銭評価値を表すパラメータである。

一方、消費者 i が自動運転車両 (A , 以降上付き添え字 A は自動運転車両を示す) を所有する場合の効用を次式で定義する。

$$U_i^A = v^A - C^A + \varepsilon_i \quad (2)$$

式 (2) の右辺第 2 項は 1 トリップあたりに換算した自動運転車両の所有コストであり、 $C^G < C^A$ を満たすと仮定する。右辺第 3 項 ε_i は消費者毎に異質な自動運転車両の所有自体により得られる効用を示しており、ある確率分布に従って分布しているとする。新技術に対して魅力を大きく感じる消費者ほど、 ε_i は大きな値をとることになる。

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

$$\begin{aligned} N^G &= N \times Pr(U_i^G > U_i^A) \\ &= N \times Pr(E > \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに $E = v^G - v^A + C^A - C^G - p_p - \beta t$ である。 ε_i が $[0, a]$ の連続一様分布に従っていると仮定すれば、

一般車両を選択する消費者数 N^G は

$$N^G = \begin{cases} N & (a < E) \\ \frac{E}{a}N & (0 < E < a) \\ 0 & (E < 0) \end{cases} \quad (4)$$

と表される。以下、消費者は多様で新技術に大きな魅力を感じる層が必ず存在することを想定し、 a が十分大きく $0 < E < a$ が成立する場合について考える。すなわち、 $N^G = \frac{E}{a}N$ とする。

また、モデル内の総車両数は N 台であるため、自動運転車両を選択する消費者数 N^A は

$$N^A = N - N^G \quad (5)$$

で求められる。

ここで、消費者が商業地で財を購入することにより獲得できる効用 v^M は次のように表す。

$$v^M = \left[\sum_j (q_j^M)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad 0 < \rho < 1 \quad (6)$$

この部分効用を規定する関数は Dixit-Stiglitz 型 CES 関数を採用しており、 q_j^M は消費者 (M , $M = A$ であれば自動運転車両選択者, $M = G$ であれば一般車両選択者を表す) 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。

$$\sum_j p_{rj} q_j^G + C^G + p_p = I \quad (7)$$

$$\sum_j p_{rj} q_j^A + C^A = I \quad (8)$$

なお、 p_{rj} は小売企業 (r , 以降下付き添え字 r は小売企業を示す) j の販売する財の価格を表す。

よって、一般車両所有者の効用最大化問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \max_{q_j^G} v^G &= \left[\sum_j (q_j^G)^\rho \right]^{\frac{1}{\rho}} \\ \text{s.t.} \quad \sum_j p_{rj} q_j^G + C^G + p_p &= I \end{aligned} \quad (9)$$

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、財の購入量 q^G および獲得する間接効用水準 v^G は、

$$q_r^G = \frac{I - C^G - p_p}{n^* p_r} \quad (10)$$

$$v^G = \frac{I - C^G - p_p}{n^{*(\rho-1)/\rho} p_r} \quad (11)$$

と求められる。 n^* は均衡状態での市場参入小売企業数

である。同様に、自動運転車所有者についても

$$q_r^A = \frac{I - C^A}{n^* p_r} \quad (12)$$

$$v^A = \frac{I - C^A}{n^{*(\rho-1)/\rho} p_r} \quad (13)$$

と求められる。したがって、 E は

$$E = \left(\frac{n^{*(\rho-1)/\rho}}{p_r} + 1 \right) (C^A - C^G - p_p) - \beta t \quad (14)$$

と表される。

b) 小売業行動モデル

商業地における小売企業は独占的競争市場を仮定する。各小売企業 j は商業地における土地のみを投入要素として、差別化された小売財を q_j 単位生産する。1 企業につき 1 種類の財を扱うため、合計で j 種類の財が生産される。

種類 r の財を生産する小売企業が販売に必要な土地投入量を次式で定義する。

$$l_r = f + m q_r \quad (15)$$

ここで、 f は固定土地投入量、 m は限界土地投入量を表す。

小売企業の利潤最大化行動は以下の式で表される。

$$\max_{q_r} \pi_r = p_r q_r - c l_r \quad (16)$$

ここで、 p_r は小売財の価格、 c は地代を示す。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。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_r}{\partial q_r} &= \frac{\partial p_r \cdot q_r}{\partial q_r} - \frac{\partial c \cdot l_r}{\partial q_r} = p_r + \frac{d p_r}{d q} q_r - c m \\ &= p_r \left(1 + \frac{d p_r / d q_r}{p_r / q_r} \right) - c m \\ &= p_r \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_d} \right) - c m = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

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

$$p_r^* = \frac{c m}{\rho} \quad (18)$$

となる。よって、企業の利潤は以下の通りである。

$$\pi_r = \left(\frac{c m}{\rho} - c m \right) q - c f = \frac{c m}{\sigma - 1} q - c f \quad (19)$$

利潤が正であれば、新たな小売企業が市場に参入し、新たな財の販売を始める。よって、均衡点では利潤はゼロとなるため、均衡状態での財の販売量 q^* は以下のように表される。

$$q_r^* = \frac{f}{m} (\sigma - 1) = \frac{f}{m} \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \quad (20)$$

したがって、均衡状態での土地投入量 l_r^* は、

$$l_r^* = f + m q^* = \sigma f = \frac{f}{1 - \rho} \quad (21)$$

である。

また、財の供給量と需要量との関係により、

$$q_r^* = N^G q_r^G + N^A q_r^A \quad (22)$$

であるから、式(22)に式(11)と式(12)および式(20)を代入すれば、

$$\frac{f}{m} \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right) = N^G \cdot \frac{I - C^G - p_p}{n^* p_r} + N^A \cdot \frac{I - C^A}{n^* p_r} \quad (23)$$

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

$$n^* = \frac{1-\rho}{cf} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \quad (24)$$

以上より、消費者の間接効用水準は、

$$v^G = \frac{\rho}{cm} (I - C^G - p_p)$$

$$\cdot \left[\frac{1-\rho}{cf} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \right]^{-\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (25)$$

$$v^A = \frac{\rho}{cm} (I - C^A)$$

$$\cdot \left[\frac{1-\rho}{cf} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \right]^{-\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (26)$$

となる。

c) 駐車場管理組織行動モデル

3. (1) で述べたように、一般車両のみが商業地の駐車場を必要とする。したがって、商業地の駐車場需要量は一般車両利用者数と等しく、 N^G である。独占的に商業地の駐車場を管理している組織は、商業地における駐車場需要 N^G を賄うだけの駐車場を k 箇所設置する。分析を簡単にするため、次の線形関係が成り立つと仮定する。

$$N^G(k) = \gamma k \quad (27)$$

この式より、1 箇所の駐車場あたり γ 台の一般車両を駐車することができることを想定していることになる。より一般的な関係を想定しても以降で得られる結論は大きく変わらない。

駐車場管理組織は、ある限られた区域内に必要な駐車場需要をまかなう k 箇所の駐車場を設置する。管理組織は、 k 箇所の駐車場を等密度で区域内に設置すると仮定しよう。一定区域内に設置される駐車場数 k が増加(すなわち商業地における駐車場密度が増加)すれば、駐車場から目的地である小売店までの移動距離は小さくなる。したがって、駐車場から小売店までの移動時間 t は駐車場設置数 k の減少関数であるとし、正のパラメータ b を用いて

$$t(k) = T - bk \quad (28)$$

が成立するとする。駐車場設置数 k の範囲が $0 \leq k \leq \frac{N_{\max}^G}{\gamma} = \frac{N}{\gamma}$ より、 t の上限および下限はそれぞれ $t_{\max} = T$, $t_{\min} = T - b\frac{N}{\gamma}$ である。 $t > 0$ であるため、 b は

$0 < b < \frac{\gamma T}{N}$ を満たす。また、 T は $k = 0$ 、すなわち商業地に駐車場が設置されていない場合の移動時間 t であり、商業地外の無料駐車場からの移動時間を表すことになる。ところが、式(27)より、 $k = 0$ のとき $N^G = 0$ になってしまうため、後の分析では $k > 0$ を仮定し、一般車両は常に有料駐車場を利用するものとする。

駐車場管理組織(p 、以降下付き添え字 p は駐車場管理組織を示す)の利潤最大行動は、以下のように表される。

$$\max_k \pi_p = p_p(k) N^G(k) - C(k) \quad (29)$$

ここに、 $C(k)$ は当該組織の費用関数であり、 $C(k) = ch\gamma k + F$ とする。 c は地代、 h は一般車両 1 台の駐車に必要な土地量、 F は固定費用を表す。 p_p と C はともに k の値により変動するため、 k の関数である。

利潤最大化の最適化条件は

$$\frac{\partial \pi_p}{\partial k} = \frac{\partial \{p_p(k) \cdot N^G(k)\}}{\partial k} - \frac{\partial C(k)}{\partial k} = 0$$

$$\frac{\partial p_p(k)}{\partial k} \cdot N^G(k) + p_p(k) \cdot \frac{\partial N^G(k)}{\partial k} - h\gamma \cdot \left(\frac{\partial c(k)}{\partial k} \cdot k + c(k) \right) = 0 \quad (30)$$

となる。

d) 土地市場

商業地の土地は政府に管理されており、企業は政府に面積あたりの地代を払って土地を借りる。商業地の土地を借りたい企業は小売企業と駐車場管理組織のみである。すなわち、土地供給量 L に対して小売業土地需要 L_r と駐車場土地需要 L_p が存在する。この需要と供給のバランスを考えることにより、単位面積あたりの地代 c が求まる。

$$L = L_r + L_p \quad (31)$$

小売業土地需要 L_r は、一店舗あたりの土地需要に市場参入小売企業総数を乗じたものであるから、式(21)より、以下の式が成立する。

$$L_r = n^* l_r^* = \frac{n^* f}{1-\rho} = \frac{1}{c} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \quad (32)$$

駐車場土地需要 L_p は、一般車両 1 台の駐車に必要な土地量が h と仮定すれば、以下のように表される。

$$L_p = N^G \cdot h = \gamma kh \quad (33)$$

式(32)と式(33)を式(31)に代入することにより、以下の式が得られる。

$$L = \frac{1}{c} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} + \gamma kh \quad (34)$$

したがって、上式を満たすように地代 c が決定される。

(3) 市場均衡

式 (14) に E と t を代入して、以下の式が成立する。

$$N^G = \frac{N}{a} \left\{ \left(\frac{n^{*-\frac{\rho-1}{\rho}}}{p_r} + 1 \right) (C^A - C^G - p_p) - \beta(T - bk) \right\} \quad (35)$$

式 (5), 式 (18), 式 (24), 式 (27), 式 (30), 式 (34) を再掲する。

$$N^A = N - N^G \quad (5)$$

$$p_r = \frac{cm}{\rho} \quad (18)$$

$$n = \frac{1-\rho}{cf} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} \quad (24)$$

$$N^G = \gamma k \quad (27)$$

$$\frac{\partial p_p(k)}{\partial k} \cdot N^G(k) + p_p(k) \cdot \frac{\partial N^G(k)}{\partial k} - h\gamma \cdot \left(\frac{\partial c(k)}{\partial k} \cdot k + c(k) \right) = 0 \quad (30)$$

$$L = \frac{1}{c} \{N^G(I - C^G - p_p) + N^A(I - C^A)\} + \gamma kh \quad (34)$$

したがって、市場均衡では、上記の 7 式を同時に満たす k , N^A , N^G , p_r , p_p , c , n が存在する。

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 k^* , N^{A*} , N^{G*} , p_r^* , p_p^* , c^* , n^* を求める。

(4) 数値計算例

数値解析による結果を得るため、外生変数の値を以下のように設定する。 $F = 10,000.0$, $I = 10,000.0$, $L = 2,000,000.0$, $N = 10,000.0$, $T = 200.0$, $b = 1.5$, $f = 1,000.0$, $h = 10.0$, $m = 5.0$, $a = 800.0$, $\beta = 3.0$, $\rho = 0.80$, $\gamma = 100.0$, $C^A = 3,300.0$, $C^G = 2,000.0$ 。これらは、外生変数が満たすべき条件 $0 < b < \frac{\gamma T}{N}$ を満たしている。

この場合の均衡時のそれぞれの値は駐車場設置数 $k^* = 47$, 自動運転車両選択消費者数 $N^{A*} = 5,300$, 一般車両選択消費者数 $N^{G*} = 4,700$, 小売財価格 $p_r^* = 230$, 駐車料金 $p_p^* = 550$, 地代 $c^* = 36$, 市場参入小売業数 $n^* = 390$ となる。これらは、内生変数が満たすべき条件 $0 \leq k \leq \frac{N}{\gamma}$ を満たしている。

さらにこの時、駐車場管理組織の利潤は $\pi_p^* = 880,000$ となる。

自動運転車両と一般車両の選択割合は、消費者の各車両選択時の効用の差 $U_i^A - U_i^G$ により定まる。そこで、自動運転車両を選択する消費者数 N^A と効用の差

$U_i^A - U_i^G$ の関係性を評価するために、自動運転車両選択者数 N^A と効用の差 $U_i^A - U_i^G$ の各要素ごとの関係性を示す。消費者の効用の差 $U_i^A - U_i^G$ は以下の通りである。

$$\begin{aligned} U_i^A - U_i^G &= v^A - v^G - C^A + C^G + p_p + \beta t + \varepsilon_i \\ &= (C^G + p_p - C^A) + (v^A - v^G) \\ &\quad + \beta t + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (36)$$

駐車場設置数の変動によって、 $U_i^A - U_i^G$ の値は変化する。駐車場設置数と一般車両選択者数とは線形関係にあるため、駐車場設置数 k の変化に対する効用の差 $U_i^A - U_i^G$ の変化を見ることにより、選択者数が変化した場合のそれぞれの選択者の効用にもたらす変化を分析することができる。駐車場数を設定すれば各種内生変数が決まり、自動運転車両の選択者数も決まるため、自動運転車両の選択者数毎の $U_i^A - U_i^G$ の値を求めることができる。式 (36) の右辺では、内生的に決まる第 1 項, 第 2 項, 第 3 項, 第 4 項のそれぞれのバランスにより $U_i^A - U_i^G$ の値が支配されている。したがって、ここではこれら 4 つの要素について確認する。また、消費者の異質性を表す ε_i は消費者 i によって異なる値であり、 $U_i^A = U_i^G$ となる消費者について議論するため、自動運転車両を選択した消費者の中でも低い ε_i をとる消費者に着目して評価する。

まず、第 1 項は駐車料金を含めた 1 回の買い物トリップに必要な車両コストの差である。図-2 に、自動運転車両の選択消費者数 N^A との関係を表す。なお、グラフ中の点は均衡点を表し、以降のグラフ中の点も同様とする。

図-2 より、自動運転車両を選択する消費者数の増加にともない駐車料金が上昇することが分かる。これは、自動運転車両を選択する消費者数が増加することで商業地の駐車場需要が減少し駐車場数を減少させた結果、駐車場管理組織は駐車料金を上げることで自身の利潤を最大化することができるためである。したがって駐車料金の上昇は一般車両を選択する消費者にとって不利であるため、相対的に自動運転車両を選択する消費者が有利となる。

次に、第 2 項は購入する財の種類および数の多さにとまらう効用の差である。図-3 に、自動運転車両の選択消費者数 N^A との関係を表す。

図-3 より、財の購入にとまらう効用は必ず一般車両選択消費者の方が高いことが分かる。これは、一般車両利用者の方が駐車料金を含めた 1 回の買い物トリップに要する車両コストが低く、財の購入額が高いからである。また、分析の結果、駐車場設置数が減少し、自動運転車両を選択する消費者数が増加するにつれて相対的に自動運転車両選択者の効用が高まることが分かった。これは、駐車場設置数が減少するにつれて駐車料

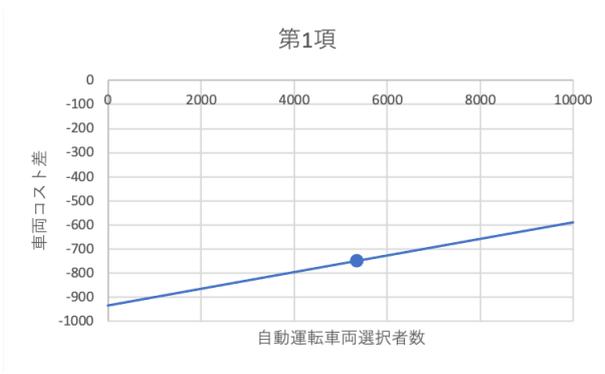


図-2 自動運転車両選択者数と車両コスト差の関係 (グラフ中の点は均衡点を示す)

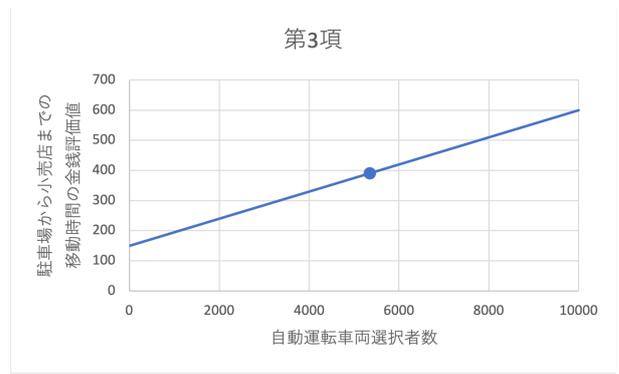


図-4 自動運転車両選択者数と駐車場から小売店までの移動時間の金銭評価値の関係

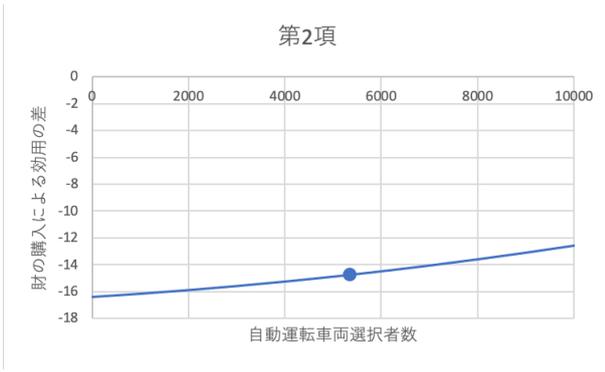


図-3 自動運転車両選択者数と財の購入による効用差の関係

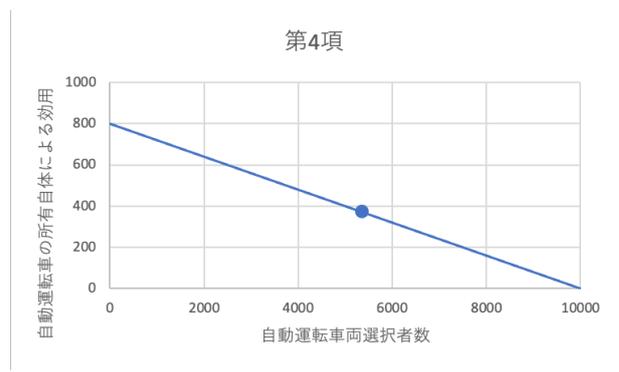


図-5 自動運転車両選択者数と自動運転車両選択者の車両所有自体による効用の最低値の関係

金が高くなり、車両選択による車両コスト差が小さくなるため、車両選択による財の購入額の差が小さくなることに由来する。すなわち、車両コスト差の変化に伴い変化する要素であり、第 1 項と本質的な要因は同一である。

次に、第 3 項は駐車場から小売店までの移動時間を金銭タームで表したものである。図-4 に、自動運転車両の選択消費者数 N^A との関係を表す。

図-4 より、駐車場設置数の減少に伴い移動時間の金銭評価値が上昇することがわかる。これは、自動運転車両を選択する消費者数が増加し、駐車場数が減少することで商業地内の駐車場密度が低下し、駐車場から小売店まで歩いて移動しなければならない距離が長くなるためである。この移動時間は一般車両を選択する消費者のみに発生するため、移動時間が長くなることで一般車両を選択する消費者が不利になり、相対的に自動運転車両を選択する消費者が有利となる。

最後に、第 4 項は自動運転車両の所有自体による効用である。図-5 に、自動運転車両の選択消費者数 N^A との関係を表す。

上述の通り、この項は自動運転車両を選択した消費者の中での最低値、すなわち $U^A - U^G = 0$ となる場合の値で評価する。図-5 は、新技術に対して感じる魅力が大きい消費者ほど、自動運転車両を選択する消費者数が少ない段階で自動運転車両を選択することを示し

ている。ここでは一様分布を仮定しているため、自動運転車両の選択消費者数の増加による一般車両の選択消費者数減少に伴い、この効用の獲得者が徐々に増加していく。そのため、駐車場設置数が減少し自動運転車両の選択消費者数が増加するにつれてこの効用の最低値が低下する。

上記の結果により、第 1 項から第 3 項が自動運転車両の選択者数 N^A の増加による効果を受け、さらにその影響が自動運転車両の選択者数を増加させることが分かる。

(5) 自動運転車両の普及要因となりうる要素の分析

本節では、前節で示した市場均衡が、車両価格や移動時間の金銭評価値などの外生的な変数の変化によってどのように変化するのかについて考察する。

まず、自動運転車両の価格 C^A が変化した時および所得 I が変化した時の自動運転車両選択者数 N^{A*} をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。所得は車両コストと十分な財の購入額の合計を下回らないとする。

図-6 と図-7 より、自動運転車両の価格が低下するほど、あるいは所得が増加するほど、自動運転車両の選択者は増加する傾向にある。これは、自動運転車両価格の低下の場合は、車両コスト差 $C^G + p_p - C^A$ の増加と財の購入による効用差 $v^A - v^G$ が、所得の増加の

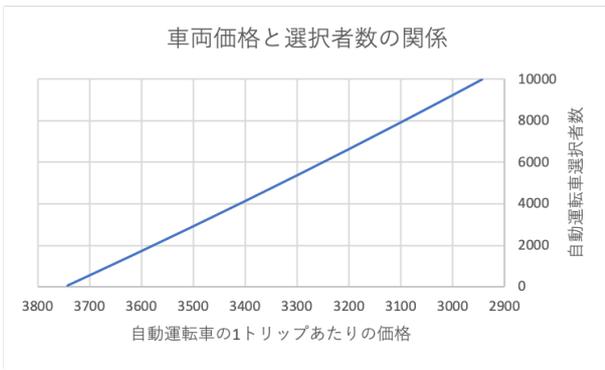


図-6 車両価格の変化が
均衡時の自動運転車両選択者数におよぼす影響

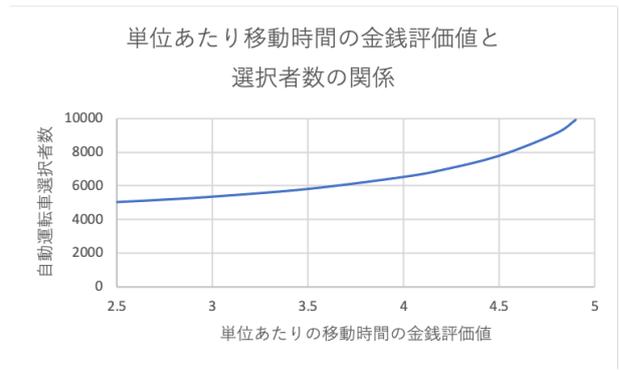


図-8 移動時間の金銭評価値の変化が
均衡時の自動運転車両選択者数におよぼす影響

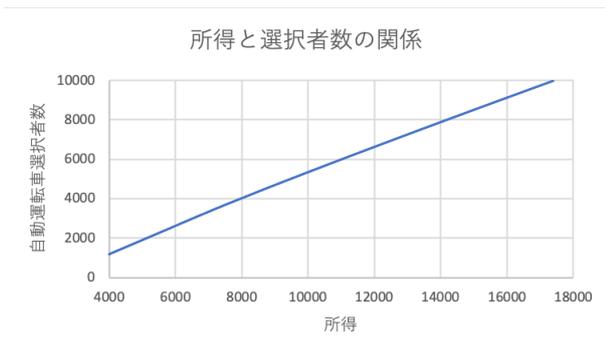


図-7 所得の変化が
均衡時の自動運転車両選択者数におよぼす影響

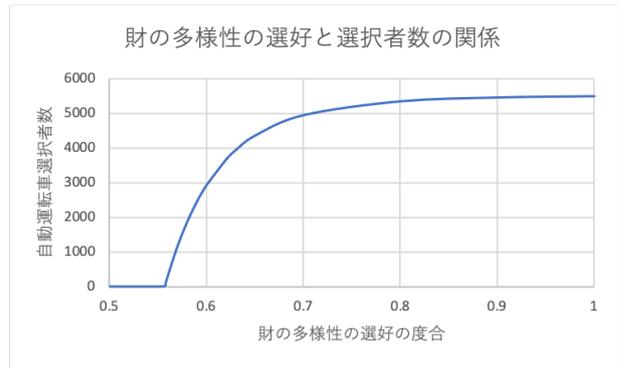


図-9 小売財の多様性の選好の度合の変化が
均衡時の自動運転車両選択者数におよぼす影響

場合は財の購入による効用差 $v^A - v^G$ が増加するためである。自動運転車両が普及してより安価に製造できるようになれば、さらに自動運転車の普及が進む可能性が示唆される。

次に、移動時間の金銭評価値と自動運転車両選択者数の関係を図-8に示す。

図-8より、移動時間の金銭評価値が高まれば高まるほど、自動運転車両を選択する消費者数は増加することがわかる。これは、移動時間の金銭評価値が高まると、駐車場から小売店までの移動時間 t 分の損失を一般車両を選択する消費者がより大きく捉えるようになるためである。社会がより進展し人々の時間価値が高くなることも、自動運転車の普及を促す可能性がある。

最後に、小売財の多様性の選好の度合と自動運転車両選択者数の関係を図-9に示す。

図-9より、財の多様性の選好の度合 ρ が大きいほど、自動運転車両を選択する消費者数 N^A は増加することがわかる。 ρ が高いということは、同一の購入額では単一の財を複数購入するよりも多くの種類の財を購入するほうが効用が高いことを示しており、多様性をより選好する消費者が増加すれば自動運転車がより普及するといえる。

4. おわりに

本研究では、商業地までの移動手段として自動運転車両と自動運転でない一般車両のいずれかの選択を行う消費者と、商業地の駐車場数を設定する駐車場管理組織および商業地にて財の販売を行う小売業の3つの経済主体による市場均衡モデルを構築し、自動運転車両を選択する消費者数が増加すると、駐車場数の減少および小売店舗の増加という周辺環境の変化を通じて、より多くの消費者が自動運転車両を選択するようになるメカニズムを示した。

完全自動運転の車両は、商業地で利用者を降ろした後に車両単体で移動し商業地の遠方で自ら駐車することができる。したがって、商業地周辺の駐車場を必要とする消費者は一般車両の利用者のみとなり、一般車両から自動運転車両に乗り換える消費者が増加するほど、商業地周辺の駐車場需要は減少する。駐車場を管理する組織は、減少した駐車場需要に合わせ自身の利潤を最大化するために商業地の駐車場数を減らす。駐車場数の減少は周辺環境を変化させ、その結果として消費者の選択を変更させる。この一連の流れにより、より多くの消費者が自動運転車両を選択するようになり、自動運転車両の普及が進行する。

まず、駐車場数の減少にともなって増加する駐車場が

ら小売店までの移動時間と小売業の店舗数を考慮した均衡モデルを構築した。自動運転車両数の増加は周辺環境の変化を招き、駐車場から小売店まで歩く移動時間が増加することに加えて、商業地で購入することのできる財の種類および数の増加を通じてさらに消費者の車両選択に影響する。構築したモデルを用いて、消費者の財の購入による効用は、車両コストが相対的に低い分常に一般車両選択者の方が大きく、自動運転車両を選択する消費者数が増加することで両選択者ともに増加するが、他方車両コスト差が小さくなることにより財の購入額差も小さくなることで相対的に自動運転車両を選択した時の効用が高まり、自動運転車両の普及の一要素となることを示した。

また、構築したモデルを用いて、自動運転車両の車両価格が低い時、消費者の所得が高い時、消費者の移動時間の金銭評価値が高い時、消費者の小売財の多様性に対する選好が高い時に自動運転車両が普及しやすいことを示した。

本研究は今後様々な発展が可能である。第一に、本モデルでは、消費者が一般車両と自動運転車両のいずれかの車両の所有を前提としていたが、実際の市場では、カーシェアやタクシー、公共交通機関の利用など、目的地までの交通手段として他の選択肢が考えられるため、他の交通手段からの自動運転車両の移行を考える

必要がある。第二に、本研究では駐車場を管理する組織が自身の利潤を最大にする場合を考えましたが、ファーストベストを優先するような公共の機関である場合も考えられる。このときは、駐車場の運営により得られる利潤を含む社会全体の厚生を最大にするような問題を定式化し、市場均衡解との比較を行う必要がある。

参考文献

- 1) SAE : Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, J3016, 2016, https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/, 2021年1月6日アクセス
- 2) Wenwen Zhang, Subhrajit Guhathakurta : Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach, *Sustainable Cities and Society* 19 pp.34–45, 2015.
- 3) Wenwen Zhang, Kaidi Wang : Parking futures: Shared automated vehicles and parking demand reduction trajectories in Atlanta, *Land Use Policy* 91 103963, 2020.
- 4) 屈卓然 : Adoption of Autonomous Vehicles with the Decrease in Parking Spaces at Shopping Areas, 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士論文, 2020.
- 5) 松島格也, 小林潔司 : タクシー・サービスのスポット市場均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.591-600, 1999.

A CHOISE MODEL ABOUT AUTONOMOUS VEHICLES WITH THE DEMAND FOR PARKING SPACES

Yasuaki HYODO, Kakuya MATSUSHIMA and Junichi SUSAKI

In recent years, with the development of artificial intelligence and communication technologies, the practical use of autonomous vehicles is expected in the near future. People may have safer trips with autonomous vehicles compared to those with general vehicles, which will promote the widespread use of autonomous vehicles. In addition, the time required for parking and land use change in the vicinity may affect the selection behavior of autonomous vehicles, since the number of required parking spaces will decrease with the spread of autonomous vehicles. In this study, we developed an equilibrium model to explain the mechanism that further promotes the diffusion of autonomous vehicles through changes in parking demand, and analyzed the effects of factors that may contribute to the diffusion of autonomous vehicles. As a result, we found that factors such as a decrease in the price of autonomous vehicles, an increase in consumer income, an increase in the monetary value of travel time, and an increase in the degree of preference for a variety of retail goods may promote the diffusion of autonomous vehicles.