

手動運転車との相互影響を考慮した 自動運転車の普及予測

五藤 大貴¹・三輪 富生²・森川 高行³

¹ 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: goto.daiki@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

² 正会員 名古屋大学准教授 未来材料・システム研究所
E-mail: miwa@nagoya-u.jp

³ 正会員 名古屋大学教授 未来社会創造機構

近い将来、自動運転車が広く普及すると期待されている。これにより、人為的交通事故の減少、渋滞や混雑の緩和、環境負荷の軽減、さらにはあらゆる人へのモビリティの提供が可能となると考えられ、新しい交通需要を生む可能性もある。このとき、自動運転車は、現在の自家用車が自動運転車に置き換わるのか、もしくは自動運転タクシーとして普及するのかについては、いまだ明らかとなっていない。本研究では、自動運転車の普及において、その保有形態と利用距離を予測することを目的としている。保有形態と利用距離に関する離散-連続モデルと交通均衡配分を組み合わせたシステムを構築し、名古屋市を対象としたネットワークに適用した。この結果、普及から 20 年ほどで 8 割の自家用車が自動運転車となること、自動運転タクシーより自家用自動運転車としての普及が大きいことが示された。

Key Words: traffic equilibrium assignment, cross nested logit model, automated vehicles

1. 序論

(1) 研究背景

自動車業界では、「CASE」と呼ばれる世界的な技術の変革が起きようとしており、社会全体にも大きな変化をもたらすと考えられている¹⁾。また、我が国では、CASE の一角である自動運転の早期実現に向けて官民一体となって取り組んできた結果、世界で初めて自動運転レベル 3 の型式指定を取得した自動運転車（条件付自動運転車）の市場化が実現されている。また、様々な地域で、高齢者等の移動手段として限定領域下での無人自動運転移動サービスの取り組みが進められている²⁾。

自動運転車の普及には、様々な効果が考えられる。辻野ら³⁾によると、自動運転車が広く普及した場合、人的事故減少効果、渋滞解消・緩和効果、環境負荷軽減効果、高齢者等の運転補助効果があるとしている。Van den et al.⁴⁾は、自動運転車ユーザーは移動中に他の活動が行えるため、移動時間の価値が低下する可能性を指摘し、Fagnant and Kockelman⁵⁾は、自動運転が若年層や高齢者、障がい者にモビリティを提供し、新しい交通需要を生み出す可能性があるとしている。

自動運転車の普及形態は、現在の手動運転車のように自家用という形態が主であるとは限らない。山本ら⁶⁾は、

自動運転シェアカー (SAV) の社会に与える影響を考察しているし、近藤ら⁷⁾は、SAV の利点として、任意の場所での乗り捨て・呼び出し、人件費削減、交通弱者救済を挙げている。ARKINVEST[®]によると、自動運転タクシー市場の規模の拡大により、消費者が支払う額は平均して現在の 1/8 に低下し、普及に拍車がかかるとしている。

また、自動運転車は、いくつかの点で手動運転車と異なるため、道路交通量も変化させる可能性がある。Shladover et al.⁸⁾は、協調アダプティブクルーズコントロール (CACC) が搭載された車両が道路に 50% や 90% 存在する時、各レーンの交通容量をそれぞれ約 20%、95% 増加させるとしている。

(2) 本研究の目的

本研究は、自動運転車の保有形態別の普及予測を行う。保有形態とは、自動運転車を“自家用車として保有するか”、“自家用車として自動車を保有することをやめて自動運転タクシーを利用するか”である。この予測を行うために、2 つのモデルを組み合わせたシステムを構築する (図-1)。

1 つ目のモデルは、各世帯における自動車保有形態の選択と、選択した保有形態における利用距離を予測する「普及モデル」であり、離散-連続モデルによって表現

される。離散選択モデルでは、全世帯が手動運転車を保有する初期状態から、各世帯は一定の期間ごとに保有形態を更新する。意思決定を行う時点で手動運転車を保有している場合は、一定の期間ごとに {手動運転自家用車を保有する, 自動運転自家用車を保有する, 自家用車の保有を辞めて自動運転タクシーを利用する} の3つから選択するとしている。一方、自動運転自家用車を保有しているか、自家用車を保有せず自動運転タクシーを利用している場合は、一定の期間ごとに {自動運転自家用車, 自動運転タクシー} から選択すると仮定している。また、「連続選択モデル」では、各世帯の保有形態に対応する年間走行距離を予測する。

2 つ目のモデルは、道路ネットワーク上の交通状況を予測する「交通量配分」である。手動運転車と自動運転車の経路選択特性の違いや道路利用の効率性を評価し、自動運転車の普及に伴う交通状況と、それが保有形態に与える相互影響を考慮する。

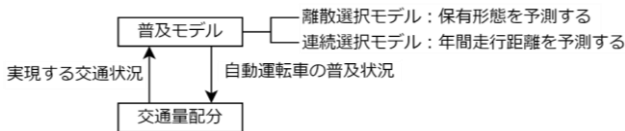


図-1 自動車保有選択モデルとシミュレーション

2. 既往研究

(1) 離散-連続モデルによるサービス普及モデル

保有形態の選択と利用量の選択が相互に影響する場合は、離散-連続モデルによってモデル化されることが望ましく、離散-連続モデルとして比較的多くの研究例がある。例えば、三輪ら¹⁰⁾は、間接効用関数とロウの恒等式から導かれる、駐車場所選択 (多項ロジットモデル) と駐車時間選択 (回帰モデル) の離散-連続モデルを適用している。また、コピュラ関数を用いた離散-連続モデルも多い。非対称・非線形な変数間の依存関係を表すことが可能であり、多変量分布が正規分布であることを前提とする必要もない¹¹⁾。Nguyen et al.¹²⁾は、多項ロジットモデルにより車種選択を、回帰式により使用量をコピュラ関数を用いてモデル化している。また、サービスの普及により、サービスレベル向上や社会の受容性は変化し、選択行動にも影響を及ぼす。福田ら¹³⁾は、ETC車載器普及率と車載器パフォーマンスの相互依存性を考慮した車載器購入行動モデルを構築した。

(2) 車種別交通量配分モデル

Wang et al.¹⁴⁾は、自動運転車と手動運転車が混在した状況下での交通量配分法を提案した。この際、表-1に示す

ように、自動運転車は移動中に他の活動を行うことができ、旅行時間を短縮するインセンティブが低下するため手動運転車と比べて時間価値が低いとしている。また、自動運転車は交通情報を高頻度に取得できかつ正確に従うことができるため、経路選択における不確実性がないとしている。さらに、より高度な自動運転技術が確立すると、自動運転車は車間距離を短くすることができ、手動運転車と置き換わることで混雑を緩和する効果があるとしている。

本論文では、Wang et al.¹⁴⁾のモデルを適用して、手動運転車と自動運転車の違いを考慮した交通量配分を行う。

表-1 自動運転車と手動運転車の比較

	自動運転車	手動運転車
時間価値	低い	高い
経路選択	確定的	確率的
混雑緩和	あり	なし

3. 普及モデル

本研究で適用した自動車の保有形態の選択と年間走行距離をモデル化する離散-連続モデルは、離散選択である自動車の保有形態選択には多項ロジットモデル、連続量選択の自動車の年間走行距離には、対数正規分布に基づく回帰モデルを用いた。2つの選択の相互依存関係をコピュラ関数によって表現した。

Lee¹⁵⁾によって提供された離散-連続モデルは、2つの一変量限界分布の結合分布を表すために二変量分布を用い、最尤法で推定された。Leeによる発展は、適切な二変量分布関数の確立に基づくものである。Sklarの定理によれば、二変量分布関数はコピュラと呼ばれ、コピュラ族の集合から選択することが可能である。また、自動車の保有形態と年間走行距離の選択は、同時に検討される可能性があるため、相互に関連している。本研究では、コピュラのうち Frank コピュラを使用する。

(1) 保有形態選択の多項ロジットモデル (離散モデル)

多項ロジットモデルは、個人 i が M 個の選択肢からなる集合 $J = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ から選択肢 j を選択する確率を表現する。以降では、手動運転自家用車を PH (Private Human-Driven Vehicle)、自動運転自家用車を PA (Private Connected and Autonomous Vehicle)、自動運転タクシーを AT (Connected and Autonomous Taxi)と表記する。また、手動運転車を HDV (Human-Driven Vehicle)、自動運転車を CAV (Connected and Autonomous Vehicle) とする。添え字には手動運転車は H 、自動運転車には A を使用する。したがって、車種の集合 Z は $Z \in \{H, A\}$ である。 $H \in \{PH\}$ 、 $A \in \{PA, AT\}$ である。すなわち、普及モデルでは、世帯

i が PH を保有している場合は、選択集合は $J = \{PH, PA, AT\}$ である。PA を保有している場合や自家用車を保有せず AT を利用している場合は、改めて手動運転車を選択しないと仮定して、選択集合は $J = \{PA, AT\}$ である。

選択肢 j が個人 i にもたらす効用を式(1)のように表す。

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

V_{ij} は説明変数の関数であり確定効用、 ε_{ij} は、観測されない要因の影響や、個人間の選好の際による影響を表す誤差項である。確定効用は観測可能な変数のベクトル \mathbf{x}_{ij} で説明できるとき、効用関数式(1)は、式(2)のように書き換えられる。

$$U_{ij} = \beta_j \mathbf{x}_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

このとき、誤差項 ε_{ij} がガンベル分布に従うとき、個人 i が選択肢 j を選択する確率 $p_i(j)$ は、式(3)である。

$$p_i(j) = \frac{\exp(V_{ij})}{\sum_{j'=1}^M \exp(V_{ij'})} = \frac{e^{\beta_j \mathbf{x}_{ij}}}{\sum_{j'=1}^M e^{\beta_{j'} \mathbf{x}_{ij'}}} \quad (3)$$

(2) 利用距離の回帰モデル (連続モデル)

自動車の使用量は、年間走行距離 d で表され、 $\ln(d)$ が正規分布に従うと仮定する。このとき、保有形態 j を使用する世帯 i の年間走行距離は次のように表される。

$$\ln(d_{ij}) = \alpha_j \mathbf{z}_{ij} + \eta_{ij} \quad (4)$$

ここで、 α は回帰係数、 \mathbf{z} は説明変数、 η は誤差項を表す。そして、誤差項 η に関する確率分布関数 $f(\eta_{ij})$ および累積分布関数 $F(\eta_{ij})$ は次のように表される¹⁶⁾。

$$f(\eta_{ij}) = \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij})) = \frac{1}{\sigma_j} \phi\left(\frac{\ln(d_{ij}) - \alpha_j \mathbf{z}_{ij}}{\sigma_j}\right) \quad (5)$$

$$F(\eta_{ij}) = \Pr(\ln(D_{ij}) \leq \ln(d_{ij})) = \Phi\left(\frac{\ln(d_{ij}) - \alpha_j \mathbf{z}_{ij}}{\sigma_j}\right) \quad (6)$$

ここで、 $\phi(\cdot)$ および $\Phi(\cdot)$ は、標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数である。

(3) 保有形態-利用距離の離散-連続モデル

保有形態選択と利用距離の決定が独立ではなく、個人 i が保有形態 j_i を選択した場合にのみ年間走行距離 d を観測できるとする。同様に、個人 i が年間走行距離 d を運転する場合、保有形態 j_i を選択する確率を観測できるとする。したがって、結合した確率によって、2つの選択の関係を推論することができる。

$$\begin{aligned} & \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij}), J_i = j_i) \\ &= \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij}) | J_i = j_i) \Pr(J_i = j_i) \\ &= \Pr(J_i = j_i | \ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij})) \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij})) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)の結合した確率は、コンピュータを用いることで表

現できる。Sklar の定理によれば、2つの一変量分布 $\ln(D)$ と J の間にコンピュータ C で表される二変量分布関数が存在する。周辺分布関数 $F^{\ln(D)}(\ln(d_{ij}))$ 、 $F^J(j_i)$ を持つ連続な二変量同時分布関数を $F(x, y)$ とする。この時、任意の $[x, y] \in [-\infty, \infty] \times [-\infty, \infty]$ について、次式を満たすコンピュータ C が一意に存在する。

$$\begin{aligned} & \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij}), J_i = j_i) = F(\ln(d_{ij}), j_i) \\ &= C\left(F^{\ln(D)}(\ln(d_{ij})), F^J(j_i)\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Sklar の定理から、コンピュータ C に周辺分布関数 $F^{\ln(D)}$ 、 F^J を適用することで生成される $C(F^{\ln(D)}, F^J)$ は、周辺分布を区間 $[0, 1]$ とする同時分布関数である¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。

周辺分布関数は $F(\eta_{ij})$ と $F(\varepsilon_{ij})$ に置き換えられる。Frank コピュラを適用した場合、 $F(\varepsilon_{ij})$ と $F(\eta_{ij})$ は、 θ を持つ二変量標準正規分布となり、式(9)に変換される²⁴⁾。ここで、 θ は、2つの一変量分布の間の関連を表す依存性パラメータである。 θ の範囲は使用するコンピュータに依存するが、Frank コピュラでは $-\infty \leq \theta \leq +\infty$ である。

$$\begin{aligned} & \Pr(\ln(D_{ij}) = \ln(d_{ij}), J_i = j_i) \\ &= \left(1 - \frac{e^{\theta F(\eta_{ij})} \cdot (e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} - e^\theta)}{e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} e^{\theta F(\eta_{ij})} + e^\theta (1 - e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} - e^{\theta F(\eta_{ij})})}\right) f(\eta_{ij}) \end{aligned} \quad (9)$$

個人 i が選択肢 j を選択した場合のダミー変数を C_{ij} と定義すると、Frank コピュラを用いた離散-連続モデルの対数尤度関数は、式(10)のように書ける。

$$\begin{aligned} LL = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} & \left\{ \ln\left(1 - \frac{e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} - e^\theta}{e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} e^{\theta F(\eta_{ij})} + e^\theta (1 - e^{\theta F(\varepsilon_{ij})} - e^{\theta F(\eta_{ij})})}\right) \right. \\ & \left. + \ln\phi\left(\frac{\ln(d_{ij}) - \alpha_j \mathbf{z}_{ij}}{\sigma_j}\right) - \ln(\sigma_j) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

4. 自動運転の混在を考慮した交通量配分

ここでは、Wang et al.¹⁴⁾の交通量配分法を説明する。表-1で示した議論より、CAVの経路選択行動は確定的利用者均衡配分、HDVはCNL(Cross Nested Logit)モデルによる確率的利用者均衡配分で表現できるとする。

CNLモデルの構造は図-2である。ネスト構造は、道路ネットワークを構成するリンクによって定義される。ODペア集合は W と表記し、ODペア w におけるネスト m の選択確率 $p^w(m)$ 、ネスト m を選択したという条件のもとで経路 k を選択する条件付き確率 $p^w(k|m)$ 、及び経路 k の選択確率 $p^w(k)$ は式(13)である²¹⁾。

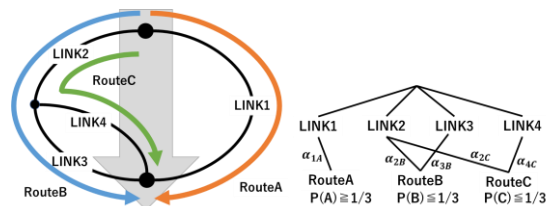


図-2 適用するCNLの構造

$$p^w(m) = \frac{\left(\sum_{k \in R_H^w} [\alpha_{m,k}^w \exp(-\theta c_{k,H}^w)]^{1/\mu}\right)}{\sum_{b \in \Gamma_H} \left(\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{b,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu}\right)^\mu} \quad (11)$$

$$p^w(k|m) = \frac{\left(\alpha_{m,k}^w \exp(-\theta c_{k,H}^w)\right)^{1/\mu}}{\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{m,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu}} \quad (12)$$

$$p^w(k) = \sum_m P(m) P(k|m) \quad (13)$$

$$\alpha_{m,k}^w = \frac{l_m}{l_k^w} \cdot \delta_{m,k}^w \quad (14)$$

$$, \forall w \in W, \forall k \in R_H^w, \forall m \in \Gamma_H$$

ここに、 R_H^w は HDV が利用可能な OD ペア w の経路集合、 $\alpha_{m,k}^w$ は経路 k のネスト m に対するアロケーションパラメータ、 $c_{k,H}^w$ は経路 k の HDV のコストである。また、 Γ_H は HDV が利用できるリンク集合、 θ は経路選択に関する感度パラメータ、 μ はネスティングパラメータ、 l_m はリンク m の長さ、 l_k^w は OD ペア w の経路 k の長さであり、 $\delta_{m,k}^w$ は OD ペア w の経路 k にリンク m が含まれるとき 1、そうでないとき 0 の変数である。

Prashker and Bekhor²²は CNL モデルを経路選択モデルとした確率的利用者均衡配分モデルを示した。しかし、ある交通流の走行時間への HDV の増加が及ぼす影響と、CAV の増加が及ぼす影響が相互に等しくない（リンクコスト関数が非対称である）場合（式(15)）は、均衡状態を導く等価な数理最適化問題が存在しない²³。

$$\frac{\partial \bar{t}_m(v_{m,H}, v_{m,A})}{\partial v_{m,H}} \neq \frac{\partial \bar{t}_m(v_{m,H}, v_{m,A})}{\partial v_{m,A}}, \forall m \in \Gamma \quad (15)$$

ここに、 Γ はリンク集合、 $v_{m,H}$ と $v_{m,A}$ は、それぞれリンク m の HDV 及び CAV の交通量、 $\bar{t}_m(v_{m,H}, v_{m,A})$ はリンク m の旅行時間である。それゆえ、均衡条件は相補性問題で記述するか、あるいは変分不等式や不動点問題によらなければならない²³。以降では、経路交通量の変数とした変分不等式を定義する。

まず、HDV の経路選択確率を CNL モデルで表現する。均衡条件下では、OD ペア w の経路 k の一般化コストは式(16)のようになる¹⁴。

$$C_{k,H}^w = c_{k,H}^w - \frac{\mu}{\theta} H_{k,H}^w + \frac{\mu}{\theta} \ln \left(\frac{f_{k,H}^w}{q_H^w} \right), \forall w \in W, \forall k \in R_H^w \quad (16)$$

ここに、

$$H_{k,H}^w = \ln \left[\sum_{m \in \Gamma_H} (\alpha_{m,l}^w)^{\frac{1}{\mu}} \left(\sum_{l \in R_H^w} [\alpha_{m,l}^w \exp(-\theta c_{l,H}^w)]^{1/\mu} \right)^{\mu-1} \right] \quad (17)$$

また、 $f_{k,H}^w$ は OD ペア w の経路 k の交通量、 q_H^w は HDV の OD ペア w の OD 間交通量である。均衡状態では、各 OD ペアで、HDV の全経路の一般化コスト $C_{k,H}^w$ が等しくなるような経路交通量 $f_{k,H}^w$ が実現する。この条件は式(18)のように表現できる。

$$C_{k,H}^w(\mathbf{f}_H^*) = \tau_H^w, \forall w \in W, \forall k \in R_H^w \quad (18)$$

ここに、 \mathbf{f}_H^* は $f_{k,H}^w$ のベクトルであり、式(19)である。

$$\mathbf{f}_H^* = \{f_{k,H}^w, \forall w \in W, \forall k \in R_H^w\} \quad (19)$$

$$\mathbf{f}_H^* \in \Omega_{f_H} = \{\mathbf{f} | \Lambda_H \mathbf{f}_H = \mathbf{q}_H, \mathbf{f}_H \geq 0\}$$

また、 Ω_{f_H} は \mathbf{f}_H の実行可能領域、 Λ_H は HDV の OD ペアと経路交通量の接続行列、 \mathbf{q}_H は OD 交通量のベクトルである。このとき、 τ_H^w は \mathbf{f}_H^* によって与えられる平衡状態での一般化コストである。式(18)は以下の変分不等式問題により表現できる。

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in R_H^w} C_{k,H}^w (f_{k,H}^w - f_{k,H}^*) \geq 0 \quad (19)$$

ここに、 $\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_H^* \in \Omega_{f_H}$ である。

続いて、HDV と CAV が混合する交通量配分モデルについて説明する。同一リンク上では HDV と CAV は同一の旅行時間となるが、旅行時間はそれらの構成比によって変化すると仮定する。この場合のリンクコスト関数は式(20)と表現する。

$$\bar{t}_m(v_{m,H}, v_{m,A}) = \frac{l_m}{s_m} \left[1 + \alpha \left(\frac{v_{m,H} + v_{m,A}}{Q_m} \right)^\beta \right], \forall m \in \Gamma \quad (20)$$

ここに、 s_m はリンク m の自由走行速度である。 α および β は BPR 関数のパラメータであり、本研究では土木学会²⁴に従って、それぞれ 0.48 と 2.82 とした。また、 Q_m は交通容量であり、性質の異なる HDV と CAV を考慮して、以下のように計算する。

$$Q_m = \frac{1}{\frac{v_{m,H}}{v_{m,H} + v_{m,A}} \frac{1}{Q_{m,H}} + \frac{v_{m,A}}{v_{m,H} + v_{m,A}} \frac{1}{Q_{m,A}}}, \forall m \in \Gamma \quad (21)$$

ここに、 $Q_{m,H}, Q_{m,A}$ は交通流が HDV もしくは CAV のみで構成される場合のリンク m の交通容量である。また、その比を非対称性のパラメータ AS とし、式(22)のように定義する。

$$Q_{m,A} = AS \cdot Q_{m,H}, \forall m \in \Gamma \quad (22)$$

また、HDV と CAV の時間価値 VOT_z が異なるとし、車種 z のリンクコストを式(23)のように計算する。

$$t_{m,z} = \bar{t}_m(v_{m,H}, v_{m,A}) \cdot VOT_z, \forall m \in \Gamma, \forall z \in \{H, A\} \quad (23)$$

続いて、CAV の均衡状態を定義する。CAV は HDV と異なり、交通状況を完全に把握しているとし、最小移動コストの経路を常に選択できるとする。このとき、均衡状態は同一 OD ではコストが等しく、CAV ユーザー内では確定的利用者配分となる。また、その時の CAV の一般化コストは式(24) (UE 条件) を満たす必要がある。

$$C_{k,A}^w = c_{k,A}^w = \begin{cases} \tau_A^w, & \text{if } f_{k,A}^w > 0 \\ \geq \tau_A^w, & \text{if } f_{k,A}^w = 0 \end{cases}, \forall k \in R_A^w, \forall w \in W \quad (24)$$

ここで、

$$\mathbf{f}_A^* \in \Omega_{f_A} = \{\mathbf{f} | \Lambda_A \mathbf{f}_A = \mathbf{q}_A, \mathbf{f}_A \geq 0\}$$

式(18)、式(24)に示された条件より、経路交通量 $(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*)$ が、式(25)の変分不等式問題を満たす場合にのみ、HDV は CNL モデルであらわされる確率的利用者均衡状態、CAV は確定的利用者均衡状態となる¹⁴。なお、式(25)は少なくとも一つの解を有し、また非対称性に起因

する複数の局所的な解を持つ場合がある²⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W_H} \sum_{k \in R_H^w} C_{k,H}^w(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*) (f_{k,H}^w - f_{k,H}^{w*}) \\ & + \sum_{w \in W_A} \sum_{k \in R_A^w} C_{k,A}^w(\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*) (f_{k,A}^w - f_{k,A}^{w*}) \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} & [\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_A], [\mathbf{f}_H^*, \mathbf{f}_A^*] \in \Omega_f \\ & = \{[\mathbf{f}_H, \mathbf{f}_A] | \Lambda_H \mathbf{f}_H = \mathbf{q}_H, \Lambda_A \mathbf{f}_A = \mathbf{q}_A, \mathbf{f}_H \geq 0, \mathbf{f}_A \geq 0\} \end{aligned}$$

5. 配分アルゴリズム

本研究では変分不等式問題を解くアルゴリズムに Wang et al.¹⁴⁾の RSRS-MSRA (Revised Smith's route-Swapping-Modified the Self-Regulated Average) アルゴリズムを用いる。

RSRS アルゴリズムは、最小コストに近いコストを持つ経路に交通量を移すアルゴリズムである。RSRS アルゴリズムの主なフローは以下の通りである。

Step1: OD 交通量を均一に割り当て、初期経路交通量 $(\mathbf{f}_{n,H}, \mathbf{f}_{n,A})$ とする。 $n = 1$ とする。

Step2: 降下方向を検出する $\Phi_H(\mathbf{f}_n)$ 、 $\Phi_A(\mathbf{f}_n)$ を計算する。

$$\begin{aligned} \Phi_{k,H}^w(\mathbf{f}_n) &= \sum_{g \in R_H^w} \left[f_{g,H}^w(n) (C_{g,H}^w(\mathbf{f}_n) - C_{k,H}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right. \\ & \quad \left. - f_{k,H}^w(n) (C_{k,H}^w(\mathbf{f}_n) - C_{g,H}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right] \\ & \quad , \forall w \in W, \forall k \in R_H^w \\ \Phi_{k,A}^w(\mathbf{f}_n) &= \sum_{g \in R_A^w} \left[f_{g,A}^w(n) (C_{g,A}^w(\mathbf{f}_n) - C_{k,A}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right. \\ & \quad \left. - f_{k,A}^w(n) (C_{k,A}^w(\mathbf{f}_n) - C_{g,A}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right] \\ & \quad , \forall w \in W, \forall k \in R_A^w \end{aligned}$$

ここに、 $(X)_+$ は $X > 0$ のとき $(X)_+ = X$ 、そうでなければ $(X)_+ = 0$ である。

Step3: Step2 で計算された $\Phi(\mathbf{f}_n)$ によって、以下のように経路交通量の更新する。ここに、 $\Phi_{k,H}^w(\mathbf{f}_n)$ と $\Phi_{k,A}^w(\mathbf{f}_n)$ はいずれも $\Phi(\mathbf{f}_n)$ の要素である。

$$\mathbf{f}_{n+1} = \mathbf{f}_n + \beta_n \Phi(\mathbf{f}_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{n,H} \\ \mathbf{f}_{n,A} \end{bmatrix} + \beta_n \begin{bmatrix} \Phi_H(\mathbf{f}_n) \\ \Phi_A(\mathbf{f}_n) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Step4: 新たな経路交通量 \mathbf{f}_{n+1} が収束条件を満たしていれば終了。満たしていなければ $n = n + 1$ として Step2 へ。

なお、ステップサイズ β_n は現ステップでの反復計算と前ステップでの反復計算の両方の情報を使用している。

$$\beta_n = \frac{1}{h_n} \cdot \frac{1}{\chi_n} \quad (27)$$

ここで、

$$\chi_n = \begin{cases} Y_0; & \text{if } n = 1 \\ \chi_{n-1} + Y_1; & \text{if } |\Phi(\mathbf{f}_n)| \geq |\Phi(\mathbf{f}_{n-1})| \text{ and } n \geq 2 \\ \chi_{n-1} + Y_2; & \text{if } |\Phi(\mathbf{f}_n)| \leq |\Phi(\mathbf{f}_{n-1})| \text{ and } n \geq 2 \end{cases} \quad (28)$$

$$h_n = \max \left(h_{i,z}^w(n) | h_{i,z}^w(n) = \sum_{j \in R_Z^w \setminus i} (C_{j,z}^w(\mathbf{f}_n) - C_{i,z}^w(\mathbf{f}_n))_+ \right. \\ \left. , \forall i \in R_Z^w, \forall w \in W, \forall z \in \{H, A\} \right)$$

Y_0, Y_1, Y_2 は事前に決定する値で Wang et al.¹⁴⁾ は 2, 2, 0.01 としている。

また、収束の度合いを示す関数を、Wang et al.¹⁴⁾ は式 (29) のように定義した。

$$G = \frac{b}{a} \quad (29a)$$

ここで

$$a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_H^w} f_{k,H}^w C_{k,H}^w + \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_A^w} f_{k,A}^w C_{k,A}^w \quad (29b)$$

$$b = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_H^w} f_{k,H}^w (C_{k,H}^w - C_{min,H}^w) \\ + \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_A^w} f_{k,A}^w (C_{k,A}^w - C_{min,A}^w) \quad (29c)$$

HDV の一般化コスト $C_{k,H}^w$ は、式(16)の第 2, 3 項により負値をとる可能性があり、その場合は G がマイナスになってしまう。また a が 0 に十分に近づくと G が無限に発散するため、本研究は a を以下のように定義した。

$$a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_H^w} |f_{k,H}^w C_{k,H}^w| + \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_A^w} |f_{k,A}^w C_{k,A}^w|$$

本研究では経路集合の作成には、DSD (Disaggregate simplicial decomposition) を用いた。Damberg ら²⁶⁾ は、有用な経路の生成と配分を交互に繰り返すことで経路の全列挙を避ける DSD を提案した。

6. アンケート調査

アンケートは 2022 年 10 月 17, 18 日に Web 形式 (調査会社: 楽天インサイト(株)) で行った。本調査の対象者は、運転免許を保有し、名古屋市の栄交差点から半径 30km 以内に市役所を持つ市町村に在住し、年齢 20-69 歳、世帯で自家用車を保有し、自家用車のうち”最も利用頻度の高い自動車”の購入費用と年間走行距離を把握している人であり、世帯の自動車保有選択行動について質問した。回収サンプル数は 1000、有効回答数は 753 である。

まず、回答者の個人属性、世帯属性、最も利用頻度の高い自動車について質問した。続いて、CAV, PT, AT の説明を提示した。次に、今後の自動車の購入意向について仮想状況を想定した質問を行った。その際に、各保有形態について、具体的な条件を提示した。各条件の内容は、以下の①~⑧である。なお、括弧内は該当する保有形態である。[PH] は、PH について「現在の最も利用頻度の高い車と同等」と提示したものである。

- ① 地域の普及率 (PH, PA, AT)
- ①' 交通事故遭遇確率 (PH, PA, AT)
- ② 車両価格 ([PH], PA)
- ③ 維持費 ([PH], PA)

- ④ 運転免許の必要性 (PA)
- ⑤ タクシー同乗確率 (AT)
- ⑥ タクシーキロ当たり料金 (AT)
- ⑦ 移動時間の変化 (PA, AT)
- ⑧ タクシー待ち時間 (AT)

なお、①は現在と比較した場合であり、国土交通省²⁷⁾および①の CAV と HDV の普及率より算出している。

①～⑧のそれぞれに水準値を設定し、L27 混合系直交表を用いて各因子の水準を割り当てた。要因間の交互作用は考慮していない。また、被験者にはランダムに選んだ 1 種類の条件設定を提示し、世帯で最も利用頻度の高い車の次の買い替え時期にどの保有形態を選ぶかを質問した。さらにその後、選択した保有形態において、移動距離変化の増減率を質問した。

7. 選択モデルの構築と適用準備

(1) 推定結果

保有選択と使用量の選択に関する離散-連続モデルの Frank コピュラでの推定結果を表-2 に示す。地域の普及率が正の効用をもたらす、社会的相互作用が確認された。

(2) PT データの補足

推定したパラメータを用いて、名古屋市周辺地域への適用を試みた。適用の際に使用したデータは、アンケートに加え、第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査データ（以降、PT 調査）である。

PT 調査には、世帯年収の情報がないため、アンケート調査の世帯属性から、回帰モデルを用いて年収を推定した（表-3）。ここでは、被説明変数を $\ln(\text{世帯収入})$ とした。表中に示された決定係数は低く、対数変換した世帯収入に対するモデル適合度は高くないが、モデルから計算される被説明変数 $\ln(\text{世帯収入})$ を、世帯収入として再計算した場合の R^2 は 0.288 となり、このモデルによって比較的精度よく世帯収入を説明できている。

続いて、PT 調査には、車の所有目的の情報がないため、アンケート調査から得られる世帯属性と保有目的の傾向から決定した。離散-連続モデルには、「所有目的_通勤」と「所有目的_観光」が含まれるため、それら 2 つの目的と世帯属性に着目し、アンケートデータの分析を行った。その結果、①世帯人数が 2 人未満か以上か、②保有台数が 1 台か以上か、③名古屋市在住かどうかで特徴がみられ、世帯属性に基づき 8 つに分類し、各分類の所有目的の割合を求めた。同様に、PT 調査の世帯を分類し、アンケートデータと同様の割合で、所有目的を通勤、観光、それら以外に定めた。

続いて、PT 調査には、普段の買い物場所までの距離

表-2 離散-連続モデルの推定結果

説明変数	種別	Frank copula	
		推定値	t値
離散モデル (保有選択)			
定数項	PA	-0.194	-0.95
	AT	-1.650	-4.73
普及率	ALL	0.679	3.88
$\ln(\text{車両価格[千円]}/\text{世帯収入[千円]})$	PH,PA	-0.265	-2.04
所有目的_通勤	ALL	-0.130	-1.61
$\times \ln(\text{キロ当たり費用[円]}/\text{世帯収入[千円]})$			
所有目的_観光 \times 時間削減割合 (PA),		2.041	2.33
相乗り確率	AT	-0.304	-0.77
世帯内後期高齢者ダミー	PA	-0.498	-1.99
買替期間[年]	PH	-0.043	-2.15
所有目的_観光 $\times \ln(\text{待ち時間[h]})$	AT	-0.273	-2.58
6人以上世帯ダミー	AT	0.560	0.88
連続モデル ($\ln(\text{年間走行距離})$)			
定数項	PH	-0.251	-1.56
	PA	-0.219	-1.38
	AT	-1.308	-2.62
最も利用する買い物場所までの距離[km]	ALL	0.041	2.71
$\ln(\text{キロ当たり費用[円]}/\text{世帯収入[千円]})$	ALL	-0.120	-3.52
人口密度[千人/km ²]	PH,PA	-0.027	-2.09
世帯内後期高齢者数[人]	ALL	-0.122	-1.13
待ち時間[h]	AT	-0.242	-2.17
相乗り確率	AT	-0.764	-2.22
買替期間[年]	PH,PA	-0.026	-2.82
連続モデルの分散			
	PH	0.924	20.56
σ	PA	0.928	20.37
	AT	1.068	9.16
依存性パラメータ			
	PH	-3.363	-4.70
θ	PA	-2.643	-3.62
	AT	-3.596	-2.90
サンプルサイズ		753	
Log-likelihood at convergence		-1645.68	
AIC		3345.37	

表-3 回帰モデル (世帯年収)

説明変数	推定値	t	P> t
定数項	-0.999	-12.28	0.000
人口密度[千人/km ²]	0.026	2.80	0.005
18歳未満人数	0.106	4.73	0.000
18歳以上 75歳未満人数	0.129	5.03	0.000
75歳以上人数	-0.094	-1.60	0.110
春日井市ダミー	-0.137	-1.28	0.199
豊田市ダミー	0.457	3.80	0.000
四日市市ダミー	0.182	1.33	0.184
岐阜市ダミー	-0.188	-1.29	0.199
N		753	
R ²		0.0851	
\bar{R}^2		0.0752	

の情報が無いため、名古屋市かそれ以外で分類し、アンケート調査から得られた平均値を使用した。

(3) ネットワーク

名古屋市周辺を想定して、作成した道路ネットワークは図-3 である。ノード数 116、リンク数 245 であり、一般道のみを表現している。各リンクの制限速度、車線数は道路交通センサスに基づく。また、道路長は、ノードの座標から計算され、直線距離が 3km を超える場合は Google マップより取得している。

各リンクの車線当たり可能交通容量は、道路交通センサス箇所別基本表から 1 時間当たりの可能交通容量を求め、溝上ら²⁸⁾を参考に、各リンクの日交通容量は 1 時間当たりの可能交通容量の 17 倍としている。また、配分対象交通量は平日のトリップとした。

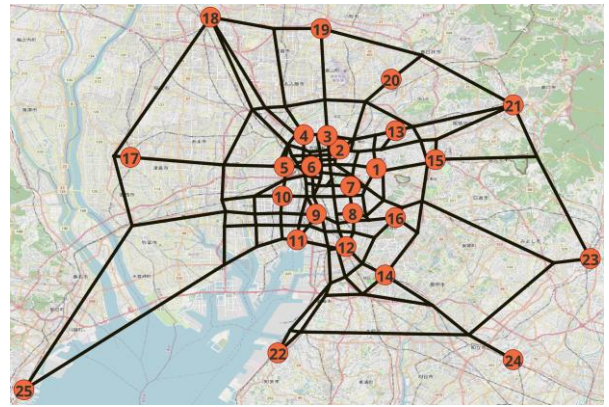


図-3 ネットワークとセントロイド

(4) 計算フローと各種条件

普及シミュレーションフローは図-4 である。オレンジ枠が普及モデル、水色の枠が交通量配分のフローである。

まず、対象エリア内の世帯属性を有する世帯分布を得るため、作成したネットワーク内に在住し、データに不備のない世帯を抽出した。これらの世帯を“調査世帯サンプル”と呼ぶ。これらはサンプルデータであり実世帯数とは一致しないため、中ゾーン別の調査世帯サンプル数で各中ゾーンの実世帯数を除し、各中ゾーンの世帯拡大係数を求めた。実世帯数には、令和 2 年度国勢調査²⁹⁾の 2015 年の世帯数を使用している。その後、中ゾーン別世帯拡大係数を調査世帯サンプルに乗ずることで、対象エリア内の中ゾーン別世帯数を得た。すなわち調査世帯サンプルと同一の属性とトリップを持つ世帯が、中ゾーン別世帯拡大係数だけ複製されたことになる。拡大後の世帯数は対象とする中ゾーンの実世帯数とほぼ一致し、約 294 万世帯となった。hh をそれら世帯の集合とする。

次に、「OD 交通量算出」について説明する。世帯 i の保有形態 j の年間走行距離を年間走行距離を $d_{i,j}$ とする。世帯 i が PH を選択した時、その世帯が持つ年間走行距離には変化がないとし、その世帯のトリップに対する交通量の比は 1.0 とした。世帯 i が PA または AT を選択した時、その世帯の持つトリップに対する交通量は $d_{i,PA}/d_{i,PH}$ 、または $d_{i,AT}/d_{i,PH}$ とし、倍率をかけている。よって、OD 交通量は式(30)となる。なお、交通量配分結果の世帯の走行距離は、配分計算における経路の生成結果に依存するため、厳密にはこの倍率と一致しない。

次に「リンクコスト計算」では、式(20)より算出される。また、「経路コスト計算」では、HDV は式(16)、CAV は通過するリンクコストの和である。

「経路探索・過去の経路と照合」について説明する。本研究では、最短経路探索および DSD アルゴリズムにより、有用な経路を挙げ、経路集合を作成し配分している。CAV は、交通情報を高頻度に取得できるという仮定のもと、HDV で利用可能な経路はすべて利用できる

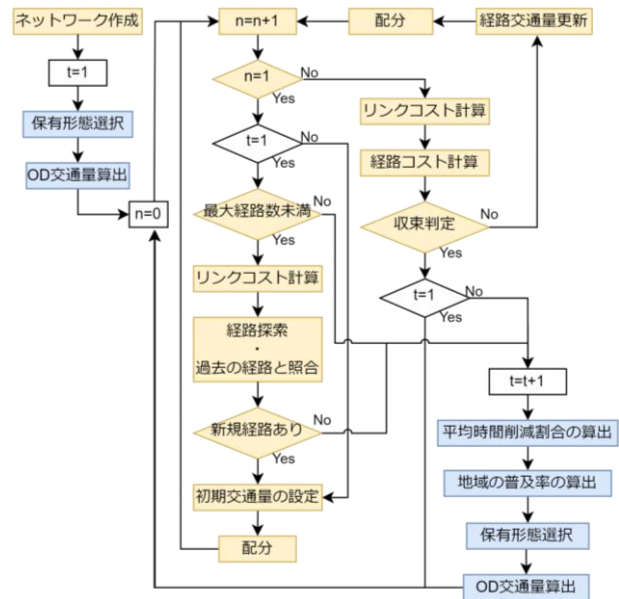


図-4 詳細フロー

としている。また、HDV は自動運転専用レーン（以降、CAV レーン）が利用できないネットワークで経路探索が行われる。得られた経路は、車種別の経路集合 R_z^w と照合し、車種別の経路集合内で重複しない場合に限り、その経路をその車種の経路集合に加えている。

次に「最大経路数未滿」について説明する。本研究では、DSD アルゴリズムを用いて、経路集合を作成しているが、用いる OD とネットワークには無数の経路が存在する。そのため、経路数に制限を掛けた。「最大経路数未滿」では、HDV の OD ペアごとの経路数を数えている。「最大経路数未滿」では、HDV のある OD ペア間の経路数が設定した最大経路数となった時に「 $t=t+1$ 」に移動するように設定している。

「初期交通量の設定」では、 $t = 1$ の時は、OD 交通量を同一 OD 及び同一車種の経路数で除した値を各経路の初期交通量として与えた。 $t \neq 1$ の時、 t 年の初期交通量は、前年 ($t - 1$) の経路交通量に依存した初期交通量が与えられ、式(31)となる。ただし、前年度の車種 z の OD 交通量が 0 の場合は、 $t = 1$ と同様に計算される。ここ

で、 $f_{k,z,t}^w$ は、 t 年の $f_{k,z}^w$ を表し、 $q_{z,t}^w$ は t 年の q_z^w を表す。

$$f_{k,z,t}^w = f_{k,z,t-1}^w \times \frac{q_{z,t}^w}{q_{z,t-1}^w} \quad \forall w \in W, \forall k \in R_z^w, \quad (31)$$

$$\forall z \in \{H, A\}$$

続いて、「収束判定」では、収束条件は G を一定以下としている。なお、 $n \leq 10$ の場合は、前年度の結果と相関の高い配分交通量である可能性が高いことから、収束していないと判定している。

「経路交通量更新」では RSRS-MSRA アルゴリズムを用いている。なお、本研究では、交通量が 0 に近い経路も計算されることから、プログラム上の処理にあたり実行不能解が生成される場合がある。実行不能解が生成されるのを防ぐため、式(28)の χ_n について Y_0, Y_1, Y_2 をそれぞれ 4, 4, 0.001 に変更している。なお、実行不能解が生成された場合は、 $\beta_n = 10^{-N}$ とし、最も大きい β_n となる自然数 N を使用している。

「平均時間削減割合の算出」は、世帯ごとに計算される。まず、OD ペアごとの平均時間削減割合 Ave^w は、その OD ペア間を移動する際の HDV と CAV の平均所要時間差から求める。なお、平均所要時間は、交通量に基づく加重平均としている。世帯ごとの平均時間削減割合は、その世帯が行うトリップごとに得られる Ave^w の平均値である。 $t = 1$ や $q_H^w = 0$ または $q_A^w = 0$ の場合は、 $Ave^w = 0$ としている。

「地域の普及率の算出」は、セントロイドごとに算出される。なお、買替期間は全世帯で 9 年とし、AT を選択した世帯は、{PA・AT} の選択を毎年に行う。また、CNL モデルにおいて、HDV の経路選択に関する θ 及び μ はいずれも 0.5 に設定した。

8. シミュレーション結果と考察

(1) 基本シナリオ

基本シナリオとして、次のような設定を用いた。

- ・車両価格 (PH, PA) : 全世帯で共通。アンケートの新車購入価格の平均値(302 万円)を参考に、300 万円。
- ・キロ当たり費用 : 全世帯で共通。PH は、アンケートを参考に、16.96 円/km。PA は、電気自動車 (EV) を仮定し、3.4 円/km。これは、EV はより確実な制御が可能とされ³⁰⁾、CASE の背景からも EV で展開される可能性が高いためである。AT は、180 円/km。
- ・その他 : 相乗り率 0%、AT 待ち時間 5 分、CAV レーンなし、最大経路数 10、 $G = 0.005$ 、 $AS = 1.0$ 、 $VOT_z = 1.0$

得られた経路は、全 OD ペア、HDV・CAV を合計して 4286 経路であった。普及の推移は図-5 である。20 年程度で、PA が 8 割近く普及する結果となった。

1 年目の各保有形態のシェアを見ると、{PH, PA,

AT}={95.3%, 3.9%, 0.8%}であり、1 年目に選択した世帯の選択割合は、それぞれ {PH, PA, AT}={48.5%, 42.7%, 8.8%} である。しかし、全期間を通じて、AT は 1.2% 程度に留まった。これは、AT は、毎年保有形態選択し、PA への流出が大きいためである。

図-6 は、HDV と CAV それぞれの総走行距離の推移、図-7 は、総旅行時間と総 OD 交通量変化率の推移である。総 OD 交通量変化率は、次の式で表され、全世帯が PH である時 (q_0^w) と比較した、OD 交通量の変化率を示す。

$$\text{総 OD 交通量変化率} = \frac{\sum_{w \in W} q_H^w + \sum_{w \in W} q_A^w}{\sum_{w \in W} q_0^w}$$

総 OD 交通量変化率は 1.24 まで上昇し、交通量が増加した。これは、PA は PH より年間走行距離が長くなる傾向があるが、1km 当たりの費用の低下がそれに拍車をかけたためである。また、最終的な総 OD 交通量変化率が 1.24 に対して、最終的な総走行距離が 1 年目の 1.15 倍程度になっているのは、CAV が最適な経路選択を行ったことにより、ネットワークに効率的に配分されているためである。また、総旅行時間は 2 倍程度に増加した。CAV と EV の組み合わせは、混雑を招く可能性がある。

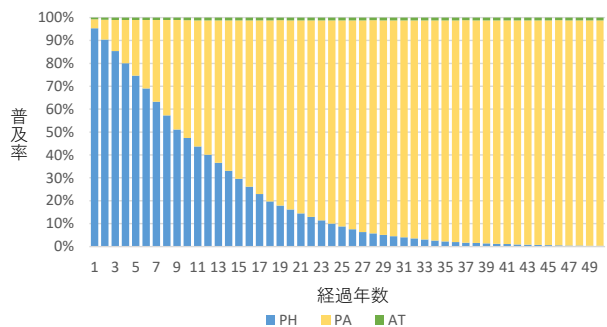


図-5 普及推移 (基本シナリオ)

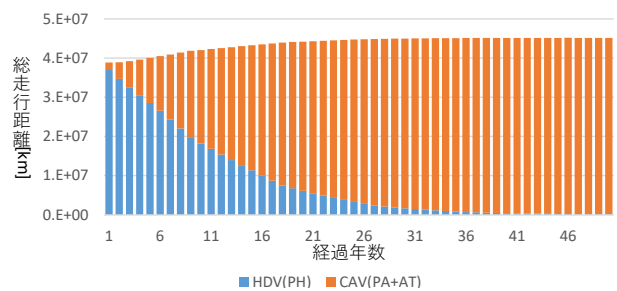


図-6 総走行距離推移

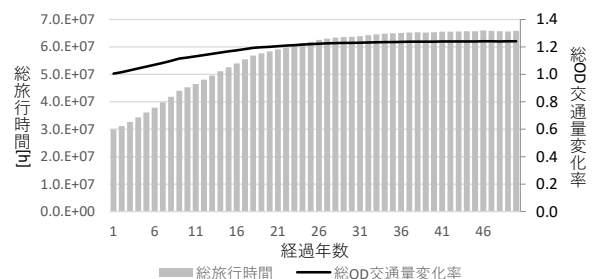


図-7 総旅行時間と総 OD 交通量変化率の推移

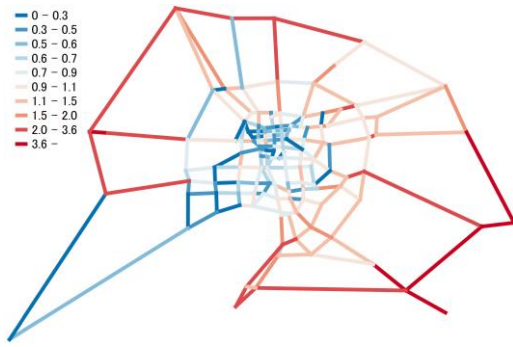


図-10a $(v_{a,H} + v_{a,A})/Q_a$ (30年目)

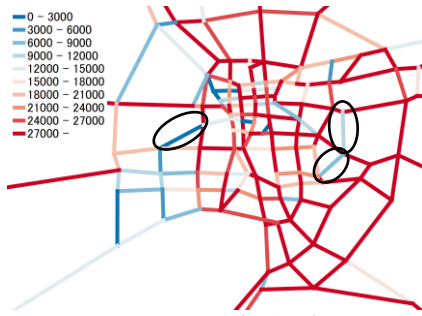


図-10b $v_{a,A}$ (30年目)

表-4 CAV 普及率と時間削減, 高齢者を含む世帯割合

地域	CAV 普及率	時間削減 割合平均	後期高齢者 世帯割合
緑区 15	71.1%	-2.0%	12.9%
小牧 19	70.8%	-3.3%	16.4%
安城 24	70.8%	0.0%	17.1%
熱田区 9	70.7%	-0.7%	16.0%
春日井 20	70.7%	-0.9%	15.3%
知多 22	70.6%	-0.5%	15.9%
天白区 16	70.6%	-1.2%	11.8%
一宮 18	70.6%	-1.3%	18.2%
名東区 14	70.6%	-2.1%	13.9%
豊田 23	70.5%	-0.2%	16.0%
東区 2	70.4%	-0.8%	14.7%
四日市 25	70.4%	-1.1%	18.4%
中川区 10	70.3%	-0.5%	14.6%
中区 3	70.2%	-0.8%	17.7%
中村区 8	70.2%	-0.5%	17.0%
港区 11	70.1%	-0.3%	15.6%
北区 6	70.0%	-0.6%	19.6%
千種区 1	70.0%	-0.6%	18.0%
守山区 13	70.0%	-0.5%	14.9%
南区 12	69.9%	-0.6%	15.5%
昭和区 4	69.9%	-0.5%	18.1%
津島 17	69.9%	-0.4%	20.4%
瀬戸 21	69.8%	-3.7%	26.1%
西区 7	69.7%	-0.6%	19.6%
瑞穂区 5	69.0%	-0.4%	20.3%

のシェア (%) は{PH, PA, AT}={ 95.3, 3.9, 0.8}である. 図-10a は, 30 年目の交通容量に対する交通量, 図-10b は CAVの交通量 ($v_{a,A}$ (30年目)) である. なお, 30年目のシェア (%) は{PH, PA, AT}={ 4.5, 94.2, 1.2}である. 1年目の HDV と 30年目の CAV は同程度の普及率である. 前述のように, $v_{a,H}$ (1年目) と比較して, $v_{a,A}$ (30年目) では, PA の影響で 30年目の全体の交通量が増えているが, 図-10bの○で囲ったリンクのように, 一部のリンクでは, 交通量が減少している. これは, CAV が確定的な配分により, 混雑を避けて配分されたためであると考えられる. 実際に, 交通量が減少した 31 リンクの車線数平均は 4.38 であり, 交通量が増加したリンクの車線数平均 5.17 よりも小さい.

また, 地域別の時間削減割合と普及率の関係を見ていく. 地域別に CAV 普及率を見たときに, CAV が最も普及している地域と最も普及していない地域の CAV 普及率の差が最大となるのは, 15年目で 2.03%の差となる. 表-4 は 15年目の始点別の時間削減割合の平均と CAV 普及率, また後期高齢者を含む世帯の割合である. なお, 表-4 は CAV 普及率が高い順に並び変えている. 時間削減割合の平均が-1.0%を下回るような, CAV の旅行時間が HDV と比較して短い地域は, 時間削減割合を太字にしている. そのような地域のほとんどは, CAV が普及している地域であることが分かる. しかし, 1.0%を超えていても「瀬戸 21」は低い普及率であった. これは, 後期高齢者を含む世帯が多いためである. PA の離散選択モデルの効用関数には, 後期高齢者を含む世帯に負の効用が付与されるため, CAV の普及率が低くなった.

(2) 自動運転優遇シナリオ

自動運転車を優遇するシナリオを考える. 近年, 環境・エネルギー性能に優れた自動車は補助金を受けることができる. 自動運転車は, 社会的恩恵が大きく, 補助金が出るのが考えられる. ここでは PA に 50 万円の補助金が出ると想定し, PH の車両価格は 300 万円, PA は 250 万円とする. また, ARK INVEST®の予測に従い, タクシー運賃を現在の 1/8 として, 45 円/km を想定する.

さらに, 6車線以上道路に CAV レーンが設置されるとする. CAV レーンは, リンクに設置する場合, リンクは, 仮想的に一般レーンを想定したリンク a と, CAV レーンを想定したリンク b に分割され, 容量も分割される. CAV レーンは, 名古屋市内に多く設置される. G は 0.05 とした. それら以外は基本シナリオと同様の条件である. 普及の推移は図-11 である. 得られた経路は 7598 経路であった. CAV のシェアが基本シナリオと比較して, 50 年間の平均で 0.75%高い結果となった.

動時間が手動運転車よりも短い地域ほど、自動運転車が普及しやすい傾向が確認された。また、自動運転専用レーンは、手動・自動を問わず旅行時間を増大させる恐れがあり、自動運転専用レーンの設置に注意が必要である可能性を示した。

本研究の課題としては、自動運転車シェアカーへの移行は、公共交通からが多いとされている⁹⁾が、本研究では他の交通手段選択を考慮していない。また、推定した離散-連続モデルは、世帯構成員の嗜好や、自家用車を複数台所有する世帯、現時点で自家用車を保有していない世帯を考慮できない。さらに、保有形態が手動運転自家用車から他の形態へ変化した時、交通量だけが変化するとしたが、自動運転自家用車であれば、運転の負担が少なく、より行動範囲が広がる可能性がある。自動運転タクシーであれば、自家用車と比較してキロ当たりの費用が高いため、狭い範囲で行動することが考えられ、目的地的変化も考えられる。また、シミュレーションでは経路数に制限を設け、また収束条件も緩和し、加齢を考慮していない点が改善点として挙げられる。そのほか、過去の選択が影響しない点や、離散モデルに使用した MNL モデルでは選択肢間は独立であるとしている (IIA 特性) が、自家用車や自動運転の観点から独立ではないため、IIA 特性を緩和できるモデルの利用が望ましい。

謝辞：本研究は、本研究は、JSPS 科研費 19H02260 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 李春利：自動車の未来と中国—CASE はどこへ向かうのか—, 国際ビジネス研究第 13 巻第 2 号, p.25-45, 2021.
- 2) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (IT 総合戦略本部)：官民 ITS 構想・ロードマップ, pp.18, 2021.
- 3) 辻野照久, 坪谷剛：自動運転自動車の研究開発動向と実現への課題, 科学技術動向 2013 年 1-2 月号, pp.9-15, 2013.
- 4) Van den Berg, V. A. C. and Verhoef, E. T.:Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity, Transportation Research Part B, Methodological, Vol.94, pp. 43-60, 2016.
- 5) Fagnant, D. J. and Kockelman, K.:Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, Transportation Research Part A, Policy and Practice, Vol.77, pp. 167-181, 2015.
- 6) 山本真之, 梶大介, 服部佑哉, 山本俊行, 玉田正樹, 藤垣洋平：自動運転車によるシェアカーの普及に関する研究, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.1324-1327, 2016.
- 7) 近藤恭志郎, 金森亮, 山本俊行, 森川高行：鉄道端末交通としての自動運転シェアリングサービスの利用意向分析, 情報処理学会研究報告, Vol.2020-ITS-80, No.7, pp.1-8, 2020.
- 8) ARK INVEST:BIG IDEAS 2022, pp.101-107, 2022.
- 9) Shladover, S., Su, D., Lu, X, Y.:Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2324(-1), 2012.
- 10) 三輪富生, 山本俊行, 森川高行：駐車場所—駐車時間選択行動への離散-連続選択モデルの適用と駐車料金施策分析, 日本都市計画学会都市論文集, No.42(1), pp.34-41, 2008.
- 11) 福田大輔, 力石真：離散-連続モデルの研究動向に関するレビュー, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.69, No.5(土木計画学研究・論文集第 30 巻), I_497-I_510, 2013.
- 12) Nguyen, N.T., Miwa, T., Morikawa, T.:Asian Transport Studies, Volume 4, Issue 3(2017), pp.499-517, 2017.
- 13) 福田大輔, 渡邊健, 屋井鉄雄：利用者間の相互依存性を考慮した ETC 車載器普及モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, no.22, pp.463-472, 2004.
- 14) Wang J., Peeta, S., He X., :Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles, Transportation Research Part B, Methodological, Vol.126, pp. 139-168, 2019.
- 15) Lee, L.F.:Notes and comments generalized econometric models with selectivity, Econometrica, 51 (2), pp.507-512, 1983.
- 16) Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N.:Continuous Univariate Distributions. New York, John Wiley & Sons Inc, 1994.
- 17) Trivedi, P.K. and Zimmer, D.M.:Copula Modeling: An Introduction for Practitioners. Boston, MA, Now Publishers Inc, 2005.
- 18) Nelsen, R.B.:An Introduction to Copulas. Springer, 2006.
- 19) 桑野将司, 藤原章正, 塚井誠人, 張峻屹, 岩本真由：コンピュータを用いた自動車保有期間と走行距離の同時決定モデルの開発, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.1, pp.54-63, 2010.
- 20) Bhat, C.R. and Eluru, N.:A copula-based approach to accommodate residential self-selection effects in travel behavior modeling, Transportation Research Part B, Methodological, 43 (7), pp.749-765, 2009.
- 21) Vovsha, P. and Bekhor, S.:Link-Nested Logit Model of Route Choice: Overcoming Route Overlapping Problem, Transportation Research Record, Vol.1645, No.1, pp. 133-142, 1998.
- 22) Prashker, J. N. and Bekhor, S.:Stochastic User-Equilibrium Formulations for Extended-Logit Assignment Models, Transportation Research Record, Vol.1676, pp. 145-152, 1999.
- 23) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と分析-, pp.115, 丸善, 2000.
- 24) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編利用者均衡配分の適用に向けて, 丸善, 72p, 2003.
- 25) Nagurney A.:Network economics: a variational Onequality Approach, Springer Science & Business Media, 2013.

- 26) Damberg, O., Lundgren, J. T., Patriksson, M.: An Algorithm for The Stochastic User Equilibrium Problem, Transportation Research part B, Vol. 30(2), pp. 115-131, 1996.
- 27) 国土交通省：先進安全自動車（A S V）推進計画 報告書－第 6 期 A S V 推進計画における活動成果について－本編, pp.39-131, 2021.
- 28) 溝上章志, 松井寛, 可知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集 第 401 号, 1V-10, pp.99-107, 1989.
- 29) 総務省統計局：令和 2 年度国勢調査, 2021.
- 30) 目代武史, 岩城富士大：パワートレイン電動化へ向けた技術選択と不確実性への対応戦略, 研究 技術計画, Vol.32, No.4, pp.409-437, 2017.

(Received March 6, 2023)
(Accepted,)

PREDICTION OF AUTONOMOUS VEHICLE DIFFUSION CONSIDERING INTERACTIONS WITH MANUAL DRIVING VEHICLES

Daiki GOTO, Tomio MIWA and Takayuki MORIKAWA

Autonomous vehicles are expected to become widely used. It is not clear whether Autonomous vehicles will be widely used as private cars or taxis. This study predicts the ownership and usage of Autonomous vehicles when they become widely used. A system combining a discrete-continuous model and traffic assignment was constructed and applied to a network covering the city of Nagoya. The results indicate that 80% of all vehicles will be spread as Autonomous vehicles for private cars in about 20 years.