自動運転車の普及が将来の都市構造へ与える影響の定量的分析：立地均衡モデルの適用

杉本　達哉[1]・杉浦　聡志[2]・髙木　朗義[3]

[1]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8）
E-mail:tt-sugimoto@yachiyo-eng.co.jp

[2]正会員　北海道大学准教授　工学研究院北方圏環境政策工学部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）
E-mail:sugiura@eng.hokudai.ac.jp

[3]正会員　岐阜大学教授　工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸１番１）
E-mail:a_takagi@gifu-u.ac.jp

現在，我が国は人口減少や都市の低密度化を背景としてコンパクト・プラス・ネットワークのまちづくりを進めている．一方，近年の技術革新に伴い，新たな交通手段として自動運転車の研究・開発が進められており，その実用化が期待されている．既往研究等では，自動運転の普及が都市構造へ与える影響について指摘があるものの，それを定量的に分析した研究はほとんどない．そこで本稿では，自動運転車の普及が都市構造へ与える影響を定量的に分析するため，岐阜都市圏を対象として2040年までのシミュレーションを実施した．計算結果から，自動運転車の普及により，空間的に交通利便性が均一となった場合，世帯の立地は郊外へ分散することを示した．これに伴い，行政コストは増加し，DID地区相当のゾーンも郊外へ分散することを確認した．

Key Words : *self-driving car, urban structure, future population distribution, location equilibrium, compact city*

1. はじめに

現在，我が国は人口減少や都市の低密度化を背景としてコンパクト・プラス・ネットワークのまちづくりを進めている[1)]．一方で，近年の技術革新に伴い，新たな交通手段として自動運転車の研究・開発が進められており，その実用化が期待されている．例えば，自動運転車の普及により道路交通に関する多くの課題が解決されることを期待し，政府はロードマップを策定している[2)]．そこでは2020年を自動運転の目標年次として，目標に向けた取組みの明確化や持続可能なビジネスモデルの検討等を行っている．また，民間企業においても，例えばトヨタ自動車が自動運転車の事業展開を発表する等[3)]，自動運転車の実用化に向けた動きが進行している．

自動運転車の普及は，日常の道路交通だけでなく，人々の居住選択にも影響を及ぼすと考えられる．自動運転車の利用により移動中の活動自由度が向上する．これにより，移動時間に対する抵抗感が大きく低減することで，人々は居住地に依らず同程度の交通利便性を享受できる可能性がある．このように，空間的に交通利便性が均一となった場合，「①人々の居住傾向が変わり都市構造は分散する」，「②都市構造は変わらない」の2つの方向性が考えられる．その方向性を見定めることができれば，人々の居住に関する満足度や行政コスト等を踏まえた，より望ましい社会資本整備を検討することができると考える．

上記のような，自動運転車の普及が都市構造へ与える影響については，内閣府の自動運転車に関する検討[4)]の中で，社会的・産業的インパクトの一項目としてインフラ・都市構造が挙げられる等，具体的な議論が近年されつつあるものの，定量的な議論まで至っていない．

そこで本稿では，自動運転車の普及を前提とした都市の社会資本整備の検討に資する情報提供を目的として，自動運転車の普及が都市構造へ与える影響について，定量的な分析を実施する．具体的には，岐阜都市圏を対象に，時系列を考慮した立地均衡モデルを用いて，自動運転車の普及により空間的に交通利便性が均一となった場合の将来世帯分布を予測し，その結果について考察する．

2. 本稿の位置づけ

まず，都市構造に限定せず，自動運転車の普及が社会全般に与える影響を概観する．既往研究等[4)~11)]に基づき，その影響は**表-1**の内容に概ね整理できる．このうち，都市構造に関わる項目として，人々が居住環境で重要としている内容[12)]等を踏まえると，交通費用や交通行動が該当する．本稿では，これらをまとめて交通利便性として取り扱うこととする．

次に，自動運転と都市構造の関係性について，定量的な分析がされている既往研究として，Webアンケート調査等から都市属性ごとの自動運転の導入・普及に伴う影響を分析した香月・川本・谷口（2016）[13)]，仮想的に設定した都市条件の下，自動運転車の普及条件を分析した紀伊ら（2017）[14)]，都市構造がシェア型自動運転車の運行効率に与える影響を分析した東・香月・谷口（2017）[15)]等がある．これらはいずれも都市構造を与件とした分析であり，本稿で着目する事象とは異なる．

一方で，自動運転車の普及が都市構造へ与える影響について定量的に分析したものとして，香月ら（2018）[16)]がある．ここでは，自動運転車の普及による土地利用への影響として駐車時空間を取り上げ，その削減効果について分析している．しかしながら，分析では交通行動変化に着目しているものの，立地行動を考慮した分析となっていない．

本稿は，自動運転車の普及を交通利便性の変化と捉え，交通利便性の項を効用関数に与えた立地均衡モデルにより，立地への影響を定量的に分析する点に特徴がある．

表-1　自動運転車の普及が社会へ与える影響[4)~11)]

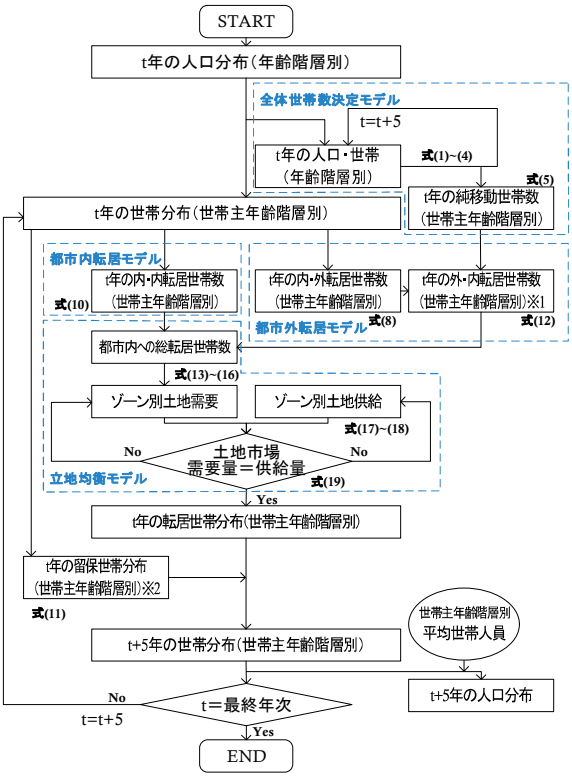
大項目	小項目	内容
交通	・交通費用	・運行コスト,物流・流通コストの縮減
	・交通混雑	・交通流の整流化や車間距離減少による交通容量の拡大
	・交通行動	・移動のしやすさ改善 ・公共交通利用促進
	・交通安全	・人的交通事故の最小化
交通施設	・街路・道路空間	・効率的な空間利用と交通容量の増加
	・交通結節点	・駅前広場空間の最適な利用
土地利用	・駐車場	・駐車場の縮小，平準化
経済 ：消費面	・自動車の価値	・自動車保有台数減少 ・シェアリングの普及
	・移動中の消費	・移動時間中のサービス享受
経済 ：生産面	・生産性	・交通費用削減による生産コスト減少 ・ドライバー不足解消による生産増
	・産業構造	・自動運転車両所有のカーシェア事業者の台頭
環境	・大気汚染	・排出ガスの低減
	・エネルギー消費	・短車間走行による燃費改善
情報	・サイバーセキュリティ	・個人情報の流出の危険性増大

3. モデルの構築

(1) モデルの概要

本モデルは先行研究[17)]で構築したモデルをベースとしており，全体構成は**図-1**のとおりである．世帯総数は全体世帯数決定モデルにより算出する．世帯分布は，転居意思決定モデル（都市内転居モデル・都市外転居モデル），立地均衡モデルにより算出する．モデル構築にあたっての仮定を以下に示す．

- ✧ 対象圏域は同一都市圏を構成する市町村群として，複数のゾーンに分割されている．
- ✧ 各ゾーン内の施設へのアクセシビリティや地代等の価格は均質とする．
- ✧ 経済主体は，世帯属性別（世帯主年齢階層別）の「家計」と，「不在地主」の2主体とする．
- ✧ 家計は，都市外転居の意思決定を行った上で，都市内転居の意思決定を行う．また，都市内の転居先選択に際し，効用最大化行動を行う．
- ✧ 不在地主は利潤最大化行動を行う．
- ✧ 市場は土地市場のみを考える．
- ✧ 対象圏域内の転居先は立地均衡モデルにより決定される．



※内・内転居世帯数：対象圏域『内』に居住する世帯のうち，対象圏域『内』へ転居する世帯数．内・外転居世帯数：対象圏域『内』に居住する世帯のうち，対象圏域『外』へ転居する世帯数．外・内転居世帯数：対象圏域『外』に居住する世帯のうち，対象圏域『内』へ転居する世帯数．

※1：純移動世帯数と内・外転居世帯数の合計

※2：世帯分布から内・内世帯数および内・外世帯数を除いた分布

図-1　モデルの全体構成

(2) 全体世帯数決定モデル

全体世帯数は，コーホート要因法による推計人口に世帯主率を乗じて世帯主年齢階層別に推計する．人口を式(1)~(3)，総世帯数を式(4)，純移動世帯数を式(5)に示す．

$$POP_{t+5}^{w+5} = POP_t^{w,m} \cdot (S_t^{w,m} + M_t^{w,m}) + POP_t^{w,f} \cdot \left(S_t^{w,f} + M_t^{w,f}\right) \quad (1)$$

ただし，w=0（0～4歳）の場合，

$$POP_t^{w,m} = \sum_\mu POP_t^{\mu,f} \cdot f_t \ \cdot \frac{L_t}{100+L_t} \quad (2)$$

$$POP_t^{w,f} = \sum_\mu POP_t^{\mu,f} \cdot f_t \ - POP_t^{w,m} \quad (3)$$

$$N_t^w = POP_t^{w,m} \cdot \dot{N}_t^{w,m} + POP_t^{w,f} \cdot \dot{N}_t^{w,f} \quad (4)$$

$$G_t^w = POP_t^{w,m} \cdot M_t^{w,m} \cdot \dot{N}_t^{w,m} + POP_t^{w,f} \cdot M_t^{w,f} \cdot \dot{N}_t^{w,f} \quad (5)$$

ここで，t：期，w：年齢階層（5 歳階級別），m：男性，f：女性，POP：人口，M^w：年齢階層wから年齢階層$w+5$にかけての純移動率，S^w：年齢階層wから年齢階層$w+5$にかけての生残率，L：出生性比，N：世帯数，$\dot{N}$：世帯主率，f：子ども女性比，G：純移動世帯数.

(3) 転居意思決定モデル

a) 都市外転居モデル

都市外への転居（内・外転居）は転居行動を「転出する・転出しない」の二者択一行動と捉え，その確率は二項分布に従うと仮定し，式(6)，(7)のように定式化する．

$$Prob\left(E_{j,t}^w \middle| \lambda_{j,t}^w\right) = {}_{N_{j,t}^w}C_{E_{j,t}^w} \left(\lambda_{j,t}^w\right)^{E_{j,t}^w} \left(1-\lambda_{j,t}^w\right)^{N_{j,t}^w - E_{j,t}^w} \quad (6)$$

$$\log\left\{\frac{\lambda_{j,t}^w}{1-\lambda_{j,t}^w}\right\} = \varphi(Q^{w,n}) \quad (7)$$

ここで，$Prob\left(E_{j,t}^w \middle| \lambda_{j,t}^w\right)$：年齢$w$の世帯主における市町村$j$全体での$t$年から$t$+5 年にかけての都市外への転居率，$E$：都市外への転居数，$\lambda$：都市外への転居率，$\varphi(\cdot)$：リンク関数，$Q^n$：市町村ダミーのベクトル.

よって，内・外転居世帯数は式(8)のとおりとなる．

$$N_{out,i,t}^w = N_{i,t}^w \cdot \bar{S}_t^w \cdot \lambda_{j,t}^w \quad (8)$$

ここで，i：ゾーン，N_{out}：内・外転居世帯数，$\bar{S}$：世帯自然増減率（世帯の新規発生および消滅が生じる割合）．

b) 都市内転居モデル

都市内への転居（内・内転居）は，式(9)のように定式化する．

$$P_{i,t}'^w = \frac{1}{1+\exp(V_{i,t}^w + \tau_i^w)} \quad (9)$$

ここで，$P_i'^w$：ゾーン i の世帯主年齢階層 w の世帯が内・内転居（都市内転居）を行う確率，V：間接効用，τ：間接効用以外の地域（ゾーン）の魅力度を示す項目．

よって，内・内転居世帯数N'は式(10)のとおりとなる．

$$N'^w_{i,t} = N_{i,t}^w \cdot \bar{S}_t^w \left(1-\lambda_{j,t}^w\right) \cdot P_{i,t}'^w \quad (10)$$

c) 留保世帯数および外・内転居世帯数

式(8)，式(10)を踏まえ，留保世帯数$\hat{N}$は式(11)となる．

$$\hat{N}_{i,t}^w = N_{i,t}^w \cdot \bar{S}_t^w - \left(N'^w_{i,t} + N_{out,i,t}^w\right) \quad (11)$$

また，都市外から都市内への転居（外・内転居）世帯数N_{in}は，内・外転居世帯数と純移動世帯数の合計から式(12)のとおりとなる．

$$N_{in,t}^w = G_t^w + \sum_i N_{out,i,t}^w \quad (12)$$

(4) 立地均衡モデル

都市内への転居（内・内転居と外・内転居の和）世帯数の転居先は，立地均衡モデルによる土地市場の需給一致から決定される．立地均衡モデルについて以下に示す．

a) 世帯の行動

家計の行動は，所得制約の下，交通利便性を考慮して効用を最大化するよう合成財，土地の消費を行うとして定式化する（式(13)）．

$$V_{i,t}^w\left(U_{i,t}^w\right) = \max\left[U_{i,t}^w\left(x_i^w, b_{i,t}^w, ACC_i^w\right)\right] \quad (13a)$$

$$\text{s.t.} \quad px_i^w + R_{i,t}b_{i,t}^w = I_i^w \quad (13b)$$

ここで，$V(\cdot)$：間接効用水準，$U(\cdot)$：効用水準，x：合成財需要量，b：土地需要量，ACC：交通利便性，p：合成財価格（=1），R：地代，I：所得.

上記の最大化問題を解くと，各需要関数が得られ，それを式(13)に代入すると間接効用関数が得られる．

$$V_{i,t}^w = V_{i,t}^w\left(I_i^w, R_{i,t}, ACC_i^w\right) \quad (14)$$

家計の立地選択行動は，上記の間接効用関数を用いて以下の最大化問題により定式化できる．

$$e_t^w = \max_{P_{i,t}^w}\left[\sum_i P_{i,t}^w V_{i,t}^w - \frac{1}{\theta^w}\sum_i \left(P_{i,t}^w \ln P_{i,t}^w\right)\right] \quad (15a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_i P_{i,t}^w = 1 \quad (15b)$$

ここで，e：世帯の立地選択における最大期待効用値，θ：ロジットパラメータ，P_i^w：世帯主年齢階層wの世帯がゾーンiを選択する確率.

上記の最大化問題を解くと，立地選択確率が以下のロジットモデルとして得られる.

$$P_{i,t}^w = \frac{\exp\{\theta^w \cdot (V_{i,t}^w + \tau_i^w)\}}{\sum_i \exp\{\theta^w \cdot (V_{i,t}^w + \tau_i^w)\}} \tag{16}$$

b) 不在地主の行動

不在地主の行動は，家計からの地代収入と提供する土地の維持管理費用からなる利潤最大化行動として定式化する.

$$\pi_{i,t} = \max_{K_{i,t}} [R_{i,t}K_{i,t} - C(K_{i,t})] \tag{17a}$$

$$\text{s.t.} \quad C(K_{i,t}) = -\sigma_i \overline{K}_{i,t} \ln\left(1 - \frac{K_{i,t}}{\overline{K}_{i,t}}\right) \tag{17b}$$

ここで，π：利潤，K：土地供給量，$C(\cdot)$：不在地主の費用関数，$\overline{K}$：土地供給可能量，σ：パラメータ.

上記を解くと以下の土地供給関数が得られる.

$$K_{i,t} = \left(1 - \frac{\sigma_i}{R_{i,t}}\right)\overline{K}_{i,t} \tag{18}$$

c) 均衡条件

t期からt+5 期にかけての土地市場の均衡条件は式(19)となる（D_t：t期の土地需要量）.

$$\sum_w [D_{i,t}^w + \dot{b}_{i,t}^w \cdot N_{i,t}^w \cdot (\bar{S}_t^w - 1) + b_{i,t}^w \cdot (\sum_i N'^w_{i,t} + N_{in,t}^w) \cdot P_{i,t}^w - \ddot{b}_{i,t}^w \cdot (N_{out,i,t}^w + N'^w_{i,t})] = \left(1 - \frac{\sigma_i}{R_{i,t}}\right) \cdot \overline{K}_{i,t} \tag{19a}$$

$$\dot{b}_{i,t}^w = \begin{cases} b_{i,t}^w & \text{if } \bar{S}_t^w > 1 \\ D_{i,t}^w / N_{i,t}^w & \text{if } \bar{S}_t^w \le 1 \end{cases} \tag{19b}$$

$$\ddot{b}_{i,t}^w = \begin{cases} \dfrac{D_{i,t}^w + b_{i,t}^w \cdot N_{i,t}^w \cdot (\bar{S}_t^w - 1)}{N_{i,t}^w \cdot \bar{S}_t^w} & \text{if } \bar{S}_t^w > 1 \\ D_{i,t}^w / N_{i,t}^w & \text{if } \bar{S}_t^w \le 1 \end{cases} \tag{19c}$$

4. 実証分析

(1) 対象圏域およびゾーン区分

対象圏域は，**図-2** に示す岐阜都市圏の 10 市町（岐阜市，羽島市，各務原市，山県市，瑞穂市，本巣市，岐南町，笠松町，大野町，北方町）とする.

ゾーンは，対象圏域内の 2 分の 1 地域メッシュ（約 500m メッシュ）のうち，2000 年・2005 年・2010 年のいずれかにおいて，国勢調査上，人口が存在するメッシュを対象とし，2,030 ゾーンとする.

(2) 関数型の特定化

効用関数は式(20)のとおり定式化した．ここで，交通利便性ACCは，目的地までの所要時間とした（$ACC_i^w = \sum_n \beta_n^w \ln T_{n,i}^w$）．目的地は，住生活総合調査の『居住環境に関して最も重要と思う項目』の回答結果から [12]，上位に挙げられているものを参考に「勤務地」，「小・中学校」，「食品スーパー」，「病院」とした.

$$V_{i,t}^w(U_{i,t}^w) = \max[\alpha_x^w \ln x_i^w + \alpha_b^w \ln b_{i,t}^w + \sum_n \beta_n^w \ln T_{n,i}^w] \tag{20a}$$

$$\text{s.t.} \quad p x_i^w + R_{i,t} b_{i,t}^w = I^w \tag{20b}$$

ここで，n：目的地，T：目的地までの所要時間，$\alpha_x, \alpha_b, \beta$：パラメータ（$\alpha_x + \alpha_b = 1$）.

上記の最大化問題を解くと，次の土地需要関数および間接効用関数が得られる.

$$b_{i,t}^w = \frac{\alpha_b^w I^w}{R_{i,t}} \tag{21}$$

$$V_{i,t}^w = \ln I^w - \alpha_b^w \ln R_{i,t} + \alpha_x^w \ln \alpha_x^w + \alpha_b^w \ln \alpha_b^w + \sum_n \beta_n^w \ln T_{n,i}^w \tag{22}$$

(3) 基礎データの設定

モデル構築に用いる基礎データは，先行研究 [17]に準じて作成した．また，今回新たに必要となる交通利便性に関するデータについて，勤務地までの所要時間は，各ゾーンの中心点から勤務地までの直線距離を自動車の平均走行速度で除すことにより設定した．ここでの勤務地は，従業者数分布から，岐阜駅を代表点とした．小・中学校までの所要時間は，各ゾーンの中心点から最寄りの学校までの直線距離を標準歩行速度で除して各々算出し，その平均を設定値とした．食品スーパーと病院は，各ゾーンの中心点から最寄り施設までの直線距離を自動車の平均走行速度で除すことにより設定した．なお，各施設の位置座標データには国土数値情報データ等を使用した.

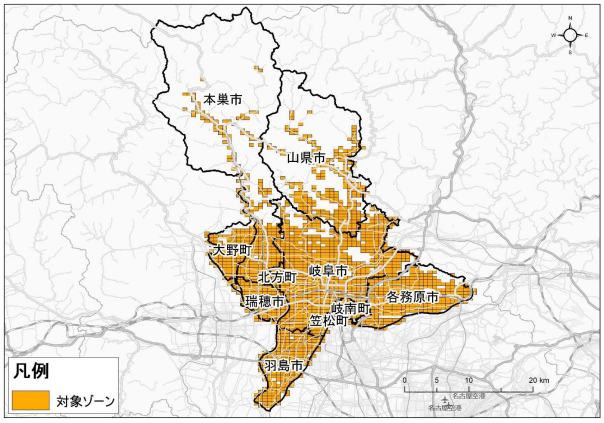


図-2 対象圏域およびゾーン区分

(4) パラメータの推定

モデルのパラメータは，基礎データを用いて，先行研究 [17]の方法に準じて推定を行った．推定結果等を**表-2~4**，**図-3** に示す．各々について，概ね良好な推定結果を得た．

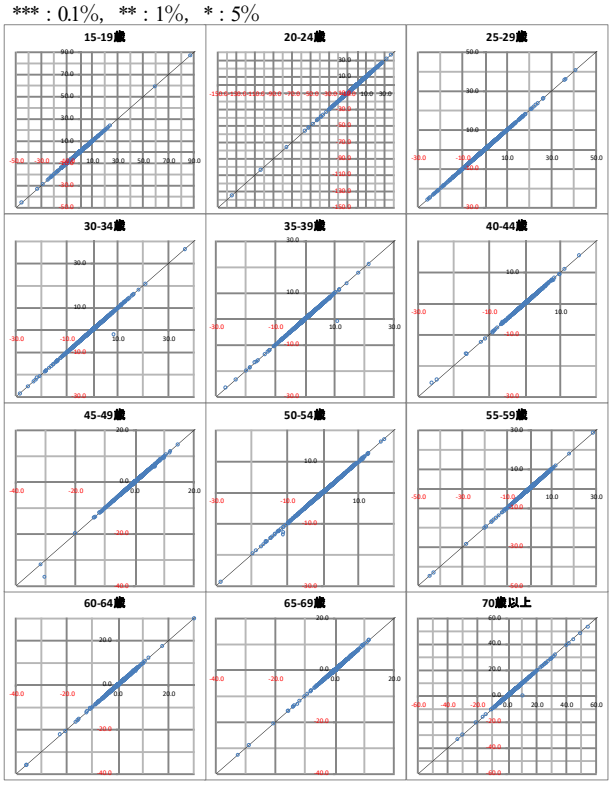
表-2 土地需要パラメータ推定結果

年齢	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44
推定値	0.0133	0.0136	0.0153	0.0184	0.0212	0.0206
t値	55.68	60.52	57.13	61.26	67.40	61.99
R2	0.659	0.678	0.651	0.683	0.722	0.687
年齢	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-99
推定値	0.0193	0.0176	0.018	0.0235	0.0254	0.0253
t値	61.42	62.12	61.43	57.92	59.85	54.59
R2	0.682	0.688	0.683	0.657	0.672	0.629

表-3 交通利便性パラメータ等推定結果

	15-19			20-24			25-29		
	係数	t値		係数	t値		係数	t値	
定数項	-8.824	0.254	***	-10.24	0.177	***	-9.937	0.175	***
勤務地	0.3695	0.105	***	-0.317	0.073	***	-0.363	0.072	***
小中学校	-0.672	0.086	***	-0.919	0.06	***	-0.946	0.059	***
食品スーパー	-0.487	0.11	***	-0.494	0.077	***	-0.487	0.076	***
病院	-0.338	0.107	**	-0.312	0.075	***	-0.327	0.074	***
R2	0.127			0.427			0.451		
	30-34			35-39			40-44		
	係数	t値		係数	t値		係数	t値	
定数項	-10.33	0.17	***	-9.84	0.143	***	-9.87	0.148	***
勤務地	-0.395	0.07	***	-0.473	0.052	***	-0.47	0.053	***
小中学校	-0.788	0.058	***	-0.79	0.052	***	-0.702	0.053	***
食品スーパー	-0.231	0.074	**	-0.302	0.054	***	-0.253	0.056	***
病院	-0.3	0.072	***	-	-	-	-	-	-
R2	0.363			0.355			0.298		
	45-49			50-54			55-59		
	係数	t値		係数	t値		係数	t値	
定数項	-9.851	0.176	***	-9.174	0.22	***	-6.745	0.298	***
勤務地	-0.367	0.063	***	-0.369	0.079	***	-0.734	0.103	***
小中学校	-0.672	0.063	***	-0.567	0.079	***	-0.956	0.104	***
食品スーパー	-0.291	0.066	***	-0.265	0.083	**	-	-	-
病院	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	0.209			0.12			0.122		
	60-64			65-69			70-99		
	係数	t値		係数	t値		係数	t値	
定数項	-7.359	0.283	***	-5.631	0.403	***	-8.595	0.168	***
勤務地	-0.637	0.097	***	-0.813	0.145	***	-0.727	0.058	***
小中学校	-0.811	0.099	***	-0.982	0.145	***	-0.687	0.059	***
食品スーパー	-	-	-	-0.288	0.153		-	-	-
病院	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	0.101			0.109			0.233		

***：0.1%，**：1%，*：5%



※実測値は国勢調査等から設定した基礎データによる値

図-3 2000-2005年のゾーン別純移動数（縦軸：推計値，横軸：実測値）

(5) 再現性の確認

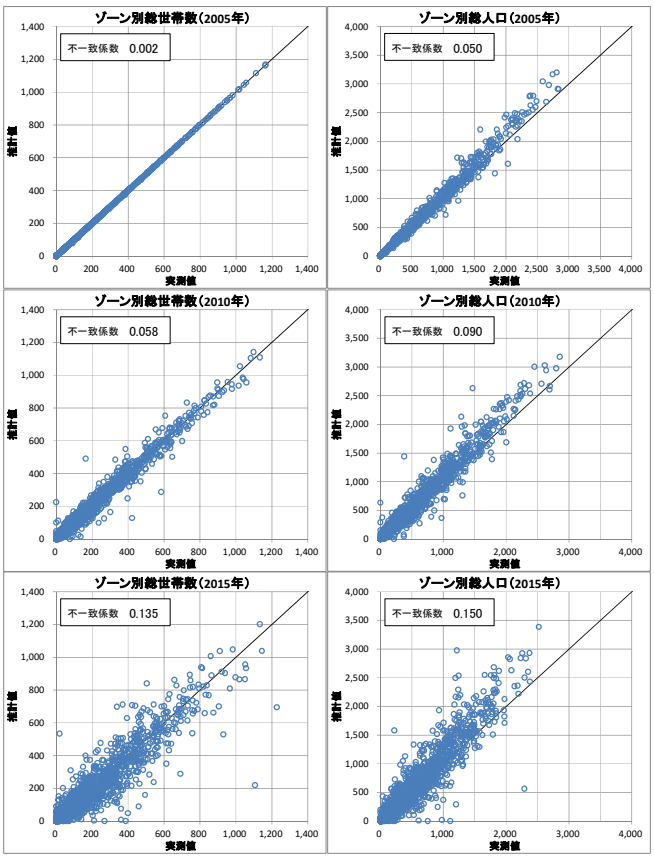
推定した各種パラメータを用いて，2000 年を基準年として 2015 年まで推計を実施し，再現性の確認を行った．推計方法は先行研究 [17]に準じて，各ゾーンの地代を更新することにより土地需給量の均衡計算を行うことでゾーン別人口を推計した．計算は，科学技術計算ライブラリ SciPy のパッケージの一つである optimize を用いて，制約付き信頼領域法により実施した．

推計結果を**図-4** に示す．各時点の不一致係数は，2005 年時点で人口は 0.005，世帯数は 0.002，2010 年時点で，人口は 0.090，世帯数は 0.058，2015 年時点で，人口は 0.150，世帯数は 0.135 となった．以上より，先行研究 [17]と同程度の再現性があることを確認した．なお，ここでのゾーン別人口は，土地需給量の均衡結果として出力されるゾーン別の世帯数に，市町村別・世帯主年齢別の平均世帯人員（2000 年値）を乗じて算出したものである．

表-4 内・内転居数（推計値，実測値）

	世帯主年齢											
	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-
推計値	867	3,458	3,837	3,442	2,439	2,138	2,199	2,036	1,522	1,388	1,115	1,872
実測値	521	3,454	3,838	3,467	2,446	2,101	2,172	1,803	1,430	1,224	960	1,971

※実測値は，国勢調査の年齢別転出人口に世帯主率を乗じて設定した値



※不一致係数 $U = \frac{\sqrt{\frac{1}{l}\sum_i^N(\bar{M}_i - M_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{l}\sum_i^N(\bar{M}_i)^2} + \sqrt{\frac{1}{l}\sum_i^N(M_i)^2}}$．$l$：標本数，$M$：観測値，$\bar{M}$：予測値

図-4 実測値と推計値の比較およびゾーン別の不一致係数（左：世帯数，右：人口）

(6) 数値シミュレーション

a) 条件設定

本稿では，自動運転車が普及することにより大きく変化すると想定される交通利便性に着目し，その影響度合いを変化させたシミュレーションを 2040 年まで実施し，世帯数や行政コスト，人口密度の視点から分析を行う．具体的には，式(20)で定義した効用関数に交通利便性の影響度合いを示すγを追加して式(23)とし，7 ケース（1.0, 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1, 0.0）の計算を行うこととする．

$$U_{i,t}^{w} = \alpha_x^w \ln x_i^w + \alpha_b^w \ln b_{i,t}^w + \gamma \cdot ACC_i^w \qquad (23)$$

ここで，γの低下は，自動運転車の普及で移動時間に対する抵抗感が低減することにより空間的に交通利便性が均一化されることを表現している．なお，$\gamma = 0.0$は自動運転のレベル 5 を想定したものではなく，世帯が交通利便性に対して全く影響を受けない極端な状態を考えたものである．

また，行政コストの算定にあたっては，**図-5** に示す市町村の人口密度と行政コストの関係式を用いる [18]．この関係式は市町村単位での人口密度と歳出の関係を示したものであるため，これに準じて，本稿モデルから出力されるゾーン別の人口を集計して，市町村単位で行政コストを算定する．この際，人口密度の算定に必要な市町村面積は，市町村決算カード [19]の値を使用した．

b) 世帯数の変化

まず，$\gamma = 1.0$について経年的な世帯数の変化をみると（**図-6**），2015 年から 2040 年にかけて，世帯数は岐阜駅周辺を中心に減少し，瑞穂市や本巣市南部，羽島市を中心に増加した．また，市街化区域内とそれ以外（市街化調整区域と都市計画区域外．これ以降，郊外と呼ぶ）で変化数を集計すると，**表-5** より市街化区域内で約 7,700 世帯減少，郊外で約 1,200 世帯増加となり，経年的な傾向として世帯立地が郊外へ分散することを確認した．

$\gamma = 0.0$について経年的な世帯数の変化をみると（**図-7**），$\gamma = 1.0$と概ね同様の傾向を示したが，本巣市北部や山県市等が増加を示す等の違いもみられた．また，増加・減少の度合いがより顕著となっており，**表-6** に示す市街化区域・郊外別の世帯数変化の集計値でもそれを確認できる．

また，2040 年時点で，$\gamma = 0.0$と$\gamma = 1.0$の世帯数変化をみると，**表-7** のとおり，市街化区域において約 23,000 世帯の減少となった．

次に，各ケースについて，対象圏域全体の世帯数に対する市街化区域内の世帯数の割合に着目して，経年的な変化をみると（**図-8**），いずれのケースにおいても割合は低下する結果となった．若干ながら，低下の度合いが経年的に小さくなっているのは，市街化区域内の経年的

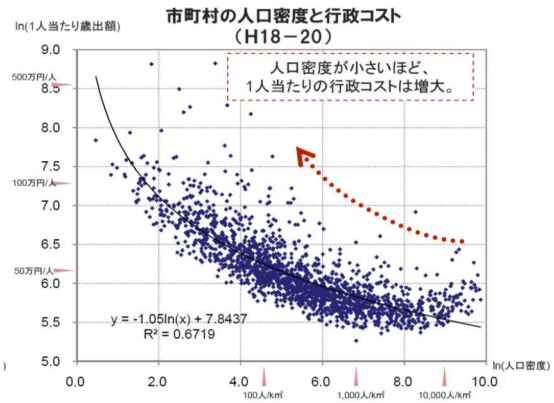


図-5 市町村の人口密度と行政コスト[18]

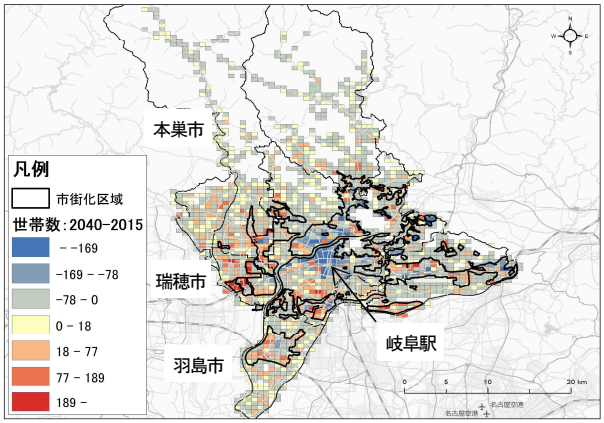


図-6 $\gamma = 1.0$での世帯数の経年変化分布（2040年 - 2015年）

表-5 $\gamma = 1.0$での世帯数の経年変化（2040年 - 2015年）

	減少最大	増加最大	平均	合計
市街化区域	−380	547	−13	−7,695
郊外	−145	263	1	1,247

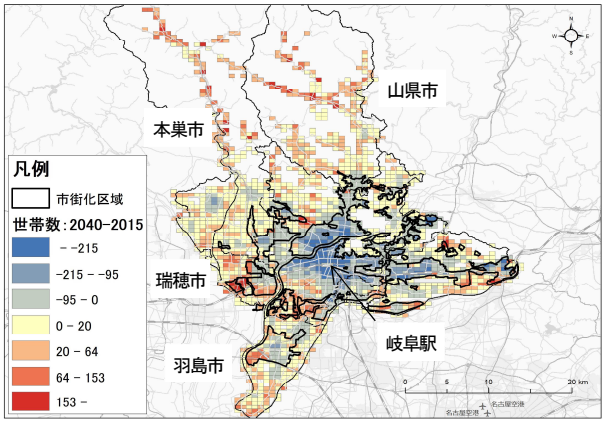


図-7 $\gamma = 0.0$での世帯数の経年変化分布（2040年 - 2015年）

表-6 $\gamma = 0.0$での世帯数の経年変化（2040年 - 2015年）

	減少最大	増加最大	平均	合計
市街化区域	−443	362	−51	−31,057
郊外	−180	304	17	24,609

表-7 2040年時点の世帯数の比較（$\gamma = 0.0$ - $\gamma = 1.0$）

	減少最大	増加最大	平均	合計
市街化区域	−434	410	−39	−23,362
郊外	−203	369	16	23,362

な世帯数の減少に伴って，市街化区域内の地代が相対的に低下したことで，同区域内の立地選択確率が上昇したためと考えられる．また，各ケース間を比較するとγが低い（交通利便性の影響度合いが低下する）ほど，市街化区域内の世帯の割合は低下（郊外へ分散）する結果となった．

自動運転車の普及が都市構造へ与える影響として，「①居住地の選択肢が広がるために居住が郊外へ分散する方向性」，「②現状の居住地でより利便性が得られるためにその居住地に留まる現状維持の方向性」の 2 つの可能性を想定していた．そのような中で，今回のシミュレーションでは，郊外への立地の傾向が強まる結果となった．この要因の一つとして，対象とした岐阜都市圏において，現状（2000 年~2005 年）の世帯立地が分散基調であったことによる影響が考えられる．

c) 行政コストの変化

行政コストについて，$\gamma = 0.0$~0.9と$\gamma = 1.0$との差分を**図-9** に示す．全てのケースにおいて，行政コストは$\gamma = 1.0$よりも増加する結果となり，$\gamma = 0.0$では2040年時点で約 60 億円／年の増加となった．これは，交通利便性の変化により人口密度が高まった市町村の方が，人口密度が低くなった市町村よりも，一人あたり歳出額の算定値が高くなったためである．また，γが低下する（交通利便性の影響度合いが低下する）ほど，行政コストの増加の度合いは大きくなった．これは交通利便性の影響度合いが低下することで，行政コストとして非効率な人口密度の低いゾーンへの立地が促進したためである．

d) 人口密度の変化

c)を踏まえて，2040 年時点の人口密度について$\gamma = 0.0$のケースと$\gamma = 1.0$の差分をみると（**図-10**），岐阜駅を含む岐阜市中心部の人口密度が低下し，本巣市北部や山県市北部といった郊外の人口密度が高まった．

さらに，$\gamma = 0.0$と$\gamma = 1.0$について，2040 年時点の人口密度から 4,000 人／km^{2}以上のゾーン（DID 水準）を抽出すると**図-11** のとおりとなった．$\gamma = 0.0$と$\gamma = 1.0$に共通する箇所（灰色）は主に 2015 年時点の DID 地区内だが，瑞穂市や各務原市等，DID 地区外にも存在を確認した．$\gamma = 1.0$のみの箇所（赤色）は主に岐阜市中心部の DID 地区内であり，また，$\gamma = 0.0$のみの箇所（青色）は市街化区域から離れた郊外にその存在を確認した．以上より，交通利便性の影響度合いが低下することで，市街地の DID 地区が縮小し，郊外への分散傾向が強まる結果を得た．

前述の行政コストの結果から言えば，総論として，交通利便性の影響度合いの低下はコスト増加の要因となる．この際，行政コストを低減させる方策として，郊外においてある程度集約化させることが考えられる．このとき，$\gamma = 0.0$で示された郊外の DID 地区相当のゾーンには，交通利便性以外の立地選択要因の存在が想定され，居住の効用と行政コストの低減の両立に向けた，郊外部での集約核を検討する際に参考となると考える．

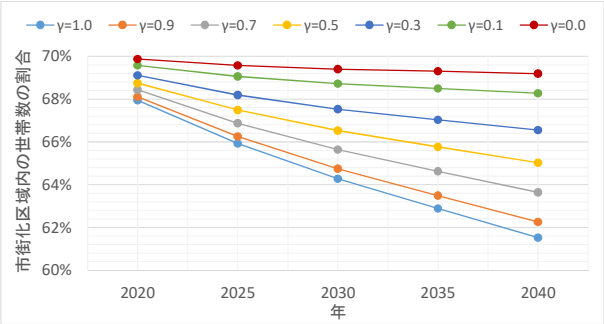


図-8 市街化区域内の世帯数の割合（2020年～2040年）

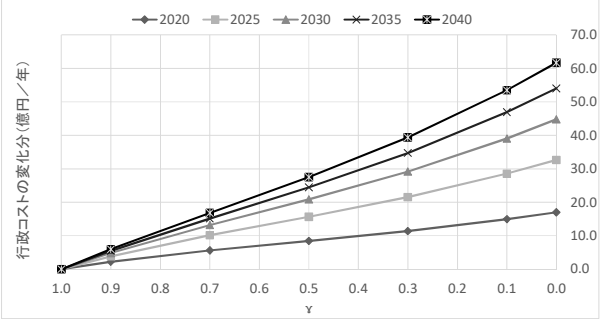


図-9 行政コストの比較（$\gamma = 0.0$~0.9 - $\gamma = 1.0$）

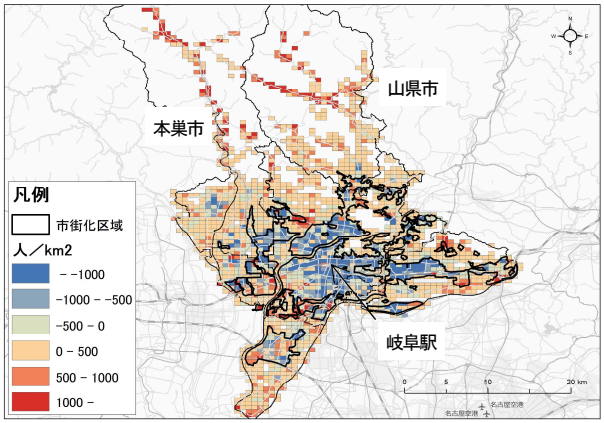


図-10 2040年時点の人口密度変化（$\gamma = 0.0$ - $\gamma = 1.0$）

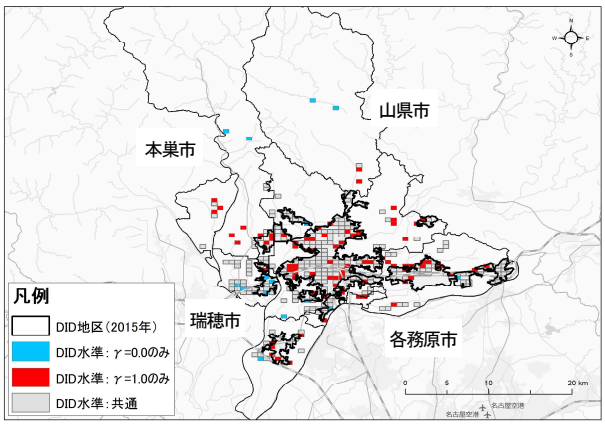


図-11 2040年時点の4,000人／m^2（DID地区相当）のゾーン

6. おわりに

本稿では，自動運転車の普及が都市構造へ与える影響を定量的に分析するため，岐阜都市圏を対象として2040年までのシミュレーションを実施した．シミュレーションの結果から，自動運転車の普及により世帯が交通利便性に対して全く影響を受けない状況となった場合，世帯の立地は郊外へ分散し，2040年時点で市街化区域内の世帯が約23,000世帯が減少することを示した．これに伴い，行政コストは約60億円／年増加し，DID地区相当のゾーンも郊外へ分散することを確認した．これらの結果から，居住の効用と行政コストの低減の両立には，郊外部において集約核を形成することが方策として考えられ，これを検討するために，将来のDID地区相当のゾーンの把握が参考となるとした．

今後の課題として，交通利便性のパラメータ推定の精度向上が挙げられる．今回用いたパラメータは統計的に有意な結果ではあるが，世帯主年齢によっては直感的に違和感のある変数が採用された箇所も存在した．今回の分析方法の場合，地域の魅力度τと交通利便性ACCを区分することが重要となることもあり，パラメータ推定方法の再検討も含めて今後の課題としたい．また，本稿では歳出全般を対象として，簡便な方法でコスト算定を行った．都市構造の議論をする際に最も着目すべき行政コストとしてインフラコストが挙げられるため，これに特化したコスト算定方法の精緻化は課題である．さらに，今回のモデルの構造では移転コストが考慮されていない．転居に関する負担として移転コストは関連深いと思われるため，その明示化の検討は必要であると考える．

本稿では，都市構造へ与える影響を分析するにあたり，自動運転車の普及を空間的な交通利便性の均一化として表現してシミュレーションを行った．しかしながら，交通利便性の他に，2章の**表-1**で挙げた，駐車場の縮小・平準化もその要因として考えられるため，これも考慮したシミュレーションの条件設定が必要である．その他にも，都市構造へ与える影響要因を精査し，シミュレーションに反映させることは課題である．

参考文献

1) 国土交通省：国土のグランドデザイン 2050, 2014.
2) 内閣官房：官民 ITS 構想・ロードマップ 2019, 2019.
3) トヨタ自動車株式会社：トヨタのコネクティッド&MaaS 戦略, 2019.
4) 東京大学：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における自動走行システムの高度化及び普及展開に向けた社会面・産業面の分析に関する調査 報告書, 2018.
5) 森川高行：モビリティデバイス化する次世代ビークル, システム／制御／情報, Vol.61, No.12, pp.506-510, 2017.
6) D. Milakis, B. van Arem, and B. van Wee：Policy and society related implications of automated driving:A review of literature and directions for future research, Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol.21, No.4,pp.324-348, 2017.
7) 二宮芳樹・加藤真平：一般道完全自動運転によるモビリティサービスの実現, 計測と制御, Vol.57, No.7, pp.484-487, 2018.
8) 山本俊行：自動運転車のシェアリングによる交通システム, 計測と制御, Vol.57, No.3,pp.143-149, 2018.
9) 坂井康一・大口敬・須田義大：自動走行システムの高度化・普及展開の姿およびその社会的・産業的インパクトに関する検討, 生産研究, Vol.70, No.2, pp.69-74, 2018.
10) 坂井康一・大口敬・須田義大：日本における自動走行システムの社会的ニーズおよびその普及展開に伴う社会的影響等にかかる検討, 生産研究, Vol.71, No.2, pp.37-44, 2019.
11) 国土交通省 都市局：都市交通における自動運転技術の活用方策に関する検討会, 2018.
12) 国土交通省：平成 25 年住生活総合調査結果, 2013.
13) 香月秀仁・川本雅之・谷口守：自動運転車の利用意向と都市属性との関係分析, 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp.728-734, 2016.
14) 紀伊雅敦・横田彩加・高震宇・中村一樹：共有型完全自動運転車両の普及に関する基礎分析, 土木学会論文集 D3, Vol.73, No.5, pp. I_507- I_515, 2017.
15) 東達志・香月秀仁・谷口守：都市構造の違いがシェア型自動運転車の運行効率に及ぼす影響, 都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.551-557, 2018.
16) 香月秀仁・東達志・高原勇・谷口守：シェア型自動運転交通 Shared-adus 導入による駐車時空間削減効果, 都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.544-550, 2018.
17) 杉本達哉・神永希・加藤秀弥・高森秀司・佐藤徹治：都市構造のコンパクト化施策の有効性検討のための実用的な都市内人口分布推計モデル, 土木学会論文集D3, Vol.74, No.5, pp.I_439-I_451, 2018.
18) 国土交通省：「国土の長期展望」中間とりまとめ, 2011.
19) 総務省：平成 13 年度 市町村決算カード.

(2019. 10. 4 受付)

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF AUTONOMOUS DRIVING ON THE FUTURE URBAN STRUCTURE : APPLICATION OF LOCATION EQUILIBRIUM MODEL

Tatsuya SUGIMOTO, Satoshi SUGIURA, Akiyoshi TAKAGI