

都市・交通施策評価のための 立地均衡型準動学土地利用・交通モデル

岡田 和磨¹・佐藤 徹治²

¹非会員 千葉工業大学大学院 都市環境工学専攻 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

E-mail: s17b2024ph@s.chibakoudai.jp

²正会員 千葉工業大学教授 創造工学部都市環境工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

E-mail: tetsuji.sato@it-chiba.ac.jp

立地均衡型の土地利用・交通モデルである応用都市経済 (CUE) モデルは、土地利用モデルと交通モデルの間に整合性が保たれており、都市・交通施策評価において整合的検討が可能である反面、1時点の静学モデルであり時系列的に連続性のある分析ができない。本研究では、立地均衡モデルによる都市内人口分布の推計結果を同期の交通モデルに投入し、交通モデルの出力結果を次期の立地均衡モデルに反映させることで、時系列展開が比較的容易に可能となる立地均衡型準動学土地利用・交通モデルを提案する。立地均衡モデルでは、世帯の独立・統合、自動車日常利用の可否による転居行動の違い等を考慮するため、立地主体を基本的に「個人」とする。

また、ケーススタディとして、新潟市を対象に実証モデルを構築し、地域限定型自動運転車の導入による長期影響分析を行うことで、実証方法の一例を示す。

Key Words : *land use-transport model, locational equilibrium, quasidynamics, autonomous car*

1. はじめに

日本の総人口は、2010年の国勢調査における1億2806万人を起点に長期的な人口減少過程に移行している。地方の諸都市では、地方中枢都市など一部を除き、三大都市圏への人口集中も相まって、人口減少・少子高齢化の進行が深刻な状況になりつつある。

人口減少都市では、税収も減少し、整備されたすべてのインフラを将来に渡り維持・管理、更新していくことは、極めて困難である。このような状況下で、2014年に都市再生特別措置法が改正され、長期的な都市のコンパクト化を促す立地適正化計画制度の創設された。多くの地方都市では、立地適正化計画を策定して居住誘導区域等を定めるとともに、コンパクト化を誘導する具体的な都市・交通施策を検討している。

また、今後、公共サービスの担い手不足や、高齢者の免許返納の増加が想定される中、地域内の移動手段の確保の観点から、自動運転車の普及、自動運転技術を用いたオンデマンドバス等の次世代型モビリティサービスに期待が集まっている。自動運転は、その搭載される技術によって0から5までの6段階にレベル分けされているが、運行設計領域 (ODD)

での条件付き自動運転「レベル 3」や、限定地域での無人自動運転移動サービス「レベル 4」の実現は現実味を帯びてきている。自動運転技術が普及した場合には、自動運転車が高齢者等の移動困難者の移動手段の選択肢の一つとなり、都市内の交通事情は大きく変容することが予想される。長期的には、自家用車が利用できないため公共交通中心の生活基盤を想定した居住地選択を行っていた世帯が自家用車中心の生活基盤を想定していた世帯と同様の居住地選択を行うようになる可能性が考えられる。この場合、郊外部から中心部への転居が減少し、地域全体が人口減少傾向にある状況下で、相対的に郊外部の人口減少が緩慢になる可能性がある。更には、土地供給可能面積が広く、地代の安い郊外部の居住地を好んで選択する世帯の出現も予想される。このように、自動運転の普及・導入は、人口減少下で地方都市が目標とする都市のコンパクト化と逆行する形で、将来の都市内人口分布を変化させる可能性を孕んでる。故に、自動運転車の普及や限定地域での次世代型モビリティサービスの導入を前提に、人口減少に対応した新たな都市・交通施策を早急に検討する必要がある。

都市・交通施策の評価・検討のための手法の一つ

に、都市・交通施策が都市内の人口分布に及ぼす影響を定量的に分析可能な土地利用（人口分布等）と交通の相互作用を考慮した土地利用・交通モデルがあり、1980 代頃から各国で開発されている。土地利用・交通モデルの発展型である土地利用マイクロシミュレーションモデル（土地利用 MS モデル）は、様々な個人属性、世帯類型毎の行動の違いを考慮して時系列の人口分布を推計できる。しかし、同モデルには、モデル構築に際して初期時点の個人属性毎の人口分布など多くの基礎データを作成する必要があり多大な労力を要する上に、シミュレーション結果に頑健性がない（同一条件で複数回シミュレーションを実施した場合に結果が異なる）という難点がある。

一方、2000 年代以降に開発された立地均衡モデルは、家計、企業、不在地主の合理的行動、土地市場の需給均衡を仮定したもので、シミュレーション結果に頑健性があり、モデル構築に際してのデータ収集の労力が前述の土地利用 MS モデルと比較して小さい。ただし、同モデルは、1 時点の静学モデルであり時系列的に連続性のある分析ができない。また、立地主体の基本単位が「世帯」であり、世帯の「独立、統合」（子供の世帯分離、結婚等）を表現することができない。

以上を踏まえて、本研究では、シミュレーション結果に頑健性があり、モデル構築に際しての労力が小さいという立地均衡モデルの利点を維持しつつ、世帯の独立・統合を表現可能で、かつ、各種都市・交通施策が将来時系列の都市内人口分布及び都市内交通状況に及ぼす影響を比較的容易に分析可能な新たな土地利用・交通モデルを提案する。また、提案したモデルに基づき、人口 80 万人規模の地方都市である新潟市を対象として実証モデルを構築し、都市内の中山間部などの地域に限定して「レベル 4」の自動運転車が導入されることによる都市内人口分布への長期的影響を分析する。

2. 関連既往研究と本研究の位置付け

(1) 土地利用MSモデルに関する既往研究

土地利用MSモデルを構築した近年の研究としては、阪田ら(2021)¹⁾、古田ら(2021)²⁾が挙げられる。阪田らは、世帯マイクロシミュレーションに基づく将来都市構造の予測技術の実用化の一環として、予測結果の評価指標を計算し可視化するためのアプリケーションの構築とケーススタディを行った。古田らは、住居主体のライフステージと世帯構造を考慮したシミュレーションモデルを構

築し、世帯構造変化に伴う都市構造変化への影響の分析手法を提案した。

土地利用MSモデルでは、立地主体の基本単位を性・年齢階層や世帯構成など様々な属性別の「個人」や「世帯」としている。このため、都市内人口分布の推計の際、世帯構成の変化や多様化する家族のあり方や交通行動を考慮することができる。交通施策評価を行う上では、立地均衡モデルと比較して、土地利用と交通行動の整合性が高いと言える。ただし、分析に際して初期時点の基礎データを各種属性別に収集・設定する必要があり、データ収集が基本的に国勢調査で完結する立地均衡モデルと比較して労を要する。

(2) 立地均衡モデルに関する既存研究

都市・交通施策が都市内人口分布に及ぼす影響を分析するために立地均衡モデルを構築した近年の研究としては、武藤ら(2017)³⁾、富岡ら(2018)⁴⁾、高杉ら(2018)⁵⁾、杉本ら(2019)⁶⁾が挙げられる。

武藤らは、従来の土地市場のみでの部分均衡を考慮した応用都市経済(CUE)モデルを改良して、すべての市場での均衡(一般均衡)を仮定し、交通整備による企業生産や家計所得の拡大効果等の間接効果を便益と理論整合的に計測可能な一般均衡型CUEモデルを開発した。

富岡らは、LRT 整備の影響評価手法として、LRT 整備に伴う車線数の減少の自動車交通への影響を考慮した立地均衡モデルと交通モデルの統合モデルである応用都市経済(CUE)モデルを構築した。

高杉らは、LRT と BRT の特性の違いを考慮し、これらを導入した際の都市内人口分布への長期的影響を分析可能な立地均衡モデルを構築した。

杉本らは、住宅地の立地均衡モデルを時系列に拡張した実用的な都市内人口推計モデルを構築した。その上で、居住地選択時の部分効用における各種施設までの所要時間の負のパラメータを 0 とすることで自動運転車の普及を疑似的に表現し、岐阜都市圏を対象として都市内人口分布への影響を分析した。

以上の武藤ら、富岡らの研究では、土地利用と交通の相互依存関係が考慮されているが、1 時点の分析に留まっている。一方で、杉本ら、高杉らの研究では、モデルの時系列展開がなされており、将来時系列に亘る分析が可能となっているが、土地利用と交通の相互依存関係が考慮されていない。

また、以上の研究のモデルでは、すべて立地主体の基本単位を「世帯」としており、「個人」に対する依存性が高いと考えられる交通行動を考慮する上での整合性に疑問がある。

(3) 本研究の位置付け

本研究では、立地均衡型準動学土地利用・交通モデルの構築を行う。これまでの立地均衡モデルは、立地主体の基本単位を「世帯」として構築されてきたが、本研究では基本単位を「個人」とすることで、「個人」への依存度の高い交通行動との整合性向上を図るとともに、世帯の世帯の分裂や消滅、発生や融合等を擬似的に表現する。その上で、立地均衡モデルと交通モデルを交互に時系列に結合することで、都市内の人口分布と交通状況の相互依存関係を考慮した準動学モデルとする。これにより、様々な都市・交通施策が将来時系列の都市内の人口分布、交通状況に及ぼす影響について、従来の土地利用MSモデルと比較して、容易かつ頑健に分析することができる。

3. 理論モデルの構築

(1) モデルの全体構造

モデルは、立地均衡モデルを基にして、都市内人口分布を住宅地市場の立地均衡理論に基づいて推計する「都市内人口分布推計モデル」と、発生・分布・分担・配分モデルより成る四段階推定法に基づいた「交通モデル」より構成される。

まず、人口分布とネットワーク条件を「交通モデル」に入力し、交通状況（交通混雑等）を考慮した各ゾーン間の所要時間を出力する。次に、人口分布と「交通モデル」より出力された各ゾーン間の所要時間を「都市内人口分布推計モデル」に入力し、次の期の都市内人口分布を出力する。続いて、「都市内人口分布推計モデル」から出力された人口分布を次期の交通状況に反映させることで、モデルの時系列展開を図る。

図-1にモデルの全体フローを示す。

(2) 都市内人口分布推計モデル

1) モデルの概要

本モデルは、土地利用、主に都市内人口分布の時系列

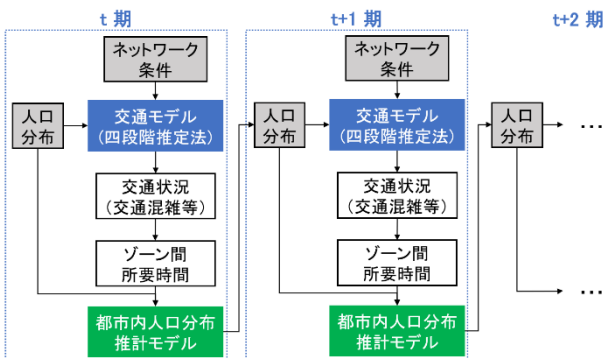


図-1 準動学土地利用・交通モデルの全体フロー

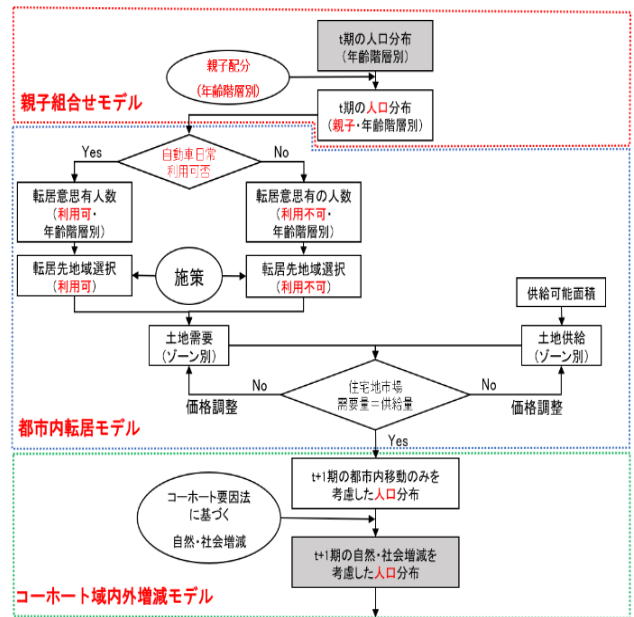


図-2 都市内人口分布推計モデルの全体フロー

的变化を推計する機能を備えたモデルであり、「親子組合せモデル」、「都市内転居モデル」、「コーホート域内外増減モデル」の3つのモデルより構成される。

都市内転居モデルは立地均衡モデルを基に構築するが、本研究では、転居行動の基本単位を「世帯」ではなく「個人」とする。ここで、「個人」転居を仮定することに伴い、「個人」単位で転居することが稀で基本的に家族と行動を共にすると考えられる「年少者」については、「親世代」と同様に行動するように制約を掛ける。これにより、親子での転居を擬似的に表現し、「年少者」のみでの転居行動を仮定しないこととし、推計値の精度向上を図る。また、都市内の自然増減、都市内外の社会増減については、国立社会保障・人口問題研究所（以降、社人研）の推計結果より「コーホート域内外増減モデル」にて考慮する。

都市内人口分布推計モデルの全体フローを図-2に示す。図-2における「自動運転の日常利用可否」は「同一世帯に自動車を保有する、あるいは自動運転カーシェアリングが利用可能など、個人がいつでも利用可能な自動車があるか否か」を示すものとする。

2) 親子組合せモデル

本モデルは、年少者の人口（年齢階層別）と親世代の人口（年齢階層別）との組み合わせの存在比率（以降、「親子組合せ存在比率」）を設定するものである。親子組合せ存在比率（各年齢階層の年少者が、どの年齢階層の親を持つかの比率）は、分析初期の実績値を各期共通で用いる。(1)式に親子組合せ存在比率の設定式を示す。

$$MR_{g,g'} = \frac{POP_{g,g'}}{\sum_{g'} POP_{g,g'}} \quad (1)$$

ここで、下添え字の g は年少者の年齢階層、 g' は親世代の年齢階層を表す。また、 MR は親子組合せ存在比率、 $POP_{g,g'}$ は親世代が年齢階層 g' の年齢階層 g の年少者の人口を表す。

3) 都市内転居モデル

本モデルは、域内転居のみを考慮した将来各期の都市内人口分布を住宅地市場の立地均衡理論に基づいて推計するものである。

土地（住宅地）の需要は、個人単位での年齢階層別、自動車日常利用可否別の転居意思有の割合および転居先地域選択行動により決定される。各個人の転居先地域選択確率は、(2)、(3)式に示す通り、各ゾーンの部分効用関数とロジットモデルにより求められるものとする。

$$P_{i,c,g,t} = \frac{\text{EXP}(V_{i,c,g,t} + \tau_{i,c,g})}{\sum_i \text{EXP}(V_{i,c,g,t} + \tau_{i,c,g})} \quad (2)$$

$$V_{i,c,g,t} = f(r_{i,c,g,t}, I_{i,c,g,t}, \mathbf{Z}_{i,c,g,t}) \quad (3)$$

ここで、下添え字の t は期、 i はゾーン、 c は自動車の日常利用の可否、 g は個人の年齢階層を表す。また、 P は転居先地域選択、 V は部分効用、 τ はその他の効用（部分効用で評価できないゾーン固有の魅力を表す調整項）、 r は地代、 I は所得を表す。 \mathbf{Z} は居住地域評価指標ベクトルを表し、評価指標やパラメータは自動車日常利用可否別、年齢階層別に異なるものとする。

また、1世帯あたりの土地（住宅地）需要面積は地代によって変化すると仮定する。(4)～(6)式に土地（住宅地）需要量の推計式を示す。

$$D_{i,g,t} = L_{i,g,t} \cdot N_{i,g,t} \quad (4)$$

$$L_{i,g,t} = \frac{\beta_g}{r_{i,t}} I_{i,g,t} \quad (5)$$

$$N_{i,g,t} = \sum_c (P_{i,c,g,t} \cdot NT_{c,g,t}) \quad (6)$$

ここで、 D は土地（住宅地）需要量、 L は1人あたりの土地（住宅地）需要面積、 I は所得、 N は転入人数、 P は転居先地域選択確率、 NT は転居意思有の総人数、 β は土地需要パラメータである。

土地（住宅地）供給者は、都市外に居住し、地代によって土地（住宅地）供給面積を変化させる不在地主とする。この前提の下、供給者側の行動としての不在地主による土地（住宅地）の供給面積を(7)式に示す。

$$S_{i,t} = \left(1 - \frac{\sigma_i}{r_{i,t}}\right) \bar{S}_{i,t} \quad (7)$$

ここで、 S は土地（住宅地）供給面積、 r は地代、 σ は土地パラメータ、 \bar{S} は供給可能面積を示す。

供給可能面積は、(8)式のとおり、 t 期から $t+1$ 期までの間に各地域の世帯数の増減に応じて更新されるものとする。

$$\bar{S}_{i,t+1} = \bar{S}_{i,t} - \sum_g \left((N_{i,g,t+1} - N_{i,g,t}) L_{i,g,t} \right) \quad (8)$$

初期時点の供給可能面積は、市街化区域では(9)式、市街化調整区域では(10)式より算出する。

$$\bar{S}_{i,t_0} = S_{a,i,t_0} + S_{b,i,t_0} \cdot v_{i,t_0} \quad (9)$$

$$\bar{S}_{i,t_0} = S_{b,i,t_0} \cdot v_{i,t_0} \quad (10)$$

ここで、 t_0 は初期、 S_a は田畑・農用地面積、 S_b は建物用地面積、 v は空き家・空き地率を示す。

住宅地市場では、(11)式のとおり、ゾーン毎に需要と供給が均衡し、各ゾーンの市場価格（地代）と立地量が決定されるものとする。

$$S_{i,t} = \sum_g D_{i,g,t} \quad (11)$$

4) コーホート域内外増減モデル

本モデルは、都市内転居モデルで算出された各期の域内転居のみを考慮した各ゾーンの年齢階層別人口に、コーホート要因法に基づく各期の都市全体の年齢階層別人口増減率を乗じることで、自然増減や対象圏域外に関連する社会増減を考慮した各期、各ゾーンの年齢階層別人口を求めるものである。

各期の域内自然増減および対象圏域外に関連する社会増減率は、(12)式のとおり導出され、各ゾーンの域内自然増減および対象圏域外に関連する社会増減を考慮した人口は(13)式のように導出する。

$$R_{t,g} = \frac{POP_{t,g}}{POP_{t-1,g}} \quad (12)$$

$$POP_{i,g,t} = POP'_{i,g,t} \cdot R_{g,t} \quad (13)$$

ここで、下添え字の t は期、 i はゾーン、 g は個人の年齢階層を表す。また、 R は域内自然増減・域外社会増減率、 POP' は域内自然・域外社会増減を考慮した人口、 POP は都市内転居モデルにて導出される域内社会増減のみを考慮した人口を表す。

(3) 交通モデル

1) モデル概要

本研究の交通モデルは、発生、分布、分担、配分の

4段階に分けて推計を行う伝統的な四段階推定モデルとする。本モデルでは、各ゾーンの人口（人口分布）とネットワーク条件より、交通渋滞等の交通状況を予測し、各ゾーン間の移動所要時間を出力する。

2)発生モデル

本モデルは、各ゾーンの発生交通量を推計するもので、(14)式の通りとする。

$$Q_{i,g,p,t} = POP_{i,g,t} \cdot q_{g,p} \quad (14)$$

ここで、下添え字の*t*は期、*i*はゾーン、*g*は個人の年齢階層、*p*はトリップ目的を表す。また、*Q*は発生交通量、*POP*は人口、*q*は生成原単位（一人当たりのトリップ数）を表す。

q（一人当たりのトリップ数）は、実績値（パーソントリップ調査等の公的データ）より算出した固定値を用いる。

3)分布モデル

本モデルでは、各ゾーン間の交通量を推計する。各ゾーンでの発生交通量の目的地の比率は、トリップ目的別に異なると仮定し、トリップ目的が「通学、帰宅」の場合は(15)式、「通勤、業務、私用」の場合は(16)式より分布交通量を算出する。

$$Q_{ij,p,t} = \sum_g Q_{i,g,p,t} \cdot \frac{POP_j}{\sum_j POP_j} \quad \{ p=2,4 \} \quad (15)$$

$$Q_{ij,p,t} = \sum_g Q_{i,g,p,t} \cdot \frac{NW_j}{\sum_j NW_j} \quad \{ p=1,3,5 \} \quad (16)$$

ここで、下添え字の*t*は期、*i*はゾーン、*j*は目的地、*p*はトリップ目的 {*p*=1:通勤, *p*=2:通学, *p*=3:業務, *p*=4:帰宅, *p*=5:私用}、*g*は個人の年齢階層を表す。また、*Q*は発生交通量、*POP*は人口、*NW*は従業者数を表す。

4)分担モデル

本モデルは、各ゾーン間の交通手段別の交通量を推計するもので、(17)式の通りとする。

$$Q_{ij,p,m,t} = \sum_g Q_{i,g,p,t} \cdot R_m \quad (17)$$

ここで、下添え字の*t*は期、*i*はゾーン、*j*は目的地、*m*は交通手段、*g*は個人の年齢階層を表す。また、*Q*は発生交通量、*R_m*は交通分担率を表す。

ただし、交通手段分担率は実績値（パーソントリップ調査等の公的データ）より固定値を用いる。

5)配分モデル

本モデルでは、各ゾーン間の自動車の交通量を「利用者均衡配分法」により各道路ネットワークに配分し、各道路の自動車交通量、所要時間を算出する。利用者均衡配分法は、旅行時間の最短経路を選択し、これ以上の

最短経路が選択できない最善の均衡状態になるという仮定の下、利用者均衡が満たされた条件下での配分交通量を導出する。

4. 実証モデルの構築

(1)対象圏域・単位地域

対象圏域は、新潟県新潟市全域とした。分析の単位地域は、世界測地系平面直角座標系3次（1km）メッシュを基本とした。対象圏域の郊外部（中山間地域など）については、3次メッシュ4メッシュを統合した2kmメッシュとした。対象圏域・単位地域を図-3に示す。

(2)都市内人口分布推計モデル

1)親子組合せモデル

親子組合せ存在比率（各年齢階層の年少者がどの年齢階層を親に持つかの比率）については、平成27年国勢調査「就業状態基本統計」より新潟市における「最年少の子供の年齢（5歳階級）」別の「親の年齢（5歳階級）」別存在比率を求め、これを用いた。個人での転居意思決定が稀な年少者は、一般的には18歳未満と考えられる。本モデルでは、国勢調査のデータの制約から19歳以下を年少人口とし、5歳階級別に親世代とのマッチングを行った。

最年少の子供の各年齢階層における親の年齢階層別存在比率を表-1に示す。

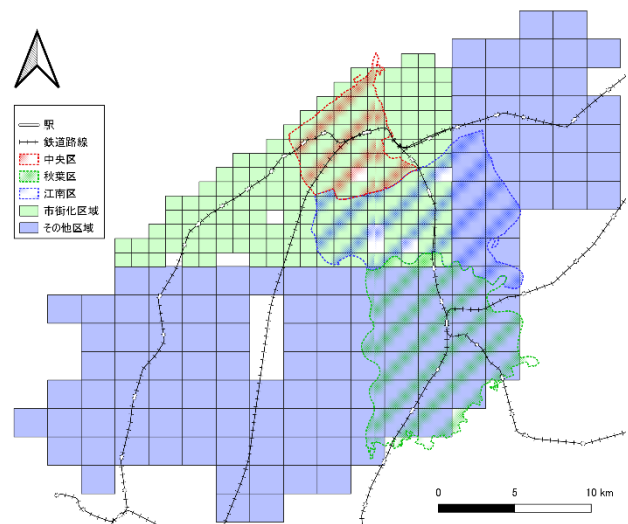


図-3 対象圏域・単位地域

表-1 親の年齢階層別存在比率（新潟市）

	20代	30代	40代	50代
0～4歳	44.5%	44.8%	10.7%	0.0%
5～9歳	10.8%	62.3%	26.4%	0.5%
10～14歳	0.6%	36.7%	55.5%	7.2%
15～19歳	0.0%	13.3%	71.6%	14.2%

2) 都市内転居モデル

2.1) 部分効用関数

(3) 式の部分効用関数における居住地域評価指標は、プレアンケート調査に基づき選定し、部分効用関数のパラメータ推定は、プロファイルアンケート調査の結果を用いて、自動車日常利用可否別・年齢階層別に行った。自動車日常利用の可否については、現時点では新潟市においてはカーシェアリングの普及は限定的であり、自動車運転も普及していないことから、アンケート調査においては、「同一世帯に自動車を保有し、個人でいつでも運転可能な自家用車を有するか否か」と同義とした。

プレアンケート調査では、対象地域の住民の転居意向、居住地域評価指標を多数示した上での各指標の転居地域選択における重視度を尋ねた。重視度の高かった指標を自動車日常利用可否別に上位8個抽出した。調査は、新潟市在住の世帯主を対象に、2020年11月上旬に民間リサーチ企業に依頼してweb調査で実施し、300サンプル回収した。調査結果より、自動車日常利用可能者の居住地評価指標は「総合スーパー・大型商業施設までの所要時間（自動車）」、「都心部までの所要時間（自動車）」、「最寄り駅・停留所までの所要時間（徒歩）」、「町医者・クリニックまでの所要時間（自動車）」、「洪水による想定浸水深」, 「国道へのアクセス時間（自動車）」, 「市街化区域ダミー（市街化区域：1, その他：0）」とした。自動車日常利用不可能者の居住地評価指標は、「国道へのアクセス時間（自動車）」の代わりに「最寄り駅・停留所の公共交通の運行頻度」とし、他の6指標については日常利用可能者と同指標で移動手段を自動車から徒歩に変えたものとした。

プロファイルアンケート調査は、プレアンケート調査により抽出された居住地評価指標を基に、自動車日常利用可否別にL18(2¹×3⁷)直交表を用いて、18の仮想地域の転居する際の転居先としての居住意向を5段階評価で尋ねたものである。調査は、2020年12月上旬に実施し、自動車日常利用可能者300サンプル、不可能者50サンプルを回収している。自動車日常利用可能者向けの調査票を図-4に示す。ここで、(3)式の変数である地代については、回答者がイメージしづらいと考え、代理変数として、地代に比例すると考えられる地価を用いた。

本研究では、以上のプロファイルアンケート調査の個票データを用い、自動車日常利用可否別、年齢階層別に新たにパラメータを推定した。推定は、最小二乗法（減少法）により行った。推定結果を表-2, 表-3に示す。

2.2) 単位地域毎のデータ設定

構築したモデルを用いて将来時系列の都市内人口分布を推計するため、初期時点（2015年）のすべての変数を単位地域毎に設定した。

	大型商業施設まで	都心部まで	最寄り駅・停留所まで(徒歩)	町医者・クリニックまで	洪水時浸水深	国道アクセス	地価/m ²	除雪に関する負担(市街化区域・市街化調整区域)	評価
例)	10分	10分	5分	5分	0m	2分	2.5万円	市街化区域	4
1	10分	10分	5分	5分	0m	2分	2.5万円	市街化区域	
2	10分	20分	10分	10分	0.5m	7分	5万円	市街化区域	
3	10分	40分	20分	15分	2m	12分	7.5万円	市街化区域	
4	20分	10分	5分	10分	0.5m	12分	7.5万円	市街化区域	
5	20分	20分	10分	15分	2m	2分	2.5万円	市街化区域	
6	20分	40分	20分	5分	0m	7分	5万円	市街化区域	
7	30分	10分	10分	5分	2m	7分	7.5万円	市街化区域	
8	30分	20分	20分	10分	0m	12分	2.5万円	市街化区域	
9	30分	40分	5分	15分	0.5m	2分	5万円	市街化区域	
10	10分	10分	20分	15分	0.5m	7分	2.5万円	市街化調整区域	
11	10分	20分	5分	5分	2m	12分	5万円	市街化調整区域	
12	10分	40分	10分	10分	0m	2分	7.5万円	市街化調整区域	
13	20分	10分	10分	15分	0m	12分	5万円	市街化調整区域	
14	20分	20分	20分	5分	0.5m	2分	7.5万円	市街化調整区域	
15	20分	40分	5分	10分	2m	7分	2.5万円	市街化調整区域	
16	30分	10分	20分	10分	2m	2分	5万円	市街化調整区域	
17	30分	20分	5分	15分	0m	7分	7.5万円	市街化調整区域	
18	30分	40分	10分	5分	0.5m	12分	2.5万円	市街化調整区域	

図-4 プロファイル調査票（日常利用可能者向け）

表-2 日常利用可能者の(3)式のパラメータ推定結果

	総合スーパー・大型商業施設までの所要時間【自動車】	自宅からJR新潟駅までの所要時間【自動車】	最寄り駅・停留所までの所要時間【徒歩】	町医者・クリニックまでの所要時間【徒歩】	洪水による想定浸水深	国道までのアクセス性【自家用車】	地価	市街化区域ダミー(-1)	定数項
20代	-0.027 (-6.808**)	-0.012 (-4.605**)	-0.010 (-1.835*)	-	-0.097 (-2.530**)	-	-0.050 (-3.112**)	0.186 (-2.858**)	3.491 (-22.89**)
30代	-0.027 (-6.808**)	-0.012 (-4.605**)	-0.010 (-1.835*)	-	-0.097 (-2.530**)	-	-0.050 (-3.112**)	0.186 (-2.858**)	3.491 (-22.89**)
40代	-0.030 (-8.614**)	-0.013 (-5.925**)	-0.010 (-2.247*)	-0.012 (-1.779*)	-0.148 (-4.490**)	-	-0.060 (-4.401**)	-	3.878 (-26.72**)
50代	-0.030 (-7.902**)	-0.010 (-5.503**)	-0.009 (-2.427**)	-	-0.152 (-5.772**)	-0.009 (-1.663*)	-0.041 (-3.752**)	0.222 (-4.954**)	3.419 (-30.55**)
60代	-0.029 (-7.902**)	-0.010 (-4.228**)	-0.011 (-2.337*)	-0.014 (-1.937*)	-0.166 (-4.726**)	-	-0.054 (-3.685**)	0.217 (-3.629**)	3.500 (-22.17**)
70代	-0.037 (-6.787**)	-0.015 (-4.072**)	-0.014 (-2.017*)	-0.020 (-1.866*)	-0.164 (-3.124**)	-	-0.026 (-1.187)	0.284 (-3.186**)	3.385 (-14.36**)

注) ()内はt値. **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意であることを示す。

表-3 日常利用不可能者の(2)式のパラメータ推定結果

	総合食品スーパー・大型商業施設までの所要時間【公共交通】	都心部(JR新潟駅)までの所要時間【公共交通】	最寄り駅・停留所までの所要時間【徒歩】	町医者・クリニックまでの所要時間【徒歩】	洪水による想定浸水深	最寄り駅・停留所の公共交通の運行間隔	市街化区域ダミー(-1)	地価	定数項
20代	-0.017 (-7.192**)	-0.008 (-5.737**)	-0.021 (-4.610**)	-0.005 (-1.932*)	-0.109 (-3.290**)	-0.005 (-1.671*)	0.158 (-2.818**)	-0.062 (-4.521**)	3.444 (-23.72**)
30代	-0.017 (-7.192**)	-0.008 (-5.737**)	-0.021 (-4.610**)	-0.005 (-1.932*)	-0.109 (-3.290**)	-0.005 (-1.671*)	0.158 (-2.818**)	-0.062 (-4.521**)	3.444 (-23.72**)
40代	-0.023 (-11.08**)	-0.009 (-7.227**)	-0.012 (-2.914**)	-0.006 (-2.370**)	-0.123 (-4.177**)	-0.004 (-1.719*)	0.127 (-2.538**)	-0.052 (-4.284**)	3.530 (-28.60**)
50代	-0.022 (-13.30**)	-0.006 (-5.761**)	-0.014 (-4.426**)	-0.006 (-3.222**)	-0.158 (-6.701**)	-0.006 (-2.922*)	0.230 (-5.726**)	-0.045 (-4.609**)	3.410 (-34.32**)
60代	-0.021 (-10.20**)	-0.006 (-5.155**)	-0.015 (-3.761**)	-0.010 (-3.940**)	-0.131 (-4.337**)	-0.009 (-3.545**)	0.295 (-5.772**)	-0.064 (-5.123**)	3.411 (-25.93**)
70代	-0.024 (-6.860**)	-0.007 (-3.091**)	-0.012 (-1.737*)	-0.010 (-2.370**)	-0.193 (-3.800**)	-0.013 (-2.997*)	0.244 (-2.832**)	-0.042 (-1.971*)	3.406 (-15.94**)

注) ()内はt値. **, *はそれぞれ1%, 5%水準で有意であることを示す。

地価については、2015年の新潟市内の公示地価データを用いて地価関数を推定し、推定された地価関数と各地域の説明変数のデータにより推計した。本研究では、市

場の特性の違いを考慮して住居系と商業系の用途地域別にそれぞれ推定を行った。地価関数の説明変数は、一般的な地価の説明要因を候補として、5%水準で非有意な変数を除いて推定を繰り返す減少法により決定した。

地価関数を(18)式、推定結果を表-4に示す。

$$\ln(r_{i,k}) = f(\mathbf{X}_{i,k}) \quad (18)$$

ここで、 k は土地系統、 \mathbf{X} は説明変数および \ln (説明変数)のベクトルを表す。

ここで、「JR新潟駅ダミー」は最寄り駅がJR新潟駅であること、「調区ダミー」は市街化調整区域に指定されていること、「近商ダミー」は用途地域が近隣商業地域に指定されていること、「中央区ダミー」は新潟市中央区であることを示すダミー変数で、該当する場合1、該当しない場合0とした。

各種施設までの所要時間(徒歩、自家用車、路線バス)については、各メッシュの重心から目的地点までの直線距離に森田ら(2014)⁷⁾による道直比係数(新潟市)を乗じて道路距離を求め、移動速度で除すことにより算出した。移動速度は、徒歩は「不動産の表示に関する公正競争規約施行規則」より80m/分、自家用車は「平成22年度道路交通センサス(昼間12時間平均旅行速度)」より34.6km/時、路線バスは「社会資本審議会都市計画・歴史風土分科会(p.2)」を参考に17.5km/時に設定した。鉄道の場合は、時刻表の各駅の発着時刻を用いて所要時間を算出した。

洪水時浸水深については、国土数値情報の「浸水想定区域」より求めた。公共交通の運行頻度については、昼間12時間の時刻表を基に昼間12時間の平均値に設定した。国道については、国土数値情報より「緊急輸送道路」の国道を抽出し、各地域からのアクセス時間を設定した。

郊外部における2kmメッシュについては、含有される3次メッシュの値の平均値に設定した。

3) コーホート域内外増減モデル

コーホート要因法に基づく各期の都市全体の年齢階層別人口増減率については、社人研による将来の5年毎の推計値データを用いた。

表-4 地価関数の推定結果

	JR新潟駅ダミー	ln(最寄り駅までの道路距離)	調区ダミー	近商ダミー	中央区ダミー	定数項	決定係数 R ²
住居系	0.352 (-2.718**)	-0.130 (-2.543**)	-1.006 (-7.750**)		0.532 (-4.345**)	11.616 (-31.54**)	0.6629
商業系	0.658 (-3.786**)	-0.262 (-3.216**)		-0.354 (-2.682**)	0.766 (-4.470**)	12.619 (-23.05**)	0.8287

注) ()内はt値。 **は1%水準で有意であることを示す。

(3) 交通モデル

1) 発生交通量

対象地域に居住する全ての人のうち、外出した人一人一日あたりの平均トリップ数(ネット生成原単位)は、「平成29年都市交通特性調査」および「平成27年国勢調査人口等基本集計」より設定した。

生成原単位は、年齢階層別・トリップ種別に設定するものとし、トリップ種別の定義は「都市交通特性調査」に倣い、「内内トリップ」は「市内に出発地と到着地を持つ移動」、「内外トリップ」は「出発地または到着地のいずれかが市内である移動」と定めた。「都市交通特性調査」には、「市内に出発地と到着地を持たない移動」の「外々トリップ」が設定されているが、本研究では都市内人口分布及び交通状況の変化を捉えるモデルの構築を目指すため、「外々トリップ」は都市内交通状況に直接的影響を及ぼさないものと仮定し、除外した。

なお、ここで取り扱う「都市交通特性調査」の調査対象年齢は、「5~14歳」「15~24歳」「25~64歳」「65~74歳」「75歳以上」の5階層である。これは、本研究の「都市内人口分布推計モデル」にて、国勢調査との整合性や親子配分設定などの分析上の都合から設定した年齢設定との間に齟齬が生じる。そこで、ここでの生成原単位の設定においては、「都市交通特性調査」に基づいて算出したパラメータを「都市内人口分布推計モデル」の年齢階層に合うよう表-5のように割り当てた。

(14)式における q (一人当たりのトリップ数)は、表-5に準拠して設定した。

2) 分布交通量

分布交通量のうち、対象地域内に起終点を持つ「内内トリップ」については、(15)、(16)式から算出する。トリップ目的は、「通勤」「通学」「業務」「帰宅」「私用」の5種とし、(15)、(16)式におけるトリップ目的比率 R_p は「平成29年都市交通特性調査」の「移動目的構成」の比率に基づき設定した(表-6)。

起点を対象地域内に持ち終点を対象地域外に持つ「内外トリップ」、起点を対象地域外に持ち終点を対象地域内に持つ「外内トリップ」の分布交通量については、「平成27年度全国道路・街路交通情勢調査一般交通量

表-5 生成原単位(新潟市)

都市交通特性調査の調査対象年齢階層	5~14歳		15~24歳		25~64歳			65~74歳	75歳以上
	5~9歳	10~14歳	15~19歳	20代	30代	40代	50代	60代	70代以上
総計トリップ	2.91	2.91	1.53	1.53	3.20	3.20	3.20	3.14	1.31
内内トリップ	2.90	2.90	1.41	1.41	2.70	2.70	2.70	2.86	1.25
内外トリップ	0.01	0.01	0.11	0.11	0.38	0.38	0.38	0.23	0.05

注) 単位は[トリップ/人/日]

表-6 移動目的構成 (新潟市)

目的種	通勤	通学	業務	帰宅	私用	
構成比	15%	5%	14%	37%	29%	100%

表-7 交通分担率 (新潟市)

移動種	鉄道	バス	自動車	二輪車	自転車	徒歩	
構成比	2.7%	3.1%	71.0%	0.6%	7.5%	15.0%	100%

調査「集計表」における主要道路の市境付近の交通量に基づき推計し、将来も変化しないと仮定する。

対象地域外に起終点を持つ「外々トリップ」については、高速道路や国道等の通過交通が考えられるが、都市内の分析を主とする本研究においては除外することとした。

3) 分担交通量

代表交通手段は、「鉄道」「バス」「自動車」「二輪車」「自転車」「徒歩」の6種とし、(17)式の交通分担率 R_m は、「平成29年都市交通特性調査」の「代表交通手段構成」に基づき設定した(表-7)。

4) 配分交通量

交通量配分は、「交通需要予測 パッケージSTRADA version4」を用いて、各ゾーン間の分析期毎の自動車交通量を対象地域の交通ネットワークに配分する。対象地域の交通ネットワークは、一般財団法人日本デジタル道路地図協会(DRM)の「全道路リンク(一般都道府県道以上)」および「全道路ノード(一般都道府県道以上)」に基づき設定し、分析初年度から将来時系列に亘り不変であると仮定した。配分プログラムには、「交通需要予測 パッケージSTRADA version4」の「利用者均衡配分法」を用いた。配分用の交通ネットワークを図-5に示す。

図-5における交通発生点・集中点は、「各ゾーンの重心点」、「対象地域内のICおよびSIC」、「対象地域越境部の主要道路」とし、これらを「全道路リンク(一般都道府県道以上)」と接続するように「ダミーリンク」を設定した。ここで、「ダミーリンク」は各発生点と「全道路ノード(一般都道府県道以上)」の近傍ノードを一律に結ぶものとする。

5. シミュレーション分析

(1) 概要

新潟市を対象として構築した実証モデルを用いて、1期を5年として、2015年から2045年までの6期間、30年間の現状趨勢ケースおよび郊外部における自動運転サービス導入ケースの都市内人口分布の将来推計を実施した。

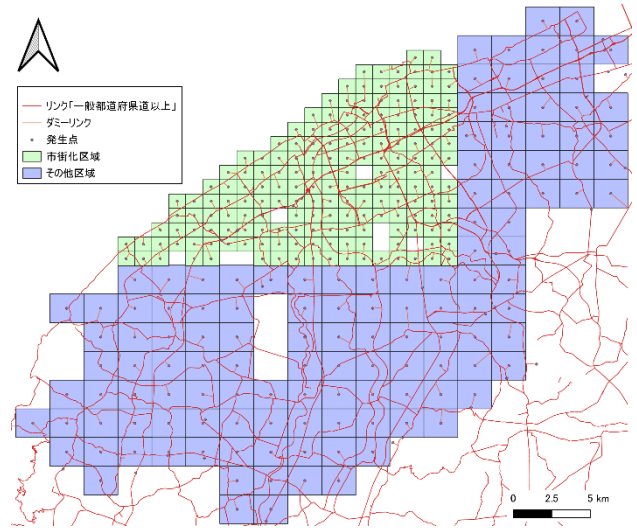


図-5 交通ネットワーク

(2) 現状趨勢ケース

1) 概要

自動車日常利用可否の割合(年齢階層別)は、新潟市民の自動車保有・非保有の比率に等しいと仮定し、各期で共通して用いた。ここで、自動車保有比率および非保有比率(年齢階層別)は、プレアンケート調査の結果より設定した(表-8)。

転居意思有の人数(年齢階層別、自動車日常利用可否別)は、年齢階層別、自動車日常利用可否別に、各ゾーンの人口に転居意思有の割合を乗じることで算出した。転居意思有の割合(年齢階層別、自動車日常利用可否別)は、新潟市内から市内への5年以内の転居率に等しいものとした。転居率(年齢階層別、自動車日常利用可否別)は、5年間の転居率(年齢階層別)、免許保有率(年齢階層別)、内閣府刊行の交通安全白書における年齢階層別、免許保有・非保有別の存在比などから設定した。転居率は、平成27年国勢調査(新潟県)の「5年前の常住市区による現住地」と平成22年および平成27年交通安全白書に基づき、「5年前の常住者のうち自市内の5年前と異なる住所へ転居した人口(年齢階層別、自動車日常利用可否別)」を「5年前の常住者の総数(年齢階層別、自動車日常利用可否別)」で除することで算出した。

新潟市内から市内への5年以内転居率(年齢階層別、自動車日常利用可否別)を表-9に示す。

2) 分析結果

分析結果は、当日公表するものとして、ここでは省略する。

表-8 新潟市民の自動車保有・非保有比率

	全体	20歳未満	20代	30代	40代	50代	60代	70代以上
保有	83.33%	0.00%	45.45%	89.19%	81.54%	85.57%	88.06%	85.00%
非保有	16.67%	100.00%	54.55%	10.81%	18.46%	14.43%	11.94%	15.00%

表-9 新潟市内から市内への転居率（5年以内）

	全体	20歳未満	20代	30代	40代	50代	60代	70代以上
全体	13.17%	15.76%	19.06%	29.06%	13.18%	6.48%	5.20%	14.51%
利用可	13.36%	14.15%	18.73%	28.80%	13.20%	6.82%	5.62%	22.72%
利用不可	12.63%	16.24%	20.81%	33.91%	12.84%	4.25%	3.98%	10.29%

(3) 自動運転サービスの導入ケース

1) 概要

構築した実証モデルを用いて、地域限定で自動運転車が導入されたケースについて、現状趨勢ケースと同様に2015年～2045年の30年間（各期5年毎，6期間）の都市内人口分布推計を行う。

ここでは、政策的に完全自動運転の自家用車やシェアリングサービスが道路交通渋滞への影響が小さい地域に限定して認可された状況を想定する。即ち、地域限定での「レベル4」の自動運転車両の導入の影響を検討する。自動運転車が導入される地域は、渋滞への影響が極めて小さいと考えられる中山間地域などの都市計画区域外、市街化調整区域などに限定する。具体的には、北区、秋葉区、南区、西蒲区の大半の地域とする。

本研究では、このような地域限定型自動運転車が導入された場合、当該地域のすべての住民が従来の自家用車利用可能者と同様の移動時間で各種施設へアクセス可能となること、同様の転居行動（転居の有無の意思決定、転居先地域の選択）をすることを仮定する。

また、ここでは自動運転サービスの導入による免許返納率の変化やそれに伴う免許保有率の変化、即ち自動車分担率の変化は考慮しないものとする。

2) 分析結果

分析結果は、当日公表するものとして、ここでは省略する。

6. まとめ

本研究では、シミュレーション結果に頑健性があり、モデル構築に際しての労力が小さいという立地均衡モデルの利点を維持しつつ、世帯の独立・統合を表現可能で、かつ、各種都市・交通施策が将来時系列の都市内人口分布及び都市内交通状況に及ぼす影響を比較的容易に分析可能な新たな土地利用・交通モデルの構築を試みた。

既存の立地均衡型のモデルでは「世帯」を分析の基本単位としていたが、交通手段選択は「個人」に依存するところが大きいことを考慮し、本研究のモデルでは「個人」を基本単位とした。「個人」単位での推計により、副次的に年齢階層別の推計が可能となり、現状の交通状況への反映精度の向上とともに将来的の人口分布や自動運転の普及による影響を年齢階層別に把握することが可

能となった。既存の立地均衡型時系列都市内人口分布推計モデルに、四段階推計法による交通モデルを組み合わせたことで、自動運転車や次世代型モビリティサービスの導入による将来時系列の都市内人口分布への影響やそれに付随した交通状況に変化による渋滞の発生等を加味した施策検証が可能になったと考える。

本研究の実証分析では、2015年から2045年の30年間の現状趨勢ケースと自動運転車普及ケースの将来推計を予定している。

ただし、本研究では、自動運転サービスの導入や人口分布の変化による交通渋滞等については、交通モデル（四段階推定法）により考慮できているものの、免許保有率の変化、即ち交通分担率の変化までは考慮できていない。今後の課題として、自動運転サービスや次世代型モビリティの導入・普及によって変化し得る免許保有率や交通分担率の変化を加味できるようなモデル改良を実施したい。また、自動運転サービスの導入シナリオについても、運行設計領域（ODD）での条件付き自動運転「レベル3」や、限定地域での無人自動運転移動サービス「レベル4」といった、より現実的な設定を行い、具体的な施策の影響分析から、施策提言まで行うことを実現したい。

謝辞

本稿は、JSPS科研費（JP20K04724）の助成を受けて実施した研究成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 阪田知彦・鈴木温・杉木直・正木俊行・田寛之：世帯単位の将来都市構造予測モデルに基づく都市構造評価 Web アプリケーションの作成，土木計画学研究発表会・講演集（CD-Rom），Vol.64，35-09，2021.
- 2) 古田稜・鈴木温・永田光希：居住者のライフステージと世帯構造に着目した土地利用変化シミュレーション，土木計画学研究発表会・講演集（CD-Rom），Vol.64，35-11，2021.
- 3) 武藤慎一・宮下光宏・右近崇・水谷洋輔・猪狩祥平（2017）：都市交通整備評価のための一般均衡型 CUE モデルの開発、土木学会論文集 D3（土木計画学）、Vol. 73、No. 5、pp. I_163-I_181
- 4) 富岡秀虎，森本章倫：CUE モデルを用いた LRT 導入による人口誘導効果に関する研究，都市計画論文集，Vol.53，No.3，pp.1348-1354，2018.
- 5) 高杉叡生，佐藤徹治，竹間美夏：LRT・BRT の違いおよび都市内人口分布への影響を考慮した整備便益の計測—計測手法の開発と群馬県前橋市を対象とするケーススタディ—，都市計画論文集，Vol.53，No.3，pp.1341-1347，2018.

- 6) 杉本達哉, 杉浦聡志, 高木郎義(2019) : 自動運転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, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM) , Vol. 60, 26-11
- 7) 森田匡俊・鈴木克哉・奥貫圭一(2014) : 日本の主要都市における直線距離と道路距離との比に関する実証研究(2014), GIS-理論と応用, Vol22, No. 3, pp. 1-7

(Received September 30, 2022)