

自動運転等新たな交通の導入・普及評価のための立地均衡型準動学土地利用・交通モデル

Quasi-dynamic land use/transportation model based on the location equilibrium theory for evaluating the introduction and spread of new transportation such as automated driving

佐藤徹治研究室 21R2004 岡田 和磨

1. はじめに

近年、自動運転技術の開発が進み、実用化の機運が高まっている。高齢化が進み、公共交通が脆弱な地方諸都市においては、自動運転車の普及は、高齢者等の移動困難者の移動手段の1つとして期待される。しかし、長期的にみると地域の交通利便性の均質化により、居住地選択行動に影響を及ぼし、多くの都市が目標としている都市のコンパクト化と逆行する形で都市が変容することが懸念される。実用化に向けては都市への影響の可能性を広く検討する必要がある。そこで、本稿では将来的な自動運転車の一般世帯への普及や地域限定での導入を前提に、将来時系列の都市内人口分布に及ぼす影響を分析可能な立地均衡型準動学土地利用・交通モデルを提案する。

関連既往研究の高杉ら(2018)¹⁾、杉本ら(2019)²⁾をはじめとした立地均衡モデルでは、立地主体の基本単位を「世帯」として構築されてきた。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。さらに、新潟市を対象とした実証モデルを構築し、自動運転車の普及シナリオ別の都市内人口分布への長期的影響を分析する。

2. 理論モデルの構築

2.1 モデルの全体構造

モデルは、「個人」を転居の基本単位として、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

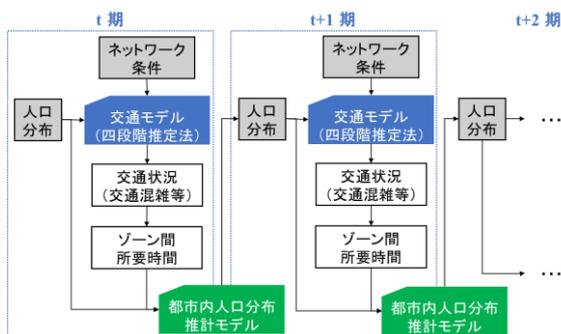


図-1 理論モデルの全体構造

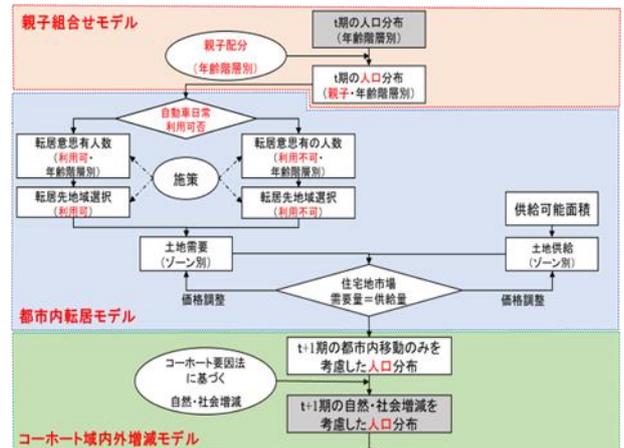


図-2 都市内人口分布推計モデルの全体フロー

「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」より構成される立地均衡型準動学土地利用・交通モデルである。モデルの全体フローを図-1に示す。

2.2 都市内人口分布推計モデル

本モデルは、土地利用、主に都市内人口分布の時系列的变化を観測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つのサブモデルより構成される。

基本的に、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とで親子での転居を擬似的に表現する。また、都市内の自然増減、都市内外の社会増減については、「コーホート域内外増減モデル」にて仮定する。都市内の社会移動については、本モデル内で内生的に得るものとしている。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。

親子組合せモデルでは、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。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。

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

ここで、下添字の g' は親世代の年齢階層、 g'' は年少者の年齢階層を表す。また PCR は親子組合せの存在比率、 POP は人口を表す。

都市内転居モデルでは、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。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。

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

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

ここで、下添字の t は期、 i はゾーン、 c は自動車日常利用の可否、 g は個人の年齢階層を表す。 V は部分効用、 τ はゾーン別のその他の魅力度を示す調整項、 r は地代、 I は所得、 Z は居住地域評価指標要素ベクトルを表す。また、1人あたりの土地（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。

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

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

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

ここで、 D は住宅地需要面積、 L は1人あたりの需要面積、 N は転入人数、 P は転居先地域選択確率、 NT は転居意思有の人数、 β は土地需要パラメータを表す。

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 は住宅地供給面積、 σ は土地供給パラメータ、 \bar{S} は住宅地供給可能面積を表す。住宅地供給可能面積は、(8)式のとおり t 期から $t+1$ 期までの間に各地域の人口の増減に応じて更新されるものとする。

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

初期時点の供給可能面積は、市街地では(9)式、郊外部では(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・空地率を表す。

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。

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

コーホート域内外増減モデルでは、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。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)式で表され、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)式により導出する。

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

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

ここで、 CR は域内自然・域外社会増減率、 POP は推計人口、 POP' は域内移動のみを考慮した推計人口を表す。

2.3 交通モデル

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。

各ゾーンの発生交通量は、(14)式より推計されるものとする。

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

ここで、下添字の 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 は生成原単位を表す。

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。

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

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

ここで、下添え字の 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、 $p=5$: 私事) を表す。また、 NW は従業者数を表す。

各ゾーン間の交通手段別の交通量は、(17)式より推計する。

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

ここで、下添字の m は交通手段を表す。また、 TR は交通分担率を表す。

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ものである。

3. 実証モデルの構築

3.1 対象圏域・ゾーン区分

実証モデルの対象圏域は、新潟県新潟市全域とした。ゾーン区分（分析の単位地域）は、世界測地系平面直角座標系3次メッシュを基本とした。対象圏域の郊外部については、3次メッシュ4メッシュを統合した2kmメッシュとした。

3.2 都市内人口分布推計モデル

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。

(3)式の部分効用関数における居住地評価指標の選定、パラメータ推定については2回のアンケート調査に基づき行った。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、自動運転車も普及していないことから、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。

第1回アンケート調査では、対象地域の住民の転居意向、居住地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。

第2回アンケート調査では、第1回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地域としての魅力度を5段階評価で尋ねた。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、以上の第2回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。

また、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）のすべての変数をゾーン毎に設定した。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。

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、国立社会保障・人口問題研究所（社人研）による将来の5年毎の推計値データを用いた。

3.3 交通モデル

発生交通量は、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。

分布交通量のうち、対象圏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 TR_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。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した。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。

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 TR 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、固定値とした。

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。対象圏域の交通ネットワークは、主要地方道以上で構成されるものとし、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）」に基づき設定した。ただし、各ゾーンと主要地方道とのアクセスリンクを設定し、道路ネットワークと各ゾーンの接続を考慮した。配分用の交通ネットワークを図-3に示す。なお、道路ネットワークは、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。

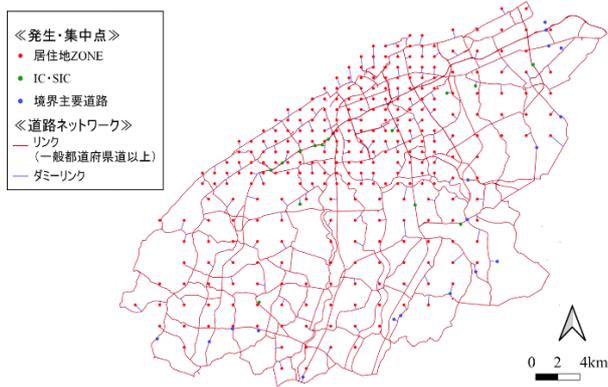


図-3 交通ネットワーク

高い地域に人口集約が起こることが示唆される。

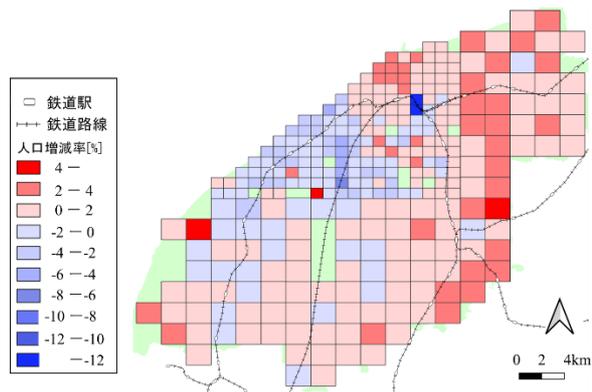


図-4 2045年の case0 に対する case1 の人口増減率

4. シミュレーション分析

4.1 概要

新潟市を対象として構築した実証モデルを用いて、2015年から2045年までの6期間、30年間の現状趨勢 (case0)、2030年時点で中央区を除く新潟市内の地域限定で認可される場合 (case1) および自動運転車の走行が全域で認可される場合 (case2) の3つのケースでの都市内人口分布の将来推計を実施した。

ケース別の転居率、自動運転車利用率、交通分担率について、第3回アンケート調査の調査結果より設定した。ここで、自動運転車の利用により自動車日常利用不可能者も自動車の日常利用が可能になるという考えのもと、自動運転車が利用可能なケースでは、当該地域の従来の日常利用不可能な住民のうち自動運転車を利用する住民が自家用車利用可能者と同様の転居行動 (転居の有無の意思決定、転居先地域の選択) を取ることを仮定した。

4.2 分析結果

2045年時点での case0 に対する case1、case2 の全年齢階層の人口増減率の分布をそれぞれ図-4、図-5に示す。

図-4から、自動運転車を都市の主要機能が集まる地区以外の主に郊外部限定で認可された場合には、走行が認可された郊外部および認可されていない中心市街の一部において人口の増加が確認できる。一方で、走行が認可された市街地においては、人口の減少傾向が見られる。これは、自動運転車認可により自動車交通量が増加し、元より交通量の多い市街部においては、交通容量を上回ったことによる渋滞の発生、これによる移動時間の増加が居住地としての忌避を招いたことが原因であると考えられる。

また、図-5からは、自動運転車が地域制限なしで走行認可された場合、郊外部において現状趨勢ケースと比較して人口が増加しているゾーンも見られるが、その増加は駅周辺地域に多く見られる。このことから、自動運転車が制限なく普及した場合に懸念されている人口の郊外拡散は際限なしには起こらず、駅周辺などの商業施設が集まること、比較的自動車交通利便性以外の魅力度の

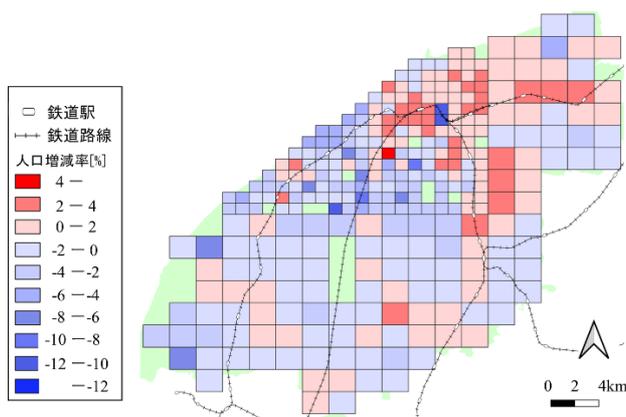


図-5 2045年の case0 に対する case2 の人口増減率

5. まとめ

本稿では、立地均衡型準動学土地利用・交通モデルを構築し、自動運転普及による都市への影響分析を行った。構築したモデルでは、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、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。

参考文献

- 1) 高杉叡生, 佐藤徹治, 竹間美夏 (2018): 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ー, 都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.1341-1347.
- 2) 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.