

# 自律的な転居を考慮した大都市郊外の人口動態シミュレーション

山田訓平 出口弘 (東京工業大学)

## Simulation Analysis of Population Dynamics Based on Autonomous Residential Choice in Suburb Areas

\*K. Yamada and H. Deguchi (Tokyo Institute of Technology)

概要—今日の人口減少社会において、地方のみならず大都市圏の市区町村にも人口確保のための政策決定が求められている。本研究では、大都市郊外の市区町村における人口に関わる政策効果の分析と可視化を目的として、エージェントベースシミュレーション (ABS) を用いた将来人口推計手法を提案する。提案するモデルでは住民の属性変化と自律的な転居行為をミクロな範囲で表現することで、マクロな都市間の人口動態の変化を表現した。モデルによって人口減少の局面にある大都市郊外の郊外市区町村の政策が将来人口に与える影響の定量的な分析を可能にした。

キーワード: 都市, 人口, シミュレーション

### 1 目的

今日の人口減少社会において、各自治体には長期的な都市の存続のための政策決定が求められている。人口減少は地方都市において顕著な問題であったが、現在は大都市圏でも例外でない。国立社会保障・人口問題研究所によれば、1都3県を有する東京圏の人口は2020年に減少に向かうとされている。ただし東京圏にもすでに人口減少の局面を迎えている市区町村が多く存在し、神奈川県人口統計調査報告によれば2014年の横浜市18区のうち7区が負の人口増加率を示している。これらの区は郊外地域のうち都市部から離れた立地に多い。加えて郊外都市には、近隣都市間で住民の移動が多い、住民の属性に住み分けが起こるなどの性質が強くみられる。今後の大都市郊外に位置する市区町村が効果的な政策決定を行うためには、大都市圏に特徴的な人口動態について新しい分析手法が求められるといえる。

そこで本研究では、大都市郊外における人口に関わる政策効果の分析と可視化を目的として、エージェントベースシミュレーション (ABS) を用いた新しい将来人口推計手法を提案する。一般に将来人口推計手法というと、コーホート要因法や多地域モデルがある。これらは統計的手法であるために汎用性が高いが、外的要因によって将来人口がどのように変化するか分析や住民の属性についての分析には不向きである。本研究ではABSを用いてこれらの欠点を改良する形で、都市住民の属性や世帯構成のミクロな変化の再現、ならびに世帯単位での自律的な転居行為を反映して市区町村単位でのマクロな人口動態を推計するモデルを構築する。

### 2 方法

人口動態に関する研究には、調査・分析研究、数理モデルを用いた研究、シミュレーション手法を用いた研究が挙げられる。

調査・分析研究として長沼、荒井<sup>1)</sup>は住民の属性が転居行為に与える影響についてアンケート調査を行い、都心と郊外の居住地選択において世帯構成と居住費のバランスが最も大きな要因であると結論づけた。また清水<sup>2)</sup>は国立社会保障・人口問題研究所の実施した第

7回人口移動調査を用いて転居の意向と住民の属性の関係について分析を行なうことで、住民の属性が転居の以降に大きな影響を与えることを示した。

数理モデルを用いた分野は、人口の増減を微分方程式として表して地域内の大まかな将来人口推計を行う数学的手法、ある年に生まれた人口をコーホートとみなして加齢、死亡、出生などの操作を行うコーホート要因法が用いられる<sup>3)</sup>。また、地域間の人口移動を扱うモデルとして、推計対象とする全ての地域間の移動率を地域間の転居率を統計データから見積もる手法が多地域モデルである。近年は統計データの充実やコンピュータの計算資源の向上、地域別人口推計の需要の高まりにより、多地域モデルがコーホート要因法と合わせて用いられることが増えてきた<sup>4)</sup>。実際に、国立社会保障・人口問題研究所の将来人口推計には多地域モデルによる移動率を仮定したコーホート要因法が一貫して用いられている。多地域モデルの他に地域間の人口移動を扱う手法として、空間相互作用モデルが挙げられる。多地域モデルが統計データに基づいているのに対し、空間相互作用モデルでは人口学的変数に基づいた地域間の人や物資の流れを説明するモデルである。空間相互作用モデルのなかで代表的な重力モデルは、ニュートンの万有引力の法則のアナロジーを基本的な考え方として、都市の人口や魅力、地域間の距離を変数として用いられる。このときモデルの変数を恣意的に設定できるため、モデルの妥当性を評価するプロセスが必要になる。

シミュレーションモデルの分野の先行研究について述べる。シミュレーションを用いた研究には格子状のセルの状態が遷移ルールに従って変化するセル・オートマトンモデル、エージェントの自律的な振る舞いから大域的な現象を表現するエージェントベースシミュレーション (ABS) が挙げられる。セル・オートマトンモデルはもともと細菌などの生命現象や結晶の成長といった複雑な現象を表現する研究として発展したが、計量地理学者であるTobler<sup>5)</sup>によって地域のシステムを表現する試みがなされ、今日では滝澤ら<sup>6)</sup>によって都市モデルへの応用が提案された。セル・オートマトンを用いた都市モデルの構築には人間や建築物、自然環境といった要素間の局所的な相互作用を表現できる利

点がある。一方 ABS では、属性に基づく自律的な意思決定主体 (エージェント) の存在を仮定する。エージェント間の相互作用は空間的な近傍との作用に限らないため、セル・オートマトンに比べてより複雑な、また抽象的な事象を表現することが可能となる。応用分野としては、エージェントが意思決定を行う内部モデルと振る舞いを行う外部モデルに階層を分けることで社会に貨幣が創発する現象を表現する研究<sup>7)</sup>や、商業数積地域の来訪者の自律的な回遊行動を表現することで都市の中心地域の活性化やエリアマネジメントを行う研究<sup>8)</sup>が行われた。

ABS で用いるエージェントは、可能な限り現実に即した属性を付与与えることが望ましい。しかしそのような統計データは現実的に得られないことが多く、公表されている統計データを用いてエージェントの属性を復元する研究が行われている。都市住民の世帯属性を統計データから復元する手法として福田<sup>9)</sup>は、シミュレーテッドアニミシング法 (SA) を用いて限られた 8 種類の統計データに整合するような近似的な世帯構成の組合せを得る手法を提案した。SA は一般的にヒューリスティックな最適化手法として知られているが、他の手法と異なり出発点に依存せずに大域的最適解を得られるとされている。相澤<sup>10)</sup>は、この属性復元手法によって地方都市の住民属性を復元したデータを用いることで、世帯を単位とした住民の移動から地方都市内の人口動態を表現するシミュレーションモデルを提案した。

本研究では ABS の手法を用いる。シミュレーションモデルには、調査研究と数理モデルの中間に位置する特徴がある。複数地域の人口動態を表現する目的に対して、都市の住民をエージェントとするミクロな世帯変化と都市間の転居行為の結果を集計することで、複数の市区町村が隣接するような郊外地域のマクロな人口動態の表現を行う。これにより、コーホート要因法の欠点である社会移動を扱えない点を補うだけでなく、地域ごとの政策の反映が将来人口に与える影響を分析することが可能になる。また、数理モデルと調査・分析研究による知見はアルゴリズムの設計段階だけでなく、評価の指標として用いた。

### 3 モデル

本研究で提案するモデルは、世帯構成の時系列変化を表現するための世帯変化モジュール、世帯ごとの都市間の転居を表現するための転居モジュールをサブモデルとして持つ。以下に、扱う対象の前提条件を述べた上で、モデルの詳細設計を述べる。

#### 3.1 モデルケース

本研究では、複数都市の「都心」から「郊外」にかけての立地の差と都市ごとの特性の差をモデル内に表現する。そこで、以下のようにモデルケースを選定した。

モデルケースは、1.) 東京圏において都内へのアクセスを変化させながら連続的に分布している郊外地域であること 2.) 人口の流入流出が対象地域内である程度閉じていること 3.) 市区町村単位での人口移動のデータが得やすいこと、の条件を満たしていることが望ましい。「都心」から「郊外」にかけて連続的に分布していることで立地条件のばらつきを持たせることができ、流入流出が対象都市内で収まっていることで外部との人口移動の誤差を少なくすることができるためである。

そこで今回は、神奈川県に位置する 6 都市 (高津区、宮前区、青葉区、都筑区、緑区、大和市) をモデルケースとして用いた。これらは郊外住宅地と都心を結び同一路線沿線に位置しており、地域内での転居も多いためである。平成 22 年の国勢調査の人口移動集計によれば、2005 年から 2010 年にかけて都市から転出する人口のうち 6 都市内の移動の占める割合は平均 71% である。

#### 3.2 転居の仮定

本研究における転居の捉え方について述べる。国土交通省住宅局による平成 25 年住生活総合調査の結果より、最近 5 年間の住替えの主な目的には「就職、転職、転勤などに対応 (21.7%)」、「親、配偶者などの世帯からの独立 (21.2%)」、「子育て・教育の環境を整える (17.7%)」の結果が目立った。これらより転居の多くが世帯は仕事、自立、出生などのライフイベントに付随して転居を行う傾向が読み取れる。また世帯構成別の結果では、親と子からなる世帯の転居の目的には「子育て・教育の環境を整える (32.9%)」、「部屋を広くする、部屋を増やす (27.7%)」が目立つ一方で、高齢者からなる世帯では「高齢期の生活の安心・安全 (35.5%)」、「退職・離職後の生活の充実・平穏 (15.5%)」が目立った。これらより、世帯構成や年齢層によって転居の目的が異なることが読み取れる。

本研究では、都市に居住するすべての世帯を若年単身世帯、若年夫婦のみ世帯、若年子供連れ世帯、高齢単身世帯、高齢夫婦世帯、高齢子供連れ世帯に 6 分類しそれぞれの転居の嗜好を反映する。以降この 6 分類を世帯分類と表記して用いる。

#### 3.3 世帯変化の仮定

本研究では出生、死亡、婚姻、子供の自立のみを世帯変化として扱う。世帯変化はこれら以外にも離婚や 2 世帯の統合、単身赴任による一時的な別居などが考えられるが、今回はこれらを扱わないものとする。これらは年齢の変化から確率的に導くことが困難であるためだ。世帯は 1 年に 1 回世帯変化を行う機会を得る。出生、婚姻、子供の自立を順に行い、すべてを同じ年に行うこともある。

世帯変化の表現のためにモデル内で用いた統計データについても述べる。国立社会保障・人口問題研究所から得た年次の統計データとして、年齢階級別死亡率 (2015)、第一子～第四子についての年齢階級別出生率 (2015)、年齢階級別婚姻率 (2015) を用いた。

#### 3.4 収入と地価の仮定

住民の収入は居住地決定のメカニズムに影響を与える要因のひとつとして一般に扱われるが、今回は収入の要因を扱わずに年齢と世帯構成のみを要因として扱う。理由としては対象とする 6 都市内で地価の差が少ないことが挙げられる。平成 27 年の住宅地に限った地価平均は、川崎市高津区 (273,500 円)、宮前区 (244,300 円)、横浜市青葉区 (266,400 円)、都筑区 (253,700 円)、緑区 (206,600 円)、大和市 (183,300 円) と差があるものの、これらの近隣都市である東京都世田谷区 (534,900 円) や渋谷区 (1,046,600 円) と比べると明らかに差は少ないことがわかる。よって、本研究では住民の転居行為を表現する上で世帯の収入による差を考慮せず、世

帯分類と都市の属性のみが転居に影響する変数であると仮定する。

### 3.5 人口集積の仮定

Thomas C. Schelling は著書“ Micromotives and Macrobehavior<sup>11)</sup> ”の中で、住民の人種や文化、貧富の差に基づく居住地選択の僅かな選好の違いが大域的、空間的な分居をもたらすことをゲーム理論的に説明している。一方、今回モデルケースとする 6 都市については、子供連れ世帯に適した都市や単身世帯に適した都市といった都市の特性がエリアごとに分かれており、Schelling のいう分居の様相がみられる。そこで本研究における人口の集積の考え方は、近隣エージェントの属性によって自身の満足度を計測する Schelling の考え方を応用させ、同じ都市の同じ分類の世帯数が都市の特性変数として、間接的に新規流入世帯にとっての魅力度に影響するものとしている。ここで、本研究で扱う都市の魅力度については定義を後述する。

### 3.6 対象の定義



Fig. 1: 住民エージェント、世帯、都市の包含関係

本モデルで扱う対象の包含関係を Fig.1 に図示する。対象は、住民エージェント、世帯、都市から構成され、それぞれは個別の ID を持つことで区別される。また、住民は年齢 (Age)、役割 (Role) の属性を持ち、世帯は世帯構成 (FamStyle)、世帯分類 (Group)、世帯大分類 (MetaGroup) の属性を持ち、都市は立地 (LocationUtility)、魅力度 (Attraction)、人口 (Population)、世帯数 (NumOfHousehold) の属性を持つものとする。以下に、住民、世帯、都市とそれぞれの属性集合と属性を得る関数について定義を示す。

#### 3.6.1 住民の定義

$\Omega[Agent] = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  を住民集合とする。このとき、  
 $Age = \{0, 1, \dots, 99\}$   
 $Role = \{single, husband, wife, child, parent\}$   
 $f_{Age} : \Omega[Agent] \rightarrow Age$   
 $f_{Role} : \Omega[Agent] \rightarrow Role$  とする。

#### 3.6.2 世帯の定義

世帯集合は住民集合の直和分割として扱う。つまり、  
 $\Omega[Household] \subseteq \rho(\Omega[Agent])$  ,  
 $\forall X, Y \in \rho(\Omega[Household]), X \cap Y = \phi$  ,  
 $\cup\{X|X \in \rho(\Omega[Household])\} = \Omega[Agent]$  ,  
 を全て満たすような  $\Omega[Household] = \{H_1, H_2, \dots, H_m\}$  を世帯集合とする。このとき、  
 $FamStyle = \{s, hw, hwc, hwcc, hwccc, hwccccc, phw, phwc, phwcc, phwccc, pphw, pphwc, pphwcc, pphwccc, hc, hcc, wc, wcc\}$   
 $Group = \{ 若年単身, 若年夫婦, 若年子供連れ, 高齢単身, 高齢夫婦, 高齢子供連れ \}$   
 $MetaGroup = \{ 若年, 子育て, 高齢 \}$   
 $f_{FamStyle} : \Omega[Household] \rightarrow FamStyle$

$f_{Group} : \Omega[Household] \rightarrow Group$   
 $f_{MetaGroup} : \Omega[Household] \rightarrow MetaGroup$  とする。

#### 3.6.3 都市の定義

都市集合は世帯集合の直和分割として扱う。つまり、  
 $\Omega[City] \subseteq \rho(\Omega[Household])$  ,  
 $\forall X, Y \in \rho(\Omega[City]), X \cap Y = \phi$  ,  
 $\cup\{X|X \in \rho(\Omega[City])\} = \Omega[Household]$  ,  
 を全て満たすような  $\Omega[City] = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  を都市集合とする。このとき、  
 $LocationUtility = \{1, 2, \dots, 6\}$   
 $f_{LocUtil} : \Omega[City] \rightarrow LocationUtility$   
 $f_{Attraction} : \Omega[City] \times MetaGroup \rightarrow \mathbb{N}$   
 $f_{Population} : \Omega[City] \times Age \rightarrow \mathbb{N}$   
 $f_{NumOfHouseholds} : \Omega[City] \times Group \rightarrow \mathbb{N}$  とする。

### 3.7 インプットデータ

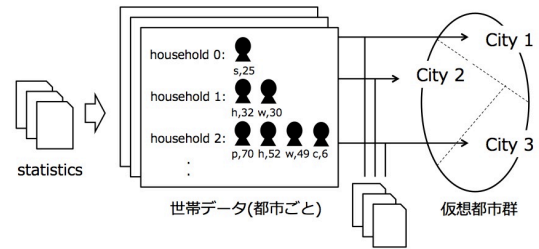


Fig. 2: インプットデータ生成のプロセス

本モデルのインプットデータは各都市の初期の世帯データである。この世帯データは都市に居住するすべての世帯について、住民それぞれの世帯内役割、年齢を列挙した csv データである。実際の個票データが得られることが理想であるが、今回は現実の 1/20 の世帯数で統計値から復元した世帯のデータを用いる。国立社会保障・人口問題研究所から得た年次の統計データを用いて、福田<sup>9)</sup>の世帯推計モデルを用いて 6 都市分を生成した。

その他のインプットデータとして統計データがあり、国立社会保障・人口問題研究所の資料より年齢階級別死亡率、年齢階級別出生率 (第一子 ~ 第四子)、年齢階級別婚姻率を、平成 22 年国勢調査より 6 都市間の移動人口マトリクス、東京圏における年齢階級別の移動率を用いた。Fig.2 にインプットデータ生成のプロセスを図示する。

### 3.8 世帯変化モジュール

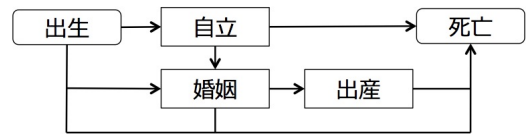


Fig. 3: 世帯変化モジュールのイベントの依存関係

世帯変化モジュールでは、住民エージェントと世帯属性の属性の変化を記述する。Fig.3 に本モデルで扱う世帯変化のイベントの依存関係を図示する。1 期は現実の 1 年に対応する。t 期の世帯変化は「死亡」、「加齢」、「出生」、「婚姻」、「自立」のイベントからなる。はじめに全ての住民エージェント  $w \in \Omega[Agent]$  は年齢別の死亡率に沿って「死亡」を行う。死亡した住民エージェン

トは今後の世帯変化に関与せず、世帯や都市の人口に含めないものとする。次に、死亡していない住民エージェントは「加齢」を行う。次に、 $f_{Role}(w) = wife$ 、 $18 \leq f_{Age}(w) \leq 44$ の住民エージェントは年齢階級別・出生順位別の有配偶出生率に沿って「出生」を行う。住民エージェントが出生を行う場合、自身の世帯に新規エージェントを追加する。次に、 $f_{Role}(w) = single$ または $child$ 、 $18 \leq f_{Age}(w) \leq 59$ の住民エージェントは、年齢階級別の婚姻率に沿って「婚姻」を行う。婚姻を行う場合、同一都市に含まれる2つの住民エージェントを選定し、新たに生成した世帯に追加する。次に、 $f_{Role}(w) = child$ かつ $20 \leq f_{Age}(w) \leq 39$ の住民エージェントは年齢別の一定の確率で「自立」を行う。自立を行う場合も婚姻と同様に、世帯から独立して新たな世帯を生成する。

一般に、婚姻のシミュレーションについては地域をまたぐ婚姻や年齢差の統計に即したマッチングが提案されている。本研究では世帯構成の変化の表現に重きを置くために、生殖可能年齢の範囲で統計値とのマッチングを重視することで婚姻の表現とした。よって、本研究では夫婦間の年齢差の最適化や地域をまたぐような婚姻は考慮されておらず、婚姻率のみに従った同一都市内での婚姻を扱っている。

最後に、 $t$ 期において世帯に含まれる住民エージェントのいずれかが「死亡」、「出産」、「婚姻」、「自立」のイベントを経験したとき、その世帯は次の転居モジュールで転居の可能性を得る。これはライフイベントに転居が付随することを表現している。

### 3.9 転居モジュール

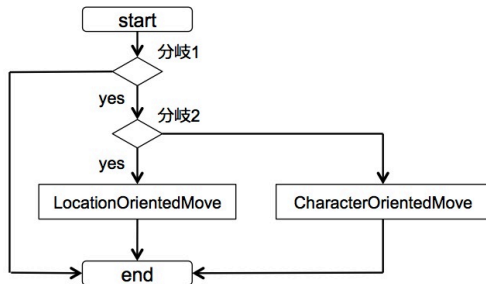


Fig. 4: 転居モジュールのフロー

転居モジュールでは、世帯変化モジュールにおいて世帯変化のイベントを経験した世帯に対して都市間の転居の操作を行う。Fig.4に転居モジュール内のフローを図示する。Fig.4の分岐1において世帯が実際に他の都市に転居を行うかどうかの分岐を行い、分岐2では転居を行う世帯が2通りの転居先決定プロセスの内どちらに従うかの分岐を行う。本研究では転居先決定のプロセスが世帯分類によって異なることを前提としているため、単身世帯や若年世帯に強くみられると予想できる「立地志向型 Location Oriented」と子供連れや高齢世帯に強くみられると予想できる「特性志向型 Character Oriented」の2種類の転居プロセスをモデル化した。転居を行う世帯はこの2つのいずれかに従って転居先を決定するものとする。

立地志向型の転居プロセスでは、都市の立地属性に基づいて転居先を決定する。このとき世帯が都市 $C \in \Omega[City]$ を選択する確率 $P_1(C)$ は以下のように

表される。ここでは、都心に近い立地の都市が高い $LocationUtility$ を属性として持つものとしている。

$$P_1(C) = \frac{f_{LocUtil}(C)}{\sum_{X \in \Omega[City]} f_{LocUtil}(X)} \quad (1)$$

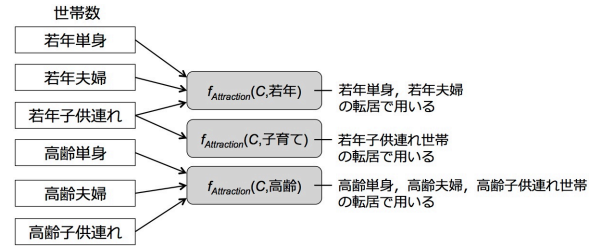


Fig. 5: 魅力度の依存関係

都市 $C \in \Omega[city]$ の魅力度 $f_{Attraction}(C, M)$ は、都市に居住している世帯のうちそれぞれの世帯大分類 $M \in MetaGroup$ に分類される世帯数の平均値として与えられる。この関係を Fig.5に示す。

このとき特性志向型の転居プロセスでは、都市の魅力度と立地の双方に基づいて転居先を決定する。世帯 $H \in \Omega[Household]$ が都市 $C \in \Omega[City]$ に転居する確率 $P_2(H, C)$ は重力モデルの考え方に基づき、魅力度に比例し移動距離に反比例する形で以下のように定義する。ただし、 $l$ は転居元と転居先の都市の立地の差の絶対値を、 $\alpha(G)$ は後述するパラメータである。

$$P_2(C, H) = \frac{\alpha(f_{Group}(H)) \cdot f_{Attraction}(C, f_{MetaGroup}(H))}{l \cdot \sum_{X \in \Omega[City]} f_{Attraction}(X, f_{MetaGroup}(H))} \quad (2)$$

転居モジュールでは Table.1 に示すような3種類のパラメータの集合を用いる。以下に定義を示す。

$$P_M[G] : \{T, F\} \rightarrow [0, 1]$$

$$P_p[G] : \{Loc, Char\} \rightarrow [0, 1]$$

$$\alpha : G \rightarrow [0, 1]$$

これらは6つの $G \in Group$ のそれぞれに対して独立に値が存在するパラメータである。 $P_M[G](T)$ は世帯分類 $G$ の世帯が $t$ 期に転居を行う確率、 $P_p[G](Loc)$ は世帯分類 $G$ の世帯が転居先決定プロセスに特性志向型ではなく立地志向型を選択する確率、 $\alpha(G)$ は式(2)内に用いた世帯分類 $G$ の世帯にとっての魅力度の影響を調整する係数を意味する。

Table 1: 転居モジュールで用いる各種パラメータ

パラメータ名	説明
$P_M[G](T)$ $G \in Group$	特定の世帯変化イベントが起こった期に世帯が実際に転居を行う確率
$P_p[G](Loc)$ $G \in Group$	転居先の決定プロセスが特性志向型ではなく立地志向型である確率
$\alpha(G)$ $G \in Group$	式(2)において魅力度の影響を調整するための係数



Table 2: パラメータの推定結果

	若年			高齢		
	単身	夫婦	子供連れ	単身	夫婦	子供連れ
$P_M[G](T)$	0.705	0.191	0.011	0.629	0.058	0.035
$P_p[G](Loc)$	0.676	0.535	0.410	0.453	0.335	0.437
$\alpha(G)$	0.277	0.571	0.403	0.408	0.465	0.704

#### 4 パラメータ推定

モデルのパラメータ推定を行うために、今回は多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA) を用いた。目的関数は6都市間の移動統計マトリクスとシミュレーション結果の差の二乗和と年齢階級別の移動率とシミュレーション結果の差の二乗和の2つを用い、2010年から2015年の5年間の統計値に対して目的関数を最小化することでパラメータフィッティングを行なった。また、GAの基本的な考え方の一つである交叉の操作には小野<sup>12)</sup>の単峰性正規分布交叉 (UNDX) パッケージを用いた。UNDXは変数間に依存関係がみられる場合や目的関数に多峰性が認められる場合での最適化に適しているとされる。本研究の転居モデルでは3つのパラメータ間に時間的な前後関係による依存関係が想定されるため、UNDXを使用した。

##### 4.1 パラメータ推定結果

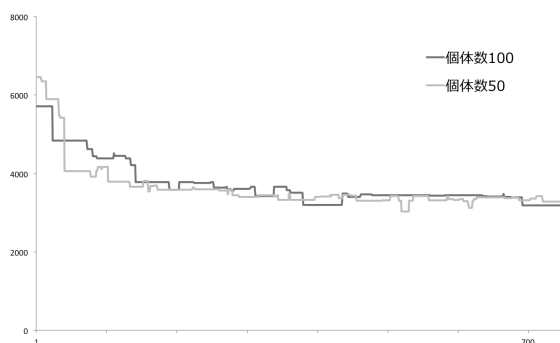


Fig. 6: 目的関数の推移

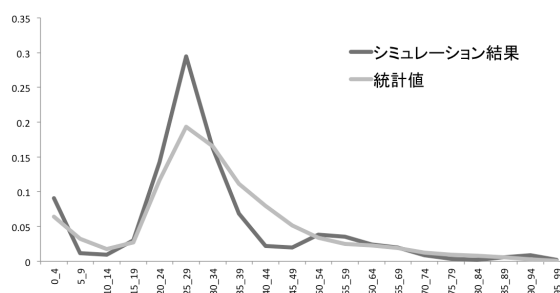


Fig. 7: 年齢階級別転居率

パラメータ推定結果を Table2 に示す。 $P_p[G](Loc)$  のパラメータから、立地志向の転居先決定方式に従って転居を行う傾向は高齢単身世帯や若年単身世帯に強くみられることがわかる。一方、立地志向ではなく都市の特性志向の転居先決定方式を採用する傾向は高齢子供連れ世帯や若年子供連れ世帯に強くみられる。これは

子供連れ世帯が立地よりも都市の特性を優先して転居を行うという仮説を支持する結果であるといえる。また、この時の目的関数の推移を Fig.6 に、推定結果のパラメータを用いた年齢別転居率のシミュレーション結果と統計値の比較を Fig.7 に示す。Fig.6 からは目的関数がひとつの値に収束していることがわかり、Fig.7 からは統計値に対してシミュレーションが最適化されていることが読み取れる。以降、Table2 に示す結果を得られたパラメータとして用いる。

#### 5 妥当性の評価

社会現象を対象とする社会シミュレーション研究では、構築したモデルを検証する手続きとして妥当性の評価が必要とされる<sup>13)</sup>。この段落では、上記を踏まえて、本研究で提案するモデルの妥当性を評価する。妥当性の評価では、得られたシミュレーション結果が対象とする特定の事象を表現できているかの指標を用いる。本研究では青葉区の推定結果を例に挙げ、すでに公開されている2015年の青葉区の人口組成の変化と世帯構成の変化に照らし合わせることでモデルの妥当性の評価を行った。今回は、以下に示す結果をもってモデルの妥当性が支持されたものとする。

##### 5.1 人口組成からの評価

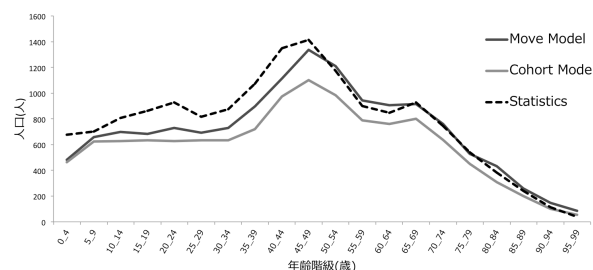


Fig. 8: 青葉区の2015年の年齢階級別人口, 2つのモデルによる推定結果と統計値の比較

Table 3: 1階級あたりの統計値から乖離した平均人口(人)

	総人口	0歳-49歳	50歳-99歳
コーホートモデル	166.0	246.5	148.3
転居モデル	90.4	32.5	85.5

Fig.8は転居モデルを用いて2010年の世帯データから導いた2015年の青葉区の年齢別人口組成と、実際の青葉区の2015年の年齢別人口組成を重ねたグラフである。また、比較用として社会移動を扱わないコーホート要因法による推定結果を同様に重ねあわせた。縦軸は人口を、横軸は5歳階級の年齢を表している。また、Table3は統計値からの乖離度を1年齢階級あたりの平均人口として比較したものである。統計値から乖離した

人口の転居モデルとコーホート要因法はどちらも 2010 年の年次データから生成した現実の 1/20 のスケールの世帯データを用いており、2015 年の青葉区の人口組成は横浜市政策局の横浜市統計ポータルサイトより入手した。

これらの結果から、転居モデルを用いた 2015 年の人口推計結果はコーホート要因法による結果と比べて統計データからの乖離が少ないことがわかる。一般的に人口推計において生じる誤差は自然増減の誤差と社会増減による誤差に分類できる。今回は転居行為を転居モデルとして扱った結果、コーホート要因法よりも社会増減の誤差が小さくなったことが考えられる。また、年齢別の乖離具合に着目すると転居モデルは 50 歳以上の人口推計の精度が高いのに対して、50 歳未満の推計の精度が低い。これは 2010 年時点での推計よりも 5 年の間に若年世帯の流入が多かったためと考えられる。これは、青葉区の進めている若年世帯に向けた都市計画の方針とも合致した結果である。

## 5.2 世帯構成からの評価

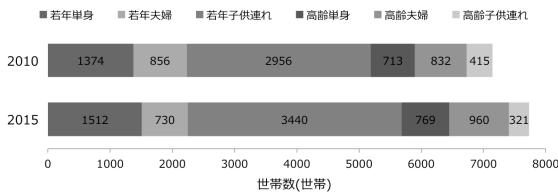


Fig. 9: 青葉区の世帯構成 (絶対値) の推移

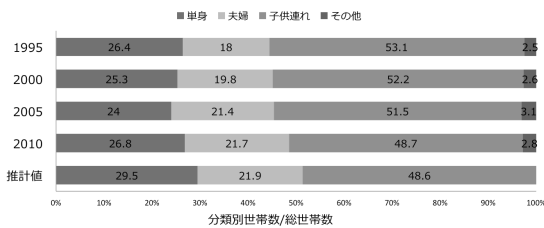


Fig. 10: 青葉区の世帯構成 (割合) の推移

次に、世帯構成の面からモデルの妥当性の評価を行う。Fig.9 は青葉区の 2010 年の世帯構成別世帯数と 2015 年の推計値を示したもので、Fig.10 は 1995 年から 2010 年の世帯構成 (3 分類) の全世帯に占める割合と、2015 年の推計値を示したものである。今回はこれらを横浜市都市計画マスタープラン青葉区プラン「青葉区まちづくり指針」と照らしあわせることで 2015 年における世帯構成の面からモデルの妥当性の評価を行う。推計結果と統計の整合性の評価を Table4 に示す。

## 6 シミュレーション実験

### 6.1 実験手法

ここでは本研究の転居モデルの可用性を検討するためにシミュレーション実験を行う。今回は、モデルケースとして設定した 6 都市 (高津区、宮前区、青葉区、都筑区、緑区、大和市) の中から青葉区を例に挙げ、青葉区が直面している人口問題に対して計画している施策が将来の人口動態に与える影響についての分析を行う。

Table 4: 推計結果にみられる世帯変化の傾向と整合性の評価

青葉区の推計結果にみられる傾向	整合性の評価
全体の世帯数が増加傾向 単身、夫婦、子供連れ世帯数の増加 高齢世帯の占める割合に変化がない 夫婦のみ世帯の割合が増加 子供のいる世帯の割合が減少	×

横浜市青葉区は青葉区まちづくり指針のなかで、地域内の人口減少と少子高齢化を避けるべき問題として提起している。また地域内では共働きの世帯が増加傾向にあることを紹介した上で「子育てと仕事を両立させるための様々な仕組み」が今後必要であり、「子育てを支援する様々なサービス、近くに同じ年代の子供がいて一緒に遊ぶ環境と場」も必要であると結論づけている。今回のシミュレーション実験では、この青葉区の計画を若年子供連れ世帯に向けた「施策」として位置付け、以下の手順で評価することを試みる。

### 6.2 実験条件

施策の影響をシミュレーション結果に反映するために、今回は以下の条件で実験を行う。

- シミュレーション期間は 2010 年から 2040 年、人口のスケールは 1/20 とする。
- 若年子供連れ世帯にとっての都市の魅力度を定数倍することを施策の実行とする。
- 施策を実行した場合としない場合の年齢別人口の変化をもって施策の評価とする。
- 各シミュレーション実験は結果の平均値が十分に収束する回数まで繰り返し行う。

### 6.3 評価指標

若年層の誘致の達成度を評価するために、施策の評価指標を定義する。評価指標は、何も施策をしない状態 (ベースシナリオ) と比較して、施策を行なった場合の 0 歳から 59 歳の若年人口の増加率とする。つまり、施策を行なった場合の  $f_{Population}$  を  $f_{Population}[scenario]$ 、ベースシナリオの場合を  $f_{Population}[base]$  と記述するとき、都市  $C \in \Omega[City]$  のシナリオ評価値  $Value(C)$  は以下のように定義する。このとき単位は%である。

$$Value(C) = \left( \frac{\sum_{x=0}^{59} f_{Population}[scenario](C, x)}{f_{Population}[base](C, x)} - 1 \right) * 100 \quad (3)$$

### 6.4 予備実験

はじめに、施策を行わない場合の青葉区の若年人口と各世帯分類の世帯数を得るための実験を行う。それぞれベースシナリオとして 400 回のシミュレーション実験を行い、平均値を得る。各世帯分類の世帯数の推移を Fig.11 に示す。また、ベースシナリオでシミュレーションを行った際に都市ごとの人口規模のバランスが大きく変化しないことを確かめる。Table6 は 2010 年から 2040 年にかけてのベースシナリオにおいて、転入

Table 5: 5年間のみ施策を実行した場合のシナリオ評価値 (%)

		年別シナリオ評価値					
		2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年
施行期間	2010-2014年	+3.33	+0.90	+1.06	+1.18	+1.26	+1.53
	2015-2019年		+2.60	+0.95	+0.99	+1.12	+1.37
	2020-2024年			+2.98	+1.10	+1.11	+1.30
	2025-2029年				+3.38	+1.16	+1.31
	2030-2034年					+3.63	+1.47
	2035-2039年						+3.07

Table 6: 人口規模と流出入の比較 (万人)

	高津	宮前	青葉	都築	緑	大和
2015年の総人口	21.50	21.73	30.26	19.93	17.60	23.07
累積転出人口	2.26	2.34	2.93	2.29	1.99	2.27
累積転入人口	2.58	2.83	3.13	2.38	1.78	1.39
転入 - 転出	0.32	0.48	0.20	0.09	-0.21	-0.88

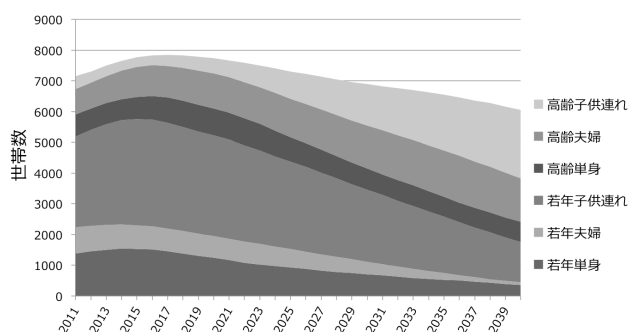


Fig. 11: ベースシナリオでの世帯数の推移

または転出した人口の累積合計を示したものだが、総人口の規模に対して過剰な流出入は確認できない。また、高津区や宮前区などの比較的都心に近い立地の都市に人口が移動している傾向が見取れ、これは都心から遠くに位置する都市において人口減少が起こる現象と整合性が確認できる。

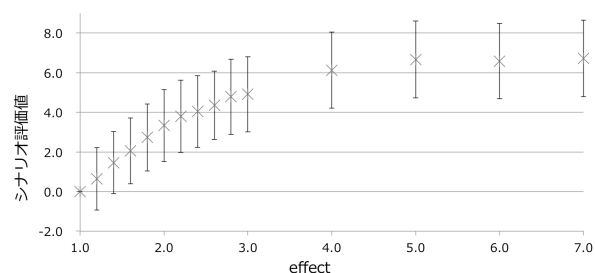


Fig. 12: effect が青葉区のシナリオ評価値に与える影響

次に、施策をシミュレーション結果に反映させるために都市の魅力度をどれほど定数倍するかを決定するための予備実験を行う。施策の実行が転居に与える影響については実証的な調査研究結果が得られないため、今回は仮定値としてパラメータを設定し、適切だと思われる値を設定した。パラメータとは都市の魅力度にかける非負の実数  $effect$  である。Fig.12 は青葉区の施策によって  $f_{Attraction}$  (青葉区, 若年子供連れ世帯) の値を  $effect$  倍したときの、2015年におけるシナリオ評価値の値である。  $effect$  を変化させながらそれぞれ 400 回のシミュレーション実験を行い、  $Evalue$  (青葉区) の平均値と標準偏差をプロットした。 Fig.12 より、  $effect = 4.0$

付近までは  $Evalue$  (青葉区) の増加が  $effect$  の増加に伴っているのに対し、それ以降では影響を受けていないことがわかる。これは、  $attraction$  による特性志向での転居を行う若年子供連れ世帯が、全ての都市から青葉区にのみ転入するようになったためと考えられる。今回は、  $effect=2.0$  が適切な施策の効果の程度であると判断し、以降の実験に用いる。

## 7 実験結果と考察

### 7.1 人口組成に着目した実験結果

Table.5 は 2010 年から 2039 年間の特定の 5 年間だけ青葉区のみが施策を行った場合の、年ごとのシナリオ評価値を示したものである。すべてのシナリオでシナリオ評価値は正の値を示しているが、施策の時期と評価の年ごとでシナリオ評価値に差があることがわかる。2010-2014 年に行う施策を例に挙げると、シナリオ評価値は 2015 年で大きく上昇し 2020 年では減衰、その後はゆるやかに増加する。これは施策を行うことが短期的にも長期的にも将来人口の確保に効果的であることを示す。また、2040 年のシナリオ評価値をみると、短期的な効果と思われる 2035-2040 年での施策を除いて、2010 年-2014 年の施策が最も大きい値を示している。このことから、長期的な目標でのシナリオ評価値の増加を目指す場合は、5 年間という短い期間の施策であっても早い時期に行うことが効果的であるとの解釈ができる。しかし同時に、2020-2024 年や 2025-2029 年の施策よりも 2030-2034 年の方がシナリオ評価値が大きい。これらの結果から、以下の政策評価に関わる知見が得られる。

#### 知見 1.

施策直後は短期的に人口が増加し、その後は一度減衰した後に徐々に効果が出るため、5 年間という短い期間の施策であっても早期の実行が効果的である。

#### 知見 2.

2040 年時点の人口確保を目標にする場合、2010 年、2030 年、2015 年、2025 年、2020 年の順に 5 年間の施策を始める時期として適切である。

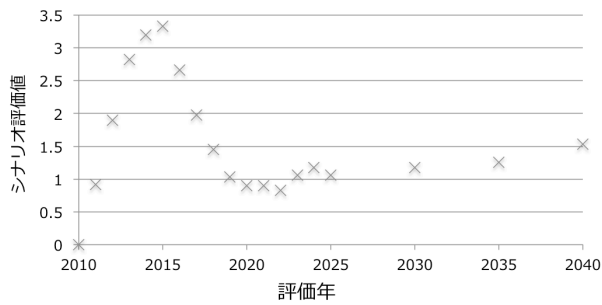


Fig. 13: シナリオ評価値の年別の時系列変化

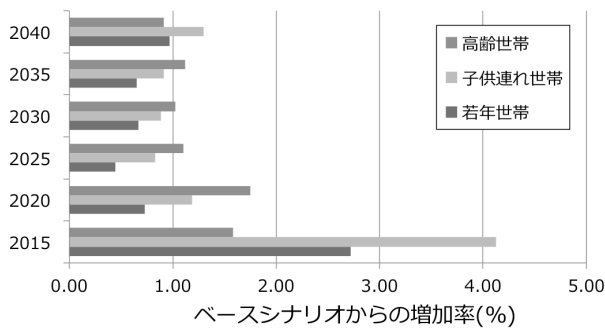


Fig. 14: 魅力度の増加率について年別の変化

ここで、施策の効果の時系列変化とその要因について分析を行う。Fig.13は青葉区のみが2010年から2014年にかけて若年子供連れ世帯の誘致を行なった場合の年別の青葉区のシナリオ評価値を詳細に示したものである。Fig.13より、施策の実行中には若年人口が増加し、一度減衰したあと再び増加がみられる。前者の増加を施策の直接効果と呼び、後者を間接効果と呼ぶこととする。一方、Fig.14はFig.13と同様の条件で実験を行った場合の青葉区の年別の魅力度のベースシナリオからの増加率を示したものだ。施策を行うことで青葉区の魅力度は人口の増加率の増減と同様に増加しており、他都市と比べて相対的に都市の魅力が増加することが青葉区への人口流入増加の原因となっていることがわかる。この結果より、直接効果は施策によって誘致された世帯によって生じるもので、間接効果はこれらの世帯が都市の魅力度を増加させることで生じるものと考えられる。また、特徴として、直接効果はすぐに減衰するが、間接効果は施策の実行後に時間をかけて徐々に増加するような効果であるといえる。

知見 3.

施策の効果は直接効果と間接効果に分けられ、前者は施策の実行期間中に誘致された世帯による効果、後者は直接効果によって誘致された世帯によって増加した都市の魅力度による効果である。

知見 4.

2010年から2014年にかけて若年子供連れ世帯の誘致を行なった結果、特に子供連れ世帯と若年世帯にとっての都市の魅力度が向上する。

次に、青葉区が同様の施策を行うことで近隣都市との人口の流出入に与える影響を分析する。Fig.15は、

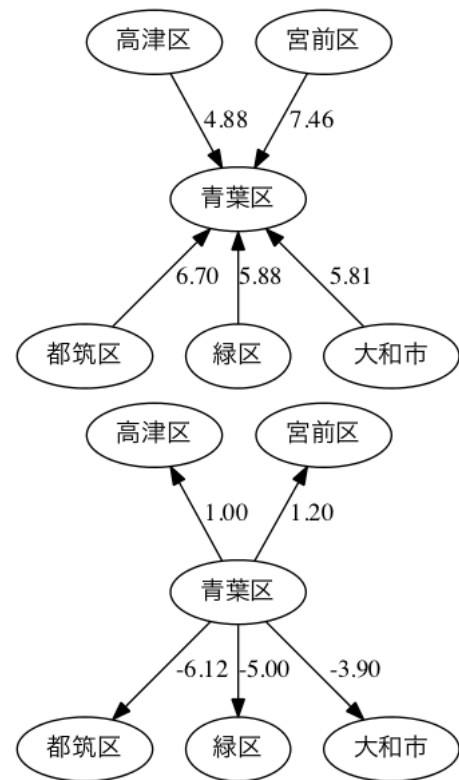


Fig. 15: 青葉区と他都市間の流出入人口の増加率 (%)

ベースシナリオと比較して青葉区と他都市間での人口の流出入の増加率をそれぞれグラフとして図示したものだ。施策には2010年から2014年にかけて青葉区のみが若年子供連れ世帯の誘致を行なった場合を想定し、2010年から2040年にかけて1年あたりの増加率を算出した。青葉区への流入に着目すると、近隣都市(宮前区、都筑区)からの流入に顕著な増加がみられる。これは魅力度の工場により特性志向型の転居による青葉区への流入が活性化されたことで、距離の近い近隣都市からの転居が増加したためと考えられる。一方、青葉区からの流出に着目すると、立地の良い都市(高津区、宮前区)への流出は増加しているが、立地の良くない都市(都筑区、緑区、大和市)への流出は減少している。これは、立地志向型の転居を行う世帯が青葉区の魅力度に関わらず立地の良い都市に転居すること、特性志向型の転居では流出が抑えられることが理由として挙げられる。これより以下の知見が得られる。

知見 5.

都市は施策の実行によって隣接する都市からの流入を増加させ、流出を減少することができる。しかし、一定の世帯は施策の効果に関わらず立地の優れた都市に流出する。

次に、施策の実行期間を10年間にした場合の2014年におけるシナリオ評価値をTable7に示す。Table7とTable5の結果から、同時期に施策を開始した場合で5年間の施策と比較したときに、10年間の施策のシナリオ評価値は増加しているものの、2倍までの増加ではない。このことから、以下の知見が得られる。

知見 6.

ある時期に開始される施策の効果は、2倍の期間



Table 7: 10 年間のみ施策を実行した場合の 2040 年におけるシナリオ評価値 (%)

	2040 年におけるシナリオ評価値
2010-2019 年	+2.95
2015-2024 年	+2.85
2020-2029 年	+2.82
2025-2034 年	+2.93
2030-2039 年	+4.43

を費やしたとしても 2 倍の効果を得られるものではない。

## 7.2 世帯構成に着目した実験結果

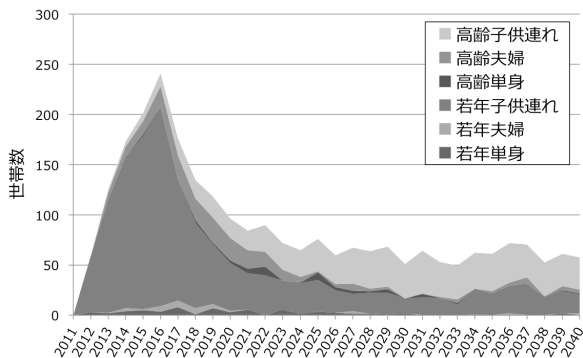


Fig. 16: 増加した世帯数 (絶対数) の推移

次に、施策が世帯分類の変化に与える影響に着目したシミュレーション実験を行う。今回は青葉区が 2010 年から 2014 年までの 5 年間だけ若年子供連れ世帯に向けた施策を行う状況で、ベースシナリオと比較して青葉区の世帯の増加数を世帯分類別に Fig.16 に示した。

Fig.16 より、施策の実行によって若年子供連れ世帯を中心に常に世帯数が増加していることがわかる。ただし施策の効果を止めた 2015 年からは、ベースシナリオと比較すると世帯数は増加しているものの、前年度比の世帯数としては減少している。これは近隣都市と比べて比較的高かった青葉区の魅力度が元の水準に戻ることで、本来他の都市に居住する志向の世帯が流出したためと考えられる。

若年子供連れ以外の世帯については、施策の実行によって 2014 年から 2021 年にかけて若年単身世帯、若年夫婦世帯の増加がみられる。これは施策によって増加した若年子供連れ世帯から子供エージェントが自立し、そのまま青葉区に残留することで増加したものと考えられる。また、高齢夫婦と高齢子供連れ世帯の増加も顕著だが、これらも施策によって直接誘致されたのではなく、誘致された世帯が高齢化することで増加したものだ。

### 知見 7.

若年子供連れ世帯を 2010 年から 2014 年にかけて誘致することで、間接的に他の分類の世帯数にも増加がみられる。

## 8 結論

本研究ではこれまでに世帯構成の変化、世帯の転居のメカニズムを表現するモデルを提案してきた。モデ

ルは単に市区町村単位での将来人口推計の精度の向上を目指すだけでなく、ライフイベントごとに転居を行う割合、立地と施設の充実度のどちらを優先するかの割合、重力モデルの係数を世帯構成別に遺伝的アルゴリズムを用いて統計値に対してフィッティングすることで、住民の自律的な転居行為を表現することを目指したものである。結果として各種統計値と整合性が確認できる人口推計を行うことができた。

本研究の目的は市区町村単位での政策が将来人口に与える影響を分析することであった。それに対して本モデルでは、人口減少の局面にある市区町村間で居住人口を確保しあうような競争の局面において優れた政策を行なう市区町村が人口を確保する様相を示し、複数の軸から政策を定量的に評価することを可能にした。今回の実験では、特定の期間のみ政策の影響を表現して人口動態分析を行なった。これは、一定期間だけ効果が見込める給付金や助成金のようなフローの投資を表現したものと捉えることができる。一方で、長期的な効果が見込める保育園や教育施設の新設といったストックの投資による住民誘致効果はフローと異なり減衰するものではない。本モデルではこれらの違いを分析することも可能であり、政策の特性の違いを考慮した分析にも役立てることができるだろう。

本研究では 6 都市内での人口移動のみを扱った。しかし、国勢調査によれば 2010 年から 2015 年までの転居の内、約 29%は 6 都市外への転居である。統計データより 6 都市の外部との流入流出を行う世帯の属性データが得られれば、流入と流出の差をモデルに組み込むことも可能であり、そのような形で推計の誤差を少なくすること、分析の精度を向上することが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 長沼, 荒井: 都心居住者の属性と居住地選択のメカニズム - 地方中核都市福岡を事例に -, 地学雑誌, 119-5, 794/809(2010)
- 2) 清水昌人; 大都市圏居住者の移動可能性, 国立社会保障・人口問題研究所 人口問題研究, 71-1, 48/60(2015)
- 3) 栗田治: 都市モデル読本, 96, 共立出版 (2004)
- 4) 小池司郎: 地域別将来人口推計における人口移動モデルの比較研究, 人口問題研究, 64-3, 87/111(2008)
- 5) Tobler. W: Cellular geography, Philosophy in Geography, 379/386(1979)
- 6) 滝澤, 河村, 谷: セルオートマトンとしての都市 (その 1)CA の応用性と土地利用パターンの形成, 日本建築学会計画系論文集, 506, 203/209(1998)
- 7) 出口, 木嶋: エージェントベースの社会システム科学宣言: 地球社会のリベラルアーツめざして, 160, 勁草書房 (2009)
- 8) 兼田, 吉田: 歩行者回遊行動のエージェントモデリング ((特集) エージェントベース社会シミュレーションの動向と展望), オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 53-12, 672/677(2008)
- 9) 福田純也: シミュレーテッドアニーリングによるエージェント属性決定手法を用いた人口推計モデルの評価, 第 4 回社会システム部会研究会資料, 35/40(2013)
- 10) 相澤景: 地方中核都市における政策に関する合意形成支援のための基礎需要推計モデルと政策評価フレームワークの構築, 第 5 回社会システム部会研究会資料, 135/144(2014)

- 11) Thomas C. Schelling : Micromotives and Macrobehavior , Norton and Company(1978)
- 12) 小野功 : 単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA による関数最適化 , 人工知能学会誌 , 14-6 , 1146/1155(1998)
- 13) Nigel Gilbert, Klaus G. Troitzsch : Simulation for the social scientist , Open University Press(1999)