

多様な立地主体間の相互作用を考慮した Agent-based Simulation を用いた立地誘導施策評価

古田 稜¹・鈴木 温²

¹学生会員 名城大学 社会基盤デザイン工学専攻 (〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501)

E-mail:213433008@ccmailg.meijo-u.ac.jp

²正会員 名城大学 社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501)

E-mail:atsuzuki@meijo-u.ac.jp

現在、人口減少や少子高齢化に伴い、商業施設や公共施設の縮小、撤退や空き家の増加など様々な問題が生じており、今後も市街地の衰退や都市機能の低下が進行することが懸念されている。このような問題に対応した持続可能な都市構造への転換が必要であり、そのための適切な立地誘導や施設の統合・移転などの施策が今後、増加すると考えられる。そこで本研究では、多様な立地主体の相互作用を考慮した Agent-based Simulation を構築することによって、都市構造の動的変化や、公共施設の移転・統合施策を評価することを目的とする。本研究で構築するシミュレーションモデルは、居住者のライフサイクルと世帯構造、通勤先、購買先といった立地主体間に働くネットワーク構造を表現している。住居・商業・業務・公共施設の各主体間のネットワーク構造と、それらによって変化する立地選択シミュレーションを行う。

Key Words: Multi-agent Simulation, landuse, Household

1. はじめに

現在、人口減少や少子高齢化に伴った生活利便施設、商業施設や公共施設の縮小、撤退、学校の統廃合により、居住者に様々な影響を与えている。今後も市街地の衰退、都市機能の低下が進行し、それがさらなる人口減少を招くことが懸念されている。このような問題に対応した持続可能な都市構造への転換が必要であり、コンパクト+ネットワーク等の都市構造施策が進行している。これらの施策の下、住居、商業施設や公共施設を集約させることで、移動の利便性、各種サービスを効率的に行い、生活利便性の向上が期待される。また、それらを実現するためには適切な立地誘導や施設の統合・移転などの施策が必要となる。

持続可能な都市構造への転換に向けた計画や施策、都市構造評価に対するニーズは高まっている。しかし、都市構造評価は、居住地分布や施設立地、通勤、通学、購買など様々な要素が相互に影響する動的な変化を行い、容易ではない。しかし、現在行われている多くの都市構造評価は静的なシステムとして評価されていると考えられる。そのため、都市構造のさらなる向上のためには、動的変化の考慮が必要である。筆者ら¹⁾は、住居・業務・商業・空間地の4つの土地利用主体の消滅・移転・

生成と鉄道ネットワークを考慮したマルチエージェントシミュレーションモデルを構築してきた。

生産年齢において、単身世帯では、より職場に近い場所に居住地を構え、子どものいる世帯では、より学校や職場に近い場所を考慮した居住地選択を行う。しかし、高齢者において退職後、勤務先や学校などによる制約を受けず、都市の中心部ではなく、都市郊外へ立地選択することが可能になる。また、用途規制を設けることで商業施設や学校など公共施設の過度な郊外化や撤退、消滅を防ぎ、さらなる都市の発展が期待される。そこで本研究では、都市の動的変化の知見を得るために、住居・業務・商業・学校間のネットワーク構造と土地利用主体の消滅・移転・生成を行うマルチエージェントシミュレーションモデルを構築し、用途規制を考慮したシミュレーションを行う。

2. 既存研究と本研究の位置づけ

仮想都市を対象に行う土地利用パターンを考慮したセルオートマトン、マルチエージェントシミュレーションの研究は数多く行われている。

Michael Batty²⁾は、セルオートマトンを用いて、住宅・産業・商業の立地とライフサイクル(初期・成熟・

消滅)のダイナミクスを考慮したシミュレーションを行った。Battyら²⁾のモデルでは、隣接するセルとの相互作用しか考慮されておらず、居住地と勤務地との関係等、非隣接セル間の相互作用等を分析する手法には適さないと考えられる。一方、瀧澤ら³⁾は、マルチエージェントシステムを用いて遺伝的アルゴリズム(GA)を導入し、住居・商業・業務、3種類の土地利用パターンについてシミュレーションを行った。見城ら⁴⁾は、住宅、商業、産業、緑地、空闲地、暫定緑地の6種類の土地利用エージェントを持ったマルチエージェントモデルを作成し、都市のコンパクト化や空闲地の緑地転換について分析を行った。藤岡・野里⁵⁾は、住居、職場、学校、病院、空地をモデルに配置させ、土地利用パターンのマルチエージェントシミュレーションを構築している。藤岡・野里モデルでは、加齢による住民のライフスタイル変化や初期配置を変更することで様々な都市モデルを表現している。

一方、人流や情報ネットワーク等の社会システムにおける共通のネットワーク特性に着目する複雑ネットワーク理論(Complex Network Theory)が、Watts and Strogatz⁶⁾や Barabasi and Albert⁷⁾らの研究をきっかけとして急速に広まった。近年では、従来から研究されてきた土地利用・交通統合モデルやマルチエージェントモデルと複雑ネットワーク理論との間に共通性やつながりを見出し、複雑ネットワーク理論の観点から再構築する取り組みも見られる。例えば、Ding⁸⁾は、複雑ネットワーク理論(Complex Network Theory)の観点から土地利用と交通の相互作用モデルに関するレビューを行い、複雑ネットワークの思考を持ったモデル構築が今後の研究の方向性として重要であることが述べられている。人々のライフイベントを考慮したマルチエージェントシミュレーションの研究として、長尾ら⁹⁾は、マルチレイヤネットワークモデルを作成し、個人、世帯属性の変化やライフイベント、居住ゾーン選択、地価モデルを考慮したシミュレーションを行い、アクセシビリティを用いた個人の施設アクセスに関する分析などを行った。

本研究は、住居、業務、商業、学校、空闲地の5つの土地利用エージェントを持ったマルチエージェントモデルを構築し、購買、通勤、通学などエージェント間の相互作用とその変化による都市構造変化のシミュレーションを行う。さらに、用途規制を設けた都市構造の動的変化と学校に生じる変化を明らかにすることを目的とする。

3. シミュレーションの設定

(1) 本モデルの基本設定

本モデルはNetlogo¹⁰⁾を用いて、全体で51×51セルで構成されている。立地する主体として、住居、業務、商業、

表-1 ライフステージの設定

$age < 22$	$22 \leq age < 65$	$65 \leq age$
未成年	成人	高齢者

学校、空闲地の5主体を設定する。各セルには1種類の主体のみが立地できるものとし、主体が立地したセルは、主体が持つ用途の土地利用となる。土地の高度利用を考慮するため、同種類の主体であれば1セルに複数の個体が立地可能とする。各セルには、個体数の上限はないものとする。立地個体数に応じてセルに濃淡をつける。空闲地は、立地主体がないセルとする。住居、業務、商業、学校の4主体は効用関数に応じて消滅・移転の判断を行い、実行する。セルの1辺の長さを1とする。

(2) ライフサイクル・世帯構造の設定

住居主体のライフサイクルの設定を以下のa)~f)に示す。

a) 加齢

加齢は、住居主体に1tick毎に発生する。シミュレーション内の1tickを四半世紀と仮定し、住居主体の年齢ageに1/4加算する。表-1に示す、年齢によって未成年、成人、高齢者と変化する。

tickとは、シミュレーションにおける時間経過を示す概念である。図-1に示す、学校の消滅の動作が終了するとtickが1増加する。

b) 死亡

死亡は、年齢が100に到達した住居主体に発生し、その住居主体が消滅する。消滅の際に、自身が保有するリンクも全て消滅する。

c) 結婚

結婚は、単身世帯かつ年齢が40以下の男性に確率的に発生する。男性の年齢と±5の年齢と合致する女性とマッチングを行う。その後、家族リンクを結び、女性が男性の居住地へと移転し、同居する。同居後、女性の通勤リンクは消滅し、男性のみが通勤リンクを所有する。また、世帯が単身世帯から夫婦世帯へと変化する。

d) 出生

出生は、1夫婦世帯に最大3回まで、確率的に発生する。親と同じ居住地に新たな住居主体を生成し、親と家族リンクを結ぶ。子どもの年齢は0、性別はランダムに選ばれる。1人目の出生時に親の世帯が夫婦世帯から夫婦+子世帯へと変化する。その後、最寄りの学校へ通学リンクを結ぶ。

e) 就職、離家

就職イベントは、年齢が 22 に到達した住居主体に発生する。ランダムに選択された業務主体 1 つに通勤リンクを結ぶ。すでに雇用されていた通勤先が消滅した場合、他の業務主体 1 つに通勤リンクを無作為に結び、住居主体は常に通勤リンクを 1 つ持つように設定する。通勤リンクは、通勤先の業務主体が消滅しない限り、変更しないものとする。その後、住居主体の移転動作を行い、家族リンクを消滅させる。

f) 退職

退職は、年齢が 65 に到達した住居主体に発生する。自身の通勤先とのリンクを消滅させる。

(3) 住居主体の設定

住居主体の効用関数は、以下の(1)(2)(3)式のように定義する。

単身、夫婦世帯の効用関数

$$\pi_i^{H1} = ACC_i^C + \alpha \cdot ACC_i^{h1} - \beta \cdot R_i \quad (1)$$

夫婦+子世帯の効用関数

$$\pi_i^{H2} = ACC_i^C + \alpha \cdot ACC_i^{h2} - \beta \cdot R_i \quad (2)$$

高齢者の効用関数

$$\pi_i^{H3} = ACC_i^C - \beta \cdot R_i \quad (3)$$

$$ACC_i^C = \sum_{j \in J} n_j^C \exp(-\gamma^C d_{ij}), J = \{j \mid d_{ij} < 3\} \quad (4)$$

$$ACC_i^{h1} = \exp(-\gamma^O d_{ik}) \quad (5)$$

$$ACC_i^{h2} = \exp(-\gamma^O d_{il}) + \exp(-\gamma^S d_{il}) \quad (6)$$

ここで、 α 、 β ：重みパラメータ、 γ^O 、 γ^S 、 γ^C ：移動距離に関する減衰パラメータ、 ACC_i^C ：地点 i における商業主体へのアクセシビリティ、 n_j^C ：地点 j に立地する商業主体数、 d_{ij} ：地点 i から購買先 j までの距離、 d_{ik} ：地点 i から通勤先 k までの距離、 d_{il} ：地点 i から通学先 l までの距離、 R_i ：地点 i における地代である。

住居の効用関数 π_i^H は、商業へのアクセシビリティと地代は共通しているが、世帯または年齢によって計算方法が異なる。単身、夫婦世帯では、通勤距離を考慮し、夫婦+子世帯では、通勤距離と学校への距離を考慮する。高齢者は、退職するため通勤距離と通学距離を考慮しない。また、住居主体は、半径 3 以内の商業主体に購買リンクを結ぶ。移転では条件を満たす住居主体が自身の効用が最大となる場所へ移転する。

移転の各発生条件と動作を以下の 1) に示す。

1) 移転

条件：効用関数下位 2%

動作： $\max \pi_i^H$ となる場所へ移転

(4) 業務主体の設定

業務主体の効用関数は、以下の(7)式のように定義する。

$$\pi_i^O = o_1 \cdot N_i^O + o_2 \cdot n_i^O - R_i \quad (7)$$

ここで、 o_1 、 o_2 ：重みとなるパラメータ、 N_i^O ：雇用している住居の数（雇用者数）、 n_i^O ：地点 i における半径 3 以内の業務の主体数である。

業務の効用関数 π_i^O は自身を雇用先としている住居の数、周辺の業務の数、地代によって増減する。効用が 0 未満になった場合、または雇用者数が 0 になった場合に業務主体は消滅する。移転では条件を満たす業務主体が周辺の業務数と地代を考慮した場所へ移転する。また、シナリオによって初期配置や移転場所に制限がかかる。

消滅、移転、生成の各発生条件と動作を以下の 1)～3) に示す。

1) 消滅

条件： $\pi_i^O < 0$ または $N^O \leq 0$

動作：仮想都市から消去

2) 移転

条件：効用関数下位 1%

動作： $\max o_2 \cdot n_i^O - R_i$ となる場所へ移転

3) 生成

条件：1tick 毎の確立を満たした場合

動作：業務主体を空閑地にランダムに 1～3 個生成

(5) 商業の設定

商業主体の効用関数は、以下の(8)式のように定義する。

$$\pi_i^C = c_1 \cdot N_i^C + c_2 \cdot n_i^C - R_i \quad (8)$$

ここで、 c_1 、 c_2 ：重みとなるパラメータ、 N_i^C ：自身を購買先とする住居の主体数（購買者数）、 n_i^C ：半径 3 以内の商業の主体数である。

商業の効用関数 π_i^C は購買者数と周囲の商業の数、地代によって増減する。効用関数が 0 未満になった場合か購買先としている住居の数が 0 になった場合に仮想都市から消滅する。移転では条件を満たす商業主体が効用が最大となる場所へ移転する。また、業務主体と同じようにシナリオによって初期配置や移転場所に制限がかかる。

消滅、移転、生成の各発生条件と動作を以下の 1)～3) に示す。

1) 消滅

条件： $\pi_i^C < 0$ または $N_i^C \leq 0$

動作：仮想都市から消去

2) 移転

条件：効用関数下位 1%

動作： $\max \pi_i^C$ となる場所へ移転

3) 生成

条件：1tick 毎の確立を満たした場合

動作：商業主体を空閑地にランダムに 1~3 個生成

(6) 学校主体の設定

学校主体の効用関数は、以下の(9)式のように定義する。

$$\pi_i^S = N_i^S \tag{9}$$

ここで、 N_i^S ：自身に通う未成年の数（児童数）である。

学校主体の効用関数 π_i^S は、児童数によってのみで計算される。それをもとに学校主体の消滅の判断を行う。ほかの主体と異なり、移転、生成を行わない。

消滅の発生条件と動作を以下の 1)に示す。

1) 消滅

条件： $N_i^S \leq 3$

動作：仮想都市から消去

(7) 地代の設定

地代は、以下の(10)式で定義する。

$$R_i = n_i^H + \rho \cdot n_i^O + \mu \cdot n_i^C \tag{10}$$

ここで、 ρ 、 μ ：重みとなるパラメータ、 n_i ：地点 i における半径 3 以内の主体数、H：住居、O：業務、C：商業である。

地代 R_i は、周囲の主体数が多いほど高くなり、主体数が少ないほど低くなるように設定した。地代が高くなるほど効用関数は低くなり、地代は、各主体の効用関数を抑える役割を担っている。

4. シミュレーションのフローとシナリオ設定

(1) シミュレーションのフロー

本研究で行うシミュレーションのフローを図-1 に示す。初期配置では、業務主体を 600、商業主体を 400 配置する。その後、住居主体を 1500 ランダムに配置する。シナリオによって業務主体と商業主体の初期配置の場所を制限する。住居主体の男女比は 1：1、住居主体は単身世帯を 1000、夫婦世帯を 300、夫婦+子世帯を 200 配置する。さらに、単身世帯の男女、夫婦世帯、夫婦+子世帯の男性はランダムに 1つの業務と通勤リンクを結ぶ。学校主体は 25 を長さ 10 離れ、等間隔になるように定位置に配置する。主体が配置されないセルを空閑地とする。初期配置より、シミュレーションを開始し、業務、住居、商業、学校の順番で消滅・移転・生成（学校主体は消滅のみ、住居主体は移転のみ）の動作を行う。住居主体のライフイベントは、加齢、死亡、結婚、出生、就職、離家、退職の順番に動作を行う。これを 1tick とし、200 ticks に到達するまでこの動作を繰り返し行う。また、パ

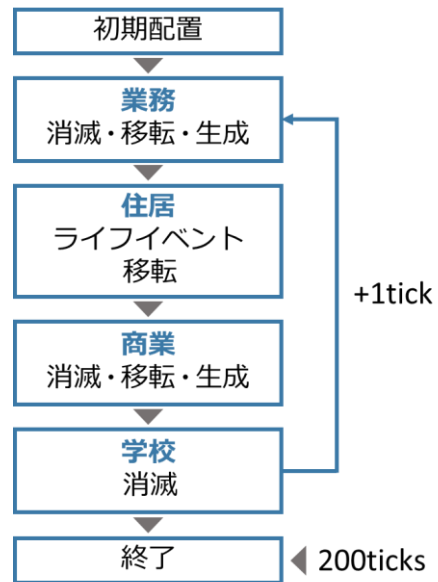


図-1 シミュレーションのフロー

ラメータ値は、Netlogo のスライダー機能を使い、適宜変更可能である。

(2) シナリオ設定

本研究では、用途規制の表現として中心部から一定の距離以内のみ業務主体、商業主体が立地できるように設定した。用途規制は、業務主体と商業主体の初期配置、移転先に影響する。そして、用途規制地域を設けないシナリオ、用途規制の範囲を変更した以下 4つのシナリオを作成し、シミュレーションを行った。

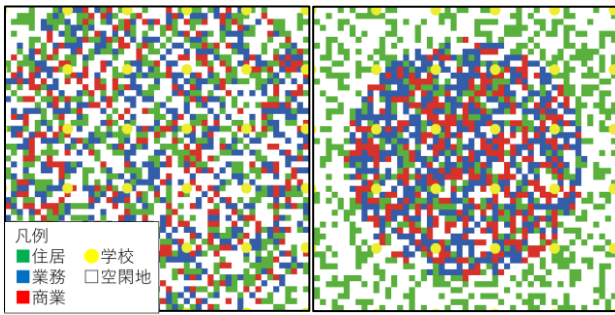
- ①規制なしシナリオ
- ②用途規制—半径 20 シナリオ
- ③用途規制—半径 15 シナリオ
- ④用途規制—半径 10 シナリオ

5. シミュレーション結果

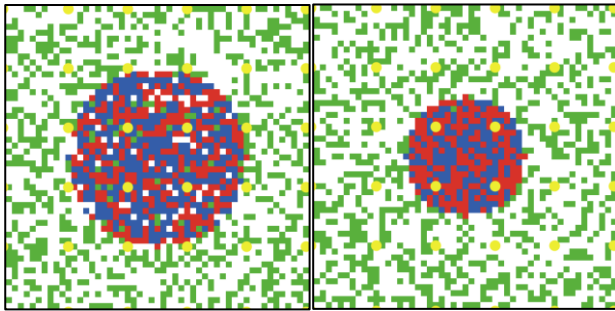
4つのシナリオに対し、シミュレーションの結果を図-2、図-3、図-4 に示す。図-2、図-3 ではリンクを表示していない。

①規制なしシナリオ

規制なしシナリオでは、用途規制を設けていないため、他のシナリオに比べ、所々で集積する主体がみられるが都市全体は分散している。そのため、表-2 に示す空閑地の数は他シナリオに比べ一番少なく、立地密度は住居、業務主体ともに一番低い値を示し、商業はやや高い値を示している。図-5、図-6 に示す通勤距離、通学距離の累積度数割合は、縦軸に割合、横軸に距離をとり、都市の分散によって、通勤距離が長くなっている住居主体が数多く存在し、通勤の平均距離が一番長い。通学距離が短い住居主体が多く存在し、通学の平均距離も短い。

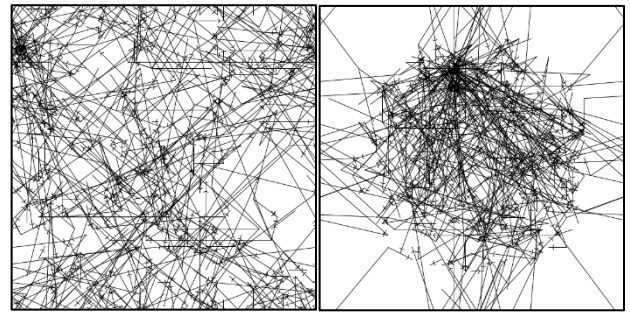


①規制なしシナリオ ②半径 20 シナリオ

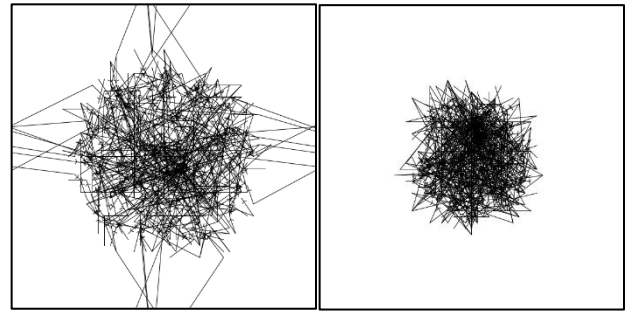


③半径 15 シナリオ ④半径 10 シナリオ

図-2 シミュレーション初期配置

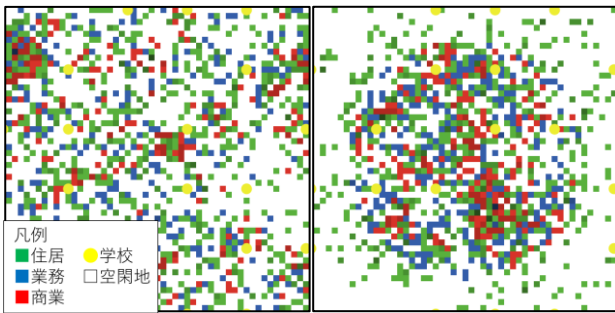


①規制なしシナリオ ②半径 20 シナリオ

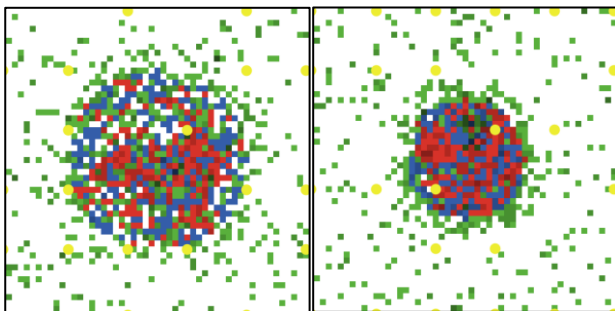


③半径 15 シナリオ ④半径 10 シナリオ

図-4 シミュレーション結果通勤リンク (200ticks 後)



①規制なしシナリオ ②半径 20 シナリオ



③半径 15 シナリオ ④半径 10 シナリオ

図-3 シミュレーション結果 (200ticks 後)

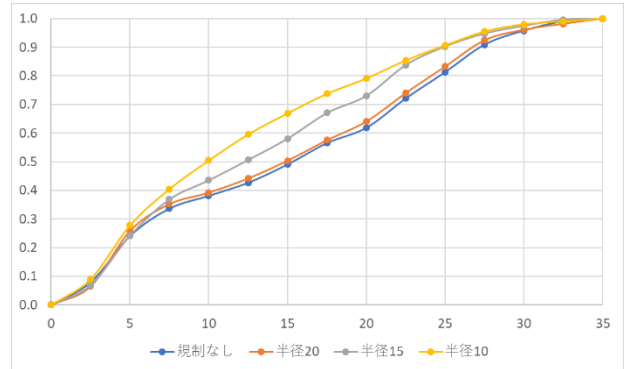


図-5 通勤距離の累積度数割合 (200ticks 後)

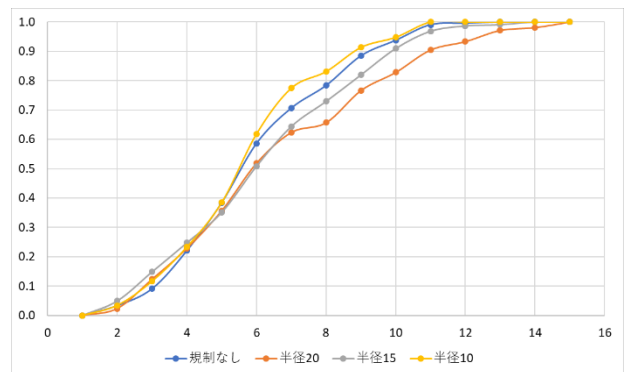


図-6 通学距離の累積度数割合 (200ticks 後)

②用途規制—半径 20 シナリオ

用途規制が半径 20 のシナリオでは、中心部やその周辺に空閑地が多く、各主体が分散しているが、住居、商業主体の立地密度は高い値を示している。このシナリオでは通勤距離、通学距離がともに長い割合の住居の割合が多くなっている。特に通学距離が 8 以上の住居主体が多く存在している。通勤の平均距離も長く、通学の平均距離はどのシナリオよりも一番長い値を示している。

表-2 シナリオ毎の各平均距離 (200ticks 後)

	規制なし	半径 20	半径 15	半径 10
通勤距離	14.8	14.5	13.0	11.8
通学距離	5.7	6.4	6.0	5.5

表-3 シナリオ毎の各主体数と立地密度 (200ticks 後)

	規制なし	半径 20	半径 15	半径 10
住居	1143 (2.74)	1157 (3.38)	1185 (4.15)	1189 (5.19)
業務	282 (1.21)	297 (1.40)	295 (1.59)	299 (4.25)
商業	400 (3.44)	400 (3.05)	400 (3.06)	400 (5.48)
空閑地	1571	1667	1795	1969
学校	14	14	15	13

(括弧内は立地密度)

③用途規制—半径 15 シナリオ

用途規制が半径 15 のシナリオも商業、業務主体が中心部周辺に多く立地している。立地密度では、住居主体が高く、業務主体はやや高い値を示し、商業主体の立地密度は用途規制の半径 20 シナリオとほとんど同じ値を示している。通勤距離が短い住居は多く存在し、通勤の平均距離も短い。しかし、通学距離が長い住居の割合が多く、通学の平均距離は、規制なしシナリオよりも長く、用途規制の半径 20 シナリオよりも短い。また、中心部の学校がほとんど消滅している。

④用途規制—半径 10 シナリオ

用途規制が半径 10 のシナリオでは、範囲の狭い規制を設けたため、一番コンパクトに各主体が立地している。それに伴い、1セルに複数個体立地する場所が多くみられる。住居、業務、商業主体の立地密度も一番高い値を示している。4つのシナリオの中で通勤距離が短い住居の割合が一番多く存在する。通勤の平均距離も一番短い。残存学校数は一番少なく、通学距離も短い住居が多く存在し、通学の平均距離も他シナリオと比べ一番短い。

6. おわりに

本研究では、住居、業務、商業、学校、空閑地の5つの土地利用エージェントを持ったマルチエージェントモデルを構築し、学校の分散配置のパターンについて用途規制を用いた商業施設や企業の立地誘導を考慮したシミュレーションを行った。

より範囲の狭い用途規制を設けた場合、都市はコンパクトになる。それに伴い、立地密度が高まり、都市の高度化が多くみられる。通勤や通学にかかる距離は用途規制地域沿いに住居が多く集まるため、短くなると考えられる。しかし、中心部の学校は商業施設や企業が多く立地し、児童の確保が十分でなく存続することが難しい。その結果、用途規制地域沿い、あるいは郊外の学校に多くの児童が通い、郊外よりに学校が存続していると考え

られる。一方、範囲の広い用途規制を設けた場合、都市は分散し、立地密度は小さくなる傾向にある。都市が分散することで、通勤距離、通学距離が長くなる住居が多くなると考えられる。また、学校は児童の確保が間に合わず、郊外よりの学校は児童数が減少し、やがて存続ができなくなると考えられる。

本モデルのシミュレーションを行うことで、範囲の狭い用途規制では、中心部における企業や商業施設の立地密度が高く、学校に通う児童の確保が容易ではなく、郊外の学校に通う児童が多い。そのため、住居や企業、商業施設は中心部に集積し、都市全体では高度化、コンパクト化が進み、学校が郊外化するという知見が得られた。

現在のモデルは、学校主体の分散配置のみでシミュレーションを行っているが、分散配置ではない他の初期配置を行うことでさらなる分析が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 古田稜, 鈴木温: 住居・業務・商業のネットワーク構造に着目した土地利用変化のマルチエージェントシミュレーション, 都市計画論文集 Vol.56 No.3, 2021
- 2) Michael Batty・Yichun Xie・Zhanli Sun: Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata, Computers, Environment and Urban Systems, Computers, Environment and Urban Systems 23(3), pp.205-233, 1999
- 3) 瀧澤重志, 村廣, 谷明勲: 適応的マルチエージェントシステムによる都市の土地利用パターンの形成, 日本建築学会計画系論文集, No.528, pp.267-275, 2000
- 4) 見城紳, 玉川英則: コンパクトシティ政策と空閑地の緑地転換利用政策の両立可能性の分析—マルチエージェントシミュレーションを用いて—, 都市計画論文集, Vol.52, No.1, pp.28-33, 2017
- 5) 藤岡薫, 野里碧海: コンパクトシティ政策を支援する都市シミュレーションモデルの開発, 環境情報科学 学術研究論文集 33, pp.79-84, 2019
- 6) D. J. Watts and S. H. Strogatz: Collective dynamics of “smallworld” networks, Nature, vol. 393, no. 6684, pp. 440-442, 1998.
- 7) A. Barabasi and R. Albert: Emergence of scaling in random networks, Science, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999
- 8) Rui Ding (2019), The Complex Network Theory-Based Urban Land-Use and Transport Interaction Studies, Complexity, Volume 2019, pp.1-14
- 9) 長尾将吾, 杉木直, 倉内文孝, 松尾幸二郎: マルチレイヤネットワークを用いた社会ダイナミクスモデルのシミュレーション, 土木計画学研究・講演集 Vol.62, 22-12, 2020
- 10) Netlogo HP: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

?

Evaluation of Location Guidance Policies Using Agent-based Simulation Considering Interaction among Various Location Actors

Ryo FURUTA and Atsushi SUZUKI

Currently, various problems such as the shrinking of commercial facilities and public facilities, the withdrawal of such facilities, and the increase in the number of vacant houses are occurring as the population declines, the birthrate declines, and the population ages, and there is concern that urban areas will continue to decline and urban functions will deteriorate in the future. In response to these problems, a shift to a sustainable urban structure is necessary, and measures such as appropriate location guidance and the integration and relocation of facilities are expected to increase in the future. The purpose of this study is to evaluate dynamic changes in urban structures and measures for relocation and integration of public facilities by constructing an agent-based simulation model that takes into account the interactions among various location entities. The simulation model developed in this study represents the life cycle of residents and the network structure among location entities such as household structure, commuting destinations, and purchasing destinations. The simulation model simulates the network structure among residential, commercial, business, and public facility entities and the location choices that change depending on these network structures.