

マルチエージェントシステムを用いた土地利用計画支援システム

Land Use Planning Support System Using Multi-Agent Systems

長崎浩紀**・渡辺公次郎***・近藤光男****

By Hiroki NAGASAKI**・Kojiro WATANABE***・Akio KONDO****

1. はじめに

多くの地方都市では、郊外部へのスプロール化やそれに伴う中心市街地の衰退化が問題とされている。こうした問題の原因の1つに、開発先行型の都市計画が挙げられる。本来、都市計画とは市民が健康で文化的な生活を享受でき、同時に各種の都市活動が十分達成できるような都市空間を計画するもの¹⁾だが、開発が計画を先行し、無秩序な開発が進行してしまうことにより、交通渋滞や生活環境の低下といった弊害も生じている。こうした開発先行型の都市計画を防ぐためにも、計画の評価が重要とされており、都市開発や土地利用規制に関わる政策の効果を定量的に予測することが求められている。

以上の背景より、本研究では、多数の個体が各々の環境や状態に応じて、それぞれ自律的に考え、行動することが可能なマルチエージェントシステムを用い、個々の世帯の移動行動をモデル化することにより、土地利用計画支援システムを開発することを目的とする。

2. モデルの内容

(1) 対象空間とエージェント

本研究では、対象空間を図1に示す3つの都市からなる20×20セルの仮想格子空間とし、土地利用や地価を図2のように与える。

また、エージェントは世帯（世帯主）とする。各エージェントには、年齢、収入、居住年数を与え、年齢、収入に応じてそれぞれ15段階、5段階の階級を与える。

(2) エージェントの行動

本モデルでは、エージェントは自分自身の属性と土地の魅力を用いて、現在住んでいる場所から移動、すなわち引っ越すかどうかを決定し、移動先は、現在自分が住んでいる場所よりも土地の魅力が高い場所である。もし、対象空間内にそういった場所がなければ対象空間外へ移動する。

移動するかどうかを決定する移動ポテンシャル P_{ij} は以

下の通りである。

$$P_{ij} = P_i^a \cdot P_j^b \cdot P_i^c \cdot \exp(-a \cdot Land_j) \quad (1)$$

ここで、 i はエージェント、 j は現在住んでいるセル、 P_i^a は年齢に対する移動ポテンシャル、 P_j^b は収入に対する移動ポテンシャル、 P_i^c は居住年数に対する移動ポテンシャル、 $Land_j$ はセル j の魅力、 a は係数とする。

移動ポテンシャル P_{ij} を算出後、その値が0~1の乱数値より大きい場合、エージェントは移動を決める。移動を決めたエージェントは、空間内のセルをランダムに選択し、そのセルの $Land_j$ を算出する。その値が現在住んでいる場所の $Land_j$ より高い場合、エージェントはそのセルへ移動するが、低い場合新たなセルを選択する。これを繰り返し移動するセルを決定するが、総セル数以上の回数を繰り返しても $Land_j$ の高いセルが存在しない場合、エージェントは空間内に魅力のあるセルが無いと判断し、空間外へ移動する。

以上の流れに基づき、エージェントは行動する。

(3) 土地の魅力度

居住地の選択において、その土地の魅力は大きな要因の1つである。魅力を表す指標は、中心部や近隣商業施

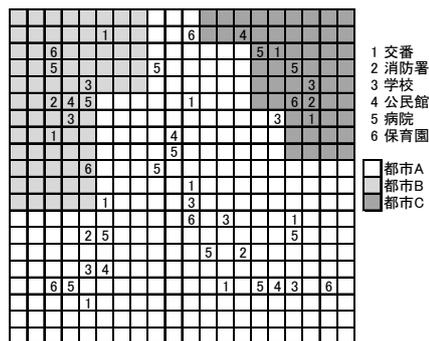


図1 対象空間

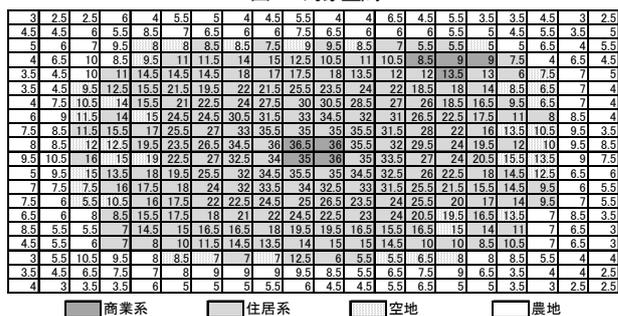


図2 土地利用と地価 (万円)

*キーワード：都市計画，土地利用

**学生員，徳島大学大学院先端技術科学教育部

***正員，博士（工学），徳島大学大学院 ソフトウェア工学研究部

****正員，工博，徳島大学大学院 ソフトウェア工学研究部

(徳島県徳島市南常三島町2-1, TEL088-656-7612, FAX088-656-7341)

設までの距離といった利便性や安全性、周囲の自然や町並みの美しさ、コミュニティ等様々なものがあり²⁾、さらにそれらは個人の状態や価値観によって大きく異なる。そこで、本モデルでは、これらを考慮した土地の魅力度 $Land_j$ を式(2) のように設定した。

$$Land_j = (\alpha \cdot C_j^1 + C_j^2 + \beta \cdot C_j^3 + \gamma \cdot C_j^4 + \gamma \cdot C_j^5 + C_j^6) / 6 \cdot (\beta \cdot C_j^7 + \beta \cdot C_j^8 + C_j^9 + C_j^{10} + C_j^{11} + C_j^{12}) / 6 \cdot (\delta \cdot C_j^{13} + \delta \cdot C_j^{14} + C_j^{15} + C_j^{16} + C_j^{17}) / 5 \quad (2)$$

各項目の意味は表1の通りである。係数 α , β , γ , δ が掛け合わされている項目は、エージェントの年齢や収入に応じて変化すると考えられるものである。例えば、 C_j^1 は、車を頻繁に利用しないであろう高齢者にとっては、それほど重視しないと考えられる。また、 C_j^4 は、教育環境を重視する子供がいる世帯では、重要な魅力度となる。これらを考慮するために、係数 α , β , γ , δ を用いた。各魅力度の詳細を以下に述べる。

a) 利便性に関する魅力度 $C_j^1 \sim C_j^6$

一般に、利便性は各施設までの距離が近いほど高くなる。ここでは、利便性に関する魅力度を式(3)に示す値とした。式(3)は、各施設までの距離が最も遠いセルで魅力度が最低になるようにしている。

$$C_j = (Dist_{max} - Dist_j) / Dist_{max} \quad (3)$$

ここで、 C_j は各施設の利便性に関する魅力度、 $Dist_{max}$ は対象空間内における各施設まで最も遠いセルからの距離(m)、 $Dist_j$ はセル j から施設までの距離(m)である。

b) 安全性に対する魅力度 $C_j^7 \sim C_j^{12}$

C_j^7 は消防署に近いほど大きくなると考えられるので、式(3)を用いて算出する。

C_j^8 は設置密度が高いほど大きくなると考えられるので、式(3)の距離を設置密度に置き換えた式(4)より算出する。

$$C_j^8 = (Dens_{max} - Dens_j) / Dens_{max} \quad (4)$$

ここで、 $Dens_{max}$ は対象空間内における各セルから周囲

5セル以内の交番と警察署数の最大値、 $Dens_j$ はセル j から周囲5セル以内の交番と警察署数である。

C_j^9 , C_j^{10} , C_j^{11} は発生率が低いほど安全性が高いとし、式(5)に示す値とする。

$$C_j = \exp(-Inc) \quad (5)$$

ここで、 Inc は単位人口当りの発生率である。

C_j^{12} は水洗化率が高いほど衛生環境がよく、安全性が高いと考え、都市の全人口に対する水洗化人口の割合を魅力度として用いる。

c) その他の指標に対する魅力度 $C_j^{13} \sim C_j^{17}$

C_j^{13} は地価が安いほど魅力が高く、そのセルの土地利用が住宅系や商業系の場合、その魅力は維持されるが、農地や空地の場合、魅力は低下すると考えられるので、式(6)より算出する。

$$C_j^{13} = \eta (Price_{max} - Price_j) / Price_{max} \quad (6)$$

ここで、 $Price_{max}$ は対象空間内の最大地価、 $Price_j$ はセル j の地価である。 η は土地利用係数であり、セル j の土地利用が住居系、商業系の場合 $\eta = 1.0$ 、農地や空地の場合 $\eta = 0.6$ とする。

C_j^{14} は固定資産税と都市計画税に対する魅力度であり、エージェント i の収入に対する税額で表し、その値が低いほど魅力が高いとする。税額 Tax_{ij} は、課税標準額と各都市の税率との積であり、課税標準額は土地については地価の約70%、建物については建築費の約50~70%とされている⁴⁾ ことから、式(7)より算出する。

$$Tax_{ij} = Price_i \cdot Area1_i \cdot 0.7 \cdot Rate_j + Area2_i \cdot Cost_i \cdot 0.6 \cdot Rate_j \quad (7)$$

ここで、 $Area1_i$, $Area2_i$ はそれぞれエージェント i の敷地面積(m²)、建築面積(m²)であり、 $Rate_j$ はセル j が存在する都市の税率である。ただし、市街化区域セルに存在するエージェントの $Rate_j$ は固定資産税と都市計画税の和であり、その他のエージェントの $Rate_j$ は固定資産税のみである。 $Cost_i$ は建築工事費単価(円/m²)である。また、この税金に関しては「住宅用土地に対する軽減措置」があり、土地の課税標準額が、敷地面積200(m²)以下の場合、固定資産税に対しては1/6、都市計画税に対しては1/3に、200(m²)を超える部分はそれぞれ1/3、2/3に軽減される³⁾ ので、これらも考慮する。

C_j^{15} は快適な生活を送る上で適切な世帯密度に近いほど魅力度が高いとし、式(8)より算出する。

$$C_j^{15} = 1 - |PopDen_{pro} - PopDen_j| / PopDen_{pro} \quad (8)$$

ここで、 $PopDen_j$ はセル j の世帯密度(世帯/セル)であり、 $PopDen_{pro}$ は快適な世帯密度(世帯/セル)である。また、 $PopDen_j > 2 \cdot PopDen_{pro}$ の場合、 $C_j^{15} = 0$ とする。

C_j^{16} は周囲にエージェント i の収入と同等の収入階級の世帯が多いほど魅力が高いとし、式(9)より算出する。

$$C_j^{16} = num_{equ} / num_{tot} \quad (9)$$

ここで、 num_{equ} はセル j の周囲1セル内に存在するエー

表1 各変数の性質と意味

変数	性質	意味
C_j^1	利便性	幹線道路までの距離に対する魅力度
C_j^2		商業施設までの距離に対する魅力度
C_j^3		病院・診療所までの距離に対する魅力度
C_j^4		小中学校までの距離に対する魅力度
C_j^5		幼稚園・保育所までの距離に対する魅力度
C_j^6		公民館・集会所までの距離に対する魅力度
C_j^7	安全性	消防署までの距離に対する魅力度
C_j^8		交番・警察署の設置密度に対する魅力度
C_j^9		犯罪発生率に対する魅力度
C_j^{10}		事故発生率に対する魅力度
C_j^{11}		火災発生率に対する魅力度
C_j^{12}		水洗化率に対する魅力度
C_j^{13}	その他	土地利用と地価に対する魅力度
C_j^{14}		税金に対する魅力度
C_j^{15}		世帯密度に対する魅力度
C_j^{16}		周辺の世帯収入に対する魅力度
C_j^{17}		土地利用規制に対する魅力度

エージェント*i*と収入階級の等しいエージェント数で、 $num_{out,j}$ は周囲1セル内に存在するエージェントの総数である。

C^{17}_j は、土地利用規制が緩いほど魅力が高いとする。市街化調整区域内ではいかなる開発でも許可の申請が必要だが、その他の地域では一般的な住宅建設の規模では許可の申請は不必要である。そこで、セル*j*が市街化調整区域の場合 $C^{17}_j=0.2$ 、その他の場合 $C^{17}_j=1.0$ とする。

d) 係数

α は年齢が低いほど高くなる係数であり、 β は年齢が高いほど高くなる係数である。ともに最大値1、最小値0をとり、それぞれ式(10)、(11)より算出する。

$$\alpha = 0.071 \cdot Age_i + 1.071 \quad (10)$$

$$\beta = 0.071 \cdot Age_i - 0.071 \quad (11)$$

ここで、 Age_i はエージェント*i*の年齢階級である。

また、 γ は教育を受ける子供がいる世帯の多い年齢で高くなる値とし、30代前半で最大値1をとる(式(12))。

$$(30歳未満) \gamma = 0.33 \cdot Age_i - 0.33 \quad (12)$$

$$(30歳以上) \gamma = -0.091 \cdot Age_i + 1.363 \quad (12)$$

δ は収入が低いほど高くなる係数であり、最大値1、最小値0をとる(式(13))。

$$\delta = -0.25 \cdot Income_i + 1.25 \quad (13)$$

ここで、 $Income_i$ はエージェント*i*の収入階級である。

(4) 1年の経過条件とそれに伴う変化

本モデルでは、空間内の移動世帯数、空間外への移動世帯数がともに一定値に達した時、1年が経過し、それに伴いエージェントに変化を与える。年齢、居住年数はともに1増加し、収入は増減率に従い変化する。

また、対象空間外から移動してくる世帯を考慮し、新たにエージェントを出現させ、各エージェントに年齢、収入、居住年数を与える。新たなエージェントが出現するセルは、エージェントが無作為に1つのセルを選択し、そのセルの魅力度を算出する。その値が空間内に存在する全エージェントの持つ魅力度の平均値より大きければそのセルに決定し、それ以下の場合新たなセルを探す。これを繰り返し出現するセルを決定するが、総セル数以上の回数を繰り返しても条件を満たすセルが存在しない場合、選択したセルの中で最も魅力度の高いセルに決定する。

自然増減も考慮する必要があるが、本モデルでは正確にそれらを考慮することはできない。そこで、エージェントに初期値として与える年齢の中で最も低い値を持つエージェントを毎年新たに出現させ、それを自然増加と考える。そして、エージェントに収入、居住年数を与え、社会増加の際と同様の方法で出現するセルを決める。また、自然減少は、高齢世帯の自然減少のみを考慮することとし、65歳以上の高齢世帯に対し

て、年齢ごとの死亡率より毎年生死の判断を行う。死亡と判断された場合、単身高齢世帯の場合は世帯がなくなるが、高齢者が2人以上いる世帯の場合、他的高齢者が新たな世帯主になり、高齢者が1人で世帯人員が2人以上の世帯の場合、65歳以下の人が新たな世帯主になると考え、それぞれの世帯割合に従い、エージェントが消滅するのか、変化しないのか、年齢と収入が減少するのかを判断する。

3. シミュレーション

(1) 前提条件

ここでは、対象空間を地方都市である徳島市とその周辺市町と想定する。

エージェントが持つ年齢、居住年数は、徳島県の割合⁴⁾に従いランダムに与え、収入は年齢に応じて各年齢階級の平均収入⁵⁾の前後の値をランダムに与える。ただし、社会増加の際の新たなエージェントには、徳島県の転入世帯の年齢別割合⁶⁾に従い年齢を与える。また、1年経過ごとにエージェントに与える増減率は、各階級の平均収入より平均増減率が得られるので、その前後の値(増減率1)をランダムに与える。ただし、収入の増減のない世帯や、平均とは増減が異なる世帯もあることが考えられるので、2割のエージェントには停滞や増減が平均とは異なる増減率2を与える(表2)。

土地の魅力度算出に用いる指標は、都市Aは徳島市、都市Bは鳴門市、都市Cは藍住町の値を用い、 $PopDen_{pro}$ は、各都市の可住地面積に対する世帯数の割合とする。また、各エージェントの建築面積、敷地面積は、徳島県の年収別の居住室の畳数⁷⁾を参考に算出した表3に示す年収に応じた一定の値とし、 $Cost=150,118$ (円/㎡)⁸⁾とする。1年間の空間内の移動世帯数、空間外への移動世帯数、社会増加世帯数は、それぞれ徳島県内間の移動世帯の割合、県外への移動世帯の割合、県外からの移動世帯の割合⁹⁾より算出する。また、自然増減の際に用いる指標は、死亡率のみ全国の死亡率⁹⁾を用いるが、その他の指標は徳島県の値^{4) 6)}を用いる。

表2 年齢階級ごとの収入増減率

年齢(歳)	平均増減率	増減率1	増減率2
25歳未満	1.075	1.04~1.10	0.95~1.00
25~29	1.046	1.02~1.07	0.95~1.00
30~34	1.037	1.02~1.06	0.95~1.00
35~39	1.026	1.02~1.06	0.95~1.00
40~44	1.025	1.01~1.04	0.97~1.00
45~49	1.008	1.01~1.04	0.97~1.00
50~54	0.992	0.99~1.00	1.00~1.01
55~59	0.947	0.92~0.98	1.00~1.01
60~64	0.959	0.93~0.97	1.00~1.01
65~69	0.985	0.96~1.00	1.00~1.01
70歳以上	0.974	0.95~1.00	1.00~1.01

表3 収入に応じた建築面積、敷地面積

年収(万円)	建築面積(㎡)	敷地面積(㎡)
200未満	57.21	193.32
200~300	70.37	237.79
300~400	78.46	265.14
400~500	87.54	295.81
500~700	93.63	316.39
700~1,000	106.62	360.31
1,000~1,500	120.74	408.00
1,500以上	137.88	465.95

(2) 移動ポテンシャルの設定

エージェントの移動ポテンシャルの算出に用いる P^a_i , P^b_i , P^c_i は、年齢に関しては徳島県の各年齢階級の移動率⁶⁾が存在するが、収入、居住年数に関しては徳島県における統計が存在しないため、それぞれ尼崎市の移動世帯の収入の割合¹⁰⁾、大阪市の移動前の居住年数の割合¹¹⁾を用いる。それぞれの移動ポテンシャルに同様の幅を持たせるため、 P^a_i は移動率を1.5倍、 P^b_i は割合を4倍、 P^c_i は割合を各カテゴリーの年数で割り、それらの値を8倍した。ただし、「15年以上」のカテゴリーは30年未満と仮定した。各移動ポテンシャルを表4～6に示す。また、土地に対する移動ポテンシャルが、空間内の全エージェントが持つLandの平均値で0.5となるよう、 $a=5$ とする。

(3) シナリオの設定

土地利用規制の変更に伴う効果をみるため、初期世帯分布を図3とし、以下の2つのシナリオを想定し、20年間のシミュレーションを行う。

- ①対象空間を全て未線引きにした場合。
- ②中心部の6x6セルのみ市街化区域、その他を全て市街化調整区域とし、さらに中心部のみ地価を半減した場合。

(4) 結果

シナリオ①、②の20年後の世帯分布をそれぞれ図4、図5に示す。

図4より、シナリオ①では、中心部での大幅な減少がみられた一方、周辺の商業施設や教育施設等の周辺部で

表4 年齢に対する移動ポテンシャル

年齢階級	15～19歳	20～24歳	25～29歳	30～34歳	35～39歳
移動率	0.33	0.57	0.57	0.54	0.41
P^a_i	0.50	0.86	0.86	0.81	0.61
年齢階級	40～44歳	45～49歳	50～54歳	55～59歳	60～64歳
移動率	0.28	0.21	0.17	0.14	0.12
P^a_i	0.42	0.31	0.25	0.21	0.18
年齢階級	65～69歳	70～74歳	75～79歳	80～84歳	85歳以上
移動率	0.11	0.10	0.13	0.18	0.28
P^a_i	0.16	0.16	0.19	0.26	0.42

表5 収入に対する移動ポテンシャル

世帯収入	100	100～200	200～300	300～400	400～600
割合	0.09	0.11	0.14	0.12	0.21
P^b_i	0.35	0.44	0.58	0.48	0.85
世帯収入	600～800	800～1000	1000～2000	2000	無回答
割合	0.10	0.05	0.06	0.00	0.10
P^b_i	0.42	0.20	0.25	0.02	

表6 居住年数に対する移動ポテンシャル

居住年数	1年未満	1～3年未満	3～5年未満	5～10年未満
割合	0.08	0.23	0.11	0.16
P^c_i	0.640	0.904	0.432	0.256
居住年数	10～15年未満	15年以上	不明	
割合	0.10	0.32	0.02	
P^c_i	0.152	0.168		

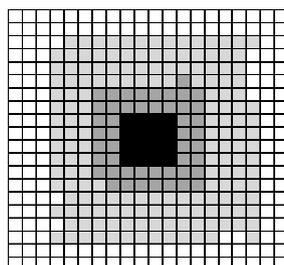


図3 初期世帯分布

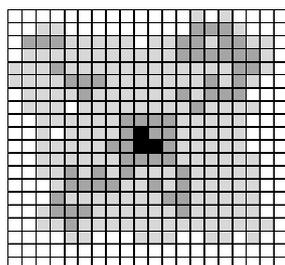


図4 20年後の世帯分布 (シナリオ①)

の大幅な増加がみられた。これは、全ての地域で線引きを無くすことによって、どのセルでも住宅建設に対する制限がなくなり、地価や税金が安く、利便性や安全性も良い郊外部への移動が増加したためと考えられる。

図5より、シナリオ②でも周辺部への移動も多くみられたが、中心部の世帯数がシナリオ①と比べて大きく増加した。これは、周辺部を市街化調整区域にし、住宅の建設に制限をかけることで、周辺部への人口流出を抑え、さらに地価を半減させ、周辺部との差を少なくすることで、中心部で留まる世帯や、中心部へ移動してくる世帯が増えたためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、マルチエージェントシステムを用いた土地利用計画支援システムを開発し、2つのケースを想定してシミュレーションを行った。その結果、何も規制を与えていない場合、地価や税金の安く、利便性や安全性の高い郊外の地域への移動が顕著にみられたが、郊外部を市街化調整区域に指定し、中心部のみ開発が行いやすい環境にした場合、郊外部への人口流出を最小限に抑えることができるという結果が得られた。

しかし、本システムでは、世帯人員数や各世帯人員の年齢といった詳細な情報まで与えていないため、子供の独立や別居等による世帯の分裂や、正確な自然増減等を考慮できていない。また、実際には変化があるであろう地価や商業施設の位置を変化させていない。こうした点を今後の課題としたい。

付記

本研究は科学研究費補助金（若手研究B、2006～2007年度、No. 18760463）による成果の一部である。

参考文献

- 1) 加藤晃, 竹内伝史: 新・都市計画概論, 共立出版株式会社, 2004.
- 2) 青木俊明, 稲村肇: 居住地選択行動に及ぼす要因に関する考察, 土木計画学研究・講演集, No.18(2), pp.109-112, 1995.
- 3) 山形県: 住宅・土地にかかる税金の概要, 山形県ホームページ, <http://www.pref.yamagata.jp/>, 2005.
- 4) 総務省: 国勢調査, 2005.
- 5) 総務省: 全国消費実態調査, 2004.
- 6) 総務省: 国勢調査, 2000.
- 7) 総務省: 住宅・土地統計調査, 2003.
- 8) 住宅金融支援機構: 個人住宅規模規格等調査, 2004.
- 9) 厚生労働省: 人口動態統計, 2005.
- 10) 尼崎市: 人口移動アンケート, 2005.
- 11) 大阪市: 人口移動要因調査, 2003.

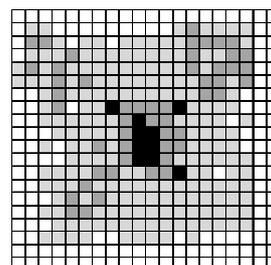


図5 20年後の世帯分布 (シナリオ②)

世帯数
0
1～9
10～29
30以上