

# マルチエージェントアプローチによる均衡型土地利用モデルの拡張\*

## A expansion of equilibrium type land use model by multi agent approach\*

戸川卓哉\*\*・林良嗣\*\*\*・加藤博和\*\*\*

By Takuya TOGAWA\*\*・Yoshitsugu HAYASHI\*\*\*\*・Hirokazu KATO\*\*\*\*\*

### 1 はじめに

人口減少段階に突入した日本では、人口増加に伴って郊外に進展していった都市域を、人口減少に対応したコンパクトな構造に造り変えていく必要がある。この転換を誤れば、都市域の希薄化を招き、インフラ維持コスト増大などによる莫大な損失が発生する可能性がある。

人口を強制的に移動させることは非常に困難であり、間接的な政策を通じて都市域が集約的に利用されるように世帯や企業などの立地を誘導することが現実的である。また、今後必要なインフラの維持・整備量を検討する上でも、人口減少に伴って、都市圏のどの部分の人口がどの程度減少するのかを予測しておく必要がある。

従来、このような政策を都市圏レベルで検討する場合、「土地利用・交通モデル」を用いた分析が行われてきたが、モデル構造に関する各種の制約もあり、人口減少下における都市政策の分析に対応したフレームワークとはなっていない。さらに、様々な主体の意思決定の結果によってもたらされる、都市の発展や衰退のメカニズムは非常に複雑であり、その理解は十分なものとは言えない。

本研究では、世帯の立地行動のモデル化をベースとしたマルチエージェントアプローチによる土地利用モデルのプロトタイプを構築することを目的とする。マルチエージェントモデルとは、内部状態と行動ルールを持った多数のエージェント（自立的主体）が相互作用するモデルのことであり、コンピュータ上に作成することによって現実の社会現象を理解しようとする方法である。マルチエージェントによるモデル化は、都市のように、その対象が様々な主体による離散的な意思決定に支配され

\* キーワーズ：住宅立地，地域計画，人口分布

\*\* 学生員，修(情報科学)，名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町，TEL 052-789-3828, FAX 052-789-1454,

E-Mail: togawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp)

\*\*\* フェロー，工博，名古屋大学大学院教授 環境学研究科 都市環境学専攻

\*\*\*\* 正員，博(工)，名古屋大学大学院准教授 環境学研究科 都市環境学専攻

ている場合に適していることから、これまでの土地利用・交通モデルに課せられていた前述の障害を突破できる可能性がある。

### 2 既往研究と本研究の位置づけ

#### (1) 既往研究

土地利用・交通モデルの枠組みでは、経済理論との整合性を重視した「均衡型」と、個別にモデル化された立地主体の行動を逐次的に追跡する「マイクロシミュレーション型」の主に2つのタイプが提案されている。

#### a) 均衡型土地利用・交通モデル

世帯や企業などの最適化行動を仮定し、価格メカニズムによって、均衡状態に調整された結果を考察対象とする。通常、雇用圏程度の広域レベルが対象とされる。経済理論と整合的であるため便益指標を理論的に計測することができ、道路整備などの社会基盤整備プロジェクトの評価に用いられてきた。モデル構造は理論的一貫性を持っており、前提（立地主体の行動原理やシナリオなど）と結果の関係は明確である。しかしながら、均衡探索の計算過程は複雑になるため、扱える立地主体タイプには制限が生じるとともに、実際の土地利用変化に見られる動的なプロセスも考慮されてこなかった。

#### b) マイクロシミュレーション型土地利用・交通モデル

個別の都市レベルが分析対象となることが多く、立地選択対象単位は1kmメッシュのような狭いゾーンや、場合によっては個別建物であることもある。各種の統計データから立地主体の世帯や企業に関するマイクロレベルの情報が利用されている。現実社会の多様性を反映させることが可能であり、土地利用変化予測のツールとして主に欧米諸国で用いられてきた。しかしながら、均衡概念を利用しないため、地価（地代）によって立地が調整されるプロセスは擬似的なものである。また、複数のサブモデルから構成されているにもかかわらず、それらの組合せが結果に与える影響について十分に検討されていない。したがって、モデル全体を通した行動原理は不明確である。

## (2) 本研究の位置づけ

マルチエージェント・シミュレーション研究の分野では、エージェントの分権的な意思決定プロセスと市場均衡の考え方を両立した人工市場モデルが提案されている。本研究では、これを発展させ、土地利用モデルにおいてもマルチエージェント手法により、ミクロにモデル化された各立地主体の行動と土地市場の両方を考慮したモデルを構築する。

また、近年、コンピュータの処理能力の進展を背景に、構成的アプローチと呼ばれる分析対象の理解法が提案されている<sup>1)</sup>。構成的アプローチとは分析対象を自分の手で（コンピュータ上に）作ることによって理解しようという考え方である。複雑なシステムである都市を理解する上でも有効であると考えられる。これまで、マイクロシミュレーション型モデルでは予測精度の向上や政策効果の分析が主な考察対象であり、構成的アプローチの視点が欠落していた。

本研究では、人口減少下の都市構造の理解と都市政策分析への適用を念頭において、均衡型土地利用・交通モデルよりは柔軟で、マイクロシミュレーション型土地利用・交通モデルよりは構造的なマルチエージェントアプローチによるモデルの提案を目的とする。そのため、構成的アプローチから都市を理解するための第一次接近として、できるだけ単純な構造のモデルを提案する。

## 3 モデル

### (1) 仮定条件

都市圏を対象とした地域を想定し、その地域は  $J$  個のゾーンに分割されている。任意の2ゾーン間は交通ネットワークにより結ばれ、それぞれに距離が定義されている。モデルの内部には、「世帯エージェント」が複数存在しており、それらが各ゾーンで居住・就業している。世帯エージェントはライフステージの経過に伴って、転居、消滅といった行動を行い、外生的に与えられたルールに従って新たに誕生する。各ゾーンには土地市場が存在し、世帯エージェントの行動に反応して地代が調整されるメカニズムが存在する。

### (2) モデル・コンポーネントとフロー

大きく分けて2つのモデルを構築する。1つは居住地や従業地を選択する「世帯エージェントの行動モデル」であり、もう1つはその結果、各ゾーンの地代がどのように変わるのかを示す「土地市場モデル」である。図2に示すフローに従ってシミュレーションは実行される。

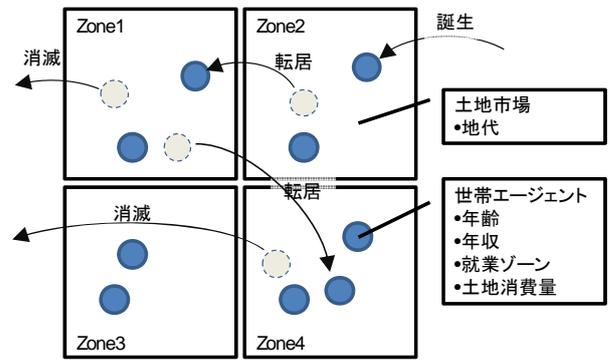


図1：モデルの実行イメージ

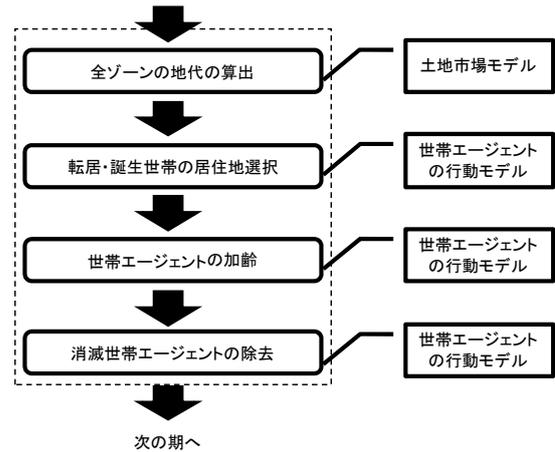


図2：モデルフロー

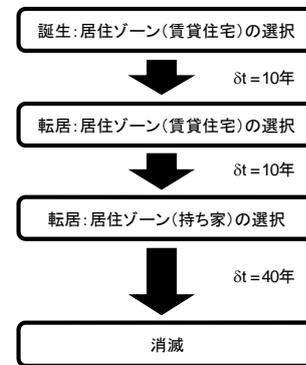


図3：世帯エージェントのライフサイクル

### (3) 世帯エージェントの行動モデル

#### a) 世帯エージェントのライフサイクル

世帯は、社会・経済状況などの外部環境と自己の貯蓄やライフステージなどの内部状態の両方を考慮しつつ意思決定を行っていくものとする。川口<sup>2)</sup>を参考に世帯エージェントのライフサイクルについて図3に示す仮定をおく。ここでは、世帯は親世帯からの独立によって誕生する。誕生と同時に就業地と最初の賃貸住宅を選択し居住を開始する。10年後に転居を行い、さらに10年後に、持家を所得すべく再び転居する。その後、40年間生存した後、世帯は構成員の死亡などにより消滅する。

### b) 世帯エージェントの就業ゾーン選択モデル

世帯エージェントは、誕生時に一度だけ就業ゾーンの選択を行う。ここでは、現実のデータに基づいて確率的に就業地を選択させる。したがって、本研究の範囲では転勤などに伴う転居現象は取り扱っていない。

### c) 世帯エージェントの居住ゾーン選択モデル

世帯エージェントは、コスト要因である地価と就業地までの距離を考慮して居住ゾーンを選択すると仮定する。具体的には、 $t$  期における就業ゾーンが  $i$  の世帯エージェントの居住ゾーン  $j$  に対する効用関数と予算制約を (1) 式のように仮定する。

$$\begin{aligned} \max_{h,z} U_{ij}(t) &= h^\alpha z^{1-\alpha} \\ \text{s.t. } y - \gamma d_{ij} &= r_j(t)h + z \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $h$  は土地の  $z$  は合成財の消費量、 $r_j(t)$  は  $t$  期におけるゾーン  $j$  の地代、 $d_{ij}$  はゾーン  $i \cdot j$  間の距離、 $\gamma$  は距離1単位の移動コストを表す。

(1)式の最適化問題を解くことにより、間接効用関数(2)を導出する。

$$V_{ij} = \alpha^\alpha (1-\alpha)^{1-\alpha} r_j(t)^{-\alpha} (y - \gamma d_{ij}) \quad (2)$$

さらに誤差項を考慮して、居住ゾーンの選択は (3) 式の多項ロジットモデルにより確率的に行われるものとする。

$$P_{ij} = \frac{\exp(\mu V_{ij})}{\sum_j \exp(\mu V_{ij})} \quad (3)$$

居住ゾーン選択における3度の転居の差異は、パラメータ  $\alpha$  と所得  $y$  により表現する。

### (4) 土地市場モデル

図4は、愛知県の市区町村のデータを基に、横軸に可住地面積あたりの住宅床面積、縦軸に公示地価の平均値から利率6%で換算した地代  $r$  をプロットしたものである。プロットの形状から、(4)式のように地代  $r$  を説明する3次式を仮定して、最小2乗法によりパラメータを推定した結果を表1に示す。ここで、 $A_j$  はゾーン  $j$  の面積を、 $H_j$  はゾーン  $j$  に居住する世帯の総消費土地面積を表す。本研究では、人口集積に応じて地価が上昇し、立地が抑制されるプロセスをこの曲線を用いて表現する。

$$r_j(t) = \eta_1 \left( \frac{H_j}{A_j} \right) + \eta_2 \left( \frac{H_j}{A_j} \right)^2 + \eta_3 \left( \frac{H_j}{A_j} \right)^3 \quad (4)$$

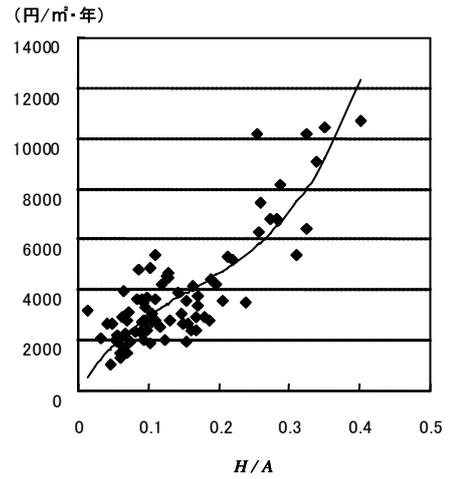


図4：土地消費量と地代の関係

表1：パラメータの推定結果

	パラメータ	t値
$\eta_1$	$1.54 \times 10^2$	18.71
$\eta_2$	$-7.14 \times 10^{-2}$	10.42
$\eta_3$	$1.17 \times 10^{-5}$	10.05
自由度調整済みR値：0.845		

## 4 実験

### (1) 設定

図5に示すような9つの正方形のゾーンから構成される仮想都市を対象としたシミュレーション実験を行う。すべての世帯の就業ゾーンはZone5とする。初期値では、世帯エージェントに0~60歳までの年齢をランダムに与える。每期、消滅したエージェントと同数の0歳のエージェントをモデルに補給していく。

次に、各種パラメータ値を名古屋都市圏の値を意識して設定する。各ゾーンの面積は名古屋市と同様の290k  $m^2$  (17km $\times$ 17km) とする。(1)式における  $d_{ij}$  は各ゾーンの重心間の距離を利用する。金本・徳岡<sup>3)</sup>の定義による名古屋都市雇用圏の世帯数は約200万世帯であるが、コンピュータの処理能力を考慮して20000エージェントとする。すなわち、1エージェントが100世帯に対応するイメージである。転居時の世帯エージェントの年収は、300万円、500万円、700万円とする。予備実験から  $\gamma=2.3 \times 10^6$ 、 $\mu=1.0 \times 10^{-5}$  とする。また、初期の世帯エージェントの土地消費量を50  $m^2$  とした。以上の設定により、ランダムな初期配置状態からスタートしても、シミュレーション時間で約50年程度経過した後、定常状態に達する(図6)。定常状態では世帯エージェントの約半数が雇用ゾーンであるZone5に居住し残りが周囲のゾーンに居住することになる。

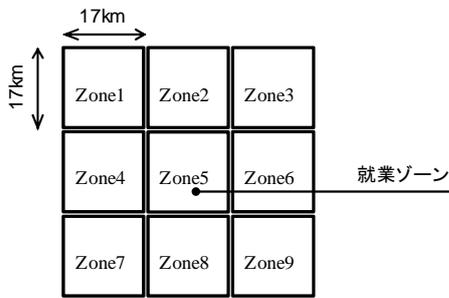


図5：都市構造の仮定

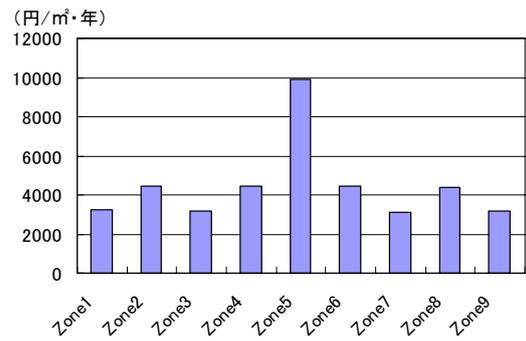


図7：定常状態における各ゾーンの地代

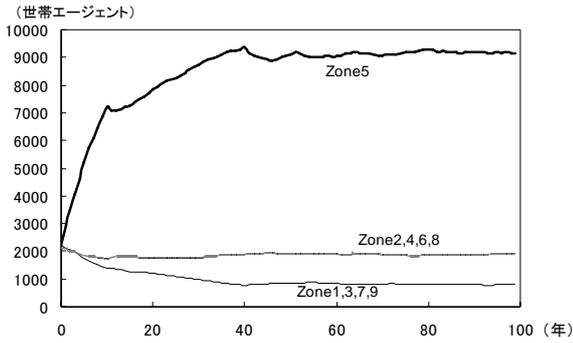


図6：世帯エージェント数の収束過程

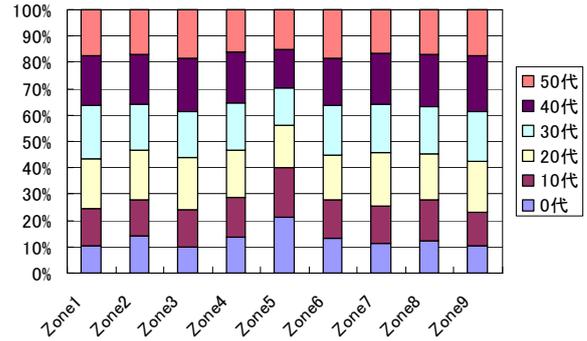


図8：定常状態における世代別の世帯割合

## (2) 考察

定常状態（図6における100年経過した状態）の考察を行う。図7は地代の推定結果であり、都心部（就業ゾーン）で高く、郊外部へ行くほど低価格になっている。図4と比較しても妥当な範囲に納まっていることが分かる。

図8は各ゾーンの世帯の年齢別割合を示したものである。都心部で若年世代の割合が多く、高齢世代である富裕層ほど郊外へ居住する傾向を示しており、都市経済学の知見とも合致した結果となっている。以上より、これまでの知見や現実と大きくかけ離れることなくマルチエージェントアプローチによるシミュレーション・モデルの基本形が構築できたことが分かる。

## 5 まとめ

本研究では、世帯をエージェントと見立てたマルチエージェントアプローチにより、土地利用モデルのプロトタイプを構築し、シミュレーション実験を行った。

世帯のライフサイクルを考慮した行動モデルを組み込んでも、各ゾーンの地代や世帯分布などこれまでの知見や現実と大きくかけ離れることのない結果が得られた。人口減少下の都市を研究していくために必要な要素であり、「均衡型」のモデルが捨象してきた都市の動的側面を土地利用モデルに拡張することができた。

しかしながら、本分析におけるモデル・コンポーネントは極端に単純化したものであり、現実的な政策分析

をするためには様々な要素を考慮してモデルを拡張しなければならない。

次のステップとしては、複数の主体の相互作用からの創発現象を研究するというマルチエージェントシステム本来の趣旨から考えても、モデルに世帯エージェントだけではなく、ディベロッパーや企業などのエージェントを組み込み、それらとの相互作用の結果を研究することが考えられる。

## 参考文献

- 井庭崇, 福原義久：『複雑系入門』, NTT出版, (1998).
- 川口太郎：大都市圏における世帯の住居移動, 『日本の人口移動 -ライフコースと地域性-』, 古今書院, (2002).
- 金本良嗣, 徳岡一幸：日本の都市圏設定基準, 『応用地域学研究』, No. 7, pp1-15, (2002).