世帯の空間分布予測モデルを用いた土地利用計画支援システムの開発

DEVELOPMENT OF A LAND USE PLANNING SUPPORT SYSTEM USING HOUSEHOLD DISTRIBUTION PREDICTION MODEL

長崎 浩紀*, 渡辺 公次郎**, 近藤 光男***

Hiroki NAGASAKI, Kojiro WATANABE and Akio KONDO

In this paper, we developed a land use planning support system using the household distribution prediction model. The concept of multi-agent systems was used in the model. The agent of this model is a household. The agent decides decision of migration depending on its own conditions and migration potential at current address. Next, the agent starts to select the next address by land potential. If land potential of the next address is higher than the current address, the agent will migrate to the selected address. This model was incorporated in GIS to develop a land use planning support system.

Keywords: Land Use Planning, Planning Support Systems, Geographic Information Systems, Household Distribution, Multi-Agent Systems
土地利用計画、計画支援システム、地理情報システム、世帯分布、マルチエージェントシステム

1. はじめに

1.1 背景と目的

現在、徳島都市圏を始めとする多くの地方都市では、郊外化と中心市街地衰退化が同時に進行しており、様々な弊害をもたらしている。分散的な郊外化は、緑地や農地の減少、交通量の増加、非効率的な社会資本整備などを引き起こし、中心市街地衰退化の大きな原因にもなっていることから、今後は、郊外部の開発規制と中心市街地活性化の両方に配慮した土地利用計画が必要である。その策定のためには、土地利用規制、誘導の効果を様々な形で予測、評価し、分かりやすく表示させることで、プランナーの意思決定を支援するシステムが必要である。

そこで本研究では、マルチエージェントシステム(MAS)を用いて個々の世帯の移動行動をモデル化し、そのモデルをGISソフトに組み込むことで、土地利用規制の効果を、世帯の空間分布で予測することが可能な土地利用計画支援システム(LUPS)を開発することを目的とする。

1.2 研究対象地域

研究対象地域は、徳島市、鳴門市、小松島市、松茂町、北島町、藍住町、石井町から構成される徳島都市圏とする。対象地域の位置

を図1、人口と世帯数を表1に示す。この地域は、徳島県の政治、経済、文化の中心地域であり、県全体の58%の人口が集積する。中心都市である徳島市では、特に中心市街地で人口減少が進んでいるものの、藍住町や松茂町など郊外部では人口が増加しており、それに伴い都市機能の郊外化も進んでいる。また、交通渋滞も慢性化していることから、より実効性のある土地利用計画が求められている。

表1 徳島都市圏の人口と世帯数

No	市町名	面積 [km ²]	人口[人]		
			1980	1990	2000
1	徳島市	191.39	249,343	263,356	268,218
2	鳴門市	135.46	63,423	64,575	64,620
3	小松島市	45.11	43,636	43,188	43,078
4	石井町	28.83	24,434	25,207	26,023
5	松茂町	13.1	10,196	12,096	14,267
6	北島町	8.77	16,466	18,986	19,823
7	藍住町	16.27	19,713	25,674	30,368
計		438.93	427,211	453,082	466,397
No	市町名	面積 [km ²]	世帯数[世帯]		
			1980	1990	2000
1	徳島市	191.39	79,754	90,738	104,891
2	鳴門市	135.46	17,691	19,052	21,841
3	小松島市	45.11	12,439	12,983	14,742
4	石井町	28.83	6,358	6,944	8,063
5	松茂町	13.1	2,601	3,524	4,853
6	北島町	8.77	4,918	5,968	6,883
7	藍住町	16.27	5,264	7,351	9,925
計		438.93	129,025	146,560	171,198

図1 徳島都市圏

* 中央コンサルタンツ(株) 修士(工学)

** 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
助教・博士(工学)

*** 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
教授・工博

Chuoh Consultants Co., Ltd., M. Eng.

Assistant Prof., Institute of Technology and Science, The Univ. of Tokushima, Dr. Eng.

Prof., Institute of Technology and Science, The Univ. of Tokushima, Dr. Eng.

1.3 既往研究

ここでは、関連する既往研究を挙げ、本研究との違いを述べる。まず、MASを用いた都市モデルとして、奥^{1),2),3)}は一連の研究の中で、土地利用分布を自己組織化の原理に基づき説明することを目的に、セルオートマトン（CA）の考え方による土地利用変化モデルを開発している。Kii and Doi⁴⁾は、コンパクトシティの効果を把握することを目的とした、MASを用いた土地利用交通モデルを開発している。池谷ら⁵⁾は、MASを用いて人口分布の動的特性をモデル化している。安藤ら⁶⁾は、都市の衰退過程をMASによりモデル化し、人口、空き家、地代、商業地の変化が都市の衰退化にどう影響するかを検討している。以上のように、奥^{1),2),3)}のモデルは土地利用の変化を、Kii and Doi⁴⁾は土地利用と交通量の変化を、池谷ら⁵⁾のモデルは人口分布を、安藤ら⁶⁾のモデルは人口、空き家、地代、商業地の変化を予測している。本研究では、世帯の移動行動をMASによりモデル化し、3次メッシュ（約1km×1km）単位で予測しており、この点が既往研究とは異なる。

次に、土地利用計画支援システムに関する研究では、呉ら⁷⁾は、用途地域指定を支援するため、作業過程をシステム化することでエキスパートシステムを開発している。大貝ら⁸⁾は、環境管理計画立案支援エキスパートシステムとGISを統合し、環境に配慮した土地利用計画の現況把握から計画立案までを支援する計画支援システムを開発している。長崎ら⁹⁾は、途上国における土地利用計画策定支援を目的とした、計画支援システムを開発している。これは、GISに、CAを用いた市街化予測モデルとAHP（階層分析法）を用いた土地利用計画図作成支援システムを統合したシステムである。金ら¹⁰⁾は、福岡市と川崎市を対象に、マクロデータを用いた土地利用の遷移行列を分析することで遷移の特徴、定常状態の土地利用構成の特徴を明らかにし、その結果から、将来の土地利用フレームが設定された場合の土地利用遷移行列を推定し、土地利用変化の予測を行っている。これらの研究との相違点は、GISに世帯の空間分布予測モデルを組み込むことで、GIS上で様々な土地利用計画案が実施された場合の世帯分布を予測し、案の検討が行える支援システム、という点である。

1.4 本論文の構成

第2章では、世帯の空間分布予測モデル（HDPM）を開発し、第3章ではそのモデルをGISソフトに組み込むことでLUPSを開発する。第4章では、対象地域に開発したシステムを適用し、シナリオ別の将来予測を行う。最後に第5章で成果と今後の課題を述べる。

2. 世帯の空間分布予測モデルの開発

2.1 モデルの考え方

MASとは、多数の自律した主体が相互に依存、協調することで、全体として様々な現象を捉えることが可能なシステムである。世帯の社会移動は、各世帯の家族構成、収入、居住環境に関する意識といった世帯属性や、場所の利便性や安全性など周辺環境の違いにより変化すると考えられる。ここでは、ある世帯の移動は他の世帯や周辺環境との相互作用により決定されると考え、MASを使ってモデル化する。本モデルにおけるエージェントは、世帯（世帯主）、地価、土地利用とし、互いに相互作用を及ぼし合いながら、世帯の空間分布、世帯の属性、地価、土地利用比率が変化する。詳細は2.6に

表2 用いたデータ

項目	内容
道路網	国道
施設位置	駅、医療施設、小中学校、交番・警察署、県庁、公民館・集会所、商業施設
土地利用	市街地、空地、農地、森林、水域
土地利用規制	市街化区域（住居系、商業系、工業系、その他）、市街化調整区域、未線引き都市計画区域、都市計画区域外
地形	標高
その他	世帯数、地価、大規模住宅団地、DID、犯罪発生率、事故発生率、火災発生率

示す。

2.2 データ整備

本モデルで用いるデータを表2に示す。本モデルでは、世帯の空間分布を3次メッシュ（約1km×1km）単位で予測する。メッシュサイズは小さいほど詳細な分布を捉えることができるが、ここでは、世帯数データに国勢調査の地域メッシュ統計を用いたため、3次メッシュとした。土地利用は、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを市街地、空地、農地、森林、水域に再分類して用いた。区域区分と用途地域は、都市計画総括図と用途地域変更総括図を用いて作成した。駅、医療施設、小中学校、交番・警察署、県庁、国道の位置は、数値地図25000（空間データ基盤）を基に、公民館・集会所は一覧表から位置をデータ化した。商業施設は、床面積1,000m²以上の大規模小売店舗と、徳島県内でチェーン展開しているスーパーマーケット（1,000m²未満も含む）の位置をデータ化した。これらの商業施設は世帯移動に関係すると考えたためである。地価は、国土数値情報の地価公示点（公示地価）、都道府県地価調査点（基準地価）データを用いる。ただし、両者が重複している地点については、公示地価の方を用いる。大規模住宅団地はその位置を、人口集中地区（DID）は、総務省統計局が公開しているDID境界図を用いてデータ化した。標高は数値地図50mメッシュ（標高）を用いた。

これらのデータを用いて、3次メッシュごとに世帯数、各施設からの距離、土地利用・区域区分・用途地域・大規模住宅団地の各面積比率、平均標高、DIDが50%以上含まれているかどうか、地価を属性として付加した。データの制約上、公示地価、基準地価が存在しない3次メッシュについては、存在するメッシュのデータを用いて重回帰分析を行い、得られた式より地価を推計した。

2.3 世帯の行動

世帯は、各自の属性と現在住んでいる土地の魅力度より、そこから移動する（引越す）かどうかを決める。移動先は、現在より魅力度が高い場所とし、対象地域内にそういった場所がなければ空間外、すなわち徳島都市圏外へ移動する。

まず、メッシュ*J*に居住する世帯*i*は、移動の意思を次式に示す移動ポテンシャル*P_{ij}*により決定する。

$$P_{ij} = P_i^a \cdot P_i^r \cdot P_i^y \cdot Land_{ij} \quad (1)$$

ここで、*P_i^a*、*P_i^r*、*P_i^y*はそれぞれ*i*の年齢、年収、居住年数に対する移動ポテンシャル、*Land_{ij}*は*i*が*J*に感じる魅力度*S_J*に対する移動ポテンシャルである。移動ポテンシャルに、年齢、年収、居住年数を用いた理由であるが、年齢は、就職や進学、結婚などにより転居する可能性を考慮するため、年収は、収入の違いが住宅の購入や転居する

場所の決定に影響を及ぼすと考えたため、居住年数については、転勤など定期的に転居が必要な世帯を考慮するために用いた。 $Land_{ij}$ は、魅力度が低いほど移動の意思が強くなると考え、式(2)に示す指数関数型とした。

$$Land_{ij} = \exp(-\omega \cdot S_{ij}) \quad (2)$$

ここで、 ω は係数である。

本モデルでは、世帯が移動する可能性が大きいほど P_{ij} が高くなるよう、各要因の値を設定している。しかし、実際には P_{ij} が大きい世帯が必ず移動するとは限らない。現実の世帯の移動は、式(1)で用いた要因以外にポテンシャルとして設定しにくい不確定要素にも左右されると考えられる。そこで、最小値0、最大値1の乱数値 r （一様乱数）を用いることで、 P_{ij} が r よりも大きければ i は移動を決意し、移動先の選定に移るようにした。これにより、 P_{ij} が大きいほど、 i は移動を決意しやすくなるが、そうならない可能性も含ませることができる。以上の方法で世帯移動の意思決定に不確定要素を加味させた。

次に、対象空間内のメッシュ K をランダムに選択し、 i が K に感じる魅力度 S_{ik} を算出する。この値が S_{ij} よりも高い場合、 i は K に移動し、低い場合は別のメッシュを選択する。この過程を繰り返すことで移動先を決めるが、対象地域内のメッシュ数以上の回数だけ繰り返しても S_{ij} より魅力度の高いメッシュが存在しない場合、 i は対象地域内に魅力がないと判断し、対象地域外に移動する。なお、本モデルでは同一メッシュ内での移動は想定していない。また、対象空間内のメッシュには、上限世帯数を設定していない。その理由は、各メッシュの上限世帯数は、戸建て、集合住宅といった住宅種別、規模、その場所の容積率等に左右され、しかもそのメッシュに建設される住宅種別は時間とともに変化することが考えられるため、3次メッシュ単位ではうまく設定することができなかった。しかし、何の制約もなければ魅力度の高いメッシュに世帯が集中してしまうため、後述する世帯密度に関する魅力度を用いて過度の集中を抑制した。

2.4 土地の魅力度

土地の魅力度は、土地が持つ特性に加えて個人の状態や価値観によっても大きく左右される。そこで、これらを考慮し土地の魅力度 S_{ij} を次式で算出する。

$$S_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^5 \alpha_n \cdot C_{ij}^n}{5} \times \frac{\sum_{n=6}^9 \alpha_n \cdot C_{ij}^n}{4} \times \alpha_{10} \cdot C_{ij}^{10} \times \frac{\sum_{n=11}^{16} \alpha_n \cdot C_{ij}^n}{6} \times \alpha_{17} \quad (3)$$

ここで、各変数の意味は表3に示すとおりである。 $\alpha_1 \sim \alpha_{16}$ は各魅力度に重みを与える係数で、この設定により個人の価値観を反映させる。詳細は後述する。 α_{17} は標高によって変化する係数であり、標高が一定値以下の場合は1.0、それ以上は0.5とする。

次に、表3に示す各変数の考え方を説明する。

「利便性」に関する魅力度は、生活する上で必要な施設からの距離に応じて設定した。「安全性」に関する魅力度は、警察関連施設からの距離と、犯罪・事故・火災発生率に応じて設定した。「土地利用規制」に関する魅力度は、区域区分と各種用途地域指定を取り上げ、新規開発が行われやすいほど、また良好な居住環境が形成されやすいほど高くした。「その他」の指標として、税金に関する魅力度は税率に応じて設定し、世帯密度に関する魅力度は、シミュレーション開始時の密度との差が大きくなるほど低くした。周辺の世帯年収と世帯主年齢に関する魅力度は、同程度の年収、世帯主年齢の世帯が集まりやすいと考えたため、そういった場合に高くした。大規模住宅団地に関する魅力度は、大規模住宅団地では住環境に配慮した整備が行われていると考えられるため、団地の面積に応じて設定した。土地利用に関する魅力度は、土地利用の違いが開発のしやすさに影響を及ぼすことが考えられるため、市街地、農地、空地別に魅力度を設定した。

以下に、各変数の設定方法の詳細を述べる。

利便性と安全性（警察関連施設密度）に関する魅力度 $C_{ij}^1 \sim C_{ij}^6$ は、対象地域内の過去の移動世帯数と、各施設までの距離・警察関連施設密度を集計し、両者を多項式近似させて求めた。以下に C_{ij}^1 を求める式を示す。

$$C_{ij}^1 = \beta_1 \cdot (dist_{ij}^1)^6 + \beta_2 \cdot (dist_{ij}^1)^5 + \beta_3 \cdot (dist_{ij}^1)^4 + \beta_4 \cdot (dist_{ij}^1)^3 + \beta_5 \cdot (dist_{ij}^1)^2 + \beta_6 \cdot (dist_{ij}^1) + \beta_0 \quad (4)$$

ここで、 $dist_{ij}^1$ はメッシュ J から幹線道路までの距離[km]、 $\beta_1 \sim \beta_5$ は係数、 β_0 は定数項である。 $C_{ij}^2 \sim C_{ij}^6$ は、 $dist_{ij}^1$ を表3に示す各施設からの距離に変えて、警察関連施設密度に対する魅力度 C_{ij}^6 は、距離を密度に変えて計算する。

安全性（犯罪・事故・火災発生率）に関する魅力度 $C_{ij}^7 \sim C_{ij}^9$ は、次式に示す指数関数型とした。

$$C_{ij}^{7 \sim 9} = \exp(-risk_{1 \sim 3}) \quad (5)$$

ここで、 $risk_1$ は単位人口当たりの犯罪発生率、 $risk_2$ は事故発生率、 $risk_3$ は火災発生率である。

土地利用規制に関する魅力度 C_{ij}^{10} は、次式で算出する。

$$C_{ij}^{10} = \sum_{n=1}^7 \delta_n \cdot rate_kubun_j^n \quad (6)$$

ここで、 $rate_kubun^{1 \sim 7}_j$ は、順番に、 J の住居系用途地域、商業系用途地域、工業系用途地域、その他の用途地域、調整区域、未線引き都市計画区域、都市計画区域外の面積比率である。 $\delta_1 \sim \delta_7$ は新規開発と居住地環境形成に関する影響度で、次式で計算する。

表3 式(3)の各変数の意味

変数	内容	変数	内容
C_{ij}^1	利便性	C_{ij}^{10}	規制
C_{ij}^2		C_{ij}^{11}	メッシュ J の土地利用規制に対する魅力度
C_{ij}^3		C_{ij}^{12}	メッシュ J の税金に対する魅力度
C_{ij}^4		C_{ij}^{13}	メッシュ J の世帯密度に対する魅力度
C_{ij}^5		C_{ij}^{14}	周辺の世帯年収に対する魅力度
C_{ij}^6		C_{ij}^{15}	周辺の世帯主の年齢に対する魅力度
C_{ij}^7	安全性	C_{ij}^{16}	メッシュ J に存在する大規模住宅団地に対する魅力度
C_{ij}^8			メッシュ J の土地利用に対する魅力度
C_{ij}^9			利便性指標で用いる距離はメッシュ J から計測し、安全性指標で用いる設置密度と発生率はメッシュ J のものをを用いる。その他の指標で用いる周辺の世帯年収と年齢は、メッシュ J に居住する世帯 i の周辺世帯のものをを用いる。

$$\delta_{1\sim 7} = (\varepsilon_{1\sim 7} + \phi_{1\sim 7}) / 2 \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon_{1\sim 7}$ は J で指定されている土地利用規制が新規開発に、 $\phi_{1\sim 7}$ は居住地環境形成に及ぼす影響度である。 ε と ϕ の添字1～7は、式(6)の $rate_kubun^{1\sim 7}_J$ の添字1～7と同じ土地利用規制を示している。

税金に関する魅力度 C^{11}_J は、 J に居住する i の年収 $Income_i$ に対する税額 Tax_{ij} で表す。 C^{11}_J を式(8)に、 Tax_{ij} を式(9)に示す。

$$C^{11}_J = Tax_{ij} / Income_i \quad (8)$$

$$Tax_{ij} = Price_J \cdot site_area_i \cdot \gamma_1 \cdot taxrate_J + Cost \cdot build_area_i \cdot \gamma_2 \cdot taxrate_J \quad (9)$$

ここで、 $Price_J$ は J の地価[円/㎡]、 $site_area_i$ は i が所有する敷地面積[㎡]、 $taxrate_J$ は J の税率、 $Cost$ は単位面積当たりの建築工事費[円/㎡]、 $build_area_i$ は i の持つ建物の延面積[㎡]、 γ_1 と γ_2 は、課税標準額の割引率である。 J が市街化区域内の場合、 $taxrate_J$ は固定資産税率と都市計画税率の和、それ以外の場合は固定資産税率のみとする。

周辺世帯に関する魅力度 C^{12}_J は、次式で算出する。この魅力度は、世帯の密度が居住環境に及ぼす影響を反映させるために用いた。具体的には、シミュレーション開始時に比べて、周囲の世帯密度が上昇もしくは下降するほど、密集もしくは散在のため、居住環境が悪化すると考えた。

$$C^{12}_J = 1 - |app_den_J - den_J| / app_den_J \quad (10)$$

ここで、 den_J は J の世帯密度、 app_den_J は J のシミュレーション開始時の世帯密度である。ただし、 den_J が app_den_J の2倍以上である場合、 $C^{12}_J=0$ とする。

周辺世帯に関する魅力度 C^{13}_J 、 C^{14}_J は、次式で算出する。

$$C^{13}_J = equal_income_{ij} / total_agt_J \quad (11)$$

$$C^{14}_J = equal_age_{ij} / total_agt_J \quad (12)$$

ここで、 $equal_income_{ij}$ 、 $equal_age_{ij}$ は、 J に居住する i と同じ年収階層、年齢階層の世帯数、 $total_agt_J$ は J の総世帯数である。式(11)、式(12)は、 J に居住する i と同じ年収、年齢の世帯が集まることで、その場所の魅力度が高くなる。これにより、世帯間の直接的な相互作用を考慮する。

大規模住宅団地に関する魅力度 C^{15}_J は、次式で算出する。

$$C^{15}_J = he_area_J / area_J \quad (13)$$

ここで、 he_area_J は J に存在する大規模住宅団地の面積、 $area_J$ は J の面積である。

周辺土地利用に関する魅力度 C^{16}_J は、次式で算出する。

$$C^{16}_J = \sum_{n=1}^3 \eta_n \cdot rate_landuse^n_J \quad (14)$$

ここで、 $rate_landuse^1_J \sim rate_landuse^3_J$ は、 J の市街地、農地、空地比率であり、 $\eta_1 \sim \eta_3$ は係数である。

次に、式(3)の $\alpha_1 \sim \alpha_{17}$ 、式(7)の $\phi_1 \sim \phi_7$ の設定について説明する。

一般に、土地の魅力度は個人の価値観によっても左右されると考えられる。そこで、世帯の居住志向パターン¹¹⁾として、中心市街地志向型（利便性重視、快適性・コミュニティ形成を軽視）、郊外部

志向型（快適性・コミュニティ形成を重視、利便性軽視）、コミュニティ重視型（コミュニティ形成を重視、利便性軽視）、経済性重視型（経済性のみ重視し他は軽視）、無関心型（特定の要因に左右されない）の5つを想定し、各パターンに応じて係数を変化させる。

2.5 モデル内の時間と世帯の変化

本モデルでは、空間内の移動世帯数と空間外への移動世帯数とともに一定値に達した時、1年が経過し、それに伴い、世帯の年齢と居住年数が1増加し、年収が増減率に従い変化する。この一定値とは、国勢調査（2000年）から得られた過去5年間の徳島県内間の移動世帯数、県外への移動世帯数を、1年毎の値に変換したものである。1年が経過すると同時に、対象空間外からの移入や、出生、死亡といった自然増減によっても世帯数は変化する。

対象空間外から移入してくる世帯については、まず、ランダムに1つのメッシュを選択し、その魅力度が対象地域内に存在するメッシュの魅力度の平均値よりも高ければ、そこに移入する。そうでなければ、再びランダムに別のメッシュを探索するが、対象地域内の全メッシュ数以上の回数を繰り返しても条件を満たす場所が見つからない場合は、最も魅力度が高いメッシュに移入する。対象地域外から移入してくる世帯は、収入や周辺環境など各世帯の条件の違いから、その全てが最も魅力度の高いメッシュに移入するとは限らない。そのため、移入先の選択では、魅力度の高いメッシュが優先されるものの、ある程度の不確定要素も含まれると考え、最初はランダムに選択している。

自然増により増加する世帯の出現位置は、対象空間外から移入してくる場合と同じ手法を用いる。自然減については、65歳以上の高齢世帯に対して年齢階級別死亡率より、生死の判断を行う。もし、ある高齢世帯が次の年に死亡すると判断された場合、現実には、その世帯人員構成により次の3ケースが考えられる。高齢世帯が(1)高齢単身世帯であれば世帯が消滅、(2)高齢夫婦世帯であれば配偶者が世帯主となる、(3)高齢者以外の家族がいる場合はその中の最年長者が世帯主となる。(2)と(3)の場合は、次の年でも世帯は残る。なお、本モデルでは世帯の属性に世帯人員が含まれていないため、どのケースに該当するかはランダムに判断することにした。

2.6 相互作用

2.1でも示したように、本モデルでは、世帯、地価、土地利用が互いに相互作用を及ぼし合いながら変化する。ここでは、地価と土地利用の変化について、その詳細を説明する。

地価については、メッシュ内で世帯が変化した際に、増加するか減少するかを判別式により判別し、所与の変化量に応じて地価が変化する。この判別式には乱数を用いた攪乱項が含まれている。

土地利用は、市街地から空地、農地から市街地、空地から市街地への変化のみを想定する。その変化量については、市街地1[ha]あたりの平均世帯数を設定し、各メッシュの世帯数変化がその値に達したとき、市街地比率が1%増加もしくは減少する。市街地が増加し、メッシュ内に空地が存在する場合、空地比率が1%減少し、存在しない場合、農地比率が1%減少する。空地と農地のどちらも存在しない場合や市街地比率が既に100%の場合、メッシュ内の市街地は増加しない。逆に、市街地が減少すると、空地比率が1%増加する。

2.7 世帯属性の初期値とモデルのパラメータの設定

次に世帯属性の初期値を設定する。

年齢、居住年数については、ランダムにメッシュに振り分けたが、対象地域全体での割合は、国勢調査（2000年）から得られる徳島県全域の割合に従っている。年収もランダムにメッシュに振り分けたが、こちらも対象地域全体での割合は、全国消費実態調査（2004年）から得られる徳島県全域の年齢階級別平均年収の割合に従っている。延べ面積と敷地面積は、住宅・土地統計調査（2003年）を用いて年収別の居住室面積を集計し、世帯の年収に応じて与えた。居住志向パターンはランダムに与えた。

式(1)の年齢に対する移動ポテンシャル P^a_{ij} は、国勢調査の年齢階級別移動割合を用いた。年収と居住年数に対する移動ポテンシャル P^i_{ij} と P^r_{ij} は、対象地域である徳島県のデータが存在しなかったため、 P^i_{ij} は尼崎市¹²⁾で、 P^r_{ij} は大阪市¹³⁾で集計されていた類似のデータを利用した。尼崎市や大阪市といった大都市と、対象地域のような地方都市では移動の傾向が異なることが考えられるが、今回はデータの制約上、両都市のデータを用いた。今後はアンケート調査などで対象地域のデータを収集し、モデルで用いる必要がある。

式(2)の ω は、 $Land_{ij}$ の平均値を0.5に変換するために用いた。 $Land_{ij}$ は、0～1までの値となるように指数関数型で定式化したが、 S_{ij} が P^a_{ij} 、 P^i_{ij} 、 P^r_{ij} に比べて小さな値に偏ってしまったため、このような処理を行った。具体的には、式(2)の S_{ij} をシミュレーション開始時の全世帯の S_{ij} の平均値、 $Land_{ij}$ を0.5として、式(2)より ω を計算し、 $\omega=15$ を得た。

式(3)の $\alpha_1 \sim \alpha_{17}$ は、各居住パターンの特徴に従い、表4のように設定した。 α_3 と α_6 は年齢が高いほど、 α_{11} は年収が低いほど高く設定している。 α_4 は教育を受ける子供がいる世帯の多い30代前半で最大値1となるように設定した。

式(4)の係数 $\beta_1 \sim \beta_6$ と β_0 は、距離帯別に1990年から2000年までの世帯数変化を集計し、多項式近似して求めた。式(5)で用いる犯罪発生率、事故発生率、火災発生率は、各市町単位の値を用いた。式(7)の係数 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$ は、土地利用規制が新規開発に及ぼす影響から判断して $\varepsilon_1=1.0$ 、 $\varepsilon_2=0.7$ 、 $\varepsilon_3=0.5$ 、 $\varepsilon_4=0.4$ 、 $\varepsilon_5=0.4$ 、 $\varepsilon_6=1.0$ 、 $\varepsilon_7=1.0$ とした。

式(9)で用いる単位面積当たりの建築工事費 $Cost_l$ は、個人住宅規模規格等調査（2004年）より150,118[円/㎡]とした。課税標準額の割引率 γ_1 と γ_2 は、土地の場合、地価の約70%、建物の場合、建築費の約50～70%とされている¹⁴⁾ことから $\gamma_1=0.7$ 、 $\gamma_2=0.6$ とした。固定資産税率と都市計画税率は、各市町の値を用いる。地価の増減を判別する判別式は、1990年から2000年の間に地価が増加、減少したメッシュに対して判別分析を行った結果（判別率76.5%）を用いた。判別式で用いた変数は、前年の移動世帯数、駅までの距離、県庁までの距離、森林比率、市街化区域面積比率であり、判別式には乱数項も用いている。次に、地価の変化量は、対象地域の中心部と郊外部で異なることが考えられるため、都市圏中心部（徳島駅から半径3[km]）、市部中心部（鳴門駅、南小松島駅から半径2[km]）、それ以外の3地域に分類し、各地域の、1世帯当たりの変化量の平均値を用いた。

式(14)の係数 $\eta_1 \sim \eta_3$ は、現況土地利用が新規開発に及ぼす影響から判断して $\eta_1=1.0$ 、 $\eta_2=0.2$ 、 $\eta_3=0.4$ とした。土地利用比率の計算で用いる市街地1[ha]当たりの平均世帯数は、人口集中地区（DID）と、その他の地区に分けて過去のデータから算出した。

最後に、自然減の判定で用いる年齢階級別死亡率は、人口動態統計（2000年）を用いた。

2.8 再現性の検討

次に本モデルを用いて、居住志向パターン別に、式(7)の $\phi_1 \sim \phi_7$ を4種類設定（表5）し、1990年から2000年までの世帯分布の再現を行い、最適な組み合わせを求めた。シミュレーション結果については、誤差世帯総数、世帯数の平均誤差率、世帯数の相関係数、半径次元の誤差率を計算し、再現性の指標とした。これらを表6に示す。

誤差世帯総数とは、1990年から2000年までに変化した実際の世帯数（観測値）とモデルで予測した世帯数（予測値）との差（誤差世帯数）をメッシュ毎に求め、それらの値を総和したもの、世帯数の平均誤差率とは、各メッシュの誤差世帯数の割合の平均値、世帯数の相関係数は、観測値と予測値の相関係数である。半径次元 D とは、フラクタル次元の一種で、分布の形態的な特徴をみるために用いた指標である。渡辺ら¹⁵⁾は、この指標を用いて市街地分布形態の類似度を比較しているが、ここでは、世帯の空間分布の類似度を比較する。計算方法は、世帯数の重心を求め、そこから半径 r を1[km]ずつ増やした円を描き、その円内に含まれる世帯数 N を数えて式(15)より算出する。

$$N = r^D \tag{15}$$

表4 居住志向パターンのパラメータ

居住志向パターン	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
中心市街地型	1	1	変化	変化	0.5	変化	1	1
郊外部型	0.5	0.5	変化	変化	1	変化	1	1
コミュニティ重視型	0.6	0.6	変化	変化	1	変化	1	1
経済性重視型	0.5	0.5	変化	変化	0.5	変化	1	1
無関心型	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数
居住志向パターン	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}
中心市街地型	1	変化	0.5	0.5	0.5	1	0.2	0.5
郊外部型	1	変化	1	0.5	1	1	1	1
コミュニティ重視型	1	変化	0.5	0.5	1	1	1	1
経済性重視型	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0.5
無関心型	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数	乱数

変化：年齢や年収に応じて変化する／乱数：全くランダムに数値を与える

表5 居住志向パターン別の ϕ

No	居住志向パターン	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7
1	中心市街地型	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	郊外部型	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	コミュニティ重視型	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	経済性重視型	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	無関心型	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム
2	中心市街地型	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3	0.3
	郊外部型	0.5	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	0.5
	コミュニティ重視型	1.0	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
	経済性重視型	0.3	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0
	無関心型	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム
3	中心市街地型	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1
	郊外部型	0.5	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	0.8
	コミュニティ重視型	1.0	0.3	0.3	0.3	0.8	0.8	0.5
	経済性重視型	0.5	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0
	無関心型	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム
4	中心市街地型	0.8	1.0	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3
	郊外部型	1.0	0.5	0.3	0.3	0.8	1.0	0.3
	コミュニティ重視型	0.7	0.5	0.3	0.3	0.7	0.7	0.3
	経済性重視型	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5
	無関心型	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム	ランダム

表6 再現性の検討

No	世帯数			半径次元		
	誤差総数	平均誤差率	相関係数	誤差率[%]		
				0-5[km]	5-14[km]	14-20[km]
1	44,431	0.36	0.97	-1.0	3.0	40.4
2	40,108	0.35	0.97	2.6	-1.2	26.7
3	41,414	0.33	0.97	4.2	-0.3	29.6
4	46,704	0.34	0.96	-1.2	2.8	38.0

D は、都市圏中心部、郊外部、郊外部周辺地域で異なる傾向を示していたことから、重心からの距離を5[km]以下、5～14[km]、14[km]以上の3つに分けて算出し、観測値と予測値の誤差率を求めた。

表6より、各指標とも大きな違いはみられなかったものの、No2とNo3の組み合わせが他よりも精度が高くなった。本モデルでは世帯数を予測することから、平均誤差率が最も小さかったNo3の組み合わせを採用した。

3. LUPSの開発

3.1 システムの概要

前章で開発したHDPMとGISソフトを用いてLUPSを開発する。利用するGISソフトは、SIS6.2（インフォマティクス）である。SISでは、用いるデータ管理やシミュレーション結果の表示等を行う。HDPMは、Artisoc1.0（構造計画研究所）を用いて開発し、操作パネルなどを付加させるためにVisual Basic2005を介してSISに組み込む。

3.2 システムの機能

ここでは、システムの機能について説明する。以下に挙げた機能は、筆者らが土地利用計画に関わっている実務者に対して行ったアンケート調査結果¹⁶⁾を基に選択したものである。

(1) 世帯の空間分布予測機能

これは、HDPMを用いて、ユーザーが想定した計画案に含まれる土地利用規制や税率等が実施された場合に变化する世帯の空間分布を予測することで、計画案の評価情報を提供する機能である。

(2) 情報表示機能

システム内で管理している情報をユーザーが自由に検索、閲覧できる機能である。計画案の作成や検討時に、整備したデータを参考情報として表示させることで、作業の効率化を目指すものである。

(3) 情報更新機能

これは、HDPMや現況把握で用いるデータを、システム上で更新する機能である。メッシュ形式やベクタ形式のデータも、直接LUPS上で更新することで、それと同時に距離や面積計測を行い、HDPMで利用できる形式に変換する。

(4) 地図出力機能

これは、HDPMの予測結果など必要なデータを地図形式で出力する機能である。

(5) フレーム値推計機能

これは、土地利用計画図の作成や用途地域の指定の際に行う、フレーム値や各種土地利用地域の面積推計を行う機能である。LUPSでは、アンケート調査結果¹⁶⁾で示されていた実務で多く利用されている手法¹⁷⁾を用いて、次式により工業用地面積 $Area_{ind}$ [ha]、商業用地面積 $Area_{comm}$ [ha]、住宅用地面積 $Area_{resi}$ [ha]を算出する。

$$Area_{ind} = Sv \cdot Area_{busi} \cdot Rate_{comland} / Add_value \quad (16)$$

$$Area_{comm} = P_{est} \cdot pc_Area_{comm} \quad (17)$$

$$Area_{resi} = P_{resi} / Popden_{resi} \quad (18)$$

ここで、 Sv は工業出荷額[円]、 $Area_{busi}$ は事業所敷地面積[ha]、 $Rate_{comland}$ は公共用地比、 Add_value は付加価値額[円]、 P_{est} は推計人口、 pc_Area_{comm} は人口一人あたりの商業用地面積[ha]、 P_{resi} は住宅用地内人口、 $Popden_{resi}$ は住宅用地人口密度[人/ha]である。

ユーザーはこれらの数値を独自に設定することが可能であるが、起動時はデフォルト値が入っている。各デフォルト値は次のとおりである。 Sv 、 $Area_{busi}$ 、 Add_value は過去15年間の工業統計調査結果を用いた予測値、 $Rate_{comland}$ は参考資料¹⁸⁾より0.3、 P_{est} は過去5時点の国勢調査結果を用いた予測値、 pc_Area_{comm} は参考資料¹⁸⁾より10[m²]、 $Popden_{resi}$ は参考資料¹⁹⁾より80[人/ha]とした。 P_{resi} は次式で計算する。

$$P_{resi} = P_{est} - Area_{ind} \cdot Popden_{ind} - Area_{comm} \cdot Popden_{comm} \quad (19)$$

ここで、 $Popden_{ind}$ は工業用地人口密度、 $Popden_{comm}$ は商業用地人口密度である。これらの値は、参考資料¹⁷⁾より、それぞれ30[人/ha]、100[人/ha]をデフォルト値とした。

システムの画面を図2に示す。

図2 システムの画面構成

4. LUPSの適用

4.1 想定したシナリオ

本章では、LUPSを研究対象地域に適用し、その妥当性を検証する。ここでは、区域区分の変更に伴う世帯分布の変化をみるために、区域区分以外の指標はデフォルト値を用い、以下の3つのシナリオの基で、2000年を初期値とする2010年の世帯数予測を行った。

シナリオ1：現在の区域区分を変更しない

シナリオ2：徳島市の市街化区域のみ残し、他を全て市街化調整区域にする

シナリオ3：研究対象地域全域で区域区分を廃止する

図3に対象地域の区域区分を、図4に2000年の世帯分布、図5に2010年の予測結果（2000年から変化した世帯数）を示す。図3より、研究対象地域には、藍住町のみの藍住都市計画区域と、それ以外の徳島東部都市計画区域が存在する。前者は区域区分が指定されていない、いわゆる未線引き区域であり、後者は市街化区域と市街化調整区域（調整区域）が指定されている都市計画区域である。なお、鳴門市には北部に一部都市計画区域外も含まれている。藍住町は、都市計画区域指定当初より未線引きであり、かつ農地を中心とする平坦な地形であることから、沿道開発が盛んで、近年は大規模商業施設の進出も相次いでいる。また、徳島市や鳴門市のベッタタウンとして住宅地開発も進んでおり、表1に示すように人口も増加傾向にあ

る。一方、徳島、鳴門、小松島といった市部では、中心部を始め人口減少が著しい。

このような中、シナリオ1では、現状の土地利用規制が変更されなかった場合、将来、どのような世帯分布となるのかを予測する。シナリオ2は、都市圏の中心都市である徳島市のみ現状の市街化区域を残し、他は全て調整区域とすることで、これまで主に藍住町に向かっていった開発圧力が市街化区域に向かい、結果としてコンパクトな市街地形成（コンパクトシティ）を実現できるのではないかと考えたシナリオである。シナリオ3については、徳島東部都市計画区域の整備、開発及び保全の方針（平成16年）²⁰⁾では、区域区分廃止に否定的な方針が述べられていることから、現実的には実施される可能性は低いものの、区域区分の効果を評価するために重要な条件と考え、想定シナリオに含めることにした。

4.2 予測結果

図5より、シナリオ1の結果を見ると、未線引き区域である藍住町のほぼ全域で世帯数が増加する一方、徳島市中心部では減少が予測された。このことより、現状では、規制の緩い藍住町で市街化が進行し、徳島市の中心市街地では世帯減少が続くことがわかった。

シナリオ2の結果を見ると、徳島市以外を全て調整区域にするという強い開発規制を加えたため、藍住町を除く全ての市町の中心部で

世帯増加がみられた。しかし、シナリオ1と比較すると、その増加量は少なくなっており、徳島市の中心部での増加量が多くなっている。これは、徳島市以外の地域では、開発規制による土地の魅力度が減少し、そうした地域に在住する世帯の中でも、特に中心市街地志向型の世帯が徳島市中心部へと集まってきたと考えられる。この結果より、シナリオ2は中心市街地活性化につながる可能性があると考えられる。

シナリオ3の結果を見ると、全域で区域区分を廃止したことにより、藍住町での世帯増加が抑制され、都市部の中心や国道沿いで世帯増加がみられた。これは、土地利用規制による影響がなくなったことで、利便性の高い場所への世帯移動が多くなったためと考えられる。また、この結果から現在の藍住町での世帯増加は、土地利用規制による影響が強い、つまり、藍住町のみが規制の緩い未線引き区域であるために起こっていると考えられる。

以上、LUPSを用いて、区域区分に関する3つのシナリオが実施された場合の世帯数変化予測を行った。その結果、区域区分の指定が世帯分布に及ぼす影響を把握することができた。

5. 結論

本研究では、MASを用いて世帯の移動行動をモデル化し、3次メッシュ単位で分布を予測するHDPMを開発した。このモデルをGISソフトに組み込み、土地利用計画に関する機能を付加させた、LUPSを開発した。これを用いて、区域区分指定に関する3つのシナリオを想定し、その効果を世帯分布で予測した。その結果、現状の区域区分指定のままでは、今後も藍住町を中心とする郊外化と徳島市中心部の空洞化が続くこと、徳島市にのみ市街化区域を残し、他を全て調整区域に指定した場合は、郊外化が抑制され中心市街地活性化につながる可能性があること、そして、全域で区域区分を廃止した場合は、藍住町での世帯増加が抑制され、都市部の中心や国道沿いで世帯増加が起こる可能性があることがわかった。

今後の課題を以下に示す。

(1)HDPMでは、MASを用いて世帯の移動行動をモデル化したが、ランダムに選んだメッシュの魅力度と現状の魅力度とを比較し、それのみにより移動を決定している。現実の居住地選択行動では、世帯は複数の居住地候補を比較検討しながら移動先を決定することが考えられるが、この部分がモデル化できていない。今後は、

図3 区域区分指定状況

図4 世帯数（2000年）

図5 予測結果（2000～2010年までの変化世帯数）

複数の候補地を同時に比較するプロセスもモデルに組み込む必要がある。

- (2)土地の魅力度には多くの変数が含まれることから、パラメータ設定が困難である。実務への応用を考えると、今後は変数を取捨選択し、できるだけ少ない変数で予測が可能なモデルに改良する必要がある。
- (3)世帯属性に世帯人員が含まれていないため、世帯分離や世帯消滅などを正確にモデル化できなかった。今後は、世帯人員の変化をモデルに組み込む必要がある。
- (4)LUPSでは、区域区分や用途地域指定・変更による世帯分布を予測することが可能である。しかし、現実の土地利用計画では、世帯分布以外にも人口や交通量など他の指標で、土地利用計画の評価を行いたい場合も考えられることから、これらの予測モデルとの統合も課題である。

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) 奥 俊信：土地利用間の親和度に基づく土地分凝形態の特徴－マルチエージェントの満足度戦略による土地移転モデル－、日本建築学会環境系論文集、No.588、pp.71-77、2005.2
- 2) 奥 俊信：用途地域制度に基づいた土地利用用途間の親和度設定による土地利用形態－マルチエージェントの満足度戦略による土地移転モデル その2－、日本建築学会環境系論文集、No.605、pp.147-154、2006.7
- 3) 奥 俊信：主に空地を介した土地利用移転によって形成される土地利用パターンの特徴－マルチエージェントの満足度戦略による土地移転モデル その3－、日本建築学会環境系論文集、No.617、pp.87-94、2007.7
- 4) Masanobu Kii, Kenji Doi: Multi agent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.32, pp.485-504, 2005
- 5) 池谷直樹、谷本 潤、萩島 理、相良博喜：マルチエージェント・シミュレーションに基づく都心部における人口分布の過渡的動態モデルに関する研究、日本建築学会技術報告集、Vol.13、No.26、pp.845-848、2007.12
- 6) 安藤陽介、横田敬司、吉川徹：都市衰退過程での空き家の発生と集積および空地の商業への影響に着目したマルチエージェントシステムによる都市シミュレーション、都市計画論文集、No.40-1、pp.51-59、2005.4
- 7) 呉 愚如、萩島 哲、大貝 彰、嶋 心治：メッシュデータによる新用途地域指定における支援エキスパートシステムの開発に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.512、pp.191-198、1998.10
- 8) 大貝 彰、渡辺公次郎、五十嵐 誠：パーソナルコンピュータ上で稼働するGISを用いた土地利用計画立案支援ツールの試験的開発、日本都市計画学会学術研究論文集、No.34、pp.751-756、1999.11
- 9) 長崎浩紀、渡辺公次郎、大貝 彰、ディジタルピティア ブラサンナ、近藤光男：開発途上国における土地利用計画支援ツールの開発、GIS－理論と応用、Vol.14、No.2、pp.157-168、2006.12
- 10) 金 俊栄、萩島 哲、大貝 彰、岩尾 襄、黒瀬重幸：土地利用遷移行列による都市の土地利用用途転換の分析、日本建築学会計画系論文報告集、No.424、pp.69-78、1991.6
- 11) 葛 堅、外尾一則：居住性志向を考慮した居住ライフスタイルに関する研究、土木計画学研究・講演集、Vol.29、pp.136-143、2004.6
- 12) 尼崎市：平成18年度人口等都市政策調査研究事業報告書、2006.3
- 13) 大阪市：第5回大阪市人口移動要因調査、2005.9
- 14) 東京都主税局：「固定資産税・都市計画税」、(オンライン)、入手先<http://www.tax.metro.tokyo.jp/shisan/kotei_tosi.html>、参照2007.12
- 15) 渡辺公次郎、大貝 彰、五十嵐 誠：セルラーオートマタを用いた市街地形態変化のモデル開発、日本建築学会計画系論文集、No.533、pp.105-112、2000.7
- 16) 長崎浩紀、渡辺公次郎、近藤光男：GISを用いた土地利用計画支援ツールに関するアンケート調査、日本建築学会技術報告集、Vol.26、pp.795-800、2007.12
- 17) 福島県：都市計画決定の手引、2002
- 18) 加藤 晃、河上省吾：都市計画概論[第2版]、共立出版株式会社、1990.10
- 19) 国土交通省：都市計画運用指針、2006.11
- 20) 徳島県：徳島東部都市計画区域の整備、開発及び保全の方針、2004.3

(2008年5月8日原稿受理、2008年11月5日採用決定)