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—

THE FORMATION OF THE LAND USE ACCORDING TO THE FAMILIARITY
BASED ON THE LAND USE RULE

—The modeling land replace by satisfaction strategies of multi agent Part 2—

奥 俊 信*

Toshinobu OKU

The familiarity of the agent cell is set up about five kinds of land use, and the agent cells take three kinds of strategy: egoism, altruism and reciprocity. It is supposed that the agent cells act corresponding to the familiarity and the strategies. The formation of agent cells are simulated by the cellular automata method. A self organization emerged on the egoism strategy and the altruism strategy, but did not on the reciprocity strategy clearly at the author's previous study. The aim of this study clarifies the characteristics of formation of agent cells by the reciprocity strategy in detail. The familiarities were set according the actual land use rule at this study. The result shows that the reciprocity strategy makes the agent cells the self-organization and the simulation used the familiarities reproduce an actual land use form.

Keywords : Cellular automata, Multi agent, Land use strategy, Familiarity, Land use

セル・オートマトン, マルチエージェント, 土地利用戦略, 親和度, 土地利用

1. はじめに

都市の土地利用用途(以後,土地利用または用途と略す)の転換または配置の数値的研究には2種類ある.1つは土地利用の時間的変化の法則を抽出し,将来の土地利用変化^{(1)~(10)}や都市の成長^{(11)~(16)}を推定することを目的とした土地利用転換問題または土地利用遷移問題である.この研究の場合,土地利用転換法則のモデル構築が主題となる.一般に用途種類毎(集計的)または敷地単位(非集計的)で用途転換が計算され用途毎の面積は増減する.例えば市街化が進むとすれば農地や緑地が減り宅地が増える.

もう1つの研究は土地利用の配置問題である.この場合,土地利用毎の面積を所与とし,面積を変えずに最適もしくは一定の条件を満たす配置形態を求めるのが目的となる.従って適合度を判定する評価関数の設定とその評価値を最大もしくは最小にする計算手法が研究の主題となる.本研究はこの土地利用配置問題を扱う.これには次の既往研究がある.

奥平⁽¹⁷⁾は都市内に事業所や住宅が立地しようとするとき,周りに何があるかを最も重視していると仮定し(具体的には同業種間のみに関連があり,他業種とは連携がないとし),業種間が近くにあることの望ましさと相互の距離を変数とした目的関数を設定し,業種の分布パターンを計算機シミュレーションによって求めている.瀧澤ら⁽¹⁸⁾は具体的な都市の土地利用配置について,遺伝的アルゴリズム(GA)を適用して配置を再現し,土地利用配置にGAが有効であることを示している.奥⁽¹⁹⁾は宅地(住居地,商業地,工業地の総体)

の凝集化再配置をセル・オートマトンを用いてシミュレーションし,宅地間距離と宅地の混み具合との関係から適切な宅地の凝集形態について検討している.青木⁽²⁰⁾は都市の状態ベクトルの遷移確率を用いて,土地利用形態がランダムな状態から想定された形態へと推移可能なことを数理的に示すとともにシミュレーションによって明らかにしている.

これらの研究はいずれも土地利用配置の形態形成において,互いに近くに位置する土地利用状況を重要な要因にしている.本研究ではそれを最も明示的な計算手続きとしているセル・オートマトンを適用する.もとより現実の土地利用転換は都市的立地,経済性,社会変化,法規制,周辺環境など多くの要因によるので,近傍の土地利用状況のみを対象とするセル・オートマトンのモデルは実際の現象を充分には再現しえない限界が推測できる.しかし近傍要因は重要であり,このモデルの特性把握は数理的な都市形態研究において有意義と考える.

また,土地利用配置の従来的一般的方法はある程度規模以上の土地領域をひとまとまりとして土地利用全体の機能的構造化を図るものである.それに対しセル・オートマトンによる方法は敷地・街区など小さな構成単位の相互作用から全体構造の創発を期待する複雑系理論によるものであり,その特質の検討は土地利用配置方法論の広がり寄与と考える.

筆者は前報⁽²¹⁾でセル・オートマトンを適用した土地利用配置の理論モデルを提案しシミュレーションによってその特徴を検討した.

本研究は参考文献(25)(26)を大幅に修正加筆したものである。

* 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・工博

Prof., Div. of Global Architecture Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.

すなわち、1セルをエージェント・セルとし、5種類の土地利用と土地利用間の親和度に基づいた満足度関数を設定し、各エージェント・セルは満足度が向上するよう位置交換する行動をとるとする。そしてその行動戦略として利己主義、利他主義そして互惠主義の3戦略を想定し、それらの戦略によるエージェント・セル全体の分布形態を求めその特徴を検討した。その結果、次の成果を得たとともに課題も残した。成果として、①利己主義と利他主義をとる場合エージェント・セル間の親和度に応じた自己組織化がみられ、②エージェント・セルの構成比率が大きいほど、そして計算対象の近傍範囲が大きいほどまとまりの大きいクラスターを形成する、をえた。しかし、課題も残された。次に残された課題とそれに対する本研究で検討する事項を挙げる。①前報ではエージェント・セルの種類を数理的な組み合わせによって形式的に設定したため実際の用途との対応が希薄で抽象的であった、本研究では住居地、商業地、工業地、緑地そして空地という具体的な土地利用用途を想定する、②親和度の設定についても形式的だったので現実との対応が希薄であった。本研究では現行の用途地域制度に基づいた数値を想定する、③エージェント・セルの行動ルールとした戦略のうち、利己主義と利他主義については自己組織化がみられたが互惠主義では自己組織化せずランダムな分布となった、この互惠主義の特徴が一般的であるのかどうかを初期分布などの条件を変化させて再検討する、④さらに利己主義と利他主義についても互惠主義と同様のパラメータでシミュレーションし自己組織化の再検証をする。

なお本研究では一般的なセル・オートマトン法^{(注1), (22), (23)}を修正し、あるセルの状態(土地利用の用途)の変化はその近傍内にある別のセルとの交換によることとした。これにより各用途の土地利用面積を常に一定に保つことができる。なお、本研究ではセルのことを前報との連続性を考慮してエージェント・セルと呼ぶ。

2. シミュレーションの方法

エージェント・セルはある戦略に基づき近傍の他のエージェント・セルと位置を交換する。この処理が繰り返され終了条件を満足した時点でシミュレーションを終える。次にシミュレーションの条件と方法を述べる^(注2)。

(1) シミュレーション対象の形態とサイズ

シミュレーションの対象の全形を正方形とし、その1辺を50等分して正方形格子に分割し、各格子をエージェント・セルとする。従ってエージェント・セル総数は $50 \times 50 = 2500$ 個である。なお1つのエージェント・セルは1種類のための土地利用を持つとする。

(2) エージェント・セルの種類

土地利用を住居地、商業地、工業地、緑地、空地の5種類とする。

(3) エージェント・セルの位置交換戦略

あるエージェント・セルが別の種類のエージェント・セルと位置を交換する方法に次の3つの戦略を設定する。なお、これらの戦略はエージェント・セルの満足度を向上させる理念モデルであって、実際の土地転換現象の直接的なモデル化ではない。

①利己主義戦略: 現在の位置より別の位置に移動した方が満足度(後述する)が向上する場合、その別のエージェント・セルと位置を直接交換する。

②利他主義戦略: 現在の位置に別の位置にある他のエージェント・

セルが移転してきた方が他のエージェント・セルの満足度が向上する場合、位置を直接交換してあげる。

③互惠主義戦略: 自他共に満足度が向上する場合のみ、位置を直接交換し合う。

(4) エージェント・セル間の親和度

親和度とはあるエージェント・セルが別のエージェント・セルに対して近接が望ましいか分離が望ましいかの程度を示すパラメータであり、数値範囲として $[-1.0, +1.0]$ とした。正は近接が望ましく $+1.0$ に近いほどそれが強く、0値は中位であり、負は分離が望ましく -1.0 に近いほどそれが強いことを意味する。親和度の設定について、まず住居地、商業地、工業地については現在の用途地域制度^(注3)を参考とし、用途純化を基本としつつ利便性を考慮した。緑地については小公園を想定し、また空地はどこにでも存在するものとした。具体的には下記のように近接・分離の程度を定性的判断をもとに直感的に数値化した。

①住居地、商業地、工業地については用途純化を基本としたので同じ用途間の親和度は $+1.0$ とし他の用途とは -1.0 とした。しかし、住居地と商業地間は利便性を考慮し互いに $+0.5$ とした。

②緑地については小公園としたので住居地、商業地、工業地のいずれにも立地するとし、特に住居地での必要性を重視した。従って住居地との親和度を互いに $+1.0$ とし、商業地、工業地との親和度を互いに $+0.5$ とした。なお緑地集積による大緑地形成は考えず緑地同士を0とした。

③空地はいずれの用途にもある程度存在する(つまり正の親和度がある)が、他の用途からはある程度忌避される(つまり負の親和度がある)として、空地の他用途への親和度を $+0.2$ とし、他用途の空地への親和度を -0.2 とした。なお空地同士は0とした。

以上の親和度を表1に示す。なお、表の数値は行の用途が列の用途に対する親和度である。例えば、2行5列の -0.2 は商業地が空地に対する親和度である。

表1 エージェント・セル間の親和度

	住居地	商業地	工業地	緑地	空地
住居地	+1.0	+0.5	-1.0	+1.0	-0.2
商業地	+0.5	+1.0	-1.0	+0.5	-0.2
工業地	-1.0	-1.0	+1.0	+0.5	-0.2
緑地	+1.0	+0.5	+0.5	0.0	-0.2
空地	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	0.0

註: 行の用途の列の用途に対する親和度

(5) エージェント・セルの満足度

エージェント・セル i のエージェント・セル j に対する満足度 S_{ij} を次式で定義する。

$$S_{ij} = f_{ij}/r_{ij}^2 \quad (i \neq j) \quad (1)$$

f_{ij} : エージェント・セル i がセル j に対する親和度

r_{ij} : エージェント・セル i とセル j の中心間直線距離

ただし1セルの辺長を1単位距離とする。

エージェント・セル i のその近傍全体に対する満足度 S_i を次式で定義する。ただしシミュレーション対象領域から外に出た部分は計算対象外つまり0値とする。

$$S_i = \sum_j S_{ij} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

j : エージェント・セル i の近傍内のセル

(6) エージェント・セルの近傍範囲

エージェント・セルが他のエージェント・セルと位置交換できる範囲ならびに満足度の計算対象の範囲を近傍範囲とする。近傍の大きさについてはエージェント・セルの周囲を1セル幅で囲まれた範囲を第1近傍範囲と呼ぶこととし、同様に2セル幅で囲まれた範囲を第2近傍範囲と呼ぶこととする。このようにn個のセル幅で囲まれた範囲を第n近傍範囲と呼ぶ。本研究では、第1近傍、第3近傍、第5近傍、第10近傍、第20近傍の5種類についてシミュレーションを行った。

(7) エージェント・セルの構成率

住居地、商業地、工業地、緑地、空地の総エージェント・セル数に対する比率について次の2系列を設定した。

①土地利用等比率:シミュレーションのモデルとしての特徴をみるため、各土地利用について同率20%とした。

②東京都土地利用:実際の土地利用率での分布形態をみるため、2001年の東京都の土地利用率^(注4)を用いた。ただし5種類の土地利用率の総計を100%になるように換算し、住居地55%、商業地16%、工業地11%、緑地11%、空地7%とした。

(8) 初期分布:①一様ランダム分布、②帯状分布、③短冊状分布^(注5)の3種類とした(図1)。

(9) 計算対象エージェント・セルの選択方法:領域内のすべてのエージェント・セルをランダムな順番に選択していった。

(10) 探索回数:あるエージェント・セルについて、その近傍範囲に交換条件を満足するエージェント・セルが1つしか存在しないとした場合、それを探索できない危険率を0.05とする回数までランダムに探索する^(注6)。

(11) 計算終了条件:すべてのエージェント・セルについて一通り計算することを1反復とし1000反復行った。なお交換資格のあるエージェント・セルが選択されれば交換した後、次のエージェント・セルについて計算するという非同期計算とした。またエージェント・セルの交換が全く行われない反復が10回連続すれば収束したと見なし計算を打ち切り、それ以降は同じ状態が続くとした^(注7)。

3. シミュレーションの結果と考察

エージェント・セル分布のシミュレーション結果を図1に示す。また全エージェント・セルのうち交換を行ったセルの割合ならびに相対満足度の平均値のグラフを図2～図19に示す。なおグラフは表現を明快にするため10反復きざみの値を表示している。

3-1. 利己主義戦略について

(1) エージェント・セルの分布形態について(図1)

①土地利用等比率、東京都土地利用とも、また一様ランダム初期分布、帯状初期分布、短冊状初期分布に対しても、住居地、商業地、工業地は同じ用途間の親和度が高く(+1.0)他とは低い(-1.0)同じ用途でまとまる。特に工業地は他との分離が良い。住居地と商業地は分離が主であるが混在化もみられる。これは両者の親和度を正(+0.5)に設定したからである。

②初期分布の違いによる分布パターンへの影響は近傍範囲3までは見られるが近傍範囲5以上では類似パターンとなり影響が少ない。

③住居地と商業地について、近傍範囲1では商業地の小さいまとま

りが分散しているが(但し東京都土地利用の帯状初期分布と短冊状初期分布を除く)、近傍範囲3で主なまとまりが形成されはじめ、近傍範囲5では1つのまとまりができる。しかし、近傍範囲10では住居地と商業地の混在化が進行し、近傍範囲20の土地利用等比率では両者はほとんど混在化し、東京都土地利用では住居地の周縁部に商業地が散在する。

この原因は次の通りである。住居地と商業地のまとまりにおいて周縁部では他の用途のエージェント・セルが存在するので相対満足度は小さい。それに対し、まとまりの内部では同種のエージェント・セルが多いので相対満足度は大きい。そのため、まとまりの周縁部からまとまりの内部に移転する。このようにして同種のまとまりを形成する。しかし近傍範囲が大きくなると、まとまりの周縁部にある住居地と商業地のエージェント・セルは近傍範囲に親和度の低い工業地(-1.0)、空地(-0.2)そして領域外(0)を多く含むことになり、互いに相手のまとまりの中に割って入った方が相対満足度が向上するため混在するようになる。

④工業地は、同じ用途間の親和度が+1.0、他の用途とは緑地を除いて負、領域外とは0なので、領域の周縁部特に角の部分での相対満足度が高くなり、そこにまとまる。

⑤緑地は住居地との親和度が+1.0、商業地と工業地とは+0.5であるので、緑地の多くは住居地に存在する。しかし住居地は商業地との親和度が+0.5、工業地とは-1.0と低いので、これらを避けてまとまろうとする。その結果、緑地は住居地の周辺に押しやられる。

⑥空地は住居地、商業地、工業地への親和度が正であるが(+0.2)、逆にこれらの用途からは負であり(-0.2)排除の作用が働く。また住居地、商業地、工業地のまとまり力が強いので、空地はそれらの周縁部に押しやられる。

(2) エージェント・セルの交換率及び相対満足度の平均値について
①平均相対満足度の変化をみると(図2～図7)、いずれもほぼ単調に増加し反復計算100回から300回程度まででほぼ一定値にいたりその後は微少な振動的変化である。このことからほぼ一定値にいたった時点で土地利用分布の基本的なパターンが形成されたと推測できる。図20は近傍範囲10で反復計算300回目の分布であるが最終の1000回目(図1)と基本パターンが類似しているのが分かる。

②近傍範囲が大きくなると親和度の低い他の用途や領域外(親和度0)を含む割合も高くなるので、相対満足度は低い値となり平均値も低くなる。

③初期分布による違いについては、帯状分布つまりゾーニング配置で反復計算の早い段階で相対満足度の平均値がほぼ一定値になる。このことは本研究で設定した親和度が、土地利用の用途純化を基本とする現行の用途地域制度を反映した値であることを示している。

④エージェント・セルの交換率の変動は平均相対満足度の変動と対応している。すなわち平均相対満足度がほぼ一定値になるとエージェント・セルの交換率もほぼ一定値になる。しかし土地利用等比率・帯状初期分布・近傍範囲1では交換率が緩やかに増大し、ほぼ一定値になるまで他に比べ反復計算回数が多い(約400回)。これは初期の帯状分布が崩れる過程に対応していると思われる。

⑤エージェント・セルの交換率は近傍範囲が大きくなるほど高い。これは近傍範囲が大きいほど交換可能なエージェント・セルが多いことによる。

図1 エージェント・セル分布のシミュレーション結果

図 14 互惠主義戦略・土地利用等比率・ランダム

図 15 互惠主義戦略・土地利用等比率・帯状

図 16 互惠主義戦略・土地利用等比率・短冊状

図 17 互惠主義戦略・東京都土地利用等比率・ランダム

図 18 互惠主義戦略・東京都土地利用等比率・帯状

図 19 互惠主義戦略・東京都土地利用等比率・短冊状

土地利用比率	初期分布	利己主義戦略	利他主義戦略
土地利用等比率	ランダム		
住居: 20%	帯状		
商業: 20%	短冊状		
工業: 20%			
緑地: 20%			
空地: 20%			
東京都土地利用等比率	ランダム		
住居: 55%	帯状		
商業: 16%	短冊状		
工業: 11%			
緑地: 11%			
空地: 7%			

図 20 近傍範囲 10・反復計算 300 回目の分布状態

図 21 平均相対満足度の平均値
ランダム初期分布: 土地利用等比率 図 22 平均相対満足度の平均値
ランダム初期分布: 東京都土地利用等比率 図 23 平均相対満足度の平均値
帯状初期分布: 土地利用等比率 図 24 平均相対満足度の平均値
帯状初期分布: 東京都土地利用等比率 図 25 平均相対満足度の平均値
短冊状初期分布: 土地利用等比率 図 26 平均相対満足度の平均値
短冊状初期分布: 東京都土地利用等比率

3-2. 利他主義戦略について

(1) エージェント・セルの分布形態について (図1)

①利他主義戦略は立場を入れ替えれば利己主義戦略と同じなので、直観的には利己主義戦略の場合と同じ分布になると予想される。確かに住居地、商業地、工業地は同じ用途同士の親和度が高いのでそれぞれでまとまりはある。しかし利己主義戦略はほとんど明快でない。つまり住居地と商業地が混在化し、緑地は住居地内に分布し、空地はどの土地利用内にも分布している。これは立場を入れ替えれば同じ戦略であっても、エージェント・セルの交換機会が利己主義戦略と利他主義戦略とで異なるためである。つまり利己主義戦略の場合は、あるエージェント・セルが利己主義になれるのは1回だけあり、その後は近傍範囲のエージェント・セルから利己主義行為の対象にされる。それに対し利他主義戦略の場合は、利他主義になるのは1回だけあり、その後は近傍範囲のエージェント・セルから利他主義行為を受ける対象になる。従って利他主義の方が自己の満足度を向上する位置への移転機会が多くなる。そして構成率が小さいエージェント・セルほどその近傍に他の用途のエージェント・セルが多

く存在するのでその移転機会が多くなる。例えば東京都土地利用の場合、緑地の構成率7%に対し住居地は56%なので緑地の方の満足がより満たされて住居地内に緑地が散在し、住居地のまとまりは弱くなる。

②初期分布の違いによる影響は土地利用等比率では近傍範囲5まで見られ、東京都土地利用では近傍範囲3までみられる。しかし、その後は類似パターンとなり影響が少なくなる。

③近傍範囲5までは近傍が大きくなるに従って住居地、商業地、工業地のまとまりが良くなる。しかし近傍範囲10, 20では住居地と商業地のまとまりは崩れ混在化が進む。その理由は前述したように(3-1. (1)③), 近傍範囲が大きくなるとまとまりの周縁部にあるエージェント・セルの相対満足度が小さくなり、互いに相手のまとまりの中に割って入った方が相対満足度が向上するためである。

(2) エージェント・セルの交換率及び相対満足度の平均値について

①平均相対満足度の変化をみると(図8～図13), 多くは単調に増加し反復計算100回から300回程度まででほぼ一定値にいたりその後は微少な振動的変化をする。

②利己主義戦略の場合と同様に、相対満足度の平均値がほぼ一定になった時点で基本パターンが形成されたと推測できる。図20に示した近傍範囲10での反復計算300回目の分布をみると、ランダム初期分布以外は最終の1000回目(図1)と類似している。ランダム初期分布においても工業地が分離してまとまり、住居地と商業地が混在したまとまりとなるという基本パターンは同じである。

③エージェント・セルの交換率をみると(図8～図13)、土地利用等比率と東京都土地利用度で特徴が異なる。土地利用等比率では、近傍範囲1で交換率75%程度であるが、その他は90%以上である。反復計算のたびに全領域で位置交換があることが分かる。東京都土地利用度では、交換率は近傍範囲が大きくなるほど高い。これは近傍範囲が大きいくほど交換可能なエージェント・セルが増えるからである。

3-3. 互惠主義戦略について

(1) エージェント・セルの分布形態について(図1)

前述の利己主義戦略と利他主義戦略に比べて本戦略の大きな特徴は、土地利用等比率、東京都土地利用度とも、初期分布の影響が強いこと、分布形態が明快であること、近傍範囲が大きくなっても住居地と商業地の混在化が起こらないこと、そして少ない反復回数で収束することである。これは互惠主義戦略の場合、土地利用交換の条件が両エージェント・セルの満足度が共に向上することという強い制約があるためである。また前報では自己組織化が不明瞭であったが、本研究では明快な自己組織化が見られる。その原因は親和度があり、現行の用途地域制度に基づいた親和度を想定したためである。このことは、親和度が分布形態に大きく影響することを示している。収束については図14～図19に示すように反復計算の少ない時点でエージェント・セルの交換率が0になる。最も少ない場合は1回、最も多くて28回で収束した。次に初期分布毎に検討する。

①ランダム初期分布の場合

土地利用等比率、東京都土地利用度とも、住居地、商業地、工業地が他と分離した明快なまとまりを形成する。住居地と商業地との親和度は+0.5であるが混在はしない。その理由は、エージェント・セル間の位置交換は相対満足度が共に向上する場合に限られており、住居地と商業地の同じ用途間の親和度が+1.0で+0.5より高い値であるので、同じ用途でまとまった後の位置交換が無くなるからである。次に緑地は住居地内に分布し、空地は住居地、商業地、工業地に分布する。また近傍範囲が大きくなるに従って自己相似的な拡大をしている。これについてスケール面で2つの解釈ができる。1つは、近傍範囲1での全体領域を地区レベルのスケールとみなし、近傍範囲20の方を都市的スケールとみなせば、地区レベルでは用途混在化しており、都市レベルではゾーニングされた都市のモデルと解釈できる。もう1つはその逆に近傍範囲1の方を都市的スケールとみなし、近傍範囲20の方を地区レベルのスケールとみなせば、地区レベルではゾーニングされた住居地、商業地、工業地と、緑地と空地が散在している住居地域を形成しており、都市レベルではこれらの地区の集合体となっているというコンパクト・シティ²⁴⁾のモデル例と解釈できる。

②帯状初期分布の場合

近傍範囲1と3では初期分布形態からほとんど変化がない。近傍

範囲5以上になって工業地、緑地そして空地間に位置の入れ替えが起こる。このように初期分布形態の保持性が強いことは、設定した親和度が帯状分布つまり整形のゾーニングに適合していたことを示している。

③短冊状初期分布の場合

近傍範囲1では初期分布形態が強く残っている。近傍範囲3以上からは土地利用等比率と東京都土地利用度で形態が異なる。土地利用等比率では住居地、商業地、工業地が縦方向に対称的なまとまりを形成する。東京都土地利用度では、構成率の多い住居地が地を形成する。そして工業地は近傍範囲3と5では領域の中央を縦方向に細長い工業地帯を形成するが、近傍範囲10と20では分離してまとまる。商業地は工業地の両側に散在したまとまりを形成し、近傍範囲が大きくなるに従いまとまりは大きくなる。

(2) エージェント・セルの交換率及び相対満足度の平均値について

①図14～図19に示すように、反復計算の早い時期に収束するので、その時点以降相対満足度の平均値は一定となる。いずれの初期分布に対しても、東京都土地利用度の平均値の方が土地利用等比率の平均値より高い。これは東京都土地利用度の方が、相対満足度が高くなる住居地が多いためである。

②利己主義戦略と利他主義戦略に比べて、近傍範囲の違いによる相対満足度の平均値の差が小さい。これは近傍範囲が異なっても土地利用分布形態が自己相似的であるためと思われる。

3-4. 相対満足度の平均値による戦略の比較

利己主義戦略、利他主義戦略、互惠主義戦略のうち、どの戦略が最も平均相対満足度の平均値(この節では、満足度と略す)が高いかを比較する。図21～図26は平均相対満足度がほぼ一定になる反復計算回数501回目以降1000回目までの平均値のグラフである。なお同じ近傍範囲についてすべて危険率0.05で戦略間の平均値に有意差があった。戦略間の特徴は次の通りである。

(1) 戦略間の満足度の差は東京都土地利用度の方が土地利用等比率より小さい。これは東京都土地利用度での住居地が全体の55%を占め、その影響度が大きくて戦略間の違いを抑制したためと考えられる。

(2) 初期分布にかかわらず利他主義戦略と利己主義戦略の満足度の順位は、土地利用等比率の場合、利他主義戦略>利己主義戦略であり、逆に東京都土地利用度の場合、利己主義戦略>利他主義戦略である。図1の土地利用分布で分かるように、利己主義戦略は用途純化が強く、利他主義戦略は用途混在が強い。土地利用等比率の場合、用途純化によって満足度が高くなる用途(住居地、商業地、工業地)は全体の60%、用途混在によって満足度が高くなる用途(緑地、空地)は40%である。それに対し東京都土地利用度の場合、82%と18%である。本研究の場合、この比率の違いが満足度の順位を変えたといえる。ここで同じ用途に対し親和度が最大となるエージェント・セルと、異なる用途に対し最大となるエージェント・セルに分け、前者を用途純化志向エージェント・セルと呼び、後者を用途混在志向エージェント・セルと呼ぶとする。するとエージェント・セル全体の相対満足度の平均値 S_{av} は、用途純化志向エージェント・セルの相対満足度の平均値 S_{uni} と用途混在志向エージェント・セルの相対満足度の平均値 S_{mix} より次式で求められる。

$$Sav = Suni \times p + Smix \times q \quad (3)$$

ただし、 $p + q = 1$

p : 用途純化志向エージェント・セルの構成率

q : 用途混在志向エージェント・セルの構成率

ここで $Sun_i \times p$ は全体の相対満足度の平均値への用途純化志向エージェント・セルの寄与率であり、 $S_{mix} \times q$ は用途混在志向エージェント・セルの寄与率である。従って寄与率のより大きい志向エージェントについて満足度が向上する移転機会の多い戦略が良いといえる。

(3) 互恵主義戦略は近傍範囲の大きさによる満足度の差が少なく、ほぼ横ばいである。近傍範囲1と3では他の戦略より満足度が低い、近傍範囲5と10の間ではほぼ同等となり、近傍範囲20では他の戦略よりも高くなる。つまり、この戦略は近傍範囲の大きさの変化を受けにくいといえる。

4. まとめと今後の課題と展望

4-1. まとめ

住居地、商業地、工業地、緑地、空地の5用途のエージェント・セルについて、それら相互の親和度を現行の用途地域制度との対応を想定して数値化し、初期分布を一樣ランダム分布、帯状分布、短冊状分布の3種類とし、そして利己主義戦略、利他主義戦略、互恵主義戦略の3戦略について、セル・オートマトンを利用した土地利用分布のシミュレーションをした。その結果は次の通りであった。

(1) 前報において主課題として残した「互恵主義戦略は自己組織化するか」については、本研究での親和度設定で明快な自己組織化が見られた。

(2) 利己主義戦略と利他主義戦略の特徴についても前報で検討しなかった初期分布の違いの影響や近傍範囲の大きさの影響についてより明確に把握できた。つまり、

① 用途純化の方が用途混在より相対満足度の平均値を上げる寄与度が高い場合は利己主義戦略が良く、逆に用途混在の方が平均満足度を上げる寄与度が高い場合は利他主義戦略が良いといえる。互恵主義戦略は位置交換をする場合双方のエージェント・セルとも満足度が向上することという強い制約があるため初期分布の依存性が強くなり、近傍範囲の大きさによる相対満足度の平均値の差は小さい。

② 近傍範囲の大きさについて、近傍範囲10の場合(本研究では領域面積の約18%を覆う)、近傍範囲内のエージェント・セルが多くなるだけでなく、近傍範囲が領域の外にはみ出る場合が増え(本研究の場合、近傍範囲が領域の外にはみ出るエージェント・セルは全体の64%になる)、それが満足度に影響して土地利用分布形態に影響する。それについて、a) 近傍範囲の大きさを5以下(本研究の場合)として領域外の影響を少なくするか、b) 領域外の影響を外部的効果として利用する、という2つの観点が考えられる。

4-2. 今後の課題と展望

セル・オートマトン法によって、現行の土地利用制度に基づく土地利用のパターンが首肯しうる程度に再現的に形成されたことから、この方法が土地利用形成のモデルとして利用しうる可能性が得

られたと思われる。しかしモデルの改良なども必要である。下記に今後の課題と展望を述べる。

(1) 実際の土地利用転換の仕組みを反映したモデルへの改良

本研究での土地利用交換はエージェント・セル同士が直接交換する方法であるが、実際にはそのようなことはなく、空地を経由して行われる。このようにより現実と対応したモデル化が必要である。

(2) 境界領域の処理課題

本研究では領域外を計算対象外とした。つまり親和度0値と扱った。そのため、近傍範囲が大きくなると領域の周辺部でその影響が出た。境界条件の処理については一般的なシミュレーションでいくつか方法が提案されているが、具体的に土地利用の課題に適用するには、セルのスケールの設定が関係する。つまり1つのセルを敷地とするか街区とするか、それに対応して全体の領域を地区レベルとするか都市レベルとするかが問題となり、慎重な検討が必要となる。

(3) 親和度の設定と頑健性

本研究では現行の用途地域制度の定性的な把握に基づき仮想的に数値化した。数値の僅かな変化がどの程度影響するかを確認する必要がある。実際には精度の高い数値化は困難であるし有意味とも思われない。従ってモデルは親和度の僅かな変化に対し結果が大きく変わらない頑健性を持っている必要がある。

(4) 土地利用の相互関係に基づく都市の土地利用形態または土地利用計画・制度の新たな可能性

初期分布、近傍範囲、親和度の設定を種々試みるにより、様々な土地利用形態が生み出される可能性がある。それらを都市計画的に検討することにより、新たな土地利用計画、規制、誘導、緩和の方法が案出できる。また従来のように用途地域制度に基づく即地的な土地利用形成に対し、親和度に基づく土地利用の相互関係を制御することで土地利用を形成していく手法も考えられる。

(5) セル・オートマトン法の拡張

本研究では土地利用という1つの属性と1つのセルサイズを扱ったが、この他、容積、人口、交通、エネルギーなど複数の属性を取り扱うこと、そして属性に応じて異なるセルサイズを設定すること、などセル・オートマトン法を拡張することによって、より実際に有用なモデルの構築が可能と考えられる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 平成14年度科学研究費補助金 基盤研究(A)(1)「複雑系科学による人間・環境に適応する建築・都市・社会のシステムデザイン」(課題番号:14205087)の援助の下に行われた。ここに感謝申しあげる。

注

注1) 一般的なセル・オートマトン法²²⁾ 23)

① 同じ大きさの正方形(セル)に区切られた碁盤のような面を想定する。

② 各セルは幾つかの種類の状態をとることができる。

③ 次の時点のセルの状態は、現在の状態と近傍のセルの状態だけの局所的な規則で決まる。

注2) プログラムはC言語を使用し、計算結果の図表示はOpenGLを用いた。

注3) 都市計画法第8条、建築基準法第48条

注4) 東京都統計年鑑平成13年

注5) 短冊状分布とは、領域の正方向格子の1行1列目のセルより始めて1行目に土地利用構成率分のエージェント・セルを配置していき1行目が埋まれば続いて2行1列目のセルに移り2行目上に配置していく、という様に順次行を埋めていく方法である。具体的には、住居地20%、商業地20%、工業地20%、緑地20%、空地20%の場合、まず最初の20セルに住居地を配置し、続く20セルに商業地を配置するというようにして空地まで100セルを配置する。次に101セルからは逆順にまず20セルに空地を配置し、続く20セルに緑地を配置する、というようにして住居地まで100セルを配置する。以上で一巡であり、次の201セルからは同様の方法を繰り返した。

注6) 近傍範囲のセル数を n とする。交換条件を満たすエージェント・セルが1つしかない場合、1回の探索でそのセルを見逃す確率 p は

$$p = (n - 1) / n \quad (1)$$

である。

従って m 回連続探索して見逃す確率つまり探索できない危険率を0.05とすれば

$$0.05 = p^m \quad (2)$$

となる。

注7) 交換条件を満足する空間セルが近傍内に1つしかない場合、それを探索できない危険率が0.05となるまで1回の反復計算で探索しているので、連続して10回反復計算しても探索できない危険率は0.05の10乗となりほとんど危険率0とみなせる。

参考文献

- 1) 金俊栄, 荻島哲, 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集, 第424号, pp69-78, 1991.6
- 2) 石坂公一: 土地利用遷移行列の分析手法に関する考察—首都圏市街化区域における住居系用途を中心とした土地利用変化動向の分析その1—, 日本建築学会計画系論文集, 第436号, pp59-69, 1992.6
- 3) 石坂公一: 首都圏における距離帯別の土地利用変化動向—首都圏市街化区域における住居系用途を中心とした土地利用変化動向の分析その2—, 日本建築学会計画系論文集, 第442号, pp97-106, 1992.12
- 4) 青木義次, 永井明子, 大佛俊泰: 遷移確率行列を用いた土地利用分析における誤差評価, 日本建築学会計画系論文集, 第456号, pp.171-177, 1994.2
- 5) R.White, G.Engelen: Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, Environment and Planning B: Planning and Design, vol.24, pp.235-246, 1997
- 6) Batty.M. and Y.Xie: Possible urban automata, Environment and Planning B, Planning and Design, vol.24, pp175-192, 1997
- 7) 山本秀一・奥俊信・谷川寛樹: セル・オートマトンとニューラルネットワークを適用した土地利用予測モデル—都市近郊における「田」「畑」から「建物用地」への転換—, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 第22回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp109-114 1999.12
- 8) 大佛俊泰, 西松照生, 吉川徹: 画地単位の転換確率に基づく土地利用モデル, 日本建築学会計画系論文集, 第564号, pp203-209, 2003.2
- 9) 青木義次: 用途規制によらないゾーニングの可能性, 日本建築学会計画系論文集, 第573号, pp79-83, 2003.11
- 10) 田中慎也, 加藤公洋, 安西敦明, 増田浩通, 新井健: セルオートマトンを適用した街区単位の土地利用動態モデルの開発, 地理情報システム学会講演論文集, Vol.13, pp75-78, 2004
- 11) Clarke, K.C., S.Hoppen and L.Gaydos: A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bayarea, Environment and Planning B, Planning and Design, vol.24, pp247-261, 1997
- 12) 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: セルオートマトンを用いた都市の土地利用パターンの形成—相互作用とパターンの関係について—, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 第20回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp421-426, 1997.12

- 13) 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: セルオートマトンとしての都市(その1) C A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, 第506号, pp203-209, 1998.4
- 14) 瀧澤重志, 河村廣, 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, 第528号, pp267-275, 2000.2
- 15) 渡辺公次郎, 大貝彰, 五十嵐誠: セルオートマトン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, 第533号, pp105-112, 2000.7
- 16) 朝山秀一: 土地利用現況図に基づく港区の商業用地の成長解析—複雑系のアルゴリズムに基づく都市の成長シミュレーション(その1)—, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp551-552, 2002.8
- 17) 奥平耕造: 都市工学読本, pp93-109, 彰国社, 1976
- 18) 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: 遺伝的アルゴリズムを用いた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, 第495号, pp281-287, 1997.5
- 19) 奥俊信: セル・オートマトンを用いた宅地再配置による都市凝集化の特徴と評価, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 第26回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 pp121-126 2003.12
- 20) 青木義次: 都市の土地利用パターンの復元性に関する理論的考察, 日本建築学会計画系論文集, 第580号, pp149-152, 2004.6
- 21) 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, 第588号, pp71-77, 2005.2
- 22) 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋史: セルオートマトン法, pp17-28, 森北出版, 1998
- 23) 森下信: セルオートマトン, pp40-41, 養賢堂, 2003
- 24) Urban Task Force: Towards an Urban Renaissance, Spon Press, 1999
- 25) 奥俊信: エージェントの構成比率の相違による分布形態の特徴, 計算工学講演会論文集, Vol.9, No.2, pp481-484, 2004.5
- 26) 奥俊信: 互恵主義戦略をとるマルチエージェントの自己組織化について, 計算工学講演会論文集, Vol.10, No.2, pp651-654, 2005.6

(2005年8月23日原稿受理, 2006年3月7日採用決定)