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

A STUDY ON MULTI-AGENT SIMULATION MODEL FOR TRANSIENT DYNAMICS AND DISTRIBUTION OF THE POPULATION IN AN URBAN AREA

池谷直樹 — * 1 谷本 潤 — * 2
萩島 理 — * 3 相良博喜 — * 4

Naoki IKEGAYA — * 1 Jun TANIMOTO — * 2
Aya HAGISHIMA — * 3 Hiroki SAGARA — * 4

キーワード：
都市形成, マルチエージェント・シミュレーション, 自己組織化

Keywords：
Urban formation, Multi agent simulation, Self-organization

In order to reproduce both transient dynamics and space distribution of an urban population only derived from a simple self-organism principle, a multi-agent simulation model is established. A resident agent tries to move to a cell so as to maximize his own utility that is defined by both effects of distance from the urban central and population density. The so-called “doughnut phenomenon” as well as growing Densely Inhabited District (DID) can be emulated qualitatively, even though the model bases on a simple self-organism rule.

1 緒言

都市の成長と衰退は、政治、経済活動や交通機関の発達など、さまざまな要素に影響を受けながら繰り返され、それに伴って人口の集中や分散が生起する。逆に、人口の集中と分散によって、都市は更なる成長と衰退を繰り返すことから、そのダイナミクスには複雑系科学で云うところの自己組織化構造[1]があるものと思われる。しかし、その因果律は複雑であり、例えば、何が因由となって所謂ドーナツ化現象が創発するのかと云った単純な問題にすら明然と応えることは困難である。本稿では、都市成長・衰退のダイナミクスを単純な自己組織化原理に基づき再現するモデルを仮構したので報告するものである。モデル化手法としてはマルチエージェント・シミュレーション技法を適用する。マルチエージェント・シミュレーションは、建築学分野でその適用事例が現下蓄積されつつある新しい技法（例えば、[2],[3]）であり、様々な応用事例をストックすることはその適用可能性の裾野を思量する上で技術報告の要に適うものと考えられる。

ところで、都市成長のダイナミクスを考えると、領域制約が比較的緩やかなアメリカとそれらが厳しい日本とでは多くの異なる点があるが、i)初期に周縁部から人口の吸引により原初の都市が形成され、ii)過度の集中が都心部のドーナツ化を引き起こし、iii)その後、都心回帰が起きる、と云うマクロな動態は通底するものと考えられる。

政治的、経済的要請が吸引力となって周縁部から人口が流入することにより都市は発生する。古くは紀元前 8～9 世紀におけるギリシアのポリス（都市国家）発生がシノイキスモス（集住）により説明付けられていたことから推量されるように、系統的都市論の萌芽はかなり早い時期にあった。シカゴ学派の E.W.Burgess は 1920 年代に同心円状

のエリア分けで階層分居や都市における土地利用の生態を説明しようと試みた（同心円地域構造論[4]）。第 2 次大戦後の先進諸国における経済発展に軌一して起きた急速な都市化、各国の特殊事況により様々なバリエーションが観察された都市成長、あるいは近年アジアの巨大都市で生じつつあるメガロ・シティの動態予測などは、Burgess 以降の H.Hoyt（扇状理論）、C.D.Harris & E.L.Ullman（多核理論）などの古典モデル[5]を単純に適用するだけでは説明がつかない。これら今日的な都市化、都市成長を巡っては、社会科学、都市計画学などを中心に多くの研究が継続的に行われている（例えば[5]）。複雑な人口分布が生じる要因を挙げれば、都市の発生形態や発展性、他民族の存在、住民の所得較差、交通機関の発達、地理的条件などがあり、それらが相互に影響し合っているといえる。このように、人口の空間分布、ひいてはその時間ダイナミクスには、様々な要因が複雑に影響するものと思われる。

奥[6]は、都市の平面的人口分布にみられる一極集中が多極クラスターへの相転移を自己組織化ルールに基づくマルチエージェント・シミュレーションにより検討している。それによると均衡時の一極化が多極化への帰結は、宅地エージェントが移動するか否かの意志決定をする相互作用の範囲と所与条件である人口密度により異なると云う。また、奥[7]は、都市における土地利用の空間分布を、各用途間の親和度を定義することで、自己組織化原理に基づき説明することを試みており、一連のプロセスを一種の社会ジレンマゲームとして観ようとしている。

これら先行研究と異なり、本稿では都市形成の過渡的ダイナミクスに着目し、一極集中とドーナツ化が振動的に創発させる自己組織化ル

* 1 九州大学工学部エネルギー科学科
(〒816-8580 春日市春日公園6-1)

* 2 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

* 3 九州大学大学院総合理工学研究院 准教授・工博

* 4 九州大学大学院総合理工学府博士課程 修士(工学)
日本学術振興会特別研究員

* 1 Department of Energy Science and Engineering, School of Engineering, Kyushu Univ.

* 2 Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

* 3 Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

* 4 Graduate Student (Doctoral Candidate), Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, M. Eng.
JSPS Research Fellow

図1 2次元空間の概要

ールについて考察する。具体的には、都市の人口分布を単純な自己組織化ルールに基づいてモデル化し、原初的な非集住状態から過渡的に一極集中により原始都市が創発し、集中による郊外退避（ドーナツ化）、その後、再集中、再分散を繰り返す過程で、都市が準定常的な摂動（規模を小さくしながら集中、分散を繰り返す）状態に落ち着く動態を再現するマルチエージェント・シミュレーションモデルを作成する。

2 モデル

2.1 モデルの概要

図1のように、2次元空間内に都市形成上の中心地を仮定し、中心地の移動はないものとする。初期には空間上にランダムに配置された居住者エージェント（図1中の黒い点）は、中心地からの距離と各セルの居住者エージェント密度によって決まる効用が最も高い場所に確定的に移動する。ただし、移動イベントは確率的に生起する。すなわち、移動する居住者エージェントの数は、全居住者エージェントのうちのある一定の割合（移動確率）とする。同一セル内に複数の居住者エージェントが居住することができる。したがって、各セルは居住者エージェント数に応じた密度を持つ。

移動によって変化する密度効用情報の更新は、ステップ毎に行う（すなわち synchrony 更新）。中心地から近いほど望ましい距離効用と密度が低いほど望ましい密度効用の線形重み和で決まる効用関数は以下で定義する。

$$fitness(i, j) = \frac{\alpha}{1 + \exp\left(\frac{dis(i, j) - \max_dis}{2}\right)} + \frac{(1 - \alpha)}{1 + agent_num(i, j)} \quad \dots(1)$$

$fitness(i, j)$, $dis(i, j)$, $agent_num(i, j)$ はそれぞれセル (i, j) における効用、中心地からの距離、居住者エージェント数を示している。 $\max_dis$ は中心地から最遠地までの距離である。第1項目が距離効用、第2項目が密度効用を意味し、 α は両者の重みを決めるモデルパラメータである。

2.2 距離効用

(1)式第1項の距離効用の具体的関数形としてはシグモイド関数を仮定した。この関数は図2に示されるように、中心地付近では効用が高く、ある距離隔たると急激に効用が低下する。これは、中心地付近では都市施設、都市基盤設備により得られる効用が高く、中心地から

図2 距離効用に適用したシグモイド関数($\alpha=0.5$)

ある距離を隔てるとその利便性が急激に低下し、郊外ではほとんど効用が得られなくなる現実をエミュレートしている。

2.3 密度効用

(1)式第2項の密度効用は、居住者エージェント密度の1乗に逆比例するものとした。これは、集住により生活環境の悪化が招来されることを定性的に模擬している。

3 実験

数値実験は10回試行のアンサンブル平均で評価する。

3.1 パラメータ設定

実験におけるパラメータを表1にまとめる。

表1 実験におけるパラメータ

居住者エージェント数	3000
2次元空間の大きさ	30×30
移動確率	0.2
効用関数のパラメータ α	0.5

本設定の場合、移動確率が0.2であるので、ステップ毎に移動する期待居住者エージェント数は600人となる。既述したように、全居住者エージェントの移動が終了した時点で密度の再計算が行われ効用情報がシンクロに更新される。また、効用関数の重みパラメータである α を0.5とすることで、距離効用と密度効用の最大値はいずれも同値の0.5にスケーリングされる。本稿では、都市形成の過渡的ダイナミクスに着目しているため、重みパラメータ α を固定値として扱った。

3.2 評価パラメータの定義

居住者エージェントの集中・分散の指標として、中心地からの平均距離 $average_dis$ を次式によって定義する。

$$average_dis = \sum_{i,j} \frac{agent_num(i, j)}{agent_num} \times dis(i, j) \quad \dots(2)$$

$agent_num$ は全居住者エージェント数である。

4 結果

結果を図3から図5に示す。図3はある試行における中心地からの平均距離の時間推移である。図4はその試行における2次元空間上の居住者エージェント密度の snapshot であり、色が濃いほど密度が高いことを示している。図5はアンサンブル平均した中心地からの距離と居住者エージェント密度との関係をステップ毎に示したものである。

人口分布の過渡的変化を示すために、ここでは、初期の50Stepまでのデータから、特徴的な分布を示すデータを示した。50step以降は

それ以前のような摂動を繰り返しながら準定常的な状態に落ち着いていく。

以下では 50step までを詳しく見て行く。

Step1

全く集住が起きていない状況であり、居住者エージェントが2次元空間上にランダムに配置された初期状態を示している。

Step5

中心からの平均距離 (図3) は、単調減少の部分に当たり、各居住者エージェントが中心地に一極集中する途上であることを示している。図4を見ても、中心地付近に密度の高いセルが確認できる。また、距離と密度の関係 (図5) をみると、中心地に近いほど高密度になっており、居住者エージェントが中心地へ最初の一極集中を始めていることが模擬されている。

Step10

中心からの平均距離 (図3) が極小に近い部分で、居住者エージェントが中心地に最も密集している部分である。最初の一極集中が収束した状況であり、図5をみると中心付近に DID (Densely Inhabited District) が形成されている様子が模擬されている。

Step20

DID のピークが平坦になり裾野が広がっている過程である。中心からの平均距離 (図3) は再び増加傾向にある部分で、居住者エージェントが中心地から分散し始めている状況を模擬している。ドーナツ化現象の初期兆候である。

Step32

図3では、中心地からの平均距離が極大になる部分で、居住者エージェントが中心地から距離を隔てた郊外に分布している。図4から分かるように、Step32では中心地の密度が低くなり、その周囲に高密度のセルが出現し、ドーナツ化現象を視覚的に捉えることができる。また、距離と密度の関係 (図5) から、人口分布のドーナツ化がよく再現されていることが確認できる。

Step35

図3では、中心からの平均距離が再び減少する部分で、居住者エージェントが再び中心地に集中し始めている状況であるといえる。ある試行の snap-shot である図4では、人口分布のドーナツ化がいまだ消えていないが、アンサンブル平均の図5を見ると、2度目の一極集中のモードであることがわかる。

Step40

図4の2次元空間上では、郊外の密度が下がり、中心地に近いエリアの密度が増加していることが確認できる。密度と距離の関係 (図5) から、中心地にごく近いエリアの密度が急激に増加している。ここでは、郊外の居住者エージェントの大部分が再び集中し始めていると言える。図5の Step35 と Step40 の比較から、Step35 の中心地居住の居住者エージェントの郊外退避と、遠方居住の居住者エージェントの都心回帰が重合されたモードにより、Step40 では都心ごく近傍部に DID のリングが形成されたことが推測される。

Step50

図3にも示されるように、中心からの平均距離が、Step10 直後の極小値と同程度になる部分で、居住者エージェントが中心に密集する2度目のピークであることがわかる。図4と図5でも同様に、中心地に

密度の DID が形成されていることが確認できる。

Step50 後の変動について簡単に述べておく。再度の人口集中の後、居住者エージェントは再び、分散し始める。しかし、Step32 のような広範囲の分散は起こらず、中心地近傍での集中と分散が繰り返される。

以上の結果をまとめると、次のようになる。ランダムに配置される Step1 の状態から、徐々に中心地への人口集中が始まる。Step10 付近で中心地での人口集中が最も激しく起きているが、Step20 から Step32 にかけて、人口の郊外退避が進む。その後、Step40 から Step50 で、再び都心部への人口集中が生じる。つまり、都市の初期形成→急激な一極集中→ドーナツ化による郊外への分散→中心地への再集中の動特性が確認出来る。

5 結語

都市における人口分布の動特性を単純にモデル化したマルチエージェントシミュレーションモデルを作成した。モデルでは基本的には、①居住者エージェントの居住地における効用は中心地からの距離と人口密度により決まる、②移動イベントは確率的に生じ、全居住者エージェントでシンクロに移動を行い、人口密度情報の更新を行う、というルールだけを規定する。このようなごく単純なモデルであっても、居住者エージェントの自己組織化により、都市の初期形成過程、一極中心による都心部の DID 化、集中の弊害による都心部ドーナツ化、空洞化した都心部が再評価され都心回帰が起こる、という一般的な都市動態の特徴をそれなりに再現することができた。

なお、本モデルのプログラムは、研究室の web ページ (http://krlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/MAS/Ikegaya_Mas.htm) よりダウンロード可能である。動作には構造計画研究所のマルチエージェントシミュレータ KK-MAS を要する。

【参考文献】

- [1]Kauffman,S.A.; The Origins of Order, Oxford University Press, New York, 1993.
- [2]溝澤重志,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, 421-426, 1997.
- [3]谷本潤,脇山宗也,相良博喜;外生的資源制約を課した環境ジレンマゲームの普遍モデルに関する研究, 日本建築学会環境系論文集 No.610, 107-112, 2006.12.
- [4]R.E.パーク (大道・倉田 訳);都市, 鹿島出版会, 1972.
- [5]高橋勇悦 他;新しい都市社会学, 学文社, 1985.
- [6]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の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, 121-126, 2003.
- [7]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転移モデル—その 2—, 日本建築学会環境系論文集 No.605, 147-154, 2006.7.

図 3 中心地からの平均距離とステップ数の関係

図 4 2次元空間上でのエージェント密度の分布

図 5 中心地からの距離と居住者エージェント密度の関係

[2007年4月16日原稿受理 2007年7月26日採用決定]