

Artisoc[®]による都市道路ネットワーク形成メカニズム 解明のためのシミュレータ開発

加 藤 康 彦^{†1}

平 松 燈^{†2}

井 上 寛 規^{†3}

米 田 耕 士^{†1}

概 要

本論文では、都市道路ネットワーク形成のメカニズムを分析するためのマルチエージェント・シミュレータの開発に関して述べる。近年、計算機シミュレーションの研究分野では、人工社会モデリングが注目を浴びている。本論文においてもこの社会分析手法を用いて、複数の旅行者エージェントの行動ルール、政府による通行税の徴収、道路整備などをモデル化する。つぎに、実際にエージェント・ベースド・モデル (Agent-Based model) のプログラミングに適した Artisoc[®] を使いシステム開発を行う。最後に、東京圏の疑似都市モデルのシミュレーションを行い、開発されたシミュレータが都市道路ネットワーク形成メカニズム解明の一助となる可能性を示す。

キーワード：道路ネットワーク (road network), 交通渋滞 (traffic congestion), 交通政策 (traffic policy), シミュレータ開発 (simulator development), エージェント・ベースド・モデ

ル (agent-based model)

1 はじめに

世界中の都市で、多様なパターンの道路ネットワークが、自然発生的または計画的に形成されている。これらの道路ネットワークは、ライン型、格子型、放射型、環状型、またはそれらの複合型に定性的に分類することができる^[1]。例えば、京都 (日本)、マンハッタン (アメリカ)、長安 (中国) の主要な道路は格子型、キャンベラ (オーストラリア)、ローマ (イタリア) は、放射型、東京 (日本)、パリ (フランス) は、放射型と環状型の複合型、ワシントン、フィラデルフィア (アメリカ) は、格子型と放射型の複合型の道路ネットワークにそれぞれを分類することができる。一方、道路ネットワーク構造の類似度を定量的に評価するために、オペレーションズ・リサーチ (OR) や複雑ネットワーク科学などの分野で、グラフ理論に基づいた次数分布や平均最短距離、クラスター係数などの指標を用いる研究^[2]や認知心理実験により道路ネットワーク構造の知覚的認知度指標を開発をする研究^[3]などがされている。

^{†1} 熊本学園大学経済学部 (Faculty of Economics, Kumamoto Gakuen University)

^{†2} 近畿大学総合社会学部 (Faculty of Applied Sociology, Kindai University)

^{†3} 京都大学経済研究所 (Institute of Economic Research, Kyoto University)

では、これらの道路ネットワーク構造は、どのような条件で形成されるのであろうか、また、どのような目的で計画的に設計されてきたのであろうか。都市経済学分野の研究^[4]では、道路のキャパシティと消費者行動が内生的に決定されるモデルを用いて応用一般均衡分析がされている。しかし、道路ネットワーク構造を単純なライン型としているため、複雑な道路ネットワーク構造についての議論がされていない。また、工学分野の研究^[5]では、ある種類の粘菌が管によって餌と餌を繋ぐ経路を最短にするように変形する性質を応用して、輸送の効率性を基準とした輸送最適ネットワークを発見するバイオコンピュータの開発がされている。このような自己組織化により形成された生物界の複雑ネットワークの形状は都市の道路ネットワークと共通の多重環状型やスーパーハブの構造を持つことがある。この事実は、都市の道路形成メカニズムの解明には複雑系アプローチによる分析が有効であることを示唆している。

そこで本論文では、還元主義では説明が困難な複雑な道路ネットワークの形成メカニズムを解明するために、多数の要素（エージェント）が相互作用しあうことで創発された現象を、シミュレーションで再現する複雑系アプローチの一手法であるマルチエージェント・シミュレーション（Multi-Agent-Simulation, MAS）を用いて分析を行う。具体的には、まず、MASに適したシステム開発環境の Artiso[®]を用いて、道路ネットワークが内生的な市場メカニズムにより成長するモデルに基づいた道路ネットワーク分析のためのシミュレータを開発する。さらに、このシミュレータを用いて、東京圏の疑似都市のシミュレーション実験を行い、交通を効率化する道路ネットワークとはどのようなものかについての初歩的な分析を試みる。

本論文の構成は以下の通りである。第2節で都市道路ネットワークの経済モデルについて述べる。第3節でシミュレーションの具体的な設定を解説し、続く第4節で開発されたシミュ

レータを使い東京圏の疑似都市モデルのシミュレーションを行うことで、MASが都市道路ネットワーク形成メカニズムの解明の一助となる可能性を示す。最後に、第5節で今後の課題について述べ、本論文のむすびとする。

2 都市道路ネットワークの経済モデル

2.1 都市モデル

本論文で取り扱う都市は、図1のような六角形のノード（地区）が並んだ構造とする。辺どうしが接しているノード間は道路によって接続されているものとする。六角形のタイルが敷き詰められた様に見えることから、ヘキサタイル型都市と呼ばれる。

都市の規模を表すために、図2のようにリング状に配置されている道路を、便宜上、1、2、3、…Mと番号付ける。図2は、リング数が3の時のノード番号とリング番号の関係を表したものである。リング数をMとすると、ノードの数は一般的に以下の式で表すことができる。

$$n = \sum_{i=1}^M 6i + 1 \quad (1)$$

2.2 旅行者の行動

各ノード間の往路の旅行者数は、出発ノード o の人口 P_o と目的ノード d の人口 P_d とノード od 間の最短ルートの距離 L_{od} によって、以下の古典的な重力モデルで決定する。

$$A_{od} = \frac{P_o^{\sigma_1} P_d^{\sigma_2}}{L_{od}^{\sigma_3}} \quad (2)$$

A_{od} : ノード o からノード d への出発旅行者数

P_o : ノード o の人口

P_d : ノード d の人口

L_{od} : ノード o とノード d 間の最短距離

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 重力モデルパラメータ

ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は非負の重力モデルのパ

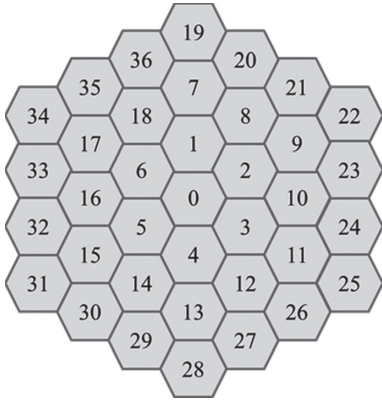


図1 ヘキサタイル型都市

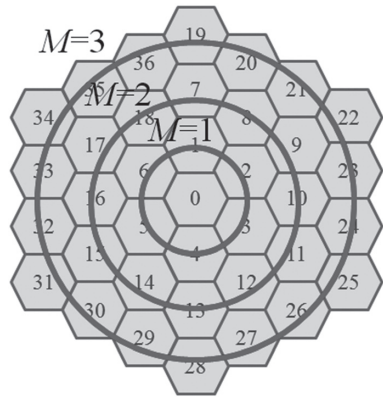


図2 ノード（地区）とリング

ラメータであり、 σ_1 が大きくなるほど人口の多いノードから出発する旅行者が多くなり、 σ_2 が大きくなるほど人口の多いノードへ向かう旅行者が多くなる。以降では、 $A_o = \sum_d A_{od}$ をノード o の全出発旅行者数、 $A_d = \sum_o A_{od}$ をノード d の全到着旅行者数と呼ぶ。

次に旅行者の出発ノードから目的ノードへのルート選択の方法であるが、すべての旅行者は同質であり、旅行費用に基づいて確率的にルートを選択すると仮定する。以下では、旅行者のルート選択や道路通行時間、道路上の旅行者数を Anas and Liu^[6]を参考にして定式化する。

出発旅行者のノード o から d へのルート候補の k 番目のルート R_{od}^k と表記すると、時点 t における、ノード o から d への出発旅行者がルート R_{od}^k を選択する確率は、ルート R_{od}^k の旅行費用 $b_{R_{od}^k}(t)$ と候補となる全ルートの旅行費用によって確率的に決定される。

$$q_{R_{od}^k}(t) = \frac{e^{-\lambda b_{R_{od}^k}(t)}}{\sum_{k'=1}^K e^{-\lambda b_{R_{od}^{k'}}(t)}} \quad (3)$$

$q_{R_{od}^k}(t)$: 時点 t におけるルート R_{od}^k の選択確率

$b_{R_{od}^k}(t)$: 時点 t におけるルート R_{od}^k の旅行費用
 λ : 旅行者のルート選択の分散度の調節パラメータ

$\lambda \in [0, 1]$ (λ が 1 であれば旅行者が選択するルートは第 1 候補のルートに集中する。逆に、 λ が小さくなれば旅行者のルート選択は分散する)

K : 候補ルート数

式(3)のルート R_{od}^k の時点 t での旅行費用 $b_{R_{od}^k}(t)$ は、ルート上の各リンク（道路）の通行時間に対する機会費用と支払う通行料（ピグー税）の総和とする。通行時間に対する機会費用は 1 分あたりの賃金率を乗じて求められる。また、通行料も渋滞状況を反映して課税額が決まる。よって、旅行費用と通行料はその時点の渋滞状況に左右されることから、旅行費用もそれに伴い変化する。

$$b_{R_{od}^k}(t) = \sum_{ij \in R_{od}^k} \left(T_{ij}(t) \frac{w}{60} + PG_{ij}(t) \right) \quad (4)$$

$b_{R_{od}^k}(t)$: ルート R_{od}^k の旅行費用

w : 1 時間の金銭的価値（賃金率）

$T_{ij}(t)$: 時点 t においてルート R_{od}^k に含まれる道路 ij の通行にかかる時間

$PG_{ij}(t)$: ルート R_{od}^k に含まれる道路 ij で時点 t において課される通行料（ピグー税）

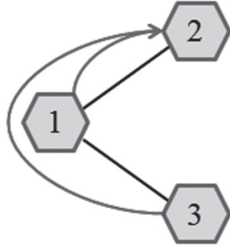


図3 道路1-2を往路として通る旅行者数（3地区）

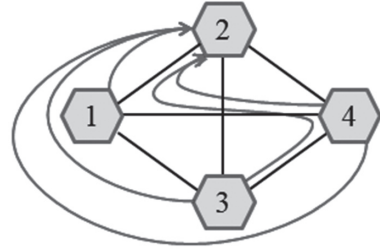


図4 道路1-2を往路として通る旅行者数（4地区）

道路 ij の時点 t における通行時間は、道路キャパシティ $c_{ij}(t)$ と道路の長さ l_{ij} 、道路 ij を通る総旅行者数 $f_{ij}(t)$ から求められる。

$$T_{ij}(t) = \alpha l_{ij} \left\{ 1 + \beta \left(\frac{f_{ij}(t)}{c_{ij}(t)} \right)^\gamma \right\} \quad (5)$$

$T_{ij}(t)$: 道路 ij の時点 t での通行時間

l_{ij} : 道路 ij の距離

$f_{ij}(t)$: 時点 t において道路 ij を通る総旅行者数

$c_{ij}(t)$: 道路 ij の時点 t でのキャパシティ

この関数は Bureau of Public Road (BPR) function と呼ばれる。Peeta, Liu, and He^[7] や He, Qin, and Hong^[8] など、多くの研究において $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.15$ 、 $\gamma = 4$ という値が用いられている。本論文においても、シミュレーションを行うときにはこの値を用いた。

道路上の旅行者数については、図3と図4を使って説明する。例えば、図3のようなルート選択の無い線形都市では、道路1-2（リンク）上の旅行数 f_{12} は「ノード1-2間の旅行者」と「ノード3-2間の旅行者」の合計となる。つまり、ルート選択のないケースでは以下のように表せる。

$$f_{ij} = \sum_k (A_{ik} + A_{ki}) \quad (6)$$

一方で、図4のようなルート選択が生じるケースでは複雑な計算を要するうえに、時点 t 毎に数が異なる。道路1-2を往路として使う旅行数 $\overrightarrow{f}_{12}(t)$ は、「ノード1-2間の旅行者うち道路

1-2を選択する人数」と「ノード1-3間の旅行者のうち道路1-2を選択する人数」、「ノード4-2間の旅行者のうち道路1-2を選択する人数」と「ノード4-3間の旅行者のうち道路1-2を選択する人数」、さらに「ノード3-2間の旅行者のうち道路1-2を選択する人数」を足し合わせた数となる。

ノード o から d への出発旅行者が選択したルート R_{od}^k に道路 ij が含まれていて、その旅行者がちょうど時刻 t に道路 ij 上にいる確率を $\Pr_{ij \in R_{od}^k}(t)$ とする。この確率に od 間の往路の出発旅行者数を乗じ、全ノード組合せと全ルート候補分の総和をとれば、道路 ij を往路として使う旅行者数となる。同一の旅行者であっても往路と復路で通行するルートとタイミングが異なるため、以下のように分けて考える。道路 ij を往路として使う旅行者数は、

$$\overrightarrow{f}_{ij}(t) = \sum_{odk} \Pr_{ij \in R_{od}^k}(t) \times A_{od} \quad (7)$$

となる。さらに、道路 ij を復路として使う旅行者数は

$$\overleftarrow{f}_{ij}(t) = \sum_{odk} \Pr_{ij \in R_{do}^k}(t) \times A_{do} \quad (8)$$

と表すことができ、これらをまとめて道路 ij の総旅行者は、

$$f_{ij}(t) = \sum_{odk} \left(\Pr_{ij \in R_{od}^k}(t) \times A_{od} + \Pr_{ij \in R_{do}^k}(t) \times A_{do} \right) \quad (9)$$

となる。

2.3 政府の行動

政府は一定期間 Δt ごとに道路の整備拡張を行う。整備の費用は前の期に徴収したピグー税で賄う。渋滞が生じている場合に最適交通量が達成されるように、渋滞の価値としてピグー税が各旅行者には課されることになる(図5)。以下ではピグー税の導出過程について述べる。

まず、道路 ij 上の社会的交通時間 $STC_{ij}(t)$ は、

$$STC_{ij}(t) = T_{ij}(t) f_{ij}(t) \quad (10)$$

であり、社会的限界交通時間 $SMTC_{ij}(t)$ は

$$SMTC_{ij}(t) = \frac{\partial STC_{ij}(t)}{\partial f_{ij}(t)} \quad (11)$$

と表される。さらに、旅行者1人あたりの渋滞による限界的な負の外部生 $NE_{ij}(t)$ は、自由走行時間と実際の通行時間との差から、

$$NE_{ij}(t) = SMTC_{ij}(t) - T_{ij}(t) \quad (12)$$

となり、これを時給 w で金銭的価値に直すと道路 ij の通行に課されるピグー税が導出される。ピグー税は(5)式の $T_{ij}(t)$ の定義より、

$$\begin{aligned} PG_{ij}(t) &= NE_{ij}(t) \frac{w}{60} \\ &= \alpha \beta l_{ij} \gamma \left(\frac{f_{ij}(t)}{c_{ij}(t)} \right) \frac{w}{60} \end{aligned} \quad (13)$$

と求められる。

政府は徴収した税を旅行時間の機会費用 $TC(t)$ が最小化されるように分配し、各道路の整備を行う。一度道路整備に投入した費用は再分配できないものとし、累積の投入額で道路のキャパシティが決まる。また、機会費用の評価に用いる道路を利用する旅行者数は、それまでの累積人数を期間数で除した、時間あたりの平均旅行者数を、

$$\bar{f}_{ij}(t) = \sum_{s=1}^t \frac{f_{ij}(s)}{t} \quad (14)$$

とする。

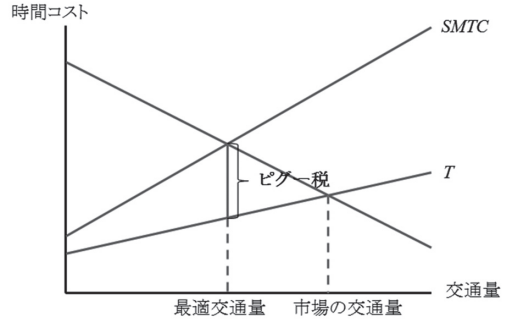


図5 ピグー税

これらを整理すると、目的関数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \min_{x_{ij}(t)} TC(t) &= \sum_{ij} T_{ij}(\bar{f}_{ij}(t), c_{ij}(t)) \bar{f}_{ij}(t) \frac{w}{60} \\ \text{subject to} \quad c_{ij}(t) &= F\left(\sum_{s=1}^t x_{ij}(s), r_i, r_j\right) \\ \sum_{ij} x_{ij}(t) &= \sum_{ij} \Delta PG_{ij}(t) \\ \Delta PG_{ij}(t) &= PG_{ij}(t) - PG_{ij}(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (15)$$

$x_{ij}(t)$: t 期において道路 ij に投入する道路整備費用

$c_{ij}(t)$: 道路 ij のキャパシティ

$\bar{f}_{ij}(t)$: 時間あたりに道路 ij を利用する平均旅行者数

r_i : ノード i の地価

r_j : ノード j の地価

$\Delta PG_{ij}(t)$: t 期における道路 ij での徴税額 = 前回の整備時点 $t - \Delta t$ 期から t 期までの徴税分

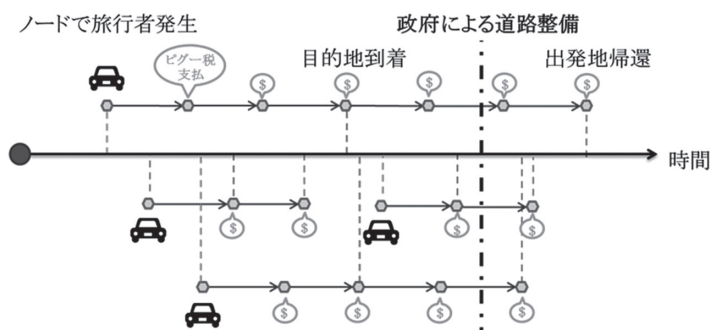


図6 シミュレーションのイメージ

3 シミュレーション実験の概要

3.1.1 マルチエージェント・シミュレーションとは

マルチエージェント・シミュレーション (Multi-Agent Simulation, MAS) は、KISS の原則に基づき設計されたルールに従い、複数の自律エージェントが、局所的な相互作用をおこすことにより創発する現象として、社会現象・自然現象などを再現する技法である。

従来の数理シミュレーションでは、エージェントの相互作用の過程と発展を数理モデルとして明示しなければならず、複数の異質なエージェントの相互作用過程を数理モデル化することは困難であった。一方、MAS では、エージェント間の単純な行動ルールだけをモデル化することで複雑な現象をシミュレーションによって再現することができる。

このように MAS では、異質な複数のエージェントの存在と相互作用の積み重ねによって、個々のルールからは予想ができない現象 (創発現象) が生じることがある。この特性から、MAS は、交通渋滞や災害時のパニック現象などの発生メカニズムのはっきりしない社会現象を分析することに広く応用されている。

3.1.2 Artisoc[®] を利用した都市道路ネットワーク形成シミュレーションの概要

Artisoc[®] は、直感的な操作でエージェントの

ルールから結果の出力まで容易にプログラミングできる MAS の開発プラットフォームとして注目されている。Artisoc[®] では、エージェント種類毎にルールを記述することができ、同様のルールを持つエージェントを複数発生させることができる。そして、発生させたエージェントを用意した仮想空間上で動作させることで、MAS が実行される。さらに、そのシミュレーション過程は様々な形式で可視化でき、結果の分析を容易にする。

次に、Artisoc[®] における都市道路ネットワーク形成シミュレーションの概略を簡単に述べる。Artisoc[®] で実行する MAS は、タイムドリブン型のシミュレーションである。時間は常に一定の速さで流れており、確率的に旅行 (イベント) が発生する。また、道路は時間の経過に伴い劣化していく。これらのシミュレーションのイメージを示したものが図6である。

旅行者エージェントは発生した時に往路のルートを選択する。ルート選択は、その時点での交通状況を所与として、旅行費用の小さなほうから数えて上位3つのルート候補から式(3)のロジットモデルで確率的に行われる。その後は目的地に到着するまで選択したルートを移動する。このとき一つの道路上を移動し終えるごとにピグー税を支払う。目的地に到着した後は、再度、復路のルートを選択し、同様にピグー税を支払いながら出発地に戻る。出発地に戻った旅行者エージェントは消滅する。一方で、政府

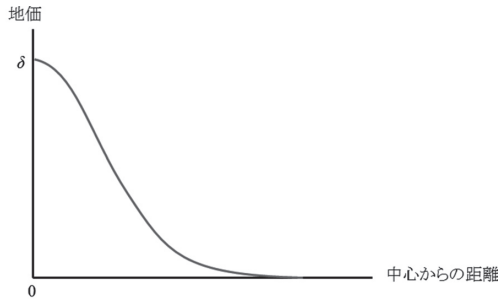


図7 中心からの距離と地価の関係①

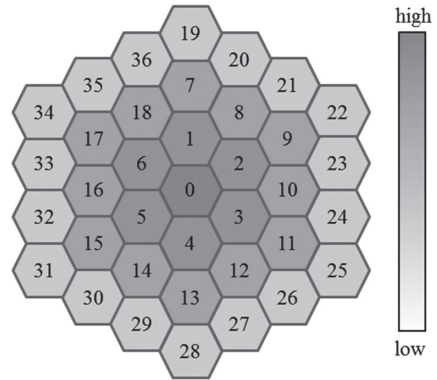


図8 中心からの距離と地価の関係②

表1 日本の3大都市圏市区町村の地価平均と人口密度

| Population density | 東京圏 (Log-linear model) b/t | 名古屋圏 (Log-linear model) b/t | 大阪圏 (Log-linear model) b/t |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ln (r) | 5322. 8569 [20. 05]*** | 4957. 0098 [12. 15]*** | 5839. 9947 [9. 83]*** |
| _cons | 20971. 3147 [28. 86]*** | 11341. 3348 [18. 01]*** | 13562. 8941 [16. 67]*** |
| R-squared | 0. 693 | 0. 747 | 0. 4655 |
| Adj-R-squared | 0. 6913 | 0. 7419 | 0. 4607 |
| Observation | 180 | 52 | 113 |

[] 内の数値はt値である。* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

は一定の時間ごとに、徴収した税を旅行時間の機会費用 $TC(t)$ が最小化されるように分配し、各道路の整備を行う。

以下ではシミュレーションで用いた各種の設定について説明する。

3.2 ノード (地区) の地価

シミュレーションでは中心点が1つの都市圏(図8)を仮定し、図7のように中心にいくほど地価が高くなるように設定した。

各ノードの地価は、 δ と σ をパラメータとして持つ滑らかに変化する単調減少関数(式(16))を用いて、ノード*i*が所属するリング番号から計算される。

$$r_i(m_i; \sigma) = \delta \cdot e^{-\sigma m_i^2} \quad (16)$$

3.3 ノード (地区) の人口

シミュレーションで使う各ノードの人口を算出するために、まず実際の都市圏の各地区の人口密度 D を地価 r に応じて決まる回帰モデル式(17)を作り、その妥当性を統計的に検証する。

$$D = \alpha + \beta \ln r \quad (17)$$

日本の三大都市圏(東京圏、名古屋圏、大阪圏)における市区町村レベルのデータを使って、地価平均(注1)と人口密度(注2)との関係を表した式(17)のモデルのパラメータを推計し検定を

行ったところ、表1のような結果が得られた。表1の統計的検定結果から、式(7)は人口密度 D を推計するモデルとして有効であることが明らかとなった。これにより、シミュレーション時に、想定する都市圏のタイプに応じて推計されたパラメータ値を用いることで、それぞれの都市圏の特徴を反映した分析が可能となる。

シミュレータでは任意に総人口 N を入力できるようにになっている。ある都市圏における各ノードの面積を S とすれば、都市全体の総人口が N となるように各ノードの人口は次式を使って計算することができる。

$$P_i = \begin{cases} \frac{D_i S}{\sum_j D_j S} N & \text{if } D_i > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

P : ノードの人口

D : ノードの人口密度

S : ノードの面積

N : 総人口

単純化のため、ひとつの都市圏に属する各ノードの面積はすべて同じ S であるとする。シミュレーションでは、東京圏の地区面積の中央

表2 日本3大都市圏の市区町村面積の記述統計量

| 面積 (km ²) | 東京圏 | 名古屋圏 | 大阪圏 |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| median | 31.86 | 34.46 | 28.11 |
| mean | 58.76 | 80.14 | 69.20 |
| sd | 79.90 | 143.45 | 121.75 |
| min | 5.11 | 8.20 | 4.39 |
| max | 626.70 | 918.32 | 827.83 |
| range | 621.59 | 910.12 | 823.44 |

(出典:「平成27年国勢調査人口等基本集計」より作成)

値(表2)を採用し、道路長は、実際に東京圏内の隣接地域間のGIS (Geographic Information System) データ^(注3)から実際に計算した平均値(6.441)を用いた。

3.4 旅行者エージェントの生起確率

旅行者エージェントの生起頻度は出発需要の多いノードほど高く、その確率はポアソン分布に従う。待ち行列モデルでよく用いられるポアソン到着のちょうど真逆になっているので、本論文ではポアソン出発と呼ぶことにする。

出発需要は(2)式から求められるが、いくつかの重力モデルパラメータを与える必要がある。これらのパラメータも日本の3大都市圏のデータをもとに推計した(表3)。推計には3節3

表3 日本の3大都市圏の市区町村間パーソントリップOD量の推計結果

| $\ln(A_{ij})$ | 東京圏 (Gravity model) b/t | 名古屋圏 (Gravity model) b/t | 大阪圏 (Gravity model) b/t |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| $\ln(P_i)$ | 0.498 [41.39]*** | 0.4936 [21.71]*** | 0.5393 [35.31]*** |
| $\ln(P_j)$ | 0.3771 [30.31]*** | 0.4791 [20.95]*** | 0.3702 [24.29]*** |
| $\ln(I_{ij})$ | -1.525 [-68.16]*** | -1.7923 [-34.62]*** | -1.6664 [-52.57]*** |
| R-squared | 0.9509 | 0.9492 | 0.9694 |
| Adj-R-squared | 0.9508 | 0.9491 | 0.9694 |
| Observation | 6621 | 1434 | 1926 |

[] 内の数値は t 値である。* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

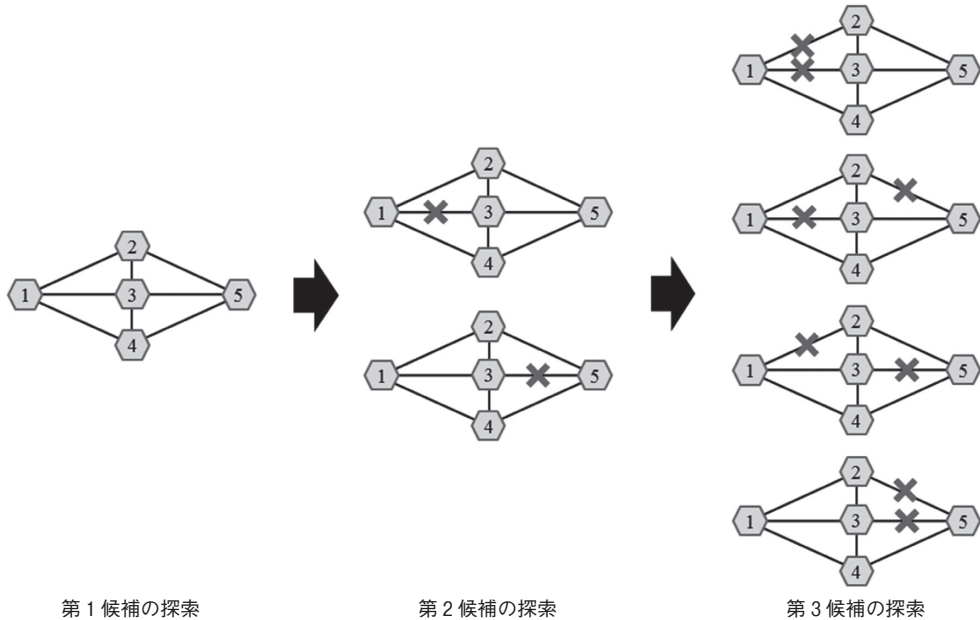


図9 ルート探索アルゴリズム

項で利用した市町村別人口に加え、国土交通省で公開されている GIS データ^(注3)を利用した。また、市区町村間の直線距離は緯度経度からヒュベニの公式を用いて算出した。

3.5 旅行者エージェントの目的地

旅行者エージェントは発生した時に、需要に応じて確率的に目的地が設定される。ノード o で発生した旅行者エージェントの目的地がノード d になる確率は

$$\Pr_{od} = \frac{A_{od}}{A_o} \quad (19)$$

A_{od} : ノード o からノード d への出発旅行者数

A_o : ノード o の全出発旅行者数

で求められる。

3.6 ルート候補

旅行者は発生した際に往路のルートをも、目的地に到着した際に復路のルートを決める。旅行者は同じノードを2回通るルートは考えないも

のとするが、本論文で取り扱うヘキサタイル型の都市配置の場合、ルートは複数に存在する可能性がある。そのため、シミュレーションでは、人間の認知能力を考慮に入れて、候補とするルートを旅行費用の小さいほうから数えて上位3ルートに限定した。

次に、式(4)で与えられる旅行費用の小さいほうから数えて上位3つのルートを見つけ出すための探索アルゴリズムについて説明する。これ以降、ルートの選択候補を旅行費用の小さいほうから数えて、順に第1候補、第2候補、第3候補と呼ぶ。アルゴリズムの探索イメージを図9に示す。このアルゴリズムは通常の経路探索の反復アルゴリズムである。

まず、最短経路の探索アルゴリズムを使い、第1候補となるルートを見つけ出す。図9では第1候補としてルート $R_{(1,3)}$ が見つかったと仮定している。

次に、第2候補のルートであるが、第1候補のルートに含まれる道路のうちどれか1つの道路を使わないルートのうちで旅行費用が最小の

ルートとである。よって、第1候補のルート中の1つの道路をタブー（利用不可）状態にして経路探索を行えばよい。図9のように第1候補のルートに含まれる道路1-3または3-5をタブーとする。この例では、経路1-3をタブーとした時の旅行費用最小経路と経路3-5をタブーとした時の旅行費用最小経路を比較してより小さい方を第2候補とする。

さらに、第3候補のルートは、第1候補のルートと第2候補のルートに含まれる道路の中から、それぞれ1本ずつをタブーとするタブーパーリストを作り、このリスト内のタブーパーごとに旅行費用が最小となるルートを探査し、さらにそれらの中で最小となるルートとして求められる。そのため、必要となる経路探索の回数は、「第1候補ルートの道路数×第2候補ルートの道路数」となる。例えば、図9で説明すると、ルート $R_{(112,25)}$ が第2候補ルートであったとすると、第1候補ルートに含まれる道路1-3または3-5と第2候補ルートに含まれる道路1-2または2-5からそれぞれ1つずつの道路をタブーとして計4回の経路探索を行わなければならない。

経路探索に利用するアルゴリズムは効率が良いものならどのようなものでも構わないが、本論文では、ダイクストラ法を採用した。

3.7 道路整備

道路キャパシティは、地価と費用投入額（ピグー税投入額）から影響を受けるとした。実際に設定した関数は以下の式であるが、これは道路が無限に拡張できるわけではなく、限界拡張路が逓減することを仮定した。

$$c_{ij}(t) = \left\{ \ln \left(\sum_s^t x_{ij}(s) / \zeta \frac{r_i + r_j}{2} l_{ij} + c_{mit} \right) \right\}^\eta \quad (20)$$

$$- \left\{ \ln \left(\sum_s^{t-\Delta t} x_{ij}(s) / \zeta \frac{r_i + r_j}{2} l_{ij} + c_{mit} \right) \right\}^\eta + c_{ij}(t-1)$$

$c_{ij}(t)$: t 期での整備後の道路 ij のキャパシティ
 $x_{ij}(s)$: s 期で道路 ij に新規投入された整備費

用

$\sum_s^t x_{ij}(s)$: 道路 ij に投入された累計整備費用
 $\sum_s^{t-\Delta t} x_{ij}(s)$: 前回更新時点 $t - \Delta t$ における道路 ij に投入された累計整備費用
 $c_{ij}(t-1)$: 整備直前の道路 ij のキャパシティ
 c_{mit} : 道路の初期キャパシティ
 ζ : 地価に対するウェイト
 $\eta < 1$: 逓減パラメータ

この式の第1項は累計費用投入額で整備される道路キャパシティ、第2項は前回の整備タイミングにおける累計費用投入額で整備される道路キャパシティを意味する。つまり、第1項と第2項の差は今回新たに投入された費用で整備された分の道路キャパシティである。これに第3項の道路整備直前の道路キャパシティを足し合わせると、現在の道路キャパシティとなる。第3項の道路整備直前の道路キャパシティは、前回の整備後の道路キャパシティから時間経過で道路が劣化した後の状態である。

道路の劣化ルールを式で書くと以下の通りである。

$$c_{ij}(t) = \left(1 - \frac{\rho}{\Delta t} \right) c_{ij}(t-1) \quad (21)$$

$c_{ij}(t)$: t 期での整備後の道路 ij のキャパシティ
 ρ : 次の道路更新までに劣化する道路の割合（道路劣化率）

4 実験結果とその初歩的な分析

本節では、開発したシミュレータによる初歩的な分析を行う。シミュレータは図10のようにいくつかの画面から構成されている。右端に配置されているコントロールパネルでシミュレーションの設定や各種パラメータの変更ができる。中央の画面が道路キャパシティを表しており、数値とリンクの色で道路の整備の度合いが示さ

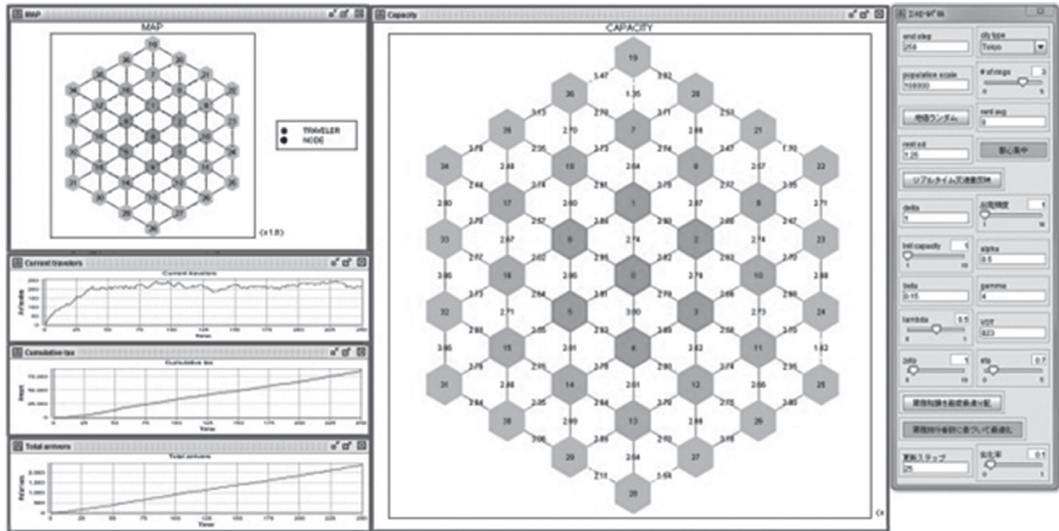


図10 シミュレータ画面

表4 東京圏型のシミュレーションでの道路整備結果

| 道路種別 | mean | Sd | max | min | observation |
|---------------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| ノード0とリング1間の道路 | 2.86889 | 0.09199 | 2.99863 | 2.73515 | 6 |
| リング1 | 2.87467 | 0.04218 | 2.92992 | 2.79442 | 6 |
| リング1とリング2間の道路 | 2.67444 | 0.09659 | 2.86538 | 2.55460 | 18 |
| リング2 | 2.72821 | 0.03866 | 2.78334 | 2.63731 | 12 |
| リング2とリング3間の道路 | 2.56779 | 0.26525 | 2.80346 | 1.35259 | 30 |
| リング3 | 2.58933 | 0.59078 | 3.17675 | 1.47076 | 18 |

表5 東京圏型道路キャパシティのt検定

| x | y | t-value | p-value | df | Reject H_0 ($p < 0.01$) | Reject H_0 ($p < 0.05$) | Reject H_0 ($p < 0.10$) |
|------|-------------------|---------|---------|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| リング1 | vs. ノード0とリング1間の道路 | -0.1399 | 0.4458 | 10.0000 | No | No | No |
| リング1 | vs. リング1とリング2間の道路 | 7.0140 | 0.0000 | 19.8860 | Yes | Yes | Yes |
| リング2 | vs. リング1とリング2間の道路 | 2.1205 | 0.0394 | 24.0080 | No | Yes | Yes |
| リング2 | vs. リング2とリング3間の道路 | 3.2281 | 0.0224 | 31.9242 | No | Yes | Yes |
| リング3 | vs. リング2とリング3間の道路 | 0.1461 | 0.4315 | 21.1793 | No | No | No |

Null hypothesis H_0 : mean (road capacity of x) - mean (road capacity of y) = 0
 Alternative hypothesis H_1 : mean (road capacity of x) - mean (road capacity of y) > 0

れる。左上のマップでは実際にエージェントがノード間を移動する様子が見える。その下の3つの時系列グラフはシミュレーションの進行状況を把握するのに役立つ。上から順に現在旅行中のエージェント数、徴収した累計税額、旅行を終えたエージェント総数を表示している。

以下では、実際に本研究において開発したシミュレータを用いて東京圏の特徴を持つ疑似都市をシミュレーションした結果を紹介する。都市の規模はリング数3の総人口100000とした。シミュレーションのパラメータ設定は以下の通りである。中心地の地価 $\delta = 1$ 、地価生成に関するパラメータは $\sigma = 0.32$ 、BPR functionの各パラメータは $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.15$ 、 $\gamma = 4$ 、旅行者のルート選択の分散度調整パラメータ $\lambda = 0.5$ 、時間の価値 $w = 823$ 、道路整備に関するパラメータ $\zeta = 1$ 、 $\eta = 0.7$ 、道路劣化率 $\rho = 0.1$ である。シミュレーションの終了ステップ数250、道路更新は25ステップ毎に行う。なお、道路容量キャパシティの初期値はすべて1である。

シミュレーションの最終ステップにおける道路整備状況を表4に示す。表4には、道路の種類を同じリングに属するノードどうしをつなぐ道路と別々のリングに属するノード間をつなぐ道路とに分類し、それぞれの道路種別ごとの道路容量キャパシティの平均値、標準偏差、最大値、最小値を掲載した。平均値に注目して見ると、リング上に配置された道路とその前後のリング間をつなぐ道路では、リング上の道路の容量キャパシティがわずかに大きくなっていることから、「リング1、リング2、リング3の幹線としての多重環状道路が形成されている」という仮説を立てることができる。

そこで、これらの道路種別間の道路容量キャパシティの母平均に有意差があるのかをt検定により統計的に検証した結果を表5にまとめた。これをより詳しく説明すると、帰無仮説を「母平均の差が0」、対立仮説を「リング上に位置する道路容量キャパシティの母平均がリング間をつなぐ道路容量キャパシティの母平均よりも大きい」と

して、以下の①から⑤のグループ間に対しそれぞれt検定（片側検定）を行った。ただし、すべてのt検定は、事前に有意水準5パーセントで正規性検定（Kolmogorov-Smirnov検定）、等分散性の検定（F検定）を行い、その結果、①については、対応のない・分散が等しいもとの片側検定（Studentのt検定）、そして②から⑤については、対応のない・分散が等しくないもとの片側検定（Welchのt検定）をそれぞれ行った。

- ① リング1上の道路と円内部の都心道路
- ② リング1上の道路とリング1とリング2をつなぐ道路
- ③ リング2上の道路とリング1とリング2をつなぐ道路
- ④ リング2上の道路とリング2とリング3をつなぐ道路
- ⑤ リング3上の道路とリング2とリング3をつなぐ道路

これらのグループ間の検定のうち②、③および④において、5%の有意水準で「母平均の差が0」という帰無仮説が棄却され、「リング間をつなぐ道路容量キャパシティの母平均よりもリング上に配置されている道路容量キャパシティの母平均の方が大きい」という対立仮説が採択された。リング1の円内部の都心道路と外周道路のリング3には特殊な事情があることを勘案すれば、リング1とリング2に配置されている道路の整備が進み幹線環状道路が形成されている可能性があることを確認できた。

5 おわりに

本論文では、道路ネットワークの形成を分析するシミュレータの開発を行った。このシミュレータでは統計データに基づいて設定した都市圏ごとの特徴を反映したシミュレーションが可能である。今回は東京圏の特徴を持つ疑似都市での初歩的なシミュレーションを行い、環状道路の形成を統計的に確認することができた。

今後の課題としては、各ノードの人口と出発頻度の関係を明らかにし、現実的な旅行者発生状況を再現することが挙げられる。また、シミュレーションで得られた道路ネットワークをネットワーク分析にかけるなど、結果の詳細な分析が必要である。

注

- (1) 地価公示データ（平成27年度）
http://www.mlit.go.jp/totikensangyo/totikensangyo_fr4_000034.html
- (2) 平成27年国勢調査人口等基本集計（総務省統計局）
http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&tclassID=000001077438&cycleCode=0&requestSender=search
- (3) 国土数値情報 交通流動量 パーソントリップOD量データ（平成22年度）
http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-S05-b-v2_2.html

参考文献

- [1] 藤原健一郎・朝倉康夫・柏谷増男（1996）：「道路網の機能的階層性とネットワーク信頼性指標との関連」、『土木計画学研究・講演集』, 19(2). pp. 275-278.
- [2] Costa, L. D. F., Rodrigues, F. A., Travieso, G., and Villas Boas, P. R. (2007): "Characterization of Complex Networks: A Survey of Measurements," *Advances in Physics*, 56(1), pp.167-242.
- [3] 浅見泰司・神谷浩史・鳥津利行（1999）：「都市道路網の知覚的類似度」、『総合都市研究』, 第69号, pp. 187-199.
- [4] Anas, A., and Kim, I. (1996): "General Equilibrium Models of Polycentric Urban Land Use with Endogenous Congestion and Job Agglomeration," *Journal of Urban Economics*, 40(2), pp. 232-256.

- [5] 中垣俊之（2010）：『粘菌その驚くべき知性』, P H P 研究所.
- [6] Anas, A., and Liu, Y. (2007): "A regional economy, land use, and transportation model (relu-tran[®]): formulation, algorithm design, and testing," *Journal of Regional Science*, 47(3), pp.415-455.
- [7] Peeta, S, Liu, H., and He, X. (2015): "Traffic network Modeling," in Teodorovi, D. (Ed.), *The Routledge Handbook of Transportation*, Chapter 3, pp. 25-41.
- [8] He, Y., Qin, J., and Hong, J. (2017): "Comparative Analysis of Quantitative Efficiency Evaluation Methods for Transportation Networks," *PLoS ONE*, 12(4): e0175526.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175526>
- [9] 株式会社構造計画研究所（2002）：「MASコミュニティ」,
<http://mas.kke.co.jp/modules/tinyd0/index.php?id=13>
（参照2017-9-7）.

謝辞

本論文は熊本学園大学付属産業経営研究所の研究助成（平成28年度～29年度）「都市道路交通網の発達要因の分析と経済生産性」の研究成果の一部です。

また、本研究を進めるにあたり、隣接都市間の平均道路距離の推計におけるデータ分析などの補助を行っていただいた熊本学園大学経済学部経済学科の研究生である原口海氏に深謝申し上げます。