

交通行動の居住地選択行動への影響を仮定した 都市動態のマルチエージェントシミュレーション

谷口忠大*・高橋佑輔**

Multi-agent simulation about urban dynamics based on a hypothetical relationship between
individuals' travel behavior and residential choice behavior

Taniguchi TADAHIRO* and Takahashi YUSUKE**

In this paper, we proposed a simple urban model including individuals' travel behavior and residential choice behavior. Multi-agent simulation framework is described. We performed several experiments to evaluate political measures which will solve problems about motorization. As a result, drastic mobility management scheme increased the number of travelers using a train, and the distribution of residences became compact. However, it also increased many agents' total costs of living because of high rent and several kinds of cost including time cost and fatigue cost to reach a station. On the other hand, raising gas price made CO₂ emission less and kept total cost of living lower than the drastic mobility management measure. This suggests that to have people use train or bus by changing their attitude might be socially more expensive than to make people chose whether they use car or not under the condition that gas price is raised.

Key Words: Multi-agent simulation, mobility managemanet, travel behavior

1. はじめに

私たちの都市空間は日々の経済活動の中でダイナミックに変容する動的なパターンである。それらは日常生活の中では固定されているように見えるが、数年の中期で見ると徐々に変化し、数十年以上の長期で見ると大きく姿を変えている。特に近年は、環境・エネルギー問題や、地方の経済問題などが相互に関連しあいながら都市構造の問題が多方面から議論されてきている。その中で、モータリゼーションが私達の都市環境を流動化させ不安定化させていると指摘されている²⁸⁾。たとえば、地方都市における市街地の賑わいは郊外に開発された大型ショッピングモールに顧客を奪われることで衰退し、空洞化した都心、及び自動車の往来が激しくなった郊外では、交通渋滞、少年犯罪の増加、地域コミュニティの喪失といった様々な負の影響を与えていると言われるている¹⁹⁾。これらに加え、枯渇する化石資源へのエネルギー依存という根本的な現代社会の問題を克服するために、コンパクトシティへの道が模索されている¹⁶⁾。コンパクトシティでは都市の機能がその中心に集約され、人々が電車やバスといった公共交通、および自転車や徒歩といった交通手段を主に用いて移動することで、賑わいのあるまちづくりが目指される。

近年、藤井らは交通行動が居住地選択に及ぼす影響についての調査研究を行い、居住地選択行動がそれ以前の交通行動選

択の影響を受ける事を指摘した。これにより、コミュニケーション施策を中心としたソフト施策であるモビリティマネジメントによりコンパクトシティへ都市を導くことが出来る可能性を指摘した²¹⁾。本研究では、藤井らの仮説を前提としてつづ、自動車利用を抑制するどのような施策が個人の交通行動変化と居住地選択行動変化を介して、都市構造の変化を生み出していくのかをマルチエージェントシミュレーションを用いて構成的に検証し、その構造について議論する。また、あまり注目されてこなかった自転車に対する施策について、同シミュレーションモデルを用いて検討する。

2. 研究背景

2.1 コンパクトシティとモビリティマネジメント

近年、地方の都市の多くが無個性化し郊外化していると指摘される。この一因は自動車の急速な普及にあり、このモータリゼーションが都市を低密度に広げ、また住人の生活スタイルを変容させていると考えられている²⁸⁾。この都市の変化はマクドナルド化やファスト風土化などと形容される^{5), 19)}。その弊害は、ガソリン消費の増加だけでなく、警察などの公共サービスの維持コストの増加や、住人の匿名化、コミュニティの喪失、中心市街地の没落など多岐に渡る。この問題を解決し、コンパクトシティを実現する事が多くの地域、人々、行政によって目指されている。

コンパクトシティとは都市機能を高密度に集約し、人々がコンパクトに住まう町の形である^{16), 25)}。その定義は、分野、関係者毎にゆらぎがあり完全な了解はえられていないが、様々な定義の中にも、二点ほどの共通点が見られる。一つは、都

* 立命館大学

** 北陸先端科学技術大学院大学

* Ritsumeikan University

** JAIST

市空間がコンパクトになっている事、もう一つは、クルマ中心でなく公共交通や歩行者を中心としたまちづくりである事である。歩行者を中心としたまちづくりはジェイコブスなどにより古くから主張されてきたが、街路のもつコミュニティ機能など、多様性を内包したまちづくりは、マクロ視点の都市計画では見落とされがちであったが、近年は重要な事項として認識されてきている³⁾。しかしながら、コンパクトシティを如何にして実現するかは難しい問題となっている。

一方で、モータリゼーションからの脱却は、石油の枯渇を背景としたエネルギー問題を鑑みても喫緊の課題であり、まちづくりの課題と関係させながら議論されてきている。その中で、脱クルマを実現する為の施策としてモビリティマネジメントが注目されている。モビリティマネジメントとは当該の地域や都市を「過度に自動車に頼る状態」から、「公共交通や徒歩などを含めた多様な交通手段を適度に(＝かしこく)利用する状態」へと少しずつ変えていく一連の取り組みを意味するものである¹⁷⁾。モビリティマネジメントの手段として、公共交通の整備では新型路面電車 LRT の導入が注目を集めているし^{26), 27)}、また、パークアンドライドやロードプライシングなどの施策も注目を集めている。一方で、近年のモビリティマネジメントの研究においては、トラベルフィードバックプログラム (TFP: Travel Feedback Program) を始めとしたコミュニケーション施策が注目されている^(注 1)。これは対象とする人々、一人一人と個別のかつ大規模にコミュニケーションをとることを通じて一人一人の意識と行動の変容を促すものである¹⁷⁾。このように道路の敷設や公共交通の整備と行ったハード施策のみならず、コミュニケーションや情報提供、料金体系の改善などのソフト施策も導入することで脱モータリゼーションを実現する研究・施策がなされている。

コンパクトシティを実現する為には土地利用や交通行動の変容に関わる施策を一体的に実現することが重要であると言われるが、近年、モビリティマネジメントとコンパクトシティ形成の関係性が指摘されている。谷口らは、都市のコンパクト化と共に、モビリティ・マネジメント施策を協調させる事の必要性をシナリオ分析から指摘している¹¹⁾。また、藤井らは転居前の交通行動が習慣として転居後にも引き継がれるために生じる、居住地選択行動への影響を指摘し、高崎市を対象としたアンケート調査を通して検証している^{21), 23)}。つまり、クルマに乗っている住人は転居先でもクルマに乗る可能性が高く、故に、クルマに乗ることを基準として転居先を決定するという考え方である。これを認めると、モビリティマネジメントを通して、住人のクルマ利用を控えさせることで、徐々にクルマを利用しないことを前提とした転居を誘発でき、結果として町をコンパクトシティにすることが出来ると考えられる。これらを踏まえ本稿では、上記の藤井らの仮説が実際に機能しているとした際に、都市の形がどのように変化するのかを、マルチエージェントシミュレーションを通して検証する。

(注 1) オーストラリアのパースで大規模な TFP 施策「トラベルスマート」が実施され、成果を上げた。日本でも、京都府や札幌市⁴⁾など多くの地域での導入事例がある。

2.2 都市と交通のマルチエージェントシミュレーション

マルチエージェントシミュレーション^(注 2)を始めとした計算機実験を通して都市や交通の動態について研究がなされてきている。マルチエージェントシミュレーションは系に存在する個々の主体をエージェントとして表現し、これら全ての動きをシミュレーションすることを通して全体の挙動、及び個々の挙動とその関係性を分析する手法である。松中や中川らは都市内交通シミュレーションを用いてパッケージ施策や LRT 導入の評価を行っている¹⁴⁾。奥嶋らは都市交通政策のための人工社会モデルを構築し日常的な交通行動変化を分析している⁶⁾。

これらのモデル化として、都市の政策評価の為の数値計算の枠組みは一体一体を別にみて交通移動時に各エージェントの座標位置を考慮しながら検討する座標システムよりも、ゾーン単位で考慮するゾーンシステムで検討される場合も多い。戸川らはゾーンシステムの上で、土地利用モデル、買物行動モデルを構築し政策評価を行っている^{9), 10)}。松本らはゾーンシステムをとった上で数理計画法に基づいて最適な都市の設計を検討している。しかし、計算量の問題が生じることが指摘されている¹⁵⁾。これらに対して、菊池らは座標システムを導入して生活行動シミュレーションを行う手法を提案している⁸⁾。交通行動の意思決定を個々のエージェントのシンプルな意思決定問題およびその学習問題に還元出来る場合には個々のエージェントの動きを座標上でモデル化の方が効率的な場合もある。本稿でも座標システムによるアプローチをとる。

また、都市計画の研究における多くの研究では、シミュレーションを行う際に、ある地域を想定しそのパラメータを模擬し、予測を行い評価を行おうとしている。しかしながら、マルチエージェントシミュレーションの特性上、また、社会システムが開放系であるという特性上、数値レベルでの予測は非常に困難である。それゆえに、構成的アプローチでは、個別的な予測を直接的に問題にするのではなく、大胆に簡略化したモデルを用いて、構造的なレベルの検討を行うという研究の方向性が存在する²⁾。特にシステムの創発的な振る舞いを見る際にこれらのアプローチは有効となる。本稿での研究アプローチは後者に属する。

本稿では、ミクロな意思決定としての住人の交通行動と居住地選択の関係性を仮定した上で生じる、都市構造の変化というマクロな現象を検討することを目的とする。土地利用と交通行動の相互依存の動態を検証した先行研究としては、鈴木らの研究がある。鈴木らは交通行動に加え、土地利用を内生変数化した DCUE (Dynamic Computable Urban Economic) モデルを提案し岐阜市における政策評価を行っている³⁰⁾。これに対して、本稿では、仮想的な都市を対象として、政策が都市のトポロジカルな形状に与える影響を検討し、また、現在、考えられているモビリティマネジメント施策をとった際の諸変数に関わる隠れた因果を検討する事を目的として研究を行う。

2.3 都市と創発システム

都市は多くの住人が住まい、多くの利害関係者が生態系と

(注 2) エージェントベースモデリング (ABM) もほぼ同義である¹³⁾。

して接続されながら作動しているシステムである。それらの行動主体は当然ながら自律して作動する。一方で、その都市における建物や交通機関の多くは人工的に生み出された物でありながら、日々の行動主体の行動を制約する。これはまさに、ミクロな自律的行動がマクロな状態変数により制約されるとする創発システムの特性であり、ミクロ・マクロループの顕著なる例である。しかしながら、都市のダイナミクスはこれまで自律分散システム、創発システムの文脈では活発には議論されて来なかった。

例えば、交通行動をとっても、一般的に人間は住居から勤務地までの最短ルートをとるように学習するが、その経路学習は住人の居住地、勤務先、道路形状、公共交通機関の整備状況などを制約条件としてなされる。しかし、長期で見ると、居住地や勤務先は移転する可能性があり、また、公共交通や道路は整備されたり改廃される可能性がある。そしてまた、この移転や改廃は住人の交通行動にも依存するという事態があるのである。これは都市と交通行動とのミクロ・マクロループとして捉えることが出来る。

都市を創発システムとして捉えることは、都市が直接制御・直接設計可能であるという考えを事実上捨てることを意味している。これはコンパクトシティの設計論を考える上でも非常に重要である。民主的な近代国家においては、既存の都市を行政の力により強制的に誰かが望む姿に変容させることや、また、望む都市を新たに生み出すことは現実的には不可能である^(注3)。つまり、我々は直接的に都市を所望な状態へと制御することは出来ず、諸々の施策を通じて民間の行動選択、投資行動にバイアスをかけてコンパクトシティへと間接制御をかけるより他ない^(注4)。しかしながら、都市の中の事象は相互に関係付いており、どのような施策がどのような動的な変化を都市に与えるかについては不明確である。そこで、マルチエージェントシミュレーションにより、これらの変化を検討することが考えられる。つまり、コンパクトシティの設計論は理想状態を指し、それを直接設計する「つくる設計論」から、徐々にその状態に近づくように環境条件をととのえる「育てる設計論」をとる必要があるのである。

3. シミュレーションモデル

本稿では、前節で述べたように簡略化された都市モデルを用いて、環境条件に応じた住人の交通行動選択と居住地選択から組織化される。都市の形状変化を追う。各エージェントは日々、通勤もしくは通学、購買の為の移動などを想定したトリップを行い、その時に用いる交通手段を自らの評価関数に従って学習する。これらにより習慣が固まったところで、各エージェントが順に転居を行うという流れでシミュレーションを行う。以下に、シミュレーションの設定について示す。

(注3) 権力者が絶対的な権力をもった古代王国などでは都市一つを生み出すことも可能ではあったが、各個人の所有権が保証された民主主義国家では難しい。

(注4) さらに踏み込むと行政の施策の意思決定すら様々な利害関係の中で制約されており、系の外部からの制度設計自体が不可能であると捉える視点も重要であり得る¹⁸⁾。本稿ではこの立場はとらず、あくまで間接制御自体は可能であるという立場をとる。

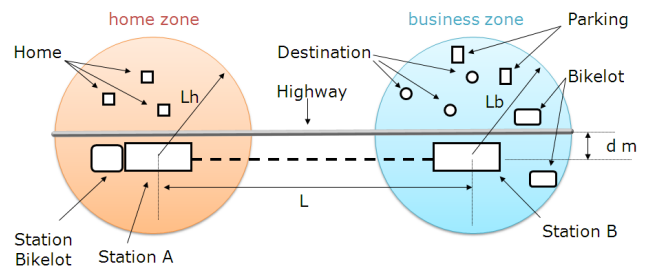


Fig. 1 Simple urban model

3.1 都市モデル

本稿では交通行動変化と居住地選択行動変化を同時に議論するために、単純な都市モデルを導入する。Fig. 1 に都市モデルの概観を示す。交通行動選択において、各エージェントは総移動コスト (total travel cost) に基づいて交通行動を決定する。総移動コストは時間コスト、料金コスト、疲労コストの三つのコストの重み付き和として計算される。エージェントは交通行動が学習を通して一通りに収束した後、次の居住地を現在の利用している交通手段を前提として選択するという流れで、都市構造の変化を追う。交通手段とは移動を用いる際に用いる交通手段 (徒歩、自転車、バスなど) を指す。

シミュレーション空間上には二つの領域があり、一つが居住空間 (home zone) で、もう一つが商業空間 (business zone) である。前者にはエージェントの日々の交通行動の起点となる居住地 (home) があり、後者には交通行動の終点となる目的地 (destination) がある。目的地は、店舗やオフィス、学校など多くの種類の施設を含むものとする。各エージェントは日々、このいずれかの目的地へと通勤や購買の目的で移動するものとする。ただし、これら居住空間と商業空間は便宜的に名付けるものであり、厳密な境界はなく、実際にはそれぞれ居住地と目的地の分布により表現される。

居住空間と商業空間はそれぞれ一つずつの駅を持つ。駅 A と駅 B がそれぞれ居住空間と商業空間の中心に置かれる。二次元の座標系がこの都市モデルには定義され、 i 番目の居住地は (x_i^h, y_i^h) の座標を持ち、 j 番目の目的地は (x_j^d, y_j^d) の座標を持つものとする。原点は二つの駅の中点にとる。二駅間の距離は L とし 駅 A と駅 B がそれぞれ $(-L/2, 0), (L/2, 0)$ に置かれる。

居住地の初期値は駅 A を中心としたガウス分布に基づいてランダムに配置される。また、目的地は駅 B を中心としたガウス分布に基づいてランダムに配置される。それぞれの分布はそれぞれ L_h と L_b の標準偏差をもつ。

全ての地点は連続的に接続され、エージェントは歩行、自転車での移動及び車での移動によりこの連続な空間を移動できるものとする^(注5)。これは、全ての空間に於いて均一な密度で道路が配置されているという大胆な過程である。本稿では交通行動と居住地選択行動の変化に伴う都市の動態を可能な限りシンプルな系で観察するためにこのような仮定を採用する。また、幹線道路が二駅間を結ぶ線路の $d[m]$ 北を走る。エージェントは幹線道路では他の空間よりも高速に移動することが出来る。また、エージェントは他の移動手段によ

(注5) ただし車の移動については渋滞の効果が考慮される。

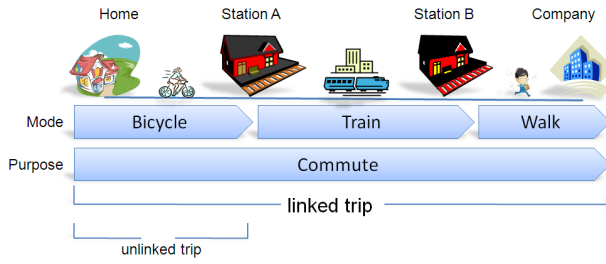


Fig. 2 linked trip and unlinked trip

り幹線道路を移動することは出来ない。また、幹線道路は特定の入り口を持たず、エージェントは y 座標が幹線道路のそれに到達した時点で幹線道路に乗り入れる事が可能になる。

また、駅 A と商業空間内には駐輪場が置かれ、商業空間内には駐車場も置かれる。商業空間内の各駐輪場、駐車場は駅 B を中心としたガウス分布に従って配置される。また、駐車場は民間企業により運営されていると考え、交通行動学習の終了後に利用率が非常に小さい駐車場は除去される。

3.2 交通行動

各エージェントは毎日、居住地から目的地へ向かう。各エージェントの日々の交通行動は、それぞれのトリップの交通行動の価値に従った ϵ -greedy 法により確率的に決定される。日々の交通行動の総移動コストは時間コスト、料金コスト、疲労コストの三つの重み付き和により計算される。この重みを本稿では選好バイアスと呼ぶ。

3.2.1 トリップ

交通行動分析の分野では人の移動はトリップという単位で認識される。出発点から目的地への一連の交通行動は交通行動分析の分野では目的トリップ (もしくは、linked trip) と呼ばれる。その人が複数の交通手段を用いて目的地にたどり着いた場合でも、それら一連の交通行動をリンクトリップと呼ぶ。一方で、リンクトリップの要素となる、一単位のトリップを手段トリップ (もしくは、unlinked trip) と呼ばれる。Fig. 2 に示すように、たとえば、家から会社までの移動は目的トリップであり、家から駅 A、駅 A から駅 B、駅 B から会社への移動は手段トリップである。

我々の都市モデルでは、Fig. 3 に示すように、8種類の目的トリップを想定する。これら8個の選択肢は次節で定義される各目的トリップの価値に基づき ϵ -greedy 法によって確率的に選択される。手段トリップとして 徒歩、自転車、自動車、及び電車 が定義される。Fig. 3 内の 手段トリップ で自転車で駅 A に向かっているにもかかわらず、駐輪場を経由していないものは、駅前に違法駐輪している事を示す。違法駐輪を行う自転車は確率 P_r で撤去され、エージェントは罰金としてのコスト c_R を支払うことになる。

Fig.3 中の各トリップについて、1,2,8 は電車利用を行うが、1 は自転車で駅まで行き駐輪場に自転車を停める [Train], 2 は違法駐輪する [Train(il.)], 8 は徒歩で駅へ行く [Train(Walk)]. 5,7 は自転車で直接目的地へ向かうが、5 は目的地そばの駐輪場に自転車を停め [Bicycle], 7 は目的地そばに違法駐輪する [Bicycle(il.)]. 4,6 は自動車で直接、目的地へ向かうが、4 は幹線道路を用いず直接目的地へ向かい [Car], 6 は幹線道路

を用いて目的地へ向かう [Car(H)]. 角括弧 [] 内は、それぞれのトリップの略称を示しており、後に実験結果の考察時に用いる。

手段トリップの中で、最も代表的な交通手段は代表交通手段と呼ばれる。基本的に代表交通手段となる優先度は電車、自動車、自転車、そして徒歩の順である。

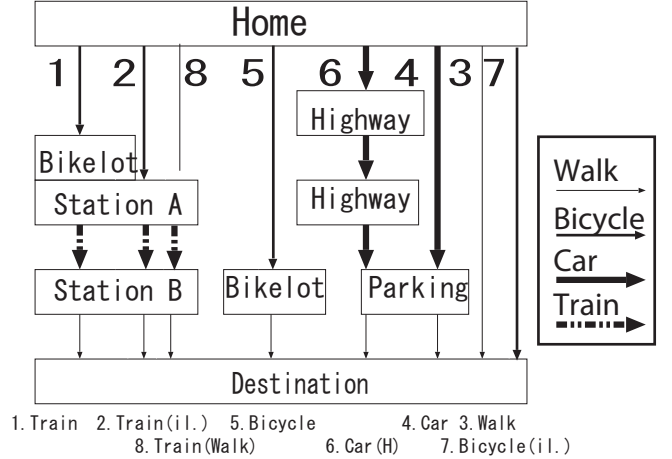


Fig. 3 Variety of trips

3.2.2 コスト

それぞれのエージェントは i 番目の手段トリップの総移動コスト C_i に基づいて各目的トリップの価値 V_i を学習する。

- 総移動コスト C_i

$$C_i = \omega_T C^T + \omega_M C^M + \omega_F C^F \quad (1)$$

$$\omega_T, \omega_F, \omega_M \geq 0 \quad (2)$$

C^T , C^M , と C^F はそれぞれ 時間コスト, 料金コスト, 疲労コストを表す。同様に, ω_T , ω_F , と ω_M はそれぞれ時間コスト, 料金コスト, 疲労コストの選好バイアスを表す。それぞれの値はエージェントにより異なる。本稿の実験では、これらを一定とした。

- 時間コスト C^T

$$C^T = \eta^T T \quad (3)$$

ここで T はエージェントが出発地から目的地に到達する時間であり, η^T は時間をコストに変換する係数である。

- 料金コスト C^M

$$C^M = c_b + c_c + c_t + c_G T_c + c_R. \quad (4)$$

料金コストは駐車場代金 c_c と、駐輪場代金 c_b , 電車賃 c_t , ガソリン代 $c_G T_c$, 及び駐輪撤去のペナルティ c_R の和として表現される。ガソリン代金は運転時間 T_c に比例する。もし、エージェントが違法駐輪を行った場合には、確率 P_r で撤去される。

- 疲労コスト C^F

$$C^F = (F_w T_w + F_b T_b + F_c T_c + F_t T_t) + F_{con} \quad (5)$$

T_w, T_b, T_c, T_t はそれぞれ歩行, 自転車, 自動車, 電車による移動時間を表す。 F_w, F_b, F_c, F_t は時間からコストへ変換す

る係数である。これに渋滞による疲労コストを表す F_{com} を足すことで疲労コストが計算される。

総移動コスト C_i は毎日エージェントが目的地に着く度に計算される^(注 6)。総移動コストを受け取った後に、エージェントは i 番目の 目的トリップの価値を下のように変化させる。

$$V_i \leftarrow \alpha(-C_i) + (1 - \alpha)V_i \quad (6)$$

日々の交通行動はこの価値に基づいた ϵ -greedy 法により毎日決定される。 ϵ -greedy 法では、最も価値のあるルートが $1 - \epsilon$ の確率で選ばれ、別のルートがランダムに確率 ϵ で選ばれる。 ϵ は下式に従って ($\gamma < 1$) 徐々に減衰させる。

$$\epsilon \leftarrow \gamma\epsilon \quad (7)$$

ϵ は試行を重ねる度に徐々に 0 に向かう。

3.2.3 渋滞の影響

エージェントが渋滞の中を移動した際には、追加での時間コストと疲労コストを考慮する。本稿のモデルではエージェント周辺のエージェントの密度が D_0 [agents/km²] より大きくなった際に渋滞が発生すると考える。

渋滞下における車の移動速度 V_c は以下のようにして決定する。

$$V_c = \max(V_c^{min}, \min(\eta_v \times (D - D_0) + \alpha_v, V_*)) \quad (8)$$

D はエージェント周り 100[m] 四方でのエージェントの密度を表し、 η_v は変換係数を表す。 α_v は定数項を表す。 V_* は車の通常速度を表し、これは道の種類に依存する。つまり、幹線道路では $V_* = V_h$ となり、通常の道路では $V_* = V_c$ となる。これらの式は参考文献⁷⁾を参考に作成した。

渋滞による疲労コストは下記のように算出される。

$$F_{con} = \min(F_{con}^{max}, \eta_{con}D) \quad (9)$$

ここで F_{con} は渋滞による疲労コストを表し、 η_{con} は密度から疲れへの変換係数をあらわす。また、 F_{con} は F_{con}^{max} を超えないものとする。

3.2.4 移動

本稿の実験では、全てのエージェントは居住地を同時に出発する。エージェントは現在の位置から、現在選択している手段トリップのゴールに向かって直進するものとする。また、自転車や自動車で移動するエージェントは合法的に最終目的地に最も近い、駐輪場もしくは駐車場に停めなければならない。

3.3 居住地選択行動

本節では、居住地選択行動のアルゴリズムについて記述する。十分な日数が経過し交通行動が収束した後に、エージェントの一部は自らの居住地を変更する。

まず、居住地を変更することになったエージェントには、いくつかの候補がランダムに提示される。この候補は現在の居住地の分布をガウス分布でモデル化した後に、このガウス分布から生成されるものとする。エージェントはいくつかの候補が提案された後に、この候補の中から、最も自らの総生活コスト C_i^l が最小となる居住地を選ぶ事で転居先を決定する。具体的には、一度、提案された候補地に仮想的に転居した後

に、学習された交通手段を用いて目的地へ移動することで候補地における総移動コスト C_i を見積もる。総生活コスト C_i^l は地代 r_i と総移動コスト C_i の和で表されるものとする。

ここで藤井らの研究²¹⁾に基づき、居住地選択を行うときの総生活コスト計算には転居前の交通行動選択を用いる事にする。

$$C_i^l = r_i + C_i \quad (10)$$

それぞれの地域での地代 r_i は下記に従うものとする。

$$r_j = \eta_r I_j \left(\frac{H_j}{A_j} \right) \quad (11)$$

居住空間、商業空間には一定区画ごとに地代を設定する。本研究においては 1 区画を 100[m] × 100[m] とする。地代は戸川の研究で用いられた土地消費量と地代の関係を示すデータを参考にしている¹⁰⁾。 A_j は一区画の広さを表し、 H_j はその区画で住人や会社が消費する面積を示す。これは、人口の集中が地代を上昇させることを意味する。

転居前に候補地の総生活コスト C_i^l を計算するために各エージェントは仮想的に目的地への移動を行う。この際に、他のエージェントも同時に移動を行うことで渋滞などの影響も加味した上で、それぞれのエージェントは総生活コストを見積もる事が出来る。このようにして、エージェントの居住地選択行動はエージェントの習慣的な交通選択行動に影響を受けることとなる。

4. 実験 1

4.1 実験条件

実験で用いたパラメータを Table 1 に示す^(注 7)。実験では、交通行動選択では 30 日間の学習を行い、その後に居住地選択を行うというループを 10 回行った。この際、一度に転居するエージェントは全体の 1/10 とした。

本実験ではモビリティマネジメントにおけるコミュニケーション施策を極端にした形である (MM X%) 条件と、ガソリン価格を上昇させる (gas price × Y) の二つの施策によって、自動車からその他の交通へのモードシフトと、その波及としての居住地選択行動への影響による居住地の分布変化を検証する。

モビリティマネジメント施策の一つとして TFP (Travel Feedback Program) と呼ばれる施策がある。これは、居住者

(注 7) 全てのパラメータは様々な資料からの断片的な情報に基づき、比較的自然と考えられる値を設定した。徒歩速度、自転車速度は一般的に平均速度 4km/h(66m/分)、16km/h(267m/分)といわれている。また幹線道路での車速度については、国土交通省の統計から一般国道での平均速度が 36km/h(600m/分)であることを参考とした。ガソリン代については国土交通省統計より実走行燃費 9.7km/L、本実験を行った際の平均ガソリン価格が 122 円/L であることから算出した。電車代は JR の普通運賃を元に求めた。疲労コストの係数については、周囲の人間に対する聞き取り調査を行い決定した。具体的にはそれぞれ手段トリップの条件について時間数を変化させながら「どちらが疲れるか?」「電車の運賃がいくら以下なら歩かず電車にのるか?」のような質問を行うことで適切と考えられる値を探索した。違法駐輪罰金は一例として京都市における撤去時の撤去・保管の費用 2300 円に返還場所まで取得しにいく際のコストを多少加味したものとした。しかし、これらは十分に正確な値とは言い切れず、この値の変化により当然結果は変化するが、本稿ではこれらの微妙な違いに依存しない範囲で議論を進めるよう配慮し議論を進める。

(注 6) 駐輪撤去や渋滞といった不確定な事象により、同じルートであっても総コストは毎回変化する。

Parameter	initial value (unit)
Number of agents	1000
Number of homes	1000
Number of destinations	1000
ϵ	0.7
α	0.5
γ	0.94
Walk speed V_w	66(m/min.)
Bicycle speed V_b	267(m/min.)
Car speed V_c	450(m/min.)
Train speed V_t	$L/7+350$ (m/min.)
Bicycle speed V_{ch}	600(m/min.)
Walk fatigue cost T_w	220
Bicycle fatigue cost T_b	80
Car fatigue cost T_c	20
Train fatigue cost T_t	40
gas price c_G	0.01(yen/m)

Parameter	initial value (unit)
Train fare c_t	$L \times 0.04$ (yen/m)
η^T	30(yen/min.)
Number of bicycle parkings	1000
Number of car parkings	1000
Bicycle parking fare c_b	150(yen)
Car parking fare c_c	800(yen)
Distance between two stations L	4000(m)
Distance between the highway and the rail track d	10(m)
home zone size L_h	3200(m)
business zone size L_b	3200(m)
Ratio of removal of illegal bicycle P_r	0.5
Illegal bicycle penalty c_R	3000(yen)
Car parking capacity	4
Size of a home	140(m^2)
Rent coefficient η^r	1000
Zone size	100(m^2)

Table 1 Parameters

一人一人にコミュニケーションを通して、自動車から公共交通への乗り換えを様々な情報提供を通して実現していくアプローチである¹⁷⁾。これは、コストへのアプローチではなく、社会的な態度へのアプローチであると言われる²⁹⁾。目に見えるコストの変化ではなく、意思決定に於ける態度にアプローチして交通行動を変化させようと言うものである。このシミュレーション上の表現として、(MM $X\%$) 条件では、 $X\%$ の自動車利用者が電車利用に乗り換えるように変化させられるとする。もう一つの条件である (gas price $\times Y$) 条件ではガソリン価格が Y 倍になるとする。この価格上昇は原油の枯渇による石油価格の高騰が原因であるとしても、政策的に炭素税などの措置により高騰したととらえても構わない。これら前提の下で、(MM 0%, 20%, 50%, 100%), および (gas price $\times 2, \times 5, \times 10, \times 100$) の条件の下で実験を行った。

4.2 実験結果

Fig. 6 は居住地区、商業地区のそれぞれの初期分布をしめしている。黒い正方形が二つの駅を表している。また、それぞれの実験条件下で3回の実験を行い、その平均の結果を下に示す。学習初期において各交通手段の価値は0で初期化されるために交通行動の分布は確率的に一樣となる。

各試行において、エージェントは開始後、それぞれの条件下で学習をすすめ30日間の学習で交通行動を固定化させて

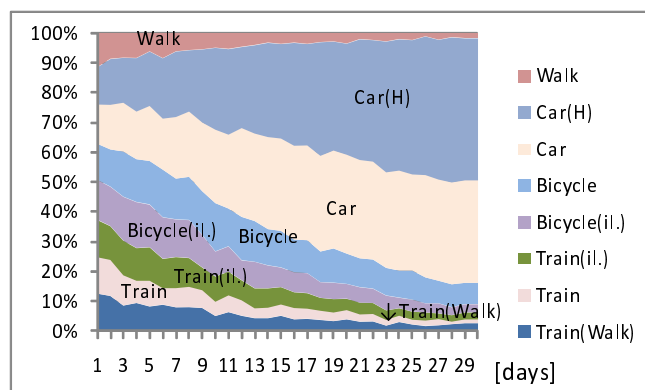


Fig. 4 Transition of utilization ratio of each travel mode

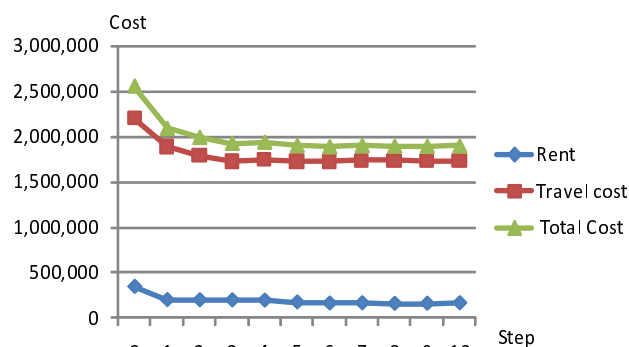


Fig. 5 Transition of each cost for each iteration of residential choice behavior

いった。この際の学習過程の一例を Fig.4 に示す。横軸は日数を示し、縦軸は各リンクトリップの分担割合を示す。

また、交通行動の変化のみならず、転居を繰り返すことによって、エージェントは自らの支払うコストを減少させていく。Fig.5 に実験結果の一例として、各転居のステップ毎のエージェントの地代 (Rent) と総移動コスト (Travel Cost) と総生活コスト (Total Cost) の全エージェント和の変化を表示する。全体としての総生活コストが減少するように系が変化して行っていることがわかる。

Fig. 7 は何の政策もとられなかった際の最終的な居住地の分布とそれぞれの交通手段の利用率を示す。居住地の分布は商業地区の周辺にひろがり、多くの人は車を用いて、目的に向かい、少しの人だけが他の交通手段を用いた。

Fig. 8 は全ての自動車利用者が電車を使うように転換された際の、最終的な居住地の分布と交通手段の利用率を表している。交通行動の変化に伴い、それが有利に働くような居住地へ向かうために、居住地の分布がコンパクトになっている。

Fig. 9 はガソリン価格が100倍に跳ね上がった場合の結果を表している。この条件下でも、やはり都市の構造はコンパクトになっているが (MM 100%) 条件と比較すると、質的な差がある。この条件下では、コンパクトにはなっているが、居住地区の分布は (MM 100%) 条件に比べると、多少広く分布している。また、居住地区と商業地区の間にクラスターが生まれており、分析した結果、ここに住む人は自転車を用い

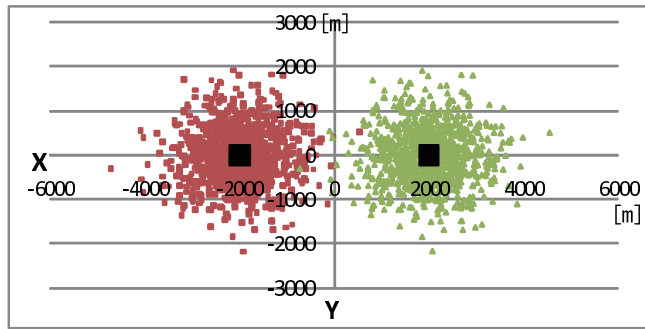


Fig. 6 Initial positions of homes and destinations

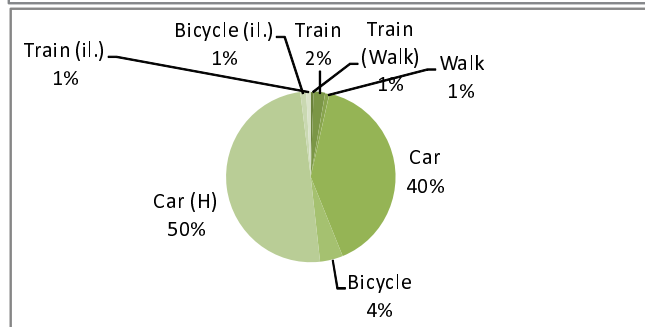
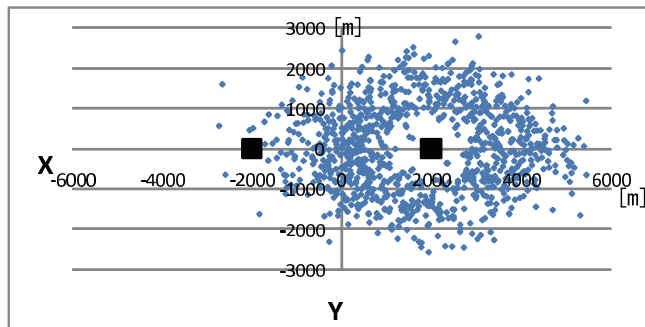


Fig. 7 (top) Final distribution of residences without political measures, (bottom) utilization ratio of each mode without political measures.

Table 2 Comparison of environmental impact of transport modes (Base = 100 for private car)

	Car	Train	Walk	Bicycle
CO ₂	100	30	0	0
Space consumption	100	6	4	2

て、目的地へと直接向かっている事がわかった。

CO₂ の排出量，交通に求められる都市空間，各エージェントの総生活コストの総和を簡便な手法で計算した．文献¹⁾に報告される UPI report (Umwelt-und Prognose-Institut report) がそれぞれの交通手段における環境負荷の相対的な値を Table.2 のように報告しており，単純にこれらの値を，交通手段利用の割合に掛け合わせ比較することにより，相対的な環境負荷の変化を調べた。

Fig. 10 は CO₂ 排出量を，Fig. 11 は必要空間を，また，Fig. 12 は全てのエージェントの総生活コストの総和を表している．これらの縦軸は UPI report の各交通手段の負荷の比率に基づくものであり，相対的な指標のみに意味があり，絶対的な値は意味を持たない。

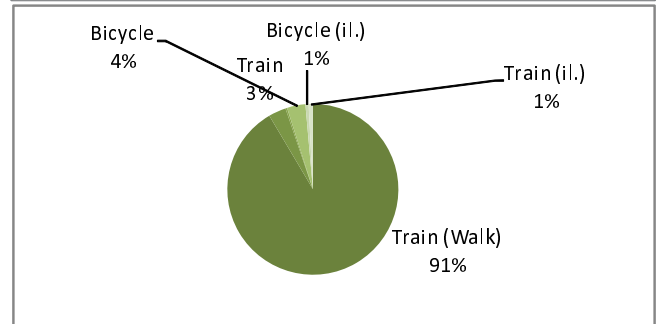
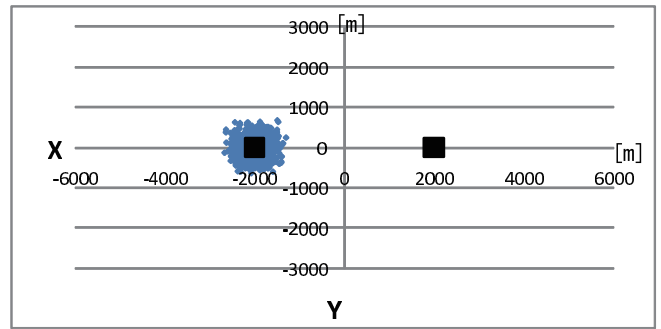


Fig. 8 (top) Final distribution of residences with 100% mobility management, (bottom) utilization ratio of each mode with 100% mobility management.

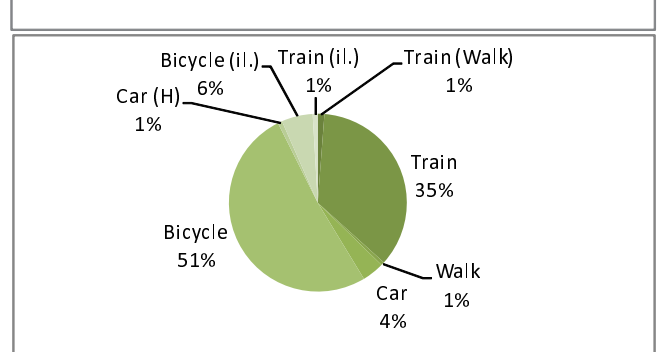
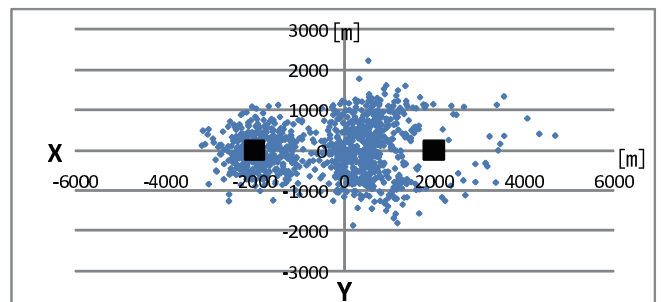


Fig. 9 (top) Final distribution of residences with 100 times gas price, (bottom) utilization ratio of each mode with 100 times gas price.

4.3 議論と考察

強制的な公共交通への乗り換えは CO₂ の排出を十分に減らすことは無かった．MM 100% の条件では，最終的には CO₂ の排出量は半分程度に収まった．しかし，電車へのモードシフトは全体としての総生活コストを急激に上昇させた．これはまた，駅 A 周辺の地価上昇や駅まで歩くことについての疲労コストや時間コストの上昇に起因するものと考えられ

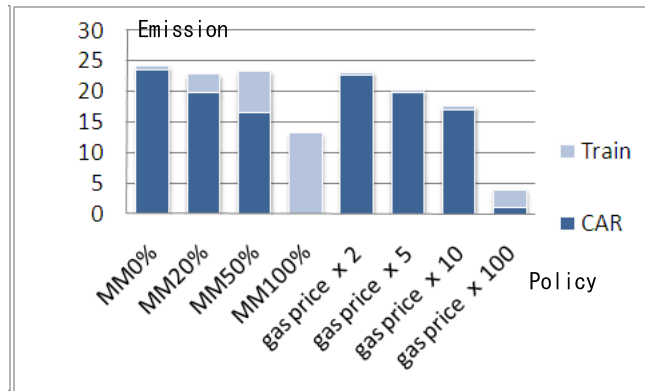
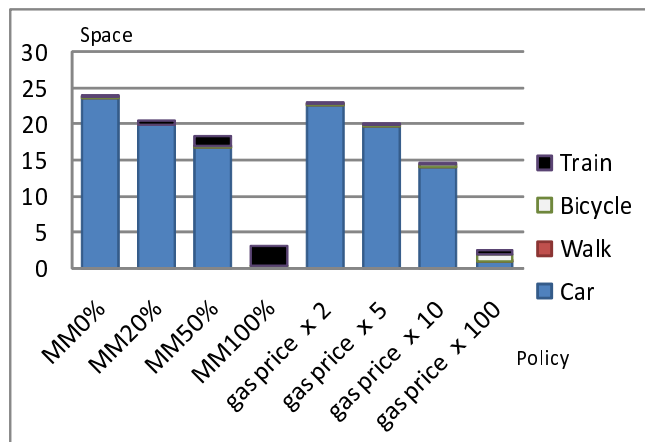
Fig. 10 CO₂ emission for each condition

Fig. 11 Required urban space for transportation for each condition

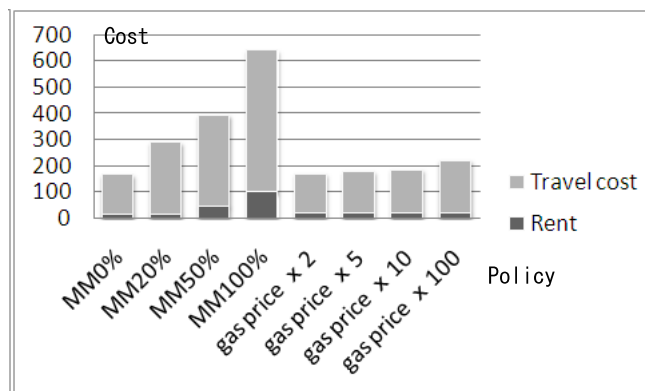


Fig. 12 Total cost of all agents for each condition

る。確かに、居住地の分布はコンパクトになっている。しかし、このような政策は、住民の負担を増大させるのみならず、都市空間の効率的利用や、CO₂ 排出削減の視点からみても、それほど大きな効果は持たないことがわかる^(注8)。

これに対し、ガソリン価格を上昇させると CO₂ の排出と必要空間はなだらかに減少した。MM 100% 条件に比べると居住空間の分布は広がっているにも関わらず、CO₂ 排出や必要

空間は減少した。このことは、直感的なコンパクトさが、必ずしも本質的なコンパクトさに結びつかない事を示唆している。さらに、ガソリン価格の上昇にも関わらず、総生活コストはそれほど増加しなかった。これは、エージェントが交通行動と居住地を柔軟に変化させることで自らの出費を減らした結果である。gas price × 100 (Fig. 9) 条件での特徴的な結果は、自転車と電車がそれぞれにトリップを分担していた点にある。電車は確かに優れた交通機関であるが、一方で、やはり電力消費による CO₂ 排出もある。また、徒歩と電車の組み合わせでは駅の周辺に過度な集中が生まれる。一方で、自転車は本質的に CO₂ を排出せず、都市空間の消費も小さい。自転車を上手く利用した施策の実現が重要になるであろう。

5. 実験 2

次に自転車撤去の影響について考察を行う為に実験を行った。駅前や道路上の駐輪自転車に対して、徹底した撤去を行った場合、自転車の利便性が低下し、結果として自動車へのモードシフトを生む可能性がある。

5.1 コンパクトな都市と自転車

コンパクトな都市を実現するにあたって公共交通の充実と、歩行空間の整備は必要である。国内では、例えば京都市は「歩くまち・京都」憲章を制定し歩行者を中心としたまちづくりを進める意思表示を行っている。その一方で、自転車もコンパクトな都市に適合した移動手段である。藤井は脱クルマ社会においては公共交通を補完する意味で、自転車が必要となることを端的に指摘している²⁰⁾。また、自転車利用は交通のみへの効果に制限されず、健康や環境など多方面において優れた移動手段であることが指摘され、各国で促進策がとられている¹²⁾。

しかしながら、自動車社会である現在の状況から見ると自転車は扱いづらい存在であり、歩道走行における歩行者への危険性、駅前等での違法駐輪など否定的な面ばかりが強調されやすい。また自動車産業、公共交通と異なり利益団体も少ないことから振興策への後押しが弱い。これらから、地方自治体の中には、まちの景観や安全、住環境の維持から違法駐輪に対しては積極的な撤去を行い、抑止することが住「環境」の向上の為に重要であると考えて、自転車に利するよりも、厳しくあたる自治体も多い。藤井らはコミュニケーション施策を通して違法駐輪を減らすというモビリティ・マネジメントの研究を行っている^{22), 24)}。しかし、このような違法駐輪の抑止は、自転車利用抑止に繋がり、場合によっては自動車へのモードシフトを生むのではないかという懸念は、まったく議論されて来なかった。本稿では、マルチエージェントシミュレーションを用いる事で、このような隠れた因果関係を検討する事を目指す。

5.2 実験条件

実験条件は実験 1 と同じ値を用いた。自転車撤去率 P_r のみを変化させ、その場合における各交通手段の負担割合を観察した。 P_r を 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 50% と変化させて実験を行った。

5.3 実験結果

結果を Fig.13 に示す。 $P_r = 0$ 、つまり、撤去を行わない状態では、全ての住人は自由に自転車で走行し、ドアトゥー

(注 8) ただし、これらの結果は UPI report の係数を単純にかけるという評価手法による影響もある。

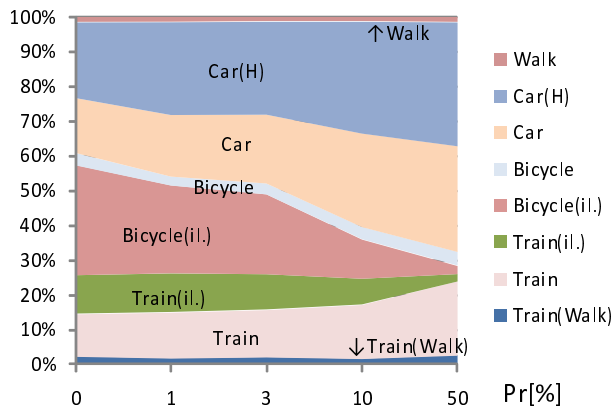


Fig. 13 Changes in trip selection depending on removal probability

ドアであらゆる場所にアクセスすることができる。この利便性から多くのエージェントは自転車で直接通勤を行い、目的地の目の前まで行く Bicycle(il.) を採った。 P_r を 50% まで増大させると、徐々に違法駐輪を行うエージェントは減少し、Bicycle(il.) 及び駅前に違法駐輪をする Train(il.) は約 90% 減少した。Fig.13 では代表交通手段順に分担率を示している。この図から違法駐輪をするエージェントは減少したが、その変化先には大きく二通りあることがわかる。まず、電車利用者の割合が 25% 程度で変化していない事が観察される。これより、駅前に違法駐輪していたエージェントの多くは、駐輪場利用に切り替えたものと考えられる。これは、駐輪場がコスト 150 で利用するため、撤去による損失を考えた場合、期待値としては駐輪場を選択した方が有利になってくるためである。別のいい方をするとエージェントが合理的意思決定をするならば、駅前駐輪のコストは P_r に比例して増加するが 150 を上限として増加しなくなるために、電車利用のコスト増は高どまる。ただし、ここで駅前駐輪場の容量の上限を設けていない事は注意すべきである。もし、これに上限があった場合には、自動車利用など別の交通手段へさらにシフトする事が考えられる。

一方で直接目的地へ向かう交通行動 (Car(H), Car, Bicycle(il.), Bicycle, Walk) では、Bicycle の減少分が、そのまま Car と Car(H) の増加につながっている事が見て取れる。これは多くの目的地において、街の中に点在する駐輪場から目的地への距離があるために Bicycle(il.) から Bicycle へのシフトはコスト高になり、Bicycle(il.) で目的地まで乗り付けられる利便性を活用することができなくなったために、自動車への乗り換えが進んだものと考えられる。自転車は自動車に比べて店舗や事務所の目の前まで乗り付けられることが、重要な機能として多くの利用者に認識されている。本研究でも、まさに、この機能の欠損により自動車利用へのシフトが起きた。

違法駐輪の撤去を行うことでの住人の交通行動の変化は、違法駐輪の代替としての駐輪場の配置と密接に関わっている。通常、直接目的地に向かう場合の自転車利用の駐輪場は分散型になる一方で、電車利用の場合の駐輪場は集中型となり、そ

の運営のコストも変わる。交通法規上は違法駐輪は犯罪であり抑止されるべきであるが、駐輪場を十分量配置出来ず、またそれらに対する適正な価格設定と運用が出来ない現実の系においては、違法駐輪により自転車のトリップ分担率が担保されている可能性がある。コンパクトシティにむけたモビリティマネジメントに於いて自転車の活用は重要である。違法駐輪排除の徹底は自転車という手段トリップのコストを増大させ、都市の動態としては結果的にコンパクトシティへのベクトルと逆のベクトルを与えかねない危険性がある。脱クルマ社会を経て、コンパクトシティ形成の為に、秩序をもった自転車利用の増大、つまり、駐輪場の徹底的な整備とその料金の低価格維持か、もしくは路上駐輪への寛容な取り扱いが求められる。もし、これら無く、自転車撤去を徹底すると、その分担が結局は自動車に逃げることになり、歩行者中心のまちづくりとは逆の結果を得てしまう可能性があることを本実験は示唆している。

6. 結 言

本稿では、個人の交通行動選択と居住地選択を含んだシンプルな都市モデルを提案し、実験を行った。この都市モデル上で自動車利用を減らすための複数の施策を検証し、その質的違いを観察した。結果として、人間の社会的態度に訴え、強制的に電車利用に乗り換えさせるような施策は、電車利用者を増やし、居住地の分布を駅周辺にコンパクトにはするが、一方で、地代の上昇や、駅までの交通コストの増大によってエージェントの総生活コストを増加させることがわかった。一方で、ガソリン価格を上昇させることは、エージェントの総生活コストをそれほど増大させずに、CO₂ 排出を減少させることがわかった。これは、社会的態度に訴求して人々の交通行動を恣意的な方向に変化させることでコンパクトシティを目指す手法は、ガソリン価格を上昇させた上で、何の交通手段を用いるかは自らに選択させる手法に比べて社会的により高価になる事を示唆している。しかし、モビリティマネジメントにおける TFP を自動車から電車への強制的な乗り換えと解釈することは、かなり乱暴であり、より適切なモデル化の方向性が求められる。

また、自転車の違法駐輪問題を本シミュレーションの枠組みの中で議論した。撤去率を変化させることで、自転車撤去を行えば行うほど、その分担割合が自動車利用へ逃げ、結局は脱クルマのコンパクトシティ形成とは逆方向に向かいかねないことが示唆された。

本稿では渋滞については、自動車のみについて考慮したが、電車においても満員電車が疲労コストを増加させることなども考えられるし、通学路などにおいては自転車ですら渋滞することが起こり得る。また、本実験では電車の運賃は一定であるとしたが、実際には利用者の増減にあわせて長期的には変化する。このように、本モデルは、多くのマルチエージェントシミュレーションと同様に、全ての考えうる要素を網羅したモデルでは無く、それらの影響が都市構造変化に関わる議論に強い影響を与えるという仮説を持つ場合には、これらも含めた議論を行うべきである。ただ、構成的研究においては、構成要素をできるだけシンプルに保つことがモデルの見通しを良くするために重要でもあり、今回は考慮しないこと

とした。

都市における各エージェントは制約条件下で徐々に自らのコストを最小化するように、ある程度確率的に行動する。交通行動と居住地選択行動の相互の影響は、この視点からすると、二つの変数のグループを交互に最適化していくプロセスとして理解できる。つまり、ある制約条件の下での社会的厚生最適化問題を自律分散的に解くプロセスとも見なせる。この理解の上から示唆されることは、この最適化手法は局所解に陥るということであり、都市を望ましい状態に至らしめるために採られるべき施策も都市の状態、つまり、初期値に依存して変わるということである。今後は、施策の初期値依存性の見地に立った上での都市のダイナミクスの理解もすすめたい。また、マルチエージェントシミュレーションの文脈においては、提案したシンプルな都市モデルのフレームワーク上で、都市システムに隠れた因果関係を抽出する事が、今後の課題である。

Acknowledgment

本研究を行うに当たり、「不便の効用を活用したシステム論の展開」(平成 21 年度-25 年度、科学研究費補助金基盤研究(B))及び「記号過程を内包した動的適応システムの設計論」(平成 19-23 年度、科研費学術創成、19GS0208 の一部支援を受けた。

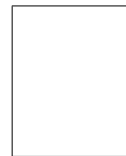
参 考 文 献

- 1) *Implementing Sustainable Urban Travel Policies: Moving Ahead: National Policies To Promote Cycling*. Organization for Economic, 2004.
- 2) Joshua M. Epstein and Robert L. Axtell. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up (Complex Adaptive Systems)*. The MIT Press, 1996.
- 3) ジェーン・ジェコブス. アメリカ大都市の死と生 (SD 選書 118). 鹿島出版会, 1977.
- 4) 谷口綾子, 高野伸栄, 原文宏. かしい車の使い方を旨としたトラベル・フィードバック・プログラムの試み (特集「まちづくり・基盤整備と or」. オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol. 48, No. 11, pp. 814-820, 2003-11-01.
- 5) 丸田一. 「場所」論 - ウェブのリアリズム、地域のロマンチズム (叢書コムニス 08). エヌティティ出版, 2008.
- 6) 奥嶋政嗣, 秋山孝正. 局所的相互作用を考慮した都市交通政策評価のための人工社会モデル. 土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 2, pp. 134-144, 2007.
- 7) 西成活裕. 渋滞学 (新潮選書). 新潮社, 2006.
- 8) 菊池輝, 藤井聡, 北村隆一. 座標システムを導入した生活行動シミュレーションモデルによる交通政策評価. 2001 年度第 36 回日本都市計画学会学術論文集, pp. 577-582, 2001.
- 9) 戸川卓哉, 加藤博和, 林良嗣. 買物行動モデルを用いた大型店郊外立地規制の影響評価. 日本不動産学会 学術講演会梗概集, Vol. 24, , 2008.
- 10) 戸川卓哉, 林良嗣, 加藤博和. 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. 第 37 回土木計画学研究発表会投稿原稿, 2008.
- 11) 谷口守. コンパクトシティとモビリティ・マネジメント. 国際交通安全学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 44-51, 2006.
- 12) 古倉宗治. 自転車利用促進のためのソフト施策 - 欧米先進諸国に学ぶ環境・健康の街づくり. ギョウせい, 2006.
- 13) 出口弘. エージェントベースモデリングによる問題解決-エージェントベース社会システム科学. OR 学会誌, Vol. 49, No. 3, 2004.
- 14) 松中亮治, 谷口守, 若林玄. 都市構造の変化を考慮した L R T 整備の環境影響評価 - 都市内交通シミュレーションモデルを用いて -. 日本都市計画学会 都市計画論文集 都市計画論文集, No. 42-3, pp. 961-966, 2007.
- 15) 松本卓也, 玉置久, 稲元勉. 都市と交通の数値計画モデル. 第

- 21 回自律分散システムシンポジウム, pp. 273-278, 2009.
- 16) 海道清信. コンパクトシティ - 持続可能な社会の都市像を求めて. 学芸出版社, 2001.
- 17) 藤井聡, 谷口綾子. モビリティ・マネジメント入門 - 「人と社会」を中心に据えた新しい交通戦略. 学芸出版社, 2008.
- 18) 谷口忠大, 山田章博, 大島祥子. ソフトシステムズ方法論に基づいた市民参加の場の構築 - 自転車都市・京都への対話空間の取り組み. 第 37 回 知能システムシンポジウム, pp. 287-292, 2010.
- 19) 三浦展. ファスト風土化する日本 - 郊外化とその病理 (新書 y). 洋泉社, 2004.
- 20) 藤井聡. 自転車を巡る都市交通計画論. 交通工学, Vol. 40, pp. 5-9, 2005.
- 21) 藤井聡. 交通行動が居住地選択に及ぼす影響についての仮説検証: コンパクト・シティへの誘導に向けた交通政策に関する基礎的研究. 交通工学, Vol. 43, No. 6, pp. 53-62, 2008.
- 22) 藤井聡, 小畑篤史, 北村隆一. 自転車放置者への説得的コミュニケーション: 社会的ジレンマ解消のための心理的方略. 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, No. 1, pp. 439-446, 2002.
- 23) 藤井聡, 染谷祐輔. 交通行動と居住地選択行動の相互依存関係に関する行動的分析. 土木計画学研究・論文集, Vol. 24, No. 3, pp. 481-488, 2007.
- 24) 萩原剛, 藤井聡, 池田匡隆. 心理的方略による放置駐輪削減施策の実務的検証: 東京メトロ千川駅周辺における事例. 土木計画学研究・講演集, Vol. 34, , 2006.
- 25) 鈴木勉. コンパクトシティ再考 - 理論的検証から都市像の探求へ (都市科学叢書 2). 学芸出版社, 2008.
- 26) 望月明彦, 中川大, 笠原勤. わが国の公共交通政策における富山ライトレールプロジェクトの意義に関する研究. 日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol. 42, pp. 63-68, 2007.
- 27) 土居靖範, 榎田基明, 近藤宏一. LRT が京都を救う - 都大路まちづくり大作戦 (「京都の交通今日と明日」). つむぎ出版, 2004.
- 28) 北村隆一. ポスト・モータリゼーション - 21 世紀の都市と交通戦略. 学芸出版社, 2001.
- 29) 北村隆一, 佐々木邦明, 山本俊行, 森川高行, 藤井聡. 交通行動の分析とモデリング - 理論/モデル/調査/応用. 技報堂出版, 2002.
- 30) 鈴木俊之, 武藤慎一, 小川圭一. 都市の郊外化抑止と中心市街地活性化のための土地開発規制策評価. 土木計画学研究・論文集, No. 19, pp. 196-202, 2002.

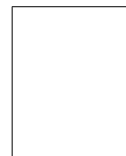
[著 者 紹 介]

谷 口 忠 大 (正会員)



2006 年京都大学工学研究科博士課程修了。2005 年より日本学術振興会特別研究員 (DC2), 2006 年より同 (PD)。2007 年より京都大学情報学研究科にて (PD) 再任。2008 年より立命館大学情報理工学部助教, 2010 年より同准教授。個体と組織における記号過程の計算論的な理解や共生社会に向けた知能情報学技術の応用研究についての研究に従事。京都大学博士 (工学)。計測自動制御学会学術奨励賞, システム制御情報学会学術奨励賞, 論文賞, 砂原賞など受賞。計測自動制御学会, 日本人工知能学会, システム制御情報学会, 日本神経回路学会などの会員。

高 橋 佑 輔



2010 年立命館大学情報理工学部知能情報学科卒業。2010 年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程。主たる興味: マルチエージェントシミュレーション, 地域活性化, コンパクトシティ, 地域通貨