

賑わいが街を変える - 立ち寄り施設と都市動態モデリング -

Bustle Changes the City - Facility for Stopping Off and Modeling Urban Dynamics -

永井 秀幸
Hideyuki Nagai

筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻
Department of Risk Engineering, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
s1530156@u.tsukuba.ac.jp

倉橋 節也
Setsuya Kurahashi

筑波大学大学院ビジネス科学研究科
Graduate School of System Management, University of Tsukuba
kurahashi.setsuya.gf@u.tsukuba.ac.jp

keywords: agent-based model, compact city, urban sprawl, optimal location, policy evaluation

Summary

In this paper, we propose an agent-based urban model in which the relationship between a central urban area and a suburban area is expressed simply. Allocation and bustle of a public facility where people stop off in daily life are implemented in the model. We clarify that transportation selection and their residence selection of residents make an effect to change the urban structure and environment. We also discuss how a compact urban structure and a reduction in carbon dioxide emissions are achieved with urban development policies and improvements on attractiveness of the facility for pedestrians and cyclists. In addition, we conduct an experiment of the exclusion of cars from the center of the city. The experimental results confirmed that the automobile control measure would be effective in decreasing the use of automobiles along with a compact urban structure.

1. 研究の背景と目的

20世紀を通じて世界の人口は急増するとともに急速な都市化が進み、今世紀に入ってもその勢いは衰えるどころか、将来的に都市化とそれ以外の地域の衰退の二極化が更に進行すると予測されている [WUP 14]. 都市化が引き起こす問題のうち、都市構造のスプロール化は数十年来大きなテーマであり続け、多くの都市で深刻な問題として認識されている [Haase 10, Kazepov 11]. 日本では20世紀の初頭から戦後の高度経済成長期にかけて、大都市の周縁部に公共交通機関での通勤・通学を前提としたベッドタウンが数多く開発された。しかし自動車を主たる交通手段とするライフスタイルの一般化により、現在に至るまで低密度な市街地の拡大と、従来の主たる交通結節点であった鉄道駅の周辺で発展してきた市街地の衰退が進展しつつある [Kaido 06, Millward 06].

この状況は、公共サービスの希薄化による生活利便性の低下や近隣コミュニティの喪失、加えて自動車依存による化石資源消費の増大及び大気汚染といった負の連鎖に繋がると懸念されている。今後人口減少及び高齢化が進行し、同時に限られた巨大都市圏への人口集中傾向が続く中でこうした問題の深刻化が危惧され、その対策として、

ヨーロッパの多くの都市と同様にコンパクトシティへの転換が模索されている [Howley 09].

しかし、我々の生活する都市が、個人及び家族や企業といった組織という様々な主体による自律した活動によりボトムアップ的に生成されるシステムであるという見地に立つと [Batty 07], そのダイナミズムを直接制御することの困難さが浮き彫りになる。例えば先の大震災の際、以前に津波で繰り返し大きな被害を受けてきたため家屋の建設を原則禁止する条例が制定された地域があったが、年月を経るにつれ住人たちの短期的な利便の追求の前にそれが形骸化され、結果的に被害の拡大に繋がった [共同通信 11]. また、ジーバーツは、コンパクトシティの実現のためには、個々の利害を持った組織や個人の自由な活動を規制する必要があるが、民主主義の下では強力な計画システムを導入したとしても、市民の資産、人権、ライフスタイルの変化を強制することはできず、コンパクトシティの実現も困難であると指摘している [ジーバーツ 06].

そこで本研究では、自律した住人個人の行動を、強制するのではなく誘導することによって、都市構造を間接的に望ましい方向へ誘導する可能性を、エージェントベースモデル (ABM) を用いて検証する。ABMでは、個々の行動主体と環境との相互作用が反映されるため、複雑な環

境における政策の効果の測定への貢献が期待されている [Jager 07, Railsback 11].

また、都市問題に対する政策を評価するために実際の都市において実験を行うことは多大な費用と時間を要し、また失敗が許されないことからその実行は殆ど不可能である。しかし ABM では、条件を細かく変更しながら何度も実験を行い、複雑な相互作用に起因する現象を容易に観察できる利点がある。

2. 関連研究

2.1 交通行動選択と住居選択を介した都市構造の変化

都市構造のスプロール化に焦点を当てた先行研究には [Brown 06, Vega 09] 等がある。

また、都市のコンパクト化施策とモビリティマネジメント施策を協調させることの必要性 [谷口綾 03] や、自動車依存傾向の低下を目指すモビリティマネジメントによって都市が自ずとコンパクトなものへと変容する可能性 [藤井 07, 藤井 08], 各世帯が地価と就業地までの距離を考慮して居住するゾーンを選択する土地利用モデル [戸川 08] なども指摘されている。谷口らはこれらを踏まえ、自動車利用を抑制するソフト施策が、個人の交通行動選択と住居選択を介して都市構造の変化を生み出していくことを、ABM を用いて構成的に検証した [谷口忠 11]。この研究は、住人の日々の交通行動に干渉することで間接的に都市構造を望ましい方向へ誘導する可能性を示し、都市問題に関する政策による長期的な効果の予測に大きな貢献を果たした。

本研究では、このモデルをベースとしながら、かつて [Jacobs 61] や [Oldenburg 89] において提唱されたインフォーマルな公共空間の重要性が近年再評価されつつある [Glaeser 11, Zukin 09] という現状を踏まえ、住居や就業地・学校以外で、誰もが気軽に立ち寄れる施設や街路といったインフォーマルな公共空間の存在、及びそうした場所にいることで得られる質的な利益を考慮する。なお、本研究における公共空間とは、公共団体により保有及び運営される図書館や庁舎といった場所か、民間団体による商業施設といった場所か、あるいは近年盛んに導入が進められている PPP(Public Private Partnership) のスキームによる公民連携による場所であるか、を問わない。

2.2 立ち寄り利用を想定した施設配置問題

磯野らは、住居と駅などの間の往復移動の途中で地域施設を利用するという、立ち寄り行動を考慮したモデルを用いて、施設利用者の圏域の「卵型」形状が形成されるメカニズムを説明し、図書館は駅の近くに配置することが高い利便性を実現する上で有効であることを示した [磯野 11]。これは、住居から施設への直接的なアクセスを前提とした施設配置モデルと異なり、近年数多く建設・運営

がなされている先駆的な図書館等^{*1}の主たる利用形態のように、通勤・通学のついでに立ち寄り利用される施設の最適配置を明らかにした点に大きな意義がある。

本研究では、我々が転居する際には、職場・学校に加えて、人気のある地域施設や賑やかな商業施設へのアクセスも考慮することが一般的なこと、即ち誘引性の強い公共的施設が利用者の住居の分布そのものを変化させるという、数理モデルでは扱いづらい相互作用のダイナミズムを考慮する。

2.3 本研究の位置付け

上記を踏まえ本研究では、単純化した都市モデル上で、住人エージェントが住居から通勤・通学のため出発し、図書館のような公共的施設への立ち寄りを経て帰宅するという交通行動を想定した ABM を作成する。その上で、その立ち寄りの対象となる施設の配置及びその周囲における賑わい促進施策が、住人エージェントの交通行動選択と住居選択を介して間接的に都市構造を望ましい方向へ誘導させる可能性を検証する実験を行う。

続けて、モビリティマネジメントの一種である、都市環境の改善を目的とした自動車利用抑制施策を併用する場合に関しても、同様に実験を行う。

3. シミュレーションモデル

3.1 実験 1 - 基本モデル

基本モデルは [谷口忠 11] をベースとしつつ、立ち寄り行動の考慮のため住民エージェントの交通行動を往復とすることや、パラメータの精緻化といった修正を施したものである。実験モデルの概要を ODD プロトコルに準拠して表 1 に記述する。ODD プロトコルによる定式化は、実験モデルに対する他人の理解及び再現に際して有効となる [Grimm 10, Railsback 11]。また、各定義式は付録 A に記述する。

§1 都市モデル

図 1 の上部は、中心都市とその周囲の鉄道路線沿いのベッドタウンの関係を簡略化して表現したものである。これは、予め職住分離のゾーニングに則って計画されたと想定している。実験に用いる都市モデルは、その一部を同図の下部のように抽出したもので、各住人エージェントの日々の通勤・通学に対応した交通行動の起点及び終点となる住居からなる住居ゾーンと、その交通行動の折り返し地点となる勤務先・学校からなる目的地ゾーンからなる。それぞれの中心部は東西に 4km 離れており、1 つずつ駅が配置され、その間に鉄道が敷設される。また鉄道の

*1 せんだいメディアテーク (2001), 武蔵野プレイス (2011), 武蔵市図書館 (2013), ぎふメディアコスモス (2015), 英国ロンドンの Idea Store(2002) 等。これらは図書館機能を核としながら、公民が連携してカフェや学習・交流施設など多様なサービスの提供、開館時間の延長等によって、利用者の利便性を向上させ、地域の文化の拠点となっている。

表 1 実験モデルの ODD プロトコル

Overview	
目的	実験 2 では立ち寄り施設の設置とその周囲の賑わい促進施策の実施, 実験 3 ではこれに加え自動車利用抑制施策の実施が, 住人エージェントの交通行動選択及び住居選択を介して, 間接的に都市構造を改善させる効果を検証する.
エンティティ, 状態変数, スケール	エンティティは住人エージェントとその活動の場となる都市モデル (住居, 目的地, 駅, 駐車場, 駐輪場, 実験 2 及び 3 では立ち寄り施設, 等を含む) である. 住人エージェントの状態変数は, 住居の座標, 目的地の座標, 現在の目的トリップ及び各目的トリップの価値のリストである. 都市モデルの平面的な大きさは 150 バッチ四方で, 現実世界では 15km 四方に相当する, 座標は連続値である. モデルは 1 ステップを 1 分として進行し, 全住人エージェントが住居を出発してから再び戻るまでを 1 日とする.
プロセスの概要, スケジューリング	住人エージェントは毎日, 各目的トリップの価値に基づき交通行動選択を行い, 30 日間の学習期間を経てそれを一通りに収束させる. その後, ランダムに選ばれた 1/10 の住人エージェントには新たな住居の候補地が提示され, その中から総生活コストを考慮し転居を行う. この住居選択サイクルを 20 回繰り返した後, モデルは停止する.
Design concept	
	実験 2 及び 3 においては立ち寄り施設の設置とその周囲の賑わい促進施策, 及び実験 3 では自動車利用抑制施策, を通じた住人エージェントの日常活動の間接的なコントロールにより, 都市構造を物理的及び質的に変化させられるという仮説がモデル設計の基本原理である. 住人エージェントは日々の交通行動選択及び住居選択においてコストを最小化することを目標とする. 都市構造の変化は, この目標の実現のための適応行動の結果として創発する. 住人エージェントは日々, 各目的トリップの価値を学習し, 毎日の交通行動をこの価値に基づいた ϵ -greedy 法により確率的に決定する. 移動する住人エージェントは現在の自身の交通手段を知覚できる. 自動車で移動する際には, 周囲の状況に応じて渋滞が発生するという相互作用が発生し, 実験 2 及び 3 においては徒歩又は自転車で立ち寄る際にも周囲の状況に応じて街なか賑わい度を獲得するという相互作用が発生し, 総移動コストに影響を与える. また住居選択の際, 住人エージェントの住居は地代を上昇させるため, 斥力的な相互作用が発生する. 都市構造の物理的及び質的な変化を観察するため, 住居の分布, 各代表交通手段の割合, 総 CO ₂ 排出量及び平均移動時間という指標を定義する.
Details (初期化)	
	都市モデルは目的地ゾーン及び住居ゾーン, 加えてこれらを結ぶ鉄道及び幹線道路等を二次元座標系で簡略化して表現したものである. 住居ゾーンには住人エージェント数 1000 と同数の住居が, 駅を中心とした正規分布に基づきランダムに配置され, 各住人エージェントの初期配置となる. 目的地ゾーンにも同数の目的地が同様に配置される.

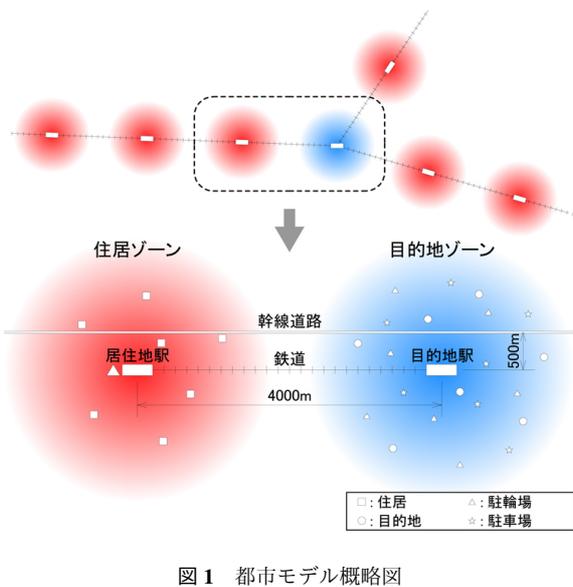


図 1 都市モデル概略図

500m 北側には幹線道路が敷設される. 住人エージェントは徒歩, 自転車及び自動車での移動によりこの空間を自由に移動できる. 住居は初期配置として, 住居ゾーンに住人エージェントと同数が居住地駅を中心とした正規分布に基づき配置され, 目的地ゾーンにも同数の目的地が同様に配置される. また居住地駅には十分な駐輪場が併設され, 目的地ゾーンには目的地と同数の駐輪場・駐車場も同様に配置される.

§2 交通行動選択

各住人エージェントは毎日, 選択された目的トリップ*2に従って通勤・通学を想定した交通行動を繰り返す. 目的トリップは図 2 に示す 8 種類が想定され, 各住人エージェントは目的地へ向かって住居を同時に出発し, 全住人エージェントが目的地に到達するのを待って, 次に住居へ向かって出発する.

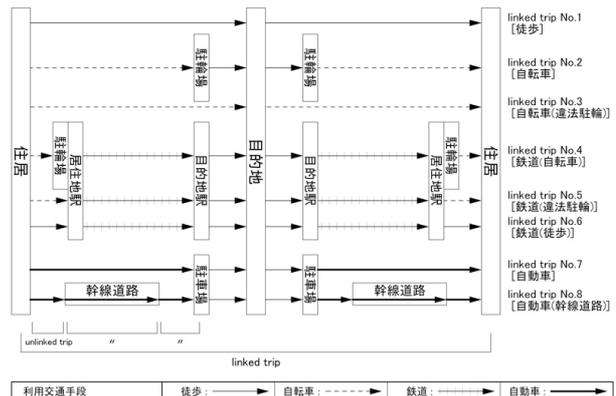


図 2 目的トリップのバリエーション (実験 1)

その後, 住居に戻るたびに総移動コストを計算し, それに従って各目的トリップの価値を変化させる. 翌日の交通行動は, この価値に基づいた ϵ -greedy 法により確率的

*2 出発地から最終目的地へ到着するまでの一連の交通行動を目的トリップ, 目的トリップの構成要素となる各移動手段を手段トリップと呼ぶ. また, 手段トリップの中で最も代表的な交通手段をその目的トリップの代表交通手段と呼ぶ.

に選択される。各住人エージェントは、30 日間の学習期間を経て交通行動選択を一通りに収束させる。藤井は転居前の交通行動が習慣として転居後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実証分析の結果に基づいて指摘しており [藤井 07], 上記の学習はこうした交通行動の習慣化のプロセスに対応する。

§3 住居選択

全住人エージェントが交通行動選択を収束させた後、全体からランダムに選択された 1/10 の住人エージェントは住居を変更する。新たな住居の選択は、総生活コストに基づいて行われる。

住居を変更することになった住人エージェントには、その時点で住居の分布から大きく外れない範囲内で新たな住居の候補地が各々ランダムに 10 か所提示される。各住人エージェントはこれらの中から総生活コストが最小となる候補地を新たな住居として選択する。総生活コストは総移動コストと地代の和とする。この住居選択サイクルを 20 回繰り返した後、モデルは進行を停止する。以降、この基本モデルによる実験をシナリオ A と表現する。

3.2 実験 2 - 立ち寄り施設と賑わいを考慮したモデル

この実験では、目的地ゾーンの内部あるいはその周辺に、前節で言及した図書館のような公共施設を 1 か所配置する。そして、全住人エージェントが目的地に到着するのを待って、同時にその立ち寄り施設に向かって出発し、到着後に住居へ戻る。この際、立ち寄り施設自体の機能や魅力はその場所にかかわらず同じであると仮定し、立ち寄り施設での滞在は考慮しないものとする。即ちこの実験における目的トリップは、図 2 に示す 8 種類に対して、各々立ち寄り施設の立ち寄りを加えた図 3 に示す 8 種類となる。

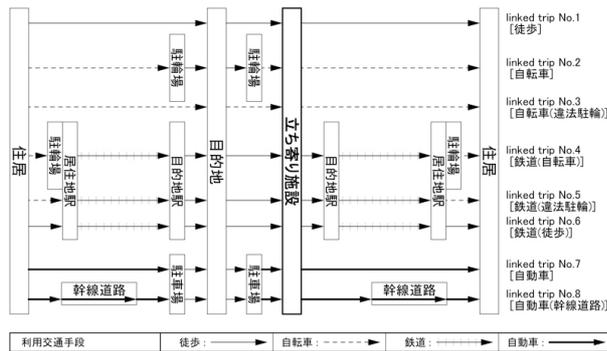


図 3 目的トリップのバリエーション (実験 2)

立ち寄り施設を中心として半径 500m の範囲内では、その影響圏域として賑わい促進施策の実行を考慮する。また、立ち寄り施設にも十分な台数を収容可能な駐輪場・駐車場が併設される。

§1 立ち寄り施設の位置

立ち寄り施設の位置は、

図 4 に示すように以下の 4 通りを想定する。

- B : 目的地駅から北 0.5km, 東 2km の郊外の幹線道路沿い
- C : 目的地駅から南 2km, 東 0.5km の郊外
- D : 目的地駅と同位置
- E : 目的地駅から南 0.5km, 東 0.5km の駅近傍

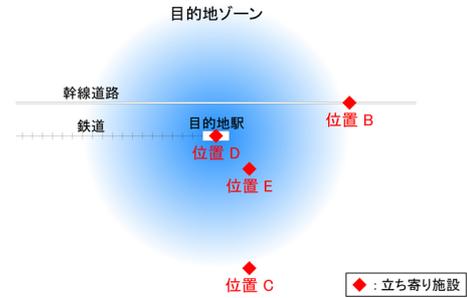


図 4 立ち寄り施設配置バリエーション

§2 街なか賑わい度

住人エージェントが、立ち寄り施設を中心として半径 500m の範囲内を徒歩又は自転車で移動する際に、当該住人エージェントの周囲半径 100m 内を自身と同様に徒歩又は自転車で移動する他の住人エージェントの数 $D_{bust}(person)$ に応じて街なか賑わい度 $B(yen/min)$ が計算される。

$$B = \min(\eta_{bust} D_{bust}, B^{max}) \quad (1)$$

これに選好バイアスを掛け合わせたものが、利得として総移動コストと相殺される。

$$C_i = \omega_T C_T + \omega_M C_M + \omega_F C_F - \omega_B B \quad (2)$$

$$\omega_T, \omega_M, \omega_F, \omega_B \geq 0 \quad (3)$$

C_T, C_M, C_F, B は時間コスト, 料金コスト, 疲労コスト, 街なか賑わい度を, $\omega_T, \omega_M, \omega_F, \omega_B$ はそれぞれの選好バイアスを表す。現実世界では各個人の選好バイアスは各個人ごとに異なるが、本モデルでは全エージェントについて一定とする。

賑わい係数 $\eta_{bust}(yen/(person * min))$ は、当該範囲において通行人の集積に従って、行政主体等がその場所の更なる賑わいをもたらす努力の度合いと捉えることができ、快適な歩道や自転車道の整備, 魅力的な店舗群や公共空間の設置, 及びイベントの開催等で高められる。この値が向上すると、当該範囲を徒歩や自転車で移動する利点も増大し、住人の総移動コストの相殺分も大きくなるため、利得の係数と捉えることができる。本研究では、この賑わい係数の向上に相当する施策を賑わい促進施策と呼ぶ。

ジェイコブズは、公共街路的空間に沿って相当数の店舗や公共の場所が散在していれば、人々がそこを楽しみながら自発的に利用することで、無意識のふれあいや監視のネットワークが形成され、それが都市の公共空間における

平穏をもたらすことを指摘している [Jacobs 61]. またグレイザーは、都市において活動する人々の密度が増大すれば、多種多様な交流が生まれる機会も増加し、それが彼らにとって有益な情報の獲得や創造性の向上といった面で有利に働くことを指摘している [Glaeser 11]. この実験における、通行人の集積に従い住人の総移動コストの相殺分が増大する、即ち住人の利益が増大するという設定は、こうした指摘を根拠としている。

また、徒歩や自転車で移動する場合であっても、通行人の過度な集積は自動車の渋滞に相当する弊害を引き起こす可能性も考えられるが、本研究では、通行人の集積に伴う賑わい促進施策 (快適に通行するための歩道や自転車道の整備) がそうした弊害を緩和すると仮定する。

§3 実験パターン

立ち寄り施設の位置に関して 4 通りと、賑わい係数に関して 0,10,20,30 の 4 通りを組み合わせた条件の下で実験を行う。以降、これらの実験を立ち寄り施設の位置を表す B~E の記号と賑わい係数を並べてシナリオ D10 というように表現する。

3.3 実験 3 - 自動車利用抑制施策を考慮したモデル

市街地における交通渋滞の緩和、歩行者・自転車利用者保護及び大気汚染軽減のための施策として、中心市街地への自動車乗り入れ抑制がある。この実験では、上記のような自動車乗り入れ抑制として、図 5 に示すように目的地駅を中心とした半径 1500m の円周上に、十分な台数を収容できる駐車場が等間隔で 10 か所設置され、この範囲内では自動車は利用できず、自動車利用者は駐車場から徒歩で移動する Park and Walk 施策が実施される。また、通過交通排除の観点から、幹線道路も線路の北方 1500m に移動し、住居選択においても自動車利用者にはこの範囲外の転居候補地のみが提示される。

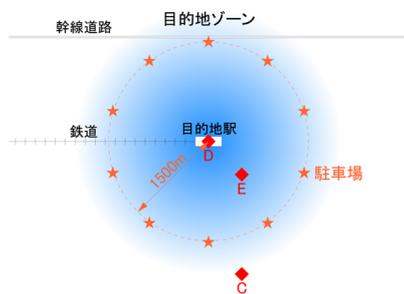


図 5 Park and Walk 駐車場配置図

この実験における目的トリップは、代表交通手段が自動車であるとき、図 3 に示すものと異なる場合がある。即ち、自動車排除範囲内に立ち寄り施設があるシナリオにおいては、立ち寄り施設へ徒歩でアクセスせざるを得なくなるため、図 6 の下部に示す linked trip No.7' 又は No.8' が選択される。

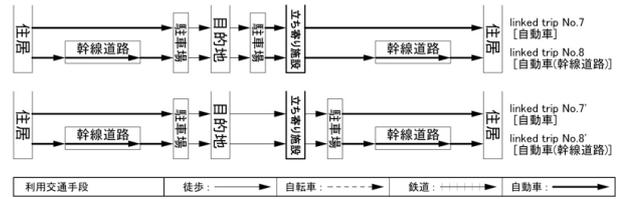


図 6 目的トリップのバリエーション (実験 3)

立ち寄り施設の目的地駅からの距離の違いについて考察するため、立ち寄り施設を配置しない場合に加え C,D,E の 3 通りの配置と、賑わい係数に関して 4 通りを組み合わせた条件の下で実験を行う。以降、これらの実験を先に用いた A,C~E の記号と賑わい係数、及び parking の頭文字の p を並べてシナリオ Ep20 というように表現する。

3.4 実験の実行

都市モデル及び住人エージェントのパラメータの設定値を付録 B の表 B.1 及び表 B.2 に記す。これらは、[谷口忠 11] を含めた様々な資料からの情報に基づき妥当と考えられる値を設定した。現実の一部を反映した値に過ぎないが、本研究ではこれらの微細な変化に考察が左右されないよう配慮して議論を進める。

各実験は同条件で 10 回繰り返し、最終的な結果を以下の指標において観察し、都市構造の変化を評価する。

- 住居の分布 (代表交通手段で色分け)
- 各代表交通手段の割合
- 総 CO₂ 排出量 (シナリオ A を基準とした百分率で表現) *3
- 平均移動時間

各代表交通手段の割合、総 CO₂ 排出量及び平均移動時間は 10 回の実験結果の平均値を、住居の分布はそのうちの任意の 1 つを示す。モデルの作成及び実行にはフリーソフトウェアの NetLogo [NetLogo 99] を使用した。

4. 実験結果 1 - 基本モデル

図 7 は実験開始前の住居 (赤色) と目的地 (灰色) の分布を示したものである。図 8 はシナリオ A の最終的な住居の分布、表 2 は同じく代表交通手段の割合、総 CO₂ 排出量、平均移動時間を示したものである。

表 2 実験 1 の結果 - 代表交通手段の割合、総 CO₂ 排出量、平均移動時間

	代表交通手段の割合				CO ₂ 排出量	移動時間
	徒歩	自転車	鉄道	自動車		
A	1.3%	3.9%	4.8%	90.0%	100%	14.2min

*3 各交通手段における旅客 1 人の輸送距離あたりの CO₂ 排出量 [国交省 13] (付録 C に記す) に最終的な全住人エージェントの自動車による総移動距離、及び鉄道の利用者数から計算される鉄道での総移動距離を掛け合わせて計算する。

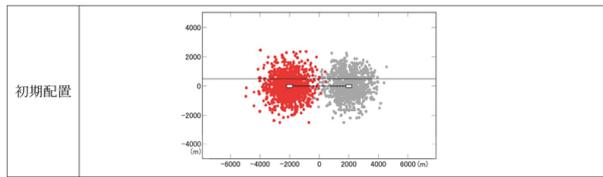


図7 住居と目的地の初期配置

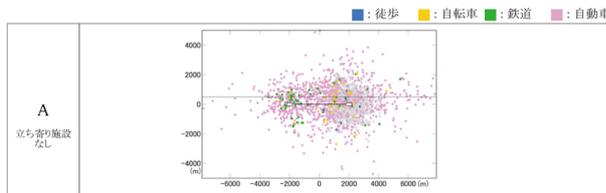


図8 実験1の結果 - 住居分布

自動車利用者が約90%に達し、その住居の大多数が初期配置である住居ゾーンを離れ、目的地ゾーンの中心部から周辺までスプロール状に広く分布し、残りの少数が徒歩、自転車又は鉄道利用者となっている。

5. 実験結果2 - 立ち寄りと賑わいを考慮したモデル

図9及び表3はシナリオB0~30, C0~30, D0~30, E0~30の結果を示したものである。

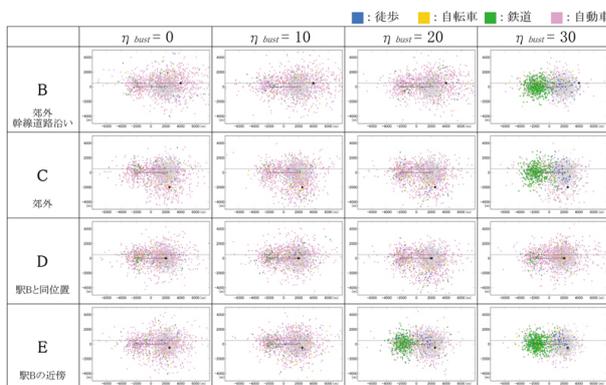


図9 実験2の結果 - 住居分布

賑わい促進施策を全く実施しないまま立ち寄り施設の配置を変化させたB0, C0, D0及びE0では、いずれもAと同様に、自動車利用者が約90%に達し、その住居がスプロール状に広く分布する。B0及びC0では遠距離にある立ち寄り施設への立ち寄りの分だけ移動距離も増加するため、総CO₂排出量はB0でAの約150%, C0で約140%と大幅に増大し、移動時間も倍以上に増大する。

B0~30では、B0からB20まではほぼ変化は見られないが、賑わい促進施策をさらに進めB30となった時点で、自動車利用者の約半数が鉄道や徒歩の利用に転換し、住居

表3 実験2の結果 - 代表交通手段の割合, 総CO₂排出量, 平均移動時間

	代表交通手段の割合				CO ₂ 排出量	移動時間
	徒歩	自転車	鉄道	自動車		
B0	0.9%	2.3%	3.2%	93.6%	152.4%	29.7min
B10	0.9%	2.6%	3.5%	93.1%	150.9%	29.7min
B20	1.1%	2.6%	3.4%	92.9%	154.0%	30.0min
B30	5.1%	2.2%	44.0%	48.8%	89.4%	56.7min
C0	1.0%	2.8%	3.5%	92.7%	139.1%	38.5min
C10	0.9%	2.8%	3.1%	93.2%	141.2%	38.4min
C20	0.9%	2.7%	3.6%	92.9%	145.1%	39.2min
C30	5.1%	2.2%	48.8%	43.9%	76.7%	63.5min
D0	1.0%	3.1%	4.7%	91.1%	98.6%	19.3min
D10	1.1%	2.6%	5.4%	90.9%	100.0%	19.8min
D20	1.1%	2.9%	5.6%	90.5%	99.4%	19.6min
D30	1.1%	2.7%	6.1%	90.1%	99.7%	19.6min
E0	1.0%	3.0%	4.2%	91.8%	98.6%	24.3min
E10	1.0%	3.1%	4.1%	91.8%	100.3%	24.2min
E20	3.2%	2.8%	36.0%	58.0%	68.8%	33.2min
E30	4.5%	2.9%	66.8%	25.8%	38.3%	44.5min

の分布に関しても目的地エリア周辺でのスプロールが抑制され、居住地駅の周囲に鉄道利用者の住居のクラスタが形成されるという顕著な相転移が創発する。この転換に伴い総CO₂排出量は大幅に減少するが、平均移動時間はさらに増大する。

C0~30では、Bシリーズと同様に、C30で自動車利用者の鉄道や徒歩の利用への転換が起こり、住居の分布、総CO₂排出量、平均移動時間に関しても同様の変化が起こる。

D0~30では、B及びCシリーズとは異なり、賑わい促進施策を進めてD30となっても、自動車利用者の他の交通手段への転換も、その波及効果としての住居の分布の変化も見られない。

E0~30では、B及びCシリーズとは異なり、E20となった時点で早くも自動車利用者の約1/3が鉄道や徒歩の利用に転換し、E30になるとその数は約2/3に達する。それを反映し、E30では居住地駅周囲の鉄道利用者の住居のクラスタはより顕著になり、総CO₂排出量もAの40%弱と大きく減少し、立ち寄り施設が目的地ゾーン中心部にあるため平均移動時間もB及びCシリーズ程は増大しない。

6. 実験結果3 - 自動車利用抑制施策を考慮したモデル

図10及び表4はシナリオAp, Cp0~30, Dp0~30, Ep0~30の結果を示したものである。

Apでは、Aと比較すると自動車利用者が約30ポイント減少し、その分自転車・鉄道利用者が増加し、総CO₂排出量も約15%減少する。また、目的地ゾーン中心部からは自動車利用者は排除されるが、目的地駅から見て駐車場以遠にスプロール化が起こる。

Cp0~30では、Cシリーズと比較するとCp0及び10では自動車利用者の割合がそれぞれ約10ポイント及び15ポイント減少し、自転車・鉄道利用者が増加するが、立ち寄り施設周囲にスプロール化が見られる。また、Cシリー

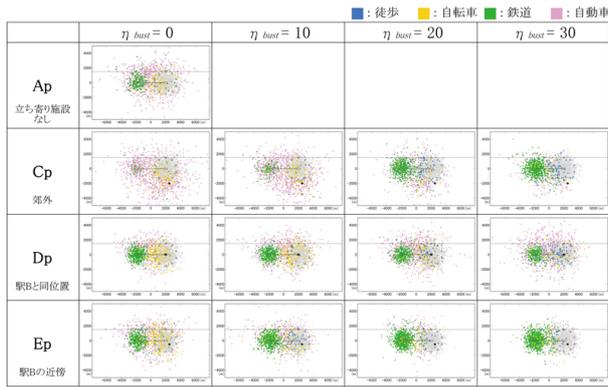


図 10 実験 3 の結果 - 住居分布

表 4 実験 3 の結果 - 代表交通手段の割合, 総 CO₂ 排出量, 平均移動時間

	代表交通手段の割合				CO ₂ 排出量	移動時間
	徒歩	自転車	鉄道	自動車		
Ap	1.6%	13.8%	22.5%	62.0%	85.2%	28.9min
Cp0	1.2%	11.8%	5.0%	82.1%	138.5%	60.1min
Cp10	1.1%	11.1%	10.9%	76.8%	131.3%	60.5min
Cp20	5.4%	5.0%	47.1%	42.5%	79.8%	70.2min
Cp30	5.4%	3.8%	64.5%	26.3%	55.5%	77.0min
Dp0	1.2%	20.7%	45.3%	32.8%	55.5%	40.7min
Dp10	1.7%	17.6%	40.7%	40.0%	63.6%	42.7min
Dp20	4.0%	11.4%	36.5%	48.2%	71.7%	45.9min
Dp30	6.3%	7.9%	31.7%	54.1%	80.0%	47.9min
Ep0	1.0%	23.4%	34.8%	40.9%	66.5%	47.7min
Ep10	3.1%	11.5%	54.4%	31.1%	53.3%	51.0min
Ep20	4.5%	7.5%	71.5%	16.5%	34.6%	53.0min
Ep30	4.1%	5.8%	80.9%	9.2%	26.7%	54.6min

ズとは異なり,賑わい促進施策を Cp20 まで進めた時点で全体の約半数が鉄道利用者となる顕著な相転移が創発し,都市構造のスプロール化も総 CO₂ 排出量も大幅に抑制され,Cp30 ではその傾向はさらに顕著になる。

Dp0~30 では,D シリーズと比較すると Dp0 の時点で自動車利用者の割合が約 60 ポイント減少し,その分自転車・鉄道利用者が増加し,総 CO₂ 排出量も都市構造のスプロール化も大幅に抑制される。しかし,賑わい促進施策を進めるにつれ自動車利用者の割合が徐々に増加し,それに伴い都市構造のスプロール化も総 CO₂ 排出量も増大してゆく。

Ep0~30 では,E シリーズと比較すると Ep0 の時点で自動車利用者の割合が約 50 ポイント減少し,その分自転車・鉄道利用者が増加し,CO₂ 排出量も都市構造のスプロール化も大幅に抑制される。さらに賑わい促進施策を進めると自動車利用者の割合が徐々に減少し,それに伴い都市構造のスプロール化も総 CO₂ 排出量も抑制され,Ep30 になると鉄道利用者の割合が 80%にも達する。

7. 考 察

7.1 モデルのバリデーション

基本モデルを用いた実験によって,都市構造は当初の職住のゾーニングがなされた状態から,大部分の住居が目的地ゾーンを中心としたスプロール状態へと大きく変化し,そこに居住する住人エージェントの利用する交通手段は自動車が大多数を占めた。これは谷口ら [谷口忠 11] の実験結果にほぼ適合する。また,日本において市街化区域人口密度が低い (=コンパクトでない) 都市ほど,住人の自動車依存度が高いという事実 [谷口守 13] にも適合する。このスプロール現象の発生と自動車利用者の増加は,モデルには組み込まれていない複数の社会パターンの再現であり,基本モデルの妥当性を示している [Railsback 11]。

7.2 実験 2 に関する考察

賑わい促進施策を全く実施せず,立ち寄り施設を設置するだけでは,その位置の如何に依らず,設置しない場合と同様にスプロール化が起こる。特に郊外に立ち寄り施設を設置した場合,そこが幹線道路沿いであろうがなかろうが,スプロール化のもう一つの核になっている。これは,魅力の高い施設がその地域の住人の住居をその近傍に引き付ける可能性があることを示唆している。

また,立ち寄り施設が目的地駅と同位置でない場合には,賑わい促進施策を進めるにつれ,ある時点で急激に都市構造に改善が見られる。このことは,こうした施策は,ある程度大きな規模で実施しないと効果が表れにくいことを示唆している。この中で,立ち寄り施設が駅から適度に距離を置いた近傍にある方が早く改善が見られるが,これは立ち寄り施設が駅から徒歩圏内にあるため,「街歩き」に有利に働く賑わい促進施策の効果が表れやすいためと考えられる。

立ち寄り施設が駅と同位置である場合に改善が見られないのは,同様の理由で「街歩き」に有利に働く賑わい促進施策の効果が表れにくいためと考えられる。このことは,立ち寄り施設の位置の,駅と同位置かその近傍かといった微妙な違いが,将来的な都市の構造に大きな違いをもたらす可能性を示唆している。また,都市構造の改善が達成される場合でも,住人に移動時間の増大というデメリットを強い場合があることにも注意が必要である。

7.3 実験 3 に関する考察

自動車利用抑制施策を併用することで,賑わい促進施策を全く実施せず立ち寄り施設の設置のみを実施する場合と比較して,全般的に自動車利用者の減少が見られ,更に賑わい促進施策を進めると,都市構造のコンパクト化も早い段階で現れる。特に,立ち寄り施設が自動車交通排除範囲内にある場合にその傾向は顕著であり,これも「街歩き」に有利に働く賑わい促進施策の効果が表れやすいためと考えられる。

しかしながら、立ち寄り施設の位置が、駅と同位置であるか、適度に距離を置いた近傍にあるかという違いしかないにもかかわらず、賑わい促進施策を進めるにつれ、前者は都市構造が悪化し、後者は改善してゆくという顕著な違いが見られる。これは、自動車排除範囲内においては、そもそも全住人が賑わい促進施策の恩恵を受けられる上に、駅と同位置である場合には、自動車利用者が駐車場まで徒歩で移動することで大きな恩恵を受けられるためと考えられる。このことは、立ち寄り施設の位置の微妙な違いによっては、賑わい促進施策の効果が表れないどころか、悪影響すら及ぼす可能性を示唆している。

8. 結 論

8.1 研究の成果

本研究で用いた実験モデルでは、住人の日々の交通行動が渋滞や賑わいの発生を通して、転居が地価の変動を通して、周囲にいる他の住人から影響を受ける。このモデルを用いて、まず立ち寄り施設の整備及びその周辺の賑わい促進施策の、都市構造の改善効果を検証するシミュレーション実験を行った。その結果、賑わい促進施策を全く実施せず施設を配置しただけでは、その位置の如何に依らず配置しない場合と結果は変わらず、都市構造は悪化に向かうが、その周辺における賑わい促進施策を適切な規模で併用することで、都市の物理的構造のコンパクト化や自動車利用の抑制、及びそれに伴う CO₂ 排出量の削減に効果を発揮することを明らかにした。加えて、立ち寄り施設の位置の微妙な違いがその効果に大きな違いをもたらすことを明らかにした。

続いて、都市環境の改善を目的とした、中心市街地における自動車利用抑制施策を併せて実施する実験を行った。その結果、自動車利用抑制施策と適切な規模の賑わい促進施策が相乗効果を発揮して、都市構造の改善に際立った効果を発揮することを明らかにした。同時に、立ち寄り施設の位置の微妙な違いにより、賑わい促進施策が却って都市の構造や環境を悪化させる場合もあることを明らかにした。

上記のいずれも、都市構造の改善を目的として立ち寄り施設を整備する際には、その位置や、周囲の賑わいの醸成にも細心の注意を払う必要があることを示唆している。

8.2 今後の展望

今後の展望として、今回触れられなかった、現実世界で強い影響力を持つ現象についても議論できるようなモデルへの拡張が挙げられる。

例えば本研究においてはモデル上で住人の数を一定としたが、実際の都市を広域で見ると転入超過による過密化や転出超過による過疎化が大きな問題になっており、このダイナミズムを考慮したモデルとすることが望ましい。また、本研究ではどのシナリオにおいても立ち寄り施設で

の滞在を考慮しなかったが、都市における余剰空間を上手く活用しているエキナカ施設や小規模交流施設等を鑑みると、立ち寄り施設での滞在時間やその質的価値が、その立地や提供するサービス等によって変化する可能性も考慮する必要があると思われる。加えて、立ち寄り施設周辺において通行人の過度な集積により引き起こされる弊害も考慮する必要があると思われる。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Batty 07] Batty, M.: *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-based Models, and Fractals*, The MIT Press (2007)
- [Brown 06] Brown, D. G. and Robinson, D. T.: Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl, *Ecology and Society*, Vol. 11, No. 1, p. 46 (2006)
- [藤井 07] 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, pp. 481–487 (2007)
- [藤井 08] 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)
- [Glaeser 11] Glaeser, E.: *Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes US Richer, Smarter, Greener, Healthier and Happier*, Pan Macmillan (2011)
- [Grimm 10] Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., and Railsback, S. F.: The ODD protocol: A review and first update, *Ecological Modelling*, Vol. 221, No. 23, pp. 2760–2768 (2010)
- [Haase 10] Haase, D., Lautenbach, S., and Seppelt, R.: Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, No. 10, pp. 1225–1240 (2010)
- [Howley 09] Howley, P., Scott, M., and Redmond, D.: An examination of residential preferences for less sustainable housing: Exploring future mobility among Dublin central city residents, *Cities*, Vol. 26, No. 1, pp. 1–8 (2009)
- [磯野 11] 磯野雄人, 岸本達也: 立ち寄り利用を考慮した公共図書館の利用モデルと最適配置の特性, 都市計画論文集= Papers on city planning, Vol. 46, No. 3, pp. 415–420 (2011)
- [Jacobs 61] Jacobs, J.: *The Death and Life of Great American Cities*, Vintage (1961)
- [Jager 07] Jager, W. and Mosler, H. J.: Simulating human behavior for understanding and managing environmental resource use, *Journal of Social Issues*, Vol. 63, No. 1, pp. 97–116 (2007)
- [Kaido 06] Kaido, K.: Urban densities, quality of life and local facility accessibility in principal Japanese cities, *Future Forms and Design for Sustainable Cities*, Oxford (2006)
- [Kazepov 11] Kazepov, Y.: *Cities of Europe: Changing Contexts, Local Arrangement and the Challenge to Urban Cohesion*, Vol. 46, John Wiley & Sons (2011)
- [国交省 13] 環境: 運輸部門における二酸化炭素排出量 - 国土交通省, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (2013), accessed: 2016-02-05
- [厚労省 12] 平成 24 年就労条件総合調査結果の概況 | 厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/jikan/syurou/12/index.html> (2012), accessed: 2016-02-05
- [共同通信 11] 宮城県、78 年前に津波防災条例 大地震教訓に居住制限, 共同通信 (2011), 2011 年 4 月 6 日
- [Millward 06] Millward, H.: Urban containment strategies: A case-study appraisal of plans and policies in Japanese, British, and Canadian cities, *Land Use Policy*, Vol. 23, No. 4, pp. 473–485 (2006)
- [名古屋 15] 名古屋市: 地価公示 (住宅地・商業地平均価格) の長期推移 (市・区別) (市政情報), <http://www.city.nagoya.jp/somu/page/0000059346.html> (2015), accessed: 2016-02-05

- [NetLogo 99] NetLogo Home Page, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (1999), accessed: 2016-02-05
- [Oldenburg 89] Oldenburg, R.: *The Great Good Place: Café, Coffee Shops, Community Centers, Beauty Parlors, General Stores, Bars, Hangouts, and How They Get You through the Day*, Paragon House Publishers (1989)
- [Railsback 11] Railsback, S. F. and Grimm, V.: *Agent-based and Individual-based Modeling: A Practical Introduction*, Princeton University Press (2011)
- [ジーバーツ 06] ジーバーツ, T., 袁原敬監訳: 都市田園計画の展望 - 「間にある都市」の思想, 学芸出版社 (2006)
- [谷口綾 03] 谷口綾子, 高野伸栄, 原文宏: かしこ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)
- [谷口忠 11] 谷口忠大, 高橋佑輔: 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, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 11, pp. 571-580 (2011)
- [谷口守 13] 谷口守, 肥後洋平, 落合淳太: 地方分権時代における自動車 CO₂ 排出量低減政策の可能性-都市計画マスタープランを対象に, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 5, pp. I.613-I.620 (2013)
- [戸川 08] 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)
- [Vega 09] Vega, A. and Reynolds-Feighan, A.: A methodological framework for the study of residential location and travel-to-work mode choice under central and suburban employment destination patterns, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 43, No. 4, pp. 401-419 (2009)
- [WUP 14] World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf> (2014), accessed: 2016-02-05
- [Zukin 09] Zukin, S.: *Naked city: The Death and Life of Authentic Urban Places*, Oxford University Press (2009)

[担当委員: 和泉 潔]

2016 年 2 月 21 日 受理

◇ 付 録 ◇

A. モデルの定義

A.1 総移動コスト C_i (基本モデル)

$$C_i = \omega_T C_T + \omega_M C_M + \omega_F C_F \quad (A.1)$$

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

C_T, C_M, C_F は時間コスト, 料金コスト, 疲労コストを, $\omega_T, \omega_M, \omega_F$ はそれぞれの選好バイアスを表す. 現実世界では各個人の選好バイアスは各個人ごとに異なるが, 本モデルでは全エージェントについて一定とする.

A.2 時間コスト C_T

$$C_T = \eta_T T \quad (A.3)$$

$$T = T_w + T_b + T_t + T_c \quad (A.4)$$

T_w, T_b, T_t, T_c は各住人エージェントの徒歩, 自転車, 鉄道, 自動車による移動時間を表す.

T は各住人エージェントの総移動時間であり, η_T は時間をコストに変換する係数である.

A.3 料金コスト C_M

$$C_M = c_b + c_c + c_t + c_g T_c + c_{il} \quad (A.5)$$

$c_b, c_c, c_t, c_g T_c, c_{il}$ は駐輪代金, 駐車代金, 鉄道運賃, ガソリン代, 違法駐輪ペナルティを表す. ガソリン代は自動車での移動時間 T_c に比例する.

A.4 疲労コスト C_F

$$C_F = (F_w T_w + F_b T_b + F_t T_t + F_c T_c) + F_{cong} \quad (A.6)$$

F_w, F_b, F_t, F_c は徒歩, 自転車, 鉄道, 自動車による移動時間をコストに変換する係数, F_{cong} は渋滞による疲労コストを表す.

A.5 渋滞

当該住人エージェントの周囲半径 r_{cong} 内を自身と同様に自動車でも移動する住人エージェントが 1 以上存在する場合に渋滞が発生すると考える.

幹線道路以外を移動する自動車 (基準速度 V_N) の渋滞下での移動速度 V_{cN} は下記のように決定する.

$$V_{cN} = \max(V_N(1 - \eta_v D_{cN}), V_{cN}^{min}) \quad (A.7)$$

ここで D_{cN} は当該住人エージェントの周囲半径 r_{cong} 内を自身と同様に自動車でも幹線道路以外を移動する住人エージェントの数, η_v は変換係数を表す.

同様に, 幹線道路を移動する自動車 (基準速度 V_H) の渋滞下での移動速度 V_{cH} は下記のように決定する.

$$V_{cH} = \max(V_H(1 - \eta_v D_{cH}), V_{cH}^{min}) \quad (A.8)$$

ここで, D_{cH} は当該住人エージェントの周囲半径 r_{cong} 内を自身と同様に自動車でも幹線道路を移動する住人エージェントの数を表す. また, 渋滞中は毎分下記の疲労コスト F_{cong} が加算される.

$$F_{cong} = \min(\eta_{cong} D_{cN}, F_{cong}^{max}) \quad (A.9)$$

又は

$$F_{cong} = \min(\eta_{cong} D_{cH}, F_{cong}^{max}) \quad (A.10)$$

η_{cong} は密度から疲労への変換係数を表す.

A.6 目的トリップの価値 V_i の学習

各住人エージェントは住居に戻るたびに総移動コストを計算し, それに従って i 番目の目的トリップの価値 V_i を下記のように変化させる.

$$V_i \leftarrow \alpha(-C_i) + (1 - \alpha)V_i \quad (A.11)$$

各住人エージェントは, 毎日の交通行動をこの価値 V_i に基づいた ϵ -greedy 法により確率的に決定する. 即ち確率 $1 - \epsilon$ で最も価値の高い目的トリップを選択し, 確率 ϵ で全ての目的トリップからランダムに選択する.

ϵ は下式に従い徐々に減衰し, 試行を重ねるにつれ 0 に収束してゆく.

$$\epsilon \leftarrow \gamma \epsilon \quad (A.12)$$

$$\gamma < 1 \quad (A.13)$$

A.7 総生活コスト C_i^l

$$C_i^l = C_i + R_i \quad (A.14)$$

C_i, R_i は総移動コスト, 地代を表す.

A.8 地代 R_i

候補地における地代 R_i は, [戸川 08] で用いられた土地消費量と地代の関係を示す式を参考とし, 下記に従う.

$$R_i = \eta_R^h I_i^h \left(\frac{A^h}{A}\right) + \eta_R^d I_i^d \left(\frac{A^d}{A}\right) \quad (A.15)$$

$\eta_R^h \cdot \eta_R^d$ は変換係数, $I_i^h \cdot I_i^d$ は自身を中心として半径 r_R の範囲内の住居・目的地数, A は当該範囲の面積, $A^h \cdot A^d$ は住居・目的地単位の消費面積を表す. 即ち地代は居住及び労働・就学人口の集積に応じて上昇する.

表 B.1 都市モデルのパラメータ

都市モデルのパラメータ	設定値
住居の分布の標準偏差 L_h	800(m)
目的地の分布の標準偏差 L_d	800(m)
駐輪代金 c_b	150(yen)
駐車代金 c_c	800(yen)
鉄道運賃(片道) c_t	160(yen)
ガソリン代 c_g	0.015(yen/min)
違法駐輪ペナルティ c_{il}	3000(yen)
違法駐輪撤去率 P_r	0.5
地代計算半径 r_R	100(m)
住居の変換係数 η_R^h	150(yen)
目的地の変換係数 η_R^d	1500(yen)
住居の広さ A^h	140(m ²)
目的地の広さ A^d	140(m ²)

表 B.2 住人エージェントのパラメータ

住人エージェントのパラメータ	設定値
徒歩の速度 V_w	4(km/h)
自転車の速度 V_b	12(km/h)
鉄道の速度 V_t	55(km/h)
一般道路での自動車の速度 V_N	24(km/h)
幹線道路での自動車の速度 V_H	60(km/h)
一般道路での自動車の最低速度 V_{cN}^{min}	8(km/h)
幹線道路での自動車の最低速度 V_{cH}^{min}	20(km/h)
時間コスト変換係数 η_T	50(yen/min)
徒歩での疲労コスト変換係数 F_w	180(yen/min)
自転車での疲労コスト変換係数 F_b	420(yen/min)
鉄道での疲労コスト変換係数 F_t	60(yen/min)
自動車での疲労コスト変換係数 F_c	60(yen/min)
渋滞計算半径 r_{cong}	150(m)
渋滞による速度低減率 η_v	0.1
渋滞コスト変換係数 η_{cong}	100(yen/min)
最大渋滞コスト F_{cong}^{max}	500(yen/min)
最大街なか賑わい度 B^{max}	$\eta_{bust} * 100(yen/min)$
学習率 α	0.5
低減率 γ	0.94
ϵ の初期値	0.5

B. 都市モデル及び住人エージェントのパラメータ

例えば、時間コストの係数は厚生労働省の調査資料 [厚労省 12] をベースに、疲労コストの各係数は各行動の消費カロリーに基づいて設定した。地代の変換係数は [戸川 08] で用いられたパラメータ及び名古屋市の統計 [名古屋市 15] から住居と目的地で異なる係数を設定した。また名古屋市において標準的な鉄道駅は約 10,000 世帯をカバーするが、計算機の処理能力を考慮し住居ゾーンには 1000 エージェントを配置した。即ち 1 エージェントが 10 世帯に相当する。

C. 旅客の輸送量あたりの CO₂ 排出量

[国交省 13] による。

表 C.3 旅客の輸送量あたりの CO₂ 排出量 (g/person * km)

交通手段	自家用車	旅客機	バス	鉄道
CO ₂ 排出量	147	103	56	22

D. 実験モデルの公開

本研究のモデルはフリーソフトウェアである NetLogo を用いて作成されており、

<https://www.openabm.org/model/5227/>

にてダウンロード可能である。

著者紹介



永井 秀幸(学生会員)

2000 年京都大学工学部建築学科卒業。2004 年東京大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程修了。2015 年筑波大学大学院ビジネス科学研究科経営システム科学専攻修了。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻博士後期課程。複雑系の観点から人間の生活空間形成に関する研究に従事。一級建築士。計測自動制御学会, IEEE, 日本建築学会, 各会員



倉橋 節也(正会員)

2002 年筑波大学大学院経営・政策科学研究科企業科学専攻修了。博士(システムズ・マネジメント)。2006 年筑波大学大学院ビジネス科学研究科助教授。現在ビジネスサイエンス系教授。2009 年, 2015 年 University of Groningen (オランダ) 客員研究員。社会シミュレーション, 経営システム分析などの研究に従事。計測自動制御学会, 経営情報学会, IEEE, PAA 各各会員