

歩行者回遊行動のエージェントモデリング

兼田 敏之, 吉田 琢美

本稿では、実用関心、理論関心上の意義を持つ商業集積地区来訪者の回遊行動モデル研究の経緯を簡潔に解説したのち、マルコフ型モデルでは扱えなかった回遊行動特性の指摘を踏まえて、歩行者回遊行動のエージェントモデリングについての研究を解説する。限定合理性が特徴となるエージェントのモデリング研究におけるルールベースと合理性仮定緩和の二種のアプローチについて解説するとともに、筆者らの取り組みを交えて、最近の回遊行動エージェントモデリングの研究事例を紹介する。スケジューリング、エージェント内部の動的更新、データフィッティングを巡るモデル開発のトリレンマについても言及する。

キーワード：回遊行動，エージェントアプローチ，都市解析

1. はじめに—回遊行動とは

欧州に続き、わが国でも顕在化した中心市街地空洞化の問題の対策として、まちの回遊性の向上がよく挙げられるようになった。しかし、人々の店舗（施設）間の渡り歩きである回遊行動については、厚い研究者層の関心を惹きつけているというわけではない。都市経済学が称する「集積効果」をマイクロから解釈するならば、少なくともその効果の一部は、この回遊行動に特徴的な「立ち寄り輻輳」に起因することは明白であるが、この点を自覚的に扱った研究もまた多くない。

しかし、思い出してみれば、かつてジェイン・ジェイコブスは、国家や貨幣成立以前における交換市場としての都市、つまり生き活きとした盛り場 (lively downtown) の魅力を描いて示した[1]が、同女史の文献[2]では、盛り場の魅力を、ヒューマンスケールや近隣コミュニティの重要性とともに、新旧建物の多様性や用途や客層の混在に求めていた。最近の創造都市論を読んでも魅力の源泉は多様性の寛容にあり、消費そのものの魅力でもある新奇性とあわせて考えると、盛り場とは、ひとびとが日常生活において機能効率性以上の何かを求めめるために、用事にかこつけて余暇的 (recreational) あるいは再創造的 (re-creative) な何かを探索する場として捉えることができる。ワンストップ・ショッピングやインターネット・ショッピングの時代が到来しても、この本質に変わりはあるまい。

これらのことを考慮すれば、回遊行動研究には、理論・実用の両面において OR、特に都市解析が取り組むべき肥沃な領域があり、とりわけ近年、マイクロ行動モデル以来のボトムアップアプローチを精緻化するエージェントモデリングの研究が進展している。

本稿では、商業集積地区来訪者の回遊行動モデル研究の経緯を簡潔に解説したのち、既存モデルでは扱えなかった回遊行動特性の指摘を踏まえて、歩行者回遊行動のエージェントモデリングについての研究を解説する。エージェントモデリングの際に避けて通れない、合理性モデルならびに限定合理性モデルの二種類のアプローチ（ルールベースと合理性仮定緩和）の考え方や研究事例にも言及したい。

2. 既存の回遊行動モデルとその限界

回遊行動モデル ('shop-around' behavior model) は、多用事・多立寄り (MPMS: Multi-Purpose Multi-Stop)¹ を特徴とする空間行動モデルの一種である。ただし、行動調査データありきのモデリング問題であり、巡回セールスマン問題のような最適化問題とは異なる。中心市街地活性化やエリア・マネジメントといった実用関心のみならず、都市解析などの理論関心に基づき、80年代から地理学や都市計画学の分野で研究の取り組みがなされてきた。

このころ、提案された回遊行動モデルは、空間相互作用モデルと推移確率行列のおよそ二つの構成要素からなる。ハフモデル (Huff model) や引力型ロジットモデル (logit model) といった空間相互作用モデ

かねだ としゆき, よしだ たくみ
名古屋工業大学 大学院工学研究科おもひ領域
〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

¹ Multi-Stop Multi-Purpose と呼ばれることもある。

表1 回遊行動モデルの形式

モデルの事例	マルコフ型モデル			(非マルコフ型)エージェントモデルの例
	エントホーベン大学グループ [4]	福岡大学グループ [5, 6]	兼田・横井・高橋 [7]	ASSA(Agent Simulator of Shop-Around Behaviour) [8,9]
地区来訪意思決定モデル	-	来訪候補地区は単一を想定し、来訪頻度をポアソン分布と仮定。確率的に来訪決定	目的別にハフ(地区間)モデルを推定し、当地区には確率的に来訪決定	来訪候補地区は単一を想定。タイムバジェットを与件として多種の用事がポアソン到着、その累積により確率的に来訪決定(「修正」ゴミ箱モデル Ver.1~)
地区内回遊行動モデル	目的地選択モデル	「地点-目的」対毎に求めた引力型ロジットモデルより確率的に選択	多段ロジットモデルより第一来訪地点決定。次地点は引力型ロジットモデルより推定したOD推移確率により選択	店種間推移確率(属性別)を用い、推定したハフ(地区内)モデルより次地点を確率的に選択
	経路選択モデル	候補経路毎に求めたロジットモデルより確率的に選択	-	-
	随時(衝動)立寄りモデル	地点(通り)の魅力値を求め確率的に選択	-	-
扱う政策	-	再開発、テナントミックス	再開発、テナントミックス	駐車場設置、シャッタータウン化の影響評価
事例地区	Maastricht, 88通り	天神, 22店舗 小倉, 27通り	大須, 34ゾーン(通り+地区)	大須, 20通り

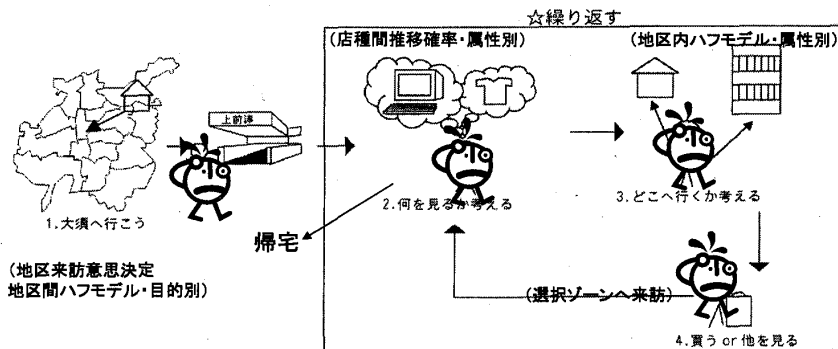


図1 マルコフ型回遊行動モデルの例[7]

ル (spatial interaction model)² は、調査データからパラメータ推定できるものの、単一用事・単一立寄りのみを扱うものである。そのため、調査データで得たトリップ連鎖 (trip chain) を OD 行列 (Origin-Destination matrix) に集計、これより求めた推移確率行列を用いるというものであった。理論モデルでは、この行列を基本的に不変と仮定し、再開発施設立地などで行列に変更が加えられる場合、産業連関分析の波及効果と同様に逆行列を用いてその効果を算出する。OD ベースのこの行列の各行の値は選択確率を意味す

るので、空間相互作用モデルにより説明されるとして、あらかじめそのパラメータを推定しておく。施設立地の際にはこれを用いて行列を変更する。推移確率行列は必ずしも OD ベースでなくてもよく、実用指向のシミュレーションモデルには様々な変種があるが、この行列を持つ点にモデルの特徴がある。

この種のモデルは、その時点の選択が前の選択履歴に依存しない、という意味で「マルコフ性 (Markov property)」を有するため、マルコフ型回遊行動モデルと呼ばれる (解説として文献[3]³)。また、個々人の行動シミュレーションは可能であるが、すべての確率はもともと比率から読み換えられたものなので、人数を算出する集計量モデルでもある。マルコフ型回遊行動モデルの研究として、エントホーベン大学や福岡大学のグループが知られる (表1 参照)。

² 本稿では、候補店舗 $j(j \in J)$ の規模を A_j 、 j までの距離を T_j としたとき、 j の選択確率 p_j を $A_j^\alpha T_j^{-\beta} / \sum_j A_j^\alpha T_j^{-\beta}$ で与えるのがハフモデル、 j のランダム効用関数の固定項を V_j として $\exp(V_j) = A_j^\alpha \cdot \exp(-\beta T_j)$ と置き、 p_j を $\exp(V_j) / \sum_j \exp(V_j)$ で与えるものを引力型ロジットモデルと呼んでいる (α, β とともに非負値)。ともに規模の (広義) 増加関数、距離の減少関数であることに注意。

³ 原文では、回遊マルコフモデル。

例として筆者らの集計量モデル[7]を説明する(図2)。名古屋市大須地区は、十数の商店街からなり、男性向きのパソコン店、女性向きの衣料品店など、さまざまな客層がさまざまな店種に集まる商業集積地区である。このモデルでは、まず、商圈域を17地区に区分し、各地区の買物目的(店種:7店種)別の人口、地区間時間距離よりハフモデルを用いて、目的店種別の大須地区来訪者数を求める(ステップ1)。モデルでは、大須地区内を34ゾーンに区分し、第一立寄りゾーンについては、データより得た比率に応じて人数が按分される。次の立寄り店種については、属性別(6属性)に求めた店種間推移確率行列を用いてゾーン別・属性別に求め、(ステップ2)、属性別に推定した地区内ハフモデルを用いて、立寄りゾーンの人数を求める(ステップ3)。帰宅行動があるため店種間推移確率行列の行和は1未満なので、ステップ2,3を十分な回数繰り返すことにより、属性別・店種別・ゾーン別に累積立寄り者数を算出することができる。

90年代までに成立したロジット-ポアソン結合モデル(LLPM: Linked Logit and Poisson Model)[10]は、マルコフ型の個人行動シミュレーションモデルである。個人の来訪頻度等がポアソン分布すると仮定するとともに、空間相互作用モデルを中心にロジットモデルを用いるもので、データフィッティング手法が確立しており、適用事例も多い。

ただし、個人行動シミュレーションモデルとしてみると、トリップ連鎖におけるシーケンスを捨象する点等に理論面の弱点があり、それゆえエリア・マネジメントなどに有効な実用知見にも限界が生じうる。そのため2000年前後より、回遊行動モデル研究では、非マルコフ型のエージェントモデルが登場することになった。

3. 回遊行動のエージェントモデリング

3.1 合理性モデルと二種類の限定合理性モデル

話は前後するが、ロジットモデルはランダム効用を近似的に推定したものと解釈できるため、LLPMは合理性モデルと呼ばれている。これに対するエージェントモデルは、限定合理性モデルといえるが、この形式には少なくとも二つある。一つは、ヒューリスティック・ルール(heuristic rule)を用いるルールベース・アプローチ(rule-base approach)である。これは、サイモンが呼んだ「手続き的合理性」を表現したものと解釈でき、認知科学研究では以前から本稿でい

う回遊行動の説明例が知られ、知識工学におけるプロダクションシステムを端緒とした実装技術もあり、研究も進展している。もう一つは、満足化や制約充足原理等を導入することにより合理性の持つ全知全能の仮定を緩める合理性仮定緩和アプローチ(assumption-relaxation approach)である。このアプローチは、同じくサイモンの「満足化原理」やその周辺を整理した数理モデル研究[11]等により基礎づけされる。

3.2 回遊行動エージェントモデルの特徴要素

回遊行動のエージェントモデルを分類整理する上で特徴要素となるのは、第一にタイムバジェット(time budget)の下での店舗立寄りの割付け、すなわちスケジューリングの扱いである。スケジューリング機能の導入は、それ自体がマルコフ型モデルのアンチテーゼであるが、時間的制約を強調するものであり、また、計画行動という知的機能の実装を意味する。第二に、再スケジューリングも含めて、エージェント内部の動的更新の扱いについてであり、これもまた適応や学習といった知的機能に関連する。第三に、データフィッティング方法についてである。この三者を同時に考慮することは容易ではなく、一種のトリレンマともいえるが、同じくMPMSモデルとして一日間の用事と交通行動を扱う、交通計画分野の生活圏交通行動モデル(daily activity-travel model)研究——同じくエイントホーベン大学グループによる——が一步先んじている感がある(表2)。

例えば、ルールベース・アプローチの回遊行動モデルとして、文献[13]が報告されているが、生活圏交通行動モデルでは、C4.5を用いた二分木の自動生成によるデータフィッティングの事例[10]がある。ただし、単純なルール表現で複雑なスケジュールを形成しようとする分析者が可読性の問題に直面することも考えられる。最近の報告としては、ロジットモデルの効用に閾値を設け、制約条件付き最適化により、パラメータ推定を行った回遊行動モデル[15]がある。このモデルは、閾値概念を条件ルールとみなすとともに、ルール間の競合をロジットモデルで解消すると解釈できるため、パラメータフィッティング可能なルールベース限定合理性モデルということもできる。

生活圏交通行動モデルでは、現在認知している環境下において効用を最大化するスケジュールを保持しようとする研究があり、そこではGAを用いての非線形効用関数の推定が言及されている[12]。全知全能を前提としない点で限定合理的であるが、再スケジュー

表2 エージェントモデルと既存モデル

		ロジックモデル・アプローチ (ex. LLPM: ロジック=ポアソン結合モデル) [10]	Albatross [10]	Aurora [12]	Kurose [13]	ASSA [8,9,14]
モデルが扱う行動		一日間の用事と交通行動 / 商業地区内での多用事・多立寄り行動	一日間の用事と交通行動	一日間の用事と交通行動	商業地区内での多用事・多立寄り行動	商業地区内での多用事・多立寄り行動
モデルの原理	エージェントの行動原理	効用最大化	ヒューリスティック・ルール	突発事態や各種制約のもとで効用最大化スケジュールの保持	ヒューリスティック・ルール	制約充足ないし効用満足化
	モデル形式	合理的	限定合理的	限定合理的であるが知的機能を持つ	限定合理的	限定合理的であるが知的機能を持つ
知的機能	スケジュール形成機能	×	○(ただし、条件ルール表現)	○	○(ただし、条件ルール表現)	○
	スケジュール再形成	×	×	漸次的加除(混雑がトリガー)	×	再計算による(用事失敗等がトリガー)
	適応的な嗜好の変化(形成)	×	×	×	×	用事達成による一種の強化学習(店舗構成変化への適応性を有する)
	メンタルマップの拡大	×	言及なし	原理的に可能	言及なし	原理的に可能
適用可能性	データフィティングの方法	ランダム効用理論に基づく古典的データ解析手法	機械学習(G4.5)による、二分きの自動生成	GAによる非線形効用形状の推定	カテゴリ分類作業による(?)	パッチワーク・アプローチ(統計データ解析、実験、仮説の混合)
	報告された事例	事例多数	ベンチマーク研究含む事例 (Hendrik-Ido-Arnbaecht, Zwijndrecht 等)	数値的な例示	事例あり (Veldhoven)	事例あり(大須)[8]

リングといった動的更新を行う点に特徴がある。

3.3 回遊行動のエージェントモデリングの研究事例

回遊行動のエージェントモデリングの事例として、ここでは、筆者らが ASSA (Agent Simulation of Shop Around behavior) と称して進めている研究を紹介したい[8][9][14]。筆者の研究室では、名古屋都心の各地区を対象として、既に大小十二回にわたって回遊行動調査を行っている(例えば文献[11][17])。調査では、立寄り店舗や歩行経路等のほか、その店舗立寄りが「予定」されていたか否かを尋ねる。冗長性解析[16]が示すところによれば、地区内の回遊行動は、必ずしも順路や経路長さが最適化されていない。

そこで筆者らは、回遊行動を計画行動と即応行動の二つに分解、さらに即応行動を代替行動、随時行動、即応歩行の合計四つのレイヤーに分解して考えることにした(表3)。特に計画行動とは、スケジュールに沿った行動であり、即応行動のうち代替行動とは、予定していた用事が達成されない際に試みる代替店舗立寄りの行動である。この概念は、マルコフ型回遊行動モデル(表1, 文献[4])では弁別されていなかったものである。

図2に例を挙げて詳しく説明する。少年は、本を買うことと正午に予約した歯医者に行くことの二つの用

表3 地区内回遊行動のレイヤー分解

行動の分類	意味	行動の動機
計画行動	地区来訪前に計画された行動	スケジュールで与えられる
即応行動	代替行動	用事失敗時の代替店舗の立寄り行動
	随時行動	上述以外の思いつきの店舗立寄り行動
	即応歩行	上述以外の思いつきの経路選択

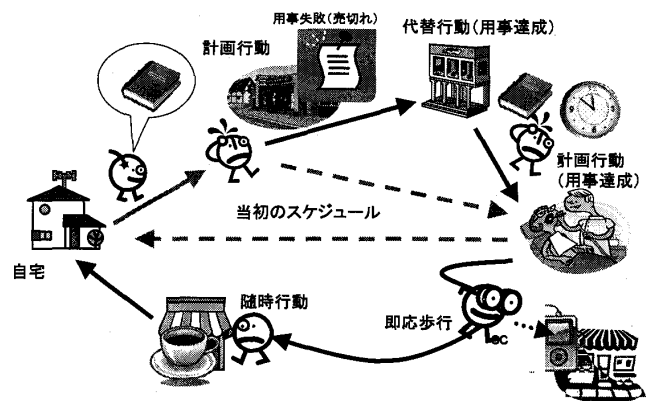


図2 地区内回遊行動のレイヤー分解の説明例

事を持って自宅を立つ。当初のスケジュールは、近くの本屋で本を買った後、歯医者に行く計画であった。一軒目の本屋を訪れる(計画行動)と、彼は本が売切れているのを知る(用事失敗)。次の時刻制約や替りの本屋との距離を考えて、彼は二軒目の本屋に行くことにする(代替行動)。彼はそこで本を買うことがで

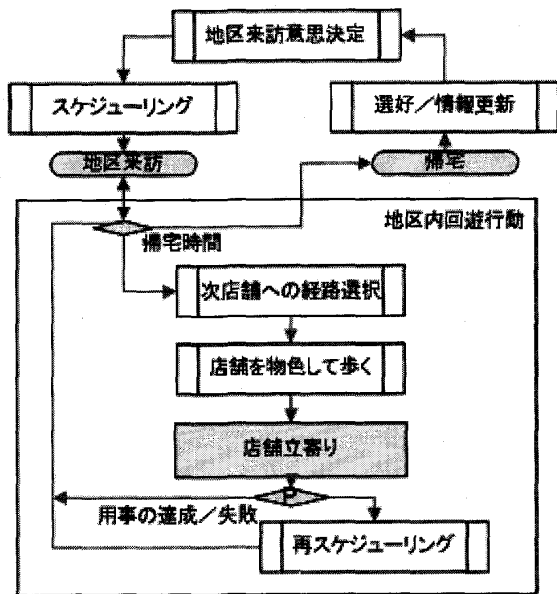


図3 ASSAの基本構造[14]

きた(用事達成)が、歯医者予約時刻が迫っている
ので、歯医者へ急ぐ(計画行動)。治療が予想より早
く終わり(用事達成)、自宅に直行するはずであった
彼は、まわりみち(即応歩行)をしてウインドウ・シ
ョッピングを楽しんだ後、喫茶店でお茶を飲み(随時
行動)、帰宅した。この例では、当初のスケジュール
に冗長性が加わったものの立寄り順序といった基礎構
造に変更はない。もし一軒目の本屋で本の売切れを知
ったとき、二軒目に立寄る時間の余裕がなかったなら
ば、彼は歯医者行きを優先して、その後、本を買いに
行ったであろう。この場合、彼は再スケジュール
を行っていることになる。

ASSAの基本構造を図3に示す。ASSAver. 1は、
計画行動と代替行動(用事達成/失敗を用事別に固定
確率として表現)を扱い、用事失敗時には再スケジ
ューリングする機能を持つものとして開発された。現在、
既存モデル[18]を参考にしながら随時行動や即応歩行
を取り込んだASSAver. 2の開発が進行している[14]。
ASSAでは、合理性仮定である全知全能の条件を緩
和して、限定合理性を表現している。例えば、スケジ
ューリング・モジュールは、計算量制約を想定したた
め、最適化問題ではなく、制約充足ないし効用満足化
問題として定式化されている。

ASSA開発の目下の課題は、まず、データフィッ
ティングにある。大規模な実用モデルでは常につきま
とうことであるが、モデルの構造同定とパラメータ同
定の双方とも調査データのみでは到底支えきれないた

め、部分的なテスト・実験や常識的に許容できる仮説
を導入したパッチワーク・フィッティングで対応せざる
を得ない。また、パフォーマンス評価についても同様
である。冗長性指標[16]のほかにも、非マルコフ型
モデルならでの、多側面を扱うパフォーマンス評価
指標の開発が目下の研究課題になっている。

ASSAの構想では、エージェント内部の動的更新
についても検討している。更新サイクルの短い順に並
べると、(1)再スケジュール(一回の地区来訪で0
回から数回, ver. 1より実装)、(2)店舗効用の強化学
習(地区来訪後に毎回, ver. 1より試行実装)、(3)メ
ンタルマップの更新(地区来訪後に毎回、現版では既
知を仮定)、(4)来訪頻度とタイムバジェットの更新
(地区来訪回数ごとに一回、現版では固定)である。
さらには、エージェントの個性としての意思決定原理
(特にリスク・不確実性に対する態度)の実装が考え
られる。

4. BRAWL原理?—結びに代えて

実用面から考えると、回遊行動エージェントモデル
は、歩行者流エージェントモデルやマーケティング科
学、特に消費者行動の情報処理アプローチ等とも接続
可能性を有しており、距離概念は若干異なるものの、
ネットサーフィン行動等への適用も視程に入り得る。
理論面から考えると、本稿で言及した前述のトリレン
マは、回遊行動のみならず他の人間行動のエージェン
トモデリングにも通底する課題を提起している。一時
点データを用いてのフィッティングの課題はもとより、
多時点データを用いた動力学パラメータの同定を視野
に入れようとすれば、KISS原理の放棄をいとわず、
エージェント内部に複雑な構造の作り込みを目指すこ
とになる。回遊行動のみならず人間行動は、「限定合
理的であっても長期的に賢い」はずだ。この発想から
筆者は冗談交じりにBRAWL(Boundedly RAtional
but Wise in Long term)原理と口走るようになった。
回遊行動エージェントモデリング研究の持つ面白味を
多くの読者に伝えることができればと思い、このもじ
り言葉をもって本稿の結びに代えたい。

参考文献

- [1] Jacobs, J.: The Economy of Cities, (1969), 中江・加賀谷訳、『都市の原理』, 鹿島出版会, (1971).
- [2] Jacobs, J.: The death and Life of Great American Cities, (1961), 黒川訳、『アメリカ大都市の死と生』, 鹿島

- 出版会, (1976).
- [3] Borgers, A. and Timmermans, H.: A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities within Inner-City Shopping Areas, *Geographical Analysis* 18 (2), 115-128, (1986).
- [4] 石橋: 回遊行動モデルからみた都心空間評価, 計画理論研究会『公共システムの計画学』, 技報堂出版, 177-193, (2000).
- [5] 斎藤, 石橋: 説明変数を含んだマルコフチェーンモデルによる都心再開発に伴う消費者回遊行動の変化予測, 日本都市計画学会論文集, Vol. 27, 439-444, (1992).
- [6] 斎藤, 熊田, 石橋: 来街者調査ベースポアソン回帰集客数予測モデルの提案とその応用, 日本都市計画学会論文集, Vol. 30, 523-528, (1992).
- [7] 兼田, 横井, 高橋: 施設種間推移を考慮した歩行者回遊行動シミュレーション・モデルの開発, シミュレーション&ゲーミング, 11 (2), 17-23, (2001).
- [8] Yoshida, T. and Kaneda, T.: An Architecture and Development Framework for Pedestrians' Shop-Around Behavior, 10th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (Paper-215), (2007).
- [9] Yoshida, T. and Kaneda, T.: Improvement of Pedestrian Shop-Around Behaviour Agent Model, DDSS, (2008).
- [10] Arentze, T. et al.: Rule-Based Versus Utility-Maximizing Models of Activity-Travel Patterns: A Comparison of Empirical Performance. In Hensher, D. (eds.) *Travel Behaviour Research*, 569-583 (2001).
- [11] Rubinstein, A.: *Modeling Bounded Rationality*, MIT Press (1998), 兼田・徳永訳『限定合理性のモデリング』, 共立出版, (2008).
- [12] Arentze, T., Pelizaro, C. and Timmermans, H.: Implementation of a Model of Dynamic Activity-Travel Rescheduling Decisions: An Agent-Based Micro-Simulation Framework, CUPUM 05 Paper 48 (2005).
- [13] Kurose, S., Borgers, A. and Timmermans, H.: Classifying Pedestrian Shopping Behavior according to Implied Heuristic Choice Rules, *Environment and Planning B* 28, 405-418 (2001).
- [14] Kaneda, T. and Yoshida, T.: Toward Adaptive Shop-Around Agent Model, 2nd World Congress of Social Simulation, (2008).
- [15] Zhu, W. and Timmermans, H.: Incorporating Principles of Bounded Rationality into Models of Pedestrian Shopping Behavior—Theory and Example, DDSS, Paper 10, (2008).
- [16] 荒川, 兼田, 名古屋都心域における回遊行動の冗長性に関する分析, 日本建築学会計画系論文集, 556, 227-233, (2002).
- [17] 大岩, 山田, 三阪, 兼田: 回遊行動からみた商店街複合地区の動態分析—名古屋市大須地区をケーススタディとして—, 日本建築学会技術報告集, 21, 469-474, (2005).
- [18] Dijkstra, J., Timmermans, H. and Vries, B., Empirical Estimation of Agent Shopping Patterns for Simulating Pedestrian Movement, CUPUM 07, Paper 56, (2007).