

人間行動の記号過程の確率ネットワークモデルと それに基づくシミュレーション

建築・都市空間が誘発する人間行動の記号過程に関する研究 (その2)

MODELING AND SIMULATIONS OF HUMAN BEHAVIOR SEMIOSIS BASED ON PROBABILISTIC GRAPHICAL MODELING

Study on semiosis of human behavior afforded by architecture and urban space (Part 2)

木曾 久美子*, 門内 輝行**

Kumiko KISO and Teruyuki MONNAI

This paper aims to understand the human behavior semiosis through the probabilistic graphical model, in order to consider a spatial design from human behavior. The study is organized as follows; 1) Human behaviors are described. 2) Interactions between human behaviors and architectural/urban space are extracted from the description, and are classified based on C.S. Peirce's categories, 3) A Bayesian network is constructed from the classified data. 4) The human behavior semiosis is analyzed by the sensitivity analysis of the Bayesian network of step 3. 5) Spatial behavior modeling and simulations with Cellular Automaton are done based on the analysis.

Keywords: *Architecture and Urban Space, Human behavior, Semiosis, Bayesian Network, Cellular automaton*

建築・都市空間, 人間行動, 記号過程, ベイジアンネットワーク, セル・オートマトン法

1. 序

1.1 本報の位置づけ

本報は、建築・都市空間の設計を、建築・都市空間と人間とが相互に関係し、変化し続ける複雑な現象の設計であるとして、日常の自由な人間行動を誘発する建築・都市空間を対象に、人間行動の記号過程(建築・都市空間と人間行動のあらゆる相関のプロセス)に着目してその現象を解釈し、設計する方法の提案を目的とした研究の一環をなすものである。

前報(その1)¹⁾では、①京都精華大学天ヶ池周辺における人間行動(流動および滞留の組み合わせ)の観測・記述に基づき、人間行動の記号過程の分析を行い、②分析によって得た建築・都市空間と人間の相互作用のルールに基づいて、セル・オートマトン法を用いて人間行動をモデル化し、そのシミュレーションを行うことにより、③日常の自由な人間行動の記号過程をマルチエージェントシステムとして分析する方法の基礎的な枠組みを構築した。

本報では、前報における滞留(その場に留まること)に着目した人間行動のデータに、流動(位置の移動)の記述を加えることで、調査対象とした広場空間内に入ってから出るまでの人間行動のプロセス全体の分析へと展開する。また、人間行動の分析に確率的な視点を導入する。この分析に基づいて、前報で構築したシミュレータを発展させ、人間行動の記号過程をさらに深く解釈していく。

1.2 研究の目的および方法

本報の目的は、人間行動を基軸とした建築・都市空間の設計に主眼を置いた上で、京都精華大学天ヶ池周辺における人間行動の記号過程を、確率ネットワークモデルを用いて分析し、解釈することである。

前報と同様、アメリカの記号学者 C.S. Peirce の記号過程の考え方を援用し、環境を記号として捉え(記号としての環境を、以下「環境記号」と呼ぶ²⁾)、人間行動を、環境記号を媒介として、目的・状況との結びつきの中で理解する。このとき、建築・都市空間(記号集合)は主体の目的や状況に応じて異なった記号集合に分節され、それに応じて異なった人間行動(解釈項)を誘発するという考えに基づき、記号である環境(本報では建築・都市空間)、解釈項である人間行動を、それぞれ C. S. Peirce の提示する記号分類に基づいてさらに細かく分類し、分類した各要素同士の関係性を考えることで人間行動の記号過程について考察をする。

以上の立場から、次の研究方法および手順を採用する。

①調査対象とした広場空間における人間行動を記述し、特に流動の記述を、前報で行った滞留の記述と関連付ける。

②記述に基づき、調査地における人間行動を構成する要素を C. S. Peirce の提示した記号分類を用いて抽出・分類する。

③調査地における人間行動の記号過程として、②で抽出した要素同士の相互関係を、確率ネットワークモデルの一つであるベイジアンネットワークによって構造化する。

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
博士後期課程・工修

日本学術振興会 特別研究員 DC2

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Department of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., M. Eng.

Research Fellow (DC2) of JSPS

Prof., Department of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.

④構造化したモデルを用い、建築・都市空間と人間行動の各相互関係を確率で定量的に評価し、分析をする。

⑤②③④において抽出・評価されたさまざまな相互関係を用いて、調査対象とした広場空間における人間行動の記号過程をモデル化し、そのシミュレーションを行う。

⑥人間行動に基づいた建築・都市空間の設計について考察する。

1.3 既往研究と研究の位置づけ

建築・都市空間を記号集合として捉え、記号集合の分節の仕方について考えることは、建築記号論においては一般的であるが^{2),3)}、本研究に関連して、C.S.Peirceの記号分類を建築に応用している例としては、Blomeyer⁴⁾、Helmholtz⁴⁾、Dreyer⁵⁾、Ertekin⁶⁾等の研究がある。これらはPeirceの記号分類に基づいて、記号集合としての建築の分類について言及しているが、中でも、G.L.Koenigは、Peirceの記号論の流れをくむC.Morrisの行動主義的記号モデル^{注2)}を導入し、人間行動との関係性から建築的記号の定義を試みている⁸⁾。

また、ベイジアンネットワークは、本報で扱う日常の自由な人間行動のように、無数の要因が複雑に関係し、同一の条件下でも一意に決まらない不確実な情報を伴った事象にアプローチする方法の一つである。近年人工知能の分野をはじめとし、生物学、医学など、さまざまな分野でベイジアンネットワークを応用した研究を確認することができるが、本報と同様、環境と人間行動との相関関係に人間行動のデータに基づいてアプローチする研究としては、店舗内における人間の購買行動に関する研究や^{10),11)}、子供の行動に関する研究^{12),13)}など多く見られる。

このような中で本研究の独自性は、まず、建築・都市空間における日常の自由な人間行動を、記号過程としてその全体性および多様性を位置付けた上で、ベイジアンネットワークを用いて構造化していること、そしてそれに基づいて、マルチエージェントシステムとして人間行動の記号過程をモデル化し、その上で建築・都市空間における人間行動の記号過程を、建築・都市空間の設計に焦点を当てながら分析していることにある。

2. 建築・都市空間における人間行動の記述

京都精華大学天ヶ池周辺における2007年7月26日10時～11時および12時～13時に行った調査^{1)注3)}によって得られたビデオの動画および写真の目視から、「人間行動」を「流動(人間の位置の移動)」と「滞留(5秒以上一定の場に留まること)」の組み合わせとして記述する^{注4)}。

(1) 各人間行動の記述

調査地内における全ての人間行動を記述する。記述する項目は次の通りである(表1)。

- ①ID: 記述する人ごとに個体識別番号(ID)を与える。
- ②滞留ID: 途中で滞留が行われる場合、各滞留にIDを与える。このIDは、前報で使用した滞留のIDを用いる。
- ③集団: 集団での人間行動(他者との人間行動)かどうかを識別する。他者との人間行動である場合には○、不明な場合には不明と記入する(単独の場合は無記入)。動画および写真の目視からコミュニケーションをとっていることが確認できて、かつ流動の速さがほぼ同じである場合に、集団での人間行動であると定義した。
- ④出発時間: 調査地に入った時間を調査開始時間からの時間で記入

- し、動画撮影開始時点で行動が始まっている場合は無記入とした。
- ⑤出発口: 調査地に入る際の使用出入口の番号(図1)を記入する。
- ⑥到着口: 調査地から出る際の使用出入口の番号(図1)を記入する。

(2) 流動軌跡と滞留位置

動画および写真の目視から、流動している人の体の中心を地面に投射した点を滑らかにつなぎ、平面図上に流動軌跡を記述する。途中で滞留が行われる場合には、前報における記述のデータを用い、流動経路中に滞留位置を記述する。図2に、記述した全ての流動軌跡を示す。

表1 各人間行動の記述の例
(10:00～11:00)

①ID	②滞留ID	③集団	④出発時間	⑤出発口	⑥到着口
0			0 : 53	8	1
1	1	○	2 : 21	12	8
2	2	○	2 : 20	12	8
3	3	○	2 : 59	14	1
4	4	○	3 : 1	14	7
5			1 : 58	14	7
6			2 : 3	8	1
7			2 : 19	14	1
8			2 : 26	15	1
9			2 : 28	14	1
10			2 : 33	14	3
11		○	2 : 42	14	1
12		○	2 : 44	14	1
13		○	2 : 46	14	3
14		○	2 : 48	14	3
15			2 : 49	14	1
16			2 : 49	15	6
17			2 : 59	15	8
18			3 : 19	14	6
19		○	3 : 25	14	8
20		○	3 : 27	14	8

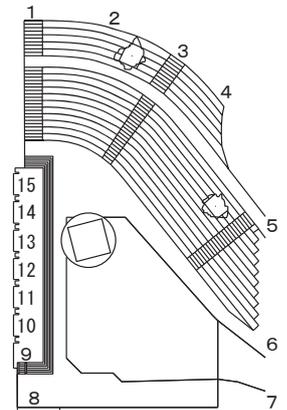


図1 出入口番号

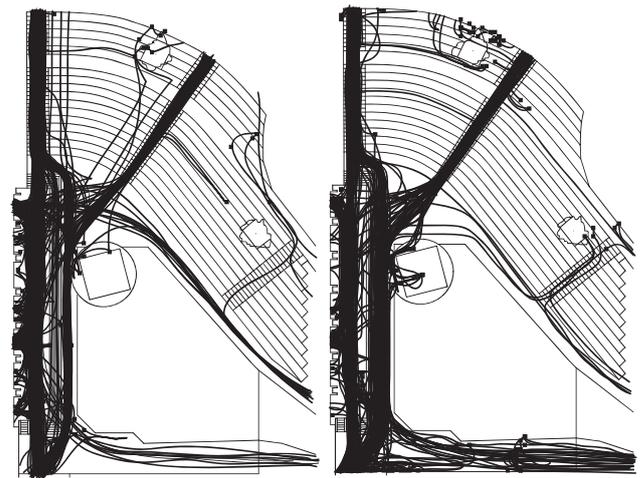


図2 全流動経路
(左: 10:00～11:00 右: 12:00～13:00)

3. ベイジアンネットワークを用いた建築・都市空間における人間行動の記号過程の構造化

3.1 ベイジアンネットワークの定義および特徴

ベイジアンネットワークは、対象とする確率的な事象を構成する変数間の確率的関係性を、その確率変数を表すノードと、方向性を持った有向リンクによって表すことのできるグラフィカルモデルである^{14),15)}。ベイジアンネットワークは、2つの確率変数 x_i, y 間の条件付き依存性を $x \rightarrow y$ と表し、 x を親ノード、 y を子ノードと呼ぶ。

まず、対象とする事象を構成する確率変数の集合を $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、その同時確率(joint probability)を $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ とする。ある確率変数 x_j が与えられた時の確率変数 x_i の条件付き確率を $p(x_i | x_j)$ とし、 x_i の親ノードとなっている変数集合を $pa(x_i)$ とする。このとき、ベイジアンネットワークは次のように定義できる¹⁶⁾。

① $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を表す非循環有向グラフである。

② $P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i | pa(x_i))$ と因子分解できる。

したがって、ある現象がベイジアンネットワークによって構造化されれば、②から、現象を構成する各事象を確率によって表現できる。この特徴を利用すれば、観測データと確率推論アルゴリズムを用いることによって、各事象を確率値で定量的に評価することが可能となる。このとき、ベイジアンネットワークでは、確率的な評価の方向を有向リンクの方向に限定しないため(例： $x \rightarrow y$ と表される場合に、 y から x の方向にも評価ができる)、あらゆる事象を対象に確率的な評価を行える点に特徴がある。

3.2 ベイジアンネットワークの構築方法

本報では人間行動の記述データからベイジアンネットワークを構築するが、データからのベイジアンネットワークの構築とは、データセットを D 、非循環有向グラフを G 、ノード数が n である非循環有向グラフすべてを要素とする集合を G^n とすると、次のような非循環有向グラフ G^* を求めることである¹⁷⁾。

$$G^* = \arg \max_{G \in G^n} f(G; D)^{\text{注}5)}$$

ここで、 $f(G; D)$ はデータセット D に基づいたグラフ G のネットワーク構造を評価するスコアを示しているが、このスコアとは、対象とする現象の将来のデータの予測精度のより良いものをより高評価とするスコアである。つまり、人間行動の記述データからベイジアンネットワークを構築することは、人間行動の記述データ間の、将来の確率的な関係性を表す非循環有向グラフを求めることに等しい。

このようなグラフを求めるには、一般にヒューリスティクスに、構造探索アルゴリズムを用いて計算機上で行う^{注6)}。本報では構造探索アルゴリズムとして Hill-climbing を^{注7)}、評価スコアには K2metric²⁹⁾を用い、確率ネットワークを構築する^{注8)}。

3.3 確率ネットワークとしての人間行動の記号過程

人間行動の記述のデータを用いて、調査地における人間行動の標準的記号過程をベイジアンネットワークによって構造化する。このように建築・都市空間における人間行動の記号過程を確率ネットワークとして捉えるということは、目的・状況-環境-人間行動間のそれぞれの結びつきを確率的に捉えることに他ならない。3.2 より換言すれば、構造化されたネットワークは、目的・状況-環境-人間行動間の将来の確率的な関係性を可視化したものとなる。

本報では、特に環境-人間行動間の結びつきに着目して研究を行うこととする。具体的には、まず環境および記述した人間行動をある単位に分節し、環境、人間行動のそれぞれに属する要素を抽出する。そして抽出したさまざまな要素同士の関係性をベイジアンネットワークとして構造化し、各関係性を確率的に評価するという方法をとる。

このとき、環境と人間行動の各要素への分節には、Peirce が提示する包括的な記号分類を参照し、広場内外の他の場所との関係性の有無によってカテゴリー分けをした上で行う。関係性の有無を基準として分節することによって、広場内の要素同士の関係や、広場外の要素も含めた関係など、さまざまなレベルの関係性を抽出することが可能となる。

3.4 建築・都市空間における人間行動および環境記号の抽出・分類

まず、調査対象としている広場を、①広場内の場所における人間

行動、②広場内の他の場所との関係性を含む場所における人間行動、③広場外の場所との関係性を含む場所における人間行動} の3つに分類し、それぞれに対応する人間行動を抽出し、次に、抽出した人間行動との対応から、広場空間における環境記号を抽出・分類する。

3.4.1 建築・都市空間における人間行動の抽出・分類

(1) 広場内の場所における人間行動

広場内の場所で、広場内の他の場所との関係性なしに記述される人間行動をここに分類する。

まず調査地を、観察される人間行動の傾向と環境記号との観点から、似た特徴を持つ部分ごとに分割し、便宜上、図3のように名前を付ける。分割した広場内の各場所を「広場内の場所」として定義し、以下、「広場内の場所における人間行動」として、分割した各場所内における人間行動を抽出する。

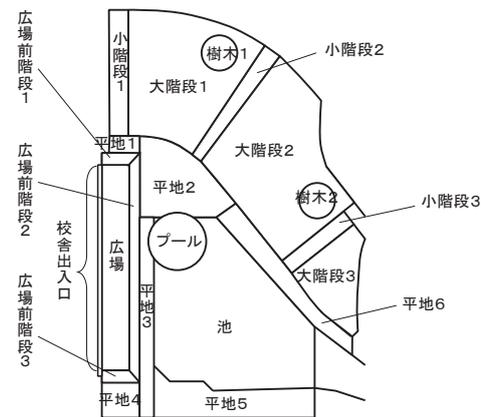


図3 広場内の場所

行動種類：広場内の場所における人間行動を、滞留の有無によって①流動のみ、②滞留あり、行動が確認されない場合には、③行動なしとして3つに分類する。

滞留継続時間：広場内の場所における人間行動を、平均滞留継続時間ごとに①滞留なし②滞留 10 秒未満、③滞留 10 秒以上 1 分未満、④滞留 1 分以上に分類する。

滞留回数：広場内の場所に入ってから出るまでに行われた滞留の平均回数ごとに①滞留なし、②滞留 1 回、③滞留 2 回以上に分類する。

(2) 広場内の他の場所との関係性を含む場所における人間行動

広場内の他の場所との関係性に基づいて記述される人間行動をここに分類する。例えば、ある主体の調査地に入ってから出るまでの滞留の回数など、主体と広場内の様々な場所との関係性を総合することで記述することができる人間行動を抽出・記述する。

全体滞留回数：調査地に入ってから出るまでの人間行動を、合計滞留回数ごとに①滞留なし、②滞留 1 回、③滞留 2 回以上に分類する。

全体滞留継続時間：調査地に入ってから出るまでの人間行動について、合計の滞留継続時間ごとに①滞留なし、②滞留 10 秒未満、③滞留 10 秒以上 1 分未満、④滞留 1 分以上に分類する。

(3) 広場外の場所との関係性を含む場所における人間行動

広場外の場所との関係性に基づいて記述される人間行動をここに分類する。具体的には、出入口(広場に接する校舎の位置など、広場外との関係性から成立する場所)との関係性から決定する流動経路の形状、およびその位置関係を抽出する。

まず、流動経路を使用出入口ごとに分類し(表 2)、各使用出入口

で、過半の人がたどる経路を主要な流動経路とする。なお、使用回数が3回以上の組み合わせにのみ主要経路を定義し、3回未満の出入口の組み合わせに関しては、主要な経路は定義しない。

表2 各出入口の使用回数および寄り道の回数

出入口	合計	10:00-11:00		12:00-13:00		寄り道			出入口	合計	10:00-11:00		12:00-13:00		寄り道		
		あり	ややあり	なし	あり	ややあり	なし	あり			ややあり	なし	あり	ややあり	なし		
1-1	7	2	5	7	0	0	5-5	1	0	1							
1-2	4	1	3	4	0	0	5-6	1	1	0							
1-5	1	0	1				5-8	1	0	1							
1-6	1	0	1				5-11	1	0	1							
1-7	4	2	2	0	1	3	6-14	1	1	0							
1-8	103	60	43	0	5	98	6-15	11	10	1	2	0	9				
1-9	5	5	0	0	0	5	7-7	4	0	4	4	0	0				
1-10	2	0	2				7-8	4	0	4	0	1	3				
1-11	41	30	11	0	10	31	7-10	2	1	1							
1-12	2	2	0				7-11	5	0	5	0	0	5				
1-14	12	10	2	0	1	11	7-12	1	1	0							
1-15	8	6	2	2	3	3	7-13	1	1	0							
2-2	11	1	10	11	0	0	7-14	2	2	0							
2-8	2	1	1				7-15	2	2	0							
2-11	2	2	0				8-8	10	2	8	10	0	0				
2-15	2	2	0				8-9	5	2	3	0	1	4				
3-3	3	0	3	3	0	0	8-10	3	1	2	3	0	0				
3-7	2	0	2				8-11	29	15	14	0	5	24				
3-8	54	24	30	1	5	48	8-12	5	5	0	0	0	5				
3-9	2	2	0				8-13	1	0	1							
3-11	7	6	1	0	1	6	8-14	2	2	0							
3-13	1	0	1				8-15	62	38	24	1	10	51				
3-14	7	7	0	0	0	7	11-11	3	3	0	3	0	0				
3-15	4	2	2	2	0	2	11-15	23	15	8	0	0	23				
							14-15	1	0	1							
							15-15	4	2	2	4	0	0				
							その他	14	1	13							

寄り道流動(主要経路との関係性)：①主要な流動経路から離れる流動経路の部分を持つ人間行動(図4(a))、②主要な流動経路からやや離れる部分や(主体の5歩以内)、流動経路内で後戻りの部分を持つ人間行動(図4(b))、③同一の出入口を用いる人間行動(図4(c))を寄り道の経路を持つ人間行動として定義し、①③を寄り道ありの人間行動、②をやや寄り道ありの人間行動、そのほかを寄り道なしの人間行動と呼ぶことにし、寄り道の有無によって分類する^{注9)}。表2に使用出入口ごとの使用回数、寄り道の回数を示す。

寄り道位置滞留：行動する主体が滞留を行っている場合に、①主体の主要経路上で滞留を行っている場合、②主要な経路に隣接した広場内の場所で滞留を行っている場合、③その他の広場内の場所にお

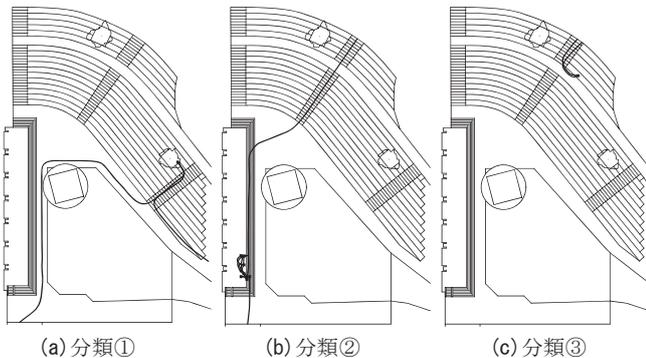


図4 各寄り道経路の定義

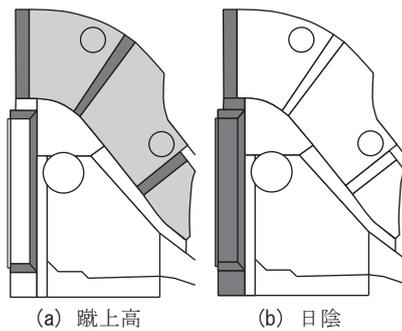


図5 分類の例

いて滞留を行っている場合(寄り道位置での滞留と呼ぶ)に分類する。

3.4.2 建築・都市空間における環境記号の抽出・分類

(1) 広場内の場所に関する環境記号

広場の他の部分との関係性なしに記述される環境記号をここに抽出し、分類する。前報で抽出した例では、樹木周辺の雰囲気(質的環境)、知り合い周辺の雰囲気(質的環境)、階段の段差(物理的・指標的環境)、日陰(物理的・指標的環境)などがある。

樹木：広場内の場所における樹木の有無を示す。

知り合い：広場内の場所における行動主体にとっての知り合いの有無を示す。知り合いであるかどうかは、動画および写真の目視により、コミュニケーションの有無によって判断した。

蹴上高：広場内の場所を階段の蹴上高によって(H)40cm程度、(L)20cm程度、(X)平地(段なし)に分類する。図5(a)に行った蹴上高の分類を示す(H:最も濃い灰色、L:薄い灰色、X:白)。

日陰：広場内の場所における日陰の有無を示す。日陰の領域は時間帯によって変化するが、ビデオおよび写真の目視から、広場内の場所の面積の半分以上が日陰で覆われた場合に日陰があるとし、半分未満のときには日陰なしとした。図5(b)に12:00~13:00のある時刻における日陰の位置を示す(日陰あり:灰色、なし:白)。

(2) 広場内の他の場所との関係性を含む場所に関する環境記号

広場内の他の場所との関係性に基づいて記述される広場内の場所を抽出し、ここに分類する。本報では、広場内にいる他の主体を環境記号の一つとみなし、広場内の他の場所との関係性の一例として、他の主体との関係性を抽出する。

つれ：主体が①誰かと一緒に調査地入ってきているか、②一人か、によって分類をする。

(3) 広場外の場所との関係性を含む場所に関する環境記号

広場外の場所との関係性に基づいて記述される広場内の場所をここに抽出し、分類する。

主要な流動経路からの距離：広場内の場所を主要な流動経路からの距離によって、①主要な流動経路上にある、②主要な経路に隣接する、③①②以外の場合、の3つに分類する。

使用出入口：調査地に入ってから出るまでに使用した出入口番号のセットによって分類する(表2)。

入口・出口からの距離：広場外と広場内を結ぶ各出入口に接しているか否かで場所を分類する。

調査時間帯：調査地全体を取り巻く状況の一例として、調査時間帯によって、①10:00~11:00、②12:00~13:00の2つに分類する。

表3 ある主体の人間行動と環境の関係性の記述の例

小環境名	広場内の場所と人間行動						広場内の他の場所との関係性を含む場所				広場外との関係性を含む場所と人間行動						
	樹木	知り合い	蹴上高	日陰	行動種類	滞留継続時間	滞留回数	つれ	全体滞留回数	全体滞留継続時間	主要経路	使用出入口	入口からの距離	出口からの距離	調査時間帯	寄り道流動	寄り道位置滞留
小階段1	なし	なし	L	なし	流動のみ	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	隣接	その他	10~11	ややあり	滞留なし
大階段1	なし	なし	H	なし	滞留あり	10秒未満	1	なし	2	60秒以上	隣接	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	隣接位置
樹木1	あり	なし	H	あり	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
小階段2	なし	なし	L	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
大階段2	なし	なし	H	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
樹木2	あり	なし	H	あり	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
小階段3	なし	なし	L	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
大階段3	なし	なし	H	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
平地1	なし	なし	X	なし	流動のみ	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
プール	なし	なし	X	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	隣接	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
平地2	なし	なし	X	なし	流動のみ	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
平地3	なし	なし	X	なし	流動のみ	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
校舎前広場	なし	あり	X	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
校舎前出入口	なし	なし	X	あり	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	隣接	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
広場前階段1	なし	なし	L	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
広場前階段2	なし	あり	L	あり	滞留あり	60秒以上	1	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	経路上
広場前階段3	なし	なし	L	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
平地4	なし	なし	X	なし	流動のみ	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	経路上	1-8	その他	隣接	10~11	ややあり	滞留なし
平地5	なし	なし	X	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし
平地6	なし	なし	X	なし	行動なし	滞留なし	0	なし	2	60秒以上	その他	1-8	その他	その他	10~11	ややあり	滞留なし

3.5. 建築・都市空間における人間行動の記号過程の構造化

本報では、流動と滞留との関係性に着目するべく、3.4 に基づいて、表3のように作成した全9198行のデータから、調査地に入ってから出るまでに滞留を1回以上行う人の2058行のデータを抽出し^{注4)}、ベイジアンネットワークによってデータ間の関係性を構造化すると、図6のようになる^{注10)}。

4. ベイジアンネットワークを用いた建築・都市空間における人間行動の記号過程の分析

4.1 ベイジアンネットワークからの知識の抽出方法

構築されたベイジアンネットワークからの知識抽出にあたり、本報では、定性的な特性から直感的に抽出することはせず、Junction tree アルゴリズム³⁰⁾を用いて事前確率および事後確率を算出し、それに基づいて感度分析を行うことによって抽出する^{注10)}。

感度分析は、ベイジアンネットワークにおけるどの事象がどの事象に影響を与えているかを定量的に示す1つの方法である。感度とはベイジアンネットワーク内の事象Aについて、事前確率P(A)と、事象Bが観測され値nに固定された場合の事象Aの事後確率P(A | B="n")との比である、「P(A | B="n")/P(A)」の値を指す。したがって、感度>1の場合には、事象Bが事象Aに対して事象Aの起こる確率が高くなる方に影響を与え、感度<1の場合には、事象Aの起こる確率が低くなる方に影響を与えているということになる。なお本報では(感度-1)の値を使用し、得られた感度の絶対値が高いほど、大きな影響を受けていることを示し、符号は影響の方向を示すこととする。

4.2 建築・都市空間における人間行動の記号過程の分析

作成したベイジアンネットワークを用いて感度の値を求める。表4、表5に環境ノードに各観測値を与えたときの(感度-1)の値およびグラフを示す。

4.2.1 広場内における人間行動の環境に対する感度(表4)^{注11)}

(1) 行動種類

広場内の場所における滞留のない人間行動は、平地もしくは蹴上高が低い広場内の場所、主要経路上の広場内の場所に対し高い感度を示し(入口および出口からの距離が近い場合にも高くなっているが、定義によるものである)、すなわち主に歩きやすさに関わる環境記号に対して比較的高い感度を示している。また、使用出入口に対する感度が、滞留のある人間行動に比べて高く、主体の使用出入口がわかった場合には、その主体が広場内の場所で流動のみをする傾向が強くなるかどうかをあらかじめ予想できることを示唆している。

一方で、滞留のある人間行動は、樹木あり、知り合いありの場合に対して感度が高い。他に、主要経路上および主要経路から近い、入口および出口から近い広場内の場所に対しても感度が高い。一方で、つれ、調査時間帯、使用出入口とはほぼ無関係であり、主体の使用出入口がわかっていても、広場内の場所で滞留をするかどうかは予測ができないことを示唆している。つまり、広場内の場所における各滞留は、流動中に順次立ち現われる環境記号によって、その都度誘発されている可能性が高い。

(2) 滞留時間

滞留時間が0秒となる確率は、広場内の場所に知り合いがいる場合を除き、今回抽出した環境記号とはほぼ無関係である。

滞留時間が10秒未満の場合および60秒未満の場合は、環境に対する感度が類似しており、知り合いあり、平地、主要経路上、入口もしくは出口からの距離が近い場合に高い感度を示す。一方で使用出入口に対する感度は全体的に低く、主体の使用出入口がわかっていても、広場内の場所で60秒未満の滞留をするかどうかは予測ができないことを示唆している。つまり、60秒未満の滞留は、流動中に順次立ち現われる主要経路周辺の環境記号によって、その都度誘発されている可能性が高い。

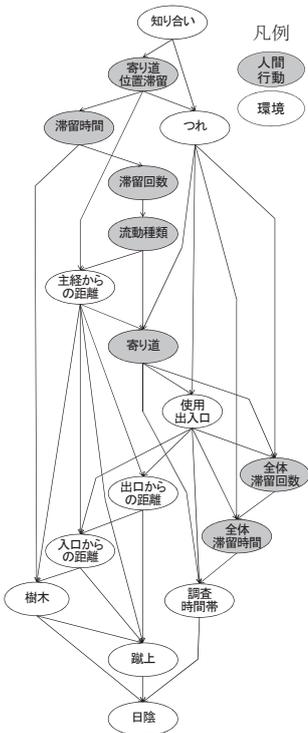


図6 構築されたネットワーク

表4 広場内の場所における人間行動の環境記号に対する(感度-1)の値^{注12)}

		広場内の人間行動の(感度-1)の値													
		行動種類		滞留時間						滞留回数					
		流動のみ	滞留あり	0秒	10秒未満	60秒未満	60秒以上	0回	1回	2回以上					
広場内の場所	樹木	なし	0.10	-0.05	0.00	0.04	0.01	-0.29	0.00	-0.05	-0.07				
		あり	-0.84	0.47	-0.03	-0.36	-0.12	2.56	-0.03	0.46	0.55				
	知り合い	なし	0.02	-0.38	0.03	-0.39	-0.41	-0.37	0.02	-0.39	-0.39				
		あり	-0.91	15.01	-0.98	15.17	15.81	14.28	-0.97	15.08	15.06				
	蹴上高	低い	0.20	0.05	0.00	0.15	0.09	-0.13	0.00	0.06	0.04				
		高い	-0.66	-0.20	0.01	-0.49	-0.37	0.45	0.01	-0.21	-0.17				
なし		0.33	0.11	-0.01	0.24	0.20	-0.22	-0.01	0.11	0.09					
日陰	なし	0.05	-0.06	0.00	0.03	0.00	-0.26	0.00	-0.06	-0.07					
	あり	-0.10	0.12	-0.01	-0.07	0.00	0.57	-0.01	0.12	0.14					
広場内の場所	主要経路からの距離	経路上	3.21	1.88	-0.12	2.70	2.22	0.30	-0.12	1.91	1.73				
		近い	-0.17	0.68	-0.04	0.32	0.12	2.15	-0.04	0.69	0.69				
		遠い	-0.88	-0.68	0.04	-0.84	-0.66	-0.52	0.04	-0.69	-0.64				
入口からの距離	近い	1.44	1.44	-0.09	1.70	1.36	1.24	-0.09	1.45	1.35					
	遠い	-0.28	-0.28	0.02	-0.33	-0.26	-0.24	0.02	-0.28	-0.26					
	なし	1.73	1.50	-0.10	1.83	1.48	1.12	-0.10	1.52	1.40					
出口からの距離	近い	-0.30	-0.26	0.02	-0.32	-0.26	-0.20	0.02	-0.27	-0.25					
	遠い	0.00	-0.01	0.00	-0.04	-0.01	0.05	0.00	-0.01	0.00					
	なし	0.00	0.02	0.00	0.13	0.06	-0.17	0.00	0.02	0.01					
広場外との関係性を含む場所	調査時間帯	am	0.04	0.00	0.00	0.07	0.03	-0.12	0.00	0.00	0.01				
		pm	-0.03	0.00	0.00	-0.06	-0.02	0.10	0.00	0.00	0.01				
		1-1	-0.28	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04				
	使用出入口	1-2	-0.48	0.15	-0.01	0.13	0.12	0.19	-0.01	0.14	0.13				
		1-7	0.33	-0.03	0.00	0.11	0.01	-0.20	0.00	-0.02	-0.04				
		1-8	0.31	-0.04	0.00	0.08	0.00	-0.22	0.00	-0.03	-0.05				
		1-9	0.09	-0.05	0.00	0.14	0.05	-0.40	0.00	-0.04	-0.07				
		1-11	0.32	-0.08	0.00	-0.02	-0.05	-0.18	0.00	-0.07	-0.07				
		1-14	0.09	-0.05	0.00	0.14	0.05	-0.43	0.00	-0.04	-0.07				
		1-15	-0.18	-0.01	0.00	-0.06	-0.01	0.06	0.00	-0.01	0.01				
		2-2	-0.29	0.02	0.00	-0.17	-0.04	0.30	0.00	0.01	0.04				
		3-3	-0.28	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04				
		3-8	0.26	-0.04	0.00	0.09	0.01	-0.24	0.00	-0.03	-0.06				
		3-11	0.20	-0.06	0.00	0.11	0.02	-0.38	0.00	-0.05	-0.09				
		3-14	0.09	-0.05	0.00	0.14	0.05	-0.40	0.00	-0.04	-0.07				
3-15	-0.27	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04						
6-15	-0.25	0.02	0.00	-0.14	-0.03	0.27	0.00	0.01	0.04						
7-7	-0.28	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04						
7-8	0.44	0.02	0.00	0.09	0.00	-0.01	0.00	0.03	0.00						
8-8	-0.28	0.02	0.00	-0.17	-0.04	0.30	0.00	0.01	0.04						
8-9	0.09	-0.05	0.00	0.14	0.05	-0.42	0.00	-0.04	-0.07						
8-11	0.37	-0.05	0.00	0.01	-0.03	-0.12	0.00	-0.05	-0.05						
8-12	0.09	-0.05	0.00	0.14	0.05	-0.42	0.00	-0.04	-0.07						
8-16	0.33	0.02	0.00	0.04	-0.01	0.06	0.00	0.02	0.01						
11-11	-0.27	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04						
11-15	-0.45	0.19	-0.01	0.34	0.21	-0.05	-0.01	0.19	0.14						
15-15	-0.28	0.02	0.00	-0.16	-0.03	0.29	0.00	0.01	0.04						

60秒以上の場合は、樹木あり、知り合いあり、蹴上高が高い、日陰があり、主要経路上もしくは主要経路から近い、入口および出口からの距離が近い場合に対して感度が高く、樹木と蹴上高と日陰が比較的長い滞留時間を誘発する環境記号であることがわかる。また、使用出入口に対する感度が全体的に60秒未満および10秒未満の場合よりも高く、主体の使用出入口がわかれば、その主体が広場内の場所で行う滞留時間を予測できる可能性を示唆している。

(3) 滞留回数

広場内の場所で滞留回数が0回となる確率は、知り合いがいる場合に低くなることを除き、抽出した環境記号とはほぼ無関係である。

広場内の場所で滞留回数が1回の場合と2回以上の場合で、類似した感度を示しており、広場内の特定の環境記号が、広場内のある場所における1回以上の滞留を誘発していることは確認できるが、広場内の滞留回数の変化(1回のみか、複数回か)に関わりのある環境記号は今回見つかっていない。このとき特に、1回以上の場合、環境内の歩きやすさなどに関する環境記号に対してではなく、樹木や知り合いなどの環境記号に対して感度が高く、広場外との関係性を含む場所からは、出入口からの距離を除いてそれほど影響を受けていない。また、主要経路上もしくは主要経路から近い、入口および出口から近い場合にも高い感度を示す。

4.2.2 広場内の他の場所との関係性を含む場所における人間行動の環境に対する感度 (表5) ^{※1)}

(1) 全体滞留時間

全体的に広場内の状況よりも、調査時間帯や使用出入口など、広場外との関係性に左右されており、主体の使用出入口がわかれば、その全体滞留時間を予測できることがわかる。

全体滞留時間が60秒以上の場合は日陰に対して高い感度を示しており、日陰が全体滞留時間を長くすることがわかる。10秒未満の

場合には、日陰に対する感度は負の値を示している。また樹木、知り合い、蹴上高は全体滞留時間とはほぼ無関係である。つれに対する感度が高く、つれは滞留時間を短くする方向に影響を与えていることがわかる。

全体として全体滞留時間は、調査時間帯に対して高い感度を示す。特に60秒以上の場合は午後に対して感度が高く、60秒未満の場合は午前に対して感度が高い。

(2) 全体滞留回数

使用出入口以外の環境記号とはほぼ無関係であり、使用出入口に対する感度は、全体滞留回数が1回である場合と2回以上である場合とでは、感度の符号の向きが逆であり、使用出入口が観測されれば、全体滞留回数を予測することができる。4.2.3 広場外との関係性を含む場所における人間行動の環境に対する感度 (表5)

(1) 寄り道流動

全体的に、広場内の場所に関する環境記号と、入口および出口からの距離とはほぼ無関係である。一方で、行動主体のつれの有無、調査時間帯、使用出入口がわかれば、寄り道流動の傾向を予測できることがわかる。

このとき、つれがいる場合および調査時間帯が午前の場合には、寄り道流動がなしの場合に対して感度が高く(主要経路上にある広場内の場所に対して感度が高くなるのは定義によるものである)、一方で寄り道流動がありの場合に対して感度が低い。また、調査時間帯が午後の場合には、寄り道流動がありの場合に対して感度が高い。

(2) 寄り道位置滞留

主要経路上での滞留については、特定の使用出入口(図1,表5内:1-7,1-8,1-9,1-14)に対して感度が高い。また、特に観測された滞留が平地の上である場合と主体につれがいる場合に対しても感度

表5 広場内の他の場所との関係性を含む場所における人間行動の環境記号に対する(感度-1)の値および広場外との関係性を含む場所における人間行動の環境記号に対する(感度-1)の値^{注12)}

観測値として入力した各値	広場内/広場内他の場所	環境記号	広場内の他の場所との関係性を含む場所での人間行動の(感度-1)の値						広場外との関係性を含む場所での人間行動の(感度-1)の値					
			全体滞留時間			全体滞留回数			寄り道流動			寄り道位置滞留		
			10秒未満	60秒未満	60秒以上	1回	2回以上	なし	ややあり	あり	なし(経路上)	ややあり	あり	
広場内の場所	樹木	なし	0.01	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.02	0.02	-0.02	0.06	-0.29	-0.09	
		あり	-0.11	-0.05	0.10	-0.03	0.07	-0.17	-0.16	0.19	-0.51	2.54	0.81	
		知り合い	なし	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.41	-0.27	-0.48	
	蹴上高	あり	0.04	-0.03	0.00	0.00	-0.01	0.15	-0.13	-0.04	16.18	10.53	18.74	
		低い	0.06	0.02	-0.05	0.01	-0.02	-0.01	0.08	-0.09	0.17	-0.04	-0.16	
		高い	-0.09	-0.04	0.07	-0.02	0.05	-0.13	-0.14	0.15	-0.75	0.64	0.31	
	日陰	なし	0.03	0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.03	0.04	-0.04	0.41	-0.42	-0.12	
		なし	0.13	0.04	-0.10	0.00	-0.01	0.10	-0.01	-0.06	0.06	-0.27	-0.12	
		あり	-0.27	-0.08	0.21	-0.01	0.02	0.21	0.02	0.14	-0.12	0.57	0.26	
	広場内他の場所	主要経路からの距離	経路上	0.31	0.13	-0.26	0.09	-0.18	0.46	0.47	-0.53	4.04	-0.84	-0.84
			近い	0.12	0.04	-0.10	0.03	-0.06	0.17	0.17	-0.19	-0.87	5.82	-0.77
			遠い	-0.11	-0.05	0.09	-0.03	0.06	-0.17	-0.17	0.19	-1.00	-0.97	0.40
		入口からの距離	近い	-0.04	-0.05	0.06	0.01	-0.01	-0.03	-0.12	0.08	1.86	2.24	-0.62
			遠い	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	-0.01	-0.36	-0.43	0.12
			出口からの距離	近い	-0.07	-0.03	0.06	0.02	-0.04	-0.03	-0.06	0.05	2.16	1.86
つれ		遠い	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.38	-0.32	0.12	
		なし	-0.06	-0.02	0.05	-0.03	0.06	-0.19	-0.03	0.14	-0.08	0.08	0.11	
		あり	0.22	0.07	-0.17	0.11	-0.22	0.64	0.10	-0.49	0.29	-0.27	-0.37	
広場外との関係性を含む場所		調査時間帯	am	0.60	0.22	-0.49	0.00	0.00	0.47	-0.06	-0.30	0.18	-0.18	-0.26
			pm	-0.47	-0.17	0.38	0.00	0.00	-0.36	0.05	0.23	-0.14	0.14	0.19
			1-1	-0.91	0.00	0.49	0.44	-0.92	-0.95	1.07	-0.93	-0.40	0.34	0.71
		使用出入口	1-2	-0.91	-0.94	1.20	0.09	-0.18	-0.97	-0.95	1.09	0.08	0.33	0.04
			1-7	-0.86	1.79	-0.93	-0.26	0.53	0.50	1.37	-0.95	0.27	-0.16	-0.60
			1-8	0.48	0.28	-0.47	0.46	-0.96	0.70	1.14	-0.99	0.24	-0.24	-0.50
	1-9		2.87	-0.84	-0.87	0.37	-0.78	1.81	-0.80	-0.91	0.45	-0.73	-0.55	
	1-11		0.79	0.12	-0.51	0.46	-0.94	0.88	0.83	-0.98	0.07	-0.26	-0.24	
	1-14		1.81	-0.93	-0.24	-0.02	0.05	1.97	-0.93	-0.91	0.48	-0.79	-0.58	
	1-15		-0.89	0.90	-0.22	-0.51	1.05	0.00	-0.93	0.41	-0.11	-0.03	0.29	
	2-2		-0.80	1.80	-0.97	0.18	-0.37	-0.99	-0.98	1.12	-0.41	0.35	0.74	
	3-3		-0.90	-0.93	1.20	-0.02	0.05	-0.95	-0.93	1.07	-0.40	0.34	0.71	
	3-8		-0.32	0.60	-0.30	-0.09	0.18	0.88	0.49	-0.83	0.28	-0.29	-0.53	
	3-11		2.88	-0.84	-0.88	0.38	-0.78	1.82	-0.81	-0.91	0.40	-0.60	-0.61	
	3-14		2.87	-0.84	-0.87	0.37	-0.78	1.81	-0.80	-0.91	0.45	-0.73	-0.55	
3-15	1.10	-0.90	0.11	-0.26	0.54	-0.93	-0.90	1.04	-0.39	0.33	0.68			
6-15	-0.77	1.67	-0.88	-0.89	1.85	-0.87	-0.81	0.96	-0.36	0.31	0.63			
7-7	-0.93	0.47	0.13	0.10	-0.20	-0.97	-0.95	1.09	-0.41	0.35	0.71			
7-8	-0.77	1.67	-0.88	-0.89	1.85	-0.87	3.46	-0.91	0.13	0.31	-0.54			
8-8	0.24	-0.56	0.30	-0.57	1.18	-0.98	-0.97	1.11	-0.41	0.35	0.73			
8-9	-0.86	1.79	-0.92	-0.26	0.54	1.93	-0.89	-0.95	0.47	-0.78	-0.57			
8-11	0.28	-0.12	-0.06	0.25	-0.52	0.34	1.70	-0.99	0.09	-0.09	-0.33			
8-12	3.09	-0.91	-0.93	0.42	-0.88	1.93	-0.89	-0.95	0.47	-0.78	-0.57			
8-15	1.67	-0.99	-0.93	-0.11	0.24	-0.97	2.83	-0.96	0.02	0.35	-0.32			
11-11	-0.86	1.79	-0.93	-0.26	0.54	-0.93	-0.90	1.04	-0.39	0.33	0.68			
11-15	-0.92	-0.23	0.67	-0.81	1.26	-0.20	-0.95	0.56	0.55	0.06	-0.67			
15-15	-0.90	0.00	0.48	-0.02	0.05	-0.95	-0.93	1.07	-0.40	0.34	0.71			

が高い。なお、出入口からの距離に対して感度の値が高いが、出入口近くが主要経路上であるという定義によるものである。また、樹木に対する感度が低いのも、樹木が主要経路上にはないためである。

主要経路から近いところでの滞留および主要経路から離れたところでの滞留について、両者は使用出入口に対する感度および広場内の場所に対する感度が類似しており、使用出入口や広場内の場所における環境記号が観測されても、滞留位置が主要経路上から近いところとなるのか、遠いところとなるのかどうか予測することは困難である(なお、出入口からの距離に対して感度の値が異なっているが、出入口近くが主要経路上であるという定義によるものである)。また、調査時間帯が午前である場合には、寄り道位置での滞留となる確率は低くなる。なお、滞留の特徴や位置に関わらず知り合いの近くでは滞留すると出ているが、これはコミュニケーションの有無によって知り合いを定義したことが影響している。

5. 建築・都市空間が誘発する人間行動の記号過程のモデル化およびシミュレータの構築

5.1 各環境記号が誘発する人間行動の記号過程のモデル化

分析に基づいて、京都精華大学天ヶ池周辺における環境記号が誘発する人間行動の記号過程を次のように推測・単純化し、モデル化をする。

(1) 広場内の場所が誘発する人間行動

歩きやすさに関わる平地および蹴上の低い階段は、流動のみ人間行動、経路上での滞留、継続時間が短い(60秒未満)滞留を誘発しており、また、継続時間が短い滞留を誘発している要素は、歩きやすさに関わる要素以外では知り合いを除き特でない。このことから、継続時間が短い滞留は、歩きやすい地点を流動中に偶発的に行くと仮定する。一方で、樹木および蹴上の高い階段および日陰は、主要経路から近いもしくは遠いところでの滞留、継続時間が長い(60秒以上)滞留を誘発し、日陰はさらに全体滞留時間を長くする方向に働く。このことから、60秒以上の滞留は、主要な流動経路を少し離れた、60秒以上の滞留に相応しい環境周辺、中でも特に日陰内において発生すると仮定する。また、主体の行動傾向に関わらず、知り合いを発見した場合には知り合いの周辺まで行って滞留をする。

また、本報で抽出した環境記号は、広場内の各場所における滞留回数(1回だけか、複数回か)に変化を与えない。

(2) 広場内の他の場所との関係性を含む場所が誘発する人間行動

寄り道をする主体としない主体の双方を検討するため、本報ではつれがない場合をモデル化する。

(3) 広場外との関係性を含む場所が誘発する人間行動

基本的に各流動は、歩きやすい環境記号によって誘発され、その結果、主要な流動経路が形成される。したがって、全体の流動形状(寄り道流動)や滞留の位置(寄り道位置滞留)を、主要経路からの距離を用いて定義していたが、ここで主要経路からの距離を、歩きやすい場所との位置関係として再定義する。

出入口近くでは、滞留の種類(滞留時間、滞留回数)によらず、滞留を誘発することとする。

行動主体の使用出入口ごとに、全体滞留時間、全体滞留回数、流動形状(寄り道流動)、滞留位置(寄り道位置滞留)の傾向を決定することとする。特に、広場内の場所内で比較的最長い間(60秒以上)滞留

する場合は、使用出入口によって影響を受ける傾向が強くなるので、全体滞留時間が60秒以上である場合には、あらかじめ長い滞留をするために広場内に入ってくるものとする。

調査時間帯によって寄り道の傾向と全体の滞留時間が変化するが、本報では寄り道の起こる確率の高くなる午後の時間帯に設定する。

5.2 セル・オートマトン法によるシミュレータの構築

5.1に基づき、建築・都市空間が誘発する人間行動をセル・オートマトン法によってモデル化し、シミュレータを構築する。基本的には前報で構築したシミュレータに変更を加え、再構築する^{注13)}。

5.2.1 建築・都市空間の設定

前報と同様、格子状のセル群を調査地の環境セル群とし、設定した環境内を行動する人間セルをエージェントとしてモデル化する。基本的には前報と同様に状態量を設定するが、前報に加えて、各環境セルに対して日陰の有無についての状態量を設定した(図7)。

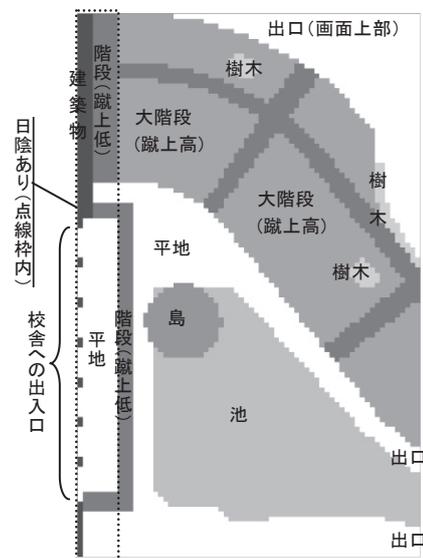


図7 セルの状態量

5.2.2 人間行動の記号過程の設定

まず、設定した建築・都市空間内にエージェントを配置する。配置されるとエージェントは目的地に向かうが、その過程で、エージェントは各環境セルの持つ状態量を読み取り、行動(流動および滞留)を順次決定する。このエージェントと環境セルとの相互作用をエージェントの記号過程としてモデル化する。

(1) 初期配置されるまでのエージェントの行動の記号過程

① エージェントの行動傾向の設定

初めに各エージェントに使用出入口(出発地および目的地となる出入口の組み合わせ)を設定し、それに伴って調査地に入ってから出るまでの全体滞留時間、全体滞留回数、寄り道流動(流動形状)を、分析に基づき表6のように設定する(主要経路を定義できなかった、同一の出入口もしくは1-2を用いている場合は除く)。使用出入口は、表6の使用出入口の組み合わせの中からいずれかを設定する(各エージェントへの使用出入口の割り振りについては、(2)①全体の流れ参照のこと)。各エージェントは設定した場所に初期配置され、目標とする方向を向く。なお、設定する全エージェントを5グループに分け、同じグループに属するエージェント同士を知り合いとする。

1step(1エージェントが25cm前進)を1秒として設定し、各エー

エージェントに全体滞留時間を設定し、10秒未満は1~9step、60秒未満は10~59step、60秒以上は、60~600stepを設定する。

表6 各使用出入口に対応する人間行動の傾向^{注14)}

使用出入口	全体滞留時間 0内は指定する滞留時間となりうる確率	全体滞留回数	寄り道流動 0内は指定する寄り道流動となりうる確率	
1-7	60秒未満(100%)	2回以上	なし(25%)	ややあり(75%)
1-8	10秒未満(60%) 60秒未満(40%)	1回	なし(35%)	ややあり(65%)
1-9	10秒未満(100%)	1回	なし(100%)	
1-11	10秒未満(25%) 60秒未満(75%)	1回	なし(50%)	ややあり(50%)
1-14	10秒未満(100%)	任意回数	なし(100%)	
1-15	60秒未満(100%)	2回以上	あり(100%)	
3-8	60秒未満(100%)	2回以上	なし(65%)	ややあり(35%)
3-11	10秒未満(100%)	1回	なし(100%)	
3-14	10秒未満(100%)	1回	なし(100%)	
3-15	10秒未満(90%) 60秒以上(10%)	2回以上	あり(100%)	
6-15	60秒未満(100%)	2回以上	あり(100%)	
7-8	60秒未満(100%)	2回以上	ややあり(100%)	
8-9	60秒未満(100%)	2回以上	なし(100%)	
8-11	10秒未満(100%)	1回	なし(25%)	ややあり(75%)
8-12	10秒未満(100%)	1回	なし(100%)	
8-15	10秒未満(100%)	2回以上	ややあり(100%)	
11-15	60秒以上(100%)	2回以上	あり(100%)	

②エージェントの距離帯の設定

各エージェントに「個体距離」および「社会距離」の距離帯を設定する^{注15)}。

個体距離：エージェントが処理する情報の範囲のうち、他者を受け入れる範囲。さらに本報ではやや寄り道をする傾向にあるエージェントが寄り道をする際に読み取る環境の範囲を示す。

社会距離：エージェントが扱う環境の範囲。エージェントは「社会距離」以遠のセルを認識しない。さらに本報では寄り道をする傾向にあるエージェントが寄り道をする際に読み取る環境の範囲を示す。

(2) 初期配置終了後のエージェントの行動の記号過程

①全体の流れ

(1)の初期配置終了後に行動が始まるが、各エージェントは出口へと向かうことを最終目標とする。出口に向かう過程で、基本的には歩きやすいセル(平地、もしくは蹴上高の低いセル)を選択して流動し、流動の途中、毎step1/10の確率で、各自の流動傾向(表6)に適応した距離帯内の環境セルを探索開始し、滞留位置を選択する。10step毎に1エージェント発生させ、表6の17種のいずれかの傾向を持つエージェントを各4ずつ発生させ計68のエージェントを設定する場合、および各10ずつ発生させ計170のエージェントを設定する場合をシミュレーションする^{注16)}。全エージェントが出口に到着した時点もしくは3000step後にシミュレーションを終了する。

②滞留位置の選択基準

寄り道ありの性質の場合、社会距離帯内から樹木あり、蹴上高が高い、日陰あり、出入口周辺の条件のいずれかを満たすセルを選択する。寄り道ややありの性質の場合は、個体距離帯内から樹木あり、蹴上高が高い、日陰あり、出入口周辺のいずれかの条件を満たすセルを選択する。寄り道なしの性質の場合は、個体距離帯内のセルのうち、主体の前方120°の範囲かつ出入口周辺、なければ主体の前方120°の範囲を選択する^{注17)}。

さらに全体滞留時間が60秒以上の性質を持つ場合には、各自の距離帯内で、日陰内のセルを優先的に選択する。また、いずれの場合も知り合いが各自の距離帯内で滞留している場合には、優先的に知り合いの個体距離帯内で滞留する。なお、条件を満たすセルが見つからない場合には、滞留は行わない。

③各滞留を継続する時間の設定

選択した滞留位置の環境記号の種類によって滞留時間を設定する。樹木あり、蹴上高が高い、日陰ありのいずれかの場合は60秒以上(60~600step)とし、その他の場合は60秒未満(1~59step)とする^{注18)}。滞留終了時に全体滞留時間から滞留時間を減算する。全体滞留時間が0以下となった場合には次回以降、滞留のための探索を行わない。

5.3 建築・都市空間における人間行動のシミュレーション

次の①~③を目的として、シミュレーションを行う。

- ①人間行動と建築・都市空間との動的な相互関係を観察する。
- ②今回の建築・都市空間における人間行動の分析で明らかにならなかった環境記号を発見する。
- ③人間行動を基軸とした建築・都市空間の設計への応用について考察する。

5.3.1 シミュレーションの条件

(1) 広場内の場所を変更する場合

広場内の場所の変更を行う場合の例として、樹木を、滞留を頻繁に誘発する要素として変更する。具体的には、全体の環境要素配置の変更は行わず、エージェントのルールに、樹木が主体の滞留の選択肢の範囲内にある場合には必ず滞留する設定を加える。

(2) 広場内の他の場所との関係性を含む場所を変更する場合

広場内の他の場所との関係性を変更する例として、次の①②の変更を行う。

①主要な流動経路との位置関係に基づいた配置変更

(1)で設定した、滞留をより誘発する樹木を、主要な流動経路が集中する場所である図8(a)の位置に配置する。

②主要な流動経路となりうる場所の増設

大階段の蹴上高を、蹴上の低い階段の蹴上高と同じくし(図8(b))、階段上からの流動経路の選択肢を増やすように誘導する。

(3) 広場外との関係性を変更する場合

広場外との関係性を変更する一例として、校舎の位置を変更し、校舎出入口を画面右下の図8(c)の位置に移動する。

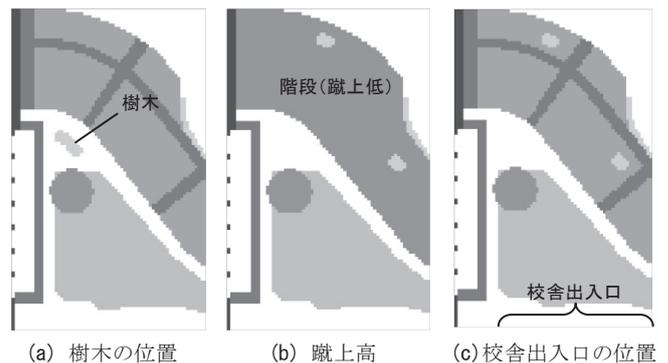


図8 各種シミュレーション条件の変更

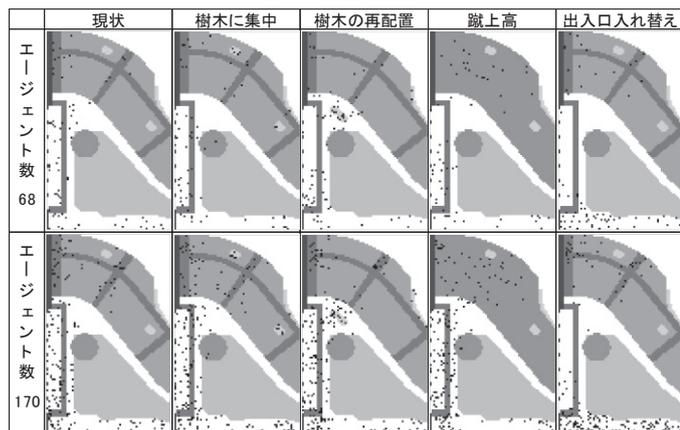
5.3.2 シミュレーション結果および考察

各変更に対して10回ずつシミュレーションを行う。各シミュレーション中に行われた全滞留位置の分布を表7に、行われた全滞留の合計累計時間および知り合いとの滞留回数を表8に示す。

(1) 広場内の場所を変更する場合

現状と比較して、樹木での滞留および、滞留の累計時間が増加している。これは、樹木を必ず滞留を誘発する要素に変更したこと

表7 滞留者分布



よって、樹木に滞留する確率が変更前と比較して高くなり、樹木での滞留は 60 秒以上とする本シミュレータの設定に伴って、結果として滞留の累計時間が増加したためである。一方で、知り合いとの滞留回数への影響は今回のシミュレーションでは確認できない。

(2) 広場内の他の場所との関係性を含む場所を変更する場合

①主要な流動経路との位置関係に基づいた配置変更

(1)と比較して、樹木での滞留および、滞留の累計時間がさらに増加しているが、主要経路の集中する場所、つまり流動が集中する場所は、滞留のための検索が比較的起こりやすいことが予想される場所である。そこに樹木を置くことによって、樹木での滞留をより多く発生させたためである。一方で、今回の配置は知り合い同士への影響は今回のシミュレーションでは確認できない。

②主要な流動経路となりうる場所の増設

流動経路の選択肢が増えた結果、階段上での滞留分布が分散した。一方で、選択された場合には必ず 60 秒滞留が起こる設定である蹴上高の高い階段が減ったため、累計滞留時間が減少している。またエージェント数が 68 の場合には、累計滞留時間の減少が、知り合いとの出会う確率の減少に比較的大きく影響を与えている。

実際には、大階段全体の蹴上高が低くなる場合、蹴上高の種類が減ることによって、蹴上高を比較検討する必要自体がなくなり、その結果、蹴上高の低い階段での 60 秒以上の滞留が起こる確率に変化が起こる可能性がある。蹴上高の人間行動に対する影響については、「周辺と比較した上での蹴上高」を環境記号として抽出しさらに検討する必要がある。

(3) 広場外との関係性を変更する場合

校舎出入口の位置を変更した結果、累計滞留時間が減少しているが、これは滞留が起こる確率が比較的高い出入口付近が日陰ではなくなったためである。

実際には、校舎出入口の位置を南側に配置すると、階段の上部に向かうまでの歩行距離が変化する。歩行距離を基準に人間行動を抽出した上で今後検討する必要がある。また、校舎出入口の位置の変更に伴って、そのほかの環境要素の配置の変更を一切行わなかったが、実際には、校舎出入口を動かすことによって現れる環境記号の変化についても同時に検討する必要がある。

5.4 小結

広場内にある要素を変更する際には、広場内における他の要素との関係性を考慮した上で変更を行う場合の方が、人間行動の確率的

表8 知り合いとの滞留回数(単位:回)・累計滞留時間(単位:step)

	現状		樹木に集中		樹木の再配置		蹴上高		出入口入れ替え	
	知り合い	累計時間	知り合い	累計時間	知り合い	累計時間	知り合い	累計時間	知り合い	累計時間
エージェント数 68										
1回目	23	15191	22	16804	27	21870	11	9499	22	10854
2回目	26	15540	21	17047	22	18251	16	10951	23	13014
3回目	16	16259	25	16976	22	19319	21	9812	19	10448
4回目	23	17286	19	17554	25	17423	20	11702	24	11451
5回目	26	18184	27	17757	28	17123	13	9526	24	12828
6回目	17	14641	20	17954	22	15793	23	13107	24	12362
7回目	33	16126	27	17821	21	16282	18	13994	22	11404
8回目	27	14894	25	17131	24	20047	23	14214	23	11196
9回目	25	14752	23	19205	29	19403	26	12397	22	9672
10回目	28	18122	23	15947	31	17662	18	15520	22	10055
平均値	24.4	16097.5	23.2	17419.6	25.1	18417.3	18.9	12072.2	22.5	11328.4
エージェント数 170										
1回目	85	46953	77	44386	76	48683	74	33837	56	27294
2回目	91	42735	61	42362	84	44664	78	31707	63	26112
3回目	76	42088	74	45493	83	44084	52	27071	67	30050
4回目	77	41825	63	41451	69	46499	64	33423	78	28916
5回目	83	47854	72	46791	81	46378	81	34675	56	27665
6回目	77	41239	58	42457	93	44726	75	33187	63	28691
7回目	96	46880	82	45817	82	44946	61	32573	58	26634
8回目	90	45516	82	47887	68	45468	54	30307	75	29881
9回目	67	39509	77	40777	80	44690	80	33359	67	28665
10回目	87	43400	75	46741	69	40847	73	34289	80	25039
平均値	82.9	43799.9	72.1	44416.2	78.5	45098.5	69.2	32442.8	66.3	27834.7

な法則性に対して、確率的な意味で大きな影響力を持つことができる。どのような関係性を考慮するべきかについては今後さらに分析をする必要があるが、本報では特に主要な流動経路との関係性を考慮することで全体の人間行動がさらに変化することを確認した。

また、広場内の環境要素の配置の変更をしなくても、広場外との関係性を変更すれば、広場内全体の人間行動に影響があることを確認した。

さらに、各環境記号および環境記号間の関係性について変更を行うことによって、建築・都市空間と人間行動に影響を与える可能性のある新たな環境記号を発見した。

6. 結

以上から、本報の研究成果は次に示す①～③の通りである。

- ①確率ネットワークとしての建築・都市空間が誘発する人間行動の記号過程の分析方法の基礎的な枠組みを構築した。
- ②ベイジアンネットワークに基づいた感度分析によって人間行動の記号過程を解釈し、人間行動に対して確率的な意味で影響力のある環境記号を発見した。
- ③前報で構築したシミュレータに、分析に基づいた変更を加え、新たなシミュレータを構築し、確率的に影響力のある環境記号の配置の問題について、要素自身のみではなく、対象とする場所と要素との関係性、対象とする場所外の要素との関係性を考慮した上での建築設計を主眼において考察を行い、建築・都市空間を構成する要素同士の関係性のデザインが重要な意味を持つことを指摘した。

注

- 注1) 本報では、記号としての環境(目的・状況および人間行動との結びつきから捉えた環境)を環境記号と呼ぶこととする。
- 注2) C. Morris は、Peirce の記号モデルを行動科学の枠組みのもとで展開させた記号モデルを提示し、記号過程を行動との関連から説明している⁹⁾。
- 注3) 日常の自由な人間行動の記号過程を解釈する方法を構築することを目的として、この2時間のデータをモデルケースとして選択し、分析を行う。
- 注4) 調査地に入ってから出るまでを1回として、10:00~11:00にのべ270回、12:00~13:00にのべ216回の人間行動を確認した。うち有効データ438回に対し、各人間行動の21個の場所内(3.4.1(1)で定義)に対する行列データ9198行(=438×21(うち10:00~11:00:5232件, 12:00~13:00:3969件))を獲得した。なお滞留を含む人間行動は98回で2058行(=98×21)。
- 注5) arg max は数学記号の1つ。argument of maximum に由来し、独立変数(argument)x のもとでの関数f(x)について、arg max f(x)は、与えられた関数f(x)が最大値を取る場合の独立変数の集合を示す。
- 注6) データからベイジアンネットワークを求める問題は、NP 完全である

ため¹⁸⁾、一般的には計算機上で、構造探索アルゴリズムを用いたヒューリスティクスによる発見的構造探索を行う。

- 注 7) 構造探索アルゴリズムについては、さまざまな方法が研究されている^{19),20),21)}が、Hill-climbing は、コンピュータでの処理上の便宜と、良好な探索結果とのバランスがよいためによく使われるアルゴリズムである^{22),23),24)}。本報において hill-climbing を用いた理由としては、局所探索法ではあるもの実際には良好な推測結果をもたらすこと²⁵⁾、行動記述データによって構築されたネットワークが理解しやすく、クロスバリデーションによる判別率が比較的高く(約 90%)、信頼性(予測モデルとしての正確性)が高いと判断したことが挙げられる。
- 注 8) 将来の予測精度に関する評価スコアについては、今もなお研究が続けられており、これまでに K2metric の他に、AIC²⁶⁾、MDL²⁷⁾、BDeu²⁸⁾ 等が提案されている。本報で K2metric を用いた理由としては、K2metric によって構築されたネットワークが理解しやすかったことが挙げられる。
- 注 9) 使用出入口が 1-2 の場合は流動経路が多様であり、主要経路が定義できなかったため、同一の出入口を用いる場合同様、常に寄り道ありとした。
- 注 10) ベイジアンネットワークの構築および感度分析には、Waikato 大学の Machine Learning Laboratory を中心に開発されているデータマイニングツールである Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) 3.6.6 を使用した。
- 注 11) 建築・都市空間の設計への応用の観点から、建築・都市空間の人間行動への確率的な影響について、なるべく多くの要素を抽出し検討するべく、(感度-1)の値が 0.2 以上の場合には「感度が高い」として検討している。
- 注 12) 表 4、表 5 の各列の値は、 $\{P(\text{人間行動} | \text{環境記号} = \text{観測値}) / P(\text{人間行動}) - 1\}$ の値 (=感度-1) を示している。例えば、表 4 内「行動種類」が「流動のみ」の「蹴上高」が「低い」場合に対する(感度-1)の値は 0.20 であるが、 $\{0.20 = \{P(\text{流動のみ} | \text{蹴上高} = \text{低い}) / P(\text{流動のみ}) - 1\}$ 、である。
- 注 13) モデル化とシミュレーションのためのマルチエージェントシステムとしては、構造計画研究所が開発した Artisoc を用いる。
- 注 14) (感度-1)の値が正の値を示す場合には、その確率が起こりやすくなるとの仮定の下で、感度の値に基づいて実験的に 5%刻みで設定したが、各確率値および感度値の設定の方法を今後検討していく必要がある。
- 注 15) 本報では実験的に、個体距離を 10 セル、社会距離を 20 セルとして設定する。距離帯の大きさの検討は今後の課題とする。
- 注 16) 17 種の使用出入口の割り当てる順はランダムとしている。
- 注 17) 本報では前報との対応から 120° とした。なお、寄り道をするエージェントが滞留位置を探索する際には、一旦辺りを 360° 見回す設定とした。
- 注 18) この設定では、全体滞留時間が 60 秒未満と設定されたエージェントも 60 秒以上の滞留をする可能性があるが、今回使用出入口によっては、サンプル数が十分でないものあることを考慮し、使用出入口による行動傾向を絶対とせず、場所との相互作用をある程度許容する設定とした。

参考文献

- 1) 木曾久美子, 門内輝行: 建築・都市空間における人間行動のモデル化とシミュレーション 建築・都市空間が誘発する人間行動の記号過程に関する研究(その 1), 日本建築学会計画系論文集, vol.76, No.668, pp.1819-1828, 2011.10.
- 2) De Fusco.R.: *Storia dell'Architettura Contemporanea*, Editori Laterza, 1979.
- 3) M.L.Scalvini: Structural Linguistics versus the Semiotics of Literature: Alternative Models for Architectural Criticism, *Signs, Symbols and Architecture*, G.Broadbent, R.Bunt, C.Jenks (eds.), John Wiley & Sons, pp.411-420, 1980.
- 4) G.R.Blomeyer, R.M.Helmholtz, et al.: Semiotic in Architecture -A Classifying Analysis of an Architectural Object-, *Semiosis1*, Heft1, Agis-Verlag, pp.42-51, 1976.3.
- 5) C.Dreyer: DIE REPERTOIRES DER ARCHITECTURE UNTER SMIOTISCHEM GESICHTSPUNKT, *Semiosis19*, Heft3, Agis-Verlag, pp.37-48, 1980.9.
- 6) A.Ertekin: Objekt und Raumzeichen in der Architektur: Analyse und Syntese auf den Grundlagen der abstrakten Semiotik von Charles Sanders Peirce und der erweiterten Semiotik von Max Bense und Elisabeth Walther, Stuttgart: Diss. Ing. 1981.2.
- 7) W.Nöth: *Handbook of Semiotics*, Indiana University Press, pp.435-439, 1990.
- 8) G.L.Koenig: *Architecture e Comunicazione: preceduta da Elementi di Analisi del Linguaggio Architettonico*, Liberia Editrice Fiorentina, 1970.
- 9) C. Morris: *Signs, Language and Behavior*, George Braziller Inc., pp.17-20, 1946.
- 10) 立岡恵介ほか 2 名: 購買行動と商品陳列方法のベイジアンネットワーク分析, 日本建築学会計画系論文集, vol.73, No.633, pp.2349-2354, 2008.11.
- 11) 立岡恵介ほか 2 名: 店舗内の購買行動のベイジアンネットワーク分析, 日本建築学会計画系論文集, vol.73, No.634, pp.2633-2638, 2008.12.
- 12) 河田 諭志ほか 4 名: 室内における幼児の行動予測のための確率的因果構造モデルの学習と推論, 電子情報通信学会技術研究報告, NC, vol.107, No.542, 279-282, 2008.3.
- 13) 野守耕爾ほか 4 名: 乳幼児の環境誘発行動を予測する計算モデルの開発, *The Japanese Journal of ergonomics*, vol.46, No.2, pp.166-171, 2010.4.
- 14) D.Heckerman: A Tutorial on Learning With Bayesian Networks, *Technical Report, MSR-TR-95-06, Microsoft Research*, pp.1-2, 1996.11.
- 15) 石垣司ほか 2 名: ベイジアンネットワーク, オペレーションズリサーチ, 55 巻, 9 号, オペレーションズリサーチ学会, pp.584-585, 2010.9.
- 16) J. Pearl, et al: Bayesian Networks, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks 2nd edition*, MIT Press, No.5, pp.157-160, 2002.11.
- 17) J.A. Gámez et al: Learning Bayesian networks by hill climbing: efficient methods based on progressive restriction of the neighborhood, *Data Mining and Knowledge Discovery 22*, pp.106-148, 2011.1.
- 18) D.M. Chickering: Learning Bayesian network is NP complete, in *Learning from Data, Artificial Intelligence and Statistics V*, pp.121-130, Springer Verlag, 1996.5.
- 19) G.F. Cooper, E. Herskovits: A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data, *Machine Learning 9*, pp.309-347, 1992.10.
- 20) W. Lam, F. Bacchus: Learning Bayesian belief networks: An approach based on the MDL principle, *Computational Intelligence 10*, pp.269-293, 1994.8.
- 21) D. Heckerman et al: Learning Bayesian Networks: The Combination of Knowledge and Statistical Data, *Machine Learning 20*, pp.197-243, 1995.3.
- 22) W. Buntine: Theory refinement on Bayesian networks, *Proc. of the 7th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp.52-60, 1991.7.
- 23) W. Buntine: A guide to the literature on learning probabilistic networks from data, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering 8*, pp.195-210, 1996.4.
- 24) D.M. Chickering: Learning equivalence classes of Bayesian-network structures, *Journal of Machine Learning Research 2*, pp.445-498, 2002.2.
- 25) N. Friedman et al: Learning Bayesian Network Structure from Massive Datasets: The "Sparse Candidate" Algorithm, *Proc. 15th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp.206-215, 1999.8.
- 26) H. Akaike: A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control 19(6)*, pp.716-723, 1974.12.
- 27) J. Rissanen: Stochastic complexity and modeling, *The Annals of Statistics 14(3)*, pp.1080-1100, 1986.12.
- 28) D. Heckerman, et al: Learning Bayesian networks: The combination of knowledge and statistical data, *Machine Learning 20*, pp.197-243, 1995.9.
- 29) G. Cooper, et al: A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data, *Machine Learning 9*, pp.309-347, 1992.7.
- 30) Jensen, F. V.: *An Introduction to Bayesian Networks*, University College London Press, 1996.8.

※本研究は、平成 23 年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費)「建築・都市空間が誘発する人間行動の記号過程に関する研究」、および平成 19~23 年度科学研究費補助金学術創成研究「記号過程を内包した動的適応システムの設計論」(研究代表者: 榎木哲夫)の一部として遂行したものである。

(2012年1月10日原稿受理, 2012年6月27日採用決定)