

ベイジアンネットワークを用いた海の見え方に対する 印象評価に基づく街路空間の確率モデルに関する研究 -宮古市鉾ヶ崎地区を対象として-

A Study on Probabilistic Model of Street Space Based on Sensibility Evaluation of Visibility of Sea
Using Bayesian Network
-A case of planning for Kuwagasaki District in Miyako City-

酒谷駿一¹・宗本晋作²・山田悟史³

Shunichi Sakatani, Shinsaku Munemoto and Satoshi Yamada

¹大和ハウス工業株式会社 (〒530-8241大阪府大阪市北区梅田3-3-5)

Daiwa House Industry Corporation

²立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Engineering

³中央大学助教 理工学部 人間総合理工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Assistant Professor, Chuo University, Dept. of Integrated Science and Engineering for Sustainable Society

The purpose of this paper is to provide the method for the construction of the probabilistic model of street space based on the evaluation of visibility of sea that is important for the stricken area of the Great East Japan Earthquake. We applied Bayesian Networks to construct a graphical model that represented the correlation between the impression of street space with visibility of sea and spatial elements of which street space is composed. The relationship of spatial elements was easily understood by visual analysis of graph structures. By executing probabilistic reasoning of Bayesian Networks on this model, furthermore we deduced the combination of spatial elements for the city planning that are expected to be impressed in good image.

Keywords : Bayesian network, probabilistic reasoning, sensibility evaluation, street space, visibility of sea

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、臨水地の歴史都市においても、自然の驚異から文化遺産を守る重要な役割を果たす防潮堤の設置が検討されている。しかしながら防潮堤は、歴地都市や文化遺産そのものの印象を変えてしまう可能性があるため、災害時の減災の観点だけでなく、印象を変えてしまわないよう防潮堤と街区の関係を同時に捉えて検討する必要がある。

本論で対象とする鉾ヶ崎地区も、震災前は防潮堤が未整備であった地区であるが、現在、復興まちづくり計画¹⁾において、防潮堤の計画が進められている。筆者が主宰した住民ヒアリング²⁾においても、海の見え方に関する回答が多かった。海と共に暮らす人々にとっても減災の観点だけでなく、海を平常時の生活の一部と考え、防潮堤の高さと海の見え方に対する印象を同時に検討する必要がある。ここで、海の見え方と防潮堤や街区を構成する空間要素の関係を構造化するモデルを作成し、人がどのように感じるかを推測しながら、防潮堤や街区の構成を検討する枠組みができれば、被災地における沿岸部の計画において、さらには臨水地の歴史都市防災において、これまでの印象を損なわないよう、まちを守る方法を検討するのに有用である。

本論がテーマとする街路空間における海の見え方による印象評価は、人の体験を含むもので全員が一致するこ

とはなく、不確実性を含むと云える。一方、街路空間は、既往文献³⁾で示されているように、計画対象の空間要素の組合せにより記述することができる。そこで本論は、任意の街路空間からの海の見え方に対する人の印象評価を、街区の空間要素を変数とする不確実性を含む確率的な行為ととらえ、海の見え方に対する印象評価と空間要素の関係を確率モデルで表現する。

このような対象のモデル化には、対象の背景にある変数の複雑な関係を表すためにグラフ構造を利用し、不確実性を確率で扱うことのできるベイジアンネットワーク⁴⁾が有効である。ベイジアンネットワークは統計学習により、複数の変数の関係を非循環有向グラフで表し、変数間の関係をそれぞれ条件付確率で定量化する確率モデルである。確率モデルは、変数の関係を表すグラフ構造と条件付確率の集合により定義される。

一般に対象(目的変数)とそれを表現する複数の属性(説明変数)との関係を良く知る方法として、線型回帰モデルがよく知られるが、属性間の関係が複雑な非線型の場合には適切な手法とは云えない。ニューラルネットのバックプロパゲーション法は目的変数と説明変数の関係を学習する手法であるが、目的変数と説明変数の関係を明示することはできない。決定木は、目的変数と説明変数の関係を木構造で表現することはできるが、一部の説明変数や目的変数から残りの変数を推測することはできない。

ベイジアンネットワークは、変数間の関係が非線型・非正規的であっても、離散的な条件付確率表により柔軟にモデル化を行うことができる。さらに確率推論により、一部の説明変数を観測したときのその他の変数の確率分布を計算することができ、予測に有用である。近年、不確実性を含む人間の行動を計算機上にモデル化する手法として注目を集めている⁵⁾。ベイジアンネットワークを用いて、街路空間における海の見え方に対する印象と空間要素の関係を確率モデルで表現する方法は、人の予測困難な曖昧な判断を推測し簡潔に伝達する手法となり、復興まちづくり計画の策定に役立てられることが期待される。

2. 目的と方法

本論の目的は、任意の街路空間の海の見え方に対して、人が印象がよいと感じるか、あるいはよくないと感じるかの判断を、街路の空間要素を変数とする不確実性を含む確率的な行為としてとらえ、海の見え方に対する印象評価と空間要素の関係を確率モデルで提示することにある。

本論の方法としては、まず宮古市鉾ヶ崎地区の防潮堤設置地区を対象とし、本論で定義する街路の空間要素で記述し、街路空間のモデル化を行う。またこれらの街路空間の海の見え方に対して印象がよいかよくないかの印象評価実験を実施する。次に得られたデータにベイジアンネットワークを適用し、街路空間における海の見え方に対する印象評価と街路の空間要素の関係を示す確率モデルを獲得し、確率モデルのグラフ構造を分析する。最後にベイジアンネットワークの確率推論を用いて、任意の街路空間の海の見え方に対する印象評価の結果を推測したり、印象のよい空間要素の組合せの推測から鉾ヶ崎地区の新しい復興まちづくり事業計画図を作成することにより、得られた確率モデルの活用例と有用性を示す。

3. 防潮堤設置地区の街路空間のモデル化

(1) 対象地区の概要

対象地の鉾ヶ崎地区は、傾斜地の道路網が脆弱なまま住宅が密集していた上、防潮堤が未整備であった地区である。東日本大震災では、宮古湾と背面の蛸の浜からの津波被害により、浸水面積は39.1ha、浸水高はT.P. 5.4~9.0m、最大浸水深は8.2mに達した。建物被害は約800棟、そのうち流失をはじめとする全壊被害が約88%を占めた。

2012年3月に「宮古市東日本大震災地区復興まちづくり計画

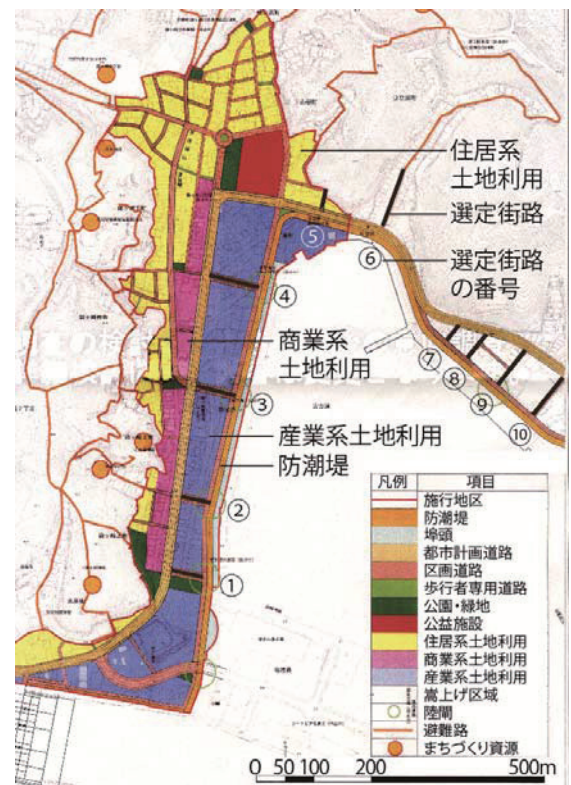


図1 鉾ヶ崎地区の事業計画図と選定街路

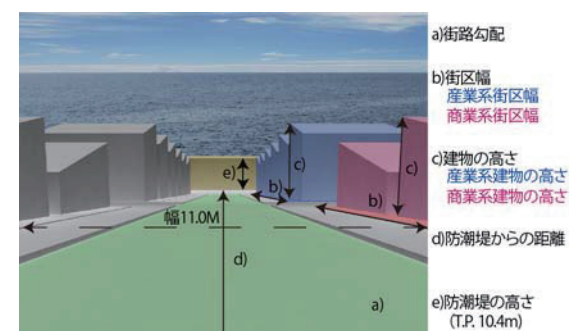


図2 街路空間モデル

1)」が策定され、市内33地区の計画が作成された。鉾ヶ崎地区の復興まちづくり事業計画では、防潮堤と計画的な道路網の整備により地区の安全を確保すると共に、従前のコミュニティに配慮した住宅地と産業用地の調和した市街地の整備を図ろうとしている（図1）。

鉾ヶ崎地区の事業計画に関して3回の説明会が開催された。この事業計画図の変更過程において、変更のなかった防潮堤の位置と高さ、道路線形、海側から山側にかけて産業系、商業系、住居系と並ぶ土地利用の配列を制約として街路空間のモデル化や事業計画図の策定を行う。

(2) 街路空間モデルの定義

鉾ヶ崎地区の事業計画図から海と直交する10の通り①～⑩を選定する（図1）。街路の空間要素であるa)街路勾配、b)街区の幅、c)建物高さに加え、防潮堤に関する要素d)防潮堤から視点場までの距離、e)防潮堤の高さの5項目の空間要素を定義し、街路空間モデルを記述する（図2）。なおe)鉾ヶ崎の防潮堤の高さは、計画からT.P. +10.4m 街路幅は11.0mの一定とし、a)～d)の4項目について、以下の6細分項目を定義する。

a) 街路勾配 (G)

街路勾配(G)は、街路ごとに図3のように標高から勾配を算出する。

b) 街区の幅 (W)

街区の幅(W)とは、図2b)のように街区の通りに面する長さで、地区復興まちづくり事業計画図（図1）に基づき、産業系(Wi)と商業系(Wc)に分類する。

岩手県の都市計画⁶⁾を参考に、街区の建蔽率を産業系を60～65%、商業系を75～80%となるよう、最小敷地面積は200㎡、壁面後退1.5mとして、正方形にモデル化した平面形状で建物のボリュームを設定する（図3, 4）。産業系は青、商業系は赤で示す。これらに基づいて、街路に面する長さである街区の幅は30, 60, 90mと設定した（図5）。海の見え方に関係のない防潮堤と並行の街区の幅は一定とする。

c) 建物高さ (H)

建物高さ(H)は、産業系建物高さ(Hi)、商業系建物高さ(Hc)に分類する（図3）。岩手県都市計画を参考に5, 10, 20, 31mと設定する。

d) 防潮堤からの距離 (P)

視点場は、宮古湾に直交する10の街路①～⑩（図1）の中央線上とする。防潮堤からの距離は、街区の幅(W)と同じく30mごとに30, 60, 90, 120, 150, 180mの地点で設定する。上記で定義した空間要素の組合せの変化に伴い、仮想空間における海の見え方が変化する。図6に例として示す。視点の高さは、人の平均視線の高さ150cmとし、視線方向は、視線の下方優位を考慮し、図3のように垂直見込み角10度下がりとする。

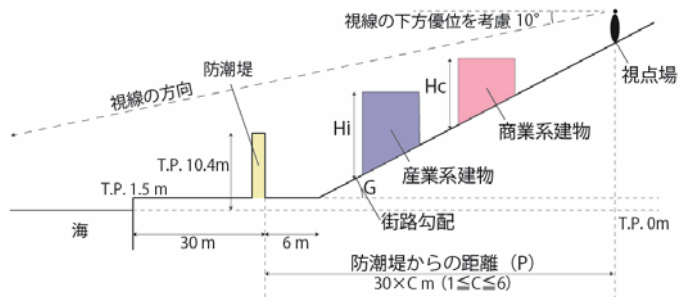


図3 街路空間モデルの断面方向の空間要素の定義

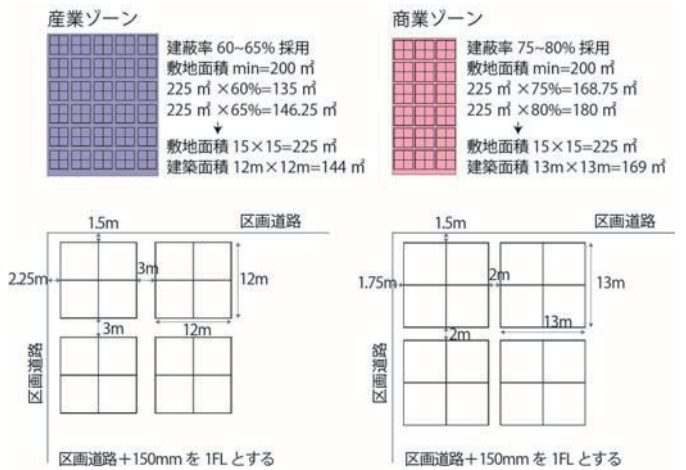


図4 街路モデルの街区の定義

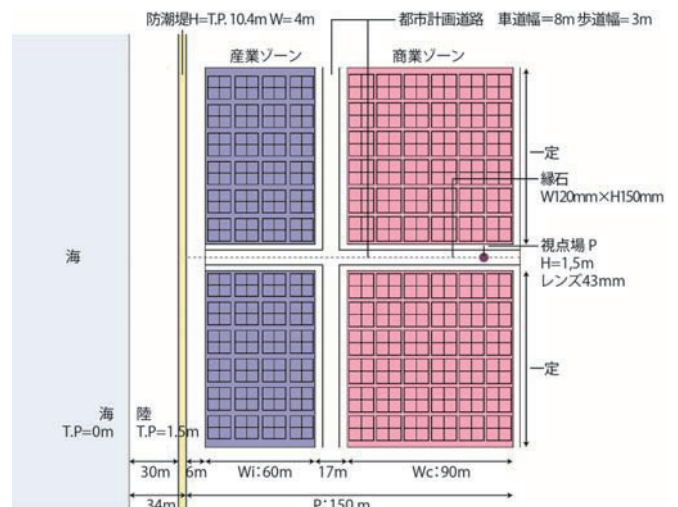
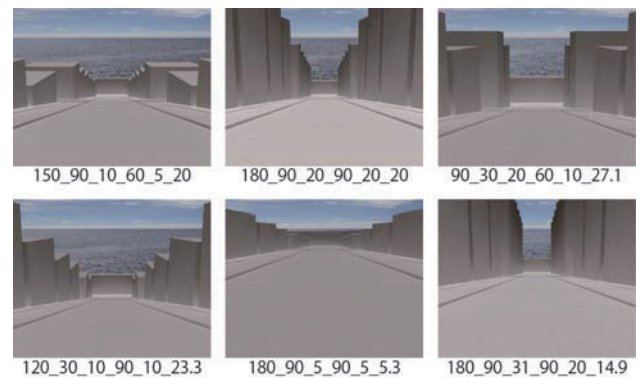


図5 街路空間モデルの平面方向の空間要素の定義



※画像下の数字は P_Wi_Hi_Wc_Hc_Gの空間要素の値を示す

図6 作成した街路空間モデルの例

(3) 仮想空間の作成

仮想空間の作成は、市販の三次元モデリングツールを用いた。カメラの設定は、人の周辺視野を考慮し、視野角を1000mm×800mm、35mm レンズカメラの標準レンズ長である43mm相当とした。なお、街路空間における海の見え方に着目するため、海と空にテクスチャを用い、その他の建物や街路に関しては誘目性のある色彩を排除し、陰影のみの表現とした。定義した空間要素の組合せにより全462枚の仮想空間の画像データを作成した。図6に例として示す。

4. 感性評価実験

全462の仮想空間の画像より100画像を無作為に抽出し、画像1枚につきA4用紙1枚に印刷した100枚1セットの実験シートを50セット作成した。鎌ヶ崎の住民の被験者50名(男性25名、女性25名)に対して、実験シート1セットを用いて、1枚ずつ提示し、「鎌ヶ崎のまちとして海の見え方の印象がよいかよくないか」の二択でアンケート用紙に回答する感性評価実験を行った。この感性評価実験により5000の回答データを得た。

5. ベイジアンネットワークによる分析

(1) 入力データ行列の構成

ベイジアンネットワークを適用するために、462の街路の仮想空間を表1～表6に示す空間要素の略記号で、感性評価実験の結果の「よい」をY、「よくない」をNとして記述し表7に整理した。ベイジアンネットワークの学習精度を向上させるため、感性評価実験の結果に合わせて下記のように区分した。街路の勾配(G)は、被災地は津波避難路として高台への接続も必要とされることから、道路構造令の規定以上であっても鎌ヶ崎地区の標高から算出した縦断勾配をそのまま用いることとした。道路構造令の最大勾配12%を意識しながら、勾配の分布から6.5, 13, 21%で4つに区分した(表1)。産業系街区の幅(Wi)、商業系街区の幅(Wc)は中間の60mで2つに区分し(表2, 3)、産業系街区の建物高さ(Hi)は20m, 30mで3つに(表4)、商業系街区の建物高さ(Hc)は20mで2つに区分した(表5)。防潮堤からの距離(P)は、100m, 150mで3つに区分した。

表1 街路勾配(G)の要素

略記号	G1	G2	G3	G4
空間要素 (%)	$G < 6.5$	$6.5 \leq G < 13$	$13 \leq G < 21$	$21 \leq G$

表2 産業系(Wi)の要素

略記号	W1	W2
空間要素 (m)	$W \leq 60$	$60 < W$

表3 商業系(Wc)の要素

略記号	Wc1	Wc2
空間要素 (m)	$W \leq 60$	$60 < W$

表4 産業系(Hi)の要素

略記号	Hi1	Hi2	Hi3
空間要素 (m)	$Hi < 20$	$20 \leq Hi < 30$	$30 \leq Hi$

表5 商業系(Hc)の要素

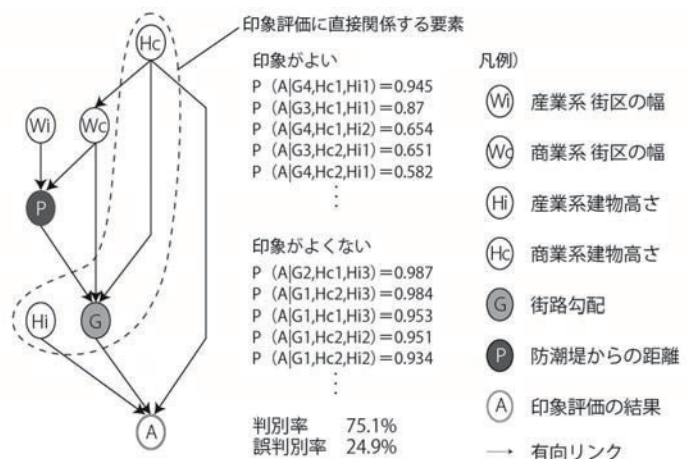
略記号	Hc1	Hc2
空間要素 (m)	$Hc < 20$	$20 \leq Hc$

表6 防潮堤からの距離(P)の要素

略記号	P1	P2	P3
空間要素 (m)	$0 < P \leq 100$	$100 < P \leq 150$	$150 < P$

表7 入力データ行列の構成

防潮堤設置地区における街路の空間要素							印象評価の結果					
防潮堤からの距離	産業系街区の幅	産業系建物高さ	商業系街区の幅	商業系建物高さ	街路勾配							
P	Wi	Hi	Wc	Hc	G	A						
180	90	5	90	5	5.3	N						
150	60	31	90	20	5.3	N						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						
90	30	20	60	10	4.4	N						
120	30	10	90	5	27.1	Y						
180	90	5	30	0	14.9	Y						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						
150	60	31	90	10	4.4	N						
100×n行							被験者1名分(100空間)					
150							90	5	60	5	27.1	Y
180							90	31	90	10	5.3	N
⋮							⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
150							90	5	60	10	7.9	Y
n番目の被験者(100空間)												



・Hi (産業系建物高さ) と Hc (商業系建物高さ)、G (街路勾配) が A (印象評価の結果) へ直結する。Hi (産業系建物高さ) は単体要素で A (印象評価の結果) にリンクする。

・街区形成の平面要素である Wi (産業系街区の幅) と Wc (商業系街区の幅)、P (防潮堤までの距離) は G (街路勾配) を基点にリンクする。

図8 海の見え方の印象評価と街区の空間要素の関係を示すベイジアンネットワーク

(2) グラフ構造の結果と考察

表7の入力データ行列にベイジアンネットワークを適用し、印象評価の結果と空間要素の関係を示す確率モデルを獲得した(図8)。モデルの適合度は、「印象がよい」あるいは「よくない」をどれだけ正しく判別できるかを示す判別率によって示される。ノードは定義した空間要素に対応する。

図8のノードHi(産業系建物高さ)とノードHc(商業系建物高さ)のノードA(印象評価の結果)への有向リンクから、街路空間を形成する立面の要素が海の見え方の印象に直接関係することが分かる。またノードP(防潮堤からの距離)のノードG(街路勾配)を経たノードA(印象評価の結果)への有向リンクから、防潮堤までの距離(P)と街路空間の勾配(G)が海の見え方の印象に直接関係することが分かる。ノードWc(商業系街区の幅)、ノードHc(商業系街区の建物高さ)のノードG(街路勾配)を経たノードA(印象評価の結果)への有向リンクから、海と視点場の中間の商業系建物が街路勾配と合わせて海の見え方の印象に関係することが分かる。

ノードA(印象評価の結果)の条件付確率から、ノードA(印象評価の結果)に有向リンクを持つ空間要素について、任意の要素の組合せが含まれるときの印象がよい確率を知ることが出来る。図8に印象がよい、印象がよくないの条件付確率をそれぞれ高確率のものから順に5つずつ示した。図8の印象がよいとされる条件付確率P

$(A|G4, Hc1, Hi1) = 0.945$ は、 $G4 (21\% \leq G)$ 、 $Hc1 (Hc < 20m)$ 、 $Hi1 (Hi < 20m)$ のときに0.945の確率で印象がよいとされることを示す。これらの条件付き確率に含まれる要素に、 $G3 (13\% \leq G < 21\%)$ と $G4 (21\% \leq G)$ の要素が多く含まれることから勾配のきつい街路空間は、海の見え方においては印象評価の結果が良いと考えられる。

(3) 確率推論の活用

図9に任意の街路空間のモデルの海の見え方に対する印象評価の結果の推論を行う例を示す。まず任意の街路空間を本論で定義する空間要素で記述し、それらを確率モデルに入力し、ノードA(印象評価の結果)の確率分布を獲得する。この確率分布に基づいて、対象の街路空間が印象がよいとされる、あるいはされなないかを推論することができる。

最後にベイジアンネットワークの確率推論を用いて、海の見え方に対する印象評価に基づいて鉄ヶ崎地区の復興まちづくり事業計画図を作成した。まず図1の街路①~⑩をノードP(防潮堤からの距離)の要素P1($0m < P \leq 100m$)、P2($100m < P \leq 150m$)、P3($150m < P$)の区間ごとに場合分けし、ノードG(街路勾配)には、区間の街路の勾配に対応した略記号G1~G4を、ノードA(印象評価の結果)にはA1(印象がよい)を代入した。それぞれの場合についてWi(産業系街区の幅)、Hi(産業系建物高さ)、Wc(商業系街区の幅)、Hc(商業系建物高さ)の確率分布を算出し、高確率の要素を抽出した。図10には街路②においてノードG(街路勾配)にG3($13\% \leq G < 21\%$)、ノードP(防潮堤からの距離)にP1($0m < P \leq 100m$)、ノードA(印象の結果)にA1(印象がよい)を代入した例を示す。

事業計画図を作成するために、上記を反復し、街路①~⑩のP(防潮堤からの距離)の区画ごとに得られ

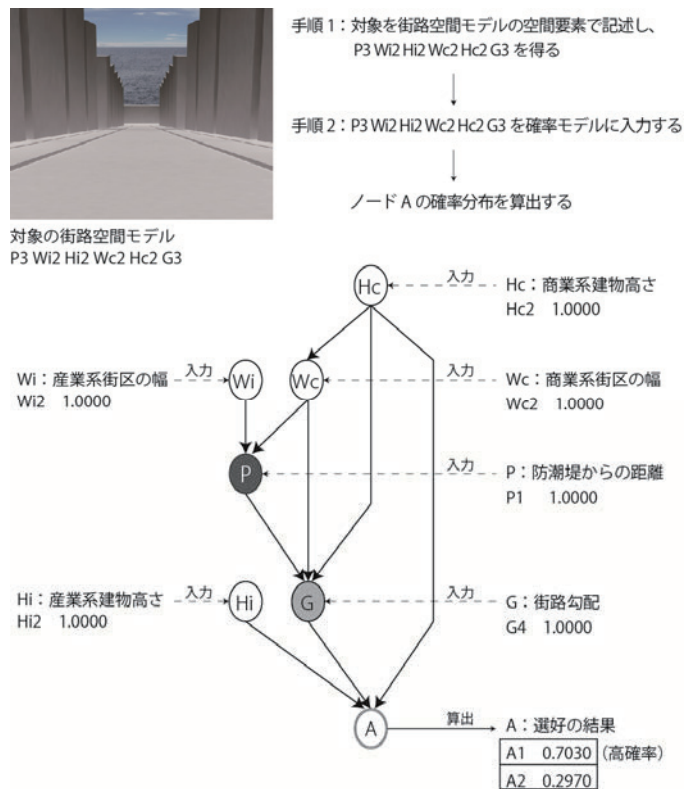


図9 海の見え方に対する印象評価の結果を推論するベイジアンネットワークの確率推論

表8 確率推論によって得られた各街路の空間要素の組合せ

入力した空間要素の組合せ	対象街路	①	②	③	⑤	⑥	⑧	⑨	⑩
G (街路勾配)	P	G1 1.0000	G3 1.0000	G1 1.0000	G4 1.0000	G2 1.0000	G3 1.0000	G4 1.0000	G1 1.0000
	P	P3 1.0000	P1 1.0000	P3 1.0000	P1 1.0000	P2 1.0000	P1 1.0000	P1 1.0000	P3 1.0000
Wi (産業系街区の幅)	Hi	Wi2 0.9983	Wi1 0.9970	Wi2 0.9983	Wi1 0.9985	Wi1 0.7049	Wi1 0.9970	Wi1 0.9985	Wi2 0.9983
	Hc	Wc2 0.9983	Wc1 0.6862	Wc2 0.9983	Wc1 0.9961	Wc1 0.5096	Wc1 0.6862	Wc1 0.9961	Wc2 0.9983
Hi (産業系建物高さ)	Hi	Hi1 0.6169	Hi1 0.7206	Hi1 0.6169	Hi1 0.6520	Hi1 0.8866	Hi1 0.7206	Hi1 0.6520	Hi1 0.6169
	Hc	Hc1 0.7794	Hc1 0.7795	Hc1 0.7794	Hc1 0.8137	Hc1 0.5078	Hc1 0.7795	Hc1 0.8137	Hc1 0.7794

算出した確率分布において最高確率の空間要素の組合せ

た W_i （産業系街区の幅）、 W_c （商業系街区の幅）の要素のうち、最高確率のものを抽出し表8に整理した。

街路①から順に、表8の街路①の W_{i2} ($60 < W$)、 W_{c2} ($60 < W$)、街路②の W_{i1} ($W \leq 60$)、 W_{c1} ($W \leq 60$) に基づいて産業系、商業系土地利用の幅を選択し、街路が避難路に繋がりに行き止まりになるまでの部分を住居系土地利用とした。街路①と街路②に挟まれた箇所の土地利用はこれらをつなぐことで決定した。表8の要素を用いて街路①～⑩に対して同様に実施し、鉾ヶ崎地区の復興まちづくり事業計画図を作成した(図11)。

表8に街路勾配 G_1 ($G_1 < 6.5$) と街区の幅 W_{i2} ($60 < W$)、 W_{c2} ($60 < W$) の組合せが見られるように、街路の勾配が緩いと街区の幅が大きくなる傾向があり、図1の計画図と比べ、各種土地利用の奥行きが長くなった。得られたまちづくり事業計画図は、確率モデルを用いて、その地の街路の勾配や防潮堤までの距離に合わせた海の見え方に対する印象を推測し計画されたものと云える。事業計画図は二次元の情報に限定した要素の組合せにより作成されたものであるが、表8の H_i （産業系建物高さ）、 H_c （商業系建物高さ）の高さ情報も合わせて用いることにより、街路空間モデルとして空間を再現し、海の見え方を確認することもできる。また表8の要素群より、産業系建物、商業系建物共に高さ20m以下に規制することで、海の見え方に配慮した街区形成を実現できることが把握できた。

6. まとめ

本論は、ベイジアンネットワークを用いて、海の見え方の印象に基づいて、防潮堤設置地区における街路の空間要素と選好の結果を確率モデルで明示した。確率モデルのグラフ構造から、海の見え方に関する街路空間の要素の関係を視覚的に把握した。また確率モデルの確率推論を試行して海の見える街路空間の印象結果の予測を行い、海の印象評価に基づく事業計画図を作成し、確率モデルの確率推論を実際の計画に利用した一例を示した。

謝辞：宮古市鉾ヶ崎地区の住民の皆様には、対象地の調査において多大なる協力を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮古市：宮古市東日本大震災地区復興まちづくり計画，2012。
- 2) 立命館大学，鉾ヶ崎復興会議共催：自分たちのまちづくり会議 in 鉾ヶ崎 2013
- 3) 日本建築学会編：コンパクト建築設計資料集成，丸善，42pp，2005
- 4) S.Russell and P.Norvig 著 古川康一監訳：エージェントアプローチ人工知能 (Artificial Intelligence, A modern approach)、共立出版，1997。
- 5) 木村陽一、岩崎弘利：ベイジアンネットワーク技術，東京電気大学出版局，2006。
- 6) 岩手県：岩手県の都市計画 2010 パンフレット，2010。

手順
(i) G_3, P_1, A_1 代入のとき (ii) G_3, P_2, A_1 代入のとき (iii) G_3, P_2, A_1 代入のとき
3つの場合分けて確率推論を行う

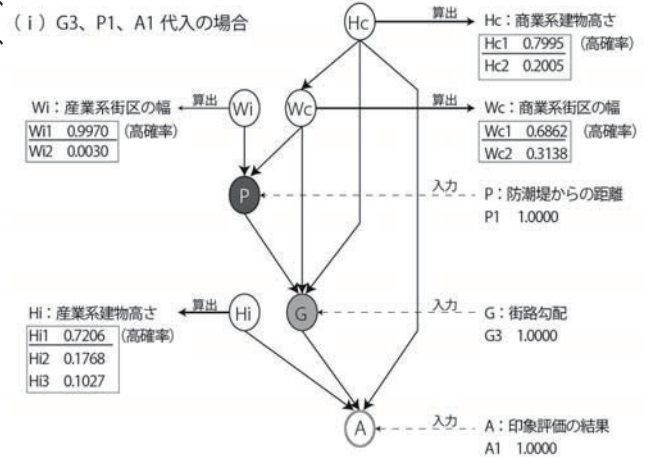


図10 空間要素の組合せを推測する
ベイジアンネットワークの確率推論

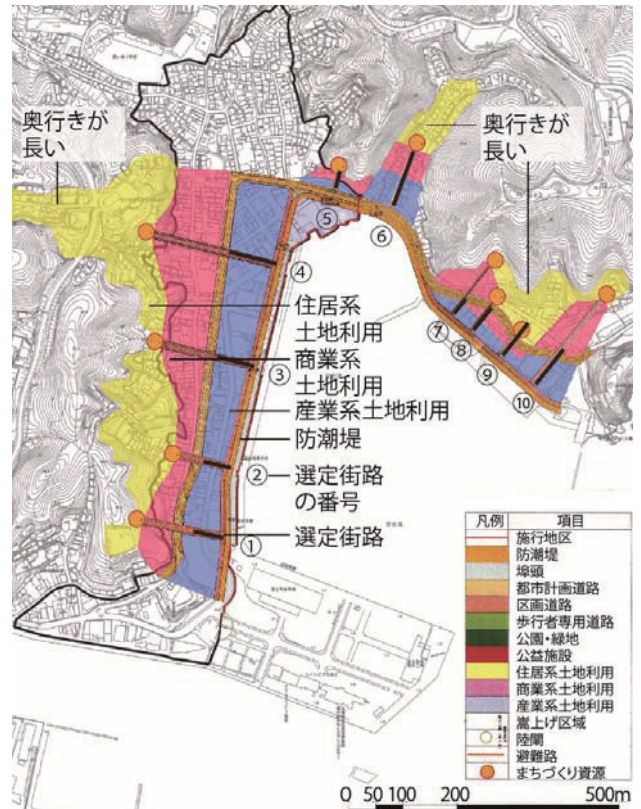


図11 確率推論によって得られた新事業計画図