

新しい情報処理手法による橋梁景観設計へのアプローチ

AN APPROACH TO AESTHETIC DESIGN OF BRIDGES
USING A NEW DATA PROCESSING METHOD

保田敬一*、白木 渡**、木村 晃***

Keiichi YASUDA, Wataru SHIRAKI and Akira KIMURA

*(株)ニュージェック 橋梁部橋梁第二室 (〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

**工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目 101)

***工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目 101)

In recent years, the importance of the aesthetic design of bridges is being greatly acknowledged. There are many approaches for aesthetic design, and they are centered on the neural network. In this study, aesthetic design of bridges for arched bridges and girder bridges, small and medium sized, was performed using the Expert Rule Prototyper, which employs the ID3 algorithms of using entropy data. The essential factors were identified, and an attempt was made to derive rules for evaluation. Moreover, neural network, which is considered to be very close to human thinking, was used in the aesthetic design of bridges, and by studying various evaluation examples, its applicability was investigated.

Key Words: aesthetic design, ID3 algorithms, decision tree, neural network

1. まえがき

近年、社会資本整備の普及に伴って、人々の要求は土木構造物において、より質の高いものへと移行しつつあり、いかに美しいものを作るかに多くの関心が払われている。すなわち、景観設計の重要性が高くなってきており、また、社会全体に広く認識されつつある。ところが、構造物の美しさを定量的に評価することは非常に困難であり、例えば橋梁についていえば、全体の大部分を占める中小橋梁においては、景観について考慮している時間や経済的な余裕はほとんどなく、デザイン教育をほとんど受けていない橋梁技術者や設計者に一任されることが多い。これまで、橋梁の景観設計に関するアプローチは多くの研究者によって行われており、中でもSD法によるアンケート調査結果を用いてニューラルネットワークを適用する例が多く見られる^{1) 2) 3) 4) 5)}。しかし、ニューラルネットワークについては、中身がブラックボックスであることや人間の思考パターンと本当に一致しているのかなどの問題点が指摘されているが、その有効性も認められるところである。

景観設計の問題点としては、①定量的評価が困難である、②ルール化が困難である、③人によって評価が異なる、④労力と時間がかかる等があげられる。このように複雑に多くの要因が関連しあっており、その評価も定まったものがない橋梁の景観設計に対して、何らかの形で

ルール化が可能になれば、これまでその評価が難しいとされてきた景観評価に対して有効であると考えられる。これまで、橋梁の景観評価のような曖昧性を含む問題に対しては、ニューラルネットワークが有効でよく用いられている。景観の定量的な評価については、近年盛んに研究が行われており、その成果が徐々にではあるが実橋に適用されつつある。しかし、その研究は評価対象を例えば学生など1部分に限定しており、また、ニューラルネットワークの橋梁景観設計への適用の有用性は指摘されているが、ニューラルネットワーク以外の方法でのルール化の試みはなされていない。

本研究では、比較設計案としてよく用いられる中小規模のアーチ橋と桁橋を対象にして、曖昧性を含む景観評価に対して有効な方法として、情報エントロピーに基づく方法を検討し、その適用性について考察した。また、ニューラルネットワークについても同様の考察を行い、情報エントロピー法との比較を行うことで、要因が複雑に関連しており、かつ曖昧性を含む景観評価に対しての適用性の検討を行った。

具体的には、情報エントロピーを用いたID3法によるエキスパートルールプロトタイパーを用いて、橋梁の景観設計を行う上で、重要な因子を明らかにし、その評価ルールの抽出を試みた。さらに、人間の思考に最も近いといわれているニューラルネットワークを、曖昧性を

含む橋梁の景観設計に適用し、種々の評価例について学習することにより、その適用性について検討した。

2. 景観設計の現状

社会資本整備は、高度成長期の画一的・量的整備の時代から、成熟化・多様化社会を迎え、生活環境に対する価値観の変化も相まって、質的整備の時代へと移行してきている。また、近年は建設関連の専門誌などでもデザインに関する特集が頻繁に組まれ、また各種委員会の研究テーマとしてもよく取りあげられていることから、景観に対する関心が高まっていることがわかる。

橋梁の景観設計を行う上で、橋梁自体の形の美しさの他にも周辺環境との調和が特に求められている。周辺環境との調和には、その形態とともに色彩も重要な要因となる。したがって、橋梁の景観設計に係わる全ての要因を考慮して、最適設計案を作成することは容易ではない。

景観設計の現状は、その設計の複雑さから定まったものがなく、また、経済性や施工性などの指標とは異なり、主観的なものや客観的なものが入り混じったものとなるため、その評価も定性的にならざるをえないことにある。また、その評価も人によって、あるいはその置かれている状況によっても変化する。さらに、景観設計は多くの労力と時間を必要とし、景観について考慮している時間が十分にとれないなどの問題点をかかえている。したがって、現場の実状としては、代替案として数種類のパースの作成を行い、最適案を決定していることが多い。

景観設計の流れを図-1に示すが、橋梁の設計の中で景観は、最初のデザインコンセプトの作成から最後の細部処理に至るまで、全てにおいて係わってくる。したがって、設計にあたっては最終形状をよく見きわめた上で、経済性、施工性、維持管理、走行性、景観等を考慮してその型式や部材寸法を決定しなければならない。

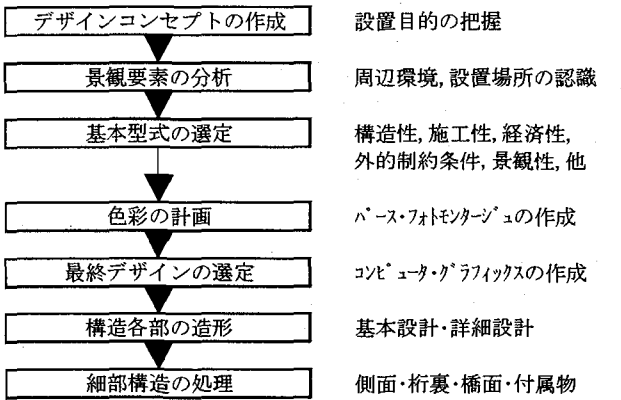


図-1 景観設計の流れ

3. 景観評価要因と評価項目

3.1 評価要因

表-1 アーチ橋の景観評価要因

分類年度ページ		橋梁名		H3	H3	H3	
形式		橋種	ローゼン	ニルベン	リカー		
		路面位置	上路	下路	上路		
		7-717の傾斜	平行	ハズレ	平行		
上部工	幅員(m)		9.2	9.0	9.2		
	部材	7-717	支間(m)	190.0	183.4	55.0	
			ライズ(m)	35.0	28.0	14.0	
			主構間隔(m)	6.5	2.0	7.2	
			部材	クランク	2.2	1.8	0.5
			高(m)	支点	2.2	1.8	0.5
	桁		形状	箱形	箱形	箱形	
			形状	箱形	箱形	I断面	
			桁高(m)	1.6	1.2	1.4	
	吊材		形状	箱形	円形	I断面	
間隔(m)			10.0	11.3	6.9		
色彩		7-717, 桁, 吊材		茶	赤	赤	
下部工	クリアランス(m)		91.0	60.0	29.0		
付属物	高欄			縦格子	縦格子	横棧	
	照明			無し	無し	一般	
コンポジション	排水管			横引き	無し	縦引き	
	視距離			中景	近景	中景	
	視点		視線入射角	斜側方	斜側方	側面	
			高さ	水平	水平	水平	
	背景			山	山	山	
	背景の色彩		上層	緑	濃い緑	緑	
			下層	緑	濃い緑	濃い緑	
プロポーション	スパン・ライズ比		5.43	6.55	3.93		

表-2 桁橋の景観評価要因

分類		類 度		H3	H3	H3	
一 梁		シ		71	72	74	
橋 式		名		A 橋	B 橋	C 橋	
上部工	形 式	型 式		連続箱桁	連続箱桁	連続箱桁	
		径間数		3	2	3	
	連 数	色 彩			3	4	2
	明 度	高 欄	灰		灰	黒	
			緑		青	黄	
			赤		灰	灰	
			高		高	低	
			低		高	中	
			高		中	中	
			中		中	低	
			低		中	中	
彩 度	高 欄	高		高	中		
		中		中	中		
下部工	型 式	単柱 T 型		単柱壁型	単柱壁型		
		断面形状		小判	小判		
付属物	高 欄	縦格子		縦格子	縦格子		
	照 明	一般		無し	一般		
	遮音壁	無し		無し	無し		
	排水管	縦引き		縦引き	縦引き		
コンポ ジション	視距離	中景		近景	中景		
		視 点		30	30	30	
	視 点	視線入射角		横	下	上	
		高さ位置		横	下	上	
	背 景	上 層	青		青	緑	
			緑		青	灰	
			高		中	中	
			中		中	中	
	プロ ポー ション	スパン比	1.0～1.5		0.0～1.0	1.0～1.5	
		スパン橋脚高比	15～20		20～25	5～10	
桁高変化比		1.5～2.0		1.5～2.1	1.5～2.2		
スパン桁高比		25～30		20～25	25～30		
幅桁高比		8～10		2～4	4～6		

橋梁のデザインにおいては、橋梁の景観がどのような要素から構成され、どのような相互関係にあるかを分析し、認識しておくことが重要である。橋梁景観を構成す

る要素としては、架橋地点や周辺環境との調和など背景に関するもの、視点場や視線方向など構図に関するもの、橋梁自体のプロポーシオン（寸法比、スパン比、桁高比等）や色彩・テクスチャなどの橋梁本体に関わるものなどが挙げられる。

本研究では、景観評価をより客観的なものとして定量的に表すために、できるだけ多くの橋梁事例を収集し分析する必要があると考え、橋梁の完成写真とともにその橋梁型式や構造寸法等が整理されている橋梁年鑑⁶⁾を使用した。そして、景観の構成要素は、橋梁年鑑に記載されているデータや別途各橋梁ごとに追加収集した寸法データからアーチ橋および桁橋について、表-1および表-2に示す評価要因にとりまとめた。

3.2 評価項目

橋梁の景観デザインを行うにあたり、設計時で配慮する事項としては、橋梁自体が個性美を持つことと、周辺環境に調和していることが重要である。設計段階で立案されたデザイン案を評価する際、ほとんどの人が同じ評価をする場合はまれで、意見が分かれるケースが大部分である。これは、共通性が高い評価基準、すなわち、認知のしやすさなどの認知特性に基づく評価基準はあまり個人差はないが、魅力のあるなしや好き嫌いなど、個人の感性やその時の気分などによって異なる判断要素が組合わさっているためである。このうち、共通性が高い評価基準を客観的、個人によって評価が異なる基準を主観的、どちらでもないものを中間として定義した。

評価項目は、過去に行われている景観評価の事例等²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾を参考にしてリストアップし、そのうち景観評価において関わりが深いと考えられる27項目を表-3のように設定した。そして、主に橋梁の設計および施工を実際に行う技術者である橋梁技術者10名、完成した橋を実際に使用する立場で、一般の人よりも構造物に関する知識があると思われる工学部の大学生約50名および主にデザインに関する部分に係わる人で、設計および施工の実務に関してはほとんど知識がないデザイン専門家3名を対象に表-3の評価用紙を用いてSD法による5段階のアンケート調査を行った。橋梁技術者には橋梁年鑑の実際の写真を見せて、学生およびデザイン専門家には橋梁年鑑の写真から作成したスライドを見せてそれぞれ評価させた。評価に要した所要時間は約4時間で、途中に30分の休憩を入れた。評価に用いた橋梁は、橋梁年鑑の昭和62年から平成4年までのアーチ橋108橋、桁橋104橋である。評価日を変えると、しっかりとした評価基準を持っていない人はその評価が変わってしまう恐れがあるため、評価は1日で集中して行うこととし、1橋で約1分の評価時間があれば26項目の評価はできるということと、連続して評価できるのが約100分ということと、事前に行った複数人による予備調査で確認し、200橋×1分/橋+30分の休憩=約4時間=100分の評価×2

+30分の休憩という設定から、前述のアンケート件数を割り出した。

表-3 評価項目

	非常に 2	やや 1	0	やや -1	非常に -2	区 分
1 美しい					醜い	中 間
2 魅力のある					魅力がない	主観的
3 好きな					嫌いな	主観的
4 親しみやすい					親しみにくい	中 間
5 目立つ					目立たない	客観的
6 個性的な					個性がない	中 間
7 印象的な					印象が薄い	中 間
8 力強い					弱々しい	客観的
9 動的な					静的な	客観的
10 機能美がある					機能美がない	中 間
11 安定した					不安定な	客観的
12 落ちついた					落ちつかない	中 間
13 自然な					不自然な	中 間
14 調和した					調和していない	客観的
15 まとまりのある					バラバラな	客観的
16 リズム感がある					単調な	中 間
17 すっきりしている					煩雑な	客観的
18 すすがしい					うっとおしい	客観的
19 開放感がある					圧迫感がある	中 間
20 柔らかな					堅い	中 間
21 近代的な					古臭い	中 間
22 洗練された					野暮ったい	中 間
23 均整のとれた					均整のとれていない	中 間
24 明るい					暗い	中 間
25 軽快な					鈍重な	中 間
26 重厚な					軽薄な	中 間
27 冷たい					暖かい	中 間

4. Decision Tree による分析

現実直面する種々の問題は、複雑な制約や条件を受けている。それらを解決するには専門家が「暗黙の知識」を十分にふまえて意志決定を行い、結論を導いている。エキスパートシステムを構築する際に、この「暗黙の知識」を専門家から獲得することは従来は非常に困難であったが、複雑な知識も各種の条件や属性値を整理して小さな知識に分割すれば、「もし・・・ならば・・・さもなくば・・・」という階層型の多数のルールで表現が可能である。

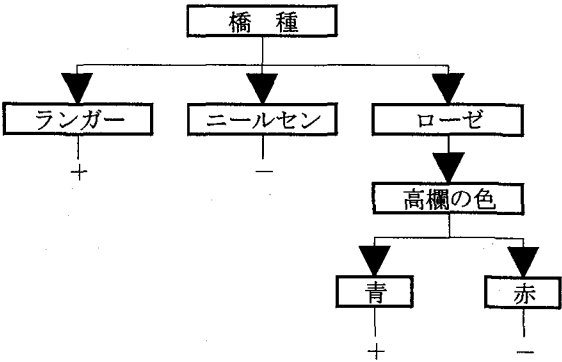


図-2 決定木(Decision Tree)の例

決定木(Decision Tree)とは、例えば、図-2のようなもので、分類型の知識を表現するのに適している。今、

あるデータの”分類クラス（結論）”を知りたいとする。まず最初に最上位の節点（ルート接点）でその属性の値を調べる。そして、その値の枝を辿ることにより次に調べる属性を知ることができる。これを次々と繰り返し、葉節点（下に枝がない節点）に到達すると、その分類クラスが判明する。そして、同時に葉節点数のルールを得ることができる。

「橋 種」	「桁形状」	「高欄の色」	「評価クラス」
ローゼ	I 型	青	+
ランガー	箱型	赤	-
ランガー	箱型	青	-
ニールセン	箱型	青	+
ランガー	I 型	青	-
ローゼ	箱型	赤	-
ローゼ	I 型	赤	-
ローゼ	箱型	青	+

図－3 データ集合 D

例えば、図－3 のようなデータ集合が与えられた時に、図－2 のような決定木を作成する方法を述べる。データ集合Dは、次の3つの属性と分類クラスによって記述されている。

属性 橋種 = {ランガー, ニールセン, ローゼ}
桁形状 = {箱型, I 型}
高欄の色 = {青, 赤}
分類 評価クラス = {+, -}

このとき、どのような順序で属性を調べるかにより色々な決定木が作成される。J.R.Quinlan によって 1979 年に提案された” I D 3 (Interactive Dichotomizer Three)”は「データを分類するときの判断回数の期待値を最小にする決定木」を生成することを目的としている。そのために、獲得情報量（相互情報量）の期待値を最大にする属性を、その時の決定木の判断節点として選択する。

D の情報量 I(D) は、各クラスの出現する確率を p1,p2 とすると、

$$I(D)=-p1\cdot\log_2 p1-p2\cdot\log_2 p2 \tag{1}$$

と定義できる。この例では、「+」クラス、「-」クラスの出現する確率はそれぞれ 3/8 と 5/8 となり、

$$I(D)=-3/8\cdot\log_2 (3/8)-5/8\cdot\log_2 (5/8)=0.954$$

となる。

次に、各属性について、その属性でテストした場合の情報量を計算する。例えば、属性「桁形状」でテストすると考えると、

$$\begin{aligned} \text{桁形状 8 件 (+:3, -:5)} &\rightarrow \text{箱型 5 件 (+:2, -:3)} \\ &\rightarrow \text{I 型 3 件 (+:1, -:2)} \end{aligned}$$

のように分類されるので、「箱型」と「I 桁」に対するデータ集合 Dh と Di の情報量を計算する。

$$I(D_h)=-2/5\cdot\log_2 (2/5)-3/5\cdot\log_2 (3/5)=0.971$$

$$I(D_i)=-1/3\cdot\log_2 (1/3)-2/3\cdot\log_2 (2/3)=0.918$$

そして、属性「桁形状」でテストした後の情報量を求めると、Dでの「箱型」と「I 型」の確率がそれぞれ 5/8 と 3/8 であるので、

$$E(\text{桁形状}, D)=5/8\times0.971+3/8\times0.918=0.951$$

となる。

同様に、属性「橋種」と「高欄の色」でテストした場合の情報量の期待値はそれぞれ

$$E(\text{橋種}, D)=3/8\times0+1/8\times0+4/8\times1=0.5$$

$$E(\text{高欄の色}, D)=5/8\times0.971+3/8\times0=0.607$$

となる。

そして、これらとDの情報量 I (D) との差である獲得情報量G (桁形状, D)を計算すると、

$$\begin{aligned} G(\text{桁形状}, D) &= I(D) - E(\text{桁形状}, D) \\ &= 0.954 - 0.951 = 0.003 \end{aligned}$$

となる。

同様にして、

$$G(\text{橋種}, D)=0.454$$

$$G(\text{高欄の色}, D)=0.347$$

となり、これらが最大となる属性をDの判断節点として選択するので、この場合は「橋種」が選択される。これを各節点と同じクラスのデータだけになるまで、繰り返して適用すると、図－2 の決定木が得られる。

以上、I D 3 によって決定木を作成するアルゴリズムは次のようになる。

- (1) 全ての学習データを対応付けた節点（ルート節点）を生成する。
- (2) 節点に対応付けられた学習データ集合Dがすべて同じ分類クラスCkに属するならば、その節点を葉節点とし、分類クラスCkをラベル付けする。
- (3) そうでなければ、その節点は葉節点ではないので、次の処理を行う。

- ・各属性Aiに対して、その属性値によりDを部分集合に分割し、獲得情報量G (Ai, D)を計算する。

- ・計算した獲得情報量が最大となる属性をこの節点の判断属性Amaxとする。

- ・判断属性Amaxの各部分集合に対して、元の節点と各部分集合の節点とを結ぶ枝に、対応する属性値Amaxjをラベル付けする。

- ・作成した全ての節点に対して、(2)から実行する。

このようにして、景観評価という漠然とした知識の整理に Decision Tree 法を使用して、橋梁の各物性データ（属性）と評価という感性に近い結論（分類クラス）との関係を分析することを試みた。

使用したソフトは、(株)第一コンピュータリソース製 XpertRule ProtoTyper（以下[XPT]と略す）⁷⁾である。このソフトは、判断例、実験・観測データなどの事例からその結果を分類するためのルール（決定木）を帰納的に誘導する手法を採用し、体系化された知識獲得を支援するツールである。さらに、XPTはユーザが問い合わせた場合、「どのようにしてこの結果が得られたか」という判断の経緯

をユーザに回答することもできる。

あらゆる評価は、個人の持つ「評価基準」に照らして行われ、景観評価も例外ではない。この評価基準には、構造の安定性のように客観的な基準に基づくものと、景観評価のように個人の主観的な感覚が基準になっているものがある。

個人の感覚を基準とした評価は、評価要因およびその基準が明確ではなく、かつ個人により異なっている。ここでは、評価者がどのような要因に着目しているか、また、どのような評価基準を持っているかを明らかにし、さらに、この分析されたルールに基づいた景観評価の妥当性を検証することを目的とした。

XpertRule	課題名	ARCH_1	ルールの印刷
1 色彩／橋			
2	-----赤:アーチライズ		
3	-----25~:部材高／支点		
4	-----1.6~1.9: 2	(2, 1.00)	
5	-----1.0~1.3: 2	(1, 1.00)	
6	-----0.0~0.4: (不足)	(0)	
7	-----0.4~0.7: 1	(1, 1.00)	
8	-----0.7~1.0: 2	(1, 1.00)	
9	-----1.3~1.6: 1	(2, 1.00)	
10	-----1.9~ : 2	(1, 1.00)	
11	-----10~13: 桁 高		
12	-----1.2~1.4: 1	(2, 1.00)	
13	-----1.4~1.6: 1	(2, 1.00)	
14	-----2.0~ : 1	(1, 1.00)	
15	-----1.8~2.0: (不足)	(0)	
16	-----1.0~1.2: 橋 種		
17	-----ニールン: (不足)	(0)	
18	-----ローゼ : 0	(1, 1.00)	
19	-----ランガー: (不足)	(0)	
20	-----ラングートラス: (不足)	(0)	
21	-----トラストランガー: (不足)	(0)	
22	-----アーチ : -1	(1, 1.00)	

図-4 アーチ橋の美しさについての抽出ルール

ルールの誘導は、平成5年12月に実施した学生によるアンケートから行った。その誘導されたルールの一例を図-4に示す。この例では、最初に橋本体の色彩でまず分岐し、それが赤ならばアーチライズの値で次の分岐になる。アーチライズが25m以上ならば部材高／支点部の値で評価が決定される。また、判断例の不足による「不足」をもった決定木が現れている。これは、ID3アルゴリズムが与えられた判断例を全て決定木の分類の中に取り込もうとすることから生じるもので、極端に分岐の多いルールが出来上がってしまう。この対策としては、J.R.Quinlanによる「Pessimistic Pruning」アルゴリズムにより不足の分岐を置き換える方法が提案されている。

桁橋の分析結果を表-4に、アーチ橋の分析結果を表-5に示す。ここで、ツリーの1番目の階層順位とは、分岐の際に最も上位に来る項目で、図-4においては色彩／橋となり、この項目が評価の分岐の際に一番最初に判断される。2番目の階層順位は、図-4では部材高／支点、桁高・・・となり、表-4、5では、各評価項目ごとにツリーに現れた項目を全て記した。右の数字は出

現回数である。摘要中のツリー数とは、例えば図-4における左の番号の最大値を、最大深度とは分岐の深さを示し、要因数とは、そのツリーに出現した要因の数を示している。なお、表-4、5では教師値として最頻値を使用している。また、アーチ橋の各評価項目ごとのツリーの最上位に来る項目のアンケート日と利用データを変えて分析した結果を表-6に示す。これは、同じ橋をアンケート日と見せる順序を変えて評価した結果である。学生50名における-2~+2までの5段階の評価結果の平均値と最頻値を教師値として与え、比較した。

表-4 Decision Treeによるアーチ橋の分析結果

評価項目	ツリーの階層順位			摘 要
	1 番 目	2 番 目	3 番 目	
印象的	色彩橋梁	橋種 色彩背景上 色彩背景下	4 クラファン 3 色彩背景下 2 幅員 支間 吊材間隔 橋種 主構間隔 リブ傾斜 路面位置	ツリー数: 157 最大深度: 5 要 因 数: 11
			2	
個性的	橋種	色彩橋梁 色彩背景上 色彩背景下 リブ傾斜	2 高欄 幅員 色彩橋梁 吊材間隔 部材高/クラン 視距離 路面位置 ライズ 支間 色彩背景下 主構間隔	ツリー数: 128 最大深度: 4 要 因 数: 14
			2	
洗練された	橋種	支間 色彩橋梁 色彩背景下	3 背景 ライズ 幅員 路面位置 ライズ比 部材高/支点 色彩橋梁 支間 色彩背景上	ツリー数: 117 最大深度: 4 要 因 数: 11
			3	
親しみ	色彩背景上	色彩橋梁 色彩背景下 幅員 ライズ 桁形状	色彩背景下 主構間隔 橋種 背景 幅員 色彩橋梁	ツリー数: 122 最大深度: 5 要 因 数: 9
			5	
調和	視距離	色彩橋梁 色彩背景下	2 橋種 桁高 背景 支間 路面位置 色彩背景下 色彩橋梁 幅員	ツリー数: 121 最大深度: 5 要 因 数: 9
			2	
美しい	ライズ	色彩橋梁 背景	アーチ形状 橋種 幅員 色彩背景上 照明 桁高 色彩橋梁	ツリー数: 139 最大深度: 4 要 因 数: 9
			3	

表-5 Dicision Treeによる桁橋の分析結果

評価項目	ツリーの階層順位			
	1番目	2番目	3番目	摘要
印象的	幅桁高比	ハッソ桁高比 明度背景上 桁高変化比 色彩桁 橋脚形状 径間数	高欄 径間数 ハッソ比 彩度高欄 色彩背景下 排水管 色彩高欄	ツリー数: 110 最大深度: 5 要 因 数: 11
個性的	ハッソ橋脚高比	ハッソ桁高比 明度背景上 色彩桁 視線入射角 連数	明度桁 幅桁高比 橋脚形状 彩度桁 色彩桁 上部工型式 色彩地覆 径間数	ツリー数: 103 最大深度: 6 要 因 数: 13
洗練された	色彩桁	ハッソ橋脚高比 明度地覆 彩度桁 ハッソ桁高比 色彩高欄	ハッソ比 色彩高欄 高欄 幅桁高比 明度背景下 橋脚形状 彩度地覆 径間数 断面形状 連数 色彩地覆	ツリー数: 130 最大深度: 5 要 因 数: 16
親しみ	桁高比	視線入射角 幅桁高比	径間数	ツリー数: 22 最大深度: 3 要 因 数: 4
調和	色彩高欄	橋脚形状 明度高欄 ハッソ桁高比	色彩背景下 径間数 照明 ハッソ比 連数	ツリー数: 74 最大深度: 7 要 因 数: 9
美しい	色彩桁	橋脚高比 排水管 桁高変化	彩度高欄 明度桁 視線入射角 視線高さ 断面形状	ツリー数: 50 最大深度: 4 要 因 数: 9

表-6 アーチ橋の分類・ツリーの最上位の項目

アンケート日	H5.12.1		H5.12.15	
	最頻値	平均値	最頻値	平均値
印象的な	色彩橋梁	橋種	色彩背景上	色彩背景上
個性的な	橋種	橋種	色彩橋梁	色彩橋梁
洗練された	橋種	橋種	色彩橋梁	色彩背景上
親しみやすい	色彩背景上	背景	色彩背景上	色彩橋梁
調和のとれた	視距離	色彩橋梁	色彩橋梁	色彩橋梁
美しい	アーチライズ	アーチライズ	色彩橋梁	高欄

この分析結果に対しては以下の結論が得られた。

(1) 桁橋

- ・評価項目により、ツリー数や要因数の差が大きい。
- ・評価全体のバラツキが小さい（-1, 0, 1で-2, 2はない）。
- ・全体的に色彩が上位にきており、色彩により評価が決定される度合いが大きい。

(2) アーチ橋

- ・橋種、色彩などが上位にきており、人間が頭の中で考える思考とはほぼ合っていると思われるが、3番目までに出てこない項目（アーチ支間等）がある。
- ・評価日による違いが大きいのは、しっかりとした判断基準を持っていないためで、細かいところまで評価せずに、最も目立つ色彩でしか評価していないためと考えられる。

問題点としては、

- (1)最もバラツキの小さい項目が上位に来るが、これは要因の属性の数に影響されている。
- (2)ルール型式での出力となるため、前例のない判断例に対しては評価が困難となる。

5. Neural Network による分析

ニューラルネットワークによる分析にあたり、パーソナルコンピュータ上で動作するニューロコンピューティングソフト「RHINE(センチュリーサーチセンター(株))」⁸⁾を使用した。このソフトウェア上で実現されるニューラルネットの仕様は以下のとおりである。

- ・ニューラルネットモデル：階層型・再帰階層型
- ・学習方法：拡張バックプロパゲーション
- ・学習対象パラメータ：シナプス荷重・しきい値
- ・階層結合方式：全結合（シナプス結合の省略なし）

5.1 教師値の与え方

評価者の集団の総意を教師データとして与える際、問題となるのが教師値の与え方である。評価結果をどのような型式の評価データとして与えるのがよいかは、問題の種類により一義的に決定されるものではなく、データの性質にも依存する。このため、教師データの形式による学習結果の相違を見るため、教師データとして次のような形式を用いてシステムの構築を試みた。

- (1)評価点を数値として取り扱い、この平均値に最も近い整数値を用いる。
- (2)評価点を数値として取り扱い、この平均値（実数）を用いる。

- (3)上記(1)の値を-2～+2に対応する Bit で与える。

(ex. 評価点 -1:[0,0,0,1,0]、評価点 2:[1,0,0,0,0])

- (4)評価のランク別得票数を、ランクに対応する5細胞の値で表示する。

(ex. 評価1が3人、0が2人:[0,3,2,0,0])

学習回数を十分にとることにより、上記(1)～(4)のいずれの形式においても構築されたシステムは学習データを正しく評価している。

今回のアンケートでは、評価者の間でその評価結果はかなりばらついており、上記(1)、(2)、(3)のような形式では評価者間の意見の相違を反映できない。(4)の形式は評価のバラツキも表現できるため、有力である。

5.2 中間層細胞数

今回構築したニューラルネットワークは、入力層、出力層の他に1層の中間層を持っている。中間層の細胞数を多少増減させて(8～30)システムを構築しても、学習データを完璧に再現するシステムを構築することは可能であった。一方、非学習データについては、その正解率は中間層の細胞数により大きく変動する結果となった。この非学習データの正解率を見るために、一人の評価者の“周辺と調和した”という評価項目に関して、3層のニューラルネットワークを構築し、その中間層細胞数を8、10、

13, 15, 20, 25, 30、学習回数を 8100, 16200, 24300, 32400 とそれぞれ変化させて、その正解率を見たところ、中間層細胞数が 25、学習回数が 24300, 32400 とした場合が 77.8 で最も高くなった。ここで、正解とは、システムの出力と正解との差が±1 以内としている。その結果を表-7 に示す。

表-7 中間層細胞数による正解率の相違

学習回数	中間層細胞数						
	8	10	13	15	20	25	30
8,100	63.0	66.7	66.7	74.1	63.0	70.4	70.4
16,200	55.6	70.4	59.3	74.1	66.7	70.4	70.4
24,300	63.0	70.4	53.0	70.4	66.7	77.8	70.4
32,400	55.6	70.4	63.0	70.4	66.7	77.8	66.7

現段階では、中間細胞数の決定方法には決定的なものではなく、その問題によっても変わってくるため、このように色々のケースを検討して決定しているのが現状である。

5.3 評価のゆらぎ

同一の評価者が時期を変えて評価を行った場合、評価結果は異なる場合があることは先に述べたとおりである。評価者のある時点の評価に基づいて行うニューラルネットワークの学習においては、評価のゆらぎをノイズとして考え、過学習させないように留意する必要がある。また、ニューラルネットワークの出力結果を評価する際、評価者の回答と多少のずれがあっても、両者の差がある範囲内であれば、正解として取り扱う方が妥当であろう。

図-5 はある橋梁技術者による評価結果が評価日を変えた3回の評価においてどの程度異なるかを見たものである。評価日は H4.2, H5.7, H7.5 の3回行い、その3回の評価結果を以下の方法で評価点として表した。

評価点 = (3 回の中の最大値と最小値の差の絶対値) × 符号の変動

これによると、3 回とも評価結果が同じならば評価点はゼロとなる。また、符号の変動は、3 回とも同じ符号ならば+1 を、異なるならば-1 を与える。したがって、(-2, 0, 1) ならば評価点は-3 となる。この評価点は、値が小さいほど変動が少なく、マイナスがついていれば、良い・悪いが逆転していることになる。

結果は、6 項目の形容詞対ともに同じような傾向が見られ、3 回とも同じ評価点となるゼロは全体の約10~14% しかない。しかし、+1 程度の変動は許容できると考えると、ゼロと+1 との合計は全体の約50~64% となる。また、符号が逆転している-2~-4 は25~36% と全体の約1/4~1/3 を占め、かなり評価が変動していることがわかる。

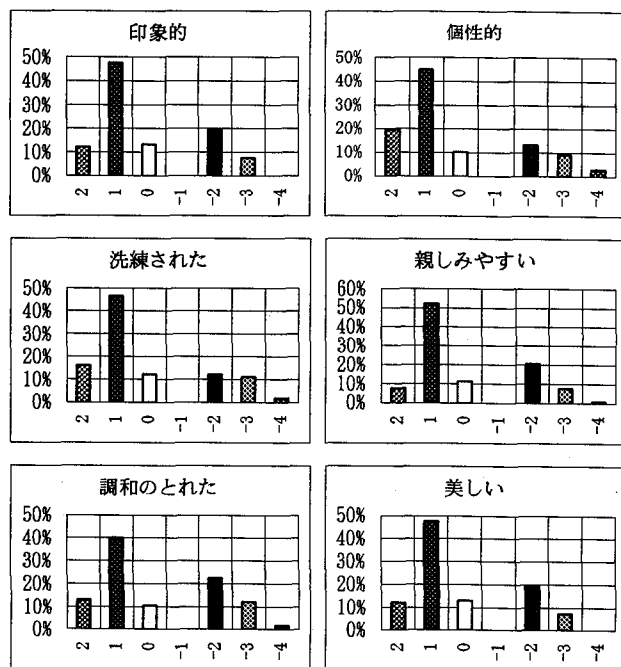


図-5 橋梁技術者による評価の時間的変動

結論としては、同じものを見てもその人の評価は時間や環境、経験によっても変化するため、このような結果はやむを得ない。逆に、この程度の評価のゆらぎはやむを得ず、データとしては使えると思われる。しかし、その必要な時に必要なデータを使用するなどのデータの更新を行う方がベターであろう。

5.4 デザイン専門家によるアンケート

多数の学生による評価に基づいた解析では、全員の評価結果を統計処理し、代表値を用いて解析を行った。この方法では、評価者間の評価のばらつきにより代表値として採用した「平均値」や「最頻値」等は平滑化されて、橋梁間での差が小さくなってしまい、満足な解析結果を得ることができなかった。また、特定の評価者による評価に基づく評価を行おうとすると、評価の質に関わる問題として、評価者がしっかりとした評価基準を持っているかどうかの問題となる。5.3 でも述べたように、一般的に同一の評価者が時間をおいて同一の橋梁を評価した場合、評価結果にゆらぎが生じるため、教師値としては採用できない場合もある。

このため、橋梁デザインに携わる専門家に対して橋梁評価を行い、これに基づいた解析を行った。表-8 にその結果を示す。デザイン専門家の評価に基づくシステムでは、学習データ・非学習データともに正解率（正解からのずれが±1 以内）は 90% 程度であり、満足すべき結果が得られた。一方、橋梁技術者のシステムでは、学習データについては十分に再現しているが、非学習データに関しては正解率は 50% 程度であった。これは、橋梁デザイナーが橋梁の美的評価に関して確固たる意見を持っていると言える。実際に評価するのは、一般の人、

橋梁技術者、デザイナーなどが考えられるが、これらはそのものの見方が異なって当然であり、実務レベルで景観設計を行うには、何種類かの評価者別のシステムが必要であろう。また、どの評価項目の影響が大きいかは、感度解析等⁹⁾でその解析は可能である。

表－8 専門家の評価に基づくシステムの正解率

		正解からのずれ(絶対値)					
		0	1	2	3	4	総数
デザイン 専門家	学 習	18	76	10	3	1	108
	データ	(17%)	(70%)	(9%)	(3%)	(1%)	(100%)
	非学習	6	21	2	1	0	30
	データ	(20%)	(70%)	(7%)	(3%)	(0%)	(100%)
橋梁 技術者	学 習	24	78	1	1	4	108
	データ	(22%)	(72%)	(1%)	(1%)	(4%)	(100%)
	非学習	4	12	4	6	4	30
	データ	(13%)	(40%)	(13%)	(20%)	(13%)	(100%)

6. Decision Tree 法と Neural Network 法との比較

桁橋とアーチ橋それぞれについて、事例学習により自動生成されたルールを用いたエキスパートシステムおよびニューラルネットワークにより昭和62年から平成3年までの橋梁データを学習させ、システム構築を行った。そのシステムを用いて、平成4年度の学習させていない橋梁データによるシステムの妥当性を検証した。モデルは3層の階層型で、一人の橋梁技術者の評価を用いた。

“美しい”という項目に関して、実際の評価と RHINE による評価、XPT による評価を表－9および表－10に示す。RHINE による出力値は、評価項目が 2, 1, 0, -1, -2 におけるそれぞれの数値がその認識の程度を表している。例えば、アーチ橋の橋梁1では分類1の“やや美しい”に含まれる可能性が 0.946 と最も高くなり、この橋梁は“やや美しい”と判断される。また、XPT による評価は 2, 1, 0, -1, -2 の整数値で出力される。

表－9 桁橋のシステム評価 (美しい)

橋梁 No.	実際の 評価	ニューラルネットワークによる評価					XPT による 評価	
		2 美しい	1	0 中間	-1	-2 醜い		
1	-1	0.005	0.002	0.126	0.796	0.003	0	
2	1	0.169	0.001	0.936	0.002	0.005	-1	
3	0	0.000	0.025	0.992	0.003	0.001	1	
4	1	0.005	0.422	0.410	0.000	0.020	0	
5	0	0.021	0.000	0.050	0.815	0.024	-1	
6	0	0.002	0.797	0.001	0.469	0.093	0	
7	0	0.024	0.007	0.929	0.065	0.022	0	
8	1	0.003	0.144	0.870	0.072	0.002	0	
9	0	0.020	0.187	0.918	0.018	0.010	0	
10	0	0.002	0.080	0.819	0.003	0.027	0	
集計					6	60%	4	40%
					4	40%	5	50%
					△	0%	0	0%
					×	0%	1	10%

◎：評価が同じ
△：評価が2ランク以上違う
○：評価が1ランク違う
×：符号が反転するもの

表－10 アーチ橋のシステム評価 (美しい)

橋梁 No.	実際の 評価	ニューラルネットワークによる評価					XPT による 評価		
		2 美しい	1	0 中間	-1	-2 醜い			
1	2	0.075	○ 0.946	0.000	0.002	0.002	◎ 2		
2	0	0.011	0.080	◎ 0.987	0.001	0.000	◎ 0		
3	-1	0.001	× 0.990	0.002	0.003	0.012	◎ -1		
4	2	◎ 0.710	0.015	0.047	0.015	0.044	◎ 2		
5	0	0.001	○ 0.585	0.032	0.286	0.000	○ 1		
6	1	0.001	◎ 0.563	0.100	0.281	0.013	◎ 1		
7	1	0.029	◎ 0.958	0.005	0.024	0.000	◎ 1		
8	0	0.000	0.011	◎ 0.993	0.112	0.005	◎ 0		
9	1	0.006	◎ 0.961	0.040	0.003	0.000	◎ 1		
10	0	0.000	○ 0.714	0.138	0.011	0.002	○ -1		
11	0	0.000	0.008	◎ 0.963	0.032	0.002	○ 1		
12	1	0.003	◎ 0.978	0.004	0.020	0.002	◎ 1		
13	0	0.040	○ 0.946	0.018	0.008	0.006	○ 1		
14	1	0.037	◎ 0.944	0.080	0.004	0.001	◎ 1		
15	1	0.021	◎ 0.925	0.012	0.004	0.006	◎ 0		
16	0	0.001	0.009	◎ 0.953	0.383	0.017	◎ 0		
17	1	0.006	◎ 0.680	0.234	0.089	0.138	◎ 1		
18	1	0.044	◎ 0.805	0.327	0.010	0.049	◎ 0		
19	0	0.030	◎ 0.803	0.467	0.004	0.002	△ 2		
20	-1	0.000	× 0.653	0.540	0.002	0.011	○ 0		
21	0	0.006	0.185	◎ 0.859	0.020	0.000	◎ 1		
22	0	0.001	0.271	◎ 0.889	0.087	0.001	◎ 0		
23	1	0.697	◎ 0.716	0.003	0.000	0.000	◎ 1		
24	1	0.092	◎ 0.831	0.036	0.063	0.052	◎ 1		
25	-1	× 0.543	0.089	0.259	0.091	0.031	○ 0		
26	2	0.467	○ 0.808	0.004	0.001	0.000	◎ 2		
27	-2	0.000	0.028	0.484	○ 0.495	0.073	× 1		
28	1	0.072	◎ 0.559	0.005	0.002	0.006	◎ 1		
集計					◎	18:	64%	17:	61%
					○	7:	25%	9:	32%
					△	0:	0%	1:	4%
					×	3:	11%	1:	4%

◎：評価が同じ
△：評価が2ランク以上違う
○：評価が1ランク違う
×：符号が反転するもの

桁橋、アーチ橋ともにうまく学習できていないパターンが数パターンあるが、おおむね評価結果と実際の評価とが一致しているといえる。

Decision Tree 法は、中身が見えるため階層構造がはっきりする、実務設計レベルではツリー構造が実際に見えるため使いやすさなどの特徴がある。また、事例にないデータについては判断できない、分岐の数を最小にするという方法から、人間の思考過程と本当に合致しているのか不明といった欠点があるが、使い方によっては、景観設計にとって有効な方法の1つとなりうる。一方、Neural Network 法は、中身がブラックボックスであるが、ロバスト性があり、事例にないデータに対しても何らかの答えを出力するため、景観設計のような要因が複雑に関連している問題においては適しているといえる。また、ニューラルネットワークには新しい展開¹⁰⁾も考えられつつある。

7. あとがき

本研究では、橋梁の景観評価に、情報エントロピーに基づく方法とニューラルネットワークによる方法を適用し、その有用性を検証することを試みた。橋梁形式としては、中小規模の橋梁ではよく用いられるアーチ橋と桁橋を取りあげた。問題点としては、橋梁の景観評価に及ぼす要因の選択や、評価者や評価時間が異なるとその評価が異なってくるというデータの質の問題、さらには、事例学習させるためのデータの量をどうするかなどの点

がある。しかし、これらの方法を用いると、複雑なモデルやルール化を行わなくても入出力として事例を与えるだけで、何らかの有意な答えを得ることができる。橋梁の景観評価にニューラルネットワークを用いる方法はこれまでに多く行われており、本研究では、橋梁の景観設計にニューラルネットワークが有効であることを再確認した。また、情報エントロピーに基づくツリー構造のルールを作成し、橋梁の景観評価を行い、その方法も実務レベルにおいては有効な方法の1つであることを確認した。

今後、橋梁の景観設計の重要度が増していく中で、実務レベルでの景観設計を効率よく行うためにも景観設計支援システムの構築は必要である。そのためにも、評価に与える要因、すなわち、プロポーショナルや色彩、背景など、相互の関連についての研究が必要であろうと考えられる。

参考文献

- 1) 加藤雅史・田中信治・大場邦弘：アンケートに基づく橋梁の景観評価に関する一考察，構造工学論文集，Vol.36A,pp.535-542,1990.3
- 2) 阪神高速道路公団報告書：橋梁設計におけるエキスパートシステムの応用に関する研究業務（その3），1990.3
- 3) 古田均・大谷裕生・中林正司・白石成人：ニューラルネットワークの橋梁景観設計への応用，構造工学論文集，Vol.37A,pp.669-675,1991.3
- 4) 白木渡・松保重之・高岡宣善：ニューラルネットワークによるアーチ橋の景観評価システム，構造工学論文集，Vol.37A,pp.687-697,1991.3
- 5) 白木渡・松保重之：色彩を考慮したアーチ橋の景観設計へのニューラルネットワークの適用，構造工学論文集，Vol.39A,pp.595-606,1993.3
- 6) 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑，昭和62年～平成6年
- 7) (株)第一コンピュータリソース：XpertRule ProtoTyper User's MANUAL,
- 8) (株)CRC 総合研究所：RHINE ユーザーズマニュアル，1993
- 9) 白木渡：中国地方の美しい橋づくり，土木学会中国四国支部研究成果報告書，1994.4
- 10) T. コホネン著・徳高平蔵・岸田悟・藤村喜久郎訳：自己組織化マップ (Self-Organizing Maps), シュプリンガー・ヘアラー東京，1996

(1996年9月6日受付)