

色彩と形態を融合した橋梁景観評価法の提案

A study on evaluation method of landscape of bridge with fusing fluctuation of color and fractal dimension

岡島延康*, 白木 渡**, 保田敬一***, 安達 誠+, 伊藤則夫++, 堂垣正博 +++
Nobuyasu Okajima, Wataru Shiraki, Keiichi Yasuda, Makoto Adachi, Norio Itoh, Masahiro Dogaki

*工修 (株)穴吹工務店 大阪支店マンション営業課 (〒542-0086 大阪市中央区西心斎橋 1-13-21)

**工博 香川大学教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 227-20)

***工博 (株)ニュージェック 総合計画・環境部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

+工博 復建調査設計(株) 総合計画部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

++工博 (有)シー・エー・イー 代表取締役 (〒680-8064 鳥取県岩美郡国府町分上 2-210)

+++工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

In bridge design, standardization and cost down have been required since the war. However, people would obtain the quality from the quantity with the time. So landscape and environment symbiosis would be asked. Under such situation, the research of Kansei Engineering and sensitivity information processing are developed to measure and analyze sensitivity and apply the sensitivity to the product. In this study, for color information and form information of the bridge image, we quantify the former by the fluctuation, and the latter by the fractal dimension, finally examine the relation with the sensitivity. In addition, we try to develop a new landscape evaluation technique with both of form information and color information.

Key Words: fluctuation, fractal dimension, assessment of landscape of bridge, GMDH

キーワード: ゆらぎ, フラクタル次元, 橋梁の景観評価, GMDH

1. まえがき

「感性」なる言葉が、日常で頻繁に使われるようになってきた。物が不足していた時代には、物への安全性や経済性など、実用的な性能を考えることで満足できたが、量的な満足が得られた後では、付加的な機能が求められるようになった。そして現在では、利用者が抱く感性に適合した製品の開発が求められるようになってきた。

橋梁の設計でも同じことが言える。戦後の生産中心、経済中心の考え方から、従来、画一的で機能性重視の橋梁設計が多く行われてきたが、人々が量より質を求めるようになったため、景観や環境との共生が重視されるようになった。そこで、人々が橋梁に抱く感性を的確に分析し、それを橋梁の景観設計に取り入れることが不可欠になってきた。

もともと橋梁は土木構造物の中でも景観に対する関心が高かったが、近年景観を性能としてとらえ、機能の中にも含めるような動きもある¹⁾。橋梁に嗜好性を持たせるような試みは1990年前後によく行われたが、近年のコスト縮減傾向と嗜好性を持たせる必要性の説明が難しいなどの理由から最近あまり行われていない。もっとも景観に対する配慮が欠けているわけではなく、1990年前後に集中して行われたデザインに対する知見の蓄積から、膨大なコストをかけなくても優れたデザインを生み出せるノウハウが多くあるという意味である。嗜好性をどの程度橋梁に持

たせるべきかについては、個々の橋梁の位置づけや社会情勢、人々の価値観の変化などによって変わってくるが、人々の感性をできるだけ取り入れていくのが望ましいと考える。

しかし、人々の感性と景観を結びつける評価指標や基準は依然あいまいなままであり、現状では橋梁のデザインに人々の感性を十分に取り入れることができていないと言いがたい。そのため、景観の感性評価に客観的な指標を与える工学的な研究が望まれている。

このような状況のもとで、人々が持つ感性の計測や分析、感性の製品への応用を目的に感性工学や感性情報処理などの研究が展開されている。そのアプローチとして、脳科学からのアプローチ、心理学からのアプローチ、情報工学からのアプローチ、言語学からのアプローチがある。

橋梁の景観評価に関する研究では、主に心理学からのアプローチや情報工学からのアプローチが試みられている。前者は、人々が景観に抱く「美しい」や「近代的な」などの感性的なイメージを統計学的に分析し、これと景観構成要素との関係を明らかにしようとするものである²⁾。後者は、景観を画像として捉え、対象の色、形態、大きさ、配置などの物理量を明確にし、見る側が抱く感性を数値、言語、パターンなどを用いて、客観的に表現しようとするものである³⁾。また、画像の特徴から感性を評価するための新たな指標を提案する研究がなされている^{4)~7)}。しかし、画像が色や形あるいは背景といった多くの要素から成り立っている

ることがこれらの研究を難しくし、これまで有効な指標が提案されるに至っていない。

そこで、画像を一括して解析するのではなく、色・形などの画像を構成する画像特徴を個別に解析し、それらを総合して画像全体の感性を調べる手順が有効と考えられる。そのためには、まず数多くの画像の特徴を抽出・整理し、さらにはそれらを融合できる手法の開発が必要である。

本研究では、橋梁画像の色彩情報と形態情報を対象に、前者をゆらぎ、後者をフラクタル次元で定量化し、それらと感性との関係を調べる。さらに、両手法を融合し、色彩情報と形態情報の両方をあつかった新たな景観評価手法の構築を試みる。

2. 画像特徴の定量化手法

2.1 ゆらぎによる画像特徴の定量化

ゆらぎは、景観の自己相関性を定量化したものである。既往の研究⁴⁻⁷⁾において、それが数値を示したとき、比較的良好な景観が得られているとされている。ここでは、2次元スペクトルから得られるゆらぎを用いた景観評価法を提案する。

(1) ゆらぎとは

ゆらぎ^{8, 9)}とは、不規則なものの変動をいう。これは、自然界に存在し、静止しているものではなく、時間とともに必ず変化している。たとえば、風は突然吹いたり、止まったりする。天候は、少しずつズレながら軌道運動を続け、決して一様な規則正しい動きをしていない。生物は規則的な運動ができない。このように、

宇宙や自然のすべてにゆらぎが存在する。

ゆらぎの解析には、スペクトルが用いられる。これは、ゆらぎをフーリエ変換し、各周波数成分のパワースペクトルを算出する方法である。その結果、ゆらぎを構成するさまざまな周波数成分がどの程度含まれているかが明らかにされる。

ゆらぎは、パワースペクトルの周波数依存性により白色ゆらぎ、 $1/f$ ゆらぎ、 $1/f^2$ ゆらぎなどに分類される。これらのうち、 $1/f$ ゆらぎは、変化の仕方が単調すぎず、ランダムすぎず、適度な変化を有し、これが人に快適感を与えられている。 $1/f$ ゆらぎは、小川のせせらぎや波の音など、自然界に心地よい音として存在する。また、心拍数や脳波の α 波など、我々の生体内にも見られる。 $1/f$ ゆらぎは、体のリズムと非常に類似しているため、人に快適感を与えられている。

(2) ゆらぎによる景観評価指標

ゆらぎに関する既往の研究では、1次元的にゆらぎを評価することが多い。本研究では、平面的な広がりをもつ被写体を扱うため、亀井の研究¹⁰⁾を参考に、橋梁とその周辺の色彩に注目した2次元のスペクトルから得られるゆらぎに基づく景観評価法を提案する。

景観を平面に広がる色彩の集合とみなせば、隣接する色模様の変化が互いに影響し合い、観察者に刺激を与えていると考えることができる。そこで、色彩を数値化し、その変化をゆらぎと見なす解析を行う。ゆらぎ解析の具体的な手順は、以下のような(図-1を参照)。

① 画像データを離散的な $M \times N$ 行列で表現し、 m 行 n 列目のピ

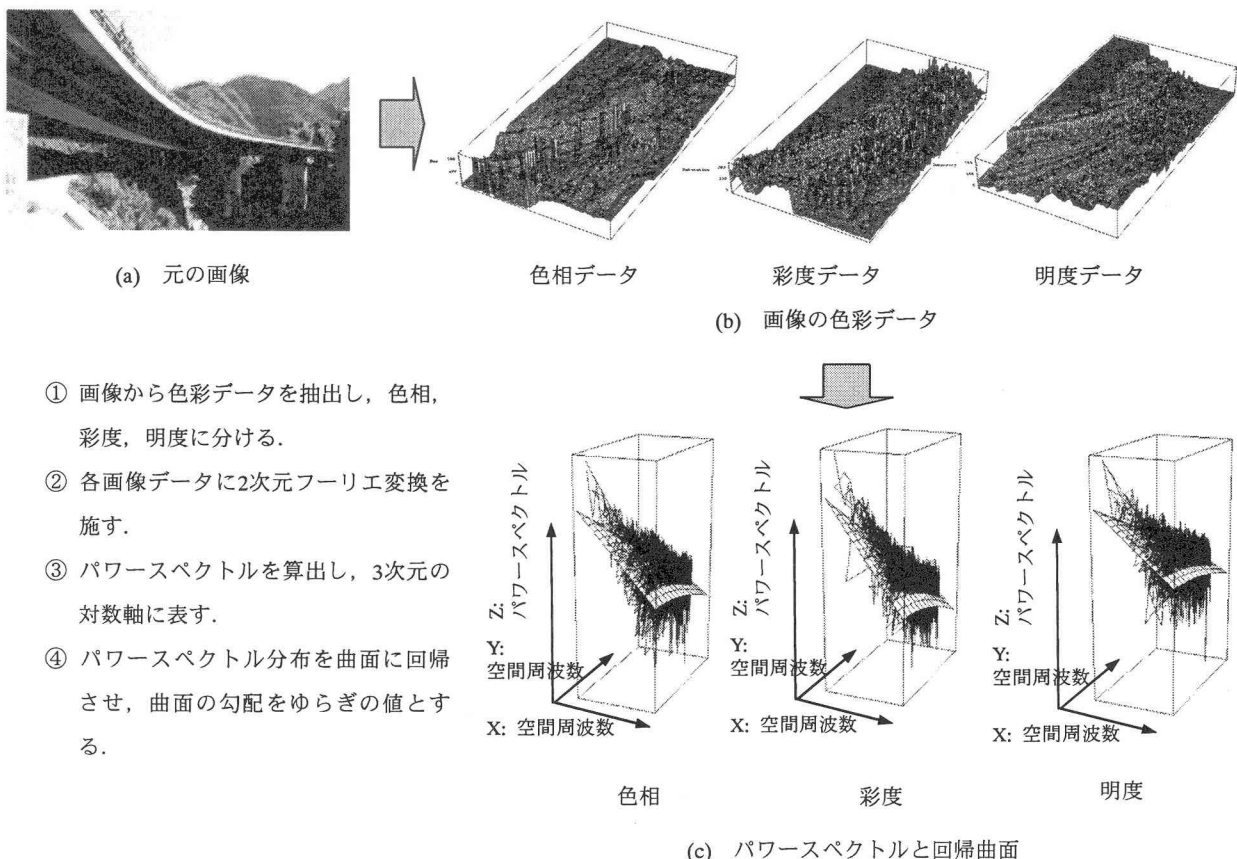


図-1 ゆらぎによる景観評価の手順

クセルの色相、彩度、明度を抽出して画像データ $f(m,n)$ とする。そして、それぞれの値を3次元で表せば、図-1(b)のようになる。

- ② 画像パターンに2次元離散的フーリエ変換を施せば、画像 $f(m,n)$ がどのような空間周波数成分から構成されているかが分かる。2次元離散的フーリエ変換 $F(u,v)$ は式(1)で定義される。

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) \exp \left\{ -2\pi j \left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに u, v はそれぞれ水平方向と垂直方向の空間周波数で、 $u=0, 1, 2, \dots, M-1$, $v=0, 1, 2, \dots, N-1$ とする。

- ③ 各空間周波数に対するパワースペクトル P_w を式(2)で求める。

$$P_w = |F(u,v)|^2 \quad (2)$$

これは、各空間周波数成分のエネルギーで、画像の全体的な性質を表現する。

- ④ u, v, P_w をそれぞれ x, y, z 軸とした3次元空間に表現する。なお、3軸とも対数軸とする。つぎに、パワースペクトルの分布を一定の傾きを持つ式(3)で現される曲面に回帰する(図-1(c)を参照)。

$$z = a + b\sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

そして、式(3)の傾き b をゆらぎの値とし、単調、ランダムなどのゆらぎ特性を判断する。

ゆらぎは負の値をとり、絶対値が大きいほど単調なゆらぎを示し、逆に小さいほどランダムなゆらぎを示す。

(3) 画像サイズとゆらぎの関係

ゆらぎの値は画像のサイズによって異なる。ここでは、ゆらぎが画像のサイズによってどの程度異なるかを調べ、その結果を踏まえて本研究で用いる橋梁写真の画像サイズを決定する。

解析対象とする橋梁画像のサイズを①116×208 pixel, ②140×250 pixel, ③162×291 pixel, ④186×333 pixel, ⑤208×374 pixel, ⑥232×416 pixel に変化させ、それぞれの画像サイズにおけるゆらぎの変化を調べた。解析の結果を表-1 および図-2 に示す。

表-1 から明らかなように、同じ写真であっても画像サイズが変化すると、ゆらぎも変化する。ゆらぎがサイズによって異なる要因として、以下のことが考えられる。

- (1) サイズが大きいほど、画像の細かな変動を捉えるため、ランダムさが増す。すなわち、ゆらぎの絶対値は小さくなる。
- (2) サイズが小さいほど、変化の仕方がなめらかになるため、自己相関性が強まる。すなわち、ゆらぎの絶対値は大きくなる。
- (3) 本研究で用いた写真は橋梁年鑑からスキャナで読み取ったもので、画質はあまり良いとは言えない。そのため、大きい画像ほど画質の荒さがゆらぎに反映される。

画像のサイズを変えると、これら(1), (2), (3)の要因から、表-1 に示すようなゆらぎの増減が生じたと考えられる。サイズ①~④では、画像(a)のゆらぎは-2.1程度、画像(b)のゆらぎは-1.5程度、画像(c)のゆらぎは-1.3程度となった。

しかし、画像(a)のサイズ⑤, ⑥ではゆらぎが-1.6とよりランダムになり、画像が小さい場合に比べて大きな差が生じている。画像(a)では面積の半分を草原が占めており、画像を拡大したために草原部分の細かな色の变化が荒さとしてゆらぎに大きな影響を及ぼすようになったものと考えられる。

以上のことから、画像のサイズをあまり大きくすると、画像の細部の状態がゆらぎの評価に与える影響が大きくなると考えられる。本研究では、景観から受ける印象を計ることが目的であり、画像を細かく捉える必要はない。それゆえ、画像のサイズは①~③程度が妥当であると考えられる。よって、本研究では、サイズ①を採用することとした。

2.2 フラクタル次元による画像特徴の定量化

フラクタル次元は、景観の複雑性を定量化したものである。既往の研究^{9) 7)}において、フラクタル次元が一定の数値を示す景観は比較的良好な評価が得られるとされている。

(1) フラクタル次元とは

フラクタル^{11), 12)}とは、特徴的な長さを持たないような図形や構造、現象などの総称である。特徴的な長さを持たない図形とは、積乱雲、海岸線、コッホ曲線のように、いくら拡大しても全体と部分が同じ形、もしくは同じような複雑さをもつ形となるような図形のことをいい、この性質を自己相似性という。

フラクタル(Fractal)という言葉は、1975年にMandelbrotによって新しく作られた言葉で、語源はラテン語の *fractus* である。*fractus* は、物が壊れて不規則な破片になった状態を表している。従って、フラクタルという言葉に対しても、小さな破片や大きな破片が多く集まったような状態を思い浮かべればよい。

“統計的に自己相似である”という性質を定量的に表したもの

表-1 画像サイズの相違によるゆらぎの変化

	(a) 武雄高架橋	(b) 野村橋	(c) 苫東大橋
①116×208pixel	-2.072	-1.517	-1.178
②140×250pixel	-2.172	-1.453	-1.283
③162×291pixel	-2.129	-1.482	-1.465
④186×333pixel	-2.140	-1.448	-1.198
⑤208×374pixel	-1.585	-1.415	-1.332
⑥232×416pixel	-1.615	-1.352	-1.333
range	0.032	0.070	0.287
average	-2.129	-1.475	-1.281

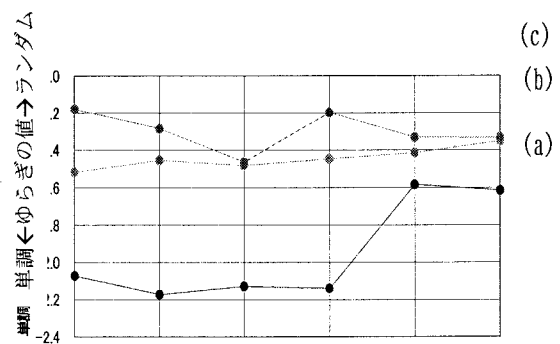


図-2 画像サイズによるゆらぎの相違

がフラクタル次元である。全体の構造を細分化し、細分化されたそれぞれの単位長さが全体の単位長さになるようにしたとき、おのおの部分と全体とが統計的に自己相似となる。それらの個数が平均 b 個であるならば、フラクタル次元は次式で与えられる。

$$D = \log_a b \quad (4)$$

しかし、自然界に見られるフラクタルを確かめるために、上記の定義を直接適用してフラクタル次元を求めるのは非常に困難である。そこで、フラクタル次元を求めるためのいろいろな方法として、回転半径法、PD法、ボックスカウンティング法などが提案されている。その中でも、ボックスカウンティング法がコンピュータ画像への適用という点で最も優れている。

(2) フラクタル次元による景観評価指標

本研究では、フラクタル次元を求める方法として、ボックスカウンティング法を用いる。以下に解析手順を示す。

- ① 対象画像のエッジを抽出し、輪郭画像を作成する。
- ② 輪郭画像を一辺 r の直交格子に分割する。
- ③ 分割した図に対して、輪郭を含む格子数 n を数える。
- ④ r 、 n の対数をそれぞれ X、Y 軸にとり、格子の一辺 r を徐々に変化させた場合の r と n の関係を両対数グラフに表す。その分布を直線に回帰させた場合の負の傾きがフラクタル次元 a となる。この a の値が大きい程、複雑な景観を表す。

既往の研究⁷⁾によれば、フラクタル次元 a が1.20～1.40程度るとき、比較的良好な景観であることが示されている。

3. 橋梁景観の感性評価

3.1 アンケート調査による分析

本研究では、先の筆者らの研究¹³⁾で得られた景観評価値とゆらぎによる景観評価値を比較する。評価対象の橋梁景観は、橋梁年鑑¹⁴⁾から選定した。景観を選定する際には次のような点を重視している。

- ・写真が見やすく撮れている
- ・全体的な構図に統制がとれている

- ・被験者が判断しやすい

筆者らは、90 橋の桁橋を対象に、43 個のイメージ形容詞に関するアンケート調査を SD 法によって行った。ちなみに、SD 法は、測定方法として、十分な客観性、信頼性、妥当性を備え、かつ、多様な被験者や種々の概念をもつ領域にも適用が可能であるといわれている²⁾。形容詞対の評価段階には、アンケートの被験者に判断しやすく、かつ被験者の疲労が少ないと考えられる 5 段階評価が採用されている。なお、被験者は、関西大学工学部土木工学科の学生 40 名（女性 20 名、男性 20 名）とした。

評価に用いた 90 橋の桁橋について説明を加える。この 90 橋は様々な視点場（視点高さ、視距離、視線入射方向）が混在している。同一橋梁であっても視点場が異なれば評価もまた違ったものになることは容易に予想できる。著者等の既往の研究¹⁵⁾でも、同一橋梁で撮る場所を変えた複数の写真を用いた景観評価の研究として、視点場と評価結果とは相関があること、形容詞によって評価の良くなる視点場は存在するというように結論づけている。

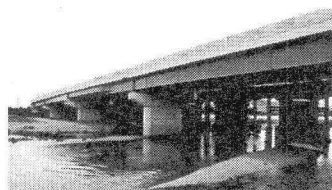
本研究で、視点場の異なった橋梁を対象とした理由は、ゆらぎの値を説明する変数は少ない方がよく、様々な視点場が混在しても、視点場の情報を包括することができれば理想的であると考えたことによる。

また、本研究で被験者を学生とした理由は、橋梁技術者など他の被験者との評価の差を検証することが目的ではないことによる。アンケート評価値は、SD 法（-2、-1、0、+1、+2）による 40 名の学生の平均値を採用した。個々の被験者で評価のばらつきは存在するが、平均値とすることで評価の傾向を把握することができると思われる。被験者数は多い方が望ましいが、40 名でも平均値を採用することによりある一定の評価の傾向が得られていると考えた。

3.2 ゆらぎ解析による評価

(1) ゆらぎによる評価結果

アンケート調査に使用した 90 橋の橋梁写真に対し、画像を構成する要素である色彩（色相、彩度、明度）に注目し、それらのゆらぎを求めた。解析に用いた画像の大きさは縦 116pixel、横

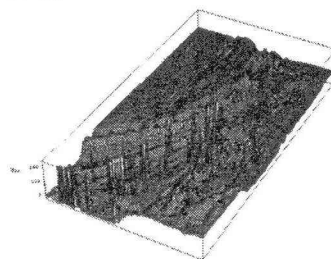
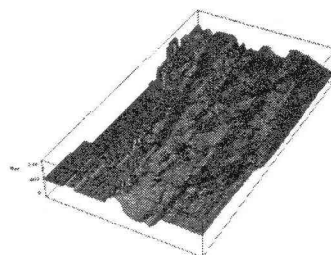


画像① ゆらぎ-2.167 (単調)



画像② ゆらぎ-1.379 (ランダム)

図3 単調なゆらぎとランダムなゆらぎ



208pixelである。

ゆらぎは負の値であり、絶対値が大きいほど単調なゆらぎを、小さいほどランダムなゆらぎを示す。色相、彩度、明度に関する90橋のゆらぎの平均値は、それぞれ-1.62, -1.36, -1.94のように求められた。この結果から、色相と明度のゆらぎは彩度のゆらぎよりも単調であることが分かる。

ゆらぎから単調な景観およびランダムな景観といえる例を図3に示す。ここに、写真の右に示した図は、画像要素の1つである色相の変化を表したものである。図3の画像①では桁の色は青、そして画像②では赤となっている。

ゆらぎ解析の結果、画像①の色相のゆらぎは-2.167で単調な景観と、また画像②の色相のゆらぎは-1.379でランダムな景観と判断される。図に現れる色相の変化をみると、画像②の赤い桁の周囲における変化が著しく、これがランダムな景観との評価に強く寄与していることがわかる。

(2) ゆらぎと感性の関係

i) 90橋全体の比較

ゆらぎと感性の関係を調べるため、ゆらぎによる評価値とアンケート調査の結果を分析した。感性を表現する形容詞対には、筆者らがアンケート調査で用いた43対のうち、ゆらぎに関係するつぎの4対を選んだ。

- ・複雑性 (すっきりとした—ごみごみした)
- ・快適性 (快適な—不快な)
- ・調和性 (調和のとれた—調和のとれていない)
- ・シンボル性 (象徴的な—象徴的でない)

ゆらぎ解析とアンケートによる評価値をそれぞれ横軸と縦軸にとり、ゆらぎと感性との関係を表す散布図を作成し、これを観察した。その結果、90橋全体を対象として分析した場合には、ゆらぎと感性との間に明白な相関関係は認められなかった。これは、橋梁景観が視点場到大いに影響されるにもかかわらず、視点場の異なる90橋を同じ尺度で同一に評価したためと考えられる。

すなわち、90橋には様々な視点場が混在している。視点場が変わればその評価も変化するため、90橋全体でゆらぎと感性との散布図を書くのではなく、視点場毎に分類してから散布図を書いた方がよりゆらぎと感性との関係が把握しやすくなると考えられる。この理由として、著者らの既往の研究(13)で、橋梁のデザイン要素(色、形、風景、付属物、視点場など)と感性評価との関係を数量化理論I類により分析した結果から、視点場(視点高さ、視距離、視線入射方向)が評価に大きく影響していることがあげられる。

ii) 視点場の相違を勘案した比較

橋梁写真を視点場で分類し、視点場ごとに評価することとした。視点場は、視距離(遠景、中景、近景)、視線入射角(斜側面、側面)、および視点高さ(上、水平、下)で区別される。

視点場の違いで橋梁景観を分類し、①近景-斜側面-下、②近景-斜側面-水平、③近景-斜側面-上、④遠景-側面-水平、⑤中景-斜側面-水平における景観のゆらぎと感性の関係を調べた。視点場「⑤中景-斜側面-水平」のゆらぎと感性との関係を示したものが図4である。また、図4中のA,B,Cは単調～ランダムなゆらぎを持つ特徴的な3つの橋梁景観の例(図5参照)を示している。

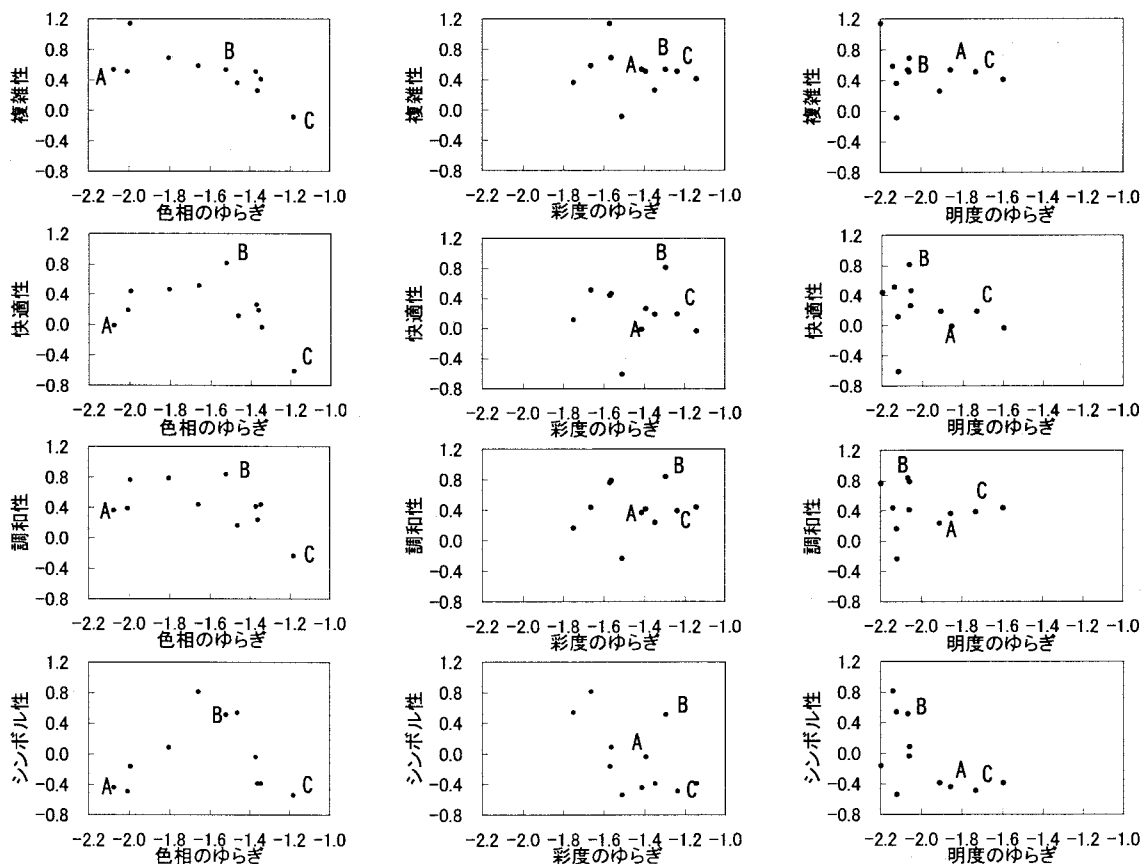
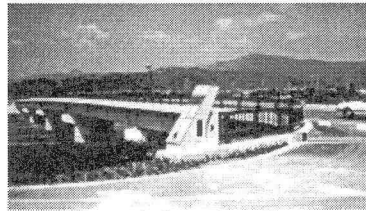


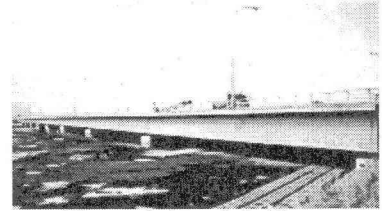
図4 “中景-斜側面-水平”の視点場におけるゆらぎと感性の関係



画像 A 色相のゆらぎ-2.072
単調なゆらぎをもつ不快な景観



画像 B 色相のゆらぎ-1.517
適度なゆらぎをもつ快適な景観



画像 C 色相のゆらぎ-1.178
ランダムなゆらぎをもつ不快な景観

図-5 解析画像

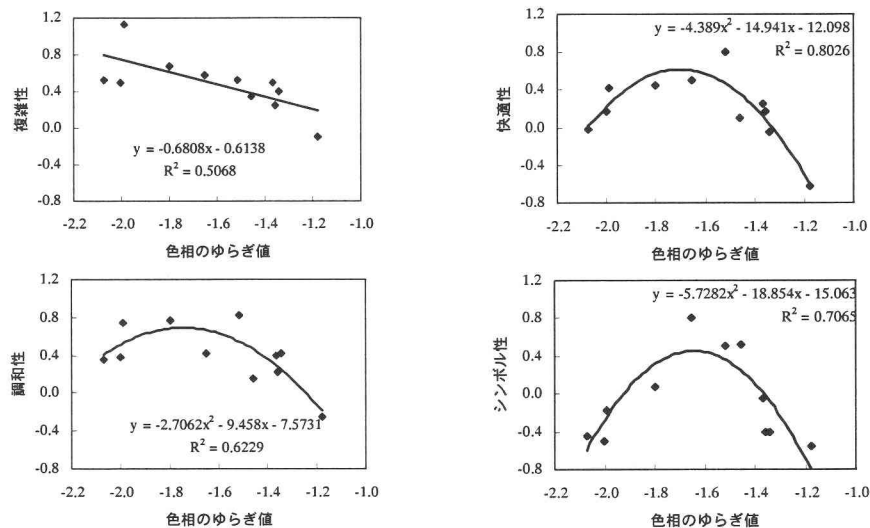


図-6 中景-斜側面-水平における色相のゆらぎと感性の関係式

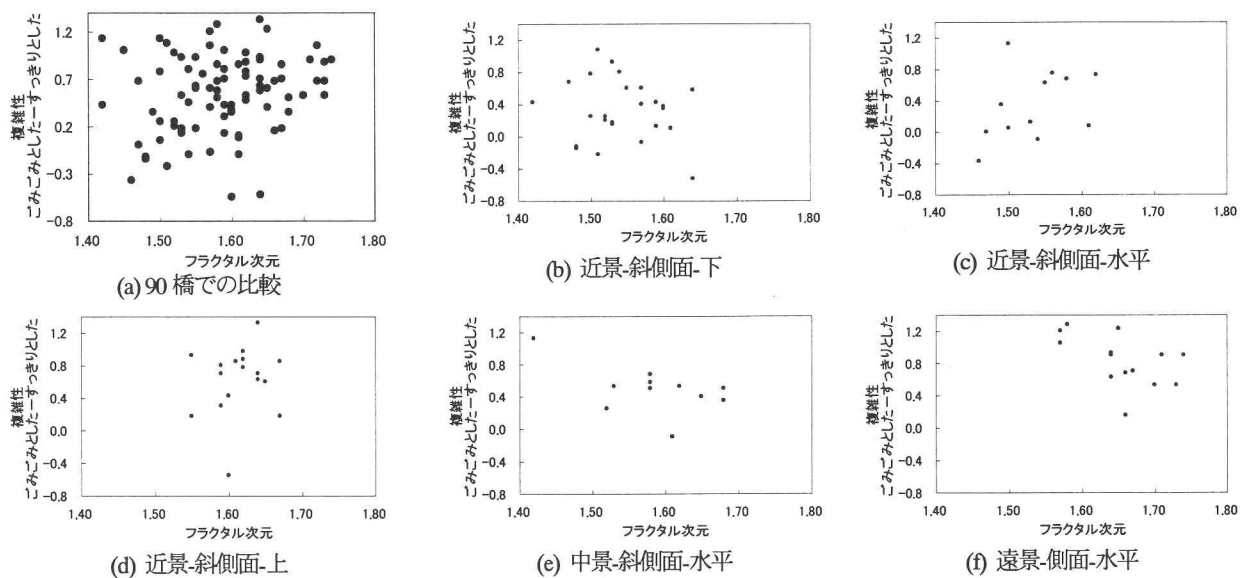
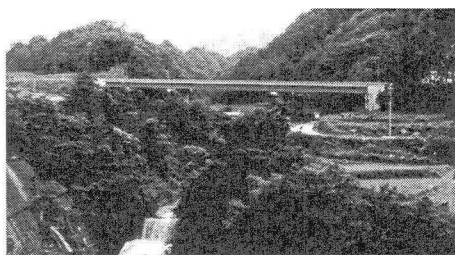
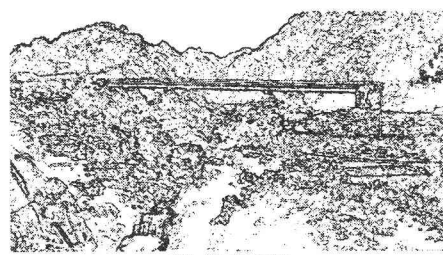


図-7 フラクタル次元と複雑さの関係



(a) 元画像



(b) 輪郭画像

図-8 楠川大橋の元画像と輪郭画像

図5に例示しているように、あまりにも単調あるいはランダムな場合には感性評価が低く、適度なゆらぎを持つ場合に高い評価が得られることが予想できる。従って、ゆらぎと景観感性評価値の相関が高い場合には図4のような散布図は上に凸な分布を示すことになる。

このように考えると色相のゆらぎと感性評価値の相関はかなり高いのではないかと考えられる。一方で、明度および彩度のゆらぎについては、複雑性の感性評価値に関しては相関が認められるが、快適性、調和性、シンボル性については相関が認められない。よって、画像の印象には色相のゆらぎが主に影響しているのではないかと考えられる。

図4の色相のゆらぎに対して重回帰分析を行うことで、図6に示すような関係式を導くことができた。本研究では、この関係式を色相のゆらぎと呼ぶことにする。これらの2次曲線の極値が理想的なゆらぎであると考えられるなら、それぞれの感性に関する理想的なゆらぎは、快適性-1.702、調和性-1.748、シンボル性-1.646となる。

なお、①近景-斜側面-下、②近景-斜側面-水平、③近景-斜側面-上、④遠景-側面-水平では、ゆらぎと感性の間に明瞭な相関関係は見られなかった。これは、桁の色彩面積が大いに関係していると思われる。視点場が近景の場合、桁の色彩面積が写真の大部分を占めるため、色の変化よりもむしろ、桁の色そのものが感性に多大な影響を与えと考えられる。それゆえ、色の変化を扱うゆらぎでは、近景である橋梁景観の感性を正しく評価できないのではないかと考えられる。また、遠景である橋梁景観では、周辺環境に比べて橋梁が小さく、その存在がゆらぎにあまり反映されない。それゆえ、ゆらぎでは、遠景である橋梁景観の感性を正しく評価できないと思われる。

3.3 フラクタル次元による評価

フラクタル次元は、複雑さを表す指標として用いられる。ここでは、橋梁景観から受ける複雑さの印象とフラクタル次元との関連性を探る。

フラクタル次元を横軸に、複雑さ(すっきりとしたーごみごみとした)の感性評価値を縦軸として90橋分の解析結果をプロットすると、図7(a)に示す散布図が得られる。

フラクタル次元の値が大きいほど複雑な形態を示すわけであるから、散布図は右下がりの分布となることが予想されたが、図7(a)にそのような分布の傾向はみられない。やはり、全ての景観を一括して扱うのは難しいと思われる。

視点場ごとに橋梁景観を分類して、フラクタル次元と複雑さとの関係を調べたものが図7(b)~(f)である。視点場は、(b)近景-斜側面-下、(c)近景-斜側面-水平、(d)近景-斜側面-上、(e)中景-斜側面-水平、(f)遠景-側面-水平とした。

それぞれの視点場のフラクタル次元を比較すると、下→水平→上、近景→中景→遠景のように輪郭線を多く含む画像ほど、フラクタル次元は大きくなっている。しかし、すべての視点場で、複雑さとフラクタル次元に相関は認められなかった。従って、フラクタル次元は画像そのものの複雑さを正しく評価しているが、印象としての複雑さを正しく評価できていないと考えられる。

例えば、図8に示す画像の場合、木々が画像の大部分を占め、多くの輪郭線が含まれているため、フラクタル次元は大きな値を

示す。しかし、アンケート調査では比較的すっきりとした景観という評価となっている。この違いが生じた要因として、色の分布が考えられる。この写真では、輪郭線はごみごみしているが、色の変化はあまりみられない。このため、すっきりとした印象を与えたと考えられる。

以上のことより、形態の複雑さだけを対象とした場合、印象を正しく評価できないため、色の変化も考慮する必要があると言える。従って、形態を対象としたフラクタル次元と色を対象としたゆらぎを融合した新たな指標による評価を行うことが望ましい。

4. GMDH によるゆらぎとフラクタル次元の融合

脳科学研究の進展に伴って人間の認識過程について多くの知見が明らかにされてきた。その一つとして、視覚処理の初期段階(初期視覚系)に関する冗長度削減原理がある¹⁶⁾。この考え方によると、視覚データに存在する高い冗長性はデータの生成過程において生ずるもので、データを生成する要因そのものは確率的に独立であるとされている。そして、このデータ生成の逆過程、つまり観測されたデータからそれを引き起こした独立要因を推定する過程(冗長度削減過程)が、初期視覚系の計算であるとされている。冗長度削減過程は、2段階の処理過程、すなわち入力データを無相関化される段階(第1段階)と確率的に独立な成分に分解される段階(第2段階)で構成されると仮定されている。乾らのモデル¹⁶⁾では、第1段階過程において関与する3種類の細胞の受容野構造と色選択性が再現されており、さらに第2段階で行われる独立成分に分解するユニットは、色に非選択的なユニットと選択的なユニット、すなわち色に対する選択性によって2種類に大別されることが示されている。この結果、初期視覚系の処理過程では、空間情報を処理する広帯域ニューロンと空間の情報は伝達しないが色情報を処理する色選択性を有するニューロンが得られている。この結果から、乾らは空間情報を処理するニューロンと色選択性のみを有するニューロンとの和で画像生成できモデルを提案している¹⁶⁾。

本研究では、乾らの研究成果を参考にして、先に示したフラクタル次元による形に関する情報処理結果とゆらぎによる色に関する情報処理結果を統合して画像評価を行うことを考える。統合の方法として、ここではニューラルネットの一種であるGMDHを用いることにする。

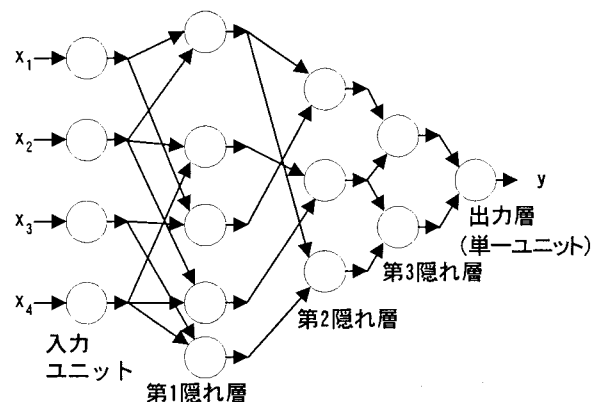


図9 典型的な GMDH ネットワーク

4.1 GMDH とは

GMDH(Group Method of Data Handling)^{17)~19)}は、1960年代後半に、キエフの研究者 A.G.Ivakhnenko が、複雑な非線形現象の入出力関係を見出すために提案した発見的自己組織化の原理に基づいた手法である。GMDH は、脳や神経回路網の自己組織化機能を真似た数学モデルで、多入力非線形写像の近似法である。

典型的な GMDH ニューラルネットワークを図-9 に示す。このネットワークは2入力1出力を持つ処理要素の集合であり、各処理要素は2つの入力 x_1, x_2 を式(4)のような2次形式に結合した出力信号を出す。

$$y = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_1 x_2 + e \cdot x_1^2 + f \cdot x_2^2 \quad (4)$$

このようなユニットからなる複数の層が、写像を実現するために組み合わせられる。なお、ネットワークは層間でフルには結合していない。入力ユニットに与えられる信号の任意の2つ x_1, x_2 が1つの最初の隠れ層処理要素に供給される。そして式(4)で得られる隠れ層処理要素からの出力がつぎの層に供給され、以下同様に前方に向かって進行していく。なお、最終出力は1つの実数 y である。

4.2 GMDH のアルゴリズム

具体的なデータを用いて、GMDH による融合の手順を述べる。ここでは、入力データに視点場「近景・斜側面・下」の橋梁景観の色相、彩度、明度の各ゆらぎとフラクタル次元を、出力データには快適性に関する景観評価値を用いる。入出力データを表-2 に示す。

第1層 Step1 24組の入出力データのうち、前半部の12組を学習用データ、後半部の12組を評価用データとする。

第1層 Step2 4個の入力変数 x_1, x_2, x_3, x_4 の中で任意の2つの入力変数を選択し、6つの部分表現式を構成する。

表-2 入出力データ (近景・斜側面・下)

No.	出力データ 快適性の 景観評価値 y	入力データ			
		ゆらぎ			フラクタル 次元 x_4
		色相 x_1	彩度 x_2	明度 x_3	
8	0.05	-2.17	-1.56	-2.45	1.48
15	0.4	-1.69	-1.17	-1.88	1.59
23	-0.23	-1.61	-1.37	-1.97	1.6
25	0.3	-1.62	-1.41	-1.66	1.53
27	0.05	-1.23	-1.24	-2.12	1.55
28	0.13	-1.99	-1.73	-2.36	1.5
36	0.1	-1.36	-1.47	-2.15	1.42
46	0.23	-1.59	-1.42	-1.91	1.57
47	-0.58	-1.35	-1.19	-1.37	1.64
50	0.2	-1.77	-1.53	-2.31	1.47
53	0.13	-1.69	-1.26	-1.52	1.57
54	-0.13	-1.84	-1.31	-1.97	1.52
55	-0.13	-1.64	-1.47	-2.23	1.5
61	0.08	-1.78	-1.71	-2.15	1.59
68	0.58	-1.57	-1.49	-1.45	1.51
69	0.13	-1.54	-1.53	-2.2	1.57
71	0.08	-1.83	-1.51	-2.14	1.6
72	0.58	-1.38	-1.12	-1.8	1.64
76	-0.03	-1.64	-1.52	-2.02	1.61
77	-0.23	-1.59	-1.45	-1.96	1.48
83	0.13	-1.53	-1.46	-1.92	1.53
85	0.55	-1.6	-1.3	-1.88	1.51
86	0.25	-1.49	-1.13	-1.77	1.54
90	0.4	-1.51	-1.36	-1.95	1.53

第1層 Step3 線形回帰分析によって、学習用データから、各部分表現式の係数を推定する。その結果、つぎの6つの部分表現式が得られた。

$$\textcircled{1} x_1, x_2 \text{ による部分表現式} \quad y_1 = -4.11 - 5.33x_1 + 0.62x_1^2 + 1.04x_2 - 5.20x_1x_2 + 3.65x_2^2 \quad (5.1)$$

$$\textcircled{2} x_1, x_3 \text{ による部分表現式} \quad y_2 = -7.60 - 5.33x_1 - 0.12x_1^2 - 2.51x_3 - 2.33x_1x_3 + 0.39x_3^2 \quad (5.2)$$

$$\textcircled{3} x_1, x_4 \text{ による部分表現式} \quad y_3 = -53.18 + 11.42x_1 - 0.16x_1^2 + 82.68x_4 - 7.89x_1x_4 - 31.50x_4^2 \quad (5.3)$$

$$\textcircled{4} x_2, x_3 \text{ による部分表現式} \quad y_4 = -5.03 + 2.59x_2 + 5.85x_2^2 - 6.55x_3 - 6.52x_2x_3 + 0.61x_3^2 \quad (5.4)$$

$$\textcircled{5} x_2, x_4 \text{ による部分表現式} \quad y_5 = -89.00 - 3.65x_2 + 0.36x_2^2 + 116.08x_4 + 3.30x_2x_4 - 37.24x_4^2 \quad (5.5)$$

$$\textcircled{6} x_3, x_4 \text{ による部分表現式} \quad y_6 = -34.27 + 4.80x_3 - 0.24x_3^2 + 53.57x_4 - 3.65x_3x_4 - 20.54x_4^2 \quad (5.6)$$

第1層 Step4 Step3 で得られたそれぞれの部分表現式に評価用データを代入し、2乗誤差 E を計算する。

$$y_1 \text{ に対して } E_{11}=1.68, \quad y_2 \text{ に対して } E_{12}=1.72$$

$$y_3 \text{ に対して } E_{13}=1.78, \quad y_4 \text{ に対して } E_{14}=1.33$$

$$y_5 \text{ に対して } E_{15}=1.74, \quad y_6 \text{ に対して } E_{16}=1.34$$

第1層 Step5 2乗誤差値の小さいものから順に並べると、 $E_{14}, E_{16}, E_{11}, E_{12}, E_{15}, E_{13}$ の順になる。そして、2乗誤差値の小さいもの M 個に対する部分表現式を残し、残りは捨てる。本研究では $M=4$ として、 y_4, y_6, y_1, y_2 を残した。

第1層 Step6 y_4, y_6, y_1, y_2 を用いて新たな入出力データを構成する。

第2層 Step2 部分表現式を構成する。

第2層 Step3 線形回帰分析を行う。その結果、以下の6つの部分表現式が得られた。

$$z_1 = 0.17 - 1.31y_4 - 6.42y_4^2 + 1.46y_6 + 22.35y_4y_6 - 14.85y_6^2 \quad (6.1)$$

$$z_2 = -0.07 + 0.20y_4 + 5.06y_4^2 + 1.92y_1 - 6.85y_4y_1 - 3.04y_1^2 \quad (6.2)$$

$$z_3 = 0.07 - 0.17y_4 + 2.05y_4^2 + 0.62y_2 - 0.66y_4y_2 - 3.40y_2^2 \quad (6.3)$$

$$z_4 = -0.03 - 0.40y_6 + 9.30y_6^2 + 2.97y_1 - 21.54y_6y_1 - 1.96y_1^2 \quad (6.4)$$

$$z_5 = -0.01 + 2.15y_6 - 0.07y_6^2 - 1.80y_2 - 23.31y_6y_2 + 21.90y_2^2 \quad (6.5)$$

$$z_6 = 0.14 + 0.00y_1 - 1.07y_1^2 - 0.04y_2 + 7.62y_1y_2 - 6.48y_2^2 \quad (6.6)$$

第2層 Step4 評価用データに対する2乗誤差 E を求める。

$$E_{26}=0.99, \quad E_{23}=1.89, \quad E_{25}=3.86$$

$$E_{24}=4.39, \quad E_{22}=6.14, \quad E_{21}=15.97$$

第2層 Step5 Step4 で得られた最小2乗誤差 E_{26} は、第1層 Step4 で得られた最小2乗誤差 E_{14} と比べて

$$E_{26}=0.99 \leq E_{14}=1.33$$

となるため、アルゴリズムを終了せず、継続する。

第2層 Step6 z_6, z_3, z_5, z_4 を用いて新たな入出力データを構成する。

第3層 Step2~Step4 第2層 Step2~Step4 と同様。

第3層 Step5 Step4 で第3層の最小2乗誤差 $E_{35}=23.76$ が得られる。これは、第2層の最小2乗誤差 E_{26} と比べて

$$E_{35}=23.76 \geq E_{26}=0.99$$

となり、最小2乗誤差が増加しているため、アルゴリズムを終了する。

以上の手順をたどった結果、 $E_{26}=0.99$ を得た第2層の部分表現式 z_6 および第1層の部分表現式 y_3, y_4 より図-10の完全推定式を得る。この完全推定式の x_1, x_2, x_3 に入力データを代入すれば

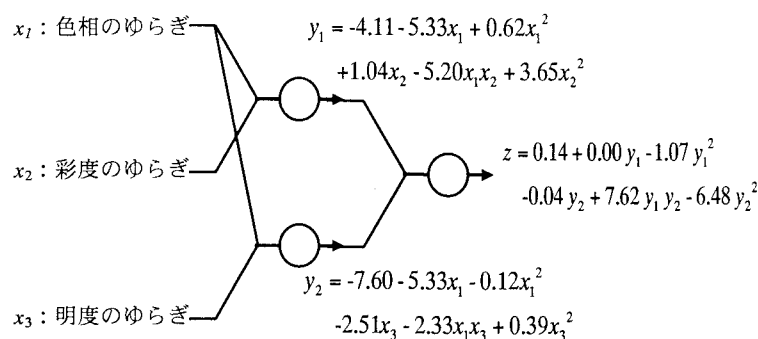


図-10 完全推定式

推定値が計算できる。

4.3 GMDH によるゆらぎとフラクタル次元の融合

(1) 90 橋全体を対象とした場合のゆらぎとフラクタル次元の融合

ゆらぎとフラクタル次元の融合を GMDH を用いて行った。対象景観はこれまでと同様 90 橋の桁橋写真である。なお、計算は前節で述べた手順に従い、Mathematica Ver.4.1 を使用して行った。

GMDH の入力データは色相のゆらぎ、彩度のゆらぎ、明度のゆらぎ、フラクタル次元である。出力データは、3.1 節で説明したアンケート調査による評価結果であり、ここでは快適性、複雑性、調和性、シンボル性に関する景観評価値を用いた。

景観評価値と推定値の相関係数を表3に示す。同表からわかるように、あまり高い相関は認められなかった。これは、橋梁景観の評価が視点場に大いに影響されるため、視点場の異なる 90 橋を同じ推定モデルで評価するのは困難であることを示している。

(2) 視点場ごとの橋梁写真を対象とした場合のゆらぎとフラクタル次元の融合

橋梁景観 90 橋を各視点場に分類し、比較的橋梁数の多い(a)近景-斜側面-下、(b)近景-斜側面-水平、(c)近景-斜側面-上、(d)中景-

表-3 景観評価値と推定値の相関係数

景観評価項目	相関係数
複雑性	0.34
快適性	0.25
調和性	0.45
シンボル性	0.41

斜側面-水平、(e)遠景-側面-水平における橋梁景観に対する推定モデルを GMDH によって構築し、その有効性を検討した。

視点場別の推定値と景観評価値の相関係数を表4に、計算の停止層を表5に示す。また、表6には最終的に構築された完全推定式の入力変数を示している。例えば、視点場「近景-斜側面-下」における快適性の評価値は色相・彩度・明度の3つゆらぎを変数として推定できることを表している。逆に言えば、フラクタル次元は快適性の評価に影響を与えないともいえる。

表4から明らかなように、ほとんどの視点場の橋梁景観で推定値と景観評価値の相関は低いが、視点場「中景-斜側面-水平」の橋梁景観では高い相関が認められる。3.3 節に述べたゆらぎを用いた感性評価の場合と同様に、この視点場の橋梁景観が定量的な感性評価に適していると考えられる。

視点場「中景-斜側面-水平」の橋梁景観の推定結果について詳しく調べると次のとおりである。

表4より、この視点場の橋梁景観では、景観評価値と推定値の相関係数は0.62~0.95 となっており、いずれも非常に高い相関が認められる。また、表5よりこの視点場では停止層が他と比べて大きいことがわかる。すなわち、この場合の橋梁景観の完全推定式は他と比べて複雑な構造になっていて、表6と合わせ見てわかるように感性評価値の推定には3つのゆらぎおよびフラクタル次

表4 各視点場の感性評価値と推定値との相関係数

視点場	複雑性	快適性	調和性	シンボル性
(a) 近景-斜側面-下	0.48	0.53	0.19	0.48
(b) 近景-斜側面-水平	-0.02	-0.39	0.66	0.48
(c) 近景-斜側面-上	0.37	0.09	-0.05	0.30
(d) 中景-斜側面-水平	0.62	0.95	0.92	0.88
(e) 遠景-側面-水平	0.53	-0.18	0.08	0.02

表5 停止層

視点場	複雑性	快適性	調和性	シンボル性
(a) 近景-斜側面-下	1	2	1	1
(b) 近景-斜側面-水平	1	1	1	1
(c) 近景-斜側面-上	1	1	1	1
(d) 中景-斜側面-水平	1	3	4	3
(e) 遠景-側面-水平	1	1	1	1

表6 入力変数

視点場	複雑性				快適性				調和性				シンボル性			
	色相	彩度	明度	フラクタル	色相	彩度	明度	フラクタル	色相	彩度	明度	フラクタル	色相	彩度	明度	フラクタル
(a) 近景-斜側面-下		○	○		○	○	○		○	○			○	○		
(b) 近景-斜側面-水平		○		○		○		○			○	○		○		○
(c) 近景-斜側面-上	○	○			○	○			○			○	○	○		
(d) 中景-斜側面-水平	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
(e) 遠景-側面-水平	○			○	○		○		○		○		○	○		

表-7 視点場(d)の橋梁景観に関する景観評価値と推定結果の相関係数

	複雑性	快適性	調和性	シンボル性
ゆらぎ式	0.71	0.9	0.79	0.84
GMDH	0.62	0.95	0.92	0.88

元の全てが影響していることになる。

表-7は、視点場(d)の橋梁景観についてGMDHによる感性評価推定値と3.3で求めた色相のゆらぎ式による推定値の比較を行ったものである。同表より明らかなように、複雑性についてはGMDHの推定がゆらぎ式にやや劣るものの、その他の感性評価ではGMDHによる推定結果の方が色相のゆらぎ式に勝っている。これは、色相のゆらぎだけで景観を評価するよりも、色相・彩度・明度の3つのゆらぎとフラクタル次元を加えた4つで景観を評価する方が正しく評価できることを示している。

5. 結論

本研究では、景観の感性評価を行うための景観構成要素として色彩の変化と輪廓を取り上げ、前者をゆらぎ、後者をフラクタル次元で定量化した。そして、色彩情報であるゆらぎおよび形態情報であるフラクタル次元をそれぞれ単独に用いた橋梁景観評価手法について検討を行った。さらに、GMDHを用いて、色彩情報と形態情報の2つの感性情報を融合した新たな評価指標を提案し、その有効性を検証した。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- ① 色彩情報のみを用いた場合では、視点場を「中景・斜側面・水平」とした場合に色相のゆらぎと景観感性評価値の間に明確な相関関係が認められた。そして、両者を2次放物線で回帰することで、色相のゆらぎによる感性評価値の推定式である「ゆらぎ式」を得た。
- ② 形態情報のみを用いた場合には、フラクタル次数と景観感性評価値の間に明確な相関関係を認めることができなかった。結局、フラクタル次元では画像そのものの複雑さを正しく評価できるが、印象としての複雑さはフラクタル次元のみでは必ずしも正しく評価できていないのではないかとと思われる。
- ③ GMDHを用いて色彩情報と形態情報の2つの感性情報を融合した場合、「中景・斜側面・水平」の視点場において、感性評価値の推定が良好に行えることがわかった。この場合、感性評価値の推定に当たって色相・彩度・明度の3つのゆらぎ、およびフラクタル次元の全てが複雑に関係しあって、最終的な感性評価に至っている様子を示した。

著者らの研究グループでは、過去にも景観感性評価の問題にニューラルネットワークを応用する試みは行ってきたが、十分な成果を挙げるに至らなかった。この種の問題へのニューラルネットワークの応用がうまくいかなかった原因として、考慮すべき要因は非常に多いのに対して、データの収集に被験者に大きな負担を強い感性アンケートの実施が必要なこと、十分な量のデータを得ることができなかったことが挙げられる。

本研究でも、データの総量は決して多いとは言えないが、景観の中の色と形の情報を3つのゆらぎにフラクタル次元を加えた4つの因子に集約したことでニューラルネットワークによる分析が可能となったことに大きな意義がある。この考え方は、橋梁景観問題に限定されず、また、ニューラルネットワーク以外の分析手法を用いる場合にも有用であると思われる。

参考文献

- 1) (社)土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン、2001.4.
- 2) 長町三生：感性工学、海文堂、1989.
- 3) 矢川元基・吉村忍・松田聡浩：感性と設計、培風館、1999.
- 4) 岡岡正泰・岩松幸雄・原田隆郎・阿久澤孝之：周辺環境を含む橋梁設計のための評価指標の提案-その2 1/fゆらぎの橋梁形式選定への適用、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、I-A556, pp.1260-1261, 1993-9.
- 5) 西藤康浩・岩松幸雄・原田隆郎・山口允郎・阿久澤孝之：1/fゆらぎによる橋梁の景観性評価に関する研究、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、I-A207, pp.412-413, 1994-9.
- 6) 福島宏幸・五郎丸英博・浪越 勇・三浦金作・土方吉男：フラクタル次元と1/fβノイズによる橋空間の解析、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、I-A353, pp.704-705, 1997-9.
- 7) 瀬尾高宏・五郎丸英博・福島宏幸：フラクタル次元と1/fβノイズによる橋空間の定量的評価、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、I-A278, pp.556-557, 1998-10.
- 8) 武者利光：ゆらぎの発想、NHK出版、1994-3.
- 9) 武者利光：ゆらぎの世界、講談社、1980-10.
- 10) 亀井栄治：景観のゆらぎ特性に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.449, pp.101-108, 1993-7.
- 11) 高安秀樹：フラクタル、朝倉書店、1986-4.
- 12) 高安美佐子：フラクタル科学、朝倉書店、1987-10.
- 13) 保田敬一・白木渡・堂垣正博・河津圭次郎・安達誠：桁橋の景観評価・設計への感性工学手法の適用に関する研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.45A, pp.553-560, 1999-3.
- 14) 日本橋梁建設協会編：橋梁年鑑 昭和63年版、日本橋梁建設協会、1988.
- 15) 保田敬一、白木 渡、安達 誠、堂垣正博：桁橋の景観評価における視点場とフラクタル次元との関係、平成12年度土木学会四国支部 第6回 技術研究発表会講演概要集、pp.84-85, 2000.5.13.
- 16) 乾 敏郎：ヒトを含む高等動物における視覚情報の符号化と認識、第19回ファジイシステムシンポジウム講演論文集、日本知能情報ファジイ学会、pp.31-38, 2003-9.
- 17) 馬場則夫・小島史男・小澤誠一：ニューラルネットの基礎と応用、共立出版、1994-9.
- 18) R.H.Nielsen, 袋谷賢吉訳：ニューロコンピューティング、トッパン、1992-8.
- 19) 池田三郎、榎木義一：GMDH(発見的自己組織化法)と複雑な系の同定・予測、計測と制御、Vol.14, No.2, pp.11-21, 1975-2.

(2003年9月12日受付)