

多目的GAによる中小橋梁の景観設計支援システムに関する研究

DECISION SUPPORTING SYSTEM FOR AESTHETIC DESIGN OF HIGHWAY BRIDGES BASED UPON GENETIC ALGORITHM

古田 均*・藤田靖司**・堂垣正博***

Hitoshi FURUTA, Seiji FUJITA, and Masahiro DOGAKI

- * 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1052 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)
 ** 学士(工学) 中林建設(株) 土木部工事課 (〒556-0014 大阪市浪速区大国3-12-22)
 *** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

In recent years, the importance of the aesthetic design of bridge structures is being greatly acknowledged. The purpose of this study is to develop a decision supporting system of aesthetic design of continuous girder bridges with small and medium spans. This system employs the pareto-optimal solution which is a kind of Genetic Algorithms (GA) for multi-objective optimization, fuzzy sets, and color harmony theory.

Keywords: aesthetic design, pareto-optimal solution, fuzzy deduction, color harmony theory, continuous girder bridges.

1. まえがき

土木構造物は、長い年月にわたって供用され、日常の市民生活や経済活動に深く関わり、極めて重要な社会基盤施設である。今日、その景観が重要な位置を占めつつある。たとえば、橋梁においても、その造形美や周辺との調和が機能性と同等に重視され、完成度の高いものが望まれるようになった。

橋梁分野では、土木用材料や架設技術の発展によって、機能性・安全性・耐久性・施工性などと同様、景観性が検討されるようになってきた。ただし、計画や設計に携わる構造設計技術者や小人数の専門家グループが景観を評価する場合が多い。それゆえ、橋梁景観の知識に乏しい構造設計技術者でも周辺と調和のとれた景観設計ができるような景観設計支援システムがあれば、極めて重宝であろう。

ところで、ランドマーク的な長大橋とは違って、我々が日頃よく目にする中小橋梁では、時間と経費の関係から、景観の知識に乏しい構造設計技術者が景観設計しなければならない状況にある。従来、中小橋梁では、ややもすると経済性や機能性に重点がおかれ、景観への配慮が乏しかったように思われる。

本研究では、スパンが50m程度の3径間連続の仮想桁橋を景観設計の対象とし、その主桁と高欄の色彩、ならびに、主桁と橋脚の形状に着目した景観設計支援システムを構築する。特に、色彩に注目した点は、それが橋梁景観の構成要素の中でも景観と深く関わり、かつ人の感

性と密接に関係し、工学上の制約をあまり受けないと判断できるからである。

景観は、人の感性との密接な関係から、極めて曖昧で、その定量化は一般に難しいとされる。ここでは、曖昧な景観評価を曖昧な問題解決に適した”ファジィ推論”で行う。また、景観案を探索する最適化手法に遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)の改良型で多目的GAの一つである”パレート保存戦略”を用いる。これによれば、多数の景観案が同時に提示され、意思決定者はシステムと対話しながら最終の景観案を決定できる。

2. 景観構成アイテム

本研究では、主桁と高欄の色彩、および、主桁と橋脚の形状を景観構成アイテムとする。以下、それらについて述べる。

2.1 主桁と高欄の色彩¹⁾

すべての有彩色は、色相とトーン、すなわち

①色相：赤(R)、青(B)、緑(G)などの色合いをいい、10色相環がJISで規定されている。

②トーン：色彩の明度と彩度を表す。明度は明るさの尺度で、最も明るい色は白色、暗い色は黒色である。また、彩度は色の鮮やかさの尺度である。

で表現される。

ここでは、主桁と高欄の塗装に使用される色彩のほか、色相とトーンが一様に分布するような44色の色彩を

景観設計の対象とした。これらのマンセル値と系統色名をTable 1に示す。ここに、マンセル値とは色彩を色相(Hue)、明度(Value)、彩度(Chroma)の3属性で数値化した値である。すべての色彩が数値化されるため、これを用いれば、色彩の景観評価が容易に行える。

Table 1 橋の塗装で対象となる色彩とそのマンセル値

慣用色名	系統色名	マンセル値
ピンク	うすい赤	2.5R 7/7
紅色	あざやかな赤	3R 4/14
えんじ	赤	4R 4/11
朱色	あざやかな黄みの赤	6R 5.5/14
サーモンピンク	うすい黄みの赤	8R 7.5/7.5
ピーチ	明るい灰黄赤	3YR 8/3.5
肌色	うすい黄赤	5YR 8/5
だいたい	黄赤	5YR 6.5/13
茶色	くらい黄赤	5YR 3.5/4
小麦色	くすんだ赤みの黄	8YR 7/6
山吹色	赤みの黄	10YR 7.5/13
アイボリー	明るい灰黄	2.5Y 8.5/1.5
クロームイエロー	黄	3Y 8/12
たんぱぽ色	あざやかな黄	5Y 8/14
レモン色	緑みの黄	8Y 8/12
うぐいす色	暗い灰黄緑	1GY 4.5/3.5
若草色	黄緑	3GY 7/10
草色	暗い黄緑	5GY 5/5
松葉色	暗い黄緑	7.5GY 5/4
エメラルドグリーン	緑	4G 6/8
深緑	こい緑	5G 3/7
ビリジアン	くすんだ青みの緑	8G 4/6
青竹色	くすんだ青緑	2.5BG 5/6.5
ピーコックグリーン	青緑	7.5BG 4.5/9
ピーコックブルー	こい青緑	10BG 4/8.5
あざぎ	緑みの青	2.5B 5/8
ターコイズブルー	緑みの青	5B 6/8
水色	うすい緑みの青	6B 8/4
空色	明るい青	9B 7.5/5.5
コバルトブルー	青	3PB 4/10
すみれ色	青紫	2.5P 4/11
江戸紫	くすんだ青みの紫	3P 3.5/7
ライラック	うすい紫	6P 7/6
紫紺	暗い紫	8P 2/4
牡丹色	あざやかな赤紫	3RP 5/14
つつじ色	あざやかな紫みの赤	7RP 5/13
ワインレッド	こい赤紫	10RP 3/9
スノーホワイト	白	N 9.5
シルバークレイ	灰色	N 6.5
鼠色	灰色	N 5.5
墨	黒	N 2

2.2 主桁と橋脚の形状²⁾⁷⁾

色彩と同様、ものの形は人がそれに抱くイメージと密接に関わる。たとえば、橋の造形美はその典型的な例である。そこで、主桁と橋脚の形状も景観構成アイテムとし、主桁と高欄の色彩とともに景観設計支援システムに組み入れた。

主桁には、Fig.1に示す等断面と変断面の桁形状を仮定した。ただし、変断面構造には4種のハンチを考え、合計5種類の主桁形状を景観設計の対象とした。

橋脚には、Fig.2に示す14種のオーソドックスな形状を景観設計の対象とした。なお、デザイナーらによる斬新な形状は除外した。

2.3 景観構成アイテムの数値化

桁橋の最適な景観案を組合せ最適化問題から決定するため、最適解の探索に遺伝的アルゴリズム(GA)の改良型で多目的GAの一種である”パレート保存戦略”を用いる。そのため、個々の景観案を「0」と「1」の組合せ、すなわち2進数で数値化した遺伝子列で表現する。

前述のように、主桁と高欄の色彩、および、主桁と橋脚の形状を景観設計の対象とし、主桁と高欄の色彩にそれぞれ44色、主桁の形状に5種類、橋脚の形状に14種類の景観要素を仮定した。それゆえ、考えられる景観要素の組合せ、すなわち、景観案の総数は135,520(=44×44×5×14)となる。一方、景観案を表現する遺伝子列には、Fig.3に示す19ビットが必要である。それは、44色の主桁色彩のための6ビット($2^6 > 44$)、44色の高欄色彩のための6ビット($2^6 > 44$)、14種類の高欄形状のための

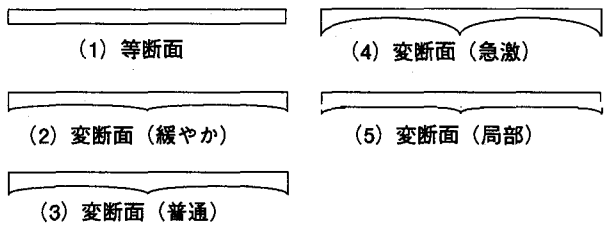


Fig.1 景観設計の対象にした主桁の形状

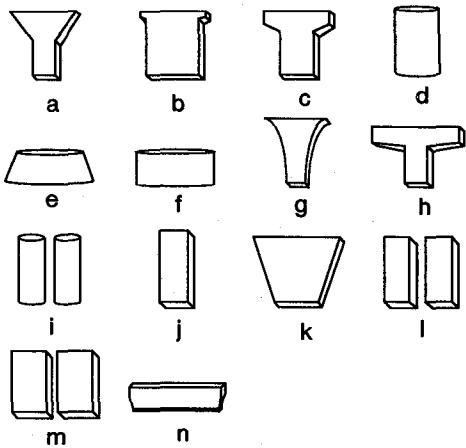


Fig.2 景観設計の対象にした橋脚の形状

0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0
主桁の色彩					高欄の色彩					橋脚の形状					主桁の形状		

Fig.3 景観構成アイテムと遺伝子列

4 ビット ($2^4 > 14$), 5 種類の主桁形状のための 3 ビット ($2^3 > 5$) からなる。それゆえ, 総数は 524,288 となる。

本来, 景観要素の組合せ総数と遺伝子列の総数は同数であるのが, 望ましい, 上述のように, 景観要素の組合せ総数と遺伝子列の総数は明らかに異なる。それゆえ, ここでは一つの景観要素を異なった 2 進数で表現し, 景観要素の組合せ総数が遺伝子列の総数に一致するようにした。たとえば, 主桁の場合, 5 種類の形状を景観要素としたため, Fig.1 に示す等断面の桁に 000 と 001, 変断面 (緩やか) に 010 と 011, 変断面 (普通) に 100 と 101, 変断面 (急激) に 110, 変断面 (局所) に 111 の 2 進数を当てはめた。これと同様の方法で, 主桁の色彩, 高欄の色彩, 橋脚の形状も 2 進数で表した。

3. パレート保存戦略⁸⁻¹⁰⁾による最適解の探索法

多目的最適化問題の本質は, 目的関数間にあるトレード・オフの関係をいかにバランスさせるか, また, 総合評価された多くの解の中からいかに最適な解を見いだすかにある。”パレート保存戦略”は, 個々の目的関数を最適化するので, 優れた手法である。GA を多目的最適化問題の解法に用いる場合, 一般には, 2 つ以上の目的関数を数学的方法で 1 つの目的関数に集約し, その最適化から解が求められる。

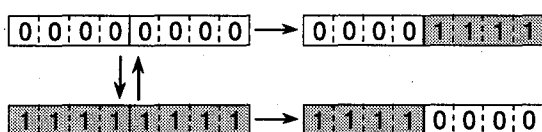
パレート保存戦略による最適解の探索手順は, 以下のようである。

ステップ 1: 初期生物の誕生

解を探索するスタート時に, どのような個体が好ましいか定かでない。それゆえ, 初期生物集団の遺伝子列を, 通常, あらかじめ定めた個体数 (N 個) だけ乱数でランダムに発生させる。

ステップ 2: 交叉

N 個の個体の中から偶数個の個体をランダムに選び, 最大で $N/2$ 組のペアを作る。一つのペアごとに遺伝子列を任意の箇所で切断し, Fig.4 のように入れ替える。これを交叉という。仮に, 交叉の前に個体数が N 個であったとする。パレート保存戦略において, すべての個体を交叉すれば (すなわち, 交叉率=100%), 新しい遺伝子



(a) 交叉前

(b) 交叉後

Fig.4 交叉の方法

列からなる個体が N 個誕生する。それゆえ, 交叉後の個体の総数は交叉前のそれと合せて $2N$ 個となる。

ステップ 3: 突然変異

突然変異とは, あらかじめ定めた生起確率で, 遺伝子列の中から突然変異させる箇所を乱数で定め, Fig.5 のように, そのビットが「0」であれば「1」に, 「1」であれば「0」に置き換える操作のことをいう。交叉と同様, 個体は増殖する。

ステップ 4: パレート最適個体の生成

多目的最適化問題において, すべての目的関数が同時に最適化された完全最適解は, 一般に存在しない。ある目的関数の満足度が, その他の目的関数の満足度を低下させずに, 向上されない解集合は, 「パレート最適解」と呼ばれる。ここでは, これを

「1 つの目的関数に対する評価が少なくとも他の個体のそれより高い個体は, パレート解である。」

と定義し, 解を得る。

ステップ 5: 並列選択あるいはシェアリング

並列選択は, パレート最適個体の数が交叉前の個体数より少ない場合, 交叉前の数まで個体を増殖する操作である。これに従えば, 個々の目的関数を満足する度合いの高い個体が優先的に残される。

一方, シェアリング (選択淘汰) は, パレート最適個体の数が交叉前の個体数より多い場合, 交叉前の数まで個体を淘汰する操作である。この場合, 個体のニッチ数 (niche: 生態的地位) を求め, それが小さい個体から順に保存する。ここに, ニッチ数とは, ある個体の近傍での個体の密度を示す値で, これが大きいほど個体の近傍に類似した遺伝子をもつ個体が多く存在する。それゆえ, ニッチ数の小さい個体から保存し, 離散的でかつ多様な解が次世代に生存するように配慮する。

ニッチ数の求め方にはさまざまな方法が考えられる。ここでは, コンセプト k に対する個体 i の適応度 F_{ki} とその他の個体 j の適応度 F_{kj} との差 d_{ij} を用いる。すなわち, 個体 i のニッチ数 n_i は

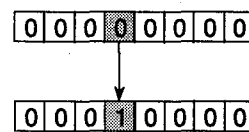
$$n_i = \sum_{j=1}^M S(d_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

で求められる。ここに $S(d_{ij})$ はシェアリング関数で,

$$S(d_{ij}) = 1 - \frac{d_{ij}}{D} \quad 0 \leq d_{ij} \leq D,$$

$$= 0 \quad d_{ij} \geq D$$

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^M |F_{ki} - F_{kj}| \quad j=1, 2, \dots, M$$



変異箇所

Fig.5 突然変異の操作

である。ただし、 D はニッチの大きさを表すパラメータで、前もって定められる。また、 n_c はコンセプトの数、 M は探索過程で増減する個体の数である。

4. システムの概要

”パレート保存戦略”による景観設計支援システムの基本的な流れをFig.6に示す。すなわち、

- ①システムの利用者は、橋梁景観に必要なコンセプト、対象橋梁の路面高と路面幅、周辺環境、景観構成アイテムと周辺との面積比を入力する。ただし、これらはシステムのメニューから選択する。なお、GAに固有なパラメータ、すなわち、初期個体総数、交叉率、突然変異率、シェアリングに必要なニッチ数、世代総数なども入力する必要があるが、これらのパラメータの最適な入力値の決定は高度な知識を必要とするため、あらかじめシステムに適切な値を設定し、使用者が入力しなくてもよいように配慮した。
- ②初期生物を自動的に乱数で発生させ、桁橋の景観構成アイテムを遺伝子コードに変換する。
- ③”パレート保存戦略”によって、最適解すなわち景観案を求める。景観案は、つぎのように評価される。
 - a)景観構成アイテムと景観をイメージする形容詞対とを評価ルールで結びつけ、固有の得点を与える。
 - b)これを”ファジィ推論”に適用し、景観案のコンセプトに対する適応度を求める。
 - c)橋梁の色彩と周辺との調和度を”ムーンとスペンサーの色彩調和論”で評価する。

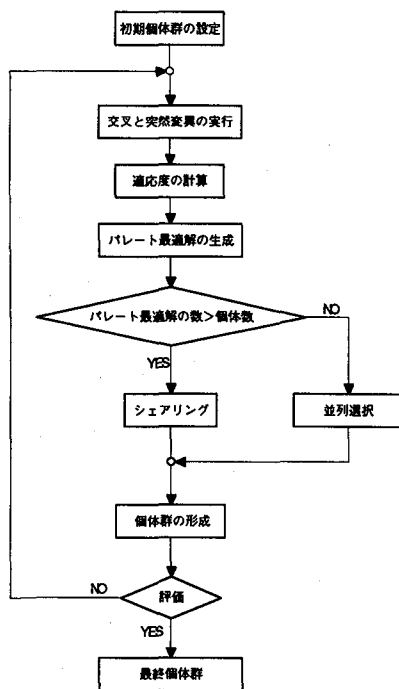


Fig.6 パレート保存戦略による最適解の探索過程

4.1 コンセプトの設定²⁾

現実の景観設計では、いくつかのコンセプトを設定し、それらを満足する設計案が示される。本文では、Table 2のコンセプトの中から景観設計にふさわしいコンセプトを選択するようにした。

4.2 周辺環境の設定¹⁾

景観設計に求められる要素の一つに、周辺との調和がある。考えられる周辺環境として、Table 3に示す9種をシステムに準備し、計画する橋梁に適ったものをその中から選択するようにした。また、同表のように、周辺環境の色彩に対して、それに合ったマンセル値を設定した。

4.3 色彩調和の評価^{12), 13)}

- 色彩間の調和と不調和は、いずれもマンセル表色系上で説明される。すなわち、調和には、
- ①同一調和：同じ色の配色
 - ②類似調和：類似の配色
 - ③対照調和：反対の配色

- があり、不調和には、
- ①第1不明瞭：ごく似かよった色の不調和
 - ②第2不明瞭：やや異なった色の不調和
 - ③眩輝：極端な反対色の不調和

がある。

ここでは、橋梁と背景の色彩がどの程度調和しているかを評価するため、”ムーンとスペンサーの色彩調和論”を用いる。橋梁と指定された周辺環境との面積比（ただし、主桁を単位面積とする）を用い、面積比を勘案した美度で景観案の『周辺との調和』を評価する。

パークホフは美度を

$$M = \frac{O}{C_x} \tag{2}$$

で定義した。ここに、 O は秩序、 C_x は複雑さである。

ムーンとスペンサーは式(2)で色彩調和の美度を計算した。その際、秩序 O には色彩の色相、明度、彩度を考慮に入れ、Table 4のように美的係数を定めた。

配色の面積を考慮した色彩の調和は、つぎのように評価される。すなわち、ある色彩のスカラーモーメントは

Table 2 システムに準備したコンセプト

	コンセプト
1	周辺との調和
2	シンボル性
3	個性的
4	信頼感
5	親しみやすさ
6	風格
7	美しさ

Table 3 勘案した周辺環境とそのマンセル値

周辺環境	マンセル値
晴天	10B8/2
曇り空	N-7
白雲	N-9
山(緑)	10GY5/4
山(紅葉)	7.5R4/9
海, 川	10G5/1.5
ビル街	10YR7/1
住宅街	5Y8/1
岩, 土	10YR5.5/2

Table 4 美的係数

	同一	第1不明瞭	類似	第2不明瞭	対照
色相間隔	+1.5	0	+1.1	+0.65	+1.7
明度間隔	-1.3	-1.0	+0.7	-0.2	+3.7
彩度間隔	+0.8	0	+0.1	0	+0.4
無彩色との調和	+1.0	-	-	-	-

$$S=A\sqrt{C^2+64(V-5)^2} \quad (3)$$

から求められる。ここに、 A は色彩の配色面積、 C 、 V はそれぞれマンセルの彩度と明度の値である。

面積を考慮して美度 M を求める場合、色対のスカラームーメントが

- ①1:1の場合 1.0
- ②1:2 (1:1/2) の場合 0.5
- ③1:3 (1:1/3) の場合 0.25
- その他の場合 0.0

を秩序 O に加える。たとえば、3色配色の場合、3通りの組合せが考えられる。仮に、それぞれの色彩のモーメントが等しいとすれば、秩序 O に3を加えればよい。

また、複雑さ C_s は

$$C_s = (\text{色数}) + (\text{色相差のある色対の数}) + (\text{明度差のある色対の数}) + (\text{彩度差のある色対の数}) \quad (4)$$

で与えられる。

以上のように、景観案（主桁と高欄の色彩）が指定された周辺環境とどの程度調和しているかが評価される。なお、いずれの視点場から橋梁を景観設計してもよいが、橋梁と周辺との面積比を評価に取り入れるため、橋梁全体が確認できかつ背景があまりに広くならないような視点場を設定すべきである。

4.4 景観の評価 ルールの設定

景観案は、景観構成アイテムの組合せで与えられる。それゆえ、景観案の評価ルールを、基本的には、景観構成アイテムごとに作成し、橋梁の景観が定量的に評価できる形容詞対で得点づけできるルールとした。「橋梁の色彩と形状

Table 5 準備した形容詞対

	形容詞対	
1	派手な	⇔ 地味な
2	明るい	⇔ 暗い
3	暖かい	⇔ 寒い
4	華やかな	⇔ 渋い
5	軽快な	⇔ 重厚な
6	安定感のある	⇔ 安定感のない
7	刺激的な	⇔ 温和的な
8	ソフトな	⇔ ハードな
9	モダンな	⇔ アンティークな
10	新鮮な	⇔ 陳腐な
11	動的な	⇔ 静的な
12	シンプルな	⇔ 複雑な
13	力強い	⇔ 弱々しい
14	固い	⇔ 柔らかい
15	統一感のある	⇔ 統一感のない
16	開放的な	⇔ 圧迫感のある

が、人々にどのようなイメージをどの程度与えるか」といった感性の評価をいくつかの形容詞対と景観構成アイテムとを結びつけて行った。ただし、景観構成アイテムの組合せで評価できるものは、組合せごとに得点づけした。桁橋の景観と関係ある形容詞対を、文献2)を参考に、Table 5のように選定した。

(1) 色彩の評価

色彩は人がものへ抱くイメージに大いに影響する。ここでは、色彩による感情の推定として、Table 5に与える1から11の形容詞対と景観構成アイテムである主桁と高欄の色彩を、文献1)と12)~17)を参考に、1.0から-1.0の範囲で得点づけした。

(2) 形状の評価

桁橋では、路面高と幅員がその景観に影響する。ここでは、計画する橋梁の路面の高低と幅員の広狭を入力し、コンセプトを満足するような主桁と橋脚の形状が選定されるようにした。ただし、12から16の形容詞対と形状を、文献2)~7)を参考に、1.0から-1.0の範囲で得点づけした。

4.5 ファジィ推論のルール¹⁶⁾

景観案がコンセプトをどの程度満足しているかを定量的に評価するため、コンセプトと形容詞対による評価とを結びつける。ここでは、景観のような曖昧な概念を“ファジィ推論”で定量化した。

“ファジィ推論”は、「もし～なら、～である」なる推論にファジィ変数を適用したものである。この特徴は、曖昧な情報と曖昧な情報とのソフトマッチングで曖昧であるものの妥当な結論が導出される点にある。

たとえば、ファジィ推論のルールは、つぎのように定義される。すなわち、

前提1: IF $x=A$ THEN $y=C$

前提2: $x=A_1$

なる2つの前提から

結論: $y=C_1$

が導かれる。ここに、 A 、 A_1 はファジィ変数、 C 、 C_1 は実数値である。

ここでは、ファジィ推論の中でも演算が簡単で制御結果が良好な“簡略化ファジィ推論”を用いる。これは

IF $x=A_i$ THEN $y=C_i$ ($i=1,2,3,\dots,n$)

のように表される。ここに、 n は任意の整数である。ちなみに、ファジィ変数はFig.7のようなメンバシップ関数で与えられる。たとえば、入力値を X_i 、その適合度を ϕ_i とすれば、適応度 f は

$$f_i = C_i \phi_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

から求められる。

本研究では、Table 5の16の形容詞対がコンセプトにどの程度影響するかという重み、すなわち、式(5)の実

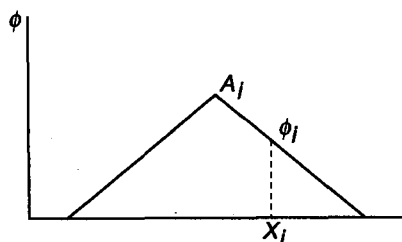


Fig.7 メンバーシップ関数

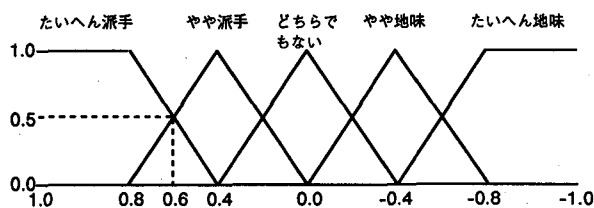


Fig.8 ファジィ推論 (派手な⇔地味な)

数値 C_i を、文献1)と2)を参考に、設定した。

たとえば、形容詞対「派手な⇔地味な」に対する得点を用い、コンセプト「シンボル性」に関するファジィ推論ルールをFig.8で説明する。仮に、形容詞対「派手な⇔地味な」に対する主桁の色彩の彩度による評価が $X_i=0.6$ であったとする。Fig.8から明らかなように、「たいへん派手な」に対する適合度は $\phi_i=0.5$ である。一方、「シンボル性」がもつ「たいへん派手な」の重みが $C_i=2.0$ であるとすれば、適応度 f_i は

$$0.5 \times 2.0 = 1.0$$

と求められる。同様に、「やや派手な」に対する評価が $\phi_i=0.5$ で、重みが $C_i=1.0$ であれば、適応度 f_i は

$$0.5 \times 1.0 = 0.5$$

のように求められる。それゆえ、これらの合計

$$1.0 + 0.5 = 1.5$$

が形容詞対「派手な⇔地味な」の「シンボル性」に対する適応度となる。

以上のように、コンセプトに関して、個々の形容詞対に対する適応度を求め、それらを合計すれば、設定したコンセプトに対する適応度が求められる。ちなみに、適応度が高いほどコンセプトの満足度がよい。なお、コンセプトごとに全個体の適応度をそれぞれの最高値で正規化した。

i 番目のコンセプトに対する景観案の適応度 F_i は

$$F_i = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m C_{k,j} \phi_{k,j} \quad i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

から求められる。ここに、

m : コンセプトの数

n : 形容詞対の数

$C_{k,j}$: 実数値

$\phi_{k,j}$: 適合度

5. 桁橋の景観設計への支援システムの適用

構築した景観設計支援システムを仮定の橋梁の景観設計に適用し、得られた景観案を考察する。ただし、GAの固有なパラメータ、すなわち、交叉率を0.6、突然変異率を0.05、シェアリングに必要なニッチ数を0.2、世代総数を1,000世代とした。

5.1 最適な景観案

景観設計のためのコンセプトを「シンボル性」と「親しみやすさ」、計画する橋梁の路面高を「高い」、路面幅を「広い」として探索したところ、Fig.9に示すパレート最適解の解集合、いわゆる最適景観案を得た。ここに、縦軸と横軸はそれぞれコンセプト「親しみやすさ」と「シンボル性」に対する式(6)の適応度である。ちなみに、これが1.0に近いほどコンセプトの満足度が高い景観案である。図中、1、25、100世代目のパレート最適解を×、◇、○(●)で示す。

図から明らかなように、1世代目から早くも100世代目でのパレート最適解集合の近傍に解が存在している。これは、広く分布する個体の中から複数個の解が生成されるためである。また、2つのコンセプト間にトレード・オフの関係が大いに認められる。すなわち、橋に「シンボル性」を求めれば「親しみやすさ」に劣る景観案が、逆に「親しみやすさ」を求めれば「シンボル性」に劣るそれが求められている。

以上のように、「パレート保存戦略」を多目的組合せ最適化問題の解法に用いれば、異なった満足度の組合せからなる多数の最適解が得られる。それゆえ、さまざま

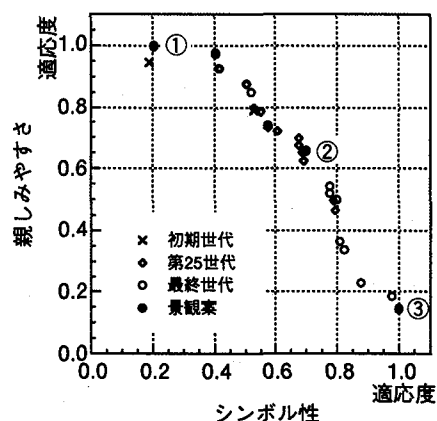


Fig.9 さまざまな世代での景観案の分布

Table 6 「シンボル性」と「親しみやすさ」のコンセプトに対する景観案

景観案	色 彩		形 状	
	主桁	高欄	主桁	橋脚
①	肌色	サーモンピンク	変断面 (急激)	d
②	クロムイエロー	山吹色	変断面 (急激)	a
③	山吹色	山吹色	等断面	c

な景観案がFig.9のように示され、意思決定者は最終の景観案をスムーズに決定できる。また、解が広く分布するので、多くの案を対象に景観設計できる。

Fig.9に示す100世代目の個体群に含まれる①、②、③の景観案をTable 6に示す。

5.2 コンセプトによる景観案の相違

提示される景観案は、景観設計のコンセプトによって大いに異なるものと思われる。ここでは、いくつかのコンセプトに対する景観案とそのパレート最適解との関係を明らかにする。また、“ファジィ推論”と“ムーンとスペンサーの色彩調和論”の異なる方法で評価された個体間のトレード・オフの関係にも注目する。

(1)『周辺との調和』と『親しみやすさ』をコンセプトとした場合

コンセプトに『周辺との調和』と『親しみやすさ』を選び、パレート最適解を探索したところ、1,000世代目での景観案がFig.10のように得られた。ただし、主桁と周辺との面積比を「主桁：青空=1：3」，「主桁：緑山=1：6」とした。

図から明らかなように、コンセプト『周辺との調和』に対する適応度が高い景観案の中には、コンセプト『親しみやすさ』をある程度満足した景観案が存在する。同様に、コンセプト『親しみやすさ』に対する適応度の高い景観案の中には、コンセプト『周辺との調和』をある程度満足した解がある。Fig.10に図示したパレート最適解のうち、①、②、③の景観案をTable 7に示す。

なお、美度が1.0を超えたり、その上限が入力する面積の比によって変化する。この場合、コンセプト『周辺

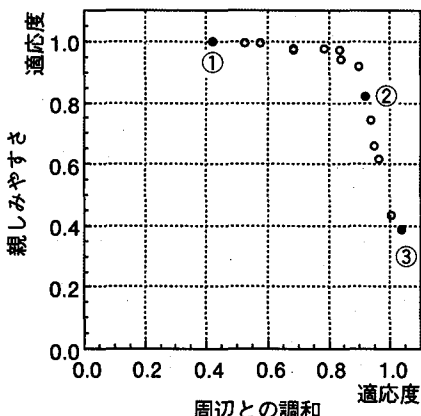


Fig.10 最終世代における景観案の分布

Table 7 『周辺との調和』と『親しみやすさ』のコンセプトに対する景観案

景観案	色 彩		形 状	
	主 桁	高 欄	主 桁	橋 脚
①	肌色	サーモンピンク	変断面 (急激)	d
②	ピーチ	えんじ	変断面 (急激)	a
③	紅色	紅色	変断面 (急激)	a

との調和』に対する適応度は1.0を超えている。

(2) コンセプトが『周辺との調和』と『信頼感』の場合

コンセプトに『周辺との調和』と『信頼感』を選び、パレート最適解を探索したところ、最終世代でのパレート最適解がFig.11のように得られた。ただし、主桁と周辺との面積比は「主桁：青空=1：2」，「主桁：河川=1：2」，「主桁：市街 (ビル)=1：6」である。

図から明らかなように、コンセプト『周辺との調和』と『信頼感』の間には、直線的なトレード・オフの関係がある。また、コンセプト『周辺との調和』に対する適応度の最小値は0.65で、コンセプト『信頼感』に対する満足度に関わらず、景観案はコンセプト『周辺との調和』を相対的によく満足していると思われる。

Fig.11に示すパレート最適解のうち、①、②、③の景観案をTable 8に示す。

(3) コンセプトが『信頼感』と『風格』の場合

5.2(1)と(2)では、コンセプト間でトレード・オフの関係が認められるような場合の景観案を探索した。

つぎに、比較的類似したコンセプト『信頼感』と『風格』に対して景観案を探索したところ、Table 9の景観案を得た。

最適な景観案、すなわち、最終世代におけるパレート最適解はわずか3個体で、これら2つのコンセプト間にトレード・オフの関係は認められなかった。なお、いずれも重厚で力強いイメージの景観案で、その適応度からも2つのコンセプトを十分に満足した解であった。

(4) まとめ

以上のように、コンセプトの異なるさまざまな景観案を示した。その結果、つぎのようなことがわかった。す

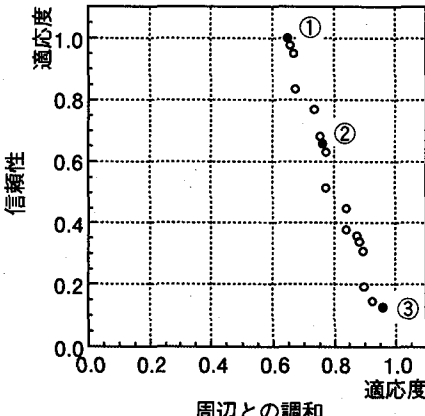


Fig.11 最終世代における景観案の分布

Table 8 『周辺との調和』と『信頼感』のコンセプトに対する景観案

景観案	色 彩		形 状	
	主 桁	高 欄	主 桁	橋脚
①	小麦色	紫紺	等断面	c
②	草色	紫紺	等断面	b
③	紫紺	紫紺	変断面 (急激)	a

Table 9 「信頼感」と「風格」のコンセプトに対する景観案

景観案	色 彩		形 状	
	主桁	高欄	主桁	橋脚
①	草色	茶色	等断面	c
②	草色	紫紺	等断面	c
③	松葉色	紫紺	等断面	c

なわち、

①コンセプト間のトレード・オフの関係、パレート最適解の数と分布パターンなどは、選択するコンセプトに大いに左右される。

②類似したコンセプトを選択した場合、パレート最適解は少なく、かつトレード・オフの関係もあまり認めれない。

ここでは、7種類のコンセプトのうち、コンセプト「周辺との調和」に対してのみ”ムーンとスペンサーの色彩調和論”で景観案を評価した。他のコンセプトに対する景観案は”ファジィ推論”で評価した。このように異なった手法で景観案を評価した場合でもコンセプト間にトレード・オフの関係が認められた。

5.3 収束の状況

本支援システムでは、前述のとおり、解の収束条件として、同じパレート最適個体が100世代にわたって生存することとした。しかし、パレート最適解は複数個あり、かつそれらは増減するため、なかなか収束しなかった。トレード・オフの関係が強いコンセプト間において、特に顕著であった。

ここでは、コンセプトに「個性的」を選択した場合と、5.2(3)で示した「信頼感」と「風格」のコンセプトを選択した場合を対象に、探索中の解の収束過程を調べた。その結果、Fig.12とFig.13を得た。

Fig.12から明らかなように、解は5世代目で最高値に達し、105世代の早い段階で収束した。一方、Fig.13の場合、適応度が世代間で増減している。複数個のパレート最適解が存在する場合には、収束条件に選択したコンセプトに対するパレート最適解の適応度の平均値を用いた。その結果、適応度の平均値は減少することになった。なお、28から128世代までの間、適応度の平均値はまったく変化しなかった。これより、この間、同じパレート最適解が持続されていたものと思われる。

以上の結果をまとめると、つぎのようである。

①コンセプトが1つの時、”パレート保存戦略”によ

Table 10 初期生物の数の相違による解探索の差異

個体数	収束世代	パレート最適解の個数
10	197	11
20	109	22
40	107	36

る解の収束状況は”単純GA”のそれと遜色ない。

②パレート最適解が多くなれば、収束が困難になる。

③パレート最適解が20以上も存在するようになれば、10,000世代に達しても収束しない場合がある。

④選択するコンセプトにも左右されるが、トレード・オフの関係が希薄な場合もある。

5.4 GAパラメータの検討

5.3までは、GAパラメータ、いわゆる個体数、交叉率、突然変異率、ニッチ数の値を一定のままでシステムを実行した。ここでは、GAパラメータが解の探索に及ぼす影響を考察する。

(1) 個体数

10, 20, 40の初期個体に対し、コンセプトが「個性的」な場合の収束世代、ならびにコンセプトが「シンボル性」と「親しみやすさ」の場合の最終世代でのパレート最適解の個数を求めれば、Table 10のようになった。

まず、コンセプトが「個性的」に対する収束世代は、個体数が20と40の間で大差ない。しかし、個体数が10の場合、収束がかなり遅い。

つぎに、パレート最適解の個数は、個体数とともに増加する。個体数が40の場合、パレート最適解の個数は36で、個体数より少ない。これは探索の過程でも起こり、パレート最適解の個数が初期の個体数より少ない場合が

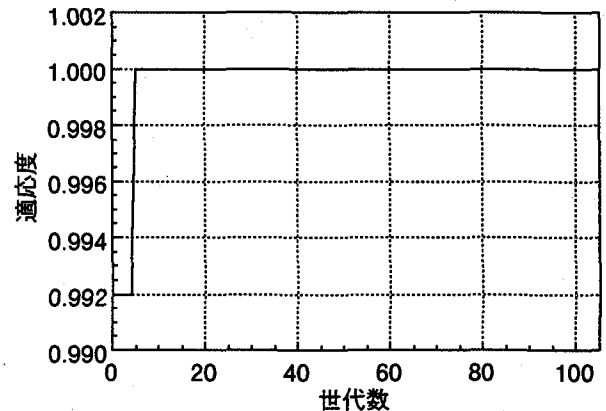


Fig.12 コンセプトが「個性的」な場合の最適解の収束状況

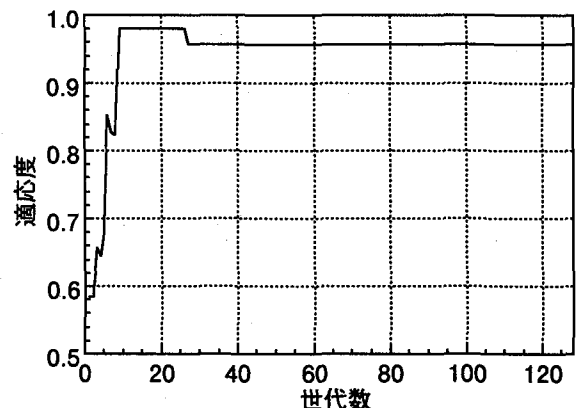


Fig.13 コンセプトが「信頼感」と「風格」の場合の最適解の収束状況

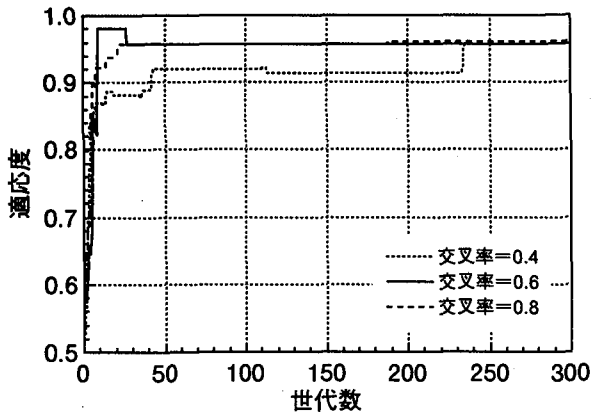


Fig.14 交叉率の相違による収束状況の差異

あった。それゆえ、シェアリング操作が効率的になされていないことが考えられる。

本支援システムでは、シェアリング操作を終えた最終世代でのパレート最適解が景観案として提示される。個体数が40の場合、提示される景観案が多すぎ、意思決定者が最終の景観案をスムーズに決定できない恐れがある。それゆえ、収束状況も考慮に入れて、個体数は20前後がよいと思われる。

(2) 交叉率

コンセプトに『信頼感』と『風格』を選び、交叉率が0.4, 0.6, 0.8の場合、300世代までの解の収束状況を調べた結果、Fig.14を得た。

図から明らかなように、交叉率が0.4の場合、解はなかなか収束しなかった。また、"パレート保存戦略"では、交叉が個体増殖の重要な操作であり、交叉率が低すぎると、解の探索がスムーズに行えない。

一方、交叉率が0.8の場合には、早い世代で解が収束している。また、同じ解が100世代続いたあとでも、新たなパレート最適解が生成されることがわかった。

交叉率が0.6の場合、交叉率が0.8の場合に比べて、収束は遅い。さらに、交叉率が0.8の場合に生成された個体も生成されていない。

"パレート保存戦略"では、個体が交叉で増殖するため、むやみに交叉率を高めると、探索に時間のかかるこ

とがわかった。なお、本支援システムでは、ビルディングブロックの破壊を防止するため、交叉位置を限定した。それゆえ、交叉による新たな遺伝子列をもつ個体が世代とともに生成されなくなった。さらに、個体が多様化しなくなることになった。

以上のことから、交叉率は0.6程度で十分である。

(3) 突然変異率

コンセプトに『シンボル性』と『親しみやすさ』を選び、突然変異率が0.02, 0.05, 0.08の場合に対する最終世代でのパレート最適解を求めれば、Fig.15を得る。

突然変異率が0.02の場合 (Fig.15(a))、パレート最適解は狭い範囲に分布する。これは、突然変異率が低いと、初期個体の遺伝子列と類似な個体が多く生存し、多様な個体が発生しにくいからである。それゆえ、突然変異率が高すぎると、パレート最適個体が一様に生成されなくなる恐れがある。

突然変異率が0.05と0.08の場合 (Fig.15(b), (c))、パレート最適解の分布はあまり変わらない。ただし、交叉と同様、突然変異の操作を行えば、個体が増殖するため、突然変異率が高い場合には、探索効率が低下する。

以上の結果を勘案すれば、ここで用いた0.05の突然変異率は妥当なようだ。

(4) ニッチの大きさ

コンセプトに『シンボル性』と『親しみやすさ』を選び、シェアリング操作に必要なニッチの大きさを与えるパラメータが $D=0.05, 0.2, 0.6$ の場合に対し、最終世代におけるパレート最適解を求めれば、Fig.16のようになる。ただし、シェアリング操作が行いやすいように、個体数を10とした。

図から明らかなように、 $D=0.2$ の場合、パレート最適解は一様で、広く分布する。一方、 $D=0.05$ と $D=0.6$ の場合、パレート最適解が局所的に分布している。

ニッチの大きさを表すパラメータは、シェアリング操作や解の探索に極めて重要である。個体を中心に、適応度による距離がパラメータ D 以内にある個体をその距離計算の対象とし、それによりニッチ数を求める。これが

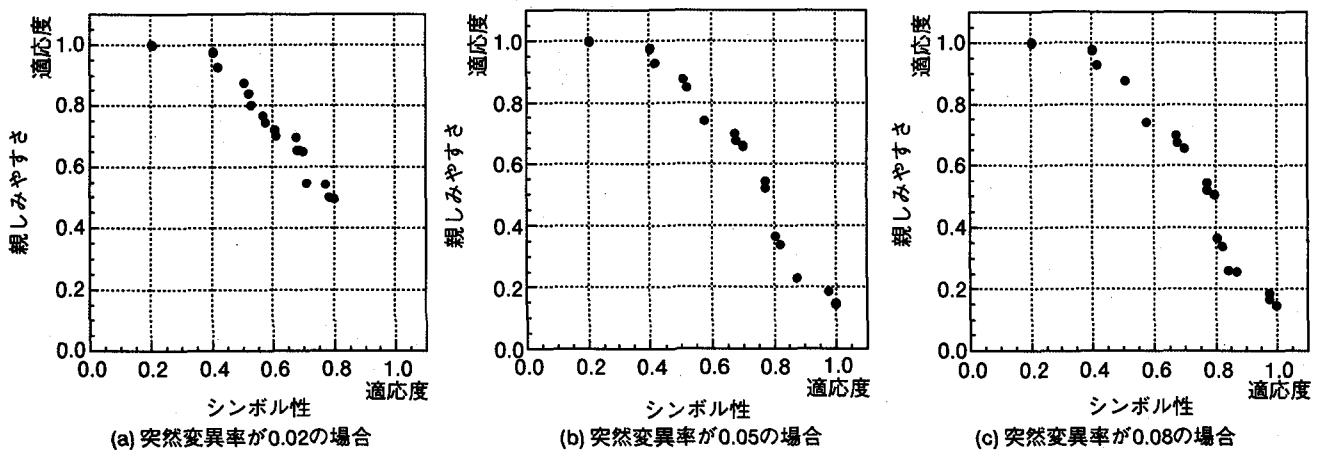


Fig.15 突然変異率の相違による最適解の分布

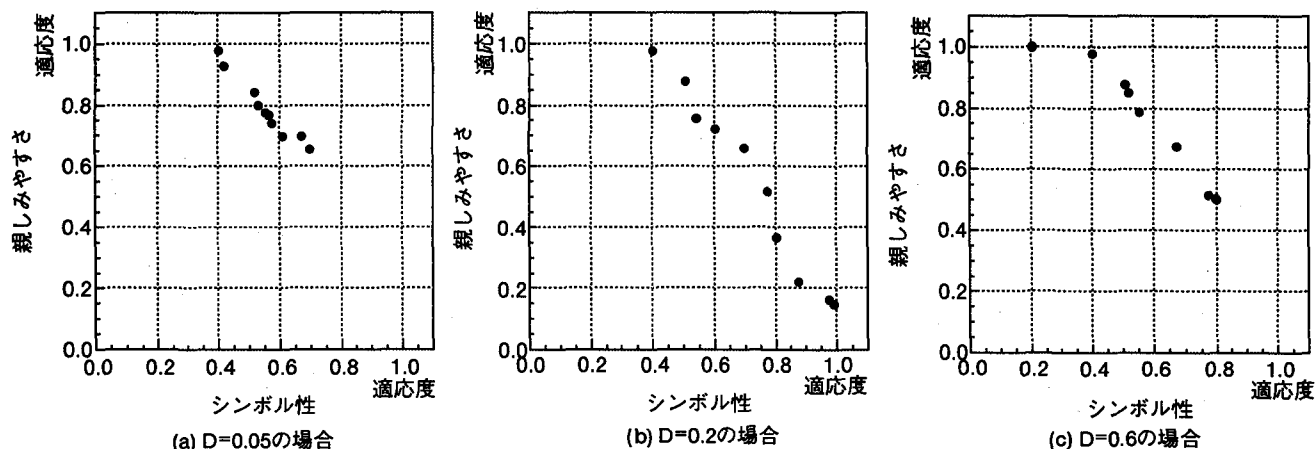


Fig.16 ニッチ数の相違による最適解の分布

大きすぎたり小さすぎたりすると、パレート最適個体が広い範囲にわたって一様に分布しなくなる。本支援システムで用いた $D=0.2$ のパラメータ値は、シェアリング操作を十分に発揮されているものと考えられる。

(5) まとめ

効率的な最適解の探索のための適切なGAパラメータの値を検討した。不適切なGAパラメータの時、システムの効率は悪く、多様な最適解が得られなかった。

6. あとがき

本論文では、桁橋の構造要素を景観構成アイテムとし、それらの組合せからなる莫大な数の景観案を作成した。多数の景観案の中から、景観設計のためのコンセプトを満足し、意思決定者に受け入れられる幾つかの最適な景観案を効率的にかつ即座に提示できるシステムを構築した。すなわち、多数の景観案の中から最適解を効率よく探索するため、遺伝的アルゴリズムの改良型で多目的GAの一種である“パレート保存戦略”を用いた。最適案の探索過程では、景観構成アイテムと形容詞対とを結びつけ、客観的かつ定量的な評価ルールを作成した。橋梁の色彩と周辺との調和を評価するため、“ムーンとスペンサーの色彩調和論”を用いた。また、景観案のコンセプトに対する満足度を定量化するため、曖昧な問題の取り扱いに適した“ファジィ推論”を用いた。

仮想の桁橋を本支援システムで景観設計した結果、つぎのような結論を得た。

- ① “パレート保存戦略”によれば、コンセプト間に生じるトレード・オフの関係を巧みにバランスさせながら、速やかに多様な景観案が求められる。それゆえ、意思決定者が最終の景観案をスムーズに決定できることがわかった。なお、“パレート保存戦略”は、対話型システムに向き、かつ効率的である。
- ② “パレート保存戦略”によれば、局所解に陥る恐れが少ない。また、何度も初期化して実行しても、パレー

ト最適解の分布に差異は認められなかった。近傍に分布する個体間に類似性が認められ、最適解が安定して得られた。ただし、パラメータによっては、最適解に一様性が見られなくなることもあった。

- ③ “ファジィ推論”と“ムーンとスペンサーの色彩調和論”の異なった方法で景観評価されたコンセプト間にもトレード・オフの関係が認められた。また、類似のコンセプト間にはトレード・オフの関係があまり認められず、類似の景観案が示された。一方、相反するコンセプトの間にはトレード・オフの関係が顕著で、多様な景観案が求められた。それゆえ、本システムが有効であることがわかった。

- ④ 人の感性と相関関係にある景観評価を曖昧さと人のもつ判断力とを兼ね備えた“ファジィ推論”で行った。その結果、本法が極めて有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 日本規格協会編：JISハンドブック 色彩，日本規格協会，1996-4。
- 2) 古田 均・伊藤 肇・堂垣正博：中小橋梁の色彩景観設計支援システムに関する研究，第4回ファジィ建築土木応用シンポジウム講演論文集，日本ファジィ学会，pp.29-38，1997-3。
- 3) 山本 宏：橋梁美学，森北出版，1980-11。
- 4) 橋 (BRIDGE IN JAPAN)，土木学会，1993-1994。
- 5) 篠原 修・鋼橋技術研究会編：橋の景観デザインを考える，技報堂出版，1994-6。
- 6) 松村 博：橋梁景観の演出，鹿島出版会，1988-8。
- 7) 鳴海邦碩：景観からのまちづくり，学芸出版，1995-2。
- 8) 玉置 久・喜多 一・岩本貴司：遺伝的アルゴリズム-V-GAの拡張，システム/制御/情報，システム制御情報学会，Vol.40，No.2，pp.69-76，1996-2。

- 9) 玉置 久・森 正勝・荒木光彦：遺伝的アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法，計測自動制御学会論文集，Vol.31, No.8, pp.1185-1192, 1995-8.
- 10) 坂和正敏・乾口雅弘・砂田英昭・澤田一哉：改良型遺伝的アルゴリズムによるファジィ多目的組合せ最適化，日本ファジィ学会誌，Vol.6, No.1, pp.177-186, 1994-2.
- 11) 近藤恒夫：景観色彩学－醜彩から美観へ－，理工図書，1986-6.
- 12) 福田邦夫：色彩調和論，朝倉書店，1996-2.
- 13) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック，東京大学出版，1980-2.
- 14) 西田虎一：色彩心理学，造形社，1981-10.
- 15) 小林順重・道江義順：応用色彩心理，誠信書房，1975-5.
- 16) 小林順重：配色センスの新開発-色彩情報処理のノウハウ－，ダヴィット社，1997-8.
- 17) 和田陽平・大山 正・今井省吾：感覚・知覚心理学ハンドブック，誠信書房，1969-8.
- 18) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，1989-10.

(1998年9月18日受付)