

免疫アルゴリズムを用いた中小桁橋の最適景観案探索システムの構築

DECISION SUPPORTING SYSTEM FOR OPTIMAL AESTHETIC DESIGN OF GIRDER TYPE BRIDGES
WITH SMALL OR MEDIUM SPAN BY USING IMMUNE ALGORITHM

鳴尾友紀子*, 古田 均**, 堂垣正博***

Yukiko NARUO, Hitoshi FURUTA, and Masahiro DOGAKI

- * 学士(工学) 関西大学大学院工学研究科土木工学専攻 博士課程(前期課程)
(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)
- ** 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1052 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
- *** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

The aim of this paper is to develop a decision supporting system of the aesthetic design of girder type bridges with small or medium span. When this system appraise the aesthetic design for concept, items image which compose the aesthetic design of girder type bridge are evaluated by contradistinction of adjective and fuzzy deduction. In color harmony valuation, this system uses the theory of Moon-Spencer's color harmony, calculation of Birkhoff's aesthetic measure. Immune algorithm is applied to solve the optimal problems for the aesthetic design of girder type bridges. It is able to obtain plural semi-optimum solutions that allow the designers to select an adequate aesthetic suggestion. The numerical computation shows the availability of the decision supporting system developed for designing girder type bridges aesthetically.

Key words: aesthetic design, girder bridges, immune algorithm, fuzzy deduction, color harmony theory

キーワード: 景観設計, 桁橋, 免疫アルゴリズム, ファジィ推論, 色彩調和論

1. まえがき

わが国は, 社会の成熟化とともに, いまや社会資本の整備が量的なものから質的なものへと転換する時期にきた。この流れは橋梁分野にもあてはまり, 橋梁景観に関心が向けられつつある^{1)~4)}。

ところで, 美の認知は, 個人の感性と大いに関係がある。それは時代によっても異なる。多くを占める中小桁橋の場合, その美は, 単純な形状がゆえ, 色彩によるところが大きい。色彩の定量的評価は形状のそれより難しい。それゆえ, 景観に関する感性情報が可能なかぎり定量化され, 設計コンセプトを満たす橋梁が自動的に探求求められるようになれば, 設計の省力化が図られる。このような観点から, 筆者らは周辺環境に調和した中小桁橋の景観設計支援システムを構築してきた^{5), 6)}。

筆者らはさきの研究^{5), 6)}で, 設計コンセプトを満たす最適景観案探索問題を組合せ最適化問題として定式化し, その解をパレート保存戦略に基づいた遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) で求めた。しかし, 美の評価に多くの曖昧な点を含む景観設計のような場合, ある評価法に基づいて探索された解だけを提示するよう

なシステムで十分な景観設計が行えるとは決して思わない。

ここでは, 景観評価法で算出した評価値が多少劣る解も求めることができ, より多様な景観案の代替案の中から設計者が解を自由に選ぶことのできる景観設計支援システムを構築する。そのため, 解の探索に免疫アルゴリズム (Immune Algorithm : IA) を用いる。また, 景観案の景観評価は, 文献 5), 6) と同様の方法で行う。

2. 中小桁橋の景観設計支援システムについて

2.1 景観設計支援システムの概要

本システムでは, 新設および既設の橋梁を対象とする。新設橋と既設橋では景観設計に必要なデータが異なる。すなわち, 新設橋の場合, ①設計コンセプト, ②路面の高低, ③主桁の面積を1とした場合の周辺環境の面積が, 一方, 既設橋の場合, ①設計コンセプト, ②路面の高低, ③主桁・高欄の色彩, ④主桁・高欄・橋脚の形状, ⑤主桁の面積を1とした場合の周辺環境の面積, ⑥周辺環境の色彩が, データである。これらをもとに, 設計コンセプトを満たす景観案が免疫アルゴリズムによって求めら

れる。設計者はシステムが推奨する景観案の中から最終案を決定する。最適景観案を探索する過程は、図-1 のようである。

2.2 橋梁景観を左右する要素

本研究における景観案は、橋梁を構成する主桁・高欄・橋脚の3形状、ならびに、主桁と高欄の2色彩からなる5つの景観構成アイテムの組合せで表現されるものとした。以下、設定した景観構成アイテムについて述べる。

(1) 橋梁を構成する主桁・高欄・橋脚の形状

橋梁を新設する場合、主桁・高欄・橋脚の形状と寸法は設計基準を遵守し、その要求性能を満たすように決定される。ここでは、設計基準と要求性能を満足した、つぎのような形状を仮定し、景観設計の過程で設計コンセプトに合致するものをこれらの中から選ぶ。

- ① 主桁：図-2 に示す等断面と4種類の変断面の、計5種類の形状を設定した。
- ② 高欄：文献 7) と 8) を参考に、図-3 に示す5種類の形状を設定した。
- ③ 橋脚：斬新で奇抜な形状は省き、文献 7) を参考に、図-4 に示す13種類の形状を設定した。

(2) 主桁と高欄の塗色

主桁と高欄に用いる塗料は、マンセル表色系⁹⁾ で表記された色彩の中から選定する。マンセル表色系では、色相・明度・彩度の3属性が数値化されている。たとえば、5R4/16すなわち“色相(5R) 明度(4)/彩度(16)”のように表記され、これはマンセル値と呼ばれる。これらの値を後述のムー・スペンサーの色彩調和論とパークホフの美度計算に用い、橋梁景観の色彩調和を定量的に評価する。以下、色相・明度・彩度の3属性について述べる。

- ① 色相 (Hue; H)：色知覚の性質を特徴づける色の属性を記号と数値で表したものである。赤や青などの10色相環がJISで規格化されている。
- ② 明度 (Value; V)：色彩の明るさを数値で表したものである。完全な黒色を0、完全な白色を10とし、その間を10等分して表記される。
- ③ 彩度 (Chroma; C)：色彩の鮮やかさを数値で表したものである。無彩色を0とし、鮮やかさとともに数値が増す。

明度と彩度を組合せたものはトーンと呼ばれる。トーンは、色相に関係なく、色彩の濃淡、明暗、強弱によって12段階に分類される。

ここでは、無数の色彩の中からできるだけ偏りのないように120種類(10色相×12トーン)の有彩色と8種類の無彩色の128種類¹⁰⁾を主桁と高欄の色彩候補とした。表-1にこれらの慣用色名とマンセル値を示す。

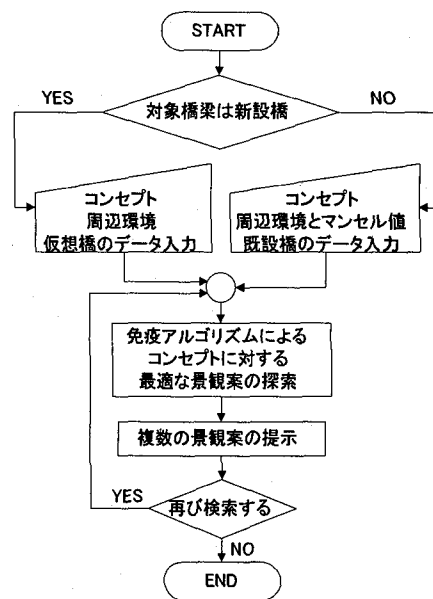


図-1 景観設計支援システムの流れ

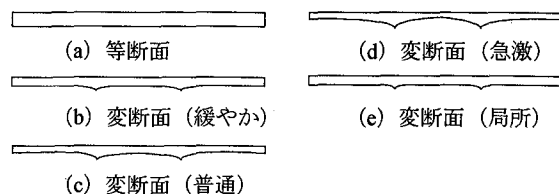


図-2 主桁の形状

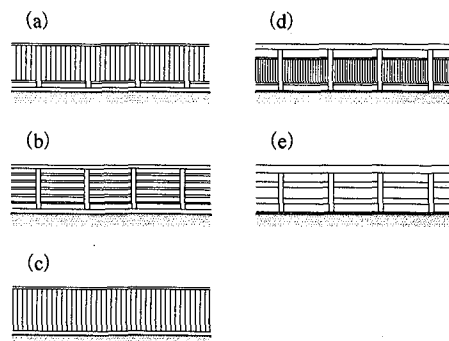


図-3 高欄の形状

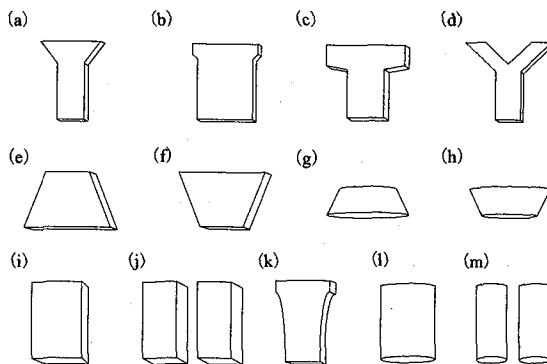


図-4 橋脚の形状

表-1 設定した 128 種類の色彩の慣用色名とマンセル値

トーン	R/赤	YR/黄赤	Y/黄	GY/黄緑	G/緑	BG/青緑	B/青	PB/青紫	P/紫	RP/赤紫
V	赤 5R4/16	橙 5YR7/16	黄 5Y8/15	黄緑 5GY7/15	緑 5G4/14	青緑 5BG5/12	青 5B5/14	青紫 5PB4/14	紫 5P5/14	赤紫 5RP5/14
S	さんご色 5R5/10	柿色 5Y6/12	うこん色 5Y6/11	くさ色 5GY6/10	緑青色 5G5/9	あおたけ色 5BG5.5/9	あさぎ色 5B5/9	りり色 5PB4/9	あやめ色 5P4/10	紅梅色 5RP4/10
B	ばら色 5R7/9	あんず色 5YR8/7	たまご色 5Y8/11	カナリヤ色 5GY8/11	エメラルド 5G7/10	トルコ石色 5BG7/9	空色 5B7/8	サルビア色 5PB7/8	藤色 5P7/9	桃色 5RP7/10
P	とき色 5R8/6	夕陽色 5Y9/4	香色 5Y9/6	若苗色 5GY8.5/6	浅みどり 5G8/6	浅青緑 5BG8/5	水色 5B8/5	浅霧色 5PB8/6	うす紫 5P8/6	うす桃色 5RP8/6
Vp	さくら色 5R9/2	白茶 5YR9/1	象牙色 5Y9/1	利休白茶 5GY9/2	白緑 5G9/2	うすあさぎ 5BG9/2	白群 5B9/2	藍白 5PB9/1	淡藤色 5P9/2	紅桜 5RP9/2
Lgr	桜かすみ色 5R8/2	とのこ色 5Y8/2	桑色白茶 5Y8/2	利休ねずみ 5GY8/3	浅霧みどり 5G8/2	あさぎねずみ 5BG8/3	深川ねずみ 5B7.5/2	浅藍ねずみ 5PB7/2	うすいろ 5P7/2	灰桜 5RP7.5/2
L	樹皮色 5R6/6	肌色 5YR6/5	からし色 5Y6/4	若芽色 5GY6/5	若竹色 5G6/6	みずあさぎ 5BG6.5/6	さびあさぎ 5B6/5	藍ねずみ 5PB6/4	鳩羽紫 5P6/4	蘭色 5RP6/4
Gr	きじばと 5R5.5/2	茶ねずみ色 5Y5/2	鈍色 5Y5/1	山鳩色 5GY5/2	うす葉色 5G5/2	裏葉色 5BG5/2	納戸ねずみ 5B5/2	さびはなだ 5PB5/2	さび紫 5P5/2	桜ねずみ 5RP5/2
DI	さびえび色 5R5/5	らくだ色 5Y5/6	うぐいす色 5Y5/6	おひみどり 5GY5/5	とくさ色 5G4/5	老竹色 5BG4/6	さび納戸 5B4/6	うすはなだ 5PB4/6	あやめ色 5P4/5	牡丹ねずみ 5RP5/5
Dp	れんが色 5R3/10	茶色 5YR4/9	うぐいす茶 5Y5/8	こけ色 5GY4/8	濃緑 5G3/7	濃青緑 5BG3.5/7	納戸色 5B3/9	紺青 5PB3/9	すみれ色 5P3/8	ぶどう酒色 5RP3/10
Dk	えび色 5R2.5/8	たばこ色 5YR3/7	オリーブ 5Y3.5/6	ふかみごけ 5GY3/6	深緑 5G3/6	深青緑 5BG3/4	深納戸 5B2.5/4	紺色 5PB3/5	茄子紺 5P3/6	深ぶどう酒色 5RP3/6
Dgr	くり色 5R2/3	黒茶 5YR2/2	オリーブ茶 5Y2/3	みる色 5GY2/2	森林色 5G2/2	鉄色 5BG2/2	こきはなだ 5B2/2.5	濃紺 5PB2/2.5	深紫 5P2/2	濃色 5RP2/2

無彩色	白 N-9.5	パールグレー N-9	シルバークレー N-7	灰色 N-6	ティアドムグレー N-5	スモークグレー N-3	チャコールグレー N-2	黒 N-1.5
-----	------------	---------------	----------------	-----------	-----------------	----------------	-----------------	------------

表-2 設定した設計
コンセプト

	コンセプト
1	周辺環境との調和
2	シンボル性
3	個性的
4	信頼感
5	親しみやすさ
6	風格のある
7	地域性

表-3 設定した周辺環境

周辺環境	マンセル値
青空	10PB8/10
曇り空	7.5B7.5/0.5
白雲	N-9.0
山(緑葉)	2G3/5
山(紅葉)	7.5R4/9
川, 海	6BG3/3
ビル, 住宅, 橋脚	5Y8/1
路面	N-5.5
岩, 土	10YR3/2
石, 砂	2.5Y8/2

表-4 16 種類の形容詞対

	形容詞対		形容詞対
1	派手な⇔地味な	9	軽快な⇔重厚な
2	刺激的な⇔温和な	10	調和した⇔調和していない
3	ソフトな⇔ハードな	11	安定感のある⇔安定感のない
4	動的な⇔静的な	12	シンプルな⇔複雑な
5	モダンな⇔アンティークな	13	力強い⇔弱い
6	明るい⇔暗い	14	固い⇔柔らかない
7	暖かい⇔涼しい	15	開放的な⇔圧迫感のある
8	華やか⇔渋い	16	連続感のある⇔連続感のない

2.3 景観評価に必要な設計コンセプトと周辺環境

橋梁の景観設計で重要なことは、つぎの2点である。第一に、「どんな橋を設計したいか」という設計のコンセプトである。これが決まれば、これを満たす景観案が探索できる。ここでは桁橋の設計コンセプトを表-2のように設定し、その中から目標とする景観にマッチしたものをを選び、それを満たすように景観案を探索する。ここに、地域性とは地域の特性を表現するもので、景観案が地域にふさわしいかどうかの判断に用いられる¹¹⁾。

第二に、橋梁とその建設地点との調和である。周辺環境との調和を評価するため、主桁の面積を1とした場合の周辺環境の面積と周辺環境のマンセル値を入力する。既設橋の場合、周辺の環境条件は決まっている。一方、新設橋の場合、さまざまな場所が考えられるので、表-3に示す10個の周辺環境¹²⁾を設定した。その中から建

設サイトに合った環境を選び、主桁の面積を1とした場合の周辺環境の面積を入力する。

2.4 橋梁景観に影響する景観構成アイテムの評価

橋梁景観に影響する景観構成アイテムの評価は、ややもすれば曖昧になる。ここでは景観構成アイテムの景観イメージに対し、表-4に示す16種類の形容詞対との関係で1～1の得点づけを行う。

(1) 主桁と高欄における色彩の景観評価

色彩の良し悪しの判断は個人の感性と大いに関係するため、その定量的評価は極めて難しい。表-4に挙げた1～10の形容詞対は色彩に関わる形容詞で、主桁と高欄に適用される色彩の固有なイメージを個々の形容詞との関係で得点づける。また、塗装の耐久性も色彩の関係で得点づけた¹³⁾。

(2) 主桁、高欄、橋脚における形状の景観評価

表-4 に挙げた 11~16 の形容詞対はものの形をイメージする形容詞で、構造美を創出する主桁・高欄・橋脚の形状と、路面の高低すなわち桁下空間の広狭のもつ景観イメージを形容詞との関係で得点づける¹⁴⁾。

2.5 橋梁景観案の設計コンセプトに対する適応性のファジィ推論による評価

(1) ファジィ推論ルールについて

橋梁景観案が設計コンセプトにどの程度適応しているかの評価と景観構成アイテムの形容詞対による景観評価とを結びつけるルールにファジィ推論を適用する。

ファジィ推論¹⁵⁾は、一般に、推論“もし~ならば、~である”にファジィな概念を取り入れたものである。これには、曖昧な情報と曖昧な情報との組合せによって、曖昧にもかかわらず、妥当な結果が導かれるという特徴がある。ファジィ推論は一般に

前提 1 : If a is A then b is B

前提 2 : a is A_1

結論 : b is B_1

のように表示できる。ここに a, b は対象名、 A, A_1, B, B_1 は全体集合におけるファジィ集合を表す。

さきに触れたように、本システムでは、景観案の設計コンセプトに対する適応性評価と景観構成アイテムの形容詞対による評価とをファジィ推論で結びつける。そのルールを後件部が実数値である簡略化ファジィ推論¹⁶⁾に従って作成する。

まず、前件部のメンバシップ関数には、図-5 に示すような三角形で与えられる k 個のファジィ変数を用いる。ここに、 $k=1, 2, \dots, 5$ である。すなわち、2.4 で示した 5 つの景観構成アイテムの景観イメージが形容詞対 j に対して x_j ($-1 \leq x_j \leq 1$) のように得点づけられているとき、前件部の適合度 $\phi_{j,k}(x_j)$ が図-5 に示すメンバシップ関数から求められる。ちなみに、すべての形容詞対にこれを適用する。

つぎに、簡略化ファジィ推論に基づいて、後件部の実数値が $C_{i,j,k}$ のように得点づけられているものとする。その結果、メンバシップ関数 k で導かれる適応度 $f_{i,j,k}$ は

$$f_{i,j,k} = C_{i,j,k} \phi_{j,k}(x_j) \quad (1)$$

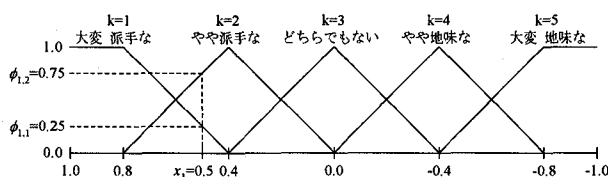


図-5 形容詞対「派手な⇔地味な」のメンバシップ関数

のように求められる。ここに、設計コンセプト i は表-2 に示す 7 個 ($i=1, 2, \dots, 7$)、形容詞対 j は表-4 に示す 16 個 ($j=1, 2, \dots, 16$) である。

ある景観案のコンセプト i に対する形容詞対 j のときの適応度 $F_{i,j}$ は、式 (1) から求めたメンバシップ関数 k の適応度 $f_{i,j,k}$ を $k=1 \sim 5$ に対して求め、その総和をとれば、

$$F_{i,j} = \sum_{k=1}^5 f_{i,j,k} \quad (2)$$

のように求められる。

したがって、ある景観案の設計コンセプト i への適応度 F_i は

$$F_i = \sum_{j=1}^{16} F_{i,j} \quad (3)$$

によって求められる。これは、さきにコンセプト i への形容詞対 j に対する適応度 $F_{i,j}$ を求めたのと同様、残り 15 個の形容詞対に対してある景観案の設計コンセプト i へのその適応度をファジィ推論ルールによって求めた値の和を意味する。ちなみに、式 (3) の値が大きいほど設計コンセプトを満たす度合いが強い。

最終的には、ある景観案に対して求められたコンセプト i に対する適応度 F_i をそれらの最大値 $F_{i,max}$ で除した

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{F_{i,max}} \quad (4)$$

をある景観案の設計コンセプト i への適応度すなわち景観評価値とする。

(2) ファジィ推論ルールの例

たとえば、形容詞対 1「派手な⇔地味な」に対する景観構成アイテムの得点を用い、コンセプト 2「シンボル性」に対するファジィ推論ルールを説明する。

ある景観構成アイテムの形容詞対 1「派手な⇔地味な」に対する得点が $x_1=0.5$ であったとする。この場合、ファジィ変数 1「大変派手な」に対する適合度 $\phi_{1,1}$ は、図-5 に示すように、

$$\phi_{1,1}=0.25$$

のように求められる。このファジィ変数 1「大変派手な」のコンセプト 2「シンボル性」に対する重みが $C_{2,1,1}=3.0$ であれば、適応度 $f_{2,1,1}$ は式 (1) から

$$f_{2,1,1}=0.25 \times 3.0=0.75$$

のように求められる。同様に、ファジィ変数 2「やや派手な」に対する適合度は

$$\phi_{1,2}=0.75$$

で、重みを $C_{2,1,2}=1.5$ とすれば、その適応度 $f_{2,1,2}$ は、

$$f_{2,1,2}=0.75 \times 1.5=1.13$$

のように求められる。残り 3 つ ($k=3, 4, 5$) のファジィ変数の適合度は $\phi_{1,k}=0$ であるため、それらの適応度は

$$f_{2,1,k}=0$$

となる。

以上のことより、 $k=1 \sim 5$ の全メンバシップ関数に対

して適応度は

$$F_{2,1} = \sum_{k=1}^5 f_{2,1,k} = 0.75 + 1.13 + 0 + 0 + 0 = 1.88$$

となる．このようにして残り 15 個の形容詞対に対しても算出し、その和をとって正規化する．

2.6 周辺環境との調和の評価

橋梁と周辺環境の色彩を定量的に評価するため、ムーン・スペンサーの色彩調和論⁹⁾とパークホフの美度¹⁷⁾を用いる．以下、それについて述べる．

(1) ムーン・スペンサーの色彩調和論

ムーンとスペンサーが1944年に発表した色彩調和論には、2種の色彩からなる配色の色彩調和が述べられている．これによれば、色彩の組合せは調和と不調和に大別される．また、調和と不調和がそれぞれ3つに区分され、いずれもマンセル表色系上で表される．すなわち、調和には①同等、②類似、③対照が、不調和には①第一不明瞭、②第二不明瞭、③眩輝がある．マンセル表色系上での調和と不調和の関係は、表-5とされる．

(2) パークホフが提案した美度

パークホフは、美の評価、すなわち、美度 M が

$$M = \frac{O}{C_x} \tag{5}$$

で計算されるものとした．ここに、 O は秩序の要素数、 C_x は複雑さの要素数である．

ムーンとスペンサーは式(5)を色彩調和の評価尺度に用い、複雑さの要素数 C_x と秩序の要素数 O をつぎのように考えた．すなわち、複雑さの要素数 C_x は

$$C_x = (\text{色数}) + (\text{色相差のある色対の数}) + (\text{明度差のある色対の数}) + (\text{彩度差のある色対の数}) \tag{6}$$

である．また、秩序の要素数 O は、配色された色彩相互の関係が、色相・明度・彩度に対して、同等、第一不明

瞭、類似、第二不明瞭、対照、眩輝のいずれに相当するかを判定し、それぞれの美的係数を表-6から求め、それらの総計とした．また、景観案を構成する色彩の中から2色間の面積の比率をそれぞれ算出し、その比率に対する係数を秩序の要素数 O に加味した．

なお、美度 M が大きいほど一般に美しいとみなされ、それが0.5以上であれば、周辺と調和しているとされる．

3. 組合せ最適化問題における最適解導出のための免疫アルゴリズムについて

本システムでは、景観案が景観構成アイテムの組合せで与えられる．その数は

$$128 \times 128 \times 5 \times 5 \times 13 = 5,324,800$$

で、すべての景観を一つひとつ評価することは極めて複雑である．そこで、景観評価の高い景観案をこれら解候補の中から効率的に見出すため、組合せ最適化手法を用いる．さきの研究^{5), 6)}では、組合せ最適化手法にパレート保存戦略を取り入れた多目的GA手法を用いた．しかしながら、個人の感性と強い相関にある景観を評価する場合、景観評価値の高い解候補が必ずしも最適な景観案とはかぎらない．

以上のような観点から、組合せ最適化手法に景観評価値が多少劣る解候補も提示でき、より多様な解候補が探索できる免疫アルゴリズム(Immune Algorithm : IA)^{18) ~ 20)}を適用した．ただし、複数の目的関数すなわち設計コンセプトの組合せを考えるため、文献18) ~ 20)などで用いられている単目的IA手法を多目的IA手法に改良した．多目的IA手法によるフローチャートは図-6のようで、以下に詳述する．

さて、橋梁の景観設計では、設計コンセプトが目的関数、景観案が多目的問題の最適解となる．また、パークホフの美度が0.5以上であれば周辺と調和していると見なされるため、これが制約条件となる．

IA手法には、抗原と抗体の概念が取り入れられている．橋梁景観の最適化問題では、抗原が目的関数と制約条件に、抗体が最適解に対応する．また、抗体と抗原との親和度は、景観案の設計コンセプトに対する適応度となる．

【Step 1】 抗原の認識

システムに侵入する抗原を入力情報として認識する．

【Step 2】 抗体の遺伝子型の決定(コーディング)

一つひとつの抗体は、一般に、一次元配列で表記された遺伝子で識別される．各要素は2進(0または1)で与えられる．ここでは5つの景観構成アイテムの組合せからなる一つの景観案を、図-7に示すように、24ビットの遺伝子列で表現する．

【Step 3】 抗体群の初期生成

解析に必要な数の抗体をランダムに発生させ、抗体群

表-5 調和と不調和の範囲

調和・不調和	H だけの变化	V だけの变化	C だけの变化
同等	0~1j.n.d	0~1j.n.d	0~1j.n.d
第一不明瞭	1j.n.d~7	1j.n.d~0.5	1j.n.d~3
類似	7~12	0.5~1.5	3~5
第二不明瞭	12~28	1.5~2.5	5~7
対照	28~50	2.5~10	>7
眩輝	—	>10	—

j.n.d は最小判別閾値

表-6 秩序の要素数 O に加える美的係数

調和・不調和	色相間隔	明度間隔	彩度間隔	無彩色
同等	+1.5	-1.3	+0.8	+1.0
第一不明瞭	0	-1.0	0	—
類似	+1.1	+0.7	0.1	—
第二不明瞭	+0.65	-0.2	0	—
対照	+1.7	+3.7	+0.4	—
眩輝	—	-2.0	—	—

を形成する。ただし、それまでに有効であった抗体群が記憶細胞の中に残っておれば、それも活用した抗体群を形成する。ここでは抗体の数を100とした。

【Step 4】 抗体間の親和度 $ay_{v,w}$ の計算

免疫システムには、抗体と抗体の結合反応によって、抗体の産生を自己調節しながら多様な抗体を生成する機能が取り入れられている。ここに、抗体と抗体の結合力は、親和性の尺度である親和度（抗体の類似度を測る尺度）によって測られる。

抗体 v と抗体 w との親和度 $ay_{v,w}$ は

$$ay_{v,w} = \frac{1}{1 + H_{v,w}} \quad (7)$$

で求められる。ここに、 $H_{v,w}$ は抗体 v と抗体 w との類似度を測る尺度で、ハミング距離と呼ばれる。ちなみに、 $H_{v,w}=0$ のとき、抗体 v と抗体 w は同じ遺伝子からなる。この場合、 $ay_{v,w}=1$ で、式(7)は最大の値となる。

景観案である遺伝子列には、規則だった類似性が存在しない。それゆえ、遺伝子列が類似していても、景観案が似かよっているとは一概にいけない。一般に、式

(7)の親和度いわゆる景観案の類似度は、遺伝子ごとに異なり、大小さまざまな値となる。したがって、2抗体間で遺伝子列の異なる数に関係なく、いずれか一つの景観構成アイテムが異なれば、そのハミング距離は1であるとする。5つの景観構成アイテムがすべて異なれば、ハミング距離は最大の5となる。

【Step 5】 抗体と抗原の親和度 $ax_{v,i}$ の計算

抗体 v と抗原 i の親和度 $ax_{v,i}$ は、ファジィ推論で計算した景観案の設計コンセプト i への適応度 $\bar{F}_i$ と同値で、

$$ax_{v,i} = opt_{v,i} \quad (0 \leq opt_{v,i} \leq 1)$$

のように定義される。ここに、 $opt_{v,i}$ は抗原 i と抗体 v との結合力の強さを表す。親和度 $ax_{v,i}$ は、この最大値が単位量1になるように正規化される。

なお、ここではシステムに生存するすべての抗体に対し、選択した設計コンセプトの数だけその適応度を算定する。

【Step 6】 記憶細胞とサブレッサ細胞への分化

すべての抗体の濃度 c_v を計算する。すなわち、

$$c_v = \frac{\sum_{w=1}^N ac_{v,w}}{N} \quad (8)$$

$$ac_{v,w} = \begin{cases} 1 & ay_{v,w} \geq Tac1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

である。ここに、 $Tac1$ は類似度の閾値、 N は抗体の総数である。

たとえば、抗体 v の濃度 c_v が閾値 Tc を超えた場合、抗体 v を記憶細胞 m に分化させる。それが景観案の解候補となる。ただし、記憶細胞の数を Mc に制限する。記憶細胞の数が制限数 Mc に達した場合は、最も親和度の高い記憶細胞と交換する。また、新しく分化した記憶細胞と同じ遺伝子をもつサブレッサ細胞 s に分化させる。

なお、濃度の閾値を $Tc=0.35$ 、記憶細胞の総数を $Mc=20$ とした。また、類似度の閾値 $Tac1$ を、景観構成アイテムのうち、主桁と高欄の色彩が同じで、主桁・高欄・橋脚の3形状のうち、一つが異なる場合の親和度とした。

【Step 7】と【Step 7+】 抗体産生の抑制 1

N 体の抗体のうち、乱数で選ばれた設計コンセプト p に対し、適応度の低い順に全抗体の半数($N/2$)を消滅させる。ただし、これら $N/2$ の景観案の中に、少なくとも一つの設計コンセプトに対する適応度が他の景観案より高ければ、その抗体は消滅させずパレート最適抗体とする。

【Step 8】 抗体産生の抑制 2

同一あるいは類似な記憶細胞が産生されないようにするため、抗体 v とサブレッサ細胞 s との親和度 $as_{v,s}$ が類似度の閾値 $Tac1$ より大きい抗体を消滅させる。【Step 7+】で選んだパレート最適抗体も、サブレッサ細胞との親和度 $as_{v,s}$ が閾値 $Tac1$ 以上であれば、消滅させる。

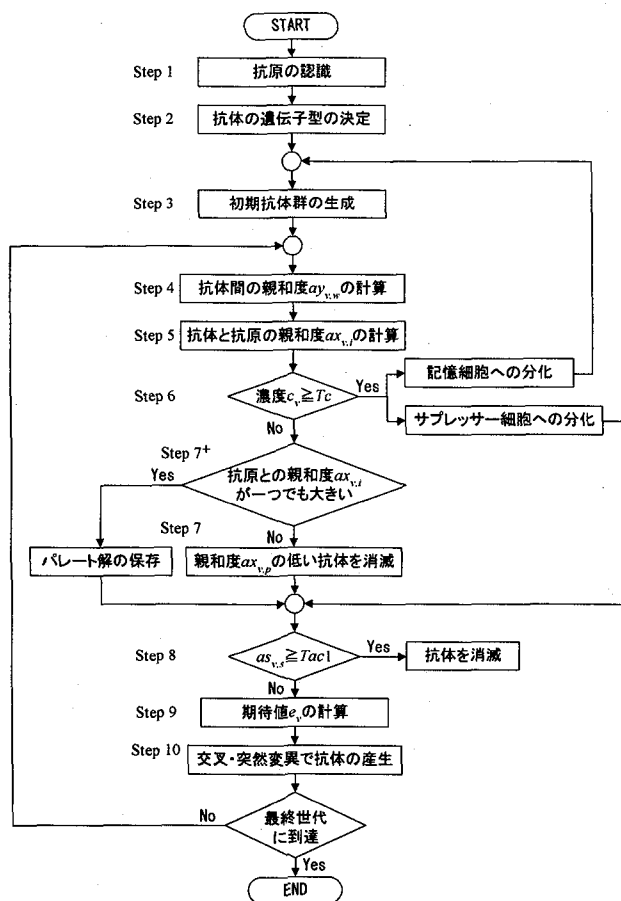


図-6 多目的IAの流れ図

0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1		
主桁							高欄							橋脚					主桁					高欄				
色彩														形状														

図-7 景観案を表す遺伝子列

【Step 9】 期待値 e_v の計算

【Step 7】と【Step 8】で残った抗体 v が次世代に残る期待値 e_v は、

$$e_v = \frac{ax_{v,p} \prod_{s=1}^S (1 - (ae_{v,s})^K)}{c_v \sum_{n=1}^N ax_{n,p}} \quad (10)$$

$$ae_{v,s} = \begin{cases} as_{v,s} & as_{v,s} \geq Tac2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

で決定される。ここに、 S はサプレッサー細胞の総数、上添字 K は産生抑制力、 $Tac2$ は類似度の閾値である。式 (10) は、抗原 p との親和度 $ax_{v,p}$ が大きい抗体ほどつぎの世代に生き残れる確率が高いことを、また、抗体とサプレッサー細胞との親和度 $as_{v,s}$ が大きく濃度の濃い抗体ほどつぎの世代に生き残れる確率が低いことを意味している。

ここでは、類似度の閾値 $Tac2$ は、5 つの景観構成アイテムのうち、一つだけ異なる場合の親和度とした。

【Step 10】 抗体の産生

【Step 8】におけるサプレッサー細胞の抑制機能によって消滅した抗体に代わる新しい抗体を乱数で産生する。つぎに、【Step 7】で残った抗体と新しく産生した抗体に対して、重複を許容し、 $N/4$ 組のペアを選ぶ。ただし、期待値 e_v が高い抗体ほど確率的に選択されやすい。ペアになった抗体に対して、交叉を施し、新しい $N/2$ 個の抗体を産生する。産生した抗体に対し、設定した突然変異確率で遺伝子を変化させる。ここでは、突然変異確率を 0.05 とした。

最終的には、1,000 世代で演算を終えるが、それまでの間、【Step 4】から【Step 10】の手順を繰り返す。

4. 景観設計支援システムの実行例

構築した景観設計支援システムを稼動し、本システムの有用性を検討する。

4.1 既設橋の景観を見直した例

既設橋の景観を現状分析し、その景観性がより向上するように改良したい場合、橋梁とその周辺が写っている写真から①路面の高低、②主桁・高欄の色彩、③主桁・高欄・橋脚の形状、④主桁の面積を 1 とした場合の周辺環境の面積、⑤周辺環境のマンセル値を求める。ただし、周辺環境を構成する色彩のマンセル値は JIS Z 8721 標準色票²¹⁾で決定した。また、主桁と高欄の色彩には、2.2 (2) で設定した 128 色に最も近い色彩を当てはめた。

(1) 既設橋の景観設計に必要な初期データ

図-8 に示す 3 径間連続鉄桁橋の柴原橋（橋梁年鑑、平成 4 年版）⁷⁾を対象とした。入力データのうち、路

面の高低と景観構成アイテムを表-7 に、主桁の面積を 1 とした場合の周辺環境の面積とマンセル値を表-8 にそれぞれ示す。また、「シンボル性」と「親しみやすさ」を設計コンセプトに選び、これらを満足する景観案を求める。

(2) 既設橋の景観評価

既設橋の場合、塗装に際し、何色を選べば現状より景観が上回るかを知るため、すべてのコンセプトに対し、現状の景観を評価し、美度を算定する。

解析した結果、柴原橋の現状は表-9 のようである。これによれば、柴原橋は「シンボル性」に対する景観評価が最も高く、「風格のある」に対して最も低いことがわかる。この評価は、主桁にばら色という目立った色彩が用いられているためと考えられる。なお、美度は 0.977 であった。

(3) 景観案の提示

(1) の入力データをもとに、景観設計支援システムを稼動した。その結果、表-10 に示す 20 ケースの景観案が得られた。ただし、コンセプト「親しみやすさ」への適応度が高い順に示した。景観案の美度はいずれも柴原橋のそれを上回った。これらを図示すれば、図-9 を得る。ここに、横軸と縦軸はそれぞれ「シンボル性」と「親しみやすさ」への適応度である。同図には現況の柴原橋もプロットしたが、現橋はコンセプト「シンボル性」があると評価されている。

表-7 入力データ①

路面高	高い
主桁の色彩	ばら色
高欄の色彩	白色
主桁の形状	(a)
高欄の形状	(d)
橋脚の形状	(c)

表-8 入力データ②

周辺環境	面積比	マンセル値
空	6.96	5B9/2
山 (近景)	1.67	5G2/6
山 (中景)	3.49	2.5Y8/2
川	0.46	10G7/1
草 (緑)	1.83	10GY5/10
草 (黄緑)	0.56	2.5GY6/8
土	0.32	5YR4/6
砂・石	0.65	5Y7/3
コンクリート	3.49	2.5Y8/2

表-9 既設橋の評価

	コンセプト	適応度
1	周辺環境との調和	0.357
2	シンボル性	0.757
3	個性的	0.688
4	信頼感	0.363
5	親しみやすさ	0.380
6	風格のある	0.274
7	地域性	0.402

表-10 既設橋の景観案

	色彩		適応度		美度
	主桁	高欄	シンボル	親しみ	
1	桜かすみ色	あざぎねずみ	0.350	0.710	1.04
2	利休白茶	裏葉色	0.340	0.695	1.02
3	さくら色	裏葉色	0.366	0.692	1.06
4	桑色白茶	黒茶	0.471	0.667	1.13
5	淡藤色	象牙色	0.334	0.662	1.08
6	浅藍ねずみ	あやめ色	0.390	0.658	1.07
7	らくだ色	浅霧みどり	0.512	0.639	1.05
8	牡丹ねずみ	うす桃色	0.555	0.573	1.06
9	たばこ色	白茶	0.580	0.564	1.11
10	たばこ色	藍白	0.558	0.561	1.11
11	浅青緑	れんが色	0.531	0.558	1.07
12	香色	くり色	0.594	0.554	1.10
13	夕陽色	紺青	0.574	0.547	1.09
14	うす桃色	さんご色	0.578	0.525	1.06
15	あんず色	オリーブ茶	0.685	0.506	1.08
16	ふかみごけ	あんず色	0.582	0.442	1.06
17	赤	白緑	0.725	0.415	1.08
18	橙	深紫	0.831	0.347	1.12
19	黄	深ぶどう酒色	0.810	0.324	1.09
20	黄	たばこ色	0.822	0.324	1.06

20 ケースの景観案のうち、1, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 15, 17, 18 の 10 ケースはパレート解である。ここに、パレート解とは、「他の景観案より少なくとも 1 つのコンセプトに対する評価値が高い解」を意味する。これらの中から景観案 12 を選び、それよりも適応度の劣った景観案 16 と、景観案 1 および景観案 18 を可視化したところ、図-10 を得た。なお、景観案 1 はコンセプト「親しみやすさ」への適応度が最高の、景観案 18 はコンセプト「シンボル性」への適応度が最高の景観案で、これらの間にはトレード・オフの関係がある。

コンセプト「シンボル性」への適応度がほぼ同一の景観案 12 と景観案 16 の 2 案において、後者はコンセプト「親しみやすさ」への適応度が前者に比べて 0.112 ほど低い。しかし、両者を比較したところ、後者は周辺の環境にとけ込み、前者に比べても遜色なく、代替案になり得る景観案であると考えられる。それゆえ、景観設計のように、評価値の近接した探索解に顕著な差異が認められないような場合には、より広範な解探索がなされ、評価値の多少劣る解も示すことのできる IA 手法は有効な方法であると考えられる。

また、景観案 1 はやわらかで親しみやすいイメージを、景観案 18 は人々を引きつける橙色の主桁がシンボル性を高めている。このように、本システムが推奨する景観案はコンセプトを十分に満たし、本システムは有用な解を提示できるものと思われる。

4.2 新設時に検討する景観設計の例

(1) 入力データ

新設橋の景観性を検討する場合、建設される地点の写真から周辺の環境を認識し、①設計コンセプト、②路

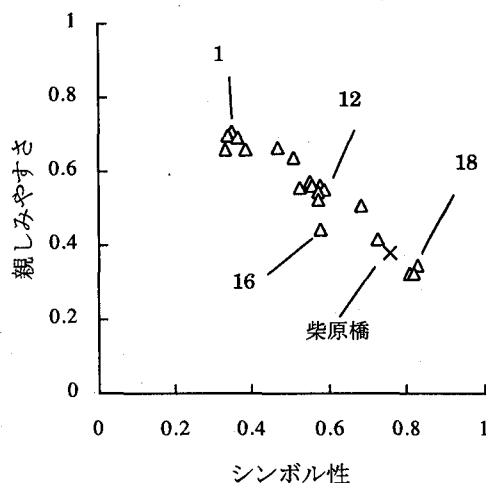


図-9 既設橋対象の景観案の分布

面の高低、③周辺環境が占める割合をシステムに入力する。ここでは②と③に 4.1 で入力した柴原橋のデータを用いた。また、設計コンセプトには、柴原橋で評価値が低かった「風格のある」と「個性的」を選んだ。

(2) 景観案の提示

(1) の入力データのもとに本システムを稼動した結果、表-11 を得た。ただし、コンセプト「風格のある」への適応度が高い順に 20 案を示した。また、縦軸と横軸にそれぞれコンセプト「風格のある」とコンセプト「個性的」への適応度を用いれば、図-11 を得る。同図には、比較のため、GA 手法で得た 78 のパレート最適解も●印で示した。GA 手法で求められるパレート解は、最大で初期個体の数 100 個を得ることができるが、本研究では、パレート解となる景観案が 78 個探索された。IA 手法で得た 20 案の内、IA1, IA2, IA3, IA4, IA6, IA7, IA8, IA10, IA18, IA19 の 10 案はパレート解となる。

IA 手法で得られた 20 個の景観案の中でパレート解である景観案 IA8 と IA10、および両者よりコンセプトへの適応度が劣る景観案 IA15 を図示すれば、図-12 を得る。また、GA 手法による景観案の中から適応度が IA8 と同程度の GA57 と、適応度が IA10 と同程度の GA64 を示せば、表-12 を得る。図-12 にこれらも示した。

(3) IA 手法と GA 手法で探索された解の比較

IA 手法と GA 手法で得られた景観案を分析する。ここに、IA 手法と GA 手法に固有なパラメータは、表-13 のとおりである。ここに、記憶細胞の総数は景観案にとって替わることのできる案の数となるため、最終の決定が繁雑にならないためにも多くもなく少なくもない数が適切である。したがって、ここでは 20 とした。また、濃度の閾値は、その値を変化させて検討した結果、最もよい分布が得られた 0.35 とした。

図-11 から明らかなように、GA 手法で探索された景観案は一本の線状に分布する。一方、IA 手法による景

表-11 新設橋の景観案

	色彩		形状			適応度		美度
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚	個性的	風格のある	
IA 1	さびはなだ	浅霧みどり	c	a	i	0.258	0.684	1.16
IA 2	きじはと	利休白茶	b	a	l	0.322	0.667	1.14
IA 3	深ぶどう酒色	白緑	c	a	i	0.438	0.662	1.19
IA 4	たばこ色	白茶	c	c	i	0.485	0.652	1.17
IA 5	肌色	えび色	c	c	l	0.442	0.632	1.14
IA 6	黒茶	たばこ色	b	c	l	0.607	0.597	1.21
IA 7	黒茶	深ぶどう酒色	b	d	l	0.620	0.593	1.23
IA 8	くり色	たばこ色	c	d	i	0.636	0.579	1.17
IA 9	えび色	黒茶	c	c	i	0.593	0.576	1.20
IA 10	黒茶	オリーブ茶	c	d	i	0.684	0.543	1.20
IA 11	たばこ色	柿色	b	a	i	0.559	0.541	1.16
IA 12	黒茶	えび色	c	d	c	0.655	0.530	1.19
IA 13	オリーブ茶	濃色	b	d	h	0.667	0.513	1.20
IA 14	濃色	濃色	c	d	h	0.650	0.508	1.28
IA 15	濃色	橙	a	d	l	0.618	0.465	1.19
IA 16	たばこ色	紫	b	c	h	0.669	0.421	1.15
IA 17	緑	オリーブ	c	a	l	0.673	0.372	1.06
IA 18	黒	こけ色	c	d	a	0.732	0.354	1.01
IA 19	赤紫	黒茶	c	d	l	0.738	0.333	1.22
IA 20	赤紫	すみれ色	c	d	i	0.729	0.304	1.17

表-12 GA 手法による景観案の一例

	色彩		形状			適応度		美度
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚	個性的	風格のある	
GA 57	オリーブ茶	たばこ色	c	d	i	0.639	0.584	1.18
GA 64	黒茶	黒茶	c	d	i	0.684	0.541	1.15

表-13 IA 手法と GA 手法に用いられるパラメータ

	IA 手法	GA 手法
初期個体数	100	100
突然変異確率	0.05	0.05
交叉率	世代により異なる	0.6
世代数	1,000	1,000
濃度の閾値 T_c	0.35	—
記憶細胞の総数 S	20	—

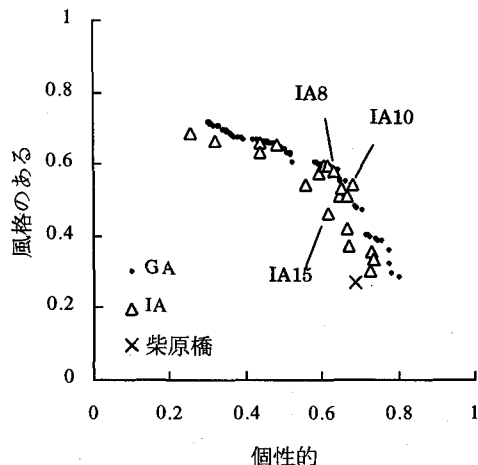


図-11 新設橋対象の景観案の分布

観案は、GA 手法による最適解いわゆるパレート解の内側に、ある幅をもって分布している。

IA 手法による案の中には、GA 手法による景観案と同程度に評価されるものも含まれる。たとえば、IA10 は GA64 と高欄の色彩だけが異なる。その適応度と美度は GA64 よりも優れている。

IA15 は IA8 や GA57 に比べて 2 つのコンセプトの適応度が劣る。しかし、これら 3 ケースを比較したが、優劣つけがたかった。すなわち、IA15 は残りの 2 案と遜色なく、十分に採用できるものと思われる。

IA 手法で求められたパレート解の 10 ケースを分析したところ、それらは主桁が (b) と (c) の形状、橋脚が (a), (i), (l) の形状の組合せからなっている。一方、GA 手法で探索された景観案では、主桁はすべて (c) の形状、橋脚は 62% が (i)、残り 38% が (l) の形状であった。これらは、コンセプトが「個性的」と「風格のある」への適応度が高い景観案である。

参考までに、IA15 の主桁を (a) から (c) の形状へ、橋脚を (l) から (i) の形状へ替えると、「個性的」と「風格のある」への適応度がそれぞれ 0.618 から 0.664、0.465 から 0.477 へと向上した。しかし、コンセプトへの適応度がよくても同じような景観案が探索されたのでは、比較・検討する上で十分ではない。それゆえ、IA 手法で得られる景観案の中には景観評価値がパレート最適解より劣るものも含まれるが、主桁の形状が (a) や橋脚の形状が (h) のような案も示されるので、景観を検討する上では有益である。



図-8 対象橋梁の柴原橋



IA 8



景観案 12



IA 10



景観案 16



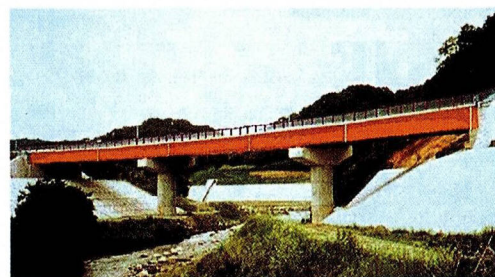
IA 15



景観案 1



GA 57



景観案 18



GA 64

図-10 可視化した既設橋対象の景観案

図-12 可視化した仮想橋対象の景観案

中小桁橋を対象に、設計コンセプトを満たす景観案が探索できる景観設計支援システムを構築した。5つの景観構成アイテムからなる景観案は、設計コンセプトに対する適応度が異なる。景観構成アイテムの組合せからなる景観案が莫大な数あり、その最適解を効率よく求めるため、最適化手法に免疫アルゴリズムを適用した。

景観案の探索過程では、つぎのことを行った。景観案を構成する景観構成アイテムの景観評価を行うため、橋梁の色彩と形状をイメージする16個の形容詞対を設け、景観評価ルールを作成した。つぎに、形容詞対を設計コンセプトと結びつけるため、曖昧な評価に適したファジィ推論を用い、ファジィ推論ルールを作成した。さらに、橋梁の主桁と高欄の色彩と周辺環境の色彩との調和を評価するため、ムーン・スペンサーの色彩調和論を用い、さらに、景観評価の数量化のためにパークホフの美度を用いた。開発した景観設計支援システムを新設橋と既設橋の景観設計に適用し、設計コンセプトを満たした景観案を提示した。

本研究によって、つぎのような結論を得た。

- 1) 最適化手法にIA手法を採用し、GA手法では探索できない、パレート解より評価の劣る景観案が求められるようなシステムを構築した。すなわち、さまざまな景観案を示すことでより多様な設計が可能となり、より自由度の大きい景観設計を行うことのできるシステムに改良した。
- 2) 単目的IA手法を多目的IA手法に改良し、複数の設計コンセプトを満たす景観案が提示できた。多様なニーズに応えられるシステムが構築でき、住民をも交えた住民参加型社会基盤整備に役立てるシステムへと改善された。
- 3) IA手法では、抗体を抑制するサプレッサー細胞の働きで、サプレッサー細胞と同一か類似の抗体が消滅できる。その結果、同一か類似の景観案は再生されず、局所解に陥らないように解の探索ができた。
- 4) 免疫アルゴリズムが最適な景観案の探索に優れていることが1)～3)からわかった。
- 5) 16個の形容詞対と設計コンセプトをファジィ推論ルールで結びつけ、景観案の景観評価を定量化した。ファジィ推論は橋梁景観のような曖昧な問題の解決に有用であった。

なお、本研究の一部は、平成13年度関西大学重点領域研究助成金によって行った。

- 1) 構造工学委員会・橋の景観とその形態および色彩に関する研究小委員会編：美しい橋のデザインマニュアル，土木学会，1982-6。
- 2) 石井一郎・元田良孝：景観工学，鹿島出版，1990-8。
- 3) 近田康夫・城戸隆良・宇野正高・小堀為雄：橋梁景観の色彩調和分析に関する研究，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.139-146，1994-4。
- 4) 太田亜矢・渡邊英一・古田均・鈴木ゆかり：色彩の橋梁景観に及ぼす影響，構造工学論文集，土木学会，Vol.44A，pp.553-574，1998-3。
- 5) 古田均・藤田靖司・堂垣正博：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，構造工学論文集，土木学会，Vol.45A，pp.465-476，1999-3。
- 6) 古田均・中村幸一郎・堂垣正博：桁橋の景観設計支援システムに関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.46A，pp.321-331，2000-3。
- 7) 日本橋梁建設協会編：橋梁年鑑，昭和63年-平成12年版，1988-2000。
- 8) 大野美代子：橋の付属物—高欄を中心に—，橋梁と基礎，Vol.29，No.8，pp.72-75，1995。
- 9) 福田邦夫：色彩調和論，朝倉書店，1996-2。
- 10) 小林重順：配色イメージワーク，講談社，1995-7。
- 11) 佐々木葉・立川貴重：中小橋梁の景観設計におけるコンセプトとデザインに関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.585-595，1992-3。
- 12) 近藤恒夫：景観色彩学—色彩情報処理のノウハウ—，ダヴィット社，1969-8。
- 13) 片脇清士：橋と塗装—橋を美しくまもる—，山海堂，1996-6。
- 14) 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。
- 15) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，1989-10。
- 16) 南将行・渡邊英一・古田均・杉浦邦征・宇都宮智昭：ファジィ推論を用いた遺伝的アルゴリズムによる構造景観設計支援システムに関する研究，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，I-381，pp.760-761，1994-9。
- 17) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック，東京大学出版会，1980-2。
- 18) 森一之・築山誠・福田豊生：免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化，電気学会論文誌，Vol.117-C，No.5，pp.593-598，1997-5。
- 19) 中村秀明・宮本文穂・松本剛：改良型免疫アルゴリズムによる多峰性関数の最大値の探索，第6回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，

pp.97-102, 1999-12.

- 20) 中村秀明・宮本文穂・河村圭・鬼丸浩幸：遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる橋梁維持管理計画最適化の検証，構造工学論文集，土木

学会，Vol.47A，pp.201-210，2001-3.

- 21) JIS色票委員会：JIS Z 8721 準拠 標準色票，日本規格協会，1976.

(2001年9月14日受付)