

新設および既設桁橋の景観設計支援システムの構築

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORTING SYSTEM
FOR AESTHETIC DESIGN OF NEW AND EXISTING GIRDER BRIDGES

古田 均*・中村幸一郎**・堂垣正博***

Hitoshi FURUTA, Kouichirou NAKAMURA, and Masahiro DOGAKI

- * 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)
 ** 学士(工学) 建設省近畿地方建設局 大滝ダム工事事務所工務課
 (〒639-3102 奈良県吉野郡吉野町大字河原屋 128-1)
 *** 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)

This paper is to demonstrate the development of a decision supporting system of the aesthetic design of new and existing girder type bridges with small and medium spans. In the assessment of aesthetics of landscape, this system uses the theory of Moon-Spencer's color harmony, contradistinction of adjective, and fuzzy deduction. In a method for optimizing an aesthetic suggestion of girder bridges, Genetic Algorithm (GA) is applied. It is developed with the method, based on neutral mutation hypothesis and paretic-optimal solution. This study shows the availability of developed decision supporting system for designing virtual and existing girder bridges aesthetically, and considers the color harmony of girder bridges for the peripheral environment in all seasons mainly.

Key words: aesthetic design, paretic-optimal solution, fuzzy deduction, color harmony theory, girder bridges, genetic algorithm.

1. まえがき

戦後の高度経済成長期に定着した大量生産・大量消費型の経済活動は、国民の生活水準を著しく向上させた。当時、人々のものに対する思いは、機能性・安全性・経済性など、概して画一的なものであった。しかし、安定成長期を迎えた今日、人々は歴史性・話題性・快適性・美観など多様な要求をものに期待するようになった。この傾向は、土木の分野でも同様で、人々は豊かな社会にふさわしい質の高い社会基盤施設を求めている。

ところで、構造物の設計法は、現在、仕様設計法から性能設計法へと変革する過程にあり、設計の自由度が広がりがつつある。このことは、設計技術者により高い技術と知識を要求することになる。設計技術者に要求される事項は多様化するため、あらゆる面で設計技術者を支援できる設計システムがあれば重宝である。そのためにも、景観という曖昧な要素を含む設計をスムーズに解決するために、景観設計支援システムを構築することは、非常に有益であると考えられる。

景観設計支援システムの構築には、橋梁景観の定量的な評価と景観案の合理的な探索法が重要である。まず初めに、つぎのような景観評価に関する研究がある。色彩評価に関するものとして、ムーン・スペンサーの色彩

調和論を用いた近田ら¹⁾の研究、絵画を題材にした太田ら²⁾の研究がある。また、形状評価に関するものとして、視覚的な力の流れを景観評価に取り入れた杉山ら³⁾と阿部ら⁴⁾の研究がある。保田ら⁵⁾は橋梁景観を感性工学手法で橋梁のデザイン要素と人々の感性との関係を合理的に結びつける方法を検討し、それを景観設計へ応用した。

つぎに、景観案の探索手法に関する研究には、つぎのようなものがある。すなわち、古田ら^{6)・8)}は遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)とニューラルネットワーク(Neural Network: NN)を景観案の探索手法に適用し、その有効性を検討した。

このように従来から橋梁の景観設計支援システムに関する研究がなされているが、いずれの研究も主として新設される橋梁を対象にしている。本研究では、システムの汎用性を高めるため、既設の橋梁にも適用できるような景観設計支援システムを構築する。対象とする橋梁は、わが国でその大半を占め、一人の橋梁設計技術者で設計する機会の多い中小橋梁とする。すなわち、スパンが50m程度の3径間連続の桁橋で、その主桁と高欄の色彩、ならびに、主桁、橋脚、高欄の形状に注目する。最適な景観案を探索するため、①橋梁と周辺環境の色彩調和の評価にムーン・スペンサーの色彩調和論、②橋梁景観の評価に形容詞対、③景観案のコンセプトに対する満

足度の定量化にファジィ推論，を用いる．最適化手法には，「中立進化説に基づく遺伝的アルゴリズム」と「パレート保存戦略」を用いる．

2. 設計対象

2.1 鈑桁橋を構成する主桁と高欄の色彩⁹⁾

すべての有彩色は，色相とトーンで表現される．ここに，色相とトーンとは，つぎのようである．

- ①色相：赤(R)，青(B)，緑(G)といった色味のことで，10色相環がJISで規格されている．
- ②トーン：色の明度と彩度を表している．明度とは明るさのことで，これが最も明るい色彩は白色，最も暗い色彩は黒色である．また，彩度は色の鮮やかさを示す．本支援システムでは，橋梁に使用されと思われる色彩のほか，色相とトーンが様に分布するように，64色を選定し景観構成アイテムとした．表-1 に使用する色彩の名称とマンセル値を示す．

2.2 鈑桁橋を構成する主桁，橋脚，高欄の形状^{10),11)}

ものの形は，色彩と同様，人のものに抱くイメージに深く関わり，景観上，重要な役割を担う．そこで，システムを構築するにあたり，主桁，高欄，橋脚の形状をつぎのように仮定し，景観構成アイテムとする．

主桁は，図-1に示すような等断面や変断面の形状からなるものとした．ただし，変断面桁の場合，4種類の

表-1 システムに使用する 64 種類の色彩

慣用色名	マンセル値	慣用色名	マンセル値
ローズ	1R5/14	エメラルドグリーン	4G6/8
ピンク	2.5R7/7	深緑	5G3/7
紅色	3R4/14	ビリジアン	8G4/6
えんじ	4R4/11	青竹色	2.5BG5/6.5
蘇芳(すおう)	4R4/7	ピーコックグリーン	7.5BG4.5/9
マルーン	5R2.5/6	ピーコックブルー	10BG4/8.5
朱色	6R5.5/14	あさぎ	2.5B5/8
サーモンピンク	8R7.5/7.5	ターコイズブルー	5B6/8
あずき色	8R4.5/4.5	マリンプール	5B3/7
赤さび色	9R3.5/8.5	水色	6B8/4
樺色	10R4.5/11	空色	9B7.5/5.5
チョコレート色	10R2.5/2.5	セルリアンブルー	9B4.5/9
ピーチ	3YR8/3.5	ベビーブルー	10B7.5/3
肌色	5YR8/3.5	藍色	2PB3/5
だいだい	5YR6.5/13	コバルトブルー	3PB4/10
茶色	5YR3.5/14	紺青	5PB3/4
みかん色	6YR6.5/13	紺	6PB2.5/4
褐色	6YR3/7	群青色	7.5PB3.5/11
琥珀色	8YR5.5/6.5	桔梗色	9PB3.5/13
小麦色	8YR7/6	藤色	10PB6.5/6.5
山吹色	10YR7.5/13	すみれ色	2.5P4/11
セピア	10YR2.5/2	江戸紫	3P3.5/7
ひまわり色	2Y8/14	ライラック	6P7/6
アイボリー	2.5Y8.5/1.5	紫紺	8P2/4
クロームイエロー	3Y8/12	牡丹色	3RP5/14
たんぽぽ色	5Y8/14	つつじ色	7RP5/13
レモン色	8Y8/12	桜色	10RP9/2.5
うぐいす色	1GY4.5/3.5	ワインレッド	10RP3/9
若草色	3GY7/10	スノーホワイト	N9.5
草色	3GY7/10	シルバーグレイ	N6.5
松葉色	7.5GY5/4	鼠色	N5.5
白銀(びやくろく)	2.5G8.5/2.5	墨	N2

ハンチを仮定したため，5形状の主桁が景観構成アイテムとなる．

橋脚は，図-2に示す16種の形状を景観構成アイテムとする．なお，デザイナーによる斬新な形状は省いた．

高欄は，採用されることが多いと思われる図-3のような5種類の形状を景観構成アイテムとする．

3. 景観設計支援システム

3.1 システムの概要

本支援システムでは，景観設計に携わる意志決定者が，

(1)新設橋を対象とする場合には

- ①計画する橋梁の路面高と路面幅
- ②周辺環境と橋梁の面積
- ③景観設計のコンセプト

(2)既設橋を対象とする場合には

- ①既設橋の主桁と高欄の色彩，および，主桁・橋

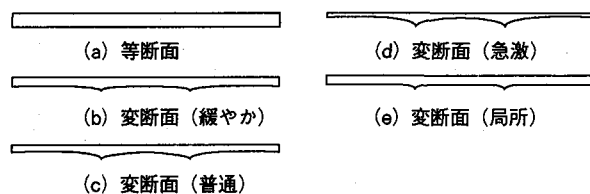


図-1 主桁の形状

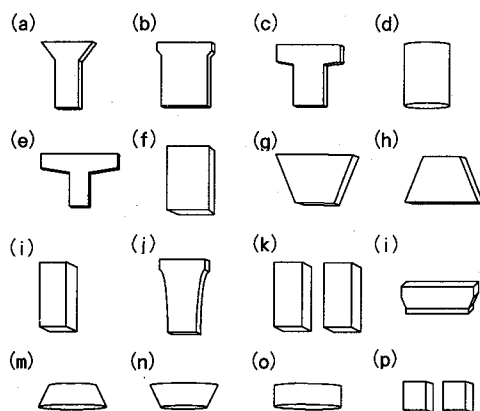


図-2 橋脚の形状

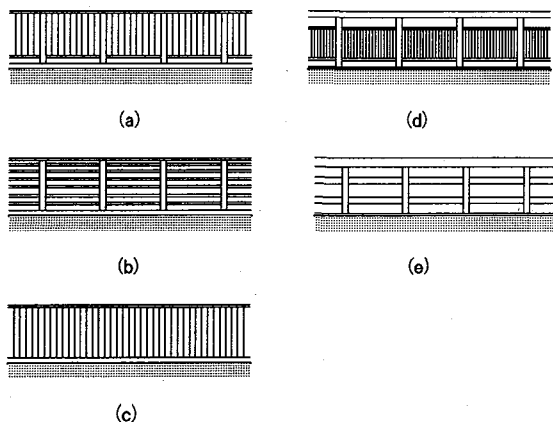


図-3 高欄の形状

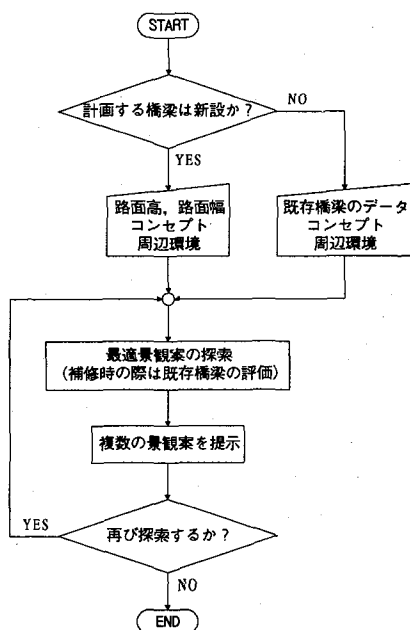


図-4 本支援システムのフロー

脚・高欄の形状

②周辺環境と橋梁の面積

③景観設計のコンセプト

をそれぞれ入力するようにした。

つぎに、これらの入力データをもとに遺伝的アルゴリズムで最適景観案が自動的に探索される。その結果、複数の異なった景観案がシステムを利用するユーザーに提示され、その中からユーザーの望む景観設計案がスムーズに選択される。なお、ユーザーがシステムを容易に利用できるように、対話型の入力方式を採用した。システムの動作環境は、汎用性を考え、パソコン上のWin98とした。したがって、ユーザーがシステムファイルを開けば、自動的にDOS画面が起動し、その画面に表示される事項に逐次答えながら必要なパラメータ値を入力するようにした。図-4に本支援システムの流れを示す。

3.2 コンセプトと周辺環境の設定¹²⁾

橋梁の景観設計では、一般に、景観設計用のコンセプトが設定され、それを満足するように設計される。こ

表-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	風格のある

表-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	10B5/1.5
曇り空	N-7
白雲	N-9
山(緑山)	10GY5/4
山(紅葉)	7.5R4/9
川, 海	10G5/1.5
市街(ビル)	10YR7/1
市街(住宅)	5Y8/1
岩, 土	10YR5.5/2
枝幹	7.5YR4/9
枯葉	10YR6/4

こでは、橋梁の景観設計に関する文献からコンセプトを抽出し、一般によく用いられる代表的なコンセプトを6つだけ選び(表-2)、支援システム内に準備した。これらの中から景観設計を行うたびに望まれる景観コンセプトに近いものを選択するようにした。

つぎに、景観設計に求められる要素の一つに、橋梁の周辺環境との調和がある。本支援システムでは、橋梁の周辺環境として表-3に示す11ケースを考え、その中から計画する橋梁の周辺環境に合ったものを選ぶようにした。また、同表に示すように、周辺環境の色彩をマンセル値で定量化した。後述するが、景観案の周辺環境との調和の評価は、配色の面積比を考慮したムーン・スペンサーの色彩調和論で行った。その際、周辺環境のマンセル値を用いた。

3.3 周辺環境との色彩調和^{1), 13)}

つぎに、橋梁と周辺環境の調和を評価する方法、すなわち、ムーン・スペンサーの色彩調和論について述べる。

(1) 色彩の調和と不調和

調和と不調和には、マンセル表色系上で説明されるつぎの種類がある。すなわち、調和には、

①同一調和—同じ色の配色

②類似調和—似た色の配色

③対照調和—反対色の配色

があり、不調和には、

①第一不明瞭—ごく似た色の不調和

②第二不明瞭—やや違った色の不調和

③眩輝(glare)—極端な反対色の不調和

がある。

(2) 美的価値の算出

古代のギリシャ人には「美とは、多様性の統一を表すことにある」という考えがあったと言われる。バークホフ(Birkhoff, G. D.)は、「複雑さのなかの秩序性(order in complexity)」という考えのもとに、美度 M (aesthetic measure) が

$$M = \frac{O}{C_x} \quad (1)$$

で求められるとした。ここに、 O は秩序(order), C_x は複雑さ(complexity)である。これが基準値、すなわち、0.5以上であれば、周辺と調和した配色とみなされる。

秩序 O には、配色間における色彩の色相、明度、彩度を考慮に入れ、表-4のように美的係数(aesthetic factor)を定めている¹³⁾。

つぎに、配色の面積比を考慮した色彩調和論について説明する。たとえば、ある色彩の配色面積を A とすれば、

表-4 美的係数

	同一	第一不明瞭	類似	第二不明瞭	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	-	-	-	-

そのスカラーモーメントは

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

で与えられる。ここに、 C 、 V はそれぞれマンセルの彩度と明度の値である。

面積の効果を考慮して美度を求める場合、色対のスカラーモーメントが

- ①1:1のとき : 1.0
- ②1:2(1:1/2)のとき : 0.5
- ③1:3(1:1/3)のとき : 0.25
- ④それ以外のとき : 0.0

の値が秩序0に加えられる。ただし、スカラーモーメントがこれらの値にない場合（この場合が大多数である）には、内挿して求められる値を用いた。

また、複雑さ C_x は

$$C_x = (\text{色数}) + (\text{色相差のある色対の数}) \\ + (\text{明度差のある色対の数}) \\ + (\text{彩度差のある色対の数}) \quad (3)$$

で与えられる。

入力された周辺環境と景観案である主桁・高欄の色彩がどの程度調和しているかをこの方法で評価する。その結果、この評価値が基準値以上のものを最終景観案とする。本支援システムでは、いずれの視点場でも橋梁の景観設計が行える。ただし、周囲の面積を考慮しているため、橋梁全体が確認でき、かつ背景が広すぎないような視点場とするのがよい。

3.4 景観構成アイテムの評価^{6),7)}

橋梁の景観案は、景観構成アイテム、すなわち、主桁と高欄の色彩、主桁・橋脚・高欄の形状の組合せで表現される。それゆえ、景観構成アイテムの組合せが多く存在し、その中から優位な景観案を探し出すことは並大抵でない。景観案の優劣を判定する評価ルールを、橋梁景観が景観構成アイテムごとに定量的に評価できるように、作成し、そのアイテムの景観性を形容詞対で評価し、得点づけした。ここに、得点づけは橋梁設計の専門家の意見を参考に行った。色彩と形状が人に及ぼす景観イメージを推定するため、いくつかの形容詞対と景観構成アイテムを結びつけて評価した。桁橋の景観に係る形容詞対を表-5に示す。

表-5 桁橋の景観をイメージする形容詞対

1	派手な ⇔ 地味な	10	新鮮な ⇔ 陳腐な
2	明るい ⇔ 暗い	11	動的な ⇔ 静的な
3	暖かい ⇔ 冷たい	12	調和 ⇔ 不調和
4	華やか ⇔ 渋い	13	単純な ⇔ 複雑な
5	重厚な ⇔ 軽快な	14	力強い ⇔ 弱い
6	安定な ⇔ 不安定な	15	固い ⇔ 柔らかい
7	刺激的な ⇔ 温和的な	16	統一感がある ⇔ 統一感のない
8	ソフトな ⇔ ハードな	17	開放感 ⇔ 圧迫感
9	現代的な ⇔ 古典的な	18	連続感がある ⇔ 連続感がない

(1) 色彩の評価

色彩は、人がものに抱くイメージに大いに影響する。これが定量的に評価できれば、景観設計に対して有効である。本支援システムでは、先に示した18個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結びつけ、景観案を評価した。

(2) 形状の評価

桁橋では、橋の路面高と路面幅がその景観に大いに影響する。また、高欄の形状は、歩行者の美意識に著しく影響する。本支援システムでは、形状からくるイメージを形容詞対で評価した。

3.5 ファジィ推論¹⁴⁾

3.4で形容詞対により景観構成アイテムを評価した。これらの評価を景観設計のコンセプトに結びつけ、景観案がどの程度コンセプトを満足しているかを定量的に評価する必要がある。ここでは、景観のような曖昧な概念の定量化に適しているファジィ推論を用いる。

ファジィ推論とは、「もし～なら、～である」という推論にファジィ変数を用いたものである。ファジィ推論は、曖昧な情報と曖昧な情報のソフトマッチングから、曖昧ではあるが、きわめて妥当な結論が導かれるという特徴を有している。

本支援システムでは、ファジィ推論のなかでも演算が簡単で、推論結果が良好な簡略化ファジィ推論を用いる。簡略化ファジィ推論は、つぎのように表される。

$$\text{IF } x=A_i \text{ THEN } y=C_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

ここに、 A_i はファジィ変数、 C_i は実数値、 n は任意の整数である。ファジィ変数は図-5に示すようなメンバシップ関数で与えられる。入力値を X_i とすると、適合度は ϕ_i となり、満足度 f_i は

$$f_i = C_i \phi_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

によって求められる。

たとえば、「明るい⇔暗い」に対する形容詞対の得点を用い、コンセプト『シンボル性』に関するファジィ推論ルールを図-6で説明する。仮に、形容詞対「明るい⇔

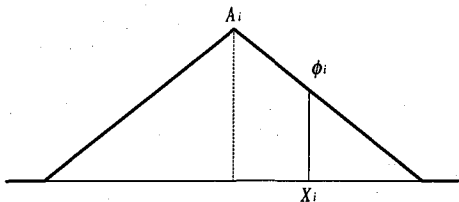


図-5 メンバシップ関数

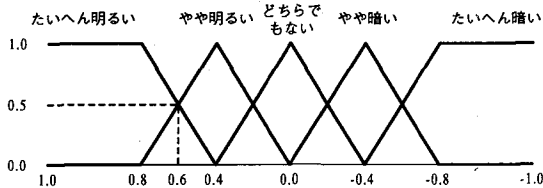


図-6 ファジィ推論（明るい⇔暗い）

暗い」で主桁の明度の得点が+0.6であれば、「たいへん明るい」に対する適合度は図-6より $\phi_i=0.5$ である。また、「シンボル性」に関するファジィ推論ルールに関して、「たいへん明るい」に対する重みを $C_i=2.0$ とすると、適応度 f_i が

$$0.5 \times 2.0 = 1.0$$

と求められる。同様に、「やや明るい」に対する適合度は0.5で、その重みを+1.0とすると、適応度は

$$0.5 \times 1.0 = 0.5$$

として求められる。その結果、これら2得点の合計

$$1.0 + 0.5 = 1.5$$

が「明るい⇔暗い」の「シンボル性」に対する適応度となる。

以上のように、個々のコンセプトに対する景観案の適応度 F_i は

$$F_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^5 C_{k,m} \phi_{k,m} \quad i=1,2,3,\cdots,n \tag{6}$$

から求められる。ここに、

m ：メンバシップ関数の数

n ：形容詞対の数

$C_{k,m}$ ：あらかじめ設定する実数値

$\phi_{k,m}$ ：適合度

である。ちなみに、適応度が高いほどコンセプトに対する満足度が高い。なお、本支援システムでは、最終世代において、個々の適応度を最終世代までの適応度の最大値で除し、-1.0から1.0の間に正規化した。

3.6 遺伝的アルゴリズムの適用^{(15)~(18)}

(1) 遺伝子のコーディング

「中立進化説に基づく遺伝的アルゴリズム」の適用にあたり、遺伝子をつぎのようにコーディングした。

$$strings = \{P_i \mid i=1,\cdots,m\} \tag{7}$$

$$P_i = \{p_j \mid j=1,\cdots,n\} \tag{8}$$

ここに、

P ：遺伝子の部分集合

v ：遺伝子のビット数

である。これを図示すれば、図-7のようになる。ここに、列は遺伝子の部分集合である「オペロン」と定義した。また、1行目は景観構成アイテムに対応する活性値、そ

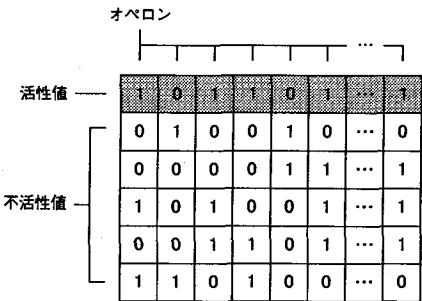


図-7 遺伝子のコーディング

れ以降の行は不活性値である。

(2) 遺伝子列と景観構成アイテムの対応

景観構成アイテムとGAの遺伝子列との対応は、以下のとおりである。主桁と高欄に用いる色彩をそれぞれ64種、橋脚の形状を16種、主桁の形状を5種、高欄の形状を5種とした。そのため、これら90種の景観構成アイテムを遺伝子列で表現する。本支援システムでは、遺伝子列を「0」と「1」の2進で表現したため、遺伝子長は、図-8のように、22ビットとなる。

本来、遺伝子の並びのパターン数とそれに対応する景観案のパターン数は同数であることが望ましい。本支援システムの景観構成アイテムの組合せ総数は1,638,400 (=64×64×16×5×5)である。一方、遺伝子列が図-8に示すように22桁の2進数からなるため、その数は4,194,304である。ここでは、主桁と高欄の形状に遺伝子列を重複させ、景観構成アイテムと対応させた。

たとえば、主桁の場合、5種類の形状を景観要素とするため、図-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。同様に、高欄の形状も2進数で表した。

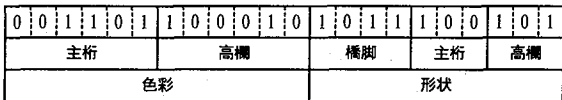


図-8 景観構成アイテムと遺伝子列

(3) 遺伝子操作

遺伝子操作には、図-9に示す交叉と突然変異を用いる。これらの操作を3.6(1)で定義したすべての遺伝子 v_i に施す。交叉には一点交叉法を用いる。交叉位置は、22桁からなる遺伝子列の6と7、12と13、16と17、19と20の間とした。これは、図-8に示すように、遺伝子列1～6が主桁の色彩、7～12が高欄の色彩、13～16が橋脚の形状、17～19が主桁の形状、20～22が高欄の形状に対応するからである。その結果、遺伝子列がランダムな位置で切断されず、ビルディングブロックの破壊が防止された。突然変異には一点突然変異を用いる。これは、生起確率で

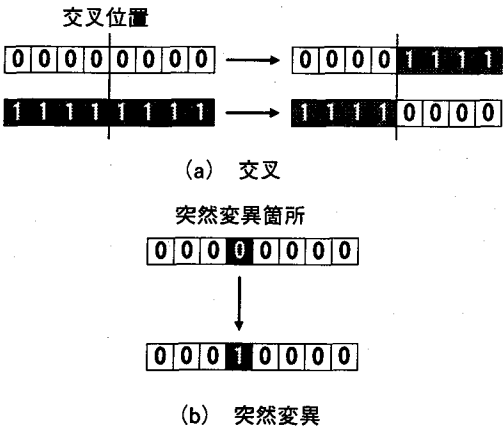


図-9 交叉と突然変異の遺伝子操作

変異箇所を決め、そのビットが「0」なら「1」に、「1」なら「0」に置き換える操作である。これにより個体群が局所解に陥ることを防ぐ。

さらに、個体群に多様性を持たせるため、重複、欠失、逆位の操作を遺伝子の部分集合であるオペロン（遺伝子の縦列、図-7）に対して以下のように行う。すなわち、

$$\text{重複: } \{v_1 = v'_1 = v'_2, v_2 = v'_3, \dots, v_{n-1} = v'_n\} \quad (9)$$

$$\text{欠失: } \{v_2 = v'_1, v_3 = v'_2, \dots, v_n = v'_{n-1}\} \quad (10)$$

$$\text{逆位: } \{ \exists k \neq 1, v_k = v'_i, v_i = v'_k \} \quad (11)$$

である。ただし、

v : 変異前の遺伝子

v' : 変異後の遺伝子

である。これらは、遺伝子の部分集合 P_i に対して操作する。欠失の操作は、下端に「0」か「1」をランダムに挿入する方法である。しかし、世代が進むに連れ、 P_i 内のビット数が同じにならないように、

$$v'_n = 1 \quad \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} v'_i}{n-1} < 0.5 \right),$$

$$= 0 \quad (\text{otherwise}) \quad (12)$$

を下端に挿入する。

(4) パレート保存戦略

本支援システムでは、選択と淘汰の操作にパレート保存戦略を用いる。まず、選択にあたる「パレート最適個体の生成」を行うために、パレート最適解の概念に基づきパレート最適個体をつぎのように定義した。すなわち、

「他の個体より少なくとも1つの目的関数に対する評価値が高ければ、その個体はパレート最適個体である。」

この条件によって生成されたパレート最適個体の集合を「パレート最適解集合」と呼び、これを次世代に強制的に残す。

つぎに、淘汰にあたる「並列選択」と「シェアリング」の操作を行う。すなわち、パレート最適個体の数が個体の総数より少なければ「並列選択」が、逆に多ければ「シェアリング」が行われる。これらの操作で個体の総数と次世代に残る個体数を同数にすることができる。

a) 並列選択

パレート最適個体の数が交叉前の個体の総数より少なければ、並列選択で次世代に残る個体数を交叉前のそれと等しくなるように増殖させる。並列選択とは、ある単一の適応度が高い個体を順次、つぎの世代に残す手法で、どの目的関数に対する適応度を評価基準にするかは、乱数で決定する。

b) シェアリング

パレート最適個体の数が交叉前の個体の総数より多ければ、シェアリングでつぎの世代に残る個体数を交叉前のそれと等しくなるように減少させる。シェアリングとは、個体のニッチ数（niche：生態的地位）を求め、そ

のニッチ数の小さな個体から順に保存する手法である。ここに、ニッチ数とは、ある個体の近傍における個体の混雑度を表す指標である。ニッチ数が多いほど個体の近傍にはほかの個体が多く存在していることを示す。したがって、ニッチ数のより小さな個体を保存することで離散的でかつ多様な解を保存することができる。

ここでは、 k 番目のコンセプトに対する個体 i の適応度 F_{ki} とほかの個体 j の適応度 F_{kj} の差 d_{ij} を用い、個体 i のニッチ数 n_i を

$$n_i = \sum_{j=1}^M S(d_{ij}) \quad i=1,2,\dots,M \quad (13)$$

で算出する。ここに、

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

$$= 0 \quad (d_{ij} \geq D) \quad (14)$$

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^{n_c} |f_{pi} - f_{pj}| \quad j=1,2,3,\dots,M \quad (15)$$

n_c : コンセプトの数

M : パレート最適個体の数

$S(d_{ij})$: d_{ij} に関する単調減少関数

D : ニッチの大きさを示すパラメータ

である。

パレート保存戦略の流れを図-10に示す。

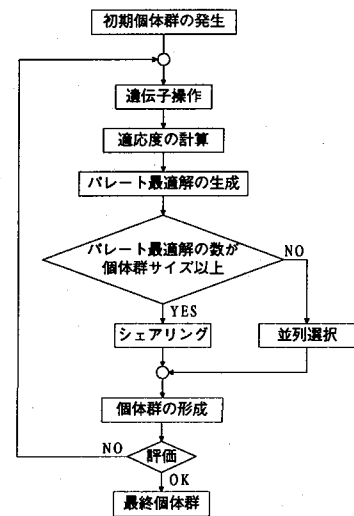


図-10 パレート保存戦略の流れ

4. 景観設計支援システムの桁橋への適用

4.1 仮想の桁橋を対象とした適用例

(1) 初期設定

仮想の桁橋を対象に、本支援システムの適用性を検討する。ただし、GAに固有なパラメータ、すなわち、個体数を20、交叉率を0.6、突然変異率を0.05、重複・欠失・逆位の変異率を0.3、シェアリングに必要なニッチ数を0.2、世代交代数の最大値を1,000とし、収束は同じパレート最適解集合が100世代続いた時点とした。また、計画する桁橋は、路面高が「高い」、路面幅が「広い」

とし、橋梁景観のコンセプトに『シンボル性』と『親しみやすさ』を選んだ。橋梁周辺の風景とそれが占める面積の割合は、主桁の面積を1.0とした場合に対し、晴天の部分3.0、緑山の部分が5.0、岩・土の部分が2.0である。これらの面積比は橋梁の美度値を求めるのに用いられる。

(2) 最適景観案の提示

4.1(1)の条件のもとにシステムを実行した。その結果、図-10に示すパレート最適解集合、すなわち、最適景観案を得た。ここに、縦軸と横軸はそれぞれ『親しみやすさ』と『シンボル性』に対する適応度である。同図より明らかなように、橋梁に『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』に劣るそれが得られる。これは、2つのコンセプト間にトレード・オフの関係があることを意味している。このように、パレート最適解が一様に分布しておれば、意志決定者はこのようなパレート最適解集合のなかから最終の景観案をスムーズに決定できる。また、解が多様に分布しているので、多くの異なった景観案を参考に設計できる。

パレート最適解の分布は、初期の世代では、それほど多様でない。しかし、世代が進むにつれて、パレート最適解集合は多様になる。これは、重複、欠失、逆位の遺伝子操作によって遺伝子の部分集合内の $v_2 - v_n$ 領域に現世の遺伝子 v_1 が伝搬されるからである。それゆえ、個体が過去に体験した有意な探索空間、または、その近傍へ転移することになる。

最終世代の個体群のなかから、例として、図-11に示した①、②、③の景観案を表-6に示す。同表から明らかなように、親しみやすさをコンセプトにする景観案は①で、主桁と高欄の色は赤みがかった色合いである。一方、

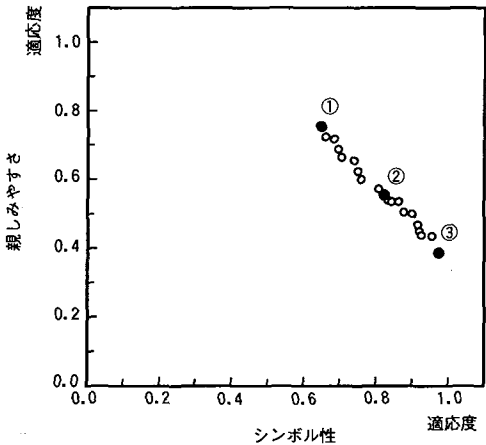


図-11 パレート最適解の分布

表-6 『シンボル性』と『親しみやすさ』をコンセプトとした場合の景観案

景観案	色彩		形状		
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚
①	桜色	だいだい	c	d	a
②	山吹色	若草色	c	d	a
③	レモン色	山吹色	c	d	b

シンボル性を求めた景観案は黄色みがかった色彩をしており、コンセプトの特徴がよく表れている。

4.2 コンセプトによる景観案の相違

提示される景観案は、景観設計コンセプトによって大いに異なるものと推察される。ここでは、複数のコンセプトに対する景観案を示す。つぎの(1)と(2)では、最終世代でのパレート最適解の分布を示す。ただし、景観設計のコンセプト以外は、4.1(1)で決定したパラメータとする。

(1) コンセプトに『周辺との調和』と『信頼感』を選択した場合

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、図-12を得た。4.1(2)と同様、2つのコンセプトのうち、一方のコンセプトを十分に満足する景観案は、もう一方のコンセプトの適応度が低い。図-12に示すパレート最適解のうち、①、②、③の景観案を表-7に示す。

(2) コンセプト『信頼感』と『風格のある』を選択した場合

4.1(2)と4.2(1)では、コンセプト間でトレード・オフの関係にある景観案を探索した。一方、比較的類似なコンセプトである『信頼感』と『風格のある』に対し、景観案を探索したところ、図-13を得た。同図より明らかなように、コンセプト間のトレード・オフの関係はあまり認められない。図-13に示すパレート最適解のうち、①、②、③の景観案を表-8に示す。同表より明らかなように、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2つのコンセプトを十分に満足しているものと思われる。

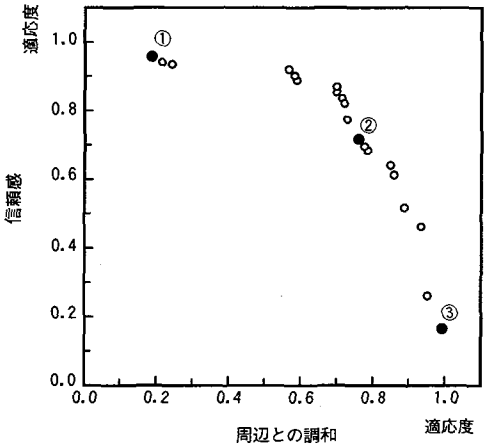


図-12 パレート最適解の分布

表-7 『周辺との調和』と『信頼感』をコンセプトとした場合の景観案

景観案	色彩		形状		
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚
①	赤さび色	チョコレート色	a	d	c
②	うぐいす色	チョコレート色	a	b	b
③	肌色	シルバーグレイ	c	b	j

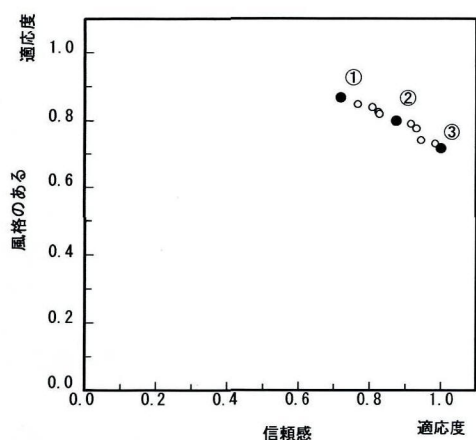


図-13 パレート最適解の分布

表-8 『信頼感』と『風格のある』をコンセプトとした場合の景観案

景観案	色彩		形状		
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚
①	草色	紫紺	a	b	b
②	草色	セピア	a	b	c
③	赤さび色	セピア	a	d	c

(3) コンセプト『周辺との調和』、『シンボル性』、『信頼感』を選択した場合

コンセプトに『周辺との調和』、『シンボル性』、『信頼感』を選び、最終世代におけるパレート最適解を探索したところ、20個の景観案が求められた。そのなかから、それぞれのコンセプトに対する適応度が最大となる景観案を表-9に示す。すなわち、景観案①は『周辺との調和』を、景観案②は『シンボル性』を、景観案③は『信頼感』を最も満足する解である。

同表より明らかなように、あるコンセプトを満足する解を求めれば、他のコンセプトに劣る景観案が求められる。しかし、どの景観案もコンセプトに対する適応度を著しく悪化せずに、トレード・オフの関係が認められた。

(4) すべてのコンセプトを選択した場合

最後に、本支援システムに準備したすべてのコンセプトを選択した場合の結果について4.2(3)と同様に考察する。それぞれのコンセプトを最も満足するように求められた景観案とその適応度を表-10に示す。

同表から明らかなように、『シンボル性』や『個性的』を求めた景観案は、コンセプト『信頼感』と『風格のある』を満足しない解となる。それ以外の解は、4.2(3)と同様、いずれのコンセプトもその適応度をあまり悪化させずにそれぞれのコンセプトを満足している。

表-9 『周辺との調和』、『シンボル性』、『信頼感』をコンセプトとした場合の景観案と適応度

(a) 景観案					
景観案	色彩		形状		
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚
①	ベビーブルー	あざき色	a	b	k
②	山吹色	セルリアンブルー	a	a	c
③	セピア	マリンブルー	a	a	c

(b) 適応度			
景観案	適応度		
	周辺との調和	シンボル性	信頼感
①	0.717	0.096	-0.042
②	0.186	0.821	0.249
③	0.202	0.464	0.752

表-10 すべてのコンセプトに対する景観案と適応度

(a) 景観案					
景観案	色彩		形状		
	主桁	高欄	主桁	高欄	橋脚
①	松葉色	うぐいす色	c	b	b
②	クロムイエロー	ローズ	a	a	a
③	だいだい	だいだい	a	b	e
④	肌色	深緑	a	a	c
⑤	桜色	うぐいす色	b	a	b
⑥	松葉色	うぐいす色	c	b	b

(b) 適応度						
景観案	適応度					
	周辺との調和	シンボル性	個性的	信頼感	親しみやすさ	風格のある
①	0.714	0.330	0.107	0.458	0.370	0.606
②	0.221	0.828	0.694	-0.027	0.346	-0.224
③	0.171	0.701	0.763	-0.310	0.057	-0.353
④	0.642	0.457	0.397	0.591	0.450	0.224
⑤	0.457	0.442	0.425	0.349	0.544	0.086
⑥	0.714	0.330	0.107	0.458	0.370	0.606

のがある』を満足しない解となる。それ以外の解は、4.2(3)と同様、いずれのコンセプトもその適応度をあまり悪化させずにそれぞれのコンセプトを満足している。

4.2の(3)と(4)の考察から明らかなように、本支援システムで用いた「パレート保存戦略」は、コンセプトが3つ以上ある場合においても有効な手法であり、かつ多様な最適解が得られる。

4.3 既設の桁橋を対象とした適用例

既設の桁橋を対象に、本支援システムを適用する。

(1) 初期設定

GA固有のパラメータは、4.1(1)と同じ値とする。既設橋に図-14に示す福島県に架かる太田橋（橋種：連続鈑桁橋、全長：154.0m）を採用した。橋梁の写真をもとに、その主桁と高欄の色彩を算出した。その結果、主桁の色彩は「ピーコックグリーン」、高欄のそれは「スノーホワイト」と判断した。既設橋の形状は、その写真をもとに、主桁は「b」、橋脚は「e」、高欄は「c」とみなした。周辺環境とその面積は、主桁の面積に対し、「晴天」で5.2、「白雲」で3.0、「緑山」で3.0、「ビル街」で1.3、「枯葉」で3.2である。ただし、この風景にはビル街に相当するものはないが、コンクリート擁壁をそれと見なした。

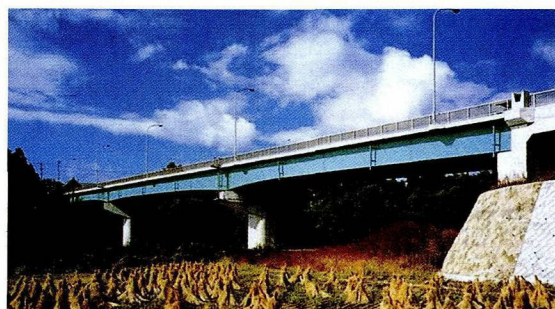


図-14 対象とした橋梁（太田橋）

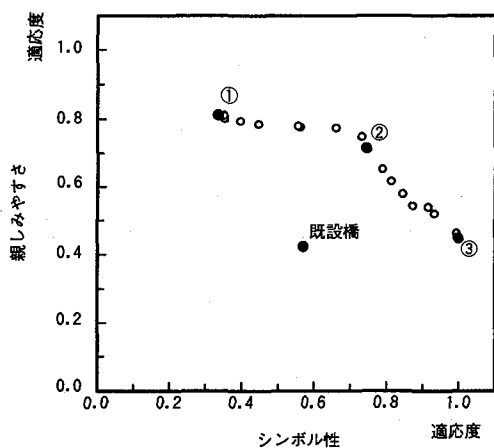


図-15 最終世代での景観案の分布

(2) 最適景観案の提示

4.3(1)の条件のもとにシステムを実行したところ、図-15のようなパレート最適解集合を得た。最終世代でのパレート最適解の数は18個であった。

つぎに、既設橋を評価したところ、表-11の結果を得た。また、同表には図-15のなかから選んだ①、②、③の景観案を示す。

既設橋の美度値は0.645で、基準値以上であった。ただし、コンセプトを満足する景観案の適応度は、既設橋のそれより劣った。『シンボル性』を求めて本支援システムで探索した景観案は、『周辺との調和』を崩さない案であることがわかった。

表-11 既設橋の評価と『シンボル性』と『親しみやすさ』をコンセプトとした場合の景観案と適応度

(a) 既設橋の評価				
パークホフ の美度値	適応度			
	シンボル性		親しみやすさ	
0.645	0.570		0.423	

(b) 景観案					
景観案	色彩		パークホフ の美度値	適応度	
	主桁	高欄		シンボル性	親しみやすさ
①	肌色	うぐいす色	0.625	0.335	0.812
②	桜色	山吹色	0.573	0.745	0.714
③	山吹色	レモン色	0.546	0.999	0.449

4.4 季節変化を考慮した橋梁と周辺環境との調和

(1) 季節変化による周辺環境の相違

橋梁の色彩が、周辺環境に与える影響は大であろう。わが国は、四季による周辺環境の変化が著しいため、いずれの季節の周辺とも調和するように設計することは、困難であろう。ここでは、本支援システムで探索した景観案が一年を通して周辺環境とどの程度調和しているかを調べる。そのため、景観設計の対象を図-14の既設橋とし、最適な景観案を探索する。ただし、コンセプトに『周辺との調和』と『シンボル性』を選択した。つぎに、季節「春・夏」、「秋」、「冬」に対して、得られた景観案のパークホフの美度値を調べる。それぞれの季節における周辺環境、そのマンセル値および面積を表-12に示す。

表-12 季節の違いによる周辺環境を構成する色彩

(a) 「春・夏」			
周辺環境	マンセル値	面積比	スカラーモーメント
晴天	10B8/1.5	5.2	125
白雲	N-9	3.0	96
緑山	10GY5/4	6.2	25
ビル街	10YR7/1	1.3	21

(b) 「秋」			
周辺環境	マンセル値	面積比	スカラーモーメント
晴天	10B7.8/2	5.2	117
白雲	N-8.8	3.0	91
緑山	10GY4.8/4	1.5	7
紅葉	7.5R4/9	1.5	18
ビル街	10YR7/1	1.3	21
枯葉	10YR6/4	3.2	29

(c) 「冬」			
周辺環境	マンセル値	面積比	スカラーモーメント
晴天	10B7.5/2.5	5.2	105
白雲	N-8.5	3.0	84
緑山	10GY4.5/4	1.5	8
ビル街	10YR7/1	1.3	21
枯葉	10YR6/4	4.7	42

表-13 季節の違いによる景観案とその評価

	色彩		パークホフの美度値			
	主桁	高欄	春・夏	秋	冬	
既設橋	ビコックグリーン	スノーホワイト	0.690	0.675	0.595	
①	ベビーブルー	ベビーブルー	0.531	0.724	0.662	
②	ベビーブルー	水色	0.448	0.618	0.470	
③	山吹色(うぐいす)	ベビーブルー	0.419	0.627	0.529	
④	桜色	レモン色	0.624	0.636	0.539	
⑤	クロムイエロー	山吹色	0.467	0.577	0.437	

ただし、「春・夏」の季節は「枯葉」がない、「秋」の季節は「緑山」の半分が「紅葉」、「冬」の季節は「緑山」の半分が「枯葉」とした。

(2) 最適な景観案

4.4(1)の条件で既設橋を景観設計する。その結果、最終景観案のなかから、5つの景観案を選び、表-13に示す。すなわち、

景観案①：『周辺との調和』を追求したもの

景観案②：『周辺との調和』にやや重きをおいたもの

景観案③：選択したコンセプトに対する満足度の中間のもの

景観案④：『シンボル性』にやや重きをおいたもの

景観案⑤：『シンボル性』を追求したもの

である。

同表より明らかなように、既設橋の美度値は、一年を通して、周辺と調和している。しかし、季節によって美度値が多少ばらついている。つぎに、提示された景観案には、ある季節で周辺と調和を保っていても、他の季節では美度値が基準値以下になるものもある。しかし、景観案①と景観案④のように一年を通して周辺と調和するものもある。

(3) まとめ

橋梁と周辺環境の色彩調和を季節ごとにパークホフの

美度で評価したところ、以下のことがわかった。すなわち、

①景観案は季節によってパークホフの美度値が異なる。これは、既設橋の場合も同様である。

②周辺環境とその面積の変化により、パークホフの美度は変化する。

③本支援システムでコンセプト『周辺との調和』を求めた景観案を探索すれば、一年を通して、周辺環境と調和を保つような色彩景観案が提示できる。

以上のように、橋梁と周辺環境との色彩調和を考慮する必要がある場合には、一年を通して、橋梁が周辺環境とどの程度調和しているかを把握する必要がある。

5. あとがき

本研究では、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。多数の景観案のなかから、景観設計のためのコンセプトを満足し、意志決定者に受け入れられる幾つかの最適な景観案が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、多数の景観案のなかから最適な景観案を効率よく探索するため、「中立進化説に基づく遺伝的アルゴリズム」と多目的GAの一種である「パレート保存戦略」を用いた。最適景観案の探索過程では、まず、橋梁の色彩と周辺環境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た。つぎに、景観構成アイテムと形容詞対を結びつけた客観的でかつ定量的な評価ルールを作成した。最後に、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。仮想の桁橋と既設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「中立進化説に基づく遺伝的アルゴリズム」によれば、世代が進むにつれて、解の多様性が高まり、探索時間が短縮できた。その結果、意志決定者に受け入れられる複数の景観案が探索できた。

②「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た。それゆえ、意志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、対話型システム向きで、かつ効率的である。

③既設橋に本支援システムを適用すれば、提示された景観案は、既設橋よりコンセプトに対する満足度が高かった。また、景観設計のコンセプト『シンボル性』を求めても、ムーン・スペンサーの色彩調和論に基づくパークホフの美度値は、基準値以上であった。すなわち、周辺との調和を配慮した景観案が探索された。

④橋梁と周辺との調和を考える場合、季節による色彩調和の評価値が異なるため、その色彩選定には、十分留

意する必要がある。しかし、本支援システムで提示される景観案は、コンセプト『周辺との調和』を追求したときは、どの季節においても周辺との調和を保つものであった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 杉山俊幸・深澤泰晴・辻 和政・高橋良武：サイロベクトルを用いた橋梁景観の定量的評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.35A，pp.523-532，1989-3.
- 4) 阿部哲子・石井信行・藤野陽三・阿久津正大：視覚的に力の流れを認識する橋の形に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.42A，pp.471-480，1996-3.
- 5) 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.543-551，1999-3.
- 6) 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.468-475，1999-3.
- 7) 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.
- 8) 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，土木学会，Vol.37A，pp.669-675，1991-3.
- 9) 日本規格協会編：JISハンドブック 色彩，1996-4.
- 10) 日本橋梁建設協会編：橋梁年鑑，昭和57-63年版，1982-1988.
- 11) 大野美代子：橋のデザイナーデザインを支える技術—橋の付属物—高欄を中心に，橋梁と基礎，Vol.29，No.8，pp.72-75，1995.
- 12) 近藤恒夫：景観色彩学—醜彩から美観へ—，理工図書，1986-6.
- 13) 日本色彩学会：新編色彩科学ハンドブック，東京大学出版，1980-2.
- 14) 坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用，森北出版，1989-10.
- 15) 大倉和博・上田完次：中立突然変異型GAによる騙し問題の最適化，計測自動制御学会論文集，Vol.32，No.10，pp.1461-1469，1996.

- 16) 玉置 久・森 正勝・荒木光彦：遺伝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.
- 17) 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み合わせ最適化，日本ファジィ学会誌，Vol.6，No.1，pp.177-186，1994-2.
- 18) 安居院 猛・長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，昭晃堂，1993-9.
- 19) 山本 宏：橋梁美学，森北出版，1980-11.
- 20) 橋(BRIDGE IN JAPAN)，土木学会，1993-1994.
- 21) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会・景観設計小委員会編：景観設計とコンピュータテクノロジー，1998-3.
- (平成11年9月17日受付)