

包絡分析法による橋梁景観評価

Landscape evaluation of highway bridges by data envelopment analysis

古田 均*・鳴尾友紀子**・田中紀昌***・堂垣正博****

Hitoshi FURUTA, Yukiko NARUO, Kisho TANAKA, 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)
 ** 修士(工学) (株)サノヤス・ヒシノ明昌 (〒530-6591 大阪市北区中之島 3-6-32)
 元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学生
 *** 学士(工学) 元関西大学工学部土木工学科学生
 **** 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)

This paper is to demonstrate the development of a decision supporting system of the aesthetic design of girder type bridges with small and medium span. In the assessment of aesthetics of landscape with bridge, this system uses the theory of Moon-Spencer's color harmony, calculation of Birkhoff's aesthetic measure, contradistinction of adjective, and fuzzy deduction. In a method for optimizing an aesthetic suggestion of girder bridges, Genetic Algorithm (GA) is applied. Furthermore, Data Envelopment Analysis (DEA) estimates the superiority of the optimal aesthetic suggestion. It helps to carry out an aesthetic design more smoothly. The present paper shows the availability of decision-supporting system developed for designing girder-type highway bridges aesthetically.

Key Words: aesthetic design, data envelopment analysis (DEA), Genetic Algorithm (GA), fuzzy deduction, color harmony theory, aesthetic measure, girder bridges

キーワード：景観設計，桁橋，包絡分析法，組合せ最適化問題，GA，ファジィ，景観設計支援システム

1. まえがき

人々は昔からものの美しさに関心を持っている。土木構造物である橋梁にも、その美しさが求められてきた。現在、名橋と呼ばれ、市民に親しまれている橋梁の多くは戦前に造られたものが多い。戦後、わが国では、高度経済成長を支えるため、機能本位で画一的な橋梁が多く建設された。その結果、戦後から奇跡的な経済成長を成し遂げたのとひきかえに、次々と街の風情を失っていった。経済が安定成長期になるにつれて、人々が橋梁に対して要求する価値に変化がみられ、機能性・経済性・安全性などといった性能に加えて、歴史性・快適性・話題性・美観などの多様な価値が求められるようになった。

構造物の設計法は、今日、仕様設計法から性能設計法へと変わろうとしている。具体的な材料や寸法などを指定する仕様規定から、新材料や新技術の利用が促進できる性能を基盤とした設計体系へと移りつつある。このことは、設計の自由度を高めることを意味しており、技術者にはより高い技術と知識が要求され、景観の知識も必要になる。しかし、景観設計は感性という曖昧な要素を多分に含んでおり、設計者の独善的なものになりかねない。そこで、多様な感性をできるだけ定量化し、橋梁と周辺環境の調和にも配慮した景観設計が支援できるシステムを構築することは、景観設計に含まれる種々の問

題を解決することができ、大変有用である。

ここでは、曖昧な要素を多分に含む景観設計をスムーズに行うため、桁橋を対象とした景観設計支援システムを構築する。桁橋を構成する要素として、5つの景観構成アイテムを考え、それらの組合せからなる莫大な数の景観案を作成する。最適な景観案を探索する組合せ最適化手法に遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithm: GA) を採用する。景観案の評価過程では、16種類の形容詞対を用いた評価ルールによって景観構成アイテムのイメージを定量化し、ファジィ推論ルールによって形容詞対と景観コンセプトを結びつける。また、橋梁とその周辺環境との色彩調和を評価にムーン・スペンサーの色彩調和論とパークホフの美度計算を用いる。

GAによって選び出された複数の準最適な景観案を包絡分析法 (Data Envelopment Analysis: DEA) で再度評価し、より優れた景観案を選出する。

2. 構築する道路橋の景観設計支援システム

2.1 景観設計支援システムの概要

本支援システムでは、景観設計の対象となる桁橋を新設橋と既設橋に分け、以下に述べる方法で対象橋梁のデータを入力する。

- (1) 新設橋を対象とする場合
 ・路面の高低

- ・周辺環境と橋梁との面積の割合
- ・橋梁の景観設計に要求される設計コンセプト

(2) 既設橋を対象とする場合

- ・路面の高低，主桁・高欄の色彩，橋脚・主桁・高欄の形状
- ・周辺環境と橋梁との面積の割合，マンセル値
- ・橋梁の景観設計に要求されるコンセプト

これらの入力データをもとに，コンセプトに合致した複数の景観案を GA による探索から求める．求められた複数の景観案の特徴を DEA によって分析する．その結果，設計技術者はコンセプトへの適応度と DEA による景観案の特徴を参考に，複数の景観案の中から最終景観案を決定する．

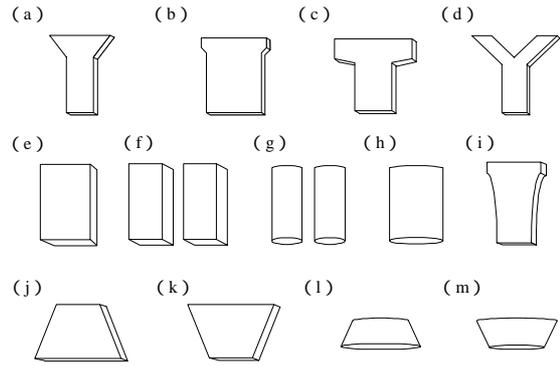


Fig.1 橋脚の形状

2.2 景観構成アイテムの設定

橋梁景観を構成する要素は景観構成アイテムと呼ばれる．ここでは主桁・高欄の色彩，主桁・高欄・橋脚の形状をその要素とする．これらの景観構成アイテムを種々組合せれば，さまざまな設計案が提示できる．

以下に，本支援システムで用いる景観構成アイテムについて述べる．

(1) 主桁と高欄の色彩

本研究では，色彩の表現方法にマンセル表色系を用いる．マンセル表色系によれば，色彩は色相・明度・彩度からなる 3 属性で尺度化されている．ここに，色相 (Hue : H) は色味を，明度 (Value : V) は明るさを，彩度 (Chroma : C) は色の鮮明な程度を表す．

明度と彩度の組合せはトーン (色調) と呼ばれる．トーンは色相に関係なく，色の濃淡，明暗，強弱によ

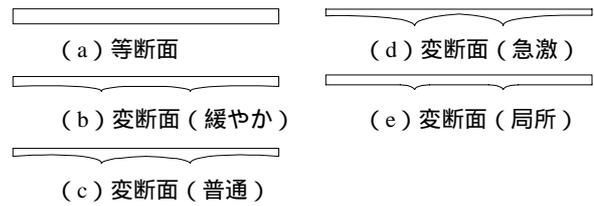


Fig.2 主桁の形状

て決定される．

本研究では，無数の色彩の中で，規則的な色彩の選定方法として，色相・明度・彩度がほぼ一様に分布するように，Table 1 に示す 10 色相×12 トーンの 120 色の有彩色と 8 種類の無彩色からなる 128 色を選定した．

(2) 主桁，高欄，橋脚の形状

景観構成アイテムである主桁，高欄，橋脚の形状はつぎのように設定した．

Table 1 128 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 4/16	橙 7/16	黄 8/15	黄緑 7/15	緑 4/14	青緑 5/12	青 5/14	青紫 4/14	紫 5/14	赤紫 5/14
S	さんご色 5/10	柿色 6/12	うこん色 6/11	くさ色 6/10	緑青色 5/9	あおたけ色 5.5/9	あさぎ色 5/9	るり色 4/9	あやめ色 4/10	紅梅色 4/10
B	ばら色 7/9	あんず色 8/7	たまご色 8/11	カナリヤ色 8/11	エメラルド 7/10	トルコ石色 7/9	空色 7/8	サルビア色 7/8	藤色 7/9	桃色 7/10
P	とき色 8/6	夕陽色 9/4	香色 9/6	若苗色 8.5/6	浅みどり 8/6	浅青緑 8/5	水色 8/5	浅霧色 8/6	うす紫 8/6	うす桃色 8/6
Vp	さくら色 9/2	白茶 9/1	象牙色 9/1	利休白茶 9/2	白緑 9/2	うすあさぎ 9/2	白群 9/2	藍 9/1	淡藤色 9/2	紅桜 9/2
L-gr	桜かすみ色 8/2	との色 8/2	桑色白茶 8/2	利休ねずみ 8/3	浅霧みどり 8/2	あさぎねずみ 8/3	深川ねずみ 7.5/2	浅藍ねずみ 7/2	うすいる 7/2	灰桜 7.5/2
L	樹皮色 6/6	肌色 6/5	からし色 6/4	若芽色 6/5	若竹色 6/6	みずあさぎ 6.5/6	さびあさぎ 6/5	藍ねずみ 6/4	鳩羽紫 6/4	蘭色 6/4
Gr	きじばと 5.5/2	茶ねずみ色 5/2	鈍色 5/1	山鳩色 5/2	うす葉色 5/2	裏葉色 5/2	納戸ねずみ 5/2	さびはなだ 5/2	さび紫 5/2	桜ねずみ 5/2
DI	さびえび色 5/5	らくだ色 5/6	うぐいす色 5/6	おいみどり 5/5	とくさ色 4/5	老竹色 4/6	さび納戸 4/6	うすはなだ 4/6	あやめ色 4/5	牡丹ねずみ 5/5
Dp	れんが色 3/10	茶色 4/9	うぐいす茶 5/8	こけ色 4/8	濃緑 3/7	濃青緑 3.5/7	納戸色 3/9	紺青 3/9	すみれ色 3/8	ぶどう酒色 3/10
Dk	えび色 2.5/8	たばこ色 3/7	オリーブ 3.5/6	ふかみどけ 3/6	深緑 3/6	深青緑 3/4	深納戸 2.5/4	紺色 3/5	茄子紺 3/6	深ぶどう酒色 3/6
Dgr	くり色 2/3	黒茶 2/2	オリーブ茶 2/3	みる色 2/2	森林色 2/2	鉄色 2/2	こきはなだ 2/2.5	濃紺 2/2.5	深紫 2/2	濃色 2/2
無彩色	白 N-9.5	パ-グレー N-9	シパ-グレー N-7	灰色 N-6	ミ-イパ-グレー N-5	ス-グレー N-3	チャコ-グレー N-2	黒 N-1.5		

主桁の形状を等断面と変断面の5種類とした。
 高欄の形状を中小桁橋に採用される機会の多い5種類とした^{1),2)}。
 橋脚の形状をデザイナーが考案するような特殊な形状¹⁾を除いた13種類とした。
 主桁, 高欄, 橋脚の形状を Fig.1~Fig.3 に示す。

2.3 橋梁の景観コンセプト

本研究では, 景観コンセプトとして, 設計時にしばしば用いられる Table 2 の7種類を設定した。橋梁景観に対する多様な要求から, 7種の景観コンセプトの中から要求するコンセプトを複数個を選択できるようにシステム化した。

	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

2.4 周辺環境の設定

橋梁と周辺環境の調和を評価するため, 周辺環境のデータを入力する。ただし, 既設橋の場合には, 周辺環境が明確であるため, 橋梁の主桁の面積を1とした周辺環境との面積比および周辺環境のマンセル値を入力する。新設橋の景観設計の場合には, 種々の周辺環境が対象となるため, 周辺環境と色彩を10種類設定し, その周辺環境の中から適切なものを選択し, 面積比を入力する。

2.5 景観構成アイテムの定量的評価

景観案が景観コンセプトにどの程度適合しているかを評価するため, まず, 景観案を景観構成アイテムに分類し, イメージしやすいように設定した Table 3 の16形容詞対に対して定量的に評価する。各形容詞対は, 1から-1の間で得点が付けられる。

本システムでは, 色彩の塗装における耐久性も考慮する。塗装の耐久性³⁾は, 長油性フタル酸樹脂系や塩化ゴム系など, 塗料の種類によって多少の誤差はあるが, 主として色調および色の濃淡によって異なる。すなわち, 色調は色相で, 色の濃淡はトーンによって判断される。赤色系は一般的に変退しやすく, 濃い色よりも淡い色に変退しやすい傾向にある。黄色系は赤色系の場合と同様, 変退しやすい。青色系は色の変化が目立たず, 緑色系も同様である。緑色系の場合は, 濃い色よりの淡い色のほうが色の変化が少ない。このように, 色彩の耐久性を色相とトーンで得点付ける。

2.6 ファジィ推論

本研究では, 設計者が要求する景観コンセプトに適応した景観案を提示する。そのために, 景観構成アイテム

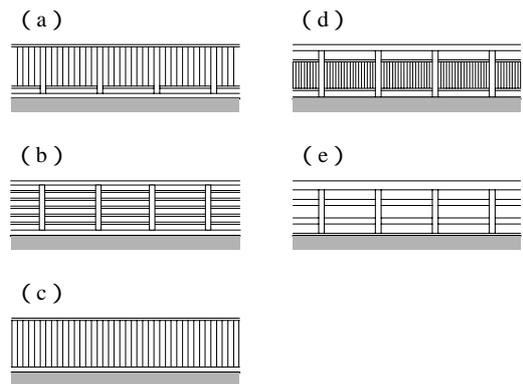


Fig.3 高欄の形状

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

の評価と景観コンセプトをファジィ推論によって定量的に結びつけ, コンセプトに対する評価尺度を導き出す。

ファジィ推論は, 「もし...なら, ...である」という推論にファジィ理論を用いたものである。このルールは, 曖昧な情報と曖昧な情報との関係から, 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する。ファジィ推論のルールは, つぎのようである。

$$\text{前提 1: IF } x=A_1 \text{ THEN } y=B$$

$$\text{前提 2: } x=A_2$$

(1)

$$\text{結論 1: } y=B_1$$

ここに, A, A_1 : ファジィ変数, B, B_1 : 実数値, x, y : 対象名。

本研究では, ファジィ推論の中でも演算が簡易で, 推論結果が良好な簡略化ファジィ推論法を用いる。簡略化ファジィ推論法は, A_i をファジィ変数, C_i を実数値, n を任意の整数とすれば, つぎのように表される。

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

ファジィ変数のメンバシップ関数には, Fig.4 のような関数を用いる。このとき, ある形容詞対の評価が入力値として与えられた場合, その入力値とファジィ変数の

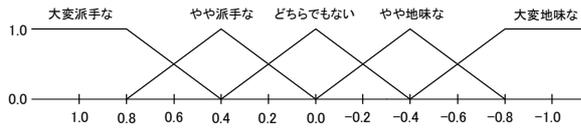


Fig.4 メンバシップ関数

適合度 $\phi_{i,j,k}$ を算出し、その適合度と実数値 $C_{i,j,k}$ との積から適応度 $f_{i,j,k}$ が導かれる。

$$f_{i,j,k} = C_{i,j,k} \phi_{i,j,k} \quad (i=1,2,3,\dots,n \quad j=1,2,3,\dots,p \quad k=1,2,3,\dots,q) \quad (3)$$

ここに、 n : コンセプトの数、 p : 形容詞対の数、 q : メンバシップ関数の数。コンセプト i , 形容詞対 j のとき、すべてのメンバシップ関数の得点を足し合わせた適応度をその形容詞対に対する適応度 $F_{i,j}$ とする。

$$F_{i,j} = \sum_{k=1}^q C_{i,j,k} \phi_{i,j,k} \quad (4)$$

それぞれの形容詞対についてファジィ推論のルールから適応度を算出し、それらの合計がコンセプトの得点 F_i となる。

$$F_i = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q C_{i,j,k} \phi_{i,j,k} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

得点 F_i の高い景観案ほどコンセプトに適応していると考え、その値を得点 F_i の最大値 $F_{i,max}$ で割ったものをコンセプトに対する適応度 N_i とし、景観案の評価値とする。

$$N_i = \frac{F_i}{F_{i,max}} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (6)$$

2.7 橋梁と周辺環境の色彩調和

橋梁と周辺環境の色彩調和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⁴⁾とパークホフ⁵⁾の美度計算を用いる。以下に、その評価方法を述べる。

(1)ムーン・スペンサーの色彩調和論

ムーン・スペンサーの色彩調和論は、マンセル表色

Table 4 調和と不調和の範囲

調和・不調和	明度だけの 変化	彩度だけの 変化	色相だけの 変化
同等	0 ~ 1j.n.d	0 ~ 1j.n.d	0 ~ 1j.n.d
第2の曖昧	1j.n.d ~ 0.5	1j.n.d ~ 3	1j.n.d ~ 7
類似	0.5 ~ 1.5	3 ~ 5	7 ~ 12
第2の曖昧	1.5 ~ 2.5	5 ~ 7	12 ~ 28
対照	2.5 ~ 10	> 7	28 ~ 50
眩輝	> 10	-	-

Table 5 秩序の要素 O の加える美的係数

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1の曖昧	0	-1.0	0	-
類似	+1.1	+0.7	0.1	-
第2の曖昧	+0.65	-0.2	0	-
対照	+1.7	+3.7	+0.4	-
眩輝	-	-2.0	-	-

系での調和の範囲を示し、2色配色の色彩調和を定量的に評価している。

色彩の配色には快いものとそうでないものがあり、快い配色は美的な価値が高く、調和と呼ぶ。一方、そうでないものは不調和という。

ムーン・スペンサーの色彩調和論では、調和する配色として、同等の調和、類似の調和、対照の調和、不調和の配色として、第1の曖昧、第2の曖昧、眩輝という関係を示しており、いずれもマンセル表色系上で表される。この調和と不調和に関する範囲区分を Table 4 に示す。

(2)パークホフの美度計算

パークホフは、美しさの尺度を表す美度 M を、秩序の要素 O と複雑さの要素 C_x を用いて、つぎのように定義した。すなわち、

$$M = O / C_x \quad (7)$$

ムーンとスペンサーはパークホフ式を色彩調和の評価に用いた。すなわち、配色における複雑さの要素 C_x は

$$C_x = (\text{色数}) + (\text{色相差のある色対の数}) + (\text{明度差のある色対の数}) + (\text{彩度差のある色対の数}) \quad (8)$$

で求められる。

配色における秩序の要素 O は、ムーン・スペンサーの色彩調和論によって分類した色相・明度・彩度の3属性における同等・類似・対照・第1の曖昧・第2の曖昧・眩輝に該当する組合せを選び、その組合せの数に与えられている美的係数 (Table 5) を掛け合わせて求められる。また、配色面積のバランスの美的係数が秩序の要素 O に加えられる。

以上のようにして求められた美度 M が 0.5 以上であれば、調和は一般的に基準を満たし、かつ M が大きいほど調和していると判断される。

2.8 景観案の組合せ最適化手法に適用される GA

本景観案は、景観構成アイテムの組合せによって提示され、その組合せ総数は $128 \times 128 \times 13 \times 5 \times 5 = 5,324,800$ とおりである。これらの中から高い評価値を示す景観案を探索するため、組合せ最適化問題の解法に GA を適用する⁶⁾。以下に GA の手順について述べる。

(1)遺伝子のコーディング

本システムに遺伝的アルゴリズムを適用するため、遺伝子のコーディングを Fig.5

に示すように行う^{7), 8)}。Fig.5 において、縦列は遺伝子の部分集合である「オペロン」として定義される。ま

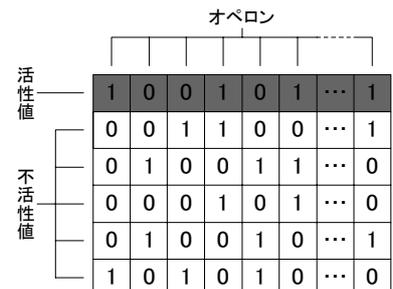
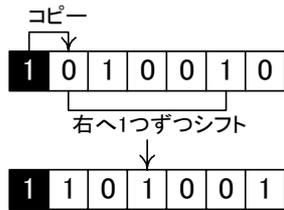


Fig.5 遺伝子のコーディング

た、1 行目を景観構成アイテムに対応する活性値、それ以降を景観構成アイテムに不对応な不活性値とした。



(a) 重複



(b) 欠失



(c) 逆位

Fig.6 遺伝子操作

個体群に多様性を持たせるため、重複、欠失、逆位の3遺伝子操作を行う。ここに、遺伝子の部分集合であるオペロンに Fig.6 に示すように操作する。

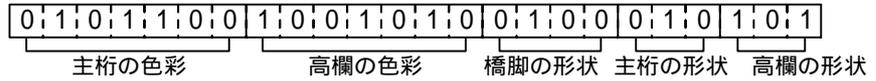


Fig.7 景観案を表現する遺伝子列

欠失の操作は、下端に0か1をランダムに挿入する。ただし、世代が進むにつれオペロン内が同じビット数にならないように、次式を下端に挿入する。

$$v'_n = \begin{cases} 1 & \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} v'_i}{n-1} < 0.5 \right) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 v'_i は遺伝子操作後のビット数、 n はオペロンの長さを表す。

アイテム対応での影響が少ないため、重複・欠失・逆位の操作による個体数の増加はないものとする。

上述の3操作の他に、交叉と突然変異の遺伝子操作を用いる。

交叉には、一点交叉法を用いる。交叉位置は、ビルディングブロックの破壊を防ぐため、遺伝子列をそれぞれの項目の内部で切断する。

突然変異には、一点突然変異を用いる。本法は、生起確率で変異箇所を決め、そのビットが1なら0、0なら1に置き換える操作のことである。これによって、個体群が局所解に陥ることを防ぐ。また、一点交叉法と一点突然変異の遺伝子操作によって個体数を増加させた。

(3) 遺伝子列と景観構成アイテムの対応

遺伝子列は、主桁の色彩、高欄の色彩、橋脚の形状、主桁の形状、高欄の形状の順に表している。本システムでは、遺伝子列を2進数で表現するため、遺伝子長は24ビットとなる (Fig.7)。

(4) パレート保存戦略

多目的最適化問題では、すべての目的関数を同時に最適化した解を得ることは一般的に困難である。どの目的関数も改善する必要のない満足できる解集合をパレート最適解という。

本支援システムでは、パレート最適個体を適切に評価・選択し、次世代に残していくために、パレート最適個体を「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」と定義した。この条件によって生成されたパレート

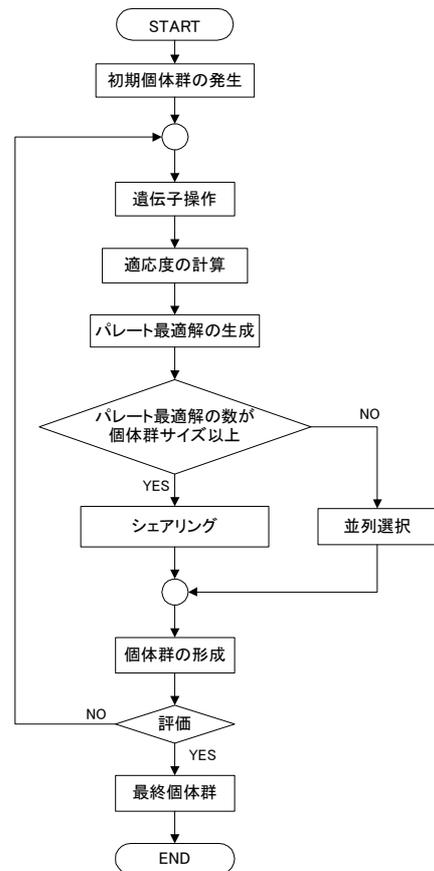


Fig.8 パレート保存戦略のフロー

最適個体の集合をパレート最適解集合とし、これを次世代に強制的に残す。

パレート保存戦略において、淘汰にあたる操作には、局所解に陥るおそれが少なく、妥協解が得られやすいと思われる並列選択とシェアリングを用いる。パレート保存戦略の流れを Fig. 8 に示す。

1) 並列選択

パレート最適個体の数が交叉前の個体数より少なければ、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す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に次世代に残す手法で、どの目的関数に対する適応度を評価に用いるかは、乱数で決定

される。

2) シェアリング

パレート最適個体の数が交叉前の総数より多ければ、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シェアリングで減少させる。ここに、シェアリングとは、個体のニッチ数（niche：生態的地位）を求め、ニッチ数の小さな個体から順に保存する方法のことで、また、ニッチ数とは、ある個体の近傍での混雑度を表す数値のことである。ニッチ数のより小さな個体を保存することで離散的かつ多様な解が保存できる。

3. DEA による景観特性の評価

本システムでは、景観案がもつ景観構成アイテムの評価と景観コンセプトの評価から景観案の優位性が評価できる包絡分析法（Data Envelopment Analysis：DEA）を用いる。ここでは DEA^{9)~11)}の概略と本研究における適用方法と適用例について述べる。

3.1 DEA とは

DEA は、1978 年にテキサス大学の A.チャーンズと W.W.クーパーによって提唱された効率分析手法で、包絡分析法あるいは経営効率分析法とも呼ばれる。既往の研究^{9)~11)}によれば、DEA での評価対象は民間企業や公共団体の学校、病院、銀行など、さまざまである。一般に、それらの事業体は、投入要素を用いて産出物を生産する変換プロセスと考えることができる。産出/投入の比は各事業体の生産性を測定する尺度である。この尺度は比率尺度 θ といわれ、0 から 1 の間の数値をとり、各事業体の効率性を示す。DEA では、同種の投入要素と産出物をもつ事業体が複数ある場合、より少ない投入でより多くを産出する事業体が効率的であると考えられる。ここでは、DEA を用いて景観案の優越性を評価するが、はじめに DEA による評価方法について述べる。

(1) DEA に必要なデータ

DEA の分析対象となる事業体は DMU（Decision Making Unit）と呼ばれる。 n 個の DMU を考え、それらを $DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$ と番号づける。つぎに、それぞれの生産活動に共通した投入（入力）項目と産出（出力）項目を選ぶ。 m 個の投入項目と s 個の産出項目が選ばれ、 DMU_j の投入（入力）データを $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}$ ($j=1,2,\dots,n$)、産出（出力）データを $y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{js}$ ($j=1,2,\dots,n$) とする。各事業体の生産活動に関するデータを横に並べて行列を作り、入力データ行列を X 、出力データ行列を Y とすれば、つぎのように表される。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Table 6 データの項目数と比率尺度

	m	s	比率尺度
	1	1	y_{j1} / x_{j1}
	2	1	$y_{j1} / x_{j1}, y_{j1} / x_{j2}$
	1	2	$y_{j1} / x_{j1}, y_{j2} / x_{j1}$

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1s} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{ns} \end{bmatrix} \quad (9)$$

DEA 評価に用いる入力項目と出力項目について、入力項目数 m と出力項目数 s が

1 つと 1 つの場合

2 つと 1 つの場合

1 つと 2 つの場合

には、“出力/入力”の比率尺度が Table 6 のように求められ、各事業体の相対比較が容易に行える。

一方、入力項目数 m と出力項目数 s が多くなれば、各事業体の相対比較が簡単に行えるような比率尺度を求めることは困難となる。そのため、ある DMU_j の複数の入力項目を 1 つの仮想入力項目 P_j に、複数の出力項目を 1 つの仮想出力項目 Q_j に変換する。仮想入力 P_j は入力データ x_{jh} にウェイト v_{hj} をかけ、 $h=1 \sim m$ まで足し合わせ、仮想出力 Q_j も同様に、出力データ y_{ji} にウェイト u_{ij} をかけ、 $i=1 \sim s$ まで足し合わせる。すなわち、

$$P_j = v_{1j} \times x_{j1} + v_{2j} \times x_{j2} + \dots + v_{mj} \times x_{jm} \quad (10)$$

$$Q_j = u_{1j} \times y_{j1} + u_{2j} \times y_{j2} + \dots + u_{sj} \times y_{js} \quad (11)$$

となる。

さらに、式(10)と式(11)から事業体 j の効率値 θ_j が

$$\theta_j = Q_j / P_j \quad (12)$$

のように求められる。ここに、 θ_j は $0 \leq \theta_j \leq 1$ で、 $\theta_j = 1$ のとき DMU_j は効率的、 $\theta_j < 1$ のとき DMU_j は非効率的とされる。このように P_j, Q_j, θ_j をすべての DMU に対して算出する。ただし、すべての DMU に同じウェイトは付けない。すなわち、入力ウェイト v_{hj} と出力ウェイト u_{ij} は DMU_j に対するウェイトで、それぞれの DMU でウェイトが異なることで、各 DMU にとって最美好都合となるようにウェイトを付ける。そのため、DEA の評価はどの事業体に対しても個々の特性を活かし、公正なウェイト付けがなされるという特徴を持つ。

このように事業体の効率性を評価するためのさまざまな DEA モデルが提案されている。本研究では Charnes-Cooper-Rhodes モデル（CCR）を述べる。

(2) CCR モデル

DEA は、複数の事業体を対象にその事業体の効率性を比率尺度で評価する方法である。たとえば、分析対象となる事業体を o とし、 DMU_o と称する。 DMU_j に対するウェイト v_{ho}, u_{io} を線形計画問題として解いて決める。

CCR モデルは、LP を解く際に、すべてのウェイトが基底変数に入る前に最適解が導かれる場合がある。その

場合、基底変数に入らなかったウェイトにゼロが与えられる。これはウェイトにゼロが付いた入力項目や出力項目のデータを無視していることになり、事業体全体としての評価が十分になされていないと考えられる。さらに、LP において、項目数が多くなるほど複数のウェイトがゼロになりやすくなる。本研究では、項目数の合計が 3 ~ 10 個と多くなっている。そのため、ウェイトがゼロとならないように、ウェイトの領域を制限する領域限定法⁹⁾を取り入れる。

(3) 領域限定法

領域限定法は、各ウェイト間の比の上限と下限を式 (13) と式 (14) に示すように設定する。

$$\frac{1}{t} \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_h} \leq \frac{v_{ho}}{v_{lo}} \leq t \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_h} \quad (13)$$

$$\frac{1}{t} \frac{\bar{y}_1}{\bar{y}_i} \leq \frac{u_{io}}{u_{lo}} \leq t \frac{\bar{y}_1}{\bar{y}_i} \quad (14)$$

ここに、 \bar{x}_h と \bar{y}_i は入力データと出力データの各項目における平均値で、

$$\bar{x}_h = \sum_{j=1}^n \frac{x_{jh}}{n} \quad (h=1,2,\dots,m) \quad (15)$$

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^n \frac{y_{ji}}{n} \quad (i=1,2,\dots,s) \quad (16)$$

である。また、 t は $t>1$ であり、ウェイトの比である v_{ho}/v_{lo} 、 u_{io}/u_{lo} の上下限を設定するもので、本研究では $t=2$ とした。式 (13) と式 (14) を用い、式 (15) のように線形計画問題 (LP) で表す。

$$\begin{aligned} \langle \text{LP}_o \rangle \quad & \text{目的関数} \quad \max \theta = \sum_{i=1}^s u_{io} y_{io} \\ & \text{制約式} \quad \sum_{h=1}^m v_{ho} x_{ho} = 1 \\ & \sum_{i=1}^s u_{io} y_{ij} - \sum_{h=1}^m v_{ho} x_{hj} \leq 0 \\ & (\bar{x}_1 / \bar{x}_h) / t \leq v_{ho} / v_{lo} \leq t (\bar{x}_1 / \bar{x}_h) \\ & (\bar{y}_1 / \bar{y}_i) / t \leq u_{io} / u_{lo} \leq t (\bar{y}_1 / \bar{y}_i) \end{aligned} \quad (15)$$

上式の制約式は、ウェイト v_{ho} 、 u_{io} による入力データ X と出力データ Y の比をすべての DMU について 1 以下に押さえることを意味する。その上で、対象になっている DMU_o の比率尺度 θ_o を最大化するように、 v_{ho} 、 u_{io} を決める。そのため、 v_{ho} 、 u_{io} は入力データと出力データのどの項目が高く評価されているのかを表す。

3.2 本研究における DEA の適用方法

前述の DEA を用い、本研究では、景観案の優越性を評価する。つまり、景観案が持っている 5 つの「景観構成アイテムの評価」を入力項目とし、選択したコンセプト数の「景観コンセプトの評価」を出力項目として、

“ 仮想出力 / 仮想入力 ” の比率尺度 θ から景観案の優越性を評価する。比率尺度 θ が

$\theta = 1$: 景観案は優越的である。

$\theta < 1$: の景観案は非優越的である。

とみなす。以下に、本研究での DEA の適用方法について述べる。

(1) 景観案が持つデータ

本研究での DMU は景観案であり、その景観案は GA によって選び出された 20 橋のパレート解である。その景観案が持つ入力データ X と出力データ Y について述べる。

) 入力データ X

DEA 評価に用いる入力データには、2.5 で述べた景観構成アイテムである主桁・高欄の色彩、橋脚・主桁・高欄の形状の景観イメージを、16 種類の形容詞対で得点付けた値を用いる。

本システムでは、対象橋梁として、新設橋と既設橋を扱う。対象橋梁が既設橋の場合、形状を変更することはできないため、形状を変化させず、色彩のみの変化で景観案を探索する。それゆえ、入力データ X の一部となる橋脚・主桁・高欄の形状の得点が同じなため、既設橋が対象の場合は、入力データ X は主桁・高欄の色彩のみとする。このことから、入力データ X を 2 つに分けて、主桁・高欄の色彩の 2 項目を入力データ X_1 、橋脚・主桁・高欄の形状の 3 項目を入力データ X_2 とする。そして、“出力データ Y と入力データ X_1 ” と、“出力データ Y と入力データ X_2 ” からなる 2 種類の比率尺度を算出する。

景観構成アイテムの得点づけには、16 種類の形容詞対を用いる (Table 3)。同表の形容詞対 1~10 までを用いて、景観構成アイテムの主桁・高欄の色彩を得点付け、形容詞対 11~16 で橋脚・主桁・高欄の形状を得点付ける。そして、各入力項目の得点を 0.0~1.0 の値に正規化する。

) 出力データ Y

DEA 評価に用いる出力データには、景観コンセプトの適応度を用いる。出力データの数は選択したコンセプトの数によって異なる。景観コンセプトの適応度の算出方法は、2.6 で述べたとおりで、0.0~1.0 の値を持つ。

上述の入出力データを用い、景観案の優越性を CCR モデルと領域限定法で評価する。

4. 既設橋を対象とした景観設計支援システムの適用

本研究では、設計者が景観配慮型設計をスムーズに行えるシステムの構築を目的にし、前節までにシステムの内容や景観案の評価方法について述べた。ここでは、対象橋梁を設定し、支援システムを稼働させ、景観案を探索し、その DEA の評価と景観の評価について考察し、システムの有用性を検討する。ここでは、既設橋と仮想

橋について考察する．また，DEA の評価で，さらにスムーズな景観設計が可能なことを示す．

さて，本支援システムでは，既設橋を対象とする場合，橋梁と周辺環境が認識できる写真から路面高の高低，主桁・高欄のマンセル値，橋脚・主桁・高欄の形状，また，周辺環境のマンセル値，橋梁との面積比を読みとる．その結果を用いて，本システムを適用し，景観案を探索する．しかし，既設橋の場合，橋梁形状を変えることはできないため，形状を固定した色彩の変化による景観案である．この景観案を用いることによって，塗装塗り替え時にどのような色彩を選択するかを容易に行える．周辺環境の色彩のマンセル値の測定は，JIS Z 8721 標準色表⁴⁹⁾を用いて，主桁・高欄の色彩は 2.2(1)で設定した 128 色の中から類似の色彩を決定する．

(1) 既設橋の入力データ

本システムを既設橋の景観設計に適用する例として，Fig.9 に示す 3 径間連続鈹桁橋の東大川橋（橋梁年鑑，平成 12 年版）を採用した．



Fig.9 対象橋梁の東大川橋

本支援システムに入力するデータとして，路面高の高低と景観構成アイテムの種類を Table 7 に，周辺環境のマンセル値と橋梁との面積比を

Table 8 にそれぞれ示す．景観設計に必要なコンセプトとして，コンセプト 1「周辺環境との調和」と 2「シンボル性」を選択した．

(2) 既設橋の周辺環境

対象橋梁となる東大川橋を設定した入力データをもとに，全コンセプトに対する評価と美度値を算出する．全コンセプトに対する東大川橋の適応度と美度値を Table 9 に示す．同表によれば，東大川橋はコンセプト 4「信頼感」が最も高い適応度を，コンセプト 3「個性的」が最も低い適応度を示す．

(3) DEA 評価の適用

設定したデータをもとに本支援システムを実行し，GA によって 20 橋の景観案を選び出した．その結果，Table 10 を得た．

同表のデータを用い，景観構成アイテムの得点を入力データ x_i ，景観コンセプトを出力データ y とし，DEA による景観案の優越性を評価する．DEA によって得られた各景観案の入力ウェイト v_i ，出力ウェイト u_r と優越値 θ を Table 11 に示す．

Table 11 から 20 橋の景観案の中で優越値が $\theta=1$ となり，優越な景観案 1,2 と，優越性の低い景観案 19, 20 に注目する．

Table 7 路面高，景観構成アイテムのデータ

路面高	低い
主桁の色彩	水色
高欄の色彩	深緑
橋脚の形状	c
主桁の形状	a
高欄の形状	d

Table 8 周辺環境のデータ

周辺環境	面積比	マンセル比
青空	8.84	5B 9/2
山	1.18	7.5Y 5/4
川	3.14	2.5PB 8/4
住宅，橋脚	0.17	10Y 9/1
コンクリート	0.37	N9.0
路面	0.65	N7.0
岩，土	0.25	10YR 6/6
若草	0.10	7.5GY 6/4
陰	1.72	N2.0

Table 9 既設橋の適応度と美度値

	コンセプト	適応度
1	周辺環境との調和	0.594
2	シンボル性	0.516
3	個性的	0.434
4	信頼感	0.626
5	親しみやすさ	0.513
6	風格のある	0.524
7	地域性	0.513
東大川橋の美度値		1.073

Table 10 景観案の色彩と美度値

景観案	景観構成アイテム		アイテムの得点		コンセプトの適応度	
	主桁の色彩	高欄の色彩	主桁色彩	高欄色彩	周辺環境	シンボル
1	あんず色	利休白茶	0.608	0.574	0.651	0.539
2	橙	灰桜	0.779	0.512	0.297	0.696
3	利休ねずみ	藍白	0.528	0.603	0.808	0.361
4	橙	とのこ色	0.779	0.490	0.298	0.692
5	白茶	灰桜	0.535	0.512	0.79	0.429
6	黄	とくさ色	0.828	0.417	0.253	0.714
7	利休ねずみ	とのこ色	0.528	0.490	0.804	0.392
8	橙	オリーブ	0.779	0.390	0.208	0.784
9	橙	えび色	0.779	0.371	0.199	0.791
10	橙	たばこ色	0.779	0.360	0.203	0.788
11	とのこ色	鳩羽紫	0.490	0.508	0.778	0.449
12	白茶	ふかみごけ	0.535	0.388	0.731	0.516
13	白茶	くり色	0.535	0.364	0.715	0.531
14	夕陽色	黒茶	0.570	0.339	0.633	0.605
15	とき色	くり色	0.569	0.364	0.595	0.610
16	とき色	黒茶	0.569	0.339	0.595	0.617
17	たまご色	くり色	0.654	0.364	0.411	0.647
18	たまご色	黒茶	0.654	0.339	0.410	0.653
19	カナリヤ色	黒茶	0.668	0.339	0.415	0.630
20	ばら色	黒茶	0.607	0.339	0.402	0.658



景観案 1

景観案 2

景観案 3

景観案 4

Fig.10 優越案と非優越案



(a)景観案 3

(b)景観案 19

Fig.11 高欄の比較

a)景観案 1

景観案 1 は、Table 10 より主桁の色彩に「あんず色」、高欄の色彩に「利休白茶」が選ばれている。これを可視化すれば、Table 10 の を得る。「あんず色」はマンセル値が 5YR8/7、トーンが B、「利休白茶」はマンセル値が 5GY9/2、トーンが Vp である。「あんず色」、「利休白茶」ともに派手さを抑えたトーンであるが、さわやかで濁り味を感じさせず、明るく親しみやすい色彩となっているため、コンセプトの「周辺環境との調和」、「シンボル性」の両者が高得点の案となった。また、主桁と高欄の色彩が 0.608, 0.574 で、高い値を示している。それゆえ、景観案 1 は優越な案となっている。

b)景観案 2

景観案 2 は、Table 10 より主桁の色彩に「橙」、高欄の色彩に「灰桜」が選ばれており、可視化すれば、Fig.10 のようである。「橙」は、マンセル値が 5YR7/16、トーンが V である。「灰桜」は、マンセル値 5RP7.5/2、トーンが Lgr である。「橙」のトーン V は彩度が高く、あざやかで派手さを強調しており、「灰桜」のトーンは彩度が低く、やや灰味を帯びた色彩となっている。高欄では派手さを抑えられるが、主桁にシンボル性の高い色彩を持つ景観案となっており、コンセプトの「シンボル性」が高い得点となっている。また、主桁、高欄の色彩の得点が 0.779, 0.512 で、両要素とも高得点の色彩が選ばれている。それゆえ、景観案 2 は優越な案となっている。

c)景観案 19

景観案 19 は、Table 10 によれば、主桁に「カナリヤ色」、高欄に「黒茶」の色彩案となっている。可視化すれば、Fig.10 である。「カナリヤ色」はマンセル値が 5GY8/11、トーンが B である。「黒茶」はマンセル値が 5YR2/2、トーンが Dgr である。カナリヤ色のトーン B は彩度が高く、明るく新鮮な色彩で、黒茶は重厚で深みのある色彩である。それゆえ、高欄の色彩で明るさが抑えられた景観案となり、コンセプトの「シンボル性」の

得点が抑えられるが、主桁の色彩によって「シンボル性」の得点がやや高い案となっている。また、高欄の色彩の得点が 0.339 と低い値を持つ色彩が選ばれたことから、優越性の低い景観案となっている。

d)景観案 20

景観案 20 は、Table 10 によれば、主桁に「ばら色」、高欄に「黒茶」の色彩案となっている。可視化すれば、Fig.10 のようである。「ばら色」のマンセル値は 5R7/9、トーンは B である。「黒茶」のマンセル値は 5YR2/2、トーンは Dgr である。ばら色のトーン B は彩度が高く、明るくさわやかな色彩、黒茶は重厚で深みのある色彩である。そのため、主桁のばら色で明るさを残しつつ、黒茶により抑えられ、コンセプトの「シンボル性」の得点もやや高い程度に抑えられている。また、高欄が 0.339 と低い得点の色彩が選ばれたことから、優越性の低い景観案となっている。

(4) ウェイト値が示す意味

ウェイト値は、3. で述べたように、すべての DMU に同じウェイトを付けるのではない。つまり、入力ウェイトと出力ウェイトは個々の景観案に対するウェイトであり、それぞれの景観案でウェイトが異なることで、各景観案にとって最も好都合となるようにウェイト付けを行う。そのため、DEA の評価は、どの景観案に対しても個々の特性を活かし、公正なウェイト付けがなされるという特徴を有する。

Table 11 のウェイト値に注目する。

景観案 1 は、「周辺環境との調和」のウェイト値が 1.139 と高い。このことから、景観案 1 は「周辺環境との調和」に特徴のある案で、可視化した Fig.10 の から周辺環境に調和している景観案である。

景観案 2 は、「シンボル性」の値が 1.147 で最も高く、シンボル性が高い評価の景観案である。可視化による Fig.10 の から明らかのように、これはシンボル性の高い景観案である。

景観案 1 と景観案 2 は、主桁の色彩が似ており、Fig.10 の からよく似た景観案に見える。しかし、異なる特徴を持っている。これは、Table 10 の景観コンセプトの適応度の値をみると、景観案 1 は「周辺環境との調和」が 0.651、「シンボル性」が 0.539 で、両コンセプトとも高い評価を得ている。したがって、景観案 1 は、「シンボル性」の高い案であるが「周辺環境との調和」の評価がより高い景観案となっているため、景観案 1 と

Table 11 DEA 評価結果

景観案	入力ウェイト		出力ウェイト		優越値
	主桁の色彩	高欄の色彩	周辺環境	シンボル	
1	0.433	0.165	1.139	0.480	1
2	0.338	0.290	0.681	1.147	1
3	0.395	0.151	1.041	0.439	1
4	0.513	0.167	0.884	1.039	0.983
5	0.382	0.146	1.007	0.424	0.978
6	0.503	0.164	0.658	1.108	0.957
7	0.391	0.127	0.985	0.415	0.954
8	0.472	0.154	0.617	1.039	0.943
9	0.462	0.151	0.604	1.018	0.926
10	0.457	0.149	0.597	1.006	0.914
11	0.358	0.137	0.943	0.397	0.912
12	0.369	0.120	0.931	0.392	0.883
13	0.362	0.118	0.912	0.384	0.857
14	0.368	0.120	0.634	0.745	0.852
15	0.377	0.123	0.649	0.763	0.852
16	0.368	0.120	0.633	0.744	0.836
17	0.412	0.134	0.710	0.835	0.832
18	0.401	0.131	0.691	0.813	0.815
19	0.407	0.133	0.700	0.824	0.810
20	0.383	0.125	0.660	0.776	0.776

景観案 2 の特徴が異なっている。

景観案 3 は、「周辺環境との調和」のウェイト値が 1.041 で最も高く、周辺環境との調和に特徴のある案である。

景観案 19 は、「シンボル性」のウェイト値が高いことから、シンボル性に特徴のある案である。

景観案 3 と景観案 19 は、主桁の色彩がよく似ているように見えるが、異なった特徴を有する。これには、主桁の色彩のトーンの違いが影響していると考えられ、また、高欄の色彩も影響していると考えられる。

高欄の色彩を判別しやすいように、ピックアップしたものを Fig.11 に示す。

Fig.11 において、主桁の色彩に着目すれば、景観案 19 の方が少し鮮やかなイメージを持つ色彩が選ばれている。つぎに、高欄の色彩に着目すると、景観案 3 は空やコンクリートに馴染みやすい色彩が選ばれており、景観案 19 は重々しく象徴的なイメージを持つ色彩が選ばれている。それゆえ、主桁の色彩だけでなく高欄の色彩も考慮した評価から、景観案 3 は「周辺環境との調和」、景観案 19 は「シンボル性」に特徴のある案である。このように、ウェイト値は、対象とする景観案のなかでウェイトの大小により、その景観案が持つ特性を示すことができる。

5. あとがき

本研究では、形状が比較的単純な中小桁橋を対象に、その景観設計をよりスムーズに行うための支援システムを構築した。その結果、つぎのような成果を得た。

- (1) 多目的 GA によって選出されたパレート解を DEA で評価し、景観性により優れた設計案とそうでない案に分類した。すなわち、準最適設計案 20 橋の中からより優れた設計案を提示することで、スムーズな景観設計が実行可能なことを示した。
- (2) DEA の評価結果から、ウェイト値によって個々の景観案が持つ特徴を知ることができた。たとえば、優越値が同値である景観案でも、ウェイト値を調べることで、景観案の特徴が簡単に認識でき、採用する景観案の決定を容易にした。
- (3) DEA 評価の CCR モデルに領域限定法を適用した。その結果、景観構成アイテムと景観コンセプトのすべての項目を考慮した評価が行えた。
- (4) DEA で優越的と非優越的に評価された景観案を可視化し、優越的な景観案が非優越的な景観案よりも景観性に優れていることを示した。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会編：橋梁年鑑，昭和 63 年～平成 12 年版，1988-2000。
- 2) 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。
- 3) 片脇清士：橋と塗装 - 橋を美しくまもる，山海堂，1996-6。
- 4) 福田邦夫：色彩調和論，朝倉書店，1996-2。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993-6。
- 8) 安居院猛・長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，昭昇堂，1993。
- 9) 刀根 薫：経営効率性の測定と改善 - 包絡分析法 DEA による - ，日科技連出版社，1993-9。
- 10) 末吉俊幸：DEA - 経営効率分析法 - ，朝倉書店，2001-11。
- 11) 刀根 薫・上田 徹：経営効率評価ハンドブック 包絡分析法の理論と応用，朝倉書店，2000-2。