

緑化されたコンクリート擁壁の景観評価の逆解析

安田 登¹・近田康夫²・松島 学³・小堀為雄⁴

¹正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 構造研究室主管研究員 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

²正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野 2-40-20)

³正会員 工博 東電設計株式会社 技術開発本部 耐震技術部課長 (〒110 東京都台東区東上野 3-3-3)

⁴正会員 工博 金沢大学工学部長 (〒920 石川県金沢市小立野 2-40-20)

本研究は、緑化されたコンクリート擁壁の景観評価を判断することを目的としており、評価者の経験や感覚に左右される評価に対しては、主観的な立場からファジ理論を利用する方法を提案する。さらに、従来経験的に設定されていた、ファジ理論における帰属度関数や重要度係数などについて、本研究では専門家から得られたアンケート結果を基に、GAによる逆解析を行うことで、客観的な裏付けを与えるとともに、説明因子の同定を試みた。

Key Words: scenery evaluation, concrete structures, planted, fuzzy set theory, genetic algorithm

1. はじめに

コンクリート構造物の建設は、社会資本蓄積の重要な手段としてなされており、今後も耐久的かつ経済的な理由からコンクリート材料への依存は継続すると考えられる。一方、地球規模でのマクロな環境問題とともに、都市やその周辺地域でのミクロな環境問題も顕在化しており、物理的な側面である生態系保全、微気象の緩和、炭酸ガスや有害な排気ガスなどの大気環境は当然のことながら、その他に、心理的な側面であるやすらぎや親しみと言った、景観に代表されるアメニティ指向の評価も重要な要素となりつつある。

コンクリート構造物の景観評価は、各人の嗜好や、判断の境界が明確でないこと、その評価が個人により異なることから、評価は各人の主観的な感覚や経験により左右されやすいものとなっている。この場合、たとえ定量的な表現であっても、それらの区分の判断は、各個人の経験に基づいた主観的な判断に負うところが大きい。そのため、景観評価を行うとき、従来の分類を用いその採点を行うように、客観的な立場で判断する手法の開発を目指すのではなく、必要とあらば、主観的な立場で判断をすることがよいと考えられる。このような主観的不確実性を数学的に取り扱う一手法として、ファジ集合の概念が、1965年にL.A. Zadeh¹⁾によって提案されている。土木工学の分野でも、物性の評価、構造物の劣化や耐力の評価にファジ理論が応用されている。清水ら²⁾は岩盤の等級区分の判断にファジ理論を応用し、その適合性を評価している。筆者らの一人³⁾もコンクリートの劣化評価にファジ理論を応用している。

本研究は、緑化されたコンクリート擁壁の景観評価を判断することを目的としており、このような主観的な立場からファジ理論を利用する方法^{4),5)}を提案する。評価は、機能面からの評価もあるが、ここでは景観の評価に絞って評価手法を提案した。さらに、ファジ理論の適用において帰属度関数の形状や、その重要度係数を客観的に求めるために、120ケースのアンケート調査を基に得られた各評価値及び総合評価レベルを用いて遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以降GAと称する)⁶⁾⁻⁸⁾を適用した逆解析により、各説明因子を同定することを試みた。

2. 景観評価の項目

コンクリート構造物はもとより、全ての構造物の計画ならびに設計思想の中に、強度や変形と言った安全性あるいは維持管理に関わる耐久性と共に、環境調和を目標とする評価を取り入れる手法の整備が望まれている。

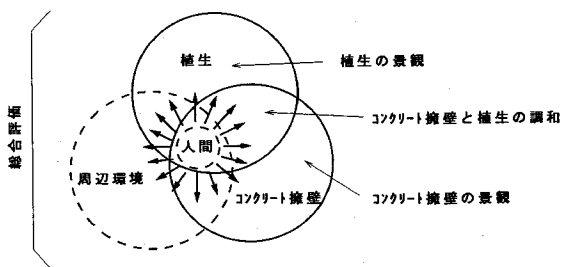
「環境調和を目指した評価」の内容には、前述の各種要素、特に自然界の生物としての植物と人工物であるコンクリート構造物に係わる問題は、相互の物理的影響を検討する必要があるため、評価を行う前に工法の選定や相互作用に関する固有技術の発展が不可欠である。一方、心理的な側面である景観評価は、都市や住環境問題において様々な研究⁹⁾が行われ、その実例も多く示されてきた。従って、ここでは、「環境調和を目指した評価」のうち、景観評価に絞って検討した。

緑化されたコンクリート構造物の景観評価の全体像は、図-1に示すとおり、①対象とする構造物(コンク

表一 緑化されたコンクリート擁壁の景観評価項目

大項目	評価項目	評価	No.				
緑化の景観	配置	植栽範囲は的確ですか？	多い 少ない	1			
		樹種の組合せ方法は適切ですか？	適切 不適切	2			
		立体感の創出に配慮されていますか？	有る 無し	3			
	形状寸法	樹木の形状は適切ですか？	適切 不適切	4			
		高さのバランスは適切ですか？	適切 不適切	5			
		樹木の密度は適切ですか？	適切 不適切	6			
	色彩	植栽は背景の色相と合いますか？	合う 合わない	7			
	季節感	季節が感じられますか？	感じる 感じない	8			
	擁壁の景観	素材	擁壁の素材は良いですか？	良い 悪い	9		
		形状寸法	擁壁の形状は良いですか？	良い 悪い	10		
		肌合い	擁壁の表面テクスチャーは良いですか？	良い 悪い	11		
調和	緑化と周辺環境	緑化は周辺の地形と馴染みますか？	馴染む 馴染まない	12			
	周辺環境と擁壁	擁壁は周辺環境と馴染みますか？	馴染む 馴染まない	13			
	擁壁と緑化	人工物と自然は調和していますか？	調和 不調和	14			
総合評価	安定感がありますか？	有る 無し	15				
	親しみやすいですか？	有る 無し	16				
【評価尺度】							
	非常に悪い	かなり悪い	やや悪い	ともいえない	やや良い	かなり良い	非常に良い
(例)	1	2	3	4	5	6	7

リート擁壁), ②植生による緑化の状態ならびに③周辺の環境が, 本来の目的・機能を持った個々の要素として, お互いに融和して景観を創出していると考えられる。人間は, これら景観の物理的要素を再構築して, 人間の心理要素に変換し, 景観を評価している。従って, それら個々の要素と調和の関係を考慮して, 評価項目を選定した。具体的には, 既往の研究^{9)~12)}などを参考にして, 表一に示す評価項目とした。また, 全体から受ける総合的印象である総合評価については, 同様の心理的側面を研究している分野で色彩による景観評価が行われており, 本研究では, その研究成果を取り入れて次のように総合評価を設定した。景観に関する総合評価は, 人間に関する



図一 緑化されたコンクリート擁壁の景観評価

表二 総合評価の形容詞

順位	形容詞	回答した人の割合
1	安定感のある	86%
2	親しみやすい	83%
3	落ちつきのある	79%
4	安らぎのある	67%
5	すっきりした	61%
6	整然とした	60%
7	さっぱりした	55%
8	自然である	54%
9	心地よい	45%
10	華麗な	38%

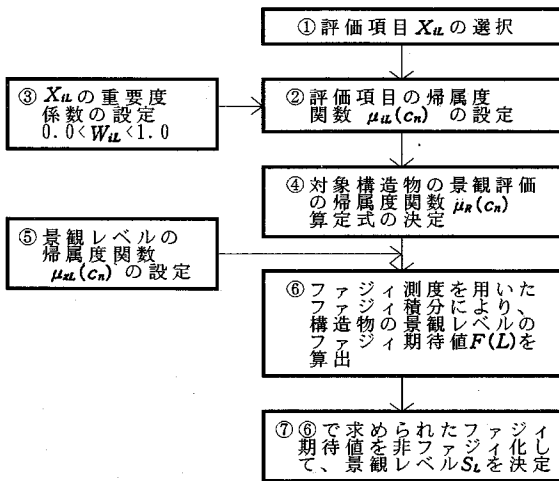
心理的な価値観だけではなく, 人間社会で景観が持つ相対的な価値, すなわち, ①景観的価値, ②社会的価値, ③技術的価値, ④経済的価値が存在する。本論文では, 前者の心理的価値を総合評価として定義し, 後者の相対的な価値は考慮しなかった。

色彩などの分野で心理的效果あるいは印象(イメージ)の総称として色彩感情と言う言葉が使われることが多く, 色彩によってもたらされる体験あるいは刺激を見せて思いつく言葉を全部報告してもらう自由連想による手法である。これらの研究の内, 小木曾, 乾¹³⁾や, 富塚等の研究¹⁴⁾をもとに, 色彩の刺激により連想される形容詞が591語抽出されている。本研究では, 景観工学の研究者へのアンケート結果から, この中から緑化されたコンクリート擁壁にかかわる形容詞20語を選定した。さらに, レポートリーグリット法¹⁵⁾を用いて, 重要度のランクづけを行った結果, 最終的に表二に10語が絞り込まれ, その内, 1位「安定感のある」および2位「親しみやすい」を総合評価の形容詞とした。

3. ファジ理論による景観レベルの評価

(1) 評価手順

一般に各評価項目は, 定性的な表現によるものが多い。たとえ定量的な表現であっても, その境界を明確に区分することは難しく, 各個人の主観的評価に負うところが



図一 対象構造物の景観レベルの決定の流れ

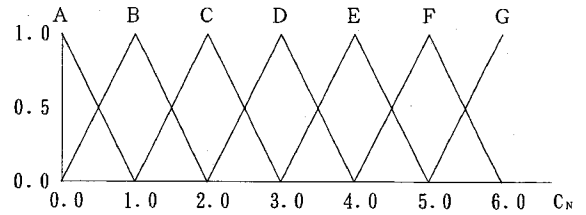
大きい。本研究では、各評価項目に対する判定が、判断者の主観に依存しているという“あいまいさ”，すなわち各人の判定のばらつきを考慮した景観の評価手法を開発するものである。

ファジィ理論による景観レベルの評価に関する研究の流れは、図一 2 に示すとおりである。すなわち、①既往の研究から景観に及ぼす評価項目 X_{iL} (表一 1 に示す 14 項目) を選択し、②各評価項目毎の評価尺度の帰属度関数 $\mu_{iL}(C_N)$ を設定する。さらに、③各評価項目 X_{iL} の重要度係数 W_{iL} を設定し、④で各帰属度関数と合わせて対象構造物の景観評価に対する帰属度関数 $\mu_R(C_N)$ を求める。次に、⑤景観の帰属度関数 $\mu_{zL}(C_N)$ を設定し、この関数を被積分関数として、⑥ファジィ測度を用いて $\mu_R(C_N)$ をファジィ積分し、各構造物について景観レベルのファジィ期待値 $F(L)$ を求める。⑦では⑥により求めたファジィ期待値を非ファジィ化することにより、景観レベル S_L を決定している。

(2) 景観評価項目の帰属度関数の設定

表一 1 に示された各評価項目の判定は、定性的に表現されるもので、その区分の境界は明確なものではなく、その設定根拠についてもあいまいなものである。例えば、評価項目「(9)擁壁の素材は良いですか?」の回答を、A:非常に悪い, B:かなり悪い, C:やや悪い, D:どちらとも言えない(普通), E:やや良い, F:かなり良い, G:非常に良いの7つに区分する場合の境界の判断は、各評価者個人の主観に依存することになる。本研究では分類した各境界のあいまいさを、ファジィ集合として扱い、判定区分は区間 $[0.0, 6.0]$ を 12 等分して、式(1)のように全体集合を定義した。

$$C_N = \{0.0, 0.5, 1.0, \dots, 5.5, 6.0\} \quad (N=0 \sim 12) \quad (1)$$



図一 3 評価項目のファジィ帰属度関数

全体集合 C_N の要素は景観を表す指標であり、この値が小さいほど景観の評価が低く、逆に大きくなるほど景観の評価が高いことを意味している。

次に、評価項目の判定区分をファジィ集合として定義する。本研究では表一 1 に示す評価項目の評価を A~G の7つに区分し、ファジィ集合として置き換えられるものと仮定した。7段階としたのは、SD法などでも採用されており、人間の尺度に良く合うとされており、本論文でも同様の区分とした。本来、各項目には相関性があり、その組合せにより景観評価の判断がなされるものであるが、このように仮定したことで、各項目は独立として取り扱ったことになる。すなわち、各評価項目 X_{iL} ($i=1 \sim 14$) について、7段階の評価区分を設定して、これらをファジィ集合 X_{iL} ($L=A \sim G$) とし、 $L=A \sim G$ の評価の各言語表現に対して、次のようなファジィ集合として定義することができる。

- A:非常に悪い : $X_{iA} = 1.0/0.0 + 0.5/0.5$
- B:かなり悪い : $X_{iB} = 0.5/0.5 + 1.0/1.0 + 0.5/1.5$
- C:やや悪い : $X_{iC} = 0.5/1.5 + 1.0/2.0 + 0.5/2.5$
- D:普通 : $X_{iD} = 0.5/2.5 + 1.0/3.0 + 0.5/3.5$
- E:やや良い : $X_{iE} = 0.5/3.5 + 1.0/4.0 + 0.5/4.5$
- F:かなり良い : $X_{iF} = 0.5/4.5 + 1.0/5.0 + 0.5/5.5$
- G:非常に良い : $X_{iG} = 0.5/5.5 + 1.0/6.0$

さらに、 X_{iL} の帰属度関数を、 $\mu_{X_{iL}}(C_N)$ ($C_N \in C_N$) と表せば、図一 3 に示すとおり書き表せる。なお、本図は研究で用いたファジィ集合の標準的な例を示す。このようにファジィ集合を用いれば判定区分の選択に関わるあいまいさを定量的に表現できる。しかしながら、この帰属度関数の設定方法により評価結果が異なることが予想される。従って、図一 3 に示した帰属度関数の形は、あくまでも当初設定した初期値であると考え、本来は、各個人の主観的判断により設定される必要がある。

(3) 評価項目の重要度係数の設定

景観の総合評価に及ぼす各評価項目の影響度合は各項目ごとに異なることが考えられる。そこで、評価項目ごとに $[0, 1]$ の間の重要度係数 W_{iL} を与えた。また、この重要度係数も前述の帰属度関数と同様に、各個人の主観的判断によって設定されるものである。

(4) 景観評価のファジィ期待値の評価

各評価項目の判定結果から景観評価 (A~G のレベルを意味し、以降、景観レベルと呼称) の期待値を求める手法を以下に説明する。一般に、この決定は各個人の主観により設定されるもので、その最終の景観レベルの判定に対する思考過程を説明することは難しい。本研究ではこの過程を明確に表現するため、ファジィ理論を用いて景観レベルのファジィ期待値を求める。

a) 景観レベルのファジィ集合

評価項目の判定結果と重要度係数を用いて対象構造物の景観レベルのファジィ集合を求める。つまり、景観レベルに属している程度を表す帰属度関数 $\mu_R(C_n)$ を評価者が判断した区分 L の帰属度関数 $\mu_{xL}(C_n)$ とその重要度係数 W_{iL} を用いて求める。本研究ではこの $\mu_R(C_n)$ を求めるにあたり、式(2)の算定式を定義した。

$$\mu_R(C_n) = \bigvee_{i=1}^{14} W_{iL} \cdot \mu_{xL}(C_n) \quad (2)$$

ここで、 W_{iL} は重要度係数、 $\mu_{xL}(C_n)$ は区分 L の帰属度関数である。

式(2)の意味は、この帰属度関数 $\mu_R(C_n)$ に与える影響は最も大きな因子で説明できる、と言うことである。このように、 $\mu_R(C_n)$ を定める算定式は各個人の感覚や経験により主観的に定められる。

b) ファジィ測度

ファジィ集合は、その対象の意味のあいまいさを表現しているのに対して、ファジィ測度^{16)~18)}は判定結果のあいまいさを表現するものである。本研究では、この評価尺度として $g-\lambda$ ファジィ測度を用いる。 $g-\lambda$ ファジィ測度は λ をパラメータとして式(3)で構成される。

$$\left. \begin{aligned} g_\lambda(E_0) &= g_1 \\ g_\lambda(E_i) &= g_i + g_\lambda(E_{i-1}) + \lambda \cdot g_i \cdot g_\lambda(E_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

($-1 < \lambda < \infty, i=0 \sim 12$)

ただし、 $E_i = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_i\}$ で、 C_n の部分集合である。また、 g_i はファジィ密度 ($0.0 < g_i < 1.0$) であり、式(4)で表される。

$$g_i = \alpha \cdot \mu_R(c_i) \quad (4)$$

ただし、 α は g_i を正規化するための定数で、パラメータ λ を与えた後に、式(5)で求められるものである。

$$1 = \begin{cases} \sum_{i=0}^{12} g_i & \lambda = 0.0 \\ \lambda^{-1} \left[\prod_{i=0}^{12} (1 + \lambda \cdot g_i) - 1 \right] & \lambda \neq 0.0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)は λ と g_i の制約式であり、 λ をパラメータとして、 E_i の重複する度合を表す尺度である。 $\lambda > 0.0$ のとき、 $g_\lambda(E_i) > g_i + g_\lambda(E_{i-1})$ つまり優加法的となり、大きな評価レベルを重視する結果を与える。 $\lambda < 0.0$ のとき、 $g_\lambda(E_i) < g_i + g_\lambda(E_{i-1})$ つまり劣加法的となり、逆に小さな

評価レベルを重視する結果を与える。また、 $\lambda = 0.0$ のとき $g_\lambda(E_i) = g_i + g_\lambda(E_{i-1})$ つまり加法的となり、 $g-\lambda$ ファジィ測度と確率測度は一致する。

c) ファジィ積分による景観レベルの評価

景観評価は、各評価区分の帰属度関数を被積分関数とするファジィ積分によって行う。 $g_\lambda(E_i)$ は式(3)を用いて $\mu_R(C_n)$ より求められる。ファジィ期待値 $F(L)$ は景観レベルの帰属度関数 $\mu_{xL}(C_n)$ を $g_\lambda(E_i)$ で積分することで得られる。従って、各景観レベル L のファジィ期待値 $F(L)$ は式(6)で表される。

$$\begin{aligned} F(L) &= \int \mu_{xL} \cdot g_\lambda \\ &= \bigvee_{i=0}^{12} \left[\left(\bigwedge_{n=0}^i \mu_{xL}(C_n) \right) \wedge g_\lambda(E_i) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

d) 景観レベルの決定

求められた各景観レベル L のファジィ期待値 $F(L)$ から景観レベル S_L を決定する。本研究では、この非ファジィ化の方法として、式(7)に示すように各期待値の分布の重心を求めることで決定した。

$$S_L = \frac{\sum_{L=1}^7 [F(L) \cdot L]}{\sum_{L=1}^7 F(L)} \quad (7)$$

4. アンケート調査による景観評価

(1) アンケート調査

アンケートの手法は、写真を提示して表-1に示した景観評価項目に従って7段階の評価を行う方法を採用した。景観評価に用いるための素材は、実構造物の写真以外にもフォトモンタージュやCGを用いる手法もあるが、それらの出来映えが評価結果に間接的に含まれてしまうことを排除するために、今回は実写を用いることとした。また、周囲の環境や構造物の種類や規模が異なると、全体から受ける調和や視野の違いによる印象の度合いが変化するため、構造物の種類は、コンクリート擁壁の1種類に限定するとともに、写真の撮影角度(約45度)や構造物の占める割合(約50%)を可能な限り一定とし、周囲の状況も同程度の割合で写すよう工夫した。

評価の対象は、写真-1に示す12種類の都市郊外にある住宅地内道路脇にある緑化されたコンクリート擁壁であり、その特徴は各写真の脚注に示した。評価者は、景観工学に関連した研究に従事している男女10名(年齢層は40歳代、30歳代、20歳代ほぼ同数名ずつ)を選定した。10名としたのは、標本から母集団を推定するのに、このようなばらつきの大きな問題では、10名程度有れば十分であると判断したからである¹⁹⁾。

(2) 評価結果

アンケート調査による景観評価結果のうち、「安定感」



(I) 格子状ブロック組
裏込栗石法尻草地在り



(II) 標準品矩形ブロック積み
疎な街路樹有り



(III) 自然石風ブロック積み
上部法肩密な植栽有り



(IV) 自然石風ブロック積み
上部法肩植樹有り



(V) 上部直壁下部ブロック
2段式中間植樹有り



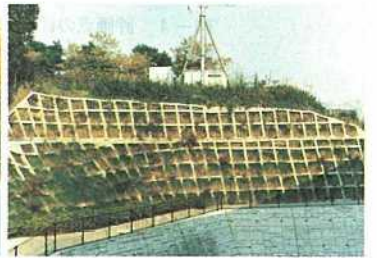
(VI) 格子状ブロック組
枠内さつき植込有り



(VII) 標準品矩形ブロック積み
上部法肩植樹有り



(VIII) 直壁上部ツル科植物の
垂下り下部植込有り



(IX) 急斜面現場打ち法枠
ブロック枠内牧草風



(X) 表面テクスチャー直壁上部疎な
植樹下部植込有り



(XI) 直壁全面植樹と庭園風
植込有り

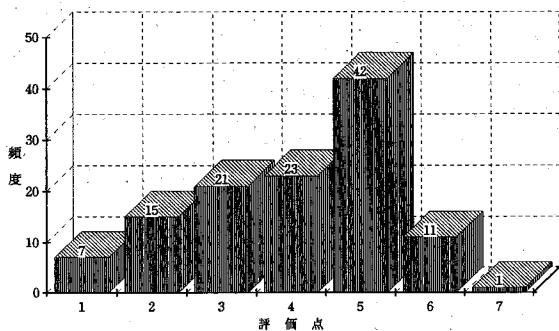


(XII) 緩斜面現場打ち法枠
ブロック枠内牧草風

写真一 1 景観評価に用いたコンクリート擁壁

表一 3 評価点の平均値と標準偏差

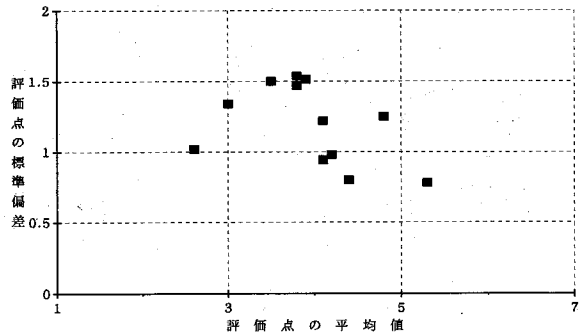
写真	評 価 者 番 号										平均値	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
I	5	3	2	4	5	4	4	4	5	5	4.1	0.94
II	5	5	4	4	5	5	5	4	2	3	4.2	0.98
III	6	6	4	6	6	5	6	4	5	5	5.3	0.78
IV	6	5	2	5	5	6	5	6	3	5	4.8	1.25
V	4	3	1	4	3	3	5	7	4	4	3.8	1.47
VI	3	5	5	5	1	4	3	2	6	5	3.9	1.51
VII	2	2	1	3	2	3	3	2	5	3	2.6	1.02
VIII	5	5	5	5	3	5	5	4	4	3	4.4	0.80
IX	5	2	2	4	3	4	3	1	6	5	3.5	1.50
X	4	5	2	4	1	4	2	4	1	3	3.0	1.34
XI	5	3	5	5	3	5	4	6	2	3	4.1	1.22
XII	5	3	1	5	5	5	2	2	5	5	3.8	1.54



図一 4 評価点のばらつき

についての総合評価を表一 3 に示す。総合評価には、「安定感」の他「親しみやすさ」の評価項目もあるが、評価結果ならびに後述する逆解析結果が、ほぼ同じ傾向を示すため、ここでは安定感に関する分析結果を示す。総合評価の点数は、同じ写真でも評価者によりかなりばらつきがあることがわかる。評価点の全体的傾向は図一 4 に示すとおり、中間的な評価点の割合が多いものの 1 から 7 まで全ての評価点が存在する。また、評価点の平均値とその標準偏差の関係は図一 5 に示すとおり、全評価者の平均値で見ると、各写真とも評価点は「やや悪い/良い」や「どちらとも言えない」に相当する中間的な景観評価となっている。つまり、平均が中間的な値を取ると言うことは、評価者が一致して、「非常に良い/悪い」あるいは「かなり良い/悪い」など、極端な評価とはならないことがわかる。

一般に、景観の極端に悪いものの評価は多くの人の意見が一致するが、良好な景観のうち特に斬新であったり個性的な表現を含む景観は、評価が分かれる。ここでは、総合評価の平均値が比較的良好なもの（評価点が 7 に近いもの）と比較的悪いもの（評価点が 1 に近いもの）は、比較的ばらつきが小さく、評価点が多に属するものは比較的ばらつきが大きい。これは、今回対象としたコン



図一 5 評価点の平均値と標準偏差の関係

クリート擁壁が、それ自体主体性を持った構造物ではなく、周辺の街並みに調和することが本来要求されるものである。そのため、景観評価が比較的良好と考えられる構造物の評価も、比較的悪いものと同様に、さほどばらつかない結果となっている。逆に中間的な評価点となっているものは、評価ランクが 7 段階となっているためのばらつきであると判断できる。

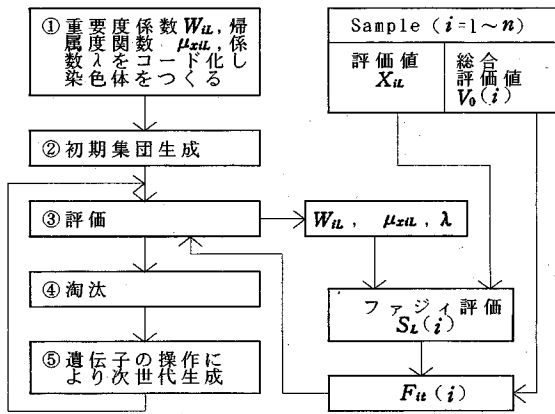
5. GA による逆解析

(1) 逆解析の手順

GA は、生物進化から着想を得た確率論的手法の 1 つであり、組み合わせ最適化問題をはじめとする多くの問題の適用に利用されている。

GA は生物進化の過程をダーウィンの適者生存過程と考え、現存する生物群を環境に対してより高い適合性を持った準最適生物とみなす。生物進化の過程における繁殖・淘汰、遺伝子交叉、突然変異の各プロセスを簡単な数理モデルに置き換え、最適化の手法として用いようとするものである。特に、組合せ最適化問題の解法として優れているとして、近年注目されている²⁰⁾。GA の詳細に関しては、文献に譲るが²¹⁾、ここでは、主観的に決定した重要度係数の値、帰属度関数の形状およびファジイ測度算出のためのパラメータ λ を、専門家に対するアンケート結果に基づいた逆解析により決定することを試みている。これにより専門家の判断の特性を探ることの可能性も検討できる。この逆解析は多数の変数を持つ組合せ最適化問題となるので、その解法として GA を採用している。

GA を用いて逆解析を行う本研究の流れは、図一 6 のフローで示すように、①重要度係数 W_{il} 、帰属度関数 $\mu_{x_{il}}$ ならびに重複の度合いを表す尺度 λ を、それぞれ離散化された変数としてコード化する。個々の変数が遺伝子であり、これらの組み合わせを 1 つの線列として取り扱う。個体は線列で表される。②複数の線列からなる初期集団に対して、③適合度（目的関数の満足度）を評価し、④



図一六 GAによる逆解析の流れ

これに基づいて淘汰を行って適合度の低い線列の組み合わせを排除する。⑤その後、交差（部分変数列の交換）、突然変異（変数値の変更）などの遺伝子操作により、次世代の集団を生成する。

具体的には、離散化した求めるべき未知パラメータの変数（遺伝子）による線列を生成し、一組のアンケート結果 i による表一1の14項目の評価値を用いてファジィ測度を求め、ファジィ積分を行うことによりファジィ評価値 $S_L(i)$ を得る。これとアンケート調査から得られた総合評価値 $V_0(i)$ から適合度 $F_{it}(i)$ を式(8)で定義した。

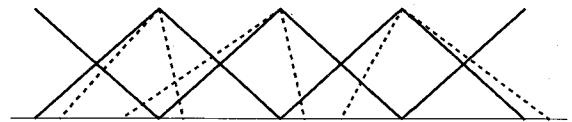
$$F_{it}(i) = 10 - |V_0(i) - S_L(i)| \quad (8)$$

すなわち、2つの評価値が完全に一致したときの適合度が10となる。従って、 n 組のアンケート結果に対する適合度 F_{SUM} は、式(9)で定義できる。

$$F_{SUM} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n F_{it}(i)^2 \quad (9)$$

こうして n 組のアンケート結果に対して全体的な適合度 F_{SUM} を最良値10として定義でき、適合度を最大にするようにGAにより世代交代をおこなうことになる。換言すれば、 F_{SUM} を最大とした目的関数の最適化問題である。GAの手法としては、後述するように、変数が多く線列が長くなるので、並列分散GAを採用する。ここでは、4組の線列群を生成し、それぞれの線列群で単純GAによる世代交代を行う。一定世代毎に線列群の間で線列を入れ替える。線列群間の線列の入れ替えは、一方の線列群の適合度の低い線列を一定数他方の線列群の適合度の高い線列で置換することとした。また、一世代の中で適合度のレンジが比較的小さいので適合度の最小値が最大値の1/3になるように線列スケリングを施した後に、ルーレットによる淘汰を行っている。

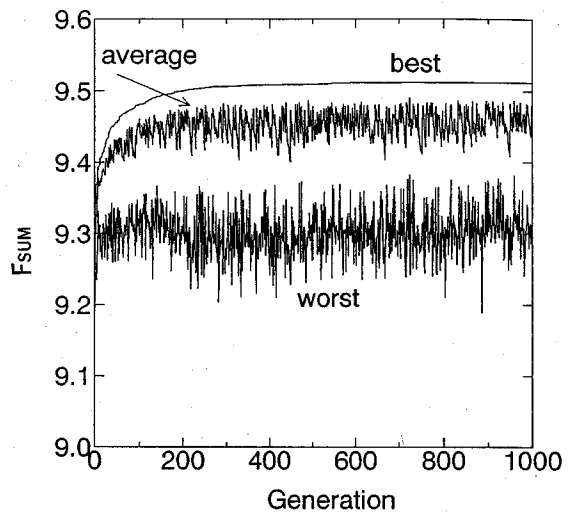
求める未知パラメータは、①重要度係数、②帰属度関数、③変数 λ とした。帰属度関数は、図一七に示すよう



図一七 帰属度関数の傾きの変化

表一三 GAのパラメータ

項目	値
個体数	100
交差率	0.8
突然変異率	0.03
世代数	1000
線列群数	4



図一八 GAの各世代毎の適合度 F_{SUM} の変化

にその関数の傾きを変化させることで、重複度が変わるようにしている。なお、左右の傾きを独立して変化させることにより、平均値の変化も併せて表現している。

(2) 逆解析

重要度係数は、 $[0.0, 1.0]$ の範囲で0.1ピッチに離散化し、組み合わせ数は 11^{14} となる。

帰属度関数は、左右独立に傾きを28分割し、 $28^2 = 784$ に離散化した。変数の数については判定値が7種類で評価項目が14であり $7 \times 14 = 98$ であることより、組み合わせ数は 784^{98} となる。また、基本的なGAパラメータは表一三に示す通りである。

得られたアンケート結果を用いて、GAによる逆解析を行った。各世代毎の適合度 F_{SUM} の変化は、図一八に示すとおりであり、平均値と最小値はある幅を持って徐々に適合度が上昇し、集団の最大値は、1,000世代でほぼ安定していることから、十分収束していることがわかる。

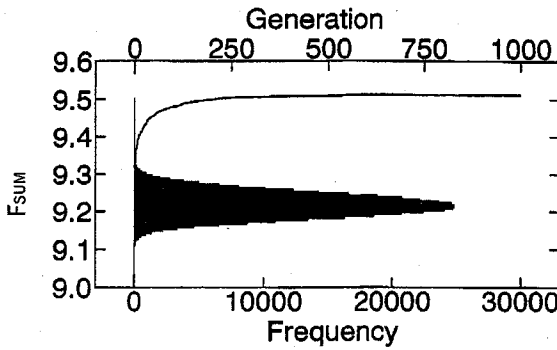


図-9 GA とモンテカルロシミュレーションとの比較

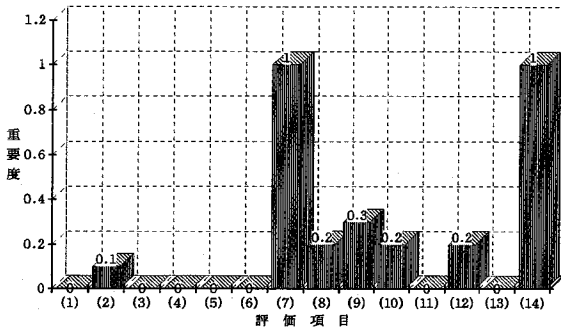


図-10 重要度に関する逆解析結果

収束値の妥当性を検証するため、10,000個の乱数を用いたモンテカルロシミュレーションを行った。適合度の分布とGAにより得られた適合度の収束状況の比較を図-9に示す。GAで得られた収束適合度は、モンテカルロシミュレーションの平均値から 9.3σ の距離があり、ほぼ最適値に近いことを示している。

(3) 逆解析結果

各項目毎の重要度係数の逆解析結果を、図-10に示す。重要度係数の感度が高い評価項目は、「色彩」と「緑化の調和」に関するもので、従来景観の重要な要素であると考えられる項目が今回の逆解析でも明らかとなった。また、14項目のうち半数の項目は重要度係数に対する感度が全く無いことも明らかとなった。特に、緑化に関して樹木の高さや密度など、物理的尺度への変換が容易と考えられる項目が、景観評価を代表する項目として、必ずしも適切でないことを示唆している。すなわち、景観評価に関しては、緑化そのものの評価である植栽の配置や形状より、むしろ構造物や緑化が周辺の環境と調和していることが必要であると解釈できる。

帰属度関数についての逆解析結果は、図-11に示すとおりである。初期に左右対称で与えたファジィ関数が左右非対称となっており、特に非対称性が強くなっている部分は、評価値が大小の極端な場合つまり「非常に」や

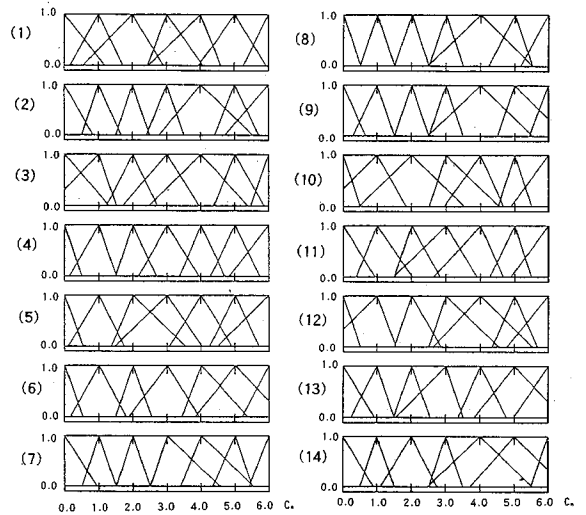


図-11 帰属度関数に関する逆解析結果

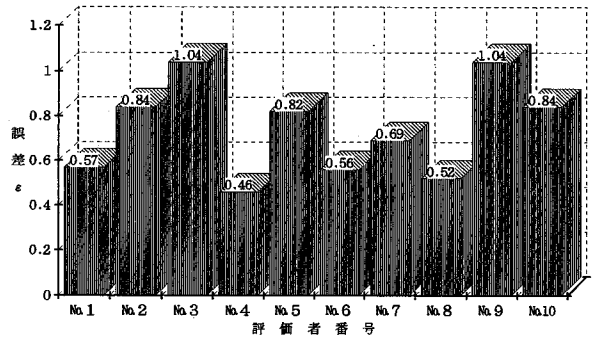


図-12 評価者毎の誤差

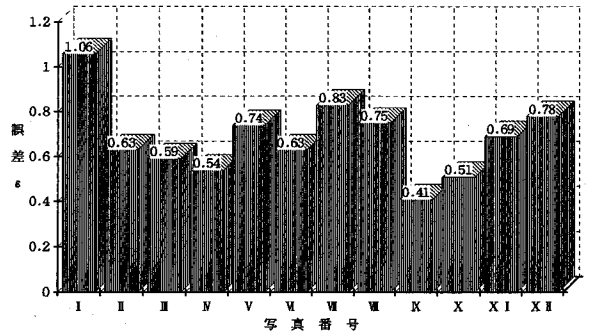


図-13 写真毎の誤差

「かなり」の評価値に対するものと、前述の重要度の感度が高い評価項目である。このことは、着目する評価項目に、大小極端な評価点を与えられた場合に、総合評価に最も影響を及ぼし、その影響度合いは非線形に大きくなることが予想される。逆解析によって得られた総合評価と、アンケート結果の誤差を、評価者毎ならびに写真毎に集約して示したのが、図-12ならびに図-13である。

誤差 ε の定義は、式(10)で示すとおりとした。

$$\varepsilon = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n [S_L(i) - V_0(i)]^2 \quad (10)$$

評価者毎の誤差は0.46から1.04と、評価者によって多少異なっている。誤差の少ない評価者は、評価が安定しており適切であると考えても良いが、全体的に見て評価点の誤差は、ほぼ1.0程度の範囲であり、総合評価が7段階であることを考慮すれば、今回行った景観評価の質が良いことを示唆している。また、写真毎の誤差はさほど特徴的な傾向は少ないが、写真によっては若干誤差が大きく、評価が難しいものも含まれていたと考えられる。4章のアンケート調査による景観評価結果で述べた総合評価のばらつきは、対象とする景観の評価点の高い場合にばらつきが小さくなる傾向を示したが、GAを用いた重要度係数や帰属度関数の傾きの修正により、特定の写真の景観にばらつきが大きくなる傾向が改善され、より安定した評価に近づいたものと判断できる。

また、逆算で求められた λ は、10,000 と大きな値をとり、各項目は優加法性を有していることがわかる。

6. まとめ

本研究は、緑化されたコンクリート擁壁の景観評価を判断することを目的としており、主観的な立場からファジィ理論を利用する方法を提案している。

ファジィ理論の適用において帰属度関数の形状や、その重要度係数を客観的に求めるために、アンケート調査を基に得られた各評価値及び総合評価レベルを用いてGAを適用した逆解析を試みた。その結果、本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 緑化された擁壁の景観評価に対して、ファジィ理論を用いることにより、景観を求める思考過程の数量化が可能で、主観的な評価を定量的に表すことができる。
- (2) GA逆解析による適合度の変化は、200世代程度の交配においても、最適値にかなり近い値を与えており、今回のように厳密な意味での最適解を必要としない場合などにはこの種の問題に対しては、効率的で有効な手法であることが確認された。
- (3) GA逆解析により求めた重要度係数のうち、感度が高い項目は、「色彩」や「緑化の調和」など、極めて少数の要因で景観評価が説明可能であり、逆に樹木の密度などの物理的尺度への変換が容易な項目が必ずしも景観評価には重要でないことが示唆される。

なお、GA逆解析の誤差は、対象とする構造物や評価者により異なり、対象物による評価の難易や評価者の回答の安定性がこれらの主観的な判断を求められる問題に対しては、攪乱要因と成り得るため、今回行ったアンケー

トのように、その対象者がある程度同じ知識レベルにあわせる必要がある。

謝辞：本論文を作成するに当たり、大成建設(株)技術研究所提案奈緒子研究員他の方々にはアンケートに協力して頂きました。(株)大林組土木技術本部増井直樹課長には、景観評価項目の策定に関して、東京電力(株)技術研究所佐藤仁人主管研究員、中山和美研究員には、景観評価手法に関する議論に加わって頂きました。また、佐藤建設工業(株)永見政夫氏には、評価の対象とした擁壁の選定にご協力して頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, *Information and Control*, Vol. 8, pp 338-353, 1965.
- 2) 清水剛一, 桜井春輔: ファジィ理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究, 土木学会論文報告集, 第370号/III-5, pp.225-232, 1986.6.
- 3) 松島 学, 関 博, 松井邦人: ファジィ理論に基づいた海岸施設の劣化診断, 土木学会論文集, 第432号/V-15, pp.254-261, 1991.8.
- 4) 松島 学, 安田 登, 増井直樹, 大口 健: ファジィ理論を用いた緑化されたコンクリート構造物の景観評価に関する一考察, コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集, pp.65-72, 1993.9.
- 5) 安田 登, 近田康夫, 松島 学, 木下真二: ファジィ理論に基づく緑化されたコンクリート構造物の景観評価の逆解析, 土木学会第3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.11-19, 1993.12.
- 6) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning, *Addison-Wasley*, 1989.
- 7) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, pp.3-88, 産業図書, 1993.
- 8) 宮沢丈夫: 遺伝的アルゴリズムと最適化問題, *ASCII*, Vol.5, No.6, No.7, アスキー, 1991.
- 9) 石井一郎, 元田良孝: 景観工学, 鹿島出版会: 1990.
- 10) 岡本亨久, 二羽淳一郎: 緑化したコンクリート構造物の景観評価の現状, *コンクリート工学*, Vol.32, No.11, pp.29-33, 1994.11.
- 11) 安田 登: 景観評価設計法, *コンクリート工学*, Vol.32, No.11, pp.34-38, 1994.11.
- 12) Nagataki, S., Okamoto, T., Yasuda, N., Masui, N., Tanaka, S.: Aesthetic Design Method of Concrete Structures Using Plants, *Proc. of 16th Concrete Conference by CEB & INCERC of Bucharest, Romania*, pp.s 1-s 10, 1994.6.
- 13) 小木曾, 乾: Semantic Differential 法による建物の色彩効果の測定, *日本建築学会論文報告集*, No.67, 1961.
- 14) 富家 直: 色彩感情の研究(1), 聖心女子大学論叢
- 15) 建築・都市計画のための空間学, *日本建築学会編*, 井上書院, 1990.11.
- 16) 田中英夫: ファジィ理論と応用, ファジィ測度に基づくファジィモデルとその応用, *数理科学*, pp.19-25, 1987.2.
- 17) 菅野道夫: Fuzzy 測度と Fuzzy 積分, *計測自動制御学会論文集*, 第8巻, 第2号, pp.218-226.1972.
- 18) 菅野道夫: Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価, *計測自動制御学会論文集*, 第9巻, 第3号, pp.361-368, 1984.
- 19) 松島学, 松井邦人: 採取個数から母集団の推定誤差に関する一考察, *土木学会第47回年次学術講演会*, pp.1224-1225, 1992.9.

- 20) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No. 482/IV-22, pp.37-46, 1994.1.
- 21) 杉本博之, 鹿 麗, 山下洋敬: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No. 471/I-24, pp.67-76, 1990.7.

(1994.4.28 受付)

INVERSE ANALYSIS OF SCENERY EVALUATION OF PLANTED CONCRETE RETAINING WALL

Noboru YASUDA, Yasuo CHIKATA, Manabu MATSUSHIMA
and Tameo KOBORI

In this paper, a procedure for the scenery evaluation of planted concrete retaining wall based on fuzzy set theory is presented. 14 items are chosen for evaluation. Fuzzy expected value of each valuation level is calculated by g - λ fuzzy measure and fuzzy integral. Evaluation level is assumed to be obtained from center of gravity for fuzzy expected value of each level. The important coefficients and the membership function profiles of items for evaluating scenery are obtained from inverse analysis on 120 questionnaire results by using genetic algorithm.