

(25) 物理効用を考慮した緑化構造物の環境評価手法に関する研究

A STUDY OF THE ENVIRONMENT EVALUATION TECHNIQUE OF PLANTED STRUCTURES CONSIDERING PSYCHOLOGICAL UTILITY

天野 佐寿* 近田 康夫** 松島 学***
Satoshi AMANO Yasuo CHIKATA Manabu MATSUSHIMA

* 東京電力(株) 送変電建設所 基礎設計グループ (〒170 東京都豊島区東池袋1丁目25番8号)

** 金沢大学 工学部土木建設工学科 助教授

*** 東電設計(株) 技術開発本部 耐震技術部課長

This paper deals with the environment evaluation technique of planted structures by using multi attribute utility analysis (MAUA). Many structures have been planned and designed on from the viewpoint of safety, but in this paper from three additional items - psychological (scenery), physical (water income and outgo, temperature control) and expenses - are considered in order to take into account the effects of plants.

Investigations are made on 15 alternatives of planted structure by using MAUA, and for making a comparison, the sensitivity analysis by neural network are also performed.

Key Words ; environment evaluation, planted structures, MAUA, N. N.

1. まえがき

有史以前から、我々人類は、時空を越え、大自然の中に数々の土木構造物を建設してきた。特に、土木技術者は、大自然の中に、巨大なコンクリート構造物の建設することが美徳と考えてきたが、ここ数年のエコブームによりその建設が見直されている場合が多い。そもそも、土木構造物は環境破壊を伴う事例が多く、その主な材料であるコンクリートと草木の緑とは全く対照的なイメージを、もたれる場合が多かった。しかし、最近、自然環境とコンクリートの調和を考え、コンクリート構造物表面に緑を植栽した、いわゆる『緑化されたコンクリート構造物』(以下、緑化構造物)の技術が開発され、その応用例も数多く見受けられるようになってきた。そこで、本研究では、社会のインフラストラクチャーとしての土木構造物の計画対象として、緑化構造物(擁壁の緑化)を取り上げ、コンクリートテクノロジーの新たな可能性を考えることにした。

以前は、緑化構造物の計画代替案評価は、力学上の安全性や、景観に代表される心理的効用だけで取り扱うものが多く、決して満足できるものとは言えなかった。しかし、本研究においては、この2点以外に、構造物周辺の環境や、建設費用に関する評価を計画代替案の評価に取り込むことを目標として、以下の3点で、緑化構造物を総合評価することにした。

1. 心理的効用(景観という人間の感性に対する効用)
2. 物理的効用(周辺の環境に与える物理的作用)
3. 費用効用(建設費用の評価)

2. 研究フロー

本研究では、第一に、研究対象に、多属性効用理論を援用し、専門家に対するアンケート結果による各計画代替案の期待効用を求める手法の妥当性、問題点をあげた。(図1, ①)。第二に、環境に対する定量評価の可能性を探るため、緑化構造物の緑による被覆度を仮定し、その値を用いて期待効用を算出し、それをアンケートによる期待効用と比較し、被覆度と物理効用の因果関係を検証した。(図1, ②) 第三に、ニューラルネットワーク理論(以下 N.N.理論)を用いて算出した各項目別の期待値と、効用理論における各項目別の期待値とを比較し、多属性効用理論を援用する際のモデル化した効用関数の妥当性の検討を行った。(図1, ③) 最後に、今

後のアンケート採取の方法における、個々のアンケート問題と属性の期待効用との関係を調べるために、N.N.理論を援用した感度解析を行った。(図1, ④)

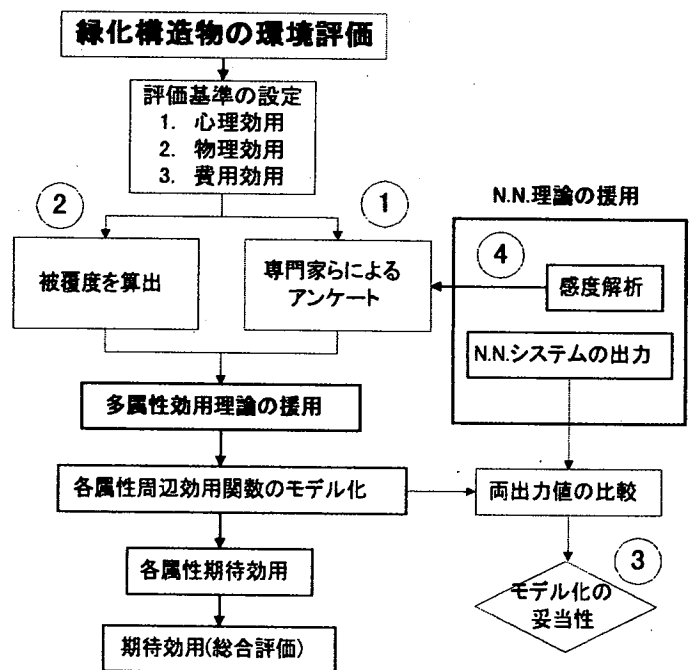


図1 本研究のフローチャート

3. 多属性効用理論

3.1 仮定

A. 統計的独立性の仮定 確率変数 $X_i (i=1, \dots, n)$ は、統計的に互いに独立である。これより、同時確率密度変数は、 $f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) = f_{X_1}^i \dots f_{X_n}^i$ となり、代替案 a_i に関しての個々の変数 X_i の周辺確率密度関数 $f_{X_i}^i(x_i)$ の積で表される。

B. 選考独立の仮定 任意の2つの属性間のトレードオフは、1つの無差別曲線で表すことができ、且つ、その無差別

曲線は、その他の属性値によって影響されない。
C. 効用独立の仮定 ある属性 X_i の効用は、他の属性の効用と無関係に決まる。

B と C の仮定は、結合効用関数が個々の属性の効用の汎関数として与えられるということを表している。従って、個々の単属性効用関数 $u_i(x_i)$ が求まれば、汎関数は $u_i(x_i) (i=1, \dots, n)$ の互いのスケールを決めて結合することによって求められる。

4. ニューラルネットワーク理論 (N.N.理論)

4.1 バックプロパゲーション学習アルゴリズム

バックプロパゲーション (B.P.) 学習アルゴリズムが用いられる階層型ニューラルネットワークでは、入力ベクトルは出力層へ向かって流れる。出力層では、教師ベクトルによって誤差が求められる。その誤差は、入力層へ向かって伝播して、重みの学習が行われる。B.P.学習法は、次のように行われる。

- (1) ネットワークの初期化
重みの初期値を、乱数を用いて小さな値に設定する。
- (2) 入力ベクトルの入力(前向き)
まず、入力層に入力ベクトルが入力される。ここで入力ベクトルとは、入力パターンそのもの、あるいは前処理がされたものをいう。入力ベクトルは出力層へ向けて伝播する。各ニューロンは、前の層のニューロンからの重みづけ和を求め、シグモイド関数によって出力値を決定する。
- (3) 出力層への教師信号の入力
出力層へは、入力ベクトルに対応した教師ベクトルが与えられる。
- (4) 誤差伝播による重みの学習
次式に基づいて重みを更新する。
(新しい重み) = (前の重み) + (定数) × δ × (ニューロン出力)

(5) (2)へ戻る (2)～(4)の動作を繰り返して、重みを学習していく。

5. 緑化構造物の環境評価への援用

5.1 研究対象

本研究では、研究対象として、コンクリート擁壁の法面及び、その周辺の緑化を取り上げた。緑化構造物の計画代替案として、3 グループ各 5 枚、合計 15 枚の既存のコンクリート擁壁の写真を用意した。

5.2 アンケートの実施

アンケートは、心理効用、物理効用、費用効用の 3 つの視点から緑化構造物を捉え、できるだけそれぞれの分野の専門知識を持った人物が評価したデータを入力するため、各効用毎に 14 名の専門家に協力してもらいアンケートを行った。アンケートの結果をランダムにつなぎ合わせ、あたかも 1 人の被験者が全ての効用のアンケートに回答したかのように工夫した。ただし、費用効用に関しては、直接見積りし、各代替案に 1 つの確定値となり、被験者数によるアンケート結果のばらつきは存在しないため、被験者数とは無関係である。

5.3 アンケートの質問と回答

各専門家に配布したアンケートの質問内容と回答方法は、表 1～表 3 に示す。評価には、5 段階と 3 段階の SD 法 (Semantic Defential 法) を用い、評価基準によって、評価の高いものから、例えば、5 段階評価ならば、5, 4, …, 1 のように高得点を与えるようにする。尚、費用効用に関しては、初期建設費用のみを見積もることとした。緑化に関係している工事費とその他の工事費を 100m 当たりの金額 (万円) で評価した。

表 1 心理効用のアンケート内容と回答方法

番号	大項目	小項目	内容	評価基準	評価法
1. 1	緑化の景観	配置	植栽範囲	狭い／広い	5 段階
1. 2			樹種の組合せ	不適切／適切	↑
1. 3			立体感創出の配慮	ない／ある	↑
1. 4		形状・寸法	樹種の形状	不適切／適切	↑
1. 5			高さのバランス	↑	↑
1. 6			樹木の密度	↑	↑
1. 7		色彩	植栽と背景の色相	合わない／合う	↑
1. 8		季節感	季節感の演出	感じない／感じる	↑
1. 9	擁壁の景観	素材	素材の良さ	悪い／良い	↑
1. 10		形状・寸法	形状寸法	↑	↑
1. 11		肌合い	表面テクスチャー	↑	↑
1. 12	調和	緑化と周辺環境	馴染みやすさ	馴染まない／馴染む	↑
1. 13		擁壁と周辺環境	↑	↑	↑
1. 14		擁壁と緑化	↑	↑	↑
1. 15	総合評価	形容詞による評価	親しみやすさ	無い／有る	↑
1. 16			安定感	↑	↑

表 2 物理効用のアンケート内容と回答方法

番号	大項目	小項目	内容	評価基準	評価法
2. 1	水収支	雨水	保水力	ない／ある	5 段階
2. 2		水質	汚濁負荷低減能力	↑	↑
2. 3		総合評価	(植栽がない場合と比べて) 効用が期待できるか	できない／できる	3 段階
2. 4	温度制御	周辺空間	温度変化抑制効用	ない／ある	5 段階
2. 5		木陰の形成	温度上昇抑制効用	↑	↑
2. 6		総合評価	(植栽がない場合と比べて) 効用が期待できるか	できない／できる	3 段階

表 3 費用効用のアンケート内容と回答方法

番号	大項目	小項目	内容	評価方法
3. 1	費用	緑化費用	緑化に関わる費用	金額 (万円／100m)
3. 2		その他	緑化以外の費用	金額 (万円／100m)
3. 3		総合評価	初期建設費用	金額 (万円／100m)

6. 多属性効用理論を援用した解析

6.1 属性の決定

緑化構造物の計画代替案を評価するための属性は、表 4 のように定義した。現実には、多属性効用理論を援用するためには、意志決定者が 2 つのくじの間で選考無差別となるようにアンケートなどで p_i を変えて質問し、選考無別になる p_i の値を決定する。しかし、本研究では、属性が多く、 p_i を決めるために意志決定者に直接質問することは、ほとんど不可能なので、簡略化のため $p_i = \{0.25, 0.75\}$ の 2 つのパラメーターの組合せのうち、

表 4 評価属性の定義

属性	項目	記号	内容 (目標)
心理効用	親しみやすさ	X_1	緑化構造物を、できるだけ親しみやすいものにする。
	安定感	X_2	緑化構造物を、できるだけ安定感のあるものにする。
物理効用	水収支	X_3	保水力、汚濁負荷低減能力を高めた構造物にする。
	温度制御	X_4	周辺環境の温度変化抑制能力、木陰による温度上昇抑制能力を高めた構造物にする。
費用効用	建設費用	X_5	緑化費用、その他の費用を分割して積算する。

表 5 計画の種類

NO.	計画の種類	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
1.	親しみやすさ X_1 を重視した計画	0.75	0.25	0.25	0.25	0.25
2.	安定感 X_2 を重視した計画	0.25	0.75	0.25	0.25	0.25
3.	心理効用 X_3 を重視した計画	0.75	0.75	0.25	0.25	0.25
4.	水収支 X_3 を重視した計画	0.25	0.25	0.75	0.25	0.25
5.	温度制御 X_4 を重視した計画	0.25	0.25	0.25	0.75	0.25
6.	物理効用 X_5 を重視した計画	0.25	0.25	0.75	0.75	0.25
7.	建設費用 X_5 を重視した計画	0.25	0.25	0.25	0.25	0.75

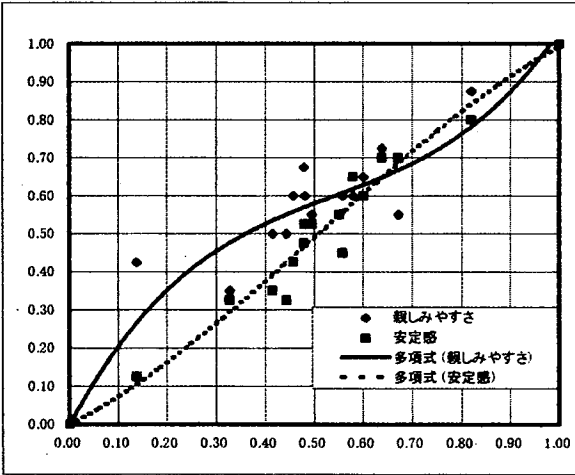


図 2 アンケートによる X_1, X_2 の周辺効用関数

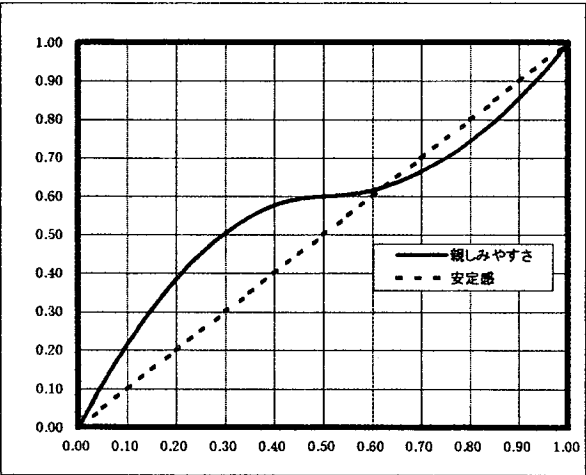


図 3 モデル化された X_1, X_2 の周辺効用関数

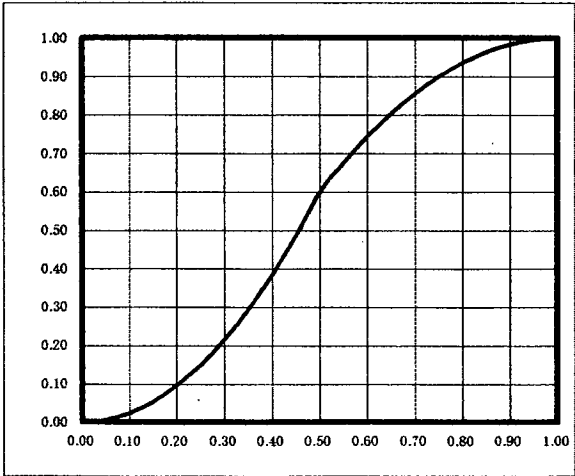


図 4 モデル化された X_3 の周辺効用関数

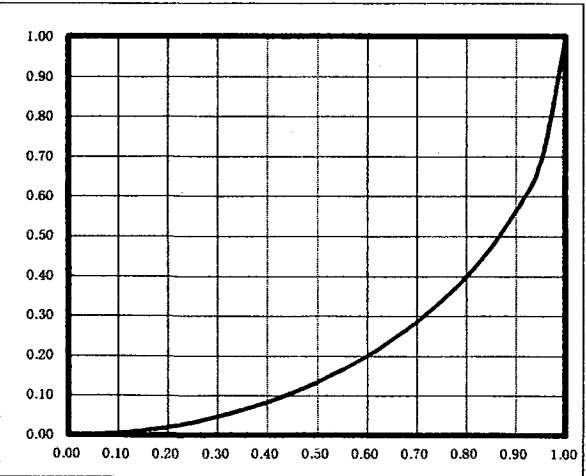


図 5 モデル化された X_4 の周辺効用関数

表 5 に示す特徴的なもの 7 通りを検討した。

6.2 周辺効用関数のモデル化

多属性効用理論を援用するには、各属性毎の周辺効用関数を決定する必要がある。本研究では、15 代替案に対する被験者 14 人の回答の内、10 人分を利用し、周辺効用関数を決定した。(図 2) 横軸には、その属性に対する計画者の努力度を、縦軸には、該当する属性の評価をそれぞれ $[0, 1]$ で正規化した結果を、図 3~5 に示す。

6.3 期待効用

アンケート結果に基づく期待効用

アンケート結果に基づく期待効用を求めるために、被験者 14 人中、周辺効用関数のモデル化に使用しなかった被験者 4 人分のアンケートの回答を利用し、緑化構造物の 15 代替案の期待効用を求めた。図 6 に示す。

物理効用に被覆度を考慮した場合の期待効用

つぎに物理効用に対する努力度(X軸)を、アンケートの回答によるデータではなく、写真から直接得られるコンクリート表面の緑による被覆度をデータとして、期待効用を求めた。その方法は、写真を5mm四方のグリッドで区切り、1グリッドの50%以上が緑化されているものを数え上げ、全体のグリッド数で割り、データとした。図 7 に示す。

6.4 考察

専門家らは、写真から物理効用(水収支、温度制御)を読みとる際に、単に、緑を量的なものだけで判断していかないことが推察できるので、物理効用の入力データとして被覆度のみを利用することは、現状では、不十分であると考えられる。

写真や計画案より物理効用に関する努力度を被覆度以外にも、緑の密度や、斜面の傾斜、樹種の組合せなどによっても評価するべきであることが示唆されている。

7 N.N.理論を援用した周辺効用関数形の検討と感度解析

1 次及び 2 次関数を用いてモデル化された周辺効用関数の検討のために、ニューラルネットワーク理論を援用

したシステムを構築し、入力値と出力値の相関を調べた。また、専門家に対して行ったアンケート問題の属性との関係を調べるため、構築されたシステムを利用し、平均値廻りの感度解析を行った。

7.1 モデル化された周辺効用関数形の検討

N.N. システムによる出力値と前節でモデル化した周辺効用関数による出力値を比較し、モデル化された各周辺効用関数の妥当性を検討するために、2 つの誤差を図 8 に示した。それによると、建設費用の周辺効用関数のモデル化以外の属性は、ほとんど両者の差が 0.20 以下になっているので、周辺効用関数のモデル化は、成功しているといえる。しかし、建設費用に関する周辺効用関数は、実際にアンケートによる周辺効用関数形の推定ができないので、適当な関数を与えて、その効用を求めることが必要になる。

7.2 N.N.を援用した感度解析とアンケート

システム構築後、アンケートの質問内容と各属性との関係を検証するために、感度解析を行った。平均値まわりの各項目 X_i の感度を算出し、ネットワークの内部構造を検討した。(図 9) ほとんど全ての属性に高い感度を上げているアンケートの質問項目は、樹種の組合せ、擁壁と周辺環境の調和に関する質問であり、ほとんど感度を示さないものは、樹木の密度、季節感、形状バランス、保水力などである。

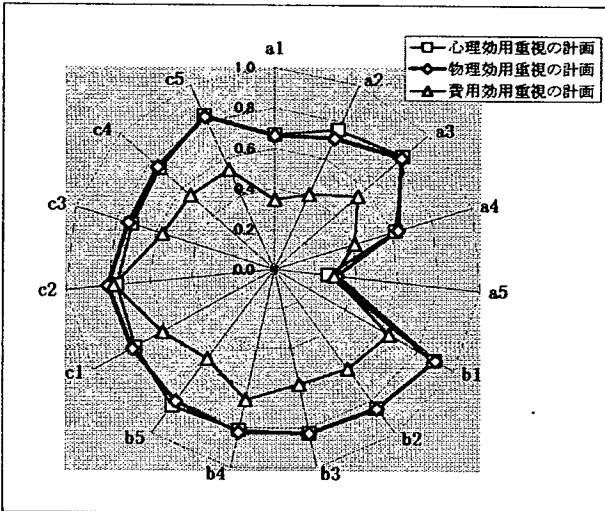


図 6 アンケート結果に基づく期待効用

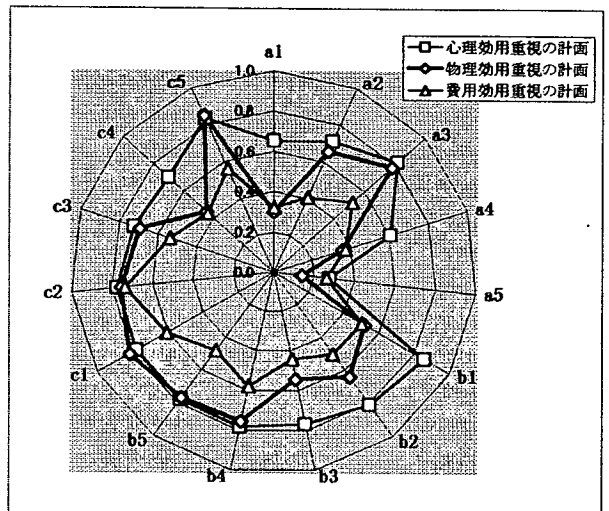


図 7 被覆度を考慮した場合の期待効用

表 6 モデル化された周辺効用関数

項目	属性	記号	周辺効用関数	範囲
心理効用	親しみやすさ	X_1	$u(X_1) = -2.40X_1^2 + 2.40X_1$	[0.00, 0.50]
	安定感	X_2	$u(X_1) = 1.60X_1^2 - 1.60X_1 + 1.00$	[0.50, 1.00]
物理効用	水収支	X_3	$u(X_2) = X_2$	[0.00, 1.00]
	温度制御	X_4	$u(X_3) = 2.40X_3^2$	[0.00, 0.50]
	建設費用	X_5	$u(X_3) = -1.60X_3^2 + 3.20X_3 - 0.60$	[0.50, 1.00]
費用効用	建設費用	X_5	$u(X_4) = X_4$	[0.00, 1.00]
			$u(X_5) = 1.00 - \sqrt{1 - X_5^2}$	[0.00, 1.00]

7 結論

以下、本研究で得られた知見を列挙する。

1. 物理効用のアンケートに回答したの専門家の評価基準は、単に被覆度だけにより物理効用を評価していないことが推察できる。他の要因として、法面の傾斜角、樹種の組合せ、緑の密度等を写真から読みとり評価しているのではないかとと思われる。
2. 周辺効用関数のモデル化では、費用効用に関してかなり誤差が出てしまった。これは、アンケート結果に確定値しか現れないので、計算の便宜上、2次式でモデル化することに限界がみられる。
3. 感度解析によってアンケート問題の検討を行った結果、SD法を用いた評価では、被験者の回答が中央部（どちらでもない）によりやすくなってしまうこと

が、今後の研究課題といえる。

参考文献

- 1) Alfredo H-S.Ang, Wilson H.Tang, 確率統計の応用, 丸善株式会社, pp7-pp124, 1988.1
- 2) コンクリート工学, Vol32/No.11, 日本コンクリート工学協会, 1994.11
- 3) 安田登, 近田康夫, 松島学, 小堀為尾, 緑化されたコンクリート擁壁の景観評価の逆解析, 土木学会論文集, No.514/V-27, 1995.5
- 4) 近田康夫, 木下真二, 城戸隆良, 小堀為雄, ファジィ理論に基づく景観評価のGAによる逆解析に関する一考察, 土木情報システム論文集, Vol.3, 1994
- 5) 安居 院猛: ニューラルプログラム. (株) 昭晃堂 1993.

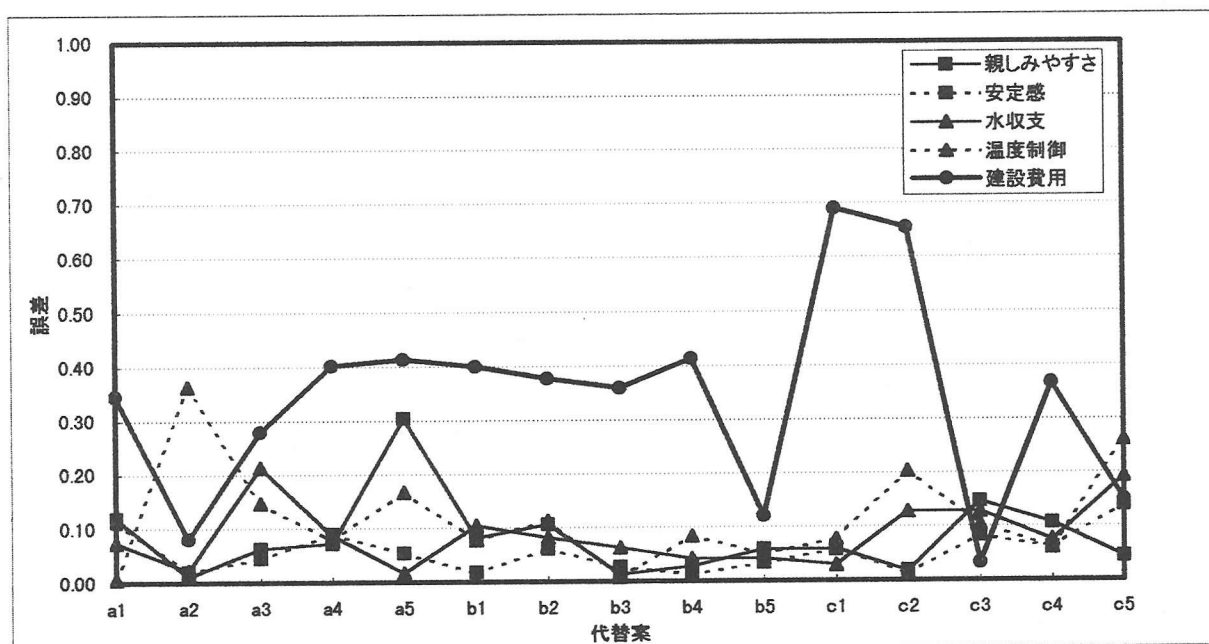


図 8 N.N. 出力値と周辺効用関数形との誤差

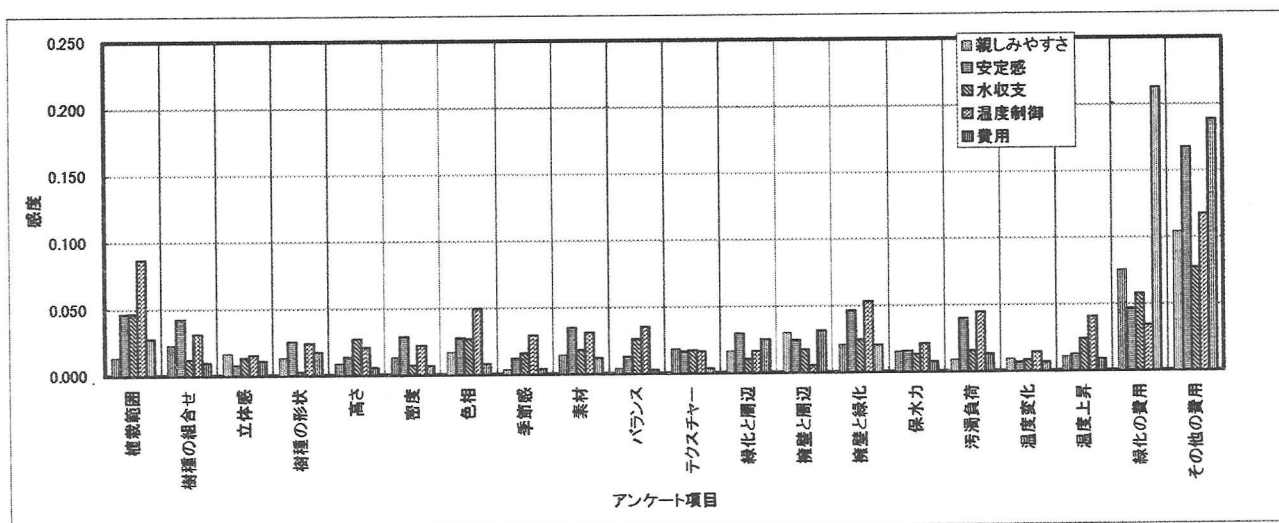
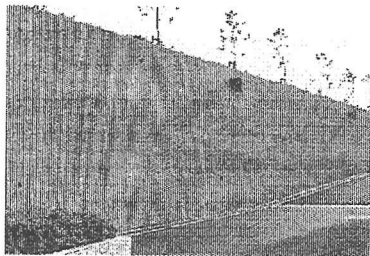
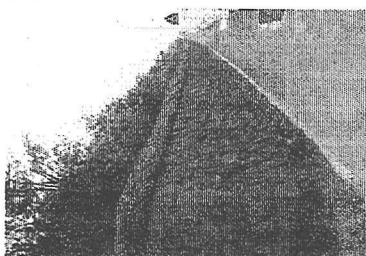


図 9 感度解析

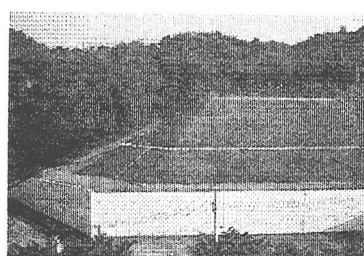
付録 計画代替案として用いた写真



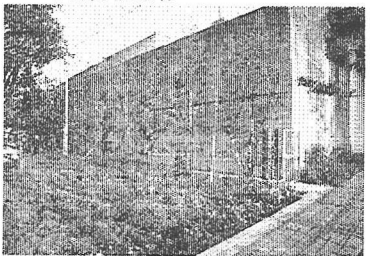
a1 表面テクスチャー直壁粗な植樹
下部分植込有



b1 自然石風ブロック積上部粗な
植栽有 ※写真左が上



c1 緩斜面菱形現場打法枠ブロック
枠内牧草風下部直壁



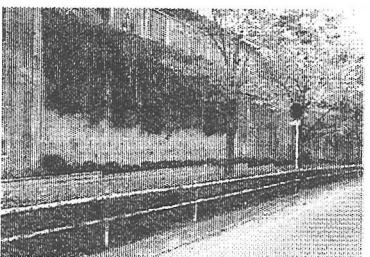
a2 直壁前面植樹と庭園風植込有



b2 自然石風ブロック積
法面肩密な植栽有



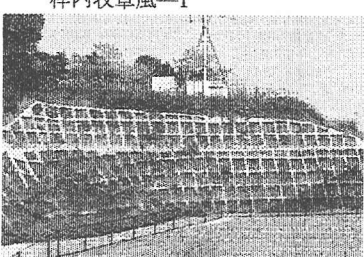
c2 緩斜面現場内法枠ブロック
枠内牧草風—1



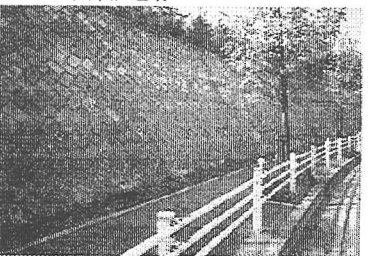
a3 直壁上部ツル科植物の垂下り
下部植込有



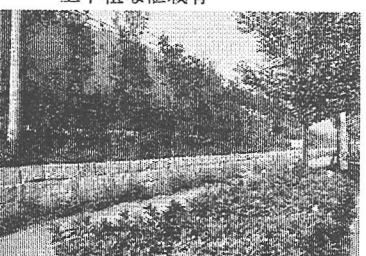
b3 自然石風ブロック積
上下粗な植栽有



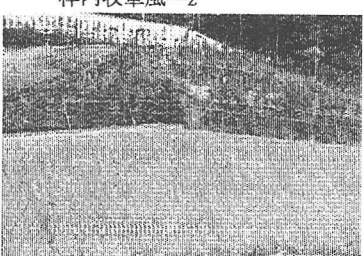
c3 緩斜面現場打法枠ブロック
枠内牧草風—2



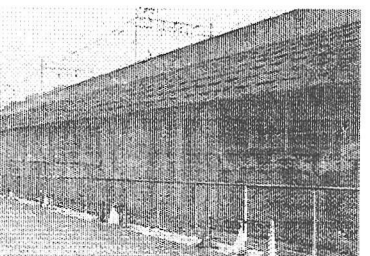
a4 標準矩形ブロック疎な街路樹有



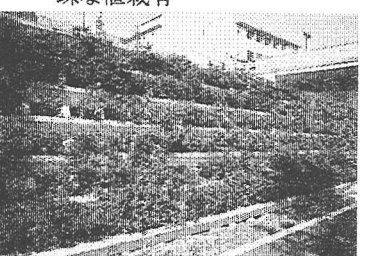
b4 低い自然石風矩形ブロック積
疎な植栽有



c4 矩形段違ブロック積上部疎な
植栽有り



a5 上部緩斜面現場打法枠下部直壁



b5 格子状ブロック組枠内サツキ
植込有



c5 格子状ブロック組
ツル科植物有