

多目的意思決定法によるエネルギー使用量を 考慮した構造物設計代替案の選択

本城勇介¹・松尾 稔²

¹正会員 Ph. D. 岐阜大学 工学部 土木工学科 教授 (〒505-1193 岐阜市柳戸1-1)

²フェロー 工博 名古屋大学 総長 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

近年さまざまな分野で地球環境の悪化が論じられており、社会基盤施設の建設においても、エネルギー・資源と環境の持続的な保全を可能にするシステムの構築が求められつつある。本研究は、建設工事におけるエネルギー使用量・環境負荷の実態を把握し、これらを考慮した新しい設計法の構築を目指すものである。具体的には二酸化炭素排出量をエネルギー使用量・環境負荷の指標として用い、一定の構造物の信頼性のもと、二酸化炭素使用量と経済性(コスト)など複数の指標を評価要素とし、多目的意思決定手法の内、階層分析法と多属性効用分析法を用い、海上埋め立て地の護岸を例題として、複数の設計代替案より最適なものを選択する手法を研究した。

Key Words: *infrastructure design, energy consumption, CO₂ emission, multiobjective decision making, analytic hierarchy process, multi-attribute utility analysis*

1. はじめに

著者らは先に、これから我々が直面するであろう資源・環境の制約を踏まえたうえでの社会基盤の整備の問題を、社会基盤施設の設計法という立場から捉え、そのアプローチの方向を示すことを目的とした研究の結果を公表している¹⁾。

そこでは、この問題を考える前提として、人類の経済活動の大規模化にともない、従来それに資源を提供し、また廃棄物を受容していた自然システムが、もはや無限の容量を持つとは考えられなくなったことを示した。そして、我々の経済活動を従来のように経済システム内の貨幣と財の循環としてだけ捉えるのではなく、自然システムをも含めた枠の中で、物質収支を分析することが必要であることを述べた。しかし、我々の知識の不足と、自然システムの複雑さのため、すべての物質の収支を追うことは現時点では不可能であることも述べた。

そして、このような理解に基づき、我々は社会基盤施設の設計法に物質収支と言う観点を考慮した指標を、従来から考慮されてきた経済性と信頼性と言う指標に加えるため、当該構造物のエネルギー使用量・環境負荷をおおまかに測る現実的な指標として、二酸化炭素発生量をとることを提案した。各構造物の建設・維持管

理・廃棄のときに発生する二酸化炭素量は、各構成材料の二酸化炭素発生原単位を積み上げることにより計量される。

提案した設計法では、設計代替案を評価する指標として構造物の建設費用と信頼性に加えて、二酸化炭素発生量を加えている。このため設計代替案の選択の問題は、多目的決定法の問題となる。

本論文は、経済性、信頼性、二酸化炭素発生量と言う3つの指標を持つ意思決定問題としての設計法をとらえ、合理的な意思決定方法を研究したものである。

この論文では、多目的意思決定法の中から、階層分析法(AHP: Analytic Hierarchy Process)、と多属性効用分析(Multi-attribute utility analysis)の二つの手法を取り上げ、それらの本問題への適用を試みた。

手法の説明の後にこれらを、海上埋め立て地の護岸の設計代替案選択の問題に適用し、その効果や問題点を考えた。

2. 従来の設計法と例題の説明

この章では、従来から行われてきた社会基盤施設の

計画方法や設計法を簡単にまとめ、また例題で扱った、海上埋め立て地の護岸の設計代替案の比較について、その概要を述べた。

(1) 従来の設計法

a) プロジェクトの計画法

現在、最も一般に行われている社会資本整備プロジェクトの評価手法の一つは、費用・便益分析である。そこでは当該代替案の実施にともない生じる便益を消費者余剰として計量し、また代替案の実施にともなう直接的な費用を算出し、その差である純便益が大きい代替案を実施するものである：

$$\max \{B(a) = B_T(a) - C_T(a)\} \quad (1)$$

ここに、 B :純便益、 B_T :プロジェクト実施により得られる便益、 C_T :総費用、 a :代替案。

b) 安全率を用いた設計法

社会基盤施設の計画法と設計法は基本的に同一のものであり、設計法は意志決定問題として定式化できる。すなわち計画では、プロジェクト全体の純便益を最大化しようとするのに対し、その下位のレベルの意思決定である構造物の設計では、その便益については、その構造的な設計にかかわらずほぼ一定であると仮定し、総費用の最小化を目的とした意志決定問題として定式化される。例えば、4車線の高速道路の建設が決定されれば、その便益は一定であると仮定し、式(1)の総費用(特に建設費用)の最小化を図ろうとする。このとき、設計示法書で示された安全率を守るなど、安全性に関する制約を守らなければならない：

$$\begin{aligned} \min. C_c(a) \\ \text{s. t. } P_F(a) < P_F^* \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 C_c :建設費用、 P_F :破壊確率、 P_F^* :ある規格化された破壊確率であり、通常安全率として与えられる。

c) 信頼性設計法

一方、この制約条件を目的関数に組み込んだ、信頼性設計法における費用最小化基準は：

$$\min \{ C_T(a) = C_c(a) + P_F(a) \cdot C_F \} \quad (3)$$

ここに、 C_F :構造物の破壊費用。

信頼性設計法では、安全性を期待損失費用という形で建設費用と同じ金銭的な評価指標に置き換え、この合計である総費用を用いて、意志決定を行う設計法と見ることができる。この方法では、経済的な制約

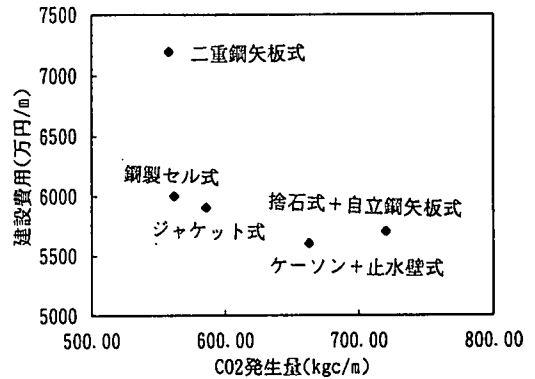


図-1 各設計代替案の建設費用とCO₂発生量の関係

のため、無限に安全な構造物を建設することはできないという現実を、設計法の中に直接反映させている。いわば、費用と信頼性と言う2軸の評価を、破壊確率を通じて1軸評価に変換している。

このような2軸評価に、環境負荷・エネルギー使用量という第3軸を評価項目に加えるべきだと言うのが、本研究の主張である。

(2) 例題の概要説明

本論文で取り上げる例題は、文献²⁾よりとられたもので、水深4m、海底面下10mの粘性土地盤上に、海底面より5m高さの埋め立てを行うための護岸を設計する問題を考える。この場合、埋立を排水したドライな状態で行うことを想定しているの、護岸は止水性を有している必要がある。これは、先に松尾ら¹⁾により、検討された例題と全く同様のものである。

この例題では、二重鋼矢板式、鋼製セル式、ジャケット式、ケーソン+止水壁を組み合わせた形式、捨石と自立鋼矢板を組み合わせた形式の5つの構造形式が、設計代替案として検討された。それぞれの護岸は現行の設計法により設計され、従って一定の信頼性のレベルを満足していると仮定し、その上でCO₂排出量と、建設費用の2つの目的関数を最小化するという目的の元で、これらの5つの代替案より、多目的意思決定法により最適の代替案を決定しようと言うのが、ここにおける問題である。

図-1に、各設計案の法線1m当りの建設費用と、二酸化炭素(CO₂)排出量を、これらを軸とするグラフに示した。CO₂排出量の算定方法、それぞれの代替案のCO₂排出材料の構成などの詳細については、松尾ら¹⁾を参照されたい。この図から分かるように5個の代替案の内4個はパレート最適解である。すなわち、この

中の任意の2個の案を比較したとき、2つの評価規準(建設費用と二酸化炭素発生量)のどちらかは一方が優れており、他方はもう一方が優れている。この意味で、この2つの評価規準を独立に考慮する場合、これら2つの案のどちらが優れているとはいえない(無差別である)。

3. 階層分析法^{3), 4)}

階層分析法(Analytic Hierarchy Process: AHP)は比率尺度による一対比較をもとに、全体としての項目間の合成比率尺度を決定する方法である。具体的には、ある意思決定をするに際して、その評価基準が複数個存在し、しかもそれらの計量化が難しく一軸的に評価できない場合でも、問題をいくつかのレベルに階層化、分解し、一対比較といわれる比較的判断の容易な形式に持ち込み、後でこれらの結果を合成することにより、総合的な評価尺度をその中から見いだそうとする試みである。

以下(1)では解析の手順を述べ、またこの方法を用いる上で特に重要な、階層分析法の理論的な基礎となる一対比較行列の性質について述べる。(2)では、護岸設計代替案の比較へのAHPの適用例を示す。

(1) 階層分析法の手順

階層分析法は、次のような手順で行われる。

- 1) 評価したい問題について階層図を作る。
- 2) 各レベルの要素について、親要素に対する重要度の一対比較を行う。
- 3) 一対比較行列の最大固有値、固有ベクトルを求める。
- 4) 一対比較値が妥当かどうかを整合度、整合比によって評価する。
- 5) 階層に基づき重要度の合成を行い、最終要素の優劣を判断する。

以下に、これらの手法について詳述する。

a) 階層図の作成

階層構造に基づき問題を分析することにより階層図を作る。階層図はレベルと要素(または項目)と上下の要素を結ぶ線からなる。上の要素を親要素、下の要素を子要素と呼ぶ(図-2)。

このようにいくつかのレベルに階層化し、問題を単純化することによって、評価項目が複数個存在し、しかもそれらの計量化が難しく一軸的に評価できない意思決定問題でも、一つの親要素の評価項目に関する一対比較という、意思決定者にとって、比較的評価しやすい形式に持ち込むことができ、最終的には、後述するような方法を用いることによって、評価項目ごと

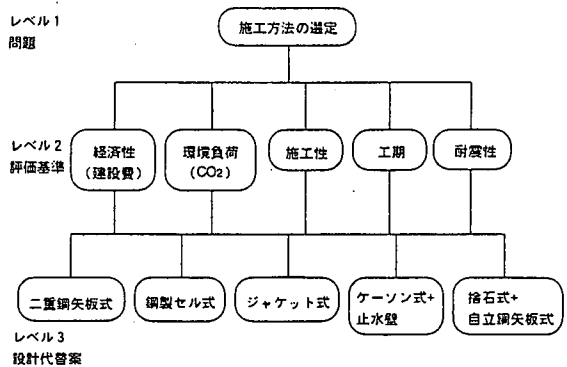


図-2 階層分析法の階層図

表-1 一対比較値の意味

一対比較値	数値の意味
1	両方の項目が同じくらい重要
3	左の項目の方が上の方より若干重要
5	左の項目の方が上の方より重要
7	左の項目の方が上の方よりかなり重要
9	左の項目の方が上の方より絶対的に重要
2,4,6,8	補間的に用いる
上の数値の逆数	上の項目から左の項目を見た場合に用いる

の重要度を容易に求めることができるようになるのである。

b) 一対比較行列の作成

ある親要素に属する要素を I_1, I_2, \dots, I_n とするとき、一対比較行列 A は $(n \times n)$ 型の行列である。 A の成分 a_{ij} は次の意味をもつ。

$$a_{ij} = (\text{要素 } I_i \text{ の重要度}) / (\text{要素 } I_j \text{ の重要度}) \quad (4)$$

この値(一対比較値)としては原則として、1, 2, ... 9およびその逆数を用いる。これは、刀根³⁾が経験的に推奨している一対比較値のランクであり、その数字の意味は表-1のとおりである。表-1を見て明らかであるが、一対比較を行うにあたって要素 I_i と要素 I_j が同じくらい重要であると判断した場合は、この一対比較値 a_{ij} は1となる。同様に、要素 I_i が要素 I_j よりかなり重要であると判断した場合は、この一対比較値 a_{ij} は7、また対称要素の一対比較値 a_{ji} は式(4)より1/7となることがわかる。一般に

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (5)$$

という性質をもつ。

次に、一対比較値に1から9までの数とその逆数を用いる理由についてであるが、これは端的に言えば、人間が感覚的に識別できる数的領域ということである。1から9までの代わりに1から100までの数を使うこともできる。しかし、100と99の差を感覚的に分離することは極めて困難である。

c) 一対比較行列の性質

今n個の評価項目 I_1, \dots, I_n があり、その本来の重要度が w_1, \dots, w_n であるとする。そのとき、項目 I_i と I_j の重要度の一対比較値 a_{ij} は

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$$

という関係を満たす。したがって、一対比較行列 $A=(a_{ij})$ は次のような形となっている：

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \quad (7)$$

このAの右側から、重要度ベクトルを乗じて：

$$\begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

この関係式より、各要素の重要度のベクトルはAの固有ベクトルであり、nは固有値であることがわかる。しかもnは行列Aの最大固有値である。

d) 整合性の評価

式(7)のような理想的な一対比較行列は、完全な整合性(一対比較値の妥当性)をもったランク1の行列になるが、評価項目が多い場合は現実にはランク1にはならない。そこで、整合性を調べるために最大固有値 λ_{max} 以外の固有値の平均を整合度とし、整合度を行列

の次数に関して重み付けしたものを整合比として用いる。

行列Aには、n個の固有値があり、その和はnとなることがわかっている。一般に、

$$\lambda_{max} \geq n \quad (9)$$

であり、式(8)より $(\lambda_{max} - n)$ は、 λ_{max} 以外の固有値の大きさを示す指標と見ることができる。

従って、 $(n-1)$ 個の固有値の1個当たりの平均的な大きさは、

$$C. I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

である。行列が完全な整合性をもつ場合は、この値は0であり、それが大きくなるほど不整合性は高いと考え、この値を整合度(consistency index)と呼び、C. I. で表す。C. I. が0.1(場合によっては0.15)以下である場合は、経験的に合格とする³⁾。整合性が悪い場合は、決定した一対比較値を再検討する必要がある。

なお本研究では、最大固有値と固有ベクトルを求めるために、べき乗法を用いた⁵⁾。

e) 合成重要度の算定

それぞれの階層で評価された重要度は、合成され、最終的に各代替案の重要度がえられる。いま、レベルkとレベルk+1の、親子関係にある要素を考える。レベルkの要素iの重要度を w_{ki} とすし、またレベルk+1の子要素jの重要度を v_{ij} とする。このとき合成重要度 $w_{k+1,j}$ は、次の式により求められる：

$$w_{k+1,j} = \sum_i w_{ki} v_{ij} \quad (11)$$

このような合成を、階層を逆昇って行うことにより、各代替案(一番低い階層)の最終的な重要度 w_j が、最上級の階層iについての重要度 w_{ij} 合計することにより、求められる：

$$w_j = \sum_i w_{ij} \quad (12)$$

(2) 護岸設計代替案選択への適用

a) 階層図の作成

2. (2)で述べたように、この護岸設計代替案に関しては、二重鋼矢板式、鋼製セル式、ジャケット式、ケーソン式+止水壁、捨石式+自立鋼矢板式の5通

りを用意した。

評価項目は、経済性と環境負荷に加えて、一般にこの種の構造物で問題となることの多い施工性、工期、耐震性を加えた5項目を用いた。このときの階層図を図-2に示した。

b) 一対比較行列の作成と重要度の計算

5つの設計代替案について二酸化炭素発生量と建設費を求めると、表-2のようになる。なお、施工性、工期、耐震性に関しては専門家の常識的判断によっており、◎→○→△→×の順に優れていることを表わす。もちろんこのような判断はかなり主観的なものであり、その影響は次に述べるような環境負荷に対する3つの立場を考慮することにより、その重要度の変化を検討した。

このデータをもとに一対比較行列を作成する。各項目の重要度の評価は、主観的にならざるをえないので、ここでは①二酸化炭素発生量を考慮しない場合、②やや考慮した場合、③相当考慮した場合の3つのケースを設定し、その違いを見ることとした。この場合の、評価項目に関する一対比較表を表-3に示した。合わせて、計算された重要度も示している。

各評価項目について、設計代替案の一対比較表を作成する必要があるが、この中で②のケースの、二酸化炭素発生量に関する比較の例を表-4に示した。

c) 総合重要度の合成

表-5に②のケースの総合合成重要度の計算結果を示した。表の上段の値は、それぞれの2→3レベルで算出された重要度で、これを最上段の各項目の重要度に乗じることにより、下段の重要度が求まる。さらに、これらを横方向に集計すると各工法の総合重要度が求まる。算出した3ケースの総合合成重要度を、表-6示した。

(3) 結果の考察

以上の評価結果から、この護岸を建設するに際して、二酸化炭素発生量を考慮しない場合では、鋼製セル式が最も適しているが、環境負荷をやや考慮した場合とかなり考慮した場合は、ジャケツ式が最も適した施工法であるといえる(表-6)。

しかし、環境負荷を考慮しない場合とやや考慮した場合に関しては、上位3つの施工法の合成重要度にさほど差がないことから、この3つのいずれの施工法で建設してもよいといえる。その点、環境負荷をかなり考慮した場合は、二重鋼矢板式の合成重要度が上位2つの施工法に対してかなり低い値となっているため、上位2つの施工法のいずれかで建設するべきであるということになる。なお、環境負荷をかなり考慮した場合、二重鋼矢板式の評価が下がった理由は、この施工法が環境負荷に関する重要度が低い(二酸化

表-2 設計代替案の評価項目別比較

	経済性 (万円/m)	環境負荷 (kg/m)	施工性	工期	耐震性
二重鋼矢板式	558	7200	○	△	△
鋼製セル式	562	6000	◎	◎	○
ジャケツ式	586	5900	◎	◎	◎
ケーソン式 +止水壁	663	5600	○	△	×
捨石式+ 自立鋼矢板式	720	5700	△	○	×

表-3 評価項目(レベル1→2)に関する一対比較と重要度

(a) ケース①: CO₂発生量を考慮しない場合

	経済性	施工性	工期	耐震性	重要度
経済性	1	7	5	3	0.549
施工性	1/7	1	1/3	1/5	0.053
工期	1/5	3	1	1/5	0.102
耐震性	1/3	5	5	1	0.297

$\lambda_{max}=4.230$ C.I.=0.077

(b) ケース②: CO₂発生量をやや考慮する場合

	経済性	環境負荷	施工性	工期	耐震性	重要度
経済性	1	5	7	5	3	0.490
環境負荷	1/5	1	3	3	1/3	0.126
施工性	1/7	1/3	1	1/3	1/5	0.044
工期	1/5	1/3	3	1	1/5	0.075
耐震性	1/3	3	5	5	1	0.264

$\lambda_{max}=5.313$ C.I.=0.078

(b) ケース③: CO₂発生量をかなり考慮する場合

	経済性	環境負荷	施工性	工期	耐震性	重要度
経済性	1	1	7	5	3	0.356
環境負荷	1	1	7	5	3	0.356
施工性	1/7	1/7	1	1/3	1/5	0.038
工期	1/5	1/5	3	1	1/5	0.069
耐震性	1/3	1/3	5	5	1	0.182

$\lambda_{max}=5.247$ C.I.=0.062

表-4 CO₂発生量(レベル2→3)に関する各代替案の一対比較

環境負荷	二重鋼矢板式	鋼製セル式	ジャケツ式	ケーソン式+止水壁	捨石式+自立鋼矢板式	重要度
二重鋼矢板式	1	1/7	1/7	1/8	1/8	0.030
鋼製セル式	7	1	1/2	1/3	1/2	0.137
ジャケツ式	7	2	1	1/3	1/2	0.180
ケーソン式+止水壁	8	3	3	1	1	0.357
捨石式+自立鋼矢板式	8	2	2	1	1	0.296

$\lambda_{max}=5.175$ C.I.=0.044

表-5 ケース②の場合の結合合成重要度の計算

環境負荷	経済性	環境負荷	施工性	工期	耐震性	重要度
	0.490	0.126	0.044	0.075	0.264	
二重鋼矢板式	x0.444 0.218	x0.030 0.004	x0.126 0.006	x0.057 0.004	x0.122 0.032	0.264
鋼製セル式	x0.302 0.148	x0.137 0.017	x0.349 0.015	x0.370 0.028	x0.258 0.068	0.276
ジャケット式	x0.159 0.078	x0.180 0.023	x0.349 0.015	x0.370 0.028	x0.514 0.136	0.280
ケーソン式+止水壁	x0.067 0.033	x0.357 0.045	x0.126 0.006	x0.057 0.004	x0.053 0.014	0.102
捨石+自立鋼矢板式	x0.029 0.014	x0.296 0.037	x0.050 0.002	x0.146 0.011	x0.053 0.014	0.078

炭素排出量が大きい)ことがあげられる。

4. 多属性効用分析法^{4), 6), 7)}

(1) 多属性効用分析の概要

多目的意思決定問題は、次のような多目的最適化として定式化できる。

$$\begin{aligned} \min. \quad & \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)\} \\ \text{s. t.} \quad & g_k(x) \leq 0, \quad k=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

ここでxは決定変数とよばれ、N次元とする。評価項目の個数pは、たかだか数個であるのに対し、決定変数の次元数Nは、通常これよりもはるかに大きい。

図-1に示した、例題の建設費用と、CO₂発生量の関係は、典型的な多目的計画問題の例と言える。本章では、式(13)で与えられる多目的最適化問題を、多属性効用分析法により解くことを試みる。なお、本章において石谷・石川⁶⁾、田村⁷⁾、今野⁴⁾を参考にした。

a) パレート最適解

x*がパレート最適解であるとは、すべての目的関数でこれより大きいか等しい値を与える解が存在しないことを意味する。すなわち、

$$\begin{aligned} f_i(x) &\geq f_i(x^*) \quad (\text{すべての } i=1, 2, \dots, p) \\ f_j(x) &> f_j(x^*) \quad (\text{いくつかの } j=1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (14)$$

を満足する決定変数xが存在しないことである。言い換えればパレート最適解に対して、これよりもあらゆる評価側面で優れた解は存在しない。

逆にパレート最適でない解は、これよりもあらゆる評価側面で優れているパレート最適解が必ず存在するので、考慮の対象から除外しても差し支えない。

このパレート最適解は1個だけではなく、一般には無数に存在し、これらをの間には、明白な優劣関係はなく、ある評価項目に関しては前者が優れているが、別の評価項目に関しては後者が優れているという関係がある。これらの間の優劣を決定するには、意思決定者(Decision Maker:DM)が選好情報を与える必要がある。なおここにDMとは、この事項の決定を行なう、個人または集団のことを言う。

多目的評価における求解は、第一ステップで、パレート最適解集合を求め、第二ステップで選好情報に基づき選好解を求めるという手順をとる⁶⁾。

表-6 各ケース・各代替案の総合合成重要度の計算結果

設計代替案	ケース①	ケース②	ケース③
二重鋼矢板式	0.293	0.264	0.200
鋼製セル式	0.299	0.276	0.243
ジャケット式	0.296	0.280	0.254
ケーソン式+止水壁	0.066	0.102	0.170
捨石式+自立鋼矢板式	0.050	0.078	0.137

(備考) ケース①:CO₂発生量を考慮しない場合。

ケース②:CO₂発生量をやや考慮する場合。

ケース③:CO₂発生量をかなり考慮する場合。

b) 期待効用最大化の原理と多属性効用分析法

意思決定者が、どのような選好構造により代替案を選択するのかを知るのには、容易ではない。この選好構造を解析するための方法に基礎を与えるのが、フォン・ノイマンの期待効用最大化の原理である。

ここで、意思決定者が選択することのできる代替案の集合をC={c₁, c₂, ..., c_n}とし、意思決定者が代替案c_j(j=1, 2, ..., n)を選択したときの結果x_jが現れる確率をp_jとする。このとき、結果x_jによる効用をu(x_j)とするとき、代替案c_jを選択したときの期待効用E_{Cj}は、

$$E_{Cj} = \sum_i p_i u(x_i) \quad (15)$$

で与えられる。

フォン・ノイマンの期待効用最大化の原理によると、「意思決定者は、代替案の集合Cの中から、期待効用が最大になる代替案を選択するのが最良である」という結論が導かれる⁴⁾。この原理を用いて、DMが暗黙に持っている価値観を分析し、その選好構造をモデル化する事によって、多属性効用関数を陽に求めるのが、多属性効用分析法である。

c) 単属性効用関数の決定

まず、一つの属性についてだけの効用関数の求め方について述べる。

代替案の集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ において、 x^* を最良の結果、 x_0 を最悪の結果とする。そして、任意の結果 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) の効用を

$$x_i \sim \langle x^*, p, x_0 \rangle \quad (16)$$

を満足する確率 p によって計測する。ただし、記号 \sim は、これら2つの効用が等しいことを表し、また $\langle x^*, p, x_0 \rangle$ をくじと言い、 x^* が確率 p で実現し、 x_0 が $1-p$ の確率で実現するとする。これは、 x^* の効用を1、 x_0 の効用を0と正規化することに相当している。また、 x_i をくじ $\langle x^*, p, x_0 \rangle$ の确实同値額と呼ぶ。

$p=0.5$ のときのくじを50-50くじと呼び、 $\langle x^*, x_0 \rangle$ と表す。この50-50くじをいくつか用いることによって、単属性効用関数を容易に決定することができる。いま、三つの50-50くじに対する确实同値額 $x_{0.5}$ 、 $x_{0.25}$ 、 $x_{0.75}$ を意思決定者に尋ねて

$$\begin{aligned} x_{0.5} &\sim \langle x^*, x_0 \rangle \\ x_{0.25} &= \langle x_{0.5}, x_0 \rangle \\ x_{0.75} &= \langle x^*, x_{0.5} \rangle \end{aligned} \quad (17)$$

であったならば、确实同値額に対する効用値が

$$\begin{aligned} u(x_{0.5}) &= 0.5u(x^*) + 0.5u(x_0) = 0.5 \\ u(x_{0.25}) &= 0.5u(x_{0.5}) + 0.5u(x_0) = 0.25 \\ u(x_{0.75}) &= 0.5u(x^*) + 0.5u(x_{0.5}) = 0.75 \end{aligned} \quad (18)$$

のように求まる。この結果に基づき $(x, u(x))$ 空間において、 $(x_0, 0)$ と $(x^*, 1)$ を通り、 $(x_{0.25}, 0.25)$ 、 $(x_{0.5}, 0.5)$ 、 $(x_{0.75}, 0.75)$ の3点に最も良く当てはまる曲線を求めることで単属性効用関数 $u(x)$ が決定できる。このように単属性効用関数を求める方法を中点連結による确实同値法という。

d) 二(多)属性効用関数の決定

結果 $x \in X$ が、二つの属性 Y と Z によって生起するものとする。例えば、本研究では Y が CO_2 発生量に、 Z が建設費用に相当する。このとき

$$x = (y, z), \quad y \in Y, \quad z \in Z \quad (19)$$

と表すことができ、起こりうるすべての結果の集合 X は、 $X = Y \times Z$ で表される。これを二属性空間とよぶ。この空間における二属性効用関数を決定する方法は、大別して3通りある⁶⁾。

第一の方法は、くじを直接的に用いる方法である。これはc)のように、結果 X の中から最良のものを x^* 、最悪のものを x_0 とし、 x^* の効用を1、 x_0 の効用を0とす

ることによって、くじ $\langle x^*, p, x_0 \rangle$ と x とが無差別となる確率 p を求め、これを効用値とする方法である。ただ、この方法は結果の集合 X の数が多くなると手間がかかる上に、意思決定者に関数形という認識が希薄であるため、効用曲面内のすべての効用を整合性をもって求めることが困難である。

第二の方法は、単属性効用関数 $u_1(x)$ を求めた後に、もう一つの属性についての単属性効用関数 $u_2(y)$ を求め、 $u_1(x)$ と $u_2(y)$ を合成することにより二属性効用関数を求めるという、二段階方式による決定方法である。この方法により求められる二属性効用関数には、加法独立性・効用独立性・凸依存性等いくつかの性質を仮定し、合成が行われる。

第三の方法は、ある属性の各レベルにおけるもう一つの属性に関する単属性効用関数を求め、効用間に存在する構造(加法独立性・効用独立性・凸依存性)を仮定した上で、求められたいくつかの単属性効用関数間においてそれらが満たされているかを検討することにより、すべてを内包するような効用関数を決定するものである。

以上のような手順のいずれかを用いて、二属性効用関数を求めるのであるが、このとき次のような仮定をしておくことと便利なが多い(詳細は田村⁷⁾を参照せよ)。

① 加法独立性

一般に、属性が二つ以上あって、全体的な評価を行う場合に、各属性の重みつき和によって評価することが多い。このように、各属性間の干渉(交互効果)をいっさい認めない条件を、加法独立性という。

しかし、この仮定は非常に強い仮定であり、現実の選好構造を反映できないことが多い。

② 効用独立性

属性 Y が属性 Z に効用独立であるとは、 Z のレベルのある値に固定して、 Y 上の任意に与えられた二つのくじを考えると、その選好順序が、固定したレベル Z に依存しないことである。

③ 凸依存性

属性 Y と Z の間で効用独立性が満たされない場合、属性 Y が Z に n 次凸依存性を満たすとは、任意の $y \in Y$ と $z \in Z$ に対して、

$$u_1(y|z) = \sum_{i=0}^n \lambda_i(z) u_1(y|z_i), \quad \sum_{i=0}^n \lambda_i(z) = 1$$

を満たす相異なる z_i ($i=0, 1, \dots, n$) と Z 上の実数値関数 $\lambda_i(z)$ 存在するということである。この定義は、 Y 上のすべての正規関数が、条件レベルの異なった他の

(n+1)個の凸結合で表されることを意味している。

(2) 本研究で用いる多属性効用関数の決定

a) CO₂発生量／建設費用に関する単属性効用関数

前述したように、単属性効用関数は意思決定者に
 確実同値額を尋ねる確実同値法や、確率を問うことで
 決定する確率同値法により決定する。本研究で環境
 負荷についての単属性効用関数の決定は、まず次の
 ような仮定を設けておくことが合理的であると考えた。

すなわち、CO₂発生量には基準値・限界値を設け(限
 界値の設定は効用関数決定の際の未知数を知るため
 に設定)、基準値まではCO₂発生量に比例し効用が減
 り、基準値を越えてから限界値までは限界効用の低
 減を考慮し、上に凸の二次関数で滑らかに効用が減
 少するものと考えた(図-3)。また、コストに関する
 単属性効用関数は、直線的な単調減少関数と考えた
 (図-4)。

b) 基準値・限界値の設定

基準値として1990年レベルの二酸化炭素排出量を遵
 守することと考えた。そしてこれら代替案が検討され
 た1996年の時点で、1990年と1996年の1人当たり二酸
 化炭素排出量が、0.9:1.0であると推測されることか
 ら⁸⁾、今回検討した代替案の中で二重鋼矢板式護岸を
 標準的な構造形式と考え、これが発生するCO₂排出量
 の90%を基準値とした。また限界値は、単に計算の便
 宜のために設定する点なので、これを基準値の1.5倍
 に設定した(図-4)。

c) 多属性効用関数決定までの手順

本研究では単属性効用関数を前述のとおり仮定し、
 二段階方式により二属性効用関数を決定する第二の
 方法を用いた。

基準値・限界値が求められた後、最良のCO₂発生量
 レベルと基準値でのコストに関する効用の変化(効用
 関数)を調べる。なお、最良のCO₂発生量レベルには
 評価する設計代替案の中でCO₂発生量が最も低い値
 (この例題ではL型ブロック式)をとることにした。

この効用の変化を知るため、次のようなアンケートを
 提案したい。

「あなたは、現在のこの構造物の建設標準費用
 の(A)%で二酸化炭素を1990年レベル
 の(B)%排出する構造物を建設できると
 き、この設計代替案に同意しますか？」

このようなアンケートを本来は、意思決定者である国
 民・地域住民などに聞いていくことが現実的であろう。
 また、複数の環境問題の専門家に問うことも考えられ
 る。意思決定者集団のうち同意した者の割合を効用と
 みなし、これらを結んでいくことで効用関数が決定で
 きる。

効用 (u)

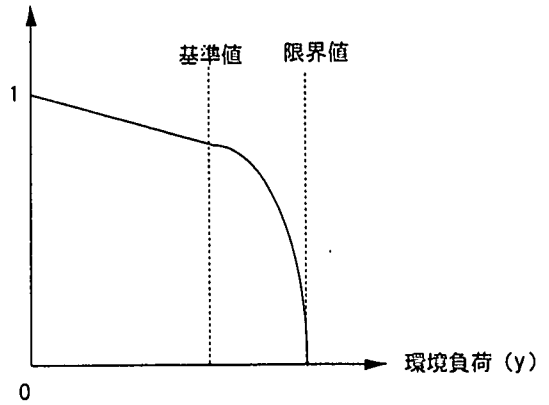


図-3 CO₂発生量の単属性効用関数

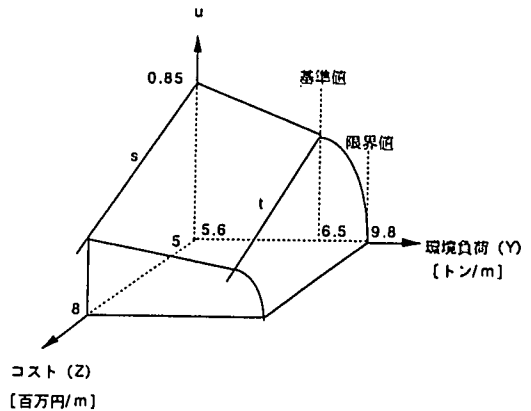


図-4 CO₂発生量と建設費用の2属性効用関数

今回の試算では、表-7(a), (b)及び(c)に示すよう
 な、環境に関する異なる立場を想定した。これらの結
 果を相互に比較することにより、この方法の感度を見
 るためである。

付録に、図-4に示す環境負荷を一定とした位置に
 おける効用関数の費用に対する変化を計測するため
 のアンケートの例と、仮想的な回答例を示した。これは
 次節のケース①に対する回答例である。

(3) 護岸設計代替案選択への適用

今回のアンケート回収結果は、全く仮想的なものである。
 その点を考慮し、図-4のsとtにおける効用関数の勾
 配を変化させることにより、CO₂発生量を徐々に重視す
 るように変化させ、それぞれの代替案の効用を計算す
 ると、表-7のようになる。

以上の結果より、環境負荷を比較的重視しない場合
 は、鋼製セル式の効用が高くなるが、徐々に二酸化
 炭素排出量を重視して行くと、ジャケット式が選択の

対象となることわかる。効用は相対的な尺度であり、その絶対的な差を論じることはあまり意味が無い。この場合いずれの場合もジャケット式が他の工法に対し同等以上の効用を与えており興味深い。一方鋼製セル式もこれとほぼ同等の効用を持っていると思われる。

5. むすび

本研究では資源、エネルギーや環境の、持続的な保全を可能にする社会システムの構築の一貫として、建設工事におけるエネルギー使用量・環境負荷を考慮した新しい設計法の構築を目指すことを目的とし、研究を行った。従来からの経済性、構造物の信頼性と云う指標に加えて、構造物の建設に伴い排出される二酸化炭素排出量を、設計代替案決の評価要素に加え、階層分析法、多属性効用分析法と言う2つの多目的最適化手法を導入し、これを解くことを考えた。海上埋め立て地の護岸の構造形式の決定の問題を具体例として、この問題を考えた。

階層分析法、多属性効用分析法を用いることで、経済性、構造物の信頼性、そして二酸化炭素排出量という多軸的な評価を取り入れた意思決定を行うことが、一応可能であることを示した。

今回取り上げた2つの多目的意思決定法は、いずれも意思決定者が暗黙に持っている、複数の評価指標間の選好関係を、定量的に明らかにするための手法であった。この様な手法を用いる場合、意思決定者をどのように選択するかは問題である。

さらに先の論文で述べたような、構造物の信頼性やエネルギー使用量を貨幣換算するような方法、また絶対的なエネルギー使用量制約を与えるような代替案選択方法などを研究する必要がある^{1),9)}。

謝辞：本研究の遂行に当たり、(財)住友財団の平成8年度環境研究助成を受けたので、ここに深謝する。実際の計算では、岐阜大学工学部土木工学科卒業生、石倉宙君(現 魚津市役所)、魚住研司君(現 運輸省)の協力を受けたので、ここに合わせて感謝の意を表したい。

付録 例題の効用関数の推定

図-6に示した多属性効用関数のsとtにおける勾配を決定するために、次のようなアンケートを行い、結果的に下記のような回答を得た場合の結果を示す。

1) sに関するアンケート：「あなたはA万円/m(標準建設費用558万円/mの約B%)で二酸化炭素発生量を

表-7 多属性効用分析法による各代替案の評価結果

(a) ケース①：CO₂発出量をあまり考慮しない場合

	s	t	効用値
二重鋼矢板式	0.792	0.779	0.730
鋼製セル式	0.764	0.754	0.761
ジャケット式	0.788	0.776	0.783
ケーソン式+止水壁	0.687	0.634	0.687
捨石+自立鋼矢板式	0.630	0.498	0.615

(b) ケース②：CO₂発出量をやや考慮する場合

	s	t	効用値
二重鋼矢板式	0.827	0.792	0.729
鋼製セル式	0.816	0.782	0.805
ジャケット式	0.825	0.790	0.809
ケーソン式+止水壁	0.785	0.734	0.785
捨石+自立鋼矢板式	0.762	0.679	0.753

(c) ケース③：CO₂発出量をかなり考慮する場合

	s	t	効用値
二重鋼矢板式	0.838	0.796	0.726
鋼製セル式	0.833	0.791	0.819
ジャケット式	0.838	0.795	0.819
ケーソン式+止水壁	0.817	0.767	0.817
捨石+自立鋼矢板式	0.806	0.740	0.799

表-A1 sに関するアンケートの回答例

A(万円/m)	B(%)	同意者の割合(%)
500	90	85
600	108	75
700	125	65
800	143	55

表-A2 tに関するアンケートの回答例

C(万円/m)	D(%)	同意者の割合(%)
500	90	80
600	108	74
700	125	55
800	143	24

1990年レベルの約85%だけ排出する構造物を建設することができるとき、この設計代替案に同意しますか。」

このアンケートに対する答えが表-A1の通りとする。

2) tに関するアンケート：「あなたはC万円/m(標準建設費用558万円/mの約D%)で二酸化炭素発生量を

1990年レベルと同じだけ排出する構造物を建設することができるとき、この設計代替案に同意しますか。」このアンケートに対する答えが表-A2の通りとする。以上2つの回答結果から、 $s \sim z$, $t \sim z$ の関数関係を決定でき、これより $y-z$ 平面上での効用関数を決定できるので、各代替案の効用が求まる。

参考文献

- 1) 松尾稔, 本城勇介, 杉山郁夫: エネルギー使用量を考慮した社会基盤施設の新しい設計法, 土木学会論文集招待論文, No. 553/VI-33, pp. 1-19, 1996
- 2) 人工島建設新技術研究会(座長: 松尾稔): 発生土類を活用した「干拓盛土工法」による人工島建設方式, 1996.

- 3) 刀根薫: 意思決定法AHP入門, 日科技連出版会, 1986.
- 4) 今野浩: 数理決定法入門, 朝倉書店, 1992.
- 5) 森口繁一: 数値計算工学, 岩波書店, pp. 152-158, 1989.
- 6) 石谷久, 石川眞澄: 社会システム工学, 朝倉書店, pp. 103-165, 1992.
- 7) 田村坦之編: 大規模システム, 昭晃堂, pp. 190-205, 1986.
- 8) (財)日本エンジニアリング振興協会: 環境研究部会報告書, 1993.
- 9) 松尾稔, 本城勇介編著: 地盤環境工学の新しい視点: 建設発生土類の有効活用, 技報堂出版, 1999

(1998. 4. 1 受付)

SELECTION OF STRUCTURE DESIGN ALTERNATIVES BY MULTIOBJECTIVE DECISION MAKING METHODS CONSIDERING ENERGY CONSUMPTION

Yusuke HONJO and Minoru MASTUO

The deteriorations of earth environment have been of keen concern recently. In constructing the infrastructure construction, a system which would make possible of sustainable use of energy, natural resources and environment is strongly demanded. This study seeks for a new design method which would take into account not only economy and reliability of the structures but also energy consumption and environmental loads. To realize such design method, the energy consumption and the environmental effects are measured by the amount of CO₂ emission during the construction. Thus the design become a multiobjective decision making problem which should take into account economy, reliability and CO₂ emission simultaneously. Both Analytic hierarchy process and multi-attribute utility analysis are examined as tools to accomplish this task.