艤装設計における不確定性のある問題の 解析手法について

(その 3) 評価解析法

正員 篠 田 岳 思* 正員 福 地 信 義**

A Practical Method for Analyzing the Indeterminable Problems in the Design of Ship Equipments (Part 3) Evaluation Analysis

by Takeshi Shinoda, *Member* Nobuyoshi Fukuchi, *Member*

Summary

The proper choices of analytical methods, design specifications, machinery selection and their layout during the ship equipment design stage, are generally made of a number of possible alternatives. The problem of reaching at a final decision that is balanced in an overall perspective is extremely vital, especially when the decision is to be taken based upon multi-criteria objectives which may be mutually exclusive, and again, when there are alternate approaches to various decision making methods. In such problems, which are extremely subjective to personal likes and dislikes, and highly dependent upon conceptual variations, the fundamental nature of alternate objectives attain an amount of fuzziness, leading to discretionary difficulties. As a result of which, instances of making use of the experience and ingenuity of engineers and specialists, are common.

The analytical process of this evaluation problem is broken down here into a hierarchy model, an impact model and an evaluation decision model. In order to postulate the conceptual, qualitative and fuzzy-quantitative elements, an analytical evaluation method based upon these models, is proposed through a multi-criteria analysis using the fuzzy theory.

The choosing problem of liquid level measuring instruments for oil/ballast tanks, and the problem of proper selection of a comfortability index and then the evaluation of thermally comfortable room environments in accommodation spaces, are presented here as two typical applications of the proposed method.

1. は じ め に

艤装設計において、解析手法、機器などの選定や設計仕様、配置などを決定する際には、いくつかの候補案の中から選定する場合が多い。特に複数の目的をもつ場合には、目的の間に競合が生じたり、また目的を達する手段が複数にあったり、判断が難しい場合があるため、これらの候補案をどのように評価して、総合的にバランスのとれた案に決定するかが重要となる。さらに評価対象の中で極めて感覚的な問題、主観的な問題を取扱う場合には、評価基準の

設定にあいまいな要素が含まれるため、候補案選定の判断が難しく、これらは技術者、専門家の経験や勘に拠るところが多い。

本研究においては、評価問題の解析過程を評価問題の構造モデル、インパクトモデル、評価決定モデルに分け、このモデルに基づき、評価の感性的・定性的情報およびあいまいさのある計量的情報を考慮するために、多基準分析にファジィ理論を応用した評価解析法を提案する。この手法の適用例として、オイルタンクやバラストタンクに設置される液面計の選定問題を扱い、さらに居住区における温熱環境の感覚指標の選定と快適性の評価を行う。

* 九州大学大学院工学研究科
(研究当時、現在九州大学工学部)

** 九州大学工学部

2. あいまいさを考慮した評価解析法

評価問題の解析は問題の構造モデル、インパクトモデル、評価決定モデルを構築する3つの過程に分けられる。構造モデルにおいては評価問題全体を把握して評価項目および評価基準を設定し、インパクトモデルにおいては候補案を実施したときに生じるインパクトのモデル化であり、また評価決定モデルはインパクト情報をどのように評価し、決定するかを分析する。

ここでは、評価解析の手法として、主観的尺度、評価インパクトなどのもつあいまいさを考慮し、2つ以上の評価対象において相対的優劣性を多種多様な基準を基に分析する、ファジィ多基準分析の手法を提案する。さらに、絶対評価の手法として、評価対象をファジィ積分により総合評価する方法についても述べる。

2.1 評価問題の構造モデル

(1) 階層構造

評価問題の構造は評価問題、評価項目、評価対象の3つに分けられ、評価問題の要因を抽出し、Fig. 1に示すような階層構造により表わす。図中、階層レベルが上位ほど大局的な評価項目を表しており、その属性グループは上位レベルの評価項目をさらに詳しく補うものである。このような階層構造での分析により、評価項目相互の関係が明確化し、評価問題全体が把握できる。

(2) 重要度の決定：一対比較法

評価項目の重要度を決めることが難しい場合には一対比較法¹⁾を用いる。この方法は、まず n 個の評価項目の集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ の中から (x_i, x_j) のように2つの評価項目を組み合わせることで $n(n-1)/2$ 通りの項目対を作り、その優劣性を比較して、その相対比を正の数値を用いて表わす。数値を決めることが難しい場合には、Table 1に示す点数表を参考にして、相対的優劣度を主観的に比率尺度により評価する。

Table 1 Table of evaluation points for the combinatorial comparative analysis

Ratio-scale	definition
1	equal importance
3	weak importance
5	essential importance
7	demonstrated importance
9	absolute importance

次に、評価項目の対 (x_i, x_j) に与えた数値を a_{ij} とすると、対角要素を1、非対角要素を $a_{ji} = 1/a_{ij}$ として、評価項目の重要度を定めるための行列 A を得る。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

さらに、行列 A の最大固有値 $\lambda_{\max}$ に対する固有ベクトルを求め、これを正規化したベクトルを次のように w とすると、この要素 w_i が重要度を意味する。

$$w = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n\}^T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

また、固有ベクトルを求める複雑さを避けるために、行列 A の各行について相乗平均をとり、重要度を求める簡便法もある。

一対比較が正確に行われている場合には、行列 A において次の整合（推移）性がすべての要素について成り立つ。

$$a_{ik} \cdot a_{kj} = a_{ij} \quad (3)$$

ただし、 $1 \leq i, j, k \leq n$

整合性が成り立つ場合には行列 A のすべての要素についての $a_{ij} = w_i/w_j$ となり、さらに $\lambda_{\max} = n$ の関係があるが、一般には $\lambda_{\max}$ について次の関係がある。

$$\lambda_{\max} \geq n \quad (4)$$

これより、整合度を調べるために次の整合度 I_c が提案されている。

$$I_c = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad (5)$$

I_c の許容範囲は0.1以下を目安としており、この域を越える場合には一対比較をやり直す必要がある。

以上の検定を終えた行列 A の最大固有値に対する固有ベクトルの各要素 w_i を評価項目の重要度とする。

(3) 評価項目の独立性²⁾

一般の線形評価において、評価項目間に強い従属性がある場合には、評価値が重複して加えられるため、候補案の選好順序の逆転などが生じることもあり、評価に必要な項目を選考することが重要である。

評価項目の独立性とは、評価項目の集合 X の中から任

Fig. 1 Hierarchy analysis model

意の2つの評価項目について、重要度を $w(x_i)$, $w(x_j)$ とし、その両方の評価項目を同時に考慮したときの重要度を $w(x_i \cup x_j)$ とすると、次に示す重要度に関する加法性が成り立つことである。

$$w(x_i \cup x_j) = w(x_i) + w(x_j) \quad (6)$$

したがって、評価項目の独立性が問題となるとき、独立性からのズレ α_{ij} を(6)式の関係より次のように表す。

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} w(x_i \cup x_j) - \{w(x_i) + w(x_j)\} & (i \neq j) \\ 0 & (i = j) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 $\max(w(x_i), w(x_j)) \leq w(x_i \cup x_j)$

ここで、 α_{ij} の符号により次の3つの場合がある。

(i) $\alpha_{ij} = 0$: 評価項目に独立性がある。

(ii) $\alpha_{ij} > 0$: $w(x_i \cup x_j) > w(x_i) + w(x_j)$

2つの評価項目を同時に考慮すると重要度に相乗効果を生じ、評価項目の不足の可能性を示している。

(iii) $\alpha_{ij} < 0$: $w(x_i \cup x_j) < w(x_i) + w(x_j)$

2つの評価項目を同時に考慮すると重要度に減殺効果を生じ、評価項目に重複があることを示している。

評価項目の独立性の程度を表わすために、 α_{ij} を -1 から 1 まで規格化した、次の重複度 m_{ij} を用いる。

$$m_{ij} = 1 - 2^{-\alpha_{ij}} \quad (8)$$

ここに、 $\mu_{ij} = \alpha_{ij} / \min(w(x_i), w(x_j))$ (9)

評価項目 x_i と他のすべての評価項目との重複度は、次の重複度 m_{ij} の重みつき平均 η_i により表す。

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n f_w \frac{m_{ij}}{n-1}} \quad (10)$$

ただし、 f_w は重み関数であり、ここでは次式をとる。

$$f_w = \text{abs}(m_{ij}) \quad (11)$$

ここに、記号 $\text{abs}(\)$ は絶対値をとる。

さらに、項目の重複度 $w(x_i)$ を用いて、重複度の程度を総合的に判断するために、次式による重複度判別式 ξ_i を用いる。

$$\xi_i = 1 + \eta_i(1 - w(x_i)) \quad (12)$$

これは、 ξ_i が 0 に近いほど評価項目に重複がある可能性を示しており、一方 1 に近いほど評価項目に独立性があることを表す。

(4) あいまいさを含んだ重要度

評価項目の重要度は、一対比較が一般に主観的評価であることに伴い、評価の整合性をすべての場合に保つことは難しい。このため、整合性が保たれた場合の一対比較に伴う評価項目の重要度のもつあいまいさの程度を見積ってみる。

一対比較を行った結果得られた重要度が(2)式である場合合(1)式には次の関係が成り立つ。

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (13)$$

ここで、 i 行については次式となる。

$$a_{i1}w_1 + a_{i2}w_2 + \dots + a_{ij}w_j + \dots + a_{in}w_n = \lambda_{\max} w_i \quad (14)$$

a_{ij} は大略 $a_{ij} \cong w_i/w_j$ であるため、(14)式の係数を $a_{ij} = w_i^*/w_j^*$ とし、また(5)式より I_c の上限値を 0.1 とすると次式となる。

$$\lambda_{\max} \leq \frac{11}{10}n - \frac{1}{10} < \frac{11}{10}n \quad (15)$$

したがって、(14)式は次のように整理できる。

$$\frac{w_1^*}{w_1} \cdot \frac{w_i}{w_i^*} + \frac{w_2^*}{w_2} \cdot \frac{w_i}{w_i^*} + \dots + \frac{w_j^*}{w_j} \cdot \frac{w_i}{w_i^*} + \dots + \frac{w_n^*}{w_n} \cdot \frac{w_i}{w_i^*} < \frac{11}{10}n \quad (16)$$

ここで、 w_i^*/w_i および w_i/w_i^* をあいまいさを考慮して $\underline{1}$ と見なす。以降、記号“ $\sim$ ”はあいまい量を意味する。これより、(16)式は次の関係となる。

$$n \cdot \underline{1} \cdot \underline{1} < \frac{11}{10}n \quad (17)$$

さらに $\underline{1}$ のメンバーシップ関数を中央値より最大幅 α をもつと仮定すると(17)式は次のように表わされる。

$$(\underline{1})^2 \leq (1 + \alpha)^2 < \frac{11}{10} \quad (17)'$$

したがって、 $|\alpha| \leq 0.05$ となり、整合時に重要度のもつあいまい度である係数 ν_c を見積ることができる。なお、 ν_c のメンバーシップ関数 μ_{ν_c} を Fig. 2(a) に示す。

Fig. 1 のように階層構造により表された評価項目 E_{lm} (ここに添字は、 l : 階層レベル、 G : レベル内評価項目グループ、 m : グループ内メンバ、を意味する) に対する重要度を ν_{lm}^c とすると、一対比較の整合性によるあいまいさを含んだ重要度 $\underline{\nu}_{lm}^c$ は次式となる。

$$\underline{\nu}_{lm}^c = \nu_c \nu_{lm}^c \quad (18)$$

したがって、最下層 l^* の重要度 w_{lm}^{l*} は次式で表される。

$$\underline{w}_{lm}^{l*} = \underline{\nu}_{lm}^c \odot \underline{\nu}_{lm}^c \odot \dots \odot \underline{\nu}_{lm}^{l*} = \nu_w \cdot w_{lm}^{l*} \quad (19)$$

ここに、 $w_{lm}^{l*} = \prod_{i=1}^{l*} \nu_{lm}^c$ (20)

記号 $\odot$ は拡張原理に基づく積を表す。なお、拡張原理による演算については第一報³⁾の付録2に述べている。また、 ν_w は ν_c の拡張原理に基づく l^* 個の積であり、階層が多重になるに従い μ_{ν_w} のあいまいさは大きくなる。

さらに、一対比較を行うための行列 A には、本来主観的

Fig. 2 Fuzzy weight membership function

なあいまいさが含まれており、また一対比較により重要度が数量化されたとしても、その数値の解釈にも主観的な判断が含まれ、これらのもつあいまいさ δ_w を考慮すると(19)式は次のようになる。

$$w_{lm}^* = v_w w_{lm}^* \oplus \delta_w \quad (21)$$

ただし、 $0 \leq w_{lm}^* \leq 1$ とする。記号 $\oplus$ は拡張原理に基づく和を表す。なお、 δ_w のメンバーシップ関数 μ_{δ_w} の例を Fig. 2 (b) に示す。

2.2 インパクトモデル

評価対象 (候補案) b_i に対する評価項目 x_j ごとのインパクトを表す評価情報 p_{ij} は次のインパクト行列をなす。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & p_{ij} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (22)$$

なお、評価情報 p_{ij} には評価項目の基準の性質、設定域などに従いあいまい量を考慮している。

p_{ij} のあいまいさの程度に応じて、インパクト行列 P を次の2つの場合に分けて考える。

P_A : 評価基準がある程度明確化されており、 p_{ij} のあいまいさが比較的小さい計量的情報を取扱う場合、および p_{ij} が感性・定性的情報であっても比較的細かな評価値である場合。

P_B : 評価基準の性質に伴い、 p_{ij} が大雑把な言語的評価、あるいは感性的評価など感性・定性的情報を取扱う場合。これらのインパクト行列のあいまいさの程度に応じて、さらに $P = [P_A, P_B]$ のように2種のインパクト行列の組合せも考慮に入れ評価・決定モデルを考える。

2.3 評価・決定モデル

(1) 選好判別

評価対象全体の集合を $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ とする。このとき、評価基準に基づき $b_i, b_j (\in B)$ に対して b_i より b_j を少くとも同等以上と判断するとき、「 b_i より b_j が (弱) 選好される」といい、記号により $b_i \leq b_j$ と表わす。また $b_i < b_j$ かつ $b_i \geq b_j$ であるとき、「 b_i と b_j は無差別である」とし、 $b_i \sim b_j$ と表わす。さらに、 $b_i \leq b_j$ かつ $\text{not } b_i \geq b_j$ のとき「 b_i より b_j が強選好される」といい、 $b_i < b_j$ と表わし、これらを選好関係と呼ぶ。

ある評価基準に基づき、評価対象 b_i に対して評価情報 p_i が決まり、 p_i を実数 v に変換する実数値関数を $v(p_i) = v$ とする。このとき、 $b_i < b_j$ なる選好関係がある場合には、評価情報についても $p_i < p_j$ のように選好関係が成り立つ必要があり、実数値関数 $v(p_i)$ を用いて、評価情報より選好関係を判別するための選好判別式を次のように定義する。

$$p_i < p_j \text{ に対して, } \mu_D \wedge \mu_U = \mu_U \quad (23)$$

ここに、 $\wedge$ は最小をとり、 μ_D は2つの評価情報に基づき選

好を決るためのメンバーシップ関数であり、 μ_U は次式に示す $v(p_i)$ と $v(p_j)$ の差であり、 μ_U はそのメンバーシップ関数である。

$$\mu_U = v(p_i) \ominus v(p_j) \quad (24)$$

ただし、記号 $\ominus$ は拡張原理に基づく差である。

また、弱選好関係、無差別についても同様に定義できる。

(2) 優調和指数

2つの評価対象 $b_i, b_j (\in B)$ に対して、 b_i の $b_{i'}$ に対する優性の度合をはかる指標として優調和指数 (Fuzzy Concordance Index) $\underline{c}_{ii'}$ を用いる。これはインパクト行列のあいまいさの程度に応じて次の2種の計算式より選択する。

i) P_A のとき:

$$\underline{c}_{ii'} = \sum_{j \in C_{ii'}^k} \{w_j \odot \text{abs}(p_{ij} \ominus p_{i'j})\} \quad (25)$$

$$\odot \max_{1 \leq i, i' \leq n} \{\text{abs}(p_{ij} \ominus p_{i'j})\}$$

ii) P_B のとき:

$$\underline{c}_{ii'} = \sum_{j \in C_{ii'}^k} w_j \quad (26)$$

ただし、記号 $\odot$ は拡張原理による除算である。なお、記号 $\sum$ は有限個のファジィ量についての加算である。また、 $C_{ii'}^k (k=1, 2, 3)$ は選好条件を示しており、次式で表される。

$$C_{ii'}^1 = \{j \mid p_{ij} > p_{i'j}\} \quad (27)$$

$$C_{ii'}^2 = \{j \mid p_{ij} \sim p_{i'j}\} \quad (28)$$

$$C_{ii'}^3 = \{j \mid p_{ij} < p_{i'j}\} \quad (29)$$

ここで、選好関係は(23)式の選好判別式を用いて決める。

選好条件 $C_{ii'}^k$ の選択は評価問題の性格により異なり、 $p_{ij} \geq p_{i'j}$ のときには $C_{ii'}^1$ または $C_{ii'}^2$ となる。特に $C_{ii'}^3$ の選好条件に従い、評価対象の劣性を評価する場合には $\underline{c}_{ii'}$ を劣調和指数 (Fuzzy Discordance Index) と呼んで区別する。

評価する人にとって、評価項目の望ましい影響を与える項目とそうでない項目がある場合には、それぞれに対して優調和指数と劣調和指数を用いて評価し、総合的に判断する。

また、ある評価項目について、評価対象 $b_i, b_j (\in B)$ において $b_i < b_j$ なる関係が不確かであるときには、選好条件 $C_{ii'}^k$ にさらに選好除外集合 N を考慮する必要がある。この場合には(25)、(26)式において重要度 w_j は次式をとる。

$$w_j = \begin{cases} w_j & (p_{ij}, p_{i'j}) \in N \\ 0 & (p_{ij}, p_{i'j}) \in N \end{cases} \quad (30)$$

(3) 評価指数

n 個の評価対象 $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 間の相対的な優劣の指標として、優性評価指数 (Fuzzy Concordance Dominance Index) $\underline{c}_i$ を用いる。これは、評価対象 b_i の $b_{i'}$ に対する優性度を示す優調和指数 $\underline{c}_{ii'}$ および b_i の $b_{i'}$ に対する非優性度を示す $\underline{c}_{i'i}$ を用いて次式より表す。

$$\underline{c}_i = \alpha \sum_i \underline{c}_{ii'} \ominus \beta \sum_i \underline{c}_{i'i} \quad (31)$$

ここで、 α 、 β は優性度と非優性度に対する重みであり、その値の取り方により次の3ケースを考慮できる。

i) $\alpha > 0$ 、 $\beta = 0$ のとき：

b_i の優性のみを評価し、極めて楽観的な評価をする場合。

ii) $\alpha = 0$ 、 $\beta > 0$ のとき：

b_i の劣性のみを評価し、極めて非観的な評価をする場合。

iii) $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ のとき：

b_i の優性と劣性を合せて評価し、評価が楽観的な悲観的かは重みの取り方による。

(4) 選好順序の決定

優性評価指数 c_i のメンバーシップ関数 μ_{c_i} により評価対象(候補案)の選好順序を決める。ただし、 μ_{c_i} はあいまい量であるため、評価目的に応じて基準の取り方を、上限、下限、重心、最大高さなど選ぶ必要があり、この選び方により候補案の選好順序が異なる場合が生じる。

本研究においては、 μ_{c_i} のあいまい量を上限、下限基準などを含め総合的に候補案の順位を判断するために、あいまい量の期待値のモデルであるファジィ積分²⁾を用いて候補案の選好順位を決定する手法を示す。

(a) ファジィ積分

有限集合 X を $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ とおき、この要素 x_i に対して $[0, 1]$ の値域をもつ関数 $h(x_i)$ が与えられており、次式のように大きい順に並べられているものとする。

$$h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n) \quad (32)$$

このときファジィ積分はファジィ測度 g を用いて次のように定義される²⁾。

$$\int h(x) \circ g = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge g(X_i)] \quad (33)$$

ここに、記号 $\bigvee_{i=1}^n$ は $1 \leq i \leq n$ の中で最大をとり、 $\wedge$ は最小をとる。また、 X_i は X の部分集合 $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ であり、 $g(X_i)$ は関数 $h(x_i)$ に対応して選択創出される X_i のファジィ測度である。

$g(x_i)$ については、次式のような加法性を有するファジィ測度 g_λ が考えられているので、これを用いる。

g_λ は X の部分集合 E, F に対して区間 $[0, 1]$ の数値に対応づける関数であり、 $g_\lambda(\phi) = 0$ (ϕ は空集合) かつ $g_\lambda(X) = 1$ (X は全集合) を満たし、

$E \cap F = \phi$ のとき：

$$g_\lambda(E \cap F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda g_\lambda(E) g_\lambda(F) \quad (34)$$

ただし、 $-1 < \lambda < \infty$

この測度 g_λ は $\lambda = 0$ のとき完全加法性があり、また $\lambda > 0$ ならば優加法性であり、 $g_\lambda(E \cup F) > g_\lambda(E) + g_\lambda(F)$ となるため相乗効果を表す。さらに $\lambda < 0$ ならば劣加法性であり、 $g_\lambda(E \cup F) < g_\lambda(E) + g_\lambda(F)$ となるため減殺効果を表すことができる。

Fig. 3 Fuzzy integration order evaluation model

(34)式に基づき、 $g^i = g_\lambda(x_i)$ とすると、ファジィ測度 g_λ の値を決める生成規則は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} g_\lambda(X_1) &= g_\lambda(x_1) \\ g_\lambda(X_i) &= g^i + g_\lambda(X_{i-1}) + \lambda g^i g_\lambda(X_{i-1}) \\ g_\lambda(X_n) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

なお、 x_i にファジィ測度が与えられたときには、 $g_\lambda(X_n) = 1$ となるように $kg_\lambda(x_i)$ (k は比例定数) とし、(35)式を満たすように k を決め、これを新たに $g_\lambda(x_i)$ にとる。

この g_λ を用いて(33)式のファジィ積分が計算できる。

(b) 選好順序

μ_{c_i} の選好順位にファジィ積分を適用するためには、Fig. 3に示すように、 n 個の候補案の優性評価指数 c_i のもつあいまいさの範囲内で重視すべき c_i 側に重みを置く単調性のある評価基準曲線を $h(x)$ にとる。ここに、 $h(x)$ の選び方には3つの場合がある。

i) $h''(x) > 0$ のとき： c_i のあいまいさの上限を高く評価する場合

ii) $h''(x) < 0$ のとき： c_i のあいまいさの上限をやや評価する場合

iii) $h''(x) = 0$ (直線) のとき： c_i のあいまいさの上限、下限を平均的に評価する場合

ただし、 c_i は α -cut により計算されるため、 $h(x)$ も α -cut の分割に対応し離散化しておく。

さらに、ファジィ測度を $g^i = \mu_{c_i}$ として(35)式により g_λ の値を定めると(33)式のファジィ積分が求まり、積分値により選好順位を決めることができる。

2.4 ファジィ積分評価

評価問題の中で、特に感覚的問題などの主観的要因を含む問題に対し、絶対的に総合評価する方法として、ファジィ積分を応用することが提案されている⁴⁾。

一般の線形評価においては評価項目の独立性が重視され、測度の完全加法性が要求されるのに対し、ファジィ積分による総合評価においては測度の完全加法性をゆるめ、(34)式のように加法性の成り立つファジィ測度を用いる。ファジィ測度は評価対象を測る主体の主観的尺度であると

解釈することができ、評価項目 x_i の重要度を g^i として (35) 式のファジィ測度を用いて、評価項目 x_i に対する数量化されたインパクトを $h(x_i)$ にとると、(33) 式よりファジィ積分が行え総合評価値が求まる。

ただし、この方法では重要度 $g^i (0 \leq g^i \leq 1)$ およびインパクト $h(x_i) (0 \leq h(x_i) \leq 1)$ に確定値を用いるため、評点など

の数値を同定し難い面がある。

3. 適用例

3.1 艤装品の選択——タンク液面計

カーゴオイルタンクやバラストタンクに設置されるタンク液面計には種々の液位計測方式⁹⁾があり、性能、価格など

Fig. 4 Hierarchy analysis model for the acquisition of tank liquid level measuring instruments

Table 2 Table of combinatorial comparative analysis for individual evaluation items

Item	(1)	(2)	(3)	(4)	Multiply average	w_i	$\sum_{j=1}^4 a_{ij} w_j / w_i$	Consistency index
(1) Cost	1	3			1.732	0.750	2.000	$I_C = 0.000$
(2) Performance	1/3	1			0.577	0.250	2.000	
(1) Initial cost	1	2	3		1.817	0.540	3.009	$I_C = 0.005$
(2) Installation cost	1/2	1	2		1.000	0.297	3.009	
(3) Explosion prev. measure	1/3	1/2	1		0.550	0.163	3.009	
(1) Accuracy	1	3	4	1	1.861	0.395	4.016	$I_C = 0.004$
(2) Pressure correction	1/3	1	1	1/3	0.577	0.123	4.005	
(3) Density correction	1/4	1	1	1/3	0.537	0.114	4.015	
(4) Measurement range	1	3	3	1	1.732	0.368	4.004	

Table 3 Table of interdependent coefficient analysis

Evaluation item	(1) Initial cost	(2) Installation cost	(3) Explosion prevention measures	(4) Accuracy	(5) Internal pressure correction	(6) Density correction	(7) Measurement range
weight	0.41	0.22	0.12	0.10	0.03	0.03	0.09
α_{ij}	(1)	0.000	0.628	0.527	0.487	0.419	0.480
	(2)	0.628	0.000	0.345	0.313	0.245	0.306
	(3)	0.527	0.345	0.000	0.247	0.179	0.240
	(4)	0.504	0.322	0.221	0.000	0.099	0.191
	(5)	0.436	0.254	0.153	0.099	0.000	0.123
	(6)	0.433	0.251	0.150	0.099	0.059	0.120
	(7)	0.497	0.315	0.214	0.191	0.123	0.000
m_{ij}	(1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	(2)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	(3)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	(4)	0.000	0.000	0.000	0.000	-1.000	0.000
	(5)	0.000	0.000	0.000	-1.000	0.000	0.000
	(6)	0.000	0.000	0.000	-1.000	0.000	0.000
	(7)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ζ_i	0.000	0.000	0.000	-0.333	-0.167	-0.167	0.000
ξ_i	1.000	1.000	1.000	0.700	0.839	0.838	1.000

Table 4 Table of goodness gradation for different types of tank liquid level measuring instruments

Type of level gauge	Evaluation item							
	Level-1	Performance			Cost			
	Level-2	Initial cost	Installation cost	Explosion prevention measures	Accuracy	Internal pressure correction	Density correction	Measurement range
Air purge type		Ex	F	G	B	F	B	B
Float type		B	Vb	B	F	G	B	F
Electro-magnetic type		F	G	B	G	G	B	Vb
METRI (magnetic) tape type		F	G	B	F	G	B	Vb
Radar type		Vb	Ex	B	Ex	G	B	Ex
Direct pressure type		Ex	G	B	Vb	B	G	Vb
Cost-predominant weight		0.39	0.21	0.15	0.10	0.03	0.03	0.09
Performance-predominant weight		0.13	0.07	0.05	0.30	0.09	0.09	0.28
Disjoint set of excluded elements						(F, B)		

Linguistic variables Ex: Excellent, G: Good, F: Fair, B: Bad, Vb: Very bad

を考慮した各方式の優劣を総合評価して設置すべき装置が選定される。このタンク液面購入時の選択問題にファジィ多基準分析法を適用する。

タンク液面計選定に関して、評価に必要な項目をできる限り独立性を保つように選び、Fig. 4 に示す階層構造により評価項目間の相互関係を把握すると、評価項目の重要度が比較容易に決定できる。重要度の決定が困難な場合には、各レベルの同じグループ内において、2.1(2) で述べた一対比較法により決める。この例における一対比較の結果を Table 2 に示す。

さらに、評価項目に重複が無いかを 2.2(3) に述べた手法を用いて調べ、その結果を Table 3 に示す。液面計の計測方式の中には、内圧または比重補正により計測精度が向上するため、これらの項目間には従属性があると仮定し、(12) 式により重複度の判別計算を行っている。ここでは、 ξ_i の値が大体 0.3 以下を目安に強い重複ありとし、重複度の見直しを必要と見なすが、例題では ξ_i の最小値が 0.7 であるため、内圧および比重補正の項目も含めて評価解析している。

これらの各評価項目について、各液面計に対して言語変数による評点を Table 4 に示すように与える。この表は (22) 式のインパクト行列を示しているが、これらの評価項目はすべて評価基準が明確であるため P_A タイプである。また、評点の言語変数には、Fig. 5(a) に示す言語関数を用いるものとし、評価項目の重要度には、(21) 式によりあいまいさを考慮するが、表中の重要度は中央値を示している。この例では δ_w の幅として 0.1 をとる。

選好条件を (27) 式のように弱選好とし、Fig. 5(b) に示す 2 つの評価対象間の評点の選好判別を決めるメンバーシップ関数を用いて、さらに選好除外集合 N を Table 4 のよ

うにとり、(25) 式により優調和指数 c_{ij} を求める。次に、(31) 式において重みを $\alpha = \beta = 1$ とし、評価対象の相対的優性度を示す評価指数 c_i を計算する。費用に関する評価項目を重視し、評価項目の重要度のあいまいさがないとした場合の各評価対象における c_i のメンバーシップ関数 μ_{c_i} を Fig. 6 に示す。この例では、メンバーシップ関数が右に寄るほど優性であるため、候補案の中から直圧式かエアパー Jeziki が選定される。

実際には、必ずしも重要度を確定的には決められないことが多いため、重要度のあいまいさを考慮した場合の優性評価指数のメンバーシップ関数 μ_{c_i} を Fig. 7(a) に示す。

図中曲線右側の良い条件が重なった場合の判断では計測方式として、直圧式、エアパー Jeziki、電波式が優性であるが、確定的ではない。このため、図に示す評価基準曲線を用いて、(33) 式によるファジィ積分値を求め、計測方式の選好順序を決める。 μ_{c_i} を評価基準曲線の重要度とし、これを (35) 式において $g^i = \mu_{c_i}$ ととり、重要度の相互作用乗数 λ を変化させた場合のファジィ積分値を Fig. 7(b) に示す。積分値が高いほど、選定の順位は上位にあるため、この例ではエアパー Jeziki を選定することが有利である。選好順位は λ により変動するが、評価基準曲線を用いる場合には、 $\lambda = 0$ での順位を参照して決める。

性能に関する評価項目を重視した場合の評価のメンバーシップ関数を Fig. 8(a) に示し、また、評価基準曲線によるファジィ積分値を Fig. 8(b) に示す。この場合には、候補案の中から電波式を選定する場合は明らかに有利であり、他方式の順位は大差がない。

3.2 温熱環境の快適さ

(1) 快適指標

温熱環境の快適さは人体からの代謝熱と熱放散の balan

Fig. 5 Functions for evaluation and decision making

Fig. 6 Membership functions for the cost-predominant acquisition decision making of tank liquid level measuring instruments

Fig. 7 Membership functions and fuzzy integration values for the cost-predominant acquisition decision making of tank liquid level measuring instruments

Fig. 8 Membership functions and fuzzy integration values for the performance-predominant acquisition decision making of tank liquid level measuring instruments

Table 5 Table of goodness gradation for various comfortability index components

Evaluation objectives	Evaluation item						
	Heat item				Measurement item		
	Temperature	Humidity	Air flow	Surrounding radiation	Convenient	Initial cost	Running cost
Kata thermometer	G	Vb	Ex	B	Ex	F	G
Globe thermometer	G	Vb	F	Ex	Ex	G	G
Effective temperature	Ex	G	F	Vb	G	F	F
Corrected effective temperature	Ex	G	G	Ex	F	B	B
Operative temperature	Ex	Vb	F	G	G	F	F
Temperature humidity indices	Ex	Ex	Vb	Vb	Ex	Ex	Ex
Weight	0.35	0.15	0.20	0.30	0.6	0.3	0.1
Disjoint set of excluded elements					(F, B)	(F, B)	(F, B)

Linguistic variables Ex: Excellent, G: Good, F: Fair, B: Bad, Vb: Very bad

Fig.9 Membership functions and fuzzy integration values for the preferential decision making of comfortability index in accommodation spaces

スにより決り、外的な支配要因としては区画内空気の温度、湿度、気流速および周壁からの熱放射がある。これらの要因を組合せた快適さを表わす感覚指標としては、Table 5 に示すものがあり⁶⁾、これらの快適さの指標としての優劣順をファジィ多基準分析を適用して求める。評価項目には熱放散と計測に関する項目があり、これらに対する評価対象の評点を Table 5 のように言語変数を用いて表わす。この表はインパクト行列に相当するが、放熱に関する評価項目は、人体の熱放散機構が明らかであり、比較的評価基準を明確化できるため P_A とし、一方計測に関する項目にはかなりのあいまいさが考えられるため P_B とする。

選好条件を(27)式にとり、選好除外集合 N は Table 5 に示すものを用い、3.1 の例題と同じ手順にて解析する。Fig. 9 (a) は快適さの指標を選択するための評価のメンバーシップ関数 μ_{c_i} であり、Fig. 9 (b) は評価基準曲線を基に μ_{c_i} によるファジィ積分値を示している。これらの図より、快適さの指標としては修正有効温度が優れていることが分かる。

(2) 温熱環境

居住区内の種々の船室における温熱環境の快適さの程度を評価する例として、Table 6 に掲げる区画について、相対的評価にはファジィ多基準分析を用い、および絶対的評価にはファジィ積分評価を適用する。

ファジィ積分評価においては、評価項目に対する評点として最も不快の 0 から最も快適の 1.0 までのあいまいさのない数値を用い、例として評点を Table 6 の下段のように与えた場合について解析する。Fig. 10 は、評価項目の重要度の相互作用乗数 λ による、各居住区画に対する積分評価値である。この結果は、ファジィ積分値が大きいほど総合的に高く評価されるため、A-class の客室の快適度は高いこと、および $\lambda > 0$ の場合には相乗効果により、A-class と B-class の客室の快適度には差が無くなることを示している。

ファジィ多基準分析による評価においては、例として Table 6 の上段に示す言語変数による評点を与えた場合について解析する。ここでは、評価基準に感性・定性的情報を取扱うため、これらのインパクト行列は P_B とする。また、重要度には(21)式の δ_w のあいまい量を考慮する。

Fig. 11 (a) には、ファジィ多基準分析により各居住区の快適さを相対的に評価した場合のメンバーシップ関数 μ_{c_i} を示し、さらに Fig. 11 (b) には評価基準曲線による積分値を示す。これらより、A-class の客室の快適さが最も優れ、B-class の客室および船員室の評価はほぼ同程度であるこ

Table 6 Table of goodness gradation for comfortability in different accommodation spaces

Evaluation item		Weight in level-2	Resultant weight	Passenger cabin		Crew cabin	Mess room	Laundry
				A-class	B-class			
Metabolic heat (0.3)	Working intensity	0.7	0.21	G 0.8	G 0.8	G 0.8	B 0.4	Vb 0.2
	Individual likes regarding metabolism	0.3	0.09	F 0.6	F 0.6	G 0.8	B 0.4	Vb 0.2
Released heat (0.4)	Environmental index	0.8	0.32	G 0.8	F 0.7	F 0.6	B 0.4	Vb 0.2
	Environmentally imposed restriction on clothing	0.2	0.08	G 0.8	G 0.8	G 0.8	B 0.4	Vb 0.2
Adaptability (0.1)		1.0	0.10	B 0.4	B 0.4	F 0.6	F 0.5	G 0.8
Air condition (0.2)	Ventilation efficiency	0.6	0.12	F 0.7	G 0.8	F 0.6	B 0.4	B 0.4
	Air cleanliness (stiffness)	0.4	0.08	G 0.8	G 0.8	F 0.6	F 0.6	Vb 0.2

Linguistic variables

Ex: Excellent, G: Good, F: Fair, B: Bad, Vb: Very bad

Fig. 10 Fuzzy integration values for the comfortability in accommodation spaces

(a) Membership function

(b) Fuzzy integration order evaluation

Fig. 11 Membership functions and fuzzy integration values for the preferential decision making of comfortability levels in accommodation spaces

とが分かる。なお、これらの評価結果はファジィ積分評価による快適度の順位と比較して大きな差はない。

4. 結 論

感性的・定性的な評価問題やあいまいさのある計量的問題の評価解析法として、評価対象の評価項目に対する評点および評価項目の重要度にあいまいさを考慮できる、ファジィ多基準分析法を提案し、2, 3の例について適用を行った。この方法は優性評価指数のメンバーシップ関数により評価対象間の優劣順序を決定するが、評価対象間の相対的な優越性の判断が難しい場合には、評価基準曲線を用いてファジィ積分を行うことにより選好順位を決定できる。

感覚的な問題はファジィ積分評価により比較的簡単な手順により絶対評価できるが、評価項目に対する評価対象の評点および評価項目の重要度に確定値を与えるため、数値の同定が難しい場合がある。この点に関しては、ファジィ多基準分析は、言語変数などによりあいまいさのある評点を付与できるため、評点の裁定が容易である。

参 考 文 献

- 1) 福田治郎：OR 入門，多賀出版，(1990)
- 2) 寺野，浅居，菅野共編：ファジィシステム入門，オーム社，(1987)
- 3) 福地，篠田：艦装設計における不確定性のある問題の解析手法について（その1）浅油・浅水時の集水問題，日本造船学会論文集，第166号，(1989)
- 4) 例えば，
李，寺野：ストーリー評価のモデル化，計測自動制御学会論文集，第17巻，第1号，(1981)
- 5) 西部造船会技術研究会：タンク液面計について，艦装部会資料 艦114・笠戸・142 P-11，(1988)
- 6) 例えば，
渡辺要：建築計画原論Ⅲ，丸善，(1965)