

ファジイ構造モデルによるダム計画の生活環境意識への影響分析

Analysis of Awareness of the Living Environment Influenced
by Dam Construction Impact Using Fuzzy Structural Modeling

加賀屋 誠 一* 山 村 悦 夫**

By Seiichi KAGAYA & Etsuo YAMAMURA

Recently inhabitants' needs for their living environments have gradually become complicated and diverse. On the other hand, civil engineering works, for example, water resources development and highway construction, influence many various factors of the living environment. In this paper, the analytical method is developed in regard to the inhabitants' awareness of the living environment as influenced by the impacts of dam construction. In this method, firstly, the hierarchical structures of importance among living environmental factors are constructed by using the fuzzy structural modeling technique. Secondly, the interrelation between the satisfactory degrees and the structures of importance is constructed by means of the inverse problem of fuzzy relation. Finally, the structural influences on environmental factors are evaluated in terms of the change of satisfaction with the impacts of dam construction.

1. はじめに

土木事業の多くは、直接的、間接的に地域の生活環境と深い関わりあいを持っている。そして近年のように社会システムが大規模でかつ、複雑になると、本来の目的ばかりでなく他に対する影響も広範で大きなものとなっている。

したがって、事業実施に伴う影響について対象地域に対するモニタリングを通して、事前の意識構造を情報として把握することが、益々重要になってくると考える。ここでは、水資源開発によるダムが建設される地域において主として、生活環境の様々な要

素に与える影響を評価できる方法について検討するものとする。その具体的な手法として、複雑な問題複合体の構造同定のために広く用いられている構造化手法の一つファジイ構造化手法を、またインパクトに対する構造化計画のためファジイ関係の逆問題解法の適用を考える。

構造化手法は、Warfield等によるISM、Battelle研究所によるDEMATELなどを中心に多数開発されており複雑な計画立案等の政策決定、地域環境の評価、都市計画の基本計画策定などに広く利用されている¹⁾。また、今後も比較的手軽に構造同定でき、モデルが得られやすいという点で益々普及するものと思われる。しかしながら、一方では、①求めるデータ、質問等本質的にあいまい性を多く含んでいること、②一般的になじみやすい統計的手法の適用が難しいことなど、適用の困難性が存在する。

* 正会員 学博 北海道大学助教授 大学院
環境科学研究科 ** 正会員 工博 北海道大学
教授 大学院環境科学研究科

(㊟060 札幌市北区北10条西 5丁目)

ここで用いたファジィ構造化手法（FSM 法）は、それらの点を踏まえ、質問項目のあいまい性を考慮し、ファジィ理論に基づく構造化手順を考えている。すなわち、ISM 法の 2 項関係を、ファジィ 2 項関係に拡張し、ISM と同様隣接行列（関係行列）から、可到達行列を作成し、有向グラフを導出する方法で田崎等によって、理論とアルゴリズムが提案されている²⁾。そのアルゴリズムは、Warfield の関係従属行列の階層性を明らかにするための合理的手順（Rationalizing Procedure）を基にしている³⁾。具体的なグラフ化手順は、要素法と呼ばれるものを採用している。要素法（Element Method）は、グラフ化の際、従属関係の単一行列—レギュラー行、レギュラー列を見つけながら、要素間の階層関係を明らかにしていくものである。これに対して、本手法で導入したレベル法（Level Method）は、後述するように要素法に比べ、より少ないステップでグラフ作成が可能な方法であり、簡便容易な方法として有効であるといえる。

一方、得られた構造について、インパクトによってどのように変化を持たすか、すなわち、構造動向把握のための方法として、ここでは、ファジィ関係システムの逆問題の応用を考える。逆問題は、原因と結果が既知の場合、それらの間のファジィ関係の把握、あるいは、原因と結果の関係と、結果が既知の場合の原因の把握に関する問題で、ファジィ推論の応用の一つと考えることができる⁴⁾。現在、病気診断、故障診断等の分野に適用事例がある⁵⁾。

本手法では、条件が設定された時（例えば、ある事業が行なわれた時）の 2 項関係を再度被験者に問う方法も考えられるが、一対比較意識調査の困難さを考えると、同じ調査をせずに、比較的容易な意識調査によって構造動向を検討できる点に特徴がある⁶⁾。

2. 方法と手順

（1）分析の手順

本手法は、事業によるインパクトを、個人あるいは集団による意識の構造として表わすためにグラフ理論、ファジィ理論の力を借りて考えていくものである。その目的は、以下の点にまとめられる。

①日頃漠然と持っている生活環境要素に対する必要

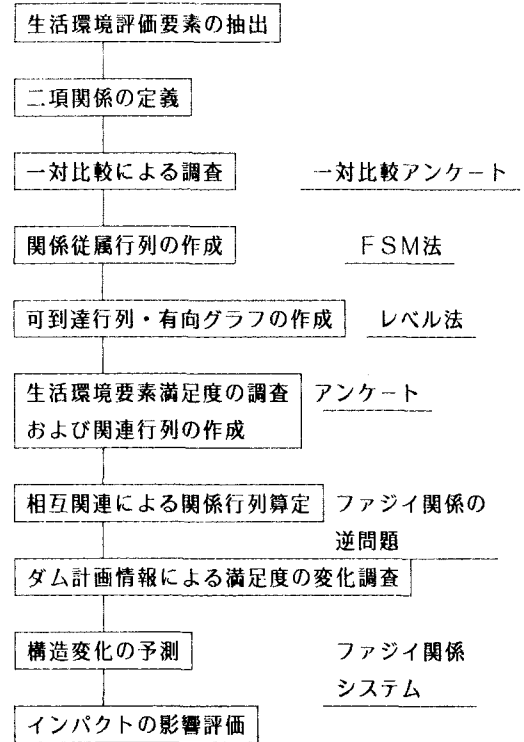


図1 分析の手順と方法

性、重要性について明示し、その階層性を明らかにすること、②生活環境に対して影響を与える大規模ダム建設事業のインパクトによる構造の変化を予測すること、③上述の目的を通して従来の計画の評価が、量的であったのに対し、質的な評価を行なえるようにすること。

これらの分析のために、図1に示すような手順を提案する。

a)生活環境要素の抽出と二項関係の定義……生活環境の水準、目的などを考慮していくつかの影響要素として抽出する。ここでは、その方法としてNGT 法を用いた。また、二項関係は、ある要素と他の要素の重要性によって求めるものとした。

b)一対比較意識調査と関係従属行列の作成……一対比較のためのアンケートは、二項のうちで、今居住する地域においてはどちらを重要だと考えているかという選択とその強さはどうかについて問う、重み付き一対比較法を用いた。

それらは、(1) 式によって、各グループごとおよび

全体としてまとめられ、関係従属行列を構成する。

$$A_k = [a_{ij}]_k = \left[\sum_{l=1}^{n_k} w_l a_{ij} / n_k \right] \quad (1)$$

ここで、 A_k は k グループの従属行列、 a_{ij} はその要素、 a_{ij} は個人 l の従属行列の要素、 w_l は重み、 n_k は k グループの総数である。

c) 可到達行列、有向グラフの作成……ファジィ可到達行列は、(2)、(3) によって算出される。さらに、その時の構造同定、および有向グラフ作成については、(2) で述べることにする。(A は要素自身パスを持つ行列である。)

$$A^{m+1} = A^m \circ A \quad (\circ \text{ は、合成}) \quad (2)$$

$$A^* = A \vee A^2 \vee \dots \vee A^n \quad (3)$$

ここで、 A^* は可到達行列を表す。

d) 生活環境要素の満足度評価およびインパクトによる変化調査……このアンケートは従来から用いられている満足の有無を問うもので、さらに将来向上するか悪化するかについて評価するためのものである。この調査は、一対比較アンケートに比べ回答が容易であるため、ここでは、構造化を行なわないで構造動向を見つけていく方法のために利用するものである。得られた結果より数種の指数が算定できるが、この中で最も因果関係がある指数として不満度指数によって、ファジィ関係を表わすものとする。

$$G = [g_{ij}] = P(d_j \cap \bar{d}_i) \quad (4)$$

$$G_f = [g_{fij}] = P(d_j \cap \bar{d}_i) + P(d_w j \cap \bar{d}_j \cap \bar{d}_i) - P(d_b j \cap d_j \cap \bar{d}_i) \quad (5)$$

ただし、 G ; 不満度指数、 G_f ; インパクトによる将来の悪化を加えた不満度指数、 $P(d_j \cap \bar{d}_i)$; 要素 i が満足のときの要素 j が不満の比率、 $P(d_w j \cap \bar{d}_j \cap \bar{d}_i)$; 付加される将来悪化の比率、 $P(d_b j \cap d_j \cap \bar{d}_i)$; 将来改善される比率、 $d_j, [\bar{d}_j]$; j 項目に不満 [でない] 場合の数。

e) 相互関連行列の決定……構造化のための関係従属行列と不満度指数行列によって相互関連行列を求める。この場合ファジィ関係逆問題によって後述のように算定する。

f) 意識構造動向の予測……d) で得られた不満度行列と e) で得られた関連行列とによってファジィ合成を求め、新しい構造を予測する。

g) インパクトの影響評価……最初に求められた構造と f) で求めた構造を比較して地域住民の事業に対する考え方についてその不安、あるいは、期待などの

潜在的構造について明らかにする。

(2) 主なアルゴリズム

a) 要素の関係の定義……得られたファジィ関係従属行列 $A = [a_{ij}]$ は、今要素 s_i と s_j の関係を表わすものと考え、要素 s_i が、要素 s_j にどの程度従属しているか、この場合は、どの程度より重要であるかを表わしている。要素間の関係は、次の3つの関係が満たされているものと定義する。

① ファジィ非反射律—— $\forall (s_i, s_j) \in S \times S$ に対して、 $a(s_i, s_j) \leq p$ が満足するならば、ファジィ非反射律が成り立つ。

② ファジィ非対称律—— $\forall (s_i, s_j) \in S \times S, (i \neq j)$ に対して、 $a(s_i, s_j) < p$ あるいは、 $a(s_j, s_i) < p$ の少なくともどちらかが成り立つならば、ファジィ非対称律が成り立つ。

③ ファジィ半推移律—— $\forall (s_i, s_j), (s_j, s_k), (s_k, s_i) \in S \times S, (i \neq j, j \neq k, k \neq i)$ に対して、 $T = \bigvee_{j=1}^n (a(s_i, s_j) \wedge a(s_j, s_k)) \geq p$ のとき $a(s_i, s_k) \geq T$ が満足されるならば、ファジィ半推移律が成り立つ。

b) 可到達行列……要素 s_i から s_j に向う有向枝を求め有向グラフ作成のために、関係従属行列から、かく要素間の到達可能性を検討する。この場合、各頂点 (各要素) は、それ自身からパスの長さ 0 で到達可能であるとして、従属行列と、単位行列の和行列を求め、(2)、(3) より、 $A^{r-1} = A^r = A^*$ ($r < N$; N は要素数) となるような可到達行列を算定する。(ファジィ構造化の場合は、単位行列でなくともしきい値 p と 1 の間の値でよい。) 可到達行列は、反射的で推移的なファジィ二項関係、すなわちファジィ半順序関係を表わしている。

c) 可到達行列の分割と抽出……各システム要素の階層性を決定するための方法として、合理的手法が開発されているが、本方法も、その手順に従う。

Step1. 最上位レベル集合と、最下位レベル集合の判別——得られた可到達行列の各要素に着目し、以下の条件によって、最上位レベルと、最下位レベルに分割する。また、それらの相互に関連する要素、またどちらにも関連しない要素についても、中間レベル集合、独立レベル集合として定義される。

Step2. 最上位レベル集合のグラフサブ集合の決定——可到達行列 A^* の分割される階層の数と、各階層の

最上位レベルを決定する。このために、最下位レベル集合に属する要素が従属する最上位レベル集合の要素の集合をみつけ、これを要素のブロック $B(s_i)$ とする。

Step3 単一階層行列の作成 — Step2 で発見されたブロックを用いて、可到達行列 A^* を、単一階層行列に分割する。それらは、次の手順で行なう。

- ①ブロック A^i によって表わされた行列 A^* の列集合の和を考える。
- ②行列 A^* の各列に、①で算定した列ベクトルを乗ずる。
- ③すべてがしきい値 p 以下の要素をもつ行と列を行列から消去する。

これらの操作によって得られた行列 A^i は、単一階層行列となる。

Step4 単一階層行列からグラフの作成 — 単一階層行列からグラフ作成のための方法として、先述したように2つの異なった方法がある。要素法とレベル法である。ここでは、レベル法を用いるものとする。

d) レベル法

①出発条件 — 単一階層行列を An とすると An が与えられたとき、この行列は、行方向に S_H 、列方向に S_V の要素集合を持ち、両方の集合の和 $S = S_H + S_V$ は、階層のすべての要素集合を表わす。

②複数レベルのサブ集合 — 階層の各レベルにおいて、そのレベルがある要素を表わす S のサブ集合があるとする。最上位でのサブ集合レベルを S_1 とする。第2位レベルは S_2 、以下最下位レベルのサブ集合 S_n までの集合を考える。それぞれのレベル i ($i=1, 2, \dots, n$) について少なくとも1つ以上の従属する要素があるサブ集合 S_i を考える。図2に示すように階層は、 $n-1$ の従属行列からなる。

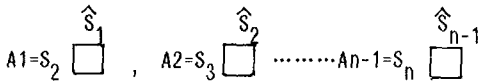


図2 階層レベルの行列の形

③レベルのサブ集合の作成 — $\hat{S}_1$ の作成： $\hat{S}_1$ は、(5) によって表わされる。

$$\hat{S}_1 = S_H - S_H \cdot S_V \quad (5)$$

S_2 の作成： S_2 は $\hat{S}_1$ の選択された An の列を隠し、残った An の列の中で1を含まない行の要素を選択する。

$\hat{S}_2$ の作成： $\hat{S}_2$ を決定するために、(6) を計算す

る。

$$\hat{S}_2 = S_2 \cdot S_H \quad (6)$$

S_1 の作成： S_1 を決定するために、 $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_{i-1}$ の集合によって選ばれた An の列を隠して、残った An の列の中で1を含まない行の要素を選択する。

$\hat{S}_i$ の作成： $\hat{S}_i$ を決定するために(6)と同様に、(7)を計算する。

$$\hat{S}_i = S_i \cdot S_H \quad (i=2, 3, \dots, n-1) \quad (7)$$

$S_2, S_3, \dots, S_n$ のサブ集合と、 $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_{n-1}$ のサブ集合が決定されたあと、それぞれの要素によって作成された行列 A_i での要素の関連性によって、階層グラフを作ることができる。

(e) ファジイ関係および逆問題の解法

X が $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ であるとき、 X 上で定義されたファジイ集合 R をファジイ関係という。先述した構造 $A = a(s_i, s_j)$ の場合、 $S \times S$ 上のファジイ関係である。ファジイ合成関係は、2つのファジイ関係あるいは、1つのファジイ関係と1つのファジイ集合を1つにすることであるが、例えば、不満度指数を基本にして作成してファジイ関係 $G = g(s_i, s_j)$ 、 $\forall s_i, s_j \in S \times S$ と、ファジイ構造モデル $A = a(s_i, s_j)$ 、 $\forall s_i, s_j \in S \times S$ の合成は、(8)で表わされる。

$$G \circ R = A \quad (8)$$

ただし、 R は、 $S \times S$ 上のファジイ関係である。

次に(8)の逆問題の解法手順について略述する。

今 A および G を次のように与える場合、次の条件が必要となる。

[仮定] 行列 G は、しきい値 p によってみかけの三角化ができると仮定する。

仮定より与えられた行列は、次のように小行列分解

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

仮定により、 G_{21} は、要素 g_{ij} が $0 \leq g_{ij} < p$ 、また、 G_{11} 、 G_{22} は、みかけの三角行列となる。

これを展開すると次式が得られ、(12)、(13)より、

$$(G_{11} \circ R_{11}) \vee (G_{12} \circ R_{21}) = A_{11} \quad (10)$$

$$(G_{11} \circ R_{12}) \vee (G_{12} \circ R_{22}) = A_{12} \quad (11)$$

$$G_{22} \circ R_{21} = A_{21} \quad (12), \quad G_{22} \circ R_{22} = A_{22} \quad (13)$$

R_{22} は仮定より直接決定され、また、 R_{21} の算出手順は、 G_{21} の小行列分割の繰返しによって、 2×2 行列を解くことで行なわれる。

3. 適用例の分析と評価

(1) 調査概要

ここでの適用例は、ダム建設が予定されている地域での生活環境要素の構造化とそのインパクトによる影響を把握するものである。具体的対象地域として、現在ダム建設計画がある北海道芦別市を選定した。調査は生活環境に関わる主要要素14を抽出し、意識調査を実施した。これら要素とその内容を略述すると、表1のようになる。また、回答対象者の構成は、表2に示される。

表2 回答対象者の構成

グループの種類	回答数
G-1 公務関係	14
G-2 農林業関係	9
G-3 商工業関係	5
G-4 小中高校教員	12
G-5 主婦代表	5
総数	45

(2) 分析結果

a)生活環境の意識構造動向把握……生活環境要素間の重要度による構造化の結果のうちで、全回答者の調査からの構造を有向グラフにまとめると、図3のようになる。また、満足度の評価（不満度指数）によって得られた条件を基にして、将来の構造変化を計測し、有向グラフで表わすと、図4のようになる。これらの図により結果を要約すると、次のようになる。

- ①全体として考えると重要な要素として、最上位レベルに、保健、雇用、教育があげられ、また、交通、消費、福祉および、居住などの要素が次のレベルに位置づけされる。すなわち、利便性や経済、快適性などの要求が強いと解釈される。
- ②特に、雇用、交通要素に、多くの有向枝が集中していることは、両要素とも他の要素との従属関係が大きく、位置づけが明確であることがわかる。
- ③将来ダム建設後において、交通、消費、経済など利便性を中心としてレベルの相対的上昇がみられる。
- ④これに比して、保健、教育などの要素が低下し、防災も相対的レベルが低下する。
- ⑤これらの傾向は、保健、教育が低下したといえるよりむしろ交通、消費、経済に対する要望が大きくなったと解釈される。これは、市内を大きく占める

貯水池によって地区の分断、交通体系の変化が起きるため、また、水没者の移転などによっての人口の減少などに起因していると考えることができる。

表1 生活環境に関わる主要要素

生活環境要素	具体的例
1. 保健	病院・診療所等の施設・サービス
2. 非公害	公害問題がないこと
3. 防災	災害に対して安全なこと
4. 交通・情報	地域内・地域間の交通の便
5. 消費・経済	日用品・生活必需品の得やすさ
6. 雇用・収入	働く場があり、収入が得やすい
7. 共同・連帯	コミュニティ活動が充分なこと
8. 風紀	犯罪・非行がないこと
9. 文化	文化活動施設およびサービス
10. 福祉	老人・子供福祉施設・サービス
11. 教育	希望する教育の施設・サービス
12. 居住	希望する規模の住宅の得やすさ
13. スポーツ等	スポーツ・レクリの施設サービス
14. 自然保全	森林・緑地の保全が充分なこと

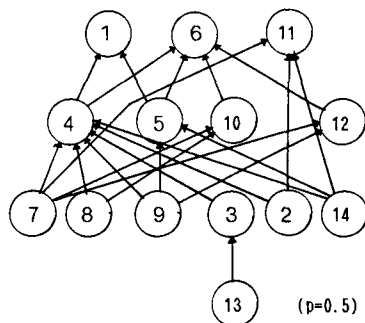


図3 構造モデルの有向グラフ（全回答）

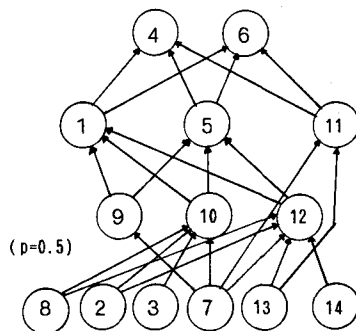


図4 ダム計画のインパクトによる構造変化

⑥全体の傾向として、要素間の相対的位置づけには、大きな変化はないが、個々の関係にはかなりの変化

がみられる。

b)各グループ間の構造類似性の把握……また各グループ別に(14)に示す類似度指数 $D_{I II}$ を算出すると、表3ようになる。

$$D_{I II} = \frac{B_I \cap B_{II}}{B_I \cup B_{II}} \quad (14) \quad \begin{array}{l} B_I, B_{II} \text{ は } I \text{ お} \\ \text{よび } II \text{ グラフ上} \\ \text{のパスの数} \end{array}$$

この結果を要約すると、次のようになる。

グループ別にみると、市の計画担当者が中心の公務関係、また農林業関係では、雇用、保健、商工業関係では、雇用、学校関係では、雇用、保健、教育、さらに、主婦層では、教育、雇用の他に居住、風紀などの要素に高い選好がみられる。また、類似性をみると、学校関係者と商工業関係者、公務関係者と農業関係者の間に高い類似性がみられた。さらに、主婦層においては、他のグループとの類似性が低く、考え方に独自性があることがわかる。

表4 各グループ間の構造の類似度指数

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
総数	0.51	0.47	0.41	0.39	0.31
G-1		0.43	0.26	0.27	0.18
G-2			0.40	0.33	0.23
G-3				0.51	0.21
G-4					0.25

4. まとめ

以上、ファジィ構造化と、得られた構造のダム建設による影響の事前評価の方法とその具体的例を示した。その結果、ダム計画が住民の地域交通体系に対しての意識に与える影響が相対的に大きいことが明らかになった。このことは、鉄道、道路の付替え等具体的な計画への有効な情報となる。

本方法の有効性について要約すると次のようなことがあげられる。

- ①比較的、統計的手法が適用しづらい思考上の概念、例えば、「重要である」や、「満足である」などの評価に対しては、ファジィネスの考え方がより妥当であり、それによって要素間の相対的位置づけも、より現実的関係を与えると考えることができる。
- ②構造化のための調査の困難性に対して、比較的容易で、なじみやすい調査を基に、ファジィ理論の数

学的展開によって構造変化を考えることができる。

③土木事業に対する生活環境の各要素間関係を計測することによって事業に対するモニタリング機能を考えることができる。

また問題点としては、①ISM法などに比べ、意識調査の数が多いこと、それに伴う質問回数が多く、したがって、回答者も限られる。このため、他の補完的な方法も合わせて考えてみる必要があること、②ファジィ逆問題を解く場合、三角化等の条件を考慮する必要があり、やや複雑であること、③構造化手法は、主として定性的な評価のために用いられたが、定量的な評価との斉合性、関連性なども考えてみる必要があることなどである。

以上今後の検討課題も多いが、原因と結果、あるいは前提と結論といった関連性を明らかにしなければならぬ問題について、広い応用可能性を持っているといえる。

なお、データの集計およびファジィ従属行列算定、およびファジィ逆問題等の計算には、NEC9801、またファジィ構造化のためには、北海道大学大型計算機センターHITAC M-200のアプリケーション「APL」を用いた。

5. 参考文献

- 1)寺野寿郎；システム工学入門、共立出版(1985)pp101-138.
- 2)Tazaki, E. & Amagasa, M. ;Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory Fuzzy Sets & Systems 2(1979)pp87-103.
- 3)Warfield, J. N. ;On Arranging Elements of a Hierarchy in Graphic Form, IEEE Trans. SMC 3-2(1973)pp121-132.
- 4)塚本弥八郎、田代勤；Fuzzy 逆問題の解法、計測自動制御学会論文集、15-1(1979)pp21-25.
- 5)鬼沢武久、菅野道夫他；歯科診断におけるあいまい推論の利用、計測自動制御学会論文集、18-7(1982)pp46-49.
- 6)加賀屋誠一；構造化手法を用いた計画目標の階層的評価に関する一考察、土木学会北海道支部論文(1979)pp243-248.