

---

研究展望

**Review**

# 研究展望

## ファジィ理論の土木計画分野における適用に関する整理と展望

### APPLICATIONS OF FUZZY SET THEORY TO INFRASTRUCTURE PLANNING AND ITS PROSPECTS

秋山孝正\*

By Takamasa AKIYAMA

#### 1. はじめに

ファジィ理論は1965年に、L. A. Zadehがその基本的概念を提唱してから20数年がたった。現在では、ファジィ理論に関する国際学会(IFSA)も設立され、その研究の範囲についても成果が整理されてきており、新しい現実問題への実用的展開が試みられている。こうした、研究内容の整理に伴って、海外はもとより国内における学術図書も多く刊行されるようになり、ファジィ理論の基本的な知識を得ることが容易となってきている<sup>1)~14)</sup>。

土木計画の分野においては、ファジィ集合の各種理論が発表され始めた比較的早い時期からその適用が検討されてきている。ここでは、ファジィ理論の方法論の概観を行い、これまでの土木計画におけるファジィ理論の適用を取りまとめる。最後にこれらを検討し、今後のファジィ理論の適用の方向性について述べる。

ファジィ理論はいくつかに大別することが可能であるが、その具体的方法論と土木計画分野での適用性の関係から表-1のように取りまとめることができる。ここでの方法論の分類はIFSAにおける研究テーマを参考とし、また適用分野の分類は土木計画における従来のキーワード中から抽出している。また本表中では従来の適用例の含まれると思われる分野を示しており、必ずしもすべての分野の適用が同程度に行われているものではない。

本表からもわかるように、ファジィ理論を統一的に一連の方法論として述べることは難しいが、ここに示した

各理論について考えることでファジィ理論の取り扱い得る範囲を概観することが可能である。

以下では、この分類に従って、①ファジィ集合の基礎的理論、②ファジィOR手法、③ファジィ推論とファジィ制御、④その他のファジィ手法という順で具体的方法と適用について述べることにする。

なおここでは、土木計画に関する過去の研究発表について、土木学会年次学術講演会、土木計画学研究発表会、土木学会論文集における発表を中心として用いている。

#### 2. ファジィ集合の基礎理論

ファジィ理論は、Zadehの提唱したファジィ集合の考え方を基本とする。これは、従来の集合の自然な拡張とすることを目的としている。簡単にいえば、従来の「集合に含む、含まれない」といったように0と1の2値論的に考えられていたものを0~1の多くの値を用いて多値論理として「ある程度含まれる」という内容を表現できるようにしたものである。

[ファジィ集合]

ファジィ集合(Fuzzy Set)は、まず $X$ を全体集合とし $x$ を $X$ の要素とする。 $X$ 上のファジィ集合 $A$ はメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ によって表現される。

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \dots\dots\dots (1)$$

この関数 $\mu_A(x)$ は、 $x$ が集合 $A$ に属する程度を示す。たとえば $\mu_A(x)$ の値が0のとき $x$ は $A$ に全く属さず、逆に $\mu_A(x)$ の値が1のときは $x$ は完全に $A$ に属している。たとえば $\mu_A(x)$ の値が0.6といった場合には要素 $x$ が集合 $A$ にそれなりに属することを示している。このファジィ集合は一般に以下のような表記法を用いて表現されることが多い。

\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

Keywords : fuzzy set theory, infrastructure planning

$$A = \int_x \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が連続量}) \text{ あるいは}$$

$$A = \sum \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が離散量}) \dots\dots\dots (2)$$

このような、表現方法を用いれば、従来の含む、含まれないの集合（クリस्प集合：Crisp Set）も全く同様な方法で記述することができる。

[ファジィ数]

ファジィ集合の定義に従えば、一般の「数」に対して、ファジィな表現をもつ「数」も記述できる。たとえば「5 ぐらい」の数はファジィ集合の表記法によれば以下のようになる。

$$\{x : 5 \text{ ぐらい}\} = \dots + 0.0/3 + 0.5/4 + 1.0/5$$

$$+ 0.6/6 + 0.0/7 + \dots$$

$$= 0.5/4 + 1.0/5 + 0.6/6 \dots\dots\dots (3)$$

（メンバシップ値 0 の要素は省略可）この表記法によれば、従来の数も同様に示すことができ、たとえば以下のようなのである。

$$\{x : 5\} = \dots + 0.0/3 + 0.0/4 + 1.0/5 + 0.0/6$$

$$+ 0.0/7 + \dots$$

$$= 1.0/5 (=5) \dots\dots\dots (4)$$

これはファジィ集合が従来の集合を包含した形で定義されていることを示すものである。また上記の表記法で示される  $\{x : 5 \text{ ぐらい}\}$  ( $= \sum \mu_A(x)/x$ ) のような形で表現される数を「ファジィ数」とよぶ。

[拡張原理]

ファジィ集合の関数、あるいはファジィ集合同士の任意の計算を行うために次の拡張原理が定義されている<sup>5)</sup>。これは上記の表記法を用いると、

$$f(A) = \sum_{x_i} \mu(x_i)/f(x_i) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、  
 $A$  : ファジィ集合  
 $f(A)$  : 任意の関数

と定義される。この原理によりファジィ数の演算が可能となる。たとえば、あるファジィ数  $A$  を

$$A = \sum \mu(x_i)/x_i \dots\dots\dots (6)$$

とし、 $f(A)$  を「2乗」とすると、ファジィ数  $A$  の2乗  $A^2$  は以下のように計算することができる。

$$f(A) = A^2 = \sum \mu(x_i)/(x_i)^2 \dots\dots\dots (7)$$

すなわちファジィ数の演算では個々の数に対して定義された演算を行い、このときの各計算結果のメンバシップ値はもとのメンバシップ値によって規定されることを示している。

さらに複数のファジィ数の演算もこの原理を用いて行うことができる。すなわち2つのファジィ集合  $A, B$  に対して、以下のように定義される。

$$f(A, B) = \sum_{x_i, x_j} (\mu_A \wedge \mu_B) / f(x_i, x_j) \quad (\wedge : \min) \dots\dots (8)$$

たとえば、さきの「5 ぐらい」(式(3))と「2 ぐらい」

表-1 ファジィ理論の方法と土木計画での適用

分類	主要な具体的手法	土木計画適用分野
ファジィ集合の基礎理論	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファジィ数</li> <li>・拡張原理</li> <li>・ファジィ確率</li> <li>・ファジィ統計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計画数理</li> <li>・システム分析</li> <li>・社会経済分析評価</li> <li>・地域都市計画</li> </ul>
ファジィOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファジィ線形計画</li> <li>・ファジィ動的計画</li> <li>・ファジィ整数計画</li> <li>・可能性回帰分析</li> <li>・ファジィ数塵化理論</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通需要分析、予測</li> <li>・交通網計画</li> <li>・交通配分</li> <li>・計画理論</li> </ul>
ファジィ推論とファジィ制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファジィ推論</li> <li>・ファジィ制御</li> <li>・ファジィエキスパートシステム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通流、交通制御</li> <li>・計算機支援システム</li> <li>・交通発生</li> <li>・情報処理</li> </ul>
その他の手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファジィ積分</li> <li>・ファジィクラスタリング</li> <li>・ファジィ構造分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・データ処理</li> <li>・交通計画評価</li> <li>・意識調査分析</li> <li>・環境計画</li> </ul>

(注) 適用分野は土木計画学審査分野、年次講演会発表分類よりキーワードを抽出した。

( $= 0.7/1 + 1.0/2 + 0.4/3$ ) の和を求めると、

$$0.5/5 + 0.7/6 + 1.0/7 + 0.6/8 + 0.4/9 = [7 \text{ ぐらい}] \dots\dots\dots (9)$$

となり人間の認識に近い演算が行えることがわかる。

このときの「ファジィ数」の演算での相互の関係を図示したものが図-1である。このようにファジィ数同士の演算を行うと一般に広がりが増加したファジィ数が得られることがわかる<sup>15)</sup>。

ここで用いた「拡張原理」が現在のところファジィ集合の演算での理論的な展開の主要な結論である。これによって、ファジィ数の演算の統合的解釈が可能となり、従来の数（Crisp数）での各種の議論がファジィ集合にも拡張して用いることができる。しかも、従来の方法での結果と相反するのではなく、内包する形で定義されていることから有効であるといえる。

こうしたファジィ数を用いて従来の基礎的な各種理論の拡張を試みた例として、ファジィ確率、ファジィ統計などの方法論を挙げる事ができる。

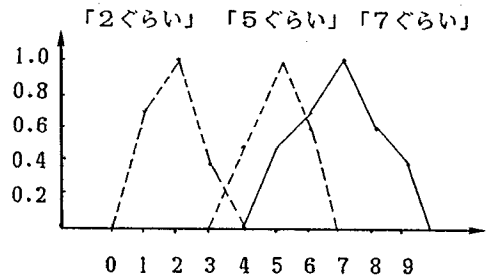


図-1 ファジィ数の計算例<sup>15)</sup>

土木計画の分野において、黒田・長尾は上記のようなファジ的な考え方をを用いて、不確実性下の意思決定問題の取扱いについて理論的検討を行っている<sup>16)</sup>。ここでは、ファジ確率を用いて、従来の統計的方法の拡張に関する基礎的な理論が整理されている。この方法を代替案評価に用いた例が黒田・曾根によって示されている<sup>17)</sup>。

石田は、代替案の総合評価に際して、ファジ的な量を用いた方法論的検討を行っている<sup>18)</sup>。また石田・平野は同様の方法を多様な住民意識による評価に用いており、特に住宅地環境、交通環境の評価分析を行っている<sup>19)</sup>。

永野・金安は一対比較法などの評価手法にファジ性を導入し環境評価などに用いることを提案した<sup>20),21)</sup>。また同著者らは、「拡張原理」によるファジ演算を用いた従来の多属性効用理論の拡張を行い、これを水道システムの評価に用いている<sup>22),23)</sup>。ここでのファジ概念の導入は厳密な数値のみならず「だいたい  $x$ 」といった評価が可能となり妥当な評価ができるとされている。

さらにファジ的な考え方を換地における土地利用計画に用いた例が中川によって示されている<sup>24)</sup>。

交通の分析にもいくつか例があり、内田・黒田はファジ情報を用いた意思決定過程を用いて、道路ネットワークのルート選択問題の定式化の提案を行っている<sup>25)</sup>。

また木下らはファジ数を用いた「拡張原理」による演算に着目し、交通機関選択の問題において従来のロジットモデルのパラメーター推計結果を用いて、ファジ表現にすぐれたファジ量を得る方法を検討した<sup>15)</sup>。

最近では、高速道路の情報処理の分野で、ファジ的な数を用いて、利用者の視点を考慮した妥当な交通情報を提供しようとする井上らによる試みがある<sup>26)</sup>。

これらの研究例は、いずれも従来の数に対して、「ファジ数」の考え方をを用いた方法である。すなわち従来の多くの方法論に対して、ファジ数を用いることで人間的な判断を含み、同一の議論を行うことができる。したがって、ここで述べた確率、統計といった方法論的展開はもちろん、既存の各種手法のファジ性の導入において重要な役割を果たすものである。今日では、ファジ集合論についての数学的な検討は一部の数学的興味をもつ者によって研究が行われているが、メンバシップ関数など興味深い話題についても検討が進んでいる。

### 3. ファジ OR 手法

ファジ OR とは OR (オペレーションズリサーチ)へファジ性の導入を行ったものである。これは1970年に R. E. Bellman (動的計画法で著名) と L. A. Zadeh が、ファジ環境における意思決定として、代

替案の集合  $X$  上にファジ目標(fuzzy goal)とファジ制約 (fuzzy constraints) が与えられた際の意思決定に関して検討を行ったものが端緒である。ここでファジ目標  $G$  とファジ制約  $C$  は、それぞれメンバシップ関数  $\mu_G, \mu_C$  によって定義される代替案の集合  $X$  上のファジ集合である。

このとき、ファジ目標とファジ制約を統合した決定集合を定義する必要がある。Bellman と Zadeh は、ファジ目標  $G$  とファジ制約  $C$  を同時に満たすことを考慮して、ファジ決定 (fuzzy decision)  $D$  を、ファジ目標  $G$  とファジ制約  $C$  との共通集合と定義した。

すなわちファジ決定  $D$  は、

$$D = G \cap C \dots\dots\dots(10)$$

であると定義され、そのメンバシップ関数は、

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x) \dots\dots\dots(11)$$

である。一般に複数個のファジ制約が存在する場合への拡張は容易に行うことができる。 $G_1, G_2, \dots, G_n$  をファジ目標とし、 $C_1, C_2, \dots, C_m$  をファジ制約とすれば、ファジ決定  $D$  は、

$$D = G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m \dots\dots\dots(12)$$

と定義され、このメンバシップ関数は以下のようである。

$$\begin{aligned} \mu_D(x) &= \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (\mu_{G_i}(x), \mu_{C_j}(x)) \\ &= \min (\mu_{G_1}(x), \dots, \mu_{G_n}(x), \mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_m}(x)) \\ &\dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

ファジ決定  $D$  における意思決定としては、 $D$  に帰属する度を最大にするような  $x$  を選ぶという最大化決定が提案されている<sup>1),4)</sup>。すなわち、

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) \dots\dots\dots(14)$$

となるような  $x^*$  を求めるものである。ここで、このような  $x^*$  は存在しない場合もあれば、無数に存在する場合もある。またこの最大化決定の他に「凸ファジ決定」や「積ファジ決定」などが提案されている。

以上の定式化はファジ的な考え方をオペレーションズリサーチにおいても用いることを考えたもので、数理計画に属する各方法はファジ的な定義が可能となる。ファジ線形計画、ファジ動的計画、ファジ整数計画などが多く定式化されている。また、その他の OR 手法としては、いわゆる多変量解析法のファジ化としてファジ回帰分析 (可能性回帰分析と総称されている)、ファジ数量化理論、ファジ判別分析などがある。

こうした方法の多くは、従来一般の数理計画的問題として定式化してきた土木計画の各問題には基本的に適用可能であり、この点からいくつかの研究例がある。

吉永・樗木は、簡単な2経路の交通経路選択問題に関して、待ち行列などのファジ制約つきの線形計画問題

としてとらえ具体的な定式化を行っている<sup>27)</sup>。

秋山は都市高速道路でのLP制御を交通容量のファジィ性から見直し、ファジィLP制御として制御効果の検討を行っている。この結果従来の方法に比べて若干の余裕を考慮した制御結果が得られるとしている<sup>28)</sup>。

木下らは、ファジィ線形帰帰モデルを機関分担保モデルとして用いることを提案している。これは機関分担保率のファジィ数としての推定を目指したものである<sup>15)</sup>。

以上のように、本来ORの方法によって定式化できる問題は、ほとんどの場合ファジィな取扱いが可能である。しかし実際には、各種のファジィ性の導入方法があり、たとえばLP問題のような場合を考えても、①目的関数のファジィ化、②制約条件のファジィ化、③係数のファジィ化をそれぞれ考え、定式化することが可能である。したがっていかなる形を用いるかは、個々の土木計画の問題によって検討する必要がある。またさらに第3の例のように、ファジィな量として決定値が得られる場合の取扱いを検討することが必要である。

この分野は、従来のOR手法のファジィ論的展開、特に計算方法の開発を中心に行われているため、適用性についての検討はどちらかといえば不十分である。したがって、各OR手法にファジィ性を導入したことによって得られる解の長所、方法論的特徴についての議論を行っていくことが今後重要であると考えられる。

これまでの研究では、ファジィ数量化理論、可能性帰帰分析、ファジィ判別分析などの各種方法は、その長所を十分に生かした適用が少ないが、今後土木計画分野の各種問題解決においても有効であると考えられる。

### 4. ファジィ推論とファジィ制御

現在のファジィ理論研究の1つの大きな課題はファジィ推論とファジィ制御である。ファジィ推論は、Zadehによって近似推論 (approximate reasoning) とよばれ、2値論理で構成されていたこれまでの推論をファジィな推論とすることで、人間の推論過程を近似的に表わそうとするものである。

ファジィ制御は、いわばファジィ推論の実用的適用であり特に知識工学の分野で従来から作成されてきたプロダクションシステムを模範として推論ルール群を用いて制御判断を記述するものである。

[ファジィ推論]

ファジィ関係と推論について述べる。ファジィ集合AとBのファジィ関係Rとは、たとえば「AとBはよく似ている。」などの両者の関係を表現するファジィ集合である<sup>3)</sup>。具体的には、

$$R = \int_{x \times y} \mu_R(x, y) / (x, y) \dots \dots \dots (15)$$

のように表現されるが、このメンバシップ関数  $\mu_R(x, y)$  は、 $\mu_A(x), \mu_B(y)$  の二項関係によって決定される。 $\{x: 5 \text{ ぐらい}\}$  (式(4)) に対して、 $\{y: 4 \text{ ぐらい}\}$  を示す  $\mu_B(y)$  を

$$\sum \mu_B(y) / y = 0.4/3 + 1.0/4 + 0.4/5 \dots \dots \dots (16)$$

のように定義すれば、この  $\mu_A(x)$  と  $\mu_B(y)$  を用いて、ファジィ関係を示す  $\mu_R(x, y)$  は、たとえば

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \dots \dots \dots (17)$$

のように示すことができ、この  $\mu_R(x, y)$  で「 $x: 5$  ぐらいのとき  $y: 4$  ぐらい」という関係が保存される。したがってファジィ集合Bは以下の計算で得られる。

$$B = A \circ R = \int_y \sup [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \dots \dots \dots (18)$$

ここで、 $\circ$ : max-min 計算,  $\sup$ : 上限

この演算は論理的な関係「If  $x$  is A then  $y$  is B」(もし  $x$  がAならば  $y$  をBとする。)を表現するものである。「 $x$  is A」とは異なる入力「 $x$  is A'」によって得られる推論結果「 $y$  is B'」は次のようにして求めることができる<sup>29)</sup>。

$$B' = \int_y \sup [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \dots \dots \dots (19)$$

これは、ファジィ関係を表現するためのメンバシップ関数  $\mu_R(x, y)$  を  $A \rightarrow B$  の関係として決定しておけば、「 $x$  is A'」の状態を示すメンバシップ関数  $\mu_{A'}(x)$  から推論結果として  $y$  の状態を示すファジィ集合  $B'$  が求められることを示している。このようなファジィ推論は図-2に示すようにメンバシップ関数として表現されるファジィな入力変数 (fuzzy variables) により出力側にも1つの分布をもつファジィな変数が得られるものである。

[ファジィ制御]

ファジィ制御は、さきに述べたようにファジィ推論の制御への適用である。したがって基本的方法論は同様である。ただし対象を「制御」とすることから、一般に入出力はファジィでない数値である。ファジィ集合が従来の集合も包含していることから、ファジィ推論においても入力情報であるA'に「 $x=5$ 」などの普通の数(クリップ入力)が可能であり、ファジィ制御等への適用ではこ

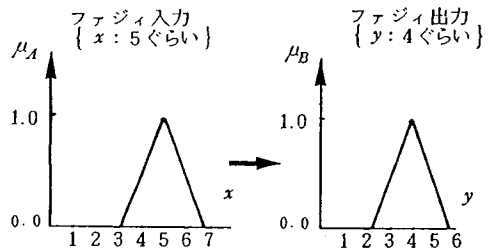


図-2 ファジィ推論の概念図<sup>29)</sup>

の形を用いている。すなわち、制御の判断は「 $x$ が大ならば  $y$  は大」といったファジ推論の形で表現され、入出力値は確定値を用いることができるということである。

したがって、従来入出力関係が  $y=F(x)$  の関数として表現された問題が、ファジ推論型のルール群として表現されることから、判断内容の明確化、ヒューリスティックな内容変更が可能となる点で有意義である。

ファジ制御はすでに多くの分野で開発研究が進み、実用的システムもいくつかみられる。特にファジ制御の創始者の存在である E. H. Mamdani が、交通制御の問題（信号制御）に用いていることは興味深い<sup>30)</sup>。またわが国においては、仙台市の地下鉄の自動運転、浄水場の制御などに積極的に取り入れられている<sup>31)</sup>。

土木計画の分野では、加賀屋らが道路粉塵に対する意識構造をモデル化するため、その思考過程をファジ推論で表現しルール群を用いて記述を試みている<sup>32)</sup>。

またファジ推論の具体的な説明とその応用に関しては、佐佐木・秋山による交通行動をファジ推論として表現したものに詳しい。ここでは、交通行動の判断をモデル化し、最終的に人間の判断結果をメンバシップ関数の分布として表現している<sup>32)</sup>。

またファジ制御では、都市高速道路の交通制御に注目して同手法の適用を試みたのが、佐佐木・秋山らのファジ流入制御モデルである。これは、実際の交通制御をモデル化したものであり、基本的方法に忠実にモデル化を行っている<sup>29), 33), 34)</sup>。

またファジ推論からいわゆるエキスパートシステムへの応用、ヒューリスティックな方法の導入にも目が向けられるようになってきている。前田らによる応用例もこの1つであるといえよう<sup>35)</sup>。

ファジ推論は、現在のファジ理論のなかでも最も有力な方法と考えられ各種の理論的研究も進んでいる。特に従来のエキスパートシステムにファジ性を導入していこうとする動向もある。すなわち、知識工学を用いた方法論と人間の判断におけるファジ性をうまく融合し適用性を向上させようとする試みである。

今後、土木計画の分野においても、ファジ推論で記述可能な問題の抽出とその思考過程記述の容易性、あるいは推論結果の明示性を生かした応用への展開を模索していくことが重要であると考えられる。

### 5. その他のファジ手法

以上に挙げなかった方法論の他に、主要なものとして、評価に用いるファジ積分の方法、クラスター分析の一般化であるファジクラスタリング、ISMを一般化したファジ構造分析手法 (FSM) などがその適用性に

優れていることから実際の適用がいくつかみられる。

#### [ファジ積分]

ファジ測度を一種のウェイトとして総合的評価を行う場合ファジ積分が用いられる。ファジ積分は具体的には以下のように定義される。

集合  $X$  に対して、関数  $h: X \rightarrow [0, 1]$  が与えられるとき、 $X$  の部分集合  $F$  上のファジ積分は、 $F' \subset F$  に対して以下のように定義される。

$$\int_F h(x) \cdot g(\cdot) = \sup_{F' \subset F} [\inf_{x \in F'} h(x) \wedge g(F')] \quad (\text{inf : 下限})$$

.....(20)

すなわちこの積分により各評価  $h(x)$  をウェイト  $g$  で統合化（積分）するわけである。このファジ積分は無集合を前提としているが、われわれが実際に直面するような有限集合にも定義される。

前述の定義において  $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  とすれば  $h(x)$ ,  $g(x)$  もそれぞれ  $h(x_i)$ ,  $g(X_i)$  で示される離散変数となり有限個であるので、式 (20) は以下のようになる。

$$\int_X h(x) \cdot g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [(\bigwedge_{j=1}^i h(x_j)) \wedge g(X_i)] \quad (\bigvee : \text{max})$$

.....(21)

なおこのとき実際の計算のために、あらかじめ

$$h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n) \dots \dots \dots (22)$$

のように並べておけば、部分集合  $X_i = \{x_1, \dots, x_i\}$  に対して常に

$$\bigwedge_{j=1}^i h(x_j) = h(x_i) \dots \dots \dots (23)$$

が成立するので上式は次のように書き直すことができる。

$$\int_X h(x) \cdot g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge g(X_i)] \dots \dots \dots (24)$$

これは定義どおり、 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  のすべての部分集合 ( $2^n$  個) に対して、演算を行わず  $n$  回の比較計算でよいことを示している。

それぞれの項目のもつ意味は以下のように考えられる。

- $x_i$  : 評価要因  $i$  の属性値
- $h(x_i)$  : 評価要因  $i$  の属性値が  $x_i$  のときの評価に対する望ましさの度合（換言すれば  $x_i$  が高い評価を与える属性値の集合に帰属する度合を示すメンバシップ関数）
- $X$  : 評価要因の全体集合  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
- $X_i$  : 評価要因の部分集合  $X_i = \{x_1, \dots, x_i\}$
- $g(X_i)$  :  $X_i$  について先験的な重視度（評価上限値）
- $\lambda$  : 相互作用乗数、評価要因の重複程度を示すパラメーター
- $\mu$  : ファジ積分値、要因に関する評価値  $h(x_i)$

を総合化した評価値

したがってファジィ積分によって与えられる総合評価値  $\mu$  は個人がおのおのの項目についてメンバシップ関数の値  $h(x_i)$  として評価したものを、ファジィ測度によって総合化した値である。また、このとき用いられる演算から max-min 的な思考過程をもつ評価であることがわかる。

本多らはファジィ積分の演算過程が人間の意思決定過程をモデル化すると考え、個人の経路選択モデルを提案している<sup>36)</sup>。佐佐木らも同様な選択に関するファジィ積分を都市高速道路の迂回現象の検討に用いている<sup>37)</sup>。

また本多らは、ファジィ積分を評価に用いることを考え、土木施設評価手法を示している。ここでは、土木施設のサービス水準と主観的総合評価との関係を中心に検討を行っている<sup>38)</sup>。

同様な試みは石田らも行っており、バス導入問題に対する住民の意識構造をファジィ積分の演算過程を用いてモデル化しようとするものである<sup>39)</sup>。

また飯田らは代替案の総合評価手法としてファジィ積分手法をとりあげ、従来からの方法である多規準分析法、多属性効用関数法と評価結果の比較を行って、手法の特徴を整理している<sup>40)</sup>。

[ファジィクラスタリング]

ファジィクラスタリング手法は、統計的手法の1つクラスタリング手法の拡張である。従来の方法では、明確な境界線を用いて、データ集合をいくつかのクラスタに分類する。しかし、実際には境界部に存在するデータをいずれか1つのクラスタのみに完全に帰属させることは困難な場合が多い。

そこで帰属度を  $\{0, 1\}$  の2値から  $[0, 1]$  に拡張して中間状態も認めることにし、境界部のデータは、複数のクラスタに少しずつ帰属することも許されるように定式化したのがファジィクラスタリング手法である。これは自然な考え方であり、多くのアルゴリズムが発表され理論的にも整備されてきている<sup>11)</sup>。

基本的には、扱うデータ集合を  $X = \{x_j\} (j=1 \sim n)$ 、クラスタ数を  $c$  とすると、ファジィクラスタリングの最終結果は1つの分割行列  $U$

$$U = [u_{ij}]_{i=1 \sim c, j=1 \sim n} \dots \dots \dots (25)$$

で表現することができる。この  $u_{ij}$  は  $[0, 1]$  の数値をとり、 $j$  番目のデータ  $x_j$  が第  $i$  クラスタに帰属する度合を表わしている。ただしここで、 $u_{ij}$  は以下の2つの制約を与えるのが一般的である。

$$\textcircled{1} \sum u_{ij} = 1 \quad \text{for } j=1 \sim n \dots \dots \dots (26)$$

$$\textcircled{2} \sum u_{ij} > 0 \quad \text{for } i=1 \sim c \dots \dots \dots (27)$$

式 (26) はメンバシップ値の規格化、式 (27) は帰属度が正で与えられることを示すものである<sup>3)</sup>。この条件

下で妥当な  $u_{ij}$  を求めることが目的であるが、実行指標となる目的関数は多く存在する。基本的には、データ相互の距離行列(あるいは類似度)との整合をとるための関数最小化が用いられ、この点は従来の方法と同様である。また解法は「重みつき最小乗法」が一般的である。

後藤・石田は道路分類のための手法としてファジィクラスタリングを用いている<sup>41)</sup>。ここでは、アンケート調査結果を用いた検討が示されている。

佐佐木・秋山はファジィクラスタリングを用いた道路建設に対する住民意識の分析を行っている<sup>42)</sup>。3つのファクタによって地域住民の意識を分類しているが、複数の意識の混在状態の表現にこの方法を用いている。

[ファジィ構造分析]

ファジィ構造分析手法 (Fuzzy Structural Modeling, 以下FSM手法と略記する。)は、従来の構造分析手法であるISM法と同様な取扱いをファジィ関係行列に対しても行うために考案された方法である。

まず構造同定を行う対象システムを、要素の集合体として、 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  とし、要素2項間のファジィ従属行列  $A$  を  $\{a_{ij}\}$  と定義する。行列  $A$  は、 $n \times n$  行列でありその要素  $a_{ij}$  は、

$$a_{ij} = f_r(S_i, S_j) \quad 0 \leq a_{ij} \leq 1 \dots \dots \dots (28)$$

$f_r$  は要素間のファジィ2項関係に関するメンバシップ関数である。すなわち  $f_r(S_i, S_j)$  は、 $S_i, S_j$  間の結合程度を示すものといえる。

またファジィ補集合  $\bar{A}$  のメンバシップ関数  $\bar{f}_r$  と  $f_r$  との関係は、

$$\bar{f}_r = (1 - f_r) / (1 + \lambda \cdot f_r) \quad (-1 < \lambda < \infty) \dots \dots \dots (29)$$

分析の最初に、要素間の関係の有無をみるための境界値  $p$ 、 $(0 < p \leq 1)$  を設定し、このファジィ従属行列  $A$  を用いて、次の手順で  $S$  の構造を決定する<sup>11)</sup>。

① 最上層レベル集合の要素に関しては行を消去、最下層レベル集合の要素については列を消去、独立レベル集合の要素については行および列を消去し、要素間の従属関係を示す小行列(単一ハイアラーキー行列  $A^{(i)}$ )を作成する。これはグラフ上で結合していない箇所について、行列から除去することを示している。

② ファジィ構造パラメーター  $\lambda$  の値を設定し、各単一ハイアラーキー行列  $A^{(i)}$  に関してグラフ化する。ここでレギュラー行(列)は要素間の一意的従属関係を示す。要素  $S_i$  に対するレギュラー行  $S_k, k=1, 2, \dots, m$  の消去は

$$a_i^* = a_i^{(j)} \wedge \left( \bigwedge_{k=1}^m \bar{a}_k^{(j)} \right) \dots \dots \dots (30)$$

により、 $a_i^{(j)}$  を  $a_i^*$  に置き換えることにより行う。

土木計画の分野においては、構造化を行うことで問題の明確化をはかることに加えて、各要因間の関係に関連

の程度として表わし、多様な表現を可能とするための試みがいくつかある。

湯沢らは、社会システムの1つとして地方都市発展のための問題点の把握にFSMを用いた構造分析を行っている。ここでは、FSM手法の概要を紹介し、調査結果データを用いて分析を行っている<sup>43)</sup>。

また加賀屋は地域環境に対する住民意識を構造的に把握するためにこれを用いている<sup>44)</sup>。

中西らは、新交通システムの1つであるリアモーターの導入における問題点の構造化を行っている<sup>45)</sup>。

加賀屋・山村は、ダム計画の生活環境意識への影響分析を行うために、FSM手法を用いて問題の構造化を行うとともに、これをもとにインパクトの予測を行うためにファジ関係を導入している<sup>46)</sup>。

都市圏構造に関する分析にも用いられており、樗木・吉武らは、分析の過程で方法論の1つとしてFSM手法を提示している<sup>47)</sup>。また飯田らは、同じく都市圏の交通構造の把握について、交通行動を基準として検討している。特にここでは、秋期と冬期の交通行動の差異がFSM手法によって構造的に把握されている<sup>48)</sup>。

ここでは、その他の手法として適用例の多い3種の手法について述べた。これらはいずれも、①方法論の意味が明確であること、②方法論的には一連の計算手順として独立していることなどの理由からその適用が多いものと考えられる。

現在のところ、ファジ積分は評価問題に、ファジクラスタリングはパターン認識に、ファジ構造分析は各種問題の構造同定に用いる場合が一般的である。

ここで注意すべきことは、これらの方法の大半はファジ的な計算結果を与えるということである。これまでの研究事例においては、分類や構造化を行うが出力されるファジ的な量を積極的に用いた分析は数少ない。0、1型の割り切り型の分類や構造化に対して「程度」をもたせることの意味を十分に活用することで、分析結果に新たな情報を付加することが可能であり、この点応用的な検討の余地が残されているものである。

## 6. ファジ理論適用についての展望

ここまで、土木計画の分野で用いられているファジ理論の方法を順に概説するとともに、いくつかの適用例について述べた。今後のファジ理論適用に関しては、いくつかの課題がある。ここでは、重要と考えられる点を以下に簡単に述べる。

### (1) ファジ理論の特徴と理解

ここまでみてきたように、ファジ理論の本質的な特徴は以下の2点に集約することができる。

① 0と1の2値的な決定ではなく、連続的な幅を

もって表現、演算が可能となっていること

② 従来の集合による結果と相反するものではなく、これを包含した形であり自然な拡張となっていること

したがって、このような点を生かせる妥当な適用分野を検討すべきであろう。具体的には土木計画の分野において、「余裕」や「幅」をもって意思決定を行うべき問題に適用することが望まれる。特にこの点では、人間の意思が介在する問題は適用性が高いということもできる。

しかし、これまでファジ理論によって人間の思考過程をモデル化するといいながら、単に意識調査などの解析のみに用いてきたことには問題が多い。これは「人間の思考=ファジ」という短絡的な考え方であり、ファジ理論の目指すところとも異なっている。

このようなことは、十分なファジ理論の理解の欠如にも起因すると考えられる。一般に「客観的」に対して「主観的」あるいは「決定的」に対して「あいまい」「不確実」という言葉から受けるイメージは必ずしもよいものではない。すなわち、現在のところいわゆるFuzzinessに対する正しい理解が不十分であり、こうした訳語の与えるイメージに影響を受けるということである。

ファジ理論の理解という点で、特に注意すべきであるのは、ファジ理論は「今日と明日では気が変わって行動が変わる。」といった“いいかげんさ”を記述するものではないことである。簡単にいえば、人間の認識に内在する判断の幅(余裕)を表現するものと考えべきであろう。そして、この点を理解することでファジ理論の現実的長所が生かされるものである。

ファジ理論を用いれば必ず人間の認識が記述できるというものではない。また問題によっては、従来の機械的、数理計画的な処理を用いることで、明解に問題解決がはかれる場合もある。こうした問題にあえてファジ理論を用いることは不必要なことであり、かえって問題を複雑にする。またファジ理論は従来の方法の一般化をめざしている。したがって拡張原理などをみてもわかるように、考えられるすべての場合を網羅した計算を実現する手順をもつ場合が多く、計算効率が良いとはいえない。この点からも、多くの意思決定変数をもつ問題などへの適用は妥当ではない。

そしてこうした幅をもった表現を必要とする分析対象物を即座に示すことは難しいが、今後の検討から問題を整理していく必要があるであろう。

### (2) 土木計画のハードとソフト

ファジでない従来の方法は、対象とする問題によっては若干不都合を生じる。たとえば決定論的方法のみで土木計画における諸問題の解決を行うことは、「予算を



1円でも越えたプロジェクトは悪い。」「調査データの実績値に完全に一致するモデルがよいモデルである。」といった危険な判断を示唆する場合がある。

一般に土木計画へのアプローチとして、モデルを作成し、実績値との整合を求め、相関係数の0.1の増加に努力を費やし、これがモデルの改良と考えられる場合も多くみられる。しかし、これを「あまり大きくは違わない」として、モデルの論理構造についての精緻化を試みることも別の観点から重要なことであると思われる。

土木計画上の問題においても、個人の意思決定、選択過程をモデル表現し、これをもとに交通需要推計、都市地域計画等の資料とする場合も多くみられる。このために人間の思考過程を「人間らしい」ソフトな判断の記述を行いながら、1つの理論的枠組みのなかで議論を進めるにはファジィ理論は有効な方法論であろう。

またいわゆる「知識」に基づくヒューリスティックな推論を用いる方法として、知識工学の検討が重要視されているが、昨今では、すでに情報処理等の分野においてエキスパートシステムにおける推論そのものをファジィ推論とする「ファジィエキスパートシステム」構築の兆しもみられる。したがって、ファジィ理論も理論的展開から実用的展開へと移行しつつあるといえる。これは土木計画においても、各種問題のハードな取扱いからソフトな取扱いへの移行の必要性を示唆するものである。

これまでにも、ファジィ理論で取り扱ってきた問題を確率論等でも同様な議論を行い、解析できるという意見があるが、残念ながら実際にこれを行った研究例を見出すことはできない。土木計画における各種問題においても確定的、決定論的なハードな方法を必要とする側面と不確実で決定に余裕をもつソフトな方法を必要とする側面の両者を検討していく必要がある。

このようなことから、従来の方法とファジィ理論を適度に組み合わせ、融合した方法論の展開が望まれる。

以上述べたように、ファジィ理論は「基礎理論」の部分では共通の基盤をもつが、実用的な各方法に対しては個別に開発されたものが多い。したがって、その適用性についての検討と展望も体系的に論ずることは難しい。

ここでは最後に土木計画への適用という点からみて、今後重要であり特に期待される話題を以下に整理する。

① ファジィ理論を土木計画の意思決定における不確実性の取扱いの1つとして考えることができる。従来の最適化手法を用いた一意な決定に対して、ファジィORなどのファジィ決定は、計画の余裕を考慮している。換言すれば計画に融通性、頑健性(robustness)を導入することができる。すべて計画問題に融通をもたせる必要はないが、逆に判断の厳格さが実用上は妥当な代替案を

排除することもあることに注目すべきである。

② 土木計画では、人々のための計画を目指すことから、「人間の判断」を記述しようとする試みは多くみられる。一般に調査データを分析、モデル化するが、この際にファジィな統計的分析やファジィ推論を用いることで1つの論理構造をもつ行動記述が可能となる。数式モデルも一見論理的であるようだが、たとえば「各要因の線形和から選択する」といった関数をわれわれの日常的な判断の記述というのはいやほや理解しがたい。

③ 近年「パターン認識」という言葉にもあるように、分析結果など各種情報の表現形態が変化しつつある。また計算機の演算能力の進歩に加えて、数値計算を行うことこそがコンピュータの役割という考え方も反省されつつある。すでに画像データ処理などではファジィな数量の取扱いが注目されており、各種の情報処理上で人間らしいソフトな扱いのためにファジィ理論を利用していくことが重要となると考えられる。

さきに述べたようにファジィ理論のみが不確実問題の解決方法ではない。また現在のファジィ理論であらゆる問題の解決が図れるものでもない。しかし、ファジィ理論の適用は紋切り形の一刀両断の計画に対し、若干の柔軟性と人間性を与えようとする試みであるといえよう。

適用性の一層の向上という点では、今後ファジィ理論自身がさらに体系化され、また新しい進展があることが期待される。たとえばファジィ理論に必要な演算を直接実行するファジィコンピュータが開発途上にあるが、これもファジィ理論の実用性向上から有意義なことである。

そして、わが国の土木工学のなかでは、土木計画学の分野ばかりでなく、構造工学をはじめ他分野でもファジィ理論の適用が非常に多くみられることに注意すべきである。また国際ファジィシステム学会(IFSA)でもファジィ理論の適用の一分野として土木工学(Civil Engineering Application)が挙げられていることも注目に値する。

このような、研究動向にも十分に注目し、従来の方法との妥当な結合を考えていくことで一層ファジィ理論の有用性が認められるものと思われる。

最後に、著者のファジィ理論研究に関しては、京都大学工学部 佐佐木綱教授のご示唆をその端緒としている。また、ファジィ理論の応用的問題に関しては京都大学工学部 古田 均講師、大阪大学大型計算機センター 馬野元秀講師に多くご助言いただいた。ここに記し感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

(国内のファジィ理論刊行図書)

- 1) 浅居喜代治・C.V. ネゴイタ：ファジィシステム理論入

- 門, オーム社(改題), 1978.
- 2) 西田俊夫・竹田英二: ファジィ集合とその応用, 森北出版, 1978.
  - 3) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫共編: ファジィシステム入門, オーム社, 1987.
  - 4) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社, 1988.
  - 5) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988.
- (国内のファジィ理論関連図書)
- 6) 坂和正敏: 線形システムの最適化, 森北出版, 1984.
  - 7) 寺野寿郎: システム工学入門, 共立出版, 1985.
  - 8) 廣田 薫: あいまい制御知能ロボット, マグロウヒルブック株式会社, 1985.
  - 9) 坂和正敏: 非線形システムの最適化, 森北出版, 1986.
  - 10) M. ツェマンコパ=リーチ, A. カンデル(向殿政男訳): ファジィ・リレーショナル・データベース, 啓学出版, 1987.
- (国内の特集雑誌)
- 11) 特集・ファジィ理論, 数理科学, No. 191, 1979.
  - 12) あいまいさとファジィ理論総合特集号-I, システムと制御, Vol. 28, No. 7, 1984.
  - 13) あいまいさとファジィ理論総合特集号-II, システムと制御, Vol. 28, No. 10, 1984.
  - 14) 特集・ファジィ理論と応用, 数理科学, No. 284, 1987.
- (土木計画における研究事例)
- 15) 木下栄蔵・佐佐木綱・秋山孝正: 交通機関選択におけるファジィ性の取扱いについて, 土木計画学研究・講演集, No. 9, pp. 337~344, 1986.
  - 16) 黒田勝彦・長尾義三: 不確実性とファジー性下の意思決定の定式化, 土木計画学研究発表会講演集, No. 2, pp. 204~209, 1980.
  - 17) 黒田勝彦・曾根 浩: 不確実性とファジー性を考慮した代替案選択法, 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 101~102, 1986.
  - 18) 石田東生: Fuzzy代数を用いた総合評価に関する基礎的考察, 土木計画学研究発表会講演集, No. 2, pp. 210~216, 1980.
  - 19) 石田東生・平野邦彦: 住民評価の多様性を表現する総合評価モデル, 昭和55年度第15回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp. 193~198, 1980.
  - 20) 金安公造: あいまい理論による重みづけ手法の環境評価への有効性の検討, 第40回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 271~272, 1985.
  - 21) 永野孝一・金安公造: ファジィ理論による重みづけ手法について, 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 419~420, 1986.
  - 22) 永野孝一・野口俊太郎・金安公造: ファジィ多属性効用関数法による水道システムに関する評価構造の同定, 第42回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 404~405, 1987.
  - 23) 永野孝一・金安公造: ファジィ多属性効用理論の定式化と水道システム評価への適用, 土木計画学研究・論文集, No. 5, pp. 131~138, 1987.
  - 24) 中川 修: 地区画整理事業における換地システムに関する研究, 土木学会論文集, 第371号/IV-5, pp. 69~77, 1986.
  - 25) 内田 敬・黒田勝彦: 確率ファジィ交通情報下でのルート選択問題の定式化, 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 25~26, 1986.
  - 26) 井上矩之・秋山孝正・飯田克弘: 旅行時間情報提供に関する2, 3の検討, 昭和63年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, IV-3-1~IV-3-2, 1988.
  - 27) 吉永 優・樗木 武: ファジィ線形計画法を用いた2経路選択交通問題, 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 316~317, 1980.
  - 28) 秋山孝正: ファジィ線形計画の交通制御への適用について, 第30回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp. 273~274, 1986.
  - 29) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村 透・広川誠一: ファジィ流入制御モデルの作成と検討, 土木計画学研究・論文集, No. 4, pp. 93~100, 1986.
  - 30) 外国文献紹介: C. P. バビス, E. H. マンダニ, 交差点のファジィ論理制御(秋山孝正翻訳, 佐佐木綱校閲) 高速道路と自動車, Vol. 30, No. 7, pp. 64~70, 1987.
  - 31) 加賀屋誠一・山村悦夫・上山和夫: 道路粉塵問題の意識構造評価と地域診断方法について, 第42回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 250~251, 1987.
  - 32) 秋山孝正・佐佐木綱: ファジィ推論と交通行動の記述, 交通工学, Vol. 23, No. 3, pp. 21~28, 1988.
  - 33) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村 透: 都市高速道路交通管制の効率化に関する検討, 土木計画学研究・講演集, No. 8, pp. 129~136, 1986.
  - 34) Sasaki, T. and Akiyama, T.: Fuzzy On-ramp Control Model on Urban Expressway and Its Extension, Proc. of the Tenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 377~396, 1987.
  - 35) 前田正人・桜井英裕・森地 茂: 土木計画におけるヒューリスティック・アプローチについて, 第39回土木学会学術講演概要集, pp. 399~400, 1984.
  - 36) 本多 均・渡辺 隆・森地 茂: あいまいを考慮した経路選択モデルについて, 第33回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 91~92, 1978.
  - 37) 佐佐木綱・秋山孝正・植林俊光: Fuzzy積分の選択行動への適用に関する考察, 昭和58年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, IV-10-1~IV-10-2, 1983.
  - 38) 本多 均・渡辺 隆・森地 茂: Fuzzy代数による土木施設評価手法, 土木計画学研究発表会講演集, No. 1, pp. 217~221, 1979.
  - 39) 石田東生・森地 茂・土屋 謙: バス導入に対する住民の評価に関する研究, 第34回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 156~157, 1979.
  - 40) 飯田恭敬・児玉 健・高山純一: 最適代替案確率の図形表示による総合評価手法特性の比較分析, 土木計画学研究・講演集, No. 8, pp. 437~444, 1986.
  - 41) 後藤喜也・石田東生: ファジィ代数を用いた道路分類手法, 第39回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 249~250, 1984.
  - 42) Sasaki, T. and Akiyama, T.: An Analysis of Regional Difference in Inhabitants' Consciousness to The Road Construction by Fuzzy Clustering, Proc. of JSCE, No. 377/IV-6, pp. 107~115, 1987.

- 43) 湯沢 昭・高橋邦夫・須田 照：FSMによる社会システムの構造化に関する研究，第35回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.139～140，1980.
- 44) 加賀屋誠一：地域環境評価における意識動向構造化手法の適用について，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.241～242，1983.
- 45) 中西良知・佐藤馨一・五十嵐日出夫：リニアモーターカーの導入を考慮した計画課題の構造化に関する研究，第41回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.111～112，1986.
- 46) 加賀屋誠一・山村悦夫：ファジィ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，土木計画学研究・講演集，No.8，pp.215～220，1986.
- 47) 樗木 武・吉武哲信：広域圏域の設定に関する基礎的研究，土木計画研究・講演集，No.9，pp.369～376，1986.
- 48) 飯田恭敬・秋山孝正・四之宮和幸：ファジィ構造分析手法の交通圏分析への適用，第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.95～100，1987.  
(1988.2.22・受付)
-