●解説●

ファジィ理論とその応用*

Fuzzy Theory and its Application

廣田 薫**
Kaoru HIROTA

Key words: fuzzy set, fuzzy inference, approximate reasoning, fuzzy control, industrial applications, fuzzy chip

1. はじめに

現在，“ファジィ”という言葉がハイテクの1つのキーワードになっている。その理論の概要と応用の現状をわかりやすく解説せよとの編集委員会からの依頼があり執筆することになった。この種の解説は、類似のものが多数発表されており^{1)~3)}、従って内容も類似なものにならざるを得ないが、現時点（1988年10月18日）で最新の話題にも言及するということでご容赦願いたい。

最初にファジィの意味と歴史的進展状況について述べ、次にファジィ理論の概要を述べる。最後に、現在および近未来の応用動向について解説する。

2. ファジィ理論の進歩

ファジィ (fuzzy) は、繊維関連の用語で“毛羽だった”という意味である。毛羽 (fuzz) を通して風景を見るとぼんやりと見えるということから、性質があいまいな様子を意味する言葉として使われる。従って、“あいまい”と訳されることが多いのであるが、“あいまい”は本来あまり良いイメージを持たぬ言葉であり、また片仮名コンプレックス現象もあって“ファジィ”という用語が定着しようとしている。

それに対して、性質の有無が Yes と No あるいは1と0と2値的にわりきれない世界を、**クリスプ** (crisp) という言い方で呼んでいる。従って、0と1の2値で動作をしている計算機の論理は、**クリスプ論**

理という言い方をする。

通常はクリスプ論理で大体用が足りるのである。しかし特に人間の情報処理が表に出てくる分野、例えば意思決定、エキスパートシステム、パターン認識などでは、クリスプ論理のみでは不十分なことが多い。すなわち、人間の情報処理では Yes と No たけでなく、Almost yes とか Don't know というようなあいまいな評価も許されないと非常に不都合である。

この点に早くから気がついていたのがカリフォルニア大学バークレイ校の L. A. Zadeh 教授である。彼は通常の集合、クリスプ集合をファジィ化して**ファジィ集合** (fuzzy set) という概念を論文にまとめ1965年に発表した⁴⁾。これが今日のファジィームをうみ出すきっかけになった有名な論文である。

例えばある会社の社員全体の中で、“男性社員全員”は1つの（クリスプ）集合を形成するが、“若い社員全員”はクリスプ集合では扱えない。しかしファジィ集合論ではそれも認められるのである。

このような1つの興味深い記述法が提案されたため、人間の必ずしもクリスプでない評価に悩まされていた研究者の多くが、ファジィ集合概念の導入を試みた。しかし記述法だけでは、応用上有効なツールにはなりえなかったのである。クリスプな場合でも、集合論だけでは具体的な応用ツールにはならず、解析学や代数学のレヘルにならないと工学的には使えない。

ファジィ集合の場合もそのようなツールに発展させるのにしばらく時間がかかった。70年代に入って、Zadeh 教授が提案した**ファジィ推論** (fuzzy reasoning, 最近では approximate reasoning という) が、

* 原稿受付 昭和63年10月31日

** 法政大学工学部（小金井市梶野町3-7-2）

表1 産業応用ファジィ
実用化事例数

年 月 日	事案件数
1986. 8. 27	20
1987. 6. 1	50
1987. 9. 12	65
1987. 11. 5	72
1988. 3. 3	86
1988. 5. 5	92
1988. 8. 24	100

そのようなツールになりうることを実証したのは、ロンドン大学クイーンメリー校の E. H. Mamdani 教授である。彼は、スチームエンジンの自動運転にファジィ推論が有効であることを 1974 年に発表した⁵⁾。PID 制御を始めとする種々の制御法を試みたのであるが、満足な結果が得られず、現場の操作員の運転知識を IF~THEN…形式のファジィプロダクションルール (fuzzy production rule) で表現しておき、入力センサ情報との近似照合によって操作量を決定するというファジィ推論法によって初めて良好な自動運転を実現したのである。

Mamdani 教授によるファジィ制御手法は、多くの応用を生み出すきっかけとなった。そして、1980 年になって、ファジィ制御の産業応用実用化事例第一号として、デンマークのセメント会社 F. L. Smidth 社によるセメントキルン (石灰岩や粘土からセメントを作るための直径 5 m、長さ 165 m 程の粉体炉のこと) のファジィ制御自動運転の開始へと発展していった⁶⁾。

このころになると、日本においても、日立製作所や富士電機を始めとする多くの企業が、ファジィ制御の良さに注目し、実用化開発研究を開始した。その成果がここ 2 年程の間に多数発表されるようになり、表 1 に示すように産業応用ファジィ実用化事例数は、100 件を超えるようになった。

なお、ここで 1 つ強調しておくべきことは、これらの事例の大半が日本の企業により実用化されているものであるということである。すなわち、ファジィ実用化技術は日本で育てられたものである。

このような状況になって、1988 年になって通産省の国際ファジィ工学研究所 (LIFE)、科学技術庁のファジィ研究会などを始めとするいくつかの国家プロジェクトが発足している。また、1985 年に発足した国際ファジィシステム学会 (IFSA) の日本支部 (現在法政大学工学部計測制御教室内に事務局がある) の会員数も 70 名から 500 名近くに増加し、現在独自の

 図1 クリbsp集合 $A = \text{“未成年”}$ とファジィ集合 $B = \text{“若者”}$

学会を作る方向で検討が進んでいる。

3. ファジィ理論の概要

ファジィ理論の基礎はファジィ集合論であるが、発表されて既に四半世紀近くになるので、それをもとにした種々のファジィ理論が展開されている。クリspを特別な場合として含むファジィの理論という観点に立てば、およそこの世に存在するすべての理論がファジィ化可能とさえ言うことができる。

しかし、それらの多数の理論の中で応用上最も重要なものはファジィプロダクションルールによるファジィ推論である。そこで本節では、ファジィ集合概念とファジィ推論についてのみ、その概略を述べる。

扱う対象物全体を

$$X = \{x\} \quad (1)$$

と表記したとき、それを全体空間 (universe of discourse, total space) とか、(特にファジィ制御では) 台集合 (support set) と呼ぶ。この X 上で、通常の集合 (クリsp集合) A は、特性関数 (characteristic function) χ_A

$$\chi_A : X \longrightarrow \{0, 1\} \quad (2)$$

$$x \longmapsto \chi_A(x) = \begin{cases} 0 & x \notin A \\ 1 & x \in A \end{cases}$$

で表現できる。例えば、図 1 において X を年齢の軸とすると、日本の法律でいう未成年 (すなわち 20 歳未満) A の特性関数は $\chi_A(x)$ で与えられる。すなわち各要素 x が A の属性を満たしていれば (すなわち $x \in A$ なら) $\chi_A(x)$ は 1、そうでなければ 0 である。

さてここで“若い”という属性 B を考えたとき、もはや B はクリsp集合では記述できない。例えば、20 歳の誕生日の前日までは“若い”が、それをすぎたら“若くない”というのでは角が立つ。しかし、図 1 の $m_B(x)$ のようなグラフなら、なんとなくうなづける。これがファジィ集合の概念である。ここで

$$\begin{array}{ccc} m_B: X \longrightarrow [0, 1] \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ x \longmapsto m_B(x) \end{array} \quad (3)$$

を、ファジィ集合 B のメンバーシップ関数 (membership function) という。 $m_B(x)$ は、要素 x が属性 B を満足する度合いを主観的に 0 以上 1 以下の数値で評価したものと解釈する。従って、同一の B であっても $m_B(x)$ のグラフは、評価者の主観に応じて若干異なっていてしかるべきである。

このようなファジィ集合概念を用いると、人間の操作員の関与する現場の知識が、都合良く表現できる。例えば、ボイラの操作員の知識として、“もしボイラの圧力が下がってきたら、コックを少し開けよ。”があったとする。このような記述法はよく見られるものであるが、圧力や開閉角度に関する定量的に明確な記述は無い。そこで、“圧力の低下を認めるのは何気圧のときか?” とクリスプな記述を求めても、操作員は困ることが多い。それよりは、中間値も許すメンバーシップ関数表現の方がはるかになじみやすい。操作員ごとに多少の差はあるかもしれないが、各自が長年の経験により、独自のメンバーシップ関数を持ちあわせているはずである。そのメンバーシップ関数をきちんと表現できれば、操作員の知識がいくつかのファジィプロダクションルールの集合で記述されることになる。それを一般的に記せば

$$\left\{ \text{IF } \bigcap_{m=1}^M (A_m \text{ is } A_m^i) \text{ THEN } \bigtriangleup_{n=1}^N (C_n \text{ is } C_n^i) \right\}_{i=1}^I \quad (4)$$

となる。ここで I はルールの総数、 M は条件部の項目数、 N は操作部の項目数である。条件部や操作部の項目を列挙する際の接続詞が $\square$ や $\triangle$ であり、通常は AND (あるいは OR) が用いられる。また、各項目の記述はファジィ集合のメンバーシップ関数を用いる。ファジィ集合 A_m^i, C_n^i の全体空間を X_m, Y_n としよう。

実用化されている種々のシステムでは、ルール数 I は、数個～30 個程度 (多くても制御系では 100 個程度)、項目数 M は 2～5 程度、 N は 1～4 程度である。また全体空間 X_m, Y_n の要素数 (カージナル数) は、数個～数十個 (高々 256 個程度) である。このように、クリスプな AI 型エキスパートシステムからみると、1 けたから 2 けたも小さいサイズで実現されているところに、大きな特徴がある。いずれの要因も数個から数十個ということで、人間が試行錯誤的に調整する場合にも適正な規模であり、現場のシステム構築作業にもなじみやすく、また構築されるシステムもコス

トエフェクティブなものになる。

式 (4) のように記述された知識ベースを計算機に記憶しておき、実際の動作時には各項目の観測情報 $\{AD_m\}_{m=1}^M$ と、各ルールの条件部の近似照合をとり、操作情報 $\{CD_n\}_{n=1}^N$ を決定する。そして、すべてのルールについて操作情報を統合して各項目ごとの操作情報 $\{CD_n\}_{n=1}^N$ を決定する。これらは、ファジィ情報であるが、制御等ではクリスプな操作値に絞り込むために、以上の演算のあとで、非ファジィ化 (defuzzification) という演算を行う。

$\{AD_m\}_{m=1}^M$ の入力に対して $\{CD_n\}_{n=1}^N$ を得る一連の演算をファジィ推論の合成演算 (compositional operation of fuzzy inference) という。合成演算と非ファジィ化を具体的にどのように行うかに関しては、多数の (一説によると 100 種類以上もの) アルゴリズムが提案されている。それらの理論的な相互比較や従来の PID 制御や最適制御等との比較も、現在 open problem となっているが、十数年間にわたる多数の適用例を通して、良好な結果が得られるとして定着しつつあるものに、Max-Min 合成重心計算法 (Max-Min Composition Center of Gravity Method) がある。それを、 $I=2, M=N=1$ と簡単化して図示したのが図 2 である。

ここで、ルール 1 は“左寄りなら右寄りに”、ルール 2 は“右寄りなら左寄りに”ということで、両者あわせて、“逆向き動作”という内容を表している。これに対して観測データ AD は“中央近辺”と入力され、Max-Min 合成重心計算の結果 CG は“中央”という操作値を出力している。なお観測データは、この例のように必ずしもクリスプな確定値でなくて、ある程度の幅を持ったファジィデータでも許容するところに特徴がある。

この図 2 のようなファジィ推論のアルゴリズムは、容易にプログラム化できる。しかも、ルール数や項目数等が、数個から数十個程度なので、マイクロプロセッサ程度の計算能力でも十分対応できる場合が多い。ということで、実用化応用はそのような比較的低レベルな計算機によるソフトウェア対応で開始された。

しかし、実用化の場面で問題になるのは、プログラムの大きさや必要なメモリー容量のほかに、処理時間という要因がある。つまり、観測データ AD が入ってから操作値出力 CG を出すのに (その一連の処理を 1 ファジィ推論という) どれ位の時間で処理できるかということである。幸いなことに、プロセス制御等では、その処理時間が数秒あるいは数分のオーダーでゆくりしたものが多かったのであるが、ロボットや高速

図2 Max-Min 合成重心計算法によるファジィ推論

の乗物になると秒以下、あるいはマイクロ秒というような処理時間が必要になってくる。そのような高速動作を要求される場面に対して、専用ハード（ファジィ推論チップ (fuzzy inference chip)）の開発が急ピッチで進んでいる。1s 間あたりの推論回数という意味で FLIPS (fuzzy logical inferences per second) という単位が用いられるが、最近では数千万 FLIPS のチップも開発されている。また、推論方式も、従来は Max-Min 合成重心計算法が中心であったが、ほかの手法もハード化されるようになった⁷⁾。

4. ファジィ応用の今後の動向

表1に示した100件以上の実用化事例は、ほとんどが日本におけるものである。また、分野別でみれば、制御関係のものが圧倒的に多い。これらの事例をここで列挙することは、ページ数の関係で不可能であるが、最近になって、それらの事例を多数まとめて紹介している文献も多く出ているので、それらの文献を紹介する。

理論的にはいくつかの open problem が残されているが、制御応用の分野ではファジィ制御は、既に立派な市民権を得ているといっていよい。しかし、ここ1~2年、制御以外の分野への応用が活発化しており、良好な結果が得られ始めている。

例えば、ポートフォリオ等の経営経済の分野、医療応用の分野、工業設計の分野、ヒューマンインタフェースの分野など、あげ出すときりがないほど多数の分野に裾野が広がりつつある。今年になってスタートした、いくつかの国家プロジェクトでもこれらのテーマを取りあげており、今後数年間で多数の成果が得られることが期待される。

参考文献

- 1) 本多中二, 大里有生: ファジィ理論とその応用, 行動計量学, **13**, 2 (1986) 64.
- 2) 廣田 薫: ファジィ推論エキスパートシステムの現状と動向, 情報処理, **28**, 8 (1987) 1065.
- 3) 廣田 薫: ファジィ制御の現状と展望, 計測と制御, **27**, 5 (1988) 431.
- 4) L. A. Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, **8**, (1965) 338.
- 5) E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, **121**, 12, (1974) 1585.
- 6) L. P. Halmblad et al.: Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, in "Fuzzy Information and Decision Process" (Gupta, Sanchez eds.), North-Holland, Amsterdam, (1982) 389-399.
- 7) 浅見直樹, 稲葉則夫: ファジィチップ相次ぎ登場, 日経エレクトロニクス, **457**, 157/168, 1988. 10. 3.
- 8) 特集: ファジィ理論と応用, 数理科学, **284**, サイエンス社 (1987. 2).
- 9) 特集: 活用期を迎えたファジィ制御, 計装, **31**, 5, 工業技術社 (1988. 5).
- 10) 特集: ファジィコンピュータ, Computer Today, **25**, サイエンス社 (1988. 5).
- 11) 特集: ファジィ制御の基礎と応用, オートメーション, **33**, 6, 日刊工業新聞社 (1988. 6).
- 12) 廣田 薫: ファジィコンピュータファジィエキスパートシステム, トリケブス (1988).
- 13) 特集: ファジィコントローラ, CAD & CIM, **2**, 4, 工業調査会 (1988) 第4号.