

ファジー理論の知識システムへの応用

大阪電気通信大学 水本雅晴 (Masaharu Mizumoto)

1. はじめに

1965年にカリフォルニア大学のザデー(Zadeh)教授によってファジー概念が提唱されて20数年になるが、ファジー理論が世間から注目されるようになったのはここ数年というところである。これには仙台地下鉄の自動運転を始めとするファジー制御の実用化やファジーコンピュータの開発によるところが大きい。今後、ファジー理論は人工知能や意思決定といった人間に係わるシステムの開発に重要な役割を果たすものと期待されている。

ここではファジー応用の基礎をなすファジー集合とファジー推論について説明し、そのファジー制御など知識システムへの応用について概説する。

2. ファジー集合

全体集合Uにおけるファジー集合 (fuzzy set) Aとは

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

なるメンバーシップ関数 μ_A によって特性づけられた集合で、値 $\mu_A(u)$ ($\in [0, 1]$) は要素 u ($\in U$) のファジー集合Aにおける所属度 (別名: グレード) を表す。

【参考1】ファジー集合とメンバーシップ関数は1対1に対応しているので、ファジー集合自身をメンバーシップ関数とみなし

$$A : U \rightarrow [0, 1]$$

と定義することもある。この場合、 u の所属度は $A(u)$ のように表される。

【参考2】Aが通常の集合の場合、式(1)の単位区間 $[0, 1]$ が $\{0, 1\}$ となり、 μ_A は特性関数となる。

ファジー集合Aの表記法としては以下の方法がよく使用される。

まず、全体集合Uが“有限”集合 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ の場合

$$\begin{aligned} A &= \mu_A(u_1)/u_1 + \mu_A(u_2)/u_2 + \dots + \mu_A(u_n)/u_n \\ &= \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i)/u_i \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、/ はセパレータであり、+ は結び (or) を意味し、たとえば $a/u + b/u = (a \vee b)/u$ である。

別の表記法として“ベクトル表現”することもある。

$$A = [\mu_A(u_1), \mu_A(u_2), \dots, \mu_A(u_n)] \quad (3)$$

全体集合 U が“連続”の場合、式 (2) の一般形として

$$A = \int_U \mu_A(u)/u \quad (4)$$

のように積分記号を用いて表される。

【例1】“数個”といった漠然とした数をファジー集合 (SEVERAL と名付ける) で表すと、 $U = \{1, 2, \dots, 10\}$ の場合、式 (2)、(3) を使うと

$$\begin{aligned} \text{SEVERAL} &= .5/3 + .8/4 + 1/5 + 1/6 + .8/7 + .5/8 \\ &= [0 \ 0 \ .5 \ .8 \ 1 \ 1 \ .8 \ .5 \ 0 \ 0] \end{aligned}$$

となる。

【例2】“負で大(NB)”，“ほぼゼロ(ZO)”，“正で中位(PM)”といったあいまいな大きさをファジー集合で表すと図1のようなメンバーシップ関数で表される。ファジー集合 ZO (ほぼゼロ) を式 (4) の表記法を用いて表すと

$$ZO = \int_{-2}^0 \frac{2+u}{2} / u + \int_0^2 \frac{2-u}{2} / u$$

となる。

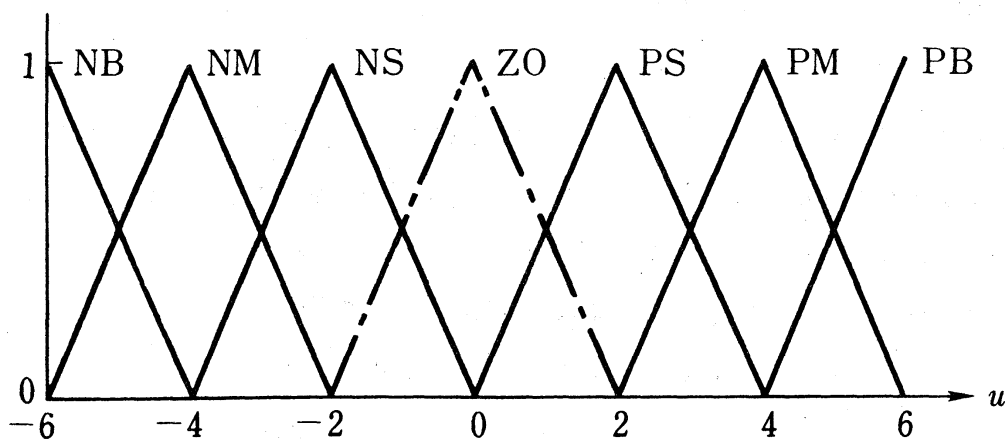


図1 あいまいな大きさを表すファジー集合

次に、Uにおけるファジー集合A, Bの基本的な演算を示すと以下のようになる。

$$\text{包 含: } A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(u) \leq \mu_B(u)$$

$$\text{交わり: } A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$$

$$\text{結 び: } A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$$

$$\text{補集合: } \bar{A} \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

ここで、 $\wedge = \min$, $\vee = \max$ を表す。

このようにファジー集合の交わり \cap は $\wedge = \min$ を、結び \cup は $\vee = \max$ を用いて定義されるが、 \wedge , \vee の代わりにそれぞれ次のような積演算, 和演算を用いてもファジー集合の交わり, 結びを定義することもできる。 $x, y \in [0, 1]$ に対して

(i) 積演算:

$$\text{論理積: } x \wedge y = \min \{x, y\} \quad (5)$$

$$\text{代数積: } x \cdot y = xy \quad (6)$$

$$\text{限界積: } x \odot y = 0 \vee (x + y - 1) \quad (7)$$

$$\text{激烈積: } x \Delta y = \begin{cases} x & \dots y = 1 \\ y & \dots x = 1 \\ 0 & \dots x, y < 1 \end{cases} \quad (8)$$

積演算に双対な演算として次の和演算がある。

(ii) 和演算:

$$\text{論理和: } x \vee y = \max \{x, y\} \quad (9)$$

$$\text{代数和: } x \dot{+} y = x + y - xy \quad (10)$$

$$\text{限界和: } x \oplus y = 1 \vee (x + y) \quad (11)$$

$$\text{激烈和: } x \dot{\vee} y = \begin{cases} x & \dots y = 0 \\ y & \dots x = 0 \\ 1 & \dots x, y > 0 \end{cases} \quad (12)$$

これらの演算の大小関係は次のようになる。

$$\wedge \leq \odot \leq \cdot \leq \Delta \leq \vee \leq \dot{+} \leq \oplus \leq \dot{\vee} \quad (13)$$

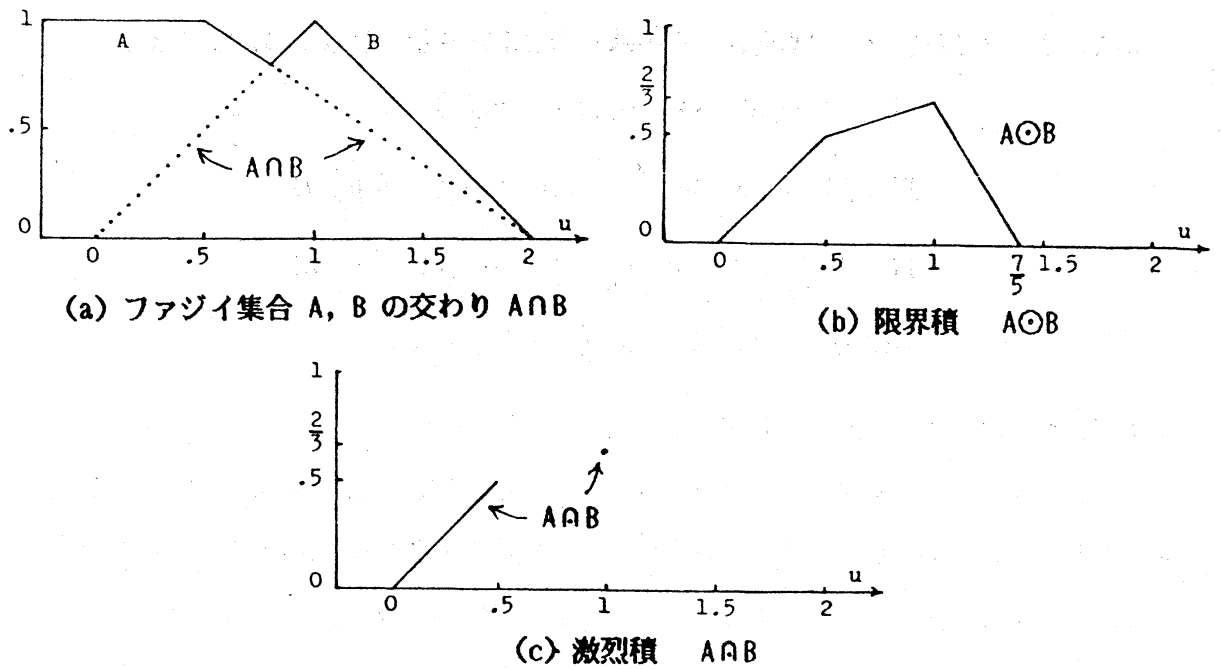


図2 ファジイ集合の種々の交わり

【例】以上の積演算を用いて定義されるファジー集合A, Bの交わりを図示すると図2のようになる。和演算を用いた結びも同様に描くことができる。

3. ファジー推論

ファジー推論 (別名: 近似的推論) はいくつかのファジー命題からある一つのファジー命題を導き出す推論法であり, 人間が行っている推論はこの種の推論であることから大いに関心をもたれている。また, ファジー制御, エキスパートシステム, 意思決定などの分野で重要な役割を果たしている。

我々は日頃次のような推論を行っている。

もしトマトが赤ければ熟している。

このトマトはかなり赤い。

(14)

∴ このトマトはかなり熟している。

このような推論を定式化してみると

規則: If x is A then y is B

事実: x is A'

(15)

結論: y is B'

のようになる。ここで, A, A', B', B' はファジー概念である。

このファジー推論形式では、式(14)の例のように、A と A' とは必ずしも一致していなくてもよいところに特徴がある。もし A' = A で B' = B であれば、式(15)は通常の分離規則(modus ponens)となる。

このファジー推論形式を簡単のため

規則： A ⇒ B	(16)
事実： A'	
結論： B'	

と表そう。ここで、A, A', B, B' はそれぞれ U, U, V, V におけるファジー集合である。

このファジー推論の結論 B' を求める方法としてはいくつかの方法が提案されているが [1] , ここではファジー制御などでよく使われている Zadeh のファジー推論法 [2] を紹介しよう。

式(16)の規則 A ⇒ B はファジー条件文であり、そのメンバーシップ関数は含意 a ⇒ b を用いて

$$\mu_{A \Rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) \rightarrow \mu_B(v) \quad (17)$$

と定義される。すると結論 B' は A' と A ⇒ B との合成を行うことによって得られる (推論の合成規則) 。すなわち

$$B' = A' \circ (A \Rightarrow B) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(v) &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A \Rightarrow B}(u, v) \} \\ &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge [\mu_A(u) \rightarrow \mu_B(v)] \} \end{aligned} \quad (19)$$

式(17)を定義する含意 a ⇒ b は数多く存在するが、以下ではファジー制御などでよく使われている Mamdani の方法 [3]

$$a \Rightarrow b = a \wedge b \quad (20)$$

を使って説明してみよう。なお、この方法は $0 \Rightarrow b = 0 \wedge b = 0$ となり、いわゆる含意の性質を満たしていないことに注意されたい。

【参考】 $a \rightarrow b = ab$, $0 \vee (a+b-1)$ とした場合にも同様に議論でき、ファジー制御により使用されている。他にも $a \rightarrow b = 1 \wedge (1-a+b)$, $(1-a) \vee b$ などがある。

Mamdani の方法 $a \rightarrow b = a \wedge b$ を式(19)に適用してみると、結論 B' は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(v) &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge [\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)] \} \\ &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge \mu_A(u) \} \wedge \mu_B(v) \\ &= \textcircled{a} \wedge \mu_B(v) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 \textcircled{a} は

$$\textcircled{a} = \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge \mu_A(u) \}$$

このことを図で説明すると図3のようになる。ここで、 \textcircled{a} はファジー集合 A' と A との交わりの高さであり、 A' と A がどの程度適合しているかという“適合度”であると解釈される。結論 B' はこの適合度 \textcircled{a} とファジー集合 B との \min を取ることにより得られる。これは \textcircled{a} によって B の頭をカットしていることから“頭切り法”と呼ばれている。

このようにファジー推論法では、通常の推論のように A' と A が完全に一致するか否かの2値的な場合だけでなく、 A' と A が一致している程度に応じて、ほどほどに一致した結論を導くといったところに特徴がある。

もし A' と A が完全に一致していれば $\textcircled{a} = 1$ となることから、結論 B' は B に一致することが確かめられ、いわゆる分離規則を満たしていることがわかる。

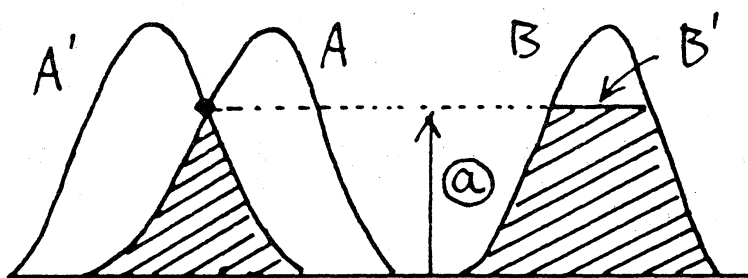


図3 A' と $A \Rightarrow B$ からの推論結果 B' (式 (21))

A' がファジーでなく、 $A' = u_0$ のように確定した値 u_0 を取る場合、

$$\mu_{A'}(u_0) = 1, \quad \mu_{A'}(u) = 0 \quad (u \neq u_0)$$

となることに注意すれば、結論 B' は式(19)より

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(v) &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge [\mu_A(u) \rightarrow \mu_B(v)] \} \\ &= \bigvee_{u \neq u_0} \{ 0 \wedge [\mu_A(u) \rightarrow \mu_B(v)] \} \vee (1 \wedge [\mu_A(u_0) \rightarrow \mu_B(v)]) \\ &= \mu_A(u_0) \rightarrow \mu_B(v) \end{aligned} \quad (22)$$

のように簡単化される。よって Mamdaniの方法 $a \rightarrow b = a \wedge b$ に対しては、結論 B' は

$$\mu_{B'}(v) = \mu_A(u_0) \wedge \mu_B(v) \quad (23)$$

と与えられる。これは図3において A' を限りなく細くした場合に相当し、 $(a) = \mu_A(u_0)$ とした場合である(図4参照)。

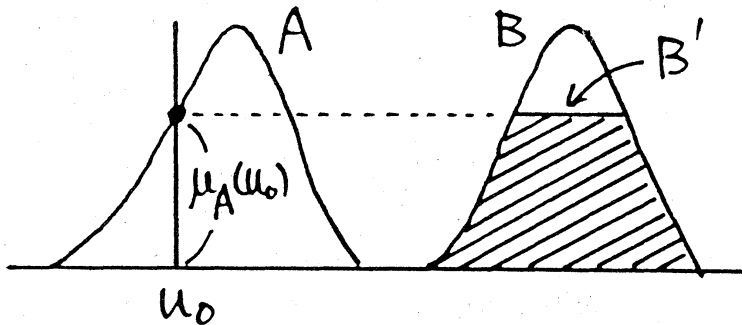


図4 u_0 と $A \Rightarrow B$ からの推論結果 B' (式 (23))

次に、式(16)の推論形式を一般化した三段論法

$$\begin{array}{l} \text{規則1: } A \Rightarrow B \\ \text{規則2: } B \Rightarrow C \\ \hline \text{結論: } A \Rightarrow C \end{array} \quad (24)$$

を考えてみよう。ここで A, B, C はそれぞれ U, V, W におけるファジー集合である。

もし $A \Rightarrow B$ と $B \Rightarrow C$ の合成を行った結果が $A \Rightarrow C$ に等しければ、すなわち

$$(A \Rightarrow B) \circ (B \Rightarrow C) = A \Rightarrow C \quad (25)$$

であれば三段論法が成立するといえる。左辺は

$$\mu_{(A \Rightarrow B) \circ (B \Rightarrow C)}(u, w) = \bigvee_v \{ \mu_{A \Rightarrow B}(u, v) \wedge \mu_{B \Rightarrow C}(v, w) \} \quad (26)$$

と与えられる。

【例】 $a \rightarrow b = a \wedge b$ とし、 B が正規（高さが1）であるとする、式(26)は

$$\begin{aligned} & \bigvee_v \{ [\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)] \wedge [\mu_B(v) \wedge \mu_C(w)] \} \\ &= \mu_A(u) \wedge \mu_C(w) \wedge [\bigvee_v \mu_B(v)] \\ &= \mu_A(u) \wedge \mu_C(w) \end{aligned}$$

となり、 $\mu_{A \Rightarrow C}(u, w)$ と等しく、三段論法が成立しているといえる。このように Mamdani の方法では分離規則だけでなく三段論法も成立することがわかる。

最後にファジー制御やエキスパートシステムで最もよく使用されている多重ファジー推論形式

規則1: $A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1 \text{ else}$	(27)
規則2: $A_2 \text{ and } B_2 \Rightarrow C_2 \text{ else}$	
.....	
規則n: $A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n.$	
事実: $A' \text{ and } B'$	
結論: C'	

を考えてみよう。ここで A_i, A' は U での、 B_i, B' は V での、 C_i, C' は W でのファジー集合である。

”and” で結ばれた「 $A_i \text{ and } B_i$ 」は

$$\mu_{A_i \text{ and } B_i}(u, v) = \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v) \quad (28)$$

と与えられ、ファジー規則「 $A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i$ 」は $U \times V \times W$ におけるファジー関係となり

$$\mu_{A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i}(u, v, w) = [\mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w) \quad (29)$$

のように与えられる。

たとえば、Mamdani の方法 $a \rightarrow b = a \wedge b$ では

$$\mu_{A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i}(u, v, w) = [\mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v)] \wedge \mu_{C_i}(w) \quad (30)$$

のように表される。

これより式(27)の結論 C' は、Mamdani の方法の場合、"else" は "or"、すなわち結び (U)と解釈され、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} C' &= (A' \text{ and } B') \circ [(A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1) \cup \dots \cup (A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n)] \\ &= [(A' \text{ and } B') \circ (A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1)] \cup \dots \cup [(A' \text{ and } B') \circ (A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n)] \\ &= C_1' \cup \dots \cup C_n' \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、 \circ は max-min合成を表す。また、各 C_i' ($i=1, \dots, n$) は

$$\begin{aligned} C_i' &= (A' \text{ and } B') \circ (A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i) \\ &= [A' \circ (A_i \Rightarrow C_i)] \cap [B' \circ (B_i \Rightarrow C_i)] \end{aligned} \quad (32)$$

のようになる。すなわち、 C_i' は $A_i \Rightarrow C_i$ の下での A' の推論結果と、 $B_i \Rightarrow C_i$ の下での B' の推論結果との交わり \cap として与えられる。詳しくは

$$\begin{aligned} \mu_{C_i'}(w) &= \mu_{(A' \text{ and } B') \circ (A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i)}(w) \\ &= \bigvee_{u, v} \{ \mu_{A' \text{ and } B'}(u, v) \wedge \mu_{A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i}(u, v, w) \} \\ &= \bigvee_{u, v} \{ [\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{B'}(v)] \wedge [\mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w)] \} \quad (33) \\ &= \bigvee_{u, v} \{ [\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{C_i}(w)] \wedge [\mu_{B'}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w)] \} \\ &= \bigvee_u \{ \mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{C_i}(w) \} \wedge \bigvee_v \{ \mu_{B'}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w) \} \\ &= \mu_{A' \circ (A_i \Rightarrow C_i)}(w) \wedge \mu_{B' \circ (B_i \Rightarrow C_i)}(w) \end{aligned}$$

となり、式(32)が導かれる。なお、途中の式(33)は

$$\mu_{C_i}(w) = \text{式(33)}$$

$$= \bigvee_{u,v} \{ \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w) \}$$

$$= \bigvee_u \{ \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \} \wedge \bigvee_v \{ \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \} \wedge \mu_{C_i}(w)$$

となることより、式(32)の C_i' ($i=1, \dots, n$) は

$$\mu_{C_i}(w) = (a_i) \wedge (b_i) \wedge \mu_{C_i}(w) \tag{34}$$

のように簡略化される。ただし、

$$(a_i) = \bigvee_u \{ \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{A_i}(u) \} \tag{35}$$

$$(b_i) = \bigvee_v \{ \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{B_i}(v) \} \tag{36}$$

よって、式(27)の最終の結論 C' は、式(31)からも分かるように、 C_i' ($i=1, \dots, n$) の結び \cup をとることにより得られる。すなわち、

$$\begin{aligned} C' &= C_1' \cup C_2' \cup \dots \cup C_n' \\ \mu_{C'}(w) &= \mu_{C_1'}(w) \vee \mu_{C_2'}(w) \vee \dots \vee \mu_{C_n'}(w) \end{aligned} \tag{37}$$

ここで、 $\vee = \max$ を表す。

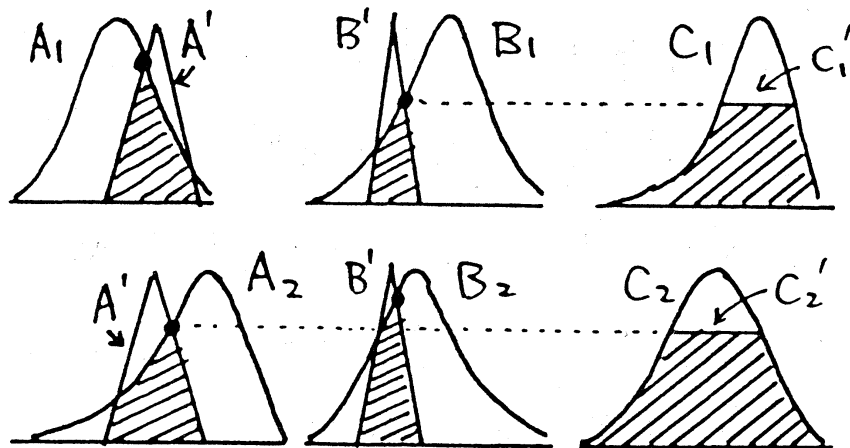


図5 式(34)の求め方

$$\begin{array}{l}
 \text{【例】} \quad A1 \text{ and } B1 \Rightarrow C1 \text{ else} \\
 \quad \quad A2 \text{ and } B2 \Rightarrow C2. \\
 \hline
 \quad \quad A' \text{ and } B' \\
 \quad \quad C'
 \end{array} \quad (38)$$

の場合の推論結果の求め方を図示すると、図5のようになる。

次に、 A' 、 B' がファジーでなく、確定した値をとる場合、たとえば、 $A' = u_0$ 、 $B' = v_0$ の場合、

$$\mu_{A'}(u_0) = 1, \quad \mu_{A'}(u) = 0 \quad (u \neq u_0)$$

$$\mu_{B'}(v_0) = 1, \quad \mu_{B'}(v) = 0 \quad (v \neq v_0)$$

であることに注意すれば、式(35)、(36)の (a_i) 、 (b_i) は

$$(a_i) = \bigvee_{u \neq u_0} \{0 \wedge \mu_{A_i}(u)\} \vee [1 \wedge \mu_{A_i}(u_0)]$$

$$= \mu_{A_i}(u_0)$$

$$(b_i) = \mu_{B_i}(v_0)$$

となる。よって、式(32)の C_i' は式(34)より

$$\mu_{C_i'}(w) = \mu_{A_i}(u_0) \wedge \mu_{B_i}(v_0) \wedge \mu_{C_i}(w) \quad (39)$$

と与えられ、最終的な結論であるファジー集合 C' は式(37)より求められる。

$$\begin{array}{l}
 \text{【例】} \quad A1 \text{ and } B1 \Rightarrow C1 \text{ else} \\
 \quad \quad A2 \text{ and } B2 \Rightarrow C2. \\
 \hline
 \quad \quad u_0 \text{ and } v_0 \\
 \quad \quad C'
 \end{array} \quad (40)$$

の場合の推論結果 C' の求め方を示すと、図6のようになる。

この最終的なファジー集合 C' の代表値 w_0 を求める操作を一点化 (defuzzifier) と呼び、その方法として

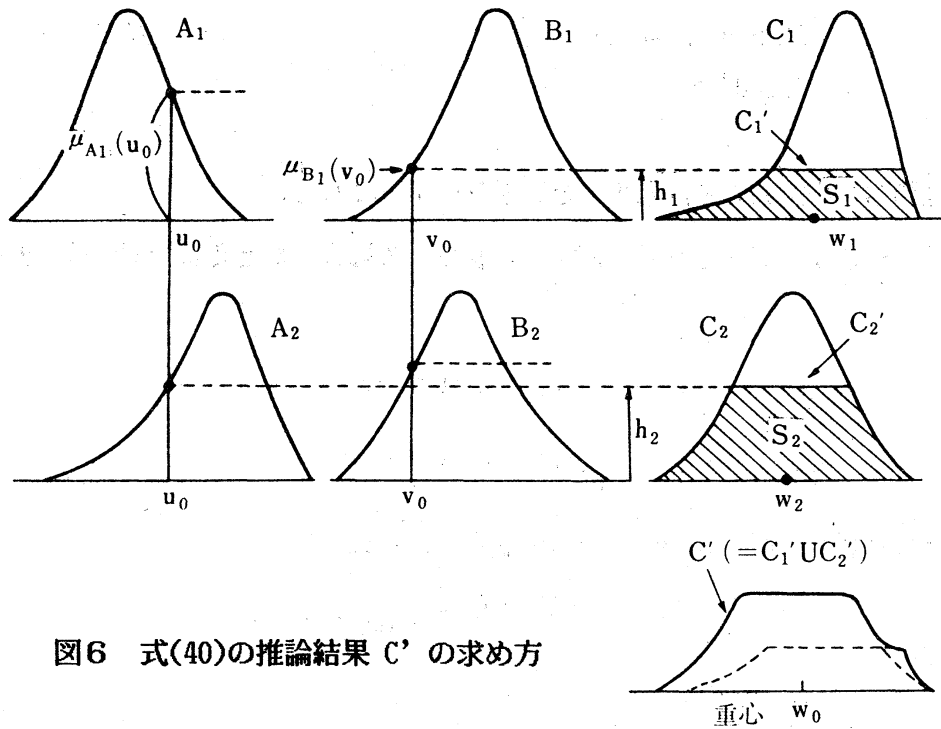


図6 式(40)の推論結果 C' の求め方

- (i) C'の最大グレードを取る点を w_0 とする
- (ii) C'の重み付き重心を w_0 とする

$$w_0 = \frac{\sum w_i \cdot \mu_{C'}(w_i)}{\sum \mu_{C'}(w_i)} \quad (41)$$

等がある (詳しくは, 文献[4] 参照) .

以上述べてきたファジー推論法を利用したファジー制御を始めとするいくつかの知識システムを取り上げてみよう.

4. ファジー推論の知識システムへの応用

前節で述べたファジー推論法がどのような知識システムに応用されているかを実例とともに概観する. ここでは, これらの知識システムの性能を議論するのではなく, どのような形でファジー規則が使われているかに注目している.

(a) 一次遅れの系のファジー制御[4]

対象とするプラントモデルは時間遅れを有する一次遅れの系で $Tdh/dt + h = q$, 具体

表 a ファジィ制御規則

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							PB
NM							PM
NS							PS
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS							NS
PM							NM
PB							NB

的には、

$$G(s) = e^{-2s}/(1+20s)$$

であるとする。この一次遅れの系に対するファジィ制御規則は表 a のようである[5]。この 13 個の制御規則は偏差 e, 偏差の変化分 Δe より操作の変化分 Δq を評価するもので

$$\begin{aligned}
 e \text{ is NB and } \Delta e \text{ is ZO} &\Rightarrow \Delta q \text{ is PB} \\
 e \text{ is NM and } \Delta e \text{ is ZO} &\Rightarrow \Delta q \text{ is PM} \\
 &\dots\dots\dots \\
 e \text{ is ZO and } \Delta e \text{ is PB} &\Rightarrow \Delta q \text{ is NB}
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

を意味する。ここで、NB (負で大), NM (負で中位), NS (負で小), ZO (0位), PS (正で小), PM (正で中位), PB (正で大) は [-6,6] におけるファジィ集合であり、ファジィ集合の巾 W を変化させた場合の図を描くと図 a-1 のようになる。

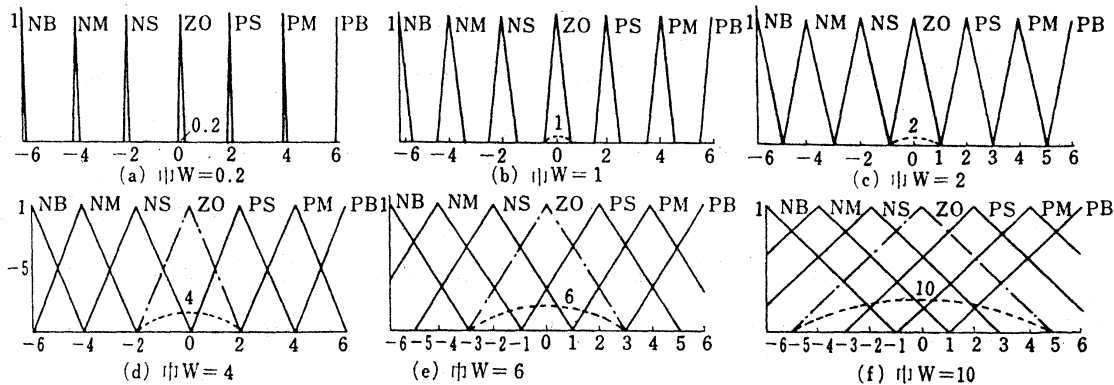


図 a-1 ファジィ集合の幅 W を変えた場合

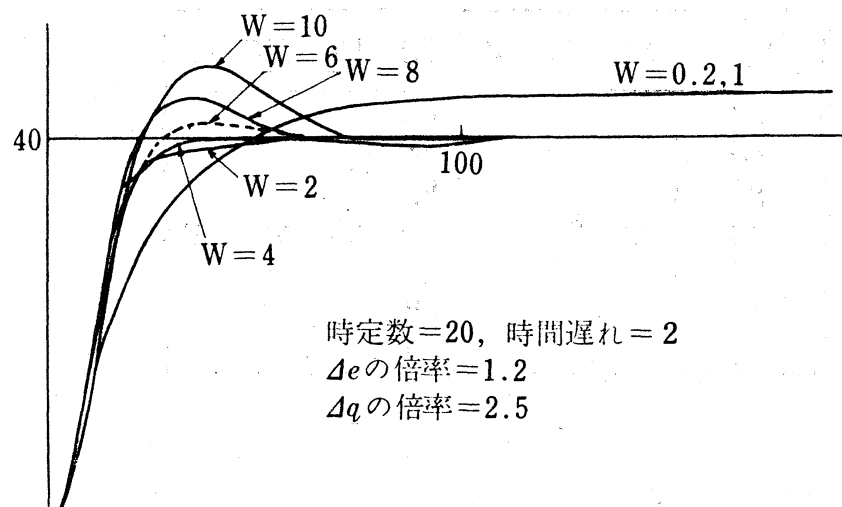


図 a-2 図 a-1の幅Wを変えた場合の制御結果

偏差 $e = e_0$ 、偏差の変化分 $\Delta e = \Delta e_0$ と確定した値が前提として式(42)に与えられたとき、各制御規則 ($i=1, \dots, 13$) から

$$\mu_{C_i'}(\Delta q) = \mu_{A_i}(e_0) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e_0) \wedge \mu_{C_i}(\Delta q) \quad (43)$$

によって C_i' が得られ (式(39)参照), 式(37)より操作の変化分 Δq に対するファジー集合 C' が求まる。その重み付き重心(41)を求めることにより、実際の操作の変化分 Δq_0 が決定される。

図 a-2はファジー制御規則を定義しているファジー集合の巾 W を $W=0.2, 1, 2, 4, 6, 8, 10$ と変化させた場合に (図 a-1), どのような制御結果が得られるかを示したものである。これより、巾を $0.2, 1$ のようにかかなり細くした場合、発火する制御規則が極めて少ないために制御が行われなく、収束しないことがわかる。巾を $2, 4$ とした場合が一番制御結果がよく、巾を太く $6, 8, 10$ としていくとオーバーシュートが大きくなり、収束も遅くなっていく。この原因として、巾を広くしたために発火する制御規則が多くなり、操作の反応が鈍くなるためである。この傾向は他の実験結果からも観測される。これより、ファジー制御規則を定義するファジー集合は適当にオーバーラップしている必要があるこ

と分かる。ちなみに、最良の制御結果を得ている巾4のファジー集合（図 a-1 (d) 参照）の場合、隣のファジー集合と高さ0.5 で交わっていることがわかる。

(b) 倒立振子の安定化制御[6]

ファジー推論コンピュータで実際に棒立て（図 b）を行った際のファジー制御規則は表 b のようである。ここで、 ψ は振り子の傾き角度、 Δx は台車の速度である。

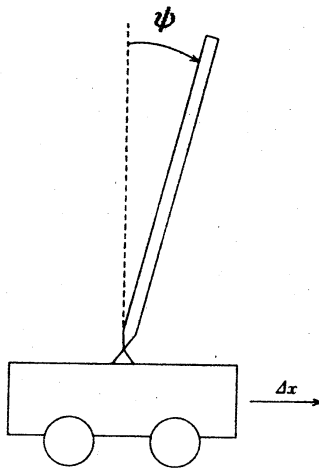


図 b 倒立振子

表 b 制御規則 $\psi, \Delta\psi \rightarrow \Delta x$

ψ	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL							
PM							
PS			ZR		PS		
ZR		NM		ZR		PM	
NS			NS		ZR		
NM							
NL							

(c) 超LSI回路位置決めシステム[7]

半導体基板に回路パターンを焼き付ける際に起きる位置ズレを補正するシステムで、「波高差Rが大きくなると、アライメント誤差が単調減少する傾向にある」（図c-1）ことから、表c-1のような推論ルールが得られる。それらのファジー集合は図c-2のようである。また、アライメント・ショット位置（X, Y）と位置ズレは図c-3のような関係にあり、これより表c-2のような推論ルールが得られる。

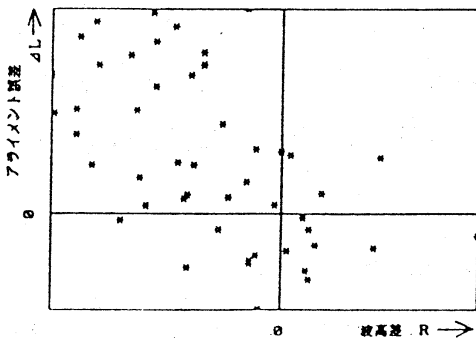
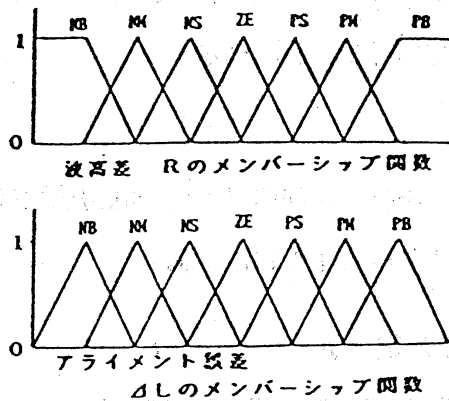


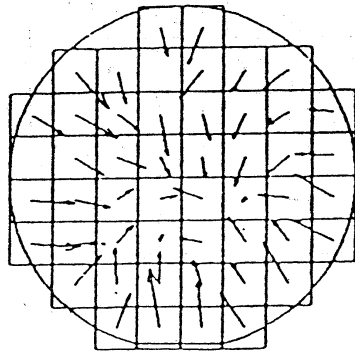
図 c-1 波高差 R とアライメント誤差 ΔL との関係

表 c-1 「波高差 R とアライメント誤差 ΔL との関係は、単調減少である。」

(1-1) if R is PB then ΔL is NB.
(1-2) if R is PM then ΔL is NM.
(1-3) if R is PS then ΔL is NS.
(1-4) if R is ZE then ΔL is ZE.
(1-5) if R is NS then ΔL is PS.
(1-6) if R is NM then ΔL is PM.
(1-7) if R is NB then ΔL is PB.



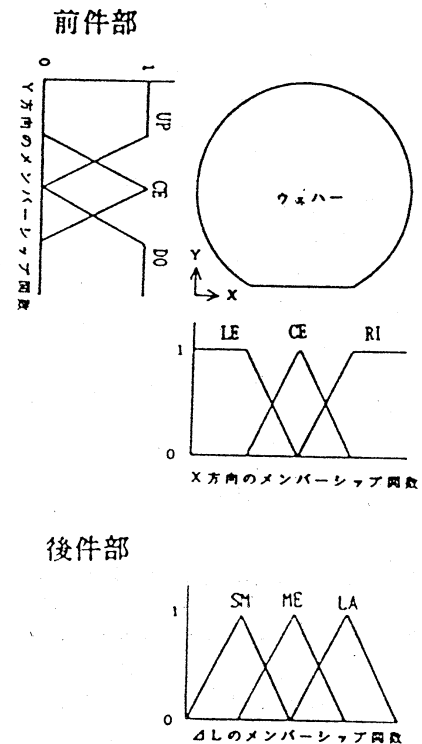
図c-2 波高差とアライメント誤差のメンバーシップ関数



図c-3 アライメント・ショット位置 (X, Y) と位置ズレのベクトル表示

表c-2 『チップ位置 (X, Y) とアライメント誤差 ΔL とは関係がある。』

(2-1)	if X is RI	then ΔL is SM.
(2-2)	if X is CE	then ΔL is ME.
(2-3)	if X is LE	then ΔL is LA.
(2-4)	if Y is UP	then ΔL is SM.
(2-5)	if Y is CE	then ΔL is ME.
(2-6)	if Y is DO	then ΔL is LA.



図c-4 アライメント・ショット位置とアライメント誤差のメンバーシップ関数

(d) 証券投資エキスパートシステム[8]

山一証券が開発したエキスパートシステムIES (Integrative Expert System)であり、証券市場で変化の兆しが見えたときに、売買行動の信号を出す。IESには、予測値に関する多くのデータが登録されており、これらに最新のデータをあてはめ、推論処理を行う。たとえば、

「株価収益率が高く、移動平均線かい離率が大きいならば、売り」

である(図d-1)。さらに、IESでは、モデルの構造に応じた4つのルール(マクロルール、業種ルール、ミクロルール、個人ルール)が設定されている(図d-2)。

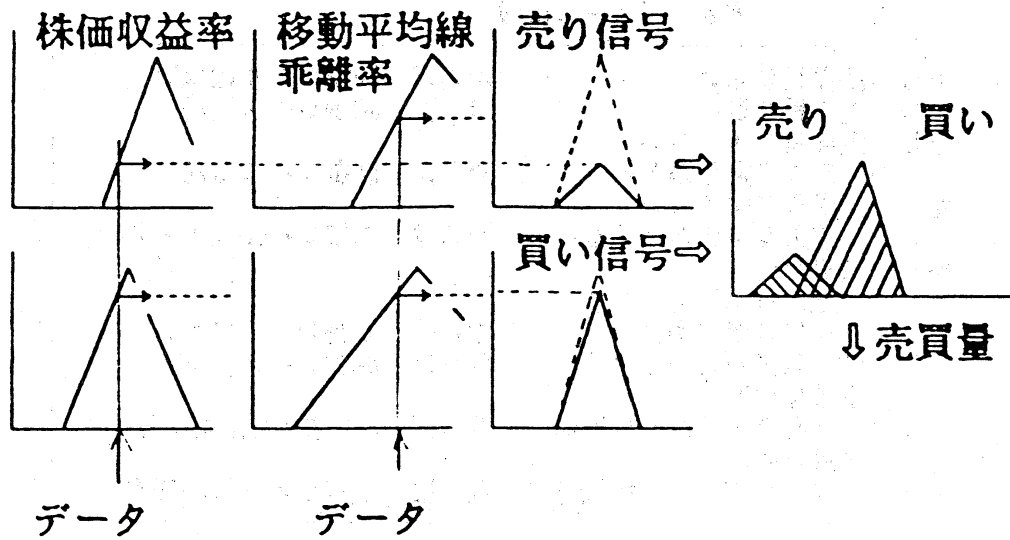


図 d-1 推論の方法

株式 → 買い
 マクロでは、
 もし、金利が上昇から下降なら、
 株式は買いである
 業種では、
 もし、百貨店売上高伸率が高いなら、
 株式は買いである
 ミクロでは、
 もし、移動平均線乖離率が高いなら、
 株式は買いである
 etc

図 d-2 ルールの構造

(e) 交通制御モデル[9]

ファジー交通制御モデルとして、渋滞長、交通需要量、流入交通量、制御継続状態および事故渋滞長から制御パターン（交通制御の必要性、程度）が決定されるという表 e のようなファジーモデルが提案され、実際に、阪神高速道路の環状線における交通制御との比較を行っている。

表 e ルール構成

もし 渋滞長が短い	ならば 制御レベルは低い
もし 渋滞長が長い	ならば 制御レベルは高い
もし 渋滞長が中くらい	
かつ 流入交通量が多い	ならば 制御レベルは高い
もし 渋滞長が中くらい	
かつ 流入交通量が多くない	ならば 制御レベルは中くらい
もし 渋滞発生後 完全に解消していない	
かつ 需要量が多い	ならば 制御レベルは高い
もし 低い制御が続いている	ならば 制御レベルは低い
もし 事故発生時	
かつ 自然渋滞長 > 事故渋滞長	ならば 渋滞長 = 自然渋滞長
もし 事故発生時	
かつ 自然渋滞長 < 事故渋滞長	ならば 渋滞長 = 事故渋滞長

(f) デザイン評価のモデル化[10]

人間の意識のあいまいさと非線形性を考慮した消費者の評価構造モデルを提案し、人間のもっている先験的情報をルールの形で組み込む(表 f)。ここで、評価パラメータは

G : 評価項目の良し悪し

E : 評価項目が購買意欲に与える影響の大きさ

N : 製品の買われる度合

であり、ファジー表現は図 f のようである。

表 f 評価のルール

評	価
E が大きく、G が良ければ、	買われるだろう(N)
" G が標準的ならば、	まあまあ買われるか買われないかのどちらかだろう
" G が悪ければ、	買われないだろう
E が普通で、G が良ければ、	買われるが、特に買われるわけでもないだろう
" G が標準的ならば、	まあまあ買われるか買われないかのどちらかだろう
" G が悪ければ、	買われないが、特に買われないわけでもないだろう
E が小さければ、G が良くても標準的でも悪くても、	購買にあまり関係しない

G: 評価項目のよしあし N: 製品の買われる度合
E: 購買に与える影響の大きさ

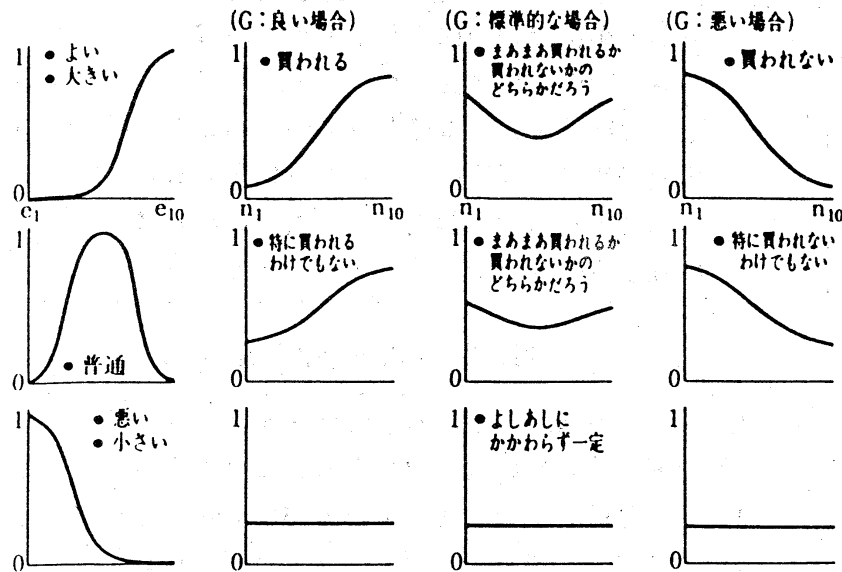


図 f E, N のファジイ集合

(g) 原子炉再循環流量制御[11]

BWR原子力発電プラントのAFC運動を安全かつ効果的に行うために、ファジー制御を適用した再循環流量制御系を構築した。すなわち、中性子束制御器と発電機出力制御器で組み合わせ、発電機出力偏差に応じて制御モードを切り換える出力制御器を作成している。発電機出力偏差に対する中性子束制御器の目標値を設定するための制御ルールは表 g-1 のようであり、制御器の使用割合を設定するための制御ルールは表 g-2 のようである。

表 g-1 中性子束の目標値設定用ルール

- | |
|---|
| <p>F1: もし発電機出力の偏差が負で大きいならば
中性子束の目標値を負で大きくする。</p> <p>F2: もし発電機出力の偏差が負で中ぐらいならば
中性子束の目標値を負で中ぐらいとする。</p> <p>F3: もし発電機出力の偏差が負で小さいならば
中性子束の目標値をゼロとする。</p> <p>F4: もし発電機出力の偏差がゼロならば
中性子束の目標値をゼロとする。</p> |
|---|

表g-1 (続き)

F5 : もし発電機出力の偏差が正で小さいならば 中性子束の目標値をゼロとする。
F6 : もし発電機出力の偏差が正で中ぐらいならば 中性子束の目標値を正で中ぐらいとする。
F7 : もし発電機出力の偏差が正で大きいならば 中性子束の目標値を正で大きくする。

表g-2 制御器の使用割合設定用ルール

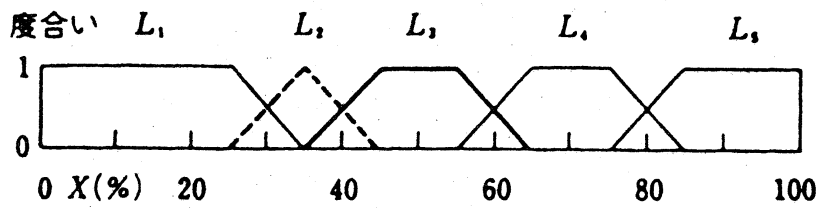
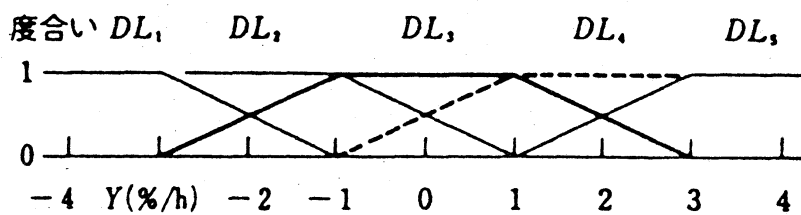
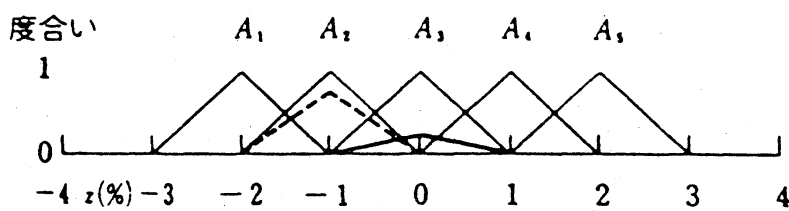
S1 : もし発電機出力偏差の絶対値が大きいならば, 発電機出力制御器出力の重みをゼロとする。
S2 : もし発電機出力偏差の絶対値が中ぐらいならば, 発電機出力制御器出力の重みを小さくする。
S3 : もし発電機出力偏差の絶対値が小さいならば, 発電機出力制御器出力の重みを中ぐらいとする。
S4 : もし発電機出力偏差の絶対値がゼロならば, 発電機出力制御器出力の重みを大きくする。

(h) 焼結プロセス制御[12]

焼結プロセスにおける返鉱配合比制御に対するファジー制御ルールは表hであり、返鉱槽レベルL (%), 返鉱槽レベル変化DL (%/hr) に対する返鉱配合比アクションA (%) を決定するものである。また、各々のファジー集合は図hである。

表h 返鉱配合比設定用ルール

L_1	L_2	L_3		L_4			L_5	L_6
DL_1	DL_2	DL_3	DL_4	DL_5	DL_6	DL_7	DL_8	DL_9
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9

(a) 返鉾槽レベル (X) のメンバーシップ関数(b) 返鉾槽レベル変化 (Y) のメンバーシップ関数(c) 返鉾配合比アクション (Y) のメンバーシップ関数

図h ファジー集合

(i) 浄水場前塩素注入制御[13]

相模原浄水場の前塩素注入用ファジー制御器についてである。目標値が原水取水量と時刻よりほぼ決定されることに着目し、原水取水量と時刻より基準目標値を求める制御ルールを1つのグループとし、もう1つは、塩素注入後における塩素消費量の外乱要因となる因子に着目し、季節・天候・原水取水量・時刻から、基準目標値の補正量を求める制御ルールである。そして両者の推論値の和を目標値とするものである。表iは2つのグループにおけるファジー制御ルールの一例である。

表 i 前塩素注入制御ルール

区 分	制 御 規 則					
	取水量	季節	時刻	天候	基準目標値	補 正 値
制御規則 1	少ない	—	深夜	—	かなり低い	—
	少ない	—	早朝	—	やや低い	—
	少ない	—	午前	—	やや高い	—
	少ない	—	午後	—	低い	—
	少ない	—	夜	—	かなり低い	—
制御規則 2	少ない	春	午前	晴	—	やや多く
	少ない	夏	午前	晴	—	かなり多く
	少ない	秋	午前	晴	—	やや多く
	少ない	春	午前	雨	—	やや少なく
	少ない	夏	午前	雨	—	そのまま

(j) オートチューニング調整計[14]

PID制御器用オートチューニング調整に関するもので、調整ルールは、オーバシュート量OV、振幅減衰比DP、整定時間比QRからPID定数の修正係数 K_p 、 K_i 、 K_d を決定するもので、表jのようである。また、それらのファジー集合は図jのようである。

表 j オートチューニング用制御ルール

No.	IFブロック変数			THENブロック変数		
	OV	DP	QR	K_p	K_i	K_d
1	PB	PB	—	PB	PB	NB
2	PB	PM	PB	PB	NB	ZO
3	PB	PM	ZO	ZO	PB	PB
4	PB	PM	NB	NB	PB	PB
5	PB	ZO	PB	PB	ZO	ZO
6	PB	ZO	ZO	ZO	PB	ZO
7	PB	ZO	NB	ZO	PB	NB
8	ZO	PM	PB	ZO	NB	PB
9	ZO	PM	ZO	ZO	NB	ZO
10	ZO		NB	PB		

PB: Positive Big

ZO: Zero

NB: Negative Big

PM: Positive Medium

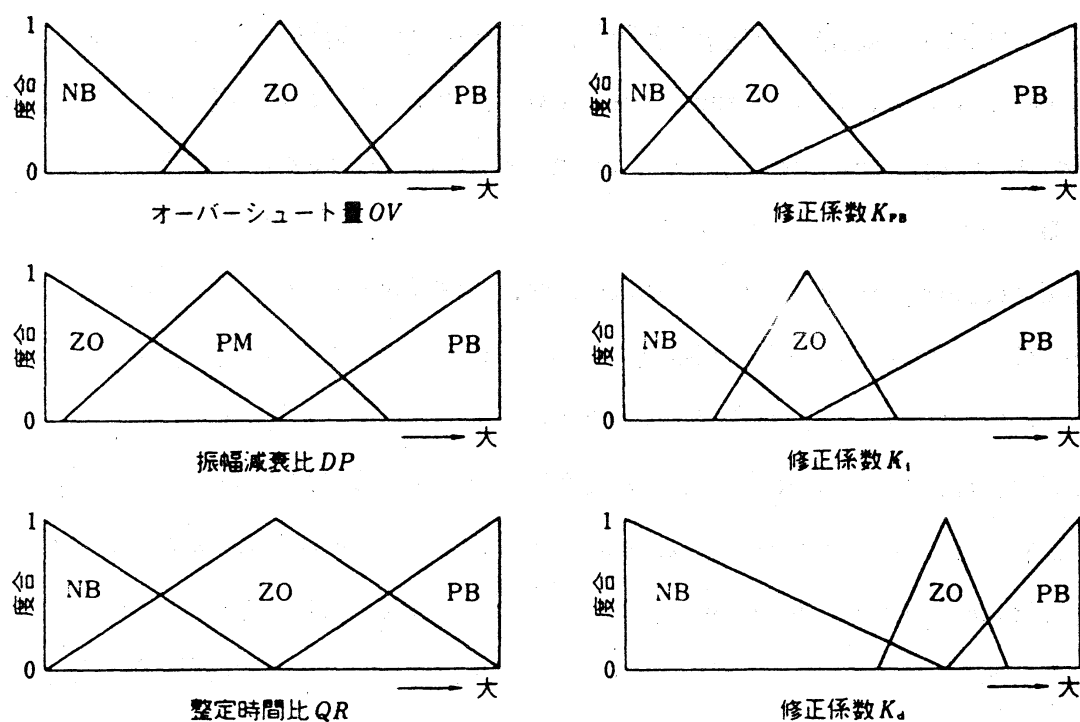


図 J ファジー集合

5. おわりに

ファジー推論法に基づいた知識システムへの応用例としていくつかの実施例をファジー推論規則の立場から概観した。ここで述べたファジー推論法はいわゆる Z a d e h の方法として知られているものであり、M a m d a n i がスチームエンジンへ適用して以来、ファジー制御を始めとする数多くの分野で使われており、重要な推論法として認められている。最近、菅野[15]によりファジー制御に適したファジー推論法が提案されており、自動車制御といった種々の分野に適用されてきているのも注目に値する。

参 考 文 献

1. 水本, ファジー推論法, システムと制御, 287, 436-441, 1984.
2. Zadeh, L.A., Calculus of fuzzy restriction, in Zadeh et al.(ed.), Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes, Academic Press, 1-39, 1975.
3. Mamdani, E.H., Applications of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant, Proc. of IEEE, 121, 1585-1588, 1974.
4. 水本, ファジィ制御法, 日本ロボット学会誌, 6, 6, 60-67, 1988.
5. 山崎・菅野, ファジィ制御, システムと制御, 28, 7, 442-446, 1984.
6. Yamakawa, T., A simple fuzzy computer hardware system employing min and max operations, Preprints of 2nd IFSA Congress, Tokyo, July 20-25, 1987.
7. 今泉・西守・信宮, ファジィ理論のステッパー・アライメントへの応用, 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 383-388, 1988.
8. 金子・菅野, 証券投資エキスパート・システム, 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 187-191, 1988.
9. 佐々木・秋山, 高速道路におけるファジィ制御モデルについて, 第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 50-55, 1986.
10. 国沢, デザイン評価へのファジィ理論の応用, 東芝レビュー, 43, 4, 324-326, 1988
11. 荒川・関水・住田, 原子炉再循環流量制御系へのファジィ理論の適用, 東芝レビュー, 43, 4, 317-320, 1988.
12. 竹腰・稲葉・小松, あいまい制御による焼結プロセスのオンライン制御システム, 計装, 31, 5, 31-34, 1988.
13. 飯田・谷川, 浄水場前塩素注入プロセスへのファジィ制御の適用, 計装, 31, 5, 45-49, 1988.
14. 立花・斎藤, P I D定数設定にファジィ推論を応用したオートチューニングワンループコントローラ, 計装, 31, 5, 11-15, 1988.
15. 菅野, ファジィ制御, 日刊工業新聞社.