直流電動機故障診断システムにおける あいまいな知識の取扱いの一手法

正 員 川 北 茂 (東 芝)
正 員 森 田 登 (東 芝)
非会員 前 田 猛 (東 芝)
非会員 高 良 理 (東 芝)
非会員 金 田 重 治 (東 芝)

1. はじめに

エキスパートシステムを用いて診断を行おうとする対象、あるいは専門家のもつ様々なヒューリスティックな知識にはあいまいなものが多く存在する。このため、知識工学においてあいまいな知識をいかに取扱うかは重要な課題であり、MYCIN における確信度の利用⁽¹⁾、evidential reasoning⁽²⁾、Dempster-Shafer 理論の応用⁽³⁾、Fuzzy 論理の応用⁽⁴⁾など多くの試みが行われている。

MYCIN で用いられた、事実およびプロダクションルールに“確からしさ”を示すための確信度を付加する手法は、理論的な背景に欠ける点をもちながらも、専門家の行っているあいまいな判断を直感的に表現しやすいこと（もちろん確信度を 0.3 とするか 0.4 とするかといった細かな点は気にとめない）、医療診断の分野での有効性が示されたことなどから、現在でも広く利用されている。また、その後に提案された各種のあいまい性の取扱い手法のベースとなった点、あるいは確信度と確率との関係分析⁽⁵⁾を促した点からも高く評価されている。あいまい性を取扱う場合に確率論を基本とすべきかどうかは、現在でも多くの議論を呼んでいるテーマである⁽⁶⁾。

プロダクションルールに確信度を付加する手法では、個々の仮説ごとに着目してその確からしさを決定していくメカニズムが基本となる〔図 1 (a)〕。これに対して常に、仮説集合全体、故障診断の場合には故障原因全体を対象としながら、個々の仮説に確率を割りあてていく推論形式が evidential reasoning である〔図 1 (b)〕。すなわち、ある evidence が与えられたときに、それがどの仮説(群)の確からしさをどの程度増減させるかという知識から、すべての仮説に対する確率を修正していくことを繰返すことにより、各仮説の確からしさを決定していく推論方式である。

仮説集合
(a) プロダクションルールにおける確からしさの決定
(a) Certainty management in production rule.

仮説集合
with 確率
(b) evidential reasoning における確からしさの決定
(b) Certainty management in evidential reasoning.

図 1

Fig. 1.

A Method of Managing Uncertainty in a Direct Current Motor Diagnostic System. By Shigeru Kawakita, Member, Noboru Morita, Member, Takeshi Maeda, Non-member, Osamu Koura, Non-member & Shigeji Kanada, Non-member (Toshiba Corporation).

川北 茂: 正員, (株)東芝重電技術研究所
森田 登: 正員, (株)東芝京浜事業所
前田 猛: 非会員, (株)東芝重電技術研究所
高良 理: 非会員, (株)東芝重電技術研究所
金田重治: 非会員, (株)東芝重電技術研究所

Dempster-Shafer 理論は

- (i) 複数の事象からなる集合に対して基本確率 (basic probability) と呼ばれる確率が定義される
- (ii) 否定量と無知量との区別が可能である
- (iii) 下界確率 (belief function) と上界確率 (plausibility) を用いて、「確からしさの確からしさ」を表現できる

などの優れた特長をもつことから、あいまい性を合理的に扱う手法として期待されている。特に最近では、evidential reasoning に対して Dempster-Shafer 理論を適用する研究が盛んである。Dempster-Shafer 理論をエキスパートシステムに適用する場合の最大の欠点は、仮説の数を n とすると 2^n の計算が各 evidence に対して必要となり、 n が大きくなると計算量が膨大になる点にある。これに対して、単一仮説にのみ基本確率を定義できるという制限を設けることにより計算量を減らす手法⁽⁷⁾、仮説集合に階層の関係が成り立つ場合に制限することによって計算量を減らす手法⁽⁸⁾などが提案されている。

Fuzzy 集合を用いてあいまい性を定量的に取扱おうとする手法は、プラント制御などの分野での応用が試みられており、各種の Fuzzy 推論法が提案されている。これらを知識工学に適用しようとする代表的な例としては、建築物被害査定エキスパートシステム SPERIL がある⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。SPERIL では建築物の被害の程度の主観的な評価に Fuzzy 集合を利用し、推論には Dempster-Shafer 理論を利用するといった手法を用いている。Fuzzy 集合は、あいまいな意味をもつ知識に対して確率のように一つの値で表すのではなく、分布関数を用いて確率の確率をも含めて表そうとするものである。

以上のような、あいまいな知識に対する様々なアプローチは、「確信度のように ad hoc な手法でなく、合理的な裏付けをベースに知識を取扱いたい」という要請に答えようとするものである。これは、ヒューリスティクスを発端としたエキスパートシステムが、機能/構造に関する知識、対象のモデルに基づく知識といった、より合理的な知識の利用の方向へと進みつつある知識工学研究全体の流れと対応するものである。一方、知識工学を応用する立場からみると、知識ベースの合理性に問題をもちながらも手軽に扱えるという点から、ルールベースを主体とするシステムが広がりを見せているのと同様に、確信度を利用したあいまい性の取扱い手法の果たす役割は大きい。

ここでは、大形直流電動機の故障診断を行うエキス

パートシステム開発^{(11)~(13)}にあたって用いたあいまいな知識の取扱い方について述べる。

大形直流電動機の専門家の故障診断ノウハウのなかで最も重要なのは、あいまいな事象を同定できる点にある。本論文では、これをエキスパートシステムとして実現するために導入した複素確信度、あいまいな事象同定の知識表現法などの新しいあいまい知識処理方式について報告する。なお診断システムは、金属板の3スタンド連続冷間圧延機における主電動機（上・下の圧延ロール各々を一つの直流電動機で駆動しているので合計六つの電動機）に対する設備診断用として実稼動中である。

2. システム概要

診断対象とした直流電動機は、重量で 10~200 t の大形のもので、鉄、アルミニウムなどの金属圧延プラントの主電動機として利用されている。主電動機はプラント操業上の設備として重要な部類に属し、一般取扱い・保守・保全業務の遂行には、経験に裏づけられた高度の技術・知識が必要とされる。従って、専門家のもつ様々なヒューリスティックな知識を知識ベース化することによって、経験の少ないオペレータの保守・保全業務を支援することが期待できる。

システムの構成を図2に示す。大形直流電動機の故障診断システムは、エキスパートシステムを構築するためのツール TDES 2 (a Tool for Developing an Expert System 2) を利用して実現されており、また TDES 2 自身は LISP を用いて作られている。TDES 2 は

- (i) プロダクションルールによる知識表現とこれに対する前向き推論/後向き推論
- (ii) プロダクションルールのモジュール化による知識構造の明確化および推論の高速化

図2 大形直流電動機故障診断システムの構成
Fig. 2. Structure of direct current motor diagnostic system.

(iii) 確信度を用いたあいまい性の表現

(iv) 推論中のルールのトレースおよび推論終了後の対話形実行履歴表示などのデバッグ機構などを基本とするシェルである。診断を行うエキスパートシステムの基本的パターンである「初期事象から前向き推論を利用して故障原因の仮説を立て、次に後向き推論を利用して仮説の検証を行う」というメカニズムは、上記の機能を用いて実現することができる。一方、大形直流電動機の診断知識および専門家の思考プロセスを分析すると、あいまいな事象をいかに取扱えるかが診断システムを実用的なものとするためのポイントになっている。従って、TDES 2 ではあいまい性の表現およびその処理方法として、確信度を基本としながらも、以下に述べるような幾つかの拡張を試みた。

3. 複素確信度

MYCIN における確信度の取扱いにおいて最も重要な点は、ある仮説 H を指示する確信度 x ($0 < x < 1$) と H でないことを指示する確信度 y ($-1 < y < 0$) がある場合の COMB 関係で、以下の式で定義される。

$$z = \frac{x+y}{1-\min(x, |y|)}$$

ここで、 z は H の確信度であり、 $1-\min(x, |y|)$ は 3 個以上の確信度を合成する場合に、その順番による影響を排除するために後に導入された項目である。

この方法で確信度を取扱ったとき、それまでに得られた情報の一部が失われる場合がある。例えば、 $x=0.9, y=-0.9$ において $z=0.0$ であり、また $x=0.2, y=-0.2$ においても $z=0.0$ となる。どちらの場合にも仮説 H を指示も不指示もできないという点では同じであるが、前者では相反する evidence による不確かさであり、後者においては evidence 自身の不確かさに基づく不確かさである。大形直流電動機の故障診断においては、この両者の相違を区別する必要性が高い。なぜならば、観察するのに手間のかかるものや観察されるデータに付随するあいまい性が高いものが多く、エキスパートシステムが非専門家に観察結果の入力を要求した場合に、その答として誤った入力、あるいは“不明”といった入力の発生する可能性が高いためである。観察に誤りが多いときには、相反する evidence となって表れ、この場合エキスパートシステムとしては再観察を依頼する必要がある。一方、不明が多いときには evidence の不確かさとなって表れ、この場合にはより手間のかかる観測も行ってもらう、あるいは知識ベースを修正してよりユーザが答えやす

い形で入力要求を行うなどの必要がある。こういった状況が発生しやすい背景には、エキスパートのもつ診断ノウハウのなかで、あいまいな現象をいかに適確に把握することができるかが重要な部分を占めているといった知識の性格がある。

このような要求に答えるため、確信度として実数部および虚数部の二つの値をもつ複素確信度を導入した。実数部は $0 \leq \text{実数部} \leq 1$ の値をとり、仮説の成り立つ確からしさを示す。また、虚数部は $0 \leq \text{虚数部} \leq 1$ の値をとり、仮説の成り立たない確からしさを示す。知識ベース中のすべての事実は、実数部および虚数部の二つの値をもつ。また、これに伴い二つ以上の evidence の確信度から合成確信度を計算する方法を以下のように拡張した。

(1) AND の関係 各 evidence の実数部の最小値を合成確信度の実数部とし、虚数部の最小値を合成確信度の虚数部とする。

(2) OR 関係 各 evidence の実数部の最大値を合成確信度の実数部とし、虚数部の最大値を合成確信度の虚数部とする。

(3) 単純平均関係 各 evidence の実数部の単純平均を計算し、その値を合成確信度の実数部とし、虚数部の単純平均値を虚数部とする。

(4) COMB 関係 各 evidence の実数部および虚数部ごとに以下の計算式を適用する。

$$CF = cf_1 + cf_2(1 - cf_1) + \dots$$

$$+ cf_n(1 - cf_1) \cdots (1 - cf_{n-1})$$

ここで、 CF : 合成確信度の実数部または虚数部、 $cf_1, cf_2, \dots, cf_n$: 各 evidence の確信度の実数部または虚数部

4. 複素確信度を利用した推論の制御

確信度をもつ事実に対して、前向き推論、後向き推論などのいわゆる演えき推論を適用しようとした場合、その発火基準を定める必要がある。すなわち、確信度をもたない事実に対しては、ルールの条件部に関して明確に真/偽が決定でき、真の場合にルールを発火すればよいが、確信度がある場合には条件部の真/偽があいまいになってくる。従って、確信度の多値空間から真/偽の二値空間への写像が必要となってくる。このような写像を行う一つの方法としては、確信度が正の場合には部分的にでも真であるという基準に基づいて、ルールを発火する手法がある。また、確信度はあくまでも事実に加付された属性の一つであることから、その値に関係なく条件部の事実と知識ベース中の事実とのパターンマッチの成功/不成功を基準に真/

偽を決定する手法も用いられている。

大形直流電動機の故障診断エキスパートシステムの開発にあたっては、第3章で述べた複素確信度を利用して、より柔軟な推論の制御を可能とするため、以下のような手法を用いた。ルール的一般形を

IF : 条件部

WITH : 確信度区間指定

THEN : 結論部

とし、条件部の合成確信度が WITH の後で推定される区間内に入っている場合に、そのルールが発火される。ここで、確信度区間指定には表1に示すようなものが指定可能である。表1中(1)～(4)では、条件部の合成確信度の実数部 x と虚数部 y から $z=x-y$ を計算し、 z が区間内にあるかどうかチェックされる。

MYCIN で用いられた 1-min (x, y) によって正規化する手法は以下の理由から用いなかった。

(1) 実数部と虚数部の二つの値を常に管理するため、計算の順番によって影響を受けるといった不都合は生じない。

(2) 大形直流電動機の専門家の直感的思考には正規化を行わないほうがよくマッチする。

一方、表1中(5)～(8)では $w=x+y(1-x)$ を計算し、 w が区間内にあるかどうかチェックされる。 z が仮説の成り立つ確からしさと、成り立たない確からしさを相殺した量であるのに対して、 w は確からしさの情報量がどれだけあるかを示す量である。

例えば、アーマチュアコイルの断線によって整流異常が発生した場合、

- (i) ドロップテストに基づく断線の可能性 (x_1, y_1)

表 1 確信度区間指定

Table 1. Certainty factor range description.

	指 定 方 法	区 間
(1)	GT r	$r < z \leq 1.0$
(2)	GE r	$r \leq z \leq 1.0$
(3)	LT r	$-1.0 \leq z < r$
(4)	LE r	$-1.0 \leq z \leq r$
(5)	gt r	$r < w \leq 1.0$
(6)	ge r	$r \leq w \leq 1.0$
(7)	lt r	$-1.0 \leq w < r$
(8)	le r	$-1.0 \leq w \leq r$
(9)	(1)～(8)の AND 結合	条件のすべてを満たす区間
(10)	(1)～(8)の OR 結合	条件のいずれかを満たす区間

$-1.0 \leq r \leq 1.0$

- (ii) 断線を引き起こす背景 (x_2, y_2)

- (iii) 目視・打音点検からの断線の可能性 (x_3, y_3)

- (iv) 整流傷害からの断線の可能性 (x_4, y_4)

などから総合的に診断が行われる。このとき、上記のどの項目もあいまい性を伴うことから、多数のデータから各項目の確信度 (x_i, y_i) ($i=1\sim 4$) が計算され、

$$\left(\sum_{i=1}^4 x_i - \sum_{i=1}^4 y_i \right) / 4 \geq 0.8$$

であれば、アーマチュアコイルの断線が整流異常の原因であると断定でき、

$$\left(\sum_{i=1}^4 x_i - \sum_{i=1}^4 y_i \right) / 4 < 0.5 \text{ かつ}$$

$$\left(\sum_{i=1}^4 x_i + \sum_{i=1}^4 y_i - \sum_{i=1}^4 x_i y_i \right) / 4 \geq 0.5$$

であれば、evidence 間に矛盾があると判定し、

$$\left(\sum_{i=1}^4 x_i - \sum_{i=1}^4 y_i \right) / 4 < 0.5 \text{ かつ}$$

$$\left(\sum_{i=1}^4 x_i + \sum_{i=1}^4 y_i - \sum_{i=1}^4 x_i y_i \right) / 4 < 0.5$$

であれば、evidence に不明が多すぎて診断が不能と判定する、といった使い方が行われる。

5. あいまいな事象の同定

大形直流電動機の故障診断における最大のポイントは、あいまいな事象の同定にある。専門家のもつ診断ノウハウのかなりの部分が、非専門家では見分けることができないような事象を特定できる点にある。すなわち、観測された事象からヒューリスティックな知識、あるいは構造、機能に関する知識を使って故障原因にたどりつく過程よりも、事象の把握に重点が置かれている。ここでは、専門家のあいまいな事象同定のための知識構造およびその実現方式について述べる。

〈5.1〉 専門家の知識構造 専門家が診断を行う場合の中心は、幾つかの key となる事象の把握にある。key となる事象としては、故障の原因を示す事象、異常状態を示す事象、原因から異常状態に至る因果関係の中間に存在する幾つかの状態を示す事象、故障を引き起こす背景となる事象などがある。

例えば、低湿度が原因で整流異常が発生した場合の key となる事象および専門家の同定方法は次のようなものである。

- (1) 低湿度(原因) 湿度が何%以下であれば、整流異常を発生するといった単純な尺度はなく、温度との関係、継続期間などとの関連を考慮して同定する。

- (2) ブラシの座乗性悪化(中間状態) 低湿度の

状態が長く続くと、ブラシの座乗性悪化を引起し、その結果ブラシの異常摩耗および整流子表面に損傷をきたし、最終的に整流異常が発生する。従って、ブラシの座乗性悪化という事象を同定することは原因を特定するうえで重要であり、専門家はブラシの振動状態、しゅう動音、ブラシの頭部／側部の損傷状態などから総合的に判定を行っている。

(3) ブラシ異常摩耗/整流子損傷(中間状態)

整流子表面の色、つや、条痕、ブラシの焼損、摩耗速度、ダストなど、いろいろな視点からの観察を行うことによって、ブラシ異常摩耗/整流子損傷の同定を行っている。

(4) 整流異常(異常結果) 火花の大きさ、色、音、射出火花の存在、火花の安定性、ちらつきなどから整流異常の発生を同定している。

このような、専門家の行っている事象把握のための観察ノウハウをエキスパートシステムとして実現するためには、オペレータに対していろいろな観察を依頼し、その結果を答えてもらう必要がある。なぜならば、整流子表面の色、つやなどといったデータを計算機が自動的に取込むことを可能とするようなセンサの設置は経済的に非現実的であり、人間の観察に依存するしかないためである。オペレータに観察を依頼するためには、オペレータが解答可能なレベルでの質問を行う必要がある。例えば、ブラシの振動状態などを観察することによって専門家にはブラシの座乗性悪化との関係を推定できるが、非専門家には推定が不可能である。従って、オペレータに対する質問としては、

- (i) 50% スピードのときでも振動が大きいのか
 - (ii) 振動は脈打つ感じがしないか
 - (iii) 振動の周波数は高いか
 - (iv) 振動は徐々に大きくなってきているか
- などのレベルまでブレイクダウンする必要がある。

このような、あいまいな事象を同定するための知識構造は、図3に示すようなものである。同図の木構造で、事象間の関係には主として COMB 関係が用いられ、確信度の与え方は各事象の階層レベルおよび同一レベルでの事象の数に影響を受ける。例えば、図4に示すような場合、親事象に割りあてられた確信度を0.6とし、三つの子事象が COMB 関係で結ばれているとすると、

$$0.6 = x + x(1-x) + x(1-x)^2$$

を解くことにより、各子事象に割りあてられるべき確信度は

$$x \approx 0.27$$

となる。もちろん、この場合各子事象の果たす役割は

図3 あいまいな事象同定の知識構造

Fig. 3. Knowledge structure of identifying ambiguous phenomena.

図4 確信度の割付

Fig. 4. Assignment of certainty factor.

等価であると仮定しており、非等価の場合には重み付けを考慮した値となる。

〈5・2〉 知識表現方法 図3で示される知識構造において確信度の果たしている役割は、あいまいな事象を同定するための木構造における各事象の寄与率になっている。従って、木構造の最下位の事象の確信度の値が寄与率を超えて大きな値になることは、全体のバランスのうえで好ましくない。一方、オペレータへの質問に対して“不明”であるという答が返ってくる可能性が高い点を考慮すると、最下位の事象を同定するために、いろいろな観点からの質問をできるだけ多く用意する必要があり、たまたま多くの“肯定”が答として返ってくると、確信度の値が寄与率を超えて大きくなってしまふ。このような問題を解決するために、図3の最下位事象の定義方法として、図5に示すような QUESTION と呼ぶ記法を用いている。図5で TH は事象に対する確信度のいき値を指定するためのもので、以下に述べる方法で計算される確信度の実数部と虚数部の差の絶対値が TH ($0 < TH < 1.0$) を超えた場合に、この QUESTION の実行が打切られる。質問 i はオペレータに対して“肯定”、“否定”または“不明”のいずれかを答えてもらう質問であり、質問 1, 質問 2, …の順番で出力され、“肯定”の場合には cfy_i を、“否定”の場合には cfn_i を確信度として採用し、

```

( 事象 TH
  ( 質問1 cfy1 cfn1 )
  ( 質問2 cfy2 cfn2 )
  .
  .
  ( 質問n cfyn cfnn )

```

図 5 最下位事象の定義

Fig. 5. Definition of leaf finding.

```

( 大きな火花 0.4
  ( " 火花指示計は5号以上を示していますか？ "
    0.25 -0.25 )
  ( " 火花の大きさはJEC 54規程で
    5号以上ですか？ " 0.25 -0.25 )
  ( " 火花の色は青白いですか？ "
    0.2 -0.2 )
  ( " 火花音はありますか？ "
    0.2 -0.2 )
  ( " 射出火花はありますか？ "
    0.2 -0.2 ) )

```

図 6 最下位事象定義の例

Fig. 6. An example of leaf finding.

COMB 関係を用いて順番に確信度の計算を行っていく。このような記法およびその処理方法を用いることによって、オペレータが明確な答を指定できる場合には速やかに事象の確信度が決定され、他方、明確な答が得られない場合には、補充するような質問を展開していくことができる。

QUESTION を使った簡単な例を図6に示す。この例では、直流電動機に火花センサが取付けられており、かつ、オペレータが保守・保全に熟練しているといった理想的な場合には、上から二つの質問だけで処理を終了させることができる。一方、火花センサがなかったりオペレータが JEC 54 の火花規程を知らないような場合でも、火花の色、音、射出火花の有無などの補充質問をすることによって、大きな火花という事象の確信度を決定していくことが可能となる。

この例のように、QUESTION の一般的な使い方は、答えるのは難しいが答が得られれば高い確信度を与えられるような質問（例えば、答えるためには手間のかかる測定が必要である、オペレータに熟練度が要求されるといった質問）を前に並べ、これらを補う形の質問を後に述べるといった方法になる。

6. 質問間の従属関係の表現

QUESTION を利用して、あいまいな事象の同定を行う場合に、特定の質問に対する答に依存する質問が多く存在する。例えば、“低湿度が整流悪化の原因である”という事象を同定する場合に、“湿度が50%以下

```

( 低湿度 0.8
  ( " 湿度は50%以上ですか？ "
    0.5 -0.5 )
  ( CONFIRMED-BY
    " その湿度は湿度計を使って測定しましたか？ "
    0.3 -0.3 )
  ( CONFIRMED-BY
    " その湿度は感覚的なものでですか？ "
    0.1 -0.1 )
  ( CONFIRMED-BY
    " その湿度は2週間以上続いていますか？ "
    0.3 -0.3 )
  ( CONFIRMED-BY
    " 温度と湿度は同じ場所のものでですか？ "
    0.3 -0.3 ) )

```

図 7 最下位事象定義の拡張例

Fig. 7. An example of enhanced leaf finding.

である”ことが判明すれば“湿度の測定条件”、“低湿度の継続期間”などをチェックすることにより、確信度の調整を行う必要があるが、湿度が不明の場合にはチェックが無意味となる。通常のソフトウェアであれば、条件判定とその結果に基づく分岐によって、このようなメカニズムは簡単に実現できるが、知識の記述というレベルであまりに自由度の高い制御構造を導入するには問題がある。もっとも、“手続き形知識”という知識表現が認められている点から考えると、シーケンス、条件分岐、繰返しといった制御の三基本構造が知識記述のための構成要素に含まれるとも言えるが、ここでは図6の QUESTION 記述における

(質問 i cfy_i cfn_i)

に対して

(CONFIRMED-BY 質問 i cf_i)

といった形式を許すことによって、質問間の従属関係を表現している。この形式は質問は、それ以前の質問に対する答から確信度の実数部または虚数部が0以外の値をもっている場合にのみ実行され、質問に対する答が“肯定”のときに cf_i との間で COMB 関係によって確信度が修正されていく。さきに述べた“低湿度が整流悪化の原因である”という事象の記述例を図7に示す。

7. 終りに

大形直流電動機の故障診断を行うエキスパートシステム開発にあたって、専門家のもつあいまいな事象同定能力を実現するために、複素確信度、あいまいな事象同定の知識表現法などを導入した。この結果、従来は専門家に依存していた故障診断を、非専門家である保守員とエキスパートシステムによって実施できるようになった。特に、あいまいな事象を同定する過程の

保守員とエキスパートシステムとの対話において、保守員の観察を助け、誤った観察結果にも柔軟に対処できるシステムの構築が可能となった。

本エキスパートシステムを専門家に検証してもらった結果、約 50% 程度の能力との評価を受けている。専門家と比べた場合の問題としては次の二点があげられる。

(1) 知識として不足している部分がある。

(2) 文章表現だけに頼った保守員への観察依頼では、正しい観察結果を得るのに限界がある。

第一の問題点については、今後、不足している知識を追加していくことによって改善することができ、基本的には本システムで用いたあいまい知識の処理方式の枠組で対処できると考えられる。エキスパートシステムのもつ拡張性の容易さを活かすことによって、除々に解決されていく問題と思われる。

第二の問題点については、事象の観察という性質上文章表現だけでは不十分であり、画像出力装置と組合せるなどの改善が重要となる。今後、このような方向でのマンマシンインタフェースの充実によっても、あいまいな事象同定能力を大幅に向上できると考えられる。

(昭和 62 年 3 月 23 日受付, 同 62 年 9 月 21 日再受付)

文 献

- (1) B.G. Buchanan & E.H. Shortliffe: Rule-Based Expert Systems (1984) Addison-Wesley
- (2) J.D. Lowrance & T.J. Garvey: "Evidential Reasoning: A Developing Concept", Proc. IEEE ICCS, p. 6 (1982)
- (3) G. Shafer: A Mathematical Theory of Evidence (1976) Princeton Univ Press
- (4) L.A. Zadeh: The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems", *Fuzzy Sets & Syst.*, **11**, 199 (1983)
- (5) J.B. Adams: "Probabilistic Reasoning and Certainty Factors", *Mathematical Biosciences*, **32**, 177 (1976)
- (6) P. Cheeseman: "In Defense of Probability", Proc. 9th IJCAI, p. 1002 (1985)
- (7) J.A. Barnett: "Computational Methods for a Mathematical Theory of Evidence", Proc. 7th IJCAI, p. 868 (1981)
- (8) J. Gordon & E.H. Shortliffe: "A Method for Managing Evidential Reasoning in a Hierarchical Hypothesis Space", *Artificial Intelligence*, **26**, 323 (1985)
- (9) 石塚: 「建築物被害査定エキスパートシステム」, 情報処理学論, **24**, 357 (昭 55-3)
- (10) M. Ishizuka: "An Extension of Dempster & Shafer's Theory of Fuzzy Set for Constructing Expert Systems", 生産研究, **34**, 7, 312 (昭 57)
- (11) 川北・森田・渡辺・安部: 「知識ベースを用いた大形直流電動機故障診断システム」, 昭 60 電気学会全大, p. 1023
- (12) 森田・川北: 「大形直流機故障診断知識の分析に基づく知識ベース設計定式化の試み」, 電気学会回転機研究, RM-85-71 (昭 60)
- (13) 森田・川北・高良: 「直流機保守支援知識ベースシステムの適用検討」, 昭 61 電気学会全大, p. 1023