ファジィ記憶ベース推論とファジィ測度による プラント状態総合評価方式[†]

後藤 賢治* 鳥山 佳洋* 伊藤 修*

プラントの状態総合評価において、各状態は正しく認識できても同時に存在する他の状態すなわち文脈情報によって状態の持つ意味が変わるため、状態の解釈方法が重要となると同時に、状態解釈に合った総合評価方法が重要となる。本論文では、数値情報の言語ラベルによる状態認識、経験事例という専門的知識による状態解釈、シナリオ統合による状態総合評価、を階層構造で実現する知的評価方式を提案する。

本方式の特徴は、評価対象の情報が持つあいまいさ及び評価者の持つあいまいさの低減化である。本論文では、それぞれを実現する「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」、「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」を提案し、オペレータがプラントの評価・判断を行っているメカニズムを模擬して、提案の状態総合評価の基礎的検討を行う。

例として、ある冷却系プラントの設計仕様調整に適用し、少ない事例でも的確な状態総合評価が可能、設計仕様調整の知識抽出が可能なことを示す。そして提案した状態総合評価方式がオペレータの意思決定という評価・判断が伴う分野に有効なことを示す。

キーワード：ファジィ記憶ベース推論、ファジィ測度、文脈、シナリオ、状態総合評価

1. はじめに

人の思考過程が介在するような問題を取り扱う方法としてファジィ理論が注目され、制御分野[1]でその有効性が示され実用段階に入っている。また、意思決定[2]・画像理解[3]・診断[4]など知的情報処理への応用は、徐々に始まりを見せている。これらシステムを構築する際に生じる共通の問題は、いかにして人が行っている主観的評価の知識を獲得するか、すなわち入力あるいは問題の情報を様々な知識に照合して対象を理解し、問題に対する主観的評価を行う筋道を獲得するかである。

従来、プラントの状態総合評価を行う場合、専門家から相互に関係しない断片的な知識(規則)を獲得し、プラントの状態量を各規則の部分部分に適用してボトムアップ的に結論、すなわち状態総合評価を導いていた。しかし、対象領域に通じた

専門家から獲得できる評価知識には不確かさがあるため、ボトムアップ処理では適切な状態総合評価を行うことが難しい。たとえば、センサー信号があらかじめ定めたしきい値よりも大きいならば異常が発生したと評価、またセンサー信号が小さいならば正常に動作していると評価する。普通、異常時にはセンサー信号は大きくなるので、この方法によれば異常はかなり正確に検知できる。しかし、センサー信号が大きいあるいはハンチング状況ならば異常となるため、本質的な異常でなくてもアラームが発生することになり、各状態属性の絶対値に大きく影響を受ける。

このため近年、状態属性間の組合せ効果(相乗・相殺効果)に基づく総合評価が可能なファジィ測度・ファジィ積分[5,6]が注目されている。ファジィ測度は、対象の状態属性値が厳密に数値化されていてあいまいさがなくても、人がその数値を捉えて判断するとき複数の可能性の中でどれかに決められないあいまいさの度合を測る評価尺度を表現する。ファジィ積分は、このファジィ測度と状態量を用いた非線形な総合評価で、人に近い主観

[†] A Method of State Synthesis Evaluation for Plant based on Fuzzy Memory-based Reasoning and Fuzzy Measure

* Kenji GOTO, Yoshihiro TORIYAMA and Osamu ITOH
(株)富士電機総合研究所 情報システム研究所
Software and System Laboratory, Fuji Electric Corporate
Research and Development, Ltd.

的評価プロセスをモデル化する。たとえば、3つの異なるセンサ(温度、煙濃度、CO濃度)信号をもとに、評価対象である家屋が火災であるかどうかの総合評価を行う場合には、センサー(温度、煙濃度、CO濃度)間の相互関係をファジィ測度で表現し、ファジィ積分モデルによる非線形総合評価に基づいて火災かどうかの判断を行うため、個々のセンサー信号がしきい値より大きくても異常と判断しない。ファジィ積分モデルは、センサー間の相互関係に基づいて状態総合評価を向上することができる。

しかし、多くのプラントでは、状況という文脈により各状態の持つ意味が変わるため、センサ信号の状態量をそのまま用いて状態総合評価を行うとあいまいになる。このため、状態量に含まれる冗長性や誤りを減らした状態総合評価を得ることが難しい。つまり、ファジィ積分モデルによる評価では、人の主観的評価に近い総合評価を行えない場合が生じる可能性がある。このことから、適切なプラントの状態総合評価を行うには、評価対象の情報が持つあいまいさ及び評価者の持つあいまいさの両方を考慮する必要がある。

本論文では、評価対象の情報が持つあいまいさ、すなわち状態解釈に伴うあいまいさを低減するための「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」を提案する。また、評価者の持つあいまいさ、すなわち状態解釈された情報の判断に伴うあいまいさを低減するための「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」を提案する。

ファジィ記憶ベース推論では、評価対象プラントに依存しない経験事例を専門的知識として取り入れ、問題の状態が与えられると類似した経験事例の中から戦略事例を類推しカテゴリー化してシナリオを生成する。シナリオは、状態から様々な戦略を類推して、立案される筋書き(戦略と一連の状態)を表す。そして、各シナリオに合った状態解釈を行うために状態と戦略カテゴリー、戦略カテゴリーと状態というボトムアップ処理とトップダウン処理を相互に作用させて、状態量を戦略に即

した情報に再構成する。また、ファジィ測度の同定では、プラントの状況を保持しながら再構成した入力情報を用いて、各シナリオの状態属性間に内在する相互作用を抽出し、状態と戦略の関係をファジィ積分を用いてモデル化することでプラントの状態総合評価能力の向上を図る。

状態総合評価方式の有効性を検証するために、ある冷却系プラントの冷却特性試験に関する状態総合評価に適用し、少ない事例でも的確な状態総合評価が可能、設計仕様調整の知識抽出が可能なことを示す。

2. 状態総合評価方式の構成

提案する状態総合評価は、人(オペレータ)が評価対象プラントの状態を認識・解釈・評価する筋道を表現することを目的とし、図1に示す階層構造を用いる。Layer 1ではファジィ記憶ベース推論、Layer 2ではファジィ測度・ファジィ積分をもとに、それぞれ次に示す状態認識・状態解釈及び状態総合評価を行い、行動のための意思決定を支援する構成とする。

- (1) 数値情報の言語ラベルによる状態認識
- (2) 経験事例という専門的知識による状態解釈
- (3) シナリオ統合による状態総合評価

(1)において、評価対象プラントから入力される数値情報をメンバーシップ関数を用いて言語化し、状態認識を行う。すなわち、数値を図2-a部に示す言語値属性(言語ラベル：高い、普通、低いなど)により数値的真理値 $[0,1]$ に変換し、対象の状態を示す数値の言語的な意味解釈を行う。たとえば、「入口温度がやや高い」の判断基準に「0.2の割合で合致する」という具合に行う。各状態属性の意味解釈を行うことで、状態は数値的真理値の列として表現され、ファジィメッセージとしてのファジィ集合を表わすものになる。ある状態属性 x_i の数値解釈する言語ラベルの集合を、次に示す離散的空間とする。

$$Fx_i(\text{入口温度}) \\ = \{\text{低い, やや低い, 普通, やや高い, 高い}\}$$

ここで、現在の入口温度が 45°C の場合、ファジィメッセージは、

$$Fx_i(\text{入口温度: } 45^\circ\text{C}) \\ = \{0.2/\text{やや高い}, 0.9/\text{高い}\}$$

のようなファジィ集合となる。しかし、各状態は認識されても同時に存在する他の状態すなわち文脈情報によって、その解釈は異なる。文脈に関する知識が存在しないと状態解釈はあいまいになる。

このため(2)においては、文脈という上位概念に基づいて状態解釈するトップダウン処理が可能な

専門的知識を要する。文脈とは、ある属性の状態を認識するときに影響を与える当該状態属性以外の状態から継起される知識・概念を表す。ファジィ制御などで用いるルールベース推論は、専門家から相互に関係しない断片的な規則を獲得し、入力情報を各規則の部分部分に適用してボトムアップ的に結論を導く。これより、同時に存在する他の情報(空間的文脈)を考慮した結論が得られないという問題がある。また、ニューラルネットワークは一連の入出力情報をネットワーク上に分散記

図1 階層構造に基づく状態総合評価方式

図2 状態総合評価方式の構成

憶することで専門的知識の獲得を行う。そのため、入力情報の全体像に関する相互作用を考慮した結論は得られるが、その筋道が明確化できない。事例全体で平均化された知識になるため例外事例の記憶ができないという問題がある。

本論文では、規則でない経験事例を積極的に活用することにより、対象領域に依存することなく不完全な知識を徐々に完全な知識に拡充でき、類似の専門的知識(事例)を利用して問題解決できる記憶ベース推論[7]を拡張したファジィ記憶ベース推論に基づく状態解釈を提案する。これを図2-b部に示す。記憶ベース推論は、現在のプラント状態の全体像に類似した仮説から予想される戦略を写像して状態を解釈し、解釈に対する戦略の候補を類推する特徴を持つ。また、経験事例は全てデータベースに蓄積されるので、例外事例も平均化されることなく推論時には参照できる特徴を持つ。しかし、記憶ベース推論は「事例の本質に関連がないようなあいまい・冗長な情報の排除」、「同じ状態でも、状態の全体像が有する文脈に応じた状態解釈」に基づく推論が難しい。このためファジィ記憶ベース推論では、図2-b部の状態・戦略事例記憶にある経験事例に対して前述の言語ラベルを用いて何を重視し、何を軽視するかの類似性判断要因の重み付けを行う。したがって、数値間の類似性ではなく、ファジィメッセージ間の類似性で評価されるので、事例の本質に関係のない状態属性を除いた類似事例の探索を容易にする。さらに、現在の入力情報を保持しながらファジィ検索のメッセージから類推される類似性の高い状態事例をもとに戦略事例をカテゴリー化してシナリオを生成する。そして、各状態属性が該当シナリオにどの程度寄与しているかという寄与度を返すことにより、「状態の持つあいまいさ・冗長性の低減」、「戦略(上位概念)に応じた状態の持つ入力情報の再構成」を考慮した状態解釈を得る。

(3)においては、(2)のトップダウン処理において状態解釈された部分的評価値をもとに、各シナリオにおいて「多くの可能性の中で何を重視して

状態評価を行い、戦略を決定しているのか」という評価者の主観的尺度を獲得するためのシナリオ統合による状態総合評価を提案する。これを図2-c部に示す。ここでは、オペレータ判断情報である教示のシナリオ総合的評価値と、各シナリオに関するファジィ積分モデル統合による状態総合評価値との偏差を最小にするシナリオ総合評価尺度を決定する。また、シナリオ総合評価尺度とファジィ積分モデルによる各シナリオ評価との残差を最小にするファジィ測度を決定する。これより、各シナリオ評価の統合によって、現在のプラント状態に対するオペレータに近いプラントの状態総合評価を得る。

以下において、「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」、「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」を示す。

2.1 ファジィ記憶ベース推論による状態解釈

状態解釈とは、評価対象からの入力と出力、すなわち状態と戦略を相互に対応づける操作である。記憶ベース推論では、入力と出力を関係づける知識として、図3に示すリレーショナルな事例データベースを用いる。これは図2の状態・戦略事例記憶を示す。現在の状態は、この専門的知識に照合して類似性の高い事例をもとに状態解釈する。類似性の照合は、現在の状態と既知事例の状態それぞれのファジィメッセージ間で行うため、(2.1)式に示すマッチング関数を用いる。この関数は、問題である現在の状態を表すファジィ検索メッセージ A が既知事例のファジィメッセージ B にどのくらい包含されているかの度合を測るものである。

図3 事例データベース

	状態フィールド				戦略フィールド			
	x1	x2		xn	T1	T2		TNr
事例-1								
事例-2								
事例-3								
...								
事例-j								
...								
事例-q								

$$s(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A|}. \quad (2.1)$$

(2.1)式において、 $|A|$ は集合 A のファジィ濃度[8]を示し、 $\sum \text{Count}(A) = \sum m_A(x_i)$ で表される(m_A は A のメンバーシップ関数)。また、 $|A \cap B|$ は(2.2)式を用いる[9]。

$$\begin{aligned} |A \cap B| &= \sum \text{Count}(A \cap B) \\ &= \sum \text{Count}(A) - \sum_i \max(0, m_A(x_i) - m_B(x_i)) \\ &= \sum \text{Count}(A) - \sum \text{Count}(A \cup B). \end{aligned} \quad (2.2)$$

類似事例のファジィ検索から状態解釈までの一連の処理は次の手順で行う。

(a) (2.1)式を用いて、ファジィ検索メッセージ F_K の図2の状態・戦略事例記憶に格納されている状態に関するファジィメッセージ

$$F_i \quad i=1, \dots, q$$

に対する類似度

$$s_i = s(F_K, F_i) = \frac{|F_K \cap F_i|}{|F_K|} \quad (2.3)$$

を求める。ここで q は登録件数である。

(b) 類似度の高い順に上位 M 位までの状態事例

$$F_j \quad j=1, \dots, M$$

を抽出する。

(c) 図2の状態・戦略事例記憶を参照し、抽出した状態事例 F_j に対する戦略事例

$$T_j \quad j=1, \dots, M$$

を取り出す。

(d) 図2のシナリオ生成では、戦略事例 T_j の中のある一つの属性

$$T_{jk} \quad (j=1, \dots, M \quad k=1, \dots, N_T)$$

に注目し、その属性値

$$T_{jk} \quad (j=1, \dots, M)$$

により、戦略事例 T_j をカテゴリー化してシナリオを生成する。ここで N_T は戦略事例の総属性数であり、戦略事例のカテゴリー化とは状態事例から類推される仮説に対応した様々な戦略について、類似した戦略によるグループ化を表す。また、グループの戦略事例の代表属性値のことをシナリオ代表値

$$\begin{aligned} \text{Scenario}_{rk} \quad & k=1, \dots, N_T \\ & r=1, \dots, p \end{aligned}$$

と呼ぶ。次の(2.4)式は k 番目の戦略属性値 T_{jk} による戦略事例 T_j のカテゴリー化を表す。

$$\left(|T_{jk} - \text{Scenario}_{rk}| \leq \varepsilon_{rk} \right) \quad \begin{matrix} k=1, \dots, N_T \\ j=e_{r1}, \dots, e_{mr} \end{matrix} \quad r=1, \dots, p \quad (2.4)$$

ここで、 p は戦略カテゴリー数を、 n_r は r 番目の戦略カテゴリーに属する戦略事例の数を表している。

戦略事例のカテゴリー化は、その属性値 T_{jk} の中で、シナリオ代表値 Scenario_{rk} を中心とする、ある適当な距離 ε_{rk} の区間内に含まれる事例を選び出すことにより行い、その事例番号を $e_{r1}, \dots, e_{mr}$ と表す。

また、カテゴリー毎の戦略事例数の和について

$$M = \sum_{r=1}^p n_r$$

が成り立つ。

(e) 図2の状態解釈では、各シナリオに対応する状態事例 F_j を取り出す。つまり、(d)で戦略事例に対してカテゴリー化した添字を用いて状態事例をカテゴリー化する。(2.5)式に状態事例 F_j のカテゴリー化を表す。

$$\left(F_j \right)_{j=e_{r1}, \dots, e_{mr}} \quad r=1, \dots, p \quad (2.5)$$

(f) F_j のカテゴリー単位で、(2.6)式に示すファジィ検索メッセージ F_k の各属性

$$F_{Kk} \quad k=1, \dots, n \quad (2.6)$$

と、(2.7)式に示す F_j の各属性

$$\left(F_{jk} \right)_{j=e_{r1}, \dots, e_{mr}} \quad \begin{matrix} r=1, \dots, p \\ k=1, \dots, n \end{matrix} \quad (2.7)$$

との類似度

$$\left(s(F_{Kk}, F_{jk}) = \frac{|F_{Kk} \cap F_{jk}|}{|F_{Kk}|} \right)_{\substack{j=e_{r1}, \dots, e_{mr} \\ r=1, \dots, p \\ k=1, \dots, n}} \quad (2.8)$$

を求め、カテゴリー内での和

$$\sigma_{rk} = M^{-1} \sum_{j=e_{r1}}^{e_{rn}} s(F_{Kk}, F_{jk})$$

$$r=1, \dots, p$$

$$k=1, \dots, n \quad (2.9)$$

を求める。

(2.9)式の σ_{rk} は問題である現在の状態属性値が、各シナリオに寄与する度合を示すもので、これを部分的評価値とする。これは、上位概念である戦略カテゴリーによって状態の判断基準を変更した値を与える。ここで、(2.6)及び(2.9)式において、 n は状態属性の総数を示す。

(g) 最終的に、生成した各シナリオに寄与する状態の部分的評価値の分布を得る。

以上より、状態解釈するために(a)～(d)のように状態から戦略カテゴリー、(e)～(g)のように戦略カテゴリーから状態というボトムアップ処理とトップダウン処理を相互に作用させて、状態を戦略に即した入力情報に再構成することで、評価対象の情報すなわち状態の持つあいまいさ・冗長性を低減できる。

すなわち、ボトムアップ処理とトップダウン処理の併用は、人の戦略という期待に即した情報を抽出および情報の質を向上する特徴を持つ。

2.2 シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価

2.1で得られた状態の部分的評価値である分布情報を主観的尺度で統合し、オペレータに近い状態総合評価を実現する。すなわち本論文では、評価者の主観的尺度を獲得するためのシナリオ統合による状態総合評価を提案する。このため、図4に示すようにオペレータ判断情報とシナリオ総合評価の残差評価を行い、これを最小化するようにシナリオを部分的に評価するファジィ測度 μ 及びシナリオを総合的に評価する尺度 w_j (添字 j はシナリオ番号)に関する同定方法を以下に示す。また、これらの同定は図5の手順に示すように、最初にシナリオ総合評価尺度を同定、その結果をもとにファジィ測度を同定、そしてオペレータ判断情報とシナリオ総合評価の残差が最小になるまで調整を行う。

2.2.1 シナリオ総合評価尺度の同定

ここでは、目標を満たすサブ目標、すなわち戦略に関連するシナリオを統合するための尺度を同定する。このため、シナリオ総合評価 z がオペレータ判断情報 $\tilde{z}$ に合致するように、各シナリオが寄与するシナリオ総合評価尺度 w_j の同定を行う。

図4 シナリオ評価尺度・ファジィ測度の同定方法

最初に、各シナリオに対する尺度 w_j 及びファジィ測度 μ に適当な値 ($\in [0, 1]$) を与えて、これらを初期設定する (図5のステップ3、4)。次に、状態解釈信号である部分評価値 h ($\in [0, 1]$) を昇順に並べ替える (図5のステップ7)。そして、以下の手順でシナリオ総合評価尺度 w_j を同定する (図5のステップ8)。

まず、各シナリオにおけるファジィ積分モデルによる評価値 z_j とシナリオ値 u_j との内積を求め

て総合評価値 z を算出する。次に、(2.10)式によりオペレータ判断情報と総合評価値の残差 e_s を求め、(2.11)式により残差が最小になるまで繰り返しシナリオ総合評価尺度 w_j を調整して同定を行う。なお、(2.11)式の δ_j は適応係数を表す。

$$e_s = \hat{z} - z \quad (2.10)$$

$$w_j \leftarrow w_j + \delta_j \cdot e_s \cdot z_j \quad (2.11)$$

2.2.2 ファジィ測度の同定

ここでは、各シナリオに関して、多くの状態属性の中で何を重視して戦略決定するかが多属性評価尺度を同定する。このため、ファジィ積分モデルによるシナリオ評価 z_j がシナリオ総合評価尺度 w_j に合致するように、状態属性間の相互作用を表すファジィ測度 μ の同定を行う (図5のステップ11)。

ファジィ測度の同定方法は数多く研究され提案されている [10, 11, 12, 13, 14] が、本論文では同定により随時変動するシナリオ総合評価尺度 w_j を教示信号とし、複数のファジィ積分モデルを処理可能な逐次同定方法を提案する。本同定方法は、文脈に応じた複数のファジィ積分モデルを同時に調整可能な構造を持つ。

最初に、随時調整中のシナリオ総合評価尺度 w_j と、昇順に並び替えられた部分評価値 h をファジィ測度により統合するファジィ積分モデルによるシナリオ評価 z_j との残差 e_{fj} を (2.12) 式により求める。

$$e_{fj} = w_j - z_j \quad (2.12)$$

次に、(2.13)式を用いて残差 e_{fj} を最小にし、かつ後述のファジィ測度の定義にある単調性を満足するように、ファジィ測度 μ を繰り返し調整することにより同定を行う。ここで、単調性は (2.14) 式により表される。また、 Ω は状態属性 x_i の全体集合、(2.13)式の α は適応係数を表す。

$$\mu(F) \leftarrow \mu(F) + \alpha \cdot e_{fj} \cdot (h(\{x_i\}) - h(\{x_{i-1}\})),$$

$$F \in 2^\Omega, F = \bigcup_{i=1}^n x_i. \quad (2.13)$$

$$F, F' \in 2^\Omega, F \subset F' \Rightarrow \mu(F) \leq \mu(F'). \quad (2.14)$$

なお、図5においてファジィ測度 μ の同定が終

図5 シナリオ評価尺度・ファジィ測度同定手順

了したら、シナリオカウント k がシナリオ数 o に達するまでステップ 9 以後の処理を繰り返す。

次に、シナリオカウントがシナリオ数 o に達したら、シナリオ総合評価尺度 w_j が収束するまでステップ 8 以後の処理を繰り返す。

シナリオ総合評価尺度 w_j が収束したら、状態属性数のカウント k_1 が登録件数 q に達するまで、ステップ 6 以後の処理を繰り返す。

カウント k_1 が登録件数 q に達したら、ファジィ測度 μ が収束するまでステップ 5 以後の処理を繰り返し、収束した場合には戦略カテゴリーのカウント k_0 がカテゴリ数 p に達するまで、ステップ 2 以後の処理を繰り返し実行して終了する。

なお、本論文で用いたファジィ測度及びファジィ積分(ショケ積分)の定義は、次のとおりである。
[ファジィ測度]

要素数 n の全体集合を $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ とする。ファジィ測度 μ は、次の性質を満たす。

$$\mu: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$$

$$\mu(\emptyset) = 0.$$

$$A, B \in 2^\Omega, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B).$$

[ファジィ積分(ショケ積分)]

全体集合 Ω の要素を被積分関数 h の値に関して、昇順に並べ替える。

$$h(x_1) \leq h(x_2) \leq \dots \leq h(x_n)$$

被積分関数 h のファジィ測度 μ に関するショケ積分は

$$(C) \int h d\mu = \sum_{i=1}^n (h(x_i) - h(x_{i-1})) \cdot \mu\left(\bigcup_{l=i}^n x_l\right).$$

で定義される。ここで $h(x_0) = 0$ とする。

2.2.3 状態総合評価

以上より、プラントの状況を保持しながら状態解釈した部分的評価値 h 及び各シナリオの状態属性間に内在する相互作用を同定したファジィ測度 μ を用いて、各シナリオに関する状態と戦略の関係を(2.15)式に示すファジィ積分でモデル化し、シナリオ評価 z_j を行う。

$$z_j = (C) \int h d\mu \quad (2.15)$$

ここで、 $h = h_j = \sigma_{jk} \quad j=1, \dots, p \quad k=1, \dots, n$ である。

状態総合評価は、このシナリオ評価を(2.16)式により統合して求める。

$$z = \sum_{j=1}^p z_j \cdot u_j \quad (2.16)$$

ここで、 u_j は k 番目の戦略属性についての j 番目のシナリオ代表値 $Scenario_{jk}$ を表す。

3. 冷却系プラントの設計仕様調整への適用

適用する冷却系プラントは、初期設計で目標を達成できる率が低く、オペレータは目標を満たすために種々の設計仕様の調整を行っている。このため、(a)冷却特性試験回数の低減、(b)開発効率の向上、(c)設計ノウハウの整理による技術伝承性の向上が望まれている。また、この冷却プラントは機種に応じて冷却特性評価に用いる情報が変化する。

そこで、冷却系プラント内の温度を一定時間内に規定温度までに降下させるという冷却特性試験の目標に対する設計仕様調整支援システムを開発した。そして、オペレータが評価・判断を行っているメカニズムを提案の方法で模擬し、設計仕様調整に伴う状態総合評価に適用した。

本冷却系プラントで測定する冷却状態属性数は 41、調整する設計仕様属性数は 26 である。冷却状態はプラント内温度及び冷却設備の特性温度を表す。また、設計仕様は冷却設備仕様を表す。

この調整支援システムでは、経験的に獲得した設計仕様とそれに基づく冷却状態を示す試験結果を図 3 に示す事例データベースに記憶する。同時に、このデータベースは現在の冷却状態が入力されると、最終的に設計仕様をどのように調整すればよいかを提示できる形式に事例を変換し記憶する。そして、この事例データベースに基づいて提案する「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」、「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」を実現し、多属性の冷却状態に基づいて、多属性の設計仕様調整というオペレータ支援を実行できる。

具体的には、図6に示す現在の試験結果をもとに経験事例とのファジィメッセージ間で類似性を測り、類似性の高い仮説から予想される多数の設計仕様(冷媒量など)の調整量候補を類推する。そこで、類推した調整仕様を属性毎にカテゴリー化して、試験結果と設計仕様調整というシナリオを生成する。ここでは、冷媒の調整に着目し、「少し減らす」、「そのまま」、「増やす」の3つのシナリオを生成する。生成したシナリオをもとに、カテゴリー化した調整仕様に対する現在の試験結果のファジィメッセージを状態属性毎に集約して試験結果を再構成すると、状態解釈された試験結果の部分的評価値の分布情報(図7)を得る。図7より個々の状態にはあいまいさ・冗長性があっても、トップダウン処理により文脈に応じた情報が抽出され、不要情報の排除というような情報の持つあいまいさが低減されている。

以上の方法で得られる同定用分布情報を用いて、予め「本プラント内の温度を一定時間内に規定温度にする」という目標に対して、設計仕様を調整し

図6 全状態属性の試験結果

図7 冷媒調整に伴う状態解釈結果

たい」という期待に沿う間接的な意図を抽出するために、シナリオ総合評価尺度及びファジィ測度を同定し、ファジィ積分モデルを生成する。同定に使用したデータは、事例データベース登録の42件中、21件である。図8は、図7の評価用データ

(a) シナリオ1

(b) シナリオ2

(c) シナリオ3

図8 図7の評価用データに対するファジィ積分モデルによるシナリオ評価

に対して、予め同定したファジィ測度によるファジィ積分モデルで各シナリオを評価した結果である。これより、シナリオ1, 2, 3に対応する代表値を登録冷媒量平均の-5%, 0%, 15%としてシナリオ統合による状態総合評価を行うと、冷媒調整量を13.6%増加という結果を得た。

さらに、比較のために状態解釈しない、すなわち図6の試験結果について事例データベース登録の最大値・最小値で正規化した評価用データ(図9)に対して、状態解釈しない同定用データで予め同定したファジィ測度によるファジィ積分モデルで各シナリオ評価を行った。図10に各シナリオ評価結果を示す。同様にシナリオ1, 2, 3に対応する代表値を、登録冷媒量の平均値の-5%, 0%, 15%としてシナリオ統合による状態総合評価を行うと、冷媒調整量を3.6%増加という結果を得た。

図6の試験結果に対する実際の冷媒調整量は15%であり、提案する「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」、「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」は、少ない事例でも的確な多属性の状態総合評価が行え、設計仕様調整の知識抽出が行えることがわかる。

図9 全状態属性の試験結果の正規化

(b) シナリオ2

(a) シナリオ1

(c) シナリオ3

図10 図9の評価用データに対するファジィ積分モデルによるシナリオ評価

以上より、提案の状態総合評価方式を用いることで、従来の評価方法では問題があった評価対象の情報が持つあいまいさ及び評価者の持つあいまいさの低減化を可能にした。

この結果、適用の冷却系プラントでは、従来若い技術者が冷却特性試験に7~8回要していたものが2~3回で終了可能となり、開発効率が約3倍向上できた。また、開発した設計仕様調整支援システムにより、設計ノウハウの事例を蓄積することで状態総合評価の信頼性向上及び技術伝承の向上が可能になった。

4. おわりに

本論文では、(1) 数値情報の言語ラベルによる状態認識、(2) 経験事例という専門的知識による状態解釈、(3) シナリオ統合による状態総合評価を実現するために、「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」、「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」を提案した。そして、本評価方式を冷却系プラントの設計仕様調整に適用し、その有効性を示した。

「ファジィ記憶ベース推論による状態解釈」では、経験事例を積極的に活用して状態から戦略のカテゴリー化、戦略カテゴリーから状態というようにボトムアップ処理とトップダウン処理を相互に作用させて状態を目標に対する戦略というシナリオに即した情報に再構成することにより、文脈に応じた状態解釈が可能になり、評価対象の状態の持つあいまいさ・冗長性が減少し的確な状態解釈を可能にした。

「シナリオ総合評価尺度・ファジィ測度の同定による状態総合評価」では、オペレータの判断情報に対して各シナリオがどの程度寄与しているかの度合を同定することで、ファジィ積分モデル構築の指標を与えることが可能となった。各シナリオの寄与度に合致するように状態属性間に内在する相互作用を同定したファジィ測度を用いたファジィ積分モデルは、状態解釈した状態と戦略の相互関係を明確化でき、評価者の持つあいまいさの低減化を可能にした。

さらに、本評価方式により適用の冷却系プラントにおける冷却特性試験回数が約1/3に減少し、開発効率の向上が可能になった。また、開発した設計仕様調整支援システムにより、設計ノウハウの事例を蓄積することで状態総合評価の信頼性向上及び技術伝承の向上が可能になった。このように本提案がオペレータの意思決定という評価・判断が伴う分野に適用可能なことを示した。

参 考 文 献

- [1] 日本ファジィ学会編：講座ファジィ5 ファジィ制御、日刊工業新聞社（1993）。
- [2] 米田稔、深海悟、ミッシェル グラビッシュ：意思決定支援システムにおけるファジィ評価と決定、計測自動制御学会論文集、Vol.28、NO.9、pp.1125-1134（1992）。
- [3] J. T. Wnag, N. B. Jones and D. P. Bono : A Knowledge-based system for fuzzy ECG interpretation, IEE Conf. Publ., No.360, pp.238-243（1992）。
- [4] K. Tomsovic, M. Tapper and T. Ingvarsson : A fuzzy information approach to integrating different transformer diagnostic methods, IEEE Trans. Power Deliv., Vol.8, No.3, pp.1638-1646（1993）。
- [5] 菅野道夫：ファジィ測度とファジィ積分、計測自動制御学会論文集、Vol.8、No.2、pp.94-102（昭47）。
- [6] M. Sugeno : Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals ; a survey, In Fuzzy Automata and Decision Processes, North-Holland, pp.89-102（1977）。
- [7] C. Stanfill and D.Waltz : Toward Memory-based Reasoning, Comm. of ACM, Vol.29, No, 12, pp.1213-1228（1986）。
- [8] L. A. Zadeh : The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty Quantification, Fuzzy Sets and Systems, Vol.11, pp.199-227（1983）。
- [9] B. Kosko : Fuzzy Entropy and Conditioning, Information Sciences, Vol.40, pp.165-174（1986）。
- [10] S. T. Wierzhon : An Algorithm for Identification of Fuzzy Measure, Fuzzy Sets and Systems, Vol.9, PP.69-78（1983）。
- [11] K. Ishii and M. Sugeno : A model of human

evaluation process using fuzzy measure, Int'l Jour. of Man-Machine Studies, Vol.22, pp.19-38 (1985).

- [12] K. Tanaka and M. Sugeno : A study on subjective evaluations of printed color images, Int'l Jour. of Approximate Reasoning, Vol.5, No.3, pp.213-222 (1991).

- [13] 森勉、室伏俊明：ファジィ測度・Choquet 積分を用いた評価モデルの解析、第5回ファジィシステムシンポジウム、pp.207-212 (1989).

- [14] 貞徳洋輝、長町三生、松原幸広、鬼沢武久：ファジィ積分・測度モデルと言葉を用いたヒューマン

エラー要因解析、人間工学、Vol.29, No.5, pp.289-297 (1993).

(1994年4月18日 受付)

(1994年8月29日 再受付)

〔問い合わせ先〕

〒191 東京都日野市富士町1

(株)富士電機総合研究所

情報システム研究所

後藤 賢治

☎：0425-85-1294

☎：0425-86-8016

E-mail : gotoh@fd013d03.fujidenki.co.jp

著者紹介

後藤 賢治 (ごとう けんじ)

(株)富士電機総合研究所 情報システム研究所

1982年3月武蔵工業大学大学院工学研究科修士過程修了。同年4月、富士電機(株)へ入社、富士ファコム制御(株)へ出向。1989年4月から技術研究組合国際ファジィ工学研究所へ出向。1992年4月より現在に至る。ファジィシステムに関する研究開発に従事。日本ファジィ学会、電気学会、日本神経回路網学会等会員。

伊藤 修 (いとう おさむ)

(株)富士電機総合研究所 情報システム研究所

1974年3月名古屋大学大学院理学研究科修士過程を修了。同年4月、富士電機(株)へ入社。1977年12月に富士ファコム制御(株)へ出向、1991年7月より現在に至る。主として、ファジィ制御の実用化研究を行い、ファジィコントローラやその支援技術の開発に従事。現在、同社研究マネージャー。昭和61年度榎本記念賞論文賞受賞(現システム制御情報学会)。博士(工学)。日本ファジィ学会、システム制御情報学会の会員。

鳥山 佳洋 (とりやま よしひろ)

(株)富士電機総合研究所 情報システム研究所

1992年3月徳島大学総合科学部総合科学科数理情報コース卒業。同年4月、富士電機(株)へ入社、(株)富士電機総合研究所へ出向。ファジィ適用技術の開発に従事。日本ファジィ学会会員。