診断用故障木による故障診断法[†]

穂坂 重孝*・高見 勲*

Fault Diagnosis Method Using Fault Tree for Diagnosis

Shigetaka HOSAKA* and Isao TAKAMI*

The fault diagnosis method using the fault trees for diagnosis is developed, which describe the relationships among the faults, causes and observations. In this method, the causes and their probabilities are estimated by the fault trees for diagnosis and the data of observations.

The probabilities of causes are calculated with the failure rate of them, and with Fussell-Vesely importance which is use in the Fault Tree Analysis. So, it is possible to diagnose objectively.

This method applied to the draining pump plant fault diagnosis system. In this system, the failed equipment is searched using the fault trees, which is constructed from designer's and maintenance man's knowledge, and the data of observations. To make the human operator understand the results easily, the system presents the estimated causes, the probabilities of the causes, and the process of diagnosis in the picture of display devices. Also, the fault trees, the system block diagrams, and the pictures of the component are shown on the CRT display devices. In the block diagram, the failed parts flicker to show the causes easily for the operator. Moreover, a maintenance guide is shown. In this paper, the diagnosis method and the feature of human interface of the system are described.

Key Words: fault diagnosis, fault tree, signal flow, probability, human interface

1. ま え が き

通常のプラントには警報監視システムが備えられ、プラントの状態をセンサを用いてモニタリングし、異常時には、自動あるいは手でプラントの全体、あるいは一部を停止させている。しかしながら、最近省人化や運転信頼性の向上のため、各種プラントでは警報監視システムの他に、故障診断システムの導入が望まれている。そこでは、プラントの構成要素の知識を収集し、整理して、あらかじめコンピュータに入力し、故障時にオペレータを支援し、迅速に復旧する方法がさかんに開発されている¹⁾。ところが、プラントの知識をいかに収集し、整理するか、どのように正しく利用するか、といった問題について、十分に答えが得られていない。

すなわち、if-then ルールを用いた診断エキスパートシステムでは、知識獲得の問題や結果の検証方法が問題である²⁾。また、物理モデルや信号モデルを用いた診断においては、モデルの同定が大変である³⁾。

そこで、著者らは、プラントの設計者とベテラン保守員の共同による知識、およびデータの作成と、既存の警報監視システムとの協調、および現場のオペレータの使いやすさを特徴とする診断法、すなわち、診断用故障木による故障診断法（以後、故障木ベース診断法と称す）を考案し、実際のプラントに適用し、良好な結果を得ているので報告する。なお、同様な論理演算子を用いて因果樹木を構成し、最下層の AND 論理ゲートで原因を同定し、上層部のゲートを登って影響を予測する実時間異常診断法が開発されているが^{8),9)}、本診断法はこれらに比べ、知識表現では本診断法が故障木解析に近く、プラント設計者と保守員の共同による知識の作成の容易さが特徴である。また、原因の探索法では、本診断法が警報をトリガとし、上層から下層へと探索するもので既存の警報監視システムとの協調、現場のオペレータの使いやすさが特徴である。ま

[†] 第4回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム (1988・11) および第31回自動制御連合講演会 (1988・10) で発表

* 三菱重工業(株)システム技術部 高砂市荒井町新浜 2-1-1 三菱重工高砂研究所駐在

* System Engineering Department, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Takasago
(Received January 16, 1990)
(Revised April 9, 1990)

た、仮説診断法、原因の確からしさの計算法が特徴である。

2. 診断用故障木

さて、信頼性解析手法である FTA (Fault Tree Analysis) では、システムの故障という“望ましくない事象”を頂上事象とし、その事象の原因となる事象を AND や OR などの理論ゲートを通じて展開して樹枝状の故障木 (Fault Tree) を作成し、これに基づいてシステムの信頼性の定性的あるいは定量的な解析を行い、システムの改善案を抽出する⁴⁾。

これに対して、診断用故障木とは **Fig. 1**、および **Fig. 2** に示すように“観測可能な望ましくない故障

事象の集りで、頂上の観測事象とともに、診断用故障木の頂上を構成する事象”を頂上事象とし、その事象の原因となる故障事象を観測事象 m_k の成立と AND や OR の論理ゲートを通じて原因を取り除ける交換部品、調整手段に関する故障事象 x_j まで展開したもので、樹枝木の木葉には観測事象、果実には故障確率が表現される。なお、Fig. 1, Fig. 2 において $\bar{m}_k$ は異常が観測されていること、 m_k は正常が観測されていることを意味する。故障木ベース診断法とはこの診断用故障木を基に、原因と原因の部位、および対応策を決定する診断法である。以下、特に断らない限り、故障木は診断用故障木を意味する。

Fig. 1 Example of OR logical fault tree for diagnosis

Fig. 2 Example of AND logical fault tree for diagnosis

3. 診断用故障木の作成方法

故障木ベース診断法は、抜けのない知識の収集と整理、入力に手間のかからない原因の探索、そして故障しやすい原因からの効率的な探索を特長としている。そこで、つぎの手順で診断用故障木を作成する。

- (1) 診断対象の特性、故障モード、入出力信号、観測信号をシグナルフロー線図に表現する。
- (2) つぎに、観測の容易な観測信号でまとめたシグナルフロー線図に再構成する (Fig. 3)。Fig. 3 において、出力信号 l を観測して得られた信号の意味づけが観測事象 m となる。
- (3) 故障確率が故障事象 (同定単位) ごとに集計する。
- (4) 故障確率が最も高い故障事象から先に探索されるように、故障木の上層から下層へと故障木を展開する。たとえば、故障確率 f_i が $f_3 + f_4 + f_5 > f_1 + f_2 > f_6 + f_7 + f_8 > f_0$, $f_5 > f_4 > f_3$ とすると、故障確率の高い故障事象 (x_3, x_4, x_5) が先に探索されるよう観測事象 m_2 , つぎに m_5 を上層に置く。そして、 $\bar{m}_5$ の下層では、 $f_5 > f_4$ であるから m_4 , $\bar{m}_4$, つぎに $\bar{m}_4$ の下層に m_3 , $\bar{m}_3$ を置く (Fig. 1)。

さらに、つぎの点を考慮して故障木を作成する。

- (a) 表示画面の見やすさから、一本の故障木の段数はたとえば 7 段を越えないように、診断対象の範囲を分割する。なお、7 段を越えてしまう場合は、途中で切って、その切った事象を一つの頂上事象として、別の故障木を作成する。
- (b) 頂上事象は原則として、プラント警報と一致させ、既存の警報監視システムとの接続を容易にする。

る。

(c) 原因の同定単位は、目的に合せて部品交換や調整手段の単位とする。また、原因の部位が同じであっても、故障モードにより対応策が異なれば別の同定単位とする。

(d) 前述した観測の容易な観測信号とは、自動入力できるもの、あるいは監視盤などの表示ランプやメータから容易にオペレータが入手できる観測事象をいう。

なお、Fig. 3 から Fig. 1 を得るルールは (4) で述べたが、さらに Fig. 3 と Fig. 1 の対応の例を示す。Fig. 3 の観測事象 m_8 には、 l_5 を介して $x_0 \sim x_5$ が、 l_8 を介して $x_0 \sim x_8$ の故障事象の信号が伝搬される。一方、Fig. 1 の $\bar{m}_8$, すなわち観測事象 m_8 が異常であることは、 $x_0 \sim x_8$ の故障事象のいずれかが原因であることを示している。

4. 故障木ベース診断法⁶⁾

故障木ベース診断法における原因の探索について、Fig. 2 を例に述べる。なお、「観測事象 m_k が成立」「 $\bar{m}_k$ が不成立」とは m_k が正常であること、「 m_k が不成立」「 $\bar{m}_k$ が成立」とは m_k が異常であること、「 m_k が不明」「 $\bar{m}_k$ が不明」とは m_k が正常か、異常か不明であることを意味する。

- (1) プラント警報より、頂上の観測事象 $\bar{m}_F$ が成立 (m_F が異常), m_E が成立 (m_E が正常) したとする。
- (2) つぎに、観測事象 $\bar{m}_B$ を評価し、 $\bar{m}_B$ が成立 (m_B が異常) であれば、さらに下層へと原因を探索する。

in: input, t_i : transmittance of element i , x_i : fault of element i , l_i : output signal of element i , m_i : measurement signal of element i

Fig. 3 Example of signal flow for fault tree of Fig. 1

(3) 観測事象 $\bar{m}_B$ が不成立 (m_B が正常) ならば, 下層への探索は打ち切る.

(4) 上層の中間の故障事象 x_A , x_B または観測事象 m_A が不明の場合はその下層の故障事象 x_A や x_B の成立も不明とする.

(5) 観測事象 $\bar{m}_B$ が不明で, 観測事象 $\bar{m}_D$ が成立 (m_D が異常) のときは, 成立した中間の故障事象 x_C , x_D のほうから先に探索する.

(6) 観測事象 $\bar{m}_B$ および $\bar{m}_D$ の両方とも不明のときは, それぞれの下層にあるすべての故障事象の故障確率の和, すなわち, $f_A + f_B$ と $f_C + f_D$ を比べ, 大きいほうから優先して探索する.

(7) 原因が一つも探索できないとき, 観測事象の一つに観測の誤り, あるいは観測事象の入力の誤りがあったものとして, ある観測事象を一つだけ反転させ (成立ならば不成立, 不成立ならば成立に), 故障確率の最も高い故障事象が原因となる順に, いわゆる仮説診断を行う.

(8) 診断はプラント警報が発生して確認したときからはじまり, 少なくとも一つの観測事象の成立または不成立が入力されるタイミングで, オペレータの判断で繰り返し診断を実行する.

(9) 不明な観測事象とは, 未観測または観測したが成否の判定がつかない場合を意味する.

(10) 観測事象の確からしさを扱うかどうかによって, 原因の確からしさの計算法として, 後述する三値論理法と固定確信度法を観測のあいまいさの存在を目安に診断対象に応じて使い分ける.

4.1 故障木と診断法の数理

さて, ここで, シグナルフロー線図と診断用故障木における観測事象と故障事象の数理を明らかにしておく.

Fig. 3 に示すシグナルフロー線図では, 観測事象 m_k ($k=0\sim 8$) は

$$m_k = \prod_{i=0}^k t_i \cdot \text{in} + \sum_{j=0}^{k-1} \prod_{i=j+1}^k t_i x_j + x_k \quad (1)$$

と表現できる. ただし, t_i はシステム構成要素 i のトランスミッタンス, in はシステムへの入力, x_j はシステム構成要素 i の故障事象を示す. なお, シグナルフロー線図上では, m_k , x_j はアナログ値を示す.

さて, 観測事象 m_8 は

$$m_8 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 + x_8 \quad (2)$$

ただし, $a_0 \sim a_7$ は in および t_i で表現される係数. ここで,

$$\left. \begin{array}{l} j \text{ 番目の故障事象が生成していないとき, } x_j = 0 \\ j \text{ 番目の故障事象が生成しているとき, } x_j = 1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

と再定義するとき,

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_2 = \dots = x_8 = 0 \text{ のとき, すなわち, } \\ \sum x_j = 0 \text{ のとき, } m_8 = a_0 \\ x_j \text{ の一つでも零でないとき, すなわち, } \\ \sum x_j \neq 0 \text{ のとき, } m_8 \neq a_0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

である. さらに,

$$\left. \begin{array}{l} j \text{ 番目の観測事象が成立していないとき, } \\ m_j = 0, \bar{m}_j = 1 \\ j \text{ 番目の観測事象が成立しているとき, } \\ m_j = 1, \bar{m}_j = 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

と再定義するとき, $a_0 = 1$ において

$$\left. \begin{array}{l} m_8 = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_8) \\ \bar{m}_8 = 1 - m_8 = (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_8) \end{array} \right\} \quad (6)$$

と表わすことができる. すなわち, 故障事象 x_j と頂上の観測事象 m_k との関係は, FTA という構造関数で表現することができる. すなわち, すべて OR 論理ゲートからなる診断用故障木は,

$$\left. \begin{array}{l} \bar{m}_k = \prod_{j=0}^k (1 - x_j) \\ m_k = 1 - \bar{m}_k = 1 - \prod_{j=0}^k (1 - x_j) \end{array} \right\} \quad (7)$$

と表現できる.

また, AND 論理ゲートを含む Fig. 4 のシグナルフロー線図では, 観測事象 m_F は,

$$m_F = \{ (t_A \cdot \text{in}_A + x_A) t_B + x_B \} t_{E1} + \{ (t_C \cdot \text{in}_C + x_C) t_D + x_D \} t_{E2} \} t_F + x_E \quad (8)$$

と表現される. ここで,

$$\left. \begin{array}{l} m_F = a_0 + a_A x_A + a_B x_B + a_C x_C + a_D x_D + a_E \\ x_E \text{ とおくと, } x_A = x_B = x_C = x_D = x_E = 0 \\ \text{のとき, } m_F = a_0 \\ \text{少なくとも } x_A, x_B \text{ のいずれか一つ零でな} \\ \text{く, かつ } x_C, x_D \text{ のいずれか一つ零でな} \\ \text{く, または } x_E \neq 0 \text{ のとき, } m_F = a_0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

したがって, (3), (5)式を用いて, $a_0 = 1$ において, 観測事象 m_F は

$$\left. \begin{array}{l} m_F = 1 - [1 - \{1 - (1 - x_A)(1 - x_B)\} \\ \{1 - (1 - x_C)(1 - x_D)\}](1 - x_E) \\ \bar{m}_F = 1 - m_F \end{array} \right\} \quad (10)$$

と表現できる.

また, Fig. 2 の故障木において,

$$\left. \begin{array}{l} \bar{m}_F = \bar{m}_E + m_E = \bar{m}_B m_D + m_E = (\bar{m}_A \\ + m_A)(\bar{m}_C + m_C) + m_E \\ = [1 - \{1 - (1 - x_A)(1 - x_B)\} \\ \{1 - (1 - x_C)(1 - x_D)\}](1 - x_E) \\ m_F = 1 - \bar{m}_F \end{array} \right\} \quad (11)$$

Fig. 4 Example of signal flow for fault tree of Fig. 2

を容易に導くことができる。

以上の考察から、OR 論理ゲートからなる故障木を例に、故障事象 x_j が一つに絞られるための条件を説明する。定義から、

$$\left. \begin{aligned} x_j &= 1 \\ x_0 &= \dots = x_{j-1} = x_{j+1} = \dots = x_k = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

したがって、シグナルフロー線図では(1)式より、

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= t_0 \cdot \text{in} \\ &\vdots \\ m_{j-1} &= \prod_{i=0}^{j-1} t_i \cdot \text{in} \\ m_j &= \prod_{i=0}^j t_i \cdot \text{in} + x_j \\ m_{j+1} &= \prod_{i=0}^{j+1} t_i \cdot \text{in} + t_{j+1} x_j \\ &\vdots \\ m_k &= \prod_{i=0}^k t_i \cdot \text{in} + \prod_{i=j+1}^k t_i x_j \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

故障木の構造関数表現では、(7)式より

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= \dots = m_{j-1} = 0 \\ m_j &= \dots = m_k = 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となる。ここで、(14)式は、 m_0 から m_{j-1} までが成立(正常)で、 m_j から m_k までが不成立(異常)を意味し、これが故障事象 x_j が生起するための必要条件である。

なお、 x_j が一つに絞られるための必要かつ十分条件は(13)式が成り立つことである。故障木ベース診断法は、(14)式を用いるので、2重故障に対しては、信号の伝達の上流の故障が先に探索される。しかしながら、後述するように迅速に原因を取り除く保守を行う

ことによって、再診断で二つ目の故障も探索される。

4.2 三値論理法による原因の確からしさの計算

ここでいう三値論理法ではプラントの確からしさは、成立、不成立、不明の3値をとる。そして、診断の結果、原因が一つに絞るとき、その原因の確からしさは1.0とする。もし、原因候補が複数ある場合、故障確率を正規化して原因の確からしさを計算する。すなわち、

(1) OR 論理の場合、要素 i の原因の確からしさ $c(x_i)$ は、

$$c(x_i) = f_i / \sum_j f_j \quad (15)$$

とする。ただし、要素 j も原因候補の一つである。

(2) AND 論理の場合、たとえば Fig. 2 において、 m_E が成立、 m_C が不成立、 m_B が不明で、その結果 x_A , x_B , x_C が原因候補となった場合、要素 A , B , C , D , E の原因の確からしさ $c(x_A)$, $c(x_B)$, $c(x_C)$, $c(x_D)$, $c(x_E)$ は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} c(x_A) &= \frac{f_A(f_C + f_D)}{(f_A + f_B)(f_C + f_D)} = \frac{f_A}{f_A + f_B} \\ c(x_B) &= \frac{f_B}{f_A + f_B} \\ c(x_C) &= 1.0, \quad c(x_D) = 0.0, \quad c(x_E) = 0.0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

とする。これらのアルゴリズムは故障木解析での Fussell-Vesely の重要度¹⁰⁾の考え方を診断に拡張したものである。

4.3 固定確信度法による原因の確からしさの計算

ここでいう固定確信度法では観測の確からしさを

0～1の値で与える。ユーザが任意に与えることも可能であるが、入力容易さを考慮し、ここでは、成立は1.0、成立に近い0.8、不成立に近い0.2、不成立は0.0の固定値をあらかじめ与える。

観測事象が不明であっても、その観測事象の一つ上層の事象が AND 論理の場合は、その観測の確からしさを1.0とし、OR 論理の場合は故障確率の比で与え、原因探索を続ける。Fig. 2 の例で説明する。

$\bar{m}_B$ が不明、すなわち観測事象 m_B が異常であることが不明で $\bar{m}_B$ の上層の事象が AND 論理であるから、確からしさ $c(\bar{m}_B)$ は1.0で与える。

m_A が不明の場合は m_A の上層の事象が OR 論理であるから、確からしさ $c(m_A)$ は $f_A/(f_A+f_B)$ で与える。

また、原因の確からしさは、その原因に至るまでの観測のうち、最下層の観測事象ともう一つの観測事象の確からしさの積で与える。なお、このもう一つの観測事象は、最下層が m_i であれば原因に至るまでの探索ルートを進んで最初に現れる $\bar{m}_j$ とする。というのは、(14)式で示したように、原因となった故障事象の上流の観測事象は正常で、下流の観測事象が異常となり、この二つの観測事象の確からしさで原因の確からしさが決まると考えられるからである。また、最下位が $\bar{m}_i$ であれば同様な m_j であるとする。なお、もう一つの観測事象がないときは、最下層の観測事象だけで決まる。というのは、Fig. 2 の x_A のように最下層の観測事象 $\bar{m}_A$ だけで原因として同定できる場合は、 $\bar{m}_A$ を逆登っても $\bar{m}_B$ 、 $\bar{m}_E$ 、 $\bar{m}_F$ が現れるだけで、これらは x_A の原因の同定には直接影響しないので確からしさの計算には利用しないという考え方である。

以上を、Fig. 2 の例で説明する。

m_A が不明、 $\bar{m}_B$ が不明、 $\bar{m}_C$ がやや成立、 $\bar{m}_D$ 、 m_E が成立の場合、

$$\left. \begin{aligned} c(\bar{m}_A) &= \frac{f_A}{f_A+f_B}, & c(m_A) &= \frac{f_B}{f_A+f_B} \\ c(m_B) &= 1.0 \\ c(\bar{m}_D) &= 1.0, & c(\bar{m}_C) &= 0.8, \\ c(m_C) &= 0.2, & c(\bar{m}_E) &= 0.0, & c(m_E) &= 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

したがって、

$$\left. \begin{aligned} c(x_A) &= c(\bar{m}_A) = \frac{f_A}{f_A+f_B}, \\ c(x_B) &= c(m_A)c(\bar{m}_B) = \frac{f_B}{f_A+f_B} \\ c(x_C) &= c(\bar{m}_C) = 0.8, \\ c(x_D) &= c(m_C)c(\bar{m}_D) = 0.2 \times 1.0 = 0.2 \\ c(x_E) &= c(\bar{m}_E) = 0.0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

となる。なお、 $c(x_C)$ および $c(x_B)$ は三値論理法の場合と一致する。

5. 雨水排水ポンププラントへの適用

5.1 故障診断システムの構築

台風や大雨の緊急時に確実に作動することが要求される排水ポンププラントは主ポンプ、駆動用ディーゼルエンジン、減速機、発電設備および各種補機からなり、万一の故障発生時には原因を明らかにし、迅速に復旧する必要がある。そのため、従来の監視システムに加え、オペレータを支援する故障診断システムに、本診断法を適用した。Fig. 5 に示すように本システムは、操作、表示における良好なヒューマンインタフェースを実現すること、およびコストパフォーマンスの両方を考え、高解像度の CRT を備えたパーソナルコンピュータを利用した。なお、構築したシステムで扱える故障診断の規模は、故障木に表現された観測事象および故障事象の総数で8,000個程度のものである。

5.2 ヒューマンインタフェースと実行例⁷⁾

診断システムの良し悪しは知識やデータの良さにあ

Fig. 5 Hardware configuration

るばかりでなく、使う人にとって使いやすいものでなくては、人間の能力を引き出して良い診断を行うことはできない。本診断法は使う人に良好なヒューマンインタフェースを提供することができるものである。

(1) 診断経過の可視化

Photo. 1(a)(b)の例で説明する。

Photo. 1(a)の下段は、システムがプラントの自動観測の入力データと、過去の故障の事前確率から、直ちに初期の診断を実行し、その結果、確からしさ35%で「潤滑水ポンプ本体の異常」あるいは「井戸ポンプ本体の異常」が原因であることを示している。Photo. 1(b)は系統図画面で、確からしさの高い二つの原因の部位、すなわち「潤滑水ポンプ本体」と「井戸ポンプ」が黄色に変化し、同時にフリッカして、オペレータに注意を喚起している。

以上の表示画面によって、オペレータの会話入力時のインプットミスの早期発見や、オペレータの考えた診断との相違点を確認することができ、より精度の高い診断にすることが可能である。

(2) 使いやすい会話型操作

メニューの選択、観測事象の答え、表示画面の切換

えはすべてマウスによって操作する。

Photo. 1(a)の上段は、「潤滑水の電磁弁は開状態ですか」「清水槽水位は水位低下レベル以上ですか」などの観測事象の問合せに対し、成立(Yes)、不成立(No)を入力する画面である。なお、自動入力される観測事象は色分け表示されており、通常、オペレータには修正ができないことを示している。

(3) わかりやすい診断結果の表示

Photo. 2(a)は、会話入力されたデータが直ちに診断に使われ、真の原因は「潤滑水ポンプ本体の異常」と断定されたことを示す。系統図表示画面では黄色であった「潤滑水ポンプ」が赤色に変わりフリッカする。なお、Photo. 2(a)において、原因候補が5個示されている。これは「断定」を80%以上の確からしさと定義し、一つの原因候補を断定しているが、他の四つにもわずかに確からしさが残されている。そして、残されたレベル2の8個の観測事象に成立／不成立が入力されると100%の確からしさに近づくしくみとなっている。Photo. 2(b)の故障箇所表示画面には、表示時間は1秒以下で故障箇所をテレビフォトにて赤い丸枠でわかりやすく表示され十分緊急時の使用に耐えることができる。また、同画面には、運転継続の方法や

(a) Initial diagnosis results by using auto observative data

(b) System diagram picture

Photo. 1 Visualization of fault tree based diagnosis process

(a) Picture of diagnosis results

(b) Picture of display for trouble parts

Photo. 2 Display for diagnosis results

修理の方法などをスーパーインポーズで表示し、画面下のメニューを選択して、印刷やページめくりができ、迅速な対応を可能とする。なお、例として示した診断でのオペレータの操作時間を除いたコンピュータの処理時間は表示も含めてトータルで5秒程度である。

5.3 評価

① プラントの故障診断に大切な診断知識を収集し、整理するのに、診断用故障木は非常に有効であることがわかった。

② 観測事象のあいまいさ、原因の成立のあいまいさの扱いにおいて、三値論理法と同定確信法の使い分けは、診断対象に取付けられたセンサの性能によるというよりも、故障対象の診断に使う知識、その表現法および人への提示方法に依存し、それらが適確であればあるほど三値論理法を用いるのがよいとの知見を得た。この知見により二つの確信度計算を使い分けられる。故障木ベース診断法は診断結果の客観性ととともに、人間の経験的診断に近いことがわかった。

③ 使いやすさを考えたヒューマンインタフェースにおいて、故障木表示による診断経過の可視化や全体の中での診断の進み具合、人間と人間の共通のコミュニケーションの場の提供などに有効であることがわかった。

また、以下に示すものが課題として抽出できた。

(a) 故障の伝播途中で故障診断を行う場合に必要な故障の時間的経過を表現した診断用故障木の作成法と診断法の拡張

(b) 故障予知システムや保守部品管理システムとの連携

(c) プラントの経年変化や新たな故障事象の発生のための診断知識やデータの獲得法の確立

(a)については、故障の進展に応じた故障木の用意と故障木間の渡りや、むだ時間を扱える CCT 診断⁸⁾が考えられる。(b)については、予知による故障確率データの変更や、保守時間や予備品やコストを考慮した診断が考えられる。(c)については、故障事例からの知識の自動編集や学習的、経験的知識の生成などが考えられる。

6. あとがき

プラントの設計者とベテラン保守員の共同による知識およびデータの作成と、既存の警報監視システムとの協調、および現場のオペレータの使いやすさを特徴

とする診断法として、診断用故障木による故障診断法を提案した。まず、診断用故障木に診断用知識を表現する方法を示し、診断用故障木の作成方法を明らかにした。ついで診断用故障木による診断法を検討し、原因の検索や仮説診断アルゴリズム、故障木と診断法の数理を示し、原因が絞られる条件を明らかにした。そして、診断における原因の確からしさの計算法として、観測事象にあいまいさを扱わない三値論理法とあいまいさを扱う固定確信度法を示した。

本診断法を雨水排水ポンププラントの事例に適用し、診断システムを実現した。雨水排水ポンププラントのように構成要素の故障モードや過去のデータなどが備っているプラントにおいて、診断知識を整理するのに診断用故障木は非常に有効であること、故障木ベース診断法はあいまいさの扱いにおいて人間の経験的診断に近いこと、また故障木表示による診断の可視化など、使いやすいヒューマンインタフェースを得られることが確認できた。

本診断法はさらに、故障の時間的伝播の遅れを考慮した診断法への拡張や、故障予知システムとの連携、新たな故障事象の発生に対応した診断知識の獲得法の確立に対して、柔軟に対応できる可能性がある。

また、故障診断という問題解決に当って、人間と人間の共通のコミュニケーションの場を提供できたことは成果の一つであった。

参考文献

- 1) 船越，新家：化学プラント向け汎用運転支援システム PDIAS，三菱重工技報，26-5，381/385 (1989)
- 2) 佐田登志夫：設備診断技術，ターボ機械，13-3，7/12 (1985)
- 3) 秋月影雄：設備診断技術と安全，計測と制御，24-4，301/306 (1985)
- 4) 清水，佐野：設備信頼性工学，49/58，海文堂 (1987)
- 5) E. Henley and H. Kumamoto: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc. (1981)
- 6) 石井，ほか：故障木ベース故障診断手法，第31回自動制御連合講演前刷，409/410 (1988)
- 7) 穂坂，高見，清水，石井，米井，貝間：故障木ベース故障診断システム，第4回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム資料，245/250 (1988)
- 8) A.B. Long, et al.: On-Line Power Plant Alarm and Disturbance Analysis System, EPRI NP-1379 (1980)
- 9) 荻野，ほか：プラント事象データベースを用いた診断法の開発，第8回システムシンポジウム講演論文集，385/390 (1982)
- 10) J. B. Fussell: How to Hand-Calculate System Reliability and Safety Characteristics, IEEE Trans. Reliability, R-24-3, 169/174 (1975)