

故障診断技術における最適化

穂坂 重孝, 高見 勲

1. はじめに

設計者や保守員の知識にもとづいて故障を診断する知識ベース故障診断における最適化について述べる。ここで言う最適化とは、与えられた知識ベースから効率よく診断を行なうための原因や観測事象や因果関係の確からしさの扱い、観測事象の入力の順序制御を言う。以下に診断用故障木ベース診断法と診断マトリックスベース診断法における最適化について述べる。

診断用故障木は、設計者の知識を中心に故障や原因や観測事象の関係を表現したものである。故障木ベース診断法は、観測事象と診断用故障木から原因が探索され、原因の確からしさは、その故障率と故障木解析で使用される Fussell-Vesely の重要度から計算される[1]。

また、工学システムであっても現象論的にシステムを理解する必要のある診断対象に対しては、ベテラン保守員の経験的知識が有効である。原因診断マトリックス CDM(Cause Diagnosis Matrix)はこれらの知識を表現するのに適している。診断マトリックスベース診断では Bayes法をもとに「原因と観測事象の因果関係」を条件付確率で与え、原因部位の故障率を因果関係の事前確率とし、人間の主観的判断により「観測事象の成立の確率」を与え、原因の確からしさを計算する。また、因果関係の「無知」を扱う方法、複数 CDM間の確からしさの継承法、観測事象の間合せの順序制御法が提案されている[2][3]。

2. 故障木ベース診断法[1]

2.1 診断用故障木とは

診断用故障木とは、図1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頂上を構成する事象を

ほさか しげたか、たかみ いさお
三菱重工業㈱ 高砂研究所
〒676 高砂市荒井町新浜 2-1-1

頂上とし、その事象の原因となる故障事象を観測事象 m_x の成立と AND や OR の論理ゲートを通じて故障事象 x 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。そして、次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。(図2参照) ②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。③故障確率を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。

2.2 故障木ベース診断法

原因の探索について、図1を例に述べる。

- (1) ブラント警報より、頂上の \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) 次に, \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。
- (3) \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 x_A, x_B または m_A の成立が不明の場合はその下層の x_A や x_B の成立も不明とする。
- (5) \bar{m}_B が不明で, m_D が成立のときは, 成立した中間の x_C, x_D の方から先に探索する。

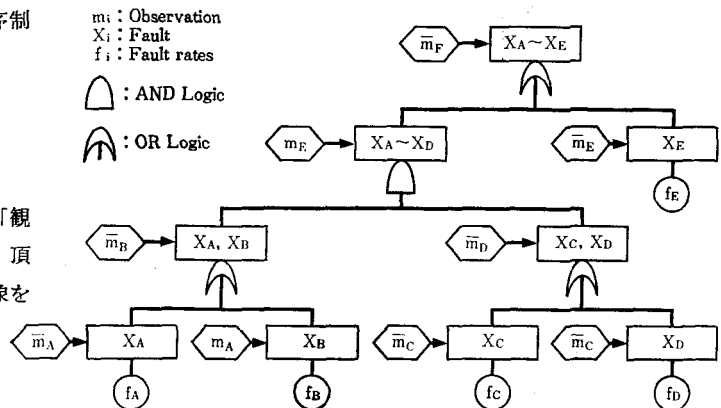


図1 診断用故障木の例

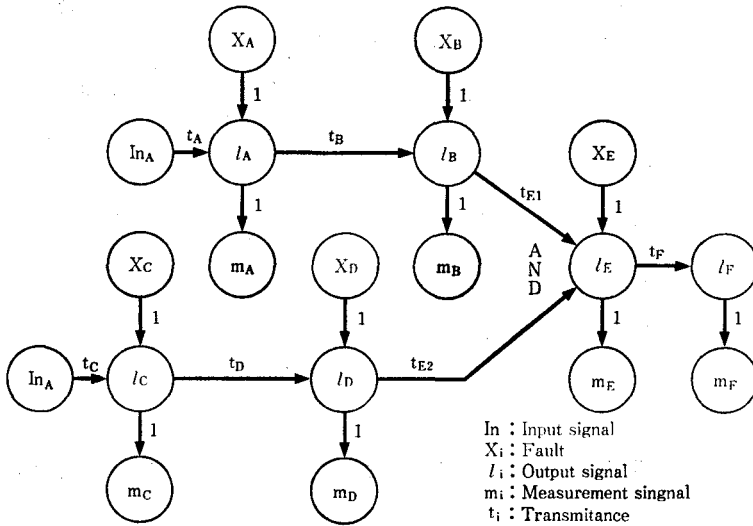


図2 図1の故障木のシグナルフロー線図の例

(6) \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、大きい方から優先して探索する。

(7) 原因が1つも探索できないとき、ある観測事象を1つだけ反転させ故障確率の最も高い故障事象が原因となる順に診断を行なう。

(8) 診断は少なくとも1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) 原因の確からしさを計算する。

(11) 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、迅速に原因を取除く保守を行なうことによって、再診断で2つ目の故障も探索される。

2.3 観測と原因の確からしさ

まず、観測の確からしさについて述べる。観測の確からしさを0～1の値で与える。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とする。観測事象が不明であっても、その観測事象の1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。図1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。

次に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1つの観測事象の確からしさの積で与える。なお、このもう1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かきおぼしてはじめに現われる m_j とする。

なお、もう1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、図1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 をさかのぼっても \bar{m}_B 、 \bar{m}_E 、 \bar{m}_F が現われるだけで、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。 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、

$$c(\bar{m}_A) = \frac{f_A}{f_A+f_B}, \quad c(m_A) = \frac{f_B}{f_A+f_B}$$

$$c(m_B) = 1.0, \quad c(\bar{m}_D) = 1.0,$$

$$c(\bar{m}_C) = 0.8, \quad c(m_C) = 0.2,$$

$$c(\bar{m}_E) = 0.0, \quad c(m_E) = 1.0$$

したがって、原因の確からしさは、

$$c(x_A) = c(\bar{m}_A) = \frac{f_A}{f_A+f_B},$$

$$c(x_B) = c(m_A) \cdot c(m_B) = \frac{f_B}{f_A+f_B} \cdot 1.0$$

$$c(x_C) = c(\bar{m}_C) = 0.8,$$

$$c(x_D) = c(m_C) \cdot c(\bar{m}_D) = 0.2 \times 1.0 = 0.2,$$

$$c(x_E) = c(\bar{m}_E) = 0.0$$

2.4 診断システムの構築

図3は、観測データと、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。図4の故障木表示画面では、診断の状況を一目で見ることができる。すなわち画面中央下の原因へと故障木の枝が太い線で色分けされ、診断の途中経過がわかる。

3. 診断マトリックスベース診断法[2][3]

3.1 CDMとは

図5に示すCDMにおいて A_j は原因, B_i は互いに独立な観測事象, C_k は原因部位である. C_k は保守の交換単位であり, 1つ以上の原因を要素に持つ. r_{ij} は A_j と B_i 間の因果関係の成立の確率を示す. A_j によって当該部位が単一故障を起こしていると仮定したときに, B_i が成立する確率を0から1の間の値で r_{ij} に与える.

3.2 CDMベース診断法

診断は, センサあるいは人間によって入力される観測事象の成立の確率 $p(B_i)$ と r_{ij} によって原因 A_j の確からしさを求め, 0であれば直ちにその原因はすべてのCDMから消去される. CDMで $p(B_i)$ の入力が終わるまで入力毎に繰り返し診断を行なう.

3.3 原因の確からしさ

ある B_i に対してすべての r_{ij} が存在する場合(「無知」を含まない), まず原因毎の部位の故障確率を正規化して事前確率 $p(A_j)$ とする. r_{ij} は, 「原因 A_j が生じた時に観測事象 B_i が観測される条件付確率 $p(B_i|A_j)$ 」と定義する. $p(A_j)$ や r_{ij} は既知の故障デー

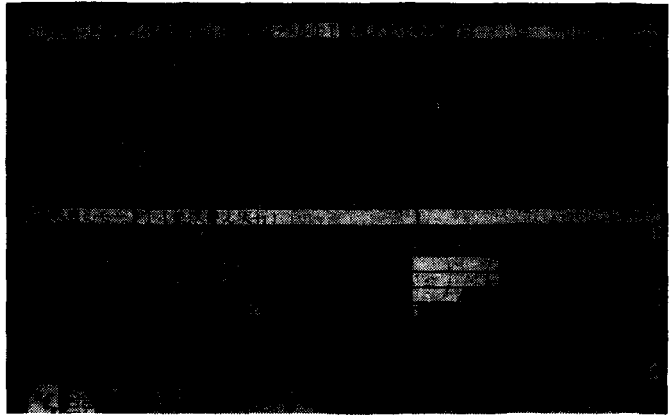


図3 故障木による診断画面例

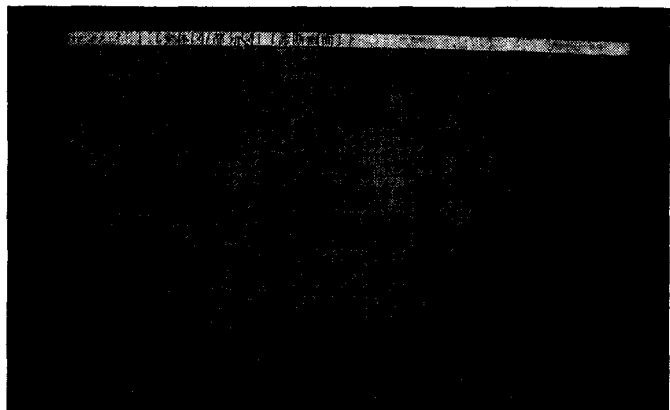


図4 故障木表示画面例

Causes Certainty Factor (initial value)	C _k	C ₁		C ₂		C ₃																						
	A _j	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆																					
CDMs at the fault occurrence	C(A)	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2																					
	CDM1	A ₁	A ₂	A ₃	*																							
	B ₁	1.0	0.9	0.2																								
	B ₂	0.9	0.0	0.8																								
B ₃	0.5	0.5	0.0																									
CDMs at inputing the pesudo-fault signal	CDM2	A ₁	A ₂	A ₄	A ₅	A ₆	*																					
	B ₄	0.4	1.0	★	1.0	0.8																						
	B ₅	0.0	0.0	0.7	★	1.0																						
CDMs at inputing the pesudo-fault signal after changing the new parts	CDM3	A ₁	A ₂	*	CDM3	A ₁	A ₃	A ₄	*																			
	B ₆	0.3	0.8		B ₈	0.8	0.6	0.4																				
	B ₇	1.0	0.6		B ₉	★	★	0.8																				
Certainty Factor (halfway value)	A _j	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆																					
CDMs at exchanging the new parts	C(A)	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0																					
	CDM4	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	<table border="1"> <tr> <td>CDM4</td> <td>A₃</td> <td>A₅</td> <td>A₆</td> </tr> <tr> <td>B₁₄</td> <td>0.7</td> <td>0.2</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>B₁₅</td> <td>★</td> <td>0.8</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>B₁₆</td> <td>0.3</td> <td>★</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>B₁₇</td> <td>0.9</td> <td>★</td> <td>0.8</td> </tr> </table>			CDM4	A ₃	A ₅	A ₆	B ₁₄	0.7	0.2	1.0	B ₁₅	★	0.8	0.3	B ₁₆	0.3	★	0.7	B ₁₇	0.9	★	0.8
	CDM4	A ₃	A ₅	A ₆																								
	B ₁₄	0.7	0.2	1.0																								
	B ₁₅	★	0.8	0.3																								
	B ₁₆	0.3	★	0.7																								
	B ₁₇	0.9	★	0.8																								
B ₁₀	0.8	0.1	1.0	0.8																								
B ₁₁	0.9	0.9	0.2	0.7																								
B ₁₂	0.2	0.9	0.8	0.8																								
B ₁₃	1.0	0.1	0.9	0.2																								

* : Undefined CDM
★ : Unknown relation

図5 4つのステージのCDMの例

タから事前に与える。観測事象 $X_1 \dots X_{m1}$ が入力された場合、原因の確からしさは、事後確率 ($[0, 1]$ の値) を正規化した値で与え、観測事象が入力される毎に逐次的に次式で計算する。

$$\frac{p(A_j | X_1 \dots X_{m1})}{\sum_{j=1}^n \{p(A_j) \prod_{i=1}^{m1} p(X_i | A_j)\}} \quad (3.1)$$

ただし、 $X_i = B_i$ (成立)
or \bar{B}_i (不成立)
 $p(\bar{B}_i | A_j) = 1 - r_{ij}$
 $p(B_i | A_j) = r_{ij}$

次に、ある B_i に対して少なくとも1つの「無知」の因果関係が存在するCDMの原因の確からしさの計算の場合も(3.1)式を用いる。ただし、「無知」の r_{ij} の設定については3つの方法が考えられる。

方法1は、すべての因果関係が定義された因果関係とした場合から計算された原因の確からしさと、当該 B_i と「無知」の A_j がCDMに元々ないきの原因の確からしさとが同じ値になるように「無知」の r_{ij} を扱う方法である。しかし、この方法は観測事象の入力の順序が変わると、たとえ同じ観測結果であっても、「無知」の r_{ij} の値が変化する欠点がある。

方法2は、原因 A_i の事前確率を用いる方法である。「無知」の r_{ij} は B_i が観測される事前確率と等しくする。これは「無知」とはCDM作成時に、「 A_i と B_i が独立し、条件付き確率は定義できない」とするものである。

方法3は、「無知」の r_{ij} に0.5を与える方法である。この場合、観測の順序の問題や例外処理の必要はない。

以下に方法2の計算式を示す。因果関係を有する A_i と当該 B_i の $r_{ii} (= p(X_i | A_i))$ を、 A_i の事前確率 $p(A_i)$ で重み付けした平均値を「無知」の $r_{ij} (= [*])$ に与える。すなわち、次式で与える。

$$* = \frac{\sum_{A_i \in S} p(A_i) \cdot p(X_i | A_i)}{1 - \sum_{A_i \notin S} p(A_i)}$$

この式は、 A_j と B_i は独立とみなし、「無知」の r_{ij} は B_i が観測される事前確率と等しいとするものである。

3.4 観測事象の不確実性

たとえば、「ホイスト停止中W1表示器の針がふらついている」といった観測事象の成立/不成立を、人間の主観的判断で答えるとき0から1までの値を使った答を許

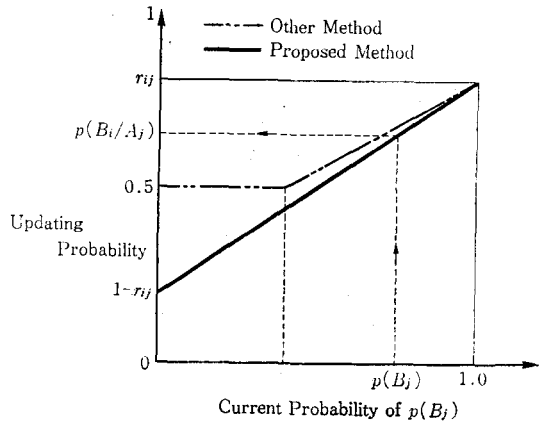


図6 r_{ij} の更新

容する。そして、ここでは B_i の成立が $[0, 1]$ の主観的に確率 $p(B_i)$ で与えられるものとする。次にこの $p(B_i)$ を原因の確からしさの計算に用いる。原因 A_j が生じたとき $p(B_i)$ が1.0すなわち観測事象が成立する条件付き確率として定義した r_{ij} が0.0のときは $(1 - r_{ij})$ を図6に示すように観測事象の成立の確率 $p(B_i)$ が0から1の間では $(1 - r_{ij})$ と r_{ij} の間を線形内挿した値に更新する。

3.5 確からしさの継承法

CDMの作成の容易さ、診断の処理の高速化を考慮して、複数のCDMを扱う。そこで、CDM間の原因の確からしさを継承する計算方法を考案した。すべての原因とすべての観測事象からなる大きなマリリックスを仮想的に考えると、個々のCDMはその部分マトリックスになる。本継承法では、CDMが定義されていない部分は、CDMが定義されている部分の計算に影響を与えないとの考えにもとづいている。

3.6 例題計算

(1) 図5のCDM1の開始時、 A_j の確からしさ $c(A_j)$ の初期値として事前確率 $p(A_j)$ を正規化した値、 $c(A_1) = 0.1$, $c(A_2) = 0.2$, $c(A_3) = 0.1$, $c(A_4) = 0.3$, $c(A_5) = 0.1$, $c(A_6) = 0.2$ を与える。

(2) CDM1においてたとえば、 B_1, B_2, B_3 が100%の確率で成立すると、原因 A_j の確からしさ $p(A_j | B_1 B_2 B_3)$ は、

$$\frac{p(A_1 | B_1 B_2 B_3)}{0.1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 0.5 + 0.2 \cdot 0.9 \cdot 0.5 + 0.1 \cdot 0.2 \cdot 0.8 \cdot 0} = 1.0$$

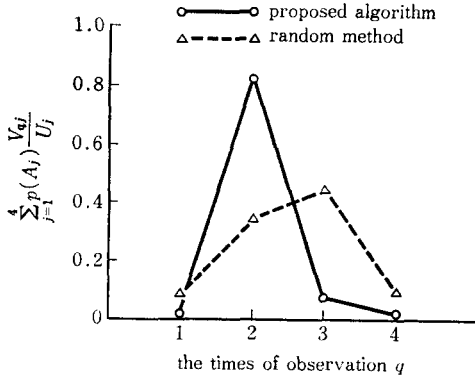


図7 ランダム法と提案法の比較

$$p(A_2|B_1B_2B_3)=0,$$

$$p(A_3|B_1B_2B_3)=0$$

CDM1のなかでも $\sum p(A_j|X_1 \cdots X_i)$ が1.0に保たれている。

(3) そして、CDM1の終了後、確からしさ $c(A_j)$ ($j=1 \cdots 6$) $\rightarrow p(A_j|B_1B_2B_3)$ を戻すとき $\sum p(A_j)$ 倍(ただし、 $A_j \in \text{CDM1}$)し、次式を得る。

$$c(A_1)=1 \cdot (0.1+0.2+0.1)=0.4$$

$$c(A_2)=0 \cdot (0.1+0.2+0.1)=0$$

$$c(A_3)=0 \cdot (0.1+0.2+0.1)=0$$

$$c(A_4)=0.3, c(A_5)=0.1, c(A_6)=0.2$$

これによって $c(A_4)$, $c(A_5)$, $c(A_6)$ は変化せず、結果は、はじめに $c(A_2)$ と $c(A_3)$ に与えられていた値が $c(A_1)$ に加算されている。 $\sum c(A_j)$ は1.0に保たれている。そして、その値は、CDM2の診断の初期値となる。

(4) CDM2において B_3 が100%の確率で成立すると A_1 の確からしきは、 r_{44} が「無知」なので次のように計算される。

$$r_{44} = \frac{0.4 \cdot 0.4 + 0.0 \cdot 1.0 + 0.1 \cdot 1.0 + 0.2 \cdot 0.8}{1 - 0.3} = 0.6$$

したがって、 A_1 の確からしきは、次式となる。

$$p(A_1|B_4) = \frac{0.4 \cdot 0.4}{0.4 \cdot 0.4 + 0 \cdot 1.0 + 0.3 \cdot 0.6 + 0.1 \cdot 1.0 + 0.2 \cdot 0.8} = 0.27$$

$$p(A_2|B_4)=0, p(A_4|B_4)=0.3$$

$$p(A_5|B_4)=0.17, p(A_6|B_4)=0.27$$

3.7 問合せの順序制御法

保守単位を原因部位 C_k とし、 C_k に属する原因の確からしきの総和を C_k の確からしきと見なす。この C_k の値が高く、かつ C_k に属する原因と因果関係の成立の事前

確率が0.5から遠い値をもつ観測事象ほど優先して成否をオペレータに問合せる。これは、疑わしい原因部位ほど早く同定される可能性が高くなるアルゴリズムである。この評価として原因 A_j の確からしさが最終の確からしき $p(A_j|X_1 \cdots X_n)$ の80%を越えるまでの問合せ回数 q の期待値 $E(q)$ の大きさを次式で評価した。

$$E(q) = \sum_{q=1}^m q \left[\sum_{j=1}^n p(A_j) \frac{V_{qj}}{U_j} \right]$$

ここで、 m は問合せの最大回数、 n は原因候補の数、 $p(A_j)$ は原因 A_j の事前確率、 U_j は真の原因が A_j であるとき問合せ順序の組合せ順列の数、 V_{qj} は U_j のうち q 回の問合せで A_j が最終の確からしきの80%を初めて越える問合せ順列の数である。図5のCDM4を用いて本方法と問合せの順序をランダムに行なう方法について q を計算した結果、本アルゴリズムの方が少ない問合せであることがわかる。(図7参照)

3.8 診断システムの構築

以下に、診断の例を説明する。「過負荷発生」トリガ信号をオペレータが確認すると、問合せの順序制御によって順序づけられた観測事象の入力画面が現われ、成立、やや成立、不明、やや不成立、未観測から1つを入力すると、診断が実行される。その結果、図8に示すように3つの原因(Ref, LCC, C10)が21%、5つの原因(PISL, C1, C80, PPHC, C90)が5%の確からしさを示した。また、すべての原因が否定された場合、仮説診断によって、成立の確率が反転された観測事象を確認しつつ、診断の結果を得ることができる。

4. おわりに

以上についてまとめる。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。②故障木ベース診断法は診断結果の客観性ととも、人間の経験的診断に近い。③複数のCDMを点検手順に合わせて作成することは、ベテラン保守員の診断知識を柔軟に表現できる。④Bayes法の診断方法で問題となっていた「無知」の扱いを実現し、CDM表現の制約を減らした。⑤観測事象の成立の確率と因果関係の成立の確率を用いて原因の確からしきの計算法は簡便で実用的なものである。

なお、筆者らは故障木やCDMの自動生成についても研究を進めている[4][5]。以上、故障診断における1つの最適化について述べた。

CDM診断											
[CDM選択] [系統図表示] [診断法] [並べ換え] [操作手順] [再表示]											
原因	PPF1.Ref.+5			LCC.C10		PISL.C1.C2		C80.PPHC.C90		14	
	PPF1	Ref	+5	LCC	C10	PISL	C1	C2	C80	PPHC	C90
観測	(%)			21	21	5	5	5	5	5	
3:発生時操作盤のアナログ計が振れたか	不明	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
4:発生時操作盤のアナログ計が振れたか	YES	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5:WRの総加重記録に7kg以上の変動記録在りか	yes	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6:操作盤のWFIDは振れたか	NO	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
1:ホイストは、燃料を吊っていたか	no	○	○	詳細説明							
2:発生位置のホイスト高さば着底位置付近か	no	○	○	発生位置のホイスト高さは着底位置付近か							

図 8 CDMによる診断画面例

参 考 文 献

- [1] 穂坂, 高見: 診断用故障木による故障診断法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No.8, 878/885, 1990.
- [2] 石井, 穂坂, 笠岡, 高見: 現場対応型診断システムのCDM診断法, 第32回自動制御連合講演会予稿集, 1989.
- [3] 穂坂, 高見, 石井, 笠岡: 現場対応型故障診断シ

ステム, 第5回ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集, 135/140, 1989.

- [4] 石井, 穂坂, 笠岡: FMEAを利用した故障診断知識獲得ツール, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム予稿集, 1991.
- [5] 穂坂, 清水, 林: 極限作業用ロボットのヘルスケア技術の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.4, 427/436 (1991)