動特性の定性的推論による故障診断の試み

正 員 土 井 淳 (三菱電機)

正 員 坂 口 敏 明 (三菱電機)

1. はじめに

故障診断は機器や設備、システムなどの監視制御において不可欠な技術の一つである。監視制御では、時間と共に変化する状態から異常の発生を検知し、故障や事故を回避するための対応処置を決定しなければならない。対応処置の決定にあたっては状態の把握、すなわち異常原因の同定（故障検知）、その波及状態の推定および今後の状態推移の予測を必要とし、故障診断によってこれらの機能が実現できる。

故障検知を計算機に代替させるには、大別して次の二つの方法が考えられる。

(1) システムを状態方程式でモデル化し、カルマンフィルタなどを用いた状態推定による方法⁽¹⁾。

(2) CCT (Cause-Consequence Tree) や知識ベースシステムによる方法^{(2)~(7)}。

システムの一部を対象にした診断機能の実現には、前者は幾つかの成果をあげている。しかしながら、システムの全体にわたる診断機能（例えば、発電所などの中央制御室で必要とされるような診断機能）の実現には、規模や非線形性の問題からその適用は難しい。従って、もっとも後者の適用が検討されている。本論文において検討する方法も後者に位置する。

また、故障検知における人間のメンタルモデルとして、次の四つの戦略があるとされている⁽⁸⁾。

- (i) Pattern Recognition
- (ii) Decision Table Search
- (iii) Hypothesis and Test
- (iv) Topographic Search

(i) および (ii) は、あらかじめ準備した故障状態の因果データと実システムでの事象のパターンマッチングによる方法で、故障の原因と現象との因果関係をル

ール化した知識ベースシステムによって、その診断機能を実現できる^{(5)~(7)}。これに対して、システムの構造と各構成要素の特性を忠実にモデル化（装置の機能に対する理解）し、異常あるいは正常であればシステムはこう機能するはずであるというシステムの挙動のシミュレーションによる方法が (iii) あるいは (iv) で、大規模系では故障およびその波及のシナリオをすべて網羅した知識ベースの作成が大変といった (i) および (ii) の欠点を補う方法として注目されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾。本論文においても、この方法〔上記 (iii)〕による診断機能の実現を試みる。

連続系のシミュレーションでは、そのモデルを微分方程式で表し、数値計算によって解くことが一般的である。しかしながら、その利用によって診断機能を実現することは、次のような理由から難しい。

(1) シミュレーションの起動において、すべてのパラメータ値（故障の程度、測定不能な変数など）の正確な把握が難しい。

(2) 数値計算の結果（応答波形）からシステムの挙動のメカニズムを知ることの自動化が難しい。

一方、システム内の信号、エネルギー、マスのフローに着目して、その機能的な構造をグラフや論理、プロダクションルールなどでモデル化し、そのモデルによって異常の因果関係を把握することで、装置の機能に対する理解に基づいた診断機能の実現⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾が試みられている。しかしながら、この方法ではシステムの動特性の把握において重要となる時間の推移に伴った状態変化が表しにくい。

最近、システムの挙動のメカニズムを理解するための理論的枠組みを提供するものとして、定性的推論⁽⁹⁾の発展が、AI (Artificial Intelligence) の関係者の間で注目されている。グラフや論理などによる今までのモデル化との決定的な違いは、微分の概念をもっている点にある。この結果、状態変化の時間推移を簡単に表すことができる。本論文では、文献(9)でその理論

Fault Diagnosis Using Qualitative Reasonings about Dynamic Behavior. By Atsushi Doi, Member & Toshiaki Sakaguchi, Member (Mitsubishi Electric Corporation).

土井 淳: 正員, 三菱電機(株)中央研究所
坂口敏明: 正員, 三菱電機(株)中央研究所

の基礎が示されている定性的推論の考え (Kuiper 氏らの方法に近い) に基づいてシステムをモデル化し (第2章), その定性モデルに従った仮説の生成とその検証による診断機能 (上記 (ii)) の実現方法を提案する (第3章)。更に, 原子力プラントの例によって, その現実の問題への適用の可能性を示す (第4章)。

2. システムの定性モデル

定性的推論では, システムの諸変数の変化は, その値の量的詳細は無視して, ある見方からシステムの挙動が同質である区間を一つにした値 (定性値) の遷移によってとらえる。システムは, そのような定性値と増減状態 (微係数の符号) の対をもつ諸変数と, 通常の定量的な微分方程式を基にした四則関係や微分方程式などの諸変数間相互の定性的関係のモデルによって表現する。更に, 必要に応じてシステムを構成する諸装置の動作状態, 故障状態のモデルを追加する。以下に, 本論文で使うシステムの定性モデルの枠組みについて述べる。必要に応じて, 図1について例示する。

〈2.1〉 状態のモデル システムの諸変数の状態についての表現モデルである。各変数は, 以下のような「属性-値」の対によって表現される。各時点でのシステムの状況はこの状態のモデルの全集合によって決まる。

- (i) Var=変数名
- (ii) Time=状態 (Val, Der) が変化した時点
- (iii) Val=定性的な値 (詳細は〈2.2〉節に)
- (iv) Der=導関数 (時間について) の値: 変数の微係数の符号によって決まる増減状態 (inc (増加), dec (減少), std (定常))

例えば, 図1に示す例ではその諸変数は $\{Q_i, Q_o, q, H\}$ で, それらの表示の一例を以下に示す。

- (Var= Q_i , Time=2, Val=o, Der=std)
- (Var= Q_o , Time=2, Val=+, Der=dec)
- (Var= q , Time=2, Val=-, Der=inc)
- (Var= H , Time=2, Val=-, Der=dec)

〈2.2〉 定性値 ある見方によって同じ性質をも

図1 断面積一定の円筒状水槽のモデル

Fig. 1. Cylindrical tank model.

つ範囲の値を同一視し, これによって連続領域から有限個の離散的な値の集合に量子化を行った各変数の値である。その最も基本的なものとしては, 変数値 (変化分) の符号によって分割された原点 (o) および正 (+), 負 (-) である。この基本的分割による定性値の集合は, $\{(+), (o), (-)\}$ となる。更に, システムの挙動を左右する幾つかの値で正, 負の領域を細分したい場合には, その分割点とその区間のすべてによって定性値の集合が構成される。例えば, ある変数の値に応じて制御装置の起動, 停止が行われる場合には, その値によって分割することが, また制御系の出力に上下限值がある場合にも, その値によって分割することが考えられる。

このような定性値には, 原点のように分割点となる境界と正負のように分割区間となる領域との二種類がある。定性値間の遷移は, 境界からは瞬間に生じる。一方, 領域からの遷移には時区間が必要である。

定性値の集合 (例えば, $\{(+), (o), (-)\}$) は, 以下のような「属性-値」の対によって表現する。

- (i) Lo =下の定性値 (例えば, (o))
- (ii) Hi =上の定性値 (例えば, $(+)$)
- (iii) Tu =上方への遷移の形: Lo の定性値が境界か領域かによって決まる (例えば, 境界)
- (iv) Td =下方への遷移の形: Hi の定性値が境界か領域かによって決まる (例えば, 領域)

〈2.3〉 特性のモデル 図1(c)に示したような各変数の対応関係を表現したモデルである。変数間の相互関係は, 四則, 微分などによって決まる。二変数間の関係は, 以下のような「属性-値」の対によって表現される。

- (i) Left=入力側の変数名
- (ii) Right=出力側の変数名
- (iii) Sign=入力から出力への伝搬の係数 (+1 (正), または -1 (負))
- (iv) Rel=二変数間の関係: alge (四則関係), diff (微分方程式)。

例えば, 図1(c)の関係は次のように表される。

- (Left= H , Right= Q_o , Sign=+1, Rel=alge)
- (Left= Q_i , Right= q , Sign=+1, Rel=alge)
- (Left= Q_o , Right= q , Sign=-1, Rel=alge)
- (Left= q , Right= H , Sign=+1, Rel=diff)

〈2.4〉 装置のモデル システムを構成する各装置の動作状態を表現したモデルである。各装置の動作状態は, 以下のような「属性-値」の対によって表現される。

表 1 定性的計算の規則

Table 1. Rules of qualitative calculation.

(a) たし算 ($x+y \rightarrow z$)

$x \backslash y$	dec (-)	std (o)	inc (+)
dec (-)	dec (-)	dec (-)	inc (+)
std (o)	dec (-)	std (o)	inc (+)
inc (+)	inc (+)	inc (+)	inc (+)

(b) ひき算 ($y+z \rightarrow x$)

$x \backslash y$	dec (-)	std (o)	inc (+)
dec (-)	dec (-)	dec (-)	dec (-)
std (o)	inc (+)	std (o)	dec (-)
inc (+)	inc (+)	inc (+)	dec (-)

(c) かけ算 ($kx \rightarrow y$)

$k \backslash x$	dec (-)	std (o)	inc (+)
+1	dec (-)	std (o)	inc (+)
-1	inc (+)	std (o)	dec (-)

(d) 微分 ($kx \rightarrow y$)

$k \backslash x$	-	o	+
+1	dec	std	inc
-1	inc	std	dec

注 1) x, y, z は増減状態 [増加 (inc), 減少 (dec), 定常 (std)], または定性値 [原点 (o), 正 (+), 負 (-)] を表示。

2) k は係数 [正 (+1), 負 (-1)] を表示。

(i) Dev=装置名

(ii) Time=状態が変化した時点

(iii) State=動作状態: open (開), closed (閉) など

〈2.5〉 故障のモデル システムを構成する各装置の故障状態を表現したモデルである。各装置の故障状態は、以下のような「属性-値」の対によって表現される。

(i) Dev=故障した装置名

(ii) Var=この装置 (故障した) から計測される変数

(iii) Der=その変数の故障時の変化 (増減状態)

例えば、図 1 に示す例において、後に必要となる二、三の故障状態を以下に表す。

(Dev=水 槽, Var= H , Der=dec)

(Dev=流入弁, Var= Q_i , Der=dec)

(Dev=流出弁, Var= Q_o , Der=inc)

〈2.6〉 計算の規則 変数間の状態の決定においては、四則、微分などに関する定性的計算が必要になる。必要な計算の規則を表 1 に示す。

3. 定性的推論による故障検知

システムの定性モデルを用いて、以下の手続きで故障を検知する。

(1) 異常はシステムのキー変数の監視によって検

知し、その振舞は時系列状に把握されているものとする。異常を検知した場合は、その時点で各変数の状態を把握する。

(2) 異常を検知した点から逆シミュレーション (時間の後退による) を行い、その異常原因 (故障箇所) の候補を推定する。

(3) その故障の波及をシミュレーションする。

(4) シミュレーション結果と (1) 項で把握した状態との比較によって、その故障の可能性を決定する。(2) 項に戻る。

以下に、図 1 に示す断面積が一定の円筒状水槽を例にして、上記 (1)~(4) の各項について詳述する。

〈3.1〉 異常の検知 図 1 の例題では、水槽の水位 H をキー変数に、異常はその低下した状態によって検知し、そのときのほかの変数は基準値にあるとする。すべての変数で、その定性値は [o] (基準値, 原点) によって分割した [(+) (高, 正), (o), (-) (低, 負)] に選んだ。

〈3.2〉 異常原因の推定 次に、異常を検知した状態からその異常原因の候補を推定し、故障の仮説を生成する。異常を検知した時点 T を 0 にして故障箇所の推定のプロセスを図 2 に示す。図 2 (a) の各行は記号 $\Leftarrow$ の左に「結論 $\Leftarrow$ 条件」を、右にその根拠を示す。例えば、①行は「時点 ($T=0$) で水位 (H) が低 ((-)) ならば、0 以前 (-1) で水位は基準値 ((o)) に、その増減状態は減少 (dec) 状態であった」ことを導いている。次に、水位の減少から同時点での「②-水槽に異常」または「③-流入出力偏差 (q) が負 ((-))」を導いている。ここで、「水槽に異常」はシミュレーションによって検証し、異常原因の可能性があるか否

- ① $T=0$, 水位 (H) が (-) に低下。 $\Leftarrow$ 異常の検知
- ② $T < 0$ ($= -1$), $H = [o, dec] \Leftarrow T=0, H = [-]$. $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ③ 水槽に異常 $\Leftarrow H = [dec]$. $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ④ 表 1 の (i) によって原因ではない。 $\Leftarrow$ 図 1 の (3) 式
- ⑤ $T=-1, q = [-] \Leftarrow T=-1, H = [dec]$. $\Leftarrow$ 図 1 の (2) 式
- ⑥ $T=-2, Q_i = [dec] \Leftarrow T=-2, q = [dec]$. $\Leftarrow$ 図 1 の (2) 式
- ⑦ $T=-2, Q_o = [inc] \Leftarrow T=-2, q = [dec]$. $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ⑧ 流入弁に異常 $\Leftarrow Q_i = [dec]$. $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ⑨ 表 1 の (ii) によって原因ではない。 $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ⑩ 流出弁に異常 $\Leftarrow Q_o = [inc]$. $\Leftarrow$ 故障のモデル
- ⑪ 表 1 の (iii) によって原因の可能性 $\Leftarrow$ 図 1 の (1) 式
- ⑫ $T=-2, H = [inc] \Leftarrow T=-2, Q_o = [inc]$. $\Leftarrow$ 図 1 の (1) 式
- ⑬ 現在に至るまで H が上昇したことはない。

(a) 異常原因の推定

(b) 状態の遷移図

図 2 故障点の推定プロセス

Fig. 2. Process of fault-finding.

かを決定する。同様にして以後の推定が進む。

このような異常原因の推定機能を実現するには、以下の規則が必要となる。

(1) 故障点 推定した変数の導関数の値(増減状態)が、ある装置の故障のモデル(〈2・5〉節)に一致したならば、その装置が故障点の候補となる(仮説の生成)。この規則によって、図2の②および⑦、⑧の状態が推定された。

(2) 状態の因果関係 特性のモデル(定性的関係式)において、その変数の導関数の値が既知な出力側変数からその関係(Rel)に応じて、同時点での入力側変数の値(Val)または導関数の値(Der)は、次のような規則によって推定される。

(a) 微分方程式(diff)においては、その出力側変数の導関数の値がinc(dec)ならば、入力側変数の値は正(負)である。

(b) 四則関係(alge)においては、その出力側変数の導関数の値がinc(dec)ならば、入力側変数の導関数の値はinc(dec)である(係数(Sign)が-1ならば反転する)。

(c) 入力側変数が常時監視していたキー変数ならば、上で推定した状態は、監視によるその時系列データと照合される。

図2の(3)の状態は規則(a)によって、(5)および(6)、(9)の状態は規則(b)によって推定された。また、推定された(9)の状態は、規則(c)によってチェックし、この状態遷移は否定された。

(3) 時間の後退 現時点で、ある変数の値が正(負)ならば、前の時点でのその値は原点で、その導関数の値はinc(dec)である。この規則によって、図2の①および④の状態が推定された。

〈3・3〉故障波及のシミュレーション 生成した仮説を検証するには、その故障を初期じょう乱に与えたシステムの挙動をシミュレーションすることが必要となる。システムの定性モデルによるシミュレーションは、二種類の操作(伝搬、予測)によって実行される。その詳細を以下に、使用例を〈3・4〉節に示す。

(1) 伝搬の規則 特性のモデル[図1(c)および〈2・3〉節の例示]に従った状態の伝搬によって、各時点での変数の導関数の値(増減状態)を決定する規則である。これには〈2・6〉節に述べた計算の規則が利用される。各規則を以下に説明する。

(a) 装置の特性 各装置の動作がどの変数にどのように作用するかを表現した規則である。例えば、

(i) ある弁の状態が開(閉)になれば、そのマス・フローの増減状態はinc(dec)になる。

図3 状態の伝搬

Fig. 3. Propagation rules.

(ii) ある変数の値が上下限值であれば、その増減状態はstdになる。

(b) 微分方程式 特性のモデルにおいて、その関係(Rel)が微分方程式(diff)である場合の伝搬の規則である。表1の計算の規則(d)に従って、出力側(Right)変数の増減状態が決定される。

(c) 前向き連鎖 特性のモデルにおいて、その関係(Rel)が四則関係(alge)である場合の伝搬の規則である。図3(a)に示す1対1の場合には表1の計算の規則(c)に従って、2対1の場合には計算の規則(a)に従って(当然、計算の規則(ii)も必要)前向きに、出力側(Right)変数の増減状態が決定される。

(d) 後向き連鎖 上記(c)項と同じ場合の伝搬の規則である。図3(b)に示す1対1の場合には、表1の計算の規則(c)に従って、2対1の場合には計算の規則(b)に従って(当然、計算の規則(c)も必要)後向きに、入力側(Left)の変数の増減状態が決定される。

(e) 不定の場合 表1の計算規則(a),(b)の空欄の部分に対する伝搬の規則である。この場合には可能なすべてについて試みる。

(2) 予測の規則 各時点での変数の値および装置の状態の変化を予測する規則である。変数の値および装置の状態の各々に関し、その規則を以下に説明する。

(a) 変数の値 変数の値に関する基本規則は次の三つである(〈3・4〉節の最後に詳しく例示する)。

(i) 前の時点で導関数の値がinc(dec)ならば、その変数の値はその上(下)の定性値に変わる(値の遷移)可能性がある。

(ii) 値の遷移が可能な幾つかの変数において、前の時点での値が境界を示す定性値であった変数の遷移が、領域を示す定性値であった変数より常に先に生じる。これは〈2・2〉節にも述べたように、前時点で境界を表す定性値であった変数からの遷移は瞬間に生じるのに対して、領域を表す定性値であった変数からの遷移には時区間が必要なためである。

(iii) 値の遷移は、特性モデルに表した諸変数間相

互の四則関係を拘束条件として、その関係を満たすことのできるものだけが生じる。

また、各制御系の出力となる変数に関して、例えばその値が上下限に対応した定性値になるには、弁が全開あるいは閉じていなければならないといった装置の動作状態に関する条件を、上記(i)の規則に追加する必要がある。

(b) 装置の状態 これは各装置の動作特性に関する表現である。規則の例を以下に示す。

(iv) ある制御系の入力となる変数が前の時点で inc (dec) で、その現在の値がある弁が全開(閉)となる定性値であれば、その弁の状態は開(閉)になる。

〈3・4〉 シミュレーションによる検証 前節に述べたシミュレーションを用いて、異常原因の仮説は、以下のように検証して、その可能性を決定する。

図1の例において〈3・2〉節(図2)で推定した水槽の異常に対しては、水位の減少($H=[dec]$)を初期じょう乱にして、表2(a)に示すようにシミュレーションできる。 $H=[dec]$ (この場合、常時 $Q_i=[o, std]$)から、この時点($T=0$)での諸変数の増減状態は、図1(c)の(1),(2)式から、前節(1)項の規則(c)によって $Q_0=[dec]$, $q=[inc]$ が決まる。この時点では諸変数の値はすべて[o]である。次に、 $T=1$ での諸変数の値を予測する。前の時点で Q_0 の値は[o]で、その増減状態は[dec]であったことから、前節(2)項の規則(a)によって Q_0 の値は[-]になる。同様に q は[+]に、 H は[-]になる。 $T=1$ での諸変数の増減状態は、まず $q=[+]$ と図1(c)の(3)式(微分の関係)から、前節(1)項の規則(b)によって $dH=[+]$ すなわち $H=[inc]$ となる。以下、 $T=0$ の場合と同じように Q_0 , q の増減状態が決まる。以上のようにして、水槽の異常によって出現可能な諸変数の状態のセット(パターン)がシミュレーションできる。本例では、前節(1)項の規則(b), (c)および前節(2)項の規則(a)だけを使い、ほかの規則は使用していない。

この場合、異常を検知した時点で把握した状態(水位だけが低下した状態)は導出されない。従って、水槽が故障箇所ではない。同様に、図2(a)の⑦, ⑧で推定した故障箇所に対しては、それぞれ表2の(b), (c)に示す。その結果、表2(c)の $T=3$ に異常を検知した時点で把握した水位低($H=[-]$)の状態(ほかの変数は基準値または原点にある)が導出された。これによって、流出弁の異常の可能性が検知される。

表 2 シミュレーションによる検証

Table 2. Verification of fault hypotheses.

(a) 水槽の異常によって $H=[dec]$ を仮定した場合

T	0	1	2
Q_i	o (std)	o (std)	o (std)
Q_0	o (dec)	-(inc)	o (std)
q	o (inc)	+(dec)	o (std)
H	o (dec)	-(inc)	o (std)

(b) 流入弁の異常によって $Q_i=[dec]$ を仮定した場合

T	0	1	2	3
Q_i	o (dec)	-(std)	-(std)	-(std)
Q_0	o (std)	o (dec)	-(dec)	-(std)
q	o (dec)	-(inc)	-(inc)	o (std)
H	o (std)	o (dec)	-(dec)	-(std)

(c) 流出弁の異常によって $Q_0=[inc]$ を仮定した場合

T	0	1	2	3
Q_i	o (std)	o (std)	o (std)	o (std)
Q_0	o (inc)	+(dec)	+(dec)	o (std)
q	o (dec)	-(inc)	-(inc)	o (std)
H	o (std)	o (dec)	-(dec)	-(std)

(注) 諸変数の定性値(V)と増減状態(D)を $V(D)$ の形式で表す。

最後に、前節(2)項の規則(a)の細則(i)~(iii)について例示する。表2(c)において、 $T=2$ の諸変数の状態は、この規則によって決定される。細則(i)によって Q_0 は[o]に、 q は[o]に、 H は[-]に移る可能性がある。しかしながら、細則(ii)によって[o](境界を示す)から[-]の遷移である H の遷移が先に生じて、 $T=2$ の状態が決まる。次の時点、 $T=3$ では、細則(a)によって Q_0 , q は[-]から[o]に移る可能性がある。この場合、ともに領域を示す値[-]からの遷移であるから細則(ii)は適合しない。状態が変化するとするならば、 Q_0 , q のどちらかが[o]になるか、ともに[o]になる三つの可能性がある。しかしながら、細則(iii)の適用によって特性のモデル[図1(c)の(2)式]に従い、 Q_0 , q はともに[o]となる(Q_i は常に[o])。

4. PWR 形原子力プラントへの適用例

PWR 形原子力プラントへの適用を試みた。以下に、適用したモデル、そのモデルの検証、提案した方法による診断例について述べる。

〈4・1〉 モデル PWR 形原子力プラントの二次系のマスバランスに着目したモデルを作成した。そのシステム構成を図4(a)に示す。この系の状態のモデルは、同図(c)に示す14個の変数によって表現した。すべての変数で、その定性値は{[+], [o], [-]}に選んだ。{[o]}は境界である。この系の特性のモデルは、図4(b)に示す12個の四則式と2個の微分

(a) システム構成

$P \leftarrow -M_t$
 $A \leftarrow -M_t$
 $P_c \leftarrow -M_t$
 $A_c \leftarrow -M_t$
 $F_{tu} \leftarrow P$
 $F_{sa} = [0, std] (P < P_1)$
 $F_{sa} \leftarrow P (P > P_1)$
 $F_{by} \leftarrow P - P_c$
 $F_o \leftarrow F_{sa} + F_{by} + F_{tu}$
 $F_i \leftarrow A_o - F_o$
 $f \leftarrow F_i - F_o$
 $f_c \leftarrow F_{by} + F_{tu} - F_i$
 $d M_t \leftarrow f$
 $d M_c \leftarrow f_c$

P - SG, steam pressure
 A - SG, water level
 P_c - SG, water level setpoint
 P_o - condenser, steam pressure
 A_c - condenser, water level
 F_{tu} - turbine, mass flow
 F_{sa} - safety valve, mass flow
 F_{by} - bypass valve, mass flow
 F_o - steam, mass flow
 F_i - feedwater, mass flow
 f - SG, mass flow deviation
 f_c - condenser, mass flow deviation
 M_t - SG, mass total
 M_c - condenser, mass total
 $\leftarrow$ 変数間の定性的な等号

(b) マスバランスに関する定性関係式 (c) 記号の説明

図 4 PWR モデル

Fig. 4. PWR model.

方程式から作成した。このモデルの適用範囲は、安全弁 (Safety valve) の動作しない領域に限定した (安全弁の動作は、エネルギーバランスに対し影響が大)。故障のモデルは、蒸気発生器 (SG)、復水器 (Condenser)、給水 (Feedwater)、タービン (Turbine)、バイパス (Bypass) の各系について作成した。

〈4.2〉モデルの検証 作成したマスバランスの定性モデルと数値計算モデル (エネルギーバランスも考慮した)⁽¹⁰⁾ について、給水ポンプ (Feedwater pump) の故障に対しその挙動を比較した。その結果、 F_i (Feedwater mass flow) の低下によって、SG では P (Steam pressure) が上昇し A (Water level) が低下すること、復水器ではその逆になることといった挙動の特徴を、定性モデルによってうまくシミュレーションできていることを確認した。

〈4.3〉診断の例 SG の A に注目して PWR 形原子力プラントの二次系のマスバランスを監視して、水位が低下した状態によって異常を検知した場合について診断を試みる。そのときの復水器の A_c は上昇し、 F_i は基準値方向に増えていた。以上の条件のもとで、図 5 に示すように異常原因を推定した。この図の (1), (2) は異常を検知した変数とその状態の入力である。故障点の候補は、〈3.2〉節 (1) の規則によって (5), (8), (9) および (11) に生成している。(3), (6) および (12) は〈3.2〉節 (3) の規則によって時間を後退し、(4), (7) は〈3.2〉節 (a) に、(10) は (c) に、その他は (b) によって、その状態の因果関係を導出している。

図 5 の (5), (8), (9) および (11) に生成した故障点

```

T = 0
> Alarming variable ? A (1)
> Value of A (+/-) ? - (2)
T = -1
A = [dec] <== A = [-] (3)
Mt = [dec] <== A = [dec] (4)
f = [-] <== Mt = [dec] (5)
< SG fault <== Mt = [dec] (6)
T = -2
f = [dec] <== f = [-] (7)
Fo = [inc] <== f = [dec] (8)
FbyFtu = [inc] <== Fo = [inc] (9)
Fby = [inc] <== FbyFtu = [inc] (10)
P = [inc] <== Fby = [inc] (11)
Mt = [dec] <== P = [inc] (12)
Pc = [dec] <== Fby = [inc] (13)
Mc = [inc] <== Pc = [dec] (14)
fc = [+ ] <== Mc = [inc] (15)
< BYPASS fault <== Fby = [inc] (16)
Ftu = [inc] <== FbyFtu = [inc] (17)
P = [inc] <== Ftu = [inc] (18)
< TURBINE fault <== Ftu = [inc] (19)
Fi = [dec] <== f = [dec] (20)
> A = [inc] <== Fi = [dec] (y/n) ? n (21)
Ao = [dec] <== Fi = [dec] (22)
< FEEDWATER fault <== Fi = [dec] (23)
T = -3
fc = [inc] <== fc = [+ ] (24)
FbyFtu = [inc] <== fc = [inc] (25)
Fi = [dec] <== fc = [inc] (26)
< No Satisfied Rules (27)
  
```

図 5 PWR モデルでの異常原因の推定結果

Fig. 5. Inference result of fault hypotheses (PWR model).

表 3 PWR モデルでのシミュレーション結果

Table 3. Qualitative simulation results (PWR model).

(a) 初期じょう乱に $M_t=[dec]$ の場合

T	0	1	2	3
f	o (inc)	+ (dec)	+ (dec)	o (std)
Mt	o (dec)	- (inc)	- (inc)	- (std)
fc	o (dec)	- (inc)	- (inc)	o (std)
Mtc	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (std)
A	o (dec)	- (inc)	- (inc)	- (std)
Ac	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (std)
Fi	o (inc)	+ (dec)	+ (dec)	+ (std)
Fo	o (inc)	+ (dec)	+ (dec)	+ (std)

(b) 初期じょう乱に $F_{by}(F_{tu})=[inc]$ の場合

T	0	1	2	3
f	o (dec)	- (inc)	- (inc)	o (std)
Mt	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (std)
fc	o (inc)	+ (dec)	+ (dec)	o (std)
Mtc	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (std)
A	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (std)
Ac	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (std)
Fi	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (std)
Fo	o (inc)	+ (dec)	+ (inc)	+ (std)

(c) 初期じょう乱に $F_i=[dec]$ の場合

T	0	1	2	3	4	5
f	o (dec)	- (inc)	- (inc)	- (inc)	- (inc)	o (std)
Mt	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (dec)	- (dec)	- (std)
fc	o (inc)	+ (dec)	+ (dec)	+ (dec)	+ (dec)	o (std)
Mtc	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (std)
A	o (std)	o (dec)	- (dec)	- (dec)	- (dec)	- (std)
Ac	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (std)
Fi	o (dec)	- (inc)	- (inc)	o (inc)	+ (inc)	+ (std)
Fo	o (std)	o (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (inc)	+ (std)

の候補は、各々を導出した状態を初期じょう乱に〈3.3〉節 (1), (2) 項にある規則に従って、マスバランスの

定性モデルの挙動をシミュレーションした。その結果を表3に示す。異常を検知した時点で把握した状態(SGの A は低下し、復水器の A_c は上昇し、 F_i は基準値方向に増えている状態)は、表3(c)に出現した。給水系での異常による F_i の減少(その後、制御系によって増える)が、この場合の異常の初期原因であると診断できた。

5. 終りに

システムの機能に対する理解に基づいた診断を、その定性的推論による仮説検証によって実現することを本論文で試み、基本的枠組みについて提案した。PWR形原子力プラントの例によって、その現実の問題への適用の可能性を示した。しかしながら、定性的推論の理論自体にまだ多くの課題が残っている。そのため、提案した基本的枠組みについても、ある機能、領域に着目した単純なモデルに対しては適用できるが、システムのすべての機能、領域を含んだ複雑なモデルを一括して扱うことは難しい。従って、本方式の適用に際しては、システムを機能別あるいは領域別にモデル化することに、更にどのモデルに着目するかといった選択の方策に工夫が必要である。

(昭和61年12月15日受付, 同62年2月21日再受付)

文 献

- (1) R. Isermann: "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods-A Survey", *Automatica*, **20**, 387 (1984)
- (2) W. Bastl & L. Felkel: "Disturbance Analysis Systems", in J. Rasmussen & W.B. Rouse (Eds.), *Human Detection and Diagnosis of System Failures*, p. 451 (1981) Plenum Press, New York
- (3) 小寺・武田: 「プラントモデルによる異常診断法」, 計測自動制御学会第1回知識工学シンポジウム, p. 107 (昭58)
- (4) 山田, 他: 「システムの機能に関する知識を用いた異常診断方式」, 同上, p. 111 (昭58)
- (5) 岡田・横林・溝口: 「知識工学による原子炉事故診断システムの開発」, 原子力学誌, **25**, 469 (昭58)
- (6) 土井, 他: 「運転マニュアルを知識ベースに用いた原子炉異常診断ガイドシステム」, 計測自動制御学会昭59年SICE関西支部シンポジウム, 計測・制御におけるマンマシンインタフェース講演論文集, p. 13
- (7) 土井・坂口: 「発電プラントの監視制御向き知識ベースとそれを用いた運転ガイドについて」, 電学論B, **106**, 25 (昭61-1)
- (8) J. Rasmussen: "Models of Mental Strategies in Process Plant Diagnosis", in J. Rasmussen & W.B. Rouse (Eds.), *Human Detection and Diagnosis of System Failures*, p. 241 (1981) Plenum Press, New York
- (9) D.G. Bobrow (Ed.): "Special Volume on Qualitative Reasoning about Physical Systems", *Artificial Intelligence*, **24**, (1-3) (1984)
- (10) K.S. Hojberg: "Power Plant Model for Display Experiments", Riso National Laboratory, N-24-82 (NKA/LIT-3.2 (82) 121) (1982)