

《解説》

システムの機能に関する知識を用いた 原子炉異常診断の試み

元田 浩*・山田直之*

1. 緒言

大規模プラントでは、安全運転を確保し、かつ稼働率を向上させるため、各種運転支援システムが開発されている。プラントの異常診断もそのひとつであり、あらかじめ想定した事象波及のシナリオに基づき原因を同定し、必要なガイドを提示する方法がよく知られている。原子炉の診断にもこの手法は使われており、その代表例がCCT¹⁾ (Cause-Consequence Tree) に基づく DAS²⁾ (Disturbance Analysis System) であり、実用段階の直前にある。この手法は、前もって重要な異常事象の波及シナリオを作成しているため非常に効率が良いが、すべての異常事象を想定し、抜けのないシナリオを作るのは容易ではない。そこで、異常原因は追究せず異常の徴候 (Sympton) から対応処置を決定する、徴候対応 (Sympton base) のガイダンスの考え方も組合せて採用されようとしている^{3), 4)}。

一方、最近、まだ研究段階であるが、知識工学をプラントの診断に応用した試みもいくつか見られる⁵⁾⁻¹³⁾。知識工学の特徴は、知識と推論を分離し、知識に基づく論理の組立てにより推論を行い問題解決を支援する機構を提供している点にあり、CCT のようにあらかじめ事象波及のシナリオをすべて記述する必要がなく、知識を断片的に記述すればよい。医学の病気の診断にこの方法が適用され効果が確認^{14), 15)}されて以後、工学の分野にも適用されつつある。

知識工学的手法をプラントの異常診断に適用することにより以下の利点が期待される。

- 1) プラント構成要素間を伝搬する複雑な異常事象は、各事象の連鎖として断片的に記述すればよい。

- 2) 知識ベースの中の知識を修正することにより、診断能力を容易に向上できる。
- 3) 診断結果に至る理由を説明できるため、説得力が強い。
- 4) 経験的な知識を問題解決に利用できる。

しかしながら、推論の過程は、断片的に記述されているとはいえ、原因、結果の因果関係に関する知識を組合せて結論を導く探索にすぎないため、準備した知識にない原因は同定できないという点では CCT と同じである。

これに対するもうひとつの知識工学的手法として、このような原因、結果に関する知識を記述するのではなく、対象システムの機能 (構造や挙動) を正しく記述し、これから直接、推論の過程で診断モデルを生成させようという試みがある¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。第2章で電気回路の故障診断を例にとりその基本的考え方を説明するが、新しい方向として注目されつつある。

両者の違いを別の観点から眺めると、診断をする場合、異常に関する知識を用いて現実の事象との一致度より診断する方法が前者の方法で、逆に、正常であればこう機能するはずであるという知識を用いて現実の事象との不一致度より診断する方法が後者の方法といえる。前者の方法は直接的であり経験的な知識も導入しやすいかわりに、知識の抜けをチェックするのが難しい。後者の方法は間接的であるが、一般には正常時の挙動を記述するほうが容易であり、かつ診断モデルが不要という利点がある。

本論文は後者の方法を用いた診断法に関するもので、とくにフィードバックループを有するダイナミック・システムに適用した点が計算機の故障診断との大きな違いである。

2. 基本的考え方

本章では、システムの機能に関する知識を用いた診

* (株)日立製作所エネルギー研究所

キーワード: 知識工学 (knowledge engineering), 推論 (inference), 導出原理 (resolution principle), 異常診断 (anomaly diagnosis), 原子炉 (nuclear reactor)

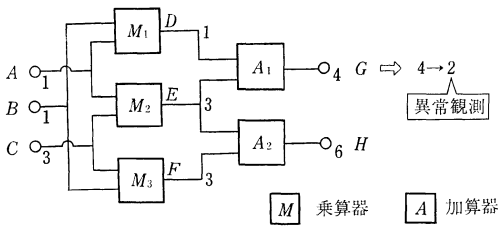


図1 電気回路の故障診断— $G=2$ の異常観測から故障原因を同定する—

断とは具体的にどのようなものであるかを、簡単な電気回路の診断例¹⁹⁾をとり説明する。図1は5個の要素(3個の乗算器と2個の加算器)からなる電気回路で、正常であれば、入力を $A=1, B=1, C=3$ とすれば、出力は $G=4, H=6$ となるはずである。今、一方の出力 G が2となって異常が観測されたとする。このとき、通常の電気回路の機能に関する知識のある人ならば、以下のように考えるであろう。

まず、故障原因は1つとし、かつ診断している間に故障の状況は変わらないと仮定し、つぎのように推論を進める。

- 1) G が異常であるから、 M_1, M_2, A_1 のいずれかが異常であるにちがいない。
- 2) 異常を1つと仮定したから、 M_3, A_2 は正常である。
- 3) H の観測値は正常であり、 M_3, A_2 も正常だから、 H の第1入力(M_2 の出力)も正常である。
- 4) したがって、 M_2 も正常であるから M_1 か A_1 のどちらかが異常である。
- 5) M_1 が異常だと仮定してみる。そうすれば、 M_1 の出力を $D=-1$ とすれば A_1 のほうは説明がつく。この仮定が正しいかどうかは、 M_1 の入出力を凍結し、 M_2 の出力 E を3から4に増加し、 G が2から3に変わるかどうかを見ればよい。
- 6) そのためには、 A, B はそのままにして、 C を3から4にすればよい。すなわち、 $A=1, B=1, C=4$ とするテストを実施し、出力が $G=3$ となるかどうか確認すればよい。 $G=3$ にならなかったら、5)の仮定が誤りで A_1 が故障の原因ということになる。

ここで、テストの結果 $G=5$ となったとする。この値は本来すべてが正常であれば G が示すべき値であるが、上記の推論により A_1 が故障と同定される。

以上の推論に用いた知識は、図1に記載されている回路の機能に関する知識のみであり、異常に関する原因とその波及効果に関する知識ではない。本論文で目的とする診断法は、ダイナミック・システムに対し、

その機能に関する知識から推論により上記のような診断を実施しようとするものである。

3. 問題の定義と対象システムの記述

解くべき問題は、「ある時刻に検知された観測信号の異常より、真の故障原因を同定すること」である。プラント診断の場合、観測可能なデータが多いこと、テスト発生の方法が制限されていることなど、第2章の例のようにはいかないが、基本的考えは採用できる。以下に対象システムを述語論理に基づき表現する方法²⁰⁾を構造と挙動の表現に分けて説明する。

3.1 構造の表現

システムの構造は、システムを構成する要素、要素間の接続関係ならびに各要素の状態を記述することにより規定される。

(1) 要素の指定

各要素はアトム(記号)で表現し、その種類を Type 記号で指定する。つぎの例は要素 A, B, C がそれぞれ検出器 (Sensor)、セレクトタ (Selector)、ポンプ (Pump) であることを示す。

(Type A Sensor)

(Type B Selector)

(Type C Pump)

(2) 要素間の接続関係の指定

各要素には、1個以上の入出力点があり、要素間のこれらの接続関係を Conn 記号で指定する。つぎの例は、ポンプ C の第1出力が検出器 A の第2入力に接続されていることを示す。

(Conn (output 1 C) (input 2 A))

(3) 要素の状態の指定

要素の中には状態を指定する必要があるものがある。たとえば、オン・オフ状態、観測可能性、冗長系などの指定である。つぎの例は、検出器 A の第1入力はオン状態 (on)、セレクトタ B の第1出力は観測可能 (Observable)、ポンプ C, D は冗長系を構成 (Redundant)、セレクトタ B の第1入力は切換可能 (Switchable) であることを示す。

(Value (input 1 A) on)

(Observable (value (output 1 B)))

(Redundant C D)

(Switchable (value (input 1 B)))

3.2 挙動の表現

システムの挙動は各要素の入出力関係を規則の形で記述することで規定される。これらは通常、動特性方程式として微分方程式で記述されるので階差化して記述する。

(1) 動特性の記述

ある要素の入力から出力を記述する表現を前向き挙動規則、その逆を後向き挙動規則と定義する。シミュレーションには前向き挙動規則しか必要ないが、推論には両者が必要となる。

a) 前向き挙動規則

具体例を2例示す。第1の例は検出器、第2の例は制御器(Controller)の挙動に関する知識表現である。OKはその要素が正常であることを、\$で始まる記号はそれが変数であることを、(Value A B)はAの値がBであることを、(True C D)はCが状況Dのもので成立することをそれぞれ示す。

第1の例は、検出器は2入力、1出力の要素で、第1入力は電源がオン状態にあることを、第2入力は測定量 m_i を示している。検出器は正常であれば、その出力 m_o はスケール・ファクタを m_r として $m_o = m_i/m_r$ となり、これが各時刻で成立する。

```
(if (Type $x Sensor)
  (if (and (OK $x)
    (Value (input 1 $x) on)
    (True (value (input 2 $x) $m_i) $t)
    (Value (rated $x) $m_r)
    (= $m_o (/ $m_i $m_r)))
    (True (value (output 1 $x) $m_o) $t)))
```

第2の例はもう少し複雑で、制御器は4入力、1出力の要素で、出力 m_o は6つの変数 $m_i, l_i, l_o, l_a, w_{f_i}, \omega_{m_i}$ を用い関数 f で規定されることを示している。とくに、入力変数 m_i は1ステップ前の時刻の制御器(自分自身)の出力であることを注意を要する。

```
(if (Type $x Controller)
  (if (and (OK $x)
    (True (value (input 2 $x) $l_i) $s)
    (True (value (input 3 $x) $w_{f_i}) $s)
    (True (value (input 4 $x) $w_{m_i}) $s)
    (True (value (output 1 $x) $m_i) $s)
    (Value (input 1 $x) $l_a)
    (= $t (+ $s 1))
    (True (value (input 2 $x) $l_o) $t)
    (= $m_o f($m_i $l_i $l_o $l_a $w_{f_i} $w_{m_i}))
    (True (value (output 1 $x) $m_o) $t)))
```

これらの表現で、どこで数値計算が必要となるかは、メタ知識で制御する。

b) 後向き挙動規則

つぎの規則は、上記、前向き挙動規則の第1の例に対応し、検出器の出力から逆に入力を推論する知識を表現している。

```
(if (Type $x Sensor)
  (if (and (OK $x)
    (True (value (output 1 $x) $m_o) $t)
    (Value (input 1 $x) on)
    (Value (rated $x) $m_r)
    (= $m_i (× $m_o $m_r)))
    (True (value (input 2 $x) $m_i) $t)))
```

(2) 要素間の接続関係の解釈

要素間の接続関係(3.1(2))を解釈する規則で、2つの入出力点が接続されていれば、それらの値は同じであるというものである。

a) 前向き接続規則

```
(if (and (Conn $x $y)
  (True (value $x $z) $t)
  (True (value $y $z) $t))
```

b) 後向き接続規則

```
(if (and (Conn $x $y)
  (True (value $y $z) $t)
  (True (value $x $z) $t))
```

4. 診断の手順

異常が検出された場所がそのまま異常原因であるとは限らない。異常の検出が遅れば、真の原因による異常が波及して、あちこちの検出器が異常を示していることも十分考えられる。とくに、プラントが非正常運転をしている場合には異常原因の同定は簡単でない。本論文に示す診断は下記の4ステップからなる。

4.1 期待値計算

診断はある検出器の信号が期待どおりではないと解釈された時点で開始される(第2章の例でGの値が期待値4ではないという徴候)。したがって、まず、異常を検知した検出器の信号が、本来、示すであろう値(期待値)を推定する必要がある。そのためには、ある初期状態からプラント動特性をシミュレーションする必要があるが、異常が起きる前の状態までさかのぼる必要はない。フィードバック・ループのあるダイナミック・システムにおいては、ある要素の出力がその要素の入力に影響を与える最大時間差 Δ の2倍の時間だけさかのぼれば、異常の効果はすべての要素を一度は伝搬する。入力が異常でも、その要素が正常であれば、その出力は予測できる。したがって、 2Δ 前の時刻からシミュレーションを開始すればよい。推論は2つのステップよりなる。

- (1) 時刻 $t-2\Delta$ の観測データより、同時刻の非観測データを推定
観測されたデータは検出器の出力であり、一般に、

ある要素の入力は検出器の入力と同じ信号であるから、構造データ (3.1 にて説明した知識)、後向き挙動規則、後向き接続規則を用いた前向き推論 (Forward chaining²¹⁾) により所要の非観測データを推論で求める。ただし、一度推論されたデータは 2 度推論しないという推論の制御が必要で、得られた非観測データ間に矛盾のないようにしなければならない。

(2) ステップ(1)で得られた非観測データより時刻 t の期待値を推定

非観測データの推定値、構造データ、前向き挙動規則、前向き接続規則を用い、前向き推論により異常が検知された検出器の期待値を推定する。ただし、ここでも、一度推論されたデータは 2 度推論しないという制御が必要である。

4.2 異常原因候補の選定

期待値と異なった徴候が得られたという事実から、検知された異常の原因となりうる要素を論理的に選定する。構造データ、前向き挙動規則、前向き接続規則を用い、時刻 t の異常検知から導出原理 (Resolution Principle²¹⁾) により異常原因候補を取り出す。導出原理を用いるために、すべての知識を標準形 (Conjunctive Normal Form²¹⁾) に変換する。必要な結果を取り出すためには、導出過程でこれ以上推論をしないで打切るという推論の制御が必要になる。このため、特定の形の命題を前もって指定しておき、この命題がきたらそれ以上の命題に関し導出を続けないようにする。今の場合には (OK $\$x$) が対応する命題となる。

4.3 観測データを用いた異常原因候補の選別

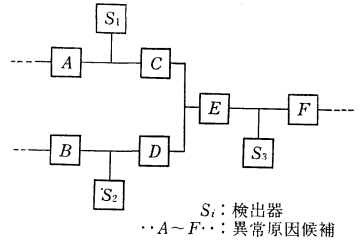
観測データ間の矛盾性をチェックすることにより、4.2 で選定された異常原因候補をさらに選別することが可能である。このステップでは構造データ、前向き挙動規則、前向き接続規則のほかに、後向き挙動規則、後向き接続規則も必要となる。推論は 2 つのステップよりなる。

(1) 使用すべき観測データの同定

ある要素の異常を判別するのに必要な、その要素を含む最小の集合を求め、使用すべき検出器を選定するステップである。このステップでは数値計算を実施せず、導出原理により記号演算のみでシミュレーションを実施する (Symbolic Simulation)。どの要素から導出を開始するかに関し、経験的な知識を用いることができる場合にはその選定に後向き推論 (Backward Chaining²¹⁾) を用い、推論の効率を上げることができる。このステップでは、前向き、後向きの規則を同時に使用した推論が必要となるため、ある命題の証明にその命題自身の証明が必要となるといった無限ループ

図 2

観測データを用いた異常原因候補選別の例



に陥ることがあり、これをさける推論の制御が必要となる。さらに、4.2 と同様、推論を打切るための命題指定も必要となる。ここでは (OK $\$x$)、(Observable $\$x$) が対応する命題となる。

図 2 に例を示す。要素 C の前向き挙動規則より導出を開始し、検出器 S_1, S_2, S_3 が要素 C, D, E の異常の判別に必要であるとの結論を出す。4.2 で得られた異常原因候補がすべて、このようないくつかの集合に分離されるまでこのステップを繰返す。

(2) 観測データの評価

(1) で得られた各集合に対して、導出原理で数値計算を実施しながら観測データ間の矛盾性を評価する。もし矛盾があれば、その集合内の少なくとも 1 つの要素が異常である。

4.4 テスト発生による異常原因候補の選別

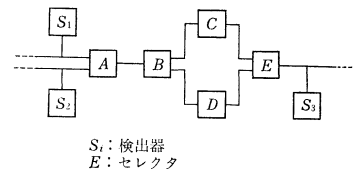
4.3 で選別された異常原因候補の各集合に対して、単一故障 (Single Fault Assumption) ならびに故障の非間欠性 (Non-intermittency Assumption) を仮定すれば、テストを発生することによりさらに候補を選別することが可能になる場合がある。その集合の中に、冗長系を構成する要素や開度の調節が許される制御弁などがある場合には一般にテストは可能である。診断は 2 つのステップからなる。

(1) テストの発生

このステップに必要な知識は 4.3 で用いたものと同じである。図 3 に例を示す。検出器 S_1, S_2, S_3 の間で何か矛盾が生じているとする。要素 C, D は互いに冗長系を構成しており、E はそのセレクトアである。今、要素 C が選択されているとする。この場合、セレクトア E のスイッチを C から D に切換えた後もデータ間に矛盾があれば、C は異常原因から除外され、そうでなければ C が原因と同定される。

図 3

テスト発生による異常原因候補選別の例



したがって、この例ではテスト発生とは以下の命題を導出することに相当する。

```
(if (and (OK S1) (OK S2) (OK S3)
         (OK A) (OK B) (OK D) (OK E)
         (True (value (output 1 S1) $S1) $t)
         (True (value (output 1 S2) $S2) $t)
         (True (value (input 1 E) D) $t)
         (= $a fa ($S1 $S2))
         (= $b fb ($a))
         (= $d fd ($b))
         (= $e $d)
         ($S3 (/ $e $er)))
    (True (value (output 1 S3) $S3) $t))
```

推論は冗長系を構成する要素の前向き挙動規則から開始され、上記の形の命題が導出されるまで続けられる。

(2) テストの評価

(1)で発生したテストに対し 4.3(2)と同様、導出原理で数値計算を実施し、予測した結果と実際のテスト実施結果とを比較する。

5. 原子力発電プラントの異常診断への応用研究例

上に述べた方法を沸騰水型原子炉 (BWR) の給水系の故障診断に適用し、シミュレーションにより手法の有効性を検討した。図4は給水系を中心とした BWR プラントの構成図であり、図5は図1に対応する図4のダイアグラムである。これらは現実のシステムより大幅に簡略化されており、33 個の要素から構成されるとする。炉心で発生した蒸気は発電に使用された後、復水器により水に冷却され、給水ポンプで再び炉心に戻ってくる (フィードバック・ループ)。炉心水位は給水制御系により一定に保たれるよう制御されている。簡単のため復水器の容量は十分大きいと仮定する。したがって、システムの動特性は炉心、制御器、ポンプの動特性で規定される。水位計 1(\$S_1)\$、2(\$S_2)\$、

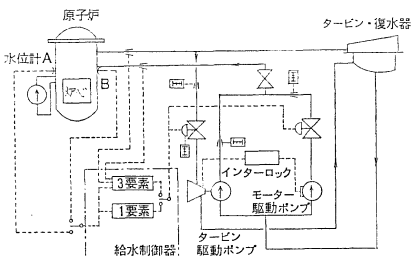


図4 原子炉簡略給水系モデル

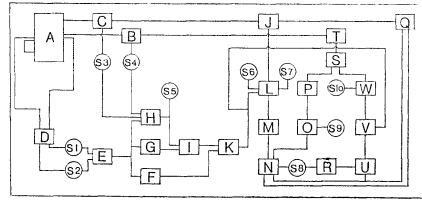


図5 原子炉簡略給水系モデルダイアグラム

タービン駆動給水ポンプ (N)、モータ駆動給水ポンプ (U)、3要素給水制御器 (H)、1要素給水制御器 (G) はそれぞれ冗長系をなす。給水制御系としてはこのほかに手動制御操作も許される。通常運転時は、\$S_1\$、N、H が使用されている。炉心の出力レベルは制御棒ならびに再循環流量を調節して制御される。

異常事象としては、出力変動運転中に水位計 \$S_1\$ が故障し、タービン駆動給水ポンプの出口流量計 \$S_9\$ に異常が最初に検知され、このときには、すでに異常がすべての要素に伝播していたという仮想的な状況を想定した。以下に診断結果をステップごとに示す。

流量計 \$S_9\$ の期待値を計算した後 (ステップ1)、異常原因候補としてつぎの要素を出力する (ステップ2)。

- A, B, C, D, E, H, I, K, L, M, N, O,
- P, Q, S, T, U, V, W, \$S_1, S_3, S_4, S_8, S_9\$

つぎに、観測データを用いることによって、これらの候補をつぎの7個に絞ることができる (ステップ3)。

- A, B, C, D, \$S_1, S_3, S_4\$

最後に、つぎのようなテスト発生を指示する：「セレクタDのスイッチを \$S_1\$ から \$S_2\$ へ切換えよ。検出器 \$S_2, S_3, S_4\$ の間で矛盾がなければ \$S_1\$ が異常原因である。」

本例では仮定によりテストが成功し、\$S_1\$ の故障が原因と正しく同定される。上記診断ステップはすべて自動化されており、4.3(1)で述べた経験的な知識としては「冗長系を構成するものから推論を開始するほうが良い」という知識を用いた。

6. 結 言

フィードバック・ループを構成するダイナミック・システムの診断を提案した。本手法の特徴は、原則として、システムの機能 (構造、挙動) に関する知識のみを用いて診断をしており、いわゆる診断モデルや原因、結果の因果関係に関する情報を必要としない点に

ある。診断に用いた推論は導出原理を中心にしており、システムの機能に関する知識から専門家が考えるであろう思考過程を再現することができる。推論の制御はすべてメタ知識を用いて実施しており、診断の全過程も自動化されている。

非常に簡略化されたモデルで、かつ仮想的な異常事象に対してではあるが、ダイナミック・システムの例として BWR プラントの給水系を例にとり、本手法が有効に機能することをシミュレーションで確認した。診断の効率を上げるためには、経験的な知識の導入も必要であり、実用的なシステムとしては緒言で述べた知識工学を応用した 2 つの方法を融合した手法を採用すべきであろう。

謝 辞

本研究におき、知識表現、推論法に関し貴重な議論をしていただいたスタッフォード大学の M. R. Genesereth, E. H. Shortliffe 両助教ならびに(株)日立製作所エネルギー研究所の木口高志、小林節雄両博士に感謝いたします。(昭和 58 年 6 月 25 日受付)

参 考 文 献

- 1) 丹治, 橋本, 岸, 大森, 渡辺: BWR インストラクション・システムの概念設計(II) — CCT を用いた事象解析 — 日本原子力学会秋の分科会 A6 (1982)
- 2) C. H. Meijer and B. Frogner: On-Line Power Plant Alarm and Disturbance Analysis System, EPRI, NR 1379, April (1980)
- 3) W. R. Corcoran, D. J. Finnicum, F. R. Hubbard III, C. R. Musick and P. F. Walzer: Nuclear Power-Plant Safety Functions, Nuclear Safety, 22, 179/191 (1981)
- 4) 渡辺, 加藤, 木口, 村田, 中村: BWR インストラクション・システムの概念設計(I) — システムの構成 —, 日本原子力学会秋の分科会 A 5 (1982)
- 5) 横林, 岡田, 溝口: 知識工学的手法を用いた原子炉異常診断技術の開発, 日本原子力学会秋の分科会 C29 (1981)
- 6) 木口, 吉田, 元田, 小林: 知識工学を適用したプラント運転ガイドダンス方式の開発, 日本原子力学会誌, 25, 298/305 (1983)
- 7) W. R. Nelson: REACTOR: An Expert System for Diagnosis and Treatment of Nuclear Reactor Accident, Proc. of AAAI, 296 (1982)
- 8) A. H. Wells and W. E. Underwood: Knowledge Structures for Nuclear Power Plant Consultant, Trans. Am. Nucl. Soc., 41, 41/43 (1982)
- 9) W. E. Underwood: A CSA Model-Based Nuclear Power Plant Consultant, Proc. of AAAI, 302/305 (1982)
- 10) B. Chandrasekaran, D. D. Sharma and D. W. Miller: The Application of Knowledge-Based Systems to Reactor Operations, Trans. Am. Nucl. Soc., 43, 241 (1982)
- 11) G. Guillon, J. Parcy and C. Berlin: Application de L'intelligence Artificielle a la Detection et an Diagnostic des Defauts du Coeur dans les Reacteurs a Neutrons Rapides, IAEA-SM-265/54, October (1982)
- 12) K. Yoshida, T. Kiguchi, H. Motoda and S. Kobayashi: Knowledge-Based Approach to Plant Diagnosis, Trans. Am. Nucl. Soc., June (1983)
- 13) 伊藤, 服部, 重野, 川村: 知識ベースによる原子炉異常診断ガイドシステムの研究, 計測自動制御学会, 第 1 回知識工学シンポジウム資料, 103/106 (1983)
- 14) E. H. Shortliffe: Computer-Based Medical Consultations: MYCIN, American Elsevier (1976)
- 15) S. M. Weiss, C. A. Kulikowski, S. Amarel and A. Safir: A Model-Based Method for Computer-Aided Medical Decision-Making, Artificial Intelligence, 11 145/172 (1978)
- 16) M. R. Genesereth: Diagnosis Using Hierarchical Design Models, Proc. of AAAI, 278 (1982)
- 17) R. Davis, H. Shrobe, W. Hamscher, K. Wieckert, M. Shirley and S. Polit: Diagnosis Based on Description of Structure and Function, Proc. of AAAI, 137 (1982)
- 18) 山田, 元田: システムの機能に関する知識を用いた異常診断方式, 計測自動制御学会, 第 1 回知識工学シンポジウム資料, 111/114 (1983)
- 19) 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資料, 107/110 (1983)
- 20) M. R. Genesereth, R. Greiner and D. E. Smith: MRS Manual, HPP-81-6, Stanford University Heuristic Programming Project, December (1981)
- 21) N. J. Nilsson: Principles of Artificial Intelligence, Tioga Publishing Company (1980)