

機械系におけるモデルに基づいた診断と知識獲得†

柳 吉 洙^{††} 志 村 正 道^{††}

モデルに基づいた診断とは、診断対象の装置の構造や装置を構成している各構成要素の挙動を表したモデルから、異常状態の説明が可能な構成要素を見出すことである。本論文では、このような診断を拡張して機械系の故障診断システムに適する新しい診断方法とその推論過程からの診断知識の獲得方法について述べる。本診断方法は次の特徴を持っている。①機械系のパイプライン構造と対応する構造や各構成要素の挙動に基づいて推測した値と、作動中の機械から観測したセンサ値や構成要素の動作状態のデータとを比較しながら診断を行っているため、実時間の故障診断に適している。②直接的な接続関係、間接的な接続関係、並列的な接続関係の概念を導入して診断対象である装置の構造を詳細に表現し、故障の候補を装置の構造のみから生成している。③構成要素の挙動が安定している場合には構成要素の機能を用い、構成要素の挙動が安定していない場合にはその挙動の定性的な変化を用いることによって、候補中の構成要素から故障要素を容易に見出している。④バルブの開閉状態やパイプの内径差に基づいた定性推論を用いて流体の状態を伝播させることによって、バルブの誤動作やパイプの破損などの機械系によく見られる故障の診断を可能としている。また、このような診断過程から、センサや構成要素の状態のみの関係を表した診断知識を獲得することによって、迅速な診断に対処している。

1. ま え が き

過去の診断用エキスパートシステムでは、専門家が持つ経験的な診断知識を用いて診断を行う方法が用いられてきた。経験的な診断知識が与えられている場合には、システムは専門家の納得する診断を迅速に行うことができる。しかし、複雑な系におけるすべての状況に対応するための診断知識は膨大な量となり、このような診断知識を専門家から獲得することは困難である。

このことから、最近深い知識をシステムに用いる研究^{1)~8)}が行われており、浅い知識と深い知識の両用²⁾、定性シミュレーション³⁾、モデルに基づいた診断^{4)~6)}などがその代表的な例である。浅い知識と深い知識の両用の方法は、経験的な知識である浅い知識と物理現象などに関する知識である深い知識を、システムが推論過程で状況に応じて選択し利用するものである。定性シミュレーションによる方法は、流体の流れなどの物理現象を定性的にシミュレートし、その結果を利用する方法である。この方法を複雑な分野における診断に適用するには、推論の複雑さや装置を構成する構成要素の表現などの問題が指摘されている⁸⁾。

モデルに基づいた診断とは、装置の構造と装置を構成している構成要素の挙動を表したモデルに基づい

て、異常状態を説明できる構成要素を見出すことである。このような診断を行う従来のシステムは次のような二つの方法を用いている。一つは観測された異常値と構成要素の挙動に基づいて構造から故障の候補を生成し、異常を説明することのできない構成要素を取り除いて、故障箇所を絞っていく方法である⁴⁾。もう一つは装置の構造と構成要素の挙動から装置全体の挙動を推測し、異常原因を見出すことによって故障箇所を同定していく方法である⁵⁾。これらの診断方法は、構成要素の挙動が物理方程式によって容易に表現できる電子回路分野などで適用されている。

本論文では、このようなモデルに基づいた診断を拡張して機械系の故障診断システムに適する新しい手法について述べる。これは機械系における専門家がセンサから異常値を観測したときに、機械系の装置の構造や各構成要素の原理を用い、観測した系の状態に基づいて故障箇所を見出すという事実に着目したものである。なお、センサからの観測値を用いて故障を発見する機械系の故障診断システムとしては、Gonzalez らによる診断システム⁹⁾があるが、このシステムでは専門家の経験的な診断知識のみを用いており、ここで述べるシステムのような深い知識は用いていない。

本論文で述べる診断システムは従来のモデルに基づいた診断システムと次の点で異なっている。

- 従来のシステムでは、対象の構造を表すために単純な接続関係のみを用いたが、本システムでは、対象の構造を媒体の種類によっていくつかの系統に分け、同一の系統内で接続されている場合には

† Model-based Diagnosis and Knowledge Acquisition in Machinery by KEEL-SOO RHYU and MASAMICHI SHIMURA (Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology).

†† 東京工業大学工学部情報工学科

直接的な接続関係に、異なる系統間で接続されている場合には間接的な接続関係に、一つの系統内で並列に接続されている場合には並列的な接続関係にあると明記することによって、故障要素を探索するとき、候補のサイズを減らしている。

- 構成要素の挙動は機械系においては、電子回路のように物理方程式では容易に表現できないことが多く、このため、構成要素の挙動が安定している場合と安定していない場合に分けて表現している。前者の場合には構成要素の機能を用い、後者の場合には構成要素の挙動による入出力側の状態の定性的変化を用いて、その挙動を表現している。
- 従来のシステムでは、装置の構造と構成要素の挙動の両方を用いて故障の候補を生成し、異常の説明ができない候補を取り除くような診断方法を用いていた。本システムでは、装置の構造を詳細に表現しているため、この構造のみから故障の候補を生成することができる。また、生成された候補中の構成要素の挙動に基づいて故障の構成要素を発見する効率的な診断を行っている。

機械系の専門家はセンサ値と構成要素の状態のみを用いて故障要素を推測する迅速な診断を行っており、このような診断では装置の構造と構成要素の原理が暗黙的に利用されていると考えられる。本システムでは、モデルに基づいた診断過程で用いたセンサ名や構成要素名を変数に置換する一般化を行うことによって、専門家が用いているような診断知識を獲得している。

2. システムの構成

モデルに基づいた診断システムでは、診断対象の装置の構造や挙動の表現において、その構成要素が基本となるが、本システムでは構成要素をその動作状態が直接観測可能なものに限っている。例えば、ポンプはその動作状態が観測可能であるので、構成要素であるが、ポンプの部品であるインペラ (impeller) の動作状態は観測不可能であるので構成要素ではない。なお、動作状態とはオン、オフ、開、閉、運転、停止などをいう。

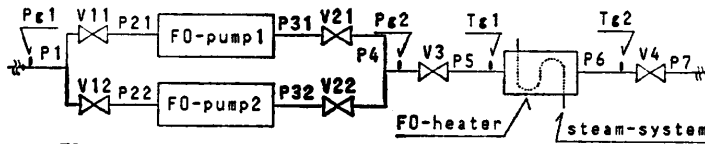
本診断システムは観測部、知識ベース、診断ルールベース、診断部から構成されている。観測部では、診断対象である作動中の機械系におけるセンサ値や構成要素の動作状態を観測する。知識ベースには、構成要素間の接続関係によって表されている装置の構造と、

安定および不安定の場合における構成要素の挙動についての知識が格納されている。また、診断ルールベースには、装置の構造と構成要素の挙動を用いて行う診断過程から獲得されるルール形式の診断知識である診断ルールが格納される。診断部では、装置の構造から次のような活性化された構造を抽出し、センサから観測した値の正しさを検査する^{10),11)}。ここで活性化された構造とは、動作状態がオン、開、あるいは運転であるような構成要素からなる部分的な構造をいう。なお、センサ値を VL (VeryLow), L (Low), N (Normal), H (High), VH (VeryHigh) の5値に、構成要素の状態を N (Normal), A (Abnormal), C (Critical) の3値に区別し、センサ値が L, H の場合を構成要素のA状態, VL, VH の場合をC状態と見なす。システムはセンサ値を VL, L, H, VH として検出すると、故障の構成要素を見出す診断を行い、故障と判断した構成要素の状態がC状態であれば、系全体の状態を危険な状態とし、動作中の系を停止してから故障部分を修理し、A状態であれば、系を運転状態のままにして故障部分を修理するような手順を決定する。

2.1 装置の構造

診断を容易にしかも効率的に行うためには、診断対象装置の記述は極めて重要である。とくに装置の構成要素間の接続関係は故障部分を見出す際の構造的な手がかりとして詳細に記述しておくことが望ましい。このため、接続関係として、前述のように直接的な接続関係、間接的な接続関係および並列的な接続関係の概念を導入する。例えば、燃料油を移動させるポンプは燃料油を加熱するヒータとパイプまたはバルブを介して接続されており、両方とも燃料油に関わっているので、ポンプとヒータは直接的な接続関係にある。しかし、蒸気用バルブ制御器とヒータはパイプを介して接続されていても、燃料油の温度を上昇させるためであることから、この二つの構成要素は間接的な接続関係にある。また、構成要素間の接続関係には方向を付けることによって、入力と出力を表示する。この結果、二つ以上の入力または出力が互いに並列的な接続関係にあることを明確に表すことができる。さらに、観測値がセンサから得られることからセンサの接続関係も同様に表す。このような装置の構造を詳細に表現することによって、診断時に故障の候補を構造の特徴のみから生成することができ、診断が効率的になる。

機械系の装置は、系中の流体の種類によって、目的が異なるいくつかの系統に分類でき、これらの系統に



FO-system =
 → P1 (ATTACHED press-gauge Pg1)
 → { PARA (V11 → P21 → FO-pump1 → P31 → V21) }
 (V12 → P22 → FO-pump2 → P32 → V22) }
 → P4 (ATTACHED press-gauge Pg2)
 → V3 → P5 (ATTACHED temp-gauge Tg1)
 → FO-heater (INDIRECT steam-system)
 → P6 (ATTACHED temp-gauge Tg2) → V4 → P7 →

図1 燃料油系統のパイプライン構造と表現

Fig. 1 Pipeline structure of fuel-oil system and representation of its structure.

よって装置全体の構造が表現される。実際の機械系の取扱説明書には流体の種類によって分類されたパイプライン構造が記述されており、このパイプライン構造が装置や部品間の接続関係を表しているの、ここでもパイプライン構造と一対一に対応する表現を用いて装置の構造を表すことにする。

図1に燃料油系統のパイプライン構造と対応する装置の構造の表現例を示す。矢印記号は装置間の直接的な接続関係を表し、流体の流れる方向を示している。PARAは、装置が多重化されている部分すなわち並列かつ直接的に接続されている関係を表す。図1において各燃料油ポンプが属している区間は互いに並列的な接続関係にあり、PARAで表現される。INDIRECTは他の系統と間接的に結ばれていることを表す。図1では、蒸気系統と燃料油系統が間接的な接続関係にある。また、ATTACHEDはその箇所にセンサが設置されていることを示す。

2.2 構成要素の挙動

作動中の機械の動作から推論を行うためには、状態の変化を実時間で推測する必要がある。しかし、構成要素の挙動の変化を分析し、状態の変化を推測することは、複雑な系では極めて困難である。このため本システムでは、構成要素の挙動の変化に注目し、挙動が安定している場合には、構成要素の機能に関する知識を用い、挙動が安定していない場合には、状態の定性的変化を示す知識を用いることによって構成要素の入出力側の状態を推測する。

構成要素の挙動は、構成要素の入出力側の正常な状態 (STATES), 入出力側に直接接続されているものの特殊な状態 (SPEC-

STATES), 構成要素を作動させる要因 (BHV-BY), 構成要素の挙動が安定しているときの機能 (ABS-FUNC), 挙動が安定していないときの構成要素の変化 (QUAL-BHV) などのパラメタによって表現されている。さらに、QUAL-BHVは構成要素の変化を PRECOND, TI, CHSTATES, TERMCOND を用いて記述する。TIは構成要素の動作状態の変化を示し、PRECONDとTERMCONDはTIから起因される変化前後の状態を示す。CHSTATESはTIによる構成要素の変化の様子を

示す。挙動の記述の中で、特殊な状態には、運転開始時や開いているべき手動バルブが作業員のミスで閉まっている場合などのセンサから直接観測できない特殊な状態が記述されている。

図2はポンプの挙動についての表現の例を示したものである。BHV-BYには、モータによってポンプの部品であるインペラが回転されることが記述されている。このことから、ポンプの動作状態が run となることが知れる。STATESにはポンプの running 時の入出力の状態が記述されており、SPEC-STATESには入力側で液体がない場合におけるポンプの running 時の入出力の状態が記述されている。また、ABS-FUNCにはポンプの running 時における機能と状態が記述されており、QUAL-BHVには starting 時の状態変化が記述されている。

```
BHV-MOD pump =
    CHARACTER, IMPELLER-TYPE, INLET-SIDE, OUTLET-SIDEなどのパラメタ
    BHV-BY revolving $impeller by $motor
    STATES run INLET-SIDE <=> pressure < 0
           OUTLET-SIDE <=> pressure = $max-pressure
    またはstopped状態の記述
    SPEC-STATES IF INLET-SIDE <=> $liquid = 0
           STATES run
           THEN INLET-SIDE <=> pressure = 0
           OUTLET-SIDE <=> pressure = 0
    またはpipeがblockされている場合などにおける状態の記述
    ABS-FUNC
    running = FUNC transfer $liquid from INLET-SIDE to OUTLET-SIDE
           STATES run
    またはstoppingについての記述
    QUAL-BHV
    starting = PRECOND stopped
           TI revolving = increasing
           CHSTATES $liquid pressure INLET-SIDE -
           OUTLET-SIDE +
           TERMCOND run
    またはstoppingについての記述
```

図2 ポンプの挙動に関する表現

Fig. 2 Representation of pump behavior.

2.3 一般知識と診断ルール

一般知識は解釈知識と因果知識からなり、いずれも IF-THEN 形式のルールで表現されている。解釈知識はシステムと専門家との対話の理解を手助けするために必要となる知識である。例えば、専門家はポンプが運転中 (running) であるとはポンプが回転していること (revolving) であることを知っているわけで、システムもこのような解釈のための知識が必要となる。

因果知識は診断目標の変更に必要な因果関係を表す知識である。例えば、ポンプの挙動に関する表現からは、ポンプが運転中に液体を移動させることが分かる。しかし、流体の状態はそれが流れているかどうかによって依存して変化するので、ポンプの運転中にはポンプにつながっているパイプ中に流体が流れていると理解する必要がある。すなわち、ポンプが液体を移動させる結果として液体が流れるということを通る因果知識が必要なのである。システムはこのような一般知識を装置の構造や構成要素の挙動に関する知識と共に用いて、柔軟な診断と説明を行うことができる。

診断ルールはプロダクションルール形式であり、装置の構造と構成要素の挙動に基づく診断過程から得られる知識を一般化することによって獲得される。ルールの条件部はセンサ名とその値または構成要素名とその状態を一つのリストとした複数のリストから構成され、結論部は故障要素名とその状態からなるリストによって構成される。また、条件部の各リスト中に現れるセンサや構成要素は装置の構造の出力側から入力側の順に配列される。獲得された診断ルールはモデルに基づいた診断と組み合わせ用いられ、推論の効率を高めている。

3. 故障診断

3.1 診断方法

故障が生じ、センサが正常でない値を示した場合、システムは次のような手順で診断を行う。

① 異常値を示しているセンサとその値が診断ルールの条件部に適用できるかどうかを調べる。そのセンサと値からなるリストを含んでいるルールがあれば、そのルールの条件部で、マッチしていない各リストについて、リスト中のセンサ値や構成要素の状態を表す値を対象系からの観測値と比較する。条件部の全リストについて、これらの値が一致すれば、結論部のリスト中の構成要素を故障と判断する。値の一致しないリストが見つかったら、その直前のリスト、すなわち装置

の構造で一致しないリスト中のセンサまたは構成要素より出力側にあるセンサに基づき②以下の手順に従って故障要素を見つける。

② 次節で述べる故障候補の生成規則に従い、故障の第一候補集合と各候補から異常が伝播する可能性のある構成要素からなる次候補集合を生成する。

③ 生成された第一候補集合からの構成要素について、その挙動を調べる。この構成要素が現在の異常状態と関連があると判断された場合には、異常値と構成要素の挙動に基づいて推測された構成要素の入力側の値とその入力側から観測された値とを比較する。異常状態に関連がないと判断された場合には、次候補集合中から故障要素を探すため、次候補集合を改めて第一候補集合とし、②からの手順を反復する。

④ 推測値と観測値が等しい場合、検査中の構成要素は故障でないすなわち正常であると判断し、その構成要素と間接的に接続され、かつそれを作動させている構成要素を次候補集合から取り除く。この操作は構造の記述における INDIRECT と挙動の記述における BHV-BY を参照することによって行われる。観測値が得られない場合には、構成要素を正常であると仮定し、上述した次候補集合修正の操作を行う。

⑤ 修正された次候補集合中から検査中の構成要素によって選ばれたものを改めて第一候補集合とする。この場合、検査中の構成要素の入力側の観測値を第一候補となった構成要素の出力側の異常値とする。ただし、この二つの構成要素がバルブやパイプを介して接続されている場合には、バルブの開閉状態やパイプの内径差に基づいて観測値を補正し、異常値とする。新しい第一候補集合と異常値を条件部に含んでいる診断ルールがあれば、①の手順に従って故障要素を探し、さもなければ、②からの手順を反復する。

⑥ 推測値と観測値が異なる構成要素を発見すると、その構成要素を故障と判断する。

故障要素を見出した場合にも、②の手順で生成された第一候補集合中の検査されていない他の構成要素の挙動も検査することによって、複数の故障要素を見出すことができる。これらの手順は故障要素を見つけるまで反復される。このため、候補集合のサイズが大きくなる可能性があるが、④の手順では、これらの集合を減少させ、検査中の候補と同一系統上の次候補を優先させることによって競合を解消している。

3.2 構造からの故障候補の生成規則

システムは、異常値を示しているセンサが属する系

統で入力側向きに探索を行い、以下の規則に従って故障候補を生成する。

- R1: 異常値を示しているセンサから最も近い構成要素を第一候補集合の要素とし、その次に近い構成要素を次候補集合の要素とする。
- R2: PARA 内の一部の区間が異常状態である場合には、その区間の開閉機能を持つ例えばバルブなどの構成要素を第一候補とし、その区間中の他の構成要素を次候補とする。その区間中に開閉機能を持つ構成要素がない場合には、候補を生成しない。
- R3: PARA 内の全区間が異常状態を示している場合には、全区間に影響を与える開閉機能を持つ構成要素を第一候補とし、PARA 内には構成要素を次候補とする。
- R4: 第一候補と間接的に接続されている系統があれば、その系統内の入力側の構成要素も次候補集合の要素とする。
- R5: 一つの系統の終端から候補を生成する場合、間接的に接続されている系統があれば、その系統から第一候補と次候補を選択する。そのような系統がなければ、候補を生成しない。

3.3 構成要素の挙動に基づいた状態の推測

構成要素の入出力側の状態は異常値と構成要素の機能 (ABS-FUNC) やその挙動の定性的変化 (QUAL-BHV) に基づいて推測される。

構成要素の機能に基づく場合には、次の手順によって状態を推測する。

- ① 異常を示す項目 (例えば、燃料油の圧力が低い場合には燃料油の圧力) が ABS-FUNC と STATES に記述されていないならば、圧力や温度などの異常の対象と構成要素とは関連がないと判断する。
- ② SPEC-STATES 中から、異常値と構成要素の動作状態からなる記述を選択する。そのような記述が存在しなければ、構成要素の動作状態についての記述を STATES 中で選択する。
- ③ 異常値が構成要素の入力側の状態であれば、その記述から出力側の状態を推測し、さもなければ、入力側の状態を推測する。

構成要素の挙動による定性的変化に基づく場合には、次の手順によって状態を推測する。

- ① 異常を示す項目が QUAL-BHV と STATES に記述されていないならば、異常の対象と構成

要素とは関連がないと判断する。

- ② 構成要素の動作状態の変化 (TI) に関する記述を選択する。例えば図2において、ポンプの回転 (revolving) が増加中であれば、starting の記述が選ばれる。
- ③ 上で選ばれた記述の CHSTATES と異常値に基づいて構成要素の入力側または出力側の状態を推測する。

システムは診断時に、構成要素の挙動の変化を監視することによって二つの記述 (ABS-FUNC, QUAL-BHV) を組み合わせながら推測を行う。STATES や SPEC-STATES には入出力側との関係がルール形式に記述されており、適用すべき記述が選ばれると、その記述の結論部の状態を推測値とする。また、CHSTATES には構成要素の入力側と出力側の状態の変化が定性的に記述されており、この記述に基づいて異常値を変化させて推測値とする。

3.4 バルブやパイプによる状態の伝播

ある構成要素がバルブやパイプによって他の構成要素と接続されている場合、その構成要素の挙動から推測された流体の状態は、バルブやパイプの状態によって変化して他の構成要素まで伝播される。すなわち、バルブが閉 (closed) 状態では流体が流れることができないので、バルブ前後の圧力や温度は無関係であるが、全開 (open) 状態では圧力はパイプの内径差に依存する。バルブの部分開 (partly-open) 状態では、パイプの内径が狭くなっているとき、圧力は降下する。しかし、パイプの内径が広がっているときには、圧力はパイプの内径差による上昇とバルブの部分的開状態による降下とによって、定まらない。一般に、接続されている2本のパイプの内径差は小さいので、これによる圧力の変化は小さいが、バルブの状態には大きく依存する。したがって、本システムではパイプの内径差が大きい場合を除いては、バルブの状態のみに基づいて圧力が変わるものとしている。また、表1に示すようにバルブの partly-open 状態を closed に近い状態と open に近い状態に分けることによって、パイプの内径差が大きい場合にも対処させている。すなわち、closed に近い partly-open 状態であればバルブの状態に基づいて圧力が変わるものとし、さもなければパイプの内径差に基づいて圧力が変わるものとしている。ここで、-はパイプの内径が狭くなっていること、+は広がっていること、0は内径差がないことを意味する。

表 1 バルブの開閉状態とパイプの内径差による圧力と温度の変化
Table 1 Change of pressure and temperature in accordance with valve state and difference in pipe diameter.

バルブ開閉状態	closed			partly-open				open		
	-	0	+	- 0 +	-	0	+	-	0	+
パイプの内径差	-	0	+	- 0 +	-	0	+	-	0	+
圧力	無関係			降下	降下	同一	上昇	降下	無変化	上昇
温度	無関係			無変化				無変化		

CPO: closed に近い partly-open 状態, OPO: open に近い partly-open 状態

3.5 ユーザとの対話による情報収集と故障発見

システムは診断過程で第一候補の構成要素の挙動に基づいてその構成要素の入力側の値を推測し、実際の観測値と比較して、検査中の構成要素が正常であるかどうかを判断する。二つの値が異なると、検査中の構成要素を故障要素とする。二つの値が等しい場合には、構成要素が正常に作動していると判断し、故障要素を見つけるまで次候補集合中の構成要素の挙動に基づく推測値と観測値を比較する診断を続ける。このような診断方法によれば、候補として選ばれた全構成要素の入力側におけるセンサの値が得られるならば、診断は実時間で実行される。

入力側にセンサが存在せず、観測値が得られない場合、システムはまず検査中の構成要素を正常であると仮定し、次候補集合から故障要素を探す。次候補集合中の構成要素を検査する場合にも同様である。観測値が得られる構成要素が見つかったら、その観測値と構成要素の挙動に基づく推測値を比較し、二つの値が一致すれば、正常であると仮定した全構成要素は正しく作動していることが確認される。二つの値が異なる場合には、正常であるという仮定が間違っていたことになり、正常であると仮定した構成要素の中に故障が存在することになる。なお、正常であると仮定した構成要素の集合を仮故障候補集合と呼ぶ。システムは仮故障候補集合中の故障要素を見出すために、ユーザに情報を要求し、次のような診断を行う。

- 構成要素 X が仮故障候補集合中に存在し、 X と並列的な接続関係にある構成要素 Y が停止しているならば、システムは Y を稼働させたときの状態をユーザに質問する。その結果、異常状態が正常状態になれば、構成要素 X を故障要素であると判断する。さもなければ、構成要素 X は正常に動作していると判断する。
- 構成要素 X が構成要素 Y に間接的に接続され、

かつ X と Y が仮故障候補集合中に存在する場合には、 Y の入力側の状態をユーザに質問する。その状態が正常であれば、 X または Y を故障要素であると判断する。さもなければ、 X と Y は正常であるとし、システムは Y の入力側に存在する仮故障候補集合中の構成要素に故障があると判断する。

- 仮故障候補集合中の各構成要素について、その構成要素の入力側の状態をユーザに質問する。その状態が正常であれば、質問中の構成要素が故障であると判断する。

4. 診断ルールの獲得

システムは次の三つの過程から診断ルールを抽出する。

- ① 列挙過程
- ② 決定過程
- ③ 一般化過程

列挙過程では、診断過程で調べた順にセンサや構成要素をその状態と共に列挙し、リストをつくる。

決定過程では、以下の規則に従い、列挙過程で生成されたリストから診断ルールの結論部と条件部を決定する。

- 故障要素とその状態からなるリストを結論部とし、残りのリストを条件部とする。
- 故障要素が PARA 内にある場合には、故障要素とその状態からなるリストとその PARA 内の他の区間での構成要素とそれらの状態からなるリストを結論部とし、残りのリストを条件部とする。
- 故障要素が他のシステムと間接的に接続されている場合には、故障要素とその状態からなるリストと他のシステムで候補として生成された構成要素やセンサとそれらの状態からなるリストを結論部とし、残りのリストを条件部とする。

一般化過程では、決定過程で生成された診断ルールの結論部から値が normal のリストを除去し、定数を変数に置換する以下のような一般化規則に従って診断ルールを洗練する。また、一つの系統や PARA を基本単位としてその中のセンサと構成要素について一般化を行い、他の一般化されたリストとは連言で結合する。

- 系統または PARA 内で同種のセンサの状態を変化させる構成要素が存在しない場合、その状態が変化していないならば、一つの変数と全称記号 \forall を用いてセンサの状態を表す。変化しているならば異なる状態の数と同数の変数と存在記号 \exists を用いてセンサの状態を表す。
- PARA 内の各区間におけるセンサ名または構成要素名が同種類の場合には、同一の変数に置換する。
- PARA が条件部にあり、かつ間接的に接続されている他の系統の PARA が条件部または結論部にある場合には、両系統の PARA 内の同一の定数を同一の変数に置換する。

5. 診断と知識獲得の例

図3は燃料油系統、吸気系統、排気ガス系統がディーゼル機関のシリンダを介して間接的に接続され、さらに各系統の終端が並列的に接続されている機械系の例である。ここで、Aは吸気孔、Eは排気ガス孔、Vは燃料油バルブを意味する。ディーゼル機関には複数個のシリンダがあり、各シリンダには吸気孔、燃料油バルブ、排気ガス孔が接続されている。

以下、図中 x 点における排気ガスの温度計が異常な高温と観測された場合の診断例を説明する。この機械系において、異常値を示す温度計から各シリンダに設置されている排気ガスの温度計まではパイプで結合されているのみである。したがって、 x 点での温度は、表1に基づいて各シリンダまで伝播され、各シリンダでの排気ガスの観測温度と比較される。ここでは、全シリンダでの排気ガスの温度が高温と観測される場合と、一部のシリンダでの排気ガスの温度が高温と観測される場合がある。

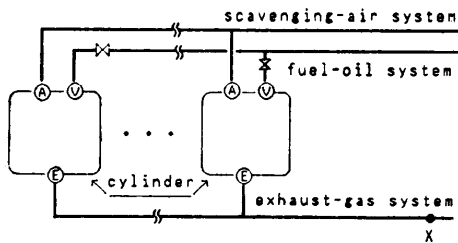


図3 複数の系統
Fig. 3 Example of indirect connections between systems.

前者の場合には、構造からの故障候補の生成規則 R3, R4 に従って、候補は燃料油系統と吸気系統の PARA 内にはない部分から生成される。これらの系統における診断では、故障候補の生成規則 R1 のみに従って第一候補と次候補が一個ずつ生成され、これらの候補の挙動を調べることによって、容易に故障が発見される。

後者の場合には、PARA 内の一部が異常状態であるので、構造からの故障候補の生成規則 R2, R4 に従い、故障候補が燃料油系統と吸気系統の PARA 内から生成される。吸気系統の PARA 内には、バルブのような開閉機能を持った構成要素が存在しないので、故障候補の生成規則 R2 に従って吸気系統における構成要素の故障ではないと判断される。したがって、燃料油系統の PARA 内からバルブと燃料油バルブが故障候補として選ばれる。バルブが opened 状態になっていることが確認されると、次は燃料油バルブの機能が検査される。その結果、燃料油バルブにおけるノズルが故障であると診断される。

診断が終了すると、システムは診断ルールの獲得を試みる。図4は上記の診断で、後者の場合における診断ルール獲得の各過程を示している。(a)は診断ルール獲得の列挙過程で、調べた構成要素名やセンサ名と各々の状態からなるリストを表し、(b)は決定過程での三番目の規則に従って(a)のリストを条件部と結論部に分けたルールを表している。また、(c)は一般化

```
(EGt(1) H) ..... (EGt(4) H)
(PARA (EGtc(1) N) ... (EGtc(5) H) (EGtc(6) N) )
(SAp(6) N) (FOt(15) N)
(PARA (Nozzl(1) N) ... (Nozzl(5) A) (Nozzl(6) N) )
(a)列挙過程

(EGt(1) H) ..... (EGt(4) H)
(PARA (EGtc(1) N) ... (EGtc(5) H) (EGtc(6) N) )
(SAp(6) N) (FOt(15) N)
(PARA (Nozzl(1) N) ... (Nozzl(5) A) (Nozzl(6) N) )
(b)決定過程

 $\forall x(EGt(x) H) \wedge \exists y(EGtc(y) H) \wedge \exists z(EGtc(z) N)$ 
 $\rightarrow$ 
(Nozzl(y) A)
(c)一般化過程
```

図4 各過程で生成された診断ルールの例
Fig. 4 Examples of diagnostic knowledge produced in (a) enumeration step, (b) determination step, (c) generalization step, after diagnosis.

過程で(b)のルールの結論部から値が正常状態であるリストを除去し、条件部には一、二番目の一般化規則を、結論部には三番目の規則を適用して一般化を行い、各リストを連言で結合した診断ルールを表している。

6. む す び

本論文では、機械系を対象として、センサから異常値が観測されたとき装置の構造や構成要素の挙動に基づいて故障要素を発見する診断方法を提案した。またその推論過程から診断知識を獲得する方法についても述べた。

機械系を例とした構造の表現形式やその構造における候補生成の方法は人間の専門家が行う方法と同じであり、他の分野にも応用が可能である。本論文で述べた機械系の場合には、診断対象の装置の構造がパイプライン構造と一対一に対応する表現によって記述されるので、診断システムの設計者にとってその構造を容易に表現できるという利点を持っている。

モデルに基づいた診断法は論理式や物理方程式で表現できるような電子回路における故障診断として主に用いられている。方程式で系の挙動が記述できないような機械系ではほとんど用いられず、経験的知識に基づく方法⁹⁾が利用されている。しかし、明らかにモデルに基づく方がより正確な、しかも機械的原理に従った推論による診断が可能となる。本論文では、機械系に実際に存在するパイプライン構造に着目し、定性的な記述を導入してモデルを実現している。したがって、本方法は、物理的な挙動のみならず、構成要素の機能にも基づいた推論を可能にしている点において、従来の方法よりも優れていると考えられる。すなわち、迅速な実時間の診断が行え、また診断過程から獲得した診断知識が利用できるため、効率のよい診断が行えると考えられる。

本診断方法から獲得された診断知識は装置の構造と構成要素の挙動に基づいて抽出されている。したがって、このような知識を用いた診断は過去の専門家の経験に基づいて確率的に表現されている診断知識を用いて行う診断より正確に故障要素を見出すと考えられる。

本論文では、構成要素が正常に動作しているかどうかを検査するために、構成要素の挙動に基づいて推測される値とセンサから観測される値を比較する方法を用いた。しかし、構成要素からセンサまで時間遅れが

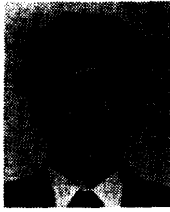
ある場合には、診断結果が誤る場合も生ずると考えられる。とくに、プロセス系には時間遅れがある場合が多いので、今後このような場合における推測値と観測値の比較方法について検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Chandrasekaran, B. and Mittal, S.: Deep versus Compiled Knowledge Approaches to Diagnostic Problem Solving, in *Developments in Expert Systems*, ed. Coombs, M. J., pp. 23-34, Academic Press, London (1984).
- 2) Fink, P. K., Lusth, J. C. and Duran, J. W.: A General Expert System Design for Diagnostic Problem Solving, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol. PAMI-7, No. 5, pp. 553-560 (1985).
- 3) Klein, D. and Finin, T.: What's in a Deep Model?, A Characterization of Knowledge Depth in Intelligent Safety Systems, *Proc. IJCAI-87*, pp. 559-562 (1987).
- 4) de Kleer, J. and Williams, B. C.: Reasoning about Multiple Faults, *Proc. AAAI-86*, pp. 132-139 (1986).
- 5) Geffner, H. and Pearl, J.: An Improved Constraint-Propagation Algorithm for Diagnosis, *Proc. IJCAI-87*, pp. 1105-1111 (1987).
- 6) Cunningham, P. and Brady, M.: Qualitative Reasoning in Electronic Fault Diagnosis, *Proc. IJCAI-87*, pp. 443-445 (1987).
- 7) de Kleer, J. and Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 7-83 (1984).
- 8) Bylander, T. and Chandrasekaran, B.: Understanding Behavior Using Consolidation, *Proc. IJCAI-85*, pp. 450-454 (1985).
- 9) Gonzalez, A. J., Osborne, R. L., Kemper, C. T. and Lowenfeld, S.: On-Line Diagnosis of Turbine-Generators Using Artificial Intelligence, *IEEE Trans. Energ. Conv.*, Vol. EC-1, No. 2, pp. 68-74 (1986).
- 10) 柳 吉洙, 志村正道: 機械のパイプラインに注目した故障診断, 第1回人工知能学会全国大会, pp. 291-294 (1987).
- 11) Chandrasekaran, B. and Punch III, W. F.: Data Validation During Diagnosis, A Step Beyond Traditional Sensor Validation, *Proc. AAAI-87*, pp. 778-782 (1987).

(昭和 63 年 4 月 21 日受付)

(平成 元年 3 月 7 日採録)

**柳 吉洙 (正会員)**

1953年生。1976年韓国海洋大学
機関学科卒業。平成元年東京工業大
学大学院情報工学専攻修了。工学博
士。現在韓国海洋大学電子通信学科
講師。自動制御学会，人工知能学会

各会員。

**志村 正道 (正会員)**

昭和11年生。昭和35年東京大学
工学部応用物理学科卒業。昭和40
年同大学院博士課程修了。工学博
士。現在東京工業大学工学部情報工
学科教授。人工知能の研究に従事。

「機械知能論」昭晃堂，「人工知能」オーム社など。
IEEE, AAI, ACM, 人工知能学会各会員。