

故障オントロジー

—概念抽出とその組織化—

An Ontology of Faults —Articulation and Organization—

來村 徳信* 溝口 理一郎*
Yoshinobu Kitamura Riichiro Mizoguchi

* 大阪大学 産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki 567-0047, Japan.

1998年5月8日 受理

Keywords: ontology, diagnosis, model-based reasoning, modeling

Summary

Although a lot of model-based diagnostic systems have been developed, the conceptual meaning of "causes of faults" detected by them has not been discussed clearly. We believe there are two meanings of causes of faults, that is, the cognitive causes and the physical causes. The former specify locations of faults (i.e., component name) as results of cognitive interpretation based on means-ends relations among functions of hierarchical view of functional architecture. The later represent the states that physically cause the symptoms together with physical causal chains among them. In this article, we define such concepts about faults, aiming at establishing an ontology of faults. A set of classes of faults defined in the ontology allows us to specify the limited scope of detectable faults of conventional diagnostic systems.

1. はじめに

故障診断は多くの問題解決の中でこれまでに最も詳細に論じられ、最も多くのシステムの実現がなされた問題の一つである。日常生活においても故障診断は行われ、極めて身近な問題であると言える。言い換えると、我々は「故障」という概念に関してはよく理解しており、深い考察の必要性はないと考えてきたように思われる。しかしながら、筆者らはこれまで故障診断システムの研究・開発を通して故障に関する基礎的な考察を行ってきたが、基本的なレベルにおいて十分な概念化がなされておらず、診断システム概念レベルでの記述や相互比較を行うために必要な概念が不足していること、そして、さらに重要なこととして「故障」や「原因」といった基盤となる概念において曖昧性があることが明らかとなった。

例としてある AND 素子が壊れていて回路全体が異

常な値を出力している状況を考えてみる。専門家ではない一般の人は、故障診断によって AND 素子が壊れていることが分かった後で、「部品が壊れると全体が壊れる」というナイーブな認知的理解方法によって「AND 素子という部品が壊れたことが、回路全体の故障の原因である」と理解していることが多いと思われる。一方、回路の専門家は AND 素子と観測された異常値の間の物理的因果関係に基づいて故障原因を理解していると考えられる。このように、故障の原因の理解の方法が2つあるにも関わらず、いづれに基づく場合でも同じ「故障原因」という言葉で表されている。本稿では、前者を認知的故障原因、後者を物理的故障原因と呼び、両者を明確に区別する。

物理的故障原因の観点から見ると、部品の故障にさらなる原因が存在することがある。さきほどの例ではさらなる原因として例えば周りの部品の発生する熱がありえる。このような原因は機能階層に基づく理解で

は捉えられないため認知的故障原因ではないが、故障の真の原因を表しており、故障の再発を防ぐためには本質的である。

このように曖昧である「故障原因」概念などを明確化することで初めて、故障診断システムの能力を明らかにすることが出来る。例えば、従来の多くのモデルベース故障診断システム（例えば、[de Kleer 87]）は故障している部品を同定しており、部品が故障した原因を説明するさらに深い物理的故障原因は推論されない。したがって、結果として認知的故障原因を推論しているとみなすことができる。診断の結果同定された部品を交換しても故障が再発するおそれがある。

モデルベース故障診断システムの能力や性質に関する従来の議論は、仮説推論の観点からの論理的性質 [Console 92, Poole 92] や多重故障 [de Kleer 87] といった論理レベルのものに留まっている。しかし、故障診断研究の初期において Davis [Davis 84] によって指摘されているように、診断システムは特定の物理的な意味を持つ仮定に基づいて限られた範囲の故障しか扱っていない。例えば、多くのシステムでは部品間の接続関係が変化するような故障は扱っていない。このような能力の限界を表現できるような概念に関する議論は十分ではなく、システムの能力や性質は暗黙的になってしまっている。

これらのことを一般化すると、知識ベースシステムの問題解決能力や仮定が人間にとって不明確であるという問題に帰着する。つまり、知識ベースシステムの能力記述は問題解決器に具体化された記号レベルの記述のみであり、人間に容易に理解可能な概念レベルの簡潔な記述がない。したがって、システムの利用者は、問題解決器の詳細を調べない限り、システムの出力がどのような仮定に基づいているのか分からない。また、知識がシステムにおいて果たす役割が不明確であることが、知識の再利用性を妨げることになる。

これらの問題の解決の鍵として注目されているのが「オントロジー」である [Mars 95, 溝口 96, 溝口 97]。オントロジーは概念化の明示的な規約であり、概念体系である。知識ベースシステムの問題解決の能力・仮定・解法を表現する概念を定義するオントロジーはタスクオントロジーと呼ばれる [溝口 97]。タスクオントロジーに基づいて記述された、ある知識ベースシステムの問題解決に関する記述をタスクモデルと呼ぶ。タスクモデルは、タスクオントロジーに定義された語彙を用いて記述され、タスクオントロジーの公理に制約されている。このようなタスクモデルは知識ベースシステムを設計した際の合理的判断の根拠とその結果を

表しており、「設計意図」を表現している [溝口 97]。知識ベースシステムの設計意図の明示的表現は、知識の再利用、システムの協調動作に本質的に貢献する。

本稿では、故障診断システムの問題解決能力を明示的に記述するために、故障に関する概念の明示化と故障の分類を行う。つまり、故障診断システムの能力定義のための概念を定義するタスクオントロジーの中核となる故障オントロジーを定義する。まず 2 章において、前述した 2 種類の故障原因についてさらに詳細な議論を行う。次に、3 章において故障が起こる物理的な過程を考察し、物理的故障原因や故障個所といった概念に故障事象という概念に基づいた明確な定義を与える。これらの概念に基づいて、4 章において故障診断タスクについて検討を行い、故障診断に 3 つの意味があることを示す。また、5 章において故障を様々な観点から分類し、故障のクラスを概念化する。

同定された故障オントロジーは以下のように用いられる。

- 故障診断システムの能力の明示化
- 故障事象概念に基づいた故障推論方式の実現
- 故障クラスに基づいた段階的故障推論の実現

まず、同定された故障クラスを用いて、故障診断システムの扱える故障の範囲を明示することができる。明示された特徴や限界によって、利用者が各自の要求に適したシステムを選択することが可能になる。6 章において、代表的なモデルベース故障診断システムである General Diagnostic Engine (GDE) [de Kleer 87] を例として取り上げ、GDE が限られた範囲の故障しか扱っておらず、構造が変化する故障や周囲の環境による故障などの原因を同定できないことを明らかにする。残り 2 つについては、別稿 [來村 99] で述べる。

オントロジーに対する合意には方法論、内容、用語、公理化の 4 つのレベルがある [Skuce 95]。本オントロジーは公理集合による記述に向けた概念の抽出と組織化が終了した段階であり、本稿は概念の内容と用語に対する合意を目標としている。

2. 故障原因

本章では、人間がどのような概念を故障の原因と感ずるかということを議論し、人間のナイーブな理解としての故障原因を定義する。本章での議論は（人間またはシステムが）故障診断を行う方法や順序とは独立である。本章で述べる概念間の関係を図 1 に示す。概念は図中に示す識別番号を持ち、本文中では記号 b を付けて示す。図 4 の左半分もこれらの概念の関係を表

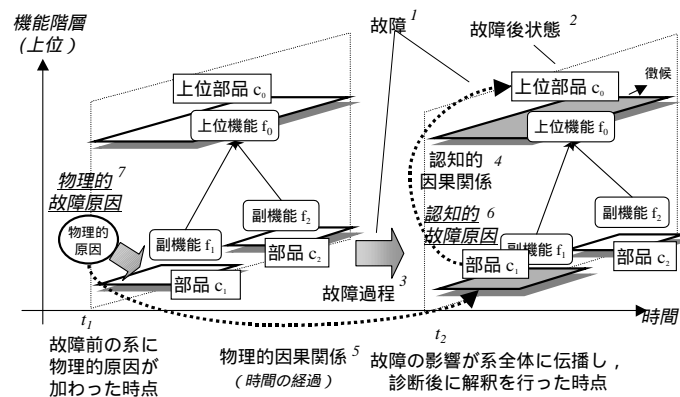


図1 認知的故障原因と物理的故障原因

している。

まず、故障^{b1}概念には故障が起こった後の対象の系の状態である故障後状態^{b2} (図1の右の平面)と、物理的故障原因^{b7}から故障後状態への遷移を表す故障過程^{b3} (図の2つの平面の間)の2つの意味がある。前者は発生した故障の影響が系全体に伝播し、その結果として現れた徴候を元に診断が終了した後でその結果を静的に解釈した時点を表す t_2 における状態である。後者は故障前の系に物理的原因が加わった時点 t_1 から t_2 までの時間区間に対応する「故障原因」を故障後状態を結果とするなんらかの意味での「因果関係」における原因であると定義する*1。故障が故障後状態^{b2}を意味する場合には、時間点 t_2 においてどのような関係が成り立っているかが焦点となる。一方、故障過程^{b3}を意味する場合は、時間的に先行する原因によってどのようにその状態になったのかということが大切である。前者の理解を支える因果関係を認知的因果関係^{b4}、後者の場合を物理的因果関係^{b5}と呼ぶ。その結果、故障原因にも認知的故障原因^{b6}と物理的故障原因^{b7}の2つが存在することになる。

まず、認知的因果関係^{b4}は機能の階層的達成関係 (図の垂直方向)に沿っている。まず徴候を、それを出力する(上位)部品 c_0 の機能 f_0 が機能不全に陥った結果であると解釈する。故障診断によって c_0 に含まれる部品 c_1 の機能 f_1 が機能不全を起こしていることが判明した後でその結果を解釈すると、副機能 f_1 が達成されることで上位機能 f_0 が達成される関係 (機能階層関係と呼ぶ)の理解に基づいて、副機能 f_1 の機能不全が上位機能 f_0 の機能不全をもたらしたという機能レ

ベルにおける認知的因果関係の認識ができ、下位部品 c_1 が上位部品 c_0 の故障の認知的原因^{b6}であると言える。このように、認知的原因は部品 (故障箇所^{t26})を示す。認知的原因を考慮する際には、その根底にあるはずの機能不全の間の物理的因果関係^{b5}は意識されず、機能の階層関係のみに基づいていると考えられ、原因と結果の間に時間は対応しない。専門家ではない一般の人間のいう故障原因とは認知的原因を指していることが多い。つまり、詳細な物理的因果関係は意識せず、機能階層のみに基づいて下位の部品 (の機能不全)が故障原因であると納得していると考えられる。

一方、物理的因果関係^{b5}は、時間軸 (図の水平方向)に沿っており、原因状態が生起したことが結果状態を物理的に生起させる関係を言う。あるグレインサイズにおける部品が故障後状態^{b2}に陥った物理的因果関係における原因を物理的故障原因^{b7}という。物理的故障原因は認知的故障原因^{b6}の部品が故障後状態^{b2}に変化したことのさらなる原因を表す。また、認知的故障原因が時間点 t_2 における状態を説明するのに比べて、物理的故障原因は t_2 の状態に至る過程を説明する。

定性推論システムが扱う因果関係は時間概念と対応しており物理的因果関係^{b5}を意味している。一方、Consolidation 理論 [Bylander 85] は対象の理解として認知的因果関係^{b4}を推論する試みであるが、両者は区別されていない。

多くのモデルベース故障診断システムは、故障原因として故障している部品を同定している [Hamscher 92]。機能階層知識に基づく診断方式 (例えば, [Larsson 96]) では、階層をトップダウンに探索し、機能不全を起こしている部品を同定する。定性推論や制約に基づく診断システム (例えば, [de Kleer 87, Reiter 87]) は、部品間の振舞いの制約に基づいて推論しているが、診

*1 後で議論するように故障原因は本来相対的な概念である。しかしナイーブな理解としては認識範囲における最上流の原因 (絶対故障原因^{t34})を故障原因と呼ぶことが多い。

断結果は正常ではない振舞いをしている部品であり、その部品が故障した原因は推論されない。つまり、従来の多くのモデルベース故障診断システムは、部品が故障状態になった原因（物理的故障原因^{b7}である）を推論しておらず、結果として認知的故障原因^{b6}を推論していると解釈することができる。部品の機能不全は物理的因果連鎖の途中の状態であり、さらなる原因が存在する。故障の再発を防ぐためにはそのような深い故障原因に対処する必要がある。

以下では、故障過程^{b3}について検討することで、物理的故障原因^{b7}についてさらに明確な定義と分類を行う。以降、単に故障原因と述べた場合は物理的故障原因を指すものとする。

3. 故障過程

本章では、診断対象の系を構成単位（部品）の階層的集合であると捉えて、部品が故障後状態^{b2}へ遷移する故障過程^{b3}について考察を行う。図2は考察の結果同定された故障に関する概念の集合である。これらの概念の識別番号には記号 t を付けて示す。

3.1 状態

故障過程を状態^{t1}の物理的因果連鎖で捉える。状態はひとつまたは複数のパラメータとその値の組で表される。パラメータのうち、意図されている状態を表すパラメータを意図パラメータ^{t3}、そうでないものを意図外パラメータ^{t4}と呼ぶ。正常な振舞いのシミュレーションを行えるという条件で作っている故障診断システムでは、モデル化されているものが意図パラメータであり、そうでないものは意図外パラメータである。

また、表現的観点からはパラメータを現実世界におけるなんらかの量に対応する物理パラメータ^{t5}とそうではない概念パラメータ^{t6}に分類することができる。例えば、物が存在するといった状態は物理量では表現しにくく、概念パラメータである「存在」として表現される。一般に、意図パラメータは物理パラメータである。

3.2 原因

故障の認識にはパラメータの値が正常とみなせる範囲を逸脱している異常値であることが出発点となる。観測された異常値を徴候と呼ぶ。ある部品において異常値が出力されたとき、何らかの原因によって部品が異常な状態に遷移したと捉えることができる。このプロセスを単に状態遷移または事象^{t2}と呼ぶ。事象は4つ組（原因^{t7}、結果^{t8}、箇所^{t9}、時間^{t10}）で表現される。

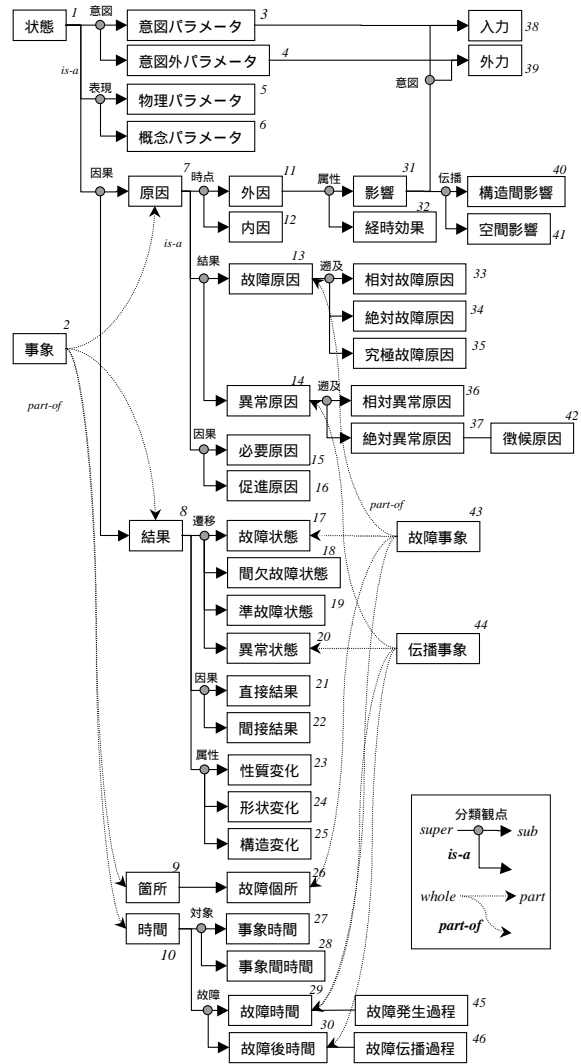


図2 故障過程を表現する概念

以下では状態のサブクラスである原因，結果を分類することで、故障の概念を明らかにする。

〔1〕影響

状態遷移の原因としてもっとも一般的なものは部品外部から伝わってくる影響^{t31}である。異常な影響が部品に伝わったことがトリガーとなって状態遷移が引き起こされる。まず、影響を意図の観点から分類することが出来る。意図パラメータ^{t3}によって表現される、部品が正常な振舞いをするために部品に外部から与えられることを設計者が意図している影響を入力^{t38}と呼び、入力に異常な値を取ったとき異常入力と言う。それに対し、設計者が意図していない意図外パラメータ^{t4}で表される影響を外力^{t39}と呼ぶ。例えば、電気回路にお

ける過電流は異常入力として扱えるのに対し、回路に異常な物理的圧力が加わったことは一般に外力である。

さらに、影響の伝わり方の観点からは、影響が構造的に接続関係にある個体間に伝わる構造間影響^{t40}と、空間的に伝わる空間影響^{t41}に分類できる。先ほどの例で、回路にかかる異常な物理的圧力が構造的に接続関係にある部品の張力である場合には構造間影響に分類されるのに対し、周りの空間にあった浮遊物が部品に衝突し物理的圧力が伝わった場合は空間影響に分類される。

〔2〕 経時効果

状態遷移は必ずしも部品外部からの影響によるわけではなく、時間の経過によって自然に劣化したことによって起こるものもある。このような状態遷移の原因としての時間の経過を経時効果^{t32}と呼ぶ。

〔3〕 内 因

前述の2つの故障原因は診断対象の運転過程において発生する状態である。しかし、ある種の原因は運転開始時にはすでに対象に内包されていると考えられる。例えば、設計ミスや製造ミスによって部品のあるパラメータの値がそうであるべき値でない場合には、通常の影響の伝播によっても故障が発生する。この故障の故障原因はそのパラメータの値であり、伝播された影響ではないと考えられる。このような運転開始時にすでに対象に内包されている故障原因を内因^{t12}と呼ぶ。それに対し、運転時に発生する事象（時間経過も含む）を外因^{t11}と呼ぶ。

一般に、故障は外因と内因の両方の原因を持つ。例えば、異常な電流が流れ込んでトランジスタが破損した場合の故障原因は第一には異常な電流という外因であるが、トランジスタをゆとりのある規格のものにしておかなかったという内因と考えることもできる。一般に、異常な影響によって起こった故障に対してその遷移を防ぐような設計を考えることができ、それがなかったことを内因と捉えることができるからである。

〔4〕 因果的分類

因果的には、原因をその状態がないと状態遷移が起こらない必要原因状態^{t15}と、状態遷移にとって必須ではないがそれを促進する効果のある促進原因状態^{t16}に分類することができる。

3・3 状態遷移とその結果状態

本節では部品の異常な状態遷移を遷移の可逆性に着目して分類し、故障状態を定義する。本オントロジーでは不可逆な状態遷移を故障事象^{t43}と呼び、原因^{t7}の状態^{t1}（多くの場合は影響^{t31}）を故障原因^{t13}、結果^{t8}

の状態^{t1}を故障状態^{t17}と呼ぶ。また、故障している部品のことを故障箇所^{t26}と呼ぶ。

状態遷移が不可逆な場合：内部状態が不可逆に変化しており、たとえ異常な影響がなくなったとしても元の状態には戻らないものを言う。例えば、「物理的な圧力がかかり、回路が断線したために電流が流れなくなった」という現象は異常な圧力がなくなったとしても、状態は元に戻ることはなく電流は流れない。

状態遷移が可逆な場合：異常な影響により内部状態が変化するが、その影響が正常に戻った場合には元の状態に戻る可逆な状態変化をいう。例えば、「熱によりCPUが暴走したが、電源を切って冷し、再起動すると正常に動く」という現象がこれにあたる。この場合は故障していないと考え、結果状態を準故障状態^{t19}と呼ぶ。

内部状態が変化していない場合：内部状態は変化していないが、入力が異常なため出力が異常である部品の場合である。例えば、「電力が低下したためモーターの回転数が低下した」という現象がこれにあたる。この事象を伝播事象^{t44}と呼び、原因状態を異常原因^{t14}、結果状態を異常状態^{t20}と呼ぶ。

因果的観点からは状態遷移によって必ず起こる直接結果状態^{t21}と付随して起こるであろう間接結果状態^{t22}に分類することが出来る。また、状態の遷移が間欠的である場合は間欠故障状態^{t18}と呼ばれる。さらに、結果として変化する属性の種類によって、質などの内的属性の場合である性質変化^{t23}、形状が変化する形状変化^{t24}、部品の構造的な位置関係などが変化する構造変化^{t25}に分類される。

3・4 時 間

状態遷移にはなんらかの長さの時間が経過すると考えられる。つまり、原因となる影響と結果となる状態または出力される異常値の間には、時間区間がある。原因と結果という因果関係の認識にとって、それらの間の時間区間の認識は本質的である。このような時間区間の長さを、状態遷移に最低限必要な時間区間として捉えて事象時間^{t27}と呼び、「長期」、「短期」、「瞬時」といった定性的な時間概念で捉える。例えば、部品が湿気によって腐食する場合には長期な時間区間が必要であり、外部からの圧力によって振動する場合は瞬間的な時間区間しか必要としない。

3・5 故障事象とその連鎖

診断対象の系において故障が起こったとき、故障過程^{b3}は故障事象^{t43}と伝播事象^{t44}の連鎖として捉えることができる。つまり、故障事象は他の故障事象または

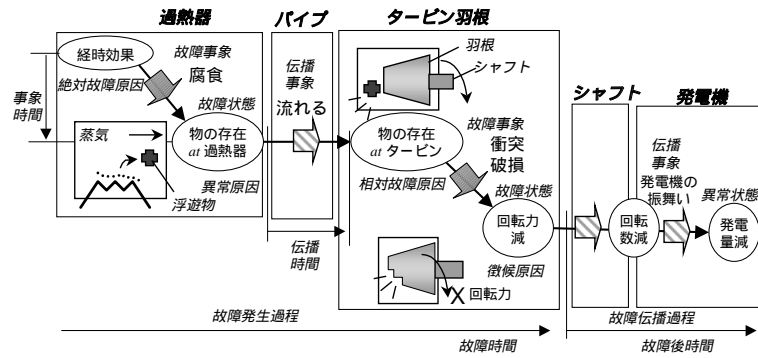


図3 故障過程の例

伝播事象を引き起こし、結果として徴候が観測される。図3は故障過程の例を示している。系は過熱器、パイプ、タービン羽根、シャフト、発電機の5つの部品からなる。まず、過熱器において経時効果^{t32}が故障原因^{t13}となって、故障事象「腐食」が起こり、小さな浮遊物が存在する状態（故障状態^{t17}）に遷移する。パイプは正常と同じ状態であるが、外力^{t39}である浮遊物が入ることによって、伝播事象「物が流体によって流れる」が起こり、浮遊物がタービンに存在する状態（異常状態^{t20}）になる。その結果、タービンは故障事象「衝突」と「破損」を起こし、回転数が正常より小さい故障状態になる^{*2}。シャフトからの異常入力が発電機に伝わった結果、発電機の出力である発電量が減少する。発電機自体は故障しておらず、異常状態^{t20}である。連続する故障事象の間の因果的順序関係を反映した時間を事象間時間^{t28}と呼ぶ。

故障箇所^{t26}は故障状態である部品と定義されているので、図の系における故障箇所は過熱器とタービンである。また、故障原因^{t13}は故障状態を引き起こした状態であるので、「経時効果」と「タービンにおける物の存在」である。後者はタービンにおける衝突・破損の直接的な原因であるが、さらに上流にその原因が存在するので、それらを相対故障原因^{t33}と呼ぶ。前者は与えられたモデルの中での因果関係においてそれ以上遡れない最上流の故障原因であるので、それらを絶対故障原因^{t34}と呼ぶ。一般に絶対故障原因はこの例のように経時効果^{t32}であるか、または現在考慮している対象モデルの外からの影響^{t31}である。後者の場合は実世界においてはそのさらなる原因が存在する場合があります、それらを究極故障原因^{t35}と呼ぶ。

一方、「過熱器における物の存在」と「タービン羽根

の回転力の減少」はそれぞれ故障事象ではなく伝播事象の原因と考えることが出来るため異常原因^{t14}と呼ばれる。特に、後者は伝播事象の連鎖のなかでは最上流の原因であるため絶対異常原因^{t37}と呼ばれる。絶対異常原因より上流の因果連鎖を故障発生過程^{t45}と呼び、それにかかる時間を故障時間^{t29}と呼ぶ。下流の因果連鎖を故障伝播過程^{t46}と呼び、その時間を故障後時間^{t30}と呼ぶ。故障原因が故障時間における故障事象の原因を説明するのに比べて、異常原因は故障後時間において異常値の発現している状態を説明する。その意味で、観測された徴候を説明する徴候原因^{t42}と呼べる。

さらに、タービン羽根とシャフトの2つの部品をタービンという大きなひとつの部品と階層的に見なしたとすると、故障診断後に「タービンの『故障原因』はタービン羽根である」と捉えることができる。これが2章で議論した認知的故障原因^{b6}である。タービン羽根の回転力発生という機能がタービンの回転数生成という上位機能の副機能であるという機能階層関係に基づいて、タービン羽根の機能不全がタービンの機能不全をもたらしたと解釈した結果である。このとき、故障後時間^{t30}にシャフトで生じた伝播事象は意識されておらず、タービン羽根の故障とタービンの出力における徴候との間の時間経過は認識されない。

4. 故障診断の種類

ここまで同定してきた概念を用いて、故障診断タスクの種類と意味を明示することができる（図4）。タスクがどのようなサブタスクによって達成されるか（問題解決構造）という part-of 分解ではなく、タスク全体としてどのような出力が得られるかに基づいた is-a 分類を行う。故障過程^{b3}は故障事象^{t43}を含む故障発生過程^{t45}と伝播事象の連鎖である故障伝播過程^{t46}から成

*2 2つの故障事象が連続して起こっているが、説明を簡単にするために2つの事象の結果をまとめて示している。

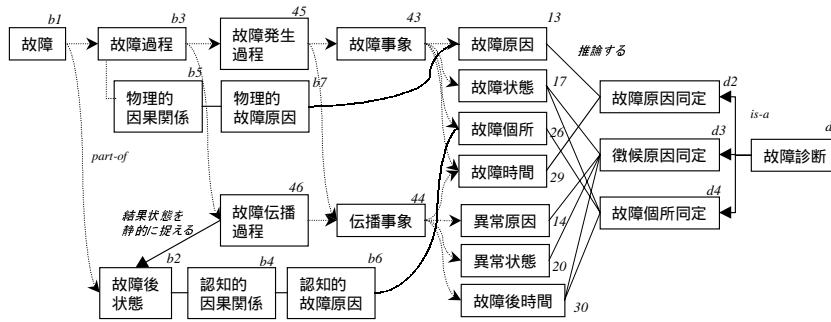


図 4 故障の構成と故障診断タスク

る．故障診断タスクには図の右に示す 3 種類がある．徴候原因同定^{d3}は徴候を説明できる異常原因^{t14}を同定する．故障個所同定^{d4}は故障状態である部品^{t26}を同定する．この 2 つの故障診断タスクを行うためには，故障後時間^{t30}を扱って絶対異常原因^{t37}ならびにそれを生成した故障状態^{t17}を同定する能力が必要である．故障原因同定^{d2}はさらに部品がなぜそのような状態に陥ったのかを説明する原因（とその連鎖）を同定する．この場合，推論エンジンにはさらに故障時間^{t29}を扱い，故障発生過程^{t45}を推論する能力が必要である．

3 つの故障診断タスクのうち，いずれが望まれるかは，タスクのコンテキストに依存する．例えば交換修理を行っている状況では故障個所の同定で十分であり，再設計を行うために故障の理由を追求したい場合には故障原因の同定が望まれる．したがって，人間が「故障」という言葉を使う際にはその意味は曖昧であり，故障原因，徴候原因，故障個所のいずれかをタスクコンテキストによって暗黙的に使い分けている．さらに，対象の系に故障原因が存在せずに徴候原因のみが存在する場合があるため，診断タスクの内容はタスクの実行後に初めて明らかになる．実行前に故障原因という場合は，暗黙的に故障の存在を仮定していることになる．

故障診断は一般的に次のように階層的に行われると考えることが出来る．対象の系と徴候が与えられたとき，まず系全体をひとつの部品として捉えたうえで故障していると仮定して，ひとつ下の階層における部品群を推論対象として絶対徴候原因同定^{d3}と故障個所同定^{d4}を行う．必要があればさらに細かいグレインサイズにおける診断が行われる．この診断結果の意味を解釈すると，認知的故障原因^{b6}を同定したと見なすことが出来る．さらに，タスクコンテキストの要請に応じて物理的故障原因^{b7}が探索される．

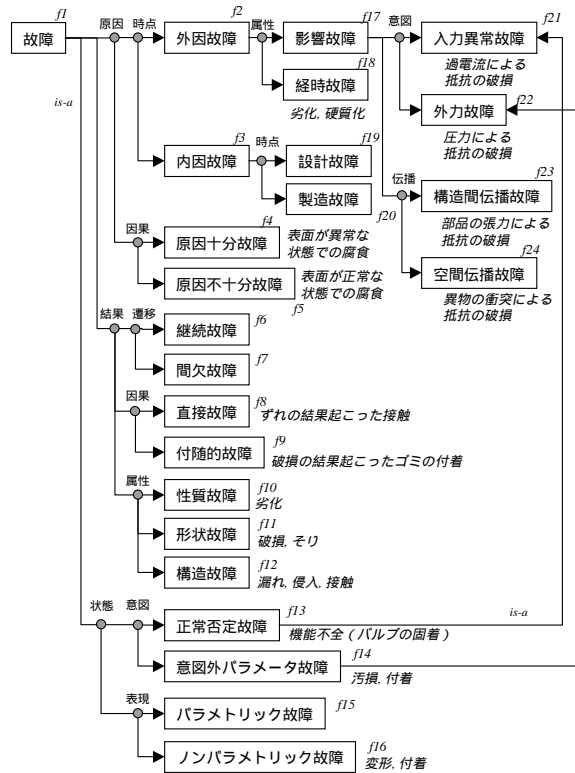


図 5 故障クラス

5. 故障の分類

これまで述べてきた故障に関する概念を用いて，故障を様々な観点から分類し，故障クラスを同定することが出来る．図 5 は故障クラスとそれぞれの例（斜字体で表す）を示している．識別記号に f を用いる．故障クラスの分類は，図 2 の概念に対応している．例えば，設計者によって意図されているパラメータ^{t3}で表現できるバルブの固着といった機能不全を表す故障などは，

部品の正常な振舞いを表現するモデルの否定で表現できるので正常否定故障^{f13}と呼ばれる。一方、汚損や付着のように意図されていないパラメータ^{t4}が必要な故障は、意図外パラメータ故障^{f14}と呼ばれる。また、物理量に直接対応するパラメータ^{t5}で表現できる故障をパラメトリック故障^{f15}と呼び、変形や付着といった概念パラメータ^{t6}で表現される故障をノンパラメトリック故障^{f16}と呼ぶ。結果状態^{t8}に関しては、例えば結果として変化する属性によって、質や強度などの部品の性質の変化^{t23}が起こる性質故障^{f10}、破損などの形状が変化^{t24}する形状故障^{f11}、漏れや接触などのように部品の構造的な位置関係や接続関係が変化^{t25}する構造故障^{f12}に分けることができる。

故障クラス分類は、図2に示される概念とともに概念を区別するために用いた概念(分類観点)に基づいている。一般に、ある概念 C を分類する際には分類の観点となるような C の属性とそのとりえる値の集合を同定することが重要である。図2は故障概念の重要な part-of 要素である原因・結果などを分類しているため図5と構造が似ているが、本質的には分類観点属性とその値の列挙という役割を果たしている。

6. 故障診断システムの能力

ここまで述べてきた故障概念の定義と故障の分類が提供する語彙を用いて、故障診断システムの診断能力を記述することができる。診断能力には推論効率などもあるが、ここではどのような範囲の故障を診断することができるかについて議論する。故障の範囲は、推論時に操作することができる概念の集合(操作能力)、同定することのできる故障クラス(範囲能力)、遡ることができる因果連鎖の深さ(遡及能力)で表現できる。これらは互いに依存している。診断能力の評価基準はタスクコンテキストに依存する。例えば、遡及能力は交換修理の場合には重要ではないが、再発防止のための再設計のときには本質的である。

本章では診断能力の記述例として、代表的な制約に基づく診断システムであるGDEを取り上げる。まず時間に関する「操作能力」について検討すると、故障後時間^{t30}のみを扱っており、故障時間^{t29}を扱っていない。その結果、事象に関する操作能力として、推論のためには故障時間が必要な故障事象^{t43}を推論できないため故障発生過程^{t45}を推論しておらず、故障原因同定^{d2}が出来ない。GDEは故障後時間における故障状態^{t17}と伝播事象^{t44}を扱うことによって、故障箇所同定^{d4}及び徴候原因同定^{d3}を行っている。しかし、GDEの推

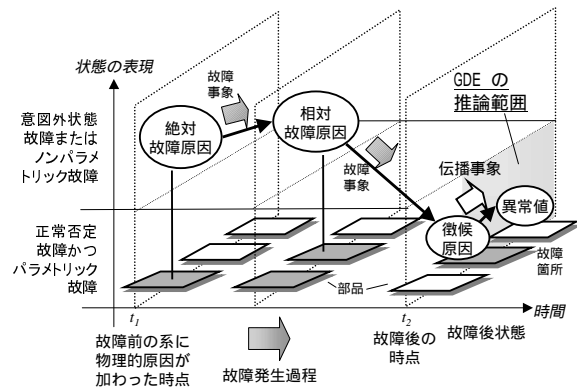


図6 GDEの故障診断範囲(網かけ部分)

論は静的で時間の概念がないため、故障後時間^{t30}における時間経過は無視されている。診断結果を解釈すると、故障発生過程^{t45}における物理的故障原因^{b7}は推論されておらず、認知的故障原因^{b6}を同定していると言える。

次に「範囲能力」について検討すると、GDEでは故障は「正常ではない振舞い」と定義されるので、正常否定故障^{f13}を扱っていると言える。しかし、GDEのモデルは意図されている物理パラメータから構成されるので、意図外パラメータ故障^{f14}やノンパラメトリック故障^{f16}は表現できず扱えない。

さらに、部品間の接続関係は変化しないと仮定され、構造故障^{f12}、外力故障^{f22}、空間伝播故障^{f24}のような正常とは異なる部品間の関係を推論することができない。したがって、これらの故障が発生したときには、故障していない部品が故障していると診断されたり、故障している部品が同定されないことが起こりえる [Davis 84, Tatar 96].

以上の考察結果を図示すると図6のようになる。GDEは正常否定故障^{f13}かつパラメトリック故障^{f15}の結果の故障伝播過程^{t46}のみを推論し、故障発生過程^{t45}を推論していない。また、図6に示すように故障後時間^{t30}は圧縮され故障後状態^{b2}を推論していると見せる。「遡及能力」は浅いといえ、GDEで診断された故障箇所のほかにさらに因果連鎖の上流の故障原因(箇所)が存在することがある。図3の例では、GDEではタービンだけが故障箇所として出力されるため、より深い故障原因である過熱器の腐食に対処できず、タービンを交換しても同様の故障が再び起こる可能性がある。

なお、GDE+[Struss 89]は部品で起こり得る故障パターンを「故障モード」として与える枠組みである。「範囲能力」は与えられた故障モード群のカバーする範

困であり GDE より狭くなるが、物理的裏付けのある故障が推論される。故障モードは故障状態^{t17}を表す式とそれを概念的に表す「漏れ」といったラベルから構成される。ラベルが故障原因^{t13}を暗に含んでる場合もあるが、故障原因を明示的に同定することはできない。

7. 関連研究

従来の故障の定義や分類に関する議論は、論理レベルにおけるものが多い。特に、制約に基づく診断と Abduction に基づく診断での故障の定義の違いに関する議論が多く成されており [Console 92, Poole 92]、ここではモデルの違い（正常時、異常時）、徴候の違い（入力、出力）、徴候のカバーの違い（矛盾、説明）が指摘されている。本稿で述べた故障の定義や分類は物理的な現象を概念レベルにおいて考察を行ったものであり、abduction に基づく診断の枠組みでいえば、仮説にどのようなものがあるかを概念レベルで分類したものといえる。

Struss は故障診断プロセスにおける論理的な仮定について議論し、疑う仮説の範囲を変化させる枠組みについて論じている [Struss 92]。本論文で述べた故障クラスは、故障発生過程の観点から行った、そのような範囲の概念化であると言える。

Davis [Davis 84], Böttcher [Böttcher 95] は従来の故障診断が部品間の異常な伝播を扱えないことを指摘している。Davis は故障を「構造故障」や「電流の向きが逆転する故障」などいくつかに分類している。Tatar は故障が連鎖する現象について議論し、GDE のようなシステムがすべての故障原因を列挙できないことがあることを指摘している [Tatar 96]。山口らは、故障メカニズムについて研究を行っている [Purna 96, 山口 92]。

また、信頼性工学や故障物理 [塩見 77] の分野において、故障概念の整理が必須であることが認識されており、故障発生過程でおこる現象（故障メカニズムとよばれる）として SCWIFT（応力破壊、腐食などの頭文字）などが同定されている。また、想定外の原因である外乱の列挙も行われている [小栗 80]。本オントロジーでは、このような現象のインスタンスを形式的に記述するための構成要素のクラスであると言える。これらの構成要素を用いて、別稿 [來村 99] で述べる故障事象モデルを記述することができる。

8. おわりに

本稿では人間の故障の認識を分析し、あらためて故

障を定義した。それに基づいて、故障を物理的な観点からみた概念である故障クラスを同定した。概念化することによって、故障診断システムの扱える故障の範囲が明確になり、システムの特徴や限界を明らかにすることができる。このことを GDE を例として示した。

本稿で示した故障オントロジーの故障事象概念に基づくことで、より広い範囲の故障を推論する枠組みを実現することができる。また、同定された故障クラスを用いて探索範囲の動的な制御を行うことができる。これらについては、別稿 [來村 99] で述べる。

今後、本オントロジーの公理化を進める予定である。例えば、故障診断システムの診断能力に関する質問に答えるために、故障クラスとそれが表す故障事象、それに必要なモデルのクラスの間を公理化することが考えられる。

謝辞

当研究室の池田満助教授に多くの助言を頂いた。本学産業科学研究所の鷲尾隆助教授には草稿に有益なコメントを頂いた。本稿は龍谷大学大学院の植田正彦氏（現在、東光精機（株））、大阪大学大学院の西原稔人氏（現在、三菱重工業（株））とともにに行った考察に基づいている。また、査読者に有益なコメントを頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- [Böttcher 95] Böttcher, C.: No Fault in Structure? – How to Diagnose Hidden Interactions, *Proc. of IJCAI-95*, pp.1728-1733 (1995).
- [Bylander 85] Bylander, T. and Chandrasekaran, B.: Understanding Behavior Using Consolidation, *Proc. of IJCAI-85*, pp.450-454 (1985).
- [Console 92] Console, L. and Torasso P.: A Spectrum of Logical Definitions of Model-based Diagnosis, In *Readings in Model-based Diagnosis*, pp.78-88 (1992).
- [Davis 84] Davis, R.: Diagnostic Reasoning based on Structure and Behavior, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.347-410 (1984).
- [de Kleer 87] de Kleer, J. and Williams, B. C.: Diagnosing Multiple Faults, *Artificial Intelligence*, Vol.32, pp.97-130 (1987).
- [Hamscher 92] Hamscher, W., Console, L. and de Kleer, J. (eds.): *Readings in Model-based Diagnosis*, Morgan Kaufmann (1992).
- [來村 99] 來村徳信, 他: 故障オントロジーの考察に基づく故障診断方式 — 網羅的故障仮説生成 —, *人工知能学会誌*, Vol.14, No.5, pp.??-?? (1999).
- [Larsson 96] Larsson, J. E.: Diagnosis based on Explicit Means-ends Models, *Artificial Intelligence*, Vol.80, pp.29-93 (1996).
- [Mars 95] Mars, N.J.I. (eds.): *Towards Very Large Knowledge Bases*, IOS Press (1995).
- [溝口 96] 溝口理一郎: 形式と内容 — 内容指向人工知能研究の

- 勤め —, 人工知能学会誌, Vol.11, No.1, pp.50-59 (1996).
- [溝口 97] 溝口理一郎, 池田満: オントロジー工学序説, 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp.559-569 (1997).
- [小栗 80] 小栗富士雄: 機械が受ける外乱障害ハンドブック, 共立出版 (1980).
- [Poole 92] Poole, D.: Normality and Faults in Logic-based Diagnosis, In *Readings in Model-based Diagnosis*, pp.71-77, Morgan Kaufmann (1992).
- [Purna 96] Purna, Y. W. and Yamaguchi, T.: Generating and Testing Fault Hypotheses with MODEST, *Proc. the Third World Congress on Expert Systems*, Vol.2, pp.954-961 (1996).
- [Reiter 87] Reiter, R.: A Theory of Diagnosis from First Principles, *Artificial Intelligence*, Vol.32, pp.57-96 (1987).
- [塩見 77] 塩見弘: 故障解析と診断, 日科技連出版 (1977).
- [Skuce 95] Skuce, D.: E-mail communication on July 24th, 1995 at srkb@cs.umbc.edu
- [Struss 89] Struss, P. and Dressler, O.: "Physical negation" — Integrating Fault Models into the General Diagnostic Engine, *Proc. of IJCAI-89*, pp.1318-1323 (1989).
- [Struss 92] Struss, P.: Diagnosis as a Process, In *Readings in Model-based Diagnosis*, pp.408-418, Morgan Kaufmann (1992).
- [Tatar 96] Tatar, M. M.: Diagnosis with Cascading Defects. *Proc. of ECAI-96*, pp.511-515 (1996).
- [山口 92] 山口高平, 溝口理一郎, 他: 対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラ II の構築と評価, 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.663-674 (1992).

〔担当編集委員: x , 査読者: x x 〕

著者紹介



來村 徳信(正会員)

1991年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1993年同大学院基礎工学研究科前期課程修了。同年,同大学産業技術研究所技官。1994年同助手。現在に至る。物理的システムに関するオントロジー工学的考察と,それに基づいたモデル化と推論に関する研究に従事。1996年人工知能学会創立10周年記念論文賞受賞。情報処理学会会員

kita@ei.sanken.osaka-u.ac.jp



溝口 理一郎(正会員)

1972年大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。1977年同大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年,大阪電気通信大学工学部講師,1978年大阪大学産業科学研究所助手,1987年同研究所助教授,1990年同教授。現在に至る。工学博士。パターン認識関数の学習,クラスタ解析,音声の認識・理解,エキスパートシステム,知的CAIシステム,オントロジー工学の研究に従事。1985年 Pattern

Recognition Society 論文賞, 1988年電子情報通信学会論文賞, 1996年人工知能学会創立10周年記念論文賞, 1990, 1991, 1996年人工知能学会研究奨励賞, 1989, 1990, 1991年人工知能学会全国大会優秀論文賞受賞。電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本音響学会, 教育システム情報学会, 日本認知科学会, IEEE, AAAI, IAIED 各会員。

miz@ei.sanken.osaka-u.ac.jp