

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 —

Fault Diagnosis based on Ontological Consideration of Faults
— Exhaustive Fault Hypotheses Generation —

來村 徳信*¹ 西原 稔人*^{1,†1} 植田 正彦*^{2,†2} 池田 満*¹
Yoshinobu Kitamura Toshihito Nishihara Masahiko Ueda Mitsuru Ikeda
小堀 聡*² 角所 収*³ 溝口 理一郎*¹
Satoshi Kobori Osamu Kakusho Riichiro Mizoguchi

- * 1 大阪大学 産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki 567-0047, Japan
- * 2 龍谷大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Ryukoku University, Otsu 520-2123, Japan
- * 3 兵庫大学経済情報学部
Faculty of Economics and Information Science, Hyogo University, Kakogawa 675-0101, Japan

1998年5月8日 受理

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

Summary

This paper describes a diagnostic method based on the ontology of faults discussed in [來村 99]. The ontology defines the concept of the fault event for capturing faults. On the basis of the concept, we propose a diagnostic method using the fault event models, which represent generic state transitions which could commonly occur in components. The categorization of causes of faults in the ontology helps the modelers describe such generic models. The reasoning method exhaustively generates fault hypotheses in wider range. We also integrate the reasoning method with the conventional methods. Moreover, the set of classes of faults in the ontology allows users to control the scope of suspected faults.

1. はじめに

従来、多くの故障診断システムが開発されてきたが、その能力に関する議論は診断精度や効率に関するものが中心であり、診断できる故障の範囲に関する議論は少ない。診断範囲は診断機構とともに診断知識に大きく依存するが、診断知識の内容に関する議論が行われていないことがその大きな原因である。

我々は別稿 [來村 99] において、診断範囲の明示化を目指して故障オントロジーを設計し、従来の多くのモデルベース故障診断システムが故障が起こった後の状

態における「故障箇所」の同定に留まっており、故障箇所が故障状態になぜ陥ったのか（故障発生過程）を説明する、より深い「物理的故障原因」は同定されないことを明らかにした。また、GDE[de Kleer 87] に代表される正常時モデルを用いた制約に基づく診断システムは、意図外パラメータ故障^{f14}やノンパラメトリック故障^{f16}を診断できず、構造故障^{f12}、外力故障^{f22}、空間伝播故障^{f24}などの正常とは異なる部品間の関係を推論できない（別稿第6章。記号は別稿における識別記号を示す）。その結果、故障のより深い原因を同定できず、浅い故障原因である部品を交換しても同様の故障が再び起こる恐れがある。

本稿での我々の目標は、このような深い故障原因を推論する枠組みを構築することである。深い故障原因

†1 現在、三菱重工株式会社

†2 現在、東光精機株式会社

の問題空間は非常に広いため、それを計算機によって完全に同定することは非現実的である。むしろ、どのような種類の故障原因を疑うべきかを経験や直感によって決定することができる人間の専門家を対話的に助けるような故障推論システムが望まれると考えられる。

その実現のための鍵は、推論システムが広い範囲の故障原因を網羅的に数え上げる能力を持つことと、その推論システムの問題空間を人間が概念レベルで制御できることであると考えられる。人間による診断行為は常識や経験に基づいて疑う故障の範囲を制限しており効率が良いが、それにとらわれて可能性のある故障原因を見落とす場合がある。計算機による網羅的故障仮説生成は、そのような見落としに気づかせる効果があると考えられる。また、「思わぬ故障」とは人間が当初考慮しなかった範囲に発見された真の故障原因を指すと考えられる。人間にとっても考慮しにくいような故障を含む広い範囲を、対話に基づいて段階的に推論することによって、「思わぬ故障」を含む深い故障原因の同定の支援が可能になると思われる。

推論できる故障の範囲の尺度として、完全性と健全性の2つを考えることができる。前者は実際に起こりえる故障原因集合に対するシステムが推論できる割合を言い、後者はシステムが推論する故障のうち実際には起こらないものの割合を言う。しかしながら、ある故障がある対象において「実際には起こらない」と断言することは専門家にとっても難しいため、健全性の評価は本質的に困難である。したがって、本稿では広い推論範囲（高い完全性）の実現に重点を置く。

別稿での分析結果（図2）が示す通り物理的故障原因には多様な種類があり、理想的には別稿図5に示されている故障クラスのすべてを推論する能力を持つことが望まれる。そのためには、モデルに記述すべき知識の「内容」を検討する必要がある。つまり、広い範囲の故障発生過程を推論するためにはどのように故障を捉えればよいかを明らかにする必要がある。従来の経験則を徴候原因関連ルールとして表現する方式では、知識の内容に関する指針がないため、診断対象の構成に依存した知識になりがちであった。また、部品ごとの故障モード記述 [Struss 89] では、部品固有の故障モードを表現しており詳細ではあるが、部品ごとに記述する必要があり、かつ部品の故障した原因を推論することはできない。

別稿 [來村 99] で述べた故障オントロジーがそのような役割を果たせると考える。オントロジーはモデル記述者に対象をとらえる際の視点と、記述の際の語彙とガイドラインを与える [溝口 97]。故障オントロジー

は故障を捉える際の中心的概念として故障事象概念を定義しており、モデルの記述の際の基本単位を与える。また、故障の原因と結果を網羅的に分類しており（別稿図2）、広い推論範囲を実現するためのモデル記述を容易にする。

さらにユーザが推論範囲を指示する際に用いる概念レベルの語彙として、故障クラス（別項図5）を提供する。仮説の信頼度といった数値ではなく、故障に関する物理的概念に対応する故障クラスを用いることで、ユーザの経験や直感を生かして効率よく深い故障原因を探索することができると考えられる。

本稿では、[山口 92] に示した枠組みを発展させた網羅的故障仮説生成システムの設計と実現について述べる。まず基本的な設計方針を次章で述べる。本稿では故障診断の故障仮説生成について主に議論し、故障仮説検証、徴候解釈については議論しない。これらについては多くの研究がなされており、[山口 92] においても議論を行っている。

2. 基本設計

2.1 故障事象に基づく推論

故障原因^{t13}を推論するための故障発生過程^{t45}モデルとして、抽象度の高い一般的な故障モデルと対象固有の属性を表す対象モデルを併用するアプローチが有効であると考えられる。一般的な故障モデルは高い再利用性を持ち、診断範囲の完全性に貢献する。対象モデルは対象に依存するが、健全性に貢献する。

そこで本稿では、一般的故障モデルとして故障事象概念^{t43}に基づいた「故障事象モデル」を提案する。故障事象は部品の不可逆な状態遷移と定義されており、故障事象モデルは故障時間^{t29}において部品で一般に起こり得る異常な状態遷移を表す。故障オントロジーに基づくことで、一定の視点に基づいたモデルを記述することができる。また、網羅的な故障の分類に基づくことで、外力^{t39}や空間影響^{t41}なども扱えるモデルを記述でき、広い診断範囲を実現することができる。

一方、対象モデルとしては「オブジェクトモデル」を記述する。各部品の属性や部品間の構造的関係を表し、各部品における故障事象の生起可能性を判定することができる。属性は抽象化されており、物の存在といった概念パラメータ^{t6}を含んでいる。

2.2 統合推論システム

別稿 [來村 99] の第6章において議論したように、GDE [de Kleer 87] に代表される制約に基づくモデル

ベース故障診断システムは、故障後時間^{t30}における物理パラメータ^{t5}かつ意図パラメータ^{t3}で表現される故障状態^{t18}と伝播事象^{t44}を扱っている。一方、故障事象^{t43}に基づいた推論は概念パラメータ^{t6}や意図外パラメータ^{t4}で表される故障発生過程^{t45}における事象を推論する。また、前者は対象に固有なモデルを用いており、後者は主に一般的な故障事象モデルを用いる。両者を統合した枠組みによって、対象固有の故障後状態と一般的な故障発生過程を捉えることが可能になると思われる。

本稿では、故障事象に基づく推論システムと制約に基づく推論システムの統合を提案する。両者は解釈知識と呼ばれる知識を用いて変換される。解釈知識の役割には、物理パラメータと概念パラメータとの間の表現の違いの変換と、部品固有な制約モデルと一般的な事象モデルを結びつけることがある。一般に前者の役割を果たす解釈知識は一般性があり、後者の場合は部品に依存した知識となる。

2・3 段階的故障推論と思わぬ故障

一般に人間が故障診断を行う際にはある程度な疑わしいかを経験などによって決めて、まずその範囲内で推論を行うと思われる。その範囲で故障原因が発見できない時に初めて、範囲を拡大する。このような段階的推論は推論範囲の健全性と推論効率の向上に貢献する。さらに、人間にとっても考慮しにくいような故障を含む広い範囲を段階的に推論することによって、「思わぬ故障」を捉えるようになると考えられる。ユーザとの対話的診断や推論結果の理解のためには、推論範囲を信頼度といった数値ではなく、故障に関する物理的概念に対応した概念を用いて表現する必要がある。

本稿では、故障クラス（別稿 [来村 99] 図 5）を用いた段階的故障推論システムを提案する。ユーザが疑わしいと考える故障クラスを選択することによって推論範囲を限定する。一般的には、まず、もっとも狭い範囲で推論を行なわせる。その範囲で故障原因が発見できない場合は、疑わしい故障クラスを含むように範囲を広げて、もう一度推論を行わせる。故障クラスは構造変化や時間経過といった物理的概念に対応した概念であり、故障の疑わしさに関するユーザの感覚を生かすことができると考えられる。

2・4 本論文の構成

まず、次章において故障事象に基づいた故障推論方式を提案する。次に、4章で従来の制約式に基づく推論方式と統合した推論システムの枠組みと推論例を示す。さらに、5章において段階的推論について述べる。

6章で評価を含めて検討を行い、7章で関連する研究について議論する。8章でまとめを行う。

3. 故障事象に基づいた故障推論

本推論方式では、対象の系をオブジェクトの集合として捉えて、オブジェクトで起こる状態遷移（故障事象）やその間での異常値の伝播（異常伝播事象）を推論する。以下ではまずオブジェクトモデルについて説明し、次に故障事象モデルについて述べる。

3・1 オブジェクトモデル

オブジェクトモデルは対象の系を構成する物の正常時における属性と位置関係を表す。オブジェクトは故障する主体となるものであり、タービンといった装置としての部品とともに蒸気や油などの媒体等も含む。例として火力発電プラントのタービンのオブジェクトモデルは図 1 のようになる。オブジェクトの属性としては故障事象を弁別するために必要なものとして、相、正常時において運動するかどうか（動作）、内部・外部を区切る境界があるかどうか（内部空間）を記述する。それ以外の形状や強度等の属性は、値として正常値と比較した「正常」または「異常」という定性値を取る。ここでは、一般的な定性推論システムに相当する定性的推論機構のみについて議論し徴候検出などについては議論しないので、これらの属性の値は推論の初期状態では（徴候として外部から与えられる異常値を除き）正常値を取るものとする。したがって、正常時の値を表すモデルには定性値は明示的には記述されない。オブジェクト間の位置関係として接触している関係（contact）や包含関係（include）を記述し、また、その一種として流体の流れる向き（flow）を記述する。

さらに、機能不全による思わぬ影響の伝播を推論するために、オブジェクトの機能を記述する。筆者らは多様な部品固有の機能についても研究を行っている [笹島 96] が、ここでは影響の伝播に関する一般的な機能を記述する。現在のところ、力学的エネルギーと熱エネルギーの伝播について記述している。例えば、タービンのシャフトは羽根から発電機に力学的エネルギーを「伝える」機能を果たしており、図 1 のように述語 function を用いて表される。逆に、ダンパーのように意図的に力を伝えないようにしている部品は、述語 disable-function で記述される。後で述べる一般的なモデルを用いて、機能不全の発生とその結果を推論する。

表1 故障事象モデルの例

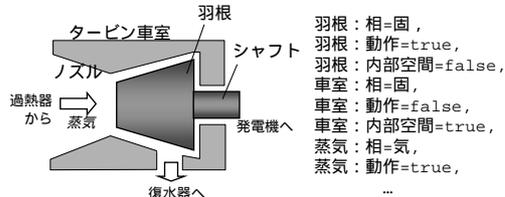
語彙	故障原因	故障動作	故障状態
付着	env:物=存在 and obj:相=固	物:付く(短)	obj:物=存在, *obj:形状≠正常, *obj:摩擦係数>正常
混入	env:物=存在 and (obj:相=液 or 気)	物:まざる(長)	obj:物=存在, obj:質≠正常
劣化	*env:温度≠正常	obj:変化する(長)	obj:強度<正常, obj:質≠正常, obj:表面≠正常
腐食	obj:相=固 and *obj:表面≠正常	obj:腐食する(長)	obj:強度<正常, *obj:形状≠正常
膨張	env:温度>正常	obj:膨張する(短)	obj:体積>正常, obj:形状≠正常, *obj:位置≠正常
磨耗	obj:相=固 and *obj:位置≠正常 and *obj:動作=true	obj:磨耗する(長)	obj:形状≠正常, *env:温度>正常, *env:表面≠正常
衝突	env:物=存在 and obj:相=固 and *flow(obj ₁ ,obj ₂ ,obj)	物:ぶつか(短)	env:圧力>正常 and *env:表面≠正常
接触	obj:位置≠正常 and obj:相=固 and *near(obj,obj ₁)	obj:ぶつか(短)	env:圧力>正常, contact(obj,obj ₁)
破損	(obj:強度<正常 or env:圧力>正常) and obj:相=固	obj:壊れる(短)	obj:形状≠正常, *env:物=存在
ずれ	env:圧力>正常 and obj:相=固	obj:動く(短)	obj:位置≠正常
侵入	(obj:相=液 or 気) and contact(obj ₁ ,obj) and obj ₁ :内部空間=true and obj ₁ :形状≠正常	obj:入る(瞬)	env _{in} :物=存在 and include(obj ₁ ,obj)
漏れ	(obj:相=液 or 気) and include(obj ₁ ,obj) and obj ₁ :形状≠正常	obj:漏れる(瞬)	env _{out} :物=存在, (include(obj ₂ ,obj ₁) and include(obj ₂ ,obj))

表2 異常伝播事象モデルの例

語彙	必要原因状態	故障動作	直接結果状態
圧力が伝わる	env ₁ :圧力>正常 and contact(obj ₁ ,obj ₂) and not disable-function(obj ₃ , 圧力伝達,obj ₁ ,obj ₂)	圧力:伝わる(短)	env ₂ :圧力>正常
接しているものに物が流れる	env ₁ :物=存在 and contact(obj ₁ ,obj ₂)	物:流れる(短)	env ₂ :物=存在
近傍に物が流れる	env ₁ :物=存在 and near(obj ₁ ,obj ₂)	物:流れる(短)	env ₂ :物=存在
流体によって物が流れる	env ₁ :物=存在 and flow(obj ₁ ,obj ₂)	物:流れる(短)	env ₂ :物=存在
包含関係に物が流れる	env _{in1} :物=存在 and include(obj ₁ ,obj ₂)	物:流れる(短)	env ₂ :物=存在
物が侵入する	env _{out1} :物=存在 and obj ₁ :内部空間=true and obj ₁ :形状≠正常	物:入る(瞬)	env _{in1} :物=存在
近傍に熱が伝わる	env ₁ :温度>正常 and near(obj ₁ ,obj ₂) and not disable-function(obj ₃ , 熱伝達,obj ₁ ,obj ₂)	熱:伝わる(短)	env ₂ :温度>正常

表3 機能不全を表す事象モデルの例

語彙	必要原因状態	故障動作	直接結果状態
力伝達不良	function(obj ₁ , 力伝達,obj ₂ ,obj ₃) and obj ₁ :形状≠正常	力:伝わらない(短)	env ₃ :圧力<正常
力緩衝不良	disable-function(obj ₁ , 力伝達,obj ₂ ,obj ₃) and (obj ₁ :形状≠正常 or obj ₁ :質≠正常)	力:伝わる(短)	env ₃ :圧力>正常
熱伝導不良	function(obj ₁ , 熱伝導,obj ₂ ,obj ₃) and (obj ₁ :質≠正常 or env ₁ :物=存在)	熱:伝わらない(短)	env ₂ :温度>正常 and env ₃ :温度<正常
断熱不良	disable-function(obj ₁ , 熱伝達,obj ₂ ,obj ₃) and obj ₁ :質≠正常	熱:伝わる(短)	env ₂ :温度<正常 and env ₃ :温度>正常



```

include(車室, (羽根, シャフト, ノズル, 蒸気)),
contact(羽根, シャフト), flow(蒸気, ノズル, 羽根)
contact(蒸気, (羽根, ノズル, 車室))
function(シャフト, トルク伝達, 羽根, 発電機)
...

```

図1 タービンのオブジェクト・モデル

3.2 故障事象モデル

故障事象モデルはオブジェクトにおいて一般的に起こり得る故障事象^{t43}を表現する。故障事象モデルは故障原因^{t13}、動作、故障状態^{t17}の3つの要素からなる。別稿図2で示したように、ある対象における故障発生

過程^{t45}を構成する事象^{t2}は4つ組〈原因^{t7}、結果^{t8}、箇所^{t9}、時間^{t10}〉で表現される。故障事象モデル f はその故障原因 fc の条件にオブジェクト o が一致したとき、 f の故障状態を fe 、動作にかかる時間(後述)を ft とすると、事象 $e_1 = \langle fc, fe, o, ft \rangle$ が起こる可能性があることを意味している。

故障原因と故障状態は4つ組〈主体、属性、関係、値〉で記述される。主体にはオブジェクト(モデルでは“obj”と表記される)または環境(“env”)のいずれかが記述される。環境は部品の近傍の領域を指す。本稿では obj_1 の近傍領域を env_1 と表記し、添え字で対応関係を表す。環境の属性には「温度」「圧力」「物」などがある。属性「物」は「存在」または「存在しない」を値として取り、水滴やゴミといった小さな浮遊物等が部品の環境に存在する(しない)ことを表す。動作は主体、ラベルとしての動詞、長期・短期・瞬間でのいずれかである事象時間^{t27}で記述される。

これまでに55個の故障事象モデルが同定されてい

る．表 1 にその一部を示す．表のなかで *がついている状態は促進条件^{t16}または間接結果^{t22}であることを示す．例えば，付着事象では，ある固体オブジェクトの周りに小さな浮遊物が存在することが必要原因^{t15}となって，「物が付く」という短期動作が起こり，直接結果^{t21}としてオブジェクトの表面に物が付いた状態になる．さらに，間接結果^{t22}として形状が正常ではなくなり，摩擦係数が正常より大きくなることが記述されている．

さらに伝播事象^{t44}の一部を表す異常伝播事象モデルを表 2 のように記述する．異常伝播事象は異なるオブジェクトの環境の間での伝播として表現される．あるオブジェクトの環境の圧力は，接している異なるオブジェクトの環境にしか伝わらないが，物と熱はそのほかにも近傍や流体の下流のオブジェクト，または囲んでいるオブジェクトの環境にも伝わるのがモデル化されている．これらのモデルが空間影響^{t41}や外力^{t39}を扱うことを可能にする．

また，部品の機能不全が起こる原因とその結果を，表 3 のように記述する．これらのモデルによって，機能不全が起こったことによる思わぬ影響の伝播を扱えるようになる．

3.3 故障事象推論方式

これらのモデルを用いた推論には結果を推論する順行推論と原因を推論する遡行推論の 2 つがある．遡行推論は入力として与えられた状態を起こす異常な状態（原因状態^{t7}）を特定する．順行推論は入力として与えられた状態が起こす異常な状態（結果状態^{t8}）を特定する．故障診断タスクでは前者が故障仮説の生成，後者が仮説検証のための徴候生成に用いられる．

推論プロセスはマッチングと評価の 2 つのステップからなる．遡行推論のマッチングステップでは，現在の状態とマッチする結果状態を持つ事象を探す．選ばれた事象は現在の状態を起こした可能性があり，現在の状態の因果連鎖の一部である．複数の事象が選ばれた場合，それらの間の関係は OR である．次に評価ステップではその事象の原因状態の記述に従って，新しい現在状態を作る．そして，さらなる原因を探すための次のマッチングステップが始まる．

故障事象モデルを用いた遡行推論は，オブジェクトの状態遷移の物理的な相対故障原因^{t33}として，主に部品の周りの環境の異常を推論する役割を果たす．一方，異常伝播事象モデルは，異なる部品（の環境）間の伝播事象を推論し，遡行推論の結果は相対異常原因^{t36}である．機能不全を表す事象モデルは，部品が意図された機能を発揮していないことによる異常な影響の伝播

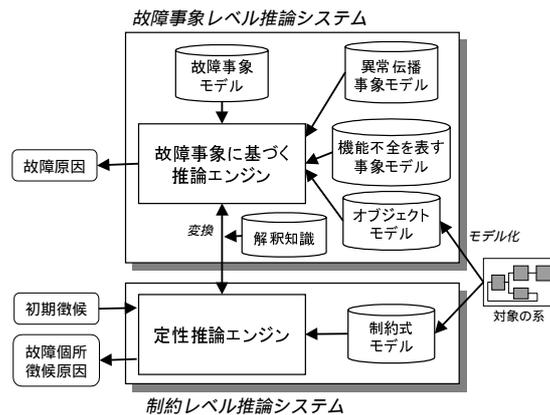


図 2 統合推論方式の枠組み

を推論する役割を果たす．

順行推論は遡行推論とは逆方向に推論を行う．マッチングステップでは現在の状態と一致する原因状態を持つ事象を探し，評価ステップで事象の結果状態の記述に従って新しい現在状態を作る．

4. 統合推論方式

本章では，故障事象モデルを用いた推論方式と，従来の制約に基づいたモデルベース推論方式を統合した推論方式を提案する．ここでは後者を制約レベルと呼ぶ．統合推論システムの枠組みを図 2 に示す．制約レベルの知識ベースは，意図された^{t3}物理パラメータ^{t3}間の制約式によって表現された部品モデルの集合とそれらの間の接続関係から成る．制約式は部品の望ましい振舞いを表しており，部品の接続関係は構造間影響^{t40}を表し入力^{t38}を伝播できる．制約レベルにおける推論エンジンは，定性推論に基づいており，定性値を制約式に沿って伝播することで影響の広がりや推論する．推論方式は [de Kleer 84] の方式を拡張したもので，詳しくは論文 [來村 97] に述べられている．定性値は正常値との比較によって [+], [0], [-] のいずれかを取るものとする．

4.1 推論プロセス

統合推論システムの故障推論は 2 つのプロセスから成る．まず，遡行推論によって，観測された徴候から故障原因の候補を生成する（仮説生成）．次に順行推論によって，故障原因候補から予測される他の徴候を生成し，実際の値と比較して検証を行う（仮説検証）．図 3 に推論される因果連鎖を示す．

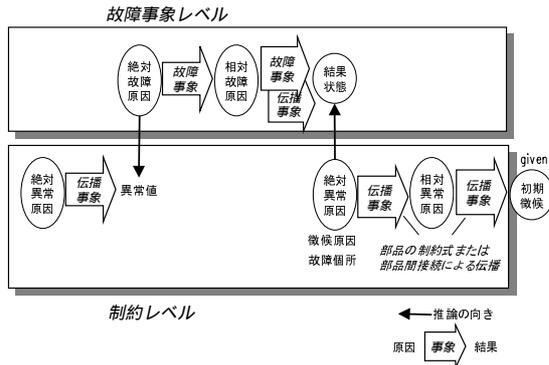


図3 統合推論方式によって推論される因果連鎖

仮説生成プロセスでは、まず制約レベルにおいて観測された徴候から遡行推論を行う。制約レベルでは状態遷移を扱っていないので、故障原因^{t13}ではなく異常原因^{t14}を推論することになる。制約レベルの遡行推論は部品内推論と部品間推論から成る。まず、与えられた徴候からひとつの部品内部で影響を伝播し、相対異常原因^{t36}を推論する。相対異常原因が接続されている部品からの入力^{t38}である場合は、部品間推論によってその接続部品へ影響を伝播する。そうでなければ、原因をそれ以上遡ることができないため、その異常原因は絶対異常原因^{t37}、すなわち徴候原因^{t42}である。

次に、この制約レベルにおける徴候原因を解釈知識によって故障事象レベルの結果状態に変換する。変換された故障状態から故障事象モデルを用いて遡行推論を行うことで、故障原因^{t13}の候補を生成する。さらに以下に述べるように、可能であれば再び制約レベルに戻って推論を行う。以上のプロセスによって、故障箇所、徴候原因、故障原因の候補（故障仮説と呼ぶ）を生成することができる。

仮説検証プロセスでは、まず、生成された故障仮説集合から仮説をひとつ取り出し、それが起こっている場合に観測されるはずである徴候をすべて推論する。これには順行推論が用いられ、故障仮説から結果として発生する状態を次々と生成することによって推論される。次に、推論された徴候を実際の値と比較して、故障仮説の弁別を行う。

4.2 解釈知識

物理パラメータと故障状態の変換は「解釈知識」にしたがって行われる。以下はその例である。

- IF 蒸気:乾き度=[-] THEN env:物=存在
- IF タービン効率=[-] THEN 羽根:形状 ≠ 正常

Name: turbine

Port:

symbol connected component : port
 in superheater : out
 out condensor : in
 gen generator : in
 flow flow : receiver
 press press : receiver

Parameters:

symbol	description	causal spec.	port
n	shaft revolution	CĒ	gen
qin	inlet heat	CĒ	in
qout	outlet heat	ĈE	out
flow	flow rate	CĒ	flow
pin	inlet pressure	CĒ	press
pout	outlet pressure	CĒ	press
e	efficiency	CĒ	
v	velocity	CE	

Constraints:

$$n = e * flow * v \quad (1)$$

$$v = (pi - po) * (qin - qout) \quad (2)$$

図4 タービンの制約モデル

前者の解釈知識は蒸気の乾き度が低下するということは気体である蒸気に液相の物である水滴が存在する（混入している）ことを意味することを表している。この知識は部品にあまり依存せず汎用性が高い。一方、後者の知識はタービンに依存しており、因果関係の推論結果も含んでいる。

遡行推論における制約レベルから故障事象レベルへの変換は、ある異常値の原因が制約レベルにおいては見つからないときに行われる。一方、逆の変換は解釈知識が適用可能であればいつでも行われる。この戦略は制約モデルの方が部品固有の知識も含み詳細であることに基づいている。

4.3 推論例

本節では火力発電プラントにおける推論例を示す。対象はボイラー・過熱器・タービン・発電機の部品となる。この対象において出力電力低下という徴候が現れた際の仮説生成プロセスについて、タービンにおける推論を中心として述べる。図4にタービンの制約レベルモデルを示す。

〔1〕 制約レベル

まず、与えられた徴候「電力低下」を出力する発電機が制約レベルにおいて推論対象となる。その結果、発電機の電力低下の原因の候補として、発電機における絶対故障原因（例えば、軸摩擦係数増大）と、相対異常原因「タービン軸回転数低下」が OR の関係で推論される。前者についてはそれ以上推論せずに、後者についてさらに原因を推論したとすると、異常値がター

ピンに伝播され、タービンが次の推論対象となる。軸回転数低下から式 (1) によって効率低下、流量減少、速度減少が推論される。速度減少の原因を式 (2) によって推論することで、入口圧力低下、出口圧力上昇、入口熱量低下が推論される^{*1}。したがって、推論結果は以下ようになる。

絶対異常原因 効率低下。

相対異常原因 入口流量減少, 入口熱量低下, 入口圧力低下, 出口圧力上昇

「入口流量減少」などは隣りの部品からの入力^{t38}であるため相対異常原因^{t36}であり、接続先である過熱器や復水器に値を伝播して、さらなる異常原因を推論する。

一方、「効率低下」は制約レベルでは低下した原因を推論することができないため、絶対異常原因^{t37}すなわち徴候原因^{t42}である。そこで、解釈知識によって表現を変換し、故障事象レベルでさらなる原因を追求する。ここでは、タービンの解釈知識「IF タービン効率 = [-] THEN 羽根:形状 ≠ 正常」により、「羽根:形状 ≠ 正常」に変換された場合の推論例を以下で示す。

〔2〕故障事象レベル

まず、(obj:形状 ≠ 正常) を結果状態に持つ故障事象を探すと、羽根の「磨耗」「破損」などが推論される。破損の原因状態は強度の低下または圧力が加えられたことであるので、次に、破損の原因として「劣化」による強度の低下や、なんらかの浮遊物が「衝突」したこと、さらには圧力が接触関係にあるシャフトから「伝わった」ことなどが導出される。羽根に衝突した浮遊物については、「流体によって流れる」事象を推論することで上流の過熱器から蒸気とともに流れてきた可能性が推論される。この因果連鎖は別稿 [来村 99] の図3で示したものと同一である。また、「物の存在」は解釈知識「IF 蒸気:乾き度 = [-] THEN env:物 = 存在」によって、制約レベルにおける「乾き度 = [-]」に変換される。この原因を制約レベルで推論すると、例えば過熱器に供給される熱エネルギーが不足していることが推論できる。

5. 段階的故障推論

本節では、ここまで述べてきた統合故障推論の枠組みの上に実現された段階的推論システムについて述べる。本システムでは、推論対象とする故障の範囲を指定するために、表4に示す7つの制御軸を同定し、それぞれ2つの選択枝を用意した。選択枝は故障クラス

*1 制約レベルの推論方式の詳細については [来村 97] を参照して頂きたい

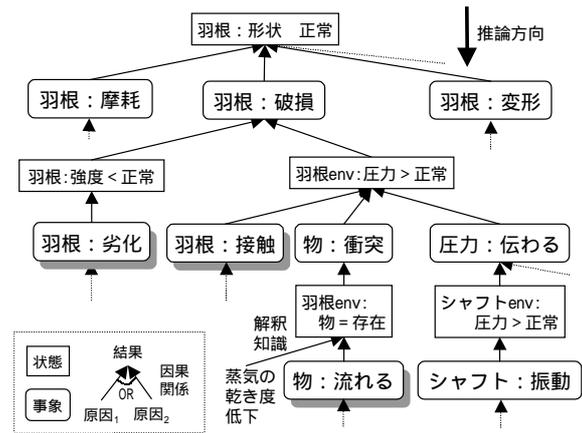


図5 推論例：形状の異常の故障原因（故障事象レベル）

(別稿 [来村 99] 図5) を語彙として用いており、物理的な概念と対応させることが出来る。選択枝 B によって形成される探索空間は選択枝 A によるものを含んでおり、広い範囲の故障をカバーすることになる。すべての選択枝を A にしたときの推論範囲は、多くの制約に基づく故障診断システムが扱える範囲と同じになる。

ユーザは制御軸の選択枝を選ぶことによって、システムの探索空間を制御することが出来る。一般的には、まず選択枝をすべて A にして最も狭い推論範囲で推論を行わせる。推論結果を検証した結果故障原因が見つからなかったとき、どの故障クラスが疑わしいかを経験などに基づいて決定し、その選択枝を B にして再度推論を行わせる。診断システムは探索空間を指定に応じて動的に変化させて推論を行う。

例として、前述の推論例と同じ徴候から段階的推論を行った場合を考えてみる。まず、ユーザが全ての選択軸において選択枝 A を選択したとすると、制約レベルのみで推論が行われる。推論結果は「タービンの効率低下」「ボイラーへの供給熱量減少」などになり、GDE の推論結果と同じように故障箇所と徴候原因が推論される。軸 6,7,8 を B にすると、事象レベルでの推論が始まるが、図5に示す故障事象のうち影が付いている3つの事象は推論されない。次に、「軸3:変化属性」で「B:構造故障^{f12}を含む」を選択すると、構造的な位置関係や接続関係が変化する故障を扱うモードになり羽根が車室に接触したことで破損した可能性が推論される。また、「軸5:経時故障」で「B:経時故障^{f18}も含む」を選択すると羽根の自然劣化が推論され、「軸4:影響伝播」で「B:空間伝播故障^{f24}を含む」を選ぶと過熱器から物が流れてきた可能性が推論される。

表 4 段階的故障推論のための選択軸

軸	軸の名前	選択肢 A	選択肢 B
1	原因十分性	原因十分故障 ^{t4} のみ	原因不十分故障 ^{t5} も含む
2	結果直接性	直接故障 ^{t8} のみ	付随的故障 ^{t9} も含む
3	変化属性	性質故障 ^{t10} , 形状故障 ^{t11} のみ	構造故障 ^{t12} も含む
4	影響伝播	構造間伝播故障 ^{t23} のみ	空間伝播故障 ^{t24} も含む
5	経時効果	影響故障 ^{t17} のみ	経時故障 ^{t18} も含む
6	意図パラメータ	正常否定故障 ^{t13} のみ	意図外パラメータ故障 ^{t14} も含む
7	物理パラメータ	パラメトリック故障 ^{t15} のみ	ノンパラメトリック故障 ^{t16} も含む
8	故障時間	故障後時間 ^{t30} のみ	故障時間 ^{t29} も含む

6. 検 討

故障事象レベルの推論エンジンは Common Lisp を用いて実装が終了しており、タービン及び変圧器において推論が実行されている。前者については専門書 [関西電力 67] の付録に挙げられているすべての故障原因を生成することができた。

また後者については、専門家の協力を得て、オブジェクトモデル 9 個、事象モデル 55 個、異常伝播事象モデル 14 個を用いて、実験を行った。例えば、電線が硬質化したという徴候に対して、本システムは 22 個の故障原因を生成した。そのうち 3 個は改修マニュアルに記述されていたすべての故障原因であり、それ以外にもマニュアルには記述されていなかったが 3 個については十分ありえると評価された。残りについても可能性は低いがありえないことはない、との評価であった。専門家によればマニュアルには起こる可能性の高い因果連鎖を記述しているとのことであり、例えば硬質化の原因のひとつである熱のさらなる原因としてマニュアルは漏電のみをあげていた。本推論方式ではそれ以外に外気温の上昇といった外的要因を推論したが、これは実験に用いたモデルの外の事象である放熱系の異常や機器の構成変更によって起こりえる。つまり、専門家が最後まで追っていない事象連鎖を網羅的に生成することで思いがけない故障に気づかせる効果があると考えられる。

段階的故障推論は故障仮説を疑わしいクラスのものに制限する役割を果たす。故障クラスの発生確率（またはその順序関係）を一般的に記述することは困難であるため推論範囲の決定はユーザにゆだねられているが、故障クラス概念は構造変化や時間経過といった物理的概念に対応しているため、人間の経験を生かした診断を行うことが出来る。例えば、新しい対象物に対して軸 5:経時効果の選択肢 B:経時故障^{t18}を疑う必要は低いと考えられる。

このように、本推論方式は物理的概念に対応した語

彙を用いて推論範囲を動的に拡大することによって、可能性の非常に低い故障原因までを生成する枠組みとなっており、当初予想されていなかった故障を発見することができることから「思わぬ故障」の一部を扱っていると考えられる。

故障事象モデルは高い抽象度における一般的な事象を表しており、比較的高い再利用性を持っていると考えられる。実際、現在の故障事象モデルはまずタービンに適用され次に変圧器に適用されたが、変圧器への適用に際しては電気に関連する少数の属性と事象を追加する変更だけであった。しかしながら、現在のところ対象として主に流体システムなどを想定しており、複雑な機構部品などに固有な故障事象などはモデル化されていない。

制約レベルの推論エンジンは CESP を用いて実装されている。詳細な推論アルゴリズムなどは論文 [來村 97] に述べられている。故障事象レベルとの密な結合はまだ実装されていない。

7. 関 連 研 究

故障事象に基づいた故障仮説生成は、GDE に代表される制約に基づいた故障診断における故障仮説生成に比べて、故障発生過程^{t45}における物理的故障原因^{b7}を生成でき、より深い因果連鎖における故障個所を生成できるという 2 つの利点がある。後者の利点は空間伝播故障^{t24}やノンパラメトリック故障^{t16}を扱えることから生まれる。4章で示したように、制約に基づいた診断システムの診断範囲を拡張する役割を果たすことができる。

故障事象モデルは故障モデルの一種であるが、序論でも述べたように従来の故障モデルは再利用性が低いものが多い。故障オントロジーの故障事象概念に基づいたプリミティブな事象を組み合わせることで、従来直接記述されていた因果関係を導出することが出来る。

正常時の振舞いを表す制約モデルと異常な振舞いを表す故障モデルを統合する理論的枠組みについて

は、多くの研究が行われている（例えば、[Struss 89, Console 90]．より一般的には複数のモデルの統合 [Struss 92b]）．本推論方式では、制約モデルに基づいて同定された部品の機能不全のより深い故障原因を探るために、故障モデルを用いている．

Qualitative Process (QP) 理論 [Forbus 84] はプロセスという概念を導入している．故障事象は特殊なプロセスであると考えられる．故障事象は故障診断に特化しているため、促進原因や間接結果などの曖昧な表現や概念パラメータなどを扱っている．

山口らは素朴概念と事象の因果関係を表す素朴物理と呼ばれる知識の利用を提案している [Purna 96]．例えば、液体の存在は、液体が流れるか、個体が溶けるか、ガスが凝縮するかによって生じることが記述される．また、Böttcher は hidden interactions と呼ぶ異常な部品間干渉を扱っている [Böttcher 95]．そこで用いられている漏れといった hidden interaction model は部品間の伝播事象の一種である．

Davis は故障を「構造故障」や「電流の向きが逆転する故障」など4つに分類し、仮定を緩和することで段階的な診断が可能であることを示している [Davis 84]．本稿で示した段階的推論システムはその方向を押し進めたものであると言える．Struss は仮説を緩和することで診断の焦点を変化させる推論の枠組みを提案している [Struss 92a]．

本稿で示した故障診断方式の開発にあたって別稿で示した故障オントロジーが果たした役割は、システム的设计者に対してシステム設計及びモデル記述に対する指針とユーザと共有できる概念集合を与えることであった．一般に、計算機実行可能なレベル（レベル3[溝口 98]）の問題解決構造に関するオントロジー（タスク・オントロジー）はある種の問題解決器を合成する役割を果たすことができる [瀬田 98a, 瀬田 98b]．別稿で示した故障オントロジーは問題解決構造を考察の対象としておらずまた計算機実行可能なレベルにおける記述がなされていないため、そのような役割を果たすことはできないが、故障発生過程と故障診断能力を表現する語彙を与えることで故障診断に関する概念レベルでの合意を促進する役割を果たす．

8. おわりに

別稿 [来村 99] で述べた故障オントロジーに基づいた故障推論方式を提案した．故障事象概念に基づいて、空間を伝わってきた原因による故障などを含む広い範囲の故障仮説を生成できるシステムを開発した．また、

それを従来のモデルベース故障診断システムと統合した．オントロジーの語彙を用いて、それぞれのシステムの能力を明確に述べる事が出来る．さらに、故障オントロジーで定義された故障クラス概念を用いて、探索範囲を動的に変化させる枠組みを提案した．いわゆる「思わぬ故障」の一部を扱える枠組みとなった．

本稿では主に故障仮説生成について述べた．順行推論を行うことによって仮説検証のための徴候の生成ができることは示したが、異常値の検査や仮説管理機構などについては議論を行っていない．効率のよい検証方法や検査方法については、今後の課題である．

謝 辞

変圧器への適用に関して、東光精機（株）の高岡良行氏、太田衛氏、尾田純二氏ならびに関西電力（株）の水上雄一氏にご協力頂いた．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．また、大阪大学（現在、NEC 通信システム関西（株））の西田佳広氏に実装の一部を行って頂いた．査読者にも有益なコメントを頂いた．記して謝意を表します．

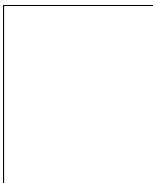
参 考 文 献

- [Böttcher 95] Böttcher, C.: No Fault in Structure? - How to Diagnose Hidden Interactions, *Proc. of IJCAI-95*, pp.1728-1733 (1995).
- [Console 90] Console, L. and Torasso P.: Integrating models of the correct behavior into abductive diagnosis, *Proc. of ECAI-90*, pp.160-166 (1990).
- [Davis 84] Davis, R.: Diagnostic Reasoning based on Structure and Behavior, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.347-410 (1984).
- [de Kleer 84] de Kleer, J. and Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.7-83 (1984).
- [de Kleer 87] de Kleer, J. and Williams, B. C.: Diagnosing Multiple Faults, *Artificial Intelligence*, Vol.32, pp.97-130 (1987).
- [Forbus 84] Forbus, K. D.: Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.85-168 (1984).
- [Hamscher 92] Hamscher, W., Console, L. and de Kleer, J. (eds.): *Readings in Model-based Diagnosis*, Morgan Kaufmann (1992).
- [関西電力 67] 関西電力神戸支店技術研究委員会: 新版火力発電用語辞典, オーム社 (1967).
- [来村 97] 来村徳信, 他: モデルに基づく問題解決のための流体系と時間のオントロジーの構築とその評価, *人工知能学会誌*, Vol.12, No.1, pp.132-143 (1997).
- [来村 99] 来村徳信, 溝口理一郎: 故障オントロジー —概念抽出とその組織化—, *人工知能学会誌*, Vol.14, No.5, pp.??-?? (1999).
- [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).
- [溝口 98] 溝口理一郎: オントロジー工学の試み, 1998年度人工知能学会全国大会論文集, pp.24-31 (1998).
- [Purna 96] Purna, Y. W. and Yamaguchi, T.: Generat-

- ing 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).
- [笹島 96] 笹島宗彦, 來村徳信, 池田満, 溝口理一郎: 機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現言語 FBRL の開発, *人工知能学会学会誌*, Vol.11, No.3, pp.420-431 (1996)
- [瀬田 98a] 瀬田和久, 池田満, 角所収, 溝口理一郎: 問題解決オントロジーの構成 — スケジューリングタスクオントロジーを例にして —, *人工知能学会学会誌*, Vol.13, No.4, pp.597-608 (1998)
- [瀬田 98b] 瀬田和久, 島輝行, 池田満, 角所収, 溝口理一郎: 問題解決オントロジーに基づく概念レベルプログラミング環境 CLEPE, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J81-D-II, No.9, pp.2168-2180 (1998).
- [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 92a] Struss, P.: Diagnosis as a Process, In *Readings in Model-based Diagnosis*, pp.408-418, Morgan Kaufmann (1992).
- [Struss 92b] Struss P.: What’s in SD? – Towards a Theory of Modeling for Diagnosis, In *Readings in Model-based Diagnosis*, pp.419-449, Morgan Kaufmann (1992).
- [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 〕

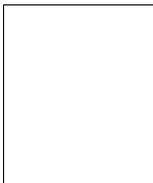
著者紹介

來村 徳信(正会員)は, 前掲 (Vol.14, No.5, p.?) 参照.



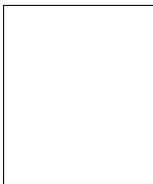
西原 稔人

1996年大阪大学工学部電子工学科卒業. 1998年同大学院修士課程修了. 同年, 三菱重工業(株)入社. 在学中, 故障診断に関する研究に従事.
nishihara@eic.kobe.mhi.co.jp



植田 正彦(正会員)

1994年龍谷大学理工学部電子情報学科卒業. 1996年同大学院修士課程修了. 同年東光精機株式会社入社. 在学中, 故障診断に関する研究に従事. 情報処理学会会員.
ueda@cdd.toko-s.co.jp



池田 満(正会員)

1984年宇都宮大学工学部情報工学科卒業. 1986年同大学院修士課程修了. 1989年大阪大学大学院博士課程修了. 同年, 宇都宮大学助手. 1991年大阪大学産業科学研究所助手. 1997年同助教授. 現在に至る. 工学博士. 形式言語の構文解析, 仮説推論, 帰納的推論, 知的教育システム, オントロジー工学の研究に従事. 1996年人工知能学会創立10周年優秀論文賞受賞. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会会員. ikeda@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

小堀 聡(正会員)

1985年立命館大学理工学部電気工学科卒業. 1987年大阪大学大学院医学研究科修士課程修了. 博士(工学). 現在, 龍谷大学理工学部電子情報学科講師. 1998年ロンドン大学認知神経科学研究所客員研究員. 生体情報処理と認知科学の立場から, 運動, 視覚, 記憶, 学習, 問題解決などに関する研究に従事. 医療分野への応用にも興味を持つ. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本認知科学会
kobori@rins.st.ryukoku.ac.jp

などの各会員.



角所 収(正会員)

1950年大阪大学工学部通信工学科卒業, 1957年同大学産業科学研究所勤務, 1989年同大学名誉教授, 龍谷大学理工学部教授, 1995年兵庫大学経済情報学部教授, 現在に至る. 工学博士. 超音波, 電子応用計測, 医用電子装置, 音声パターン認識, 心理音響, ネットワーク理論, 信号処理および知的情報システムの研究に従事. 1985年度Pattern Recognition Society 論文賞, 1987年度電子情報通信学会論文賞受賞. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本音響学会, 日本認知科学会, IEEE各会員
kakusho@humans-kc.hyogo-dai.ac.jp

溝口 理一郎(正会員)は, 前掲 (Vol.14, No.5, p.?) 参照.