

相互運用性を指向した機能・不具合知識の統合とその概念写像に基づく知識変換

Interoperability-oriented Integration of Failure Knowledge into Functional Knowledge and Knowledge Transformation based on Concepts Mapping

小路 悠介
Yusuke Koji

大阪大学 産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
koji@ei.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~koji/>

來村 徳信
Yoshinobu Kitamura

(同 上)
kita@ei.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~kita/>

加藤 義清
Yoshikiyo Kato

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部*1
Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency

筒井 良夫
Yoshio Tsutsui

(同 上)*2

溝口 理一郎
Riichiro Mizoguchi

大阪大学 産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
miz@ei.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~miz/>

keywords: design knowledge management, failure knowledge, ontology, functional representation

Summary

In conceptual design, it is important to develop functional structures which reflect the rich experience in the knowledge from previous design failures. Especially, if a designer learns possible abnormal behaviors from a previous design failure, he or she can add an additional function which prevents such abnormal behaviors and faults. To do this, it is a crucial issue to share such knowledge about possible faulty phenomena and how to cope with them. In fact, a part of such knowledge is described in FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) sheets, function structure models for systematic design and fault trees for FTA (Fault Tree Analysis). The problems on which we focus in this paper are that such knowledge scatters around in several knowledge formats such as functional structures and FMEA sheets, and hence interoperability among them is low. Aiming to promote sharing of such knowledge among designers, this paper proposes an integration model and, a system to transform an extended functional model into a task-dependent knowledge model (FMEA sheet, for example) semi-automatically based on ontology engineering. The integration model includes both knowledge about functional structures and possible faulty behaviors. In order to transform the models, the system uses two ontologies for the two knowledge models, each of which defines fundamental concepts in each model to capture the target world from its own viewpoint. The system transforms the knowledge models using ontology mapping knowledge, which specifies the correspondences (mapping) between concepts in the ontologies. This paper discusses the contents of the ontologies, the ontology mapping knowledge, and the transformation system.

1. は じ め に

近年の工学を取り巻く状況は、設計・開発リードタイムの短縮、グローバルな協調作業、熟練技術者の知識継承

などを要請しており、組織構成員のもつ工学知識を顕在化し、組織内で共有・継承し活用することが重要視されている。本研究は、機能と不具合に関する知識に注目した設計知識管理を大きな目標としている。人工物の機能は直感的には目的や使用時の効用などを表し、人工物に関する知識の根幹であると言える。設計問題は要求条件と

†1 現在、情報通信研究機構

†2 現在、有人宇宙システム(株)

して与えられる機能を、それを実現できる（同時に他の要求条件も満たす）構造へマッピングする問題であると言え、その初期段階である概念設計は、目標とする機能（要求機能）を部分機能へ分解する機能分解を含む [Pahl 88, Hubka 98]。そのため、その結果として得られる機能分解木は、人工物がなぜそのように設計されているのかという設計者の意図（設計意図（Design Rationale, 以下 DR）[Lee 97]）の一部を表す。機能分解木としてそのような知識を明示化することは、他の技術者の理解を容易にするため、概念設計をグループで検討する設計レビューなどで役立つ。また、設計者自身の暗黙的知識を外在化するメディアとなることで、設計者の対象に関する深い理解を促進すると共に、改良設計や品質問題解決における見落としを防ぐ効果がある。

一方、本論文で不具合とは直感的には、設計者・使用者によって好ましくないと判断されるもので、不具合、不具合原因、不具合症状、不具合メカニズムなどを総称したものを指す^{*1}。設計・製造現場では設計された人工物の作動効率や製品品質を更に向上させることは必須の課題であり、信頼性解析などを行い潜在的な不具合を同定し、それを解決する方法を考えることが行われる。そのためには、設計者がどのような不具合を想定し、どのように対策を行ったかを記録し、共有することが重要である。例えば、設計レビューにおいて設計者が予期した不具合の網羅性を議論する際に役立つ。また、ある装置で起こった不具合に関する知識を、他の装置や分野で活かすことも重要である。

このような機能に関する知識と不具合に関する知識は密接に関連している。例えば、信頼性解析の分野で広く用いられている FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) [塩見 83] では、装置の不具合（故障モードと呼ばれる）は機能の否定（例えば「動かない」など）として表現されることが多い。また、不具合の列挙は機能ごとに行われ、対策の一部として機能の追加や他の防ぎ方へ機能を変更するような改良が行われることが多い。そのため、両者を関連づけて理解することが求められる。しかし、機能と不具合を関連づけて知識として記述し、組織内で共有することが重要であるにもかかわらず、設計・生産現場ではそのような知識の共有はあまり進んでいない。本稿ではその原因として、知識記述に関する以下の二点に注目している。

(1) 規約が不十分で記述が ad hoc であること

機能に関する設計知識は暗黙的かつ属人性が強い。そのため、不十分な規約の下で、他の設計者が利用できるように一般的かつ一貫性を持って記述することは容易ではなく ad hoc な記述になりがちである。不具

合に関する知識も、同様に一般性、一貫性が低くなりがちである。不具合に関する知識の場合には、原因や結果をもれなく列挙することが重要であるが、ad hoc な記述は網羅性の低下につながる。

(2) 記述がタスク依存で相互運用性が低いこと

機能に関する知識が記述される機能分解木は概念設計へ依存した記述であり、不具合に関する知識が記述される FMEA シートは信頼性解析タスクへ依存した概念を用いた記述となっている。例えば、FMEA シートで記述される故障モードがそれにあたり、信頼性解析タスクに依存した概念であるといえる。このようなタスク（問題解決）への依存により、タスク間で共通している一部の知識も分散して記述され、相互の関連づけが十分にされていない。したがって、同じような情報を何度も記述する必要があり更新も困難であるばかりか、重要な情報の見落としも生じがちである。このように異種の知識が分散しており、統合化が図られていない。

本研究ではこのような問題点を解決し、機能と不具合に関する知識の管理と流通を促進するために、オントロジーに基づく統合記述支援と概念写像に基づく変換を提案する。まず、機能と不具合を統合して記述する知識モデルとそれを支えるオントロジーを提案する。オントロジーは知識記述の規約と共通語彙を提供することで、前述の問題点の(1)を解決することに貢献する。これは従来、開発してきた機能オントロジー [來村 02a] を拡張することで得られる。このオントロジーとそれに基づく記述枠組みは住友電気工業（株）生産技術部における通常業務において実用されており、技術者から暗黙的だった知識の明示化と共有に役立つという評価を得ている [溝口 02]。不具合についても同様の効果を得るためには、不具合をどう捉えるのか、不具合の発生過程（どのように発生するか）、伝播過程（どのように他の機能へ伝播するか）、そして機能との関連性等を明らかにする必要がある。特に、不具合の発生過程は機能構造とは独立しているものが多いため、これまでの機能モデルでは余り扱われていなかったが、不具合を防ぐためにその発生過程に何らかの作用をする機能も多く、このような知識を機能と関連づけて扱うことは改良設計などに大きく貢献すると考えられる。

次に、(2)の問題点を緩和するために、統合モデルをタスクに依存するそれぞれのモデル（タスク依存モデル：例えば FMEA シートや Fault Tree）へ変換する枠組みを提案する。この変換を行うための重要な課題は各モデルを規定するオントロジー間の対応付けを用意しておくことである。オントロジー間の対応付けは表層的な語句マッチングによって自動的に行う研究が多いが、本研究では概念的 content に踏み込んだ対応付けを行うため、実際に企業でタスクを実行している専門家からの意見を反映し手動で行う。この枠組みにより、設計者が統合モデル

^{*1} 本論文における機能の「故障」と「不具合」の違いは、故障が「機能の否定（例：動く 動かない）」のみを指すのに対し、不具合は「機能の属性値の低下（例：動く 精密性が低下して動く）」も含む点とする

として記述した複数のタスクに共通する機能と不具合に関する知識を、それぞれのタスク実行者がタスク依存モデルとして参照し、再利用することができる。本枠組みは、オントロジーを更に拡張、構築することで、分散している設計に関する様々な知識を統合・管理する、より一般的な設計知識相互運用ツールへと発展させることが可能である。

ただし本論文では、一般に不具合として考えられるもののうち、概念レベルの設計段階などで対象となる不具合 (mal-function に関連するもの) を対象とし、ショートなどの構造的な要素を含む不具合 (mal-structure に関連するもの) は対象としない。そのため、装置構造自体のモデル化やその変化プロセスは扱わない。

本稿ではまず、統合モデルについて 2 章で述べる。ここでは、例題を用いて統合モデルの概要と必要となる概念について説明し、その後、それらの概念を定義する機能・不具合統合オントロジーについて説明する。次に、統合モデルをタスク依存モデルへ変換する知識変換システムの概要について 3 章で述べる。ここでは、タスク依存モデルの例として、信頼性解析の分野で広く用いられている FMEA シートを扱う。4 章では、この知識変換システムを用いて得られる効果について述べる。5 章では、知識変換システムの効果を検証するために行った、知識変換システムの実装と人工衛星の電源系への適用について述べる。6 章では、関連研究について述べる。

2. 統合モデル

統合モデルは、主に機能に関する知識を扱うモデルである機能分解木に、機能が望ましくないと解釈されるもの (機能不具合と呼ぶ) へ変化することの原因とその結果を表すモデルを統合したモデルである。また、その不具合がどのように防がれているかを表すモデルも扱うことができる。

2 章では、まず、統合モデルの具体例を通してそこで表れる概念の概略について述べる。例題は半導体生成プロセスにおけるインゴット切断装置であるワイヤソー内で発生する不具合である。直観的に理解するために図 1 に概要を示す。これを統合モデルとして記述したものが図 2 である。その後、モデルで用いられる概念を規定する機能・不具合オントロジーについて述べる。

2.1 機能分解木

2.1 節では、統合モデルの元となった機能的知識のモデルである機能分解木について述べる。機能分解木は、概念設計における機能分解 [Pahl 88] の結果を示しており、機能が更に詳細なグレインサイズで捉えた部分機能の集積によって達成されていることを表す。機能分解木で最上位に位置する機能 (全体機能と呼ぶ) は要求された機

能を表していることが多い。

図 2 の右側の木は、ワイヤソー装置の機能分解木の一部である。筆者らは振る舞いをブラックボックスモデルとして「装置の入出力の状態の変化を装置の観点から捉えたもの」と定義し、機能を「振る舞いを要求された機能を達成するという目的の下で解釈したもの」と定義している [来村 02a]。さらに、具体的な機能 (例えば、インゴットを分割する、力を生成するなど) を機能概念オントロジーで定義している。図 2 では明示していないが各機能を発揮する主体としての装置と、機能間の入出力物の接続関係を記述可能である。また、各一段の機能達成関係 (例えば「インゴットを分割する」機能が「結合力をなくす」機能と「離す」機能によって達成されている関係) とその原理を機能達成方式知識として概念化して定義している。このような概念に基づいて記述することで機能分解木の一貫性が向上し、知識を再利用することが容易になる [来村 02b]。

機能分解木は設計者によって意図された「人工物がこのように機能を達成する」ということを概念的なレベルで表しており、ある状況下の人工物がどのような振る舞いをするかということ自動的に推論することを目指したものではない。したがって、幾何学的な装置の配置関係や相互作用を表すモデルは含まれない。

2.2 統合モデルで対象とする知識

統合モデルは、不具合に関する知識を体系的に記述できるように機能分解木を拡張する。すなわち、

- (a) 不具合過程: 全体機能を望ましくないと解釈されるもの (機能不具合) へ変化させる一連の過程
 - (b) 不具合防止過程: (a) が起こらないようにしている機能 (補助機能と呼ぶ) が働く一連の過程
- をモデリングの対象とする。例えば、図 1 では、ワイヤソーでは摩擦力を生成するため副産物として摩擦熱が生じる。そのため、そのままではワイヤの温度が上昇しワイヤの強度が下がるためワイヤが断線する。これによりワイヤで起こる「摩擦力を生成する」という機能を果たしていたと解釈される振る舞いが変化し、停止していると解釈される。この機能不具合は他の機能へ伝播してい

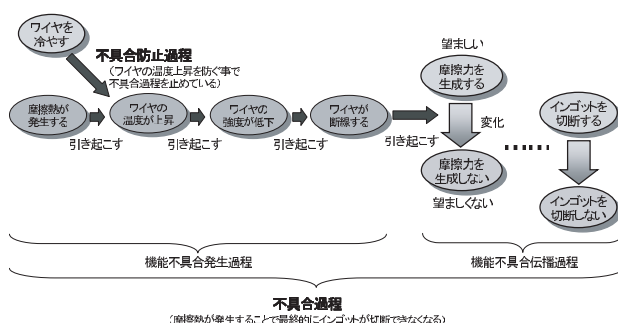


図 1 ワイヤソーで起こる不具合過程と不具合防止過程

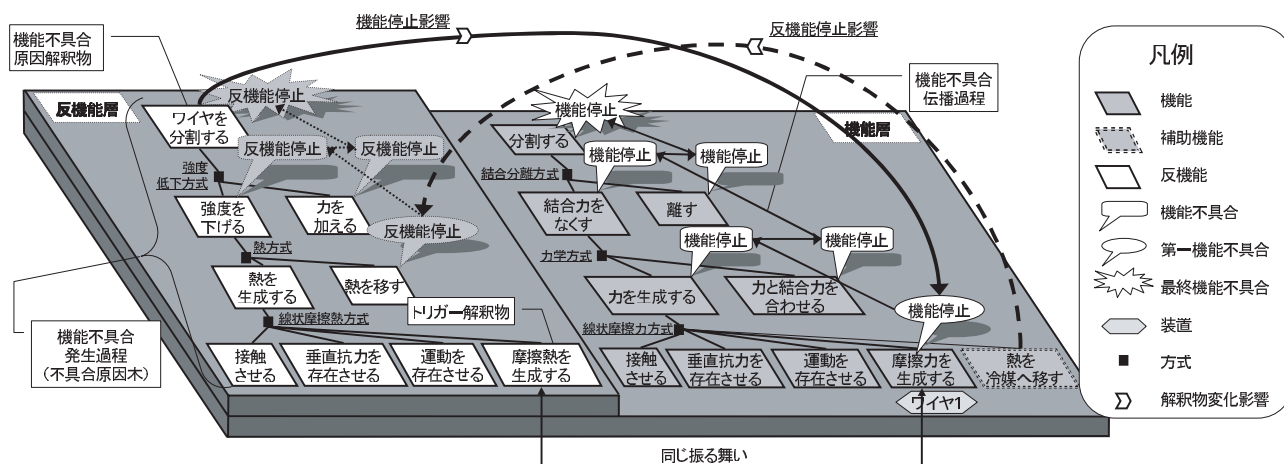


図 2 ワイヤソーの統合モデル (一部)

き、最終的にワイヤソーの全体機能である「インゴットを分割する」機能が停止する。このような一連の過程が不具合過程である。

ワイヤソーではこの不具合過程を、スラリと呼ばれる流体へ摩擦熱を移すことによって防いでいる。その過程を不具合防止過程と呼ぶ。不具合過程と不具合防止過程のモデルは相似であるため、以下では不具合過程を構成する概念を中心に述べる。

2.3 不 具 合 過 程

機能・不具合統合オントロジーでは、不具合過程のうち、最初の機能不具合の直接の原因となる現象が発生するまでの過程（図 2 では摩擦熱の発生からワイヤの断線が起こるまで）を機能不具合発生過程と定義し、それによる機能不具合が伝播していく過程（図 2 では摩擦力生成機能の停止からインゴット分割機能の停止まで）を機能不具合伝播過程と定義する*2。これらは、筆者らが提案してきた故障オントロジー [来村 99] における故障原因の認知的故障原因、物理的故障原因に相当する。

§ 1 機能不具合

機能不具合は、ある装置の振る舞いが本来、意図された機能を発揮しておらず、望ましくないと解釈された結果である。本枠組みでは、これを二つの場合に分けて扱う。一つ目は、機能概念オントロジーで定義されている入出力関係に沿わない場合である。これは、意図された出力対象物を出力しない場合や意図された入出力関係を逸脱している場合などである。一般的にこのような場合が装置の故障と呼ばれる。一方、二つ目は、機能属性値が

要求値から逸脱し望ましくない値である場合を指す。機能属性とは機能の特性を表す属性のことで、出力対象物に関する属性（出力量、均一性など）とプロセスに関する属性（効率など）がある。例えば、電圧を増幅する装置があった時に、装置自体は正しく電圧を増幅しているが、装置への入力量が低下したために出力電圧値が要求された基準値より低いといった場合も、出力対象物の属性値が要求値より低く望ましくないため、機能不具合とする。このように、本枠組みでは装置の故障だけでなく、装置が動作していたとしても機能属性値が要求される基準値よりも小さい場合も機能不具合として扱う。機能分解木上では、機能不具合を、機能の右上に吹き出しを付加して示す。

§ 2 機能不具合発生過程

まず、機能不具合発生過程を構成する反機能について述べる。例えば、図 1 の機能不具合発生過程で最上流に位置する「摩擦熱を生成する」は（図 2 では反機能層の分解木の右下のノードとして位置づけている）は機能分解木中に表れる「摩擦力を生成する」という機能と同時に副作用的に発生する。このことを本枠組みでは、「摩擦力を生成する」という機能は、「ワイヤソーで起こる振る舞いを、要求された機能を達成するという目的（設計者の意図）の下で解釈した結果」であるのに対して、「摩擦熱を生成する」は「同じ振る舞いを、上とは別の目的、即ちワイヤソーを分割するという目的の下で解釈した結果」とであると捉える。このようにある振る舞いを設計者の意図しない架空の目的の下で解釈した結果を、反機能と定義する。「反機能」と呼ぶのは要求された機能を達成するという目的に反して、その達成を阻害するという目的の下に解釈された結果であることに由来する。

機能と反機能は、解釈するための目的が違うだけでなく似た概念であるため、機能不具合発生過程は機能分解木と同様の記述様式、すなわち共通の語彙と共通の達成方式を用いてモデル化できる。図 1 の機能不具合発生過程をモデル化したものが図 2 の左の木である。このよう

*2 実際にはワイヤが断線することで同時的に他の部分機能も停止しており、それも摩擦力生成の停止の原因のひとつとなっている。1 つの機能不具合発生過程は原則的に 1 つの原因発生過程を表すため、ここでは「摩擦力を生成する」の停止という機能不具合を中心とした原因発生過程の記述の 1 つとしてワイヤの断線を直接的な原因としてモデル化している。また伝播過程についても同様に複数の影響が考えられるが図 2 では一つの伝播過程のみを表現している。

な木を機能不具合発生木と呼ぶ。図 2 では機能分解木は機能層に、機能不具合発生過程は反機能層に記述している。

機能不具合発生木の最上位の反機能（機能不具合原因解釈物と呼ぶ）が機能不具合の直接の原因である。図 2 では「ワイヤを分割する」が「摩擦力を生成する」を機能停止にする直接の原因であり、これが機能不具合原因解釈物である。この両者の間の関係は解釈物変化影響の項で詳しく述べる。

また、機能不具合発生過程の中で、最初の原因となる反機能を、その機能不具合発生過程のトリガー解釈物と呼ぶ。図 2 のワイヤソーの例では「摩擦熱を生成する」がそれに当たる。トリガー解釈物の注目対象物をトリガーと呼ぶ（図 2 では摩擦熱）。トリガーは系内から発生する場合と系外から発生する場合がある。系内から発生するトリガーとは、ある機能分解木における本質機能の部分機能が作動したときの副産物として生成される対象物を指す。一方、系外から発生するトリガーとは、モデルが対象とする領域の外側から入力される対象物のことである。この場合、システム的环境またはユーザがトリガーを生成するとみなすことでモデル化することができる。

トリガーに相当する概念は故障オントロジー [来村 99] では内因、外因として分類されている。その観点から考えると本枠組みでは内因（例：製造段階に不具合がありひびが入っていた）はモデリングの対象外である。しかし、その結果である引き起こされる不具合状態及び、その不具合伝播過程を記述することは可能である。また外因（例：時間経過による老朽化）も基本的に扱えないが、外因の一部（例：雨が降ってくる）は上記の系外から発生するトリガーとしてモデリングすることで扱うことが可能である。

このように不具合発生過程の中で、機能構造とは独立している機能不具合の原因がどのように発生するかという過程を、機能分解木と同様の形式で詳細にモデリングし、関連づけている点は統合モデルの特徴の一つである。

§ 3 機能不具合伝播過程

機能不具合伝播過程は、原則として機能不具合がボトムアップに機能分解木上を伝播していく過程である。ある部分機能の機能不具合は、入出力関係に従って主に下流の部分機能の機能不具合を引き起こす。例えば、図 2 では「力を生成する」の機能停止が「力と結合力を合わせ」の機能停止を引き起こす。これは「力を生成する」が機能停止になると、摩擦力が「力と結合力を合わせる」に供給されなくなるためである。また、一般に、ある本質機能の部分機能が機能不具合になるとその上位の機能もまた機能不具合になる。例えば、ワイヤソーの例では、「力と結合力を合わせる」が機能不具合になると、「結合力をなくす」という機能も機能不具合になる。

機能不具合伝播過程を構成する一連の機能不具合の中で、最初に表れるものを第一機能不具合と呼ぶ。また、最後に表れる機能不具合を最終機能不具合と呼ぶ。図 2 の

ワイヤソーの機能不具合伝播過程の場合、第一機能不具合は「摩擦力を生成する」の機能不具合である。第一機能不具合は丸い吹き出しで表現される。一方、最終機能不具合は「インゴットを分割する」の機能不具合である。最終機能不具合は星形の吹き出しで表現される。その他の機能不具合は角丸四角の吹き出しによって表現される。

§ 4 解釈物変化影響

図 2 において「ワイヤを分割する」と「摩擦力を生成する」の「機能停止」の間に引かれているリンクが解釈物変化影響である（機能停止影響と表記している）。この機能停止影響は「ワイヤを分割する」という反機能が「摩擦力を生成する」という機能の装置であるワイヤを破壊することによって、その機能を停止させていることを表す。また、その影響が最終的に全体機能を機能不具合にする影響であることを表す。一般に、解釈物変化影響は、反機能が機能に対し影響を与えて機能不具合へ変化させることを表す（2.5 節で述べるが、解釈物変化影響は補助機能が意図外解釈物へ与える影響を記述するときにも用いられる。）

解釈物変化影響は、変化、対象物、全体への影響、可逆性、時間という 5 つの要素から記述される。例えば、図 2 の機能停止影響の場合、反機能である「ワイヤを分割する」が、本質機能である「摩擦力を生成する」という機能の装置であるワイヤを変化させ、それによって機能を機能停止へ不可逆的に変化させ、更にこの影響は全体機能を機能不具合へ変化させる影響であると言えるので、各要素は、それぞれ機能停止、装置（ワイヤ）、悪影響、不可逆、間欠的・動作中となる。以下では各要素のうち重要な、変化、対象物、全体への影響について述べる。変化 変化という要素は、影響を受ける機能（図 2 の機能停止影響の場合、「摩擦力を生成する」）がどのように変化したのかを表現する。ここで言う変化は要素 3 で述べる全体への影響というコンテキストに依存するものではなく、単にその装置内における機能がどう変化しているかという意味で使う。具体的な例として、「機能停止」、「効率低下」、「安定性低下」などが挙げられる。

対象物 対象物という要素は、実際に機能を構成する要素のどれが影響を受けて変化しているかを表現する。一般に、対象物として記述されるものは、影響を受ける機能の「装置」か「入力対象物」である。装置が変化させられる場合は、影響を与える側の反機能によって、影響を受ける側の機能の装置が対象物として扱われ変化させられる場合である。一方、入力対象物が変化させられる場合には、更に既に機能モデルに記述されている入力対象物を変化させる場合と、新たな入力対象物が生成され入力される場合とに分けられる。

全体への影響 全体への影響とは、その解釈物変化影響による機能の変化が、そのコンテキストにおいて、全体機能に対し好影響（preventive:機能不具合を防ぐ）か悪影響（disruptive:機能不具合へ変化させる）かを表現す

る要素である。今、議論している不具合過程の場合では、解釈物変化影響は反機能から機能に対する影響であるので、この要素は常に悪影響である。

2.4 機能不具合の機能構造外伝播モデル

基本的に、図2に見られるように、機能不具合伝播過程の機能不具合は機能構造に沿って伝播する。この場合は、上述したように機能不具合伝播過程は各機能に機能不具合を付加することで記述出来る。しかし、それとは別に機能不具合が機能構造に沿わず、機能構造を飛び越えて伝播する場合がある。例えば、「回転エネルギーを生成する」という機能を持つモーターに過剰な電圧がかかったときに、「過剰な回転エネルギーを生成する」という機能不具合が発生すると同時に「熱を生成する」という反機能が発生し、それが他の部品Aを加熱しその部品Aの機能も機能不具合にする場合を考える。この場合、「過剰な回転エネルギーを生成する」ことによる他の機能への影響は機能構造に沿った機能不具合伝播過程であるのに対し、部品Aへ熱が伝わることによる機能不具合の伝播は機能構造外の伝播ということが出来る。統合モデルではこのような機能構造外の伝播を、反機能によって構成される別の分解木（「熱を生成する」がトリガー解釈物となり部品Aの機能の機能不具合の直接原因がルートノードとなる）と解釈物変化影響を用いて記述することが可能である。

このような機能不具合の機能構造外の伝播は、「部品間の距離が近くなってしまう（または接触してしまう）」といった装置構造の不具合（mal-structure）が原因で発生することも多い。本枠組みでは構造自体のモデル化は対象外であるため、そのような構造の不具合を直接記述することはできない。しかし、機能構造外の伝播を表す分解木の中で、熱を伝える方式を特殊化したものとして「物体間距離が近い（または接触している）ために熱が伝播する方式」としてそれに相当する知識（の一部）を表現することが可能である。

2.5 不具合防止過程

不具合防止過程は、補助機能が不具合過程をどのように防ぐかをモデリングしたものである。不具合過程を防ぐために、補助機能は不具合過程の中の何かに対し影響を与える。この影響は前節で述べた解釈物変化影響の枠組みを使って表現することが出来る。図2における補助機能は「熱を除去する」で、この補助機能による解釈物変化影響は、反機能停止影響である。「熱を除去する」は、図2に示した不具合過程である、摩擦熱発生によってワイヤの断線が起こりワイヤソーが機能停止するという不具合を防いでおり、そのことを反機能停止影響が表現している。

この反機能停止影響を構成する5つの構成要素はそれぞれ、反機能停止、入力対象物（摩擦熱）、好影響、可

逆、連続的・動作中である。これにより、補助機能「熱を除去する」が「熱をワイヤへ移す」の入力対象物である熱に対し影響を与え、熱を「熱をワイヤへ移す」へ入力させなくすることによって、「熱をワイヤへ移す」を停止させており、この影響は全体機能にとって好影響であるということを示している。

また、この解釈物停止が不具合原因発生木の他の反機能へ伝播していく様子も機能不具合伝播過程と同様に記述できる。図2では、反機能に付加されている吹き出しがそれを表している。このように、反機能と機能の共通性を見いだすことにより、不具合過程、不具合防止過程は相似形のモデルとなる。

2.6 機能・不具合統合オントロジー

ここまで本章で述べた統合モデルに表れる各概念を、我々が開発を進めているオントロジー構築環境 Hozo のオントロジーエディタ（OE）[古崎 02]を用いて機能・不具合統合オントロジーとして定義した。そのうちの主要な部分を図3に示す。凡例に示すようにOEでは各概念の詳細な定義を表すために、全体・部分関係を表す part-of (p/o) スロットと属性を表す attribute-of (a/o) スロットが用意されている。各スロットは、スロットに入るインスタンス（スロットフィルア）が所属する概念クラスを示すクラス制約、スロットフィルアの取りうる数を示すカーディナリティ制約、それが担う役割を示すロール概念、ロール概念を担っているスロットフィルアを示すロールホルダなどから構成される。また、必要に応じてスロットフィルア間に存在する必要がある関係を記述することができる。

機能・不具合統合オントロジーのうち振る舞い解釈物に関する部分の一部を図3(a)に示す（以下、本節では図3に示す概念名のうち初出のものを太字で示す）。ここで振る舞い解釈物とは、振る舞いのある目的の下で解釈した結果とする。振る舞い解釈物は、目的コンテキストが「意図内（要求機能達成）目的」か「意図外（架空）目的」かで、意図内解釈物と意図外解釈物に分けられる。意図外解釈物は更に、振る舞いを解釈する際に機能の定義を参照し、その定義から逸脱していると解釈されるものは機能否定解釈物（機能不具合）、それ以外の意図外解釈物は一般意図外解釈物（反機能）に特殊化される。機能否定解釈物は、ここまで機能不具合と呼んでいた概念であり、より正確に定義を表す概念名としてこのように表現している。また、一般意図外解釈物はここまで反機能と呼んでいた概念である。一方、意図内解釈物も同様に、反機能の定義を参照するものは反機能否定解釈物、それ以外は一般意図内解釈物（機能）に特殊化される。このように、機能と呼んでいた概念は一般意図内解釈物（機能）として、概念階層内に位置づけられる。機能や反機能はこれまで機能概念オントロジーとして行っていたように更に入出力対象物などで細かく分類・定義される。

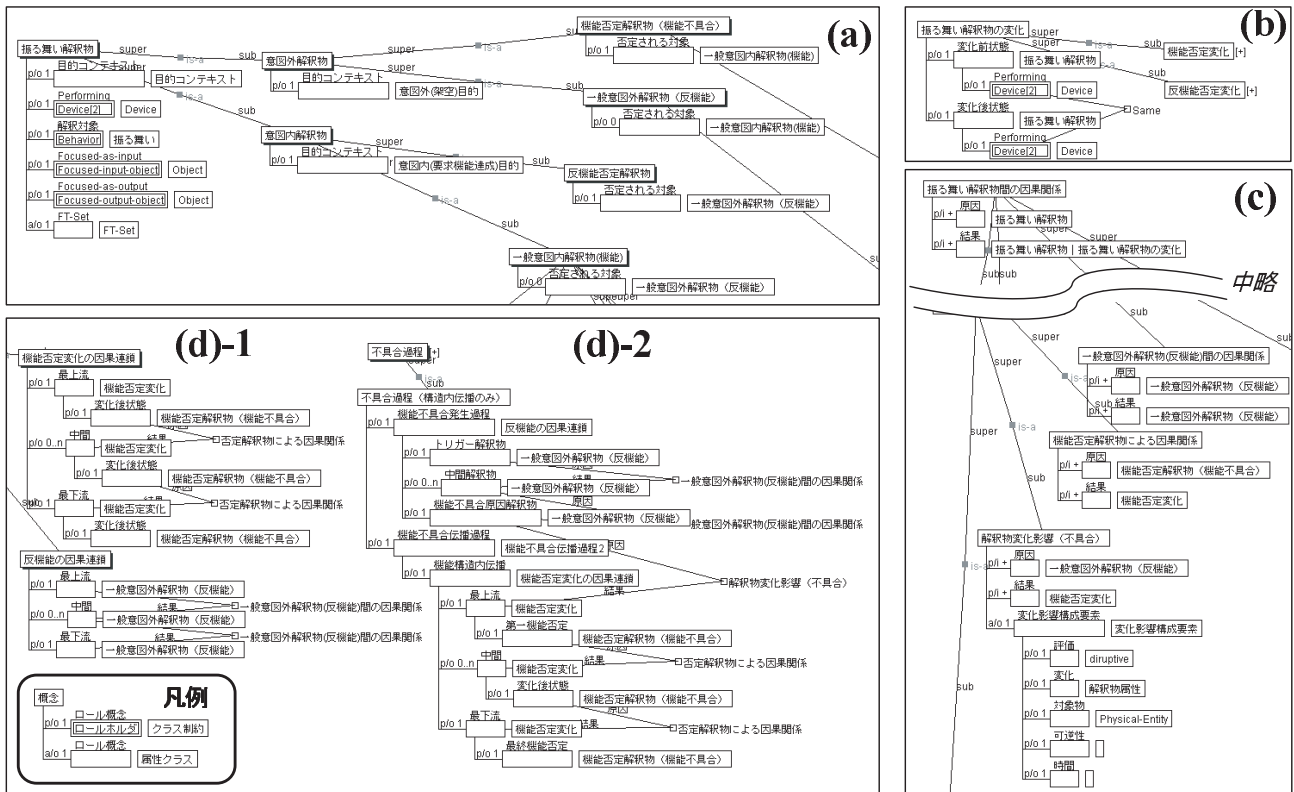


図 3 機能・不具合統合オントロジー (一部)

ここで、「振る舞い」とは装置内で起こる対象物変化プロセスのみを指し、対象物変化プロセス自体をある状態とみなし、その状態が他の状態へ変化するようなメタ的なプロセスは含まない。このようなメタ的なプロセスは振る舞いの変化として定義している (図 3 (b))。例えば、ある機能が機能不具合へ変化するプロセスは機能不具合変化であり、「振る舞いの変化」の下位概念として定義される。

不具合過程に関する概念を図 3 (c) に示す。ここでは不具合過程を記述するために因果関係、解釈物の因果連鎖を定義し、それらを用いて不具合過程を定義している。ただし、ここで定義する因果関係は、人工物内の振る舞い解釈物やそのメタプロセス間の因果関係のためのものであり、一般的な因果関係を定義するものではない。

因果関係は関係概念として定義され、二つの振る舞い解釈物もしくはメタプロセス間に因果関係があることを示す。因果関係は原因ロール、結果ロールを担うクラスによって更に細かく分類されるが、図 3 (c) は不具合過程に関するものだけを示している。例えば不具合過程内の解釈物変化影響は、因果関係を、原因が反機能で、結果が機能不具合変化であると特殊化したものとして解釈物変化影響 (不具合) と定義する。

この因果関係で結ばれる一連の解釈物群を解釈物の因果連鎖として定義する。解釈物の因果連鎖は、解釈物の種類によって、反機能の因果連鎖などの下位概念が存在する (図 3 (d) -1)。

不具合過程は機能不具合伝播過程が構造内のみか、構

造外を伝播するかで、定義が変わるが、図には構造内だけのものを載せている。この不具合過程 (構造内伝播のみ) は二つの因果連鎖の下位概念から構成される。すなわち、機能不具合発生過程ロールを果たす反機能の因果連鎖と、機能不具合伝播過程ロールを果たす機能不具合変化の因果連鎖である。更に、機能不具合発生過程ロールの下でトリガー解釈物ロールや機能不具合原因解釈物ロールが決まり、機能不具合伝播過程ロールの下で第一機能不具合ロールや最終機能不具合ロールが決まる。機能不具合原因解釈物ロールホルダと第一機能不具合を含む機能不具合変化である最上流ロールホルダの間には解釈物変化影響 (不具合) が引かれる (図 3 (d) -2)。

3. 知識変換システム

本章では 2 章で述べた統合モデルを、信頼性解析や故障診断などの概念設計以外のタスクで用いられるモデル (タスク依存モデルと呼ぶ) へ変換し出力する知識変換システムについて述べる。本システムを用いることにより、これまで概念設計、信頼性解析、故障診断などで共通して用いられる知識であるにも関わらず別々の形式で記述され相互運用性に欠けていた機能や不具合に関する知識の共有・再利用を促進することができる。

本章ではタスク依存モデルとして機能 FMEA で用いられる FMEA シートを扱う。機能 FMEA は FMEA の一種で、主に概念設計に対して行われる FMEA である。機能 FMEA では、部品の持つ機能に対して起こりえる不

具合を故障モードとして列挙し、その故障モードの原因と装置全体への影響、それへの対策として必要があればどのような機能を追加するかといった事が解析され、その結果をFMEAシートなどに記述する。図4の下表はFMEAシートの例である。このFMEAシートでは、ワイヤソーにおいて、ワイヤが断線するという故障モードが存在し、その原因として摩擦熱または張力変動が推定され、それによってシステム全体として機能が発揮できなくなることなどが示されている。このような故障モードとそれに対する推定原因と影響は、2章で述べた不具合過程と類似している。すなわち、FMEAシートが含む不具合に関する情報と統合モデルが含む不具合に関する情報は、共通する部分があると言える。FMEAは信頼性設計の分野で広く使われている手法なので、統合モデルで記述された不具合に関する情報のうち、FMEAシートと共通する部分をFMEAシートで表現し直すことができれば、知識の相互運用性が高まる。

3.1 知識変換システムの構成

図4に知識変換システムの概要を示す。知識変換システムは以下の要素から構成される。

- (1) 機能・不具合統合オントロジー
- (2) タスク依存モデルのオントロジー
- (3) オントロジーマッピング知識
- (4) モデル変換エンジン

一つ目の要素は、2章で述べた機能・不具合統合オントロジーである。二つ目の要素は、タスク依存モデルを規定するオントロジーであり、ここではFMEAシートを規定するFMEAオントロジーとなる。三つ目の要素であるオントロジーマッピング知識は、2つのオントロジーに含まれる概念同士の対応付けを記述したものである。四つ目の要素は、オントロジーマッピング知識に従い、統合モデルに記述された情報の一部を、変換先の表現形式に合わせて変換する変換エンジンである。変換は変換先のオントロジーのインスタンスモデルへ変換する段階（モデルレベル変換）と、そのモデルを実際の表現形式（本稿では、FMEAシートという表現形式）に変換する段階（表現レベル変換）に分けられる。

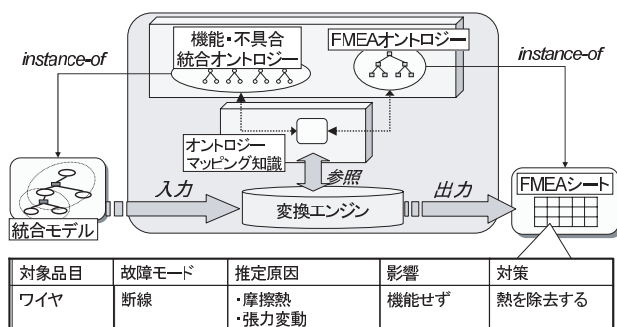


図4 知識変換システムの概要

3.2 FMEA オントロジー

今回構築したFMEAオントロジーは、統合モデルをFMEAシート形式に変換するためにのみ使うので、その目的に必要な最低限の概念しか含んでいない。

FMEAオントロジーでは、FMEAシートの行に当たる概念を「解析結果」としている。また、解析結果を構成する概念として、FMEAシートの各列にあたる概念「対象品目」、「故障モード」、「推定原因」などが存在する。

3.3 オントロジーマッピング知識

複数のオントロジーにまたがる概念間の関係には、上位・下位関係や全体部分関係、相当関係と言ったいくつかの関係が考えられる。ここでの目的は、各オントロジーに基づいて記述されるモデルの間に共通して表れる知識を結びつける事であるので、相当関係のみを扱うことにする。相当関係とは、二つの概念が、名前やスロットが違っているとしても、本質的に同じ概念であるという関係のことを指す。相当関係によって二つのオントロジーに表れる概念が対応づけられてあれば、それに従ってどのように処理を行うかを記述しておくことにより、モデルの変換が可能になる。

以下では、機能・不具合統合オントロジーとFMEAオントロジーの間の相当関係について述べていく。この例では、特に相当関係の中でモデル変換のために必要な相当関係のみを記述する。そのため、FMEAオントロジーの解析結果を構成する概念に対して、それに対応する機能・不具合統合オントロジーの概念を考えていく。

i. 故障モード

FMEAにおける「故障モード」は様々な定義が行われているが、その多くは故障の状態を表しており「故障の症状、形態」[塩見 83]「故障状態の形式による分類」[越川 82]、"the manner by which a failure is observed" [MIL 80]などと定義される。

実際のFMEAシート例では、故障モードとして「動作不良」、「不純物混入」、「漏れ」などがみられる。これらは、機能・不具合統合オントロジーにおける「機能不具合」、「トリガー解釈物」、「機能不具合原因解釈物」にそれぞれ対応する。このように、FMEAの実際の運用では「故障モード」という一つの概念が複数の意味で用いられており定義に対し厳密でない。しかし、統合モデルをFMEAシートへ変換することを考えると、「故障モード」に対して複数の概念を対応付けることは望ましくない。また、故障モードの定義をみると、ある部品が故障状態になっていることを指すのが一般的である。これより、「故障モード」と対応づけられる概念として「機能不具合」が候補として挙げられる。更に、FMEAを実行するときは、そのコンテキストにおいて最小単位の部品項目に対する故障モードが扱われる。これより、機能不具合の中でも特に「第一機能不具合」を故障モードと相当関係にあると対応付ける。

ii. 品 目

FMEA における「品目」は、故障モードになる部品を指す。これは、機能・不具合統合オントロジーでは、第一機能不具合になる機能の「装置」であるので、これと「品目」とを相当関係にあると対応付ける。

iii. 推定原因

FMEA における「推定原因」は故障モードの原因を示す。FMEA シートの例をみると推定原因は故障モードの時と同様に、複数の意味で使われている。例えば、「摩耗」「振動」「傷」「構造不良」などが推定原因として記入されるが、これらのうち「摩耗」「振動」は機能・不具合統合オントロジーでは「トリガー（解釈物）」にあたり、「傷」「構造不良」は「機能不具合原因解釈物（の結果である出力物の状態）」にあたる。ここでは故障モードを「第一機能不具合」と対応づけるため、直接的な原因（因果的に直接の上流解釈物）である「機能不具合原因解釈物」が対応する。このことをより明確に表現するため、「トリガー解釈物」も推定原因と対応づけ、「トリガー解釈物機能不具合原因解釈物」と出力するようにする。

iv. 影 響

FMEA における「影響」は故障モードの結果としてシステムや装置全体がどのように変化するかを表す。そのため、機能不具合伝播過程の最終的な結果である「最終機能不具合」が対応づけられる。

v. 対 策

FMEA における「対策」は、「影響」を防止または緩和する機能の追加や、その影響を無視できる場合には何もしないことなどを表す。機能・不具合統合オントロジーでは、その不具合過程を防ぐ補助機能がこれに当たるので、「対策」と「補助機能」を対応づける。

vi. 致命度、検知法

FMEA における「致命度」は、故障モードによるシステムへの影響が、どの程度、深刻かを示す評価値であり、微少、軽微、重大、致命的といった段階付けがなされる。また、FMEA シートでは故障モードの検知法を示す場合もある。現在の統合モデルではこのような情報を含んでいないので、これらに相当する概念はない。

4. 本枠組みの利点

4.1 統合モデルの利点

概念設計時に設計者が統合モデルを記述することによりいくつかの利点が期待できる。

まず、オントロジーに基づいた記述枠組みが提供されることにより、モデル記述者の対象への理解が促進され、一貫性を保って知識を明示化することができるため、知識共有を促進させると考えられる。例えば、設計レビューなどで、対象とする人工物に存在する多くの潜在的な機能不具合のうち、どのような機能不具合が設計時に考え

られ、どのように対処されているかをチェックするための知識媒体として使用することが可能である。

また、ワイヤソーでは「力を存在させる」という機能を第一機能不具合にするトリガーとして「摩擦熱」や「過剰な張力」などがある。このような複数のトリガーを統合モデルでは OR で一枚の図上で表現でき、網羅的に検討することが可能である。

更に、設計者が、ある一つの機能によって、複数の機能不具合を防ぐと意図したことを明示できる。例えば、ワイヤソーでは、摩擦熱によるワイヤの断線を防ぐ「熱を除去する」という補助機能の部分機能「スラリを流す」が、同時に「切り屑を除去する」という補助機能の部分機能になっている。「切り屑を除去する」は「インゴットを分割する」の精密性が低下するという最終機能不具合を防ぐ補助機能である。このように「スラリを流す」は複数の役割を持っており、それを明確に表現することが出来る。

4.2 方式知識の利点

統合モデル内の分解木は振る舞い解釈物とその間の達成関係を示す方式によって記述される。振る舞い解釈物はオントロジー内で一般的なドメインに依存しない語彙として定義されており、記述者はそこから選択しインスタンス化することでモデリングを行う。また、方式はモデル内で用いられた方式をその振る舞い解釈物のクラス-インスタンス関係を利用して一般化することが可能である。一般化された方式を解釈物達成方式知識^{*3}と呼ぶ。解釈物達成方式知識はモデリングの対象ドメインに依存しない形となるため汎用性が高い。そのため、他の統合モデルを記述するために再利用することが可能である。設計における一つの重要な知識は、ある機能をどのように達成するか（反機能の場合、その望ましくない現象がどのように発生してしまうか）という知識であり、そのような知識を構成するプリミティブな知識を方式知識として蓄積し再利用することは、知識の再利用という点から大きな利点であると言える。

4.3 知識変換システムの利点

知識変換システムを用いることにより、技術者が概念設計、信頼性解析、故障診断、再設計などのタスクを実行する際に知識を共有・再利用することを支援することができる。本節では信頼性解析、再設計時における本枠組みの利点について述べる。

§ 1 信頼性解析 (FMEA)

FMEA 実行者は、概念設計時に記述された統合モデルを参照しながら信頼性解析タスクを行い、統合モデル上

^{*3} この方式知識は機能と反機能のどちらも達成することが出来るためこのようなラベルとした。すなわち、あるモデルで機能を達成していた方式と同じクラスの方式が他のモデルでは反機能を達成することもあり得る。

に解析結果を記述する．それを知識変換システムを用いて変換することによって，故障モード，原因，影響が記述された FMEA シートを得ることができる．これにより，潜在故障モードや原因，影響などの列挙がより網羅的になることが期待される．これは，統合モデルが，装置が複数の機能を持っていることや，一つの部分機能が複数の親機能の達成に関与していることなどが明示されているため，FMEA 実行者がその知識を参照しつつタスクを実行できるからである．このことは，信頼性解析タスクの本質は FMEA シートの記述ではなく，対象装置で生じうる不具合を種々に想定しながらリストアップすることにあるが，統合モデルを参照しながら記述することは，異なるタスクである概念設計の知識を参照しながら表現形式から独立して信頼性解析タスクを実行することの効果を意味する．

統合モデル上に不具合発生過程を記述する際には，前節で述べたように過去にモデルとして記述された知識が方式知識として蓄積されているので利用可能である．タスク実行者に過去にこの方式を使ったときにはこのような不具合が起こった（例えば摩擦方式を用いると摩擦熱が発生し不具合が起こった）といったことや，この機能はこのような不具合になったことがあるといったことを提示することができる．タスク実行者はこのような発生する可能性のある候補を元に，今回も同様の不具合が起こるかどうかを判断する．本枠組みはこのような必ず起こるとは言えないが起こる可能性のある不具合の候補を提示可能であり，タスク実行者に思考の出発点を与え検討を促進する効果がある．

また，他者が記述した FMEA シートを読む際に，「記述された対策がなぜこの故障モードを防ぐことができるのか」といったことを理解することが困難な場合がある．このような場合に，変換された FMEA シートは元の統合モデルとリンクされているので，詳細な因果連鎖が記述されている統合モデルを示すことができ，理解を助けることができる．

§2 再設計時

FMEA を実行した結果，ある故障モードの致命度が高く対策を行う必要があることが分かった際には，それが起こらないように再設計を行う必要がある．そのような再設計において統合モデルは有用である．例えば，設計者がある機能不具合を防ぐための他の方法を思いつきやすくなるという利点が考えられる．これは補助機能によって防ぐことが出来る他の意図外解釈物が統合モデル上で明示化されるためである．補助機能を付加する代わりに方式を置換することも考えられる．この時，置換前の方式に付随していた補助機能が，置換後も必要かどうかといったことが，不具合過程や不具合防止方法を明示することで理解しやすくなる．さらに，このような再設計による統合モデルの変化は知識変換システムにより自動的に FMEA シートへ反映させることができ，設計変更の

度に FMEA シートを書き直す手間を軽減できる．このように統合モデルと知識変換システムを使用することで，概念設計，信頼性解析，再設計の各タスク間の知識の流通を促進させることができる．FMEA シートへの変換と同様に他のタスク依存モデルへ変換するように知識変換システムを拡張することが可能であり，本システムにより様々なタスク間で知識の相互運用性を向上させることが期待される．

5. 知識変換システムの開発と適用

5.1 システムの開発

3 章で述べた知識変換システムをオントロジー構築環境 Hozo のオントロジーエディタ (OE) を中心として開発した．まず，オントロジーを Hozo OE で記述した．次に，モデルレベルの変換エンジンを Hozo API を用いてオントロジーの内容にアクセスすることで実装した．モデルレベル変換は，機能・不具合統合オントロジーが規定するモデル (インスタンス) を他のオントロジーが規定するモデルへ変換することを指す．この変換は二つのオントロジー間の相当関係を示すオントロジーマッピング知識を参照して行われる．変換の手順は以下の通りである．

1. オントロジーマッピング知識を参照し，どの概念とどの概念が相当関係にあるかを得る（統合モデル側の概念を概念 A，変換先の概念を概念 B とする）
2. 統合モデルの中から概念 A のインスタンス (インスタンス A とする) を検索する
3. 概念 B のインスタンス (インスタンス B とする) を作成し，インスタンス A のスロット値に従いスロット値を決める
4. 1～3 の手順を相当関係の数だけ繰り返す

この手順によって，統合モデルはオントロジーマッピング知識で対応づけられた FMEA オントロジーのインスタンスモデルに変換される．実装した変換エンジンはオントロジーマッピング知識やオントロジーの内容からは独立した構成となっている．そのため，オントロジーマッピング知識が変更された場合にも変換システムのユーザは特に操作をする必要なくそれに準じて変換されたインスタンスモデルを得ることが出来る．また，本論文では FMEA オントロジーのインスタンスモデルへの変換しか行わないが，オントロジー及びオントロジーマッピング知識があれば FTA で用いられる Fault Tree など他のタスク依存モデルへの変換も可能である．

Hozo OE ではインスタンスモデルを XML 形式で保存する．表現レベルの変換については，この XML 形式のファイルに対して，XML スタイルシート (XSLT) を適用することで実装した．これにより FMEA シートの表形式に変換することができる．Web ブラウザで XML ファイルを開くことで，表形式の FMEA シートを見る

ことができる。

5.2 人工衛星電源系システムへの適用

前節で述べたシステムを JAXA (宇宙航空研究開発機構) において開発されているある人工衛星の電源系システムに適用し, FMEA シートを生成した。また, この FMEA シート (生成 FMEA シートとする) と, 既に JAXA で使用されていた FMEA シート (元 FMEA シートとする) を専門家を交えて比較し検証した。本節では, これらの知識変換システムの人工衛星電源系システムへの適用について述べ, そこで得られた知見である, 期待できるシステムの効果やモデリング範囲について述べる。

§1 FMEA シートの生成

対象とする電源系システムは, ある人工衛星のメインとなる機能を果たすための電力を安定して供給するための装置である。人工衛星は常に太陽光を得ることができないため, 日照時に太陽電池により電力を生成し, それをメインとなる装置へ供給すると同時に, 一部をバッテリーに蓄積しておき, 蝕時 (蝕時とは, 人工衛星が地球などの陰に入り, 太陽光を得られない時を指す) に電力を供給するといったことを行う必要がある。このような操作を行う装置群を電源系システムと呼ぶ。電源系システムは太陽電池, バッテリー, バッテリーへの電圧制御装置 (BCCU), 余剰電力消費装置 (シャント) などから構成されている。この電源系システムの機能分解木の一部を図 5^{*4} に示す。電源系システムで発生しうる不具合についての知識は JAXA 内で用いられている元 FMEA シートから抽出した。元 FMEA シートは, 電源系システムの 4 つの主要な部品に対応するシートからなり, 36 項目の故障モードが記述されていた。ここでは 4 つの部品のうち特に, バッテリーと BCCU に注目し, これらについての不具合に関する 11 項目に対し統合モデルを記述した。図 5 の機能停止影響 a による機能不具合伝播過程は, そのうち, バッテリーのセルが開放したためにバッテリーの「化学 E (エネルギー) を電気 E に変換する」という機能 (放電機能) が停止し, 「不足する電力を供給する (増やす)^{*5}」という機能の出力量が低下する不具合を表している統合モデルである。また, 残りの 25 項目についても検討を行い実際に統合モデルとして記述できることを確認している。

この統合モデルをオントロジーマッピング知識に従い変換して得られた生成 FMEA シートの一部を表 1 に示す。また, それに対応する元 FMEA シートを表 2 に示す。

§2 知識共有・再利用への効果

本システムにより, 設計者が統合モデルとして記述した知識を FMEA シートへ変換して他の技術者へ提供することができるため, 知識の相互運用性が向上すると考えられる。ここでは, そのような効果について, 電源系システムへの適用の中で得られた実例を通して述べる。

まず, 統合モデルとして記述された 11 項目の知識の中で FMEA シートとして生成されるべき部分は, ほぼ全て, 知識変換システムによって出力されることが確認された。

更に, 統合モデル内の機能分解木に従って不具合に関する知識を記述していく中で新たな機能不具合と伝播に気づき, 知識を追加することができた。表 1 の 1 行目がそれを変換した部分に当たり, 表 2 に示す元 FMEA シートには記述されていなかった。この追加は,

・バッテリーが充電機能 (「電気エネルギーを化学エネルギーに変換する」) と放電機能 (「化学エネルギーを電気エネルギーへ変換する」) の両機能を果たしていること

・バッテリーの充電機能が 2 つの上位機能 (「不足する電力を供給する (増やす)」, 「余分な電力を消費する (減らす)」) に対し貢献していること

に起因する。統合機能モデルを構築する際は, 図 5 に示すように「バッテリー・セルを開放させる」によって充電機能と放電機能が機能停止し, 機能分解木に沿ってそれぞれの上位機能 (「不足する電力を供給する」, 「余分な電力を消費する」) も停止するという影響を記述した。一方, 元 FMEA シートでは「不足する電力を供給する」への影響に関する行しか記述されていなかったため, 生成 FMEA シートに「余分な電力を消費する」に関する行が差分として表れることになった。FMEA の理念として, このように故障モードや影響がより網羅的になることは望ましく, 本システムによる大きな効果であるといえる。ただし, 当然であるが, 実際の機器ではこの影響はシャント回路 (余剰電力消費のための装置) などにより回路全体としての動作に影響がないように設計されている。

このように, 4.3.2 節で述べた期待できる効果のうち, 統合モデルと知識変換システムを用いることによる, 設計タスク, FMEA タスク間での知識の相互運用性の向上と, それに伴う故障モード, 影響, 推定原因の網羅性向上への効果が確認された。

§3 統合モデルの表現能力の検討

表 1 に示す生成 FMEA シートは, 基本的に元 FMEA シート内に記述されている内容と同等のものを表現しており, 統合モデルによって FMEA シートに記述される主要な機能と不具合に関する知識 (機能, 故障モード, 原因, 影響の列に相当する知識) をモデリングすることが可能であることが確認された。しかし, FMEA シートとして生成されない部分もいくつか確認された。以下では, 元 FMEA シートと生成 FMEA シートを比較し, それ

^{*4} 反機能層が「セルを離す (セルを開放)」という反機能のみしか記述されていないのは, 本モデルが JAXA の既存資料に従っており, その資料内には故障原因発生過程がこれ以上展開されていなかったためである。

^{*5} 「供給する」は機能語彙ではないが理解を容易にするために用いた。括弧内の「増やす」が機能語彙として正しい。

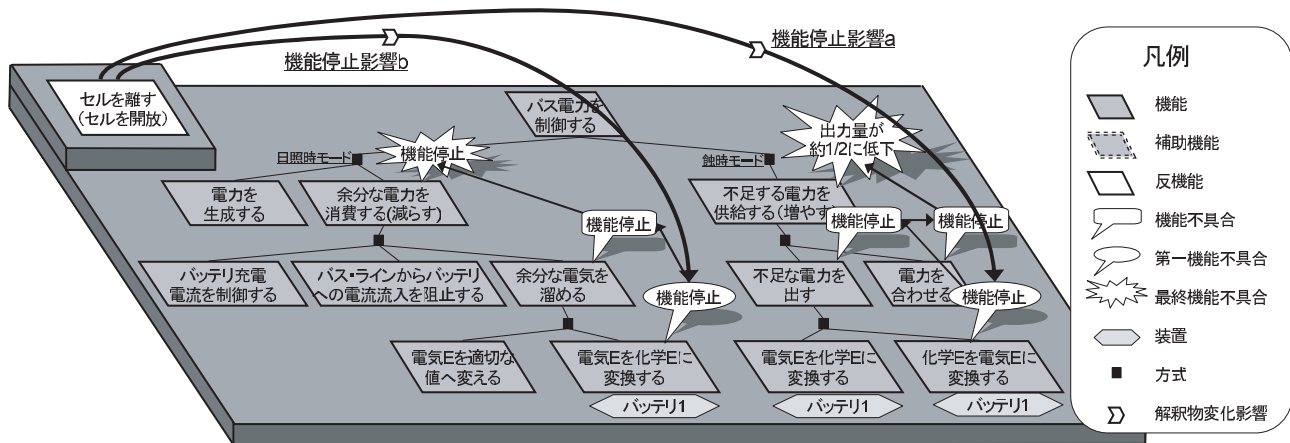


図 5 EPS の統合モデル (一部)

を通して統合モデルのモデリングの表現能力について述べる。

まず、表 2 の致命度については、対応する概念が統合モデルにないため、オントロジーマッピング知識として記述していないので表 1 には出力されない。

次に、表 2 の「コマンドによるバッテリー・ヒータ冗長系への切り替え」という表現は、部品の機能ではなく人工衛星の操作者の行為を表しており、記述の一貫性のためのオントロジカルな制約を満たさないため表 1 の対策欄には出力されない。しかしながら、記述枠組み上はこの制約を緩和すれば、操作者を装置の一種と捉えることができ、操作者の行為を記述すること自体は可能である。また、この例ではモデルにバッテリー・ヒータの機能をもうひとつ記述することで同様のことを表現することが可能である。ただし、このような冗長系の記述は「冗長系である」ということを直接表現したものではない。

次に、表 2 には影響欄に「蝕時供給可能電圧の低下」のような表現が見られる。これは「蝕時動作モード」における能力の低下を意味しており、動作モードによってこの故障モードの影響が異なることを示している。現在の統合モデルでは動作モードは機能達成方式として表現され、動作モードごとに部分機能系列とそれに対する影響が記述される。これはそれぞれの動作モード内における機能構造と不具合を記述するには十分であるが、これらの方式（動作モード）の両方がシステム内に実装され（システムが持つという意味では AND）、システム動作中の時間点ではどちらかの方式（動作モード）で機能している（時間点に対して OR）、ということは表現されていない。また、動作モードを切り替える機能の表現も難しい。このような記述の充実は今後の課題である。

§ 4 費用対効果について

本論文で提案した機能・不具合統合オントロジは Heavy-weight ontology[溝口 05] に属する。そのためオントロジ構築にかかるコストは高い。しかしこのようなオントロジは基本的に一度構築すれば更新の頻度は高くないと考えている。また、このオントロジは設計、

信頼性解析、故障診断、製造など人工物に関わる物理プロセスを扱う広い範囲で使えると考えている。

また、本記述枠組みを設計、生産現場の技術者が理解し習熟するにはある程度の期間が必要である。現在、統合モデルの基盤となった機能分解木は住友電気工業（株）生産技術部で実用されているが、そこでは習熟に約 3ヶ月が必要であるとの報告を受けている。統合モデルにおいても同等程度の期間が必要であると考えられる。

統合モデルはモデリングコストが高いといえる。設計者は我々の記述枠組みに従って多くのノードやリンクを記述する必要がある。しかし、一度モデルを記述すれば、そこで用いられた知識は再利用することができるためこの点はある程度の緩和が期待できる。知識の再利用は大きく二つに分けられる。一点目は 4.1 で述べた方式知識としての再利用、二点目は 4.2 で述べた知識変換システムを用いた他タスクでの再利用である。

更に、モデリングを行うこと自体が記述者の対象への理解を助けるという効果も期待できる。このことは[溝口 02] で機能分解木については効果が報告されている。記述者自身にも効果があるため、設計者のモデリングへの動機付けが期待できる。

6. 関連研究

FMEA シートを自動的に生成するための研究として、機能モデルから自動的に FMEA シートを得る FMAG[Teoh 04] や、潜在的故障モードを体系的に生成するための手法である advanced FMEA[Steven 99] などがある。また、モデルベース診断の分野では製品の振る舞いモデルに基づいた故障推論[Kleer 87] や、階層的な機能モデルを用いる故障診断[Chittaro 93, Larsson 96] が提案されている。これらで用いられているモデルと比較して本研究の大きな違いは、機能不具合発生過程をモデル化の対象に含んでいる点である。故障や不具合に関する知識は、装置や部品がどのように壊れるかだけでなく、なぜ壊れるのかという原因も含んで体系化されるべきであり、本枠

表 1 統合モデルより知識変換システムによって生成された FMEA シート (一部)

品目	機能	故障モード	推定原因	影響	対策
BAT/バッテリー・セル	電気 E を化学 E へ変換する	機能停止	セルを開放させる	機能停止 (余分な電力を消費する)	
	化学 E を電気 E へ変換する	機能停止	セルを開放させる	出力量が 1/2 に低下 (不足な電力を供給する)	
		出力電圧低下	セルを短絡させる	出力電圧低下 (不足な電力を供給する)	
BAT/バッテリー・ヒータ	電気 E を熱 E へ変換する	機能停止	ヒータ電力ラインを開放させる	出力電圧低下 (不足な電力を供給する)	
BAT/V/Tカーブ用サーミスタ	バッテリーの温度情報を出力する	出力 0 固定	サーミスタを短絡させる	出力量が 1/2 に低下 (不足な電力を出す)	
		出力過大固定	サーミスタを開放させる	安定性低下 (不足な電力を出す)	バッテリーが高温の時に、充電電流をなくす

表 2 JAXA 内で用いられていた元 FMEA シート (一部)

品目	機能	故障モード	故障の影響		対策	致命度
			サブシステムへの影響	ミッションへの影響		
BAT/バッテリー・セル	・電力を蓄積する ・電力を供給する	セル開放によるバッテリー充電/放電不能	蝕時供給可能電力の低下 (約 1/2)		蝕時衛星負荷電力の軽減	II
		セル短絡によるバッテリー電圧の低下	蝕時バス電圧の低下		蝕時衛星負荷電力の軽減を検討する	III
BAT/バッテリー・ヒータ	バッテリーを加熱する	ヒータ電力ラインの開放によるバッテリー温度の低下	蝕時バス電圧の低下		コマンドによるバッテリー・ヒータ冗長系への切り替え	IV
BAT/V/Tカーブ用サーミスタ	バッテリー温度情報を BCCU へ出力する	サーミスタ短絡によるバッテリー充電不能	蝕時供給可能電力の低下 (約 1/2)		蝕時衛星負荷電力の軽減	II
		サーミスタ開放によるフル充電モードの継続	バッテリー過充電によるバッテリー特性の劣化 (蝕時バス電圧の低下等)		バッテリー温度上昇を検出しバッテリー過温度時充電自動停止機能により充電をオフ	III

組みはそのような知識も統合して扱うことができる。更に、[Davis 84, Böttcher 95] では従来の故障診断システムは漏電のような部品間の異常な伝播を扱うことが出来ないことが指摘されている。統合モデルではそのような相互作用を機能構造外の伝播として別の木を用いて表現でき、その伝播と機能構造上の伝播の間の関係についても解釈物変化影響を用いることで表現できる。

ある不具合に対しその原因を解析する FTA (Fault Tree Analysis) で用いられる Fault Tree の表現形式は本研究の枠組みの不具合過程のモデルと類似した形式であると言える。しかし、Fault Tree はその記述規約が不十分のため、従来の FMEA シートと同様にアドホックな記述になりがちである。また、機能不具合伝播過程は人工物の機能構造と密接な関係を持っているが、そのような関係は Fault Tree では暗黙的であることが多い。

[Dittmann 04] では、FMEA における知識再利用のためのオントロジーが提案されているが、不具合過程を機能不具合解釈物や一般意図外解釈物などの区別をせず単純な因果連鎖として捉えており、複雑な関係を記述できない。また、記述されたインスタンスをそのまま知識ベースへ格納するのに対し、我々の枠組みでは方式知識として各解釈物間の関係を抽象化して蓄積するのでより高い再利用性が期待できる。また、設計、診断間の知識共有のためのオントロジーベース計算機支援枠組みとして DAEDALUS Framework [Lee 01] が提案されているが、オントロジーがシンプルであるため、知識共有のた

めに重要な機能概念の違いや方式などの概念を扱えない。

オントロジーに基づく設計に関するモデル運用・統合の研究として [Cutkosky 93, 関谷 99] がある。これらの枠組みはより一般的な工学的知識を対象としているのに比べ、本研究が提案する枠組みは、機能と不具合という特定の知識に特化した詳細なオントロジーを構築している点に違いがある。扱う範囲は狭くなるが、詳細なオントロジーに基づくことで、内容により深く踏み込んだ知識変換ができるなど、有用な知識共有支援が可能となる。

我々の補助機能の定義はそれが本質的に必須かどうかということを含んでいる。その意味では補助機能は付属機能 [Pahl 88] や追加機能 [Hubka 01] と類似している。しかしながら、本稿で述べた補助機能の定義は意図外解釈物への影響という観点からも定義しており、全体機能の達成に対して、それが無いと発生するであろう機能不具合を避けることによって、本質的に必須ではないが貢献する機能を意味している。

7. ま と め

本稿では、タスクに依存した様々な記述様式で記述される機能的知識と不具合知識の相互運用性、共有性を高めることを目指し、統合モデルを介した知識変換を提案した。タスク依存モデルの例として FMEA シートを用いたが、提案した知識変換システムはその他のタスク依存モデルへの変換にも応用することが可能である。

今後の課題として、生成した FMEA シートの変更などを、自動的に統合モデルへ反映するような、今回示した変換とは逆の変換が行えるようにシステムを拡張することが挙げられる。また、現在十分に扱えていない動作モードを制御するような機能や、生産プロセスに関する知識など、より広範囲の知識が記述できるように、統合モデルを更に拡張することも課題と考えている。

謝 辞

人工衛星への適用に関して宇宙航空研究開発機構 館和夫 部長、奥田一実 グループ長、空野正明 主任開発員にご支援と貴重なコメントを頂いた。また、溝口研究室 古崎晃司助手には実装面で貢献を頂くと共に有益なコメントを頂いた。記して感謝します。なお、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（特定領域研究（2）16016256）の支援を受けた。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Böttcher 95] Böttcher, C.: No Faults in Structure? How to Diagnose Hidden Interactions., in *Proc. of the 14th International Joint Conferences on Artificial Intelligence*, pp. 1728–1735 (1995)
- [Chittaro 93] Chittaro, L., Guida, G., Tasso, C., and Toppano, E.: Functional and Teleological Knowledge in the Multi-Modeling Approach for Reasoning about Physical Systems: A Case Study in Diagnosis, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 6, pp. 1718–1751 (1993)
- [Cutkosky 93] Cutkosky, M. R., Englemore, R. S., Fikes, R., Genesereth, M. R., Gruber, T. R., Mark, W. S., Tenenbaum, J. M., and Weber, J. C.: PACT: An Experiment in Integrating Concurrent Engineering Systems., *IEEE Computer*, Vol. 26, No. 1, pp. 28–37 (1993)
- [Davis 84] Davis, R.: Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior., *Artificial intelligence*, Vol. 24, No. 1-3, pp. 347–410 (1984)
- [Dittmann 04] Dittmann, L., Rademacher, T., and Zelewski, S.: Performing FMEA Using Ontologies, in *Proc. of 18th International Workshop on Qualitative Reasoning* (2004)
- [Hubka 98] Hubka, V. and Eder, W. E. eds.: *Theory of Technical Systems*, Springer-Verlag, Berlin (1998)
- [Hubka 01] Hubka, V. and Eder, W. E.: Functions Revisited, in *Proceedings of International Conference on Engineering Design 01* (2001)
- [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. 68–77 (1999)
- [来村 02a] 来村 徳信, 溝口 理一郎: オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 61–72 (2002)
- [来村 02b] 来村 徳信, 他: 機能オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述とその機能構造設計における利用, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 73–84 (2002)
- [Kleer 87] Kleer, de J. and Williams, B. C.: Diagnosing Multiple Faults., *Artificial intelligence*, Vol. 32, No. 1, pp. 97–130 (1987)
- [越川 82] 越川 清重, 植草 源三, 村田忠 (編): 実務にすぐ役立つ信頼性技術, 日刊工業新聞社 (1982)
- [古崎 02] 古崎 晃司, 来村 徳信, 池田 満, 溝口 理一郎: 「ロール」および「関係」に関する基礎的考察に基づくオントロジー記述環境の開発, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 196–208 (2002)
- [Larsson 96] Larsson, J. E.: Diagnosis Based on Explicit Means-End Models., *Artificial intelligence*, Vol. 80, No. 1-2, pp. 29–93 (1996)
- [Lee 97] Lee, J.: Design Rationale Systems: Understanding the Issues., *IEEE Expert*, Vol. 12, No. 3, pp. 78–85 (1997)
- [Lee 01] Lee, B. H.: Using FMEA models and ontologies to build diagnostic models., *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 15, No. 4, pp. 281–293 (2001)
- [MIL 80] MIL-STD-1629A: *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, Military Standard (1980)
- [溝口 02] 溝口 理一郎, 来村 徳信, 布瀬 雅義: オントロジー工学の成功事例 ~ 機能オントロジーに基づく生産技術知識の共有・再利用 ~, 人工知能学会研究会資料 (2002)
- [溝口 05] 溝口 理一郎: オントロジー工学, オーム社 (2005)
- [Pahl 88] Pahl, G. and Beitz, W. eds.: *Engineering Design - a Systematic Approach*, The Design Council (1988)
- [関谷 99] 関谷 貴之, 吉岡 真治, 富山 哲男: オントロジーを用いた統合的設計支援環境の実現, 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 6, pp. 119–128 (1999)
- [塩見 83] 塩見 弘, 島岡 淳, 石川 敬幸 (編): FMEA, FTA の活用, 日科技連出版社 (1983)
- [Steven 99] Steven, K., Peder, F., and Ishii, K.: Advanced Failure Modes and Effects Analysis of Complex Processes, in *Proceedings of the ASME Design for Manufacturing Conference* (1999)
- [Teoh 04] Teoh, P. and Case, K.: Modelling and Reasoning for Failure Modes and Effects Analysis Generation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. 3, pp. 289–300 (2004)

〔担当委員：武田 英明〕

2006 年 5 月 12 日 受理

 著 者 紹 介



小路 悠介(学生会員)

2002 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業．2004 年同大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了．現在，同大学院工学研究科電子工学専攻博士後期課程に在学中．機能を中心とした人工物に関するオントロジー工学的考察とそれに基づく設計知識の共有に興味を持つ．



来村 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，同大学産業科学研究所技官．1994 年同助手．2003 年同助教授．現在に至る．博士(工学)．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



加藤 義清(正会員)

1998 年東京大学工学部航空宇宙工学科卒業．1998 年から 1999 年までカリフォルニア大学サンディエゴ校計算機科学・工学科に留学．2003 年東京大学大学院博士課程修了．博士(工学)．同年より，宇宙開発事業団宇宙開発特別研究員．同年 10 月宇宙航空研究開発機構宇宙航空プロジェクト研究員．2005 年 10 月より情報通信研究機構研究員．設計知識マネジメント，情報の信頼性評価などの研究に従事．AAAI 会員．



筒井 良夫(正会員)

九州芸術工科大学(現九州大学芸術工学部)音響設計学科卒業．ソフトウェア開発メーカーにてオペレーティングシステム，制御系ソフトウェア開発に従事．1991 年～1999 年：宇宙ステーション搭載ソフトウェアの安全・信頼性評価・解析手法の開発とこれを用いた解析業務に従事．2000 年～2005 年：宇宙航空研究開発機構(JAXA)招聘開発部員：アブダクションを用いた不具合診断、オントロジー等の研究に従事．情報処理学会，日本ヴァーチャルリアリティ学会会員

ティ学会会員



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，知的学習支援システム，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，1999 年 ICCE99 Best paper Award，2005 年大川出版賞(オントロジー工学)，2006 年人工知能学会論文賞，ICCE2006 Best Paper Award 受賞．人工知能学会理事，同編集委員会委員長，教育システム情報学会理事，同編集委員長，Intl. AI in Education(IAIED) Soc. President, APC of AACE President を歴任．現在，人工知能学会会長，Semantic Web Science Assoc. Vice-President，電子情報通信学会，情報処理学会，日本認知科学会，AAAI, IEEE 各会員．