

工学ドメインオントロジー

Engineering Domain Ontologies

來村 徳信

Yoshinobu Kitamura

大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

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

keywords: ontology, domain ontology, engineering domain, ontology development, ontology application

1. はじめに

本稿では工学の対象となる製品やプラントといった物理的人工物に関するオントロジーについて議論をする。このような物理的人工物は人間または計算機が実行する設計行為や故障診断行為といった工学的行為の対象物として捉えることができる。オントロジー工学では一般に問題解決行為をタスク、その対象世界をドメインと呼ぶことから、ここでの議論の対象世界を「工学ドメイン」と呼ぶ。計算機システムが工学的問題解決（またはその強い支援）を行う際には、内部に対象となる物理的人工物に関する「ドメインモデル」を保持している。これは対象世界に存在するものとそれらの挙動の記述である。一方、計算機が人間が行う問題解決を弱い意味で支援する場合や、検索などによって対象に関する情報の流通を支援する際にも、対象とする情報にどのような内容が含まれているかを表すような弱い意味でのドメインモデルが暗黙的であれ存在している。

工学ドメインオントロジーはこのような工学ドメインモデルの内容を規定する知識である。つまり、そのモデリングで捉えられる対象物理世界に根本的に何が存在し、どのような関係が存在しうるのかを定義する。物理的世界のモデルは空間的な構造的側面と時間的な振る舞いの側面に大きく分けられる。例えば、電気回路の故障診断のためのドメインモデルであれば、構造的側面からはトランジスタといった種類の部品と電気的接続という関係が存在すると捉えることができる。一方、振る舞いの側面からはそれらの部品の物理量がどのように変化するか、またそれを支配する法則、それらが果たす機能などが記述される。このようなモデルに対するドメインオントロジーには、部品概念や、その下位概念であるトランジスタなどの部品体系、接続関係、物理法則、属性体系、機能体系などが含まれる。弱いドメインモデルの場合には部品の名前の体系などが考えられる。

本稿では、まず、2章で工学領域におけるオントロジーの必要性について議論し、3章で構築上の留意点に触れる。次に、4章で開発された工学ドメインオントロジー

の例として、基礎的なデバイスオントロジー [de Kleer 84, Gruber 96]、階層的な PhysSys オントロジー [Borst 97]、ツールとの接点として KIEF のオントロジー [関谷 99]、概念的オントロジーとして機能オントロジー [來村 02a] を特に取り上げて述べる。5章ではこれらのオントロジーの用いられ方について述べる。

本特集では、[堀 04] が工学的問題解決を含む問題解決タスクに関するオントロジーについて述べている。また、PSL や EPISTLE は工学ドメインオントロジーの一種ともみなせるが、企業活動にからんだ大規模なものであるため、それぞれ [西岡 04]、[岡田 04] で述べられる。

2. オントロジーの必要性

工学領域におけるドメインオントロジーの必要性はモデリングにおける視点依存性の明確化と相互運用にあるといえる。物理世界の捉え方（概念化 (conceptualization) と呼ばれる）にはさまざまな恣意性がある。物理世界は客観的であってその法則は物理学が明らかにしていることから、モデル化も単一であるように思われるかもしれないが、例えば以下のようなものに依存してさまざまなモデルが記述される。

- 抽象度・粒度：例えば、電子回路のモデルには電圧レベルや論理レベルなど様々な抽象レベルがある。また、構成単位の粒度にも恣意性がある。
- 理想化：工学的なモデル化は常になんらかの理想化（ある現象を無視するなど）を伴っており、理想化や前提によってモデルは異なる。
- 対象装置、領域、学問領域：機械、電子回路、プラントといった物理システムの種類（対象領域）や、設計工学、信頼性工学といった学問領域によって、対象のとらえ方が異なる。
- タスク：設計や故障診断といったタスクに依存したモデリングが行われる。また、工学的問題解決を支援する計算機ツールは異なる側面を扱ったモデルを利用している。

さらに、より設計者などの認識に近いレベルの知識である機能的知識を考えると、客観的な構造や振る舞いの記述とは異なり、個々の部品がどのように装置全体の機能に貢献しているかといった設計者の主観的知識であるために、記述が ad hoc になり、記述者によって記述が異なってしまいがちである。例えば「溶接する」は一見、機能を表す概念のようであるが、機能を達成する方式を意味に含んだ概念である [來村 02a]。

このようなモデルの視点依存性は多くの場合暗黙的である。つまり、書かれたモデルの視点や前提、仮定、理想化は明確になっていないことが多い。このような暗黙性からは3つの問題が生じる。第1にその質を保つことが極めて困難である。つまり、モデルが満たすべき規約が明確でないため、計算機的な意味の一貫性を保つことが困難である。第2に、使われている概念の意味や制約が明示的でないため、他人が理解することや計算機エージェント同士で連携をすることが難しいという相互理解の困難さが生じる。第3に記述された知識を異なる対象装置や他の領域で再利用することが難しい。また、タスクへの過度の依存は、設計時に記述した知識をその装置の故障診断時に用いるといった、異なる問題解決における利用を阻害する。モデルの再利用とはモデルのビルディングブロックの集積を意味する。ボルトやナットと同じようなモデル構成要素の標準的ライブラリは工学的に自然な発想であり、工学ドメインオントロジーの重要な動機のひとつである。

このような物理世界の概念化における暗黙的視点依存性を明確化し、概念化の規約 (specification) として記述したものが工学ドメインオントロジーである。規約には様々なレベルがあるが [溝口 03]、表現レベルの規約ではなく、物理世界の内容に関する規約が求められる。このようなオントロジーの提供する概念と制約に基づいて対象のモデルを記述することで、前述の第1の問題点である恣意的記述を避けてモデルの一貫性を保つことが可能になる。第2に、オントロジカルな規約への合意によって、モデル記述者が意図した意味を他者に伝え、誤った解釈をされることを防ぐことができる。第3に、明示化された規約に基づいて、異なる対象やタスクへの適用可能性を判断することができ、また、異なる視点からのモデルとの相互運用や統合を図ることが可能になる。

3. オントロジー構築上の問題点

工学ドメインオントロジーを構築する際の主な問題は、前述した依存性をどのように切り出すかである。つまり、多様なドメインモデルの内容をいかに捉えるかが問題であり、以下に挙げるような留意点について、一種のトレードオフの関係を適切に決定しなければならない。

- (1) 抽象レベル：前述したような抽象レベルのどの概念、知識を対象とするか。

- (2) 領域一般性：どの程度対象領域に固有であって、どのような領域範囲の対象に適用可能か。
 - (3) タスク共通性：特定タスク用のドメインモデルなのか、タスク独立なのか。
 - (4) モデルレベル：記述対象の完全な計算機モデルを指向するのか、または、検索などのための部分的モデルもしくはインデックスを意図しているのか。
 - (5) 記述レベル：オントロジーの内容は語彙階層 (taxonomy) のみであるのか、概念間関係を含むのか、さらに公理を含む深い記述レベルなのか。また、概念構造が哲学的側面から見て本質的 (intrinsic) であるのかどうかを意識するのか。
 - (6) 多様性：単一オントロジーへの合意を前提とするのか、複数オントロジーの相互運用を考慮するのか。
- ここで、(1)~(3) は前章で述べたモデルの依存性をどのレベルに設定するかを規定する。(4)~(6) はモデルまたはオントロジーの記述の性質を規定するものである。

4. オントロジー自体の説明

4.1 基礎：デバイスオントロジーとプロセスオントロジー

人工物のモデル化の基礎は、なにがモデルの基本構成要素であり、その要素がどのように結びついているとみなすかである。本特集の [武田 04] で述べられている上位オントロジーや大規模オントロジーはその基礎を与えるが、工学領域でよく用いられているもののひとつが、装置を中核概念とするデバイスオントロジーである。対象世界を、入力を変換し出力する「装置」(デバイス)が「ポート」を介して「接続」「集積」されたものであると見なす。接続関係(接続トポロジー)を「構造」、装置によって変換されるものを「対象物」(operand)と呼ぶ。構造に沿った対象物の流れと装置での対象物の属性(物理量)の変化の記述によって、振る舞いの側面が表現される。また、装置はブラックボックスとしての集積-分解(part-of)関係を持ち、2章で述べた記述粒度の違いを表現する。

このようなオントロジーはシステム理論を起源とみなすことができ、様々な工学領域で広く用いられている(例えば、よく知られた設計方法論である [Pahl 96])。[de Kleer 84] ではこのオントロジーに基づく因果理解を提案している。ここでは、オントロジーとして定式化されているわけではないが、装置間の接続に関して「導管」概念とそこでの認知的な時間経過(架空時間(mythical time))を明確化することで、人間の認知に沿った因果理解の前提条件を明らかにしたことが重要である。また、部品モデルの使用コンテキスト(組み込まれる装置)への依存を排除すること(No-Function-In-Structure (NFIS) 原則)の重要性を指摘し、モデルライブラリの必要条件のひとつを明らかにしている。

```

(define-class COMPONENT (?x)
  :def (individual-thing ?x)
  :axiom-def (and
    (domain-of component SUBCOMPONENT-OF)
    (domain-of component HAS-SUBCOMPONENT-OF)
    (domain-of component CONNECTED-COMPONENTS)))

(define-relation CONNECTED-COMPONENTS (?a ?b)
  :def (and (component ?a) (component ?b)
    (not (subcomponent-of ?a ?b))
    (not (subcomponent-of ?b ?a)))
  :axiom-def (and
    (irreflexive-relation connected-components)
    (symmetric-relation connected-components)))

(define-relation SUBCOMPONENT-OF (?sub ?super)
  :def (and (component ?sub) (component ?super))
  :axiom-def (and (irreflexive-relation subcomponent-of)
    (antisymmetric-relation subcomponent-of)))

```

図 1 Component-Assemblies Theory [Gruber 96] の定義の一部

デバイスオントロジーの構造的側面に関する形式的実装の例が Component-Assemblies theory [Gruber 96] に見られる。Frame ontology に基づいて、Ontolingua で記述されている。図 1 に定義の一部を示す（コメント部などを省略した）。connected-components 関係は 2 つの部品間の接続関係を表し、互いの部分部品ではないこと、また、自己再帰的ではなく (irreflexive)、対称 (symmetric) である（つまり接続方向を考慮しない）ことが記述されている。一方、集積 - 分解関係を表す subcomponent-of 関係は、自己再帰的ではなく、非対称（逆向きの関係は同時には存在しない）であることが定義されている。

一方、物理現象を引き起こすものとして「物理プロセス (physical process)」を考える、物理プロセスオントロジーが Forbus によって提案されている [Forbus 84]^{*1}。この物理プロセスオントロジーは、プロセスの発生条件や影響などの記述プリミティブとそれらの間に成り立つ時間関係や因果関係などの公理などから構成される。このようなオントロジーは特に化学反応プロセスの記述によく用いられる。論文 [Angele 03] では類似した概念に基づいた化学領域のオントロジーが述べられている。

物理プロセスオントロジーとデバイスオントロジーの違いは、プロセスオントロジーではモノはプロセスへの対等な参加者 (participants) であり、デバイスオントロジーにおける主体と客体という関係がないことである。そもそも全ての物理的デバイスは自然現象に制約を加え制御することによって機能を実現しており、デバイスとしての認識をはずすと装置内部で起こっている（複数の）物理・化学プロセスが残ることになる。したがって、デバイスオントロジーは自然現象を表す物理プロセスオントロジーを装置の観点から特殊化したものであると言える。

*1 「プロセス」という言葉には過程、系列、手順、処理などの意味もあり、一般にプロセスオントロジー（例えば PSL）とはそのような一般的な「時間的に変化する過程」を表すためのオントロジーを指すが、ここでいう「物理プロセス」はそれらとは異なり、自然現象もしくは自然法則を表している。

デバイスオントロジーは対象世界における要素の果たす「役割」を規定している。オントロジー工学ではこのようなコンテキストにおける役割を「ロール」という概念で捉える [溝口 99]。デバイスオントロジーは人工物におけるロールの割り当てに関するひとつの系であり、実要素の認識が終わった後にシステム全体におけるそれぞれの役割を明らかにすることができる。筆者らはこのデバイスオントロジーにおけるロール概念に注目し、装置を特殊化した「導管」、対象物を特殊化した「媒体」の定義と割り当て方について議論している。また、装置と対象物の割り当て方の違いなどから「振る舞い」概念には 4 種類のとらえ方があることを明確にした [來村 02a]。

物理量 (Physical Quantities) は物理世界を記述するもう一つの基礎である。質量などの「物理量」、kg などの「単位」、その実際の値である「実数」の関係を明確にする必要がある。「量」(Quantity) とは具体物が持つある属性の「大きさそのもの」を指し、測定（表現）する際のスケールに依存しない。「単位」には kg などの重さを量るスケールそのもの（英語の dimension に対応）と、大きさ 1 の 1kg (英語の unit に対応) の 2 つの意味がある。Gruber らは物理量とそれらの間の物理式を記述するための EngMath (Engineering Mathematics) オントロジーを綿密な考察に基づき、構築している [Gruber 94]。論文 [Dreyer 03] は RDF(S) を用いた物理量の表現を議論している。ここでは単位は物理量と値を結びつけるプロパティとして表現され、例えばキログラムは質量クラス（物理量クラスのサブクラス）を定義域、実数クラスを値域とするスケールプロパティとして定義されている。

基礎的オントロジーの他の例として、Hayes の液体のオントロジーがある [Hayes 85]。液体のアイデンティティに関する深い議論に基づいて液体を格納する容器を中心として液体を捉えるオントロジーを提案している。Liu らは電気回路における巨視的オントロジーであるデバイス・オントロジーと微視的である荷電粒子と電場などを要素とする荷電粒子オントロジー (charge-carrier ontology) とを組み合わせる推論方法を提案している [Liu 92]。[Rosenman 01] は設計分野における物質-幾何形状 (substance-geometry) モデルや形状特徴 (feature) モデルとの関連性などについて議論している。小野里は実体概念ではなく時空間における状態記述を中心とした物理世界オントロジーについて考察している [小野里 02]。論文 [須藤 02] は人工物の操作者 (ユーザ) とのインタラクションを考慮した因果連鎖のオントロジカルなモデルを提案している。また、ボンドグラフ理論 [Rosenberg 83] は対象物の持つ属性として、流れるモノの量を表す "flow"（電流量や質量流量など）とそれを起こす能力を表す "effort"（電圧や流圧など）という一般的カテゴリを規定しているとみなせる。

このようなオントロジーは一般性が高く、比較的広い範囲の物理的システムに適用できるため、2 章で述べた

対象領域や学問領域に共通なモデリング基盤を提供する役割を果たす。

4.2 階層化：PHYSYS オントロジー

実際にドメインモデルの概念化の規約を表現するためには、多くのオントロジー的規約が必要である。数多い規約に一度に合意することは困難であるし、オントロジー自体の再利用を考慮する必要がある。そのためのひとつの方法がオントロジーの階層化である。前述したような基礎的オントロジーを基盤として、その上により豊かな規約を記述したオントロジーを結びつけるのである。このようなアプローチは多くの研究にみられるが^{*2}、典型的な例が PHYSYS オントロジー [Borst 97] である。

PHYSYS オントロジーは3つのベースオントロジーと3つの上位理論オントロジーから構成される(図2)。図中の矢印はオントロジー間の包含(inclusion)関係を表しており、矢印の先のオントロジーが元のオントロジーを部分として含む。最上位理論である mereology は要素の全体と部分の関係(前節における集積・分解関係)に関する理論であり、topology はその要素間に対して(型付けされた)接続関係という概念を追加する。さらに、これらに基づくシステム理論をさらに特殊化し terminal 概念を用いた接続関係を定義することによって部品(component)オントロジーが構成される。部品オントロジーは3つのベースオントロジーの一つとして、対象世界を構造的観点から捉えたモデルを与える^{*3}。これは前節で述べた Component-Assemblies Theory [Gruber 96] に対応するが、基礎理論が分離され明確・詳細になっている。このように、基礎的なオントロジーを包含しつつ、拡張(新たな概念を追加)または特殊化(基本概念の意味を特殊化)していくことで定義されている。

一方、異なる観点からのモデルのオントロジーとして、振る舞いの側面を表すプロセスオントロジーがある。ここでは前節で述べたボンドグラフ理論に基づいて stuff の移動(flow)とそれを起こす effort という概念を定義する。システム理論の要素が flow 分配や effort 源といった挙動のプリミティブに特殊化され、また、接続関係が energy flow などに特殊化される。さらに、3つ目の観点として、前節で述べた Gruber らの EngMath オントロジーがあり、物理世界を数式で記述するために必要な物理量や単位などの概念を提供する。

すなわち、PHYSYS オントロジーは構造、振る舞い、物理式という3つの観点から対象を捉える。それらの間には、例えば、部品はプロセスの担体(carrier)であり、物理量と物理式はプロセスを数学的に表現するといった概念間の関係が定義される。このようにオントロジーをモ

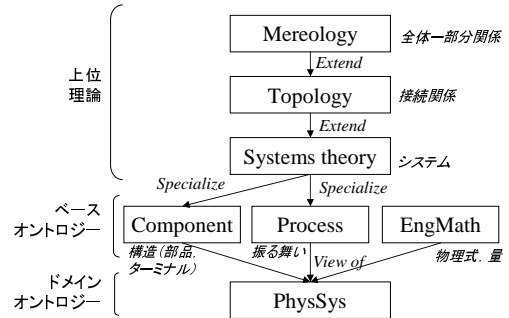


図2 PHYSYS オントロジーの構成 ([Borst 97] Fig.1 を改変)

ジュール化して漸次的に規約を増やすことを piecemeal ontological commitment と呼んでいる。

論文 [Valente 99] では既存の複数のオントロジーの導入やマージに基づいた、航空機の作戦行動に関するオントロジーの構築過程について述べている。López らは METHONTOLOGY オントロジー構築方法論を用いた化学分子とその構造に関するオントロジーの構築過程について詳しく述べている [López 99]。Horváth らは PHYSYS オントロジーでは扱っていない幾何形状や、特に物体間の接触関係についてオントロジカルな考察を行っている [Horváth 98]。また、論文 [Bachmann 94] は(拡張した) EngMath オントロジーに基づいた金属やプラスチックといった材質に関するオントロジーについて述べている。また、[武田 04] で述べられている上位オントロジーの一部は mereology に関する理論を含んでいる [Guarino 97]。

4.3 工学ツールとの接点：KIEF におけるオントロジー

工学行為には CAD や解析ソフトウェアといったさまざまな計算機ツールが用いられている。これらは独自の観点からのモデルを持っており、独自のオントロジーに基づいていると見なすことができる。このようなオントロジーを明確化しそれらに基づくモデルの相互運用を目指す試みが SHADE (Shared Dependency Engineering) [Gruber 92], PACT (Palo Alto Collaborative Testbed) プロジェクト [Cutkosky 93] などで行われてきた。ここでは、より緊密な統合を目指した、富山らの統合設計支援環境 KIEF (Knowledge Intensive Engineering Framework) におけるオントロジー [関谷 99] を紹介する。

KIEF では図3に示すように複数のオントロジーに基づくモデルを扱うためにプラガブル・メタモデル機構を持つ。これは単一のメタモデル内の概念と各固有オントロジー内の概念との間の結び付けを管理し、モデル間の一貫性を維持する。つまり、メタモデルは複数のモデルを結びつけるための還元モデルである。これまでに、Mathematica、ソリッドモデラ、FEM プリポストモジュール、梁モデラ、FEM モデラの結合がなされている。

KIEF においては共通の物理世界オントロジー(概念辞

*2 前述した Gruber らのオントロジーも後述の VT タスクのためのドメインオントロジーの部分オントロジーとして公表されている [Gruber 96]。

*3 したがって前節で中心的に述べたデバイスオントロジーとは異なり、装置から見た振る舞いに関する規約を含まない。

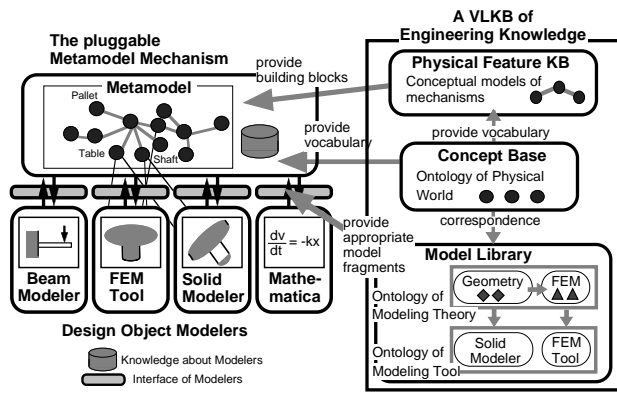


図 3 KIEF のフレームワーク [関谷 99]

表 1 梁モデラのオントロジーの例 [関谷 99]

Attribute	Related Concept	Available Concept	Reasonable Concept
	-	Force, Distributed Area, Supported Point	Deformation, Bending Moment Diagram ..
Entity	Entity	Beam	-
Physical Phenomenon	Force	Distributed Force, Concentrated Force	-
Relation	Relation	Hinged Support, Fixed Support, Free Support	-

書と呼ばれている)として、実体、関係、属性、物理現象、物理法則のカテゴリを用意している。フィジカルフィーチャは部品構造とその部品構造で起こる物理現象の汎用なモデルである。この共通の物理世界オントロジーに対して、ツール固有のオントロジーが結びつけられる。ツール固有のオントロジーの例として梁モデラのオントロジーを表 1 に示す。概念辞書の概念のどの概念がそのツールで利用可能か (related concept) やどの概念の特殊 (is-a 関係の下位) 概念になっているか (available concept) などが定義されている。

一方、[堀 04] で述べられる CommonKADS に代表されるタスクオントロジー研究では、工学的タスクから見た工学ドメインモデルについて多くの研究が行われている。特に、エレベーター設計問題 (VT Task) は共通例題として用いられドメインオントロジーとモデルが構築されている [Schreiber 96, Gruber 96]。KACTUS (modeling Knowledge About Complex Technical systems for multiple Use) プロジェクトの目標のひとつは異なるタスクにおける工学ドメインモデルとオントロジーの再利用であり、VT モデルの再利用 [Schreiber 95] の他に、送電網の故障診断用モデルのオントロジーと、復旧計画用モデルのオントロジーの二つを統合し、送電網制御支援システムに用いた例が報告されている [Bernaras 96]。

4.4 認知的知識のオントロジー：機能オントロジー

2章で述べたように機能的知識は人間の認識により近いレベルであり、人工物の理解に欠かすことができないにも関わらず、恣意性が強い。設計工学、機能表現、価値工学などの分野で多くのオントロジカルな考察が行われて

きた [Kumar 98, Salustri 98, 関谷 99, Chandrasekaran 00, Hirtz 02]。ここでは、筆者らが開発してきた機能を中心とするオントロジー [来村 02a] を紹介する。

筆者らの機能的知識・オントロジーの中心的部分の構成を図 4 に示す。4.2 節で述べた PhysSys オントロジーに類似した階層構造になっている。図の下にあるほど基礎的な知識であり、より上にある知識で用いられる概念を定義し、規約を提供するオントロジーとしての役割を果たす。まず、拡張デバイスオントロジーは、一般的なトップレベルオントロジーに基づいて、4.1 節で述べたように、一般的なデバイスオントロジーを物理世界を捉える際のルール概念に関して拡張したものである。次に、機能概念オントロジーは装置の果たす機能を表示する一般的な概念 (機能概念と呼ぶ) を is-a 関係 (一般 - 特殊関係) で体系化したものである。客観的な振る舞いに目的論的解釈を表す情報を結びつけた計算機理解可能な一般的な定義を行っている。機能間の達成関係 (集積 - 分解 (part-of) 関係) はその達成原理を概念化した「方式」として捉えられる。達成方式知識は一般的に成り立ちうる達成関係をライブラリとして is-a 関係で組織化したものである。実際の装置の機能モデルは、この一般的方式知識の規定する関係概念のインスタンスで結びつけられた、機能概念インスタンスから構成される。視点依存知識層は、一般的知識ではあるが、タスクなどの特定のコンテキストに沿って構造化されたものである。このように類似した概念間関係を明確に区別し、状況 (装置と知識使用コンテキスト) への依存性を明確にしている。特に重要であるのは、機能が “What to achieve” を概念化したものでその is-a 関係も達成すること (達成目標状態またはブラックボックスの入出力としての対象物の状態変化) の一般化であるのに対して、方式は “How to achieve” を概念化したものでその is-a 関係は達成原理の一般化である、という両者の違いが明確化されていることである。さらに、これらのオントロジー的規約を記述ガイドラインとして明確にした。また、現在、望ましくない挙動 (不具合事象と呼ぶ) の記述を機能表現に統合する研究を行っている。これは、そのような事象を防ぐ補助機能の設計意図を表現するために重要な役割を果たす。

5. オントロジーの使われ方

Uschold らはオントロジーの応用を、(U1) 中立的記述 (neutral authoring), (U2) 規約 (specification) としてのオントロジー、(U3) 情報への共通アクセス、(U4) オントロジーに基づく検索に大別している [Uschold 99]。溝口は、オントロジーを (M1) 共通語彙、(M2) 情報アクセス補助、(M3) 相互理解の媒体、(M4) モデル規約、(M5) 体系化基盤として利用する仕方があると分類している [Mizoguchi 03]。ここではこれらを参照しつつ工学分野におけるオントロジーの使われ方を議論する。

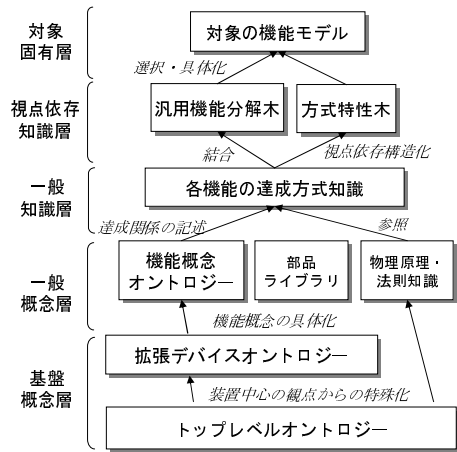


図 4 機能的知識・オントロジーの階層

5.1 モデルの規約，ライブラリ構築

第 1 の使われ方はドメインモデルに対して規約 (specification) を与え，メタモデルとしての役割を果たすことである．これは上述の U2, M4 に対応する．オントロジーはモデルを記述する際の語彙としての概念群とそれらの間の意味的な制約を与え，2 章で述べた恣意性を固定する．これはモデルの記述時に役立ち，モデルの記述を容易にし，一貫性を向上させる．計算機システムとしてはオントロジーに基づくモデル構築 (記述) 支援ツールとして具体化される．特にオントロジーの規定する理論的制約を明確に意識したものは “ontology-aware authoring tool” と呼ばれる．また，規約はモデルの再利用性に貢献し，ドメインモデルを構成単位要素ごとに再利用することを可能にし，モデルライブラリを構築できる．

このような使い方は前述したすべてのドメインオントロジー例に当てはまる (KIEF については次節，機能オントロジーについては 5.4 節で述べる)．まず，de Kleer のデバイスオントロジーにおける NFIS 原則 [de Kleer 84] は，構造 (部品間の接続トポロジ) に依存しない振る舞い記述を徹底することで，個々の部品のモデルを他の構成をとるシステムの記述時に再利用することができる．しかしながら，2 章で述べたようにモデルは本質的なならかの仮定を伴うため完全に徹底することは原理的に不可能である．そのような仮定を明示化し，それを利用して適切なモデルを構築する Compositional modeling と呼ばれる枠組みが提案されており，CML (Compositional Modeling Language) はそれに基づくオントロジカルな定義を持った記述言語である [Falkenhainer 94]．

Borst らはモデル記述を進化的 (evolutionary) なものと捉え，ベースオントロジーの観点ごとにモデル記述を徐々に進めることで，2 章で述べたような多くのモデリング上の選択肢を検討することを提案している [Borst 97]．また，オントロジーに基づいた OLMECO と呼ばれるモデルライブラリの構築について述べている．同じオントロジーに基づく別論文 [Pos 98] では一部，計算機による

モデル検証・修正が行われている．

5.2 相互運用・交換・統合

第 2 の使われ方は，U1/U3, M2/M3 に相当し，2 章で述べたような前提の異なる知識源の間の相互運用や交換を目的とする．ツール間での知識交換を目指した KIEF では，設計行為を様々なモデルを構築・評価しながら設計対象の情報を詳細化する作業と見なす．したがって，モデル構築 (モデリング) をオントロジーを用いて支援することは設計を支援することの重要な一部である．KIEF ではまずメタモデル機構上に初期モデルを構築し，次に選択されたツール上にメタモデル上の情報を利用してそのツール固有のモデルを構築する．つまり，U1 に相当する．この際に，ワークスペース上にはそのツールで扱える (逆に言えばツールを使う際に必要な情報を表す) 概念が導入されるが，そのツール固有の概念とメタモデル上の概念との関係に従って，メタモデル上の情報が参照される．ツール上で事象の生起可能性の評価などが行われ新たな情報が得られれば，その情報がメタモデルにリンクされ，他のツールからも参照可能になる．このように，ツールによって異なる側面からの情報が扱われるがそれらの間の相互運用性がメタモデルによって確保される枠組みとなっている．これは U3, M2 に対応する．

KIEF におけるメタモデルは複数モデルの多くの内容を統合しており，緊密なコミットメントを前提としている．SHADE [Gruber 92], PACT [Cutkosky 93] や FIPA, DAML などにおけるエージェント指向の研究では，より部分的なコミットメントのみを前提として，分散的なデータ交換を目指している．現在盛んに研究が行われているセマンティックウェブにおけるオントロジーも，よりオープンで動的な Web 環境を意識した，この種類の用いられ方が主に議論される．工学領域では例えば，基礎的なオントロジーに基づいた自動車会社における情報統合化が試みられている [Maier 03]．また，ScadaOnWeb プロジェクト [Dreyer 03] は前述した物理量に関するオントロジーに基づいたプラントの監視，制御のための共通プラットフォームを目指している．

5.3 人間との相互理解

[Mizoguchi 03] で M3 として述べられているように，オントロジーは計算機エージェント間だけではなく，計算機と人間 (ユーザ)，人間同士の共有概念を提供し，相互理解を促進する．前者は説明機能，後者は知識内容に関するナレッジマネージメントへの貢献として位置づけられる．筆者らはヒューマンメディアプロジェクトの一環として，石油精製プラントオントロジーとそれに基づいた実規模のプラントモデルを構築し，プラント運転員へのタスクコンテキストに応じた説明生成を実現している [古崎 02]．また，Semantic Web における Trust のためにも計算機実行結果の合理性を示す情報 (provenance

information と呼ばれる) が重要である。[Angele 03] では化学に関する質問回答とその説明に用いている。

5.4 知識の体系化

知識の体系化を行うためには基礎的概念を明確化し、他の概念との関係を同定することで、概念構造において適切に位置づけることが必要である [Mizoguchi 03]。オントロジーは対象を捉える際の基礎的概念とそれらの関係を明確化することで、さまざまな知識を関係づける基盤としての役割を果たす (M5)。[岡田 04] で解説されている EPISTLE プロジェクトは、従来領域によって異なっていた概念構造を統一化することを目指しており、オントロジーを知識体系化に用いている例であると言える。

筆者らの機能オントロジーは特にこの側面を強調しており、明確な基礎的概念に基づく知識構造化と管理・共有を目指している [來村 02b]。この枠組みの一部は民間企業において生産に関わる装置に関する機能的知識管理に実用されており、例えばデザインレビューのやり直し回数の削減、特許申請のクレームの強化、従来手法で解決できなかった品質問題の解決など大きな成果をあげている [溝口 02, 布瀬 03]。また、この枠組みに基づいて開発された知識管理ソフトウェア SOFAST のユーザーズグループが組織されており、現在 13 社で使用されている。その成功の鍵は、

- (1) デバイスオントロジーにおけるロール概念と 4 つの振る舞い概念の明確化
- (2) 方式概念と機能概念の分離
- (3) 機能と方式の is-a 関係と part-of 関係の識別
- (4) 不具合とそれを防ぐ補助機能の関係性の明示化

にあると考えられる。例えば、2 章で述べた「溶接」概念は、(2) の方式概念と (3) の関係識別に基づいて、「一体化」機能と「溶融」方式に分解してモデル化することができる。こうすることで始めて、他の一体化達成方式 (例えば、塑性変形方式) との相互運用性を実現することができる。また、共通の機能を達成する方式群を is-a 関係で構造化することができる。このような機能と方式の分離とその記述ガイドラインは、エンジニア自身が自己の知識を表出しやすくし、設計や問題解決を内省するトリガーとなることが明らかになった。例えば、機能モデルを記述したことで研磨装置のガイドリングの隠れた機能 (砥粒を押し込む) に初めて気づき、従来手法では達成できなかった研磨時間の短縮が図れた。さらに、(4) の不具合の記述は異なるタスクの観点からの知識の統合であると言える。実際、デザインレビューで用いた機能モデルを品質問題解決と特許申請に用いた例がある。さらに、設計者、保全者、オペレータなどの異なる職種のエンジニアが共同で機能モデルを記述する実験を行ったところ、このような記述様式が適切な抽象レベルの中間言語として働き、前節で述べた人間間の相互理解を促進することが確認された [溝口 02]。このように機能オントロ

ジーは知識内容に関する規約として機能しており、知識の体系化と共有を促進する役割を果たす。

6. 終わりに

工学の対象となる物理的人工物に関するオントロジーの開発例について述べた。対象の概念的とらえ方を規定する基礎的オントロジーに基づいて、階層的に複数のオントロジーを組み合わせ、全体としてドメインオントロジーが構成されることを述べた。また、異なるオントロジーに基づく工学ツールや知識源を還元的オントロジーを通して統合・相互運用できることを示した。

オントロジー工学やセマンティックウェブ研究でも、ドメイン独立の知識記述・推論メカニズムに注意が行きがちであるが、いうまでもなく良質のドメインオントロジーの構築は必須の課題である。工学ドメインオントロジーの対象領域は広いが、一般性に注意を払いつつも、領域に依存した強い「知識内容の理論」とそれに基づく知識体系化を目指した研究活動が望まれている。

謝 辞

大阪大学産業科学研究所 溝口理一郎教授には日頃から議論して頂くとともに、草稿に多くのご示唆を頂いた。図 3 と表 1 の掲載はデルフト工科大学 富山哲男教授、北海道大学 吉岡真治助教授、東京大学 関谷貴之助手のご厚意によるものであるとともに、吉岡助教授には草稿にコメントを頂いた。また、住友電気工業株式会社生産技術部 布瀬雅義部長 (現在、住友電装株式会社)、柏瀬雅一部長、篠木秀次主席には 5.4 節で述べた実用に際してご協力頂いている。記して感謝申し上げます。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Angele 03] Angele, J., Moench, E., Oppermann, H., Staab, S., Wenke, D.: Ontology-based Query and Answering in Chemistry: OntoNova @ Project Halo, In *Proc. of the 2nd Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2003)*, 913-928 (2003)
- [Bachmann 94] Bachmann, B., Steffens, M.: An Ontology of Materials, In *Proc. of ECAI '94 Workshop W13: Comparison of Implemented Ontologies*, 17-33 (1994)
- [Bernaras 96] Bernaras, A., Laresgoiti, I., Corera, J.: Building and Reusing Ontologies for Electrical Network Applications, In *Proc. of ECAI 96*, 298-302 (1996)
- [Borst 97] Borst, P., Akkermans, H., and Top, J.: Engineering Ontologies, *Int. J. of Human-Computer Studies*, 46(2/3), 365-406 (1997)
- [Chandrasekaran 00] Chandrasekaran, B. and Josephson J. R.: Function in Device Representation, *Engineering with Computers*, 16(3/4), 162-177 (2000)
- [Cutkosky 93] Cutkosky, M.R., et al.: PACT: An Experiment in Integrating Concurrent Engineering Systems, *Computer*, January, 28-37 (1993)
- [de Kleer 84] de Kleer, J., Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artificial Intelligence*, Vol.24, pp.7-83 (1984)
- [Dreyer 03] Dreyer, T., Leal, D., Schröder, A., Schwan, M., ScadaOnWeb - Web Based Supervisory Control and Data

- Acquisition, In *Proc. of ISWC 2003*, 788-801 (2003)
- [Falkenhainer 94] Falkenhainer, B., Farquhar, A., Bobrow, D., Fikes, R., Forbus, K., Gruber, T., Iwasaki, Y., Kuipers, B.: *CML: A Compositional Modeling Language*, KSL-94-16, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University (1994)
- [Forbus 84] Forbus, K. D.: Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, 24, 85-168 (1984).
- [布瀬 03] 布瀬雅義, 柏瀬雅一, 篠木秀次: 生産技術の体系化と生産・設備設計, *人工知能学会誌*, 18(2), 114-118 (2003)
- [Gruber 92] Gruber, T. R., Tenenbaum, J. M., Weber, J. C.: Toward a Knowledge Medium for Collaborative Product Development, In *Proc. of Artificial Intelligence in Design '92*, 413-432 (1992)
- [Gruber 94] Gruber T. R., Olsen, G. R.: An Ontology for Engineering Mathematics, *Fourth Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning* (1994)
- [Gruber 96] Gruber, T. R., Olsen, G. R., Runkel, J.: The Configuration Design Ontologies and the VT Elevator Domain Theory, *Int. J. of Human-Computer Studies*, 44, 569-598 (1996)
- [Guarino 97] Guarino N.: Some Ontological Principles for A Unified Top-Level Ontology, *Proc. of AAAI Spring Symposium on Ontological Engineering* (1997)
- [Hayes 85] Hayes, P. J.: Naive physics I: Ontology for liquids, In *Formal theories of the commonsense world*, 71-107, Ablex (1985)
- [Hirtz 02] Hirtz, J., Stone, R. B., McAdams, D. A., Szykman, S., Wood, K. L.: A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts, *Research in Engineering Design*, 13, 65-82 (2002)
- [堀 04] 堀 雅洋, 瀬田 和久: 問題解決タスクのためのオントロジー, *人工知能学会誌*, 19(2) (2004)
- [Horváth 98] Horváth, I., Kuczogi, Gy., Vergeest, J. S. M.: Development and Application of Design Concept Ontologies for Contextual Conceptualization, In *Proc. of 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences DETC, DETC98/CIE-5701* (1998)
- [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, *人工知能学会論文誌*, 17(1), 61-72 (2002)
- [来村 02b] 来村徳信, 笠井俊信, 吉川真理子, 高橋賢, 古崎晃司, 溝口理一郎: 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, *人工知能学会論文誌*, 17(1), 73-84 (2002)
- [古崎 02] 古崎晃司, 来村徳信, 佐野年伸, 本松慎一郎, 石川誠一, 溝口理一郎: オントロジー構築・利用環境「法造」の開発と利用 - 実規模プラントのオントロジーを例として -, *人工知能学会論文誌*, 17(4), 407-419 (2002)
- [Kumar 98] Kumar, A. N. and Upadhyaya, S. J.: Component-Ontological Representation of Function for Reasoning about Devices, *Artificial Intelligence in Engineering*, 12, 399-415 (1998)
- [Liu 92] Liu, Z.: Integrating Two Ontology for Electronics, In *Recent Advances In Qualitative Physics*, 153-168, MIT Press (1992).
- [López 99] López, M. F., Gómez-Pérez, A., Sierra, J. P., Siera, A. P.: Building a Chemical Ontology using Methontology and the Ontology Design Environment, *IEEE Intelligent Systems*, Jan./Feb., pp.37-46 (1999)
- [Maier 03] Maier, A., Schnurr, H. P., Sure, Y.: Ontology-based Information Integration in the Automotive Industry, In *Proc. of ISWC 2003*, 897-912 (2003)
- [溝口 99] 溝口理一郎, 池田満, 来村徳信: オントロジー工学基礎論 - 意味リンク, クラス, 関係, ロールのオントロジーの意味論 - *人工知能学会誌*, 14(6), 87-100 (1999)
- [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 SIG-KBS-A202*, 39-46 (2002)
- [溝口 03] 溝口理一郎, 池田満, 来村徳信: 対象モデリングの視点から見た知識表現, *人工知能学会誌*, 18(2), 183-192 (2003)
- [Mizoguchi 03] Mizoguchi, R.: Tutorial on Ontological Engineering: Part 2: Ontology development, tools, and languages, *New Generation Computing*, 22, 61-96 (2003)
- [西岡 04] 西岡 靖之: Process ontology: NIST の PSL (仮題), *人工知能学会誌*, 19(2), 2004.
- [岡田 04] 岡田 宏: プロセスプラントとオントロジーパラダイム EPISTLE データモデルの紹介, *人工知能学会誌*, 19(2), 2004.
- [小野里 02] 小野里雅彦: 設計対象記述のための物理世界オントロジーとモデリング, *人工知能による協調的シネシスの方法論 研究成果報告書*, pp.35-56, 2002.
- [Pahl 96] Pahl, G., and Beitz, W.: *Engineering design - a systematic approach*, 2nd ed., Springer-Verlag (1996)
- [Pos 98] Pos, A., et al.: Automatic Revision of Simulation Models, *IEEE Intelligent Systems*, 13(2), 75-81 (1998)
- [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*, 14(6), 119-128, 1999.
- [武田 04] 武田 英明: 上位オントロジー, *人工知能学会誌*, 19(2), 2004.
- [Uschold 99] Uschold, M., and Jasper, R.: A Framework for Understanding and Classifying Ontology Applications, In *Proc. of the IJCAI99 Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods (KRR5)* (1999)
- [Rosenberg 83] Rosenberg R. C. and Karnopp, D. C.: *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw-Hill (1983)
- [Rosenman 01] Rosenman, M., Simoff, S. J.: Some Conceptual Issues in Component-assembly Modeling, *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, 109-119 (2001)
- [Salustri 98] Salustri, F. A.: Ontological Commitments in Knowledge-based Design Software: A Progress Report, In *Proc. of the Third IFIP Working Group 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD*, 31-51 (1998)
- [Schreiber 95] Schreiber, G., Wielinga, B., Jansweijer, W.: The KACTUS View on the 'O' World, In *Proc. of IJCAI Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing* (1995)
- [Schreiber 96] Schreiber A. Th. and Birmingham W. P.: The Sisyphus-VT initiative, *Int. J. of Human-Computer Studies*, Editorial of a Special Issue, 44(3-4), 275-280 (1996)
- [須藤 02] 須藤 秀紹, 川上 浩司, 堀内 匡, 片井 修, 操作者とのインタラクションを考慮した人工物モデリングに関するオントロジカルな考察, *計測自動制御学会論文集*, 38(2), 210-218 (2002)
- [Valente 99] Valente, A., Russ, T., MacGregor, R., Swartout, W.: Building and (Re)Using an Ontology of Air Campaign Planning, *IEEE Intelligent Systems*, Jan./Feb., 27-36 (1999)

〔担当委員: 〕

2003 年 12 月 10 日 受理

著者紹介

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