

1. はじめに

筆者らは、人間の知的活動を支援するツールの設計に関心を持って研究を進めている。研究の前提として、そのような設計活動は次の二つの行為の流れで構成されると考えている。

(A) 何らかの前提(原理・仮定)に従って、ユーザの活動プロセスを想定して「モデル化」する

(B) そのモデルに基づいて、ユーザの活動を支援するツールを「具体化」する

もちろん、設計一般において前提となる原理・仮定を明示した上で対象をモデル化するという(A)の側面の重要性は広く認識されている。例えば、オブジェクト指向方法論では、(B)に対応するコード化の正当性を裏打ちする意味で(A)の重要性が強く意識され、設計を合理化するための様々なモデル化手法が考案されて広く受け入れられている[1]。

しかし、支援対象として想定するものが人の知的活動のような *ill-defined* なタスクである場合には、(A)のモデル化がより困難な問題になる。例えば、対象が *well-defined* で定型的タスクであれば、厳密にそのプロセスを記述(モデル化)することが比較的容易にできる。一方、他の例として研究活動を対象としてみると、大まかなプロセス(計画・実行・検証など)は決めることができるが、詳細レベルでは万人が納得するモデルは無いに等しく、どのようなものが良いかについて明確な基準があるわけでもない。このような活動を支援対象とする場合には、前提が不明瞭なために設計者が明確に想定プロセスをモデル化できなかつたり、モデル化できたとしてもツールとしての具体化が不十分なままユーザに提供されることも少なくない。そして、その結果としてユーザにその設計意図が明確に伝わらず、意図通りの効果が得られないということも起こり得る。

このような問題を解決するために、筆者らは計算機が以下の2つの機能を持ち、設計者による想定プロセスのモデル化とツールとしての具体化を一貫性をもってシームレスに連携させる支援を行うことが重要であると考えている。

- 設計の前提に基づいて、設計者が自身の考えを適切にモデル化できる記述体系を提供する。
- そのモデルを設計意図として、成果物としてのツールとの対応関係を管理する。

そして、これらの実現の基盤となるものが「オントロジー」であると考えている。オントロジーは設計の前提を明示化し、人と計算機が前提を共有する基盤となると同時に、計算機に上記の支援の源泉となる「知識」を持たせるための基盤となる。多くの読者にとってオントロジーという言葉は、言葉を聞いただけか、なんとなくは分かっているが詳しくは分からないというものであると思われる。そこで、2節ではオントロジーを扱う「オントロジー工学」という研究領域の必要性和役割を述べる。3節では知的システムにおけるオントロジーの役割を整理した上で筆者らが提案するオントロジーに基づく支援環境の姿について述べ、続く4節では研究事例を通じてその具体化を紹介する。最後に本稿のまとめとインタラクションのモデル化との関連を考察する。

2. オントロジー工学とオントロジー

2.1 オントロジー工学

現実を直視して地道に知識ベースを構築して実世界に存在する解決が困難な問題を解くために作られたエキスパートシステム研究では、計算機を「知的」にすることへの一定の貢献が得られたが、その一方で知的さの源泉となる「知識」への工学的アプローチをさらに発展させるための大きな問題点もいくつか明らかになってきた。その中で特に注目したいのは、知識を積み上げることが難しいということである。エキスパートシステムでは専門知識をプロダクションルールとして記述し利用する。そう一言で言っても、実際には専門家を含む種々の知識源から知識を抽出し、ルールの形式に整理する作業は膨大なものである。この肝心な、しかも手間のかかる部分を支援する技術が欠けていた。知識を積み上げるためにはその前提となる仮定や視点、利用の目的に対する基本的合意が必須であるが、前提を明示化するため

の方法論がなかったのである。このために知識ベースの共有・再利用の問題が発生し、問題毎に知識ベースを構築しなければならないという大きな欠点があることも指摘された。

このような背景のもとで、知識を積み上げるための方法論として提案されたものが「オントロジー工学」である。オントロジー工学は知識ベースの前提となる仮定や視点、利用の目的を明示化する枠組みを提供すると共に、その上で知識を積み上げるための方法論を提供する。オントロジー工学で扱われる「オントロジー」とは本来、哲学用語で「存在論」という意味であるが、人工知能の分野では真理を追究するのではなく、そのような哲学者の「姿勢」を学び、工学的に「役に立つ」範囲で対象世界の根元的な概念体系を考察したものである。オントロジーの詳しい定義については[2]などを参考にさせていただくこととして、ここでは次のように理解していただくのが有用であると思われる

対象とする世界の情報处理的モデルを構築する人が、その世界をどのように「眺めたか」、言い換えるとその世界には「何が存在している」と見なしモデルを構築したかを(共有を指向して)明示的にしたものであり、その結果得られた基本概念や概念間の関係を土台にしてモデルを記述することができるようなもの[2]

オントロジー工学の重要な思想は、「内容指向」の研究¹ということ、計算機と人間の両方のために存在し共有・再利用されるものであるという2つである。知識は複数の主体の間で共有され、様々な目的のために再利用されなければならない。そして、計算機による知識処理は、多様な知識源に潜在する知識を両方の主体にとって操作可能な形に、抽出、変形、組織化する技術、すなわち、知識メディア技術に進化しなければならない。オントロジー工学はその基礎を与える学問であり、技術でもある。

2.2 オントロジーの分類

オントロジーにはいくつかの種類があり、定義する内容と深さによって主に以下の2種類の分類が考えられる。オントロジーの構築においては、その利用目的に合わせて適切な内容と深さのオントロジーを構築することが重要となる。

(1) 上位オントロジー・タスクオントロジー・ドメインオントロジー

この分類はオントロジーの本質的な分類で、概念化する対象による区別である。上位オントロジーは哲学におけるオントロジーに対応する。このオントロジーでは、時間、空間、もの、プロセス、属性、関係などの抽象度の極めて高い概念を定義する。タスクオントロジーは診断、設計、計画、制御などの問題解決の型(タスク)を対象としたオントロジーであり、ドメインオントロジーは特定の具体的な対象世界のオントロジーである。通常「オントロジー」というとドメインオントロジーを指すことが多い。タスクオントロジーとドメインオントロジーを組み合わせることによって、あるドメインでのあるタスクに関する概念体系が構成される。例えば、物理(ドメイン)のオントロジーと教育(タスク)のオントロジーを組み合わせることで物理教育に関するオントロジーが構成される。このように、定義ではタスクとドメインを分離し、利用時に結合することによって、双方に依存性が減少し再利用性が増す。また、タスクオントロジーやドメインオントロジーは信頼できる上位オントロジーに基づいて定義されていることが望ましい。

(2) Heavy-weight オントロジー・Light-weight オントロジー

この分類では、オントロジーを記述の深さによって区別している。Light-weight オントロジーは Web ドキュメントのオントロジー、すなわち Yahoo などの検索エンジンが持っているトピックの階層などのメタデータ関連の語彙集合や概念階層を代表例とするオントロジーである。これは用語(terminology)との差別化を気にしないで、オントロジーを「厳密に定義された用語集合」と位置づけ、とにかくウェブドキュメントの検索などの具体的な目標に対して必要な情報の効率的な記述とその有効利用が優先される。一方、Heavy-weight オントロジーは知識ベースの立場からのオントロジーであり、哲学的な考察を重要視し、概念や関係の形式的な定義、あるいは意味制約記述が要求される。これは、知識ベースの骨格としての役割を持ち、それを核にして知識ベースの再利用性や共有性の向上を目指していることから、厳密性や意味の明確性などが必要になるためである。また、概念や関係のインスタンスを作成することによって対象のモデルを作

¹ 人工知能研究の中には、論理や知識表現などを扱う「形式指向」の研究と、知識の内容を研究対象とする「内容指向」の研究がある。オントロジー工学は、「内容」を場当たり的ではなく、一般性を持って扱う技術とそれを支える理論を確立することを目指している。

成して、それに対する操作を定義することもあるために厳しい制約が課されることになる。

ここまでの解説で、読者の中にはオントロジーと知識ベースは結局は同じようなものと思われた方もいるかもしれない。確かにオントロジーは何かに関する理解を表現したものであって、知識の一種であることから当然の帰結であるとも言える。しかし、本稿を通じて最低でもこれだけは知っておいて欲しいことは、オントロジーと知識ベースは相対的にメタな関係にある点が決定的な違いであるということである。なぜなら、オントロジーは「ある知識ベースの前提となっている暗黙の概念化(対象世界に関する理解)を明示化したもの」であって、知識ベースとはレベルが一段異なるからである。メタ知識も知識であるが、「メタ知識」という別名を持っているのは、それが知識に関する知識という意味であると考えれば、両者の差別化をすることに意義がある。

3. オントロジーaware なシステム

オントロジーの応用については、その中でオントロジーが果たす役割に応じていくつかのタイプが考えられる。本節ではまずオントロジーの応用について一般的に分類し、その中で筆者らの研究アプローチを位置づける。

3.1 オントロジー応用の分類

オントロジーの応用対象はオントロジーが果たす役割に応じて以下の 5 タイプに分類できる。

- (1) **共通語彙としてのオントロジー**: もっとも直接で単純な応用であり、あるドメインにおける語彙の統一を目標とする。
- (2) **情報アクセスのためのオントロジー**: WWW のような大規模情報源において、情報アクセスを少しでも知的にして必要な情報を素早く入手できるようにすることは重要な課題である。オントロジーはこの問題に対して、次の二つの方法で貢献する。一つは WWW 上の情報資源にアノテーションするためのメタデータ要素と語彙を提供すること、もう一つはメタデータを解釈するためのクラス階層やクラス間の関係を提供することである。
- (3) **相互理解のための媒体としてのオントロジー**: 人や計算機間での相互理解が人と計算機を含めた系における知的活動の実現に向けて必要となる。セマンティックウェブはこのタイプの応用の最大のアプリケーションで、オントロジーに基づく意味解釈やオントロジー変換などが重要な研究課題である。これは(2)よりも高度で、メタデータのマッチングだけではなく、それらを使った推論が求められる。
- (4) **規約としてのオントロジー**: インスタンスは実世界のオブジェクトのモデルであり、オントロジーはインスタンスのモデルであることから、オントロジーはどのようなインスタンスがあり得るかということを規定するメタモデルであるといえる。このメタモデルとしての役割を活用し、システムは自身の支援対象を「理解」し、ユーザを知的に支援することができる。
- (5) **知識の体系化の基盤としてのオントロジー**: 知識を体系化する際には、厳密に定義された合意に基づく概念や語彙を用いて様々な現象や観測事象、興味ある対象を説明する理論が記述され、それに基づく知識の記述と組織化がなされる。厳密に定義された合意に基づく概念や語彙としてのオントロジーはこのような知識の体系化の拠り所になる。

3.2 研究アプローチ

筆者らは主に上記の(4)、(5)のタイプに注目して、序論で述べた

- 設計の前提に基づいて、設計者が自身の考えを適切にモデル化できる記述体系を提供する。
- モデルを設計意図として、成果物としてのツールとの対応関係を管理する。

の2つを実現する知的支援環境の構築を目指している。筆者らのアプローチの特徴は、オントロジーに基づいてシステムが対象に関するモデル化の前提をそのユーザ(人もしくは他の計算機)と共有し、同じ規約の下でモデルを作成・操作できるようにするという点である。前述したように、オントロジーはメタモデルとしての役割を果たす。従って、オントロジーに基づいてモデリング環境を構築することによって、システムはモデル化の前提を理解(aware)した上で、モデル構築をガイドすることができる。また、オントロジーで規定する範囲内でモデルの操作能力を発揮し、モデルの整合性の検証や概念レベルでのモデル変化のシミュレーションが可能になる。このようなシステムを筆者らはオントロジーaware なシステムと呼んでいる。

オントロジーawarenessを実現するためには、インデックス的に用いられるLight-weight オントロジーでは不十分で、より厳密な定義を持つHeavy-weight オントロジーが求められる。筆者らはHeavy-weight オントロジーを指向し、オントロジーawarenessを実現するために次節で例示するような具体的な対象に対してその利用の目的にあったオントロジーの構築を進めると共に、Heavy-weight オントロジーを構築するための方法論を確立することを目指している。

4. 研究事例

本稿では、オントロジーaware なシステムの例として、学習教材の作成を支援するオーサリングシステムの研究事例を2つ示す。学習教材は一種のコンテンツであり、人間の学習・教授活動での利用に特化されたものと考えることができる。この学習教材の設計を序論で述べた設計活動の流れに当てはめると、以下ようになる。

(A) 学習理論や教授理論などの理論的知識や教師が持つ過去の実績に裏付けされた経験的知見などに従って、実現したい学習・教授活動を想定して「モデル化」する

(B) そのモデルに基づいて、必要な説明文や図、問題などを構造化することで学習教材を「具体化」する

つまり、学習・教授理論や経験的知見が設計の前提に相当するが、そもそも学習・教授プロセスをどう捉えるか、またどのようなものが良いかについて諸説乱立しており、その検証や比較、体系化のための基盤が明確ではないという問題を抱えている。従って、既存の多くのオーサリングシステムの支援機能は主に学習教材の表現やインタフェースのデザインなど(B)の具体化に対応するメディア編集機能のみで、学習教材の妥当性は保証されず、設計意図が残されないために共有・再利用が難しい。妥当性の保証については、研究レベルでは何らかの学習・教授理論に基づいて支援するシステムもあるが、理論の内容が手続き的に組み込まれ、原理がオーサに暗黙的になってしまっている上にその支援知識を積み上げていくことが難しい。筆者らは、オーサリングシステムを単なるメディア編集支援システムではなくオントロジーaware なシステムとすることで、(A)のモデル化の支援と理論に基づく支援知識の積み上げの実現を目指した。

4.1 研究事例1：タスクオントロジーに基づく教授プロセスの明示的モデル構築による知的化

1 つめの事例は、オーサが意図する学習・教授プロセスを明確にモデル化できる環境を提供することを目指したオーサリングシステム iDesigner である[3]。この事例の特徴は、従来は存在していなかった(A)のモデル化を支援するために、抽象的な教授プロセス(タスク)を記述するための基本概念・語彙を学習内容(ドメイン)とは独立に学習コンテンツオントロジーとして体系化したことである。2 つを独立に構築し、組み合わせを可能にすることで、iDesigner は様々な学習内容に対応可能な汎用的フレームワークとなり、学習内容に依存しないレベルでモデルの一貫性を管理できる。

iDesigner において、オーサによる学習・教授プロセスのモデル化は以下の2つの意味を持っている。

- 学習教材の背後にある設計意図を学習・教授プロセスモデルとして明確にし、共有・再利用性を高めること
- システムが学習・教授プロセスモデルを通じてオーサの設計意図を解釈・処理できるようにすること

前者では、学習コンテンツオントロジーがモデル化の規約としてモデルの構成要素(学習目的や学習行為)とその構成の原則²を提供する。これにより、従来は暗黙的であった設計意図の外化を設計者に促し、共有・再利用性を向上させる。さらに、設計過程を視覚的に再認識させる効果をもたらし、設計に関わる思考を深める効果が期待される。

後者は、モデル化の規約としてのオントロジーのもう一つの効用である。学習コンテンツオントロジーでは、学習行為を学習者の状態を変化させるプロセスとして定義している。この定義に基づいて学習・教授プロセスモデルを解釈することで、その学習教材が学習者にどのような状態変化をもたらすかを概念レベルでシミュレートすることができる。この結果は、設計者が想定プロセスとモデルの整合性を検証する際に有益な情報になる。

以上、iDesigner では、モデル化の規約としてのオントロジーの役割を活用し、さまざまな理論や経験的知識を許容した学習・教授プロセスの汎用的モデリング環境と、オーサが自分の意図とその外化であるモデルとの整合性の検証を

² ここで提供されるのは基本的に考えられるすべての構成であり、その中からモデル化のコンテキストに合わせた妥当な組み合わせではない。妥当な組み合わせについては、事例2で学習・教授理論に基づいて提示することを実現している。

可能にする支援機能を構築した。

4.2 研究事例2：本格的 Heavy-Weight オントロジーに基づく Theory-awareness の実現による知的化

2 つめの事例, OMNIBUS プロジェクト³では, 多種多様な学習・教授理論を組織化し, 複数の理論に基づくオーサリング支援の実現を目指している。この事例での目標は, 単純に学習・教授理論のデータベースを作って「検索」できるようにするのではなく, オーサによる具体的なシナリオの作成時に, 適用できる理論を内容に基づいて「説明」し, 選ばれた理論を実際に「適用」することである。このようなシステムの能力をここでは Theory-awareness とよぶ。

単純に「適用」だけを実現するならば, エキスパートシステムのように理論をルールとして手続き的に定義すればよい。しかし, それではルールと元の理論との関係が暗黙的になってしまう。各理論では想定される状況と期待する学習効果に対して適切と考えられる学習・教授方略を整理しており, これが学習・教授理論の本質である。従来の理論ベースのオーサリングシステムでは, この本質の operational な解釈はシステム開発者により行われ, その解釈の過程はその頭の中に留まってしまうため, 理論的知識の積み上げが困難になってしまっている。

「説明」についても, 従来のエキスパートシステム的にはシステムがある理論を適用可能という結論に達した理由や, ある支援機能を実行する必要性について, 選択したルールの履歴や条件部を使って説明することができる。しかし, これは表層的に適用したルールの連鎖を追っているだけであり, その「正当性」を説明するものではない。正当性を説明するためには, 対象の原理的な知識に基づいた解釈が必要となる。ルールなどの問題解決に直接使われる知識が浅い知識とよばれるのに対して, このような正当性を説明するための原理的な知識は深い知識とよばれる。

OMNIBUS プロジェクトにおける知的化の特徴は, 学習・教授理論に基づく深い知識をオントロジーとして宣言的に定義して積み上げていくと同時に, それを手続き的に利用することで「説明」と「適用」を一貫性を持って両立させていることである。この鍵となるのが「学習者の状態」と「方式」という考えを主軸とした学習・教授理論のモデル化である。

学習・教授理論の分野では行動主義, 認知主義, 構成主義, そして社会的構成主義といった4つの異なったパラダイムが存在している。各パラダイムの説明は紙面の都合上割愛させていただくが, 問題となるのはこれら4つが相互に反発し合い, 深いところで異なった用語, 概念, モデルを導入して理論を構成しているために, 共通の基盤を見いだすことはとても難しいことである。このプロジェクトでは, 『学習者の状態変化という観点から, 「学習」に関する共有可能な何らかの「工学的近似」を見いだせるのではないか』という作業仮説を立て, 学習・教授理論群から「学習者の状態」をパラダイムの相違点と共通点を浮き彫りにする基盤概念として抽出し, 学習支援関連理論オントロジー: OMNIBUS (以下, OMNIBUS オントロジー)として体系化を進めている[4][5]。この OMNIBUS オントロジーは, 理論をモデル化するための基本概念を提供すると同時にそれに基づくモデルの構築と操作に規約を提供するものであり, 学習支援・e-Learning 研究における世界で最初の本格的 Heavy-weight オントロジーといえる。

「方式」という考えは, 人工物(装置)の機能構造を把握することで有効性が検証されている, デバイスオントロジーに基づく機能モデル枠組み[6]で提案されているものである。その特徴は, 装置の機能を対象物の状態変化として概念化し, 「何を」達成するか(what to achieve)と「どのように」達成するか(how to achieve)を区別していることにある。方式とは, 「どのように」を状態変化の達成・分解関係として, その原理と対応づけて概念化したものである。本研究では, 教授・学習理論が対象としている世界について, 機能を教授・学習行為に, 機能の実施結果を学習者の状態変化, そして, その変化を目指すことを教授・学習ゴールに対応させて, OMNIBUS オントロジーに基づく学習・教授理論の工学的モデル化手法を提案した⁴。この利点は理論の宣言的定義と operational な解釈を一つの枠組みで両立させ, 理論的知識の積み上げを容易にすることである。方式は状態と行為の達成・分解関係の概念として宣言的に定義される。この関係のボトムアップな解釈により, ある状態がどのように達成されるかという descriptive な意味が表される。一方, トップダ

³ <http://edont.gee.jp/omnibus/>

⁴ 人間を装置と対応させるからといって, このモデル化は決して非人間的に扱うことを意味しない。学習・教授世界に対して, デバイスオントロジーで洗練され, 検証された概念モデルを有効利用することが主眼である。

ウンな解釈により、ある状態を達成するためになにが必要かを示す prescriptive な意味が表される。方式の概念とこの2種類の解釈を規定することで、従来は暗黙的であった理論に関する深い知識と operational な解釈の関係を明示化し、理論的知識の積み上げに貢献する。現在、9つの理論に基づいて80個の方式を定義している。

このような OMNIBUS オントロジーに基づくモデル化の枠組みによる Theory-awareness の実現として、OMNIBUS プロジェクトではオーサリングシステム SMARTIES を開発している。SMARTIES では OMNIBUS オントロジーで定義された80個の方式を読み込み、説明生成やシナリオモデルへの理論の適用支援を行う。現状のオーサリングシステムは最上のものでも一つの学習・教授理論を手続的に組み込んだものであり、SMARTIES のように複数の学習・教授理論が計算機処理可能な形で蓄積され、利用者を知的にガイドするシステムは他に例を見ない。

さらに、人工知能分野における SMARTIES の知的システムとしての実現に関する特徴は、完全にオントロジーに基づく、いわゆるオントロジー-aware なアーキテクチャに基づいていることである。その基本機能は、経験則に基づくルールベースによる処理ではなく、単にオントロジーで宣言的に定義された概念の参照と、シナリオモデルと方式のマッチングのみである。このシステムはまだプロトタイプであり、実運用までは多くの課題が残されているが、エキスパートシステムが進化した形態としての、オントロジーに基づく次世代の知的システムの雛形と位置づけることができる。

5. おわりに

本稿では、オントロジー工学の成り立ちを述べた上で、筆者らの目的と研究アプローチについて研究事例を通じて紹介した。オントロジーは人間にとっては抽象的な対象のモデリングに規約を与えることで、設計意図の明示化と外化による思考の深化に貢献し、システムにとっては支援対象の理解の基盤となり、ユーザが記述したモデルを解釈してモデリングの状況に合った支援やモデルの検証などの支援が可能になる。ルールなどではなく深い知識に基づく支援を行うこのような姿が次世代の知的システムといえ、オントロジー工学がその基盤になると考えている。

もちろん、オントロジーに従ったモデル化を設計者に強いることのデメリットも容易に想像される。オントロジーへの合意性が低ければ、ツールとユーザのインタラクションの疎通の度合いが低くなる。しかし、これは二者択一の問題ではなく、メリットを可能な限り高めて、デメリットを可能な限り抑制することが望まれるトレードオフの問題である。これはどれだけ合意性の高いオントロジーをツールに実装できるかが鍵であり、オントロジー工学の重要な課題の一つである。

また、本稿での事例では、計算機にオントロジーを操作する能力を持たせることで、システムを知的にするアプローチが主であった。しかし、オントロジーは計算機と人間の両方のために存在し共有・再利用されるものと述べたように、システム開発者がオントロジーを通じて支援したい対象の理解を深めることによって、人間が計算機を通じて行うタスクのプロセスや、計算機から人間へ情報を提示するプロセスなど人間と計算機のインタラクションの適切なデザイン、そしてインタフェースとプロセスの親和性の向上にも貢献できるのではないかと考えている。

参考文献

- [1] Rumbaugh, J. et al: *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice Hall, 1990.
- [2] 溝口 理一郎: オントロジー工学, オーム社, 2005.
- [3] 林 雄介, 山崎龍太郎, 池田 満, 溝口理一郎: “オントロジーアウェアな学習コンテンツ設計環境”, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No.1, pp.195-208, 2003.
- [4] Mizoguchi, R. and Bourdeau, J.: “Using Ontological Engineering to Overcome Common AI-ED Problems”, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.11, No.2, pp. 107-121, 2000.
- [5] Mizoguchi, R., Hayashi, Y., and Bourdeau, J.: “Inside Theory-Aware and Standards-Compliant Authoring System”, *Proc. of SWEL'07*, pp. 1-18, 2007.
- [6] 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), pp.61-72, 2002.