

対象モデリングの視点から見た知識表現

Knowledge Representation from the Modeling Point of View

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/>

池田 満
Mitsuru Ikeda

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

來村 徳信
Yoshinobu Kitamura

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

keywords: knowledge representation, knowledge representation language, modeling, ontology, epistemology

1. ま え が き

知識表現は人工知能研究の根幹をなす重要な課題であることは論を待たない。これまでの知識表現の歴史を見る限り、研究の重点は推論に置かれてきた。人工知能の本質は推論にあると考える人が多いことを考えればそのことは当然の帰結であると言える。しかし、その中の多くの人の間では知識を表現することの重要性が過小評価される傾向にあることは一考の余地がある。

推論が知的システム構築において重要であることは明らかである。しかし、推論能力だけでは無力である。推論は知識があって初めて実行可能になり、現実の世界に役に立つ結論を導出できる。推論と知識は車の両輪であり、一方だけでは役に立たない。エキスパートシステムの成功の要因はシステムの推論能力にあるのではなく、現実存在する知識の知識ベース化に着目したことにあることは周知の通りである。確かにエキスパートシステムのブームは沈静化した、「知識（ベース）こそが力」というスローガンの正しさは今も生きており、決して知識ベースの重要性が低下したのではない。問題は知識を巧く取り扱う方法論の欠如にある。

知識表現はある表現言語を用いた単なるインプリメンテーションではない。それは対象の分析とモデリングを伴う高度な作業である。モデリングが含まれるが故に、知識表現に関する議論はたぶん哲学的な要素も含まれ、問題を難しくしている。そもそもこのレクチャーの企画はAIにおけるモデリングと哲学におけるオントロジー研究、すなわち世界のモデリング、との比較という意図があった。現実の知識、専門家が日常活動で用いている知識の表現を考えれば分かるように、知識を表現するにはまず、対象を理解して、視点を設定して、知識を抽出して、編集して、整形して、組織化する必要がある。そこで必要となるのが対象モデリングである。良いモデル

は知識表現がアドホックになるのを防ぐ事に貢献する。

しかし「論理」はモデリングを助けてはくれない。論理は推論の基礎であって、知識表現の基礎ではない。記述論理 (Description Logics (DL), 本レクチャーシリーズの前回 [兼岩 03] を参照して頂きたい) は表現言語の意味論の確立という意味でその役割は大きい、やはり「表現する」ことの基礎ではない。知識表現の基礎はモデリングを支えるオントロジーなのである。

一方、オントロジー研究は新しい知識表現を要求するはずであるが、DAML+OIL [DAML+OIL 01] や OWL [OWL 02] に代表される現実のオントロジー記述言語の動向は、知識表現研究としてみた場合には見るべき成果が少ないのが現状である。XML という新しい型の言語の出現によりこれまでにあった知識表現言語の XML 構文への変換や、実用上は重要であるが研究とはほど遠い機能 (値の制約方法) に関する議論が中心となっている。

知識表現の歴史を振り返れば、我々は高い表現力・健全性・完全性・効率性のトレードオフに苦しみながら、数理論理的に合理的な推論体系の構築を目指してきたといえる。難解な、circumscription, 非単調論理, 様相論理などの理論研究も、推論の新しい世界を開きつつ、トレードオフの中庸を見つける試みを積み重ねてきたものといえる。数理論理的に高度な推論をステレオタイプ的に追い求めることが、知識の妥当なモデリング手法を明らかにすることに貢献するには決して思われない。重要なことは、推論と表現の役割の再認識である。片方が他方を支配する形がいいのか、両者が対等に補完するべきものなのか？残念ながら、そのような基本的で根本的な問いに、人工知能研究者の多くは真剣に答えようとしてきたとはいえない。

一方、知識表現に関する解説も知識表現言語の設計者が込めた対象モデリングの思想を考察する立場から論じたものは少ない。実際、その対象モデリング思想と利用者

がその言語を使用する際に受ける恩恵,あるいは制約は同質のものであって,知識表現の結果が持つ性質と同様重要な意味を持っている.一般に知識表現にはこの2つの側面(表現行為と表現結果)があるにも関わらず,これまでは後者に重点を置いた研究や解説活動が活発であった.本解説は,この二面性自体の指摘と前者の重要性を論じることにも目的の一つとしている.

勿論,モデリングに関するいくつかの優れた研究もある. Newell の知識レベルの研究 [Newell 82] は知識表現対象としての「知識」を初めて明確に定義した.意味ネットワークの Brachman による認識論レベルの導入 [Brachman 79],同じく T-box, A-box の提案 [Brachman 83].そして N. Guarino の存在論レベル [Guarino 94].さらには R. Davis らの知識表現の5つの役割の議論 [Davis 93], J. Sowa のいう「論理はオントロジーなくして世界について意味のあることは何もいえない」という主張 [Sowa 99] などはその好例であろう.本稿ではこのような対象モデリングとしての知識表現研究について,私見を交えて解説する.さらに,オントロジー記述に関しても触れ,オントロジー工学基礎論 [溝口 99] で論じられるようなモデリングの基盤としてのオントロジーが要求する知識表現にも言及する.最後に,哲学と AI のモデリングについて総括する.

2. 知識表現の役割

R. Davis [Davis 93] らは知識表現とは何かという問題に関する興味深い考察を行っている.そこでは,知識表現が持つと考えられる5つの役割,(1)実世界に存在するものの代理,(2)オントロジーの基本原則への合意 (Ontological commitment), (3) 知的な推論のための理論, (4) 効率的な推論実行のための媒体, (5) 人間のための表現,に付いて詳細な議論が展開されている.

コンピュータでの処理は何らかの意味で対象のモデルを持っており,そのモデルを構成する要素は対象世界に存在するものに対応し,その代理として機能する.知識表現言語はそれ固有の表現の枠組みを持っており,その枠になぞらえて対象世界を表現することになる.従って,ある表現言語を使用することはその言語作成者が持つオントロジーに対してコミットすることを意味する.知的な推論には論理や連想や統計的推論など様々なものがあるが,それは知識表現が前提とする推論方式として規定される.知識表現力とその推論効率とは常に背反する関係にあり,問題に応じた最適化は重要である.最後に,知識表現言語による表現は自然言語による表現とは異なり曖昧さがないので,ある知識を外化したものとしてそれを人間同士のコミュニケーションにも使うことができる.いずれも興味深い論点であるが,ここでは本稿に特に関連が深いはじめの二つに重点を置いてまとめる.

現実世界のものの代理機能で大きな問題となるのは表

現の忠実度 (fidelity) である.代理はあくまでも現実世界の近似であり,決して正確なモデルとはなっていない.従って,代理を用いる推論が導く結論は厳密には正しくないことになる.そこでどの程度正しくないか,何を無視したのか,その理由は何か,近似には統一した正当性の根拠はあるのか等を明らかにしておかなければならない.ここにモデリングの一番重要なこと,そして難しい課題がある.すなわち,対象とするものは同一でも,それをモデリングする人の能力,観点などによって揺らぎが生じるだけではなく,場合によっては根本的に異なった代理が得られることもあり得る.たとえば物とプロセスを同一視するか(3次元空間と時間を合体して4次元空間として扱う4Dモデリング)しないか(両者を独立の別の物として扱う3Dモデリング)の選択,属性と状態を同一視するかどうか,物質の相の扱い(水と水蒸気の扱い)などである.代理としての表現を共有・再利用する際にはそのようなモデリングの際に用いられた暗黙の前提や仮定を知ることが必要となる.

代理が近似であることから重要な帰結が得られる.すなわち知識表現された世界において厳密な推論を展開しても得られる結果が現実の世界において正しいとは限らないということである.このことは意味するところは大きく,もし厳密で正確な推論を実行するために何か重要なもの,たとえば実行速度というものを犠牲にしているとすれば,多少厳密性を欠いても高速に実行する推論システムがあれば現実問題としてはどちらが有用かはわからないということである.

さて次はオントロジーに対する合意 (Ontological commitment) である.知識表現方式,たとえば,意味ネットワーク,プロダクションシステム,フレームなどはそれぞれ独自の視点で対象をモデル化することを前提としている.意味ネットワークでは物と物との連想関係のネットワークを,プロダクションシステムでは条件と動作という組を,そしてフレームでは物事の典型性を属性の集まりで表現することを各々表現の基本原則としている.この多様かつ複雑な実世界は何らかのガイドなしには表現することは不可能である.何をみて,何を無視するか,どの観点から眺めるか.それをある程度定めるのが知識表現である.選択した知識表現が提供する色眼鏡を通して対象世界がモデル化されることになる.しかし,全ての近似が知識表現の選択によってなされるわけではない.また,知識表現といっても述語論理か Lisp かというような表現の形式のことではなく,表現のパラダイムの問題である.具体的には,電気回路を集中定数系で表現するか分布定数系で表現するかという問題である.前者では抵抗やコイルなどの回路部品は入出力を持つ時間遅れのない一つのブラックボックスと見なされ,回路はそれらのトポロジカルな接続とみることができる.しかし,後者では各回路部品は時間遅れをもち,内部において電磁波が伝播する空間的な大きさを持った装置と見なされる.

このように知識表現は対象世界を表現するための概念を提供する役目も持つ。

ここで注意が必要であることは、プロダクションシステムと経験則の峻別である。エキスパートシステムの強烈な印象から両者を同一視する傾向が見受けられるが決して両者は等しくない。プロダクションシステムは一つの言語であり、条件部と結論部（実行部）の間の依存関係は一切規定しないが、経験則というものはたとえば診断であれば、兆候（症状）と原因仮説（病名）というような「経験に基づく連合（association）関係」という限定を与える。一般に if-then 構造のルールは多様な依存関係を表現し得る。論理的含意、因果関係、義務、条件・行為、共起関係、そして単なる association などである。ここで Davis らが主張していることは言語としてのプロダクションシステムのレベルだけではなく、このような種々の依存関係の中のどれかを特定することも、その次に必要なオントロジーに対する合意であるということである。このように、オントロジーに対する合意には階層がある。フレームの例でいえば、それに特有のスロットという概念がまず対象記述の枠を決定するが、次に必要となることは、スロットに記述する属性と状態の区別である。その次には、何を属性とするかの判断が続く。従って、知識表現がそのままオントロジーに対する合意全てを決定づけるわけではない。この問題は知識表現の本質に関わる重要な事項であり、本稿の主題の一つであるので3章において再び詳しく論じる。

3. 知識表現と対象モデリング

3.1 Newell の知識レベル

Newell は論文 [Newell 82] で知識表現の対象としての知識を定義し、知識の「内容」と「表現」の分離を主張している。そこでは、人間の合理的行動と認知的に等価な計算機システムを目指す立場から、知識を動作主体としてのエージェントが合理的に行動する「知識レベル」においてそれを可能にしていると外部からみなせるものとして定義している。一方、知識の「表現」は知識レベルにおける知識実体を「記号レベル」でエンコードした、データ構造とそこから知識を導出する手続き（アクセス関数）をあわせたものであるとされる。つまり（人間、計算機の両方の）エージェントが持つ実体としての知識を表現の「対象」とみなして、記号レベルで表現されたものが表しており計算機エージェントが保持している（と外部からみなせる）知識内容について議論するレベルを設定している。さらに、この計算機が持つ知識内容は人間が持つ知識に対して、前章で紹介した Davis の議論における現実世界に対する忠実度に近い意味で、荒い近似でしかないことを指摘している。

この論文で、Newell は当時の知識表現研究において論理などの記号レベルが中心とみなされていることを指摘

して、知識レベルにおける知識の内容の把握が重要であることを主張している。知識レベルの研究の例の1つとして Schank の CD 理論が挙げられており、理論の記号レベルにおける表現形態や実装よりも、人間の自然言語処理における因果構造モデルを明らかにした貢献の方が大きいと指摘している。もちろん、自身の Soar の研究も知識レベルの研究として位置づけられる [Newell 93]。

一方、Newell の記号レベルの構造はデータ構造と呼ばれており、論理や意味ネットワークといった知識表現形式が想定されている^{*1}。しかしながら、その後の本解説で紹介するような研究の積み重ねで記号レベルの記述の検討が進み、記号レベルの構造としてより高度なプリミティブが提供されるようになってきている。したがって、当時、知識レベルの概念とみなされていたものが記号レベルの一般的構造に還元されていき、知識レベルと記号レベルの乖離は縮小されてきていると考えられる。それでもなお知識の内容と表現は分離して議論することができ、それを明確に主張したこの論文での Newell の主張の意義は現在でも大きい。

3.2 知識表現の展開とオントロジー：認識論レベルと存在論レベル

意味ネットワークのアイデアは、哲学・認知心理学・人工知能の各分野で様々な形で登場しているが、一般には、1966年に Quillian が博士論文にまとめた“semantic memory”が起源とされ、それから知識の意味を捉えようという研究が盛んに行われるようになった。そして、1975年に Woods が“ What's in a link ”という論文 [Woods 75] において、論理のような明確な意味論が意味ネットワークに欠如していることの問題を指摘してからは、多くの研究者が、それまで直観的に考えていたリンクの意味を精密に考え始めるようになった。Brachman は Woods の提示した問題に、表1のように、既存の意味論を4つに区分したうえで、認識論レベルを追加することで解決しようと試み [Brachman 79]、知識表現言語 KLONE（後に KL-ONE と改名）としてそれを具体化した [Brachman 85]。実装レベルでは、プログラミング言語のアトム・ポインタ・配列などプリミティブとしたデータ構造で対象がモデル化される。論理レベルは、Prolog, DL などのように、述語と論理演算子をプリミティブとする言語が対応する。認識論レベルでは、基本概念やロール概念の区別、抽象概念から詳細概念への継承の制御などが記述される。概念レベルでは、Schank の CD 理論の概念プリミティブ、オブジェクト概念や行為概念が典型である。言語レベルの典型例は Fillmore の格文法で、動詞を中心にした格構造の表現プリミティブが相当する。

*1 ここでの「データ構造」は次節で述べる Brachman の実装レベルにおけるもののような一般的なものとは異なる。また、Newell は論理を記号レベルで知識表現形式として使うのではなく、知識レベルでエージェントの論理的思考に基づく合理的行動を解析するために使うことを主張している。

表 1 Brachman による意味論のレベル [Brachman 79]

レベル	プリミティブ	例
実装レベル	アトム, ポインタ	データ構造
論理レベル	述語, 論理オペレータ	FOL 推論システム
認識論レベル	概念タイプ, サブ概念, 継承, 構造的関係	KL-ONE
概念レベル	意味的關係 (格構造), プリミティブオブジェクト, アクション	Schank の CD 理論
言語レベル	任意の言語に現れる概念, 単語, 表現	格文法

この認識論レベルにおいて Brachman は, 様々な基本的問題について検討を加えている. 例えば, 認識論的プリミティブの構造タイプ (「概念」, 「ロール」など) と構造化オペレーション (特化 (specialization), 制約 (restriction), 区別 (differentiation) など) を導入し, それまでの知識表現で曖昧だった知識の構成に関する一般原理の説明を試みている. これが KL-ONE ファミリのフレーム様式の知識表現言語 (T-Box) に発展している. 文献 [Brachman 79] では, “is-a” リンクについて, 集合間の包含関係, 一般化・詳細化関係, a-kind-of (AKO) 関係, 上位概念から下位概念へ制約を追加する関係, ロールによる概念への制約付加, 集合とプロトタイプの間の関係, の少なくとも 6 つの異なった is-a 関係があるとしている. 例として, AKO と一般化・詳細化とは共通性が高い is-a リンクであるが, AKO は「種類 (kind)」を表す概念の間にひかれるものに限定されている点に特徴があると指摘している. この違いは, 認識論レベルと論理レベルとの対応づけにおいて説明される. 例えば, 種概念の is-a 関係, $p \text{ is-a } q$ には例外 (「ペンギンは飛べない鳥」が典型例) が許されるので全称限量の $p(X) \Rightarrow q(X)$ と単純に対応づけられないが, 一般化・詳細化は対応づけられるといった違いがある. また, 汎化概念としてのアーチと実世界オブジェクトのバリの凱旋門の関係 (instantiation) と, 汎化概念としてのアーチとバリの凱旋門を表す (denote) 個体概念との間の関係 (individuation) を区別し, 「インスタンス」に直観的に複合させていた複数の意味を認識論レベルで峻別することの重要性も文献 [Brachman 79] で指摘し, そのような深い考察があって初めて知識の構成に関する一般原理が理解できると主張している. 特に, DL と深い関係がある, ロール概念とそのロールを担う個体概念の間の関係の認識論レベルの説明からは, その重要性が強く読み取れる. Brachman の仕事の重要な点は, 概念レベルに依存せずに概念化の差異を説明する認識論レベルの意味論を構築する必要があると考えた点である. この考えを知識表現言語として具体化したのが KL-ONE ファミリーである. また, KL-ONE の延長線上にある知識表現言語 KRYPTON [Brachman 83] では, T-box により上述の

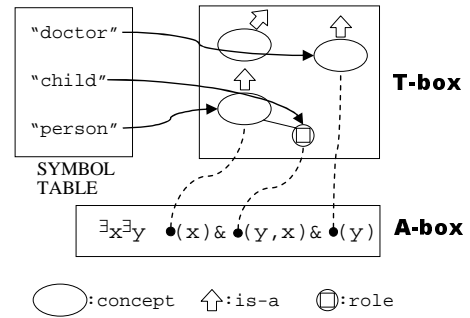


図 1 KRYPTON における T-box と A-box [Brachman 83]

認識論レベルの原理を反映したフレーム様式の定義記述が提供され, A-box によりその論理的記述が捉えられ, 両者が統合されるというアイデアが示された. 図 1 に概念的な図式を示しているが, A-box の意味論は論理レベルで定義され, T-box の意味論は KL-ONE のフレームの意味論で定義され, 両者が名辞テーブルを通じて統合される. 表 1 のレベル階層で言えば, 論理レベルの A-box と認識論レベルの T-box を統合して, 概念レベルの知識を表現する仕組みが与えられたといえる.

Brachman の優れたところは, 知識を内容面から深く見つめて知識を構成する一般概念とリンクを洗い出して認識論レベルを構成したうえで, それを論理レベルで明確に定義した点にある. これに対して, 知識の構成についてより深い考察の必要性を訴えたのが, Guarino の存在論レベルである.

Brachman の認識論レベルでの分析は, KL-ONE 言語ファミリに反映されてはいるが, それはユーザに「任意の」認識論レベルでの記述を許すということであった. しかし, この任意性が知識の再利用性の阻害要因になっていることを指摘し, それを解決するためには, 概念の認識論レベルの捉え方を類型化し, その類型をユーザに選択できるようにするべきであると指摘したのが Guarino である [Guarino 94]. その類型を体系化するレベルを Guarino は存在論レベルと呼んでいる. この考え方を説明するために Guarino がよく使う一引数述語の基本オントロジーを図 2 に示している. 「赤いりんご」を述語論理で表現しようとすると, 多くの場合 $\text{Apple}(X) \ \& \ \text{Red}(X)$ となる. しかし, $\text{Apple}(X)$ と $\text{Red}(X)$ は述語としては異なっている. この差異を Guarino は, 図 2 の基本オントロジーでは $\text{Apple}(X)$ は「個体を識別する原理を与えるもの」として Sortal であり, $\text{Red}(X)$ は「識別された個体を特徴づけるもの」Nonsortal であるという. しかし, Guarino は同時に $\text{Red}(X)$ が共産主義者を表す場合は Sortal であることを, 異なるオントロジーに対する合意として認める. 存在論レベルにおいて大切なことは, ある概念にある定義づけを与えることではなく, 概念の捉え方のオントロジー的説明を明確にすることであると主張している. そのためには, 概念の成り立ちについて, 図 2 のような

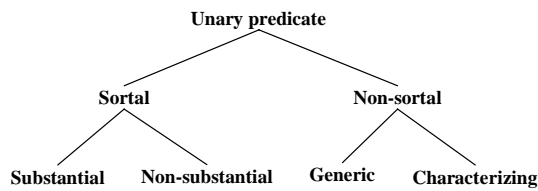


図 2 Guarino の一引数述語の基本オントロジー

共通の認識が必要であると Guarino は主張して、表 1 の認識論レベルと概念レベルの間に、存在論レベルを追加することを主張した。知識表現研究における Guarino の業績は、Woods, Brachman などが進めてきた知識表現の基礎的考察・歴史的認識において、オントロジーの必要性・役割を明確にした点にあるといえる。

3.3 論理，データ構造，知識表現

論理は知識表現のみならず AI に関するいろいろな局面において重要な基礎であることは確かではあるが、それを金科玉条の理論として受け入れることは危険である。まず、論理は推論の基礎としてはきわめて強力であるが、それ以上の物ではない。悪いことには推論においてすら危険な点がある。その典型は含意の意味論にある。A imply B は本質的に論理的な含意しか意味しないのであるが、とすると $A \rightarrow B$ という形のような推論の表現全てに適用可能であると思われがちである。実はそうではない。坂原氏の「日常言語の推論」[坂原 85] にあるように、それはたとえば因果関係を正しくは表し得ない「コーヒーを飲む \Rightarrow 夜眠れない」と表現した人の真意は、コーヒーを飲むことが「原因となって」夜眠れないということであるのが普通であるが、この論理式はコーヒーを飲む事象と、夜眠れない事象がともに真であるときには両者の因果関係に無関係にいつでも真となる。しかし、記述者にとってみれば、たまたまコーヒーを飲んだときに眠れなくても、実際の原因が腹痛であったとすればその命題は「偽」となるべきなのである^{*2}。

データ構造と知識表現の関係もこの際明確にしておく必要がある。意味ネットワークとグラフの例を用いて Davis[Davis 93] らによって論じられている。グラフは意味ネットワークの実現には欠かせない物であるが、両者は別の物である。意味論が異なるのである。グラフはノード間には任意のリンクを張ることによって任意のグラフ構造を生成することができる。一方、意味ネットワークを使って何かを表現するときに、たとえば家族関係を表現する場合には決してループ構造にはなり得ない。すなわち意味ネットワークはグラフ構造に意味的制約を与えたものであり、そのことによってグラフ構造を特殊化しつつ、対象モデリングに必要な概念を提供することに

成功している。このように一見類似、あるいは同一と思われる物の間の本質的な相違点を認識することは健全な思考を進めることにとって極めて重要である。さらに付け加えるならば、プロダクションシステムもフレームも意味ネットワークも述語論理や DL で定式化できるからそれらは知識表現として意味がなく、論理さえあれば十分であるという主張があるとすればそれは的はずれである。これまで、そして以下にも述べるように、推論ではなく知識「表現」として意味のあるものは対象モデリングに有用な適切なオントロジーの原則を提供する枠組みなのである。

論理はオントロジー的には中立である。それ故汎用な論理推論を美しく論じることができるのであるが、対象モデリングという点では非力である。Sowa がいつも主張するとおり「論理はオントロジーなくして、実世界で意味のあることは何も主張することはできない」のである [Sowa 99]。そして Guarino の主張も Davis らと同様、知識表現における論理偏重への警告とオントロジーの重要性の指摘という点で軌を一にするところがある。

この議論は 2 章で述べたように、知識表現におけるオントロジーに対する合意の階層に関する議論である。3.2 節で述べた Brachman の認識論レベルは 2 章でいう知識表現パラダイムが持つ固有の知識構造化のレベルに対応する。

3.4 オントロジー工学基礎論

筆者らはオントロジー工学基礎論 [溝口 99] で is-a リンクや part-of リンクの意味論、そしてロール概念などの基本的な概念の議論を行った。ここでは知識表現のモデリングに関係が深い部分についてまとめてみる。

§1 is-a による属性継承

オブジェクト指向の考えが災いして is-a リンクの本来の意味が理解されていないことが引き起こす問題は大きい。オブジェクト指向における多重継承を許す is-a リンクは下位概念が上位概念の持つ全ての属性を継承する枠組みであり、その利用に関するガイドラインはない。しかし、本来あるべき is-a リンクは概念の identity を規定する本質属性が継承されるときにのみ認定される関係でなくてはならない。そしてそういう概念階層においてのみ現実世界での出来事と整合性のあるインスタンスの生成を行うことができるのである。インスタンスを単なる「例」と見なすことも同じ意味で危険である。インスタンスはそのクラスのメンバーであることをそれ自体の本質とする物でなくてはならない。そして、そのクラスを含む全ての上位クラスのインスタンスでもなければならぬが、これを満たさない場合には現実にはそぐわない状況が生じることを容易に示すことができる。〈太郎 instance-of 教師〉、〈教師 is-a 人間〉とモデル化するとき、太郎が教師を辞めれば太郎は教師のインスタンスではなくなり、自動的に人間のインスタンスでもなくなり、死ぬしかな

^{*2} ここで言う論理は表現言語の意味論を支える論理ではなく、 $A \Rightarrow B$ という論理的含意などを直接知識表現に使うレベルの論理である。 $A \text{ causes } B$ という表現を許す言語を設計して、その意味論を論理で定義することは可能である。

くなる．このようなおかしいことが起こることは，教師をその本質属性として持つ物が世界に存在しないのに，無理矢理 is-a 階層に組み込んだことが原因である．同様に <太郎 instance-of 人間>，<人間 is-a 触れるもの>，<人間 is-a 動物> もよく見られるモデル化であるが，太郎が死ねば人間のインスタンスではなくなるが，その死体は触れるものであることには変わらない．このようなことが起こる原因は，そのインスタンスの identity が失われる条件が異なる二つのクラスを上位に持つことを許したことにある．このおかしさの原因は，物の本質が複数あることはそもそも「本質」という概念に矛盾することからも推測がつくと思われる．

§2 ロール概念，基本概念

上述の問題の半分を解決するのはロール概念である．ロール概念は何かがある状況において担うべき役割（たとえば教師，夫，商品など）であって，それを本質として持つ物が存在するのではない．そのクラスに属することをその本質として持つもの，人間，鉄，車など，は基本概念と呼ばれるが，ロール概念は基本概念とは区別して扱う必要がある．さらに，役割自体と役割を担った状態を区別して，役割を担った状態の基本概念を「ロールホルダー」と呼ぶ．ロールのモデル化に関しては 4.2 節で述べる．

§3 part-of の峻別と適切な運用

part-of リンクの研究 [Winston 87, 溝口 99] は示唆するところが大きい．まず，part-of 関係に推移律が成立するとは限らないことの指摘は極めて重要である．そして全体を部分に分割した際に生じる結果による part-of 関係の細分化も正しいモデル化においては有用である．自転車と車輪：自転車は車輪をとられると自転車ではなくなるが，車輪は自転車の部分であるときも無いときも車輪である．森と木：森から木を一本除いても森であり続けるし，木も木のままである．夫婦と夫：夫婦から夫を除くと夫婦は崩壊するし，夫もただの男になる．ケーキとその一片：ケーキ全体から一切れのケーキを除いても，残された方も一切れもいずれもケーキである．このように最低 4 種類の part-of 関係があることがわかるが，それを正しくモデル化する言語は筆者らの知る限り存在しない．

さらに，part-of の認定の難しさも指摘されている．例を挙げる．プラントの「運転」を考えてみる．次の二つのモデル化のどちらが正解であろうか？

<正常運転 is-a 運転> <復旧運転 is-a 運転>

<正常運転 part-of 運転> <復旧運転 part-of 運転>

is-a の方の説明は不用であろう．あるプラントの運転を考えればわかるように正常運転をしているか復旧運転をしているかのいずれかであるので，間違いなく，運転は正常運転と復旧運転から構成されている．どちらも正しいのである．しかし，同じ概念の間に is-a と part-of の両方が同時に成立することはあり得ず，どこかが間違っ

ている．実はこの問題の解決のヒントは「運転」という概念が二つの意味を持っていることであるが，解の説明は省略して読者への問題とさせていただく*3．

このように，推論に関しては多くのことがわかっているにもかかわらず，知識を表現するために基本的な関係の理解とその運用，そしてロール概念などの基本的な概念カテゴリーやその取り扱いに関する知識が不足していることは大きな問題であろう．

4. オントロジー表現言語

4.1 セマンティックウェブにおけるオントロジー表現言語 OWL

機械理解可能な Web システムを目指すセマンティックウェブにおいてもオントロジーは意味記述を支える重要な基盤として認識されており，Web 環境におけるオントロジーを記述するための言語 OWL (Web Ontology Language) [OWL 02] の策定が W3C によって進められている*4．OWL は RDF Schema [RDFS 03] を拡張したものであり，DAML-ONT 言語と DL に基づいた OIL 言語を統合した DAML+OIL 言語 [DAML+OIL 01, 益岡 02] を元に行っている*5．本節では，最新のオントロジー記述言語といえる OWL について，モデリング言語としての観点から検討する．

OWL は RDF/XML に基づいており，XML のシンタックスと，RDF によって規定される，オブジェクト（リソースと呼ばれる）の属性（プロパティ）がある値（属性値）であるという知識表現の基礎的モデル（フレームワーク）に従っている．RDF 記述に対して，OWL を用いて記述されたオントロジーは，RDF Schema と同様に，記述に現れるリソースのクラスやプロパティを定義し，記述内容を制約する役割を果たす．

OWL の開発は Web 環境の特性を踏まえて，オントロジーの拡張，改変，相互運用，不整合の検出ができること，Web 標準規格に準拠すること，そして表現力とスケーラブルな簡素性のバランスを取ることを目標としている．その結果として OWL は一般的なフレーム型言語や RDFS に対して，以下に述べるように，(1) 不整合の検出のための詳細な制約や性質の記述，(2) 柔軟な記述のための拡張，(3) 相互運用と改変のための記述，という特徴を持っている．

まず，クラスの性質の記述として，インスタンス (individual と呼ばれる) の集合に関するブール演算 (unionOf など)，排他関係 (disjointWith)，全インスタンスの列挙 (oneOf) などが追加されている．またプロパティに関しては RDFS にある定義域と値域のクラス (rdfs:domain,

*3 この問題は一見類似している <男 is-a 人間> <女 is-a 人間> <男 part-of 人間> <女 part-of 人間> とは別の問題である．

*4 執筆時点において仕様書は Working draft である

*5 現時点における変更は大きくない [OWL 02, Appendix D]

rdfs:range)に加えて、値の個数に関する制約 (minCardinality など)、推移律 (TransitiveProperty) などの性質、他のプロパティの逆関係 (inverseOf) になっていることなどが記述できる。

次に、柔軟な記述のために、ほとんどのクラス名を書けるところにクラス式 (class expression) と呼ばれる、前述したクラスのブール演算子などを用いた匿名のクラス定義が書ける。これは特にクラスに依存したプロパティの特殊化を行うときに使われる。OWL は RDFS と同じように属性と関係を区別せず、一般的なフレーム型の言語ではクラスに従属する形で行う属性定義も、クラスから独立してグローバルに行われる。そこで、特定のクラスを定義域にするときのみプロパティの値域や値の個数などを制約する (それによってクラスを定義するというフレーム言語的な記述様式を提供する) 仕組み (Restriction, onProperty) が用意されており、これは匿名のクラスを定義することに等しい。また、一般的にこの枠組みで使われる値制約として、一階述語論理における全称限量子 (\forall) に類似した allValuesFrom や、存在限量子 (\exists) に類似する someValuesFrom、プロパティの値が指定する値 (インスタンスまたはデータタイプ値) と等しくなければならないことを表す hasValue がある。

最後に、Web の特徴である分散性に対処するための相互運用性と改変性については、クラス、プロパティ、インスタンスの等価性、非等価性 (sameClassAs, differentFrom など) を記述でき (前者は概念定義の必要十分性を表現するのに用いられる)、他のオントロジーの定義を import すること (imports)。やテキストによるバージョン記述 (versionInfo) ができる。

このように、OWL は Web 用スキーマ記述言語としては高い能力を持っている [Gómez-Pérez 02]。しかしながら CycL や Ontolingua (KIF+Frame Ontology) のように、論理式を自由に書けるわけではなく、オントロジー記述によく現れる記述要素が用意されているだけである。一方で、OWL は DL を理論的背景にもつ OIL を継承することで、理論的な意味論と推論方法を保証することを目指している。また、本解説では触れなかったが、OWL Lite, OWL DL, OWL Full という3つの言語クラスに分割して、使い分けることを提案している。

これらの OWL の特徴は記述上のシンタックスレベルのものにとどまっている。本稿のテーマである「対象モデリング」のための言語としてみた場合には、特に特徴がない。OWL に含まれる対象モデリングのための枠組みはクラスとプロパティという RDF(S) と同じものである。RDF(S) の XML に対する役割は、可能な記述形態の中から記述モデルを (非常にシンプルな形ではあるが) 限定することである。これは、本解説で述べてきたモデリングの概念の一種であるということもできるが、むしろデータモデルに近い。例えば、プロパティは単に2項間の関係という記号レベルの概念であり、前述したよう

に、属性、特徴、関係のいずれでも表し、区別されない。このことは、モデリング言語として見た場合には対象を捉えるための有益な高次概念を提供していないと言える。実際、文献 [Bechhofer 01] においても、OWL とほぼ等価である DAML+OIL は OIL にはあったフレーム概念を失いつつあり、論理レベルの意味論が等価であってもオントロジー設計者の意図を表現 (保存) できないため、直接、対象モデリングに用いるには適していないという指摘がなされている。

4.2 OE におけるロール概念

オントロジー構築・利用環境「法造」のオントロジーエディタ (以下、OE) [古崎 02] は、いくつかのモデリングに有用な概念をビルトインしたモデリング環境をオーサに提供する。OE には、3.4 節で述べたオントロジー基礎論 [溝口 99] が規定する一種の上位オントロジーの一部が組み込まれている。また、それを支える認識論的表現モデルは [林 98] の枠組みに基づいている。これらの理論に基づいて OE が提供する主なモデリング要素は、基本概念、ロール概念、ロールホルダー、全体概念、関係概念、部分概念 (part-of 関係)、属性 (値) (attribute-of 関係)、公理、インスタンスである*6。3.4.2 節で述べたロール概念には概念間の関係やタスク、ドメインに依存するものなどが存在することが知られているが、OE は主に part-of 関係と任意の関係概念に伴うロール概念を定義する環境を提供する。以下では OE における part-of 関係に伴うロール概念について述べる。

ある概念が複数の概念から構成されていると言えるとき、OE ではその一つの部分概念の定義は、(1) ロール概念、(2) クラス制約としての基本概念への参照、(3) 基本概念がロールを担った状態を表すロールホルダーの3つの概念的要素から成る。例えば「学校組織クラス」の1つの部分概念として、(1) 組織における教員の役割を表す「教師 role」、(2) 教師ロールを担うものが属するクラスが「人間」クラスでなければならないこと、(3) 教師 role を担った状態である「教師ロールホルダー」の3組が定義できる。(1) の教師 role の定義は、「人間」クラスの定義内容の特殊化 (制約の追加など) と、教師ロールを果たすのに必要な属性の記述から成る。(2) のクラス制約の定義は別に定義されている基本概念「人間」クラスへの参照の指定と、人間クラスの定義内容のうちどの部分が教師 role において参照される範囲の記述から成る。(3) のロールホルダーの定義内容は、基本概念 (人間) の定義内容とロール概念 (教師 role) の定義内容の論理和になる。OE ではこのような定義内容を区別して記述する環境を与える [古崎 02]。さらに法造では、状況

*6 [溝口 99] では 3.5 節で述べたように part-of の峻別についても議論している。また、[林 98] では実体のアイデンティティについて議論し、ロール概念に加えて状態の変化に伴うアイデンティティの変化についてもモデル化を行っている。これらは現時点での OE では直接にはサポートされていない。

に依存している概念の分解を支援するガイド環境「概念工房」を提供している [石川 02] .

このような OE におけるロール概念の定義内容は前節の OWL では、ロール概念・ロールホルダーを通常のクラスとして扱い、ロールホルダーを基本概念とロール概念との is-a 関係の多重継承で表現することが出来るようにも思われるが、3.4 節で述べたように、ロール概念とロールホルダーの関係はインスタンスの存続に関するセマンティックスが一般的な is-a 関係とは異なる*7 .

しかしながら、記号レベルにおける等価性よりも（等価ではないが、たとえ等価であるとしても）、ロール概念とロールホルダーがプロパティや関係引数といった概念を対象モデリングの観点からさらに詳細化したものであり、状況に依存している概念を適切にモデリングすることに役立つ概念であることが重要である。対象世界に存在する概念の多くは状況に依存しているロール概念であり、その状況依存性を明示化することは存在論の立場から対象世界を「正しく」反映した知識表現を得るために欠かすことができない。OE は知識記述（操作）環境であり、知識表現言語の意味論を規定するというよりも知識表現行為を規定することによって生成される知識を存在論レベルの健全な意味論（オントロジー基礎論 [溝口 99]）に整合させる役割を果たす。

5. 哲学と人工知能の対象モデリング むすびにかえて

哲学は存在の根元から考えることが使命である。人工知能ではそこまでの深さは不要かもしれないが、本質を見極める哲学の姿勢は学ばべきところが多い。多くの人が共有できる知識表現の実現にはオントロジーに負うところが大きいからである。哲学から学んだ多くの中で一つだけここで指摘しておきたいことは、mereology として研究されてきた全体・部分関係の重さである。人工知能では is-a 関係と part-of 関係は全く異なるものと理解されてきた。そして is-a が本質であって、part-of 関係はその次、という認識のされ方をしている。しかし、哲学では両者は本質的には同一のものであり、フッサールの formal ontology では mereology から抽象概念が生み出されるとするということである*8。さらに、このこと以外にもオントロジー工学基礎論と哲学とは多くの接

点があることもわかった。

さて、まえがきで少し触れたように「知識表現」という言葉には

(1) 知識表現された「もの」

(2) 知識表現する「こと」

との二つの意味があることに注目しよう。本稿では両者の区別を特別に明示する必要がある場合に知識表現「する」と記述した以外は曖昧なままにしてきた。特にまえがきで述べた、論理が知識表現の基礎で無いという主張の趣旨は、(2) の基礎ではないということであった。論理が (1) の基礎であることは DL が知識表現言語の意味論を支えるために作られたことから明らかであろう。

この二重性は論理の役割の二重性にも関わっており、これが重大な誤解をしばしば引き起こす。3.3 で述べた「論理的含意は因果を表現していない」というときの論理は表現言語の意味論を支える (1) の意味の論理ではなく、 $A \Rightarrow B$ という論理的含意などを直接知識表現に使う (2) の意味での論理である。(1) の意味では、脚注でも述べたように $A \text{ causes } B$ という表現を許す言語を設計して、その意味論を論理で定義することは可能である。

実はこの二重性は本質的な点をついている。人工知能研究が実社会で使われる場合には知識表現は必須であるが、知的システムの開発者が必要なものは、知識表現された「もの」を得るために知識表現「すること」なのである。知識表現されたとしたらどのような性質を持っているべきか、ということは二の次であって、まず適切な知識表現「する」ことを実行しなければならない。従って知識表現言語は知識表現することを助けるものでなければならないし、そのためには対象を如何に捉えるかという対象モデリングの根本原則を提供するものでなければならない。そういう意味で、本稿で取り上げた研究はそのような主題を論じる数少ない研究であった。

また、OWL などの言語がオントロジー記述言語としてその意味論を規定しているのに対して、OE がオントロジー表現の操作環境として機能すること、そしてオントロジー記述者の表現行為を規定することによってその意味論を規定している点は、この二重性（表現の二面性）の現れでもある。

古典的アリストテレス流のオントロジーでは存在ありきである。実際我々常識人にとっては人間の存在とは独立に存在する圧倒的な外部世界を考えればごく自然な考えのように思える。従って、まず存在としての外部世界があって、それを説明するオントロジーがあり、そしてその上に知識と知識論（認識論）ができ、考えを表出する際に自然言語が使われる、という様に、

(a) <存在, オントロジー, 認識論, 概念, 言語>

の順に物事の階層があるように思われる。しかし、知識表現レベルの階層図（表 1）では

(b) <論理, 認識論, オントロジー, 概念, 言語>

の順になり、オントロジーと認識論の部分で逆転が生じ

*7 OWL が基づいている DL の classifier によるインスタンスに関する推論を用いて、インスタンスの所属するクラスを動的に変化させることで表現することは可能である

*8 なお、Formal ontology の「Formal」の意味が二つあることには注意が必要である。一つは自明であるが「形式的」、すなわち概念の定義をしっかりと公理で書くという意味。もう一つが「形に関する」という意味である。この「形」というのは本レクチャーシリーズの最初に現れる材料と形質の「形相（あるいは本質）」に対応する意味である。ちょうど、粘土と花瓶の関係と考えればわかりやすい。同じ粘土を使って形を変えればコップにも花瓶にもなるが、その相違は「形」にある。そして「形」に概念の本質があるということである。

ている。この逆転には実は、上述の二重性が根底に潜んでいる。さらに、表現されたものとしての知識表現を考えるとそれを支えるのは論理であって、存在そのものではない点も対照的である。

所詮人間が何かを理解した結果は表現である。オントロジーも哲学者としての人間の思考の産物であり、それは表現なのであると考える立場もある。そう考える人にとっては (a) の順序よりは (b) の順序の方が自然となる。この議論は第一回から四回までの哲学のオントロジー研究の講義にあったように、3通りのオントロジーの立場 (i) 存在ありき (アリストテレス流古典的存在論) (ii) 言葉 (論理) ありき (ウィットゲンシュタイン) (iii) 人間の認識機構ありき (カント) を思い出させる。人工知能における知識表現の問題にも哲学の存在論の根本的な立場の対立がそのまま反映されていることは興味深い。

7回続いた本レクチャーシリーズも今回で終了する。哲学と人工知能というこれまで疎遠であった研究分野がオントロジーを媒介として、対象世界モデリングという課題において接点を見いだすべく努力を重ねてきた。十分に理解し合えたかに関しては読者の判断にゆだねることになるが、全レクチャーの著者と読者のみなさまに感謝するとともに、この交流が今後も続くことを祈念しつつ、筆を置くこととする。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Bechhofer 01] Bechhofer, S., Goble, C. and Horrocks, I.: DAML+OIL is not enough, In *Proc. of the First Semantic Web Working Symposium (SWWS'01)*, pp. 151-159, 2001.
- [Brachman 79] Brachman, R. J.: On the Epistemological Status of Semantic Networks, in *Associative Networks: Representation and Use of Knowledge by Computers*, Findler, N. V. (ed.), Academic Press, New York, 3-50, 1979.
- [Brachman 83] Brachman, R.J., Fikes, R. E., and Lavesque, H.J.: Krypton: A functional Approach to knowledge representation, *IEEE Computer*, 16(10), 67-73, 1983.
- [Brachman 85] Brachman, R.J., Schmolze, J.G.: An Overview of the KL-ONE Knowledge Representation System, *Cognitive Science*, 9, 171-216, 1985.
- [DAML+OIL 01] DAML+OIL (March 2001) Reference Description, W3C Note 18 December 2001, <http://www.w3.org/TR/2001/NOTE-daml+oil-reference-20011218>
- [Davis 93] Davis, R., Shrobe, H., Szolovits, P.: What is a Knowledge Representation?, *AI Magazine*, Spring, 1993, pp. 17-33, 1993.
- [Gómez-Pérez 02] Gómez-Pérez, A. and Corcho, O.: Ontology Languages for the Semantic Web, *IEEE Intelligent Systems*, January/February 2002, pp.54-60, 2002.
- [Guarino 94] Guarino, N.: The Ontological Level, In R. Casati, B. Smith and G. White (eds.), *Philosophy and the Cognitive Science*, Holder-Pivhler-Tempsky, Vienna: 443-456, 1994
- [林 98] 林雄介, 瀬田和久, 池田満, 金来, 角所収, 溝口理一郎: 概念間関係に関するオントロジー的考察 ~ is-a, part-of, identity ~, 信学技法 AI98-40, pp.1-8, 1998.
- [石川 02] 石川 誠一, 久保 成毅, 古崎 晃司, 来村 徳信, 溝口 理一郎: タスク・ドメインロールに基づくオントロジー構築ガイドシステムの設計と開発, 人工知能学会論文誌, 17(5), pp. 585-597,

2002.

- [兼岩 03] 兼岩憲, 佐藤健: DL: Description Logics, 人工知能学会誌, 18(1), pp.73-82, 2003.
- [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, 人工知能学会論文誌, 17(3), pp. 196-208, 2002.
- [益岡 02] 益岡竜介: DAML プログラムと Semantic Web - よりオントロジカルな世界へ -, 人工知能学会誌, 17(4), pp.392-399, 2002.
- [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), pp.87-100, 1999.
- [Newell 82] Newell, A.: The Knowledge Level, *Artificial Intelligence*, 18, pp.87-127, 1982.
- [Newell 93] Newell, A.: Reflections on the Knowledge Level, *Artificial Intelligence*, 59, pp.31-38, 1993.
- [OWL 02] Web Ontology Language (OWL) Reference Version 1.0, W3C Working Draft 12 November 2002, <http://www.w3.org/TR/2002/WD-owl-ref-20021112/>
- [RDFS 03] RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema, W3C Working Draft 23 January 2003, <http://www.w3.org/TR/2003/WD-rdf-schema-20030123/>
- [坂原 85] 坂原 茂: 日常言語の推論, 東京大学出版会, 1985
- [Sowa 99] Sowa, J. F.: *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*, Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA., 1999.
- [Winston 87] Winston, M.E., Chaffin, R., Herrmann, A.: A taxonomy of part-whole relations, *Cognitive Science*, 11, pp. 417-444, 1987.
- [Woods 75] Woods, W.A.: What's in a Link? : Foundations for Semantic Networks, in *Representation and Understanding*, Bobrow, D. G., and Collins, A. M. (ed.), Academic Press, New York, 35-82, 1975

—— 著 者 紹 介 ——

溝口 理一郎 (正会員)

1977 年同大学院基礎工学研究科博士課程修了。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。音声の認識・理解, エキスパートシステム, 知的 CAI システム, オントロジー工学の研究に従事。1985 年 Pattern Recognition Society 論文賞, 1988 年電子情報通信学会論文賞, 1996 年人工知能学会創立 10 周年記念論文賞, 1999 年 ICCE99 Best paper Award 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, 日本認知科学会, Intl. AI in Education (IAIED) Soc., AAAI, IEEE, APC of AACE 各会員。現在, IAIED Soc. 及び APC of AACE の会長。

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。

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, 同大学産業技術研究所技官。1994 年同助手。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。