予見できない問題の処理と AI の意義

Significance of AI in Solving Problems That Can Not Be Foreseen Beforehand

大須賀 節雄

Setsuo Ohsuga

東京大学名誉教授

Emeritus Professor of University of Tokyo

ohsuga@fd.catv.ne.jp

Keywords: Multi-Strata-Model as conceptual modeling, automatic generation of information systems, aiding conceptual modeling, building-block approach of system generation, automatic programming

Summary

Problems in the world are classified into two classes; the ones that people can foresee to the details beforehand (to such an extent that making computer programs for solving them is possible) and the others. Because of very the nature of current information technology computers are used only for the former class problems but the latter problems are left to human without exception. Only possible method to deal with unforeseen problems in the latter class is to take trial-and-error approach. When an unforeseen problem comes arise, human tries to make a hypothetical solution and evaluate it. When the scale of problem gets large however, it becomes a very difficult task even for human. Recently, the number and the scale of the latter class problems are increasing. It is anticipated that in near future they go beyond human capability. Then no one can deal with these problems satisfactory and it is expected that many troubles happen to be. An innovative technology is required to deal with these problems in order to avoid the troubles. It is expected that computers have potential to contribute in this process by undertaking evaluation of the hypothesis. Since however the problems are not foreseen beforehand, it is not possible to provide any specific method suited for evaluating the hypothesis in advance. Automatic and dynamic generation of evaluation system in real time is necessary as an innovative information technology. The major objective of this paper is therefore to discuss such an information technology that can aid human trial-and-error approach. An analysis of the process of solving unforeseen problems and a method of generating automatically information systems for evaluation are discussed.

1. はじめに

人間同士が真に理解しあえる状況を、「共通の言葉をもつ」という言い方をする。文学的な言い方で、他に言い様がないためにやむを得ずこのように表現されているが、これが表す意味は深い。ここで使われている「言葉」は狭い意味での言語ではなく、むしろ共通体験や知識のようなものである。同じ言語、例えば日本語を使っている人間同士は非常に多い。それに対しこの意味するところは、表現の表層的な意味に拘わらず、話者の意図を、その奥深い理由や内容に至るまで正しく理解することができることである。このために会話は話題とする共通の世界モデルを持ち、その解釈のために共通の文化的背景すなわち深い知識を持たねばならない。さらに一連の会話は異なる話題あるいは要素から構成されている。個々の要素は世界を一つの視点から見た側面であり、会話の進行に応じてこの視点が変動するので、会話の世界をそれに応じて動的に自動構

築できねばならない。ただしこの機能は世界のあらゆる側面をカバーする必要はない。一連の会話が成り立つ範囲でこれが保証されれば良い。

人間同士の会話でこのようなコミュニケーションがどの程度理想的に行われているかを測ることは難しい。理解の正しさを客観的に評価することが困難だからである。これは個人としての文化的背景や理解の深さに関わり、かつ対話者の相対的なレベルにも関わるからである。しかしこのような会話ができることがコミュニケーションの理想であることに変わりはない。

これは当事者の一方が情報システムであっても同様である。人間と機械のコミュニケーションの究極はこの様な理解が両者間で成り立つことであろう。事実、人間同士の場合と同じ枠組みが不可欠なコンピュータ応用が存在する。後に述べるように、これは前もって問題の詳細を知ることができない（従って処理プログラムを準備しておくことができない）問題である。この様な例としてシステム開発や介護ロボットを挙げておこう。これら

は上記のようなコミュニケーションを人間 機械間で実現するための創造的な情報技術を必要とする。これについては後に述べるとして、上記のコミュニケーションを可能にするための枠組みとして、

(1) 世界モデル、

(2) 背景知識、

(3) 視点変動による関連背景知識の自動調整機能、を挙げよう。言うまでもなくコミュニケーションの前提として(狭義の)言語がなくてはならず、言語の意味を共有するためにオントロジーが必要である。これらはコミュニケーションの基盤であり、既に多くの議論がなされてきているから、ここでは既に満たされているとしよう。本稿の本旨は理想的なコミュニケーションにはこれだけでは不十分であり、その上に上記の仕掛けの必要性を主張することである。

人間 機械間の応用問題解決については、これはコミュニケーションの基盤技術と応用の中間に、上記の枠組みで実現されるもう一つの技術レイヤーが必要であることを意味する。情報処理という観点で見れば(1)の世界モデルや(2)の背景知識はデータであり、これらの質と量が会話の質やレベルに関わる。(3)の調整機能は処理機能である。ここで重要なことは、視点変動に応じて必要な知識の調整は自動的に行われなければならないことで、もしこの段階に人間が介入せねばならないとしたら、例えばモデルの解釈に人間が関与せねばならないとしたら、会話はその都度途切れてしまうからである。処理機能を状況に適應して動的かつ自律的に生成すること、すなわち自律適應性が核心であり最も困難な点である。

この状況を明らかにするため、一般的に現在の技術と比較してみよう。現在のいかなる技術も、自律性を前面に出すと前もって定めた通りの行動を行う非適應型あるいは[押し付け型]にならざるを得ず、適應性を主にすると予め準備された行為を人間の指示に応じて実行する非自律型にならざるを得ない。いずれの場合も将来予想される問題に対応できない。

自律適應型の人間 機械間コミュニケーションで人間同士のように文化的な理解を伴う会話を目指すことは可能であるが、上述したように、この時は理解の正しさを客観的に評価することが困難である。従って当面の考察範囲を、'対象とする世界モデルが物理的な物に関する範囲'に限定しよう。この場合、理解の正しさは、'コミュニケーションを通して、対象世界の要求された変化あるいは状態を満たすように対象への働きかけが正しくなされるか否か'によって客観的な評価が可能になる。さらに上記の枠組み内の情報の質、さらには枠組み自体が評価される。これを情報技術の一つの目標として、現状を見てみよう。

今日の情報技術はネットワーク技術との結合によって広域情報網を実現し、大きな発展を遂げている。しかし現実を直視するなら、これによってソフトウェア技術

として創造的な進化がおこなわれている訳ではない。広域化と通信量の増大効果が際だっているに過ぎないと言える。これらは現代社会が直面している真の問題。そこにこそ自律適應性のような創造的な情報技術が強く期待されている分野から人々の関心を転じてしまっている。この状況は人工知能研究とて例外ではない。かつて多くの人工知能研究者の研究目標は、「人間と類似の統合的知的機能を持つ情報システムの開発」にあった。しかしエキスパート・システム研究の挫折により、近年は統合的知能の情報化技術が後退し、研究対象が要素的知的機能の解明とそのモデル化に偏っている感がある。

優れた知能を実現する上で優れた要素知能が不可欠である。機械知能も、より高度な要素機能の研究が重要であることは言うまでもない。しかし認識であれ、推論であれ、あるいは発見であれ、いかに優れたものであっても要素技術が単独で現実の問題を解決することは少ない。人間には多様な知的機能が備わっているが、置かれた状況に応じて適切な判断の下に、様々な要素的な知能を統合することによって、困難な状況への対応を可能にしている。そこに我々は高度の知能を見る。人工知能も同様であり、状況に応じて多くの要素を自律的に統合することによって始めて環境や目的の多様性に対応する機械知能の発揮が可能になるし、統合化の機能が有って初めて要素機能が生きてくる[ROS 97, OHS 01]。

一方、先進的情報技術への期待あるいは社会的なニーズと言う点では、統合化は極めて重要な課題である。例えば環境、安全、福祉、産業その他の現実世界の多くの分野で大規模化によって計画・開発・管理等が困難になるという問題への対策や、介護ロボットのよう新しい技術目標の達成が必要になっている。これまでは人間が問題の把握と、新計画・開発の見通しを立ててきた。しかし対象の大型化に伴って、全体を正しく見通すことが極めて困難になって来ている。近年発生している各種大型の事故(例えば原子力プラントの事故、医療事故、米国における停電の発生など)の原因は突き詰めてゆけばこの問題に突き当たる。これを避けるために開発計画のアセスメントの重要性が強調されるが、見通しが困難な問題を人間自身が評価することは困難である。情報技術を導入しようとしても、今日の技術では未知の対象に対して情報システムを開発することは困難である。すなわち現代の問題は、(A)未知問題の計画・概案を作成するために情報技術を導入したいが、(B)計画・概案が前もって確定されていない限り情報システムが開発できない、という矛盾を含む。これをここでは「計画のジレンマ」と呼ぼう。この困難の要因を分析し、解決に寄与する新しい情報技術を開発することは人工知能に課せられた大きな課題である。

未知問題の計画・概案を確定する唯一のフォーマルな方式は試行錯誤である。従ってこの課題は試行錯誤の過程に組み込むことのできる情報システムを開発すること

である。仮説を作るのは主として人間であり、情報システムの役割は仮説の正しさを検証することである。作られる仮説が異なれば要求される情報システムの機能も異なる。しかも仮説は動的に作り替えられ、その範囲を前もって全て予測し、前もって準備しておくことは困難である。そこで状況に応じて情報システムの自動生成が必要になる。情報システムへのこの要求は冒頭のコミュニケーションにおける(3)の機能に相当するものである。

コミュニケーションにおいて会話の流れを中断しない為に会話世界の自動構築が必要であると同様に、問題解決においても試行錯誤の過程を支援する情報システムは流れを中断しないよう、既存の機能を自律的に統合することによって必要な機能を生成する機能が必要である。これが今日の情報技術のネックになる。例えば統合を特徴としてうたっている IMS[YOS 03]の技術でも、目的に合わせて機能の統合計画を作るのは人間である。

処理機能を動的に自動生成する方式としては、データとしての知識（背景知識）を素材にして知識構造を自動的に構築し、それを直接動作化するか、あるいは処理系に変換することが最も有力である。生成に際してはその機能が適用される対象（世界モデル）が明示的に存在することが必須条件である。これは前記コミュニケーションの枠組みと同じである。

この方式の特徴は「予見できない現実のニーズに直接、統合的に対応するソフトウェア技術」を実現することである。「予見できない状況に統合的に対応すること」が要求される問題はシステム開発の外にも介護ロボットや宇宙システムの保守、自動車のリアルタイム診断等で現実的なものになってきている。このような質的に高いレベルの情報技術には人工知能の技術が不可欠であり、多くの努力を傾けるべき課題である。

自動化には、それに必要な全ての情報を情報システムが保有することが前提である。これが対象のモデル（前記会話世界のモデル）と行為を自動構築する素材としての知識である。この方式は、人間が対象のモデルと問題解決の要素知識を持っていてコンピュータの機能統合を指示する現在の「人間指示による機能統合」に代わり、コンピュータが対象のモデルと知識を持ち、自身で機能統合を行う「コンピュータ自律機能統合」である。大規模問題では対象の中に人間が含まれるから、人間を含むモデルの表現を定式化することが必要である。この意味については後により詳細に述べるが、これを知的な情報システムのあり方とする[1]。以下では、人工知能を主とする新しい情報技術の必要性と、これを達成する一つの方式について論じる。

2. 知的情報技術の意義 - 技術開発の場合

このような新情報技術の実現を目指して、まず新情報技術の意義をより具体的にしよう。これを端的に表す例として近い将来大きな問題となることが予想される技術開発問題を説明の導入部として取り上げる。開発問題は、*創造的な仕事である、*多要素から成る複雑系である（分散の処理）、*人間が関わる、*多分野に関わる、*制約事項が多い（環境、保有設備、保有技術、経験、法規、その他）、*正しいという確認が取れない=原案に基づいて評価が出来ない、などの要因で対象が大型化すると共に困難度を増している。ソフトウェア開発もこの一つであることは言うまでもない[WAY94]。これを支援することが重要になっている。

情報技術とりわけ人工知能のように人間に最も近い領域の情報研究は人間の知的活動を分析し、定型化することが重要である。人間の知的活動は応用に近づくほど統合的になるが、その活動内容は多くの場合対象依存である。従って応用分野について十分理解しない限り、そこで行われている統合的情報機能について理解することができない。しかし統合的情報機能の研究を目指して応用分野について学ぶことは情報技術研究になりにくかった。情報技術を理解した応用分野技術者になり得ても、普遍性を求める情報技術の成果には成らないからである。これが知的情報統合の研究を困難にしてきた。学会論文として応用研究が重要であるという声はこれまでもしばしば聞かれたが、それが実際に困難であった主たる原因がここにある。

しかし、前章で述べた統合的情報機能は、このように特定応用分野に特化した個別統合機能ではない。多分野の対象について、適用される個々の分野が指定されれば分野依存の情報システムを生成する汎用の機能、すなわちメタ機能を実現する方法論である。このようなメタ方法論は人間の世界では珍しいものではない。代表的なのは科学的方法論で、これは広い分野に適用可能な普遍性を持っている。もし上記統合化のメタ機能を情報技術として実現する方法が見いだされれば、普遍的方法論として広い範囲の応用を持つ。

コンピュータが方法論を持ち問題解決を自己管理する効果は非常に大きい。各応用分野がこの成果の効用を理解し、情報技術と応用分野技術の協調がより積極的に進められることが期待される。すなわち「コンピュータ自律機能統合」が情報技術における重要な研究対象に成り得る。言うまでもなく、この様な方法論を情報システム内に実現することは容易ではない。以下そのような新しい情報技術の意義と効用を述べ、さらにそれを実現するための要求と技術について述べる。

2.1 技術開発における情報技術の利用

個々の分野ごとに分野依存の情報システムを人間がその都度開発するものと、汎用情報システムが分野依存の情報システムを自動生成するメタ機能の違い、およびそのような情報システム開発の重要性を、技術開発支援を例にとって述べる。これは説明のための例であるが、メタ機能の重要性は現実のものになっていることが理解されよう。

メタ機能ではないが、情報技術が一般の技術開発に利用されている既存の例として CAD / CAE が代表的である。CAD / CAE の概念は機械、電子・電気、材料など分野によらないが、作られるソフトウェアは分野によって異なる。以下の議論では便宜上説明例として機械分野を想定するが、考え方は他の分野についても全く同様である。これは人間の用いる設計の方法論の一部を定式化し、情報技術で実現したものである。この方法論は対象の形を定義・表現する部分と、その構造によって定まる機能・性能を評価する部分から成る(図1)。設計の情報化によって要求されるのは、

(A) 設計対象を必要な処置が可能な形式で表現すること、

(B) その表現に対して必要な処理を行うプログラムを準備すること

である。(A) で作られる表現を製品モデルあるいは対象モデル(以下単にモデル)と呼ぶ。モデルは要求される処理の内容を考慮して作られる。(B) のプログラムは原則的には3種ある。第1は表示装置上に対象を可視的に表示するもの、第2はモデルから対象の性質や機能を見いだすもの、第3はモデルから製造情報を生成するためのもの、である。この3種のうちどこまで実装されるかはモデルの表現法による。これは一般にデータベースとして実現される。しかし今日用いられているデータベースの形式化の枠組みは単純なものであり、CAD / CAE の適用範囲はこの形式化が可能な範囲に制約される。分野ごとにそれに適した形式化が必要になるため機械、電子・電気、材料など分野依存のものになっている。今日のデータベースの枠組みでは1章で述べた条件を満たすことができない。

一方、その制約があるが故に、CAD / CAE のシステムは個々の適用対象とは無関係に前もって作ることができる。必要なときに支援システムを作るのではなく、既存のものを使うことは応用上重要な条件である。

しかし技術開発の全過程で見ると今日の CAD / CAE の効用は大きなものではない。技術開発は様々な段階からなるが CAD / CAE が使われるのは下流過程の部品開発のレベルであり、このレベルに至るまでの上流の仕事の比重が大きくなっているからである。現行 CAD / CAE の技術をさらに拡大してその部分をカバーすることは困難である。それは上流過程の仕事が要求する内容が質的に高度で、単純な形式のデータベースとその

図1 設計製造の手順とCAD / CAE / CAM の位置づけ

処理プログラムを基本とする現在の情報処理技術の枠組み内でプログラムを工夫すると言った方法では対応できないからである。これは現在の技術開発支援ソフトウェア技術の限界であり、この限界を超えるには従来とは異質のレベルの高い情報技術が必要である。情報技術のカバー範囲は情報技術のレベルによるからである。

技術開発の全過程とその中で今日の CAD / CAE がカバーする範囲を示したものが図2である。開発の目的は指定した機能・性能を持った「何ものか」を実現することであり、これが全体の要求である。技術開発の場合の「何ものか」は「物」としての製品であるが、一般には必ずしもそれに限定されない。方法や組織あるいは行為など、より抽象的なものであっても良い。これを以下では「開発の対象」、あるいは単に「対象」という。対象は開発のスタート時点では存在しない。これを具体化すること、その形状や部品・要素から作られる構造・組織を作り出すことが開発である。

「概念設計」はいかにしてそのような対象を作り出すかについて全体の構想を表す構造を作るものである。これはいわば開発の基本方針であり、方針の決め方により以後の作業も全く異なるものになる。以後の作業内容の大筋がこれで定まり、開発の成否の多くがこれにかかっている。

「技術設計」はこの概案が技術的に実現可能かどうかを検証し、あるいは技術的に実現可能なように対象の構造を定める。一般に大規模開発では作られる対象も複雑になり、技術設計は全体から細部に至る多くの段階で行われるのでこの部分の作業範囲は大きい。

「詳細設計」はこれによって定まる全体構造を、入手可能な部品を用いて実現可能なように、まだ詳細化されていない細部までを定める。

「製造」はこの情報を、求められている「何ものか」に変換する過程である。対象が物理的な物である場合、この情報から実際の物を生成する。この後、これが当初の要求を正しく満たしているかを検証(「検査」)し、「出荷」される。

図2 技術開発過程

この過程の中で概念設計が極めて重要である。概念設計から技術設計の上部に至る部分で開発の成否の 70% 以上が定まると言われる。CAD/CAE がカバーする範囲は技術設計の一部と詳細設計に留まる。

概念設計の影響は対象が複雑になるほど大きくなる。この細部は個々の分野・ケースによって異なるが、基本は要求機能を満たす構造を見いだすことである。この基本原則は「可能な全ての対象構造の中から、利用可能な情報（知識）あるいは他の評価手段を用いて最適なものを選ぶ」というものである。実際には可能な全ての対象構造を並列的に全て作るとは困難かつ非効率的で、これを可能にする実際的な方式がとられる。

多くの場合、複雑な要求を満たす複雑な構造を一度で見いだすことは困難で、まず要求機能を小要求の組に展開して詳細化し、個々の小要求機能を満たす対象構造を求め、あるいはさらに小要求機能を展開するという多段の方式プロセスが取られる。この結果作り出される対象も多階層の構造になる。この作り方にトップダウン方式やボトムアップ方式など異なるアプローチがある。いずれの方式に関わらず、作業の単位は「上位の要求を満たすように、直下の複数部品の機能とそれらの構造関係を定めること」である。そのような小構造からなる作業をどのような順序で行うかは人が動的に決めるので、支援情報システムはそれに対応せねばならない。

個々の作業単位については「一つ（または少数）の構造を仮説として作り、それを評価して不適切なら作り替える」と言う試行錯誤が行われる。これら小構造が相互に関連付けられながら全体構造を形成してゆく。この段階の対象構造は適切と思われるが、未だ最終評価がなされていないものである。これを設計者の概念を表すものとして概念構造と呼ぼう。この階層構造の中で最上位に近い構造部分はそれより下位の構造の概要を定め、作業内容の大筋がこれで決まる。この選択には大きな自由度があり設計者の考え方が大きく反映される部分であるので、特にこの部分を（狭義の）概念設計と呼ぶ。

このことを例で示す。離島間の新しい乗り物を設計する場合を想定しよう。この場合主設計者が問題解決者であり、「新しい乗り物」が対象で、その構造が未知である。設計に際しては所要速度（時間）、乗り心地（揺れ、騒音）、安全性、製造コスト、運用コスト、運用・管理条件（荒天時の運用等）、法規など、利用目的（軍用、民用等）や

状況（港湾の状況等）によって定まる要求や制約条件が多数あり、これらを満たすように、これまでの様々な知見を参照しながら対象の構造を細部まで定めるのが設計問題解決である。可能性のある方式として、通常船方式、水中翼船方式、潜水船方式、水面浮上（ホバークラフト）方式水上飛行機などがあり、まず仮案として基本方式と概略の構成を作る。例えばジェット機のようなターボエンジンを用いた水中翼船方式を採用するとしよう。対象の基本構造は、水中翼船に関する知識から、「船体」、「エンジン」、「水中翼」等から構成されるものとし、次いで対象自体の諸要求を満たすように、個々の部分（アセンブリ）の性能や相互の構造関係を定める。このように基本方式を定める部分が概念設計であり、この決定により以後の設計方向が定まる。個々のアセンブリの性能は、「それらが満たされればそれから構成される対象の要求が満たされる」ものとして仮に定められる要求性能である。ここまでの検討の結果、要求が達成される可能性が高いと考えられれば概念設計が（仮に）終了し、個々のアセンブリについて、上で与えられた要求機能を満たすように、下流部分の設計が始まる。この下流部分の設計、例えばエンジン設計は別の専門家に委託される場合が多い。このような分業が可能なことによって始めて大規模な開発が可能になる。この時、この部分以下の設計がどのように進められるかについて、上記の主設計者は完全には見通せない。これは「上位の設計（問題解決）結果に応じて下位の設計問題が定まる」動的な問題解決である。

2.2 概念構造の形成例

図2では処理の流れのみを示したが、これに伴って概念構造が作られてゆく。状況をさらに明確にするために概念構造の表現を考える。一般にこの作成例を作るとは困難な作業である。枠組みは普遍的なものであるが、これでは抽象的な議論に終わる。話題を具体的にするには分野固有の情報に基づく特定の構造を作らねばならず、分野の専門性が要求されるからである。ここでは単純化して示す。

図3は前記離島間海上交通システムの例である（もちろん実際の概念構造はこのように単純なものではない）。この図では開発の開始時（同図（a））、第1段の終了時点（同図（b））、および概念設計終了近く（同図（c））の概念構造を示している。開発責任者は開始時には未だ情報としても存在しない開発問題を持つのみである。これから第1段階の構造を作る。この過程において、前述したように、様々な代替案がある。それらの中から水中翼船方式が選ばれたとしよう。以後、作業が順次下方に進行する。大規模な、あるいは複雑な対象ではこの全体を一人の人間が行うことは不可能で、多くの専門家が協調してこの構造を作り上げる。例えばAはこの海上交通システム全体を輸送手段、運用システム、保守システム、等

から構成するように基本構造を決め、それぞれの機能・性能と、これら各サブシステム間の関係を、「それらが達成されれば全体の海上輸送システムに対する要求が満たされる」ように定める。次いで専門家 B, C, D を選定し、以後の仕事を任せる。ここまでの A の役割である。次いで専門家 B, C, D はそれぞれ与えられた条件を満たすようにサブシステム開発を行う。例えば B は与えられた機能・性能の輸送手段を水中翼船方式で実現することを目的とし、船体、エンジン、水中翼などのサブシステムでそれを形成し、それぞれの機能・性能およびそれらの関係を定め、以後の作業を専門家 E, F, G に任せる。このようにして、A の決定に基づいてサブシステムの構造が定まり、それに応じてさらに下位の構造が決定されてゆく。この展開は上位の複数の異なる要求を分散することである。下位のサブシステムへの要求はより単純なものになり、それを満たす作業は、より単純な、実現しやすいものになる。A, B, … G の作業のパターンは類似で割り当てられた範囲の作業（これを作業単位と呼ぶ）を実行する。個々の作業では可能な限り過去の事例を参照し、数値的計算あるいはシミュレーションによって構造の妥当性を評価せねばならない。各作業単位が対象とする概念構造の部分（範囲）を概念構造要素と呼ぶことにしよう。

図3 概念構造の形成

開発の各段階で、与えられた条件を満たすようにサブシステムの構造を決定することは容易ではない。このために必要な情報を収集し、サブシステム構造を評価するなどの支援システムが不可欠である。また、サブシステムへの要求決定後、それらサブシステムの低位構造を要求通り実現する能力を備えた人物を選ばねばならない。

この選定も重要であり、その作業を支援する情報システムが必要になる。例えばこのシステムは、サブシステムの下位の構造決定に際して関連する技術分野を推定し、それらの分野に関して十分な知識を持つ人物をこのサブシステムの担当者として選定するのに必要な情報を提供するなどで、担当者を助ける。個々の作業単位のパターンは類似であっても要求内容は異なるから、これを情報システムが支援するとしたら、同じ枠組みで、個々の作業内容は全く異なる処理方式が要求される。これが冒頭に述べたコミュニケーションの(3)と同じ機能が要求される所以である。

図3は開発手順の原理を示したもので、現実にはこのように最初から全て新しく作り上げることは少なく、可能な限り前例を用い、変更する部分についてのみ新しく構造を作る。変更部分に関連する部分も影響を受けるから、実際には大きな範囲を見直す必要があり、また担当者の選定は新たに行わねばならないが、基本構造の多くに前例を用いることによって効率的な開発が行われる。変更する部分とそれに影響される範囲は開発目的によって異なるから支援システムとしてはこれに対応できねばならない。

これら作業単位のパターンが類似であること、その実行時において各作業単位は半独立性（相互関連を考慮しながら自己完結的に作業が行われる）を保つことによって作業順序の任意性を保つこと、上記前例の利用における柔軟な作業範囲の指定に対応すること、は支援システムの構造を示唆している。それは個々の作業単位ごとに個別支援システムが形成され、これら複数の個別支援システムが概念構造に応じて関連づけられた構造を持つシステム、このシステム内で各個別支援システムは分散して独立にかつ連動的に動作することにより、人間の発想を妨げることなく、個々の作業が必要とする問題解決（試行錯誤の実行）を支援することができるとようなシステムである。これは個別作業単位の要求する内容に応じて自律的に生成されるエージェント・システムが、概念構造と同型に構造化されるマルチ・エージェント・システムの形態である[HUH 97, SYC 98, ARA 01]。ここには2つの解決されねばならない問題がある。一つは個々のエージェント・システムの自動生成方式、もう一つはこれらエージェント・システム同志の自律的協調関係である。第1については本稿の主題としてこれまで述べてきたが、以下の章でさらに考察する。第2はマルチ・エージェント・システムの一般的な基本問題の一つであるからここで特に取り上げる話題ではないが、各エージェン

ト・システムは実際の処理に際して多くのプログラムを必要とし、これを、Web サービスを利用する等、可能な限り既存の処理系を利用することを考えねばならない [KON 01]。第 2 の問題はこれを考慮してエージェント・システムを自動生成する条件を考慮することにある。

2.3 新しい情報システムの意義 支援システムの目的と情報技術開発のあり方

支援システムの詳細に入る前に、新しい情報システムの意義をより明確にするために、開発過程における支援システムの果たす役割を示しておく。図 3 は既に全体が見えていて、大きな困難は無い例であるが、概念設計の難しさの一つは、対象の規模が大きくなるにつれ、要求機能が多面的になり、対象構造を決める段階で、下位の構造が見通せない為に生じる。上述したように、少し大きな対象に成ると、概念設計の担当者と個々のアセンブリ設計の担当者は一般には異なる。概念設計の結果によって下位のアセンブリ設計が異なるから、原理的にはアセンブリ設計の担当者は概念設計が終了した段階で定まることになる。すなわち、行為主体である設計者も、上位段階の問題解決の結果によって定まる。現実には概念レベルで従来と大きく異なる革新的な設計が行われる場合は少なく、概念構造も大半は以前の事例を用いる場合が多い。主体である人間の組織が大幅に変わることも少ない。しかし技術革新の時代には新しい技術が今後増加する可能性が高く、概念構造の動的構成の必要性が高くなっている。

上位の決定が下位動作範囲を決めるという動的な構造構築が行われるのは技術開発の場合のみではない。人間組織において下位の作業の割り振りをそれぞれの責任者に委ねる場合も同様で、経営管理で上位の人間には下位の作業の細部は見通せないという類似の状況が起きる。

もし、概念構造の作り方が個々の応用分野に固有で、分野ごとにすべて異なるものであったら、これは 100% 応用分野の専門家のなすべき仕事になり、情報技術者が関与する余地はない。これが従来の考え方であり、特に概念設計には方法論はなく、個人の直感的能力と経験に待つほかないと信じられてきた。現実には概念構造の作り方には多くの分野に共通性がある。分野の専門的情報が効果を挙げるのは作られた概念構造の評価の段階であり、概念構造の作り方自体は、評価を内部に取り込んだ試行錯誤である。これを定型化すれば汎用的な概念設計支援の方法論としての枠組みになる。その中の評価部分に分野の専門的情報を利用することにより、結果は分野固有のものになる。これは枠組みと内容の違いである。応用分野と情報技術分野の境界は従来考えられてきたように概念構造が作られた後にあるのではなく、概念構造の製作過程にある。

これを図 4 に示す。図 4 (a) は現在の開発方式である。開発の構想を作る段階は結果の検証方法がなく、開発者

の考えがそのままチェックされることなく実現される。下流過程の技術設計から詳細設計の段階は要求の範囲が狭まり、作業範囲も絞られるので CAD / CAE により設計・評価を行いながら作業が進められる部分で、その分誤りは少ない。これに対し上流の部分では正当性が保証されていない。いかなる場合でも、製品のトラブル等が発生した場合、前段に戻って改良がなされるが、原因が概念レベルの決定にある場合、致命的な結果に成ることが多い。これを防ぐには、概念設計レベルでも作られた構造を直ちに最終構造とするのではなく、結果の評価を行って、製品化に至る以前に誤り等を見つける外ない。正しさを保証するために構造を評価するという考え方は部品設計でも概念設計でも同様である。しかし概念構造の評価は、構造の表現法においても、構造を生成することと評価をすることの時間関係においても部品設計のような単純なものではない。このために情報技術として新しい方式が必要とされる。これを示したのが図 4 (b) である。図 4 (b) で情報システム開発が作業ループの中に入らねばならないのがこれを表している。

現在の情報システム開発は対象のレベルで個別の問題解決システムを人間の手で開発するものとしている。

図 4 開発過程

これでは図 5 のようにならざるを得ない．分野の問題解決者は必要が生じると情報の専門家に情報システム開発を依頼せざるを得ず，分野システムの開発に異分野の情報技術者が入り込むことになる．この開発には時間が掛かり，意思伝達の不正確のために正しい要求仕様が作られない可能性もある．さらに仮説としての概念構造を変える度にこのサイクルが必要になる．これは事実上実施が困難でありこの過程は省略される．その結果が図 4 (a) である．

これを防ぐには分野システム開発のループに情報分野の技術者が入らないで済む方式を実現する外ない．それには図 6 の様に情報システムを自動生成する方式とする外ない．情報技術者が行うのは対象のレベルのシステム開発ではなく，システムを生成するメタレベル技術の開発である．この技術によって開発されたシステム自動生成システムが分野の問題解決過程に含まれ，概念構造を入力として受け取って必要な情報システムを生成し，これが開発に利用される．この方式なら問題ごとに人手による新たなシステム開発は必要としない．この点は部品設計のレベルで CAD / CAE が使われる状況と類似になる．CAD / CAE システム開発を実際の問題解決（設計）の最中に行うことはない．CAD / CAE の場合は分野が限定されているので，問題範囲が予見され，前もって必要な処理機能が定義されるので対象レベルのシステムとして比較的困難なく開発されてきた．問題が予見できないときはこれが困難で，問題が見えたとき直ちにシステムを生成する方式とする外ない．問題が予見可能か，予見困難であるかが，情報システムを対象レベルで開発可能か，メタレベル開発が必要であるかを分けることになる．

図5 現実の開発方式

図6 情報システム開発における情報技術者の役割

人間世界の問題は予見可能か予見不可能かによって2分される．今日の情報技術は予見可能な問題にのみ利用できるレベルである．このため多くの問題が情報技術を適切に利用できないまま残されている．この範囲をカバーする新しい情報技術の意義はきわめて大きい．

2.4 支援システムの汎用性

これまで支援システム構造の柔軟性を強調するために開発を例として述べてきた．開発の特徴は概念構造を作り上げることであるが，対象の構造がすでに存在している場合，例えば解析や診断などの場合でも対象の構造にあわせて支援システムを構成する上記の原理は同じである．個々の支援システムに与えられる問題に応じて，処理内容の異なるエージェント・システムが自律的に生成される．あるいはそのような情報技術を開発することが必要である．

また，これまで技術問題を中心に述べてきたが，問題の本質は技術分野に限らず，政治・経済・産業・流通・環境・福祉など，広く人間の知的活動として未知の世界に進む際に取りられるほぼ唯一の方法であり，分野によらない一般的な方法である．技術問題を中心に述べてきたのは開発例が多数あり，人間の発想から始まって具体的なものに至る迄の過程の体系化がなされてきたので議論の導入に便利であったからにすぎない．図 4 (b) は技術分野におけるこの過程を示しているが，このうち技術分野に直接関わるのは縦の太い点線の右側の部分である．左側の部分は人間が構想を練る段階であり，目的が技術的な製品の開発であるなしに関わらず行われる部分である．上記の情報技術を開発するなら，それは人間の目標指向のあらゆる活動を支援する極めて普遍的な技術になる．

ただし情報技術を導入する以上、モデル化ができる範囲の問題に限定される。

3. 新情報技術実現の条件

新情報技術の開発に先立ち、新支援システムへのニーズをもう少し深く分析しておこう。キーとなる概念は

- (1) 世界のモデル(概念モデル)を作ること
- (2) 広い範囲で動く視点に対応する情報システムを生成する上で必要な知識
- (3) 動的な視点変化に対応して情報システムを実現する自動システム生成である。

3.1 概念モデル

技術開発支援の場合、支援のための情報システムは概念モデル構造に基づいて定義された。その全体構造は、概念構造要素に対応する作業単位ごとに定義されるエージェント・システムをビルディング・ブロックとして形成される。各ビルディング・ブロックは概念モデル構造に従って相互関連され、分散系として独立にかつ連携的に動作する。この意味で概念モデルは中心的な役割を持っている。この役割をより明確にし、実現方式に結びつける。

概念モデルに関しては古くはデータベースの3階層構造の一つである概念モデル、最近は対象指向モデルなど、これまでも様々な提案や議論がなされてきた。これらのモデルの議論は、意図する役割に応じて異なっている。データベースにおける概念モデルの代表例とも言える ER モデルは主としてビジネス分野での活動があるがままに(静的に)表現することを目指して開発された。これをどのように処理するかは別の問題であった。オブジェクト指向モデルはこれに比べると特定の処理系を実現するための表現モデルである。予見できない問題の処理を可能にする新情報技術の開発と言う目標に対し、どのようなモデルが相応しいか、既存のモデル概念が利用できるか否か、を知るにはモデルの満たすべき性質をより詳細にしておかねばならない。

§1 意図/問題表現としての概念モデル

未知項を含む概念モデルが問題の表現であり、すべて既知項となって矛盾の無い構造に至ったものは最終解を表す。問題解決は問題のモデルを処理して解モデルに変換することである。概念モデルのどの部分が未知項であるかによって問題の表現、すなわち最初に人間が与える初期概念モデルも解決の方法もまったく異なる。概念モデルは人間の意図あるいは問題の表現を容易にするものでなければならない。それには実問題において問題がいかに表現されるかを知らねばならない。

技術開発問題を例にとろう。前述したように、これは構造自体が未知項であり、与えられる条件を満たす構造を求める問題であった。概念設計はこの問題解決のプロセスである。条件は一般には多くの機能・性能的要求であった。例えば自動車について言えば、速度、加速度、燃費、発進・停止特性、安全性、コスト、外観など、多くの条件を満たすことである。このように開発型問題解決の定義は、「機能・性質に関する要求を満たす構造を見いだす行為」であるから、問題の表現としては構造を定める上で必要なすべての機能・性能的要求を最初に与えればよい。問題表現はこれらの機能・性能要求を表す単純な概念モデルですむように見える。

しかし実際にはこのように単純なものではない。多くの場合、条件を正しく与えること自体が容易ではない。すなわち人間自身が問題を正しく表現できない状況で問題解決が開始されるからである。開発によって、目的を達成する具体的な対象構造が見いだされたとしよう。これは多数の部品からなる構造である。使われている部品にはそれぞれ固有の性質があり、それらが最終的に対象全体の機能に関わる。従って、求める構造は与えられた条件も満たすが、同時に、設計過程で導入された部品を通して、与えられた要求には含まれていない様々な(部品の)性質が(暗黙的に)導入されたものになっている。

逆に、「これら暗黙的に導入されてきた機能・性質を含めた全ての機能・性質がこの構造を特定している」と言うことができ、この構造が正しい解であるなら問題解決にそれだけの情報が必要で、最初から要求に含めるべきものだったということになる。上記の「もし構造を定める上で必要なすべての機能・性能的要求が問題として最初に与えられているなら」という条件は、定型的な作業手順を可能にするには前もってこれだけの情報を作っておくことが必要である、ということであり、どのような部品を使うかを含めて最初に解を見通していることに外ならない。解が見通されているなら問題解決をしなくて済むから、一般にはそのようなことはない。一般に開発目標に挙げられる機能・性能は必要最小限に留まり、これを満たす構造は必ずしも一つに限られず、要求された機能・性能は満たすが、それ以外の機能・性質はすべて異なるものの集まりである。中には解として不適切なものもある。すなわち問題定義が不十分であり、これが普通といえる。それら付随的な条件を開発の過程において順次対象に含めてゆくことが概念設計過程と言える。

現実はこの機能を性能として(言語的に)表現する代わりに、それを満たすと考えられる構造を直接書いてしまうことの方が人間にとって多くの場合容易である。この様に人間が与える問題の定義を「機能・性能要求で与える」ように固定することは人にとって制約になる。機能・性能要求は通常は言語で表される。複数機能・性能間の関連を含めて、機能・性能への要求で問題をすべて表現することは、「問題を言語で表現すること」である。

が、文章化に固有の文脈を考慮しながら複雑な問題を文章で表すことは容易ではなく、また正しさを直接評価することが困難である。そのため人間の世界では、機能・性能要求の言語表現に加え、直接図 5 の様に概念構造の概要を作るとか、その 1 変形である動作シナリオを作る様な方法の混用を許すことが行われる。すなわち、複雑な問題を定義することが人間にとって第 1 に困難な仕事であり、問題解決支援をするには、人間にとって容易な問題定義を可能にするような支援から始めねばならない。

言語表現が困難なことは、少なくとも問題解決においては人間・機械コミュニケーションを自然言語で行えばよいという安易な考え方が成り立たないことを示している。一方、直接概念構造を表示し、機能要求をそこに個別に記入する方式では、全体の文脈に相当する機能要求の関連付けが構造関係で間接的にそして自動的に生成され、機能要求間の関係も容易に理解される。そしてこれは問題ごとに異なるものではなく、すべての問題に共通した表現形式なのである。

§2 問題の定義に必要なすべての情報を定型的に表現していること

情報システムの自動生成を含め、概念モデルの自動処理は、まず基本となる概念構造表現を定型化し、表現の枠組みを定めることが必要である。定型化の条件は、

- (1) その枠組みに基づく処理が容易であること
= 単純であること
- (2) 定型化された範囲で対象の表現が可能なこと
= 記述力の高いこと

である。この 2 条件は一般には排反的である。ただし (1) で定型化されることによって人間にとっても表現がしやすくなる面もある。また表現の枠組みが複雑になると、記述力は増すが人間が使いこなす事が困難になる。これを補うため、できるだけわかりやすいインターフェースが必要である。

図 7 多階層モデル構築要素

概念構造が階層的になる理由の一つに、人間が一度に可能な作業単位の大きさが制約されることがある。従ってこれを明示すること、そのため、枠組みの中に作業を行う主体とその処理範囲の表現が無くてはならない。すなわち「行為主体（人間）が、何（対象）についてどのような行為を行うか」を基本の単位とする必要がある。これを「主体 行為 対象」三つ組みと表し、概念ユニットと呼ぶ。図 7 にこれを示す。行為の主体が必ずしも人間である必要はない。概念構造内に自動化装置が組み込まれる場合には、その行為の主体は人間ではなく、これとは別の非人間主体（コンピュータ等）である。概念構造内では人間主体は図 7 の様に人間エージェントである。「主体 行為 対象」三つ組において、「主体」は行為主体として構造の一部を形成する。「対象」は行為がそこに及ぶ範囲を示す。例えば行為が部品設計であるなら、対象は部品を表す概念構造要素である。概念設計では人間を含む下位の概念ユニット自体が対象の一部に含まれる。三つ組内の「行為」は主体が対象に対して行う行為を表すもので、定型的言語表現として述語である。一般には「主体」に複数の行為が割り当てられる。この時、「行為」はそれぞれの異なる行為を表す述語の組である。

行為には少なくとも 2 種有る。第 1 種行為は主体が対象に対して行う行為、第 2 種行為は上位の概念構造要素から下位の構造を定義してゆくための行為で、図 7 (a) ではそれぞれ行為 1、行為 2 と示されている。これらはそれぞれが複数の個別行為の組である。この中には概念構造を評価する行為も含まれる。

主体、対象はそれぞれ固有の属性や他の要素との関係を持つ。例えば主体は名前等の属性や固有の性格を持つ。それにも述語が用いられ、複数の記述の組である。対象に与えられる属性の中には、機能や性能のように、その対象を形成している構造によって定まるものがある。すでに述べたように、一般に「物」の構造として表される対象（例えば航空機）はそれを構成する部品（例えばエンジン、翼等）の機能・性能と、それら部品間および対象部品間の関係として定義される構造によって一意に定まる。これを機能・構造関係と呼ぶ。設計行為はこの関係の制約内で所要の機能・性能を発揮する構造を見いだすと言う行為であり、それを、() 目に見える構造を作り、() それを評価する、と言う形式に定型化したものが図 1 であった。このように、属性はそれぞれ主体や対象の性格を規定するものである。行為についても性格を規定する条件がある。これは行為内容の記述に対する記述であり、メタ記述である。一般に概念構造要素から作られる概念構造において、上位概念ユニットの第 2 種行為は下位概念ユニットの行為を記述するメタ記述であるから、構造上、行為の属性は上位要素の行為記述に含まれ、これが行為間の上下関係を作る。主体についても上位要素の主体と下位要素の主体間には上下関係があり、権限の範囲が異なる等、上下位主体の属性間の制約条件

が作られる．これらもすべて述語として表現される．

対象に付いては，同一の対象構造の上位要素，下位要素（部品）の関係にある場合，上記の機能 構造関係が内在する．これは主体間の上下関係のように，任意に作られるものではなく，機能 構造関係が満たされるように対象構造が作られねばならない．

概念モデルは図 7 の構造要素を組み合わせで作られてゆく．このような概念モデルの形成方式を多階層モデルと呼ぶ．概念構造の形成過程の一例を示したのが図 8 である．これは目標の機能・性能を満たす製品を設計するため，人間を含む概念構造を構成してゆく過程を想定したもので，設計の例を用いたのは，概念モデルが問題解決の進行に伴って動的に生成されるという難しさを持つ問題だからである．他の問題例えば解析では最初に概念モデルが作られた後，問題解決が始まる．図 8 の例では最上位のユーザは実際の作業はせず，下位構造を定義する行為（第 2 種行為）のみをもつ特殊なものとして表されている．一般にはすべて標準的な 2 種の行為を持つが，図では煩雑になるため一部を除き単に行為とのみ表している．ただし構造の末端要素は対象に対する行為のみに専念する．従って行為 1 のみを持つ．

[1] 図 8 においてユーザは複雑な対象の設計を意図し，この実務を人間 A に委ねる場合を想定している．その行為（第 2 種行為）の内容は，

- () 下位概念ユニットを作り 人間 A を下位概念ユニットの人間主体として割り当てる．
- () 人間 A の行為 1 を「製品を設計する」と指示する．
- () 設計される製品すなわち対象の満たすべき要求を指定する．

である．人間主体は専門分野，過去の経験，性格等の属性を持つ，() の人間主体を割り当てる行為に際してこれらを参照する．

上記の行為 2 の展開は知識として表現され，「行為指示」のような名前が付けられる．第 2 種行為を「行為指示」と指定しても，この段階では要求として未処理項になっている．問題解決過程に入ると概念モデルの未処理項が順次評価される．「行為指示」の場合，上記知識が呼び出され，この知識に基づいて実行される．

行為を明文化して表すことによってこれを要求とする問題解決プロセスが明示的に行われて記録されることになり，開発中あるいは開発後のチェックが可能になる．下位の主体への行為指示が人間間のコミュニケーションで行われる場合，そこに伝達エラーが入る可能性があるが，上記の様に明記することによりこれが避けられる．

[2] 上位概念ユニットの行為が実行されると下位概念ユニットの行為が定まる．この例では実際の製品設計である．このようにして下位主体 A が指示された行為を未処理項として持つ新たな問題表現が作られる．下位主体 A はこれを実行する．設計者 A は要求された機能・性能を持つ対象の構造を求める．前述の，「離島間の新しい乗

り物を設計する」場合のように，この要求機能を満たす方式には様々な可能性があり，A は目的の達成の概念構造を作る．ただし機能が複雑なものは構造も複雑で，概念形成も多段に行われ，A はその第 1 段を行う．例えば上記の乗り物を水中翼船方式とし，それが「船体」，「エンジン」，「水中翼」等から構成されるものとする．A は目的とする機能・性能を満たすためにこれら各部（組み立て）の機能・性能と，それらの間の関係を定める．こ

図 8 多階層モデル構築例

れが A による概念ユニットの第 1 種行為である。A はこれ以後の設計をそれぞれの専門家に委ねることにし、下位の概念ユニット B, C, D 等を生成する。これはユーザによって A が生成されたと同様で、A の第 2 種行為の役割である。

[3] B, C, D はそれぞれ与えられた要求を満たすように行為を行う。これは A の場合と同様である。図 13 はこのようにしてトップダウンに作られる概念構造を示している。この過程で必ずしも人間主体を割り当てなくても実現可能なものについては図 12 (b) の形式の非人間主体の概念ユニットが用いられる。これは上位主体が自動設計可能と判断した場合である [OHS 96]。

§3 行為の自動化

上述したように下位主体を定義する際、その行為仕様がすべて明確で、機械的な処理が可能なものは非人間主体を割り当て、自動処理とすることができる。さらに、ある範囲の下位行為がすべて非人間主体行為として定義される場合、これらの構造関係から上位のマクロ行為を行為構造に展開することができる。構造内の行為が全て自律的行為である場合、この上位行為自身が自律的行為になる。後述するように、この行為構造はプログラムに変換が可能である。各行為は知識によって表現されるが、その解釈（推論）過程を記録して、行為構造の実行系を作り、手続きプログラムに変換することになる。作られるプログラムから見て、行為構造の定義は仕様の作成と見ることができる。

§4 従来モデルとの違い

概念モデル図 8 は「主体 行為 対象」三つ組みを基本要素とする点で特殊なものであるが、従来の方式との対応をつけておくことは本方式の特徴をあらわす上で効果的であろう。本概念モデルと概念的に最も近いのはデータベースの概念モデル、例えば ER モデルである。しかし本概念モデルで重視するのはモデルの表現と同時にそのモデルの解釈・自動処理を通してモデルの自動再構築をする点にあり、これを可能にするための表現形式への条件がある。ER モデルの記述力はこれまでに述べた条件を表すのに十分ではなく、自動処理に関する議論も未だ不十分である。ただし、概念的に類似のモデルは相互変換の方式を見出すことができるから、相互利用の可能性は探る価値はある。

一方、現実の例、特にモデル化が強く意識されてきた技術開発の場合はどうであろうか？現実の問題においては経験を通して表現が決められ、分野によってまちまちであるが、多くは表面的な表現の違いであって、必要な情報には共通点が多い。これまで用いてきた技術問題との関連で言えば、製品モデルとか対象モデル等と呼ばれる「開発対象のモデル」がある。これはかつて設計図として 2 次元図面で表され、CAD 等の導入によって 3 次元表現に変わっているが、対象の構造部分は厳密に表現されてきた。これは図 8 において対象モデルと示されて

いる部分に相当する。

図 8 では構造と共に機能・性能・属性が書き込まれているが、通常はこの部分の表記は構造に直接関連する一部（表面粗さ等）を除き、別に作られる「設計書」等に含まれる。設計書の表記を構造に結び付けて解釈・処理をするのは人間である（その際人間に判る表記の一部は省略されてしまう）。設計書は行為と属性等に関わる記述で、言語表現を必要とする部分である。これは図 8 のモデルで行為の記述、属性等の記述に対応する。一方、開発に関わる人間の構造を示す「組織図」が、主に管理目的で作られる。これは図 8 の概念モデルで主体とその関係を示す部分である。

このように図 8 の概念モデルに含まれる多くの部分が現実には作られている。従来は人間主体で作業を行うことを前提にしていたので、表現形式に制約は無く、また主体・行為・対象のモデルがそれぞれ別個に作られていた。この表現から関連する部分を読み取り、計算を含む多くの処理を行うのは人間であった。本方式はそれを自動化の範囲に含めるために、それらの関連を明示する三つ組みを基本要素としている。

このように自動化のためには基本のモデル表現の枠組みから変えることが必要である。なお、図 8 は説明図であって、実際にこれをどのように表現し記憶するか、すなわち物理モデルをどのようにするのが効率的であるかは別途考えねばならない。従来の製品モデルと同様、あるいはそれに変換可能な方式で対象モデルを表現する様に考えることも現存資源を利用する上で重要である。重要なのは、従来は別々に作られてきた情報同志が、自動処理可能な形で結び付けられることである。

3.2 知識処理と知識ベース

§1 大規模知識ベース

変化する状況においては処理機能を動的に自動生成する方式が必要であり、それにはデータとしての知識（背景知識）を素材にして知識構造を自動的に構築し、それを直接動作化するか、あるいはプログラムに変換することが最も有力である。これにはまず動的な知識構築とその処理が必要である。生成される処理系は、視点が定まった時それに関連する処理範囲を確実に含みかつ最小のものであることが望ましい。この範囲を視野と呼ぼう。システムとしては視点変動に対応して、関連する視野の範囲全域をカバーする知識を準備することが必要である。これにはシステム内に大規模知識ベースを作り、そこから関連知識を検索する外ない。かつて人工知能分野で専門家からの個人の知識収集は困難と言われ、それを大規模に収集するのは不可能という見方もある。しかしこれは主に専門家の頭の中にある知識を言語化することの困難であった。現実には、例えば技術開発支援のような分野において要求されるのは既に言語化された大量の教科書的な知識が、多分野にわたって、使いやすい形で存在

することである．これらの知識は形式を定めておけば，最初作成するときにマンパワーを要するが，知識の収集に技術的な困難は少ない．予見の困難な問題解決を支援する上で，要求に関わる処理能力はいかなる形式であれ不可欠であり，表現形式として知識を用いるとしたら大規模知識ベースは不可欠である．従って以下の議論においては大規模知識ベースの開発を前提とする．

§2 視点設定

個々の問題解決において必要最小限のシステムを生成するには，視点と視野を正しく同定せねばならない．人間同士の会話では視野は文脈から見いだされるが，必ずしも正確なものを要しない．一方，実問題解決では正しい視点の設定が重要である．

実問題には異なった解決方法論を必要とする様々な種類のものがある．同一の方法論で処理される問題のクラスを同じ型であると言う．実問題には様々な型がある．例えば，設計，診断，制御，計画，等は固有の方法論を必要とするので異なる型を示す．問題型ごとに，その問題解決の方法論を知識として表現し，問題に応じてそれを呼び出すことによって，多様な型の問題解決が可能になる^{*1}．

基本の型の問題解決方法論が準備されていれば，多種の問題型を含む複雑な問題の解決法は個々の方法論を組み合わせることによって問題毎に生成される．図 9 に代表的な型の例を示す．設計型，診断型に含まれている評価は解析型を含む．これらは複合型である．基本の型は同じでも，対象によって問題解決の具体的な方法の細部が異なる場合がある．例えば，同じ設計であっても，機械を対象とする設計と，プログラム設計では細部で方法が異なる．すなわち個々の問題型は平板的ではなく，分野によって構造化される．

方法論は対象に関する特定の処理要素の，一定の構造で表される．設計についていえば初期モデル構築，モデル計算，モデル評価，モデル修正を一定の手順で構造化したものである．これら各処理が知識に基づいてなされるのが知識処理方式であり，それぞれ初期モデル構築知識，モデル計算知識，モデル評価知識，モデル修正知識が使われる．このように知識を型と分野に応じてそこで使われるものに限定して準備すれば，視点（作業内容）に応じて視野が見出される．すなわち視野同定は視点をキーとして大規模知識ベースから‘型×分野’で定まる範囲の知識を検索することによって達成される．これには大規模知識ベースそのものをこれに適した形式で構造化する必要がある．

^{*1} 未知の型の新しい問題が生じたときは，その解決の方法論を新しく見出さねば成らない．これはあらゆる行為の中で最も創造的な仕事であり，人間が行う外ない．方法論がない限り，いかに高度な情報技術を用いても自律的問題解決は不可能である[OHS 01]．

(a) 解析型

(b) 設計型

(c) 診断型

図 9 問題型とその問題解決構造（問題解決方法論）

§3 知識の構造化

知識ベースは方法論知識ベースと領域知識ベースから成り，問題型，分野の両方で構造化される．図 9 から判るように方法論の知識は分野知識の使い方を示すメタ知識であり，分野知識が方法論知識の下で構造化される．

個々の方法論を形成する処理要素（設計問題の例ではモデル構築，モデル計算，モデル修正など）の種類は有限で，異なる方法論自体の種類も有限であるから，全方法論を通して異なる処理要素の種類全体も有限である．そこでまず知識を処理要素の種類によって分類する．例えばモデル構築の知識群，モデル計算知識群，モデル修正知識群などである．さらに，各処理要素の知識，例えばモデル計算知識，は分野毎に異なるから，それをさらに領域によって分類する．このようにして領域知識ベースの（操作×領域）によるクラスが作られ，それが方法論知識と組み合わせられる．図 10 はこの構造を示す．

問題型と問題分野が特定されると，それをキーとして，この構造化された知識ベースから所要知識が検索される．

なお問題型，問題分野とも，平板な分類である必要はなく，階層的に細分化される．例えば，設計と言う問題型は，標準的な設計の方法論のみでなく，その変形版が分野に固有の設計方法として作られる可能性がある．前述したように，設計と言う枠組みの中で，機械を対象とするものとプログラムのよう情報を対象とするものでは詳細が異なる．従って問題型を細分する．例えば図 11

図10 知識検索による問題向き知識構造の生成

で機械設計の方法論である設計1型、プログラム設計方法論の設計2型のように細分し、異なる名前を与える。同じ機械に関する設計1型でも、分野によっては領域知識の特徴を活かした方法論の表現を作ったり、「A氏の設計方法論」のように、個人の方式が作られても良い。これらは標準型が細分化された下位問題型として定義される。細分化は分野についても同様に行われる。

これら構造の作り方に基準があるわけではなく、また動的なものであるが、この構造の作り方に応じて知識ベース構造が作られ、また後述するように、利用者が意図を表現する際にこの構造を用いるので、それらを考慮して作成することになる。この構造の作り方が、システムの能力に関わってくる[OHS 01b]。

図11は概念の構造として、オントロジーの一種である。図11(a)はタスク・オントロジーに、図11(b)はドメイン・オントロジーに対応する。この構造で知識ベースの構築には多くのマンパワーを要するが、一度作られたものの共用性は高い[MIZ 99, YAT 99]。この枠組みと同時に、ユーザがシステムを使いながら知識を保存して行くような方式を準備することが重要である。

以上の処理によって生成されるものは、知識と推論によって解を自律的に見いだす情報システム、すなわち、かつてのエキスパート・システムと類似のものである。言い換えれば、エキスパート・システムはこれまで述べてきた前処理部分は全て人間に任せた上で成り立つシステムであった。問題解決において困難なのはここまで問題を整理し絞り込むことである。かつてのエキスパート・システムでは、それ使えるようにするために、問題解決の本質的な部分はほとんど人間が行うことが前提で

図11 問題型と領域の階層

あり、エキスパート・システムが扱えるのは狭い範囲の、トイ・プロブレムに近いもののみであると批判された理由がここにある。

3.3 情報システムの自動生成

情報システムを生成することは、情報システム自身のシステム設計とそれを実現するソフトウェアを自動生成することであり、いずれも極めて困難なことでされてきた。後者について、従来のソフトウェア方式では目的とするシステムを、手続き的プログラムを中心に表現することであるが、これは問題が事前に細部まで詳細に記述されて始めて可能になる。予見されない問題はこの条件に本質的に反する。無理なコンピュータ化は人間の発想を制約する。これに対処する方式が、問題の表現である概念モデルに合わせて情報システムを生成する方法である。これを適応的ビルディング・ブロック方式と呼ぶ。

§1 適応的ビルディング・ブロック方式

問題を概念モデルによって表現し、概念構造内の既知部分から始めて段階的に未知の部分の処理を進めながら

問題を解決するのが、事前に予見できない場合を含めた幅広い問題に対応する問題解決方式である。全体としては大きな概念から始めて順次細部の概念形成が行われる

人間はこのようなトップダウンの作り方を基本にしながら、問題に応じて、内部の詳細に立ち入る前に、形態的な判断、明文化し難い経験、他の問題とのアナロジーなどを用い、局所的な Breadth-First のアプローチを取って概念構造を作る。Breadth-First と言っても一律にレベルを合わせるというのではなく、状況に応じて柔軟に深さと幅の変化を許しながら仮の概念構造を作るのが人間の優れた方法である。ここでは問題形成と問題解決が適応的に組み合わせられている。この方式によって各段の概念構造の作成がフィージブルな範囲に収まる。

このような人間の柔軟な発想を許しながらそこに支援システムを導入する。その役割は「各段階で仮の概念構造の評価を行って試行錯誤を可能にしながら構造の詳細決定を支援する」ことである。支援システムは概念モデルに合わせて生成されるが、一回に生成できるのは多段に行われる概念形成の 1 段の処理を支援するサブ情報システムである。開発の場合のように、上位の構造は既に定まっているが下位は基本構造は定まっていない状況にも対応せねばならないからである。従って情報システム全体はサブ情報システムが概念構造に対応して生成され、相互に関連づけられるマルチエージェント型のシステムとなる[4, 5, 6]。これを適応的ビルディング・ブロック方式と呼ぶ。

§2 適応的ビルディング・ブロック方式の定義

ビルディング・ブロック方式の基本は、

- (1) 概念ユニットに単一の枠組みのビルディング・ブロックを対応させることにより、全概念構造に対応する情報システムの構造を作る、
 - (2) 実行時にはそれらビルディング・ブロックが構造内の要求に応じて独自の動作をするように内容の自動定義をする、
- ことにある。

ビルディング・ブロックの枠組みは全て共通でありながら、実行時には各ブロックが概念構造内で置かれた位置に応じて異なる内容の処理を行うという条件を満たすために知識処理を基本とする。宣言的な表現に基づく知識処理の方式は、知識を用い、その組み合わせを作りながら推論を行うことにより、前提条件からゴールまでの道を自律的に見出すので、準備された知識の範囲内で様々な状況に対応することが出来る。知識処理を構成する枠組みは、知識を蓄える知識ベースと、処理を行う推論機構であり、すべてのビルディング・ブロックについて同一である。知識自身は推論の処理対象になるデータであるが、このデータを入れ替えればシステムは全く異なる動作をする。知識処理のこの特徴を活かす。

もし十分な知識量があれば広い範囲の問題に対応するから、原理的には単一のビルディング・ブロックで全

てすませることが出来るが、知識量が増すと組み合わせ爆発が生じる。個々の問題に対して利用する知識は全体の一部であるから、実用性を確保するため、各ビルディング・ブロックの実行時の知識を必要最小範囲に制限する方法が、視野に応じた問題向きの知識範囲を同定するのが前述した方法だった。各ビルディング・ブロックは「視野に応じて問題向き知識ベースから知識を選び推論を行う」と言う同じ動作を行い、知識内容によって異なる処理が行われるようになる。共用知識ベースは大規模知識ベース管理システムで管理される。

概念構造は末端の、対象の処理に専念する個別問題（例えば部品設計）と、それより上位にあって、下位の要素の処理結果を組み合わせで統合化する統合問題から形成されているが(図 3) 知識処理の下では使われる知識が異なるのみで、個別問題解決も統合問題解決も構造的な相違はなく、ビルディング・ブロックの概念はそのどちらもカバーする。個別問題解決が統合問題解決と違う点は問題を展開して下位ブロックに送る部分が無いこと、すなわち概念モデル内で第 2 種行為が指定されないことのみである。

各ビルディング・ブロックは共用知識ベースに必要な知識の供給を依頼し、知識ベース管理システムは要求された知識を検索し、供給するが、大規模知識ベースと言っても多様な個別問題解決に必要な知識を全て自システム内に共用知識ベースとして準備することは非効率で、Web サービスのような方式を出来る限り利用し、他所にある機能を有効に使う方式が必要になる[PAO 01, 11]。これも知識ベース管理システムの役割である。

個々のビルディング・ブロックは概念モデル構造内で役割が定まるが、その機能を定義するのは、上位処理ブロックあるいは人間から当該ブロックに与えられる部分問題である。問題はモデルの一部として表されているから、ビルディング・ブロック間で問題および解として受け渡されるのはモデルの一部である。

§3 ビルディング・ブロックの構成

図 12 にビルディング・ブロックの枠組みを示す。これは(a)上位ブロックあるいは直接人間から与えられる問題すなわち行為内容と処理対象を受け取る、(b)問題に応じて必要な知識を外部の大規模知識ベースを検索して取り込む、(c)固有の知識ベースを形成する、(d)これに基づいて問題解決を行う、基本部分を有する。末端概念ユニットに対応するものはここで部分問題の解が求まる。それ以外の概念ユニットの場合、(e)対象を要素に展開し、(f)各要素に対応する新たな下位ビルディング・ブロックを生成し(枠組みを表わすテンプレートをコピーし)、個々の対象要素とその処理要求を要求行為として下位のビルディング・ブロックに送る。また(g)下位ビルディング・ブロックから返送されてきた解を用いて問題解決を続行してこのビルディング・ブロックの解を生成し、(h)結果を上位ブロックに返す。これに

4.2 システムの評価

図 8 においてユーザは単に下位の主体 A を割り当て、仕事をさせることのみ示されたが、実際には概念形成の責任者としてユーザの最大の仕事が全体の概念構造の評価である。これが図 6 に示されたモデル評価である。評価は解析に基づいて概念モデルの正当性を判定する行為であり、図 9(a) そのものである。評価は人間が直接指定する外、図 9 の (b), (c) のように他の行為型に含まれる場合もある。

§1 シミュレーション構造の生成

評価自体が一つの行為であり、記述されてモデルに含まれる。評価対象は同じ概念モデルの一部である。この範囲は評価される対象の側面と評価行為の表現内に含まれる対象範囲によって定まる。評価行為はこの範囲内の対象の性質・機能とそれらの関係から上位対象の性質・機能を求めること、あるいは範囲内の下位対象が主体となって行う諸行為のうち、評価要求に関連するものが実行されたときの結果の推定である。評価行為の実行は内容に応じて解析あるいはシミュレーションを行うことである。より具体的には評価行為を表す知識があり、解析方法あるいはシミュレーション方法が表現されている。評価実行は評価行為の表現に基づいてこの知識を呼び出して推論処理を行うことである。解析の場合、解析手順が知識として表現される。一方、シミュレーションの方法は評価目的に応じて多様である。しかしシミュレーションにおいて全体の動作の管理を行う部分には共通性がある。例えば有る行為の推移を時間的に追ってゆく場合、時間のインターバル、繰り返し回数などをパラメータとする基本構造を作り、その中に個別の下位行為を埋め込んでゆく形式で全体のシミュレーションが可能になる問題は多い。この様なパターン化のできるものはこれ以外にもあり、これらを知識化しておくことにより、モデルに基づくシミュレーションが自律的に進めるようになる。

異なる評価行為（例えばシミュレーション）は異なる行為名を持ち、その各々についてシミュレーション方法を表す知識が準備される。これら評価行為は特定の問題型として図 11(a) の型構造内の解析型の一つとして含まれ、人間が随時指定することができるし、設計、診断のような他の型の行為に含まれ、その中で自動的に呼び出されることもある。

シミュレーションを行うにはその準備が必要であり、これはそれぞれの評価目的に応じて評価（解析）知識に含まれる。例としてある建物を設計するために内部の群集の動きを分析する問題を考えよう。この概念モデルは主体として解析者と解析行為を持つ上位ユニットと、個人を主体とし、状況に応じて一定の行動パターンに従う行為を持つ多数の下位ユニットによって形成される群集からなる。上位主体は解析結果から建物の評価を行うので、まず解析を行う。この解析行為は、

シミュレーションの対象範囲を定める

シミュレーションの構造を作る、

この構造の下で対象範囲内の主体の行為を実行し、その記録を取る、

終了を判定する

というもので、この「シミュレーションの構造を作る」がこのシミュレーションの目的に直接関わる部分である。これは

- 1 微小時間間隔と試行回数を定める
- 2 の下位主体行為を微小時間間隔だけ実行させる構造を作る
- 3 終了判定部分を上記構造に含める

からなる。は指定した建物内に居る下位主体の集合を同定すること、はこの全ての主体について行為を実行すること、は試行回数が設定値に達したか否かを判定すること、である。これらを知識の形に表現し、微小時間間隔や試行回数を人間が設定できるようにして状況に応じたシミュレーションが行われる。

これは一つの例であるが、動作系の時間変化を調べる一般手法であり、広い適用範囲を持つ。これについては単純な問題について実験を行って実証の可能性を確認している。このほか動作の基本が時間の代わりに空間変数であるもの、それも 2 次元空間、3 次元空間など、異なる型のシミュレーション行為が作られる。これらのシミュレーション基本構造と、その対象であるモデル表現を組み合わせることにより、多様な評価が可能になる。

評価はモデルの整合性を確かめることであり、正否判定ですむ簡単な場合から、定量的評価が必要なものまである。後者が前者も含むと言う意味でより一般的なので、それが可能な方式としておかねばならない。モデル内の属性や行為のように述語で表される部分に、それが正しく達成される尺度（正当率）が含まれ、構造全体の表現が整合的になるようにこれら各行為等の正当率を定める。従って評価とは形式的には正当率を含めてモデル表現を整合的にする行為である。

§2 人間の評価

人間の行為は誤りが多いため、人間を含む問題解決に際しては人間を含む評価方式を定義せねばならない。人間の誤りの結果は行為の内容によって異なる。例えば図 9 にいくつかの問題型に対する方法論が人間を含む形で与えられているが、設計におけるモデル修正行為に入り込む人間の誤りは、この方法論の試行錯誤ループに含まれる評価行為によって次のサイクルで自律的に見いだされる構造になっているので比較的影響が少ない。しかし最終的な出口になる結果の評価部分にいる人間の判断誤りは修正される機会がなく、直接結果の正当性に影響する。従って行為の正当性評価には、その人間の専門分野と応用分野のマッチングの程度を調べるなど、人間の能力評価を含め、誤り率として表す必要がある。

以上は問題解決で生じる誤りであるが、概念構造の生成時に下位の問題解決ユニットの行為を定義する際の誤

りがあることは 3.1 節で述べた通りである。人間同士の低位行為の定義は、口頭で行う場合、メモを渡す場合、正式に定式化された命令書を用いる場合、など様々である。前 2 者の場合、誤りが生じる確立は高い。これを定式化することにより誤りを減少することができる。

4.3 自動プログラム生成

§1 行為構造としてのプログラム

関連技術として考慮せねばならないもう一つの大きな課題が応用プログラム生成である。これまで述べてきた方式は概念モデルによって人間が問題を定義し、情報システムはそれを解釈し、未処理部分があればそれを実行して概念モデルを問題表現から解表現に変換する、と言うものであった。モデルの構成要素は主体・行為・対象の三つ組みであり、この各部分が未処理部分になり得る。もし主体が非人間主体であるとき、行為は自動処理可能なものであり、情報システムはそれを実行する。このような行為が同一構造内に複数存在するとき、その全体は上位主体が行うべき行為が下位のユニットの行為から構造化されたマクロ行為である。行為は知識として表現されるから、行為構造は知識構造であり、この実行は推論による知識の解釈過程になる。

これによって予見できない問題解決の基本構造はできているし、概念モデルの自動処理部分の構造が動的に生成されるので、開発過程において仮説の対象のシミュレーションをモデル構造に応じて実行し、結果によって直ちに仮説を変更するような開発プロセスを実現できる大きな利点を持つ。問題は実用性にある。特にシミュレーションに関しては同一の処理を多数回実行する必要がある、処理時間が最大のネックになる。これを解消するには生成された行為構造を直接実行する代わりに、これを手続き化する必要がある。ここに自動プログラム生成の必要性があり、しかも実用面では重要な課題になる。

以下ではこの過程におけるプログラム生成を考慮する。これは、(1) 小行為から大きな行為を組み立てること、言い換えれば行為の構造を作ること、(2) これをコンピュータ用言語で表現する、というメタ行為である。プログラム対象とされる行為は非人間主体を持つもの、すなわち機械的に実行される行為である。プログラミング行為の主体が人間なら、人による通常のプログラミングであり、非人間主体なら自動プログラミングになる。現在のプログラム開発過程に対応づけると、(1) は要求・仕様の作成、(2) はコーディングに対応する。手続き的なプログラムは要求・仕様が確定しなければ作れないが、要求が定まり、仕様が正しく作られるなら、今日のソフトウェア工学の技術の下で作られるプログラムに大きな誤りは少ない。従って、今日、プログラム開発で問題なのは上流過程と呼ばれている要求・仕様作成の部分すなわち (1) の部分と、この部分とインプリメント

である(2)との間のギャップにあり[WAY94, MUR01]、この一つの原因は応用分野の問題解決が不十分のため応用分野における情報システムの役割が容易に確定できないことにある。すなわち、これは一般問題解決の上流過程と全く同じ問題である。行為構造は応用分野に依存するから、一般の問題解決と同様、この作成は分野の専門家に任せるのが合理的である。

多階層モデルでは行為構造は述語表現の階層構造である。上位の行為の実行は下位の行為構造を実行することであり、その結果を受けてそれ自身の解とする。このため構造の末端は実行可能な行為でなければならない。行為構造を作るまで、すなわち問題解決をする部分は知識処理による方式を用い、結果としての行為構造を手続き的プログラムに自動変換することが合理的な方法であり、状況によっては不可欠である[OHS 98, OHS 99, HEY 02]。

最近モデルをベースにしたソフトウェア開発の方式が注目されている。例えば[IPJ 04]にその特集が行われている。これらはプログラムの生産性を重視しており、この基本的な考え方は、まず対象の注目する(プログラム化しようとする)側面をモデリング手法を用いて表現し、それからプログラムを生成するものである。しかしモデルの作成をプログラマーあるいは情報システムの技術者が作成するため、応用分野の理解は必ずしも十分でない場合が予想され、モデル自体の正当性をいかに保証するかが大きな問題になる。

上述の方式もソフトウェア開発という観点から言えばその一種という見方もできるが、モデルを応用分野の専門家が作るという点で本質的に異なる立場にたつ。しかし当然共通点も多いので、今後相互の利用を検討することが必要である。

§2 プログラム開発の特殊性

プログラム生成は文脈依存性の少ない述語を要素とするこの行為構造全体を文脈依存性の強い手続き的表現に変換することである。この中間構造として階層構造の各階層で同一レベル内の横の関連を変数の関係によってグラフ構造として明示的に示すものが作られる。上位の行為の入力・出力関係は下位の行為構造(グラフ)の入出力関係である(図 13)。

プログラムも人工的な製品であるから、行為構造を見出す問題は部品から対象構造を作る一般の設計問題に類似である。しかし開発対象が行為の構造である点が一般製品の設計・開発と異なる。その特異性の為に現実にはソフトウェア設計は物の設計問題と異質の性質を持ち、固有の方法論が必要になる。従って固有の問題型を与えるのが良い。相違点として以下の 2 点を挙げる。

[1] 一般の設計はトップダウンに行われるが、それは第 1 に、対象に関する多くの知見があり、要求された機能を持つ対象構造を作る際に、無作為に構造を作って評価するよりも、この知識を利用して不要な構造の生成を

出来る限り避ける方が遥かに効率よく目標に近づくことが出来るからである。物理的な「物」は様々な物理法則に従う。それらを満たすもののみが実現可能だから、この法則を知識化し、利用することによって、効率的に設計を進めるのがトップダウン設計である。一方、ソフトウェアには汎分野性があり、一般にはそのような物理的制約を持たない。普遍的な数学的あるいは論理的な法則があるが、相対的に少数である。従って構造作成時に効果的に不要構造を除去する性質を知識化することが困難であり、必然的に行為構造の作成は相対的にボトムアップ設計の性質を強くする。

[2] 一般の設計とプログラム設計は、要素から行為構造が作られる際の組み合わせ爆発の程度が全く異なる。要素が 3 次元の物体である時は、2 要素間の結合でも異なる効果を生じる組み合わせ方に一般的な構造制約はないから、時には無限に近い。例えば位置関係がわずかに異なる 2 つの構造に機能の相違が現れる。これに対し、行為要素は有限の入出力ポートを通してのみ相互結合されるという構造的制約があり、2 要素間の結合は有限である。要素数が有限なら全体の組み合わせ数も有限である。

ボトムアップ構造作成の場合、可能なあらゆる構造を作り、評価して最適なものを残せば良い。しかし有限と言っても現実には場合の数は大きく、人間によるプログラム開発ではこれは困難であり、個人的な見通しに基づいて作った特定の構造が基本になる。しかしこのようにして作られた要求・仕様が正しいものである保証はない。しかるにソフトウェア開発の上流過程でこの誤り検出が困難である。

知的システムを用いてプログラム開発を行うにはこのような問題を解決するための方法論、すなわち正しさの保証された行為構造（概念構造）を作る方法を提供する必要がある。これは要素の組み合わせとして作られる多くの行為構造の中から応用分野の要求を満たす正しい解を速やかに選ぶことである。それでも要素の数が多い時は実用的な困難が生じるので、適切な対応策が必要である。その第 1 は機能の適切なマクロ化によって多層化し、各層内の要素数を減らす。最初に階層構造を作るのはこのためである。設計の多層化は機能に基づいて対象

要素間に part-of 関係を生成することであり、これについては一般設計とプログラム設計の差はなく、プログラム設計でも応用分野における知識やプログラムの機能的構造に関する知識の範囲内で全体機能の分割がトップダウンに行われる。これは例えば企業において必要な処理の単位が大きいとき、これを分割し、複数の人間で分散的に実行することを考えれば良い。次いで各層内の設計が breadth-first に行われる。

第 2 は可能な構造の中から条件に合うものの選択を自律的に行うことである。それには細部までの明示的表現とその処理が必要であり、(a) 要素の組み合わせ構造

(グラフ構造)の生成と、(b) 生成された構造の中から条件に合うものの選択、を自律的に行うことになる。前者はアルゴリズムで行われるが、後者に付いては選択の知識が必要である。(b)の機能が充実していれば、(a)ではあらゆる可能な構造を生成することも可能である。

人間が行う場合、経験に基づいて巧みに構造を作ってしまうため、選択の方法が明示化されていない。これを明示し知識化できれば候補構造の絞り込みを自動的に行うことが出来る。ただし一つに絞り込まれる保証はないため、最終的には最適に近いものを選ぶ手段としてのシミュレーションが必要になる。今日、それを開発手順に含まれているものに組み込み型のプログラミングがある。そこでは HILS (Hardware in the Loop Simulator) と呼ばれるシミュレータが不可欠な要素としてプログラミングに含まれる [HAN96]。このように候補構造の生成と絞り込みおよびシミュレーションの方法を自律化することによってプログラムの自律的設計が可能になる。

§3 整合的でない構造の除去

応用分野との対応を持たない基本プログラムは別にして、応用プログラム開発には分野固有の知識を使うので、それを構造の絞り込みに用いることができる。筆者らはこれについて、() 入力 出力結合によって生じる構造の整合性チェック、() 変数の変域関係による構造矛盾のチェック、() 変数の型チェックを拡大した意味チェック、などの可能性を試みている。

図 13 プログラム設計

() は可能な行為構造のうち構造的に整合的でないものを除去することによって絞り込みを行う。例えばある行為（関数）の出力の結合先がない構造は不整合構造である。入力 出力結合によって作られる構造は、最初はすべて整合的に作られても、構造内の一つもしくは複数の結合が(), () のチェックで消去された場合、その影響が構造内に伝播的に広がり、遂には不整合構造になる。不整合構造をすべて除去することにより、構造

の絞り込みが行われる．不整合構造による絞り込み効果は一般に大きい．

この構造不整合を引き起こすのは () , () のチェックによる個々の結合の除去である．各行為の入力，出力変数は整数，少数などの一般的な型のほかに問題に応じて一定の変域・値域を持つ．結合される行為間でこの変域・値域間に一定の関係が保たれねば成らない．() ではそれが保たれないものの結合が除去される．更に情報処理の基本関数は可能な限り分野の固有性を除いた普遍的な機能を果たすものとして開発され，変数の型も数学的な定義に限定されていても，これを現実の問題に応用する際，分野の色が付く．この時点で変数は応用依存の物理的 (その他の) 意味を持つ．これが () である．意味はいくつかの型に分類される．外部変数が行為構造に入力された時，入力変数の持つ意味が処理内容に応じて変換され，出力変数の意味が定義される．結合される行為間で変数の意味型が合わないものは原則的には不整合結合である．簡単な例を挙げる．ある行為は，2 入力と，その積を求める数学的演算行為を持つとする．これは数学的な定義である．応用に際してその入力変数に「長さ」という意味型をもつ物理量が与えられたとする．この時，出力は「長さ×長さ」すなわち「面積」という意味型を持つ．もし，この出力が他の行為の，「面積」以外の意味型を持つ変数，例えば「重さ」を表す変数に結合されていたら，この結合は不整合であり，除去される．

これは物理における次元解析の概念であり，直交的な基本概念から基本の意味型記号が定義され，それから複合概念の意味型が表現される．例えば， L ；長さ， M ；質量， T ；時間を基本概念とすると， L^2 ；面積， L^3 ；体積， $L \cdot T^{-1}$ ；速度 $L \cdot T^{-2}$ ；加速度， $M \cdot L \cdot T^{-2}$ ；力，などである．この概念を物理的対象以外にも拡張することを試みる．例えば P ；1 単位当たり価格， V ；量，とすると， $V \cdot P$ ；価格である．行為構造は前もって準備されている要素行為から構成されるものとし，要素行為を定義する時に入力・出力間の意味的關係をもたらし構造關係を，例えば，出力 $i = \text{入力 } 1^P \cdot \text{入力 } 2^Q \cdots \text{入力 } m^r$ の様に表して，行為の付加情報として準備しておくことができれば，この入力に意味コードを代入して出力の意味コードが容易に求まり，このチェックが可能になるであろう．以上の議論は応用プログラム開発に際し，プログラムという具体的な特性を持たない (抽象的な) ものを応用分野に結び付ける際に，応用分野の物理的な性質等を反映させることによってプログラムの開発を助ける方式を示したものである．

これは一つの試みであり，筆者らはこの一部を実験的に確かめたが，今後の研究に俟つところが大きい．この問題はソフトウェア開発を含めて，上流の問題解決から最終解 (プログラム開発の場合はコード生成) まで，一貫して行う方式が必要であることを示している [21] と言

う点で今日の情報技術全般の問題であることを示す例として用いたものである．

5. 言語とシステム構成例

現実には生じる問題は多くの分野にまたがり，多様な概念の複合体として現れる．人間が問題解決できるのは，これら多様な概念を理解し適切に利用しているからである．予見できない問題を含め，人間の問題解決を全的に支援する新しい情報システムは，人間と，人間が扱う対象に関わる多様な概念を現実にあわせて複合的に表現し処理可能にせねばならない．それには多様な基本概念を記述し，かつ処理する言語が必要である．

これまでの例からも容易に想像できるように，この言語は様々な概念を表す記述力が必要である．これにはどのような基本概念の表現が必要であるかを，応用の分析を含めて検討せねばならない．筆者らは可能な範囲の分析を通して，そのような実験的言語を開発し，それを用いて実験を行った．これまでに述べてきた問題解決システムの基本は概念的モデルにあり，モデル内の行為や属性は宣言的に記述されることによって随時新しい行為や属性を付加・削除できることが重要な特性になっている．従ってこの言語は宣言的言語であることが基本条件である．同時に，モデルにおいて構造の概念が重要な意味を持つ．何故なら問題解決の基本は機能・構造關係の処理にあるからである．従って言語は構造の記述能力が高いものであることが要求される．概念モデルは主体・行為・対象からなる概念ユニットを基本に構成されるが，この要素ごとに階層構造が作られる．行為の階層はメタ行為の概念を表しており，この表現にはメタ記述が必要になる．これも言語への要求になる．

この言語記述は処理可能でなければならず，そのための処理系が必要である．宣言的言語であることから，この処理系は推論を主体としたものになるが，単純な記号マッチングに基づく推論エンジンでは不十分で，内部に構造の処理を含む高度の処理系が要求される．このような記述・処理システムとして筆者等は KAUS (Knowledge Acquisition and Utilization System) と名付けたシステムを開発した．KAUS はこれまで述べてきたモデル化方式，問題のモデル表現 (概念構造)，知識の表現，問題向き知識の収集方法，問題分割・分散などの諸概念を表現できることを目標として進化させてきたシステムである [OHS 85, YAM 95, YAM 00]．これを用いて筆者らが開発してきた実験システムの概要を図 14 に示す．このシステムは KAUS を前提にして始めて実現が可能になったものである．このシステムを用いて基本概念の実証実験を行った．結果はこの方法の正当性を示すものであった．

図 14 新情報システム構成図

6. むすび

問題の複雑化、大規模化は現代の大きな特徴であり、それに誘起される問題は将来社会の最大問題の一つになる可能性がある。複雑化の傾向にいち早く反応しているのは経済分野で、対応策が模索されている[GUN 00, DIA 97]が、その原因である社会組織の複雑化をもたらした最大の要因は急速な技術発展にある。そして技術やそれに関わる人間を含む管理組織の複雑化に人間が対応できなくなっている。近年発生している大型システムの事故の多くはここに有ると考えられる。その対応を急がねばならないが、このような問題の複雑化、大規模化には新しい情報技術で対応するほかない。

問題解決はすべて自動化される訳ではないから、必ず人間が関わってくる。実世界では問題解決を多くの人が分担する方式が一般化している。この全体が問題解決の構造を表す。この構造は一度でうまく作られる訳ではないため、しばしば再構築が行われる。再構築に応じて人

の移動が伴ったりする。これまで人間が行う問題解決がうまく行われてきたのは、このような動的な概念構造の構築、修正、再構築が人間の能力の範囲内で可能だったからでもある。このような複雑な問題解決に情報システムを利用するには、情報システムがこのプロセスを制約することがないように形で開発されることが不可欠である。しかし問題の大型化によってこれを満たすことが困難に成ってきている。

問題解決に情報システムを利用するということは、問題解決の構造をコンピュータ内に表現し、実行することである。これまではそれをコンピュータの仕組みに基づいて、プログラムという形式で問題解決の構造の一部を表現してきた。コンピュータ内の表現と現実の問題解決の構造では大きな差がある。この差が大きい程、コンピュータ化が困難になり、コンピュータの表現でカバーする範囲が狭くなり、コンピュータ化の効果が減少する。このような状況に情報技術面で対応するためのアプローチとして、オブジェクト指向やマルチ・エージェント・システムなどのパラダイムが出現した。表面的にはこれらの方式で表現されたものは人間の問題解決方式と似ているが、概念構造を作る時の動的な問題解決過程は、現実の世界で行われているものと、これらパラダイムを用いてコンピュータ内で表現されるものとの間には大きな相違がある。そのため、情報システムの専門家が間に入らなければならない。

問題解決の中に情報システムの専門家が入ることによって、無事システム開発が行われている間は良いが、情報システムの専門家は必ずしも実世界の問題に関する専門家ではないから、常にこの間のギャップによる誤解が付きまとい、開発されたシステムの正当性が保証されない。問題が大規模・複雑になるほどこれは大きな問題になる。実世界での上記の問題解決プロセスに通じたユーザが自身で情報システムを構築することが理想である。

これに必要なのは正しいモデルの概念である。複雑・大規模な問題解決には、関連する多くの概念を包括的に表すモデルの作成が不可欠であるが、このような統合モデルの研究はこれまでなされておらず、一部実践として情報化のためのビジネス業務のモデル化の試みがなされたに過ぎない[GOT 97]。

本稿では前半で問題を正しく表現することの重要性と解の正当性を保証する方式に付いて述べ、後半ではそれを実現するために、実世界で行われるプロセスに適合する情報システム開発方式として、人間が問題を概念モデルとして表し、柔軟に定義可能な問題解決ブロックを用いて、概念モデルと同形の情報システムをビルディング・ブロック方式で自律的に作り上げる方法とその為の新しい情報技術の研究を行った。ブロック内では知識処理が行われ、概念モデル内で置かれた位置に応じて定まるブロックの役割(機能)は、与えられる問題のモデル

に基づいて、その問題を解決する上で必要な知識を収集することによって達成される。これによって柔軟で動的な構造化を保障することが出来る。このような方式は新しいものであるため、未だ多くの課題を残しているが、方式として実現可能であることは実験的に示されている。この実用化にはこの基本構想を充実するための、周辺ソフトウェア整備が必要である。

最後に付言するが、今日ソフトウェア開発に関してモデリングの概念に関心が高まっている。この方法は目的とするソフトウェアを生成するために、対象の必要な範囲あるいは側面をまずモデル化することによって開発の見通しをつけるアプローチと言ってよい。モデルは一過性の存在であり、異なるソフトウェア開発間で共用性は乏しい。これはソフトウェア開発を単独の閉じた行為とすることを原則とするからで、モデルと言う中間的な生成物の比重を減らすことが重要である。この事情は多かれ少なかれ他の開発問題でも同様である。

本稿の考え方は基本的にこれと異なる。問題ごとに一過性のモデルを作る方式は、今後技術面からも、トータルなコストの面でも困難になり、多くの問題に共通の基盤となるモデルの構築法を与えることによって、資産としてのモデルと、それに関連して体系化される知識を共有する方式が今後不可欠になると言うのが本稿の立場である。この方式を立ち上げるためには初期の投資が大きいため、組織による開発が必要になる。

参考文献

- [ARA 01] 新谷虎松；特集「マルチエージェント技術における新しい可能性」，人工知能学会誌，Vol.16, No.4(2001)
- [DIA 97] 週間ダイヤモンド編集部，ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス編集部共編，京都大学経済研究所・複雑形経済システム研究センター協力；複雑形の経済学[入門と実践]，(1997)
- [GOT 97] 後藤靖国；業務知識と情報システムーモデル・統合業務システム，講談社出版サービスセンター，(1997)
- [GUN00] グンター・パウリ（近藤隆文訳）；アップサイジングの時代が来る，朝日新聞社，(2000)
- [HAN 96] H. Hanselmann; Hardware-in-the-Loop Simulation Testing and its Integration into a CACSD Toolset, IEEE Int. Symp. Computer-Aided Control System Design, (1996)
- [HUH 97] Readings in Agents (Edited by M. N. Huhns & M. P. Singh), Chapter1; Agents and Multi-agent Systems, Themes, Approaches, and Challenges, (1997).
- [IPJ 04] 情報処理 特集 モデリングとツールを駆使したこれからのソフトウェア開発技法 モデル駆動開発手法を中心として，情報処理，Vol.45, No.1, 通巻 467 号，(2004)
- [KEY 02] Kevin L. Mills and Hassen Gomaa; Knowledge-Based Automation of a Design Method for Concurrent Systems, IEEE Trans. On Software Engineering, Vol.28, No.3, (2002)
- [KON 01] 河野浩之；特集「Web システムにおける情報獲得支援技術」，人工知能学会誌，Vol.16, No. 4, (2001)
- [MIZ 99] 溝口理一郎；オントロジー研究の基礎と応用，人工知能学会誌 Vol.14, No.6, (1999)

- [MUR 01] G.C. Murphy, D. Notkin and K.J. Sullivan; Software Reflexion Models: Bridging the Gap between Design and Implementation, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 27, No.4, (2001)
- [OHS 85] S. Ohsuga & H. Yamauchi ; Multi-Layer Logic -A Predicate Logic Including Data Structure as Knowledge Representation Language, New Generation Computing, Vol. 3, 403-439, (1985)
- [OHS 96] S. Ohsuga ; Multi-Strata Modeling to Automate Problem Solving Including Human Activity, Proc.Sixth European-Japanese Seminar on Information Modelling and Knowledge Bases, (1996)
- [OHS 98] S. Ohsuga ; Toward Truly Intelligent Information Systems - From Expert Systems To Automatic Programming, Knowledge Based Systems, Vol. 10, (1998)
- [OHS 99] S. Ohsuga ; A Modeling Scheme for New Information Systems -An Application to Enterprise Modeling and Program Specification, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (1999)
- [OHS 01] S. Ohsuga ; ; How Can AI Systems Deal with Large and Complex Problems? International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol.15, No.3, (2001)
- [OHS 01b] S. Ohsuga and H. Ohshima; A Practical Approach to Intelligent Multi-Task Systems - Structuring Knowledge Base and Generation of Problem Solving System, 11th European-Japanese Conference on Information Modelling and Knowledge Base, (2001)
- [PAO 02] M. Paolucci, T. Kawamura, T.R. Payne and K. Sycara ; Semantic Matching of Web services Capabilities, Proc. 1st Semantic Web Conference (ISWC002), (2002)
- [ROS 97] F. H. Ross; Artificial Intelligence, What Works and What Doesn't ? AI Magazine, Volume 18, (1997)
- [SYC 98] K.P. Sycara; Multiagent Systems, AI Magazine, AAAI, Summer , 79-92, (1998)
- [WAY 94] W. Wayt Gibbs; Software Chronic Crisis, Scientific American, Volume 18, No.2, (1994)
- [YAM 95] H. Yamauchi ; KAUS6 User's Manual, RCAST, University of Tokyo, (1995)
- [YAM 00] H. Yamauchi and S. Ohsuga ; A Method and Language for Constructing Multi-agent Systems, International Symposium on Methodology of Intelligent Systems (ISMIS), (2000)
- [YAT 99] 山口高平編；論文特集「オントロジー研究の基礎と応用」人工知能学会誌 Vol.14, No.6, (1999)
- [YOS 03] 吉岡真治編；特集「Intelligent Manufacturing Systems:IMS」，人工知能学会誌 Vol.18, No.2, (2003)

〔担当委員：溝口 理一郎〕

2003 年 10 月 16 日 受理

著者紹介

大須賀 節雄（名誉会員）

1957 年東京大学工学部航空学科卒業，富士精密工業株式会社入社，1961 年東京大学航空研究所助手，1966 年東京大学宇宙航空研究所助教授，1981 年東京大学工学部境界領域研究施設教授，1991 年東京大学先端科学技術研究センター長，1992 年東京大学学際工学専攻教授，1995 年東京大学定年により退官，早稲田大学理工学部情報学科教授，2000 年早稲田大学理工学研究科客員教授，2003 年早稲田大学退職。知識科学，知能システム，データからの知識発見，自動プログラミング等に從事。