

## 建設生産における知識の体系化に関する研究

—IMS国際共同研究プロジェクトにおける研究成果とVirtual Constructionの提案—

中村裕幸 (技術研究所)	三根直人 (技術研究所)
社本康弘 (技術研究所)	赤川敏 (技術研究所)
堀内澄夫 (技術研究所)	

## §1. はじめに

通産省が主催するIMS (Intelligent Manufacturing System) は、高度な製造技術を日米欧で共有することによる国際貢献を通じて、世界各国の製造業の直面している構造的な課題を解決することを目指している。そのために、将来、国際共同研究に移行することを前提として、1990年より国内先行研究が開始された。また、1992年からは国際共同研究への移行準備が進められ、1993年には国際共同研究の本格研究遂行に必要な基礎的な資料を得るために、フィージビリティスタディー (以後、FSと略す) が実施された。FSではテストケースとして6つのコンソーシアムが生まれ、1年間研究を行なった。テストケースに対して国際技術委員会が行なった評価は極めて良好な結果で、1994年2月にハワイで行なわれた国際運営委員会で、本格研究への移行が決定された。

清水建設は4つのプロジェクトに参加しており、このうち3つは国内先行研究、1つは国際共同研究である。本報告は国際共同研究に関するもので、FSにおいて清水建設の行った研究成果をまとめたものである。本報告は3部より構成されており、第1部 (§2.~§3.) はIMSの概要、第2部 (§4.) では国際共同研究において筆者らが行った研究成果の概要について述べる。第3部 (§5.) では、第2部で得られた研究成果を踏まえ、約1年後に開始される本格研究の基本概念となるVirtual Constructionについて説明する。

## §2. IMSプロジェクトの概要

## 2.1 IMSとは

IMSは、日欧米加豪の5つの地域が参加する国際

共同研究プログラムである。国内的には1988~89年にかけて行なわれたFAビジョン懇談会の席上で、当時東大工学部長であった吉川弘之によって提案された<sup>1)</sup>。このプログラムの目的は、受注に始まり、開発、設計、生産、物流、経営管理に至る製造業の生産プロセスにおいて、各装置・ラインを自律化させ、これらの自律化した装置・ラインが全体として相互に協調し合う形の統合を実現することである。天然資源の枯渇、環境破壊、地域間の貿易不均衡などの現在の製造業を取り巻く状況に鑑み、新たな製造業のパラダイムを見出すために、製造技術に関わる研究開発の国際的な協調を行なうという点がこのプログラムの特徴である。

具体的には、1990年5月にワシントンで開かれた第2回日米科学技術協力協定高級委員会においてIMSに関する日米協力を同協定の枠組みの下で行なうことについて合意を得た。その後何回かの会議を経て、1992年2月、トロントで行なわれた第1回国際運営委員会において、FSの実施を決定した。FSでは、委員会による評価の下、具体的な国際共同研究プロジェクトとしてテストケースを実施することを取り決めた。同年7月ストックホルムで行なわれた第2回国際運営委員会において、テストケースに取り組むコンソーシアムへの参加募集を開始した。

日本国内におけるIMS推進の中核機関として、1990年4月、(財)国際ロボット・FA技術センター (略称: IROFA) 内に「IMSセンター」を新たに設置した。IMSセンターでは、以下のようなメンバー制を導入している。

- ①コアメンバー：実際の研究開発等IMS構想を中核となって推進する企業 (1993年6月現在65社)
- ②サポーティングメンバー：IMS構想の趣旨に賛同し支援する企業 (同18社)

受託業務名	パートナー名
1. プロセス工業におけるクリーンな製造	ICI Engineering (EC), Ciba-Geigy, VTT, KCL, Du Pont, Dow Chemical, Abitibi 東洋エンジニアリング、東工大、帝大、ほか
2. グローバル・コンカレント・エンジニアリング	Northern Telecom (Canada), CSIRO, AATA, MM Cables, Transfer Tech. Group, Syntax, Ford, de Montfort U. NCSU, IBM, SMC, Cal. Polytech. ほか
3. 21世紀を指向したグローバル生産のための企業統合 (Gloeman21)	British Aerospace (EC), Toronto U., HUT, CMU, 東洋エンジニアリング、京大、東大、電総研、竹中工務店、トヨタ自、日本IBM、マツダ、リコ、横河電機、ほか
4. ホロニックな制御システム：自律形モジュールとその分散制御のシステム構成要素技術	Allen-Bradley (USA), HMP, ARC, U. Calgary, IPA, TRA, VTT, UTC, CMU, 日立製作所、慶応大、神戸大、東芝、安川電機、日立精工、フナツク、ほか
5. 迅速な製品開発	United Technologies (USA), Pratt&Whitney, NRCC, ETS, EPM, U. West Ontario, Daimler-Benz, Mercedes, PPK, IPA, Sandia National Lab. PTI, MIT, CMUほか
6. 知識の体系化：設計及び製造のための構築システム (GNOSIS)	三菱電機 (日本), 九工大, 東大, 東工大, 清水建設, 鹿島, 日産自, 富士ロックスARC, U. Calgary, ADEPA, IPA, Cambridge U., IBM, ABB, VTT, Deneb ほか

注) パートナー名の先頭は各プロジェクトのリーダー

表-1 国際FSテストケースの一覧表

## 2.2 IMSを構成するプログラム

現在、IMSプログラムは国内先行研究と国際共同研究の2種類のプログラムで構成されており、国内先行研究はいずれ国際共同研究に移行することを前提としている。1993年度時点では、国際共同研究はFSの段階であり、6つのプログラムについてテストケースを行なった。この成果を受けて、現在、本格研究に向けての準備が行なわれている。表-1に1993年度に行なわれた国際FSテストケースの一覧表を示す。

同表に示すように、日本が参加しているプログラムは表中で1,3,4,6の4つである。

このうち、日本がリーダーを務めているプログラムは6番目の「知識の体系化」であり、筆者らはこれに参加している。

## §3. 「知識の体系化：設計及び製造のための構築システム (GNOSIS)」プロジェクト

### 3.1 概要

現状までの生産技術は種々の形態で生産に寄与し、人類に貢献してきた。しかし、その製品自体についていえば、その概念作りから最後の廃棄までのライフサイクル全体で、資源・環境問題、廃棄物問題などについて十分に配慮しているとは言い難い。したがって、現在の生産技術はグローバルな視点に欠け、結果として矛盾の多い問題対処戦略になっている。そのため、1つの対策が結果として別の新たな問題を引き起こす原因になることも少なくない。

ここに、生産技術においては製品のライフサイクル、地球規模及び業実的な視点が必要となる。設計・生産知識を利用し、現代の技術と組合せてこれらの問題を解決することが本プログラムのねらいである。しかし、現状では生産知識の多くは必ずしもすぐに利用できるように組織化、形式化されている訳ではないため、これらの大規模かつ業実的な問題を解くことは難しい。知識の体系化という手段を用いて、応急処置的な政治規制や利用者への耐乏の転化ではなく、技術開発で問題を解決することをねらっている。

### 3.2 研究の枠組み

GNOSIS (ギリシャ語で「体系化された知識」の意)の長期目標はポスト大量生産パラダイムの実現に有効な技術開発を行なうことである。ポスト大量生産パラダイムの実現においては、量から質への転換によって経済成長を維持できる方策を模索する必要がある。この目的を達成するために、「やわらかい機械 (システム)」といった新しい概念を提案した。これは、リサイクル、部分取替え、自己修復、自己組織化等によって、無制限の長さのライフサイクルを持った機械 (システム)である。やわらかい機械を実現するために、コンフィギュレーション管理システム、コンフィギュラブル生産システムなどが必要となる。これを有効に機能させるために、それぞれの領域の知識を体系化するための、良く構成され統合された情報基盤が必要となる。

図-1は研究計画の全体の枠組みを示しており、コンフィギュレーション管理システムとコンフィギ

ュアラブル生産システムは、知識の体系化から発展し、やわらかい機械の実現とポスト大量生産パラダイムの目標設定に寄与する。

図-1に示した技術的な研究課題をそれぞれテクニカルなワークパッケージ (Technical Workpackage: TW) とした。また、プログラムを遂行するために必要な管理的なワークパッケージをメタ

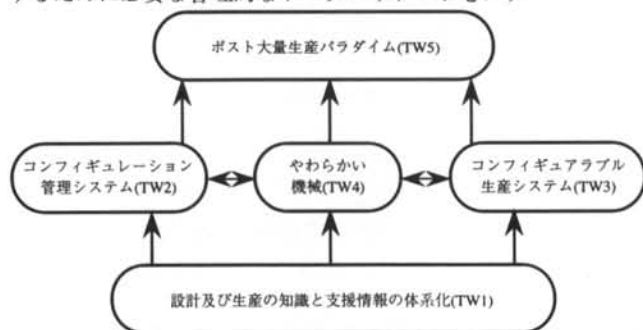


図-1 研究に枠組み

ワークパッケージ (Meta Workpackage: MW), プログラムの中で言葉の誤解を避けるために用語を定義するための、定義ワークパッケージ (Definition Workpackage: DW) を表-2のように設けた。

## §4. 清水建設の研究内容

### 4.1 研究の課題と目的

#### 4.1.1 建設業における生産をめぐる課題

日本の大手建設業者は製品の価格と品質を向上させることによりその競争力を高めてきた。ここでいう価格とは初期投資を、また品質とは設計、耐久性、安全性等を意味する。

最近のエレクトロニクス技術の進歩により、建築設備類の進歩は非常に早い。一般に新しい設備は使い易く、維

ワークパッケージ名称	作業内容
(1) MW1: プロジェクトの総合的な調整	ワークショップの組織化 全般的なプロジェクト管理
(2) MW2: 成果報告	IMS事務局への報告 テストケースの結論の誘導 将来のIMSの研究計画にとって重要な課題の明確化 国際的な刊行物の編集及び発行 標準化関連機関への報告
(3) DW1: 用語の定義	専門用語の定義、プロジェクト内で使われる用語の定義 テストケース・デモンストレーションの定義
(4) TW1: 設計及び生産の知識と支援情報の体系化	設計及び生産の機能的知識の定義 知識の体系化のための研究環境の確立
(5) TW2: コンフィギュレーション管理システム	コンフィギュレーション管理システムの先端技術の調査 コンフィギュレーションにおける問題の定義と定式化 コンフィギュレーション管理のソフトウェアとモデルの開発
(6) TW3: コンフィギュアラブル生産システム	コンフィギュアラブル生産の管理方式 スケジューラを用いた生産管理 管理とスケジューリングのシステムを評価するための工場シミュレータ
(7) TW4: やわらかい機械	製品知識と知性 再構成可能な製品と機械加工 自律制御 自己修復と自律的性質をもった製品
(8) TW5: ポスト大量生産パラダイム	将来のシナリオを体系化するための枠組みの確立 ポスト大量生産パラダイムに対する各パートナーの見解の比較と統合

表-2 各ワークパッケージの名称と作業内容

持・管理費用も少ないため、最近では建物の寿命以前に建て替えが行なわれる場合が多い。一般的には建物寿命は60年、設備寿命は20年程といわれている。最近では中規模のオフィスビルを中心に設備の寿命に合わせた建築が多くなっている。その結果、建設・解体の頻度が上がり建設廃棄物が急増している。一方、東京などの大都市を中心に廃棄物の処理能力は既にほぼ満杯状態となり、建設廃棄物の急増は大きな問題となっている。

以上のような現状認識から、筆者らは建築設備と建物の寿命の調和、および建設廃棄物とその処理能力の調和が今後の我が国における建設業の重要な問題であると考え、これを活動テーマとした。

この1年間の活動を通して上記のような問題が建設業のみならず他の産業においても顕在化していることが分かった。他産業での主な課題は「他社に先駆け、いかに素早く消費者の要望に応えるか」、すなわち「より短い製品開発期間」と「環境問題への対応」であり、その対応策はより発展した形のライフサイクルである。建設業においてはその長い商品寿命のおかげで他産業で問題となっている製品の開発期間はあまり問題にならない。

#### 4.1.2 研究の目的と項目

IMSプロジェクトには多くの製造業が参加しており、生産の統合化を考える上で建設業として学ぶべきものが多い。GNOSISの最終的な目的は、地球環境にやさしい人工物を提供する技術を開発することである。そこで、筆者らは各ワークパッケージに対し、以下のように取り組んだ。

- ①「設計・生産知識の体系化と支援情報の体系化」(TW1)では、利用可能なツールを適用し、建設における概念構築から施工に至るまでの一連の知識及び情報の体系化を試みた。
- ②「コンフィギュアラブル生産システム」(TW3)では、建物の基礎を生産する際の施工計画に利用可能なツールを適用し知識のモデル化を試みた。
- ③リニューアルの具体例として、「やわらかい機械」(TW4)では、TW1,2,5において並行して行なわれている研究の総合的な例題として「再利用可能な基礎構造」を提案し技術的な検討を行なった。
- ④「ポスト大量生産パラダイム」(TW5)では、建物のリニューアル問題を取り上げ、LCC、LCO<sub>2</sub>、LCEnergy、更にLCEntropyなどの評

価指標を検討した。

## 4.2 FSにおける研究成果

### 4.2.1 設計・生産知識の体系化と支援情報の体系化

研究に参画している技術作業部会が協力し以下の作業を行なった。

- ①実際の設計および生産に用いるツールの評価
- ②現実の工業生産に対する要求項目の分析
- ③デモンストレーションのための、建築分野での具体的な例題の作成と、知識の体系化のコンセプトを示すために行なった例題の統合

以下に上記作業の成果について述べる。

#### 1) ツールの評価

建築生産に関する具体的な問題を用い、ツールの評価を行なった。知識ツールとしては、東京大学のSYSFUND、九州工業大学のXDSP、ヘルシンキ工科大学のDELTAを対象とした。また、前述の問題を視覚的に表現するのに有効と思われる3次元グラフィックシミュレーションツールである米テネブ社のQUESTを評価をした。評価の概略を以下にまとめる。

##### (a)SYSFUND<sup>2,3)</sup>

SYSFUNDは東京大学で開発された、オブジェクトの機能知識を扱う機能構造(Function Behavior Structure)モデラーを中心に、定性推論システム、知識ベースとその管理システム、機能冗長システムなど、幾つかのデザインサポートツールで構成されている。機能知識は、複数のオブジェクトや関係を継承したオブジェクトや関係として表わされており、構造的に記述される。このためこのシステムで使われる知識は読むことができ、したがって容易に修正できる。さらに、シンボリック(定性的)な知識を取り扱えるが、反面、数量的(定量的)な知識は取り扱えない。

##### (b)XDSP<sup>4,5)</sup>

XDSPは九州工業大学で開発された、DSP言語で記述されるスプレッドシートに似た設計支援ツールである。DSPはPROLOGを基にしたデータフロー型言語であり、約10個の基本的なプリミティブ(関数)によって記述されるリスト形式のデータを取り扱う。XDSPにおいて知識は、2つの部分に分かれた1つのフレームとして記述される。第1の部分は条件と検証であり、第2の部分は計算とデータベースの参照を含む手続きである。どのフレームの手続きが実行されるかは、1番目の部分で決定される。

知識の記述に用いる関数が少なく、言語そのものの理解が容易でありかつデータフローに基づいている。したがって、エキスパート自身によって全体の構成を考慮することなしに表現できるところから知識を記述することができる。これは同時に同じ分野の技術者にとって、記述された知識を理解することができ、これを再利用する事が可能であることを意味している。しかし、記述された知識の構成は構造的ではない。

#### (c) DELTA

DELTAはヘルシンキ工科大学で開発された設計支援システムである。特徴は、図面上の図形と対になった概念(シンボル)を階層的に記録し表示することによって、設計図書に描かれている物体の階層構造を表現できることである。例えば、1つの部屋は、天井、床、窓などの様々なサブセットのパーツで表わされる。この考え方は図形データのオブジェクト化、もしくは図形データのデータ継承といった概念を利用している。これを発展させると、ある階層のパーツデータの選択を促すような設計支援を行なうことができる。しかし、現時点では、知識ベースのサポートや推論機構は付加されておらず、一種の図形エディタとなっている。DELTA自体は、上記の概念を検討するためのプロトタイプであり、現実の設計業務に利用するためには、マンマシンインターフェイスなどの点で改善の余地がある。

#### (d) QUEST<sup>6)</sup>

QUESTは、米国テネブ社の開発した3次元工場生産シミュレーションツールである。QUESTのコンセプトは、工場生産のVirtual Reality化と生産単位の機能モジュール化にあり、後者の立場に立てば、フィンランド国立技術センター(VTT)の提案するVirtual Factory<sup>(註1)</sup>のコンセプトと共通性がある。

QUESTでは、まず3次元エディタで工場内で必要な機械の形状を作成し(必要に応じて、機械のキネマティック動作も記述する)、各種の機械の機能を定義する。次にこれらの仮想機械を、工場内にレイ

アウトし、工場生産のシミュレーションを行なう。仮想機械自体が、実際の3次元形状やキネマティック動作を再現するため、生産性と機械のレイアウトの両者を同時に最適化できる。またアニメーションによるシミュレーション結果の認知性も高い。

QUESTでは、機能定義や生産ラインの条件判断をPASCALに似た言語で記述することができる。この意味で適用範囲は広いが、ツールを最初に準備してある状況以外で使うには、かなりの専門知識が必要になる。またQUEST自体には最適化のための推論機構や知識ベースをサポートする機構はなく、全体のシステムを構築する上でこの点をどう判断するかが重要になる。

QUESTは工場生産に特化したシステムであり、建設施工計画に適用するためには幾つかの問題点がある。最も大きな問題は、建設施工では、建造物(製品)は動かずに、機械や人間が移動する。この形態は通常の工場生産と逆であり、QUEST自体に本質的な変更が必要になる。また建設施工では、人間の作業しやすさといった心理的側面が生産性に影響するが、作業空間という概念をシステムの中でどう捉えるかといった問題点も残されている。

#### 2) ポスト大量生産のための知識構造モデル

##### (a) 知識の階層

SYSFUNDやXDSPのようなAIツール研究や評価を通して、図-2に示すような知識の体系化の概念を提案した。この図は知識が定性的、定量的そして具体的の3つのレベルで表わせることを示している。住宅の設計における配置問題を例としてこの概念を説明する。先ず、住宅に必要な部屋をリストアップする。次に、定性的な機能、部屋間の関係、部屋に生じる物理現象を用いて、最適な配置計画を探索する。このプロセスは「定性的な設計」と呼ばれる。より一般的に言えば、これは知識の関係と知識システムの構造を用いたシンボリックなイメージを組み立てるプロセスである。

次に、シンボリックなイメージを定量的なモデル

(注1) ヴァーチャルファクトリー<sup>7)</sup>: 工場の生産ラインを生産管理ユニット(PMU: Production Management Unit)と呼ぶ単位で階層的に構成させ、この階層構造を利用して効果的に多品種の生産に対処できるよう、PMUの相反する統合的制御と自律分散化を図ろうとする考え方。最下位のPMUは製作機械であり、それら製作機械で構成される1本の生産ラインも同様にPMUとみなされる。従って、いくつかのラインで構成されるある生産機能全体もPMUである。

ここで言うヴァーチャルとは“仮想なるもの”という意味ではなく、ある製品を作るのに必要な期間だけそのための生産システムがPMUを基に構成されるといった“実体を持たない”という意味で使われる。この概念では制御システムが重要視される。すなわち、ヴァーチャルであるためには配置及び生産ラインの再構築と再設計を煩雑に行わなければならない。もしこの制御システムが搬送システムと効果的に組み合わせられると、要求される生産ラインを(現在使われている機械の能力による制約条件下において)どのようにも作る事ができる。ヴァーチャルファクトリーとは現在の工場生産と完全に自律化された生産の中間に位置する概念である。

に変換し、その定量的なモデルを用いてより詳細な配置を評価する。このプロセスでは、知識や例を記述した後、定量的なシミュレーションを行なう。このプロセスの主な目的は、分野固有のモデル化やツールを用いて隠れた知識や見えない知識を顕在化させることである。

最後の段階は具体的な設計である。この段階の主な目的は、作図や数値データの計算である。例題では、意匠、構造、設備などの作図を行なうことである。

(b) 人工物のライフサイクルのためのコンピュータ上の世界を示すコーン

コンピュータ上の世界における人工物のライフサイクルは図-3に示すように、設計、生産、メンテナンスの3つの段階で構成されている。定性的な知識の観点に立てば、それらは同一の概念モデルを固有の視点から見たものになる。生産やメンテナンス段階も、その段階の特徴を反映した前述の3つのレベルを含んでいる。メンテナンスにおける定性的な知識は、図-3に示すように設計段階より小さなものとなる。

コンピュータ上の世界は、図-4のように各レベル・各段階に対応する知識を持っている。それゆえ、

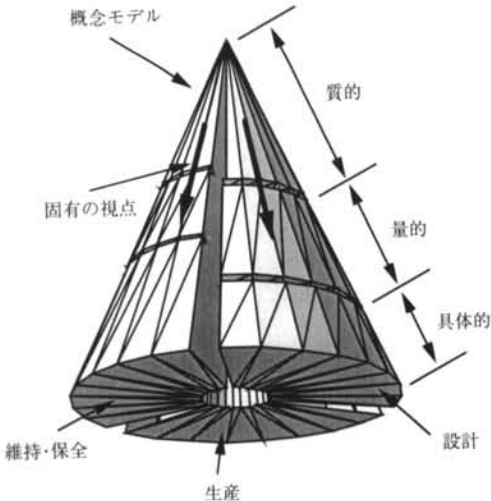


図-3 人工物のライフサイクルに関するコーンモデル

各産業分野の現実の知識の世界を示す円錐の形状は、円錐の頂部を除けばコンピュータ上の世界を示す円錐と同じになる。現実の知識の世界では、知識の円錐の頂部は背景知識の球に突き刺さっている。

(c) 異なった産業分野の知識構造

コンピュータの世界では、異なった産業分野の知

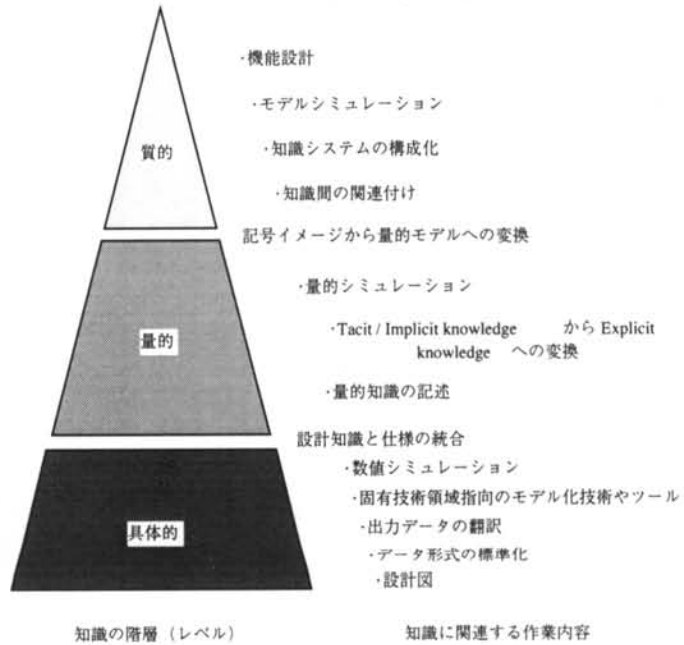


図-2 知識の体系化における三つのレベル

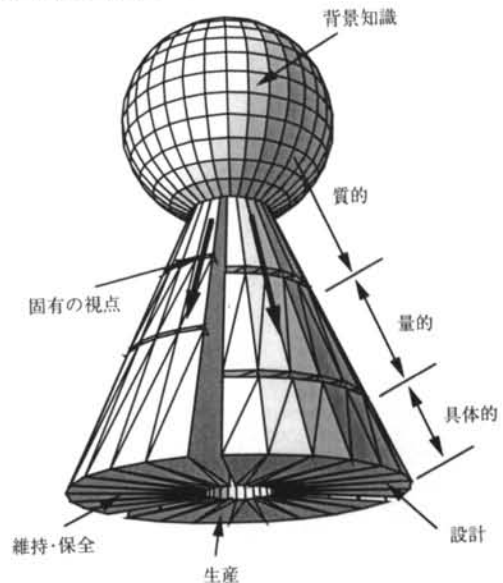


図-4 人工物のライフサイクルに関する固有技術の知識に関するコーンモデル

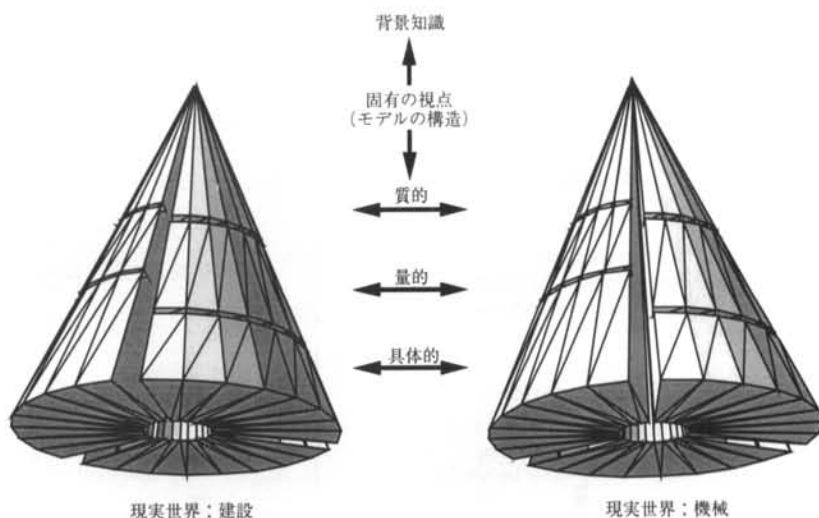


図-5 異なる産業における知識空間の類似性を表わすモデル

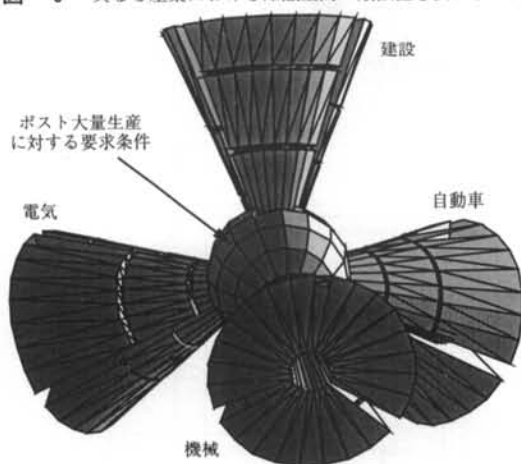


図-6 GNOSISモデル

知識構造の円錐はそれぞれ類似している。それ故、現実の知識の世界を記述したすべての円錐は図-5のように表わされる。この視点は、工業的人工物の間の1つのメタ知識である。

図-6は異なった産業での知識構造の関係を示したものである。先に述べた、背景知識の球が中央にある。背景知識の球は、GNOSISの世界におけるポスト大量生産のための要求項目と言え、社会における調和、人間に対する優しさなどを含んでいる。全ての産業は、この要求内容を表わす球を共有する。

#### 4.2.2 ポスト大量生産パラダイム

##### 1) 背景および現状認識

これまでの大量生産パラダイムではイニシャルコストが経済活動の主要な指標となっている。この指

標は人工的な価値を表現することはできるが、現状の経済システムのもとでは環境への関連を表現していない。そこで、筆者らは現在建設業が直面している環境問題についても適切に取り扱うことのできる指標を模索した。

現在の環境問題の根源は、あまりにも大量に生産していることにあるとの認識を得た。しかし、現状は自動化された大量生産ラインによるコストの低下を是としている。FMSはこの点をかなり改善し、またIMSはいくつかの改善案の1つとして高度なリサイクルの活用を提案している。

建設業としてもこの方向性が適当であるとの結論に至った。すなわち当初から建築設備のリサイクルを予定した建築物を建設することにより、その耐用年数を本来の建物寿命にまで引き延ばし、建設廃棄物の量を減少させることが重要であると考えた。以上がシナリオの概要であるが、これを実現するためには大量のデータを取り扱うことのできる適切な計画・設計ツールの開発が必須である。計画・設計ツールを使うにはコンピュータの活用が必須であり、また適切なリサイクル計画のためにはコスト以外の環境に対する指標の導入が重要と考えた。コンピュータを利用した計画・設計ツールに関してはGNOSISのTW1からTW4の成果が対応し、環境に対する新しい指標に関してはTW5の成果と考えた。

上記の関係は図-6に示したマルチコーンモデルと図-7を用いて以下のように説明することができる。同図に示す球形の部分はいわゆる「背景知識」を表わす部分で、その中心部には本研究の核となる

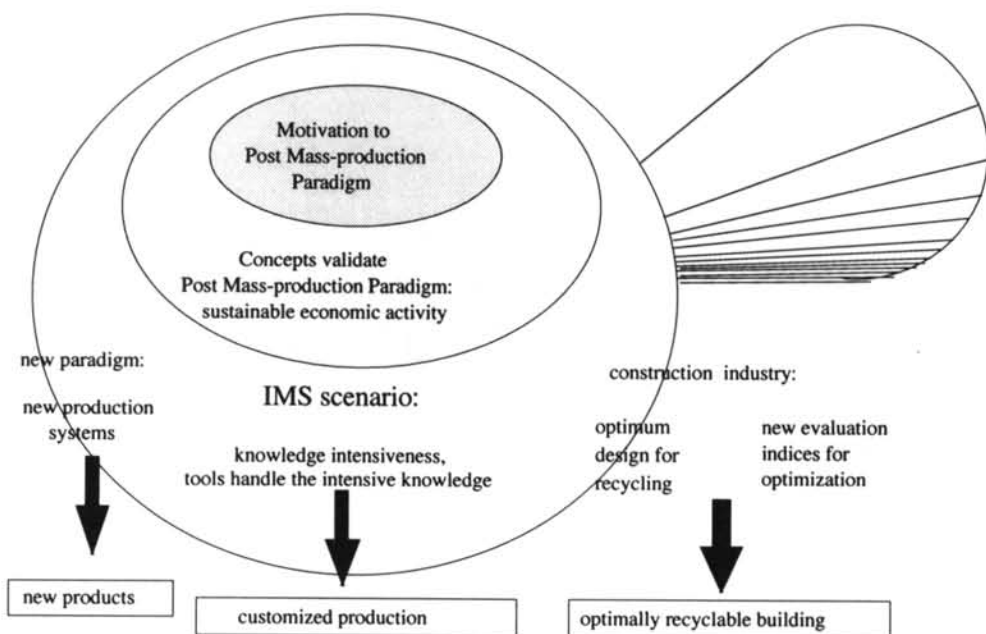


図-7 ポスト大量生産パラダイムの背景知識

大量生産パラダイムからポスト大量生産パラダイムに移行するモチベーションが存在している。その外側には、モチベーションを実現し得る社会・経済活動、例えば「持続可能な発展」の概念が位置している。一番外側には具体的な方策、例えば「ライフサイクルコスト」、「ライフサイクルエネルギー」、「ライフサイクル地球温暖化ガス」、将来的には「ライフサイクルエントロピー」といった複数の指標を提案した。

2) ポスト大量生産へのモチベーション

GNOSISは将来の生産パラダイムの実現を模索している。そのためには大量生産パラダイムからポスト大量生産パラダイムへという大きな変革を駆動する広範な認識が必要である。筆者らは現在のGNOSISにはこの点が欠如していることを指摘してきた。

パラダイムシフトを促すであろう認識としては、例えば「大量生産パラダイムではコストを下げるための過剰生産が多大な廃棄物を生み、次第に人類に不都合な環境変化を生じ始めた」といった定性的なものがある。しかしながら、この認識には何時どこ

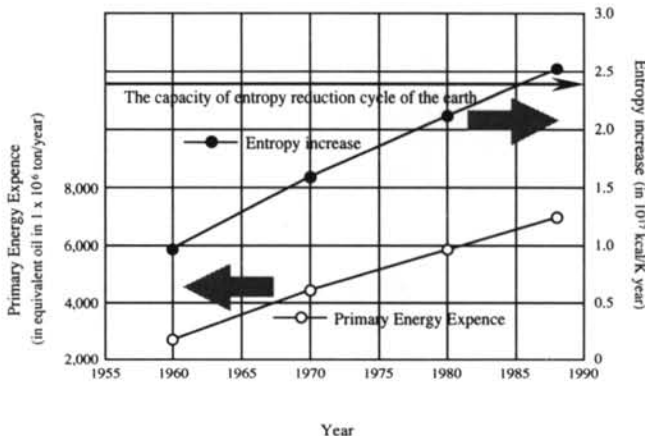


図-8 エネルギー消費とエントロピー増加の試算結果

でこのような不都合が生じ、今後どうなるかといった具体的な危機感が欠如している。例えば実際に温暖化による海面上昇といった現象をみるまではパラダイムシフトの強力な駆動力にはなり得ない。

そこで多少大雑把ではあるがパラダイムシフトを促すであろう定量的な試算の結果を図-8に示す。同図に示す試算は、次の仮定を基にしている。すなわち、地球の自然環境は大気の大循環により人類を含む生物の生産活動によるエントロピーの増加分を地球外へ放出し、地球としてはエントロピーの増加を克服している<sup>8)</sup>。そして、主に人類の生産活動に



よるエントロピー増加量が地球のエントロピー浄化サイクルの最大値を上回ったとき、地球上の自然環境は明確な変動を始める。

図-8には全世界での1次エネルギーの消費量変化<sup>9)</sup>と、これを基に適当な仮定により計算したエントロピーの年間増加量の変化を地球のエントロピー浄化サイクルの最大値と共に示してある。上記の適当な仮定とは、「1次エネルギーは全て20℃の水を造り出すために消費された」というもので、現実と比べれば過大な見積りである。しかしながら、この試算がエントロピーの増大を過大に評価しているにせよ、人類がなんら対応策を講じなければ、1次エネルギーの消費の増大に伴い遅かれ早かれ人類の生産活動によるエントロピー増加量は、地球大気によるエントロピー減少サイクルを上回ることを明解に示している。

### 3) ポスト大量生産パラダイムが理解されるために

人々が現在の地球の自然環境が上記のような末期の状態へ向かいつつあることを認識することができれば、この状況を回避するために必要な、社会・経済システムの変更を必要とするある種の駆動力が生まれると考えられる。このためには、まず上記試算の精度を上げることが必要である。次にその駆動力が破局以前に生まれたとしたら、できるだけ現在の生活水準を低下させずに済む対応策、例えば「持続可能な発展」に類似する社会・経済システムが必要となる。GNOSISはこのような時代背景において真価を発揮するもので、TW1-4とTW5は車の両輪のように相互に具体性を高めていく必要があろう。

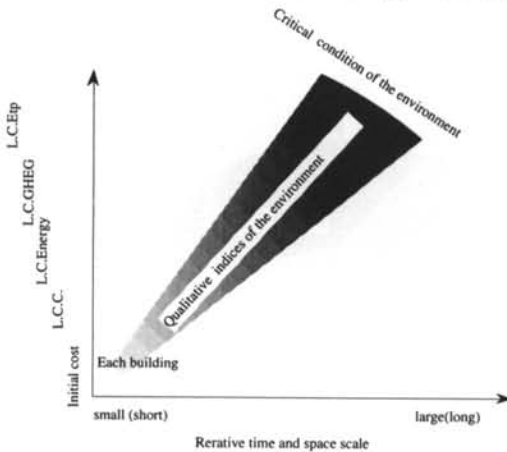


図-9 評価システム空間

### 4) リサイクルを実現し得るシステム

リサイクルという概念はなにも新しいものではない。しかし、IMSでいうリサイクルはより厳密な意味を持つ。当然のことではあるが、リサイクルのためのリサイクル、例えば、リサイクルのために過剰なエネルギー消費を伴うものなどはIMSでいうリサイクルではない。IMSでいうリサイクルには以下の4つが必要である。

- ①各産業界を横断する生産・流通知識の共通化を図るシステム
- ②リサイクルを実現するための主にハードな技術
- ③適切なリサイクルの限度を示し得る複数の評価尺度
- ④IMSの成果を適用できる社会・経済システム

大量生産パラダイムからポスト大量生産パラダイムへのシフトは多大な困難が予想される。このことを考慮すれば③で示した尺度は、導入の平易な「ライフサイクルコスト」から「ライフサイクルエネルギー」、「ライフサイクル温室効果ガス」、そして最終的には定量的な判断の可能な「ライフサイクルエントロピー」といった順で徐々に導入することが現実的であろう。また、図-9に示すようにこの導入順序は、その評価システムの評価する時間的、空間的広がりに適した順となっているため科学的にも妥当な順序と考えられる。

図-7で示したように、大量生産パラダイムに疑問を持つ人々に対して、GNOSISはポスト大量生産パラダイムの具体的な必要性を示す必要がある。このような認識のもとで、「持続可能な発展」といった社会・経済システムが受け入れられる素地を持つ。このような状況なしにはいかなるIMSの成果も社会に受け入れられることはない。

図-7で示したシナリオは、高度なAIツールを駆使した複数の評価尺度によるリサイクルの最適化なしには成立しない。最終的には、生産活動や生命活動による総エントロピー増加量と地球のエントロピー減少サイクルの許容量との定量的な比較が可能なシステムを確立して、最適化生産システムを構築することがポスト大量生産パラダイムの完成形態と考える。

#### 4.2.3 再利用可能な基礎構造

建設行為は自然の改変を伴うため、環境と切り離して考えることはできない。こうした建設行為が占める全炭素排出量は図-10に示すように30%にも達している。廃棄物の発生量を見ても18%を占めてい

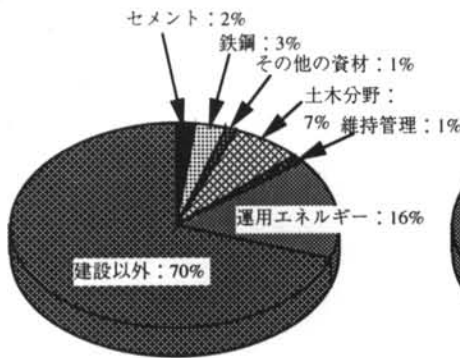
る。このように、建設行為は環境に大きな影響を及ぼしており、建築物に関してもできるだけリサイクル、再利用を考えねばならなくなってきている。

建築物は概略、地下躯体部分、地上構造部分、内外装部分、設備部分などに区分できるが、使用に支障を来すようになるとこの一部または全部を取壊し、要求に合った新しい建築物が構築される。例えば、電気などの設備は、性能が低下すると全体を替えるなどの措置が取られ、また内外装はリフォームなどが行なわれている。こうした建築物の改造・改装は地下躯体と地上構造とを除いた部分が主体である。

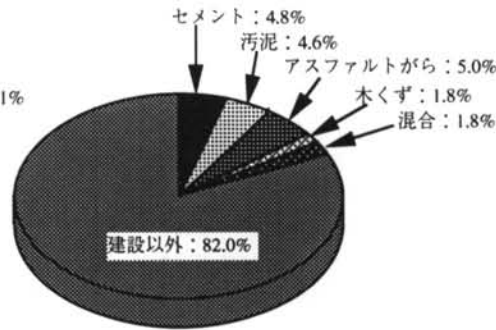
建築物のうちでも地下躯体部分は特に耐久性を重視して設計・施工されており、その品質は長きに亘って安定している。当社が建設したビルの基礎コンクリートを34年経過した時点で調査したところ、その健全性は全く損なわれていなかった例もある。し

かしながら、建築物を建替える場合には地下躯体も含めて旧建築物の全てを解体し、新たに構築し直すことが多い。新建築物の重量が大幅に増加する場合を除けば、健全な地下躯体は再利用できるはずである。コストもさることながら地下躯体の再利用はコンクリートがらなどの建設廃棄物の発生量を抑制するなど、環境面のメリットも大きい。

建築物のライフサイクルを通じてのコスト、エネルギー消費量を計画段階で評価し、設計に反映させる方法が近年とられるようになってきた。図-11は英国における小学校（建物の寿命を50年と仮定）のライフサイクルコスト<sup>10</sup>と、東京に建築する寿命30年の10階建てオフィスビルのライフサイクルエネルギーとを示している。学校では冷暖房や電気の使用量が限られているため運用に係わるコストが低い

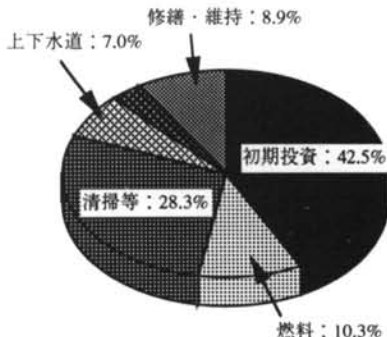


炭素排出量に関わる実態  
(昭和62年実績)  
(社) 建築業協会  
(社) 日本土木工業協会

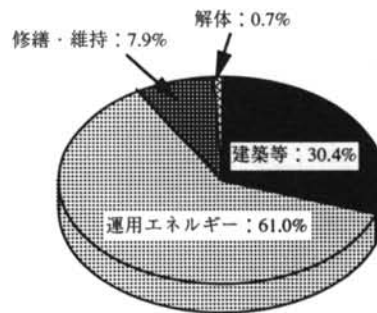


産業廃棄物に関わる実態  
(昭和62年実績)  
(社) 建築業協会  
(社) 日本土木工業協会  
OECD

図-10 建設行為と環境への影響



英国の小学校のライフサイクルコスト  
(建物のライフサイクル計画より引用)



東京のオフィスビルのライフサイクルエネルギー  
(10,000m<sup>2</sup>, S造についての試算)

図-11 建築物のライフサイクル分析の例

ルギーの約70%が運用で消費される。建物の使用目的や構造が異なっているほか、人的エネルギーを考慮していないなど両者は単純な比較はできないが、建設そのものの比率も大きい。ライフサイクル分析では建設～運用～解体に係わるコストやエネルギーを設計段階で検討し、トータルとして最も効率の良い構造や材料を選択する。

オフィスビルを例にとりてそのコストを概略的に分類すると、建設時のコストのうち約30%が地下躯体の構築に係わっている。それも土留めなどの仮設工事に多くの費用を要している。また建物全体の解体に係わるコストは一般的に総工事費の15%程度であるが、その中で地下躯体の比率は6割以上と高い。さらに建物の解体によって多くの廃棄物が発生しており、その大部分が地下躯体の構築に関係している。また法令上は廃棄物の取り扱いを受けていないが、地盤の掘削によって発生する残土は全国で1億トンにもものぼっている。

こうして見ると地下躯体の解体～再構築はコストと環境の両面から解決すべき課題が多い。既存建物の地下躯体を積極的に再利用することは環境への影響に大きく寄与すると考えられるが、再利用しなくとも、たとえばそれを撤去せずに新規建物を構築できれば大きな前進となる。

以上に述べた背景から、ポスト大量生産パラダイムに対するシステムの1つの在り方を示す例として、地下躯体の再利用の問題を取り上げた。

#### 4.2.4 地下躯体の再利用のメリットと課題

地下躯体は再利用のメリットが大きい。にも拘わらずそれが進められなかった主な理由は以下の2点である。

- ①地下躯体は上部躯体の柱の位置を考慮して構築されるが、新規建物の柱の位置は既存建物と異なる。
- ②既存建物の地下躯体の信頼性に関するデータが欠如している。

基礎の構築方法をはじめとして地下躯体の信頼性は大きく向上している。このため再利用に対する課題は主として①であり、新規建物の荷重を旧基礎にうまく伝達できない点にあると言って良い。

上記のメリットを利用した例としては、既存地下躯体を撤去せずに新規建物を構築した建物<sup>11)</sup>がある。これは本来の「やわらかい機械」とは言えないが、「やわらかい機械への移行」にとって大きな前進である。

## § 5. GNOSISに対する長期的取組

筆者らはGNOSISプログラムに対して、現在、長期的な研究プログラムを作成している。このプログラム全体を貫く基本的な概念がVirtual Constructionである。以下にVirtual Constructionの概念と、GNOSISにおける筆者らの研究計画について述べる。

### 5.1 Virtual Construction (VC)

建造物が造られると、長期に亘って人間や周辺環境に影響を与え続ける。建造物やその生産システムが、長期に亘る変化の中で周辺環境に適合してゆくためには、環境に対して適切に変容する必要がある。変容という言葉は、単に環境に適合するという進化の過程だけでなく、既存の建造物や生産システムが環境の変化に適応し続けるという建造物のライフサイクル全体をも含んでいる。

VCとは、このように進化および建造物のライフサイクル自体をプロセスとして捉え、変容するものであるとするものの見方である。ここで、VCの"Virtual"は、現実の建設行為に対して、知識の体系を中心とした概念の世界を意味し、現実と概念世界の両者は双方向的ダイナミズムを通して相互に適応しながら変化を続ける。そのために、常に変化する現実を反映し逆に現実を変容させる概念モデルと、これを可能にする柔軟な情報技術を構築する必要がある。こうすることによって、従来の固定的な生産形態にとらわれない、変容に柔軟に対応できる生産が可能となる。そのためには、建造物とその生産システムの進化、建造物のライフサイクルに対して変容するための技術と、様々なプロセスにおける固有の視点から必要な知識を再構築するための技術が必要となる。

近年、建造物を取り巻く環境や人間社会の意識は急激に変化しつつある。これらの変化は、構造的には何ら問題のない既存の建造物を無意味なものとし、時には公共のための道路や河川改修が、自然破壊と看做されることもある。このように、従来からの固定的な生産形態や建造物そのものは現代社会の要求とは必ずしも一致しなくなりつつあり、今後も同じように造り続けることは致命的な社会矛盾を引き起こす可能性をはらんでいる。また、建設生産は有限な資源を大量に消費し環境を変化させることから、環境に対する負荷を最小限に止めることが緊急な課題になってきている。このような社会の変化や要求

に適応した新しい建造物を生みだし、その建造物のライフサイクルを通して最適に変容してゆくために、Virtual Constructionは重要な概念である。

## 5.2 長期研究計画の概要

環境に適応し変容する建造物やその生産システムを実現するために、以下に示す課題について研究する。

- ① 建造物とその生産システムの変容性（変容を起こさせる能力）の追及
- ② 上記を支える知識の体系化
- ③ ポスト大量生産に適合させるための推論様式と制約条件（評価軸）の明確化

建物の変容性を高めるために、営業、設計、資材調達、生産、メンテナンス、リフォームなどの各段階での具体的な技術開発を行なうとともに、情報や知識の観点からもこれを実現させるための具体的な支援ツールやシステムを構築する必要がある。こ

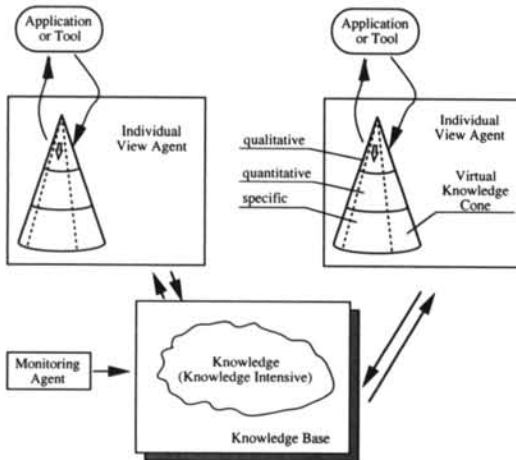


図-12 知識の再構築のイメージ

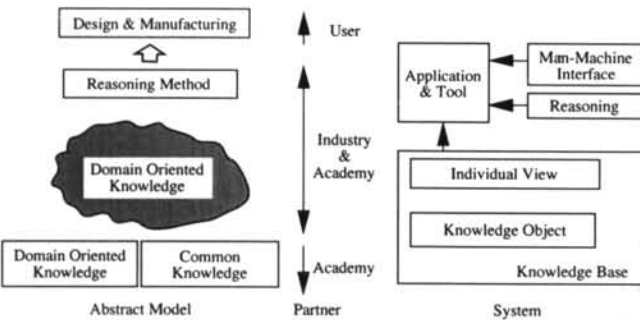


図-13 知識構造を支える知識の構成規則の関連イメージ

の研究課題では、設計や生産計画等の個々の問題を扱うだけでなく、それぞれの視点から知識を再構築するための手法が重要であり、これにはオブジェクトモデリングの技術が重要な鍵となる。

可変容性を高めるための具体的な研究として、設計 (Virtual Design)、施工管理・計画 (Virtual Management) などがある。短期的には、仮設構台計画、モジュール化生産システム、可変性の高い搬送システムなどのVCに関連した具体的な事例を研究する。

VCを支える知識の体系化に関しては、全体のシステムに関する研究と個々の技術的な課題に分けることができる。全体の構成は、図-12に示すように、中心に体系化された知識ベースがあり、これは形式的にはオブジェクト指向のデータベースで、必要に応じて分散している。各アプリケーション（またはツール）がIndividual View Agentによって、知識ベースを基にその視点から必要な知識構造を再構築する。Individual View Agentが再構成した知識は、定性的な知識から具体的な知識に至る知識のコーンのイメージで表わされる。具体的には、知識のコーンは、知識ベースに対するシンボリックリンクの構造で実現される。

このような知識体系を作る上での要素技術の課題は、知識構造を支えるための知識の構成規則を明らかにすることと（図-13）、Individual View Agentと知識ベース間の通信のためのプロトコルを明らかにすることである。プロトコルをマクロ的に見れば、物理レベル、情報タイプレベル、意味的レベルの3つの階層を持ち、意味的レベルは、知識の構成規則と密接な関係を持っている（図-14）。

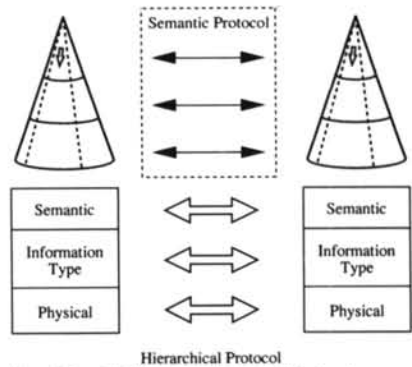


図-14 階層構造に対応する通信プロトコルのイメージ

短期的な研究課題として、図-12のシステム全体のプロトタイプを作り、個別の問題の知識の体系を記述し、領域固有の知識の構成規則を明らかにする。そのために、設計、施工、維持管理など具体的な事例を対象に業務を分析し、知識の体系化を試みる。

このような新しいパラダイムはポスト大量生産パラダイムの目指す「高い生活水準や生産水準を維持した上でのマクロ地球環境の保全」を可能にし、さらには、社会・経済界に受け入れられる必要がある。筆者らは建設業に特有なVCの概念を基本的な考え方として具体的研究を進めIMSの発展を図るほか、第3の課題に対してこのような社会・経済構造のあり方や、来るべきパラダイムの新しい評価尺度の提案を行なう計画である。

## §6. おわりに

IMSプロジェクトの概要及び国際共同研究フィージビリティスタディーにおける清水建設の研究成果を中心に述べた。1993年度に行なったフィージビリティスタディーの成果を受けて1995年1月から10年間の本格研究を開始すべく、現在、準備が進められている。フィージビリティスタディーの段階では6つの国際共同研究がテストケースとして実施され、本格研究へ向けての準備も、基本的にこの6つのコンソーシアムを中心に進められている。

当社はGNOSISと呼ばれるプロジェクトに参加して1年間活動した。今後は、この成果を踏まえて、当社としての位置付けを明確にしつつ、本格研究のプロジェクトに参加してゆきたいと考えている。

## <参考文献>

- 1) 吉川弘之：“テクノグローブ”工業調査会 (1993年)
- 2) Forbus, K.D: “Qualitative Process Theory” Artificial Intelligence Vol.24 (1984) pp.85~168
- 3) Kiriya, T. et al: “The Use of Qualitative Physics for Integrated Design Object Modeling” DTM'91 Vol.31, Design Theory and Methodology (1991) pp.53~60
- 4) 長澤勲, 手塚義昭: “DSP: 設計計算のためのスプレッドシート” 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1988年) pp.437~438
- 5) Nakamura, H. & Shamoto, Y: “A description for planning the temporary platform stage in construction site” A brief report for evaluating AI tool: Designer's Spread Sheet for TW1 & TW3, Proc. of 2nd IRM in Helsinki IMS/GNOSIS (1993)
- 6) Fuller, C.E: “QUEST, White Paper” Deneb Robotics, Inc. (1992)
- 7) Aalto, H. et al: “The Virtual Factory” Proc. of the Finish Automation Days (1993) pp.77~86
- 8) 室田武: “エネルギーとエントロピーの経済学” 東経選書 (1981年)
- 9) (財) 矢野恒太記念会: “世界国勢図会, 1992-1993” (1993年) pp.201~207
- 10) Flanagan, R. & Norman, G: “Lifecycle costing for construction” Surveyors Publications (1983)
- 11) 小川絃宇, 堀内澄夫: “地下躯体の再利用” 第9回環境工学連合講演会講演論文集 (1994年) pp.113~116
- 12) GNOSIS: “Knowledge Systematization: Configuration System for Design and Manufacturing” Technical Workpackage Reports of the Test Case (IMS TEST CASE 7, 1994)
- 13) Warnecke, H.J: “The Fractal Company” Springer-Verlag (1993)