

工事マネジメントにおける
知的工程計画システムの開発に関する
実証的研究

1992(平成4)年5月

池田 將 明

序

わが国における建設産業は日本経済の発展と共に拡大し、その流れの中で近代化・合理化が進められてきた。しかし、現在進められている各種の建設プロジェクトを眺めてみると、確かに工事内容は大規模化し、そこで用いられる施工機械も大型化してきてはいるものの、建設現場で行われている日常の管理業務は、いまだに人手に頼るところが大きいのが現状である。このことは、これまで進められてきた技術革新が、施工方法や施工機械、それに新材料の開発など、いわゆるハード技術を中心として推進されてきたことが大きく影響していることと思われる。

しかし、経済や社会状況が複雑化し多様化してきた結果、建設計画や管理業務などのソフト技術の重要性は日に日に増してきているのも事実である。特に、建設生産の最前線である工事現場事務所（本論文では作業所と呼ぶ）では、工事に伴う騒音や振動の排除や自然環境に対する配慮が求められるなど、工事を遂行する方法が従来より難しくなっている中で、さらに工期短縮やコスト低減が強く求められている。このために、従来のような手作業による工事計画や工事管理方法では、このような要求に迅速に、かつ効果的に対応することが難しい状況となってきた。ここに、建設工事を一つの生産システムと捉え、これにシステムズアプローチを適用することにより合理化を図る工事マネジメント・システムの重要性がある。

本研究では以上のような観点から、作業所で行われる種々のマネジメント業務を対象とし、中でも中核的な管理要素であるという理由から“工程管理業務”に焦点を絞って、合理化およびコンピュータ・システム化を進めるための方法を論じた。そして、ここで取り扱うマネジメント業務は、実務経験により得られた知識や技術が重要な役割を果たす経験主義的な特質を持つこと、また、このためにコンピュータによるシステム開発が、日程計算などのほんの一部でしか行われていないなどの理由から、このブレイクスルーとなる技術として人工知能という新たなシステム化技術を適用した。

人工知能技術は、現在研究が進められている未完成の技術である。また、これを工事マネジメントに適用し、これを知的システム化するための研究も、まだ緒についたばかりである。このために、本論文で知的システムとして具体的に示すことができた問題も、工事マネジメント問題全体からみるとほんの一部分でしかない。しかし、この論文の中で示すことができたシステム化のための方法論が、今後進められる工事マネジメントの合理化、システム化に多少なりとも寄与することができれば、望外の喜びである。

本研究を進めるにあたっては、多くの方々にご指導、ご鞭撻をいただいた。特に京都大学教授吉川和広先生には、昭和59年4月より2年間、筆者が土木計画学研究室の受託研究員となって以来、終始篤実なるご指導ご鞭撻を賜った。また、立命館大学教授（前京都大学助教授）春名攻先生には、本研究を進める上で数々

の貴重なご教示をいただいた。さらに、名古屋工業大学教授山本幸司先生には、本論文をまとめるに当たって直接ご指導をいただいた。以上の方々に深甚なる謝意を表す次第である。

また、筆者が所属する株式会社フジタにおいても、実に多くの方々のご指導、ご協力をいただいた。特に、前取締役副社長馬場勇博士（現相談役）は筆者がこの分野で技術開発に携わる機会を与えられ、以後ご指導、ご鞭撻をいただいた。また、吉井良二氏（現大阪支店副支店長）には本社土木本部に在籍中、上司として親しくご指導をいただいた。また、後藤哲雄氏（現名古屋支店副支店長）には、(株)フジタに入社して以来、システム開発に関して基礎的なご教示をいただいた。さらに、技術研究所に転動し本論文をまとめるに当たっては、田中修身氏（技術研究所所長）、鎌田正孝博士（同副所長）、和久昭正氏（同生産技術研究部長）に多大なご支援をいただいた。また、本論文中に示したシステム開発にあたっては、野末章氏、太田宏通氏、荒田幸宜氏、大倉吉雅氏、関原康成氏の協力を得ることができた。ここに謝意を表す。

また、土木学会における建設マネジメント委員会ならびに人工知能小委員会（土木情報システム委員会）での研究活動においては、本研究に係わる多くの議論を行い、また貴重な意見や情報を得ることができた。特に、建設マネジメント委員会の中の計画・管理技法小委員会（現分科会）では、平田義則小委員長（当時）以下多くのメンバーの方々と大変意義深い討論を行うことができた。これらの学会活動が、本論文を取りまとめるに当たり非常に参考となったこと最後に記し、謝意を表す次第である。

平成4年9月21日
池田 将明

【目次】

第1章 序 論	
第1節 緒 言	1
第2節 建設生産システムとマネジメント	5
第3節 本研究の目的と構成	10
参 考 文 献	20
第2章 工事マネジメント構成に関する研究	
第1節 緒 言	21
第2節 建設産業の近代化とマネジメント技術の開発	22
第3節 建設マネジメント組織	35
第4節 マネジメント情報システム	43
第5節 結 言	51
参 考 文 献	52
第3章 知的工程計画システムに関する研究	
第1節 緒 言	54
第2節 システム開発状況と知識ベース・システム化	57
第3節 人工知能研究の概要と技術レベル	70
第4節 知的工程計画システムの構想	85
第5節 結 言	97
参 考 文 献	99
第4章 プランニング・システムに関する研究	
第1節 緒 言	103
第2節 知的プランニングの方法	105
第3節 ハイブリッド戦略によるネットワークの生成方法	118
第4節 ネットワーク生成システムの開発	134
第5節 結 言	147
参 考 文 献	149
第5章 スケジューリング・システムに関する研究	
第1節 緒 言	151
第2節 スケジューリング・システムの構成	153
第3節 スケジューリング・システムの開発	170
第4節 実工事での運用実験とその考察	185
第5節 結 言	196
参 考 文 献	198
第6章 結 論	200
添付資料	
資料-1 人工知能適用に関する外国文献抄録	
資料-2 知識ベース・システム開発事例	
資料-3 発表論文一覧表	

第 1 章 序 論

第 1 節 緒 言	1
第 2 節 建設生産システムとマネジメント	5
1. 建設生産システムの特徴	
2. 建設生産環境の変化とマネジメント	
第 3 節 本研究の目的と構成	10
1. 研究の目的	
2. 論文の構成	
参 考 文 献	20

第1節 緒 言

建設産業は農業とともに最も古い産業に属し、社会生活や他産業の基盤整備を担うことから、古くから経済の中核的な産業として位置づけられてきた。わが国の建設産業も、第2次世界大戦による国土荒廃に対する復旧事業や、昭和30年代以降急速に発達した国内経済を支えるための産業基盤整備事業など、戦後一貫して建設需要が拡大推移してきたことが大きな要因となって、現在では、わが国GNP（国民総生産）の約17%に当たる60兆円を越える建設投資を担い、全就業者の約9%に当たる540万人の就業者数を擁する基幹産業として、わが国経済の中で重要な地位を占めるように成長してきている。

しかし、昭和46年のいわゆるニクソンショックによる変動為替制度への移行や昭和48年秋のオイルショックによるエネルギー危機が大きなトリガーとなって、わが国の経済活動は質的に大きな変化を迫られることとなった。そして、その後の10年余りの不安定期を乗り越え、現在では世界経済の中で重要な地位を占めるまでになってきている。このことは、すなわち、それまでの米国経済に大きく依存した単純な2国間関係ではなく、欧州諸国から第3世界諸国までを含めた複雑な地球規模の政治・経済関係の枠組みの中に組み込まれたことを意味し、この結果、かつてないほどに世界の経済状況や社会変動の影響を強く受けるようになってきた。

また、以上のような経済状況の変化は、我々の社会生活や社会に対する考え方、さらに人生観にまで大きな影響を与えるようになってきている。つまり、かつての経済中心、もの中心の考え方から、生活環境の向上や自然環境保護など、より質を重視した考え方に移行してきている。また、質的な変化ばかりではなく、人々の価値観の多様化も進み、従来と比較して、より質の高い多様な価値観の存在する社会を形成してきている。この結果、女性の社会進出や地位の向上、高学歴化や出生率の低下による若年労働力の減少、医療の発達による高齢化などの社会現象が進展し、さらに、わが国経済の発展にともなって、外国企業の参入や外国人労働者の流入などの“内なる国際化”も急激に進んできて、わが国の社会状況は有形無形の大きな質的变化を起こしてきているのが現状である。

以上のような、わが国の経済および社会状況の変化は、当然のことながら、建設産業にも非常に大きな影響を与え、その結果、かつて例を見ないようなタイプの問題点が、随所に顕在化してきている状況にある。例えば、建設需要の動向は、経済活動の活発化やインフラストラクチャの整備の要求から、基本的には拡大傾向にあるが、世界的な経済・社会変動の影響を強く受けるために、将来的な予測は大変困難となってきている。例えば、ほんの数年前まで「建設業は冬の時代が続く」と予想されていた¹⁾にもかかわらず、現在では、消化しきれないほどの需要を抱え「建設業夏の時代」とさえ言われるようになってきている。また、建設需要の内容を見ても、わが国経済の発展に伴い、築造する構造物の巨大化・複

難化が進んできている。また、重厚長大産業から軽薄短小産業へ産業界全体がシフトしてきたことにより、これまでのような構造物をただ建設するだけでなく、近代設備を伴う高機能構造物の建造や、複合施設の企画・設計、都市機能を備えた地域開発など、従来のハード技術だけではなく、ソフト技術が重要な役割を演じる建設工事の割合が増加してきている。

また、社会環境の変化は、さらに大きな影響を建設産業に及ぼしてきている。例えば、都市の高密度・高機能化や生活環境向上の要求、さらには地価の異常な高騰により、都市圏における建設工事の施工環境は、大変な困難を伴うようになってきている。また、若年労働者の建設離れとそれによる作業員の高齢化、熟練技能工の不足と賃金の上昇など、労務事情の逼迫は、これまで主に建設構造物の大型化に対応するために進められてきた工事の機械化やプレハブ化を、中小規模の工事にも対象に含めて、さらに推進する必要に迫られている。また、地球規模での環境保全の重要性が叫ばれるようになった昨今では、建設工事による自然環境の破壊は、その経済的な意義がいかに大きくとも、許されない社会的コンセンサスが形成されつつある。

このように、建設事業を取り巻く多種多様な環境変化の中で、まだまだ不足している社会資本の充実や、拡大の速度を早めつつあるわが国経済の基盤整備を効率的に推進していくために、建設産業の責務はますます増大してくると予想される。すなわち、建設期間の短縮化、高機能建造物や長大型建造物の建設、そして生産性向上による建設費用の低減化などが、より強く求められている。しかし、他産業と比較して①労働生産性が低い、②労働災害が多い、の2点が示しているように、建設産業界の中には、いまだに多くの非近代的な問題点を多く抱えているのも事実である。

このような問題点に対して、これまで戦後一貫して建設産業の近代化を進めてきた方法は、建設機械や新材料の開発、建設機械の大型化、製造過程のプレハブ化など、新工法の開発を主体とした方法であった。このことは、個別工事のおかれた工事環境や建造物に求められる機能が千差万別であるために、建設生産システムの標準化や管理方法の合理化などのソフト技術による生産性の向上は大変難しかったのに対して、新材料や新工法、新施工機械の開発などのハード技術の方が、より革新的な生産性向上をもたらすことが容易であったことによる。

しかし、このようなハードな施工技術の発達によって、逆に、それらの遂行を効率的に管理する方法や、施工時の環境変化への迅速な対応方法、さらに保有資源の有効的な利用方法や、効果的な施工技術の組合せ方法、さらに施工時の進捗状況の把握や予測方法など、ソフトな管理技術の必要性が、より大きくなってきている。つまり、これまで施工技術や建設資材の開発により、建設工事の生産性は大幅に前進したが、それらの技術の発達にともない、より生産性を高くするためには、工事の計画・管理技術（マネジメント技術）が注目を集めるようになってきた。

ところが、ソフト技術と呼ばれるこれらのマネジメント技術の多くの部分は、これまで現場技術者が経験的に修得し、また実務を通して若い世代に受け継がれ

てきたことから、科学的方法の研究やその普及に対する努力は、これまであまりなされてきていなかった。そこで、以上のような建設業界の状況を踏まえて、1976年(S51.8)土木学会土木計画学研究委員会の中に施工計画問題分科会（主査：吉川和広）が発足し、それまであまり体系立てた研究がなされていなかった施工計画問題について、大学と官庁、および民間企業の研究者が一同に会して研究が進められることとなった²⁾。この研究会は、現在、建設マネジメントと呼ばれる、建設工事の計画と管理方法をシステムズ・アプローチにより解明し、システム化の方法をさぐる研究の嚆矢となった³⁾。そして、この研究会が1979年(S54.8)には、施工情報システム分科会（主査：川崎健次）、1982年(S57.7)には施工情報システム小委員会（委員長：川崎健次）に発展し、さらに1985年(S60.2)には、土木計画学研究委員会から独立して建設マネジメント委員会と発展し、対象とする研究の範囲も、それまでの建設工事計画・管理分野（これを以後工事マネジメント construction management と呼び、プロジェクト企画から維持管理までを含む建設マネジメント project management と区別する）だけでなく、建設プロジェクトの企画や海外工事のマネジメントまでを含むように拡大してきている⁴⁾。

以上のように、工事マネジメントに関する研究は、施工計画問題分科会発足から数えても既に16年間続けられてきていることになる。また、この間にはコンピュータ技術が飛躍的に発達し、この結果、工事マネジメントを支援するための数々のシステム開発も試みられてきた。しかし、これまでになされたシステム開発は、工程管理における日程計算や原価管理における既払集計などの計算業務が対象で、マネジメントの本質的な部分のシステム化までには至っていないのが現状である。この理由は、先ほども述べたように、工事に関するマネジメントは経験的に修得される部分が非常に多く、定型化しにくい特性を持っているため、従来のシステム化技術を用いた方法には自ずと限界があったことによる。

これに対して、コンピュータ科学の研究に端を発し、人間の頭脳の心理学や生理学的研究などを巻き込んで発達してきた人工知能(Artificial Intelligence)研究は、従来とは異なる思想によるシステム開発の可能性を我々に示唆している。特に、人間のもつ知識をコンピュータに記憶させて、それを用いて問題解決を図る知識ベース・システムの考え方は、従来システム化の対象となった定型化された知識ばかりでなく、経験的に修得されるような非定型型の知識も、システム化することを容易にしている点で、工事マネジメントをシステム化する上で大変貴重な手法となりうる。

本研究では、これまで述べてきたような問題認識に基づき、わが国の社会構造や経済構造の変化により、これまでより益々難しくなってきた建設工事の生産性向上について、従来一般的に行われてきた施工技術や建設材料の開発などのハード技術ではなく、それらのハード技術をより効率的に実施するためのソフト技術、すなわち建設工事の計画から施工管理までのマネジメント方法を研究対象と考えた。また、この工事マネジメントでは、マネジメントを評価する3つの重要要素である①原価、②工程、③品質の中でも、全体の工事の進行を把握する上で、共通の基準軸となる工程計画・管理に着目し、計画立案過程に経験的な知識を有効

的に利用するために、人工知能技術を適用したマネジメント・システムの開発を主要な研究目的とした。すなわち、建設工事の遂行に直接的に携わる現場工事事務所（以後、作業所と呼ぶ）においてなされる建設生産システムの解明と合理化、その生産システムに適した科学的な管理技術の開発と、それをを用いたコンピュータ・システムの開発、およびそのシステムを適用するための普及方法に関して、具体的な事例に基づき実証的な研究を行うこととした。

第2節 建設生産システムとマネジメント

1. 建設生産システムの特徴

建設工事における生産システムは、一般製造業と比較して多くの異なる特徴があることが、これまでも度々指摘されている⁸⁾。そして、これらの特徴ゆえに建設工事のためのマネジメント・システム構築に際しては、従来一般製造業を対象に発達してきたマネジメント手法をそのまま適用することは難しい。このため、建設生産のためのマネジメントには、その特性に適した手法を用いたシステム化が必要となる。

ここでは、以上のような観点から、建設生産システムの特徴を再度検討し、これを以下に示すように①製品としての特徴、②生産活動の特徴、③生産組織の特徴、の3つに分類して、各々の特徴がマネジメント・システムにどのように影響するかという点についての考察を試みる。

(1) 製品としての特徴

建設活動により生み出される建造物を工業製品としてみた場合、一般製造業のそれと比較して、いくつかの大きな違いがみられる。ここでは、それらの違いをマネジメントへの影響という視点から検討する。

①個別性が高い

製造される製品の形状・規模・仕様等は、全て異なる。これは、自然環境に適合し易いように建造物が設計され築造されることによる。つまり、建造物は、現地の地形や気象などの自然環境の影響を非常に強く受けることにより、その形状・規模・仕様などが大きく異なるため、製造される製品は全て唯一無二のものとなる。このため、これまで他の製造業において生産システムの近代化や合理化を進める基本的な手段として推進されてきた“製品の規格化・標準化”が、建設生産においては非常に困難を伴い、マネジメント・システム構築にあたっては、よりフレキシブルな構造とする必要がある。

②生産規模が大きい

建造物は、我々の生活や産業基盤を構成し、また大自然の中に長期間晒されるものであるため、他の工業製品と比べて、個々の製品の生産規模は一般的に大きくなる。このため、製品の重量や容積が大きく、かつ製造原価も莫大となるのが一般的であることから、そのマネジメントには全体をマクロに把握する機能と、必要な品質を損なわない緻密性が、同時に要求される。

③地域性が高い

生産活動は、生産地域の産業・気象・政情等に強く影響される。例えば、建造物に用いられる材料や基本構造などは、寒冷地や熱帯地、降雪地や乾燥地など、その地域の気象条件に大きく左右される。このため、工場生産を前提としたような画一的なマネジメント方法ではなく、地域特性を考慮したシステム化が必要と

なる。

④公共性が高い

一般に、建造物は多くの人々の生活基盤を支える目的で利用されるため、製品の良否による影響が、生命を直接的に脅かすなど、重大かつ広範囲に及ぶ場合が多い。このため、品質管理はマネジメントを構成する基本的な要素の1つとして検討されなければならない。

⑤需要変動が激しい

公共工事が地域振興や失業対策等の政策的要素で決められる事が多い事や、民間の設備投資や住宅建設などの工事は、その時々々の景気変動に強く影響されるために、建設工事の需要変動は大きく、また予測し難いという特徴がある。このため、これらの変動を旨く吸収し、効率的に生産を進めることができる組織構造を検討する必要がある。

⑥在庫が難しい

事前に見込み生産をしておいて保存しておくというような生産調整が難しいため、自立的な生産計画を立てにくい。このため、先ほどの“大きな需要変動”と併せて、生産マネジメントの合理化を単体工事だけで検討するのではなく、複数工事の合理化を図るマルチプロジェクト・マネジメントの概念が重要となる。

(2) 生産活動の特徴

以上のように、建造物は一般の工業製品と比較していくつかの特異性を有するため、その生産活動も一般製造業とは大きく異なる。ここでは、それらの主なものを、マネジメントへの影響という観点から検討する。

①現地での生産活動

建造物は地域性が高く、かつ個別性が高い上に製品の重量が大きく製造後に現地へ運搬する事も難しいため、どうしても現地で生産しなければならない場合が多い。このため、一般製造業では生産設備を工場などに固定させて製造できるのに対して、建設生産では現地に生産設備や労働力などの生産手段を移動させなければならない。そこで、このためのマネジメントには、限られた生産資源を有効に利用して生産を進めることが求められる。

②屋外での生産活動

現地生産という特徴に加えて、建造物は一般に大きく、また自然の中に長期的に固定されるために、生産活動の多くの部分は屋外作業となる。このことは、生産活動がその場所の自然条件に強く影響されることを意味し、生産計画に大きな不確実性を与える一因となり、その不確実性を合理的に計画に組み込むマネジメント手法が必要となる。

③長期の生産活動

建造物は一般的に規模が大きいため、生産期間が長期に渡る場合が多い。特に、土木工事では普通のプロジェクトで3～4年、ダムなどの大規模工事となると10年以上かかることも珍しくない。このため、建設計画に当たっては、長期間の政治・経済変動や技術の発達などを予測する必要があるし、また、生産過程の要所要所においては、現実に即した計画変更が容易に出来るようなマネジメント方法

をとることが重要となる。

④労働集約的な生産活動

建造物は個別性が高い上に現地の屋外で生産しなければならないことが多いために、製品の規格化や標準化による工場生産や機械化生産が難しい。また、自然を相手に生産活動を行うことにより、その場その場に合わせて柔軟に対応した生産活動を行う必要があり、どうしても人手に頼らなければならない部分が多く存在する。このため、機械と比較して作業スピードや作業能力に大きなばらつきがある技能員を有効に投入するためのマネジメントが重要となる。

(3) 生産システムの特徴

建造物自身の特異性や、それに起因する生産活動の特異性により、生産システムもまた一般製造業と大きく異なる。ここでは、生産システムを以下のように4つに分類して検討する。

①単品受注生産

建造物は、同じものが2つとないと言われるように個別性が高く、また、生産規模が大きくリスクも大きなことから、施工業者は工事を受注してから、そのための生産組織を編成し、生産計画を立て、必要な資機材を調達し、工事にとりかかることとなる。

②重層的下請け生産

建造物は需要変動が激しく、かつ長期におよぶ生産活動のために、生産に必要な作業員や施工機械等の生産財の全てを固定的に保有することには、大きな経済的リスクを伴う。このため、これらのリスクヘッジを目的として、現在のような“元請け-下請け-孫請け”という重層的な生産組織が形作られてきた^{*)}。

ただし、かつては主に労務供給のリスクヘッジを目的として、このような階層組織が形成されてきたのに対して、その後の施工の機械化や高度化に伴い、特殊技術や大型機械を保有する専門業者が現れたこと、また最近では、技術や施工体制を整備することにより力をつけ、特定の元請けに所属しない下請け業者も出現してきたことから、このような重層構造の各層間の関係は、以前とは大きく様子が異なってきているのも事実である。

③原価主義による製品価格決定

工業製品は、その製品に対する需要と需給のバランスによる市場原理によって製品の価格が決定するのが一般的である。ところが、建造物は個別性が高く単品受注生産であることから、このような市場価格を形成することができずに、生産に掛かった原価に利潤を加えるという、いわゆる原価主義に基づいた価格形成が行われる。

④設計と施工の分離

設計と施工を行う組織が異なるということも建設生産システムの大きな特徴の1つである。これは、建造物は1つ1つ個別に設計しなければならないために、「設計により具体的な製品の仕様が決定し、その仕様に基づいて製品価格を決定する」という独自のメカニズムが働く。このため、合理的な価格決定を行うためには、この両者の機能を異なる組織で行い、施工業者の選定は入札によるという

制度が作られてきた。

2. 建設生産環境の変化とマネジメント

建設生産システムは、公共性が高く地域に密着しているなどの特性から、その時々々の社会環境や経済環境の影響を強く受けるという特徴がある。このため、現在、経済大国と言われるようになったわが国の中で、急速に進んできている社会・経済環境の変化が、このような生産システムに大きな影響を与えることは容易に想像がつく。そこで、ここでは建設生産システムに影響するだろうと考えられる社会・経済環境の変化について、工事マネジメントとの係わりという観点から考察を加える。

(1) 社会環境の変化とその影響

科学技術や経済活動の発展は、我々の生活を質量ともに大きく向上させたが、このことは、また、建設生産活動へも大小様々な影響を与える結果となった。そこで、ここでは、これらの社会環境の変化が、建設生産システムに与えている影響について考察を加える。

① 社会の高齢化

医療技術の発展により、日本人の平均寿命は男子で77歳、女子では82歳と大幅に延び、わが国は北欧と変わらないような高齢化社会に変わろうとしている。この結果、労働者の高齢化や技能工不足が急速に進行している。また価値観の多様化や社会全体の富裕化等により、若年労働者の建設離れが急速に進んだことも、このような状況を深刻化させる大きな要因となっている。

このため、建設作業のロボット(自動機械)化や省力化技術の開発などが緊急課題となっている。一方、このような労働力不足は、作業現場だけの問題ではなく、それを計画・管理する技術職員の不足も大きな問題となっており、そのようなマネジメント業務を効率化するためのコンピュータ・システムの開発も、重要な課題となっている。

② 自然環境の重視

自然環境の保護が、経済的な効率化よりも強く求められる時代となってきている。このことは、社会に色々な意味での余裕ができてきていることと、環境保全が問題となるほど人間の活動が大規模化してきたことによるものと考えられる。特に、建設活動は我々が快適に生活を営めるように自然環境を造り変えることを目的としているので、この目的と自然環境保護との係わりあいは重要である。

そこで、建設による自然環境の操作が必要最低限に抑えられることが重要となり、そのための新しい工法や施工機械の開発が必要となっている。そして、そのような技術を目的通りに実施するための管理技術として、工事マネジメントの必要が高まってきている。

③ 生活環境の向上

生活の質の向上にともなって、我々の価値観は多様化してきている。このため、

かつてのように“建設=よいこと”という単純な判断ではなく、各自の生活環境との係わり合いの中から、建設工事の価値が考えられるようになってきていて、そのような環境の中で建設工事を推進するためには、近隣住民の意向を反映した施工計画の立案が重要となってきている。

④ 都市の高密度化

都市化の進行にともなって、都市部における建設需要は増大してきている。しかし、活動中の都市機能を損なうことなく工事を推進しなければならないために、その施工にはより多くの制約条件が課され、それらを反映した施工計画の立案や、管理システムの開発が重要となる。

(2) 経済環境の変化とその影響

経済環境の変化も、建設生産システムに大きな影響を及ぼしている。ここでは、工事マネジメントとの係わりあいの観点から、それらの変化を考察する。

① 構造物の高度化

建設投資の効率的な運用や建造物の高機能化を目的として、複合施設やインテリジェントビルなどの建設が進められてきているが、これらの構造物は構造が複雑であることや、高い品質が求められることなどから、その建設にはこれまで以上に高度な施工技術と、それを効率的に実施するための工事マネジメント技術が必要となる。

② 工事期間の短縮化

建設工事の大型化に伴い、建造物を早く使用に供し、投下資本を早期回収する必要性が高まってきている。このことは、何も民間工事に限ったことではなく、建設投資の効率的な運用という見方をすると、全ての工事にあてはまる。そして、このためには急速化施工技術の開発ばかりではなく、効率的に施工を進めるための計画・管理技術が必要となる。

③ リスクの増大

建設投資の大型化とその工事の高度化・複雑化により、建設工事に伴うリスクはこれまでと比較にならないくらいに大きくなってきている。このため、このような工事を間違いなく建設するための計画技術や、その時々々の状況の変化に応じて施工を進めるための管理技術の必要性は、これまで以上に必要となってきている。

第3節 本研究の目的と構成

1. 研究の目的

(1) 建設産業の現状と工事マネジメントの必要性

前節で述べたように、建設生産システムは、建造物の特殊性ゆえに一般製造業と比較して特異な生産形態を有している。また、建設産業は社会や経済状況に強く影響される特性があるため、この十数年の間にわが国で起こった大きな変化に適応する方法を模索している状況にある。そして、このように社会や経済が大きく変化する中であって、急激に膨張を続ける日本経済の産業基盤や、国民の生活向上に伴う社会基盤を急速に整備しなければならないという使命を建設産業界は担っているという状況にある。

すなわち、交通機関や物流設備、住宅需要など、わが国における社会経済基盤は、欧米などの先進諸国と比較して大きな落差があり、今後とも早急に整備する必要がある。また、生活の向上や社会の高度化にともない、これまでのような量的な整備だけではなく、質的な整備も求められるようになってきている。そして、これらの整備は、生活環境や自然環境を極力損なわないという社会が許容する方法で、より効率的にまた廉価に行うことが求められている。

このような社会の要求に応えるためには、施工方法の改良や生産管理の近代化により、多様な制約条件をクリアしつつ、生産性の向上を進めなければならない。そして、このための方法としては、新しい施工法の開発や施工機械の大型化、それに新建材の開発など、主にハード的な対応が、これまでは重点的に行われてきた。このことは、メカトロニクスや新素材など、他分野における先端技術を吸収することにより、常に新しい建設生産方法の開発を進めることができたこと、また建造する構造物の規模がこれまで順調に拡大を続けてきたことの2つが幸いして、このようなハード的な方法により、これまでは生産性を飛躍的に向上させることが可能であった。

しかし、大型工事では大きな成果を上げることができた「施工機械の大型化」という方法は、大部分の中小規模の工事には適用することが難しいというように、これまでの生産性向上を目的とした戦略は、多分に生産規模の大型化に依存してきた傾向が強い。このため、図-1.1のように、一般製造業が順調に労働生産性を向上させてきたのに対して、建設業全体でみた場合では、一部大型工事の飛躍的な生産性向上にもかかわらず、生産性は下降傾向となっている。このことは、両者の生産性の比である労働生産性指数（建設業÷製造業×100）で示すとより明かとなるが、昭和50年(1975)に120.4であった指数が、10年後の昭和60年(1985)には52.8まで低下している⁷⁾。この結果、これまで順調に生産性を向上させてきた大型工事であっても、建設を取り巻く環境は、以前にも増して複雑化・多様化してきているため、より効率的な生産システムを確立する必要に迫られてきてい

る。

この結果、これまでは目に見えない計画・管理技術より、実際に触ることができ、評価もしやすい施工技術の導入に、より多くの努力が払われてきたのが実状ではあるが、これまで述べてきた理由から、これからは、従来からのハード的な方法だけで建設生産システムの合理化を進めるのではなく、各種の計画・管理技法に基づく生産管理システムを併せて適用し、より緻密に生産システムの合理化を図ることが、これまで以上に重要となるものと考えられる。すなわち、「建設工事を合理化するためには、ハード的な施工技術とソフト的な計画・管理技術が、車の両輪のごとくバランス良く発達することが望ましい⁸⁾」といわれるように、マネジメント・システムと呼ばれるソフト技術の研究・開発が、これからは益々必要となってきている。

(指数 50年=100)

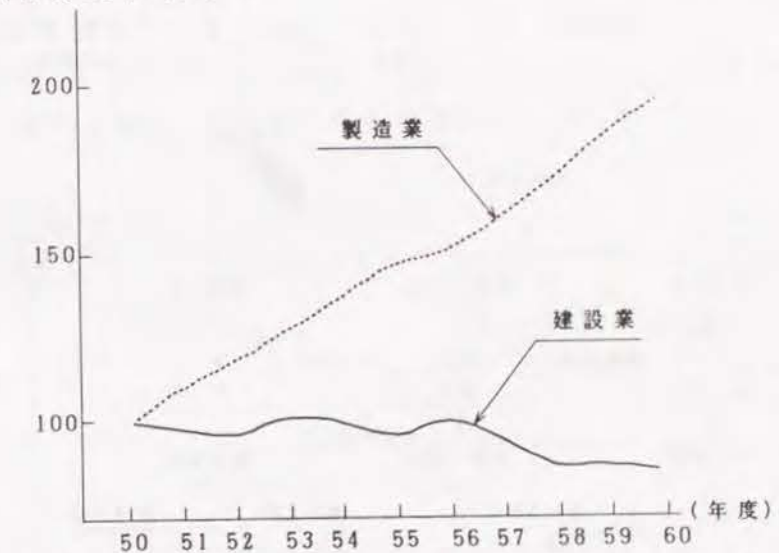


図-1.1 労働生産性の推移 (昭和62年版建設白書より転載)⁹⁾

(2) 新たなマネジメント技術の適用

以上のような主旨から、土木学会では建設マネジメント問題を研究対象とした建設マネジメント委員会が設立され、建設プロジェクトの企画から維持管理までを含めて、産学官共同の研究が行われるようになった。しかし、建設工事の生産性に直接的に係わる工事マネジメントの範囲だけを見ても、昭和40年代の工程管理の合理化を目指したPERT導入運動や、昭和50年代のVEやTQCの導入活動、それに50年代後半からのマイクロ・コンピュータや通信技術の進歩に触発された作業所管理システムの開発ブームを経て、現在では1つの壁に直面し、足踏みしている状態にあるものと推察できる。

これは、これまで進められてきたシステム化の範囲が、広範な業務の中のプログラム化しやすい一部分に限られていて、それだけでは期待するような効果が生まれないことが、次第に理解されてきたことによるものと思われる。

一方、コンピュータ科学の世界では、人工知能(Artificial Intelligence)に

関する研究が、次第に実用化レベルに達してきた。例えば、定形化しにくい経験的知識をシステム中に蓄積し、これに基づいて問題解決を行うための知識工学 (Knowledge Engineering) 研究や、人間の頭脳の生理学的な研究が発端となったニューラル・ネットの研究などの実用化が進んできた。周知のように、土木工学は経験工学である。このため、実務を通じて修得された経験的知識が、日頃の業務の中で大きな比重を占める分野である。特に、本研究が対象としている工事マネジメントの分野は、経験的知識の占める割合がより高いため、そのシステム化にあたっては、経験的知識を効率的に蓄積し、利用できるプログラミング技術が必要不可欠である。このため、現在、停滞気味のマネジメント・システムの開発において、知識ベース・システムなどの人工知能技術の適用を検討することは非常に重要である。

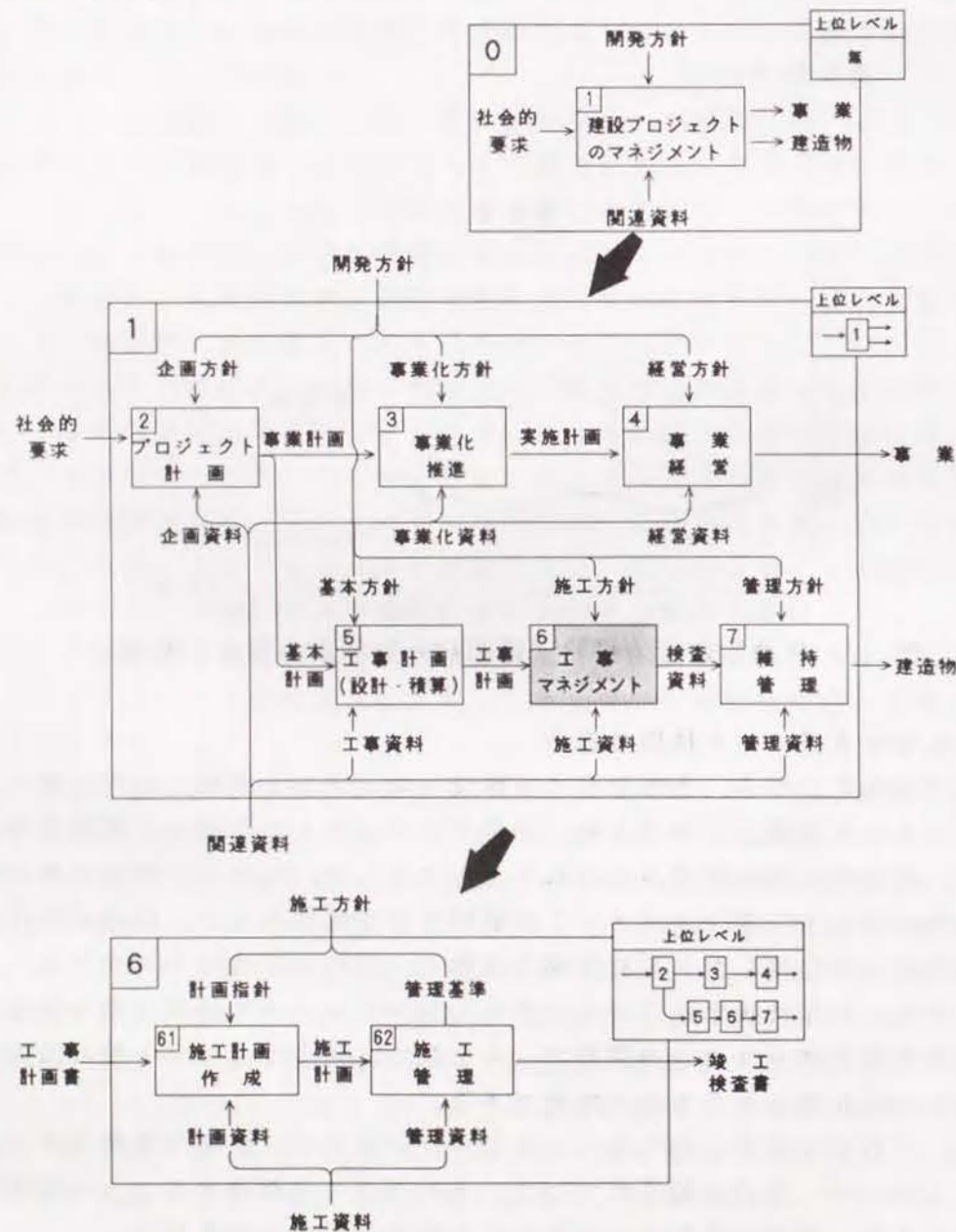


図-1.2 建設マネジメントと工事マネジメント

(3) 工事マネジメントの定義

本研究が対象とする分野は、現在、学問的な体系化が進められつつある分野であるために、使い方が統一されていない用語が多々ある。そこで、このような用語の中でも、本研究に深く係わり、かつ重要と考えられる用語の本論文中での使い方を、ここで予め定義しておくこととする。

まず、本論文の表題の中にも現れる“工事マネジメント”という言葉であるが、この言葉は、新しい請負契約方式として米国で普及してきたCM (Construction Management) 方式が、契約遂行の手段として科学的マネジメント技術を駆使していることから、わが国においても、新しい建設工事管理を表す用語として使用されるようになった。しかし、同様の主旨を持った“建設マネジメント”と混同して用いられる場合が多いことから、図-1.2にSADT (Structured Analysis and Design Technique)で示したように、企画から維持管理までの建設プロジェクト全体のマネジメントを“建設マネジメント”、この中の「施工計画」と「施工管理」段階のマネジメントを“工事マネジメント”と呼び区別することとした。なお、英語との関係は、建設マネジメントがProject Management、工事マネジメントがConstruction Management に対応するものとした。

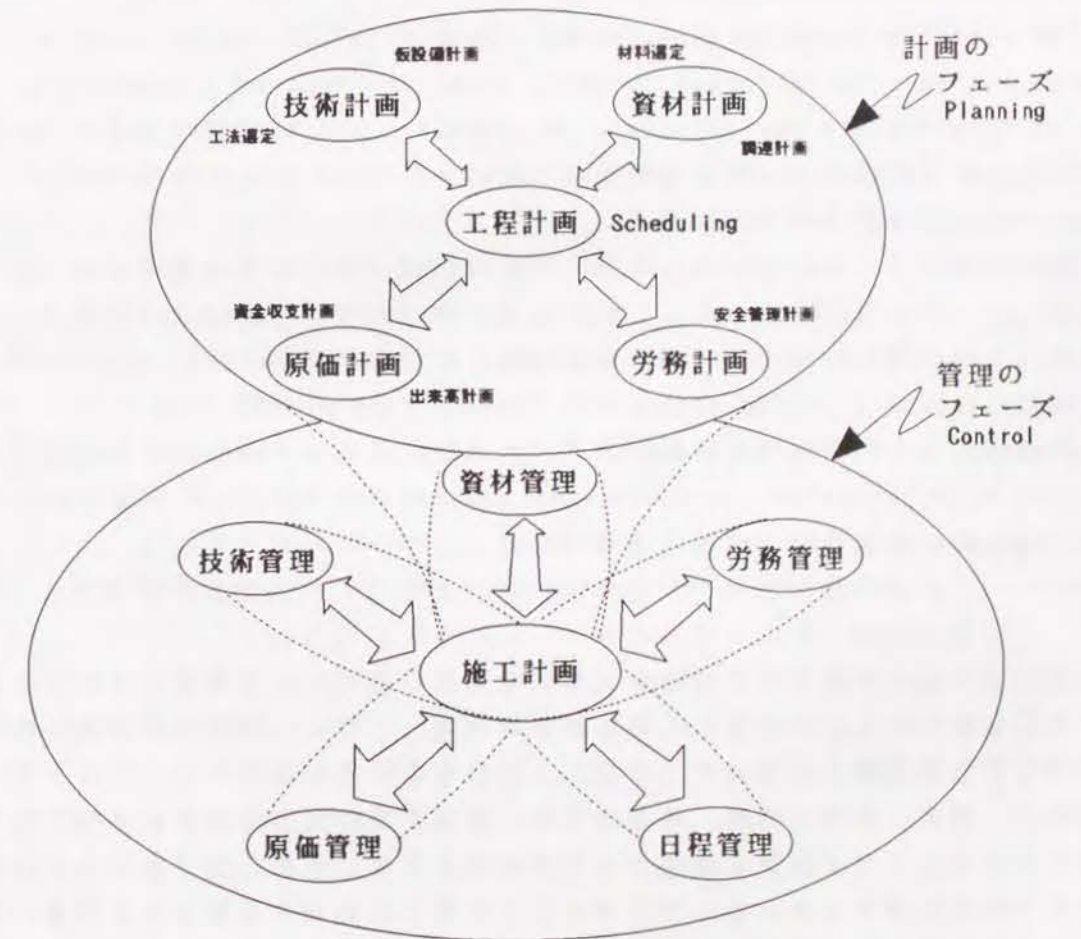


図-1.3 工事マネジメントの概念構成

また、このような工事マネジメントは、施工計画や施工管理に係わる多種多様な業務から構成されるが、これらの業務間の関係を分類・整理すると、図-1.3のようになる。すなわち、基本的構造としては計画フェーズと管理フェーズの2階層をなし、上位の計画フェーズでは工程計画が中核となっており、この工程計画を決定するための工法選定や仮設備計画など、諸々の要素別の計画問題が散在する構造となっている。つまり、工事マネジメントにおける業務の遂行手順は、最初の計画段階では、まず各要素別問題を解決、もしくは仮定し、この結果に基づいて工程計画を立案する。そして、ここで作成された計画群（これを施工計画と呼ぶ）に基づいて施工管理を行うという構図となる。

以上の論旨を整理すると、工事マネジメントは、基本的に図-1.4に示したような三つの段階により実施されることとなる。本論文では、この図の最初の要素別計画段階をプランニング(Planning)、また、二番目の工程計画段階をスケジューリング(Scheduling)、そして、最後の管理段階をコントロール(Control)と呼んで区別することとした。この点に関しては、クラウ(R. H. Clough)も同様な区別をしている¹⁰⁾が、ウェスト(J. D. Wiest)がこれらの概念をより明確に定義している¹¹⁾ので、以下にその部分の文章を示す。

The planning phase of any venture involves a listing of tasks or jobs that must be performed to bring about the venture's completion. Gross requirements for material, equipments, and manpower are also determined in this phase, and estimates of costs and durations for the various jobs are made.

Scheduling is the laying out of the actual jobs of the project in the time order in which they have to be performed. Manpower and material requirements needed at each stage of production are calculated, along with the expected completion time of each of the jobs.

Control, generally regarded as "the underlying managerial function" begins with reviewing the difference between the schedule and actual performance once the project has begun.

以上のように、工程計画におけるプランニングの目的は、工事遂行のために必要な作業を洗い出し、各作業の所要日数やコスト、それに、技術的な作業間の順序関係などを決定する所にある。そして、これらを決定するために、先ほど述べたように、技術、資材、労務、原価などの、個別要素計画との連携が必要となる。すなわち、必要となる作業を生成するためには、どのような方法で施工するのかを決定しなければならないし、プロジェクト全体で必要とする資源の大枠は、労務や資材計画で個別に検討される。また、スケジューリングの目的は、プランニング段階で生成された各作業について、資源の調達量やコスト、それに工期など

に関する諸々の制約条件の中で、その開始日と終了日を決定することにある。さらにコントロールの目的は、工事の着工後の段階において、工事の進捗状況を計画と比較し、進捗状況の評価と問題箇所の探索を行い、発見された問題点に関して検討した改善方法を実施することにより、工事を遅滞なく推進させることにある。本研究では、以上のような考え方にに基づき、工事マネジメントを図-1.4のような3段階から構成されるものと定義して研究を進めることとした。

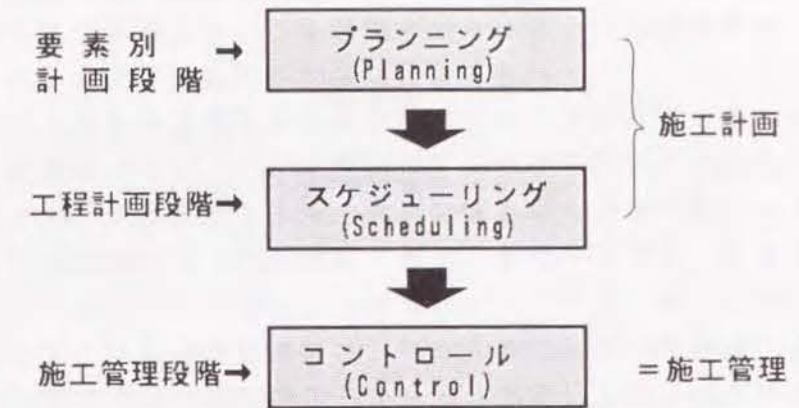


図-1.4 工事マネジメントの実施段階

(4) 本研究の目的

これまで述べてきたように、わが国の建設産業界は、技能工不足や労働者の高齢化など、内に大きな問題を抱えながらも、生産性向上を推進することにより、産業および社会基盤の整備に貢献することが求められている。このような生産性向上を推進する手段としては、施工機械や建設設備の大型化であるとか、新工法のための新たな施工機械の開発など、従来は主にハード面での研究が中心であった。これは、わが国経済の高度成長に伴う建造物の大型化への対応や、従来からの労働集約的生産形態を改善するために直接的な効果が期待できることから、当時としては妥当な選択であったといえる。

しかし、このような情勢の中で、工事計画の合理化や管理技術の向上など、ソフト面に関する研究には、このようなハード面での研究活動に比して、あまり努力が払われずに、今日の建設プロジェクトを取り巻く非常に複雑な環境に、十分に対応できない状況を作り出してしまった。すなわち、わが国の経済状況は、“重高長大”から“軽薄短小”と言われるように、これまでのような量的拡大だけではなく、質的な変化が進んできている。また、価値観の多様化などによって、社会環境も大きく変化してきていることなどから、これまでのようなハード面だけの対応のみでは、従来のような生産性向上は望めない状況となってきた。言い換えると、現在の状況は、ソフト面での遅れがボトルネックとなっていて、ハード面での研究開発成果が、建設プロジェクトの生産性向上に十分に寄与していない状況となってきたものと考えられる。

建設プロジェクトは、先ほど定義したように企画、設計、施工計画・管理、維持管理の各段階を踏んで実施されるが、これらの中で施工計画・管理段階を対象とした研究は、ハード面の研究とソフト面の研究という比較で見た場合、相対的に非常に遅れている状況にあると思われる。また、この部分を改善することは、建設システム全体の生産性向上に特に大きく寄与すると考えられる。そこで、本研究においては、建設プロジェクトの中でも、施工計画・管理、すなわち工事マネジメントの部分に焦点をあてて、この分野に人工知能などの新しいシステム化技術を適用し、従来システムの改善や、これまで問題構造が複雑であるために開発が進まなかった業務範囲のシステム化を推進することが重要であると考え、このような新しいコンピュータ・システムを開発する方法を研究することとする。

また、本研究では、工事マネジメントの中に存在する多種多様な管理要素の中でも、“工程”が中核的な働きをなすとの認識から、“工程を基軸とした施工計画・管理のシステム化”を研究の主要な目的とすることとした。そして、この目的を実現するために、上で述べたような人工知能研究により発達してきた、新しいシステム化技術を工事マネジメントへ適用することとし、そのために、現状システムの分析と、問題点の把握、さらに、これに新技术を適用して合理的なシステムに改良するための方法を具体的に研究し、この成果に基づいたコンピュータ・システムを開発し、その運用実験を通して、新たな方法の長所と欠点、それに将来に向けた研究課題などを、実証的に明らかにしたいと考える。

2. 論文の構成

本論文は、建設マネジメントの中でも、直接生産活動に携わる工事マネジメントを対象として、そこで行われるマネジメント業務に関する①システム構造の解明と、②マネジメント・システムの開発方法の確立を大きな目的として、序章と結論を含めて、全体で6章の構成とした。

以下に、各章ごとの研究目的とその概要を示すが、これら論文全体の構成と論旨の流れをより明確に表すために、図-1.5にこれらの関係を図化して示した。

(1) 第2章の概要

第2章では、本研究が対象とする工事マネジメントの概念構成を明らかにする目的で、その主要な構成要素である①マネジメント技術、②マネジメント組織、③マネジメント情報システムについて、その枠組みを示す。

まず最初に、マネジメント技術の開発経緯とその背景を明らかにする目的から、わが国における建設産業の近代化の歴史と、その過程で顕在化した問題や解決の試みなどに関して、本研究に至るまでの過程を、工事マネジメントという視点から考察した。また、工事マネジメントが、従来の工事管理と異なることを特徴づける1つの要素である各種のマネジメント手法に関して、1890年代後期に米国で起こった科学的マネジメント法の発達や、それ以後の各分野におけるマネジメント手法の研究開発状況を、品質、原価、工程、安全の4分野ごとに概観する。

次に、マネジメント・システムを設計する上で、重要な要素となるマネジメント組織に関して、概念的な考察を加える。ここでは、最初に、米国において普及してきた新たな建設契約形態の一つであるCM契約(Construction Management)に着目し、従来のランブサム契約(Lump-sum)との関係から、現状における組織形態を再考する必要性を明かとする。そして、このような観点から、近代組織形態の発展過程を検討し、現状における建設企業の組織形態の成り立ちとその特徴、それに、建設企業組織の中において、実際に工事マネジメントを遂行する作業所組織の現状を分析し、今後の組織の在り方に関して考察を加える。

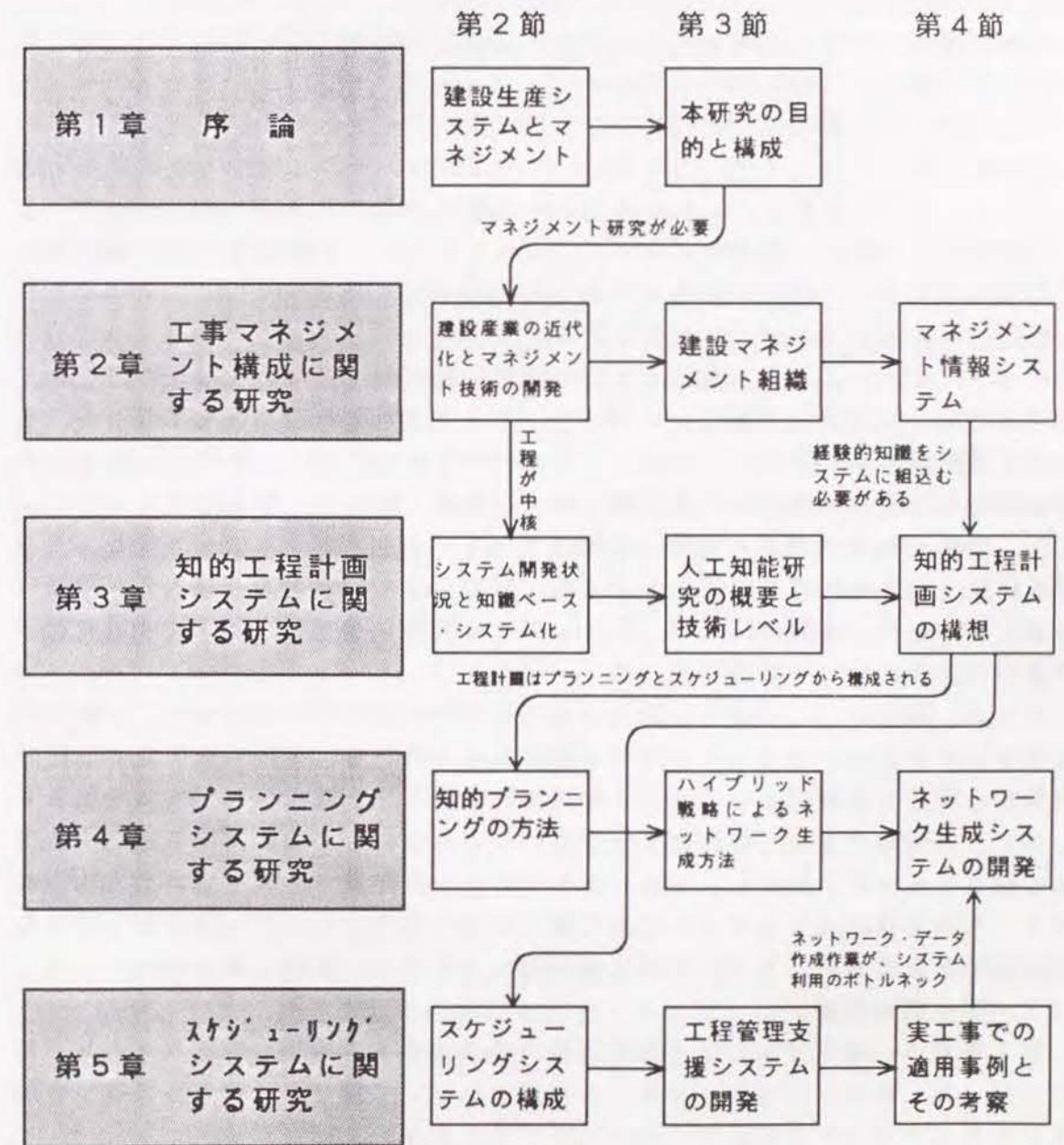


図-1.5 論文構成と論旨の流れ

また、マネジメント情報システムに関しては、情報処理技術や通信技術の発達、これまでの組織形態や業務形態を大きく変貌させてきたことを述べる。そして、この結果、組織内における意思決定権限の配分問題、本支店組織と作業所組織との業務分担の問題、また、これをうけて、作業所組織内部における情報システム構成の在り方について考察を加える。また、以上のような合理的なシステム構成を検討する方法として、SADTを適用したモデル化が有効であることを示す。

(2) 第3章の概要

第3章では、工事マネジメントの中核をなす工程計画システムについて、その現状と問題点を考察し、これを解決するための新たなシステム化技法として、人工知能技術の有効性と技術レベルを示し、この人工知能技術を適用した工程計画システムの構成と可能性について論ずる。

すなわち、まず最初に、これまでわが国で進められてきた工程計画に関する研究内容を①プランニング法、②スケジューリング法、それに③投入資源最適化法に分けて、詳しく考察し、これらの研究の特徴と問題点を指摘する。そして、ここで指摘した問題点を解決する一つの方法として、人工知能研究により開発された新しいシステム化技法が有効であることを、主に米国で行われてきている人工知能技術の適用研究を示しながら論ずる。

そして、次に、このような人工知能に関する研究が、どのようにして起こり、どのようにして発達してきたかについて、本研究との関わりという視点から、その歴史を概観する。そして、このような歴史的考察に基づき、現状における人工知能技術の特徴とシステム開発技術としての意義に関して、筆者の考えを示す。また、知識工学やファジィ理論、それに、ニューラル・ネットワークなど、人工知能研究で生まれた様々な技術の中でも、特に、マネジメント・システム開発に有効と考えられる技術に関して、現状における技術レベルと、近い将来における発達の可能性について私見を述べる。

そして、最後に、このような新しい人工知能技術の適用を前提として、新しい工事マネジメント・システムの開発を模索する目的から、その中核をなす工程計画問題の構造や特徴について、人工知能技術適用という観点から、検討を加える。そして、以上のような工程計画立案過程に、これらの人工知能技術を適用する方法に関して具体的に検討し、工程計画を対象とした知識ベース・システム、すなわち、知的工程計画システムの開発に関して、その構造と、そこで必要となる知識の種類と表現方法、また、計画生成方法などについて詳細に論じる。

(3) 第4章の概要

第4章では、前章で示した「知的工程計画システムの構想」のプランニング部分に関して、計画生成方法とシステム化方法について論じ、この方法に基づき開発したネットワーク生成システム(PF-PLAN)を紹介する。

まず最初に、計画生成の段階の分析から、プランニングの問題構造を明かとする。そして、このような問題に対して、これまでどのように研究が行われてきたのか、どのような計画生成戦略が提案されてきているのかについて、その概要と

問題点を示す。次に、以上の考察に基づき、新たな計画生成戦略を提案する。ここでは、計画生成に必要な知識をフレーム理論(frame theory)により、階層構造を持たせて蓄積する方法や、オブジェクト指向(object-oriented)に基づくネットワークの生成方法について、具体的に検討する。特に知識ベース・システムの理念である“知識の独立性”や、メソッドやトリガーなどの付加手続きの活用方法などに関して詳細に考察する。

また次に、以上のような考え方に基いて開発したプランニング・システム(PF-PLAN)について、システム開発の過程や、システム構成、それに、いくつかの重要な機能とシステムの特徴などを紹介する。このシステムは、次章で詳しく述べるスケジューリング・システム(PF-NETS)の入力データ・ジェネレータとして、位置づけられる。すなわち、基本的な工事情報を入力するだけで、PF-NETSが必要とするネットワーク・データを自動的に生成することができる。そして、次に、PF-PLAN開発の過程で得られた数々の知見を整理し、工事マネジメント・システムの開発という観点から、人工知能技術適用の可能性とその限界について考察を加える。

(4) 第5章の概要

第5章では、工程計画の後半を構成するスケジューリング・システムに関して、その構成とシステム開発例、および、このシステムの適用例について論じる。

最初に、スケジューリング・システムで用いる計画モデルについて、工事マネジメントで有効に利用できる方法という観点から、これまでに提案されてきたモデルを比較検討する。そして、新たなるスケジューリング方法を考案する上で明かしておかなければならない、工程計画の前提条件や制約条件を明確に規定する。そして、これらの条件に基づく、資源制約を考慮した新たなスケジューリング方法と、これに人工知能技術を適用してシステム化する方法を提案する。

以上の研究は、全く新しいスケジューリング・システムを提案するものであるが、従来のスケジューリング・システムが、それほど活用されていないという現実が、他方に存在する。そこで、従来技術を改良して開発したスケジューリング・システムの適用状況とそこでの問題点を明かしておくことも重要である。このような意図から、ここでは、筆者が数年前に開発し、普及を進めているパソコンで稼働するスケジューリング・システムPF-NETSの開発に関して、その概要を紹介する。

このシステムは、開発と改良を繰り返しながら、これまでに多くの建設プロジェクトに適用してきたが、ここでは、この概要をまず紹介し、次に、下水管敷設工事を取り上げて、適用方法とその経過、および結果について、詳細に紹介する。そして、この適用実験から得られたいくつかの知見について、詳しく論ずる。

【参考文献】

- 1)建設産業ビジョン研究会：21世紀への建設産業ビジョン、(財)建設経済研究所、1986
- 2)川崎健次：第3回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集序文、土木学会建設マネジメント委員会、1985
- 3)吉川和広：施工計画学の歴史と展望、土木学会論文集、第365号/IV-4、招待論文、pp.7~18、1986
- 4)梅園輝彦：建設マネジメント委員会活動報告、建設とマネジメント、土木学会建設マネジメント委員会、1991
- 5)例えば、矢野信太郎：土木施工システム論、鹿島出版会、1971
- 6)徳永勇雄、荒木睦彦：建設業の生産組織と管理体制、清文社、1978
- 7)建設業の現状と課題、建設業界グラフ No.19、(社)日本土木工業会、pp.11、1989
- 8)吉川和広：建設マネジメントについて、第6回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、土木学会建設マネジメント委員会、pp.11~17、1988
- 9)昭和62年版建設白書、建設省
- 10)Clough, R. H. Sears, A. G. : Construction Project Management, 2ed., 北村美都穂監訳、井戸偵光訳：建設のプロジェクト・マネジメント実践マニュアル、pp.52、1984
- 11)Wiest, J. D. and Levy, F. K. : A Management Guide to PERT/CPM, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., 1977

第2章

工事マネジメント構成に関する研究

第1節 緒言	21
第2節 建設産業の近代化とマネジメント技術の開発	22
1. 建設産業の近代化	
2. 科学的マネジメント手法の開発	
3. 工事マネジメント技術の開発	
第3節 建設マネジメント組織	35
1. 工事マネジメント組織の現状	
2. 施工環境の変化と組織の動態化	
第4節 マネジメント情報システム	43
1. マネジメント情報システムの発達	
2. 工事マネジメントのモデル化	
第5節 結言	51
参考文献	52

第1節 緒言

建設工事は、気象条件や土質条件など、事前に予測することが難しい不確実な要因の影響を強く受けるため、目標の建造物を施工するための最適な方法や手順を事前に把握することは、一般に難しい。また、実際の施工にあたっては、当初予想できなかった事態が発生することも多く、計画に従って滞りなく施工を推進することも、また難しい問題の一つである。

このように建設工事の遂行を難しくしている原因の一つには、事前に予測することが難しい自然現象の不確実性があるが、もう一つ別の原因としては、建設工事には多くの人や組織が関係していて、各自の目的や利害が複雑に関係していることが上げられる。

「人類の近代化の歴史は数量化の歴史である」といわれるように、自然科学の分野では多くの自然現象を数量化することにより、そのメカニズムを解明してきている。これに対して、社会現象の解明を目的とした社会科学の分野では、研究の対象が人間やその集合体である組織であるため、それらの意思や行動を数量化することが難しく、このために自然科学ほどには問題構造の解明は進んでいないのが現状と考えられる。

土木工学は、基本的には自然を対象とする工学であるため、例えば、基礎地盤の強度解析や構造物の構造解析など、自然科学の問題が多くの部分を占めるが、多様な価値観が存在する社会環境の中で、建設活動そのものの是非が問われるような時代となってきた現在、土木工学の中でも社会科学に属する問題は次第に大きな比重を占めるようになってきている。特に、本研究が対象としている建設工事の施工段階においては、非常に多くの異なる特性を持った人や組織が、直接的に建設生産活動に携わることから、社会科学に属する問題が特に大きな比重を占める状況にある。

特に、近年、コンピュータや通信技術の発達により、これまで主に人手で行ってきた業務をコンピュータ・システム化しようという機運が高まり、本研究が対象とする工事マネジメント業務に対しても、各種のシステム開発が試みられるようになってきた。一般に「マネジメントは“組織”と“情報システム”より構成される」といわれるが、本論文が対象とする工事マネジメント研究においては、これまで情報システムの研究は数多くなされてきたものの、そこで開発された各種の情報システムが実際に稼働する組織との関連や、工事マネジメント組織自体の研究は、これまであまり議論されてきてはいないのが現状と考えられる。

本論文の研究目的は、工事マネジメントを実施する上で中核的な役割を果たす工程管理業務の解明と知識工学技術を適用したシステム化ではあるが、このようなテーマを論ずる前に、本研究の理論的な背景や基礎的な概念を明らかにする目的で、本章では、本研究に関わる既往の研究の流れを概観し、つぎに建設生産組織およびマネジメント情報システムの現状と今後のあり方に関して、基礎的な考察を行うこととした。

第2節 建設産業の近代化とマネジメント技術の開発

建設工事の生産システムは、構造物を造り上げる地域の社会風土に密着して発達してきたため、地域や文化の違いによって生産形態が異なるという性質がある。例えば、日米建設摩擦という形で近年顕在化してきている諸問題の背景には、このような文化的、歴史的な差異が少なからず影響していると考えられる。このため、本論文で対象としている工事マネジメントを研究する上において、その背景をなす建設産業の歴史的な発展過程を理解しておくことは、非常に重要である。

また、工事マネジメントに関する研究は、ここで述べる建設産業の発展の歴史の中で、何らかの原因でブレーキが掛かったときに、強く指向され発展してきた経緯があるので、ここでは我が国における建設産業近代化の歴史を振り返り、この中で工事マネジメントに関する研究が、どのように起こり、発達してきたのかという点を再検討することとする。ここで述べる我が国における建設産業の発展とマネジメント研究の関係を参考までに表-2.1に年譜形式で整理してみた^{1) 2) 3)}。

1. 建設産業の近代化

(1) 創生期

建設工事は、古くは古代エジプトにおけるピラミッド建設にまで遡ることができるように、大変深い歴史を持つとともに、農業を始め鉱工業に至るまでの全ての産業にとって、それらの生産基盤を建造するということから、最も根元的な産業の1つと考えられる。しかし、建物を築造する建築工事を除くと、我が国において独立した産業部門として認識されるようになったのは、そんなに古くはない。これは、生産の対象となる構造物の大きさや、人手以外に頼りとなる機械力や施工技術が存在しなかったことから、主に時の権力者によって半強制的に集められた庶民による労働に依存してきたことが、大きく影響していると考えられる。

しかし、17世紀後半の江戸時代中期になると“町触れ”という競争入札形式により請負施工が行われることも次第に多くなってきた。これは、建設行為が初めて経済行為として認識され定着されたものと言われている。ただし、これが近代法規により明文化されたのは、明治22年(1889)に大日本帝国憲法発布と同時に全面的に改正され、公布された会計法および会計規則が最初である。ここでは、初めて「国が当事者の一方となって行う工事の契約は、原則として一般競争入札によること」と規定された。また、明治29年(1896)には民法が制定し、ここに請負契約制度が確立した。

(2) 大正の発展期から東アジアへの進出

大正期にはいると、第1次世界大戦(1914~1918)が勃発し、これにともなう波動的な世界的規模の金融恐慌や、関東大震災の発生(1923)等により、景気変動の

表-2.1 我が国における建設産業の発展とマネジメント研究の年譜

年代	時代	建設産業の発展段階	マネジメント研究と主な出来事
明治	創生期	一般競争入札による請負制度の確立	<ul style="list-style-type: none"> 大日本帝国憲法の発布(1889, M22) 会計法、会計規則の大改訂 民法の制定(1896, M29) テイラーによる近代マネジメント法の創設(1898)
大正 ↓ 昭和	発展期	工事規模の拡大による株式会社化の普及 コスト・プラス・フィー契約の普及	<ul style="list-style-type: none"> フォードによるベルコン多量生産方式の発明(1913) 第1次世界大戦(1914~18) 丹那トンネル着工(1916, T5) 関東大震災が発生(1923, T12)
昭和10年代	進出期	東アジアへの進出 戦時統制の強化による一般競争入札制度の形骸化	<ul style="list-style-type: none"> 日月潭発電所工事(台湾, 1931~34) 日華事変(1937, S12) 海南島開発工事(中国, 1941~45)
20年代	復興期	復興事業などにより建設需要が急速に復活 建設行政の整備・確立 建設業界の確立と技術研究所設置ブーム	<ul style="list-style-type: none"> ポツダム宣言受諾(1945, S20) 建設省、全国建設業協会の設立(1948, S23) 建設業法が施行(1949, S24) SQCの普及
昭和30年代	成長期	経済成長に伴う建設需要の急増と大規模工事の増大(佐久間ダムで重機工事) 株式公開による資本力の強化	<ul style="list-style-type: none"> コストコントロール使節団の訪米(1955, S30) ダートマス会議(1956) CPM, PERTの開発(1957~58) 日科技連PERT・CPMセミナー開催(S37) 東京リビック開催(1964, S39)
40年代	高度成長期	急激な工事量の増加とインフレの進行 景気に急激なブレーキ	<ul style="list-style-type: none"> 霞ヶ関ビル工事でPERT適用('68, S43) ニクソンショック変動相場制移行('71, S46) オイルショック 原油供給不安('73, S48)
昭和50年代	停滞期	総需要抑制策の実施 企業倒産や人員削減による産業構造の調整	<ul style="list-style-type: none"> TQC建設企業への導入進む('76, S51) 施工計画問題分科会が発足('76, S51) 施工情報システム分科会に改組('79, S54) ワークショップ「土木施工と情報」('82, S57) 施工情報システム小委員会('82, S57)
60年代以降	変動期	民間設備投資の増加に伴う工事量の急激な拡大 労働力不足と外国人労働者の就労問題 海外建設企業の参入問題発生	<ul style="list-style-type: none"> 建設マネジメント委員会発足('85, S60)

激しい時代となった。また、大正5年(1916)に着工し16年を要した丹那トンネル工事や我が国最初のケーソン工事となった永代橋工事など、日本経済の発展に伴い建設工事の規模も急速に拡大した。

以上のような経済変動や工事規模の拡大の結果、施工請負契約に伴うリスクが増大することとなり、この対応策として、それまで個人経営で運営されていた建設企業組織は、合資・合名会社や株式会社組織へ組織形態を変換する動きがでてきた。また、それまで施工契約として主流であった一括請負方式(ランブサム契約)に替えて、リスクヘッジを目的とした実費報酬加算方式(現在でいうコストプラスフィー(cost-plus-fee)方式)の導入が図られるようになった。

大正後期から昭和初期にかけては、日本経済の発展による東アジアへの進出にともない、日月潭発電所工事(台湾、1931~1934)や海南島開発工事(1941~1945)等の大型工事が、国策事業として外地で盛んに行われるようになった。しかし、昭和12年(1937)以降の日華事変の拡大とともに戦時統制が次第に強くなり、工事の施工方式も従来的一般競争入札制度は形骸化されていった。

(3) 戦後の復興期

昭和20年(1945)、日本のポツダム宣言受諾による無条件降伏により、我が国経済は荒廃と混乱の極地に陥った。しかし、荒廃した国土の復興事業や進駐軍のための施設工事などにより、建設需要はその後急速に復活した。昭和23年(1948)には、戦後復興の必要性から建設省が設置され、全国建設業協会が設立された。また、翌24年には建設業法が施行され、これにより「建設業とは、元請け、下請けその他いかなる名義をもってするかを問わず、建設工事の完成を請け負う営業をいう。」と定義された。

これ以後、建設業法等の制度的裏付け、共同企業体(joint-venture)による受注契約制度の導入、建設市場の恒常的な伸び等により、建設業は急速な成長を遂げた。この結果、現場における経営管理を軸とした戦前の“集合体的企業認識”は、企業全体を単位として経営戦略を図る方向に変化するようになった。この企業認識の変化を最も端的に表す出来事として、昭和24年(1949)から35年(1960)にかけて技術研究所の設立が相次いだ。

(4) 高度経済成長期

昭和30年(1955)代になると、日本経済は本格的な復興期にはいった。いわゆる神武景気による民間設備投資の活発化と、東京オリンピック(昭和39年開催)に向けた公共投資の拡大にともない、建設需要も急速に増大した。

また、この時期には、日本経済の拡大にともない、佐久間ダム(昭和28年着工)に代表されるような大規模構造物の必要性が高まり、建設業界ではこれに対応した大型工事の施工技術の確立の必要性に迫られた。つまり、これらの大型工事を日本経済の拡大に必要な期間で完成させるためには、それまでの労務を主体とした施工方法では対応できず、建設機械の大幅な導入による急速機械化施工法を取り入れることが必要不可欠であった。

しかし、当時我が国はこのような要求に対応できるような大型建設機械を製造する技術を持たず、外国からの輸入に頼る状況であった。そしてこのような建設

機械を輸入し保持するためには、建設企業にとって莫大な資金力を必要とすることとなり、昭和31年(1956)から40年(1965)にかけて、株式の公開による資本力の強化が図られた。

(5) 工事量の増加とPERTの導入

東京オリンピックが成功裡に幕を閉じ昭和40年代にはいると、それまでに加熱していた経済の鎮静化を目的として、金融の引き締めが行われた。この結果、企業倒産が相次ぎ、一時的に不況感が漂った。このように、昭和30年以降は周期的に好況と不況が波状的に繰り返す状態が続いたが、昭和40年代に入ってから、図-2.1に示すように、急激に建設需要が増加した。これは、米国向けの工業製品輸出が急激に伸び、そのための工場設備投資が増えた結果で、建設業界ではこのように急増する需要の消化に追われる状態が続いた。しかし、このような建設ラッシュの反動として、①熟練技能労働者不足や、②労働賃金の上昇、③建設資機材の高騰、等の問題が大きくなり、企業経営を次第に圧迫するようになった。

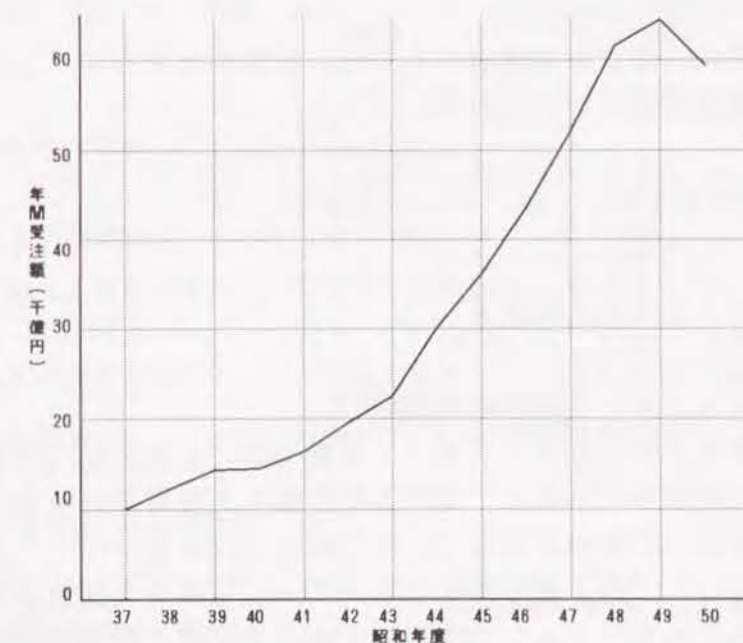


図-2.1 建設大手43社の受注高の推移 (建設統計要覧より)

現在、工程管理手法として有名なPERT(Program Evaluation and Review Technique)やCPM(Critical Path Method)は、昭和30年代前半に米国で開発され、30年代後半には我が国へも紹介されていたが、建設工事への導入は40年代になって本格化した。例えば、昭和43年に完成した霞ヶ関ビルの工程管理にはPERTが全面的に採用される⁴⁾など、その導入には多大な労力が払われた。また、この年代は、大型コンピュータの導入熱が建設産業界にも及んできた時期で、建設業各社は大型コンピュータの導入とその利用に積極的であった。このため、当時は新たな工程管理手法として脚光を集めていたPERT/CPMの利用をこの大型コンピュータで行うためのプログラムが、盛んに開発された。

そして、昭和46年(1971)のいわゆる“ニクソンショック”と呼ばれる円の為替変動相場制への移行や、昭和48年(1973)秋のアラブ諸国による石油供給停止を示唆する声明(いわゆるオイルショック)、等の世界経済の激動の影響を強く受けて、それまで驚異的な成長を続けていた日本経済に急激なブレーキが掛けられることとなった。

(6) 景気の停滞とVE・TQC導入運動

昭和50年代にはいると、日本経済はそれまでの急激な拡大から転じて、本格的な不況となった。このため、時の政府は“列島改造論”に代表されるような、それまでの拡大投資政策を180°転換して、総需要抑制策を実施し建設投資予算を大幅に削減し、さらに民間設備投資意欲も急激に低下したため、戦後1本調子で拡大成長を続けていた建設業界は、初めての停滞期に入った。

このような状況に対処するために、建設業界では安定成長が指向され、当時予想された低い建設需要の伸び率に合わせるように産業構造の再編成が図られたが、高度成長期に肥満化した産業構造の変革には、小規模企業の倒産や企業内における人員削減などの大きな痛手を伴った。

このような時期に、建設生産過程の合理化・省資源化を目的としてVE等の手法が、相次いで建設生産に導入された。

2. 科学的マネジメント手法の開発

(1) 科学的マネジメント手法の必要性

工程や原価管理などの工事マネジメント業務では、計画作成や進捗管理において各種の方法が用いられているが、これらの方法は、技術者自身が実際の工事を担当することにより、経験的に修得し、さらに自らの知見を加えて洗練化してきたものが多い。このことは、同じ工事であっても、担当する技術者の経験や能力の違いにより、そのマネジメントの精度は大きく異なり、担当者の選任を誤った場合、工事の遂行に支障をきたす事態も生じかねないという問題の一因となっている。

確かに、建設工事はその特質から全く同じ工事は2つと存在せず、各工事が各々ユニークであるため、その工事マネジメントの方法も、工事のタイプごとに違ったものとなることは理解できる。しかし、近年の建設プロジェクトが大規模・複雑化してきている状況にあることや、その結果、より多くの組織や人間が生産活動に関わるようになってきていることなどにより、これまでとは大きく異なる条件下でマネージしなければならない現状においては、技術者個人の経験と能力だけに依存した方法を用いていたのでは、マネジメント方法の合理化による生産性の向上は望むべくもない。

このため、工事マネジメントのための方法を明確化し、さらに標準化する試み

は、我が国においても、これまで多くの労力を掛けて行われてきた。そして、このような試みの理論的な裏付けとして、今世紀初頭から米国で発達してきた近代マネジメント思考が、大きな影響を与えてきたと考えられる。すなわち、品質管理におけるSQCの導入や、原価管理における工業会計法や価値工学(Value Engineering, VE)の導入、それに工程管理のためのPERT/CPMの導入など、我が国における工事マネジメント技術の発達において、主に米国におけるマネジメント手法の研究は、非常に大きな影響を与えてきた。そこで、本研究の技術的な背景を明確にすることを目的として、表-2.2に概略示した科学的マネジメント手法の開発と発展の状況について、ここで考察を加えることとする。

表-2.2 科学的マネジメント手法に関する研究の年譜

西暦	主要出来事	概要
1893~1897 1898	[大恐慌] 科学マネジメント創設	・F.W.テラーがベツレヘム製鉄会社に入社。クズ運び作業やショベル作業の作業研究を行い始めて、ストップウォッチによる時間研究を考案した。 ・テラー:「Shop Management」 ・テラー:「Principle of Scientific Management」
1903 1912	微細動作研究 (micromotion study)	・ギルブレス(Gilbreth)夫妻が、活動写真による動作研究(motion study)を発表。微細動作研究(micromotion study)と命名
1913	大量生産方式	・フォードがベルトコンベヤ方式による大量生産方式を創設
1914~1918	[第1次世界大戦]	
1923 1924	統計的品質管理法	・シエルドン: The Philosophy of Management ・ベル研究所のシュワート(W.A. Shewart)が統計的品質管理法を創設
1929	照明実験 [世界大恐慌]	・MayoがW.E.社で照明実験(ホーソン実験)を開始
1939	[第2次世界大戦勃発]	
1941 1943 1945 1946 1948	ブレインストーミング [第2次世界大戦終結] ENIAC完成 シャノンの情報理論	・オズボーンがブレインストーミング法を考案 ・ASQC(American Society of Quality Control)創設 ・シャノンの情報理論
1950 1956 1957	チューリングマシン ダートマス会議開催 CPM	・A.M.チューリング「Computing Machinery and Intelligence」を発表 ・J.マッカーシーによるAIに関する会議 ・デュボン社において化学プラントの設計・建設用に関与
1958 1969	PERTの開発 目的として開発 第1回人工知能国際会議	・米国海軍によりポラリス・ミサイル開発管理を

(2) 米国における近代マネジメントの創生

科学的マネジメントの研究は、米国においてテラー(F.W. Taylor, 1856~1915)によって創設されたといわれている。彼は1898年にベツレヘム製鉄会社に入社し、

“クズ運び作業”や“ショベル作業”に対して、始めてストップウォッチによる作業研究を行い、1日の標準作業量を設定し、これを課業(task)と名付けた。そして、この課業による管理を行い「能率給制度」を考案し、これらの研究を取りまとめて1903年には『工場管理(Shop Management)』、1912年には『科学的マネジメント法原理(Principle of Scientific Management)』を著した。この後、彼の研究は単に課業管理にとどまらず、工程管理、工具管理、倉庫管理、運搬管理、さらには生産組織構成など、経営管理全般に適用するものに拡張されていった。

また、同じ時期にギルブレス(Frank Bunker Gilbreth, 1868~1924)夫妻は、レンガ積み作業の動作研究(motion study)を行い、活動写真を用いて記録した動作を17の基本要素(therblig)に分解し、合理的な動作を見いだす方法を考案し、これを微細動作研究(micromotion study)と名付けて1912年に発表した。

翌1913年には、以後の近代工業発展に大きな影響を与えた、ベルト・コンベアによる大量生産方式がフォード(Henry Ford, 1866~1947)により考案され、自動車の生産過程に適用された。また1924年になると、ベル研究所のシュワート(W.A. Shewhart)によって統計的品質管理法が創設され、統計学が工場管理の有力な手段となり、後日の実験計画法の端を開くものとなった。

このように、科学的な方法を用いた近代マネジメントの考え方は、米国において創設され、工場生産を対象として発達してきた。この結果、米国の工業生産力は飛躍的に向上し、第1次世界大戦で疲弊した欧州に替わって、世界をリードするようになった。しかし、このような近代マネジメントの研究は、工場における多量生産に適用されて大きな成果を発揮したものの、建設産業のように個別受注生産に適用されるまでには至らなかった。

3. 工事マネジメント技術の開発

前項では、工事マネジメントの基盤をなす近代マネジメントの創生期の概要に関して述べたが、ここでは、工事マネジメントを遂行する上で必要となるマネジメント手法に関して、品質、原価、工程、安全の4項目に分けて、手法の開発と改良の経過、および現状の問題点に関して、より具体的にその概要を述べることにする。

(1) 品質管理法の開発

近代的品質管理法に関する研究は、1920年代の米国において開始された。ベル研究所のシュワート(W.A. Shewhart)は、従来からの品質管理に統計的手法を取り入れた研究を行い、統計的品質管理法(Statistical Quality Control, SQC)を提唱した。また1928年には、同じくベル研究所のドッジ(H.F. Dodge)とロミング(H.G. Roming)らが、抜取り検査に関して推測統計学を応用した理論を発表している⁸⁾。ともに近代的品質管理法の基礎を築いた研究であったが、彼らの理論は当時の米国内では高い評価を得られなかった。しかし、1940年代になると第二次世界

大戦が勃発し、それにともなう軍需物資の増産を背景として“厳しい品質管理”の必要性が増大した。この結果、彼らの理論は米国産業界に急速に普及することとなった。

以後、統計解析手法を中心に手法の改良が進められ、1960年代になるとZD運動(Zero Defects)やTQC(Total Quality Control)の普及活動が進められた。このTQCとは、シュワートの統計的品質管理法を母胎として、1960年代当時GE社のQC部門の最高責任者であったファイゲンバウム(A.V. Feigenbaum)が品質管理活動の適用対象を会社全体に拡大して推進し、この活動全体をTQCと命名したものである⁹⁾。

我が国の製造業においては、1950年のデミング(W.E. Deming)の来日以来、「QC七つ道具」などの手法や小集団活動(QCサークル)を通じてTQCが広く普及し、日本的なTQCの理論および技術を確立するにいたった。また、我が国の建設業においても、田村による「建設業における管理思想の変遷」(1980)¹⁰⁾の中で詳しく述べられているように、1975年頃からTQC導入の機運が急速に高まり、全社的な活動として適用事例も増加してきた。このような状況の中で、日本工業規格(JIS)では1981年の改訂時に、このTQCを「総合的品質管理」あるいは「全社的品質管理(Company Wide Quality Control)」と規定した¹¹⁾。また、現在ではTQCの考え方を一歩進めて、施主の要求する品質を確実に保証するための体系的活動として、品質保証(Quality Assurance, QA)の概念が強く提唱されるようになってきた。

しかし、これまでの品質管理手法の研究では、「管理基準値を満たしバラツキを少なくする方法」の発見やその適用方法に主眼が置かれているように推察される。すなわち、これらの手法の評価基準となる“管理基準値”の設定方法に関する研究は非常に少ないのが現状である。周知のように、建造物の品質とは、美観などの定性的な要因も含めて、その建物が必要とする機能によって決定されるものであり、当然コストと緊密な関連がある。従って、このような“管理基準値”を機能とコストとの関係から明らかにしていく研究が、生産性向上を主眼とする工事マネジメントの観点からすると、今後は特に重要となるものと考えられる。

(2) 原価管理法の開発

原価管理の主要な目的としては、原価低減(Cost Reduction)と原価統制(Cost Control)がある。この内、前者に関する初期の研究には、テイラー派の人々による作業効率に関する研究があるが、機能とコストの関係から合理的に原価低減法を明らかにしたのは、マイルズ(L.D. Miles)により創設された価値工学(VE, Value Engineering)である。当時(1947)、米国GE社の購買課長をしていたマイルズは、製品が必要とする機能とそのためのコストに関する研究を進め、製品の原価を低減させる方法として価値工学を提唱するに至った¹²⁾。我が国には1955年に米国へ派遣された日本生産性本部主催の「コスト・コントロール視察団」により初めて紹介された¹³⁾。そして、一般製造業ばかりでなく、建設業の設計過程や施工過程に順次導入された。特に、馬場は施工部門でのVE利用を推進するために、VE計画会議や3時間VE手法を考案して大きな成果を上げることに成功した¹⁴⁾。

また、後者の原価統制に関しては、それまでの「実際原価計算方式」を批判し「標準原価計算」の必要性を説いたハリスン(G. C. Harrison)やフィッシュ(J. C. L. Fish)らの研究が初期のもので、以後、工業会計制度として発展してきた。

建設業における原価管理の問題としては、一般的に着工前の予算計画段階におけるものと、着工後の予算統制段階におけるものに分けて考えられる。前者においては、標準原価の設定や原価低減が主な目的となり、これに関する研究としては、黒田の設計・積算方式の標準化に関する研究¹²⁾や古阪の概略積算法に関する研究¹³⁾などがある。これに対して、後者の原価統制段階では、工事の出来高数量とそれに要した費用に基づいた進捗分析、ならびに、この分析による問題点の発見とその対応策の検討に基づいた原価統制が主要な目的となる。そして、この進捗分析に関しては、工事原価と工程計画との関係が明確に把握できるPERT/COSTや工事原価と施工組織との関係を階層的なマトリックス構造で表現するWBS(Work Breakdown Structure)を用いたプロジェクト・マネジメント法の研究が行われてきた。しかし、進捗分析による問題点の発見方法とそれに基づく原価統制(低減)法などのように、本質的に企業のノウハウに係わる研究は、それとは全く異質な財務会計法などの研究は別として、非常に少ない。

すなわち、工事の進捗時における原価統制とは、実質的には重点管理対象のコスト・ダウンが主な目的となるが、どの部分をコストダウンの対象としたらいいのか、また、どのような方法でコストダウンするのかに関する研究は非常に少なく、現場でマネイジする技術者の経験と能力に依存しているのが現状である。

(3) 工程計画法の開発

建設工事の工程計画法として最初に登場したのは、ガント(Henry Gantt, 1861~1919)によるガント・チャート(gantt chart)である。彼は科学的マネジメントの祖といわれるテイラー(F. W. Taylor)の指導を受けたテイラー派の一人で、第1次世界大戦(1914~1918)中にこの手法を開発したといわれている。しかし、時間軸上に作業を棒で表すという考え方は最も基礎的な考え方であり、一般にはバーチャート(bar-chart)と呼ばれ、それ以前からも様々な様式のものが存在していたと考えられる。このため、マックグルー(E. H. McGough)も述べているように、“従来から行われてきたバーチャートを、ガントが体系だてて普及を図った工程計画法をガントチャートと呼ぶ”¹⁴⁾と考えるのが妥当であろう。

また、1950年代にはいると、製造プラントの生産工程管理を目的に、米国海軍によりラインオブバランス(LOB, Line of Balance)が開発された。この手法は、目的とする最終製品の計画生産数量曲線に対して、そのために必要となる材料生産量の推移を、事前に知ることができる。また、製造過程においては、現時点における各材料の生産数量が、今後の製品の生産量に与える影響を、把握することが出来る。このため、コンクリート・ダムにおけるプラント管理、建築工事におけるPC部材管理など、多数の同一ユニットが順番に製造、組立られるタイプの工事に適用することが可能と考えられている。

1950年代後半になると、現在、ネットワーク手法の中で最もよく使われているPERT(Program Evaluation and Review Technique)とCPM(Critical Path

Method)が、ほぼ同時期に開発された。CPMは、作業の所要時間と作業間の順序関係に基づき、工程の最長経路(critical path)をネットワーク理論を用いて解く手法で、1957年デュボン社とレミントランド社が、化学プラントの設計・建設用に共同開発したといわれている。また、PERTは、翌1958年に米国海軍のSPO(Special Project Office)が、ポラリス・ミサイルを開発するのに際し、ブーズ・アレン・ハミルトン社(Buzz Allen)と共同で開発した。PERTが、当初、時間管理中心だったのに比べて、CPMはコストと時間との関係に重点が置かれ、特に工期の短縮とそれに要する費用を線形計画法(LP, Linear Programming)で求めるという違いがあった。また、PERTが作業の所要日数を、楽観値(a)、最可能値(m)、悲観値(b)を三点見積りに対して、CPMでは確定的な一点見積りを用いた。しかし、その後の改良により、両手法の機能的な差はほとんどなくなり、現在ではPERT/CPMと並べて用いられるようになってきている。

1960年にはいると、急速にPERT/CPMの普及が進んだ。この理由の1つには、当時、随時契約実費清算方式(negotiated cost-reimbursable basis)による工事契約が普及を始め、このために発注者が工事管理を以前より厳密に行うようになったこともあるが、コンピュータの技術革新も、この流れの大きな原動力となった。つまり、当時は、それまでのトランジスターを使った第2世代コンピュータから、IC(Integrated Circuit)を用いた第3世代へと飛躍した時期にあたり、コンピュータの記憶容量と処理スピードは飛躍的な発達を遂げた。そして、この結果、手法のプログラム開発が進み、コンピュータ利用による利便性から、PERT/CPMの適用が急速に進むこととなった。また、このプログラム化の流れの中で、時間コスト曲線(time-cost curves)表示機能(1964)、リソースのレベリング機能(1965)、時間-コストの動的計画(dynamic programming)法(1967)、カレンダー機能(1968)、等の発表が相次いで行われた¹⁵⁾。

しかし、このように手法の改良が進むにしたがって、PERT/CPMの持つ根本的な問題点も指摘されるようになった。例えば、不確定要因の多いプロジェクト計画では、あるアクティビティの実施結果が以後のアクティビティの内容までを変えることがあるが、このような関係を従来のネットワーク手法で表現することはできなかった。そこで1966年に、プリッカー(Pritsker)は、工程ネットワークの中に、確率表現やフィードバック機能を持たせた手法を開発し、これをGERT(Graphical Evaluation and Review Technique)と名付けた。

以上のように、1960年代はネットワーク手法の改良とそれを適用したプログラム開発が急速に進められた時代であったが、あまりにも手法が複雑となってしまったために、かえってネットワーク手法の利用が難しくなるという弊害も生じた。このために、スタンフォード大学のフォンダール(Fondahl)は、「コンピュータを用いないCPMの利用法に関する報告書」(1962)¹⁶⁾を発表し、①手法が実用的で多くのプロジェクトに適用できる、②段階的に計算を進めることにより計画内容の問題点を発見できる、③手法の前提条件や解法を理解できる、の3点により手計算の有効性を主張したほどである。

1970年代に入ると、我が国でも霞ヶ関ビル建設プロジェクトなどで、PERT

／CPMが導入されるようになったが、ネットワーク法利用の先進国である米国では、逆に、PERT／CPMの普及が頭打ちとなり、“ネットワーク手法はどのような工事にむいているか？”といった議論が行われるようになってきた。これは、建設契約方式として実費清算方式(cost-plus-fee)やCM方式(Construction Management)が普及したことにより、「契約管理のためのネットワーク手法」という位置づけは確立してきたものの、これを実際の工事管理までに適用する段階に及んで、各種の実務上の問題点が発見されてきたためとみられる。

以上のように、建設契約の遂行を目的とした進捗管理手法として、ネットワーク手法の利用は一般的となったが、施工者が行う工事管理のための研究も続けられた。例えば、この頃からポールソンらにより「ネットワーク手法によるマネジメント・システムの統合化」が議論されるようになったが、これも、このような研究の流れの一貫といえる。

また、同様な目的から、ネットワーク手法以外でも、特定の種類の工事を対象とした工程計画法やより簡便な計画手法の研究が行われた。例えば、地下鉄やトンネルなどの線形的な特徴を有する工事に関しては、視覚的に理解しやすい斜線式工程表(space diagram)の適用研究が進められ、超高層ビル建築を対象としたVPM(Vertical Production Method, J. O'Brien, 1975)¹⁷⁾や高速道路工事を対象としたLSM(Linear Scheduling Method, D. W. Johnston, 1981)¹⁸⁾が、提案されている。

また、1981年には、バー・チャートを改良したFBC(Fenced Bar-Chart, J. W. Melin)が、提案されている¹⁹⁾。これは、作業間の順序関係を考慮しないことから起こるバーチャートの問題点を解消することを目的とした手法で、作業の余裕(float)を作業棒の右端から延ばした破線と縦棒(fence)で表すことにより、①後続作業との順序関係と、②各経路のトータル・フロートを図上で理解できるようにした。しかし、この方法は、アクティビティを表す箱を時間軸上にスケールアップして表示するTPDM(Time-scaled Precedence Diagram Method)が、この後に開発され、FBCの機能を凌駕してしまったために、現在ではほとんど利用されていない。

これまでに述べてきた工程計画法開発の概略を表-2.3に示す。

(4) 安全管理法の開発

安全に関する科学的な研究は、米国のThe Travelers Insurance Companyの安全技師であったハインリッヒ(H. W. Heinrich)による『産業災害防止論(Industrial Accident Prevention)』(1931)が初期の研究として有名である。彼はこの中で、災害統計資料から死亡重傷・軽症・無傷の比を分析し、いわゆる“ハインリッヒの法則”と呼ばれる法則を発見している²⁰⁾。また1962年には、米国のベル研究所のワトソン(Watson)がミニットマン・ミサイルの発射制御システムの安全性解析のためにFTA(Fault Tree Analysis)を考案した。1965年には、コロドナー(Herbert J. Kolodner)が安全性の定量化に関する研究として、FTAを用いた研究を発表している²¹⁾。また、個々の要素の故障が全体システムにどのように影響するのかを定性的、帰納的に求める手法としては、FMEA(Failure

Mode Effective Analysis)が重要であり、現在では米国航空宇宙局(NASA)等の多くの政府機関で実際に用いられている²²⁾。

表-2.3 工程計画法開発の歴史

年代	開発状況
1910	ガントによるバーチャートの普及
1950	米国海軍によるLOBの開発 デュボンにおけるCPMの開発(1957) 米国海軍によるPERTの開発(1958)
1960	米国建設会社でネットワーク法が使用され始める フォンダールによる手計算法の提案(1962) ブリッカーによるGERTの開発(1966)
1970	PERT普及はピークとなり、以後高原状態が続く オブリエンによるVPMの提案(1975)
1980	リニア・スケジューリング法の提案(1981) フェンスド・バー・チャートの提案(1981)

建設分野における安全管理手法としては、上記の安全(信頼性)工学手法やKYT(危険予知)法などが最近では適用されているが、この分野における初期の研究としては、騒音と機械操作に関するオトボニ(F. Ottoboni)の研究(1967)²³⁾や、初めて安全工学にヒューマン・ファクターを取り入れたデストウォリンスキー(Lance W. deStwolinski)の研究(1969)²⁴⁾、さらに詳細な作業分析をもとに建設作業への安全工学の適用を体系的に取りまとめたパーカー(Henry W. Parker)の研究(1972)²⁵⁾などが有名である。

しかし、我が国におけるこの種の研究はまだ非常に少なく、わずかに小林による高所作業における心理的負担に関する研究(1976)²⁶⁾や川村による橋梁事故解析へのFAT適用に関する研究²⁷⁾、それに花安・鈴木による建設労働災害統計データ分析に関する一連の研究²⁸⁾が散見されるのみであり、我が国の工事マネジメントにおける安全に関する研究はまだ底の浅いものといえる。特に、建設工事においては労働災害の多さもあって、適切な対策の研究がなされないまま法制度のみが厳しくなるという状況にある。従って、建設工事の安全性だけでなく、そのためのコストに関する研究が、今後は重要な課題となってくるものと考えられる。

(5) 工事マネジメント技術の現状

これまで、品質、原価、工程、安全という4要素に分類して、工事マネジメントに係わるマネジメント手法の開発と現状について述べてきたが、各要素に共通していえる特徴は、各要素ごとの数値情報を操作するものが多く、他の要素との関係や、それらを総合的に判断する方法、それに定性的な情報の取扱い方法に関しては、あまり研究がなされていない。例えば、品質管理では品質保証の概念が強調された結果、コストとの関係はそれほど重要視されてきていないし、原価管

理においても財務会計的な支出管理が中心をなし、工程や品質との関係も含めて管理する研究は、あまり進んでいない。また、安全管理においては、FTAやFMEAなど、安全性の定量化に関する手法は存在するものの、これらを工事マネジメントに適用するための応用研究は、あまり行われていないのが現状である。

以上のように、工事マネジメントの遂行に必要な手法には、①主に数値情報だけを取り扱う、②複数の管理要素を同時に取り扱いにくいなど、まだ数々の問題点が存在する。例えば、工程と投入資源や原価との関係を表す手法として、これまでPERT/manpowerやPERT/costなどの手法が提案されているが、これらの手法は工程と資源や原価との関係を単純な数値関係で表しているだけであって、これだけでは工事マネジメントの中で旨く利用することはできない。

このため、以上のような問題点に関して、工事マネジメント業務の中にどのように組み入れるのかという視点で、今後とも具体的な研究を進める必要があるものと考えられる。

第3節 建設マネジメント組織

1. 工事マネジメント組織の現状

(1) 工事マネジメントの定義

近年、米国においては、建設プロジェクトの新しい請負契約の方式として、図-2.2に示したようなCM(Construction Management)方式が採用されるケースが多くなってきている。このCM方式とは、従来からの一括請負契約(lump-sum contract)では対応できないような、大きなリスクが存在する大規模工事によく用いられ、CMr(Construction Manager)と呼ばれる建設プロジェクトのプロフェッショナルが、設計段階からプロジェクト完了まで施主のコンサルタントとして活動し、その技術力の対価としてフィーを受け取る²⁹⁾。これはコストプラスフィー契約とよく似ているが、プロジェクトの設計・計画段階から参加して、設計が完了した部分から段階的に工事を発注する段階的発注(phased construction)により、従来より早期にプロジェクトを完了することが出来る点が異なるといわれている³⁰⁾。

そして、このようなCM方式では、当然のことながら、施主、設計者、CMr、サブコントラクターなど多くの組織が建設プロジェクトの遂行に関係するため、関係者が工事の計画や進捗状況に関して共通の認識を持つ必要があり、そのための手法としてPERTやCPM等のネットワーク手法が再評価されてきている。また、CMrは技術の対価としてフィーを受け取るのであるから、中核となってプロジェクトを推進していくための豊富なマネジメント技術力が要求され、この意味からも建設マネジメントの契約形態としての面だけではなく、技術的な側面も重要視されるようになってきている状況にある³¹⁾。

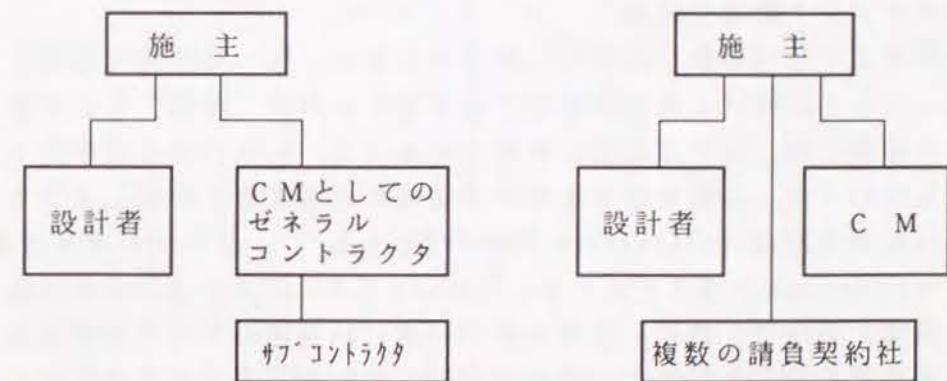


図-2.2 CM方式による建設プロジェクトの契約形態³²⁾
 (「Professional Construction Management」より)

本研究は、企画から維持管理までの建設プロジェクトの流れの中でも、直接的に施工と関係する「施工計画・管理」部分を研究対象として、これを工事マネジ

メントと称しているが、この言葉には、主に米国において発達した I E (Industrial Engineering)、V E (Value Engineering)、Q C (Quality Control)等の近代マネジメント手法を建設現場に適用し、管理業務の近代化を図りたいという意図がある。そして、その方法として、米国の CM方式で用いられる、工程ネットワーク手法を中核としたマネジメント・システムを、我が国の実状に合わせて改良することにより、現状の工事管理業務の中に取り入れることが重要であると考へ、本研究の主要なテーマとしている。

本研究では以上のような認識のもとに、工事マネジメントという言葉を用いているが、以後の研究内容を明確とするために、ここで改めて本研究における工事マネジメントの定義を行っておく。

工事マネジメントとは
 目的とする構造物を構築するための生産活動を合目的的に行うために、生産に関わる人や物、金、それに情報を組織化、システム化して、さらにこれらの生産組織やシステムを目的を遂行するために統制し運用すること

この定義により、工事マネジメントにおいては、生産材としての人や材料や金を効率的に使用して工事を遂行するための組織、及びその遂行を円滑に行うための組織内部や組織間の情報伝達が必要不可欠であることがわかる。つまり、工事マネジメントにおいては、マネジメントを実行するための「組織」と組織が効率的に活動するための「情報システム」が重要な構成要素となる³³⁾。

本研究は、工程管理業務を中核とした工事マネジメントのシステム化が目的であるが、まずそのようなシステムが稼働する組織と情報システムの本質を明らかにすることを目的として、この両者に関する現状とその問題点、および今後のあり方に関して、以後、基本的な考察を加える。

(2) マネジメント組織の発達

人間は個人としての活動の限界を克服するために、様々な協働を展開してきた。この協働システムが時代と共に高度化されて来たものが“組織”と言われている。このような組織には、外的な環境に影響される中で、組織自体の効率化を図ろうとする特長を持つが、これを踏まえながら複雑な組織現象を解明しようと考えられたのが状況適合理論 (Contingency Theory)である³⁴⁾。この状況適合理論とは、ローレンス (Lawrence, P. R.)とローシェ (Lorsch, J. W.)により1967年に出版された『組織と環境』の中で、技術・市場の変化の激しい環境のもとでの組織の内部特性の条件適応性を論じた理論で、組織が直面している不確実性や多様性に適応するための一般理論を追求しようとするものであり、後にサイバネティクス概念を援用することで、環境変化に組織が動的適応するメカニズムを示すものとなった。

この理論で明らかになったことは、組織形態と環境適応、組織戦略には一貫したパターンが存在し、これに沿って組織形態が発展して来たことである。古典的

管理論においてテーラーがファンクショナル組織を、フェイヨルがライン組織を提唱した。前者は、技術への対応を重視する専門化・効率型の組織形態を志向し、生産においては規模の経済性が得られるが、機能部門間にセクショナリズムが生じやすいという短所がある。これに対し後者は、外部環境への適応を重視する秩序化・問題解決型の組織形態であり、環境への適応性に優れるが、技術の内部蓄積が行われ難いという短所を持つ。

この両者の短所を補う目的から、1850年代の米国でラインスタッフ組織が考案された。さらに、これをより環境適応型に改良したものが、地域もしくは生産品ごとに分権化された事業部組織であり、より機能別に集約したものが機能部門別組織と言える。また近年になって、組織を取り巻く環境がより厳しくなったこと、技術的な不確実性が増大したことに対応するための組織動態化の手法として、機能部門制組織と事業部制組織を2次元的に組合せたマトリックス組織や、新たにプロジェクト組織、ネットワーク組織³⁵⁾などの概念が登場してきた。

以上のように、組織は経営環境の変化に対応して自ら組織形態を変化させてきたが、この過程においては図-2.3に示したように、①仕事の専門化・効率化、および②組織秩序の維持と問題解決の効率化、という2つの相対する目的が存在し、この両者の重みのバランスによって、いくつかの組織形態が提案されてきている。

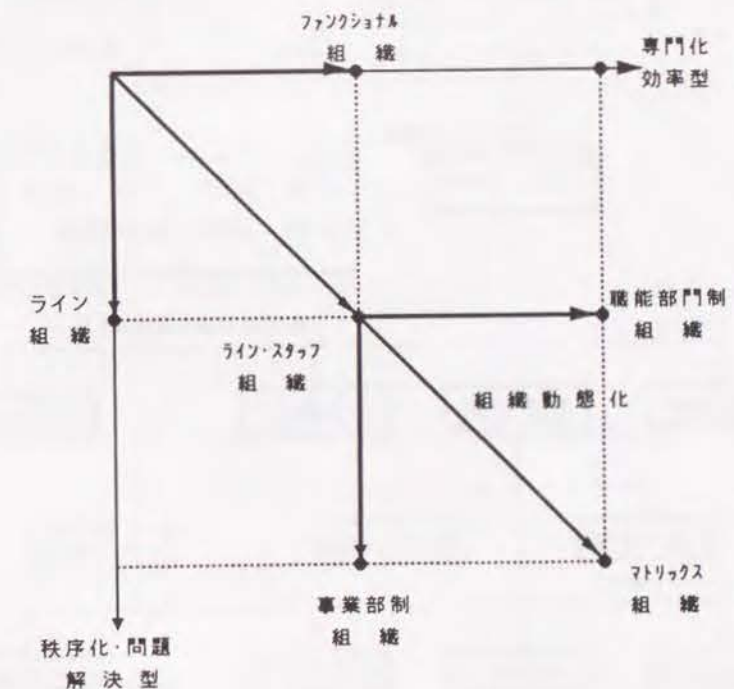


図-2.3 経営組織形態の発展過程³⁵⁾

(3) 建設企業の組織形態

以上のような経営組織の発展過程の中で考えると、建設企業における現在の組織形態は、図-2.4で示すように、全体としては本社と独立採算的な支店という事業部組織であり、その内部は人事・管理等のライン部門と、経理、設計、見積等

の職能別スタッフ部門に機能化されたラインスタッフ組織とすることができる。

また、地方中核都市には営業機能を集約した機能組織として営業所が設置され、工事の受注に対応して、その工事を完成させるという単機能を持った作業所組織が編成され、工事場所近辺に設置されるのが一般的である。

以上のような建設企業の組織構成は、建設生産システムの特徴から、地域性の強い組織構成となっている。つまり、組織を本社から作業所にいたる縦構造と見ると、一部の権限に関しては、地域に密着した支店ないしは作業所などの下位組織に、より多く委譲されている。このような特徴により、建設企業組織は巨視的にみると地域的事業部組織とみなすことができる。

(4) 作業所を中心とした生産組織

前述したように、工事の受注に対応して編成される作業所組織は、その工事を完成させるという単一の機能を持って、工事場所近辺に設置されるのが一般的である。これは、生産活動の大部分を現地で行わなければならないこと、さらに屋外生産のため自然環境の影響を強く受けること、個別受注生産であること、などの建設生産の特徴に起因している。

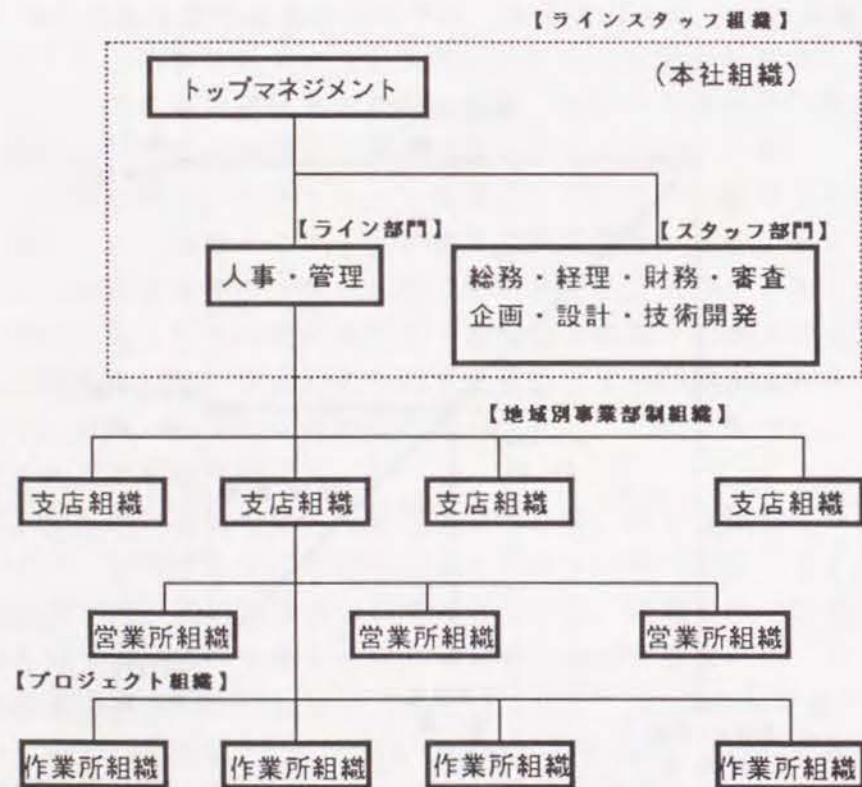


図-2.4 建設企業の組織形態

特に、交通機関や通信手段が未発達であった時代には、工事の途中で一時的な援助を外部から得るためには、多くの困難を伴ったために、建設工事組織は、その工事を遂行するための全ての機能を保有するのが普通であった。

そして、このような組織形態は、①明確な達成目的を持つ、②目的達成のため

の全機能を保有する、③所長を頂点としたピラミッド構造を形成する、④組織の運営はトップダウンで行われる、等の特徴から問題解決型のライン組織ということもできるが、⑤組織存続の期間が有限である、⑥組織構成がプロジェクトの進行と共に変化する、という特徴から、一般にはプロジェクト組織、またはタスクフォース(taskforce)と呼ばれる。

このような特徴を持った作業所組織は、図-2.5に示すように、建設工事を遂行していく上で、他の多くの組織と関係する。この図の中で、作業所組織と協力会社組織が一体となって建設工事のための組織を形成してきたが、近年の建設プロジェクトの大規模化や複雑化により、特殊技術を持ち特定のゼネラルコントラクターに属さないサブコントラクターや、大型機械を保有するリース会社などとの関係が重要となってきている。

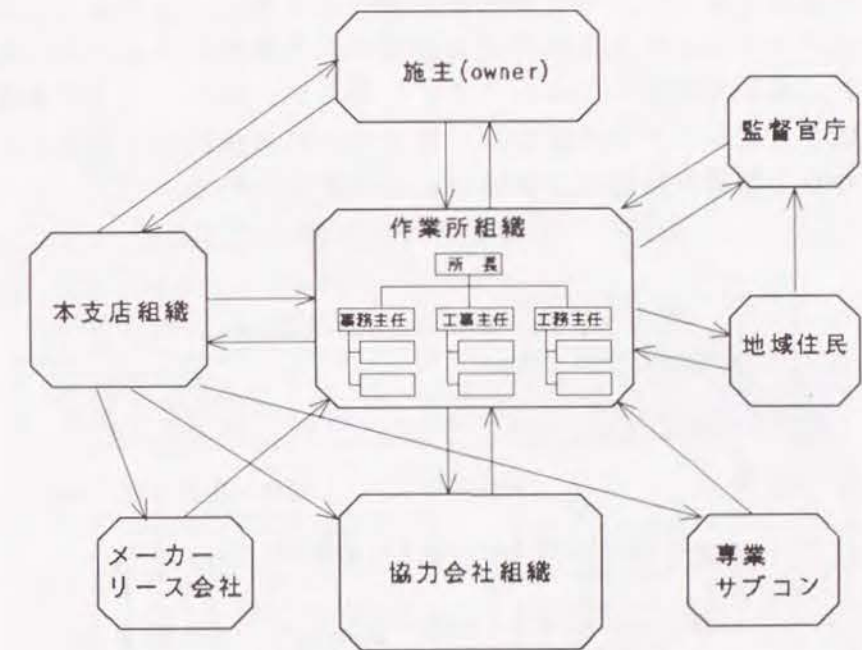


図-2.5 作業所を中心とした組織間の関係

2. 施工環境の変化と組織の動態化

(1) 作業所組織の動態化

近年、社会経済変動に伴い、建設企業ばかりでなく企業経営を取り巻く環境は、大きく変化してきている。また、それに起因する不確実性も増大してきているために、これらを個別の部門だけで対応するのではなく、全社組織で対応する必要が起きてきた。この結果、例えば図-2.6に示すような従来のスタッフ部門の権限を強化した本支店間の組織形態や、委員会や研究会などの部門間にまたがる組織形態など、ラインスタッフ組織をマトリックス組織に変更する試みが多くなっ

できた。

また、建設生産に直接係わる状況を見ても、

- ① 工事規模の多様化、
- ② 職員の高齢化・同年齢化、
- ③ 施工条件の不確定化、
- ④ 施工技術の高度化・複雑化、
- ⑤ 情報処理・通信システムの発達、
- ⑥ 交通手段の発達、

など近年になって急速に変化してきており、作業所組織の編成にも大きく影響するようになってきた。

この結果、①小刻みに人員構成を変化させ難い、②ピラミッド（年功序列）型体制が取り難い、③全ての機能を保有するためコスト増となる、④現場職員にとって新技術の修得が難しい、などの問題点が指摘されるようになってきている。

ローレンスとローシェによる状況適合理論に示されているように、組織形態は環境の変化に適応して変貌するものである。そして、以上のような多種多様な環境変化に直接さらされる作業所組織は、今まさに組織体制の変更を迫られている状況、すなわち「組織の動態化」状態にあると考えられる。

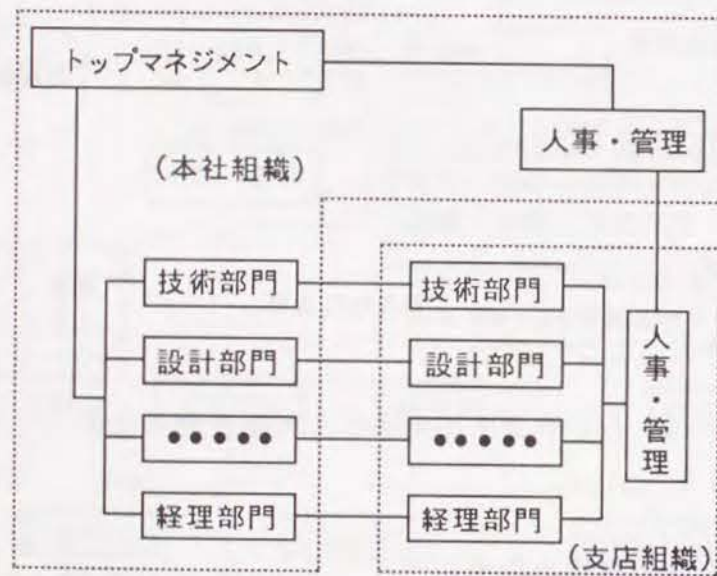


図-2.6 建設企業におけるマトリックス組織

作業所組織の動態化の手段としては、支店組織と作業所組織のマトリックス組織化が考えられる。これは、工事に対する両者の権限配分の割合を変化させることによって可能となるが、当然のことながら工事規模や施工条件は個々の工事で異なることから、様々なケースが考えられる。

支店組織と作業所組織が持つ権限の比率から、組織形態の変化を図示すると図-2.7のようになる。すなわち、建設工事に関する全ての権限が作業所組織に与えられている場合が、純プロジェクト組織であり、その逆が純ファンクショナル組

織（つまり作業所組織という別組織が存在しない）で、マトリックス組織はこの両者の中間に位置することになる。また、作業所組織構成に影響する要因と組織形態との関係を定性的に検討した結果を、表-2.4に取りまとめた。

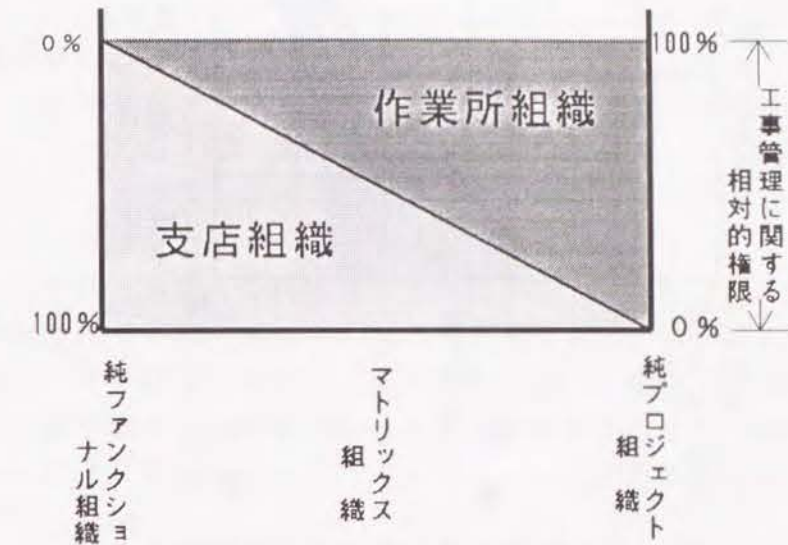


図-2.7 組織形態と管理権限との関係

表-2.4 組織構造選択に関連する要因

組織構造選択に影響する要因	選択される組織形態	
	マトリックス組織	プロジェクト組織
建設工事の規模・期間	中小規模	大規模
工期制約	緩い	厳しい
原価制約	厳しい	緩い
資源制約	厳しい	緩い

(2) マトリックス組織の編成

最近の工事マネジメントでは、事務職員が数現場を兼務するとか、支店にプールした技術職員を一時的に忙しい作業所に派遣するという現象が既に起こっている。これは、①工事用資源の共同利用、②固定経費の削減、③リスクの分散、④需要変動への対応、等を目的として、複数現場の最適化を図るマルチ・プロジェクト組織的な考え方が取り入れられたもので、今後その必要性がさらに増してくると予測される。これなども、プロジェクト組織のマトリックス組織化の傾向を示唆したものととれるが、今後の作業所組織形態の傾向としては、図-2.8に概念的な傾向を示したように、組織形態のバリエーションが多くなって行く中で、全

体としては支店管理の色彩の強いマトリックス組織へ移行して行くものと推定される。

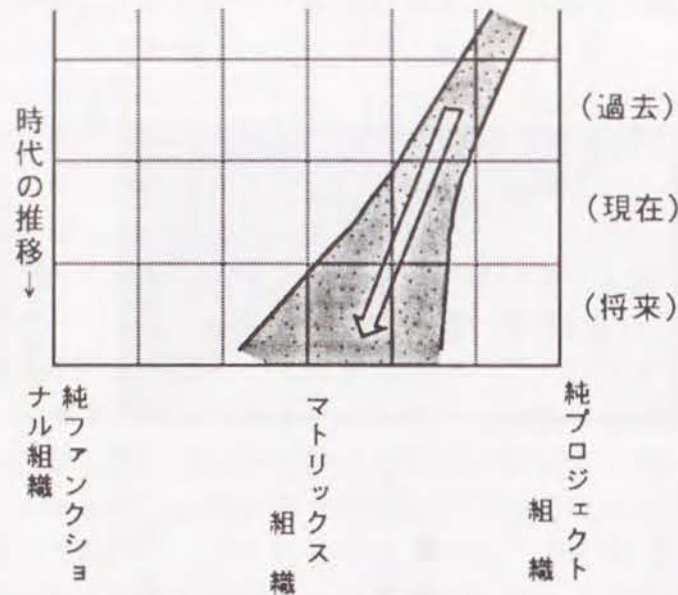


図-2.8 作業所組織形態変遷の概念図

また、我が国においてはマトリックス組織を組織活性化の一手法と考える見方がある³⁷⁾が、前述した「現場職員の高齢化、同年齢化」という今後の大きな問題点に対応するためにも、現場職員を固定的な基幹要因と一時的な派遣要因から構成するというような、作業所組織のマトリックス化が進められるのではないかと推測される。そこで、このような組織形態の一例を図-2.9に示す。

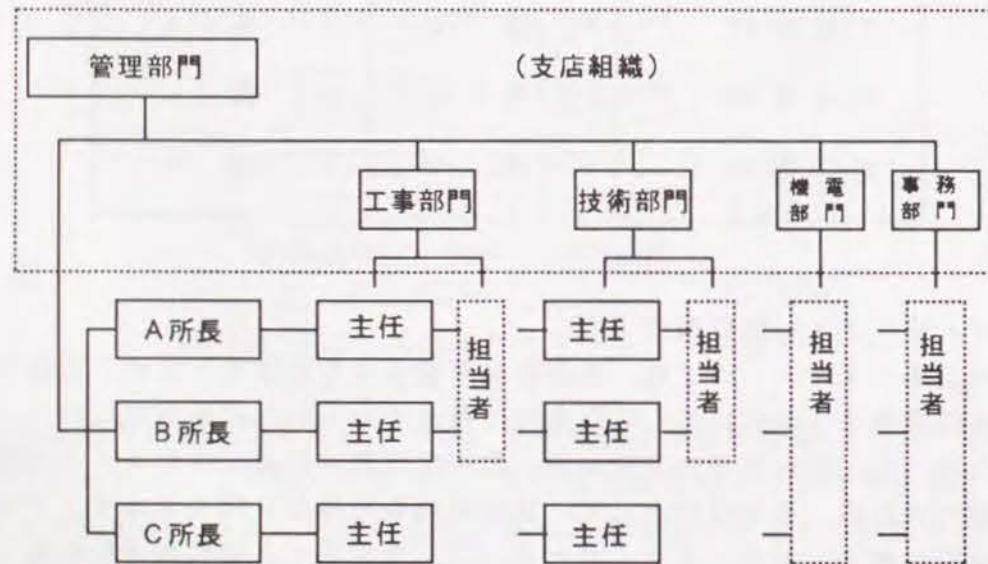


図-2.9 マルチプロジェクト組織の例

第4節 マネジメント情報システム

1. マネジメント情報システムの発達

(1) 作業所を中心とした情報システム

図-2.4に示したように、建設工事を直接的に推進する作業所組織は、その目的を達成するために、種々の外部組織と連携してマネジメント業務を実行している。そして、このような連携を実行するためには、文字情報だけでなく地形や土質など様々な形をした情報の伝達が必要不可欠である。

しかし、これまで作業所で利用できる情報システムとしては、郵便や電話、それに電報がほとんどで、情報伝達のスピードや確実性、ならびに伝達できる情報の種類には、大きな制約があった。このため、会計情報や通達文書など作業所と支店間等の情報量の多い組織間では、人間が書類を運んだり、緊急の事態に対しては、その道の専門家が現場に直行するなど、人間の移動に大きく依存した情報システムであった。

そして、国内の交通機関が現在ほど整備されていない時代においては、人間の移動には時間がかかり、緊急事態に対処できない恐れがあった。また、人間の移動には大きなコストを伴うため、これまでの作業所組織では、建設工事を遂行するために、建設機械や技能員、それに技術者等、ほとんど全ての建設資源や機能を保有しているのが普通であった。そして、保有している資源を効率よく用いて如何に速く工事を完成させるのかが、工事マネジメント技術者の腕前とされていた。

現在では、新幹線や国内航空、高速道路など、高速交通ネットワークの整備が進み、人の移動は大変スムーズとなってきた。また、通信技術の驚異的な発達により、これまで音声しか伝達できなかった電話回線を用いて、文字や画像情報までも高速に伝えることが出来るようになった。また、現在普及が進んでいるISDN(Integrated Services Digital Network)では、文字や音声、それに画像情報を同時に高速で通信できるようにもなっている。

このような、交通手段や通信技術の発達は、作業所を中心とした工事マネジメント・システムにも大きな影響を及ぼすことが容易に想像できる。従って、以前の交通・通信技術を前提として構築されてきている従来の作業所組織と、そのマネジメント情報システム(MIS, Management Information System)は、現在、このような新しい技術を前提とした形態に変革が迫られている状況にある。

また、工事規模の大型化にともない、工事マネジメントを行う技術者も多くなり、作業所組織は拡大してきている。このため、これまでは少数の担当者間の打ち合わせだけで済んでいた情報交換も、関係者が多くなることによって、打ち合わせだけでは済まない状況になってきている。このことから、作業所内部のマネジメント情報システムを整備する必要がでてきている。

すなわち、工事マネジメントのための情報システムは、外部組織との間だけでなく、組織内部の構成員間でも重要性を増してきているのが現状である。以上のような観点から、作業所組織と外部組織との関係や、作業所組織内部の情報通信システムの構造を概念的に表したものが、図-2.10である。この図では、作業所と現場に各々設置された通信ネットワーク、LAN(Local Area Network)の間を専用回線で接続し、両者間の情報を一元化していることと、作業所と外部組織との情報伝達は公衆回線を用いて行っているような、作業所を中心とした通信ネットワークの例を図示している。

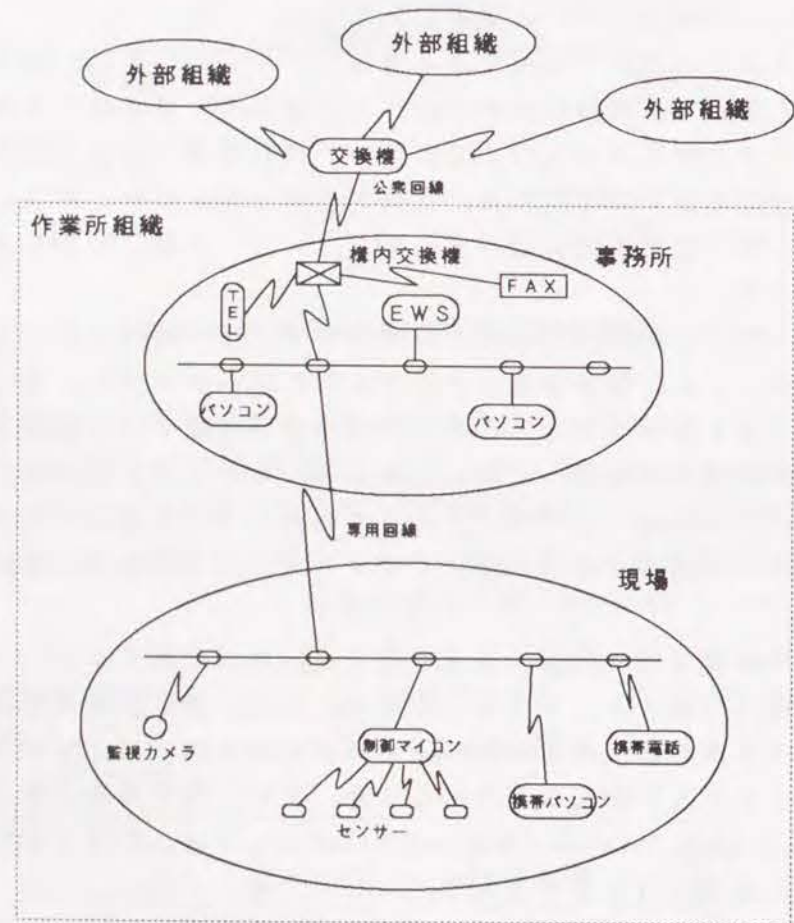


図-2.10 作業所を中心とした情報通信システム

(2) 情報システム機器の発達とOA化—組織の分権化と集権化—

以上のような作業所を取り巻く情報システム技術の変化を受けて、作業所における工事マネジメント情報システムも当然更新されなければならないが、ここではマネジメント情報システムのこれまでの流れを振り返る意味で、これとほぼ同意語で用いられて来たOA(Office Automation)化の歴史について考察する。

我が国で最初にOAという言葉が用いられ始めたのは1950年代後半であるが、この時の主要な情報処理手段は汎用大型コンピュータで、主に数値情報を対象として、基幹的な作業や意思決定過程に適用された。これを後に第一次OA化と呼ぶ

ようになったが、次ぎにOA化が叫ばれ、第二次OA化と呼ばれるのは1970年代末で、この時はパーソナルコンピュータやファクシミリ、ワードプロセッサなどの登場がきっかけとなった。そして、ここでは伝統的EDP(Electronic Data Processing)システムに適さない文字情報の処理が主な対象となり、末端現場の小規模業務や非定型的な意思決定過程で適用され、職場ごとの局所的、自主的、それに個性的な分散処理(Distributed Processing)が志向された。

このように、異なる動機、目的からOA化が進んだことにより、階層的な組織構成の中であって、①トップダウン的な情報化の流れと、②ボトムアップ的な情報化の流れの間で、情報の不整合が生じている状況にある。例えば、組織の中の権限には、①業務的な意思決定に関わるものと、②戦略的な意思決定に関わるものの2種類が存在するが、このような観点から組織の中の権限の集中度の変遷を検討してみると、前述したように全体的には分権化の流れにあると言えるが、この分権化の流れは、業務的意思決定に関する権限に限っての現象であり、戦略的意思決定権限に関しては、むしろ集権化が進んでいると考えられる。

この原因の一つに情報の流れが速くなったことが挙げられる。つまり、より組織の下層での活動状況が、すばやく把握できる情報技術の発達、業務的な意思決定についてではあるが、権限の委譲を進めたという考え方である。しかし、情報伝達の迅速化ということは、全く逆の考えかたをも可能にする。つまり、より下層での活動状況が素早く把握できる状況が、極度な集権化を可能とする要因とも成り得るからである。

このように、情報システムの発達は、組織における権限の配分に大きく影響するので、マネジメントのシステム化を検討する場合は、この点に関して今まで以上に明確化しておく必要がある。

(3) 情報システムの発達と権限の委譲

組織における権限には、①業務的な意思決定に関わるものと、②戦略的な意思決定に関わるものの2種類が存在する。そこで、組織における権限の配分という観点からマネジメント組織体制の変遷を見てみると、前者については分権化、後者は集権化傾向と見ることができる。これは、①情報の種類や量が増加したこと、②情報の流れが迅速になったことによる。つまり、より組織の下層での活動状況が、すばやく把握出来るような情報通信技術の発達、戦略的意思決定権限の集権化を押し進める状況となった。(図-2.11)

このように、情報システム技術の発達は、組織における権限の委譲や業務体制のあり方に大きく影響する。このため、マネジメント情報システムを構築する際には、組織形態との関連を今まで以上に配慮したシステム設計がなされる必要がある。すなわち、業務構造と情報の流れをシステムズ・アプローチにより分析するだけでなく、各組織構成員間の責任と権限のあり方を、多くの関係者のコンセンサスを得ながら明確化していくことが必要である。

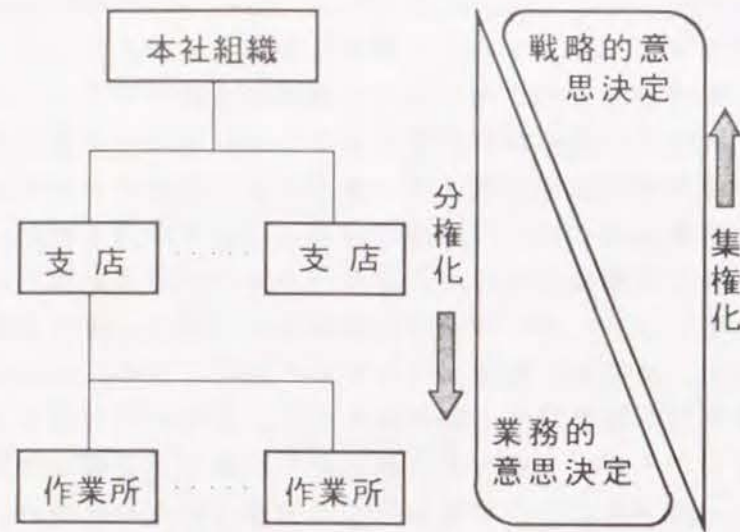


図-2.11システムの発達による権限の委譲

(4) 作業所組織における情報システム化

初期のマネジメント情報システム化では、大型コンピュータを主な道具とし、本支店組織がシステム開発の主な対象となった。しかし、最近では飛躍的に進歩を遂げたOA機器、特にパーソナルコンピュータによる情報システム化の試みが多くなされるようになってきた。ここでは、この場合の留意点を3点示す。

第1点は、前記したようにこれまでのOA化の流れには2種類あり、その一つは本支店を対象とした第一次OA化の流れであり、もう一つは現場事務所における第二次OA化の流れである。そしてこの後者は、当初、作業所事務所内における個人レベルの作業軽減化という前者とは異なった目的と動機を持っていたといえる。このように、異なる動機・目的からOA化が進んだことにより、現在、この両者の間で情報の不整合が顕在化してきている。これに対処するためには、本社・支店・作業所組織といった、階層的組織間における必要情報を明確にしてから、システム開発を行うことが必要である。

また第2点は、企業内において比較的独立的存在であった作業所組織が、これに関連する他の内部組織との情報伝達が迅速化されることにより、これまでより独立性を少なくするといった状態が想定される。つまり、情報システムの発達が意思決定権限構造を変化させるインパクトとなりうることである。従って、システム化を図る以前に、本支店組織と作業所組織との間で、責任と権限の関連を明確にしておくことが重要である。

また第3点は、これまでより少人数で効率的にマネジメント業務を遂行していかななくてはならない作業所組織の中にあっても、職員間のコミュニケーションを阻害しないように、全体として効率の良い分散処理システムを構築していくことが重要となる。この点に関しては、例えばLAN(Local Area Network)やBBS(Bulletin Board System)などの情報システムを作業所組織内にも実現化して、効率的な情報の共同利用を進める必要がある。

2. 工事マネジメントのモデル化

(1) マネジメント業務モデル

ここでは、新たなマネジメント情報システムの開発過程について検討するが、この過程においてはマネジメント業務モデルが非常に重要な役割を果たす。すなわち、新たな情報システム技術の開発は、図-2.12に示したように、最初に①対象となるマネジメント業務の構造を分析してモデル化し、次に②このモデルを新たな情報システム技術の適用を前提に改良し、最後に③このモデルに基づき組織の改良とここで適用するソフトウェアの開発を行う、といった3段階で行われるのが、開発者が意識的に活動するかどうかは別として、一般的である。

この際、情報システム技術の革新が大きな誘因となったことは、前項で述べたとおりである。すなわち、どのような情報システム技術を利用するのかによって、マネジメント・システムの構造は変わってくる。例えば、人手でバーチャートを作成し工程管理を行う場合と、これをネットワーク法によりパソコンで処理する場合とでは、ただ省力化されるというだけでなく、計画の協議方法や外部組織への報告(情報伝達)方法など、マネジメント・システムの構造自体が変わってくるのが自明であり、この変化を明確に把握してシステム開発を行うことが重要となる。

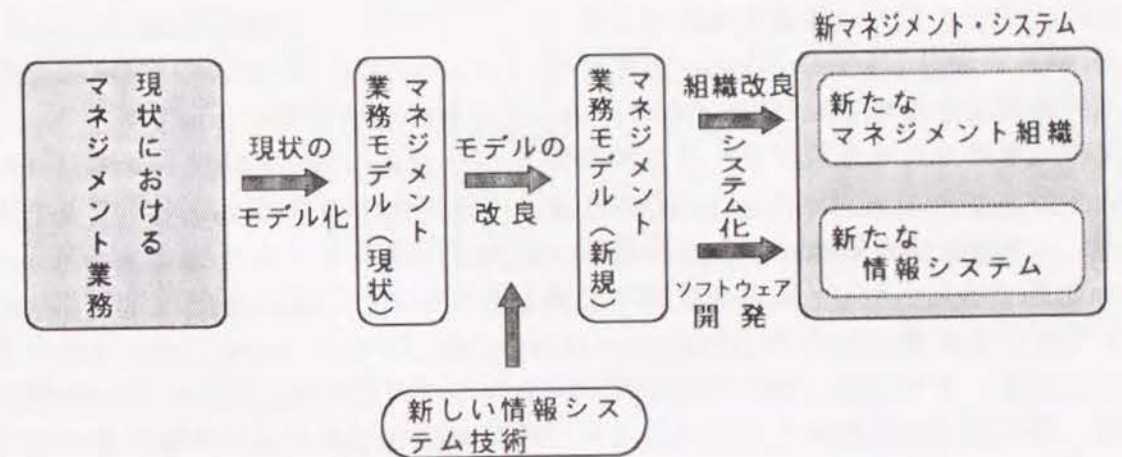


図-2.12マネジメント情報システム開発の概念

そして、このようなシステム構造の違いを明示的に表すのに適したマネジメント業務モデルの開発と、これを用いたシステム化が重要となる。しかし、現状においては、このようなトップダウン的な方法はあまり行われずに、開発者が自らの経験と勘により、マネジメント業務の中からシステム化しやすい部分だけを選んで、虫食的にコンピュータ化するというボトムアップ的な方法が一般的であった。すなわち、新しい情報システム技術を用いてシステム化を図っているにも

かかわらず、現状のマネジメント構造の整理と再検討を行わずにシステム化を行っているのが一般的であり、この結果、予想したほどの効果をあげられないというケースが多く存在する。

この原因としては、現状のシステムをモデル化して検討するということが煩雑であるということだけではなく、このようなマネジメント業務システムをモデル化する方法自体が、十分に研究されてきていないという問題点も、強く指摘されなければならない。すなわち、これまで発表された研究の中でも、工事マネジメント業務のモデル化に関する研究は非常に少ない。唯一、この分野に関するまとまった研究としては、現場管理体系研究グループ（土木学会建設マネジメント委員会システム開発小委員会）によるものが存在する³⁴⁾。

この研究では、マネジメント作業の洗い出しから、その分析とモデル化の方法について、約5年間をかけて検討し、“基本単位業務”という概念とその表現方法としての「業務仕様書」を新たに提案している。しかし、このような考え方の背景に存在すると考えられるシステム・モデルを、明示的に示すところまで研究が進まなかったことから、研究全体が理解しにくく、実際の問題に適用することが困難な結果となっている。

すなわち、我々が業務のシステムを検討するとき、漠然と捉えている問題構造を明確に把握することが非常に重要であり、そのための構造化方法、すなわち業務モデルを明確にする必要がある。

(2) 業務モデルの表現方法と単位業務モデル

工事マネジメントの構造を表現する方法の一つに、FBS (Functional Break-down Structure) がある。これは工事活動をトップダウン的に分解して階層的なツリー構造で表すWBS (Work Breakdown Structure)と同様に、工事マネジメント業務の構造を表す方法だが、これを用いるとマネジメント業務構造は図-2.13のように表わされる。しかし、この方法はマネジメントの構造を静的に表現するもので、業務間の意思決定順序や情報伝達経路などは表現できない。

そこで、マネジメント構造を動的に表現する方法が必要となるが、先ほどの工程管理の例ではPERT (Program Evaluation and Review Technique) などのネットワーク・モデルが一般に用いられる。しかし、例えばPERTを用いた場合には、業務間の順序関係は表現できても、情報の流れや意思決定の関係までを明確に表現することは難しい。この点、システム記述のための階層的な図式言語であるSADT (Structured Analysis and Design Technique)³⁵⁾は、業務に係わる意思決定情報や制御情報、それに参照情報などを動的に表現することができる一つの方法と考えられる。

このSADTを用いて工事マネジメントをトップダウン的に分解していくと、“一人で効率的に行える最小単位”といえるレベル、言い替えると“一人でやる最小の意思決定レベル”が存在することが解る。これを我々は一般に“業務”と呼び、日常のマネジメント活動の中で経験的に把握し、各組織構成員に割り当てているもので、前述の報告書の記述で表すと“業務とは業務仕様書で定義された基本単位業務”ということになるが、ここでは単に単位業務と呼ぶこととする。

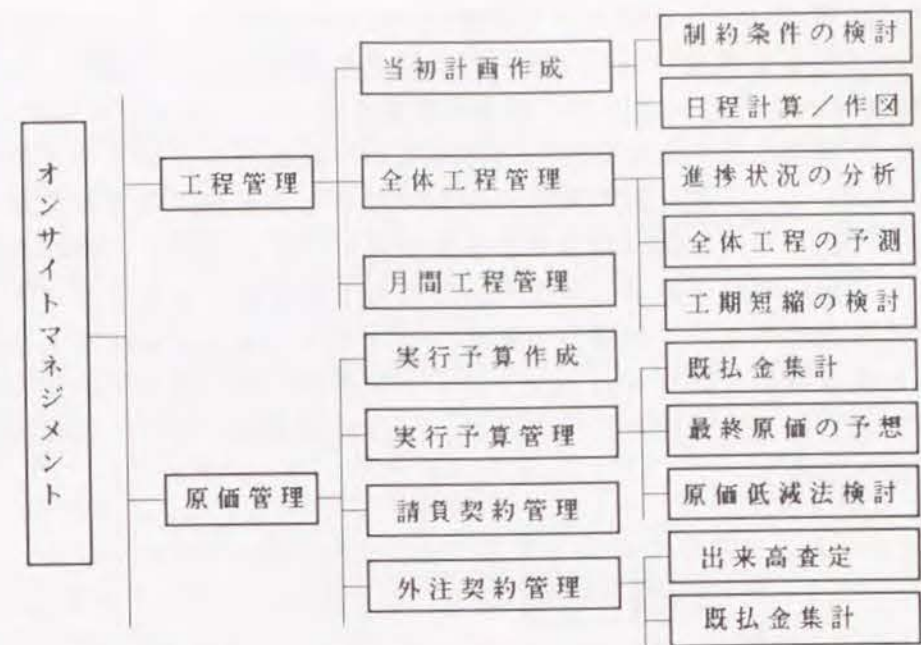


図-2.13 工事マネジメントFBSの例

つぎに、この単位業務の内容を詳細に検討すると、あらかじめ決められた一定の手順で処理できる部分と、その結果と外部の情報をもとに現状を評価し意思決定を行う部分から構成されることが解る（ここでは、前者を処理システム、後者を判断システムと呼ぶこととする）。基本的にマネジメントとは、“意思決定を有機的に結合したもの”と考えられるので、単位業務においても判断システムが主体となって他の単位業務と関係づけられ、処理システムはそのための情報加工システムにすぎないと考えられる。

しかし、前述の業務仕様書では、これらの区別は特に行われていない。また、全体の処理手順をフローチャートで表現しているだけで、他の単位業務との関係も明確にはされていないという問題点があった。これらの問題点を解決するために、単位業務関係をSADTで表現することを検討してみた結果、図-2.14のように判断システムと処理システムを区別し、業務間の関連は意思決定情報により結び付け、処理システムは従来のフローチャートで記述する方法が、全体の業務モデルを表現するのに適当ではないかと考えた。すなわち、これがマネジメント構造を検討する場合の基本単位となるもので、本論文ではこれを“単位業務モデル”と呼ぶこととする。

(3) 単位業務モデルの適用方法

以上のような単位業務モデルを階層的に組み合わせることによって、図-2.12の中で示したマネジメント業務モデルを明示的に表現できる。そして、このような階層構造は、現場所長から担当者間のライン型組織構造に対応した意思決定レベルによって規定される。このために、作業所組織の編成においては、表-2.4の評価要因と図-2.7の作業所組織と支店組織間の権限比率により、その建設プロジェクトに適応した組織形式を戦略的に意思決定することが必要となる。そして、

この組織形式に基づいてマネジメント業務モデルを階層化し、次にこの中の単位業務をグループ化して職位(post)とし、この職位に職務(duty)と職責(responsibility)が付加されることによって、新たな組織を組み立てることが可能となる。

ここでは、本研究の主要な研究対象である工程計画業務にこのモデルの適用を試みた。図-2.15 は、工程計画の最初の段階で行われる構想計画業務を単位業務モデルで表した図であり、図中の各単位業務は更に下層に存在する詳細な単位業務ネットワークから構成される。つまり、このような記述により予めマネジメント問題の構造を明かとし、この構造を新たなシステム化技術の適用を前提に改良した後で、組織改編を行いながらソフトウェアの開発を進めることが重要である。本研究では、以上のような観点から、以後、工程計画業務のシステム化方法について論じることとする。

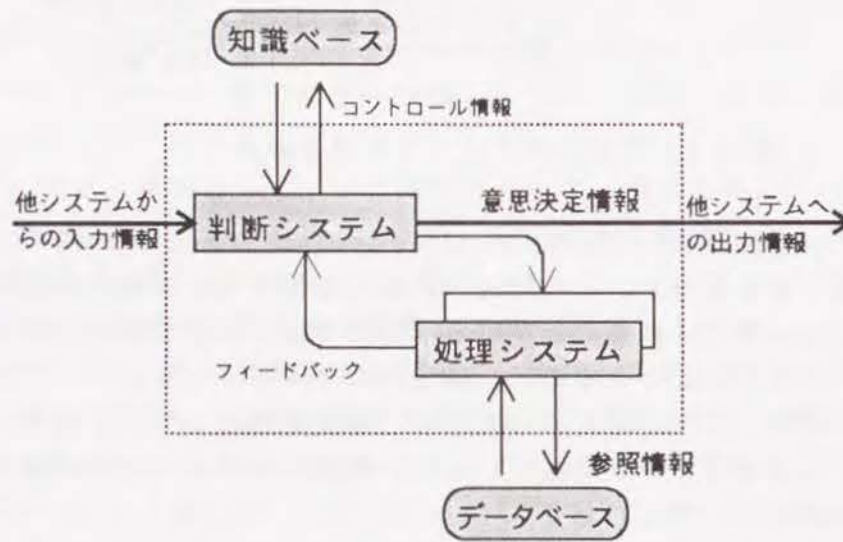


図-2.14 SADTを用いた単位業務モデル

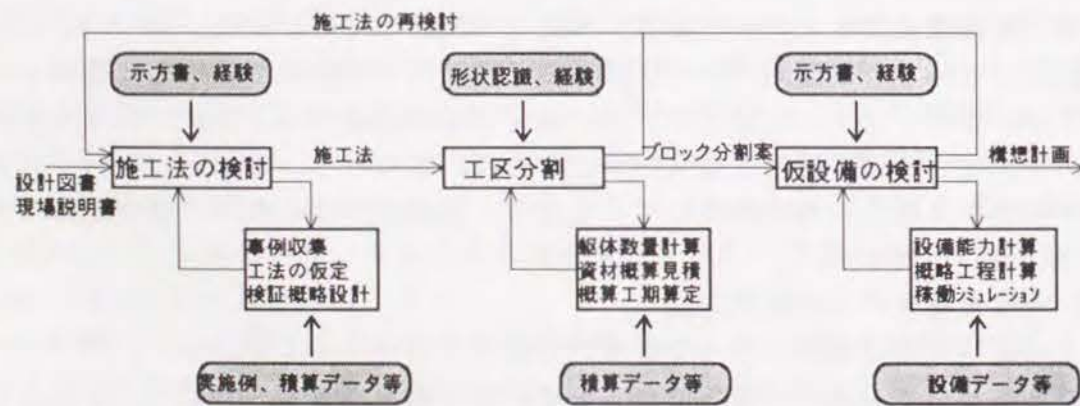


図-2.15 単位業務モデルによる工程計画問題の表現 (構想化段階)

第5節 結言

本研究は、工事マネジメントの中でも中核となる工程計画業務の解明と知識工学手法を用いたシステム化を目的としているが、本章では、このための基礎的事項を明らかにする目的で、工事マネジメント手法の開発経過と現状の問題点、および、組織構造とそこで稼働する情報システムの発達の歴史、それに現状における問題点に関して基礎的な考察を加えた。

工事マネジメントを遂行するための方法は、テラーによる近代マネジメント法の創設以来、米国を中心としてOR (Operations Research) や数理計画モデルを用いて進められてきたが、これまでの方法は計画の最適化や、現状分析と評価に関する研究が多く、そのような分析結果に基づき、それではどのような対応策を実行するのかといった意思決定方法に関する研究は非常に少ない状況にある。これは、工事マネジメントが取り扱う問題構造が、他の問題と比較してより複雑であることに起因するもので、本章で述べてきた手法では解決しにくい問題と考えられる。このような悪構造問題を解決するシステム化手法としては、近年人工知能技術が脚光を浴びるようになったが、この工事マネジメントへの適用方法については、次章で詳しく述べることにする。

また、マネジメント業務のシステム化とは、コンピュータ・ソフトウェアの開発だけではなく、それが稼働するための組織の改良も含めた活動という観点から、本章では、第3節でマネジメント組織を、また第4節では情報システムに関して考察を加えた。すなわち、マネジメント組織構造の変遷やマネジメント情報システムの発展経緯などの基礎的な考察から、それらの知見に基づいた工事マネジメントのモデル化の必要性、および、モデル化のための単位業務とマネジメント業務モデルについて考察を進めた。しかし、ここでの考察は、筆者がこれまでに行ってきた情報システム構築のための研究や、そこでの経験に基づく知見によるもので、今後このような考え方を実証するためには、実際のマネジメント業務の分析とモデル化を進めていく必要がある。

また、作業所組織の編成方法についても、本章の最後に若干言及したが、現実の作業所組織編成は、経験的に獲得した知識に基づいて行われ、実際のマネジメント活動を通して、組織構造や構成員間の業務分担を調整する方法がとられている。このような考え方は、非常に柔軟性があり、不確定要素の多い工事マネジメントにおいては、これまでは妥当な方法であったといえよう。しかしながら、現在建設業が直面している環境の変化に対して、これまでのような経験的方法だけで対応できるかどうかは疑問である。今後は、以上のような業務モデルに基づく作業所組織編成方法について、さらに研究を進める必要があるものと考えられる。同様に、従来の情報システムの開発も、これまでのような経験的方法だけで、今後とも旨くできるのかどうかを十分に検討する必要がある。

【 参 考 文 献 】

- 1) 土木工業協会、電力建設業協会編：日本土木建設業史、技報堂、1971
- 2) 伊藤俊太郎他：科学史技術史事典、弘文堂、1983
- 3) 三浦忠夫：日本の建設産業、彰国社、1977
- 4) 矢部 真：これからの工程管理の考え方、工程管理、土木学会関西支部、1969
- 5) 日本インダストリアル・エンジニアリング協会編：IE活動ハンドブック、丸善、1968
- 6) Feigenbaum, A. V. : Total Quality Control, McGraw Hill Inc., 1961
- 7) 朝香鉄一、田村 恭：“建設業のTQC”、日本規格協会、1980
- 8) JIS(28101-81-G2), 1981
- 9) Lawrence D. Miles : "Techniques of Value Analysis and Engineering", 1961
- 10) 日本インダストリアル・エンジニアリング協会編：IE活動ハンドブック、丸善、1968
- 11) 馬場 勇：工事管理のための価値工学手法の適用、早稲田大学学位論文、1990
- 12) 黒田 隆：建築計画コスト概論、経済調査会出版部、1978
- 13) 古阪秀三：集合住宅設計最適化の支援方法に関する研究、京都大学学位論文、1986
- 14) McGough, E. H. : Scheduling: Effective Methods and Techniques, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 108, No. C01, pp. 75~84, 1982
- 15) Popescu, C., and Borcharding, J. D. : Development in CPM, PERT and Network Analysis, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 101, No. C04, pp. 769~784, 1975
- 16) Fondahl, J. W. : A Non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry, 2nd ed., Technical Report No. 9, The Construction Institute of Stanford University, 1962
- 17) O'Brien, J. : VPM Scheduling for High-Rise Buildings, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 101, No. C04, pp. 895~905, 1975
- 18) Johnston, D. W. : Linear Scheduling Method for Highway Construction, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 107, No. C02, pp. 247~261, 1981
- 19) Melin, J. W. and Whiteaker, B. : Fencing a Bar Chart, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 107, No. C03, pp. 497~507, 1981
- 20) 伊藤俊太郎他：科学史技術史事典、弘文堂、1983
- 21) Kolodner, H. J. : The Quantification of Safety, ASSE Journal, vol. 10, no. 3, 1965
- 22) 井上威恭監修、総合安全工学研究所編：FTA安全工学、日刊工業新聞社、1979
- 23) Ottoboni, F., Milby, T. H. : Occupational Disease Potentials in the Heavy Equipment Industry, Archives of Environmental Health, vol. 15, pp. 317~321, 1967
- 24) DeStwolinski, L. W. : Occupational Health in the Construction Industry",

- Stanford University, Dep. of Civil Engineering, Construction Institute, Technical Report 105, 1969
- 25) Parker, H. W., Oglesly, C. H. : "Methods Improvement for Construction Managers", McGraw-Hill Inc., pp. 121~133, 1972
「田村 恭監訳 建設技術改善の手法—ワークスタディの理論と応用、1979」
- 26) 小林謙二：高所における建設作業に関する人間工学的研究、日本建築学会関東支部研究報告集、1976
- 27) 川村幸男：橋梁事故解析へのFATの適用に関する一考察、安全工学シンポジウム、Vol. 12th、1982
- 28) 花安繁郎：工事条件と労働災害の関連の分析、土木学会論文集第379号/VI-6、1987
- 29) 赤木俊允、他：プロジェクト・マネジメント、土木工学大系17、彰国社、1976
- 30) Richard H. Clough, Glenn A. Sears : Construction Project Management 2ed, 井戸禎光、他訳：建設工事プロジェクト・マネジメント実戦マニュアル、ジャテック出版、1984
- 31) エンジニアリング振興協会訳：プロジェクトマネジメントの手引、1983
- 32) Barrie, D. S., Paulson, Jr, B. C. : Professional Construction Management, second edit., McGraw-Hill Book Company, 1984
- 33) 古川修、古阪秀三：建設のプロジェクトマネジメント、鹿島出版会、1987
- 34) 高木 清、丸山祐一：経営管理の理論と歴史、中央経済社、p. 204~206, 1988
- 35) 今井賢一：エンジニアリング産業とネットワーク組織、エンジニアリング・フォーラム、No. 5、1985
- 36) 森本三男：経営組織、中央経済社、1985
- 37) 草柳俊二：海外工事における人材育成とプロジェクト組織、第2回「施工体験発表会」講演概要、pp. 44~51、1985
- 38) 現場管理体系研究グループ：建設現場に於ける業務のシステム化に関する研究報告書、土木学会、建設マネジメント委員会システム開発小委員会、1988. 8
- 39) 岩田一明：生産システム学、コロナ社、1982

第3章

知的工程計画システムに関する研究

第1節 緒言	54
第2節 システム開発状況と知識ベース・システム化	57
1. 工程計画に関する我が国の研究	
2. 既往研究の問題点とシステム化の限界	
3. 知識ベース・システムの必要性と開発状況	
第3節 人工知能研究の概要と技術レベル	70
1. 人工知能研究の歴史	
2. 人工知能技術の特徴	
3. 人工知能研究の現状	
第4節 知的工程計画システムの構想	85
1. 知識ベース・システムの特徴と計画立案問題	
2. 工程計画立案過程と知識ベース・システム化	
3. 知的工程計画システムの構想	
第5節 結言	97
参考文献	99

第1節 緒言

“土木は経験工学である”とよく言われるように、土木工学では古くから経験的な知識が重要な働きをしてきた。これは、科学的に解明しにくい自然や社会現象を対象としていることに基本的な原因があるためと考えられるが、このために、土木工学では、これらに内包された複雑さや不確かさを科学的に解明することに、これまで多大な努力が払われてきた。そして、その結果、構造力学や土質力学、水理学など、土木工学の中の多くの分野で、構造物の力学特性や自然現象のメカニズムなどに関して、工学的な解明が進められてきた。

しかし、このような技術の進歩にもかかわらず、土木工学の様々な分野では、今なお工学的に解明できずに、個人の力量に大きく依存し、経験的に伝承されている技術が多く残されている。特に、本研究が対象としている工事マネジメント (Construction Management) 分野では、このような傾向が非常に強く、建設プロジェクトを推進するための計画や管理技術は、OJT (On the Job Training) によって、経験的に修得されるような部分が、大変重要な位置づけのもとに多く存在している。すなわち、第1章で詳しく述べたように、建設生産では製造対象となる構造物が一つ一つ個別であり、かつ生産環境も個々に異なることから、生産システムの標準化が他産業と比較して遅れていることが、このような状況を作り出した主要な要因と考えられる。そして、このような状況であることから、実工事を通して得られた経験的な知識が、現在でも重要な意味を持ち、実務に当たっては、生産現場の状況に沿って臨機応変に問題解決を図ることが、重要な問題解決方法の一つと考えられている。

しかし、建設プロジェクトを取り巻く環境は、この数年の間に大きく変化してきた。例えば、プロジェクト規模の巨大化・複雑化や、それに伴う施工技術の高度化、社会の高齢化に伴う若年労働者不足、さらに自然環境保護や生活環境重視などに代表される価値観の多様化など、これまでとは大きく異なった状況となってきたために、過去の経験に基づいた知識や個人の力量に大きく依存した方法だけでは、以上のような状況に対応できなくなっている。すなわち、以上の問題を施工段階に限定して具体的に考えると、現在急速に開発されている施工機械や新素材、それに、これらを応用した新施工法などを、現在の建設システムの中に確実に取り入れ、生産性の向上に寄与させるためには、これまでのような経験的な方法だけでは困難な状況となってきた。

このような状況に対応するために、これまで、ORや統計解析法などの基礎的な手法や、VEやQCなどの総合化された技法などを用いて、工事マネジメント業務のシステム化が試みられてきた。しかし、これまで構築され、業務で利用されてきたコンピュータ・システムは、そのシステムが対象とする業務の中でも、業務の仕方や判断基準が明確な部分だけを処理するものでしかなかった。反対に、これまでシステム化されずに残された部分は、より複雑な問題構造を有するために処理手順が複雑に錯綜していて、かつ多種多様な要因が影響するために判断基

準も明確に定義しにくい部分であり、このために従来のシステム化技術ではシステム化することが困難な業務であった。

このように複雑な問題領域のことを、人工知能(Artificial Intelligence)研究の分野では、悪構造問題(ill-structured problem)と呼ぶが、工事マネジメント問題には、このような悪構造の部分が多く存在する。そして、これらの問題の多くは、システム化することが困難であるが故に、これまで経験豊富な技術者の手にゆだねられてきた。しかし、生産性向上の欲求や労働力の緊迫化など、現在進行しているプロジェクトが抱える問題の健全化に伴い、このようにシステム化しにくい業務範囲でさえも、コンピュータ・システム化を進めていく必要が惹起されてきている。

一方、情報処理分野においては、人工知能研究に基づく、システム化技法の新しいパラダイムが形成されつつある。特に、人工知能研究の中でも実用化の進んでいるといわれる知識工学(Knowledge Engineering)分野では、知識ベース・システム(Knowledge Base System)と呼ばれる「蓄積された知識に基づき問題解決を図るシステム開発技法」が実用化段階に入ってきたことから、各分野の研究者により応用システムの開発が進められる状況になってきた。土木工学分野においても、橋梁形式や山留工法などの施工法選定システムや、コンクリート劣化診断システムなど、様々な知識ベース・システムが研究開発されるようになってきている。

しかし、これまで開発されてきた知識ベース・システムは、工法選定とか劣化診断など、入力情報に基づき、システムに予め蓄積した結論の中から解を選択するタイプの問題、すなわち、選択型問題が主にシステム化の対象となってきた。逆に、設計や施工計画などの計画型、あるいは設計型問題を対象とした知識ベース・システムは、非常に少ないのが現状である。一般的に、計画・設計型問題は、選択型問題より問題構造が複雑であるために、システム化が難しいといわれる。しかし、現実に我々が直面する問題の多くは、計画・設計型問題であり、選択型問題だけですむ場合は、非常に少ないのが一般的である。この点からみても、現在、建設分野において進められてきている知識ベース・システムの開発状況は、まだ、初期の実験段階にあるものと見受けられる。

このように、建設分野における研究開発状況はまだ初期段階にあるものの、先ほども述べたように、建設分野における知識ベース・システム開発の必要性は非常に大きい。特に、本研究が対象としている工程計画問題は、工事マネジメント業務の中では、中核的かつ経験的なノウハウを多く必要とすることから、これを知識ベース・システム化することには、非常に大きな意義がある。また、工事マネジメント業務の中には、曖昧な情報や一種の勘に相当する問題解決方法が不明な問題が多く存在する。そこで、知識や情報の持つ曖昧性(ambiguity)を科学的に取扱うファジィ理論(fuzzy logic)や、パターン認識など、文字で表現しにくい知識を利用するために、人間の脳の生理学的な研究から生まれたニューラル・ネットワーク(neural network)など、人工知能分野における新しい技術に関しても、工事マネジメント・システムの中で応用するための研究を進めることも重

要である。

以上のような基本的な認識の基に、本章では、まず最初に、従来から行われてきた工程計画に関する研究の内容とシステム開発の状況に関して、その現状と問題点を考察する。そして、その問題を解決するためには、人工知能技術の適用が重要であることを、工程計画問題の構造から明かとする。そして、このような問題に人工知能技術を適用する試みが、これまでどのように行われてきたかについて、この分野における先進国である米国の状況を調査する。

次に、以上のように重要な技術を創出した人工知能研究に関して、歴史的な研究の変遷やそこで開発された技術開発の歴史を再検討し、人工知能技術の特徴と可能性を、人間の行う情報処理とコンピュータのそれとを比較しながら、明らかにする。また、人工知能技術の可能性ばかりではなく、現在、システム開発に適用しうる技術レベルに関して考察を加え、現在、最も価値ある技術として知識ベース・システムの重要性を示し、この技術を用いたシステム開発の方法を論じる。また、曖昧性を扱うファジィ理論やパターン認識に有効なニューラル・ネットワーク技術の持つ重要性と可能性に関して論じる。

そして、最後に、以上のような人工知能技術を、工程計画問題のシステム開発に適用する方法に関して、詳細に検討を加える。すなわち、工程計画問題の特徴と、これに人工知能技術をいかに適用するのか、また、その結果開発される知的工程計画システムの構成、さらに、そのようなシステムに必要な知識の構成とその蓄積方法などに関して、プランニング部分とスケジューリング部分に分けて、詳細に検討を加える。

第2節 システム開発状況と知識ベース・システム化

1. 工程計画に関する我が国の研究

(1) プランニングに関する研究

わが国における建設工事管理にPERT/CPMが導入されたのは、国立競技場や霞ヶ関ビルが建設された1960年代後半といわれるが、この頃から我が国の建設産業界においても急速に近代的マネジメント手法の適用研究が進められるようになった。特に、ネットワーク手法を建設プロジェクト計画に適用することに関しては、吉川、春名、および川崎らが、早くからこの重要性を認識し、理論的研究ばかりでなく応用研究を含めた研究活動を行った¹⁾²⁾。そして、この結果、ネットワーク手法を工事管理に適用するためには、工事計画の立案過程の研究、すなわちプランニングに関する研究が重要であることが認識されるようになった。

春名と田坂は、このような認識から、工事計画の作成方法を研究し、建設工事の計画・管理業務は階層的構造をなしていること、すなわち“工事の多階層性”を指摘し、ネットワーク手法を適用した工程計画・管理の手順をフローチャートで示した³⁾⁴⁾。すなわち、工程計画・管理業務は、①計画情報作成段階、②総括計画作成段階、③詳細計画作成段階、④施工管理段階の4つの段階に区分できることを示した。

しかし、このような施工計画の立案過程、すなわちプランニングに関する研究は、あまり進められていないのが現状である。つまり、この問題領域の内容や問題解決方法が、個別プロジェクトの内容により大きく異なるために、これを学問として一般化することが難しかったことによるものと考えられる。このために、問題構造を概念的に捉える研究はされたものの、この研究から、具体的なシステムが提案されることは、ほとんどなかった。

ただし、トンネルやシールド工事など、単純な繰り返し作業の多い工事では、計画作成順序を明確に定義することが、それほど難しくはないことから、計画立案過程をモデル化し、システム化方法までを提案した研究がいくつかある。例えば、湯沢はケーソン式防波堤工事を対象にメッシュ式工程計画システムを提案しているが、この方法では工事の基本計画を入力するだけで、工事の作業構成や保安距離などの制約に基づき、詳細計画を自動的に生成する機能を持つ⁵⁾。また、大規模土工事を対象とした工程計画に関しては、現地盤と計画地盤のメッシュ情報を基に、線形計画法などにより得られた土量配分計画情報、すなわち、運搬距離、方向、運土量、勾配などの特性値データを算出し、これらの計算結果を、さらにクラスター分析することにより、ネットワークのアクティビティを生成する方法が、山本によって提案されている⁶⁾。

また、直接的にはネットワーク・モデルを用いているのではないが、春名と大

音らは、建設工事では作業間の空間的・時間的距離が保安上重要な制約となる点に着目し、これらを平面座標空間に図式に表示できる斜線式工程表の重要性を再認識し、斜線式工程表と従来のネットワーク手法との複合化に関して研究を進め、パーソナルコンピュータを用いてシステム化を図っている⁷⁾。

(2) スケジューリングに関する研究

スケジューリングに関する研究では、①計画表現モデルと②資源の投入方法が、重要な問題となる。そして、前者に関しては、生産形態の特殊性からくる工事計画の不確実性、すなわち作業手順が一意に決まらないケースや作業時間のバラツキの取り扱い方が問題となり、これまでにGERTや確率PERTが考案されてきた。また、後者に関しては、資源の遊休が少なく、かつ必要数量の変動が少ない投入方法を決定することが、非常に重要なポイントであり、これまでPERT/manpowerに代表される資源の山積み/山崩(leveling)方法などが、研究されてきた。しかし、これらの方法をもってしても、工事マネジメントへ適用するためには、いくつかの問題点のあることが、運用の過程で発見されたことから、我が国においても、これらの問題点の解決に向けて研究が進められた。

吉川と春名は、アクティビティの所要時間の不確実性を確率変数としてネットワーク内に取り込み、計画の妥当性を評価しようとした⁸⁾。ここで春名は、従来の確率PERTが、作業日数の確率分布をベータ分布で表す方法を採用していることと、それに起因する日程計算方法の問題点を指摘して、コンボリューションを用いた、新たな確率PERT手法を提案している。しかし、確率PERTを用いる場合には、所要日数の確率分布をどのように決定するのか、また、得られた結果を如何に評価するのかという基本的な問題点が存在する。また、建設工事の不確実性は、所要日数だけにあるのではなく、作業の手順や作業方法など、いたるところに存在するため、所要日数だけを確率的に評価することの妥当性に関しては再考する必要がある。

また、ネットワーク手法を利用する場合、順序関係の設定方法も重要な課題である。この点に関して、吉川と春名は、作業(activity)間の順序関係には、施工技術の制約から変えることができない①技術的關係と、資源の転用関係等のように、工程計画を効率化するために必要となる②管理的順序関係に分けることができることと、この管理的順序関係はランチ&パウンド法によって数理的に決定することが可能であることを示した⁹⁾。そして、この手法を適用して、工程ネットワークの作成から、日程計算までを行うコンピュータ・システムを開発した¹⁰⁾。しかし、同じ資源を共有するコンフリクトな作業の数は少なくないこと、また、必要となる資源の種類も多く、各々の計画立案における重要度も異なることなどから、この方法を実際の工事に適用することには限界があるものと考えられる。

また、スケジューリングのシステム化に関する研究としては、田坂らによる、大型コンピュータと小型コンピュータを連携した工程計画システムの開発と適用例がある¹¹⁾。当時、作業所に設置できるような小型コンピュータでは、ネットワーク計算をするのに記憶容量や計算スピードに問題があったことから、ネット

ワーク計算は本社に設置された大型コンピュータで行い、ネットワーク・データの入力や変更は、作業所に設置された小型コンピュータで行い、両者を公衆電話回線で接続することが試みられた。

(3) 投入資源最適化に関する研究

ネットワークの各アクティビティに、必要となる資源を、いつ、どれくらい投入すべきかということは、スケジューリングの中でも大きな問題の一つである。これに関して、我が国でも以下のような研究が行われてきた。

例えば、1つのアクティビティにおける資源投入を日ごとに変化させたり、作業の中断を許す、いわゆる“山均(smoozing)法”が、田坂らによって提案されている¹²⁾が、まだ実際にシステム化できるような手順までは示されていない。また、春名による技術的および管理的順序関係という考え方は、後者が型枠の転用順序などを表すために、ここで用いられるブランチ&バウンド法も投入資源最適化を目的とした方法と考えられるが、この方法は前述したように実用化にはまだ課題が多く残されている¹³⁾。

これに対して、山本はヒューリスティック(huristic)な資源配分法を提案し、実際の工事を例にその適用方法を詳しく紹介している¹⁴⁾¹⁵⁾。この方法は、資源投入を日ごとに変化させたり、作業の中断を許す、いわゆる山均法に近い考え方を採っているが、田坂の山均法ではネットワークの日程計算結果を基準に、アクティビティをその前後に振ることにより資源の山積を均す、山崩しと類似した方法を採用しているのに対して、山本の方法は、着工から竣工までを1日ごとに、1つの手順で着手する作業や中断する作業、およびアクティビティごとの投入資源数を順次決定していく方法で、技術者が紙上で行っている方法と酷似している。このため、この方法で作成された工程計画は、最適であるという保証は得られないものの、着手作業の選定や1作業への投入資源数の決定を合理的に行えるならば、非常に実用的な計画を作成できる可能性を持っている。

また、宇津橋は「作業への投入数量と単位当たりの仕事量の関係は、非線形的である」という考えから、投入資源量と歩掛りの関係をモデル化して、工事全体の投入資源の最適化方法を提案している¹⁶⁾¹⁷⁾。すなわち、普通の状態であれば「投入資源量を倍にすれば、その作業は半分の時間で完了する」が、投入資源量が多くなるに従って作業効率が低下し、両者の関係が比例しないという考え方に基づいている。そして、このような考え方は従来から指摘されていたものではあるが、宇津橋はこれを数式化して、1作業の投入資源最適化と全体工事での最適化の関係を明らかにした点が評価される。しかし、このモデルで用いられている各種の係数、例えば重複係数などをどのように決定するか、また、こうして決定された資源の投入量が上限を越えた場合にどうするのかなど、未だ多くの課題が残されている。

2. 既往研究の問題点とシステム化の限界

(1) 既往の研究の問題点

前述したように、我が国におけるネットワーク手法の研究は、PERT/CPMが導入された1960年代後半頃から、多大な労力を掛けて進められてきた。しかし、このような先達の努力にもかかわらず、現在、ネットワーク手法が有効に利用されているかということ、残念ながら、そうとは言えないのが現状である¹⁸⁾。そして、この原因の一つには、これまでの研究内容にも問題があると考えられる。

すなわち、PERT/CPMが導入された初期の段階では、この革新的手法を従来の工程管理業務の中で使用することだけが注目されたために、手法自体の問題点を検討し、これを工事マネジメントに適用しやすいように改良するという研究は皆無に近かった。また、工程管理業務の構造や計画立案過程などを明らかにし、その中のどの段階で、どの程度の精度でネットワーク手法を適用したら合理的かというような研究も少なく、この結果、ネットワーク手法の普及は、当初予想されたほどには進まなかった。

また、プランニング段階の研究が少ないことも、既往の研究の問題点の一つである。つまり、ネットワーク手法利用に必要な不可欠な工程ネットワークの作成方法に関する研究は非常に少なく、このこともネットワーク手法普及の阻害要因の一つとなっている。周知のように、建設工事では設計図書に明示された施工条件だけではなく、明示はされていないが過去の経験から推測されるような、施工遂行上重要となる制約条件が多く存在する。また、計画立案過程は非常に複雑で、アルゴリズムで表現することは難しい。また、その過程には、仮設備計画や仮設工法検討など、経験的知識を必要とする多くの選定問題を含む。これらのことが、プランニングを対象とした研究の少ない原因と考えられる。

また、提案された工程計画手法が、実用的に有効であるかどうかは、最終的には実工事で適用してみなければ解らない。すなわち、建設工事では一般製造業とは比較にならないほど多種多様な制約条件が存在するために、実工事での運用実験が大変重要な意味を持っている。そして、これまで提案されてきた計画方法は、その多くがコンピュータ利用を前提としていることから、提案された手法をプログラムという形でシステム化することは、非常に重要である。しかし、PERT/CPMの単純なプログラム化を除くと、プログラム開発が行われ、実用に供されたシステムは、非常に少ないのが現状である。

もう一つの問題点としては、着工後の工程管理段階で利用できる手法や、そのシステム化が進んでいないことが上げられる。すなわち、これまでの研究は、工程計画の作成や最適化に主眼がおかれていたために、実際に作業所で行われる工程管理業務で利用するための手法や、そのシステム開発が進んでいない。工程管理とは、現在の進捗状況を把握し、その中の問題点を分析して、その実績データに基づいてそれ以後の計画を変更するという、管理者の能力や経験的知識がものをいう非常に重要な業務であるが、この部分がこれまであまり取り扱われてこな

かったことも、これまでの研究の問題点と考えられる。

(2) コンピュータ利用の現状

それでは、これまで行われてきたシステム開発の状況は、どうであっただろうか。周知のように、建設プロジェクトは設計条件や製造環境がそれぞれ異なることから、生産過程の標準化は難しく、その影響からマネジメント業務のシステム化も部分的なものに限られる。しかし、施工条件の緊迫化や管理業務の複雑化、それに技術者不足という厳しい状況の中で、さらに生産性向上が求められるといった難しい課題を抱えている状況にもある。

このような場合、一般製造業では、革新著しいコンピュータを現場の製造部門に早くから導入し、作業の自動化と併せて生産性向上を図ってきた。しかし、建設業では、設計など技術的業務においては、早くからコンピュータ利用が進められてきたにもかかわらず、直接的にマネジメント業務に携わる作業所に、コンピュータが設置されるようになったのは、それほど古いことではない。

作業所にミニ・コンピュータを設置し、工事マネジメント業務への適用が試行されたのは、昭和50年代に入ってからといわれる。例えば、昭和54年(1979)に着工された寒河江ダムでは、現場事務所にミニコンピュータを設置して、堤体の盛立工事管理やグラウト工事管理、洪水吐工事管理、重機運行管理など、工事マネジメントの大変広い範囲にコンピュータの利用が試みられた¹⁹⁾。

以上のような試みは、コンピュータの低価格化によるところが大きかったが、それでも、当時のコンピュータは、現在のパーソナルコンピュータなどと比べ、価格は遙かに高く、空調設備のある広い設置場所を必要とした。このため、一般の作業所に手軽に導入するような状況ではなく、従って、当時、コンピュータ利用を試みる工事といえば、寒河江ダムのような長期に渡る大規模工事に限定されていた。しかし、コンピュータの低価格化はさらに進み、また、第2次オイルショックによる景気後退の影響も重なって、昭和55年頃になると、一般の建設工事でも、当時マイクロコンピュータと呼ばれた小型コンピュータを導入して、生産性向上を目的としたコンピュータ利用が模索されるようになった²⁰⁾。

(3) システム化の限界

以上のような経過の中で、多くのマネジメント・システムが開発されてきたが、これらを概観すると、マネジメント業務全体の中のごく一部分を代替したにすぎないシステムが、大多数を占めることが理解できる。同時に、これらのシステムは、工程管理システムは工程管理業務だけを、また、原価管理システムは原価管理業務だけを対象とし、両者の境界領域にまたがる業務までを含めて複合的に処理できるシステムともなっていない。そして、この結果、コンピュータ導入時に期待されていた“コンピュータ利用による生産性の大幅な向上”という目標は、当初の目論見どおりには進んでいないのが現状である。

例えば、工程管理業務では、基本工法や主要設備の検討から始まって、様々な資機材選択や数量算定などを経て工程ネットワークを作成し、これに基づき工程計算を行い、この結果を評価し、計画修正を行い、最終的に工程図を作成するという順序で業務が進められる。しかし、これまでに開発された工程管理システム

では、これら一連の業務の中の日程計算や資源の山積計算、それに工程図作成業務を代替したにしか過ぎない。しかも、以上の処理を行うのに必要なデータ(例えば、ネットワーク手法を用いる場合は、工事の作業構成とその順序関係)は、技術者が諸々の施工条件を勘案して作成し、これを入力しなければ、コンピュータは処理できない。また、このような工程管理システムが資材管理システムと連携して、調達計画や在庫調整業務を行えるようになってはいるわけでもない。

また、原価管理システムを例にとると、これまでに発表されたシステムでは、既払金集計や予算との差額集計、そして、集計結果の簡単な評価値算出を行っているに過ぎず、計画段階における予算の作成や、管理段階における実績値評価とそれに立脚した原価予測、さらには、工程管理システムとリンクした進捗分析など、いまだにシステム化されていない部分が多く存在する状況にある。

以上のように、工事マネジメント業務の中で、コンピュータを用いたシステム化が進んでいる部分は、残念ながら非常に少ない。図-3.1には、工程計画立案過程を、原価管理など他の管理要素も含めて詳細に示したが、この図のように、コンピュータで処理できる部分は、業務全体から見ると非常に限られているのが現状である。

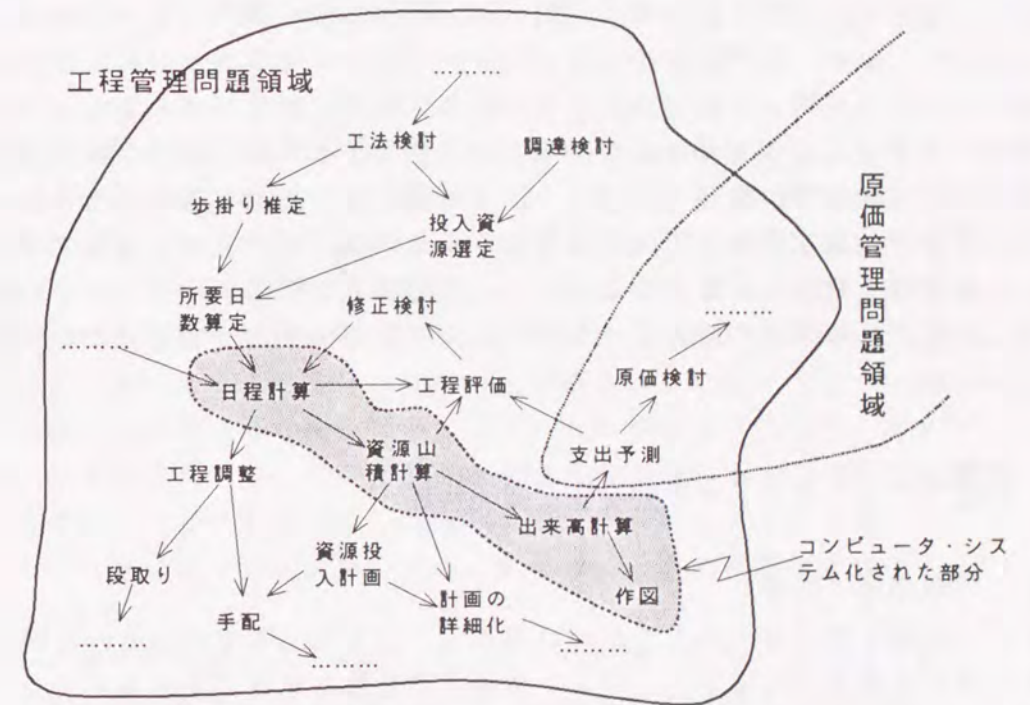


図-3.1 工程管理問題領域とシステム化の範囲

(4) システム化の阻害要因

このような問題は、特にシステム化のための努力が不足していたというわけではなく、これまでシステム開発が及ばなかった部分が、いわゆる悪構造問題に属し、従来技術ではシステム化しにくかったところに、1つの原因がある²¹⁾。例えば、先ほど例に取り上げた原価管理業務では、既払金集計などの単純な計算業務

から、実績値の評価と対応策の検討などの高度な戦略的意思決定まで、多種多様な業務から構成される。そして、このような業務の中で、FORTRANなどの手続き型言語を用いてシステム化が容易に行える部分は、原価計算などの数値データ処理やデータ・ベース利用による情報検索など、情報処理のアルゴリズムが明確なごくわずかな業務でしかない。

以上のように、これまでシステム開発を阻害してきた要因の1つには、従来のシステム開発技術の限界があるが、もう1つの要因としては、ORや統計解析法など、これまでのシステムで用いられてきた問題解決方法の中にも、一つの問題点がある。例えば、PERTにおける投入資源の最適化問題では、対象とした資源の日投入量の二乗和が最少となるように作業を逐次ずらす、いわゆる最少自乗法が提案されている。しかし、この方法で考慮する制約条件としては、基本的には資源の投入量しかなく、この投入量にしても期間的な変動までは考慮していない。また、複数資源を考慮する場合でも、それらの重要度を単に比率で表す程度でしかなく、現実問題の使用に耐える答をこの方法で得ることは期待できない。

このような例は、他にもCPMによる工期の短縮問題など、ORや統計解析法などの数理計画法では解決できない問題が、工事マネジメント業務には数多く存在する。そして、このことがこの分野におけるシステム化の推進を阻む要因の1つとなってきた。すなわち、現実問題では、制約条件や意思決定メカニズムが複雑であることから、①問題解決のためのアルゴリズムを手続き的に記述することが難しいこと、同様な理由から②従来の数理計画法で解決できるようなモデル化が困難であること、の2点により、システム化できる問題領域が、従来技術だけを用いたのでは非常に限定されている。つまり、これまでシステム化されずに残された部分は、より複雑な問題構造を有するために、処理手順が複雑で錯綜し、かつ多種多様な要因が影響することから、判断基準を明確に定義しにくい部分であり、このために従来の技術だけを用いたのではシステム化することが困難な部分であった。

3. 知識ベース・システムの必要性と開発状況

(1) 問題領域の特徴

土木は経験工学であると言われるように、土木工学では古くから経験的な知識が重要な働きをしてきた。特に、本研究が対象とする工事マネジメント分野では、この傾向が非常に強く、建設プロジェクトに長年携わって、初めて一人前の技術者と呼ばれるような経験主義的な特徴を持つ分野といえる。すなわち、建設プロジェクトの計画や管理技術は、書物などに明示された知識だけが全てではなく、そこに書かれた技術の適用方法など、実際の工事を体験することによって、初めて修得できる性質の部分が多く存在する。このために、工程管理や原価管理などの実務に当たっては、生産現場の状況に応じて臨機応変に問題解決を図ることが、現在でも重要な問題解決方法の1つと考えられている。

このような工事マネジメント分野の特徴は、この領域の業務をシステム化する上で、知識工学技術の導入が非常に重要な役割を果たす可能性を示唆している。この点に関して、早くから工事マネジメント分野に知識工学技術導入の必要性を唱えたスタンフォード大学のレビット(R. E. Levitt)は、その理由として以下の8項目を示している²²⁾。

- ① 建設工事は繰り返しが少ない
- ② 不確実性が多く存在する
- ③ 生産の標準化が遅れている
- ④ 意思決定に十分な時間が掛けられない
- ⑤ 意思決定が主観的である
- ⑥ 不完全な情報でも意思決定しなければならない
- ⑦ 技術者にコンピュータに関する知識が少ない
- ⑧ 有能なエキスパートが存在する

以上の項目を、第1章で詳しく述べた建設生産システムの特徴と併せて考えると、次のようになる。すなわち、②～⑥で共通して言えることは、工事マネジメントでは、経験主義的な問題解決方法を必要としているということである。例えば、②の不確実性や⑥の情報不足、それに④の決断時間不足などは、理論的に突き詰めて検討するための情報や時間が不足し、それを補う技術として経験的な判断の必要性を示している。

これに対して、唯一として同じものはないといわれるプロジェクトの個別性や、完成に数年を要するというような生産の長期性など、建設生産システムの特徴により、一人の技術者が経験できる範囲は自ずと限定される。そして、これに①の性質も加わることにより、工事マネジメントでは経験的な問題解決が重要であるにも関わらずに、技術者が経験を蓄積し、一人前となるのは容易ではない。

さらに、情報不足や検討時間不足などの問題から、経験豊富な技術者といえども、間違っただ判断を下す可能性は少なからず残されている。そして、このような“人間の能力の限界を補う技術”として、これまで多くの業界で、コンピュータ利用による業務のシステム化が推進されてきた。すなわち、これまで産業界の生産性向上にコンピュータの果たした役割は計り知れないものがある。特に、マネジメントというソフト技術においては、コンピュータが重要な道具であることに、間違いはない。

しかし、この際問題となるのが、レビットが指摘する⑦である。つまり、“工事マネジメントに携わる技術者には、コンピュータに不慣れな者が多い”という指摘であるが、この点も工事マネジメント問題の特徴の一つを表している。何故ならば、建設業界にコンピュータに不慣れな技術者が特に多いという意味ではなく、生産計画・管理に直接的に携わる技術者の比率が、他産業と比較して高いという意味である。つまり、生産現場が多岐に分かれるために、各現場の担当者が一人で全てに対応しなければならない、一般製造業のような業務の分化が進まないために、必然的にコンピュータを取り扱わなければならない職員の比率が高くなる。

以上のように、工事マネジメントでは、経験主義的な問題解決方法が用いられるが、このための経験を蓄積することは容易ではない。また、この対応策としてコンピュータ利用が重要となるが、そのための教育を周知徹底することは、その対象者が多いということと、教育のための莫大なコストを考えると現実的とは考えられない。すなわち、①経験主義的な問題解決システムと②マンマシン・インターフェイスの向上の2点から、工事マネジメント分野における人工知能技術の適用は、大変重要であると考えられる。

(2) 知識ベース・システム開発の可能性

システム開発上の問題点を克服する一つの方法として、知識ベース・システムに代表される人工知能技術を工事マネジメント分野へ適用することが重要である。知識ベース・システムの特徴は、プログラムによる手続き的な問題解決方法だけでなく、それにプロダクション・ルールなどを用いたヒューリスティックな問題解決方法を組み合わせることにより、より複雑な問題領域をシステム化できるという可能性にある。また、曖昧情報を科学的に取扱うファジィ理論や、文字で表現しにくい問題を対象としたニューラルネットワークなど、人工知能分野では、この他にも新しい技術が実用化されてきている。このため、これらの技術を工事マネジメント分野に適用し、これまで経験深い技術者でしかできなかった業務までをシステム化するための研究が、今後はより重要となってくるものと予想される。

例えば、ニューヨーク州立大学のモーハン(S. Mohan)は、ジュニー(J. E. Jouni)、レビット(R. E. Levitt)、レハク(D. R. Rehak)らの研究も参考に、建設マネジメント分野(the field of construction and management)において、知識ベース・システム適用の可能性が高い部分を、以下のように12項目を上げて、説明を加えている(1990)²³⁾。

- ① Design of Construction Methods
- ② Concrete Mixing and Placement
- ③ Constructability
- ④ Temporary Facilities
- ⑤ Project Planning, Scheduling and Control
- ⑥ Project Management
- ⑦ Construction Quality Control
- ⑧ Construction Company Management
- ⑨ Equipment Selection, Diagnosis, and Repair
- ⑩ Human Resources Management
- ⑪ Operational Problems in Construction Facilities
- ⑫ Materials Management
- ⑬ Legal Issues

以上の中の②は、コンクリートの配合設計から打設工法選定、プラント計画など、特定の工種を対象とした分類だが、その他は、一部重複した部分も存在するが、ほぼマネジメントの管理要素に従った分類となっている。そして、ここでも

示されているように、Plan-Do-Check-Actionというマネジメント・サイクルの中で、Doの部分を除き、ほぼ全ての分野で、知識ベース・システムの開発が期待できる。ただし、知識ベース・システム開発のためには、問題構造のシステム分析や、問題解決過程に適用できる経験的な知識の蓄積など、これまでと同様に、多くの課題が残されているのも、また事実である。

(3) 米国における研究状況

知識工学が初めて提唱された第5回人工知能国際会議(1977)において、テイト(A. Tate)がプロジェクト・ネットワークの生成方法(NONLIN)に関する論文²⁴⁾を発表しているように、工程計画へ人工知能技術を適用することは、早くから人工知能の主要な研究テーマとなっている。しかし、工事マネジメント分野全般において、知識工学の適用研究が行われるようになったのは、カーネギーメロン大学のレハク(D. R. Rehak)による、工事管理全般における知識ベース・システム開発の可能性を論じた論文(1984)²⁵⁾が発表された1980年代半ば頃からである。

そして、これ以降、多くの論文が発表されるようになった。例えば、テキサス大学のアシュレイ(D. B. Ashley)は、1987年に発表した論文の中で、工事マネジメントにおける知識工学適用の有効性と将来における潜在力・適用可能性を力説しているものの、“現状は、まだ研究段階で成功例は少ない”と、この頃の米国におけるこの分野の研究状況を述べている²⁶⁾。また、スタンフォード大学のレビットは、1987年に発表した論文の中で、アシュレイと同様にプロジェクト計画における知識工学適用の有効性を力説するとともに、当時開発が進められていたエキスパート・システムを幾つか紹介し、実用化のための研究がかなり進んできていることを印象づけている²⁷⁾。

1987年という、1980年代前半に世界的規模で起こったAIブームの影響が、工事マネジメント分野にも波及し、エキスパート・システム開発の事例が多く発表された時期である。しかし、開発事例が多くなるにつれて、開発ツールの機能的限界や対象問題の整理不足などにより、実用システムの開発がそんなに簡単でないことが理解され、このような一種熱病的な状況は去り、以後、現在に至るまで、着実に研究が進められる状態となった。

米国建設工学研究界の代表的組織であるASCE(American Society of Civil Engineers)では、1980年代中頃より、コンピュータ利用技術審議会(Technical Council on Computer Practices)の配下に、エキスパート・システム委員会を設立し、システム技術の研究と啓蒙のための活動を行ってきたが、1987年には、それまでの活動成果をとりまとめた『EXPERT SYSTEM for Civil Engineers』²⁸⁾を発行している。また、1989年にアトランタで開催された第6回コンピュータ利用会議(the Sixth Conference on Computing in Civil Engineering)では、「エキスパート・システムに関するシンポジウム」を主催するなど、現在でも活発な活動を続けている²⁹⁾。

また、ニューヨーク州立大学のモーハン(S. Mohan)は、同じくASCEの委員会(the Subcommittee on Advanced Topics of the ASCE Committee on Micro-computers in Construction)による、建設マネジメント分野における知識ベース

・システムの開発状況に関する調査を取りまとめ、その結果を論文発表している(1990)³⁰⁾。彼は、この論文の中で、37個の知識ベース・システム開発例に言及し、レビットの分類方法³¹⁾を用いて、これらのエキスパート・システムを各々の開発段階に基づき、以下のように分類している。

- ① 実用化システム (operational expert system) …… 7 件
- ② プロトタイプシステム (operational prototypes) …… 14 件
- ③ 開発中のシステム (developmental expert system) …… 16 件

この論文で示された調査結果とその考察は、米国の建設マネジメント研究分野における、エキスパート・システムの開発状況と、そこでの問題点をよく表している。すなわち、“ニーズがあり実質的な利益が期待されるにも係わらず、実用化されたエキスパート・システムは、非常に少ない”状況にあるようである。

(4) 知識ベース・システムの開発例

続いて、米国における知識ベース・システム開発の現況を、より詳細に検討する。最初に、カーネギーメロン大学(Carnegie Mellon University)では、ヘンドリックソン(C. Hendrickson)が、ブロック積み作業自動化のための計画作成システム³²⁾や、建築工事の施工計画エキスパート・システム CONSTRUCTION PLANEX の開発を進めている³³⁾。また、同大のナビチャンドラ(D. Navichandra)は、マサチューセッツ工科大学のスリラム(D. Sriram)と共に、プロジェクト・ネットワーク自動生成システムの研究を進め、GHOST (Generator of Hierarchical networks for cOnSTruction) と呼ばれる工程計画エキスパート・システムを開発している³⁴⁾。また、スタンフォード大学(Stanford University)では、レビット(R. E. Levitt)が、プロジェクト計画に関する研究³⁵⁾とともに、仮設設備配置計画システム SITE PLAN³⁶⁾の開発を進めている。

同じく、スタンフォード大学のポールソン(B. C. Paulson)は、重機土工等のシミュレーション計画や搬土重機のリアル・タイム操作に関して、知識工学を取り入れた研究を行っている³⁷⁾。また、UCバークレイ校(University of California, Berkeley)のイブス(C. W. Ibbs)は、工事マネジメントに関する知識の表現法や推論法などの基礎的な研究から、ビル建設工事を対象とした工程ネットワークの自動生成方法まで、広範な研究を行っている³⁸⁾³⁹⁾。また、コロラド・ボルダー大学のデックマン(J. E. Diekman)は、知識ベース・システムにおける説明機能の重要性を指摘し、建設工学に関する諸々の知識を蓄積し、これによりシステム利用者に技術的な説明を行うための機構と知識ベース・システム例を示している⁴⁰⁾。

その他には、オハイオ大学のハディプリーノ(F. C. Hadipriono)によるコンクリート打設作業の研究⁴¹⁾や、ジョージア工科大学のカンガリーによる、リスク管理システム Decision-Making and Risk Analysis、それに現場組織編成支援システム CPO-ES などが開発されている⁴²⁾。

なお、ここで参考とした研究論文の抄録を巻末の資料-1「人工知能適用に関する外国文献抄録」に示した。また、これらの文献で紹介されている知識ベース・システムの主なものを表-3.1に、また、詳細な内容を巻末の資料-2「知識ベース・システム開発事例」にとりまとめた。

表-3.1 米国における知識ベース・システムの研究開発例

No.	システム名	概要	参考文献
1	MASON	ブロック積み作業計画システム	8706-00
2	CONSAES	建設工程解析エキスパート・システム	8709-00
3	SITPLAN	仮設設備配置計画システム	8709-03
4	CONSTRUCTION PLANEX	超高層ビルの建設計画システム	8710-00
5	CPO-ES	現場組織編成支援システム	8710-02
6	Decision-Making and Risk Analysis	リスク管理システム	8710-02
7	IRIS	建設工事におけるリスク指示システム	8710-02
8	IPMS85/2	プロジェクト管理エキスパートシステム	8710-02
9	CODSS	コンクリート打設機械選定システム	8806-00
10	GHOST	工程ネットワーク手法生成システム	8807-00
11	LIFE	建設計画評価システム	8807-00 8809-00
12	ESEMPS	道路工事用搬土重機選定システム	8809-04

(注) 参考文献は巻末の「資料-1 人工知能適用に関する外国文献抄録」の番号を表す。

(5) 我国における研究状況

我が国の建設分野における研究活動は、ファジィ理論に関する研究と知識工学に関する研究の2つの流れがある。この中で、前者のファジィ理論適用に関する研究は、比較的早くから始まり、1980年代初期から発表例が見られる。折田と山本は、この分野の研究動向について詳細な調査を行っているが⁴³⁾、この分野の研究には、ファジィ確率を応用した土工機械選定や、ファジィ線形計画法による土量配分計画など、施工計画の最適化を目指して、古くから研究が進められてきたOR (Operations Research) 技法の延長上にあるものが多くある。つまり、従来、問題となっていたデータの曖昧性を克服する技術として、ファジィ理論の適用が研究されているという意味合いが強く、このために、この分野の研究は、理論的研究の色彩が強い。ただし、最近になって注目されてきた応用例に、ファジィ制御があるが、こちらの方は、シールド機械の掘削制御などの適用システムの開発が進み、人工知能の中でも実用化の進んだ研究分野となっている。

これに対して、後者の知識工学に関する研究は、エキスパート・システムという言葉に代表されるように、理論というよりはむしろ応用例の方が前面に出ていて、先ほどのファジィ研究とは趣を異にしている。このため、理論的色彩の強い研究は、やはり1980年代初期から発表されてはいたものの、現在、この分野の中核的な研究となっている、エキスパート・システムの開発に関する応用研究は、遅れて1987~89年に集中的に発表されている。そして、このような応用研究の中には、理論的洞察を踏まえずに、単にシステム開発技法として知識工学を捉えた研究が多くあったために、現状における技術レベルの限界に直面すると、簡単に挫折してしまう事例も、多く見受けられた。

知識ベース・システムは、推論方法や適用分野の違いから、一般に①選択型、②合成(設計)型、および③制御型に分類されるが、これまでに工事マネジメント分野を対象として開発されたシステムを調べると、工法選定システムなどの選択型システムが圧倒的に多く、また、これらのシステムは、プロトタイプに留まっている例が多いという状況にある。これは、これらのシステムの多くが、施工計画問題の中のごく一部しか取り扱っていないところに問題がある。つまり、実際の業務に適用するためには、施工のコストやスケジュールまでを含めた「設計問題」全般を含めてシステム化する必要があるが、そこまで研究が進んでいないのが、我が国の状況と考えられる。

このことは、逆に言うと、合成型エキスパート・システムには、計画作成のためのモデルをシステム内に必要とするなど、選択型と比べて問題構造が複雑であり、このために、開発が進まないということでもある。従って、本研究の主題である工程計画に係わるエキスパート・システムの開発研究も、我が国では、まだほとんど行われていない。唯一、早稲田大学の嘉納が、工事の進行過程を因子連鎖グラフを用いてモデル化し⁽⁴⁴⁾、工程計画立案過程をエキスパート・システム化する方法を研究しているにすぎない⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾。すなわち、工事マネジメント分野において、今後、実用的なエキスパート・システムの開発を進めるためには、問題構造を解明し、計画型システムの開発を進めることが重要である。

第3節 人工知能研究の概要と技術レベル

1. 人工知能研究の歴史

経験により得られた知識が重要な役割を果たす工事マネジメント分野では、業務システムの開発技術として、人工知能技術の適用が重要となってくる。ここでは、そのような観点から人工知能研究の概要と技術レベルについて考察を加える。なお、参考までに、人工知能とコンピュータの研究開発の過程を、図-3.2に示す。

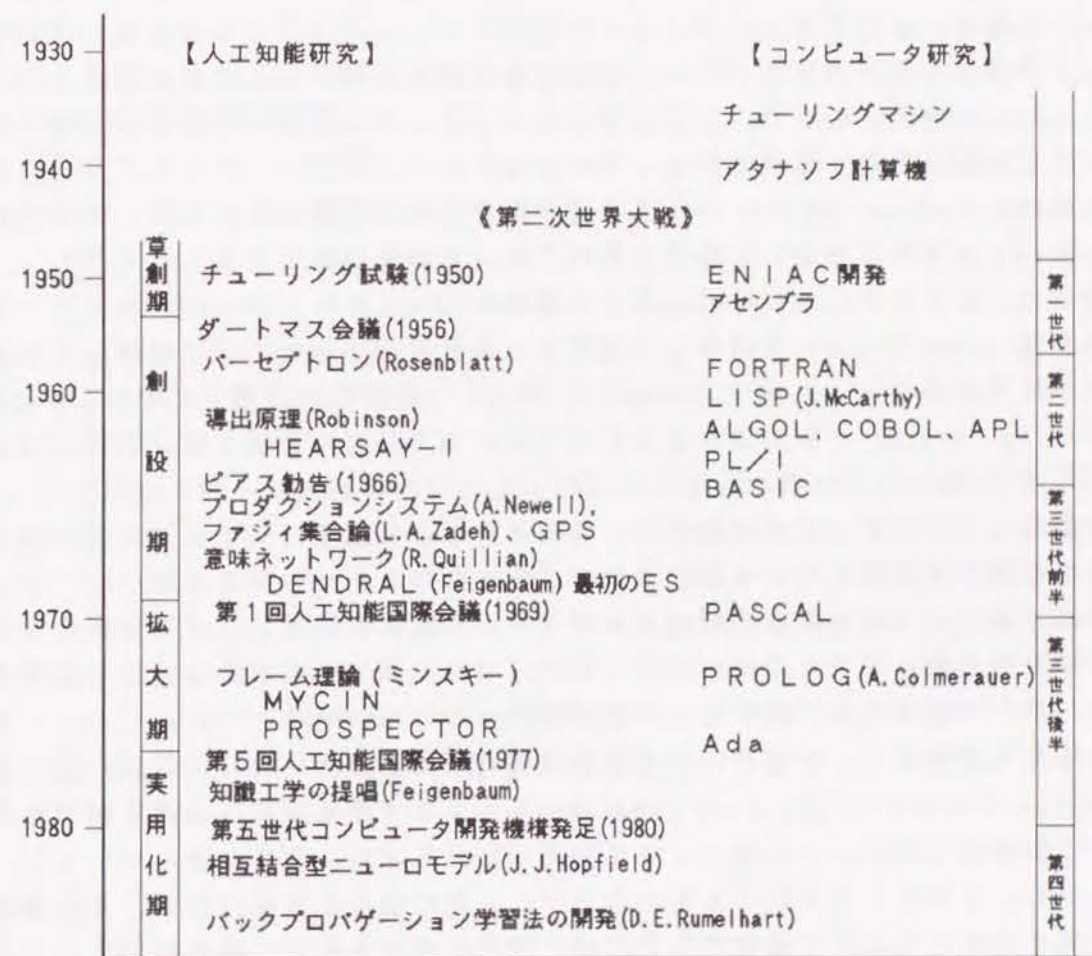


図-3.2 人工知能研究に関する年譜

(1) 人工知能研究の始まり

知能(intelligence)は、長い間人類固有の能力と考えられてきたが、科学技術の発達とともに、知能を機械化できないかという発想が起こってきた。特に、エ

ジプトの土砂算盤に始まるといわれる加算機開発の歴史が、英国の数学者チューリング(A. M. Turing)による自動計算機原理(いわゆるチューリングマシン)の提案(1936)により具体性を帯びてきたこと、また、同じくチューリングによる論文「Computing Machinery and Intelligence」により“知能機械”の可能性が示唆された(いわゆるチューリング試験の提案)ことにより、多くの科学者の間で“知的なコンピュータの可能性”が認識されるようになった⁴⁷⁾。

以上のように、人工知能の研究とコンピュータ開発とは、大変深い関係にあるために、史上初のコンピュータといわれるENIACが開発(1948)されたことにより、「知的機械の創造」は、より具体的に思考されるようになった⁴⁸⁾。そして、このコンピュータ技術は、逐次処理方式(sequential processing method)やプログラム内蔵方式(stored program method)の開発により、その後、急激な発展を遂げて現在に至っている。しかし、このような発達にもかかわらず、コンピュータの限界、すなわち、コンピュータはプログラムどおりにしか稼働しないために、アルゴリズムが明確でない問題には無力であることが、次第に認識されるようになってきた。そして、このようなコンピュータの限界を打破する技術として、人工知能の研究が期待されるようになった。

Artificial Intelligenceという言葉が歴史上初めて使われたのは、1956年の夏にダートマス大学において開催された“ダートマス会議”と言われる⁴⁹⁾。この会議には、LISP(LIST Processor)を開発したマッカーシ(J. McCarthy)、フレーム理論(frame theory)の開発で有名なミンスキー(M. Minsky)、情報理論で有名なベル研究所のシャノン(C. E. Shannon)、それに一般問題解決器(GPSS, General Problem Solver)の研究で有名なニューエル(A. Newell)とサイモン(H. A. Simon)など、人工知能研究に携わっていた当時の主だった研究者が一同に会し、ここでの討議により、現在の人工知能研究の枠組みがほぼ形成され、また、人工知能という研究分野が、社会的にも認知されるようになったといわれる。

当時の研究の主な対象は、機械翻訳やゲーム、数式処理など、非常に限定された問題を取り扱っていたに過ぎなかったが、当時の米ソ冷戦という緊迫した情勢から、ロシア語を英語に訳すための機械翻訳への応用が期待された。しかし、当初の安易な期待感、米国政府の自動言語処理諮問委員会(ALPAC, Automatic Language Processing Advisory Committee)による“機械翻訳には将来性なし”という衝撃的な報告、いわゆるピアス勧告(1966)により、急速に萎んでいった。

しかし、このような挫折にもかかわらず、人間の脳の働きを分析し、その機構を解明するというような基礎的な研究は、地道に続けられた。例えば、マックロック(McCulloch)とピッツ(Pitts)による論理演算系としての脳神経細胞のモデル化や、ウィナー(Wiener)のサイバネティクス、ヘブ(Hebb)の学習モデル、ローゼンブラッド(Rosenblatt)によるパーセプトロンの提案など、1960年代は、脳とコンピュータを学際的に研究して、知的な情報処理の基本原則を明かにしようという機運が盛り上がった時代でもあった⁵⁰⁾。そして、1969年には、ワシントンD.C.において第1回人工知能国際会議(IJCAI, International Joint Conference on Artificial Intelligence)が開催され、この大会が火付け役となって、今度は世

界的規模での人工知能研究ブームが起こることとなった。

(2) 知識工学の発達

1960年代後半になると、ファイゲンバウム(E. Feigenbaum)らにより、有機化学物質の構造同定システムDENDRALが開発された。このシステムでは、従来のプログラムと異なり、化学構造を同定するために必要となる知識と、それらの知識を用いて同定を行う部分を分けてコンピュータに記憶させ、実行する方法が初めて用いられた。このようなシステム技術のことを、現在は、知識ベース・システム(Knowledge-based system)と呼ぶが、この考え方の特異な点は、従来のプログラムが、問題解決の手順とそのためのノウハウを、一体化していたのに対して、その両者を明確に離れた所にある。また、DENDRALのもう一つの特徴は、有機化学物質の同定といった非常に限られた専門分野に、対象を限定したことにより、このために、少ない知識の蓄積であっても実用的な能力を備えることに成功することができた。

以上のように、人間の持つ知識をコンピュータ内部に蓄積し、これを適用して現実世界の問題を解決しようとするのが知識工学(Knowledge Engineering)であるが、DENDRAL開発に成功したファイゲンバウムが、第5回人工知能国際会議(1977)で、この知識工学を最初に提唱したといわれている。なお、知識ベース・システムは、対象分野を特定の専門分野に限定して開発されることから、エキスパート・システム(Expert System)とも呼ばれる。そして、この後、数々のエキスパート・システムが開発され、実務に適用されるようになった。例えば、油田探査エキスパートシステム: PROSPECTORは、実際の探査で用いられて、新たな油田探査に成功するという快挙をとげた。

以上のように、人工知能の研究は、科学的な基礎研究から工学的な応用研究にわたる幅広い分野で、研究が進められるようになってきている。特に、最近では人間の脳の働きを解明するための基礎的な研究分野として、哲学や心理学、脳生理学、それに計算機科学などの広範な分野における研究の重要性が認識されるようになり、これらを併せて認知科学(cognitive science)と呼ぶようになってきている⁵¹⁾。また、これらの研究の実用化が進むに従って、曖昧性の取扱いや知識獲得の自動化など、新たな問題点も指摘されるようになってきて、人工知能研究の幅は、さらに広がってきている状況にある。

2. 人工知能技術の特徴

人工知能研究では、人間の持つ知的活動をコンピュータにより実現することが、研究の初期段階から想定されてきた。そこで、ここでは、「人間とコンピュータの相違」を比較検討することにより、人工知能技術の特徴を明らかにしたい。

(1) 人間とコンピュータ: 処理情報の相違

例えば、視覚や聴覚など、外界から取り入れられた情報を判断し、それにより

次の行動を計画する能力や、それらの経験から学習する能力、言葉を理解し会話する能力など、人間は実に様々な能力を有している。我々はこれを総称して知能と呼んでいる。これに対して、コンピュータは、あらかじめ人間によって作成されたプログラム(program)に従って、データを高速に処理する機械であることから、あらかじめ人間が教えた内容と手順から少しでもはみ出した問題に対しては、まったく無力である。つまり、プログラムとは、対象となる問題を人間が分析し、解決手順(アルゴリズム)を明確化し、それをFORTRANなどのプログラミング言語で記述し、これを記憶させることによって初めて実行できるのであって、多少なりともコンピュータが独自に判断し行動できる構造とはなっていない。

このように、人間とコンピュータとでは、備えた能力や情報処理方法に相当な違いがあり、このために両者が取り扱う情報の種類や特徴も大きく異なっている。表-3.2に、このような人間とコンピュータの取り扱う情報の違いを整理して示したが、人間は主に文字や図形、それに音声などのパターン情報の取扱いに長けているのに対して、コンピュータは数値情報の処理を高速に実行することができる。また、この両者の取り扱う情報の違いを質的な観点から比較すると、人間は実に多種多様な情報を処理している(多種少量処理)のに対して、コンピュータは予め決められた範囲のデータを多量に処理している(少種多量処理)といえることができる。

表-3.2 処理情報から見た人間とコンピュータの相違

比較項目	人間の特徵	コンピュータの特徵
得意な能力	想像力、創作力、問題把握力、行動計画立案力、	計算力、印字力、作図力
情報の種類	文字や図形、音声などのパターン情報	主に数値情報
情報の特徴	多種少量処理	少種多量処理
対象領域	現実世界	モデル化された世界
求められる解	妥当解(現実的)	最適解(理想的)

そして、このような処理情報の相違は、両者が対象とする問題領域の違いに起因している。すなわち、我々人間は現実の世界を相手として問題解決を図っているのに対して、コンピュータは何らかの形でモデル化された世界を対象として働いている。そして、この違いは、両者の行う問題解決方法までを異なるものとしている。つまり、何か問題が発生した場合、人間は最適解とはいえなくても、なるべく良い解決方法を模索するが、必ずしも最適解を求めているわけではない。

これは、人間が置かれた現実世界が非常に複雑な構造を持っているために、理論的に最適解を得ることが不可能であったり、また、何が最適なのかが簡単には解らない場合が多いことによる。これに対して、コンピュータはプログラムに記

述された狭い世界で稼働するために、問題解決に当たってはその中での最適解を求めることができる。すなわち、コンピュータは与えられた条件の範囲内の最適解を求めることはできるが、人間が行うように適当な解、すなわち、間違いではないが必ずしも最適解とは言えないような解を求めることはできない。このような解を、最適解に対して、ここでは妥当解と呼ぶが、コンピュータが妥当解を求められないということも、問題解決における人間とコンピュータとの大きな相違の一つである。

(2) 人間とコンピュータ：情報処理方法の相違

以上のような人間とコンピュータの処理情報の違いは、両者の情報処理方法が異なることと非常に関連している。すなわち、コンピュータは予め記憶されたプログラムに従って、全ての処理がなされるのに対して、人間は何か問題を発見するたびに、学習や経験により自ら蓄えた知識を利用することにより、その場面で最良と考えられる行動を選択して活動している。このような方法は、その都度判断して行動するということから発見的(heuristic)方法と呼ばれる。これに対してコンピュータは、プログラムに従って行動するため手続的(procedural)方法を取るといわれる^{8,2)}。

ただし、問題が起こるたびに、いちいち悩み考えていたのでは、快適な人生を送ることは難しいことから、人間は経験や信念、あるいは宗教から修得した自らの行動規範(norm)を持っていて、日常に起こる様々な問題に対処している。また、毎朝食事をするたびに、口や手の動かし方を考えて実行することも煩わしいために、人間は頻繁に発生するきまりきった行動に対しては、一定の行動パターンを持って対処している。これなどは、何かの拍子に無意識的に行われる手続的な行動で、繰返し経験しているうちに自然と修得されるプログラムのようなものと考えられることもできる。

表-3.3 人間とコンピュータの情報処理方法の相違

比較項目	人間の特徵	コンピュータの特徵
処理方法	記憶された知識や個人の規範に従って(意識的・発見的) ～ 経験的に記憶された行動パターンに従って(無意識的・手続的) ～ 脳に焼き付けられたパターンに従って(反射的・瞬間的)	人間が作成し入力したプログラムに従って(手続的)

また、我々の持つ情報処理方法には、もう1つ、人間の五感から得られた情報を瞬間的に判断する方法がある。これは、例えば目から入ってきた画像情報から、目の前の物を瞬間的に識別したりする情報処理方法で、これまでの2つの方法が、

意識的にしろ無意識的にしろ、ルールやプログラムのように記号化された知識を用いて問題を解決していたことから記号主義(symbolism)と呼ばれるのに対して、このような瞬間的な識別では、記号化された知識を用いないということから、非記号主義またはコネクショニズム(connectionism)と呼ばれる。

このように、意識的に行われる発見的方法から、無意識的に行われる手続的方法、さらには、反射的に行われるコネクショニズムによる方法まで、人間は非常に幅の広い情報処理方法を備えているために、現在のコンピュータでは対応することができないような多種多様な問題を柔軟に処理できると考えられている。このような、情報処理方法から比較した人間とコンピュータとの相違を、表-3.3に示した。

(3) 人工知能研究の目的とAIシステムの定義

以上のように、人間とコンピュータの問題解決方法には、非常に大きな相違がみられるが、このような両者の違いを少なくし、コンピュータでも人間が行っているような問題解決方法を行えるようにしようとするのが、人工知能研究の基本的な目的である。すなわち、

- ①人間の持つ幅広い情報処理能力を機械化する
- ②これまでシステム化の対象とならなかった問題領域をシステム化する
- ③プログラムのような手続的方法ではなく発見的方法によりこれを実現する

以上の3点が、人工知能研究の基本的な目標である。このような、人間の持つ幅広い情報処理方法と、その特徴、および、これをコンピュータで実現するためのシステム化方法を示したのが図-3.3である。

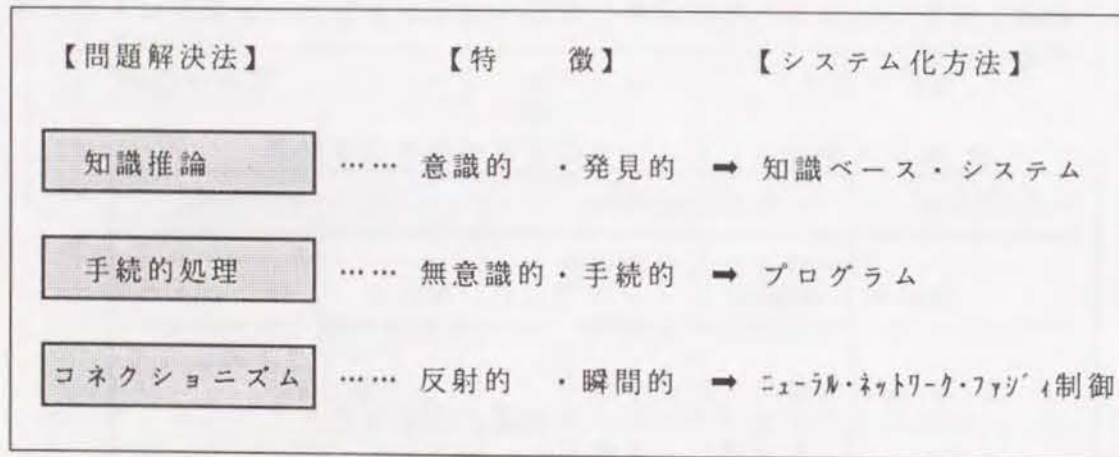


図-3.3 人間の情報処理方法とそのシステム化

人工知能研究では、以上のような目的を持つことから、人工知能研究により開発される情報システム(これを以後、AIシステムと呼ぶ)は、従来技術により開発される情報システム(これを以後、従来システムと呼ぶ)と比較して、以下のように定義することができる。

- ①従来システムより広い問題領域を対象としたシステム

②様々な人工知能技術を用いて開発されたシステム

すなわち、この第1点は、システムの扱う問題領域の違いで、AIシステムでは従来システムと比べて幅の広い情報処理能力を持つことから、従来システムでは扱えずに人間に頼っていた問題までも含めて、システム化の対象とすることとなる。また、第2点は、以上のような広範な問題領域を対象とすることから、AIシステムでは、知識ベース・システムやファジィ理論、それにニューラル・ネットワークなど、これまでの人工知能研究により開発された新たなシステム化技術を用いることとなる。

(3) 研究対象領域の特性

このような両者の相違を明かにするために、表-3.4に両システムが対象とする問題領域の特徴や、想定できる具体的なシステム事例を示した。すなわち、従来システムでは、構造物の強度計算とか安定計算とか、計算ロジックが明確に解っているような問題を対象に、システム開発が行われている。これに対して、AIシステムでは、強度計算とか安定計算だけではなく、周囲の状況やこれまでの構造物設計の経験的な知識なども考慮して、その設計の安全性やコストなどの評価を下すところまでもシステム化の対象としている。

表-3.4 従来システムと人工知能システムの相違

		従来システム	AIシステム(注)
問題の特徴		構造が単純な問題 (良構造問題)	より複雑な問題 (悪構造問題)
		例) 数値計算、作図など	例) 意思決定、診断、問題分析、行動計画立案など
システム事例	構造設計	構造計算	入力条件設定/結果の判断
	情報検索	条件検索	検索条件設定/自然語検索
	会計処理	分類集計/分析情報計算	分析情報の判断
	工程計画	ネットワークの日程計算	ネットワーク作成/最適化

(注) AIシステムの対象は、従来システムの対象を包含している。

このように、従来システムが取り扱ってきたような、単純明快な問題構造のことを、人工知能研究の分野では、良構造問題(well-structured problem)または良定形問題(well-defined problem)と呼び、反対に我々が人間社会の中で行き当たるような複雑な問題のことを悪構造問題(ill-structured problem)もしくは非定形問題(ill-defined problem)と呼び区別する。そして、この分類を用いると、人工知能研究はまさにこの悪構造問題を研究の対象としていることとなる。このために、AIシステムの開発に当たっては、対象となる領域の問題構造や意思決定機構の解明に、大きな労力が払われることとなる。

3. 人工知能研究の現状

ここでは人工知能研究によって開発された技術に関して、その現状と問題点に関して考察する。

(1) 人工知能研究の分類

人工知能の研究は、工学分野から科学分野まで、非常に広範に行われているために、その全体象を把握することは容易ではない。このために、このような研究分野を何らかの基準に従って分類し、これに基づいて全体を把握する必要が生ずる。しかし、研究の進展が非常に早く、人工知能研究の捉え方が、時代と共に変化していることから、これを的確に分類することは、容易ではない。そこで、ここでは、2種類の基準による分類方法を示すのにとどめる。

一つは、人工知能研究により開発された諸々の技術が、どのような情報を対象に、どのような処理方法を用いているかという観点からの分類で、“処理内容を基準とした分類”方法である。ここでは、図-3.4に示したように、記号で明示できる情報を対象に論理的な推論を行う①知識処理、視覚情報を対象に物体の認識を行う②画像処理(ビジョン)、それに、言語情報の認識や生成を行う③自然言語処理の3分野に分類することとした。

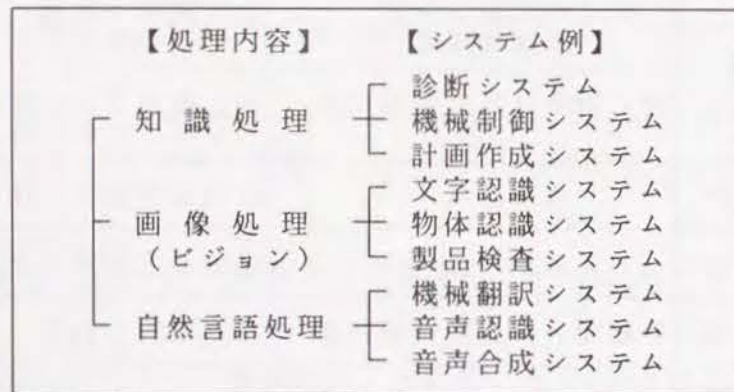


図-3.4 処理内容を基準とした分類

また、もう一つの分類方法は、人工知能研究により開発された要素技術が、全体としてどのような構成をなしているのかという観点からの分類方法で、“技術内容を基準とした分類”方法である。ここでは、図-3.5に示したように、①推論・問題解決・探索、②知識表現・知識獲得・学習、③パターン認識の3つに分類することとした。人工知能研究では、これまで人間はどのような方法で問題解決を行っているのか、また、どのような形で知識を蓄積しているのか、また、何故一瞬の内に物事を認識できるのかについて、長い間研究が続けられてきたが、ここでの分類は、このような観点からの分類ということができる。

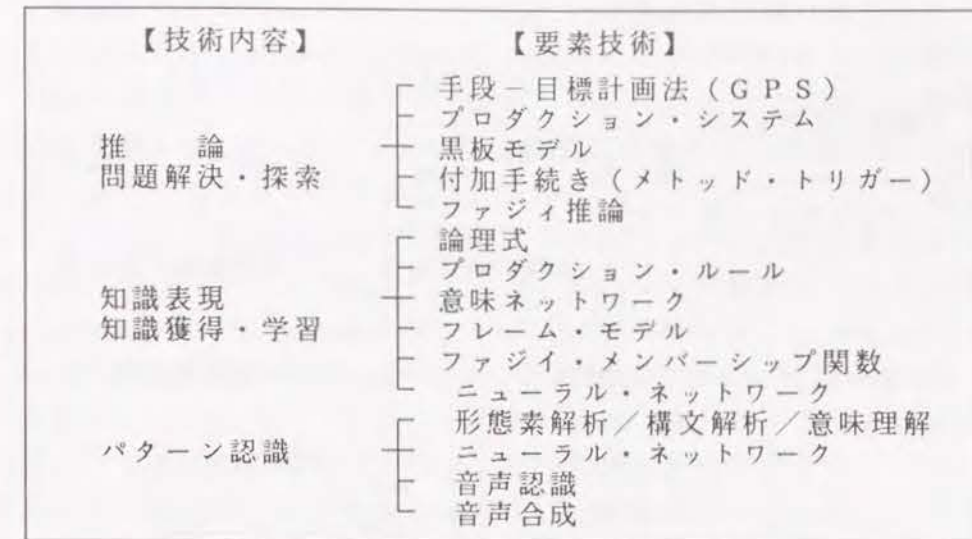


図-3.5 技術内容を基準とした分類

(2) 知識ベース・システム技術

知識ベース・システム(knowledge based system)とは、人間の知識をコンピュータに蓄積し、これを利用して問題解決を行うシステム化技術で、人工知能研究の中では最も実用化が進んだ分野といわれる。特に、対象分野を一つの専門分野に限定することにより、専門家に近い働きをさせることに成功したことから、エキスパート・システムとも呼ばれる。

従来型のシステム化技法では、問題の特性や解決方法、それに各段階で必要となる処理手続きなど、問題解決に必要な全ての知識を、FORTRANなどのプログラム言語で一体化して記述する。これに対して、知識ベース・システムでは、問題解決のための知識を知識ベース(knowledge base)に記録し、汎用問題解決機構である推論機構(inference engine)が、その知識に基づいて推論を進めることによって、問題解決が遂行される。

すなわち、知識ベース・システムでは、従来のプログラムの内容を、①問題解決のための知識と②その適用順序に分離し、適用順序決定機構を汎用化したところに、基本構造の特徴がある^{5.3)}(図-3.6)。そして、このような知識ベース・システムは、図-3.7のように、①知識ベース、②推論機構、③知識獲得機構、④データベースおよび⑤説明機構の5つの機能構成により、コンピュータ上で実現化されることとなる。

このような構造的特徴を有するために、知識ベース・システムでは、一連の問題解決処理の中から、そのための知識を分離して、個別に取り扱うことが可能となった。そして、この結果、システム開発やメンテナンスの効率が向上するという利点が生じた。また、ルールやオペレータなどの記号標記法を用いているために、これまでのシステム化技術の弱点であった、言葉を用いた問題解決が、知識ベース・システムを適用することにより実現化しやすくなった。

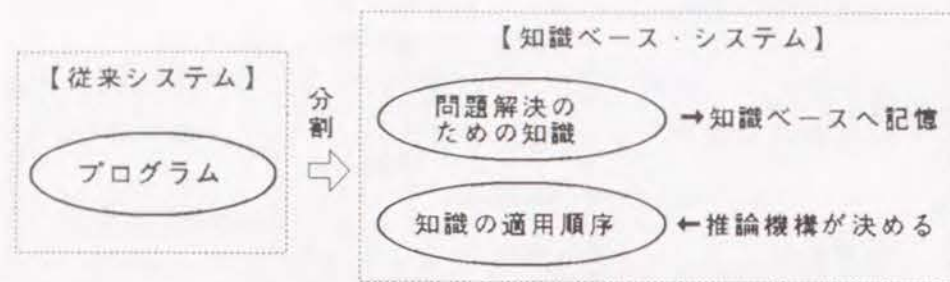


図-3.6 従来システムと知識ベース・システムの構造的相違

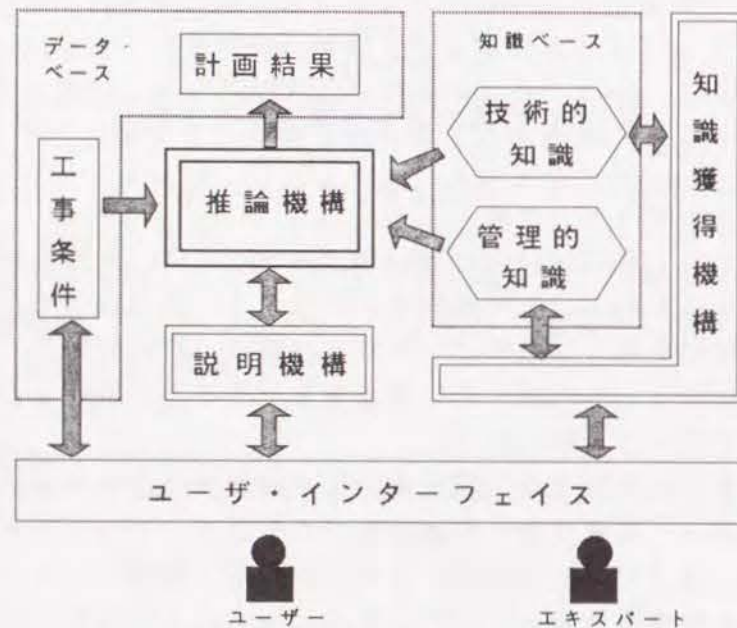


図-3.7 知識ベース・システムの構成

また、図-3.2で説明したように、人間は、①知識推論、②手続的処理、③コネクショニズムというように、多様な情報処理方法を用いて現実の問題に対応している。このように、全ての問題解決に知識推論法が適しているわけではないことから、手続型プログラムを知識推論の過程で適宜実行するような形態で、知識ベース・システムが開発されることとなる。工程計画を例とすると、工法や材料選定、それにネットワークの生成などは、知識推論法で取り扱ったほうが合理的だが、それによる日程計算や工程図の作成など、問題解決のためのアルゴリズムが明確な処理は、従来型のプログラム言語で記述する方が得策である。このような観点からすると、知識ベース・システムは問題解決のためのシェルと捉えることが的を得ている。

(3) 知識の表現と推論方法

知識ベース・システムでは、知識を蓄積するための知識表現法(knowledge representation)と、それをを用いて問題を解決する推論方法(inference method)がキーテクノロジーとなる。そして、当然のことながら、推論の際の利用方法を想

定しない知識表現法が考えられないように、この両者には強い関係がある。つまり、人工知能研究の分野で扱う知識とは、推論の過程で利用あるいは参照される形式化された情報であると定義できる。そして、このような知識は、物事の意味を現す事実知識(factual knowledge)と、状態を評価する判断規則(judgemental knowledge)の二つに大きく分類される⁵⁴⁾。

そして、このような知識表現方法には、これまでの人工知能研究の過程の中で様々な方法が提案されてきている。上野は、これらの知識表現方法を①論理モデル(logic-based model)、②意味ネットワークモデル(semantic network model)、③ルールモデル(rule model)、④フレームモデル(frame model)の4つに分類している。この中で、論理モデルとは、一階述語論理の体系の中で知の知識を表現し、三段論法によって推論を進める方法で、唯一論理的根拠を持ったモデルであるが、逆に非常に狭い範囲の問題しか扱えないという欠点がある。また、人間の連想能力に関する心理学的な研究から、1960年台後半にクイリアンによって考案された意味ネットワークモデルでは、事実知識をネットワーク構造により表現する。このために、もう一方の知識である判断規則を、この体系の中で表現することはできない。しかし、図-3.8に意味ネットワークの例を示すが、この例のように、意味ネットワークでは、概念間の意味的關係を視覚的に表現することが容易であることから、概念間の關係を試行錯誤的に検討するための手段としても、価値がある。

また、ニューエルが人間の思考モデルとして考案したと言われるルール・モデルでは、知識をIF-THEN形式で記述するために、「もし～ならば～である」といった形式で表現されることの多い判断規則の表現に適している。しかし、例えば、「構造物にはコンクリート構造物と土構造物があり、各々はさらに……」というような事実知識は、ルール・モデルで表現すると冗長的となるという問題がある。しかし、ルール・モデルは、表現形式が平易であり、かつ、我々の思考形態と類似していることから、知識ベース・システムにおける知識表現方法として、最も多く用いられている。

また、フレーム・モデルは、人間の長期記憶モデルの一つとして、ミンスキーにより提案されたフレーム理論(Frame Theory)に基づく知識表現方法で、同一の概念を持つ知識群をフレームと呼ばれる枠で、統一的に記述できる。このために、静的な事実知識の表現に優れているし、また、フレーム間に上位-下位の關係を設定することにより、情報の継承(inheritance)が自動的に行われる。この機能は、対象となる問題領域に存在し推論の対象となる各種の概念(もの)を、上位概念や下位概念との關係から構造的に表現する場合に適している。また、現在各種のエキスパート・システム・シェルで利用することができる、フレーム・モデルは、フレーム理論にオブジェクト指向(object oriented)の考え方が融合したシステム化技法となっており、フレームの中にメソッドやトリガーなどの付加手続き(attached procedure)を記述することができる。この結果、フレームによる宣言型知識と付加手続きによる手続型知識を、フレームという知識の単位で、統合的に取り扱うことが可能となった⁵⁵⁾。

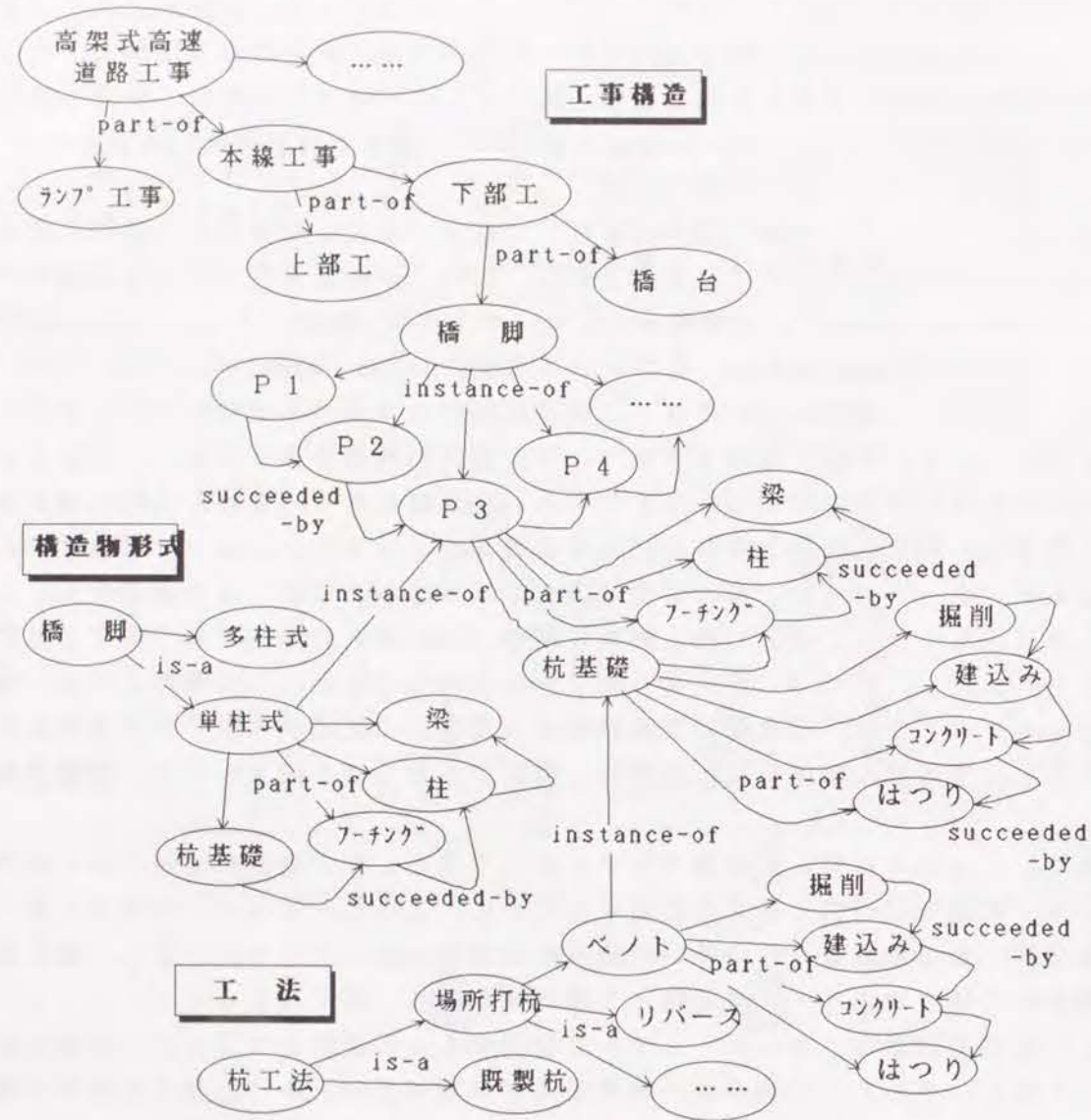


図-3.8 意味ネットワークによる高架式高速道路工事分解過程の表現例

以上のように、知識の表現方法として、これまでにいくつかの方法が提案されてきているが、我々の持つ知識は多種多様であることから、これらの知識を、以上のどれかの方法で表現することには無理がある。このために、以上の知識表現方法を組み合わせて知識を蓄積し、推論する方法が研究されてきた。この結果、「判断規則はルール・モデル、事実知識はフレーム・モデル」というように、複数の表現法を組み合わせる知識を表現し、推論する方法が開発されてきている。例えば、ルール・モデルとフレームモデルを組み合わせた、いわゆるハイブリッド型のシステム開発支援ツールが、現在では一般的となってきている。

(4) 曖昧性の取扱い

例えば土質特性を表すN値や土質分類、それに岩盤分類や安定性評価など、我々が普段行っている情報処理活動には、曖昧な情報や信頼性の低い情報が多く存在するし、また、そのような状況下で各種の評価活動を行っている。このために、

従来より広い問題領域をシステム化の対象とするAIシステムでは、このような曖昧性(ambiguity)を合理的に取り扱う技術が、非常に重要となる。

従来、このような技術としては、統計解析による方法や確率論による方法が用いられてきた。しかし、前者は多くの事例を分析することにより、ある種の規則性を見出す方法であることから、同様な条件下の多量なデータが必要であるために、非常に限られた問題にしか適用できないという問題がある。また、後者は不規則性(randamness)を確率分布で現し、これを確率論により処理する方法であるが、この不規則性とは現象の特性を表すものであって、ここでいう曖昧性とは基本的に異なる。

すなわち、曖昧性とは言葉や情報、それに知識などの持つ特性のことを意味し、このために人工知能研究における推論方法において、大きな問題となる。石塚は、このような曖昧性を、①制御の非決定性(non-determinism)、②多義性(multiple meanings)、③不確実性(uncertainty)、④不完全性(incompleteness)、それに⑤ファジィ性(fuzzi-ness)の5つに分類している^{66) 67)}。ここで、制御の非決定性とは、問題を解決する筋道を事前に決定することができないという性質のこと、また多義性とは、物事を一意に定義できない特性で、言葉の意味理解などで問題となる特性のこと、また、不確実性とは情報や知識の確からしさのこと、不完全性とは、常に正しいとは限らない知識の特性、そしてファジィ性とは、概念間の境界の曖昧性を意味する。

そして、このような曖昧性には未解明の問題が多く存在し、現在、研究が鋭意進められている状況にある。例えば、制御の非決定性に対する推論制御の研究や、多義性に関する空間や分脈理解の研究、また、不完全性に対しては、非単調論理によるアプローチなどである。これに対して、不確実性に対する確信度(Certainty Factor:CF)やファジィ性に関するファジィ理論など、現在の知識ベース・システムの中で、既に利用されている方法も存在する。

しかし、このように実用に供されている方法であっても、理論的根拠や利用方法などに関して、まだ多くの問題点が存在する。例えば、情報や知識の確からしさを確信度で表す方法は、MYCINの開発以来、多くの知識ベース・システムで用いられているが、この値を決定する方法や計算方法の理論的な根拠は、まだ完全には明らかにされていない。このために、確信度を使ったシステムでは、妥当な結果を出すために行われる確信度調整に、多くの労力を掛ける必要がある。また、ファジィ理論とは、1965年に米国のザディ(L.A.Zadeh)により提案されたファジィ集合論を基本概念とし、言葉や知識の曖昧性をメンバーシップ関数に置き換えて処理する方法であるが、このメンバーシップ関数をどのように決定するのか、また、知識提供者とシステム利用者の感覚的な違い(discrepancy)を如何に調整するのかといった問題など、真に実用に供するためには、まだ多くの問題が存在している。

(5) コネクショニズムの適用

人工知能の研究では、工学的な実用化研究とは別に、頭脳のメカニズムを解明する科学的な研究が、重要な位置を占めていることは既に述べたが、このような

研究から最近注目を集めるようになった新しい技術にニューラル・ネットワーク(neural network)がある。人間の脳は、成人男子で約1400g、表面積はほぼ新聞紙1ページ分の約2250cm²あるといわれているが、これらの数字を他の動物の脳と比較すると、重量では鯨や象より軽く、表面積ではイルカより狭い。つまり、人の脳の優秀さは、その重さや表面積の大小によって決まるのではなく、脳を構成する140億個といわれる膨大な数の神経細胞と、それらの複雑な結合の仕方によるということ、また、この神経ネットワークの結合は、人間の成長とともに進化するが、これまでの生理学的研究で解明されてきている⁸⁸⁾。

また、前項の人工知能技術の特徴の中で述べたように、人間の行う情報処理方法には、意識的に行われる①論理的思考から、普段無意識的に行われる②手続的行動、それに五感から入力された情報の③瞬間的判断まで、三通りの方法がある。この中で、ニューラル・ネットワークは、③の情報処理方法として利用できるものと考えられる。例えば、車の運転中に何か危険な状況を察知した場合、我々は急ブレーキにより危険を回避するが、このような場合の状況判断は瞬間的に行われ、それに伴う行動は反射的に行われる。そして、これらの判断や行動は経験を積むほどよりの確になるのが一般的である。

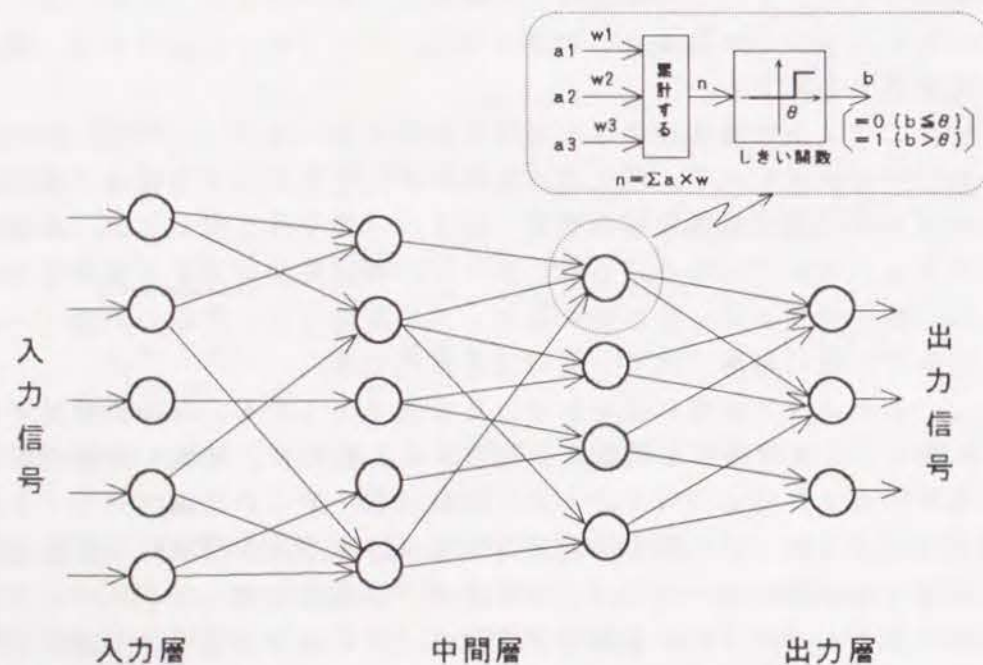


図-3.9 階層型ニューラル・ネットワークの構造

以上の例のように、瞬間的な状況判断では、言葉で表された知識を用いて意識的に判断するのではなく、経験的に養われた一種の勘のような方法が用いられる。そして、このような方法を機械で実現する技術として、ニューラル・ネットワークが注目を集めるようになった。すなわち、ニューラル・ネットワークとは、我々の頭脳の中にある神経ネットワークによる情報処理機構を人工的に実現化しようとしたもので、1960年代に盛んになった神経回路モデルの研究、その中でも

特にローゼンブラッド(F. Rosenblatt)による自己学習能力を持つ神経回路モデル、いわゆるパーセプトロン(perceptron)の研究(1958)に端を発する⁸⁹⁾。

ローゼンブラッドの研究は、コンピュータの能力的限界などの問題から、結局は実現化に至らなかったが、1980年代に入って、カリフォルニア工科大学のホップフィールド(J. J. Hopfield)が、相互結合型ニューラル・ネットワーク(1982)を考案したことで、再度注目を集めるようになった。また、1986年には図-3.9に示した階層型ニューラル・ネットワークにおける効率的な学習方法、いわゆるバックプロパゲーション法(back propagation)をルメルハート(D. E. Rumelhart)が開発して以来、急激に実用化が進んだ⁹⁰⁾。

ちなみに、従来のように知識を文字や記号で表す考え方を記号主義(symbolism)と呼ぶのに対して、ニューラル・ネットワークでは知識をネットワークモデルで表現することから、非記号主義あるいはコネクショニズム(connectionism)と呼ぶ。そして、文字や音声の識別や、ロボットのセンサー情報の総合判断、レーダ情報による潜水艦の識別など、従来の知識ベース・システムでは実現化しにくかった問題への適用が期待されている。

また、知識ベース・システムは、人間の持つ知識をコンピュータに蓄え、これを利用して問題解決を図る技術であるために、このような知識をいかに獲得し、蓄積するのかが、非常に重要な問題である。この点、ニューラル・ネットワークでは、プログラムやルールを必要とせず、学習により知識の蓄積を行う方法であることから、知識の獲得と蓄積の自動化を解決する方法の一つとしても期待されている。例えば、曖昧性の表現に確信度を用いたシステムの確信度調整法や、ファジィ推論で用いるメンバーシップ関数の決定法などの研究が現在進められている⁹¹⁾。

第4節 知的工程計画システムの構想

1. 知識ベース・システムの特徴と計画立案問題

ここでは、まず最初に、知識ベース・システム開発技術の現状とシステム化対象問題の関係について考察し、次に、工程計画の立案過程を再検討することにより、人工知能技術の適用方法に関して検討する。

(1) 知識工学技術の現状と対象問題

知識ベース・システムには、宣言型知識を効率的にシステム化する機能とは別に、システム稼働のためのシェル(shell)としての機能がある。前述したように、問題解決の方法には、①知識推論、②手続き的処理、③コネクショニズムの3種類あるが、知識ベース・システムでは、知識推論を行うだけではなく、その過程で必要となる手続型問題に対しては、従来のプログラミング言語を用いた手続き的処理を、また、パターン認識などの問題に対しては、コネクショニズムによる問題解決を行うように、システムをコントロールする機能を備えている。すなわち、知識ベース・システムとは、図-3.10に示したように、知識推論によるマンマシン・インターフェイスをベースに、対象問題の問題構造に従って、知識推論、手続き的処理、コネクショニズムを使い分けるためのシェルとしての機能が存在する。

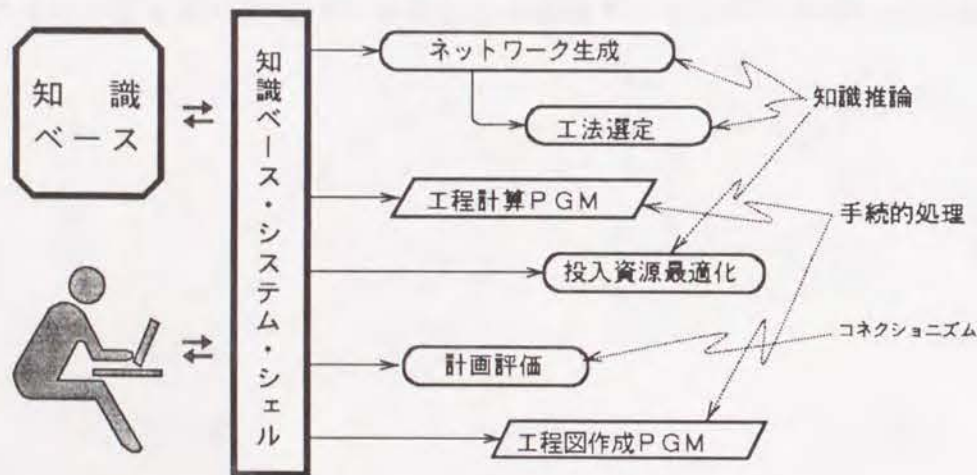


図-3.10 シェルとしての知識ベース・システム

例えば、工程計画問題の中には、工法や施工機械などの選定問題だけではなく、ネットワーク計算などの手続型問題、それに、計画評価などのパターン認識問題など、多種類の問題が存在する。そして、この中の手続型問題に対しては、問題解決のアルゴリズムが明確であることから、それをFORTRANなどの手続

型言語で記述し、システム内部にプログラム・モジュールとして記憶して、問題解決を図ることとなる。このように、我々がシステム化の対象とする問題には、一般的に3種類の異なる形式の問題が存在し、それらのシステム化方法はそれぞれ異なる。そして、このために、ある問題をシステム化するためには、その問題の構成や特徴を、以上のような観点から把握しておくことが、非常に重要である。

何故ならば、汎用問題解決機構と問題解決のための知識の分離、ルールやフレームなどによる知識記述方法の多様化など、システム開発技術面に対する高邁な理念とは裏腹に、現在、実用システムに適用できる技術のレベルは、それほど高くはないのが現状である。このことは、実際のシステム開発のために利用するエキスパート・システム開発支援ツール(Expert System shell)のレベルでは、より顕著となる。すなわち、知識表現の種類、付加手続きの記述方法、曖昧情報処理、マンマシン・インターフェイスの方法など、現実のシステム開発に当たっては、多くの制約が存在する。

(2) 知識構成問題領域の特性

図-3.11では、ある問題解決に必要な知識を、プログラムで記述する手続的知識と、ルールなどで記述する宣言的知識に分けて、その両者の比率からシステム化の対象となる問題の分類を試みた。当然のことながら、問題の規定の仕方によっては、一つの問題の中に多くのサブ問題を含むことになるが、ここでは問題特性を把握するという目的から、非常に単純化して示した。この図のように、概念的には、手続型知識だけを必要とする純手続型問題と、宣言型知識だけが必要となる純推論型問題が存在し、我々がシステム化する問題は、この間のどこかに位置することとなる。

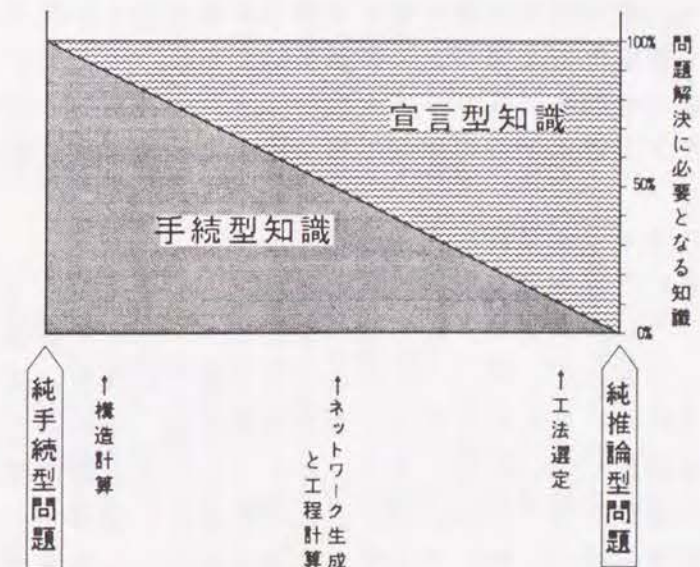


図-3.11 知識構成による問題領域の特性

従来のシステム化では、コンピュータの高速計算機能を有効に利用するために、構造計算など純手続型問題が主な対象であった。同様に、今後のシステム開発

に当たっても、手続的知識の比率の高い問題から、順次開発を進めるのが有効であると考えられる。すなわち、知識処理だけではなく、多量な情報処理を伴う問題領域、つまり、少種多量情報処理というコンピュータの特性を活かせる問題領域を対象に、システム化を検討することが重要であり、このことは、本研究の主題である工程計画のシステム化においても、考慮する必要がある。

(3) 工程計画の立案過程に関する研究状況

工程計画の立案過程は、比較的早くから研究が進められてきているが、これらの研究では、計画作成の基本的手順と、工事の階層性という対象問題の基本構造を示しているだけで、実際に計画立案ができるほど詳細かつ具体的に計画化の手順が示されているわけではない。すなわち、これらの研究は、“ある程度の工事経験を持った技術者を対象に、これまで経験的に行ってきた工程計画業務を、システムの思考に基づき、より合理的に実施できるような指針を示している”ものといえる。つまり、建設工事の知識がない素人が、計画作業を行うためには、行動手順や判断方法を事細かに記述したマニュアルが必要となるが、これまでの研究の成果によって、『建設工事における工程計画作成マニュアル』が作成できているわけではないし、また、そのようなマニュアルができたとしても、それは、やはり標準的な業務の説明でしかなく、実際の業務に利用できるような柔軟性を備えたものではない。

この理由は、これまでも詳しく述べたように、固定した工場で生産される一般製造業とは異なる、建設生産システムの特異性による。すなわち、①制約条件が多種多様である、②計画の立案に統一された方法がない、③代替案が多く存在する、④意思決定方法が主観的（経験的）、⑤定性的な評価方法を用いる、⑥作成される計画は各人の技量に大きく依存する、などの特徴から、一つの工事の工程計画を考えても、そこには無限に近い代替案が存在するし、また、それら进行评估する要因の数や重要度も工事ごとに多種多様である。そして、このことから、計画立案の意思決定過程をアルゴリズム化してフローチャートで明示することは、トンネルやシールド工事などの特殊な工事を除くと、ほぼ不可能に近いと考えられる。

(4) ヒューリスティックな計画立案過程

それでは、実際に計画立案に携わる技術者は、どのようにして工程計画を作成しているのだろうか。例えば、計画構造をネットワークで表現して工程計画立案の過程を分析して見ると、図-3.12のような手順で計画化が進められることが理解できる。すなわち、最初に工区分割や基本施工法、それに主要仮設備などの計画の基本構想を仮定し(Step.1)、これに沿って、作業と順序関係を記述した工程ネットワークの生成を行う(Step.2)。次に、資源や工期などの制約条件の基で作業の日程を設定する(Step.3)。そして、このようにして作成された工程計画を総合的に評価し(Step.4)、問題部分を再検討しネットワークの改良を進める。この場合、部分的な再検討だけでは問題を解消できずに、最初の構想計画に戻って再度計画化を行う場合も存在する。

以上のような計画立案方法では、計画がネットワークの改良という形で、ヒューリスティック（発見的）に進められるために、計画全体としての整合性がとりやすいということ、また、最初から最適計画作成を目指すのではないために、最適解かどうかの保証はないものの、現実に適用可能な妥当解は、確実に得ることができるという特徴がある。ただし、このような計画生成過程の各段階では、重要度の異なる様々な要因が関係し、非常に複雑な問題解決手順と高度な意思決定を要する。また、ステップ2のネットワークの生成過程においても、単純な作業の分解では対応できないこと、さらに、作業の配置（最適化）方法や計画の評価方法についても方法論が確立されていないなど、システム化するためには多くの課題が存在するのも事実である。

以上のような計画立案方法では、計画がネットワークの改良という形で、ヒューリスティック（発見的）に進められるために、計画全体としての整合性がとりやすいということ、また、最初から最適計画作成を目指すのではないために、最適解かどうかの保証はないものの、現実に適用可能な妥当解は、確実に得ることができるという特徴がある。ただし、このような計画生成過程の各段階では、重要度の異なる様々な要因が関係し、非常に複雑な問題解決手順と高度な意思決定を要する。また、ステップ2のネットワークの生成過程においても、単純な作業の分解では対応できないこと、さらに、作業の配置（最適化）方法や計画の評価方法についても方法論が確立されていないなど、システム化するためには多くの課題が存在するのも事実である。

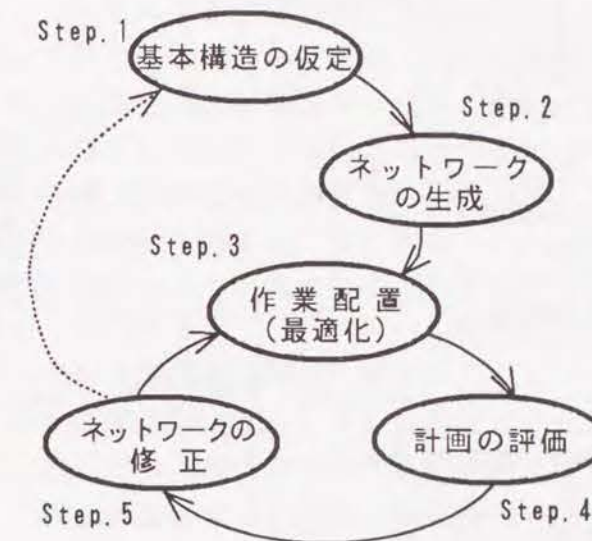


図-3.12 ヒューリスティックな計画立案過程

2. 工程計画立案過程と知識ベース・システム化

ここでは、図-3.12 に示したように、技術者がヒューリスティックな計画立案を行っているとの前提の基に、工程計画のプロセスを再度整理して図-3.13 に示した。すなわち、工程計画のプロセスを整理すると、①構想化、②モデル化、③作業配置計画、④評価、⑤要素計画の5つの段階に分けて考えることができる。以下に、各段階における知識ベース・システムの可能性について論じる。但し、最後の要素計画は、本研究で取り扱う範囲を越えるために、除外する。

(1) 構想化段階

構想化段階では、主要な仮設工法や仮設備、それに工区分割などが、過去の工事実績などに基づいて検討され、次のモデル化段階における前提条件が設定される。この中で、工区分割とは、基本的には構造物の形状特性が主要な判断要因であり、この形状パターンを認識し、過去の施工パターンと照合することにより、

管理しやすい部分に分割する問題である。しかし、このようなパターン認識問題をシステム化することは、現状の技術では難しい。また、地下鉄工事における作業帯の制約など、最近の工事では、形状特性以外の外的な制約条件の重みが相対的に高くなってきていることもあり、現時点での知識ベース・システム化は困難と考えられる。

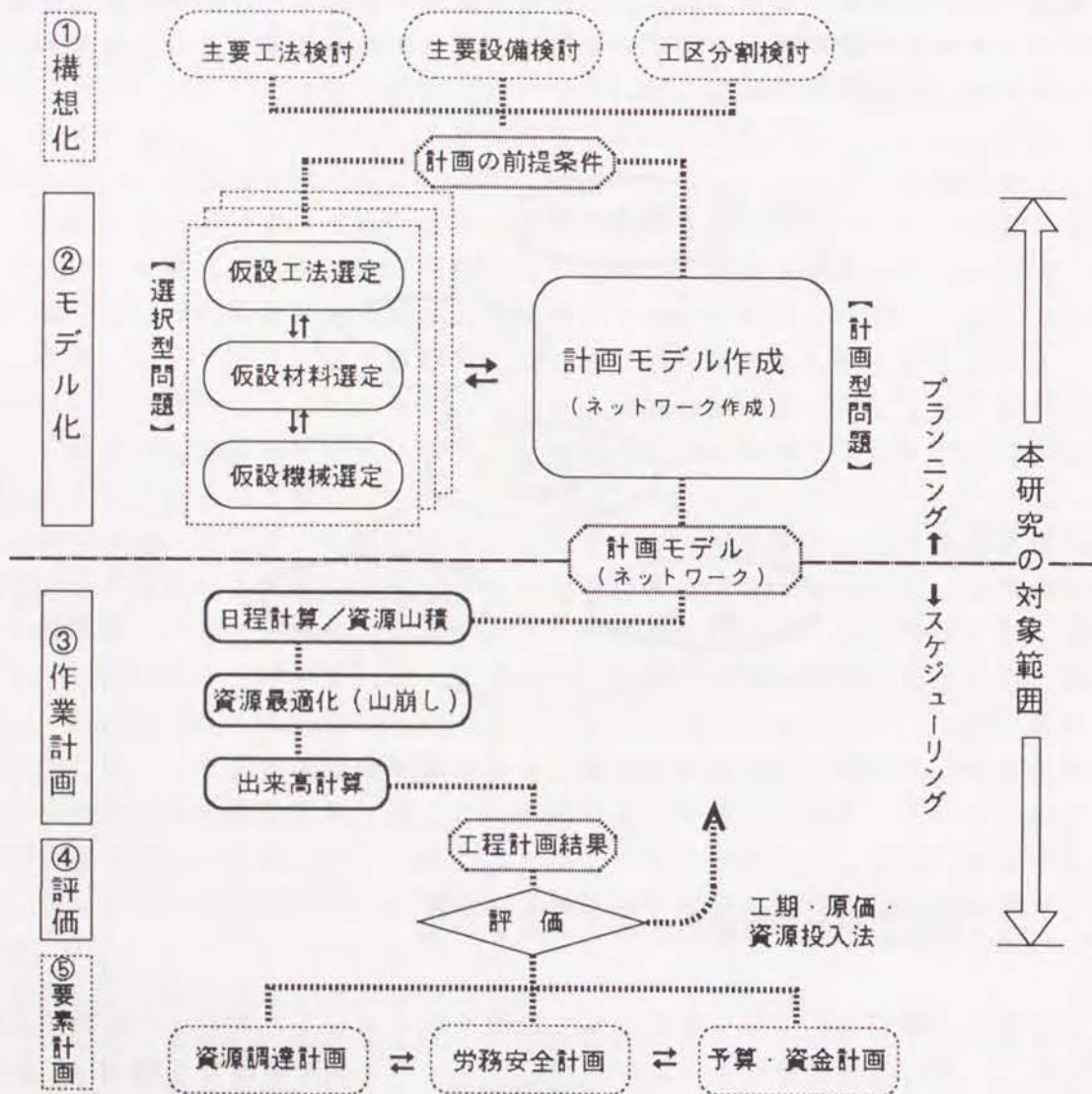


図-3.13 工程計画の立案過程

また、工法や設備選定の問題は、あらかじめ蓄積された案の中から入力条件によって選択するといった選択型問題である。そして、このタイプの問題は、主に宣言型知識だけを取り扱うことから、計画型問題と比較して、より単純な構造をしており、早くからエキスパート・システム化が試みられてきた。しかし、選定要因はやはり多種多様であること、また、これらの要因が、例えば施工環境のように言葉での表現が困難であったり、地質条件のように数値だけでは表現しにくいなど、定性的なものが多いこと、さらに、この種の問題は図-3.12のように、

純宣言型問題に近いことなどから、これまでに開発された例は多いが、真の実用化はあまり進んでいないのが現状である。

(2) モデル化段階

モデル化段階では、仮設工法や仮設材料、施工重機などの選定を経て、工程計画のための計画モデルが作成される。すなわち、この段階では、ネットワーク法や斜線式工程表などの計画モデルを用いて、計画案を作成する。例えば、ネットワーク・モデルを用いる場合を考えると、構想化段階で想定した基本計画に従って工事を分解し、ネットワークの構成要素であるアクティビティ(activity)と順序関係(relationship)を生成する。そして、この生成過程の途中では、未決定の工法や投入資源の種類や規格などの選定が行われる。

つまり、ネットワーク生成自体は計画型の問題だが、その解決過程には多くの選択型問題を内包していることとなる。また、この問題の中には、生成されたネットワークを用いて、各種の工程計算を行うなど、多くの手続型問題も含まれている。また、計画型問題であることから、選択型問題がシステム内部に蓄積された解の一つを選択するのと比較して、処理の結果得られる情報量も多量となる。このために、知識ベース・システムとしての開発効果は、現時点における知識ベース・システム技術を考慮しても、充分大きいと考えられる。

(3) 作業計画段階

作業計画段階では、前段で作成された計画モデルを用い、そこで規定された作業構成やそれらの順序関係は既定とし、その範囲内で最も適当と考えられる工程計画が作成される。すなわち、前段のネットワーク計算では、最早時刻と最遅時刻を算出するが、これらは各作業の実際の計画時刻ではなく、その範囲を規定しているに過ぎない。つまり、実際の作業時刻は、同じ資源を必要とする他の作業との関係や、安全性やコストとの関係など、前段では規定できなかった原価や工期、安全性などの評価要因のバランスも考慮して、計画が立案される。すなわち、作業計画段階とは、作業の開始時期や投入資源量を調整する段階であり、これを端的にいうと、ネットワーク・モデルに対する投入資源の最適化問題と位置づけられる。

これまでは、このような問題に対して、山積・山崩しという数理計画手法が取られてきた。しかし、これまでの長い研究にも拘らず、現在でも実用的な方法は発見されずに、ネットワーク手法利用のボトルネックともなっている。すなわち、これまでの研究では、例えばPERTの山崩法等のように、主に数理計画法を用いて最適案を求めることを目標としていたが、この問題に係わる要因の種類や重要度が多種多様であるために、制約条件を制限せざるをえず、現実に適用できるレベルの解を求めることはできなかった。このために、山本は、技術者が経験的に行っている資源割当法を数理モデル化したヒューリスティック法を提案している⁶²⁾。この方法は、従来の方法と比べると、より現実的な方法と考えられるので、知識ベース・システムの技術を適用して、経験豊富な技術者の知識をよりよく反映したエキスパート・システムの開発が期待できる。

(4) 評価段階

次の評価段階とは、前段で作成した工程計画案を、工期や原価、安全性、確実性、それに資源の使用方法など、非常に多くの評価要因に基づき総合的に評価する段階である。そして、ここで問題が発見された場合は、それがどのような要因に起因しているのか、また、それがどの段階まで戻れば解消できるのかを判断する。反対に、特に問題点が発見されず、総合的にも妥当な計画であると判断された場合は、これが当該プロジェクトの工程計画となる。そして、この計画に基づいて、次の要素計画段階で、資機材や労務、それに予算など、個別の要素ごとに実施計画が立てられることとなる。

以上のように、この段階では、やはり多種多様な評価要因が存在し、それらの間の相対的な重要度や関連関係が不明確である。例えば、資源投入量や概算原価などの定量的なものは、数量的比較評価が比較的容易であるが、施工性や安全性などの定性的な要因は、技術者の経験的判断による部分が多く、数量化することが難しい。このような情報は、数量化理論などを用いて要因分析し、評価判定式を作成することも可能とは考えられるが、評価要因が多種多様であることや、それを精度良く分析するためのデータ収集が、非常に難しい。この結果、計画の総合評価は、技術者の主観に頼る部分が大きくなり、これをシステム化するためには、従来からの問題解決方法では限界があるものと考えられる。

しかし、経験豊富な技術者は、このような複雑な問題を、割に速く解決することができる。これは、工程や原価などに関する各種の指標を、総合的に判断する能力を、多くの経験を積むことによって、技術者が獲得しているためと考えられる。すなわち、このような問題は、一種のパターン認識問題と捉えることができ、その総合的な評価メカニズムは、学習によってなされることになる。そして、このような人間の持つ学習とパターン認識の能力を代替する方法として、前節で説明したようなニューラル・ネットワークなどのコネクショニズムが、提案されてきている。したがって、この評価段階も、以上のような方法を用いることによって、将来的にはシステム化の可能性が残されているということが出来る。

3. 知的工程計画システムの構成

ここでは、先ほどの工程計画立案過程に人工知能技術を適用した工程計画システム、すなわち知的工程計画システムの構成と、その中で必要となる知識の構成と表現方法について、考察を加える。

(1) 知的工程計画システムの構成

前述したように、工事計画の立案過程は、工事の構想計画から個別要素計画まで、多くの段階を経て行われる。そして、それらの中には、現状の技術レベルでシステム化しやすい部分とそうでない部分が存在する。また、このような計画過程は、原価などの他の管理要素とも密接に関係するために、どの範囲を工程計画とするのかも曖昧である。そこで、本研究では、このような計画の各段階の中で、

工事の構想化段階から工程計画案が作成される評価段階までを、全体工程計画を作成するための一つのまとまりと考え、この部分に知識ベース・システム技術を適用して、知的工程計画システムを開発するための方法を検討することとした。

そこで、工程計画の立案プロセスを表した図-3.13 に関しては、知識ベース・システム化が適するかどうかといった観点から、各プロセスがどのようなタイプの問題であるかを、前段で検討したが、この結果から、このような計画立案過程を具体的なシステム構成として検討すると図-3.14 のようになる。この図では、知識ベース・システム・シェルが、右端に示した知識ベースに蓄えられた知識を参照しながら、利用者とのコミュニケーションを取り、計画立案過程に係わる各モジュールの処理を制御して、工程計画の立案を推進する。このモジュールとは、一連の問題処理の塊を指し、その問題解決が手続処理による場合は従来型プログラムを、また、知識推論による場合はルール（図中ではESと表示している）を用いてシステム化される。

この図のように、工区分割や主要工法・仮設備などは、多種多様な要因が関連し、システム化しにくい部分であることから、ここでは、構造物形状などの設計情報と共に、事前に決定されている入力情報と考えた。そこで、「ネットワーク生成ES」は、これらの入力情報に基づき、工程ネットワークを生成する。また、このネットワーク生成過程の中では、仮設のように設計仕様で指定されていない作業に関して、そこで用いられる工法や施工機械、資材などに関して、条件に適したものを選定するESが、必要に応じて稼働する。

以上の過程は、計画モデルを作り出すプランニング段階に当たるが、これに引き続いてスケジューリング段階にはいる。スケジューリングとは、与えられた計画モデルに基づいて、作業の開始日と終了日、それに資源の配分方法を決定する段階であるが、この問題の多くの部分は、問題解決手順が明確でアルゴリズムを記述できることから、従来のシステム化技術を用いて、システム化が進められてきている。このために、この段階の日程計算、資源山積計算、出来高計算、それに、工程図の作成部分は、知的工程計画システムにおいても、手続き型言語により記述し、プログラム・モジュールとしてシステム内に記憶され、システム・シェルが必要に応じて稼働させる。

しかし、この過程で必要となる資源配分の最適化問題、すなわち、一般に「山崩し」と呼ばれる問題は、これまでに多くのアルゴリズムが提案されてきたにもかかわらず、現在でも、現実問題に適用できる方法は発見されていない。何故ならば、最適化の対象となる資源が複数存在し、それらは互いにトレードオフの関係にある場合が多いために、そのような条件の基で妥当な解を求めるアルゴリズムが存在しないことによる。このために、経験ある技術者は、計画案を段階的に改良するという方法、すなわち発見的方法により、このような問題に対処している。このために、作業の重要度に応じて投入資源の配分量を変化させ、より現実に近い計画とするためのヒューリスティック法が提案されてきた⁶³⁾。しかし、これらの手法は、従来の手続的言語によるシステム化を目指したことから、技術者が行っているような柔軟な問題解決方法を再現するまでには至っていない。そこ

で、今回の知的工程計画システムにおいては、ここの部分をエキスパート・システムとすることにより、より実行性の高い計画が立案できるように考えた。

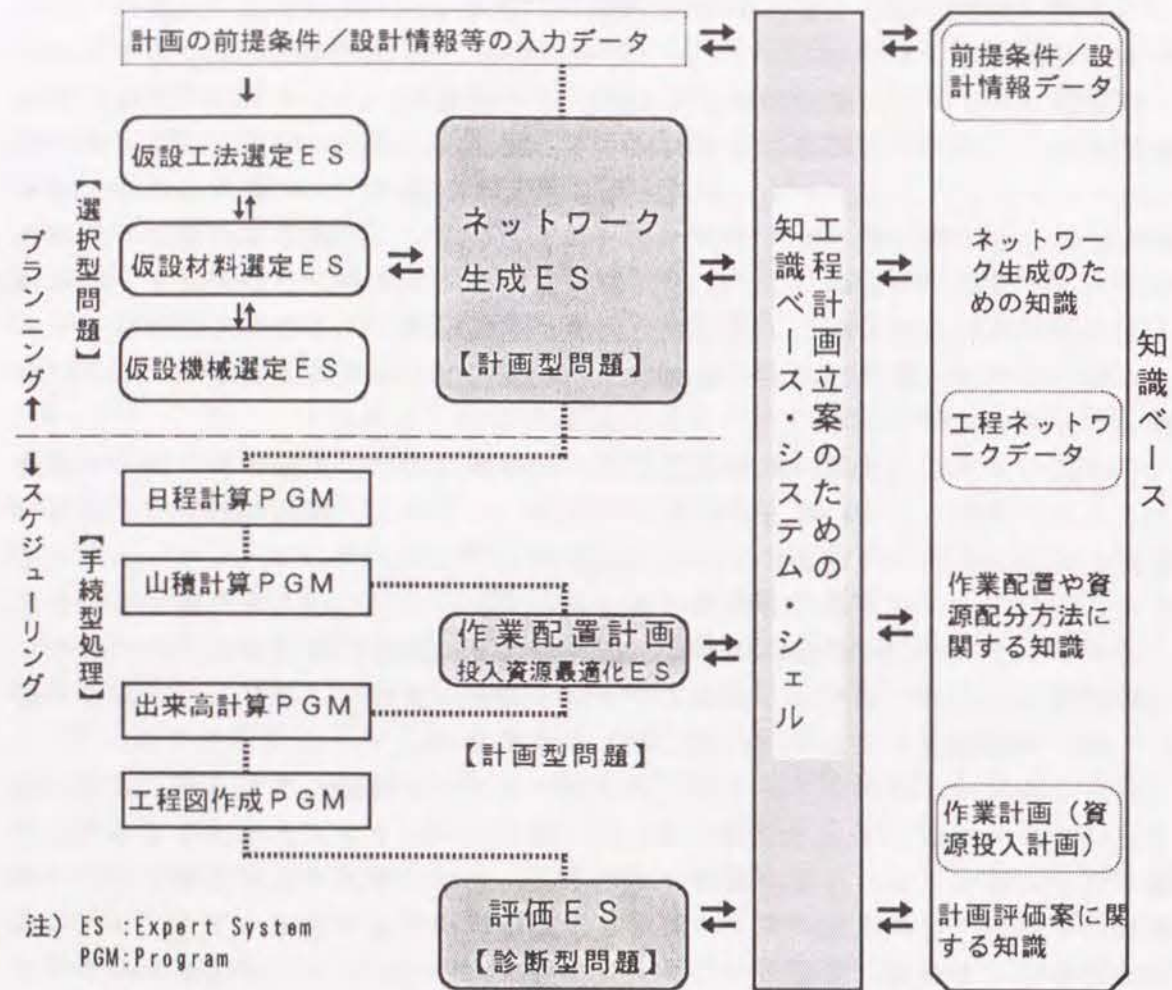


図-3.14 知的工程計画システムの構成

(2) 工程計画に必要な知識の構成

前述したように、工程計画はいくつかのプロセスを経て立案され、その各プロセスの問題を解決するために、多種多様な知識が適用される。このため、工程計画の立案課程を知識ベースシステム化するためには、どのような知識がどの段階で必要となるのか、また、それらの知識はどのような形でシステムに組み込んだら良いのかを、事前に検討し整理しておくことは重要である。そこで、工程計画立案に必要な知識を洗いだし、それらを概念的に整理・分類を行った。

建設工事は、その特徴から施工に当たって様々な制約を受ける。また、工法や投入資機材、施工順序など、選択の自由度が高いという基本的特性もあるため、工程計画立案に当たっては、ただ計画を作るというだけでなく、より合理的な計画を効率的に作成することが重要となる。このことから、嘉納は、工程計画を立案するための知識として、①工事技術に関する知識と②計画立案方法に関する知

識が必要であると述べている⁶⁴⁾。しかし、後者の計画立案方法に関する知識をより詳細に検討すると、この中には、計画生成の基本的なメカニズムに関する知識と計画を改良するための経験的な知識の2種類が存在することが解る。また、問題解決のための知識には、以上のような宣言的な知識とは別に、従来からの手続きの知識も存在する。そこで、本研究では、工程計画立案に必要な知識としては、図-3.15 に示したように、①工事技術に関する知識、②計画立案方法に関する知識、③計画評価に関する知識、それに、④工程計算処理手続きの4種類に分類して考えることとした。

知識工学分野では、知識を専門的事実(facts)と経験則(heuristics)に分けて考えるが、①は前者に、また②と③は後者に当たるものといえる。④は、従来スケジューリング・システムとして行われてきた日程計算、資源山積計算、出来高集計、工程図作成など、問題解決のためのアルゴリズムが明確な処理手続きであり、システム内部では、FORTRAN等を用いたプログラム・モジュールとして記憶される。そして、①の知識が図-3.14における知識ベース・システム・シェルとして働き、他の②から④までの知識を制御して、工程計画を順次生成することとなる。

(3) 工事技術に関する知識

工事技術に関する知識とは、建設工事に係わる技術的な知識のことで、専門書や技術資料等に記号や数値形式で明示されたものが多い。人工知能研究分野では、このような知識のことを教科書的知識と呼ぶが、工事技術に関する知識は、まさにこの分類に属する。このために、比較的知識獲得は容易であるといわれる。また、この種の知識は、いわゆる静的知識であることから、知識ベース・システムではフレームとして蓄積される。

以下に、工事技術に関する知識の具体例を示す。

① 工事構成に関する知識

例えば、「高速道路工事は、本線工事とランプ工事等から構成される」というように、建設プロジェクトの構成に関する知識のこと。工事種類から推定される構造物構成と、設計図書情報として与えられる個別プロジェクトの情報が存在する。

② 構造物の形式に関する知識

例えば、「RC橋脚の構造形式には、単柱式、門型、ラーメン式等がある」というように、どのような構造物があるのか、また、各構造物にはどのような形式が存在するのか、施工に際してどのように部位分割して施工するのかを表す。

③ 工法に関する知識

例えば、「杭工法は、既製杭工法と場所打杭工法に分類され、場所打杭工法にはベント杭、リバース杭等がある」など、施工法の種類、そこで必要となる施工機械などに関する知識。

④ 工種に関する知識

例えば、「鉄筋組立作業は、鉄筋工が加工した鉄筋を材料置場から組立場所に小運搬し、組み立てる」など、工種の種類とその内容に関する知識。

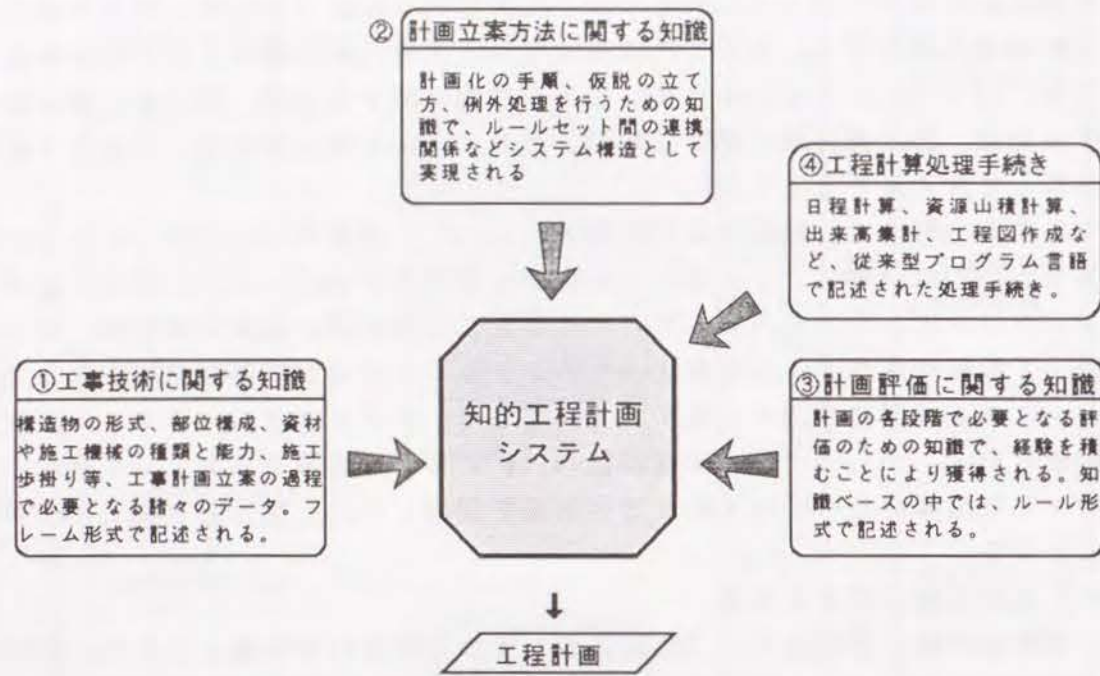


図-3.15 工程計画問題に関連する知識構成図

(4) 計画立案方法に関する知識

計画立案方法に関する知識とは、工程計画を効率的に作成するための計画化戦略（手順や方法）を表した知識のことである。すなわち、全体計画を作成するためには、どのような個別計画が必要となるのか？また、それらの個別計画はどのような順序で作成するのか？途中で行き詰まった場合、どこまで戻って考え直すべきか？等々、いくつかの問題を解決しなければならない。このために、①計画立案手順、②的の絞り方、③無駄な思考の避け方、④バックトラックの仕方、あいまいな情報の取扱方、等に関する知識が必要となる。

工事計画の立案手順については、工事の主類別にマニュアル化されている例があるが、実際のプロジェクトの計画立案は、このようなマニュアルだけでは作成できない。すなわち、個別プロジェクトは、それが置かれた環境が各々異なるために、それらの条件を考慮して計画を立てる必要がある。このために、同じ工事の計画であっても、それを立案する技術者によって、計画立案の手順や方法が、それぞれ異なるのが一般的である。このことは、計画立案方法が、技術者の個人的経験や技量に影響されることを示している。

このような知識は、多数の技術者から得られた知識の差異を分析し、知識の一貫性や最適性の検討をした上で、整合性が取れた一つの計画立案体系としてモデル化される。そして、この知識は、知識ベース・システムの中では、部分的な計画生成を行うルールセットとそれらが関連づけられたシステム構造という形で実

現化される。すなわち、図-3.14における「知識ベース・システム・シェル」の中に組み込まれることとなる。

(5) 計画評価に関する知識

計画評価に関する知識とは、計画立案に関する知識により作成された工事計画案を評価し、より良い計画に改良するための知識である。すなわち、資源の投入方法やコスト、安全性等から計画案を評価する知識で、①投入資源最適化、②工期の短縮化、③コスト低減化、④問題部分の発見、等が存在する。

これらの知識は、その性格からして、技術者個人のノウハウに属するものが多く、宣言的知識であることから、知識ベース・システムの中では、プロダクション・ルール形式で蓄積される。この分類に属する知識は、推論結果の妥当性を評価し、妥当でないと判断した場合には、どのような段階から計画修正を行ったらいかがを示す知識で、主に経験的に蓄積される種類の知識である。具体的には、施工の安全性や効率性、また、全体計画と部分計画の整合性などに関する知識が、これに属する。

第5節 結 言

本章では、工事マネジメントの中核をなす工程管理のシステム化を進めていくことが重要であること、また、そのための新しい技術として、近年めざましい進歩を遂げている人工知能技術が重要であるという認識から、これまでのシステムより知的な工程計画システム、すなわち、工程計画エキスパート・システムに関して、技術的な開発の可能性と考えるシステム構成について論じた。

第2節では、我が国においてこれまでになされた工程計画に関する研究を再検討し、そこでの問題点、現状の問題解決に対する不足分野などについて考察した。すなわち、建設プロジェクトの工程計画をいかにモデル化するか、また、そのモデルを用いて最適計画を求める方法など、主にスケジューリングに関する研究が行われてきたが、そのような工程計画モデルをいかに作り出すのかというプランニングに関する研究は、非常に少なかった。また、スケジューリングにおける最適化手法に関しても、非常に制限された制約下における問題にしか適用できない手法しか提案されてきていないことがわかった。

そして、この原因には工程計画問題の特性が大きく影響していること、すなわち、多種多様な要因が影響する複雑な意思決定過程を含む問題であることがわかり、このような悪構造問題のシステム化には、人工知能技術の適用が必要であると考え、工程計画問題に人工知能を適用するために、これまでにどのような研究が行われてきているのか、主導的役割を果たしてきている米国の状況と、それに比して、非常に遅れたわが国の現状について述べた。

この結果、工程計画分野では、経験の蓄積が業務の遂行に重要な要素であるにも関わらず、生産システムの特徴から、一人の技術者が経験できる範囲には限界があること。また、不確定な情報の中で早急な意思決定が求められること、さらに、このような状況を支援するためのシステムを、従来のシステム技術では開発しにくいということなどが述べられていた。しかし、具体的な知識ベース・システムとしては、工法選定などの選定問題に関してシステム化が進められているものの、いまだにプロトタイプシステムであるものが大部分であること、また、計画型問題に対するシステム化が遅れていることがわかった。

また、第3節では、工程計画問題領域におけるシステム化を進めるためのキーテクノロジーとして、人工知能研究とそこで開発された技術に着目し、その特徴を明らかにするために、人工知能研究の発祥や発展の過程を考察し、その結果明らかとなった、技術の構成や、各技術の適用分野とその有効性、および現状の技術レベルと数年先における可能性を論じた。人工知能技術の特徴に関しては、最初に、人工知能研究と関係の深いコンピュータと人間の頭脳における情報処理方法の違いに着目し、コンピュータが手続き的な処理しかできないのに対して、人間は意識的な知識推論から反射的なコネクショニズム的方法まで、実に幅広い問題解決方法を備えていること、そして、このような問題解決方法をコンピュータで実現しようとしているのが、人工知能研究であることを述べた。

そして、この結果、当面の応用技術としては、知識ベース・システムの適用が最も重要であること、そして、この重要性は、これまでのプログラムで表現しにくかった宣言的知識を、プロダクション・ルールなどを用いて容易に扱えることと、それに、従来型システムと利用者の仲立ちをするマンマシン・インターフェイスとしての働きにあることを示した。また、このようなシステムの中で頻りに現れる曖昧情報を合理的に処理するために、ファジィ理論の適用が必要となることを述べた。また、ここ数年内に実用化が期待でき、代替案評価や現状評価など、パターン情報の認識にニューラル・ネットワークが、重要な働きをするだろうことを述べた。

また、第4節では、以上のようなレベルにある人工知能技術を、どのように工程計画問題に適用かという方法を考察し、その結果を踏まえた知的工程計画システムの構成について検討を加えた。すなわち、工程計画立案のプロセスの中の、どの部分をシステム化し、どの部分は利用者が処理することが現実的か、また、そのような考えで知識ベース・システム化をすると、どのような構成の知識ベース・システムが可能であるのか、さらに、そのような知識ベース・システムで必要となる知識の種類とその構成、および、それらの知識の蓄積方法について、論じた。

そして、以上の検討の結果、知的工程計画システムは、大きくプランニング部分とスケジューリング部分に分けて考えられること、プランニング部分では、その前の構想計画段階で設定された、工区分割や基本工法、それに主要な設備計画を前提条件として、後のスケジューリング段階で必要となる工程計画モデル、すなわち、工程ネットワークの生成を目的にするシステムの開発が重要であることが解った。また、プランニング段階では、前段で生成された工程ネットワークモデルを用いて、作業の開始時期や資源の投入方法などの計画化を進めるが、ここで重要となる、投入資源の最適化・合理化を達成するためには、これまでに行われてきた数理計画手法だけでは不十分であり、経験豊富な技術者の知識を利用した、ヒューリスティックな計画システム、すなわち、知識ベース・システムの開発が必要であることが解った。

【 参 考 文 献 】

- 1) 吉川和広、春名 攻：ネットワーク手法による施工計画のシステムアプローチに関する研究、土木学会論文集、第151号、1968
- 2) 川崎健次：建設工事における工務管理の合理化に関するシステム論的研究 京都大学学位論文、1974
- 3) 川崎健次、春名 攻、田坂隆一郎、他：ネットワークモデルによる施工計画、システムに関する研究、土木学会論文報告集、第204号、pp.95~105、1972
- 4) 春名 攻、田坂隆一郎：工事施工の多階層構造特性を考慮した工程計画・管理のシステム化、第3回土木計画学研究発表会、pp.253~261、1981
- 5) 須田、湯沢 昭：メッシュ式工程管理モデルによる港湾工事の工程管理、土木学会論文集、No.359/IV-3、pp.235~242、1985
- 6) 吉川和広、山本幸司、他：大規模運土作業計画のシステム化に関する研究、昭和51年度年次学術講演会、土木学会関西支部、1976
- 7) 春名 攻、大音宗昭：工程管理システム設計の実施例について、第46回年次学術講演会講演概要集 第6部、pp.296~297、土木学会、1991
- 8) 吉川和広、春名 攻：施工計画システムへの確率PERTの導入に関する研究、土木学会論文報告集、第179号、1970
- 9) 吉川和広、春名 攻：施工計画における最適ネットワークの作成法に関する一考察、土木学会論文報告集、第182号、1970
- 10) 川崎健次、春名 攻、田坂隆一郎、笹嶋 博：ネットワークモデルによる施工計画システムに関する研究、土木学会論文報告集第204号、pp.95~105、1972
- 11) 春名 攻、田坂隆一郎：土木施工における工程計画・管理のシステム化に関する実証的研究、第5回土木計画学研究発表会講演集、1983
- 12) 春名 攻、田坂隆一郎：土木工事の工程計画の方法に関するシステム論的考察、土木学会論文報告集、No.318、pp.117~216、1982
- 13) 池田将明、吉川和広、春名 攻：資源制約を考慮した工程計画システム化の研究、土木学会第40回年次学術講演会、1985
- 14) 山本幸司：土木工事における施工計画のシステム化に関する研究、京都大学学位論文、1978
- 15) 吉川和広、山本幸司：MAN, DAYを変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察、土木学会論文報告集No.256、pp.49~58、1976
- 16) 宇津橋昭八郎：工程管理の最適化に関する考察(1)、土木技術39巻3号、1984
- 17) 宇津橋昭八郎：工程管理の最適化に関する考察(2)、土木技術39巻5号、1984
- 18) 山本幸司：施工計画・管理手法としてのPERT系技法の現状と今後、土木工事のマネジメント問題に関する研究討論会講演資料集、1983
- 19) 松浦博、他：コンピュータによるフィルダムの工事管理、ダム日本、No.415、pp.17~33、1979
- 20) 土木施工と情報ワークショップ、第4回土木計画学研究発表会、1982
- 21) 中村秀治：知識工学と土木構造物、土木学会論文集 第386号/1-8、1987

- 22) Levitt, R. E. : Expert System in Construction: State of the art, Expert Systems for Civil Engineers: Technology and Application, M. L. Maher, ed., pp. 85~112, ASCE, 1987
- 23) Mohan, S. : Expert System Applications in Construction Management and Engineering, The Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 116, No. 1, ASCE, pp. 87~99, 1990
- 24) Tate, A. : Generating Project Network, Proceeding of 5th IJCAI, 1977
- 25) Rehak, D. R. et al : Expert Systems in Construction, Computers in Engineering, vol. 1, ASCE, 1984
- 26) Ashley, D. B. and Levitt, R. E. : Expert System in Construction : Work in Progress , Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 1, No. 4, ASCE pp. 303~311, 1987
- 27) Levitt, R. E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 114, No. 3, ASCE, 1988
- 28) Maher M. L. ed. : EXPERT SYSTEM for Civil Engineers, ASCE, 1978
- 29) Barnwell T. O ed. : Computing in Civil Engineering, ASCE, 1989
- 30) Mohan, S. : Expert System Applications in Construction Management and Engineering , The Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 116, No. 1, ASCE, pp. 87~99, 1990
- 31) Levitt, R. E. : Expert System in Construction: State of the art , Expert Systems for Civil Engineers: Technology and Application, M. L. Maher, ed., pp. 85~112, ASCE, 1987
- 32) Hendrickson, C et al. : Hierarchical Rule-Based Activity Duration Estimation , The Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, pp. 288~301, 1986
- 33) Hendrickson, C. et al. : Expert System for Construction Planning, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 1, No. 4, 1987
- 34) Navinchandra, D., et al. : GHOST : Project Network Generator, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 2, No. 3, 1988
- 35) Levitt, R. E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 114, No. 3, ASCE, 1988
- 36) Tommelein, I. D. et al. : USING EXPERT SYSTEMS FOR THE LAYOUT OF TEMPORARY FACILITIES ON CONSTRUCTION SITES, Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium, 1987
- 37) Paulson, B. C. : Expert Systems in Real-Time Construction Operation, Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium, 1987
- 38) Echeverry, D., Ibbs, C. W., and Kim, S. : Sequencing Knowledge for Construction Scheduling, Journal of Construction Engineering and Management,

- ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 118~130, 1988
- 39) Garza, J.M. and Ibbs, C.M. : Issues in Construction Scheduling Knowledge Representation, Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium, 1987
- 40) Diekman, J.E. et al. : EXPLANATION OF CONSTRUCTION ENGINEERING KNOWLEDGE IN EXPERT SYSTEMS, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 114, No. 3, pp. 364~389, 1988
- 41) Hadipriono, F.C. et al. : CONCRETE OPERATION DECISION SUPPORT SYSTEM (CODSS), The 5th International Symposium on Robotics in Construction, June 6-8, Tokyo, Japan, pp. 491~499, 1988
- 42) Ashley, D.B. et al. : EXPERT SYSTEM IN CONSTRUCTION: WORK IN PROGRESS, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 1, No. 4, October, pp. 303~311, 1987
- 43) 折田利昭、山本幸司 : 建設マネジメントにおけるファジィ理論の応用に関する一考察、第7回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、土木学会、pp. 193~198、1989
- 44) 嘉納成男 : 建築工事の工程計画手法に関する研究、早稲田大学学位論文、1985
- 45) 嘉納成男 : 工程計画におけるエキスパートシステム、計画の推論方法とそのアルゴリズム、第4回建築生産と管理技術シンポジウム、日本建築学会、1988
- 46) 嘉納成男 : 工程計画におけるエキスパートシステムに関する研究(その1) エキスパートシステムの基礎構造、第3回建築生産と管理技術シンポジウム、pp. 181~184、1987
- 47) 塚本克治、他 : AI~情報処理から知能処理へ、アスキー、1988
- 48) 人工知能ハンドブック、人工知能学会、オーム社、1990
- 49) 土屋俊、他 : AI事典、UPI、1988
- 50) 合原一幸 : ニューラルコンピュータ、東京電気大学出版局、1988
- 51) 淵一博、他 : 認知科学への招待、日本放送出版会、1983
- 52) 和多田作一郎 : AIの基礎を知る事典、実務教育出版、1986
- 53) 上野晴樹 : エキスパート・システム概論、情報処理 Vol. 28, No. 2, pp. 147~157、1987
- 54) 上野晴樹 : 知識工学入門、オーム社、1985
- 55) 春木良且 : オブジェクト指向への招待、啓学出版、pp. 168~169、1989
- 56) 上野晴樹、石塚満 : 知識の表現と利用、オーム社、1987
- 57) 石塚満 : 人工知能ハンドブック、オーム社、p. 60~62、1990
- 58) 山田博 : 脳とコンピュータ、NTT出版、1990
- 59) 福島邦彦 : 知的コンピュータシステム事典、産業調査会、p. 120~123、1989
- 60) 合原一幸 : ニューラルコンピュータ、東京電気大学出版局、p. 98~105、1988
- 61) 登場し始めた「エキスパート・システム製品」、日経AI、1988
- 62) 吉川和広、山本幸司 : MAN, DAYを変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察、土木学会論文報告集No. 256, pp. 49~58, 1976

- 63) 吉川和広、山本幸司 : MAN, DAYを変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察、土木学会論文報告集No. 256, pp. 49~58, 1976
- 64) 嘉納成男 : 工程計画におけるエキスパートシステムに関する研究(その1) エキスパートシステムの基礎構造、第3回建築生産と管理技術シンポジウム、pp. 181~184、1987

第4章

プランニング・システムに関する研究

第1節 緒言	103
第2節 知的プランニングの方法	105
1. プランニング・システムの構成	
2. 計画生成に関する既往の研究	
3. 計画生成戦略	
第3節 ハイブリッド戦略によるネットワーク生成方法	118
1. ネットワーク生成過程のモデル化	
2. 計画に要する知識とフレーム表現	
3. オブジェクト指向によるネットワーク生成方法	
第4節 ネットワーク生成システムの開発	134
1. システムの概要	
2. システムの機能と特徴	
3. 適用実験と問題点の整理	
第5節 結言	147
参考文献	149

第1節 緒言

工程計画のためのプランニングとは、施工計画の初期段階で検討し想定される構想化計画に基づき、スケジューリングのための計画モデルを作成する段階と定義することができる。すなわち、構想化計画では、主要な施工法や仮設備、それに工区分割などが設定されるが、工程計画のプランニング段階では、この構想化計画を前提条件として、より詳細に施工計画を検討する。つまり、対象構造物の建造に必要な作業とその順序関係、および、そこで必要となる種々の施工法や使用資機材の選定が、ここで行われる。そして、ここでの結果は、以後のスケジューリング段階で最適化を図るために、プレシードンス・ネットワークなどの計画モデルとして作成される。

このようなプランニング段階では、当然のことながら多種多様な計画情報を必要とするし、非常に広範囲にわたる制約条件を考慮しなくてはならない。また、ここでの計画立案過程は、建設プロジェクトの個別性から、標準的な方法というものは存在せずに、計画立案者の経験や技量により千差万別である。さらに、スケジューリングと比較して、計画立案の自由度が高いことから、工程計画の合理性や最適性を追求する上で、根幹となる段階でもある。以上のように、プランニング段階での計画の良否は、最終的な工程計画に大きく影響する重要な段階であるとともに、施工計画の中でも非常に難しい問題の一つである。

しかし、従来進められてきた工程計画に関する諸研究は、スケジューリングに関する研究が主体で、スケジューリングの前提となる計画モデルをいかに作成するかという、プランニングに関する研究は非常に少ないのが現状である。すなわち、ネットワーク法を例にとると、不確実性やフィードバックなど、工程ネットワークによる工程計画の表現方法、それに、日程計算法や投入資源の最適化方法などが、主に数理計画法による方法が考案されてきている。しかし、このような研究の前提条件となるネットワーク自体の生成過程やその合理性などに関しては、トンネルや防波堤工事などの特殊な工事を除くと、ほとんど問題とされてきていない。

この事実は、プランニングがスケジューリングより、工程計画における重要度が低いというわけではない。逆に、文頭で述べたように、プランニングは合理的な計画を立案する上で、非常に重要な段階であると同時に、非常に解明するのが難しい部分でもある。このような問題は、人工知能研究分野では、悪構造問題と呼ばれるが、その複雑な問題構造ゆえに、これまでこの段階で行われる計画立案過程に関する研究や、これをコンピュータ・システム化する研究が進め難かったということが出来る。

そこで、本研究では、このように複雑かつ重要なプランニング段階に着目し、ここに人工知能技術を適用することにより、問題構造の解明と、それをシステム化するための方法に関して研究することとした。そして、ここでの研究結果に基づき、経験少ない技術者でも、経験深い技術者と同等な計画を効率よく作成する

ための知識ベース・システム、すなわち知的工程プランニング・システムの開発を試みることにした。

すなわち、本章の第2節では、技術者が行っているプランニングの方法に着目し、その問題構造や計画生成メカニズムを人工知能システムという視点から分析し、計画生成のための新たな戦略を検討する。つまり、プランニングはどのようなサブ問題から構成され、それらはどのような過程を経て総合化されるのか。また、人工知能研究の分野では、このような計画生成方法に関して、これまでにどのような方法が考案されてきたのか。さらに、その成果を受けてどのような工程計画生成システムが開発されてきているのか。そして、この節の最後では、以上の既往の研究の考察に基づいて新たに考案した計画生成戦略を紹介する。

また、第3節では、前節で提案する新たな計画生成戦略に、オブジェクト指向と呼ばれるシステム開発技法を適用することにより、合理的な工程ネットワーク生成方法を検討する。すなわち、意味ネットワークなどの知識表現方法を用いることにより、工程計画の生成過程を明かとし、そこで要する諸々の知識を分類整理する。そして、このような計画化の過程を、オブジェクト指向と呼ばれる技法を用いてシステム化する方法を検討する。また、そこで必要となる計画知識の蓄積方法として、階層構造を有するフレームの適用を検討する。

また、第4節では、前節で検討する工程ネットワーク生成方法に基づき、実際に開発を行った知的工程計画生成システム(PF-PLAN)について、システムの概要と機能、および、特徴などを紹介する。また、本システムの有効性を検査するために、モデル工事を設定してシステムの適用実験を行い、この結果について論じる。

第2節 知的プランニングの方法

1. プランニング・システムの構成

(1) ネットワーク生成メカニズム

本章で論ずるプランニングとは、端的に表現すると、工程ネットワークの生成過程を意味する。ここでいう工程ネットワーク自体は、アクティビティとその順序関係により構成されるが、その生成過程には、複雑な意思決定を必要とする多くのサブ問題が存在する。図-4.1にこのような関係を図化して示すが、構造物分解による作業(task)の生成や、工法や資機材の選定によるアクティビティの作成、そこでの資源投入量や歩掛り推定による所要日数の見積、アクティビティ間の順序関係の生成など、工程ネットワーク生成問題は、多くサブ問題から構成され、これらのサブ問題を順次解決することにより、初めて工程ネットワークが生成できる。

以上のように複雑な構造を有する工程ネットワーク生成問題を、ここでは、①作業(task)生成問題、②工法・資機材選定問題、③作業数量見積問題、④順序関係生成問題、の四つサブ問題に分けて、より詳細に検討を加えることとする。

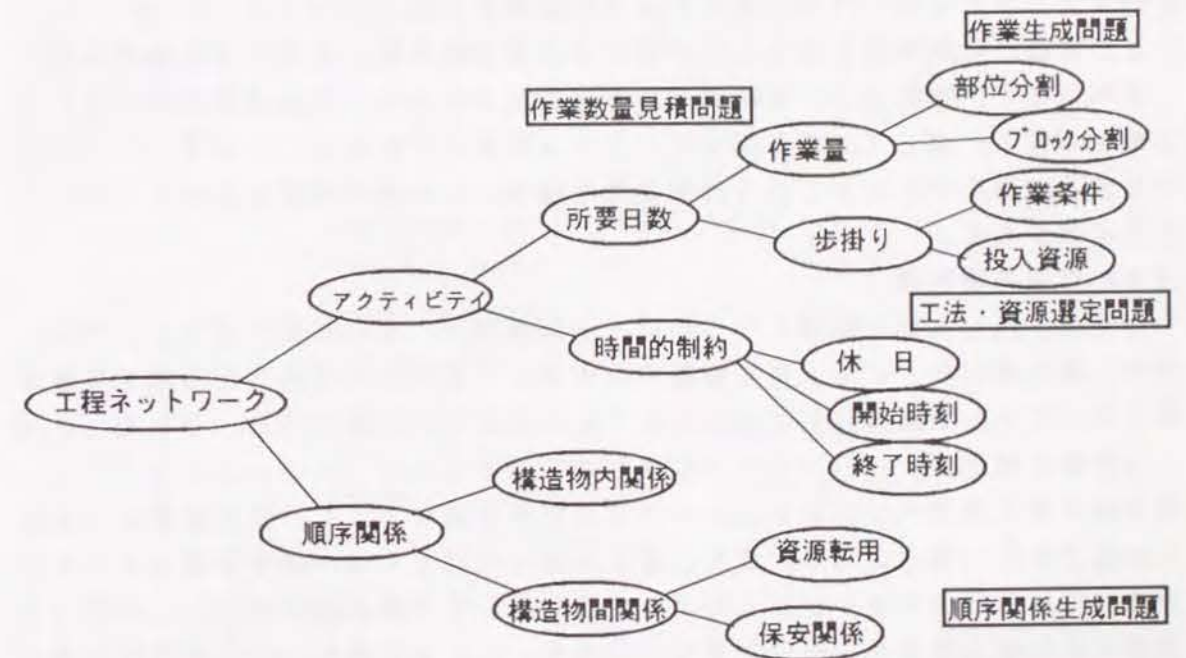


図-4.1 工程ネットワーク生成メカニズム

(2) 作業生成問題

建設プロジェクトのネットワーク生成において、最も大きな問題は、対象構造物を生産するために、どのような作業(task)が必要となるかということである。

この場合、構造物生産のためにどのような作業が必要か、一つ一つ手順を分析しながら考え出す方法もあるが、過去の同様な工事経験に照らし合わせて、トップダウン的に創出する方法もある。

前者の方法としては、人工知能分野において、ロボットの行動計画を作成する方法として、手段-目標計画法(means-ends planning)が提案されている。しかし、過去の類似の工事があるにもかかわらず、計画を始めから一つ一つ考え、作り出す方法は、最終的には工程計画が作成できたにせよ、効率的な方法とはいえない。

また、後者の方法としては、建設プロジェクトの作業構造を、階層的な樹枝状構造で表現したWBS(Work Breakdown Structure)が想定できる。しかし、周知のように、このWBSとは、対象となる建設プロジェクトの生産構造を把握するために、構造分析の結果として作成されるものであり、そのプロジェクトのWBSを作成する過程で、過去の工事のWBSが参考とはなっても、これだけで当該工事のWBSを作れるわけではない。

すなわち、建設プロジェクトの工事構成は、過去のWBSを参考にして生成できる。また、杭基礎工事やコンクリート工事などの工種単位で見ると、標準的な作業パターンというものが存在することから、このレベルで作業構成を記憶しておくことにより、詳細レベルの作業生成も、WBS利用により行えなくはない。しかし、足場や支保工などの仮設作業に関しては、作業方法や使用材料が工事環境によって異なるために、単純なWBS利用では生成することができないために、この部分には、手段-目標計画法の適用が必要になる。

この問題の詳細に関しては、この後の「計画生成戦略」のところで論ずるが、いずれにせよ、技術者は、この両方の方法を組み合わせて、計画を作成していると考えられる。従って、この部分をシステム化するためには、どのような方法をどの段階で適用するのかという計画生成手順を、他のサブ問題も含めてモデル化する必要がある。

(3) 作業見積問題

作業を生成した後で問題となるのは、①作業数量、その作業で使用する労務、資材、施工機械などの②工事中資源の投入量、工事環境を考慮した③施工歩掛り、そして、これらを総合化して求められる④作業の所要日数である。そして、これらの数量の関係は、式-4.1のように表すことができる。この中の①については、構造物の施工部位への分解や工法や使用資材の種類によって、設計数量から単純に算出できない場合がある。また、施工歩掛りに関しては、標準歩掛りとして整備されている場合が多いが、このような値はあくまで標準値であり、これだけで実際に近い値を得ることはできない。また、投入資源量も、各作業環境に適した投入量が存在することが、経験的ばかりではなく、投入量と作業効率の関係からも、指摘されている¹⁾。そして、これらの数量を総合化して、工程計画で最も重要となる所要日数が求められる。

$$\text{所要日数} = \frac{\text{作業数量} \times \text{施工歩掛り}}{\text{投入資源量}} \quad \text{(式-4.1)}$$

以上のように、ネットワーク生成で必要となる数量見積は、過去の工事情報ば

かりではなく、それらの経験に基づいた深い洞察力を必要とする。例えば、最も推定が難しいと考えられる施工歩掛りを例に、これらの数値の見積方法を考えると、統計解析により過去の実績データを分析する方法が考えられる。すなわち、施工歩掛りは、様々な変動要因により決められる多属性関数として捉えることが合理的と考えられるために、これらの変動要因を統計解析法により定量的に把握し、歩掛り推定式を得ることができ^{2) 3)}。しかし、このような方法は、変動要因と作業の関係を解明するには有意義な研究であったが、データの収集と分析に非常に労力がかかり、多種類の歩掛り推定問題に対応するには適当な方法とは考え難い。そこで、標準歩掛りを基準として、これを投入資源や作業環境を勘案して修正し、適当な歩掛り値を得る方法が妥当と考えられる。

以上のような、作業の所要日数推定問題に関して、カーネギメロン大学のヘンドリックソン(C.Hendrickson)は、図-4.1のような多段階で所要日数を推定する方法を提案し、この考え方を煉瓦積み作業に適用して、所要日数推定エキスパート・システムMASONを開発している。この中で、彼は所要日数 t_k の算定式を式-4.2のように考えている。

$$t_k = \frac{q_k}{n_k p_k} + \frac{d_k}{n_k} \quad \text{(式-4.2)}$$

この式の中で、 q_k は作業量(physical quantity)、 n_k 投入資源量(number of crews)、 p_k は生産性(productivity per crew)、 d_k は非稼働時間(estimated idle or downtime)をそれぞれ表している。このように、ヘンドリックソンは、作業量と投入資源量は既知として、歩掛りの逆数である生産性と非稼働日を推定することにより所要日数を推定する方法を提案している。

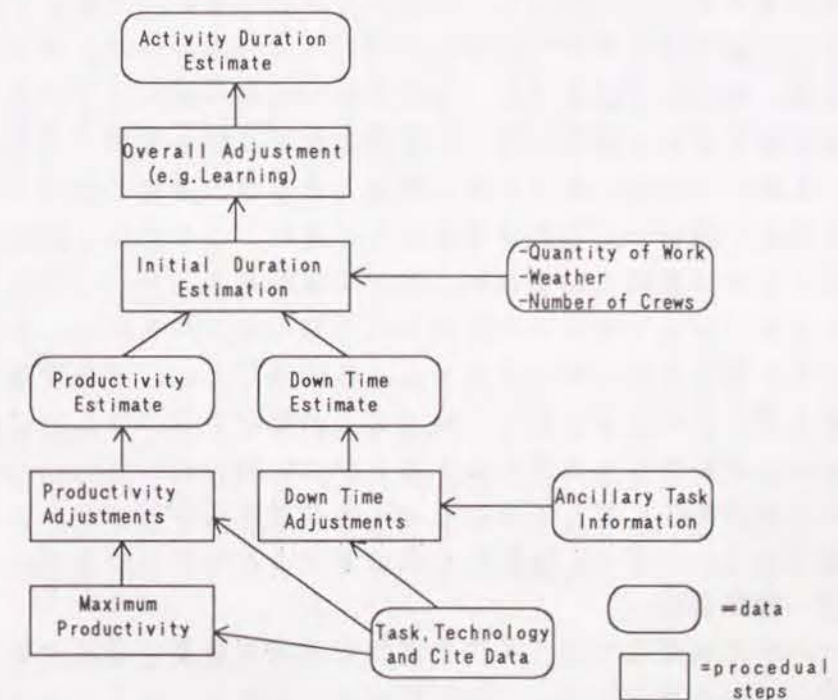


図-4.2 MASONによる所要日数推定過程⁴⁾

(4) 順序関係の生成問題

作業間の順序関係(relationship)も、アクティビティと並び、工程ネットワークの主要な構成要因の一つであるので、落ちがないように効率的に生成する必要がある。しかし、この順序関係には、異なる目的と性質を持つものが存在し、その生成過程は単純ではない。これまでに提案されてきている順序関係設定方法としては、設定目的による分類として、①技術的順序関係と②管理的順序関係がある。ここで、前者は「施工法・施工技術的側面から決定され、あるいは現場の環境条件に対する施工の安全確保さらには技術的确实性を追求するための手段として決定される」関係、また、後者は「各種工事用資源の効率的な管理・運用をはかる」⁵⁾ 関係と定義されている。

また、この他の分類方法としては、順序関係を設定する対象による方法が考えられる。すなわち、建造する構造物が橋脚のように単体で存在する場合は、構造物を単位として、また、共同溝など連続的な構造物は施工ブロックを単位として、一つの構造物、もしくは、一つの施工ブロック内のアクティビティを対象とした順序関係と、ことなる構造物もしくは施工ブロック間に設定される順序関係の、二種類が存在する。このような関係を、ここでは①構造物内順序関係と②構造物間順序関係と呼ぶこととする。ちなみに、前者の関係は、一般的な工程計画では、サブネットワーク内の関係となる。また、後者の関係は、異なるサブネットワーク間の関係で、資源の転用関係を表す場合に、よく設定される。

以上のような分類で、順序関係を分類してみると、表-4.1のようになる。この中で、物理的關係とはコンクリート打設前には鉄筋組を終えていなければならないというような、純技術的關係を表す。また、概念的順序関係とは、工程計画を構造物または施工ブロック単位で捉えた場合に、それらの間に設定される基本的な順序関係を表す⁶⁾。この関係は、より下位のレベルに順序関係が設定されている場合には、日程計算の中で用いられないという特徴を持つ。詳しくは、第5章で示す。また、資源転用関係とは、構造物間で転用可能な同じ資源を使用する場合に、その資源を有効に使用するために設定される順序関係である。また、この関係には、工程計画立案において強い制約となる施工重機との関係と、ある程度融通のきく労務転用関係の二種類が存在する。また、この他に、同時に作業すると安全上問題となる作業間に設定される保安関係がある。

以上のように、ネットワークを構成する作業の順序関係には、多種多様なものが存在し、その設定目的も異なるために、各関係ごとに、どの段階でどのような条件の基に生成するのかについて、検討する必要がある。但し、これらの関係の多くの部分は、作業生成に標準的なWBS (Work Breakdown Structure)が利用できるように、順序関係に関しても、このような標準的作業パターンというものを記憶しておくことによって、自動的に生成することは可能である。

(5) 工法・資源選定

ネットワーク生成過程では、工法と資源の選定も重要な構成要素の一つである。ここで検討しているプランニングの前段には、基本施工法と主要な仮設備を設定する構想化計画があるが、ここでいう工法や資源選定とは、より下位レベルの選

定問題を意味する。例えば、部位が生成された際、この部位が置かれた作業環境や、部位自体の形状寸法などを考慮して、型枠支保工法や足場工法をどうするのか、また、型枠材料の種類と規格はどうするのかなど、多くの選定問題が発生する。

表-4.1 作業間順序関係の種類

	構造物内順序関係	構造物間順序関係
技術的關係	物理的關係	概念的關係
管理的關係	保安關係 資源利用關係?	資源転用關係 ①施工重機転用 ②労務転用 保安關係

以上のように、ネットワーク生成においては、多種多様な工法と資源の選定問題が発生する。そして、型枠材料と支保工法との関係のように、この両者の間には非常に密接な関係がある。また、例えば、同じ構造物の仮設材料が部位ごとに千差万別とならないように、ここでの選定は、他の部位や他の構造物における選定結果と整合性を考慮する必要がある。また、このような選定問題は、構造物の機能上必要となる本設工が、設計段階でほとんど決定されていることから、その対象のほとんどは、型枠や支保工、もしくは山留工などの仮設工となる。そして、このような仮設工の選定や、そこで必要となる仮設材料の選定、また、その設計は、専門書に書かれている知識だけではなく、経験的知識を多く必要とすることから、ここで検討を進めている知的プランニング・システムの開発の中でも、重要かつ構築困難な部分と考えられる。

2. 計画生成に関する既往の研究

プランニングは人間の持つ高度な問題解決能力の一つであることから、初期の頃から人工知能研究の主要なテーマに位置づけられている。特に、ロボットの行動を想定して進められた手順計画(process planing)の研究は、本研究の主眼である建設プロジェクトの工程計画の立案方法を考える上で、重要な研究の一つであるので、ここでは、これまでに行われた研究の概要について考察を加えることとする。

(1) 人工知能における計画生成研究

人工知能分野では、人間の持つ高度な問題解決能力を解明する目的から、単純

なロボットを想定し、これが目標を達成するための手順計画の立案方法に関して研究を進めてきた。例えば、テーブル上に置かれた積み木の積み替え手順や、部屋から部屋へ移動して目標に到達する手順などを例として研究が進められた。このような手順計画は、初期状態(initial state) から出発し、可能な手の中から最適と思われる手を選択しつつ目標状態(desired state) へ到達する経路として表される。すなわち、樹枝状構造(a state tree)をなす状態空間上を、初期状態から目標状態へ到達する手順を探索する問題として定式化できる。しかし、選択可能な手を全て探索する、いわゆる総当たり方式を用いていたのでは、探索空間が膨大であることから、現実問題には適用不可能である。そこで、何らかの知識を用いて、より効率的に探索する方法が、人工知能研究の分野で模索された。

これに対して、1957年頃に、ニューエル(A. Newell)、ショー(J. C. Shaw)、それにサイモン(H. A. Simon)らは、手段-目標解析(means-ends analysis)と呼ばれる状態空間の評価方法を考案し、この方法を用いて一般問題解決器(GPS, General Problem Solver)と呼ばれる探索プログラムを開発した。すなわち、①状態、状態を変換する②作用素(operator)、③初期状態と目標状態、という探索問題定式化のための知識に加え、2つの状態間に差異がある場合に、どのような差異を優先して解消すべきかということを表す④差異の重要度の順序、また、どのような目標(差異)を持っている場合に、どのような作用素の適用が有効かということを示す⑤目的-手段表、の5つの知識を用いて、総当たり法より効率的な探索方法を開発した⁷⁾。

ここで考えられた手段-目標解析とは、目標状態から初期状態に向かって状態空間の探索を行う方法で、図-4.3に示したように、目標状態と初期状態との差異を分析し、より簡単な副問題に分割していく、問題の縮小還元と捉えることができる。このGPSは、特定の問題を対象としない問題解決機構という特徴を備えていたが、逆に、このために、入力すべき情報が非常に多いという欠点もあった。しかし、このGPSの考え方をベースとして、これ以後、多くの人工知能研究に基づいた知的計画作成方法が開発されるようになった。

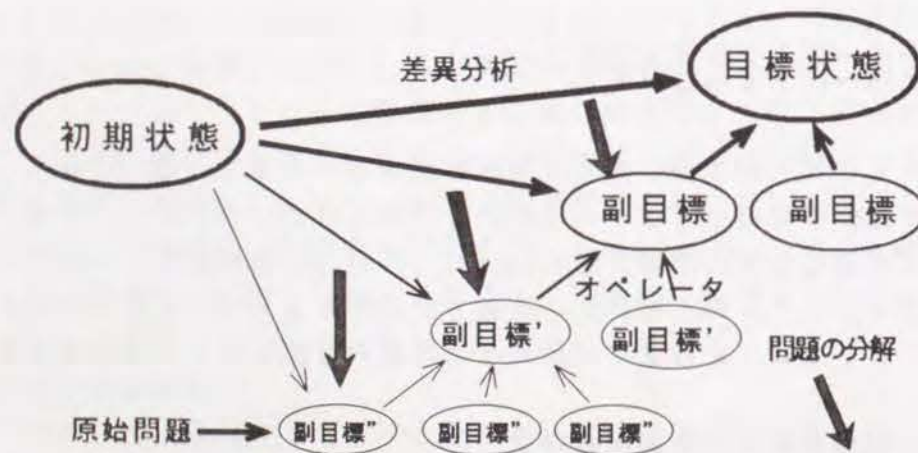


図-4.3 手段-目標計画法

レビット(R. E. Levitt)は、これまでに開発された手順計画に関する方法に関して、知識を多用せず推論中心で、汎用的な目的を持ち、特定分野を対象としないプランナ(Knowledge-lean, general purpose, domain-independent planners)と、知識を多用し、特定分野に特化した計画システム(Knowledge-intensive, domain-specific planning system)の二つに大きく分類できると述べている⁸⁾。そこで、ここでは、前者をAIプランナ(AI Planner)、後者をKIプランナ(Knowledge-intensive Planner)と呼び、具体的なシステムを示すことにより、それぞれの特徴と問題点を論ずることとする。

(2) AIプランナ

AIプランナとは、GPSの開発で考案された手段-目標計画法を基本に開発された汎用計画システムで、簡単なロボットの行動計画を例に研究が進められた。このために、建設プロジェクト計画のような複雑な問題に適用するには、自ずと限界があるが、ここで考案された計画生成に関する考え方は、本研究にとって大変重要であるので、これまでに開発された主な代表的なプランナの特徴を、ここでまとめておくこととする。

まず最初に開発されたAIプランナーは、1971年にスタンフォード大学のフィクス(Richard Fikes)とニルソン(Nils Nilsson)によって、開発されたSTRIPS(Stanford Research Institute Problem Solver)といわれる。STRIPSでは、手段-目標解析をロボットの行動計画作成に応用したもので、動き回ることができ、かつ、物を押すことができるロボット(SHAKEY)の問題解決機構として使用された。

また、STRIPSがサブ問題間の重要度の差異を考慮せずに、無意味な推論を多く繰り返すという反省から、1973年にササドーテ(Earl Sacerdoti)により、ABSTRIPS(ABstraction-based STRIPS)が開発された。ABSTRIPSは、その名前が示すように、対象となる問題に含まれるサブ問題を、抽象化されたより重要度の高い問題からそうでない問題へ階層化し、より重要度の高い階層から問題解決を図る方法を用いた。このように、ABSTRIPSは、推論効率を上げることを目的にSTRIPSを改良したものであるが、これと異なる方法で推論効率の向上を図ったシステムにINTERPLANがある。INTERPLANは、1975年にエジンバラ大学のテイト(A. Tate)により開発されたAIプランナであるが、ここでは推論の過程をチェックリスト(ticklist)に記録し、これに基づいて効率的なバックトラックを実現することができた⁹⁾。

また、計画立案過程における問題の一つに、ある目標を達成するために、それ以前に達成した目標を消去することにより、デッドロックに陥ってしまうことがある。そこで、この問題を解決するプランナとして、1975年にササドーテによりNOAH(Network Of Action Hierarchies)が開発された。また、このNOAHでは、それまでのプランナが、計画を行動(action)の一次的な繋がりとしてしか取り扱えなかったのに対して、並行的な作業の繋がりを持つ計画も作成できるようにした。人工知能研究では、前者のような計画を線形計画(linear planning)、後者を非線形計画(nonlinear planning)と呼ぶ。

また、1976年になると、INTERPLANを開発したテイトが、これを非線形計画に適用できるように改良して、NONLIN (NONLINEar planner) と名付けた。テイトは、このNONLINを建設プロジェクト計画の立案過程へ適用しようと試みた¹⁰⁾。この点に関してレビットは、テイトが煉瓦積み家屋を例に行った、建設作業生成の試みについて、プロジェクト計画の特徴と絡めて、推論主体のAIプランナの限界を示している¹¹⁾。

以上のように、特定の分野を対象としない汎用目的のAIプランナの開発が、人工知能研究分野で進められてきた。そして、その中には、建設プロジェクトへの適用が試みられるものもでてきた。しかし、この点は後で詳しく論じるが、これらのAIプランナのベースにある手段-目標計画法を、建設プロジェクトのような複雑な問題に適用すること自体に、基本的な問題点があることも理解されるようになった。すなわち、建設プロジェクトでは、繰り返しの少ない個別の作業を多く必要とするために、この建設過程を計画するためには、この分野に関する多くの専門知識を蓄積し、その知識を利用することが必要不可欠であることが、明かとなった。

なお、これまで説明してきたAIプランナについて、生成される計画の構造やその立案過程の違いにより分類し、表-4.2に示した。

表-4.2 AIプランナの分類

AIプランナ	生成計画形式	計画立案方法	開発
STRIPS	線形計画 (linear planning)	単純な手段-目標計画法	1971
ABSTRIPS		サブ問題間への重要度付け	1973
INTERPLAN		チェックリストによる効率的なバックトラック	1975
NOAH	非線形計画 (Nonlinear planning)	手続きネットによる計画表現	1975
NONLIN		INTERPLANの改良	1976

(3) KIプランナ

スタンフォード大学のステフィック(M. J. Stefik)は、1981年に分子(molecular)生成を目的に、MOLGEN (MOLEcular GENerator)を開発したが、この中で、彼は手段-目標計画に制約伝播(constraint propagation)と分野別知識を融合させたユニークな問題解決機構を開発した¹²⁾。そして、ここで開発された計画生成方法は、ウイルキンス(Wilkins)により汎用システム化され、SIPPE (System for Interactive Planning and Execution Monitoring)が開発された。SIPPEでは、オブジェクトやオペレータは分野別知識と関係づけられた制約条件によって記述される。そして、異なった階層間での通信と相互作用を行いながら計画を進める。また、マンマシン・インターフェイスを備えたインタラクティブなシステムであること、フレーム・ベースや論理ベースの知識表現法を備えていること、演繹的ル

ール表現が可能であるなど数々の機能を有している¹³⁾。このために、SIPPEを建設プロジェクト計画に適用する研究も行われるようになってきている¹⁴⁾。

また、カーネギーメロン大学のヘンドリックソンは、1987年に発表した工事計画エキスパート・システムに関する論文の中で、①対象工事に関する情報を記録するContext、②工程計画作成のための知識を蓄積したKnowledge Base、そして③それらの情報を操作し工程計画を作成するOperatorsから構成されるCONSTRUCTION PLANEXと名付けたシステムを紹介している¹⁵⁾。このCONSTRUCTION PLANEXは、この後も、研究と改良が進められ、現在では、汎用KIプランナであるPLANEXと、そのアプリケーションとしてのCONSTRUCTION PLANEXに分離されている。

このCONSTRUCTION PLANEXは、高層オフィスビルを対象としたシステムであるが、これまでの計画生成システムとは大きく異なり、建築工事に関する大量の知識を蓄積し、これにより作業の生成ばかりでなく、そこで用いる資源の選定、所要日数の推定、工法選定なども行うことができる。しかし、構造物の構成や形状データなど、計画生成のための基本的情報は、設計段階でCADシステムを用いて作成されることが前提となっているために、実際にCONSTRUCTION PLANEXを利用するためには、多くの前処理が必要となるなどの問題点が存在する¹⁶⁾。

また、これまでに述べたKIプランナと少し趣が異なるが、ナビチャンドラ(D. Navinchandra)は、1988年に、GHOST (Generator of Hierarchical networks for cOnStruction)というシステムを発表している¹⁷⁾。このシステムは、入力データとして与えられたアクティビティ間に順序関係を生成するシステムである。ナビチャンドラはこの中で、①構造物の制約、②工法による制約、③施工環境(資源・場所等)による制約、の3種類の制約条件に基づき、順序関係を段階的に生成し、最後にOR技法を用いて無駄な順序関係を削除するという方法を提案している。しかし、ここで考案された順序関係生成方法は、非常にユニークではあるが、現時点ではいくつかの問題点が存在する。これに関して、ゾザヤゴロスティザは、①冗長的(redundancy)、②ループのチェックをしない、③設計物を認識し、タスク生成を行わない、④アクティビティの所要日数を見積もらない、⑤ネットワークの階層構造を扱えない、などの問題を指摘している¹⁸⁾。

また、我が国におけるこの種の研究は非常に少ないが、嘉納が建築工事を対象に計画生成方法に関する研究を行っている。すなわち、プランニング・ボードというものを想定し、その上に計画目標を表す目標シートを置くことにより、①META推論、②PLAN推論、③TOOL推論と呼ぶ3つの推論行為を起動させ、順次目標の細分化と計画結果を記録する結果シートの生成を行う方法を提案している。また、ここで用いる結果シートは、グラフ形式で表され、作業間の順序関係だけでなく、作業空間、使用資源、作業内容などと作業との関係までを、グラフ上に視覚的に表現できるという特徴がある¹⁹⁾。また、嘉納は、このシステムの計画生成方法として、ラチス(lattice)構造と呼ぶ特殊な構造を有したWBSを適用した、階層的計画方法(Hierarchical Scheduling Method)を提案している²⁰⁾。

3. 計画生成戦略

これまでに述べてきたように、人工知能研究の分野では、ロボットの行動計画を例に計画生成のための研究が進められてきた。これに対して、我々技術者は、過去の工事事例に基づき、計画を効率的に作成する能力がある。そこで、ここでは、以上のような計画生成のための基本的な考え方、すなわち計画生成戦略に関して、これまでの研究の特徴と問題点を検討し、この考察に基づいて、新たな計画生成戦略を提案することとする。

(1) 手段-目標戦略

これまでに述べてきたAIプランナは、そのほとんど全てが手段-目標計画法を計画生成の基本として、実際の計画生成問題に適用できるように改良が進められてきた。本研究では、このような計画生成戦略を手段-目標戦略(means-ends strategy)と呼ぶこととするが、この手段-目標法は、GPS (General Problem Solver)の所(図-4.3)でも説明したように、計画目標と初期状態の差異を分析し、これを副目標に順次細分化し、これ以上細分化できない原始問題に至った後に、各々の問題に適したオペレータ(operator)を適用することにより、計画を順次作成する方法である。

この手法の特徴を端的に述べると、①単一記述法(homogeneous terminology)による状態表現と②オペレータによる状態変換により代表的に表される。すなわち、初期状態や目標状態など、問題解決過程にあるあらゆる状態を単一記述法により記述し、これに適したオペレータを適用することにより、初期状態を順次改良して目標状態に至る過程が、手順計画となる。このため、手段-目標計画法は以下のように定式化することができる。

手段-目標計画法の定式化

与件:	目標とする製品の記述 利用可能な資源群 適用可能なオペレータ群
目的:	目標製品を得るために組合されたプロセスとオペレーションの動作記述

しかし、以上のように、非常にシンプルな問題解決機構であるが故に、手段-目標計画法は、非常に限定した範囲の問題にしか適用できない。すなわち、単一記述法を用いた場合、現実問題に存在する複雑な状態を記述することには、限度があると考えられる。また、オペレータの適用条件や適用結果を成果物と関連づけて記述することも難しい。また、複数の目標を同時に解決しようとしてデッドロックに陥ったり、作業の組み合わせの局所的な効率化のために全体としては冗長な計画を生成したりする可能性もある。また、計画化が具体的な動作の連続と

して進められるため、不確定要因を内包した計画を立てにくいことや、建設工事の各部分においては、無限に近い代替案が存在することなどから、現実の複雑な問題に適用するのは困難ではないかと考えられる。

(2) プロジェクト・マネジメントのためのWBS

WBS (Work Breakdown Structure)は、1960年代始めより米国において用いられた、プロジェクト・マネジメント手法の一つである。『エンジニアリングプロジェクト・マネジメント用語事典²¹⁾』によると「プロジェクトをトップダウンの形で階層状に分割していき、効果的な計画と管理を行うのに必要な程度にまで細分化し、それらの相互関係を表したものがWBSである」と説明されている。そして、以後、各種の改良を経て、現在に至っている。

例えば、組織に対応した機能構造を表すFWBS (Functional WBS)と、従来からのWBS複合させて、2次元のマトリックス構造とし、これにより、プロジェクトに携わる多数の組織間の業務分担を明確にする方法が開発された。また、プロジェクトのコスト構成を表すPWBS (Project WBS)と、WBSおよびFWBSを複合させた、3次元のマトリックス構造として、工程とコストと組織の関係を明確にする方法も開発された。

以上のようにして、WBSと工程計画ネットワークとの関係は、ある程度明確に関係付けられるようになった。しかし、WBSとは本来、対象とするプロジェクトの構造を明らかにするために、プロジェクトごとに個別に作成される物で、標準的なWBSというものは、存在しない。また、このWBSを如何に作り出すのかという基準も、指針を示したような曖昧な物を除くと、存在しない。このために、標準的なWBSや過去のプロジェクトのWBSを用いて、工程ネットワークを作成するという発想は、近年まで存在しなかった。

(3) WBS戦略

しかし、我々があるプロジェクトのWBSを作成する場合、過去の類似のプロジェクトのWBSを参考にすることは、よくある。すなわち、当該プロジェクトの情報と過去のWBSとを突き合わせ、足りない部分は、工事の内容や施工環境に自らの技術力や経験を加えて、補足する方法が取られる。そして、このようにして作成したWBSに基づき、工程ネットワークを作成することができる。

このような方法で、工程ネットワークを作成する考え方を、ここではWBS戦略と呼ぶ。そして、このような考え方は以前から存在していたとは思われるが、嘉納によって明確に提起され²²⁾、筆者も参画していたネットワーク手法活用研究グループ(土木学会建設マネジメント委員会計画・管理技法小委員会、主査:折田利昭)によって、土木構造物を対象に、具体的に検討された²³⁾。この研究では、工程計画を作成するための工程計画WBSが必要であること、この工程計画WBSは①工種内容、②工法、③作業対象、④工事場所により分解されること、また、工程計画WBSの作成過程は単純な分解ではなく、包含関係(and関係)と選択関係(or関係)を交互に繰り返すこと、そして、工程計画WBSの末端は単純な樹状構造ではなく、ラチス構造を有するなどが、示された。

以上のように、工程計画を作成するためのWBSとはいっても、従来とは随分

性質の異なる構造を有していた。また、この研究では、このような工程計画WBSを用いて、工程ネットワーク作成のためのデータベースを作成するとは書いていないが、具体的にどのような形でシステム化できるのかまでは、検討が進んでいない。また、RC高架橋を取り上げ、WBS作成方法の標準化を検討したが、一例を上げるに留まっている。

(4) WBS戦略の問題点

WBS戦略に関する研究で、最終的に解決できなかった理由の基本には、建設プロジェクトの個別性や多様性がある。つまり、建設プロジェクトでは、工事内容や施工環境などが、プロジェクトごとに異なり、その形態は千差万別である。このような問題に、WBSという静的な知識表現方法を用いること自体に、根本的な問題が有るのではないかと考える。このために、以上の研究では、工程計画WBSをどのようにデータ・ベース化するのか、そのデータ・ベースをどのように利用して工程ネットワークを作り出すのかについて、その方法を具体的に示すことはできなかった。

しかし、我々技術者は、プロジェクト計画を立案する際、過去の工事実績を調査し、これに自らの経験に基づく知識を重ね合わせて、計画を作成していることは事実である。この場合、工事の構成を決定するという観点からは、過去の事例を参考にして計画案を仮定し、その後で、その案の妥当性を、技術的および経験的観点から評価するという順序で計画化が進められる。また、計画の詳細部分に関しても、例えば「単柱式橋脚は、基礎、底版、柱、梁から構成される」というような、先ほどのWBS的な発想で計画案を作り、その後で、「この場合、柱が長いので分割施工する」といったように、技術的・経験的知識の基づいて、その案の妥当性を評価するという方法が取られる。

以上のように、全体計画を考える場合でも、部分計画を考える場合でも、まず最初に、過去の多くの実績を帰納論的に整理した知識を適用して、計画案を作成し、次に、他の技術的知識や個別の経験情報に照らし合わせて、その計画案の妥当性を評価し、修正するという方法が取られている。すなわち、この計画過程では、計画案作成とその評価のために、2種類の知識が用いられる。前者は、WBSのように理論的に整理された知識で、人工知能研究分野では教科書的知識と呼ばれる。また、後者は、過去の経験により具体的事例として個別の蓄積した知識の集合体で、人工知能研究分野では経験的知識と呼ぶ。

(5) 仮設工事の生成とハイブリッド戦略

これまで、主に構造物本体を築造する本設工事について述べてきたが、本設工事を行うための足場工や支保工など、仮設工事部分の工程計画をどのように作成するのかは、技術者の力量を問われる、非常に難しくかつ重要な問題である。何故ならば、仮設工事は、本設工事を比して、計画の自由度がかなり高いことから、多くの代替案が存在し、また、計画の評価要素も多種多様であるから、それらの代替案の評価も難しい。すなわち、仮設工事は、本設工事を成し遂げるために、仮に設けられる構造物を築造するものであるから、その必要性の有無から始まって、どのような工法を用いるのか、どの材料を使うのか、また、いつからど

のような手順で工事を進めるのかなど、仮設工事の計画問題は、実に様々な意思決定過程を含む、輻輳した問題構造をなしている。

このために、先ほどのWBS的な考え方で、この部分の計画を生成することは、例え、ラチス構造という特殊な構造形態を加味したとしても、ほぼ不可能に近い。このために、この仮設工事計画部分には、WBS戦略とは異なる計画生成方法を適用する必要がある。この際、有効な計画生成方法が手段-目標戦略である。すなわち、我々技術者が、このような仮設工事を計画する場合、何故それが必要なのか(差異分析)、どのように考えれば既存の作業手順を組み合わせることにによって目的が達成できるのか(問題の分割)、そして最後に、各作業手順にどの工種が適用できるのか(オペレータ選択)、という順序で問題解決を図ろうとする。この問題解決の過程は、手段-目標計画法のそれに他ならない。また、この種の問題は、全体計画を検討するのに比べれば、計画対象領域が非常に狭いという特徴もあるため、手段-目標計画法の適用がしやすい問題でもある。

以上述べてきたように、工事全体の計画から、構造物、部位などを対象とした計画レベルには、WBS的な考え方で工事を分解することにより計画を生成し、その末端部分の仮設工事に対しては、手段-目標計画法を適用することにより、対象プロジェクト全体の計画が、細部にわたるまで、効率的に作成できる。このような計画生成に対する考え方は、前述したWBS戦略と手段-目標戦略を組み合わせた戦略であり、本研究ではこれをハイブリッド戦略と呼ぶこととする。

第3節 ハイブリッド戦略によるネットワーク生成方法

1. ネットワーク生成過程のモデル化

ハイブリッド戦略とは、本設工事に関して建設プロジェクトを分解し、ネットワークを生成するWBS戦略と、仮設工事を生成する手段-目標戦略を組合せたものであるが、ここでは、このハイブリッド戦略に即したネットワーク生成過程を検討し、それを実現するために行ったモデル化について述べる。

(1) 意味ネットワークによるネットワーク生成過程の検討

意味ネットワークとは、人間の連想能力に関する研究から生まれた手法であることから、人間の思考過程を表現するのに有効である。そこで、工程計画問題にこの意味ネットワークを適用し、ネットワークの生成過程の解明を試みることにした。すなわち、工程ネットワークの生成とは、構造物を如何に作るのかという観点から、対象となるプロジェクトを分解し、その施工順序を検討する思考過程に他ならない。このために、この思考過程の表現に意味ネットワークを用いることは、理にかなっている。

例えば、高架式高速道路建設プロジェクトを例に、ネットワークの生成過程を検討し、これを意味ネットワークで表現すると、図-4.9のようになる。この図では、建設プロジェクトが次第に分解され、工程ネットワークのアクティビティとなる作業レベルに至る過程を表している。なお、意味ネットワークでは、事実をノード(node)で、事実間の関係関係述語を持ったリンク(link)で表現すが、図-4.9の中では、ノードは楕円で、また、リンクは矢線で表し、関係述語としては、①part-of、②is-a、③instance-of、④reference-from、⑤succeeded-byの5種類を使用した。この中で、①は構成関係を表す関係述語で、ある事実がどのような事実から構成されるかを表す。また、②はある事実と同類の事実を表す。また、③は概念的事実とその実体との関係を表し、④は参照関係を表す。最後の⑤は、実体間の順序関係を表すこととした。

以上のように、意味ネットワークで示されたネットワークの生成過程を、そのための情報や知識と処理手続きの関係なども含め、より明確に表すと図-4.10のようなフロー図となる。すなわち、建設プロジェクトは、設計図書などの情報から構造物が認識されると、次に、この構造物に構造物形式に関する知識を適用し、部位に分解される。そして、この部位をどのような方法で構築するのかという観点から適用工法が検討され、この結果決められた工法に基づき、工法に関する知識を適用して工種が生成される。この工種とは、作業の標準パターンという概念を持つが、これにどのような資源を投入するのかという資源選定を経て、具体的な作業が生成されることとなる。

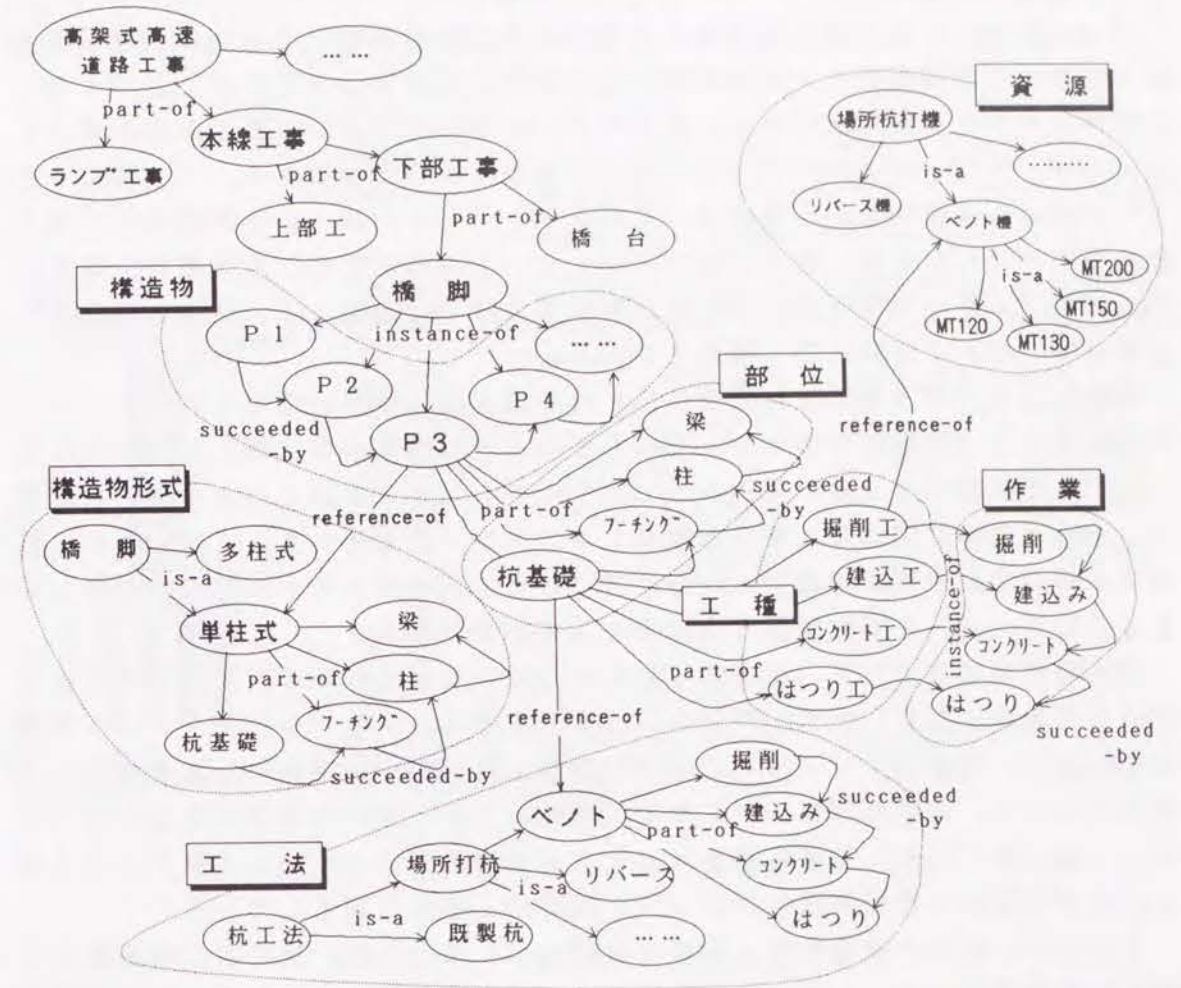


図-4.9 意味ネットワークによるネットワークの生成過程

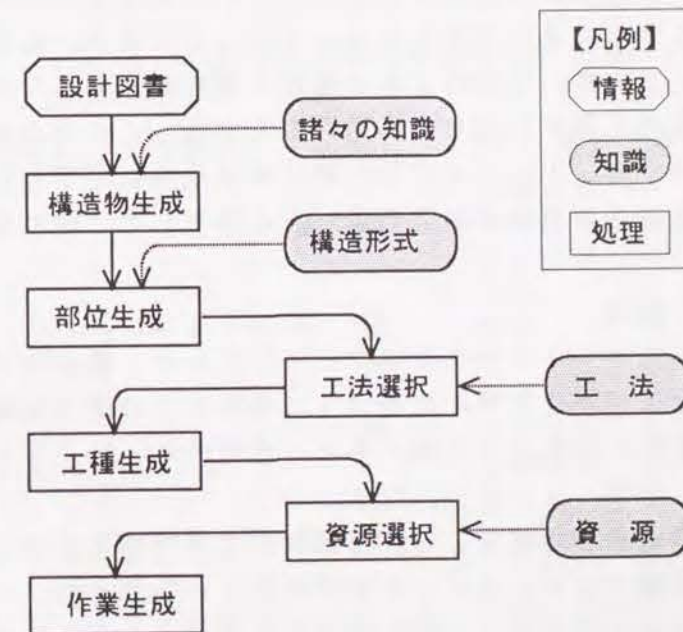


図-4.10 工程ネットワークの生成手順

(2) 構造物のモデル化

図-4.10 に示したように、工程ネットワーク生成の最初の過程には、構造物生成があり、この構造物という概念が、順次分解され、実体化されることにより、工程ネットワークが生成される。すなわち、この構造物という概念が存在することにより、工程ネットワークを生成することができる。いい替えると、ここで用いる構造物という概念は、工程ネットワーク生成という目的から、構造物をモデル化したものに他ならない。そして、この構造物は、設計図書で与えられたプロジェクトの情報に、技術者が有する“諸々の知識”と“高度な思考力”を用いて、始めて認識される概念といえる。

何故ならば、技術者は設計図書に描かれた構造図と設計仕様書を見ることで、そこにどのような構造物があり、それをどのような条件の中で施工しなければならないかを認識することができる。しかし、コンピュータはこのような形状認識や、それと複雑に関係した環境認識をすることが不得意である。このために、技術者が構造物の特徴を認識する仕方に基づいて、構造物をモデル化し、分類しておくことが、システムを開発するに当たって必要となる。

以上の考察に基づいて、本研究で対象としている構造物のモデル化とその分類方法を考えた。なお、前述したように、本研究では、ネットワーク・モデルの適用を前提に、建設プロジェクトにおける詳細工程計画立案業務のシステム化を目的としている。このために、トンネル工事のように一定の作業手順を繰り返すサイクル型工事²⁴⁾や、生産構造をネットワークで表現しにくい土工事などではなく、橋脚や橋台などの鉄筋コンクリート構造物工事を対象としている。

そして、これらの構造物を、先ほどの図-4.10 で示した、技術者が構造物を分解する思考過程に沿うように、構造物のモデル化を行った。例えば、単柱式橋脚構造物を例にとると、図-4.11 のように表すことができる。この図のように、①構造物は部位から構成され、また、②部位は一つの本設工事と、それを施工するための複数の仮設工事とにより構築される。なお、この場合、杭基礎などのも部位の一種と考える。さらに、③本設工事と仮設工事を実施するための工法は工種から構成され、④その工種に対応して作業が存在する。このレベルの作業を本研究では単位作業と称する。また、作業間の順序関係生成に必要な概念として、足場や支保工などの仮設構造物の撤去作業などを総称して、仮設復旧作業と呼ぶこととした。

(3) 構造形式の分類

以上のように、工程ネットワーク生成という目的から、構造物のモデル化を行ったが、このようなモデル化の考えに基づき、実際にどのような構造物が存在し、これをどのような形状的特徴から分類すると、合理的かということについて検討し、整理しておくことが、次に必要になる。

図-4.12 に橋脚構造物を対象とした、構造物形式の分類方法を示すが、この図のように、単柱式橋脚は柱が1本という形状特性から定義され、これに梁の形状特性、すなわち①両側に梁がある、②片側だけに梁がある、③梁がない、という特性から、3種類の形状タイプに分類している。この場合、柱の形状が矩形なの

か円形なのか小判型なのかという特性も存在するが、これは工程ネットワーク生成という目的からは、重要でないために構造物の形状分類特性で考慮していない。

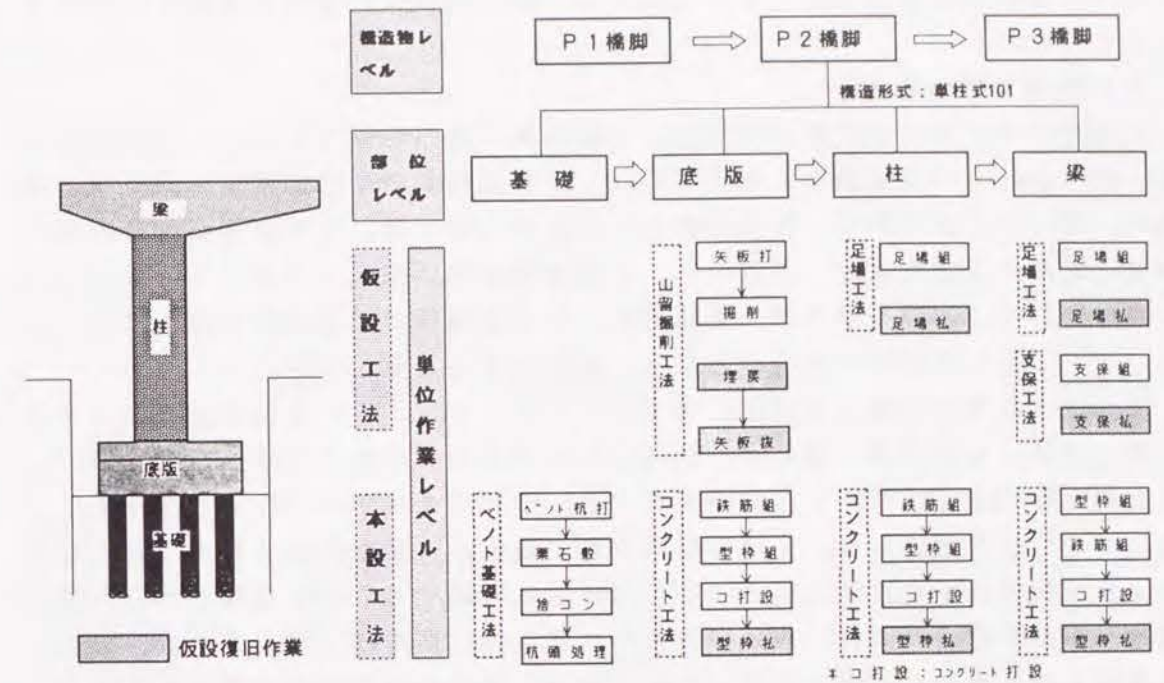


図-4.11 単柱式橋脚を例とした構造物のモデル化

【基本特性】	【梁特性】	【構造形式】
柱が1本	両側	→ 1 0 1
	片側	→ 1 0 2
	なし	→ 1 0 3

図-4.12 単柱式橋脚の構造形式分類

【柱形状】	【基礎】	【梁部】	【梁位置】	【構造形式】
柱が2本	一体	両側	両側通常	→ 2 0 1
			片側柱部	→ 2 0 2
			両側柱部	→ 2 0 3
		片側	通常	→ 2 0 4
			柱部	→ 2 0 5
			なし	→ 2 0 6
	別個	両側	両側通常	→ 2 0 7
			片側柱部	→ 2 0 8
			両側柱部	→ 2 0 9
		片側	通常	→ 2 1 0
			柱部	→ 2 1 1
			なし	→ 2 1 2

図-4.13 門型橋脚の構造形式分類

但し、当然のことながら、柱構築における作業量算定には、この特性が必要となる。同様にして門型橋脚を分類すると図-4.12 のようになる。ここでは、単柱式橋脚に加えて、底版が一体となっているかどうか、梁の取り付け位置はどうか、という2種類の形状特性が加わることから、最終的には12種類の形式を考慮することとした。

(4) 仮設工事の生成

足場や支保工などの仮設構造物は、本設工事の施工を遂行する上で必要な場合に、仮に設けられる構造物であることから、仮設作業の生成過程は本設工事と基本的に異なる。すなわち、仮設作業の生成に当たっては、①その必要性を吟味し、次に、②その工法を選定し、最後に、③仮設構造物の規模を推定することとなる。これに対して、本設工事では、基本的にこれら3種類の要素は設計段階で決まっています、工程計画段階では与件となり、検討することはしない。

このような特徴を有する仮設工事ではあるが、ネットワーク生成過程における位置づけは、本設工事と同じく、図-4.10 の部位生成の後の工法選定の段階で、仮設構造物の必要性がありと判断されると、それがきっかけとなって、その工事のための工法を選定され、工種が生成され、最後に作業が生成されることとなる。つまり、仮設工事も本設工事と同じく、部位に附属するものと見なされる。但し、本設工事の工法は各部位の一つであるのに対して、例えば、梁工事では、足場工と支保工の2種類が必要となるように、仮設工事は複数存在する場合もある。

以上のように、仮設工事も部位単位で、その必要性が検討されるが、他の部位の仮設構造物との関連が深いために、構造物全体における仮設構造物という位置づけで、全体の整合性を取っておく必要がある。そして、そのためには、構造物を取り巻く作業空間の形状的な認識をする必要がある。しかし、ここで述べている工程ネットワーク生成方法では、先ほど述べたように、構造物の形状分類によるモデル化を行っていることから、利用者により指定された各形状タイプを用いることにより、非常に限定された問題空間の中で推論を進めることができる。

例えば、橋脚の底版構築に足場が必要かどうかは、基本的にはその部位の高さだけで判断できる。

2. 計画に要する知識とフレーム表現

ここでは、構造形式、部位、工法、工種、資源など、工程計画に要する知識の定義と、その知識表現法について、具体的に述べる。なお、ここで論ずる知識は、静的な知識であることから、フレームで表現するのが適当である。また、各知識の要素間には階層的関係が存在することから、階層構造化して蓄積する必要がある。

(1) 構造形式に関する知識

構造物形式とは、橋脚の中でも柱が一つの物を単柱式橋脚、柱が二つある物を門型橋脚と呼ぶように、形状的な特徴により構造物を分類する概念である。前述

したように、工程ネットワーク生成という目的から、このような分類が行われる。図-4.14 に、このような構造物形式に関する知識構造をフレーム構造として示した。

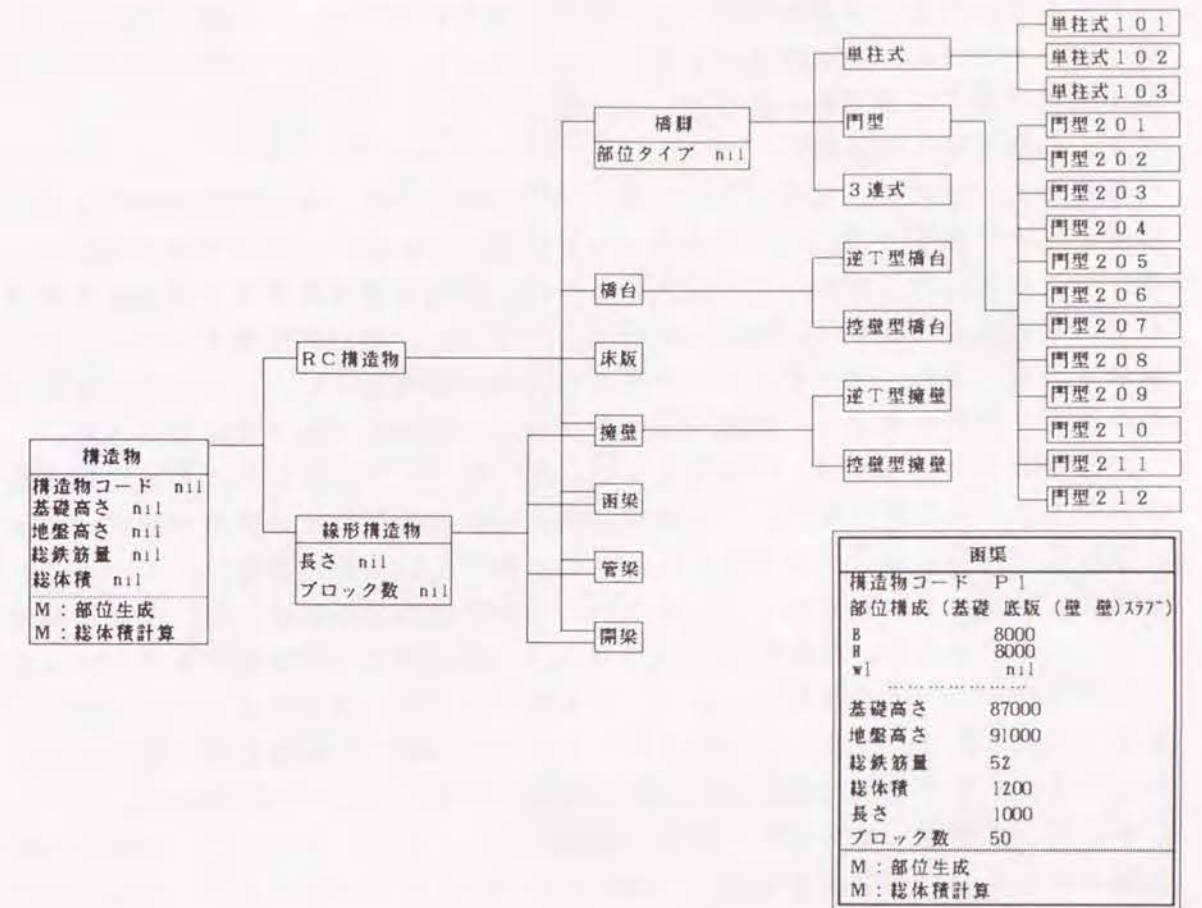


図-4.14 構造形式の知識構造

フレーム (frame) とは、人間の持つ長期記憶に関する研究により提唱されたフレーム理論に基づく知識記憶方法のことであるが、このフレームを用いることにより、構造物という概念に含まれる知識を合理的に表現することができる。このフレームは、一般的に階層構造を表現できる。この場合、上位のフレームのことをスーパーフレーム (super-frame)、より下位のフレームのことをサブフレーム (sub-frame) と呼び、この両者の間で、性質の継承 (inheritance) が自動的に行われるという特徴がある。

図-4.14 では、対象とする構造物は、全て鉄筋コンクリート (RC: Reinforced Concrete) 構造物とし、この下には橋脚など7種類の構造物が存在すると定義している。また、先ほどの構造物形式の分類方法に従って、構造物形式の分類が行われている。そして、構造物コードなど、構造物の特性を規定する項目 (slot) は、スーパーフレーム・サブフレームの性質継承により、階層構造の最上部のフレームで定義されている。また、擁壁や函渠など、延長の長い構造物は、橋脚など単

体の構造物とは異なった性質を有するために、RC構造物と同様に、線形構造物と呼ばれるフレームを設定して、それより下位にある構造物が、RC構造物ばかりではなく、線形構造物という特性も併せ持っていることを示している。このような構造形態を、嘉納が提案したWBS内のラチス構造にあわせて、ここでは、フレーム間のラチス構造と呼ぶこととする。すなわち、フレーム間にスーパーフレーム・サブフレームの関係を定義することにより、このような特殊な関係を簡単に記述することが可能である。

(2) 部位に関する知識

部位とは、例えば、橋脚の底版、柱、梁などのように、構造物の部分的な形状特徴から他の部位と識別されるようになった概念であるが、その実体は曖昧である。すなわち、例えば柱と梁の関係のように、部位と部位の境界が明確に定義されていない場合もあるし、底版と床版などのように、同じ部位を違う用語で示す場合もある。また、ボックスカルバートの上部の版のように、どの用語が適当なのか不明な場合もあるし、梁柱や壁スラブのように合成された部位名もある。

以上のような問題点は、何も部位だけに限ったことではなくて、先ほどの構造物名や工法名、工種名など、工程計画に関するほとんど全ての技術用語に、多かれ少なかれ同様な問題点が存在する。これに対して、我々技術者は、このように曖昧な用語を、それが使用された場所や、その背景などを勘案して、柔軟に処理することができるが、現在の技術レベルは、これと同じような処理をコンピュータに期待することはできない。また、将来的にみても、マンマシン・インターフェイスは別として、ファジィ理論におけるメンバーシップ関数を用いたにして、コンピュータ内部では、使用する用語は明確に規定しておく必要がある。

そこで、本研究においても、部位の定義を行っている。すなわち、本研究では、工程ネットワークを生成するという目的から部位という言葉を用いているために、「部位とは、設計で決められた構造物を構成する一部分」と定義することとする。このために、部位は、平面的な形状特性による認識ではなく、立体的な認識で捉える必要がある。このために、橋脚のような単体の構造物では、従来の平面的な認識とはそれほど違わず齟齬は生じ難いが、共同溝や地下鉄などのようにブロック分割をして施工される構造物の場合には、「平面的に認識される従来の部位を施工ブロック方向に拡張した立方体」として部位を認識する必要がある。なお、ここでいうところの部位を施工ユニットと称する研究²⁵⁾があるが、ここでは部位という言葉を用いることとする。

以上のような認識に立って、部位を定義し、分類したのが図-4.15である。ここでも、構造形式の知識と同様に、階層的なフレーム構造で、部位に関する知識の蓄積を図っている。この図の中で、最も上位のフレームには「部位」があり、その下位に「RC部位」と「基礎」が存在している。一般的には、基礎を部位と称することは少ないと考えるが、“構造物の一部を構成する”という定義からすると、基礎も部位の一種に他ならない。すなわち、部位は必ずしも鉄筋コンクリート構造物だけを対象としているのではなくて、例えば、鋼管杭基礎などのように、構造躯体として後に残る物は、ここでは部位の一種として取り扱うこととし

ている。

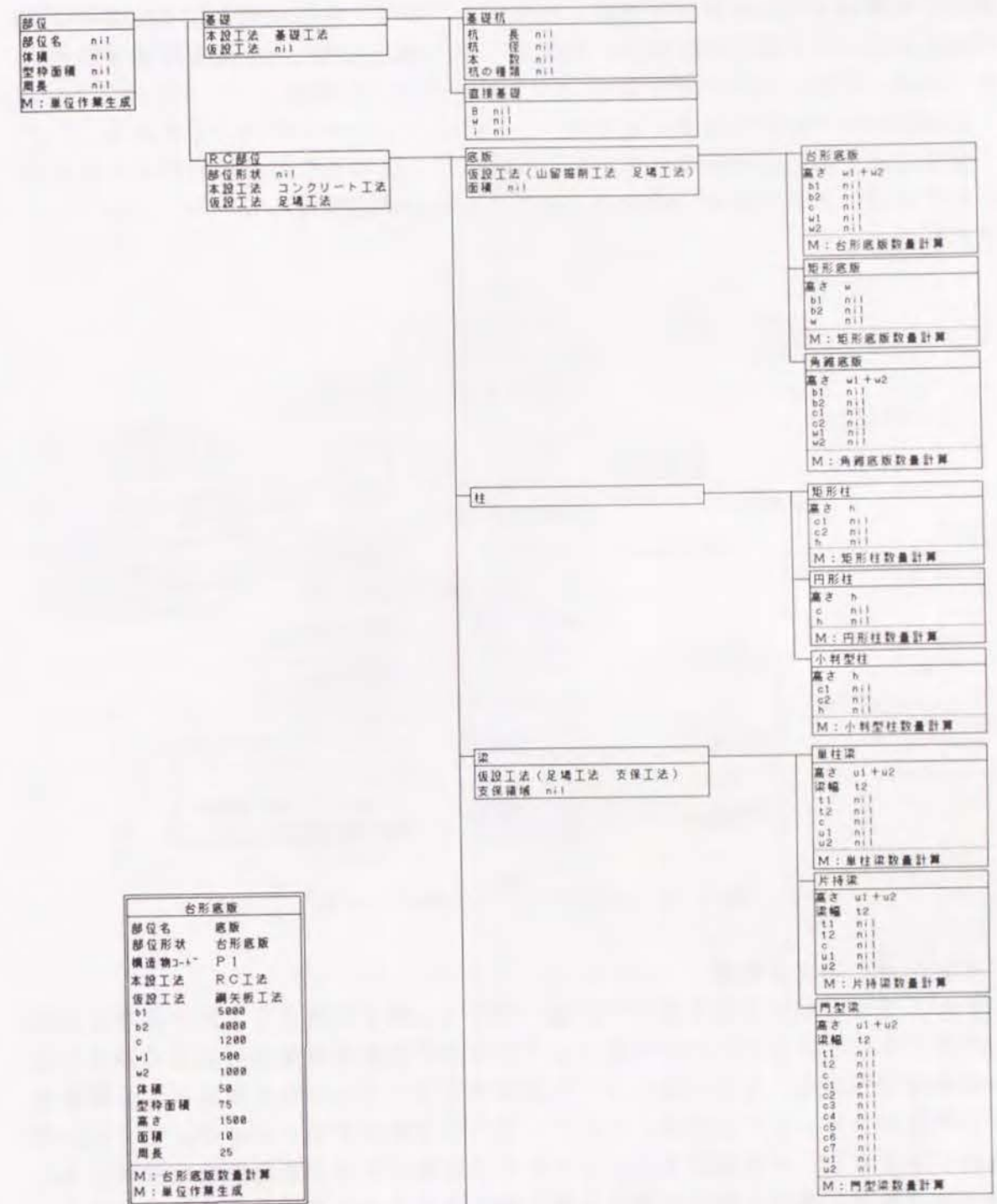


図-4.15 部位のフレーム構造 (一部)

(3) 工法に関する知識

工法と一口に言っても、建設プロジェクトの基本的施工技術を指す大きなものから、施工の細部における工種と区別しにくい工法まで、多くのバリエーションがある。そして、これらの多様な工法の間には、類似の工法ではあるが、資材が

違うもの、施工機械が異なるものなど、様々な関係が存在する。そこで、本研究では、先ほどの工程ネットワーク生成を目的としたモデル化に従い、「工法とは構造物を構成する部位の構築方法、あるいは、そのために必要となる仮設構造物の構築方法」と定義し、図-4.16 に示したように、フレームによる階層構造により、知識の蓄積を図ることとした。

この図の中で特徴的な点としては、「工法」フレームの下が、「本設工法」と「仮設工法」に二分されていること、既成杭打工法の下位が、杭材料による分類と杭打方法による分類の二種類に分かれ、ラチス構造化されていることなどが上げられる。



図-4.16 工法のフレーム構造 (一部)

(4) 工種に関する知識

また、工種という言葉も非常に曖昧な概念で、様々な場合に、色々な意味を持って用いられる。そこで、本研究では“工種は、構造物構築のために必要となる多種多様な作業を、そこで用いられる資源や作業パターンの特徴から、分類整理した作業のフレーム”と定義した。ここでいう作業のフレームとは、フレーム理論におけるフレームを意味する。すなわち、建設プロジェクトの遂行には、大小様々な、また、多種多様な作業が必要となる。そこで、工種の定義においては、全体工程計画のアクティビティとなる作業(これを単位作業とここでは呼ぶ)を対象として、その作業主体となる資源や作業構造などを類型別に分類した枠組みが工種で、これに実際の工事を対象に求められた作業量や使用資源、歩掛り、所要日数などをあてはめることにより、工程計画に必要な実体としての作業が出現する。そして、このメカニズムが、フレーム理論における視覚情報の認識過程に類似していることから、“作業のフレーム”という言葉で工種を定義することと

した。

ここでは、工程ネットワーク生成という具体的な目的が存在するので、より明確に工種を定義することができる。すなわち、“工種とは、工法を構成する作業の一つ”で、これ作業数量、適用資源、歩掛り、所要日数が当てはまられて、実際の工程ネットワークを構成する単位作業が生成される。

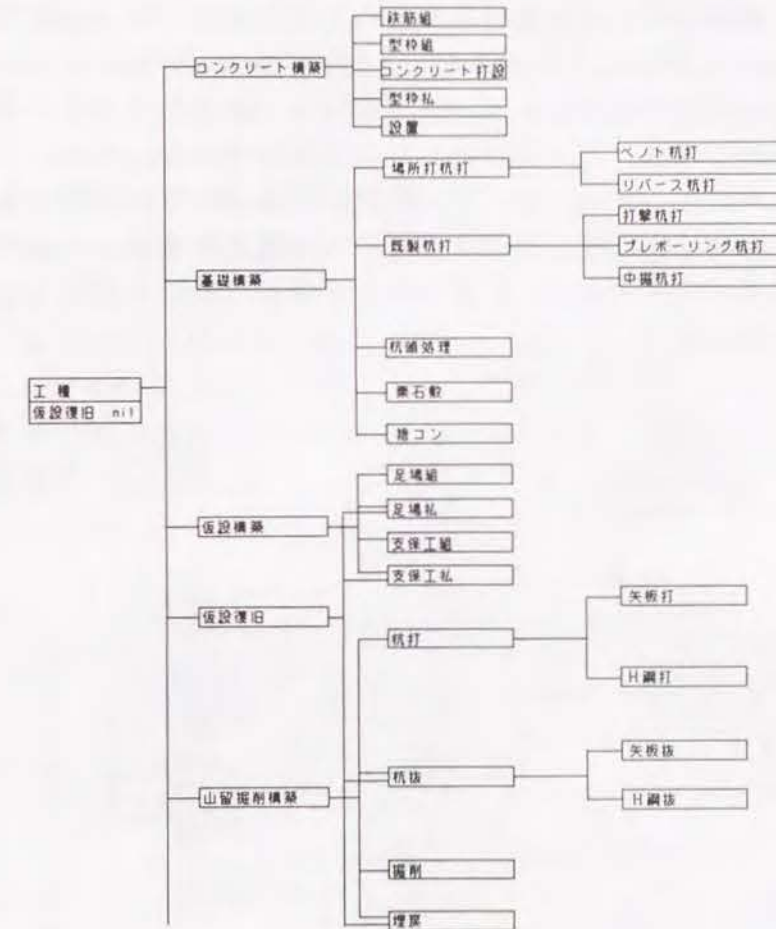


図-4.17 工種のフレーム構造

例えば、コンクリート工法では、①型枠組み、②鉄筋組み、③コンクリート打設、それに④型枠脱型という4種類の作業が必然的に必要となるが、この場合、この4つの作業は、具体的な作業実態を表しているのではなく、4種類の作業パターンを表しているに過ぎない。つまり、このような作業パターンでは、型枠組と言っても、作業数量や型枠材の種類など、具体的な項目は規定されていないで、単に作業の種類を規定しているに過ぎない。そこで、このような作業パターンを工種と呼ぶこととした。また、この定義を用いると“工法は、必要となる工種の種類とその適用順序を規定している”と、逆に定義することもできる。

そこで、このような工種に関しても、これまでと同様に、階層構造を有するフレームにより、工種知識の構造化と蓄積を図った。図-4.17 に、この一部を示すが、ここでは、構造物のモデル化の際に定義した、仮設復旧作業の範囲と特徴を、このようなフレーム構造により表現している。

(5) 資源に関する知識

建設プロジェクトで必要となる資源は、比較的对象がはっきりしているために、他の知識ほど曖昧な点は少ないが、①資材、②労務、③機械などといった、基本的に性格の異なるものを含むために、その知識構造はそれほど単純ではない。なお、一般にプロジェクト資源という場合、資金もその分類に含めて考えるが、ここでは、工程ネットワーク生成という目的から、資金は資源に含めてはいない。

以上のような資源に関する知識構造を図化したものが、図-4.18 である。ここでは、最初に大きく「材料」、「機械」、「労務」の三つのフレームに分類され、その下の構造は、各々の特性により、全く異なった構造となっている。「材料」に関しては、「本工事材」と「仮設材」に二分されている。また、「機械」の最下位にある「パイプロハンマ」は、杭の打設と引抜の両方の目的で使われることから、両者の中間に「杭打機」と「杭抜機」の2種類のフレームを配置し、この両者の下位に「パイプロハンマ」を置くことにより、このような二つの異なる機能を表現している。

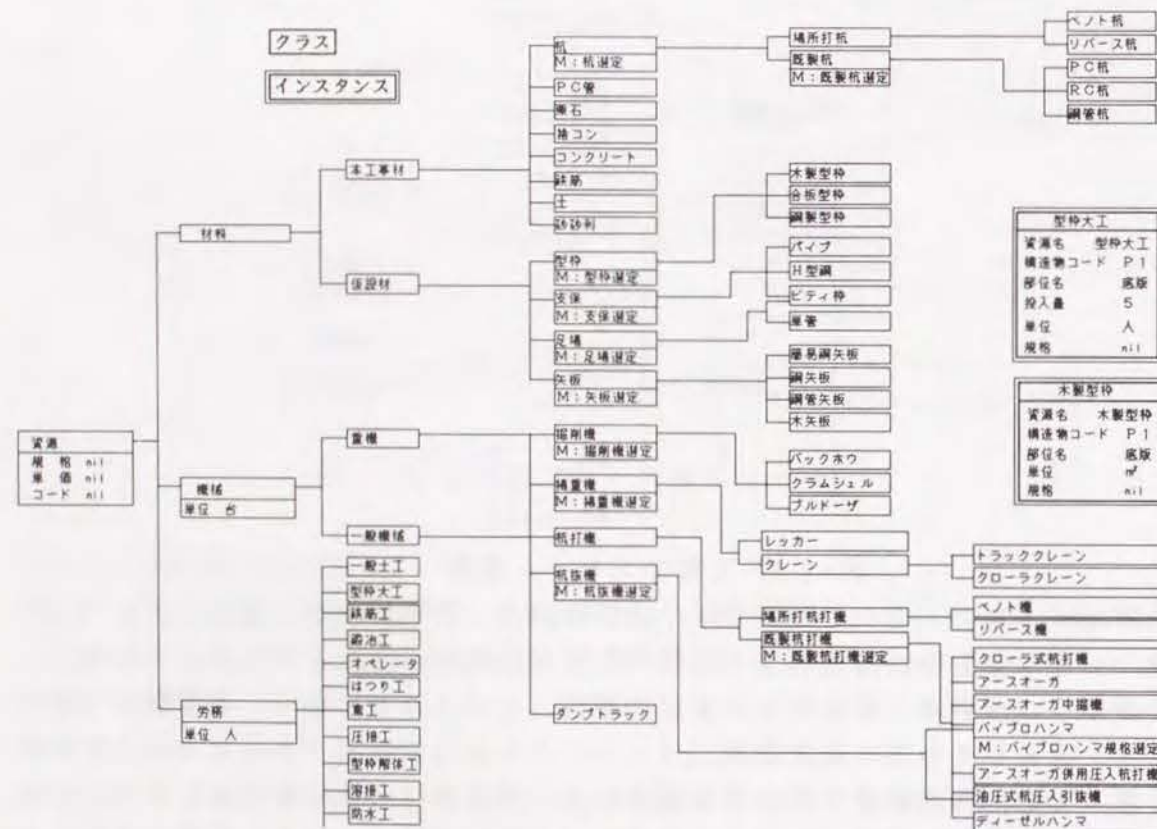


図-4.18 資源のフレーム構造 (一部)

3. オブジェクト指向によるネットワーク生成方法

これまで、ハイブリッド戦略に即した工程ネットワーク生成過程のモデル化と、

フレームによる知識の構造化と蓄積方法について述べてきたが、ここでは、これらの考え方に基づいた、具体的な工程ネットワーク生成方法について述べる。

(1) オブジェクト指向によるネットワーク生成過程

工程ネットワークの生成過程は、基本的な流れとしては図-4.10 で示したようになるが、その細部の処理手順は非常に複雑な構造をなしている。また、生成過程において、それまでの前提条件と食い違う結果が現れた場合には、過去に遡って推論をやりなおす、いわゆるバックトラックが必要となる場合も起こる。また、前述したように、これらの推論過程には、多種類の知識が必要であり、かつそれらの知識構造は一様ではない。さらに、工程計画に関する知識の種類と量は莫大であり、かつ、たゆまない技術革新により、今後とも、既存の知識の更新と新たな知識を追加を継続して、行っていかなければならない。

このような複雑な構造と多種多様な知識を要する工程ネットワークの生成問題をシステム化するためには、ただ単にプロダクション・ルールを用いてエキスパート・システム化するだけでは対応できない。前述した階層構造を持つフレームにより、これらの知識を蓄積するののも一つの方法であるが、さらに一歩進めて、計画化を進めるための各種の推論知識と処理手続きを、対象となる構造物や部位、工法などの構造化された知識の中に埋め込み、一体化することで、柔軟に処理するメカニズムが必要である。

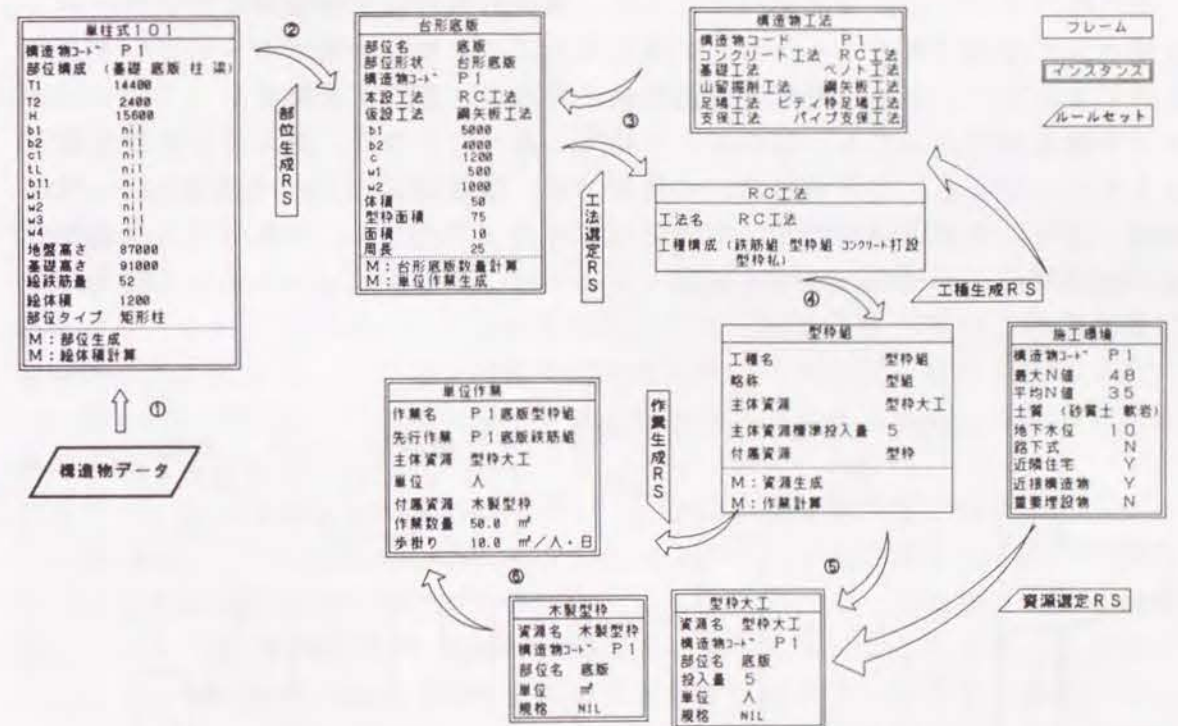


図-4.20 オブジェクト指向によるネットワーク生成過程

このような考え方は、データや知識と処理手続きを物(object)単位で纏めてしまうということから、オブジェクト指向(Object-Oriented)と呼ぶが、本研究では

この考え方の適用が、非常に重要である。一般に、オブジェクト指向の考え方は、ゼロックス(Xerox)社のパロアルト研究所において1970年代に開発されたSmalltalk-80により確立されたと言われている²⁶⁾が、先ほど述べたフレームによる知識の構造化と蓄積方法も、フレーム理論とオブジェクト指向が融合した一つのシステム化技法である。そして、このようなフレーム(オブジェクト指向ではこれをクラス(class)と呼ぶが)の内部には、メソッド(method)やトリガー(trigger)と呼ばれる付加手続き(attached procedure)を記述することができるが、この方法を用いて工程ネットワーク生成のための処理手続きやルール群を、同じ性質を有するフレームごとに記述し、適用することとした。

以上のような考え方で工程ネットワークの生成過程を表したものが、図-4.20であるが、この図の中では、フレーム間の関連とそこで必要となるルールセット(rule-set)を示している。この図のように、一つの構造物データがシステムに入力されると、それが端緒となって、フレーム知識間に知識の連鎖が発生し、前述したように、①部位生成、②工法選定、③工種生成、④資源選定、⑤作業生成の順で、一つの構造物の工程ネットワーク、すなわち、全体のから見た場合のサブ・ネットワークが生成される。なお、この図の中のインスタンス(instance)とは、フレームが特定の物を対象としない情報の枠組みを表しているのに対し、その枠組みをある具体的な物に適用し、情報の実体を表したものをインスタンスという。

(2) 部位の生成

構造物のモデル化の所で述べたように、構造形式とは、構造物の形状特性から分類された知識であることから、標準的な施工のための分割パターンというものを有している。しかし、実際の構造物は、例えば、単柱式橋脚といった同じパターンの構造物であっても、柱の長さが極端に違っていれば、施工のための分割方法も異なってくる。このために、本研究では、構造物形式ごとに記憶された部位構成により、まず、標準的な部位構成を生成し、その次に、対象となる構造物固有の形状特性に基づき、これを修正するという、2段階により部位を生成することとした。

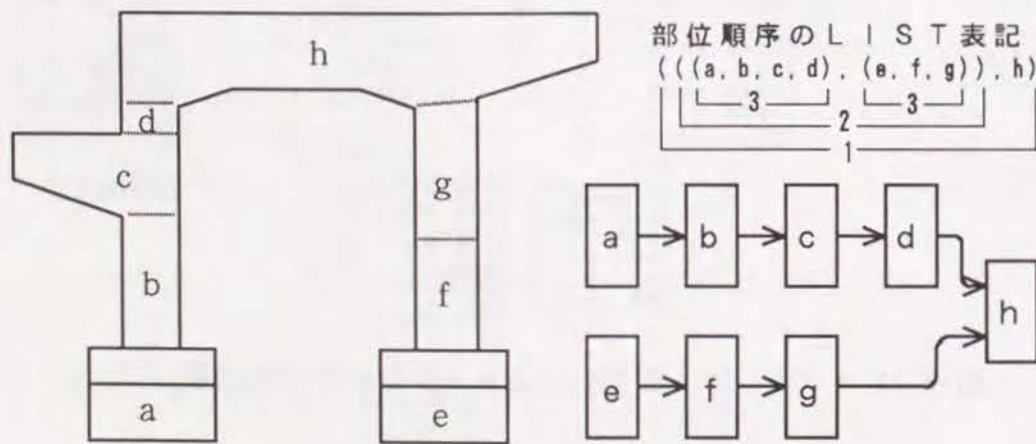


図-4.21 リスト表記による部位構成の表現法

以上のような、部位の生成過程は、前述したように、部位フレーム内に記述されたメソッドが、同じく、フレーム内のスロットに、リスト構造で記述された部位構成を参照しながら進める。このような、リストによる部位構成を表した例を図-4.21に示す。そして、次に、構造物形状に関するルール形式で蓄積した経験的知識に基づき、部位の分割、あるいは合成を行う。例えば、図-4.22の門型橋脚では、左梁上部の柱部分が極端に短いために、この部分と上部の梁を同時に施工した方が合理的である。そこで、本研究においては、標準的な部位構成が生成された後に、このような経験的な知識を適用して、施工により適した部位生成が行える方法を考案した。

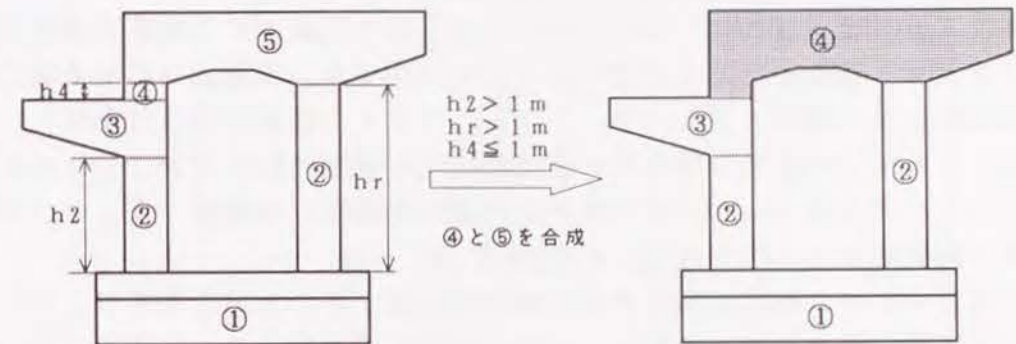


図-4.22 門型橋脚における柱-梁部位の合成例

(3) 工法選定から単位作業生成

前述したように、ここで取り扱う工法は、部位の施工方法を意味し、本設工法と仮設工法に分かれる。そして、これらの工法は、設計仕様書で決められている場合には、その工法を用い、そうでない場合には、対象となる部位の特徴や置かれた状況などにより、システム内部で選定される。この場合、仮設工法については、例えば、梁において足場工法と支保工法が必要となるように、複数の工法が設定される場合もありうる。

そして、ここで決められた工法に従って、工種が生成される。つまり、工法とは、図-4.20の「RC工法」フレームが示すように、それを施工するために要する工種とその適用順序を規定する概念であることから、そこに記憶された工種構成に基づき工種を生成できる。この点を厳密に表現すると、ここでは、工種のインスタンスが生成されるのではなく、必要となる工種リストが生成される。そして、この次に、これらの各工種が対象とする作業の作業量を算出し、投入資源の種類と投入数、および、歩掛りを推定し、最後に所要日数を推定することによって、実体としての単位作業が生成される。そして、このような一連の処理の各種の計算と選定問題は、フレーム内に記憶されたメソッドをにより行われる。また、これらの処理の流れも、メソッドが中心となって制御する。

例えば、工種フレームから単位作業を生成する段階では、資源の選定が行われるが、図-4.20の「型枠組」という工種では、使用材料として型枠としか表現していない。そこで、システムは図-4.18に示した、資源に関するフレーム知識を参照し、「型枠」の下位に①木製型枠、②合板型枠、③鋼製型枠の三種類が存在することを認識し、「型枠」のメソッドとして記憶された選定知識を適用することにより、そこでの作業ではどの種類の型枠材料を使用するのか、自動的に決定する仕組みになっている。

(4) 順序関係の生成

これまで、主に工程ネットワークのアクティビティに相当する、単位作業の生成について述べてきたが、これらの単位作業間の順序関係も、以上のような過程の中で生成できる。例えば、図-4.21の部位構成の所でふれたが、部位間の順序関係は、「構造形式」フレーム内に記憶されたリスト構造に基づき生成できる。また、部位ごとに設定された「工法」の中には、そこに属する工種間の順序関係が、やはりリスト構造で記述されていて、これに基づき、工種に対応する単位作業間の順序関係を生成できる。なお、このようなリスト構造による順序関係の記述方法は、リストの外側から数えて、偶数個のカッコの内側の要素(LISP言語ではこれをS式と呼ぶ)は、作業間の並列関係を表し、奇数個のカッコの内側の要素は、直列関係をそれぞれ表している²⁷⁾。

以上のようにして、単位作業間の順序関係を生成することができるが、このような生成過程を、更に詳細に検討し、また、実際の構造物において作成された順序関係の例を参考として、帰納法的に推論すると、図-4.23に示した5ステップによる順序関係の段階的な生成方法が合理的であると考えた。以上の検討過程で用いた例を、図-4.24に示す。この図では、柱が長いという特徴のために分割施工される単柱式橋脚を例に、単位作業間につけられる順序関係を示している。

図-4.23を説明すると、まず最初に、「工法」に記憶された工種に関する知識を基に単位作業間の順序を生成し、次に、仮設工法と本設工法の関係と、部位間関係から、それらに属する単位作業間に順序関係を付加する。そして、以上のような標準的な知識では生成されない関係については、工種間の特殊な関係を考慮したルールにより、個別に順序関係の付加を行う。この際、仮設復旧作業という概念を導入して、ルールの汎用化と、それによるルール数の削減を図った。

これまで述べてきた作業間の順序関係は、個別の構造物を対象としたサブネットワークを構成する関係であるが、プロジェクト全体の工程ネットワークを作成するためには、異なるサブネットワーク間に順序関係を生成しなければならない。この点に関して、本研究は、利用者が構造物間の基本的な施工順序を指定することを前提に、こうして、でき上がった概念ネットワーク(conceptual network)を参考として、同じ主要な資源を必要とし、かつ異なるサブネットワークに属する同種の作業間に、資源転用の順序関係を生成することとした。

構造物間の順序関係は、構築する構造物間の技術的な関係やプロジェクトが置かれた環境など、多種多様な決定要因が存在することから、その決定をコンピュータに行わせるためには、莫大な情報を入力しておく必要がある。しかし、現状

の技術レベルでは、そのようなことは不可能であるので、ここでは利用者が、それらの情報を勘案して決定し、システムに入力することとした。また、概念ネットワークとは、そこでの順序関係が、構造物間の概念的な順序関係を表すだけで、実際の工程計算には用いられないことから、このように名付けた。詳しくは、第5章第3節で論ずる。

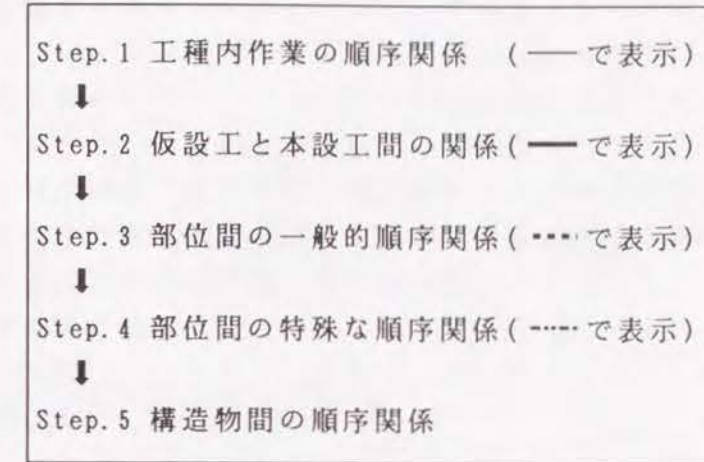


図-4.23 順序関係の生成手順

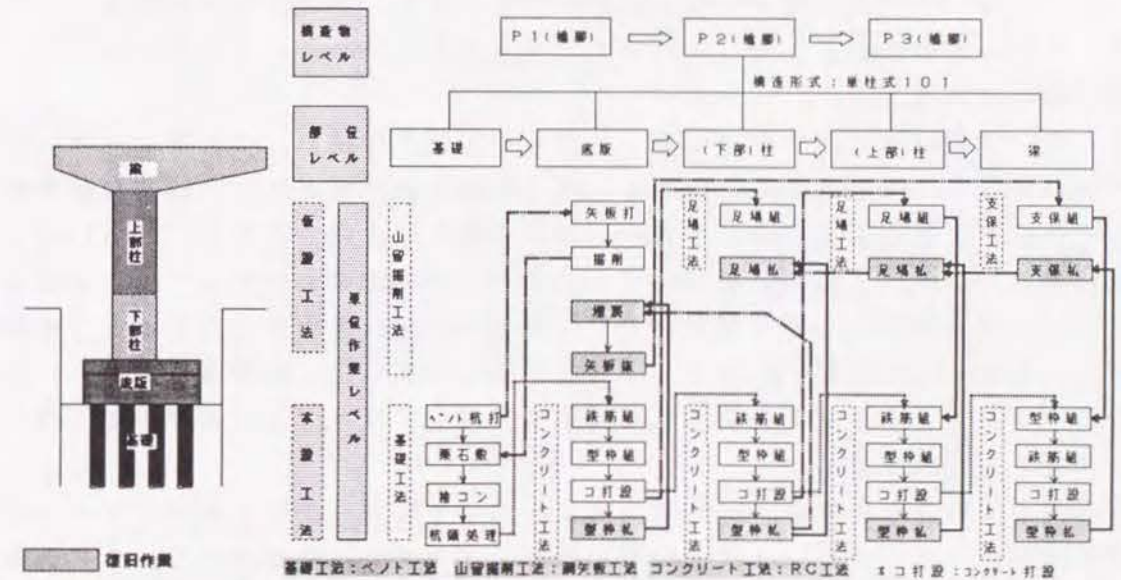


図-4.25 単柱式RC橋脚を例とした構造物のネットワーク生成

第4節 ネットワーク生成システムの開発

1. システムの概要

(1) システム開発の目的

次章で紹介するスケジューリング・システムPF-NETSの適用においても大きな問題点として指摘されたことであるが、スケジューリング・システムを用いて建設プロジェクトの工程管理を行う場合には、システムの入力データである工程ネットワークの作成と入力作業が、ボトルネックの一つとなっている。すなわち、このような工程計画では、当該工事の設計図書や契約条件に明示された条件だけではなく、現地調査や過去の類似工事調査など、多種多様な情報を収集する必要があり、また、これらの情報に基づき、仮設工法や仮設備などについても多面的に検討し、決定する必要がある。そして、これらの意思決定の多くの部分は、図書やマニュアルなどに明記された知識だけではなく、経験的な知識に大きく依存している。

そして、以上の理由から、工程ネットワークを作成するためには、多くの時間と労力を必要とするし、また、このようにして作られたデータをシステムに入力するのも、結構大変な作業となる。加えて、質の高い工程計画を作り出すためには、データ作成者の長い経験と高い技量が必要となる。このような理由から、工程ネットワークの作成と入力、スケジューリング・システムを利用する上で、重要な課題である。

そこで、工程計画立案に関する多くの情報や知識を内蔵し、スケジューリングのための工程ネットワークを、迅速に、かつ経験に裏打ちされた合理的な計画案として作成することが重要であると考え、知的工程計画生成システム (Knowledge Intensive Planning System)を開発することとした。このシステムでは、鉄筋コンクリート構造物築造工事を対象として、構造物の設計情報を入力すると、そのサブネットワークを自動的に生成し、これに構造物間の施工順序を加えると、先ほどのサブネットワーク間に資源転用関係を生成し、プロジェクト全体の工程ネットワークを作成できる。

ここでの工程ネットワークの生成方法は、前節で詳細に説明したハイブリッド戦略が基本となり、オブジェクト指向に基づくシステム技法を適用し、システム化したものである。そして、ここで生成された工程ネットワーク・データを、次章で説明するスケジューリング・システムに転送し、ここで工程計算と工程図作成を行うことにより、当該プロジェクトの工程計画を完成させることができるようにしようと考えた。

(2) システムの構成

ここで開発した知的工程計画生成システムの機能構成と基本的な処理の流れを図-4.28に示す。この図のように、このシステムでは、①工事概要の指定、②現

地情報の指定、③標準工法の指定、④手持ち工事資源の指定、⑤構造物の指定、それに、⑥構造物順序の指定というように、6種類の情報を必要とする。そして、これらの情報を入力すると、各構造物ごとのサブネットワークが生成され、次には、これらのサブネットワークが全体ネットワークに組み合わせられ、最終的に、この図の左下に示したスケジューリング・システムに、これらのデータが受け渡されることにより、工程計画を作成できる。また、これらの処理は、コンピュータと利用者が対話する形式で、インタラクティブに進められる。

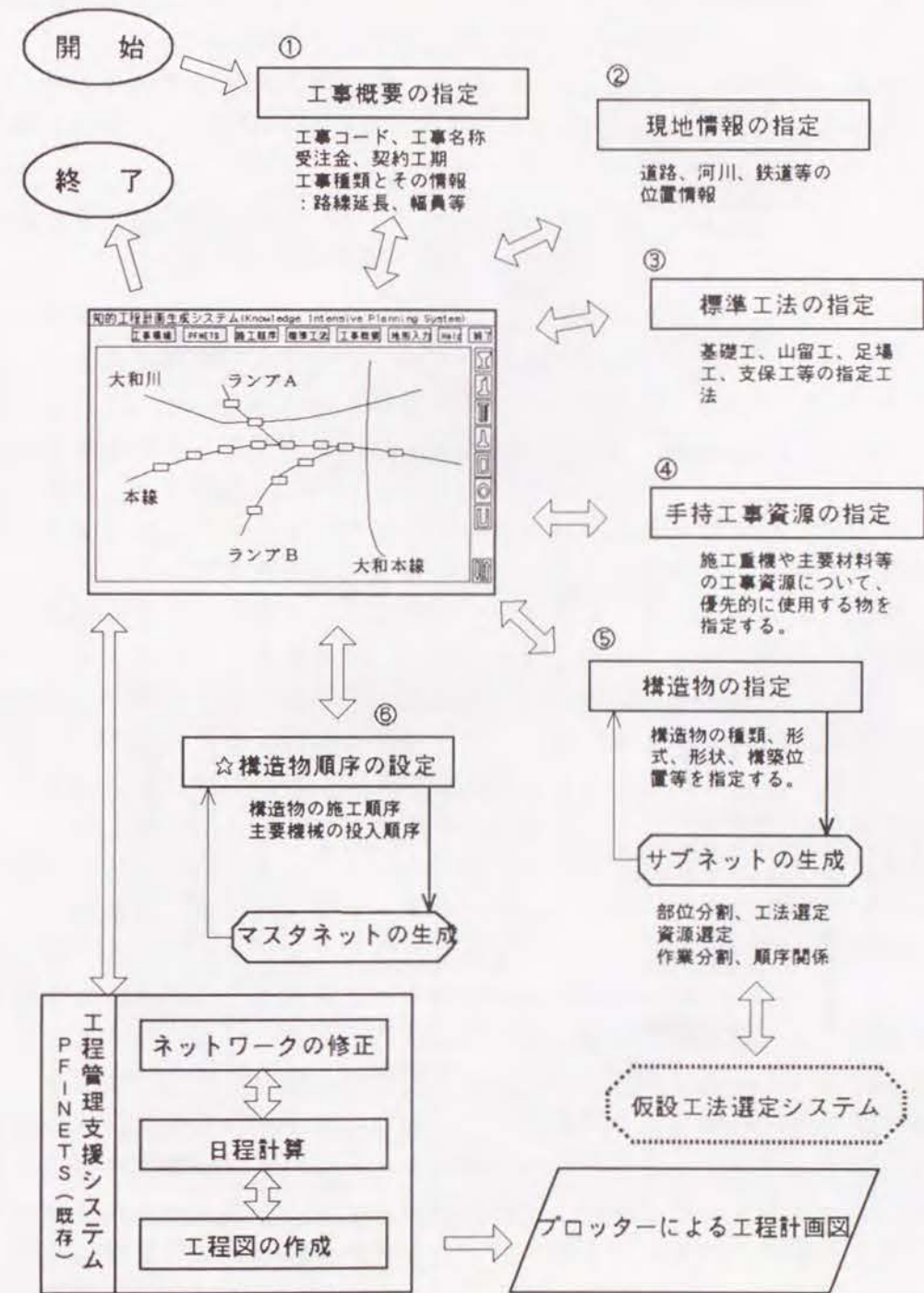


図-4.28 知的工程計画生成システムの処理フロー

また、このシステムの開発に当たっては、作業所でも手軽に利用できることと、既存のスケジューリング・システムを利用することを考え、パーソナル・コンピュータ（以後、パソコンと称す）環境で稼働するように設計した。図-4.29 にシステムの開発環境を示すが、32ビットCPUを備えたパソコン(NEC PC-9800)にメモリ(8MB)を増設し、ハードディスク(40MB)、プリンター、プロッター、音声合成ボード、スピーカーを加えたハードウェア構成とした。ここで、プロッターは工程図の作成用、音声合成ボードとスピーカーは、後で説明する音声案内用に用いた。

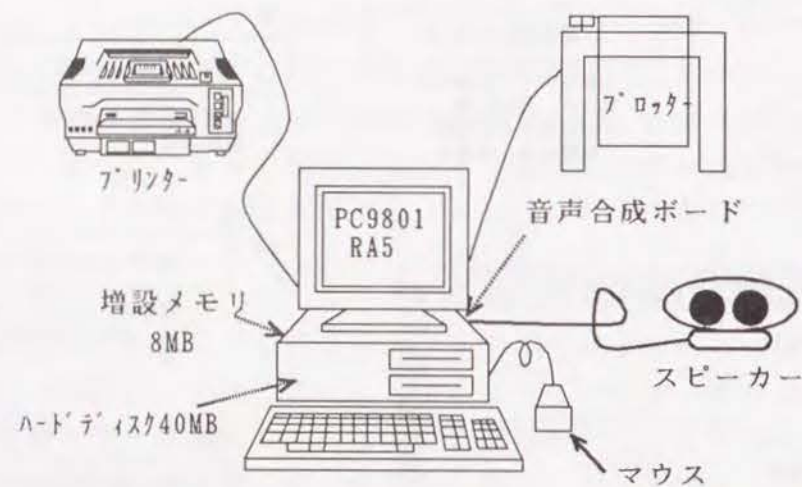


図-4.29 ハードウェア構成

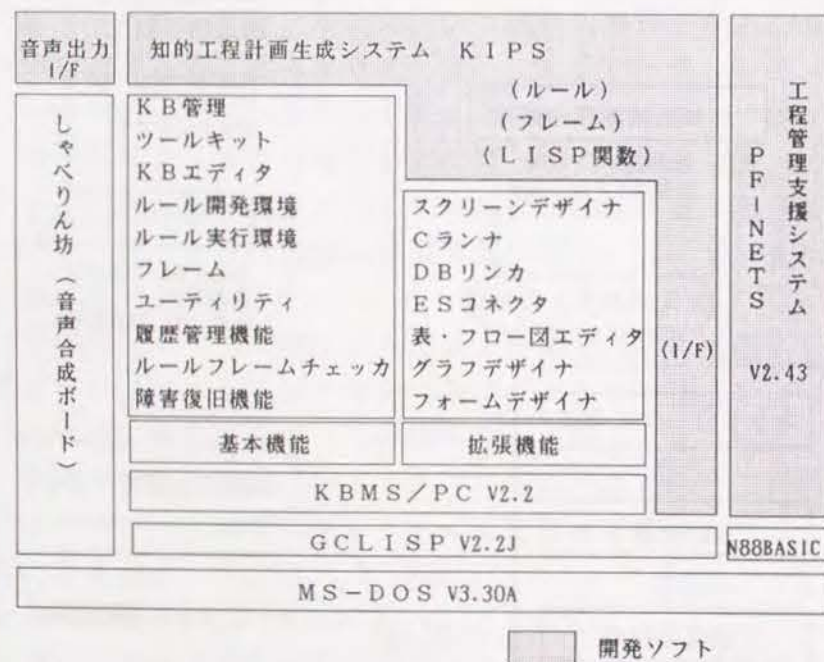


図-4.30 ソフトウェア構成

また、このシステムの開発には、①パソコン上で開発・実行が可能なもの、②ハイブリッド型の知識表現・推論機能を持つもの、③メインフレーム・ワークステーション・パソコン間で知識ベースの互換性あるもの、④コスト・パフォーマンスの優れたもの、⑤C言語変換機能等のデリバリ環境が整備されているもの、⑥プレゼンテーション機能が優れているもの、という評価基準で各種のエキスパート・システム・シェルを検討した結果、KBMS/PC™を用いることとした。なお、このツールは、MS-DOS™とGCLISP™の環境下で稼働する。

図-4.30 には、これらのソフトウェア構成を示した。この中で、中核となる知識ベース・システムの規模は、本論文を作成している段階で、①ルールセットが12個、それらの中に記録された②プロダクション・ルールが68個、構造形式などを記憶した③クラスが294個、それに④リスプ関数が306個となっている。

2. システムの機能と特徴

本システムは、主に設計段階で作成された情報に基づき、工程ネットワークを生成し、これを次章で説明するスケジューリング・システムPFNETSに受け渡すことにより、工程計画を作成することができる。ここでは、このような目的を達成するための主要な項目について説明する。

(1) 対象となる構造物

本システムは、ネットワーク・モデルを用いた工程計画の作成を目的としていることから、トンネルやシールドなどのサイクリックに施工される構造物を除く、一般鉄筋コンクリート構造物を基本的な対象としている。そして、対象となる構造物を、ネットワーク生成という目的から類型化し、その部位構成や形状特性などを事前に知識ベースに蓄積する方法を用いている。

しかし、このような構造物の種類や、その形式は、非常に多く存在することから、最初から全ての構造物に関する知識を記憶させておくことは難しい。そこで、本システムでは、フレームによる知識の蓄積と、その中に各種の付加手続きを内蔵させることにより、ネットワーク生成のための知識や手続きを、全て構造物形式ごとの階層構造を持つオブジェクトに集約したため、いわゆるプログラムを変更をしなくとも、オブジェクトを追加するだけで、構造物に関する知識を段階的に蓄積することが、行えるシステム構造とした。

以上のように、本システムが取り扱える構造物の種類と形式は、今後とも増やしていく予定であるが、現段階で取り扱える構造物は、図-4.32 に示したように、7種類11形式である。そして、これらの形式や特徴は、図-4.14 で既に説明した、構造物形式を対象としたフレーム型知識と完全に対応している。また、この図を見ても解るように、ほとんど全ての構造物は、現場打ちコンクリート工法によるが、唯一、管渠だけは、プレキャスト・コンクリート工法での施工を前提とした知識が蓄積されている。

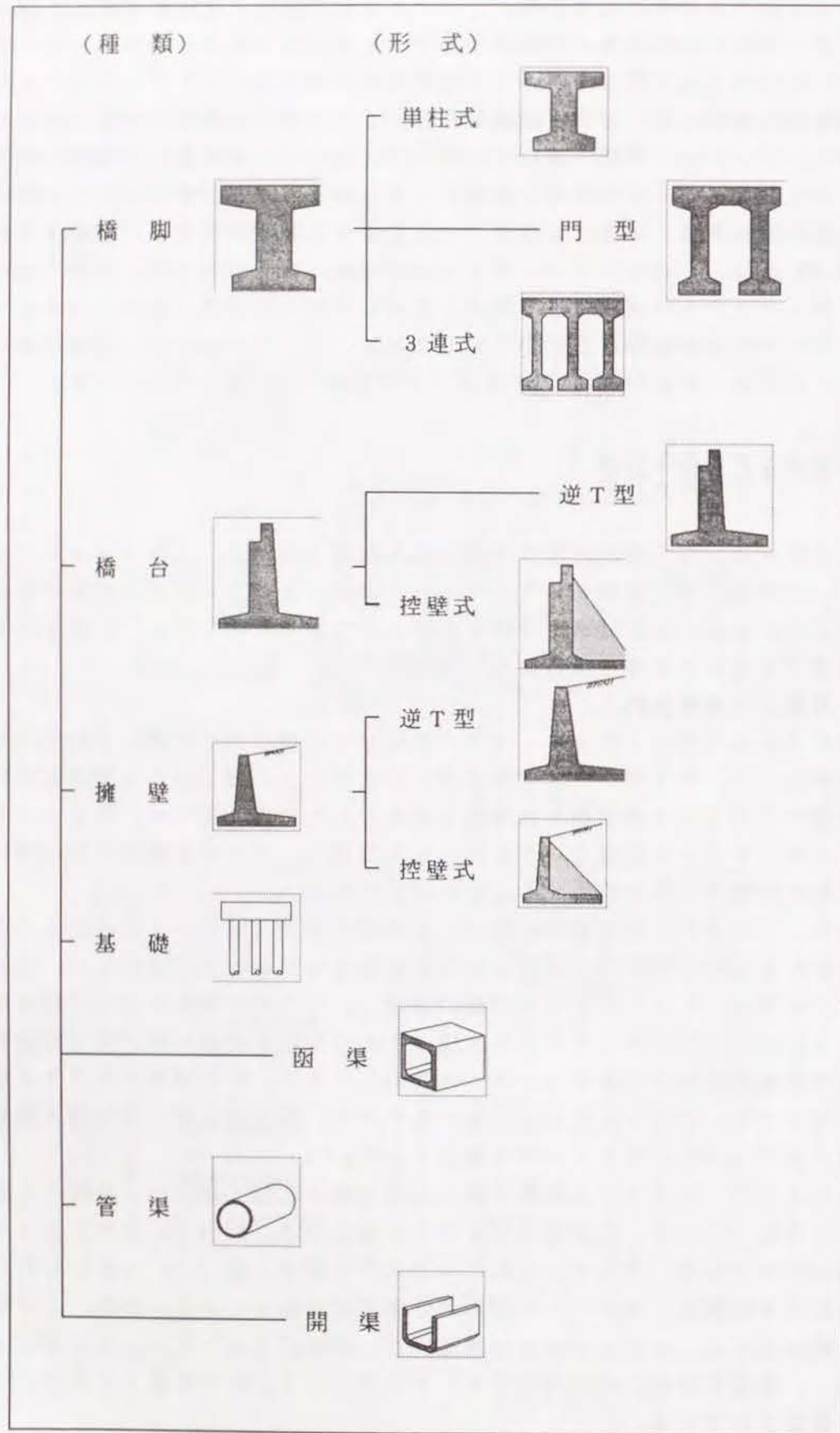


図-4.32 対象となる鉄筋コンクリート構造物の種類

以上のように、本システムでは、このフレーム型知識を参照することにより、データ入力画面のアイコンを表示したり、構造物ごとの特徴を認識し、さらに、工程ネットワークを生成することができる。

(2) 構造物情報の入力

以上のような構造物は、図-4.33 に示した本システムのメイン画面の右端に表示したアイコン(icon、図形キー)により、指定することができる。このアイコンの構造は、構造形式のフレーム構造(図-4.14)と対応していて、利用者は、階層的に目的とする構造形式を選択できるようになっている。また、新たな構造形式をシステムに追加する場合は、その構造物に関する情報を、構造形式のフレーム構造の中に追加することにより、システム自体を変更することなしに、対象構造形式を増やすこともできる。

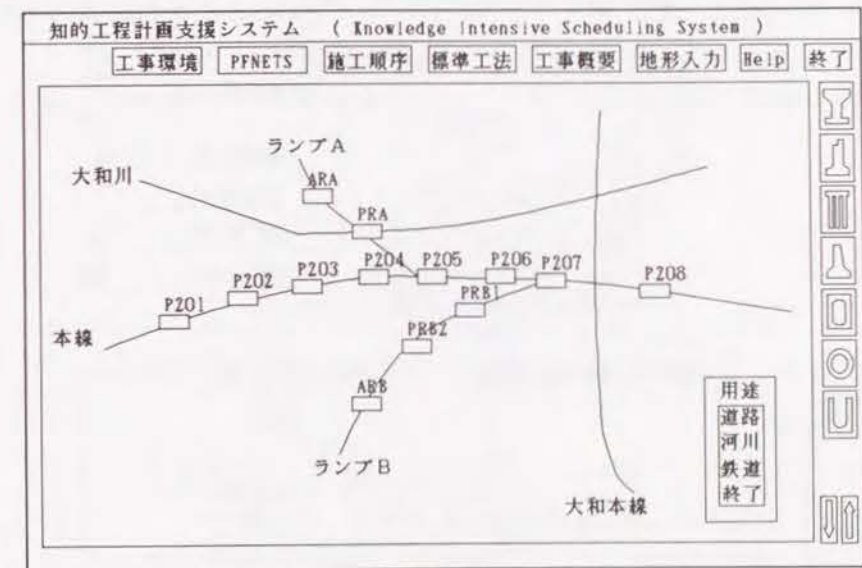


図-4.33 システムのメイン画面

これに対して、計画立案の初期段階などでは、工程計画にそれほど高い精度が要求されない場合もある。そこで、構造物の高さや幅などの主要な寸法を入力すると、他の寸法は既知の寸法値から推定することができるようにした。

利用者は、以上のような方法で、対象となる構造物の形式を指定すると、次に、メイン画面の中央部に想定された工事領域内に図-4.33 に示すように、構造物を配置させる。そして、次には、指定した構造物に対して、構造形状や基礎構造など設計情報や施工環境など情報を図-4.34 のようなサブウィンドウを用いて入力する。このように構造物に関するデータを入力する場合、構造形状の入力に最も労力を要する。何故なら、図-4.35 に一例を示すように、構造物の種類によっては、構造物形状を表す数値データは、細かい部分も含めると非常に多くなるためである。

(3) マンマシン・インターフェイス

本システムの利用方法に関しては、これまでも記述したように、視覚的に理

解しやすいデータ入力方法を開発して、操作性の向上に努めた。例えば、先ほどの図-4.33 に示したメイン画面は、建設対象エリアを表し、この中に道路や鉄道、それに河川など、構造物の位置ぎめや計画立案の制約条件推定に必要となる、現地の様々な情報をグラフ形式で指定することができる。そして、利用者は、このような現地情報の上に、プロジェクトを構成する構造物を、マウスを使用して容易に配置することが可能となった。すなわち、プロジェクト全体の位置関係を視覚的に把握することが容易にできるようになった。

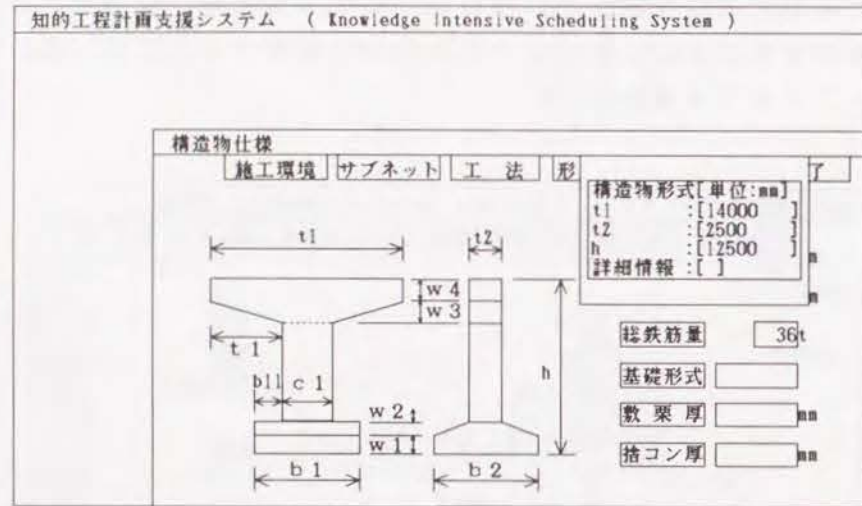


図-4.34 構造物データの入力画面

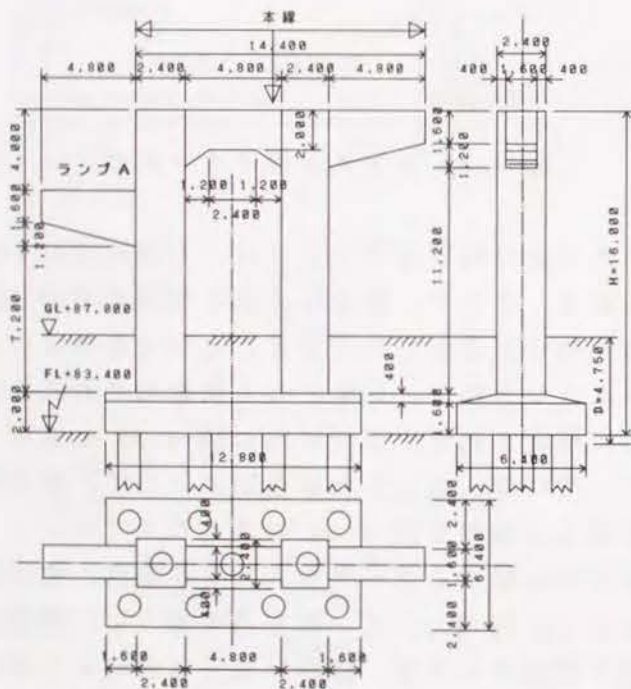


図-4.35 門型橋脚の形状寸法データ

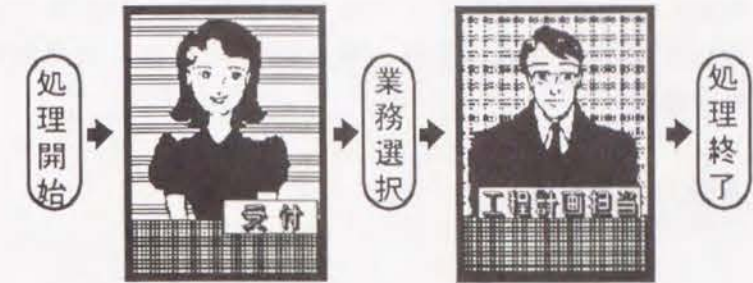


図-4.36 人物象を用いた音声案内

本システムにおいて、マンマシン・インターフェースの向上を目的とした機能の一つに、音声コンサルティングがある。コンピュータ使用に不慣れな利用者にとって、従来のように、ディスプレイによる文字や画像表示だけでは、良好なシステム利用環境とはいえない。そこで、本システムでは、図-4.36 に示した女性と男性が、入力の指示や利用方法の説明などを行うという設定で、音声合成ボードを用いて聴覚にも訴えるマンマシン・インターフェースを実現した。

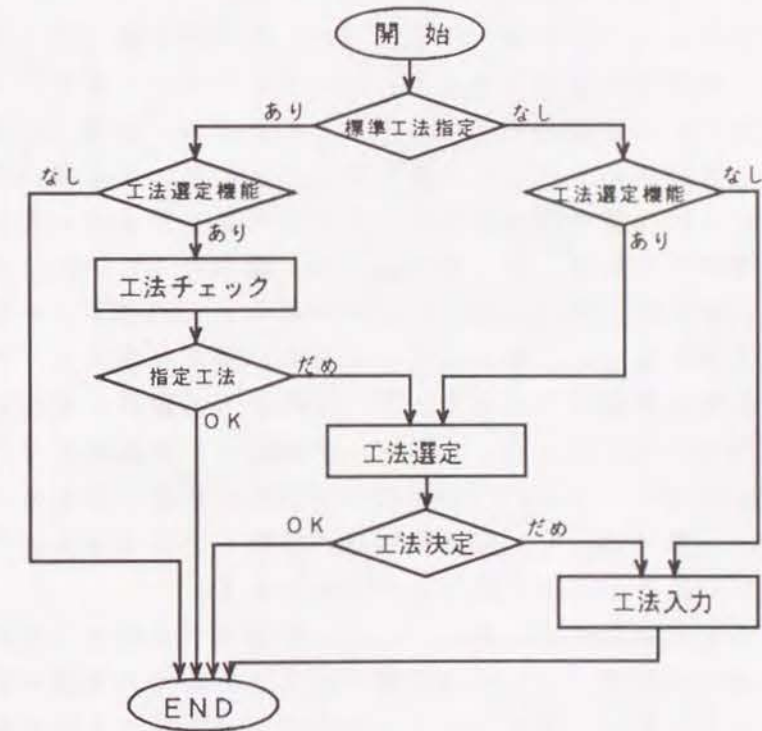


図-4.37 工法の決定手順

(4) 工法選定

山留工などの仮設工法は、図-4.37 に示した手順により、構造物の部位ごとに、システムが選択する。この場合、プロジェクト全体を対象とした標準工法という概念と、構造物ごとの構造物工法という、二つの概念が存在する。最初に、構造物単位で工法が設定されているかどうかを検査され、この指定がない場合は、標

準工法について検査し、この指定がない場合は、工法選定が自動的に行われる。また、どちらかに指定があった場合でも、構造物の置かれた環境条件に基づき、その可否が検査される。

3. 適用実験と問題点の整理

(1) モデル工事による適用結果

本システムの有効性を検証する目的で、丘陵地に計画された高速道路のインターチェンジ工事を想定し、これを事例として本システムの適用実験を行った。工事の種類は高架橋式高速道路のRC下部工事であり、本線部と2カ所のランプ部に、単柱式橋脚11基、門型橋脚3基、逆T型橋台2基、杭基礎92本の鉄筋コンクリート構造物を構築する。図-4.40に当モデル工事の全体図を示す。また、図-4.41には、本システムを適用して作成した工程計画図を示す。なお、前述してあるように、本システムの機能は工程ネットワークの自動生成にあり、このデータを使用して工程計画図を作成するシステムは、本システムと連携して稼働するスケジューリング・システムPF-NETSである。

この工程計画のネットワークは、作業数342、順序関係数429より構成されるが、これらのデータの全てを本システムで生成することはできなかった。これは、本システムに蓄積された知識の不足ということもあるが、準備工など、鉄筋コンクリート構造物と直接係わりのない工事が存在することによる理由の方が大きい。このために、足りない作業や順序関係は、PF-NETSを用いて追加した。

しかし、本システムを利用することによって、従来行っていた、PF-NETSの単独利用と比較して、データ作成のための労力と入力作業は格段に早く、また容易にできるようになった。また、本システムが備えた音声コンサルティング機能により、システム利用に当たって、入力手順や入力項目の選定などにあまり注意を払う必要がなくなったため、入力データの間違いや誤操作などのトラブルが、非常に少なくなった。ただし、利用者の問合せに柔軟に答えることは、現在の技術では、まだ困難であるし、相当な知識の蓄積も必要であることから、非常に限られた範囲での応答しか出来ないのが現状である。

また、作業の所要日数の決定に当たっては、作業量や歩掛り、それに投入資源数を推定する必要があるが、これらの数量決定には、種々の要因の影響を総合的に考慮しなければならない。当然、これらの情報には曖昧なものも多く存在するので、所要日数の推定は非常に難しい問題の一つである。今回開発したシステムでは、以上の点に関しては知識の蓄積が不十分で、それほど精度の高い推定はできなかった。推定モデルの検討も含めて、不足している知識の蓄積が、今後の課題の一つであると考えている。すなわち、工程計画に関する知識は多種多様で、これらを完全に蓄積することは不可能に近いが、構造物の形式の追加や計画化知識の蓄積や洗練化は、過去の工事事例との照合やヒヤリング調査等により、今後とも継続して行っていく予定である。

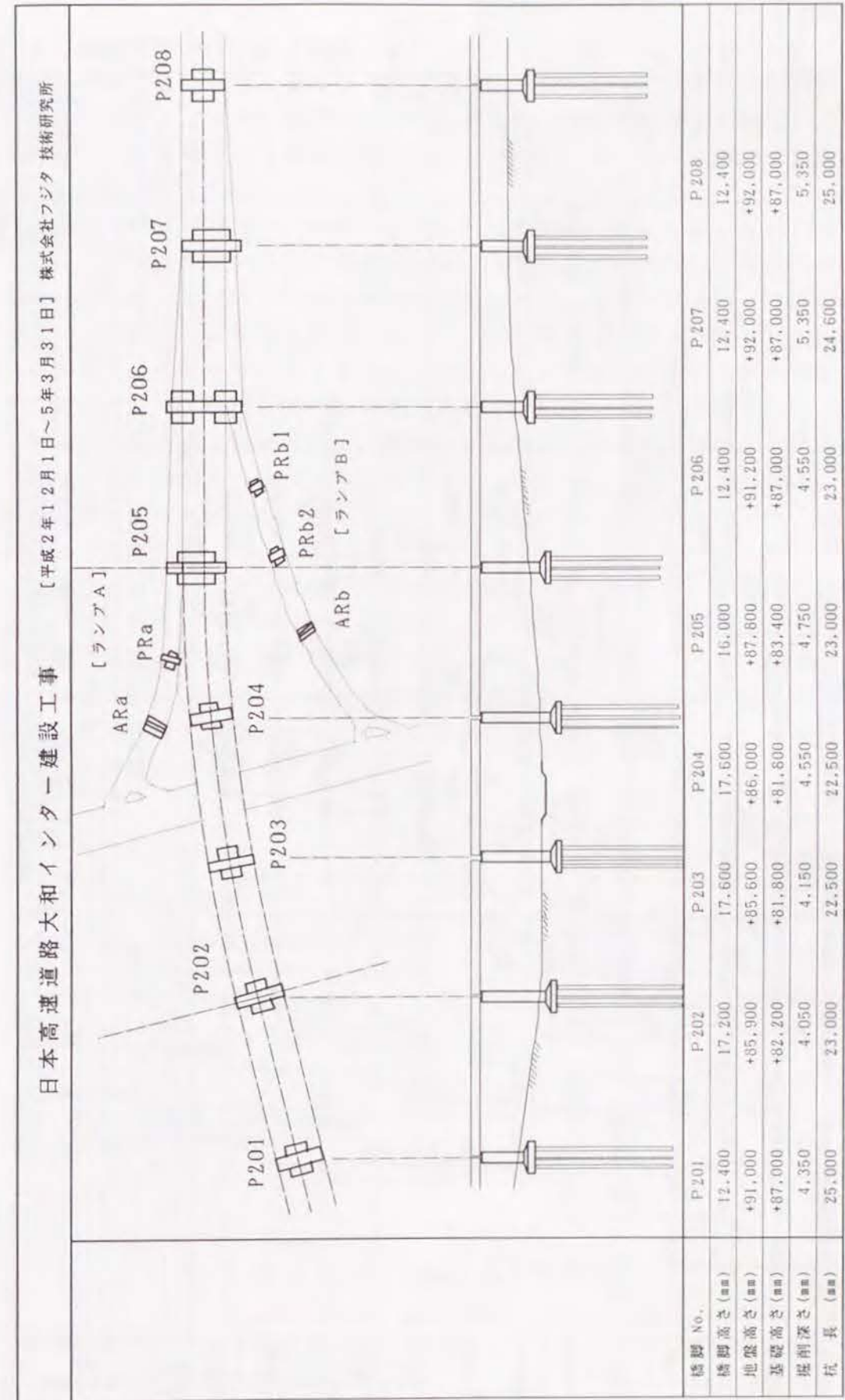


図-4.40 適用モデル工事

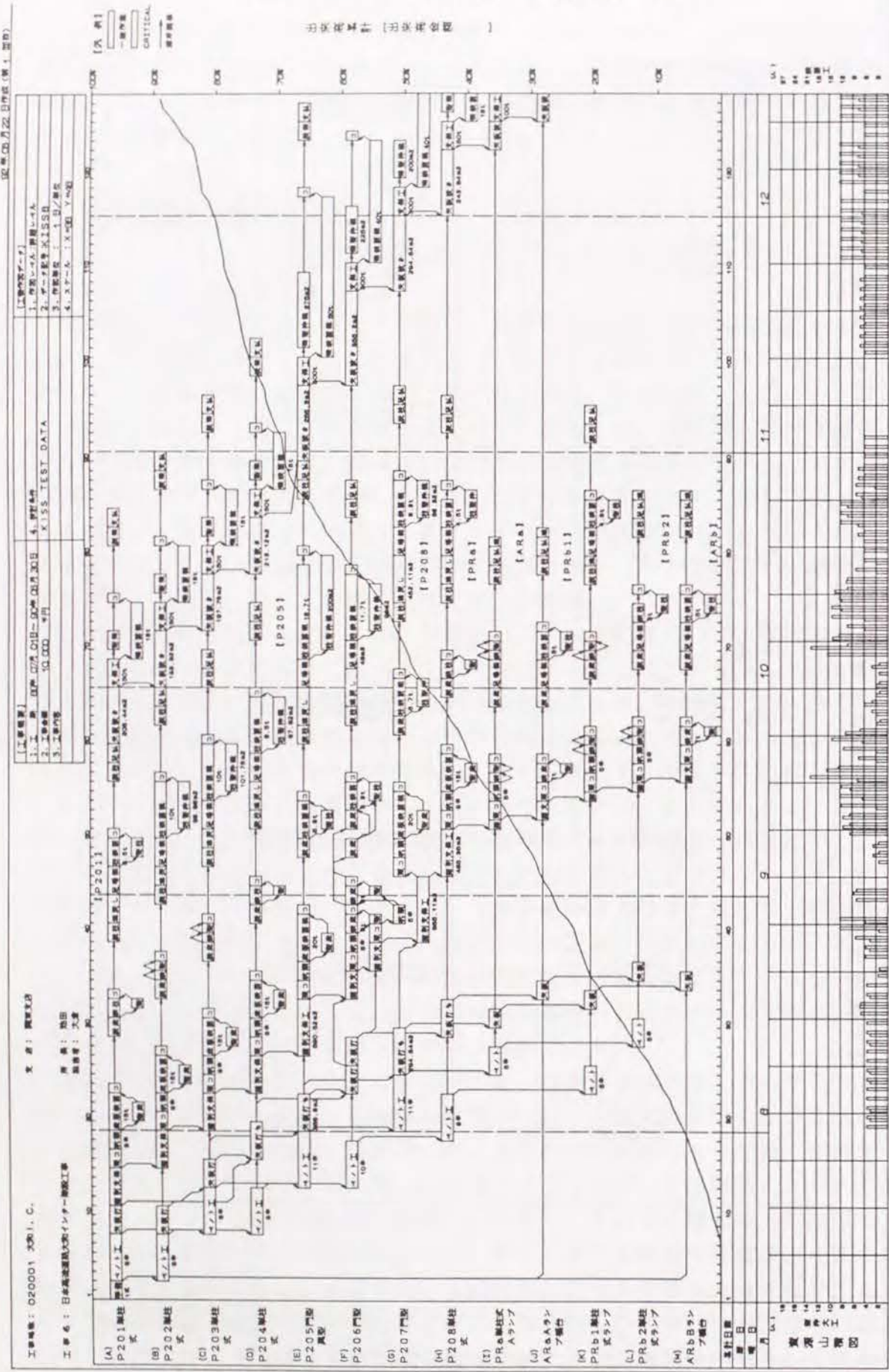


図-4.41 全体工程計画図

(2) 計画知識の体系化と推論方法

建設分野においては、実に様々な技術用語が用いられているが、その使われ方は一様ではなく、一つの言葉が色々な場面で異なった意味で使われることは、希ではない。同様に、一つの概念を表す言葉として、幾つもの言葉が存在する場合も、決して少なくない。

一般に、技術分野では、科学的思考に則り物事を明確化するという目的を持つことから、そこで用いられる技術用語も、日常生活で使用される用語などと比較して、明確に定義づけられているのが普通である。前にも人工知能技術の所で述べたが、このことが大きな理由となって、ある特定の分野に限定した知識ベース・システム、すなわち、エキスパート・システムの実用化が進んだのであるが。

これに対して、建設に関する用語の定義と統一化が、余り進んでいない原因としては、建設技術の歴史が古く、情報交流の少ない時代に、地域や建設対象分野ごとに、用語の使用方法がある程度固まってしまったとも、考えられる。また、建設に従事する技術者が、様々なレベルで非常に多く存在することも、統一化が遅れている原因の一つかも知れない。

理由はともあれ、現実に建設工事計画で使用される専門用語の統一化が進んでいないのは事実で、本システムの開発に当たっては、工法や工種など、工程計画に係わる知識の定義と他の知識との関係を明確にするのに、非常に苦労した。また、工法ならば工法という概念を持つ知識群の中に存在する知識間にも、包含関係や選択関係などが存在することから、階層的構造を有するフレーム構造として、これらの知識の構造化をモデル化した。

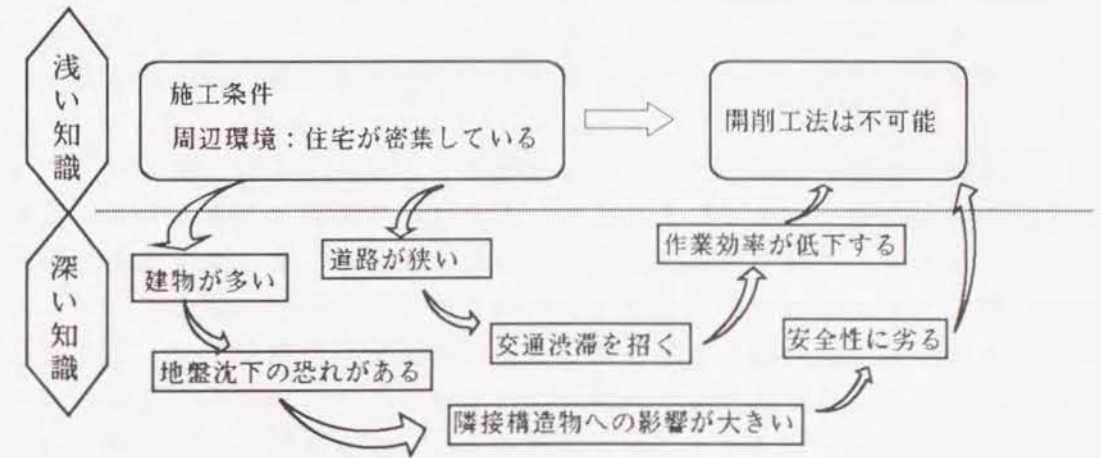


図-4.42 深い知識と浅い知識の例

また、本システムの工法選定においては、システムが行う質問の冗長性や選定結果の間違いなどの問題が認識されたが、これらの問題は、対象問題の構造をより深く考察し、表面的に認識された知識ではなく、より深い因果関係や制約関係を考慮にいたした知識を適用する必要がある。例えば、図-4.42のように、「周辺

環境が“住宅が密集している”場合は開削工法は不可能」というルールが、本システムの知識ベース内に蓄積されているが、この知識の提供者は“住宅が密集している”からには“道路は狭いだろう”と考え、“開削工法は不可能”という結論を下したと推定される。このために、「住宅は密集しているが、たまたま道路は狭くはなかった」場合に、このルールを適用すると間違っただけの答えを出すことになる。

すなわち、専門家の持つ経験的知識をルール化する場合には、実際には色々な因果関係などがその背景にあったとしても、登録されるルールはそれらを簡略化した表面的な知識に置き換えられる場合が多い。そして、このために、このような問題が顕在化してきていると考えられる。しかし、この解決策として、より深い知識を適用するためには、専門分野以外の多量の知識を登録することが必要条件となるために、それほど簡単に解決できるとは考えられない。今後の課題の一つと考える。

第6節 結 言

本章では、建設プロジェクトにおける工程計画の中でも、計画モデルを生成するためのプランニング部分に着目し、これをシステム化するという観点から、種々の課題に関して論じた。すなわち、従来からの研究開発の状況と問題点、計画生成問題の構造と特徴、そこから考え出された人工知能技術の必要性、また、人工知能技術を用いた計画生成方法とこの考え方を適用して開発した知識ベース・システムの内容、および、運用実験の結果得られた知見など、プランニングに関する多くの課題に関して、詳細に論じた。

第2節では、人間の行うプランニング作業、すなわち、知的プランニングに関して、その構成やメカニズムを人工知能システムという視点から論じ、計画生成のための新たな戦略を提案した。まず始めに、プランニング・システムの構成に関して検討を加え、工程計画のためのネットワーク・モデル生成のメカニズムと、その過程に①作業生成問題、②作業見積問題、③順序関係の生成問題、④工法・資源選定問題、などの課題が存在することを明かした。そして、これらの課題に対応する方法として、人工知能技術の必要性を示した。また、これらの課題の中でも、プランニングの要となる①の作業生成問題に関して、人工知能分野で進められてきた研究状況と、これを工程計画生成問題へ適用する場合の問題点を明かした。すなわち、これまで人工知能分野における研究は、積み木の積み替え作業やロボットの移動計画のように、非常に限定された世界を対象としてきたことから、ここで開発された方法を現実世界の問題に単純に適用することは難しい。そこで、人工知能研究での方法（これを本研究では手段一目標戦略と呼ぶ）を、従来から人間が行ってきた方法（これを本研究ではWBS戦略と呼ぶ）に融合させた、より現実的な問題解決の方法を考案し、これをハイブリッド戦略と名付けた。

また、第3節では、ハイブリッド戦略に基づいた計画生成方法に関して、計画生成メカニズムをより具体的に分析し、これにオブジェクト指向という、システム開発技法を適用して、合理的な方法を考案した。すなわち、まず始めに、意味ネットワークを用いた生成過程の分析から、計画生成のためには、①構造物生成、②部位生成、③工法選択、④工種生成、⑤資源選定、⑥作業生成の順で、計画が具体化されることを示した。そして、この過程で必要となる、知識の蓄積方法としては、階層構造を有するフレームを適用することが有効であることを示し、①構造形式、②部位、③工法、④工種、⑤資源について、具体的な知識構造とその内容を示した。また、これらのフレーム型知識にプロダクション・ルール型の知識を組み合わせることで、効率的に工程ネットワークを生成する方法に関して、最後に具体的に述べた。ここでのシステム化の方法では、フレームとインスタンスの関係、階層的もしくはラチス構造などのフレーム間関係、それに、付加手続きによる手続きやルールセットの制御など、一般にオブジェクト指向と呼ばれる方法を効果的に取り入れた。そこで、この方法をオブジェクト指向によるネ

ネットワーク生成方法と名付けた。

また、第4節では、第3節で示したネットワーク生成方法に基づいて、具体的に開発した工程計画エキスパート・システム「知的工程計画生成システム (P F - P L A N)」に関して、システムの概要、機能と特徴、それに、適用実験とその過程で得られた数々の知見に関して、考察を加えた。まず、本システムの概要としては、このシステムが作業所で利用されることが多いと考え、パソコンを利用できる構成とした。また、マンマシン・インターフェースの向上が重要であると考え、C A D的なデータ入力法や、音声による操作案内などの機能に重きを置いた。また、本システムの有効性を検査する目的で、高架橋高速道路のインターチェンジ部分を想定した、モデル工事を作成し、システムの適用実験を行った。この結果、スケジューリング・システムでデータ入力する場合と比較して、必要となるデータが百パーセント生成できたわけではないが、ネットワークデータの作成とその入力作業が非常に軽減されること、また、生成結果も妥当であることが解った。しかし、この逆に、問題点として明確になったことは、知識の蓄積量がまだまだ少ないこと、浅い知識ばかりではなく、深い知識の蓄積と利用が必要であること、曖昧データの処理が不十分であることなどが理解できた。

以上のように、本章では、人工知能技術を適用した工程計画生成システムについて、計画生成方法としてはハイブリッド戦略を用い、システム開発技法としてはオブジェクト指向による方法が有効であることを示し、この方法を適用して開発したエキスパート・システムの概要と、運用実験の結果を示した。これらの結果をまとめると、ここで提案した方法は、非常に現実的で有効であること、しかし、仮設工事の生成に関しては、まだ空間認識とその中での計画の評価方法が不十分であること、計画の精度を上げるためには、所要日数の推定方法など、まだ多くの課題が残されていることなどが理解された。

【 参 考 文 献 】

- 1)吉川和広、春名攻、池田将明：資源制約を考慮した工程計画システム化の研究、土木学会第40回年次学術講演会、1985
- 2)池田将明：統計的手法による歩掛りデータ利用の研究(その1)、第2回土木工事のマネジメント問題に関する研究討論会、土木学会、1984
- 3)池田将明：統計的手法による歩掛りデータ利用の研究(その3)、第4回土木工事のマネジメント問題に関する研究討論会、土木学会、1987
- 4)Hendrickson, C et al. : Hierarchical Rule-Based Activity Duration Estimation, The Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, pp. 288~301, 1986
- 5)川崎健次、春名 攻、田坂隆一郎、笹嶋 博：ネットワークモデルによる施工計画システムに関する研究、土木学会論文報告集第204号、pp. 95~105、1972
- 6)池田将明、吉川和広、春名攻：パーソナル・コンピュータを用いた工程管理システムの開発に関する方法論的研究、土木学会論文集 No. 391/VI-8、pp. 179~187、1988
- 7)土屋俊、他：A I事典、U P I、p. 316~317、1988
- 8)Levitt, R.E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 114, No. 3, ASCE, 1988
- 9)Zozaya-gorostiza, C., Hendricson, C and Rehak, D.R. : Knowledge-Based Process Planning for Construction and Manufacturing, Academic Press, Inc.、pp. 20~22、1989
- 10)Tate, A. : Generating Project Network、Proceeding of 5th IJCAI、1977
- 11)Levitt, R.E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 114, No. 3, 1988
- 12)Nigel Ford : How Machines Think, 中村克彦著：100万人の人工知能入門、オーム社、pp. 137~146、1988
- 13)Levitt, R.E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol. 114, No. 3, 1988
- 14)Kartam, N.A. and Levitt, R.E. : Intelligent Planning of Construction Projects, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 4, No. 2, pp. 155~176、1990
- 15)Hendrickson, C. et al. : Expert System for Construction Planning, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 1, No. 4, 1987
- 16)Zozaya-gorostiza, C., Hendricson, C and Rehak, D.R. : Knowledge-Based Process Planning for Construction and Manufacturing, Academic Press, Inc.、1989

- 17) Navinchandra, D., et al. : GHOST : Project Network Generator, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol.2, No.3, 1988
- 18) Zozaya-gorostiza, C., Hendricson, C and Rehak, D.R. : Knowledge-Based Process Planning for Construction and Manufacturing, Academic Press, Inc., pp.53~54, 1989
- 19) 嘉納成男 : 工程計画におけるエキスパート・システム、計画の推論方法とそのアルゴリズム、第4回建築生産と管理技術シンポジウム、日本建築学会、pp.235~240、1988
- 20) 嘉納成男 : 工事計画と管理のためのブレークダウン・ストラクチャーの体系と日程計画への適用、第1回建設ロボットシンポジウム論文集、1990
- 21) プロジェクトマネジメント用語研究会編 : エンジニアリングプロジェクト・マネジメント用語事典、重化学工業通信社、1986
- 22) 嘉納成男 : 工程計画における多段階計画法、第1回建築生産と管理技術シンポジウム、建築学会、pp.81~84、1985
- 23) 折田利昭 : 工程計画におけるWBSの活用、第3回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、土木学会、pp.161~168、1985
- 24) 折田利昭 : 工程計画におけるWBSの活用、第3回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、土木学会、pp.161~168、1985
- 25) 春名 攻、田坂隆一郎 : 地下鉄開削工事における掘削工程のシステムシミュレーション、土木学会論文報告集、第293号、pp.91~99、1980
- 26) 知的コンピュータシステム事典、pp.339~340、技秀堂、1989
- 27) 佐野可寸志、島崎敏一 : AI手法を用いた工程計画支援システム、第7回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、1989

第5章

スケジューリング・システムに関する研究

第1節 緒言	151
第2節 スケジューリング・システムの構成	153
1. 工程計画モデルの選定	
2. 発見的スケジューリング法	
3. スケジューリングのための問題整理	
4. 知的スケジューリング・システムの構成	
第3節 スケジューリング・システムの開発	170
1. システムの概要	
2. 工程ネットワーク・モデルの改良	
3. システムの特徴	
第4節 実工事での運用実験とその考察	185
1. システムの改良と適用経過	
2. 下水管敷設工事における適用例	
3. 建設工事におけるネットワーク手法適用の課題	
第5節 結論	196
参考文献	198

第1節 緒言

前章では、工程計画におけるプランニング(planning)部分に関して、その問題構造の特徴と人工知能技術の適用方法、それに、具体的なシステム開発の方法などについて述べてきた。本章では、工程計画の後半部分を構成するスケジューリング(scheduling)に関して、工程計画モデルの分類と評価、それに、ヒューリスティック計画法と人工知能技術の適用方法などを論じ、最後に、従来から行ってきたスケジューリング・システム開発の内容と、実工事での適用事例に基づく種々の問題点などについて、考察を加えることとする。

プランニングとスケジューリングの位置づけは、第3章で既に定義しているように、工程計画モデルを作成する段階をプランニング、そのモデルを用いて最適な工程計画を作成する段階をスケジューリングと考える。すなわち、工程計画モデルとは、建設プロジェクトを遂行するための仕事(task)の構成と順序を表すもので、スケジューリング段階では、プランニング段階で作成された計画モデルを、与えられた制約条件の範囲内で、工期もしくは原価という評価尺度に基づき最適化を図りながら、計画モデルに含まれる仕事を時間軸上に配置する段階と考えられる。

以上のような役割を担うスケジューリングの方法としては、古くは、その簡便さからバーチャートや斜線式工程表などが利用されてきた。しかし、スケジューリング問題は、前章のプランニングと比較すると、問題の範囲が限られ、また、その構造も比較的複雑ではない。そして、このために、問題の定式化をある程度容易に行うことができたことから、オペレーションズ・リサーチ(Operations Research)の分野では、古くから研究の対象とされ、これまでに多くの計画モデルが提案されてきた。

この代表的な例が、PERT(Program Evaluation and Review Technique)とCPM(Critical Path Method)である。この両手法は、以後、各種の改良が加えられて今日に至るが、ここで考え出された、建設プロジェクトの生産工程をネットワークで表現する方法、すなわちネットワーク・モデルは、これ以後の計画モデル開発において、基礎的なプロジェクト表現方法となった。例えば、資源やコストを評価要素に加えたPERT/manpowerやPERT/cost、それに、所要日数を確率分布として捉える確率PERT、作業関係に確率表現を加えたGERTなど、ネットワークをベースとした計画モデルが次々に開発された。

そこで、本章では、第2節において、工事マネジメントにおける工程計画問題に、どのような計画モデルが適しているのかを検討する目的で、これまでに開発されてきた様々な計画モデルを分類し整理する。ただし、前章の研究内容を見れば明らかなかのように、本研究では、ネットワーク・モデルの適用を前提としていることから、ネットワーク・モデルをより詳細に分類し、本研究が対象とする工程計画問題に、より適用性の優れたモデルの検討を行う。そして、ここで選択されたモデルを用いて、具体的にどのように工程計画を作成するのかについて、

計画立案の前提となる諸条件とともに明らかにする。特にここでは、技術者の経験的知識を活用した計画立案方法が有効であると考えられることから、人工知能技術を取り入れたヒューリスティックな問題解決法を提案する。

しかし、以上のような知的システムの開発とは別に、従来からのスケジューリング・システムにおいても、これを実際のプロジェクトに合理的に適用するには、いまだ多くの問題点があることから、第3節では、このような問題点を明らかにする目的で開発した工程管理支援システムPF-NETS (Planning Forecasting - Network System) に関して、その開発段階で行った計画方法の改善と、システムの機能および特徴について述べる。このシステムは、プレシーデンス・ネットワーク法における順序関係の一部を改善し、さらに、プロジェクト・グラフによる視覚的データ編集機能を備え、一般の作業所でも手軽に利用できるように、パーソナル・コンピュータを用いて開発した。

また、第4節では、以上のようなスケジューリング・システムを実際のプロジェクトに適用してきた結果に関して、全般的な経過とともに、一つの実例を取り上げて詳しく紹介する。そして、この過程で判明したシステム導入の効果と問題点について、分類・整理し、第2節で示した知的システムの開発との関係も踏まえて、若干の考察を加える。

第2節 スケジューリング・システムの構成

1. 工程計画モデルの選定

ここでは、これまでに開発されてきた工程計画モデルを分類し、本研究が対象としているネットワーク・モデルを中心に、どのような計画モデルが工事マネジメントの工程計画に適しているのかについて考察を加える。なお、ここで述べる計画モデルとは、対象問題のシステム構造を表す概念を意味し、この概念を対象に具体的に示された計画手順を計画手法と呼んで区別している¹⁾。

(1) 工程計画モデルの分類

建設分野では、一般製造業などと同様に、工程計画を対象として、これまでに多くの計画モデルが提案されてきている。この過程については、第2章第1節において、その概略を述べたが、ここでは、工事マネジメントのための工程計画遂行のためには、どのような計画モデルの利用が適当であるか、第2章で示した内容を再度検討することとした。そして、この結果に基づき、工程計画法を図-5.1のように分類した。ただし、本論文では、最も工事マネジメントに適用しやすいという理由から、ネットワーク・モデルの適用を前提に研究を進めている関係上、この図では、この部分をより詳細に分類している。

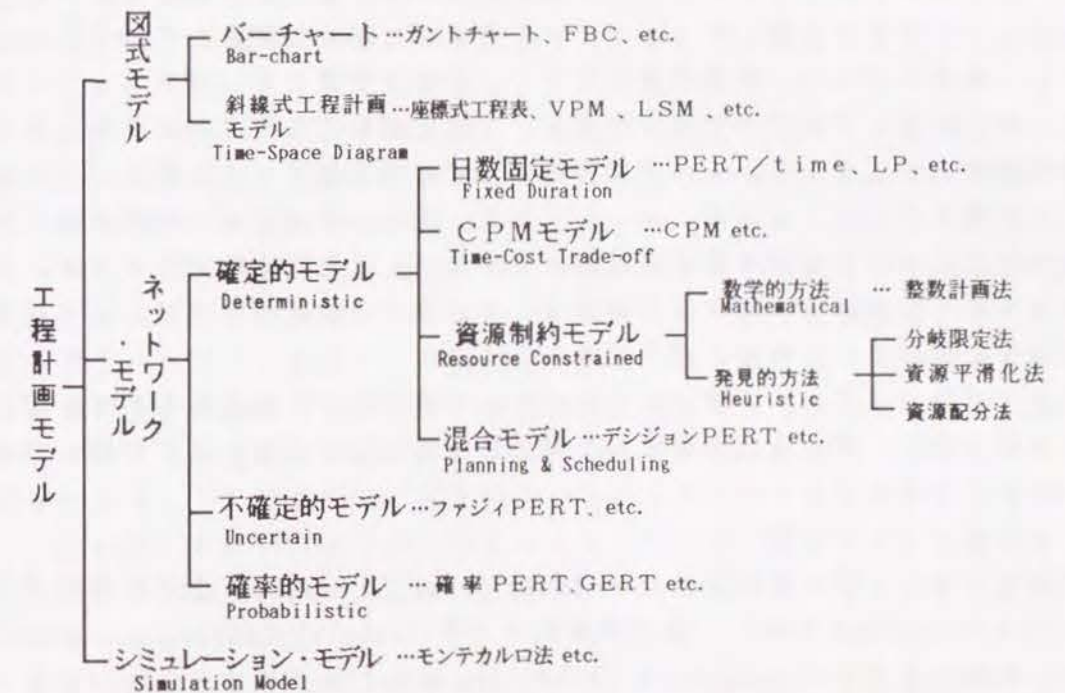


図-5.1 工程計画モデルの分類

この図のように、これまでに提案されてきた計画モデルは、①図式モデル、②ネットワーク・モデル、③シミュレーション・モデルに大きく分類することができる。この図式モデルとは、周知のように、工程計画を図形として表現するモデルで、バーチャートと斜線式工程表に分類され、FBC²⁾、VPM³⁾、LSM⁴⁾などの手法が提案されている。また、工事の構成と作業順序をシミュレーション・モデルで表現し、モンテカルロ法で工程計画を立案する方法も提案されている⁵⁾。しかし、これまでに述べたように、工事マネジメントのための計画モデルとしては、ネットワーク・モデルの適用が妥当と考えられることから、ここでは、ネットワーク・モデルについて、さらに検討を進めることとする。

ただし、計画情報の入力や、計画結果の表現方法として図式モデルを適用することは、良好なマンマシン・インターフェイスという観点からみて重要である。このために、利用者からみるとバーチャートや斜線式工程表であっても、作業間の順序関係を内部に保持し、システム内部ではネットワーク・モデルとして計画データを処理するシステムは、今後とも重要であると考えられる。

本研究が対象とするネットワーク・モデルは、作業の所要日数や順序関係などの情報の取り扱い方法により、①確定的モデル(deterministic models)、②不確定モデル(uncertainty models)、それに、③確率的モデル(probabilistic models)に分類することができる。そして、確率モデルを用いた手法としては、所要日数を確率分布で表現することによって、全体工期の確率分布を得ようとする確率PERTや、アクティビティの成功する確率や、失敗したときのフィードバック・ルーチンを表現できるGERTなどの手法が存在する。また、不確定モデルとしては、ファジ理論を適用したファジPERTなどが、提案されている⁶⁾。

しかし、確率モデルは、実施経験が乏しく、不確定要素の多いプロジェクトを対象に、その成功の可能性や問題点の発見、全体工期などを確率的に評価しようとする手法であることから、その使用目的は自ずと限られてくる。特に、これまで多くの実績を持つような建設プロジェクトで、複数の管理要素を同時に扱う工事マネジメントに適用するには向いていない。また、不確定モデルは、建設生産システムにおける不確実性の存在や、その適用の位置づけなど、まだ基礎的な理論を研究している段階と考えられる。

以上述べてきたように、工事マネジメントへの適用という観点からして、現在、最も実用性の高いと考えられる確定的モデルに注目して、以後、より詳細に計画モデルの検討を進めることとする。

(2) 確定的モデルの分類

確定的モデルは、①日数固定モデル(Fixed Duration model)、②CPMモデル(Time-Cost Trade-Off model)、③資源制約モデル(Resource Constrained model)、それに、④混合モデル(Planning & Scheduling model)に分類することができる。

ここで、日数固定モデルとは、各アクティビティの所要日数を確定値として取り扱うモデルで、PERT/timeや線形計画法による方法が開発されている。PERTは、本来、ミサイル開発という未知のプロジェクトを対象に開発された手法であることから、プロジェクトがいつ完了するのかが、最大の関心事であった。

このために、所要日数を三点見積法で算定する方法が、開発当初はとられてきたが、現在では、よほど未知のプロジェクトでない限りは、所要日数を確定値として計算するのが一般的である⁷⁾。また、PERT/timeも線形計画法も、プロジェクト遂行に必要な資源やコストを考慮していないことから、限られた資源の中で遂行される建設工事では、これらの方法だけで工事マネジメントを遂行することは難しい。

また、CPMモデルとは、開発初期段階におけるCPMで用いられた考え方であり、各アクティビティにおけるコストと所要時間の関係を表した情報に基づき、プロジェクト全体の工期短縮をコスト面から評価する計画モデルである。CPMモデルの代表的な手法は、各アクティビティの所要時間と所要コストとの関係を線形関数で表現する方法で、プロジェクト全体の工期とそのために必要なコストとの関係を線形計画法により求めることができる。しかし、これらの方法は、計画要素として、時間とコストの関係だけに着目していて、主に計画段階での工期短縮が主要な目的となっていることから、投入資源との制約関係が強く、かつ進捗管理での利用が、重要な目的の一つである工事マネジメントでは、適用できる場合が非常に限られるモデルと考えられる。

また、資源制約モデルとは、工程計画の過程の中で、各作業が必要とする資源量と調達可能量を考慮するモデルで、工期ばかりではなく、コストや資源が大きな計画要因となる工事マネジメントでは、非常に有効な計画モデルといえる。つまり、建設プロジェクトでは、使用できる資源種類と量には限りがある。また、資源の投入量を頻りに変化させる計画は、自ずとコストの増大を招くこととなるために、作業の種類や順番ばかりではなく、そこで必要となる資源制約を考慮する必要性が生じる。

このような問題を解決する方法としては、問題を定式化し、制約条件下で最適な資源の投入順序を整数計画法により求めることが考えられるが、建設プロジェクトを構成する作業の数は非常に多く、そこで用いられる資源の種類も多様であるために、未だ現実問題に適用できる解法が発見されていないのが現状である⁸⁾。

しかし、経験ある技術者は、より良い解を求めて試行錯誤しながら、同様の問題を解くことができるという事実がある。このような考え方の根幹には、数学的な最適解を求めるのではなくて、現実問題に対処できるような妥当的な解を経験的に発見しようとする意図が存在する。つまり、この方法は、実務経験で養った知識を適用して、発見的に工程計画を立案しようとする考え方で、工事マネジメントには適した計画立案方法と考えられる。そこで、ここでは、発見的スケジューリング法(Heuristic Scheduling Method)と呼び、この後で、さらに詳しく検討することとする。

また、混合モデルとは、プランニングとスケジューリングの過程を、同じ1つのネットワークの中で表現するモデルで、デシジョンCPM(Decision CPM)が有名である。デシジョンCPMでは、ネットワークの各ノードが、所要日数と所要コストを有する仕事を表しているが、これらの中には、代替案の選択を表す特殊なノード(decision node)が存在する。そして、このネットワークのクリティカ

ルパスを算出し、トータルコストが最小になるように、クリティカルパス上のデシジョン・ノードの選択を繰り返すことにより、最適なネットワークを決定することができる⁹⁾。

以上のように、デシジョンCPMでは、プランニングにおける意思決定過程をネットワークの中に織り込み、プランニングとスケジューリングを同時に行おうとするモデルであるが、建設プロジェクトのように、複雑な意思決定を必要とする問題に、このような方法を適用することは、現実的ではない。

2. 発見的スケジューリング法

(1) 発見的方法の概要

多くの制約条件下で進められる建設生産システムの工程計画では、数ある管理要素の中でも、労務や施工機械などの投入資源に関する制約条件を、計画の中に如何に反映させるのかが、重要な課題である。何故ならば、全体コストの中で、本体材料費などの固定費を除く変動部分に、資源利用の効率性が影響する比率は非常に高いと考えられる。このために、効率的に資源を利用することは、工程計画立案に当たっての非常に重要な要素となっている。そして、効率的な資源利用のための計画立案方法として、先ほども述べたように、資源制約モデルを適用した発見的スケジューリング方法（以後、発見的計画法と略す）が適している。

すなわち、ここで対象となる問題は、種々の制約条件下で作業に資源を割り当てる問題であるが、見方を変えると、有限の作業と有限の資源の組合せ問題と同じであり、その解決過程は木(tree)と呼ばれる状態空間を探索することに帰着する。そして、この探索方法としては、縦型探索(depth-first search)と横型探索(breadth-first search)と呼ばれる、いわゆる盲目的な探索方法があるが、現実には存在する問題は探索空間が膨大であることから、人間は経験則(heuristics)を利用することにより、効率的に問題解決を図っている¹⁰⁾。そして、このような考え方を適用したスケジューリング方法を、ここでは発見的方法と呼ぶこととした。

このような発見的計画法は、作業間の順序関係設定問題として、既に1960年代初期から研究が進められてきた。この中でも、最初の試みとしては、分岐限定法(branch & bound algorithm)を適用した研究がある。第3章でも述べたように、春名は、主に資源の転用関係を表す作業間の管理的順序関係の生成に、この方法の適用が可能であることを示した¹¹⁾。しかし、建設工事の計画問題は、必要となる資源の種類も多く、各々の計画立案における重要度や資源の投入方法も異なることから、探索空間は膨大となるにもかかわらず、分岐限定法では探索空間を限定する知識として、下限界値だけしか用いていない¹²⁾ことから、実際の工事に適用することには限界がある。

このために、実際の建設プロジェクトに適用できるような、より現実的な発見

的計画法が、研究されるようになった^{13) 14)}。しかし、作業への資源の投入方法を考えてみても、現実の計画では多様な方法が取られていること、また、計画に係わる資源制約の強弱に関しても、対象プロジェクトが、都市部で実施されるのか、山間僻地で実施されるのかなど、建設現場の置かれた環境によって、自ずと異なってくることから、効果的な発見的計画法といっても、必然的に多くのバリエーションが存在する。例えば、デイビス(Davis)とパターソン(Patterson)は、8つの異なる発見的計画法を83のプロジェクトに適用し、その効果を評価したが、全てのプロジェクトに効果が認められた方法はなかったと述べている¹⁵⁾。

以上のように、資源の投入方法をどのように考えるのか、また、資源の限界を厳しく捉えるのかどうかなど、作業とそこで投入される資源との関係や、全体的な資源調達制約に対する考え方など、いくつかの要因によって、スケジューリングを行う際の計画化戦略が異なってくる。また逆に、プロジェクトのタイプごとに適用しやすい計画方法を考えることも必要となってくる。そして、このような理由から、これまでに何種類もの発見的方法が考案されてきた。

(2) 資源平滑化法と資源配分法

このような状況の中で、ウェスト(J. D. Wiest)は、これまでに提案されてきた種々の発見的計画法を、①資源平滑化法(Resource Leveling Programs)と②資源配分法(Resource Allocation Programs)の二つに大きく分類している¹⁶⁾。この分類は、資源調達制約と工期制約との関係に注目した方法であるが、このために両者の計画立案の方法(計画化戦略)は、後で述べるように非常に異なっている。

資源平滑化法とは、日程計算による時刻を基準として作成した資源山積を出発点として、この資源のピークを順次崩していく(平滑化する)スケジューリング方法で、我が国では山崩し法(resource leveling method)と呼ばれる場合が多い¹⁷⁾。この方法の具体的な手順には、いくつかのバリエーションがあるが、その基本となる考え方は、日々の資源必要量と供給限度量との差の二乗和に着目し、これを最小にするように、作業の開始時期をずらすという考え方である。例えば、まず最初に各作業の開始日を最早時刻に設定し、余裕(slack)の多い作業から、順次、作業開始日をずらして、先ほどの二乗和が最も少なくなる計画を探し出す方法がある。

また、資源配分法とは、最初に資源の山積があるのではなく、資源の限度量や作業の重要度を考慮しながら、各作業を時間軸に沿って割り付けていく計画方法である。この方法の具体的な手順には、やはりいくつかのバリエーションが存在するが、その基本的な考え方は、技術的順序関係やマイルストーンなどから着手可能な作業を洗い出し、これに作業の重要度から順序づけを行い、設定された日々の資源の限度量を越えない範囲で、最も重要な作業から順に資源を割り付けていく方法である。

なお、この他に類似な分類方法として、工期を固定しながら資源使用の山を崩すフィックスド・タイム・アロケーション(fixed time allocation)と、逆に、資源の最大限度量を固定して資源配分を行うフィックスド・リソース・アロケーション(fixed resource allocation)という分類もある¹⁸⁾が、資源と工期のどち

らを優先するにしても、片方を固定して作業日を決定する方法では現実問題に適用できる解を得ることが難しいと考えられるので、本研究では、ウェストの分類方法に従い、以後の検討を進めることとする。

(3) スケジューリング戦略

以上のように、資源平滑化法と資源配分法では、互いに異なる計画化戦略（スケジューリング戦略）を用いている。この両者の特徴を比較すると、資源平滑化法は日程計算による資源山積という初期解が設定されているので、資源制約がそれほど厳しくないプロジェクトに対しては、妥当な解を早く決定することができる。これに対して資源配分法は、資源制約と技術的な作業順序制約を同時に考慮しながら、作業の開始日と終了日を決める方法であることから、制約条件が厳しいプロジェクトに対しても、対応しやすい計画化戦略と考えられる。

つまり、このどちらの戦略を用いて計画を作成するのかは、対象となるプロジェクトの特性に大きく依存する。このために、図-5.2に示した計画要因を変化させながら、この両戦略の具体的な方法をいくつか用意し、プロジェクト発生するたびに、その特性を判断して最適な方法を適用する必要がある。ただし、この両者を比較した場合、例えば一つの作業に投入する資源量を日ごとに変化させてみたり、作業を分割してみるなど、各種の方法を比較的自由に考案できることから、資源配分法のほうが適用範囲の広い戦略と考えられる。そこで、ここでは、この資源配分法の範疇に入るシステムとして、代表的な方法を二つ取り上げてみる。

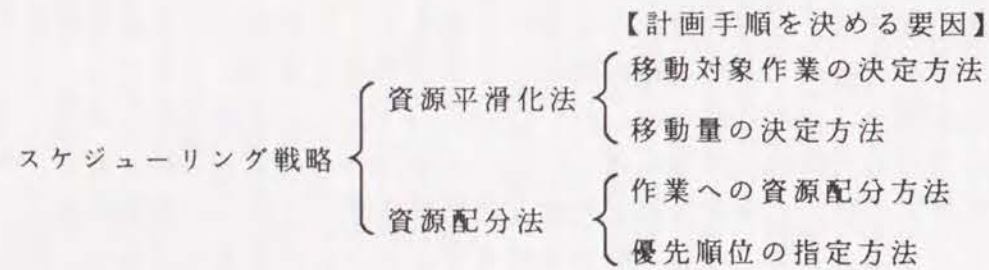


図-5.2 スケジューリング戦略と計画手順を決める要因の例

その一つは、ウェストらにより開発されたSPAR-1 (Scheduling Program for Allocation Resources)¹⁰⁾がある。このシステムは、図-5.3のフローチャートに示したように、いくつかの特徴的な方法を取り入れている。例えば、アクティビティの必要資源量は、最大値、標準値、最小値で表現するとか、クリティカル経路上のアクティビティ（これを以後クリティカル・アクティビティと呼ぶ）には、可能な場合には、最大資源量を配分して工期の短縮を図るとか、もし、クリティカル・アクティビティで使用する資源が足りない場合は、既に配分された非クリティカル・アクティビティの資源を転用するなどの考え方を考案している。しかし、複数の資源を必要とするアクティビティを、単に、資源ごとに分割して処理したり、クリティカル・アクティビティの資源配分に失敗した場合、単純に工期を遅らせてしまうなど、いくつかの問題点が存在する。

これに対して、資源投入量を変数とし、資源の投入方法も資源の特性を考慮し

て行う計画方法を山本が提案している²⁰⁾。この方法では、着手可能なアクティビティの間に、いくつかの評価基準に基づき優先順位を設定し、次に、各アクティビティの特性を考慮して、資源配分方法を決定し、優先順位の高いアクティビティから、順次、資源を割り付ける。そして、クリティカル・アクティビティで使用する資源が足りない場合は、既に配分された非クリティカル・アクティビティの資源を転用するなど、SPAR-1と近い方法を提案している。しかも、山本の方法では、アクティビティが複数の資源を必要とする場合でも、それらを同時に評価して資源配分を行っていることと、アクティビティの特性に応じて資源の配分率を変化させるなど、SPAR-1よりは適用性の高い方法と考えられる。

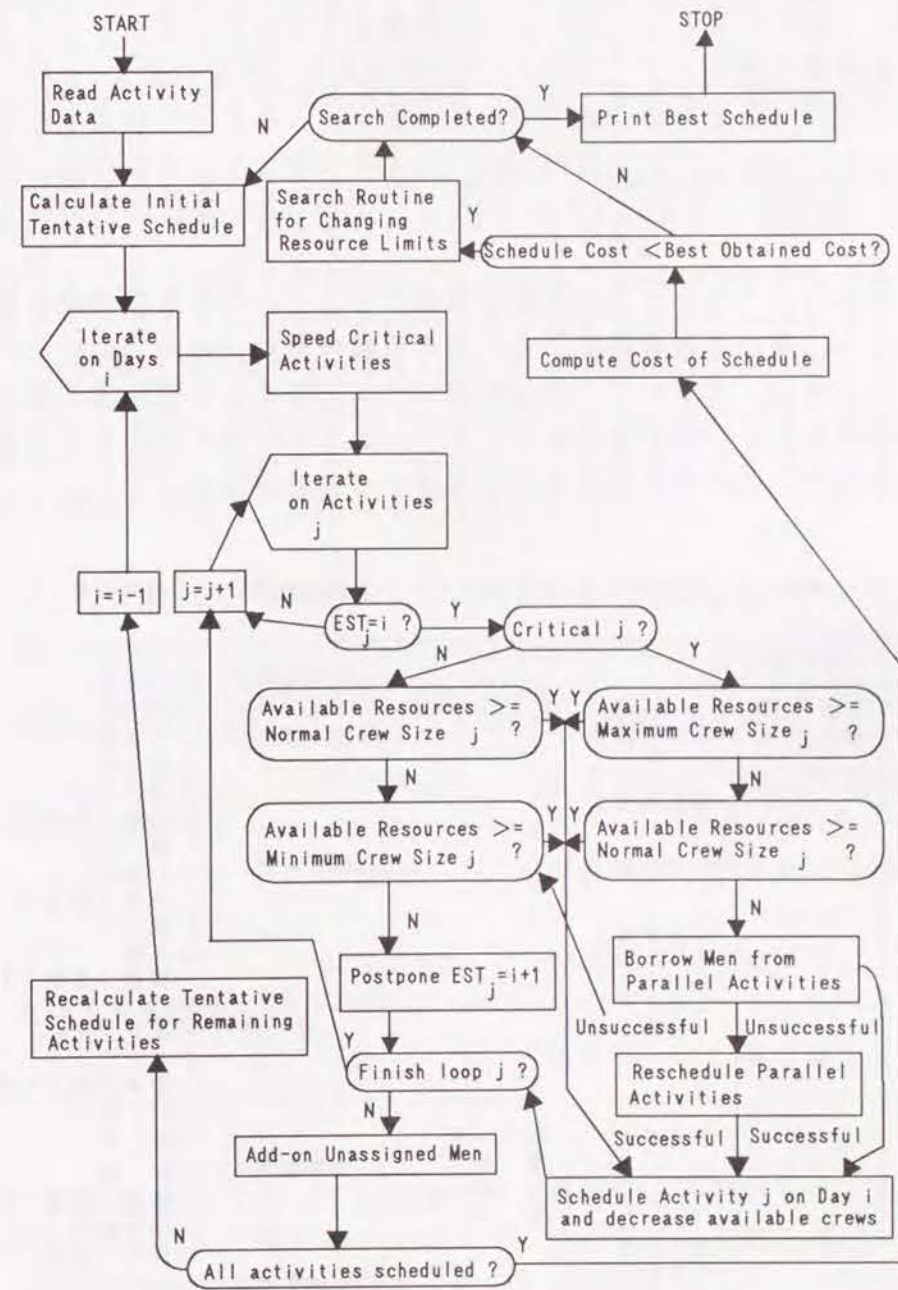


図-5.3 SPAR-1の資源配分フローチャート

3. スケジューリングのための問題整理

前項では、これまでに提案されてきた工程計画モデルの特徴と分類方法について述べてきたが、ここでは、より合理的な工程計画モデルを検討する上で前提となる各種の概念や課題について、その考え方を整理しておくこととする。

(1) 単位作業と要素作業

図-5.4に地下滞水池築造工事のWBSの一部を示すが、この図のように、建設プロジェクトの生産システム構造が、階層的なツリー構造で表現されることは、第2章で既に示した。そして、このような階層構造の中で、プロジェクト全体の工程計画を取り扱う場合は、この例の中の「鉄筋組立」や「型枠組立」といったレベルをアクティビティとするのが適当であることが、これまでの研究から明らかにされてきている。しかし、例えば「鉄筋組立」を例にとると、この作業は「小運搬」や「墨出し」、「組立」、「圧接」、「台直し」など、より小さい単位の作業から構成されている。

そこで、前者のように全体工程計画を構成するレベルの作業を単位作業(unit work)、後者の、単位作業を構成する作業を要素作業(element work)と、本研究では呼ぶこととする。すなわち、全体計画レベルで要する計画精度を達成するためには、単位作業を用いた計画で事足りるが、より下位の月間計画や週間計画を立案する場合には、この要素作業までを考慮する必要が表れてくる。

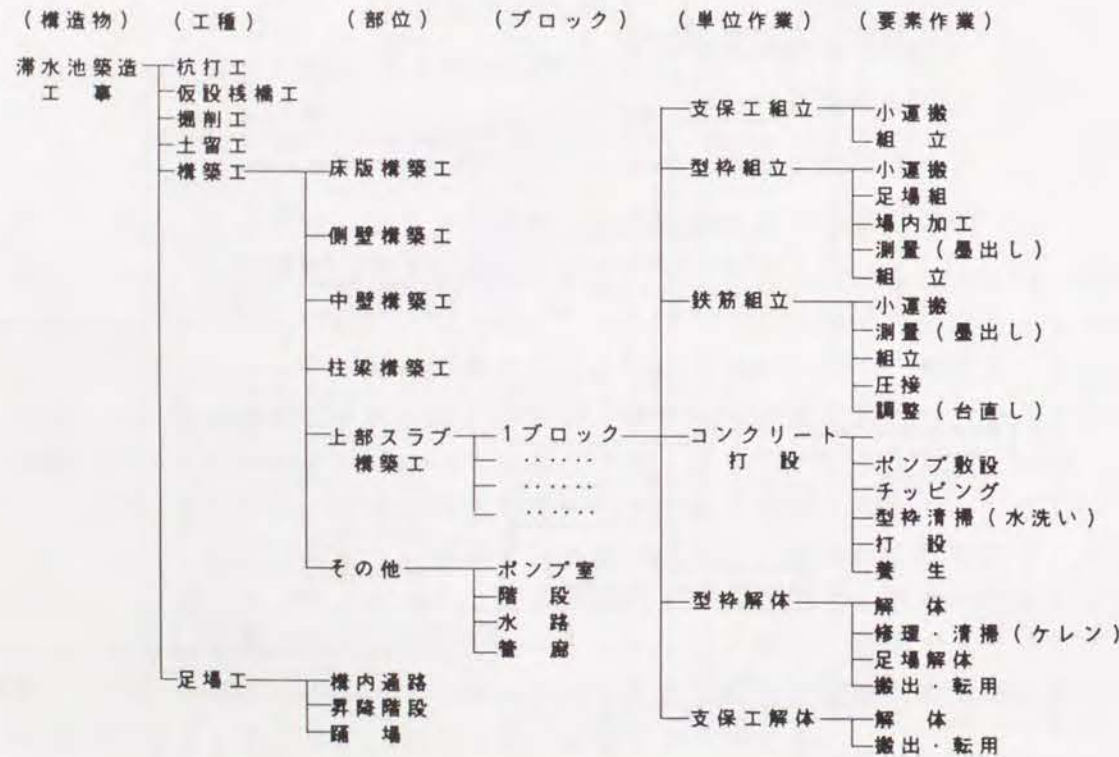


図-5.4 地下滞水池築造工事を対象としたWBSの例

なお、ここでは全体工程計画の立案方法を、主要な研究テーマとしていることから、以後、単に作業と呼ぶ場合は、単位作業を意味するものとする。また、類似の用語に工種があるが、第4章のネットワーク生成過程の中で明きらかとしたように、工種とは、ここで定義した単位作業レベルの作業をパターン分類した概念であり、単位作業と対をなす用語ということができる。

(2) 主体資源と附属資源

一つの仕事を遂行するためには、機械や労務、それに資材など、多くの資源を必要とするが、作業の所要日数決定に直接影響するのが、機械と労務である。そして、この両者は様々な形態で協同しながら、作業を遂行している。このような形態を考察してみると、技能員が主体となり補助的に機械を使用する場合と、施工機械が主体となり補助的に作業員を使用する場合に、大きく分類することができる。ここでは、前者を労務主働型作業、後者を機械主働型作業と呼んで、区別することとする。

労務主働型作業の例としては、「鉄筋組立」、「型枠組立」などがあるが、例えば「鉄筋組立」作業は、そのほとんどが鉄筋工により遂行され、機械を用いた作業は、資材搬入などごく一部にすぎない。このために、作業の効率を決する要因としては、作業員によるものが大部分を占めることとなる。これに対して、機械主働型作業は、「機械掘削」や「締固め」などの例が存在するが、これらの中で労務が必要となる部分は、機械の運転と機械では手の届かない小部分の施工などで、大部分は施工機械が主体的に活動する。このために、作業の効率を決する要因も、自ずと、施工機械によるところが大きくなる。

表-5.1 主体資源による作業分類と単位作業例

作業分類	単位作業(工種)	作業資源	
		主体資源	附属資源
労務主働型作業	鉄筋組立	鉄筋工	小運搬用機械
	型枠組立	型枠大工	小運搬用機械
機械主働型作業	機械掘削	掘削機械	一般作業員
	杭打ち	杭打機	一般作業員

以上のように、仕事を遂行するために様々な資源が作業することとなるが、作業の効率を主眼とした工程計画・管理では、技能員にしろ施工機械にしろ、主体となる一つの資源の投入数量と作業歩掛りを考慮することで、合理的な計画立案を充分に行うことができると考えられる。そこで、本研究では、作業の主体となる資源を主体資源、それ以外の資源を附属資源と呼んで区別し、以上のような資

源に対する概念を工程計画立案方法に適用することとした。

(3) 作業に対する資源投入方法

前項で紹介したSPAR-1では、資源の最少投入量、標準投入量、最大投入量をアクティビティごとに設定し、この三つの値に基づき各作業へ投入する資源量を決定する仕組みとなっていた。この例のように、ある施工条件下で実行される作業に対しては、これ以上、投入資源量を少なくすると作業がほとんど遂行できなくなる投入資源の下限値と、これ以上多く資源を投入しても、作業場所の広さなどの関係から、作業効率が極端に低下する投入資源の上限値が存在することは、経験的に容易に想像することができる。一方、与えられた条件の基では、最も作業効率が良いと考えられる資源の投入量が存在することも、経験的に知られている。そこで、これらの値をSPAR-1と同様に、それぞれ①最少投入量、②最大投入量、それに、③標準投入量と、ここでは呼ぶこととする。

以上のような、一つの作業に対する資源の投入量に対する考え方に関して、宇津橋は、単位時間当たりの仕事量と資源投入数量との関係を図-5.5のようなモデルと仮定して、コスト最少となる資源の投入量の存在を証明しようと試みている。すなわち、一つの作業の原価が、作業員の賃金などの①投入資源量と単価の積による費用(図-5.6のC1)、機械損料などの②使用時間に比例する費用(図-5.6のC2)、それに、材料費などの③固定費用(図-5.6のC3)から構成されるとして、この原価構成に先ほどの資源投入モデルを適用することにより、原価最少となる資源投入量を、式-5.1のように求めている²¹⁾。

$$r_{opt} = \sqrt{k^2 + 2kr_c + r_2^2} - k \dots\dots\dots \text{式-5.1}$$

ここで $k = \frac{b2}{b1}$

- b1 : 資源の単価
- b2 : 単位時間当たりの費用
- r_c : 限界資源量 (図-5.4参照)
- r₂ : 比例限界資源量 (図-5.4参照)

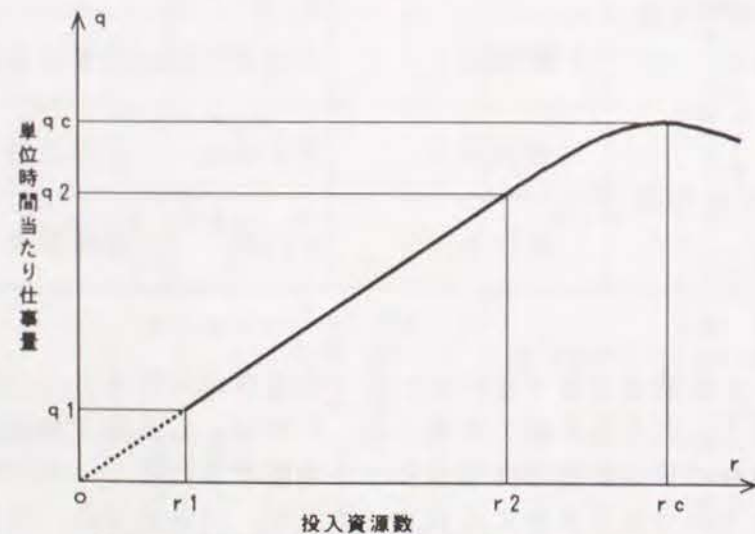


図-5.5 作業効率と資源投入数量との関係

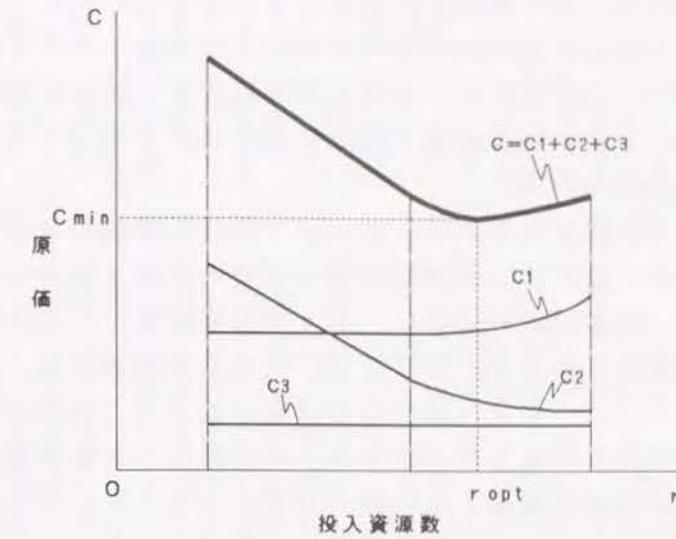


図-5.6 資源投入量と原価の関係

(4) 作業への資源投入量と中断の必要性

先ほどの資源配分法のところでも述べたように、各作業へ配分する資源量を日々変化させることで、資源の使用がより効率的な工程計画を立案することが可能となる。すなわち、山本が指摘しているように、「各作業の所要日数と所要資源量を確定値として考える限り、日々の調達資源量とその変動幅を縮小することと所要工期を短縮することはトレード・オフの関係に陥るため、これらを同時に満足するような日程計画を作成することは困難である」²²⁾。

しかし、山本の方法を除き、これまでに提案された発見的計画法のほとんどは、日々の投入数量を可変で計画できるようにはなっているが、そのほとんどは、先ほど紹介したSPAR-1と同様に、最小値、標準値、最大値の中のどれかを選択できるだけで、それらの中間値を取ることはできない。前述したように、ここでいう標準値は、コスト最小値であり、かつ、この値より投入量が離れるに従って、コストは増大する。このために、なるべく標準値に近い値を配分するのが得策であり、この点でも、これまでの計画法には問題が残されている。

また、以上のように各作業への資源投入量を変数と考えた場合に、どうしてもある作業を途中で中断させなければならない場合が起こってくる。この場合、作業中断を許すのかどうかは、議論の分かれるところである。しかし、本研究は詳細な全体工程計画を研究対象としていて、ここで対象となるアクティビティは、いわゆる単位作業が該当する。そして、この単位作業には、それを構成する複数の要素作業が存在する。このために、作業の中断を検討する場合は、この要素作業のレベルまで考慮しなければ、中断できるのかどうか、また、中断する場合は、どこで中断できるかを判断する必要がある。

しかし、これを一つ一つの作業に関して考慮することには限界がある。また、作業を中断した場合に、どの程度、作業効率が低下し、所要日数が増加するのかを把握することも難しい。このために、工種や作業規模などから、該当する作業

を分割するのが可能かどうかを検討し、可能であるならば、これを分割することは可能であるが、そうでない場合は、作業の中断まで考慮することは、あまり現実的とは考えられない。このために、本研究が対象とする全体詳細計画の作成段階では、作業中断はしないという前提で計画を進めるのが妥当と考える。

(5) 資源の重要度と調達限界

建設生産に必要な資源の中には、クレーンや杭打機械のように、現場への搬入搬出にコストが高いために、必要資源量の経時的変動を極力少なくしなければならない資源と、一般作業員のように、日々の需要変動に、ある程度は容易に対応できる性質の資源が存在する。ここでは、前者を強制約資源、後者を弱制約資源と呼んで区別するが、このような両者の性質の違いは、該当資源が機械か労務かによって単純に決められるものではない。すなわち、対象資源の需給関係が悪化すると、技能工が強制約資源となる場合は希ではないし、ダム工事など工事現場が労務供給地から遠い山間僻地などでは、一般作業員とても強制約資源となる場合も存在しないとは言えない。

また、以上のような資源の制約条件を考えると、工程計画の立案に当たっては、資源の日々の調達量に、ある一定の幅があるとするのが妥当である。すなわち、図-5.7のように、資源の使用量として最も望ましいと考えられる①標準調達量、それに、これ以上調達することは難しいと考えられる②上限調達量、また、これ以下の使用量では、資源の遊休が多くなり、合理的な計画とは考えられなくなる③下限調達量という、三つの値が資源調達量には存在する。そこで、スケジューリングに当たっては、日々に必要な資源量が、上限調達量と下限調達量の範囲に旨く納まるように、各作業の実施予定日を計画することが求められる。なお、最初に述べた強制約資源とは、この許容調達量に幅がないか、非常に狭い資源であり、また、弱制約資源とは、この幅が非常に広い資源と考えることができる。

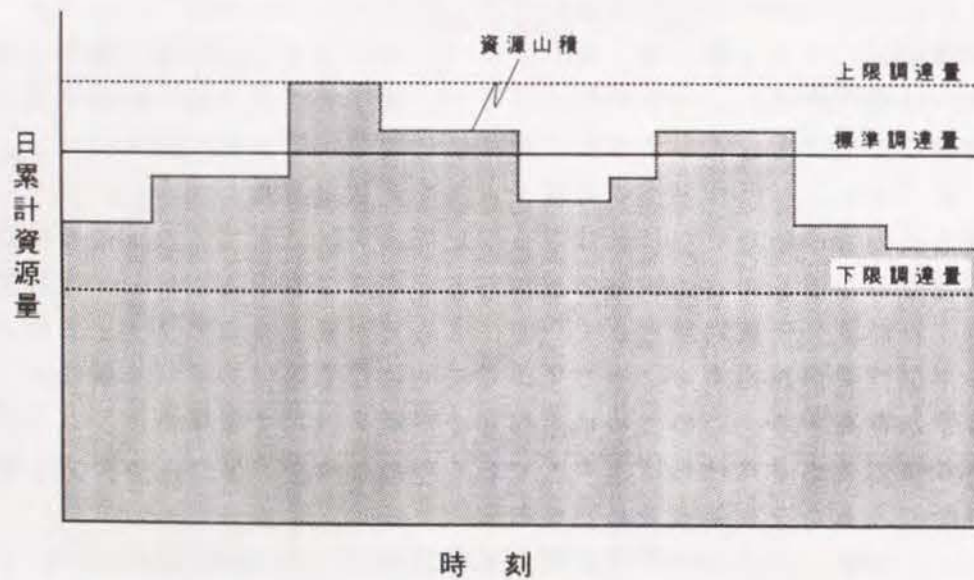


図-5.7 資源の調達限界と計画山積

4. 知的スケジューリング・システムの構成

ここでは、これまでに述べてきた発見的スケジューリング法に、知識ベース・システムの考え方を適用した知的スケジューリング・システムの構成に関して、考察を加える。

(1) システムの位置づけと適用手法

知的スケジューリング・システムは、図-5.8に示したように、工程計画のスケジューリング段階に位置するシステムで、プランニング段階で生成された工程ネットワークに基づき、各作業の計画時刻を決定するシステムである。すなわち、プランニング段階で生成された工程ネットワークとは、プロジェクトを実施するための作業構成と、それらの技術的な順序関係を表したもので、各作業の実施時刻は、この段階では決められていない。そこで、スケジューリング段階に入ってから、諸々の制約条件を満足するように、ここで検討するシステムが、各作業の開始時刻と終了時刻を推定する。

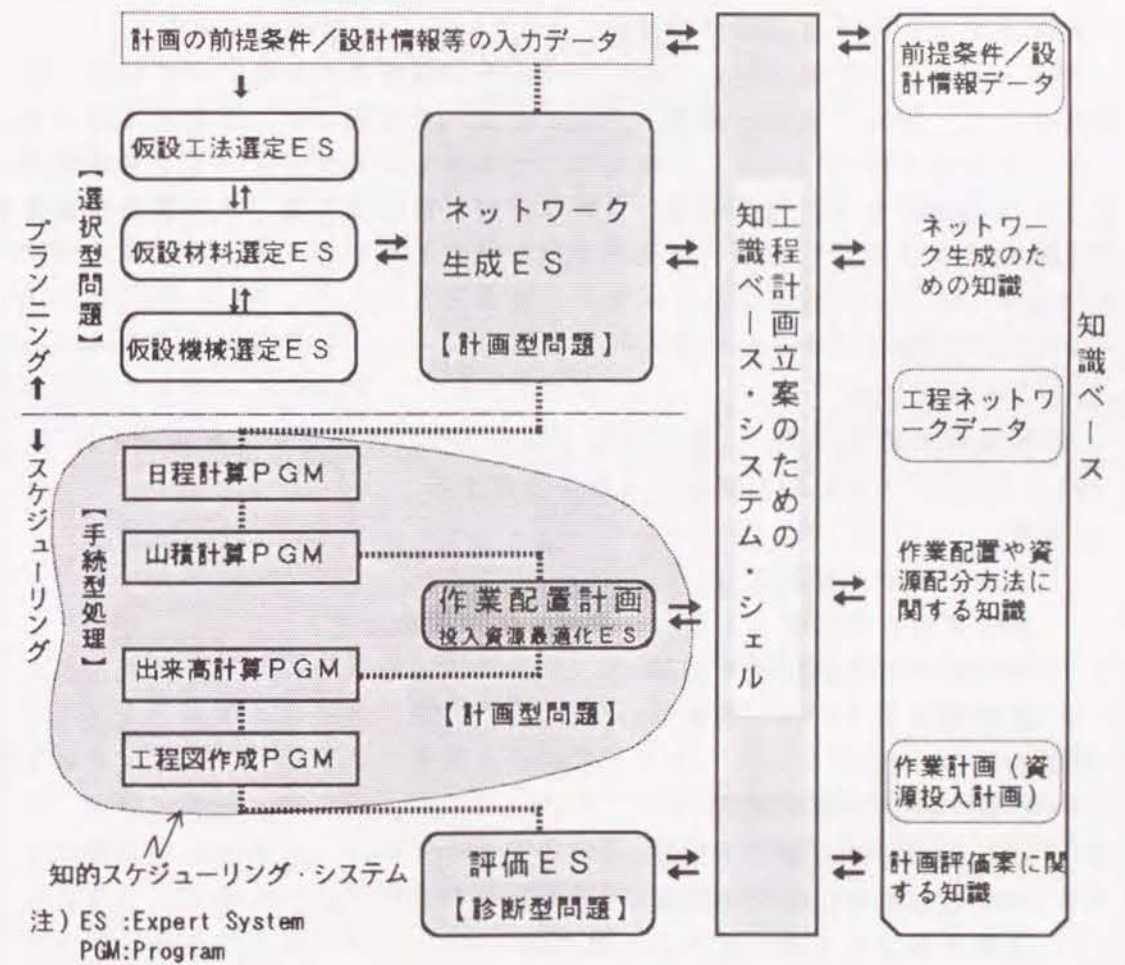


図-5.8 知的スケジューリング・システムの位置づけ

また、このシステムでは、これまでに述べてきたように、スケジューリングのための資源制約モデルを採用し、これを用いて計画化する方法として、発見的計画法を適用することとした。この発見的計画法とは、第3章で詳しく述べたように、計画化の要所所で、それまでの計画過程を評価し、経験的な知識も踏まえてその先を予測し、計画化を進める方法を意味し、人工知能における重要な研究テーマの一つでもある。すなわち、建設プロジェクトのスケジューリングでは、コストや施工性、それに工期など、互いにトレードオフの関係にある、いくつかの目標を同時に達成する計画が求められる。そこで、数学的な最適解ではないが、それに近い妥当解を効率的に求めることができる発見的計画法の考え方を適用することとした。

前述したように、発見的計画法には、①分岐限定法、②資源平滑化法、それに、③資源配分法が存在する。そして、スケジューリングに係わる各種の仮定や制約条件をシステム内部に組み込みやすいという理由から、ここでは資源配分法を基本的な計画化戦略とすることとした。また、このような試行錯誤的な問題解決過程をシステム化するためには、従来型のシステム化技法よりも、人工知能技術を適用したシステム化技術が優れていることから、以上のようなスケジューリング・システムの検討に当たっては、知識ベース・システム化を図ることとした。

(2) スケジューリング問題の明確化

スケジューリング問題といっても、どのような場面で、また、何を目的とするのかによって、種々の問題が存在する。そこで、本研究では、対象とするスケジューリング問題を図-5.9のように捉えた。すなわち、スケジューリングの目的は、「与えられた制約条件の範囲内で、工期が最短となるように、各作業の開始時刻と終了時刻、および、その間の資源使用量を決定する」ことである。

- 1) システムの目的
 - 制約条件の範囲内で、工期が最短となるように、作業の開始時間と終了時間、および、その間の資源投入量を決定する。
- 2) 与件
 - ・建設工事の作業構成
 - ・各作業の作業内容（工種、作業量、主体資源など）
 - ・作業間の技術的な順序関係
 - ・各作業のフロート（事前の日程計算による）
- 3) 制約条件
 - ・作業の技術的順序関係
 - ・日々の資源使用量の上限値
 - ・日々の資源使用量の下限値
 - ・作業の資源投入量の最小値と最大値

図-5.9 スケジューリング問題の明確化

そして、この問題に入力される与件情報としては、プランニング段階で生成された工程ネットワークに含まれる①建設工事を構成する作業、②各作業の内容、そして、③作業間に存在する技術的順序関係の3種類である。また、制約条件としては、当然のことながら、技術的もしくは物理的に前もって行わなければならない先行作業は全て完了していなければ、当該作業は開始できないという①作業間の技術的順序関係、また、これ以上の資源は調達できないという②日々の資源調達量、それに、これ以下の資源使用量では、資源の遊休が発生するという③日々の資源の使用下限値、などが考えられる。

スケジューリング・システムとは、以上のような与件情報と制約条件の基で、スケジューリング問題の解決を図るシステムであるが、ここには、前項で述べたいくつかの仮定や前提条件が存在する。そこで、これらの要点を再度示すこととする。すなわち、作業に必要となる資源は、主体資源と附属資源に分かれ、作業の所要日数は、式-5.2のように、主体資源の投入量とその施工歩掛り、および作業数量によって決定する。この場合、附属資源の必要数は充分調達できるものとして考慮しない。

$$d_i = \frac{q_i}{k_i \times r_i} \quad \dots\dots\dots \text{式-5.2}$$

但し d_i : 作業 i の所要日数
 q_i : 作業 i の作業量
 k_i : 作業 i の施工歩掛り
 r_i : 作業 i の主体資源の日投入量

また、作業ごとの資源投入量は、①最大値、②標準値、それに、③最小値が、与件情報として与えられていて、最大値と最小値の間では、歩掛りは一定とする。この点は、図-5.5に示した投入資源量と作業効率との関係と若干異なるが、資源投入量を決定するに当たって、なるべく標準値を与えるような仕組みを加えれば、計画精度上は特に問題はないと考えられる。

$$k_i = \text{一定} \quad (r_{\min} \leq r_i \leq r_{\max}) \quad \dots\dots\dots \text{式-5.3}$$

但し k_i : 作業 i の歩掛り
 r_i : 作業 i の主体資源投入量
 r_{\min} : 主体資源の最低投入量
 r_{\max} : 主体資源の最大投入量

また、日々の資源調達量は、やはり①上限値、②標準値、③下限値を設定する。そして、この上限値を越えて資源を配分することはできないし、また、下限値を下回らないように、各作業への資源配分量を調整する。なおここでは、作業中断に関しては、考慮しないこととする。何故ならば、ここで対象とする計画は詳細工程計画であるために、このレベルでの作業中断は作業効率を著しく悪化させること、また、そのような計画を計画立案段階から想定することは、よほど特殊な場合に限られると考えられることによる。

(3) 問題解決の手順

前述したように、ここで用いる発見的計画法とは、経験則を適用して効率的に問題解決を図る手法であるが、ここでは、さらに第4章で紹介した手段-目的計画法も取り入れた問題解決の手順を検討する。すなわち、対象問題を一度に解決することは難しいために、これをいくつかのサブ問題に分割して、問題解決を図ることとする。この分割方法としては、対象となる作業を重要度に応じてグループ化し、その各々について資源配分を検討することが、妥当と考えられる。そこで、ここでは図-5.10に示したように、①クリティカル作業、②継続作業、それに、③その他の作業、の3グループに分割して、資源割当法を考えることとした。

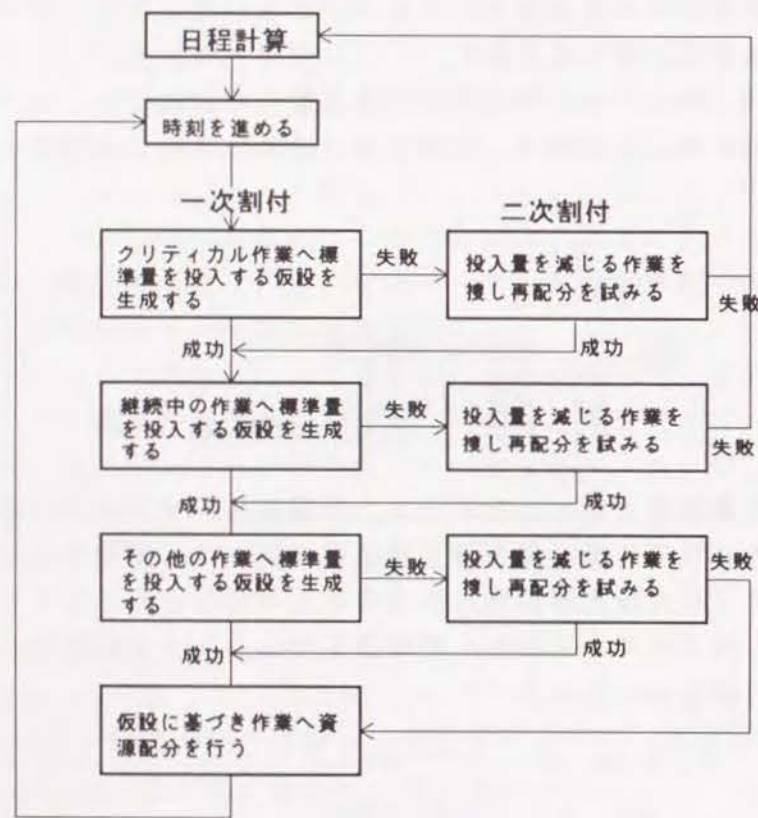


図-5.10 問題解決の手順

なお、発見的計画法とは、問題解決のためのアルゴリズムを予め明確に規定できない種類の問題を対象とすることから、その問題解決過程を詳細にわたってフローチャートとして図示することは難しい。このために、図-5.9に示したフローチャートは、あくまで、問題解決の基本的な流れを表すに過ぎない。実際の推論の進め方は、各サブ問題の中で「資源配分が可能である」という仮説を生成し、この仮説が制約条件を満足するかどうかを検査しながら推論を進める、いわゆる仮説型推論(Hypothetical Reasoning)を行う。そして、この仮説が成立しない場合には、資源配分方法を変えた二次割付の推論へ移行するというように、いわゆるイベント駆動型推論により資源配分を進めていくこととなる。

(4) システム化研究の現状

建設プロジェクトのスケジューリング問題では、イベント駆動型の仮説推論を進めることにより、合理的な解が得られる。そして、このような推論過程をシステム化するためには、知識ベース・システム技術の適用が必要不可欠である。しかし、計画生成の枠組みを作り出すことは、以上のようなシステム化技術を用いることによって可能となったが、その具体的な計画生成機構を明らかにできる状況とはなっていない。

つまり、計画生成機構の大枠は図-5.10のように示すことができたが、一次割付や二次割付の具体的方法やそこで必要となる知識、それに、この割付が失敗した場合の対応方法など、スケジューリングの具体的方法は、建設プロジェクトの種類や置かれた状況などによって千差万別である。また、同じプロジェクトを対象としたスケジューリングであっても、幾つもの異なる方法が考えうる。

そして、これらのどれがより合理的の方法かを評価することも、計画に影響する要因が多様であることや、トレードオフの関係にある評価指標も多いことなどから非常に難しい。そこで、現在は、現実の建設プロジェクトを対象として、そこで行われたスケジューリング方法を分析し評価することにより、具体的方法について、知識の蓄積を進めている。

また、これまでの議論では、人工知能技術を適用した発見的方法だけに焦点を当ててきたが、建設プロジェクトのためのスケジューリング問題には、この他にも多くの課題が存在する。その一つは、建設生産システムをネットワークで表現する場合の問題点や、現実のプロジェクトへの適用方法などである。実際問題として、これまでも指摘してきたように、工事マネジメントにおける工程ネットワークの適用は、それほど進んでいないのが現状であり、その多くの原因が、このような基本的な部分に存在する。そこで、次節以降では、このような問題点を中心としたスケジューリング方法に関して、具体的なシステム開発を例に議論を進めることとする。

第3節 スケジューリング・システムの開発

前節では、知的スケジューリング・システムの構想を述べたが、この問題とは別に、従来型のスケジューリング・システムをとっても、これを実際の建設プロジェクトに合理的に適用するには、いまだ多くの問題が残されている。そこで、ここでは、従来型システムの適用に関する問題点を明かとする事例として、工程管理支援システムPF-NETSを紹介する。

1. システムの概要

(1) システム開発の目的

建設プロジェクトの工程計画業務にネットワーク手法を適用するための研究が、これまで多くなされているにもかかわらず、現在でも、図式工程表を利用している作業所は意外に多く存在する。さらに、着工前の当初計画はネットワーク手法を用いて行った作業所でも、着工後の工程管理段階までもネットワーク手法を用いてフォローアップしている例は、国内工事では極めて少ないのが現状である。このことは、ネットワーク手法そのものの機能にも多くの問題点があるものの、そのような点が問題とされる以前に、実際に工事管理を行う作業所で、ネットワーク手法を手軽に利用する環境が、あまり整備されていないことに第1の原因があるものと考えられる。ここで問題となるネットワーク手法の利用環境とは、①工程管理用のソフトウェアと②それを稼働させるコンピュータの利用環境のことであるが、この両者ともこれまで多くの問題を抱えている。

ネットワーク手法は、本来コンピュータ利用を前提とした手法であることから、作業所でコンピュータが手軽に利用できることが、ネットワーク手法利用のための第1条件となる。この点は、エレクトロニクス技術の発達によってコンピュータの小型軽量化が急速に進んだことにより、急速に改善されてきている。すなわち、ほんの十数年前までは本社などに設置された大型コンピュータでしか利用できなかった規模のソフトウェアでも、現在では手元のパーソナルコンピュータで手軽に利用できるようになってきている。しかし、ソフトウェアの改善はハードウェアと比べて大変遅れていて、バッチ処理で稼働する大型コンピュータ用の古いソフトが今なお多く残されたままの状態、パーソナルコンピュータで簡単に利用できるアプリケーション・ソフトウェアは、現在でも数少ない状況にある。さらに、このように数少ない工程管理用のソフト中でも、建設工事管理用に開発されたものは極めて少ない状況にある。

以上のような状況であるために、利用環境の問題点ではなく、ネットワーク手法自体の機能的な問題を議論するために必要な実績データが、非常に少ない状況にある。特に、着工後の管理段階での利用データは数少なく、このことが工事マ

ネジメントのためのネットワーク手法の研究を遅らせてきた1つの大きな理由と考えられる。そこで、これまで明らかにされた問題点の一部を解決した工程管理支援システムを開発し、それによってどの程度の有効性が発揮できるのかを検証し、ひいては新たな改良方法を模索することが重要であると考え、作業所でも手軽に利用できるようなパーソナルコンピュータを用いて実験システムを開発し、いくつかの工事マネジメントに適用してみた。

ここでは、以上の目的で開発した工程管理支援システム(PF-NETS, Planning & Forecasting - NETWORK System)の概要と、このシステムに適用したネットワーク手法の改良点に関して、その概要を紹介する²³⁾。

(2) 工程管理の手順とシステムの適用範囲

工程管理業務は、工事マネジメントの中核に位置することから、他の様々な管理要素と連携するために多種多様な業務形態を示すが、ここでは、この工程管理業務のプロセスを、機能面から簡略化して図-5.2に示すように捉えた。この図のように工事管理業務は、工事着工前の施工計画段階とその後の施工管理段階に大きく2つに分けて考えられる。そして、前者の計画段階は、計画精度の違いから①基本計画、②概略計画および③詳細計画の3段階に分けられ、また管理段階では、対象となる計画期間の違いから①全体レベル、②月間レベル、③週間レベルおよび④日レベルの4段階に分けて考えることができる。以下に、各段階における業務の内容を示す。

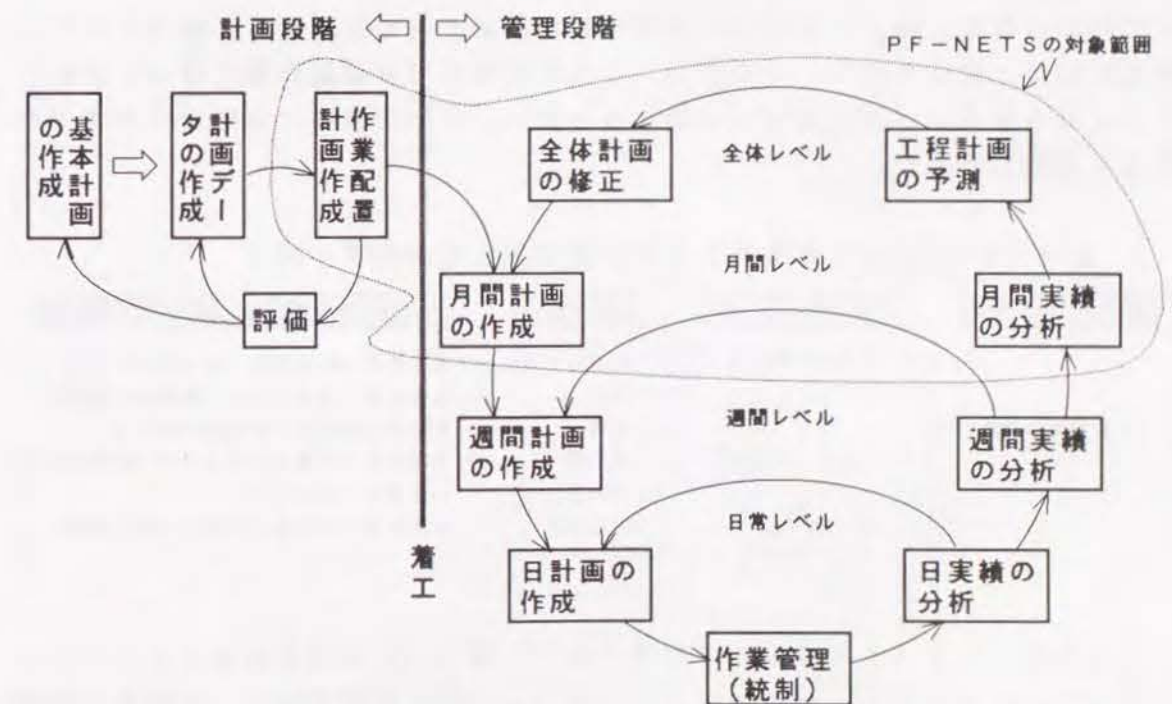


図-5.12 建設工事のプロセスとPF-NETSの適用範囲

【施工計画時】

①基本計画

工法や重機などの技術的検討、およびブロック分割やその施工順序などの基本工程を想定する

②概略計画

基本計画に沿って全体工程ネットワークを作成し、工期や工事全体での作業量と資源投入量のバランスなどを検討する

③詳細計画

概略計画に沿って詳細な工程ネットワークを作成し、細部にわたって制約条件を満足しているかを検討し、当初工程計画を作成する。

【施工管理段階】

施工計画段階で作成された工事全体に関する詳細計画を、管理期間から月間→週間→日の3レベルにブレイクダウンして、計画を作成し、当該期間の作業実績の分析も加えて次期計画にフィードバックする。

以上のような工程管理業務プロセスの中で、工程管理支援システムPF-NETSは、図-5.12中に点線で示した範囲の業務を支援することを目的として開発した。すなわち、施工計画段階においては基本計画想定後の概略計画および詳細計画の作成を、また、工事管理段階では、月間レベルまでを対象とした計画作成から実績評価、および計画変更の、いわゆる月間管理サイクルを対象としている。

ここで月間レベルまでをシステム化の対象とした理由は、全体と月間レベルでは、ネットワークのアクティビティが、同じ作業レベルであることによる。すなわち、週間と日レベルでは、全体および月間レベルで取り扱う作業（これを本論文では単位作業と呼ぶ）をさらに分解した作業レベルで管理する必要があるため、将来的にはこのようなレベルの作業（これを本論文では要素作業と呼ぶ）も扱うシステムとすることを目標としてはいるものの、今回の開発では単位作業までを扱える機能に止めた。

表-5.12 管敷設工事を例とした単位作業と要素作業の関係

全体工事	部分工事	単位作業	要素作業
下水管敷設工事	1スパン管敷設	矢板打ち	重機移動→矢板運搬→取り付け→打設
		掘削	重機移動→掘削→排土→支保工→床付け
	2スパン管敷設	基礎	松杭打→栗敷き→型枠組→捨てコン
		管設置	重機移動→管運搬→取り付け→設置→脱型
		埋め戻し	山砂運搬→排土→均し
		矢板めき	重機移動→矢板取り付け→引抜→運搬

この結果、PF-NETSでの処理手順は、図-5.13に具体的なフローチャートとして示したように、全体レベルで作成した計画を基準として、その部分計画として月間計画を作成し、一か月間の作業実績を入力し月報を作成した後に、こ

のデータを全体レベルにフィードバックして、全体レベルで今後の予測と工程ネットワークの修正を行い、翌月の月間計画に繋げるというような月間管理サイクルを構成するようになっている。

なお、本論文で用いている単位作業と要素作業の関係を明らかにするために、表-5.12に簡単な具体例を示す。また、以上のような考え方を実現したPF-NETSのグラフィック・メインメニューを、参考までに図-5.4に示す。

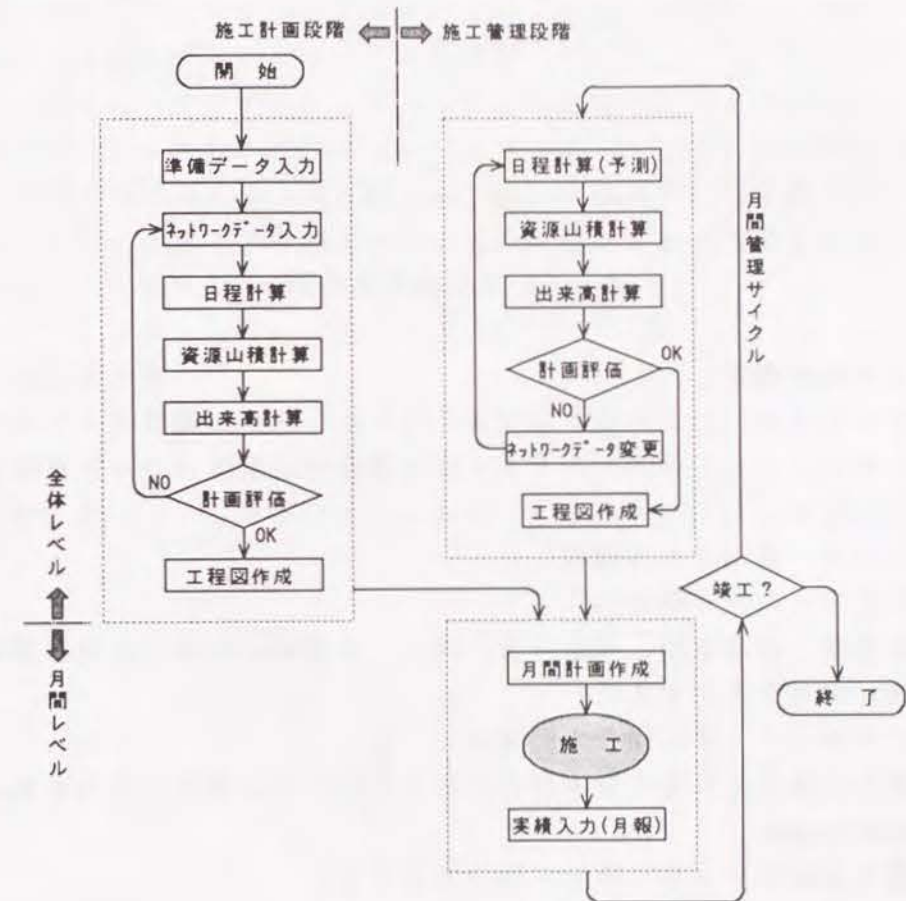


図-5.13 PF-NETSの処理手順

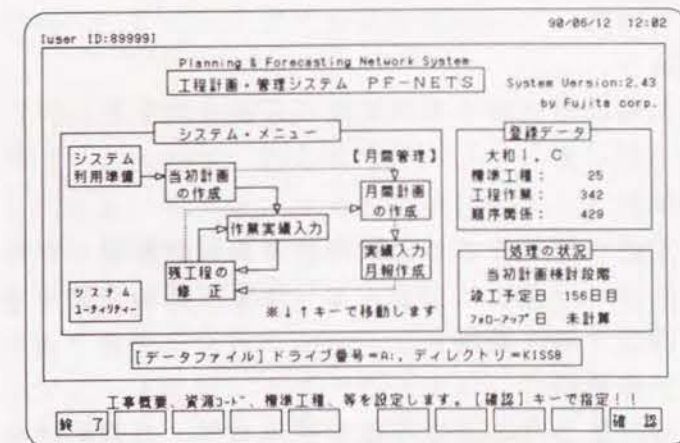


図-5.14 メニュー画面

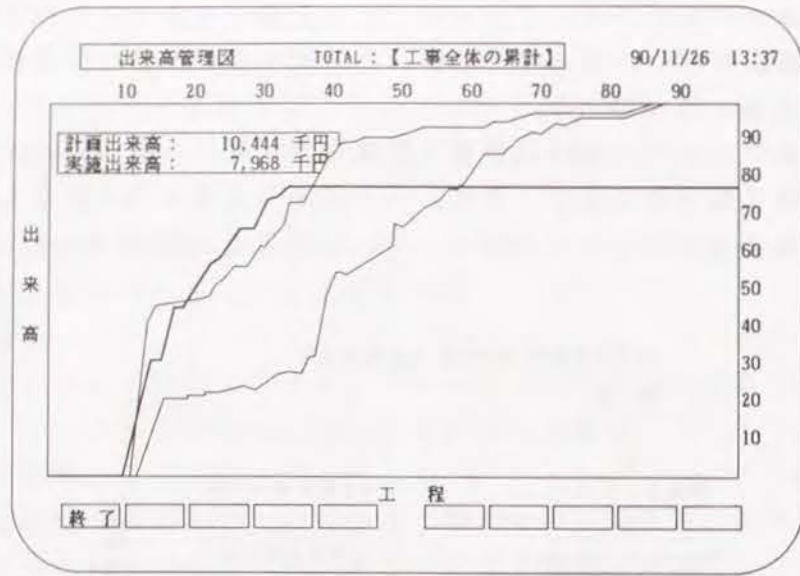


図-5.15 出来高表示画面

(3) システムの機能

PF-NETSは、以上のように大きく①全体レベルと②月間レベルに分けて考えられるので、ここでは本システムの持つ機能を、全体レベルと月間レベルに分けて以下に示す。

【全体レベルで適用される機能】

①準備データの入力機能

工事概要、資源単価、標準作業、ブロック名称、休日、月間稼働日、工事着手日、などを入力する。

②ネットワーク・データの入力機能

作業の内容やそれ等の順序関係を表形式かグラフ形式で入力する。

③日程計算機能

後述する改良PN法により日程計算を行う。

④資源山積計算機能

工事資源別に時間軸に沿った数量とその費用の山積計算を行い、これを画面上に表示する。

⑤出来高計算機能

標準工種別に時間軸に沿った出来高の累積計算を行い、これを画面上に表示する(図-5.15)。

⑥工程図作成機能

計算された工程計画を資源の山積や出来高累計曲線と共に、画面上の表示するか、またはプロッターによりA1~3版用紙に作図する。

【月間レベルで適用される機能】

①月間計画の作成機能

全体計画から対象となる月の作業を抽出して、月間計画を作成する。

②実績入力(月報作成)機能

当月の作業実績を入力して、月報を作成する。このデータは、全体レベルにフィードバックされて、残工程の予測や残工程の修正に利用される。

(4) 情報システム機器の構成

図-5.16にPF-NETSが稼働する情報システム機器の構成を示す。このシステム構成を決定するにあたっては、まず①作業所で全ての機能が利用できること(つまり、本支店の技術員に依存しない体制)、②利用コストが低いこと、③マシン・インターフェイスが優れていること、の3点を検討し、ハードウェアとしては、デスクトップ型のパーソナル・コンピュータ(NEC PC-9800)の標準的なセットに工程図作成用のプロッターを追加した構成とした。また、ソフトウェア構成としては、パーソナルコンピュータ利用による制約と当時グラフィック機能に優れていたことから、汎用オペレーティング・システム(MS-DOS)の基で稼働するコンパイラ型BASIC言語(NEC N88-日本語BASIC)を用いた。

以下に、PF-NETSを利用するための情報システム機器構成を示す。

【ハードウェア構成】

- ① パーソナルコンピュータ(NEC PC-9800)、
- ② プリンター
- ③ 外部記憶装置
- ④ プロッター

【ソフトウェア構成】

- ① OS : MS-DOS
- ② 開発言語 : コンパイラ型BASIC言語(N88日本語BASIC)

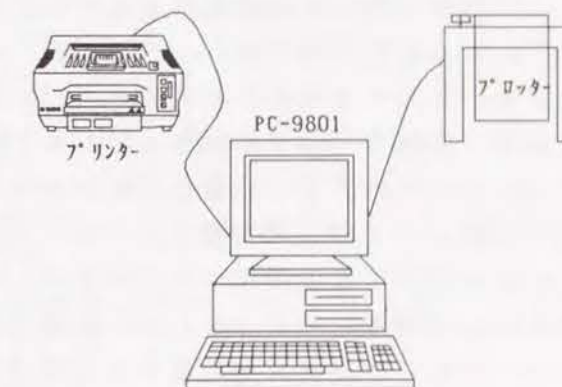


図-5.16 PF-NETSの情報システム機器構成

工事マネジメントを行う作業所は、工事の施工を行う期間だけ現場に近接して設置される仮事務所であるため、新しい情報システム機器を利用する場合に、色々な面での制約を受ける。例えば、本支店に設置された大型コンピュータを作業所で利用するためには、短期間の利用にもかかわらず専用通信回線の申請を行い、架線工事まで行わなければならないという状況であった。現在では、公衆電話回線利用による高速通信技術が急速に発達してきたことや、通信費用が安価となってきたため、コンピュータ通信による大型コンピュータの利用は、以前ほど困難ではなくなってきているが、逆に、小型コンピュータの機能が急速に発達してきた、数年前の大型コンピュータの機能をも凌ぐほどになってきたために、遠隔地

間のデータ交換などを除き、小型コンピュータの機能を補完する目的での大型コンピュータの需要は少なくなっている。このため、作業所でのコンピュータ利用は、今後とも作業所設置の小型コンピュータに依存する状況が続くものと考えられる。

2. 工程ネットワーク・モデルの改良

(1) 工事マネジメントのためのネットワーク手法

これまで、工事管理にネットワーク手法があまり適用されてこなかった理由としては、コンピュータ利用の不便さとデータ入力の煩わしさが、非常に大きい問題と考えられるが、ネットワーク手法自体にも問題は存在する。つまり、PERTやプレシードンス・ネットワーク法、GERTなど非常に大きなバリエーションを持つネットワーク手法が、もともと建設プロジェクトだけを対象として考案されたものではないため、各手法とも一長一短があり、そのまま工事マネジメントに適用することには問題がある。

建設工事は、施工方法や作業手順に選択枝が多く存在するため、計画の自由度が非常に大きい。また、設計条件や施工条件の違いから、建設プロジェクトはそれぞれユニークであるため、工場生産のように1つの工事計画に多大な労力を掛けるわけにもいかない。このため、建設工事をネットワークで表現する場合は、多様な表現方法により、よりの確に施工過程を表現するだけでなく、簡単にネットワークで表現できることも、また重要である。

このような観点からすると、GERTのようにフィードバック・ルーチンを含む確率的表現を用いるよりも、表現力としては落ちるが、より簡便に利用することができ、かつ従来のPERTよりは表現力に富むプレシードンス・ネットワーク法(PN法)は、建設プロジェクトの工程表現方法としては、最も実務的手法と考えられる。そこで、PF-NETSの開発にあたっては、このPN法をベースとして、これにいくつかの改良を加えることとした。本論文では、これを改良プレシードンス・ネットワーク法(改良PN法と略す)と呼ぶこととする。

(2) ネットワーク表現方法の改良

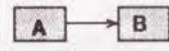
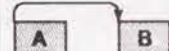
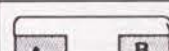
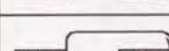
プレシードンス・ネットワーク法は、「先行作業→後続作業」という1通りの順序関係しか持たず、かつ作業間のタイムラグ(time lag)を認めないというPERTにおけるネットワーク表現の問題点を解決するために開発された手法である。すなわち、表-5.13に示したように、①先行作業Aが完了してからn日後に後続作業Bを開始するFS(Finish to Start)関係、②Aが開始してからn日後にBが開始できるSS(Start to Start)関係、③Aが開始してからn日後にBが終了するSF(Start to Finish)関係、および④Aが終了してからn日後にBが終了するFF(Finish to Finish)関係の4通りの順序関係と、同時に作業間のタイムラグを許すネットワーク表現機能を備えている。

この結果、建設工事で頻繁に現れる並行作業関係、例えば型枠組作業と鉄筋組

作業などの順序関係をSS関係で簡単に表現できることや、コンクリート打設後の養生期間をタイムラグで表現できるなど、従来のPERTでは、作業を分割するなど手間の掛かった作業間の関係を容易に表現できるようになった。また、プレシードンス・ネットワーク法ではアクティビティを四角い箱で表現するプレシードンス図法(PND, precedence network diagram)を用いるが、後に、この箱の長さを時間軸上にスケールアップして表示する図法(time-scaled precedence diagram)が考案された。この結果、この手法の工程図がバーチャート形式でも表示できるようになり、バーチャートに慣れた技術者にとっても、理解しやすくなった。また、プログラミングの観点から見ると、プレシードンス・ネットワーク法では、データを作業と順序関係に分けて操作できるために、取扱いが容易であるという長所も併せ持っている。以上の長所を簡条書きにすると以下のようになる。

- ① SS関係により、並行作業関係の表現が容易
- ② タイムラグにより、コンクリートの養生期間などの表現が容易
- ③ 工程計画図がバーチャート形式で表現される
- ④ データが作業と順序関係に分かれるため、データの取扱いが容易

表-5.13 プレシードンス・ネットワーク法の作業順序関係

順序関係図	関係表示	内容説明
	FS=n	作業Aの終了後、n日後に作業Bが開始できる
	SS=n	作業Aの開始後、n日以後に作業Bが開始できる
	SF=n	作業Aの開始後、n日後に作業Bが終了する
	FF=n	作業Aの終了後、n日後に作業Bが終了する

注) FS:Finish to Start, SS:Start to Start, SF:Start to Finish, FF:Finish to Finishの略。またnは作業間の時間間隔を表す。

しかし、プレシードンス・ネットワーク法で用いられる順序関係をさらに検討すると、SF関係とFF関係は建設工事を表現するのに必要なかどうか？また、作業間の関係を表す方法はこれだけでいいのだろうか？という疑問が湧いてくる。つまり、SF関係もFF関係も、共に作業の完了時刻を規定する順序関係であるが、作業の完了時刻はマイルストーンなど、他の制約条件により規定されることはあっても、他の作業から規定されることは考えにくい。また、墨出しや仮設作業など、ある作業を行うために必要となる準備作業は、本作業の開始前までに完了していればよく、あまり早く準備する必要はない。そして、このような関係は建設工事においては結構多く存在するにもかかわらず、これを既存のFS関係で的確に表すのは意外に難しい。このため、本作業とそのための準備作業を容易に関係づけるための方法が必要と考えられる。

また、作業間の順序関係は、大きく分類すると施工技術の制約から必然的に生じる技術的順序関係と、資源転用などを表す管理的順序関係に分けて考えることができるといわれている。この中で、管理的順序関係は、工事計画の投入資源を適正化し、コストを低減するという意味では非常に重要な関係であるが、工事期間の短縮を検討するような場合には、技術的關係と比べて比較的弱い関係となるように、非常に特徴的な順序関係といえる。すなわち、工事原価を低く抑えるポイントは、仮設材の転用回数をより多くできるような工程計画を立てることにあるとよくいわれる。また、都市近郊での施工で、作業員や施工機械の供給が容易にできる工事では、工事期間の短縮を検討する際に、このような資源転用関係を外して検討を進めることが、よくおこなわれる。そして、このように重要な管理的順序関係を、他と区別して表現することは、これまでの手法ではできなかった。

以上のような問題点を改善する方法として、表-5.14 に示したように、PN法の4つの順序関係の中からFS関係とSS関係を取入れ、これに加えて、後続作業が先行作業の作業時刻を規定するBF (finish Before start) 関係と、労務、機械、資材などの資源転用関係を表すRE (Resource removal) 関係という新たな作業間の順序関係を付け加えた。この結果、①BF関係により、ある作業に付随する準備作業の指定が容易となったことと、②工事資源の転用関係を個別に取り扱うことが容易となった。

表-5.14 改良プレジデンス・ネットワーク法の作業順序関係

順序関係図	関係表示	内容説明
	FS=n	作業Aの終了後、n日後に作業Bが開始できる
	SS=n	作業Aの開始後、n日以後に作業Bが開始できる
	BF=n	作業Aは、作業Bが開始する直前からn日前の間に終了していなければならない
	RE=n	作業Aの終了後、n日後に作業Bが開始できるが、両者の関係は弱い関係である

BF関係を用いたネットワークの日程計算は、図-5.17に示したフローチャートに従って行われる。ここで示した計算方法は、一般的なプレジデンス・ネットワーク法の計算方法の中で、前進計算といわれる最早時刻の計算過程に、BF関係の制約を満足しているかどうかチェックし、満足していない場合には、その関係の先行作業の最早時刻の決定段階まで戻って再度計算を進めるという考え方を採っている。このような考え方を具体的に明らかにするために、改良PN法の適用例とその計算結果を図-5.18と表-5.15に示す。この例では、コンクリート・ポンプ打設とそのための配管作業、それに鉄筋組立作業とそのための加工作業の間の関係をBF関係で表現している。

(2) 概略・詳細レベルの2階層ネットワーク構造

建設生産システムが階層構造をなしているように、その工程計画も図-5.12に示したように月間・週間・日常レベルなどの階層構造を持っている。このため、この工程計画を表すネットワーク・システムは、このような階層構造を容易に表現できるものである必要があることから、PF-NETSの開発では、図-5.9のような概略(マスターネットワーク)と詳細(サブネットワーク)の2つのレベルで階層的に表現できる階層型ネットワーク・システムとした。

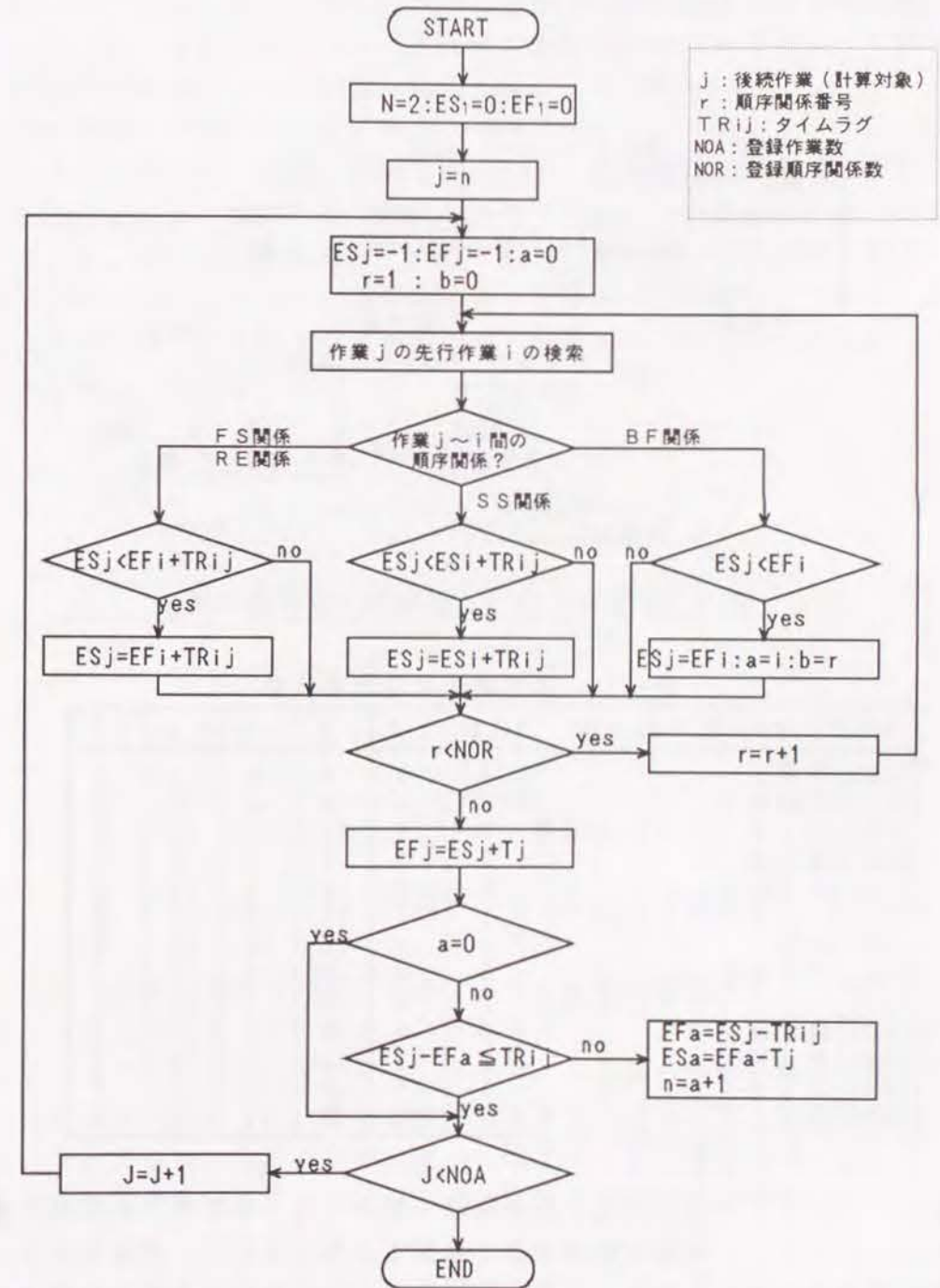


図-5.17 改良プレジデンス・ネットワーク法の計算フロー

この結果、後述するプロジェクト・グラフを用いて、概略レベルと詳細レベルのネットワークを別々に画面に表示させることにより(図-5.22)、ネットワークの形状を容易に把握できるようになった。また、概略レベルのデータ入力においては、そのサブネットワークをほとんど意識する必要がないし、また、詳細レベルでのデータ入力においても、上位のマスターネットワークをほとんど意識する必要がないことから、データの入力・変更作業が非常に容易となった。さらに、工程図や月報等の管理資料の作成においても、レベルごとに分けて出力するため計画内容や現状判断が大変容易となるなど、2階層のネットワーク構造は、システム利用において大きな効果をもたらした。

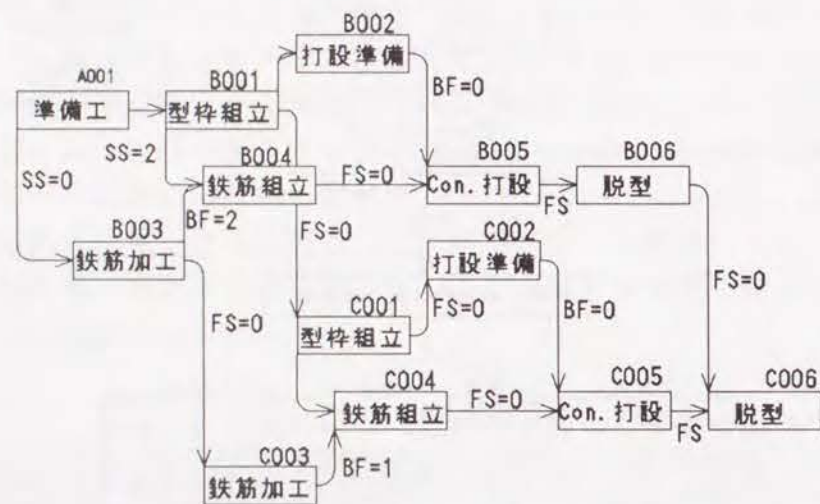


図-5.18 改良プレシデンス・ネットワーク法の適用例

表-5.15 適用例の日程計算結果

No.	作業名称	日数	ES	EF	LS	LF	TF
A001	準備工	4	0	4	0	4	0
B001	型枠組立	4	4	8	4	8	0
B002	コンクリート打設準備	2	9	11	11	13	2
B003	鉄筋加工	2	3	5	4	6	1
B004	鉄筋組立	5	6	11	6	11	0
B005	コンクリート打設	1	11	12	13	14	2
B006	脱型	3	14	17	16	19	2
C001	型枠組立	4	8	12	9	13	1
C002	コンクリート打設準備	2	14	16	14	16	0
C003	鉄筋加工	2	8	10	9	11	1
C004	鉄筋組立	5	11	16	11	16	0
C005	コンクリート打設	1	16	17	16	17	0
C006	脱型	3	19	22	19	22	0

しかし、このシステムの運用実験の過程で明らかとなったことであるが、建設工事のネットワークは、単純な階層構造では旨く表現できない。何故ならば、概念的に施工順序をマクロに捉えて、これをマスターネットワークとした場合、詳細

レベルの異なるサブネットワークに属する作業の間にも順序関係が必要となるケースが多く存在する。例えば、A橋脚の次にB橋脚を施工する工事において、マスターネットワークのアクティビティをAとB橋脚としA橋脚→B橋脚という関係を付けた場合、各々のサブネットワークに含まれる鉄筋組立や型枠組立の間にも、労務や資材の転用を表すために順序関係を設定する必要が出てくる。

このため、PF-NETSの日程計算においては、概略レベルの順序データを詳細レベルに自動変換してから、日程計算を行う方法を用いた。また、この計算方法では、サブネットワーク間に適当な順序関係が設定されているならば、マスターネットワーク間の順序関係は、日程計算の中に含まないという機能も、後に追加したために、次節で詳しく述べる概略と詳細の階層的ネットワーク間に存在する“階層間のずれ”という問題を解決することができた。

(3) 非稼働日を考慮した日程計算方法

PF-NETSでは、日程の表現方法として、①年月日を用いた“暦日”と②着工日を起点とした“延日”の2種類を指定できる。この機能は、着工日がまだ確定していない施工計画段階では“延日”を用いて概略的な計画検討を進めておき、着工が迫り、より詳細な計画を検討する段階となってから、“暦日”表示に切り替えるだけで、施工計画から管理段階へ計画業務を継続的に進めることができるように考え、開発された。

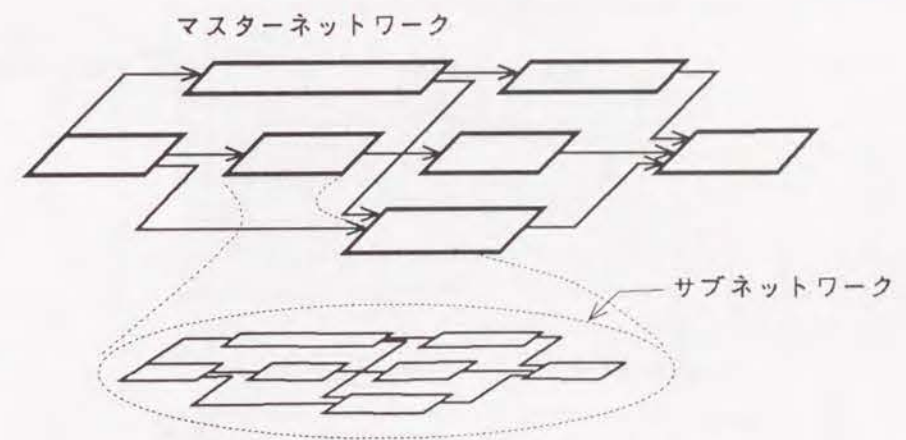


図-5.19 2階層のネットワーク構造

この方法をシステム内部に立ち入って、より詳細に説明すると、PF-NETSでは、日程の内部データとしては、西暦元年1月1日からの延べ日数という、いわゆるジュリアン・デー(ただし、BASIC言語の制約から、実際のプログラムでは基準点を変更している)を用いて工事着工日を記憶し、作業の開始日や終了日はその開始日からの相対的な延べ日数によって記憶されている。このため、この両者を組み合わせることにより、暦日と延日を自由に変換することが可能となっている。

また、工事計画では天候等の不確定要因や休日などの作業ができない日数、すなわち非稼働日を、計画に如何に織り込むのが1つのポイントとなるが、PF

PF-NETSでは、先ほどの2つの日程表現方法ごとに、①非稼働日を年月日で指定する方法と(図-5.20)、②月ごとに稼働日数を指定する方法(図-5.21)、2種類の指定機能を備えている。このうち前者の方法を用いると、日程計算を非稼働日(作業休止日)を直接除いて計算するために、非稼働日とは関係なく進行するコンクリート打設後の養生期間などを、複数のカレンダーを用いる必要もないため、従来より容易に指定することができるようになった。

図-5.20 指定休日の入力画面

図-5.21 月間稼働日の入力画面

3. システムの特徴

PF-NETSは、図-5.4に示したパーソナルコンピュータで全ての処理ができること、また階層性を持った改良PN法を適用していること、および暦日、延日という2種類の日程表示方法と、各々の稼働日指定方法を有しているということが基本的な特徴であるが、ここでは、これ以外の特徴を説明する。

(1) プロジェクト・グラフによるデータ入力

周知のように、工事マネジメントにネットワーク手法を適用する場合、頻繁に生じる計画変更に対応しやすいのかどうか、大変重要なポイントとなる。このためPF-NETSでは、プロジェクト・グラフと呼ばれるグラフ表示をベースとしたデータの編集方法を考案した。このプロジェクト・グラフとは、作業の順序関係データを基に、作業の先頭からの位置(レベル)を算出し、これによりネットワークを図-5.22のように図化したものであるが、その構造は①概略レベルに対応するマスターネットワーク画面と、②その1つの作業のサブネットワークを操作する画面、および③各作業の内容を表す画面の3階層から構成される。そして、これ等の各々の画面上で作業と順序関係の追加・変更・削除を行うことができる。

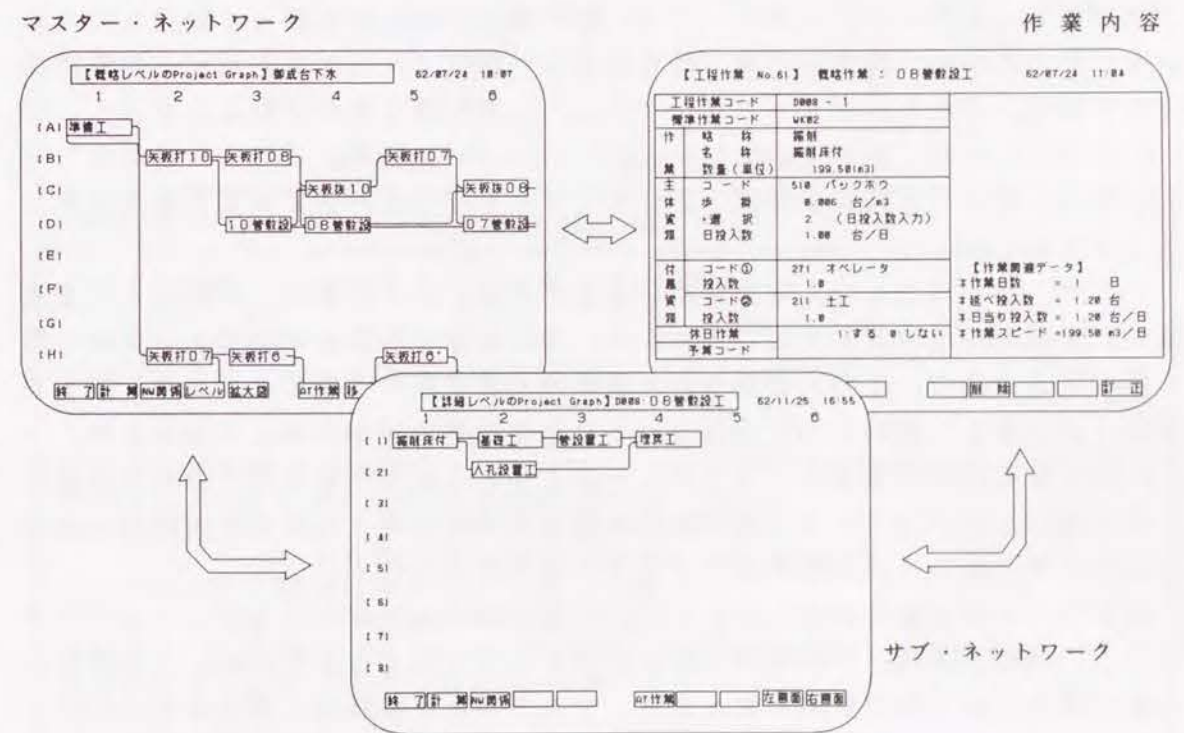


図-5.22 プロジェクト・グラフによるデータ編集

(2) 標準工種による入力・変更作業の軽減

コンクリート工事の鉄筋組立や型枠組立などのように、施工で行われる作業群は、いくつかの類似の作業パターンに分類できる。そして、このようなパターンを我々は“工種”と呼んでいるが、PF-NETSでは、この工種を事前に登録しておいて、①作業内容などの入力作業の軽減や、②同一工種の歩掛りを変化させた工程のシミュレーション、さらには③工種ごとの出来高管理に利用する、などの機能を備えている。

まず、入力作業の軽減とは、工種データとして作業名称の歩掛り、それに使用する資源の種類や標準投入量などを予め登録しておき、作業入力段階において、

その作業が属する工種を指定すると、その工種の持つデータが作業内容として自動的に記憶されるために、作業入力作業の軽減化が図れる。

また、工程のシミュレートとは、工種に登録した①歩掛りや②作業スピードなどを変更することにより、作業の所要日数を自動的に一括変更して、その結果、工程がどのように変化するかを検討する機能で、施工計画時の検討だけでなく、着工後に収集した歩掛り等の実績値を計画にフィードバックする場合に有効に利用できる。

また、工種による出来高管理とは、出来高数量、もしくは工種に登録された単位数量あたりの金額による出来高金額に基づき、工種ごとに計画値や実績値を累計して比較できる機能で、資源の集計データと対比することにより、工種ごとの原価管理にも応用できる。

(3) 作業日数の設定方法

従来のネットワーク・システムでは、特に建設工事に的を絞って開発したものが少ないことから、作業の所要日数は確定した数値で入力する方法が一般的に採られてきた。しかし、PF-NETSでは、よりの確な所要日数指定を行うことと、先ほど述べた工種による工程シミュレーションに利用することを目的として、①確定日、②日当り投入資源量、③作業スピード、の3方法で所要日数を指定できるようにした。

ここで、②の日当り投入資源量による方法とは、ある作業に1日に投入する機械や作業員の数量を入力することにより、作業数量と歩掛りの関係から所要日数を算出する方法で、工種に登録された標準投入量を利用することにより、最も簡単に、また最も一般的に用いられる。また③の作業スピードによる方法とは、1日に施工する計画作業量を入力することにより、これと作業数量との比から所要日数を算出する方法で、主に概略計画の検討や詳細計画では資源調達能力に余裕のある工事の場合に必要な資源量を求めるために用いられる。

以上のような機能を付加したことで、先ほど述べた工程シミュレーションだけでなく、所要日数決定の根拠を明確に記録することができるために、工程計画の再検討時における検討資料となったり、システム利用者以外の技術者とのコミュニケーションがスムーズになるなど、以外と多くのメリットが生まれた。

①日投入資源量指定

機械や作業員などの日当たり投入数量を指定することにより、これと作業数量、歩掛りから、作業日数を算出する方法。

②作業スピード指定

作業スピードを指定することにより、これと作業数量から作業日数を算出する方法。

第4節 実工事での運用実験とその考察

1. システムの改良と適用経過

(1) システム改良の経過

これまで紹介してきたPF-NETSの開発活動は、昭和59年(1984)4月にプロトタイプ・システムの開発に着手したことから始まった^{24) 25) 26)}。つづけて、翌昭和60年1月から5月にかけて実用システムとして第1次開発を行い、6月頃から名古屋市の地下滞水池築造工事で最初の運用実験を行った²⁷⁾。

以来、表-5.16に示すように、現場での運用実験とそこで得た知見に基づくシステムの機能拡張とを繰り返してきた。

表-5.16 システム開発活動の経過

活動期間	活動概要
'84年9~12月 (S59)	プロトタイプ・システムの開発
'85年1~5月 (S60)	実用システムの開発(Ver:1.0)
6~12月	地下滞水池築造工事での運用実験
'86年1~9月 (S61)	システムの機能拡張(Ver:2.0~2.1) ①グラフィック入力機能、②工程シミュレーション機能、 ③月間計画・管理機能などの機能を追加
10~12月	駅部改築工事での運用実験
11~12月	マニュアル改訂(第1版)
'87年1~4月 (S62)	システムの機能拡張(Ver:2.2)
4~5月	マニュアル改訂(第2版)
6~8月	下水管敷設工事での運用実験 全体計画の検討、残工程の予測・検討に適用。
9~12月	システムの機能拡張(Ver:2.3) ①月間稼働日による日程計算機能、②延日による工程図の縮小機能、③プロッター機種拡大(HPGL対応)、④作図用紙の種類拡大(A2~1版対応)、⑤順序関係作図法の改良⑥実行予算に対応した出来高金額の入力機能機能、⑦出来高のパーセント表示機能
'88年1~8月 (S63)	システムの機能拡張(Ver:2.4) ①暦日による工程計画図の縮小機能、②プロッター接続条件の設定機能、③月間工程図の改良(HPGL対応)、④システム操作性の向上(DOSコマンド対応など)、⑤ハードディスクへの対応
8~9月	マニュアルの改訂(第3版)

(2) 適用工事の状況

PF-NETSは、プロトタイプ・システム段階も含めると、約5年間にわたり、現場での運用実験とそこで得た知見に基づいたシステムの機能改良を続け、現在に至っている。このような開発過程も含めて、これまで様々な建設プロジェクトに関して、施工計画段階における概略計画から施工管理段階まで含めた詳細計画まで、多種多様な工程管理業務に適用してきた。このような適用例の中から主なものを表-5.17に示すが、この表の中には適用した工事の種類と計画レベル、それにネットワークの規模に関してデータ登録数、適用時期、それに適用地域などを知ることができる。

この表を見ると、本システムは主にRC工事に適用されていることと、ネットワークの規模としては、作業数で30から1882、順序関係数で50~1827というように、大きな幅で適用されていることが解る。このようなネットワークの規模は、当然のことながら、工事規模や計画レベルに大きく影響されるが、これまで本システムの適用を推進してきた経験も含めて考えると、一般的なRC工事の概略計画で100~300作業数程度、詳細計画で300~600作業数程度で、ネットワークによる計画表現ができるものと考えられる。

ここでは、これ等の適用例の中から、下水管敷設工事を取り上げて、適用の過程とその結果について考察を加えることとする。

表-5.17 PF-NETSの適用工事の例

工事種類と 計画レベル	データ登録数			計算工期		適用地域
	工種	作業	順序	開始日	終了日	
地下滞水池築造工事	28	218	239	85/03/25	86/06/10	名古屋
“(詳細計画)	28	716	788	85/03/25	86/06/10	“
駅改築工事	10	328	341	85/04/04	86/11/01	千葉
下水管敷設工事	7	105	108	87/01/14	87/12/17	千葉
“(詳細計画)	7	356	404	87/01/14	87/12/15	“
浄水場築造工事	21	165	164	87/09/01	217日目	埼玉
ダム護岸工事	21	109	153	87/11/10	93日目	兵庫
ダム工事全体計画	0	44	64	87/12/01	173日目	沖縄
高速道路拡張工事	3	30	50	88/04/01	91/03/01	横浜
地下駐車場築造工事	15	185	219	88/05/01	236日目	千葉
大学設立プロジェクト	0	99	169	88/05/16	529日目	東京
宅地造成工事	8	69	94	88/06/10	88/11/04	埼玉
下水処理場築造工事	17	132	128	88/08/03	89/05/20	大阪
ホテル増設工事	0	49	61	88/08/15	90/03/14	グアム
共同溝築造工事	17	220	243	88/10/16	89/06/07	千葉
海上橋梁橋脚工事	1	99	120	88/12/25	527日目	広島
高速道路工事	35	151	154	89/02/13	90/03/09	名古屋
高速道路下部工事	35	1882	1827	89/02/13	94/06/12	大阪
地下鉄工事	24	611	623	89/03/20	88/04/13	名古屋
地下鉄工事	22	187	217	89/03/01	1357日目	京都
シールド工事	72	90	115	89/08/28	92/10/19	横浜
連絡橋	30	143	171	90/06/19	91/03/08	東京
ビル建築工事	12	205	254	90/10/30	91/05/18	大阪

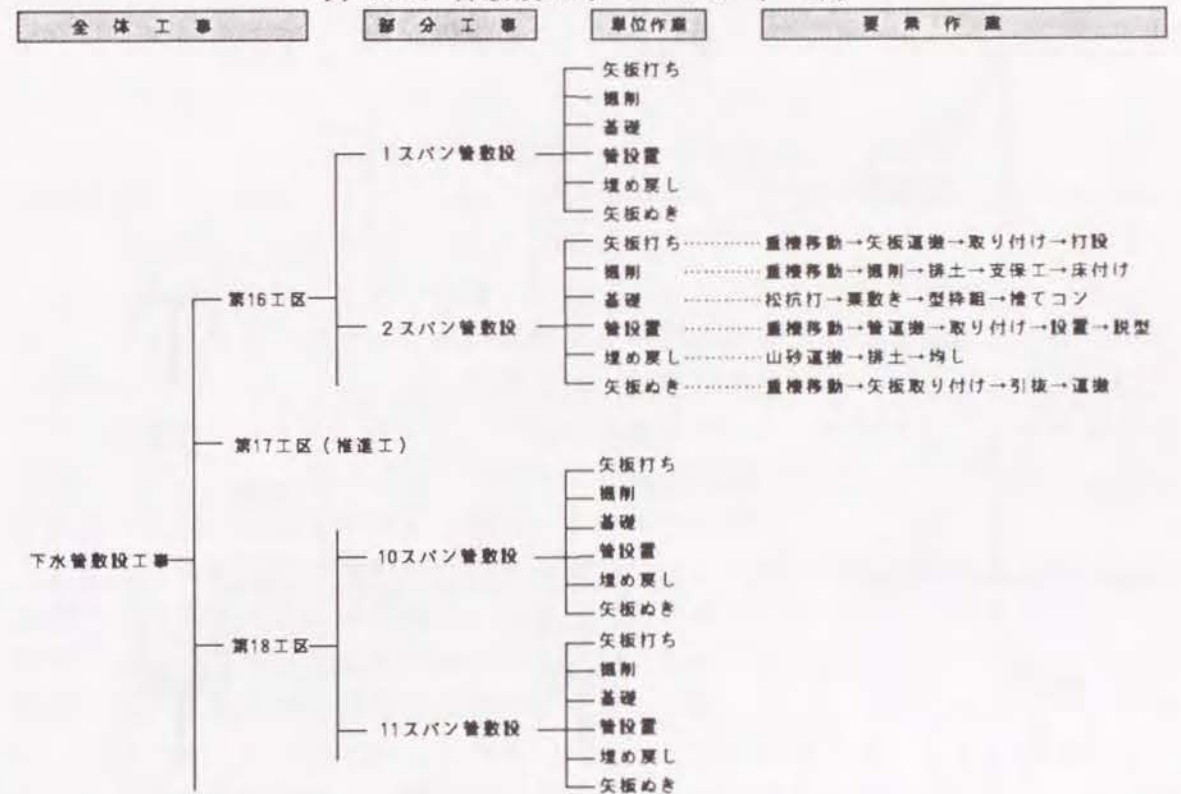
2. 下水管敷設工事におけるの適用例

(1) 工事の概要と特徴^{28) 29)}

本工事は、民間発注の大規模土地造成工事に伴う下水道工事で、延長 5.6kmにわたって下水道用ヒューム管を道路下に開削工法で敷設する（一部推進工事を含む）ものである。工期と規模の関係から協力業者3社（1社は推進専業者）、3工区に分割発注した。施工環境は、ほとんどの区間が田圃と丘の間の交通量の少ない幅員4mほどの市道で、埋設管はそれほど多くはない状況であった。また、幅員が狭いため一部で仮設道路が必要となり、そのための農地転用許可時期が、工程からみた1つの大きな不確定要因であった。

本工事のWBS (Work Breakdown Structure)の一部を表-5.18に示す。

表-5.18 管敷設工事のWBS (一部)



(2) システムの適用経過

一般に管敷設工事の設計段階では、人孔と人孔の間を1スパンと呼び、構造物の区切りとしている。しかし、本工事の管理においては、杭打工などの工種の所要日数が、ブロックごとに大きく変化しないように考慮して、30mを標準的なブロック長として、それより比較的短いスパンは他のスパンと集約し、基準長より比較的長いスパンは分割することにより、ほぼ同程度の作業パターンが繰り返されるようにブロック分割して、管理することとした。参考までに、1スパンの基

本作業パターンを図-5.23 に示す。

このような工事にPF-NETSを適用するにあたっては、パイロハンマやクレーンなどの施工重機のセット数や、各作業パーティに要する作業員の数などを概略把握するための①概略計画と、月ごとの工程計画を立てるための②詳細計画というように、2種類の計画に分けて適用することとした。

全体計画では、1スパンを1アクティビティとし、日当り敷設延長（すなわち作業スピード）を3.5m～5.0mに変化させて、工程のシミュレートを行い、予定の工期内に完了するために①作業パーティが幾つ必要なのか、また②各パーティには作業員を何人くらい配置する必要があるのか、③どこが工事のボトルネックとなるのか、④工事域内に存在する市民プールの混雑期に工事がぶつからないか、⑤作業用地の広さや借地時期はいつになるのか、などの基本的な検討に利用した。なお、ここで作成したネットワークは、作業数約200、順序関係数約200程度で、当時の16ビット・パーソナルコンピュータで、日程計算には約1分程を要した。

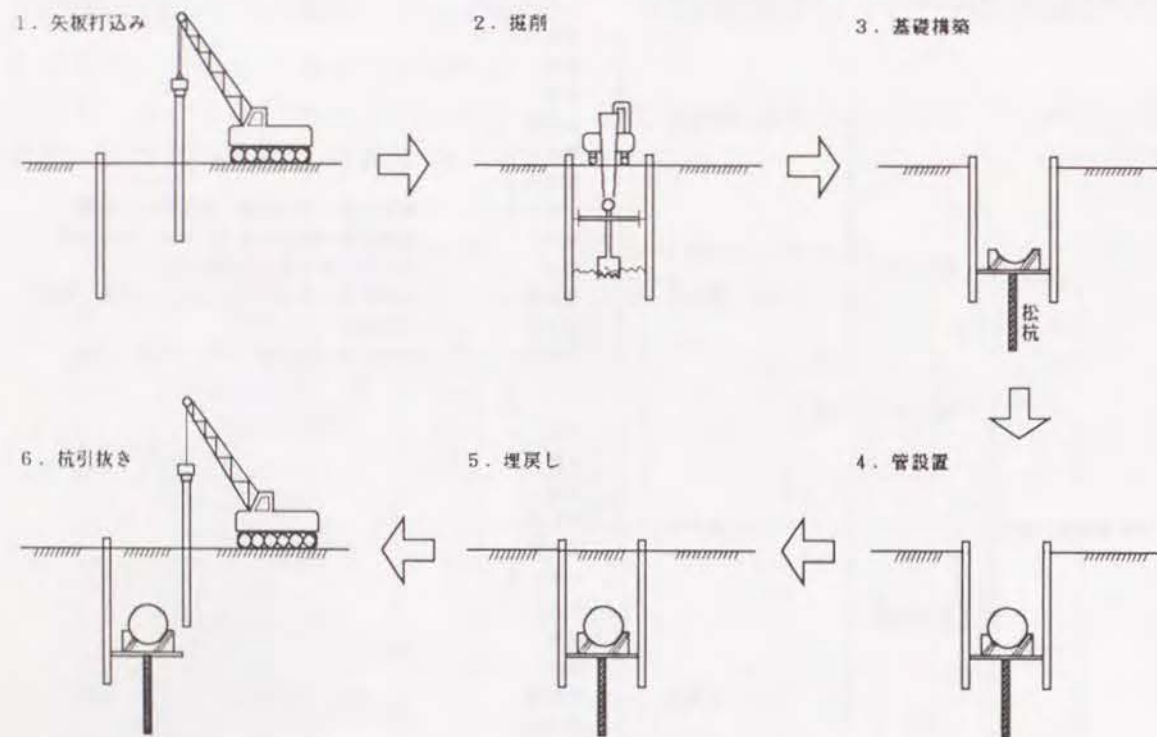


図-5.23 管敷設作業の基本作業パターン

また、詳細計画では、表-5.18のWBSに示した単位作業レベルをアクティビティとして、ネットワークを作成した。そして、このような構造を有する工事をPF-NETSのように2階層のネットワーク・モデルで表現する場合には、工事ブロック（ほぼ1スパン）の敷設工事が概略レベルの1アクティビティとなり、表-5.18の単位作業がその下位のサブネットワークとなるようにモデル化するのが自然な方法であるが、この工事での運用実験においては、図-5.24のような概略と詳細のレベル分けを行った。すなわち、表-5.18に示したタイプの工事では、

鋼矢板の打設と引抜作業が、工程計画のポイントとなるのに対して、先ほど述べた標準的なモデル化を行うと、このように重要な作業間の関係がサブネットワークの中に埋もれてしまうという問題点があり、図-5.23のようなモデル化を行うこととした。

また、この詳細計画における所要日数の算定方法としては、杭打ちと杭抜き、掘削、埋戻しの4作業が、日当り資源投入数量による方法を用いたのに対して、基礎構築と管設置作業には作業スピードにより所要日数を算定する方法を用いた。このようにして作成したネットワークは、作業数約400、順序関係数約350となり、やはり当時の16ビット・パーソナルコンピュータを使用して、日程計算に約5分程かかった。このようにして作成した工程計画図の一部を図-5.25に示す。

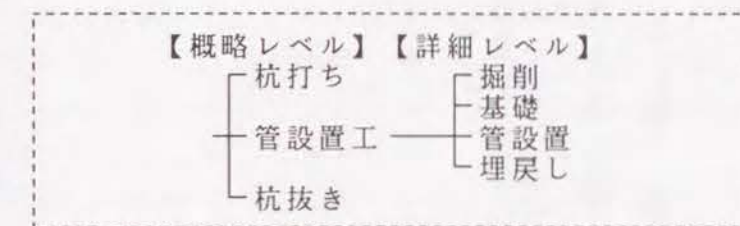


図-5.24 詳細計画での階層化

(3) システムの利用状況

PF-NETSは、従来の大型コンピュータではなく、作業所設置のパーソナルコンピュータを利用するため、処理速度と記憶容量が問題となるのではないかと懸念されていたが、この運用実験では、作業数が少なかったこともあり、特に問題とはならなかった。さらに、作業所設置のパーソナルコンピュータで全ての処理ができるため、従来のように本支店設置の大型コンピュータを利用した場合と比較すると、大幅なトータル時間の省力化となった。

また、これまで人手で行われてきた場合には、当初計画はPERT的な考え方で詳細に作成するが、着工後は、工程図を描き直すだけでも手間がかかるという理由から、大きな計画変更が生じない限り、全体計画の修正は行わずに、月間計画を作成する時点で、計画の差異を考慮して対処するのが一般的であった。しかし、今回のようにパーソナルコンピュータを利用した場合は、その手軽さから、月ごとに残工程を検討し、常に最新の工程計画図を得ることが出来た。このことは、工事マネジメントを遂行していく上で、工程だけでなく全ての管理要素に関して、計画の精度を高くすることとなり、大きなメリットがある。例えば、多忙な業務ゆえに作業所職員間の情報伝達では、齟齬を生じやすいが、PF-NETSにより作成された情報を利用することによって、これ等の問題点が解消されるというような、コミュニケーション手段としての効果も、指摘されている。

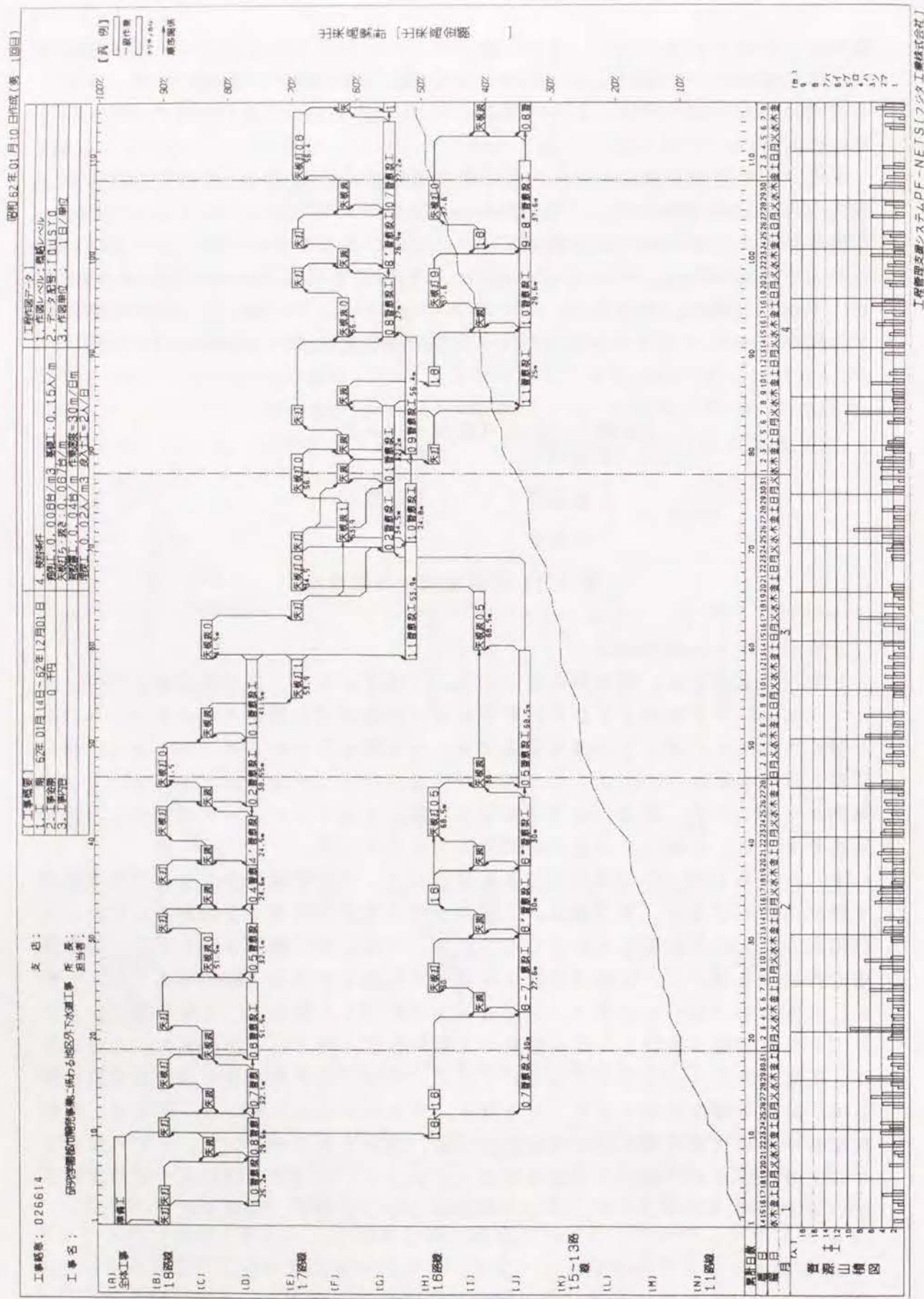


図-5.25 下水道管敷設工事の工程計画図(一部)

また、ここで適用した工事は、工程面からみると比較的単純な工事といえるが、それでも道路下埋設物や仮設道路の民間借地の問題、許認可の裁可時期など、いくつかの不確定要因があり、施工順序が工事の途中でたびたび変更される状況であった。このような状況においては、従来のように手作業や大型コンピュータを利用して対処していたのでは、多大な労力を必要とするのが一般的であったが、この適用例では、作業所設置のパーソナルコンピュータ利用という点に加えて、プロジェクト・グラフという、より人間の視覚で理解し易いデータ編集機能を用いたために、これらをスムーズに処理することができた。

(4) ネットワーク・モデルの適用状況
 この運用実験では、改良PN法で工程を表現することに問題があるかどうかを判断することも、大きな目的の一つであったが、順序関係記述という点では、特に大きな問題はなかった。ただし、表-5.18のWBSにおける部分工事(スパン単位)を概略レベルに、また単位作業(杭打ち等)を詳細レベルに対応させて、本システムの2階層ネットワーク・モデルに適用しようと当初検討したが、これを旨く表現することはできなかった。

これは、図-5.26のように後続スパンの杭打作業が、先行スパンの杭抜作業に先行するというように、詳細レベルにおける作業間の関係と、概略レベルにおけるものが完全には一致しないことに起因している。このため、前述したように、今回の運用実験では、スパン単位で表現した概略工程計画と、杭の打ち抜き作業を単位とした詳細工程計画の2種類を、別個に作成しなければならなかった。以上のことは、管敷設工事では単純な階層モデルが適用できないことを示している。そこで、このような現象のことを、特に“階層間のずれ”と呼ぶこととする。このような現象は、管敷設工事に特有のものかどうか、今後の研究結果を待たなければならないが、経験的な判断からすると、他のタイプの工事でも見られる現象ではないかと推定できる。

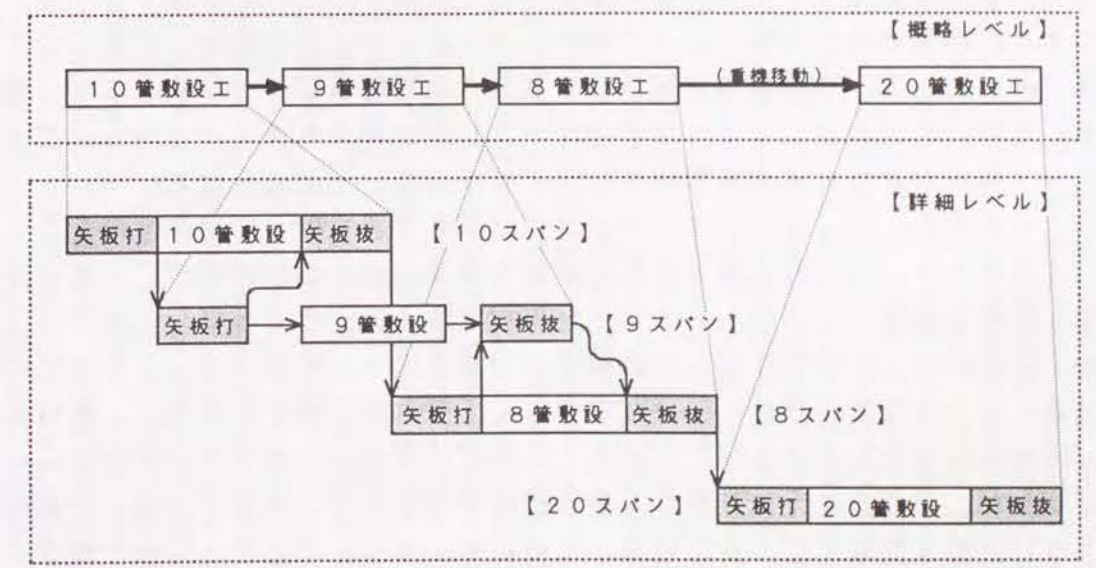


図-5.26 下水管敷設工事における階層間のずれ

3. 建設工事におけるネットワーク手法適用の課題

前段では、具体的工事を例に工程管理システム適用の効果や問題点を論じたが、ここでは他の適用工事の結果も踏まえて、建設工事の工程管理業務にこのようなシステムを適用させていくための、より本質的な問題点について、①データ作成に関する課題、②ネットワーク構造に関する課題、③計画の最適化に関する課題、および④利用環境に関する課題、の4つに分けて考察する。

(1) データ作成に関する課題

ネットワーク手法は、ネットワークを構成するアクティビティやそれ等の順序関係などの詳細なデータを組合せることにより、ネットワーク全体が要する期間やクリティカル・パスなどを算出する手法であるために、必然的に入力するデータ量が多くなる。このため、これ等のデータを容易に作成する機能が、ネットワーク手法普及のキーポイントとなる。特に、現在のように工事規模が大型・複雑化してくると、全体詳細計画のネットワークでは数千作業となるケースも現れてくるし、また、計画時に行われる代替案作成や、着工後の管理段階における計画変更なども頻繁に行われるようになるため、このようなネットワーク自動生成機能は非常に重要となる。

そこで、PF-NETSの開発にあたっては、ネットワークの一部をコピーする機能や、CRT上で図的にネットワークを作成・変更できるプロジェクト・グラフ機能を作成し、以上の問題に対応してきたが、これだけでは大規模化するネットワークに対応することは難しい状況となってきた。また、これまで他では、この問題を解決するための1方法として、工事タイプごとの標準的なWBSをデータ・ベース化して利用する方法が、主に建築分野において提案されてきている。しかし、土木工事では①工事形態が多様であること、②取り得る工法が多いこと、また③仮設工事を含めると無限に近い作業パターンが存在すること、などにより、必要となる工事パターンを全てデータ・ベースに登録しておくことは困難である。一方、作業の順序関係はWBSの階層関係だけでは決まらない場合が多いため、別途入力しなければならないという問題点もあることから、データ・ベース利用だけでは本当の意味の解決とはならないと考えられる。

以上のように、ネットワーク・データの作成は非常に難しい問題であることから、これまで、技術的知識や経験的知識を豊富に有した技術者が、工事の諸々の施工条件を勘案して作成してきたのが現状である。このことは、一方では「工事の工程計画は、それを作成した技術者の力量に大きく依存する」ことを意味している。このようなことは、工事量が少なく工事計画に関する知識が、業務を通じて確実に伝承されるような、これまでの状況であれば、さほどの問題とはならなかったが、現在のように多量な工事と技術者不足という状況下では、計画の質低下という形で問題化してきている。このため、ネットワーク・データ作成の労力削減という目的だけではなく、施工計画の質を維持するためにも、工事マネジ

メントに関する知識をコンピュータに蓄積し、これを利用してネットワークを自動的に生成する機能は、今後益々重要となってくるものと考えられる。本論文では、以上のような観点から、この問題の解決方法に関して、前章で詳細に論じた。

(2) ネットワーク構造に関する課題

前節で述べた下水管敷設工事の運用実験において、工程ネットワークを階層的に表す場合、階層間のずれという問題点があり、単純な階層モデルで表現することが難しいことが解った。つまり、建設プロジェクトを構成する構造物や施工ブロック間の施工順序は、あくまで概念的なものであり、実際の計画では、より下位レベルの施工重機や技能員の移動順序をもとに、計画化が進めらる。このため、以上のような概念レベルの施工順序関係をもとにネットワーク計算を行うと、非常に冗長な計画となってしまう。このため、前節の下水管敷設工事の例では、①工事全体を検討する概略計画と②月間レベルでの検討を行う詳細計画とは、別々のネットワークとして作成しなければならなかった。

この問題の対応策としては、階層間のずれから起こる概略作業間の重複をSS関係で表現する方法が考えられるが、この場合、SS関係のタイムラグの設定が困難であること、週間や日常レベルに拡張しにくいこと、などの理由から、根本的な解決策とは考えられない。そこで、概略レベルと詳細レベルでは、順序関係の意味が異なるものとして、ネットワーク計算を実行するモデルが考えられる。すなわち、図-5.27のように概略レベル作業の順序関係は、工事の施工順序を表す概念的な関係としての意味を持たせ、実際のネットワーク計算では、詳細レベルの異なるサブネットワーク間の作業の順序関係に基づいて計算を進め、必要に応じて上位の概念的な関係を利用するといった、“ヒューリスティックなネットワーク・モデル”が考えられる。つまり、概念的なマスター・ネットワークと実態的なサブネットワークという、階層的なネットワーク構造をベースとして、それをヒューリスティックに解析するシステムが、今後必要となるものと考えられる。以後このようなネットワークを概念ネットワーク(conceptual network)と呼ぶこととする。

(3) 計画の最適化に関する課題

周知のように、PERTはプロジェクトの全体工期を知ることが目的に開発され(PERT/time)、後に投入資源(PERT/manpower)やコスト(PERT/cost)に関するデータも加え、工程の最適化を図る手法に拡張されてきた。しかし、投入する資源は多種類にわたり、その各々の特質や供給量、それに重要度は、工事ごとに異なる。このため、このような特性を考慮して数学的に最適解を求めることは、非常に難しい問題で、これまでに試みられた方法は、そのほとんどが制約条件を制限して求められるものであったために、現実の工程計画に適用するまでに至っていない。例えば、ブランチ&バウンド法を用いる場合では、解の組み合わせが膨大な数になるために、数千作業を要するような現実の工事に適用することは難しい。また、山崩し法も資源の重み付けや山崩し手順が、非常に単純化されているために、現実の複雑な工事に適用してもそれほど効果は上がらないものと考えられる。

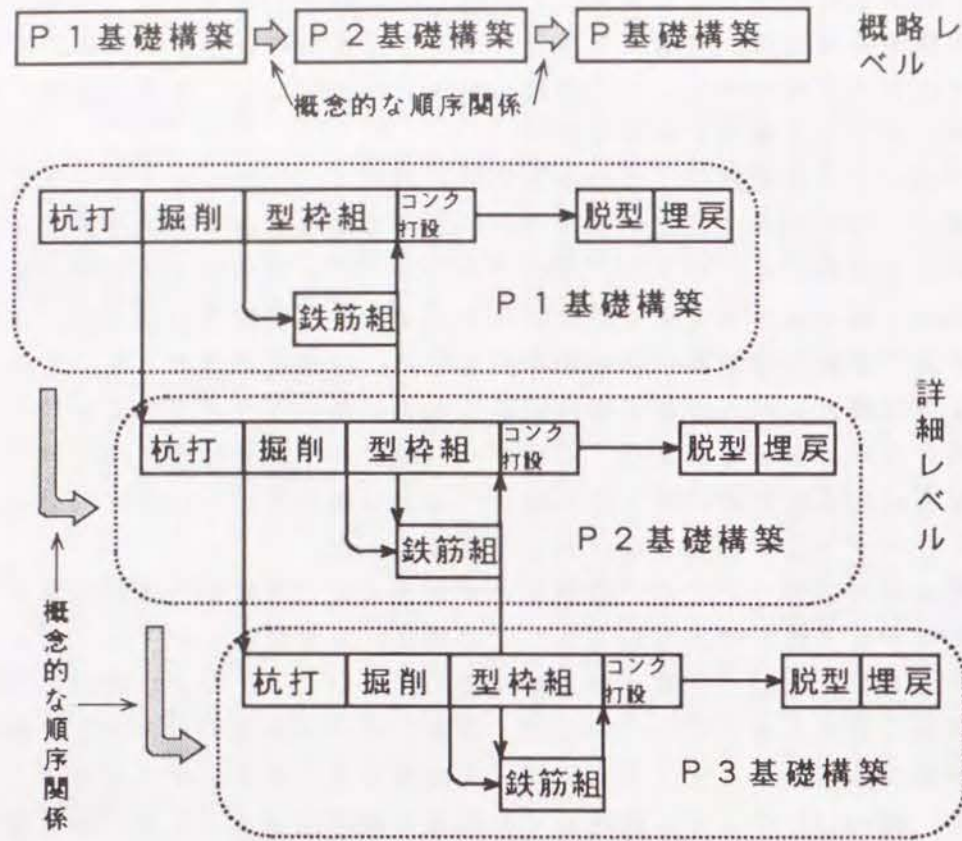


図-5.27 概念ネットワークの例

以上のように、現実の工事には多種多様な制約条件があるにも拘らず、これまでの方法は、あくまで数学的な最適解を求めようとした所に根本的な問題点があったと考えられる。すなわち、技術者が経験的に発見した計画の改善方法など、最適化に関する諸々の経験的知識を活用して、工程計画を逐次的に改善していくという発見的 (heuristic) 方法を用い、これにより現実の工事に利用できる妥当解を求めるという方法が、より適しているものと考えられる³⁰⁾。

(4) 利用環境に関する課題

ネットワーク手法を実際の工程管理業務に適用するためには、コンピュータ利用が不可欠であるが、PERTが我が国に初めて導入された20数年前には、コンピュータといえば本社に設置された大型コンピュータがあるだけで、作業所の業務にコンピュータを利用することは、非常に手間がかかる状況であった。しかし、その後、コンピュータの小型化・低価格化が急速に進んだことにより、工事期間中だけ仮設される作業所においても、パーソナルコンピュータや最近とみに低価格化が進んだEWS (Engineering Work Station)が設置されるのが普通の状態となってきている。

また、これ等の小型コンピュータの性能も大きく向上し、数年前の大型コンピュータに匹敵するような処理速度や記憶容量を持つものも登場してきている。このため、PF-NETS開発の初期において問題となったネットワークの計算時

間は、パーソナルコンピュータのCPU (Central Processing Unit) が、当時の8ビットから16ビット、それに32ビットへと進歩し、処理速度が飛躍的に向上したために、当初数時間を要したものが、現在では数分ですむように大幅に改善されてきている。

以上のように、作業所における工程管理業務にネットワーク・システムを活用するためのコンピュータの利用環境は、ハードウェア機器を中心として急速に改善されてきているが、このようなハードを利用するためのソフト、すなわち工程管理システムやコンピュータ機器類の使用方法などに関しては、まだまだ改善の余地が残されている。つまり、作業所で業務を行う職員は一般にコンピュータに不慣れであるため、今後、PF-NETSのようなシステムを普及させていくためには、音声や動画などの新しいメディアを利用することによる、マンマシン・インターフェイス (MMI, Man Machine Interface) の改善が重要である。例えば、PF-NETSでは工程図の作成のためにプロッターを使用するが、この操作の煩雑さがPF-NETS普及のボトルネックの1つともなっている。

第6節 結 言

本章では、工程計画の中でもスケジューリング段階に焦点を当てて、特に、工事マネジメントで合理的に利用するためのスケジューリング方法と知識ベース・システム化の方法、システム開発の実例、および、そのシステムの適用事例とそこで得られた知見について、考察を加えてきた。

まず最初の第2節では、工事マネジメントにおける詳細工程計画に使用するための計画手法に関して、工程計画モデルの分類を試み、各々の特質に関して検討を加えた。ただし、ここでは工程計画モデルを①図式モデル、②ネットワーク・モデル、それに③シミュレーション・モデルに大きく分類したが、本研究ではネットワーク・モデルの利用を前提としていることから、この部分を詳細に検討した。この結果、ネットワーク・モデルの中でも、工事マネジメントの重要な管理要素の一つである資源との関係が明確となる資源制約モデルの適用が、最も合理的と考えられた。

しかし、この資源制約モデルでは、工程と資源という異なる要素を同時に考慮するために、これを実現する計画方法は、従来のような数理的手法の適用は難しい。そこで、技術者のもつ経験的知識を利用して、現実的な計画案を効率的に作る方法として、発見的方法が妥当であることを示した。さらに、発見的方法の中でも、資源配分法が各種の前提条件や過程を組み込むのに適しているという理由から資源配分法が適していると考え、これを知識ベース・システム技術を応用してシステム化する方法に関して述べた。

しかし、このような知的スケジューリング・システムとは別に、従来型のスケジューリング・システムの利用という点においても、いまだに多くの問題が存在すると考えられたので、第3節では、パーソナル・コンピュータで利用することができるスケジューリング・システムPF-NETSの開発と、そこで検討した問題解決方法を紹介した。すなわち、このシステムは、工程管理業務の概略計画から詳細計画、および着工後の月間管理レベルまでを適用対象としていること、また、計画手法はプレシデンス・ネットワーク法をベースとして、BF関係など新たな順序関係を設定できるようにしたり、ネットワークを階層的に表現しやすくしたり、さらに稼働日の設定を①延日と②暦日の2方法で指定できること、また、マンマシン・インターフェースの向上には、特に注意を払い、プロジェクト・グラフと呼ぶ、ネットワーク・データの図式入力・変更機能を開発したり、その他の操作性の向上を図ったこと、さらに、建設工事での適用を行いやすくするために、アクティビティの所要日数の設定方法を、従来の確定日指定に加えて、①日投入資源量や②作業スピードによっても指定できるようにし、これによって歩掛りや作業スピードを変化させた工程のシミュレーションや、これ等の値を変えることによって施工結果を容易に残計画に反映させることができるようにしたことなどを紹介した。

さらに第4節では、このPF-NETSの運用実験の例として下水管敷設工事

を取り上げ、そこでの適用効果や問題点を整理した。そして最後に、これまでにPF-NETSを適用してきた他の多くの工事例も含めて、建設工事の工程管理業務にネットワーク・システムを適用するための課題について、①データ作成に関する課題、②ネットワーク構造に関する課題、③計画の最適化に関する課題、および④利用環境に関する課題、の4つに分けて整理した。

この結果から、①に関しては「知識工学手法を適用したネットワーク自動生成機能の必要性」が明確となった。また、また②に関しては「計画化知識によるヒューリスティックな階層管順序関係の設定法」が、③に関しては、やはり「計画化知識によるヒューリスティックな投入資源最適化方法」、④に関しては「音声や動画などの新しいメディアを利用したマンマシン・インターフェースの向上」が、それぞれ課題として上げられた。

【参考文献】

- 1) 吉川和広 : 土木計画学—計画の手順と手法、森北出版、pp.13~14、1975
- 2) Melin, J.W. and Whiteaker, B. : Fencing a Bar Chart, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol.107, No. C03, pp.497~507, 1981
- 3) O'Brien, J. : VPM Scheduling for High-Rise Buildings, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol.101, No. C04, pp.895~905, 1975
- 4) Johnston, D.W. : Linear Scheduling Method for Highway Construction, Journal of the Construction Division, ASCE, Vol.107, No. C02, pp.247~261, 1981
- 5) 春名 攻、田坂隆一郎 : 地下鉄開削工事における掘削工程のシステムシミュレーション、土木学会論文報告集、第293号、pp.91~99、1980
- 6) Ayyub, B.M. and Haldar, A. : Project scheduling Using Fuzzy Set Concept, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol.110, No.2, pp.189~204, 1984
- 7) 刀根 薫 : PERT入門、東洋経済新報社、pp.109~111、1970
- 8) 寺野寿郎 : システム工学入門、共立出版、p.241、1985
- 9) Zozaya-gorostiza, C., Hendricson, C and Rehak, D.R. : Knowledge-Based Process Planning for Construction and Manufacturing, Academic Press, Inc., pp.44~48、1989
- 10) 知的コンピュータシステム事典、産業調査会、pp.63~64、1989
- 11) 吉川和広、春名 攻 : 施工計画における最適ネットワークの作成法に関する一考察、土木学会論文報告集、第182号、1970
- 12) 吉川和広 : 土木計画学—計画の手順と手法、森北出版、pp.188~194、1975
- 13) Bennett, F.L. : Critical Path Resource Scheduling Algorithm, ASCE, pp.161~180, 1968
- 14) Wiest, J.D. : A Huristic Model for Scheduling Large Projects with Limited Resources, Management Science Vol.13, No.6, pp.359~367, 1967
- 15) Zozaya-gorostiza, C., Hendricson, C and Rehak, D.R. : Knowledge-Based Process Planning for Construction and Manufacturing, Academic Press, Inc., pp.42、1989
- 16) Wiest, J.D. and Levy, F.K. : A Management Guide to PERT/CPM, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., pp.106~120, 1977
- 17) 須永照雄 : PERT系のプログラミング、朝倉書店、pp.90、1972
- 18) エンジニアリング プロジェクト・マネジメント用語辞典、重化学工業通信社、pp.272、1986
- 19) Wiest, J.D. : A Huristic Model for Scheduling Large Projects with Limited Resources, Management Science, Vol.13, No.6, pp.359~367, 1967
- 20) 吉川和広、山本幸司 : M A N, D A Yを変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察、土木学会論文報告集 No.256, pp.49~58, 1976

- 21) 宇津橋昭八郎 : 工程管理の最適化に関する考察(1)、土木技術39巻3号、1984
- 22) 山本幸司 : 土木工事における施工計画のシステム化に関する研究、京都大学学位論文、pp.109、1978
- 23) 吉井良二、池田将明 : 工程管理支援システム (PF-NETS) の開発と適用に関する研究、第5回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会、pp.31~38、1987
- 24) 吉川和広、春名 攻、池田将明 : パソコンを用いた現場マネジメントシステムの実験的開発について、土木計画学研究・講演集 No.7、1985
- 25) 春名 攻、池田将明 : On-site Management Systemの開発方法に関する研究、土木計画学研究・講演集 No.8、1985
- 26) 吉川和広、春名 攻、池田将明 : オンサイトマネジメントにおける工程計画システムの利用に関する研究、第10回電算機利用シンポジウム、1985
- 27) 春名 攻、藤田興一、池田将明 : 地下滞水池築造工事における現場管理トータルシステムの開発について、土木学会第41回年次学術講演回、1986
- 28) 池田将明、吉川和広、春名 攻 : パーソナル・コンピュータを用いた工程管理システムの開発に関する方法論的研究、土木学会論文集 No.391/VI-8、pp.179~187、1988
- 29) Ikeda, M., Yoshikawa, K. and Haruna, M. : Development of Personal Computer-based Management System for On-site Construction Planning and Scheduling, International Conference on THE USE OF COMPUTERS IN CIVIL ENGINEERING, TORONTO, CANADA, 1985
- 30) 吉川和広、山本幸司 : M A N, D A Yを変数とするヒューリスティックな日程計画法に関する一考察、土木学会論文報告集 No.256, pp.49~58, 1976

（此處為極淡的印刷文字，內容難以辨識，疑似為正文或附錄的開頭部分。）

第 6 章 結 論

（此處為極淡的印刷文字，內容難以辨識，疑似為正文或附錄的開頭部分。）

(1) 本研究の要旨

本研究は、建設プロジェクトを推進するための工事マネジメントを対象とし、その中でも特に工程計画に着目して、システム化のための方法を論じた。ここで特に工程計画を取り上げた理由は、本文中でも度々述べたように、原価、工程、品質、労務、資材といわれるマネジメント要素の中でも、工程がマネジメントの中軸をなすことによる。このために、工事マネジメント全体をシステム化していくに当たって、まず最初に工程計画・管理業務をマネジメントの中核システムとして開発することが非常に重要である。

そして、同様な考えの基に、これまで多くの先達により、この分野に関する研究がなされてきたが、克服すべき課題はまだ多く残されているのが現状である。特に、工程計画の前段に位置するプランニング段階は、ダムなどの特定の工事種類を除き、これまでは余り研究されてきていない。特に、工程ネットワーク生成のためのプランニングに関する研究は、人工知能研究が進んできた今日、注目を集めるようになってきた段階にある。

また、後半のスケジューリング段階は、相対的に多くの研究が進められてきた分野ではあるが、実務に直結した研究はまだ充分とはいえず、やはり課題は多く残されている。その一つは、資源制約を考慮した工程計画方法であるが、これまでは、数理的側面からの研究が多く、実用的な計画が得られるまでには至っていない。人工知能技術を適用して、経験豊富な技術者の計画立案能力をシステムに組み込む必要がある。また、もう一つの課題は、スケジューリング技術を実際の業務に適用することであり、このためには計画技術だけではなくコンピュータ技術に関する研究も重要となる。

以上のように、「工程計画のシステム開発方法の確立」が本研究の主要なテーマであるが、これを補完するための研究課題として、工事マネジメント自体に関しても、①マネジメント技術の発達、②マネジメント組織、それに③マネジメント情報システムの三点に関して、若干の考察を加えた。そして、本論文は、序章と結論を含めて全体で6章の構成とした。以下に各章ごとの研究内容と結論の骨子を示す。

(2) 第2章の概要

第2章では、本研究が対象とする工事マネジメント概念を明らかにする目的で、その主要な構成要素である①マネジメント技術、②マネジメント組織、③マネジメント情報システムについて検討し、以下のような考察を加えた。

まず、マネジメント技術に関する内容としては、最初に、現状における工事マネジメントの実状を知る上で重要な、我が国における建設産業近代化の歴史に関して、現在に至る過程とそこで顕在化した諸問題について考察した。また、工事マネジメントが、従来の工事管理と異なることを特徴づける1つの要素である各種のマネジメント手法に関して、1890年代後期に米国で起こった科学的マネジメント法の発達や、それ以後の各分野におけるマネジメント手法の研究開発状況を、品質、原価、工程、安全の4分野ごとに概観した。

この結果、これまでORや統計解析法など、主に数理計画法を主体として、工

事マネジメント技術が発達してきたが、ここに技術的な限界が顕在化してきているのが解った。すなわち、これまで技術者の仕事とされてきた部分にまで、システム化の対象が拡大してきたことから、このような悪構造問題に対応しやすい、人工知能研究に基づくシステム化技術の重要性を示すことができた。

また、マネジメント組織に関しては、米国における新たなコンストラクション・マネジメント契約と、従来のランプサム契約との比較や、近代組織形態の発展過程などを検討することにより、現状における組織形態を再考する必要性を示した。そして、このような観点から、現状における建設企業の組織形態の成り立ちとその特徴、それに、建設企業組織の中であって、実際に工事マネジメントを遂行する作業所組織の現状を分析し、今後の組織の在り方に関して考察を加えた。

また、マネジメント情報システムに関しては、情報処理技術や通信技術の発達で、これまでの組織形態や業務形態を大きく変貌させてきた経過を分析し、この結果、組織内における意思決定権限の配分や、本支店組織と作業所組織との業務分担などが、変化してきていることを示した。すなわち、戦略的意思決定権限は本社集権化が進んできている反面、業務的意思決定権限に関しては、逆に、作業所への分権化が進んできている。このために、本支店と作業所との間の情報システムの在り方も、以上の変化に合わせて、緊密化をはかることが求められている。

そして最後に、以上のようなマネジメント・システムを検討する方法として、SADTを改良したシステム・モデリング方法で、現状業務のモデル化を進めることが重要であることを示した。

(3) 第3章の概要

第3章では、工程計画システムについて、その現状と問題点を考察し、これを解決するための新たなシステム化技法として、人工知能技術の有効性と技術レベルを示し、この人工知能技術を適用した工程計画システムの構成と可能性について示した。

すなわち、最初に、これまで我が国で進められてきた工程計画に関する研究内容を①プランニング法、②スケジューリング法、それに③投入資源最適化法に分けて、詳しく考察した。この結果、従来からの数理計画法を主体とした研究では、これまでの起こってきている、新たな業務システムの開発要求に応じられないこと、そして、この問題点を解決する方法として、人工知能研究により開発された新しいシステム化技法が有効であることが解った。そこで、この分野に関して先進国である米国において進められている人工知能技術の適用研究を調査し、特に、工事マネジメント分野への適用が有望であることを明らかにできた。

そこで、このような人工知能研究によるシステム化技術の適用を図るために、これまでの研究経過と現在の技術レベルを検討した。この結果、人工知能研究で生まれた様々な技術の中でも、知識工学やファジィ理論、それに、ニューラル・ネットワークなどが、工事マネジメント・システム開発に有効と考えられること、特に、現状の技術レベルでは、知識工学に含まれる知識ベース・システム技術の適用が重要であることが解った。

そして、このような人工知能技術を工程計画問題に適用することを目的として、

工程計画問題の構造や特徴について検討を加えた。この結果、プランニング段階では工程ネットワーク生成問題、また、スケジューリング段階では、資源配分問題に、人工知能技術を適用することが重要であることが理解できた。そこで、このような知的工程計画システムの開発に必要な知識の種類と表現方法、また、計画生成方法などについて、とりまとめた。

(4) 第4章の概要

第4章では、前章で示した「知的工程計画システムの構想」のプランニング部分に関して、計画生成方法とシステム化方法について、さらに具体的に検討を加え、この方法に基づき開発したネットワーク生成システム(PF-PLAN)の開発内容を紹介した。

すなわち、まず最初に、計画生成段階の分析から、プランニングの問題構造を明かにし、これを図に示した。そして、このような計画立案問題に対して行われてきた研究内容を調査し、手段-目的解析法を基礎に、単純なAIプランナからより複雑なKIプランナという計画生成方法が開発されてきたことが解った。そして、このような計画方法は、①手段-目的戦略と②WBS戦略に分類できること、また、この各々の問題点を克服する考え方としてハイブリッド戦略を提案した。

そして、この戦略に沿った計画生成方法として、フレーム理論に基づく知識の階層的な整理、蓄積方法や、オブジェクト指向に基づくネットワークの生成方法について、具体的に示した。特に、知識ベース・システムの理念である“知識の独立性”や、メソッドやトリガーなどの付加手続きの活用方法などに関しては、詳細に示した。

次に、以上の考えに基づいて開発したネットワーク生成システム(PF-PLAN)について、システム開発の過程や、システム構成、それに、重要な機能と特徴などを紹介した。このシステムは、次章で詳しく述べるスケジューリング・システムPF-NETSの入力データ・ジェネレータとして、位置づけられ、基本的な工事情報を入力するだけで、PF-NETSが必要とする工程ネットワーク・データを自動的に生成することができる。そして、この開発過程で得られた知識ベース・システム技術適用の問題点について考察を加えた。特に、推論に当たって、深い知識の利用が重要であることと、曖昧な知識や情報の取扱いや評価方法が、まだ確立していないことが明確となった。

(4) 第5章の概要

第5章では、知的スケジューリング・システム開発を目的として、計画モデルの検討、システム構成を検討し、次に、現状の問題点を明かとするために、従来型のスケジューリング・システム開発例とその適用結果を示した。

すなわち、最初に、これまでに提案されてきた工程計画モデルを比較検討した。ここでは、まず最初に①図式モデル、②ネットワーク・モデル、それに③シミュレーション・モデルに分類したが、本研究ではネットワーク・モデルの利用を前提としていることから、この部分の検討を進めた。この結果、資源制約モデルが、工程と資源制約を同時に考慮できるということから、工事マネジメントに適して

いること、そして、このための計画方法としては、発見的計画法に属する資源配分法が有効であることが解った。

また、この資源配分法による計画手順を具体的に検討するために必要となる、スケジューリングのための問題整理を行った。すなわち、①単位作業と要素作業、②主体資源と附属資源、③作業に対する資源投入方法、④作業への資源投入量と中断の必要性、それに⑤資源の重要度と調達限界に関して、考察を加え計画立案のための前提条件や仮説を定義した。また、ここでの定義に基づき、さらに、計画システムの目的、与件情報、それに制約条件を明確にして、具体的な計画立案のための戦略と手順を示した。

次に、従来型スケジューリング・システムの問題点を明かとするために、筆者が数年前に開発し、普及を進めてきた、パソコンで稼働するスケジューリング・システムPF-NETSの開発とその概要を紹介した。この開発に当たっては、建設工事をネットワークで表現するのに必要な機能という観点から、作業間の順序関係にBF関係とRE関係を追加したこと、ネットワークの階層化とプロジェクト・グラフによるデータ編集機能を付加したことを説明し、この効果が高かったことを示した。

このシステムは、開発と改良を繰り返しながら、これまでに多くの建設プロジェクトに適用してきたが、ここでは、この概要を紹介し、次に、下水管敷設工事を取り上げて、そこでの適用方法と経過状況について紹介した。この結果、“階層間のずれ”という問題があり、工事のネットワークを単純な階層構造では表現できないことが解った。そこで、他の課題も含めて整理すると、①ネットワーク生成に経験と労力を要すること、②資源制約を含めた現実的な工程計画が得られない、③単純な階層構造とはならないこと、それに④コンピュータ・システムのマンマシン・インターフェイスに劣っているなどの課題が存在することが解った。

そして、これらの課題の中で、①と②に関しては、人工知能技術の適用により解決できることを、それぞれ第4章と第5章で既に示した。また、③に関しては、新たな概念的順序関係スケジューリング・システムに付加し、第4章で示した知的システムが、他の関係と区別して生成することで、解消することができた。さらに、④の課題に関しては、第3章で人工知能技術の特徴として示したように、従来システムを人工知能システム化することにより、次第に解消できてきている。

(5) 本論文のまとめ

これまで述べてきたように、本研究では、とかく経験に頼るところの多い工事マネジメント業務の合理化を目的として、その中核的要素である工程計画のシステム化に着目した。そして、従来から研究されてきた数理工学的手法の適用だけでは、この分野の問題解決が不可能であるという認識から、人工知能技術の適用を検討し、これまで技術者が行っていた部分も含めたシステム化の方法を検討した。

すなわち、従来行われていた工事マネジメント業務では、数量計算や図表の作成など、ごく限られた部分しかコンピュータで処理されずに、その他の大部分は、担当した技術者の経験と力量に委ねられているのが現状である。ところが、人工

知能研究の分野では、このように人間が行ってきた知的な問題処理方法の解明が進展し、工事マネジメント分野でも、このような技術を利用して、より広範なシステム開発が、期待されるようになってきた。このような背景から、工程計画業務の知的システム化を目指したのが本研究である。

そして、この結果、①工程計画問題の構造を明らかにしたこと、②工程計画に関わる知識を体系化したこと、③オブジェクト指向による工程ネットワーク生成方法を開発したこと、④発見的スケジューリング方法の骨格を示せたこと、また、⑤実務での適用上の問題点とその解決策を明らかにしたこと、等々、本研究では、工程計画業務のシステム化に関して、問題の解明や体系化、それに、具体的方法の提案を行うことができた。

しかし、本研究の結果、まだ多くの問題が残されていることも明きらかになった。例えば、工事マネジメントに関する問題としては、①問題構造の体系化が進んでいないこと、②マネジメント技術に関する用語の定義や統一化が進んでいないこと、の2点が非常に重要である。何故ならば、今後、我々が取り組まなければならない問題は、多くの要因が錯綜した部分であり、その一部分を取り出してきた、そこでの整合性を図るだけで解決できる問題ではない。このような意味あいからすると、本研究で工程計画を対象としたことは、工事マネジメント全体を考える上で、最も有意義な切り口から体系化を試みたものにすぎないともいえる。つまり、将来的に工事マネジメントの体系化が進んだ段階では、本研究で築いた体系の一部に修正を迫られる事態が起こることは、予想に難くない。

また、人工知能技術に関する残された問題としては、①知識獲得や自己学習のメカニズムが明らかにされていないこと、②コネクショニズムによる問題解決方法が組み込まれていないこと、③知的システム開発支援ツールが劣ること、などが重要である。知識獲得方法の確立は、工事マネジメント問題を体系化する上で非常に重要な要素技術である。また、知的システムが必要とする知識の量は莫大であり、それらは時々刻々、追加・修正が進められている。このために、自己学習も、開発した知的システムを実用システムとして維持管理する上で、必要不可欠な要素技術である。また、言葉で表現できない問題は、工事マネジメント分野にも多く存在する。そこで、このような問題を解決するために、現在の言葉による推論システムと連携して利用できるコネクショニズムによる方法の開発は重要である。さらにもう一つ付け加えると、現状における知的システムの開発支援ツールが、研究レベルとかけ離れすぎていて、人工知能の理念を実現することが難しい状況にあることも、非常に大きな問題の一つと考える。

以上のように、本研究では、工事マネジメント問題に関し、工程計画を中心とした体系化を図り、人工知能技術を応用した新しい方法も提案し、いくつかの課題を解決することができた。しかし、いまだに多くの課題が残されていることも事実である。そこで、今後は、残された以上のような課題の中でも、特に工事マネジメントに関する研究に重点を置き、これと並行して進められるであろう人工知能技術に関する研究成果を取り入れて、世の中の要求を満たすことができる工事マネジメント・システムを確立していきたいと考える。

添付資料

資料-1 人工知能適用に関する外国文献抄録

8706-00
Hierachical Rule-Based Activity Duration Estimation 階層的知識ベースによる作業所要日数の算定
著者: Chris Hendrickson (CMU土木工学部助教授) David Martinelli (同助手)、Daniel Rehak (同助教授)
出典: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE Vol. 113, No. 2, June, 1987, PP. 288~301
概要: アクティビティの所要日数は、標準作業の生産性を現場条件や作業特性を勘案して修正し見積られるのが一般的である。そして、この修正の仕方は、工学的評価と過去の経験によるという特徴を持っている。本論文では、このような修正を行うための階層的なルールベースの構成が理論的に研究されている。見積のためのルールを理論的に形式化することにより、作業生産性に影響すると思われる要因やそれ等の修正のためのルールの精度を特定することが出来る。また、統計手法を用いた方法や統計手法とルールを組み合わせた方法など、代替的な方法との比較検討を行った。レンガ積み作業の所要日数見積を行うためのプロトタイプESであるMASONについて、その概要とルールに基づいた見積のアプローチ方法について実例による利用例を示した。また、MASONの説明機能と生産性改善分析機能についても、それ等の概要を示している。

8709-00
ISSUES IN CONSTRUCTION SCHEDULE KNOWLEDGE REPRESENTATION (建設工程計画知識表現に関する研究)
著者: Jesus M. De La Garza, C. William Ibbs(イリノイ大学土木工学部)
出典: Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium Sep. 14, 15, 1987, London United Kingdom, pp. 543~553
概要: 著者らは、建設工事における階層的工程解析・評価のための知識ベースによるプロトタイプESを開発している。本論文の主題は、このための知識の構成と表現法にあり、この問題領域とコンピュータ環境設計を論じている。このシステムの構成は、コスト、工期、施工法(logic)、一般仮設(generale requirement)の4キー副分類から構成される。また、着工前と後における工程分析の重要性についても論じている。この研究開発の目的は、a)知識ベースシステムの実行可能性を示すこと、b)コスト、工程、品質の異なるプロジェクト管理要素を統合化するための1つの重要な方法として、オブジェクト指向プログラミング概念の位置づけを研究すること、の2点である。

8709-02
EXPERT SYSTEMS IN REAR-TIME CONSTRUCTION OPERATION (リアル・タイム建設施工におけるエキスパート・システム)
著者: Boyd C. Paulson (スタンフォード大学土木工学部教授)
出典: Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium Sep. 14, 15, 1987, London United Kingdom, pp. 554~565
概要: 電子機器による建設現場作業のリアルタイム・データ収集は、知識ベースESと結び付けることにより、シミュレーションや非線形生産最適化などのような、これまでの解析的モデリング手法をより現実的な道具に変えることが出来る。つまり、リアルタイム・データ収集技術と、データ自動収集・蓄積・修正・画像表示・統計解析・意思決定支援等のマイコン・ベースのソフトとを連携することに、本研究の目的がある。本論文では、いくつかの一般的概念を概説した後、荷重増加曲線(load-growth curve)と呼ばれる非線形最適化法(non-linear optimization method)を実行する目的で、搬土スクレーパーへの機器装着と運転監視に焦点を当てた。これは、スタンフォード大学において行われた、IBM-PC/ATマイクロコンピュータ上でEXSYSというESシェルとインターフェイスを持たせた物理モデル実験をベースとしている。この研究結果は、建設生産の最適化に関するより広範な問題領域に適用できるものと考えられる。

8709-03
USING EXPERT SYSTEMS FOR THE LAYOUT OF TEMPORARY FACILITIES ON CONSTRUCTION SITES (建設現場における仮設設備配置計画へのエキスパート・システムの適用)
著者: Iris D. Tommelein, Raymond E. Levitt (スタンフォード大学土木工学部) Barbara Hayes-Roth (同大学、知識システム研究所コンピュータ科学部)
出典: Proceedings of CIB-W65 5th International Symposium Sep. 14, 15, 1987, London United Kingdom, pp. 566~577
概要: 建設プロジェクトの期間中、現場では様々な仮設設備が配置され撤去される。それ等の位置を決定することは、いくつかの制約下における対象物の位置を操作する空間的な配置問題(spatial arrangement problem)である。著者らはこの問題に対して、黒板モデルESシェル、BB1を用いて、レイアウト設計知識を実行することにより、建設現場における仮設設備配置計画を支援するESを開発している。本システムは、レイアウトを増加的に組み立てるために、便宜的に様々な問題解決戦略を適用している。設備の位置を表すフレームは、地形的かつ一時的な属性、つまり設備間の関係を表す2次元空間における一時的な制約条件を含んでいる。この表現には、対象や制約条件に関する明確なデータが必要である。従って、知識獲得法が主要な研究テーマとなっている。これまで、このBB1シェルを簡単なプロトタイプでテストしてきたが、現在は実際のプロジェクトでの適用を試みている状況である。

8710-00
EXPERT SYSTEM FOR CONSTRUCTION PLANNING 施工計画のためのエキスパート・システム
著者: Chris Hendrickson (CMU土木工学部教授) Carlos Zozaya-Gorostiza (同助手)、Daniel Rehak (同助教授) Eduardo Baracco-Miller (同助手)、Peter Lim (同助手)
出典: Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE Vol. 1, No. 4, October, 1987, pp. 253~269
概要: 建設計画には様々な項目が含まれるが、建設技術の選択(工法選択)、作業の拾い出し(定義)、所要資源量、日数、コストの見積り、それにプロジェクト工程の準備作業が主要なものである。本論文では、これ等の業務を行うための知識集約ES(プロトタイプ)、CONSTRUCTION PLANEXを紹介している。本システムは、プロジェクトのアクティビティ・ネットワークの生成、コスト見積り、それに工程計画を作成する。すなわち、アクティビティの定義、順序関係の設定、最適工法の選定、所要日数とコストの見積りなどである。本システムはルーチン作業計画自動化の支援として有効である。例えば、計画戦略の分析・評価のための実験とか、設計、現場配置計画、プロジェクト管理等、より広範な建設支援システムへの利用などである。現在、本システムは地下掘削、基礎構築、構造建築などより構成される超高層建築工事の部分計画(modular plan)に適用されている。

8710-02
EXPERT SYSTEM IN CONSTRUCTION: WORK IN PROGRESS 施工分野におけるエキスパート・システム: 研究の動向
著者: David B. Ashley (テキサス大学土木工学部助教授) Raymond E. Levitt (スタンフォード大学ターマン技術センター、土木工学部助教授)
出典: Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE Vol. 1, No. 4, October, 1987, pp. 303~311
概要: 建設計画、技術マネジメント、メンテナンスの各分野は、知識ベースESの有効な適用分野として注目を集めるようになってきている。研究や実務の両方にインパクトを与える、この新しいコンピュータ技術が現実のものとなってきたにもかかわらず、成功例は現在のところ数少ない。しかし、最近の研究動向調査によると、知識ベースESには大きなインパクトを与えるような多くの潜在力がある。この調査で調べられた現在開発中のシステムについて、基本構想、実行環境、それに主体開発者等の概要を本論文に示した。また、最後に何故この分野が注目を集めているのか、また何故建設業がこれ等の開発により利益を受けるかについて、いくつかの考えを示している。

8806-00
CONCRETE OPERATION DECISION SUPPORT SYSTEM (CODSS) コンクリート施工意思決定システム
著者: Fabian C. Hadipriono (オハイオ州立大学助教授) Robert L. Sierakowski (同教授)、Charles C. S. Lin (同大学院生)
出典: The 5th International Symposium on Robotics in Construction June 6-8, 1988, Tokyo, Japan, pp. 491~499
概要: 本論文では、CODSSと名付けられたコンクリート工事意思決定支援システムを紹介している。この研究の例として選定された作業は、多階層(multi-story)構造物のコンクリート打設作業である。また、この目的のために“1ST CLASS”と呼ばれるESシェルを用いた。本システムは、シェル内に知識ベースを蓄積することにより、特にロボット作業環境における施工機械選定の完全な自動化を行うシステムの、最初の段階と位置づけられる。

8806-02
CONSTRUCTION NETWORK GENERATION WITH APPROXIMATE REASONING 最適化推論による工事ネットワークの作成
著者: C. William IBBS、T. C. Chang、 Diego Echeverry (UCバークレイ校土木工学部)
出典: The 5th International Symposium on Robotics in Construction June 6-8, 1988, Tokyo, Japan, pp. 491~499
概要: 建設プロジェクト管理の重要な点は、基本工程計画を正確に作成することにある。つまり、その計画が全ての進捗状況や生産効率を評価する基準となるためである。知識ベースESは、プロジェクトのよりよい管理を支援することが出来る。UCバークレイにおける研究は、このツールを使いこなすことにある。本論文では、自動建設工程計画作成システムで必要とされた概念について述べている。このプロトタイプは、CADタイプの情報からマイルストーン工程図を作成することが出来る。この研究の目標は、建設計画プロトタイプ・システムを設計し実行することである。また、実用システムにおいては定性的情報の理解と数量化が極めて重要であることが議論されている。そして、最適な推論機構をその基礎となる知識ベースESに統合化することを目的とした著者の研究を示している。

8807-00
GHOST: PROJECT NETWORK GENERATOR プロジェクト・ネットワーク作成システム: GHOST
著者: D. Navinchandra (CMUロボット研究所研究員) D. Sriram (MIT土木工学部助教授)、R. D. Logcher (同教授)
出典: Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE Vol. 2, No. 3, July, 1988, pp. 239~254
概要: ネットワーク工程計画システムは、1950年代を発端として建設産業において頻繁に用いられるようになってきた。今日、資源平滑化(resource leveling)や時間-コスト・トレードオフ分析などの洗練された手法を集約したプロジェクト・マネジメント・システムが氾濫している。ネットワークを基本とした全ての手法が、正確なプロジェクト・ネットワークの存在に依存している事実にもかかわらず、このネットワークを生成するためのアルゴリズムの開発には、ほとんど注意が払われていない。しかし、このことは特に驚くことではない。何故なら、ネットワークの生成は非常に複雑な発見的(heuristic)プロセスであり、コンピュータで効率的なアルゴリズムは存在しないからである。しかし、最近の人工知能技術の開発により、この問題に対応することが可能となってきている。本論文では、知識ベースプロジェクト・ネットワーク・ジェネレーター(プロトタイプ)(GHOST)を紹介している。このシステムは、アクティビティ集合を入力すると、それ等の順序関係を設定し工程計画を作成することが出来る。この知識ベースは、基礎構造、建設規範、ネットワークの冗長性等の知識から構成されるクリティクス(critics)として知られるいくつかの知識ソースから作成された。本論文には、これ等の方法論や例題を掲載している。

8809-00

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES
FOR GENERATING CONSTRUCTION PROJECT PLANS
プロジェクト計画作成のための人工知能技術

著者: Raymond E. Levitt (スタンフォード大学土木工学科教授)
Nabil A. Kartam (同助手)、John C. Kunz (インテリコープ)

出典: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE
Vol. 114, No. 3, September, 1988, pp. 329~341

概要:

1950年代に開発されたPERT/CPM等のネットワーク計画手法は、コンピュータの発達にともない改良が進み、建設プロジェクト計画のための強力な武器となった。しかし、これ等の手法の基本的な限界は、計画段階で作成されたデータを操作するだけで、計画立案の知識をほとんど利用できないことにある。つまり、有能な技術者が存在し、彼がデータを作成し出力結果を評価しなければならない点にある。これに対し、人工知能技術は計画作成のための知識の蓄積、利用(推論)、それに説明機能を提供してくれる。つまり、AI技術を用いれば、蓄積した知識により計画を立案したり、それ等を論評したりすることが可能だ。しかし、これまでに発表されたAIによる計画システムは、表現力の欠如等の貧弱な機能と知識の蓄積が少ないことが重なって、プロジェクト計画のような現実の複雑な問題には適用できないものであった。そこで、最近の研究は、計画型システムを開発するための効果的アプローチのための知識工学手法の開発に関するものが多くなっている。本論文では、これまで用いられてきた計画手法の限界と、AI技術の利点、工事計画におけるAI技術適用に関する既往の研究、それにAIを基本としたプロジェクト計画システムを開発するためのアプローチ方法について述べている。

8809-02

EXPLANATION OF CONSTRUCTION ENGINEERING KNOWLEDGE
IN EXPERT SYSTEMS
エキスパート・システムにおける建設工学知識の説明機能

著者: J. E. Diekman (コロラド・ボルダー大学建設工学部助教授)
Zaki Kraiem (同大学院生)

出典: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE
Vol. 114, No. 3, September, 1988, pp. 364~389

概要:

ESの中心の特徴は、システムが行った推論を説明出来ることである。本論文では、ESに共通して見受けられる説明(explanation)機能のいくつかについて簡単な調査結果を載せている。また、M. 1 ESシェルを用いて開発したC言語説明機能について、そのロジックとコンピュータ・コードを掲載した。このC言語PGMは分脈規定(context-sensitive)であり、ネストされた説明が可能である。このため、使用者は上達するのにしたがって、より詳細な説明を要求することが出来る。また、この説明という特徴に加えて、このC言語PGMは様々な情報を持つASCIIファイルへアクセスすることもできる。従って、“ヘルプ”、“結論”、“注意”、“前提条件”等のファイルへアクセスするPGMのなかでこのPGMは利用される。本論文では、最後にシンプルな建設工学分野における、この説明PGMのデモを載せている。

8809-03

CLASSIFICATION SYSTEM FOR CONSTRUCTION TECHNOLOGY
建設技術のための分類システム

著者: C. B. Tatum (スタンフォード大学土木工学部助教授)

出典: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE
Vol. 114, No. 3, September, 1988, pp. 344~363

概要:

建設技術の構成や相違を明らかにすることは、建設技術の発展に貢献する。本論文では、次の4つの要素を対象とした分類システム(classification system)を紹介している。分類における要素や属性は、技術革新を計る道具であり、かつ特定の施工分野の基本的な改良状況を分析する道具となる。本論文では、これと関連したこれまでの研究をおさらいし、本システムの概要とある施工分野を例にこのシステムを用いた技術の定義法を紹介している。そして最後に、施工技術の構成に関する考え方や、研究と実務の両方において将来的にこのようなシステムがいかに重要かという点について述べている。

8809-04

EXPERT SYSTEM FOR EARTHMOVING EQUIPMENT SELECTION
IN ROAD CONSTRUCTION

道路工事における運土重機選定のためのエキスパート・システム

著者: Sabah Alkass (Tech. 大学土木工学部研究生)
Frank Harris (The Polytechnic 教授)出典: Journal of Construction Engineering and Management, ASCE
Vol. 114, No. 3, September, 1988, pp. 426~440

概要:

本論文では、今回開発した道路工事における搬土重機選定システム (ESEMP S) を紹介している。このシステムで用いている知識は、経験による判断知識、地形状況に関する規定、記録から推定される気象状況、重機性能、性能調査、積算データの6要素から構成される。この中の経験的な知識は、計画技術者や重機の専門家等の施工経験者から獲得された。これ等の知識はプロダクション・ルール形式で蓄積され、前向き・後向き推論により実行される。また、曖昧さの取扱機能、計算機能、外部PGMやDBへのアクセス機能等が付加されている。本システムの推論は、1)作業と作業環境の定義、2)道路分類による機械選定、3)積算と機械マッチング、4)最終機械選定、の4ステップで行われる。内容や価格に関していくつかのシェルを調査し、SAVOIRを採用した。これは、1)パソコンで利用できる、2)パスカル言語とのインターフェイスを持つ、3)質問に対して不確実な答えを許容する、4)カラー・ウィンドウ等のユーザ・インターフェイスを持つ、こと等による。最終的なシステムでは、十分なテストを経てこのシステムの正当性を確認する予定。エキスパートによってなされるのと同様のアドバイスが出来るシステムを目指している。

8810-00

KNOWLEDGE-BASED APPROACH TO PROJECT SCHEDULING SYSTEM SELECTION
プロジェクト計画システム選定のための知識ベース・アプローチ

著者: E. William East (合衆国陸軍建設工学研究所主任研究員)

出典: Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE
Vol. 2, No. 4, October, 1988

概要:

Stepman の調査によると 200以上のプロジェクト計画(scheduling)システムが存在する(1986)。このため、どのソフトを採用するのかを決めるのに、建築家、CMr、施工者は多くの時間を掛けている。計画ソフトに関して様々な情報源があるにも拘らず、各システムの特徴はCMの実態に沿った形では説明されていない。つまり、一般的な調査であり、特定の事務所に適しているかどうかを述べているものではなく役に立たない。この結果、多くの作業所ではそこに適した特徴を持ったシステムを買うことが出来ないことになる。本論文では、このようなシステムの選定方法に関して、選定過程の背景にある作業所の環境条件、およびシステムに求められる機能条件を示し、具体的な「計画システム選定手順」を示している。環境条件としては、1)プロジェクト環境(サイズ、タイプ、特徴)、2)契約条項環境(形式、タイプ)、3)職員環境(時間的余裕、工事とコンピュータの経験、新採用者数)、4)コンピュータ環境、が挙げられている。

資料-2 知識ベース・システム開発事例

[01]

MASON: ブロック積み作業計画システム

開発者: Chris Hendrickson他(カーネギーメロン大学)

機能: コンクリート・ブロックやレンガ積み作業の所要日数推定、説明機能、作業員構成や作業方法の代替案の提示

ツール: OPS5 (後向き推論)

参考文献: (8706-00) Hierarchical Rule-based Activity Duration Estimation

[02]

CONS AES (CONstruction Scheduling Analysis Expert System)
: 建設工程解析エキスパート・システム

開発者: C. William Ibbs他(イリノイ大学土木工学部)

機能: 部位別作業の計画日・実施状況・構造・材料・特徴などの問合わせに答える

ツール: ART

参考文献: (8709-00) Issues in Construction Schedule Knowledge Representation

[03]

SITEPLAN: 仮設設備配置計画システム

開発者: Iris Tommelein他(スタンフォード大学)

機能: 仮設設備配置計画

ツール: BB1 (スタンフォード大学で開発された計画・設計のためのドメイン・シェル)

参考文献: (8709-03) Using Expert System for the Layout of Temporary Facilities on Construction Site

[04]

CONSTRUCTION PLANEX: 超高層ビルの建設計画システム

開発者: Chris Hendrickson他(カーネギーメロン大学)

機能: 工法選択、計画作業の生成、作業順序関係データの生成、作業の所要日数とコストの見積り

ツール: Knowledge Craft

参考文献: (8710-00) Expert System for Construction Planning

[05]

C P O - E S (Construction Project Organization Design)
: 現場組織編成支援システム

開発者: Rudolf Burger他 (モーター・コロンバス社、スイス)
機能: プロジェクトの各段階における最適な組織編成を支援する
ツール: Deciding FactorTM (後向き推論用エキスパート・システムシェル)
参考文献: (8710-02)Expert System in Construction:Work in Progress

[06]

Decision-Making and Risk Analysis: リスク管理システム

開発者: Roozbeh Kangari教授 (ジョージア工科大学)
機能: プロジェクト採否決定におけるリスク分析とリスク回避方法の提案
ツール: INSIGHT 2TMエキスパート・システムシェル
参考文献: (8710-02)Expert System in Construction:Work in Progress

[07]

I R I S (Intelligent Construction Risk Identification System)
: 建設工事におけるリスク指示システム

開発者: David B. Ashley他 (テキサス大学)
機能: 原価増大・工期遅延予想、リスクの内容とそれ等の関連図の表示
ツール: M. 1 TM
参考文献: (8710-02)Expert System in Construction:Work in Progress

[08]

I P M S 8 5 / 2 (Intelligent Project Management System)
: プロジェクト管理エキスパート・システム

開発者: Navin Chandra他 (マサチューセッツ工科大学)
機能: プロジェクトの進捗管理 (工期と原価)
ツール: I M S T (MITで開発されたプロジェクト計画用シェル)
参考文献: (8710-02)Expert System in Construction:Work in Progress

[09]

C O D S S (Concrete Operation Decision Support System)
: コンクリート打設機械選定システム

開発者: Fabian C. Hadipriono他 (オハイオ州立大学)
機能: ロボットのためのコンクリート打設機械の選定
ツール: I S T C L A S S
参考文献: (8806-00)Concrete Operation Decision Support System(CODSS)

[10]

G H O S T (Generator of Hierarchical network for cOnStRuction)
: 工程ネットワーク手法生成システム

開発者: D. Navinchandra他 (カーネギーメロン大学)
目的: 工程計画ネットワークの自動生成
ツール: I M S T (MITで開発されたプロジェクト計画用シェル)
参考文献: (8807-00)GHOST:Project Network Generator

[11]

L I F E : 建設計画評価システム

開発者: Bremdal (米国陸軍建設工学研究所)
機能: 既存システムで作成した計画および実績の評価
ツール: O P S 5
参考文献: (8807-00)GHOST:Project Network Generator
(8809-00)Artificial Intelligence Techniques for Generating
Construction Project Plans

[12]

E S E M P S (Exspert System for Earth-Moving Plant Selection)
: 道路工事用搬土重機選定システム

開発者: Sabah Alkass (ポリテクニク大学、英国)
機能: 搬土重機構成の選定
ツール: S A V O I R
参考文献: (8809-04)Expert System for Earthmoving Equipment Selection
in Road Construction

資料-3 研究発表論文一覧表

発表年月	掲 載 誌 (発表大会)	論 文 タ イ ト ル
1984年11月 (S. 59)	第2回土木工事のマネジメント問題 に関する研究討論会 講演・資料集 pp. 205~212	統計的手法による歩掛りデータ利用の研究(その1)
1985年 1月 (S. 60)	土木計画学研究・講演集 第7号	パソコンを用いた現場マネジメントシステムの 実験的開発について
1985年 8月 (S. 60)	International Conference on THE USE OF COMPUTERS IN CIVIL ENGINEERING	Development of Personal Computer-based Management System for On-site Construction Planning and Scheduling
1985年 9月 (S. 60)	土木学会第40回年次学術講演会	資源制約を考慮した工程計画システム化の研究
1985年10月 (S. 60)	第10回電算機利用に関するシンポジ ウム講演集	オンサイトマネジメントにおける 工程計画システムの利用に関する研究
1986年10月 (S. 61)	土木計画学研究・講演集第9号	On-site Management Systemの開発方法に関する研究
1986年11月 (S. 61)	土木学会第41回年次学術講演会	地下滞水池築造工事における 現場管理トータルシステムの開発について
1987年 1月 (S. 62)	第4回建設マネジメント問題に関す る研究発表・討論会 講演集 pp. 35~48	統計的手法による歩掛りデータ利用の研究(その3) —分析結果の取りまとめとその利用方法—
1987年12月 (S. 62)	第5回建設マネジメント問題に関す る研究発表・討論会 講演集 pp. 31~38	工程管理支援システム(PF-NETS)の開発と適用に関する研究
1988年 3月 (S. 63)	土木学会論文集 No. 391/VI-8、 pp. 179~187	パーソナル・コンピュータを用いた 工程管理システムの開発に関する方法論的研究
1988年10月 (S. 63)	土木学会第43回年次学術講演会 講演概要集第6部、pp. 42~43	工程管理におけるエキスパート・システム適用の 考え方と順序関係設定問題への適用例

資料-3 研究発表論文一覧表

発表年月	掲載誌 (発表大会)	論文タイトル
1989年9月 (H.1)	Transactions of the Construction Management Committee(volume.3) pp.109~112	ISSUES IN KNOWLEDGE-INTENSIVE SCHEDULING METHOD FOR CONSTRUCTION PLANNING
1989年10月 (H.1)	土木学会第44回年次学術講演会 講演概要集第6部、pp. ~	工程計画エキスパート・システムにおける知識表現について
1989年11月 (H.1)	土木計画学研究・論文集 第7号 pp.59~66	知識工学手法を適用した工程計画立案方法に関する研究
1989年12月 (H.1)	第7回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集 pp.161~168	オンサイト・マネジメントにおける 組織と情報システムに関する基礎的研究
1990年 9月 (H.2)	土木学会第45回年次学術講演会 講演概要集第6部、pp.226~227	知的工程計画支援システムにおける ネットワーク生成方法について
1990年10月 (H.2)	第15回土木情報システムシンポジウム 講演集、pp.223~230	知的工程計画支援システムの開発に関する研究
1990年11月 (H.2)	土木計画学研究・講演集 第13号	知識施工計画支援システム開発における課題とその考察
1991年 5月 (H.3)	Transactions of the Construction Management Committee(volume.4) pp.187~192	THE DEVELOPMENT OF A KNOWLEDGE-INTENSIVE SCHEDULING SYSTEM
1991年 7月 (H.3)	The 4'th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering pp.381	STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A KNOWLEDGE-INTENSIVE SCHEDULING SYSTEM FOR CONSTRUCTION MANAGEMENT
1991年 9月 (H.3)	土木学会第46回年次学術講演会 講演概要集第6部、pp.310~311	オブジェクト指向プログラミングによる工程ネットワークの生成方法について
1991年10月 (H.3)	第18回人工知能学会知識ベース・システム研究会 資料 pp.105~114	知的工程計画支援システムの開発について
1992年 7月 (H.4)	The 7'th International Conference on Artificial Intelligence in Engineering	Development of Object-Oriented Expert System for Construction Scheduling