

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

STUDY ON KNOWLEDG-INTENSIVE SCHEDULING METHOD FOR CONSTRUCTION PLANNING

池田 將明*

By Masaaki IKEDA

Network scheduling method such as CPM/PERT has been used in a wide variety of construction projects since their inception in the 1960s, but it is the present condition that they are only used in some limited big construction projects. The facts show that a fundamental limitation of this traditional planning technique that they are able to manipulate only the data generated by planning process, not the knowledge used in generating the project plans.

In this paper, some research concerned about knowledge-intensive scheduling method for construction planning are referred, and some new idea how to approach this problem, which is named "Hybrid Strategy" mixed "Means-ends Strategy" with "Network Strategy", are presented.

And the goal of this research is to develop the Knowledge Intensive Scheduling System, and the prototype system has been developing for some elevated highway constructions by the author used with the expert system shell, KBMS/PCTM under personal computer environment.

1. はじめに

建設工事を取り巻く環境が年々厳しくなる中で、生産性向上を目的とした工事マネジメント・システムの重要性が、強く認識されるようになってきた。しかし、これまでに工事マネジメントのために開発が進められてきたシステムは、予算管理とか労務管理システムなど、数ある管理要素のなかの1つだけを対象とした個別システムでしかなかった。このため、導入による効果には自ずと限界があった。また、これ等のシステムを別々に1つの工事に適用することによって、利用上の混乱も起こってきているのが現状である。

以上のような状況は、本来各管理要素を総合的に評価するための尺度となるはずの工程管理が、マネジメント統合化を可能とするような方法で行われていなかったことに、大きな原因があると

考えられる。つまり、従来の工程管理では、主としてバー・チャートや座標式工程表が用いられ、原価・機械・労務・資材など他の管理要素とは、厳密な関係づけはなされていなかった。

そこで、この解決策として、CPM (Critical Path Method)を用いたシステムが開発され、現場への適用が図られてきた。筆者も同様の目的から、改良プレシーデンス・ネットワーク法を適用したパソコンで稼働する工程管理支援システムを開発し、これまで現場への普及を図ってきた¹⁾。

しかし、これ等の試みは、繰返しが多い等の特徴を持つ工事では成果を上げているものの、全般的に普及を進めるためには、いくつかの課題が残されている。その1つに、入力するデータ量の多さがある。つまり、ネットワーク法では、建設工事に特有の複雑な制約条件や不確定要素を反映させるために、技術者が自らの経験や知識によって勘案した多量なデータを入力しなければならないという基本的な問題点がある。

*正会員 フジタ工業(株)技術研究所土木生産研究室
室長 (〒223 横浜市港北区大柵町74)

この問題を解決するためには、建設工事に関する諸々の技術的知識や、技術者の経験的知識を取り入れることにより、工程計画の多くの部分を自ら判断して作成できるようなシステムが必要となる。そして、近年急速に発達した知識工学(Knowledge Engineering)は、そのようなシステムを開発するための可能性を持った手法を提供している。

本論文は、以上のような工程計画立案のための知識を保有したシステム、つまり工程計画支援エキスパート・システム(Expert System、以後ESと略す)の開発を目的として、そのための①研究動向、②工程計画に係わる知識の分類と表現方法、③工程計画立案戦略、それに④プロトタイプ・システムの概要、に関して取りまとめたものである。

2. 工程計画における知識工学の適用

(1) 研究の歴史

知識工学は、1977年にマサチューセッツ工科大学(MIT)で開催されたIJCAI(International Joint Conference on Artificial Intelligence)で、ファイゲンバウム(E. A. Feigenbaum)が提唱した人工知能研究の新しい研究分野であるが、この同じ会議においてテイト(A. Tate)が既にプロジェクト・ネットワークの生成に関する論文²⁾を発表している。

このように、本研究の対象である工程計画ESは、知識工学創設時からの研究テーマであるが、工事マネジメントに知識工学を適用するための研究が本格的に行われるようになったのは、1984年にレハック(D. R. Rehak)等により発表された「工事管理全般におけるES適用の可能性」に関する論文³⁾からで、以後多くの論文が発表されるようになった。

(2) 工程計画立案方法に関する研究

工程計画の立案方法に関して、1つのまとまった考え方を示した論文としては、ヘンドリックソン(C. Hendrickson)、ナビチャンドラ(D. Navinchandra)、それに嘉納の研究がある。

ヘンドリックソンは、1987年に発表した施工計画エキスパート・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それ等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⁴⁾。

またナビチャンドラは、昨年(1988)発表した同様の主旨の論文の中で、GHOST(Generator of Hierarchical networks for cOnSTruction)というシステムを紹介している⁵⁾。これは作業の順序関係の生成方法に特徴があり、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ステップにより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方法を提案している。

また嘉納は、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、META/PLAN/TOOL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。この結果シートは、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をグラフ上に視覚的に表現できる特徴がある⁶⁾。

(3) 工程計画立案プロセスにおけるES化

工程計画は、図-1のように①構想化段階、②計画化段階、③評価段階の3つのプロセスから構成される。

構想化段階では、工区分割や施工順序、仮設工法、それに仮設備を設定するが、この中の工法や設備の設定は、あらかじめ決められた解の中から制約条件に抵触しないものを設定する選択型問題で、システム的には比較的単純な構造をしているため、早くからES化が試みられた。しかし、形状認識を必要とする工区分割や順序決定問題については、それほど研究は進んでいない。

また計画化段階では、投入資源の種類、質、量を想定し、工程計画を作成する。ここでは、多量なデータを処理しなければならないので、システム化は進んできている。しかし、従来からのプログラミング技法では、現実の複雑な制約条件を反映したシステム化は困難であるため、今後ES化が進むものと考えられる。また、多量の情報処理を伴うため、システム化による費用効果の高い部分である。

計画代替案の評価では、①概算原価、②技術的な安全性、③工期上の確実性が、おもな評価要因となる。この中で、概算原価は数量的比較評価が可能であるが、他の要因は数量化が難しく技術者の経験的判断による部分が多い。そこで、評価要因の抽出と評価プロセスの解明が当面の研究課題である。

3. 工程計画に係わる知識

(1) 知識の分類

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。つまり、嘉納も指摘しているように⁶⁾、工程計画を作成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の2種類の知識が必要である。この点は、前述したヘンドリクソンの研究でも同様で、前者をKnowledge Base、後者をOperatorsと呼んで区別している⁷⁾。本論文では、前者を「技術的知識」、後者を「管理的知識」と仮に呼ぶこととする。また、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、技術的知識は前者に、また管理的知識は後者に当たるものといえる。

これらの知識は、図-2に示した工程計画エキスパート・システム構成図のように、知識獲得機構(knowledge acquisition module)を介して、工事管理のエキスパートにより追加・修正が行われ

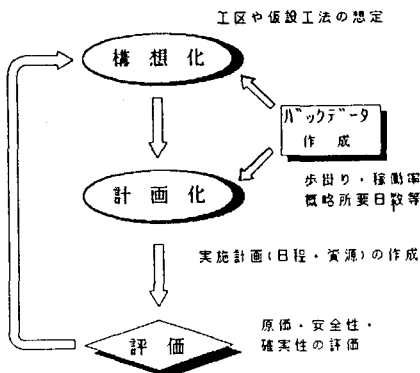


図-1 工程計画立案のプロセス

る。この図の中で、データを蓄積したものをデータ・ベース、知識を蓄積したものを知識ベースと呼び区別している。これは「知識とは、データ(情報)を概念化(体系化)したもの」と定義して概念上使い分けたものである。

(2) 工事技術に関する知識

構造物や施工技術に関する知識で、専門書や技術資料等に明文化されたものが多く、比較的知識獲得は容易である。以下に具体例を示す。

① 工事の構成に関する知識

例) 高架式高速道路工事は、本線工事とランプ工事等から構成される。

② 構造物の形式に関する知識

例) RC橋脚の構造形式には、単柱式、ラーメン式等がある。

③ 工法に関する知識

例) 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、リバーサ杭等がある。

④ 作業に関する知識

例) 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。

(3) 計画立案方法に関する知識

資源の投入法やコストなどの面から、より合理的な工程計画をより効率的に作成するための知識で、計画の手順、的の絞り方、無駄な思考の避け方、あいまいな情報の取扱方など、技術者の個人

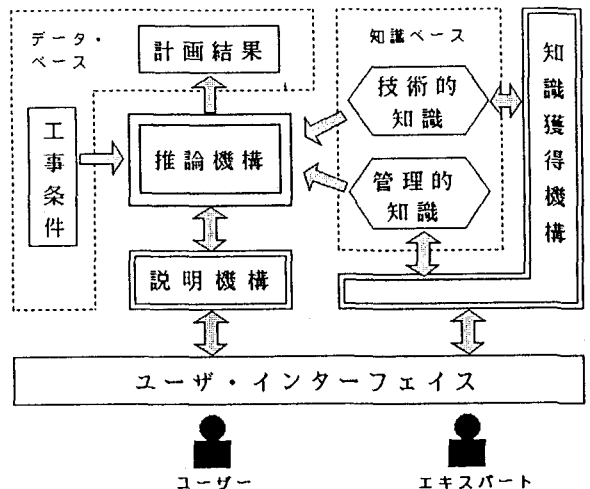


図-2 工程計画エキスパート・システム構成図

的経験に基づくノウハウに属するものが多い。このため、知識獲得は容易ではないし、また個人の経験と能力に依存する知識であるために、多数の技術者から収集した場合、知識の一貫性や最適性の検討が重要となる。

この種の知識は、以下のように分類できる。

- ①計画立案手順に関する知識
- ②投入資源最適化に関する知識
- ③工期の短縮化に関する知識
- ④コスト低減化に関する知識
- ⑤問題部分の発見に関する知識

(4) 意味ネットワークによる技術的知識の表現

知識工学における代表的な知識表現モデルとしては、①論理モデル、②ルール・モデル、③フレーム・モデル、④意味ネットワーク・モデルなどがある¹⁾。この中でルール・モデルとフレーム・モデルは、形式が単純であることから、多くの知識ベース・システムの知識記憶モデルとして採用

されている。

これに対し、意味ネットワーク・モデルは、心理学における長期記憶構造を表現する目的で考案された表現方法であるが、is-aや part-ofなど様々な関係述語によって、複雑な問題の概念構造を視覚的に表現するのに適しているため、ES開発において、対象となる問題構造を検討する際の表現方法として有効である。

図-3 に高架橋式高速道路工事の例を示す。ここでは、対象となる工事が①工事構造、②構造物形式、③工法などの技術的知識により細分化（実体化）され、より詳細な作業が生成される過程を、意味ネットワーク (semantic network) を用いて概念的に表現している。なお、この図中で用いた関係述語は、is-a が概念間の包含関係を、part-of が全体～部分の関係を、succeeded-by は作業間の順序関係を、instance-of は概念の実体化を、それぞれ表わしている。

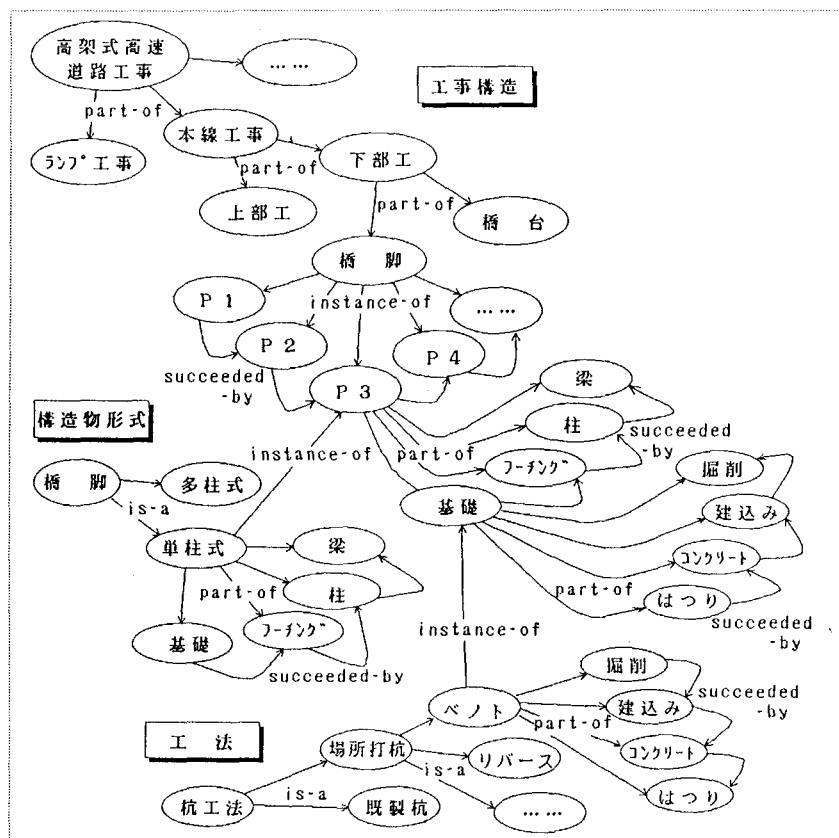


図-3 意味ネットワークによる高架式高速道路工事分解過程の表現例

4. 工程計画立案の戦略

(1) 計画化の手順と知識工学的戦略

知識工学における計画問題の解決法は、心理学者のショー(J. C. Shaw)等によって提唱された一般問題解決器(General Problem Solver)を原点としている。ここで考えられた方法は、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、手段-目的解析(Means-ends Planning)と呼ばれ、いわゆる“積木の世界”で研究が進められた¹⁰⁾ ¹¹⁾。レビットがこの間の状況を解説しているが⁹⁾、非階層的計画システムであるSTRIPSから、階層的システムのABSTRIPSへ改良研究が進められた。

これに対して、CPM等のネットワーク法で工程計画を立案する場合は、対象構造をネットワークで表現し、図-4の手順で計画化が進められる。つまり、最初に工区分割や基本的な施工順序などの計画の基本構造を仮定し(Step. 1)、これに沿って作業と順序関係の生成を行う(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、作成された計画を総合的に評価し(Step. 4)、ネットワークの改良を進める。

以上のように、手段-目的解析では、当初の計画目標と初期状態の差異を分析し、問題を順次細分化しながら計画化する戦略をとるのに対して、ネットワーク法では、ある仮定により計画(ネットワーク)を作成し、それを評価し改良する戦略をとるという違いがある。本論文では、仮に前者を手段-目的戦略、後者をネットワーク戦略と呼ぶこととする。

(2) 既往研究の計画化戦略

ここでは、以上のような計画戦略の違いを念頭に置いて、前述した研究の計画化戦略の特徴を比較する。

ヘンドリクソンのCONSTRUCTION PLANEXでは、計画の基本構造は設計段階で決められたデータを利用し、これをブレイク・ダウンすることにより、作業とその順序関係を生成し、CPMにより日程を計算している。また、ナビチャンドラのGHOSTでは、前述したように「3ステップで順序関係を生成し、最後に計画の評価を行い無駄な順序

関係を削除する」方法をとっているが、基本的にはCONSTRUCTION PLANEXと同様でCPMのためのデータ・ジェネレーターの性格が強く、ネットワーク戦略の範疇にはいる。

これに対して嘉納は、プランニング・ボードの上に目標シートと結果シートを置き、新たな目標シートを発生させる①Meta推論、目標シートの内容から計画項目を設定する②Plan推論、それに計画項目に従って計画を立案する③Tool推論、の3つの推論により計画化を実行する方法を提案している。これは手段-目標戦略の一種と考えられる。

(3) 既往の戦略の問題点

以上のように、これまでの主な研究では、それぞれ両者どちらか一方の考え方が採用されている。しかし、手段-目標戦略では、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がある。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が立てにくいことや、建設工事の各部分において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。

これに対しネットワーク戦略では、計画がネットワークの改良という形で進められるために、計画全体としての整合性がとりやすいという特徴がある。しかし、このネットワークの基本構造の設定部分(図-4のStep. 1)では、重要度の異なる様々な要因が関係し、非常に高度な判断を要する。また、ネットワークの生成(同Step. 2)においても、単純な作業の分解では対応できない¹²⁾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。これらの点に関して、前述した既往の研究では、対応方法が明確には示されていない。

- | |
|-------------------|
| Step. 1 基本構造の仮定 |
| Step. 2 ネットワークの生成 |
| Step. 3 作業配置(最適化) |
| Step. 4 計画の評価 |

図-4 ネットワーク戦略による計画化の手順

（４）複合的な計画化戦略

以上のように、既往の計画化戦略にはいくつかの問題がある。また、建設工事では様々な要因が複雑に影響するため、この計画を全てES化することは当面は不可能と推測される。そこで、“計画をネットワークで表し、これを改良する”というネットワーク戦略を基本的なベースとし、この中の「基本計画の設定」は技術者が行い、「部分的な作業生成」は手段－目的戦略を用いるといった、図－５のような複合的な戦略が、現状のES開発環境の基では実際的ではないかと考えられる。本論文では、このような戦略を仮にハイブリッド戦略と呼ぶこととする。

５．ハイブリッド戦略による計画化の方法

（１）工程計画化の手順

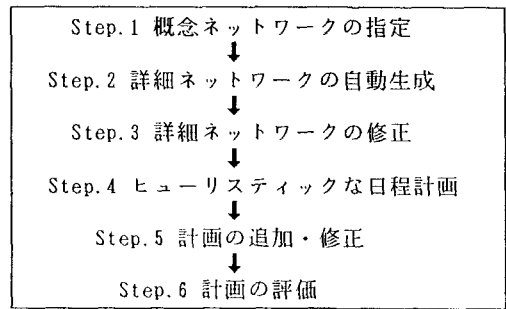
建設工事ではESだけでは考慮できない様々な要因が存在するため、計画途中へ技術者の介入が容易な方法が有効である。そこで、ハイブリッド戦略を用いた計画立案手順として、図－６のような方法が適当と考えた。

ここでは、最初にブロック分割やそれ等の施工順序を検討し、それを表した概念ネットワーク¹⁾を作成する(Step.1)。つぎに、構造物形式と工法に関する技術的な知識を用いて、作業と順序関係の生成を行う。(Step.2)。この結果は、プロジェクト・グラフ¹⁾で表し、技術者が作業や順序関係の追加や修正をできるようにする(Step.3)。つづいて、最適化を含めた日程計画を行う(Step.4)。ここでは「日程計算→山崩し」という手順ではなく、投入可能な資源をある優先順位にしたがって各作業に配分することにより作業日程を決定する

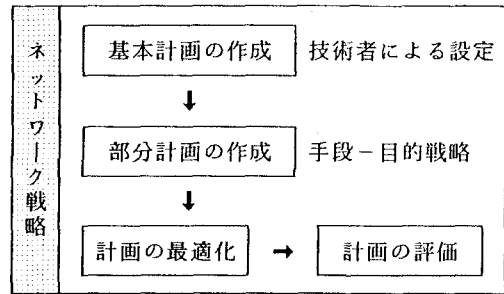
ヒューリスティック(heuristic)な方法を用いる。この結果は、時間軸上に配置されたバー・チャート形式で表われ、技術者が作業時刻の修正を行うことができるようにする(Step.5)。そして、最後に立案された計画の評価を行う(Step.6)。

（２）作業の自動生成

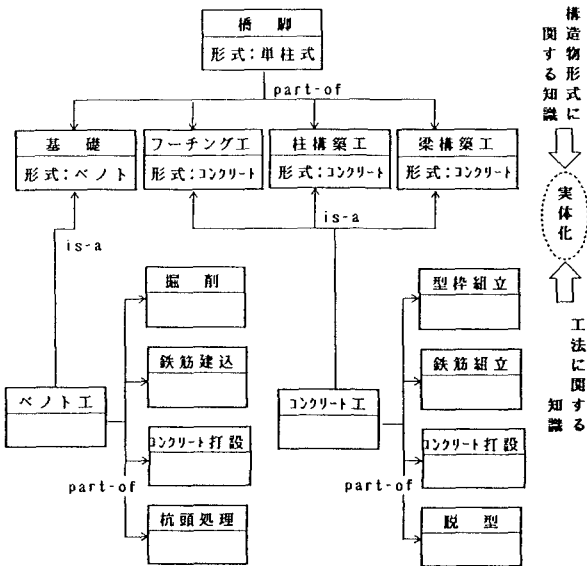
作業の生成は、図－３で示したように３つの技術的知識を用いて、工事全体をトップダウン的にブレイクダウンする方法をとる。この時、作業規模や作業場所・高さ等により、作業の必要性を考慮して、詳細作業と順序関係を自動的に生成する。また、資源転用等の理由により概念ネットワークと詳細ネットワークの間に“階層間のずれ¹⁾”が発生するので、そのための順序関係の調整もここで行う。



図－６ ハイブリッド戦略を用いた計画化の手順



図－５ ハイブリッド戦略による計画化の概念



図－７ フレームによる知識のモデル化

以上のデータは、ES の中ではフレームを用いてモデル化する。図-7 にフレームを用いた工事のブレイクダウン（実体化）の一部を示す。

(3) ヒューリスティックな日程計画

ネットワーク戦略で用いられる計画最適化の方法としては、山崩法などの数理モデルが一般的である。しかし、複数の資源間の調整や、それらの最適投入パターンまでを現実的に考慮できる方法は、まだ存在しない。

そこで、現場技術者が日常行っているように“着工日から1日ごとに着手可能な作業を捜し出し、これに手持ちの重機や作業員を割り付けていく”ヒューリスティック法が有効と考えられ、山本によってモデル化が試みられている⁹⁾。この考え方は、工期よりも投入資源量を強い制約と考える山崩法(Fixed Resource Allocation)に近い考え方であるが、競合作業（同時に開始できる作業）や使用資源の重要度等を考慮して、作業の投入資源量を変化させることができるという相違があるため、現実の複雑な制約条件をよりよく反映できるという特徴がある。

山本のモデルでは、作業ごとに最大・最少投入可能資源量と作業中断可否のデータを入力し、競合作業の優先順位の決定や投入資源量を決定する。このため、①従来の山崩法と比較して工期短縮が可能となる、②競合作業の優先順位を工事ごとの特徴に応じてパラメトリックに扱える、③投入資源量をパラメトリックに設定できる、などの長所がある。

そこで、本計画化法でも、基本的な処理の手順は山本のモデルを援用する。ただし、山本のモデルでは、手続型言語での開発を前提に優先順位の決め方や資源配分量の算定方式を検討しているが、本計画化法では、ルールやフレーム等の知識表現法を適用することにより、より実際の問題に対応しやすい方法を確立したいと考え、現在このための知識の収集と整理を行っている。

6. プロトタイプ・システムの開発

(1) システム開発の概要

これまでに述べてきた議論を踏まえて、現在、高架橋式道路橋のRC下部工事を例に、工程計画

作成の支援を目的としたプロトタイプ・システムの開発を行っている。

本システムの開発では、一般の作業所での利用を前提としているため、32ビット・パソコン(NEC PC-9800RA)を中心としたハードウェア構成を採用した。また、エキスパート・システム構築支援ツールとしては、①知識表現・推論機能、②プレゼンテーション機能、③ホスト・EWS・パソコン間の知識ベースの互換性、④C言語変換機能等のデリバリ環境、それに⑤コスト・パフォーマンスの点から、リスプ言語(GCLISP)上で稼働するハイブリッド型ツールのKBMS/PCを採用した。

このシステムの処理フローを図-8に示す。図中にあるように、本システムでは、作業生成段階で①構造形式KB(Knowledge Base)と②工法KBを、ヒューリスティック日程計画段階で③計画化KBを用いている。

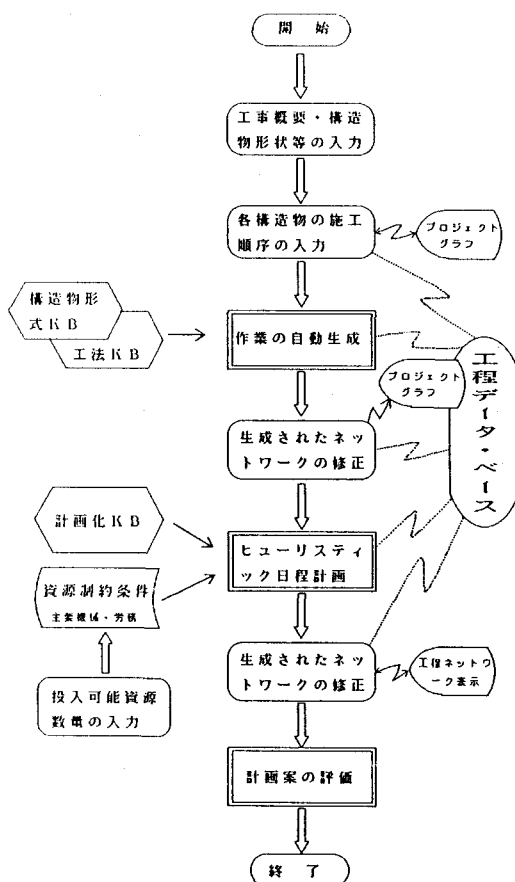


図-8 プロトタイプ・システムの処理フロー

(2) システム開発における検討項目

本システムは、ネットワーク戦略をとっているため一般のネットワーク法(GERTなどの確率的手法は含まない)と同じ前提条件にたっている。つまり、①工事は目的とする精度(日単位等)で作業(activity)に分解できる、②先行作業の成否は後続作業に影響しない、③所要日数や投入資源量等は確定値で与えうる、等である。

この中の②と③については、例えば「地質によってはH鋼杭が打設出来ないかもしれない」とか「ベント杭における掘削量は施工しないと確定できない」というような場合が考えられる。このような場合、従来はそれ等の不確定な計画要因を技術者が勘案することにより計画に反映させていた。本システムでは、それ等のノウハウをどのように知識化して取り込むのが1つの課題である。

また、CPMではクリティカル・パスの表示が、工程管理において重要な管理指標となっている。しかし、ヒューリスティックな計画法では、競合作業の状態によって作業の開始時刻をずらす操作をするため、クリティカル・パスを特定化することはできなくなる。そこで、この前段で行うCPM計算で求められたものをクリティカル・パスとする方法が考えられるが、資源制約がきつい場合には実態にそぐわなくなる。このため、計画全体を評価し重点管理部分を特定化する方法を検討する必要がある。

また、現実問題では“あいまい”な情報が多く使われる。例えば、投入可能資源数にしても工事のおかれた環境によって、ある幅をもって考えられるのが一般的である。このような場合、ファジィ理論におけるメンバーシップ関数による表現は、人間がその値の傾向を評価する際に有効と考えられる。本システムではLISP関数によりこの機能を実現する予定である。

最後に、このような計画法で一番問題となるのが、最終結果の評価法、つまり問題箇所の発見法とその解消法である。このため、ここではCPMで算出された工期との対比だけでなく、資源の使用状態等、多種類の要因を総合的に判断する必要がでてくる。“どのような要因をどのような方法で評価する”のかは今後の課題である。

7. おわりに

これまで、知識工学を適用した工程計画立案方法について、既往の研究を分析しながら検討を加えてきた。現在、これらの検討結果に基づいてプロトタイプ・システムの開発を進めているが、まだ検討途中の問題点がいくつか残されている。これらは、システムの開発と並行して、順次解決していきたいと考えている。

最後に、受託研究員として京都大学に在学中(1984~86)より本研究に至るまで、常にご指導いただいた吉川和広教授(京都大学)、春名 攻教授(立命館大学)、山本幸司助教授(名古屋工業大学)に謝意を表する。

【 参 考 文 献 】

- 1) 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、1988.03
- 2) Tate, A. : Generating Project Network、Proceeding of 5th IJCAI、1977
- 3) Rehak, D.R. et al : Expert Systems in Construction , Computers in Engineering 1984 , vol.1
- 4) Hendrickson, C. et al. : Expert System for Construction Planning, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 1, No. 4, 1987
- 5) Navinchandra, D., et al. : GHOST : Project Network Generator, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, vol. 2, No. 3, 1988
- 6) 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
- 7) 上野晴木、石塚満：知識の表現と利用、オーム社、1987
- 8) Levitt, R.E. et al. : Artificial Intelligence Techniques for Generating Construction Project Plans, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 114, No. 3, Sep. 1988
- 9) 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、土木学会論文集 No. 256 , 1976. 12
- 10) 土屋俊、他：AI事典、UPI、1988
- 11) 和多田作一郎：AIの基礎を知る事典、実務教育出版、1986