

エキスパートシステムによる建築作業の スケジューリング

松本 信二¹⁾, 三根 直人²⁾, 内山 義次³⁾, 秋本 学⁴⁾, 中村 重郎⁵⁾

1. はじめに

建築工事において、日程計画をもとに作業・工事用資機材の配分を行なうスケジューリングは施工計画の最も基本的な部分である。筆者らはそのための手法として、マルチ・アクティビティ・チャート（以後MACと略す）を開発・実用化した。（MACについては本誌Vol.28, No.5に紹介した[1]。MACは建築作業のスケジューリングのための有効な手法であるが、MACの作成そのものが個人の経験や専門知識に負うところが多くコンピュータによるシステム化がむずかしかった。一方、最近のAI技術の発達はめざましく、この種の問題のシステム化の可能性が大きくなった。MACによる建築作業のスケジューリングにエキスパートシステムの適用を試みたので、ここにその概要を紹介する。

2. MACによる建築作業の計画

MACは、施工をシステム化した場合に特に有効である。ここでいうシステム化とは、建物の1フロアを数工区に分割し、一定の人数の作業チー

ムをいくつか編成し、すべての作業チームおよび工事用機械が一定のリズムで繰り返し作業を進められるようにすることである。図1に施工のシステム化の概念図を例で示す。

MACは、繰り返し作業の1サイクルに含まれる作業を細かく分析し、各作業チームが行なうべき作業の時間割を示したものである。MACの例を図2に示す。この例では縦軸に作業チーム、横軸にサイクル日数をとっており、サイクル日数は4日である。

MACを用いてスケジューリングを行なうことによって、作業者を固定化して人数の平準化を図るとともに、作業・工事用機械の稼働率や型枠など仮設材の転用効率を向上できる。また、作業を数多く繰り返すことによって習熟効果を促進させて、作業能率を高めることができる。

3. エキスパートシステムによるMACの作成

3.1 ヒューリスティック探索

スケジュール問題を取り扱う場合、一般に制約条件が厳しいほど、また、スケジュールの対象となる項目（以後スケジュール項目と呼ぶ）の数が多く、密度が高いほどむずかしい問題となる。ここでいう制約条件とは、スケジュール項目相互の時間関係やスケジューリングにおける優先順位等を意味する。スケジュール項目の密度とは与えられた時間帯の中にスケジュール項目がどの程度密

まつもと しんじ, みね なおと, うちやま よしつぐ,
あきもと まなぶ, なかむら しげろう

¹⁾²⁾ 清水建設㈱技術研究所 江東区越中島3-4-17

³⁾⁴⁾ 清水建設㈱技術本部

⁵⁾ ニチメンデータシステム㈱営業部

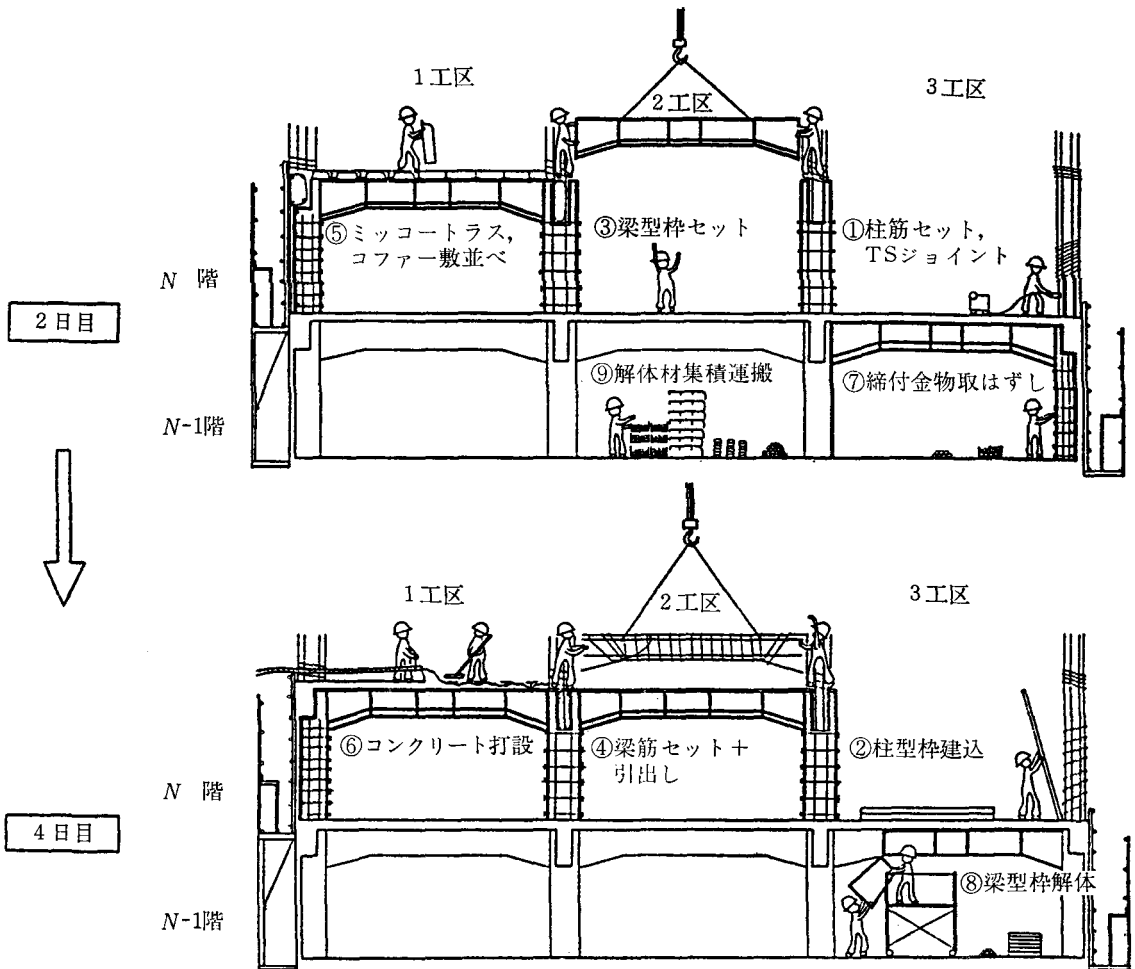


図1 施工のシステム化の概念図 (①~⑨は作業手順を示す)

に配置されるか、という意味である。

MACの作成に当っては、スケジュール項目の時間的前後関係が厳密に要求され、かつ、ほとんど隙間なく時間帯を埋めなければならない。そのような意味で、MACの作成はスケジュール問題としては非常に高度なものといえる。また、場合によっては1つの作業を2つのチームで分担するような場合もあり、問題をより複雑なものとしている。

このようなMACの作成を従来のコンピュータ言語でシステム化することは非常に困難である。扱うべき内容の大部分が非数値的データであり、

ほとんどの制約条件も数値表現には適さないからである。このようなスケジュール問題では多数の分岐が発生するが、従来のコンピュータ技術ではこれに柔軟に対処することがむずかしく、多大な開発能力が要求されることになる。したがって、この種の問題には記号処理を中心としたAI手法を用いるのが適切であると考えられる。

AIの分野では、このような試行錯誤的手法を「状態空間の探索」という。探索すべき空間が、あらかじめ体系的知識として与えられている場合には比較的やさしい問題となるが、みずから空間を構築しなければならないような場合は非常にむ

No.	作業チーム	人数	1 日		2 日		3 日		4 日	
			午前	午後	午前	午後	午前	午後	午前	午後
1	クレーン	1	トラス	大パネル トラス	トラス	柱筋 建方	メッシュ	梁型枠 取付		梁筋 建方
2	大工	外壁・柱・梁型枠	4	枠型枠 (n+1)	大パネル (n+1)	梁型枠 駄目 (n)	梁型枠 組立取付 (n+1)			柱型枠 建込 (n+2)
3		柱・梁型枠	4	トラス	ソフィット 取付 (n)					
4		壁・床型枠	6	壁片型枠 (n+1)	トラス	トラス・ コッパ (n)	トラス	在来床 コッパ	壁返 型枠 (n+1)	壁片 型枠 (n+2)
5	鉄筋工	柱・梁・床筋	3	梁筋 引出し・駄目 (n)		在来床 (n)	柱筋 建方 (n+2)	メッシュ 敷並・補強筋 (n)	梁筋 建方 (n+1)	
6		柱・梁・壁筋	2					壁配 筋 (n+1)		
7	解体工	型枠脱型	6	絞付金物 出し (n-1)		柱・梁側・壁型 枠脱型 (n-1)			ソフィット・コッパ 脱型 (n-1)	
8	大工 鉄筋工	階段型枠・鉄筋	3	階段型枠 建込 + 配筋						
2										
9	弋工	足場・支保工	6	他	工	区	足場・支保工 建込 (n+2)	他	工	区
10	土工	コンクリート打設	9	他	工	区		区		コンクリート 打設 (n)
11	大工	墨出し	3	墨 出し (n+2)	他	工	区			
12	大工	下拵え・補修	4	大工加工場 下拵え + 補修						
13	鉄筋工	鉄筋加工・先組	5	鉄筋加工場 先組						

図2 MACの例(4日サイクル)

ずかしい問題となる。これは、AIの問題としてもむずかしい部類に属する。

状態空間の探索の方法には、盲目的探索とヒューリスティック探索とがある。前者はある程度機械的に空間を展開してゆくので簡単であるが、一方で、“組合せの爆発”を招きやすい。後者は、盲目的に状態空間を探索するのではなく、その問題領域固有の知識・情報にもとづいて探索空間を絞り込んでゆく方法であり、今回のシステムでもこの手法を用いている。ヒューリスティックな知識は仮説(状態)空間を設定する局面および削除する局面のいずれにも存在し得る。つまり、どのような状態になった時、新たな仮説(空間)を設定すべきかという判断を行なう場合に、その問題領

域固有の知識が活用される場合もあるし、逆に、すでに設定された仮説を評価する場合に、そのような知識が使われることもある。

3.2 黒板モデルによる仮説展開

MACの作成において最も重要な点は、各項目の時間帯予約における複数の選択枝をどのように表現するかという問題と、それら選択枝の集合であるツリー状分岐構造空間をどのようにモデル化するかという問題である。分岐が複雑化した場合に、ツリー状空間の中で知識を系統的に制御するのは容易でない。そこで、今回は、「黒板モデル」と呼ばれている手法を用いて仮説空間を表現することとした。

「黒板モデル」とは、知識ベースを分割し、各々

作業特性			作業チーム特性		
インデックス	項目	必要資格	チーム名	所有資格	人数
W	墨出し	大工- 墨	大工チーム- 1	大工- a	4
V	足場支え建込み	鷹	大工チーム- 2	大工- b	4
U	柱筋建込み	鉄筋工- a 鉄筋工- b	大工チーム- 3	大工- c	6
T	柱型建込み	大工- a 大工- b	鉄筋工チーム- 1	鉄筋工- a	3
S	片型枠建込み	大工- c	鉄筋工チーム- 2	鉄筋工- b	2
R	壁筋組立て	鉄筋工- b	鷹チーム	鷹	6
Q	返し型枠建込み	大工- c	墨大工チーム	大工- 墨	3
P	大パネル	大工- a	コンクリートチーム	コンクリート	9
O	梁型枠組立	大工- a 大工- b			
N	梁筋建込み	鉄筋工- a 鉄筋工- b			
M	梁筋引き出し	鉄筋工- a 鉄筋工- b			
L	梁型枠駄目	大工- a			
K	トラス- 0	大工- b			
J	ソフィット取付	大工- b			
I	トラス- 1 予約無	大工- c			
H	トラスコファー	大工- c			
G	トラス- 2	大工- c			
F	コファー	大工- c			
E	在来床筋	鉄筋工- a 鉄筋工- b			
D	在来床	大工- c			
C	メッシュ	鉄筋工- a			
B	メッシュ敷	鉄筋工- a			
A	コンクリート打	コンクリート			

[Thu 29 Aug 5:14:48] 160GR1

ACU: (no_window)

図 3 作業特性と作業チーム特性

の独立性を保ちながら推論を行なっていく方法である。これは、あたかも学校の教室で先生（メタ知識）が複数の生徒 A（知識ベース A）……生徒 N（知識ベース N）を 1 人ずつ前に呼び、黒板を使って問題を解いてゆく過程に似ているので、こう呼ばれている。そして、分割された知識ベースのことを狭義の黒板と呼んでいる。

今回、MAC 作成に用いた ART (Automated Reasoning Tool) という言語は、この黒板モデルに ATMS (Assumption based Truth Maintenance System) という論理的機能を付加したものであり、仮説展開に適している。

3.3 システム構成

本システムで与条件（入力情報）として与えられる事項は以下のとおりである。

- (1) 作業特性（作業量，作業順序，担当資格，クレーン使用条件等）

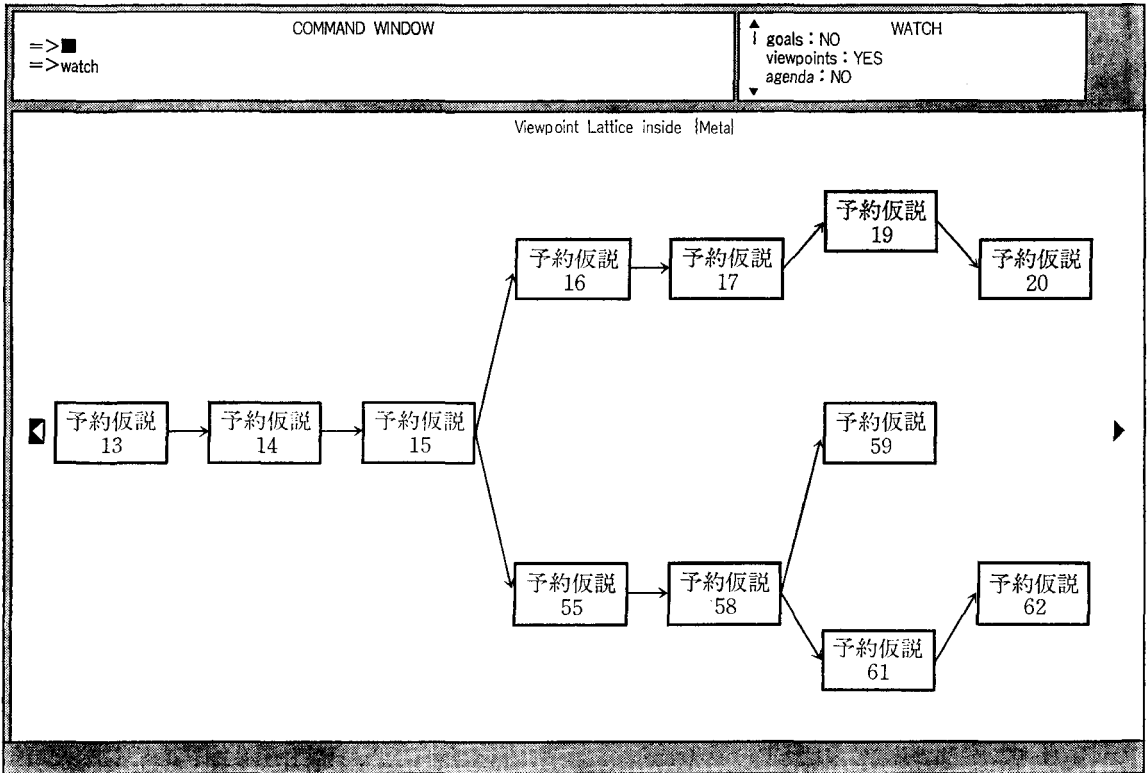
- (2) 作業チーム属性（人数，作業資格等）
- (3) 施工特性（サイクル日数，工区数等）

また，制約条件は以下のとおりである。

- (1) 各々の作業は担当チームの資格にもとづいて割り当てる。
- (2) 各々の作業は，許容されたオーバーラップの範囲で，後続作業に対して手順通りに割り当てる。
- (3) 作業によっては複数の作業チームが共同で行なうこともある。

図 3 は作業特性と作業チーム特性をまとめたものである。

具体的な推論フローとしては，A～W の各作業項目について時間予約が終了するごとに黒板を新たに展開し，その中に予約状況を記し次の作業項目が予約されると次の黒板を展開するという方法を採用している。図 4 はその黒板ツリーを示して



(Thu 6 Aug 3:35:18) SUMITANI CL-USER: (dead process)

図 4 黒板ツリーの例

いる。

図 4 で「予約仮説……」と記されたノードが 1 個の黒板を表わしている。時間帯の予約の取り方に複数の選択の可能性がある場合には、図中「予約仮説-16」と「予約仮説-55」のように、黒板自身を複数作成し、各々の仮説(時間帯の取り方)を書き込み、それぞれの枝を下流に伸ばして行なう。このような枝分かれを生じても、黒板機能がそれぞれの枝を完全に独立した系統として扱うので混乱することはない。しかも、それらの制御は黒板機能が自動的に行なうのでシステム開発者の負担は少なくなる。

これらの機能が、この種の問題に黒板モデルが適している理由の 1 つである。また、このツリーの中での推論の一貫性は、前述の ATMS 機能が管理するので、不合理な処理は一切行なわれない。今回のシステムでは 4 通りの解を導くために

総計 100 前後の黒板が生成されている。

3.4 探索空間の展開と絞り込み

黒板モデルを用いて次々と仮説を展開するだけでは問題を解決したことにはならない。作成された黒板の中の知識を評価する必要がある。この場合の評価とは、仮説として設定したある時間帯の予約が、残すべき価値のある内容になっているかどうかの判断である。たとえば、後続作業の時間帯利用に大きな支障をきたすような時間の取り方は棄却すべきである。これを「刈り込み」と呼ぶ。今回も約 10 の「刈り込み」ルールを設定した。

図 4 の「予約仮説ノード」の番号に注目されたい。「……55」の次が「……58」になっている。これは、いちど作成された「……56」、「……57」という仮説が、ある評価にもとづいて「刈り込み」の対象になったことを示している。「刈り込み」はなるべく優先して実行されなければならない。つ

まり、余分な枝が伸びる前に評価して、なるべく初期の段階で切り捨てることが重要である。

本システムでは主として「刈り込み」部分にヒューリスティックな知識を用いているが、仮説を設定する過程でもヒューリスティックな処理を行っている。図5、図6に得られた解のうちの2つの例を示すが、両者を比較すると鉄筋工チームが担当すべき作業M（梁筋引出し）以後のスケジュールが大きく異なっている。これはMを予約するさい、両図に示す2通りの時間帯の取り方が考えられるためである。図5の作業N（梁筋建込み）の時間帯の取り方で上のチームと下のチームの所要時間が異なっている。Nを決める時点ではVもRも予約はなく、空白のはずである。ここで意識的に下のチームの所要時間を短くした裏には、実は「先読み」ルールが働いているのである。つまり、Nの時間予約を決めるさいに、下の鉄筋工チームの今後の時間予約を予想し、N以後にR

という担当すべき作業があることを認識して、Rの時間帯をあらかじめ確保するために、あえて下のチームのNの時間を短くしているのである。これは先々の状況を調べて現在にその評価をもどすというルールであり、「先読み」と呼んでいる。

3.5 MAC作成結果

推論結果の一部は図5、6に示したとおりであるが、これらを含め4通りの解が約30分の推論で得られた。表示のための時間等を除くと、純粋な推論処理の時間はその半分程度である。解の数は制約条件によって決まる。すなわち、制約条件を厳しくすると、それに合致する解が存在しなくなることもあり得る。また、より複雑な状況を想定したルールを追加することにより、これ以外のパターンが解として出てくることも考えられる。

本システムは1つのプロトタイプであり、約50ルールで構成しているが、実用システムに拡張するにはさらにルールを追加する必要がある。

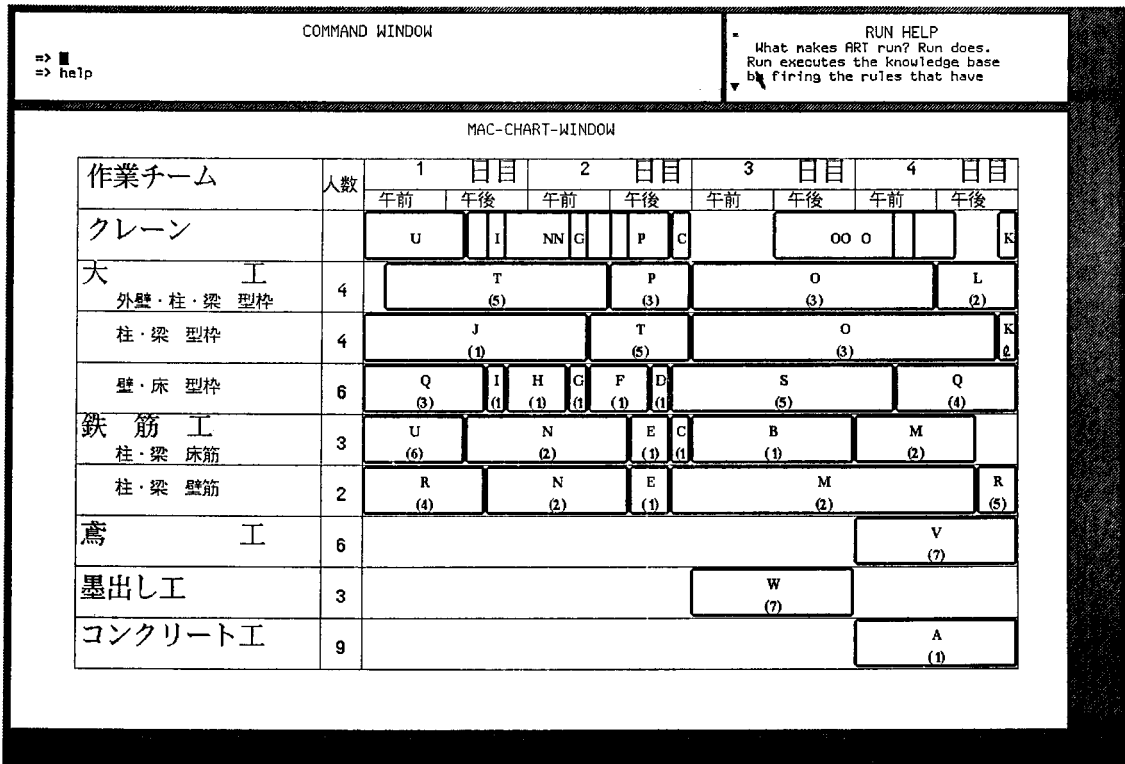


図5 MACの出力例1

4. 今後の課題

AI技術を利用してMACを作成する試みを行ない、このような方法によってMACの作成が可能であるという感触を得た。しかし、MAC作成のためのエキスパートシステムというにはまだ程遠いものであり、今後多くの研究を必要とする。さらにルールの内容を充実し、実用化システムとして完成させたいと考えている。

実用化システムを構築するためには、今後、以下に示す課題を検討する必要がある。

- (1) 工法選択システムとの連結性を高めるために作業分類データファイルを構築する。
- (2) 作業チーム編成のルールを整理し、MACの評価にもとづいて作業チームの再編成が自動的に行なえるようにする。
- (3) 今回のプロトタイプの作業特性、作業チーム特性を(1)の作業分類データファイルにもと

づいて自動的に生成できるようにする。

- (4) MACの評価基準をより詳細に検討し、実績データを評価に反映させる。
- (5) MAC作成時に常に全体の状態を予測評価し、それが割当の代替案の優先順位を決定するようなメタ・ルールを導入する。
- (6) メニュー機能、ウィンドウ機能を活用し、グラフィック表現の出力情報を増やし、視覚的な評価が行なえるようにする。
 - ネットワークの出力
 - 工区別の施工状況
 - 施工進捗状況シミュレーション等
- (7) 対話性能を高め、重要な局面で専門家がシステムの選択に対して指示できるようにする。

5. おわりに

従来、技術者の個人的な経験と専門知識に依存

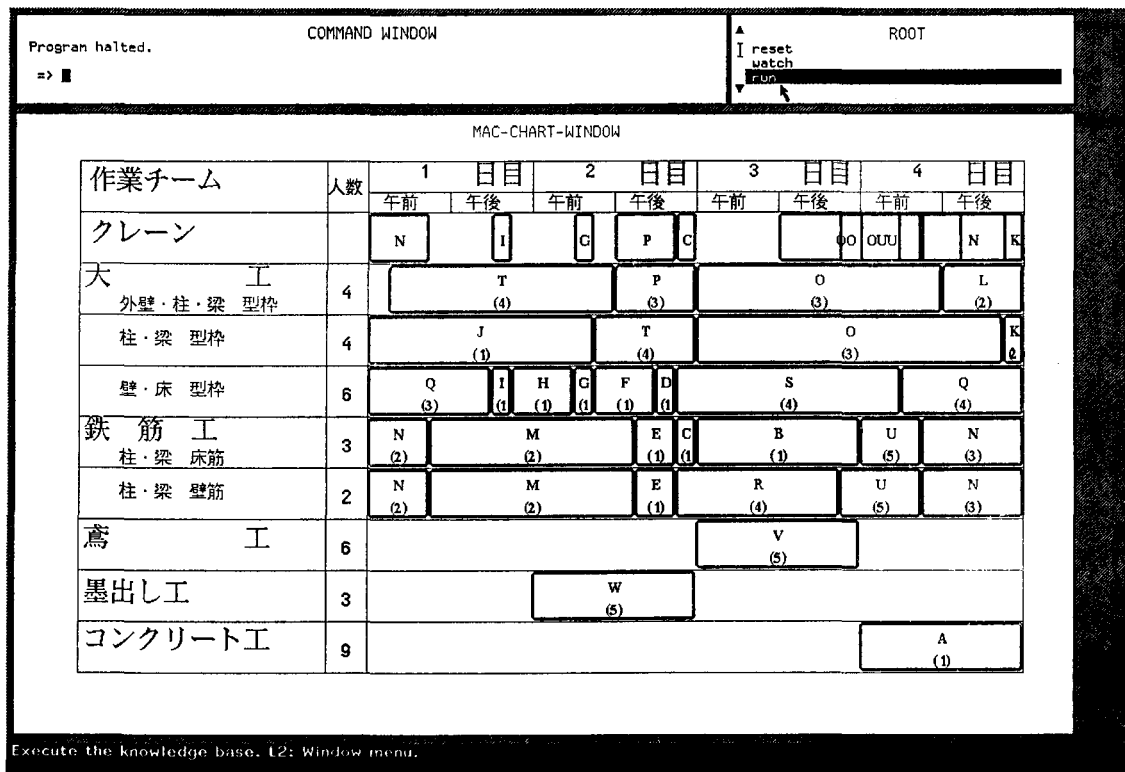


図 6 MACの出力例 2

することの多かった建築作業のスケジュールリングを、MACを利用してシステム化した。しかし、MACの作成そのものが個人の経験による部分が多く、担当者によって計画内容に大きな差があった。MACの作成をAIによってシステム化することによって、専門家のノウハウを有効に活用できるばかりでなく、短時間に多くの代替案を作成して評価することが可能となる。従来、計画段階で十分に検討しないまま施工していた工事も、納得ゆくまで検討を加えることができるようになるであろう。また、エキスパートシステムができる

と、ほとんどMACの経験のない技術者でも計画を行なえるようになるであろう。

そのような意味で、MAC作成のためのエキスパートシステムには大きな期待がよせられている。いまだ多くの問題は残されているが、種々の試行を繰り返し、1日も早く実用的なシステムを構築してゆきたい。

参考文献

- [1] 松本信二, 三根直人: 建築施工の作業計画における最適化. オペレーションズ・リサーチ Vol.28, No.5, (1983年5月), pp.219~224

上海システム・ダイナミクス国際会議報告

明治大学 島田 俊郎

1987年6月9日~12日、上海科学会議センターにおいて、システム・ダイナミクス(SD)学会87年度国際会議が開かれた。この会議の報告に入る前に1986年SD度国際会議について述べよう。86年度は、10月22日~24日、スペインセビリアで System Dynamics: On the Move というテーマで開かれた。

Forrester の Plenary Session に続き、10セッションに分れ、2セッションを並列に進めて行なわれた。セッション1~3は、SD理論研究、セッション4~10は、Models, Optimisation, Application, Expert Systems 等で総計68報告であった。日本からは島田俊郎(明治大)が参加、明大グループの Simulation Model of the Tokyo Metropolitan Region の報告を行なった。

87年度のSD国際会議は、上海機械学院の王其藩準教授を中心として組織され、上海機械学院および上海科学技術協会、その他公的機関の全面的援助のもとに、盛大に举行された。外国参加者約60名、中国参加者100名以上、開会式には、機械学院の関連学科の休講措置により、講堂一杯に学生が多数参加した。なお本会議と並行して、同じ場所で、中国SD学会が正式に発足した。

日本からの参加者は、*T内野 明(横浜商大)、*亀山三郎(中央大)、***岸 光男(大阪府大)、*小島崇弘(専修大)、**T島田俊郎(明治大)、**清水 明(千葉工大)、**堀内俊幸(千葉工大)、*T町田欣弥(朝日大)、山内 昭(阪南大)の9名で、*印の4名はアカウントィング・ダイナミクス(Accounting Dynamics Its concepts and model)を**の3名は千葉SDモデル(Design and Analysis of a Development Model for Chiba Prefecture)を、Tの3名は他2名と共同で歯科疾患モデル(A Simulation Model for Dental Diseases)を、***印の1名は他3名と共同でSDモデルのためのプロトタイプ・エキスパート・システム(A Prototype Expert System for System Dynamics Modelling)を発表した。

会議は初日の開会式、SD創案者のJay W. Forrester の招待講演に続いて、全14セッション(ポスターセッションは除く)65報告が行なわれた。

全体に中華人民共和国の論文が非常に多く、研究途中のものが多く、ほとんどがかなり大規模なモデルで、かつ、さまざまな新しい試みを行っており、その熱意と努力に感嘆する。