

PRECEDENCE NETWORKの拡張と コンピュータ処理に関する研究

EXTENSION OF PRECEDENCE NETWORK MODEL AND ITS COMPUTER PROCESSING

山本 幸司^{*} 井上 俊輝^{**}
池守 昌幸^{***} 福岡 敬介^{****}

By Koshi YAMAMOTO, Toshiki INOUE,
Masayuki IKEMORI, Keisuke FUKUOKA

Precedence Network model that permits 2 kinds of time-lag values as well as 4 kinds of relations has been developed for removing the inconvenience of PERT on representing the precedence relations between activities of a project.

This PN/Time model has improved as PN/Manpower model with interactive procedure, which is one of heuristic scheduling models under resource constraints.

PN/Manpower model has been extended to PN/Man-day model that eliminates the dissatisfaction of PN/Manpower on the assignment of required resources to activities, and also combined with the estimation system for examining the master schedule of a project.

All models proposed in this paper have been programmed by BASIC for micro-computer system on construction job-sites.

1. はじめに

土木工事は、それを構成する各作業の順序関係がほぼ一義的に決定できる工事と、自由度が大きすぎて一通りに決定できない工事とに大別できる。前者については、その施工工程のネットワーク表示が可能となるため、1950年代後半に米国で開発されたPERTを工程計画・管理手法として導入でき、我国の建設業界においてもPERTを中心とする工程計画システムの構築が進められている。

しかし、本来、PERTは土木工事の工程計画モデルとして開発された技法ではないことから、その利用に際してはいくつかの問題点が指摘され、とりわけ、

- ① 各作業間の順序関係ならびに工程ネットワークとしての記述方法に自由度を欠く、
- ② 各作業に対する所要時間、所要資源量の設定に関する検討が不十分である、

ことが本質的な問題となっている¹⁾。本研究はこのうち、問題点①を解消する一技法としてPrecedence Networkの利用と、その拡張を提案するものである。その際特に、工事現場のOA化という最近の動向を考慮し、マイコンによる自動処理システムを提案するとともに、上述した問題点②に対してもその解決策を提案する。なお、PERTによって工程ネットワークを表示する方法としてアロー型とノード型があり、後者をプレシデンス型と呼ぶことがあるが、本研究では次章以降に示すような特徴を有する工程計画技法をPrecedence Networkと呼ぶことにする。

キーワード 施工計画、プレシデンスネットワーク

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会
開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 学生会員 名古屋工業大学大学院 社会開発工
学専攻 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

*** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会
開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

**** 正会員 工修 鹿島建設(株) 情報システム部
(〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

2. PNとPERTの比較

(1) PNの概要

従来のPERT系日程計画モデルでは、「各作業はその先行作業がすべて終了するまで開始できない」という通りの順序関係しか認められず、作業間の時間遅れも存在しなかった。これに対してPrecedence Network（これをPNと略す）は表1に示すように、FS, SS, SF, FFという4種類の順序関係を認めた上で、PERTと同様に、各作業の最早開始時刻ES、最早終了時刻EF、最遅開始時刻LS、最遅終了時刻LFなどを算出するモデルである²⁾。表1から明らかなように、PERT/Timeは、「FS関係のみが許され、かつ、時間遅れが0」というPNの特殊な場合となる。

表1 PNにおける順序関係と時間遅れ

順序関係の形状	形状・遅れ時間の表現方法ならびに定義
	FS = n 作業Bは作業Aの終了後n日以上経過しないと開始できない
	SS = n 作業Bは作業Aの開始後n日以上経過しないと開始できない
	FF = n 作業Bは作業Aの終了後n日以上経過しないと終了できない
	SF = n 作業Bは作業Aの開始後n日以上経過しないと終了できない

PNはすでに述べたPERTの問題点①をかなりの程度まで解消できるモデルといえるが、本研究では表1に示すPNに対して、「何日以上経過しなければ～できない」という時間遅れだけでなく、「何日以内に～しなければならない」という逆の時間遅れをも考慮することにした。これによって土木工事で出現する各作業間の順序関係をほぼ自由に記述することが可能となる。なお以下では、第1の時間遅れをFS、第2の時間遅れをFS'のように表記することにする。なお、SS, SF, FFについても同様である。

(2) PNとPERTの比較

PERTがPNの特殊な場合であることから、両者には類似点があり、Forward Pass でES, EF値を、Backward Pass にてLS, LF値を求めるというアルゴリズムは全く同様であるが、以下に示すような本質的ともいえる相違点がある。したがって、PNを使用する際にはこれらの特徴を十分に認識する必要がある。

①PERTでは工程ネットワークをアロー型、ノード

型いずれでも表現できるが、PNではアロー型での表現が不可能である。

②双方とも工程ネットワークにおいて、フィードバックループの存在は認められず、PERTではネットワークブレイクも認められない。しかし、PNでは図1に例示するように、作業着手に関する順序関係のみが存在し、作業終了に関しては何ら制約を受けない作業が存在してもよい。

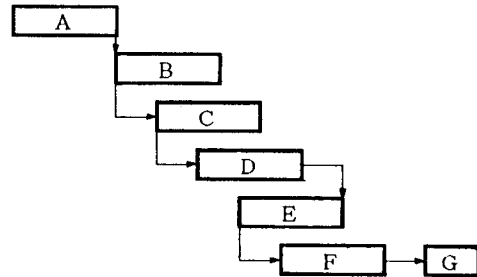


図1 PN表示の一例

③工程ネットワークに含まれる作業に対して中断を認めない場合のTF値はPERTと同様に、(LS-ES)値も(LF-EF)値も等しくなるが、PNで中断を認める場合は、最早時刻に基づくスケジュールと最遅時刻に基づくスケジュールとで中断作業の中断日数が異なるため、TF値についても上記2つの値が一致しなくなる。

④PERTではTF値が零の作業をクリティカル作業と呼ぶが、PNではクリティカルな状態は作業に対してではなく順序関係に対して発生する。このため、TF値は計算可能ではあるが、実質的な意味を持たない。

⑤PERTではクリティカル作業の所要時間を短縮（延伸）すると工期は短縮（延伸）するが、PNではクリティカル順序関係を持つ作業の所要時間を短縮しても工期短縮につながらない場合（図1の作業B, C）や、逆に工期を延伸させる場合（図1の作業F）がある。

⑥PERTでは個々の作業に対して中断を認めると工期が延伸するが、PNでは逆に短縮する場合がある。いまこれを例示したのが図2である。図のような順序関係において、作業jの中断が認められない場合、

$$\max \{ (EF_i + F_i S_j), (ES_i + S_i S_j) \} < (EF_i + F_i F_j - t_j) \quad (1)$$

ここに、 t_j ：作業jの所要日数

が成立すると、図2(b)のように作業*j*の開始が遅れ、結果的に作業*j*とSS関係を持つ後続作業の着手も遅れる。これに対して中断を認めると、図2(c)のように作業*j*の終了時刻は変わらないものの、着手時間を早めることが可能となり、それだけ後続作業の着手時刻を早めることができ、工期短縮に寄与する可能性が出てくる。

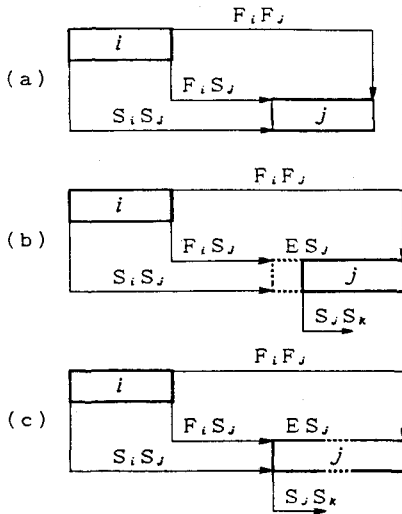


図2 作業中断を認める場合のPN

3. PN/Time アルゴリズム

PERT系日程計画モデルのうち、時間的観点からのチェックを行うモデルをPERT/Timeと称するのと同様に、PNの場合をPN/Timeと呼ぶことにする。

PN/Timeによる日程計算はPERT/Timeのアルゴリズムを準用できるが、すでに明らかにしたような本質的な相違点があるため、その分だけ日程計算アルゴリズムも複雑となる。特に、工程ネットワークを構成する作業の中断を認める場合には工期の短縮をもたらす場合もあるという特徴を有するため、本研究では作業中断の可否にかかわらず適用可能なアルゴリズムを提案することにする。ここでは、そのうちのForward Passアルゴリズムについて説明する。³⁾

Forward Passでは各作業のES, EF値を算出するが、これらの値を求めるために着目しなければならない順序関係を、2種類の時間遅れならびに先行作業と開始関係を持つか終了関係を持つかによって、以下のような4つのタイプに分割する。

タイプ1: いまES, EF値を求めようとする当該作業が先行作業とSS, FS関係を持つ場合

タイプ2: 同様にSS, FS関係を持つ場合

タイプ3: 同様にFF, SF関係を持つ場合

タイプ4: 同様にFF, SF関係を持つ場合

これによって、Forward Passにおいては、これらの組合せとして、次式より、

$$\sum_{i=1}^4 C_i = 15 \quad (2)$$

15通りの場合それぞれについてアルゴリズムを考えなければならないが、ここでは最も汎用性のある場合、すなわちタイプ1～タイプ4すべてを認める場合についてES, EF値の計算方法を説明する。なお、ここでは、図3に示すネットワークにおいて、B1の先行作業A1～A3のES, EF値はすでに算出されているものとする。

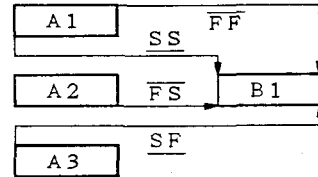


図3 PNにおける先行作業関係

[STEP 1] まず $S_{A1}S_{B1}$ 関係によって決定されている作業B1の最早開始時刻の候補値MXESを次のようにして求める。

$$MXES = ES(A1) + S_{A1}S_{B1} \quad (3)$$

さらに、 $F_{A2}S_{B1}$ 関係が存在する場合の作業B1の最早開始時刻の候補値として次の2つの値を求めておく。

$$NWFES = EF(A2) \quad (4)$$

$$WWFES = EF(A2) + F_{A2}S_{B1} \quad (5)$$

[STEP 2] STEP 1で求めたMXESとNWFES, WWFESの大小関係によって、最早開始時刻の二次候補値MNES, MWESを以下のように決定する。

1) $MXES < NWFES$ の時

$$MNES = NWFES \quad (6)$$

$$MWES = WWFES \quad (7)$$

2) $NWFES \leq MXES \leq WWFES$ の時、

$$MNES = MXES \quad (8)$$

$$MWES = WWFES \quad (9)$$

3) $WWFES < MXES$ の時、

実行不可能となる。

[STEP 3] $S_{A3}F_{B1}$ 関係が存在する場合の作業B1の最早終了時刻の候補値MXEFを次のようにして求める。

$$MXEF = ES(A3) + \frac{S_{A3}F_{B1}}{DUR(B1)} \quad (10)$$

(もしMXEF ≤ 0 ならばMXEF = 1とする)

さらに $F_{A1}F_{B1}$ 関係が存在する場合の作業B1の最早終了時刻の候補値として次の2つの値を求めておく。

$$NWFEF = EF(A1) - DUR(B1) \quad (11)$$

$$WWFEF = EF(A1) + \frac{F_{A1}F_{B1}}{DUR(B1)} \quad (12)$$

[STEP 4] MXEFとNWFEF, WWFEFの大小関係より、最早終了時刻の二次候補値MNEF, MWEFを以下のように決定する。

1) $MXEF < NWFEF$ の時、

$$MNEF = NWFEF \quad (13)$$

$$MWEF = WWFEF \quad (14)$$

2) $NWFEF \leq MXEF \leq WWFEF$ の時、

$$MNEF = MXEF \quad (15)$$

$$MWEF = WWFEF \quad (16)$$

3) $WWFEF < MXEF$ の時、

実行不可能となる。

[STEP 5] このようにして求めたMNES, MWES, MNEF, MWEFの大小関係によって作業B1の最早開始時刻および最早終了時刻を求める。

1) $MNES > MWEF$ の時、

実行不可能となる。

2) $MWEF > MNES > MNEF$, かつ、

$MWES > MWEF$ の時

中断を認める場合も認めない場合も、

$$ES(B1) = MNES \quad (17)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) \quad (18)$$

3) $MWEF > MNES > MNEF$, かつ、

$MWES \leq MWEF$ の時、

中断を認める場合も認めない場合も、

$$ES(B1) = MNES \quad (19)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) \quad (20)$$

4) $MNES \leq MNEF$, かつ、

$MWES < MNEF$ の時、

中断を認めない場合には実行不可能となる。

中断を認める場合には、

$$ES(B1) = MNES \quad (21)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) + MNEF - MNES \quad (22)$$

5) $MNES \leq MNEF$, $MWES \geq MNEF$

かつ $MWES < MWEF$ の時、

中断を認めない場合、

$$ES(B1) = MNEF \quad (23)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) \quad (24)$$

中断を認める場合、

$$ES(B1) = MNES \quad (25)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) + MNEF - MNES \quad (26)$$

6) $MNES \leq MNEF$, $MWES \geq MNEF$

かつ $MWES \geq MWEF$ の時、

中断を認めない場合、

$$ES(B1) = MNEF \quad (27)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) \quad (28)$$

中断を認める場合、

$$ES(B1) = MNES \quad (29)$$

$$EF(B1) = ES(B1) + DUR(B1) + MNEF - MNES \quad (30)$$

以上によって、図2に示す作業B1のES, EF値が算出できることになる。

次にBackward Passに関しても、LS, LF値の計算に際して考慮しなければならない順序関係を、

タイプ1：いまLS, LF値を求めようとする当該作業が後続作業とSS, SF関係を持つ場合

タイプ2：同様に、SS, SF関係を持つ場合

タイプ3：同様に、FS、FF関係を持つ場合
 タイプ4：同様に、FS、FF関係を持つ場合
 に分けられ、Forward Passの場合と同様に15通りの組合せが考えられ、そのアルゴリズムもForward Passの場合と同様に考えていくことができるので、ここではその記述を省略する。

4. PN/Manpowerのコンピュータ処理

(1) PN/Timeのプログラミング

PN/Timeのアルゴリズムは前述したように、PERTと比較すると一見複雑ではあるが、そのプログラミングはさほど困難ではない。本研究では、大型コンピュータ用としてFORTRAN言語で、またマイコン用としてBASIC言語でプログラムを作成した。ここではその記述を省略するが、以下にプログラミングにおける留意点について触れておくことにする。

①PERT/Timeではネットワーク形状が正常である限り、すなわちフィードバックループやブレイクが存在しない限り、日程計画を作成することができるが、PN/Timeでは4つの順序関係に対する時間遅れ値の与え方によっては物理的に実行不能となる場合が出現する。特に「何日以内に～しなければならない」という第2の時間遅れを設定する場合には十分に注意しなければならない。極端な場合には、PN/Time計算に入る前にチェック可能であるが、計算途中でこのような事態が発生する場合には、その時点で計算を打ち切るように配慮した。

②PERT/Timeではフィードバックループの存在が絶対認められず、PN/Timeにおいてもそのままでは日程計画の策定が不可能である。しかしPNでは図4のようなフィードバックの出現することが多い。そこで、このような場合には、まず逆方向の順序関係が存在しないものと仮定して日程計算を進め、得られた結果に対して当該順序関係を付加して実行可能性を検討していく方法を考えた。

③作業中断を認める場合、すでに示した図2(C)からも推測できるように、当該作業の開始時刻、終了時刻、ならびに中断日数が算出されることになる。しかし、どの時点で中断すべきか、あるいは何回中断が許されるか等に関する情報はPN/Timeからは得られない。これを強引に決定する方法もあるが⁴⁾、本研究ではPN/Manpower計算において、投入資源の有効利用を高めるという目的から、中断日数の取り方

に関して特に制限を設けないようにした。しかし、本来中断不可能な作業や中断日数の取り方に制約のある作業に対しては、十分に対処できるプログラムとなっている。

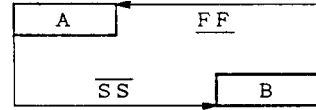


図4 PNにおけるループ発生の一例

(2) PN/Manpowerのプログラミング

PN/Manpower (以下PN/MNと略す) はPN/Timeを資源制約下の工程計画モデルに拡張したものである。しかし、PERT/Manpowerと同様に、最適計画案を求めることは極めて困難であり、資源割当て上コンフリクトな作業群に対して何らかの優先順位を設定し、それに従って実行可能な作業から漸次資源を割当てていくというヒューリスティックなアルゴリズムを導入することになる。本研究では、

①作業中断を認めるPN/Timeでは、中断を生じる作業に対して、その作業の開始日と終了日の間では自由に作業中断日を設定してもよいこと、

②画一的なアルゴリズムよりも、工事現場で種々の条件を考慮しつつinteractiveに工程計画代替案を比較しうるアルゴリズムが望ましいこと、という二点を考慮し、図5のフローに従うプログラムを完成させた。

これは、PN/Timeの計算結果を入力情報とし、資源山積量が資源制約を超える日について、その日に進行中もしくは実行可能な作業とその属性値をマイコンのディスプレイにカラー表示し、その情報を見ながら計画担当者の判断によって試行錯誤的に資源の山崩しを行う方法である。

筆者らはすでにPERT/Manpowerに関して同様のアルゴリズムを開発しているが⁵⁾、このPN/MNでは、「何日以内に～しなければならない」という第2の時間遅れが工程ネットワークに含まれる場合、そのような作業を遅らせすぎると以降の作業工程が実行不可能となる可能性が大きいので、図5のフローでもこのことに十分配慮している。

(3) マイコンによる自動作図

上述のPN/MNモデルによって得られる出力結果をできるだけ見易いものとするため、工程ネットワー

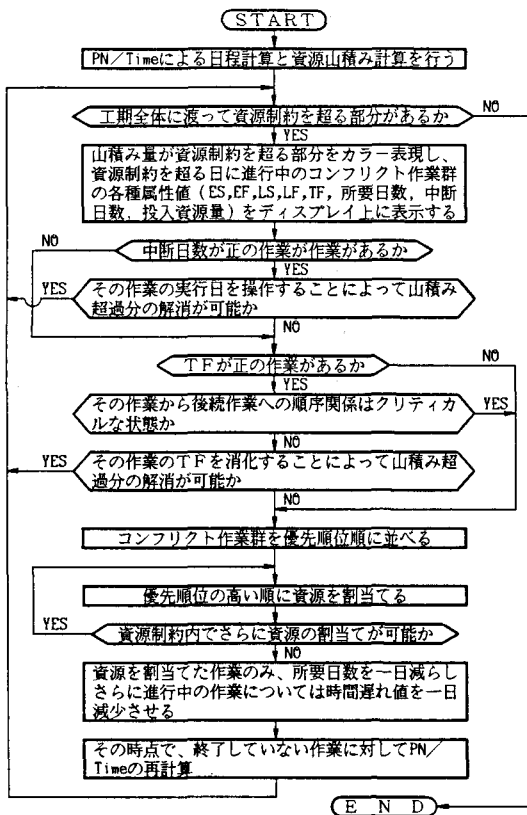


図5 PN/Manpowerアルゴリズム

ク図および資源山積図をプリンターもしくはXYプロッターに自動作図させるシステムを作成した。データの入力に関しては、マイコン本体のメモリー容量、過去のデータとの比較の容易さ、また将来他のシステム（たとえば原価管理、労務管理など）との結合可能性を考慮し、フロッピーディスクを媒体としたデータベースを利用している。

本システムでは、PNの性質上ノード型ネットワーク図を採用しているが、ディスプレイの機能上、一度に表示できるのは9ノード程度である。このため工程ネットワーク図全体を同時に見渡すことは不可能であるが、各ノードを画面の上下にスクロールさせることによりこの問題を解決した。これによって数百ノード程度のプロジェクトにも十分対応することができるようになった。また、各ノードの順序関係（前述の8種類）を示すため、矢印は色分けをして認識性の向上を図った。

図6は本システムで処理し、XYプロッターによ

り印刷された仮想工事のネットワーク図である。しかし、大規模なプロジェクトになると、図6のようなネットワークでは矢印が込入り、見づらくなるため、自動的にノードおよび矢印の位置を図7のように並びかえるアルゴリズムを開発した。また図8は計算結果を従来のバーチャート形式で出力したものである。図中、()内の数値は中断日数を、濃い方のバーチャートはESで開始したときのスケジュールを、薄い方はLSの場合を表している。

5. PN/Manpowerの拡張

(1) PN/Man・dayへの拡張

PN/MNはPERT/ManpowerをPrecedence Networkに拡張したものといえるが、これでは1.で述べたPERTの問題点②を解決することができない。このためには、すでに筆者らが開発した「MAN・DAYを変数とするヒューリスティックな日程計画モデル」（以下Man・dayモデルと呼ぶ）が有効である。これは、各作業ごとにそれを遂行するために必要な資源の上・下限値を設定し、各作業への日々の投入資源量はその範囲内で変数として扱うことにより、与えられた資源制約下で日々の調達資源量の変動をできるだけ小さくし、かつ、結果的に工期を短縮するモデルである。^{6), 7)} 本研究ではPN/MNをMan・dayモデルに拡張することを試み、PN/Man・dayモデルと呼ぶことにした。本モデルは、まずPN/Timeを適用して資源制約のない理想的な場合の工程計画を作成し、次いでMan・dayモデルによりday-by-dayに各作業へ資源を割当てるという手順を踏む。しかし、Man・dayモデルは計算手順が複雑であるため、PN/Timeから直接このモデルに入るのではなく、中断日数およびトータルフロートの消化により山崩しを試み、資源制約を満足しない場合のみ、Man・dayモデルへ移行することもできるようにした。

PN/Man・dayモデルを簡単な事例および実際の土木工事に適用した結果、投入資源量の算定方法によっては計算結果が異なる場合があるものの、同一資源制約下ではPN/MNよりも工期を短縮することができた。しかし、PN/Man・dayモデルにおいても、PN/MNと同様に4種類の順序関係や2種類の時間遅れに関する制約を満足できなくなる場合があり、この問題にどう取り組むかが今後の課題となろう。

(2) 積算業務と概略工程作成業務への拡張

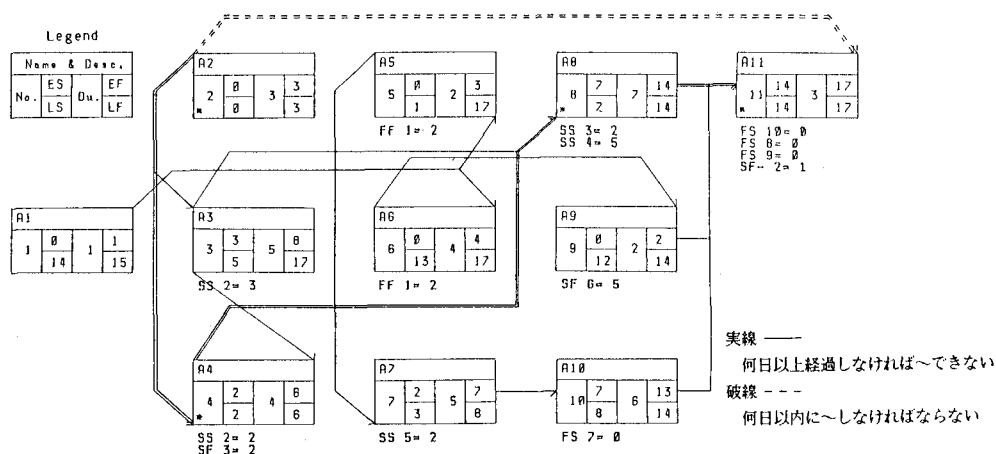


図6 適用事例のネットワーク (ノード配列変更前)

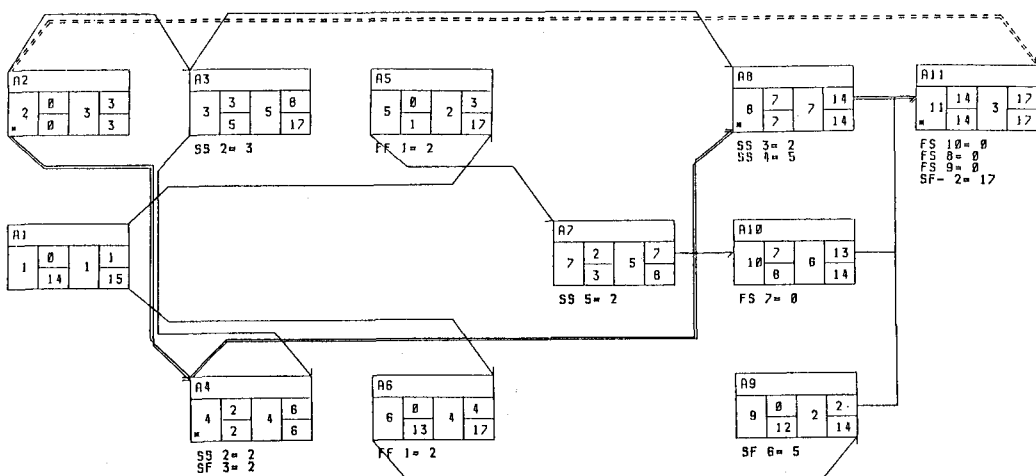


図7 適用事例のネットワーク (ノード配列変更後)

土木工事の積算業務は多大な時間と手間を必要とする手作業が中心となっていたが、近年その電算処理が進行している。筆者らも、直接工事費を算出するための単価計算を主対象とする積算業務のマイコン処理を試み、積算業務全体をコンピュータと手作業とで機能分担することにより、省力化、効率化、確実性の向上を図ったが⁸⁾、本研究ではこの積算システムによって得られた各作業の所要日数、資源量等を直接PN/MNのインプットデータとして用い、概略工程計画作成に移行できるシステムを開発した。システムの概略フローを示したのが図9である。

しかし、積算システムで得られるデータは標準歩掛を前提とした値であるため、本研究では現場の地形・地質等の諸条件に応じて積算データを変更でき

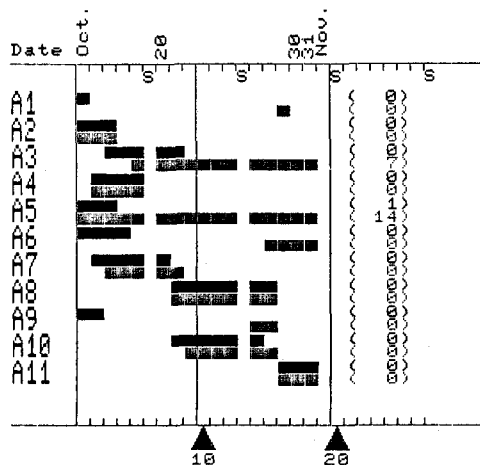


図8 適用事例のバーチャート表示

るように配慮した。また、PERTがPNの特殊な場合であることから、図9のシステムは作業工程がPERTで表現されたプロジェクトに対しても適用可能である。

6. おわりに

本研究は、従来のPERT系スケジューリングモデルが土木工事の工程計画モデルとしては不十分であることを指摘し、それを解決する方法としてPNの導入を提案するとともに、マイコンによる自動処理を可能とするシステムを開発したものである。とりわけ

①2種類の時間遅れを導入することによって、作業間の順序関係の記述に関する自由度を増したこと

②PN/Timeのみならず、PN/MN、PN/Man・dayモデルへと発展させたこと

③積算業務と連携させた概略工程計画作成のシステムへ拡張したこと

④工事現場へのOA化を考慮し、すべてマイコン利用を前提とするシステムとして開発したこと等に特徴がある。

近年、積算用や工程計画用のソフトウェアプログラムが多方面で開発されているが、上記のような特徴すべてを具備するものがいまだないことを考えると、特にマイコン用として開発できたことの意義は大きいと判断する。

なお、今後の課題としては、適用事例をより多く実施し、その結果に対する考察を行うとともに、

①出力表示方法をより見易いものに改善すること
②概略工程の検討段階だけでなく、工程管理段階における利用が可能かどうかを検討することなどを考えている。

参 考 文 献

- 1) 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，PP.217～224，土木学会，1982
- 2) Wiest, J.D. and Levy, F.K.: A Management guide to PERT/CPM, PP.134～146, Zrentice-Hall, 1977
- 3) 山本幸司・福岡敬介・池守昌幸：Precedence Network/Mandayモデルの開発に関する基礎的研究，土木計画学研究・講演集 No.7, PP.461～468, 1985

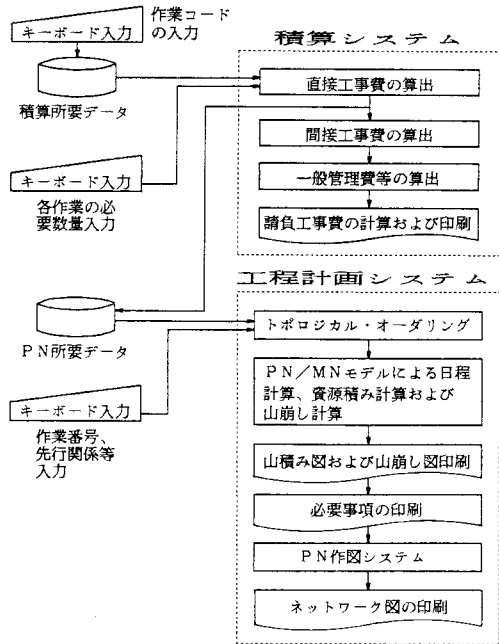


図9 積算・概略工程システム

- 4) 上掲2)
- 5) 谷岡尚昭・山本幸司・福岡敬介：PERT/Manpowerモデルの改善およびPN/Man・dayモデルの開発，土木学会第40回年講第6部，PP.13～14，1985
- 6) 山本幸司・吉川和弘：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，第256号，PP.49～58，1976
- 7) Koshi Yamamoto・Kazuhiro Yoshikawa：Two resource-constrained scheduling models solving the problems of PERT/Manpower, Proc. of 4th International Symposium on Organization and Management of Construction, Vol.3, PP.1041～1049, CIB, 1984
- 8) 井上俊輝・山本幸司：マイコン利用による工事積算業務の自動処理と概略工程の検討，土木学会第40回年講第6部，PP.17～18，1985
- 9) 大崎康生：ネットワーク手法を用いた市販ソフトの調査研究，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，PP.145～160，土木学会，1985