

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

A HEURISTIC SCHEDULING ALGORITHM WITH THE VARIABLE
OF DAILY MANPOWER

吉川和広*・山本幸司**
By Kazuhiro YOSHIKAWA and Koshi YAMAMOTO

1. 緒 言

近年建設工事はますます大規模化・複雑化する傾向にあるが、これに伴って作業量が急増し、その内容も多様化しつつある。しかし一方では、一般的傾向として経験豊かな現場管理技術者および熟練労働者が質量とともに不足しており、また工事用資源（機械、資材、人員など）の使用コストも急騰してきた。

これらのことより、建設工事を従来以上に経済的かつ迅速に遂行する必要性が高まっているが、このためには日々の投入資源量をできるだけ少なくかつ平滑化し、その結果として所要工期をも短縮しうるような日程計画を作成する必要がある。しかし、各作業を遂行するのに必要な資源の種類が決定されると一般にその仕事量（延投入資源量）は一定と考えてさしつかえないため、従来のPERT系の日程計画モデルのように、各作業の所要日数と日々の所要資源量を固定化する限り、所与の資源制約のもとで投入資源量およびその変動の縮小と所要工期の短縮を同時に期待することは困難であった。

したがって、日程計画におけるこれら2つの目的をある程度まで同時に満足させるためには、2.で詳しく考察するように各作業への日々の投入資源量を変数として扱えるような日程計画モデルを開発する必要がある。このような考え方を生かしたヒューリスティックな日程計画モデルは筆者らが知る限りにおいてもすでにいくつか開発されているが^{1), 2)}、各手法とも一長一短がありそれぞれに問題点を含んでいる。

本研究では各作業に対して仕事量のみを情報として与え、投入可能資源量は日々自由に変化する変数として扱うコンピュータ・シミュレーションモデルを作成することにより、日々の投入資源量の変動をできるだけ小さく

し、結果的に与えられた資源制約のもとで工期の短縮をはかることを目的とする日程計画モデルを提案することとする。いうまでもなく本モデルは、計算量、計算時間、費用を縮小することによって、必ずしも最適ではないがそれに近い実行可能性の高い日程計画案を得るためにヒューリスティックなモデルである。以下、2.では従来の日程計画モデルの概要と問題点について触れ、3.ではその問題点を解決しうる方法として日々の投入資源量を変数とする日程計画モデルを提案するとともに、簡単なプロジェクトネットワークへ適用し本モデルの有効性を検討する。また4.ではこのモデルを実際の建設工事に適用することにより実証的な研究を試みることにする。

2. 従来の資源制約下の日程計画モデル

従来より土木工事の管理目標としては、迅速性、経済性、確実性が考えられており、これらはそれぞれ工期の短縮、工費の低減、品質の向上として具体的に評価される。いま個々の作業に対する作業量が規定されたあるプロジェクトの遂行を考えたとき、これらの評価目標を達成するためにはそのプロジェクトに最適な工事用資源を選定すべきことは言を待たないが、有限の投入可能資源を効率よく使用することを合わせて考える必要がある。前者を設計情報に基づいてすでに決定されたものと考えれば、本論文で考察していく日程計画モデルは後者を対象とするものである。

このような日程計画モデルとしては、従来よりいくつかの方法が考えられているが、ここでは代表的なものとして山崩し法、山ならし法、RAMPSをとりあげ、これらのモデルが内包している問題点を明らかにする。

(1) 山崩し法³⁾

PERT/TIMEは各作業に必要な資源制約を全く考慮しないモデルであったため、これを考慮することによっ

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

て実行可能性の高い日程計画案の作成を目的として開発されたのが山崩し法である。すなわち、山崩し法はまず PERT/TIME 計算結果に基づいて 1 日ごとに資源割当ての制約を考慮しながら各作業の実行可能性をチェックし、資源割当て上コンフリクトな関係を生じた作業に関してはどちらかの基準に基づいて優先順位を与え、緊急を要する作業から資源割当てを行なう日程計画モデルである。

しかし、このモデルでは資源制約の与え方いかんによっては資源の遊休率がいたずらに高くなり工期が延伸する可能性が大きくなる。その端的な例が図-1 である。

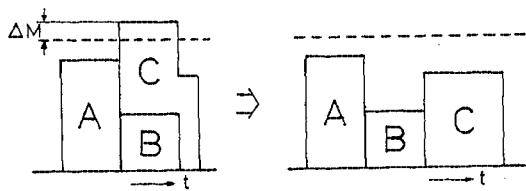


図-1 山崩し法における資源遊休の可能性

この場合には資源制約量が $4M$ だけ不足するために作業 C の開始が大幅に遅れてしまう。しかし、資源制約量を $4M$ だけ多くすれば作業 C は遅れずに開始できるが、これ以外の部分で資源の遊休が多くなり経済的にも不利になる。このような山崩し法の欠点をある程度補完するために開発されたのが山ならし法である。

(2) 山ならし法⁴⁾

山崩し法の欠点が各作業の所要資源量を日々一定と仮定したことに起因することから、クリティカルパス上の作業に関しては最大投入可能資源量、標準資源量、着手可能資源量という 3 つの状態を考慮するのが山ならし法である。

すなわち山ならし法はクリティカルパス上の作業の開始時刻を遅延させないために、資源制約に余裕のあるときは最大投入可能資源量の割当てを考慮し、逆に余裕がないときには着手可能資源量の割当てを考慮する日程計画モデルである。したがって資源の有効利用という観点からは山崩し法を一步改善することになるが、投入資源量を 3 つの状態に限定して、これらの中間の値をとり得ないこと、およびこれがクリティカルパス上の作業に限定されていることが大きな問題点として残される。

(3) RAMPS⁵⁾

RAMPS (Resource Allocation and Multi-Project Scheduling) はクリティカルパス上の作業だけではなく投入資源量と施工量が比例関係を保つすべての作業に対して、最大投入資源量 (スピードアップ作業)、標準資源

量 (正常作業)、着手可能資源量 (スローダウン作業) を設定し、以下のような基準にしたがって作業の実行可能性を検討する日程計画モデルである。

- (i) フロートの範囲内で作業の開始時刻をずらし、資源負荷のピークをさげる。
- (ii) クリティカルパス上にない作業をスピードダウンし、資源負荷のピークをさげる。
- (iii) (i), (ii) によっても投入可能資源量の制約を満たさなければクリティカルパス上の作業をスピードダウンさせ、資源負荷のピークをさげる。

しかし、RAMPSにおいても最大投入資源量、標準資源量、着手可能資源量の間の値を自由にとりえないこと、およびひとたび標準状態で着手した作業はそれが完了するまでスピードアップ、スピードダウンできないことが問題点として残される。なお、これに類似した日程計画モデルの開発がコンピュータセンターや建設会社によって進められつつある。

以上の考察により明らかなように、投入資源の効率的な使用および工期の短縮を期待しうる実行可能性の高い日程計画案を策定するためには、各作業への日々の投入資源量を変数として扱えるようなモデルを開発しなければならない。

3. MAN, DAY を変数とする日程計画モデルの作成

(1) モデル化の前提

工事管理目標のうち経済性と迅速性とはトレードオフの関係にあることが多い、両者を同時に満足する日程計画の作成は困難とされている。しかし 1 つのプロジェクトに対して同一量の工事用資源を投入しても、その運用方法如何によってある程度までは経済性（投入資源の有効利用）および迅速性（工期の短縮）を同時に追求することが可能である。これに関しては、前章の結論として各作業への日々の投入資源量を変数のままで扱う日程計画モデルの作成が必要であることを述べた。

しかし 1 つの作業について考えても、日々の投入資源量 (MAN) と所要日数 (DAY) の組合せは数多く存在する。したがって、各作業の集合である工程ネットワーク全体を考えればこれらの組合せは莫大な数となり、さらに各作業の順序関係を制約条件として考慮しなければならないことを考えると、このような問題を整数計画法などの最適化手法によって定式化し厳密解を求めるることは事実上不可能である。また、日程計画作成レベルと実際の工事施工レベルとの間に存在する少なからぬギャップ（現状では、施工レベルで初めて明らかになる天候、

j の最短所要日数を表わす ([] はガウス記号).

$$D_j^{\min} = \max_i \{ [W_{ij}/M_{ij}^{\max}] \} \dots \dots \dots (3)$$

D_j^{\min} によって PERT/TIME 計算を行うのは、工期短縮が本研究の目的の 1 つであることからあらかじめ最小工期をおさえておきたいためである。

しかし、本モデルでは D_j^{\min} の定義からも明らかのように、日程計算が進むにつれて TF が 0 以下になる作業の生じる可能性が大であるが、これはプロジェクトの遂行が不可能であることを意味するため、それ以後の工程ネットワークに対しては PERT/TIME の修正計算を実施しなければならなくなる。このように、本モデルでは PERT/TIME の計算回数が多くなることを覚悟しなければならないため、1 回当たりの計算時間を短縮することを目的としてモデル内にトポロジカルオーダリング^④を組込むことにした。

b) 実行可能性検討プロセス

作業の実行可能性の検討は、2 つのプロセスに分かれ る。その 1 つは工程ネットワークの順序関係からみた実行可能性の検討であり、もう 1 つは工程ネットワーク上 実行可能な作業およびすでに実行中の作業に対して必要な資源を新たに割当てることが可能かどうかの検討である。このうち工程ネットワークからみた実行可能性の検討は、その作業の先行作業のうちすでに完了した作業の数をチェックすることによって行う。このためには、各ノードに対してそのノードを終了ノードとする作業数をあらかじめ算出しておく必要がある。

c) コンフリクトな作業の優先順位づけ

現場での投入可能資源量 M_i^a には上限があるため、式(2)の制約のもとで資源割当て上コンフリクトなすべての作業（工程ネットワーク上実行可能な作業およびすでに実行中の作業）に対して資源を割当てることが不可能となる場合が多い。このような場合にはコンフリクトな作業のうちのいくつかについて着手時刻を遅らせることが必要となるが、この判断は工期の遅延に大きな影響をおよぼすため、工期を遅延させる可能性の大きい作業を優先しなければならない。本モデルではコンフリクトな作業に対して次のような方法で優先順位づけすることとした。

- ① 進行中で中断不可能な作業、② トータルフロートが小さい作業、③ 仕事量の小さい作業、④ 進行中で中断可能な作業、⑤ 直接後続作業数の多い作業

優先順位 ① は工期の遅延に影響するというよりむしろ中断不可能という技術的観点から最優先すべきものである。次にトータルフロート TF が 0 の作業はクリティカルパス上の作業で工期に直接影響するため優先すべきであることから、② において TF の小さい順に優先順位をつける。なお TF が等しい作業に対しては ③～⑤

の項目によって優先順位を決定することにした。③ は後続作業ができるだけ早く開始可能とするためのものであり、④ は作業段取りを簡略化することを考慮したものである。また ⑤ は投入可能資源量 M_i^a に余裕があるにもかかわらず先行作業が完了していないため多くの作業が実行不可能になるという事態を避けるためのものである。

工程ネットワークの形状によってはこのような優先順位づけが必ずしも最適とはいえないが、本モデルでは一応 ①～⑤ によって優先順位づけを行うこととした。

d) 資源割当ておよび関連処理計算プロセス

本モデルでは日々の投入資源量 M_{ijk} を変数として扱うため、資源割当ての可能性を検討するごとに M_{ijk} を算出する必要があるが、ここでは次のような 4 通りの算出方法を考えた。なお、この段階ではまだ投入可能資源量の制約を考慮に入れていないため、次式によって算出される日々の投入資源量が割当て可能かどうかは別問題である。そこで式(2)での M_{ijk} と区別するために、この段階での日々の投入資源量を \bar{M}_{ijk} で表わすこととする。

$$\bar{M}_{ijk} = \min \{ M_{ij}^{\max}, W_{ij} - W_{ij}^* - (D_j - k + 1) \times M_{ij}^{\min} \} \dots \dots \dots (4)$$

$$\bar{M}_{ijk} = [(W_{ij} - W_{ij}^*) / (D_j - k + 1) + 0.9] \dots \dots \dots (5)$$

$$\bar{M}_{ijk} = [(W_{ij} - W_{ij}^*) / (D_j - k + 1)] \dots \dots \dots (6)$$

$$\bar{M}_{ijk} = \max \{ M_{ij}^{\min}, W_{ij} - W_{ij}^* - (D_j - k + 1) \times M_{ij}^{\max} \} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、

W_{ij}^* : 作業 j を開始後 $k-1$ 日間の資源 i の延投入資源量

D_j : 作業 j の予定所要日数、初期値は D_j^{\min}

式(4)は作業 j に対して可能な限り最大限の資源割当てを行う方法で、 $k+1$ 日目以後を最小投入資源量で遂行することを前提としている。一方、式(5), (6)は常にほぼ一定した資源量の割当てを行なう方法で、式(5)は切上げ、式(6)は切捨てによって整数化している。最後に式(7)は作業 j に対して最小限の資源割当てを行う方法であり、 $k+1$ 日以後を最大投入資源量で遂行していくことを前提としたものである。

投入資源の有効利用および工期の短縮という本研究の目的を考えたとき、どの算定式が最適であるかは一概に判定できない。そこで、ここではコンフリクトな作業のなかで TF が 1 以下もしくは中断不可能な作業を最優先作業と考え、最優先作業数 MPJ によって \bar{M}_{ijk} の算定方法を変更することにした。すなわち MPJ 値が大きい場合には個々の作業への資源割当て量をある程度少なくしても最優先作業に対する資源割当ての可能性を大きく

表-1 投入資源量 \bar{M}_{ijk} の算定方法

指示方法 MIA	(1)	(2)	(3)
M_{ijk} の算出式			
最優先作業に対する式(4) それ以外の作業に対する式(5)	0 以下	1 以下	2 以下
すべての作業に対する式(6)	1	2	3
すべての作業に対する式(7)	2 以上	3 以上	4 以上

注) MIA (2) または最優先作業数 MPJ が 1 以下ならば式 (4) か式 (5), 2 ならば式 (6), 3 以上ならば式 (7) で算出する方法である。

するため式 (7) を重視する。また MPJ 値が小さい場合には工期が延伸する可能性を少なくするためにコンフリクトな各作業にできるだけ多くの資源を割当てることし式 (4) を重視する方法を考える。しかし、 MPJ の多少の判断は極めて主観的なものであるため、本研究では表-1 に示すような 3 つのケースを想定することにした。

以上によってコンフリクトな作業に対する投入資源量 \bar{M}_{ijk} の算定が可能となるため、次にこれらの作業へ実際に \bar{M}_{ijk} を割当てることが可能かどうかを検討する。ここでは、まず指定された優先順位の最も高い作業 j に対するすべての資源 i に関して、

$$\bar{M}_{ijk} \leq M_i^a \dots \dots \dots (8)$$

が成立するかどうかをチェックする。式 (8) を満足する場合は作業 j の実行が可能であるため、 \bar{M}_{ijk} を M_{ijk} に置きかえるとともにその仕事量 W_{ij} および投入可能資源量 M_i^a を修正する。

一方、式 (8) を満足しない場合には、そのような資源 i を i としたとき、

$$M_{ij}^{\min} \leq \bar{M}_{ijk} \leq M_{ijk} \dots \dots \dots (9)$$

の範囲内で投入資源量 \bar{M}_{ijk} を投入することが可能かどうかを検討する。もし可能ならば作業 j が実行できることを意味するが、この操作によって予定所要日数 D_j が延長するかどうかを確認する必要がある。また式 (9) を満足するような \bar{M}_{ijk} が存在しない作業 j はもはや実行不可能であるため、TF および FF をその分だけ減らさなければならない。またこれによって TF が 0 以下となる作業が出現すれば、当初の PERT/TIME ではプロジェクトの遂行が不可能となるため、この時点での PERT/TIME の修正計算を実施する。一方、フロートに余裕がある間はその作業の終了ノードの最早時刻を遅らせる処置をとる。

以上のプロセスによって優先順位の最も高い作業 j に対する資源割当ての検討が完了すれば、続いて、次善の優先順位をもつ作業の実行可能性を検討する。そして、すべてのコンフリクトな作業に対する検討が完了すればその結果をアウトプットし、翌日に新しく実行可能となる作業の検討にはいる。また、プロジェクトの最終作業に対する資源割当てが完了すれば計算を打ち切る。このような日程計画モデルの概要をフローチャートで示したのが図-2 である。

(3) 簡単なプロジェクトネットワークへの適用

本節では、投入資源の効率的な利用および工期の短縮化を目的として提案したヒューリスティックな日程計画モデルを簡単なプロジェクトネットワークに適用し、さらに山崩し法との比較を行うことにより、本モデルの有効性および問題点について検討することとする。

図-3 に示すプロジェクトは 3 種類の資源を必要とする中断不可能な作業によって構成されたものである⁹⁾。このプロジェクトに山崩し法および本モデルを適用するときのインプットデータ(各作業の特性値)を示したのが表-2 である。表-2において、最大投入資源量 M_{ij}^{\max}

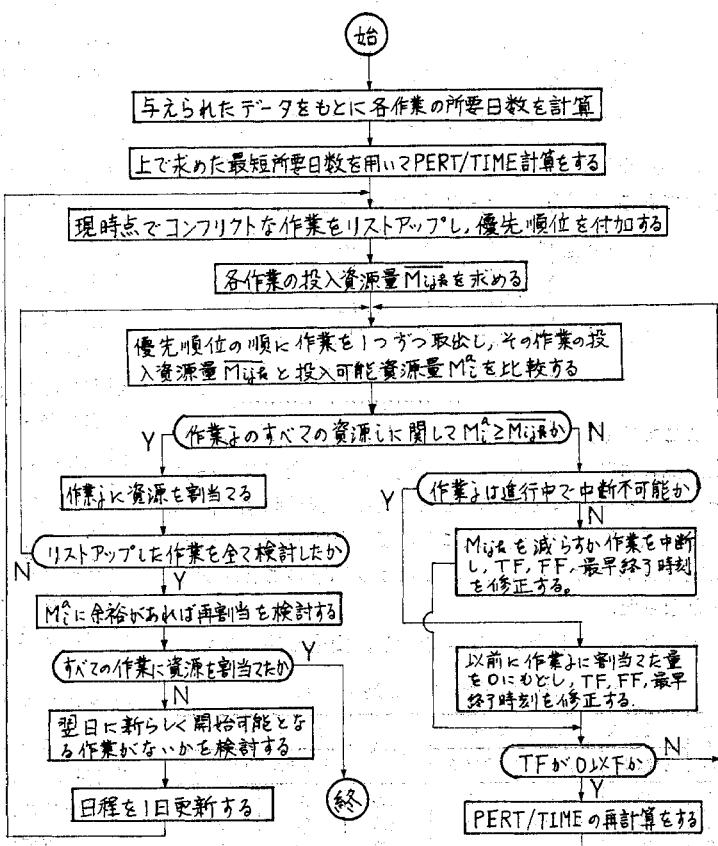


図-2 日程計画モデルのフローチャート

表-2 適用事例の作業特性値(その1)

ノード番号	*	資源 1				資源 2				資源 3				
		**	W	max	min	**	W	max	min	**	W	max	min	
1	2	10	5	50	7	3	2	20	3	1	3	30	4	2
1	4	14	4	56	5	3	3	42	4	2	4	56	5	3
2	3	3	6	18	8	4	2	6	3	1	4	12	5	3
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	5	2	10	3	1	0	0	0	0	2	10	3	1
3	7	2	4	8	5	3	2	4	3	1	2	4	3	1
3	8	8	3	24	4	2	3	24	4	2	3	24	4	2
4	5	8	4	32	5	3	4	32	5	3	3	24	4	2
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	10	4	7	28	9	5	3	12	4	2	5	20	7	3
7	10	6	4	24	5	3	2	12	3	1	0	0	0	0
8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	11	2	4	8	5	3	4	8	5	3	2	4	3	1
10	11	3	4	12	5	3	2	6	3	1	2	6	3	1
11	12	2	3	6	4	2	4	8	5	3	5	10	7	3

注) *、** は山崩し法を適用するときの所要日数および日々の投入資源量。また W は W_{ij} , max は M_{ij}^{max} , min は M_{ij}^{min} を表す。以下表-5, 7 も同様。

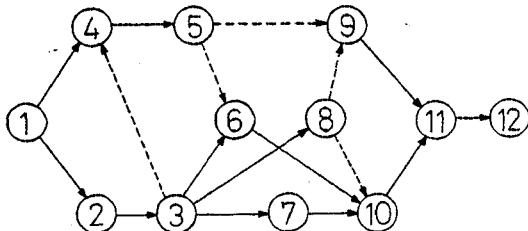


図-3 適用事例ネットワーク(その1)

および最小投入資源量 M_{ij}^{min} は次式によって想定したものである (PM_{ij} は表-2 中の ** をさす)。

$$M_{ij}^{\text{max}} = \begin{cases} PM_{ij} + 1 & (PM_{ij} \leq 4) \\ PM_{ij} + 2 & (PM_{ij} > 4) \end{cases}$$

$$M_{ij}^{\text{min}} = \begin{cases} PM_{ij} & (PM_{ij} \leq 1) \\ PM_{ij} - 1 & (1 < PM_{ij} \leq 4) \\ PM_{ij} - 2 & (PM_{ij} > 4) \end{cases}$$
.....(10)

ここでは表-3に示すように、投入資源量 \bar{M}_{ijk} の算定方法および投入可能資源量 M_i^a の制約をパラメーターとする4ケースを考え、それぞれの日程計画案を作成した。表-3には山崩し法による工期と本モデルによる工期とをあわせて示したが、これより以下のことが明らかとなった。

① ケース2が最小の工期を示し、山崩し法よりも2

表-3 適用事例ケースと工期(その1)

ケース	投入可能資源量			MIA	工期(日)	
	資源1	資源2	資源3		本モデル	山崩し法
1	10	6	8	(2)	35	35
2	10	6	8	(1)	33	35
3	10	6	7	(2)	34	38
4	9	6	8	(2)	39	41

日短縮される。また全般的に、資源制約がきつくなるほど本モデルと山崩し法との差が顕著に現われ、工期の短縮が期待できる。

② ケース1とケース2の比較より同一資源制約下であっても投入資源量 \bar{M}_{ijk} の算定方法によって工期が多少ばらつく可能性が認められる。

③ ケース1とケース3を比較すると、前者は資源3が1単位多いにもかかわらず工期は1日長くなっている。

以上の結果のうち、①より図一3のような小さなプロジェクトに対しても本モデルの有効性を確認することができた。しかし②およ

び③に関しては、それぞれの問題点が本モデルに内在するものがあることは図-3のプロジェクトネットワークの形状などに強く影響を受けたものについて、さらに詳しく検討することが必要である。

図-3のネットワークは比較的簡単なものであり、最優先作業数 MPJ は常時2以下と仮定してもさしつかえない。したがって表-1を参照すれば、ケース1では式(4)～(6)、またケース2では式(6)、(7)によって \bar{M}_{ijk} が算定されるため、ケース1はケース2よりも個々の作業に対する資源割当量が多くなる。しかし、これは同時着工業数が減少し資源割当が困難となる作業の生じる可能性が大きくなることを意味する。ここでもし本来中断不可能な作業の資源割当が不可能になれば、その作業は開始時刻にさかのぼって実行できないことを意味するため、結果的にこのような作業は大幅に開始時刻が遅れることになる。本事例ではすべての作業を中断不可能と考えたため、特にこのような事態に陥る可能性が強く、これが②の結果を生じた原因になったものと思われる。

次に③に関しても、すべての作業が中断不可能であることに起因すると考えられる。すなわち、投入可能資源量が多ければ十分なトータルフロートを持つ優先順位の低い作業に対しても資源割当が可能となるが、本事例ではすべての作業が中断不可能なものであるため、このような作業も、翌日以降は優先順位が高くなってしまう。したがって、たとえクリティカルパス上の作業でも未着手なものに対しては資源割当ができなくなる可能性が生じる。ケース1はケース3よりも投入可能資源量が1単位多いためにこの影響が現われたものと考えられる。

以上により、本事例においては②、③という結果を生じた原因が図-3のネットワークを構成するすべての作業を中断不可能としたことにあると考えてさしつかえないであろう。

次に第2の事例とし

て図-4のプロジェクトネットワークを考える¹⁰⁾。これは投入可能資源量 M_{ij}^a が1日の労働時間帯によって表-4のように変化する

3種類の資源によって遂行されるプロジェクト

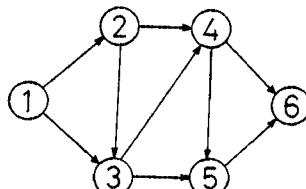


図-4 適用事例ネットワーク(その2)

トで、その作業特性値を示したのが表-5である。表-5において M_{ij}^{\max} および M_{ij}^{\min} は式(10)より算出したものである。ここではすべての作業が中断可能な場合と中断不可能な場合を考え、投入資源量 \bar{M}_{ijk} に関しても表-1の中から2通りの算定方法を考えた。これら4ケースおよび山崩し法を適用した場合の工期を示したのが表-6である。これより以下のことが明らかとなった。

① ケース1, 2の結果をみると、 \bar{M}_{ijk} の算定方法によって工期がばらつくものの、山崩し法の場合よりも短縮されている。

② 各作業を中断可能としたケース3, 4ではさらに工期が短縮され、投入資源の有効利用が大いに期待できる。

以上のうち①の原因としては図-3の事例における考察と同様のことが考えられる。また②より、施工段取り上作業を中断することが許されるならば、工期の短縮および資源の有効利用という本研究の目的に対して非常に効果的であることが明らかとなった。

表-4 適用事例の投入可能資源量

資源量		資源1	資源2	資源3
作業時間帯				
0~8		10	8	8
8~16		8	6	6
16~24		5	5	5

表-5 適用事例の作業特性値(その2)

ノード番号	* 開始 終了	資源1				資源2				資源3				
		**	W	max	min	**	W	max	min	**	W	max	min	
1	2	8	5	40	7	3	2	16	3	1	1	8	2	1
1	3	24	3	72	4	2	6	144	8	4	3	72	4	2
2	3	32	4	128	5	3	0	0	0	0	3	96	4	2
2	4	24	5	120	7	3	1	24	2	1	1	24	2	1
3	4	16	7	112	9	5	6	96	8	4	5	80	7	3
3	5	32	2	64	3	1	5	160	7	3	5	160	7	3
4	5	8	5	40	7	3	5	40	7	3	0	0	0	0
4	6	24	4	96	5	3	3	72	4	2	1	24	2	1
5	6	16	4	64	5	3	0	0	0	0	2	32	3	1

表-6 適用事例ケースと工期(その2)

ケース	中断可能性	MIA	工期(時間)	
			本モデル	山崩し法
1	不	可	(2)	127
2	不	可	(1)	116
3	可	能	(2)	105
4	可	能	(1)	104

これら2つの適用事例に関する考察をとりまとめれば、本研究で提案した日程計画モデルに対して以下のような特徴が考えられる。

① 簡単なプロジェクトに対しても山崩し法より工期の短縮化を期待することができる。これは同一資源制約下においては投入資源の効率的な利用を意味する。

② 土木工事の性格上中断不可能な作業の存在はやむをえないが、これが多の場合には資源割当て時の自由度が減少し工期短縮化の期待度が小さくなる。

③ あくまでもヒューリスティックな日程計画モデルであるため、 \bar{M}_{ijk} の算定方法あるいは投入可能資源量 M_{ij}^a の制約を幾通りか変えて、シミュレーションを実施し、各代替案を比較検討することが必要である。

4. 実際の建設工事への適用事例

(1) 概 説

3.(3)で考察したように、簡単なプロジェクトネットワークに対しては、MAN, DAY を変数とする日程計画モデルは投入資源の有効利用および工期短縮化という目的に対して非常に有効な方法であると考えることができた。そこで本章では実際の土木工事として東北新幹線高架橋工事をとりあげ、本モデルによって現実レベルの日程計画を作成する場合の妥当性あるいは問題点について検討することとした。

適用事例は図-5に概略断面図を示す高架橋を6基連続的に建設する工事であるが、図中の高欄GおよびダクトFは橋桁工事に付随する工事であるためここでは日程計算の対象外とする。橋脚1基あたりの工程ネットワークを示したのが図-6である。このプロジェクトを遂行するためには、土工、大工、鉄筋工、溶接工、はり工、クレーン車、杭打設機、バックホウなどの資源が必要である。しかし、このうちのはり工と溶接工は限られた作業にのみ投入され、これらが資源割当て上のネックとなることは考えられないため、日程計算の対象から除外す

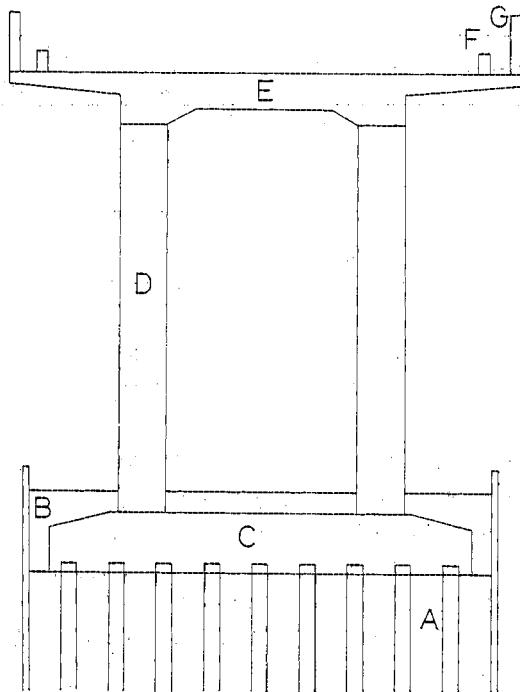
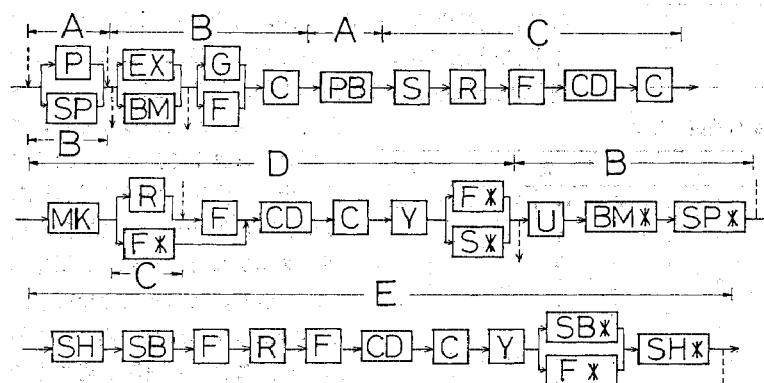


図-5 適用事例の橋脚断面図

ることとした。さらに、杭打設機、バックホウに関しては現場全体に対して1基ずつ投入すれば十分であるため、図-6のようにダミー作業を効果的に付加することによって資源運用上の制約を満たすことにした。

本研究で提案した日程計画モデルを適用するためには、3. で説明した仕事量 W_{ij} 、最大投入資源量 M_{ij}^{\max} 、最小投入資源量 M_{ij}^{\min} を決定しておく必要があるが、これらは次のような考え方に基づいて算出した。まず、 W_{ij} は設計情報として与えられる作業 j の作業量を資源 i の歩掛りで割った値を切上げることによって算出する。次に M_{ij}^{\max} 、 M_{ij}^{\min} に関しては、資源を2種類以上必要とする作業ではこれらの資源によって構成される



注) 各英文字は図-5、表-7 を参照

図-6 橋脚一基の工程ネットワーク

施工パーティとしての施工能力が低下するのを防ぐために M_{ij}^{\max} と M_{ij}^{\min} との差が小さくなるように想定した。一方必要な資源が1種類の作業については標準的な投入資源量の50% 増を M_{ij}^{\max} 、50% 減を M_{ij}^{\min} と想定した。このようにして算出された W_{ij} 、 M_{ij}^{\max} 、 M_{ij}^{\min} をまとめたのが表-7である。表-7では実際の工事施工データとしての所要日数と投入資源量（上述の標準的な投入資源量）を合わせて示した。

表-7の実施工データをもとに PERT/TIME 計算を行った結果、工期は240日となり、各資源の山積図を作成したところそれぞれの最大投入量は土工12人、大工28人、とび工14人、鉄筋工12人、クレーン車9台であった。これらの結果を参考にして、ここでは表-8に示すように投入可能資源量 M_i^a の制約が比較的きつい場合と中程度の場合およびゆるい場合の3状態を考え、投入資源量 \bar{M}_{ijk} についても表-1中の2通りの算定方法を考えることとした。さらに作業の中止可能性に関しては、本質的に中止不可能と考えるべき作業であるコンクリート養生のみを考慮する場合と、すべての作業を中止不可能と仮定する場合とを考えることとした。以上の結果、ここでは図-6に示したプロジェクトの日程計画として12通りの代替案を考えることとなった。

(2) 計算結果およびその考察

適用事例は5種類の資源を必要とする約280個のアクティビティからなるプロジェクトであるが、前節で示した12ケースに対する工期を山崩し法と比較して示したのが表-8である。各代替案とも同一資源制約下での山崩し法と比較すれば工期がかなり短縮されており、また資源制約がゆるく各作業を中断可能とする代替案が工期的に最も望ましいといえる。表-8より以下のことが明らかとなる。

① 3. での適用事例で認められた投入資源量 \bar{M}_{ijk} の算定方法が工期におよぼす影響は、プロジェクトネットワークが大きくなればほとんど見うけられない。

② 同一資源制約下では、各作業が中断可能であれば中断不可能な場合と比較してかなり工期を短縮することができる。したがって資源の有効利用という観点から工期の短縮化をはかるためには、ある程度作業段取りが複雑になんでも可能な限り中断可能性を追求すべきである。

③ 資源制約量によって工期が大きく変化する。したがって本モデルを適用する場合には、資源制約量と工期と

緩行・標準・急行という3つの状態しか考察していないため、投入資源の利用効率の向上およびその結果としての工期の短縮化を目的とすれば不十分なモデルであるといわざるを得ない。

このためにはMANおよびDAYを自由変数として扱える計画手法が必要であるが、プロジェクト全体を考えると両者の組合せ数が非常に多くなるため数学的に厳密な解析は困難と考えられた。そこで本研究では、資源の遊休率最小あるいは工期最小というような最適化問題としてモデル化するよりも、実行可能性の高い日程計画を効率よく作成することを目的としてヒューリスティックなモデルを開発することを試みた。

この方法は各作業に対して最大および最小投入資源量を与える、この範囲内で日々の投入資源量を決定するもので、資源割当て上コンフリクトな作業に対しては優先順位を付加し、1日ごとに資源の割当てをシミュレートしていく方法である。本研究では山崩し法と対比しながら事例計算を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 小さなプロジェクトに対しては、投入資源量 M_{ijk} の算定方法によって計算結果がばらつく可能性があるが、同一資源制約下では山崩し法よりも工期の短縮がはかかる。したがって投入資源の効率的な利用が可能となる。

(2) プロジェクトを構成する各作業が中断不可能な場合を、中断可能な場合と比較すると工期が延伸し投入資源の利用効率が悪くなる(実際に作業中断を行う場合には、この計算には現われないような問題点が数多く発生することが予想されるため、慎重に対処しなければならない)。

(3) 実用レベルのプロジェクトでは資源制約をゆるくすればある程度工期を短縮することができる。逆にきつくすれば工期が延伸する可能性が生じるが、資源の遊休を減少させることができとなる。

また本日程計画モデルは、

i) 複数種類の資源が施工パーティを形成する作業に対しては、施工パーティとしての施工能力を考慮しつつ資源割当てを行うことが可能のこと、

ii) 投入可能資源量 M_{ij}^* を日々自由に変更できるため、一般に出来高が低下する工事開始時期および終了時期の遊休を減少させるような資源計画を立案できること、

iii) 最優先作業数によって投入資源量 M_{ijk} の算定方法をパラメトリックに変更できること、などの特徴を持つため、PERT系を主とする従来の日程計画モデルと比較して十分に有効な手法であると結論づ

けることができる。

しかし本モデルをより完全なものとするためには、今後のような事項について研究を進めていくことが必要であろう。

(1) 最大投入資源量 M_{ij}^{\max} 、最小投入資源量 M_{ij}^{\min} の設定方法を確立するとともに、投入資源量 M_{ijk} と最優先作業数 MPJ との関係を検討する。

(2) 本モデルでは実行可能な日程計画を効率よく策定するために、本来中断不可能な作業がひとたび開始されたのちある時刻において実行不可能(すなわち資源の割当てが不可能)となった場合、その作業の開始時刻にさかのぼって再度資源割当てを行わずその間に割当てた資源量を0にもどした。この処置によって計算時間を大幅に短縮することができるが資源の遊休率が高くなる恐れがある。したがって、0にもどされる延資源量が多い場合にはそれらの作業の開始時刻にさかのぼって資源割当てをやり直す方法を確立する。

(3) 資源の有効利用という観点からは、工期の短縮だけでなく経済的評価をも考慮しうるようなモデルへ発展させなければならない。その1つの方法として各資源の損料の大小によって投入資源に対する優先順位づけを考慮する。

最後に、本研究を遂行するにあたり有益なご助言をいただいた京都大学工学部春名攻助教授、および実例計算においてご協力を得た徳田裕平氏(現日本水道コンサルタント勤務)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Wiest, J.D. : A Heuristic Model for Scheduling Large Projects with Limited Resources, Management Science Vol. 13, No. 6, pp. B-359~B-376, 1967.
- 2) 坂本 実訳：プロジェクト・ネットワーク上の資源配分問題—ヒューリスティック・プログラミングによる解法一, IE Vol. 14, No. 3, pp. 101~108, 1972.
- 3) 佐用泰司：工事管理<全訂新版>, pp. 161~165, 鹿島出版, 1974.
- 4) 川崎健次：建設工事における工程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.
- 5) Lambourn, S. : Resource Allocation and Multi-Project Scheduling, Computer Journal Vol. 5 pp. 300~304, 1963.
- 6) 河原畠良弘ほか：PERT/Manpower プログラムの開発について, 奥村組技術研究年報第1号 pp. 41~50, 1975.
- 7) Bennett, F.L. : Critical Path Resource Scheduling Algorithm, ASCE CO pp. 161~180, 1968.
- 8) 須永照雄：PERT系のプログラミング, pp. 36~34, 朝倉書店, 1972.
- 9) 吉川和広：ネットワーク手法の計算および演習, 土木学会関西支部講習会テキスト「工程管理」pp. 60~66, 1968.
- 10) 関根智明：PERT・CPM pp. 63~76, 日科技連, 1975.

(1976.5.25・受付)