

土木工事工程管理の手法について

文献調査委員会

1. まえがき

土木工事に投入する費用は、莫大な金額にのぼる。そしてこのような工事は、長い期間と数多くの発注者側、請負者側の人々の参加によって完成されるものである。このように大規模でかつ複雑な作業群から成り立っている工事を、合理的に計画し管理することは土木事業にとって重要であるといえる。従来、これらの仕事はベテランといわれる人々の深い経験によってすべてが支えられていたが、これを補助する合理的な道具の一つとして、電子計算機を使った新しい工程管理手法が実用化してきているのが現在の姿勢である。

そこで、本委員会ではこれらの手法の効果に注目し、解説記事としてこれを取り上げ、実際の問題にとり組んでおられる電力中央研究所電子計算機室 中川友康氏に解説をしていただくことにした。

2. 日程計画

たとえば土木工事のように、一つの共通目標を達成するために数百、数千という作業（工程）を相互に連絡をとりつつこれを有機的に推進させなければならないような総合的な活動（プロジェクト）を、いかに正当に計画し管理するかということは、プロジェクトが巨大化するにつれいっそうの重要性を増してきている。

この目的にあう一連の計画・管理の手法として登場したのがここに紹介する PERT¹⁾ (Program Evaluation and Review Technique), CMP²⁾ (Critical Path Method) である。どちらも 1950 年代の後半にアメリカにおいて開発された手法であり、当初 PERT が軍の研究開発プロジェクトのために*、CMP が一企業の化学プラント建設計画のために**用いられたというちがいはあっても、以下に説明するように、どちらもプロジェクトネットワークというマスタープランをよりどころとする点に従来の管理手法にみられない独創性を有する。その後、同じくプロジェクトネットワークにもとづく、いわば PERT, CPM の変種がいろいろ考案されてきていて、今日ではプロジェクトネットワークを用いる諸々の日程計画手法をひとまとめにして PERT・CPM と呼ぶ

* アメリカ海軍特別企画室、ポラリスミサイル開発計画

** Du Pont 社、化学プラント建設計画

ならわしになっている。ここでも初期の PERT, CPM の技法を忠実に紹介するというより、プロジェクトネットワークによる日程計画という立場でいくつかの技法を概説してみたい。

3. プロジェクト ネットワーク

図-1 をみていただきたい。これは一つのプロジェクトが5つの作業 (A, B, C, D, E) に分解できることおよび作業間相互の前後関係の両方の意味を簡潔に表現している。同じことであるが、作業を矢で表わしてもよい。それが図-2の流儀である。図-1が作業間の前後関係をみやすく表現しているのに対し、図-2は作業の時間の経過というものを感じさせる。いずれにせよプロジェクトをこのように書いたものをプロジェクト ネット

図-1 5つの作業の間の順序関係

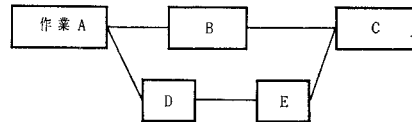
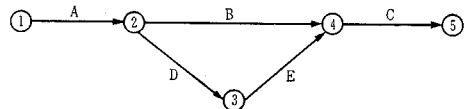


図-2 作業を「矢」で表わした図



ワークと呼ぶ。とくに作業を矢で表わす図-2の方式のものをアローダイヤグラムと呼ぶ。プロジェクトを構成する作業群に正しい前後関係をつけネットワークに表現することがここにいう日程計画手法のカギなのである。

4. 日時についての基本的な計画法 (PERT/Time)

5つの作業に必要な日数が表-1のように見積られたとしよう。このプロジェクトを時間的にむだなく進める計画(スケジュール)は表-2のように計算されよう。プロジェクトの所要日数は40日とわかる。そしてこの40日がこのプロジェクトに最小限必要な日数であるということ、およびこの日数で完了させるためにはAとD, DとE, EとCの作業のつなぎ目で時間の浪費が許されないことが見出される。A, D, Eのような状態にある作業は、プロジェクトの所要日数に直接ひびく作業

表-1 作業の所要日数見積り

作業	所要日数
A	10日
B	18日
C	5日
D	15日
E	10日

表-2 作業の開始・終了日程 (最早開始・終了計画)

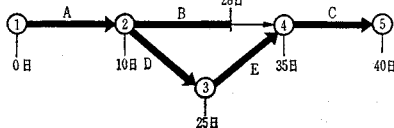
作業	開始日	終了日
A	0日	10日
B	10日	28日
C	35日	40日
D	10日	25日
E	25日	35日

であるので、これを制約(クリティカルな)作業と名付ける。これに対してBは日数にゆとりがある。つまりBは10日目に着手してもよいけれど、ぎりぎり17日目になってから着手してもよい。このゆとり(ここでは7日)をフロートという。その辺の様子が図-3(a)で適確に表現できる。従来のバーチャート表示(b)より得意とするところである。クリティカルとフロートというとらえ方がプロジェクトネットワークによる日程計画法の基本事項である。

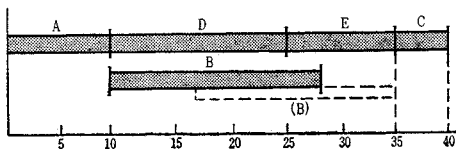
さて、作業に着手できる状態になったら——ということとは先行する作業が全部終了したら——すぐに着手し中断せずその作業を終えるという方針にもとづいて立てられる計画をPERT最早開始最早終了計画という。表-2は最早開始最早終了計画になっている。またプロジェクト所要日数をかえない範囲でなるべく遅い時刻に着手し中断せずに終えるという方針にもとづいて立てられる計画をPERT最遅開始最遅終了計画という。それは表-3のようになる。この二つの計画の相違点はフロートのある作業の開始、終了時刻のちがいにある。

以上のように各作業の日時についての計画をする手法

図-3



(a) 作業の開始・終了時点を示す「スケジュール」



(b) 対応するバーチャート表示

表-3 作業の開始・終了日程 (最遅開始・最遅終了計画)

作業	開始日	終了日
A	0日	10日
B	17日	35日
C	35日	40日
D	10日	25日
E	25日	35日

をPERT/Timeと名付ける。PERT/Timeは最も基本的な手法であり、かつ簡便であるので応用する範囲も広い。PERT・CPM手法を採用するにあたってはまずPERT/Timeから試みたら失敗が少ないと思う。

5. 日時についての計画—日数見積りの不確定さを考慮する(確率PERT/Time)—

作業の所要日数見積りが当初の計画時点では正確にはとれないということがあろう。過去の経験からみてこの種の作業には平均何日で分散(バラツキの度合い)はどのくらいという

いいかたで日数の見積りをする方がしやすいというならば、これにもとづいて計算されるべきプロジェクト所要日数も同様な確率的表現をとらざるを得ない。図-4で説明するならば、矢の長さがおのおの確率的に変わるとき⑤の時刻λも確率的に動くということである。λの期待値Tと分散Vの厳密な計算は非常に困難であるので通常つぎのような簡便計算を行なう。

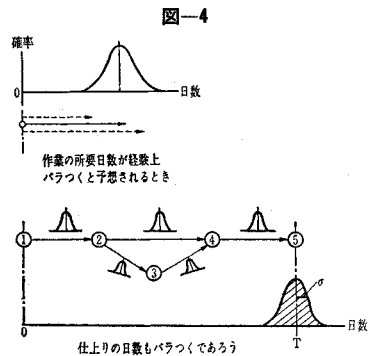


表-4 作業所要日数の期待値と分散

作業	期待値	分散=σ ²
A	10日	σ=2日
B	18日	3
C	5日	1
D	15日	2
E	10日	2

1) すべての作業がある平均的な日数(期待値)で実行されるとしたときのプロジェクト終了日をPERT/Time方式によって計算する。これをもってλの期待値Tとする。

2) 1)を計算するとき現われたクリティカル作業に見積られている分散をネットワーク上で左から右へ累計して得られた値をλの分散とする。たとえば表-4のように見積られたとしたら

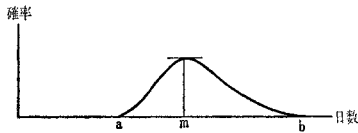
$$T = 10 + 5 + 15 + 10 = 40 \text{ 日}$$

$$V = 2^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 = (3.61 \text{ 日})^2$$

と計算するというのである。

確率PERT/Timeにはいくつかの問題点がある。まず所要日数についての期待値なり分散なりが経験により得られるのかということである。分散を与えるということは、とりもなおさず見積りにある幅を与えるということで、図-5のように楽観的に考えて得られる日数a

図-5 t_e と V を求める簡便法
(両側のすそが a と b , 頂点を与える点
が m であるような適当な分布形を考える)



(短い), 悲観的に考えた場合の日数 b (長い), もっとも実現する可能性の強い日数 m (中間) という三点を見積ってから期待値 t_e と分散 V を

$$t_e = \frac{1}{6}(b-a), \quad V = \left(\frac{1}{6}(b-a)\right)^2$$

のように算出するという試みは一時行なわれた¹⁾ (その理論的根拠はほとんどない)。

あるいは, そもそも日数が確率的に変動するというときの確率とは何かということも反省してみなければいけない。ここにいう確率とは, 客観的な確率というより計画・立案者の感じる不確定さの尺度, すなわち主観的確率の色彩の強いものである。そのような確率を導入して行なう目的がプロジェクトについての単なる時間上の主観的予想なのか, あるいは何らかの積極的意図をもった計画をつくることなのかということをもって自覚していないと確率 PERT/Time を利用する意義はよほど薄いものになってしまうおそれがある。

6. プロジェクト費用の最小化をはかる計画 (CPM)

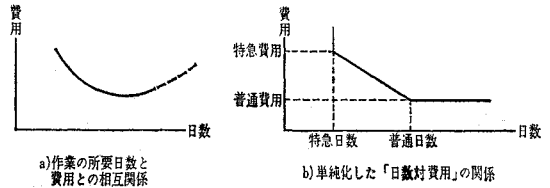
作業の所要日数と, それに費される費用との相互関係を考慮して, プロジェクト全体の費用の最低廉化をはかるという問題は, ある種の典型的なケースでは厳密にとける。この手法を CPM²⁾ と略称している。

作業の所要日数と費用との相互関係はたとえば 図-6(a) のように書けるであろうが, これを 図-6(b) のように単純化するとところが CPM のポイントである。図-6(b) は, ある標準的な日数 (これを普通日数と呼ぶ) に対して通常費用 (普通費用) がかかり, これより短縮できないという限界の日数 (特急日数) に対してはより高価な費用 (特急費用) がかかり, その中間の日数ならば短縮日数に比例した余分の費用がかかるという事情を表わしている。また普通日数より長い方は普通費用に等

表-5 CPM のための日数と費用の見積り

作 業	普通日数	普通費用	特急日数	特急費用	増分費用
A	10 日	80 万円	8 日	140 万円	30 万円/日
B	18	120	16	220	50
C	5	40	3	60	10
D	15	100	9	220	20
E	10	60	6	120	15

図-6



a) 作業の所要日数と費用との相互関係

b) 単純化した「日数対費用」の関係

しい費用がかかるものとする。

以上のような仮定の下でプロジェクトの最小費用はどのように算出されるかを例で追ってみよう。

図-6(b) に相当するデータが表-5 であるとする。プロジェクト所要日数 (以後 λ とかく) が 40 日またはそれより長いときはプロジェクト直接費 (以後 c_1 とかく) は $80+120+40+100+60=400$ 万円である (もし作業 B を特急日数で行なったら $\lambda=40$ 日は不変で, 費用は増大するだけだからそれはまったく損な計画といわねばならない)。さて λ を 40 日より短縮することができる。それには当面 A, D, E, C のどれかを短縮すればよい。その中でもっとも得な方法は表-5 で増分費用の一番小さい作業 C を短縮することである。すなわち $\lambda=40$ 日から 38 日の間は C を操作するのがよい。 $\lambda=38$ 日の最適計画は表-6 (II) である。 λ を 38 日より短縮するには C のつぎに増分費用の小さい作業 E を操作する。E を特急まで短縮することにより $\lambda=34$ 日までの計画が得られる (表-6 (III))。 $\lambda=34$ 日より短縮するには D を操作する。しかし D を単独に操作できる範囲は最大 3 日間 $\lambda=31$ 日までである。なぜなら 3 日短縮したときに B がクリティカルな作業の仲間に加わるからである。 $\lambda=31$ 日より短縮するには A によるか, B と D を同時に操作するかということになる。A ならば 1 日あたり 30 万円, B と D だと 1 日あたり $20+50=70$ 万円要するので当面 A を短縮するのがよい。こうして $\lambda=29$ 日までの計画ができた (表-6 (V))。これより λ を短縮するには最後に残った B と D を短縮するしかない。それにより $\lambda=27$ 日の計画ができる (表-6 (VI))。 $\lambda=27$ 日より短縮するのは不可能である。プロジェクト日数 λ に対するプロジェクト最小費用 c_2 の関係は 図-7 のようにグラフ化される。これを CPM のプロジェクト費用曲線という。

表-6 CPM による計画表

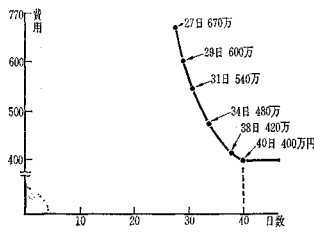
作業	(I)		(II)		(III)		(IV)		(V)		(VI)	
	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了
A	0	10	0	10	0	10	0	10	0	8	0	8
B	10	28	10	28	10	28	10	28	8	26	8	24
C	35	40	35	38	31	34	28	31	26	29	24	27
D	10	25	10	25	10	25	10	22	8	20	8	18
E	25	35	25	35	25	31	22	28	20	26	18	24
	$\lambda=40$ 日	$\lambda=38$	$\lambda=34$	$\lambda=31$	$\lambda=29$	$\lambda=27$						
	$c_1=400$	$c_1=420$	$c_1=480$	$c_1=540$	$c_1=600$	$c_1=740$						
	万円											

作業数のもっと多いネットワークでは上のように手さぐりのCPM計画を求めていくことは事実上不可能であろう(BとDを同時に短縮するといった同時短縮のあらゆる組合せを考えてみなければならないので)。

一般にCPM問題は線型不等式の制約条件の下で線型な目的関数の最小化をはかるといえる。この点についてはたとえば文献3)をみられたい。

さてそのように数学的にうまく定式化され、きれいに解けるといってもCPMが実際面で十分役に立つかどうかは別の問題である。その最大のわかれ目は図-6(b)のような費用曲線を仮定するということと思う。費用曲線の右上りの部分を落したの「時間をかけたらよけい高くつく作業は、より短い時間で処理する方が得である」ということ、あるいはCPMとは「費用増はまぬがれないにしても、いかに増し分を小さくして日数を短縮するかに努力する」ための用具であると理解すべきなのであ

図-7 プロジェクト費用曲線
(プロジェクト所要日数と最小費用との関係を示す)



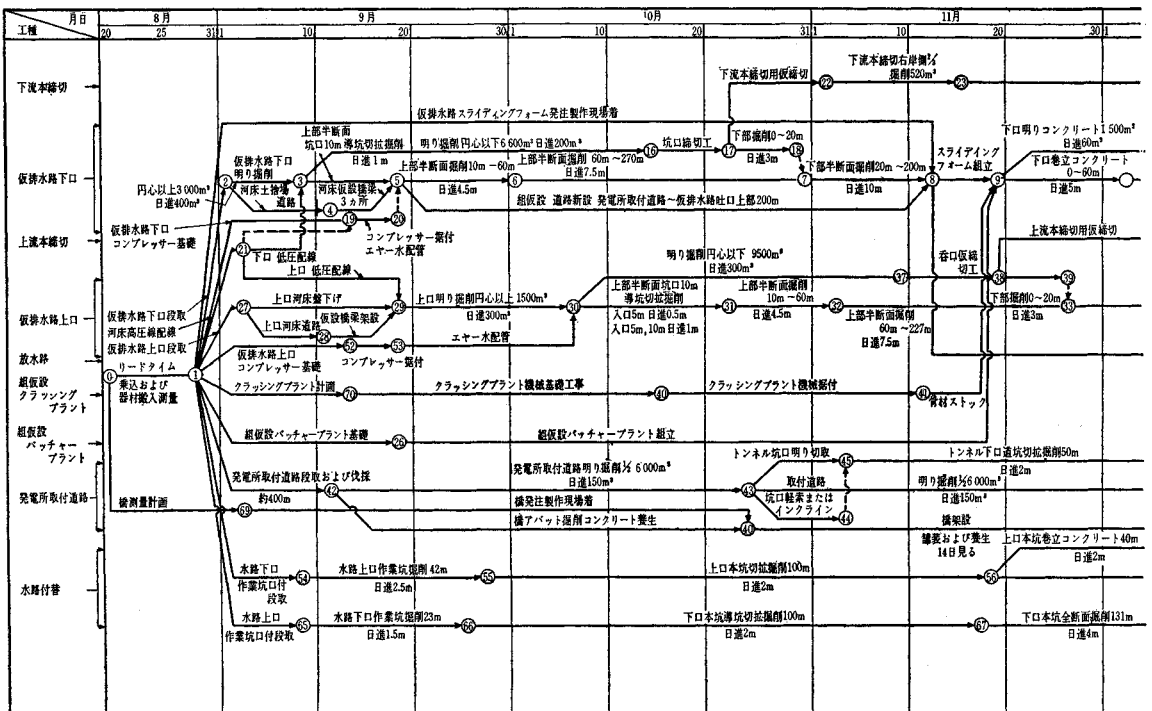
るところで費用が左上りであってもそれが連続的に増加する作業ばかりとは限らない。ある日数より短くしようとする段階的に費用が増すという作業は実際面でよく起こる。残念ながらこの種の作業がふくまれるプロジェクトの最小費用計画はCPMで求めることはできない。

7. その他のプロジェクト ネットワーク技法 (PERT と資材・人員の割りつけ)

PERT/Timeの計画では資材・人員は必要量だけ無条件に調達できるという仮定が暗に入っている。したがって実際問題として資材・人員の投入量に制約がある場合に実行可能であるような計画を得るためには当初のPERT/Time計画に手直しをする必要がある。すなわち資材・人員の山積みを行ない、制約量を越えることがないかどうかをチェックしてもし越えているならば適当に山くずしをしなければならぬ。その一つの手には、作業のフロート(ゆとり時間)に着目して、ゆとりの少ないものに優先的に資材・人員などをわりあてながらPERT/Time計画の手直しをすすめることが考えられる。資材割りつけの優先順位をフロートだけでなく、適用する業務にふさわしい因子を設定しておいてこれに基づいて自動的に山くずしを行おうという試み⁴⁾もなされている。

一般に資材割りつけを考えるモデルは数学的には組み

図-8 河床関係工事



合せ論的な問題になって最適解を求めるのはむずかしいが、厳密な答が得られるようなモデルも研究されはじめて⁹⁾。企業内で日程計画を組もうとすれば多かれ少なかれ資材・作業員などの割りふりの問題は起きる。基本的な PERT/Time 手法の上に、適用業務にふさわしい形の資源配分方式を加味していくことがこの種の日程計画作業の今後の中心的課題になると考えられる。

8. 日程計画と日程管理

PERT・CPM の主要な特長はすでに述べたように、プロジェクト ネットワークというマスタープランにあって、そのために作業の独立性、従属性がはっきりさせられるのである。これによりある作業についての改変（作業の追加、訂正、変更、削除など）が他作業におよぼす影響をとらえることとか、計画と実績との比較をすることが容易となる。またプロジェクト内での各作業の貢献度はクリティカルか否かという指標で知ることができる。そして実績が計画からずれた場合の責任の所在を明らかにし、その時点以後予想される事態（たとえばプロジェクト終了日の遅れ）とそれに対処するに最も有効・適切な手を打つことを可能にする。結局プロジェクトの立案から実施計画作成、進行状況の管理と統制までを総合的かつ正当にとり行なうことができるといえよう。一方では、作業の独立性、従属性が一義的に定められてい

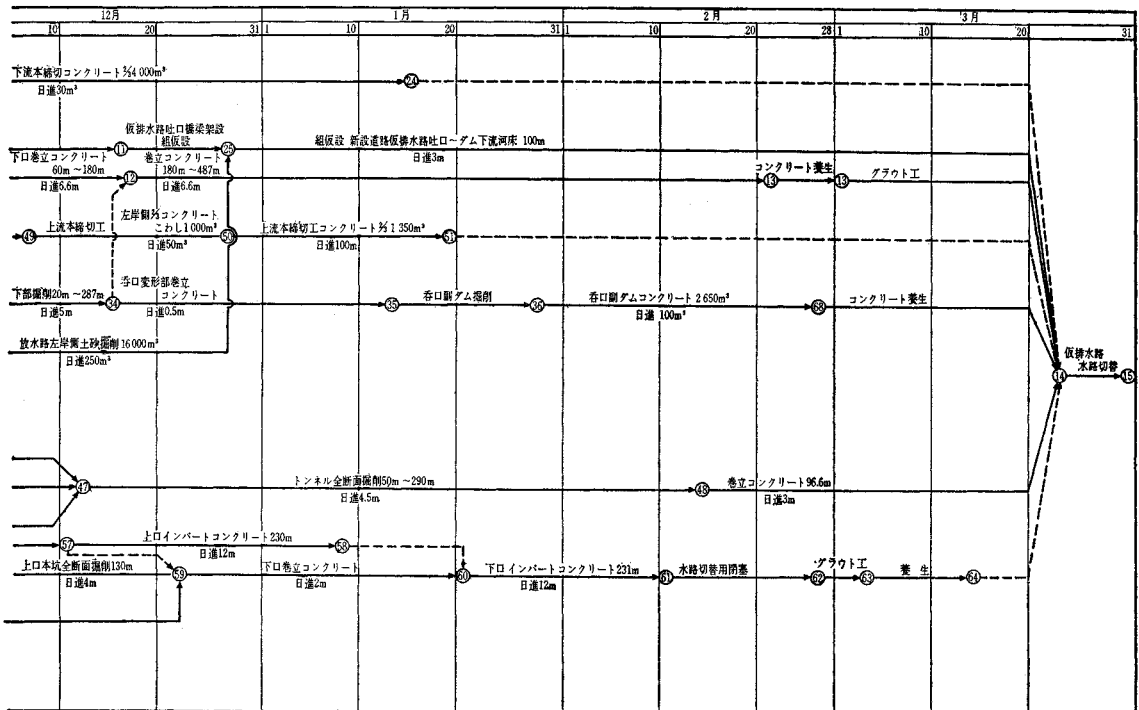
るので大量のデータがきても電子計算組織を用いてきわめて迅速に処理して、計画・管理に必要な情報を適切な様式で打ち出させることができる。あるいは、PERT・CPM は電子計算機を利用することによりいっそうその効果を発揮することができるいっともよいと思う。

9. PERT・CPM の実施状況

アメリカにおいては、国防省と航空宇宙局が協力して軍関係の契約業務に用いるための PERT の様式規格を定めたことにより⁹⁾、建設計画、研究開発計画などを対象として官、民の間に急速に広まった。その規格とは、PERT/Time 計画と、それに基づいてなされる費用の予算、見積、実績値を分類・集計し各種の表の形にまとめる様式を指定したもので、同国できわめて発達している電子計算組織を十分に活用する仕組みになっている。

わが国でも、導入の時期こそアメリカよりおくれているが、近時、大手建設業界では自社の工事計画・管理のためにとり入れる体制にあり、モデル現場に適用しつつその運用面を研究している。また一部の公共企業体（高速道路公団など）では契約時に PERT 計画をあわせ提出することを要請ははじめている。その他、鉄道、電力、自動車などの各業界でも、それぞれの企業に即した問題を、企業に即した形で消化して採用しははじめてい

工 程 表 図 (鹿島建設株式会社提供)



10. 適用例

図-8 は、ダム工事のための仮排水トンネルの掘削工事のアローダイアグラムである。アローダイアグラムをそっくり歴日表の上に展開した形で書いてあるので、このまま作業の進捗状況を当初の計画と照合することができる。すなわち、バーチャートの役割りも兼ねさせているわけである。これは日程の管理 (PERT/Time) を主たる目的としたものである。

図-9 は発電所の併設変電所新設工事の例である⁷⁾。これは配員計画と CPM の実例としてあげた。土木工事について CPM を用いたケースが筆者の手許にないのでこれで代用させていただく。なおこの例は、CPM 解析のためのデータの集め方、その処理の方法、解析結果の解釈の仕方などを種々検討するのが主目的であって、したがってすでに実施されていた工事を対象としたものであることをお断りしておく。この工事の直接費は5億円弱、所要日数1年強で、作業は200余に分解された。200余の作業は、対外契約業務のように事実上日数だけを要するもの、設計・仕様書作成のように若干の社内技術者と日数を要するもの、機器製作・請負工事のように業者に依頼しかつ大きな費用がかかるものというように区別される。業者の行なう工程には CPM による費用最小化の考え方を適用させたかったし、設計技師の担当する作業は、技師の数がかぎられているのでどうしても配員の制約条件を考慮しなければならなかった。この両方の要求をみたすような計画を得るためにつぎのような方策をとった。

1) まず技師の必要数が、与えられた人数を越えないようにするため、フロートの多少を考慮して山くずしを行なう。

2) 1) で得られた PERT 配員計画の上へ CPM のデータを投入して費用の最小化を行なう。

その結果、日数と費用との関係は、日数の短縮分約80日に対して費用の増加分は約3000万円という値が得られた。

この CPM の計算結果を実績と比較してみると、急がなくてよい作業 (クリティカルにならない作業) を特急工期で発注していたなど、あらかじめ CPM による作業計画を実施していたならば節約できたであろうといった例も若干発見された。またクリティカルになる作業の数は全作業数の高々10数%で日程管理上特に留意すべき作業が予想外に少ないことが見い出された。クリティカル作業数の全作業数に対する比率は通常この程度 (多くてもせいぜい20%) であるといわれているが、その確認にもなったわけである。一般に CPM を適用するときはその特長と限界をしっかりと把握しておいて、計算結果の解

釈を慎重に行なうことをいとわなければプロジェクトのコスト面の解析に十分役立ち得るものと考えられる。

参考文献

- 1) Malcolm, D.G. et al.: "Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation", *Operations Research*, 7 (1959), 5, 646-669.
- 2) Kelley, J.E. Jr.: "Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis", *Opns. Res.*, 9 (1961), 3, 296-320.
- 3) 関根智明: PERT・CPM 入門, 日本科学技術連盟, 昭和40年9月
- 4) RAMPS—Resource Allocation and Multi-Project Scheduling System, Users Guide & Training Text (2 vols.), C-E-I-R Inc., 1962.
- 5) Jewell, W.S.: "Divisible Activities in Critical Path Analysis", *Opns. Res.*, 13 (1965), 5, 747-760.
- 6) PERT/TIME and PERT/COST Management Information Systems for Planning and Control, Military Specification MIL-P-23189 A (NAVY), 1962.
- 7) 本告・河合・大久保・中川: 「電力工事と工程管理の新手法について」, 電力第48巻(39年)第10号, 39-83.
- 8) 加藤昭吉: 新しい計画と管理の技法, PERT/CPM の理論と使い方, 経営工学協会, 1964.
- 9) 森 竜雄: PERT—新しい仕事のまとめ方, 日本能率協会, 1964.
- 10) Waldron, A.J.: *Fundamentals of Project Planning and Control*, 1963; (邦訳) 新しい工程管理, PERT・CPM の理論と実際, 鹿島研究所出版会, 1964.
- 11) Moder, J.J. and C.R. Phillips: *Project Management with CPM and PERT, Reinhold Industrial Engineering and Mgmt. Sci. Text Book Series*, Reinhold, 1964.
- 12) Martino, R.L.: "*Project Management and Control*", Vols. 1~3, AMA, 1964.
- 13) Cone, M. W.: "Critical Path Scheduling for Maintenance of Steam Turbine-Generators", *Combustion*, July, (1964) 36-43.
- 14) Fitzgerald, J.P. et al.: "PERT Schedules 345-kV Substation Engineering Construction", *Electrical World*, 4 (1963), 23-24.
- 15) Fulkerson, D.R.: "A Network Flow Computation for Project Cost Curves", *Management Science*, 7 (1961), 2, 167-168.
- 16) Kelley, J.E. Jr.: "Parametric Programming and the Primal-Dual Algorithm", *Opns. Res.*, 7 (1959), 3, 327-334.
- 17) Kuhn, H.W. and A.W. Tucker (eds.): *Linear Inequalities and Related Systems*, Annals of Mathematical Studies No. 38, Princeton University Press, (1957).
- 18) Grubbs, F.K.: "Attempts to Validate Certain PERT Statistics or Picking on PERT", *Opns. Res.*, 10 (1962), 6, 912-915.
- 19) MacCrimmon, K.R. et al.: "An Analytical Study of the PERT Assumptions", *Opns. Res.*, 12 (1964), 1, 16-37.
- 20) Van Slyke, R.M.: "Monte Carlo Methods and the PERT Problem", *Opns. Res.*, 11 (1963), 5, 839-860.
- 21) Lambourn, S.: "Resource Allocation and Multi-Project Scheduling (RAMPS)—A New Tool in Planning and Control", *Computer Journal*, 5 (1963), 4, 300-304.
- 22) Levy, F.K. et al.: "Multiship, Multishop, Workload-Smoothing Program", *Naval Research Logistics Quarterly*, 9 (1962), 1, 37-44.
- 23) Wiest, J.D.: "Some Properties of Schedules for Large Projects with Limited Resources", *Opns. Res.*, 12 (1964), 3, 395-418.