

土木計画のシステムズ・アナリシス

武部健一¹⁾・五十嵐日出夫²⁾・鈴木忠義³⁾・吉川和広⁴⁾・中村英夫⁵⁾・河原畠良弘⁶⁾・中沢式仁⁷⁾

1. 計画

(1) 土木計画と土木計画学

a) はじめに

土木計画学とは何であるかということについては、必ずしも、確立した概念がすでに存在しているわけではない。過去5回にわたって開かれてきた土木計画学シンポジウムにおいても、土木計画学の体系化ということが始まらぬ目標であり、かつ基本テーマであったように、土木計画学の概念規定や内容も、初めの漠然としたイメージから、次第に方向づけが明らかにされてきたのが現状であるといえよう。

そして、土木計画学の主要な柱が、本章の標題である「土木計画のシステムズ・アナリシス」であるということを明らかにする意味においても、ここで土木計画学の考え方や、その学問体系における位置づけを展望して見ることは、むだではあるまい。

b) 土木計画学の概念

土木計画学というものを体系化してゆくというこれまでの試みの中で、2つのアプローチが行なわれている。第一は、主として土木工学ないしは土木計画から出発しようとするものであって、土木計画の学問体系化、すなわち「土木計画・学」という立場である。第二のアプローチは、計画学一般あるいは計画一般原理というものから出発し、その土木工学部門への適用を考える、いわば「土木・計画学」という考え方である。

第一のアプローチである「土木計画・学」的立場とは、土木計画について、その意義・目的・構成・分類・手法を分析し、ここから共通性を抽出することによって土木計画学の成立を期待するものである。その際、土木

計画をシステムとして取り扱い、その計画内容および計画過程について、システムズ・アナリシスを行なうことが、土木計画の本質を明らかにするうえで、きわめて有効であると考えられる。

土木計画とは、土木施設を主体とした計画であり、またその土木施設は土木工学によって基礎づけられるものであるが、しかし、土木計画の学問的分析は、単に自然科学のみによって求められるものではなく、社会科学諸分野、とくに経済学の助けを借りなければ成立しないものであって、その点から、土木計画学は総合科学の一分野であるということができる。

このように、土木計画学を総合科学の一分野であるとする考え方、土木計画学への第二のアプローチである土木・計画学的方法においていっそう明瞭である。土木計画をシステム論的に分析した場合、建築計画などにも共通した施設計画としての包括的な計画理論の背景が考えられるだけでなく、いっそう広く計画一般原理あるいは総合計画学の存在が想定される。すでに、欧米でも人間を主要課題とする comprehensive planning が研究されている。

土木計画は、その意義・規模からして、経済政策の重要な一節として国民経済の中に位置づけられている。その点からも、総合計画学において土木計画は少なからず重要な分析の対象となるであろう。そして、このような総合計画学ないしは計画一般原理の中で、土木計画へ適用される特性を見出すことによって、土木計画学へ接近することが可能となるのである。

かくして、土木計画学は、一方において、土木計画をシステムとして取り扱い、その共通性を求める土木計画・学的立場からその成立が期待され、またさらに、計画学一般への普遍性・共通性を求めるこによって総合科学の一部門としての位置を獲得することが可能となり、他方、土木・計画学的アプローチにおいて、隣接諸分野との関連、その共通性や相違性を明確にすることにより、いっそう土木計画学の意義が明らかになるであろう。

c) 土木計画の特質

土木計画学がその分析の対象とする土木計画には、3つの特質がある。第一はその物理的特性から土木施設を

1) 正会員 工博 日本道路公団 東京建設局建設第一部長
2) 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科
3) 正会員 農博 東京工業大学教授 工学部社会工学科
4) 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科
5) 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部社会工学科
(株)奥村組技術研究所 調査部長
6) 正会員 建設省河川局河川計画課 広域利水調査室
7) 正会員 長

対象とした計画であって、そのため空間固定的であること、第二にはその目的や動機からして、公共事業が主体であること、第三にはフローを持つシステムが多いということである。

第一の土木施設が対象という意味をいっそう具体的に示すために、土木施設計画を列挙するならば、道路計画・鉄道計画・都市交通計画・港湾計画・空港計画・上下水道計画・総合河川計画・治水計画・利水計画・海岸防災計画などがあげられる。都市計画・地域計画なども、これら土木施設を主体に施設機能が作用する点から、土木計画の一環として認識されてきた。これらの土木施設は、いずれも社会の生産基盤または生活基盤をなす基礎社会施設である。これら諸土木施設は、また空間固定的であって、大地への装置工学的性質を持っており、人間と社会のための機能空間システムを形成するうえで重要な役割をになっており、環境の形成・保持・改善のためにも主体的な位置を占めている。

この機能空間システムとしての空間固定性は、土木計画を考えるときに重要な意味を持っている。大地への物理的固定化は巨大な投資を必要とするとともに、その物理的寿命が長いために、社会的機能としてのライフ・サイクルも必然的に長いことが特徴となっている。過去の土木工事が50~100年もその機能を保っているのを見ることも少なくない。

しかしながら、人間社会の文明の進歩と欲求の変化の速度は近年加速度的に速くなり、耐久消費財に端的に現われているように、一つの生産財のライフ・サイクルが次第に短くなっている、その物理的寿命よりはるかに早く、その社会的寿命が尽き、廃棄・取替えの運命をたどる。そのような文明の加速性は、機能空間システムに対しても等しく襲ってくるものである。

機能空間システムでは、その装置系は空間的な拡張が非常に大きく、また固定的であるために、そのシステムの変更や取替えはきわめてむずかしい。そのため、システムを有効に生かすためには、① 長期的な予測をたて、社会的な需要の変化ができるだけ遠くまで見通して設備・容量を定めること、② 基本システムはある条件で設定するとして、サブ・システムをできるだけ取替え可能として、需要の変化、科学の発達に即応できるようなフレキシビリティを持つこと、③ 基本システムについても変化の可能性に対する対応策を将来にゆだね、拡張・増殖が行なえるようなシステムとしておくこと、などの方策が考えられねばならない。

第二の特質としての公共性という問題は、土木事業の85%が公共事業であるという事実に裏打ちされているが、土木計画が公共に奉仕するとい

う目的を持つことと、施設の機能面で不特定多数の人々に利用されることを前提とすることが多い点に具体的な特性があらわれる。

第三の特性は、土木計画あるいは機能空間システムには、フローを主としたシステムが多いということである。機能空間システムは、単一機能システムとしてはいわゆる個別計画があり、またそれを空間的に複合配置させて、一つの社会として機能させる複合空間計画として都市および地域計画がある。

土木計画の中の個別計画として、さきにあげた各種施設計画には、施設として樹(トリー)や網としてのネットワークを形成しているものが少くない。これらネットワーク・システムは、その中にフローを流すことが主要な機能となっている。表-1は、そのようなネットワークシステムの施設や輸送形態を一覧表にしたものである。

これらのシステムのうち、最も典型的なものは、道路・鉄道・その他都市交通機関であって、交通路の端末施設を持ち、輸送媒体としての輸送用具(車両等)を持っている。これに対して、ターミナル施設はあるが、特別な場合以外交通路施設を持たない海(水)上交通や航空のシステムもあれば、また水・燃料などの液体や、エネルギー・情報などの無形のものは、交通路は必要であるが、輸送用具は必要としないシステムである。

このように施設を重点において一覧すると、これらのフローを主要機能とするネットワーク・システムは、その大部分が土木施設をその基礎としていることが知られる。また、物資流通・郵便・清掃などの機能システムが特別の端末施設を持つ以外は、道路・鉄道などのシステムを利用して成立していることも知られよう。

d) 土木計画の社会的位置づけ

表-1のネットワーク・システムの一覧においても明らかなように、土木計画の特質は、その境界領域においては、隣接諸分野と分ちがたく結び付いている。たとえ

表-1 ネットワークシステムの構成

システム名	施 設		輸送形態	
	交 通 路	端 末 施 設	輸送対象	輸送用具
道 路	道 路	駐車場・自動車ターミナル・インターチェンジ	人・物	自 動 車
鐵 道	鐵 道	駅・操車場	人・物	鐵道車両
都 市 交 通	交通路 装 置	駅・ターミナル	人・(物)	交通車両
海(水)上 交 通	(水路・運河)	港 湾	人・物	船 舶
航 空	(航 空 路)	空 港	人・物	飛 行 機
バ イ ブ ラ イ ン	バ イ ブ ラ イ ン	貯留・配達装置	燃 料	—
電 力	電 力 線 路	発・送・受・変電装置	エネルギー	—
通 信	(伝 送 路)	送・受信・交換装置	情 報	—
上・下 水 道	水 路・管 路	取・浄水場・汚水処理場	水	—
流 通	道 路 そ の 他 の 交 通 施 設	流通ターミナル	物	自 動 車・
郵 便		郵便集配施設	郵 便 物	そ の 他 の 輸 送 用 具
清 掃		処理施設	廢 棟 物	

ば、通信のシステムは、道路・鉄道などの交通システムとその機能上の作用はきわめて似かよっており、トラフィックという現象は両者共通であり、通信理論の発達が交通計画の面に貢献している点も少なくない。とくに新しい高速鉄道システムや都市の新しい公衆輸送機関の開発には、これら通信制御工学や機械工学に依存する度合いが大きい。

また、建築施設と土木施設は、本来材料および構造の面で強い共通性を持っているが、都市計画は両者の機能が複合して成立している点で、境界領域にあるものといえよう。地方に目を向けても、自然景観の保持と開発を目的とする観光開発計画も、土木計画と分ちがたい関連性を持つ。さらに環境開発・公害防止のような計画や、資源開発、とくに大陸棚の開発を目指す海洋開発計画となると、土木工学をその一部とする諸科学分野の連係によって成立するものである。

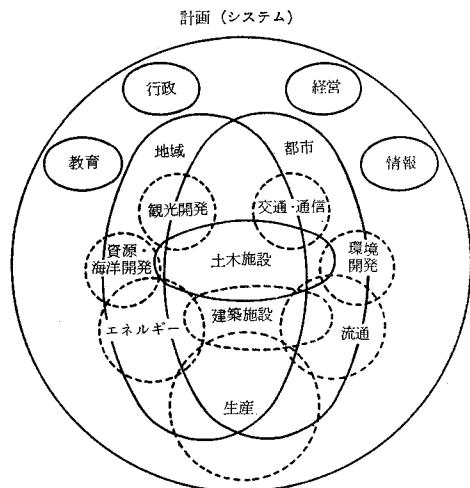


図-1 土木施設を中心とした諸システムの関係

図-1は土木施設を中心として、これら隣接分野との関連を模式化したものであるが、物理的な面では隣接分野として工学部門との関連が強く、また機能面では、ネットワーク・システムを媒体とする社会的活動——流通・生産・エネルギーなど——のシステムと関連が深い。

また、これらを総合するものとして、階層的に都市計画・地域計画・国土計画などがある。このような複合機能を面的に構成するシステムでは、階層が上位に位置するほど、施設配置やネットワーク形成において、技術的側面より、社会的経済的側面が強くなる傾向がある。

このように、土木計画は、人間と社会のための機能的な空間をつくりあげ、よりよい環境をもたらすために、主として空間固定的なシステムをつくりあげるものであり、これによって社会的活動が生かされ、方向づけられ

るのである。そのような点からも土木計画は、単に技術的・工学的側面でなく、広く社会・経済の領域との総合的関連が持たれねばならない。

(武部 健一)

(2) 土木計画システムと計画の目的

a) 土木計画システムを必要とする社会的背景

いまや、わが国の土木工学はルネッサンスの時代を迎えた。すなわち、土木学会創設時の思想を復興すべきであるという声が、土木界に滲々として流れはじめたのである。

大正4年、土木学会初代会長に就任した古市公威は土木工学の極端な専門分業に反対し、工学の総括的理念堅持を強調した。しかし、いずれの学問分野もそうであるように、土木工学においても、その急速な発展は内部における専門細分化を著しく助長し、土木工学の総括的理念は年をおい、日をおって薄らいできたのである。ところが、最近、再びこの総括的理念が注目されるようになってきた。もともと、総括的理念とは「種々雑多の特殊な事物、または観念をまとめて一つの包括的全体とする概念」である。ところでこれは、戦後、強い社会の要求により勃興してきたシステム工学の概念と一致する。すなわち、システム工学を勃興せしめた社会的背景は土木技術者をして土木工学の総括的理念を再び想起せしめたのである。

この社会的背景の第一は、高速道路網・鉄道新幹線・あるいはまた臨海コンビナートなど、いわゆる巨大プロジェクトの引き続く登場である。

背景の第二は、個々の分野の技術が相当進歩してきたことである。この有力な武器は、全体系の最適化という難問への挑戦を許容し、ある程度の勝利をも期待せしめるようになった。

背景の第三は、調査の技術が発達し、かなり多くの情報が入手できるとともに、これらの情報を迅速に処理する電子計算機の技術が大きく発展したことである。そこにこそ、全体を一つのシステムとして総括的にとらえるという考え方方が可能になってきたのである。

背景の第四は、土木技術を支える有力な土台ともいるべき公共予算等の編成にも、システムズ・アナリシスの考え方方が導入されたことである。たとえば、PPBSというシステムも、すでに実用化の段階に入っている。この発想は、社会全体をシステムの最適化の問題として考えることであり、現在の土木工学の理念に、きわめて重大な影響を与えたのである。

背景の第五は問題の複雑さである。現在は、都市土木の時代であるといわれる。道路は都市とその周辺につくられ、ダムは人口の過密地帯に近接して、河口に築かれれる。そこは当然のことながら、人々の生活との関係が繁

く、自然環境との結びつきはもとより、社会環境との関連もまた緊密である。したがって、そこにひき起こされる問題は、ひとり狭い土木工学の専門の殻に閉じこもっていては解決できず、多くの分野の協力が必要となってきたのである。

さて、背景の第六は技術の急速な発展である。このような急激な変化の時代には、その変化に対応するためにあらかじめ、どこがどのように変われば、どこにどのような変化が起こるのかを、正確に予測し把握しておく必要がある。たとえば、海上輸送が大部分、大型コンテナーに変わり、さらに陸上はトレーラー輸送に連結されるとするならば、埠頭や荷役設備の配置および、それに連なる道路や橋梁などどのように変化するのであろうか。もしも、これらの交通施設を交通システムのコンポーネントとして把握していれば、変化にも迅速な対応ができるであろう。しかも、このような変化は、加速度的速さをもって訪れる。変化に対応できない土木施設は、たちまち無用のものとなっていくより仕方がないのである。

b) システムと環境

土木計画のシステムとは一体何であろうか。これに対する解答は第4回および第5回土木計画学シンポジウムの再度にわたる討論によっても、まだ明確には示し得ない。これは、土木計画学の成立と、そのカタゴリーについて十分な追究がなされていないからである。またかりに、この追究がなされたとしても、学問の性質上から、内容の全貌を知り得ないものなのかも知れない。しかし、いま筆者に大胆な解答を許されるならば、土木計画のシステムとして次のようなものをあげるであろう。すなわち、「土木計画の目的を達成するように有機的に結びつけられた要素と、その構成」である。土木計画学のシステムをこのようにとらえることの狙いは、計画を構成する要素の相互関連の認識と、制御・調整および直接・間接効果の全体的把握にある。もともと、システムの外縁は「地域」の概念のそれのように、それぞれ目的とするところによって相異なる。一般に対象とするシステムのすべてを包含する最大のシステムをトータル・システム (total system) といい、その内に含まれるシステムをサブ・システム (sub system)、システムの最小単位をシステム・モジュール (system module) という。また、システムの中にあってこれを構成しているが、単独では機能し得ない要素がある。これをコンポーネント (component) という。土木計画者はそれぞれのシステムにわたる広い明瞭な認識とコンポーネントに至る深い知識が必要である。ただ単なる無知な「まとめ役」であってはならないのである。

システムを考えるとき重要なことは、環境 (environment) の概念である。システムは、いずれも、環境があ

って初めて機能する。この環境についてホール (Arthur D. Hall) は次のように説明している。「ある与えられたシステムについて、その環境とはシステム外部にあるすべての要素の集合であり、① その属性 (特性) の変化がシステムに影響を及ぼし、② システムの動作によってその属性が影響を受けるものである」。このことは、工業コンビナートとその周辺都市との関係をみれば明らかであろう。

この方向からみれば、公害とは人工システムと環境との境界に起こる混乱である。したがって、これら相互の依存関係を十分に研究することによって除去、あるいは軽減する方策が見つけ出されるであろう。ところが、いままでは、おもにシステムのほうにのみ気をとられ、環境およびそれとのかかわり合いについての研究が等閑に付されていた。ここに激しい公害問題が生じてきたものと思われる。

さて、システムと環境との関連についての十分なる研究が必須であると同様に、システム相互間の連関についても、綿密な調査と深い考察がなされていかなければならない。たとえば、一つの都市に地下鉄を計画する場合を考えてみよう。恐らく、この地下鉄は、在来からあるバス交通システム・市街電車交通システムなどに影響を与え、この均衡システムを破壊して新しい都市交通システムを形成していくであろう。そこで、これらの協同、あるいは競合の有様を推測しながら、これらと調和のとれる地下鉄システムを計画しなければ、地下鉄システムが完成しても十分に機能を発揮しないことが起りうる。交通計画において、現在、モーダル・スプリット (modal split) の問題がとくに重要視されるのは、このためである。さて、システムの構成要素が結合されるパターンとしては、基本的には直列結合・並列結合・直並列結合の3つが考えられるが、このほかにも並列待機結合や直並列結合として取扱うことのできない複雑な結合もある。いままでの土木工学では個々のコンポーネントあるいはシステムについての研究は、かなり発達していた。しかし、その結合においての注意が欠け、技術の粋を尽した個々のシステムが機能しないことがしばしばあったのである。高潮が、管轄の変わる防潮堤の継目から侵入してきたことは、あまりにも有名なことである。もし、土木施設がトータル・システムの立場から検討されているならば、その継目についても自然に注意が向けられることとなり、頻発する事故の多くを未然に防止しうることになろう。

土木技術は、① 一般にコンポーネントの構築、② システムの構成 (systems composition)、③ システム行動 (systems operation) の3つからなっている。最後のシステム行動は、とくに最近注目されるようになっ

てきたもので、システム構成要素の相互関連を基盤とし、その目的に対する手法・手順などの体系をいい、プロセデュア・システム (procedure system)ともいわれる。

ところで、最適な土木計画をたてるには正確に環境の実体を把握しなければならない。一体、土木計画にとって環境とはどのようなものであるか。普通、それには次のような4つが考えられている。

① 自然環境：地形・地質・気象・動植物の分布・生態や、水・骨材等の天然原材料の種類・性質・利用性などである。

② 技術的環境：セメント・骨材・鉄材など原材料の輸送方法・建設機械の利用法・施工法などの既存システムに加えて、新しい技術システムに移行する技術上の発明・改良の可能性である。この技術予測の手法としてよく用いられるものには次の4つがある。

1) 直観的予測法；一種のアンケート収束法であり、ブレーン・ストーミング (brain storming) やシナリオ・ライティング (scenario writing) あるいはデルファイ法 (delphi technique) はこれである。

2) 探索的予測法；「外挿法」「予測モデル」やシミュレーション法 (simulation method) などである。

3) 規範的予測法；「かくあるべし」という未来の技術目標を規範とし、この未来より現在を眺めて技術的問題を割りつけていく手法である。

4) フィードバック法；探索的手法と規範的手法との間に情報を相互交換しながらすすめてゆく手法である。

③ 経済的環境：土木計画システムにとって、それを取り巻く経済環境は決定的な影響を及ぼす条件である。従来はせいぜい国民経済レベル程度の考慮で十分であったが、最近は国際経済的な視野にまで拡げることが必要となってきた。

④ 社会的環境：社会制度や組織を度外視しては、計画はなりたたない。計画が実施段階に近づくに従ってその様相が明らかになってくる。わが国の現状では道路工事費の相当額を土地買収や補償費にあてねばならないであろうし、政党など種々の組織を無視しては、なかなかよい計画も実現し得ないであろう。

土木計画は、生きた地域を対象としてたてられなければならない。技術と経済を追求することにのみ熱心で、実際の社会環境とその運動法則の理解に冷淡では土木計画者とはいえないである。

c) 土木計画の目的

どのようなシステムであれ、システムに共通していることは、ある目的をめざしているということである。

それでは一体、土木計画システムの目的 (objective)

とは何であろうか。第3回土木計画学シンポジウムにおいて、筆者らは「幸福」をその目的としてあげたのである。もちろん、この「幸福」は、土木施設が個人のものであるよりも、むしろ、社会のものであるほうが多いよう、「人々の幸福」である。ハチスン (F. Hutcheson) の言葉をかりれば、「最大多数の最大幸福—the greatest happiness of the greatest number」ということになる。いま、これを少しく、歴史的な見地から眺めてみよう。古代における公共事業というと、すぐにわれわれはエジプトにおけるピラミッドと秦帝国における長城を思い出す。ピラミッドは「カアの家」ともいわれ、王に永遠の幸福を約束するために建設された。王が死ぬと生靈としてのカアは、ピラミッドにおいて神々と交わり、やがて人々の世界に戻るまでここで生活をする。オランダの宗教哲学者、ティーレ (C.P. Tiele) のいうように「宗教とは神と人との関係である」とするならば、ピラミッドは正しく「宗教」を目的とした建造物であろう。それでは、長城の築造目的は何であったか。これはいまでもなく「防衛」であった。史記・始皇本紀第六には燕人盧生が鬼神の宣託として「秦を滅ぼすものは胡（北方民族の名）ならん」と記された図書をもたらしたとある。これをみた始皇は怒り怖れて、早速蒙恬に命じ、兵30万を発して胡を撃ち、河南の地を略取、続いて34年、裁判官の公正でないものを流遁として、長城および南越城を築かせたとある。

さて、以上に述べたのは、いまから1700年も以前の外国の例であるが、わが国においてはどうであったか。道路法の変遷について調べてみよう。戦前の旧道路法第十条には国道の認定基準として、次の4項目をあげている。

① 東京市より神宮に達する路線—宗教

② 東京市より府県庁所在地、師団司令部所在地または鎮守府所在地に達する路線—防衛

③ 東京市より枢要の開港に達する路線—経済

④ 主として軍事的目的を有する路線—防衛

これに対して、現行道路法では周知のように「経済」が優先していて、次のとおりである。

① 国土を縦断横断または循環して、都道府県庁所在地、その他政治上・経済上または文化上とくに重要な都市を連絡する道路—政治・経済・文化

② 重要都市または人口10万以上の市と高速自動車国道または前号に規定する国道とを連絡する道路—政治・経済

③ 2つ以上の市を連絡して高速自動車国道または第一号に規定する国道に達する道路—政治・経済

④ 特定重要港湾、もしくは重要港湾で国内産業の開発上とくに重要な港湾、重要な飛行場または国際観光上

重要な地と高速自動車国道または第一号に規定する国道と連絡する道路—経済

⑤ 國土の総合的な開発または利用上特別の建設または整備を必要とする都市と高速自動車国道または第一号に規定する国道とを連絡する道路—國土開発・經濟

このように、歴史的順序を追って土木計画の目的を眺望すると「宗教」防衛そして「經濟」へと重点の移りかわりが知られる。しかし、これらの変遷は表層的にみた場合であって、根本的には「幸福」に帰一するのではなかろうか。そもそも、「宗教心」とは幸福を希求する心である。たとえば、キリスト教徒の信仰心を最も簡明に表現しているものに「天には栄え、地には平安、人には恵み」という言葉がある。これは幸福を目的にした命のひびきにほかなるまい。また、佛教徒の安心立命は、ことごとく生命の理想的拡充、すなわち幸福に存しよう。道教が蓬萊に求めたのは不老不死の靈薬であったと伝えられる。「まがつみ、をはらわん」とする念い、あるいは弥榮いのる心など、そのまま幸福の念いである。

「防衛」もまた「宗教」とは異なった意味で、人々の幸福をまもる心である。クラウゼヴィッツ (K. von Clausewitz) によると戦争は政治の対外的な表現であるという。すなわち、軍事行動は政治行動の一つのあらわれであって、防衛は人々に幸福をもたらすはずの政治権力を外敵の略取からまもることである。「經濟」については、いまさら言を重ねる必要もあるまい。このようにみてくると、この「人間の幸福」追求こそ、時代を問わず土木計画の目的であるといいうる。また、歴史の流れから考えれば、この「幸福」は個人を対象としたものというより、集団を対象としたもの、すなわち、「最大多数の最大幸福」である。この「最大多数の最大幸福」の追求が、いわゆる公共福祉の増進といわれるものであり、これに一般的な定量的意味を与えることが重要になってくる。しかし、「幸福」は「価値」などと同様に、もともと主観的なものである。これに、どのような客観的判断を与えるか、計量的指標を与えるか、ここに、土木計画者の回避し得ない難問が存するのである。

功利主義者ベンタム (J. Bentham) はプリーストリー (J. Priestley) の政府論 (An Essay on the First Principles of Government) の中に「成員大多数の側の利益と幸福を保障する国家こそ善である」という言葉を見つけて感動し、これをイギリス功利主義の標語とともに、次のような 7 つの指標をとて快楽計算を試みたといわれる。すなわち、強度、持続性、確実性、快楽発生時期の遠近、多産性、純粹性、影響される人間の数、である。これに対して、ミル (J.S. Mill) は快楽には質的な相違があるので単にそれらを加え合わせることはできないと考えた。この問題は以降、経済学者、心理

学者、OR エンジニア、システム・エンジニアらに受け継がれ、今日の問題として注目されている。

さて、国力をかけて施工するような、いわゆる大プロジェクトでは、確かに目的は「最大多数の最大幸福」といってもよいであろう。しかし、それを構成する個々のサブ・システム、あるいはコンポーネントのような幾段階か低次の計画の目的となると、このような高踏的題目では、ことがすすまないことになる。またたとえ、トータル・システムの場合でも、まず最初にシステムの目的を解明し、具体化し、確定しなければシステムの設計にかかるないのである。さらに、この目的は前述のように複雑であり、整理することはなかなかむずかしい。これには重点の置場所を幾通りかにかえた代替案が用意されることになろう。具体的な考察点は次の 2 つである。

① 達成目標：設計すべきシステムにとっての必要条件であり、おのののシステムの到達すべき結果の状態を指定する。

土木施設システムでは容量・処理量・出力などの、いわゆる所要能力が一般に達成目標として与えられる。

② 評価基準：これは、達成目標を実現するいくつかのシステムのうち、採択すべきシステムを選択する方針や、優先順位を決める条件である。

土木施設システムでは、経済性・信頼性・両立性・有用性・柔軟性・持続性・審美性・認容性などが問題になる。

ところで、このような卑近な達成目標 (goal) や評価基準を考えるにしても、トータル・システムのかかげる目的的、あるいは環境条件を念頭におかなければならない。

昭和 46 年 4 月 5 日、元法大総長谷川徹三は、日本医学会総会において医のエトスを説いた。「あらゆる文化は自分の論理やメカニズムをもち、当初の目的を忘れて逆に存在の意義を疑われる結果に陥りやすい。……医の倫理が変らぬものであるならば、医師たちは、現在、視野を大きく広げて、たとえば SST など人類の健康を脅かす危険のあるものに対して、正面から取り組まねばならない。この態度は、さらに政治や経済ともかかわり合うから、いっそう広範な視野を要求されることになろう。しかし、基本的な医学者の思想や態度が、倫理に支えられているかどうかは、このような点でまさに問われているのだ。いま、私たちは文明とは何か、人間とはどんな存在かを謙虚に問い合わせなければならない。文明の輝かしい進歩の神話を信じているうちに、背後にしのびよる破滅の黒い影を見落してはいけない」。(1971 年 4 月 6 日・朝日新聞) と述べている。

国土の国手をもって任ずる土木技術者は、この講演を他山の石として、わが玉を磨くべきではなかろうか。

(五十嵐日出夫)

(3) 土木計画の過程

a) 土木計画と前進の過程

土木計画の過程を概括的に結論づければ、図-2 のように、構想・設計・施工・運用の4段階になるとを考えられる。そして、この各段階において土木技術者が参加し、計画を行なっている。

この4段階は、実際には図-2 に示されているように、各計画の着手から終了までの間に時間的なずれが存在している。しかし、相互間の関連はきわめて重要で、しかも複雑である。図-2 の断面 A-A' のような土木計画の進行過程のある断面をとって見ると、構想計画の完成間近かではあるが、構造・おさまり・色彩など設計段階の問題が入ってくるし、施工の可能性、難易などもまた運用してゆくときのことなども考慮しなければならないことが明瞭になっている。

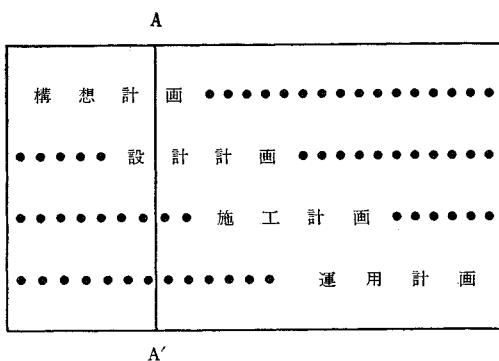


図-2 土木計画の4段階

ところで、土木計画のこの4段階は、図-3 のように、連続する計画過程の中のひとつのサイクルとして考えるべきである。河川の計画などは、図-3 のようなシリーズ的なパターンの典型であるし、都市や地域の計画においては、上位のシステムの中のサブ・システムとして、その計画が機能はじめ、つぎの土木計画が発出する。また、いくつかの土木計画が平行して行なわれ、上位の計画が完成してゆくこともある。

図-3 における構想・設計・施工・運用は、いわゆる Plan, Do, See の繰返しによる、機能の向上を示している。

b) 土木計画の過程

多種多様にわたる土木計画、大小さまざまな規模の土木計画について、その計画過程の一般化は容易なことではない。ここでは、土木学会土木計画学研究委員会が昭和46年1月に実施した第5回の土木計画学シンポジウムの結果を用いて説明を行なう。

第5回のシンポジウムの統一課題は、「土木計画の評価システム」であった。土木計画が推進してゆく各段階において、いろいろな評価が投入され、その意志決定に従い、次の段階に前進したり、相互関連段階と協調したりして前進してゆくこととなり、評価システムを追求し

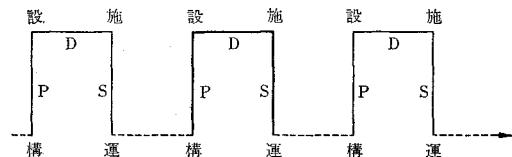


図-3 計画の進展

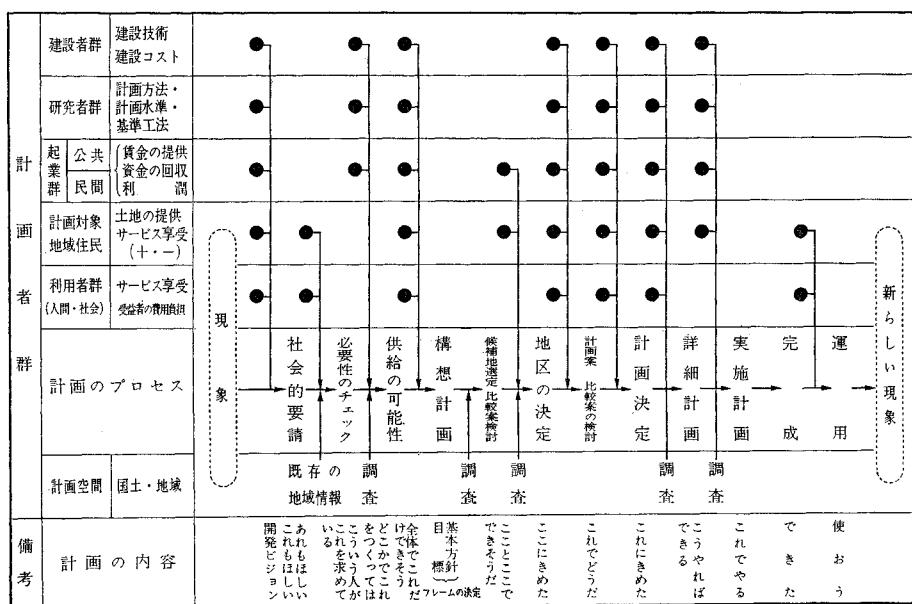


図-4 土木計画の一貫過程

てゆくときには、土木計画の過程と平行的に考えられなければ、そのシステムを解明することはできない。それゆえ、ここでは、土木技術者がどの分野に属し、どの段階で、土木計画に参加してゆくかを見ることにより、土木計画の過程を明らかにしようと試みた。それゆえ、ここでいう計画過程とは、時間軸を水平にとって、計画者群の意志決定がなされ、進行してゆく過程を示そうと試みた。**図-4**はこのことを図示したものである。以下に、その過程を説明する。

① 土木計画の計画者群：

計画者群 **図-4** の縦軸の各所に所属して土木計画を推進してゆく人々のグループ。

建設者群 建設技術・建設コストなどを主たる技術課題とし日々研議をすすめ、土木計画で対象になっている構造物の設計や施工に従事し、現実に施設を顕在化してゆく技術者群で、建設業界・直営建設などにたずさわる人々の集団。

研究者群 研究所・大学などに所属する人々のグループで、計画の方法、計画水準、基準あるいは新しい工法などの研究にたずさわり、土木計画の前進にたずさわるグループ。

起業者群 土木計画の実施主体となる公的機関、あるいは民間機関の人々のグループで、基本的にその事業の推進の決定に関与する事項に参加する。

地域住民 土木計画が実際に実行される地域の人々のグループで、その地域の広がりは大小さまざまである。一般に地域住民は、その土木計画のメリット・デメリットを直接受けるので、土木計画への参加者として重要である。

利用者（人間・社会） ここでいう利用者は広義に考えており、直接その施設を利用したり、間接のサービスを享受する人々のみでなく、地域住民以外のすべての国民の場合もある。

計画空間 現実に土木計画が実施される国土や地域の空間で、各分野・各対象・各段階によって異なる。高速道路のように国土的な場合もあれば、住宅団地のような地区もある。

② 計画の過程：

計画の過程は、本節のはじめにも述べたように、大きくは4段階に分れていると考えられる。それをやや詳細に見てみると、次のようになる。この過程の中で、多くのフィードバック機構が存在し、現実の土木計画は進行してゆく。

図-4 の計画のプロセスの行を左から右に向って眺めて見ると、その過程がわかる。

社会的要請 現在の現象があり、ここに新しい土木計画を実施して、新しい機能空間・情緒空間を建設するこ

となるわけであるが、いろいろな人々が要求を提案する。これが社会的要請として次第に集約するわけであるが、この段階においては、あれもほしい、これもほしいということで、勝手なビジョンともいいうに等しいものである。この時点では、提案者はだれでもよい。

必要性のチェック 地域住民その利用者および対象地域の既存の情報から、いろいろな社会的要請の中で、こういう人々が、こういう土木計画を求めており、その必要性は高いということを決める段階である。しかし、その計画を実施する地点などは、はっきりしない。

供給の可能性 そこで、そのような需要にこたえる地域（地点）が存在するかを調査することとなる。そのときには、起業者群・研究者群・建設者群の技術が動員され、どこどこならば需要にこたえられそうだということが明らかになる。

構想計画 そこで、地域住民・利用者の意向も加味されつつ、計画のフレームともいべき大わくと基本方針が決定されてゆく。この段階までが何を建設するのがよいか、その規模は、期間は、などをきめる重要な段階となる。

候補地選定と比較案検討 多くの供給可能地に対し比較案を作製し、二、三の候補地を比較案から選定すべくや細部の検討を行なう。

地区の決定 この段階になると現実に地域住民との話し合いが起業者との間におこるわけである。そのときは、地域住民にも計画が理解できるように、その内容を翻訳することが大切である。その手段としては、図面や文章のみでなく、模型などにより、住民の理解を促進しつつ話し合いをすることが重要となる。

計画案・比較案の検討 この段階では設計作業がかなり進行して、同一地点でもいろいろな案が考究され、提示される。

計画決定→詳細計画 比較計画案の中から1案にしばり、さらにその案について、実施のための詳細決定がすすめられる。これまでを設計の段階と考えてよからう。

実施計画 現地に設計をおろす段階で施工計画ともいえる。土木技術の各部門が参加し、地域住民とも緊密な連絡をとりつつ計画の実現がすすめられる。この結果として、土木構造物が完成する。

運用計画 新しく誕生した土木施設による空間を現実の社会空間として活用はじめる計画で、実際には広範な計画により、社会へのサービスが実現する。

以上が土木計画により、新しい社会サービスが出現するまでの過程である。このように考えてくると、土木技術者の役割は、職域としての官公庁・民間企業にかかわらず、きわめて広い範囲にわたるものである。また、

技術としても、これまでの構造・材料・施工という範囲を脱出した新しい計画技術の修得による活躍が期待されその実現により、はじめて総合技術者としての土木技術者が誕生することとなる。

(鈴木 忠義)

(4) 計画システムの構成

a) 土木計画のプロセス

フンク (Funk), ワーガルス (Wagalls) は、「計画とはある目的を達成するために必要であるか、または役に立つと信じられる多くの手段または連続的な段階の組織的な配列のことである」といっている。これに対して経営学の権威ドラッカー (P.F. Drucker) は、「計画とは未来のことに関する現在の意志決定である」と端的に定義しているが、ここで強調されていることは時間の問題のほかに、計画を人間の意志の問題としてとらえているということである。心理学者のドーフ (Doob) もドラッカーと同じように計画を人間活動のあらわれと見て、次のように定義した。「計画とは個人またはその集合体がある社会においてある目的を達成するための発見である。」

以上のように、計画に関する定義は種々の侧面から数多くなされているが、いずれにしても計画の主内容は、計画対象があつて目的が明確化され、主体の最適行動に対する方法論を追求することであり、合目的性・合理性を備える方法論としての計画の構成は、どういうものかということが計画学の研究対象となる。

土木計画での学理の追求は、計画主体の動機づけから意志決定に至るまでのプロセスの各段階においてなされるわけであるが、

まず動機づけの段階では

① 土木計画といわれるものの動機づけとなる目的と立場の深い吟味（行動の指標となる計画目標の設定）

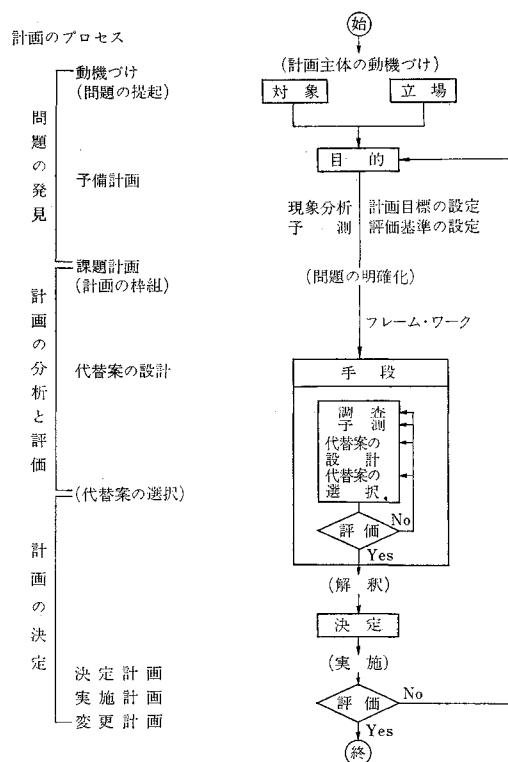
② 対象となるものの周囲をとりまいている社会・経済および自然現象の解明（現状分析から将来への予測）が問題把握の前提として必要であり、さらに

③ それらの諸現象と、これに応答する施設機能のメカニズムの解明

が必要となる。そのようなメカニズムが目的との関連においてどのように評価されるか、それによって、どのような手段が選択されるかということを分析するために

④ 合目的であるという評価の基準の設定と合理的な手段選択方法の確立

をはからねばならない。このような最適手段発見のためのシステムは、問題の発見がなされてのち行なわれたフレームワーク (frame work) の結果に基づいて、幾つかの代替案 (alternative) がつくられ、その評価をとおしてなされるわけである。最後に、



(長尾義三：公共土木計画論、による)

図-5 土木計画のプロセス

⑤ 計画主体の意志決定 (decision making)

を経て計画は確定され実施に移されるわけであるが、実施の段階で合目的性が検討され、もし乖離が認められたときは、問題は再提起されることになり始めに戻る。

以上述べた計画のプロセスは、図-5 に示すとおりであるが、この図をみて明らかのように、土木計画の問題をシステムズ・アナリシス (systems analysis) として把握することにより、その科学的な計画策定方法が確立されてくると考えることができるだろう。

b) システムズ・アナリシスと計画のフレーム・ワーク

システムズ・アナリシスとは何かということについては、研究者によってさまざまな見解があり、これを明確に定義することは、きわめてむずかしい。

クエイド (E.S. Quade) はシステムズ・アナリシスの定義を「不確実性下にある複雑な選択の問題に対する接近法またはものの見方」としており、「適切な目的を体系的に調べ、それを達成するための代替的な政策または戦略に關係する費用・有効度 (effectiveness) およびリスク (risk) を定量的に比較し、もしあれば、それに追加すべき代替案を作成することによって意志決定者の行動の選択を助ける探究である」と述べている。

マッキーン (R.N. McKean) は、OR との比較において、「将来のことをより深く突っこんで洞察し、より多

くの要因を含み、より広範囲に可能な行動案を検討し、より高次元の代替案を考慮に入れるような問題にORが応用される場合に、相互関連的な要因から構成される広範なシステムの比較のこと」をシステムズ・アナリシスといっている。

一方ヘア (V.C. Hare, Jr.) は、「広義には、結果に対し関連ある、そして信頼しうる相互関係を探究する科学的手法」と述べ、さらに、「設定されたシステムの良否を調べ、システム内の強・弱点を指摘するようふうしたテストおよび診断の手法を導入して、目的が達成されるまで、システムの設定 (definition), 分析 (analysis) および操作 (treatment) をする循環過程をいう」としている。

また、ブラック (G. Black) は、「システムズ・アナリシスは、多くの点でシステムズ・アプローチ(systems approach) の試みと考えられ、システムの設計、選択または運用に関し、可能なかぎり合理的に意志決定することを目的とし、理想的には、アナリシスは最善のシステムと、その最も効率的な運用方法とを同時に明確化するものである」と述べている。

宮川公男は、システムズ・アナリシスを次のように定義している。すなわち、「システムズ・アナリシスとは、複雑な問題を解決するために意志決定者の目的を的確に定義し、代替案を体系的に比較評価し、もし必要とあれば、新しく代替案を開発することによって、意志決定者が最善の代替案を選択するための助けとなるよう設計された体系的な方法である」と述べている。

このようにシステムズ・アナリシスは、いろいろな言葉で定義されているが、目的を達成するため、よりすぐれたシステムを構成し、選択するということについては一致があり、違いは、主として分析の過程または機能のどの部分を強調するかにあると考えることができる。

ところで、土木計画面にあらわれる問題について共通にいえることは、最初は意志決定を要する問題があいまいであったり、問題の問い合わせ方が適切でない場合があるということである。問題の解決によって達成しようとする目的の数が多くたり、なかには相互に対立的なものが含まれていたりする。また、目的の達成度についての客観的な評価基準の選択あるいは測定が困難であったり、不可能であることも多い。また、問題が将来の長い期間にも及ぶと、不確実性 (uncertainty) の大きな要因が含まれたりする。

このような複雑な土木計画の問題をシステムズ・アナリシスによって処理する第一の段階は、問題 (problem) の明確化であろう。オプトナー (S.L. Optner) は、問題の分類を 2 種類あげているが、その一つは定形の問題 (well structured problem) と非定形の問題 (ill struc-

tured problem) に分ける方法であり、もう一つは、定量的問題・定性的問題および定量的属性と定性的属性の双方を含む混合問題 (mixed problem) に分ける方法である。そして土木計画にかかる問題の多くは、混合問題であり、定形化を行なうことが困難な場合が多い。

そこで問題明確化の第一歩として、計画の問題のフレームの設定が行なわれなければならない。問題のフレームの設定というのは、計画主体の意識する問題をシステムとして把握し、システムとしての問題の範囲を限定し、その構成要素間の相互依存関係を明確に認識し、また問題に伴う制約条件や問題の背後にある客観的状況を把握する作業である。

ところで、混合問題の多くがそうであるような複雑な土木計画の問題にシステムズ・アナリシスを適用するに際しては、目的を明確に認識して設定し、分析に役立つように規定することが重要である。目的を明確に認識するためには、少なくとも

④ 目的を定量的に表現すること。すなわち目的の達成度をはかる尺度を何にするかの選択

⑤ 目的間の関係、とくに目的間にトレード・オフ (trade off) がある場合の対立的な目的間でのウエイトづけ

⑥ 目的が達成可能か否かの判断

が重要である。このこと自体決して容易ではないが、さらに、時間の経過に伴う計画目的の推移性という、やっかいな事態の起こることも考えられる。

このような計画目的の検討という課題は、社会科学の研究の対象外であり、もっぱら政治過程から与えられるものであるとする考え方方が支配的であった。しかし、以上述べたように、システムズ・アナリシスの立場は、このような考え方を一步すすめ、問題が政治過程で解決されるにせよ、計画主体に目的の検討結果をも含めた、より有用な情報を提供しようとする立場である。

かくして目的が設定されたならば、次に、目的達成のための代替案がいくつか考えられる。問題をシステムとしてとらえたことから、必然的に代替案もシステムとして設計しなければならない。そして、この代替案の中からできるだけ望ましいものを選択したり、代替案を望ましさによって順序づけたりする必要に迫られる。その際、代替案の望ましさの程度をなんらかの観点から測定するための尺度を評価基準 (criterion) という。そして、この場合の望ましさの指標としては、効率 (efficiency) と有効度 (effectiveness) が考えられる。効率の意味するところは、測定された代替案の効果と用いられる資源の比較であって (便益/費用) などは代替案の効率をみるための評価基準である。これに対し、有効度は、目的の達成度を、金額以外の計量的尺度で表示したものを意味

し、費用対有効度というような用い方をされている。

いったん評価基準が選ばれたら、その評価基準に基づいて代替案の選択あるいは順序づけがなされるが、その場合、最適化 (optimization) を行なうか、それとも満足化 (satisficing) を行なうかということがある。システムズ・アナリシスにおいて最適化とは、あらかじめ定義された望ましさを最大にするような代替案を選択することである。これに対し、満足化とは、望ましさの尺度について、あらかじめ満足できる水準を定め、その水準を達成できる代替案を選択することである。

問題の明確化のために必要なもう一つの段階は、仮説 (hypothesis)、仮定 (assumption) の設定であり、後述の計画のモデル化においてモデルが操作可能であるかどうかを決定する重要なかぎとなる。

c) システムズ・アナリシスによる計画手順

① 調査：土木計画のための調査の目的は、計画の方針なり方法を決めるのに、正確な判断をくだすのに役立つだろう情報を得るためである。このためには、対象となっている計画の目的および立場の認識をとおして調査目的を明確にすること、土木計画のプロセスを究明するのに必要な情報の質の検討をとおして、調査対象と調査項目を明らかにすることが重要である。

実際の調査を実施するにあたっては、全数調査 (census) を行なうか、標本調査 (sampling) を行なうかが問題となる。標本調査には、作為抽出法 (purposive selection) と無作為抽出法 (random sampling) があるが、近来は誤差論を背景とする無作為抽出法が、ほとんどの場合に用いられている。

さらに、情報の獲得効率をいかにして高めるかということも重要であり、どれくらいデータに経費や時間をかけたら一番有利か、などについて研究する実験計画法の導入もはからねばならない。

さらに、定量化されている要因間の関数関係を分析するための相関分析は、いまやその領域を拡張し、因子分析や多変量解析等の手法の発展によって、定性的属性を含む混合問題をも取扱うことが可能となってきた。

土木計画のための調査にとって有効と考えられる手法を列挙すると

- ⑧ 統計資料の整理法
- ⑨ 統計分布
- ⑩ 標本論
- ⑪ 標本抽出の方法
- ⑫ 推定と検定
- ⑬ 相関分析法
- ⑭ 実験計画法
- ⑮ 因子分析法
- ⑯ 多変量解析法

② 予測：計画は、本来ある時点、通常現在においてそれ以後のわれわれの行為をもっとも合理的にするためにつくられるものである。すなわち、計画とは現時点を起点として不確実性の拡がってゆく未来に向かって描かれた目標であり、不確実性の効果的な処理のために求められるものと考えることができる。したがって、計画が現在の意志決定にその本質があるとしても、すべて未来の予測がその基調となる。

現在よく用いられている統計的予測手法をあげると

- ⑩ 回帰分析
- ⑪ ウィナー過程
- ⑫ マルコフ過程
- ⑬ 時系列モデル
- ⑭ 情報理論モデル
- ⑮ 統計的決定モデル

等となる。

ところで、このような予測問題でもっとも重要なことは不確実性の分析である。システムズ・アナリシスにおいて不確実性を取扱う視点として、メクリング (W.H. Meckling) は次の4つを指摘している。

- ⑥ 不確実性の程度はどれくらいか
- ⑦ 不確実性を減らす手段として、どのようなものが考えられるか
- ⑧ 不確実性を減らすのに、どのくらい費用がかかるか
- ⑨ 技術開発が進むにつれて、どのくらい不確実性が減るか

以上の分析は、できるだけ定量化して行なわれるが、問題には定量化し得ない部分が必ずといってよいくらい含まれている。このため、システムズ・アナリシスにおいては、定性的な分析と定量的な分析を相互に補完させることが必要である。

③ 分析：調査および予測に関する検討を経て、土木計画は問題解決のための手段を考える段階へ移行する。この場合、選択の対象となる候補つまり代替案は、多くの場合ただ一つとは限らず、いくつもありうる。

オプトナーによれば、代替案には2種類ある。一つは機能の代替案 (functional alternative) であり、他は活動の代替案 (operational alternative) である。そして、土木計画のシステムズ・アナリシスにおいては、双方を考慮した代替案を設計しなければならないことが多い。

代替案がいくつか設計されたならば、それらの中から計画目的遂行のために、より望ましいものを選ぼうとする。この場合、代替案の望ましさの分析と、不確実性に対する分析とが必要である。

そして、これら代替案の設計および選択の段階における分析の中心はモデル (model) を用いた分析であり、

おもに論理的思考による分析である。モデルとは、一般的にいうなら、現象の一つの表現であって、問題に対する解答を得ることを目的として、現象を図や方程式などで表現したものである。

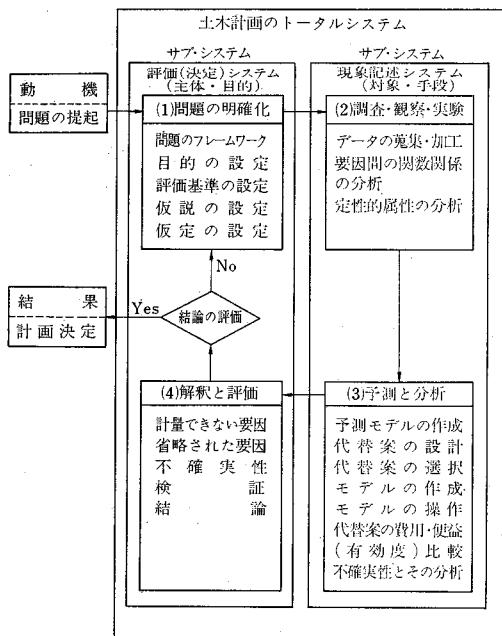
計画モデル作成の指針は

- ⑧ 問題解決に重要な関係のある要因を選び出すこと
 - ⑥ これら要因のなかから定量化できるものを選び出すこと
 - ⑤ 要因の間の定量的な関係を確立すること
- 次に、これらのモデルに要請される性質は
- ⑧ モデルは事実や状況を正しくかつ明確に叙述できること
 - ⑥ モデルに含まれている主要なパラメーターが変化しても、分析結果が依然納得的であること
 - ⑤ 既知の結果に対する原因を突きとめることができること
 - ④ 代替案の設計・評価に際して不確実な要因の影響を分析できること
 - ⑤ 時間の推移を明示的に取り入れてあること
- などである。

モデルが作成されたなら、次はこれを操作する段階である。モデルを操作することにより、費用と便益（有効度）を推計し、さらにすでに選択した評価基準を用いて、推計された費用と便益（有効度）を比較することにより、代替案の効率と有効度を検討することである。

分析および評価のためのモデルにとって有効と考えられる手法を列挙すると

- ④ 最適化モデル
 - ① ゲームモデル
 - ⑪ ベイズの決定モデル
 - ⑯ 線形計画法
 - ⑰ 動的計画法
 - ⑤ 最大原理
- ⑥ 現象分析モデル
 - ① 情報モデル
 - ⑪ 待ち行列モデル
 - ⑯ ネットワーク・モデル
 - ⑰ 力学モデル
 - ⑤ シミュレーション・モデル
- ⑦ 費用・効果モデル
 - ① 費用・便益分析
 - ⑪ 費用・有効度分析
 - ⑯ インパクト・スタディ
 - ⑮ 産業連関分析
 - ⑤ ティンバーゲン・モデル
 - ⑯ モーゼス・モデル
 - ⑯ 投資基準と投資効果モデル



(宮川公男編著: PPBS の原理と分析 (図-2) を参考にして作成した)

図-6 土木計画のシステムズ・アナリシスの循環的手法

等となる。

④ 解釈と評価：上述のように分析の段階において、すべての要因を取り入れることは困難である。残された要因のおもなものは、計量化できない要因、モデルの簡単化のために考慮外におかれた要因、そして計量化できない要因についての不確実性などである。

解釈と評価の段階は、分析結果を解釈し、かつ、これらの残された要因が分析結果をどう左右するかを問題のおかれた状況を的確に把握して評価し、システムズ・アナリシスの循環的手順における第1回目の結論を出してみる段階である。この段階では、可能な場合には、分析結果の妥当性をシミュレーションによって検証することである。検証が困難なときは、解釈や評価は直観や主観的判断に頼るしか、てだてがない。

以上、明らかにした土木計画のシステムズ・アナリシスの循環的手順を図式化すると、図-6 のようになる。

(吉川 和広)

2. 土木設計

(1) 土木設計のハイアラーキ構造

土木設計においては、一般に図-7 のようなハイアラーキが存在する。

われわれが土木計画として扱うものは、このうち上位2つの設計段階であり、下位のものを一般に土木設計と

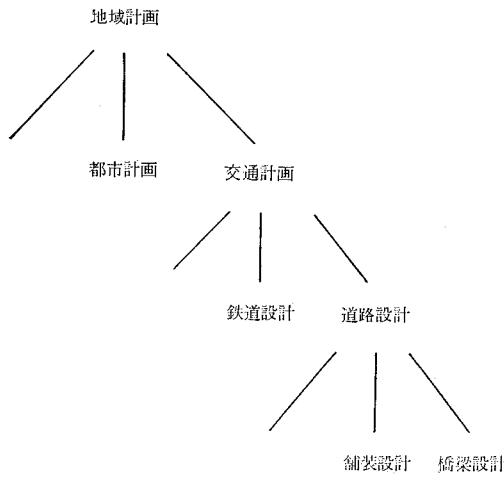


図-7 土木設計のハイアラーキ

呼んでいる。この各段階での設計活動は3つの行動からなっている。すなわち、①ある物を創造したいと決定する、②それをどこに、どのような形で、何を用いてつくるかを決める、③どのような順序・方法でつくるかを決める、の3つの行動である¹⁾。各段階において何を創造すべきかという設計の動機づけは、その上位の段階の決定結果として与えられ、その目的に対して②、③の設計行動が行なわれ、その結果がさらに下位の段階へと伝えられる。また逆に、下位の決定した結果はすぐ上位の段階へもフィード・バックされ、その結果、上の段階での決定に修正が加えられることがある。

このような設計対象のスケールに基づくハイアラーキのほかに、土木設計においては、その設計内容の精粗によるハイアラーキも存在する²⁾。たとえば、道路の設計においては1/50 000の地形図の上で甲・乙2地点を結ぶ路線を決め、これを1/5 000地形図の上で検討していく。わざと概略設計を行ない、さらに1/1 000地形図上で詳細に実施設計を行なう。この場合、1/50 000地形図の上で求められるのは、いわば幅状の路線可能帯であり、概略設計の段階ではこの帯の中では何本かの比較路線が設計され、さらに実施設計段階ではこの比較路線を中心とした、よりせまい幅状の範囲内で路線を選定する。このことを図解的に示したのが図-8である。ここでのAは最初に求められた路線可能帯を示す路線の集合であり、

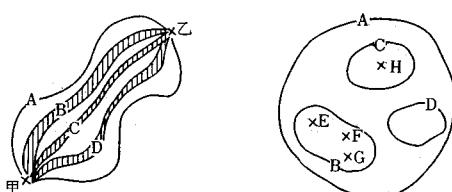


図-8 路線選定の解の集合

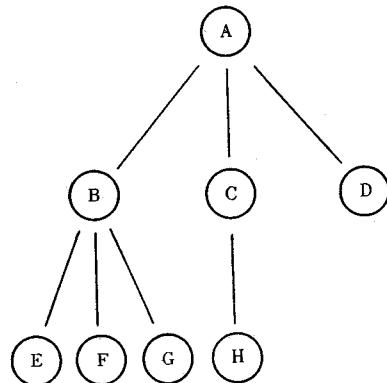


図-9 路線選定のハイアラーキ

その中に含まれるB, C, Dは概略設計で求められた解を示し、E, F, G, Hは実施設計で検討された路線を示している。この関係をツリーとして表わしたのが図-9である。

われわれは道路の路線選定という設計過程において、もっとも望ましい路線を決定したい。その路線は、いまAという集合の中に含まれている。その最適な路線を集合Aの中からただちに見出すことができればよいが、路線選定の問題は複雑であり、簡単にその解を見出すことができない。そこでわれわれは、この設計過程を図-9のようなハイアラーキな構造をもつ過程に組み立て、順次採用しうる路線帯を、より小さな集合へと減らし、その結果、路線E, F, G, Hを求め、それらを比較してもっともよい路線を決定する。この各段階でわれわれはその段階での解を評価し、ある解は採用し、また他の解はその段階で捨て去られる。たとえば、B, Cの路線は概略設計の解として採用され、Dは捨てられてさらに詳細な設計を行なうべき案としては採用されないのである。

土木設計は、このような2つのハイアラーキ構造をもつ過程が組み合わさった過程を一般にとる。そのような過程をとるのは、一つには土木設計の対象がきわめて大きな規模をもつものであり、したがって、それを構成するエレメント（たとえば橋梁とか擁壁等）が多種・多量にのぼるため、それらを総合化する過程は多段階に考えざるを得ないこと、また一方ではシステムが膨大で、たとえ全体のシステムをひとまとめにして取扱うことができたとしても、その中の最適な解を得ることは不可能であり、個々のサブ・システムの中での最適なものを組み合わせて全システムでの解とせざるを得ないためである。

(2) 設計の評価

上に述べたようなハイアラーキ構造をもつ設計の各段階において、その設計の解は評価されねばならない。その評価に基づき、設計者は採用するか捨ててしまうかの

決定をくだす。その評価の方法は各段階によりさまざまである。たとえば、地域計画や交通計画の段階では、産業連関モデルを基軸とした厚生経済学的な見地に立った評価法などが用いられるし、交通計画や道路設計の段階では費用便益分析の範囲に入る評価法が用いられることが多い。さらに橋梁の設計のような構造物の設計に際しては、破壊に対して十分安全であるという条件の中で、もっとも経済性の高いものであること、すなわち建設に要する費用という尺度で評価するのが一般である。

しかし、設計は必ずしもこのような量的評価基準のみで評価しうるものでないことはいうまでもない。快適性とか美観・無公害性といった機能は、経済的基準で評価しうる機能と同等に重視されるべきものである。これらの評価について、たとえば数量化理論のように計数的に表現し得ない要素を数量化する理論的方法も開発されつつあり、一方では、設計者の主観的判断にこれらの評価はまかせ、その主観的判断の資料をより能率的・効果的に提供しうる方法としてコンピューター・グラフィックスのような新たな手段も用意されつつある。

設計はまた意志決定過程のつながりである。設計者がその意志決定を行なう場合、上にあげたような各種の評価基準により評価するとしても、その評価の前提となる仮定条件は現実に必ずしも起こるものではない。たとえば、設計者が基礎杭の長さを 10 m か 15 m かのどちらかに決める場合、その支持層までの深さは地質調査等の結果から推定されているにしても、確実に 10 m であ

り、あるいは 15 m であるという保証はない。この場合、採用する基礎杭の長さ (action と呼ぶ) と支持層までの深さ (state of nature) の間の関係は、たとえば表-2 のように示すことができる。

この関係は、またツリーとして 図-10 のように表現される。このときわれわれは、どちらの設計を選ぶべきかを決めるために、地質調査等の情報に基づいて先見的に支持層の深さが 10 m, 15 m である確率を決める。その確率が、たとえば、支持層が 10 m の深さである確率が $P_1=0.7$, 15 m である確率が $P_2=1-P_1=0.3$ であると与えられたとき、期待損失として 10 m の杭を設計したときは

$$E(a_1)=0 \times 0.7 - 400 \times 0.3 = -120$$

15 m の杭を設計したときは

$$E(a_2)=-100 \times 0.7 + 0 \times 0.3 = -70$$

を計算し、その結果から期待損失の少ないほう、すなわち長さ 15 m の杭を選ぶのが合理的であろう。

統計的決定理論はこのように不確定さに直面して、矛盾しない決定を下すための合理的な一つの決定方法をわれわれに与える。ただこの場合、上の例でもわかるように、実験や経験によって自然の可能な状態についての知識が得られることができが一つの前提であり、その意味において優秀な設計者とは、この先駆的な確率を十分精度よく与えうる人であるということができよう。

(3) 最適設計

設計におけるシステム工学的手法の適用される一つの典型例は最適設計である。現在のところ、最適設計は全体の設計システムの中での一つの小さなサブ・システムとしての構造設計の分野で応用されているにすぎないが、しかし、問題の設定、目的の選定、システムの合成、システムの解析、解の評価といったすべてのシステム工学的手法に共通なアプローチをその中に包含している。そこで、次にこの最適設計の考え方と方法について述べてみることにする。

a) 構造設計における最適設計³⁾

工学全般にわたって共通する“設計”なる言葉は、“ある目的または必要を満足させるために、装置または方法・組織など、それらを実現するものの内部的な、詳細な構造を決定する技術である”と定義されよう。われわれは、この内部的な構造を決定するに際して、その目的や必要を十分満足し、しかも、その実現された結果、生み出される効果が、もっとも大きいものを見い出したいと考える。最適設計とは、このようなわれわれの要望を実現するための設計の方法であり、したがって、できれば、すべての設計は最適設計でありたいし、また、最適設計でなければならないのである。

表-2 基礎杭の長さと支持層までの深さの関係

state of nature \ action	根入れ 10 m の基礎杭	根入れ 15 m の基礎杭
支持層までの深さ 10 m	正しい設計 損失 0	5 m 分を切断、廃棄することによる損失 100
支持層までの深さ 15 m	杭をつなぐ費用およびその間の機械・要員の遊びによる損失 400	正しい設計 損失 0

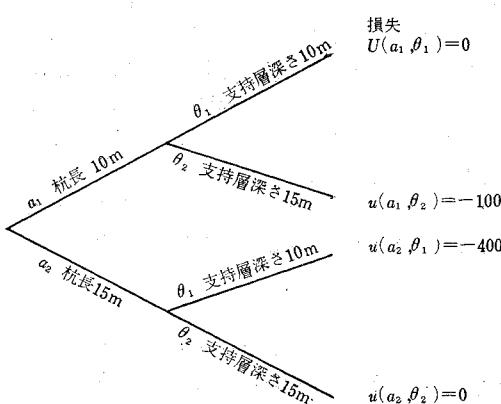


図-10 基礎杭長さ決定のツリー

上に述べた内部的な構造は、ベクトル $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ を決定することにより決められるとし、これを設計変量 (design variables) と呼ぶことにする。設計に際して要求される機能の満足度は、この設計変量により効果関数群 $E(X)$ により表わすことにする。たとえば、構造物を設計する場合、この効果関数群の中には、その構造物をつくるための工費や、つくったあとの維持費が含まれるが、さらにはその構造物から得られる便益や、こわれにくさ、あるいははつきりした美しさなども含まれよう。結局 $E(X)$ は、その構造物の有用さを表わしているといえる。最適設計とは、この効果関数群 $E(X)$ をできるだけ大きくするような設計変量 X を決定することをいう。 $E(X)$ に含まれる効果関数の中には、互いに相矛盾するものが存在するのが一般である。たとえば、こわれにくい構造物をつくれば工費は大きくなろうし、できるだけ費用をかけないようにすれば、こわれやすい傾向となろう。最適設計はこのような相矛盾する効果をバランスさせようとするものであるということができる。最適とは何をさすかは、目的とする効果の選択によって決まる。

構造設計においては、一般に、効果関数群の中で経済的効果を表わすと考えられるものを選び、これを利得(目的)関数 $f(X)$ で表わす。それ以外の効果 $G_i(X)$, $i=1, 2, \dots, m$ には、これらの許容限度 G_{ia} をつけ、設計変量がこれらの効果を果たすに必要な条件 $G_i(X) \leq G_{ia}$ を考え、これを制約条件と呼ぶ。このとき、最適設計は“設計変量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ がつくる n 次元の設計空間 V_n で、与えられた制約領域 $G_i(X) - G_{ia} \leq 0$ ($i = 1, 2, \dots, m$) のなかで利得関数 $f(X)$ を最大にするような X を決める”ことである”と定式化でき、モデルが構成される。

構造設計に際しての設計変量には、物理的には次のような種類がある。まず、断面の幾何学的性質(たとえば断面の寸法、断面積や断面二次モーメント)を定める寸法変数(sizing)，節点の位置などの幾何学的配置を定める形状変数(configuration)，合成材の弾性係数や、比重などを定める材料変数(material design variable)，また節点間の部材の有無を定める位相変数(topological variable)などがある。

設計変数は、数学的立場からは連続変数と離散変数に分類される。たとえば、鋼板のような規格材の断面寸法などは厳密には離散形であるのを簡単のために疑似連続として取り扱うことが多いが、杭の本数や補強材の数などは整数形である。このような設計変数に何を選ぶかは、その設計変量が全体の目的効果にどの程度有効に影響を及ぼすかによって決められるべきである。

制約条件は通常種々の破損形式の発生を避けることを

条件として組み立てられる。そして、破損を起こす原因である荷重条件としては、正常に使用されている状態において起こる荷重、すなわち使用荷重(service load)と、予想される異常状態において起こる荷重すなわち超過荷重(over load)の2種が考えられる。たとえば、作用荷重条件に対しては破損形式として、降伏開始・たわみの増大・局部座屈などをとり、超過荷重条件に対しては破損形式として、亀裂・崩壊・不安定状態などをとるのが普通である。

このほか、設計変量相互間の関係を表わす方程式や設計変量とそれより内生的につくれられる変量との関係式もこの制約条件に含んで考えられる。

利得関数には、構造物を建設するために必要な費用(材料費・製作費など)と維持費などを取り入れるが、居住性・快適性といった効果が重視される場合には、それらもなんらかの形で数量化して組み入れられることもある。このような二つ以上の効果関数を目的効果として利得関数にする場合には、それぞれに重みをつけ、その和をとるのが一般である。しかし、こうした形の利得関数をつくることは、多くの場合それらの数量化に非常に困難が伴うので、構造設計の問題ではきわめてまれであり、一般に工費の全体への影響が支配的であるので、工費または材料費が利得関数としてとられることが多い。

“最適”とは、その全体の設計の中での絶対的な最適を示すとは限らない。あくまで決定がなされる際に選択された制約領域内の、選択された利得関数の最大であるものをさす。したがって、ある仮説に基づいて効果関数群が選択されたときは、“最適”はこの仮説のもとににおいてのみ有効なのである。設計によって決定された構造物が全体の設計問題のシステムの中で最適であるかどうかは、いまこのシステムを構成するサブ・システムとしての、この構造設計が全体的な目的を満足する上で、どの程度有効であるかが明らかになったとき判明する。また、システムを構成する効果関数群が必ずしも設計変量の関数として適切に数量化されているわけではない場合には、最適性の判定が数量的な尺度でのみ計られることは正しくないことはいうまでもない。たとえば、あるものの形状をできるだけ美しくするということを優先させて考えるような場合、数量的な評価関数を設定することは、ほとんど不可能である。このような問題は、むしろ人間の美的感覚に基づいて判断をくだしたほうがより合理的であると考えられる。したがって、設計の問題では常に数学的モデルに置きかえて最適解を求める解法をとれるとは限らない。人間の視覚判断によって決定されるような問題では、人間の視覚判断をより容易にかつ正確に行なわせるような図解的な表現を介して、最適解を見出していくことを考えねばならない。

b) 最適設計問題の解法⁴⁾

従来われわれが行なってきた構造設計計算の方法をふりかえってみよう。

われわれは、まず、いくつかの破損形式を考え、そのそれぞれについての許容効果基準 G_{ia} を決める。たとえば、許容曲げ応力とか、座屈強度とかいった種々の許容値である。そしてわれわれは、部材寸法などといった設計変数 X の値を、主として従来の経験に基づいて仮定する。この仮定した X から効果 $G_i(X)$ を求め、これが $G_i(X) \leq G_{ia}$ を満足しているかどうかを調べ、満足していないければ、それが満足される方向へと設計変量のうち、いくつかの仮定値を変えて再び同じ操作を行ない、すべてが満足されるようにする。与えられた条件が満足されると、そのとき決まった設計変量について、たとえば、材料の重量といった利得関数の値を求める。さらに初めに仮定した設計変量の値を変えてみて、他の試設計を行ない、これについても上と同様に利得関数の値を計算してみる。このように二、三の試設計の結果得られた利得関数値を比較し、そのうちで最大値を与える（重量の場合は最小値）設計変量をもって設計の解とする。よい設計者であるための一つの能力は、この初めの設計変量の仮定値をできるだけ最適な値に近く与えることができ、また仮定値を変更するのにも利益がます方向へ上手に変えることができるという点にあるといえよう。多くの同種の設計の経験がこれを可能にするのだろう。

電子計算機を用いた設計においての一つの大きな利点は、このような比較設計を数多く試みることができるることであり、その比較設計の中で利得関数を最大にするものを求めるのである。すなわち、ここではある有限個の組の設計変量が試設計として与えられ、それより得られる効果関数値の比較により better な設計を得ようとする。最適な解はこの操作を無限回繰り返すことにより得るものであって、図-11 のような表現をすれば、そのハッチされた境界の内側の領域内に、無限に試設計変量 X_R をとることが必要になる。したがって、こうした方法で最適解（近似的な）を求めるには、一般にばく大な労力と経費を必要とする。

最適設計においては、この best な解を、できるだけ少ない計算労力でうまく解くことが必要になりその一つの手段が、いわゆる数理計画の方法である。

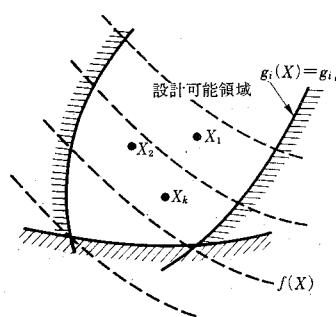


図-11 設計空間における比較設計 X_i

さきに述べたように、最適設計はある制約条件 $G_i(X) \leq 0$ のもとで目的関数 $f(X)$ を最大にする設計変数 X を求める問題であると定式化できる。したがって、制約条件・目的関数がともに線形であるような問題には線形計画法が適用でき、シンプルクス・アルゴリズムにより解を見出すことができる。塑性理論に基づいて最適設計を行なう問題では、しばしばこの線形計画法を利用して最適解が求められる。

構造が弾性的な動きを示す範囲内で設計する一般の構造設計の問題では、目的関数も制約条件も非線形の形をとるものを持つ場合が多い。しかし、非線形計画問題を取り扱うに際しての絶対的な手法は、まだ確立していないため、問題の形により種々の手法の中から利用しやすいものを選ぶしかない。しかも得られた解は常に全体の最適解であるとは限らず、局部的な最適解しか得られない場合も残る。こうした非線形最適化問題の解法として、与えられた近似値のまわりで制約条件・目的関数を線形化して線形計画の問題に近似させて次の近似解を求め、順次最適解へと収束させていく方法、あるいは制約条件を罰金を用いてこれと目的関数の合成された新しい関数の中に含めてしまい、条件なしの極値問題として取り扱う罰金関数法、あるいは目的関数のつくる多次元の曲面の上で転がり落ちる球の経路を追跡する形の解法である傾斜投影法等が用いられる。設計変量相互間およびその目的関数への影響を調べるために sensitivity analysis も応用されることもしばしばである。

(4) グラフィックな処理による設計⁵⁾

われわれの設計において、その評価がいつも数量的基準によってのみなされるとは限らないことは先にも述べた。安くつくれるというだけでなく、美しいこと、使うに快適なこと、あるいは環境に調和していることなどの効用も含めて考えられねばならないこともしばしばである。数量化できないような目的関数あるいは制約条件は、最終的には人間のもつ経験や感覚に基づいて、いくぶん主観的に判断されるほかはないであろう。人間の判断決定によって最適解を求める場合には、数学的決定法によるような厳密な意味での最大値あるいは最小値問題とはなり得ない。したがって、数多くの比較案あるいはシミュレーションの中から、人間の感覚に基づく総合的判断によって最適と思われるものを選択する手法をとらざるを得ない。われわれが日常の設計で設計図をかき、またそれを透視図や模型で表現する理由の一つは、これらの図的表現を、われわれの視覚的判断の資料とするためである。この場合、総合的判断とは、数量化しうる評価と、数量化しえない評価の総合に対して行なわれる決定であり、設計者によって意志決定される。

設計者が決定をくだす場合、それがより正確に行なわれるためには、まず第一に判断あるいは選択すべき評価資料が図解的に表現されること、第二に迅速にかつより真実に近い形で図解的表現が得られること、第三に図面上の修正すべき量が、ただちにその設計変数の修正へとフィードバックされるようなシステムになっていることが必要である。このような数量的評価と、設計者の図解的評価を組み合わせて設計をすすめる有効な手段として、マンマシン・システムによる computer aided design が現在開発されつつある。このシステムによれば数量的な評価や図形処理を計算機により行ない、設計者がその結果に対し判断や修正を加えたら、その修正データを再び計算機にもどすことが可能である。

(5) 自動設計・自動製図⁶⁾

必要な設計条件のみを電子計算機に指示し、そのあとでの処理をすべて電子計算機が行ない、設計の解を得、その結果は、さらに自動製図機により自動的に製図される自動設計は、またきわめてシステム的であるといえる。

ある構造物の自動設計プログラムの開発に際して、われわれは、まずその種の構造物に対する需要が今後どの程度の数であるかを予測し、またそのタイプの構造物には、どのようなバラエティーが考えられるかを既存の情報より分析し、われわれの開発するプログラムがどの程度の柔軟さをもたねばならぬかを決める。

次に、その種々のバラエティーをもつ構造を合成し、標準化可能なものはそれを行なう。さらに、この設計において定めるべき変量は何か、また、そのうち外生的なものはどれか、内生的に求められるべきは何かを決め、全体の問題を組み立てる。

自動設計により得られた結果は、必ずしも、いつも完全に満足なものであるとは限らない。そのため、この結果、設計者が再び修正する必要もしばしば起る。そのときどの変量を修正すれば結果にどのような影響が生じるかも分析しておかねばならない。

このような過程は、自動設計につながる自動製図のプログラム開発に際しても全く同じように必要である。とくに自動製図プログラムの能率的な開発を行なうためには、そのプログラムのシステム化、たとえば長さ何 m の鉄筋を何 cm 間隔で何本かけ、というように問題指向形のプログラム言語で製図プログラムがつくれるようなプログラム・システムをつくり上げておくことが必要となる。

自動設計・自動製図を実施するにあたっては、また電子計算機・自動製図機あるいは他の図形処理装置等のハードウエア・システムとの関連において、そのプログラムのシステム化をはかることが必要である。

(6) むすび

以上、土木設計とシステムズ・アナリシスとの関連を簡単に述べてきた。ここでは、システムズ・アナリシスのもつ意味をきわめて広義に解釈し、したがって、設計過程や対象をシステムとしてとらえた考え方から設計のシステム工学的な解法まで、幅広くとらえて述べた。われわれの設計の大規模化・大量化・多種化は、今後ますます土木設計システムへ、この種のシステム工学的手法の導入を必要とすると考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺茂: 設計論 I, 基礎工学講座 10, 岩波書店
- 2) Manheim: Hierarchical Structure, M.I.T. Report No. 7, M.I.T. PRESS
- 3) 田中尚: 最適設計における最近の進歩, 生産研究 22-1, 東大生産技術研究所
- 4) 中村英夫: 最適設計 (II), 東大生産技術研究所講習会テキスト
- 5) 丸安隆和・村井俊治: 土木設計システムにおける地形情報処理, 土木学会誌, 55-10
- 6) 丸安・中村・村井・若林: 土木構造物の自動設計, 土木学会誌, 52-8

(中村英夫)

3. 施工

(1) 施工というものの位置づけ

土木プロジェクトをシステム的にとらえて、そのプロセスを図-12のようない流れで表現するとき、その流れにおける「施工」というものの位置づけは、まさにそのプロセスの末端にあることができる。したがって、システムとしての理解のうえでは、これまでではシステム・コンポーネントとして他の「計画」「設計」に比べ、いくらか低位のウェイトを持たせられていたきらいがあ

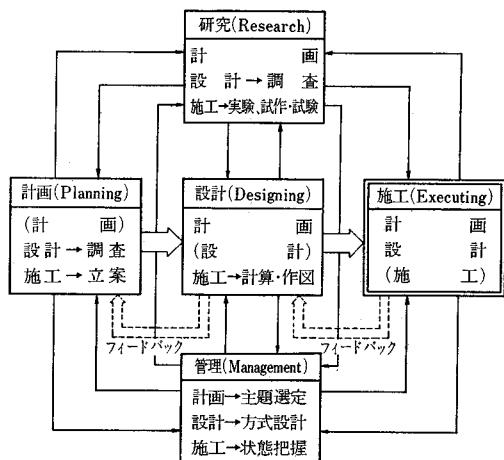


図-12 土木プロジェクトのプロセス

ろうかと思われるが、実は逆にきわめて重要な機能をもっているものであることを再認識する必要がある。すなわち、「施工」におけるミクロな「計画」——「施工計画」および「施工」におけるミクロな「管理」——「施工管理」の両者が、もし不完全なものであり、粗雑なものであったとすれば、「施工」を含むプロジェクト全体が破滅につながってしまうものである。いかに精密な「計画」であり、またいかに合目的的な「設計」であろうとも、「施工」に対してバランスを失するようなプロセスとなってしまえば、それまでの努力はまったくの徒労に終ってしまうことになろう。とくに、「施工」がプロセスの末端に位置することから、「計画」「設計」のアウトプットがいわばソフト的な思考の所産として紙という媒体により implicit (潜在的) な成果物として現わされるのに対し、「施工」はいわばハード的な労働を通じ、そのアウトプットとして顕在的 (explicit) な「構築物」を要求されるという特異点をもっていることを、わきまえておかねばならない。

従来、「施工」は発注者による「計画」「設計」「施工」を一括した直轄方式によって行なわれてきたこともあるが、現在では、特殊なプロジェクトを除き、一般には請負方式によることが建前になっている。すなわち、そのプロセスのうち、「計画」および「設計」を発注者、「施工」を受注者が担当するという方式で、これを表わせば図-13 のようになる。ところが、とくに戦後著しくなった新しい傾向であるが、発注者における「設計」の機能が開放され、別途発注という形をとり、新たにコンサルタント業に移管されることが多くなった(図-14 参照)

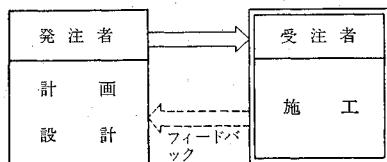


図-13 施工の形態・その 1

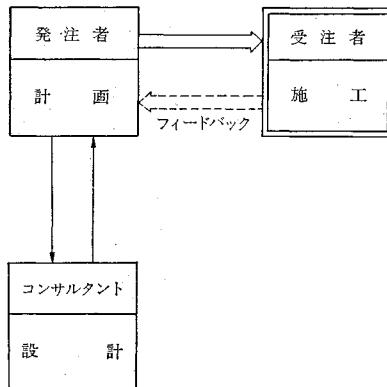


図-14 施工の形態・その 2

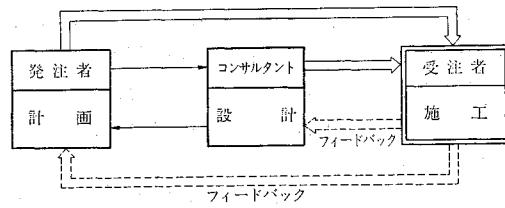


図-15 施工の形態・その 3

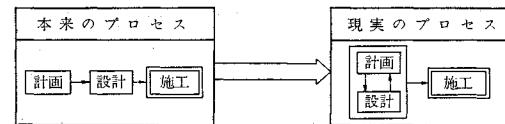


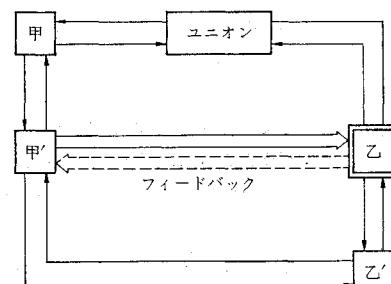
図-16 土木プロジェクトのプロセスの変形

照)。最近では、さらにそれを一步進めて、発注者の「工事管理 (project management)」のうち、とくに「監理 (supervision and control)」についても代行させることすらあるようになってきている(図-15 参照)。

ここで、請負契約における用語を流用すれば、従来は「甲」という発注者と、契約を通じて成り立つ「乙」という受注者との間の一元的な関係を生ずるだけであり、「計画」「設計」の両者と「施工」に付帯する「管理」が「甲」の役割であり、「施工」という機能のみが「乙」の責務であったわけである。しかし、現在では「甲」は「設計」という機能を「甲'」という位置づけになるコンサルタントに受け継がせているため、図-15 に見られるように、「乙」との関係も二元的になってきているものと思われる。

以上のことから、土木プロジェクトのプロセスは図-12 における基本的な流れが、現実には図-16 のように変形しており、かつ、発注・受注という行為がとられることにおいて、「計画」および「設計」と「施工」とは質的に分離されているものと解釈される。

アメリカにおいては、それがわが国の今後の姿になる



甲：発注者 Owner
甲'：発注者の役割を代行するコンサルタント
Owner-side Consultant
乙：受注者 Contractor
乙'：受注者の役割を代行するコンサルタント
Contractor-side Consultant
ユニオン：職能別労働組合 Crafts Union

図-17 アメリカ合衆国における施工の形態

のかどうかわからないが、その傾向はさらにはげしくなっている。すなわち、図-17 のように、発注・受注という形で整理してみると、「甲」と「乙」との「施工」に関する直接的な関係は、ほとんど消滅しているように思われる。

(2) 施工計画と施工管理

これまで「乙」が「甲」に対する契約において、その責務である「施工」を遂行してゆくことについて、「甲」にまったくすべてを依存していた時代には、「乙」は「施工」を土木プロジェクトのシステム・コンポーネントとして認識する必要はあまりなかった。しかし、最近のように「責任施工」ということが強調されるようになってきたため、「乙」も自主的にプロセスの中におけるシステム的役割を要求されることが必須となってきている。このことは、「施工」における科学性・合理性の追求という形で、その機能を全うしなければならないということを意味し、従来の伝統的な「施工」に対する考え方とか体制を踏襲するだけでは不完全なものとなってしまうことになる。「計画」「設計」のアウトプットをインプットとして処理される「施工」というサブプロセスは、時間・空間をはじめとしてきわめて制限条件の多いものであるから、緻密な事前の「施工計画」が必要となる。しかも、「施工」のアウトプットとしての成果物は、「契約書」「設計図書」などに明示されており、演技する舞台は決められてしまっているわけである。これを「自由度」という言葉で表現すれば「代替案(alternatives)」の比較・選択の可能性において、「計画」の自由度よりも「設計」の自由度が低くなるように、それからさらに低くなっている、「施工」というものは、ほとんど自由度をもたないといえることになろう。

さらに不幸なことには、いかに事前計画が完璧であり、精密であろうと、内的要因によることもさることながら、多数の外的要因たとえば天候・地盤の自然条件、用地問題、第三者のクレームの人的条件などにより、「施工」は「施工計画」どおりにはいかないといつても過言ではない。したがって、その予防策として、工程・資金・要員・機材など施工のための道具立てに対して「予防保全(preventive maintenance)」的な管理方式(control を含む management system)を確立しておき、常に監視(supervise)できる計画を策定しておかなければならないのである。つまり、「施工」における「施工計画」は、「施工」における「施工管理」ときわめて密接な関係にあるわけであり、むしろ癒着しているものと考えるほうが正当であろう。

從来、土木プロジェクトは標準化をすみずみまですめることができないという認識であると同時に、それが

実態であるため、経験の蓄積を基礎とした計画立案が採用されることが主流となっていた。いきおい、経験偏重論は計画手法・管理手法の発展をむしろ阻害し、「施工」における土木技術の華やかな進展にもかかわらず、それらがまったく取り残されてきたと見ることができよう。

しかも、その計画立案は静態的(static)な積み上げ方式を前提としたものであり、現象をナマの姿でつかむ動態的(dynamic)なものではなかった。たとえば、トンネル掘削において、発破で発生するずりをトロ運搬する場合、索引ロコの能力に応じてトロ台数を割り当て、編成列車数を決め、ロコが何台、トロが何台という計算をしているが、これは所要条件を満足する、ここでいう静態的な計画立案である。ところが、現実にはトンネル掘削では導坑あり、上部半断面ありでそれぞれの作業箇所に割り当てられた列車群が同一軌道上を動きまわり、コンクリート車との競合もあって、ともすると交通渋滞が起こるはずである。したがって、この場合、設備費を考慮に入れながら、8t ロコで 4両編成 3列車がよいのか、12t ロコで 6両編成 2列車が好ましいのかなど、現実に起るであろう現象を時間軸をベースにして、たとえば、コンピューター・シミュレーションなどによって再現してみる必要がある。これは一例にすぎないが、このような事例は、われわれのプロセスの中に常に存在しているものである。この動態的な計画立案に基づいた計画を基本としなければ、その計画を実施に移して進行するとき、数多くの修正を繰り返しながら最終的なまとめをするという、いわば場あたり方式の管理しか実行できなくなってしまう。「計画」が科学化され、「設計」が合理化されている今日、「施工」のこういう意味のたちおくれをばん回するためにも、これから施工担当者の責務は、きわめて重大になってきている。

(3) 施工におけるシステムズ・アナリシスとシステム・モデルとの関連

「計画」「設計」の分野における進歩に歩調を合わせて、プロセス全体の科学化・合理化をはかるためには、上述のように「施工」において今後いっそうの努力が払われなければならない。従来、「施工」における科学的なアプローチは、主としてハード・テクノロジーと呼べる土木技術、すなわち「建設技術(construction technique)」そのものの開発・進展に関しては非常に熱心に行なわれてきており、かつ大きな成果をおさめているが、今後はソフト・テクノロジーとも呼べる計画手法・管理手法を主軸とする「管理技術(management technique)」の活用についても、バランスをとりながら、十分にバックアップしていくよう大いに努力していかなければならぬものである。

そのためのアプローチとして

① 施工計画のためのシステム・モデル一覧

② 施工管理のためのシステム・モデル一覧

をそれぞれ図-18,19のように整理してみた。いずれにおいても、まだ完全な姿としてその全貌をとらえることはできないと思われるけれども、なかにはすでに実用段階にあるものもあり、あるいは、いまのところ実例はないが、利用の可能性を秘めているものもあるなど、今後の研究・開発をまって大いに利用していかなければならない。

(4) 施工の近代化のための土木計画学

「施工」の本質はいうまでもなく、より良い (better) 品質の成果物を、より安い (cheaper) 工費のもとに、より早い (earlier) 工期で”仕上げることにある。この実現のためには、「建設技術」としての土木技術の進歩・発展のみに頼るだけでなく、やはり「管理技術」をも土木技術の一部としてその積極的な導入をはかり、相互の円満な融和を前提として研さんを積んでゆかねばならない。

土木施工管理技士の国家試験にも見られるとおり、今後の土木技術者像としては、「建設技術」の専門家でなくてはならないと同時に、「管理技術」についても、深い理解が要求されている。今までとかく経験的要素の強い土木プロジェクトだけに、“場数さえ踏めば”というような安易な気持が多かったかも知れないが、これからは体系だったシステム的な認識をすんで自分のものとする努力が必要である。たしかに、土木プロジェクトは変化に富み、一件一件を新規のものという気がまえで取り組むため、経験を重ねて獲得し

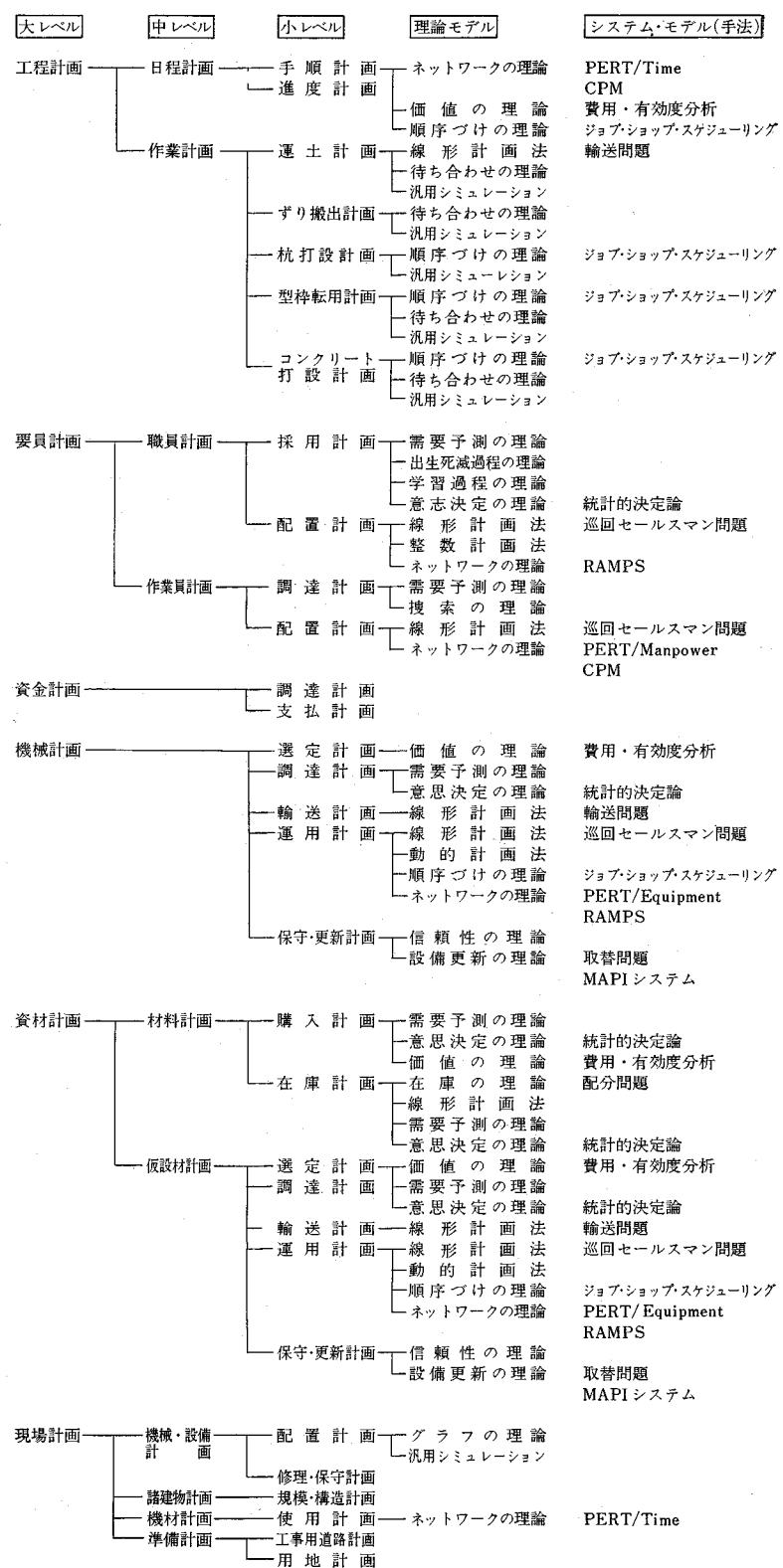


図-18 施工計画のためのシステム・モデル一覧

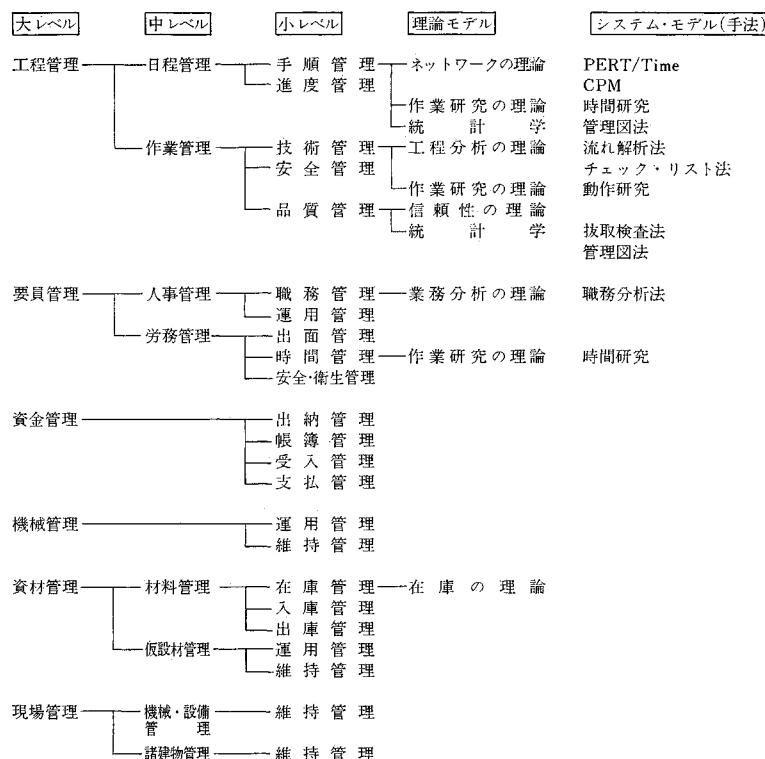


図-19 施工管理のためのシステム・モデル一覧

なければならない要素もかなり多いだろうが、そのままでは、どうしても属入的な財産となってしまって普遍性をもたなくなることを十分考慮しておかねばならない。経験だけが財産であるという自己満足だけに頼っているような土木技術者がいるとすれば、かれらは先になって落伍してしまうのではないかとおそれる。社会の成長の高度化は、われわれ土木技術者をさらに奮起させるよう働きかけてくるだろうから、「土木技術システム(civil engineering system)」について、これまで以上に強く認識を深め、体系立った「土木計画学」の研修をおろそかにしないような「近代的施工屋」となることが切望される。

(河原畑良弘)

4. 管理

(1) 管理とは

わが国では、管理という言葉は多様な使われ方をしている。組織の運用という内容を意味する使用例もあれば、維持修繕など主として物件等を保存する行為を意味することもあり、また事物を排他的に自己の統制のもとにおくという意味を含んでいる例もある。しかし、ここでは主題の「土木計画とシステムズ・アナリシス」の趣

旨と齊合を保つため、計画に基づいて建設された施設(群)の運用を管理と考える。通常、規模の小さな施設の運用にはシステム的要素が少ないので、管理におけるシステムズ・アナリシスを考察するすれば、その操作運営要素が多様多岐にわたるような大規模な施設、わが国では主として公共施設となる。最近では民間施設でも大規模なものが建設されるう勢にあるが、一応ここでは、公共施設の管理におけるシステムズ・アナリシス、対象施設としては多目的ダムを選択して考察をすすめることとした。

さて、さきに簡単に述べた管理とは何かについて、さらにくわしく定義すれば次のようになる。すなわち、「人間の生活活動の効率化・快適化をはかるため、所与の環境に対して、一定のレスポンスをするように機能が付与されている施設(群)を、目的に即して

運用し、効果を保証するための一連の行為」を管理行為という。

この定義における行為には維持修繕も当然含まれる。なぜならば、維持修繕は環境に対してレスポンスし、効果を保証するために、施設を常時稼働可能の状態に整備しておくための手段であるからである。したがって、前述のように管理を定義すれば、組織の運用・維持修繕・統制という多様な用語の使用例が包括されることとなる。

システムズ・アナリシスの観点から、管理におけると計画におけるとの差異は一体あるのか、あるとすればいかなる点か、これがこの考察における最も基本的な出発点とした。管理とは本来計画の目的を達成するための最終的具体行為であるから、管理におけるシステムズ・アナリシスは、計画におけるそれと同じではないかとの考え方もできようが、管理段階においては、管理に固有のシステムズ・アナリシスの問題が幾つか存在することのほか、計画過程でなんらかの原因で明確に得なかつた不確実性がからんだ問題の発生に対して、いや応なしに解決を迫られること、および時間要素がきわめて重要な因子となることなど、たとえ手法的には同じであっても、管理段階におけるシステムズ・アナリシスは、計画過程におけるそれとは同じものではない。本節においては、この差異を対比しつつ考察をすすめることとした。

先般来日した OECD の環境局長ローデリック (H. Roderick) 博士は、ある懇談会の席上日本側の質問に答えて、「公共施設というものは、それを計画した政府としては、理想的な施設であり計画どおりの効果を発揮していると信じているので、プロジェクトが完成し管理運用の段階に移ったのち、効果が測定された事例はほとんど見られない」と述べていたが、事実すでに建造された公共施設の管理、またはそれにつながる施設（群）の効果の測定について、関係者の努力は払われているものの、各施設に特有の各種制約条件に起因して、十分実績が上っていない現状にあるといつてよからう。從来、管理については、それが計画目的的具体化というきわめて重要な意義を持つものであるにもかかわらず、あまり学術的研究の対象とはなっておらず、したがって、文献もほとんど見られず、重要視されていなかったうらみがある。したがって、ここに述べようとする管理とシステムズ・アナリシスの考察は、序説的性格のもので、今後この分野における理論の発展を大いに期待したい。

(2) 管理の流れ

前節で述べた管理の行為は、連続する環境に対するレスポンスであるから、ある時点における管理行為によって新しい環境がつくり出され、またその新しい環境に対して新たにレスポンスするといったように、連続する環境変化に対するレスポンスの連続であると考えられる。

この流れをさらに詳しく述べれば次のようになる。

所与の環境に対し、計画の目標から導かれる目的の明確化という作業を行ない、次にその明確化された目的を達成するため、環境と情報ストックの両者から供給される情報をモデルに適用し、予測した結果を選択して指示するという意志決定の段階を経過してから、実施に移してその1単位時間における環境に対するレスポンスを終了する。そのレスポンスの結果、環境が変化したら実績評価を行ない、目的が達成されなければ、その反省を新しい環境にフィードバックして、次の単位時間のプロセスを先行の場合と同じ手順を踏んで繰り返す。一方、このプロセスと併行して施設の維持修繕、人員や組織の準備がすすめられる。この手順を図示すれば、図-20 のとおりである。

(3) 時間要素

図-20 における任意の単位時間におけるレスポンスは、情報を収集し、モデルを応用して、施設をいかに運用するかその内容を選択し指示する、いわゆる意志決定の段階を経て、具体的な操作なり行為なりが実施されて

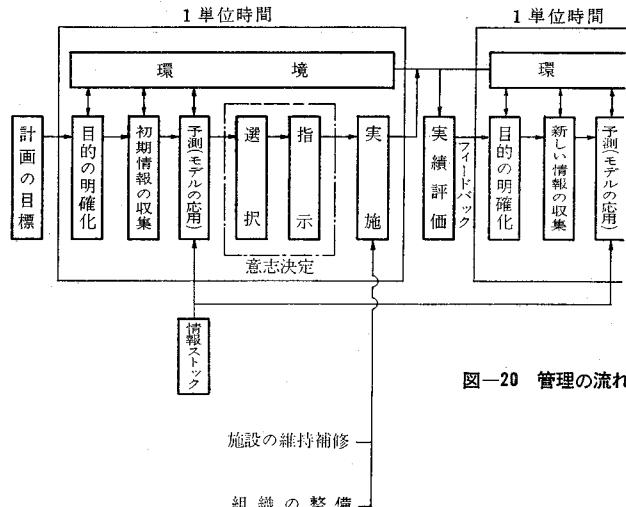


図-20 管理の流れ

終る。このプロセスの間に何がしかの時間経過があるため、環境の変化がすばやい場合は、モデルを適用する境界条件が環境を正しく反映していないこととなり、予想した成果を得られないおそれが出てくる。このため、目的を明確化してから実施に至るまでの時間は、管理の対象施設種別にもよるが、その環境の変化する時間単位以内であることが必要である。

このように、操作活動が時間要素に支配され、しかもこの時間要素の差、すなわち実施の時期の遅速がプロジェクトの効果に大きく影響する。場合によっては目標達成にとって、致命的となる可能性もある点が、システムズ・アナリシスにおいて計画過程と管理段階とで大きく異なっている点である。計画過程においては、単にプロジェクトの耐用年数に至るまでの作業手順・性能・費用・信頼性といった要素について、時間的要素を加味して検討を行なうという意味で、時間要素がシステムズ・アナリシスの中で重要な位置を占めていたのであるが、管理においては、まさにプロジェクトの計画目標達成を左右する重要な要素となっている。

システムズ・アナリシスにおいては、この時間要素を管理するために、計画評価と検査技術 (PERT) の手法がある。そこで管理段階においては、常時組織や人員構成に応じて、管理行為作業内容について作業ネットワークを準備しておけば、早い環境の変化に追随できるし、誤操作という事態を避けることもできる。さらにすんで、不確実性に基づく計画外の環境が発生した場合に、これに対応するための作業ネットワークを平素から研究しておくことが望ましい。

(4) 予測と意志決定

計画における予測の役割は、プロジェクトの発揮する効果を評価基準に照らして意志決定するための情報提供

にあるが、管理における予測では、その役割は図-20の管理の流れで見るように、計画の目標達成のためいかなる具体的な措置をとるかを意志決定するために必要な情報の提供であって、通常は環境の予測であることが多い。そして具体的な措置を決定し、実際の効果を左右するものだけに、管理における予測の重要性は、計画における予測の重要性に劣らないほど大きい。場合によっては、予測の失敗によって、受益予定者または利用者が期待する利益を享受できない場合が往々にしてある。もちろん極端な場合として、施設の管理に入った段階のある時点で直面した環境が、当初の計画過程で想定した環境以上のきびしい事態となって、そのため効果が保証されないケースが出てくることもあるが、これは計画策定期において、情報の不足等に起因して、そのような環境の予測が困難であったことによるものであり、計画過程における意志決定の問題と深くかかわる問題であるので別途考察しなければならないが、いずれにしても予測の誤差が大きすぎれば、管理行為によって計画の目標を達成するということが不可能となり、場合によっては逆に被害を招くことにもなりかねないので、予測は十分慎重に行なわねばならない。

通常、計画過程で使用される予測モデルは、事業種別にもよるが、構想や計画案の結果の予測に使われるもので、前述のように環境の予測を目的とした管理段階で使用されるモデルとは異なる。管理段階で使用される予測の手法については、管理段階に入ったら、ただちにその施設（群）の管理行為に最も適した、精度の高いモデルを開発するなり、手法を研究しておくことが望まれる。

予測の手法として、計画過程におけるものは、回帰分析モデル・時系列モデルなどを応用する方法、マルコフ過程によるもの、類推・行動予定の調査に基づいた予測など、幾つかの手法があるが、管理において使用されるモデルは環境予測のモデルで、しかも多目的ダムにおける洪水調節の場合などでは、予測の対象となる環境の変化がすばやいので、予測モデルは環境の変化に見合うだけの短い時間に結果の得られるようなものでなければならない。一般に、時間と精度は補完関係にあるので、環境の変化のすばやさや情報入手の時間がかかるなど、予測に時間がかかる場合は精度を犠牲にする必要が出てくる可能性もあるが、この場合でも、もちろん所要の精度以内でなければならず、それが確保できなければ新しい手法の開発が必要である。

次に、予測の結果を踏まえて、いかなる具体的な措置を行なうかについての意志決定が行なわれるのであるが、計画過程における意志決定は、そのプロジェクトを実施に移すかどうかに踏切るプロセスを意味していた。そのこと自体は、多額の投資を行なうことの可否を決めるの

であるから重要なことであるが、管理段階においては別の意味で重要性は大きい。計画過程においては、施設規模が变量である目的関数を解いて、いかなる施設規模とするかについての意志決定が行なわれるのであるが、管理段階では、すでに施設の規模が固定したいわば資源の量が限られているという条件のもとで、計画の目標をいかに達成するか、対費用効果をいかに最大にするかの問題に対する意志決定を行なうことであると考えられる。

一般に施設の運営は、目的が明確化していれば、運営が計画で定められたルールにそって行なわれるかぎり、期待しただけの効果を生み出すはずである。しかしながら、多目的ダムにより洪水調節なり渇水補給を行なう場合、結末の状況については不可知の状態で運営してゆかなければならぬ点が、きわめて特徴的である。すなわち、計画で定めた洪水調節の基準のハイドログラフなり渇水補給のパターンは再現があり得ない自然現象であるから、計画で定められたルールに基づいた運用を行なっても現在進行しつつある現象・環境が計画で想定した環境をはずれる可能性もあって、その場合には最後に効果を全く期待し得ない状況に追い込まれることになる。たとえば、ダムからの放流量をいかに決めるか、それによってある時点で幾らの調節容量を確保しておくべきか、また渇水の継続している途中の時点で、渇水がいつまで継続するか、補給貯水量はその時点でいくら確保されているべきかなど、管理段階の途中でも、いかに貯水池を操作すべきか、常に最適と思われる運営をしてゆかなければ貯水容量または貯水を全部使いつくしたあと、さらに予想しなかった現象の生起によって、洪水調節や渇水補給の必要性が継続する場合、もっとも肝要の時機になんらの効果を発揮し得ないこととなろう。また、計画の範囲内の環境に対する運用、すなわち洪水調節でも渇水補給でも、操作ルールが計画したとおりの効果を発揮するのに最適であるかどうかについては、検討の余地が残されていると考えられる。いずれにしても、管理段階において不確実性も考慮に含めた環境に対する意志決定の理論として、ゲームの理論の適用が考えられる。通常、ゲームの理論における行動選択のための決定原理としては、ラプラスの原理、マクシミンまたはミニマックス原理、マクシマックス原理、ハーヴィッジの原理、ミニマックス・リグレット原理などがあり、期待利益を最大にするか、後悔マトリックスを最小にするかということを意志決定の基準としている。それらのいずれをとるとても、その原理を適用して運用された場合の長期的効果の測定結果は、計画の目標を上回っていなければならない。したがって、施設の完成をみた場合、その計画の目標を達成するためには、いかなるゲームの理論を適用すべきか、またその原理を適用したときには、どれだけの

効果が、どれだけの危険率で期待できるかなどの検討を管理段階に入る前に行なっておく必要があろう。

(5) 評価

管理において、システムズ・アナリシスにおける評価が計画の場合と異なるのは、モデルの適用によって得られる仮定の結果の評価ではなく、現実の実績に対する評価であるという点である。管理行為が受益予定者の利害に直接関係するものであり、計画で予想した目標を達成するように管理が行なわなければならぬという大原則からすれば、実績の評価が重視されるのは当然である。さて実績の評価とは、実績を計画と比べて効果を測定することであるが、これによって、次の計画や制度・規準などの改訂、すなわち計画責任者の意志決定へのフィードバックが行なわれ、また1単位時間後の管理行為の実績評価においては、管理責任者の実績の評価を通じて、次の管理行為における意志決定を改善するためのフィードバックが行なわれる。前者は管理の実績を次の計画へ反映せしめることであり、後者は図-20に示すように、1単位の管理行為に対する実績評価であるが、対象施設の種別によっては、1単位時間がきわめて長くて单一操作で1管理行為を終了する場合は、実質的には前者と同じく計画へのフィードバックが、管理の改善のためのフィードバックと併列して行なわれることとなる。

実績の評価のためには、計画との差異を何によって比べるか、なんらかの基準（評価基準）が必要である。この評価基準は、計画過程において意志決定用いられた評価基準と全く異質のものであつてはならないが、必ずしも同じものである必要はない。たとえば、評価基準の大きな要素の一つである費用と効果の関係については、計画段階で多くの前提条件を仮定したうえで想定施設の事業費や効果を評価したものであるが、一方、施設の直接管理責任者の入手しうる情報は、前提条件を含まない生のデータ、いわゆる第一次データのみであって、計画において評価した効果が、そのままデータとして入手されることは、まずないといってよい。そして、第二次、第三次と、データ処理を経て実績の効果が評価されるのである。したがって、直接管理責任者がある単位時間の管理行為の実績を評価し、次の単位時間の管理にその反省を反映せしめるためには、管理責任者の入手する第一次データが、計画段階において評価した対費用効果といかかる関係があるのか、あらかじめ考察しておく必要がある。これは図-20における計画の目標と、目的的明確化との関係を明らかにしておく作業に該当する。以上のこととは、不確実性に基づく計画外の環境が生起したとき、この環境に対しいかに管理運用を行なうかの意志決定の原理を検討する際きわめて効果的な役割を果すことにな

ろう。多目的ダムの管理における評価項目と評価基準として考えられる一例を表-3に掲げる。

表-3 多目的ダム管理における評価項目と評価基準の一例

計画の目標	評価項目	一次または二次データによる評価基準
洪水調節	洪水被害軽減額	対流入量放流量比 下流基準地点流量（水位）減少効果
渇水補給	内水被害軽減額 無効放流量の最小化 流況の安定化	単位時間内の対流出総量調整放流量比 任意時刻の対放流量流入量比 単位時間内の最大の調整放流量

(6) 機能の維持

前節までは主として操作を中心とした管理行為について述べてきた。しかしながら、管理とは操作だけがすべてではなく、その対象施設を常時操作可能であるよう整備しておくことも管理の重要な内容である。また、そのほかに人員・組織についても、所与の環境に対応できるよう維持しておかねばならない。しかし、施設の維持補修といい、組織・人員の整備といい、いずれも限られた国の資源を使用するのであるから、その効率的使用が望まれる。したがって、計画過程も含めて、管理段階においては、いわゆる在庫問題なり、取替問題として取扱う必要があろう。

(7) むすび

この小論では、管理におけるシステムズ・アナリシスについて初步的な考え方を述べた。したがって、分野によっては、これよりはるかに研究がすすんでいるところも少なくないと考えられる。とくに、企業的センスに基づく管理を要請される上下水道なり交通施設では、相当すんだ各種の手法が開発されていよう。しかし、一方では、管理段階に入れば効果測定のための費用なり組織すら思うにまかせない分野も少なくないと思われる。とくにダムの場合、それが多目的であれ利水専用であれ、不確実性をも含む予見不可能な自然現象に対する最適な管理行為により計画の目標達成を求められているにもかかわらず、そのための意志決定をいかなる原理によるかいまだ確立されたとはいいにくい現状である。この小論によって、ささやかなりとも読者のご理解をいただき発展させていただければ幸いである。

参考文献

- 1) Chestnut H.・糸川英夫訳：システム工学の方法
- 2) McKean R.N.・建設省 PPBS 研究会訳：システムズ・アナリシスの基礎理論
- 3) 渡辺昭雄：MIS
- 4) 宮川公男：OR 入門
- 5) 河野豊弘：意志決定の分析
- 6) 建設省ダム統合管理技術小委員会：ダム統合管理の理念と研究、I・II.
- 7) Design of Water resource system (The Harvard Water Program, 1962)
(中沢 弘仁)