

(Ⅱ-5)

建設マネジメントにおける シミュレーション技法の利用状況

The Using Situation of Simulation Technique
in Construction Management

計画・管理技法分科会 湯沢 昭*

By Akira YUZAWA

建設マネジメント委員会、計画・管理技法分科会では、建設工事における施工計画・管理の分野において、どのような計画・管理技法が適用可能かを研究目標の1つに挙げている。今回の報告は、同分科会が平成2年6月に刊行した「シミュレーション技法利用状況調査報告書」の結果に基づき、建設業におけるシミュレーション技法の利用実態と問題点について論じたものである。その結果、シミュレーション技法は、建設工事の企画段階から施工に至るまで、幅広く利用されていることが明らかとなった。また、近年EWSやパソコンを対象としたシミュレーション専用言語もしだいに普及してきており、シミュレーションの利用は今後益々増加するものと思われる。

【キーワード】 シミュレーション、建設マネジメント、技法

1. はじめに

建設工事を取り巻く環境は、高度情報化、国際化等過去に例を見ない急速なテンポで変容しつつあり、これらに対応すべき業務の合理化と生産性の向上が強く求められている。そのためには、施工技术の進展は勿論のこと、それを支えるための計画・管理技法の研究が不可欠であることは言うまでもない。建設マネジメント委員会、計画・管理技法分科会では、どのような計画・管理技法が施工計画の分野に適用可能かを探るべく、「土木工事の施工計画支援システムに関する文献調査¹⁾」を実施した。その結果、シミュレーション技法が、他の技法に比較して、適用件数及び対象工事共、一般的な技法として採用されていることが明らかとなった。このような状況を踏まえて、当分科会では、1988年後半から「建設工事への計画・管理技法の適用に関する研究」の一環として、シミュレーション技法を取り上げ、建設マネ

ジメント分野への適用可能性の検討をメインテーマとして研究活動を行ってきた。その研究成果は、「シミュレーション技法利用状況調査報告書²⁾」として1990年6月に刊行した。本論文は、同報告書の研究内容を取りまとめたものであり、建設業におけるシミュレーション技法の利用実態と問題点について報告するものである。

2. シミュレーションの概要

シミュレーションの定義は、対象とする分野やその適用範囲により必ずしも明確なものではないが、本論文では以下のように定義する³⁾。すなわち、実際の物(実物、realistics)の形状や状況変化などの現象(phenomena)の特性を解明することを目的として、模擬表現(model)を用いることにより現象を模倣(simulate)する「モデル実験」の総称で、①実際に行うことが出来ない場合や、②実行するのが非常に高価であったり危険である場合、もしくは③極めて多くの要因が複雑に関連していて数学モデルを

* 東北大学工学部土木工学科 022-222-1800

作ることが困難な場合などによく利用される（図-1）。また、シミュレーションと言う言葉は、狭義には現実の模倣そのものを、広義にはモデル作成をも含めた意味で使われる。なお、シミュレーションの分類、特徴、及びシミュレーション言語の概要については、前述した報告書を参照して頂きたい。

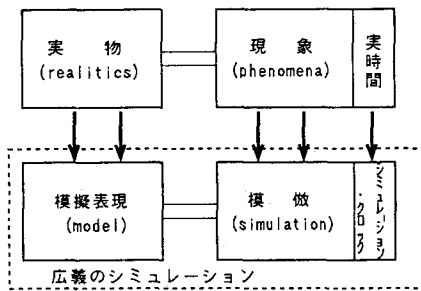


図-1 モデルとシミュレーション³⁾

3. シミュレーション・システムの開発手順

シミュレーション・システムの開発手順は、一般のシステム開発手順における問題の明確化、目的の設定、関連データの収集・分析と類似しており、最適な開発手順を明確にすることは困難である。図-2にシミュレーション・システム開発の一般的な手順を示す。

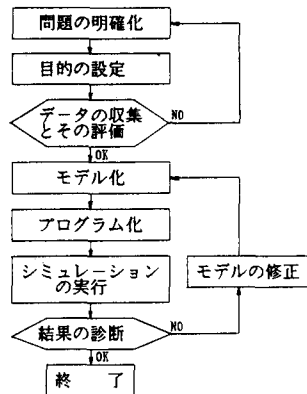


図-2 シミュレーション・システムの開発手順

(1) 問題の明確化

システムの挙動を表現する要素を十分認識し、シミュレーションで解決しなければならない問題を具体的に記述することが重要である。すなわち、代替案が列挙できるレベルまで問題をブレークダウンして記述する必要がある。

(2) 目的の設定

シミュレートすべき対象となるシステムの範囲及びそのシステムのどのような機能をシミュレートし、

分析資料としてどのようにアウトプットすれば問題解決に役立つかということを具体的に設定しなければならない。なお、シミュレーションは最適化の手法ではないため、最適解を求めることはできず、満足解が得られれば十分と判断しなければならない場合がある。このことから目的設定の段階で、アウトプットの評価の基準についても検討し、明確にしておかなければ解を求めるために時間を浪費することになる。

(3) データの収集とその評価

システムの範囲及び機能等が確立されると、そのシミュレーション・モデルを設定するために、対象システムに関連するデータの収集が必要とされる。この場合、システムの外部要因におけるシステムへの影響、システム内部で発生するデータ、及び内部要因による外部への影響について、全て調査することが必要である。次に収集するデータは、単に資料として存在する機械の性能表等のデータと、現状のシステムについて計測等観測を行って収集すべきデータに大別されるが、後者については、平均・分散・相関係数を求めたり、要因分析を行うなど種々の統計的方法を活用し、得られたデータ間の関係を前もって評価しておく必要がある。

(4) モデル化

対象となるシステムによってモデル化の方法は千差万別であり、モデル化の理論は研究され始めた段階と考えられる。しかし、一般的なモデル化の考え方として、以下のことが挙げられる。①システムの構成要素の選択とその構成要素間の相互関連を明確にする。②システムの各構成要素の変動する状態を明確にする。③各要素（外部の要素も含む）の機能や変動のルールやその基準値を設定する。

(5) プログラム化

この段階では、作成したモデルのコンピュータ・シミュレーションに最も適しており、効率良く、かつ安価にプログラム化できる言語を検討・選択しなければならない。さらに、シミュレーション・モデル自体の評価を行っておく必要であるが、チェックポイントとしては、論理構成の妥当性の検討（アウ

トアウトにおける異常値のチェック)、及び各要因の特性値の妥当性の検討(実際の計測値との比較であり、特に確率分布が近似しているかどうかのチェック)が挙げられる。

(6) シミュレーションの実行

一般的にはシミュレーションを長時間かつ、多数行えば精度は向上するものの、時間及び費用を浪費することになる。したがって、実験計画法あるいは感度分析等を用いて最小限の実行回数で所要の結果を得るシミュレーション実行方法を検証する必要がある。

(7) 結果の診断

個々のシミュレーションによって得られた結果は、分析対象のシステムに対してある状況を想定した一つの結果であり、かつモンテカルロ・シミュレーションの場合には、乱数の影響によって結果が異なることに留意する必要がある。したがって、満足解の基準に合致した結果が得られたとしても、可能性があると考えられるパラメータやルールの変更を行い、それらの影響に対しても分析する必要がある。また、シミュレーションの結果については、数値では明確な診断が難しい面もあり、アニメーション等ビジュアルな表現が診断にとっては有効な場合もある。

4. 建設業におけるシミュレーション利用の必要性

建設業では、様々な分野でシミュレーションが利用され、またその適用範囲も益々拡大している。コンピュータによるシミュレーション結果の表現は、当初は単に数字の羅列にすぎなかった。昭和45年ごろからX-Yプロッタが大型コンピュータに導入されると、そのプロッタを利用して結果や図をグラフにより表示することが行われるようになった。さらにここ数年コンピュータの高速化とコンピュータ・グラフィックの発展により、計算の一時点の結果だけでなく、時間の流れにそった各時点の結果を連続出力することが容易となり、それを基にコンピュータ・アニメーションを作成することも多くなってきた。最近では、施工の面で建設機械の制御に対してシミュレーションが使われている。その代表的な例

が、ファジィ理論と組み合わせたシールド工事における掘削機の方角制御である。このように建設業においては、コンピュータの発展と共にシミュレーションの利用形態も変化してきている。

次に建設生産のプロセスは、企画、設計、施工、及び維持管理に分けられ、この各プロセスにおいて、上流ではよりマクロ的な、下流ではよりミクロ的な検討が必要とされる。このような各プロセスにおいて、本物では試すことのできないような状況をコンピュータ上に作り出し、模擬実験や解析を行うコンピュータ・シミュレーションが最近増加している。

(1) 企画プロセスにおけるシミュレーション

ダムや橋梁の建設及び敷地の造成工事では、特に周辺の環境または景観に与える影響について非常に高いレベルのシミュレーション技術が駆使されるようになってきている。また港湾や海岸等に構築される構造物では、それを構築することにより海流にどのような影響が生じるか、水質への影響は、といった環境シミュレーションによる事前評価(環境アセスメント)の需要が益々増加している。このような事前評価での利用は、単に専門家への説明用資料の作成に止らず、地域住民や一般の人達の理解を深めるため、アニメーション技術やコンピュータ・グラフィックを利用した表示方法も最近は多く採用されてきている。

(2) 設計プロセスにおけるシミュレーション

設計のプロセスでは、地震や強風に構造物が耐えられるかといった静的な構造計算の他、地震や台風のような強風の影響により構造物がどのように揺れるか、といった動的な問題では、時間の推移と共に計算を何度も繰り返す必要がある。このような問題の解析にはコンピュータによるシミュレーションが使われる。またその結果を解析することにより、構造物の揺れを押さえる免震構法や制震構法が考え出され、これらは今や実用化の段階にきている。

(3) 施工プロセスにおけるシミュレーション

施工上に生じる各種の問題、工事の難易度、工事安全性の事前検討でシミュレーションは重要な役割を担っている。たとえば、土木工事の代表例である

敷地の造成工事やダム工事では大量の土砂や岩石が必要となる。これらの運搬には多数の建設工事車両が使われるが、これらの種類や台数の決定には、数理計画法による分析のほか、シミュレーションによる検討を行う例が多い。また、コンクリート・ダムの建設においてコンクリートを打設する順序は、一度で打設できる高さやコンクリートの量、及び打設する機械の能力によって様々であり、一意的には決定できない。そのため、所与の条件の中で打設できる最適な順序をシミュレーションにより決定し、全体の工程を立案する。

このように建設工事の企画から維持管理に至るまで、シミュレーション技法は幅広く採用されている。現在、建設各社で開発・運用されているシミュレーション・システムの一部を前述した報告書に一覧として掲載してあるので、参考にして頂ければ幸いです。

(4) シミュレーション技法の問題点

シミュレーション技法は、建設業において広範囲

に適用されており、万能薬的な印象を受ける。しかし、これらの技術も未だ利用面で多くの問題点が残されており、今後改善されなければならない点も多々ある。特にモデルの作成に当たっては、高度の専門知識を必要とし、誰でもが簡単に出来るといったものでもない。現在、様々なシミュレーション言語やシステムが開発され、モデル化も若干やり易くなったとはいえ、実際に施工計画を立案している担当者が行おうとしても無理と言わざるを得ない。そのためシステム分析を行える人は限定され、勢いその人に業務が集中してしまう。また、同じ人がシミュレーション分析を担当することが重なるため、モデル化の方法が同じになってしまったり、その人が得意とする手法に頼らざるを得ないと言ったことも生じる。また、シミュレーションでは、ある特定の業務を対象に処理を行うため、一般性のあるソフトウェアが作り難く、個別対応にならざるを得ないと言った問題もある。土木工事で比較的汎用性のあるシミュレーション・ソフトとしては、リフトスケジュー

ール計画、車両の運行計画、土量の配分計画等が建設各社で良く使われている程度である。

5. 建設業におけるシミュレーション技法の利用実態

(1) 調査の概要

計画・管理技法分科会では、シミュレーション技法が現在までに施工分野においてどのように利用されてきたかその利用状況についての調査を実施した。調査は、過去に何等かの形でコンピュータを利用したシミュレーションを対象とし、シミュレーション技法の利用状況に関する調査と、シミュレーション技法を用いて開発した個々のシステムの内容に関する調査とに分けて実施した。なお、ここで調査対象としたシミュレーションとは、建設工事の施工段階だけでなく、建設プロジェクト

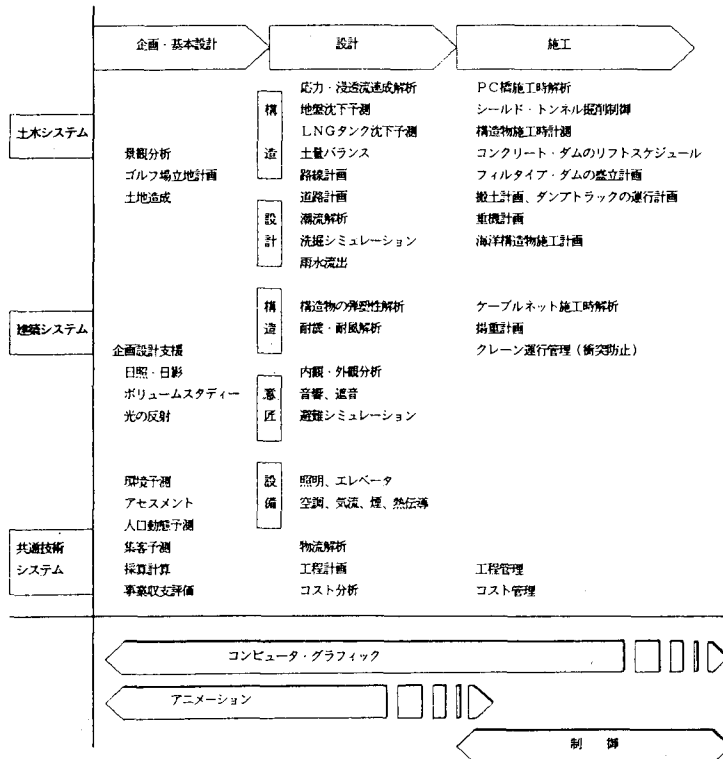


図-3 建設業におけるシミュレーションの利用

トの企画段階における経済分析や需要予測のためのシミュレーションまで幅広く含めることとした。また、シミュレーション・モデルのプログラミングについても、FORTRAN、BASIC等の汎用言語からGPSSやSLAMⅡのような専用言語までを対象とした。

(2) 調査の内容及び調査方法

①シミュレーション技法利用状況に関する調査

- ・技法利用の動機、問題点
- ・使用ツールの問題点と要望事項
- ・検証、適合度、今後の見通し、活用の方向づけ

②シミュレーション技法開発事例に関する調査

- ・個別システムに対して、概要、使用ソフト、
- ・使用ハード、モデル表現、入力データの方法、
- ・統計的手法、アニメーション、開発体制、
- ・開発・利用状況、利用対象者、サポート体制、
- ・総合評価等

③市販シミュレーション言語に関する調査

- ・言語の開発／販売先、適用機種、
- ・システム構成、言語の概要、機能、特徴、
- ・支援体制、販売価格、実績等

④調査の方法

- ・調査対象：計画・管理技法分科会のメンバー組織（2大学、12社）
- ・調査期間 平成元年6月～10月

(3) シミュレーション・システム利用状況に関する調査結果

シミュレーション技法利用の動機を5つの選択肢に対する順位付けとして質問を行った（図-4）。図-4より、利用動機の一位は、“工事計画の策定段階で必要とする解析”であり、次に“顧客側の要求・説得”と続いており、この2つの理由が利用動機の全体の90%を占めている。このことは、工事の策定段階においては、事象が複雑に絡みあっており、シミュレーション技法が最も有効な手段の一つであることを示している。また、建設業の特殊性により実物大の実験で代替案を比較検討することが困難であることから、顧客の要求・説得にはシミュレーションが有効的に利用されていることが分かる。

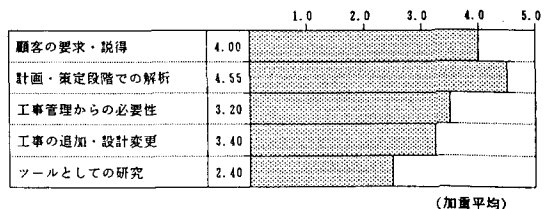


図-4 シミュレーション技法利用の動機

シミュレーション・モデルを構築するに当たっての問題点としては、回答者の7割程度が、“事象の動きの把握”、全体のモデルの組み立て方”、“入力パラメータの決定”といった初期段階の問題点を挙げている（図-5参照）。また、シミュレーションの利用は、熟知している人が担当しているためか、プログラミング、入力分布の決定、ランタイムの決定等は、特に問題点として捉えられていないことが分かる。

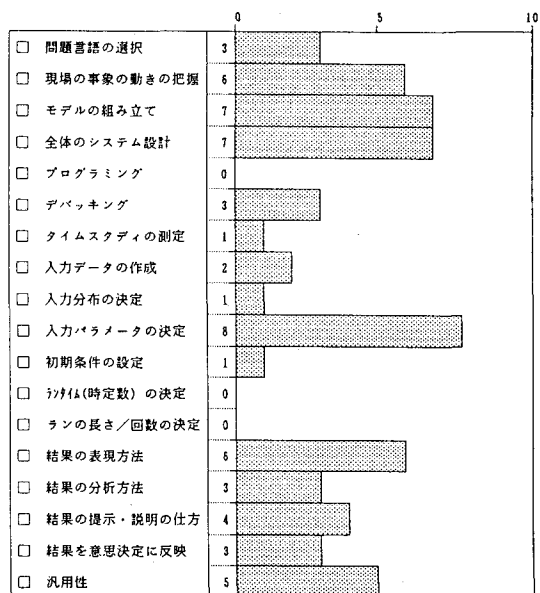


図-5 シミュレーション・モデルを構築するときの問題点

また、要望事項としては、従前のような静止画として捉えるプロット機能よりも、現在では、グラフィックやアニメーションなど動画機能が望まれている。また、ハードの利用環境もホスト系からミニコン、パソコン系への利用が多くなったことより、マンマシンインターフェースや価格などは問題となっていない。

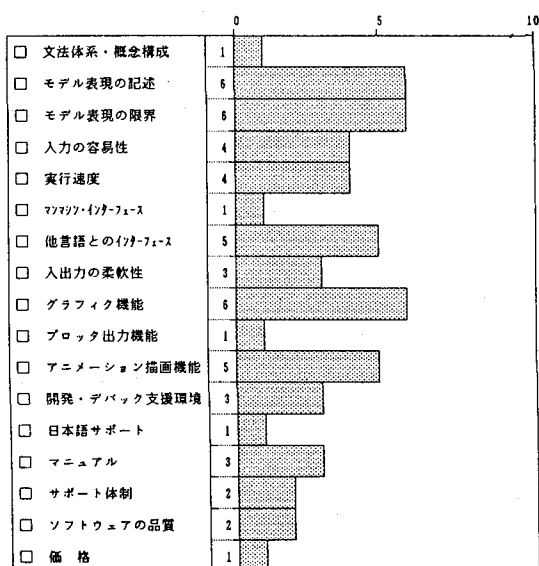


図-6 モデル構築のための問題点や要望事項

シミュレーション・モデルが作成者の意図通りに動いているかどうかの検証は、図-7に示すようにテストデータの結果を“手計算で確認”、“解析結果より確認”、“アニメーション結果より確認”など、利用者によって様々な確認方法が取られている。



図-7 シミュレーションモデルの確認方法

次に、シミュレーション結果と実際のシステムの動きとの比較は、全体の80%は概略比較にとどまっており、実際のシステムの動きのフォローまでは、あまりなされていないことが分かる。

シミュレーション技法の今後の見とおしについては、個々のプロジェクトへの個別対応にならざるを得ないが、今後も限定的な範囲で利用がなされると思われる。事実、回答者の8割は限定的もしくは技法の考え方も含め、前向きにシミュレーションの利用を考えており、解析のモデル化が困難な場合の利用、プレゼンテーションの利用等、幅広い活用が期

待される。

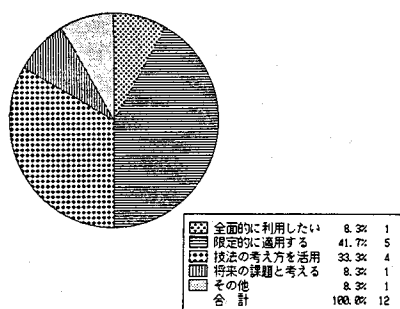


図-8 土木分野の今後のシミュレーション技法の活用

(4) シミュレーション・システム開発事例に関する調査結果

各建設会社が、独自に開発したシステムの一覧は、前述した報告書を参照して頂くとして、本論文ではその概略について報告する。まず初めに、各社がシミュレーション・システムを開発またはシミュレーション技法を組み込んだ市販ソフトを業務に適用した時期の推移を図-9にまとめた。今回の調査では、シミュレーション技法が土木の分野に適用されたのは1973年が最初であり、本格的な導入が開始されたのは、1970年代後半と考えられる。これは建設業界がコンピュータを利用した科学的な技法を積極的に導入し、実務に取り込もうとした時期と一致している。以後、現在までに毎年数件の導入が進み、シミュレーション技法が建設工事の計画・管理技法として着実に定着していることが分かる。

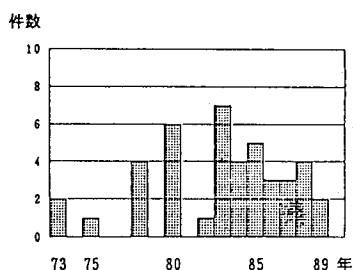


図-9 開発導入時期の推移

次にシミュレーション技法の適用分野について整理したのが、表-1である。表-1は、縦軸に適用分野を、横軸に適用プロセスを3段階に分けて整理したものである。有効回答数44件の内、純粋な土木分野の事例は24件と全体の54.5%であった。こ

れを工種別に見ると、ダム工事と港湾関連工事が各々9件と土木分野の75%を占め、シミュレーション技法の適用が特定の工種に偏っているのがわかる。土木以外の適用例は建設プロジェクト全般にわたるものと、建築、産業施設の3つに分類集計した。産業施設での適用件数が多いのは、エンジニアリング会社の回答に起因しており、この分野でシミュレーション技法が有効的に活用されていることを示している。

表-1 シミュレーションの分野別利用状況

プロセス		企画	設計	施工	計
適用分野					
全用途		2			2
土木	トンネル			1	1
	地下発電所				
	シールド				
	地下鉄・地下線			1	1
	橋梁				
	河川				
	上下水道				
	橋梁				
	土地造成			1	1
	鉄道・道路土工				
	ダム			9	9
建築	水力発電所				
	港湾・揚子物	3	3	3	9
	空港				
	その他(運行)		2	1	3
小計		3	5	16	24
建築		1	5		6
産業施設		1	1		2
合計		7	21	16	44

コンピュータ・シミュレーションに利用されている言語としては、図-10に示すようにFORTRANによる開発ケースが最も多い。この理由として考えられるのは、既存ソフトとのインターフェース開発の手間がかからない点や日頃なじみ深い言語であるという点が推察できる。したがって、使用ハードウェアとしては、その75%以上が大型の汎用コンピュータを採用している。また、現状では、専用シミュレーション言語でシステム化を計るのは、かなりのノウハウを必要とする場合が多く、これらが専用言語の利用件数を低下させている一因でもある。しかし、EWSやパソコンの機能の進展と専用言語の普及を考えると、今後は今まで以上にEWS、パソコンを用いたシミュレーションが増加するものと思われる。

シミュレーション・システムを作成する上で、どのような統計的手法が適用されているかを示したの

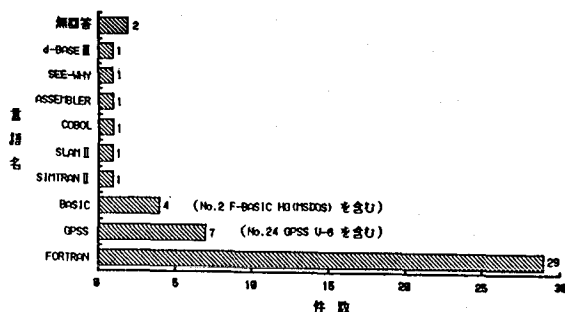


図-10 シミュレーション使用ソフト

が図-11である。本調査結果では、無回答のものが半数以上あり、傾向を把握するのは困難であるが、中でも確率理論を用いたシミュレーション・モデルが多い点が注目される。これは、工事の工程や現象が定量的に把握できない分野への利用が特に多いためと考えると、これらの分野への応用が有効であることを示している。

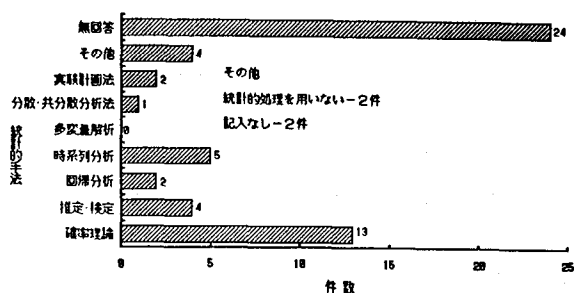


図-11 シミュレーションに利用している統計手法

前述したように、シミュレーション結果の確認には、アニメーション技法が有効であることを指摘した。今後の動向を探る意味からも実務での普及度合いを聞いたところ、その適用例は16件と全体の36.4%であった。これら的大半は、画面にグラフィック機能を用いて表示しており、その内、自社開発が10件と、モデルに合わせて独自に開発している傾向がうかがえる。一方、市販シミュレーションを利用し、その付属機能でアニメーションを作成しているケースも4件あり、今後このケースの増加も予想される。

シミュレーション技法を開発している主導部門は、システム部門が16件、施工計画部門が11件、プロジェクト方式が12件となった(図-12参照)。各社のシステム部門の政策によって開発体制の主導部門が

決まる場合もあると思われるが、市販ソフトが問題向き言語を指向しており、技法を熟知したユーザーが容易に市販ソフトを使って、施工計画部門独自に開発できる環境になっていることが調査の結果からも読み取れる。

次に、利用者の所属を見ると、最も多いのが施工計画部門の 61.6%、続いて現業部門の 31.8%となっている。逆にシステム部門での利用は以外と少なく、22.7%であった。

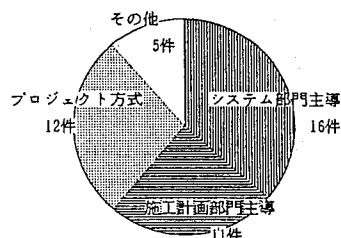


図-12 システム開発体制

最後にシミュレーション技法を開発または導入しての評価は以下ようになった。すなわち、十分に実用性があるとした回答が全体の 59.1%、ある程度実用性があるとした回答が 40.9%となり、前者と合わせて全回答者が実用性があると判断している。このように土木分野における実用的な計画・管理技法としてシミュレーション技法は高く評価されているものと思われる。

(5) 調査結果に関する考察

建設業におけるシミュレーション技法の利用形態として最も多かったのが「工事計画策定段階での解析」と「顧客側の要求、説得」であり、工事管理や工事の追加、変更における利用は、現段階ではそれほど多くない結果となった。それは建設工事が一般的に不確定要素が非常に多く、種々の条件を予めシステムに組み込むことが困難であることに起因する。これはまたシミュレーション言語にも問題があると思われる。つまり、GPSSやDYNAMO等のシミュレーション専用言語は、汎用計算機を対象として開発されてきたため、その利用が限定されていたことと、モデル作成時における専用言語の理解がシステム開発に当たっての大きな制約となっていた。しかし、EWSやパソコン対応のシミュレーション

言語の普及や、グラフィック、アニメーションといった機能を利用することにより、データの入力、結果の出力が容易となり、建設業におけるシミュレーション技法の利用は、今まで以上に進むものと思われる。

6. まとめ

建設プロジェクトを調査・企画し、設計、施工、維持管理するといった一連のプロセスにおいては、何等かの意思決定を伴う業務が多い。特に建設工事が近年ますます複雑化・大規模化しつつあることを考えると、施工計画の立案から日々の施工管理までの複雑な業務を合理的に遂行していくためには、科学的・客観的な評価基準に基づく意思決定システムを開発しなければならない。そのためには、当該プロジェクトの施工計画ならびに施工管理のプロセス全体もしくはその一部のシステム化が必要不可欠となり、コンピュータ利用を前提とするシステム技法の導入が必要となってくる。

本研究は、各種システム技法の中でも、特に汎用性に優れ、また利用実績も多いシミュレーション技法に着目し、今後の益々の利用拡大を前提として、計画・管理技法分科会が2年間にわたり調査研究してきた成果を取りまとめたものである。その成果は前述したように報告書としてすでにまとめてあるので、さらに詳細な点に興味のある方は、参照していただければ幸いである。

最後に今回の調査を進めるに際しては、アンケート調査や資料提供に御配慮頂いた関係各位に心より謝意を表します。また本論文をまとめるに当たっては、名古屋工業大学山本幸司先生を始めとして、計画・管理技法分科会の委員の皆様方には多大なるご協力を得た。ここに重ねてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 施工計画支援システムに関する文献調査報告書
建設マネジメント委員会、計画・管理技法分科会1988.6
- 2) シミュレーション技法利用状況調査報告書
建設マネジメント委員会、計画・管理技法分科会1990.6
- 3) 中西俊男：シミュレーションの発想、講談社1989