

OR手法の現状と展望

鈴木 誠 道*
島田 俊 郎**

プログラムにあるように、八つの分野について各分野における理論・応用の現状や問題点が報告された。おのおの1時間半のセッションで、40～50分講演者が報告を行なったのち、あらかじめ決められていた3～4人の討論者が5～10分ずつコメントを行ない、フロアからも意見が出され、最後に報告者がそれに答えながら締め括りをするという格好で進行した。

とくに印象に残った報告としては、Ansoff と Hayes による“Role of Models in Corporate Programming”と Naylor による“Simulation and Validation”とがあった。前者は企業プランニングにおける従来の経営科学者の問題の取り組み方を批判し、新しい改善の動向を述べたものである。後者は現在盛んに行なわれているシミュレーションに関して見過ごされがちなモデルの妥当性のチェック、実験計画および結果の分析について論じたものである。両者とも時宜を得たすぐれた報告であった。

講演者により、自分の思想を展開したものの、最近までの一連の研究を網羅的にレビューしたもの等取扱い方はさまざまであった。ここに紹介するのはそのうちの六つの報告である。執筆者が出席できなかったり、予稿を入手できなかったものは割愛させていただいた。なお、執筆者の専門外の報告もあり、思い違い、用語の不適切等不備な点が多々あるであろうことをお断わり申し上げる。

Information Systems for Decision and Control

H. Wedekind

1. はじめに

ここ数年の間に“情報システムの開発”という新

しい研究分野が確立され、欧米では多くの大学で大学院の課程が設けられるまでに至っている。しかし、初期の頃は、実現性を度外視した多種多様な概念的な意思決定システムや管理システムの提示や、単なるケース・スタディを取り扱った研究が多かった。これらに対する反省から生まれたのがここに述べるシステム開発的なアプローチである。このアプローチの各段階はライフ・サイクルと呼ばれる。基本的なライフ・サイクルはシステム分析、システム設計、システム建設およびシステム運用である。

現状では奇妙なことに、他の工学的設計の分野にくらべて、情報システムにおける設計のやり方はかなりおけている。ハードウェアやシステム・ソフトウェアが急速に発達してきたため、経済的に引き合う応用分野が拡大され、応用ソフトウェアに対するニーズは高まっている。しかも、これら応用ソフトウェアの開発をすべてマニュアルに行なうことは不可能であり、設計言語や設計アルゴリズムの開発が国家の科学・技術プロジェクトの一環としてとり上げられるべきだという説をなす人もあるくらいである。ORは、このシステム設計の段階の多くの場面に有用な手法を提供する。

2. 情報システム開発の方法

システム開発の方法には、大別して二つある。一つは外から内へのアプローチであり、他の一つは内から外へのアプローチである。外から内へのアプローチは、システムの外部条件(environment)から出発して次々に仕様を決めていくやり方である。システムが何を行なうべきかという問題がまず決められ、次にその仕様をいかに充足させるかという問題が考えられる。これに反し、内から外へのアプローチでは、システムの建設が可能になるように外部条件を規定するのである。外から内へのアプローチでは仕様が野心的すぎて実現できないという危険がある

* 日本国有鉄道鉄道技術研究所。

** 明治大学商学部。

が、一方内から外への方法に従うと、開発されたシステムが役に立たないものになるかもしれない。

情報システムの開発における主要なライフ・サイクルは、

- a. 現行システムのシステム分析
- b. 妥当性の検討
- c. 論理設計
- d. 実用設計または建設 (implementation)
- e. システムの運用

である。これらの段階の順序は、外から内へのアプローチにおける順序と一致している。

3. システム分析

情報システムの建設に関するシステム分析は次の4段階より成る。

- a. システムの適用範囲
- b. システムの調査
- c. システムの記述
- d. 事実分析

システムの適用範囲では、コンピュータ化に適切な範囲を見いだす。この出発点は新しいシステムに対するニーズである。あまり大きなシステムを意図して実現不能に陥らないようにしなければならない。小さなシステムにして、拡大可能にしておくのがよい。

システムの調査とは、現行システムの現実像を得ることである。これには、面接、アンケート、観察、推測等が用いられる。とくに情報の流れの四つの基本要素を調べなければならない。それは、①出力、②入力、③アルゴリズム、④参照・管理ファイルである。システム分析は出力志向的であるから、まず出力から始め、その出力を得るのにどんな入力、アルゴリズム、ファイルが必要かを見いだすこととなる。

情報システムの記述には特別な言語または記法を要する。自然言語やフローチャート以外にもデジション・テーブル等システムを簡潔に表現する表の類が必要となる。

システムの調査によって、新しいシステムの開発に無関係な事項が見いだされる。事実分析では、関連、無関連の別を明らかにする。

4. 妥当性の検討

この段階では、経済的、技術的、運用上の観点から、システムが妥当かどうかの問題に答える。これは、システムの目的の設定、予備設計、新システムの妥当性のチェックから成る。

5. 論理設計

ここ数年、情報システムの開発に関する文献では、論理設計と実物設計を明確に区別することの必要性が強調されている。GDBM (Generalized Data Base Management) の開発は、システムの設計者がコンピュータのハードウェアに深くかかわらなければならないような負担を取り除いてくれる。これは論理設計と実物設計の区別の効用の例である。

システムの出力や入力の構成以外に、情報システムの論理設計では次の事項を取り扱う。

- a. アルゴリズムの設計
- b. ファイルの設計

アルゴリズムの設計はORワーカーの得意とするところである。意思決定のための提案を作り出すアルゴリズムは、単なる管理のためのアルゴリズムより複雑である。従来の企業の場面では、ファイルが複雑で意思決定は簡単であったが、意思決定と管理のための情報システムでは、アルゴリズム、ファイルとも複雑となる。アルゴリズムの論理設計では収束性、有限性、くり返しサイクルの決定、選択規則等を取り扱い、実物設計では、データの格納や分割等の問題を解く。整数計画法は予想外に悪い実際結果を与えるすぐれた論理設計の好例である。

ファイル設計はORワーカーが必ずしもよく知っている分野ではない。過去数年間に、ORの方法がファイル構成の論理および実物設計に用いることができることが明らかになった。今日でも、粗い推定、簡単な計算、シミュレーション等が用いられているが、これでは不十分なのである。

ファイル構成の論理設計は、データの記録密度、検索速度、ファイル・メンテナンスの難易の間の最良の妥協点を見いだすことである。ファイル設計の一般問題は、ファイル・アクセスおよびファイル・メンテナンスに関する統計とそのファイルの記憶スペースが与えられたとき、検索とメンテナンス時間が最小になるようにデータベース内のファイル構成を見いだすことである。この問題は解かれていないが、システム設計においては重要な問題であり、良い解法が切望される。

6. 実物設計

システムの実物設計の決定は建設と呼ばれる。論理設計の結果、論理図、情報流れ図、論理ファイルのレイアウト等が得られるが、実物設計ではプログラム言語の選択、機器の選択、アルゴリズムのプログラミング、ファイルの創成、部分およびシステム・

テスト等が行なわれる。ORの技法（整数計画法）をコンピュータ機器の選択に用いようという試みはあるが、実用化されていない。しかし待行列理論やシミュレーションは、入出力機器のバランスのとれた構成を見いだすのに広く用いられている。全コンピュータ・システムを一つの待ち行列にモデル化する試みもなされている。

7. システムの運用

システムの運用は、性能測定、コンピュータのジョブ・スケジューリング、使用優先度の管理、記録、システムの保守、システム・プログラムの管理などを扱う。

8. 教育

ACMの経営に対するコンピュータ教育カリキュラム委員会は、企業における情報システムに必要な事項について報告書を提出した。それには、複雑な情報システムの開発者に対する大学院教育のカリキュラムが示されている。

Administrative information system

- A 1. Introduction to systems
- A 2. Management decision system
- A 3. Information management for decision system

Basic concept for system development

- B 1. Computers and computer programming
- B 2. Operations analysis (Operations research)
- B 3. Human and organizational behavior
- B 4. Social implication of information technology

Computer technology

- C 1. Information structure
- C 2. Computer systems
- C 3. File and communication system
- C 4. Program design

Development of information system

- D 1. Information system analysis
- D 2. Information system design
- D 3. System development projects

Planning under Uncertainty

D. B. Hertz

1. はじめに

プランニングという活動は古来から人類が行なってきたものである。したがって、いくら近代的な手法を用いても、従来のやり方を飛躍的に改善する

ことはできないという見方もある。一面ではこれは真理であるが、かなりの改善の余地があることもまた事実である。そのためには、必ず不確定性の下での意思決定という問題に直面しなければならない。

2. 不確定性の導入—PERT と CPM

プランニングを組織的に行なう技法として、PERTやCPMが開発されている。PERTでは不確定性は作業の継続時間だけに導入され、作業の存在そのものの不確定性は考えていなかった。最近では存在の不確定を考慮した複雑な論理関係を表わすネットワーク・モデル GERT が考えられている。

3. 柔軟性と適応的プランニング

柔軟性と適応性は、不確定性の下でのプランニングにとって重要である。柔軟性とは、計画の前提が誤りだったと判明したとき、行動を変えることによって結果を調整する能力であり、適応性とは、状況が予期したように展開しなかったとき、入力を小刻みに変える能力である。柔軟性を得るためには、資源を有効に使用して余裕を残しておくことが肝要であり、そのために最適資源配分の手法が用いられる。Ackoff は、単なる最適化よりさらに適応的プランニングに進むべきだとしている。適応的プランニングを行なうためには、個人および集団の価値観や行動様式を把握しなければならない。そのために、シミュレーションが用いられる。

4. プランニングの微妙さ

プランニングをうまく行なうためには、目的とそれを実現する手段、アイデアとアクション、人間と物、社会とその環境との微妙な兼合いを考えなければならない。したがって、プランニングはイマジネーションの産物にはかならない。

重要な問題は、第一にはある決定を下したとき、将来起こるであろう事象の生起の可能性であり、第二にはどの結果のほうが好ましいかという評価、最後には最終結果の期待値を最大にするための手段である。

5. 現実の経済的な意思決定における不確定性

Von Neumann と Morgenstern の研究以前には、不確定性やリスクが企業のプランナーにとって主要な問題であることを指摘した論文はほとんどなかった。しかし、企業や政府では、それ以前から未知の未来にうまく対処し、不確定性に適応することが行なわれていた。在庫管理、品質管理、予防保全、保険、ヘッジング等がその常套手段であった。

比較的最近開発された分野としては、研究開発と

不確定性の下での資源配分の問題がある。研究開発では、人的物的資源投入のタイミングやレベルの変動によって開発の成否や開発の効果が変動するモデルや、一つのプロジェクトに対して、二つ以上のチームが併行に開発を進めながら、不確定性の減少とともに、それを一つに絞っていくアプローチなどが試みられている。

6. 確率と経済学の思想

不確定性の存在は、経済学においてかなり以前から認識されていたが、それが経済学の理論体系に組み入れられ、実質的な研究が進められたのはここ20年間のことである。Von Neumann と Morgenstern の研究は、不確定性の下における個人および集団の効用関数や行動の理論についての広汎な研究を誘発した。均衡理論、投資分散、リスクのバランシング、逐次投資選択などは、OR のモデルとかなり深い関連を有するようになっている。

7. 確率論的経済学と行動

現実の意思決定者の世界においては、主要な選択は、各人がおのおのの選好規準で行動している個人によってなされる選択の結果として、グループが行なう。グループとしての合理的な意思決定を行なうことは困難な問題であり、共通の効用関数を求める満足な方法は存在しない。

不確定性の下での意思決定の分析の最終結果は確率分布の推定に依存する。そこで、主要変数の主観確率を求める多くの方法が提案されている。技術予測などに用いられているデルファイ法はその一つである。

8. プランニングと意思決定

プランニングは意思決定の一部である。プランが意思決定を求め、その意思決定がプランを求めるといふ意思決定の階層がある。各人の仕事には必ずプランニングがあり、それは不確定性をともなう。

Ansoff らは、環境を連続的にモニタして計画と実際とのギャップを検出し、プランによってそれを埋める方式を考えている。これは、不確定性をあらわに取り扱っていないが、不確定性に対する効果的な対応法になっている。

9. 完全なプランナー

OR ワーカーや経営学者が投資計画、保険、在庫管理、品質管理、研究開発、購売、競売、投資分散など経営者が不確定性に直面している分野における意思決定モデルを作ろうとしている試みや例から問題をとり上げて、各分野の学者が不確定性にまつ

わる問題に取り組んでおり、着々成果をあげている。これらの成果を織り成してモデルを作ることが、公共団体や企業のプランナーの仕事でありまた目標であろう。これらの活動は、多くのアイデアを統一的に組み合わせて不確定性を扱う手段として制御理論にまさる計画モデルの開発を促進し、経営者に代替結果や将来像を提示することを可能にしている。とくに、公共団体および企業における投資計画やプロジェクトの選択は精緻になっている。

10. 結論

公共団体や企業のプランナーが行なう計画や意思決定は、必ず不確定性や予期しない事象の影響を受ける。従来の決定論的経済理論や意思決定分析は、うまくいかない。そこで、プランナーは起こりうる可能な状況を念頭に置いて、それらの状況に耐えうるような計画をたてるか、最初から不確定性を容認して、(i) その不確定性の下での最適性をめざすか、(ii) 一定の悪条件にも対応できるように柔軟性や適応性を持たすか、(iii) 未来の不測事に備えて効果的な保険を掛けるかによって、ベイズ流のプランをたてるかのいずれかを選択することになる。

Roles of Models in Corporate Decision Making

H. I. Ansoff and R. L. Hayes

1. はじめに

企業のプランニングを、将来に備えての意思決定という広範囲の問題と解釈すると、在庫管理なども一つのプランニングになるが、ここでは将来事象の予測に基づいて、意思決定を行なったり行動計画を提案するための全社的な社会・政治的な動的過程であるとしよう。

実務家であるプランナーは全体システムの問題に関与し、経営学者は部分問題を取り扱ってきた。プランナーの関心事はモデルを構築することよりはそれを適用することであり、したがって作られたモデルは、多くの場合原始的なものであった。一方経営学者は、適用性よりはモデルの質を重視してより巧妙なモデルを作ることに専念してきた。その結果、ごく最近まで、上に述べたようなプランニングに経営学者はあまり興味を示さなかった。プランナーと経営学者間にはギャップがあり、お互いに意志の疎通を欠いていた。しかし、最近になって両者の間に相互理解が生まれてきた。

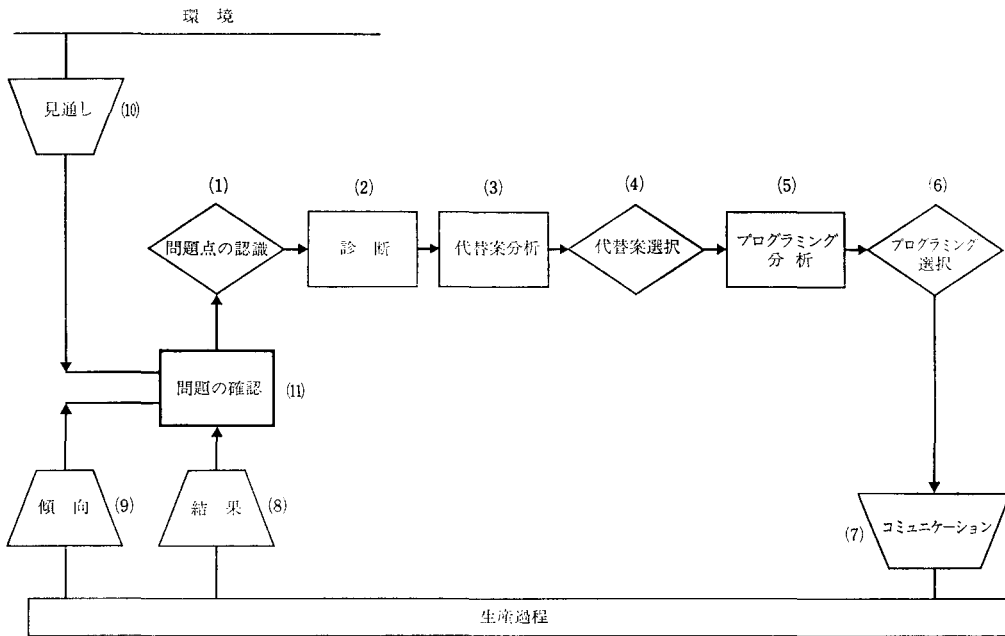


図1 経営管理サイクル

2. 意思決定過程のモデル化

経営科学者の仕事は、企業内の他の部門で認識され、問題点がある程度明確になっている問題に対してモデルを作ることに限られている場合が多い。しかし実際意思決定の世界では、このようないき方では間口が狭い。まず問題の認識が行なわれなければならないし、得られた解を実施することも重要である。したがって、意思決定過程のモデル化においては、あらゆる種類の意思決定を含むようにしなければならない。その一つのモデルとして11段階の問題解決段階を含む過程を図1に示す。

企業においては今世紀初頭から試行錯誤の結果、それぞれに意思決定システムを開発し、成文化している。図に示したものと類似のものも、やや趣を異にするものもある。しかし共通するところは、予測力と精妙さに欠ける点である。

1950年代の中頃から意思決定に対する複雑なシステムの重要性が増大してきた。自動制御系設計理論、数理制御理論、情報科学等複雑な決定システムの設計に関連する技術の応用が試みられてきたが、見るべき成果に乏しかった。その理由の一つは、経営科学者が経営のトップレベルに受け容れられなかったことである。

モデルを適用する場合には二つの立場がある。一

つは将来の行動を提案するモデル作成者の立場であり、他の一つは提案からその一つを選択し、実行する経営者の立場である。経営者はもとより企業の業績を第一に考え、それに直結する結果を得ようとしている。経営科学者は、どちらかというモデルの質を重視し、自分の腕の振えるような問題を選んでエレガントな解を求めようとする傾向がある。また、経営に関する重要問題を取り扱っても、質を重視するあまり現実を単純化しすぎてしまうこともある。その結果、得られた解がモデルの範囲内では最適解であっても、本来の問題に対しては最適解でなくなり、場合によっては実行可能でなくなる場合もある。とくに、問題が多く分野にわたるときは、モデルの質が高くても妥当性の面で失格する場合が少なくなかった。モデル作成者と経営者の間に不信感が嵩じたのも無理からぬことであった。

最近、以上の状況に改善の兆しが見られる。その一つは、経営科学者がプランニングをモデル化の対象の一つとして重視してきたことである。もう一つは、経営科学はこれまでは一分野の科学であったが、システムのモデル化を行なうには、多分野にまたがるモデル化を行なわなければならないことが広く認識されてきたことである。これに伴って、経営者とモデル作成者が協同して作業を進める作業形態

が現われてきた。モデル作成者は、モデルを作り、“こうしたらどうなるか”という結果を求める役割を果たし、最適解を求めるという従来の役割を捨てたわけである。経営者は代替案に対する決定関数を示し、外部変数に対する判断を下し、彼の判断と経験を通して意思決定を実のあるものに行っている。このような状況の改善は、実時間計算機技術の進歩に負うところが大きい。アナリストは意思決定の最適性すなわちモデルの質を代償に、彼の仕事を認められ、作業のしやすい環境を得たといえることができる。

3. 意思決定過程における各段階のモデル化

2節では意思決定過程の全体のモデル化について述べたが、ここでは各意思決定段階の中のモデル化について述べる。全システムのモデル化は、経営者の差し迫った必要に端を発するが、各段階におけるモデル化は、モデル作成者にその主導権がある。したがって、現実における重要度よりもモデル作成者の好みによってモデル化の方法やモデルの形が決められる。たとえば、心理学者は、調和のとれた人間関係が効果的な意思決定に最もたいせつであるとの考えから、コミュニケーションや人間交渉過程と関連する部分を強調するであろう。一方、数学者、経済学者、エンジニアや物理学者は、システムの問題をシステム内外の不確定性の下における解析・論理的情報変換の問題として捉えるであろう。その結果、システムのモデル化においては、代替案の分析とその選択（ステップ3と4）を重要な問題と考える。

過去30年間、代替案の選択の範疇にはいる多くのモデルが作られてきた。最適解が求まり、モデル作成者の好みを満足させるような質のよいモデルが次から次へと作られたわけである。このタイプの問題では、変数が数量化でき、その間の関係が明確であり、最もよい代替案を定めるアルゴリズムが存在することが必要である。また、経営者の評価を表わすスカラーの効用関数が必要である。これらのモデルの大部分は、特定の意思決定用のモデルであり、経営者や組織の行動様式に対する一般的理解を深めるという理論の建設にはほとんど寄与していない。それはとり上げた問題の範囲が狭く、またモデルの力が弱かったせいである。したがって、経営者のアクションに影響を与えるという観点から評価すると、投入された努力に見合う成果があったかどうか疑わしい。

これまで数多くモデル化の行なわれてきた質のよい問題は、企業内の金や物の配分という一分野の範囲に限られているものが多い。これは、経営層からいうとミドル層に属するオペレーショナルな問題である。これより低い層の問題では人の要素が強くなり、またトップの問題は、心理的・社会的・政治的な要素がはいる多分野にわたるものとなってしまう。インダストリアル・ダイナミクスやシステム・アナリシスが以上の問題を解決しようものとして期待されたこともあったが、それぞれに限界があり、万能薬でないことが認識されてきた。

代替案の分析・選択以外では、プログラミングの段階（ステップ5と6）でかなりの成果が得られている。財政計画やPERT、CPMなどがその例である。それに続いて、情報生成段階（ステップ8, 9, 10）が多くモデル化されている。組織の業績や能力の測定（ステップ8）は最も手をつけられていない部門である。会計上のデータが経営者の意思決定に役立ちにくい形になっているなどがその例である。問題の抽出、問題点の発見、コミュニケーション（ステップ1, 2, 7）もモデル作成者に無視されている部門である。

4. 問題のモデル化

次に、対象とする問題の性質を考えてみる。歴史的にみると、環境が安定しているときにはまずオペレーショナルな問題が扱われ、次に戦略的な問題がとり上げられる。企業の製品やサービスが単一の場合には、これら二つの問題を交互に解決すればよかったが、製品やサービスが多重になると、上記の二つの活動を調整する統合の仕事が加わってくる。また別の観点からみると、最初はオペレーショナルな過程の管理が主要な問題であったが、過程を可能にする能力の管理が重要視されてきた。経営科学者は主にオペレーショナルなレベルで過程の管理の問題をモデル化し、在来の方法の改善という面で貢献をしてきた。しかし、上述のように問題所在の重点はしだいに移動しており、それに対応する動きも現われている。

5. モデルの選択

意思決定のモデル化は、現実の問題の抽象化とその抽象化されたモデルに対する入力を与えられたとき、その入力に対する答を出す過程の構成から成り立つ。そして、このモデル化は、以前に同様な場面にうまく適用できた理論やモデルの存在、モデル構成・分析の費用、データの入手可能性と質や費用、

妥当性に対する見直し、特定の手法を用いることに対する組織内の反応や効用等を勘案して行なわなければならない。

6. モデルの妥当性

モデルの妥当性のチェックは、現実が抽象的なモデルで十分よく表現されているかのチェックと、抽象化されたモデルに対する入力から出力を得る方法が正しいかどうかのチェックから成る。これまでの経営科学の論文は、ほとんど後者の妥当性のチェックを扱っている。これはむしろやさしい問題であり、重要なのは前者の妥当性のチェックである。

General Systems Research

George J. Klir

本講演は以下のとおり典型的な survey 講演であった。

“システム”という言葉は古いものであるが、general systems (一般システム) という概念は相対的に新しく、第二次大戦前 Bertalanffy によって提示されたが、人間の行動の伝統的類別に関する限り、個々のシステムの特性にはよらない、ある種のシステム特性が存在する、という事実に基づいている。どの型の一般システム理論にとっても、数学的同型写像が決定的に重要である。同型写像、その変形、その一般型である準同型写像についてのさまざまな方面の研究は、一般システム理論の分野を進展させるためにはなほ重要である。

一般システム研究の方向は、3種に分類される。すなわち、systems approach (システム接近法)、general systems theories (一般システム理論)、meta-theory of general systems (一般システムの真正理論) である。

1. Systems approach (システム接近法)

systems approach は古典的 (ニュートン) 接近法と対称的であり、後者は、科学研究の対称を、孤立した部分の集まり、あるいはせいぜい対の間の関係の集まりと見る。これに反して、systems approach は、全対称の性質は、その部分部分の性質によるのみでなく、それらの間のすべての可能な相互関係に依存する、という仮定に基づいている。古典的接近法は力学ではよい結果を与えているが、生物学、心理学、社会学等の理解には貧しく、したがってこれらの科学は systems approach が起こった分野であり、Bertalanffy は生物学者であった。ところで、

純粹の systems approach ははなほ望ましいものであるが、ここに、いわゆる Bremerman 限界という、計算機能力の限界があって、実際に解決不能という問題にたびたび到達する。このようなとき“単純化の理論”が必要である [1]。それには、システム要素間の相互関係の量と重要さをはかる尺度の研究が必要である。Ashby はたびたびこの方面の研究を行なっている [1]。

2. General systems theories (一般システム理論)

最初の一般システム理論、いわゆる Mesarovic 理論は、1960年の初めに、Eckman と Mesarovic によって創始された。1967年、Wymore により第2の一般システム理論が構成されたが、これは、離散的オートマトンの理論と微分方程式で定義された連続システム理論の両者を包含するために開発されたものである。システムに関する Wymore の定義は、本質的には状態遷移構造に基づいている。よって、この理論は有限状態の離散型システムの種々のモデルを扱えるが、連続関数への適用に拡張しえ、無限集合で定義されるシステムと同時に、連続変数と離散変数の双方を含む混成システムに適用可能である。Wymore は、彼の理論のなかで、システムの結合という概念を構成しているが、これはシステムの分析と統合という問題を意味深いものとしている。この理論は、衛生システム、生態学システム、政治システム等に関する問題を含む、最も広い意味でのシステム工学の問題に主として適用されている。

Klir は、Mesarovic、Wymore の演繹的接近法と異なり帰納法によっているが、種々の分野 (自然、社会科学、工学、数学、芸術) でのシステムとシステムの問題の直観的認識に基づいてシステム特性を識別し、システムの5基本定義に到達した。Orchard [1] はこの一般化を示しているが、それによりシステム系列をそれ自身のシステムとしてみるのが可能である。

3. Meta-theory の方向

以上のとおり一般システム理論が唯一でないことが、一般システム metatheory 発展の理由である。この方向に役立つ顕著な研究が Löfgren とその一派によってなされた [1]。これまで種々の一般システム理論が別々に発展してきたが、metatheory においてのみ統合が達成されうる。統合の第1歩は、Islam により、Mesarovic 理論を Wymore 理論に比較することによってなされた [2]。meta-

theory の重要な仕事は、一般システム理論における位相数学的構造の役割を研究することであって、Coruacchio により始められたが、彼は、Wymore 理論に対する位相構造は古典的位相空間ではなく、Hammer が示した一般閉包空間であることを示している。metatheory に役立つ数学の新しい発展は、既存の数学概念の変更と新しい概念の創造とであるが、前者の例に、Hammer の拡張された位相空間があり、後者の例は、Zadeh による fuzzy 集合の考えである。

4. 一般システム理論の教育

一般システム理論を研究した専門家を specialized generalist と呼び、生物学、心理学その他の分野の専門家が一般システム理論の基礎概念を会得した場合、generalized specialist と呼ぶことにすれば、前者は、彼が共同作業を求められるすべての分野に精通することが不可能であるから、現在需要が増大しているのは、後者の generalized specialist であろう。そこで一般システム教育では、つぎの3方向が強調されねばならない。(1)十分な数の一般システム理論専門家を訓練する必要とそのため組織化されたカリキュラム、(2)一般システムの基本概念と単純原理に種々の分野の専門家を習熟させる必要、(3)特殊な分野でのシステム特性をより明確に識別するために、教育を構成しなおす必要、たとえば、個別の分野において、他の分野へよりよく伝えうるために教科書内容を変更することが必要である。

[1] Klir, G. J. (Editor), *Trends in General Systems Theory*, John Wiley, New York, 1972.

[2] Islam, S., "Toward Integration of Two System Theories, by Mesarovic and Wymore," *General Systems Journal*, **1**, 1(1972).

Simulation and Validation

Thomas H. Naylor

標題はこのようであるが、内容は以下のとおり、simulation に関する experimental design と output analysis に主題がある。

まず、シミュレーションを、複雑なシステムの動きを記述するある型の数学モデルに関し、多くの期間にわたってデジタル計算機による実験を行なう数値計算技法、と定義しようとしており、とくに、そのモデルを経営、経済モデルに集中しようとしている。この定義にはいくつかの手がかりとなる言葉

がある。(1)シミュレーションが数値計算技法であるということは、それが与えられたモデルの解を得るために解析的方法が用いられないときのみ用いられる“最後の手段”であることを意味する。(2)シミュレーションは実験である。したがって、実験計画の問題と出力データの解析に特別の考慮が払われねばならない。(3)計算機は、経済システムの数学モデルに関するシミュレーション実験を実行するのに不可欠の道具ではないが、たしかに、経過を早め、計算の単調な仕事を除き、誤差の確率を減少させる。(4)シミュレーションは、静的あるいは横断面シミュレーションと、動的あるいは時系列シミュレーションとに分けられる。ここで二つの重要な疑問が生じる。第一は静的シミュレーションに関して、与えられた水準の精度を得るために特殊なシミュレーション実験が何回くり返されなければならないか？ 他は、動的シミュレーションに関して、システムの動きについての推計値がシステムの初期条件に影響されないためには、どれだけ長く計算することが必要か？ である。(5)経済モデルに関する多くのシミュレーション実験は、純粹に決定的なシミュレーションではなく、確率的シミュレーションであるが、モンテ・カルロ法という言葉がたびたびこの確率的シミュレーションの同義語として用いられる。シミュレーションの定義に対して、シミュレーションの方法論では、次の6段階が考えられる。(1)問題の構成、(2)数学モデルの構成、(3)計算機プログラムの構成、(4)妥当性の確認、(5)実験計画、(6)出力解析。ここでは、(4)、(5)、(6)に焦点をおく。

1. Validation (妥当性の確認)

経営、経済システムの多くのモデルが複雑であるために、多段妥当性確認手順が最も適当に見える。第1段は、当該システムの動きを記述する一群の根本原理あるいは仮説の構成を求めることである。第2段は、現在のテストの限界に応じてモデルに基づく根本原理を実証する試みである。第3段は、研究中のシステムの動きをモデルが予言する能力をテストすることである。シミュレーション・モデルによって発生するデータがどの程度観測データに適合するかをテストするために、2方法——過去数値による実証と予測による実証——とが適用可能である。これらの手順の真髄は予言である。というのは、過去数値による実証は過去にさかのぼる予言に関するものであり、一方予測は将来の予言に関するものだからである。

これまでは、シミュレーション・モデルを実証する問題の哲学的観点にのみ注意してきた。モデルの適合性の良さのテストに適用される量は種々考えられているが、ここでは、主要ないくつかの方法をあげよう。(1)分散分析, (2)カイ二乗テスト, (3)因子分析, (4)ノンパラメトリック・テスト, (5)回帰分析 [3], (6)スペクトル分析 [5], (7)Theil' sinequality coefficient [4].

2. Experimental design (実験計画)

シミュレーション実験計画に際して起こる次の3種類の問題を述べよう。

1) 確率収束の問題

たとえば、計算機の数ランから計算される標本平均は random に振動し、正確には母平均に等しくはないであろうが、標本の大きさを増大することによる標本平均の収束が確率収束と呼ばれる。問題はその収束が遅いということである。合理的に小さな偶然誤差を求めることが標本の不合理な大きさを引きやすい。そこで偶然誤差をへらすために、標本の大きさを増大するのと別の方法を求めなければならないが、それがモンテ・カルロ法である [3].

2) Size の問題

“因子過多の問題”ということができる。数因子の要因計画に必要な因子組合せの数は、それぞれの因子に対する水準の数の積である。よって、2, 3 因子より多い問題の場合、完全計画は御しがたい多数の因子組合せを要することが明らかである。ラテン方格法等を含む部分的要因計画は、部分的因子組合せのみを用いる計画の例であって、分散分析の方法が適当であるが、因子 X_1, X_2, \dots, X_k が量的であり、反応 Y が関係 $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ によって関係づけられているときは、回帰分析のほうが適当であろう。上記関数関係は反応面と呼ばれるが、回帰分析に基づく反応面計画と呼ばれる方法が開発され、これには得られる情報量をへらすことなしに実験の size を縮小する利点がある。

3) 多重反応の問題

ある実験で多くの異なった反応変数を観察したいときこの問題が起こる。不幸にして、多重反応実験に対する実験計画技法は事実上存在しない。この問題を解くどんな試みも効用理論の使用を必要とするようである。Fromm はこの方向に第1歩を印したが、効用を反応変数として扱い、Brookingモデルによる政策シミュレーション実験結果の評価を行なった [2].

3. Output analysis (出力データ解析)

分散分析のいくつかの特殊な場合を研究しよう。

1) F-テスト

生産戦略のそれぞれに関する期待利得が等しいというような型の帰無仮説をテストする簡単な方法がF-テストである。帰無仮説が棄却されるなら、次の多重比較、多重序列等の解析法が薦められる。このテストは、正規性、等分散、確率的独立性の3重要仮定の上に立っている [3].

2) 多重比較

分散分析と対称的に、多重比較法は仮説の検定よりもむしろ信頼区間の使用を強調する。たとえばもし異なる母集団の平均の比較なら、母平均間の差に対する $(100-\alpha)$ パーセント信頼区間を計算するとよい [3].

3) 多重序列

一群の交代策の序列のよい評価は、それらの交代策に関する標本平均の序列であるが、偶然誤差のため、標本序列は正しい結果を与えないかもしれない。標本平均の序列が母平均の真の序列を代表するとどのような確率でいえるだろうか？ 多重序列法が答えようとするのは基本的にはこの疑問なのである [3].

4) スペクトル分析

出力データを分析する可能な方法として、スペクトル分析を考えるのには少なくとも四つの理由がある。(1)出力データには一般に高度に自己相関がある。(2)確率過程の研究に際して、アクティビティの平均水準、この水準からの偏差、これらの偏差が生じたときどのくらい長く続くか等が興味深い、スペクトル分析はこの種の情報を与える。(3)スペクトル分析によって、信頼帯を構成したり、二以上の代替シミュレーション・ランを比較するための仮説を検定することが相対的に容易である。(4)スペクトル分析は、社会システム・モデルの妥当性確認のための方法として用いられる [5].

4. 未解決問題

1) くり返し回数

最適な標本の大きさ(くり返し回数)は、次の疑問に対する答えによるということがよく知られている。(1)母集団パラメータのソフトをどのくらい望むか？ (2)母集団にどのくらいの変化があるか？ (3)どのくらい危険をおかすつもりがあるか？ [3].

2) 計算時間の長さ

Gilmanは、自己相関のある出力データを持つシミュ

シミュレーションに関して、計算時間の長さを決めるためのいくつかの“停止法則”を述べている [1].

3) シミュレーション 対 解析解

Howrey と Kleijnen はいう. “一度線型計量経済学モデルが推定され、パラメータ推定値に関して既知の分布理論により検定された上は、シミュレーション実験はモデルの妥当性について付加的情報を提供することはない. 加えて、シミュレーション結果から線型モデルの動特性のあるものが推論されうるけれども、モデル自身に基づく解析的手法(スペクトル分析)はこの目的に有効である” [3]. 一般に、どのような場合に標準の数学的方法よりむしろシミュレーションを使用すべきかという疑問は、計量経済学モデルに関してのみでなくすべての型の経済モデルについて、さらに研究しなければならない問題である.

4) 誤ったシミュレーション結果

正しく推定され健全な経済理論に基づく計量経済学モデルでも、ナンセンスなシミュレーション結果を与える場合があるかもしれない. 複雑な経済システムのモデル構成に、計量経済学者の接近法とシステムズ・アナリストの接近法とを結合する明確な必要性があるように見える.

- [1] Gilman, M. J., “A Brief Survey of Stopping Rules in Monte Carlo Simulations,” Digest of the Second Conference on Applications of Simulation, 1968.
- [2] Naylor, T. H. (editor), *The Design of Computer Simulation Experiments*, Duke University Press, 1969.
- [3] ——— (editor), *Computer Simulation Experiments with Models of Economic Systems*, John Wiley and Sons, 1971.
- [4] ——— and J. M. Finger, “Verification of Computer Simulation Models,” *Management Science*, **XIV** (October, 1967).
- [5] ———, Wertz, K. and T. Wannacott, “Spectral Analysis of Data (Generated by Simulation Experiments with Econometric Models,” *Econometrica*, **XXXVII** (April, 1969).

Stochastic Processes

F. G. Foster

本講演は、I F O R S の委員会に出席の途中、航

空機事故で遭難したイスラエルの Paul Naor に対する追悼講演である. survey 講演というより, management science における基本的モデルを考え、それらに共通の一般的思想の 1, 2 を論じようとしたものである.

Naor の第 1 回 I F O R S 論文で初めて名づけられたと信じられる確率分布関数に関する “random modification” という概念がある. 確率密度 $f(t)$, 平均値 β , 分散 σ^2 の運転時間を持つ機械をランダムにチェックするとしてよう. ランダム・チェックが運転中に起こるとすると、機械の残余運転時間 X の密度はつぎのように示される.

$$g(x) = \frac{1}{\beta} \int_x^{\infty} f(t) dt.$$

その平均値は

$$E(x) = \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{\beta^2} \right).$$

つぎに、Naor に従って、まず、機械修理システムを考える. 機械平均運転時間 α , 平均修理時間 β , 稼働平均機械数 a , 平均滞留機械数 b とすれば、 $b/a = \beta/\alpha$ は明らかである. $\beta(1/\alpha)$ は生産物 1 単位当たり要する修理サービスである. β/α をサービス因子と定義すれば

$$\text{サービス・レイト} = \text{生産レイト} \times \text{サービス因子}.$$

別の確率過程部門の在庫モデルを考え、売上げレイトを λ , 平均在庫レベルを S , 回転期間 (1 ユニットが在庫される平均時間) を τ とすると、再び明らかな関係が得られる.

$$S \div \lambda = \tau$$

在庫問題と機械修理問題と何かの関係があるかを論ずる前に、第 3 の確率過程部門、待ち行列モデルを見よう. 基本的なパラメータを、平均到着レイト λ , 平均サービスタイム (おくれの時間) D , 平均滞留数 N とすると、 $N = \lambda D$ が明らかである. この関係は経済的観点から見ると明らかであるが、最初 Morse により論じられ、のちに Little ほかに数人により証明された. 現在、Little の公式として認められているが、待ち行列関係のほか、在庫、機械修理関係もすべて別の姿での Little の関係にほかならない.

さて、この基礎関係の明瞭であることを認めたとして、それがどんな価値があるのかを考えねばならない. 在庫モデル、機械修理モデルも同様であるが、ここでは待ち行列モデルをとり、つぎの単純なシステムを考えよう. すなわち、ユニットは平均レ

イト λ で到着し、先着順にサービスを受け、サービス時間は、平均 β 、分散 σ^2 の独立分布をすとする。行列の先頭のユニットは、レート λ で到着し、 β 時間とどまる。したがって Little の関係によって、期待数は $\lambda\beta$ で、これは通常トラフィック密度と呼ばれる量 ρ である。もし、 $\{P_j\}$, $j=0,1, \dots$ がシステム内滞留数の平衡確率分布であれば、サービスを受ける期待数は $1-P_0$ 。よって、 $P_0=1-\rho$ である。同様に全システムの平均滞留数 N を計算することができる。このためには、到着過程をポアソンに制限する必要がある。さて、 $N=\lambda D$ であるが、ここに D は、到着のおくれである。しかし到着者は、前に同じ数 N のユニットを見るが、それらは、 ρ だけのサービスを受ける。どのユニットもが受けるべき残余サービスは、前述 random modification の平均値 ρ である。よって

$$D=(N-\rho)\beta+\rho$$

これを上の Little の関係に代入することにより

$$N=\rho+\frac{\rho}{1-\rho}\lambda\beta=\rho+\frac{\rho^2}{1-\rho}\frac{1}{2}\left(1+\frac{\sigma^2}{\beta^2}\right)$$

とくに、サービス時間が指数分布のときは $\sigma^2=\beta^2$ で、

$$N=\frac{\rho}{1-\rho}.$$

最後に新しい適用例、コンピュータ技術に関する確率モデルを見よう。タイムシェアリング・システムで、ジョブはポアソン分布レート λ で到着し、ジョブの滞留時間分布は $H(t)$ であるとする。到着する 1 ジョブについて考え、その滞留時間 t 、システム内で n ジョブに会うとし、反応期待時間を $R_n(t)$ とする。 t のみを条件とする反応期待時間は

$$R(t)=E_n\{R_n(t)\}.$$

無条件反応期待時間は

$$R=\int_0^{\infty} R(t)dH(t).$$

上記のジョブがサービス X を受けるときにシステ

ム内にあるユニット数が確率変数 $\nu(X)$ であるとすると、

$$E\{\nu(X)\}=N.$$

ここに N はシステム内にある平均滞留ジョブ数である。

$$R(t)=E\int_0^t \{1+\nu(x)\} dx=t(1+N)$$

$$R=\int_0^{\infty} t(1+N)dH(t)=\frac{1}{\mu}(1+N) \quad \left(\frac{1}{\mu}=\beta\right)$$

ここに Little 公式により

$$N=\lambda R=\rho(1+N)$$

これより $N=\frac{\rho}{1-\rho}$

$$R(t)=\frac{t}{1-\rho}$$

$$R=\frac{1}{\mu(1-\rho)}$$

この結果は、驚くことに、指数サービス時間の先着順システムの場合の前述の結果に等しい。しかし、 t を条件とする反応時間は、後者の場合つぎのとおり異なる。

$$D(t)=\frac{\rho}{1-\rho}\frac{1}{\mu}+t=\frac{t}{1-\rho}+\frac{\rho}{1-\rho}\left(\frac{1}{\mu}-t\right)$$

これより

$t < \frac{1}{\mu}$ のとき $R(t) < D(t)$, $t > \frac{1}{\mu}$ のとき $R(t) > D(t)$.

かくて、タイムシェアリング・システムは反応時間を改善し、平均ジョブより短くする。

このあと、 $R_n(t)$ が n と t により変わる場合を論じている [1], [2].

[1] Coffman, E.G., R.R. Muntz and H. Trotter, "Waiting Time Distributions for Processor-sharing Systems," *J. Ass. Computing Machinery*, **17** (1970).

[2] Sakata, M., S. Noguchi and J. Oizumi, "An Analysis of the $M/G/1$ Queue under Round-robin Scheduling," *Operations Res.*, **18**, (1970).