1975シミュレーション会議から

若山邦紘

1. はじめに

1975年3月12日～14日に米国フロリダ州において，第8回 Annual Simulation Symposium (第1回は1968年)が開催された．主催は The Society for Computer Simulationで，Association for Computer Machinery と IEEE Computer Society が協賛している．

発表された論文は22件，実際問題の解決のための実施例の報告，特定の問題に対するモデルの提案，計算機用ソフトウエアに関する発表，シミュレーション実験の効率化に関する発表など，話題は広い範囲にわたっている．

2. 実施例の報告

〔交通・輸送システム関係〕

1)「メキシコ市の地下鉄のシミュレーション」

2)「台湾の鉄道システムのシミュレーション」

3)「ディズニー・ワールドのモノレール・システムのシミュレーションによる最適化」

4)「鉄道，はしけによる新聞紙配送システム」

〔設備関係〕

5)「シミュレーションによる製鋼所の能力評価」

6)「エネルギー消費を最小にするための自動温度調節システム」

〔経営システム関係〕

7)「システム・ダイナミックスによる経営政策決定の分析」

8)「変動する経済のもとでの長期財務計画」

〔その他〕

9)「ミシシッピー河における有機物の流動の季節的変化」

10)「警官パトロールのシミュレーション・モデルとその妥当性の検証」

交通・輸送システムの問題に対するシミュレーションによるアプローチは多い．1)は，現在のメキシコ市の地下鉄網を将来拡張する場合，どのような路線がよいかを評価するための研究である．新しい路線を計画した場合に，そこにどれだけの乗客が流れてくるかは，現在の地上における旅客の流れを分析する必要がある．モデルの構成はこの地上での旅客の移動モデルと地下鉄の運行モデルとからなっている．前者はグラビティ・モデルによりOD行列を発生している．後者はこれを入力とするモデルで，乗客の各駅への配分サブモデル，乗客の各駅間の流れを分析するサブモデル，地下鉄の運行と乗客へのサービス状況をシミュレートするGPSSのサブモデルからなっている．4通りの代替案についてシミュレーションが行なわれた．

台湾の鉄道網はそれほど複雑なものではないが，遅れがひどい，時間がかかりすぎる，サービス状態が悪いことが問題の発端である．2)は，この問題を1)のような大がかりな設備投資をするのではなく，急行列車，普通列車のクラスを変更したり，列車の運行計画を変更することにより改善できるかどうかを調査したものである．モデルはこのような構造の問題には適した SIMSCRIPT II.5により書かれている．

3)は，もっと小規模な問題である．

フロリダのディズニー・ワールドのモノレールのシミュレーションである．運行すべきモノレールの台数，モノレールのスピード，駅での停車時間などが制御変数であり，目的は乗客の待ち時間はできるだけ短く，システムの使用効率はできるだけ高く，といった相反する2つの基準のあいだの望ましいバランスを求めようとしている．GESIMTEL（対話型のGPSS）によって書かれている．

4)は，輸送ネットワークを扱った例である．新聞用紙はカナダの Baie Comeau を出発し Quebec, Montreal を経由して New York の新聞社の倉庫まで輸送される．その間，はしけ，鉄道，トラックが利用されるが，潮の干満によりはしけが利用できる時間が制約されたり，鉄道に関してはヤードでの車輌の計画，列車の到着，出発

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

時刻に関する問題，ニューヨークに着いてからのトラック輸送またははしけによる輸送，倉庫での処理など大変に複雑なシステムである．プログラムは SIMSCRIPT により書かれている．このシミュレーションの費用が14,000ドル，これにより節約できる費用が数十万ドルという話である．

新しい工場の設計や設備の拡充などを行なう場合，工場や設備の処理能力がどの程度になるか，という問題はシミュレーション向きの問題である．5)は，ノルウエー製鉄会社における実例である．同社では設備の拡張に際し，計画案にもとづく新工場の能力算定のために4つのシミュレーション・モデルを開発した．ここではそのうちの2つのモデルを紹介している．新ドレッシング工場における製品の流れをみるためのGPSSモデルと，ビレット置場のクレーンの処理能力を決めるためのGPSSモデルとである．

6)は，太陽熱利用冷暖房システム（Solar Heating & Cooling System）に，マイクロコンピュータをつけて，エネルギー消費を最小にするようにバルブなどのコントロールをさせようという例である．この研究のために3つのモデルが開発された．第1は，太陽熱利用冷暖房システムのモデル，第2は，最適制御を求めるためのモデル，第3は制御用のマイクロコンピュータ Intel 8008の最適制御プログラムをシミュレートするためのモデルである．この制御装置の値段は415ドルということである．

7)，8)は，経営システムにおける意思決定に関する問題を扱っている．7)はある研究機関のR＆D部門における経営計画，政策決定方法の改善をはかるためにシステム・ダイナミックス・モデルを開発した例である．モデルは対話型でシミュレーションの結果はディスプレイに出される．経営者はこれを見ながら，研究費の決定，人事の決定，設備・施設の決定を行なうのである．実際に経営者にこのモデルを使用させたところ，大きなインパクトを与えることになった．第1は過去の実績と照合するとモデルは実によく再現してくれることがわかった．第2は彼らが考えた政策を入れてみると，直観とは逆の結果がでてきたことに対する驚きであった．結局，このような方法が経営者に政策決定の影響を検討し議論してゆくための枠組を提供することになった．

経営者や管理者自身にモデルを与え，実際に動かさせることが，彼らをOR/MSの仲間に引きずりこむ強力な手段となろう．

8)は，大学における経営管理の問題を扱った例である．最近のようなインフレのもとで経済が不安定な時代には，長期財務計画を頻繁にアップデートできることが望ましい．そのために変数が850程度のマクロな会計モデルを開発した．アップデートされたデータをつぎつぎと入れ，種々の決定に対する感度分析を行ない，アダプティブな意思決定が可能になった．

その他，9)は，魚貝類の豊富な河口付近の湿地帯における有機物の流動を扱った事例である．差分方程式によるエコロジカル・モデルである．

10)は，1973年にNew York市警察の警官パトロールのシミュレーション・モデルを開発したが，そのモデルを検証するため，実際の事件の発生データを集めてそれを比較した報告である．結論は実際のパトロール・システムをうまく表現していることがわかった．今後は，セクターの境界の変更による効果，パトロールカーの台数を変えることによる効果などの評価に利用されるものと思われる．

3. モデルの提案

11)「混んだ道路での車の流れのシミュレーション」
12)「トップ・マネージメントのダイナミックス」
13)「学校における管理効果のシミュレーション」

道路を走行する自動車の動きは前を走行する自動車の影響を受ける．この関係を微分方程式で表現し解析する話は昔からある．

その基本方程式は，x_kを先頭からk番目の車の位置として

$$\dot{x}_k=\alpha(x_{k-1}-x_k) \tag{1}$$

あるいは

$$\ddot{x}_k=\beta(x_{k-1}-x_k) \tag{2}$$

あるいは

$$\ddot{x}_k=\gamma(\dot{x}_{k-1}-\dot{x}_k) \tag{3}$$

などである．

11)では，(2)のモデルを基本にして，詳細なモデルを提示している．特に，加速と減速に応答の遅れを導入したため解析的に解けなくなり，シミュレーションにより解こうというものである．

コングロマリットと呼ばれる巨大企業は，事業環境の異なる子会社がたくさんある．たとえば靴会社と造船会社とでは経営上の問題もまったくちがう．したがって各子会社はある程度独自の判断で経営ができることが望ましいが，全体的には相互に協力してゆく体制を維持しなければならない．12)では，コングロマリットのような構造をもった組織体における組織構造や意思決定のルールが，全社的のあるいは部門のパーフォーマンスにどのような影響を与えるかを分析するためのモデルを提示している．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

実施例のなかにも大学運営のモデルがあったが，近年教育システムのシミュレーションは盛んである．13)は，学生1人当りにかける教育費用とか，教員の水準とか，教育設備などが教育効果におよぼす影響を調べるためのモデルについて述べている．

4. シミュレーション用ソフトウエア

14)「GPSS/SIMSCRIPT——代表的シミュレーション言語」

15)「シミュレーション問題とシミュレーション・ソフトウエアの構造について」

16)「LPSS——マネージャーのためのシミュレーション・システム」

17)「Total Avionic Real-Time System Simulation」

シミュレーションの普及は計算機の発達とその利用技術の発達にまつところが大きい．最近は大型の計算機には必ずシミュレーション用のソフトウエアが何通りか用意されている．

14)は，離散系シミュレーション言語のGPSSとSIMSCRIPTに関する評論である．それぞれについて言語のもつ基本的な構造，モデル化の概念，利点と欠点などをまとめて述べている．最後に，シミュレーションには，シミュレーション言語を選んで使うのが賢明だと強調している．

シミュレーション問題の大部分は，待ち行列ネットワーク構造をもつシステムであろう．GPSSはそのために作られた代表的な言語であるが，他のシミュレーション言語でも同じように，版が新しくなるごとに言語はより複雑な問題をあつかえるように，複雑化の一途をたどっている．

15)，16)では，これはまったくのありがた迷惑で，利用者はもっと手軽なパッケージで十分仕事はできると主張し，それぞれ簡単なシミュレーション用のパッケージを開発している．前者はGPQS(General Purpose Queuing Simulator)というFORTRANのパッケージで，後者はLPSS(List Processing System Simulator)というパッケージである．それぞれのアウトラインと例題の説明などがなされている．

17)は，大規模なシミュレーション・システムの紹介である．防空に関係したいろいろなモデルは個々にシミュレートされたり，ある問題では最適化まで進んでいるが，このようなモデルをモジュール化し，すべてを統合したシステムがAVSIM(Avionic Simulation)である．このシステムにマン-マシンのインターフェイスをつけて，インタラクティブに使用できるようにしたのがDAIS(Digital Avionics Information System)の一部になる．

5. シミュレーション実験の効率化

18)「相関を利用した探索法」

19)「マルティプロセッサ・ソフトウエア・システム・シミュレータの計算時間の短縮」

シミュレーションは実験であるから，実験からなんらかの推論をするためには，システマティックな実験をデザインする必要がある．実験計画法の諸手法は要因の効果を調べるために利用されることになる．また，モデルから得られる応答を最適にするようなパラメータや入力の値を求めようとする場合には，応答曲面による山登り法など極値探索法が利用できる．これも確定的なシミュレーションでは問題ないが，確率的な要素を含んだシミュレーションでは結果は一意的には定まらず，ある分散σ^2をもつ分布になる．この分散が大きいと信頼のおける期待値を得るためにきわめて多数回の実験が必要になる．同じ入力に対してm回実験を行なえば，期待値の分散$\sigma_m{}^2=\sigma^2/m$となる．さらに異なる入力に対する結果の期待値の間に正の相関ρがあると，応答曲面の実効分散$\sigma_e{}^2=\sigma^2(1-\rho)$となる．

これらを組合せれば$\sigma_e{}^2=\sigma^2(1-\rho)/m$となり，最適値探索にかかる手間を$L(\sigma^2)$とすると$mL(\sigma^2(1-\rho)/m)$となり，$L$がわかっていれば最適な$m$が求められる．18)は，正の相関をもった応答を得るための具体的な方法を示している．

一方，シミュレーションの効率化はプログラミングの技術でもなされる．19)は，計算機システムのシミュレーションにおいて効率化をはかった事例である．一般に計算機のシミュレーションでは，実時間1時間のシミュレーションを実行しようとすると100時間もかかってしまうことがまれでない．この事例でもそうであった．そこで，プログラム上で無駄なループをスキップさせたり，事象表のポインタを先頭と最後と中間とに設け，スキャンニングを改善したことにより，100時間がわずか1.5時間にまで短縮された．

このような改善は多くのシミュレーション・プログラムに対して応用できるものであろう．

6. その他

20)「企業モデルの基本的特性」

21)「In-Fright シミュレータの最近の進歩」

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

22)「錯視の応用——眼の反応モデルによる Visual Scene シミュレーションの改善」

企業モデルとひと口にいっても千差万別である．20)では，企業モデルを設計する場合に考慮しなければならないいくつかの特性をひろいだし明確にしようとしている．企業モデルを規定する特性とは

(1) 目的：企業モデルをなぜ作るのか．

(2) 範囲：どのようなオペレーション（たとえば，会計，財務，マーケッティング，人事などの機能）までをモデルに組入れるのか．モデルがカバーすればよい期間は短期か長期か．モデルからの結果をだれがみるのか，課長か部長か社長か．

(3) モデルの設計法：トップダウン形式，ボトムアップ形式，それらの混合形式のいずれによるのか．

(4) 利用者と利用法：モデルを利用するのはだれでなんのために利用するのか．

(5) 必要な情報：モデルから引きだしたい情報はなにか．

(6) データ管理：データの収集，データ処理，データ検索，データ利用をいかに行なうか．

(7) 経営科学手法：経営科学の手法を使うか．

以上の要素が企業モデルの性格を決める基本的特性であると述べている．

航空機産業では，フライト・シミュレータと呼ばれる装置により，飛行体の性能をテストしたり，乗員の訓練などを行なったりしている．フライト・シミュレータには地上に設置されたものと実際に飛行する飛行機の中に作られたものとがあり，後者を In-Fright シミュレータと呼ぶ．

最近のように航空機が高速になり複雑になればなるほど In-Fright シミュレータの必要性は高い．21)では現在利用されているものと計画中のものとあわせて15種類の In-Fright シミュレータを紹介している．

ディスプレイに画像を写しだし，その画面を人間が見ながら行なうシミュレーションでは，現実の画を網の目にきざみ，各メッシュの照度をディジタル化し，そのデータをディスプレイ装置へ入力して画像となってでてくる．メッシュが粗いと画像は不連続にうつる（たとえば斜線が階段状にうつる）．これを，明るいもののそばにあると実際より暗くみえたり，暗いもののそばにあると実際より明るいとみえたりする人間の眼の錯覚を利用して，ディスプレイへの出力に手を加えることにより，画像が現実に近くみえるようにしようという試みについて述べている．

参考資料

Stow, W. K., C. A. Miglierina and W. F. Coxon III ed., Proceedings of 8th Annual Simulation Symposium, (1975)

（わかやま・くにひろ　法政大学工学部）

《明日への数字》

相対誤差 100%

現場で同じ型の機器を多数使用しており，その機器の信頼性が問題になったとしよう．まず，機器の寿命を観測して平均値 μ や分布 $F(t)$を知りたいが，観測時間を節約するため，現在使用中の機器のなかからランダムに n 個を取り，使用開始から故障発生までの時間$T_1,\cdots,T_n$を観測したとする．このとき，$T_1,\cdots,T_n$の確率分布は，当然，本来の寿命分布 $F(t)$になり，したがって$T_1,\cdots,T_n$の平均$\bar{T}$でμ，経験分布$F_n(t)$で$F(t)$が推定できると思い込んでいる現場マンが多い．これは大変もっともなことではあるが，大きな間違いである．

上記の方法でランダムに抽出した n 個の機器の使用開始の時点が，やはり機器ごとにランダムであったとすると，$T_1,\cdots,T_n$の確率分布は$G(t)=\int_0^t t\,dF(t)/\mu$であって，これは通常もとの分布 $F(t)$ とは似ても似つかぬ形をしている．$F(t)$ の確率密度を $f(t)$ とすると$G(t)$のそれは $g(t)=tf(t)/\mu$ となって，$g(t)$は$f(t)$に寿命値 t の長さに比例した重みを乗じたものになっている．これはgをfと混同すると，寿命が極端に過大評価されることを示し，信頼性の観点からいうと危険きわまりない評価である．また$T_1,\cdots,T_n$の分布$G(t)$の平均値μ'をμと混同するときの相対誤差は$(\mu'-\mu)/\mu=\sigma^2/\mu^2=\theta^2$となる．ここに$\sigma^2$は$F(t)$の分散，$\theta$は変動係数である．特にもとの寿命分布が指数分布$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$ のとき，gは2次のアーラン分布 $g(t)=\lambda^2 te^{-\lambda t}$ となり，$\mu'=2\mu$ となって，上記の相対誤差はちょうど100%に達する．

このことは，寿命観測にかぎらない．たとえば，特定の時点で乗車している乗客に対して，旅行距離や旅行目的の調査をした場合のデータ処理も，よほど注意しないと，上記のような落とし穴にはまること必定である．

（国鉄技研　阿部俊一）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．