

シミュレーションを用いた研究のプロセス

著者	谷田 則幸
雑誌名	関西大学経済論集
巻	54
号	2
ページ	283-291
発行年	2004-09-30
その他のタイトル	A Note on Research Process Based on Computer Simulation
URL	http://hdl.handle.net/10112/12808

資料紹介

シミュレーションを用いた研究のプロセス

谷 田 則 幸

要 約

社会科学分野においてもエージェントシミュレーションなどの複雑なコンピュータシミュレーションが数多くなされるようになってきている。本稿では、コンピュータシミュレーションにより得られた結果が信頼のおけるものであることを保証するためになすべきことについて紹介する。

1. はじめに ～ 社会科学におけるシミュレーション

社会科学の領域においてコンピュータシミュレーションの利用が盛んになったのは、1990年代になってからというきわめて最近のことである。もちろん、大学での研究にコンピュータが導入された1960年代にもすでに、社会科学でのコンピュータシミュレーションによる萌芽的研究、すなわち、離散事象シミュレーション（たとえば、[Kolesar and Walker 1975]）やシステムダイナミクスによるシミュレーション（たとえば、[Meadows et al. 1974]）などは存在したし、マイクロシミュレーションのようにカナダやオーストラリアなどの一部の国では国の年金や税制などの政策立案にかかわるまでに成功したものもあった [Orcutt et al. 1986]。

しかしながら、社会科学の分野でシミュレーションは主流にはならず、多くの社会学者は、「数学」や「統計学」といった形式的手法を選択したのであった。このことは、理学や工学といった分野でのシミュレーションの普及の様子とは対照的である。数学は、さまざまな事柄を形式化するために『大きな力』を発揮するが、その「大きい（と思われる）力」は、ほとんどの場合、線形性の仮定に負うものである。ここでいう線形性とは、従属変数がいくつかの独立変数の（比例）和であらわされるということであるが、この仮定はきわめて制限的であり、（人間の）自己都合的であると考えられる。もちろん、非線形のシステムは、そのほとんどが解析的に解けないため、その研究も困難なものとなるが、モデリングの対象となるものが線形では説明できないのであれば、非線形なモデルを考えざるを得ない。先述のように、非線形モデルは解析的に解くことのできる方程式はほとんどないので、非線形の振舞いを調べるための方法は、シミュレーションが、唯一、かつ最も効果的な方法であると考えられる。理工学のように比較的単純な数式で表現できるような分野よりもむしろ社会科学のような複雑な対象を相手にするところこそシミュレーションを用いたほうが良いように思われる。このようなシミュレーションでは、モデル（実際には、プログ

ラム)を作成し、そのモデルが実際の対象を再現できる、ということがよし悪し(妥当性: validity)の基準となる。この妥当性をきちんと示すことこそが、シミュレーションの信頼性を高めることになる。逆に、この部分をおろそかにするとシミュレーションそのものの存在が危ういものになってしまう。本稿では、妥当性をはじめとするシミュレーションを用いた研究で注意しなければならない事柄を紹介する。

2. モデル化の論理

統計的手法であれ、シミュレーションに基づく方法であれ、実際に存在する対象を観察し、その観察から得られたデータに基づき抽象化を通して、モデルを作成する、という基本的な流れは同様である。本章では、それぞれの方法に基づくモデル化の流れの類似性を示すとともに、その異なる部分について確認をしておきたい。本章で述べられる事柄は、[Gilbert 1993] や [Gilbert & Troitzsch 1999] に基づいて記述される。

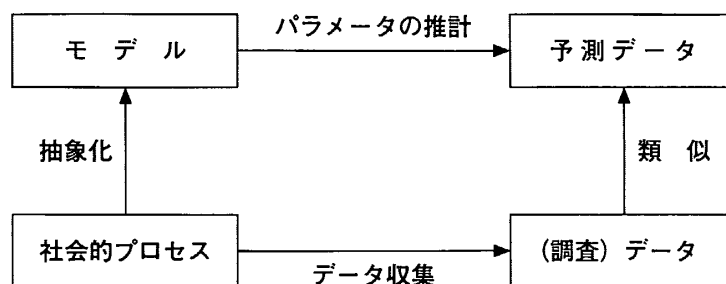


図1：統計的手法によるモデリング [Gilbert 1993, Gilbert & Troitzsch 1999]

2.1 統計的手法によるモデル化

統計的手法によるモデル化は図1のようになる。図1に現れる「モデル」は、通常、方程式などの数式で表現される。この数式には、未定係数(パラメータ)を含むが、「パラメータの推計」により推定(確定)する。この図において明確には表現されていないが、このパラメータ推計には「(調査)データ」(の一部あるいは全部)が用いられる。通常は、「モデル」化、「データ収集」のあとに、次のように、二段階の解析がなされている([Gilbert 1993]、[Gilbert & Troitzsch 1999]を参照)。

第1段階：「(調査)データ」と「予測データ」の整合性の検査

第2段階：モデル中のパラメータの重要度の測定

第1段階の検査では、統計的検定論を用いるのが一般的であろう。また、実際には、この二段階の解析を通して、モデルをより精度の高いものになるよう調整するので、一定の基準を超えるまで繰り返すことになる。

2.2 シミュレーションによるモデル化

[Gilbert & Troitzsch 1999] には、統計的手法によるモデル化 (図1) と対比させて、シミュレーションに基づく方法の場合も同様の図が描かれている (図2)。しかしながら、統計的手法の場合の「モデル」が数式であったのに対し、シミュレーションに基づく場合ではプログラムとなっていることが大きく異なっている。一般的に、数式による表現よりもプログラムによるほうが表現力が優れている¹⁾。

この方法により作成されたモデルの良し悪しは、現実社会に存在する対象のプロセスから生成されたデータとシミュレーションにより生成されたデータがどれだけ類似しているかにより判断される。基本的には、この2つのデータに対し、統計的手法によるモデル化の場合の第1段階と同様に、統計的検定が用いられる。

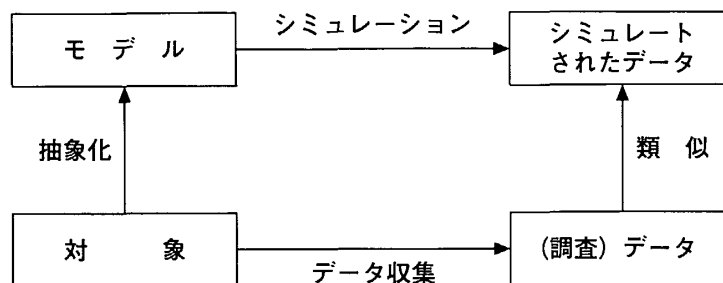


図2：シミュレーション手法によるモデリング [Gilbert & Troitzsch 1999]

3. シミュレーションを用いた研究の進め方

前章では、統計的手法とシミュレーション手法の2つの方法によるモデル化を比較した。本章では、本稿の主題であるシミュレーションの研究プロセス、すなわち、コンピュータシミュレーションを用いて研究を合理的に進める手順、について整理する。なお、本章の内容は、主として、[Gilbert 1993]、[Gilbert & Troitzsch 1999]などを基礎としている。

3.1 シミュレーションを用いた研究の流れ

シミュレーションを用いた研究の大まかな流れは、図3のようになる。図3において、後ろ向きの矢印がある分岐の部分ではそれぞれ条件判断を記述するべきであるが、内容が自明であるので、繁雑さを避けるために、省略されていることに注意していただきたい。

まず、対象となる「問題」を明確にしなければならない。ここでいう「問題」は、解決策が知られていなくて、それを解決することが研究目標になるようなものを指す。「問題」の明確化により、

1) そのほかにも、並列的なプロセスや順序が固定されていないプロセスを扱ったり、モジュール性があったり、異なる種類の対象を同時に扱えたり、いくつかの点で数学的技法よりもプログラミング言語に、優れた点がある。逆に、トレードオフとして、表現のあいまい性を持つことになる。

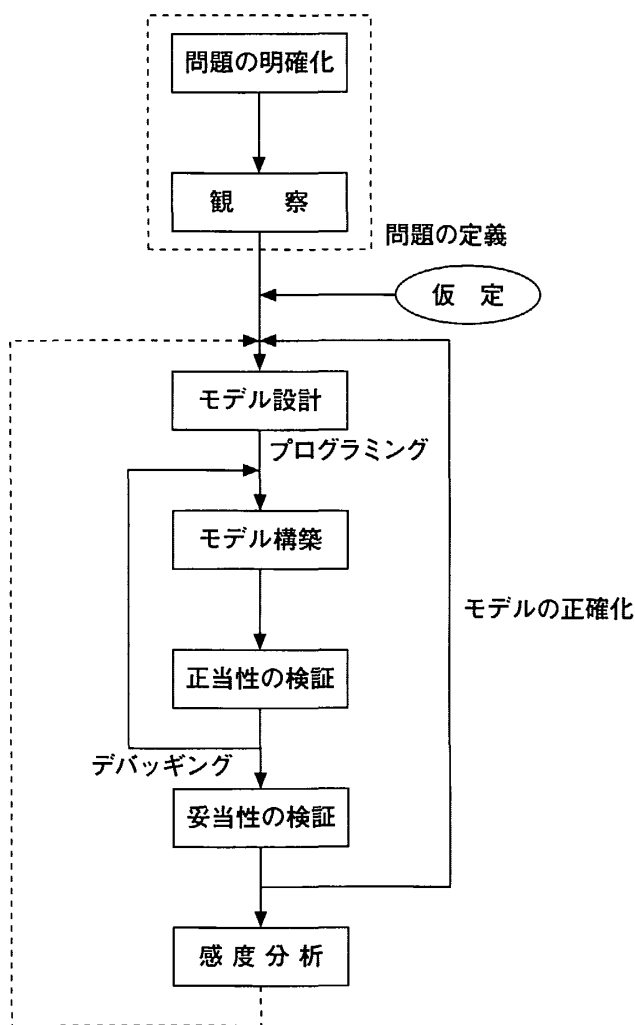


図3：シミュレーションによるモデルの作成の流れ

モデル化したい対象のアウトラインをつかむことができる。

つぎに、モデル化したい対象の「定義」、すなわち形式化を行なう。ここまでの二つのフェーズは、システム開発でいうところの要件定義に相当する。必ずしも必要ではないが、パラメータや初期条件を得るために、対象の「観察」を実施する場合もある。この観察を行なうことにより、後述の「モデル設計」や「感度分析」を効率よく実施することが出来る。

第3のフェーズでは、この「定義」に基づいて、「モデル設計」を実施する。実際には、「定義」されたすべてのことがらをモデル化するのではなく、本当に必要なものだけに絞り込まなければならない。この絞り込み（いわゆる捨象）は、これ以前の段階、すなわち問題を明確化したり、定義を行なうところでもなされていることに注意してもらいたい。最後の絞り込みがこの段階でなされる。研究者の場合、対象を少しでも正確に表現できるようなモデルを作りたいと思われるが、出来るだけシンプルにするほうがよい。なぜならば、複雑になることにより、問題の本質を見えにくくしたり、後述のいくつかの検証を困難なものにしてしまうからである。この第3フェーズは、システム開発では、概要設計や詳細設計と呼ばれるものに対応している。

第4フェーズの「モデル構築」では、先のフェーズで作成された「定義」、すなわち「設計図」を基にプログラムを作成する。いわゆる、コーディングを実施する。ここでの作業は、きわめて機械的なものとなる。

第5フェーズ「正当性の検証 (verification)」と第6フェーズ「妥当性の検証 (validation)」は、観点は違うものの、「正しいプログラム」が作成できたかどうかの検証、すなわち、デバッグのフェーズとなる。まず、「正当性の検証」では、「設計図」どおりそのプログラムが作成され、かつ、きちんと稼動しているか、言い換えれば、モデルが正しく実装され、意図したように動いているか、ということの確認である。文法的誤りを検出することはコンパイラが行なうのであまり問題はないが、それ以外の検証は困難である場合が多い。とくに、対象が複雑な場合には、バグをすべて取り去ることが出来たかどうかの判断さえも難しい。この点からも、先の「モデル設計」において、シミュレーションを出来るだけシンプルにすることが要求される。また、多くの社会シミュレーションでは、特定できない値などを、ランダムネスにゆだねる場合が多いが、このこともデバッグを難しくする要因になる。このランダムネスを実現するためには、コンピュータ上では一般に擬似乱数が用いられるが、この乱数がシミュレーションのたびごとに異なってしまい、それにより結果もそのたびごとに異なってしまう。つまり、得られた結果が、許容の範囲内なのかどうかを見極めなければならないわけであるが、これが予想以上に困難であり、「正当性の検証」をさらに難しいものとしてしまう。

「妥当性の検証」は、作成したモデルの振舞いが、対象となる実際の現象の振舞いと一致しているかどうかを確認するための作業である。適切なモデルが作成されていれば、それぞれの振舞いの多くの部分において類似点を有するであろうし、モデルが不十分であれば、あまり多くの一致は見られないであろう。この検証は、それぞれの振舞いの中で生成されたデータ（単なる時系列データだけでなく、そのプロセスや経路の情報も含んでいる）を統計的に解析する必要がある。また、ここで得られたデータは、シミュレーションというコンピュータ上の擬似実験により得られたものであるが、いかに精度のよい観測値を求めるかということに関しては、実験計画法やそれに附随する多くの統計的手法、たとえば分散分析や回帰分析などの知見が用いられることになる（たとえば、[Fisher 1990]、[Box, Hunter & Hunter 1978]、[広津1985]などを参照）。

次のフェーズでは「感度分析」(sensitivity analysis)を行なう。ここでいう感度とは、パラメータと初期条件の微小な変化に対し、結果がどの程度変化するかということの意味する。いいかえれば、そのような微小変化に対するモデルの振舞いの敏感性のことである。一般に、シミュレーションの結果が、シミュレーションのスタート時点での設定に大きく依存することが少なくない。しかし、感度分析を行なう意味が、感度を鈍くすることではなく、その敏感性を把握することにあることに注意されたい。すなわち、初期設定とシミュレーション結果の関係を把握しておく必要がある。この感度分析において、頑健性 (robustness) も調べることが出来る。

フェーズ6およびフェーズ7は、極めて多くのシミュレーションを実施しなければならない。た

たとえば、パラメータの値を少しずつ変化させてシミュレーションに供する場合も、パラメータの個数分だけ組み合わせを考慮しなければならない。

この節で見たように、シミュレーションによるモデル化はシステム開発の流れと類似していることが分かる。しかし、一方で、正当性の検証、妥当性の検証、感度分析といった、いわゆるシステムテストにかなり注力しなければならないことが分かる。次節では、「テスト」について詳しく見ておきたい。

3.2 Balciらのモデルの正当性、妥当性の検証とテスト

Balciらは、前節で示した検証やテストを実現するための技術として、44種にも及ぶ「モデルの正当性の検証、妥当性の検証およびテスト（Verification, Validation and Test: 以下では、VV&T）」を整理分類している（図4）。

Balciが提示したモデルのVV&Tは、モデル化の研究における次のような3つの主要なタイプのエラーの発生を防止するためのものである（[Balci and Sargent 1981] や [Balci 1990] を参照）。

- ・第1種の過誤：モデルが十分に信頼できるとき、そのモデルの信頼性を否定する
- ・第2種の過誤：モデルが十分に信頼されないときに、そのモデルの信頼性を認める
- ・第3種の過誤：間違っただけの問題を解く

[Balci and Sargent 1981]において、第1種の過誤を犯す確率はモデルを構築した人のリスク、第2種の過誤を犯す確率はモデルを利用する人のリスク、と呼ばれている。第1種の過誤は開発コストを増加させるし、第2種、第3種の過誤は致命的な影響を与えることになる。これを、Balciらは、コストリスク解析と呼び、重要性を指摘している。

図4に示した技法のそれぞれについてコメントすることは本稿の役目ではない。ここでは、6つのカテゴリーの意味とその役割について述べるにとどめる。

モデルのVV&T技法は、非形式的技法、静的技法、動的技法、記号的技法、制約技法、形式的技法、という6つのカテゴリーに分類されている。これらのカテゴリーは、一番左の非形式的から一番右の形式的まで、この順番で数学的な形式性の度合いが高まっている [Whitner and Balci 1989]。いいかえれば、モデルの論理的評価である。シンタックス解析は、コンパイラにより実施される。

非形式的技法 (informal technique) は、最も共通に用いられるものである。ここで、非形式的とは、構造や技法の形式性の欠如を意味するのではなく、主観性に強く依存するもの、すなわち、人間の推論や数学的形式主義によらないもの、と考えられるべきである。

静的技法 (static technique) とは、シミュレーションにおけるモデルの実行をせずに、モデルの構造の質を見るものである。いいかえれば、モデルの論理的評価である。シンタックス解析は、コ

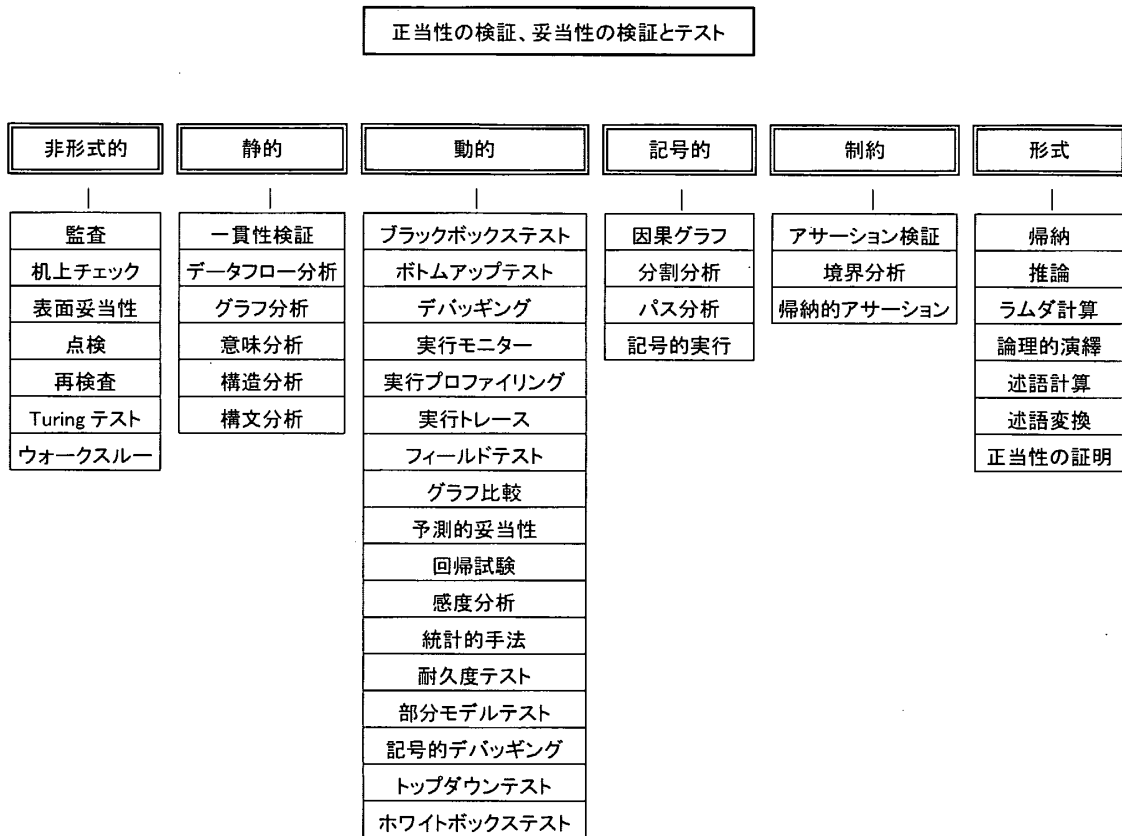


図 4 : 正当性の検証、妥当性の検証およびテストに関する分類 [Balci 1994]

ンパイラにより実施される。

動的技法 (dynamic technique) は、その反対で、モデルの実行を伴ったり、動的モデルの特性評価を行なうものである。多くのテストの中でも、感度分析と統計的技法は重要である。感度分析では、モデルの人力値とパラメータを系統的に変化させ、モデルの振る舞いを観察するものである。統計的技法は、同一の入力データをモデルとシステムの両方に与え、得られたそれぞれの出力データを比較することにより、モデルの妥当性の検証を行なうのに用いられる。T²検定、分散分析、ノンパラメトリック適合度検定などを用いるのが典型的である。

記号的技法 (symbolic technique) とは、モデルに記号を入力し、その結果モデルの実行経路によって出力された記号を得る。それらは、入力記号と出力記号の変換の正確さを評価するのに用いられる。

制約技法は、モデルに設定された仮定とモデル実行中に生じる実際の条件との間の比較を考え、それによりモデルの正確さを評価するものである。モデル構築者の仮定とモデル実行中に生起する事柄を対比するアサーションチェックは重要である。

形式的技法 (formal technique) は、数学的証明により正しいことを保証するものである。

実際には、これらの技法は、それぞれのシミュレーションごとにすべて実施することが求められているわけではなく、シミュレーションモデルや数理計画モデルといった、モデルの型により使い

分けられる。しかし、選択的に利用されるとはいえ、ここで示されたVV&T技法は、モデルの信頼性を検証するためには、多くの側面からのアプローチを必要とし、きわめて幅の広い学際的知識や経験が必要であり、かつ非常に多くの労力を要することを示しているといえよう。

4. おわりに

本稿では、シミュレーションを用いた研究の流れを示すとともに、シミュレーションにより作成されたモデルが信頼できるものであることを保証するためになすべきことから紹介した。モデルの「完全」なる信頼性を得るためには、モデルの妥当性の検証、正当性の検証およびテストを実施しなければならず、そのことは甚だコストのかかることが分かった。しかしながら、実際には、要求される信頼性に応じて、利用する技法を選択したり、テストをある程度のところで打切ったりすることにより対処するのが現実的であると思われる。たとえば、作成したモデルにより将来を予測するということであればかなりの精度を要求されるかもしれないが、その仕組みを理解することが目的であればそれほど精度を高く設定する必要がないかもしれない。それぞれのモデルが目指すものにあわせて対応するのが賢明であろう。

参考文献

- [Balci and Sargent 1981] Balci, O. and Sargent, R.G., "A Methodology for Cost-Risk Analysis in the Statistical Validation of Simulation Models", *Communications ACM*, Vol.24, pp.190-197.
- [Balci 1990] Balci, O., "Guidelines for Successful Simulation Studies", in *Proceedings 1990 Winter Simulation Conference*, IEEE, pp.25-32, Piscataway, New Jersey.
- [Balci 1994] Balci, O., "Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study", *Annals of Operations Research*, Vol.53, pp.121-173.
- [Box, Hunter & Hunter 1978] Box, G., Hunter, W. and Hunter, J., *Statistics for Experimenters*, Wiley, New York.
- [Fisher 1990] Fisher, R.A., *Statistical Methods, Experimental Design, and Scientific Inference*, Oxford University Press.
- [Gilbert 1993] Gilbert, N., *Analyzing Tabular Data: Loglinear and Logistic Models for Social Researchers*, UCL Press, London.
- [Gilbert & Troitzsch 1999] Gilbert, N and Troitzsch, G., *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press (邦訳：伊庭崇・岩村拓哉・高部陽平 訳、「社会シミュレーションの技法」、日本評論社、2003).
- [Kolesar and Walker 1975] Kolesar, P. and Walker, W., *A simulation model of police patrol operations*, Technical Report, Rand Corporation.
- [Meadows et al. 1974] Meadows, D.L., Behrens III, W.W., Meadows, D.H., Naill, R.F., Randers, J. and Zahn, E.K., *The Dynamics of Growth in a Finite World*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [Orcutt et al. 1986] Orcutt, G.H., Merz, J. and Quinke, H. (eds), "Microanalytic Simulation Models to Support Social and Financial Policy", *Information Research and Resource Reports*, Vol.7, pp.9-26, North-Holland, Amsterdam.
- [Whitner and Balci 1989] Whitner, R.B. and Balci, O., "Guidelines for Selection and Using Simulation Model

Verification Techniques”, in Proceedings 1989 Winter Simulation Conference, IEEE, pp.559-568, Piscataway, New Jersey.

[広津 1992] 広津千尋、「実験データの解析 — 分散分析を超えて —」、共立出版、1992.