

計算社会科学のためのシミュレーション研究の 可能性について—モデロジー(2)

岡 田 勇

1 はじめに

本稿は、特定の社会科学研究としてシミュレーションを用いることの研究上の意義について、再検討するものである。シミュレーションの可能性が広がり、その重要性について認識されてきていることは、岡田（2004）で指摘した。そこではまず、モデルの概念定義について検討したあと、モデルの可能性について論じた。これを受け、本稿では、シミュレーションそのものに対象を移して考察を進めることにする。

1998年にノーベル経済学賞を受賞したアマルティア・センは、同賞を受賞する契機の一つになった重要な著作に、以下のような印象的な書き出しを用いている。

問題の多くは、明証性を求めて厳密で数学的な取扱いを要求するし、もちろん非数学的な議論は頼りにならないものであるが、いったん論理的な帰結が得られたなら、それらの意味、意義及び重要性は、非数学的に議論できるであろう。実際、純粋に数学的に議論された意義は、必要以上に狭いものでしかないであろう。(Sen, 1970, 邦訳, p.iii)

この記述には「理論開発の道具」としての数学的分析の重要性が絶妙に表現されている。そして、本稿の主張はセンが「数学的」といった部分を「シミュレーション」に変換しても命題が成立するかどうかを検討するものである。

本稿では、まず一般的なシミュレーション研究への知見を廣瀬他（2002）をテキストとしてまとめる。次に、社会科学研究という本論の文脈に引き合わせて、シミュレーション研究を再定義するため、Axelrod（1997）、Gilbert（1999）を中心としたレビューを行う。その後、シミュレーション研究で最も深刻な問題をはらんでいる評価の問題について議論したあと、モデロジーに引き合わせて、シミュレーション研究で論じなければならない新たな課題について述べる。

2 シミュレーション研究の一般的な理解

計算機を使って具体的に複雑な計算が必要となるようなシミュレーション研究が対象としているモデルは、一般的には、工学的分野や物理的世界が中心となっている。例えば、数理科学

(1993)の『シミュレーション』特集号では、シミュレーションが対象とする領域を「物理現象」「流体・気象現象」「物質設計」「地球・宇宙の現象」「生物・生態系」に分類して紹介している。また、有澤他(1997)では、汎用プログラミング言語を用いて「擬似乱数」「ゲーミング」「GRSS待ち行列」「DYNAMO動的システム」などを扱っている。社会科学に限定しても、例えば、森田(1997)の経営シミュレーションは主に企業の物流や生産・販売に関する意思決定を支援するためのツールとして用いられており、そこで使用されるパラメータはすべて現実の物理的データであるという意味において、限定的である。シミュレーション研究の初期に、ローマクラブの地球モデルを用いた世界経済システムの予測(Meadows, 1974)があるが、これは世界に対する衝撃と、パラメータの不安定性によるシミュレーション研究全般への信頼性を損ねたという反動との振幅が大きかった。30年前という時代制約を踏まえればその意義は認められつつも、これを積極的に論じる必要性は小さいだろう。

また、廣瀬他(2002)は、方法論としてのシミュレーションには、以下の問題があると主張している。

シミュレーションという手法自体、自己矛盾的な部分を含んでいる。じつは『このシミュレーションが正しいことをどうやって証明すればよいのですか?』という質問を、シミュレーションを生業とする何人もの友人に投げかけたことがあるが、いまだに満足な回答が得られたという記憶がない。未知の問題を計算機による模擬実験で検討しようという場合、その答えが正解である保証はあまりない。わかりきった問題であれば正当性を証明できるであろうが、それでは何のためのシミュレーションをするのか分からなくなってしまう (廣瀬他, 2002, p.37)

シミュレーションが発達してその重要性が高まってくると、信頼性・正確性といったことに対する要求もよりシビアになる。シミュレーションという手法がそれらの要求にどこまで答えられるのかも考えておかなければならないだろう (廣瀬他, 2002, p.172)

ただしこの問題提起は、シミュレーションの守備範囲を、あくまで現実の物理的世界に対する模倣として限定している考え方から導出されているものと推測できる。すなわち、我々が議論する社会科学における理論開発手段としてのシミュレーションからみると、一面的であるという批判が生じる。その意味で廣瀬は「シミュレーションを模倣と考える限りにおいて、オリジナルを超えることはできない」(p.221)と述べているが、我々はこれに異を唱えるのである。

シミュレーションが対象にしているモデルには、物理的な現実対応が存在しないものが存在する。我々が扱いたい社会科学の研究では、その種のモデルがしばしば構築される。このとき、以下の理由からモデルの合目的性が問われることになる。すなわち、対象とする問題表現の空間では、帰納表現は演繹表現を含むことができるが、手法の空間としては、帰納方法と演繹方法は互いに独立する。数学的帰納法を広義の演繹的手法であるとみなすと、証明とは演繹的手法にのみ

適用できる概念なので、列挙していくといった、帰納的な証明は厳密な証明にはならない。それゆえ、帰納は意味論や説明に説得力をもたせる必要がある。そのため、モデルの合目的性が問われるのである。

帰納法に適用できる証明手段として推論が挙げられるが、シミュレーション技法による推論には、Hofstadter (1979) が指摘する次のような問題がある。すなわち、演繹的手続でなされる「証明」では、証明の各ステップで行われる推論は自明であろう。しかし、証明が証明として価値をもっているということは、推論の最初の命題と証明のステップで最後に獲得された命題とが同値であることは「自明でない」ということである。シミュレーション技法は、そういった意味での推論の自明性を保証することができるのであろうか。別の観点で表現すれば、モデルがある現実と同型対応しているということ自体は、モデルの外側の議論であり、モデルそのものから見出されることが出来ない、ということである。なお、Hofstadter (1979) は、メッセージにはフレーム、外部、内部という3層の構造があることを指摘している。フレームとは、メッセージ自身が全情報を持っておらず、メッセージが特定のコンテキストに存在することでメッセージとしての役割が充足されるという考え方生じる概念である。例えば、モーツァルトの協奏曲と比較して、ゲージの現代音楽は、既存の音楽概念の破壊という意味づけ—これがフレーム性—をすることで、メッセージとして完結するという考え方である。メッセージの内部性は、ハードウェアが正しく動作することによって、外部性は、メッセージが表現しているものが表現したいものと同型対応できるかどうかによって、それぞれ充足される。

また、廣瀬他 (2002) は、シミュレーションは、逆問題ではなく、順問題で威力を発揮する手法として特徴付けている。つまり、予測やシナリオ、説明といった役割を持っていると主張している。しかし、シミュレーションは逆問題にも使えることが寺野 (2003) の逆シミュレーション技法によって示唆されている。逆シミュレーション技法の基本的なコンセプトは、全体の挙動が分かっている状況の内部メカニズムを求めることで、結果から原因を理解する可能性を示唆している。

3 シミュレーション研究の現在

遠藤 (1996) は次の主張を通して、我々が本稿で論じようとするシミュレーション研究の有効性を指摘している。

…新しいタイプのシミュレーション・モデルが、いずれも、オートポイエーシス・システムや、秩序形成の問題に船首を向けていることは、刮目に値するだろう。…このような動向は、いうまでもなく、コンピュータの機能向上と操作容易性という技術的な要請に後押しされたものであるが、同時に、人間の中心的な課題は人間と社会におかれており、したがって、あらゆるものを人間や社会のモデルとして構成しようとする性向があるのかもしれない。…とくに、コンピュータ・シミュレーションは、従来のような文章

や数式による定式化にはない特性をもつ。それは、認識・感覚の双方において、人間本来のそれと近似した表現を取りうるという点である。

「モデル化」とは、対象のメカニズムを知るには、対象の動態をシミュレートすることが有効である、との認識に支えられている。ところが、…認識・表現の手段はそれ自体で思考を拘束する。 (遠藤, 1996, pp.41-42)

本節では、Axelrod (1997) と Gilbert (1999) をベースに、シミュレーション研究の現状をまとめる。

Axelrod (1997) において、シミュレーション技法は、社会科学における第3の科学的手法(帰納, 演繹, シミュレーション)として位置付けられている。彼はシミュレーションを、システムのモデルを適したインプットと対応するアウトプットに観察によって動かすことであると定義している。この定義は有用であるが、もちろん、シミュレーションの持つ広範囲の目的を網羅した定義ではない。

彼はシミュレーション研究の適用範囲が広範囲に分散していることは、すべての社会科学への応用可能性という強みとともに、それ自身で領域として自己規定できていない現状という弱みの証拠として特徴付けている。これら諸研究におけるシミュレーションの使用方法として、彼は次の7つを挙げている。

予測 例：3ヵ月後の利率を予測する

パフォーマンス 例：特定のタスクの実行, 医療診断, 会話認知, 最適化

訓練 例：フライトシミュレータ

エンターテイメント 例：訓練の拡張

教育 例：シムシティ, ビジネスゲーム

証明 例：単純なルールから複雑な振る舞いが出ることを証明

発見 例：新たな原則や関係の発見に重点をおく

このうち、発見に関する標準的な研究ステップは以下の流れであると述べられている。

1. 現実社会の観察 (事例, 意識調査やマクロデータ)
2. 仮定 (公理の集合)
3. 仮定 (厳密に特定されたルール)
4. 仮定の証明 (結果)
5. 直感の補助 (機能的に解析可能なデータによる)

本稿では、Axelrod の「発見」に特に着目する。我々は、シミュレーションを思考実験の方法

として用いるという「理論開発アプローチ」を提唱する。この見方では「創発」、すなわち、システムにおける局所的相互作用の大規模な影響を重要視する。なぜなら、理論開発にとって、研究結果をもたらす「驚き = 反直観性 (岡田, 2004)」は重要な要素であるからである。とくに Agent-Based Model においては、多くのエージェントが個々に相互作用するので、創発はボトムアップの結果として生じる。この種の研究の目標は、大概、基本的なプロセスの多様な結果 (応用) をより豊かに経験することである (Axelrod, 1997)。なお、エージェントが合理的選択において、最適戦略ではなく適応的戦略を持つ場合、結果は見通せず、シミュレーションが唯一の手法となる範囲が拡大すると、彼は主張していることを付言する。

一方、シミュレーション研究における KISS (Keep it simple and stupid) 原理との関係も重要な注意事項となる。限定合理性や、単純さは拡張する現実的な可能性を広げるという側面から、モデルはなるべく単純であるべきである。この考えの背景には Ashby (1956) の必要多様度の法則も関係している。しかしあまり単純化しすぎると、現実妥当性が損なわれることになるので、両者のトレードオフをどう克服するかが、モデリングにおける重要な研究課題となる。

Axelrod の分類による代表的な研究は以下の通りである。ここで代表的とは、選択基準、単純性、社会科学への関連、領域の多様性、実行時間の短さ、モデルの発見事項、受容可能性といった面から判断される。

- ライフゲーム：単純なルールから複雑な振る舞いが出ることを証明する (Conway)
- 組織のゴミ箱モデル (Cohen)
- Schelling's Residential Tipping Model
- GA を用いた進化的囚人のジレンマ戦略研究 (Axelrod)
- 組織コードモデル (March)
- 分権市場モデル (Alvin and Folye)
- NK Patch Model (Kauffman)
- 囚人のジレンマの社会的タグモデル (Riolo)

Axelrod はこの研究手法に関して、以下の問題がまだ未解決であることを論じている。

- 記述の両義性や記述の欠落
- テキストとデータの不一致
- ソースコード化の困難性
- 方法論の進展
- 標準化の進展
- 研究者機構の設立

次に、Gilbert (1999) からシミュレーションの特徴をまとめる。彼は、シミュレーションとは、特殊な種類のモデリングであると規定している。プログラムは、手順を文章の形で表現するよりも正確なものになり、しかも、数学が表現できる範囲よりも充分広い。プロセスの記述に向いている。これらは理論を洗練するのに役立つので、理論開発型（理論を発展させるための方法）として使用することができるのである。数学よりも優れている点を具体的に挙げると以下のようになる。

- 豊かな表現力
- 具体的
- 専門家でなくても接近可能であること
- 並行的なプロセスや順序の決まっていないプロセスの扱いが容易
- モジュール性に優れているので拡張しやすい
- 異質なエージェントが組み込まれたシミュレーションの構築が容易

Gilbert は、シミュレーションの研究に関する大きな目的は2つあるとしている。それは「理解」、すなわち、社会の特徴についての理解を深めることと、「予測」、すなわち、未来を予測することである。この両者は、本質的に依存的な関係があるので、切り離して論じることは出来ない。しかし傾向として、理解のためには単純なモデルが、予測のためには詳細なモデルが求められる。

一般に、シミュレーション目的が予測にある場合には、精度（モデルに組み込むデータと仮定の多さ）が重要となり、目的が理解にある場合には単純さが強みとなる。

(Gilbert, 1999, 邦訳, p.21)

シミュレーション研究が、社会学者にもたらす利点は、発見と形式化を助けてくれることであろう。

これまで文章の形で表現されてきた理論のいくつかを取り上げ、コンピュータ上にプログラミングできるような仕様（specification）に形式化する必要がある。その形式化の過程では、用いる理論の意味するところが正確で、完全に整合性がとれているようにする必要があるので、その形式化の過程自体も非常に重要な研究対象となっている。この点において、社会科学におけるコンピュータ・シミュレーションは、物理学における数学に似た役割を担うものなのである

(Gilbert, 1999, 邦訳, p.6)

Gilbert はまた、シミュレーションと複雑系の関係については、たとえエージェントが単純な

ルールでプログラムされていても、全体としての振る舞いが非常に複雑なものとなりうることを指摘したうえで、「2次の創発 (Second-order Emergence)」について言及している。これは、人間社会の特徴は、創発的な現象を予見した行動の結果、形成された制度であるので、再帰的な制度の創発ということが出来る。これは人間社会を動物社会から区別する顕著な特徴の一つであり、それがゆえに、社会学と行動生物学が違う理由に他ならない、というものである。

以上のことから、シミュレーション研究の現在についてまとめると以下のようにになると Gilbert (1999, 邦訳, pp.29-30) は主張している。

- 現象の理解が目的であれば、精密なモデルではなく、理論を開発するためにシミュレーションを用いるべきである。複雑なモデルだからといって社会の振る舞いを特別うまく再現できるわけではないし、作成するのが困難である以上、新しい関係性や原理を発見するのにその複雑さが邪魔になる可能性があるからである
- これまで社会学者は、演繹（仮定とそれらの結果をテストすること）か帰納（観察したことを一般化することで理論を発展させること）のどちらか一方を取り入れることが多かった。シミュレーションの場合は仮定から始めて、実験的方法を用い、帰納的に分析できるデータを生成するという第三の可能性を提供する。モデルを開発する際には、演繹と帰納の方法を行き来する必要があることを心にとどめておこう
- 多くの場合、モデルにランダムな要素を組み込んでいるので、たった一回の実行結果は信頼できるものではない。他の乱数についても、結果が頑強なものであることを確認する必要がある。さらに、モデルが前提として仮定が変化したときの影響について、感度分析することが重要であることが多い
- 社会における特定の対象をシミュレートするためにモデルを作成することが多いが、現在の私たちの社会だけでなく、可能な世界を調べるために人工社会モデルを開発することも出来る。人工社会による研究は、相互作用するエージェントからなる社会一般に適用可能な社会理論を開発する一つの方法なのである

4 シミュレーション研究の評価

シミュレーション研究において、議論しておかねばならない重要な特徴に、モデルを作成し、コーディングによって計算機に実装し、シミュレーションを実行し、結果を抽出し、理論として解釈するという一連の研究ステップ全体の研究としての正当性をどのように評価するのかという問題がある。本節で、そのことを考察する。

この評価問題については、多くの先行研究によって議論されてきている。それらを整理した寺野 (2003) において、シミュレーション実験に対する要請は次の5つにまとめられるとしている。

- 現実と整合的な結果が得られること

- 既存の理論では説明が困難な現象を示せること
- シミュレーション結果に満足できること
- 結果の妥当性を評価できること
- 既存の理論で説明困難な課題に対しても接近できること

本稿では、システム開発におけるウォーターフォールモデルをアナロジーとして、研究を以下の3フェーズに分けて、それぞれの評価を考える。分かりやすくするため図1を示す。

生成フェーズ 研究対象となる現実の現象からシミュレーションとして実装されるモデルを構築するまでのフェーズ

解析フェーズ モデルをシミュレーションによって解析するフェーズ

導出フェーズ シミュレーション結果から研究対象に関する知見を導出するフェーズ

モデロジーにおけるシミュレーションアプローチは、現実をモデルを用いて理解するという、一種の間接証明の形式を採用していると考えられる。ここで重要となる評価指標は、このアプローチが「正確」であるかである。そこでまず、「正確性」について考察する。正確性評価は研究の3フェーズに沿って概念化可能である。

生成フェーズ 対象となる現象→概念モデル→広義のフローチャートで表現できる程度のモデル→コーディングされたシミュレーション可能なモデルのそれぞれにおいて、十分性が充足されるように正確であるかどうかを評価する。特に、以下の3つの観点が重要な指標となる。

概念モデルの生成 妥当性 (validation)。対象となる現実の現象を概念モデルとして、必要十分に記述できているかどうかを評価する

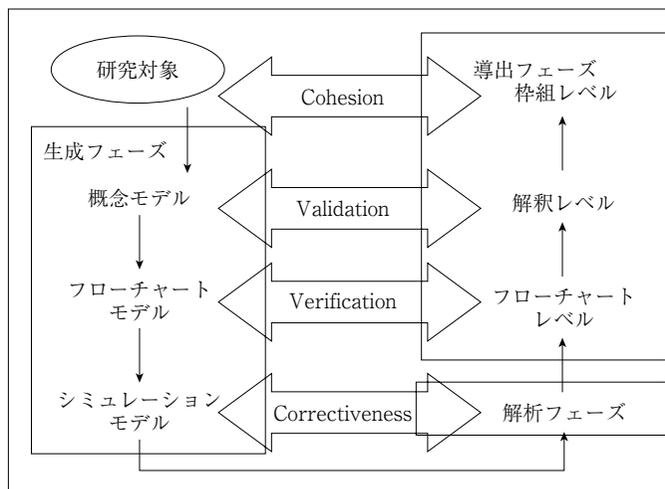


図1 モデロジーにおけるシミュレーション研究の「正確性」評価

フローチャートモデルの生成 正当性 (verification)。解釈レベルで記述されたモデルを具体的な変数や構造を明確にして、解釈レベルを理解しなくてもコーディングできるように (広義の) フローチャートとして記述できるかどうかを評価する

シミュレーションモデルの生成 狭義の正確性 (correctiveness)。フローチャートレベルで記述されたモデルを特定のプログラミング言語にコーディングする際に誤りがないかどうかを評価するレベル

解析フェーズ ソースコードが正しくシミュレーションされているのか、コンピュータのハードウェア異常や OS の違いによる乱数種の影響などを考慮して評価する

導出フェーズ 生成フェーズを逆向きに評価する。ただしウォーターフォールモデルにおいて「評価」が導出フェーズで行われるのは、生成・解析フェーズにおける評価よりも導出フェーズにおける評価がより重要であることを示唆している。一般に、充分性の証明に比べ、シミュレーションの必要性の証明のほうが困難であるからである。本稿では詳細な評価尺度を提供するために、3つのレベルに分けて議論する

フローチャートレベル 正当性 (verification)。シミュレーション結果とフローチャートモデルとが整合しているかどうかを評価する。あるいはコーディングされたシミュレーションモデルだけからフローチャートモデルを作成できるかどうかを評価する

解釈レベル 妥当性 (validation)。フローチャートモデルから対象となる現実の現象に対する概念モデルを導出できるかどうかを評価する。しかし、一般的にフローチャートモデルと概念モデルは1対1対応ではなく、多対多対応であることに注意しなければならない。ある概念モデルから複数のフローチャートモデルが作成できるのと同様に、あるフローチャートモデルから複数の概念モデルを導出できる可能性がある。後述したい

枠組レベル 整合性 (cohesion)。研究全体の目的に対して構築された概念モデルのシミュレーションによって導出された解釈 (知見) が、研究目的と合致しているかどうかを評価する

なお、正当性・妥当性の用法については、Balci (1994, 1996) を参考にした。また特に妥当性検証時において以下の点に注意する必要がある。

1. モデルのプロセスも対象のプロセスもともに確率的である、つまり正確な一致が期待できるわけではない
2. シミュレーションの経路依存性、初期条件がシミュレーションの歴史に影響を及ぼす
3. 対象には、モデルでは再現できていない別の側面がある可能性を完全に否定できない
4. モデルは正しいが対象についてのデータが間違っている可能性やデータ自体が仮定や推定の結果である可能性について考察する

概念モデルとフローチャートモデルの多対多対応関係について考察する。この点の自由度の大きさがシミュレーション研究の正確性に対する懐疑の大部分を占めており、それゆえ詳細な議論が求められる。まず、概念モデルからフローチャートモデルを構築する際に、以下の点の自由度が大きいことに注意する必要がある。

- 関数形式の特定に関する自由度の大きさ。数理解析レベルで解析可能である必要がないので、関数の単純化の制約条件が大幅に緩和される。このことはモデルの現実への妥当性を増加させ、あるいは、モデルの詳細なダイナミックスを観察可能になると引き換えに、関数特定の恣意性が生じることになる
- 変数（パラメータ）の特定に関する自由度の大きさ。たいていの社会科学におけるシミュレーションアプローチに用いられるパラメータは、現実に観察可能なデータではないことが多く、パラメータの定義域をどのレンジにして、あるいはいくつに特定化するかを決定するのが困難になる場合が多い。このとき、感度分析（sensitive analysis）、すなわち、モデルの振る舞いが、パラメータと初期条件にわずかな変化に対して、どのくらい敏感であるのかを、検討するため、膨大なシミュレーションを実行する必要性が生じる。しかし、パラメータを適切に設定することができればこの問題を回避することができる。このようなモデルは頑健であるといつてよいであろう
- 乱数に関する扱いにおける自由度の大きさ。乱数は主に、モデル化されているすべての外部環境要因の表現としてや、エージェントの個人的属性の表現として、あるいは、エージェントの行動順序が結果に影響ある場合に、その順序を制御するものとして使用されることが多い。シミュレーションアプローチでは一般的に多くの異なる乱数種を用いたシミュレーションを実施することで、乱数の影響を排除する努力を行うが、すべての観察変数に対する乱数種の違いが与える影響を検討することは事実上不可能である。ある種のモデルは理論的に乱数の影響を計算できるものもある。また、乱数種の挙動は、一般的にOSに依存するので、同じシミュレーションモデルであつてさえ、異なる結果を生む可能性を完全に否定できない

これまで、シミュレーション技法の評価尺度として正確性に注目してきた。もちろん、それ以外にもいくつかの評価指標が考えられる。

利用可能性 異なる複数の研究からであっても、フローチャートレベルで同じモジュールを使う場合がしばしばある。このときに標準的なモジュールが存在すると、生成フェーズにおける誤りをなくすることができるので、モデルの利用可能性が高いことは利点となる

拡張性 フローチャートモデルからシミュレーションモデルを作成する際に、あらかじめフローチャートモデルの変更に対応できるように拡張性を確保しておくことは重要である。あるいは、概念モデル作成時における拡張性の確保は、研究の深化につながる重要な利益を生む可

能性が高い (Axelrod, 1997)

容易性 概念モデルは、それからフローチャートモデルを構築するときに、なるべく多義的な解釈が入り込まないように作ることができれば、その概念モデルは容易性が高いといえ評価される。同様に、フローチャートモデルからシミュレーションモデルを構築するのが、比較的容易であることもまた重要である

単純性 岡田 (2004) で議論したように、抽象度の高い一般化された概念モデルほど、概念モデルの枠組レベルにおける知見の導出量は多いと考えられる。KISS 原理の要請に応えながら、如何に反直観的な知見を導出できるかが良いモデルの条件になる

再現可能性 導出フェーズにおいて特に考慮すべき指標である。再現可能性とは、シミュレーション結果が、シミュレーションモデルと比べ、あるいはフローチャートモデル、概念モデルと比べて、どれほどの再現性を有しているかを調べることで得られる。特に、シミュレーションモデルにおける乱数の影響を扱うための再現可能性には、数値的等価性、分散等価性、関係等価性の3つのレベルがある。

フィードバック性 非常に抽象性の高い「人工社会」のような対象については、対象とシミュレーションの関係が薄い、もしくは、全く存在しないということもあるため、モデルの外部観察としての妥当性と内部観察としての正当性の区別が困難になる。このような対象を扱うときには *il silico* すなわち、育成的発想が重要になる。つまり、フィードバックによって作成・解析・導出フェーズを繰り返し行い、モデルの信頼性を確保しなければならない。このためには、概念モデルからシミュレーションモデルまでの一連のモデリングにおいて、フィードバックできる余地を常に確保していることが重要になってくる。これはまた理論開発思考における *would-be* すなわち、シナリオ提示型の研究としても価値を有することになるのである

5 モデロジーとしての新たな課題

本節では、シミュレーションアプローチに関して、評価以外に議論すべき課題をモデロジーとして取り上げ、若干の考察を試みる。

まず、数理解析とシミュレーションによる解析の境界に関する議論である。数理解析という観点からは、問題は以下の4つのクラスに分類できる

1. 数理解析という手法では原理的に解けない問題クラス (解法の非存在が証明されている)
2. 解法が見つけられていない問題クラス (存在も非存在も証明されていない)
3. 解法が存在するが NP 問題に属する (実時間で解くことのできる解法が存在しない)
4. 解法が存在し、しかも P 問題に属する (数理的に完全に解ける)

数理解析とシミュレーションの境界とは、解析的に解ける問題のクラスとシミュレーションで

しか記述できない問題のクラスとの関係を議論することであるから、上記のクラスに分類した場合、解法の存在証明が不可能な問題に関して議論することが重要となる。つまり、拡張された $P=NP$ 問題として、数理解析=シミュレーション解析境界問題が定義できるのではないか。

境界問題へのもう一つのアプローチとして、シミュレーションの側から接近する場合について議論する。シミュレーションアプローチはアルゴリズムで記述できる問題クラスを対象とすることができる。それではアルゴリズムはどこまで数理解析可能であるのか。単純なアルゴリズムは差分方程式系で記述することができるので、数理解析可能であるかは不明としても、数理表現が可能である。しかし、プログラム科学と法則定立科学が本質的に違う（吉田，1995）ことから、すべてのアルゴリズムで表現される問題を数理表現することはできない。吉田（1995）によれば、社会科学領域は、本来、法則ではなく、規則が存在するだけである。規則とは法則と比べて、人為的であり、それはプログラムとして記述されるのが自然であるという立場から、社会科学におけるプログラム科学を提唱している。この場合、アルゴリズムは以下のクラスに分類できるだろう

1. 差分方程式系として数理表現可能で数理解析可能なアルゴリズム
2. 差分方程式系として数理表現可能であるが数理解析が不可能なアルゴリズム
3. 差分方程式系として数理表現をすることができないアルゴリズム

次に、ランダムネスに関する議論である。我々は、乱数のもつ鋭敏性（sensitivity）と概念モデルのもつ鋭敏性のあいだには、ちょうど不確定性原理のような一定の認知限界が存在するのではないかという提案を行う。すなわち、概念モデルの構築にあたって、現実対象の複雑性にすべて対応せず、研究目的に添って必要な単純化・抽象化を施す必要がある。繰り返し論じてきたように、その方が事象の本質的なメカニズムを導出しやすいからである。しかし、そのために導入されるツールとして乱数が用いられる場合が多い。つまり、抽象化の代償として乱数の影響が拡大される。このことは、乱数が結果に影響を与える度合いと研究目的が要請する単純で一般性の高い本質的な知見の導入とがトレードオフの関係にあることを意味していると考えられる。

また、数理解析可能なモデルにおける解が、ちょうど定理の証明のような厳密さで真偽が判定できるのに対し、そもそもランダムネスやそのチューニングに伴う誤差の介入が存在するため、厳密な証明が原理的に不可能であるシミュレーションは、その研究としての正当性のために、概念モデルの構築という「モデルの入り口」と「モデルの出口」特に、知見導出における妥当性の検証が重要になる。

ところで、研究者はシミュレーションを前提にした概念モデルに対して、なるべく数理表現できるように努める必要はあるのだろうか。この発想は数理表現できないからシミュレーションを行うといった、シミュレーション研究へのネガティブなコミットメントと関係が深いのだろうか。我々は、数理表現に努めることはネガティブなコミットメントに直ちに結びつくものではないと

いう主張を行う。厳密な数理解析はモデルの正確性を高めるために重要であるが、数理解析は直ちに数理解析可能ではないことに注意すればよい。

より議論を深めるために、オートマトンの定義と比較して、モデルのシステム論的記述はどこまで可能であるかという問いを立てることは重要である。我々は経験からかなりのマルチエージェントモデルは、初期状態と状態遷移関数をもつ抽象代数的表現で記述できることを発見した。山本（2003）は、Agent-Based Approachが対象とするモデルをセル・オートマトンの枠組で理解し、モデルの構成要素を以下のように分類して特徴付けている（カッコ内は本稿による注釈）。

- 個人（エージェント）
 - 内部状態
 - 内部状態遷移ルール
 - 目的（個人の行動目標）
- 個人の相互作用ルール
- 集合的秩序（研究者が観察する大域的現象）

また、Cohen（1999）は、繰り返し囚人のジレンマという様々な研究で使用されるモデルによってエージェント集団の社会的行動パターンに関して体系的に理解するために、3つの鍵となる次元があることを論じている。

戦略空間 エージェントの戦略をどう定義するのか

相互作用過程 エージェントは相手をどう決めるのか

適応過程 エージェントはどのように戦略を学習するのか

6 おわりに

本稿で主張した理論開発型アプローチとしてのシミュレーション研究は、次のようにまとめられるだろう。シミュレーション研究の結果、得られた知見は、現実社会の上で検証可能な理論仮説として提示される。検証可能とは、少なくとも、理論仮説に対する必要条件は検証できることを指す。しかし、理論開発型アプローチが提示する知見はシミュレーションによって初めて明らかにされる知見である、という特色を持つ。なぜなら、まず対象が複雑系に属しており、厳密な数理解析を行えず（数理解析は可能であっても）、モデルの挙動をシミュレーション実行以前に予測することが出来ないからである。これは、いわば、物理系のカオスの式からグラフの挙動を予測出来ないことに対応する。次に、現象から現象を引き起こすメカニズムを求めることが出来ないからである。これは、カオス系のグラフから、グラフの生成式を生成することが出来ないことに対応するであろう。そして、本研究が対象とする現実の現象を生ぜしめた全てのメカニズムを現実世界において観察することが不可能であるからである。金子、津田（1996）によると、対

象が複雑系の場合、カオスの挙動を記述するには必然的に構成的アプローチをとらざるを得ず、抽象化されたモデルから創発された現象の「解釈」こそが、「現実」そのものよりも、現実に対して普遍的であり予測的であるとされているのである。

一方、概念モデルを構築して、一連のシミュレーションを実行するときは、その記述能力の豊富さや計算能力の高さゆえに、興味深い様々な現象を「ありうべき (would-be)」シナリオとして、我々に提供可能であり、モデルの構築とシミュレーションによって、直観的に引き出すことが困難な、様々な仮説を引き出すことに有効である。さらに、この仮説は、モデルの持つメカニズム性を充分吟味することによって、新しい理論として提示することが可能となるのである。「システムとは物の見方である」との Weinberg (1975) の有名な唯識論的世界観を引くまでもなく、複雑な現実の現象を対象とする大概の社会科学的研究においては、対象をどのようにとらえるかによって、異なる研究観が存在する。この認識論における多視点主義においては、研究者の視点がどのような意味をもたらし、どのような貢献をもたらすのかについて議論する必要がある。その意味で、シミュレーション研究は、常に本稿で議論した評価の目に晒されることになるのである。

参考文献

- [有澤他, 1997] 有澤 誠, 齊藤鉄也, モデルシミュレーション技法, 共立出版, 1997.
- [Ashby, 1956] Ashby, W.R., *An Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall.
- [Axelrod, 1984] Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, New York, Basic Books.
- [Axelrod, 1997] Axelrod, R., *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*, Simulating Social Phenomena, 21-40.
- [Balci, 1994] Balci, O., "Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study", *Annals of Operations Research*, 53, 121-173.
- [Balci, 1996] Balci, O., "Verification, Validation and Testing of Models," in S.I. Gass and C.M. Harris (eds.), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Kluwer Academic Publishers, Boston. (邦訳) 椎塚久雄, モデルの正当性の検証, 妥当性の検証およびテスト, 経営科学 OR 用語大事典, 朝倉書店, 1999.
- [Cohen, et al., 1999] Cohen, M.D., R.L. Riolo and R. Axelrod, *The Emergence of Social Organization in the Prisoner's Dilemma: How Context- Preservation and other Factors Promote Cooperation*, SFI Working Paper Series, on <http://www.santafe.edu/sfi/publications/wpabstract/199901002>, Santa Fe Institute.
- [遠藤, 1996] 遠藤 薫, 世界はいかにして可能か, 社会情報システム学・序説, 富士通ブックス, 第1章, 25-46.
- [Gilbert & Troitzsch, 1999] Gilbert, N. and K.G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press. (邦訳) 井庭崇他, 社会シミュレーションの技法, 日本評論社, 2003.
- [廣瀬他, 2002] 廣瀬通孝他, シミュレーションの思想, 東京大学出版会, 2002.
- [Hofstadter, 1979] Hofstadter, D.R., *Gödel, Escher, Bach*, Basic Books, Inc. (邦訳) 野崎昭弘, はやしはじめ, 柳瀬尚紀, ゲーデル, エッシャー, バッハ, 白揚社, 1985.
- [金子, 津田, 1996] 金子邦彦, 津田一郎, 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店.

- [Meadows, et al. 1974] Meadows, D.L., et al., *The Dynamics of Growth in a Finite World*, MIT Press, Cambridge, MA, 1974. (邦訳) 大来佐武郎, 成長の限界: ローマクラブ「人類の危機」レポート, ダイヤモンド社, 1972.
- [森田, 1997] 森田道也, 経営システムのモデリング学習, 牧野書店, 1997.
- [岡田, 2000] 岡田 勇, 操作的オーガニゼーション指向モデルに基づく組織硬直化と再組織化に関する研究, 電気通信大学博士論文.
- [岡田, 2004] 岡田 勇, シミュレーション技法の発展に基づくモデロジーに向けて(1), 創価経営論集, 28(1), 141-157.
- [Sen, 1970] Sen, A. K., *Collective Choice and Social Welfare*, San Francisco, Holden-Day. (邦訳) 志田基与師監訳, 集合的選択と社会的厚生, 剗草書房, 2000.
- [数理科学, 1993] 数理科学, 別冊・数理科学, シミュレーション, サイエンス社, 1993.
- [寺野, 2003] 寺野隆雄, エージェントベースモデリング: KISS原理を超えて, 人工知能学会誌, 18(6), 710-715.
- [Weinberg, 1975] Weinberg, G. M., *An Introduction to General Systems Thinking*, John Wiley & Sons, Inc. (邦訳) 松田武彦, 一般システム思考入門, 紀伊國屋書店, 1979.
- [山本, 2003] 山本仁志, 双方向情報チャネルの多様化環境下における集合的秩序に関する研究, 電気通信大学博士論文.
- [吉田, 1995] 吉田民人, 自己組織性とはなにか, ミネルヴァ書房.