

## 論 文

社会システムシミュレーションの方法と  
さまざまな応用

谷 田 則 幸

## 1. はじめに

コンピュータシミュレーションが、経済学をはじめとする社会科学においても用いられるようになったのは、1960年代のことである。1960年代は、大学の研究にコンピュータが導入され、利用された時期ではあるが、その計算能力は現在のパーソナルコンピュータと比べても格段に劣っており、シミュレーションにおいても離散事象やシステムダイナミクスなど、一部の範囲に限定されていたといえる [Troitzsch 97]。

社会科学においても、政策分野などで用いられたマイクロシミュレーションは、確率過程論をベースに、個人や家計などの大規模なマイクロデータのサンプルを用い、遷移確率により時間経過をシミュレートすることで、そのサンプルに変化を与え、それを繰り返すことで、一定期間経過後の新しいサンプルを得る。この新しいサンプルを対象に統計的解析を行う。しかし、このマイクロシミュレーションは一定の成果を得たものの、社会シミュレーションにおいてその後大きな発展を記すことはなかったといえよう。

その後、社会シミュレーションが再び注目を集めるには、エージェントベースドシミュレーション (ABS) の登場する 1990年代までの時間を要した。ABSに基づく社会シミュレーションは、人工知能やマルチエージェントシステムといったコンピュータサイエンスでの技術発展に加え、社会心理学、認知科学、数理社会学などでの人間の行動に関する研究の成果が融合したことにより実現したといえる。

本稿では、社会シミュレーションのベースとして存在する、社会システムのモデリング、人間のモデリング、技法などに関する研究の現状を示すとともに、社会システムシミュレーションを歴史や紛争などに適用した事例を紹介したい。

## 2. 社会シミュレーション

## 2.1 社会システムシミュレーションとは

社会シミュレーションとは、人工社会を構築し、その人工社会にさまざまな刺激を与える

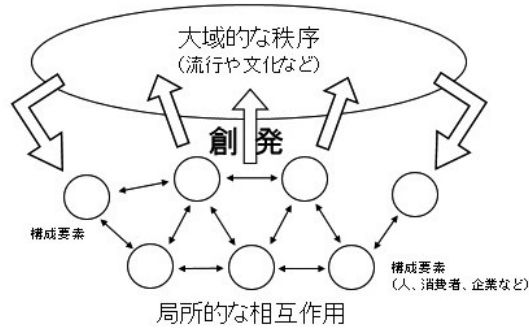


図1 社会システム

(〔伊庭ら 98〕を参考に筆者加筆修正)

実験をすることにより、社会に存在する諸問題にアプローチする技法である。とくに、近年においては、エージェントベースドシミュレーション (ABS) として、コンピュータ上に人工社会をプログラムとして作成 (構築) し、その人工社会をさまざまな設定でプログラムを実行する (実験) ことにより、どのような変化が生じるかを観測することにより、実在する社会に対して行えない実験をコンピュータ上で仮想的に行う手法として理解されている。また、ABSでは人工社会の中にはエージェントと呼ばれる主体 (例えば、人、企業など) が定義され、エージェント同士、あるいはエージェントと環境、の間での相互作用により、社会がボトムアップに構成される社会モデルを考える。このようなモデルを用いて行うシミュレーションを、本稿ではとくに社会システムシミュレーション、また、モデルを構築することを社会システムモデリングと呼ぶこととする。

[Gilbert 93] や [谷田ら 07] を参考に、人工社会の構築 (モデリング) の流れを図2に示す。

まず、フェーズ1では、「問題」の明確化を行う。「問題」の明確化により、モデル化したい対象を大まかに把握する。

フェーズ2では、「観察」を通して、モデル化したい対象の「定義」(形式化)を行う。

フェーズ3では、前述の「定義」に基づいて、「モデル設計」を行うが、「定義」された全てのものを入れ込むのではなく、できるだけ絞り込みを行うことが望ましい。いわゆる、Occam's Razor の指針に基づく。

第4のフェーズでは、フェーズ3の「定義」(設計図)に基づき、プログラミングを行う。

第5フェーズ「正当性の検証」および第6フェーズ「妥当性の検証」は、デバッグ・フェーズである。「正当性の検証」では、「定義」どおりにプログラムが作成され、意図した通り稼働しているか、を確認する。当然のことながら、シンプルなプログラムほどデバッグ

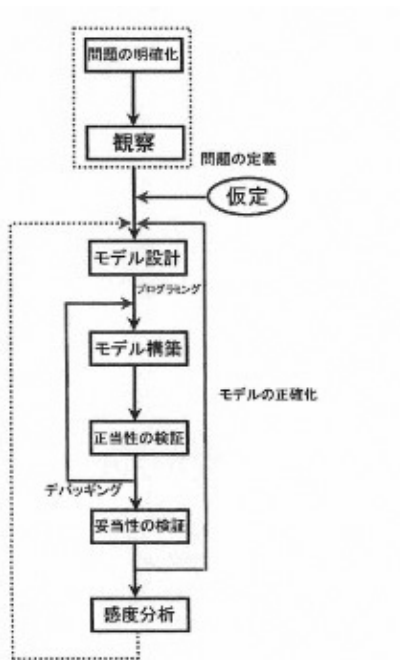


図2 シミュレーションモデリングの流れ

ングは容易であるので、ここでも Occam's Razor は有効であるといえる。

一方、「妥当性の検証」では、作成したモデルの振る舞いおよび出力されるデータが、現実社会のそれらと一致（あるいは類似）しているかどうかの確認がなされる（フェーズ6）。適切なモデルが実装されていれば、実際のそれと多くの類似点が見られるが、モデルが不十分な場合には、あまり類似点が多く見られない。モデルは実行の度に、プロセスや経路情報を伴う時系列データを生成するが、実験計画法やそれに付随する多くの統計的手法や知見により、このデータをより精度の高いものにすることが可能となる（例えば、浅野ら（2006）、広津（1976）などを参照）。

最後のフェーズ7では、「感度分析」を行う。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、結果がどの程度の変化（バラツキ）が見られるか、ということである。実際に、カオスのコンテキストでは、初期値のわずかな違いが、アトラクタの軌道に関して大きな差異を引き起こす（初期値の鋭敏性）ことが確認されている。

図2から分かるように、フェーズ4・5はデバッグのため、フェーズ3・4・5・6はモデルの正確化のため、フェーズ3・4・5・6・7は感度分布を把握するために、それぞれ繰り返し実行される。

## 2.2 複雑系

複雑系とは、多く構成要素からなり、非常に複雑な相互作用や非線形相互作用により、部分が全体に、全体が部分に影響しあって複雑に振る舞う系のことを言い、従来の要素還元的分析では捉えることが困難な生命・気象・経済などの現象に見られる。

また、ニュートンの自然観では「初期値が定まればあとは系の支配する方程式により、その後の振る舞いが決定される」のに対し、複雑系は、「初期値のほんの少しの違いにより減少が大きく異なる」という非決定的あるいは確率的な超ニュートンの自然観が形成されるとされている [古田 2009]。

一般に、社会シミュレーションで扱う「社会」は「人」の集団である。「人」は上記の意味で複雑系であり、「社会」も同様に複雑系である。したがって、「社会」は複雑系の複雑系ということになる。複雑系の数理に関しては、[金野 2013] を参考にされたい。

## 3. 社会システムモデリングと社会システムシミュレーション

### 3.1 社会システムシミュレーションの目的

社会（システム）シミュレーションの目的は、社会に存在するさまざまな課題に対して、適切と思われる社会政策を適用した際に、実在する社会がどのような影響を受けるか、その結果どのようなメリット・デメリットが生じるかについてシミュレーションを通して予測し、より望ましい社会政策を選択するという意思決定をすることにある。

### 3.2 社会システムモデリング

社会システムモデリングの概要に関しては、図2で簡易的に紹介した。ここでは、簡単のために、社会システムの構成要素である「人」に関するモデリング（ヒューマンモデリング）に関する部分を省略した。ここで、ヒューマンモデルとは、私たちが人間の行動を記述・理解・予測する際に、その行動のうち注目すべき部分のみを抽出し、何らかの表現形式で示したものをいう [古田 1998]。いうまでもなく、「人」は「社会」の基本的構成要素であり、したがってヒューマンモデリングは社会システムモデリングの最も重要な技術になる。

### 3.3 マルチスケール・ヒューマンモデリング

社会システムシミュレーションにおいて重要な位置を占めるヒューマンモデリングであるが、実際に人間の行動をモデル化することは容易なことではない。なぜならば、人間は極めて適応力が高いため、新しい社会政策を適用したとしても、当初こそ期待した効果が見られたとしても、最終的には期待した効果があまり見られなくなることもある。そればかりか、

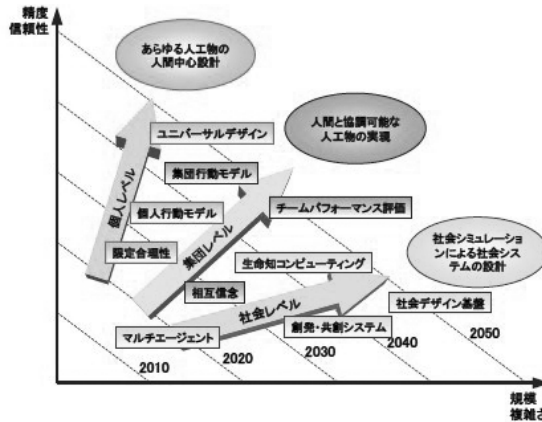


図3 ヒューマンモデリングのロードマップ ([横断09] より引用)

社会政策を適用するまでには予想もつかなかった問題や、社会環境が変化したことによる人間の行動自体の変化が生じることもある。言い換えれば、そのような行動の変化にまで耐えうるヒューマンモデルを考える必要がある。このようなヒューマンモデルを構築するにあたり、「社会システムのモデリング・シミュレーション技術分野のアカデミックロードマップ」[横断09]では、一つのアプローチとしてマルチスケール・ヒューマンモデリングが提案されている(図3参照)。すなわち、「人」を集団の規模に応じて、個人レベル、集団レベル、社会レベルの3つのレベルに分類し、それぞれのレベルでヒューマンモデリングを実施するというものである。本項では、紙幅の都合から詳細を述べることは控えるが、関心がある場合は、[横断09]を参考にされたい。

#### 4. 社会システムシミュレーションのさまざまな分野への適用

##### 4.1 セル・オートマトンモデル

セル・オートマトン (Cellular Automaton) は、規則的なグリッドの上に、有限個の状態(例えば、ON と OFF)を持つ同質のセルを、2次元(1次元や3次元でもよい)に配置した空間を想定する。セルの状態は、自身の過去の状態と近傍にあるセルの状態の依存の仕方が記述されたルールにより決定される。セル・オートマトンは、ミクロレベルの多くの単純な事象から創造(創発)されるマクロレベルの現象を研究するのに有用である。例としてよく用いられるのは、Conwayのライフゲーム [Berlekamp et al. 82] や Schellingの分居モデル (migration model) [Schelling 71] などがある。Schellingのモデルでは、各セルには2種類の人が配置され、それぞれの人は他の人種に対する許容閾値を持ち、自分の近く(近傍)に自分と同じ人種が一定以上いる場合は満足して、止まり、そうでない場合は移動する、とい

う簡単なルールを持たせるだけで、アメリカにおける人種分居のメカニズムを再現した。

#### 4.2 マルチエージェントモデル

マルチエージェントモデルの古典的な例として多用されるのは、Sugarscape [Epstein & Axtell 96] であろう。Sugarscape は、50 × 50 のセルからなるフィールドに、徐々に再生する砂糖とエージェントとしての蟻を配置し、蟻がそれぞれの能力（視力）により砂糖を探し、消費することで生きていく。非常にシンプルなモデルであるが、社会ネットワーク、文化の分化や進化、経済的な均衡や価格決定、市場メカニズムなど、多くの研究において、生物関係研究での E. coli（大腸菌）の役割を果たしている。

セル・オートマトンモデルや Sugarscape モデルは、それぞれのエージェントが簡単なルールを繰り返し適用することで、複雑な現象が創発される。このような黎明期のモデルは、現代の研究、例えば、[横断 09] などで示された、社会システムシミュレーション、国際公共政策シミュレーション、経済制度設計のための社会実験シミュレーション、経済行動シミュレーション、ものづくり・サービスづくりシミュレーション、防災・安全シミュレーション、文化・風土醸成のための参加型シミュレーション、超高齢化社会に向けた身体特性シミュレーション、などにも少なからず影響を与えているといえよう。

次に、上記のシミュレーション対象の例示にはないものについて、簡単に紹介したい。

#### 4.3 国際関係論・国際政治学への応用

この分野に対しての社会システムシミュレーションを適用した事例は、あまり多くはないが、[坂本 09, 坂本 11] で扱われている、アフリカ大陸北東部「アフリカの角」に焦点を当て、国家の領域統治の統合・分裂を捕捉し分析する意欲的な試みを次章で見たい。

### 5. 社会シミュレーションモデルのアフリカ北東部の国家の領域統治への適用

坂本は、「領域統治の統合と分裂は、政府とその対抗組織とが、国家の領域という空間の上で、数多の住民を巻き込みながら展開する軍事的・政治的競合によって引き起こされる。このような空間拘束された多主体間の相互作用を明示的に取り扱うための道具を、既存の国際政治学が十分に備えていなかった点に、先述した理論の欠乏の一因がある。一方、このような相互作用の形式化に大きな力を発揮してきたのが MAS である。」と述べている [坂本 09]。ここで、MAS とはマルチエージェントシミュレーションを指す。

[坂本 09] に関係するこの分野での研究には、[Cederman 97] や [Lustick et al. 04] が



あるが、仮想領域上の多数の住民間で創発されたグループやアイデンティティが分析された、として一定の評価を与えているが、「ヒューリスティックな知見を超えた、実証的な説明力を備えた洞察がそこからなかなか生まれてこない」[坂本 09] といった問題点を指摘している。坂本の一連の研究では、こうした問題に対し、現実世界の空間情報として、地理情報システム (GIS: Geographical Information System) と MAS を統合することで対応している。言い換えれば、MAS 上のモデルに GIS に基づく現実の国家の情報を仮想国家に与えることで、より実際的な領域統治の統合・分裂のシミュレーションを行っている。

仮想国家は、一定の領域(赤道付近で 55Km 四方)を表す PopCell (Population Cell) エージェントの集まりからなり、2次元空間上に配置される。また、この空間上には、仮想的な住民も配置される。PopCell エージェントは、3つの変数(属性、資源、状態)で特徴づけられている。「属性」は、住民の社会・文化属性を表し、[Axelrod 97] などと同様に文字列のベクトルとして表現され、言語・宗教・地域などを項とする n 項組からなる。これらは、GIS データに基づく。「資源」は、人的・物的資源を表し、これも GIS データに基づく人口分布と国民総所得から得られる。最後の「状態」は競合する政府・反政府組織のうちのどの組織に統治されているかを表し、この変数のみがシミュレーションの時間経過にしたがって変化する。

シミュレーションモデルにおけるもう一つのエージェントは、Ruler (Ruling Entity) で、政府・反政府組織を表す。このエージェントは2つの変数(属性: どのような属性の住民に偏重した組織であるか、動員因子: Ruler による内外からの人的・物的資源の調達を規定)で特徴づけられる。

これらのエージェントが与えられたルールにしたがって行動するわけであるが、そのシ

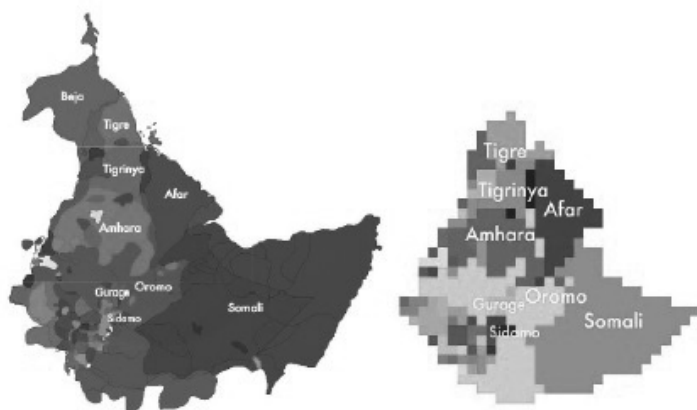


図4 エチオピア・エリトリアの言語民族分布 (左: 現実、右: 仮想)  
([坂本 09] より引用)

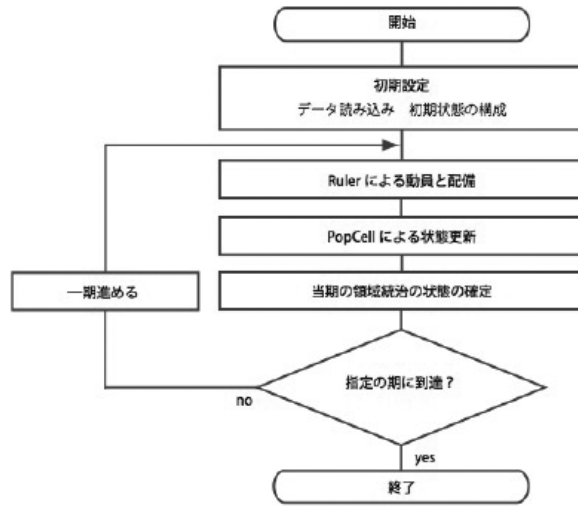


図5 シミュレーションの流れ  
 ([坂本 09] より引用)

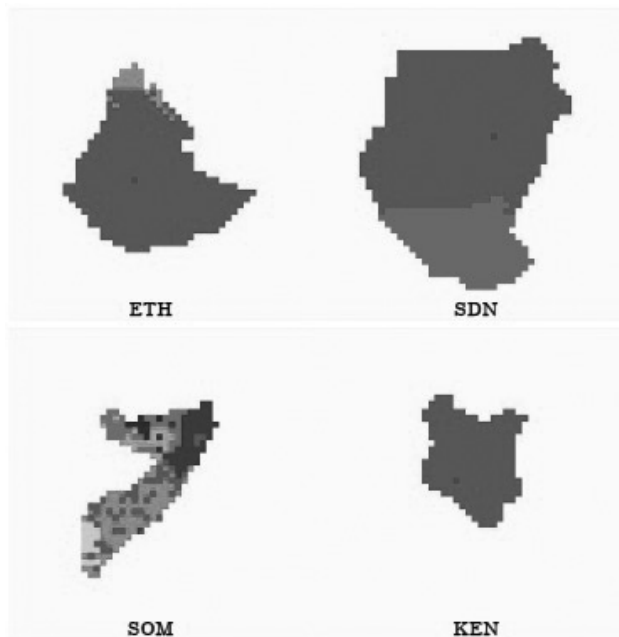


図6 仮想国家の統合と分裂  
 ([坂本 09] より引用)

シミュレーションの概略的な流れを図5に示す。詳細なルールについては、[Sakamoto 07]を参照されたい。



いくつかのパラメータの組み合わせた場合の、仮想国家の統合と分裂に関するシミュレーション結果が図6に示され、高い類似性を有していることが分かる。

## 6. むすびにかえて

本稿では、エージェントベースドシミュレーションに基づく社会システムシミュレーションの概要とその適用範囲について紹介した。

従来、理論と実験という二つの研究手法によって科学は進歩してきたが、それらに続く第3の方法として、シミュレーションが位置付けられている[塩沢02]。社会科学に対するシミュレーションに基づくアプローチは、前述のように、ある一定の範囲では、有効に機能しているといえる。一方、その範囲外においては、いまだに解決すべきことが山積している。横断型基幹科学技術研究団体連合に基づく「分野横断型科学技術アカデミックロードマップ」に示されている現状と未来(2050年)との間に散在する「すき間」をいかに早く埋めるかどうかが、社会システムシミュレーションの普及に大きく影響するであろう。

紙幅の都合で、紹介できなかつたものの中に、「歴史シミュレーション」がある。[倉橋07]では、歴史人口学および社会ネットワークの視点から、社会システムシミュレーションを用いて、約500年間にわたる中国の名門一族の系譜(家族システム)の分析を行い、家族メンバー属性を時系列変化としてシミュレーションするとともに、逆シミュレーション手法[Kurahashi 05]を用いて家族の規範システムを明らかにしている。このように、関係があまりないように思われていた分野、すなわち、「歴史」にも計算可能な社会学(Computational Sociology)の力を借りて、アプローチされている。時間を巻き戻すことは、当然のことながら不可能であるが、歴史上の「IF」をシミュレーションを用いて再現するのも悪くはないのではないかとコンピュータサイエンティストの筆者は考えている。もちろん、歴史学者にはノスタルジーがないと非難されるかもしれないが。

## 参考文献

- [Axelrod 97] R. Axelrod, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press.
- [Berlekamp et al. 82]
- [Cederman 97] L.E. Cederman, *Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve*, Princeton University Press, 1997.
- [Epstein&Axtell 96] J.M. Epstein and R. Axtell, *Growing Artificial Societies - Social Science From The Bottom Up*, The Brookings Institution, 1996.
- [Gilbert 93] N. Gilbert and K.G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press, 1999.

- [Kurahashi 05] S. Kurahashi and T. Terano, "Analyzing Norm Emergence in Communal Sharing via Agent-based Simulation", *Systems and Computers in Japan*, Vol.36, No.6, pp.102-112, 2005.
- [Lustick et al. 04] I.S. Lustick, D. Miodownik and R.J. Eidelson, "Secessionism in Multicultural States: Does Sharing Power Prevent or Encourage It?", *American Political Science Review*, Vol.98, pp.209-229.
- [Sakamoto 07] T. Sakamoto, "Simulating Territorial Integrity and Dis-integrity of States I: Integrative Application of the Multi-Agent Simulator, Working Paper Series, No.14, 2007.
- [Schelling 71] T. Schelling, "Dynamic Models of Segregation", *Journal of Mathematical Sociology*, Vol.1, pp.143-186, 1971.
- [Troitzsch 97] K.G. Troitzsch, "Social simulation-origins, prospects, purposes", In R. Conte, R. Hegselmann and P. Terna (eds.), *Simulating Social Phenomena*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.456, pp.41-54, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [浅野ら 06] 浅野長一郎・竹内光悦, 『社会環境情報の係数データの実践的解析法』, 共立出版, 2006.
- [伊庭・福原 98] 伊庭崇・福原義久, 『複雑系入門』, NTT 出版, 1998.
- [横断 09] 横断型基幹科学技術研究団体連合, 「分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ」(経済産業省平成 20 年度技術戦略マップローリング委託事業〈分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ作成支援事業〉), 2009.
- [倉橋 07] 倉橋節也, 『歴史シミュレーション 名門一族の系譜』, 人工知能学会全国大会, 2007.
- [金野 13] 金野秀敏, 「複雑系数理モデルの可能性 現実の諸問題を解く」, 『情報管理』, Vol.56, No.8, 2013.
- [坂本・山影 09] 坂本拓人・山影進, 「統合と分裂、紛争と平和—「アフリカの角」をシミュレートする」, ワーキングペーパーシリーズ人工社会研究, No.32, 2009.
- [坂本 11] 『領域統治の統合と分裂』, 書籍工房早山, 2011.
- [塩沢 02] 塩沢由典, 『マルクスの遺産』, 藤原書店, 2002.
- [谷田ら 07] 谷田則幸・村上雅俊, 「社会ネットワークシミュレーション—マルチエージェントシミュレーションによる社会構造の解明—」, 『ソシオネットワーク戦略とは何か』, 多賀出版, 2007.
- [古田 98] 古田一雄, 「ヒューマンモデリングの現状と課題」, 『人工知能学会誌』, Vol.13, No.3, pp.356-363, 2009.
- [古田 09] 古田一雄, 「社会システムのモデリング・シミュレーション技術に関するアカデミック・ロードマップ」, 『横幹』, Vol.3, No.2, pp.139-143, 2009.