

エージェント・ベース・モデリングへの招待

寺野 隆雄

本稿では、エージェントに基づく社会システムのモデリングとそのシミュレーション手法について論ずる。最初に、従来の離散事象シミュレーションとの類似点・相違点について解説するとともに、シミュレーション科学の位置づけについて議論する。その上で、最近の研究成果をいくつか紹介するとともに、このような研究アプローチに対する楽しさ・難しさを述べて結論とする。

キーワード：エージェント・ベース・モデリング，シミュレーション，シミュレーション科学，KISS 原理

1. まず例題から

仮に、現代の社会において、OR という学問分野がまったく未熟であり、それにもかかわらず、パソコンの性能は非常に高い状況にあるとしよう。例えば、あなたが数学をまったく知らない十代の「パソコンおたく」であるというような想定である。そして、あるとき駅の窓口の混雑を見て「エージェント」技術を使ってみようと思いつく。

あなたは数式を見るだけで頭が痛くなる。けれどパソコン技術ならお手のものである。そのような状況で「客」が「エージェント」だと考えてシミュレーションモデルを作るのはごく自然である。それで、何も知らずに手始めに M/M/1 のモデルを作ったとする。到着率、サービス率をそれぞれ λ, μ とし、 $\lambda = \mu$ と設定する。よく知られているように待ち行列長さは定常状態で無限大になる[18]。もちろんあなたはこのような用語も理論も知らない。ただ、窓口が一つで、客がランダムに1分に2名の割合で到着し、同様に2名の処理が行われるとして、1日分のシミュレーションを行うのである。途中で列から逃げ出す人もいないかもしれないが、とりあえずそれはモデルには組み込まない。

実際にモデルを走らせると、図1、または表1のよ

うな結果が得られる（この図表の作成には入手が容易なシミュレータを用いた[10]）。これを見て、OR を知らないあなたはどのような結論を下すだろうか？

一つの結論：「1日のシミュレーションをやっても待ち行列の長さは一定しない。けれども待合場所には30人程度の容量を持たせておけばいいだろう」

この結論は待ち行列理論からは間違っているが、現実問題の解としてはある程度の妥当性を持つ。本解説の目的は、上のような例と解釈について考察し、エージェント・ベース・モデリングの方法論について議論し、そして、みなさんにこのアプローチを魅力を伝えることである。

本稿の構成は次のようである。まず、シミュレーシ

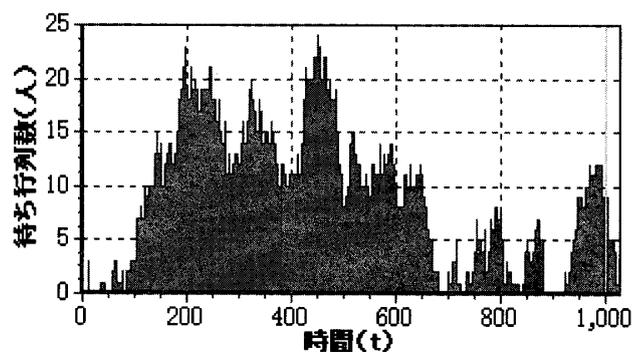


図1 M/M/1シミュレーションのスナップショット

表1 M/M/1 待ち行列シミュレーションの結果 ($\lambda = \mu = 0.5$; 1000 ステップ)

ラン番号	1	2	3	4	5	平均
平均待ち行列長さ	11.2	4.2	11.7	8.2	9.5	9.0
最大待ち行列長さ	31	13	34	28	24	26

てらの たかお
筑波大学 ビジネス科学研究科
〒112-0012 文京区大塚 3-29-1

ジョンモデルから得るべき知見について考察し、次に、その背後にあるシミュレーション科学の問題について議論する。この議論を踏まえた上で、我々が最近得たむしろ「楽しい」エージェント・ベース・モデリングの知見を紹介する。最後に、招待状を載せることにする。

2. シミュレーションで何を得るか

従来の離散事象シミュレーションでは、「確率変動をともしなうシステムに対して、(i)システムのふるまいを模倣する確率モデルをコンピュータ上に作り出し、(ii)そのモデルに対して指向実験を繰り返し行って、(iii)得られた実験結果を統計的に解析してシステムの性能を推定する」という方法がとられる[21]。文献[21]などを参照されるとわかるように、正しい評価結果を得るためには様々な工夫と研究とがなされている。このような観点からは、前出の例題も不十分とはいえシミュレーションモデルであり、「一つの結論」はその分析結果である。

さらにシミュレーションの方法を知らぬ人間に、前出の図1のグラフを見せると、「列が混んでくると、エージェントは並ぶことを避ける行動をとるために、午後になった600ステップ以降、列の長さが短くなっている」といった解釈を物語るかもしれない。もちろんこれは間違いである。それにもかかわらずエージェント・ベース・モデリングでは、我々は、モデルとシミュレーション結果に対して様々な解釈の余地を残しておきたいと考える[6, 30]。

エージェントに基づくシミュレーションの特徴は、(i)ミクロ的な観点においてエージェントが(個別の)内部状態を持ち、自律的に行動・適応し、情報交換と問題解決に携わる点、(ii)その結果として対象システムのマクロ的な性質が創発する点、(iii)エージェントとエージェントを囲む環境とがマイクロ・マクロリンクを形成し、互いに影響を及ぼしあいながら、システムの状態が変化していく点にある[6, 12, 29]。エージェントの内部のデザイン、インタラクションの方式、マイクロ・マクロリンクの形成が、システムの評価以前に大きな問題になるのである。

上の例では、マクロな現象が観測できたとしても、それはミクロなエージェントの挙動に依存して生じただけであり、列の長さというマクロな現象がエージェントのミクロなレベルに影響を与えるわけではない。そのため、我々はこれをエージェント・ベース・モデ

リングとは考えない。しかし、我々はマイクロ・マクロリンクが形成されるような複雑な現象を扱いたい。ここで、モデルの理解性・伝達性・正確性といった側面で大きな問題が生ずる。

これに対する一つの回答が、「ばかばかしいほどモデルを単純化せよ (Keep It Simple, Stupid!)」という KISS 原理である。Axelrod は彼の著書[31]において、次のように主張している：「エージェント・ベース・モデリングはシミュレーションの形を採用するとはいえ、特定の実験的な応用例を正確に描いてみせるのが目的ではない。それよりも、さまざまな応用例に表れる基本的なプロセスについての理解を深めるのが目的である。」(文献[31], p. 5)。もちろん、KISS 原理だけでは現実社会の複雑な現象のモデル化は不可能である[32]。

それがかまわないという立場と、そうではないという両方の議論がある。これはシミュレーション研究を科学の体系の中でどのように位置づけるかという、かなり深刻な問題を含む。次節でその一端について述べる。

3. 第3の方法としてのシミュレーション科学

吉田は文献[34]などの記述において、「物質エネルギーと法則」という従来の科学のパラダイムに加えて、21世紀の科学として「記号情報とプログラム」という「大文字の第2次科学革命」が進行していることを主張する。そして、前者を広義の物理科学、後者を広義の情報科学と呼び、情報科学の原理の一つにコンピュータシミュレーションを位置づけている。また、科学的な態度を「対象のあるがままの姿を記述・説明・予測する」ための「認識科学」と「対象のありたい姿やあるべき姿を設計・説明・評価する」ための「設計科学」とに分類している。

シミュレーション研究においても、認識と設計の両方の立場がある。まったく同じシミュレータを用いたとしても、対象分野の現象を知ることを目的とするならばそれは認識科学の立場である。繰り返し囚人のジレンマゲームでどのような戦略が創発するかを観測するのはこのような立場である[17]。シミュレーション結果を直接的・間接的に利用することを目的とするならば、それは設計科学としての立場である。エージェント・ベース・モデリングによって新商品の売れ行きを予測するのはこれに当たる[5]。

塩沢は文献[24]などにおいて、シミュレーションを第3モードの科学研究法と位置づけている。これは次のような意味である。科学は、従来、「理論と実験という二つの研究方法によって進歩してきた。近代物理学がその典型である。しかし、複雑な事象・システムを対象とする学問分野では、二つの研究方法ではたりない。多様な科学分野において複雑系の考えが生まれてきた背景にはこうした事情がある。理論と実験にならぶ第三の科学研究法（第三モードの科学研究法）が提案されなければならない。それは数学的な解析がうまく進められない複雑な相互作用のある現象について、なんとか確実な知識をえようとする試みである。現在、それはほぼ全面的にコンピュータ実験という形を取っている。」

Axelrod は社会科学におけるシミュレーションを、別の意味で第3の方法に位置づける[3]。第1、第2の方法は、演繹と帰納である。「シミュレーションは演繹と同様に明示的な仮定のもとに始まるが、定理を証明するかわりに、帰納的に分析可能なデータを生成する。しかし、典型的な帰納法と異なり、そのデータは実世界を計測して得たものではなく、あらかじめ規定されたルールから生成されたものである。帰納ではデータのパターンを見出すことができ、演繹では仮定から導ける帰結を見出す。シミュレーションは直観を養う思考実験の道具である。」

さらに、エージェント・ベース・モデリングのためには、モデルをプログラムコード化すること、結果を分析すること、結果を共有すること、モデルを再現することが科学的研究への重要なステップであると主張している。

Axtell は文献[4]において、エージェントシミュレーションを社会科学に適応する際、これまでの理論研究が捨象していた様々な要素をひろい上げることができると示唆している。例えば、経済理論は合理的な経済主体の上に最適化された均衡状態の存在を想定するが、エージェントシミュレーションでは、限定合理的なエージェントを直接に記述・分析の対象とすることで、合理的主体という仮説がどこまで緩和可能かを検証することができる。また、最適均衡・準最適均衡・その他の均衡状態の存在・到達可能性・到達経路依存性を直接取り出すことができ、さらに均衡状態以外の超長時間緩和仮定・動的安定、永続的不安定も分析の対象とできる。

私はこれらの意見に対して、エージェント・ベー

ス・モデリングは、数学的に記述された法則と、言葉で記述した事例・ケースの中間に位置することに注目したい。そして、モデルがコンピュータ・コードとして実行可能であるがゆえに、再現や追試が容易なことと、モデルをコンピュータ言語として記述しているがゆえに、人々の間で伝達性・理解性が高いことに大きな特長があると考えられる。

4. 最近の研究例から

以下ではこれまでの議論をふまえて、最近のエージェント・ベース・モデリングの研究の中から得られた興味深い現象をいくつか紹介する。これらは、一見自明に思えるかもしれないし、また、荒唐無稽に思えるかもしれない。しかし、ここからエージェント・ベース・モデリングの面白さを感じ取っていただければさいわいである。

4.1 争いの発生しうる状況でも協力することが重要である[3]

繰り返し囚人のジレンマゲームにおいては、「通常は「協力」し、相手に裏切られた場合に限って「裏切る」という単純な戦略がきわめて有用であることが判明している。しかも相手とのやりとりにいろいろな制約条件を加えてもこの結果はほとんど変わらない。

争いが発生しそれが有利に働きそうな状況においても、相互に協調するという考え方は重要であり、それが計算組織理論による比較的単純なシミュレーションによって確認できる。

4.2 文化は伝播するが、文化の棲み分けも発生する[3, 8]

人々は互いに性格が似ていればその習慣や文化を受け入れやすい。これによって、自らの考え方が徐々に変化していく。こうして形成される同質的なグループの存在はしばしば体験されることである。これが文化の伝播である。一方、しかしながら、世代の差、宗教の違いなど人々の（ちょっとした）考え方の違いにより、グループ間に理解しがたいほど深刻な壁が発生することもよく知られている。これが文化の棲み分けの現象である。

このような現象もまたエージェントシミュレーションによって確認することが可能である。これによって、隣同士の関係から国家のレベルに至るまで、大小様々なグループが形成されること、いったんグループ間の争いが発生するとそれが信じられないほど長く深いレベルまで継続してしまうこと、いったん形成されたよ

うに見える同質なグループがいつのまにか分裂してしまうことなどの現象が説明できる。

4.3 免疫のしかけで病気の伝染は防ぐことができる[8]

免疫の仕組みをエージェントシミュレーションで模擬することが可能である。ここでパラメータを調整すると急激に病気が伝染するシナリオとそうでないシナリオを自由に再現できる。このような結果を受けて、SARSなどの伝染病の発生と抑制、(サイバー)テロリズムの問題などが最近、エージェント・ベース・モデリングの研究資金のもとになってきている。

4.4 放任すると市場は乱高下する[33]

株式を含む金融市場の状態を解析し、その予測を行うことは非常に重要である。金融工学は、そのために発展してきたといってよい。U-Martでは、参加したエージェントが市場で取引を行うことによって価格を形成し、その価格がまたエージェントの行動に影響を与えるというマイクロ・マクロリンクが存在する。

さて、実際の市場ではちょっとした情報がきっかけとなって市場が乱高下する現象がしばしば発生する。取引額の限界に関する制約が存在しない場合は、U-Martでも似たような乱高下が発生する。エージェントシミュレーションはしばしば現実を先取りする。制約の及ばない領域では、放任することがシステムの乱れを増長させることもある。

4.5 集団思考の発生と抑制[14, 29]

過度な楽観論や集団固有の道徳への無批判、満場一致の幻想などは集団思考の症候であり、その結果稚拙な集団意思決定が引き起こされる。

このような「集団思考」現象は我々のシミュレーションでも発生する。そして、リーダー存在性の低い社会では意見の偏りが抑制される。これは、リーダーの存在が「集団思考」現象における斉一化の圧力を抑制できることを示している。ネットニュース社会においてより急激な意見の偏りが生じることがあるのは、この「集団思考」現象が生じているためと考えられる。

4.6 情報フリーライダは生き残る[15]

今日の情報社会の中では、形のない情報も貴重な資源となっている。この情報資源は、分配によってただちに減るものではないが、その取得コストや分配コストは発生する。このため、情報資源の分配においても、互恵的な規範は崩壊しやすいこはずである。そのきっかけがフリーライダの存在である。

このような共同分配規範の安定化と崩壊のプロセス

をエージェントシミュレーションによって分析した。これによると、直接的な罰則を与えない不寛容な者の存在が共同分配規範の崩壊を防ぐこと、さらに、情報の分配による知識の共有の効果が大きいために、フリーライダを故意に抑制しなくても、社会全体の知識量が増加することもわかった。

4.7 ゆとり教育は子供をダメにする[1]

ゆとり教育の導入で子供の学力が低下しているらしいことは、最近、マスコミでよく議論されている。我々は、学習者の意欲、所得格差、与えるカリキュラムをパラメータにしたエージェントシミュレーションを用いてこの現象を分析した。

それによると次のような興味深い現象が観察された。「ゆとり教育」によって学習者全体の学力が低下する。特に、中位・下位の社会階層において学力低下が著しく、上位層との学力格差が拡大する。また、「ゆとり教育」によって受験競争が緩和されても、その恩恵を受けるのは上位層が多い。格差の原因としては、階層を特徴づける初期値の学力や財産の多寡ではなく、学習者の課題達成への行動ルール、すなわち学習意欲が大きな影響を与える。

5. さあ、始めましょう

エージェントに基づくシミュレーションモデルを作成して動かすことは非常にたやすい。最近では、Ascape[2]; MAS[16]; RePast[23]; Swarm[25]などの利用が容易なツールキットが入手できるので、問題設定さえできればそれこそ1日で興味深い結果を得ることも可能である。また、エージェント・ベース・モデリングに関する教科書も数多く出版されるようにな

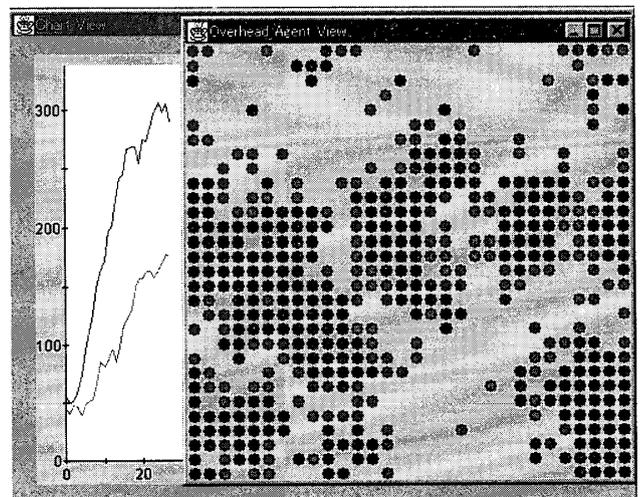


図2 繰り返し囚人のジレンマゲームの画面例[2]

った。たとえば、文献[7, 9, 19, 20, 27]などは基礎から応用までを記述した興味深いテキストであるし、文献[8]や文献[11, 17, 31]などの翻訳書も有用である。

そう、まずは試しに使ってみていただきたい。他の人には理解しがたいが、丸い粒子がコンピュータ画面上を動き回っているのを見るとワクワクするはずである(図2。この丸い粒子が空間を動き回るのが誤解のもとだという意見もある。これももつともである)。

しかし、この種の研究は、技術的にも理論的にもまた応用分野の面でもきわめて学際的である。初めてこの種のモデルに接する人々に、モデルの学術的または実用的な意義を説くのは容易ではない。それぞれの分野にはすでにルネサンス期の「第1次科学革命」から延々と培われた科学のパラダイムが存在する。その方法論と比べると、ある意味では「思い通りの結果を出す」シミュレーションの方法論とのギャップは大きい。また、我々が対象とする問題は複雑適応系である。これ自体が難しい。しかも、複雑適応系を直接制御することはほぼ不可能である。「複雑系を活かす(Harnessing Complexity)」という姿勢が望まれる[26]。

エージェント・ベース・モデリングはまだ開始されたばかりの新しい考え方であり、しかも我が国が世界の先端を走っている数少ない学問分野の一つである[12, 13, 22, 28]。みなさんをこの分野に招待したいと思う。

参考文献

- [1] Arai, A., Terano, T.: Agent-Based Simulation for Educational Policy, *Proc. 34th Conf. Int. Simulation and Gaming Assoc. (ISAGA 2003) Social Contributions and Responsibilities of Simulation and Gameing*, pp. 267-274, 2003.
- [2] Brookings Institution: *ASCAPE Web Page*, <http://www.brookings.edu/dynamics/models/ascape/default.htm>
- [3] Axelrod, R.: Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences, In R. Conte, et al. eds.: *Simulating Social Phenomena*, pp. 21-40, Springer Verlag, 1997 (文献[13]に改定版を再掲)。
- [4] Axtell, R.: *Why Agents? On the Varied Motivation for Agent Computing in the Social Sciences*. Brookings Institution CSED Technical Report No. 17, November, 2000.
- [5] Bonabeau, E.: Predicting the Unpredictable, *Harvard Business Review*, pp. 109-116, March 2002.
- [6] 出口弘, 和泉潔, 塩沢由典, 高安秀樹, 寺野隆雄, 佐藤浩, 喜多一: 座談会: 人工市場を研究する社会的および学問的意義, *人工知能学会誌*, Vol. 15, No. 6, pp. 966-973, 2000.
- [7] 出口弘: 複雑系としての経済学, 日科技連出版社, 2000.
- [8] Epstein, J., Axtell, R.: *Growing Artificial Societies*, Brookings Institution Press, The MIT Press, 1996 (服部正太, 木村香代子(訳): 人工社会, 共立出版, 1999.)。
- [9] 和泉潔: 人工市場: 市場分析の複雑系アプローチ, 森北出版, 2003.
- [10] 伊庭研究室: 待ち行列シミュレータ「Q-Simulation」の使用法, <http://www.iba.k.u-tokyo.ac.jp/~iba/SE/mimura/howto/HowTo.html>
- [11] Gilbert, N., Troitzsch, K. G.: *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press, 1999 (井庭崇, 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.)。
- [12] 人工知能学会誌: 特集: 「複雑系と集合知」, *人工知能学会誌*, Vol. 18, No. 6, 2003.
- [13] 経営情報学会誌: 論文特集: 「エージェント・アプローチ—経営情報学の新しいパラダイムをめざして—」, *経営情報学会誌*, Vol. 12, No. 3, 2003.
- [14] 倉橋節也, 南潮, 寺野隆雄: 逆シミュレーション手法による人工社会モデルの分析, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 35, No. 11, pp. 1454-1461, 1999.
- [15] 倉橋節也, 寺野隆雄: エージェントシミュレーションによる共同分配規範モデル, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol. J 84-D-I No. 8, pp. 1454-1461, 2001.
- [16] 構造計画研究所: *Multi-Agent Simulator Web Page*, <http://www2.kke.co.jp/mas/>
- [17] 松田裕之(訳): つきあい方の科学—バクテリアから国際関係まで—, HBJ 出版局, 1987 (Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, 1984.)。
- [18] 牧本直樹: 待ち行列アルゴリズム—行列解析アプローチ—, 朝倉書店, 2001.
- [19] 生天目章: マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 1998.
- [20] 大内東, 山本雅人, 川村秀憲: マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム—, コロナ社, 2002.
- [21] OR 学会誌: 特集: シミュレーションの数理: 最近の動向, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 46, No. 4, 2001.
- [22] OR 学会誌: 特集: マルチエージェント実験経済学, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 46, No. 10, 2001.

- [23] *RePast Group Web Page*, <http://repast.sourceforge.net/>
- [24] 塩沢由典：マルクスの遺産，藤原書店，2002.
- [25] *Swarm Development Group Web Page*, <http://www.swarm.org/index.html>
- [26] 高木晴夫(監訳)，寺野隆雄(訳)：複雑系組織論—多様性・相互作用・淘汰のメカニズム—，ダイヤモンド社，2003 (Axelrod, R., Cohen, M. D.: *Harnessing Complexity*, The Free Press, 1999.).
- [27] 高玉圭樹：マルチエージェント学習—相互作用の謎に迫る—，コロナ社，2003.
- [28] Terano, T., Deguchi, H., Takadama, K. (eds.): *Meeting the Challenge of Social Problems via Agent-Based Simulation*, Springer Verlag, 2003.
- [29] 寺野隆雄，倉橋節也：エージェントシミュレーションによる社会的インタラクションの分析，*組織科学*，Vol. 34, No. 2, pp. 23-35, 2000.
- [30] 寺野隆雄，倉橋節也：エージェントシミュレーションと人工社会・人工経済，*人工知能学会誌*，Vol. 15, No. 6, pp. 966-973, 2000.
- [31] 寺野隆雄(監訳)：対立と協調の科学—エージェント・ベース・モデルによる複雑系の解明—，ダイヤモンド社，2003 (Axelrod, R.: *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press, 1997.).
- [32] 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*，Vol. 18, No. 6, pp. 710-715, 2003.
- [33] U-Mart 研究会：*U-Mart Project Web Page*, <http://www.u-mart.econ.kyoto-u.ac.jp/>.
- [34] 吉田民人：21世紀の科学—大文字の科学革命—，*組織科学*，Vol. 32, No. 3, pp. 4-26, 1999.