
チュートリアル

エージェント・ベース・モデリングの技術と応用

Perspective on Agent-Based Modeling

東京工業大学 寺野 隆雄

Tokyo Institute of Technology Takao TERANO

Abstract

This paper gives the state-of-the-art of Agent-Based Modeling (ABM) technology and its applications. ABM is characterized by the points that: (1) computer simulation with software agents, which are equipped with internal states, decision rules, and information exchange mechanisms, (2) micro level interactions of agents, macro level emergent phenomena, and micro-macro links among them, and (3) new principles for design and analyses of social complex systems in the real world. This paper also addresses the overviews of the most advanced application domains.

※このチュートリアルは、日本社会情報学会（JSIS & JASI）合同研究発表大会（2006年9月12～14日開催）における記録です。

1. はじめに

「エージェント (Agent)」という言葉は適当な辞書で引くと次のような記述がある：代理人；特約店；行為の主体；作用物質；スパイ；外交官…。最近では、自律的なプログラムまたはプログラムの一部という意味でこの用語が使われる。インターネット上電子商取引をサポートするシステムや、ユーザとのインタフェースにおいて、エージェントという用語が普及している。

本稿で扱うエージェントはこれらとは少し異なるニュアンスを持つ。我々が社会システムの分析とデザインに用いるエージェントは、人間あるいは組織の動的な活動のモデルである。すなわち、エージェントシミュレーションでは、「エージェント」と呼ぶ内部状態と意思決定能力とを備えた複数の主体によるボトムアップなモデル化とこれに基づく創発的な現象やシナリオを分析しようというのである。我々は、社会的・システムの課題についてエージェントベースモデル (Agent-Based Modeling; ABM) による社会シミュレーションによって接近できると考える。

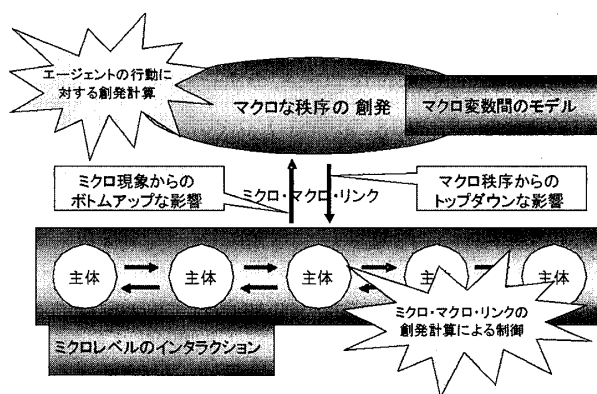


図1 エージェント・シミュレーションの構造

特に、図1に示すような、エージェント間のミクロレベルのインタラクションで創発するマクロな現象、ならびに、それがトップダウンにエージェントに影響を与えるというミクロ・マクロ・リンクの現象の分析に有用である。

本稿では、エージェントに基づく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、エージェント・ベース・モデリングが必要となった背景と研究の現状を紹介する。ついで、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、最近の我々の研究成果をいくつか紹介するとともに、このようなアプローチの今後の可能性について述べて結論とする。なお、本稿は、解説論文[22],[23],[24]に基づいている。

2. エージェント・ベース・モデリングがなぜ必要か

21世紀にはいり、人類活動の世界規模での展開と情報通信をはじめとする技術の急速な発展普及とに伴って、世界規模で人々の意識・行動の変化が、社会制度に追いつかない現象が頻発している。たとえば、①ソフトウェアの違法コピーと知的財産権の問題、②金融市場での異常な乱高下の発生、③国際的な感染症対策、④混雑時の事故発生の問題などはこれにあたる。これらの事件は発生すれば、一応の対策は立てられるものの、従来の社会科学の研究方法では事前には理解が難しく、トップダウン型の政策決定方法では制御できないという特性をもつ。このような例を図2に示す。

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ミクロ・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[7]。

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、ミクロ・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。そしてさらに、モデルの理解性・伝達性・正確性といった

側面でも問題が生ずる。

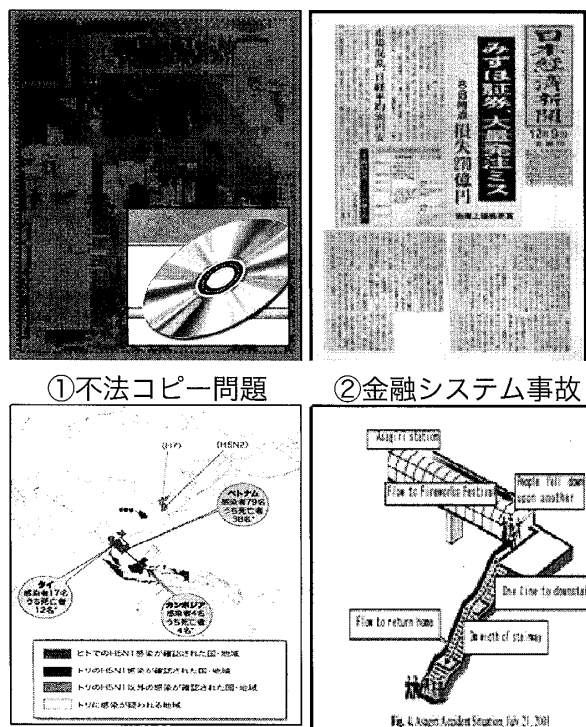


図2 ABMで分析しうる最近の事象 [24]

これに対するひとつの回答が、「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[21]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。」([21], 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[22]。

3. 第3の方法としてのシミュレーション科学

KISS原理でABMは研究が進展する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。

吉田は[25]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1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が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[21]。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あたる[9]。

塩沢は[14]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[1]。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研究への重要なステップであると主張している。

Axtellは[2]において、エージェントシミュレーションを社会科学への適応する際、これまでの理論研究が捨象していたさまざまな要素をひろい上げることができることを示唆している。たとえば、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から、モデルが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る[22],[23],[24]。

ただし、このようなシミュレーションモデルは、物理的な原理原則から離れて、自由に構築できるがゆえに、ひとりよがりなものになりがちである。また、そのためにモデル開発者以外の人々に対する説得力に欠けるきらいがある。

4. ABMの研究からわかること

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、これらはエージェント・ベース・モデリングなくしては得られない知見である。

4. 1 現状に対していかに対応できるか [24]

我々のABM適用経験によると図2で示した諸問題については以下のような結果が得られている：①については、情報財に対するただ乗り（フリーライド）は社会全体の効用を増加させ、それゆえ、適切な制度設計を行わないかぎりこれは撲滅できない[23]；②については、金額と数量を取り違う間違いはいつでも発生し、これが市場に悪影響を及ぼすことがある[18]；③については、感染症対策をいっさい実行しないでも流行が発生しないケースが存在し、それゆえ適切な対策の評価には多くの分析が必要である[17]；④については、明石市歩道橋の事故は個々人の自律的な行動で発生しており、単純な交通整理施策の適用で事故を防ぐことができた[19]。これらはごく自然な結論にみえる。

しかし、従来はこれらを得るのに経験と勘、ならびに適当なシナリオの作成が不可欠であり、長い時間と膨大な試行錯誤が必要であった。現在でもなお、社会・経済・組織の制度基盤の設計問題に関しては、やってみなければその成否がわからないという状況が継続している。本来、

シミュレーションは試行実験が必要な分野に適用すべき技術である。シミュレーションが理工学分野で普及してきたのはそれが可能であったから、社会科学分野で普及していないのはそれができなかったからにすぎない。このような状況に鑑みると、社会の要請に応じて、理工学者と社会学者とが真に協力できる文理融合型かつ領域横断型の学問体系を構築することが不可欠である。

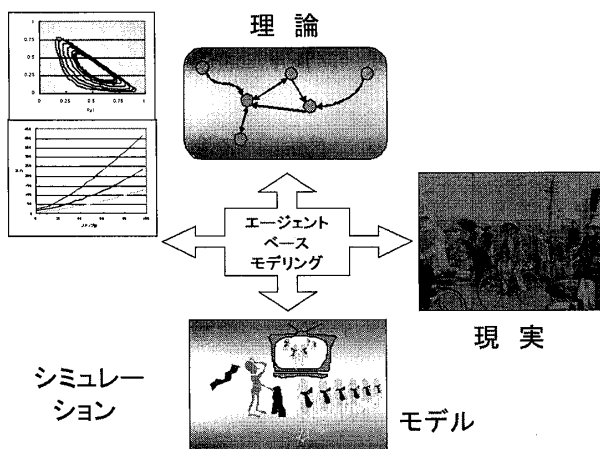


図3 ABM研究の学際性 [24]

我々は次のように考える：理工学研究者が、システム論的な観点から社会・経済・組織の制度基盤の問題へコミットし、社会の変化の速さに追従可能な新しいシステム方法論を開発・普及させること、同時に、社会学者が、多様な主体の関わる現在そして将来のシステムとその歴史について論考を進め、社会をシステムとして捉える見方を築いていくことが必要である。

人類の歴史の中では、貨幣制度・民主主義制度・裁判制度などの優れた制度が発明されてきた。しかし、それには長い時間と膨大な試行錯誤が必要であった。現在でもなお、社会・経済・組織の制度基盤の問題に関しては、やってみなければその成否がわからないという状況が継続している。このような状況に鑑みると、社会の要請に応じて、理工学者と社会学者とが

真に協力できる文理融合型かつ領域横断型の学問体系を構築することが不可欠である(図3)。

4. 2 ABMの研究動向

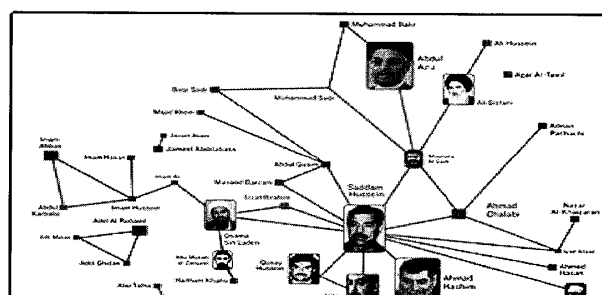
ソフトウェア・エージェントを用いた社会シミュレーションは21世紀にはいつてから、人工知能をはじめとする情報科学、社会科学分野をまたがって注目を集めている。この特長は、人工社会モデルを構築し、エージェント同士の相互作用によって現象の解明を行う点、これまで実験の困難であった社会経済システム等の分野に適用可能な点、ボトムアップ型のモデル構築が可能な点にある。

社会や組織のシステムにシミュレーション技法を用いる研究は古くから行われている。その中には、組織の意思決定行動をモデル化したゴミ箱モデルなどがある。社会・組織システムのマクロレベルの変数の変化に注目するシステム・ダイナミクスのようなトップダウンのシミュレーションの技法も存在する。これはローマクラブの「成長の限界」の研究に用いられたことは良く知られている。社会科学分野でABMを用いた研究が活発化したのは、人工知能のブームが終わり、その技術が普及し始めた1990年代初めである。興味深いことに、これらの研究は、ほぼ同時期に世界各国で開始された。米国ではAxelrod, R.(U. Michigan)[21], Carley, K(CMU), Epstein, J., Axtell, R.(Brookings Institution)等が計算数理組織理論(CMOT)を、欧州では, Gilbert, N. (U. Surrey, UK), Troitzsch, K. G. (U. Koblenz, Germany) 等がSimSocを立ち上げたのはこの時期である。

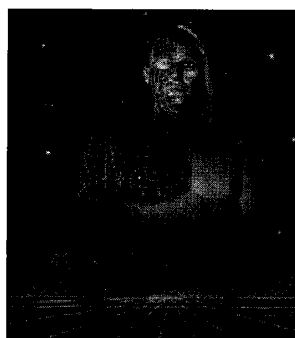
我国では、高木晴夫等がポリエージェント研究会を開始したのが最初である。我々は、これらの研究グループの立ち上げに積極的に関与し、また国際的な交流も活発に行っている[15]。

ABMによる社会シミュレーションは21世紀にはいつてから、人工知能をはじめとする情報科学、社会科学分野をまたがって注目を集めている。米

国では、カーネギーメロン大学 (CMU) ・ジョージメイソン大学(GMU)・スタンフォード大学・アイオワ州立大学などを中心に、計算数理組織理論やACE(Agent Based Computational Economics)などが活発であり、NAACSOS (North American Assoc. on Computational, Social, & Organizational Sciences) の会議が毎年開催されている。



①テロ組織の分析 ([6])



②計算考古学 ([4])



③感染症分析 ([3])

図4 最近のABMの研究から

欧州では、英国サレー大学やドイツ・コブレンツ大学などを中心に理論的な研究が盛んであり、ESSA (European Social Simulation Association) が国際会議を開催している。アジア太平洋地域では、PAAA (Pacific Asian Association on Agent-based Social Systems Sciences) が、AESCS (Agent-based Approaches on Economic and Social Complex Systems) Int. Workshopを毎年開催しており、著者が代表を勤めている([18], [19], [20])。

最近では、関連学会誌に掲載されるABMの研究例も多い。たとえば、IEEE Spectrum誌

(Sept.,2006 [6]) にはABMによるテロ対策研究が、Nature誌では、ABMによる計算考古学 (Artificial Anasazi; 10, Oct., 2002 [4]) が、Scientific American 誌では、感染症対策 (EpiSim; Mar., 2005 [3]) の解説が掲載されている (図4)。

国内でも人工知能学会、計測自動制御学会、情報処理学会、ソフトウェア科学会、組織学会、社会情報学会、進化経済学会、JAWS (Joint Agent Workshop & Symposium) などと同様の動きがみられる。これらは人工知能分野、ならびに既存の文系・理系の枠組みにとらわれないきわめて学際的な動きである。東工大のCOEプログラム：エージェント・ベース社会システム科学の創出、東大・国際社会科学専攻の学術創世プロジェクト：マルチエージェント・シミュレータによる社会秩序変動の研究も我国の代表的なプロジェクトである。山影等の研究に関連して、(株)構造計画研究所によってKK-MASというツールキットが開発され、一部コンサルティングなどに実用応用されている。また、ロボカップレスキューでは緊急時・都市災害時のシミュレーション用に、実時間のシミュレーション技術の確立をはかっている。

これらの中で、社会シミュレーションに関する国際会議 (World Congress on Social Simulation) が2006年8月に京都大学で開催された[1]。これは、上述したESSA,NAACSOS,PAAAが合同で開催した初めての社会シミュレーションに関する国際会議である。我国が社会科学分野の領域で新しい国際会議を初めて主催することはきわめてまれである。WCSS2006の企画のうち特に、若手育成をねらいとした学生論文・シミュレーションコンテストは有意義であった[17]。

WCSS2006で明らかになったABMの課題は以下にまとめられる。これを解決することが「社会エージェント」領域の目標のひとつである。(i) ABM研究のプロセスに社会科学・情報科学・自然科学に共通の標準的な手順を確立すること。

(ii) 研究のためのツール・環境・データの標準化をはかること. (iii)研究成果・知見を分野を越えて共有すること. (iv)研究の過程・成果をわかりやすく提示する方法論を開発すること. (v)シミュレーション結果と現実の減少とのギャップをなくし、シミュレーションを評価・検査・検証する方法論を実現すること.

5. おわりに

本稿では、ABMの必要性和これまでの研究動向・課題について考察した。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 [27] ; Artisoc[26] ; RePast [28]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。興味深いテキスト ([5],[8], [16], [21]など) や解説([1], [7], [10], [11], [12], [13]など) もいくつか出版されている。

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。はじ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」からえんえん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[16]。

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ひとつである[10], [11], [12], [13]。みなさんをこの分野に招待したいと思う。

参考文献

- [1] 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 ([8]に改定版を再掲) .
- [2] Axtell, R.: *Why Agents? On the Varied Motivation for Agent Computing in the Social Sciences*. Brookings Institution CSED Technical Report No. 17, November, 2000.
- [3] Barrett, C. L., Eubank, S. G., Smith, J. P.: Tackling Major Killers: Infectious Diseases. Scientific American Magazine, March 2005.
- [4] Diamond, J. M.: ArchaeologyLife with the artificial Anasazi. Nature 419, pp. 567 - 569 (10 Oct 2002).
- [5] 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.)
- [6] Goldstein, H.: Modeling Terrorists, Vol. 43, No. 9, pp. 26-34, 2006.
- [7] 石田亨, 寺野隆雄, 鳥居大祐, 村上陽平: 社会シミュレーションと参加型デザイン. 情報処理, Vol. 48, No. 3, pp. 271-277, 2007.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 情報処理:特集:社会に向き合うエージェントシステム. 情報処理, Vol. 48, No. 3, 2007.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 大沢英一, 石田亨, 石塚満, 武田英明, 寺野隆雄, 本位田真一, 横尾真: パネル討論: エージェントの社会的

- インパクト. 情報処理, Vol. 48, No. 3, pp. 278-285, 2007.
- [14] 塩沢由典: マルクスの遺産. 藤原書店, 2002.
- [15] 高木晴夫(他): マルチメディア時代の人間と社会—ポリエージェントソサエティ. 日科技連出版, 1995.
- [16] 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.)
- [17] Takahashi, S., Sallach, D., Rouchier, J.: *Advancing Social Simulation: The First World Congress*. Springer Verlag, 2007.
- [18] Terano, T., Deguchi, H., Takadama, K. (eds.): *Meeting the Challenge of Social Problems via Agent-Based Simulation*. Springer Verlag, 2003.
- [19] Terano, T., Kita, H., Kaneda, T., Arai, K., Deguchi, H. (eds.): *Agent-Based Simulation Ⅲ From Modeling Methodologies to Real-World Applications*. Springer Verlag, 2005.
- [20] Terano, T., Kita, H., Deguchi, H., Kijima, K. (eds.): *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems IV: Post-Proceedings of the AESCS International Workshop 2005*. Springer Verlag, 2007.
- [21] 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.)
- [22] 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.
- [23] 寺野隆雄: エージェント・ベース・モデリングへの招待. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 49, No. 3, pp. 131-136, 2004
- [24] 寺野隆雄: エージェント・ベース・モデリングによる社会・経済・組織問題への接近. 計測自動制御学会第41回システム工学部会研究会資料, pp. 1-6, 2007.
- [25] 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.
- [26] *Artisoc Web Page*, <http://www.kke.co.jp/>
- [27] Brookings Institution: *ASCAPE Web Page*. <http://www.brookings.edu/dynamics/models/ascape/default.htm>.
- [28] *RePast Group Web Page*. <http://repast.sourceforge.net/>.