

環境配慮型社会をデザインする エージェントベースモデリング： 研究の現状と今後の分析課題

在間 敬子

環境問題に対する政策・制度を設計するための社会科学の研究方法として、エージェントベースモデリング (Agent-Based Modelling, 以下 ABM と略す) の利用が急速に広まっている。環境問題の解決に向けて、なぜ ABM のアプローチが必要なのか、どのような問題に対して、ABM が適用されてきたのか、その特徴は何か、今後どのような領域の研究が期待されるのか、本稿の目的は、これまでの研究文献のサーベイから、これらの疑問を明らかにすることである。

キーワード：エージェントベースモデリング、環境-社会システム、環境問題、環境配慮の普及

1. はじめに

環境問題へのアプローチで ABM に注目が集まる理由は、分析対象が、一つの学問領域における方法では扱いきれない社会現象だからである。ABM は、領域透過的なアプローチ [1] を可能にする有効な方法である。

環境問題を大別すると、産業公害問題、資源問題、都市型 (生活型) 環境問題、地球環境問題がある。本稿では、それぞれの問題領域との関連で、これまでの環境関連 ABM 研究を位置づけ、それらの特徴を整理する。環境問題は学際的領域であるが、以下では、主に経済学の理論的方法と比較し、ABM の方法としての意義を明らかにする。

2. 産業公害問題領域の ABM—企業の汚染排出制御デザイン

産業公害問題は、主に工場の生産プロセスでの汚染排出による健康被害や自然破壊である。大気汚染・水質汚濁・土壌汚染・悪臭・騒音・振動・地盤沈下という 7 公害に対して、日本では 1970 年代には環境法規制が強化され汚染を削減してきたが、現在でも、アスベスト問題や有害物質の製造・使用問題などが顕在化

し、引き続き対応が求められている。

経済学は、公害問題を、企業の生産に要する私的費用と、公害発生によって社会が被る外部費用も考慮した社会的費用とが、乖離する問題として捉える。生じた外部費用を市場経済に内部化するためには政府介入が必要であり、環境政策・制度デザインを中心的に扱う応用経済学として環境経済学が誕生した。この問題領域では、新古典派経済理論の数値モデルを用いて、汚染排出企業の最適制御などが分析されてきた。

この古典的分野ともいえる問題領域の ABM 研究として、例えば、Kuscsik et al. [2] がある。これはセルオートマトン型の ABM で、汚染排出工場への分散型制御でのフィードバックメカニズムの効果を分析している。セルに企業エージェントがランダムに配置され、生産によって汚染を排出する。汚染は隣接する企業間で流出入し、センサーエージェントが地点をランダムにモニタリングする。基準値以上であれば、汚染を減らすために、該当する企業の生産にはフィードバックがかかる。

経済理論分析は、代表的エージェントの合理的意思決定モデルであり、多様なエージェントに対する分散制御やフィードバックを表現することが苦手である。その課題を克服できる方法として ABM が活用されている点は興味深い。ただし、ABM のメリットは複数の学問領域の方法が反映できることであるが、このモデル分析では、Kuscsik らも初歩的な研究と位置付けているが、具体的な環境問題の知見や環境経済研究

ざいま けいこ

京都産業大学 経営学部

〒603-8555 京都市北区上賀茂本山

の知見が反映されていない。

3. 資源問題領域の ABM—事例指向と参加型による課題解決デザイン

3.1 資源利用研究での ABM 研究の利点

資源問題には、共有資源である天然資源や再生可能資源の配分や利用に関する問題、土地利用変化や地表変化の問題、自然保護と開発の問題などがある。経済学では、資源経済学、農業経済学、林業経済学などの研究分野があり、理論分析では、古くから、最適資源配分問題などが数理モデルで扱われてきた。また、共有資源の配分問題は、Hardin (1968) が「共有地の悲劇」として提示したように、個人合理性と全体合理性が乖離するために生じる社会的ジレンマ問題の一つである。社会的ジレンマを克服する方策や心理的メカニズムの研究について、社会学や心理学からのアプローチもある。

資源問題領域の研究で ABM を用いる利点は、Bousquet et al.[3]、Janssen and Ostrom[4]や Hare and Deadman[5]などでも指摘しているが、次の5つにまとめることができる。1つは、環境システム（生態系・エコシステム）と社会システム（社会・経済システム）を同時にモデル化できることである。2つは、それらのサブシステム間、および、サブシステムのエージェント間などの相互作用をモデル化できることである。3つは、エージェントの心理や意思決定プロセスを設計でき、異質で多様な資源を取り巻くステイクホルダーをモデル化できることである。4つは、ミクロな相互作用から創発されるマクロな社会や環境のダイナミクスを表現できることである。5つは、特に土地利用変化や地表変化問題では、実際のデータも反映して、空間的に表現できることである。

また、Janssen and Ostrom[4]は、これまでの共有資源に関する環境経済学の知見とは異なり、政府介入がなくても資源の自己管理が発生している現象が存在し、それを捉える手法として ABM が有用であることも指摘している。

3.2 資源問題領域の ABM 研究の動向

現在までの環境関連 ABM 研究では、この問題領域の研究が最も多い。いくつかの優れたレビュー論文もある。それらを含めて研究動向を整理する。

社会的ジレンマは、理論的には N 人囚人のジレンマゲームとして定義される[6]。繰り返し囚人のジレンマゲームでの協調メカニズムを分析した Axelrod

[7]以後、多くの ABM 研究が行われている。囚人のジレンマベースの ABM 研究については、Gotts et al.[8]や Janssen and Ostrom[4]のレビューを参照されたい。

土地利用変化のシミュレーション分析では、セルオートマトンが以前から用いられてきたが、セルとエージェントの意思決定が不明確なモデルであった。ABM やネットワーク構造の研究を踏まえてエージェントの意思決定や相互作用のモデル化の技術や精度が向上し、研究が発展してきた[4]。Journal of Environmental Management の 2004 年第 72 巻 1-2 合併号は土地利用変化モデルの特集号であり、ABM 分析では 2 論文が掲載されている[9][10]。土地利用に関する ABM 研究を網羅したレビューとしては、Parker et al.[11]や Matthews et al.[12]がある。

Evans and Kelley[10]は、初期のセル型 ABM モデルは Epstein and Axtell[13]を拡張した抽象的なものだが、近年では、実証データや実験結果を踏まえ現実のケースに適用できるリアルなモデルに発展していることを指摘している。この分野では、ケースにフィットしたさまざまなシミュレータが開発されており、例えば、Evans and Kelley[10]は、アメリカ中西部のケースを対象にした土地利用 ABM である。Manson and Evans[14]は文献[10]を用いて、類似の地域のケースに関する応用研究を行っている。また、初期には、ツールの分類や比較もされており、例えば、Hare and Deadman[5]では、生態学の個体ベースモデリング (individual-based modeling) 研究も含めた分類を示している。また、Rouchier et al.[15]では、4つのケースの分析例を紹介している。

Anderies et al.[16]は、環境-社会システムを分析するためのシンプルな概念モデルを提示している。システムを構成するのは、「資源」「物理的・制度的な公共インフラストラクチャー」「資源ユーザー」「公共インフラストラクチャー提供者」と、それらの相互作用である。要素や相互作用の例示とモデルデザインの原理も整理されている。ABM では、環境と社会・経済の2つのサブシステムを設計することを期待されるが、Anderies et al. の概念モデルでは社会・経済システムが明確ではない。Gebetsroither et al.[17]は、既存研究では環境システムが分析の中心であり、社会・経済システムに関する設計が十分ではないことを指摘している。Gebetsroither et al.[17]の森林管理に関する ABM 分析では、生態系サブモデルに加えて、木材供

給企業と木材製品製造企業の木材取引に関する意思決定を含む木材産業がモデル化されている。

資源問題領域の最近の研究では、ABMは、対象とする課題を取り巻くステークホルダーが分析過程に参加して課題解決をはかるツールとしても活用されている。Barreteau et al.[18]は、南フランスの河川流域における水資源配分問題のケースについて、農民間の資源配分交渉をサポートするツールとして参加型ABMの有用性を示している。また、「交渉を記述したモデル (modeling of negotiation)」と「交渉プロセスで活用するモデル (modeling for negotiation)」の違いを論じ、参加型ABMを後者として位置づけている。参加型のアプローチとしては、ロールプレイングゲームとABMを組み合わせるツールも開発されている。Janssen and Ostrom[4]やCORMAS[19]を参照されたい。

4. 都市型環境問題領域のABM—環境配慮の普及メカニズムのデザイン

4.1 環境政策・制度デザインの変化とABMの意義

日本では、1980年代には公害問題は解決したというムードであり、環境政策も進まなかったが、現実には、自動車の排ガス問題、住宅やリゾート開発問題、廃棄物問題、生活排水問題などの都市型（生活型）環境問題が深刻化していた。また、グローバルな問題として、気候変動、酸性雨、オゾン層破壊、有害廃棄物の越境移動、熱帯林破壊、生物多様性の減少、砂漠化といった地球環境の諸問題が次第に明らかになり、国際的な取り組みも始まった。日本では、1993年に、公害と自然保護を対象としていた公害対策基本法から、これらの新たな問題も対象にした環境基本法に置き換わった。環境政策や制度デザインにおいても、従来の指令・統制型の法規制だけでなく、環境経済学で議論されてきた環境税など経済的手法や、自発的対策を促進するための普及・啓発策も加わった。企業の汚染への規制だけでなく、行政・企業・消費者の協働という視点も重視されている。

環境政策・制度デザインの変革で、ABMの必要性と関わるポイントは2つある。

1つは、環境政策・制度にかかわるプレイヤーの対象範囲が拡大したことである。公害対策では、汚染する企業と制御する政府という単純な構図であった。自動車利用、住宅需要、ゴミの排出、エアコンの利用など都市型や地球環境問題は、産業だけでなく、人々の

ライフスタイルに関わる問題である。それまでは公害被害の保護対象である住民・消費者は、自らの生活における環境負荷の排出者でもある。個人の利便性や快適性を追求する合理的行動が、社会全体として環境問題の発生や深刻化という非合理的な結果を招く。都市型や地球環境問題も社会的ジレンマ問題なのである。

2つは、自発的な環境配慮行動の促進というボトムアップ型のデザインも必要とされたことである。地球温暖化のように科学的な不確実性を有する問題では、明確な環境政策目標を設定することが困難であり、政策手段を検討し実施するまでの政治的意思決定にも時間がかかる。環境配慮型製品の設計や供給など企業の自発的行動を促すことは、法規制や経済的政策の補完としても有益である。また、日常の小さな行動の積み重ねによる環境負荷を減らすことも重要課題であるが、市民・消費者への規制的政策は難しく、自発的な環境配慮型のライフスタイルを促す対策が着目される。

これらの新たな環境政策・制度デザインに関する研究で、ABMが有用である点として、以下の4つを指摘することができる。

1つは、市民・消費者の心理や意思決定の内部モデルが設計できることである。ライフスタイルの変更が困難である要因の一つには、環境配慮の態度と行動のギャップ[20]の問題がある。社会心理学の理論・実証研究を踏まえたリアルな意思決定モデルを導入することが求められる。社会的ジレンマ問題の解決策として、非協力行動への罰金・協力行動への報酬という構造的方略と、知識・信頼・モラルを向上させる説得などのコミュニケーションという行動的方略がある。後者の効果に関しては、社会心理学の実験研究がなされているが、理論的根拠を示すことが難しいことが指摘されている[21]。心理学研究を踏まえたABMによって、その点も克服することが期待される。

2つは、企業の経営戦略や組織マネジメントを内部モデルとして設計することが可能なことである。自発的な環境対策は、企業経営における選択問題である。企業にとっては、自社にフィットした環境問題への戦略的対応によって、環境保全という社会的価値と企業の価値を同時に向上させることが重要である[22]。ABMを用いることによって、企業経営と環境政策・制度との相互作用に関する分析も可能になる。

3つは、個々のエージェントの学習と集団や社会の学習をモデル化できることである。戦略やライフスタイルの変更と、その普及メカニズムを捉えるためには、

これらの両者の学習をモデル化することが必要である。

4つは、資源問題領域でも述べたマイクロ・マクロリンクである。ABMでは、マイクロなエージェント間の相互作用によるマクロな社会のダイナミクスをシミュレーションし、ボトムアップ型政策・制度のデザインを分析することが可能である。

これらの4点は、伝統的経済学の手法に基づく環境経済学では扱いきれない。例えば、環境ラベルは、製品にその製品の環境負荷に関する情報を表示し、消費者の製品選択における判断材料を提供する情報提供型環境政策である。それは、消費者の環境に配慮した製品選択行動を通して、企業の製品への環境配慮を間接的に促進する普及型政策でもある。在間[23]は、この政策分析においてABMが有益であることを明らかにし、分析に必要な要素を整理し概念モデルを提示している。

4.2 環境配慮の普及に関するABM研究

この問題領域におけるABM分析の重要テーマの一つは、ボトムアップな環境配慮の態度や製品選択、技術などの普及メカニズムに関する分析である。

Mosler, and Martens[24]は、環境配慮促進キャンペーンがエージェントの態度変容に与える効果を、ABMでシミュレーション分析している。このモデルでは、広告など説得による態度変容に関する社会心理学理論である精緻化見込みモデル[25]を、エージェントのモデル設計に適用している。イノベーション普及学[26]の研究を踏まえて、マスメディア、チェンジ・エージェント、ソーシャル・ネットワークの要素をモデルに導入し、態度変容への効果を比較している。

環境問題の解決が難しい要因の一つは、環境配慮意識が高くても必ずしも行動に結び付かないからである。Zaima[27][28]は、環境配慮の態度と行動のギャップを説明する広瀬モデル[20]を踏まえて、学習エージェントを設計し、企業と消費者の市場取引に関するABMを作成している。社会的ジレンマを解決するための構造的方略や行動的方略をモデル化し、シミュレーション分析している。企業への構造的方略では、協力行動への報酬による環境配慮の促進効果は、非協力行動への罰金の効果より上回っていることを示している。また、消費者への説得コミュニケーションは効果は大きいですが、説得エージェントの割合がある程度大きくないと効果が発揮されないことも示している。

Janssen, and Jager[29]は、消費者と企業の環境配慮型製品の選択に関するABMモデルを作成し、

Rogers[26]で示される初期採用者の程度など普及速度の要因に関してシミュレーション分析している。消費者モデルは、消費者選好に関する社会心理学の理論を総括して設計をしたJanssen, and Jager[30]をベースにし、企業モデルは、Nelson and Winter[31]を拡張している。消費者と企業の共進化モデルは、Chatterjee and Eliashberg[32]のイノベーション普及の数学モデルを用いている。消費者のソーシャルネットワークには、スモールネットワーク構造[33]を導入している。

最近、van den Bergh[34]やFrenken, and Faber[35]は、新古典派経済学をベースとする環境経済学に、進化経済学の視点や方法が必要であることを示し、進化的手法の一つとしてABMを取り上げている。特に、Frenken, and Faberが編者となっている*Technological Forecasting and Social Change*の2008年「進化環境経済学」特集号では、環境技術・製品・行動という環境イノベーションが普及する条件に関する分析への進化経済学的視点に着目し、3つの論文を掲載している[36][37][38]。

これまでの製品選択のモデルは、具体的なケースにフィットしたものでなく、抽象的な製品のモデルであった。最近の研究では、実際のケースに即しており、モデルの妥当性に重点を置いている。Windrum et al.[36][37]の一連の論文では、まず、馬から車への技術転換のケースについて既存の実証研究などを精査している。次に、得られた知見に基づき、環境配慮型技術の普及に関する消費者と企業の行動モデルを設計している。さらに、ABMでのシミュレーションから、環境イノベーション普及における異質な消費者選好の役割を分析し、初期の分布や消費者のタイプ変化の有無が影響を与えることなどを示している。

Schwarz and Ernst[38]は、シャワーヘッドやトイレの排水設備、雨水貯蔵システムに関する家計の水資源節約イノベーション採用に関する問題に焦点を当てている。研究では、まず、社会心理学の行動意図の決定要因に関する計画行動理論[39]のフレームワークに基づき、南フランスでマーケティング調査組織によるアンケート調査を実施している。環境イノベーション採用の程度について、社会的カテゴリーによる違い、環境イノベーション特性による違いを、それぞれ回帰モデル・構造方程式モデルで分析している。推計されたパラメータは、家計の効用関数や製品選択の意思決定において、シミュレーションでの設定値として用い

られている。また、シミュレーション時の家計エージェントのライフスタイル・タイプ決定についても実証データを与えている。モデルの構造パラメータの変更によるシナリオ分析では、情報提供、環境配慮型製品の強制選択という規制、環境配慮型製品購入に補助金という3つの効果を分析している。しかし、著者らも述べているが、これらは、パラメータ変更とモデル設計により当然生じる結果であり、今後の研究が必要である。

5. 地球環境問題領域のABM—気候変動問題研究

地球環境問題は、前節で述べたように、社会的ジレンマ問題や、人々のライフスタイルや企業経営にかかわる問題である。さらに、時間的・空間的広がりを持ち、科学的な根拠が不明確であるという不確実性という性格もある。また、個人・組織・国など様々な意思決定主体が、不確実な問題に対するそれぞれの限定合理性のもとで、複雑に絡み合う結果、マクロな問題現象の解決が困難であるという性格もある。

地球環境問題は一国で解決できる課題ではなく国際的な枠組みで協調することが必要であるが、国レベルだけで見ても、意思決定は多様である。例えば、気候変動枠組条約の第3回締約国会議で1997年に採択された京都議定書は、温室効果ガスの最大の排出国アメリカが離脱したことにより発効要件を満たすまで8年の歳月を要した。また、ポスト京都議定書では、今後の先進国の目標設定や、これまで温室効果ガスの削減義務が課されていなかった途上国の扱いなどが議論されているが、先進国間でも、ヨーロッパ、アメリカ、日本で提出する案は異なり調整が難航している。途上国でも、経済発展を優先する中国・インドなどの国々と、温暖化による海面上昇に直面する島嶼国では主張が異なる。

経済学的な視点では、例えば、ゲーム理論によって、京都議定書の採択有無に関するモデル分析などがなされてきたが、複数のエージェントの複雑な意思決定を、数理モデルの枠組みだけで分析することは困難である。このような課題に対して、ABMの有効性が期待されている。

気候変動問題に関して比較的早くからABM研究に取り組まれており、モデル設計や分析方法が研究されてきた。

例えば、Janssen and Vries[40]は、国際的な取り

組みに参加するエージェントの意思決定モデルである。気候変動の不確実性を考慮してエージェントのタイプが設定されている。経済、エネルギー、気候の変化に関しては、経済理論やIPCCの報告書などを踏まえて、シンプルな数理モデルが設定されている。

また、気候変動問題に関する経済分析では、計量経済モデルによる応用一般均衡分析で最適解を求める手法でのシミュレーションがなされてきた。Downing et al.[41]は、既存方法とABM分析について、モデルの比較や結果を踏まえた対策を検討するために、政策担当者や専門家などが議論に加わる参加型の方法を提示している。

地球環境問題の解決のために、人々のライフスタイルや技術が変化し普及することが必要であるが、その点の分析については、第4節で述べた観点での研究と同様である。社会的ジレンマとしてのABM研究について第3節で触れたが、気候変動に関連する研究としては、例えば、近藤・藤井・谷本[42]がある。これは、空間を共有する住宅群における各住宅の冷房利用に関する社会的ジレンマモデルである。モデルの特徴は、社会科学のジレンマモデルのフレームワークに、伝熱モデルや物性値など理学・工学の知見を導入し、よりリアルな環境モデルの構築を試みていることである。

京都議定書では、排出権（排出枠・排出量）を国際間で取引する京都メカニズムと呼ばれる新たな仕組みが盛り込まれている。それを対象にしたABMとしては、例えば、山形・水田[43]の国際排出権取引に関するABMのシミュレーション分析がある。

6. おわりに：環境配慮型社会をデザインするABM研究の今後

本稿では、環境問題に対する政策・制度デザインのためのABM研究について、これまでの研究を概観し、ABMの利点やモデルの特徴を整理した。既存研究のサーベイから、以下の4点が明らかになった。それぞれに関して、今後の課題もあわせて提示する。

1つは、企業の汚染排出制御という環境経済学の古典的問題に対して、汚染モニタリングの仕組みなどのABM分析が可能なことである。製紙企業の再生紙への古紙配合率偽装問題や、環境問題以外の食品などでも不祥事が相次ぐ中、企業行動を監視する仕組みが改めて問われている。モニタリングにはコストを要するため、効率的な実施方法を検討することが重要である。

今後も、実際の環境保全や監視コストのデータなどを活用した ABM 研究が期待される。

2つは、これまでの中心的な研究分野である環境資源の利用や供給に関する ABM 分析では、実際の地形や資源に関するデータを反映させたモデル設計、および、資源をとりまくステイクホルダーの参加による ABM 分析が主流になってきていることである。特に土地利用分野では、地域にフィットしたモデルやシミュレーターが開発されている。今後は、個別の問題に応じた ABM だけでなく、共通のツールなどのプラットフォーム化も研究課題であると考えられる。

3つは、人々のライフスタイルや企業経営の変化が求められる問題に対して、環境配慮の普及という視点から、既存のイノベーション普及学の知見を生かした ABM 研究がされていることである。最近の動向としては、抽象的な態度や製品の普及モデルではなく、個別の問題にフィットした妥当性のあるモデル設計が検討されている。これまでのモデルでは、消費者の心理プロセスに関して、社会心理学の理論モデルを反映させていることが特徴である。

今後の研究としては、以下の課題がある。まず、社会心理学を踏まえたエージェントの意思決定モデルの精緻化である。さまざまな心理モデルを用いた場合の比較や、現実のケースをふまえた妥当性の研究が必要である。例えば、町田市のあるスーパーでは地域の市民団体などと協力して、レジ袋削減の実験を行った。実験では成功したが継続的な実施の可能性については疑問も提示されている。住民の協力・非協力的行動の要因を分析し、ABM モデル設計に反映させ、持続的なレジ袋削減システムの可能性を分析することは有益である。

次に、企業経営のモデル化である。ABM では企業経営の複雑な意思決定をモデル化することが期待されるが、これまでの企業行動のモデルは経済理論に基づいており、企業を質点として扱うものであった。企業の環境経営は社会貢献側面に加えて、経営者にとっても戦略的意思決定の課題となっている。ミクロな企業の環境配慮の経営戦略や組織マネジメントが与える、ライバル社や業界への影響の程度や、それらの相互作用によるマクロな環境指標への影響の程度、また、環境政策・制度デザインとの相互作用を分析することは重要である。また、ビジネス・ゲーミングと ABM の組み合わせによって、実際の企業経営に反映させることができるツールを開発することも検討課題の一つ

である。

また、環境配慮の普及については、企業や市民団体などが取り組んでいる環境コミュニケーションの役割 [44] を ABM で分析することも興味深いテーマである。企業は、環境負荷の排出者であるとともに、環境技術の開発や専門知識の蓄積と、それらの普及を担うチェンジ・エージェントとしての役割も持つ。企業の組織内外で取り組む環境コミュニケーション活動が社会に与える効果を分析することは、企業がコストをかけて行う環境活動の程度や範囲を意思決定するためにも重要である。

さらに、ネットワーク構造として、現実のケースをモデルに反映させることも課題である。最近では、複数の企業や地域で協力して、リサイクル・ループを形成して、効率的なリサイクルを実施する活動が進んでいる。この実際のネットワークの効果の程度など、ABM で取り組むことのできる課題である。

4つは、地球環境問題の領域でも国際ルールの意思決定問題の ABM 研究が進められていることである。本稿では、気候変動問題に関する ABM を取り上げた。今後の課題は、排出権取引など新たな仕組みについての研究である。新しい仕組みには、国際的な排出権取引以外にも、地域や国内での排出権取引、また、身近なカーボン・オフセットなどがある。

カーボン・オフセットは、自分が排出する二酸化炭素を相殺する仕組みで、排出量に匹敵する分を、クリーン開発メカニズムでの排出権購入やグリーン電力認証購入に充てるというものである。例えば、日産の新しいマーチや JTB での旅行などで、カーボンオフセットを用いた排出枠つき商品が販売されている。マーケティング面でも販売促進効果が期待されている。上述の第3点とも関連するが、このようなカーボン・オフセットが普及するメカニズムの研究は、ABM を有益に活用できる課題のひとつである。

環境問題への様々な対策が実施されているものの、その解決は非常に困難である。透過領域的なアプローチである ABM は、複雑な環境問題を捉える有益な方法である。今後も、環境問題の ABM のモデル設計や分析方法を発展させ、実際の環境政策・制度デザインに生かし、環境配慮型社会の形成に役立てることが求められる。

謝辞 本稿は、日本学術振興会における科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 20510042) の支援を受け

ている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 出口弘：“エージェントベースモデリングによる問題解決—エージェントベース社会システム科学としてのABM—,” *オペレーションズ・リサーチ*, 49(3): 161-167, 2004.
- [2] Z. Kuscik, D. Holvath and M. Gmitra: “The critical properties of the agent-based model with environmental-economic interaction,” *Physica A*, 379: 199-206, 2007.
- [3] F. Bousquet, O. Barreteau, C. Le Page, C. Mullon and J. Weber: “An environmental modelling approach: the use of multi-agent simulations,” in F. Basco (ed): *Advances in Environmental and Ecological Modelling*: 113-122, Elsevier Paris, 1999.
- [4] M. A. Janssen and E. Ostrom: “Governing social-ecological systems,” in L. Tesfatsion and K. L. Judd (eds.): *Handbook of Computational Economics, volume 2, Agent-Based Computational Economics*: 1465-1509, Elsevier B. V. 2006.
- [5] M. Hare and P. Deadman: “Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management,” *Mathematics and Computers in Simulation*, 64: 25-40, 2004.
- [6] R. M. Dawes: “Social dilemmas,” *Annual Review of Psychology*, 31: 161-193, 1980.
- [7] R. Axelrod: *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition*, Princeton, N. J., Princeton University Press, 1997. (『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).
- [8] N. M. Gotts, J. G. Polhill and A. N. R. Law: “Agent-based simulation in the study of social dilemmas,” *Artificial Intelligence Review*, 19(1): 3-92, 2003.
- [9] A. Ligtenberg, M. Wachowicz, A. K. Bregt, A. Beulens and D. L. Kettenis: “A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning,” *Journal of Environmental Management*, 72(1-2): 43-55, 2004.
- [10] T. P. Evans and H. Kelley: “Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change,” *Journal of Environmental Management*, 72(1-2): 57-72, 2004.
- [11] D. C. Parker, S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann and P. Deadman: “Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review,” *Annals of the Association of American Geographers*, 93: 316-340, 2003.
- [12] R. B. Matthews, N. G. Gilbert, A. Roach, J. G. Polhill and N. M. Gotts: “Agent-based land-use models: a review of applications,” *Landscape Ecology*, 22(10): 1447-1459, 2007.
- [13] J. M. Epstein and R. Axtell: *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, Cambridge, MA., 1996. (『人工社会: 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション』共立出版).
- [14] S. M. Manson and T. Evans: “Agent-based modeling of deforestation in southern Yucatan, Mexico, and reforestation in the Midwest United States,” *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA)*, 104(52): 20678-20683, 2007.
- [15] J. Rouchier, F. Bousquet, O. Barreteau, C. Le Page and J.-L. Bonnefoy: “Multi-agent modeling and renewable resources issues: The relevance of shared representations for interacting agents,” in S. Moss and P. Davidson (eds.): *Multi-Agent-Based Simulation Second International Workshop, MABS 2000, Boston, MA, USA July, Revised and Additional Papers*: 181-197, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- [16] J. M. Andries, M. A. Janssen and E. Ostrom: “A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective,” *Ecology and Society*, 9(1): 18-34, 2004.
- [17] E. Gebetsroither, A. Kaufmann, U. Gigler and A. Resetarits: “Agent-based modeling of self-organization processes to support adaptive forest management,” in F. C. Billari, T. Fent, A. Prskawetz and J. Scheffran (eds.): *Agent-Based Computational Modeling, Applications in Demography, Social, Economic and Environmental Sciences*: 153-172, Physica-Verlag Heidelberg 2006.
- [18] O. Barreteau, P. Garin, A. Dumontier and G. Abrami: “Agent-based facilitation of water allocation: case study in the Drome River Valley,” *Group Decision and Negotiation*, 12: 441-461, 2003.
- [19] CORMAS, Natural Resources and Multi-Agent Simulations: <http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>
- [20] 広瀬幸雄: *環境と消費の社会心理学: 公益と私益のジレンマ*, 名古屋大学出版会, 1995.
- [21] 藤井聡: *社会的ジレンマの処方箋*, ナカニシヤ出版, 2003.
- [22] M. E. Porter and M. R. Kramer: “A Strategy & Society: The Link Between Competitive Advantage

- and Corporate Social Responsibility,” *Harvard Business Review*, December: 78-92, 2006.
- [23] 在間敬子: “環境配慮行動と環境情報提供—エージェントシステムの方法—,” *社会・経済システム*, 21・22: 96-107, 2002.
- [24] H.-J. Mosler and T. Martens: “Designing environmental campaigns by using agent-based simulations: Strategies for changing environmental attitudes,” *Journal of Environmental Management*, 88: 805-816, 2007.
- [25] R. E. Petty and J. T. Catioppo: “The elaboration likelihood model of persuasion,” in L. Berkowitz (ed): *Advances in Experimental Social Psychology*: 123-205, Academic Press, New York, 1986.
- [26] E. M. Rogers: *Diffusion of Innovations 5th edition*, Free Press, 2003. (『イノベーションの普及』翔泳社).
- [27] K. Zaima: “Agent-based simulation on the diffusion of research and development for environmentally conscious products,” in K. Arai, H. Deguchi and H. Matsui (eds.): *Agent-Based Modeling Meets Gaming Simulation*: 119-138, Springer-Verlag Tokyo, 2005.
- [28] K. Zaima: “Effects of structural and behavioral strategies toward the environmentally conscious society: Agent-Based Approach,” in T. Terano, H. Kita, T. Kaneda, K. Arai and H. Deguchi (eds.): *Agent-Based Simulation From Modeling Methodologies to Real-World Applications*: 233-246, Springer-Verlag Tokyo, 2005.
- [29] M. A. Janssen and W. Jager: “Simulating diffusion of green products: Co-evolution between firms and consumers,” *Journal of Evolutionary Economics*, 12: 283-306, 2002.
- [30] M. A. Janssen and W. Jager: “Fashions, habits and changing preferences: Simulation of psychological factors affecting market dynamics,” *Journal of Economic Psychology*, 22: 745-772, 2001.
- [31] R. R. Nelson and S. Winter: *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Harvard University Press, Cambridge, 1982. (『経済変動の進化理論』慶應義塾大学出版会).
- [32] R. Chatterjee and J. Eliashberg: “The innovation diffusion process in a heterogeneous population: A micromodeling approach,” *Management Science*, 36(9): 1057-1079, 1990.
- [33] D. J. Watts and S. H. Strogatz: “Collective dynamics of “small-world” networks,” *Nature*, 393: 440-442, 1998.
- [34] J. C. M. van den Bergh: “Evolutionary thinking in environmental economics,” *Journal of Evolutionary Economics*, 17: 521-549, 2007.
- [35] K. Frenken and A. Faber: “Models in evolutionary economics and environmental policy: Towards an evolutionary environmental economics,” *Technological Forecasting and Social Change*, in press, 2008.
- [36] P. Windrum, T. Ciarli and B. Birchenhall: “Consumer heterogeneity and the development of environmentally friendly technologies,” *Technological Forecasting and Social Change*, in press, 2008.
- [37] K. Frenken and A. Faber: “Environmental impact, quality, and price: Consumer trade-offs and the development of environmentally friendly technologies,” *Technological Forecasting and Social Change*, in press, 2008.
- [38] N. Schwarz and A. Ernst: “Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovation—An empirical approach,” *Technological Forecasting and Social Change*, in press, 2008.
- [39] I. Ajzen: “The theory of planned behavior,” *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50: 179-211, 1998.
- [40] M. Janssen and B. de Vries: “The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change,” *Ecological Economics*, 26: 43-65, 1998.
- [41] T. E. Downing, S. Moss and C. Pahl-Wostle: “Understanding climate policy using participatory agent-based social simulation,” in S. Moss and P. Davidson (eds.): *Multi-Agent-Based Simulation Second International Workshop, MABS 2000, Boston, MA, USA July, Revised and Additional Papers*: 198-213, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- [42] 近藤良久・藤井晴行・谷本潤: “環境問題の解決法のマルチエージェントシミュレーションによる模索,” 電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処理, 102(615): 35-40, 2003.
- [43] 山形与志樹・水田秀行: “京都議定書・国際排出量取引のエージェントベースシミュレーション,” *オペレーションズ・リサーチ*, 46(10): 555-560, 2001.
- [44] 見目洋子・在間敬子: 環境コミュニケーションのダイナミズム—市場インセンティブと市民社会への浸透—, 白桃書房, 2006.