

# 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

山形 与志樹, 水田 秀行

## 1. はじめに

我々は、地球規模の温暖化対策の条約である京都議定書と排出権取引市場について研究を行っている。本稿では最近経済学において注目を集めている複雑で動的なシステムへの新たなアプローチについて紹介し、特に、Agent-based Simulation を用いた排出権取引市場の研究結果について述べる。

京都議定書で議論されているような地球温暖化や排出権の国際取引を考える上で、条件の異なる国々の間の複雑な相互作用とシステム全体の複雑で動的な振る舞いを理解することが重要な課題となる。しかし、従来の経済学や社会学の手法では、このように複雑で動的な状況を扱うのは困難である。

本来、経済システムというもの多数のさまざまな意志の相互作用に依存し、非常に複雑なものである。しかし従来の理論、例えば新古典派経済学では、代表的主体という考えを導入し、経済人は皆同じ価値観同じ行動をとり、たった一つの主体によって全てが代表されると仮定することによって、複雑さを回避してきた。また、このような主体は完全に合理的な行動を常に取るものとされる。こうした仮定の上に、市場が均衡に導かれることが示され、均衡状態における関係が与えられることになる。このようにさまざまな複雑性をとりのぞく仮定を取り入れることにより、経済学は精緻な理論を構築してきたのである。

近年、代表的エージェントや完全な合理性といった従来の仮定と、実際の複雑な状況の隔たりに対する問題意識が高まり、物理学やコンピュータサイエンス、複雑系科学といった広い分野からの研究者が、さまざまなアプローチを試みている。こうした新たな試みは、

経済学だけではなく、社会学、組織理論、生態学、ゲーム理論などさまざまな領域に広がりながら互いに影響を及ぼしあっている。

## 2. 経済学への新たなアプローチ

現在必要とされているのは、従来の経済学におけるさまざまな前提を再検討し、多様な参加者や限定された合理性のもとでのダイナミクスを考慮しうるアプローチである。そのようなアプローチとして、複雑系経済学や、経済物理、Agent-based Approach といった方法が、近年それぞれ発展しつつある。

### 2.1 複雑系経済学

複雑系経済学については塩沢[1]や出口[2]らによって詳しく紹介されている。複雑系研究からのアプローチでは、主に二つの流れが考えられる。一つは、カオスやフラクタルといった非線形力学系の方法論を用いて、マーケットの変数のダイナミクスを非線形発展方程式として定式化し、その性質や安定性を解析しようとするものである。もう一つは、複雑適応系として経済システムをとらえ、遺伝的アルゴリズム (GA) やニューラルネットワークを用いたシミュレーションによって再現しようとするものである。こうした複雑適応系は後で述べる人工市場研究とも深い関わりがある。

### 2.2 経済物理学

経済物理学 (econophysics) では、物理学、特に臨界現象やゆらぎ等を扱う統計力学の手法を用いて経済データの分析や解析を行う。株価や為替の変動を調べると、そこにはフラクタルに代表されるようなスケール不変性を見ることが出来る。特に、短期間における大小の変動がどのように分布するか注目した時、裾野がガウス分布のような指数関数的に減少するのではなく、べき乗則に従ってなだらかに減少してゆく Levy 分布に従うことが知られている。例えば、佐藤と高安[3]は、単純化したトレーダーや確率過程のモデルを用いて、価格変動の分布について解析を行っている。

やまがた よしき

国立環境研究所 地球温暖化プロジェクト

〒305-0053 つくば市小野川 16-2

みずた ひでゆき

日本 IBM 東京基礎研究所

〒242-8502 大和市下鶴間 1623-14

## 2.3 Heterogeneous Agents

また、特に経済主体の多様性 (Heterogeneity) に注目するアプローチもあり、経済および物理の研究者らによって毎年ヨーロッパで WEHIA (Workshop on Economics with Heterogeneous Interacting Agents) というワークショップが開催されている。ここでは企業や家計、労働者といった多様な経済主体によるミクロな基盤と、一国の経済指標のようなマクロな動きとの関係、いわゆるミクロ-マクロ問題が経済理論やコンピュータシミュレーションなどの手法を用いて議論されている。

例えば、Marchesi ら[4]は Genoa Artificial Stock Market によって、Heterogeneous Agent を用いたシミュレーションを構築している。また青木ら[5]は、多様なエージェントをセクターに分割し、セクター間の動的な出入りについての解析的な研究を行っている。

## 2.4 Agent-based Approach

最後に Agent-based Approach について述べる。Agent-based Approach とは、エージェントと呼ばれる行動主体に注目し、そのミクロな活動から出発して、エージェント同士の複雑な相互作用の結果生み出されるマクロな現象を理解しようという研究手法である。ミクロとマクロという二つのレベルの間をつなぐものとして、シミュレーションを用いた手法が有効である。特に、オブジェクト指向やソフトウェアエージェントといったプログラム手法を用いることによって、さまざまなミクロのエージェントの自然で効率的な実装が可能である。エージェントを用いたシミュレーションは、これまで述べた複雑系研究や経済物理、Heterogeneous Agent の研究でもしばしば用いられる。また、ゲーミングや共通テストベッドという観点からも注目されている。

ところでエージェントという用語は人によってさまざまな意味で用いられており、しばしば混乱のもととなる。ここで、用語についてまとめ、本稿での立場を明確にしておきたい。図1にエージェントの代表的な概念を示す。

例えば、ネットワーク上に分散して情報伝達を仲介する役割や、複雑系でも取り上げたように適応進化する生命をコンピュータ上に人工的に再現したものが、コンピュータサイエンスの文脈ではしばしば見受けられるものである。

一方経済学の文脈においても、代表的エージェントという語が示すように、エージェントという語が、独

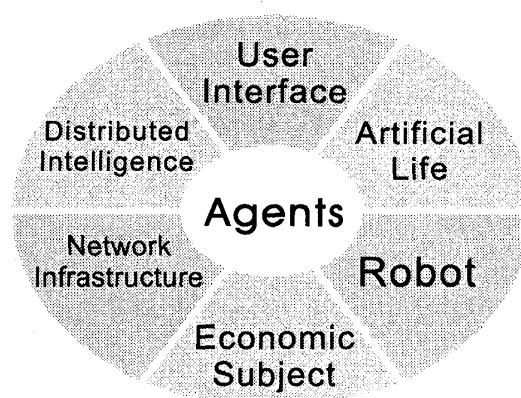


図1 エージェントのさまざまな概念

立して経済活動を行う経済主体という意味で用いられてきた。本稿では、この経済主体という意味に加えて、多様性 (Heterogeneity) とダイナミクスを独立して考えるものとしてエージェントを捉え、そのようなミクロな主体からマクロな現象を創り出す Agent-based Approach に注目したい。

このようなエージェントを用いたシミュレーションによって仮想的に作り出された市場は人工市場と呼ばれ、非線形ダイナミクスや多様性、複雑適応学習、ゲーミングなどのさまざまな観点から研究が行われている[6]。特にサンタフェ研究所の Artificial Stock Market[7]や和泉らによる人工外為市場[8]のような遺伝アルゴリズム (GA) を用いて適応学習を行う人工市場研究が広く行われている。また、水田[9]は Steiglitz ら[10]によるシンプルなマーケットモデルについて Heterogeneous Agent に注目してシミュレーションを行い、価格安定性について解析的な研究を行った。

## 3. エージェントによるシミュレーション

本節では、JAVA 上で開発したシミュレーションフレームワークである ASIA (Artificial Society with Interacting Agents) システムについて述べる。フレームワークとは大規模なシステムを構築する際、共通部分の再利用性を高め、開発効率を高めるための仕組みであり、ライブラリとデザインパターンを併せ持つものである。ASIA フレームワークは Agent-based Approach によって経済や社会のさまざまなシミュレーションを効率よく構築するために用意された。

これまでに多くの研究者によってさまざまなエージェントシステムが開発されてきた。サンタフェ研究所の Swarm[11]は、柔軟なルールセットの記述や GA

を用いて複雑な人工生命を構築できるフレームワークとして有名である。また、Epsteinらの Sugarscape [12]は、visualなセル上の人工生命を容易にカスタマイズできる仕組みを供給し、さまざまな文化社会現象の創発的なシミュレーションを可能としている。さらにU-Mart Project[13]では、ネットワーク上のサーバーに現実の株価指数に対応した仮想的な先物取引市場を構築し、共通のプロトコルを通じてマシンエージェントや人間が売買を行うシステムを配布し、公開実験を行っている。

先に述べたように、研究者によってエージェントに対する概念は異なり、システムごとに必要不可欠なコアとなる機能（たとえば、ネットワークやメッセージ処理、認知機構）はさまざまであり、他の研究者には不要となる非常に複雑な機能が組み込まれがちである。そのため我々は、シンプルで、また、レイヤーに分割して必要な機能の修正が簡単に行えるようなフレームワークを新たに構築することにした。

我々のアプローチでは、エージェントの多様性とダイナミクスを中心に考えている。個々のエージェントの独立性とさまざまな性質を簡単に組み込めるよう、JAVAを用いて基本となるエージェントを構築し、クラスの継承によってさまざまなエージェントを派生させていくことにする。また、エージェント間の動的な相互作用は全てメッセージ交換によるものとし、それぞれのエージェントは独立したスレッドによりメッセージ処理を行うことで、動的な相互作用を並列して行えるようにした。このようなメッセージ交換を用いた関係は、我々が注目している社会的、経済的な関係を模倣するのに自然であり、また、このようなソフトウェアエージェントだけではなく、人間も被験者として実験に参加する場合にも応用しやすい。

これらのオブジェクトや機能を図2のようなレイヤーに分割して考える。まず Agent Layerにおいて、Agentの基本的な動作と管理を行う。ここで定義される重要なクラスとして、全てのエージェントの親クラスとなる Agent クラス、エージェントを生成削除するといった管理を行う Env クラス、エージェント間のメッセージ交換を仲介する Message Manager クラス等がある。独自のスレッドを持つ Message Manager に管理されたメッセージ交換によってエージェントの並列動作が自然に制御されるため、アプリケーションプログラムはそうした処理を意識することなく、エージェント毎に必要なメッセージ処理を記述するこ

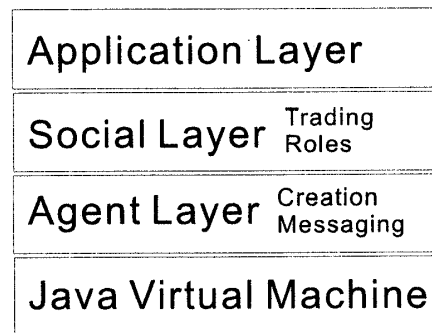


図2 ASIA フレームワークにおけるレイヤー構造

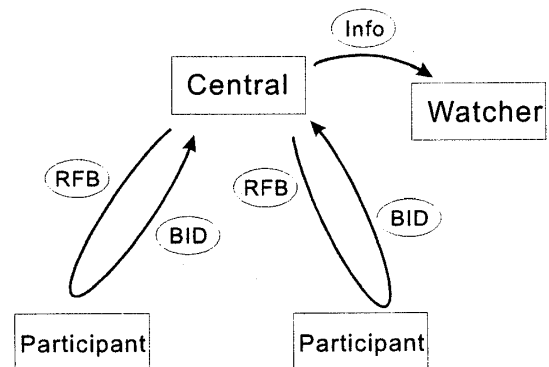


図3 Social Layer における取引手順

とでシミュレーションを行うことが可能となる。

次の Social Layer では、Agent Layer の機能を用いて、社会システムにおける役割分担やメッセージを介した基本的な相互作用プロセスを定義する。図3にここで定義した例を示す。三種類のエージェント、Central と Participant, Watcher が Agent から派生して定義されている。Central エージェントは、中央の市場において取引の仲介を行い、シミュレーションの実行を制御する。複数の Participant エージェントが市場に参加し、Central エージェントから送られる RFB (Request For Bid) メッセージに対して BID メッセージを返すことによって一回の取引プロセスが実行される。また市場の情報は Info メッセージによって Watcher エージェントに伝えられ、ユーザーに提示される。このように Social Layer は、複数の参加者による市場取引の典型的なデザインパターンを提供している。

最後に Application Layer において実際に複雑な取引を行うシミュレーションを作成することになる。次節では、このフレームワークを用いて、温室効果ガス排出権取引市場のシミュレーションを考える。

#### 4. 排出権取引市場とシミュレーション

本節では、京都議定書において考慮されている温室効果ガス排出権取引市場について Agent-based Simulation を用いた解析を試みる。

産業革命以降の人間の活動に起因する二酸化炭素などの温室効果ガスの急激な増加によって、地球表面の温暖化が進行していると考えられている。このまま温暖化が進行すると、将来、海水面の上昇や生態圏の変化など、我々の生活に大きな影響が生じると懸念されている。一国の排出する温室効果ガスは地球全体に影響を及ぼすため、このような温暖化を防止するためには、世界各国の広い合意に基づく対応が必要となる。そのため、気候変動枠組条約が合意され、97年12月に京都で開催された第3回締約国会議（COP3、京都会議）において、2008年から2012年間の第1期約束期間における先進各国に対する温室効果ガス排出量の削減目標やクリーンメカニズム、排出権取引市場といったさまざまな取り決めを盛り込んだ京都議定書が採択された。現在その批准に向けて、第6回締約国会議（COP6）で議論が進められているが、排出権取引市場をはじめとする効率的な削減のための細かな運用方法は今後の研究課題として残されている。本稿では、この温室効果ガスの国際排出権取引市場について、Agent-based Simulation を用いた検討を行い将来の議論の礎としたいと思う。

Grütter による CERT (Carbon Emission Reduction Trading) モデル[14]に基づき、参加国を12の地域に分け、それぞれをエージェントとして考える。うち、6エージェントは京都議定書附属書I (Annex I) で定められる先進各国であり、温室効果ガス削減目標が定められている。残り6エージェントの Non Annex I 国には削減目標は定められていないが、国内の温室効果ガスを削減することにより排出権取引市場に参加できるものとする。さらに、これらエージェントごとに、異なる削減コストが推定されている。

取引は中央の市場において期間ごとに決められた価格で行われるものとする。一回の取引における各エージェントの排出権売買量、国内削減量、および取引価格は、CERT モデルと同様、MAC (Marginal Abatement Cost) に基づく均衡条件から決定できるものとする。シミュレーションでは次のような手順で均衡価格を求める (図4)。

市場を制御する COP エージェントは、まず仮の取

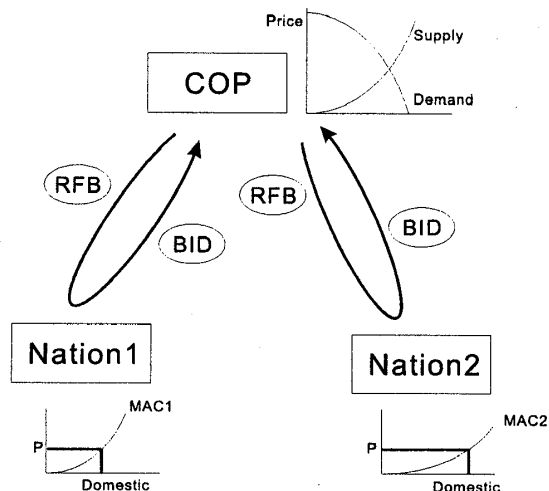


図4 排出権取引市場における取引手順

引価格を設定して RFB メッセージを参加国 (Nation エージェント) に送る。Nation エージェントは RFB を受け取ると、自分の MAC が提示価格と等しくなる国内削減量を求める。これは、市場価格以上のコストをかけて削減するのは非効率であるし、また、国内コストより高い価格で売れるなら削減量を増やした方が利益が出るためである。国内削減量が求まると、市場で買いたい、あるいは、売りたい量が、削減目標との差として求まる。こうして求まった各 Nation エージェントの需要あるいは供給量が BID メッセージにより集められる。総需要量と総供給量が等しい場合、現在の提示価格が均衡価格であることが分かる。需要と供給に過不足がある場合は、提示価格を変化させ、これらの処理を均衡に達するまで繰り返すことになる。

CERT モデルでは Excel のマクロを用いて、2010年における各種条件設定の下で、提示価格を1ドルずつ変化させて、需要と供給が一致する均衡価格を求めている。今回のシミュレーションでは、売買量と同時にその微分係数も BID を通じて収集することにより、ニュートン法を用いて均衡価格を求めた。

このように一度だけ市場が開かれる場合、先の手順で求めた均衡価格で排出権取引を行い、各エージェントの国内削減量を定めることで、世界全体において削減にかかるコストが最小化される。

次に2008年から2012年までの5年間の取引を考える。今度は、削減目標はこの5年間に削減すべき総量として与えられ、それを各年度ごとにどのように割り振るかは各エージェントの戦略にまかされているものとする。年度ごとの削減目標と MAC が与えられると、先ほどの手順に従って、国内削減量と取引量、均衡価

格を決めることができる。

そのため、次に MAC のダイナミクスに注目しよう。ここでは MAC そのものではなく、その逆関数の微分をテクノロジー関数として考える。テクノロジー関数は単価に応じて利用可能な削減技術を削減量で与える。時間が経つにつれ、技術の進歩や利率に応じて、利用可能な技術は次第に単価の安い方へとシフトしていく。また、技術には一度かぎりしか有効ではないものと何度も繰り返し使用可能なものがあるとする。これにより、市場価格が定まり、その価格より安価な技術が全て活用された後の年には、テクノロジー関数に不連続な縮小が生じる。これらをまとめると、以下の式によって  $i$  番目のエージェントの第  $n$  年度のテクノロジー関数  $t_{in}$  が与えられる。

$$t_{in}(p) = \begin{cases} \alpha_i \beta_i^n t_{i0}(\beta_i^n p) & p < \bar{P}_{in} \\ \beta_i^n t_{i0}(\beta_i^n p) & \text{otherwise.} \end{cases}$$

但し、過去の均衡価格が  $P_0^*, P_1^*, \dots$  で与えられる時、割引率を考慮した最大値を、

$$\bar{P}_{in} \equiv \max\{\beta_i^{-n} P_0^*, \beta_i^{1-n} P_1^*, \dots, \beta_i^{-1} P_{n-1}^*\}$$

とする。また、テクノロジー関数の初期状態 ( $t_{i0}$ ) は、単年度の場合の CERT モデルで用いられた MAC を再現するよう次のように与えられる。

$$t_{i0}(p) \equiv \frac{1}{\sqrt{b_i^2 + 4a_i p}}$$

このテクノロジー関数を積分し、逆関数を求めることによって MAC が与えられる。4 種類のパラメーター ( $\{a_i\}, \{b_i\}, \{\alpha_i\}, \{\beta_i\}$ ) は、シミュレーション開始時に与えられ、これが各エージェントの戦略に大きく影響する。初期の段階では、安価な技術が大量に利用可能であるため、早めに削減割り当てを消化する戦略もありえる一方、技術革新や価格割引率を考慮すれば、最後まで待つという戦略もありえる。このようにエージェントは、自分や周りの状況を考慮しつつ、割り当てられた総削減目標を 5 年の取引期間のそれぞれに分割し、コストをなるべく減らすものとする。

今回のシミュレーションでは、5 年間の試行を繰り返し行うことにより、エージェントが経験を通じてよりよい戦略を探索するようになった。各年度ごとのコストは、その年に割り振られた削減目標値と動的に与えられた MAC によって決められる均衡価格を用いることで最適化される。これは、年度ごとに均衡価格や国内削減量、需要供給がエージェントの定めた削減目標の分割の関数として与えられると見ることもできる。さらに、エージェントの年度ごとの損益は、国内コス

トと取引収支の和で与えられるため、これも同様に上記分割の関数と見ることができる。そこで、年度ごとの損益関数を割り当てられた分割によって微分したものを考え、限界分割損益を定義することができる。各年度について、全エージェントの MAC の値が市場価格と一致しており、それによって最適な市場配分が実現していたのと同様、各エージェントについて、全取引年度の限界分割損益が一定の値になるとき、損益が最適となる分割が実現しているものと考えられる。

そこで、各エージェントは 5 年間の取引期間が終了した後、限界分割損益の変動を求め、変動を減らすように分割を再調整することにする。もちろん、各エージェントが調整できるのは自分自身の分割のみであるため、他のエージェントの行動によって望む結果がすぐには得られないかもしれない。しかし、このような調整を繰り返すことによってトータルでは最適な戦略へと近づいていく。

図 5 にシミュレーション結果の一例を示す。左から日本および USA のコスト変化(上)と分割戦略(下)を示すグラフとなっている。戦略の調整を 5 回ほど行うことで、日本のコストは約 128 億ドルから 116 億ドルまで、USA のコストは約 740 億ドルから 680 億ドルまで減少している。どちらも急激な減少の後ゆるやかな上昇が見られるが、これは他国がより良い戦略を取った結果である。それらの下には、最終的に各年度ごとに削減目標 (国内削減と売買高の合計) をどのように分割したかという分割戦略が示されている。日本も USA も、初年度の 2008 年には安価な削減手段が利用可能であるため例外的に多くの削減を行うが、2009 年以降は割引や技術革新を期待して、削減を先延ばしにする戦略が有利になっている。また一番右のグラフは、世界全体のコスト変化を示す。各国はそれぞれ利己的に削減戦略の調整を行うのだが、その結果として、世界全体のコストも約 270 億ドルから 200 億ドルにま

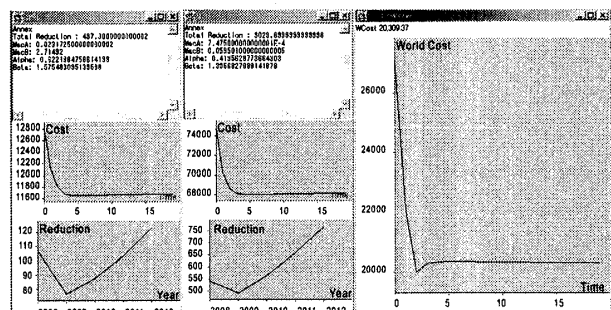


図 5 エージェントの戦略とコスト削減

で減少し、5回の調整でほぼ安定している。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、エージェントを用いたシミュレーションフレームワーク ASIA を構築し、そのアプリケーションとして、京都議定書に基づく温室効果ガス排出権取引市場のシミュレーションを行った。

シミュレーションでは、12地域に割り振られたエージェントがそれぞれ異なる削減目標とダイナミックな削減コスト関数を考慮しながら温室効果ガスの削減スケジュールを調整し、できる限り低いコストで目標を達成するよう国際取引を行った。Agent-based Approach ではこのように、それぞれ異なる多様な状況にあるエージェント間のダイナミックな相互作用から、価格変動やトータルコストの減少といったシステムのマクロな現象を観察することが可能である。

今回のモデルでは、各年度毎に市場で定まる均衡価格のみを用いた。今後の課題としては、二国間の個別の交渉による価格決定や不均衡状態における市場価格の変動、オプション取引などの金融工学的手法の導入が考えられる。また、エージェントの戦略として、限界コストの評価による削減目標の分割を考えたが、ゲーミングといった手法による交渉戦略の評価も有効であると思われる。ASIA フレームワークでは、Agent Layer においてメッセージ交換をネットワーク対応させ、ウェブインターフェースを用いることで、人間の参加するゲーミングにも応用可能である。現在、RMI を用いて Java Servlet との連携システムを準備中である。

現段階において、京都議定書自体その発効に向けての複雑な手順の途上であり、排出権取引市場に代表される有効な運用方法等は今後の議論に委ねられている。このように、まだ本格的に実現されていない社会システムについて、その有効性や性質等を条件をさまざまに変化させて試せるシミュレーションやゲーミングといった手法は、時間の限られた国際交渉において生産的な結論を導き出すための強力な道具立てとなると期待される。

## 参考文献

- [1] 塩沢由典：“複雑系経済学入門”，生産性出版（1997）。
- [2] 出口弘：“複雑系としての経済学”，日科技連（2000）。
- [3] 佐藤彰洋，高安秀樹：“統計物理から見た人工市場”，人工知能学会誌，15巻6号（2000）。
- [4] Marchesi, M. et al.: “The Genoa artificial stock market: microstructure and preliminary simulations”, WEHIA 2001 preprint (2001).
- [5] Aoki, M. and Yoshikawa, H.: “A New Model of Economic Fluctuations and Growth”, <http://meritbbs.unimaas.nl/WEHIA/Full/aoki.pdf>, WEHIA 2001 preprint (2001).
- [6] 和泉潔，植田一博：“人工市場入門”，人工知能学会誌，15巻6号（2000）。
- [7] Arthur, W. B., et. al.: “Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market”, in *The Economy as an Evolving Complex System II*, Addison Wesley (1997).
- [8] 和泉潔，植田一博：“人工市場アプローチによる為替シナリオの分析”，コンピュータソフトウェア，17巻5号（2000）。
- [9] 水田秀行：“エージェントが行うマーケットシミュレーション：コンピュータでバブルの発生を見よう”，情報処理，40巻10号（1999）。
- [10] Steiglitz, K., et. al.: “A computational market model based on individual action”, in *Market-Based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation*, World Scientific (1996).
- [11] Bonabeau, E., Dorigo M., and Theraulaz G.: “Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems”, Oxford New York (1999).
- [12] Epstein, J. M. and Axtell R.: “Growing Artificial Societies”, The MIT Press (1996).
- [13] U-Mart Project, <http://www.u-mart.econ.kyoto-u.ac.jp>
- [14] Grütter, J. M.: “World Market for GHG Emission Reductions”, Prepared for the World Bank's National AIJ/JI/CDM Strategy Studies Program, [http://www.admin.ch/swissaij/pdf/CERT\\_World-GHG-Market.pdf](http://www.admin.ch/swissaij/pdf/CERT_World-GHG-Market.pdf), (2000).