

# 人工市場モデルのための *X-Economy* システムとその利用研究

川村 秀憲, 大内 東, 車谷 浩一

## 1. はじめに

近年の複雑系研究の発展に伴って、複雑性を持った主体の行動をエージェントとしてモデル化するエージェントモデリングと、計算機シミュレーションによってエージェントのマイクロ・マクロな挙動を解析するエージェントベースシミュレーション研究が盛んになりつつある。これらの手法によって、学習や進化によってマクロな挙動からマイクロな行動ルールを変化させるような行動主体をエージェントとしてモデル化することが可能になり、従来は対象として扱うのが困難であった領域にも柔軟なモデル化とシミュレーション実験の可能性を広げている。

これらの状況から、仮説に対する検証実験を行うのが困難である社会科学でもエージェントベースシミュレーションが盛んになりつつある[1]。その中でも、アーサー等による人工市場研究に代表されるような経済現象に関するエージェントベースシミュレーションが注目を集めている[2, 3]。エージェントベースシミュレーションは、従来ほぼ不可能であった大規模な経済現象に対する実験のパラダイムとして有効であるばかりではなく、単なる仮説の検証から制度設計論への発展まで含めて経済学での重要性を増していくように思われる[4]。

しかし、エージェントベースシミュレーションには三つの大きな問題がある[5~7]。一つ目はモデルの記述・表現に関する問題である。通常エージェントモデルは計算機上にプログラムとして作成されるため、柔軟性・表現力は大きい。しかし、学習や進化を含めたエージェントの意思決定は複雑に構築されることが多く、またモデル自体がシミュレーションプログラムに

組み込まれてしまっているために、プログラムからモデルを切り離して記述・表現することが困難である。

二つ目はモデルの構築・評価に関する問題である。エージェントベースシミュレーションが扱う対象は基本的に複雑な世界であり、モデリングが対象の性質をうまく捉えて妥当に構築されているのかどうかを判断するのは困難である。また、得られる結果と対象とをどのように比較していけばよいのか、そして第三者がその結果をどう客観的に解釈すればよいのかといったことに関する統一的な方針がないという問題もある。

三つ目は、モデルの共通・蓄積に関する問題である。これは、上の二つの問題があるために、それぞれの研究者が各自の目的にあわせてオリジナルのモデルを作成することが多く、過去の研究成果を有効に共有・蓄積するのが困難であるという問題である。これらの問題を解決していかなければ、エージェントモデリングが有効な研究上のパラダイムとして確立できないのは明らかである。

そこで、これらの問題点の一つの解決策として、我々はエージェントベース経済学のための *X-Economy* プロジェクトを展開している[8, 9]。ここでは、WWW上に構築された *X-Economy* プロジェクトのフォーラムを中心に、人工市場に基づくエージェントベースシミュレーションシステムである *X-Economy* システムの提供と、それを利用したりサーチプログラムの共有を目指している。各研究者がシステムを共有し、利用したモデルとシステムを公開・提供する場所を用意することで、先ほど上げた問題点の一つの解決策になると考えている。これらの状況を踏まえ、本稿では我々が試験的に構築した *X-Economy* システムのプロトタイプの概要を紹介する。

## 2. 人工市場研究の為のエージェントベースシミュレータ

まず初めに既存のエージェントベースシミュレータについて述べる。現在、人工市場研究に関わらず幾つ

かわむら ひでのり, おおうち あずま  
北海道大学大学院 工学研究科  
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目  
くるまたに こういち  
産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター  
〒135-0064 東京都江東区青海2-41-6

かの有償・無償のエージェントベースシミュレータが提供されている。代表的なものでは、Santa Fe 研究所が提供する Swarm シミュレータや MIT の StarLogo、構造計画研究所の ABS などがある。これらのエージェントベースシミュレータは、エージェントのモデリングが直感的に行えたり、グラフィカルに振る舞いやデータを表示できる機能を持っているなど、シミュレーションを行う上で非常に利便性が高い。事実 Swarm に基づく人工市場モデルも公開されている。

これらのシミュレータを用いて行うエージェント研究は、シミュレーションの実行エンジンとエージェントの記述が分離されているために、エージェントモデルの記述には優れているが、モデル自体がシミュレータに特化していたり、またシミュレータの詳細な動作がユーザに隠蔽されていたりする場合がある。また、シミュレータの自由度が高すぎて、計算機プログラムを設計するのと同じぐらいの労力がかかる場合もある。

そこで我々のアプローチは、ある程度人工市場研究に必要なと考えられる幾つかの要素をモジュール化してプログラムを設計し、そのプログラムのソースコードを元にユーザが必要な機能を追加することで、シミュレーションシステムの提供を試みる。また、ユーザが作成した新たな機能モジュールをライブラリーとして蓄え再公開することによって、モデルをプログラムとして表現し、またほかのユーザの研究成果の相互参照を容易にすることが可能になる。シミュレータの提供と言うよりむしろ、人工市場研究のためのシミュレーションプログラムのテンプレートを提供するという感覚に近い。この様な取り組みは、Robocup におけるサッカーエージェントのシミュレーション部門でも行われており、エージェント研究の進展に大きな貢献をしている[10]。

ここで重要なのは、モジュール化の概念に基づくテンプレートの設計である。人工市場研究では、シミュレーションの要素として多種・複数のトレーダエージェントとマーケットの動作が基本となっている。そこで X-Economy システムでは、それぞれを個別のプログラムとして設計し、各プログラムの入出力を XE プロトコルとして定義することによって、モジュール間の相互作用を定義している。またそれらの通信はテンプレートプログラムに埋め込まれているので、ユーザはモジュール間の通信を意識することなく X-Economy システムの新しい機能を設計し、望みのエージェントモデルを設計することができる。システム

の概要を次に説明する。

### 3. X-Economy システムの概要

X-Economy システムは、TCP/IP 通信で結ばれたサーバ・クライアントシステムで構築されている (図 1 参照)。TCP/IP 通信を採用することで、ネットワーク上で容易に負荷分散が行え、また異なるプラットフォーム間での通信も容易に行える。システムでのサーバの役割は、システム全体に関わるシミュレーションの進行の制御と、クライアント間の通信の制御をメインに行う。また、クライアントはシミュレーションに関わる機能単位にモジュール化されており、機能に応じて以下の様な種類がある。

- **トレーダクライアント**：人工市場の基本的な構成要素であり、市場からの市場情報を基に取引の意思決定を行う。そして、どのような取引を希望するかといった取引注文をマーケットクライアントに送る。意思決定や役割に応じて、変更を加えて新たなクライアントとしてシステムに追加することができる。
- **マーケットクライアント**：トレーダクライアントからの取引注文を集計し、その取引が可能であれば取引を約定させる。取引の形態には大きく分けて相対取引と市場取引がある。相対取引ではランダムな組み合わせで二人のトレーダが相対して取引を行い、市場取引では全てのトレーダの取引注文を合計して、売り注文と買い注文が均衡する点で約定させる。トレーダと同様、種類に応じて新たなクライアントとして追加することができる。

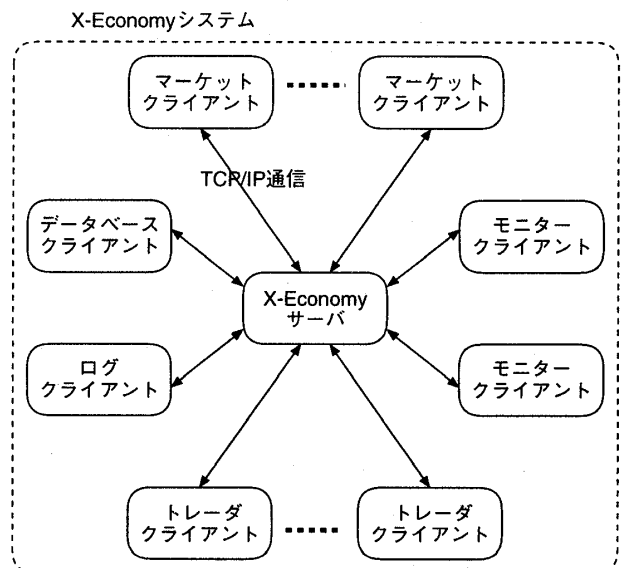


図1 X-Economy システムの概要

●データベースクライアント：全てのトレーダの財産情報等をDBとして保持・管理する。マーケットクライアントからの約定情報に基づいて、各トレーダクライアントの財産を変更する。

●モニタークライアント：マーケットモニターとデータベースモニターがあり、それぞれマーケットクライアントとデータベースクライアントの情報をグラフィカルに画面に表示する。一つのクライアントの種類に一つのモニタークライアントが対応するため、新たな種類のクライアント追加時には既存のモニタークライアントに手を加える必要はなく、対応するモニターを作るだけでよいので、拡張性に優れている。

●ログクライアント：シミュレーションのログをファイルとして記録する。現在は直接ファイルに記録するが、ログクライアントとしてモジュール化されているために、将来的にRDBへの拡張も容易に行える。

上記のように機能毎にモジュール化されたクライアントが、通信を行いながらシミュレーションを行う。通信は他のクライアントへの処理要求であるので、(送信先クライアント名、送信元クライアント名、処理要求)の組を一単位とした packets を他のクライアントへ送付することで通信が行われる。

シミュレーションの進行は通信の同期と密接に関連しており、シミュレーションの1ステップにおけるシステム全体の動作は以下の手順で行われる。

1. サーバが各クライアントへそれぞれ宛の packets を送信する。
2. 各クライアントが受け取った packets に従って、内部的な情報構造へ変換する。
3. その情報に従って、意思決定/処理を行う。
4. 意思決定/処理の内容に基づいて、内部的な情報構造から送信先クライアント毎に packets へ変換する。
5. packets を全てサーバに送信する。

この手順から、各クライアントは1シミュレーションステップに一度入力を受け取って、一度出力を行うことになる。実際にはサーバと各クライアントは独立したプログラムであるので、図2で示すように同期をとって通信を行う。この様な仕組みを採用することで、例えばトレーダ間の情報の伝わり方などもシミュレーションの概念に加えることができる。

次にシステム間の通信に用いられる packets の概要

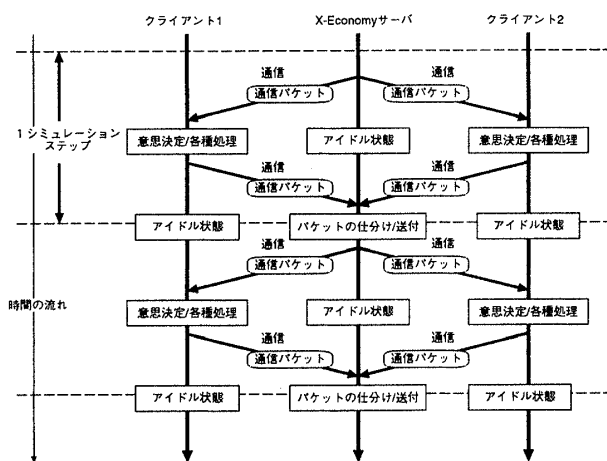


図2 シミュレーションステップと通信の同期

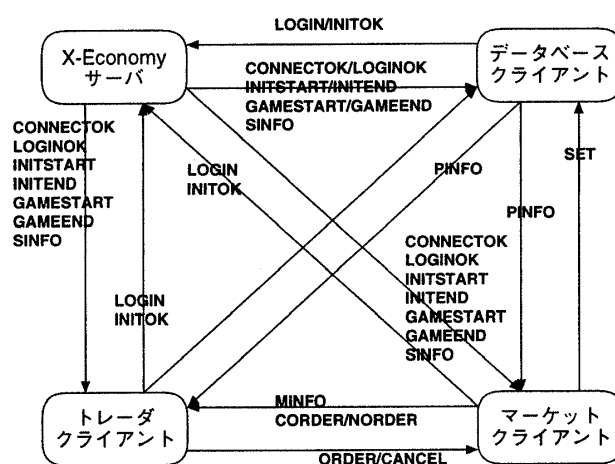


図3 システム間でやり取りされる packets のタグの概念図

について説明する。先に説明したサーバとクライアント間では、図3で示される各種のタグのついた packets がやり取りされる。それぞれのタグの概要を表1に示す。

これらのタグのついた packets は、実際には例えば図4の様な木構造を持っており、この木構造をLISPのS式で表したテキストデータがシステムでやり取りされる通信の内容である。X-Economyシステムで用いられる各種データのプロトコルを、XEプロトコルと呼ぶ。

通信のプロトコルを木構造で定義し、S式によってテキストに変換するのは、プロトコルの拡張性とデータ構造の表現力、そしてデバッグやログ解析等における通信内容の可読性を上げるためである。実際、このXEプロトコルはシステムのデバッグ時に大変役に立った。

以上がX-Economyシステムの概要であり、我々はOSとしてLinuxをインストールしたパーソナル

表1 X-Economy システムで用いられるパケットのタグとその内容

各種シグナル	
CONNECTOK	サーバ接続完了
INITSTART	初期化開始
INITEND	初期化終了
GAMESTART	シミュレーション開始
GAMEEND	シミュレーション終了
各種情報	
SINFO	サーバ情報
CINFO	クライアント情報
GINFO	商品情報
PINFO	保有財産情報
TINFO	取引情報
MINFO	市場情報
CORDER	約定情報
NORDER	未約定情報
各種要求	
LOGIN	サーバへ接続要求
ORDER	取引要求
SET	保有財産変更要求

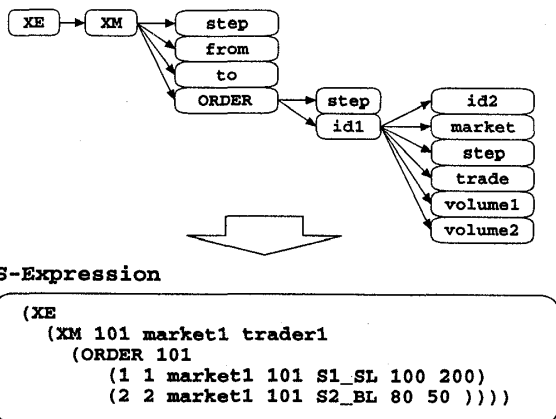


図4 XEプロトコルにおける木構造とS式の例

コンピュータ上にこのシステムを構築した。システムの安定性・実行速度、そしてグループウェアによる開発の効率性などから言語はC++を採用した。図5は実行画面の例である。画面左上と右上にはそれぞれサーバ・クライアントプログラムのプロセスを実行するためのターミナルウィンドウがあり、画面下部の左側がデータベースモニタークライアント、右側がマーケットモニタークライアントのウィンドウである。実行例ではそれぞれ X-Economy サーバと、データベースクライアント、マーケットクライアント、60のトレーダクライアントが一台のコンピュータ上で実行されている。

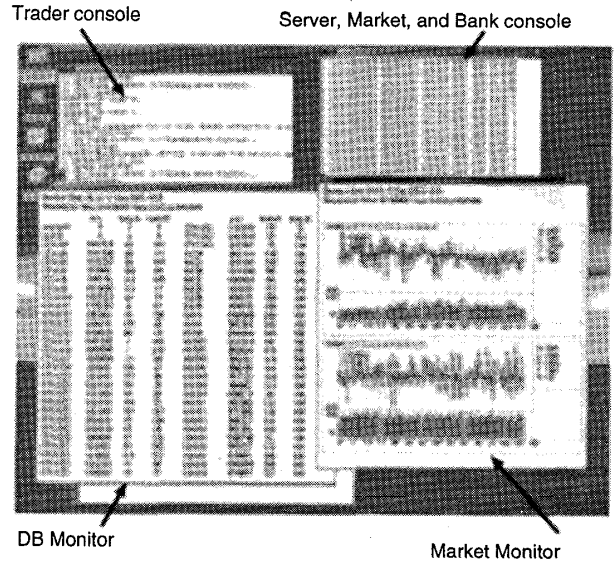


図5 X-Economy システムの実行例

#### 4. X-Economy システムを用いた研究事例

ここでは、X-Economy システムを用いた人工市場研究の事例を二つ紹介する。一つは兼平等によるニュース情報に基づく取引エージェントを用いた人工市場研究であり[11]、もう一つは佐々木等による国際取引人工市場モデルに基づく基軸通貨の発生に関する研究である[12]。これらの研究では、X-Economy システムの幾つかのクライアントの機能部分を追加・変更したシステムを用いている。それぞれについての概要と、システムの構成を簡単に説明する。

##### 4.1 研究事例1：ニュース情報に基づく取引エージェントを用いた人工市場

従来の人工市場におけるトレーダエージェントは、過去の値変動を参考に意思決定するものがほとんどであり、外部的に与えられる情報を利用したトレーダエージェントの構築と、その情報の影響に関する研究はまだあまりなされていない。したがって、人工市場研究の発展の為にそれらを扱っていくエージェント技術の発展と研究の方法論の確立も必要である。

そこで兼平等の研究では、ある企業の現実のニュースに着目して、そのニュースの情報をDBに蓄えて人工市場上のトレーダエージェントに配信し、ニュース情報が市場の振る舞いに与える影響について研究を行っている。この人工市場の構成はX-Economyサーバを中心に図6のような構成をとっており、それぞれの概要は以下の通りである。

- ニュースキャスターエージェント：日本経済新聞

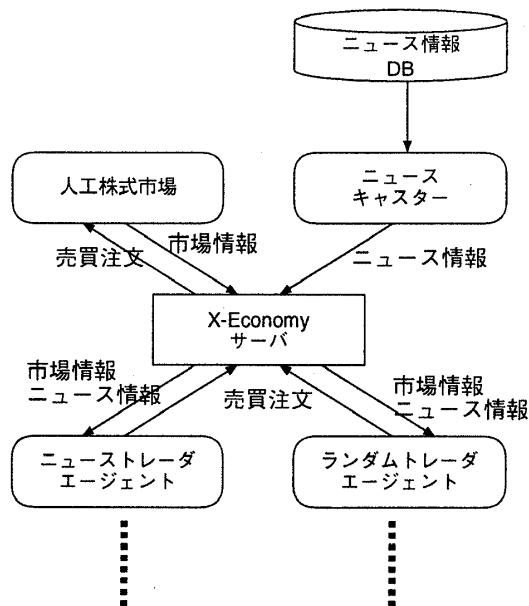


図6 ニュース情報に基づく人工市場モデル

(1999年1月1日~12月31日)に掲載された「ある企業」に関する記事に着目し、その記事から主観によって数値化されたニュース情報をDBに持っている。具体的にニュース情報は、企業にとって「とても良いニュース」~「とても悪いニュース」を+5~-5の11段階に数値化したものである。そしてニュース情報を、各ステップにおいて各エージェントに配信する。

- **ニューストレーダエージェント**：ニュースキャスターより配信されるニュース情報を参考にして、売買注文を出すエージェントである。エージェント毎にニュースの解釈に関してパラメータを持っている。このパラメータが正のエージェントは、正のニュース情報には値上がりを予想して買い注文を出し、負のニュース情報には値下がりを予想して売り注文をだす。パラメータが負のエージェントは、逆の注文をだす。値は前日の終値付近にランダムにつける。
- **ランダムトレーダエージェント**：前日の終値付近にランダムな値を付けて売買注文を出すエージェントである。市場のノイズ性を表し、ニュース情報は全く参考にしない。
- **人工株式市場**：各シミュレーションステップにおいて、いったん全てのエージェントの売買注文を集計し、もっとも約定量が大きくなるように均衡点を求めて売買注文を約定させる。また約定した時の終値を市場情報として配信する。これらの設定のもと、兼平等はニューストレーダの

パラメータが正・負の範囲でランダムに与えられている場合と、正の範囲でランダムに与えられている時で実験を行った。前者は外部的なニュース情報に統一的な解釈がない集団のモデルであり、後者は統一的な解釈がある集団のモデルである。各実験では、ランダム・ニューストレーダがそれぞれ30エージェントずつ用意された。

実験の結果、統一的な解釈のない集団ではニューストレーダとランダムトレーダの最終総資産にあまり差は生じず、ニュース情報の情報価値はあるとは言えない。しかし、統一的な解釈のある集団では明らかにニューストレーダの総資産がランダムよりも大きくなることが確認された。これは、良いニュースの時には値上がりを予想して買い注文が多くなることで本当に値が上がり、悪いニュースの時には値下がりを予想して売り注文が多くなることで本当に値が下がるといった現象が起こったからである。つまり、外部的な情報がトレーダの意思決定に影響を与え、さらにそれが市場の振る舞いに影響を与えることによって、実際にニュース情報が価値を持つといった構造が起こりうることを示唆している。

さらに、統一的な解釈のない集団と比較して統一的な解釈のある集団の場合のほうが、実験の株価の変動と現実の変動との相関が高いことが示された。実験設定を含めて現実の現象と実験結果の検証はこれからであるが、実際にニュースの影響を考慮した人工市場を構築した意義は大きいと考えられる。

#### 4.2 研究事例2：国際取引における人工市場モデルに基づく基軸通貨の創発

基軸通貨とはドルのように複数の国にまたがる取引において広く用いられる通貨のことであり、国際経済のような複雑なシステムの理解の為には重要な要素の一つである。基軸通貨が創発するメカニズムとして、通貨発行国が(1)資本の提供国であること、(2)大規模な経済を持っていること、などが挙げられているが、現実そのメカニズムは詳しく分かってはいない。したがって、国際経済と基軸通貨の関係を調べることは、国際貿易政策や制度設計の意味も含めて、重要な課題である。佐々木らの研究では基軸通貨の創発の基本的なメカニズムについて調べるために、シンプルな国際貿易エージェントモデルに基づくシミュレーションを行っている。

佐々木らのモデルは、図7で示すように複数の国が存在し、各国内では消費財としての食料と、取引媒体

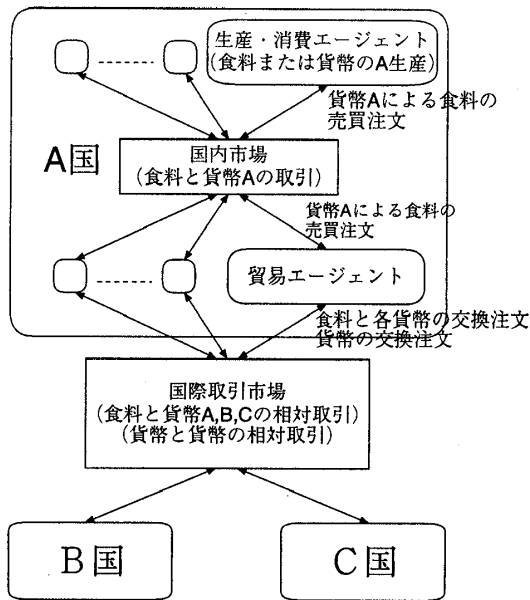


図7 国際取引に基づく人工市場モデル

としての自国の通貨の2種が流通する。ここでモデル化される通貨は、政府によって発行されるものではなく、金や銀などの様な生産者によって直接生産される財としてモデル化されており、むしろ貨幣に近いものである。このモデルは現在の複雑・巨大な国際経済のモデルというよりも、中世の貿易・経済システムなどに代表されるような原始的な国際経済モデルとなっている。モデルにおける各要素の概要は以下の通りである。

- 生産・消費エージェント**：食料または自国の通貨のどちらかを選択的に生産し、一方で食料を消費する。エージェント毎にそれぞれの生産量が違い、国内市場の食料の取引価格と生産量のバランスに従って、効率の良いものを生産する。また食料の貯蓄量に過不足がある場合、国内市場に売買注文を出して貯蓄量を調整する。
- 国内市場**：自国内の各エージェントから出される食料の売買注文をいったん集計し、もっとも約定量が大きくなるように均衡点を求めて売買注文を約定させる。約定価格は各エージェントへ市場情報として配信される。
- 貿易エージェント**：国内市場・国際市場の取引において利益を出すことを目的とする。国内市場では自国の通貨、国際市場では参加する各国の通貨が用いられるので、食料と各国の通貨を持っている。もし国内市場の価格が国際市場に比べて安い時には、国内市場に買い注文、国際市場に売り注文を出す裁定取引を行う。逆の状況時には逆の注

文を出す。国際取引に関しては、各国の通貨それぞれに信頼度をもうけて、どのくらい取引媒体として信頼できるかを判断する。注文の際には相手に信用度の高い通貨を要求して取り引きし、また相手から要求された通貨の信頼度を増加させるように変更する。

- 国際市場**：各国の貿易エージェントの注文に対して、食料と通貨の取引の場合は、ランダムな組み合わせで1対1の相対取引を行わせ、双方の注文条件が満たされる時のみ約定させる。この時の取引の情報は取引に関わるエージェントに通知される。また、通貨対通貨の取引の場合は注文をいったん集計し、均衡点で注文を約定させる。この結果は為替レートとして各エージェントに通知される。

佐々木らは以上に基づく3国モデルを構築し、生産・消費エージェント10、貿易エージェント10を用意してシミュレーションを行った。その時の各国の生産力等は同じ条件とした。この設定で実験を行うと、国際取引で用いられる通貨が一つに集約していく現象が確認できた。

これは、ある国の通貨が少しでも良く使われることから国際市場でその通貨の交換レートが上がり、その国では食料を多く輸入することが効率的になる。そして、国内の食料の価格が下がって生産・消費エージェントは通貨を生産するようになり、安定して国際取引の主媒体としての通貨を安定供給できるというフィードバックによって生じている現象と推察される。

ここで重要なのは、全ての国の生産条件が同じにも関わらず、国内市場の揺らぎからある国の通貨がほんの少しくよく使われるようになり、その通貨がさらに使われることによって自己強化的に基軸通貨になっていく現象が確認されたことである。

つまり基軸通貨の発生は、ある国に特に優位性がなく、各エージェントによって個人合理的に行われる取引に基づく国際経済においても、自律的に発生してくるメカニズムが内在されている可能性を示唆するものである。このシミュレーションは国際経済のシステム像を捉える上で新たな概念を提案するものであり、今後の理論的展開が期待できる研究である。

## 5. おわりに

本稿では、我々が現在取り組んでいる *X-Economy* システムの概要と、それを使った幾つかの人工市場研

究について紹介した。特にこれらの研究は、*X-Economy* システムを用いることで、比較的容易にシミュレーションが行えると同時に、実験プログラムを公開するという前提に立つことによって、エージェントモデリングにおけるシミュレーションモデルの記述という観点からも有効である。

エージェントベースシミュレーションが真に意味のある方法論になる為の次のステップとして、エージェントモデルをどうやって記述・蓄積していくかが大きな課題であるが、*X-Economy* システムのような取り組みは一つの試金石になるだろう。

なお、ここで紹介したC++による *X-Economy* システムはプロトタイプであり、まだ一般公開はしていないが、現在より自由度の高いシステムと通信プロトコルをJavaとXMLで構築中であり、完成次第広く *X-Economy* プロジェクトのホームページで公開する予定である。

**謝辞** 本研究に有用なアドバイスをいただいた産業技術総合研究所の幸島明夫さん、野田五十樹さんには心より感謝を申し上げます。本研究は、文部科学省科学研究費補助金 1378034 によって行われました。

#### 参考文献

- [1] 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).
- [2] Arthur B., Holland H., LeBaron B., Palmer R., Tayler P.: “Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market”, Santa Fe Working paper (1996).
- [3] 和泉潔, 植田一博: “人工市場入門”, 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 941-950 (2000).
- [4] 塩沢由典: “経済学にとっての人工市場”, 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 951-957 (2000).
- [5] Moss S.: “Editorial Introduction: Messy Systems—The Target for Multi Agent Based Simulation”, *Muti-Agent-Based Simulation*, LNAI 1979, Springer, pp. 1-14 (2000).
- [6] Edmonds B.: “The Use of Models—Making MABS More Informative”, *Muti-Agent-Based Simulation*, LNAI 1979, Springer, pp. 15-32 (2000).
- [7] Takadama K., Shimohara K.: “Toward Cumulative Progress in Agent-Based Simulation”, *JSAI 2001 International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS 2001)*, pp. 35-42 (2001).
- [8] *X-Economy* プロジェクト Web Site, <http://www.x-econ.org/>
- [9] 車谷浩一, 大内東: “国際貿易リーグ: マルチエージェント経済における標準問題(1)—概念と *X-Economy* システムによる実現—”, 情報研報, Vol. 2001, No. 1, pp. 55-60 (2001).
- [10] Robocup 公式 Web Site, <http://www.robocup.org/>
- [11] 兼平大輔, 川村秀憲, 大内東, 車谷浩一: “*X-Economy* システムを用いた人工株式市場におけるニュースの情報価値に関する研究”, 2001 年度日本オペレーションズ・リサーチ学会春期研究発表会アブストラクト集, pp. 252-253 (2001).
- [12] 佐々木雄一, 山本雅人, 大内東, 車谷浩一: “*X-Economy* システムを用いた人工国際市場における基軸通貨の発生に関する研究”, 2001 年度日本オペレーションズ・リサーチ学会春期研究発表会アブストラクト集, pp. 254-255 (2001).