X-Economy – マルチエージェント経済におけるシミュレーションプラットホーム –

川村 秀憲，車谷 浩一，大内 東

現在様々なスケールの経済活動の根本的なメカニズムを解明するためにマルチエージェント経済学が盛んになりつつある．しかし，マルチエージェント経済学はその方法論上の幾つかの問題点がある．それらは大きく分けて，モデルの記述・表現に関する問題，構築・評価に関する問題，モデルの共通化・蓄積に関する問題の３つの問題に代表される．そこで我々の研究グループでは，それらの問題点を明らかにするとともに，それらの問題を乗り越えてマルチエージェント経済研究を発展させるために，X-Economyプロジェクトを立ち上げ，マルチエージェント経済のためのシステム提供と実際にそれを用いた研究プログラムを展開している．ここではX-Economyプロジェクトの概要，シミュレーションプラットホームのの紹介と幾つかの研究事例について紹介する．

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ミクロ・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ミ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３つの大きな問題がある[5][6][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

X-Economy - Simulation Platform for Multi-agent Economics

Hidenori Kawamura, 北海道大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Hokkaido Universuty.

Koichi Kurumatani, 産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター, Cyber Asist Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

Azuma Ohuchi, 北海道大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Hokkaido University.

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無いという問題もある．

三つ目は，モデルの共通化・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合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出来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]．そこでは，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，それを用いたリサーチプログラムの共有を目指している．つまり，マルチエージェント経済におけるLinuxと呼べるようなシステムの開発と研究スタイルの提案を目的としている．各研究者がシステムを共有し，用い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

まず始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だ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，また他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X-SS(eXtensible Social System)プロトコルのサブクラスであるMAEP(Multi-Agent Artificial Economy Protocol)プロトコルとして定義する事によって，モジュール間の相互作用を定義している[11][12][13]．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出来る．システムの概要を次に説明する．

3　*X-Economy*システム

ある程度の汎用性をもったマルチエージェント経済シミュレーションのためのシミュレーションプラットホームを作成するにあたり，*X-Economy*システムでは大ま

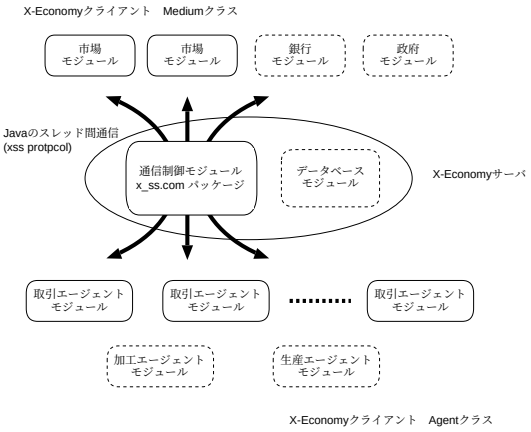

図1　*X-Economy*システムの概念図（点線で囲まれた部分は現在未実装）

かにいって以下のシステムの要素を考えている．

- *X-Economy*サーバ：このサーバーはシステム間の複数のモジュールの通信を制御する．このサーバを介して複数のモジュールが通信し，システム全体の複数の構成要素がそれぞれ役割を担いながらシミュレーションが進行する．
- Mediumクラスモジュール：具体的には人工市場モジュール（市場型取引・相対型取引），銀行モジュール，政府モジュールなど経済システムにおいて，メタな役割を担うエージェントを実現するモジュールである．
- Playerクラスモジュール：具体的には，市場に対して取引を行う取引エージェントや，農作物などの生産する生産エージェント，また生産物を加工するための加工エージェント等である．

図1はこれらの要素からなる*X-Economy*システムの概念図である．複数のモジュールが*X-Economy*サーバを介して通信し，シミュレーションが進行する．

現在このような概念に基づく*X-Economy*システムをJavaを用いて開発しており，Mediumクラスモジュールとして市場モジュール，Playerクラスモジュールとして取引エージェントモジュールが完成している．取引エージェントは複数の銘柄の財を持ち，それぞれの銘柄の財の交換注文を市場モジュールにサーバを介して送る．市場モジュールは各取引エージェントの注文を集め，それらを取りまとめることによって財の交換の仲立ちをする．この二つの要素からなるシミュレーションとしては，株式などの変動リスク資本と通貨などの無リスク資本に基づく人工市場シミュレーションなどが出来ることになる．他の要素は今後順次実装していく予定であるが，モジュール間の通信などシステムの基本的な部分はすでに完成しているので，拡張は容易である．

具体的にシステムの実装についてであるが，現在はそれぞれのモジュールをJavaのスレッドとして実現している．また，モジュール間の通信はスレッド間の通信として定義されているが，将来的に複数のプロセス・複数のプラットホームでの分散シミュレーション環境を想定し，通信プロトコルはXMLベースで開発を進めている．具体的に，*X-Economy*プロジェクトではX-SSプロトコルのサブクラスのMAEPプロトコルとしてモジュール間の通信プロトコルを定義している．

MAEPプロトコルの内容であるが，一般にシステムの構成要素としてn種類のモジュールが存在する場合，$n(n-1)/2$種類のプロトコルが必要である．また，新たなモジュールの追加によってn種類のプロトコルを追加しなければならず，組み合わせ的にどんどん実装が困難になっていく．そこでMAEPプロトコルではこの点を解決するために，システムに流通する「財」や「情報」をオブジェクトと見なし,「オブジェクトの交換」という形で取引や情報の流通を捉え，交換されるオブジェクトの種類に応じてプロトコルを定義する．例えば取引エージェントが市場モジュールに出す取引要求のプロトコルは，XMLのDTDとして図2の様に定義される．

このように，モジュール間の通信プロトコルをXMLとして定義することによって，将来的に複数のプラットホームでの分散型シミュレーションや，シミュレーション結果の解析，システムの相互利用，そしてデータ解析手法の共通化などが可能となる．現在はこのプロトコルを拡張していきながら，システムの開発を進めている．

4　*X-Economy*システムを用いた研究事例

現在我々のプロジェクトでは*X-Economy*システムを用いた幾つかの研究を行っており，ここでは，*X-Economy*システムを用いた人工市場研究の事例を紹介する．これらの研究では，基本的に*X-Economy*システムの幾つか

```
<!--
  goods-trade-request.dtd (general agent -> medium, and v.v.)
  Copyright Mar. 8, 2001.
  Koichi Kurumatani, Cyber Assist Research Center.
  All rights reserved.
-->

<!ELEMENT goods-trade-request (order, item, quality, country, market-name, value, pastmsgid)>
<!ELEMENT order   (#PCDATA)>           <!-- buy, sell, cancel, inquiry -->
<!ELEMENT item    (#PCDATA)>           <!-- wheat, flour, bread, steel, machine, house -->
<!ELEMENT quality (#PCDATA)>           <!-- reserved -->
<!ELEMENT country (#PCDATA)>           <!-- name of country (GID) -->>
<!ELEMENT market-name (#PCDATA)>           <!-- name of market (UID) -->
<!ELEMENT client-name (#PCDATA)>       <!-- name of cilent (UID) --
<!ELEMENT value   (price-range, quantity-range)>
<!ELEMENT price-range    (low, high)>
<!ELEMENT quantity-range (low, high)>
<!ELEMENT low  (#PCDATA)>              <!-- long integer -->
<!ELEMENT high (#PCDATA)>              <!-- long integer -->
<!ELEMENT pastmsgid (#PCDATA)>         <!-- long integer -->

<!-- About "pastmsgid"
- From agent to medium:
This field is valid only when "order" is "cancel".
The message id. which you want to cancell should be assigned to "pastmsgid."
-->

<!-- end of goods-trade-request.dtd -->
```

図2　MAEPのDTD定義の一例[12][13]**.**

のモジュールの機能部分を追加・変更したシステムが用いられている.

- **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に関する研究 (北海道大学：兼平大輔 他)**
  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為されていない．従って，人工市場研究の発展の為には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[14].
- **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に関する研究 (北海道大学：佐々木雄一 他)**
  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，等が挙げられているが，現実にそのメカニズムは詳しくわかっていない．従って，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．佐々木等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.
- **複数投資対象への分散投資エージェントの設計と市場の挙動に関する研究 (北海道大学：山本隆人 他)**
  現在人工市場研究で扱われている投資対象は，抽象化された単一のリスク資本に対して行われることがほとんどである．しかし現実の市場では金融工学・

ポートフォリオ理論に基づく分散投資が当たり前であり，それに基づいて複数の投資対象間の相互作用が起こっていると捉えるのが自然である．そこで山本等の研究では，実際に複数投資対象にポートフォリオ理論に基づいて分散投資を行うエージェントをモデル化し，分散投資によって各投資対象間にどのような相互作用が総じているのかを明らかにするために，*X-Economy*システムを用いて研究を行っている [15].

- **エージェント実験経済標準モデルとしての国際貿易リーグの提案 (産業総合技術研究所：車谷浩一)**
  上の佐々木の研究例にもあるように，近年一国・多国の経済システムをマルチエージェントシステムとしてモデル化し，それらの相互作用とそこから創発するマクロな振る舞いの間に潜むメカニズムを解明しようという研究がなされつつある．しかし一般に国際貿易を含めたエージェントモデルの開発，またはそれを用いた研究というのは，対象があまりに複雑であるので，モデルの抽象度やシミュレーションの方法，実験方法，結果の検証まで含めて様々な研究者が相互に成果交換を行いながら研究を進めていかなければ有効な研究の成果となり難い．また，そのような複雑なシステムでのエージェントの意思決定を議論する上では，各研究者でモデルに対する共通認識が重要になってくる．このような観点から，車谷は*X-Economy*システムを用いたエージェント実験経済標準モデルとしての国際貿易リーグの提案を行っている．

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．

エージェントベースシミュレーションによって複雑な現象を解明するためには，本プロジェクトのように研究者間での知識・方法論の共有化が重要であり，興味をお持ちの方々とはぜひ協力できればと考えている．

なお，ここで紹介したJavaによる*X-Economy*システムはプロトタイプであり，現在公開への準備を進めている．

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] Kurumatani K., Ohuchi A., World Trade League as a Standard Problem for Multi-Agent Economics - Concept and Background, Proceedings of International Workshop on Agent-based Approach to Economic and Social Complex Systems, AESCS'01, pp. 156-162 (2001).

[12] 幸島明男，車谷浩一：人工経済用エージェント間通信

プロトコル MARP，情報処理学会論文誌投稿中.
[13] X-SS Web Site, http://www.x-ss.org
[14] 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).
[15] 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).
[16] 川村秀憲，大内東，車谷浩一：“人工市場モデルのための *X-Economy* システムとその利用研究”，日本オペレーションズ・リサーチ学会学会誌，Vol. 46, No. 10, pp. 537–543 (2001).
[17] 車谷浩一：“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 - 概念と *X-Economy* システムによる実現”，日本オペレーションズ・リサーチ学会学会誌，Vol. 46, No. 10, pp. 544–548 (2001).