

# 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

車谷 浩一

## 1. はじめに

経済・金融システムのモデル化・解析の研究を遂行するにあたり、従来の伝統的な経済学的手法の限界は経済学の内部からも聞かれ、それに代わる手法として計算機科学・人工知能の分野で生み出されたマルチエージェント技術が注目されている。

このような研究の一つの方向は、金融システム（金融市場）のモデル化・解析を中心とした、人工市場と呼ばれるシミュレーション研究であり数多くのシミュレーション結果が報告されている。

また、金融市場のような限定されたサブシステムを対象とするのではなく、より大きく一国の経済システムや複数国から成る経済システムをモデル化・シミュレートするような研究も開始されている[1~5]。

シミュレーション研究においては、対象システムのモデル化の方法ならびにシミュレーション結果の妥当性に関する検討が重要であり、そのためにはシミュレーションの追試を行えることが求められるが、経済・金融シミュレーションにおいては、そのような環境は全く整っていないのが現状である。

以上のような背景のもと、我々は、マルチエージェント技術を用いた経済システムのモデル化・シミュレーション・対戦型ゲーム・教育エンターテイメントコンテンツの提供などを行うための、共通プロトコルや共通ライブラリを整備する枠組みとして *X-Economy* プロジェクトを進めている[6~8]。

このプロジェクトの目的は、

- マルチエージェント経済における標準問題の設定
- 多くのユーザが技術を競い合うゲーム（自己完結型ゲーム、対戦型ゲーム）の設定
- エージェント間通信プロトコルの標準化

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 マルチエージェントチームリーダー  
〒135-0064 東京都江東区青海2-41-6

●エージェント・サーバイブラリの標準化  
などであり、現在、金融市場・経済システムを対象としたシミュレーション・対戦型ゲームの設計・実装を行っている。本稿では、マルチエージェント経済における標準問題の一つとしての国際貿易リーグについて、その概要と *X-Economy* システムによる実現方法について述べる。

## 2. マルチエージェント経済における標準問題に求められる条件

マルチエージェント経済における標準問題は、以下のような要求を満たす必要があると考えられる。

- 1) 現実のモデルとしての妥当性
- 2) 様々な問題解決の手法の適用可能性、ならびにエージェントモデルの自然さ
- 3) ゲームとしての複雑性・面白さ
- 4) 閉問題であること

まず、1)の現実のモデルとしての妥当性であるが、社会システムのシミュレーションは自然科学のそれとは異なり、対象システムの全てをモデル化することは不可能である。すなわち、対象システムの本質的部分を抽出し、シミュレーション結果が対象システムの振る舞いの特徴を説明づけられるかどうかでその妥当性を検証する必要がある。言い換えるならば、標準問題の設定は、現実システムの本質を適度な抽象化を伴って抽出している必要がある。

次に2)に関しては、標準問題の設定は、計算機科学・人工知能の分野で開発される多くの手法が利用可能であることが必要である。従来の経済理論では、対象システムを数的に解析したいという目的・意欲が先行し過ぎており、対象システムのモデルに不自然な設定を置くことが多く（合理性、限定合理性、効率的市場仮説など）、エージェントの挙動に事前に多くの制約が置かれており不自然である。

現在我々が手にするエージェント技術・マルチエージェント技術は、人間や社会をモデル化するという目

的に関しては、従来の数理モデルに比べて遙かに優れており、不自然な設定を置く必然性はない。

また3)に関して、標準問題はゲームとして十分に複雑であって、簡単に最適戦略が見いだせるようなものであってはならない。現在までに人工知能の分野で標準的な問題として機能してきたものとして、チェス、将棋、囲碁、サッカーなどがあるが、これらの問題は、ルールは単純かつ明快であるが、その最適解は組み合わせ的に容易に見いだせるものではない。マルチエージェント経済における標準問題もその程度の複雑性を有している必要がある。このことは対戦型ゲームを設計するにあたっての、ゲームとしての面白さに関連する。

最後に4)に関して、標準問題は閉問題、すなわち外部からの情報を参照することなく、その問題自身で閉じていることが望ましい。開問題、すなわち外部から与えられる情報に依存するようなゲームは、参加者間において情報格差が生じる可能性があり、公平かつ公正なゲーム設定が困難だからである。

### 3. 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の一つとして、*X-Economy* プロジェクトでは、「国際貿易リーグ (World Trade League)」と呼ばれるゲームを想定している[9]。このゲームでは、参加者は複数のエージェントから構成される「国家」と呼ばれる単位でゲームに参加する。ゲーム構成としては、

- 各国家がお互いに干渉せずにゲームに参加してスコアを競う「自己完結型ゲーム」
- 複数 ( $n$  個) の国家が同時に参加してスコアを競う「同時参加対戦型ゲーム」

の2種類がある。ただし、ソフトウェア的には、同時参加対戦的ゲームにおいて  $n=1$  すなわち1個しか国家が参加していない場合は自動的に自己完結型ゲームとなるので、本稿の残りにおいては同時参加対戦型ゲ

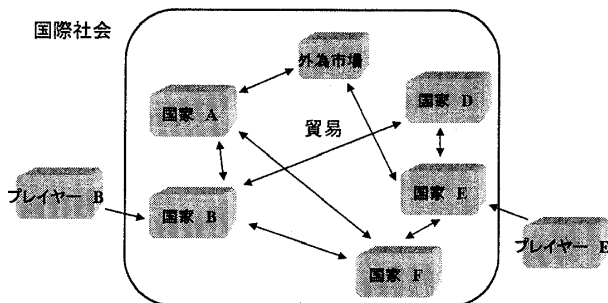


図1 国際貿易リーグ概念図

ーム (以下、単に対戦型ゲームと略記) について述べる。

国家を構成するエージェントは、生産 (農業, 食品製造, 工業素材, 工業), サービス (流通, 娯楽), 家計, 銀行, 中央銀行, 政府などを表現し、各々独立して動作するソフトウェアである。

エージェントの基本的動作は、以下の通りである。

- 公開情報、すなわち全てのエージェントに知られている情報を収集する。
- 意志決定を行い、行動を選択する。
- 各エージェントは独立に動作する。すなわち国家は直接的な中央制御方式を取らない。
- 各エージェントは必要な資源の獲得において、他の国家に属するエージェントと取引できる。つまり貿易を行うことができる。

以上のような多主体のエージェントからなる国家群が、財の生産を行い、必要であれば貿易を行い、また通貨を外国為替市場で交換しながら、経済成長を競い合うようなゲームが国際貿易リーグである (図1)。

### 4. 国際貿易リーグを構成する要素

#### 4.1 エージェントが取り得る行動選択肢とマーケット

国家を構成する各エージェントは次のような行動の選択肢を持つ。

- A) 生産・サービスエージェント  
生産量の計画ならびに実行 (借入, 物資購入, 設備投資, 雇用, 生産, 販売) を行う。
- B) 流通エージェント  
物資の運搬・仲介を行う。
- C) 銀行エージェント  
貸出先・金額を定め、貸出を行う。預金を集める。市場で取引を行う。
- D) 中央銀行エージェント  
公定歩合を決定する。銀行に貸出を行う。市場介入を行う。
- E) 政府エージェント  
税率を定める。徴収した税を財源として補助金を交付する。国債の発行・償還を行う。
- F) 資源・環境エージェント  
その国家に属する自然資源や環境の汚染度などを表現するための特別なエージェントで、自発的に動作するエージェントではない。これは人・組織に相当するものではなく、国家に属す

る「自然」を表現するためのものである。

エージェントのほかに、物品・金融商品などの取引を行うための場を提供し、価格・量の間接的調整を行う存在としてマーケット（市場）を用意する。市場としては、取引の行われる物資・商品（食品材料、食品中間財、食品、工業素材、工業製品、国債、金融商品など）ごとに用意される。

#### 4.2 国際貿易リーグのゲームとしての設定—その幾つかの段階

国際貿易リーグはそのゲームとしての設定を何段階にも変更できるように設計されている。具体的には、以下のような項目について、複雑さを段階的に変更できるように設計を行う。

##### A) 経済システムの進化の度合い

以下のように経済システムの歴史的な進化の度合いによってゲーム設定を変更することができる。

1. 中世経済：貨幣は存在するが、金融システムが整備されていないシステム
2. 近代経済：間接金融すなわち銀行融資の存在するシステム
3. 現代経済：直接金融すなわち株式・社債等が存在するシステム

##### B) エージェントの数の度合い

1種類（生産、サービス etc.）のエージェントが、どの程度の数システム内に存在するかの度合い。

##### C) 国家の数の度合い

ゲームに参加する国家（ゲーム参加者）の数の度合い。1である場合には自己完結型ゲームとなる。

一度にゲームに参加する国家の数が多いほどゲームの複雑さが増す。最初の版では2から5程度の数の国家がゲームに参加すると想定している。

##### D) 初期条件の設定

1. 対称型ゲーム：全ての国家が同一の初期条件からゲームを開始するような設定。
2. 非対称型ゲーム：各国家の初期条件が異なるゲーム。立場を変えて何度かゲームを行うことにより参加する国家（ゲーム参加者）の参加条件を平等にする。

#### 4.3 ゲーム参加者の評価関数の設定—従来の対戦型ゲームとの違い

従来の対戦型ゲームとは異なり、国際貿易リーグでは複数の評価関数を用意してその組み合わせを変えることにより、ゲームの性質や複雑度を柔軟に変更してゲームを実施することができる。国際貿易リーグにおける国家（参加者）の評価関数・指標としては以下のようなものを考えており、これらの加重平均を取って、各国家（参加者）のスコアが決定される。また各評価関数は国際経済システムのある側面を表現したものとなっている。

##### A) 自国の経済発展：

国際経済システムにおける「競争」の側面を表現。

##### B) 国際経済システム全体の発展。

##### C) 国家間の発展不均衡の減少：

国家間の「協調」の側面を表現（一人勝ちの評価を低くする）。

##### D) 国際経済システム全体の安定：

国際経済システムの「安定」の度合いを表現。

##### E) 環境の保護度：

環境との「共生」の側面を表現。

##### F) 生活向上：

国民（家計）の「生活向上」の側面を表現。

また、これらの評価関数は具体的には、1) GNP、2) 財の生産量、3) 環境汚染度、4) 財の分配度などから計算される。

対戦型ゲームとして先行する研究であるロボカップと比較すると、国際貿易リーグは、チームがマルチエージェントシステムから構成されており、そのそれぞれのチームが同時にゲームに参加するという参加方式の点において、ロボカップサッカー[10]と同種のゲームであると言える。

一方、サッカーの場合にはチームの評価関数が固定で一定であるのに対し、国際貿易リーグでは評価関数がシステムの様々な側面を評価するために複雑なものとなっている。このような複数の評価関数を導入してシステムの多様性を反映させようという方針は、ロボカップレスキュー[11]のゲーム設定と通ずるものがあるが、これは現実の社会システムを対象とする場合には避けて通ることのできない問題だと言えるだろう。

## 5. 実装

### 5.1 システム構成

以上述べてきた国際貿易リーグを実施するに当たって、*X-Economy* プロジェクトでは、サーバ・エージェントの設計・実装を行っている。図2に国際貿易リーグのシステム構成を示す。この図では簡単のため、一つの国家が存在するような場合を示しているが、対戦型ゲームを実施する場合には複数の国家がサーバに接続することになる。

この図において、エージェントとはユーザが作成するエージェントであり、メディアムとは市場に代表されるような、エージェント群からの要求をつき合わせて解を求める媒介モジュールを表す。

中心に描かれたサーバは、1) 全てのエージェント・メディアムとの通信を司る通信制御モジュール、2) エージェントの行動などのマイクロ情報ならびにシステム全体のマクロ情報を記録するデータベース、の2個のモジュールから成る。通信は後で述べる *X-SS* プロトコルを用いて行われる。

エージェント・メディアムはクラスライブラリとして用意され、国際貿易リーグに参加するプレイヤーは国家を構成するエージェントをインスタンスとして用いることができる。

### 5.2 通信プロトコル *X-SS*

*X-Economy* システムでは、エージェント間の通信プロトコルとして *X-SS* (eXtensible Social System) Protocol と呼ばれる統一的かつ拡張可能なプロトコルを用意することにより、多くの人が参加でき、

必要に応じて自由にゲームの内容を拡張できるように設計を行っている[12]。

一般に  $n$  種のエージェントが存在する場合、プロトコルは  $n(n-1)/2$  種類用意しなければならない。また新たなエージェントの種類が加わった場合、新規に  $n$  種類のプロトコルを定義しなければならない。このようなアドホックな方法でプロトコルを定義するのは計算量的にはもちろんのこと、可視性や分かりやすさの点において問題があるのは明らかである。

この組合せ的爆発の問題を避けるために、*X-SS* プロトコルでは、エージェントの種類に応じてプロトコルを用意するのではなく、物資や金融商品の取引を「交換」とみなし、交換される物資・金融商品の種類に対応するようなプロトコルの種類を用意する。例えば、物資・金融商品の取引は財の交換（「物資と貨幣」、「金融商品と貨幣」）と見なすことができるし、情報の収集・伝達は「情報と貨幣」の交換とみなすことができる。無料で入手可能な情報の収集は交換される貨幣の量を0と定義すれば良い。また通常は交換される対象の一方は貨幣である場合がほとんどなので、結局のところ、プロトコルは交換対象となる物資・金融商品の種類の数だけ用意すればよいことがわかる。具体的には、交換対象としては、

- 貨幣（国家ごとに用意。国家内部の地域通貨も定義可能）
- 物資（食品原料、食品材料、食品、工業素材、工業製品）
- サービス（流通、一般サービス）
- 労働力

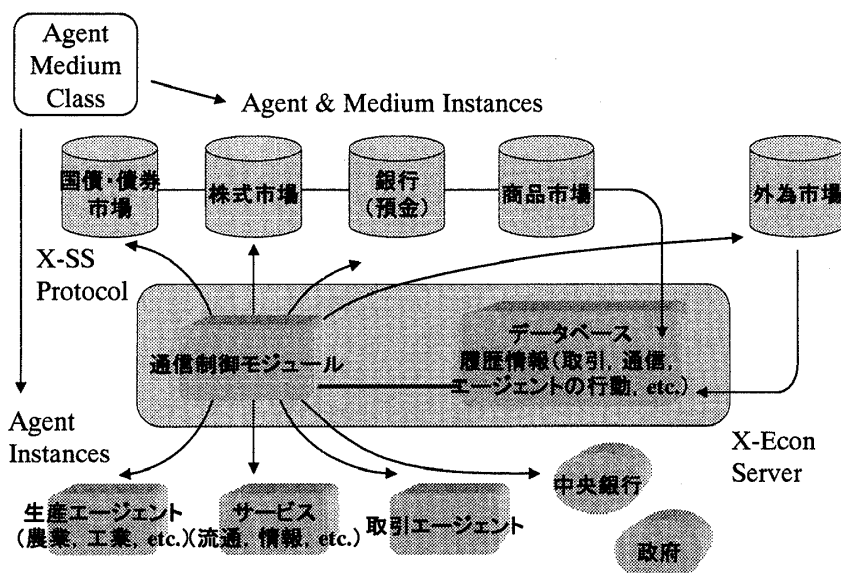


図2 国際貿易リーグの *X-Economy* システムによる実現

●金融商品 (国債, 社債, 株式)

●情報

などが定義される。

またこのような交換対象の定義を用いることにより, 各エージェントは, それがどのような対象を交換可能であるかによって特徴付けることが可能になり, エージェントクラスの階層構造が定義できることになる。

次に, 実際の実装については, エージェントとサーバの通信制御モジュール間の通信が多様な形式で行われる可能性があることを視野に入れ, 以下のように様々な手段でのメッセージのやり取りを想定している。

●TCP/IP, UDPなどのネットワークを経由する場合のXML表現

●同じくネットワークを経由する場合のCORBA表現

●プロトコルを表現するJAVA Classライブラリ

●同じくC++ Classライブラリ

後半の2種類のクラスライブラリは, メッセージを表現するようなオブジェクトクラスを用意し, それをインスタンス化したオブジェクトを, サーバの通信制御モジュールに実装されたproxyメソッドに渡すことによりメッセージの伝達を行う。これによりプロトコルの詳細が実装された部分がメソッドのコードとして埋没することがなくなり, プロトコルの定義がプロトコルクラスによって厳密に定められ, 保守性・拡張性を増すことになる。

## 6. おわりに

本稿では, マルチエージェント経済における標準問題として, 多種複数のエージェントからなる国家が, お互いに競争・協調しながら経済発展を競う対戦型ゲームである「国際貿易リーグ」について述べた。また, その実現のために必要な構成要素やX-Economyシステムによる実際のインプリメンテーションについて考察した。

本稿で提案したゲームを, なぜ「国際貿易ゲーム」と呼ばないのか? という質問がよく発せられる。

その理由は, 「国際貿易リーグ」においては, 各国が自らの経済発展のみを優先して「競争」するだけでなく, 他国の関係を重視して国際社会全体の発展を目指す「協調」的な態度や, また環境を保護しながらの経済発展を目指す環境との「共生」などを重視してい

るからである。

今後の課題としては, ゲームの設定やX-SSプロトコルの詳細な設計, ゲームを実施するのに必要なサーバ・クライアントプログラムのX-Economyシステムでの実装・公開が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 佐々木雄一, 川村秀憲, 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・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.254-255 (2001).
- [2] 佐々木雄一, 川村秀憲, 大内東, 車谷浩一: 人工市場における国際取引と基軸通貨の創発に関する研究, 第40回計測自動制御学会学術講演会 (2001年7月).
- [3] Iba, T., et al.: Boxed Economy Model: Fundamental Concepts and Perspectives, in the *Proceedings of the First International Workshop on Computational Intelligence in Economics and Finance (CIEF '00)*, (2000).
- [4] URL: <http://www.boxed-economy.org>
- [5] 出口弘: 複雑系としての経済学, 日科技連出版 (2000).
- [6] Kawamura, H., Yamamoto, M., Ohuchi, A., Kurumatani, K.: Development of X-Economy System for Introduction of Artificial Market; in the *Proceedings of the First International Workshop on Agent-based Approach to Economic and Social Complex Systems (AESCS '01)*, pp.51-58 (2001).
- [7] 川村秀憲ほか: X-Economyサーバによる仮想金融市場の設計と開発, 情報処理学会「知能と複雑系」研究会研究報告 (函館), SIG-ICS, 2001年1月.
- [8] URL: <http://www.x-econ.org>
- [9] URL: <http://www.w-econ.org>
- [10] Kitano, H., Asada, M., Kuniyoshi, Y., Noda, I., Osawa, E., Matsubara, H.: RoboCup-A Challenge Problem for AI; *AI Magazine*, Vol. 18, No. 1, pp. 73-85 (1997).
- [11] Kitano, H., Tadokoro, S., Noda, I., Matsubara, H., Takahashi, T., Shinjou, A., Shimada, S.: RoboCup Rescue: Search and Rescue in Large-Scale Disasters as a Domain for Autonomous Agents Research; in the *Proceedings of IEEE Conf. on Man, Systems and Cybernetics* (1999), <http://www.robocup.org/>
- [12] URL: <http://www.x-ss.org>