自律学習における CITTA による部分知識の結合

山川 宏[*1]、宮本 裕司[*2]、馬場 孝之[*1]、岡田 浩之[*1]

本報告では、自律学習というフレームワークにおいて、タスク学習において事前学習で獲得した部分知識をモジュールとして組み合わせて利用するために開発した、マルチモジュール問題解決アーキテクチャである CITTA(Cognition based InTelligent Transaction Architecture)について述べる。自律学習のフレームワークでは、学習を特定の目的に対する行動を獲得する「タスク学習」とまだ目的が決まってない段階で環境に関する知識を獲得する「事前学習」の二つの段階に分けて取り扱う。

事前学習で獲得する部分知識にはセマンティクスが与えられていないので、CITTA は本来同一の意味を持つ情報についてはスタック上に積み上げて扱う。また、マルチモジュール環境では各モジュールが取り扱う変数の制御可能性が動的に変化するので、CITTA はセンサ入力と行動出力を統一的に扱う一般化状態を用いる。

最後には「RWC 2001 Final Exhibition & Symposia」で行ったナビゲーション課題によるデモンストレーション「ドア&鍵課題の自律学習による解法」おいて、自律学習機能により、事前学習により予め獲得した部分環境知識を、タスク学習で CITTA によって部分環境知識を組み合わせて利用することで、新たな場面への適応が可能となることをお見せする

1　はじめに

我々は、経済産業省の国家プロジェクトであるリアルワールドコンピューティングにおいて、図 1 に示すような、学習を特定の目的に対する行動を獲得する「タスク学習」とまだ目的が決まってない段階で環境に関する知識を獲得する「事前学習」の二つの段階に分けて取り扱う自律学習というフレームワーク[1]を提唱してきており、これまでに、状況分解[2]と強化学習を組み合わせたナビゲーション実験[3]などを行っている。

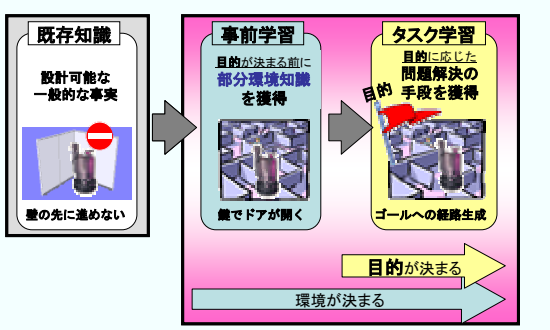


図1自律学習の枠組みの提唱

我々は自律学習の実現のために、3つの要素技術を開発した。1つ目に事前学習において、部分環境知識を抽出するための Matchable 状況分解手法[2]で、本技術ではスプレッドシート状に整形されたデータに対して、特徴量とイベントの同時選択により関係の強い複数の部分情報を自動的に抽出する。

2つ目の要素技術は、個々のモジュールにおける認知距離学習による問題解決器である。学習より獲得した任意の状態間の行動によって結び付けられた認知距離を用いて、実行時の計算コストを抑えながらの与えられたゴールに応じた行動決定が可能である[4]。

3つ目の要素技術は、マルチモジュールアーキテクチャとしての CITTA がある。タスク学習では、CITTA を用いて事前学習で獲得した部分知識をモジュールとして組み合わせて利用する。

2　自律学習というフレームワーク[1]

実世界環境からの情報を扱う従来システムでは、人間があらかじめ獲得し、設計した環境に関する知識を利用してタスク学習を行っていたが、その知識獲得に要する設計コストが大きく問題となっていた。なぜなら、システムは環境ごとに知識獲得を行う必要があるためである。

Combining Partial Knowledge using CITTA in Autonomous Learning Framework

Hiroshi Yamakawa, Takayuki Baba, Hiroyuki Okada, (株)富士通研究所, FUJITSU LABORATORIES LTD
Yuji Miyamoto*2, (株)富士通ビー・エス・シー研究所, FUJITSU BROAD SOLUTION & CONSULTING Inc.

そこで我々は個別の環境に依存しない普遍的な知識をシステムに設計して与えた後に、環境に関する知識獲得を事前学習として行う、自律学習の枠組みを提唱した。これによれば、環境に関する知識の設計コストが大幅に低減できる。

自律学習という考え方は、人間の認知発達からヒントを得たものです。つまり子供の時には特定の目的を持たない行動を行いながら環境に関する知識を蓄積してゆき、大人になったときには既に蓄えていた知識を利用して目的に応じた効率的に学習やタスクの遂行を行える能力を実現し様としています。そういう意味では、認知発達の過程では学習は多段階で行われており、単純に 2 段階に分けられるものではありません。先行する学習が後の学習を効率的に行えるようにサポートするブーツストラップな関係を作り上げることが重要であると考えています。しかし、行動の目的の有無により事前学習とタスク学習を切り分けは、最もわかりやすいと考えています。

事前学習とタスク学習の具体的な手法としても、様々な選択肢があるとは思いますが、現在我々は環境に関する知識獲得の手法として Matchable 状況分解手法[2]を利用し、これにより得られた部分環境知識を組み合せて用いれば、タスク学習においては計算コストの削減や、より少ない経験からの汎化能力が実現できます。

3　マルチモジュールアーキテクチャ(CITTA)

CITTA により、事前学習で得られた部分環境知識を組み合せて利用する。今回提案する CITTA(図2参照)では、今まで我々が提案してきた CITTA[5,6]に対して、他の二つの技術と組み合わせるため、情報交換に利用する共有メモリのスタック化やコントローラの導入などの改良を行った。

3.1 CITTA の構成と協調動作

CITTA はその内部に共有メモリ、モジュール群、コントローラを持ち、全体として環境からの現在の状態を入力し、ゴール解決のための処理を行い、ゴールへ移動するための次の状態を出力する。CITTA は環境と交互に動作し、これを 1 サイクルとする。外部環境およびモジュール間との情報交換には共有メモリが用いられる。

CITTA は複数のモジュールを管理し、ある現在の状態において処理が行なえるモジュールを使用して問題解決を行なう。

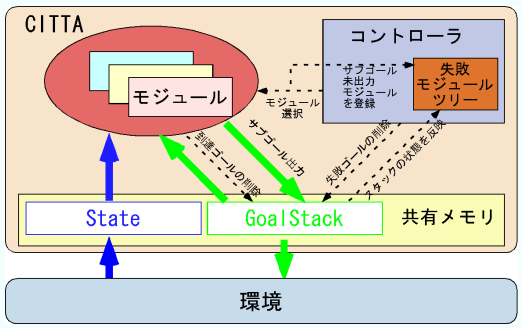


図2 CITTA の基本構成

この図では、現在の状態(State)のベクトルとゴールnスタック(Goal Stack)を分けて書いてあるが、実際にはノードごと現在の状態とゴールのスタックが存在する。

使用するモジュールはコントローラによって選択される。

共有メモリは情報の最小単位であるノードのベクトルで、ノードごとに一つの現在の状態と、実現したいゴールのスタックを持つ。

コントローラではモジュールの制御とスタックの制御を行なう。1 サイクルごとに、実行処理を行う 1 つのモジュールを選択する。一度選択され実行処理を行なったモジュールはサブゴールを出力できる間は連続して選択され、実行処理を行う。サブゴールを出力できない場合に、サブゴールを出力できるモジュールが見つかるまで、ランダムにモジュール選択を行う。

また、スタック上のゴールで、全てのモジュールが実行できない(全モジュールがサブゴール未出力)ゴールはスタックから削除する。

各モジュールは、接続されているノードとの情報の受け渡しとして、現在の状態、ゴールの取得と、サブゴールの出力を行う。処理としては、学習処理、到達ゴールの削除処理、実行処理の3つがある。学習処理、到達ゴールの削除処理は全てのサイクルで行う並列的な処理であるが、実行処理についてはコントローラによって選択されたモジュールのみ行う(逐次処理)。

学習処理は、取得した現在の状態を利用してモジュールごとの学習を行う。到達ゴールの削除処理は、自ら出力したサブゴールに到達していればスタックから削除する。

実行処理は取得した現在の状態とゴールについての問題解決を行い、次の状態をサブゴールとして出力して共有メモリ上のゴールスタックにプッシュする処理を行なう。しかしながら、以下のような3つサブゴール未出力条件を満たす場合には、モジュール内の処理を行う以前に実行動作は中止される。

- 現在のゴールに対して既に失敗している
- 現在の状態が既にゴール到達している
- 前サイクルに出力したサブゴールに到達していない

また、モジュール内の処理をした後に以下のような条件になった場合にもサブゴールの出力を行わない。

- 内部処理でサブゴールを出力できない
- 前回と同じサブゴールを出力しようとした
- ゴールと同じサブゴールを出力しようとした

以上のような動作により、スタックの最上部のゴールを監視しているモジュールの中から動作可能なモジュールの一つが動作を行うことにより全体として協調して問題解決が図られる。

3.2 CITTA の特徴

このアーキテクチャは、一種の黒板モデルと考えられるが、事前学習により獲得した部分知識を利用するために以下のような点で特徴がある。

- **セマンティクスラベルが存在しない**

  部分知識にはセマンティクスをあらわすラベルが無いので、本来同一の意味を持つ情報を、スタック上に積み上げるなどして、その同一性を保持する。このために、システム内に同じ意味を持つ情報は分散して存在しない。

- **一般化状態の導入**

  マルチモジュール環境では各モジュールが取り扱う変数の制御可能性が動的に変化し、それを事前学習の段階で知ることは困難なので、CITTA はセンサ入力と行動出力を統一的に扱う一般化状態を用いる。

4　デモンストレーション

図3に示す、「RWC 2001 Final Exhibition & Symposia」で行ったナビゲーション課題によるデモンストレーション「ドア&鍵課題の自律学習による解法」により、自律学習の効果を示す。

4.1 課題の基本設定

環境中に置かれたエージェントは以下の情報の入出力を行う

- 位置: 部屋内の 2 次元座標位置
- 行動: 前後左右方向への移動
- 存在物: 現在位置のもの(ドア、鍵置場、電話置場、エサ)
- 所持品: 現在持っている物(なし、鍵、電話)
- 部屋:　部屋の ID
- ドア条件: ドアが開く所持品を示す ID

これらは、一般化状態であるから特にセンサと行動は区別されていない。

4.2 事前学習

事前学習では、エージェントが 9 個の異なる環境でランダムウォークし、そのデータを用いて Matchable 状況分解します。ここでの状況分解では 2 時刻を一まとめにして扱う時系列状況分解の技術が用いられ、これにより部分マルコフ遷移を取り出すことができます。

状況分解は属性とイベントの同時選択により，よく起こる出来事の部分集団(部分状況)を抽出します。ここで、各部分状況は内部に規則性に基づいて評価されます.)よって，状況分解による事前学習を行うことで，「鍵とドアの関係」や、「位置と移動の関係」などについての部分環境知識が獲得されます. この例では合計 14 個の部分環境知識(部分状況)が抽出されました。その結果を図4に示します。この中では、位置、行動、存在物、部屋を含む部分状況を取り出されており、これは移動に関するモジュールとして動作します。また、存在物、所持品、ドア条件を含む部分状況はドアを開けるためのモジュールとして動作します。

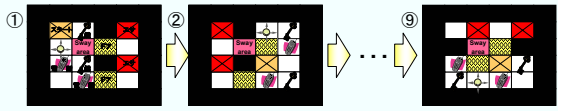


図 3 事前学習を行う環境

部屋ごとにマップが異なり、鍵でドアが開く部屋と電話でドアが開く部屋などがある。

No	位置	行動	存在物	持ち物	部屋	ドア条件
1	場所1	↑	空	空	1	1
2	場所4	→	鍵	鍵	1	1
3	場所3	↓	空	鍵	1	1
4	場所5	↓	ドア	鍵	1	1
5	場所6	↓	空	鍵	1	1
6	場所9	←	エサ	鍵	1	1
…	…	…	…	…	…	…
1000	場所7	↓	空	空	1	1
1001	場所1	↑	空	空	2	1
…	…	…	…	…	…	…
9000	場所1	↑	電話	電話	3	3

図 4 事前学習で抽出される部分状況

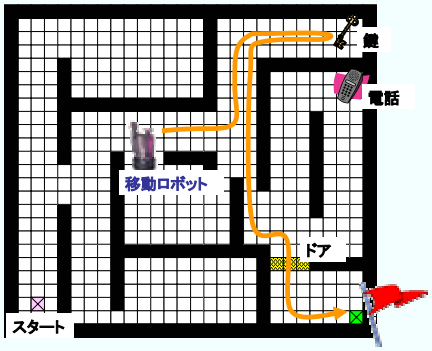


図 5 タスク学習に用いられた部屋の例

4.3 タスク学習

この場合の CITTA の動作は、エサが存在する場所に行くことがゴールとして与えられた場合には、そのゴールを実現可能であると判断した「位置と移動の関係」をもつモジュールがまず動作するようなことがおこる。

部分環境知識を利用すれば、ゴールを与えられた以降のタスク学習での行動決定に必要な経験の量を小さくできる。このため必要に応じて鍵を取りながらゴールへ向かう経路生成を少ない経験で行えるようになった。

また自律学習では、タスク学習の経験も分解して蓄えるので、環境が変化しても部分的な経験を組み合わせることで、新たな環境に素早く対応できる。

5　おわりに

我々が提案している、学習を特定の目的に対する行動を獲得する「タスク学習」とまだ目的が決まってない段階で環境に関する知識を獲得する「事前学習」の二つの段階に分けて取り扱う自律学習というフレームワークについて述べた。

事前学習としての状況分解で獲得した部分知識を、タスク学習においてモジュールとして組み合わせて利用するために、改良したマルチモジュールアーキテクチャである CITTA の提案を行った。ナビゲーション課題において、事前学習により予め獲得した部分環境知識を、タスク学習で CITTA によって部分環境知識を組み合わせて利用することで、新たな場面への適応能力が向上することが示された。

我々の研究の目的は、柔軟な学習能力を実現であり、そのためにシステムの内部構造を学習により獲得することを目指してきた。今回の成果はそのようなことがある程度可能になってきたことをデモンストレーションすることが目的である。そのため、マルチ・エージェント技術の点から見ると、エージェント間の協調や競合解消などに関しては、既存の技術が十分に盛り込まれていない。一方で学習によりシステムの内部構造を獲得しようとする場合には、「セマンティクスラベルを利用できない」、「センサと行動を区別しづらい」などの困難があり、それらに適応しうるアーキテクチャとして CITTA 提案を行っている。この研究は学習システムとしての工学的応用のみならず、人間の脳機能を理解する上でも有用であると考えているので、それらとの関係付けも探ってゆきたい。

なお本研究の一部は RWC 予算により行われた。

参考文献

[1] N. Watanabe, H. Okada, H. Yamakawa and T. Mohri. (2000). "Situation Decomposition Algorithm for Autonomous Learning," Proc. RWC2000, pp. 219-222.

[2] 山川,岡田, 渡部. (1999). "規則性を持つ部分データを抽出するアルゴリズムの提案," Proc. IBIS'99, pp.75-80.

[3] 伊藤, 岡田,山川,大森. (2000). "Matchable 状況分解に基づく Multi-module 強化学習による移動ロボットの経路探索," 信学技報, NC99-99, pp. 47-54.

[4] 山川, 岡田 馬場. (2000). "認知距離を用いた問題解決器の提案," Proc. MACC2000.

[5] 山川, 岡田, 渡部, 松尾. (1998). "一般化状態における協調と競合のためのエージェント内部機構," Proc. MACC'98.

[6] 山川, 岡田, 渡部, 松尾. (1998). "実世界で自律学習を行うための分散知能アーキテクチャ -CITTA-," 第 12 回人工知能学会全国大会, pp.455-456.

ネット情報を使った意思決定のための知識獲得エージェント

藤本 和則　山本 裕

本稿では、インターネット上の情報から意思決定に必要な知識を自動獲得する機構について、これを複数の知識獲得エージェントの協調により実現する協調獲得モデルを提案する。まず、統計的決定に必要な「代替案の集合、情報の集合、確率分布」の知識をそれぞれ獲得する 3 つの知識獲得エージェントについて述べる。そして、これらのエージェントが、容量の限られた通信路を共有しながら知識を収集／獲得する協調獲得モデルを提案する。

1　はじめに

近年、自然言語処理や知識獲得技術の進歩[6] [10] により、インターネット上の情報から様々な知識をある程度の精度で自動獲得できるようになってきた。こうした状況に合わせて、ユーザの意思決定に必要な知識をネット上の情報から自動構成する研究が始められている[1][5]。我々は、特に、不確実な状況下で合理的な意思決定を行うのに必要な知識について、これをユーザとネット情報から自動獲得する意思決定支援の枠組について研究を進めている[8] [9]。

我々は、これまでに、ユーザから「状況の集合と効用関数」を、ネット情報から「代替案の集合、情報の集合、確率分布」をそれぞれ獲得する知識獲得システムの構成を示した[9]。これら 5 種類の知識の獲得により、各代替案の期待効用 (得られる利益の見込み) を計算でき、その大きな代替案を薦めるという意思決定支援が可能となる。本稿では、これらの知識のうち、インターネットを検索しながら獲得する「代替案の集合、情報の集合、確率分布」に着目し、これらを効率的に収集／獲得する知識獲得機構について述べる。

インターネット上の情報から知識を獲得する状況では、獲得に用いる通信路の容量は限られるので、意思決定の質を上げる効果の大きい知識を優先して獲得する機構の実現が重要となる。本稿では、こうした知識獲得機構の一つとして、「代替案の集合、情報の集合、確率分布」のそれぞれを獲得する知識獲得エージェントの協調に基づく協調獲得モデルを提案する。このモデルに基づいて知識獲得を行うことにより、意思決定に用いる知識ベースをより早く価値の高いものとして構成することが可能となる。まず、2 章で、代替案の集合、情報の集合、確率分布をそれぞれ獲得する知識獲得エージェントについて説明する。3 章では、各知識獲得エージェントが意思決定の質を上げるために、協調しながら知識を収集／獲得する機構について述べる。

2　知識獲得エージェント

図 1 に知識獲得システムの構成を示す。図に示すように、知識獲得システムは、ネット上の情報から「代替案の集合、情報の集合、確率分布」を、ユーザから「状況の集合、効用関数」をそれぞれ収集／獲得する。本章では、これらの知識のうち、インターネット上の情報から獲得する代替案の集合、情報の集合、

A Knowledge Acquisition Agent for Decision Making Using Information on the Internet.

Kazunori FUJIMOTO, (有) フジモト・リサーチパーク, Fujimoto Research Park Co., LTD.

Yutaka YAMAMOTO, 京都大学大学院 情報学研究科, Graduate School of Informatics, Kyoto University.

確率分布に着目する。そして、これらを獲得するそれぞれの要素を知識獲得エージェントとみなし、代替案獲得、情報獲得、確率分布獲得のエージェントについて、具体例をもとに説明する。

2.1　代替案獲得エージェント

代替案の集合は、意思決定の対象となる要素の集合であり、例えば、電化製品を購入する場合では、購入対象になる機種が代替案となる。代替案獲得エージェントは、ユーザから意思決定の対象のカテゴリ (例えば「デジタルカメラ」など) が与えられたとき、(1) カテゴリ名をキーワードとして代替案を集めたサイトを検索し、(2) サイトにアクセスしてページを収集し、(3) 集められたページから代替案の集合を抽出する、という過程で獲得作業を実施する。代替案を集めたサイトとしては、例えば、電化製品の選定では価格調査サイト (e.g., http://www.kakaku.com/)、政治家の選定では、議員要覧サイト (e.g., http://www.seiji-koho.co.jp/) などがある。

2.2　情報獲得エージェント

「情報」の集合は、ある代替案を選択した後の「状況」を予測するためのものである。デジタルカメラの購入の例では、この「情報」は、CCD 画素数などの仕様となる。こうした仕様は、機種の画質の良し悪しという「状況」を予測するのに利用できる。情報獲得エージェントは、代替案獲得エージェントの獲得した代替案について、(1) 代替案の名称をキーワードとして「情報」を集めたサイトを検索し、(2) サイトから「情報」に関するページを収集し、(3) 集められたページから「情報」の集合を抽出する、という過程で獲得作業を実施する。「情報」を集めたサイトとしては、例えば、電化製品の選定ではメーカの提供する製品解説ページ、政治家の選定では各政治家のホームページなどがある。

2.3　確率分布獲得エージェント

確率分布は、「情報」の集合を使って、代替案を選択した後の「状況」を確率的に予測するものである。例えば、「情報」、「状況」として、それぞれ CCD 画素数、画質の良し悪しが与えられたとき、この確率分布は、CCD 画素数から画質の良し悪しを予測する確率である。ネット上に直接確率の値が数値として記述されていることはない。そこで、確率分布獲得エージェントは、確率分布に関する知識 (評価知識と呼ぶ) を収集／獲得し、それらを統合して確率分布を導出する (この導出については [2] を参照されたい)。確率分布の獲得は、情報獲得エージェントの獲得した「情報」と、ユーザから与えられた「状況」について、(1) 情報と状況の名称をキーワードとして評価知識を提供するサイトを検索し、(2) サイトから評価知識に関するページを収集し、(3) 集められたページから評価知識を抽出し、(4) 獲得された評価知識を統合して確率分布を構成する、という過程で獲得作業を実施する。評価知識を提供するサイトとしては、例えば、電化製品の選定では、機種の評価ランキングを提供するサイト、あるいは、各機種の個人的な評価を提供する個人ページなどがある。

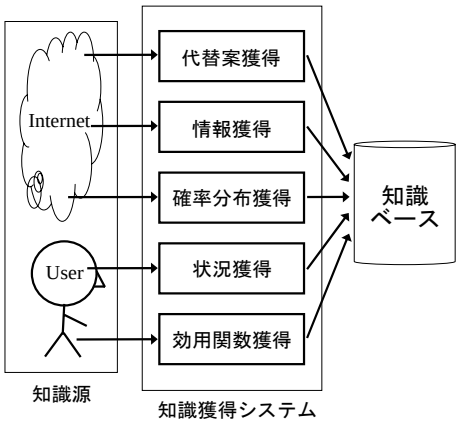


図 1　意思決定系での知識獲得システム

3　協調による知識獲得

本章では、2 章に述べた 3 つの知識獲得エージェントについて、容量の限られた通信路を共有しながら、知識の収集／獲得を行う協調獲得モデルを提案する。

3.1　エージェントの獲得戦略

本節では、知識獲得エージェントの獲得戦略として、知識ベースの価値を増す効果の大きい知識から

優先して収集する戦略を示す。こうした獲得戦略に基づくことにより、知識獲得エージェントは、価値の高い知識ベースをより早く構成することが可能となる。なお、この獲得戦略は各エージェントについて共通となることから、本節では、代替案、情報、確率分布を知識として区別せず、各知識の集合を同一の記号として E、すでに獲得された知識ベースを KB、知識ベースの価値[†1]を $V(\mathrm{KB})$、アクセスの対象となるアドレスの集合を R とそれぞれ表す。また、アドレスへのアクセスには、サイトを検索する行為と、ページを収集する行為が含まれるとする。

以上の設定のもと、エージェントがアドレス $r \in R$ へアクセスしたとき得られる知識ベースの価値の増加量の期待値は、得られる知識 $e \in E$ の見込みを表す確率 $\mathrm{P}(e|r)$ を用いて次式で与えられる。

$$\sum_{e \in E} [V(\mathrm{KB} \cup e) - V(\mathrm{KB})] \cdot \mathrm{P}(e|r) \qquad (1)$$

この期待値をアドレス r の**アクセス価値**と呼ぶ。アクセス価値の大きなアドレスほど、より大きな価値の知識ベースを期待できるという意味で、アクセスする価値があるといえる。こうした考えから、各エージェントは、知識の収集にあたって、得られる価値の期待値のより大きなアドレスを優先してアクセスする。

3.2 協調獲得モデル

協調獲得モデルの構成を図 2 に示す。協調獲得モデルは、知識源、通信路、3 つの知識獲得エージェント、知識ベース、そして、アクセス価値ボードから構成される。アクセス価値ボードは、各エージェントが各知識のアクセス価値を共有するためのメモリである。こうした協調獲得モデルにおいて、各エージェントは、次の 2 つを判断しながら獲得作業を実施する。

- 各エージェント内で、どのアドレスへのアクセスが優先されるか。
- 他エージェントとの間で、どのエージェントが優先されるか。

†1 知識ベースの価値については、様々な定量化が考えられるが、その一例を付録に記す。

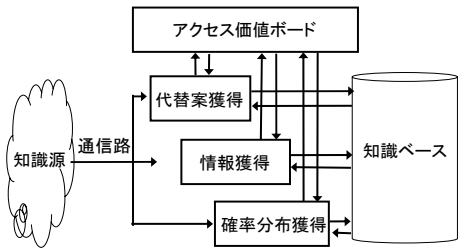


図 2　協調獲得モデル

以下では、通信路の容量制限から、ある時刻に通信路を利用できるのは 1 つのエージェントのみであるとして、効率よく知識獲得作業を実施するエージェントの振る舞いを示す。

1. すでに獲得されている知識ベースを調べ、対象となるアドレスへのアクセス価値を計算
2. アドレス価値の最大値を求め、その最大値を自エージェントの名称と合わせてアクセス価値ボードに提示
3. アクセス価値ボードを調べ、最大の価値を提示するエージェント名をサーチ
4. 最大の価値を提示するのが自エージェントである場合、(1) 収集を実行し、(2) 収集が完了したときアクセス価値ボードから自エージェントのアクセス価値を削除し、(3) 収集された情報から知識獲得を実行し、(4) 知識が獲得された場合は、知識ベースを更新して 1. へ、獲得されない場合は、そのまま 1. へ

こうした振る舞いにより、知識源への通信路の容量に制限があっても、高いアクセスの価値をもつ知識獲得エージェントが優先されながら、効率よく知識ベースを構成することが可能となる。

3.3 関連研究

統計的決定論のもとでの知識の価値については、代替案、確率分布が獲得されていることを前提に、「情報」の価値を議論することが多い [4] [7]。これに対して、図 1 に示す意思決定系では、代替案、情報、確率分布を並行して獲得するので、「代替案の集合、情報の集合、確率分布」の 3 つの要素について、それぞれの価値を考える必要がある。例えば、代替案が全く獲

得されていない場合には、いくら情報や確率分布が獲得されても、利益 (効用) を得ることは期待できない。したがって、知識が全くない場合には、まず、代替案の獲得の価値が高いことになる。一方、代替案のみが獲得され、情報と確率分布が全く獲得されない場合には、適切な選択ができないので、大きな利益を得ることは期待できないことになる。したがって、代替案を獲得した後には、それを選ぶための知識の価値も高まることになる。このように、意思決定系では、「代替案の集合、情報の集合、確率分布」を区別せずに、それらの価値を議論することが重要となる。

情報の価値に基づく獲得戦略については、Value-Driven Information Gathering [3] でもその基本的な考え方が示されている。これに対し、我々の知識獲得モデルは、代替案、情報、確率分布の知識獲得エージェントの協調により知識獲得を実現するという点が大きく異なる。ネット情報から知識を獲得するにあたっては、収集した Web ページ中に知識が存在するかどうかを判定する技術や、表やテキストから知識を抽出する技術など、様々な各知識固有の獲得技術が必要となる。こうした各知識固有の獲得技術をエージェントとしてカプセル化することにより、他知識の獲得技術との独立性を確保でき、技術の追加／変更を容易に行うことが可能となる。また、各知識の獲得手続きの実行に、異なる計算機資源を用いることも容易となる。このように、我々は、提案の協調獲得モデルには多くの利点があると考える。

4　おわりに

本稿では、インターネット上の情報から意思決定に必要な知識を獲得する機構について、これを複数の知識獲得エージェントの協調により実現する協調獲得モデルを提案した。今後は、アクセス価値の定義で用いた「アクセスの結果得られる知識の見込み」の設定法をはじめ、モデルの詳細化を進める。また、今回は、ある時刻に通信路を利用できるのは 1 つのエージェントのみであるとしたが、今後は、容量の限界まで複数のエージェントが利用できるアルゴリズムへの拡張を検討する。

参考文献

[1] Mark Craven, Dan DiPasquo, Dayne Freitag, Andrew McCallum, Tom Mitchell, Kamal Nigam, and Seán Slattery. Learning to extract symbolic knowledge from world wide web. In *AAAI–98*, pp. 509–516, 1998.

[2] Kazunori Fujimoto, Kazumitsu Matsuzawa, and Hideto Kazawa. An elicitation principle of subjective probabilities from statements on the internet. In *Proceedings of the Third International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems (KES-99)*, pp. 459–463, 1999.

[3] Joshua Grass and Shlomo Zilberstein. A value-driven system for autonomous information gathering. *Journal of Intelligent Information Systems*, Vol. 14, pp. 5–27, 2000.

[4] Judea Pearl. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, 1988.

[5] Arnaud Sahuguet and Fabien Azavant. Wysiwyg web wrapper factory (w4f). Available from `http://db.cis.upenn.edu/W4F/`, 1999.

[6] 市村, 長谷川, 渡部, 佐藤. テキストマイニング：事例紹介. 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 192–200, 2001.

[7] 植野真臣. 意思決定アプローチによる bayesian network の因果モデル構築. 人工知能学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 725–734, 1996.

[8] 藤本, 賀沢, 佐藤, 島津, 北. ネット情報を使った意思決定支援 dsiu における知識獲得技術. 人工知能学会論文誌, Vol. 16, No. 1, pp. 120–129, 2001.

[9] 藤本, 山本. ネット情報を使って意思決定する過程の数理モデルの提案. 人工知能学会研究会資料 SIG-FAI/KBS-J, pp. 29–33, 2001.

[10] 富浦, 渡辺他. 特集：ここまできた自然言語処理. 情報処理学会誌, Vol. 41, No. 7, pp. 762–796, 2000.

付録：知識ベースの価値

知識ベースの価値について、「知識ベースを利用した場合に期待できる効用」に基づいた定量化を示す。

定義 1 *(知識ベースの価値)*
知識ベースとして、代替案の集合 A、情報の集合 E、確率分布 Pr が獲得されたとき、

$$V(\{A, E, \Pr\}) = \max_{a \in A} \sum_{\theta \in \Theta} U(\theta) \Pr(\theta | (E : a)) \quad (2)$$

を知識ベース $\{A, E, \Pr\}$ の価値と呼ぶ。ここに、U は効用関数、Θ は「状況」の集合、$(E : a)$ は代替案 a についての情報の集合をそれぞれ表す。　□

情報財の開発インセンティブ

藤山英樹

This article explores competitive interaction in the development of new information goods. Fudenbeg and Tirole (1986) model is extended to apply to the case of information goods duopoly market in which profits and prices depend on consumers' willingness to pay. The incentive to develop new information goods is assessed through calculated examples.

1 はじめに

情報財市場における巨大企業の代表である Microsoft は，独占禁止法違反をめぐり，司法省と争っている。[†1]その独占力が反競争的な影響力を与えているかどうかが主要な論点である。さらに，Linux のように，オープンなソフトが大きな影響力を持ち始めている。しかし，Linux は未だ初心者にとって必ずしも扱いやすいものとは言い難く，Microsoft は次々とアプリケーションやＯＳをヴァージョンアップし，過剰ともいえるほどの高機能な情報財を開発し続けている。

競争の阻害が社会的な余剰を低下させることを論拠として，独占禁止法は制定されている。しかしながら，情報財は開発コストが大きい一方で，複製が容易であるという通常の財とはことなる特徴を持ち，このような財の特質は，市場の発展において，財に独占力を一定程度認めることが重要となる。というのも，全くの同質財の競争においては，際限のない価格競争がもたらされるからである。

以上のように，通常の財と異なる性質をもつ情報財をめぐる競争において，企業間の競争と社会的な余剰の関係は必ずしも明らかではない。本稿では，Microsoft のような大企業とその他の多くの小企業における，新しい情報財の開発インセンティブを探ることとする。

本稿における情報財の市場とは，消費者の支払意思額にしたがい，一定の独占力のもと価格が決定される市場であり，情報財の開発は，既存の情報財に対する新機能の付加として扱われる。

複数企業間の競争における新しい情報財の開発は次の２つの効果をふまえた上で決定される。ひとつは，その情報財をより魅力的にすることによる消費者の需要を拡大もしくは市場シェアを拡大し，より大きな利潤を得る効果であり，もうひとつは，ライバル企業に先に情報財を開発されて市場のシェアを奪われことを防ぐという効果である (Tirole(1988))。独占的な立場にいる企業では，既に大きな利潤を挙げており，後者の効果が大きいであろうし，市場に新規参入しようという企業は後者の効果は存在せず前者の効果だけが影響を与えるであろう。

以上の２つの効果をふまえて，Fudenberg and Tirole (1986) ではコストを削減する新技術に関する開

An Incentive to Develop New Information Goods.

Hideki FUJIYAMA, 獨協大学経済学部, Dokkyo University, Faculty of Economics.

†1 一般に情報財はデジタル化され売買されるもの全てと定義される (Shapiro and Varian(1999))。

発競争モデルが提示された。[†2]しかし，情報財の新開発ではコストの低下が利潤を拡大させるのではなく，消費者の支払意思額の増大が利潤を拡大させる。さらに，Fudenberg and Tirole (1986) では，コスト削減が利潤へ影響を与えるため，特に利潤最大化行動を明示的に示されることなく，利潤の変化が与えることができた。情報財の新開発では，支払意思額の増加が問題となり，利潤の変化を求めるためには利潤最大化行動を明示的に扱わなければならない。

本稿の目的は，新開発が利潤にあたえる変化を，支払意思額の変化と各企業の価格競争から導き，Fudenberg and Tirole (1986) モデルを拡張することである。さらに，そのモデルを用いて数値例を解き，大企業および小企業の情報財の開発インセンティブについての考察を深めることである。特に開発時期と社会的余剰の変化に注目する。

構成は以下の通りである。次節でモデルを提示し，第 3 節で数値例を用いてモデルを解く。第 3.1 節では大企業しか存在しない独占のケースを他のケースの比較基準として取り上げている。第 3.2 節では大企業が既存企業として存在し，小企業が市場への参入をうかがうケースを，第 3.3 節では大企業と小企業が共に市場に存在している複占のケースを考察している。第 4 節でまとめをおこなう。

2　モデル

2.1　利潤の決定

大企業と小企業の複占モデルを考える。2 つの企業は同様の目的に用いられるが異なる情報財を生産している。大企業は多機能な情報財を，小企業は機能を限定した情報財を生産する。例えば，多機能なワープロとコンパクトなエディターとの関係である。消費者は [0, 1] の区間に一様に分布している。支払意思額は線型に分布しており，相対的に 0 に近いほど大企業の情報財を，1 に近いほど小企業の情報財を選好するものとする。[†3]それぞれの企業の財に対する支払意思額が図 1 によって示されている。 大企業の情報財の方

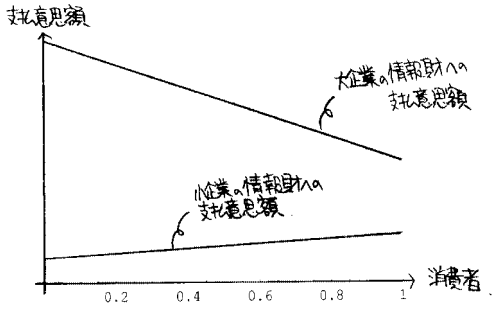


図 1　支払意思額の分布

が，より支払意思額が高くなると仮定している。[†4]

この支払意思額を前提として各企業は価格付けをする。[†5]大企業は市場のシェアを犠牲にしても，高価格を付けることによって，より高い利潤を得ることがある。このときに，全ての消費者において，支払意思額で劣っている小企業が市場でシェアを得ることが可能となる。

2.2　開発時期の決定

情報財の市場より，毎期ごとに利潤がフローとして得られるとする。新しい機能を既存の情報財に付加することによって，消費者の支払意思額を高めることが出来る。

しかし，より早い開発はより多くの開発コストがかかるものとする。つまり，技術開発水準の向上といった学習効果，他の目的で開発された技術を流用することといった外部効果が働いており，時間の経過と共に開発コストが小さくなると仮定する。ここでは，単純に，c をある定数，t を時間として，

$$\frac{c}{t} \qquad (1)$$

†2　第 3 章 (b) を見よ。

†3　このような線形の支払意思額の分布の仮定は Chung-I Chuang and Sirbu(2000) でも用いられている。

†4　このような支払意思額の分布が妥当するのは，OS やワープロソフトなどのソフトウェアの競合があげられる。そこで生じがちなネットワーク外部性も大企業の情報財への支払意思額の大きさに示されることになる。

†5　情報財におけるこのような価格付けの重要性は Shapiro and Varian(1999) をはじめ広く指摘されている。

と定式化する。

また，既存企業の開発コストと参入企業の開発コストも同一とする。[†6]

お互いの企業が，コスト関数が既知もと，利子率を r %として，利潤の流列の割引現在価値が最大となるように，新機能の開発時期に関する計画を立てる。[†7]

以上により，Fudenberg and Tirole (1986) の新技術開発競争モデルが，支払意思額に基づいた情報財の新機能開発競争モデルに拡張された。

3 数値例による分析

数値例でモデルを解き，情報財の開発競争が過剰となり，開発競争が社会的厚生を低める場合があることを示す。

3.1 大企業の独占：基準ケース

消費者は区間 [0, 1] に一様分布している。ある消費者 ($x \in [0,1]$) における大企業の情報財への消費者の支払意思額 ($V_1(x)$) を

$$V_1(x) = 20 - 10x \tag{2}$$

とする。このとき，大企業は価格を 10 とすることで，利潤 (π_{0m}) を最大にすることができ，利潤は 10 となる。

新機能の開発による支払意思額の増加については，ある消費者 ($x \in [0,1]$) における大企業の情報財への消費者の支払意思額 ($V_1(x)$) を

$$V_1(x) = 22 - 12x \tag{3}$$

と仮定する。[†8]このとき，大企業は価格を 11 とすることで，利潤 (π_{1m}) を最大にすることができ，利潤は $\frac{121}{12}$ ($\simeq 10.08$) となる。

コスト関数については，期初において開発のコストが十分に大きくなるように

$$c = 12 \tag{4}$$

とする。さらに，利子率 (r) は 0.05 とし[†9]，開発時期を i とする。

以上より，利潤の流列の現在価値は

$$\pi = \int_0^i \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^\infty \pi_{1m} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \tag{5}$$

となり，最大化の 1 次条件である

$$\frac{\partial \pi}{\partial i} = 0 \tag{6}$$

を解くと，$i \simeq 16.12$ となる。[†10]このときの利潤，つまり生産者余剰，は $\pi \simeq 200.41$ である。消費者余剰は 100.37 となり，社会的総余剰は 300.78 となる。

社会的に最適となるのは，つまり，生産者余剰および消費者余剰を合わせて最大化するとき，$i \simeq 5.07$ となり，このとき，生産者余剰は 199.46，消費者余剰は 107.75，社会的総余剰は 307.21 となる。

3.2 既存企業が大企業の小企業参入モデル

大企業を既存企業，小企業を参入企業とする，参入モデルを考察する。ここでは，各企業共に相手企業の反応を考慮した上で最適な開発時期を決定しなければならない。

大企業の情報財に対する支払意思額は前節と同様にある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，式 (2) と仮定する。大企業が新機能を開発したときも前節と同様にある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，式 (3) と仮定する。

小企業が参入していない時に得ていた大企業の利潤は，前節と同様に，$\pi_{0m} = 10$ となる。小企業が参入していない時に新機能を開発したときの大企業の利潤も，前節と同様に，$\pi_{1m} = \frac{121}{12}$ ($\simeq 10.08$) となる。

次に参入企業が新機能を開発し，情報財市場に参入してきたケースを考える。参入企業が新機能を開発し情報市場に参入した場合のある消費者 ($x \in [0,1]$) における小企業の情報財への支払意思額 ($V_2(x)$) は

†6 かなり強い仮定であるが，もし，他の企業が開発した技術を買収する場合は，この仮定は満たされる。

†7 もしくは新機能の技術を買収する最適な時期を決定する。

†8 つまり，より評価していた消費者にはより高い支払意思額の増加がなされる。

†9 以後全て c と r についてはこの値を与えている。

†10 関数の形状により最大化のための 2 次条件も満たされている。

$$V_1(x) = 2x \qquad (7)$$

であると仮定する。

参入した時点では既存企業が新機能をまだ開発していないケースの利潤を求める。つまり，既存企業である大企業と参入企業である小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (2)，式 (7) となっているときの均衡での利潤を求める。†11結果は次の通りである：大企業の価格が $\frac{32}{3}(\simeq 10.66)$ および小企業の価格が $\frac{4}{3}(\simeq 1.33)$ であり，大企業の利潤 (π_{1d}) が $\frac{256}{27}(\simeq 9.48)$ および小企業の利潤 (π_{2d}) が $\frac{4}{27}(\simeq 0.14)$ である。消費者余剰は $\frac{392}{81}(\simeq 4.83)$ となり，社会的総余剰は 14.45 となる。大企業のシェアは $\frac{8}{9}(\simeq 0.88)$ である。

次に，参入した時点で既存企業が新機能を開発しているケースの利潤を求める。つまり，既存企業である大企業と参入企業である小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (3)，式 (7) となっているときの均衡は次の通りである。大企業の価格が $\frac{607}{52}(\simeq 11.67)$ および小企業の価格が $\frac{179}{104}(\simeq 1.721)$ であり，大企業の利潤 (π_{1dw}) が $\frac{108653}{10816}(\simeq 10.04)$ および小企業の利潤 (π_{2dw}) が $\frac{5191}{21632}(\simeq 0.23)$ である。消費者余剰は $\frac{193087}{43264}(\simeq 4.46)$ となり，社会的総余剰は 14.73 となる。大企業のシェアは $\frac{179}{208}(\simeq 0.86)$ である。†12

Fudenberg and Tirole (1986) にしたがい，

1. 既存企業について Leader-Follower 曲線を描く。
2. 参入企業について Leader-Follower 曲線を描く。
3. 二つの Leader-Follower 曲線を比較する。

という手順にしたがい Nash 均衡を求める。

3.2.1 既存企業の Leader-Follower 曲線

はじめに既存企業の Leader 曲線を得る。つまり，i 期に Leader として新技術を開発し，その後，参入企業が n 期に技術を開発したときの既存企業の利潤関数を求める。ここで，既存企業が Leader として新技術を開発した時期 (i) は外生的に与えられるが，その後の参入企業の開発時期 (n) はそれを所与として最適なものが内生的に得られる。

ここでは利潤の流列の割引現在価値の和が問題となるが，この利潤の流列の和に関しての利潤関数を，既存企業については π_1 と，参入企業については π_2 と表記する。それぞれ，

$$\pi_1 = \int_0^i \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^n \pi_{1m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^\infty \pi_{idw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \qquad (8)$$

$$\pi_2 = \int_n^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} \qquad (9)$$

となる。

以下，後ろ向き帰納法で解いてゆく。後から技術を開発する参入企業の最適な開発時期は，式（9）を解いて，$n \simeq 8.43$ が得られるが，ここでは，前提として既存企業が Leader，つまり，$i \leq n$ となるので，

$$n = \max\{8.43, i\} \qquad (10)$$

が得られる。つまり，8.43 より以前に既存企業が Leader として新技術を開発したならば，参入企業は 8.43 まで待って，新技術を開発し，他方，8.43 より以降に既存企業が Leader として新技術を開発したならば，参入企業はすぐに，つまり同時に，新技術を開発することになる。†13

参入企業の以上のような行動を前提として，i 期に既存企業が Leader として新技術を開発するときの利潤関数は，

†11 各企業の最適反応関数およびその交点から均衡は得られる。

†12 以上のような数値例は，既存企業である大企業が高価格で高利潤を，参入企業である小企業が低価格で低利潤を得るという関係をしめしており，現実に，ひとつの企業が巨大なシェアを持つ市場に小さな企業が参入した後に生じると思われる大小関係とひどくかけ離れてはいないであろう。

†13 すぐに技術を開発することは利潤関数の形状からわかる。実際には意思決定がなされるのは期初だけであるが，そのような思考実験がなされるということである。技術を開発した企業を買収するケースでは期ごとに意思決定が行われると解釈することもできる。

$$\pi_1 = \begin{cases} \int_0^i \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^{8.43} \pi_{1m} \cdot e^{-rt} dt \\ + \int_{8.43}^{\infty} \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} dt \\ \qquad \text{if } i \leq 8.43 \\ \int_0^i \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^{\infty} \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt \\ -\frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \\ \qquad \text{if } i > 8.43 \end{cases} \quad (11)$$

となる。これより，既存企業の Leader 曲線が描ける。†14

次に Follower 曲線を得る。つまり，参入企業が n 期に新技術を開発したときの，Follower としての利潤関数を求める。†15

ここにおいて，この利潤の流列の和に関しての既存企業の利潤関数 (π_1)，参入企業の利潤関数 (π_2) はそれぞれ，

$$\pi_1 = \int_0^n \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^i \pi_{1d} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^{\infty} \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \quad (12)$$

$$\pi_2 = \int_n^i \pi_{2d} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^{\infty} \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} \quad (13)$$

となる。

以下，後ろ向き帰納法で解いてゆく。後から技術を開発する既存企業の最適な開発時期は，式（12）を解いて，$i \simeq 5.17$ が得られるが，ここでは，前提として参入企業が Leader，つまり，$n \leq i$ となるので，

$$i = \max\{5.17, n\} \quad (14)$$

が得られる。つまり，5.17 より以前に参入企業が Leader として新技術を開発したならば，既存企業は 5.17 まで待って，新技術を開発し，他方，5.17 より以降に参入企業が Leader として新技術を開発したならば，既存企業はすぐに，つまり同時に，新技術を開発することになる。

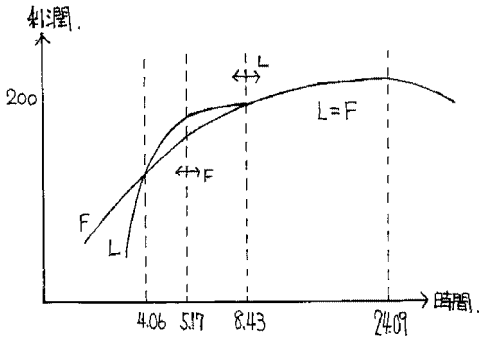


図 2　既存企業 Leader-Follower 曲線　（既存企業が大企業である。）

以上より，n 期に参入企業が Leader として新技術を開発するときの Follower としての既存企業の利潤関数は，

$$\pi_1 = \begin{cases} \int_0^n \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^{5.17} \pi_{1d} \cdot e^{-rt} dt \\ + \int_{5.17}^{\infty} \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{5.17} \cdot e^{-r5.17} \\ \qquad \text{if } n \leq 5.17 \\ \int_0^n \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^{\infty} \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt \\ -\frac{c}{n} \cdot e^{-rn} \qquad \text{if } n > 5.17 \end{cases} \quad (15)$$

となる。これより，既存企業の Follower 曲線が描ける。

以上をまとめて，既存企業の Leader-Follower 曲線は図 2 にまとめられている。 初期においては，Follower となるほうがより高い利潤を得るが，4.06 以降は Leader となる方がより高い利潤を得ることとなり，8.43 以降で Leader 曲線と Follower 曲線は一致することとなる。

3.2.2　参入企業の Leader-Follower 曲線

前節と全く同様に参入企業の Leader 曲線を求める。n 期に Leader として新技術を開発し，その後，既存企業が i 期に技術を開発したときの利潤関数を求める。†16

†14　π はすべて前節に求めた値を用いている。

†15　ここでも，参入企業が Leader として新技術を開発した時期 (n) が外生的に与えられる，その後の既存企業の開発時期 (i) を，それ (n) を所与として内生的に得る。

†16　ここで，参入企業が Leader として新技術を開発した時期 (n) は外生的に与えられるが，その後の既存企業の開発時期 (i) はそれを所与として最適なもの

ここでも利潤の流列の割引現在価値の和が問題となるが，この利潤の流列の和に関しての利潤関数を改めて，既存企業については π_1 と，参入企業については π_2 と表記する。それぞれ，

$$\pi_2 = \int_n^i \pi_{2d} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} \quad (16)$$

$$\pi_1 = \int_0^n \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^i \pi_{1d} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^\infty \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \quad (17)$$

となる。

以下，後ろ向き帰納法で解いてゆく。後から技術を開発する既存企業の最適な開発時期は，式（17）を解いて，$i \simeq 5.17$ が得られるが，ここでは，前提として参入企業が Leader，つまり，$n \leq i$ となるので，

$$i = \max\{5.17, n\} \quad (18)$$

が得られる。つまり，5.17 より以前に参入企業が Leader として新技術を開発したならば，既存企業は 5.17 まで待って，新技術を開発し，他方，5.17 より以降に参入企業が Leader として新技術を開発したならば，既存企業はすぐに，つまり同時に，新技術を開発することになる。

既存企業の以上のような行動を前提として，n 期に参入企業が Leader として新技術を開発するときの利潤関数は，

$$\pi_2 = \begin{cases} \int_n^{5.17} \pi_{2d} \cdot e^{-rt} dt + \int_{5.17}^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} & \text{if } n \leq 5.17 \\ \int_n^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} & \text{if } n > 5.17 \end{cases} \quad (19)$$

となる。これより，参入企業の Leader 曲線が描ける。

次に Follower 曲線を得る。つまり，既存企業が i 期に新技術を開発したときの，Follower として得られる利潤を求める。†17

ここにおいて，この利潤の流列の和に関しての既存企業の利潤関数 (π_1)，参入企業の利潤関数 (π_2) はそれぞれ，

$$\pi_2 = \int_n^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{n} \cdot e^{-rn} \quad (20)$$

$$\pi_1 = \int_0^i \pi_{0m} \cdot e^{-rt} dt + \int_i^n \pi_{1m} \cdot e^{-rt} dt + \int_n^\infty \pi_{1dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} \quad (21)$$

となる。

以下，後ろ向き帰納法で解いてゆく。後から技術を開発する参入企業の最適な開発時期は，式（20）を解いて，$n = 8.43$ が得られるが，ここでは，前提として参入企業が Leader，つまり，$i \leq n$ となるので，

$$n = \max\{8.43, i\} \quad (22)$$

が得られる。つまり，8.43 より以前に既存企業が Leader として新技術を開発したならば，参入企業は 8.43 まで待って，新技術を開発し，他方，8.43 より以降に参入企業が Leader として新技術を開発したならば，既存企業はすぐに，つまり同時に，新技術を開発することになる。

以上より，i 期に既存企業が Leader として新技術を開発するときの Follower としての参入企業の利潤関数は，

$$\pi_2 = \begin{cases} \int_{8.43}^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{8.43} \cdot e^{-r8.43} & \text{if } i \leq 8.43 \\ \int_i^\infty \pi_{2dw} \cdot e^{-rt} dt - \frac{c}{i} \cdot e^{-ri} & \text{if } i > 8.43 \end{cases} \quad (23)$$

となる。これより，参入企業の Follower 曲線が描ける。

以上をまとめて，参入企業の Leader-Follower 曲線は図 3 にまとめられている。 初期においては，Follower となるほうがより高い利潤を得ることができ，8.43 期以降は，Leader 曲線と Follower 曲線は一致す

が内生的に得られる。

†17　ここで，既存企業が Leader として新技術を開発した時期 (i) が外生的に与えられる，その後の参入企業の開発時期 (n) を，それ (i) を所与として内生的に得る。

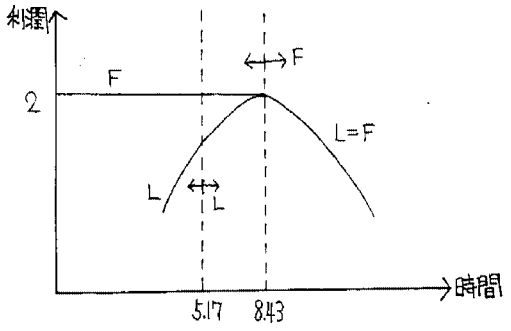


図 3　参入企業 Leader-Follower 曲線　(既存企業が大企業である)

る。全体として，Follower となることが Leader となることを弱支配している。

3.2.3　Nash 均衡

均衡においては，両企業が 8.43 期に同時に新開発する。両企業とも，なるべく開発を遅くして利潤を高めようとする。しかし，参入企業は 8.43 期以降利潤は低下してしまうので，8.43 期に開発を決定する。それを受けて，既存企業も 8.43 期に開発することとなる。このとき，既存企業の利潤（余剰）は 199.66, 参入企業の利潤 (余剰) は 2.21 となり，生産者余剰は 201.87 となる。消費者余剰は 92.95 であり，社会的総余剰は 294.83 となる。

3.1 節の独占のケースとの比較によって参入の効果を考察すると，既存企業の利潤は低下するが，生産者全体としての利潤 (余剰) は高まる。他方，消費者余剰は低下し，社会的総余剰も低下する。つまり，社会全体としては独占状態の方が望ましいことがこの例では示されている。

3.3　大企業と小企業の複占モデル

ここでは市場に既に大企業と小企業が存在する複占モデルを考察し，独占モデルとの比較を行う。

大企業の情報財に対する支払意思額は前節までと同様にある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，式 (2) を仮定する。大企業が新機能を開発したときも前節までと同様にある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，式 (3) を仮定する。

既に市場に存在する小企業の情報財に対する支払意思額は前節の参入後の小企業の場合と同様にある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，式 (7) を仮定する。小企業が新機能を開発したときはある消費者 ($x \in [0,1]$) に対して，

$$V_1(x) = 4x \qquad (24)$$

を仮定する。

両企業とも新機能を開発する前の，つまり，大企業と小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (2)，式 (7) となっているときの均衡は次の通りである。大企業の価格が $\frac{32}{3}(\simeq 10.66)$ および小企業の価格が $\frac{4}{3}(\simeq 1.33)$ であり，大企業の利潤が $\frac{256}{27}(\simeq 9.48)$ および小企業の利潤が $\frac{4}{27}(\simeq 0.14)$ である。消費者余剰は $\frac{392}{81}(\simeq 4.83)$ となり，社会的総余剰は 14.45 となる。大企業のシェアは $\frac{8}{9}(\simeq 0.88)$ である。

大企業だけが開発したときの，つまり，大企業と小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (3)，式 (7) となっているときの均衡は次の通りである。大企業の価格が $\frac{607}{52}(\simeq 11.67)$ および小企業の価格が $\frac{179}{1044}(\simeq 1.72)$ であり，大企業の利潤が $\frac{108653}{10816}(\simeq 10.04)$ および小企業の利潤が $\frac{5159}{21632}(\simeq 0.23)$ である。消費者余剰は $\frac{193087}{43264}(\simeq 4.46)$ となり，社会的総余剰は 14.73 となる。大企業のシェアは $\frac{179}{208}(= 0.86)$ である。

小企業だけが開発したときの，つまり，大企業と小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (2)，式 (24) となっているときの均衡は次の通りである。大企業の価格が $\frac{34}{3}(\simeq 11.33)$ および小企業の価格が $\frac{8}{3}(\simeq 2.66)$ であり，大企業の利潤が $\frac{578}{63}(\simeq 9.17)$ および小企業の利潤が $\frac{32}{63}(\simeq 0.50)$ である。消費者余剰は $\frac{247}{63}(\simeq 3.92)$ となり，社会的総余剰は 14.59 となる。大企業のシェアは $\frac{17}{21}(\simeq 0.80)$ である。

両企業が開発したときの，つまり，大企業と小企業のそれぞれの情報財への支払意思額が式 (3)，式 (24) となっているときの均衡は次の通りである。大企業の価格が $\frac{437}{35}(\simeq 12.48)$ および小企業の価格が $\frac{11}{35}(\simeq 3.17)$ であり，大企業の利潤が $\frac{48507}{4900}(\simeq 9.89)$ および小企業の利潤が $\frac{3219}{4900}(\simeq 0.65)$ である。消費者余剰は $\frac{9451}{2450}(\simeq 3.85)$ となり，社会的総余剰は 14.39 となる。大企業のシェアは $\frac{111}{140}(\simeq 0.79)$ である。

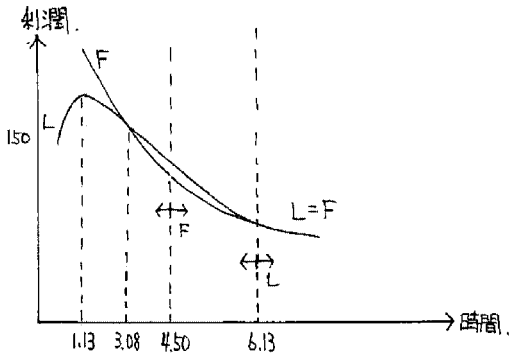


図 4　大企業 Leader-Follower 曲線

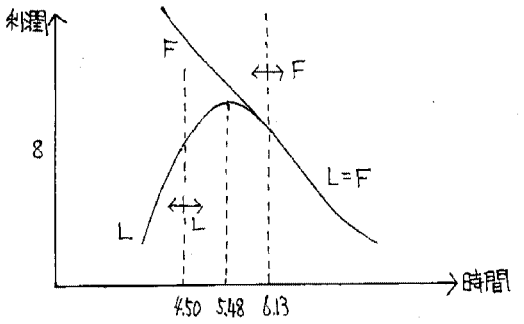


図 5　小企業 Leader-Follower 曲線

3.3.1　Leader-Follower 曲線

前節同様にそれぞれの企業の Leader-Follower 曲線を求めることが出来る。大企業の Leader-Follower 曲線は図 4 で示されている。 小企業の Leader-Follower 曲線は図 5 で示されている。

3.3.2　Nash 均衡

均衡では，1.13 期に大企業が新開発し，6.13 期に小企業が新開発する。既存企業の利潤（余剰）は 177.85, 参入企業の利潤 (余剰) は 9.39 となり，生産者余剰は 187.24 となる。消費者余剰は 80.76 であり，社会的総余剰は 268.00 となる。

3.1 節の独占のケースとの比較によって複占状態の効果を考察すると，生産者余剰，消費者余剰，社会的総余剰の全てにおいて余剰は低下し，参入のケースと同様に，社会全体としては独占状態の方が望ましいことがこの例では示されている。[†18]

最後にこの節の各結果を表 1 にまとめておく。

4　結び

本稿では，Fudenberg and Tirole (1986) のモデルを拡張し，参入のケースおよび複占のケースに関しての情報財に対する開発インセンティブを数値例によって考察した。

参入のケースにおいては，大企業が独占のケースと比較して，開発時期は早まり，小企業と大企業が同時に開発する。複占のケースでは，大企業の独占のケースと比較して，さらに，開発時期は早められた。しかしながら，社会的総余剰は，独占のケース，参入のケース，複占のケースという順に，低下していった。

他の支払意思額の変化を仮定すると，もちろん他の結論も得られる。例えば，大企業の支払意思額の変化が全ての消費者に同様に起こる場合では，参入のケースでは，情報財の開発の時期は変化しないが，小企業は技術開発コストが十分に低下してから参入をするという例が得られており，複占のケースでは，前節の数値例と同様に大企業の技術開発が早まるケースも得られている。以上の場合でも，競争の存在が社会的余剰を低下させている。

参入のケースにおいて，需要の価格弾力性が大きいときには，既存大企業が参入を阻止するような均衡も得られている。この場合も，参入することによる厚生の損失と，参入阻止による厚生の損失の大小によって，独占企業の価格戦略を評価しなければならない。

このように，支払意思額に基づいた新しい情報財の開発競争においては，複数企業の開発競争が社会的厚生を増大させるについては，十分に注意をして判断しなければならない。

ただ，競争が開発競争を促すことから，技術革新を押し進めるという基準のもとでは，より競争を取り入れることが有効となろう。

今後の課題として，数値例ではなく各パラメータの関係から新しい情報財の開発インセンティブを比較

†18　ここでの複占のケースは消費者の支払意思額がより大きくなっているのに，社会的余剰は低下し，より効率性を損なっているといえる。

表 1　各ケースでの開発時期と余剰

	計画	独占	参入	複占
開発時期	5.07	16.12	8.43(両)	1.13+6.13 (大) (小)
生・余剰	199.46	200.41	201.87	187.24
消・余剰	107.75	100.37	92.95	80.76
総・余剰	307.21	300.78	294.82	268.00

することがある。また，支払意思額の分布に関して，および新しい情報財の開発がどのように支払意思額を高めるかに関して，より詳細な考察が求められる。

謝辞

様々な情報財に関する様々な研究機会をご紹介いただいている京都大学大学院情報学研究科石田亨教授，また，ワークショップでコメントをいただいた方々に深く感謝いたします。当研究は文部科学省科学研究費補助金を受けている。

参考文献

[1] Chung-I Chuang, J., and M. A. Sirbu. 2000. Network Delivery of Information Goods: Optimal Pricing of Articles and Subscriptions. Internet publishing and beyond ed. Kahlin, B and Varian, H. R. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

[2] Fudenbeg, D., and J. Tirole. 1986. Dynamic Models of Oligopoly. Volume 3 of Fundamentals of Pure and Applied Economics, ed. J. Lesourne and H. Sonnenschein. London: Harwood.

[3] 藤山英樹，八槇博史，石田亨, 2001. 「情報財と情報市場戦略」『情報処理』Vol. 42 No. 4. pp. 410-414. 情報処理学会.

[4] Shapiro, C., and Varian, H.R. 1999. Information Rules., Harvard business school press, Boston, Massachusetts. (千本倖生訳：「ネットワーク経済」の法則, IDG ジャパン).

[5] Tirole, J. 1988. The Theory of Industrial Organization., MIT Press. Cambridge.

人工市場における複雑さの発展の分析

和泉 潔

In this study we rethought efficient market hypothesis from a viewpoint of complexity of market participants' prediction methods and market price's dynamics, and examined the hypothesis using simulation results of our artificial market model. As a result, we found the two difference from the hypothesis. (a) Complexity of markets was not fixed, but changed with complexity of agents. (b) When agents increased the complexity of their prediction methods, structure of dynamic patterns of market price didn't disappear, but it can't be described by equation of any dimensions.

1 はじめに

専門家の行う金融価格の予測と, 目隠しした猿がダーツに矢を投げてした予測が同じであると言ったらビックリするであろうか.

経済学の分野では 70 年代に効率的市場仮説という金融市場の理論が提唱され, 今日まで大きな議論の的となっている. この仮説では金融市場の価格の挙動はランダムウォークであり予測不可能であるとしている. そのため, 最初に言ったようなことが言われるのである. 今日, 大きく発展した金融工学の理論もこの仮説をベースにして, 金融価格を確率過程で表すことから始まっている.

仮説の統計的な検証も実証データを用いて数多く行われたが, 仮説が市場参加者の予想形成といったことを含んでいるため, なかなか直接的に検証できなかった. しかし近年, 計算機の中に仮想的な市場モデルを構築してシミュレーションを行う人工市場アプローチが現われ, これにより仮説の検証を直接的に行うという研究が出てきた [1–3].

本研究は, 市場参加者個人の予測方式の複雑さと市場価格の挙動の複雑さの関係という新しい視点から効率的市場仮説を捕らえ直し, 人工市場モデルを用いたシミュレーション結果から, 仮説の検討を行った.

2 複雑さから見た効率的市場仮説

効率的市場仮説の要点をまとめると下記のようになる.

- 金融市場の市場参加者は市場価格の挙動に関係する全ての情報を, 極めて迅速かつ的確に取り入れて, 価格予想に用いる.
- そのような市場参加者間の取引で決定される市場価格は, 現在までに利用可能で重要な情報を全て適切に反映している.
- 従って, ある者が現在までに利用可能な情報と市場価格の新たな関係を見つけ出して, 他の者より有利になる余地はない. つまり市場価格の挙動はだれにも予測不可能な新規情報によって動くランダムウォークになる.

上記の要点を複雑さの観点から見ると, 効率的市場仮説は下記のことを暗に含んでいる.

- 各市場参加者は適切な情報の取り込み方を得るために, 自分の予測方式を学習により複雑にしていって, 市場価格の決定式の構造をつかもうとする.

Kiyoshi IZUMI, 産業技術総合研究所, AIST & 科技団 さきがけ, PRESTO, JST, 電子メイル: (kiyoshi@ni.aist.go.jp)

- 価格決定式の構造は市場参加者の学習とは独立して固定して存在し, 最終的には市場参加者に構造を見破られて, その構造が消えてしまう.

つまり, 各市場参加者の予測式の複雑さと市場価格の挙動の複雑さの独立が暗黙の前提となっているのである.

これに対し, de la Maza [4] は人工市場シミュレーションにより, 市場参加者の予測式の次元が 0 から 1 に上がると, 市場価格もランダムウォークから線形性を持つ挙動になることを見つけた. つまり, 個人の複雑さと市場の複雑さが独立でない可能性を示した.

それでは, 各市場参加者が自分の予測方程式をより複雑にする動機はどこにあるのだろうか. Joshi ら [6] によると, 囚人のジレンマゲームに似た状況が起きているからだとしている. 彼女らの人工市場モデルでは, 予測方式にテクニカル分析の移動平均の手法を取り込んで, 予測式の次元を 0 から 1 に上げることを, 囚人のジレンマゲームの裏切り戦略に対応させた. これに対し, テクニカル分析を予測に用いないことを協調戦略に対応させた. シミュレーション結果より, 囚人のジレンマ状況となる下記の 2 つの条件が見られた.

条件 1　予測次元を上げること (裏切り戦略) によって, 予測の精度が上がって取引結果の収益が増大するメリットが得られた.

条件 2　しかし, 皆が次元を上げると市場価格の挙動が複雑になり, 皆がテクニカル分析を用いていなかった (協調戦略) ときよりも予測精度が下がってしまった.

このように, 皆が利益追求のため自分の予測式の次元を上げようとして, 結局は予測精度が下がってしまう状況が起きる.

本研究では次節以降で, 人工市場シミュレーションにより, 予測次元がより大きくなったら囚人のジレンマ的状況や市場の複雑さはどうなるのかについて分析を行う. その結果に基づき, 今までの効率的市場仮説の検討を行う.

3　人工市場モデル

50 人の仮想ディーラー (エージェント) がいる人工市場を構築した. この人工市場には 1 つの金融商品と 1 つの無リスク資本が存在する. 各エージェントは金融商品の価格の推移を予想して, 予想収益の効用が最大になるように, 金融商品と無リスク資本の持高を変える. 人工市場の中では, 予想・注文・価格決定・学習のステップから 1 期間がなり, この 4 つのステップを繰り返すことによって離散的に時間が進んでいく.

3.1　予想

今期の金融価格の変動値を, 過去の金融価格の変動値の線形和で予想する. つまり, 今回の研究では市場にファンダメンタルズ情報は存在せず, テクニカル分析のみによる予想となる.

各エージェントが持つ予想方程式は, 自己回帰和分平均移動モデル ARIMA(n,1,0) である. n は何期前までの価格変動を予想に用いるかを表す. n が大きいほど予想方程式の次元が大きいことになるので, 本研究ではこれを各エージェントの予想の複雑さと見なす.

P_t をまだ決定されていない今期の金融価格とし, $\tilde{y}_t$ を金融価格の変動 $(P_t - P_{t-1})$ の予想値とすると, 予想式は下記のようになる.

$$\begin{aligned} \tilde{y}_t &= \sum_{i=1}^{n} b_i y_{t-i} + e_t \qquad (1) \\ &= \mathbf{x}_t' \mathbf{b}_t + e_t \end{aligned}$$

ただし, e_t は平均 0, 分散 0.1 の正規分布, $\mathbf{b}_t$ は予測式の係数をまとめたベクトル $(b_1, \cdots, b_n)'$ であり†1, $\mathbf{x}_t$ は予測式の説明変数, つまり過去の価格変動のベクトル $(y_{t-1}, \cdots, y_{t-n})'$ である†2.

3.2　注文

各エージェントはリスク回避型の予想収益の効用関数を持っているとする. このとき, 効用が最大になるような金融商品の持高の最適量 q_t^* は, 式 (1) の変動の予想値 y_t に比例する.

$$q_t^* = a y_t \qquad (2)$$

今までに持っている金融商品持高を q_{t-1} とすると, 各エージェントの注文量 o_t は最適な持高との差になる.

$$o_t = q_t^* - q_{t-1} \qquad (3)$$

†1　各エージェントの予測式の係数の初期値 $\mathbf{b}_0$ は-1 から 1 までの一様乱数によって与えられる.

†2　一番最初の期では $\mathbf{x}_0$ に平均 0, 分散 1 の正規分布で生成された価格の時系列データを用い, その後の時期では $\mathbf{x}_t$ に人工市場で生成された価格データを用いた.

注文量が正 (負) の場合は, エージェントが買い注文 (売り注文) をすることを意味するので, 市場価格 P_t が自分の予想価格 $(P_{t-1}+y_t)$ よりも安くて (高くて) 有利な場合は, o_t だけ買い注文 (売り注文) をする.

$o_t > 0$ の場合

$$\begin{cases} o_t\text{だけ買い} & (P_t \le P_{t-1}+y_t \text{ のとき}) \\ \text{何もしない} & (P_t > P_{t-1}+y_t \text{ のとき}) \end{cases}$$

$o_t < 0$ の場合

$$\begin{cases} \text{何もしない} & (P_t < P_{t-1}+y_t \text{ のとき}) \\ o_t\text{だけ売り} & (P_t \ge P_{t-1}+y_t \text{ のとき}) \end{cases}$$

3.3 価格決定

50 個のエージェントの売買戦略を市場全体で集積して, 需要と供給が均衡するような値にモデルの今期の市場価格が決定される. 市場価格よりも高い値段をつけた買い手と安い値段の売り手の間で取引が成立する.

3.4 学習

各エージェントは新たに決定された市場価格の変動 y_t の情報と逐次最小二乗法を用いて, 予測式 (1) の係数 $\mathbf{b}_t$ を更新する†3. 係数の逐次更新の式は

$$\mathbf{b}_{t+1} = \mathbf{b}_t + \frac{\left(\mathbf{X}_t'\mathbf{X}_t\right)^{-1}\mathbf{x}_t(y_t - \mathbf{x}_t'\mathbf{b}_t)}{f_t} \qquad (4)$$

と表現される [5]. ただし, $\mathbf{X}_t$ は $\mathbf{X}_0 = 100 \times \mathbf{I}$ ($\mathbf{I}$ は単位行列) で始まる学習の行列であり, 下記の式で更新される.

$$\left(\mathbf{X}_t'\mathbf{X}_t\right)^{-1} = \left(\mathbf{X}_{t-1}'\mathbf{X}_{t-1}\right)^{-1} - \frac{\left(\mathbf{X}_{t-1}'\mathbf{X}_{t-1}\right)^{-1}\mathbf{x}_t\mathbf{x}_t'\left(\mathbf{X}_{t-1}'\mathbf{X}_{t-1}\right)^{-1}}{f_t} \qquad (5)$$

また,

$$f_t = 1 + \mathbf{x}_t'\left(\mathbf{X}_{t-1}'\mathbf{X}_{t-1}\right)^{-1}\mathbf{x}_t \qquad (6)$$

とする.

4 シミュレーション結果

人工市場モデルを用いて, 予測次元が大きくなったら囚人のジレンマ的状況や市場の複雑さはどうなるのかシミュレーションで確かめた.

4.1 予測式を複雑にするメリット

予測式を複雑にした方が有利になるかどうか確かめた. 25 個のエージェントの予測式の次元を n とし, 残り半分の 25 個のエージェントの予測式の次元を $n+1$ とした. 4000 期間のシミュレーションを行い, 各エージェントの予測値と市場価格との差を全期間で集積し, n 次元のエージェントグループと $n+1$ 次元のグループそれぞれについて平均をとった. そのようなシミュレーションを乱数の初期値を変えて 100 回行った†4. 100 回の平均をとり, n 次元のグループの予測誤差を 100 として, $n+1$ 次元のグループの予測誤差がどれほど小さくなっているかを示したのが図 1である.

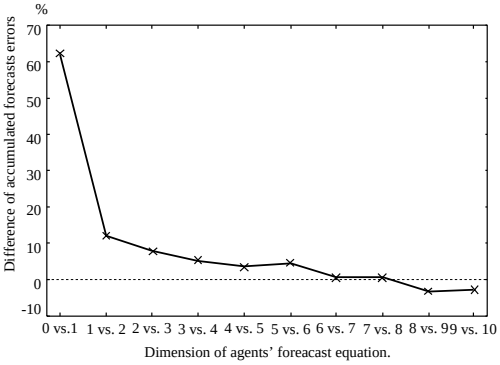


図 1　予測誤差の差: 値が正 (負) の時は予測式を複雑にした方が予測誤差が小さく (大きく) なる.

次数が小さいうちは予測式を複雑にするメリットが大きい. 相対的により正確に予測できるエージェントが利得を増やせるので, 次数の小さいときは囚人のジレンマ状況の条件 1 が成り立っている. しかし, しかし次数が大きくなると, 予測式を複雑にするメリットがなくなることがわかる.

4.2 市場全体のデメリット

各エージェントが予測式の次元を上げると, 市場全体では予測しにくくなるのか確かめた. 50 個全てのエージェントの予測式を同じ n 次元にして, 4000 期間のシミュレーションを 100 回行った†5. 予測誤差を 4000 期間で集積し, 50 個のエージェントの平均をとった後, さ

†3　$n = 0$ の場合は, 乱数だけでの予測なので学習は行わない.

†4　金融価格が発散してしまったパスは測定不能になるので, それは除外し発散しなかったパスで 100 回になるまでシミュレーションを行った

†5　全てのエージェントの予測式が同じ次元の場合, 発散するパスは見られなかった.

らに 100 回のシミュレーションの平均をとった (図 2).

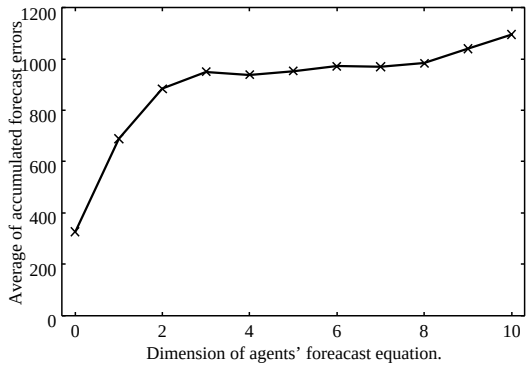


図 2　予測誤差

その結果, 次数が小さいときは, 次数の増加に伴い予測誤差が大きくなり, 囚人のジレンマ状況の条件 2 が成り立っていた. しかし, しかし次第に予測誤差がある一定の値に収束してしまったことがわかる.

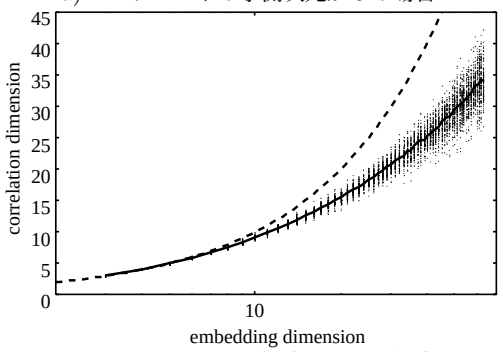
4.3　市場の複雑さの発展

上記のメカニズムを調べるため, 相関次元分析を行った†6. 50 個全てのエージェントの予測式を同じ n 次元にして, 4000 期間のシミュレーションを 100 回行った. 学習がある程度安定した後半の 3885 期間の市場価格の階差をとり, 埋め込み次元を変えながら, 相関次元を計算した (図 3).

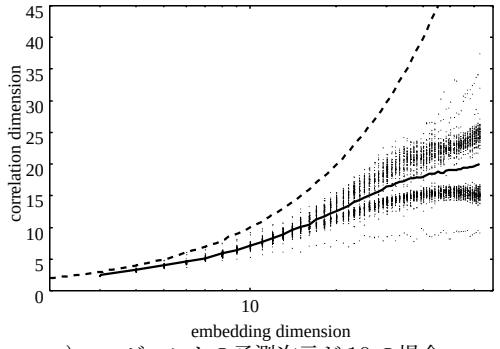
その結果, 予測次元が 0 の場合 (図 3a) は, 平均は下に凸な曲線となり, ホワイトノイズに近い相関次元の特徴を持っていた. しかし予測次元が少し上がると (図 3b), 市場価格のダイナミクスに構造が現われて相関次元が飽和し上に凸な曲線になった. さらに予測次元を上げていくと (図 3c), ほぼ直線となり, 構造は存在するが相関次元が飽和しない状態になった.

中島 [8, 9] によると, 現実の東証株価指数データの相関次元分析結果も, 対数ベースで直線的に上昇した. つまり, 各エージェントの予測次元が増加していくと, 人工市場の価格のダイナミクスは, 現実の株価指数と同様に,「いくつかの自由度をもつ力学系によって, (略) 挙動を大

a) エージェントの予測次元が 0 の場合



b) エージェントの予測次元が 1 の場合



c) エージェントの予測次元が 10 の場合

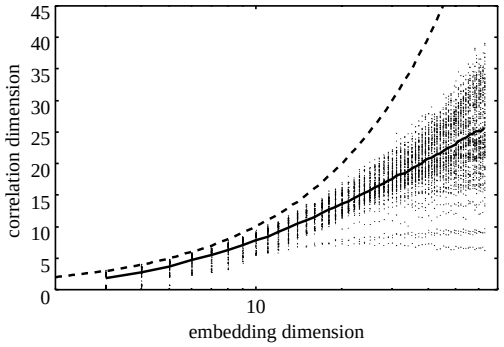


図 3　相関次元: x 軸 (埋め込み次元) は対数表示. 実線は 100 回のパスの相関次元の平均. 点線はホワイトノイズの場合の理論値.

まかに記述することができ, その記述はそれなりの有効性をもつ. そして, 自由度を増やすことによって, より精密な記述も可能となる. しかしながら, 完全にその挙動を再現する力学系は構成できない. すなわち, (略) 挙動に関わる変数の数は特定できない (中島 [9])」状態になるのである.

†6　相関次元分析の手法は [8, 9] と同様にして行った.

5 新・効率的市場仮説

前節の結果をまとめると, 下記のようなことがわかる.

- 各市場参加者の予測次元が 0 の時は, 市場価格の挙動はランダムウォークであるが, 予測次元を上げる人が出てくると価格の挙動にある自由度の力学系で記述できるような構造が出てくる.
- そのため, 各エージェントが予測次元を上げると価格決定式の自由度に近づいて予測精度が上がるため, メリットが出てくる. しかし, 皆が予測次元を上げると前よりも予測精度が下がり囚人のジレンマ的状況になる.
- 囚人のジレンマ的状況で皆が予測次元を上げていく方向に進んでいくと, 市場価格の挙動の構造は存在するが, どの自由度でも完全に記述することができない状態になる.

今までの効率的市場仮説が言うような, 各個人が学習により価格決定の構造を完全に把握し, その結果構造が消えてランダムウォークになることはなかった. 市場の複雑さは個人の複雑さとともに変化し, 最終的には構造は存在するが完全に把握することのできない状態になったのである.

このような学習の「正解」がないような状態では, 学習の結果自体に加えて (よりも?), 各市場参加者の学習の仕方が市場価格の挙動に対する主要因になると考えられる. つまり, 吉地 [7] が言うように, 市場参加者の学習の効率性学習や市場を捕らえる認知的枠組みの違い, 学習者間の相互作用, 情報の取捨選択の仕方などが焦点になってくるのであろう.

また, もう 1 つの焦点として考えられるのは, 市場価格決定の制度である. 本研究では, 価格決定はある一定の時間ごとに均衡価格を求める制度にしたが, 連続的に取引が成立した価格を市場価格とする制度も考えられる. 市場価格決定の制度は個人の複雑さをどのように市場の複雑さに集積するかというメカニズムであるので, 市場の複雑さの発展の仕方に大きな影響を与える. 制度を変えた場合に本研究と同じような最終結果になるのか, それとも異なるのかも興味深い.

6 結論

本研究で, 人工市場アプローチを用いて効率的市場仮説の検討を行った結果, 今までの効率的市場仮説と異なる以下の 2 点を見つけた.

- 市場の複雑さは個人の複雑さとともに変化する. 個人の予測次元が小さいうちは, 市場価格の挙動に記述可能な構造が存在し, 囚人のジレンマ的状況により市場参加者が予測次元を上げる動機が存在する. しかし次元が上がっていくとその状況が壊れてしまう.
- 市場参加者が予測次元を上げていっても, 市場価格の挙動の構造は消えない. 最終的には構造は存在するが完全に把握することのできない状態になった.

今後の研究の発展の方向として, (a) 市場参加者の学習の仕方, (b) ファンダメンタルズ分析の取り込み, (c) 価格決定の制度 などが市場の複雑さと個人の複雑さの関係にどのような影響を与えるか調べてみたい.

謝辞

本研究の遂行にあたり有益な議論や分析プログラムの提供をしてくれた中島義裕氏に深く感謝したい.

参考文献

[1] Chen, S.-H. and Yeh, C.-H.: Genetic Programming and the Efficient Market Hypothesis, *Genetic Programming: Proceedings of the 1st Annual Conference*(Koza, J., Goldberg, D., and Fogel, D.(eds.)), the MIT Press, 1996, pp. 45–53.

[2] Chen, S.-H., Yeh, C.-H., and Liao, C.-C.: Testing the Rational Expectations Hypothesis with the Agent-Based Model of Stock Markets, *Proceedings of Internatinal Conference on Artificial Iintelligence 1999*, Computer Science Research, Education, and Application Press, 1999, pp. 381–387.

[3] Chen, S.-H., Yeh, C.-H., and Liao, C.-C.: Testing the Rational Expectations Hypothesis with the Agent-Based Model of Stock Markets, 進化経済学論集第 *4* 集, 進化経済学会, 2000, pp. 142–145.

[4] de la Maza, M.: Qualitative Properties of an Agent-based Financial Market Simulation, *Proceedings of ICA199*, CSREA, 1999, pp. 367–373.

[5] Harley, A. C.: *Time Series Models*, Philip Allan Publishers, 1981. (国友直人・山本拓訳『時系列モデル入門』東京大学出版会,1985.).

[6] Joshi, S., Parket, J., and Bedau, M. A.: Technical Trading Creates a Prisoner's Dilemma: Results from an Agent-Based Model, *Computational Fi-*

nance 1999(Abu-Mostafa, Y. S., LeBaron, B., Lo, A. W., and Weigend, A. S.(eds.)), MIT Press, 2000, pp. 465–479.

[7] 吉地望: 不確実性下での期待形成と仮説の進化–為替相場における期待形成を通して–, 方法としての進化 (塩沢由典 (編)), シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000, chapter 6, pp. 173–206.

[8] 中島義裕: 経済現象に見られる決定論的性質と確立論的性質の両義性, 情報処理学会論文誌:『数理モデル化と応用』, Vol. 40,No. SIG9(TOM2)(1999).

[9] 中島義裕: 経済の揺らぎとフラクタル, 方法としての進化 (塩沢由典 (編)), シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000, chapter 7, pp. 207–235.

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

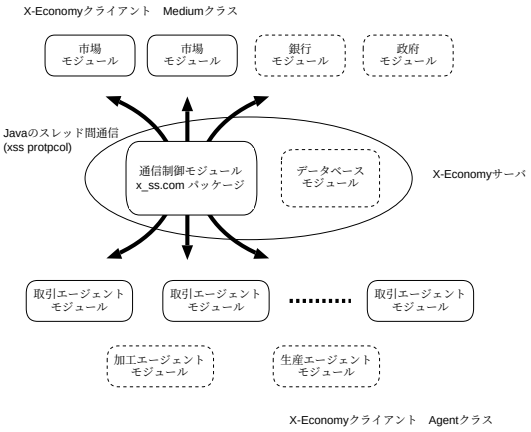


図1　*X-Economy*システムの概念図（点線で囲まれた部分は現在未実装）

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).

P2P 型電子商取引のための エージェントの提携に基づく売買交渉機構について

服部 宏充　伊藤 孝行　新谷 虎松

1　はじめに

近年，電子商取引 (EC: Electronic Commerce) が社会的にも高い関心を集めている．電子商取引は，インターネット上で行われる売買活動であるため，実世界で行われるものとは異なるタイプの，効果的な商取引が実現できる可能性がある．現在，人工知能の分野では，電子商取引を対象とした研究が活発に行われている．特に注目を集めているアプローチとして，エージェントに基づく電子商取引支援がある [10]．エージェントとは，自律的かつ協調的に振る舞い，人間の代理として様々なタスクを実行可能なソフトウェアであり，計算機上での知的な活動主体である．ユーザは，エージェントを用いることによって，希望する商品を探し出したり，実際に交渉する負担から解放される利点が得られる．エージェントが主体となって売買交渉を行うことにより，インターネット上で，ソフトウェアを中心とした新たな経済活動のパラダイムが生み出されることが期待される．ここでは，エージェントが，売買に関する多くの情報を知的に処理し，効果的な売買を自律的に行うことが求められる．ゆえに，エージェントを中心とした新奇な売買メカニズムの開発が必須である．

エージェントに基づく電子商取引支援に関しては，これまでに様々な研究が行われている．筆者らは，これら既存の研究を 2 つのカテゴリに分類している．一方は，エージェントに基づく電子マーケットに関する研究で，Kasbah [4]，Tete-A-Tete [9]，FishMarket [15]，および AucutionBot [18] などの研究がある．もう一方は，売買に関する情報収集エージェントに関する研究がある [5][6][12]．現在筆者らは，前者の，エージェントに基づく電子マーケットに関する研究に注目している．

本論文では，実際に複数のエージェントが売買交渉を行う場として，電子マーケット *G-Commerce* を提案する．既存の多くのシステムは，実世界における市場のメタファをネットワーク上のソフトウェアとして実現した，中央集中型のシステムである．そのため，高度に非同期分散処理が可能なインターネットの利点を十分に活かしていない．一方，*G-Commerce* は Peer-to-Peer(P2P) [14] に基づく分散型のシステムである．P2P とは，Napster [13] や Gnutella [8] に代表されるネットワークモデルのことである．*G-Commerce* では，インターネット自体を，複数の買い手／売り手エージェントが存在する 1 つの巨大な市場とみなす．その中で，ある商品の売買に関係する複数のエージェントが，一時的な (ad-hoc な) 売買ネットワークを形成し，各エージェントは特定のサーバを介

On a Negotiation Mechanism based on Coalition Formation among Agents in a P2P Electronic Marketplace.

Hiromitsu HATTORI, 名古屋工業大学大学院 工学研究科, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology.

Takayuki ITO, 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学教育研究センター, Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology.

Toramatsu SHINTANI, 名古屋工業大学 知能情報システム学科, Dept. of Intelligence and Computer Science, Nagoya Institute of Technology.

さずに直接売買交渉を行う．現在，P2P の形式には，Hybrid P2P 型と Pure P2P 型の 2 つのタイプがあると考えられている．Hybrid P2P 型は Napster が採用している形式で，各ユーザが持つ情報を管理するサーバを有しており，従来のサーバ／クライアント形式を一部取り入れたものとなっている．一方，Pure P2P 型は Gnutella が採用している形式で，Hybrid 型のようなサーバを持たない．完全な分散型システムの実現のためには，後者の Pure P2P 型が望ましいが，各ユーザが持つ情報の把握が困難である点や，最初に誰と接続するのか，というエントリポイントに関する問題が存在する．筆者らは，両者を組み合わせたシステムアークテクチャの構築を試みている．本論文では特に，*G-Commerce* において，エージェントが適切な売買交渉の相手を発見するための手法を示す．

G-Commerce には，買い手，もしくは売り手となる複数のエージェントが存在することになる．既存のシステム (e.g., Kasbah，Tete-A-Tete) では，売買交渉は 1 つの買い手エージェントと 1 つの売り手エージェントによって行われていた．すなわち，複数の買い手／売り手エージェントがマーケット内に存在するにもかかわらず，各々の売買交渉は互いに独立して行われていた．筆者らは，売買交渉の際に，複数の買い手／売り手エージェントが相互に関係する場合を考慮した交渉手法の開発を試みている．文献 [19] では，交渉プロトコルの一種であるオークションにおいて，複数の買い手エージェントが提携する仕組みが提案されている．本論文では，売り手エージェントと買い手エージェントの双方が提携可能とした場合での，売り手エージェントの提携手法について明らかにする．具体的には，売り手エージェントは，交換に基づく協調的な交渉 [11] によって提携を形成する．

本論文の構成は以下の通りである．第 2 章では，*G-Commerce* の概要を示し，システムにおけるエージェントのマッチング手法について述べ，語彙の定義と交渉のプロトコルを示す．第 3 章では，売り手エージェント間の，交換に基づく交渉手法について論じる．第 4 章では，提案した交換に基づく交渉手法について，理論的／実験的な評価を行い，システムの実行例を示す．第 5 章では関連研究を示し，本研究との相違点を明らかにする．第 6 章で結論を述べる．

2 *G-Commerce*: P2P に基づく電子マーケット

2.1 *G-Commerce* の概要

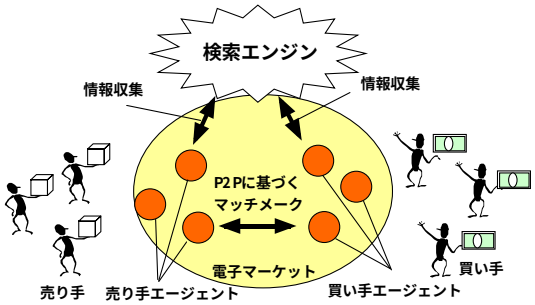


図 1　Outline of *G-Commerce*

図 1 に，P2P に基づく電子マーケット *G-Commerce* の概要を示す．*G-Commerce* には，ユーザの代理となるエージェントが複数存在し，自律的かつ協調的に商取引を行う．ユーザである売り手と買い手は，それぞれ，売り手エージェントおよび買い手エージェントを生成する．売り手エージェントと買い手エージェントは，お互いに適切な相手を探しだし，交渉を行う．

G-Commerce は P2P に基づくシステムであり，市場における情報管理のための特別なサーバを必要としない．ユーザは，個々の計算機において，エージェントが動作する場を提供するためのソフトウェアを稼働させるだけで良い．各ユーザの計算機上には，ユーザの好み (嗜好) を保持し，売買交渉を代行するエージェントが，少なくとも 1 つ存在している．エージェントは，モバイルエージェントとして実装されており，適切な交渉相手を発見した後に，ネットワークに接続された他の計算機に移動して，直接売買交渉を行うことができる．また，エージェントは WWW サーバとしての機能を持ち，HTTP アクセスに対して，適切な内容の HTML を生成する CGI プログラムとして動作する．従って，エージェントは，入力されたユーザの好みに適切な処理を与え，通常の Web ページと同様の形式でインターネット上に公開することができる．ここでエージェントが公開する情報は，

交渉相手として適切なエージェントのマッチングを実現するために利用される．エージェントのマッチングについては，第 2.2 節で述べる．

本システムの実装には，*MiLog*(**M**obile **i**ntelligent agents using **Log**ic programming) [7] を用いている．*MiLog* は，Java によって実装された知的エージェント開発環境であり，Prolog と Java を用いて，知的なエージェントをプログラミングすることが可能である．*MiLog* では，強モビリティ，WWW サービス機能，および WWW アクセス機能を持つエージェントを生成できる．すなわち，*MiLog* のエージェントは，CGI プログラムや Servlet のようにサーバーサイドプログラムとして振る舞うと同時に，HTTP を用いて他の WWW サーバーにアクセスすることが可能である．

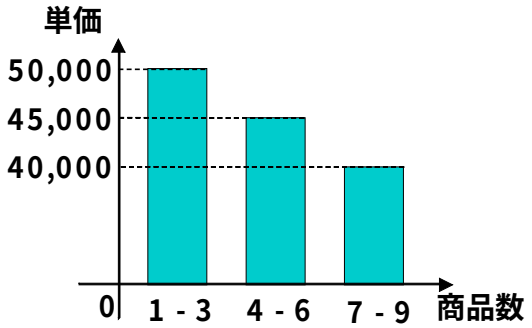


図 2　売り手の価格テーブルの例

G-Commerce では，1 つの売り手エージェントが，複数の商品を販売することができる．各商品には，価格テーブル，締め切り，および在庫数が定められている．価格テーブルとは，商品の販売数に基づく割引価格を示すテーブルであり，締め切りとは，その商品を売ることができる期限である．図 2 に，価格テーブルの例を示す．本例では，買い手エージェントが 5 つの商品を買った時，商品の単価が 45,000 円になることが示されている．

2.2　エージェントのマッチングメイキング

本節では，*G-Commerce* における，エージェントのマッチング手法を明らかにする．具体的なマッチングのプロセスを以下に示す．

【*Process 1*】
ユーザは，エージェントに対して，売買に関する希望 (e.g., 購入，もしくは販売希望商品に関する選好) を入力する．現在，本システムではユーザの選好として，商品のカテゴリ，商品名，希望価格等を用いている．

【*Process 2*】
第 2.1 節で述べた通り，エージェントは WWW サーバの機能を持つため，通常の Web ページと同様の HTML による記述に基づいてユーザの選好をインターネット上に表明することができる．買い手エージェントは，ユーザの商品に関する選好を表明する HTML 文書に，特殊なキーワード *UniqueKeyword*, および各々のサーバへのアクセス方法 (e.g., IP アドレス) 等をコメントとして埋め込む．

【*Process 3*】
Google，goo 等のロボット型検索エンジンでは，検索ロボットがネットワーク上を自動巡回し，Web データを収集する．*G-Commerce* のエージェントも，通常の Web ページと同様，検索ロボットによるアクセスを受け付けることが可能である．検索ロボットは，エージェントが生成した，ユーザの選好とキーワード *UniqueKeyword* 等を含む HTML データを収集し，各検索エンジンのデータベースに記録する．ここで，エージェントは，保持しているユーザの選好に基づいて，表明する情報を適切に調整する．

【*Process 4*】
適切な交渉相手を探すために，エージェントは，検索エンジンを利用したエージェントサーチを行う．最もシンプルな方法として，検索エンジンに対して，商品名とキーワード *UniqueKeyword* との “AND” 検索を行う．例えば，商品 *Item* の販売を希望しているエージェントが，買い手のエージェントを探す場合は，*Item* と *UniqueKeyword* との AND 検索を行う．ここでの検索結果は，本システムを利用しており，かつ商品 *Item* の購入を希望している買い手エージェント

のリストとなる．リストはエージェント内部にキャッシュされ，次回以降，同様の商品の売買を行う際に利用される．

【*Process 5*】
エージェントは，検索の結果得られたリストからサーバへのアクセス方法を抽出し，各々のエージェントの計算機上へ移動し，売買交渉を開始する．

本手法の特長は，他のエージェントの情報を参照するためのサーバとして，通常は Web ページを検索するために用いる検索エンジンを利用している点である．そのため，P2P の形式は Hybrid P2P 型と同様になるが，ユーザの側でサーバを用意する必要は無い．エージェントが複数の検索エンジンを同時に用いることにより，インターネット上に存在するほぼ全てのエージェントの発見が可能となる．また，同種の商品に関する売買を繰り返し行うならば，エージェントが，過去に交渉を行ったエージェントの情報を内部にキャッシュしておくことにより，本手法を用いることなく，直接売買交渉を行うことができる．すわなち，Pure P2P 型と同様の動作が可能となる．

2.3 *G-Commerce* におけるエージェント間の交渉プロトコル

まず，本論文で用いる語彙を以下に定義する．

買い手エージェント: $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_l\}$ は，買い手エージェントの集合を表す．

売り手エージェント: $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_m\}$ は，売り手エージェントの集合を表す．

商品: $G = \{g_1, g_2, \ldots, g_n\}$ は，商品の集合を表す．特に，売り手 s_j の持つ商品の集合を，$G(s_j) = \{g(s_j)_1, g(s_j)_2, \ldots, g(s_j)_n\}$ と表す．売り手は，複数の種類の商品を売ることが可能とする．

買い手の希望商品: $g(b_k)$ は，買い手 b_k の希望する商品を表す．

価格テーブル: 売り手 s_j の商品 g_i に対する価格テーブルは，関数 $p(s_j, g_i) : N \to R$ で表される．ここで，N は自然数，R は実数である．$p_n(s_j, g_i)$ は，商品 g_i が n 個売れた場合の g_i の単価を示す．

商品のコスト: $cost(s_j, g_i)$ は，売り手 s_j が商品 g_i を仕入れるため，または生産するためにかけるコストを表す．

希望価格: $r(b_k, g_i)$ は，買い手 b_k の商品 g_i に対する希望価格を表す．

売り手が提示する商品数: $num(s_j, g_i)$ は，交換に基づく交渉において，売り手 s_j が提示する商品 g_i の数である．

買い手が希望する商品数: $num(b_k, g_i)$ は，買い手 b_k の商品 g_i に対する希望個数を表す．

買い手の提携: $C(g_i)$ は，商品 g_i に対する買い手の提携を表す．ここで，$C(g_i) \subset B$ である．

提携としての商品の希望個数: $num(C(g_i)) = \sum_{b_k \in C(g_i)} num(b_k, g_i)$ は，提携 $C(g_i)$ が希望する商品 g_i の個数を表す．

買い手の効用: 買い手 b_k が，売り手 s_j から商品 g_i を買った時，b_k の効用は以下のように定義される．$u_{b_k}(g_i) = r(b_k, g_i) \times num(b_k, g_i) - p_{num(b_k, g_i)}(s_j, g_i) \times num(b_k, g_i)$.

買い手の提携の効用: 提携 $C(g_i)$ の効用は以下のように定義される．$u_{C(g_i)}(g_i) = \sum_{b_k \in C(g_i)} r(b_k, g_i) \times num(b_k, g_i) - p_{num(C(g_i))}(s_j, g_i) \times num(C(g_i))$.

G-Commerce では，以下のプロトコルに従ってエージェントが売買交渉を行う．ここでの基本的なアイデアは，単独での商品の売却に失敗した売り手エージェントが，他の売り手エージェントと在庫にある商品を交換することにより，買い手エージェント，もしくは買い手エージェントの提携が希望する商品数を集めて商品の売却を試みる，というものである．

(Step 1): 買い手エージェント b_k は，売買に関する要求（商品の種類 g_i，希望価格 $r(b_k, g_i)$，および個数 $num(b_k, g_i)$）を宣言する．第 2.2 節で述べた方

法により，同じ種類の商品 g_i を希望する複数のエージェントにより，提携 $C(g_i)$ が形成される．

(Step 2):　売り手エージェント s_j が商品 g_i に関する提携 $C(g_i)$ を発見し，売り手エージェント s_j の持つ商品の中に商品 g_i が含まれている，すなわち，$g_i \in G(s_j)$ ならば，商品 g_i の売却を試みる．もし，商品 g_i に対する提携 $C(g_i)$ が存在しなければ，自分が持っている商品の集合 $G(s_j)$ に含まれる商品に対する，買い手エージェントの提携が形成されるのを待つ．ただし，待つのは，ユーザに与えられた締め切り時間までである．

(Step 3):　$num(s_j, g_i) \geq num(C(g_i))$ が成り立つなら，売り手エージェント s_j は，商品 g_i の提携 $C(g_i)$ への売却に成功し，交渉は成立する．もし，$num(s_j, g_i) < num(C(g_i))$ ならば，(Step 4) へ．

(Step 4):　買い手の要求を満足させるために，売り手エージェント s_j は，交換に基づく交渉手法を用いて，商品 g_i の数を増やすことを試みる．例えば，売り手エージェント s_j が，他の売り手エージェント s_k から，より多くの商品 g_i を得るために，s_j は g_i の代償として，その他の商品を s_k に渡す．交換に基づく交渉の詳細は，第 3 章で述べる．

(Step 4) において，もし，商品を交換可能なエージェントが複数存在する場合，売り手エージェント s_j は効用を最大化するエージェントと交換を行う．もし，商品 g_i の交換が可能なエージェントが存在しない場合，売り手エージェント s_j は，ユーザから与えられた締め切りまで，他の売り手エージェントの参加を待つ．

3　商品の交換に基づく売買交渉

第 2.3 節の (Step 4) において，もし，売り手エージェント s_j が，要求された個数以上の商品を持っていない場合，s_j はその商品を持っている他の売り手エージェントを探し，商品の交換に基づく交渉を行う．2 つの売り手エージェントが交渉に成功した場合，それぞれのエージェントは，効用を増加させることができる．また，売り手間の交渉が成功することにより，多くの割引が期待できるため，買い手としても多くの利得を獲得することができる．以下に，2 つの売り手エージェント間での商品の交換に基づく交渉手法を示す．

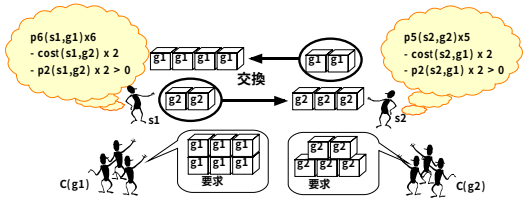


図 3　2 つの売り手エージェント間の交換機構

図 3 に交渉の例を示す．本例では，2 つの売り手エージェント s_1 と s_2 が存在している．売り手エージェント s_1 は，商品 g_1 を 4 つ，商品 g_2 を 2 つ持っているとし，売り手エージェント s_2 は，商品 g_1 を 2 つ，および商品 g_2 を 3 つ持っているとする．ここで，買い手エージェントの提携 $C(g_1)$ が，売り手エージェント s_1 から商品 g_1 を 6 つ購入しようとしているとする．さらに，別の買い手エージェントの提携 $C(g_2)$ が，売り手エージェント s_2 から商品 g_2 を 5 つ購入しようとしているとする．

売り手エージェント s_1 は，十分な数の商品 g_1 を持っていないため，提携 $C(g_1)$ との売買を成立させることができない．そこで，売り手エージェント s_2 と交換に基づく交渉を行う．まず，売り手エージェント s_1 が次の提案を行う:『s_1 が商品 g_2 を 2 つ s_2 に渡す代わりに，s_2 は s_1 に商品 g_1 を 2 つ渡す』．この時，以下の条件が成り立つならば，s_1 と s_2 は提案に関して合意する：

s_1 について:

$$p_6(s_1, g_1) \times 6 - cost(s_1, g_2) \times 2 - p_2(s_1, g_2) \times 2 > 0$$

かつ，s_2 について:

$$p_5(s_2, g_2) \times 5 - cost(s_2, g_1) \times 2 - p_2(s_2, g_1) \times 2 > 0$$

以上の条件の元でエージェントが合意することにより，交渉によって効用が減少しないことが保証される．商品を交換する際の条件の定義を以下に示す．

Definition 1 (商品交換の条件) *2* つのエージェント s_1 および s_2 と，*2* 種類の商品 g_1 および g_2 が存在する場合に，*2* つのエージェントは，以下の *2* 通りのケースにおいて合意が可能である．

【case 1】

$shortage(s_1, g_1) = num(C(g_1)) - num(s_1, g_1) > 0$ かつ，

$shortage(s_2, g_2) = num(C(g_2)) - num(s_2, g_2) > 0$ として，s_1 の効用が，

$$u(s_1) = p_{num(C(g_1))}(s_1, g_1) \times num(C(g_1)) - cost(s_2, g_2) \times shortage(s_2, g_2) - p_{shortage(s_2,g_2)}(s_1, g_2) \times shortage(s_2, g_2) > 0$$

かつ，s_2 の効用が，

$$u(s_2) = p_{num(C(g_2))}(s_2, g_2) \times num(C(g_2)) - cost(s_1, g_1) \times shortage(s_1, g_1) - p_{shortage(s_1,g_1)}(s_2, g_1) \times shortage(s_1, g_1) > 0$$

である場合．

【case 2】

$shortage(s_1, g_2) = num(C(g_2)) - num(s_1, g_2) > 0$ かつ，

$shortage(s_2, g_1) = num(C(g_1)) - num(s_2, g_1) > 0$ として，s_1 の効用が，

$$u(s_1) = p_{num(C(g_2))}(s_1, g_2) \times num(C(g_2)) - cost(s_2, g_1) \times shortage(s_2, g_1) - p_{shortage(s_2,g_1)}(s_1, g_1) \times shortage(s_2, g_1) > 0$$

かつ，s_2 の効用が，

$$u(s_2) = p_{num(C(g_1))}(s_2, g_1) \times num(C(g_1)) - cost(s_2, g_2) \times shortage(s_1, g_2) - p_{shortage(s_1,g_2)}(s_2, g_2) \times shortage(s_1, g_2) > 0$$

である場合．

4　議論

4.1　パレート最適性

本論文で提案した交渉手法は，ゲーム理論 [17] における交渉問題のルールの 1 つであると言える．ゲーム理論における交渉問題では，交渉の結果得られる配分を示す効用ベクトル $(u(s_1), u(s_2))$ が以下の (1)，(2)，および (3) の条件を満たす時，その配分はパレート最適であると言う．

1. $u(s_1) \geq u(s_1)^*$ かつ $u(s_2) \geq u(s_2)^*$．ただし，$u(s_1)^*$ および $u(s_2)^*$ は現在の状態を表す．すなわち，$u(s_1)$ と $u(s_2)$ は，効用の最大値である．
2. $(u(s_1), u(s_2))$ は R の 1 点である．R は，すべての可能な点の集合を表す．
3. R には，$u(s_1)' \geq u(s_1)$ かつ $u(s_2)' \geq u(s_2)$ となるような $(u(s_1), u(s_2))$ と異なる点 $(u(s_1)', u(s_2)')$ は存在しない．すなわち，$u(s_1)$ と $u(s_2)$ の両方がより大きくなる点は存在しない．

本論文で提案する交換に基づく交渉手法では，エージェントは 2 つの戦略を持つ．1 つは交換すること，もう 1 つは何もしないことである．ここで 2 つの戦略を *str.1*，および *str.2* とする．エージェントが交換によって合意に達した時，得られる効用 $u(s_1)$ と $u(s_2)$ は，明らかに最大化されるため，条件 (1) が満たされる．また，提案手法では，すべての可能な戦略集合は，$\{(str.1, str.1), (str.1, str.2), (str.2, str.1), (str.2, str.2)\}$ である．ここで，$(str.1, str.2)$ は，s_1 の戦略が $str.1$，および s_2 の戦略が $str.2$ であることを表す．可能な効用ベクトルの集合は，$\{(u(s_1), u(s_2)), (0,0), (0,0), (0,0)\}$ である．ここで，$(u(s_1), u(s_2))$ は，戦略ベクトル $(str.1, str.1)$ を実行した場合の効用ベクトルである．$(u(s_1), u(s_2))$ は，R に含まれる点の 1 つであるため，条件 (2) が満たされる．条件 (3) に関しては，2 つのエージェントは戦略ベクトル $(str.1, str.1)$ を選んだ時にのみ，0 より大きい効用を得ることができる．どちらか 1 つのエージェント，もしくは両方のエージェントが，他の戦略を用いた場合，効用ベクトルは $(0, 0)$ となり，条件 (3) も満たされる．以上より，交換の結果得られる配分はパレート最適な配分になっていると言える．

4.2　実験

提案手法の有効性を示すために，下記の設定で，シミュレーション実験を行った．

- 売り手の数:　5
- 買い手の数:　500

- 商品の値段:　200 to 300
- 商品の種類の数:　10
- 売り手の持つことのできる商品の最大数: 10
- 買い手の希望商品に関する分布:　正規分布
- 商品に対する売り手の効用の分布:　一様分布
- 売り手の商品数の分布:　一様分布

本実験では，既存の手法と提案手法とを比較した．既存の手法は，以下の 3 ステップからなる単純なプロトコルである．交換に基づく交渉手法は，第 2.3 節で示した (Step 1) から (Step 4) に基づくプロトコルである．

(Step A):　買い手エージェント b_k は，売買に関する要求（商品 g_i，希望価格 $r(b_k, g_i)$ ，および個数 $num(b_k, g_i)$）を宣言する．同じ種類の商品 g_i を希望するエージェントの集合が，提携 $C(g_i)$ を形成する．

(Step B):　売り手エージェント s_j は，商品 g_i に対する提携 $C(g_i)$ が存在し，売り手エージェント s_j の持つ商品の中に商品 g_i が含まれている，すなわち $g_i \in G(s_j)$ ならば，商品 g_i を売ることが可能である．もし，提携 $C(g_i)$ が存在しなければ，締め切り時間になるまで，自分が持っている商品の集合 $G(s_j)$ に含まれる商品に対する買い手エージェントの提携を探し続ける．

(Step C):　$num(s_j, g_i) \geq num(C(g_i))$ が成り立つなら，売り手エージェント s_j は，商品 g_i を提携 $C(g_i)$ に売る．

本実験では，上で挙げたパラメータを変化させた，いくつかの異なる設定の元で比較を行った．実験では，各々の設定の元で 1000 回試行し，1 試行は 1000 単位時間とした．1 単位時間は，既存の手法では (Step A) から (Step C)，提案手法では，(Step 1) から (Step 4) とした．買い手エージェントと売り手エージェントは，n 単位時間毎に電子マーケットに 1 つずつ参加するものとし，$n = 1000/$(エージェントの総数) とした．

図 4 は，売り手の効用の変化と売り手の数の変化の比較を示している．図 5 は，売れた商品の割合の

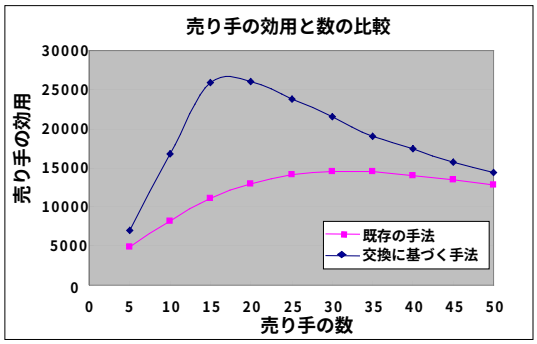


図 4　売り手の効用と売り手の数の比較

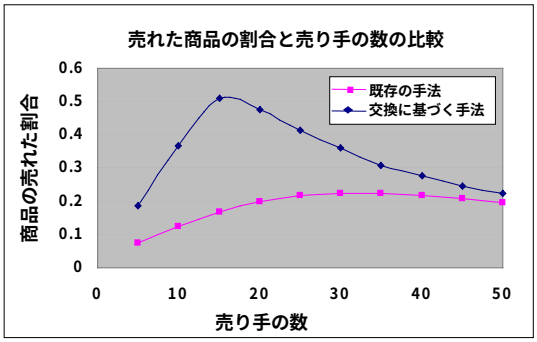


図 5　売れた商品の割合と売り手の数の比較

変化と売り手の数の変化の比較を示している．図 4，および図 5 が示す通り，提案手法の方が既存の手法と比較して，より多くの効用が得られている．特に，売り手の数が 10 から 25 の範囲では，既存の手法の 2 倍の効用が得られている．売れた商品の割合に関しては，提案手法では，既存の手法の 3 倍から 5 倍の効用が得られている．売り手の数が少ない時に，売り手の効用も売れた商品の割合も少ない理由は，売り手も買い手も数が少なすぎるために十分な数の商取引が行われないためと考えられる．

図 6 は，売り手の効用の変化と売り手が持つことのできる最大の商品数の変化の比較を示している．図 7 は，売れた商品の割合の変化と売り手が持つことのできる最大の商品数の変化の比較を示している．図 6 および図 7 からも，提案手法では既存の手法より多くの効用が得られることが分かる．

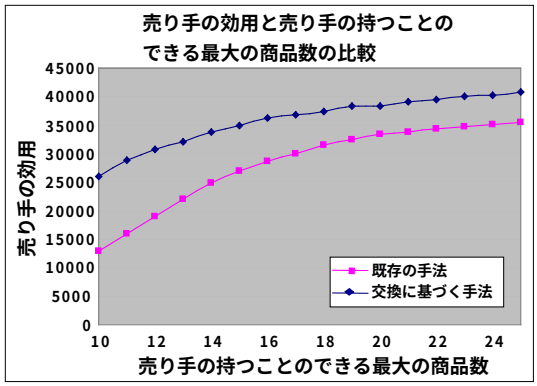


図 6　売り手の効用と売り手が持つことのできる最大の商品数の比較

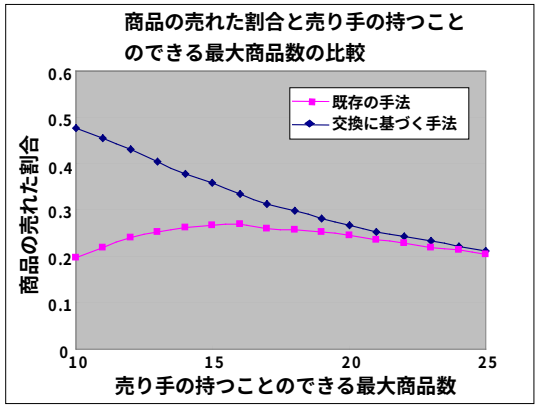


図 7　売れた商品の割合と売り手が持つことのできる最大の商品数の比較

4.3　ユーザインターフェースの例

図 8 と図 9 は，*G-Commerce* のユーザインターフェースの例を示している．

図 8 のウィンドウは，ユーザの好み（嗜好）を入力するユーザインターフェースである．MiLog のエージェントは，CGI プログラムのように振る舞う機能を持つため，ユーザは，自分のエージェントに WWW ブラウザを用いてアクセスすることができる．ユーザは，自分の希望する商品，および希望価格を，図 8 に示すインターフェースの中央のテキストボックスから入力する．

図 9 のウィンドウは，現在の状態を示すユーザインターフェースである．ユーザは，現在，どの商品を監

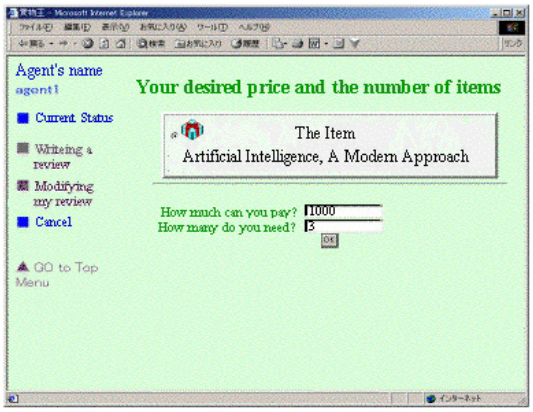


図 8　ユーザの希望価格と希望商品数の入力

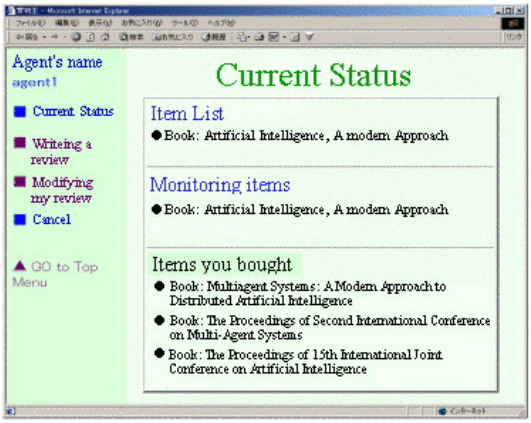


図 9　現在の取引の状況の表示

視しているか，どの商品が売られているか，どの商品が売れたか，を知ることができる．また，商品を売りたいユーザもこのインターフェースを用いて商品の情報を入力する．買い手エージェントと売り手エージェントが合意した時，買い手エージェントは，ユーザに合意したことを知らせる．エージェントの合意後に，実際に購入を実行するのはユーザである．

5　関連研究

本節では，関連研究を示し，本研究との相違点を明らかにする．特に，インターネット上の複数のサイトから商品の情報を検索し統合するシステム，および，商取引を行う場を提供するシステムについて述べる．

インターネット上の複数のサイトから商品の情報を

検索し統合するシステムに関する研究または商用の製品としては Sherlock 2，AuctionWatch，BargainFinder，ShopBot, Jango などがある．Apple 社 [1] の Sherlock 2 は，インターネット上の複数のサーチエンジンにアクセスすることによって，複数の財に関する情報を得ることができる．AuctionWatch [2] は，主要なオークションサイトを継続的に監視し，ユーザから指定されたキーワードとマッチする商品が出品された時，ユーザに E-mail で知らせるというオンラインサーバである．BargainFinder [3] は，オンラインショップにおける商品の値段を比較し，買物における意思決定を支援するエージェントである．特定の商品を与えると，BargainFinder は前もって指定されたいくつかの商店の Web サイトから，その商品の値段を検索する．BargainFinder を発展させて開発されたショッピングエージェントが ShopBot [5] である．ShopBot の特長は，オンラインの商店のサイトの記述や，その商店に対するクェリーを自動的に解析できる点である．ShopBot をさらに発展させた Jango [6] では，ユーザが商品に対する情報を指定することを可能にしている．BiddingBot [12] では，エージェントは複数のオークションサイトから情報を収集することだけでなく，実際に入札することも支援する．以上のシステムは，インターネット上の既存の WWW サイトから情報を収集することが主な目的であり，売り手と買い手双方の活動をエージェントが代行する本システムとは異なる．

オークション，または商取引を行う場を提供するシステムとしては，AuctionBot，eMediator，Kasbah，FishMarket，Tete-A-Tete，GroupBuyAuction などがある．AuctionBot [18] はオークションサーバーである．AuctionBot のユーザは，商品を売るためにオークションを始めることができる．そのオークションでは，エージェントが売り手，もしくは買い手となり，あらかじめ定義されたプロトコルに従って入札を行う．AuctionBot の特長は，ユーザが自分自身のソフトウェアエージェントを作成できるような API を提供している点である．Kasbah [4] は，WWW 上の仮想的なマーケットプレースであり，その上でユーザは，自分の代理として商品の売買を行うエージェントを生成できる．Kasbah でのエージェント間の取引は単純なものである．また，AuctionBot のようにオークションのプロトコルに従う必要はない．FishMarket [15] は，仮想的なオークションの場を提供するシステムである．FishMarket では，ユーザはエージェントの入札戦略をエンコードすることができる．FishMarket は実世界のシステムとしては現在のところ使われていないが，様々な入札戦略を持ったエージェントによるトーナメントが開催されている．Tete-A-Tete [9] も仮想的なマーケットプレースを提供する．Tete-A-Tete の特長は，エージェントが議論に基づく協調的な交渉を行う点である．eMediator [16] は，eAuctionHouse と eCommitter から成る電子商取引サーバーである．eAuctionHouse では，Sandholm らによって開発されたアルゴリズムによって勝者を決定する，組合せオークションを行うことができる．eCommitter では，Leveled Commitment Contracts を使って最適な価格での契約を実現する．GroupBuyAuction [19] は，ボリュームディスカウントに基づく仮想マーケットである．ボリュームディスカウントとは，複数の買い手で多数の商品を共同で買う代償として，売り手が商品の単価を割引くことである．GroupBuyAuction では，買い手のエージェントの提携により，ボリュームディスカウントを実現している．以上のシステムは，仮想的な商取引の場を提供することにより，自動的な取引を実現しようという点では，本システムと同じである．しかし，本システムの相違点は，売り手が協調することができたり，P2P 技術で売り手と買い手のコネクションを確立する点である．

6　おわりに

本論文では，インターネット上の電子マーケット *G-Commerce* を提案し，システムにおけるエージェントの交渉方式について論じた．既存のエージェントに基づく電子マーケットシステムは，市場を管理するサーバを用いた中央集中型のシステムであった．従って，ユーザは，売買を行うためには，マーケットの場所を知り，その都度システムにアクセスする必要がある．さらに，サーバに対して売買に関する種々の情報を登録しておく必要があった．それに対

して，*G-Commerce* は特別なサーバを必要としない Peer-to-Peer(P2P) に基づく分散型のシステムである．*G-Commerce* のユーザは，個々にソフトウェアを起動し，インターネットに存在する多数のユーザの中から，適切な交渉相手から成る一時的な (ad-hoc な) 電子マーケットを形成することができる．売買交渉は，エージェントを用いて行い，ユーザは交渉の過程で必要となった情報のみを表明するだけで良い．

また，既存の研究では，1 つの商品に関する，売り手と買い手の 1 対 1 の交渉プロトコルが提案されているが，インターネット上の多数のユーザを対象とする *G-Commerce* では，それら既存の交渉プロトコルでは不十分である．本論文では，複数の売り手と買い手がそれぞれに提携を形成することを前提とした交渉プロトコルを提案している．本論文では特に，売り手エージェントが提携を形成する手法として，商品の交換に基づく協調的な交渉手法について論じた．理論的／実験的な評価により，本手法によって，売り手と買い手の双方にとって有益な交渉が実現できることが示された．

参考文献

[1] Apple URL. http:// www.apple.com/.

[2] AuctionWatch URL. http://www.auctionwatch.com

[3] BargainFinder, http:// bf.cstar.ac.com/.

[4] Chavez, A. and Maes, P., “Kasbah: An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods,” In *Proc. of 1st International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-96)*, pp. 75–90, 1996.

[5] Doorenbos, R. B., Etzioni, O. and Weld, D. S., “A Scalable Comprison-Shopping Agent for the World-Wide Web,” In *Proc. of the 1st International Conference on Autonomous Agents (Agents-97)*, pp.39-48, 1997.

[6] Etzioni, O., “Moving Up the Information Food Chain: Deploying Softbots on the World Wide Web,” In *AI magazine*, Vol. 18, No. 2, pp. 11–18, 1997.

[7] Fukuta, N., Ito, T. and Shintani, T., “*MiLog*: A Mobile Agent Framework for Implementing Intelligent Information Agents with Logic Programming,” In *Proc. of the 1st Pacific Rim International Workshop on Intelligent Information Agents (PRIIA-00)*, pp. 113–123, 2000.

[8] Gnutella URL. http://www.gnutella.wego.com/.

[9] Guttman, R. H., “Merchant Differentiation through Integrative Negotiation in Agent-mediated Electronic Commerce,” Master’s thesis, MIT(Massachusetts Institute of Technology), 1998.

[10] Guttman, R. H., Moukas, A. G. and Maes, P., “Agent-mediated Electronic Commerce: A Survey,” Journal of the Knowledge Engineering Review, Vol. 13, No. 2, pp. 147–159, 1998.

[11] 伊藤孝行, 新谷虎松, “協調的なスケジューリングのための交換条件の提示による説得手法,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J81-D-I, No. 9, pp. 1099–1106, 1998.

[12] Ito, T., Fukuta, N. and Shintani, T. and Sycara, K., “*BiddingBot*: A Multiagent Support System for Cooperative Bidding in Multiple Auctions,” In *Proc. of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-00)*, pp. 399–400, 2000(poster abstract).

[13] Napster URL. http://www.napster.com/.

[14] Oram, A., “Peer-to-Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies,” O’Reilly & Associates, 2001.

[15] Rodriguez, J. A., Noriega, P., Sierra, C. and Padget, J., “FM96.5:A Java-based Electronic Auction House,” In *Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-97)*, pp. 75–90, 1997.

[16] Sandholm, T., “eMediator: A Next Generation Electronic Commerce Server,” In *Proc. of AAAI-99*. AAAI Press, 1999. At the Intelligent Systems Demonstration Program.

[17] 鈴木光男, “新ゲーム理論,” 勁草書房, 1994.

[18] Wurman, P. R., Wellman, M. P., and Walsh, W. E., “The Michigan Internet AuctionBot: A Configurable Auction Server for Human and Software Agents,” In *Proc. of the 2nd International Conference on Autonomous Agents (Agents-98)*, pp. 301–308, 1998.

[19] Yamamoto, J. and Sycara, K., “A Stable and Efficient Buyer Coalition Formation Scheme for E-Marketplaces,” In *Proc. of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)*, pp. 576–583, 2001.

U-Mart: 経済学と工学をエージェントが結ぶ

喜多一　出口弘　寺野隆雄

Abstract: Agent-based simulation is one of promising approaches to understand and design complex socio-economical systems. U-Mart is a research program of providing economists and computer scientists with an agent-based simulation system of a financial market as a test bed for interdisciplinary study. This paper overviews aims, activities, achievements and future plan of the U-Mart program.

1 はじめに

インターネットに代表される情報通信革命のもとで社会経済システムのデザイン論として工学と経済学は互いに領域を重ねつつあり，システム工学，情報工学などの工学と経済学などの社会科学の学際的な交流が重要となっている．そこでは複雑な社会経済システムを研究対象とすることから，従来の数理モデルを用いた演繹的，理論的アプローチには限界があり，ブレークスルーのための新しいアプローチが求められる．

その一つの可能性がエージェントシミュレーションである．特に市場についてエージェントシミュレーションによる実験的研究は人工市場と呼ばれる [6]．ここでは取引エージェントの定型行動や学習，適応行動など従来の理論では扱えなかったエージェントの行動をシミュレーションし，それがいかなる価格形成をもたらすのかを実験的に考察する．また，人工市場や実市場に見られる複雑な現象への理論的接近として，統計物理学における相転移や臨界現象などの視点から研究を進める経済物理学 [7] とも交叉して興味深い研究が展開されている．

しかしながら人工市場の研究方法には実際の市場を模擬するに十分な複雑さと計算機実験や分析が可能な単純さとを合わせ持つモデルの設計は必ずしも容易ではない．また理論モデルに比べ複雑にならざるを得ない実験設定やその結果について研究者間で効果的な知識の共有をはかる必要もある．このような課題に対して我々は工学と経済学が問題を共有するためのエージェントシミュレーションのテストベッド（試験台）を構築することで研究を促進することを考えている [3]，U-Mart と呼ぶ人工市場実験はその一つの試みとして進めているものである [8] [9] [10] [12]．本論文では U-Mart 研究プログラムについて，その構想，実践と今後の展望について紹介する．

2 テストベッドとしての人工市場

2.1 研究プログラムの構想

U-Mart は市場について，その複雑性に起因するさまざまな問題 [1] を検討することを目指して構築されてきた．考察を行いたい問題としては例えば

1. 株式などの売買行動に関する人間集団の学習・創発や相互干渉，制度設計を含む意思決定問題の

U-Mart: Agent-based Simulation Interconnects Economics and Engineering.

Hajime KITA, 大学評価・学位授与機構, National Institution for Academic Degrees.
Hiroshi DEGUCHI, 東京工業大学, Tokyo Institute of Technology.
Takao TERANO, 筑波大学, The University of Tsukuba.

解明,

2. 市場における投機的売買行動と価格の乱高下などの市場の不安定性との関連の解明とこれを回避するための制度設計,
3. インサイダー情報の利用の検定など，市況からのエージェントの行動の推定,
4. 取引戦略の市場における共進化的側面の実験,

等が挙げられる．これらの課題はいずれも従来の経済理論では対象とすることさえ困難なものであり，ある程度の複雑さを伴ったエージェントシミュレーションによる接近が必要である．

2.2 実験システムの要件

我々はテストベッドの構築にあたって以下の 3 点を要件とした．

実世界との関連付け ：経済システムについての実験として完全に架空の市場を設定することは，現実経済のもつ基本的な複雑さや予期不可能性などの重要な要素が消去され，実際的な意義のない仮想実験に終わりかねない．そこで，テストベッドは何らかの形で実世界と関連付けられていることが必要である．

広い参加可能性を持つシステムの開放性 ：経済学や金融工学，計算機科学などの諸領域の学際研究を可能とするため，多様な主体が参加可能な開放型システムとして設計する必要がある．これに関しては，Axelrod が行った繰り返し囚人のジレンマゲームについてのプログラムのコンテスト [4] やロボカップなどの事例が参考になる．

制度の解析と設計のための実験環境の提供 ： 社会経済システムについて検討すべき課題は，多数の自律エージェントの経済行動がシステム全体にどのような挙動をもたらすかを解析し，それらを律する市場の制度の影響を評価し，これを踏まえて制度を設計することである．テストベッドにはこのための実験的な考察を可能にすることが求められる．

3 人工市場システム U-Mart

3.1 U-Mart の特徴

先に挙げた要請に対して，U-Mart では以下のような方法を採用した．

まず，実世界との関連付けとして，U-Mart では，現実に存在する株価指数を対象とし，その「現物」ではなく，現実には市場が存在しない「先物」を取引する市場を仮想的にに形成しようとする†1（図 1 参照）．

先物市場では先物の売買契約は期日に現物市場の価格で清算される．したがって現物市場における価格の動き，それが将来，現実の経済の動きにつれてどのように変化するかという期待についての判断と売買の決断への反映を迫られることになる．また，ソフトウェアエージェントの構成においては，エージェントに取引される商品の「価値」を組み込むことの難しさがある．先物市場の導入により取引される商品の価値が期日において現物価格に拘束されることでこの難点を解消できる．

このように現実には存在しない仮想の先物市場を構成することにより，仮想の市場での固有の取引，価格形成が可能であり，その固有の挙動として現実の市場における判断の複雑さを十分に再現することが期待される．†2.

次に第二の要請については，U-Mart では，コンピュータ・プログラムによって自ら売買の判断をするソフトウェア・エージェントと自然人との両方の参加を可能とし，同等に成果を競わせることを考えた．

人工市場の研究では売買戦略の (限定された) 合理性と多様性が重要である．U-Mart ではソフトウェア・エージェントのコンテストや人によるゲーミング・シミュレーションを通じて多様な戦略の可能性を探り，それらのもとでの価格形成の研究を可能にしようとする．

第三の要請については，多様な取引戦略のもとで市場を仮想的に実験することにより，実験結果の解剖学

†1 先物市場の利用は U-Mart の提案者の一人である大阪市立大学，塩沢由典教授の発案による．

†2 証券会社などが提供しているいわゆる模擬市場でのゲームは価格形成機能を持たない．

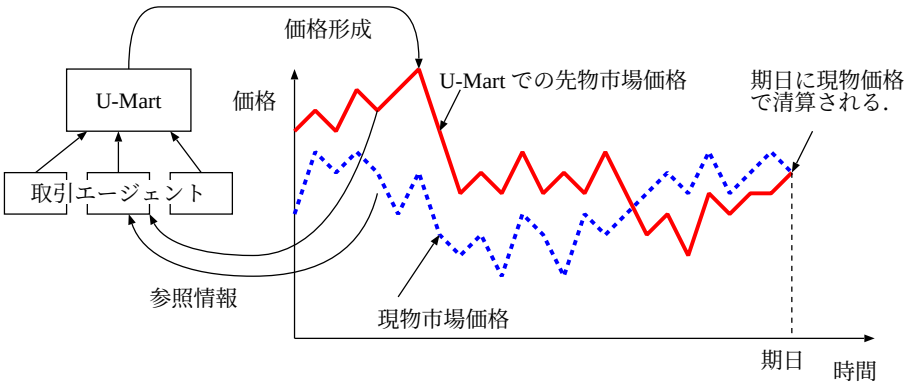


図 1　U-Mart における仮想先物取引.

的な分析が可能になる．そして値付け，決裁，手数量など市場のさまざまな制度の影響を評価し，制度の設計問題に接近しようとする．

4　U-Mart システムの概要

U-Mart では現実に存在する市場の「先物」を仮想の市場で取引する．システムはサーバ・クライアント型の形態をとり，TCP/IP 上に実装された専用プロトコルを用いて売買等の情報を交換する．取引所を模擬するサーバは各取引クライアントからの注文を受付け，値付けと売買の約定を行い，資産口座を管理する．各クライアントはサーバから値動きなどの情報を得て独自の判断で売買注文を出す．また，U-Mart ではソフトウェアエージェントのほかに人間による取引も共存したゲーミング・シミュレーション型の実験も考慮して設計されている．U-Mart システムの詳細については文献 [9] を参照頂きたい．

4.1　U-Mart システムの構成

U-Mart の現在のシステムは以下のような文書とソフトウェアにより構成されている．

- Simple Virtual Market Protocol (SVMP) と実験用市場の仕様書．市場取引のための TCP/IP 上でのテキストベースのプロトコルを規定している．
- 仕様書に基づいて実装された 1 銘柄 1 限月の市場サーバ．Java を用いて記述されている．バックエンドのデータベースには PostgrSQL を採用した．
- クライアント記述のための SVMP を呼び出す Java API. SVMP で規定されているリクエストとほぼ一対一に対応する API である．
- API を利用した U-Mart クライアントの実装例. ユーザが API を用いてクライアントの取引エージェントを作成するための雛型を提供している．
- サーバ管理のための GUI. Java/Swing で実装.
- ソフトウェア・エージェントのモニタリングと人による取引のための GUI. Java/Swing で実装されたものと C++ で Windows 上に実装されたものの 2 種類がある．
- クライアント記述のためのラッパープログラム
- クライアント開発のためのスタンドアロンサーバ API は SVMP のリクエストとほぼ一対一で対応しているため，初心者には戦略の記述が難しい．U-Mart への参加を容易にするため売買戦略を現物や先物の過去の価格系列や現在の資産状況から注文への関数と考え，これのみを記述すれば U-Mart クライアントが構成できるラッパープログラムとクライアント開発時にクライアントのテストを行うためにいくつかの簡単な取り引きエージェントを内部に組み込んだスタンドアロン型のサーバを開発した．

これらは SVMP の仕様策定に始まり，サーバの実装から徐々に発展してきたものである．その過程で 2 度の公開実験や大学・大学院での教育などの実践を経て必要なソフトウェアが認識，作成されるとともに改

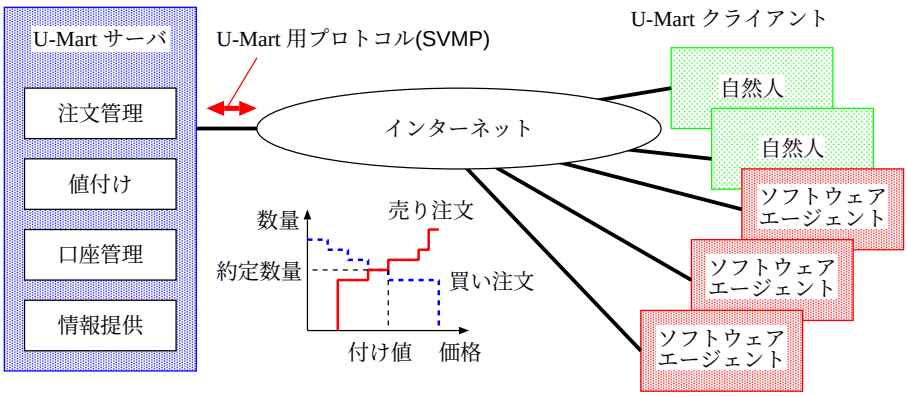


図 2　U-Mart の概要.

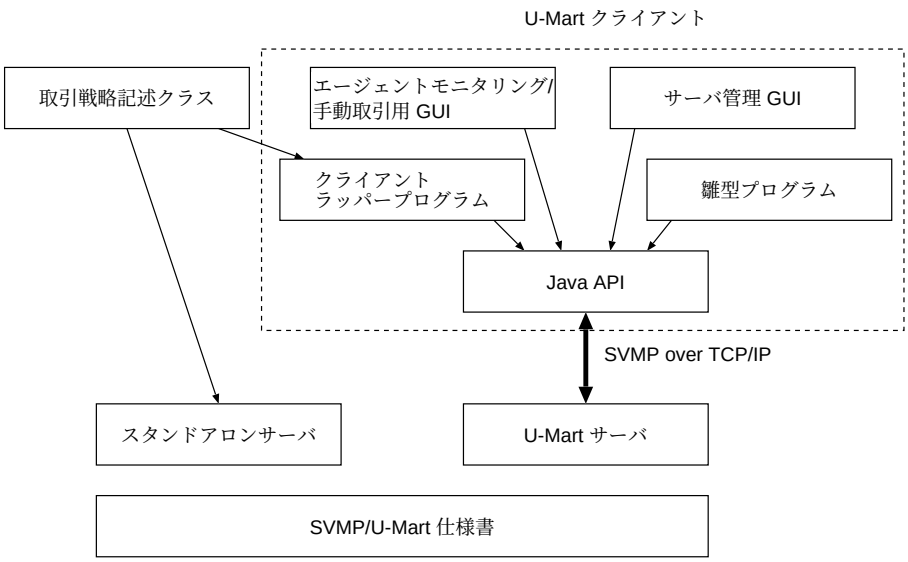


図 3　U-Mart システムの構成.

良が進められてきた.

4.2　次世代 U-Mart システムの構想

現行の U-Mart システムは 1 銘柄 1 限月の市場を前提とし，また U-Mart の実験を経験する前に概略の設計がなされた．その後の実践を経て SVMP の拡充，バグの修正や実行効率の改善などがなされたが，実験の仕様の拡大などの要求にはシステムの再設計が必要であり，次世代の U-Mart システムについて以下の点を課題に作業を開始した.

- 複数銘柄・複数限月の市場を構成可能とすること．これにより，より多様な取引戦略が取り込めるとともに，結果のより本格的な分析が可能になる.
- サーバ負荷軽減のための SVMP リクエストの見直し.
- ロギングのためのデータベース運用の柔軟化.
- 市場の取扱効率の向上.

現在，SVMP の見直しを済ませ，サーバについてのオブジェクト設計も概ね完了した．今後，サーバと

クライアント API の実装，GUI やクライアントの移植などを進めて行くとともに，複数銘柄，複数限月の市場での実験計画を検討して行く予定である．

5 U-Mart 公開実験

U-Mart ではすでに 2 度にわたって取引エージェントを公募して公開の実験を行った．

まず，2000 年 8 月にこのような実験のフィージビリティを探ることを目的に Pre U-Mart 2000 を，2001 年 8 月により本格的な公開実験として U-Mart 2001 をいずれも計測自動制御学会主催の合宿型研究集会「創発システムシンポジウム」の場を借りて行った．

Pre U-Mart 2000 の模様については文献 [10] に報告しているが，主催者の予想を上回る多様な取引戦略や開発方法があることが認識された．実際に行った実験では市場が初期段階で猛烈な乱高下を示し，その原因追求などを通して市場やそこでの取引戦略についての理解が深まった．また経済学系，工学系両方からの参加者が合宿という場を共有して共通のプログラムに取り組むことが相互理解に極めて有効であることも改めて実感された．

U-Mart 2001 では Pre U-Mart 2001 の経験を踏まえ，U-Mart を用いたより本格的な研究を支援するためにエージェントのプログラムと説明文書の事前提出を求め，シンポジウムに先だって現物価格や乱数の系列を変えた実験を行いその結果を取りまとめて報告するとともに，事前実験で優秀成績を示したエージェントに絞り，人間による取引も加えて当日，会場でデモンストレーションを行った．U-Mart 2001 については今後，参加エージェントのすべてのプログラムや実験結果などを整理して提供して行く予定である．

6 U-Mart の教育面での利用

研究プログラムとして進めて行く過程で，U-Mart システムは経済学，工学の両分野での教育に極めて効果的な教材となることが理解されてきた．そして実際に U-Mart を用いた教育がいくつかのサイトで実践されている[†3]今後，教材としても利用しやすい形でドキュメントやソフトウェアの積極的な提供を進めて行く予定である．

6.1 経済学系分野での利用

経済学系 (経済学，経営学，商学などの学部，大学院) の分野では U-Mart は

- 市場が個々の取引エージェントの行動により形成されるという基本的な概念を実験的に示すことができる，
- 金融市場，とくに金融派生商品 (デリバティブ) 市場の考え方や制度を体験的に理解することができる，
- 個々のエージェントの戦略や行動が市場に与える影響を体験することができる，

などの点で有効な教材である．

利用方法としてはもっぱら学生自身が (公開実験などで提供されたエージェントとともに) 市場取引に参加するゲーミング・シミュレーションが用いられる．京都大学の事例は文献 [10] に紹介されている．また，ある程度，数式や計算機に馴染みさえあれば自ら U-Mart システムを用いてソフトウェア・エージェントを構成することも社会科学系の学生でも十分に可能である．

6.2 工学系分野での利用

一方，U-Mart は情報工学系の分野での教材としても

- 学部レベルの初級プログラミングの課題，
- 大学院レベルでの予測，学習，適応，最適化アルゴリズムやエージェントシミュレーションそのものの学習，
- 工学系の学生に経済学や金融の紹介，

などに有効である．

とくにプログラミングの課題としては，

†3 U-Mart による授業が実施されたサイトとしては経済学系では京都大学経済学部/大学院経済学研究科，大阪市立大学経済学部，大阪産業大学経済学部，筑波大学大学院経営政策科学研究科，中央大学商学部など，工学系では徳島大学工学部，東京工業大学大学院総合理工学研究科，東京大学工学部などである．

- 自らの知識やスキルのレベルに応じた取り組み,
- 自らの着想をプログラムコードとしての実現,
- 事前の予想のもとに作成したプログラムの実際の複雑な環境での動作の確認,

といった点で主体的に学習できることが通常のプログラミングの演習とは異なる点であり，機械系の学科などで見られるロボットコンテストと同様の効果を持っている．また U-Mart のエージェント開発は個人の単位で比較的短期間に取り組めるためカリキュラム編成上も扱いやすい.

7 おわりに

U-Mart は情報通信革命のもとでの社会経済システムのデザインという研究対象の重なりを意識し，経済学と工学の共同研究の場としてエージェントシミュレーションのテストベッドを提供する試みとして始められた研究プログラムである．U-Mart は当初の予想以上に多くの方々に関心を持って頂いたり，教育面で極めて効果的な教材となり得ることの発見など当初の予想を上回る成果を挙げている.

一方で，実際に安定に稼働するシステムを構築し，多くの方々の協力を得て多様な戦略を持つ取引エージェントを構成することなどはようやく本格的な研究レベルの分析に着手できるところまでたどりついたという感がある．今後，研究のプログラムをより明確，具体的なものとして進めて行く予定である.

U-Mart 自身は金融市場を例にテストベッドを提供しようという試みであるが，その経験からもエージェントシミュレーションは社会科学の広範な領域で新しい研究アプローチとなり得ると期待できる．しかし，それは，モデリング，シミュレーション，分析などすべての面において従来の社会科学の理論研究や実証研究とも，また自然科学の応用という考え方に重心を置いて来た工学の研究とも異なった発想や行動規範が求められる．このような点を明確にしつつ有効な学際研究を進めて行くことがこの方向の研究を成功に導く鍵となるであろう.

最後に大阪市立大学 塩沢由典 教授をはじめ U-Mart 研究会に参加されている皆様に感謝の意を表します.

参考文献

[1] 塩沢由典:「複雑系経済学入門」，生産性出版 (1997)
[2] 高木, 木嶋, 出口他 :「マルチメディア時代の人間と社会」，日科技連出版 (1995)
[3] 出口:「複雑系としての経済学」，日科技連出版 (2000)
[4] Robert Axelrod: The Complexity of Cooperation — Agent-Based Models of Competition and Collaboration, Princeton University Press (1997)
[5] 塩沢由典：進化経済学の可能性としてのバーチャル市場の参加型シミュレーション提案，進化経済学会第 3 回大会予稿集，(1999.3)
[6] 和泉，植田：人工市場入門，人工知能学会誌 **15**-6, pp. 941-950 (2000).
[7] 佐藤，高安：統計物理から見た人工市場,，人工知能学会誌 **15**-6, pp. 958-965 (2000).
[8] 塩沢 , 出口 , 喜多 , 寺野 , V-Mart 研究の目指すもの，SICE システム情報部門合同シンポジウム 99, 169/174 (1999)
[9] 佐藤，福本 , 廣岡 , 久保 , 生天目 , 人工市場のシステム構造，人工知能学会誌 **15**-6，pp. 974-981 (2000).
[10] 佐藤 浩, 松井 啓之, 小野 功, 喜多 一, 寺野 隆雄: オープン型人工市場におけるエージェントの戦略と市場の挙動 (Pre U-Mart 2000 実施報告) SICE 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 203-208 (2001).
[11] http://www.u-mart.econ.kyoto-u.ac.jp/ キャピタル (1998).
[12] Hiroshi Sato, Hiroyuki Matsui, Isao Ono, Hajime Kita, Takao Terano: U-Mart Project: Learning Economic Principles from the Bottom by both Human and Software Agents, Proc. of the 1st Int"l workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems, Matsue, pp. 59-66 (1991).

エージェントシミュレーションによる「チープ・トーク」モデルの拡張

小山 友介

1　やや長い前書き：社会科学のエージェントシミュレーション

社会科学のエージェントシミュレーションは、個々のエージェントが環境を認識して意思決定をする多主体複雑系特有の相互作用の難しさ (出口 [4]) をどうモデル上で実現し、分析するかが課題となる。モデル上で実現する方法および分析対象は広範囲にわたり、明確な基準はない。単純な指標として、モデル内の「エージェント数」とモデルと個々のエージェントの行動原理の「複雑性」(これも定義が厄介な基準である) の積を考えてみるとわかりやすい。指標の大きさが水準以上に達する現象を分析の対象にしていると言っていいだろう。もし指標の大きさが明確に定義できれば、指標の大きさそのものが「研究フロンティア」の位置を示していると考えてよい。

この視点からは、社会科学のエージェントシミュレーションの研究は「エージェント数」と「複雑性」を両極にした研究フロンティア上に位置する事になる。可能な限り行動原理をシンプルにしてエージェント数を増やし、多数のエージェントによる相互作用から発生した創発現象を研究する経済物理学が一方の極である。もう一方の極は、コンピュータを用いたエージェントシミュレーションではないが、実際の人間数人が複雑な現象について行うゲーミングシミュレーションを挙げる事ができるだろう。

これまで社会科学のエージェントシミュレーションが採用してきた研究パラダイムは、Axelrod [3] が主張した KISS 原理 (Keep it simple and stupid) である。経済物理学で扱うような数万エージェントは扱わないが、数十〜数百のエージェントを扱うために、行動原理はできるだけシンプルにし、相互作用のあり方もできるだけ単純なものに限定する。エージェントが相互作用する空間は用意しないでランダムマッチングにするか (Axelrod [3] や多数の生態学からの派生モデル)、セル型の空間内での近隣間相互作用に限定する (Epistein [5]、Gaylord et.al [7] など) か、市場タイプの相互作用のみに集中する (Arthur [1] など) と言った形でモデル自体の複雑性をできるだけ減らすようにしていた。こういった事情で、社会科学のエージェントシミュレーションのほとんどは、Axelrod [3] に始まる GA(遺伝アルゴリズム) 系とシェリング [9] に始まるセル系、Arthur [1] に始まる人工市場 (ここに経済物理学も含まれる) に分類する事ができる。

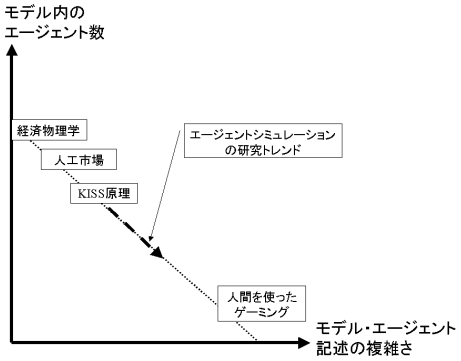
KISS 原理に基づく多数のエージェントによるシンプルな相互作用モデルの研究は、研究から得られる成果が減少しつつあるため、今後はエージェント数が少なくてもより複雑な相互作用を行うモデルへと研究トレンドがシフトしてゆく事が予測される (図 1)。このような複雑で具体的なモデルを構想するにあたっては、実際の現象や実験データ、ゲーミングから得ら

The extention of the 'cheap-talk' model in the agent simulation

Yuhsuke Koyama, 日本学術振興会特別研究員・京都産業大学客員研究員, Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, Visiting Fellow of Kyoto Sangyo University

koyama@cc.kyoto-su.ac.jp / yus@ma1.seikyou.ne.jp , http://ha1.seikyou.ne.jp/home/yus/index.html

図 1　研究トレンド



れた知見などからモデルの構想力を豊富にする事が必要である。最終的に一番重要なのは、研究の蓄積やモデリング手法のブレークスルーによって、研究可能フロンティアを図 1 の右上方向に広げる事である。そのためには、技術に比較優位を持つ工学系と、ビジョンや知識に比較優位をもつ社会科学系の共同研究が今後ますます重要になってくるだろう。

2　協力発生の難しさ

2.1　事前コミュニケーションの重要性

ゲーム理論の囚人のジレンマ (表 1) の例で有名なように、見知らぬ他人と協力する事は難しい。自分の利益を最大化する個人を仮定すると、ジレンマ状態では協力は発生できない (ワンショット・ゲームでのナッシュ均衡)。同じゲームが繰り返され、将来利益の割引評価率が十分大きければ、協力状態もありうるが、協力の発生には (比喩ではなく、本当に) 無限回の繰り返しが必要である (フォーク定理)[†1]。

表 1　囚人のジレンマ

		プレーヤー B	
		協力	裏切り
プレーヤー A	協力	(3,3)	(0,5)
	裏切り	(5,0)	(1,1)

†1　繰り返し囚人のジレンマと協力の発生については、Axelrod [2] が今でも基本文献である。社会心理学者による議論は山岸 [11]、社会学者による議論は盛山他 [13]、経済学者による議論は松島 [8] を参照。

理論的なフレームワークを離れて、人間による囚人のジレンマ実験の結果 (Frank [6]) をみてみよう。質問紙調査の結果によると、過半数の被験者が「相手が協力的に行動する確信があれば、自分も協力的に行動する」と答えている。実際の実験結果では、相手との選択前コミュニケーションを被験者に許可した場合、許可しない場合に比べて協力を選択する確率は大きく上昇する。さらに、「お互いに裏切らない」という (拘束力のない) 約束を許可されている場合、約束ができない場合より協力の選択率は高くなる。この結果は、実際の行動前にコミュニケーションがとれ、相手が協力する確信を得られれば、協力が起こりやすくなる事を示している。

2.2　「チープ・トーク」による相手の情報の収集

実際の現実世界では、ジレンマ状態の相手と約束が可能とは限らない。コミュニケーションできない場合も多い。しかし、われわれは直接コミュニケーションが不可能でも、何らかの形で相手の情報を収集し、また、無意識のうちに自分の情報を発信している[†2]。このことがコミュニケーションに準ずる効果を挙げている。

「ゼロコストもしくは無視可能な低コストでの相互情報交換」を、ゲーム理論ではチープ・トーク (Cheap Talk) と呼ぶ。チープ・トークで得る情報は、直接コミュニケーションが難しい実際の社会で協力が発生するために、非常に重要な役割を果たしている。

2.2.1　チープトークによる社会秩序の変化の例：Secret Handshakes

ここで、チープ・トークを用いた Secret Handshakes と言う簡単なモデルを考えてみよう[†3]。多数のプレーヤーの一群の中からランダムに 2 名がマッチングされ、ゲームを 1 回プレイする。利得行列は表 2 を用いる。

利得行列 (表 2) にはナッシュ均衡が 2 つある。

†2　話し方や服装、しぐさなどの「自分がその場にいるだけで近くの人に伝達される情報」の量は膨大である。無意識に相手から収集する情報、こちらが発信する情報は意外に多い。

†3　詳細は Weibull [10] 参照。

表 2　コーディネーション・ゲーム

		プレーヤー B	
		選択肢 A	選択肢 B
プレーヤー A	選択肢 A	(3,3)	(0,0)
	選択肢 B	(0,0)	(1,1)

{ 選択肢 A, 選択肢 A} と { 選択肢 B, 選択肢 B} である。それぞれを均衡 A と均衡 B と呼ぶとき、均衡 A が均衡 B をパレート優越 (全員の利益が上回る状態) している。

プレーヤー群全体が選択肢 B を採用している状態、すなわち社会状態が均衡 B の場合、たとえ均衡 A の方が望ましい事がわかっていても、(利得を得るためには) プレーヤーは選択肢 B を選ばざるを得ない。すなわち、社会状態が均衡 B の時には選択肢 A は進入不可能[†4]である。

このとき、プレーヤー群の一部が突然変異を起こしたとしよう。一部のプレーヤーは行動を選択する前に、一部の突然変異を起こしたプレーヤーのみにわかるメッセージ μ を出す。変異プレーヤーは、相手からメッセージを受け取った時のみ (すなわち、相手も自分と同種である事を確認できた時のみ) 選択肢 A を選択し、それ以外のときは選択肢 B を選択する。事前にメッセージを交換するこの戦略は均衡 B の中に進入可能であり、徐々に環境内で勢力を増し、環境全体を均衡 A へと移行させることが可能である。チープ・トークによって社会状態が良くなる方向へと移行させる事が可能になるのである。

しかし、Secret Handshakes モデルは囚人のジレンマではなく、コーディネーション・ゲームである。行動主体に利益最大化行動を仮定している限りでは、チープ・トークが可能であっても、囚人のジレンマ (およびその多人数版の社会的ジレンマ) を解消する事は原理的に不可能である。Secret Handshakes モデルでは複数のナッシュ均衡状態から望ましい均衡へと移行させる事はできても、ナッシュ均衡戦略以外の行動をとらせることはできない。

†4　選択肢 A も選択肢 B も進化安定戦略 (Evolutionary Stable Strategy:ESS) である。進化安定戦略についての詳細は、前述の Weibull [10] を参照。

ジレンマ状態で協力を発生させるには、先ほどの実験の結果で見受けられるような何らかの先験的な協力性向を想定し、短期的な利益最大化 (いわゆる合理性) の仮定を外す必要がある。節を変えて、より現実的な方向への議論の拡張を試みてみよう。

2.2.2　「社会的知性」

チープ・トークによって Secret Handshakes モデルのような明瞭なメッセージを交換することは、現実では難しい。通常は、相手から受け取った不明瞭なメッセージを解釈する必要がある。いわゆる「鈍感な人」が多数いる事からわかるように、メッセージの解釈能力には個人差がある。この「メッセージの誤解」も考慮に加えると、チープ・トークはノイズが非常に多く、使うのが大変なコミュニケーションである。

さらに、相手を利用して自分が得をしようと考えている人も多数存在する。いわゆる詐欺のように、コミュニケーションを逆に利用して相手に信用させ協力させ、裏切ると言う可能性もある。チープトークで得た「情報」を受信した側で適切に解釈できるかどうかは、協力が発生できるか否かだけではなく、迂闊に悪人を信頼してしまって自分が「食い物」にされるか否かと言った、より根源的な場面で重要である。

この「誰が信頼できるか」を見抜く能力を、山岸 [12] では「社会的知性 (social intelligence)」と呼んでいる。「社会的知性」が高い人ほど、裏切られて利用されかねない環境で協力的な人とそうでない人を見抜き、協力的な人を信頼する能力が高い。実験の結果からも、われわれの日常経験からも、「相手が協力的なら協力的にふるまう」人が社会に (それなりに) 多数存在する事はわかっている。こういった協力的で社会的知性が高い人同士がチープトークで情報交換しあうことで、社会内では協力が発生しているという「お話」を、われわれは想像する事ができる。

2.3　本研究の目的

山岸 [12] によると、他者を信頼する傾向が強い人は相手が信頼できる人 (＝協力してくれる人) を見抜く能力が強く、社会内に協力できる人を見つけ、ネットワークを広げてゆける人である。一方、社会的知性が低い人は、信頼できる人を見つけ出す能力が低いの

で、すでに存在している協力のネットワークにしがみつく (コミットメント状態) 以外できない人である。

山岸 [12] の知見は質問紙調査と実験から得られたものである。この現象をエージェントシミュレーションで再現を試み、エージェント間の相互作用によって他の収束がありうるかを探る事が本研究の目的である。

3　モデル

3.1　内容

n 人のプレーヤー[†5]によるグループを想定する。各プレーヤーに社会的知性、倫理度 (自分から裏切らない性向。Axelrod [2] の意味での「上品さ」)、基本信頼度 (初対面の相手に対する信頼度)、信頼の修正速度をエージェント固有パラメータとして用意する。毎回ランダムに 2 人をマッチングさせ、ゲーム (後述) をプレイする。ゲーム後相手への信頼度を修正し、双方協力の場合には他プレーヤーの情報を交換し合う。このプレイを繰り返す。

ゲームは 2 プレーヤー・3 × 3 の対称ゲームである。利得行列は表 3 である。表 3 の利得行列の純粋戦略ナッシュ均衡は M,M であり、ESS でもある。各プレーヤーは積極的に相手と協調し高い利益を得ることを目指す協調行動 C、C を選択する相手を利用して高い利益を得ようとする D、相手と積極的に関係を持たない選択肢 M という 3 つの選択肢を持っている。

表 3　チープ・トーク・ゲーム

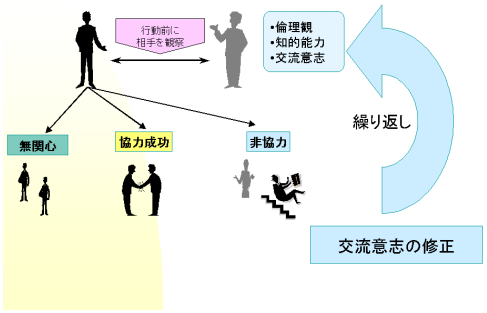
		Player 2		
		C	M	D
Player 1	C	(30,30)	(10,13)	(0,50)
	M	(13,10)	(16,16)	(13,10)
	D	(50,0)	(10,13)	(5,5)

プレーヤー i は以下のパラメータを保有する。I_i,E_i,R_i,V_i は 0 から 100 の整数である。

- 知性 I_i：大きいほどゲームをプレイするときに相手の協力度 (後述) を正確に推測できる。
- 倫理 E_i：大きいほど各プレイで協力行動を採用する確率が大きくなる。
- 信頼度 R_{ij}：相手が協力行動を取る信頼度。初対面時はデフォルト (R_i) で、毎回のプレイ毎に修正する。
- 信頼度修正速度 V_i：大きいほど相手のプレイ結果に従って信頼度 R_{ij} が大きく変化する。
- 履歴：各相手のプレイ回数、相手が C を出した回数、D を出した回数を記録する。

一回のマッチングで、以下の一連の行動が行われる。これを繰り返す (図 2)。

図 2　チープトークゲーム



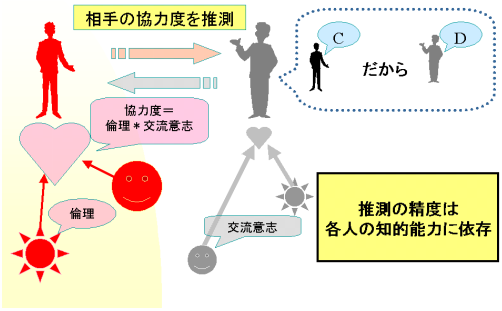
1. プレイする 2 プレイヤーを n 人からランダムに選ぶ。
2. 行動前に相互に観察し、相手の協力性向 (後述) を推測する。推測の精度は自分の知性 I_i に依存する。
3. 読み取った結果を元に自分の行動 (C,M,D) を決定する。行動の結果、得られる利得が双方に与えられる。
4. プレイ後、相手への信頼度を修正する。修正度合いは信頼度修正速度 V_i に依存する。
5. 二人の行動がともに協力 (C,C) の場合、評判情報 (後述) を交換し、信頼度を修正する。

†5　ゲーム理論の慣例に従い、エージェントではなく「プレーヤー」と書くことにする。意味に違いはない。

3.2　行動決定およびパラメータ修正方法

ゲーム中の行動決定では、(モデル内で定義する) 協力性向の大小で決定する。協力性向が大きい時は、相手が裏切らない限り協力を試みる。小さい時は、相手に対し攻撃的でスキがあれば利用しようとし、相手の利得を下げるには若干のコストも平気[†6]である。

図 3　行動決定



選ばれた 2 プレーヤーを $i, j(i > j)$ とする。1 から 100 までの整数値をとる乱数を $RAND100$ とする。プレーヤー $\alpha(= i, j)$ が相手の意図を読み取ろうとする行為を S_α であらわす。

1. 自分の倫理 E_i から $RAND100$ を引き、相手への信頼度 R_{ij} を掛け合わせたものを自分の協力性向 X_i とする。

$$\begin{cases} X_i = (E_i - RAND100) \cdot R_{ij} \\ X_j = (E_j - RAND100) \cdot R_{ji} \end{cases} \quad (1)$$

2. 相手の X を推測したものを Y とする。

$$\begin{cases} Y_i = S_i[X_j] \\ Y_j = S_j[X_i] \end{cases} \quad (2)$$

Y の推測は 2 段階で行う。

(a)　X_j の符号を推測する。最大推測誤差は $50 + I_i/2\%$。すなわち、知性が 100 の時は完全に把握できる。

(b)　相手の X_j の実値を $\pm(100 - I_i)\%$ の精度で推測する。$I = 70$ のときは推測値は X_j の 70% から 130% である。

3. 相手の Y_j を推測したものを Z_i とする。推測方法は 2 と同様とする。

$$\begin{cases} Z_i = S_i[Y_j] \\ Z_j = S_j[Y_i] \end{cases} \quad (3)$$

4. Y_i と Z_i を表 4 と照らし合わせ、相手の行動 A_j を推測する。

表 4　相手の行動の推測

Y_i \ Z_i	300～	-300～300	～-300
300～	C	M	M
-300～300	C	M	M
-300	D	D	M

5. X_i および A_i を表 5 と照らし合わせ、自分の行動を決定する。

表 5　自分の行動の決定

X_i \ A_i	C	M	D
300	C	M	M
-300 300	C	M	M
-300	D	D	M

6. プレイ後に今期 t の現在の相手への信頼度を $R_{ij,t}$ を修正する。

$$R_{ij,t+1} = \left(\frac{(1 - V_i)}{100}\right) \cdot R_{ij,t} + kV_i \quad (4)$$

k は相手が C を選択時は 1、M では 0.6、D では 0 とする。

7. 双方の行動が (C,C) の場合、情報を交換し、信頼度を以下の手順で修正する。

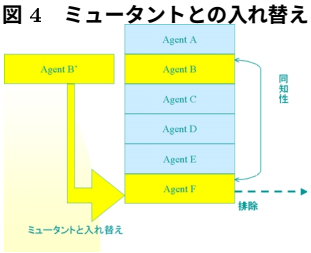
(a)　双方が過去のプレイの履歴から、C を採った回数が D を採った回数より多かった相手プレーヤーのリストを作成する。

(b)　リストを相互に交換し、そのリスト内の相手への信頼度を実際にプレイした場合と同様に (下方に) 修正する。

†6　実験では、相手より自分の利得を大きくしたい、という行動 (Spite 行動) を取る人が存在する。この仮定はそれに倣ったものである。

8. ゲームを一定回数繰り返すごとに、マッチング一回当たりの利得が最も低いプレーヤー a をミュータント (突然変異) と入れ替える (図 4)。

図 4　ミュータントとの入れ替え



ミュータントは、プレーヤー a と同知性の中で (I_a が同じ) 平均利得が最高のプレーヤー b のいくつかのパラメータを (最高 100、最低 0 の範囲内で)±5 以内でランダムに変化させたものである†7。

このモデルを計算機実験するためのプログラムは、Mathematica3.0 で†8書かれた。

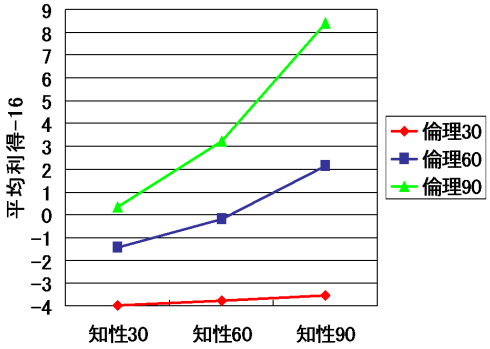
4　実験結果 (1) 同一知性グループ・学習速度一定

4.1　一般的な傾向

最初に、解析の比較的容易な少人数で実験を行った。実験で共通するパラメータは、人数 $n = 5$、初期信頼度 $R_{ij} = 80$、信頼度の修正速度 $V_i = 15$、マッチング回数 30000 回である。知性 I_i と倫理 E_i はそれぞれ高 (90)，中 (60)，低 (30) の 3 水準を用意し、$3 \times 3 = 9$ 通りを調べた。各水準 3 回繰り返し、計 27 回の実験を行った。

各水準でマッチング 1 回あたりのプレーヤーの平均利得を計算した結果を図 5 に示す。(M,M) の場合の利得が 16 であるため、縦軸は平均利得から 16 引いた値である。縦軸の値が負の場合は、協力関係が発生しなかったことを示している。知性水準と倫理水準が高いと利得も高くなる傾向があり、双方が高水準なほど利得上昇幅が大きくなることがわかる。知性、倫理、知性 × 倫理 (交互作用) の利得への効果は、それぞれ 5%水準で有意である。

図 5　実験結果 (1-1)

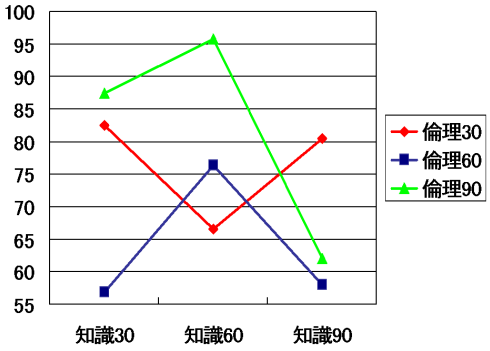


4.2　簡単な学習を導入した結果

次に、簡単な学習を導入した場合の実験を行った。マッチング 3000 回 毎に 1 プレイの平均利得を計算し、下位のプレーヤー 2 人と最上位の初期信頼度 R_b と修正速度 V_b を変化させたミュータントとの入れ替えを 100 回繰り返した。実験スタート時のパラメータは前回の実験に準ずる。

利得は前回と同じ傾向が得られた。修正速度は各水準の変化に対して有意の結果が得られなかった 。初期信頼度が検定をくぐり、興味深い結果が得られたので紹介する (図 6)。初期信頼度は知識の上昇に伴って、低倫理時には V 字型、中および高倫理時には逆 V 字型の曲線になる。

図 6　実験結果 (1-2)



†7　知性を保ったまま GA 風の学習を行うのは、「高知性は高知性なり、低知性には低知性なりの戦略」が出現するか調べるためである。

†8　Gayord ?[] を参考にした。

5　実験結果 (2) 知性混合グループ・修正速度も学習させた時

グループ内に知性の異なるメンバーが存在し、修正速度も学習させた場合を考えてみよう。$I = 90$(高知性) と $I = 30$(低知性) のプレーヤーを用意し、その他のパラメータの初期値は $E_i = 60, R_i = 80, V_i = 15$ で共通にした。ゲーム 45 回 を 1 セットとし、セット終了時に 1 マッチング辺り利得が最下位のプレーヤー a と最高のプレーヤー b の E_b, R_b, V_b を変化させたミュータントとを入れ替える作業を 10000 回繰り返した (ゲーム 45 万回が 1 実験である)。調べた条件は、表 6 の通りである。

表 6　実験のうちわけ

	低知性	高知性
実験 2-1	6 人	
実験 2-2	4 人	2 人
実験 2-3	2 人	4 人
実験 2-4		6 人

5.1　発生した戦略の分類

4 通りの実験をから発生した戦略を全て取り出して分類すると、表 7 のようになった。

表 7　発生した戦略

	倫理	初期信頼	修正速度
協力 & 警戒 (WR)	高	高	高
2 度目に期待 (ES)	高	低	高
蜜月 (HM)	高	高	低
Hit & Run(HR)	低	高	高
交渉拒否 (RC)	任意	低	低

それぞれの戦略の具体的な特徴は、以下のようになる：

- 「二度目に期待」型 (ES)：高倫理、低初期信頼、中〜高修正速度 。自分からは裏切らないで一度様子を眺め、相手が裏切らなかった場合には、一気に友好的になる。
- 「蜜月」型 (HM)：高倫理、高初期信頼、低修正速度。最初から積極的に協力し合い、少々の失敗では相手への信頼が揺るがない。
- 「協力 & 警戒」型 (WR)：高倫理、高初期信頼、高修正速度。最初から積極的に協力を求めるが、相手の出方次第でさっと引いてしまう。Axelrod [2] の「しっぺ返し (Tit For Tat)」に近い戦略。
- 「Hit and Run」型 (HR)：中〜低倫理、高初期信頼、高修正速度。交流を行う相手には裏切り、相手が攻撃的になったらすぐに交流を止める。
- 「交渉拒否」型 (RC)：低初期信頼、低修正速度。初期信頼を低い水準でずっと保つ戦略。倫理は中 (50 前後) から低い事が多いが、基本的にはどんな値でも構わない。

基本的に、上の 3 つが協力が成功した場合、下の 2 つが協力が失敗した場合と言っていいだろう。戦略としてかなり優秀なのは ES と WR で、この 2 戦略は協力を形成する事が可能であるのに加えて、相手にだまされつづける事がない。双方の違いは初対面の相手への積極性にある。HM は HM ばかりが仲間にいる場合にはノイズに対する耐性が強いため協力形成に有利だが、相手が HR の場合には延々と搾り取られる可能性がある。

やや例外なのは RC で、「成功もしないが失敗もしない」戦略である。相手を信頼しない状態を保つ戦略で、行動決定には倫理はほとんど関係ないが、戦略が RC に固まるまでには多数裏切り・裏切られた経験をもつ (＝協力を出さないように相互に学習しあう) ので、周囲の倫理は低くなっている場合が多い。

5.2　それぞれの実験での結果

次に、それぞれの実験の結果を見てみよう (表 8)。

グループが全て同じ知性で占められている場合 (実験 2-1・2-4) では過半数が協力に成功 (＝戦略が HM,ES,WR) している。その点では、同質的なグループで協力が発生する／しないと言う視点からは知性は大きな影響を与えていない事がわかる。

しかし、発生した戦略をくわしく眺めると、低知性

表 8　実験結果 (2)

	2-1	2-2		2-3		2-4
	低	低	高	低	高	高
1	RC	WR	RC	ES	HR	HR
2	HM	WR	WR	ES	RC	HR
3	ES	HR	HR	RC	ES	WR
4	ES	HR	HM	ES	RC	WR
5	RC	HR	WR	HR	WR	HR
6	ES	ES	HM	ES	ES	HM
7	ES	ES	HR	WR	ES	HM
8	ES	HR	HR	RC	RC	HR
9	HR	HR	HR	RC	ES	WR
10	ES	HR	HM	HM	WR	HM

の場合 (実験 2-1) では ES がほとんどであり、協力の形成に慎重である。また、一方、高知性の場合 (実験 2-4) では WR[†9] と HM が 3 回づつであり、積極的に協力行動を採る事が見受けられる。

グループが低知性と高知性に分かれている場合 (実験 2-2・2-3) では、協力発生が非常に難しくなっている。加えて、協力失敗の現れ方が異なっている。

低知性者が多数派の実験 2-2 では、双方が協力的な戦略となった事例が少ないだけでなく、HR が多数発生しており、協力的な人間を騙して利益を得ようとする事例が多数発生している事がわかる。高知性者が多数派の実験 2-3 では、HR ではなく RC が多数発生しており、コミュニケーションを閉ざす事で「万人の万人に対する闘争状態 (ホッブズ)」を回避する方向に進化している。また、実験 2-2・2-3 の双方ともに、協力的な戦略を採用しているのは高知性者が多い。

6　結論と課題

今回の実験では、知性の高低の区別なくエージェントは協力を試みるが、協力へのアプローチの仕方に違いがあった。社会的知性の高低は、環境へのノイズ (突発的な撹乱) に適切に対処できる能力、と考えることができる。低知性者のノイズへの対処が低さが、ES や RC の発生頻度として現れた、といえよう。

今回のモデルを 5 人 (実験 1)・6 人 (実験 2) と言った少人数で分析した理由は、最初にモデルの傾向を調べるためという側面もあったが、実行速度の制約も存在したためである。平均マッチング回数を同程度に保ったままモデルの人数を増やすと、1 ループに必要なマッチング回数が大きく増加するだけでなく、収束までに必要なループ数も増大する。現在の Mathematica 環境では高速化に限界があるので、高速な言語への移植は不可避である。

モデルの不要部分の簡素化と実行の高速化を行う事で、モデル内記述の豊富化と多人数でのシミュレーションの実現を可能にする事が、今後の課題となるだろう。

†9　山岸 [12] 内では「他の相手を『信頼』する人は社会的知性が高く、相手の行動から相手への信頼度をすばやく修正できる」と議論されている。WR がこの議論に最も近い。

参考文献

[1] W.Brian Arthur, J.H. Holland, B. LeBaron, and P Tayler. Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. In *The Economy as an Evolving Complex Systems II*, pp. 15–44. Addison-Wesley Publishing, 1997.

[2] Robert Axelrod. *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, New York, 1984.

[3] Robert Axelrod. *The Complexity of Cooperation*. Princeton University Press, Prinston, New Jersey, 1997.

[4] 出口弘.『複雑系としての経済学』. 日科技連, 2000.

[5] Joshua M. Epistein and Robert Axtell. *Growing Artificial Societies*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.

[6] Robert H. Frank, Thomas Gilovich, and Dennis T. Regan. Does studying economics inhibit cooperation? *Journal of Economic Perspectives*, pp. 159–71, 1993.

[7] Richard J. Gaylord and Louis J. D'Andria. *Simulating Society*. Springer-Verlag, New York, 1998.

[8] 松島斉.「過去、現在、未来：繰り返しゲームと経済学」. 伊藤元重, 岩井克人（編）,『現代の経済理論』. 東京大学出版会, 1994.

[9] Thomas C. Schelling. *Micromotives and Macrobehavior*. Norton, New York, 1978.

[10] Jörgen W. Weibull. *Evolutionary Game Theory*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1995.

[11] 山岸俊男.『社会的ジレンマの仕組み』. サイエンス社, 1990.

[12] 山岸俊男.『信頼の構造』. 東京大学出版会, 1998.

[13] 盛山和夫, 海野道郎（編）.『秩序問題と社会的ジレンマ』. ハーベスト社, 1991.