

人工市場と実験市場の出会い：模擬トレーディング 実験による新しいエージェントモデルの提唱

中村 茂雄, 和泉 潔, 植田 一博

1. はじめに

資産運用やトレーディングという言葉が身近なものになってきており、株式の売買のみで生計をたてる個人のデイトレーダーなども増えてきている。しかし、資産運用のプロであるヘッジファンドや保険会社さえ、近年の株式市場や外国為替市場の複雑で激しい変動に対処できず、破綻した会社がいくつもある。このような現実の市場における複雑な変動は、従来の経済理論で説明することは困難であると言われている。

それに対して近年では、計算機上に仮想的な市場参加者の役割をするコンピュータプログラムを作り、これらのコンピュータプログラムが自由に取引する仮想市場上での実験に焦点を当てた人工市場研究が、多くの研究者の注目を集めている（和泉, 植田[1]）。人工市場研究の目的は、バブル現象のような現実の市場で見られる複雑な現象を再現し、その要因を解明することである。本稿ではより現実に近い人工市場を構築するためのアプローチとしての、模擬トレーディング実験を紹介し、人工市場研究との関連性について検討を行う。

2. 人工市場モデル

人工市場は仮想的な市場参加者の役割をするコンピュータプログラムが多数集まった、コンピュータ上の仮想市場である。コンピュータプログラムは、各々が自律的に取引や学習といった行動をとるエージェントである。

なかむらしげお

東京大学大学院 総合文化研究科

〒153-8902 目黒区駒場 3-8-1

いずみ きよし

産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター, さ

きかけ研究 21

〒135-0064 江東区青海 2-41-6

うえだ かずひろ

東京大学大学院 情報学環・学際情報学府

〒153-8902 目黒区駒場 3-8-1

2.1 人工市場モデルの枠組みと成果

本稿では和泉と植田[2~4]が構築した人工市場モデルをもとに議論を行っていく。彼らの人工外国為替市場では、知覚・予想形成・戦略決定・学習からなる一連の情報処理プロセスを持った複数のエージェントがバーチャルに取引をすることで、現実の市場での様々な複雑な現象の再現と分析を試みている（図1）。

和泉と植田は人工外国為替市場を構築するにあたって、まず実際の外国為替ディーラーにインタビューを行い、市場参加者各個人の行動・学習・相互作用に関する仮説の生成を試みた。その結果、ディーラーは期間によって、予想材料の組合せや重要度を大きく変化させていること、その際に他の市場参加者の考えを考慮していること、つまり、市場のコンセンサスに合わせようとしていることを明らかにした。そして、このようなディーラーの適応行動が、生物学における遺伝の枠組みを使って表せることを見出し、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）を用いてエージェントの学習ステップを実装した。

この人工市場モデルを用いて、現実の外国為替市場にみられる幾つかの創発的現象（バブル、変動分布）のメカニズムの解析や為替政策の意思決定支援システムの構築を行っている[2~4]。

2.2 人工市場とフィールドワーク

人工市場モデルを考える際に、このようなエージェントのモデルをどのように決定するのかは、人工市場のパフォーマンスに大きな影響を与える。すなわち、

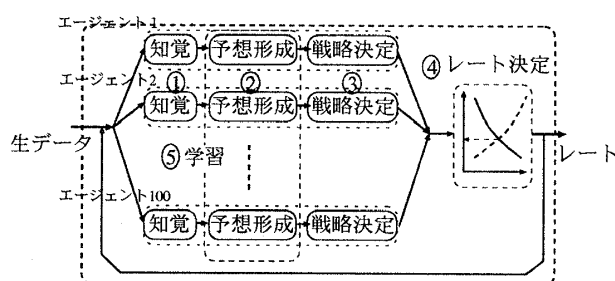


図1 人工市場モデルの枠組み

より現実に近い人工市場を構築するためには、現実の市場参加者の情報処理プロセスの分析を行い、そこから得られた知見に基づき、より現実的なエージェントを実装するというアプローチが有効であると考えられる。また、人工市場におけるエージェント同士の取引や情報交換といった相互作用をどのように行わせるのか、あるいは市場価格をどのように決定するのかといった市場構造に関しても、その現実性を考えなければならない。

より現実的で有効な人工市場モデルを構築するための手法として、我々は、現実の人間に対する観察や実験、つまりフィールドワークを採用する。フィールドワークとは、例えば実際の市場参加者へのインタビューや質問紙調査、そして人間が参加する実験などから、市場参加者の行動や思考を探ることである。その中で特に我々は、次の章で挙げるような理由により、模擬トレーディング実験が有効であると考えた。本稿では具体的な実験や分析の手順を示しながら、人工市場との関連性からの考察を解説する。

3. 模擬トレーディング実験からの示唆

模擬トレーディング実験では、現実の金融市場とほぼ同じ仕組みをもった仮想的な市場で人間同士が実際に模擬トレーディングを行う。そこで得られる市場参加者の取引ログと取引中の会話の分析 (Ericsson and Simon[5]) をすることにより、市場参加者の情報処理プロセスをより詳細に特定することが可能となる。

このような市場参加者個人の情報処理プロセスの分析については、コンピュータディーラーと取引ができるようにプログラムされたトレーディングソフトを使って、実際にディーラーに取引をしてもらおうというアプローチで Smith[7, 8] が研究を行っている。しかし、トレーディングソフトはあらかじめ市場レート変動のシナリオが設定されており、被験者の行う取引が市場の相場に影響を与えるということはない。そのため、現実の市場で見られるような投機的な仕掛けがまったく通用しない市場である。また、コンピュータディーラーと人間が行う取引では、相手との取引を通して、相手の取引動機を探る・情報交換をする・相手を出しぬくといった現実の市場で行われているような人間同士の相互作用を見ることができない。そのため、ニュースに対する反応や為替リスクの管理に関して、市場参加者個人の独立した意思決定しか分析することができない。

それに比べて模擬トレーディング実験では、市場レートは市場参加者の実際の取引によって決まり、あらかじめレート変動のシナリオは設定されていない。そのため、トレーディングソフトを使った取引よりも、より現実の市場に近い状況下における取引である。また、実際に人間同士が取引を行うため、トレーディングソフトを使った実験では分析できない市場参加者同士の相互作用についても分析が可能である。

以上のような理由から模擬トレーディング実験は、現実の市場参加者の情報処理プロセスを解明するために非常に有効なアプローチであり、そこから得られる知見は人工市場のエージェントモデルを考える際にも役に立つであろう。そこで以下では、模擬トレーディング実験で得られたデータをもとに、市場参加者の情報処理プロセスについてより詳細な分析を行った。まず初めに実験の具体的な方法を解説する。次に実験データを用いて既存の人工市場モデルにおけるエージェントの検証を行った。そして、今までの人工市場モデルのエージェントには採り入れられてなかった新たな2つの意思決定プロセスの発見を紹介し、最後にこれらの発見を人工市場モデルに実装するアイデアを考察する。

3.1 模擬トレーディング実験の枠組み

外国為替市場は、証券取引所のように1ヶ所に集中した取引所があるのではなく、市場参加者同士による分散した為替取引の集合をさす概念的なものであり、それは銀行間市場と顧客市場に大別される。このうち銀行間市場では、銀行同士による直接取引とブローカーという仲介業者を通して間接的に取引を行うブローカー取引がある。そこで、電話を使って直接取引を、電子ブローキングシステムを使ってブローカー取引を行うことができる架空の外国為替市場を構築し、実際の人間を使って模擬トレーディング実験を行った。

この模擬市場の舞台は架空の4ヶ国からなり、被験者は自国通貨を用いて3つの外貨を売買することによるトレーディング収益を競う。また、取引開始前には、その日発表される経済指標についてのアナリストのコメントが各被験者に渡され、取引中には電子ブローカーを通じて5分に1回の割合でニュースが発表される。なお、この模擬トレーディング実験は、シティバンク東京支店が主催している研修用のシミュレーションゲームであり、参加者は若手ディーラーである。年に2, 3回、25人前後の研修生が参加し、約1週間ホテルに泊り込みで午前中は外国為替に関する講義、午後は模

擬トレーディングが行われる。模擬トレーディングは参加者が二人一組でチームを作り、他のチームと取引を行ってトレーディング収益を競い合う。模擬トレーディングは30分のセッションを1日に2~3セッション行う。

この実験から得られた3つの知見について以下で紹介する。まず3.2節で、模擬トレーディング実験による既存の人工市場モデルの検証を紹介する。次に3.3節と3.4節で、模擬トレーディング実験による、既存の人工市場ではまだ実装されていない新たな発見を紹介する。

3.2 エージェントの効用関数形

和泉と植田の人工市場モデルでは、各エージェントは知覚された材料をもとにレート予想を行った後に戦略決定を行う。戦略決定とは、各エージェントが自分自身の予想を用いて、レートがいくらなら円やドルの資本をどれくらい売り買いするかを決定することである。各エージェントはドル資産保有高を評価する効用関数を持っており、この関数を最大にするような戦略、すなわちドル資産保有高が最適になるような注文を市場に出す。この際、どのような効用関数を用いるのが妥当なのであろうか。和泉と植田のモデルでは、すべての市場参加者の効用関数は式(1)のような負の指数関数であると仮定しているが、我々の実験データによりこの関数形の現実性を検証した。

$$U(W) = -e^{-\alpha W} \quad (1)$$

ただし、 U は効用関数、 W は総資本、 α は定数である。

一般に投資家の効用関数としては、2次関数型、負の指数関数型、対数型、べき関数型、調整対数型、調整べき関数型などが良く使われる。効用関数がこれらのどの関数であるかを特定するには、投資家の絶対リスク回避度 $R_A(W)$ の増減を調べれば良い (Levy [6])。

$$R_A(W) = -\frac{U''(W)}{U'(W)} \quad (2)$$

模擬トレーディング実験の参加者の効用関数の形について調べるために、参加者の絶対リスク回避度の増減を調べた。結果、実験データからは絶対リスク回避度は総資本の増減に関係なく一定であることが分かった。この条件に当てはまる効用関数は、上記の6つの関数形のうち、負の指数関数型のみである。したがって、この模擬トレーディング実験の結果からは、外国為替ディーラーの効用関数として負の指数関数型が支

持された。

3.3 複数の取引経路の使い分け

この模擬市場では、為替を取引する方法として、ディーラー同士が電話で行う直接取引と電子ブローキングシステムを使って行うブローカー取引がある。ディーラーは、電子ブローキングシステムに自分が希望するプライス（買値/売値）を入力したり、他のディーラーが出したプライスで取引することができる。各ディーラーが出したプライスのなかでベストなもの（最も安い売値/最も高い買値）が、このシステムに瞬時に反映される。したがって、電子ブローキングシステムに表示されているプライスが、その瞬間の市場のベストプライス（マーケットレート）として扱われる。ディーラーが他のディーラーを電話で呼び出して直接取引を行う時には、このマーケットレートを参考にし値付けがなされる。

実際の外国為替市場でディーラーがブローカー取引を利用するメリットとしては、ディーラーが市場のベストプライスを探しているときに、特に相手が誰であるかを意識することなく使える点が挙げられる。しかし、この模擬市場に関しては、ブローカーに注文を出すことによって自分に有利な市場操作が行えるというメリットの方が大きい。すなわち、その瞬間のマーケットレートよりも有利なプライスでブローカーに注文を出せば、そのプライスが即マーケットレートになるので、例えばその瞬間のマーケットレートよりも高い買値の注文をたて続けに出せば、マーケットレートを上げることが可能である。現実の市場では、ブローカー取引に参加しているディーラーが多数存在するため、自分の意図する通りの市場操作は容易ではないが、この模擬市場では25名程度のディーラーしか参加していないため、自分に有利な市場操作が行える場合がある。このような実験環境は、マーケットメーカーがマーケットに与えるインパクトが非常に大きい状況であり、実際の市場で流動性が極端に少ない状況や、取引量が非常に大きい市場参加者が存在している状況であると解釈できる。一方、直接取引は当事者間での取引のため、自分の売買動向が直接的にマーケットレートに反映されないというメリットがあるので、ポジション¹を大きく動かしたい時には直接取引を行うことが多い。

そこで、データを取った2チームについて、ブロー

¹ 通貨の持ち高のこと。100万単位を1本と数える。

カー取引と直接取引をどのように使い分けて取引を行っているかを調べた。その結果、一方のチームはその2つの取引を区別することなく取引を行っていたのに対して、もう一方のチームはブローカー取引を駆使して市場操作を行いながら、直接取引でポジションを大きく動かすという使い分けをしていたことがわかった。図2は、このチームの取引の一部分について、ポジションの時間変化を示したものである。縦軸がポジション、横軸が取引開始からの経過時間であり、この通貨全体のポジション変化に加えて、直接取引だけのポジション変化とブローカー取引のポジション変化も示してある。

この図をみると、このチームはこの通貨に関して最初は売りから入り、その後買い戻していることがわかる。実際、このチームはこれらの取引によってかなりの利益を上げていた。このチームの二人の会話を聞いてみると、一人が開始から360秒後に「買い戻して」と指示を出しており、指示を受けた側の人、その直後から他の銀行を続け様に呼び出し、ポジションがスクエア²になるまでこの通貨の買い戻しを行っている。その一方で買い戻しを指示した人は、自分の指示とは正反対にブローカー取引を使って大量に売り取引を行っていた。図2の直接取引・ブローカー取引別のポジション変化からもその様子が見える。彼らは自分達のポジションを大量に動かす際に、ブローカー取引を使ってマーケットメイクを行うことにより自分たちに有利に市場操作を行っていた。このように外国為替市場にはブローカー取引と直接取引という2種類の経路が存在するため、ディーラーはこれらを使い分けるといふ戦略を取る場合があることがわかった。このような

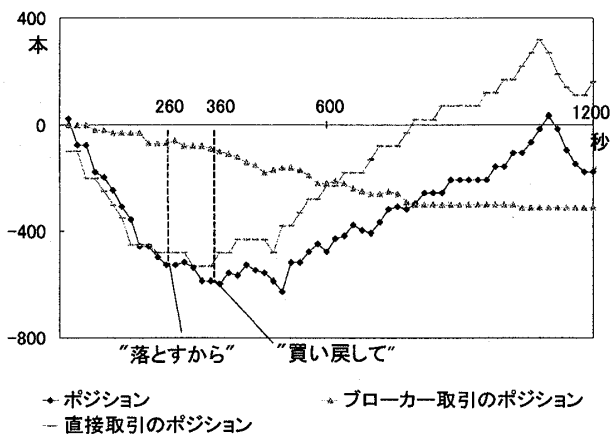


図2 ポジションの時間変化

² 買い持ちでも売り持ちでもない状態のこと。

取引経路の使い分けは、これまでの人工市場モデルで実装されていない。

3.4 リスク評価と直結した取引

相場の世界では、優れたディーラーは損切りがうまいと言われている。損切りとは、ポジションをスクエアに戻して評価損を確定し、これ以上損が大きくなるようにする行為である。通常ディーラーは損切りルールを持っており、自分の予想にもとづいてポジションを持ったが予想とは違う方向に相場が動き評価損を抱えてしまった場合に、ある一定以上の評価損が発生したら無条件に損切りを行う。

このようなディーラーの損切り行為というのは、これまで人工市場のエージェントモデルでは実装されていない。和泉と植田のモデルでは、各エージェントは自分の予想レートと効用関数にもとづきポジションを変化させているが、実際のディーラーは予想の変化が起こらなくても評価損があるレベルを越えると損切りをしてポジションをスクエアに戻してしまう。そこで、このようなディーラーの損切り行為について分析した。損切りの分析にはSmith[7,8]のリスク平面を用いた。リスク平面は縦軸にレート変化率、横軸に評価損益をとった平面であり、ディーラーの売買行動をこの2つの値によって分類すると、リスク平面は図3のような領域に分割できる。

買い持ちの時、ディーラーはレートがある一定以上の割合で上昇するとさらにポジションを買い増し、反対にレートがある一定以上の割合で下降するとポジションを手仕舞う。また評価損がある一定のレベルを越えるとレートの変動に関係なく損切ると考えることができる。図4は実際にデータを取ったチームの取引について20秒毎にリスク平面にプロットを行ったグラフである。

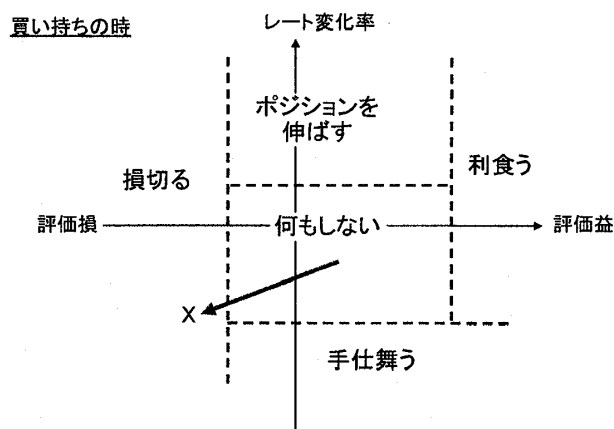


図3 リスク平面

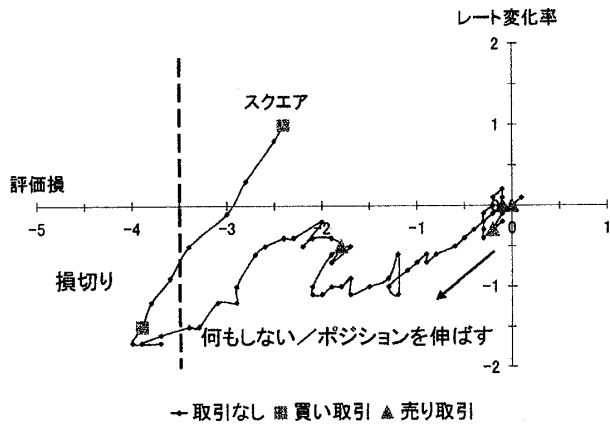


図4 リスク平面へのプロット

この図をみると、初め相場が下がるとして売りポジションをとったが予想とは逆に相場が上昇し、そのため評価損を抱えてしまい、しばらく何もせずに様子を見ていたことがわかる。しかし、その間にも評価損がますます膨れ上がったので、このチームはある限界を越えたところで一気に損切りを行った。このようにディーラーは、自分のポジションに見切りをつけると、損切りをして一気にポジションをスクエアに戻してから再度相場に挑もうとする。損切り過程では、特にニュースなどがない限りディーラーは相場の予想などを行わずに、ポジションをスクエアに戻すために取引を行っている。したがって、実際のディーラーの情報処理プロセスのより詳細なモデルを構築するためには、このようなリスク管理と直結した取引ルールをモデルに組み込む必要がある。

3.5 新しいエージェントモデルの提唱

以上の分析結果をもとに、人工市場におけるエージェントモデルの精緻化の方法を考えた。通常、エージェントモデルは、知覚・予想形成・戦略決定・学習の4つのプロセスからなる(図1)。このうち、我々は戦略決定プロセスにおいてより詳細に、リスク評価ステップと取引経路決定ステップという2つの新しい下位プロセスを提案する(図5)。

エージェントがレート予想を行った後に、その予想レートなら円やドルの資本をどれくらい売り買いするかを決定するのが戦略決定プロセスである。エージェントは最適な資産保有高に関する効用関数をもっており、この関数が最大化するように取引量を決定するとしてモデルを構築する場合が多いが、実際のディーラーは自分のポジションに見切りをつけると、そのような効用を無視していったんポジションをスクエアに戻してしまう(3.4節)。したがって、効用関数によ

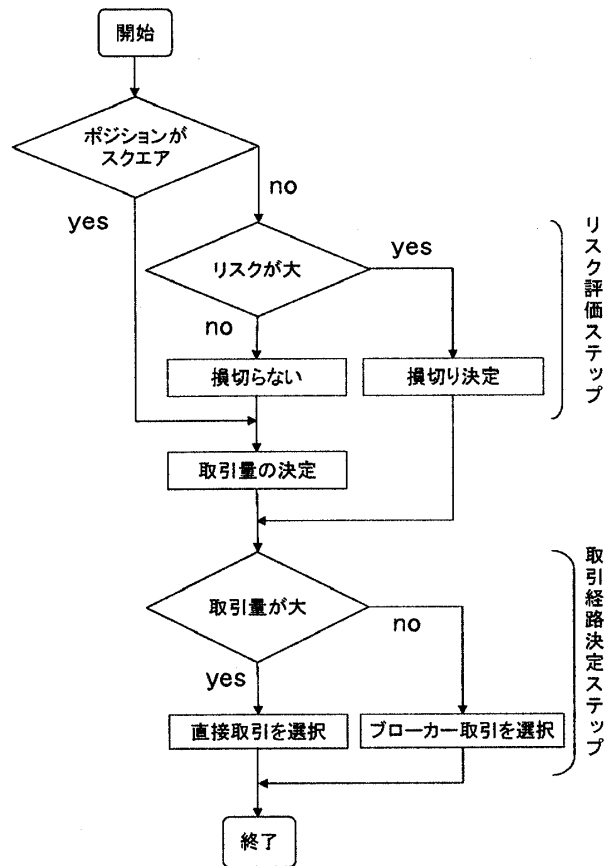


図5 戦略決定プロセス

て取引量を決定する以前に、損切るか利食うかを評価するステップが存在すると考えることができる。このステップをリスク評価ステップと呼ぶことにする。リスク評価には、例えば3.4節で用いたリスク平面などを利用することが考えられる。

リスク評価を行った結果、利食うあるいは損切ると決定した場合は、一気にポジションをスクエアに戻すため取引量は自動的に決定される。リスク評価を行った結果、損切りも利食いも行わないと決定した場合は、自分の予想レートと効用関数を使って取引量を決定する。取引量を決定した後は、その取引を行う際にブローカー取引と直接取引のどちらを使うかを決定する必要がある(3.3節)。このステップを取引経路決定ステップと呼ぶことにする。取引量が多い場合、例えば大量にドルを買うことを決定した時、ブローカー取引を使って大量にドルを買おうとすると、自分自身の取引がマーケットレートの上昇効果をもたらすため結果的に高値で買わざるを得なくなる。したがって、取引量が多い場合は、直接取引を使うことが多い。取引量が少ない場合は、ブローカー取引、直接取引どちらを使っても大差はなさそうであるが、特に相手を意識せずに取引できるという点でブローカー取引の方を

使うことが多い。また、ブローカー取引の流動性が低い場合は、自分の思惑でマーケットメイクが行うことが可能であるというメリットでブローカー取引が使われることもある。

4. まとめ

本稿では、現実の市場参加者の情報処理プロセスの解明を行うためのアプローチとしての、模擬トレーディング実験を紹介し、人工市場研究との関連性について述べた。

まず、既存の人工市場モデルで用いられているエージェントの効用関数について、その現実性を検証するために、模擬トレーディング実験によって市場参加者の効用関数の特定を行った。模擬トレーディング実験を行うことの意義の1つは、構築した人工市場モデルの現実性の検証が可能になるということである。

模擬トレーディング実験のもう1つの意義は、市場参加者同士の相互作用や市場参加者個人の情報処理プロセスの詳細について分析することにより、これまでの人工市場モデルでは実装されていない新しいプロセスの発見が可能になることである。模擬トレーディング実験の結果を分析したところ、市場参加者の戦略決定においてリスク評価ステップと取引経路決定ステップという2つの新しい下位プロセスを発見し、アルゴリズムを特定することができた。

今までの人工市場モデルでは金融価格の変動パターンや現在市場全体でどのような要因が重要視されているかといったことに対して、新たな知見を得ることができた。しかしながら、各市場参加者の具体的な投資戦略に関する示唆を得ることはできなかった。我々が模擬ディーリング実験により発見した2つの新しいプロセスを人工市場に実装し、投資戦略についてエージェントに学習させれば、例えばこういった時にはどのような投資戦略をとれば良いのかといった具体的な示唆も人工市場モデルから分析できるようになるであろう。

う。

このように模擬ディーリング実験は、人工市場研究をより具体的で現実に適用できる研究として発展させるために必要不可欠なアプローチであると我々は考えている。

謝辞 本研究を行うに際して、御協力を頂いたシティバンク東京支店に心よりの謝意を申し上げます。また、本研究に対して貴重なコメントを頂戴した、開一夫助教・内田勇輔氏・三輪宏太郎氏・山田隆志氏（いずれも東京大学）に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 和泉潔, 植田一博: “金融市場における意図せざる協調現象: 人工市場アプローチによる分析”, 植田一博, 岡田猛編「協同の知を探る」, 共立出版 pp. 199-227 (2000).
- [3] 和泉潔, 植田一博: “人工市場アプローチによる為替シナリオの分析”, コンピュータソフトウェア, Vol. 17, No. 5, pp. 47-54 (2000).
- [4] Izumi, K. and Ueda, K.: “Phase Transition in a Foreign Exchange Market: Analysis Based on an Artificial Market Approach”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation (2001, forthcoming).
- [5] Ericsson, K. A. and Simon, H. A.: “Protocol Analysis: Verbal Reports as Data”, MIT Press (1993).
- [6] Levy, H.: “Absolute and relative risk aversion: An experimental study”, Journal of Risk and Uncertainty, vol. 8, pp. 289-307 (1994).
- [7] Smith, K. C. S.: “How currency traders think about the spot market’s thinking”, In Proceedings of the 19th Annual Conference of the Cognitive Science Society, pp. 703-708 (1997).
- [8] Smith, K. C. S.: “Decision Making in Rapidly Changing Environments: Trading in the Spot Currency Markets”, PhD thesis, University of Minnesota (1996).