

人工市場入門

和泉 潔

電子技術総合研究所 情報科学部
さきがけ研究 21 研究員
〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4
kiyoshi@etl.go.jp

植田 一博

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻
〒 153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1
ueda@gould.c.u-tokyo.ac.jp

あらまし

本稿では人工市場研究の簡単な紹介と様々な研究手法や成果の分類と、これからの研究の方向性に関する検討を行う。まず、人工市場研究の簡単な定義と特徴を特定した。その特徴に基づいて、現在行われているいくつかの人工市場研究の分類を行い、この分野の現状を紹介した。そして、人工市場研究についてよくなされる批判とそれに対する対応を議論した。最後に人工市場研究のこれからの発展の方向性についていくつか示し、どういったことが必要が論じた。

キーワード 人工市場, ミクロ-マクロ問題, エージェント

Introduction to Artificial Market Studies

Kiyoshi IZUMI

and

Kazuhiro UEDA

Information Science Div., ETL and
PRESTO, JST.

1-1-4 Umezono, Tsukuba
Ibaraki 305-8568, JAPAN.

Dept. of General Systems Studies
University of Tokyo

3-8-1 Komaba, Meguro-ku
Tokyo 153-8902, JAPAN

Abstract

In this paper we introduced artificial market studies, reviewed their methods and results, and discussed their future direction. First, we proposed definition of the artificial market studies and identified their features. Based on these features, then, we classified and reviewed some artificial market studies. Next, we discussed some criticism. Finally, we showed some future directions of artificial market studies and their requirements.

key words Artificial markets, Micro-macro problems, Agents

1 はじめに

近年に市場の激しい変動を経験した株式市場や外国為替市場では、市場参加者である”人間の心理の効果”が特に注目されている。しかし、合理的な人間のみが存在するこれまでの伝統的な経済理論では、過度に理想的で非現実的な市場が仮定されており、市場参加者の個人特性の違いや心理的側面を軽視していた。

このような現状からより現実的な市場のモデルを目指した人工市場研究と呼ばれるアプローチが新たに現れた。本稿では人工市場研究の簡単な紹介と様々な研究手法や成果の分類と、これからの研究の方向性に関する検討を行う。

2 人工市場とは

人工市場とは、文字通り人の手で作りだされた架空の市場のこと。人工市場の研究の目的は、例えばコンピュータ上に様々な人間が参加し、それぞれに見通しがあり、賭けがあり、騙しがあり、出し抜きがありといった人間臭い金融市場を作るといったことにある。

では、人間心理に左右される現実的な市場を分析するにはどうすればよいのか。前述の経済実験によって、人間の被験者を使って市場を模擬実験する方法もあるが、それにも限界がある。そこで、一人一人の市場参加者の役目をする多数のコンピュータプログラムが集まって、自由に取引をするコンピュータ上の仮想的な「人工市場」で実験を行なうという方法が取られる。

人工市場モデルは、市場参加者個人の行動というミクロなレベルから市場全体にみられるマクロ現象との関係の解明を目指している。本稿では、ミクロからマクロまでの以下の3つの特徴により人工市場研究の研究手法や成果を論じていく。

2.1 エージェント：ミクロ

人工市場内では、市場参加者であるエージェントが複数存在して経済的な交換や投資、学習や相互作用を行う。各エージェントは、何かしらの情報を入力として受取り、自分なりのルールに基づいて行動決定を行い、売買行動などを出力する。行動決定のルールやパラメータがエージェントの構造として、数列やパラメータ、木構造として表現される。また、その構造が時間と

ともに、学習によって更新されていく。

2.2 市場構造：ミクロからマクロ

人工市場は経済的な市場構造のモデルである。つまりエージェントの市場行動の結果、価格(レート)が決定されるようなメカニズムを持っている。価格決定のメカニズムとしては、主に、実際の市場のように売り手と買い手が会って個別に売買が成立していく相対型と、市場全体の需要と供給をいったん全て集めて需給が釣り合うところに価格(レート)が決定される均衡型の2種類にわかれる。

2.3 分析対象：マクロ

人工市場研究がシミュレーション結果の解析を行い、金融市場のマクロ的な特徴の分析とミクロな行動とマクロ現象との関係の解明を目的としている。分析対象は大きく分けて2つある。

(a) 現実の市場の創発現象の分析:バブル現象や価格変動の裾が厚く鋭い分布などの現象を人工市場に再現し、どのような条件でそれらの現象がおきたか分析しメカニズムの解明を目指す。

(b) 経済理論の検証: 貨幣の創発, 合理的期待仮説, 効率的市場仮説など従来の経済理論で言われてきた幾つかの市場に関する仮説の検証を目指す。

3 人工市場研究の現状

前節で述べた3つの視点より、現在行われている幾つかの人工市場研究の特徴を表1に書き出した。以下の節では、この枠組みによって各人工市場研究の紹介を行う。

3.1 計量経済モデルとGA: Arifovic

従来の計量経済学的なモデルに遺伝的アルゴリズムを適用した。各エージェントが来期への貯蓄高と今期の資本の自国資本と外国資本への分配の割合(ポートフォリオ)を決定し、マネタリー均衡から導出された線形式でレートが決定される。[2,3].

エージェント

(a) 出力: 来期への貯蓄高, 今期の資本のポートフォリオ

(b) 構造: 30桁のビット列。

	エージェントの表現	市場構造	分析対象	参考文献
3.1 Arifovic	貯蓄高と資本分配	線形	価格変動の大きさ	[2, 3]
3.2 安富	財の所有状況, 効用, 需要構造	相対	貨幣の生成, 崩壊	[30, 52, 64, 72]
3.3 高安	希望価格, 売り手か買手か	相対	確率過程近似, 変動分布	[31, 60-62, 68, 69]
3.4 Arthur	100個のIF-THEN式	均衡	合理的期待仮説と比較	[4, 7, 43, 57-59]
3.5 Lux	予想タイプの違い	均衡	変動分布, 時系列的特徴	[46-51]
3.6 水田	生産家か投機家か	均衡	シグナルと市場の安定性	[53-55, 66]
3.7 Chen	過去の株価と算術関数の木構造	均衡	経済理論の検証	[12-20]
3.8 和泉	17種類の予想材料の重要度	均衡	創発現象, 意思決定支援	[35-42]

表 1: 各人工市場の特徴

(c) 行動決定: 20桁で来期への貯蓄高を10桁でポートフォリオを表す。

(d) 学習: 効用を適合度とする遺伝的アルゴリズム。

市場構造

マネタリー均衡から導出された線形式でレートが決定される。

分析対象

(a) 価格変動が大きいことの解析 [3].

(b) 人間を使った実験市場との比較 [3].

3.2 貨幣の自生と自壊: 安富ら

n 種類の財が存在する財市場でエージェントがみずからの効用と他エージェントの需要構造を考慮して [30, 52, 64, 72]

エージェント

(a) 入力: 他のエージェントの需要構造

(b) 出力: n 種類の財への需要

(c) 構造: n 種類の財の所有状況, n 種類の財の効用, 他エージェントの需要構造に関する見方を表現するベクトル。

(d) 行動決定: 自分自身の効用が高い財, もしくは他エージェントからの需要が高い財を欲する。

(e) 学習: 財の交換の時に相手のエージェントと需要構造に関する情報を交換し, 相手の情報と平均化して更新する。

市場構造

生産フェーズと交換フェーズがあり, 交換フェーズの時ランダムに選ばれたエージェントが自分が欲する

財を最も多く所有したエージェントを指名し, 2人の間でうまく需給が釣り合ったら交換が発生する。

分析対象

n 種類への財の需要が平均しているような物々交換経済から, ある財のみが突出して欲せられて交換の媒体となる貨幣経済の発生と崩壊を分析している。

3.3 価格変動の統計物理学: 高安ら

決定論的なディーラーが構成する人工株式市場をつくり, その結果を確率的なマクロモデルで近似し, 変動の分布など現象を解析している [31, 60-62, 68, 69].

エージェント

(a) 入力: 過去の価格変化量

(b) 出力: 希望価格

(c) 行動決定: 売り手は手持ちの株を売ることが出来るまで希望価格を下げ続け, 買手は株を入手できるまで希望価格を上げ続ける。また, 希望価格は過去の価格変化量に比例した値の分も変化する。

市場構造

最大の買値 > 最小の売値の場合, 個別に相対取引で価格決定。

分析対象

(a) 確率過程による近似 [31, 61, 68]

(b) 価格変動の分布の解析 [31, 61, 68]

3.4 サンタフェ研究所の人工株式市場: Arthurら

複数のIF-THEN式の集合で表されるエージェントによる人工株式市場でシミュレートされた価格と, 従

来の合理的期待仮説が成立した場合の価格と比較を行った [4, 7, 43, 57-59].

エージェント

(a) 入力: 市場の状態. チャートトレンドに関する条件 (n 期間の移動平均が閾値を越えたかどうかなど) とファンダメンタルズに関する条件 (現在の価格がその基本価値に比べて高いか低い).

(b) 出力: レートがいくらだったら, どれほど売り買いするかというオーダー.

(c) 構造: 100 個の予測ルール (IF-THEN 式)

(d) 行動決定: 現在の市場の状態が条件部にマッチする予測ルールで予測し, 期待利得が最大になるように取引をきめる.

(e) 学習: 遺伝的アルゴリズム (分類子システム).

市場構造

市場全体の需要と供給が均衡する値に価格が決定される.

分析対象

(a) 合理的期待仮説との比較 [4]

(b) 予想方式の変化 [43]

3.5 時系列的特徴の分析: Lux

ファンダメンタリストとチャートイストの 2 種類が存在する人工株式市場で, 実際の市場でみられる価格の時系列的特徴の再現と解析を行った [46-51].

エージェント ファンダメンタリストとチャートイストの 2 種類が存在.

(a) 入力: ファンダメンタルズ価格 (ファンダメンタリスト)

(b) 出力: 注文量.

(c) 行動決定: 現在の価格とファンダメンタルズ価格の差により売買決定 (ファンダメンタリスト). チャートトレンドにより売買決定 (チャートイスト)

(d) 学習: 市場全体の多数意見とそれぞれの予想の仕方による利得の差により, エージェントはファンダメンタリストに変わるかチャートイストに変わるか決める.

市場構造

価格決定は需給が合うところまで, 値段を上げ下げする.

分析対象

(a) 価格の時系列データの定常性 [51]

(b) 価格データのカオスの特性 [49]

(c) 価格変動の分布の尖度 [49, 51]

3.6 財市場と価格シグナル: 水田ら

生産消費を行う生産エージェントと市場の売買によって利益を得る投機エージェントが存在する人工の財市場をつくり, バブルのシミュレーション, エージェントにフィードバックさせる価格シグナルの種類と市場の安定性との関係を分析した [53-55, 66]

エージェント 生産エージェントとバリュートレーダー, トレンドトレーダーの 3 種類が存在する.

(a) 入力: 最適な在庫量 (生産エージェント), 価格推移 (バリュートレーダー), 均衡価格の 1 回差分 (トレンドトレーダー)

(b) 出力: 生産 (生産エージェント), 売買量 (全エージェント)

(c) 行動決定: 最適な在庫量になるように売買決定 (生産エージェント), 前回の価格がそれまでの移動平均価格よりも安ければ買い, 高ければ売る (バリュートレーダー), トレンドが上昇なら買い, 下降なら売り (トレンドトレーダー)

市場構造

市場全体の需要と供給が均衡する値に価格が決定される.

分析対象

(a) バブルの発生 [53, 66]

(b) エージェントへのフィードバック情報と市場の安定性の関係 [53, 54]

3.7 経済理論の検証: Chen ら

遺伝的プログラミングを用いた人工株式市場のシミュレーションにより, 合理的市場仮説や効率の市場仮説などの従来の経済学で金融市場についていわれていたいくつかの仮説の検証を試みている¹ [12-20].

エージェント

(a) 入力: 過去の株価と配当

(b) 出力: 予測値

(c) 構造: 端点が過去の株価と配当, 途中が足し算, 引き算, 三角関数などの算術関数である木構造.

(d) 行動決定: 予想価格を基に期待利得が最大になる

¹ [12]にある Lecture note は非常によくまとまっていて一見の価値あり.

ように取引をさめる。

(e) 学習: 遺伝的プログラミング

市場構造

市場全体の需要と供給が均衡する値にレートが決定される。

分析対象

(a) 合理的期待仮説の検証. [20]

(b) 効率的市場仮説の検証. [13, 15, 16]

(c) 価格変動の複雑度の現実の市場との比較. [14]

3.8 現実世界の解明と適用: 和泉ら

現実のディーラーへのインタビューを基につくられたエージェントによる人工外為市場により、現実の市場にみられる創発現象(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 [35-42].

エージェント

(a) 入力: 経済的ファンダメンタルズやチャートトレンドや要人発言などの17種類のレートの予想材料.

(b) 出力: レートがいくらだったら、どれほど売り買いするかというオーダー.

(c) 構造: 17種類の予想要因の重要度の列.

(d) 行動決定: 予想要因に関するニュースを自分の重要度で加重平均をとり将来のレートを予想し、予想レートを基に期待利得が最大になるように取引をさめる.

(e) 学習: 遺伝的アルゴリズムにより予想が当たった他のエージェントの重要度を模倣することを表現.

市場構造

市場全体の需要と供給が均衡する値にレートが決定される。

分析対象

(a) 90年や95年の為替レートバブルのメカニズムの解明 [35-38, 40]

(b) レート変動の分布のメカニズムの解明 [36, 40]

(c) ディーラー個人の情報処理プロセスの解明 [36, 39]

(d) 意思決定支援システムの構築 [41, 42]

4 人工市場研究への批判

人工市場研究に対してよくなされる批判を2つ挙げ、これらの批判に対する反論とこれから我々が人

工市場研究を行う上で留意すべき点について検討を行う。

4.1 ヤッコーじゃないの

シミュレーションをしている研究全般に対する批判かも知れないが、よく言われるのは、「シミュレーションを一生懸命やっているけど、とにかくシミュレーションをやってみたらコーになりましたって感じじゃないの」という批判である。

ヤッコーと言われたいためには、人工市場研究を行う際に、理論と現実の双方への関連付けを意識することが必要である。

まず、理論への関連付けであるが、これは (a) 既存の経済理論に対する立場の明確化と (b) 人工市場研究そのものの理論の確立の2つを意味している。既存の経済理論に強くこだわる必要はないが、自分の人工市場モデルと既存の市場モデルとの差異、今までのモデルの何が悪いと思っているのか、どこが良くなったのかが言えると良いだろう。例えば、多くの人工市場モデルは既存の理論の過度に理想的な合理性を批判し、今までの理論ではうまく説明できなかったバブル現象などを解析したり合理的期待仮説や効率的市場仮説の検証を目指している。また人工市場研究そのものの理論の確立を目指し、モデルの構築や解析のある程度客観的な方針を作らないと、現実合うように都合良く設定したんだからシミュレートできて当たり前と言われたり、シミュレーション結果の分析が恣意的で信用できないと言われてしまう恐れがある。

次に現実への関連付けであるが、これがないと人工市場モデルは非現実的な単なる Toy problem になってしまう。モデル構築やシミュレーション結果の分析の際に、現実の市場の何に対応しているのか、何を説明しているのかを意識することが必要である。

4.2 新しい発見はできるのか。

よくあるもう1つの批判として、「人工市場研究で何か新しい発見はできるのか」というのがある。

市場参加者個人の学習や意思決定に関する知見(ミクロなレベル)や経済的な市場全体に見られる特徴(マクロなレベル)のそれぞれは既に認知科学や経済学で発見されているものである。人工市場研究がもたらす新しい発見は何であろうか。

人工市場研究はミクロとマクロの関係を発見する科学であると考えられる。つまり、ミクロなレベルでの特徴やルールとマクロなレベルでのパターンや現象の結び付きを新しく発見すれば良い。その方法としてシミュレーションを用いているのである。

5 人工市場研究のこれから

前節までの現状の展望と批判の議論をもとに、人工市場研究のこれからの方向性について以下の4つの視点から検討してみる。

人工市場研究の基礎理論作りを。人工市場モデル構築やシミュレーション結果の分析に対して、あまりに恣意的にならないための判断材料として、定式化までも視野にいれた基礎理論作りが将来の方向性として考えられる。これらの試みへの可能性を示すものとして、量子力学におけるスピンの相転移のアナロジーにより人工市場モデルの定式的な解析を目指した [71] や、統計物理学の手法を応用し人工市場モデルの確率過程による近似と解析を試みた [61, 68] などの研究が興味深い。

他の社会現象にも適用可能な理論へ。人工市場研究の基礎理論を作ることができれば、ミクロ-マクロ関係に着目して社会現象同士を比較分析することができるのではないだろう。価格(レート)決定はミクロからマクロへ集積する1つの社会システムのメカニズムと考えることができる。だから人工市場研究の枠組みで、投票行動や移住など市場以外の社会現象を解析しそれらを比較できるであろう。市場以外の社会現象への適用は人工社会アプローチ [8, 25, 28] の研究により可能性が示されている。

検証可能な社会科学。人工市場研究により様々な既存の経済学の仮説を定量的に検証できるようになった。今までの社会科学の仮説は非常に抽象的で、サーベイデータによる検証で否定的な結果がでて、かなり言い逃れみたいなのができたように思う。これに対して人工市場研究は検証可能で今までのように言い逃れできない新しい社会科学のアプローチを示してくれるだろう。既に [13, 15, 16, 20] で合理的期待仮説、効率的市場仮説の検証を行っている。

認知科学との接点。より本物らしい、パフォーマンスのよい人工市場をつくるうえで重要な点は、仮想的

な市場参加者がどのように予想や投資の方法を学習するかを決定することである。エージェントの行動や学習方法を現実的で妥当なものにするためには、現実の市場参加者の思考プロセスの認知科学的な分析が有効であろう。そのために、実際人間に参加させた市場コンテストによる思考過程・行動の解析の試みも始まっている [45, 65]。また、そういったフィールドワークによって得られた知見と人工市場モデルの統合を試みた研究も幾つかある [2, 10, 35-42]。

6 おわりに

本稿では人工市場研究の現状の分析と発展の方向性について論じた。人工市場研究が1つの分野として認められていくには、(a) 方法論、定式化まで含めた理論の構築と (b) 現実の現象と既存の経済理論への何かしらの関連付けが必要であると考えられる。

人工市場研究と呼ばれる分野は世界的にもまだ出ていない。全く新しいアプローチであり、様々な可能性を秘めている。様々な領域の科学者やこれからの若い世代の研究者や研究者を目指す人々が仲間に入ってきて、新しい流れを作り出せる可能性があると感じている。²

参考文献

- [1] M. Andrews and R. Prager. Genetic programming for the acquisition of double auction market strategies. In P. J. Angeline and K.F. Kinneer, editors, *Advances in Genetic Programming*, pp. 355-368. The MIT Press, 1994.
- [2] J. Arifovic. Genetic algorithm learning and the cobweb model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 18, pp. 3-28, 1994.
- [3] J. Arifovic. The behavior of the exchange rate in the genetic algorithm and experimental economies. *Journal of Political Economy*, Vol. 104, No. 3, pp. 510-541, 1996.
- [4] W. Arthur and J. Holland et al. Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. In W.B. Arthur et al., editor, *The Economy as an Evolving Complex Systems II*, pp. 15-44. Addison-Wesley Publishing, 1997.
- [5] W.B. Arthur. Designing economic agents that act like human agents: A behavioral approach to bounded rationality. *the American Economic Review*, Vol. 81, No. 2, pp. 353-359, 1991.
- [6] W.B. Arthur. Complexity in economic and financial markets. *Complexity*, pp. 20-25, 1995.

²参考文献からもれている人工市場研究の論文があったら、ぜひ和泉 (kiyoshi@etl.go.jp) まで教えてください。

- [7] W.B. Author, J.H. Holland, B. LeBaron, R. Palmer, and P. Tayler. Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. Technical report, Santa Fe Insititute, 1996.
- [8] R. Axelrod. *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton University Press, 1997.
- [9] A. Beltratti and S. Margarita. Evolution of trading among heterogenous artificial economic agents. In J.-A. Meyer, H.L. Poitblat, and S.W. Willson, editors, *From Animals to Animals 2*, pp. 494–501. The MIT Press, 1993.
- [10] J. Castro and H. Coelho. Strategic interaction in oligopolistic markets: Experimenting with real and artificial agents. In C. Castelfranchi and E. Werner, editors, *Artificial Social Systems*, pp. 147–163. Springer Verlag, 1994.
- [11] R. Chatagny and B. Chopard. Parallel simulation of a foreign exchange market model. In *Proceedings of HPCN 97*, Vienna. HPCN 97, 1997.
- [12] S.-H. Chen. Lecture note: Macroeconomics. http://econo.nccu.edu.tw/ai/staff/csh/course/grad_mac, 1999.
- [13] S.-H. Chen and T.-W. Kuo. Are efficient markets really efficient?: Can financial econometric tests convince machine learning people? In *Proceedings of ICAI99*, pp. 444–450. CSREA, 1999.
- [14] S.-H. Chen and C.-W. Tan. Brief signals in the real and artificial stock markets: An approach based on the complexity function. In *Proceedings of ICAI99*, pp. 423–429. CSREA, 1999.
- [15] S.-H. Chen and C.-H. Yeh. Toward a computable approach to the efficient market hypothesis: An application of genetic programming. From Internet.
- [16] S.-H. Chen and C.-H. Yeh. Genetic programming and the efficient market hypothesis. In J.R. Koza, D.E. Goldberg, and D.B. Fogel, editors, *Genetic Programming: Proceedings of the 1st Annual Conference*, pp. 45–53. the MIT Press, 1996.
- [17] S.-H. Chen and C.-H. Yeh. Genetic programming learning and the cobweb model. In P.J. Angelino and K.F. Kinneer, editors, *Advances in Genetic Programming 2*, pp. 443–466. The MIT Press, 1996.
- [18] S.-H. Chen and C.-H. Yeh. On the consequences of "following the herd": Evidence from the artificial stock market. In *Proceedings of ICAI99*, pp. 388–394. CSREA, 1999.
- [19] S.-H. Chen, C.-H. Yeh, and C.-C. Liao. Testing for granger causality in the stock price-volume relation: A perspective from the agent-based model of stock markets. In *Proceedings of ICAI99*, pp. 374–380. CSREA, 1999.
- [20] S.-H. Chen, C.-H. Yeh, and C.-C. Liao. Testing the rational expectations hypothesis with the agent-based model of stock markets. In *Proceedings of ICAI99*, pp. 381–387. CSREA, 1999.
- [21] B. Chopard and R. Chatagny. Models of artificial foreign exchange markets. In *Proceedings of Les Houches School on "Scale Invariance and Beyond"*. Les Houches School, 1997.
- [22] H. Dawid. On the convergence of genetic learning in a double auction market. From Internet.
- [23] M. de la Maza. Qualitative properties of an agent-based financial market simulation. In *Proceedings of ICAI99*, pp. 367–373. CSREA, 1999.
- [24] M. de la Maza and D. Yuret. A futures market simulation with non-rational participants. In R.A. Brooks and P. Maes, editors, *Artificial Life IV*, pp. 325–330. The MIT Press, 1994.
- [25] J. M. Epstein and R. Axtell. *Growing Artificial Societies*. The MIT Press, 1996.
- [26] D. Friedman and J. Rust. *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*. Addison-Wesley, Reading, 1993.
- [27] D. Delli Gatti, M. Gallegati, and A. Palestini. Agents heterogeneity, financial fragility and learning. From Internet.
- [28] N. Gilbert and J. Doran. *Simulating Societies*. UCL Press, 1994.
- [29] D.K. Gode and S. Sunder. Human and artificially intelligent traders in computer double auctions. In K.M. Carley and M.J. Prietula, editors, *Computational Organization Theory*, pp. 241–262. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1994.
- [30] 長谷川敦士, 植田一博. 人工社会における貨幣交換. 本論文集, 2000.
- [31] T. Hirabayashi, H. Takayasu, H. Miura, and K. Hamada. The behavior of a threshold model of market price in stock exchange. *Fractal*, Vol. 1, No. 1, pp. 29–40, 1993.
- [32] J. H. Holland and J. H. Miller. Artificial adaptive agents in economic theory. In *American Economic Review: Papers and Proceedings of the 103rd Annual Meeting of the American Economic Association*, pp. 365–370, 1991.
- [33] J.H. Holland. the global economy as an adaptive process. In P.W. Anderson, K.J. Arrow, and D. Pines, editors, *The Economy as an Evolving Complex System*, pp. 117–124. Addison-Wesley, 1988.
- [34] 石川泰志, 寺野隆雄. 分類システムによるエージェントの共進化とマーケティングシミュレーション. 本論文集, 2000.
- [35] K. Izumi. A simulation of a foreign exchange market with genetic algorithm. Master's thesis, The University of Tokyo, 1995.
- [36] K. Izumi. *An Artificial Market Model of a Foreign Exchange Market*. PhD thesis, University of Tokyo, 1998.
- [37] K. Izumi and T. Okatsu. An artificial market analysis of exchange rate dynamics. In L.J. Fogel, P.J. Angelino, and T. Bäck, editors, *Evolutionary Programming V: Proceedings of the 5th Annual Conference on Evolutionary Programming*, pp. 27–36. the MIT Press, 1996.
- [38] K. Izumi and K. Ueda. Emergent phenomena in a foreign exchange market: Analysis based on an artificial market approach. In C. Adami, R.K. Belew, H. Kitano, and C.E. Taylor, editors, *Artificial Life VI*, pp. 398–402. MIT Press, 1998.
- [39] K. Izumi and K. Ueda. Analysis of dealers' processing financial news based on an artificial market approach. *Journal of Computational Intelligence in Finance*, Vol. 7, pp. 23–33, 1999.
- [40] 和泉 深・植田一博. コンピュータの中の市場: 認知機構を持つエージェントからなる人工市場の構築とその評価. 認知科学, Vol. 6, No. 1, 1999.

- [41] K. Izumi and K. Ueda. Analysis of exchange rate scenarios using an artificial market approach. In C.-H. Chen et al., editor, *Evolutionary Computation in Economic and Finance*. Springer Verlag, 2000. (forthcoming).
- [42] 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. 本論文集, 2000.
- [43] S. Joshi. Technical trading creates a prisoner's dilemma. *Computational Finance 99 hand-out paper*, 1999.
- [44] 海蔵寺大成. 連想記憶を持つ金融ネットワークのダイナミックス. 本論文集, 2000.
- [45] A. Lo, T. Poggio, et al. Artificial market projects. <http://cyber.exchange.mit.edu/jfox/afm.html>, 1998.
- [46] T. Lux. Herd behavior, bubbles and crashes. *Economic Journal*, Vol. 105, pp. 881-896, 1995.
- [47] T. Lux. Time variation of second moments from a noise trade/infection model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 22, pp. 1-38, 1997.
- [48] T. Lux. The limiting extremal behaviour of speculative returns: An analysis of intra-daily data from the frankfurt stock exchange. Technical Report B-436, University of Bonn, 1998.
- [49] T. Lux. The socio-economic dynamics of speculative markets: Interacting agents, chaos, and the fat tails of return distributions. *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 33, pp. 143-165, 1998.
- [50] T. Lux and M. Marchesi. Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market. Technical Report B-438, University of Bonn, 1998.
- [51] T. Lux and M. Marchesi. Volatility clustering in financial markets: A micro-simulation of interacting agents. Technical Report B-437, University of Bonn, 1998.
- [52] R. Marimon, E. McGrattan, and T.J. Sargent. Money as a medium of exchange in an economy with artificially intelligent agents. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 14, pp. 329-374, 1990.
- [53] 水田秀行. エージェントが行うマーケットシミュレーション: コンピュータでバブルの発生を見よう. 情報処理, Vol. 40, No. 10, pp. 1022-1027, 1999.
- [54] H. Mizuta, K. Steglitz, and E. Lirov. Effects of price signal choices on market stability. In *WEHIA 99*, 1999. <http://ciclaminio.dibe.unige.it/wehia/papers/mizuta-steglitz-lirov.zip>.
- [55] 水田秀行, K. Steiglitz, E. Lirov. マーケットの安定性と価格シグナル. 本論文集, 2000.
- [56] C. Nottola, F. Leroy, and F. Davalo. Dynamics of artificial markets. In F.J. Varela and P. Bpurghine, editors, *Toward a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life*, pp. 185-194. The MIT Press, 1992.
- [57] R.G. Palmer, W.B. Arthur, J. H. Holland, B. LeBaron, and P. Taylor. Artificial economic life: a simple model of a stock market. *Physica D*, Vol. 75, pp. 264-265, 1994.
- [58] J. Rust, J. H. Miller, and R.G. Palmer. Behavior of trading automata in a computerized double auction market. In D. Friedman and J. Rust, editors, *The Double Auction market: Institutions, Theories, and Evidence*, pp. 155-198. Addison-Wesley, 1993.
- [59] J. Rust, J.H. Miller, and R. G. Palmer. Characterizing effective trading strategies: Insights from a computerized double auction tournament. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 18, pp. 61-96, 1994.
- [60] A. Sato and H. Tkayasu. Dynamic numerical models of stock market price: from microscopic determinism to macroscopic randomness. *Physica A*, Vol. 250, pp. 231-252, 1998.
- [61] 佐藤彰洋, 高安秀樹. 価格変動への統計物理的アプローチ. シミュレーション, Vol. 17, No. 4, pp. 278-283, 1998.
- [62] 佐藤彰洋, 高安秀樹. 価格変動モデル: マルチエージェントモデルから統計モデルへ. 本論文集, 2000.
- [63] 嶋谷毅. 人工証券市場の構築とその評価. 本論文集, 2000.
- [64] 篠原修二, 中野昌宏, 中島義裕. 指示詞としての「貨幣」. 本論文集, 2000.
- [65] 塩沢由典ほか. 共通テストベッドとしてのヴァーチャル市場. <http://econ-ws.econ.osaka-cu.ac.jp/~Shiozawa/gongtong/vmart.htm>.
- [66] K. Steglitz and D. Shapiro. Simulating the madness of crowds: Price bubbles in an auction-mediated robot market. *Computational Economics*, Vol. 12, , 1998.
- [67] J. Stender, K. Tout, and P. Stender. Using genetic algorithms in economic modelling: The many-agents approach. In R.F. Albrecht, C.R. Reeves, and N.C. Steele, editors, *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, pp. 607-612. Springer-Verlag, 1993.
- [68] 高安秀樹. 価格変動の統計物理学入門. 日本物理学会誌, Vol. 54, No. 1, pp. 3-10, 1999.
- [69] H. Takayasu, H. Miura, T. Hirabayashi, and K. Hamada. Statical properties of deterministic threshold elements. *Physica A*, Vol. 184, pp. 127-134, 1992.
- [70] H. Takayasu and K. Okuyama. Country dependence on company size distributions and a numerical model based on competition and cooperation. *Fractal*, Vol. 6, No. 1, pp. 67-79, 1998.
- [71] 山口あづさ. 人工市場理論とその相転移ダイナミクス. 本論文集, 2000.
- [72] A. Yasutomi. The emergence and collapse of money. *Physica D*, Vol. 82, pp. 180-194, 1995.