

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—

日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所

水田 秀行

マーケットシミュレーションの背景

現在、我々を取り巻く日本および世界経済は激動の時代を迎えている。予測困難な変化が非常に速いスピードで発生し、また、ネットワークの普及により新たなチャネルが生まれている。このような状況を従来の静的な均衡分析を主とする経済学的手法によって扱うことは困難であり、新たな解析手法が必要となる。本稿で紹介するソフトウェアエージェントによるマーケットシミュレーション (図-1) はその1つである。このようなマーケットシミュレーションを用いた研究は経済学のみならず、物理や数学、工学の研究者からも注目を集めている。その研究の目的は、既存のマーケットの複雑系としての理解や、マーケットという機構の原理や動力学の解析と工学的な応用、ネットワークおよびコンピュータの成長に伴って生み出されつつある新たなマーケットの予見等さまざまである。

まず始めに、マーケット (市場) とは何かということについて簡単に触れておこう。我々が日夜必要とする品物、サービス等の財は多岐に渡り、完全に自給自足することは不可能である。そこで、それぞれが得意とするものを生産し、交換することによって必要とするものを入手することになる。このような財の大規模な交換の場がマーケットである。交換の流動性を高めるため、それぞれの財は一度貨幣を介して交換される。この貨幣との交換レートがその財の価格である。マーケットでは限られた資源を多数の異なる選好を持つ参加者に効率的に配分するため、価格による需要と供給の調整が重要な役割を果たす。一般に、品物を売りたいという供給は、その品物の価格

が上昇すると増加し、価格が下降すると減少する。また逆に、品物を買いたいという需要は、その品物の価格が上昇すると減少し、価格が下降すると増加する。そこで、価格を上下することによって品物の需要と供給の調整が行われる。また需要が供給を上回る場合、価格は一般に上昇し、供給が需要を上回る場合、価格は下降する。このように価格および需要と供給のバランスが、それぞれ影響を及ぼしつつ調整しあうことにより、自然に需要と供給とが一致した均衡価格が実現されると期待される。

一口にマーケットといってもその適用範囲は広く、マーケットシミュレーションの研究目的や手法もさまざまである。大きく分けると、3つのアプローチが考えられる。1つは複雑系的手法によってなるべく現実に近い複雑な変動を再現しようとするもの、1つは異なる戦略をとるエージェント間の競争に注目したゲーム理論的解析を行うもの、最後は最低限の要素を持つ単純なエージェントを用いて動力学的解析を行うものである。

複雑系からのアプローチでは、サンタフェ研究所の仮想ストックマーケット¹⁾が有名である。既存のストックマーケットやトレーダーの動きを可能な限り再現し、現実に生じ得る複雑な価格変動を個々のトレーダーを模したエージェントの行動から調べるというものである。日本でも電総研の和泉氏らによって、現実のディーラへのインタビューを元に創られたエージェントによる人工市場の研究²⁾が行われている。これらの研究では人工知能による学習や遺伝アルゴリズムによってエージェントの戦略を変化させ、現実にあるようなマーケットの複雑な変化を再現している。

一方IBMワトソン研究所では、ゲーム理論に基づきエ

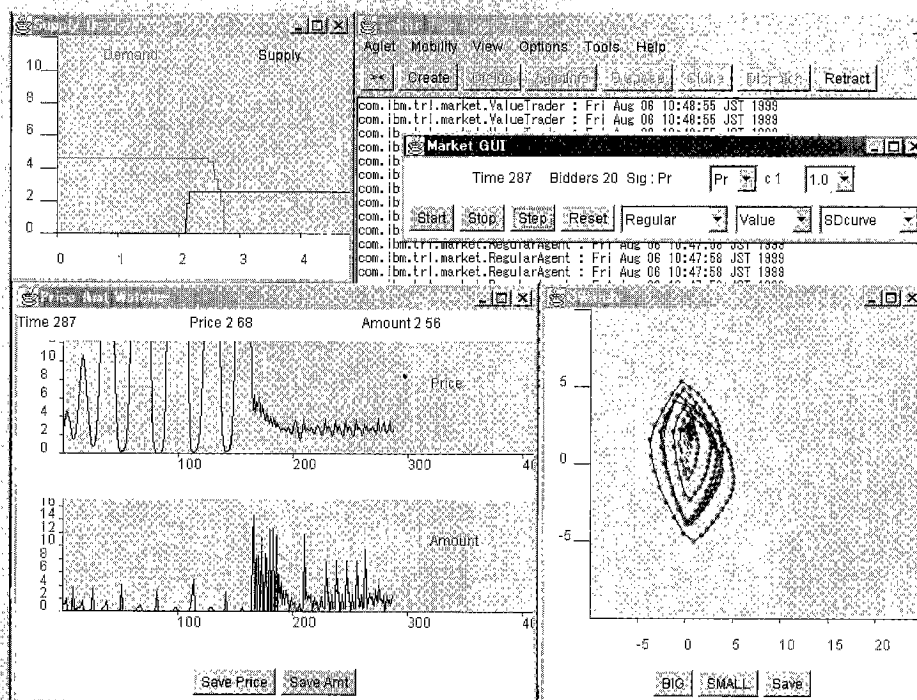


図-1 ソフトウェアエージェント（アグレッツ）によるマーケットシミュレーション

エージェントが価格競争を行う Information economies の研究³⁾が行われている。エージェントはネットワーク上で情報提供を行う企業として行動し、周囲の状況に応じて商品選択や価格設定を行い、他のエージェントと競争する。このようなマーケットにおける戦略や均衡価格の存在、価格競争による周期的な暴落等が示されている。

本稿で紹介するマーケットシミュレーションでは、エージェントのアルゴリズムを単純で確定的なものとし、その中でなお生じ得る価格変動を観測することによって、特徴的な価格振動や均衡価格への収束、バブル等の現象を分析的に扱う。また、より単純化したモデルについて動力学の解析を行い、マーケットにおけるシグナルと価格安定性について調べる。

マーケットのモデルとエージェント

それでは、このようなマーケットをコンピュータシミュレーションを行って解析するために、簡単なモデルによって表現してみよう。ここでは Princeton 大学の Steiglitz 教授らによる生産と消費を含むモデル⁴⁾を紹介する。

この仮想的なマーケットには、Food と Gold という 2 種類の財が存在している。Food は一般の消費財であり、一方 Gold は貯蓄や交換に用いられる財と考えることができる。これらの財は中央のオークションにおいて、Sealed-bid Double Auction を用いて売り買いされる。Sealed-

bid Double Auction とは、参加者が各々他の Bid の内容を知らないまま、売り、あるいは、買いの Bid を行うものである。以降 Gold を通貨のように考え、Food を提供して Gold を入手する場合を売り、逆に Gold を提供して Food を入手する場合を買いと表記し、Food 一単位に対し交換される Gold の量を Food の価格とする。

売り手としての立場を表明する Bid には、提供する Food の量と許容される最低価格が含まれ、買い手としての立場を表明する Bid には、要求する Food の量と許容される最高価格が含まれる。この Bid 価格以上の売値あるいは Bid 価格以下の買値で取引が成立することになる。提出されたすべての bid を集めると今回のオークションにおける需要供給曲線が価格に対して得られる。中央に独立して配置されたオークション仲介者は、需要供給曲線の交点から、Food の取引量が最大となる価格を定める (図-2)。

実際に売り買いを行うエージェントとしては次の 3 種類を考える。生産エージェントはこのモデルの基本となるエージェントであり、一期間に Food か Gold どちらか一方のみ、エージェントごとにあらかじめ定められた生産量だけ生産し、また、Food を 1 単位消費する。生産される財としては、それぞれの生産能力とオークション仲介者から与えられた前回の価格を基に、より価値の高いものを選ばれる。また、エージェントごとに望ましい Food 在庫量が定められており、在庫がそれより少ない場合にはマーケットで買おうとし、多い場合には売ろうと

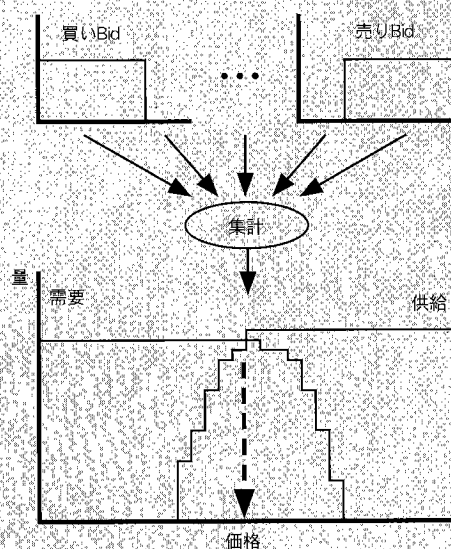


図-2 需要供給曲線と取引価格

する。

バリュートレーダーとトレンドトレーダーは、生産や消費をせずに、マーケットでの売買によって利益を得ようとする投機家である。バリュートレーダーは、それまでの価格推移に対してある種の重み付け平均操作を行い、均衡価格を推定する。前回の価格がこの推定値よりある程度安ければ買い、高ければ売ることによって利益を得ようとする。トレンドトレーダーは、均衡価格の一回差分の履歴から同様の重み付け平均操作によってトレンドを推定する。今後価格がある程度上昇傾向にあると考えればFoodを購入しようとし、下降傾向にあると考えれば売却しようとする。

このように単純で確定的なアルゴリズムに従うエージェントを用いて、さまざまな複雑な価格変動を観察することができる。次の章では、このモデルによるシミュレーションを行った結果を紹介する。

マーケットをシミュレートしてみよう

前章のマーケットモデルをJavaモバイルエージェントであるアグレッツを用いて実装し、シミュレーションを行った。アグレッツのメッセージ交換機構を利用して、オークション仲介者和其他のエージェント間で同期的にメッセージを交換しつつ、オークションを行う。

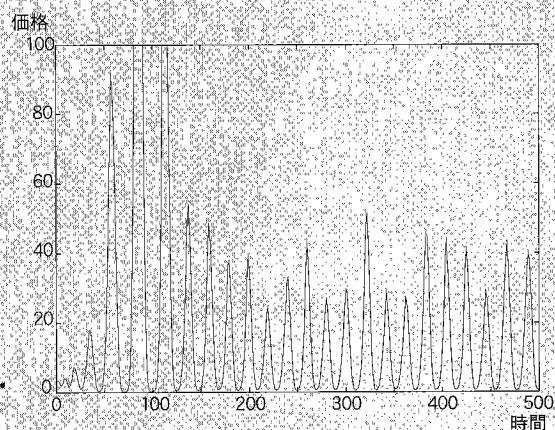


図-3 生産エージェントによる価格変動

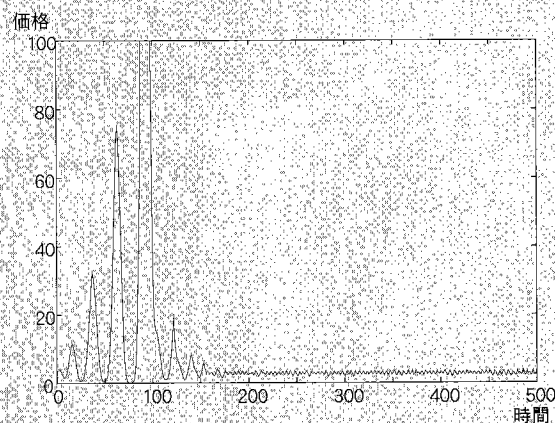


図-4 バリュートレーダーを加えたマーケット

1回のオークションは以下のような手順で行われる。まずオークション仲介者はRFB (Request For Bid) という、次のBidを要求するメッセージを全参加者に送る。RFBには、シグナルとして前回の価格が含まれている。各エージェントはこのシグナルに従って生産と消費（生産エージェント）あるいは価格の推定（バリュー/トレンドトレーダー）を行った後、売り、買い、あるいは何もしないというBidを返す。オークション仲介者はこれらのBidを集計し、需要供給曲線の交点から今回の価格を決定し、エージェントにFoodとGoldの交換を指示する。このような手順を繰り返すことによって、マーケットにおける価格変動が与えられる。

＜生産エージェントと投機家の効果＞

まず始めに生産エージェントのみからなるマーケットを見てみよう。乱数で与えられた異なるFood/Gold生産能力を持つ生産エージェントを10生成し、シミュレーションを実行する。図-3に示すように、市場価格は激しく振動する。この時、総需要および供給は著しい偏りを持ち、買い手のみ、あるいは売り手のみしか存在しない状態が

大半の期間を占める。このような振動は生産エージェントが前回の市場価格のみを参考に均一な振舞いをするこ
と、生産を開始してから理想的な在庫を持つまでに時間
差があることが原因と考えられる。

次にこのマーケットに投機家を加えてみる。生産エー
ジェントによって激しく振動するマーケットに、バリュート
レーダーを10追加すると、図-4に示すように市場価格
は急速に均衡へと向かう。これは、マーケットにFoodが
過剰となりFood価格が下落した時にはバリュートレーダ
ーが買支え、逆に、マーケットにFoodが不足して価格が
高騰した際に放出するためである。こうした市場介入に
も似たバリュートレーダーの働きによって市場価格の極
端な変動は抑えられ、需要と供給のバランスのとれた均
衡が実現される。

では、さらにこのマーケットにトレンドトレーダーを加
えてみることにしよう。トレンドトレーダーが有効に働く
ためには、実際に価格変動にある程度のトレンドが存在
する必要がある。そこで、これまで固定されていた生産
エージェントのGold生産能力を時間に応じて鋸型の変動
をするようにする。これによってFoodのFundamental
価格も時間に応じて変動し、トレンドが観測される。

この修正された生産エージェントのみのマーケットも以
前と同様に激しく振動し、バリュートレーダーを加える
ことによって安定する。このようにして得られた均衡価
格は時間とともにゆっくりと変動している。ここにトレ
ンドトレーダーを加えた結果が図-5である。

時刻 $t=540$ 付近で、価格がそれまでの変動幅を大きく
上回って高騰するバブルに似た現象が起きていることが
分かる。この現象が発生するためにはバリュートレーダ
ーとトレンドトレーダーの持つ資産の関係が重要となっ
ている。250 $<t<500$ の間、均衡価格は下がりつづけて
おり、そのためトレンドトレーダーは、全資産をGoldと
して保有している。 $t>500$ で、均衡価格が上がりはじめ
ると、トレンドトレーダーはいっせいにFoodを買おうと
する。バリュートレーダーがこの要求に対してFoodを売
ることで需要と供給が均衡している間は価格も落ち着い
ているが、バリュートレーダーのFood在庫がトレンドト

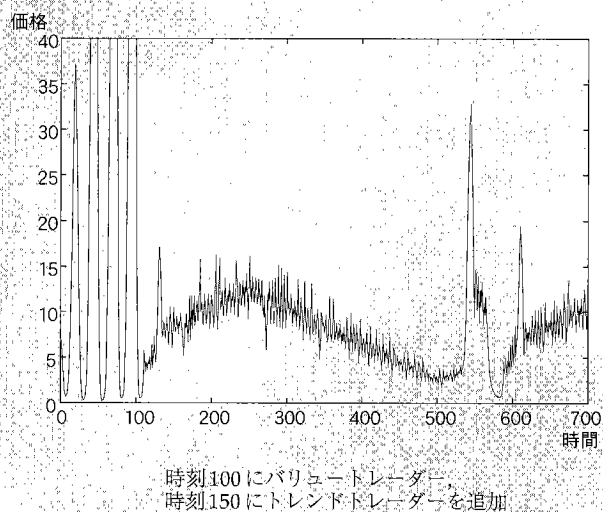


図-5 バブルの発生

レーダーのGoldよりも先に尽きてしまうと、需要過剰と
なり価格が高騰する。その後、トレンドトレーダーの
Goldが尽きると、一度反動で価格が下落した後安定する
のである。

＜シグナルを変えるとマーケットの安定性はどう影響 されるか？＞

再び、生産エージェントのみのマーケットについて詳
しく調べてみる。生産エージェントのみのマーケットでは
価格が激しく振動し、バリュートレーダーを加えること
によって安定するのを見た。このような均衡をバリュート
レーダーを加えずに、生産エージェントに与える価格
シグナルを変更することによって達成できないだろうか。

ここでは次のようなフィードバック系を考えている。ま
ず、RFBによってシグナルがエージェントに渡される。エ
ージェントはシグナルをみて生産物を決定し、また、在
庫に応じてBidを返す。この時、Bid価格はシグナルと在
庫量に依存している。オークション仲介者によって集め
られたBidから、また次のシグナルが決定される。

このようなシグナルとして、これまで通常の市場価格
(Prとする)を用いてきた。これを、集められたBidに含
まれる個々の価格や取引量といったオーダーブックの情



報を用いた他のシグナルに変更してみるとどうなるであろうか。

まずすべてのBid価格を単純に平均したシグナル(P0)を用いた結果を図-6(a)に示す。時刻100までPrを与え、その後P0へと変更している。シグナルP0によって、価格の振動がゆるやかに収まっていくのが分かる。

次に、オーダーブックの情報を更に活用するため、Bid中のFood量によって重み付け平均されたBid価格をシグナル(P1)として用いる。図-6(b)にあるように、P1を用いた場合、Prと同様の激しい振動が生じる。そこで、逆に、[Food量+定数]の逆数によって重み付け平均されたBid価格をシグナル(P2)としよう。結果は図-6(c)となる。シグナルP2によってマーケット価格は非常に速やかに収束することが分かる。

このようにシグナルを変更することによっても生産エージェントのみのマーケットを安定させられることを見た。シグナルP0とP2によって価格が安定し、P1によって不安定になることについては、次のような直感的説明が考えられる。

生産エージェントが多量のBidを出すのは、在庫の望ましい量からの隔たりが大きい場合であり、このように

均衡から大きく外れたエージェントのつける価格もまた、均衡価格とは大きく隔たったものとなる。そこで、P2のように均衡に近いエージェントの価格をより重視することで、市場全体を落ち着かせることができる。元のシグナルPrについても、オークションにおいて価格を定める際に需要供給曲線の交点を用いるためBid量の大きいものをより重視したものとなっており、P1と同様に価格が激しく振動するものと考えられる。

我々は文献5)において、さらに単純化したモデルを用いてシグナルと収束性について、解析的な研究を行った。2つの生産エージェントからなるマーケットにおいて、シグナルと余剰在庫についての発展方程式を導入し、シグナルごとに1回の価格サイクルによる振動の収束/発散の初期値依存を求め、回帰写像を示した。

オークションを使った新しい制御パラダイム

これまでのところ、マーケットというものを現実の人と人との財を交換して、必需品を入手したり、利益を得たりする場として捉え、エージェントを人の代替物として実験を行うことによって価格変動について解析することを目的としてきた。これに対し、工学的な制御における最適化問題を、制限されたリソースを取引するエージェントによるマーケットとみなし、マーケットシミュレーションによって最適解に近づくという研究も行われている⁶⁾。

元々経済学においても、マーケットにおける家計主体や企業の活動を解析する際に最適化問題として定式化して考えることができる。今度は逆に、最適化問題をマーケットとして読みかえて、その上でのエージェントの活動によって自然と均衡がもたらされるのを期待するのである。この時、各エージェントはそれぞれのリソースの配分に対して効用関数によって与えられる選好を持ち、この効用関数の値を最大化することを目的としている。マーケットにおいて、これ以上どのエージェントの効用も減少させずに全体の効用を増大させることができない状態をパレート最適と呼ぶが、競争市場において需要供給が均衡に達している時、そのマーケットはパレート最適でもあることが知られている。マーケットシミュレーションを用いた制御では、適当な効用関数を与え、マーケットが均衡に達するよう価格を調整することによって、パレート最適であるリソース配分を求めることを目的としている。

このようなマーケットに基づく制御(Market-based Control)は従来手法とは大きく異なるものであり、マ

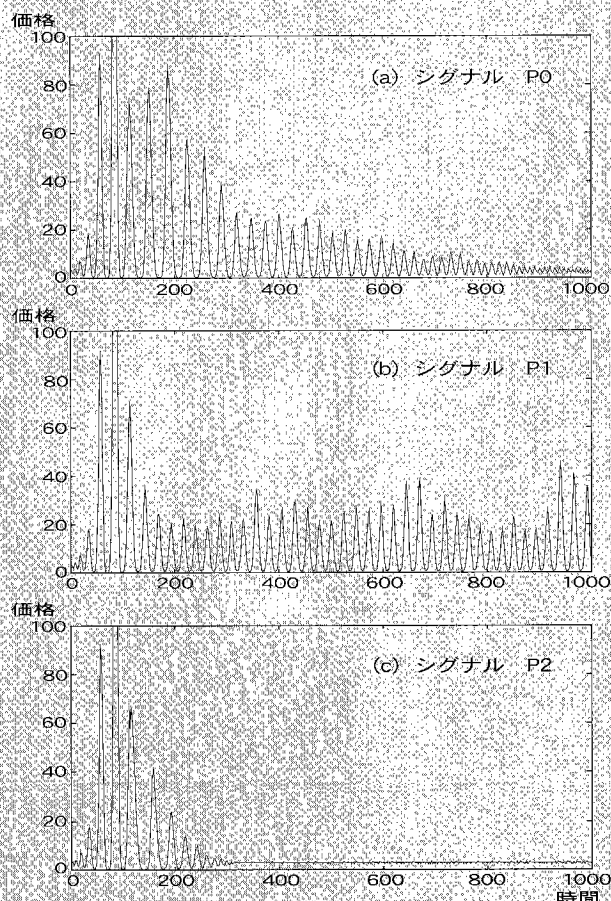
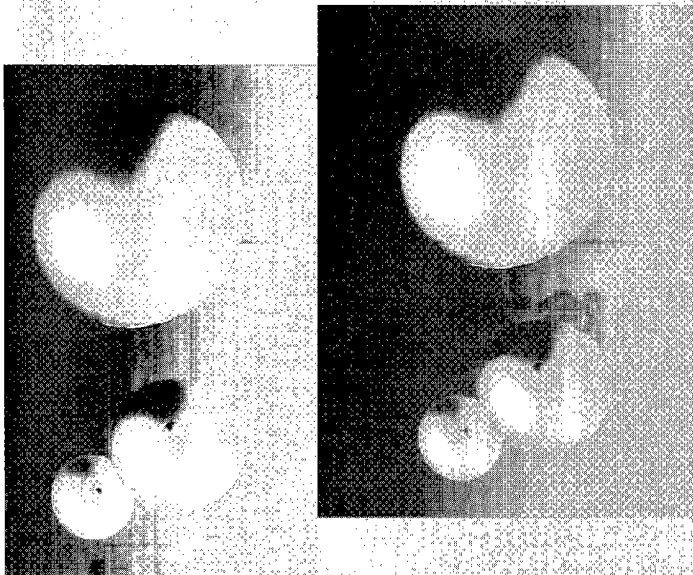


図-6 シグナルによる安定性への影響



マーケットに基づくパラダイム、あるいは、マーケット指向プログラミングと呼ばれることもある。マーケットに基づく制御によって、従来の最適化手法では困難なダイナミックに変化する多種多様なニーズに対する動的な最適配分を効率よく実行できると期待されている。

NTTの桑原氏らやAgoricsのMiller氏らは、ネットワークの限られたバンド幅をいくつかの通信経路に選好に応じて分配する問題について研究を行った⁶⁾。ネットワークアプリケーションのクライアントは、それぞれバンド幅や費用についての選好を持っている。エージェントは、クライアントの選好に応じて、バンド幅を取引するオークションに参加する。この場合、費用は現実の利用料金でもかまわないし、制御のために仮想的に割り振られたものでもよい。このような仮想的なマーケットによって、参加者がそれぞれ妥当と思える価格が定まり、選好に応じたパレート最適な配分が実現される。

また、XeroxのPalo Alto研究所では、ビルの空調制御をエージェント間のマーケットを用いて行った⁶⁾。このビルには、一定の冷風をビル全体に送る送風システムと、オフィスごとにこの冷風を取りこむ量を制限するバルブが設置されており、それぞれのオフィスにおいて内部の人間が快適となるようにバルブを調整する。このバルブの開閉度をオークションで売り買いするのである。オークションでは、我々がシミュレーションで用いたものと似たモデルによって売り買い双方のBidを集計し、需要供給曲線の交点を価格とする。また、このオークションでは仮想的な金がいられ、一定量の金オークションごとに各エージェントに割り振られる。このMarketを用いた制御は、実際にPalo Altoのビルを用いて実験が行われ、従来の制御法より良いパフォーマンスを示した。

これからの課題

本稿では、ソフトウェアエージェントを用いたマーケットシミュレーションについて概説し、一例として複数の単純なエージェントを用いたシミュレーションの結果を示した。このようなマーケットシミュレーションは従来の経済学とはまた異なった知見をもたらすものとして注目されている。

我々のシミュレーションでは共存する2種類の投機家の相互作用によって起こるバブルとその崩壊、また、生産エージェントによる激しい価格振動と、シグナルによる変化について見る事ができた。ここでは極力モデルを単純に押さえ、複雑な現象それ自体の再現ではなく、現象に不可欠な要素の抽出と解析的なアプローチに主眼をおいた。

始めに述べたように、人工市場の解析にはこのような単純なエージェントを用いた動力的な手法の他に、より複雑で投資家の相互作用や学習等による変化を重視した複雑系からのアプローチや、投資家あるいは企業間の競争に注目したゲーム理論的解析などがある。それぞれ得意とするところや適用範囲は異なり、現実のマーケットを理解するためには、今後これらの手法をうまく協調させて発展させる必要がある。

また、工学的な制御においても、マーケットという概念を資産配分問題を解く際の新たなパラダイムとして用いることで、動的に変化する複雑な異種混合系をスマートに扱えることをみた。これは、今後ますます発展するネットワーク上の多様なサービスやニーズに対応する上で重要性が増してくると思われる。しかし、実際に大規模に適用するには、その有効性や仮想マーケットの安定性等、まだ多くの課題が残されている。それらを解決するためにも、マーケットシミュレーションそれ自体の研究を行うことが重要である。

参考文献

- 1) Arthur, W. B., Durlauf, S. N. and Lane, D. A. (ed.): The Economy as an Evolving Complex System II, Addison-Wesley (1997).
- 2) Izumi, K.: An Artificial Market Model of a Foreign Exchange Market, Ph. D. thesis, The University of Tokyo (1998).
- 3) IBM Research: Information Economics Project, <http://www.research.ibm.com/infoecon/>
- 4) Steiglitz, K. and Shapiro, D.: Simulating the Madness of Crowds: Price Bubbles in an Auction-Mediated Robot Market, Computational Economics, Vol.12 (1998).
- 5) Mizuta, H., Steiglitz, K. and Lirov, E.: Effects of Price Signal Choices on Market Stability, WEHIA '99, <http://ciclaminio.dibe.unige.it/wehia/papers/mizuta-steiglitz-lirov.zip> (1999).
- 6) Clearwater, S. (ed.): Market-based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation, World Scientific, Hong Kong (1996).

(平成11年8月24日受付)