

# 人工市場シミュレーションを用いた金融市場の価格不安定性に係る考察

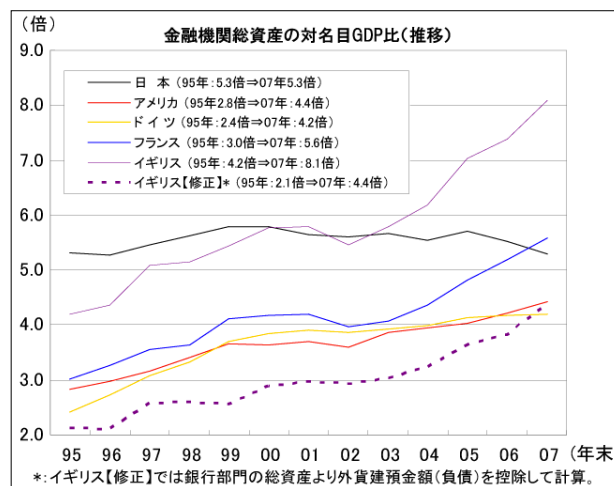
高橋 諒

東京大学大学院 総合文化研究科

## 1. 序論

近年、金融資産の膨張が顕著である。大和総研が2008年に作成した金融機関総資産の対名目GDP比推移表によれば、主要各国においては実体経済の反映であるGDPと比較して約4~8倍程金融資産が膨張していることがわかる。(図1)<sup>1</sup>

図1. 金融機関総資産の対名目GDP比推移



これらの金融資産の膨張は同時に脅威の拡大を意味する。実体経済に対して金融資産の適正規模自体は不明であるが、この実体経済と金融資産との間の乖離は一種のバブルが発生していたことを示している。人々は皆資産制約に直面しているため、このようなバブルにはいずれ修正がかかり、結果として金融恐慌が脅威として出現する可能性が指摘されていた。それが表面化した例として昨今起こったサブプライム・ローン危機は記憶に新しい。また、バブルの過程で発生する余剰資金は投機先を求めて世界中を彷徨い歩く。結果として、証券市場だけでなく原油先物や穀物等資源・商品市場が高騰し、エネルギー安全保障や食糧安全保障上の脅威をもたらし得るのである。

今般のサブプライム・ローン危機に伴う影響が如何に大きなものであったかを示す例としては、アイスランドの事例が挙げられる。アイスランドは、サブプライム・ローン危機以前国民一人

<sup>1</sup> 各国資金循環統計より大和総研作成。大和総研(2008)

当たりGDPで見て日本を凌ぐ世界有数の富裕国であった。しかしながら、今般の金融危機により多くの人が職を失い失業率が急上昇するとともに、旺盛を誇った一人当たりの名目GDPも大幅に減少することとなった。現在国としてもIMFに頼らずには国家破綻に陥りかねない危機となっており、現在もその脅威は進行中である。

現代の金融危機が本当に脅威的であるのは、膨張する金融資産に裏付けられたバブルにより発生する金融恐慌の影響が、金融取引を行う当事者に限定されない点に求められるだろう。その影響は密に結びつく経済主体間を伝播し、直接的な金融商品を扱う者を越えて世界中に波及する。昨今のサブプライム・ローン危機では、低所得者向け住宅融資であるサブプライム・ローン関連の金融機関の損失が、世界全体で1兆4000億ドル前後に上るとの見通しがIMFによって示された。<sup>2</sup>しかしながら、この損失は世界全体の損失で考えれば氷山の一角を形成するものでしかない。貿易の比較優位理論で代表されるように、国際経済は密に結びついており、互いに財やサービス、資本等を交換することで成立している。したがって、金融危機は世界から見ればごく一部の金融関係者に端を発する問題であるものの、金融危機に起因した経済危機により、結果として金融取引に全く関係のない人々が職や家を失う事態が発生し得るのである。

このような現状を踏まえて、英シンクタンクであるオックスフォード・リサーチ・グループ(Oxford Research Group)は2008年国際安全保障に関する年次報告書の中で金融危機に言及し、「国際安全保障に対する最も重大な脅威は、数億人が窮乏化し、それに伴う過度で暴力的な社会運動と紛争である」とした上で、金融危機をその原因となる窮乏化をもたらす問題であり、国際安全保障における最大の脅威であるとした。<sup>3</sup>また当該報告書においては、従来の議論から一步踏み込んで金融危機の本当の脅威は主として南の貧しい国で発生しているとし、現在の危機対策はこのような貧しい国で発生する被害を想定していないのではないかという問題提起を行っている。

金融恐慌がもたらす脅威とその対策について、我々はどのように捉えていくことができるだろうか。以上に述べてきた金融市場がもたらす脅威は、金融市場の否定に繋がるのだろうか。しかしながらそのような考えは現実的ではない。またそれらの議論を行う際には、金融市場が本来果たす役割を踏まえて論じていく必要があるだろう。金融市場が求められる背景としては様々な要素が考えられるが、私は主として次の3点に示す機能をもってその答えとしたい。それは(1)資金調達場を提供する機能、(2)株、株式市場においては、会社の支配権市場を提供し会社組織を社会にディスクローズさせる機能、(3)社会の価値判断基準が形成される場を提供する機能(間接金融部門では果たし得ない情報生産機能)、以上3点である。世界における経済のフロントランナーである我が国では、間接金融部門による情報生産機能だけでは適切な資金提供先を見つけ出すことは難しく、直接金融部門が「社会における価値判断の場」として機能し情報生産することによって資金をより必要とされる部門へ提供することが求められている。したがって、我々が目指すべき方向性としては、一方を肯定し他方を否定するという極限状態における対策ではなく、どうすれば双方

<sup>2</sup> IMF,2008,『国際金融安定性報告書(GFSR) 2008年10月』,<http://www.imf.org/external/japanese/pubs/ft/gfsr/2008/02/sumj.pdf>

<sup>3</sup> Paul Rogers,2008,"The Financial Crisis and Sustainable Security",Oxford Research Group-International Security Monthly Briefing

が両立できるかを絶えず模索していくことの延長線上になければならない。金融市場の強化と一方で発生する脅威の縮減、この両者を如何に同時達成していけるかが今問われているのである。

## 2. 問題意識

このように考えた際に、我々はどのような危機対策を講じる必要があるだろうか。私は金融市場の内部構造を考慮した市場政策が必要とされているのではないかと考える。金融市場における暴落現象は砂山の崩壊に喩えることができるだろう。砂山全体の崩壊は1粒の砂の僅かな動きから始まるように、どんなに大きい金融危機も最初はある国の金融市場における一つの売り注文による価格の下落から始まる。この暴落の「第一歩目」を緩和することで暴落の全体自体を緩和することができないだろうか。具体的には、金融市場における下落の連鎖を形成する売り注文は主として「ストップ・ロス・オーダー(Stop Loss Order)」であることが指摘されている。この「ストップ・ロス・オーダー」は人々の脅威に対する反応の現れであり、暴落の「第一歩目」が形成する極端な下落に伴い市場における恐怖心理が高まるにつれて加速度的に上昇していく。したがって、最初の下落を如何に緩和させ、市場の恐怖心理の高まりをどれだけ抑えられるかが想定以上に暴落が進行する事態を抑えられるかどうかの一つのキー・ポイントとなってくるのではないかと考える。

以上に述べた仮説を制度や政策として実際に実現・実施していくためには、どのような場合に暴落の「第一歩目」が始まるのか、どのような方法で緩和するのか等市場内部で起こるメカニズムを客観的に踏まえた上で論じる必要がある。そして従来経済学的手法としてその検証手段が閉ざされていたために、これらの制度における検討があまりなされてこなかった。この現状を打破するための一つの手法として、私はマルチ・エージェント・シミュレーション (Multi-Agent Simulation, MAS) が有用なのではないかと考える。マルチ・エージェント・シミュレーションは、エージェントと呼ばれる個々のマイクロ主体の振る舞いから、その総体的な結果として現れるマクロ的現象を創発し、そのマイクロ構造とマクロ的な結果との間にある関連性等について分析するためのシミュレーション手法である。通常我々が「社会」とか「市場」という言葉を使って表すものは、現実には形としてそれ自体が存在しているわけではない。これらは、我々一人一人が集団としてある単位となった際に、その群衆に対して名付ける言葉である。しかしながら、従来経済学ではこの既に人間集団をまとめた言葉から思考を始めねばならず、静学的にこれらの概念を捉えてきたため、現実に発生するこれらの群衆行動をうまく捉えることができなかった。そのような現状を打破する一手段として、コンピュータ上に多数の行動主体を用意し、それらを相互作用させることによって、現実と同様、ボトムアップ的に「社会」や「市場」というマクロ的現象を解明していこうとするものである。

このように考えると、金融市場はまさにマルチ・エージェント・シミュレーションが示す構造と同一構造を有していることがわかる。経済学においてプライス・テイカー(Price Taker)という言葉で表される通り、金融市場においては、マイクロ的行動主体である投資家等取引主体が取引を実施し、その総体的な結果として金融市場の価格が形成されるが、取引主体である一個人が金融市場

の価格形成に直接影響を与えることができるわけではない。金融市場の価格は、あくまでマイクロレベルでの行動主体をある群集として考えた時にその総体として現れるにすぎないのである。このようなマイクロレベルの積み重ねとその総体としてのマクロ現象との間にある関係性について、古典的な経済学ではその分析手法を持たなかった。しかしながら、現在マイクロ-マクロ間で働いている市場の内部構造を明らかにする必要性が生じており、その金融市場研究のニーズとマルチ・エージェント・シミュレーションがもたらす手法とは合致したものとなっているといえる。

以上に述べてきたように、私はこの経済不安の第1歩とも言える「第1歩目の暴落」に対する対策についても、今後は経済政策として取り組むべきではないかと考える。なぜならば、第1歩目の暴落を緩やかにすることで、その後連鎖的に続いていく極端な暴落全体を緩和することができるのではないかと考えるためである。そしてそのためには、市場内部の価格形成メカニズムを通して発生する暴落現象を科学的に理解する必要がある、それを考えるにあたっての手法を同シミュレーションは提供してくれるのである。この仮説を制度や政策として実際に実現していくためには、現状に対するより客観的な見識が求められるとともに、現状における地道な検証と知識の蓄積が必要とされるだろう。したがって我々は、将来起こり得る脅威に備え、このような手法を通じて、市場内部で発生するメカニズムについてより深い理解と見識を積み重ねていく必要があるのだ。

### 3. 金融工学と人工市場

私は、マルチ・エージェント・シミュレーションにおける研究が、経済学の研究を社会「科学」として押し進めることができるのではないかと考える。近年、従来の経済理論がマイクロ-マクロ現象をうまく捉えることができているために、その理論に欠陥を抱えていることが指摘されている。例えば、資金運用する際の柱として用いられている金融工学理論は、金融危機対策と同様に市場の内部メカニズムを考慮せず、単純化された世界で構築されたものであることが指摘されている。その代表例としては効率的市場仮説が挙げられるだろう。

効率的市場仮説(Efficient Market Hypothesis, EMH)は、1970年にシカゴ大学のユージン・ファーマ(Eugene Fama)により提唱された金融工学の基盤を築く基礎理論であり、利用可能なすべての情報を迅速に取り入れており、新規情報によって他市場参加者より有利になるという状況は生じないため、市場の挙動はランダムウォーク(Random walk)になるという仮説である。この理論に従えば、市場価格は市場の外部環境の反映にすぎないことになり、市場内部メカニズムはそれ自身では価格変動を作り出さない。この仮説を前提にすることで、1900年にルイ・バシュリエが「投機の理論」において提唱した、市場価格は正規分布に従うという仮定を取り入れることができたのである。そしてその後の金融工学理論もこの正規分布の仮定に基づいて構築されていった。具体的には、1970年代初にフィッシャー・ブラック(Fischer Black)とマイロン・ショールズ(Myron Scholes)が求めたブラック・ショールズ方程式(The Black Scholes formula)は、金融工学の世界では、資本資産価格モデル(Capital Asset Pricing Model, CAPM)、現代ポートフォリオ理論(Modern Portfolio Theory, MPT)と並んで重要とされる公式であるが、この有名な公式においてもボラティリティの分布は正規分布を仮

定しており、効率的市場仮説を前提とする世界でしか正しい値を導くことができない公式となっている。

しかしながら、金融市場の度重なる正規分布から逸脱した価格変動が経験的に知られるようになる中で、効率的市場仮説を疑問視する考え方が近年見直されている。代表格としては、マンデルブロ(Benoit.B.Mandelbrot)や経済物理学(Econophysics)が挙げられる。彼等は金融市場の価格は正規分布を超えた価格変動をすることに言及し、効率的市場仮説に警鐘を発しており、ファーマからブラック・ショールズまでの一連の金融工学理論は、相場を定めるごく僅かだが重要な変動を考慮せず、金融市場においてはそのことは致命的であるとした。具体的には、1987年10月17日に発生したブラック・マンデー(Black Monday)は効率的市場仮説に基づいた正規分布の世界を否定する際に良く取り上げられる歴史的事例である。この暴落では、1日にしてダウ工業平均株価は29.2%も下落。標準偏差でみると、正規分布に従う変動の一つの指標とされるシックス・シグマ(Six Sigma,  $6\sigma$ )を有に超える $22\sigma$ にも至った。ナシーム・ニコラス・タレブ(Nassim Nicholas Taleb)は著書「ブラック・スワン(The Black Swan)」の中で、このような金融市場の価格変動を「あり得ないことが起きた」ことの例えとして「ブラック・スワン(黒い白鳥)」という表現で比喻している。<sup>4</sup>

この「ブラック・スワン」現象が発生する現状を鑑みると、それを考慮していない金融工学の理論が十分に世の中の事象を説明するに至っていないことがわかる。それでは、この「ブラック・スワン」がもたらす脅威に対して、我々はどのような対策を講じることができるだろうか。今回作成したモデルはこの課題を検討するに際しての第一歩を提供するものである。対策を講じるに際しては現象に対する理解を進める必要があるだろう。「ブラック・スワン」現象のような価格不安定性はどのような要因によって導出されるのだろうか。そこで今回は、市場のメカニズムを理解する第1歩として、以上に述べてきた正規分布から外れた価格変動が、本当に市場内部のメカニズムに起因して現れるかどうかについて考察することで、その先にある対策を考えるための第一歩としたい。以下では考察にあたり今回構築したモデルの説明を行う。

## 4. モデル

### 4.1 概要

上記した考えを持つ私にとって、今回作成したモデルは目指すべき対策確立のための第1歩である。私はこのようなモデル構築を通じて、市場が持つ本質的な特性を理解していきたい。当モデルは、1種類の株式商品について「投資家」と「投機家」という2種類の市場参加者が取引を行うという単純な取引所市場を想定している。この骨と皮で構成された単純な株式市場において、内因的なメカニズムのみで正規分布から大きく乖離した市場価格が発生するかを観察し、それがどのような条件下で発生するのかを見ていった。

まず、シミュレーションの全体的な流れについて述べたい。シミュレーションにおける1ステップは金融市場での1営業日に相当し、各営業日において市場参加者は市場へ注文を発注する。シ

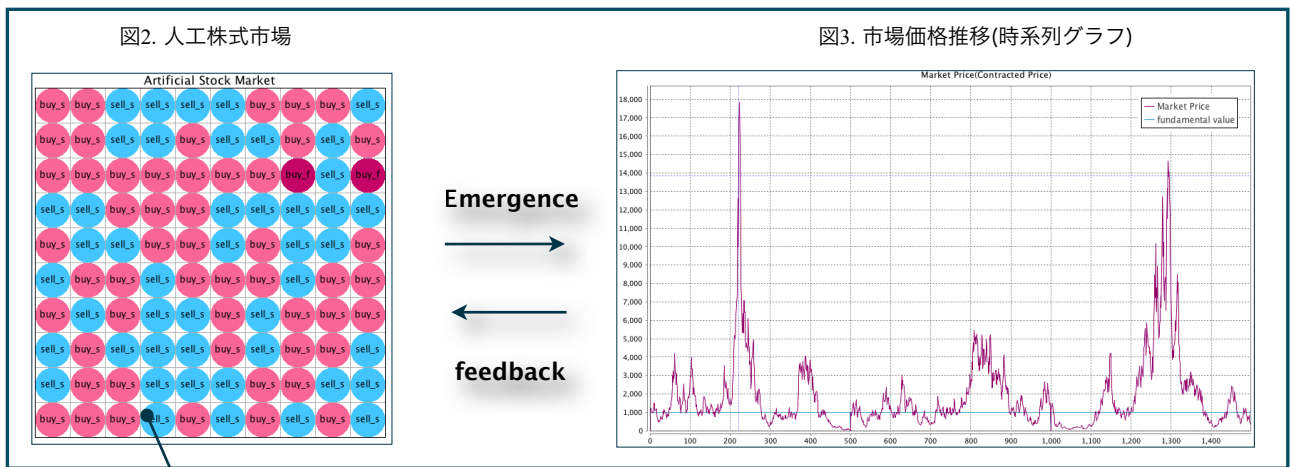
---

<sup>4</sup> Nassim Nicholas Taleb, 2008, "The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable, Penguin

シミュレーションの1ステップは、主として次の3点から形成される。(1) 市場参加者(投資家, 投機家)は自身の内部ルールに従い、注文を決定し、取引所へ注文を発注する。(2) 取引所は、自身に集められた注文を付け合わせ、約定処理を行い、買い手と売り手の均衡点である市場価格(Market Price)を算出する。(3) 取引所は、約定結果を各市場参加者へとフィードバックする。これを指定した営業日分動かすことによって、シミュレーションは進んでいく。

次にシミュレーションの全体的な流れについてイメージを膨らませるために、実際の画面を用いながら説明を加えていきたい。シミュレーションの全体像を以下に示す。(図2~8)

—シミュレーション全体像—



Agent's asset(average)

after simulation

図4.5. エージェント一人当たり平均資産(Wealth, Stock)

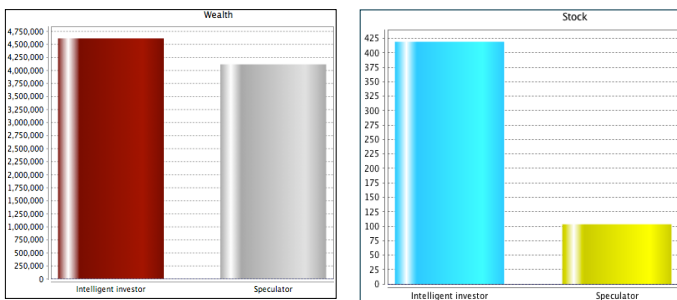


図6.7. エージェント一人当たり平均資産時系列推移(Wealth, Stock)

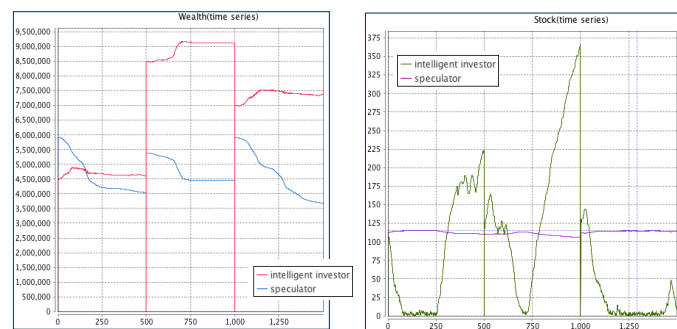
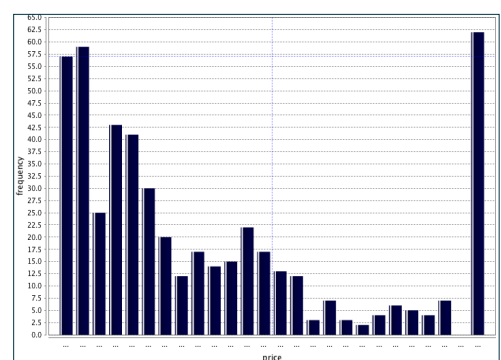


図8. Black Swan Estimator(市場価格の度数分布表)



当モデルでは、市場の挙動を見ていくために図2～8の7画面を用意した。図2は、実体としての金融市場をチェス盤(10×10)で表している。チェス盤上の各エージェントは、シミュレーション初期設定時にランダムに配置される。各市場参加者は、自身が買注文を発注していれば赤色に、また売注文を発注していれば青色に変化する。そのため当画面を通じて、市場価格が今熱気を帯びて上昇傾向にあるのか、逆に冷やされて下落傾向にあるのか、チェス盤全体が赤色を帯びているか、青色を帯びているかで市場動向を推察することができる。また、市場参加者の数は基本的にコントロールパネルを通じて自由に設定することができる。設定方法としては、初期設定時に(1)市場参加者の総数と(2)総数の内訳として、投資家と投機家各々の人数、の2点を設定すればよい。

今回のシミュレーションにおいては、市場参加者の総数は100に固定した上で、投資家と投機家の内訳を変更させ、価格形成がどのように変動するか見ていった。図3は、ミクロレベルの市場参加者による発注行動の結果、マクロ的に創発される市場価格の時系列グラフを表している。当グラフにおいては市場価格の推移を赤で表し、またその価格変動の比較として、投資家エージェントが予想するファンダメンタル価値における平均値の推移を青で表している。これら赤と青の変動の傾向を見ることで、市場価格が企業の本来の実力であるファンダメンタル価値に沿った形で変動しているのか、それとも乖離した状況なのかが把握できる。図4,5は、投資家、投機家それぞれが所有する2つの財産を表す「富(Wealth)」と「株券(Stock)」の一人当りの平均値を棒グラフで表し、図6,7はその時系列推移を表している。各エージェントは「富」と「株券」という資産を持ち、資産制約を有しているが、これらの資産は株の売買によって刻々と変動していく。これらの値の変化を見ることによって、各エージェントの間でどのような取引が行われているか、市場内部で行われている売買の傾向を可視化した。最後に、図8は「Black Swan Estimator」と名付けた度数分布表である。この度数分布の形状をみることによって、当該試行における価格形成がおおよそ正規分布に準じた変動になっていたか、反対に全くそれに囚われない変動になっていたかを可視的に把握することができる。度数分布表を作成するに際しては、レンジを200として、0から5000超までの26区分に範囲を区切っておき、その範囲の中に該当する価格が何度現れたか、頻度を集計することで作成した。この度数分布表において、分布の中心から遠く離れたところで、値が多く発生している場合には、ブラック・スワンで表されるような価格形成があったものとみなす。なお、Black Swan Estimatorは、シミュレーションの最後に1度だけ算出されるように設定してある。

以上で述べてきたように、当シミュレーションモデルは、市場参加者による発注行動、取引所による売買注文の付合せ処理、付合せ結果における各市場参加者へのフィードバック、以上3点により1ステップ(取引所の1営業日)が形成されており、これを指定日数分繰り返すことでシミュレーションが展開されていくというシミュレーションの流れになっている。

## 4.2 エージェント

モデルのエージェントとしては、投資家エージェントと投機家エージェントの2種類を想定した。各エージェントは、「富(Wealth)」と「株券(Stock)」という財産を保有しており、資産制約を有している。具体的には、買注文は、富が買いたいと考える株式の希望購入金額以上である場合

認められ、反対に売注文は、株券がエージェントが売りたいと考える希望売却数量以上である場合に認められている。なお、売買が成立した際には取引所からフィードバックされる約定価格と約定数量を受けて、各エージェントの資産である富と株券は刻々と変動していく。資産の増減を示す式については以下で示す。

(買注文の場合)

$$\begin{aligned} W_t &= W_{t-1} - P_{t-1}Q_{t-1} \\ S_t &= S_{t-1} + Q_{t-1} \end{aligned}$$

(売注文の場合)

$$\begin{aligned} W_t &= W_{t-1} + P_{t-1}Q_{t-1} \\ S_t &= S_{t-1} - Q_{t-1} \end{aligned}$$

$W_t$ :  $t$  期の富,  $W_{t-1}$ :  $t-1$ 期の富,  $S_t$ :  $t$ 期の株券,  $S_{t-1}$ :  $t-1$ 期の株券,  $P_{t-1}$ :  $t-1$ 期の約定価格,  $Q_{t-1}$ :  $t-1$ 期の約定数量

次に、投資家と投機家の行動ルールについて見ていきたい。まず、投資家エージェントであるが、当エージェントはモデル内において「賢明なる投資家(Intelligent investor)」とされているように、ベンジャミン・グレアム(Benjamin Graham)が1949年にその著書「賢明なる投資家(The Intelligent Investor)」で記した投資家像を念頭に置いている。具体的には、投資家は各ステップ毎に企業の資産等の基礎的価値であるファンダメンタル価値について予想を行い、その予想を自身の投資判断の基準とする。この時、企業の実質的な価値を表すファンダメンタル価値は、急激に乱高下を繰り返すような類の変数ではないと判断し、正規分布に従って変動するものとした。したがって各エージェントは、ステップ毎に証券アナリスト等から提示される情報を参考にしながら、自身の基準に基づき独立してファンダメンタル価値を予想し、これを基準として売買行動を決定する。具体的には、 $t$ 期の予想ファンダメンタルズが $t-1$ 期の市場価格以上であれば、「市場価格は割安である」と判断し、 $t-1$ 期の市場価格付近で「買い」注文を出す。また、 $t$ 期の予想ファンダメンタルズが $t-1$ 期の市場価格未満であれば、「市場価格は割高である」と判断し、 $t-1$ 期の市場価格付近で「売り」注文を出す。なお、発注価格は直近の市場価格周辺で定め、注文数量は1~5の乱数で求める。

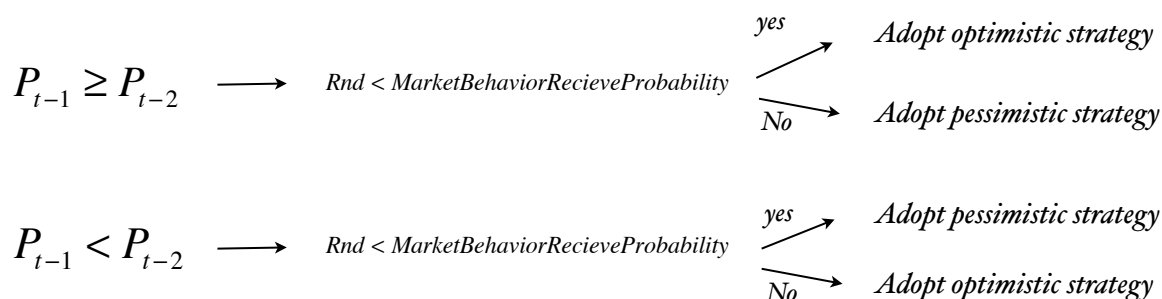
次に投機家であるが、当エージェントは株式の基礎的な価値を考慮せず市場の趨勢のみを考慮して売買行動を決定するエージェントである。投機家エージェントは「楽観主義戦略(optimistic strategy)」と「悲観主義戦略(pessimistic strategy)」という2つの売買戦略を持っている。楽観主義戦略とは市場価格は現在上昇傾向にあると判断し、将来の価格上昇を期待して買い注文のみを出す戦略であり、悲観主義戦略とは市場価格は現在下落傾向にあると判断し、将来の価格下落を期待して売り注文のみを出す戦略である。

投機家エージェントは当期における注文を定める前に、市場動向を鑑みてこれら2つの戦略の中から自身の取引戦略を決定する。具体的には、投機家の戦略は「直近の市場動向」と自身が持つ市場の動向に身を任せる度合いを決める「市場動向受入確率」の2点に依存する。市場動向受入確



率(0~1までの0.1刻みの小数)は、初期設定で外部的に定めることができる。投機家エージェントは各ステップ毎に乱数を発生させてその乱数と自身の市場動向受入確率を比較し、乱数が市場動向受入確率未満であれば、市場の流れに沿った売買戦略を選択する。つまり、投機家は $t-1$ 期の市場価格が $t-2$ 期の市場価格以上であれば、市場は現在上昇傾向にあると判断する。そして乱数を発生させて乱数が「市場動向受入確率」未満であれば「楽観主義戦略」を採用する。反対に乱数が「市場動向受入確率」以上であれば、「悲観主義戦略」を採用する。また、 $t-1$ 期の市場価格が $t-2$ 期の市場価格未満であれば、市場は現在下落傾向にあると投機家は市場動向を判断する。そして乱数を発生させて乱数が「市場動向受入確率」未満であれば「悲観主義戦略」を採用し、そうでなければ「楽観主義戦略」を採用する。なお、注文数量は投資家と同じく1~5の乱数で求める。(図9)

図9. 投機家の戦略選択



### 4.3 取引所機能

取引所機能における価格決定メカニズムには、東京証券取引所等実際の証券取引所でも用いられている板寄せ方式を導入した。板寄せ方式とは、取引所において1日の取引の始めや終わりの値段(始値、終値)を求める際に用いられる方式である。当価格決定メカニズムを導入することにより、より有利な価格を提示した市場参加者から優先的に売買を成立させる「価格優先原則」をモデルの中に組み込むことで、実際の取引所と同様に公平な取引を保証するとともに、アウトプットである市場価格の算出をより現実に近い形で算出できるようにした。当価格決定メカニズムである板寄せ方式は、和泉(2003)<sup>5</sup>とU-mart Project<sup>6</sup>における価格決定メカニズムを参考にして、artisocに実装した。

artisocで市場の売買を集約させるにあたっては、各エージェントを「注文」そのものとみなすことで実現した。エージェントは各ステップにおいて、自身の行動ルールに従い、売買フラグ(BUY or SELL)、注文価格、注文数量という主として3つのパラメータの値を決定する。取引所は各ステップの終了時点において、それらのエージェントが自身の「性質」として有しているこれら3つのパラメータを集約することで、取引所機能である(1) 売買の付合せ、(2) 市場価格の算出、及び(3) 各

<sup>5</sup> 和泉潔,2003,『人工市場 市場分析の複雑系アプローチ』,森北出版

<sup>6</sup> 佐藤浩, 久保正男, 福本力也, 廣岡康雄, 生天目章, 2000, 『人工市場のシステム構造』, 人工知能学会誌15巻6号

市場参加者への付合せ結果のフィードバック、以上3つの処理を実行する。

取引所の機能の中核を占めるのは、(1) 売買の付合せ処理である。売買の付合せ処理は、集約した注文を一旦整理した上で、価格別の買累計・売累計の算出を行い、エージェントから発注された注文1件毎に対して約定可否のフラグをつけていくことで形成される。

取引所への注文形態としては、通常「指値注文」と「成行注文」の2形態が存在する。指値注文とは、売買価格を明示して発注する注文であり、成行注文とは売買価格を明示せずどの値段でも売買執行可能として発注する注文である。当モデルにおける市場参加者からの注文形態は、基本的に指値注文を念頭に置いている。したがって価格 $P_i$ で買指値注文を発注した場合には、価格 $P_i$ 以下であれば株券を購入するという意思表示を示し、価格 $P_i$ で売指値注文を発注した場合には、価格 $P_i$ 以上であれば株券を売る意思表示をしたことを意味する。

- ・ 価格 $P_i$ で買指値注文を発注 → 価格 $P_i$ 以下であれば、数量 $Q_i$ を買う
- ・ 価格 $P_i$ で売指値注文を発注 → 価格 $P_i$ 以上であれば、数量 $Q_i$ を売る

なお、成行注文は指値注文を拡張することで実現した。具体的には、成行買注文は現在の市場価格より2倍の価格で買指値注文を発注したこととみなし、また売成行注文は現在の市場価格の1/2倍の価格で売指値注文を発注したことと同義と見なしている。当該成行注文は、投機家が発注する際の注文形態として用いられる。

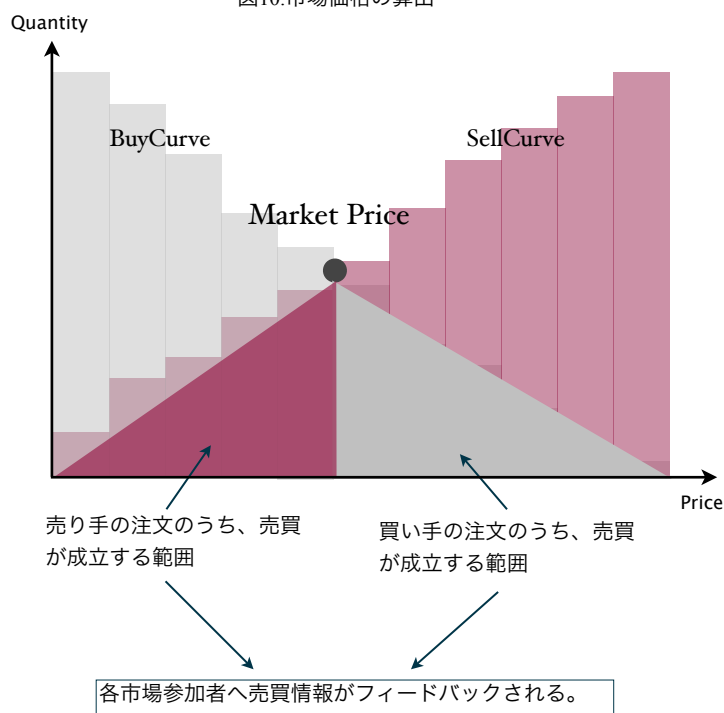
当モデルにおける注文 $Order_i$ は、売買フラグ( $Flag_i$ )、注文価格( $P_i$ )、注文数量( $Q_i$ )という3つのデータセット $Order_i(Flag_i, P_i, Q_i)$ で表されるため、上記した発注形態を踏まえると買注文と売注文の累計によって描かれる曲線( $BuyCurve(p)$ ,  $SellCurve(p)$ )は以下の式で表すことができる。

$$BuyCurve(p) = \sum_{i, Flag=Buy, P_i \geq p} Q_i$$

$$SellCurve(p) = \sum_{i, Flag=Sell, P_i \leq p} Q_i$$

付合せ処理に際しては、上記式に従い各注文価格毎の売累計と買累計を描き、累計が逆転する交点を求めることで、市場価格と約定数量を決定した。したがって市場価格は $BuyCurve(p)$ と $SellCurve(p)$ の交点として求められ、この価格を基準として全体の売買成立数量を求める。(図10)

図10.市場価格の算出



## 5. シミュレーション

### 5.1 概要

以上に述べてきた市場モデルを用いて、価格の不安定性について考察を行う。効率的市場仮説が主張するように、市場は外部環境の反映であり、市場内部の内因的なメカニズムのみでは、正規分布から乖離するような大きな価格変動は現れないのだろうか。

これを確かめるために、2つのシミュレーション(シミュレーション1,シミュレーション2)を実施した。試行1ではエージェントの種類と市場の価格形成との間にある関係性について見ていき、試行2では「投機家の割合」と「市場動向受入確率」という2つのパラメーターに着目し、価格の不安定性をもたらす要因について見ていった。なお、以下のパラメーターは所与としている。ただし市場動向受入確率においては、シミュレーション2で0~1まで0.1刻みで変化させた。(表1)

表1. 所与としたパラメーター

設定パラメーター	設定値
市場参加者数	100
取引営業日	500
市場動向受入確率	0.5*
<i>Wealth</i> の基準値	1,000,000
<i>Stock</i> の基準値	20
外生的に与えるファンダメンタル価値の平均	1,000
外生的に与えるファンダメンタル価値の分散	10

## 5.2 シミュレーション1

### 5.2.1 設定

シミュレーション1では、エージェントと創発的現象である市場の価格形成との間にある関係性に着目する。エージェントの種類と市場の価格形成との間にある関係性を見ていく上で次の3つのケースを想定した。それは(1) 全員投資家の市場(投資家100人)、(2) 投資家と投機家が半数ずつの市場(投資家50人、投機家50人)、(3) 全員投機家の市場(投機家100人)である。これら参加者の割合以外のパラメーターは全て同一条件で実施した。これら3つのケースの間で価格形成に差は発生するのか検証する。なお、シミュレーションを実施するに際しては、500ステップ(=500営業日)を1試行とし、それを3回繰り返すことで、当該1ケースの結果を判断することとした。したがって、1500ステップ(500ステップ×3)の結果をもって、大きく価格が乖離するような変動が発生していないか結果を考察する。

### 5.2.2 結果、考察

シミュレーション1において計測した各ケースにおける結果を図11～13に示す。まず、(1) 市場参加者全員が投資家の場合、3試行ともに市場価格そしてエージェントの資産はほぼ一定に保たれており、変動が極めて少ないことがわかる。またその結果、Black Swan Estimatorをみても、ほぼ一つのレンジでしか価格は発生していない。この試行から仮にすべての投資家がファンダメンタルズに基づき投資行動を行っている場合には、市場の価格はそれ自身の内在的なメカニズムだけでは変動しないことが明らかとなった。(図11)

次に、(2) 投資家と投機家が半数ずつの市場の場合、(1) に比べて市場価格は上下動が発生しており、エージェントの資産も変動していることがわかる。しかしながらBlack Swan Estimatorをみると正規分布に似た形状を示しており、ブラック・スワンで言われるような大きな価格変動に起因する特異値は検出されていない。また、エージェントの「富」の値については、3試行ともに投資家の「富」はほぼ一定に推移しているのに対して、投機家の「富」は減少する傾向がみられた。このことから当該ケースにおいては、投資家の戦略は投機家の戦略に比べてより安定した戦略であることが伺える。(図12)

最後に、(3) 市場参加者全員が投機家の場合、市場価格の動向が現実の市場と似通った価格形成がなされていることがわかる。市場価格は(2)よりもさらに上下動が激しくなっている。そしてBlack Swan Estimatorをみると、一番右端のレンジである価格が5000超の価格もかなり現れていることがわかり、ブラック・スワンで言われるような大きな価格変動が現れていることがわかる。また、投機家の資産については、3試行ともに「株券」の値が一定値であるのに対して、「富」の値は減少傾向にあり、かなり強い傾向が現れていることがわかる。(図13)

以上をまとめると、図11～13の3ケースで示されるようになりかなり明白な結果が現れた。まず市場価格については、全員が投資家の市場の場合に価格は全く動かなくなるのに対して、投機家が入るとその割合が増えるに従って、価格の変動はより大きなものになっていくことがわかる。このこ

とから、市場の不安定性には投機家の働きがかなり有意に働いていることがわかる。さらに全員が投機家のエージェントの場合、ブラック・スワンとも考えられる価格形成が現れており、この単純な人工株式市場の中にも大きな価格変動を生み出すに足る要因が含まれていることがわかる。

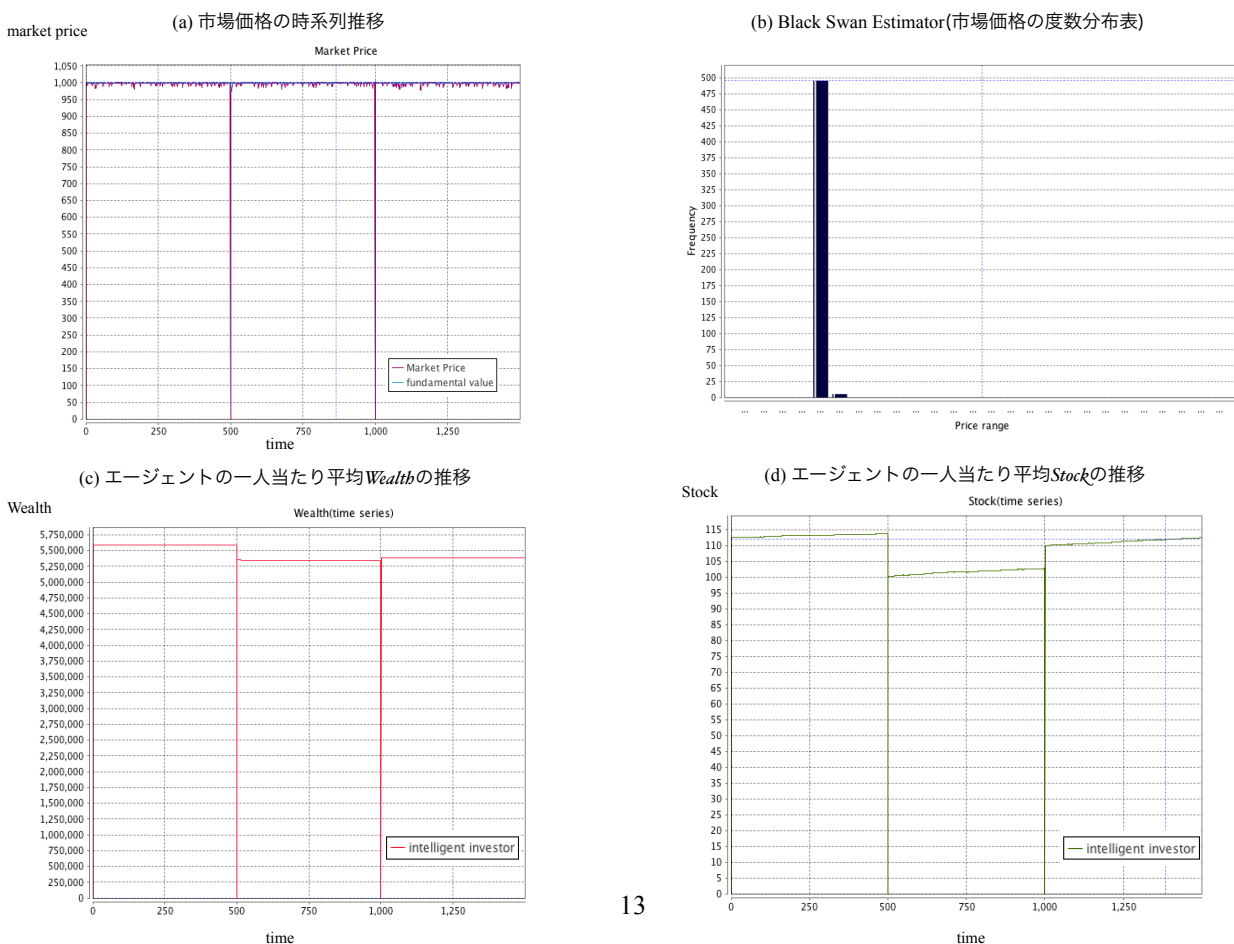
次に資産については、いずれのケースにおいても投資家の資産は安定していたが、投機家の資産は特に富において減少傾向を示すことがわかった。このことから効率的市場仮説では否定される証券アナリストの存在が、当モデルでは肯定されることがわかる。証券アナリストが調査・分析を行うことで提供される企業のファンダメンタル価値に関する情報があるからこそ、投資家の資産は大幅に減少することはなくなり、常に安定した資産を維持することができているのである。

最後に当シミュレーションから得られる示唆について述べておきたい。シミュレーション結果から鑑みると、価格変動が安定した市場を創るためには、「投資家」の役割が重要となるようだ。したがって、如何に「市場価格」ではなく、株式市場を構成する実体をなす企業そのものに目を向かせるような市場設計、情報提供を行っていくかが、安定した市場を創る上での一つの鍵になってくると考える。

#### ーシミュレーション1試行結果ー

(1) 全員投資家の市場(投資家100人), (2) 投資家と投機家が半数ずつの市場(投資家50人、投機家50人), (3) 全員投機家の市場(投機家100人), 以上3ケースについて試行を実施した。各ケースについて、以下5種類の図で結果を表す。(a) 市場価格の時系列推移, (b) Black Swan Estimator(市場価格の度数分布表), (c) エージェントの一人当たり平均Wealthの推移, (d) エージェントの一人当たり平均Stockの推移, (e) 前日との価格差の度数分布表における正規分布とのフィッティング。

図11. (1) 全員投資家の市場(投資家100人)のケース



(e) 前日との価格差の度数分布表における正規分布とのフィッティング

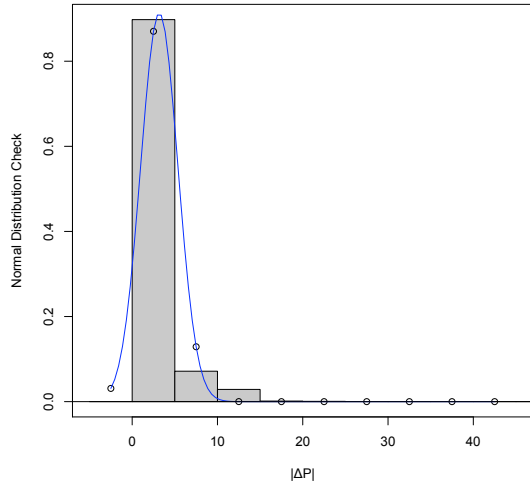
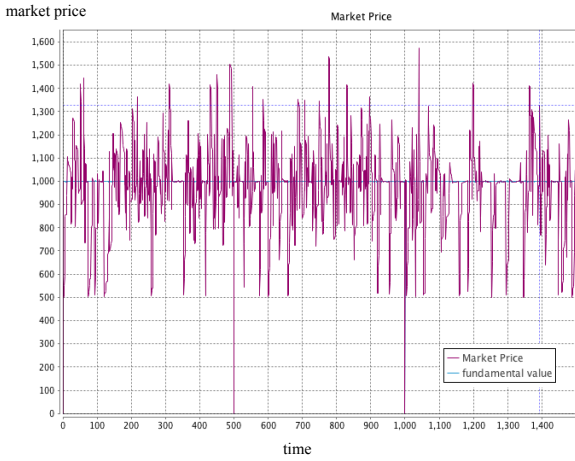
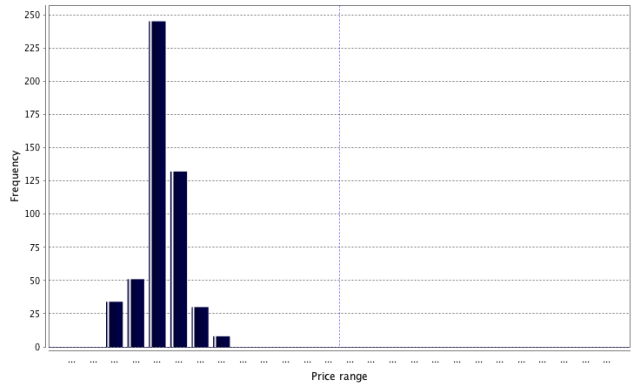


図12. (2) 投資家と投機家が半数ずつの市場(投資家50人、投機家50人) のケース

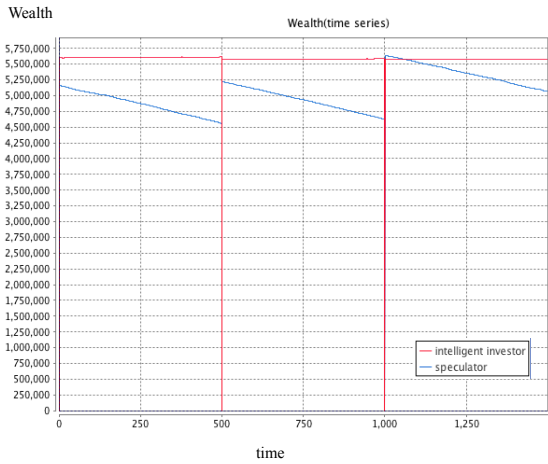
(a) 市場価格の時系列推移



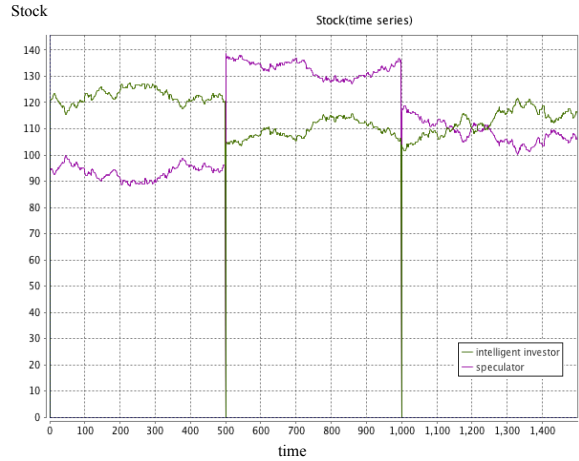
(b) Black Swan Estimator(市場価格の度数分布表)



(c) エージェントの一人当たり平均Wealthの推移



(d) エージェントの一人当たり平均Stockの推移



(e) 前日との価格差の度数分布表における正規分布とのフィッティング

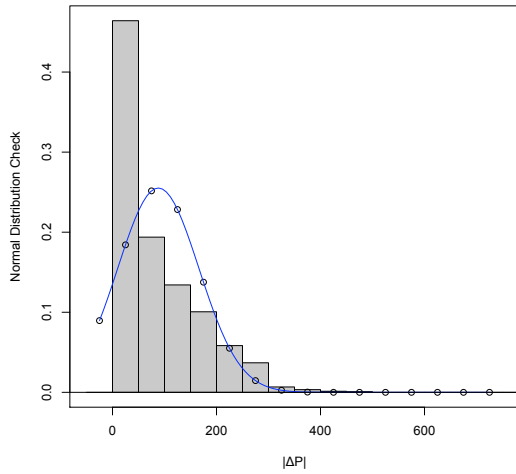
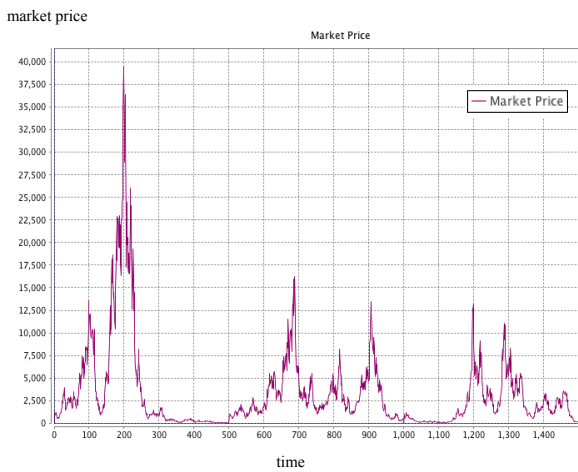
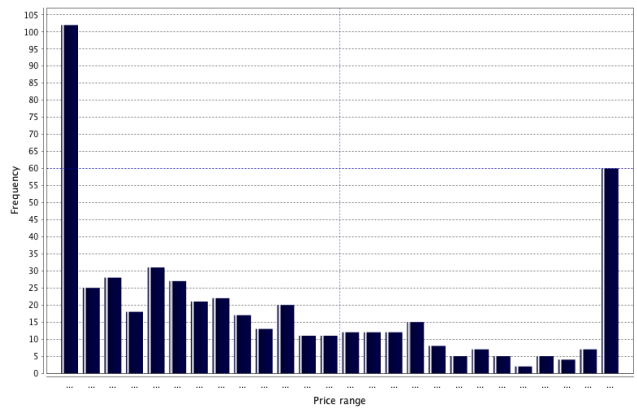


図13. (3) 全員投機家の市場(投機家100人) のケース

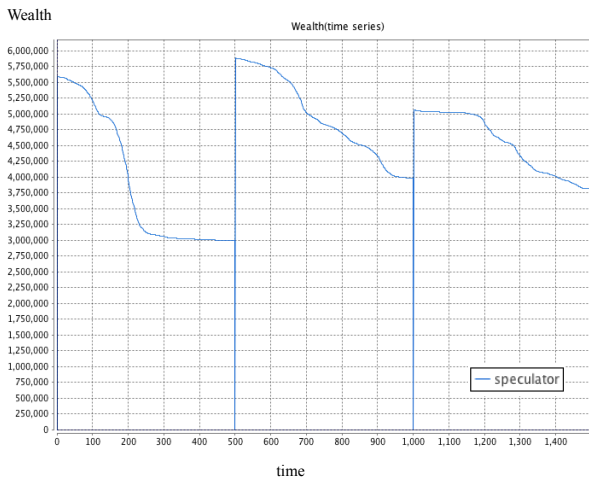
(a) 市場価格の時系列推移



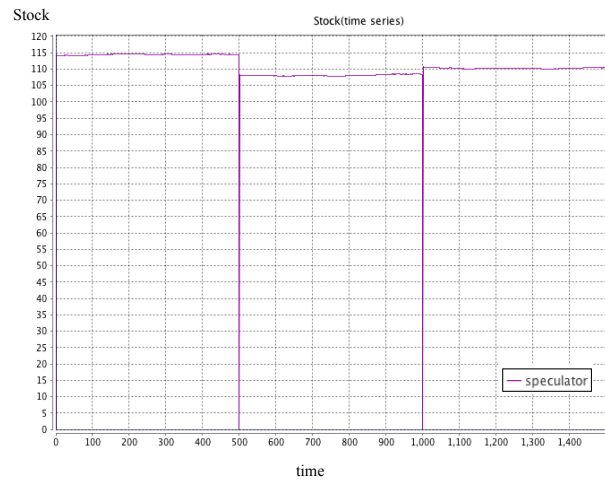
(b) Black Swan Estimator(市場価格の度数分布表)



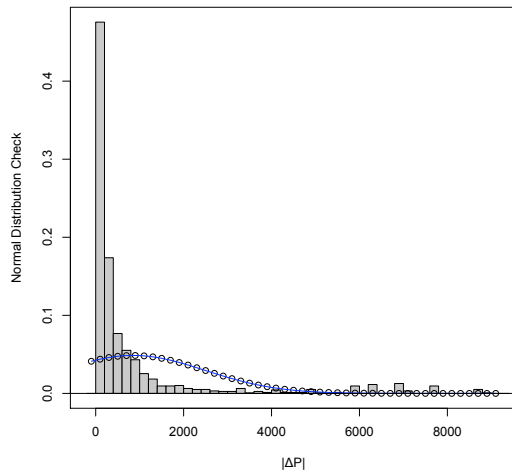
(c) エージェントの一人当たり平均Wealthの推移



(d) エージェントの一人当たり平均Stockの推移



(e) 前日との価格差の度数分布表における正規分布とのフィッティング



## 5.3 シミュレーション2

### 5.2.1 設定

シミュレーション2では、シミュレーション1で現れた価格の不安定性をもたらす要因としての「投機家」エージェントの働きに注目する。具体的には、「投機家の割合」と投機家エージェントがもつ「市場動向受入確率」という2つのパラメーターに着目し、これらのパラメーターと市場価格との間にある関係性について見ていった。そのための手段としては、投機家の割合を0~1まで0.1ずつ変化(11通り)させるとともに、「投機家が持つ市場動向受入確率」についても0~1まで0.1ずつ変化(11通り)させることで、それぞれのパラメーターの組み合わせの場合に現れる市場価格の変動について考察する。したがって、総ケース数としては121通り(=11×11)あり、各ケースについて1試行(500ステップ)を3回繰り返す(500ステップ×3試行=1500ステップ)ことで結果を判断することとした。

当シミュレーションの目的は、シミュレーション1から導かれたブラック・スワンともとれる大きな価格変動が、どのような条件下で生じるか、不安定性が現れる条件を探ることにある。なお、企業のファンダメンタル価値と比較して2倍超の価格乖離をもって大きな価格変動が発生したとみなすこととした。表1で表される結果のマトリクス上では、「×」を「大きな価格変動が発生していない」フラグ、「○」を「大きな価格変動が発生した」フラグとして区分している。

### 5.2.2 結果、考察

シミュレーション2において計測した結果を表2に示す。表2のマトリクスからわかることとして、次の2点を挙げたい。まず1点目は、市場における投資家の割合が過半数を超える場合、ブラック・スワンに代表される価格変動は姿を現さなかったことである。表2のマトリクスから読み取れるように、投機家の割合が0~0.4の場合全てのケースにおいて大きな価格変動はみられなかつ



た。これは投機家の割合の方が投機家よりも多い市場の場合、ネガティブ・フィードバックが効く市場となっており、市場価格は比較的安定していることがいえる。次に2点目は、投機家の割合が0.5以上となった場合、大きな価格変動が行われるかどうかは市場動向の受入確率次第であることである。そして投機家の割合が高くなればなるほど、基本的には市場動向受入確率は低い値でも大きな価格変動は現れることがわかった。

—シミュレーション2試行結果—

「投機家の割合」と投機家もつ「市場動向受入確率」という2つのパラメーターに着目し、これらのパラメーターと市場価格との間にある関係性について見ていった。「投機家の割合」と「市場動向受入確率」双方のパラメーターを0～1まで0.1刻みで変化させていくこと(11×11=121通り)で市場価格の観察を行った。これらの結果については、表2のマトリクスで示す。なお、証券アナリスト等から外性的に報告される企業のファンダメンタル価値と比較して2倍超の価格乖離が発生している場合を「○」で、2倍未満の場合を「×」で表現した。

表2. シミュレーション2試行結果マトリクス

市場における投機家の割合

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0.1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
0.2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
0.3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
0.4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
0.5	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
0.6	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
0.7	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
0.8	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
0.9	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
1.0	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○

市場動向受入確率

## 6. 結論

本稿では、マルチ・エージェント・シミュレーションの手法を使って、ミクロな行動主体である市場参加者の取引行動からマクロ的に創発される市場価格を算出し、どのような状況下で大きな変動が現れるようになるか、市場価格の不安定性について考察した。そしてそのために、投資家と投機家という2種類のエージェントが1種類の株式商品について売買を行う取引所市場を想定した。またモデルを構築するにあたっては、ルールや構造は極力単純化し、どのパラメーターが市場の不安定性に影響を及ぼしているかを明確にするようにした。

モデルのシミュレーション結果としては、次の4点が示された。(1)今回作成した単純な市場においても、その内因的なメカニズムでブラック・スワンに代表される大きな価格変動が出現した。

(2) エージェントに「資産制約」という現実的な投資制約を課したとしても、本稿の単純なモデルで大きな価格変動が観察された。(3) 価格の不安定性をもたらすパラメーターとして「投機家の割合」と「市場動向受入確率」が示された。(4) 投資家の資産は投機家の資産と比較して安定しており、特に価格が高騰・暴落する際には投機家から投資家へと資産が転移する様子が確認された。

これらのシミュレーションの結果から、次に示す2点の示唆を得た。1点目は、投資家の投資行動に基づいたネガティブ・フィードバックが市場を安定させる要因の一つとして考えられることである。したがって、価格が安定した市場を構築するためには、市場参加者の目を如何に市場価格ではなく、市場を構成する企業そのものに向かわせるかが鍵となってくると考える。このような動きを促進する市場設計、あるいは市場参加者への情報提供が求められているのである。次に2点目は、証券アナリスト等ファンダメンタル価値に関する情報を生産する部門の必要性である。効率的市場仮説に従えば否定されるこれらの情報生産部門の存在であるが、当モデルにおける投資家エージェントの資産が常に安定を保っていたように、これらの部門による情報生産があるからこそ、ファンダメンタル価値に関する情報を投資家が入手することが可能になり、投資行動を行うことができたのである。我々はこのような情報生産部門を拡張させるとともに、これらの情報に対する投資家からのアクセシビリティを高める必要があるだろう。

最後に、今後の課題として2点を挙げたい。まず1点目は、エージェントの精緻化である。本稿のモデルでは、どのパラメーターが影響を与えているかについて一定のトレーサビリティを確保するために、エージェントの設定を極力単純化することを心掛けた。しかしながら、今後はより具体的にエージェントの動きと市場価格との間にある関係性について見ていくために、学習行動をはじめとしてより精緻なルールを加えていき、考察を深めていきたい。次に2点目は、市場の不安定性を緩和する市場制度の研究である。当モデルでは、市場価格の不安定性がどのような状況で現れるかという点に焦点を当ててきたが、今後は価格の不安定性を緩和する市場制度についてより考えを深めていきたい。それは、これらの知見の蓄積が市場の内部構造を考慮した危機対策確立へと繋がっていくのではないかと考えるためである。金融市場の影響が世界に大きな影響を与えるようになった今日、市場の挙動や特性を科学的に分析し、より強固な金融システムや規制の枠組みについて議論を重ねる必要があると考える。

## 参考文献

- 山影進,2007,『人工社会構築指南—*artisoc*によるマルチエージェント・シミュレーション入門』,書籍工房早山
- 山影進,服部正太,2002,『コンピュータのなかの人工社会—マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系』,構造計画研究所
- Thomas Lux & Michele Marchesi,1999,"Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market", *nature*
- 和泉潔,2003,『人工市場 市場分析の複雑系アプローチ』,森北出版
- 和泉潔,植田一博,2000,“人工市場入門”,人工知能学会誌,Vol.15, No.6, pp941-950.
- 佐藤浩,久保正男,福本力也,廣岡康雄,生天目章,2000,『人工市場のシステム構造』,人工知能学会誌15巻6号
- Muranaga, J., and T. Shimizu, "Market Microstructure and Market Liquidity," mimeo, 1999a.
- Muranaga, J., and T. Shimizu, "Expectations and Market Microstructure when Liquidity is Lost," mimeo, 1999b.
- 清水季子・村永淳,1999,『取引停止措置が市場機能に及ぼす影響:人為的シャットダウンを備えた市場の挙動に関するシミュレーション分析』,日本銀行 金融研究所
- 山影進,2007,『社会科学とマルチエージェント・シミュレーション —シミュレータ開発と事例提供の課題—』,情報科学 第27号(別刷)札幌学院大学情報科学研究所 札幌学院大学電子計算機センター
- Arthur W.B., J.H. Holland, B. LeBaron, R.G. Palmer, and P.Taylor, 1997, "Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market", *The Economy as an Evolving Computer System* 2, 27, 15-44, Addison-Wesley
- Fama E.F, 1970, "Efficient capital markets: A review of theory and empirical work", *Journal of Finance*, pp.383-417
- Kyle, A.S, 1985, "Continuous Auction and Insider Trading", *Econometrica* Vol53, pp.1315-1336
- Takaaki Ohnishi, Hideki Takayasu, Takatoshi Ito, Yuko Hashimoto, Tsutomu Watanabe and Misako Takayasu,2008, "Dynamics of quote and deal prices in the foreign exchange market" *Journal of Economic Interaction and Coordination* vol.3, issue 1, pages99-106
- Masanao Aoki, Hiroshi Yoshikawa,2006, "Stock prices and the real economy: power law versus exponential distributions", *Springer-Verlag*2006
- 水田考信,八木勲,和泉潔,2010,『人工市場シミュレーションを用いた金融市場の制度・規制の検証研究の紹介』,Working Paperβ
- Gerhard Weiss,2000, "Multiagent Systems A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence", *The MIT Press*
- Michael Wooldridge,2009, "An Introduction to MultiAgent Systems", *Wiley Publisher*
- Subrahmanyam, A., "Circuit Breakers and Market Volatility: A Theoretical Perspective", *Journal of Finance* Vol. XLIX, No. 1, March 1994.
- Nirei, Makoto(2008), "Self-Organized Criticality in a Herd Behavior Model of Financial Markets" *Journal of Economic Interaction and Coordination(JEIC)* Vol.3 No. 1 pp. 89-97; Springer
- Oliver Hein · Michael Schwind · Markus Spiwoks(2008), "Frankfurt Artificial Stock Market: a microscopic stock market model with heterogeneous interacting agents in small-world communication networks", *Journal of Economic Interaction and Coordination (JEIC)*; Springer; Heidelberg
- Greenwald, B. and J. Stein, "The Task Force Report: The Reasoning Behind the Recommendations", *Journal of Economic Perspectives* Vol. 2, No. 3, Summer 1988. —, "Transaction Risk, Market Crashes, and the Role of Circuit Breakers," *Journal of Business* Vol. 64, No. 4, 1991.
- Knight, Frank H.,1921, "Risk, Uncertainty, and Profit", Boston, MA: Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Co.
- Gerety, M. S. and J. H. Mulherin, "Trading Halts and Market Activity: An Analysis of Volume at the Open and the Close," *Journal of Finance* Vol. XLVII, No. 5, December 1992.
- Oliver Hein · Michael Schwind · Markus Spiwoks(2005), "A Microscopic Stock Market Model with Heterogeneous Interacting Agents in a Scale-Free Communication Network", 10th Annual Workshop on Economic Heterogeneous Interacting Agents (WEHIA 2005); Essex, UK
- Analysis of circuit breakers using artificial stock market Shigeto Kobayashi and Takashi Hashimoto (2007) In: *Proceedings of The Twelfth International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB07)*, M. Sugisaka and H. Tanaka (Eds.), (2007)
- Richard A. Iley,2007, "Untangling the US Deficit: Evaluating Causes, Cures and Global Imbalances", *Edward Elgar Pub*
- Paul Rogers,2008, "The Financial Crisis and Sustainable Security" *Oxford Research Group-International Security Monthly Briefing*
- Paul Rogers,2008, "THE TIPPING POINT?", *Oxford Research Group- INTERNATIONAL SECURITY REPORT 2008*
- Nassim Nicholas Taleb,2008, "The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable", *Penguin*
- Nassim Nicholas Taleb,2007, "Fooled by Randomness: The Hidden Role of Chance in Life and in the Markets", *Penguin*
- Masanao Aoki · Hiroshi Yoshikawa,2006, "Stock prices and the real economy: power law versus exponential distributions", *Springer-Verlag* 2006
- IMF,2008,『国際金融安定性報告書(GFSR) 2008年10月』, <http://www.imf.org/external/japanese/pubs/ft/gfsr/2008/02/sumj.pdf>
- 大和総研,2008,「金融機関資産の増大から今般の金融危機を考える」, <http://www.dir.co.jp/publicity/column/081028.html>
- 山田悠,石島博,2005,「取引システムが価格形成に与える影響分析 人工市場アプローチ」,早稲田大学ファイナンス総合研究所ワーキングペーパー
- 大村敬一,宇野淳,川北英隆,俊野雅司,1998,『株式市場のマイクロストラクチャー』,日本経済新聞社
- Duncan J.Watts & Steven H.Strogatz,1998, "Collective dynamics of 'small-world' networks", *Nature*
- Karl Polanyi,2001, "The Great Transformation", *Beacon Press*