

# 人工市場を用いた市場暴落後における 反発メカニズムの分析

八木 勲<sup>1,a)</sup> 水田 孝信<sup>2,3</sup> 和泉 潔<sup>3,4</sup>

受付日 2012年1月26日, 採録日 2012年7月2日

**概要:** 企業不祥事や自然災害の影響でファンダメンタルズが急激に悪化し、その企業の株価が暴落することがある。その直後、株価が反発することも経験的に知られている（リバーサル現象）。これまでの実証研究では、リバーサル現象の発生要因はオーバリアクション仮説が有力視されているものの、定量的な評価は行われておらず、はっきりとした結論は出ていない。本研究では、価格決定方式の1つである板寄せ方式を採用した人工市場を用いて、理論株価急落を原因とする株式市場の暴落に対して、オーバリアクション仮説を考慮せずにリバーサル現象が発生することを確認した。そして、リバーサル現象発生時の取引価格決定メカニズムを分析し、エージェントの予想株価のばらつきと注文の需給関係の偏りによってリバーサル現象が引き起こされることを突きとめた。一方、ザラ場方式を採用した人工市場を用いると、リバーサル現象が必ずしも起こるとは限らないことが判明した。その結果、板寄せ方式を採用した市場の方が、ザラ場方式を採用した市場よりもリバーサル現象が発生する可能性が高いと考えられる。

**キーワード:** 人工市場, リバーサル現象, オーバリアクション仮説, 価格決定方式

## An Analysis on the Reversal Mechanism for Large Stock Price Declines Using Artificial Markets

ISAO YAGI<sup>1,a)</sup> TAKANOBU MIZUTA<sup>2,3</sup> KIYOSHI IZUMI<sup>3,4</sup>

Received: January 26, 2012, Accepted: July 2, 2012

**Abstract:** Fundamentals deterioration of firms due to their scandals or disasters causes the decline in their stock prices. We know empirically that stock prices rebound after they fall largely. In this paper, this trend is called the reversal phenomenon. There are some preceding researches on the issue, however, little has been explained about the market mechanism such as a market pricing mechanism in the reversal of large stock price declines. We reproduced the reversal phenomenon in the artificial market with the degree of variation of expected prices and *Itayose* system which is one of the stock pricing mechanisms and a kind of double auction, not with the overreaction hypothesis. On the other hand, the reversal phenomenon does not always occur in the artificial market with *Zaraba* system which is a kind of continuous double auction.

**Keywords:** artificial market, reversal phenomenon, overreaction hypothesis, stock pricing mechanism

<sup>1</sup> 神奈川工科大学情報学部  
Department of Information and Computer Sciences,  
Kanagawa Institute and Technology, Atsugi, Kanagawa 243-  
0292, Japan  
<sup>2</sup> スパークス・アセットマネジメント株式会社  
SPARX Asset Management Co., Ltd., Shinagawa, Tokyo  
140-0002, Japan  
<sup>3</sup> 東京大学大学院工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo,  
Tokyo 113-8656, Japan  
<sup>4</sup> JST さきがけ  
PRESTO, JST, Chiyoda, Tokyo 102-0076, Japan

### 1. まえがき

株式市場では、企業不祥事や災害などによるファンダメンタルズ（理論株価）の急悪化により株価が大暴落することがある。そして、かなりの頻度でその直後に株価が急反発することが経験的に知られている。このような現象をリバーサル現象（Reversal phenomenon）と呼ぶ。

<sup>a)</sup> iyagi2005@gmail.com

これまでにリバーサル現象に関する実証研究が報告されている [2], [3]. Bremer ら [3] は, Fortune500 の企業の株価に対し, 1日に10%以上下落した直後の平均株価リターンを調査し, リバーサル現象が発生することを確認している. しかし, 実証データからは原因を特定することはできず, 株価が急落するとき適正株価を必要以上に低く見積もり, その後適正株価に収束していくオーバーリアクション仮説 (Overreaction hypothesis) を提唱している. 一方, Benou ら [2] は, アメリカの大企業の月次株価に対し, 1カ月に20%以上下落した後の平均株価リターンを調査し, 翌月にリバーサル現象が発生することを確認している. そして, リバーサル現象には季節性アノマリや流動性低下などが影響していないことを確認している. どちらもリバーサル現象の原因としてオーバーリアクション仮説を提唱しているが, この仮説は定量的な評価は行われていない. さらに, これら既存研究では, ファンダメンタリストが予想する理論株価は一定であり, 個々でばらつきのある場合は考慮されていない. また, リバーサル現象発生時の市場内部メカニズム (取引価格決定メカニズムなど) の分析も行われていない.

一方, 水田ら [9] は, リスクが大きい資産ほど保有量が少なく, 期待リターンの確信度が高い資産ほど保有量が多くなるような効用関数が最大となるように株式発注数を決める方式 (これを, 効用関数方式と呼んでいる) と, 価格決定法の1つである板寄せ方式を形式的にモデル化し, オーバーリアクション仮説が成り立たなくても, リバーサル現象が起こることを理論的に示している. さらに, 水田ら [10] は, これらの提案モデルを利用して, ボラティリティクラスタリングが発生することを理論的に示している.

市場内部メカニズムを検討する方法の1つとして, 人工市場があげられる. 人工市場とは, 計算機上に仮想的に構築された金融市場であり, 市場参加者の行動と価格変動の関連性を分析するのに有効である. これまでに人工市場を利用して金融市場の分析を行った研究が数多く報告されている [1], [4], [5], [6], [7], [8]. 具体的には, 取引価格がファンダメンタルから自然に乖離したときの平均回帰の調査 [1] などの一般的な市場特性を分析した研究や, 為替市場におけるバンドワゴン効果の影響調査 [8] などの投資家心理に着目した研究, レバレッジ規制が市場に与える影響の調査 [6] などの規制制度設計に関する研究などがあげられる. 既存研究では, 市場の内的な要因で発生した理論株価からの乖離後のリバーサル現象を扱っているのに対して, 本研究では外的な要因による理論株価の大幅な急落後のリバーサル現象に焦点を当てている. シミュレーションによって得られた結果から, 既存研究のようにエージェントの学習だけでなく, 市場の取引価格決定方式が重要であるという新たな知見を得ることができた. このようなリバーサル現象の分析は実証研究 [2], [3] を除いて行われていない. 一

方, 実験内容の本質的な原因を突き止めるために, もしくは, ボラティリティクラスタリングなど現実市場特有の性質 (stylized facts) を持つ市場を構築するために, 従来の人工市場は比較的簡単なモデルで構成されることがある. たとえば, 取引価格決定方式は, 板寄せ方式やザラ場方式のような現実に近い複雑な方式ではなく, 注文の需給の差に比例して取引価格を決定する簡易な方式が採用されている [11].

本研究では, まず, 現実市場に近い取引価格決定方式を採用しているうえ, stylized facts も満たした人工市場モデル [13] を利用している点で既存研究と差別化を図っている. そして, これまでシミュレーション研究では取り扱われたことがなかった, 理論株価 (ファンダメンタル) の大幅な急落を原因とする株式市場の暴落時に対するリバーサル現象を, 現実の価格決定メカニズムである板寄せ方式とザラ場方式を採用した人工市場を用いて検証した. その結果, 板寄せ方式を採用した人工市場を用いると, 理論株価急落を原因とする株式市場の暴落に対しては, オーバーリアクション仮説を考慮しなくてもリバーサル現象が発生することが確認できた. さらに, このときの価格決定メカニズムを分析した結果, エージェントの予想株価のばらつきと大量の株式発注による大規模な需給のゆがみによって, 取引価格がオーバーシュートするためにリバーサル現象が引き起こされることが判明した. 一方, ザラ場方式を採用した人工市場を用いると, 理論株価急落直後に取引価格が急落するとは限らず, また, リバーサル現象も必ずしも起こるとは限らないことが判明した. よって, 板寄せ方式を採用した市場の方が, ザラ場方式を採用した市場よりもリバーサル現象が発生する可能性が高いことが新しい知見として得ることができた.

本稿の構成は以下のとおりである. まず, 2章で, 本稿で使用する人工市場モデルについて記述する. 次に, 3章で, 理論株価が急落したときの取引価格変動を分析する. 3.1節では, 3.2節と3.3節の取引価格決定メカニズム分析で利用する需給曲線について説明する. そして, 3.2節では, 板寄せ方式を利用した人工市場において, 理論株価が1度に急落したときの取引価格と取引価格決定メカニズムの分析を行い, 3.3節では, 板寄せ方式を利用した人工市場において, 理論株価が段階的に急落するときの取引価格と取引価格決定メカニズムの分析を行った. それから, 3.4節では, ザラ場方式を利用した人工市場における理論株価急落時の取引価格推移を分析した. 4章では3章の結果を基に考察を行った. 最後に5章でまとめと今後の課題について述べる.

## 2. 人工市場の構築

本研究では, 以前報告した人工市場モデル [12], [13] を取引価格の変動とそのときの取引価格決定メカニズムを分析

するために用いた。本モデルは、取引価格の変動を検証した結果、株価収益率<sup>\*1</sup>や株価収益率ボラティリティの分布が現実の市場と共通する性質を持っていることが明らかになっている。

本市場では、1つの株式を100のエージェントが売買する。エージェントは株式(リスク資産)とキャッシュ(無リスク資産)を保有する。本市場には下記3タイプのエージェントが存在する。各エージェントは各自の投資ルールに基づいて取引を行う。

- (1) ファンダメンタルエージェント
- (2) テクニカルエージェント
- (3) ノイズエージェント

エージェントのタイプ別参加比率は、(1):(2):(3) = 45:45:10である。取引開始時、すなわち、第0期のエージェントの株式およびキャッシュ保有量をそれぞれ、10と1,000,000とした。ただし、保有キャッシュが0になったエージェントは破産と見なし、それ以降の取引には参加しない。

## 2.1 エージェントモデル

すでに述べたように本市場には3タイプのエージェントが存在する。本節では各モデルの詳細な説明を行う。

### 2.1.1 ファンダメンタルエージェント

本市場におけるファンダメンタルエージェントは、理論株価に基づいて当期株価を予想し<sup>\*2</sup>、その予想株価において当期資産価値が最大になるよう株式保有数を調整する。

$t$ 期の理論株価 $P_t$ は外部より与えられ、1,000期ごとに更新される。 $P_t$ は平均 $P_{t-1000}$ 、分散 $(0.1P_{t-1000})^2$ の正規分布に従って決定される。初期値 $P_0$ は平均300、分散 $(0.1 \times 300)^2$ の正規分布に従って決定される。

エージェント $i$ の $t$ 期の予想株価 $\tilde{P}_{i,t}$ は、平均が $(1+\epsilon_{i,t})P_t$ で、分散が $(\alpha(1+\epsilon_{i,t})P_t)^2$ の正規分布に従うものとし、100期ごとに更新する。ただし、 $P_t$ は理論株価、 $\epsilon_{i,t}$ はエージェント $i$ の $t$ 期における強気度<sup>\*3</sup>、 $\alpha$ はエージェント $i$ の予想株価のばらつきを表す係数で、今回は $\alpha = 0.1$ とした。そのほか、第 $t$ 期の取引前のキャッシュを $Q_{i,t-1}$ 、第 $t$ 期の取引前の株式保有数を $q_{i,t-1}$ 、第 $t-1$ 期の株価を $P_{t-1}$ とすると、第 $t$ 期の株価決定前のエージェント $t$ の総資産

$W_{i,t-1}$ は次のように表される。

$$W_{i,t-1} = Q_{i,t-1} + P_{t-1} \cdot q_{i,t-1} \quad (1)$$

その結果、株価決定後の総資産量に基づいた効用の主観的期待値を、条件式(1)の下で最大化する株式保有数 $\tilde{q}_{i,t}$ は、

$$\tilde{q}_{i,t} = \frac{(1 + \epsilon_{i,t})P_t - P_{t-1}}{a(\alpha(1 + \epsilon_{i,t})P_t)^2}$$

と表すことができる[8]。ただし、 $a (> 0)$ はリスク回避係数で、この値が大きいほどリスクを回避するため、ファンダメンタルエージェントは保有株式数を小さくする。ファンダメンタルエージェント $i$ は $\tilde{q}_{i,t}$ を基に売買方針を決定する。

$t$ 期において、 $\tilde{q}_{i,t} - q_{i,t-1} > 0$ を満たすとき、エージェント $i$ は、株価 $\tilde{P}_{i,t}$ で株式数 $\tilde{q}_{i,t} - q_{i,t-1}$ の買い注文を出す。ただし、 $S_{max} - q_{i,t-1}$ を買い付け限度とする。一方、 $t$ 期において、 $\tilde{q}_{i,t} - q_{i,t-1} < 0$ を満たすとき、エージェント $i$ は株価 $\tilde{P}_{i,t}$ で株式数 $q_{i,t-1} - \tilde{q}_{i,t}$ の売り注文を出す。ただし、規制なし市場の最大売り注文数は $q_{i,t-1} - S_{min}$ 、規制あり市場の最大売り注文数は $q_{i,t-1}$ とする。 $t$ 期において、 $\tilde{q}_{i,t} = q_{i,t-1}$ を満たすとき、エージェント $i$ は売買せずに待機する。

### 2.1.2 テクニカルエージェント

本市場のテクニカルエージェントは移動平均に基づいた株式売買を行う。テクニカルエージェントには順張り派と逆張り派が存在する。エージェント $i$ が利用する、 $t$ 期における $n_{i,t}$ 期間移動平均を

$$MA_{t,n_{i,t}} = \frac{1}{n_{i,t}} \sum_{j=1}^{n_{i,t}} P_{t-j}$$

とし、 $\Delta MA_{t,n_{i,t}} = MA_{t,n_{i,t}} - MA_{t-1,n_{i,t}}$ とする。そして、エージェント $i$ が順張り派に属するとき、以下の方針で売買を行う。

- $\Delta MA_{t,n_{i,t}} > 0$ のとき、株価 $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$ 、株式数 $q_{i,t}^T$ の買い注文を出す。
  - $\Delta MA_{t,n_{i,t}} < 0$ のとき、株価 $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$ 、株式数 $q_{i,t}^T$ の売り注文を出す。
  - $\Delta MA_{t,n_{i,t}} = 0$ のとき、待機する。
- 一方、逆張り派に属するときは、
- $\Delta MA_{t,n_{i,t}} > 0$ のとき、株価 $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$ 、株式数 $q_{i,t}^T$ の売り注文を出す。
  - $\Delta MA_{t,n_{i,t}} < 0$ のとき、株価 $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$ 、株式数 $q_{i,t}^T$ の買い注文を出す。
  - $\Delta MA_{t,n_{i,t}} = 0$ のとき、待機する。

なお、 $n_{i,t}$ の初期値は、 $1 \leq n_{i,t} \leq 25$ を満たすランダムな値とし、 $\alpha_t$ は平均 $P_{t-1}$ 、分散 $(0.1P_{t-1})^2$ の正規分布に従う乱数とする。 $q_{i,t}^T$ は、平均10、分散1の正規分布に従う乱数で、 $0 < q_{i,t}^T \leq S_{max} - q_{i,t-1}$ を満たす。 $q_{i,t}^T$ は、平

\*1 本研究における株価収益率は次のように定義する。 $t$ 期の株価収益率 = ( $t$ 期の株価 - ( $t-1$ )期の株価) / ( $t-1$ )期の株価

\*2 理論株価は、各投資家が何らかの規則に従ってファンダメンタルズから予想し求められる。そのため、多少のばらつきがあるものと考えられ、一意に定まることは現実的には考えにくい。本モデルには理論株価を決定するための情報は存在しないため、ファンダメンタルエージェントごとに妥当な理論株価を設定することは困難である。そこで、便宜上理論株価のコンセンサスを外部から与え、それを基に各ファンダメンタルエージェントの理論株価を決定している。

\*3 強気派ほど予想株価を理論株価より高く設定するので、正方向に大きな値を設定し、弱気派ほど予想株価を理論株価より低く設定するので、負方向に大きな値を設定する。



均 10, 分散 1 の正規分布に従う乱数で, 規制なし市場においては,  $0 < q'_{i,t} \leq q_{i,t-1} - S_{min}$  を, 規制あり市場においては,  $0 < q'_{i,t} \leq q_{i,t-1}$  を満たす.

### 2.1.3 ノイズエージェント

ノイズエージェント  $i$  はそれぞれ 1/3 の確率で, 買い, 売り, 待機を選択する.

買いの場合, エージェント  $i$  は, 株価  $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$  で, 株式数  $q'_{i,t}$  の買い注文を出す. ただし,  $q'_{i,t}$  は, 平均 10, 分散 1 の正規分布に従う乱数で,  $0 < q'_{i,t} \leq S_{max} - q_{i,t-1}$  を満たす. 一方, 売りの場合, 株価  $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$  で株式数  $q'_{i,t}$  の売り注文を出す. ただし,  $q'_{i,t}$  は, 平均 10, 分散 1 の正規分布に従う乱数で, 規制なし市場においては,  $0 < q'_{i,t} \leq q_{i,t-1} - S_{min}$  を, 規制あり市場においては,  $0 < q'_{i,t} \leq q_{i,t-1}$  を満たす.

## 2.2 周囲の好成績投資家の投資法に影響される投資家のモデル化

エージェントの評価学習機能についても既述の人工市場モデル [12], [13] に従う. すなわち, 取引終了後, 各エージェントは運用成績の評価を行い, 他のエージェントと比較して相対的に成績が悪いエージェントは, 成績の良いエージェントの売買ルールの模倣を行う. ファンダメンタルエージェントは強気度を, テクニカルエージェントは移動平均の期間を模倣する. さらに, エージェントが試行錯誤的に新しい売買ルールを求める姿を客観的に表すため, 一部のエージェントの売買ルール変更ランダム性を持たせた.

本市場ではエージェントの売買タイプの割合を固定しているため, エージェントが他の売買タイプに移ることはない. すなわち, 成績の悪いファンダメンタルエージェントは成績の良いファンダメンタルエージェントの模倣を試みるが, 運用成績の良いテクニカルエージェントやノイズエージェントを模倣することはない. なおノイズエージェントは, 運用成績の評価と模倣は行わない. 以下, 各タイプにおける運用成績評価と模倣の手順について述べる.

### 2.2.1 ファンダメンタルエージェント

あるエージェント  $i$  の  $t-1$  期から  $t$  期の資産変化率を  $R_{i,t} = W_{i,t}/W_{i,t-1}$  とする. そして, 過去  $N$  (今回は  $N = 5$  とする) 期の変化率の平均

$$\bar{R}_{i,t} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_{i,t-(j-1)}$$

が, すべてのファンダメンタルエージェント中のその下位  $N_L\%$  以内に属するとき, 確率

$$P_i = \frac{\text{エージェント } i \text{ の順位}}{\text{全ファンダメンタルエージェント数}}$$

で, 強気度  $\epsilon_{i,t}$  の値を変更する. すなわち, 変化率の平均が, すべてのファンダメンタルエージェント中のその上

位  $N_H\%$  以内のエージェントを 1 つランダムに抽出し (これをエージェント  $i'$  とする),  $i'$  の過去  $N$  期分の強気度の平均

$$\bar{\epsilon}_{i',N} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \epsilon_{i',t-j}$$

を,  $\epsilon_{i,t+1}$  とする. 本研究では  $N_L$  と  $N_H$  はともに 20 とした.

さらに, より多くの利益を期待するエージェントの売買ルール変更を実現するために, 資産変化率の平均が, すべてのファンダメンタルエージェントのその上位  $N_H\%$  以外のエージェントに対し, それぞれ 5% の確率で強気度をランダムに変更する.

### 2.2.2 テクニカルエージェント

$\bar{R}_{i,t}$  が, すべてのテクニカルエージェント中のその下位  $N_L\%$  以内に属するとき, 確率

$$P_i = \frac{\text{エージェント } i \text{ の順位}}{\text{全テクニカルエージェント数}}$$

で,  $i$  の移動平均の期間  $n_{i,t}$  を変更する. すなわち, 変化率の平均が, すべてのテクニカルエージェント中のその上位  $N_H\%$  以内のテクニカルエージェントをランダムに抽出し (エージェント  $i'$  とする),  $i'$  の移動平均期間  $n_{i',t}$  の値を, 新しい移動平均期間  $n_{i,t+1}$  とする.

さらに, より多くの利益を期待するエージェントの売買ルール変更を実現するために, 資産変化率の平均が, すべてのテクニカルエージェントの上位  $N_H\%$  以外のエージェントに対し, それぞれ 5% の確率で売買方針 (順張り) および移動平均期間  $n_{i,t+1}$  を変更する. ただし,  $1 \leq n_{i,t+1} \leq 25$  とする.

## 2.3 取引価格決定法

各エージェントはそれぞれの手法で発注価格と発注株式数を決め注文を出す. 市場では,  $t$  期のすべてのエージェントの売り注文と買い注文をつき合わせて売買を成立させる. 買い手側は高い発注価格のエージェントから, 売り手側は安い発注価格のエージェントから優先的に取引に参加する. 買い手側の発注価格が売り手側の発注価格を上回る, もしくは一致するとき売買が成立する. この決定法のことを一般に板寄せ方式という. ザラ場方式については, 3.4 節で記述する.

## 3. 市場取引価格の分析

本章では, 理論株価急落を原因とする株式市場の暴落時における取引価格の分析を行う. 具体的には, 板寄せ方式を採用している市場において, 突発的な出来事によりファンダメンタルズが急激に悪化し, 理論株価が一度に急落したとき (3.2 節) とファンダメンタルズの悪化が段階的に判明し, 理論株価が段階的に急落したとき (3.3 節) を想定し

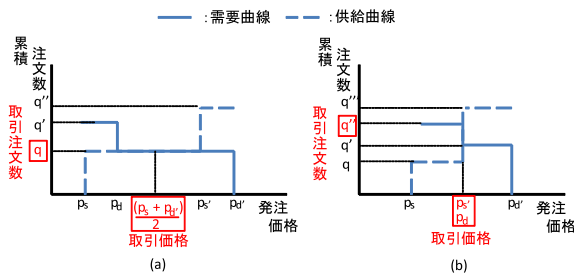


図 1 需給曲線の特例

Fig. 1 The special case of supply and demand curve.

た実験を行う。3.4 節では、ザラ場方式を採用している市場において、理論株価が一度に急落したときを想定した実験を行う。3.5 節では理論株価急落前後の株価収益率<sup>\*4</sup>の平均を調査する。

### 3.1 需給曲線

理論株価急落前後の取引価格が決定する様子を需給曲線を用いて確認する。需給曲線は 2.3 節の板寄せ方式で価格決定する際に利用される。需要曲線  $D(p)$  は、ある価格  $p$  以上の価格で発注する買い手の注文数の和（累積注文数）によって作られる。一方、供給曲線  $S(p)$  は、ある価格  $p$  以下の価格で発注する売り手の注文数の和（累積注文数）によって作られる。そして、取引価格は需要曲線と供給曲線が交差する際の価格となる。ただし、以下の場合、取引は成立するが取引価格が一意に定まらないことがある（図 1 の (a)）。すなわち、 $p_d, p_{d'}$  ( $p_d < p_{d'}$ ) を買い注文の発注価格とし、 $p_s, p_{s'}$  ( $p_s < p_{s'}$ ) を売り注文の発注価格とするとき、 $D(p_d) = q', D(p_{d'}) = q, S(p_s) = q, S(p_{s'}) = q''$ ,  $p_d < p_{s'}, p_s < p_{d'}$  が成り立つ場合である。このときは、取引価格を  $(p_s + p_{d'})/2$  とし、取引が成立する株式数を  $q$  とする。反対に、取引価格は一意に定まるが、取引成立する株式数が一意に定まらないことがある（図 1 の (b)）。つまり、 $D(p_d) = q'', D(p_{d'}) = q', S(p_s) = q, S(p_{s'}) = q'''$ ,  $p_d < p_{d'}, p_s < p_{s'}, p_d = p_{s'}$  が成り立つとき、取引は価格  $p_d$  で成立するが、取引が成立する株式数が一意に定まらない。このときは、取引が成立する株式数を  $q''$  と  $q'''$  の小さい方とする（図 1 の (b) では  $q''$ ）。

需給曲線の具体例を 3.2.1 項の実験結果である図 4 を用いて述べる。第 1,000 期における買い手の最高発注価格は 351、注文数は 8、その次に高い発注価格は 347、注文数は 9 であった。したがって、第 1,000 期の需要曲線  $D(351)$  と  $D(347)$  の値は、それぞれ 8 と 17 となる。以下、残された注文のうち発注価格の高い注文から順に、発注された株式数を累積していくことで図 4 のような需要曲線が構成可能となる。一方、第 1,000 期における売り手の最低発注価格は 243、注文数は 10、その次に低い発注価格は 248、注文数

\*4 本研究における株価収益率は次のように定義する。 $t$  期の株価収益率 =  $(t$  期の株価 -  $(t - 1)$  期の株価) /  $(t - 1)$  期の株価

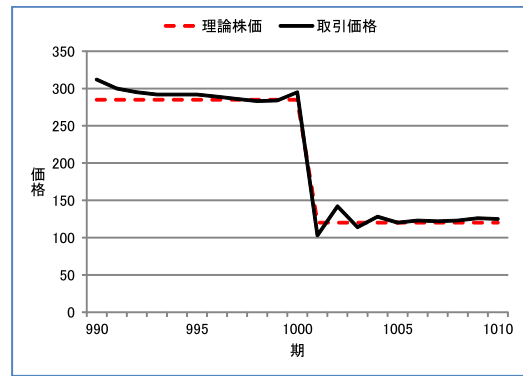


図 2 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移  
Fig. 2 Price transitions at period 1,000 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

表 1 理論株価急落前後の取引

Table 1 Transitions before or after theoretical prices decline.

	第 1,000 期	第 1,001 期	第 1,002 期
理論株価	285	120	120
取引価格	295	103	142
売り注文価格 中央値	300	123	109
買い注文価格 中央値	274	297	115

は 9 であった。したがって、第 1,000 期の供給曲線  $S(243)$  と  $S(248)$  の値は、それぞれ 10 と 19 となる。以下、残された注文のうち発注価格の低い注文から順に、発注された株式数を累積していくことで図 4 のような供給曲線が構成可能となる。そして、価格 295 のところで両曲線が交差しているため、取引価格は 295 となる。

### 3.2 理論株価が一度に急落した場合

理論株価が一度に急落したときの取引価格と取引価格決定メカニズムの分析を行う。理論株価は第 1,000 期の取引終了後に強制的に 60% 減少させる。取引に参加するファンダメンタルエージェントへの条件を以下の 3 パターン用意し実験を行った。すなわち、以前報告した人工市場モデル [12], [13] の設定条件を用いた実験 (3.2.1 項)、ディフェンシブ系株式や債券のようにファンダメンタルズが安定した資産への投資を想定した実験 (3.2.2 項)、リスク嗜好の高いファンダメンタリストの参加を想定した実験 (3.2.3 項) である。

#### 3.2.1 ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつき 0.1 のとき (条件 1)

本項では 2 章に記述した既存の人工市場で実験を行った。図 2 は理論株価急落前後の取引価格の様子である。取引価格が下がりすぎるとリバウンドが発生している。このときの取引価格決定メカニズムを表 1 および図 3~図 8 を用いて分析する。図 3 と図 4 から、第 1,000 期の需要（買い注文）と供給（売り注文）のバランスは良く、妥当な株

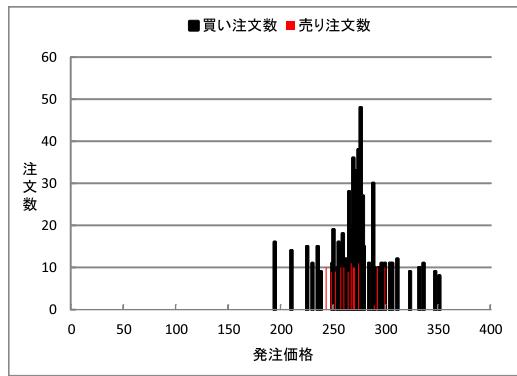


図 3 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,000 期の注文数

Fig. 3 A quantity of orders at period 1,000 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

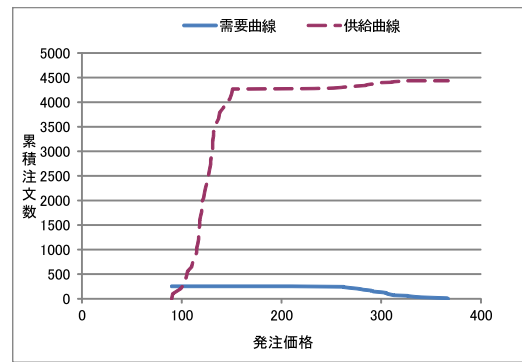


図 6 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,001 期の需給曲線

Fig. 6 A supply and demand curve at period 1,001 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

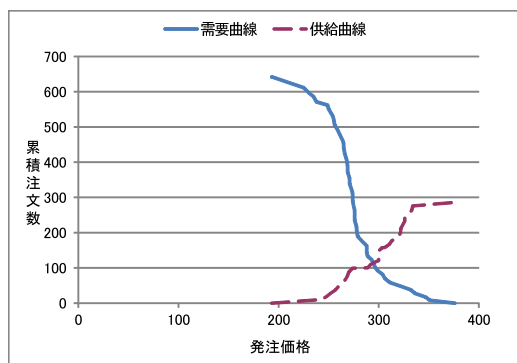


図 4 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,000 期の需給曲線

Fig. 4 A supply and demand curve at period 1,000 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

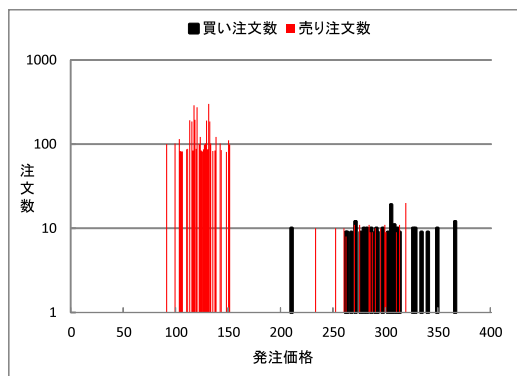


図 5 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,001 期の注文数

Fig. 5 A quantity of orders at period 1,001 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

価で取引されていることが分かる。

しかし、理論株価が急落した第 1,001 期では、買い注文は発注価格 297 を中央値として分布しているのに対し、売り注文は発注価格 123 と 287 を中央値とした分布に分かれている (図 5)。これは、ファンダメンタルエージェントが、理論株価が 120 に下がったため 123 前後を妥当な

価格と判断したのに対し、テクニカルエージェントとノイズエージェントは第 1,000 期の取引価格 295 に近い 297 前後 (買い)、287 前後 (売り) を妥当な価格と判断していることを示している。一方、第 1,001 期の需給関係は需要に対して供給が大きく上回ったため、需給曲線が大きく左に偏っている。そして、発注価格 103 のところで両曲線が交差している (図 6)。この理由は次のとおりである。理論株価が急落し、理論株価と直前の取引価格の乖離幅が大きくなる (割高になる) と、すべてのファンダメンタルエージェントはいっせいに大量の売り注文を発注する。なぜならば、理論株価が急落すると、すべてのファンダメンタルエージェントの最適株式保有数  $\tilde{q}_{i,1001}$  ( $0 \leq i \leq 44$ ) が急減し、余剰となった株式を理論株価周辺の価格で一度に大量に売ろうとするためである。一方、テクニカルエージェントとノイズエージェントの発注は理論株価から直接影響を受けることはない。これまでどおり直前の取引価格周辺の価格で、売り注文と買い注文がほぼ同数の割合で発注される。その結果、第 1,001 期の需給関係は需要に対して供給が大きく上回り、板寄せ方式の特性<sup>\*5</sup>によって、一部のファンダメンタルエージェントによる、理論株価より低い価格帯での大量の売り注文と、すべての買い注文によって取引が成立することになる。それゆえ、取引価格 (103) は、理論株価ばかりでなく、多くのファンダメンタルエージェントが妥当と判断した価格 (売り注文価格中央値) よりさらに低い価格となっている。

第 1,002 期には買い注文は発注価格 115 を中央値とした分布、売り注文は発注価格 109 を中央値とした分布となっている (図 7)。第 1,001 期同様、ファンダメンタルエージェントは理論株価周辺を妥当な価格と判断したのに対し、テクニカルエージェントやノイズエージェントは第 1,001 期の取引価格付近を妥当な価格と判断している。需給曲線は大きく右に偏り、発注価格 142 のところで両曲線が交差

\*5 発注価格の高い買い注文と発注価格の低い売り注文から順に取引が成立する。2.3 節参照。

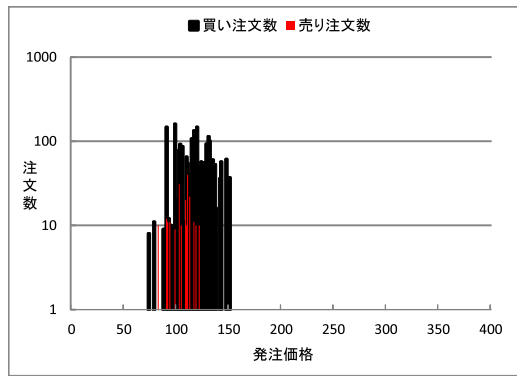


図 7 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,002 期の注文数

Fig. 7 A quantity of orders at period 1,002 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

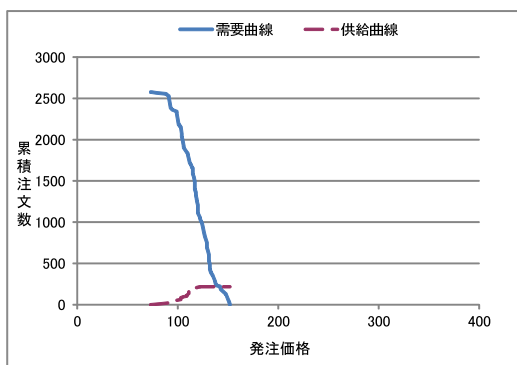


図 8 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1,002 期の需給曲線

Fig. 8 A supply and demand curve at period 1,002 when theoretical prices decline at all once under condition 1.

している (図 8)。この理由は次のとおりである。ファンダメンタルエージェントは理論株価周辺の価格で大量の買い注文を発注する。これは、直前の取引価格が理論株価より低いいため、ファンダメンタルエージェントの最適株式保有数は一転して増加するためである。一方、テクニカルエージェントとノイズエージェントは、これまでどおり直前の取引価格周辺の価格で、売り注文と買い注文をほぼ同数の割合で発注する。その結果、第 1,002 期の需給関係は供給に対して需要が大きく上回り、板寄せ方式の特性によって、一部のファンダメンタルエージェントによる、理論株価より高い価格帯の大量の買い注文と、すべての売り注文によって取引が成立することになる。それゆえ、取引価格 (142) は多くのファンダメンタルエージェントが妥当だと判断した価格よりさらに高い価格となっている。

このように暴落時に取引価格が下がりすぎるとリバウンドが発生し、妥当な価格より高い価格で取引されるリバウンド現象が発生することが分かる。表 2 にリバウンド率 (= (第 1,002 期の取引価格 - 第 1,001 期の取引価格) / (第 1,000 期の取引価格 - 第 1,001 期の取引価格)) を示す。なお表 2 は条件 1 のもとで 10 回試行した結果の平均を記して

表 2 理論株価が一度に急落したときの取引価格のリバウンド率 (平均) と株価収益率ボラティリティ (平均)

Table 2 Rebound rates and averages of return rate volatilities when the theoretical price declines at all once.

	条件 1	条件 2	条件 3
リバウンド率	0.1705	0.1180	0.0744
理論株価急落直前 5 期の 株価収益率 ボラティリティ	0.0213	0.0088	0.0126
理論株価急落直後 5 期の 株価収益率 ボラティリティ平均	0.3735	0.3323	0.3023

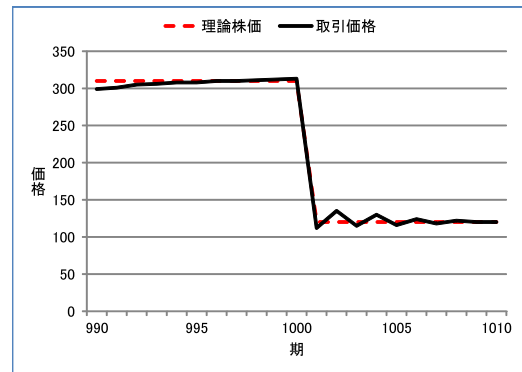


図 9 条件 2 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移  
Fig. 9 Price transitions at period 1,000 when theoretical prices decline at all once under condition 2.

いる。また、ファンダメンタルが暴落したとき、妥当だと思われる価格よりさらに低い価格で株式購入が可能であることが分かる。

### 3.2.2 ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつき 0.05 のとき (条件 2)

本項では、ディフェンシブ系株式や債券などファンダメンタルズが安定した資産を想定した実験を行う。このような資産に対しては、ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつきも小さくなる傾向がある。ここではファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつきを 0.05 として条件 1 の下での実験と同様の実験を行う。図 9 は理論株価急落前後の取引価格の推移である。条件 1 の下での実験と同様にリバウンド現象が発生することを確認した。ただし、リバウンド率は小さくなる (表 2 参照)。これは条件 1 の下での実験と比較して、ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつきが小さく、第 1,001 期、第 1,002 期とも理論株価に近い価格で取引が行われたためである。3.2.1 項の実験結果と 3.2.2 項の実験結果から、板寄せ方式は発注価格 (予想株価) の偏りが大きい注文に取引価格が影響されることが分かる。

### 3.2.3 ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつき 0.05、リスク回避係数 0.012 のとき (条件 3)

条件 2 の実験のエージェントの株式保有数は、予想株価のばらつきを小さくしたため、条件 1 の下での実験のエー



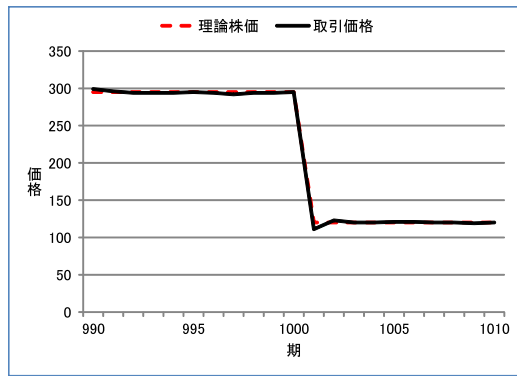


図 10 条件 3 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移  
**Fig. 10** Price transitions at period 1,000 when theoretical prices decline at all once under condition 3.

ジェントに比べて増加している。そこで理論上条件 1 と株式保有数を同等にするため、リスク回避係数を 0.003 から 0.012 に変更する。これは、ファンダメンタルズの安定した資産を取引するが、リスク回避性の高い（リスク資産である株式の保有数が少ない傾向にある）投資家が参加する市場を想定していることになる。図 10 は理論株価急落前後の取引価格の推移である。この条件においても、これまで同様リバーサル現象は発生するが、条件 2 の下での実験よりさらにリバウンド率は小さくなり株価の収束も早くなることが分かる（表 2 参照）。これはリスク回避係数が大きいほどリバウンド率は小さくなることを示している。リスク回避係数が大きくなると、ファンダメンタルエージェントの株式保有数が減少し、発注株式数も相対的に減少する。その結果、条件 2 の下での実験と比較して、理論株価から乖離した発注価格の注文数が減少し、第 1,001 期、第 1,002 期ともさらに理論株価に近い価格で取引が行われたためリバウンド率が小さくなったと考えられる。すなわち、発注される株式の需給関係が偏るほど取引価格に影響が出るのが分かる。本結果は、現実市場における、リスク嗜好の高い投資家ほど想定外の価格を好み、取引価格が不安定になる事象とも整合する。

### 3.3 理論株価が段階的に急落した場合

この節では理論株価が段階的に急落するときの取引価格と取引価格決定メカニズムの分析を行う。今回は理論株価を 3 回に分けて急落するよう設定する。すなわち、理論株価を 1 期おき、10 期おき、100 期おきに 3 回強制的に急落させる。まず第 1,000 期の取引終了後に強制的に 20% 下落させ、第 2 回目、3 回目についても第 1 回目と同じ値幅を下落させる。前節同様、取引に参加するファンダメンタルエージェントも 3 種類用意した。

図 11、図 12、図 13 は、条件 1 の下で理論株価がそれぞれ 1 期おき、10 期おき、100 期おきに 3 回急落したときの取引価格推移を表している。これらにおいてもリバーサ

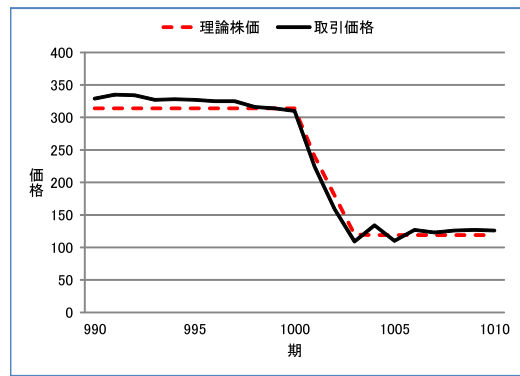


図 11 条件 1 の下で理論株価を 1 期おき（第 1,000 期、第 1,001 期、第 1,002 期）に 3 回急落させたときの取引価格推移  
**Fig. 11** Price transitions when theoretical prices decline every 1 period from period 1,000 to period 1,002.

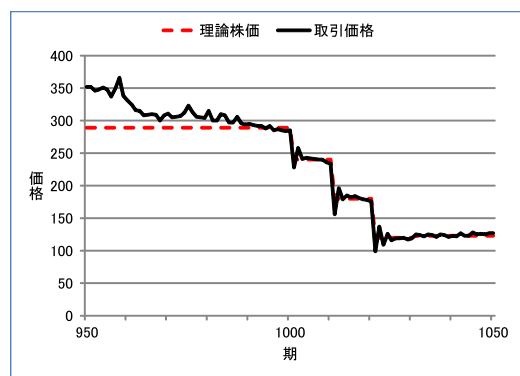


図 12 条件 1 の下で理論株価を 10 期おき（第 1,000 期、第 1,010 期、第 1,020 期）に 3 回急落させたときの取引価格推移  
**Fig. 12** Price transitions when theoretical prices decline every 10 period from period 1,000 to period 1,020.

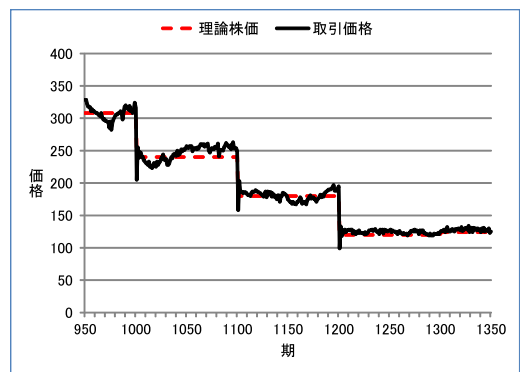


図 13 条件 1 の下で理論株価を 100 期おき（第 1,000 期、第 1,100 期、第 1,200 期）に 3 回急落させたときの取引価格推移  
**Fig. 13** Price transitions when theoretical prices decline every 100 period from period 1,000 to period 1,200.

ル現象が発生している。理論株価を第 1,000 期の取引終了後から 1 期おきに 3 回急落させたとき、理論株価が急落中（第 1,001 期から第 1,003 期）の取引価格は、つねに理論株価より低い価格で取引が成立していた。そして急落直後の第 1,004 期において理論株価より高い価格で取引が成立し



表 3 理論株価が段階的に急落したときの取引価格のリバウンド率（平均）と株価収益率ボラティリティ（平均）

Table 3 Rebound rates and averages of return rate volatilities when the theoretical price declines in stages.

次の急落までの期間	条件 1			条件 2			条件 3			
	1 期	10 期	100 期	1 期	10 期	100 期	1 期	10 期	100 期	
リバウンド率	1 回目の急落後	-0.8893	0.4027	0.3941	-0.7478	0.4688	0.4453	-0.8145	0.1663	0.1763
	2 回目の急落後	-1.7258	0.4164	0.4264	-1.0142	0.3648	0.4014	-1.0733	0.2496	0.1964
	3 回目の急落後	0.4969	0.4351	0.3620	0.3664	0.2749	0.2610	0.2495	0.2296	0.2196
理論株価急落直前 5 期の 株価収益率 ボラティリティ	0.0173	0.0208	0.0246	0.0095	0.0112	0.0100	0.0101	0.0109	0.0105	
理論株価急落直後 5 期の 株価収益率 ボラティリティ	0.1747	0.2185	0.2112	0.1533	0.1913	0.1963	0.0675	0.1606	0.1600	

ている。一方、10 期および 100 期おきに理論株価が段階的に急落する実験では、次の急落時までに株価は安定しており、小さな急落が 3 回起きた場合と変わらなかった。

表 3 はそれぞれの条件における取引価格のリバウンド率を示す。3.2 節と同様、ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつきが大きいほど、また、リスク回避係数が小さいほど、リバウンド率が大きくなる傾向があることが分かる。

### 3.4 ザラ場市場での理論株価急落時の取引価格推移

次に、価格決定方式がザラ場方式のときの市場において、理論株価急落を原因とする株式市場暴落時の取引価格の分析を行った。今回のザラ場方式は以下のような形で実現している。

第 1 期の取引のみ板寄せ方式で行い、取引が成立しなかった注文はすべて第 2 期の取引まで市場に残す。第 2 期以降は、市場に注文が残っていないエージェントの中から 1 人のエージェントをランダムに選択し発注させる。取引が成立しなければ、この注文も含め取引が成立しなかった注文すべてを次期の取引まで残す。取引が一部のみ成立した場合は、残りの未成立分の注文と、その他の取引が成立しなかった注文すべてを次期の取引まで残す。これを繰り返すことで取引を進めていく。

以上のようなザラ場方式を用いて、板寄せ方式と同様に、第 1,000 期の取引終了後に理論株価を強制的に 60% 減少させたときの取引価格推移についての実験を行った。

その結果、理論株価が急落すると取引価格も急落するが、必ずしも理論株価急落直後に起こるとは限らないことが判明した (図 14)。さらに板寄せ方式では必ず発生していたリバーサル現象が、ザラ場方式では明確に発生しないことがあることも判明した (図 15)。

そこで、なぜこのような現象が起こるのか、その理由を分析した。まず、理論株価急落直後に取引価格が急落しない理由について分析した。理論株価急落後の第 1,001 期に

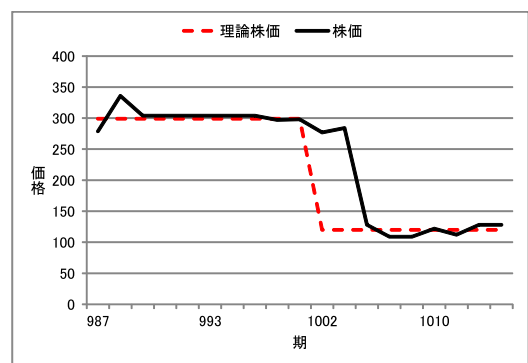


図 14 ザラ場市場で理論株価急落直後に取引価格が下落しなかったケース

Fig. 14 The case that price does not decline largely just after theoretical price declined in the market with “Zaraba” system.

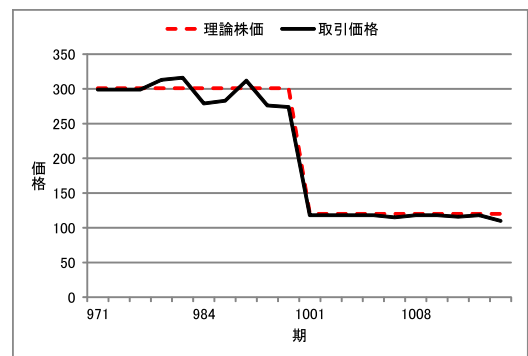


図 15 ザラ場市場でリバーサル現象が起こらなかったケース

Fig. 15 The case that the reversal phenomenon does not occur in the market with “Zaraba” system.

において、発注するエージェントがファンダメンタルエージェントであれば、板寄せ方式の場合と同様、最適保有株式数が急減するため、理論株価周辺の価格で大量の売り注文が発注され取引価格が急落する。しかし、テクニカルエージェントもしくはノイズエージェントが発注すると、直前の取引価格周辺の価格で発注するため、取引価格が急

落することはない。つまり、理論株価が急落しようとも、ファンダメンタルエージェントが発注するまで取引価格が急落しないことになる。

次に、リバーサル現象が明確に発生しない場合がある理由について分析した。取引価格急落直後に発注するエージェントがファンダメンタルエージェントであれば、板寄せ方式の場合と同様、一転して最適保有株式数が増加するため、大量の買い注文が発注される。このときはリバーサル現象は発生する。ただし、発注価格は理論株価を基に決まるため、リバウンド幅は必ずしも板寄せ方式の場合ほど大きくなるとは限らない\*6。反対に、テクニカルエージェントもしくはノイズエージェントが発注すると、直前の取引価格周辺の価格で取引が成立するため、明確なリバーサル現象は起こりにくくなる。

### 3.5 理論株価急落前後の株価収益率

最後に理論株価急落前後5期の株価収益率の平均を分析した。表2と表3から、急落直後の株価収益率のボラティリティは急落直前のボラティリティより大きくなっていることが分かる。すなわち、急落直後は市場が不安定になっていることが分かる。

## 4. 考察

2章冒頭で記したように、本市場モデルは現実市場を持つ特性を満たしており、本検証に対しては有用なモデルと考えられる。

通常取引価格が大きく動くとき、たとえば、バブルの発生、崩壊は順張り派のテクニカルエージェントの取引によって引き起こされることが分かっている[12], [13]。しかし、本研究のように、板寄せ方式を採用した市場において理論株価が急落したとき、ファンダメンタルエージェントの予想株価のばらつきと、大量の株式発注による大規模な需給のゆがみによって取引価格がオーバーシュートするため、リバーサル現象が引き起こされることが判明した。注意すべき点は、板寄せ方式のときは、オーバーアクション仮説のような反発モデルを組み込んでいないにもかかわらず、いずれの場合においても予想株価のばらつきを原因としたリバーサル現象が発生した点である。これは、理論株価急落を原因とする株式市場の暴落においては、予想株価のばらつきを考慮すれば、オーバーアクション仮説は不要となりうることを示唆している。

## 5. あとがき

現実世界では株価が暴落した直後に急反発するリバーサル現象が存在する。本研究では、板寄せ方式を採用した人

工市場を用いて、理論株価急落を原因とする株価暴落においては、予想株価のばらつきを考慮すれば、オーバーアクション仮説を考慮しなくてもリバーサル現象が発生することを確認した。そして、予想株価のばらつきが大きいときや、株式発注における需給関係の偏りが大きいときほど、取引価格が理論株価やエージェントの発注価格から大きく乖離し、リバーサル現象も大きくなることが判明した。一方、ザラ場方式を採用した人工市場では、取引価格は急落するが理論株価急落直後に急落するとは限らず、また、リバーサル現象が必ずしも起こるとは限らないことが判明した。よって、板寄せ方式を採用した市場の方が、ザラ場方式を採用した市場よりもリバーサル現象が発生する可能性が高いことも新しい知見として得ることができた。今後の課題としては、まず、理論株価急落を原因としない株価暴落時にもリバーサル現象が発生するかどうかを調査し、発生するのであればそのメカニズムを調査することがあげられる。また、ザラ場方式以外にも、板寄せ方式より取引価格の乖離が抑えられる価格決定方式が存在するのかを追跡調査することがあげられる。

## 参考文献

- [1] Arthur, W., Holland, J., Lebaron, B., Palmer, R. and Tayler, P.: Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market, *The Economy as an Evolving Complex System II*, pp.15-44, Addison-Wesley (1997).
- [2] Benou, G. and Richie, R.: The reversal of large stock price declines: The case of large firms, *Journal of Economics and Finance*, Vol.27, No.1, pp.19-38 (2003).
- [3] Bremer, M. and Sweeney, R.J.: The reversal of large stock price decreases, *The Journal of Finance*, Vol.46, No.2, pp.747-754 (1991).
- [4] Chen, S.-H. and Yeh, C.-H.: On the emergent properties of artificial stock markets: the efficient market hypothesis and the rational expectations hypothesis, *Economic Behavior & Organization*, Vol.49, No.2, pp.217-239 (2002).
- [5] Darley, V. and Outkin, A.V.: *A NASDAQ Market Simulation: Insights on a Major Market from the Science of Complex Adaptive Systems*, World Scientific Pub. Co. Inc. (2007).
- [6] Feldman, T.: Leverage regulation: An agent-based simulation, *Journal of Economics and Business*, Vol.63, No.5, pp.431-440 (2011).
- [7] 原 章, 長尾智晴: 自動グループ構成手法 ADG による人工株式市場の構築と解析, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.7, pp.2292-2299 (2002).
- [8] 和泉 潔: 人工市場: 市場分析の複雑系アプローチ, 森北出版 (2003).
- [9] 水田孝信, 八木 勲, 和泉 潔: 株式市場急落後の反発に関する分析—シミュレーション研究との比較, 第7回人工知能学会ファイナンスにおける人工知能応用研究会, pp.1-6 (2011).
- [10] 水田孝信, 八木 勲, 和泉 潔: 市場暴落後の反発時における投資家の振る舞いと人工市場への示唆, 第8回人工知能学会ファイナンスにおける人工知能応用研究会, pp.1-6 (2012).

\*6 板寄せ方式の場合は、すべてのファンダメンタルエージェントが発注し、その中で最も高い価格の買い注文が取引されるので、ザラ場方式に比べてリバウンド幅が大きくなる傾向が強い。

- [11] Palmer, R.G., Arthur, W.B., Holland, J.H., LeBaron, B. and Tayler, P.: Artificial economic life: A simple model of a stockmarket, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol.75, No.1-3, pp.264–274 (1994).
- [12] 八木 勲, 水田孝信, 和泉 潔: 人工市場を利用した空売り規制が与える株式市場への影響分析, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.208–216 (2011).
- [13] Yagi, I., Mizuta, T. and Izumi, K.: A Study on the Effectiveness of Short-selling Regulation in view of Regulation Period using Artificial Markets, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, Vol.7, No.1, pp.113–132 (2010).



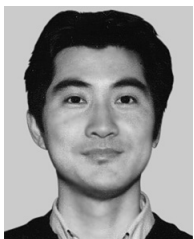
八木 勲 (正会員)

1995年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1997年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。日立造船(株)等を経て、2006年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。東京工業大学大学院総合理工学研究科特別研究員を経て、2011年より神奈川工科大学情報学部准教授。マルチエージェントシミュレーションの金融分野応用研究に興味を持つ。人工知能学会, IEEE 各会員。



水田 孝信

2000年気象大学校卒業。2002年東京大学大学院理学系研究科修了。2004年同研究科博士課程中退。同年4月スパークス・アセット・マネジメント株式会社入社。2010年5月より運用調査本部ファンドマネージャー。2011年10月より東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻博士課程に社会人のまま在籍。中小企業診断士。日本証券アナリスト協会検定会員。人工知能学会, JAFEE(日本金融・証券計量・工学学会), 行動経済学会各会員。



和泉 潔 (正会員)

1993年東京大学教養学部基礎科学科第二卒業。1998年同大学院博士課程修了。博士(学術)。同年より2010年まで、電子技術総合研究所(現、産業技術総合研究所)勤務。2010年より現職。マルチエージェントシミュレーション, 特に社会シミュレーションに興味がある。電子情報通信学会, 電気学会各会員。