

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一考察

A study of the reversal mechanism of large stock price declines using artificial markets

八木 勲^{1*} 水田 孝信² 和泉 潔³
Isao Yagi¹ Takanobu Mizuta² Kiyoshi Izumi³

¹ 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科

¹ Department of Information and Computer Sciences,
Kanagawa Institute of Technology,

² スパークス・アセット・マネジメント 株式会社

² SPARX Asset Management Co., Ltd.

³ 東京大学大学院 工学系研究科

³ School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: 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。そして急落後に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ーリアクション仮説が有力視されているものの、はっきりとした結論は出ていない。本研究では、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、オーバー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、価格決定方式の1つである板寄せ方式では、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ってリバーサル現象が引き起こされることを確認した。

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。

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、一日に 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、一ヶ月に 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。さらにリバーサル現象には季節性アノマリー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、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）の分析は行われていない。

市場内部メカニズムを検討する方法の1つとして、人工市場が挙げられる。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, 7, 8]。

本研究では、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、オーバー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、価格決定方式の1つである板寄せ方式では、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ってリバーサル現象が引き起こされることを確認した。これは板寄せ方式には効率的な市場を形成しない条件があることを示している。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2 節にて、

*連絡先：神奈川工科大学 情報学部 情報工学科
〒 243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030
E-mail: iyagi2005@gmail.com
URL : <http://iyagi2005.cocolog-nifty.com/blog/>

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 節にて，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，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い，3.3 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った．4 節では 3 節の結果を基に考察を行った．最後に 5 節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 [9, 10] 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，収益率や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みなし，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

既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，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，1000 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¹， α 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．その他，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から計算される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．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，

¹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．

- $\Delta MA_{t,n_{i,t}} > 0$ 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、 $1 \leq n_{i,t} \leq 25$ をみたすランダムな値とし、 α_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、 $0 < q_{i,t}^T \leq q_{i,t-1} - S_{min}$ を、規制あり市場においては、 $0 < q_{i,t}^T \leq q_{i,t-1}$ 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 $q_{i,t}^N$ の買い注文を出す。ただし、 $q_{i,t}^N$ は、平均 10、分散 1 の正規分布に従う乱数で、 $0 < q_{i,t}^N \leq S_{max} - q_{i,t-1}$ を満たす。一方、売りの場合、株価 $(1 + \alpha_t)P_{t-1}$ で株式数 $q_{i,t}^N$ の売り注文を出す。ただし、 $q_{i,t}^N$ 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、 $0 < q_{i,t}^N \leq q_{i,t-1} - S_{min}$ を、規制あり市場においては、 $0 < q_{i,t}^N \leq q_{i,t-1}$ 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 [9, 10] 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、成績のよ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もたせた。

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よいファンダメンタルエージェントの模倣を試みるが、運用成績のよ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、全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、全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、全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、全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、全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、全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 (順張りとは逆張り) 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 期の全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。

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、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）を想定して実験を行う。3.4節では理論株価急落前後の株価収益率²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。

需給曲線の具体例を3.2.1節の実験結果である図3を用いて述べる。第1000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1000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3のような需要曲線が構成可能となる。一方、第1000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、注文数は9であった。したがって、第1000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3のような供給曲線が構成可能となる。そして、価格295のところでも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1000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 [9, 10] の設定条件を用いた実験（3.2.1節）、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を想定した実験（3.2.2節）、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節）である。

表 1: 理論株価急落前後の取引

	第1000期	第1001期	第1002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

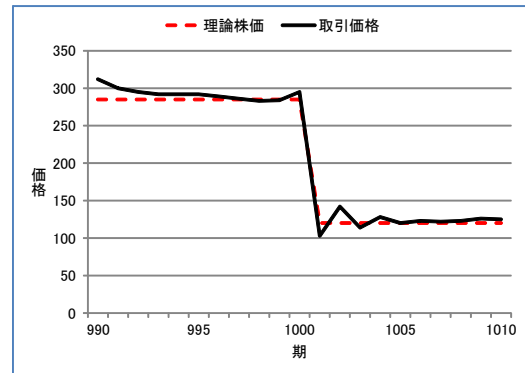


図 1: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移

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）

本節では以前報告した人工市場モデルを基に実験を行った。図1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2から図6を用いて分析する。図2と図3から、第1000期の需要（買い注文）と供給（売り注文）のバランスはよく、妥当な株価で取引されていることがわかる。

しかし、理論株価が急落した第1001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4）。第1001期の需給曲線は大きく左に偏り、発注価格103のところでも両曲線が交差している（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1000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。第1001期の需給関係は需要に対して供給が大きく上回っており、大量の理論株価より低い価格帯の売り注文と、全ての買い注文によって取引が成立している。その結果、取引価格103は多くのファンダメンタルエージェントが妥当と

²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

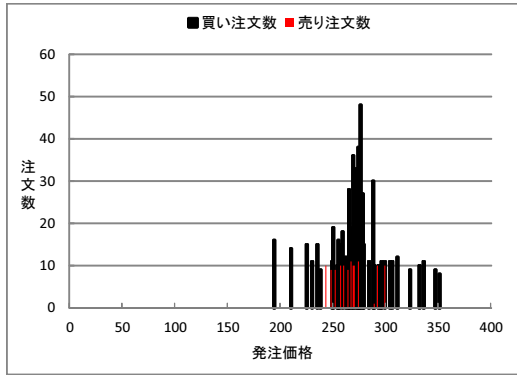


図 2: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1000 期の注文数

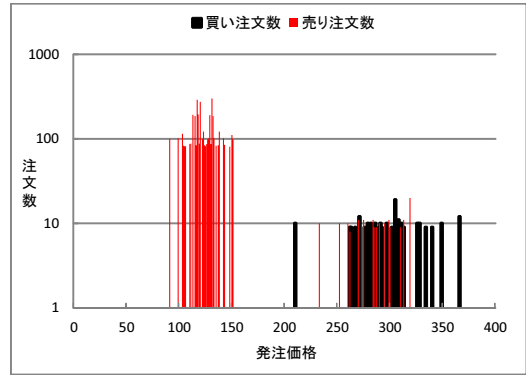


図 4: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1001 期の注文数

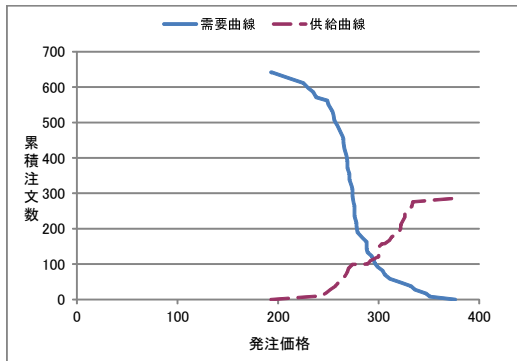


図 3: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1000 期の需給曲線

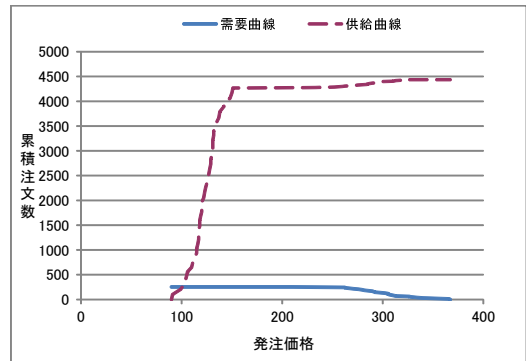


図 5: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1001 期の需給曲線

判断した価格より更に低い価格となっている。
 第 1002 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 6）。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している（図 7）。第 1001 期同様，ファンダメンタルエージェントは理論株価付近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 1001 期の取引価格付近を妥当な価格と判断している。ファンダメンタルエージェントは第 1001 期の取引価格が割安だと判断し，大量の買い注文を発注したため，第 1002 期の需給関係は供給に対して需要が大きく上回り，大量の理論株価より高い価格帯の買い注文と，全ての売り注文によって取引が成立している。その結果，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更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ーサル現象が発生することがわかる。また，ファンダメンタルズが暴落したとき，妥当だと思われる価

格より更に低い価格で株式購入が可能であることがわかる。表 2 にリバウンド率（ $= (\text{第 1002 期の取引価格} - \text{第 1001 期の取引価格}) / (\text{第 1000 期の取引価格} - \text{第 1001 期の取引価格})$ ）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いる。
 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）
 本節では，ディフェンシブ系株式や債券等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リス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 8 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ーサル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 1001 期，第 1002 期とも理論株価に近い

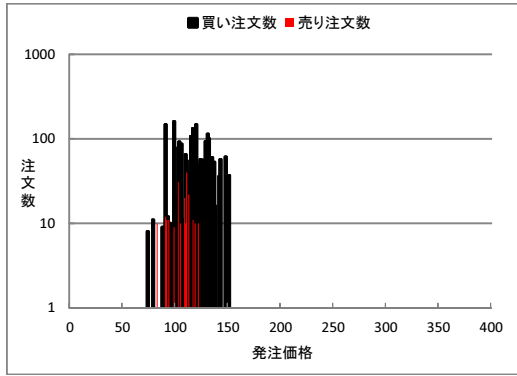


図 6: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1002 期の注文数

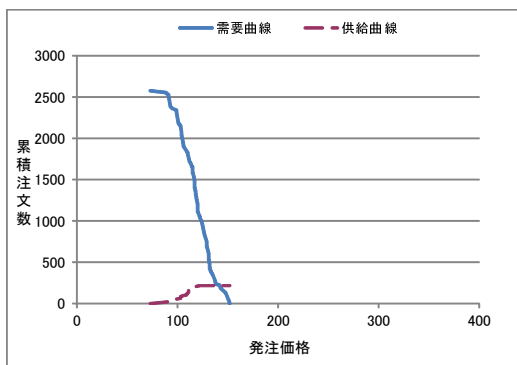


図 7: 条件 1 の下で理論株価が一度に急落したときの第 1002 期の需給曲線

価格で取引が行われたためである。

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 9 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, これまで同様リバウンド現象は発生するが, 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わかる (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

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)

	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

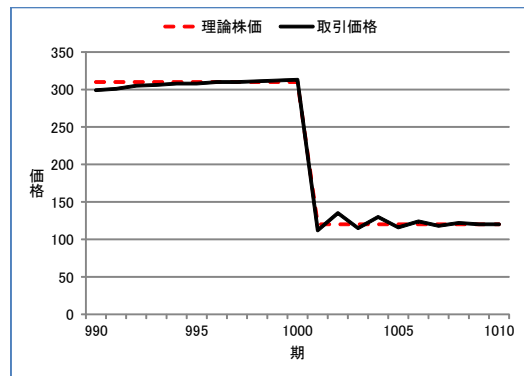


図 8: 条件 2 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移

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 の下での実験の実験と比較して, 偏った発注価格の注文数が減少し, 第 1001 期, 第 1002 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。

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 回にわ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 1000 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 10, 図 11, 図 12 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

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）

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

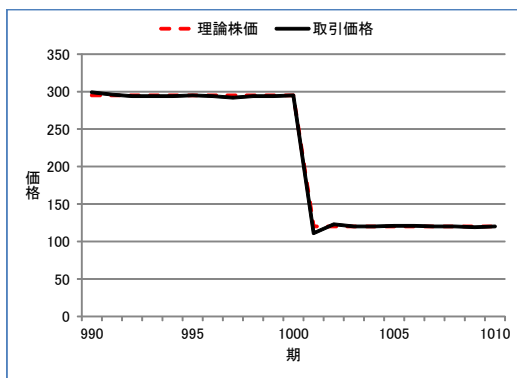


図 9: 条件 3 の下で理論株価が一度に急落したときの取引価格推移

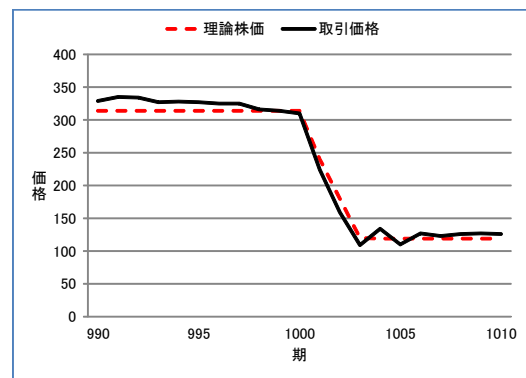


図 10: 条件 1 の下で理論株価を 1 期おき（第 1000 期，第 1001 期，第 1002 期）に 3 回急落させたときの取引価格推移

もリバーサル現象が発生している。理論株価を第 1000 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 1001 期から第 1003 期）の取引価格は、常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 1004 期において理論株価より高い価格で取引が成立している。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、次の急落時までには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、リスク回避係数が大きいほど、リバウンド率が大きくなることわかる。

3.4 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わかる。すなわち、急落直後は市

場が不安定になっていることがわかる。

4 考察

3 節にて、理論株価が急落した場合の株価変動を確認したが、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確認できた。しかし、これらの実験では先行研究で提案されたオーバーリアクション仮説は考慮していない。したがって、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、オーバーリアクション仮説は不要である可能性がある。

一方、本モデルの価格決定方式は板寄せ方式を採用しており、本実験で発生したリバーサル現象は板寄せ方式の特性による面もある。3.2.1 節の実験結果と 3.2.2 節の実験結果から、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わかる。さらに 3.2.2 節の実験結果と 3.2.3 節の実験結果から、発注される株式の需給関係が偏るほど取引価格

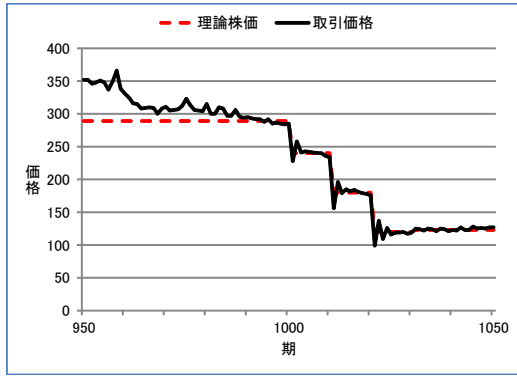


図 11: 条件 1 の下で理論株価を 10 期おき (第 1000 期, 第 1010 期, 第 1020 期) に 3 回急落させたときの取引価格推移

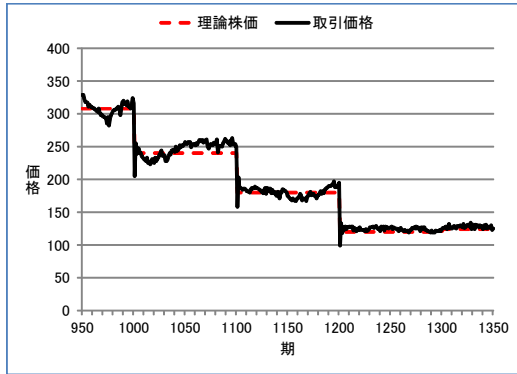


図 12: 条件 1 の下で理論株価を 100 期おき (第 1000 期, 第 1100 期, 第 1200 期) に 3 回急落させたときの取引価格推移

に影響が出ることがわかる。このような場合、板寄せ方式は効率的な市場を形成しない可能性があることが判明した。

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、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、オーバーリアクション仮説を考慮せずともリバーサル現象が発生することを確認した。そして、価格決定方式の 1 つである板寄せ方式に効率的な市場を形成しない条件があることを明らかにした。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挙げられる。また、板寄せ方式より効率的な市場を形成をする価格決定方式

が存在するのかを追跡調査することが挙げられる。シミュレーションによる効率的な市場制度のデザインに関する研究 [6] も行われており、このような手法等を用いて板寄せ方式より効率的な市場制度を検討することが考えられる。

参考文献

- [1] W. Arthur, J. Holland, B. Lebaron, R. Palmer, and P. Tayler. Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. In *The Economy as an Evolving Complex System II*, pp. 15–44. Addison-Wesley, 1997.
- [2] G. Benou and R. Richie. 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] M Bremer and Sweeney R. J. The reversal of large stock price decreases. *The Journal of Finance*, Vol. 46, No. 2, pp. 747–754, 1991.
- [4] S.-H. Chen and C.-H. Yeh. 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] V. Darley and A. V. Outkin. *A NASDAQ Market Simulation: Insights on a Major Market from the Science of Complex Adaptive Systems*. World Scientific Pub. Co. Inc., 2007.
- [6] 古幡征史. 東京証券取引所における現物市場ルールに関する研究. 第 5 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. 52–59, October 2009.
- [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] I. Yagi, T. Mizuta, and K. Izumi. 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.
- [10] 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.