

金融危機を誘発する学習過程を実装した人工市場における 値幅制限制度と空売り規制の分析*

水田孝信^a；和泉潔^b；八木勲^c；吉村忍^d

概要

バブル崩壊時や金融危機時に重要である学習プロセスを実装した人工市場を用いてシミュレーションを行い、値幅制限制度と完全空売り規制、およびアップティックルールの効果を比較した。その結果、規制がない場合にバブル崩壊がおこるとファンダメンタル価格よりもさらに価格が下落するというオーバーシュートが発生することが分かった。一方、規制がある場合はオーバーシュートが発生せず効率的な市場となることが分かった。しかし、完全空売り規制とアップティックルールは平常時に、割高な価格でしか取引されないという副作用も持っていることが分かった。これらを総合すると、値幅制限制度が平常時の副作用も無く、もっとも効率的な市場をもたらす可能性があることを示した。

キーワード：人工市場，シミュレーション，値幅制限，空売り規制

JEL Classification Codes：C63, D44, G14

1 はじめに

人工市場モデルを用いたシミュレーション研究は、実際の市場にみられる多くの統計的性質 (stylized fact¹) を再現したり規制の効果を検証したりと、多くの成果をあげている²。金融取引所において空売りを禁止する規制を採用する場合はしばしばあり、人工市場を用いた検証も行われている (Yagi, Mizuta and Izumi 2010, 八木・水田・和泉 2011)。しかし、ある時間内での価格変動が一定以上を超えた取引を禁止する値幅制限 (TokyoStockExchange 2012)³や直近で約定した価格よりも低い価格で空売りすることを禁じるアップティックルール⁴など先進諸国で実際に導入さ

れている規制を検討したり、バブル崩壊時や金融危機時など急落する時期 (以後単にバブル崩壊とよぶ) にこれらの規制・制度を比較したシミュレーション研究はこれまでなかった。

値幅制限や各種空売り規制はバブル期などの急上昇期 (以後単にバブル時とよぶ) や、バブル崩壊時に機能することが期待される。(水田・和泉・吉村 2012) は、人工市場を用いたシミュレーション研究によって、ファンダメンタル価値を重視した投資戦略からテクニカル分析を重視した投資戦略に切り替えるといった学習プロセスが、バブル時・バブル崩壊時に重要であると指摘した。実証研究において、投資家はファンダメンタル戦略とテクニカル戦略を主に用いていることが知られている (Menkhoff and Taylor 2007)。そして多くの実証・実験研究によって、これらの戦略を状況に応じて切り替えるという学習プロセスが存在し、バブル時やバブル崩壊時に重要な役割を果たしていることが指摘されている。例えば、(山本・平田 2011, Yamamoto and Hirata 2012) は価格情報や投資家情報を用いた実証分析を行い、このような戦略変更が実際に行われていることを示し、2つの戦略が実際にどれくらいの割合になっているか時系列で推定した。(Frankel and Froot 1990) はアンケート調

* 本研究の内容は著者らが所属する組織を代表するものではなく、すべては個人的な見解である。

^a スパークス・アセット・マネジメント株式会社,
東京大学大学院 工学系研究科
e-mail: mizutata@gmail.com

^b 東京大学大学院 工学系研究科, JST さきがけ

^c 神奈川工科大学 情報学部

^d 東京大学大学院 工学系研究科

¹ (Cont 2001) に整理されている。

² 優れたレビューとして (LeBaron 2006, Chen, Chang and Du 2009)。

³ 値幅制限制度は日本や中国 (香港を除く)、韓国などアジアの取引所では採用されている場合が多い。しかし、米国やヨーロッパの取引所では採用されていない場合が多く、値幅制限が市場を効率化するかどうかは議論が分かれている。

⁴ 制度の詳しい解説・実証分析として (大塚 2012) がある。日本では現在導入されているが、米国では 2007 年に廃止に

なったもののリーマンショック後に形を変えて一部再導入されるなど、賛否が分かれている。

表 1 各試行の stylized facts.

| 尖度 | | ファンダメンタル価格一定(=10000) | | | | ファンダメンタル価格急落(=10000→7000) | | | |
|------------------|-----|----------------------|------|-------------|---------------|---------------------------|------|-------------|---------------|
| | | 規制なし | 値幅制限 | 完全空売り 規制 | アップティック 規制 | 規制なし | 値幅制限 | 完全空売り 規制 | アップティック 規制 |
| | | 5.39 | 5.39 | 7.28 | 9.37 | 4.96 | 8.15 | 9.21 | 9.27 |
| リターンの2乗の 自己相関 | ラグ | | | | | | | | |
| | 1 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.15 | 0.24 | 0.14 | 0.09 | 0.18 |
| | 2 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.12 | 0.21 | 0.13 | 0.09 | 0.16 |
| | 3 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0.10 | 0.19 | 0.11 | 0.07 | 0.15 |
| | 4 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.18 | 0.11 | 0.07 | 0.14 |
| | 5 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.18 | 0.10 | 0.06 | 0.14 |
| | 6 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.18 | 0.10 | 0.06 | 0.13 |
| ハザードレート | i | | | | | | | | |
| | 1 | 55% | 55% | 52% | 70% | 55% | 55% | 51% | 70% |
| | 2 | 53% | 52% | 48% | 72% | 50% | 53% | 47% | 70% |
| | 3 | 49% | 49% | 45% | 72% | 45% | 50% | 44% | 65% |
| | 4 | 47% | 47% | 41% | 71% | 40% | 48% | 41% | 52% |
| | 5 | 44% | 46% | 40% | 65% | 34% | 46% | 38% | 38% |
| | 6 | 44% | 45% | 37% | 61% | 28% | 44% | 35% | 25% |

査を行い、投資家がバブル時に価格の上昇を受け投資戦略をファンダメンタル重視の戦略からテクニカル重視の戦略に変更したことを示した。(Hirota and Sunder 2007) は実験市場によって、最終的にファンダメンタル価値そのものをキャッシュで受け取れる投資環境では投資家はファンダメンタル情報を用いるが、途中で売却しなければならない投資環境では投資家はテクニカル分析を行うことを示した。

本研究では (Chiarella, Iori and Perelló 2009, 水田他 2012) の人工市場モデルをベースに、バブル崩壊時に重要である学習プロセスを実装したモデルを構築し、値幅制限と完全空売り規制、およびアップティックルールの効果を、投資家の学習プロセスにも着目しながら比較した。平常時に相当するファンダメンタル価格が一定の場合と、バブル崩壊時に相当するファンダメンタル価格が急落した場合について分析を行い、各規制が平常時とバブル崩壊時に市場を効率的にするか、または非効率にしてしまうのかを検討した。

以後 2 節では本研究で用いた人工市場モデルを説明する。3 節ではシミュレーション結果を示し、4 節で結果と今後の課題を述べる。

2 人工市場モデル

本研究では (Chiarella et al. 2009, 水田他 2012) の人工市場モデルをベースにモデルを構築した。本モデルは 1 つのリスク資産のみを取引対象として、価格決定メカニズムは、連続 double auction 方式⁵(ザラバ方

式)(Friedman 1993) とした。 n 体のエージェントがおり、エージェント番号 $j = 1$ から順番に $j = 2, 3, 4, \dots$ と注文を出す。最後のエージェント $j = n$ が注文を出すと、次の時刻にはまた初めのエージェント $j = 1$ から注文をだし繰り返される。時刻 t は 1 体のエージェントが注文を出すごとに 1 増える。つまり、注文をしただけで取引が成立しない場合も時刻が進む。エージェント j は注文価格、売り買いの別を以下のように決める。時刻 t , エージェント j の期待リターン $r_{e,j}^t$ は、

$$r_{e,j}^t = \left(w_{1,j} \log \frac{P_f}{P^t} + w_{2,j} r_{h,j}^t + w_{3,j} \epsilon_j^t \right) / \sum_{i=1}^3 w_{i,j}. \quad (1)$$

ここで、 $w_{i,j}$ はエージェント j の i 項目の重みであり、シミュレーション開始時に、それぞれ 0 から $w_{i,max}$ まで一様乱数で決める。 P_f は時間によらず一定のファンダメンタル価格、 P^t は時刻 t での取引価格 (取引されなかった時刻では最も最近取引された価格であり、時刻 $t = 0$ では $P^t = P_f$ とする)、 ϵ_j^t は時刻 t , エージェント j の乱数項であり、平均 0, 標準偏差 σ_ϵ の正規分布乱数である。 $r_{h,j}^t$ は時刻 t にエージェント j が計測した過去リターンであり、 $r_{h,j}^t = \log(P^t/P^{t-\tau_j})$ である。ここで τ_j はシミュレーション開始時に 1 から τ_{max} までの一様乱数でエージェントごとに決める。式 (1) の第 1 項目はファンダメンタル価格と比較して安ければプラスの期待リターンを高めればマイナスの期待リターンを示す、ファンダメンタルな投資家の成分である。第 2 項目は過去のリターンがプラス (マイナス) ならプラス (マイナス) の期待リターンを

⁵ 売り手と買い手の双方が価格を提示し、売り手と買い手の提示価格が合致するとその価格で直ちに取引が成立する方式。

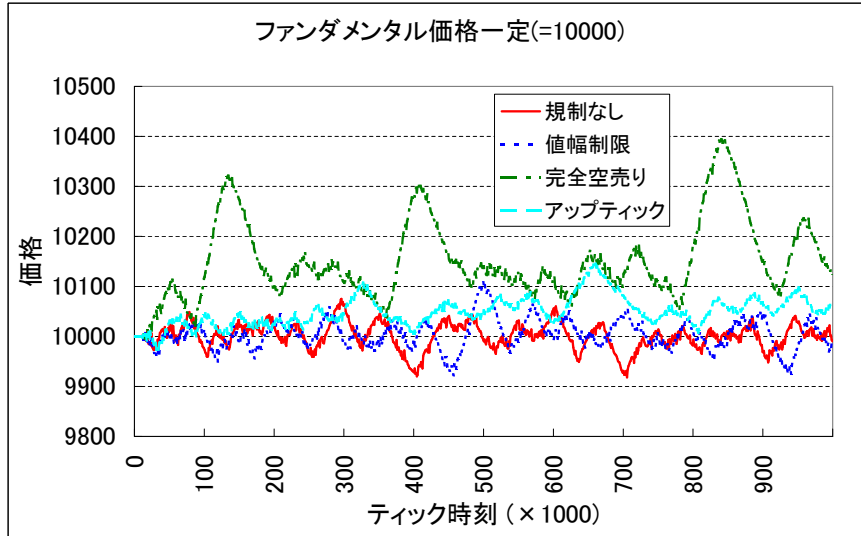


図1 ファンダメンタル価格一定 (=10000) のときの価格推移

示す、テクニカルな投資家の成分であり、第3項目はノイズを表している。期待リターン $r_{e,j}^t$ より期待価格 $P_{e,j}^t$ は、

$$P_{e,j}^t = P^t \exp(r_{e,j}^t) \quad (2)$$

で求まる。注文価格 $P_{o,j}^t$ は $P_{e,j}^t - P_d$ から $P_{e,j}^t + P_d$ までの一様乱数で決める。ここで、 P_d は定数である。価格の変化幅の最小単位は δP とし、それより小さい端数は切り捨てる。そして、売り買いの別は期待価格 $P_{e,j}^t$ と注文価格 $P_{o,j}^t$ の大小関係で決める。すなわち、

$$\begin{aligned} P_{e,j}^t > P_{o,j}^t &\text{なら 1 単位の買い} \\ P_{e,j}^t < P_{o,j}^t &\text{なら 1 単位の売り,} \end{aligned} \quad (3)$$

とし、注文数量は常に 1 と一定とする。本モデルの価格決定メカニズムは連続 double auction であるため、買い(売り)注文の場合、注文価格より安い(高い)注文が既に存在すれば最も安い(高い)売り(買い)注文と即座にマッチングされ取引が成立する。そのような注文がなければ注文を残す。残した注文が時刻 t_c 経過してもマッチングされなかった場合は、キャンセルされる。なお、資産は何単位でも買うことができる(キャッシュが無制限)が、空売りに関しては自由に来る場合と、制約がある場合とに分けて検討する。

各エージェントは学習を行う。学習は各エージェントが注文を出す直前に行われる。ファンダメンタルな投資家成分だけの場合の期待リターン $r_{e,1,j}^t = \log(P_f/P^t)$ 、テクニカルな投資家成分だけの場合の期待リターン $r_{e,2,j}^t = r_{h,j}^t$ とする。これら $r_{e,i,j}^t$ が学習

期間のリターン $r_l^t = \log(P^t/P^{t-t_l})$ と比べ、

$$\begin{aligned} \text{同符号なら, } w_{i,j} &\leftarrow w_{i,j} + k_l r_l^t \rho_j^t (w_{i,max} - w_{i,j}) \\ \text{異符号なら, } w_{i,j} &\leftarrow w_{i,j} - k_l r_l^t \rho_j^t w_{i,j}, \end{aligned} \quad (4)$$

のように $w_{i,j}$ を書き換える。ここで k_l は定数、 ρ_j^t は時刻ごと、エージェントごとに与えられる 0 から 1 までの一様乱数である。価格変化の方向を当てている戦略のウェイトを引き上げ、外れている戦略のウェイトを引き下げる。また、 r_l^t をかけることにより、小さい価格変動を当てたり外したりしても大きくウェイトが増減しない。これとは別に、小さい確率 m で $w_{i,j}$ を再設定する。つまり、0 から $w_{i,max}$ の一様乱数で決めなおす。

本研究では、値幅制限制度、完全空売り規制およびアップティックルールが存在する場合を比較した。値幅制限は以下のようにモデル化した。時刻 t から t_{pr} 前の価格 $P^{t-t_{pr}}$ を基準とし、 $P^{t-t_{pr}} - \Delta P_{pr}$ から $P^{t-t_{pr}} + \Delta P_{pr}$ の間は、自由に注文を出せる。 $P^{t-t_{pr}} + \Delta P_{pr}$ より高い買い注文は強制的に $P^{t-t_{pr}} + \Delta P_{pr}$ とし、 $P^{t-t_{pr}} - \Delta P_{pr}$ より安い売り注文は強制的に $P^{t-t_{pr}} - \Delta P_{pr}$ とする。これにより、 $P^{t-t_{pr}} \pm \Delta P_{pr}$ の外側では、取引は行われない。完全空売り規制は、リスク資産の保有数量が 0 のときに売り注文を禁止することでモデル化した。すべてのエージェントの初期に保有しているリスク資産は 1 単位である。アップティックルールは、リスク資産の保有数量が 0 のときに、 P^t 以下の売り注文した場合、注文価格を強制的に $P^t + \delta P$ に変更させることでモデル化した。

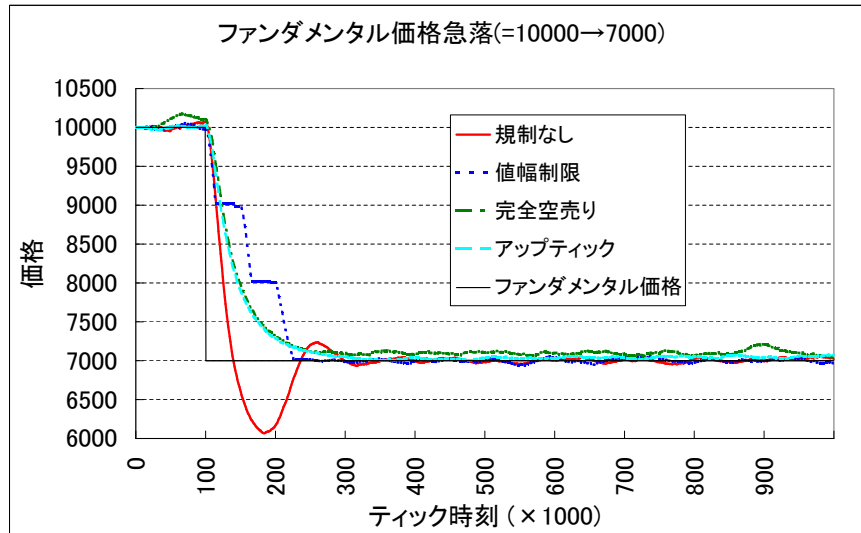


図2 ファンダメンタル価格急落 (=10000 → 7000) のときの価格推移

3 シミュレーション結果

本研究では、以下のパラメータで固定した。 $n = 1000, w_{1,max} = 1, w_{2,max} = 10, w_{3,max} = 1, \tau_{max} = 10000, \sigma_\epsilon = 0.03, P_d = 1000, t_c = 10000, \delta P = 1, t_l = 10000, k_l = 4, m = 0.01, t_{pr} = 50000, P_{pr} = 1000$ とした。また、 $P_f = 10000$ で一定である場合 (ファンダメンタル一定) と、初め $P_f = 10000$ で時刻 $t = 100000$ で $P_f = 7000$ に変化する場合 (ファンダメンタル急落) を行った。またシミュレーションは $t = 1000000$ まで行った。

モデルの妥当性は実証分析で得られている fat-tail や volatility-clustering といった代表的な stylized fact が再現できるかどうかで評価される²。表1は各試行での stylized fact を示している。各々の場合について100回の試行を行い平均値をとった。stylized fact はすべて時刻100間隔での価格を用いて計算した⁶。いずれのシミュレーションでも尖度がプラスで fat-tail となっており、騰落率の2乗の自己相関も大きなラグがあってもプラスで volatility-clustering も再現されている。バブルやバブル崩壊が発生しているかどうかを定量的に測る手法としてハザードレート (H_i) を用いた手法がある (McQueen and Thorley 1994, Chan, McQueen and Thorley 1998)。

⁶ 本モデルの時刻は注文をただけで取引が成立しない場合も時刻が進む。そのため、時刻1ごとの全ての価格を用いた stylized fact は多くの価格変動が無いデータによりバイアスがかかってしまうため、時刻100間隔での測定とした。

H_i はある測定期間 (1日や1週間) の価格の騰落率が i 回連続でプラス (マイナス) だった場合、次の測定期間の騰落率がマイナス (プラス) になった割合を示す。測定期間内にバブルやバブル崩壊が含まれている場合、 i の増加により H_i が減少することが知られている (McQueen and Thorley 1994, Chan et al. 1998)。つまり、バブルやバブル崩壊の期間は騰落率が連続でプラス (マイナス) になりやすく、その連続が続けば続くほど、その後プラス (マイナス) が続きやすくなることを示している。表1では、騰落率が i 回連続でマイナスだったときにプラスになった割合を示した。 i が増えるに連れて H_i 減少する場合は、バブルやバブル崩壊のような価格推移が発生したことを示している。ファンダメンタル価格一定の場合は、完全空売り規制のとき、 H_i が減少している。ファンダメンタル価格急落時は値幅制限制度のとき以外は、 H_i が減少しており、バブル崩壊のような現象が発生している可能性がある。

図1はファンダメンタル一定の場合の価格の推移を示している。規制なしと値幅制限の場合はファンダメンタル価格である10000周辺を振動しており、効率性が高い市場であるといえる。一方、完全空売り規制の場合は、常にファンダメンタル価格より高い価格で取引され、振幅は大きくないものの、バブルとバブル崩壊のような価格推移を繰り返している。これは (Yagi et al. 2010, 八木他 2011) の結果と一致する⁷。アッ

⁷ (Yagi et al. 2010, 八木他 2011) の結果では振幅が非常に

プティックルールの場合も完全空売り規制の場合ほどではないが、ファンダメンタル価格より常に高い価格で取引がされている。

図2はファンダメンタル価格急落時の価格の推移である。規制がない場合、新しいファンダメンタル価格である7000よりもさらに下落しオーバーシュートしている。一方、値幅制限、完全空売り規制、アップティックルールの場合、新しいファンダメンタル価格に達するまでに時間が、規制なしの場合よりもかかっているものの、オーバーシュートが発生していない。規制なしの場合、もっとも速く新しいファンダメンタル価格に到達しているの、その意味では効率的な市場であるといえる。しかし、その後のオーバーシュートにより新しいファンダメンタル価格よりかなり低い価格で取引され、その後大きくリバウンドするという、バブル崩壊のような現象が見られ、効率的な市場とは言いがたい。一方、その他の規制がある場合は、新しいファンダメンタル価格に到達するのに時間を要するが、オーバーシュートは起きておらず、規制なしの場合に比べ効率的な市場と言う事ができる。しかし、完全空売り規制とアップティックルールの場合、新しいファンダメンタル価格に収束した後、ファンダメンタル一定の場合と同じように、小さいバブルとバブル崩壊を繰り返したため、 H_i はバブルやバブル崩壊のような価格推移を示した。

図3、図4はファンダメンタル価格が急落したときの規制なしの場合と値幅制限の場合について、各戦略成分の合計ウェイト、

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sum_{i'=1}^3 \sum_{j=1}^n w_{i',j}}, \quad (5)$$

の時系列を示した。 $i = 1$ の場合がファンダメンタル成分であり、 $i = 2$ の場合がテクニカル成分である。図3が示すように、規制がない場合はファンダメンタル成分が極端に少なくなる時期が存在する。これは、オーバーシュートして新しいファンダメンタル価格からさらに下落しているときファンダメンタル投資が有効でなくなるため、テクニカル投資に切り替えるからである。ファンダメンタル成分が減少することにより新しいファンダメンタルへ向かうと予想するエージェ

大きい、初期のキャッシュを減らせば振幅が小さくなり、本研究と同程度の振幅になることを確認している。本研究と(Yagi et al. 2010, 八木他 2011)とはモデルが大きく異なるにも関わらず同一の結果が出たことは、人工市場を用いた分析結果の頑健性の高さを示していると考えている。

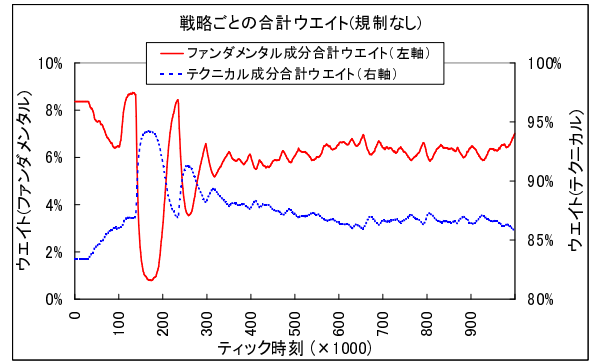


図3 規制がない場合の戦略ごとの合計ウェイト推移。

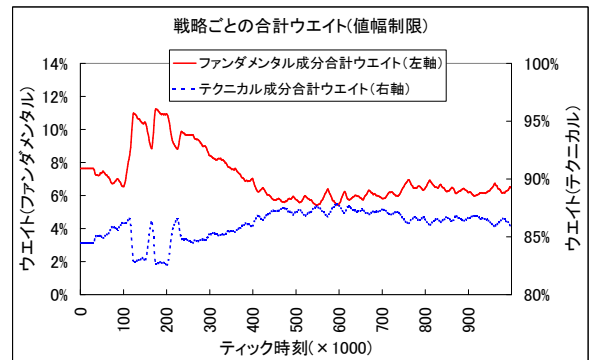


図4 値幅制限がある場合の戦略ごとの合計ウェイト推移。

ントが減り、オーバーシュートがますます起きやすくなっている。一方、図4が示すように、値幅制限の場合は、ゆっくり下落することによりオーバーシュートが発生しないため、テクニカル投資への切り替えが起きていない。つまり、値幅制限などの規制は下落をゆっくりにしてしまう代わりに、ファンダメンタル投資からテクニカル投資への切り替えをおさえ、オーバーシュートを発生させないことに成功している。

4 まとめと今後の課題

本研究では (Chiarella et al. 2009, 水田他 2012) の人工市場モデルをベースに、バブル崩壊時に重要である学習プロセスを実装したモデルを構築し、値幅制限制度と完全空売り規制、およびアップティックルールの効果を、投資家の学習プロセスにも着目しながら比較した。平常時に相当するファンダメンタル価格が一定の場合と、バブル崩壊時に相当するファンダメンタル価格が急落した場合について分析を行い、各規制が平常時とバブル崩壊時に市場を効率的にするか、または非効率にしてしまうのかを検討した。その結果、規制がない場合にバブル崩壊がおけるとファンダメンタ

ル価格よりもさらに価格が下落するというオーバーシュートが発生することが分かった。一方、規制がある場合はオーバーシュートが発生せず効率的な市場となることが分かった。しかし、完全空売り規制とアップティックルールは平常時に、割高な価格でしか取引されないという副作用をもっていることが分かった。これらを総合すると、値幅制限が平常時の副作用も無く、もっとも効率的な市場をもたらす可能性があることを示した。この結果は実証分析(大墳 2012)とも整合的な結果であり、本研究が証券市場の制度・規制に関して1つの見方を提示できたと考えている。

今後の課題は、今回はファンダメンタル価格を強制的に引き下げてバブル崩壊や金融危機のような現象を発生させているが、この初めの引き金自体もシミュレーション内で自発的に起こるメカニズムを考察する必要がある。これにより初期段階の現象を分析できるようになる。また、値幅制限のパラメータである制限期間 tpr について詳細に調べ、どのくらいの制限期間が適切であるかの議論を深める必要がある。

参考文献

- Chan, K., McQueen, G., Thorley, S. 1998. Are there rational speculative bubbles in asian stock markets? *Pacific-Basin Finance Journal*, 6 (1-2), 125–151.
- Chen, S., Chang, C., Du, Y. 2009. Agent-based economic models and econometrics. *Knowledge Engineering Review*.
- Chiarella, C., Iori, G., Perelló, J. 2009. The impact of heterogeneous trading rules on the limit order book and order flows. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33 (3), 525–537.
- Cont, R. 2001. Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues. *Quantitative Finance*, 1, 223–236.
- Frankel, J., Froot, K. 1990. Chartists, fundamentalists, and trading in the foreign exchange market. *The American Economic Review*, 80 (2), 181–185.
- Friedman, D. 1993. The double auction market institution: A survey. *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*, 3–25.
- Hirota, S., Sunder, S. 2007. Price bubbles sans dividend anchors: Evidence from laboratory stock markets. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 31 (6), 1875–1909.
- LeBaron, B. 2006. Agent-based computational finance. *Handbook of computational economics*, 2, 1187–1233.
- McQueen, G., Thorley, S. 1994. Bubbles, stock returns, and duration dependence. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 29 (3).
- Menkhoff, L., Taylor, M. 2007. The obstinate passion of foreign exchange professionals: technical analysis. *Journal of Economic Literature*, 45 (4), 936–972.
- 水田孝信・和泉潔・吉村忍 2012. 「人工市場における学習プロセスの必要性検証」, 『第26回人工知能学会全国大会論文集』, 人工知能学会.
- 大墳剛士 2012. 「東証市場における空売りの実態及び空売り規制の影響」, 『東証ワーキングペーパー』(1), 東京証券取引所.
- TokyoStockExchange 2012. Guide to TSE Trading Methodology. http://www.tse.or.jp/about/books/b7gje6000004q31-att/trading_methodology.pdf.
- 八木勲・水田孝信・和泉潔 2011. 「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』, 26 (1), 208–216.
- Yagi, I., Mizuta, T., Izumi, K. 2010. A study on the effectiveness of short-selling regulation using artificial markets. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 7 (1), 113–132.
- 山本竜市・平田英明 2011. 「日本の株式市場における戦略の切り替えの実証分析」, 『第5回行動経済学会プロシーディングス』, 行動経済学会.
- Yamamoto, R., Hirata, H. 2012. Strategy switching in the Japanese stock market. Hosei University, Working Paper No. 164.