

# 人工市場を用いた値幅制限・空売り規制・ アップティックルールの検証

Investigation of a Price Variation Limit, a Short Sell Regulation and a Up-Tick Rule  
using by Artificial Market Simulations

水田 孝信\*1\*2      和泉 潔 \*2\*3      八木 勲 \*4      吉村 忍\*2  
Takanobu Mizuta      Kiyoshi Izumi      Isao Yagi      Shinobu Yoshimura

\*1 スパークス・アセット・マネジメント株式会社  
SPARX Asset Management Co. Ltd.

\*2 東京大学大学院 工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo

\*3 JST さきがけ  
PRESTO, JST

\*4 神奈川工科大学情報学部  
Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of Technology

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。

## 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 fact<sup>\*1</sup>) 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<sup>\*2</sup>。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がしばしばあり、人工市場を用いた検証も行われている [Yagi 10, 八木 11]。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 12]<sup>\*3</sup> 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<sup>\*4</sup> 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 12] 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 07]。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 11, Yamamoto 12] 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

連絡先: 水田 孝信, スパークス・アセット・マネジメント株式会社, mizutata@gmail.com

\*1 [Cont 01] に整理されている。

\*2 優れたレビューとして [LeBaron 06, Chen 09]。

\*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っている。

\*4 制度の詳しい解説・実証分析として [大塚 12] 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、賛否が分かっている。

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 90] はアンケート調査を行い、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 07] 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、途中で売却して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 09, 水田 12] 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 09, 水田 12] 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<sup>\*5</sup> (ザラバ方式) [Friedman 93] とした。n 体のエージェントがあり、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、注文をただ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

\*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。

表 1: 各試行の stylized facts.

		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
尖度		5.39	5.39	7.28	9.37	4.96	8.15	9.21	9.27
	ラグ								
リターンの2乗の 自己相関	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%	

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),  $\epsilon_j^t$  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  $\sigma_\epsilon$  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  $\tau_j$  はシミュレーション開始時に 1 から  $\tau_{max}$  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  $\delta P$  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出来る場合と, 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  $r_i^t = \log(P^t/P^{t-t_i})$  と比べ,

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

のように  $w_{i,j}$  を書き換える. ここで  $k_l$  は定数,  $\rho_j^t$  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エイトを引き上げ, 外れている戦略のウエイトを引き下げる. また,  $r_i^t$  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エイトが増減しない. 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.

### 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  $t = 10000000$  まで行った.

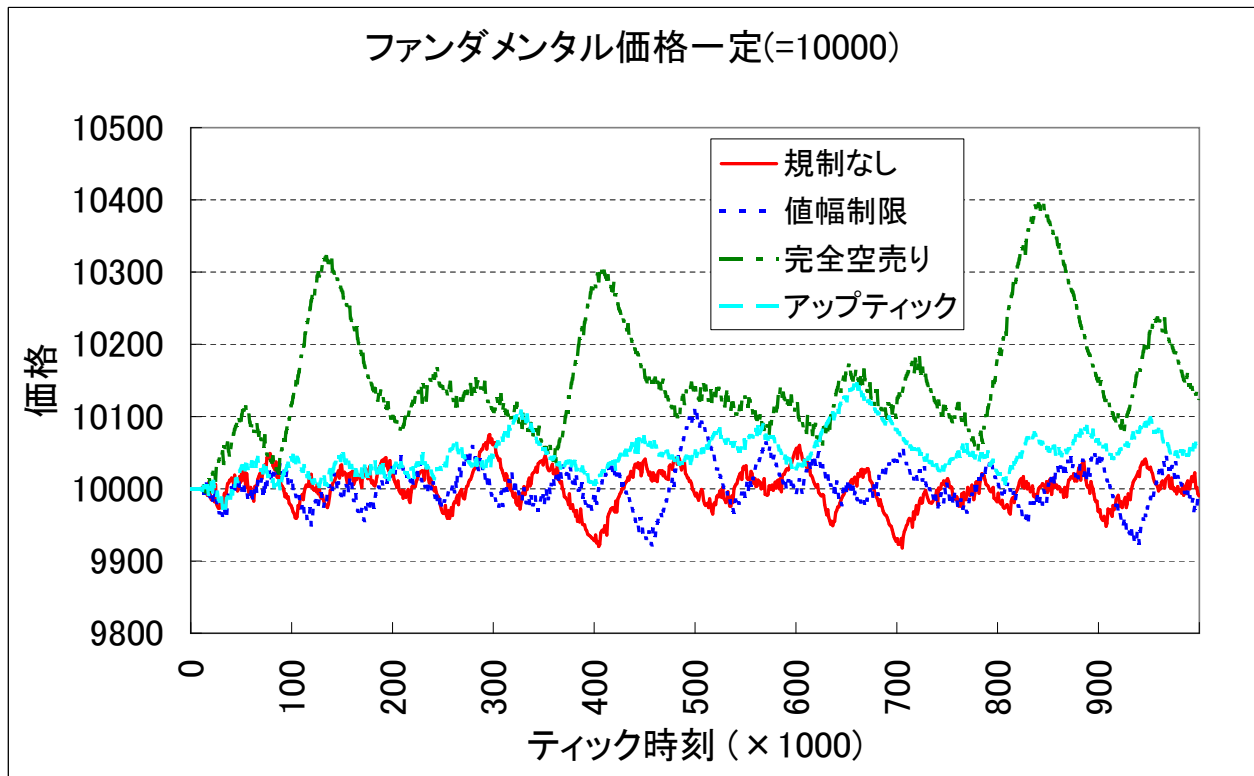


図 1: ファンダメンタル価格一定 (=10000) のときの価格推移

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 94, Chan 98]。  $H_i$  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 94, Chan 98]。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。

\*6 本モデルの時刻は注文をし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。

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 10, 八木 11] の結果と一致する\*7。アッ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には、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ため、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おきおらず、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には、新しいファンダメンタル価格に収束

\*7 [Yagi 10, 八木 11] の結果では振幅が非常に大きいですが、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 10, 八木 11] とで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。

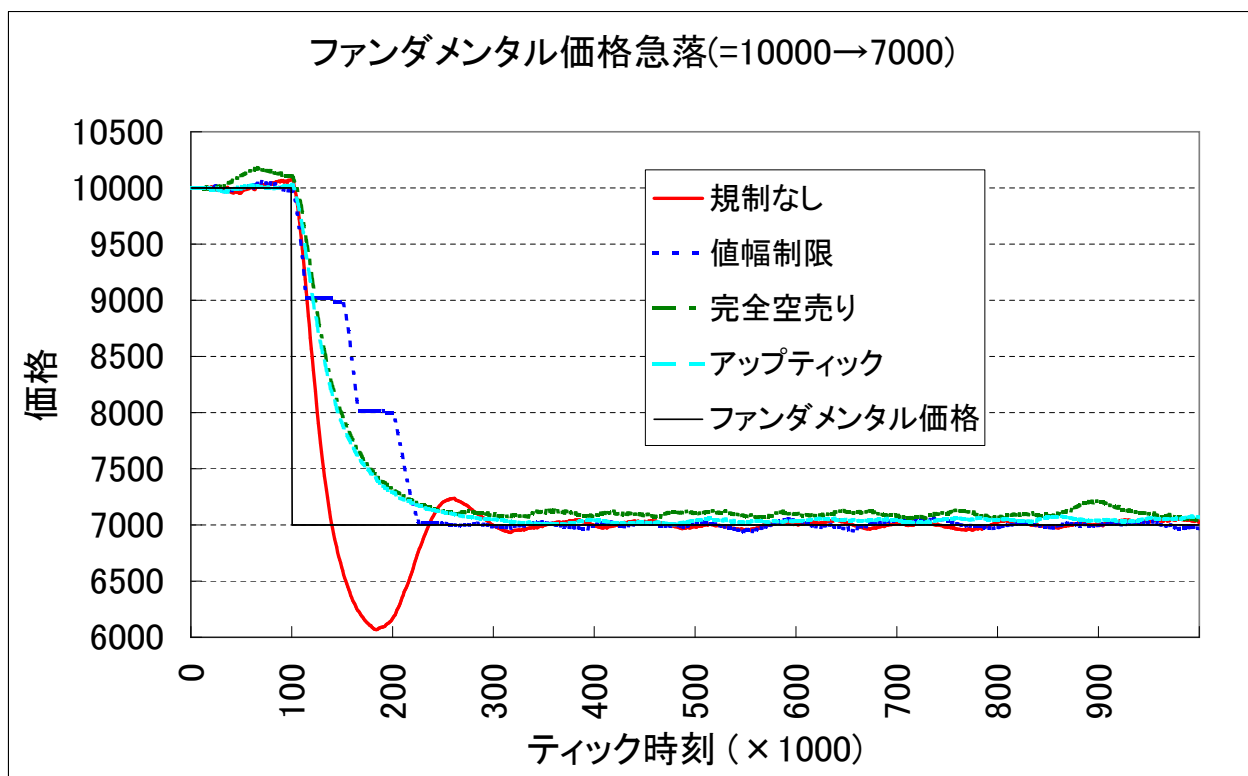


図 2: ファンダメンタル価格急落 (=10000 → 7000) のときの価格推移

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 09, 水田 12] 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 [大塚 12] 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 98] Chan, K., McQueen, G., and Thorley, S.: Are there rational speculative bubbles in Asian stock markets?, *Pacific-Basin Finance Journal*, Vol. 6, No. 1-2, pp. 125-151 (1998)

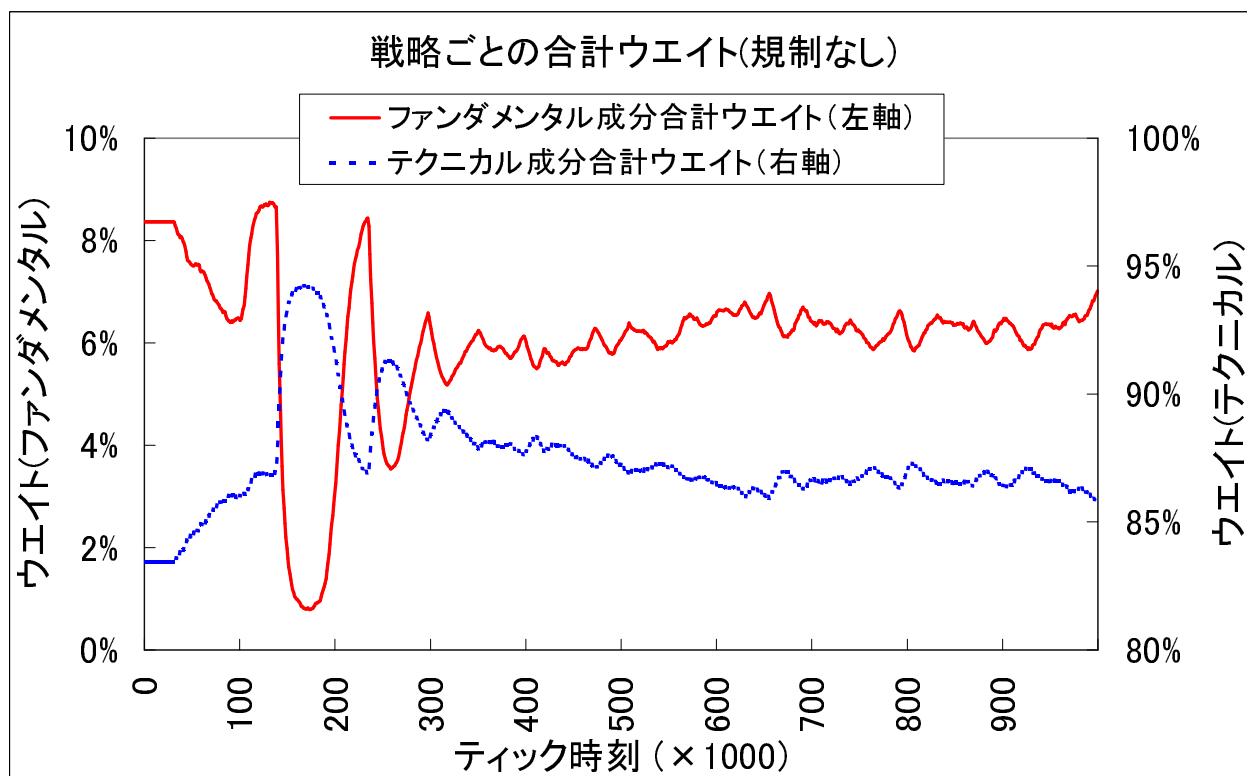


図 3: 規制がない場合の戦略ごとの合計ウエイト推移.

- [Chen 09] Chen, S., Chang, C., and Du, Y.: Agent-based economic models and econometrics, *Knowledge Engineering Review* (2009)
- [Chiarella 09] Chiarella, C., Iori, G., and Perelló, J.: The impact of heterogeneous trading rules on the limit order book and order flows, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 33, No. 3, pp. 525–537 (2009)
- [Cont 01] Cont, R.: Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues, *Quantitative Finance*, Vol. 1, pp. 223–236 (2001)
- [Frankel 90] Frankel, J. and Froot, K.: Chartists, fundamentalists, and trading in the foreign exchange market, *The American Economic Review*, Vol. 80, No. 2, pp. 181–185 (1990)
- [Friedman 93] Friedman, D.: The double auction market institution: A survey, *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*, pp. 3–25 (1993)
- [Hirota 07] Hirota, S. and Sunder, S.: Price bubbles sans dividend anchors: Evidence from laboratory stock markets, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 31, No. 6, pp. 1875–1909 (2007)
- [LeBaron 06] LeBaron, B.: Agent-based computational finance, *Handbook of computational economics*, Vol. 2, pp. 1187–1233 (2006)
- [McQueen 94] McQueen, G. and Thorley, S.: Bubbles, stock returns, and duration dependence, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, Vol. 29, No. 3 (1994)
- [Menkhoff 07] Menkhoff, L. and Taylor, M.: The obstinate passion of foreign exchange professionals: technical analysis, *Journal of Economic Literature*, Vol. 45, No. 4, pp. 936–972 (2007)
- [水田 12] 水田 孝信, 和泉 潔, 吉村 忍: 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 (2012)
- [大墳 12] 大墳 剛士: 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, No. 1, 東京証券取引所 (2012)
- [TokyoStockExchange 12] TokyoStockExchange, : Guide to TSE Trading Methodology, [http://www.tse.or.jp/about/books/b7gje6000004q31-att/trading\\_methodology.pdf](http://www.tse.or.jp/about/books/b7gje6000004q31-att/trading_methodology.pdf) (2012)
- [Yagi 10] Yagi, I., Mizuta, T., and Izumi, K.: A Study on the Effectiveness of Short-selling Regulation using Artificial Markets, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, Vol. 7, No. 1, pp. 113–132 (2010)
- [八木 11] 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)

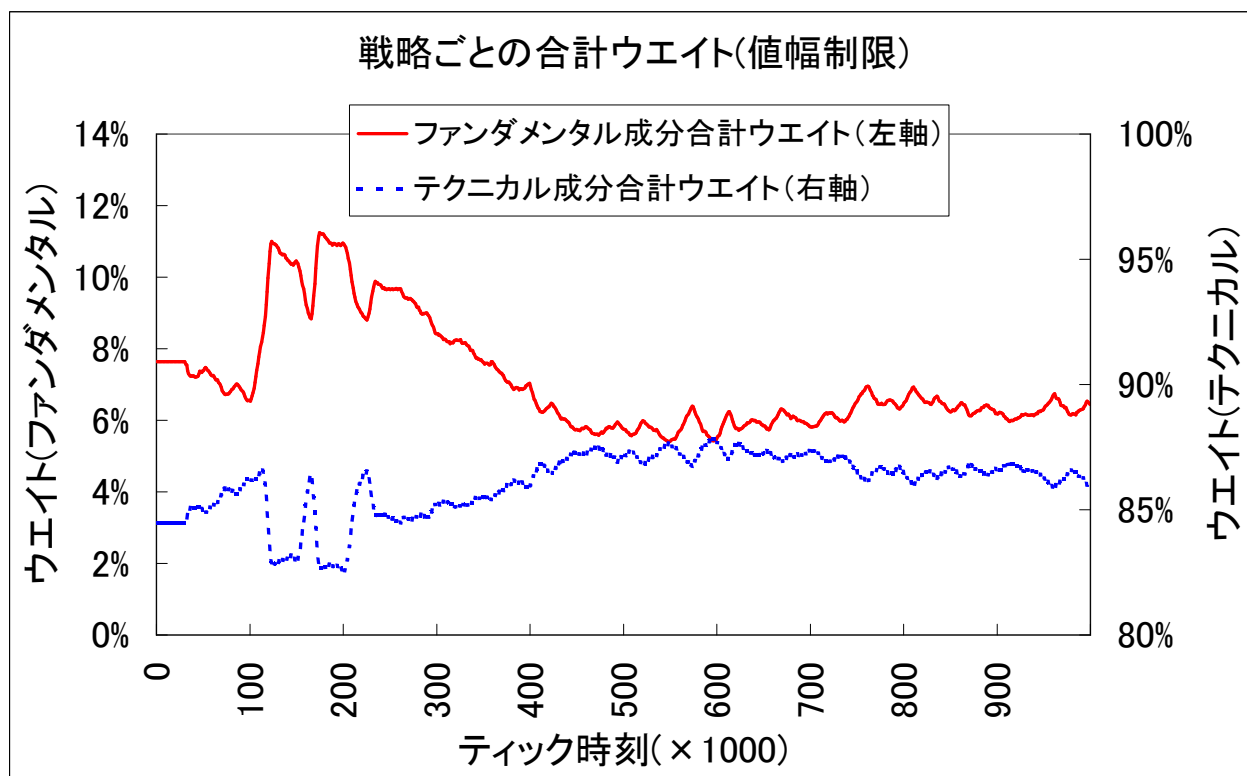


図 4: 値幅制限がある場合の戦略ごとの合計ウエイト推移.

[山本 11] 山本 竜市, 平田 英明: 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 (2011)

[Yamamoto 12] Yamamoto, R. and Hirata, H.: Strategy switching in the Japanese stock market, *Hosei University, Working Paper No. 164* (2012)