

人工市場を用いた分散投資規制が市場に与える影響分析 —ファンダメンタル価格急落時と急騰時における比較

丸山 隼矢^{1,a)} 水田 孝信^{2,b)} 八木 勲^{3,c)}

受付日 2018年12月29日, 採録日 2019年7月3日

概要: 近年投資信託のリスクが把握しにくくなっている。なぜならば、投資信託の組み入れ対象となる金融商品の仕組みが複雑になるとともにリスクの大きさが把握しにくくなってきたからである。そこで、投資信託の取引において、投資家が想定外のリスクを負うことを未然に防ぐため、分散投資規制という規制が設けられた。分散投資規制は、1つの資産への投資が過度に集中しないよう、1つの資産への投資額を投資信託純資産の一定割合以下にするものである。これまでに、人工市場を用いて、分散投資規制がファンダメンタル価格急落時に市場に与える影響について分析されている。しかし、金融市場が活況なとき、すなわち、ファンダメンタル価格が急騰するような状況において分散投資規制が市場に与える影響については議論されていない。そこで、本研究では人工市場を用いて分散投資規制がファンダメンタル価格急騰時の価格形成に与える影響について調査した。その結果ファンダメンタル価格急騰時には、ファンダメンタル価格が急騰した資産の取引価格が上昇することが分かった。そして、規制を受けるエージェントの割合が増加するにつれ、その傾向が段階的に弱まり、最終的にはファンダメンタル価格に収束しないことが分かった。また、ファンダメンタル価格急騰時と急落時に関して比較し調査した。その結果、ファンダメンタル価格急落時は急騰時に比べより影響を与えることを確認した。

キーワード: 人工市場, マルチエージェントシミュレーション, 分散投資規制, 市場規制, 金融市場

Analysis of the Market Impact of the Rule for Investment Diversification at the Time of a Crashing Market and a Soaring Market Using a Multi-agent Simulation

SHUNYA MARUYAMA^{1,a)} TAKANOBU MIZUTA^{2,b)} ISAO YAGI^{3,c)}

Received: December 29, 2018, Accepted: July 3, 2019

Abstract: In recent years the risk of mutual funds has become difficult to assess. This is because mutual funds have come to choose various assets, some of which may have high risk, and there may be some funds whose performances depend on dangerously much those of a part of the assets that the funds hold, and so on. Companies managing mutual funds are expected to perform risk control to prevent investors from taking unforeseen risk of funds. A related revision to the investment fund legal system in Japan led to establishing what is known as “the rule for investment diversification.” Some papers discussed that the rule for investment diversification affected price formation at the time of a market crash; however, we could not find that it affects price formation at the time of a soaring market. In this paper, we investigated that the rule for investment diversification affected price formation in financial markets where two types of investors who followed the rule and did not follow it participated at the time of a soaring (crashing) market that was caused by the bulge (collapse) of an asset fundamental price using agent-based simulations and discussed the difference between these effects. As results, we found that, in two-asset markets where two types of investors who followed the rule and did not follow it participated, when one asset fundamental price soared, the rule for investment diversification prevented its price rising, and when one asset fundamental price collapsed, the rule promoted the other’s price to decline.

Keywords: artificial market, multi-agent simulation, rule for investment diversification, market regulation, financial market

1. はじめに

投資信託（以下、投信と記す）とは、投資家から集めた資金をまとめ、資産運用の専門家が株式や債券などに投資する金融商品である。投信は利益を追求するためにさまざまな資産を組み入れ対象とする場合がある。中にはその仕組みが複雑なためリスクの大きさが把握しにくい金融商品も含まれており、それらを組み入れる投信はリスクが把握しにくくなっている。投信を購入する投資家がそれらのリスクをすべて把握することは事実上不可能である。そのため、投資家が想定外のリスクを負うことを未然に防ぐため、投信の運用会社側でリスクをコントロールすることが求められるようになった。その結果、2013年には投資信託法制が改正され、2014年12月より分散投資規制という規制が設けられることとなった [1], [2]*1。

分散投資規制は投信の各構成資産に対して保有上限を設ける規制である。分散投資そのものの是非については、主に運用成績の良し悪しの観点から多くの実証研究で議論されている。Cremerら [4] は、高いアクティブシェア*2の投信は、ベンチマークインデックスの投信より運用成績が総じて良いのに対し、低いアクティブシェアの投信は運用成績が良くないことを明らかにした。また低い手数料の高アクティブシェアの投信はインデックス投信より投資家にアルファ*3を与えることを示した [5]。Petajisto [6] は、高アクティブシェアかつ低ボラティリティの投信を扱う投資家の運用成績は、低アクティブシェアかつ低ボラティリティの投信を扱う投資家の運用成績よりよいことを示している。

分散投資規制に関する実証研究もいくつかあり、たとえば、欧州の分散投資規制である UCITS に関して、Lhabitant [7] は、ヘッジファンド指数に連動する投信に UCITS を適用することに否定的な意見を述べている。なぜなら、UCITS III が適用された資産には、個人投資家の資金流入が増加するが、ヘッジファンド指数は、実質、構成内容が不透明なヘッジファンドのファンドであるため、他の指数と比較してその品質は必ずしも良いとはいえないからである。また、Joenvääräら [8] は、UCITS の投資制約を受ける投信は、その影響でリターンが低下し、運用成績も時間

とともに低下するため、制約を受けていないヘッジファンドより運用成績が悪くなることを示している。

このように運用成績調査などは、実存するデータを使用することでその比較分析が可能のため、実証研究でも広く行われている。しかし、価格形成に関しては市場から受ける外的要因が数多くあるため、たとえば、ある時点の価格形成に影響を与えた要因が分散投資規制なのか、同時期に発生した他の要因なのか、切り分けることが困難なため、実存するデータでは実証分析することが難しい。

特定の取引が市場に与える影響を分析するような課題、つまり、実証研究では議論が困難な課題を分析する方法の1つとして、人工市場を用いる方法がある。人工市場とは、コンピュータ上に仮想的に構築されたマルチエージェントシステムの金融市場である [9], [10], [11]。人工市場では、エージェントにそれぞれ独自の売買手法を与え、それらを投資家として金融資産の取引をさせると、市場がどのような振舞いをするかを確認することができる。その一方で、市場側に何らかの制約（市場安定化や効率化のための制度など）をモデル化し組み込むことで、投資家がどのように振る舞うか、さらに、彼らの振舞いによって市場にどのような影響が現れるかを検討することも可能となる。

最近では人工市場を用いて市場規制制度が金融市場に与える本質的な影響を分析する研究が盛んに行われており [11], [12], [13], [14]、分散投資規制に関しても下記のような研究が行われている。Yagiら [15] は、2資産人工市場を用いて、一方のファンダメンタル価格が急落したときに他方の資産の価格形成に与える影響を調査し、分散投資規制が適用されている場合は他方の資産の取引価格も連動して下落することを明らかにしている。Nozakiら [16] は、3資産人工市場においては、ある資産のファンダメンタル価格が急落すると、連動して価格下落する資産が存在する一方で、価格下落した資産から回収された資金による需要が集中することで価格が上昇する資産が現れることも確認した。このように、人工市場を用いて分散投資規制がファンダメンタル価格が急落したときの価格形成に与える影響は議論されている。

しかし、一般に市場規制は、金融市場が不安定になり価格が下落したときのリスクを回避、または低減させることが主眼となっているため、市場が活況なときに起こりえる事象については見落としがちである。分散投資規制の場合も同様で、金融市場が活況となったときに分散投資規制が市場に与える影響は議論された形跡はない。

そこで本研究では、金融市場が活況となった状況を想定

¹ 神奈川工科大学大学院工学研究科情報工学専攻
Course of Information and Computer Sciences, Graduate School of Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

² スパークス・アセット・マネジメント株式会社
SPARX Asset Management Co., Ltd., Minato, Tokyo 108-0075, Japan

³ 神奈川工科大学情報学部情報工学科
Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

a) s1885023@cce.kanagawa-it.ac.jp

b) mizutata@gmail.com

c) iyagi2005@gmail.com

*1 欧州では同様の規制がすでに実施されている [3]。

*2 アクティブシェアとは、投信がアクティブ運用されている度合いを表す指標で、投資先を集中させると上昇し、分散させると減少する。

*3 アルファとは、市場の平均運用成績を上回る運用成果のことを指す。

して、ファンダメンタル価格が急騰したときに分散投資規制が資産の取引価格形成に与える影響について、人工市場を用いて調査した。そして、ファンダメンタル価格急落時の価格形成と比較し、どのような違いがみられるか調査した。本論文の構成は次のとおりである。まず2章では、本研究にて使用する人工市場モデルを提案する。3章では、前節で提案した人工市場を用いてファンダメンタル価格が急騰するときと急落するときの各資産の価格推移を確認する。4章では前節で得られた結果から考察を行う。5章にまとめと今後の課題を記す。

2. 人工市場モデル

本研究では、水田らの人工市場モデル [13] を基にして、人工市場を2資産市場へと拡張し、分散投資規制モデルを構築した。

以下水田ら [13] のモデルを採用した理由について述べる。水田ら [13] のモデルの特長は、シンプルでありながら、実証分析で得られた価格変動の統計的性質（スタイライズド・ファクト）が再現できるエージェントモデルとなっている点である。これまでに多くの人工市場モデルが提案されてきたが、それらの多くはパラメータが多く複雑すぎるといふ指摘があった [10]。モデルの妥当性は実証分析で得られたファット・テイルやボラティリティ・クラスタリング（詳細は3.1節にて記述）などの代表的なスタイライズド・ファクトが再現できるかどうかで評価される。しかし、モデルを複雑にしても多くの場合、再現できるスタイライズド・ファクトの種類が増えたり再現の精度が上がったりすることはほとんどない。よって、モデル自体はできるだけシンプルな構造とし、その構造や計算結果の評価が行いやすくすべきであるといわれている。水田らのモデルはこの考えに込められている点で人工市場モデルとしての妥当性が高いと判断し、本提案モデルのプラットフォームとして採用した。

2.1 注文プロセス

本モデルは2つのリスク資産^{*4}（以下、単に「資産」と呼ぶ）のみを取引対象とし、価格決定メカニズムは連続ダブルオークション方式（ザラバ方式）とした。本市場には n 体のエージェントが取引に参加する

エージェントはエージェント番号 $j = 1$ 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 $j = 1$

から注文を出し繰り返される。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、注文をただけで取引が成立しない場合も1ステップ進む。

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 にエージェント j が予想する価格の変化率（予想リターン） $r_{e_{j,k}}^t$ は、以下の式 (1) から得られる。

$$r_{e_{j,k}}^t = \frac{1}{w_{1,j,k}^t + w_{2,j,k}^t + u_{j,k}} (w_{1,j,k}^t r_{e_{1,j,k}}^t + w_{2,j,k}^t r_{e_{2,j,k}}^t + u_{j,k} \epsilon_{j,k}^t) \quad (1)$$

ここで、 $w_{i,j,k}^t$ は時刻 t 、エージェント j 、資産 k 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。この値は後述する学習過程により変化する。 $u_{j,k}$ はエージェント j 、資産 k の3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 u_{max} まで一様乱数で決められ、シミュレーション中に変化することはない。

$r_{e_{1,j,k}}^t$ は、時刻 t におけるエージェント j の資産 k に対するファンダメンタル投資家成分だけの場合の予想リターンで $r_{e_{1,j,k}}^t = \log(P_{f_k}^t / P_k^{t-1})$ 、同様に $r_{e_{2,j,k}}^t$ はテクニカル投資家成分だけの場合の予想リターンで、 $r_{e_{2,j,k}}^t = \log(P_k^{t-1} / P_k^{t-1-\tau_j})$ である ($k = 1, 2$)。 P_{f_k} は時間によらず一定の資産 k のファンダメンタル価格である。ファンダメンタル価格とは、金融資産を発行する企業自身が持っている実態の価値に基づいた価格を指す。 P_k^t は資産 k の時刻 t での取引価格（取引されなかった時刻では一番最近に取引された価格であり、時刻 $t = 0$ では $P_k^t = P_{f_k}$ とする）である。 τ_j は1から τ_{max} まで一様乱数でエージェントごとに決める。 $\epsilon_{j,k}^t$ は時刻 t 、エージェント j 、資産 k の乱数項で、平均0、標準偏差 σ_e の正規分布乱数である。

式 (1) の右辺の括弧内の第1項目は、ファンダメンタル価格と比較して、安ければプラスの予想リターンを、高ければマイナスの予想リターンを示すファンダメンタル投資家の成分である。なお、ファンダメンタル投資家は通常ファンダメンタル価値を参照して投資判断を行う投資家を指す。第2項目は過去のリターンがプラス（マイナス）であるならプラス（マイナス）の予想リターンを示す、テクニカル投資家の成分である。テクニカル投資家は過去の価格推移を参照して投資判断を行う投資家を指す。第3項目はノイズを表している。

予想価格 $P_{e_{j,k}}^t$ は、予想リターン $r_{e_{j,k}}^t$ に基づいて式 (2) から求められる^{*5}。

$$P_{e_{j,k}}^t = P_k^{t-1} \exp(r_{e_{j,k}}^t) \quad (2)$$

注文価格 $P_{o_{j,k}}^t$ は $P_{e_{j,k}}^t - P_d$ から $P_{e_{j,k}}^t + P_d$ までの一様

^{*4} 本研究において資産は個別株式を想定しているため、両資産市場とも同一パラメータ設定となっている。本研究では、ある資産が大きく急騰・急落するときの他の資産の価格形成への影響を分析するため、どの資産もボラティリティが大きくなる。仮に、投信が異なる種類の資産で構成されていたとしても、それらの資産の市場ボラティリティの大きさの違いは、急騰急落時のボラティリティの大きさと比較すると無視できるほど小さいため、同一資産の投信と同様の実験結果が得られると考えられる。

^{*5} 本研究では対数リターンを使用している。そのため予想リターンは現在の価格の対数と予想価格の対数の差である。すなわち、 $r_{e_{j,k}}^t = \log P_{e_{j,k}}^t - \log P_k^t = \log P_{e_{j,k}}^t / P_k^t$ であり、これより式 (2) が導き出される。

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、注文の売り買いは予想価格 $P_{e_j,k}^t$ と注文価格 $P_{o_j,k}^t$ の大小関係で式 (3) のように決まる*6．

$$\begin{aligned} P_{e_j,k}^t &> P_{o_j,k}^t \text{ なら 買い} \\ P_{e_j,k}^t &< P_{o_j,k}^t \text{ なら 売り} \end{aligned} \quad (3)$$

注文数はつねに 1 と一定とする．

すべてのエージェントは、注文価格や注文数を決定後、レバレッジ制約に違反していないか判定を行う．さらに分散投資規制対象エージェントはその判定も行う．レバレッジ制約と分散投資規制の詳細は 2.3 節で説明する．

本モデルの価格決定メカニズムはザラバ方式であるため、買い（売り）注文は、その注文価格より安い（高い）売り（買い）注文が市場にすでに存在すれば、その中で最も安い（高い）売り（買い）注文と即座に取引が成立する．しかし、相対する注文が市場になければ、今回の注文は市場に残す．市場に残した注文は、キャンセル時間 t_c だけ経過しても取引が成立しなかったときキャンセルされる．

2.2 学習プロセス

本研究では、実証研究 [17] が存在を示している「投資戦略の切り替え」に焦点をあて、そのメカニズムの分析を行いやすいように比較的シンプルでパラメータの少ないモデルの構築を行った．戦略を状況に応じて切り替えるという学習プロセスを以下のようにモデル化した．すなわち、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ようとした．また、資産 k の学習期間のリターン r_k^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ようにした．学習はエージェントごとに、各エージェントが注文を出す直前に行われる*7．これらの予想リターン $r_{e_{i,j,k}}^t$ が資産 k の学習期間のリターン $r_k^t = \log(P_k^{t-1}/P_k^{t-t_i})$ と比べ、同符号なら、 $w_{i,j,k}^t$ を $w_{i,j,k}^{t-1} + k_l |r_k^t| q_j^t (w_{i,max} - w_{i,j,k}^{t-1})$ に、異符号なら、 $w_{i,j,k}^t$ を $w_{i,j,k}^{t-1} - k_l |r_k^t| q_j^t w_{i,j,k}^{t-1}$ とする．ここで、 k_l は定数、 q_j^t は時刻 t 、エージェント j に与えられる 0 から 1 までの一様乱数である．

上記学習プロセスのほかに、小さい確率 m で $w_{i,j,k}^t$ を再設定する．つまり、0 から $w_{i,max}$ までの一様乱数で決めなおす．これはランダム学習を意味しており、実績からの学習と組み合わせることにより、エージェントが試行錯誤的

*6 予想価格の高低にかかわらず、買い注文と売り注文が発注される確率は同じであるが、取引が成立する確率は必ずしも同じではない．一般に予想価格が高いエージェントの注文は、買い注文の方が売り注文より取引が成立しやすく、反対に予想価格が低いエージェントの注文は、売り注文の方が買い注文より取引が成立しやすいく．

*7 ここではエージェントは価格変化の方向を短期的に評価学習している．そこでこれとは別に中長期的に評価学習するエージェントが存在する場合についての調査も行った．詳細は付録 A.1 を参照のこと．

により良い戦略のウエイトを求める姿を客観的にモデル化している．

2.3 制度モデル

本モデルは、水田ら [13] では実装されていないが、資産の総保有量を制限するレバレッジ制約と、各資産の保有量を制限する分散投資規制から構成される．既述のようにレバレッジ制約はすべてのエージェントが対象であるが、分散投資規制は該当するエージェントのみが対象となる．

本モデルにおいて、レバレッジ制約は、各エージェントの資産の取引高の総額を、純資産以下に規制するようにモデル化した*8．レバレッジ制約は以下の式で表される．

$$\sum_{k=1}^2 |P_k^t S_{j,k}^t| \leq NAV_j^t \quad (4)$$

ここで、 $S_{j,k}^t$ は、時刻 t におけるエージェント j の資産 k の保有量であり、 $S_{j,k}^t > 0$ なら買い保有している状態、 $S_{j,k}^t < 0$ なら空売りしている状態を表している．

なお、時刻 t におけるエージェント j のキャッシュの保有量を C_j^t とすると、エージェント j の純資産 NAV_j^t は次のように定義される．

$$NAV_j^t = \sum_{k=1}^2 P_k^t S_{j,k}^t + C_j^t \quad (5)$$

$$\frac{|P_k^t S_{j,k}^t|}{NAV_j^t} \leq w_{dir} \quad (6)$$

w_{dir} は、分散投資規制の規制比率（以降、規制比率と略す）であり、各エージェントの純資産に対する各資産の保有高の上限率である．

何らかの理由（たとえば、 P_k^t が P_k^{t-1} より大きく上昇したなど）で式 (6) が満たさなくなったとき、エージェントは式 (6) を満たすようになるまで資産 k の注文を出しつづけるようにしている．このような売買にした理由は次のとおりである．現実世界では、ある投信構成資産が上限を超えた場合、1 カ月以内に上限を超えないよう資産量を減らさなければ違法となってしまう．そのため投信運用者はその資産の保有量を上限を超えなくなるまで減らし続けるからである．規制違反を解消するため時に強制的に発注される売り（買い）注文のことを、「規制違反売り（買い）注文」と呼ぶ．

これらの注文は資産保有量を減らすことが目的であるため、損益度外視で発注することになる．よって、あらかじめそのような事態になることを防ぐため、分散投資規制が適用されたエージェントは、注文を発注する際にその注文が規制に違反しそうな場合（上記の式 (6) を満たさない場合）は、それをキャンセルするよう振る舞うようにした．

*8 通常の株式投資を行う投信の場合、投資資金の借入れができないため、仕組み上、レバレッジ比率が 1 より大きい投資はできない．よって、本制約は外部からの規制という意味合いではなく、投信の特性を表したものである．

3. シミュレーション結果と考察

Mizutaら [18] は、さまざまなパラメータを検討し 3.1 節で述べる妥当性検証を行った結果、後述するパラメータ値を妥当性の高い値として用いている。よって、本研究でも同様のパラメータを用いる。具体的には、パラメータを以下のように設定した。 $n = 1,000$, $k = 2$, $w_{1,max} = 1$, $w_{2,max} = 10$, $u_{max} = 1$, $\tau_{max} = 10,000$, $\sigma_e = 0.03$, $P_d = 1,000$, $t_c = 10,000$, $t_l = 10,000$, $k_l = 4$, $m = 0.01$, $\delta P = 1$, $w_{dir} = 0.5$, $C_j^0 = 40,000$, $S_{j,k}^0 = 48$, $NAV_j^0 = 1,000,000$ とした。シミュレーション期間 t は $1,000,000$ とする。

本研究では、1) ファンダメンタル価格が急騰したとき ($P_{f_2} = 10,000$, 時刻 $t = 0$ から $t = 100,000$ までは $P_{f_1} = 10,000$, $t = 100,001$ 以降は $P_{f_1} = 13,000$), 2) ファンダメンタル価格が急落したとき ($P_{f_2} = 10,000$, 時刻 $t = 0$ から $t = 100,000$ までは $P_{f_1} = 10,000$, $t = 100,001$ 以降は $P_{f_1} = 7,000$) についてシミュレーションを行う。それぞれの場合で、すべてのエージェントに対する、分散投資規制が適用されるエージェント*9 (以下、「規制あり」エージェントと呼ぶ) の割合を変化させる。すべてのエージェントに対する規制ありエージェントの割合を n_r -ratio とし、 n_r -ratio が 0%, 10%, 50%, 90%, 100% の 5 パターンでシミュレーションを行う。シミュレーションは各条件の下でそれぞれ 30 回ずつ試行し、その結果をもとに議論を行った。ただし、3.1 節のスタイライズド・ファクトについては 30 回試行の平均を、3.2 節以降の議論は各シミュレーション条件の下で 30 回試行した結果の 1 つを抽出して行っている (本シミュレーションでは全 30 試行ともほぼ同様の結果が得られている。詳細は付録 A.2 参照のこと)。

3.1 人工市場モデルの妥当性

現実の市場ではファット・テイルとボラティリティ・クラスタリングが現れる、と多くの実証研究で指摘されている [19], [20]。ファット・テイルは、資産価格のリターンの分布が厚い、すなわち、尖度が正であることである。また、ボラティリティ・クラスタリングは資産価格のリターンの 2 乗が、ラグが増えても自己相関係数が有意に正であり、長期記憶性を持つことである。

本提案モデルにおいてもファット・テイルとボラティリティ・クラスタリングが再現されているか確認を行った。その結果、すべての条件下においてこれらが再現されることが確認できた。一例として、 n_r -ratio が 50% のとき、かつ、ファンダメンタル価格が急騰するときと急落するときのスタイライズド・ファクトを表 1 に記す。この表からも

*9 厳密には分散投資規制が適用されるのは投信構成資産であり、投信運用者ではない。しかし本論文では便宜上エージェントに対して規制が適用されているか否かで記す。

表 1 n_r -ratio = 50% 条件下におけるスタイライズド・ファクト
Table 1 Stylized facts of artificial markets when n_r -ratio is 50%.

尖度	急騰		急落	
	資産 1	資産 2	資産 1	資産 2
ラグ				
1	0.12	0.09	0.16	0.22
リターンの				
2 乗の	0.10	0.07	0.14	0.18
自己相関				
4	0.14	0.05	0.12	0.07
5	0.26	0.03	0.11	0.07

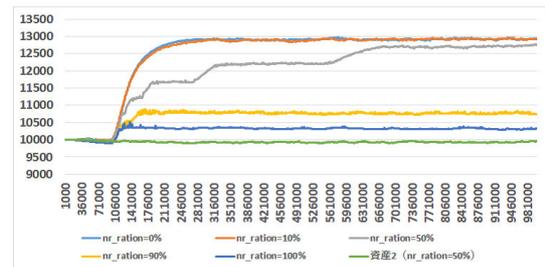


図 1 資産 1 のファンダメンタル価格が急騰したときの資産 1 (n_r -ratio = 0%, 10%, 50%, 90%, 100%) と資産 2 (n_r -ratio = 50%) の価格推移

Fig. 1 Price transitions of asset 1 and those of asset 2 when the fundamental price of asset 1 soars.

分かるように、尖度とリターンの 2 乗の自己相関ともに正值となっている。なお、スタイライズド・ファクトはすべて 100 ステップ間隔での価格を用いて計算した。なぜならば、本モデルの時刻は注文をただで取引が成立しない場合も時刻が進むため、時刻 1 ごとのすべての価格を用いたスタイライズド・ファクトでは、多くの価格変動がないデータによるバイアスがかかってしまうからである。

3.2 ファンダメンタル価格急騰時

本節では、片方の資産 (資産 1) のファンダメンタル価格のみが急騰した場合についての価格形成についての分析を行った。ファンダメンタル価格は、100,000 期までは 10,000 とし、100,001 期に 13,000 に変化させる。

各パターンの価格推移を図 1 に示す (ただし、資産 2 の価格はどのパターンでも同じような価格推移であったため、ここでは n_r -ratio = 50% のときのみを示す)。

図 1 より、資産 1 のファンダメンタル価格が急騰すると、 n_r -ratio がいずれの場合であっても、資産 1 の取引価格は上昇することが分かる。しかし、 n_r -ratio が増えるごとに取引価格が収束する値が低くなり、ファンダメンタル価格まで到達しないことが確認できる。また n_r -ratio = 50% など規制ありエージェント数と規制なしエージェント数にそれほど差がないときは資産 1 の価格は段階的に取引価格が上昇することが確認できる。

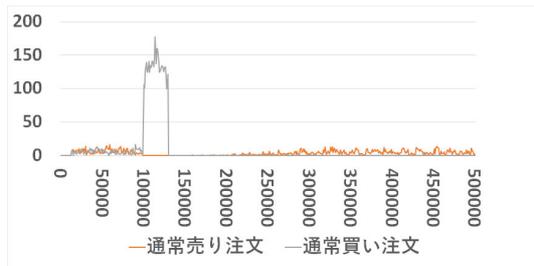


図 2 $n_r_ratio = 0\%$ のときの資産 1 の注文種別ごとの取引成立数
Fig. 2 Volume for each order type of asset 1 when n_r_ratio is 0%.

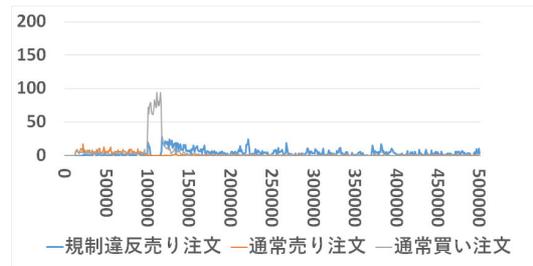


図 4 $n_r_ratio = 100\%$ のときの資産 1 の注文種別ごとの取引成立数
Fig. 4 Volume for each order type of asset 1 when n_r_ratio is 100%.

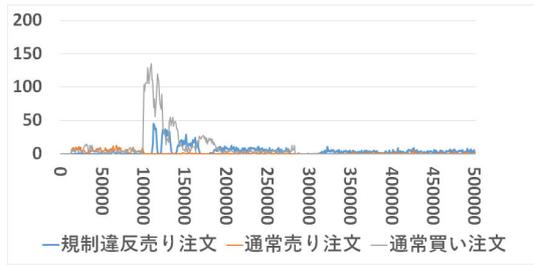


図 3 $n_r_ratio = 50\%$ のときの資産 1 の注文種別ごとの取引成立数
Fig. 3 Volume for each order type of asset 1 when n_r_ratio is 50%.

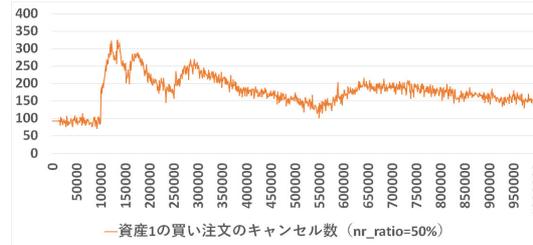


図 5 $n_r_ratio = 50\%$ のときの資産 1 への買い注文キャンセル数
Fig. 5 Number of asset 1 buy orders cancellation when n_r_ratio is 50%.

資産 1 の取引価格が上昇した理由としては、資産 1 のファンダメンタル価格急騰にともない、資産 1 の買い注文が売り注文に対して大きく増加したためだと考えられる。また、 n_r_ratio が増加するにつれ資産 1 の価格が上昇しなくなる理由としては、市場内に規制ありエージェントが存在する割合が増えると、規制による買い注文のキャンセル数が増加し、その結果買い注文の取引成立数が減少し、価格上昇力が弱まるためだと考えられる。

以上の仮説を検証するため、資産 1 における注文種別ごとの取引成立数について調査した。その結果を、図 2、図 3、図 4 に示す。図 2、図 3、図 4 から、資産 1 のファンダメンタル価格が急騰した後 (100,000 期以降)、買い注文の取引成立数が他の注文に比べて多いことが確認できる。また n_r_ratio が増えるにつれ買い注文の取引成立数が減っていることも確認できる^{*10}。

また、 n_r_ratio が 50% のときに、資産 1 の価格が段階的に上昇する原因としては、規制違反時に発生する買い注文のキャンセル数と規制違反売り注文数の多寡が原因だと考えられる。買い注文のキャンセル数の推移を図 5 に示す。

図 1、図 5 より、資産 1 の価格が上昇するにしたがって、買い注文のキャンセル数も増加し (たとえば、250,000 期から 300,000 期前後)、価格上昇が止まり安定期に入ると、買い注文のキャンセル数は漸減している (たとえば、300,000 期から 550,000 期前後) ことが確認できる。

^{*10} 図 2 以降における注文は各期に発注した注文種別ごとの注文数であり、これらと相対する注文は、以前注文されたが取引が成立せずに市場に留まっている注文である。そのため、グラフ上の各期の売り注文数と買い注文数は必ずしも一致するわけではない。

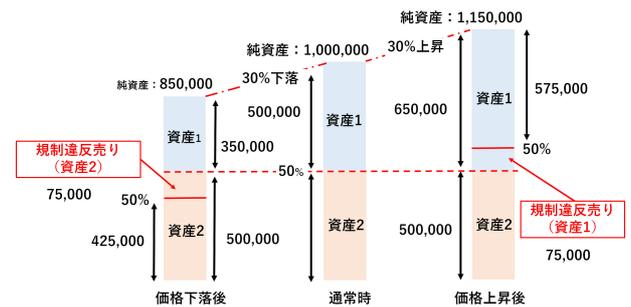


図 6 取引価格上昇および下落時に規制違反注文を出すまでのメカニズム

Fig. 6 Mechanism for placing the rule for investment diversification contravention resolution buy order when the price rises or falls.

以下、このような現象が発生する理由を述べる。ファンダメンタル価格が上昇するとそれに合わせて資産 1 の取引価格も上昇しはじめる。すると分散投資規制に違反するエージェントが現れはじめ、資産 1 に対する買い注文キャンセルと規制違反売り注文が現れるようになる (図 6 右)。仮に違反状態が解消されたとしても、資産 1 の保有高は高い状態がつづくため新たに追加購入すると再び規制違反となる。よって、新たに買い注文が発注されようとしてもキャンセルされるので、買い注文のキャンセル数が急増する。これにより、それまで買い注文の方が多かった状態から需給バランスが均衡する状態へと移ることで、資産 1 の価格上昇が止まり、価格推移が横ばいへと移行する。その後、規制違反売りではない通常の売り注文により、各エージェントの資産 1 の保有高が下がってくると、規制違反売

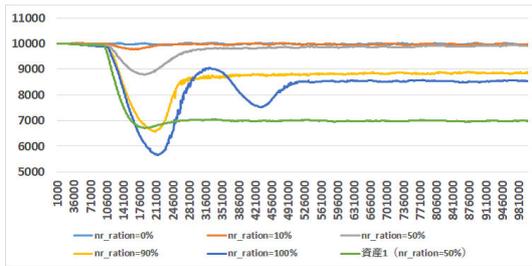


図 7 資産 1 のファンダメンタル価格が急落したときの資産 2 ($n_r_ratio = 0\%, 10\%, 50\%, 90\%, 100\%$) と資産 1 ($n_r_ratio = 50\%$) の価格推移

Fig. 7 Price transitions of asset 2 and that of asset 1 when the fundamental price of asset 1 crashes.

り注文および買い注文のキャンセルも減少する。すると投資戦略のファンダメンタル成分の影響により、再び買い注文が増加し価格が上昇しはじめる。以上のプロセスが繰り返し起こることで段階的な価格上昇が発生していると考えられる。

3.3 ファンダメンタル価格急落時

本節では、片方の資産(資産1)のファンダメンタル価格のみが急落した場合について分析を行った。ファンダメンタル価格は、100,000期までは10,000とし、100,001期に7,000に変化させる。Yagiら[15]も一方の資産のファンダメンタル価格が急落したときの調査を行っているが、規制ありエージェントのみが取引に参加したケース ($n_r_ratio = 100\%$)のみ調査していた。本研究では、そのほかのケースも調査した。

各パターンの価格推移を図7に示す(ただし、資産1の価格はどのパターンでも同じような価格推移であったため、ここでは $n_r_ratio = 50\%$ のときのみを示す)。

図7より資産1の下落にともない資産2の取引価格が連動して下落していることが分かる。また、 n_r_ratio が50%を超えると、取引価格の下落の幅が大きくなることが分かる。

資産2の価格が連動して下落した理由は以下のように考えられる。まず、資産1のファンダメンタル価格が急落するにともない、資産1の取引価格も急落する。するとエージェントの純資産が小さくなると同時に、資産2の保有高が相対的に高くなり規制違反状態となる(図6左)。その結果、数多くの規制ありエージェントから規制違反売り注文が発注され、資産2の取引価格が下落する。

以上の仮説を調査するため、資産2における注文種別ごとの取引成立数について調査した。その結果を、図8に示す。図8より、ファンダメンタル価格が急落した直後(100,000期)、規制違反売り注文が増加していることが確認できる。

また、 n_r_ratio が増加するにつれ、資産2の取引価格の

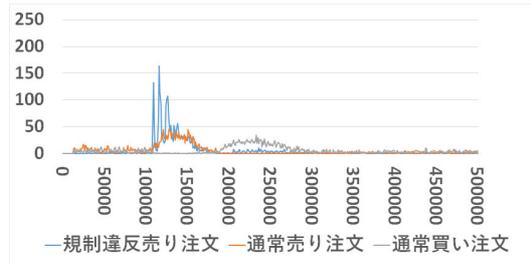


図 8 $n_r_ratio = 50\%$ のときの資産 2 の注文種別ごとの取引成立数
Fig. 8 Volume for each order type of asset 2 when n_r_ratio is 50%.

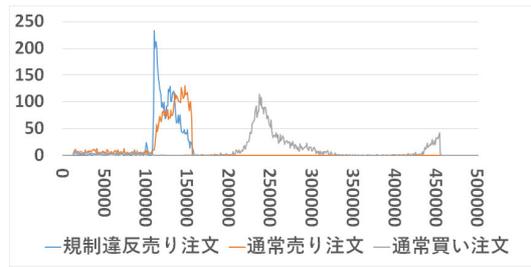


図 9 $n_r_ratio = 100\%$ のときの資産 2 の注文種別ごとの取引成立数
Fig. 9 Volume for each order type of asset 2 when n_r_ratio is 100%.

下落幅が大きくなる理由は、以下のように考えられる。まず、上記で説明したとおり規制違反売り注文が発注されることで取引価格が下落する。規制ありエージェントの割合が多いほど、規制違反売り注文数も多くなる(図8, 図9)ので、取引価格下落トレンドが一方に長く続くようになる。すると、エージェントの注文プロセスにおいて、テクニカル要素の影響が強くなり、さらに売り注文が多くなる。その結果、価格下落が加速し下落幅が大きくなる。

4. 考察

本節では、ファンダメンタル価格急騰時と急落時における各資産の価格推移の違いについて議論する。

まず、3.2節と3.3節より、ファンダメンタル価格が急騰するときと急落するときでは取引価格推移には対称性がないことが分かった。

その理由を以下に述べる。図6から分かるように、ファンダメンタル価格の急騰にともない取引価格が上昇したときは、価格が上昇した資産(資産1)の違反売り注文が増える。一方、ファンダメンタル価格の急落にともない取引価格が下落したときは、価格が下落した資産とは異なる他方の資産(資産2)の違反売り注文が増える。これがファンダメンタル価格急騰時と急落時で取引価格の推移が非対称となった原因である。

この結果から、分散投資規制は、急騰時には価格上昇を止めるという形で影響を与えているのに対し、急落時には価格を下落させるという形で影響を与えていることが分かる。

次に、分散投資規制が価格形成に与える影響は、急騰時より急落時の方が大きくなる可能性があることが判明した。

理由は次のとおりである。急騰時は急騰した資産が規制違反売りされる一方で、規制なしエージェントは割安となったその資産を購入しようとする。急騰幅が大きいと後者の購入意欲はさらに大きくなる。その結果、急騰時において、規制なしエージェントの割合が小さいときは分散投資規制が価格形成に与える影響は限定的となる。それに対して急落時は、急落した資産とは異なる資産（資産2）が規制違反売りされるが、資産2のファンダメンタル価格は一定であるため、急落直後は規制なしエージェントの注文はまちまちである。しかし規制ありエージェントによる規制違反売り圧力により資産2の価格が下落しはじめると、規制なしエージェントの注文プロセスにおいて、テクニカル投資家の成分の影響が大きくなり、売り注文が増加する。その結果、資産2の価格下落幅が大きくなる。このことから、分散投資規制が価格形成に与える影響は急騰時に比べ、急落時の方が大きいと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、人工市場を用いて分散投資規制がファンダメンタル価格急騰時の価格形成にどのような影響を与えるか調査し、ファンダメンタル価格急落時のそれとの違いについて議論した。そして、ファンダメンタル価格急騰時はその取引価格の上昇を制限する働きがあることを確認した。さらに、分散投資規制が価格形成に与える影響が、ファンダメンタル価格急落時の方が急騰時より大きいという知見、すなわち、価格急落時において分散投資規制が価格形成に与える影響（分散投資規制による価格下落圧力）が、急騰時に分散投資規制が価格形成に与える影響（分散投資規制による価格上昇圧力）より大きくなるという知見を得た。

今後の課題は以下のとおりである。本研究では、分散投資規制が価格形成に与える影響のみ調査した。しかし、価格形成以外にも市場流動性といった指標がある。そのため、分散投資規制がファンダメンタル価格急騰時、急落時にそれらの指標にどのような影響を与えるか調査することがあげられる。また、分散投資規制以外の要因からなる取引価格間の相互作用の要因（ファンダメンタルズ価格間の相関、ポートフォリオ投資、パッシブ投資の要因など）をモデルに反映させ、これらの要因と分散投資規制との関連を調査することがあげられる。

参考文献

[1] 蒲谷俊介：改正投信法が投信業界に与える影響，金融ITフォーカス，野村総合研究所，pp.12–13 (2014).
 [2] 杉田浩治：投資信託の14年改革と今後の課題，資本市場，資本市場研究会，No.347，pp.4–11 (2014).
 [3] The European Parliament and of the Council: DIRECTIVE 2009/65/EC of the European Parliament and of

the Council of 13 July 2009 on the coordination of laws, regulations and administrative provisions relating to undertakings for collective investment in transferable securities (UCITS) (2009).
 [4] Cremers, M. and Petajisto, A.: How Active Is Your Fund Manager? A New Measure That Predicts Performance, *Review of Financial Studies*, Vol.22, No.9, pp.3329–3365 (2009).
 [5] Cremers, M., Ferreira, M.A., Matos, P. and Starks, L.: Indexing and Active Fund Management: International Evidence, *Journal of Financial Economics*, Vol.120, No.3, pp.539–560 (online), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfineco.2016.02.008> (2016).
 [6] Petajisto, A.: Active Share and Mutual Fund Performance, *Financial Analysts Journal*, Vol.69, No.4, pp.73–93 (2013) (online), available from (<http://www.cfapubs.org/doi/pdf/10.2469/faj.v69.n4.7>).
 [7] Lhabitant, F.-S.: Hedge fund indices for retail investors: UCITS eligible or not eligible?, *Derivatives Use, Trading & Regulation*, Vol.12, No.4, pp.275–289 (2007).
 [8] Joenväärä, J. and Kosowski, R.: Effect of regulatory constraints on fund performance: New evidence from UCITS hedge funds (2015).
 [9] Chiarella, C., Iori, G. and Perelló, J.: The Impact of Heterogeneous Trading Rules on the Limit Order Flows, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.33, No.3, pp.525–537 (2009).
 [10] Chen, S.-H., Chang, C.-L. and Du, Y.-R.: Agent-based Economic Models and Econometrics, *Knowledge Engineering Review*, Vol.27, No.2, pp.187–219 (2012).
 [11] Yeh, C.-H. and Yang, C.-Y.: Do price limits hurt the market?, *Journal of Economic Interaction and Coordination*, Vol.8, No.1, pp.125–153 (online), DOI: 10.1007/s11403-012-0107-4 (2013).
 [12] 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).
 [13] Mizuta, T., Izumi, K., Yagi, I. and Yoshimura, S.: Investigation of Price Variation Limits, Short Selling Regulation, and Uptick Rules and Their Optimal Design by Artificial Market Simulations, *Electronics and Communications in Japan*, Vol.98, No.7, pp.13–21 (2015).
 [14] Zhou, X. and Li, H.: Buying on Margin and Short Selling in an Artificial Double Auction Market, *Computational Economics* (online), DOI: 10.1007/s10614-017-9722-4 (2017).
 [15] Yagi, I., Nozaki, A. and Mizuta, T.: Investigation of the rule for investment diversification at the time of a market crash using an artificial market simulation, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, Vol.14, No.2, pp.451–465 (2017) (online), available from (<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40844-017-0070-9>).
 [16] Nozaki, A., Mizuta, T. and Yagi, I.: A Study on the Market Impact of the Rule for Investment Diversification at the Time of a Market Crash Using a Multi-Agent Simulation, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E100.D, No.12, pp.2878–2887 (online), DOI: 10.1587/transinf.2016AGP0003 (2017).
 [17] Yamamoto, R. and Hirata, H.: Strategy switching in the Japanese stock market, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.37, No.10, pp.2010–2022 (2013) (online), available from (<http://EconPapers.repec.org/>

RePEc:eee:dyncon:v:37:y:2013:i:10:p:2010-2022).

- [18] Mizuta, T., Izumi, K., Yagi, I. and Yoshimura, S.: Design of Financial Market Regulations against Large Price Fluctuations using by Artificial Market Simulations, *Journal of Mathematical Finance*, Vol.3, No.2A, pp.15–22 (2013).
- [19] Sewell, M.: Characterization of financial time series (2006).
- [20] Cont, R.: Empirical properties of asset returns: Stylized facts and statistical issues, *Quantitative Finance*, Vol.1, pp.223–236 (2001).

付 録

A.1 異なる期間で学習するエージェントがいる場合

新たに、中期・長期的な変化を観測し学習を行うエージェントを導入し、すべてのエージェントが異なる期間で学習を行う場合について検証を行った。具体的には、シミュレーション開始時に各エージェントの学習期間のリターン $r_{i_k}^t$ を 0 から 100,000 までの一様乱数で決定させ検証を行った。

資産 1 のファンダメンタル価格急落時の結果を図 A.1 に示す。図 7, 図 A.1 より、従来（すべて同じ期間で学習するエージェント）の場合と比較して価格の下落期間が 5 万期ほど長くなる結果となった。

以下、このような現象が発生する理由を述べる。異なる期間で学習するエージェントがいる場合、従来の条件と比較して中期・長期的に学習を行うエージェントが増加する。中期・長期的に学習を行うエージェントが増加すると、学習対象期として価格急落局面を選んでしまうエージェントが試行期間中長く存在することになる（短期的な学習を行うエージェントばかりだと、価格急落が終了したあとすぐに価格上昇期を学習対象期として選ぶことになる）。価格下落期を学習することは、マイナスリターンを学習することになるため、それらのエージェントの予想価格は低くなる。その結果、長い期間売り注文が成立しやすくなるため、価格下落期間が長くなったと考えられる。

続いて資産 1 のファンダメンタル価格急騰時の結果を図 A.2 に示す。図 1, 図 A.2 より、従来の場合と比較し価格推移に大きな違いは見受けられなかった。

以下、このような現象が発生する理由を述べる。急落時とは逆に、学習対象期として価格急騰局面を選ぶエージェントが試行期間中長く存在することになる。価格上昇期を学習することは、プラスリターンを学習することになるため、それらのエージェントの予想価格は高くなる。その結果、長い期間買い注文が成立しやすくなる。しかし、価格が上昇すると必然的にその資産価値も増大するため、分散投資規制に触れてしまう。すると、分散投資規制により買い注文はキャンセルされ、それ以上の価格上昇が起りに

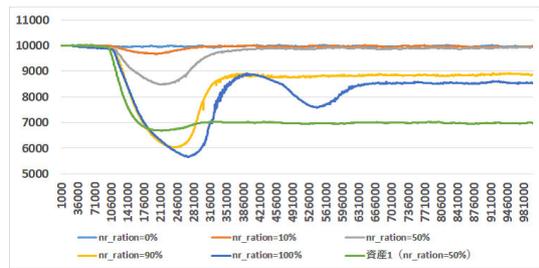


図 A.1 資産 1 のファンダメンタル価格が急落したときの資産 2 ($n_r_ratio = 0\%$, 10% , 50% , 90% , 100%) と資産 1 ($n_r_ratio = 50\%$) の価格推移 (異なる期間で学習するエージェントがいるとき)

Fig. A.1 Price transitions of asset 2 and that of asset 1 when the fundamental price of asset 1 crashes and asset k learning process periods of agents are not the same.

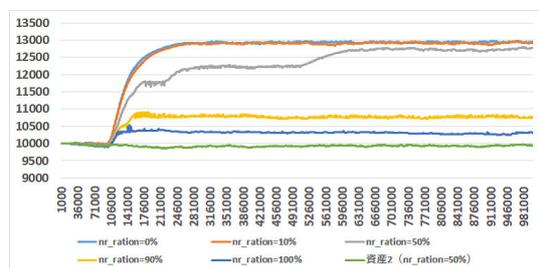


図 A.2 資産 1 のファンダメンタル価格が急騰したときの資産 1 ($n_r_ratio = 0\%$, 10% , 50% , 90% , 100%) と資産 2 ($n_r_ratio = 50\%$) の価格推移 (異なる期間で学習するエージェントがいるとき)

Fig. A.2 Price transitions of asset 1 and that of asset 2 when the fundamental price of asset 1 soars and asset k learning process periods of agents are not the same.

くくなるため、価格推移に違いが現れなかったと考えられる。

本文中のようにエージェントが価格変化の方向を短期的に評価学習するときは、価格推移は環境変化に対して 1 次の時間遅れによる反応と波を打つようなハンチング現象が生じるのは当然のように思われる。しかし、本実験のように異なる期間で学習するエージェントがある程度いた場合でも価格の変化は平準化されなかった。よって本文中で得られた結果は、学習期間には依存しない特徴的な動きであると考えられる。

A.2 価格推移の平均と標準偏差

図 A.3 は、資産 1 のファンダメンタル価格が急騰したとき、かつ、すべてのエージェントに対する規制ありエージェントの割合 (n_r_ratio) が 50% の下で、試行回数 30 回のシミュレーションを行ったときの資産 1 の取引価格の平均とボラティリティ (標準偏差) を示したものである。図 A.4 は、資産 1 のファンダメンタル価格が急落したとき、かつ、すべてのエージェントに対する規制ありエージェントの割合 (n_r_ratio) が 50% の下で、試行回数 30 回のシミュレー

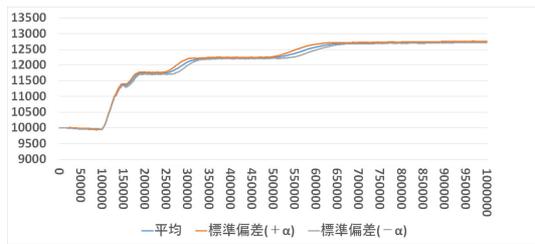


図 A-3 資産 1 のファンダメンタル価格が急騰したときの資産 1 ($n_r_ratio = 50\%$) の価格推移の平均と標準偏差

Fig. A-3 Mean and standard deviation of asset 1 price transition when n_r_ratio is 50% as the fundamental price of asset 1 soars.

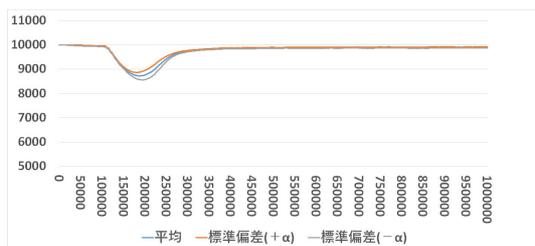


図 A-4 資産 1 のファンダメンタル価格が急落したときの資産 2 ($n_r_ratio = 50\%$) の価格推移の平均と標準偏差

Fig. A-4 Mean and standard deviation of asset 2 price transition when n_r_ratio is 50% as the fundamental price of asset 1 crashes.

ションを行ったときの資産 2 の取引価格の平均とボラティリティを示したものである。

これらの図から、どちらの場合も価格が変動するときにボラティリティが多少大きくなるものの、すべての試行回において安定した価格推移が得られていることが分かる。

ここでは n_r_ratio が 50% の結果のみを記載したが、他のすべてのパターンでも同様の傾向が見られた。



丸山 隼矢

2018 年 4 月より神奈川工科大学大学院工学研究科情報工学専攻に在籍。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。



水田 孝信

2000 年気象大学卒業。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 月ファンドマネージャー。2014 年 9 月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修了。博士(工学)。2014 年度より東京大学公共政策大学院非常勤講師。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、進化経済学会、JAFEE (日本金融・証券計量・工学学会) 各会員。



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。金融、経済、および教育分野に関する社会シミュレーションに興味を持つ。人工知能学会、進化経済学会、IEEE 各会員。