

裁定取引へのリベートは流動性を向上させるか？ —人工市場によるシミュレーション分析—

Do Rebates to Arbitrage Trades Improve Liquidity?
— Investigation by Agent-Based Model —

水田孝信*1

Takanobu Mizuta

*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.

通常、株式の売買を行った投資家は取引所に手数料を支払う。しかしながら近年米国を中心に、対当する注文を待っていた注文（指値注文，メイカー側）にリベート（負の売買手数料）を支払い、対当させた注文（成行注文，テイカー側）から手数料を取る，“メイカー・テイカー制”とよばれる手数料体系をとる取引所が増えている。流動性を供給するメイカー側にリベートを差し出すことにより、流動性を供給するインセンティブを与え、より多くの流動性を供給してもらうのが目的である。しかし、その効果やメカニズムはどのようなものかは分かっていない。そこで本研究では、人工市場（金融市場のエージェントベースドモデル）を用いて、リベートも含め、裁定取引にかかるコストが流動性に与える影響を分析した。その結果、ボラティリティよりコストが小さければ裁定の機会が訪れやすく、裁定エージェントの売買が増え、ETFと株式の価格の乖離が小さくなることが分かった。また、コストがマイナスになっても大きな変化が見られなかった。このことは、手数料をとられるかリベートを受けられるかの違いは、コストがボラティリティに比べ高いか低いかに比べ、重要ではないことを示している。さらに、売買数量にかかわらず注文数量を一定にした場合は、株式の売買量と板の厚さは負の相関となり実証研究とあわなかった。一方で、売買数量の増加に応じて注文数量を増やした場合は、株式の売買量と板の厚さは正の相関となり実証研究と整合的な結果が得られた。このことは、売買の量が増えればより多くの量を注文する投資家の存在が、流動性の統計的性質を決める重要なメカニズムである可能性を示している。

1. はじめに

通常、株式の売買を行った投資家は取引所に手数料を支払う。しかしながら近年米国を中心に、対当する注文を待っていた注文（指値注文，メイカー側）にリベート（負の売買手数料）を支払い、対当させた注文（成行注文，テイカー側）から手数料を取る，“メイカー・テイカー制”とよばれる手数料体系をとる取引所が増えている [川本 15, 岡田 17]。流動性を供給するメイカー側にリベートを差し出すことにより、流動性を供給するインセンティブを与え、より多くの流動性を供給してもらうのが目的である*1。しかし、その効果やメカニズムはどのようなものかは分かっていない。

実証研究のみではこのようなまだ導入したことがない手数料体系を調べたり、その変更の純粋な効果やメカニズムを議論したりするのは困難である。このような議論をするのにすぐれた手法として、コンピュータ上で仮想的にその状況を作り出し検証する、人工市場（金融市場のエージェントベースドモデル）を用いたシミュレーションがある*2。これまでの伝統的な経済学で使われてきた手法にはない強みがあるとして、NatureとScienceに人工市場モデルに期待を寄せる論者が掲載されている [Farmer 09, Battiston 16]。 [Bookstaber 17] でも、エージェントベースドモデルを使えば、これまでの伝統的な経済学では十分分析できなかった金融危機を分析できる可能性がある*3と主張している。

そして、人工市場モデルを用いたシミュレーション研究はバブルや金融危機の発生メカニズムの解明に貢献したことはもち

ろん、現実の金融市場の規制や制度、ルールの変更の議論に多くの貢献をした [水田 19b, Mizuta 19c]*3。また、JPX ワーキングペーパー*4においても、人工市場モデルを用いて制度変更を検討した研究を数多く公表している。

[水田 19a] は2つの株式とそれら合計と同じ価値のある1つのETF (Exchange Traded Funds, 上場投資信託) という3つの証券 (図1) とこれらの証券間の裁定取引を行うエージェントを実装した人工市場モデルを用いて、株式とETFの裁定取引にかかる手数料などのコストによって流動性がどのように変化するか調べた。しかし、リベートは調査していない。さらに裁定取引の対象となる株式の流動性は、売買が増えるにつれて待機注文の量 (板の厚さ) が減少しており、実証分析 [Muranaga 99, Chung 05] とあわない結果を出している。

そこで本研究では、[水田 19a] の人工市場モデルに、売買数量を調整できる仕組みを実装して実証分析と整合的な結果を出力するモデルを構築し、[水田 19a] では調べられていなかったリベートも含め、裁定取引にかかるコストが流動性に与える影響を分析する。

2. 人工市場モデル

[Chiarella 02] では、シンプルでありながら、実証分析で得られた長期間に存在する価格変動の統計的性質 (stylized fact) を再現できるエージェントモデルの構築に成功している。[水田 13] では、[Chiarella 02] のモデルをベースにモデルを構築し、[Chiarella 02] のモデルでは再現されていなかったミリ秒からマイクロ秒といった短い時間スケールでの性質 (マーケット・マイクロ・ストラクチャー) も再現した。[水田 19a] は [水田 13] の人工市場モデルをベースに、2つの株式とそれら合計と同じ価値のある1つのETFという3つの証券に拡張 (図

連絡先: mizutata@gmail.com

<https://mizutatakanobu.com>

当日の発表スライドは以下にある。

<https://mizutatakanobu.com/2020031415.pdf>

*1 株式などの流動性は社会の発展に非常に重要である。詳しい解説として [水田 18] がある。

*2 優れたレビューとして、[LeBaron 06, Chen 12, Todd 16, 和泉 17b] がある。

*3 その他にもレビューとして、[水田 14, Mizuta 16, 和泉 17a] がある。

*4 <https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>

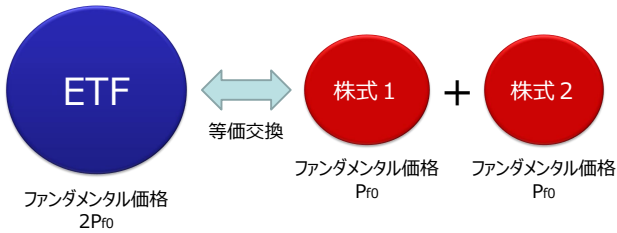


図 1: ETF1 株は、株式 1 の 1 株と株式 2 の 1 株の計 2 株と交換できる

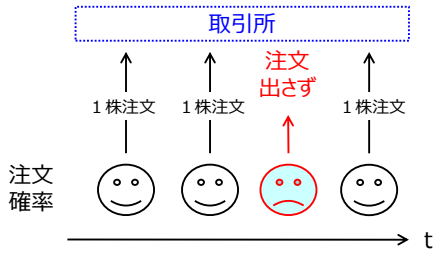


図 2: 注文は確率 k_h ($0 < k_h < 1$) で実行

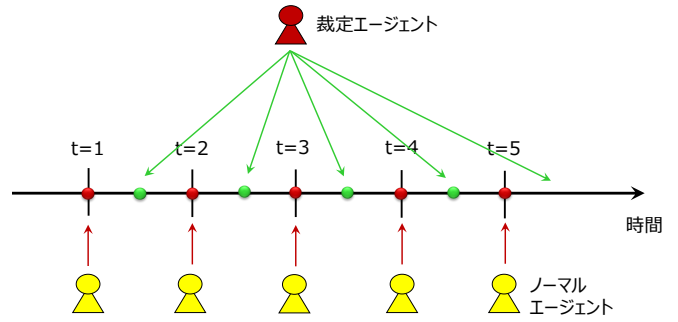


図 3: 裁定エージェントはいつでも注文を出したり、変更したりできるとする

	ETF		株式 1		株式 2			
	売り	買い	売り	買い	売り	買い		
7	20300		30	10400	50	10400		
10	20200		44	10300	70	10300		
	20100		70	10200	90	10200		
	20000		134	10100	116	10100		
→	19900	1	→	10000	120	→	10000	154
	19800	10		9900	88		9900	60
	19700	6		9800	52		9800	55
	19600	4		9700	25		9700	31

図 4: 裁定取引の例

1) し、これらの証券間の裁定取引を行うエージェントを実装したモデルを構築した。

本研究では、[水田 19a] の人工市場モデルに、売買数量を調整できる仕組みを実装して実証分析と整合的な結果を出力するモデルを構築し、[水田 19a] では調べられていなかったレポートも含め、裁定取引にかかるコストが流動性に与える影響を分析する。本研究の目的にはモデルがシンプルであることはとても重要である。本モデルの構築の基本理念は [水田 19b, Mizuta 19c] や付録 “モデル構築の基本理念” 参照。

本モデルは 2 つの株式とそれら合計と同じ価値のある 1 つの ETF という 3 つの証券 h ($h = 0$ が ETF, $h = 1$ が株式 1, $h = 2$ が株式 2) を取引対象とする (図 1)。いずれの証券 h も価格決定メカニズムは、ザラバ方式 (continuous double auction) *5 とし、独立して価格の決定・売買が行われる。注文できる価格の変化幅の最小単位 (呼値の刻み) は δP とし、注文価格のそれより小さい端数は、買い注文の場合は切り捨て、売り注文の場合は切り上げる。

いずれかの証券 h のみを売買する多数 (各証券に n 体、全部で $3n$ 体) のノーマルエージェントと、3 つの証券に対して裁定取引を行う 1 体の裁定エージェントが存在する。いずれのエージェントも保有する証券の数量に制限はなく (キャッシュが無限大)、マイナスの保有数量 (空売り) にも制限はない。

2.1 ノーマルエージェント

各証券 h に対してそれぞれ n 体のノーマルエージェントが売買に参加する。ノーマルエージェントは、実際の市場の価格形成の性質を再現するために導入するものであり、stylized fact や高頻度取引にかかわる統計量を再現するなるべくシンプルな、ごく一般的な投資家をモデル化したものとした。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。 $j = n$ が注文を出すと、次の時刻にはまた $j = 1$ から注文を出

し繰り返される。注文数量は常に 1 株と一定とする。

また、各証券 h ($h = 0$ が ETF, $h = 1$ が株式 1, $h = 2$ が株式 2) の注文の量 (流動性) を調整するため、注文は k_h ($0 < k_h < 1$) の割合でしか実行されず、実行されなかったエージェントはなにもせず次のエージェントに順番が移る。

注文価格 $P_{o,j}^t$, 売り買いの別を以下のように決める。各証券の時刻 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) $r_{e,j}^t$ は、

$$r_{e,j}^t = (w_{1,j} \log \frac{P_f}{P^t} + w_{2,j} \log \frac{P^t}{P^{t-\tau_j}} + w_{3,j} \epsilon_j^t) / \sum_i^3 w_{i,j} \quad (1)$$

とする。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。 \log は自然対数である。 P_f は時間によらず一定のファンダメンタル価格であり株式 1 または 2 の場合 $P_f = P_{f0}$, ETF の場合 $P_f = 2P_{f0}$ である。 P^t は各証券それぞれの取引価格、 ϵ_j^t は各証券の時刻 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。 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 *6。

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予想リターンを高めればマイナスの予想リターンを示す、ファンダメンタル価値を参照して投資判断を行うファンダメンタル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) の予想リターンを示す、過去の価格推移を参照して投資判断を行うテクニカル投資家の成分であり、第 3 項目はノイズを表している。

予想リターン $r_{e,j}^t$ より予想価格 $P_{e,j}^t$ は、

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

*5 ザラバ方式は、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である [東証 15]。

*6 ただし、 $t < \tau_j$ のときは第 2 項目を 0 とした。

表 1: Case A, Case B でも用いる株式 1・2 の注文比率 k_1, k_2

コスト	Case A での k_1, k_2 (k_A)	Case A での 20000 期あたり平均売買数量 V_c	V_c/V_0	Case B で使う k_1, k_2 ($k_{B,c} = k_A \times V_c/V_0$)
-0.025%	50%	2955	1.0330	51.65%
-0.010%	50%	2953	1.0323	51.61%
-0.005%	50%	2951	1.0317	51.58%
0.000%	50%	2949	1.0308	51.54%
0.005%	50%	2947	1.0301	51.50%
0.010%	50%	2944	1.0291	51.46%
0.025%	50%	2936	1.0264	51.32%
0.050%	50%	2922	1.0217	51.08%
0.100%	50%	2901	1.0141	50.71%
0.250%	50%	2876	1.0054	50.27%
0.500%	50%	2863	1.0010	50.05%
裁定取引なし	50%	2860 (V_0)	1.0000	50.00%

で求まる。注文価格 $P_{o,j}^t$ は平均 $P_{e,j}^t$, 標準偏差 P_σ の正規分布乱数で決める。ここで, P_σ は定数である。そして, 売り買いの別は予想価格 $P_{e,j}^t$ と注文価格 $P_{o,j}^t$ の大小関係で決める。すなわち,

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

とする*7。注文を行ってからキャンセル時間 t_c だけ経過した注文はキャンセルする。

2.2 裁定エージェント

ETF1 株は, 株式 1 の 1 株と株式 2 の 1 株の計 2 株と等価であり, 各証券の取引価格がいくらであったとしても交換できる。そのため, ETF を買った価格が株式 1 と 2 を売った価格の合計より小さければ, その差額が利益となる(その逆も成りである)。というのも, 安く買った ETF を株式 1 と 2 に交換して高く売ればその差額が利益となるからである。このような価格差を利益とする取引は裁定取引とよばれており, 裁定エージェントは裁定取引を行う。裁定エージェントはいつでも注文を出したり, 変更したりできるとする(図 3)。

図 4 は, 各証券の注文状況の例である。株式 1 と 2 の最も高い買い注文の価格の合計は 20000(=10000+10000) である。一方, ETF の最も高い買い注文の価格は 19800 であり, 19900 には買い注文は入っていなかったとする。裁定エージェントは ETF へ 19900 の 1 株の買い注文(赤字)を入れ待機する。もし, この注文が成立し, ETF1 株を手に入れたら, この ETF1 株を株式 1, 2 それぞれ 1 株ずつと交換し, 株式 1 と 2 を各 10000 で 1 株ずつ売れば, 差額の 100 が利益となる。もちろん逆の裁定取引も可能である。すなわち, まず ETF を借りてきて高く売り, 株式を安く買って ETF に交換して返し, その差額が利益となる。

以上の例では, 取引にかかるコストをゼロとしたが, 実際にはコストがかかる。本モデルでは上記の一連の取引にかかるすべての手数料などのコストと, 1 回の裁定取引に必要な利益額の合計を $C = c \times P_{f0}$ と定義する。 C には必要な利益も含まれているので, 上記の価格差が C となる取引ができる場合, 裁定取引を行うことができる。また, 流動性が低い ETF の取引

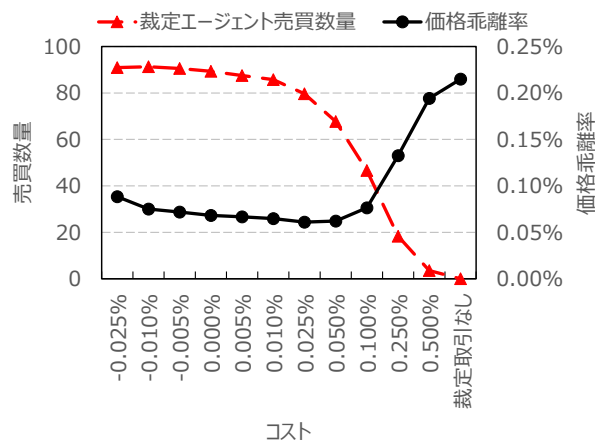


図 5: 価格乖離率と裁定エージェントの売買株数 (Case A : $k_1 = k_2 = 50\%$ で固定)

で特別に大きなリベートが得られる場合も想定し, C は負の値もとることができるとする。

今, 株式 1, 2, および ETF の最も高い買い注文の価格をそれぞれ B_1, B_2, B_{ETF} , それらの最も安い売り注文の価格をそれぞれ S_1, S_2, S_{ETF} とする。裁定エージェントは, $B_{ETF} < B_1 + B_2 - C$ のとき, ETF に価格 $B_1 + B_2 - C$ の 1 株の買い注文を, $S_{ETF} > S_1 + S_2 + C$ のとき, ETF に価格 $S_1 + S_2 + C$ の 1 株の売り注文を出す。両方出す場合もあることに注意。その後, ETF に出していた買い注文が成立したら, 直ちに株式 1 と 2 にそれぞれ価格 B_1, B_2 の売り注文を 1 株ずつ出す。これらの注文は対当する注文がすでに存在するのですぐに取引が成立し, 裁定取引が完了する。ETF に出していた売り注文が成立したら, 直ちに株式 1 と 2 にそれぞれ価格 S_1, S_2 の買い注文を 1 株ずつ出す。また, $B_1, B_2, B_{ETF}, S_1, S_2, S_{ETF}$ のいずれかが変更になれば, 注文を入れなおす。

裁定エージェントのこれらの取引は必ず C だけの価格差を確保しており損失を出すことはないが, 裁定取引の機会が全くない可能性はある。

*7 ただし, $t < t_c$ のときは十分な板の厚さを確保するため, $P_f > P_{o,j}^t$ なら 1 株の買い, $P_f < P_{o,j}^t$ なら 1 株の売りとする。また, $P^t = P_f$ とする

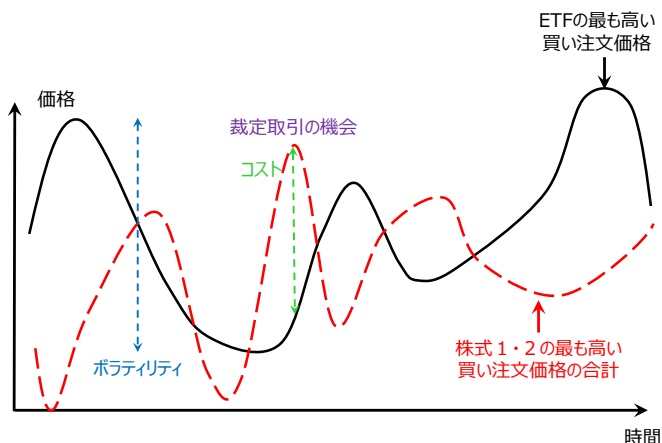


図 6: ボラティリティとコストの関係

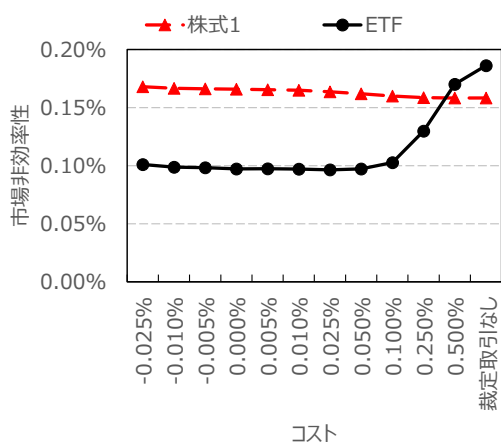


図 7: 市場非効率性 (Case A)

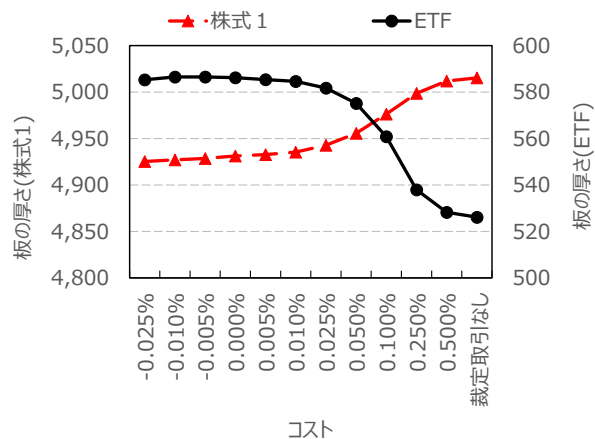


図 8: 板の厚さ (Case A)

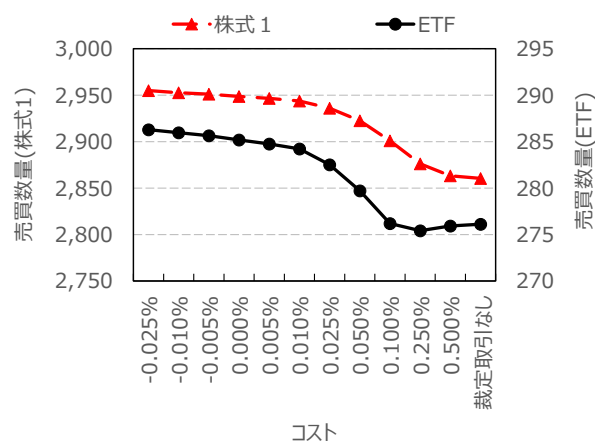


図 9: 売買数量 (Case A)

3. シミュレーション結果

本研究では [水田 13] と同じ以下のパラメータを用いる。具体的には, $n = 1000$, $w_{1,max} = 1$, $w_{2,max} = 10$, $w_{3,max} = 1$, $\tau_{max} = 10000$, $\sigma_\epsilon = 0.06$, $P_\sigma = 30$, $t_c = 20000$, $\delta P = 0.01$, $k = 0.1$, $P_{f0} = 10000$ とした。つまり各証券のファンダメンタル価格は, 株式 1, 2 が $P_{f0} = 10000$, ETF が $2P_{f0} = 20000$ である。またシミュレーションは時刻 $t = t_e = 1000000$ まで行った*8。また, $c = -0.025\%$, -0.01% , -0.005% , 0% , 0.005% , 0.01% , 0.025% , 0.05% , 0.1% , 0.5% , および裁定エージェントがいない場合に対して, その他の条件を乱数表も含め全く同じにして, 各種統計値を算出した。これを, 乱数表を変更して 100 回行い, その平均値を用いる。

Case A では, $k_0 = 5\%$, $k_1 = k_2 = k_a = 50\%$ で固定する。Case B では表 1 で示されたようにコストごとに異なる,

$$k_1 = k_2 = k_{B,c} = k_A \times \frac{V_c}{V_0}, \quad (4)$$

とする。ここで, V_c は Case A でのコストごとの株式 1 の 20000

*8 これらのパラメータの妥当性検証については付録“モデルの妥当性検証”参照。また具体的なパラメータの検討は [水田 14] に書かれている。

期あたり平均売買数量, V_0 は裁定取引エージェントが存在しないときの V_c である。表 1 に示されるように, コストが低いほど売買数量は多い。実際の市場では, 売買の量が増えればより多くの量を注文する投資家がいることが知られている。この効果を取り入れるため, 売買が増えた分, ノーマルエージェントは注文量を増やす。また, k_0 は Case A 同様, $k_0 = 5\%$ とする。

3.1 Case A : $k_1 = k_2 = 50\%$ で固定

図 5 はコスト c ごとの価格乖離率と裁定エージェントの売買株数である。価格乖離率は株式 1 と 2 の価格の合計と ETF の価格がどれだけ乖離していたかを示す指標であり,

$$M_d = \frac{1}{t_e} \sum_{t=1}^{t_e} \frac{|P_{ETF}^t - (P_1^t + P_2^t)|}{P_1^t + P_2^t} \quad (5)$$

と定義した。ここで, P_{ETF}^t, P_1^t, P_2^t はそれぞれ時刻 t における ETF, 株式 1, 2 の価格, $||$ は絶対値である。

コストが減少すると裁定エージェントの売買が増え, 価格の乖離が減っている。価格の乖離はコストが 0.1% 付近を閾値に急激に変化している。この値はちょうど, 10 期ごとの株式のリターンの標準偏差 (ボラティリティ) である 0.11% に近い値である。そのため, コストがボラティリティに比べ, 高いか低いか重要な境界であることが考えられる。

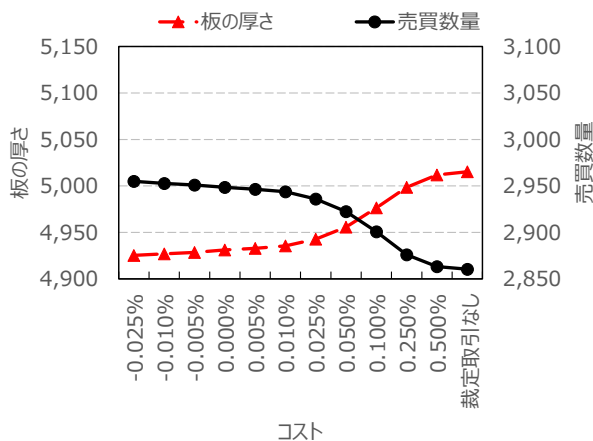


図 10: 株式 1 の板の厚さと売買数量 (Case A)

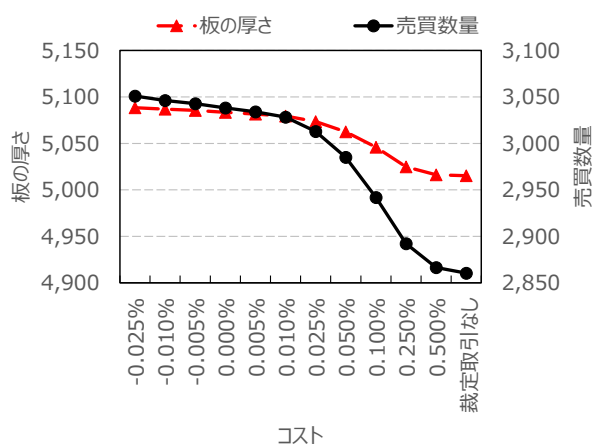


図 11: 株式 1 の板の厚さと売買数量 (Case B: 表 1 のように売買が増えた分 k_1, k_2 を増やす)

また、コストがマイナスになっても大きな変化が見られない。つまり、手数料をとられるかりべつを受け取れるかの違いは、コストがボラティリティに比べ高いか低いかに比べ、重要ではないことを示している。

図 6 は、ボラティリティとコストの関係を示した模式図である。赤い破線は株式 1、2 の最も高い買い注文の価格の合計、黒い線は ETF の最も高い買い注文の価格である。そのため、赤い破線が黒い線よりコスト以上に上に来た場合のみ、裁定取引の機会がある。一方、各証券はボラティリティ程度の幅を持って価格が変動している。そのため、ボラティリティよりコストが小さければ裁定の機会が訪れやすく、裁定エージェントの売買が増え、ETF と株式の価格の乖離が小さくなる。

図 7 はコスト c ごとの ETF と株式 1 の市場非効率性である。市場の効率性を測定する指標として、市場非効率性 M_{ie} ,

$$M_{ie} = \frac{1}{t_e} \sum_{t=1}^{t_e} \frac{|P^t - P_f|}{P_f} \quad (6)$$

を定義した*9。ここで $||$ は絶対値を示す。 M_{ie} は 0 以上の値をとり、0 なら完全に効率的、大きくなればなるほど非効率で

*9 市場の効率性を示す指標は多く提案されている [伊藤 07, Verheyden 13] が、本研究で用いる市場非効率性は、通常は観測できない

あることを示す。

コストが減少すると ETF のみ市場が効率になっている。やはり、コストが 0.1% 付近を閾値に急激に変化している。株式 1 は非効率になったりはしていない。株式 1 の効率性を犠牲にして ETF を効率的にしているわけではないことが分かる。

図 8 は ETF と株式 1 の板の厚さ (待機している注文量) を示している。板の厚さは最も高い買い注文価格と最も安い売り注文価格の平均から $\pm 0.1\%$ の範囲にある注文株数の合計の全時間での平均である。ETF はコストが下がると板が厚くなっており、特にコスト 0.1% 付近で大きく変化している。株式 1 は逆の傾向となっている。図 9 はノーマルエージェントも含めた全売買株数である。ETF、株式 1 ともにコストが低くなると売買が増えている。コストの減少により株式 1 の板の厚さが減少し売買が増えていることは、株式 1 の待機注文が裁定取引と対当していると考えれば整合的である。

しかしながら、[Muranaga 99, Chung 05] などの多くの実証研究が売買量と板の厚さは正の相関があることを示しており、株式 1 の結果はこれと合わない。図 10 は株式 1 の板の厚さと売買数量であるが、逆相関になっており実証研究の結果とあっていない。

3.2 Case B: 表 1 で示された注文比率を k_1, k_2 に使用

実際の市場では、売買の量が増えればより多くの量を注文する投資家がいることが知られている。Case A ではこの効果を取り入れていなかった。この効果を取り入れるため、Case B では売買が増えた分、ノーマルエージェントは注文量を増やす。

図 11 は Case B での、株式 1 の板の厚さと売買数量を示した。コストが減少するにつれて、板の厚さも売買数量も増加して、実証研究とあっている。

このことから、売買の量が増えればより多くの量を注文する投資家の存在が、流動性の統計的性質を決める重要なメカニズムである可能性を示している。

4. まとめと今後の課題

本研究では、[水田 19a] の人工市場モデルに、売買数量を調整できる仕組みを実装して実証分析と整合的な結果を出力するモデルを構築し、[水田 19a] では調べられていなかったレポートも含め、裁定取引にかかるコストが流動性に与える影響を分析した。

その結果、ボラティリティよりコストが小さければ裁定の機会が訪れやすく、裁定エージェントの売買が増え、ETF と株式の価格の乖離が小さくなることが分かった。また、コストがマイナスになっても大きな変化が見られなかった。このことは、手数料をとられるかりべつを受け取れるかの違いは、コストがボラティリティに比べ高いか低いかに比べ、重要ではないことを示している。

さらに、売買数量にかかわらず注文数量を一定にした場合は、株式の売買量と板の厚さは負の相関となり実証研究とあわなかった。一方で、売買数量の増加に応じて注文数量を増やした場合は、株式の売買量と板の厚さは正の相関となり実証研究と整合的な結果が得られた。このことは、売買の量が増えればより多くの量を注文する投資家の存在が、流動性の統計的性質を決める重要なメカニズムである可能性を示している。

ファンダメンタル価格 P_f を直接使用しており、人工市場シミュレーションでしか用いることができない定義である。人工市場シミュレーションでは P_f が明確であるため、推定ではない理想的な市場の効率性を測定できる市場非効率性の使用が可能である。

本研究では、裁定取引へのリポートしか分析しなかった。リポートは高頻度取引を増やして流動性を向上させると言われているが、高頻度取引には裁定取引以外にも、マーケットメイク戦略などさまざまな存在する。これらの戦略へのリポートの効果は今後の課題である。

また、リポートが高くなると、テイク側の手数料も高くなるが、テイク側にとって流動向上のメリットと手数料が高くなるデメリットのどちらが大きいのか検討する必要がある。このような観点で分析していないため、今後の課題である。

付録

モデル構築の基本理念

人工市場シミュレーションを用いれば、まだ導入したことがない手数料体系を調べたり、その変更の純粋な効果やメカニズムを議論したりできる。これが人工市場シミュレーション研究の強みである。そして、多くの人工市場シミュレーション研究がこれまでにない環境が与える影響や、規制・制度の変更を分析してきた [水田 19b, Mizuta 19c]。

ただその効果は確実な予想ではない。さまざまなケースでのシミュレーションを行い、これまで予想されていなかった、“あり得る”メカニズムでの現象を見つけておくことが、人工市場シミュレーションの大きな役割となる。金融市場でこれから実際におこる現象を定量的にも忠実に再現することが目的ではなく、環境の変化が、どのようなメカニズムで価格形成に影響を与え、どのようなことが起こり得るのかという知識獲得が目的である。これは例えば実証分析など他の手法ではできないことである。

人工市場モデルは普遍的に存在するマクロ現象を再現すべきであると考えられる。人工市場シミュレーションでは、マクロ現象である市場価格のリターンや売買数量をモデル化しない。あくまで、投資家を模した“エージェント”と取引所を模した“価格決定メカニズム”といったマイクロメカニズムをモデル化し、そのマイクロメカニズムの相互作用の積み上げとしてマクロ現象が出力される。そのため、マイクロメカニズムのモデル化は現実の市場に即したものとし、結果として出力されるマクロ現象は、現実の市場で普遍的に存在するマクロ的性質を再現されるように作る必要がある。

しかし、普遍的ではなく特定の時期や資産、地域で出現するマクロ的性質すべてを再現することは本研究の目的ではない。必要以上に多くのマクロ的性質を一つのモデルで再現しようとすると、過剰に複雑なモデルをもたらす、関連する要素が多くなりすぎて、発生メカニズムの理解を妨げてしまう。

実際、複雑な人工市場モデルに対して、モデルが複雑になるとパラメータが増えモデルの評価が困難になるという批判がある [Chen 12]。モデルが複雑すぎると関連する要素が多くなりすぎて、発生メカニズムの理解を妨げてしまう。また、パラメータが増えるほどさまざまな出力がだせるようになり、モデルを作った人が導きたい結果へ恣意的に導くためのパラメータ設定が行われる恐れがある。シンプルでパラメータが少ないモデルほど、パラメータ調整によって特定の結果に導くことが困難であるため評価が容易となる。

以上より、本研究では、分析目的を果たせる範囲内なるべくシンプルなモデルの構築を行っている。実際の市場を完全に再現することを目的としておらず、普遍的ではなく特定の時期や資産、地域で出現するマクロ的性質すべてを再現することや、実際には存在するであろう投資家をすべて網羅することは

表 2: 裁定エージェントがない場合の株式 1 の各種統計量

取引	約定率	32.3%
	キャンセル率	26.1%
	注文件数 / 20000 期間	6467
標準	1 期間	0.0512%
偏差	20000 期間	0.562%
尖度		1.42
ラグ		
	1	0.225
二乗リターンの	2	0.138
自己相関係数	3	0.106
	4	0.087
	5	0.075

あえて行っていない。

[Weisberg 12] が述べているように、よいシミュレーションモデルとはその研究目的によって異なる。そのため、本研究のモデルは本研究の目的にのみおいてよいモデルであり、他の研究目的においてはよいモデルではない。また [Weisberg 12] が述べているように、数理モデルと異なり、シミュレーションモデルは投資家などのミクロの行動やその行動の理由と、市場価格などのマクロ現象との相互作用のメカニズムの解明ができることが強みである。例えば、ノーベル経済学賞を受賞したシェリングはシミュレーションモデルを用いて人種隔離のメカニズムを議論したが、そのモデルではメカニズムの解明に焦点を当てるためどこにも存在しないシンプルな町を簡潔にモデル化していて、実際に存在する町の隔離状況の説明や予測はできないモデルであった [Schelling 06]。本研究でも、数理モデルが強みとするマクロ現象の特徴分析や予測といったことは目的とせず、メカニズムの解明に焦点をあてている。

モデルの妥当性

人工市場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 [LeBaron 06, Chen 12, 水田 14]。ファット・テールは、市場価格のリターンの分布が正規分布ではなく裾が厚い、すなわち、尖度が正であることである。ボラティリティ・クラスタリングは市場価格のリターンの 2 乗が、大きなラグでも自己相関係数が有意に正であることである。

[Sewell 11] など多くの研究で述べられているように、金融市場は不安定であり、安定的に、どのような時期にも有意に観測されるスタイライズド・ファクトはファット・テールとボラティリティ・クラスタリングの 2 つしかない。

しかも、これらは統計量の有意に正であることだけが安定して観測され、値そのものは、時期によって異なる。ファット・テールについては、実証分析でよく観測されるリターンの分布の尖度は 1 ~ 100 程度であり、ボラティリティ・クラスタリングについては、実証分析でよく観測されるリターンの自己相関は 0 ~ 0.2 程度と、かなりばらつきがある [Sewell 11]。

本研究のように、金融市場に共通する性質を分析対象とする人工市場が再現すべきは、これらの統計量が有意に正であり、問題ない範囲に値が収まっていることであって、特定の値に近づけることは本質的ではない。

表 2 は、裁定エージェントがない場合の株式 1 の毎期のリターン $\log(P^t/P^{t-1})$ の標準偏差と尖度、リターンの 2 乗の自己相関である。リターンの尖度がプラスで、ファット・テール

ルが再現されている。また、リターンの2乗の自己相関もプラスで、ボラティリティ・クラスターリングが再現されていると考えられる。

留意事項

本論文はスパークス・アセット・マネジメント株式会社の公式見解を表すものではありません。すべては個人的見解であります。

参考文献

- [Battiston 16] Battiston, S., Farmer, J. D., Flache, A., Garlaschelli, D., Haldane, A. G., Heesterbeek, H., Hommes, C., Jaeger, C., May, R., and Scheffer, M.: Complexity theory and financial regulation, *Science*, Vol. 351, No. 6275, pp. 818–819 (2016), <http://science.sciencemag.org/content/351/6275/818>
- [Bookstaber 17] Bookstaber, R.: *The End of Theory: Financial Crises, the Failure of Economics, and the Sweep of Human Interaction*, Princeton University Press (2017), (監修: 長尾慎太郎, 邦訳: 井田京子: 経済理論の終焉金融危機はこうして起こる, Pan Rolling(2019)) <http://www.panrolling.com/books/wb/wb273.html>
- [Chen 12] 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), <http://dx.doi.org/10.1017/S0269888912000136>
- [Chiarella 02] Chiarella, C. and Iori, G.: A simulation analysis of the microstructure of double auction markets, *Quantitative Finance*, Vol. 2, No. 5, pp. 346–353 (2002), <https://doi.org/10.1088/1469-7688/2/5/303>
- [Chung 05] Chung, K. H., Kim, K. A., and Kitsabunarat, P.: Liquidity and Quote Clustering in a Market with Multiple Tick Sizes, *Journal of Financial Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 177–195 (2005), <https://doi.org/10.1111/j.1475-6803.2005.00120.x>
- [Farmer 09] Farmer, J. D. and Foley, D.: The economy needs agent-based modelling, *Nature*, Vol. 460, No. 7256, pp. 685–686 (2009), <https://www.nature.com/articles/460685a>
- [伊藤 07] 伊藤 幹夫: 効率的市場仮説をめぐる論争はなぜ決着しないのか, 三田学会雑誌 (慶應義塾大学), Vol. 100, No. 3, p. 229 (2007), http://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20071001-0211
- [和泉 17a] 和泉 潔, 川久保 佐記, 米納 弘渡: 第5章 強靱な金融システム, 古田 一雄 (編), レジリエンス工学入門, 日科技連出版社 (2017), <http://www.juse-p.co.jp/cgi-bin/html.pl5?i=ISBN978-4-8171-9624-8>
- [和泉 17b] 和泉 潔: 第6章 可能世界ブラウザとしてのエージェントシミュレーション, マルチエージェントのためのデータ解析 (マルチエージェントシリーズ), コロナ社 (2017), <http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339028126/>
- [川本 15] 川本 隆雄: 米国における株式市場構造改革議論とその行方, 月刊資本市場, Vol. 11, No. 363 (2015), <http://www.camri.or.jp/files/libs/335/201703251704004867.pdf>
- [LeBaron 06] LeBaron, B.: Agent-based computational finance, *Handbook of computational economics*, Vol. 2, pp. 1187–1233 (2006), [http://dx.doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02024-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02024-1)
- [水田 13] 水田 孝信, 早川 聡, 和泉 潔, 吉村 忍: 人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析, JPX ワーキング・ペーパー, No. 2, 日本取引所グループ (2013), <https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>
- [水田 14] 水田 孝信: 人工市場シミュレーションを用いた金融市場の規制・制度の分析, 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科 (2014), <http://hdl.handle.net/2261/59875>
- [Mizuta 16] Mizuta, T.: A Brief Review of Recent Artificial Market Simulation (Agent-Based Model) Studies for Financial Market Regulations and/or Rules, *SSRN Working Paper Series* (2016), <http://ssrn.com/abstract=2710495>
- [水田 18] 水田 孝信: なぜ株式市場は存在するのか?, スパークス・アセット・マネジメント (2018), <https://www.sparx.co.jp/report/special/2174.html>
- [水田 19a] 水田 孝信: 株式とETFの裁定取引にかかるコストと流動性の関係—人工市場によるシミュレーション分析—, JPX ワーキング・ペーパー, No. 27, 日本取引所グループ (2019), <https://www.jpx.co.jp/corporate/research-study/working-paper/index.html>
- [水田 19b] 水田 孝信: 人工市場シミュレーションを用いた金融市場の規制やルールの議論, 証券アナリストジャーナル, Vol. 57, No. 5 (2019), https://www.saa.or.jp/learning/journal/each_title/2019/05.html
- [Mizuta 19c] Mizuta, T.: An agent-based model for designing a financial market that works well, *arXiv* (2019), <https://arxiv.org/abs/1906.06000>
- [Muranaga 99] Muranaga, J.: Dynamics of Market Liquidity of Japanese Stocks: An Analysis of Tick-by-Tick Data of the Tokyo Stock Exchange, in International Settlements, for B. ed., *Market Liquidity: Research Findings and Selected Policy Implications*, Vol. 11 of *CGFS Papers chapters*, pp. 1–25, Bank for International Settlements

- (1999),
<https://www.bis.org/publ/cgfs11.htm>
- [岡田 17] 岡田 功太, 齋藤 芳充: 米国株式市場のメイカー・テイカー・モデルを巡る議論-流動性向上策としてのレポートの功罪-, 野村資本市場クォーターリー, Autumn (2017),
<http://www.nicmr.com/nicmr/report/repo/2017/2017aut04.pdf>
- [Schelling 06] Schelling, T. C.: *Micromotives and Macrobehavior*, W. W. Norton & Company (2006), (邦訳: 村井章子: ミクロ動機とマクロ行動, 勁草書房 (2016))
<http://www.keisoshobo.co.jp/book/b251669.html>
- [Sewell 11] Sewell, M.: Characterization of financial time series, *Research Note, University College London, Department of Computer Science*, No. RN/11/01 (2011),
<http://finance.martinsewell.com/stylized-facts/>
- [Todd 16] Todd, A., Beling, P., Scherer, W., and Yang, S. Y.: Agent-based financial markets: A review of the methodology and domain, in *Computational Intelligence for Financial Engineering Economics (CIFER), 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence on* (2016),
<https://doi.org/10.1109/SSCI.2016.7850016>
- [東証 15] 東証: 東証公式 株式サポーター 株式取引編, 東京証券取引所 (2015),
<https://www.jpx.co.jp/learning/tour/books-brochures/detail/08.html>
- [Verheyden 13] Verheyden, T., De Moor, L., and Bossche, Van den F.: A Tale of Market Efficiency, *Review of Business and Economic Literature*, Vol. 58, No. 2, pp. 140–158 (2013),
<https://ssrn.com/abstract=2382793>
- [Weisberg 12] Weisberg, M.: *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*, Oxford Studies in the Philosophy of Science (2012), (邦訳: 松王政浩: 科学とモデル-シミュレーションの哲学 入門-, 名古屋大学出版会 (2017))
<http://www.unp.or.jp/ISBN/ISBN978-4-8158-0872-3.html>