

# マーケットメーカーがダーク・プールの存在する市場の 効率性に与える影響：人工市場アプローチによる分析

## Impact of Market Maker to Efficiency of Stock Market with Dark Pool - Artificial Market Approach

西岡伸<sup>1</sup> 鳥居拓馬<sup>2</sup> 和泉潔<sup>2</sup>

Shin Nishioka<sup>1</sup>, Takuma Torii<sup>2</sup>, and Kiyoshi Izumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学工学部システム創成学科

<sup>1</sup> Department of Systems Innovation, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> 東京大学大学院 工学系研究科

<sup>2</sup> School of Engineering, The University of Tokyo

**Abstract:** In this research, we analyzed impact on market efficiency of interaction between high frequency trading (HFT) and dark pool to a stock market using artificial market simulation. We introduced a market maker agent, a representative strategy of HFT, and changed its spread for order price. We also changed each stylized trader agents' percentage to use dark pool. The result showed that the smaller the spread of the market maker is, the more efficient the stock market becomes. We discussed the mechanism that percentage to use dark pool have a different impact to the efficiency of the market depending on the size of the market maker's spread.

## 1. はじめに

現在、高頻度取引（HFT）が株価や外国為替などの金融価格の安定性に与える影響が大きな議論の対象となっている[1]。他方で、ダーク・プールと呼ばれる、通常の取引所を通さずに投資家の注文同士を証券会社内で付け合わせる取引市場がシェアを高めつつある[2]。

現実の金融市場はさまざまな要因が複雑な相互作用をもち、関心のある要因だけを取り上げて分析することが難しい。そこで、計算機上に仮想的な金融市場のモデルを構築し分析する人工市場シミュレーションが行われている[3]。

人工市場を用いた既存研究では、HFTの影響のみ[4]、ダーク・プールの影響のみ[5]について個別に分析されている。ところが、高頻度取引とダーク・プールの両方が存在する市場については、人工市場を用いた分析はない。そこで、本研究では、高頻度取引とダーク・プールの相互作用が市場に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、人工市場シミュレーションを行った。

## 2. 人工市場モデル

本研究のモデルでは先行研究[6][7]をベースに、1つのリット市場（通常の取引所）に加えて、それに対応した1つのダーク・プール市場が存在する状況を扱う。また、 $n$ 体のスタイライズドトレーダー（標準の取引エージェント）に加えて1体のマーケットメーカー（高頻度取引エージェント）が取引を行う。シミュレーションの各ステップ  $t$  では（図1）、まず、無作為に選ばれたスタイライズドトレーダー1体がリット市場あるいはダーク・プールに注文を出す。次に、マーケットメーカーがリット市場に売り買い両方の注文を出す。このステップを繰り返し行い、ダーク・プールの取引頻度（図1、パラメータ  $d$ ）とマーケットメーカーの利益率（図1、パラメータ  $\theta$ ）が以下に定義する市場非効率性の指標に与える影響を調べる。

### 2.1 リット市場

リット市場の取引は連続ダブルオークション（ザラバ方式）に従う。リット市場では、価格優先・時間優先の原則に従い、相対する注文と突き合わせら

れ取引が生じる。ただし、約定しなかった注文は板に蓄積される。価格時系列のほか、売り板、買い板に対応した最高買い気配値（ベストビッド）、最安売り気配値（ベストアスク）、またその平均値である仲値といった情報をトレーダーは利用できる（この点でダーク・プールと異なる）。リット市場の価格  $P_{lit}^t$  は、価格の変化幅の最小単位であるティックサイズ  $\delta P = 0.1$  より細かい値段では取引されず、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。

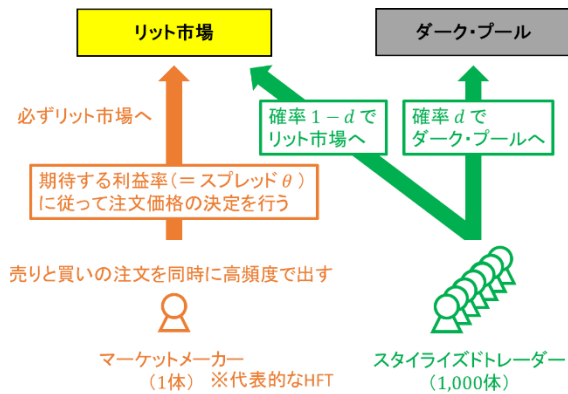


図 1 各ステップにおけるモデル全体の振る舞い

## 2.2 ダーク・プール

リット市場と対照的に、ダーク・プールでは取引価格や板の状態といった情報をトレーダーは利用できない。また、ダーク・プールに注文を出す際、トレーダーは価格を指定せず、反対側の注文がダーク・プール市場にある場合は即座に取引が成立し、取引価格は自動的にリット市場の仲値となる（図 2）。このように価格が自動的に決まり、相対する注文があれば即座に約定が起きるため、ダーク・プールでは必ず売り板か買い板の一方にしか注文が残らない。

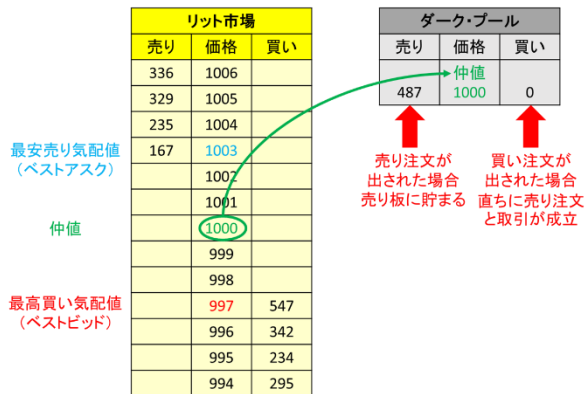


図 2 ダーク・プールにおける注文処理

## 2.3 スタイライズドトレーダー

本モデルでの標準的な取引エージェントであるスタイライズドトレーダー[5]は、リット市場の情報をもとに将来の予想価格を見積もり、注文価格を決定したのち、確率  $1-d$  でリット市場を、確率  $d$  でダーク・プールに注文を出す。

まず、スタイライズドトレーダー  $j$  はファンダメンタル分析とチャート分析を行い、これらの分析結果とノイズの加重平均として、式(1)で予想リターン  $r_{e,j}$  を見積もる。

$$r_{e,j}^t = \frac{w_{F,j}F_j^t + w_{C,j}C_j^t + w_{N,j}N_j^t}{w_{F,j} + w_{C,j} + w_{N,j}} \quad (1)$$

ここで、 $F_j^t = \log(P_f/P_{lit}^t)$  はファンダメンタル分析の成分を表し、現在のリット市場の価格  $P_{lit}^t$  とファンダメンタル価格  $P_f$  との乖離に基づく。また、 $C_j^t = \log(P_{lit}^t/P_{lit}^{t-\tau_j})$  はチャート分析の成分を表し、過去  $\tau_j$  期間に渡るリターン時系列のトレンドに基づく。最後に、 $N_j^t \sim N(0, \sigma_\epsilon)$  は平均 0、標準偏差  $\sigma_\epsilon$  の正規分布に従ったランダムな成分である。 $w_{F,j}$ 、 $w_{C,j}$ 、 $w_{N,j}$  はそれぞれ各成分への重みである。上式の予想リターンから、予想価格を式(2)で見積もる。

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

注文価格  $P_{e,j}^t \sim N(P_{e,j}^t, P_\sigma)$  は、平均  $P_{e,j}^t$ 、標準偏差  $P_\sigma$  の正規乱数で決める。売り買いの別は、予想価格と注文価格の大小関係によって決定し、 $P_{e,j}^t > P_{o,j}^t$  のとき 1 単位の売り注文を、 $P_{e,j}^t < P_{o,j}^t$  のとき 1 単位の買い注文を出す。注文は  $t_c^{st}$  ステップのうちに約定しなければキャンセルされる。

## 2.4 マーケットメーカー

本モデルでは HFT の代表的な取引戦略の一つであるマーケットメーカー (MM) を導入した。MM[4] はスタイライズドトレーダー 1 体が 1 回注文を出すごとに 1 回注文を出す機会をもち、この点で各スタイライズドトレーダーの  $n$  倍高頻度で取引を行う。MM は、必ずリット市場を選択し、リット市場の仲値の上下に等間隔で売り注文と買い注文を 1 単位ずつ出す（図 3）。この間隔は MM のスプレッド（利益率） $\theta$  とファンダメンタル価格  $P_f$  に依存し、 $(P_f \times \theta)/2$  とした[4]。MM は注文を出す前に以前の注文をキャンセルする。

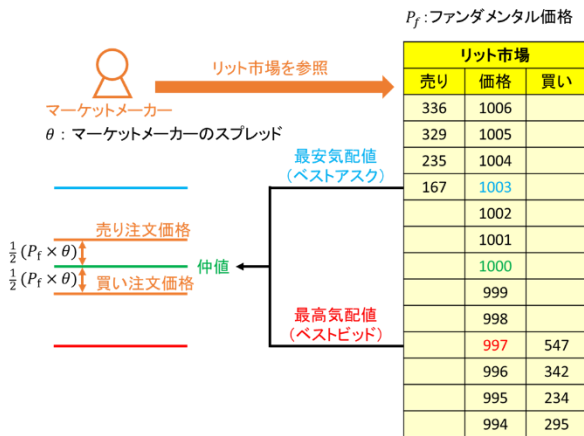


図 3 マーケットメーカーの注文価格の決定方法

## 2.5 市場非効率性

本研究では、高頻度取引とダーク・プールの相互作用が市場に及ぼす影響を明らかにするため、ダーク・プール利用率  $d$  とマーケットメーカー (MM) のスプレッド  $\theta$  が市場の効率性に与える影響を分析する。そこで、本論文では、価格発見機能の観点から水田ら [5] の定義した市場の非効率性を特徴づける指標である式 (3) を用いた。

$$M_{ie} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_s}^T \frac{|Q^t - P_f|}{P_f} \quad (3)$$

$M_{ie}$  はファンダメンタル価格  $P_f$  からの平均的な乖離を表し、大きいほど非効率となる。ここで、 $Q^t$  は、2 つの市場の効率性を同時に特徴づけるため、ある時点  $t$  でダーク・プールで取引があった場合は仲値を、そうではなくリット市場で取引があった場合はその価格を用いた。以降、本論文では  $Q^t$  を取引価格と呼ぶ。

## 3. シミュレーション結果

本研究では、 $d$  と  $\theta$  以外のパラメータの値として、 $n = 1000$ ,  $t_c^{st} = 2000$ ,  $\sigma_\epsilon = 0.06$ ,  $P_\sigma = 30$ ,  $P_f = 10000$ ,  $\delta P = 0.1$  を共通の定数とし、 $w_{F,j} \in [0, 1]$ ,  $w_{C,j} \in [0, 5]$ ,  $w_{N,j} \in [0, 1]$ ,  $\tau_j \in [1, 1000]$  を一様分布乱数で与えた<sup>1</sup>。これらの値は水田ら [5] を参考にして定めたが、水田ら [5] では、 $w_{C,j} \in [0, 10]$ ,  $\tau_j \in [1, 10000]$  としている点が異なる。シミュレーション開始後の 1000 ステップは市場が開く前の状態とし、

<sup>1</sup> パラメータの妥当性を検証するため、ダーク・プールなし、MM なしのシミュレーションを行い、価格時系列の統計的性質を調べた結果、1 日の約定率が東証の平均約定率とおおむね一致

$t = t_s = 1000$  から注文処理を開始する。その後の 40000 ステップの全期間の価格時系列を用いて市場非効率性  $M_{ie}$  を計算した。

### 3.1 $d$ と $\theta$ が市場効率性に与える影響

図 4 は、さまざまなスプレッド  $\theta$  において、ダーク・プール利用率  $d$  を変化させたときに非効率性  $M_{ie}$  がどう変化するかを示す。シミュレーションは各  $(d, \theta)$  の組合せに対して各 30 回ずつ行い、その平均を示した。全体的な傾向として、 $\theta$  が小さいほど非効率性は減少している。図から、マーケットメーカー (MM) なしの場合、グラフは下に凸の形状を示し、 $d = 0.5$  付近で非効率性は最も低くなり、 $d = 0.9$  付近では再度上昇している。MM ありの場合、 $\theta$  の大きさによって、 $d$  の変化がもたらす市場非効率性への影響が異なる。まず、 $\theta$  が極端に大きい場合 ( $\theta = 1\%$ )、MM の取引は価格時系列に影響を及ぼさず、グラフは MM なしのとほぼ一致する。他方、 $\theta$  が大きいときでは ( $\theta = 0.316\%, 0.1\%$ )、 $d$  が大きくなるほど非効率性は増加する。一方で、 $\theta$  が小さいときでは ( $\theta = 0.01\%, 0.001\%$ )、 $d$  が大きくなるほど非効率性は減少するが、その変化の大きさは  $\theta$  が大きいときに比べてわずかであった。特に、 $\theta$  とティックサイズ  $\delta P$  が一致する場合には ( $\theta = 0.001\%$ )、 $d$  に依らず非効率性はほぼゼロとなる。

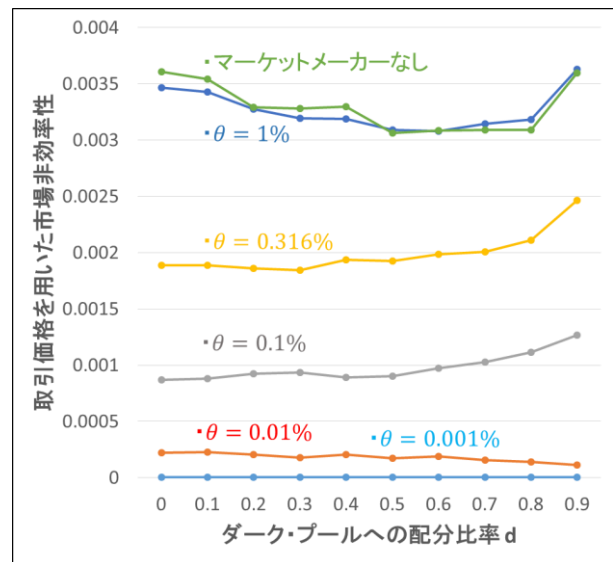


図 4 ダーク・プールへの配分比率ごとの市場非効率性

し、騰落率の尖度が正、騰落率の 2 乗の自己相関が正になることを確認した。

以上から、MM がいる場合、MM がいない場合に比べて市場は効率的になる傾向がある。また、MM の影響が小さい場合 (MM なし,  $\theta = 1\%$ ) には、ダーク・プールのある程度までの利用によって市場は効率化するのに対し、MM の影響が大きい場合 ( $\theta \leq 0.316\%$ ) には、ダーク・プールの利用率が高まるほどに市場は非効率になる可能性が示唆される。次節以降では、 $d$  と  $\theta$  が市場効率性に与える影響を探るため、図 4 から代表的な点 ( $d, \theta$ ) をとりあげ、その詳細を見ていく。

### 3.2 マーケットメーカーの影響

まず、ベースラインとなる結果として、ダーク・プールを使用せず ( $d = 0.0$ )、またマーケットメーカーのスプレッドが十分に大きく ( $\theta = 1\%$ ) 市場への影響が小さい場合の取引価格  $Q^t$  の時系列を図 5 に示す。図中、黒線は取引価格  $Q^t$  を、赤線はベストビッド、青線はベストアスクを、それぞれ表す (以下他の時系列の図についても同様)。図中、取引価格  $Q^t$  はファンダメンタル価格  $P_f = 10000$  の周辺を変動している。他方、図 6 は、ダーク・プール利用率  $d = 0.0$  は同じで、マーケットメーカーのスプレッドを 10 分の 1 ( $\theta = 0.1\%$ ) に変化させたときの価格時系列である。 $\theta = 1\%$  のとき (図 5) に比べ、 $0.1\%$  のとき (図 6) の方が、価格の変動幅が狭くなっている。実際、他の  $\theta$  の値においても、 $\theta$  が小さくなるほど価格の変動幅は狭くなる傾向が観察される。これはスタライズドトレーダーの注文がマーケットメーカーの注文と約定するため、スプレッドが実質的な価格の変動幅を制限しているためだと考えられる。このことから、マーケットメーカーのスプレッドが小さいほど、価格の変動幅が狭くなる傾向が分かる。

### 3.3 ダーク・プール利用率の影響

次に、マーケットメーカーのスプレッド  $\theta$  の大きさごとに、ダーク・プール利用率を変化させた場合の影響を調べる。図 7 は、図 6 ( $d = 0.0, \theta = 0.1\%$ ) の一部を縦方向に (価格の範囲を) 拡大したものである。他方、図 8 は、 $d = 0.9, \theta = 0.1\%$  のときの価格時系列である。これらと比較すると、ダーク・プール利用率が高くなると、取引価格のファンダメンタル価格からの乖離の最大値が大きくなる傾向や、長期間的な乖離が起きやすくなる傾向がみられる。このことから、ダーク・プール利用率が大きくなると、取引価格のファンダメンタル価格からの乖離は上記の 2 つの点で大きくなる傾向が見られた。

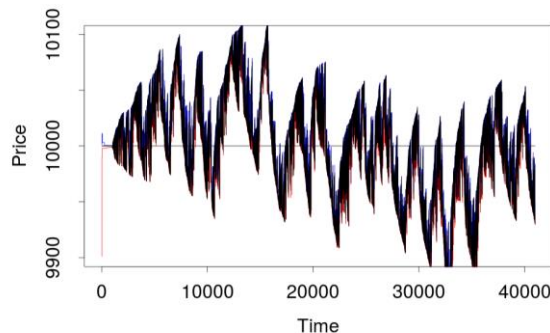


図 5  $d = 0.0, \theta = 1\%$  のときの価格時系列

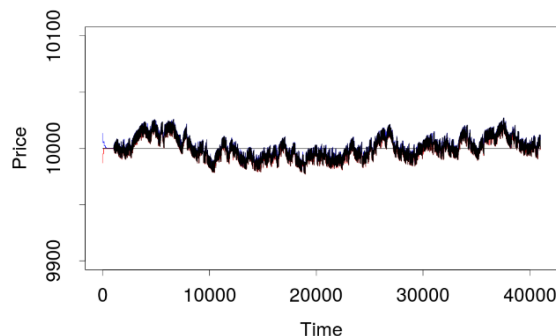


図 6  $d = 0.0, \theta = 0.1\%$  のときの価格時系列

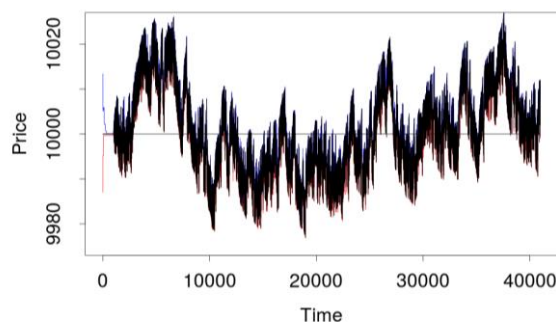


図 7 図 6 ( $d = 0.0, \theta = 0.1\%$  のときの価格時系列) を縦軸 (価格) 方向に拡大したもの

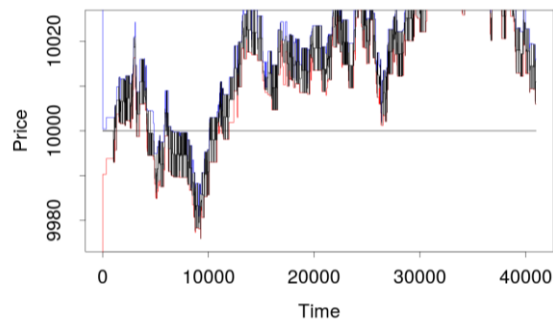


図 8  $d = 0.9, \theta = 0.1\%$  のときの価格時系列

## 4. 議論

本論文の結果では、マーケットメーカー (MM) の影響が小さい場合、ダーク・プール利用率が大きくなると、あるところまでは市場非効率性は減少し、それ以降は逆に増加して、全体としてグラフは下に凸の形状を示した。また、マーケットメーカーの影響が大きい場合、ダーク・プール利用率が大きくなるほど、市場非効率性のグラフが右肩上がりとなることが観察された。本節では、これらの代表的な結果について、そのメカニズムを考察する。

水田ら [5] は、ダーク・プールが市場を効率化するメカニズムについて、仲値を用いた取引価格によってビッド・アスク・バウンスが低減されるためであると論じている。しかし、このメカニズムが成立するには、ベストビッドとベストアスクの間にファンダメンタル価格が挟まれていることが前提となる。そのため、ファンダメンタル価格がベストビッドとベストアスクの間にある場合 (両側状態, 以下で定義) と、ファンダメンタル価格がベストビッドとベストアスクの外にある場合 (片側状態, 以下で定義) を区別する必要がある。本論文では、両側状態と片側状態の区別を導入し、水田によるメカニズムの記述をより詳細に分析し論じるとともに、マーケットメーカーの介入により生じる効果を論じる。より具体的には、以降では、以下に述べる市場の効率性に関する 3 つの効果の重ね合わせによって、図 4 に見られる、下に凸の形状および、単調増加の形状を説明する。

### 4.1 マーケットメーカーの影響が小さい場合

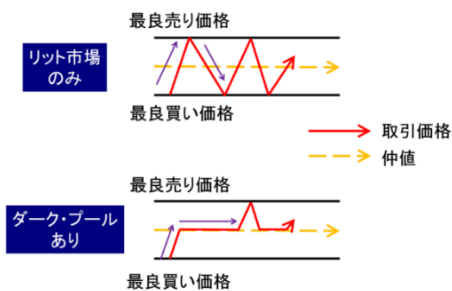


図 9 ビッド・アスク・バウンスの低減が市場を効率的にする様子 (水田ら [5] からの引用)

水田ら [5] は、ダーク・プールの利用率が高まると、図 9 のようにビッド・アスク・バウンスの低減が市場を効率的にする主張している。ここで、ビッド・

アスク・バウンスとは、取引価格がベストアスクとベストビッドの間を何度も頻繁に往復する現象のことを言う。

しかし、この主張が成り立つのは、ベストビッドとベストアスクの間にファンダメンタル価格が挟まれているときのみである。図 10 では、価格時系列を市場価格同士的位置関係によって 2 つの状態に分類した様子を模式的に表している。図中、黄色はファンダメンタル価格  $P_f$ 、青色はベストアスク、赤色はベストビッド、緑色は仲値、黒色は取引価格  $Q^t$  を表す。左側の図では、ベストビッドとベストアスクの間にファンダメンタル価格が挟まれており、本研究ではこのような状態を両側状態と呼ぶ。他方、右側の価格時系列では、ベストビッドとベストアスクの外側にファンダメンタル価格があり、本研究ではこのような状態を片側状態と呼ぶ。

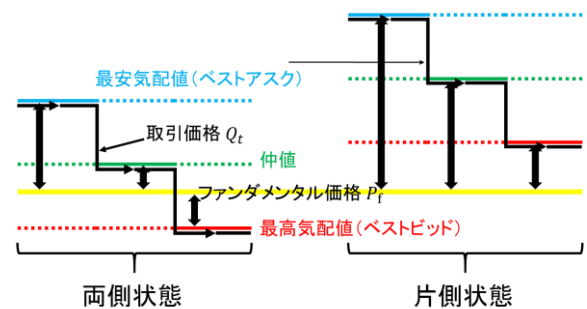


図 10 両側状態と片側状態

図 10 において、両側状態では、ベストアスクとベストビッドそれぞれのファンダメンタル価格からの乖離の平均に比べ、仲値のファンダメンタル価格からの乖離は小さい。よって、両側状態では、ダーク・プール利用率が大きくなるほど取引価格のファンダメンタル価格からの乖離が小さくなり、市場は効率的になる。これは、水田ら [5] の主張が成り立つ場合である。一方で、片側状態ではベストアスクとベストビッドそれぞれのファンダメンタル価格からの乖離の平均は、仲値のファンダメンタル価格からの乖離と一致する。すなわち、片側状態では、ダーク・プール利用率が大きくなり、ビッド・アスク・バウンスが低減しても市場を効率的にする効果を持たない。このため、片側状態では水田ら [5] の主張は成り立たない。

次に、ダーク・プール利用率の増大が市場を非効率にする効果ももたらすことを述べる。ダーク・プール利用率が大きくなると、リット市場で取引が行われる頻度が小さくなり、リット市場の板に貯まる注文の数が減る。その結果、数回の注文でベストア

スクやベストビッドが大きく変動することが起きやすくなる。すると、取引価格のファンダメンタル価格からの乖離が大きくなり、市場は非効率になる。

以上から、MMなしの場合、ダーク・プール利用率の増大に伴って、上に述べたような相反する2つの効果、すなわち、市場を効率的にする効果と非効率にする効果がもたらされると考えられる。これらの効果が拮抗することで、図4のMMなしのグラフにおいて、下に凸の形状が現れたと考えられる。

## 4.2 マーケットメーカーの影響が大きい場合

マーケットメーカー (MM) の影響が大きい場合には、4.1 節で述べたような MM の影響が小さい場合にもたらされる効果に加えて、MM による市場を非効率にする効果が加わると考えられる。MM は、常に高頻度で仲値の上下一定の幅のところに注文を出す。これによって MM の影響が大きい場合には仲値の上下に壁ができてしまうような状態となり、図6のように価格の変動幅が制限される。それと同時に、一旦ファンダメンタル価格から乖離してしまうと、MM による壁によってファンダメンタル価格への回帰が妨げられる。この回帰を妨げる効果は、ダーク・プール利用率が高まり、取引価格がファンダメンタル価格から大きく乖離しやすいほど生じやすい。そのため、図8 ( $d = 0.9$ ) の  $t = 15000$  から  $t = 40000$  のように、片側状態が持続する期間が現れ、市場が非効率になると考えられる。

MM がいる場合には、MM なしの場合にもたらされる2つの効果に加えて、今述べたようなダーク・プール利用率の増大に伴って市場が非効率になる効果が生じると考えられる。そのため、全ての効果の重ね合わせとして見たときに市場を非効率にする効果の方が大きくなり、図4の  $\theta = 0.316\%$ ,  $0.1\%$  のグラフにおいて、右肩上がりの形状が現れたと考えられる。

## 4.3 先行研究の知見との比較

最後に、本研究の MM なしの場合と水田ら[5]との結果の相違点について、その原因を考察する。3 節で述べたように、本研究では水田ら[5]に比べてテクニカル分析の成分の重み  $w_{c,j}$  の最大値が小さくなっている。そのため、相対的にノイズ成分の割合が大きくなっている。これによって、上述した、数回の注文でベストアスクやベストビッドが大きく変動する現象がより起きやすくなると思われる。そのた

め、ダーク・プール利用率の増大に伴い、市場を非効率にする効果の方が支配的になり、ダーク・プール利用率  $d$  が 0.5 以上では市場非効率性  $M_{ie}$  は増加したと考えられる。一方、水田ら[5]では逆に、ノイズ成分が相対的に小さいため、両側状態の期間が長くなり、市場を効率的にする効果が支配的となって市場非効率性のグラフは単調減少したものと考えられる。

## 5. 今後の課題

本研究では、両側状態と片側状態の区別を導入することによって、マーケットメーカーとダーク・プールの相互作用が市場の効率性に与える影響を分析し、そのメカニズムを論じた。しかし、両側状態と片側状態の成立に影響する要因は今回明らかにできていない。今後、それらの要因を明らかにしていく必要がある。また、本研究では、マーケットメーカーが資産運用を考慮せず注文の意思決定を行うようなモデルとなっており、この点において現実的でない。そのため、今後草田ら[4]によるマーケットメーカー戦略を参考にモデルを拡張していく予定である。これらの改善によって、市場の制度設計やトレーダーの投資計画に貢献できるであろう。

## 参考文献

- [1] マイケル・ルイス 著、渡会圭子、東江一紀 訳：フラッシュ・ボーイズ、文藝春秋、(2014)
- [2] スコット・パターソン 著、永野直美 訳：ウォール街のアルゴリズム戦争、日経 BP 社、(2015)
- [3] 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)
- [4] 草田裕紀、水田孝信、早川聡、和泉潔：保有資産を考慮したマーケットメイク戦略が取引所間競争に与える影響、人工知能学会論文誌、Vol. 30, No. 5, pp. 675-682, (2015)
- [5] 水田孝信、小杉信太郎、楠本拓矢、松本渉、和泉潔：ダーク・プールが市場効率性と価格発見メカニズムに与える影響、第 14 回金融情報学研究会予稿集、SIG-FIN-014-02, (2015)
- [6] Chiarella, C. and Iori, G.: A Simulation Analysis of the Microstructure of Double Auction Markets, Quantitative Finance, Vol.2, pp.346-353, (2002)
- [7] Torii, T., Kamada, T., Izumi, K., Yamada, K.: Platform Design for Large-Scale Artificial Market Simulation and Preliminary Evaluation on the K computer, Proceedings of The 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 21st 2016), OS10-2, pp.1-6, (2016)