



マルチエージェント人工市場におけるマーケットメイカーの役割：文献サーベイ

岩壺, 健太郎
喩, 啓楠

(Citation)

国民経済雑誌, 226(5):1-15

(Issue Date)

2022-11-10

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100477603>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477603>



国民経済雑誌

マルチエージェント人工市場における
マーケットメイカーの役割：
文献サーベイ

岩 壺 健 太 郎
喩 啓 楠

国民経済雑誌 第226巻 第5号 抜刷
2022年11月

神戸大学経済経営学会

マルチエージェント人工市場における マーケットメイカーの役割： 文献サーベイ

岩 壺 健 太 郎^a
喩 啓 楠^b

現実の市場では施行されていない政策や制度変更など実証分析ができない問題には、多くのトレーダーが取引する人工市場をコンピュータ上に創設し、シミュレーションによって政策効果を検証することが有効である。本稿では、マルチエージェント人工市場におけるマーケットメイカーの役割に関するサーベイを行う。マーケットストラクチャーの研究ではマーケットメイカーの理論研究が盛んに行われているが、取引データからはトレーダーとマーケットメイカーの行動が流動性や価格変動に与える影響を識別できないことがある。トレーダーやマーケットメイカーの行動モデルを現実に近いものにするのは困難を伴うが、人工市場から得られる含意は政策立案に大きな貢献をもたらすことが期待される。

キーワード マルチエージェント，流動性，マーケットメイカー

1 は じ め に

マーケットメイカーは情報を株価に反映させるという重要な役割を担っている。プライベートな情報源から情報を得たり、トレーダーが出した注文を分析したりすることで、その情報を反映した適切な価格を設定する。マーケットメイカーはビッド・アスク・スプレッドから利益を得るとともに、取引所から補助金や優遇策を受けている（Garman, 1976; Amihud and Mendelson, 1980）。取引所がマーケットメイカーを優遇しているのは、注文の提供を通じた継続的な流動性の確保を期待しているからである。ただし、マーケットメイカーは取引が多く、在庫保有コストに直面している（Ho and Stoll, 1981, 1983; O'hara and Oldfield, 1986）。

a 神戸大学大学院経済学研究科，iwatsubo@econ.kobe-u.ac.jp

b 神戸大学大学院経済学研究科，191e146e@stu.kobe-u.ac.jp

また、情報トレーダーとの間の情報の非対称性により彼らとの取引において、マーケットメイカーは損失を被る可能性が高い (Bagehot, 1971; Copeland and Galai, 1983; Glosten and Milgrom, 1985; Easley and O'hara, 1987)。事実、1994年から2004年の間に、NYSE のマーケットメイカーは約10%の営業日で損失を出していることが報告されている (Comerton-Forde et al., 2010)。NYSE では1証券あたり平均10社、一部の活発な取引が行われている証券では40社以上のマーケットメイカーが存在しており、同業者との競争にさらされていることも利益の確保を困難にしている (Madhavan and Smidt, 1993; Ganesh et al., 2019)。

多くの研究は便宜上、マーケットメイカーを単なる流動性供給装置と仮定しているが、損失に直面するとマーケットメイカーの注文提供意欲は低下し、それはビッド・アスク・スプレッドの拡大という形で気配値に表れる。この仕組みをよく理解するためのマイクロストラクチャー理論が数多く提案された。しかし、マーケットメイカーの流動性供給能力がどの程度低下するのか、そして、マーケットメイカーの反応はどれほどなのかについては、実証研究では識別し難いところがある。

この問題に対して、マルチエージェント・モデルを使った市場シミュレーションが注目を集めている。市場シミュレーションの研究では、当初、スタイライズド・ファクトをモデル化し、その存在感を示した (Kaldor, 1961; Mandelbrot, 1963; Gopikrishnan et al., 1998; Gopikrishnan et al., 1999; Pagan, 1996; Cont et al., 1997)。ファットテイル、ボラティリティのクラスタリングなどの市場特徴を満たしつつ、モデルを洗練化し、シミュレーションの過程を完全に観察できるのがこの手法の強みである。さらに、マルチエージェント・シミュレーションが誕生した。そのなかで、Chiarella and Iori (2002) は初めて異質なエージェントを導入し、オークション市場のシミュレーションを可能にしたことから、画期的なものと思われ、それ以降、市場制度を分析する研究が続々と発表されている (Chiarella et al., 2009; Mizuta et al., 2013; Mizuta et al., 2015a; Wang et al., 2013; Yagi et al., 2019)。これらの研究は、市場設計において大きな貢献を果たしたが、未だにマーケットメイカーを流動性供給装置のように設定しており、一部の研究は在庫を考慮しているとはいえ、そのマーケットメイカーの行動設定は改善が望まれる。先に述べたように、マーケット・マイクロストラクチャーの理論研究はマーケットメイカーの行動様式を明らかにしているため、この2つの組み合わせは価値のある分野である。筆者の知る限り、マーケットメイカーの行動と流動性の関係を分析した人工市場の研究はなく、情報トレーダーについても考慮されていないのが現状である。本稿では、マイクロストラクチャーにおいてマーケットメイカーが果たす役割と、マルチエージェント・シミュレーション研究の展開とその成果の一端を紹介する。

2 マイクロストラクチャー研究のなかのマーケットメイカー

初期のマーケットメイカー関連のマイクロストラクチャー理論は、研究方法によって2つに大別される。1つは在庫コスト、2つ目は情報の不均衡から生じる逆選択コストに着目している。

2.1 在庫コスト

2.1.1 初期の在庫コスト研究

在庫コストの概念を最初に導入したのは、Demsetz (1968) の研究である。売り注文と買い注文の発生はランダムであり、取引注文の不確実性から、タイミングや注文数について需給双方が合意することは困難である。そこで、調達できる資金の範囲内で需給のアンバランスを吸収するマーケットメイカーの役割が重要になってくる。マーケットメイカーは積み上がった在庫によって在庫コストが生じる一方、ビッド・アスク・スプレッドを報酬として受け取る。Garman (1976) は注文の発生をポアソン過程で表現し、精緻なモデルを作成した。彼の研究では、マーケットメイカーが初期資本と有価証券を持ち、取引中に現金と有価証券を借りることはできず、在庫切れは破産につながることで、そしてマーケットメイカーは破産を回避しながら期待収益の最大化を求める。その結果、マーケットメイカーは必ず現金資産を最大化することを目指すことを示した。Garman (1976) のモデルは Demsetz (1968) のアイデアから派生しているが、最も重要な保有コストを考慮していないものであった。Amihud and Mendelson (1980) の研究は注文気配に在庫ポジションを関連付けることによって、この欠点を改善した。興味深いのは、注文気配は現在のポジションに依存するだけでなく、マーケットメイカーの抱えるポジションの保有時間にも関連していることである。Amihud and Mendelson (1980) は最適な注文気配は在庫ポジションの単調減少関数であり、在庫ポジションが増加すると買い気配数と売り気配数が低下すると結論づけた。さらに、選好ポジションから乖離するとマーケットメイカーは選好ポジションに戻るよう注文気配を調整する。

この3つの研究はマーケットメイカーの提示スプレッドを在庫で説明しようとしたが、欠点も指摘されている。まず、Garman (1976) は、マーケットメイカーがリスク中立的な独占企業であると仮定しているため、スプレッドはマーケットメイカーの「市場支配力」を反映している。しかし、競争に直面すると、スプレッドはゼロに戻る (Amihud and Mendelson, 1980)。また、Amihud and Mendelson (1980) は、選好ポジションを決定するのは、資産のファンダメンタルズではなく、注文の発生の確率的过程である、そのため、株価の変動に関係なくマーケットメイカーは同じ選好ポジションを保持すると論じている。早期の研究

は非現実的な仮定を多く含んでいたが、その後、融資制限や資本コストの研究の基盤となった。流動性供給能力は時間を通じて移り変わるものであり、マーケットメイカーが十分な資本を利用できるのであれば、社会的に最適な流動性を供給することになる (Gromb and Vayanos, 2002; Weill, 2007)。マーケットメイカーは94%以上の時間でネットロングしており (Comerton-Forde et al., 2010)、株式市場が下落するとマーケットメイカー全体の資本も減少し、流動性が大きく低下することが報告されている (Chordia et al., 2001; Chordia et al., 2005; Hameed et al., 2010)。

2.1.2 リスク選好度による解釈

Ho and Stoll (1978) は在庫コストについて別の解釈をしている。彼らの研究では、市場間のスプレッドの違いは、マーケットメイカーのリスク選好度から生じると説明した。マーケットメイカーはリスク回避的で、在庫によって価格変動リスクと機会コストが発生すると仮定した。2期間モデルである Ho and Stoll (1978) を Ho and Stoll (1981) は多期間に拡張した。前者は情報の非対称性を考慮したが、後者の多期間モデルはこの点を省いている。O'hara and Oldfield (1986) は初めて指値注文を導入し、リスク選好度の異なるマーケットメイカーのスプレッド戦略を分析し、その結果もマーケットメイカーがリスク回避的であればスプレッドは在庫に依存すると指摘している。

2.1.3 実証的な評価

Comerton-Forde et al. (2010) までは、在庫モデルで提唱した結論をデータを用いて立証した研究は少なかった。Hasbrouck (1991) は短期的な証券価格の変化は在庫モデルで説明できるが、長期的には価格は他の情報により影響されることを見出している。Madhavan and Smidt (1993) はマーケットメイカーが短期的には在庫選好を持つが、長期的には、この選好ポジションから逸脱することを示した。一方、Hasbrouck and Sofianos (1993) はマーケットメイカーの利益のほとんどは高頻度な短期取引によるものであることを示した。しかし、最近の実験研究は、在庫モデルを肯定している (Comerton-Forde et al., 2010; Paddrik and Tompaidis, 2019)。1994年～2004年の NYSE データを用いて、Comerton-Forde et al. (2010) は在庫と収益が流動性に及ぼす影響が非線形であることを明らかにした。在庫が最も多いときや収益が最も少ないときに影響が最も大きく、ボラティリティの高い銘柄はより影響を受けやすい。この結果は、株式リターンやボラティリティを制御した後でも成立する。Paddrik and Tompaidis (2019) は、2010年から2016年の CDS 市場におけるビッド・アスク・スプレッドと複数のマーケットメイカーの在庫の関係を検証している。サンプル前期は、ビッド・アスク・スプレッドはマーケットメイカーの在庫に直接関係していたが、2009年の金融

危機後に実施された規制改革により在庫保有コストが上昇し、それに伴いビッド・アスク・スプレッドが上昇、さらにマーケットメイカー間取引コストも上昇し、ビッド・アスク・スプレッドは徐々に単一のマーケットメイカーの在庫に依存するようになった。

以上の研究はいずれも、在庫の変動がマーケットメイカーの行動研究において考慮すべき必要な要素であり続けることを指摘している。

2.2 情報コスト

一般に、情報モデルを検討した最初の論文は Bagehot (1971) であると言われている。彼は最初に、在庫コストではなく、情報の非対称性による逆選択という概念でビッド・アスク・スプレッドを説明しようとした。Bagehot (1971) は、情報トレーダーと非情報トレーダーという基本的な概念を導入した。彼は、情報トレーダーはマーケットメイカーよりも多くの情報を持っており、証券が過小評価されていると知れば買い、過大評価されていると知れば売る。さらに、マーケットメイカーと違って注文を提示する義務がなく、注文を出さないという選択肢もあるので、マーケットメイカーと取引すれば必ず利益が得られると論じている。倒産を回避するためには、マーケットメイカーはこの損失を非情報トレーダーとの取引による利益で相殺しなければならない。この利益はマーケットメイカーの提示したスプレッドから発生する。Bagehot (1971) が提示した見解は、マーケットメイカーの性質を解明する斬新な考え方であった。その後、Copeland and Galai (1983) はモデルに逆選択コストを導入した。取引コストや在庫コストがない場合でも、情報の非対称性に起因する逆選択コストはビッド・アスク・スプレッドを生み出すのに十分であると主張した。しかし、マーケットメイカーの行動は単に損失を利益で相殺するというもので、モデルは1回の取引だけ考えている。Glosten and Milgrom (1985) は動学的なモデルに改良したが、マーケットメイカーの利益拡大をもたらす戦略は考慮されていない。

情報モデルでは、マーケットメイカーの価格決定をオーダーフローと注文規模に影響され则认为られている。Glosten and Milgrom (1985) は、主にオーダーフローを考察している。均衡状態において、ビッド（アスク）価格は、マーケットメイカーが売り（買い）注文を受けた時点の証券の価値に関する条件付き期待値であるため、トレーダーの買い注文は、マーケットメイカーにビッド価格とアスク価格を上方修正するよう促す。この調整過程はベイズ学習過程とみなされている。マーケットメイカーが売り注文を受ける場合、その発注元は2つ考えられる。1つは流動性ニーズによって非情報トレーダーが出した注文で、もう1つは悪いニュースを知っている情報トレーダーが出した注文である。マーケットメイカーはこの2つの状況を区別することは出来ないが、既に発生した取引から取引相手が情報トレーダーである確率を算出し、それによってファンダメンタルズへの認識を更新し、気配値を調整す

る。このモデルは、マーケットメイカーの気配値の調整プロセスと考えることができるが、注文規模が固定され、トレーダーが一度に売買できるのは1単位の資産だけという制約が伴っている。

Easley and O'hara (1987) は注文規模について検討した。マーケットメイカーの気配値は注文の大きさに依存し、一回の取引で直面する注文量が多いほど悪い価格で取引される傾向があると結論づけた。

その後、在庫と情報の2つの要因を同時に考慮した理論研究も現れている (Madhavan and Smidt, 1993; Chan and Shelton, 2001; Liu and Wang, 2016)。そこでは、逆選択の原因として、在庫の説明力が情報に比べて弱いことが明らかになっている (Madhavan and Smidt, 1991)。また、ティックサイズが減少する傾向にある場合でも、スプレッドを説明するにはこの2つの要因が影響していることを示す実証研究もある (Gibson et al., 2003)。最近の研究として、高頻度取引下での情報価値や (Menkveld and Zoican, 2017)、複数のマーケットメイカー間の競争に関するものがある (Ganesh et al., 2019)。

3 マルチエージェント・モデル

エージェントを用いた市場のシミュレーションは比較的新しい分野であり、かつては経済物理学と呼ばれていた。この新しい学際領域は、富の分配 (マクロ経済学)、オーダーフローモデル (金融市場のマイクロストラクチャー)、金融バブルと崩壊の経済学など、様々な方向で発展している。市場設計の参考になるような研究が登場したのは、ここ10年ほどのことである。LeBaron (2006a, 2006b) と Chen et al. (2012) には、初期の研究の非常に重要なサーベイが掲載されている。先に紹介した Garman (1976) の研究もエージェントを扱っているが、そのモデルは現代の分野とは大きく異なっている。近年の研究をマルチエージェント・モデル (論文によっては人工市場とも呼ぶ) と呼ぶならば、Chiarella and Iori (2002) はそのモデルの出発点となる研究であろう。簡単に言えば、マルチエージェント・シミュレーションは、エージェントと呼ばれる異質な仮定の個体 (投資家、ディーラー、取引所、マーケットメイカー) が関わる市場シミュレーションである。このシミュレーションが他のシミュレーションと最も異なる点は、投資家の気配値を分布のある統計的なグループとして扱うのではなく、各エージェントに異なる行動ルールが与えられ、独自の価格決定方式を持っていることである。市場に何らかの制約 (例えば空売り制限) を与えることで、投資家がどのように行動し、その行動が市場にどのような影響を与えるかを観察することができる。この特性により、マルチエージェント・シミュレーションは、収集できないデータや導入コストが高すぎるシステムなど、実証研究では分析が困難な制度的課題の探求を可能にしている。

3.1 オーダーブックモデル（注文板モデル）

Stigler (1964) と Garman (1976) の 2 つの有名な研究は、投資家の心理・社会学に基づいたファイナンシャル・モデリングを改良した研究である。LeBaron (2006b) は、この種のモデルが、いくつかの「定型化された事実」の再現において柔軟性を提供し、分析目的を達成する一方で、多くの欠点を持っていると主張した。まず、構造が非常に複雑で、多数のパラメータの役割や依存関係の種類を決定するのが非常に困難な作業になることが挙げられる。次に、選択された効用関数は、必ずしも金融市場メカニズムで観察されるものを反映していないことが問題である。より単純なモデルやよりシンプルな行動のみを実装することで、モデリングに適度なバリエーションを持たせることができる。この 2 つの欠点を回避した研究は Chiarella and Iori (2002) であり、それゆえ最も有名な研究となっている。

Harris (2003) は投資家の行動をファンダメンタルズ取引、テクニカル取引、またはその 2 つの組み合わせに分類した。Lux and Marchesi (2000) は、これらのタイプの投資家が相互に作用するエージェント・ベースのモデルを提案しているが、取引は成行取引に限定されている。その後、Chiarella and Iori (2002) は指値注文を導入することで、この一連のモデルを改善した。

$$\hat{p}_{t+\tau}^i = \frac{1}{g_1^i + g_2^i + n^i} \left[g_1^i \frac{1}{\tau} \ln(p_t^f / p_t) + g_2^i \bar{r}_t^i + n^i \varepsilon_t^i \right] \quad (1)$$

Chiarella and Iori (2002) が提案したモデルでは、あらゆるエージェントの任意の時点における将来の期待リターンを算出可能である。そのうち、 g_1 、 g_2 、 n はファンダメンタルズ取引、テクニカル取引、ノイズ取引に係るウエイトを表現するパラメータである。エージェント i はランダムなウエイトを持ち、ファンダメンタルズ戦略はファンダメンタルズ価格 p^f 、テクニカル戦略は過去収益率 $\bar{r}$ を参考にする。また、参考期間と将来の予測期間の長さ（いずれも τ ）は各エージェントによって異なる。(1) 式の設定では、投資家は複合戦略を所有している。この設定は現実的ではあるが、情報トレーダーの分析ができないという欠点は避けられない。

このモデルでは、期待リターンから期待価格を求め、期待価格をランダムに分散させて気配値を作る（買い気配と売り気配）、指値注文の気配値があれば取引のシミュレーションを簡単に行える。Chiarella et al. (2009) はこのモデルをさらに改良し、ファットテイルとボラティリティ・クラスタリングという 2 つの「定型化された事実」を再現できるようにした。Chiarella et al. (2009) のモデルは現在でも広く使われている。ファットテイルに関する先行研究は数多く存在する (Zovko and Farmer, 2002; Bouchaud et al., 2002; Potters and Bouchaud, 2003)。なお、Chiarella et al. (2009) の特徴は、ラーニングの実装を行わずに「定型化された事実」を再現できることである。

3.2 人工市場デザイン：定型化された事実と学習

市場のシミュレーションモデルの妥当性を検証するには、代表的な「定型化された事実」を再現しているのかをテストするのが有効である。Kaldor (1961) はマクロ経済学に「定型化された事実」という概念を導入した。この概念は金融時系列の統計的研究から浮かび上がった、期間、場所、市場、資産などを超えて持続すると思われる経験的事実を説明するために使用される。現在最も広く用いられているのは、リターンの分布のファットテイルとボラティリティ・クラスタリング、次いでリターンの自己相関の減衰と集計上の正規性 (Aggregational normality) である。

3.2.1 リターンの分布のファットテイル

リターンの分布がファットテイルであることは、1番目の「定型化された事実」である (Mandelbrot, 1963; Gopikrishnan et al., 1999)。最も広く認識されているが、すべての金融モデルで満たされるわけではない (Gopikrishna et al., 1998)。

3.2.2 リターンのゼロ自己相関

リターンの自己相関関数は非常に急速にゼロに減衰し、連続したリターン間の相関がゼロになるというのが2番目の「定型化された事実」である (Pagan, 1996; Cont et al., 1997)。

3.2.3 ボラティリティ・クラスタリング

ボラティリティ・クラスタリングとは、価格の大きな変化の後に大きな変化が続き、小さな変化の後は小さな変化が続く傾向があることを指す (Cizeau et al., 1997; Cont et al., 1997, Liu et al., 1997)。リターンの間に相関はないが、価格は同一分布ではないので、リターンは同じ分布を持つとは限らない。なお、絶対リターンや二乗リターンは、長期間でゆっくりと減衰する自己相関関数を示す。

3.2.4 集計上の正規性

リターンを計算する時間間隔を長くすると、ファットテイルの性質が弱まり、分布がガウス型に近づくことが観察されており、これは4番目の「定型化された事実」である。

3.2.5 エージェントの学習プロセスとバブル

Chen et al. (2012) は人工市場モデルの技術開発を総括し、「できるだけシンプルなモデルでファットテイルやボラティリティ・クラスタリングを再現することが重要である」と主張した。一方、多くの複雑なモデルを批判し、学習プロセスの必要性を問い直した。学習プロ

セスとはエージェントが市場価格の変更の影響を受け、各パラメータを更新して戦略の切り替えや戦略内部を調整することである。しかし、これまでの研究では、学習を追加しても新たに説明可能となる「定型化された事実」がないことが学習を導入する動機を低下させていた。学習が実装されている人工市場モデルは多いが (LeBaron, 2006a; Chen et al., 2012), 人工市場モデルに学習が必要なのかは未だに定説が存在しない。学習については主に 2 つのベースモデルがある。サンタフェ・モデルは学習を実装しバブルを再現した (Arthur et. al., 1997)。和泉のモデルはバブル時におこる取引量に関する研究をした (Izumi and Okatsu, 1996; Izumi and Ueda, 1999)。

バブル時期の戦略選択に関しては、すでに実証研究で明らかになっていることがある。バブル時期は、投資家がテクニカル戦略に自信を深め、テクニカル戦略に傾斜する (Hirota and Sunder, 2007)。市場価格がファンダメンタル価値から乖離すればするほど、テクニカル戦略を採用する投資家が増える。故に学習プロセスを実装した人工市場モデルはバブルをよりリアルに再現できる。しかし、複雑なモデルでは新しく定型化された事実を再現することが難しくなるという欠点がある。

3.3 人工市場デザイン：エージェントの交代

エージェントはどのように交代するのか。これは結果に大きな影響を与える可能性がある。Axtel (2000) の研究では 2 つの活性化レジームを考えた。第 1 のレジームでは、エージェントは每期 1 回行動する。第 2 のレジームでは、エージェントは特定の期間にランダムに行動する。エージェントに番号をつけ、単位時間で一人のエージェントが行動する。以下で紹介する論文はすべて第 2 のレジームを採用している。

3.4 最近の研究の方向性

比較的新しい研究分野として、特定の市場現象の再現や制度の評価に焦点が当てられている。これらの制度評価研究の中には、取引場に導入され、研究成果をあげているものもある。

3.4.1 もっと現実的な市場

いくつかの研究では、エージェントの行動ルールや価格の決定方法をより現実的な設定に調整している (Chiarella and Iori, 2002; Chiarella et al., 2009; Zovko and Farmer, 2002; Bouchaud et al., 2002; Potters and Bouchaud, 2003)。オークション市場における人工市場モデルの研究の大半は、Chiarella et al. (2009) を基本モデルとしている。Mizuta et al. (2013) では、Chiarella et al. (2009) のモデルで再現されていなかった注文の成約率、注文のキャンセル率といった高頻度取引にかかわる統計量も再現した。Mizuta et al. (2013) に基づいて、

マーケット・マイクロストラクチャーの側面から政策効果を議論する研究は多い。基本モデルを簡単に説明する。

価格決定は上で紹介した Chiarella et al. (2009) のモデルと非常に似ている。エージェント i の時刻 t の期待収益は：

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

$$r_{h,i}^t = \log(P^t / P^{t-\tau_i})$$

そのうち w_1 , w_2 , w_3 はファンダメンタルズ取引、テクニカル取引、ノイズ取引が投資家戦略のウェイトを表現するパラメータ。エージェント i はランダムなウェイトを持ち、ファンダメンタルズ戦略はファンダメンタルズ価格 P_f 、テクニカル戦略は過去収益率 r_h を参考し、各エージェントは異なる参考期間 τ_i と独自のノイズ成分 ε_i^t を持つ。上記のパラメータはすべて初期で決まる。 w_1 と w_3 は 0~1, w_2 は 0~10 の一様分布から取る。 τ_i は 0~10,000 から取る（1つの取引日は20,000単位時間を含むと仮定する）。 ε_i^t は平均 0, 分散 0.03 の正規分布に従う。期待リターンから期待価格を計算する。

$$P_{e,i}^t = P^t \exp(r_{e,i}^t) \quad (3)$$

次に、予想価格の上下10%の範囲内で一様分布の乱数を取り、気配値を計算する。気配値が予想値より低い場合は1単位の売り注文、気配値が予想値より高い場合は1単位の買い注文となる。オーダーブックと注文をマッチングし、マッチングが成功した場合、即座に取引を行い、価格を更新する。マッチングできなかった注文はオーダーブックに入る。

このモデルは、ファットテイルとボラティリティ・クラスタリングという最も基本的な2つの定型化された事実を満たしており、これに基づいて様々な制度評価を拡張することができる。また、一般性を高めるために、(例えば追加の学習プロセスによって) さらに多くの定型化された事実を満たすようモデルを改良することが可能である。

3.4.2 現実に導入されていない制度や規制の研究

人工市場モデルの強みの一つは、現実の市場がまだ実施していない政策や、導入期間が短いためデータの蓄積が少ない政策をシミュレーションし、分析することができることである。市場間競争が存在する場合、ティックサイズ（呼び値の刻み）の小さい市場は人気で、シェアを獲得しやすいと言われているが、ティックサイズを減少するコストが高く、2014年以前には実施されてこなかったため、実証分析は困難であった。Mizuta et al. (2013) はティックサイズが違う人工市場を作って初めて適正ティックサイズを議論した。

マーケットメイカーが参入する市場では、提示価格のうち、どの価格がマーケットメイカーによって約定したものかを識別できない。草田他 (2014) はシンプル・マーケットメイ

カーのビッド・アスク・スプレッドと取引市場のティックサイズの大きさが取引市場間の出来高シェア競争に与える影響について分析した。シンプル・マーケットメイカーとはポジションの保有コストを考慮していないマーケットメイカーを指す。ポジションを無限に保有する可能性があるシンプル・マーケットメイカーと異なり、ポジションの保有コストを考慮したポジション・マーケットメイカーを提案したのは Nakajima and Shiozawa (2004) である。草田・水田・早川他 (2015) はポジション・マーケットメイカーを実装する環境で取引市場間の出来高シェア競争に与える影響について議論した。ポジション・マーケットメイカーは競争する取引市場のビッド・アスク・スプレッドの平均値より大きな提示スプレッドを出せば出来高シェアを獲得することを発見した。

Wang et al. (2013) はマーケットメイカーの取引頻度による影響を検証した。マーケットメイカーはビッド・アスク・スプレッドとボラティリティの抑制にポジティブな影響があるが、ボラティリティが高い時、マーケットメイカーは市場の急落を引き起こす可能性がある。マーケットメイカーの高い取引頻度は急落・急騰の平均的な規模を小さくするが、ファンダメンタル価格が不安定な場合にはより大きな急落・急騰を引き起こす可能性もある。とりわけ、学習プロセスによっては急落・急騰が起りやすく、より現実的な高頻度取引市場を開発し、マーケットメイカーの行動を研究する必要があると著者は主張している。

米国でティックサイズ・パイロットプログラムが実施された以後、Collver (2017) は Mizuta et al. (2013) と異なるティックサイズでの株価の動きをシミュレーションしている。彼らの研究では、異なる行動のマーケットメイカーが設定されているが、利益追求の行動はまだシミュレーションで考慮されていない。

日本の「投資分散ルール」の効果 (Yagi et al., 2017; Nozaki et al., 2017), 価格変更規制, 空売り規定, 値上げルールの影響 (Mizuta et al., 2015a), ダーク・プールの適正な普及率 (Mizuta et al., 2015b), 最短休憩時間, 注文キャンセル費, 取引税の影響 (Leal and Napoletano, 2019) などの制度効果に関する研究がある。

4 将来の研究の方向性

前節の研究で紹介したように、マーケットメイカーを研究する人工市場モデルでは在庫の問題を考慮するようになっている。しかし、これらの研究もマーケットメイカーの損益を考慮していないという欠点がある (Wang et al., 2013; Mizuta et al., 2013; Collver, 2017; Nakajima and Shiozawa, 2004)。

マーケット・マイクロストラクチャーの研究では、マーケットメイカーは理想的な流動性供給装置ではなく、損失に直面するとリターンを最大化するために気配値を変化させることが示されている。しかし、今のところ、マーケットメイカーの行動を決定するために情報の非

対称性を取り入れた研究はない。これらの研究の原型である Chiarella et al. (2009) ではエージェントが複数の戦略を持つことを想定しているが、情報トレーダーと非情報トレーダーの区別をモデルに組み入れていない。

他に、流動性指標は研究目的によって異なり、結論が比べられない研究も多数存在する。Yagi et al. (2019) は流動性に影響を与える要因を幅広く調査している。しかし、彼らが使用するよりも優れた流動性指標があり、マーケットメイクによる流動性の影響を包括的に論じた研究はまだない。

今後、情報非対称性をエージェントに導入することや、マーケットメイカーが利益追求する行動を表すこと、あるいは異なる時期でマーケットメイカーの行動を議論することなど、マイクロストラクチャーの理論と組み合わせた研究が期待される。

参 考 文 献

- Amihud, Y. & H. Mendelson (1980) "Dealership market: Market-making with inventory" *Journal of Financial Economics*, 8, 31-53.
- Arthur, W. B., J. H. Holland, B. LeBaron, R. Palmer & P. Taylor (1997) "Asset pricing under endogenous expectation in an artificial stock market" *The Economy as an Evolving Complex Systems*, 0, 15-44.
- Axtell, R. (2000). "Effects of interaction topology and activation regime in several multi-agent systems" *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, 33-48. Springer.
- Bagehot, W. (1971) "The only game in town" *Financial Analysts Journal*, 27, 12-14.
- Bouchaud, J.-P., M. Mézard & M. Potters (2002) "Statistical properties of stock order books: empirical results and models" *Quantitative Finance*, 2, 251.
- Chan, N. T. & C. Shelton (2001) "An electronic market-maker"
https://www.researchgate.net/publication/37597911_An_Electronic_Market-Maker Reading Date: 2022.01.01
- Chen, S. H., C. L. Chang & Y. R. Du (2012) "Agent-based economic models and econometrics" *Knowledge Engineering Review*, 27, 187-219.
- Chiarella, C. & G. Iori (2002) "A simulation analysis of the microstructure of double auction markets" *Quantitative Finance*, 2, 346.
- Chiarella, C., G. Iori & J. Perelló (2009) "The impact of heterogeneous trading rules on the limit order book and order flows" *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33, 525-537.
- Chordia, T., R. Roll & A. Subrahmanyam (2001) "Market liquidity and trading activity" *Journal of Finance*, 56, 501-530.
- Chordia, T., A. Sarkar & A. Subrahmanyam (2005) "An empirical analysis of stock and bond market liquidity" *Review of Financial Studies*, 18, 85-129.
- Cizeau, P., Y. H. Liu, M. Meyer, C. K. Peng & H. E. Stanley (1997) "Volatility distribution in the S&P 500 stock index" *Physica A*, 245, 441-445.

- Collver, C. (2017) “An application of agent-based modeling to market structure policy: the case of the US Tick Size Pilot Program and market maker profitability”
<https://www.sec.gov/file/application-agent-based-modeling-market-structure-policy-case-us-tick-size-pilot-program-and> Reading Date: 2022.01.01
- Comerton-Forde, C., T. Hendershott, C. M. Jones, P. C. Moulton & M. S. Seasholes (2010) “Time variation in liquidity: The role of market-maker inventories and revenues” *Journal of Finance*, 65, 295–331.
- Cont, R., M. Potters & J.-P. Bouchaud (1997) “Scaling in stock market data: stable laws and beyond” *Scale Invariance and Beyond*, 75–85. Springer.
- Copeland, T. E. & D. Galai (1983) “Information effects on the bid - ask spread” *Journal of Finance*, 38, 1457–1469.
- Demsetz, H. (1968) “The cost of transacting” *The Quarterly Journal of Economics*, 82, 33–53.
- Easley, D. & M. O’hara (1987) “Price, trade size, and information in securities markets” *Journal of Financial Economics*, 19, 69–90.
- Ganesh, S., N. Vadori, M. Xu, H. Zheng, P. Reddy & M. Veloso (2019) “Reinforcement learning for market making in a multi-agent dealer market” *arXiv preprint*: 1911.05892.
- Garman, M. B. (1976) “Market microstructure” *Journal of Financial Economics*, 3(3), 257–275.
- Gibson, S., R. Singh & V. Yerramilli (2003) “The effect of decimalization on the components of the bid-ask spread” *Journal of Financial Intermediation*, 12, 121–148.
- Glosten, L. R. & P. R. Milgrom (1985) “Bid, ask and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders” *Journal of Financial Economics*, 14, 71–100.
- Gopikrishnan, P., M. Meyer, L. N. Amaral & H. E. Stanley (1998) “Inverse cubic law for the distribution of stock price variations” *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 3, 139–140.
- Gopikrishnan, P., V. Plerou, L. A. N. Amaral, M. Meyer & H. E. Stanley (1999) “Scaling of the distribution of fluctuations of financial market indices” *Physical Review E*, 60, 5305.
- Gromb, D. & D. Vayanos (2002) “Equilibrium and welfare in markets with financially constrained arbitrageurs” *Journal of Financial Economics*, 66, 361–407.
- Hameed, A., W. Kang & S. Viswanathan (2010) “Stock market declines and liquidity” *Journal of Finance*, 65, 257–293.
- Harris, L. (2003) *Trading and exchanges: Market microstructure for practitioners*, OUP USA, 2022. Print.
- Hasbrouck, J. (1991) “Measuring the information content of stock trades” *Journal of Finance*, 46, 179–207.
- Hasbrouck, J. & G. Sofianos (1993) “The trades of market makers - An empirical analysis of NYSE specialists” *Journal of Finance*, 48, 1565–1593.
- Hirota, S. & S. Sunder (2007) “Price bubbles sans dividend anchors: Evidence from laboratory stock markets” *Journal of Economic Dynamics & Control*, 31, 1875–1909.
- Ho, T. S. Y. & H. R. Stoll (1978) “The supply of dealer services in securities markets” *Journal of Finance*, 33, 1133–1151

- Ho, T. S. Y. & H. R. Stoll (1981) "Optimal dealer pricing under transactions and return uncertainty" *Journal of Financial Economics*, 9, 47-73.
- Ho, T. S. Y. & H. R. Stoll (1983) "The dynamics of dealer markets under competition" *Journal of Finance*, 38, 1053-1074.
- Izumi, K. & T. Okatsu (1996) "An Artificial Market Analysis of Exchange Rate Dynamics" *Evolutionary Programming*, 27-36.
- Izumi, K. & K. Ueda (1999) "Analysis of exchange rate scenarios using an artificial market approach" *International Conference on Artificial Intelligence, Vol I and II*, 360-366.
- Kaldor, N. (1961) "Capital Accumulation and Economic Growth" In: *Hague, D.C. (eds) The Theory of Capital. International Economic Association Series. Palgrave Macmillan, London.*
- Leal, S. J. & M. Napoletano (2019) "Market stability vs. market resilience: Regulatory policies experiments in an agent-based model with low- and high-frequency trading" *Journal of Economic Behavior & Organization*, 157, 15-41.
- LeBaron, B. (2006a) "Agent-based computational finance" *Handbook of Computational Economics*, 2, 1187-1233.
- LeBaron, B. (2006b) "Agent-based financial markets: Matching stylized facts with style" *Post Walrasian Macroeconomics: Beyond the DSGE Model*, 221-235.
- Liu, H. & Y. J. Wang (2016) Market making with asymmetric information and inventory risk. *Journal of Economic Theory*, 163, 73-109.
- Liu, Y., P. Cizeau, M. Meyer, C. K. Peng & H. E. Stanley (1997) "Correlations in economic time series" *Physica A*, 245, 437-440.
- Lux, T. & M. Marchesi (2000) "Volatility clustering in financial markets: A micro-simulation of interacting agent" *Computation in Economics, Finance and Engineering: Economic Systems*, 7-10.
- Madhavan, A. & S. Smidt (1991) "A Bayesian model of intraday specialist pricing" *Journal of Financial Economics*, 30, 99-134.
- Madhavan, A. & S. Smidt (1993) "An analysis of changes in specialist inventories and quotations" *Journal of Finance*, 48, 1595-1628.
- Mandelbrot, B. (1963) "The variation of certain speculative prices" *Journal of Business*, 36, 394-419.
- Menkveld, A. J. & M. A. Zoican (2017) "Need for speed? Exchange latency and liquidity" *Review of Financial Studies*, 30, 1188-1228.
- Mizuta, T., S. Hayakawa, K. Izumi & S. Yoshimura (2013) "Investigation of relationship between tick size and trading volume of markets using artificial market simulations" *JPX working paper*.
- Mizuta, T., S. Kosugi, T. Kusumoto, W. Matsumoto & K. Izumi (2015a) "Effects of dark pools on financial markets' efficiency and price discovery function: an investigation by multi-agent simulations" *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 12, 375-394.
- Mizuta, T., K. Izumi, I. Yagi & S. Yoshimura (2015b) "Investigation of Price Variation Limits, Short Selling Regulation, and Uptick Rules and Their Optimal Design by Artificial Market Simulations" *Electronics and Communications in Japan*, 98, 13-21.
- Nakajima, Y. & Shiozawa, Y. (2004) "Usefulness and feasibility of market maker in a thin market"

- ICEES (International Conference Experiments in Economic Sciences)*, 47, 2004
- Nozaki, A., T. Mizuta & I. Yagi (2017) “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 Transactions on Information and Systems*, E100D, 2878–2887.
- O'hara, M. & G. S. Oldfield (1986) “The microeconomics of market making” *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 21, 361–376.
- Paddrik, M. E. & S. Tompaidis (2019) “Market-making costs and liquidity: Evidence from CDS markets” *OFR 19-01*, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3351288> Reading Date: 2022.01.01
- Pagan, A. (1996) “The econometrics of financial markets” *Journal of Empirical Finance*, 3, 15–102.
- Potters, M. & J.-P. Bouchaud (2003) “More statistical properties of order books and price impact” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 324, 133–140.
- Stigler, G. J. (1964) A Theory of Oligopoly. *Journal of Political Economy*, 72, 44–61.
- Wang, C., K. Izumi, T. Mizuta & S. Yoshimura (2013) “Investigating the impact of trading frequencies of market makers: a multi-agent simulation approach” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 6, 216–220.
- Weill, P. O. (2007) “Leaning against the wind” *Review of Economic Studies*, 74, 1329–1354.
- Yagi, I., A. Nozaki & T. Mizuta (2017) “Investigation of the rule for investment diversification at the time of a market crash using an artificial market simulation” *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 14, 451–465.
- Yagi, I., Y. Masuda & T. Mizuta (2019) “Detection of factors influencing market liquidity using an agent-based simulation” *Network Theory and Agent-Based Modeling in Economics and Finance*, 111–131. Springer.
- Zovko, I. & J. D. Farmer (2002) “The power of patience: A behavioral regularity in limit order placement” *Quantitative Finance*, 1–6.
- 草田裕紀, 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, 吉村忍 (2014) 「人工市場を用いたマーケットメーカーのスプレッドが市場出来高に与える影響の分析」 *JPX ワーキングペーパー*, vol. 5, 2014.
- 草田裕紀, 水田孝信, 早川聡, 和泉潔 (2015) 「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：人工市場アプローチによる分析」 *人工知能学会論文誌* 30巻 (2015) 5号.