

取引コストの削減を巡る 市場参加者の取組み： アルゴリズム取引と代替市場の活用

すぎはらよしひこ
杉原慶彦

要 旨

金融商品の売買執行に伴う取引コストへの理解が進み、精緻な測定が可能となってきたことで、近年、取引コストを技術的に抑制する実務面での取組みが発展している。本稿では、はじめに取引コストの構成要素等について整理したうえで、その削減手法としてアルゴリズム取引と代替市場がどう活用されているかサーベイする。アルゴリズム取引については、基本的な枠組み、投資家の活用動機、代表的な取引戦略、利用状況などについて整理する。また、近年アルゴリズム取引を活用しつつ発展している高頻度取引等についてもみていく。他方、代替市場については、注文付合せの形態、日米欧市場の特徴、代替市場で企図されている取引コスト削減効果などについてまとめる。こうした実務の取組みの進展は、マーケット・マイクロストラクチャーの変化を通じて価格形成に影響を与えるのほか、市場間競争や取引の仕組みの在り方に関する議論にも発展している。本稿では、最後に、アルゴリズム取引や代替市場を巡るこうした課題についても展望する。

キーワード：取引コスト、市場流動性、アルゴリズム取引、代替市場、執行戦略、高頻度取引、ダークプール

.....

本稿を作成するに当たっては、大崎貞和氏（野村総合研究所）ならびに日本銀行スタッフから有益なコメントをいただいた。ここに記して感謝したい。ただし、本稿に示されている意見は、筆者個人に属し、日本銀行の公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りはすべて筆者個人に属する。本稿は、中立的な立場から各種の取引手法や市場について解説しており、本稿で紹介する手法に基づいた投資判断を推奨するものではない。本稿に記された情報に基づいた投資判断およびその結果に対し、筆者および日本銀行は責任を負わない。

杉原慶彦 日本銀行金融研究所企画役補佐 (E-mail: yoshihiko.sugihara@boj.or.jp)

1. はじめに

金融市場では、市場の市中売買高と比べて大規模な金融商品を市場で一度に売却すると、需給バランスが崩れ価格が実勢以上に下落する。これはマーケット・インパクト（market impact）と呼ばれ金融商品の売買に伴う取引コスト（transaction cost）の1つとして古くから知られている。1990年代には、取引コストの重要性に対する理解が進むとともに徐々に精緻に測定できるようになってきたことで、取引コストを技術的に抑制する実務の取組みが発展している。

そうした取組みの主要なものとして、アルゴリズム取引（algorithmic trading）と代替市場（alternative trading venues; off-exchange venues）の活用が挙げられる。アルゴリズム取引とは、あらかじめ定められたアルゴリズムに従って機械的に売買する金融商品の売買執行形態である。アルゴリズム取引は古くから存在しているが、1990年代後半から2000年代前半にかけて情報技術の進歩とともに取引コスト削減手段の1つとして大きく発展し、その利用が拡大した。それに伴い主要国の株式市場や為替市場で売買の速度が上昇したほか、注文数の増加と小口化が進んできている。わが国においても、2010年初に東京証券取引所（東証）の売買システムが高速化するなどインフラが改良される中、アルゴリズム取引の活用が進んでいる。さらに近年では、高頻度取引（high frequency trading: HFT）や統計的裁定取引（statistical arbitrage）といった取引戦略もアルゴリズム取引を活用しつつ発展するなど、アルゴリズム取引を巡る環境は複雑化している。

他方、2000年代後半には、米欧で伝統的な金融商品取引所（exchanges; 以下、取引所）の立会取引に代わる取引の場として代替市場の活用が拡大している。代替市場は、米国で高速かつ有利な条件で売買できる可能性がある電子取引市場として発展してきたが、近年、欧州でも複数国の主要銘柄を取り扱う利便性の高い市場として成長している。代替市場では、取引所の立会取引にはない注文付合せの形態を取り入れることで、特に大口取引の流動性を集め取引コストを抑制する試みが実現されている。近年米欧では、さまざまな注文付合せの形態が出現するとともにその種類や数が増加しており、代替市場を巡る環境は多様化している。なお、わが国でも代替市場は存在しているが、その規模は米欧と比べると小さい。

本稿では、取引コストの削減を巡るこうした実務の取組みに関する2010年末時点の現状と課題について、先行する米欧の動向を中心に整理する。アルゴリズム取引は、主要国の為替市場と株式市場、およびそれらの派生商品市場を中心に進展してきている。また、代替市場は、米欧の株式市場で広がりを見せている。本稿では、そうした市場のうち、特に米欧の株式市場の動向を中心に整理し、必要に応じて為替市場等の動向も追加的に解説する。筆者が2007年から2010年までに参加した関連イベント等から集めた情報、および実務家向け論文誌に掲載されている先行研究や書籍を参考にしつつ、多様化する近年のアルゴリズム取引や代替市場について、取引コストと市場流動性という切り口から解説する。特に、どのような形態が

あるか、どういった動機で利用されているか、どのように取引コストの削減につながっているか、背後にはどういった戦略やアイデアがあるかといった点に着目している。なお、アルゴリズム取引や代替市場に関連する個別具体的な研究は数多くあるが、それらを横断的に整理した文献は Johnson [2010] などに限られており、まだ少ない。

アルゴリズム取引や代替市場には、多様な分野の学術研究や先端技術が応用されている。そうした研究・技術の分野としては、マーケット・マイクロストラクチャーやオークションの経済学、金融工学の価格付け理論、確率制御理論を応用した最適執行戦略 (optimal execution strategy) 理論、計量経済学を応用した高頻度データの大規模解析、データ/テキスト・マイニングといった人工知能、売買を高速化する情報技術など多岐にわたる。本稿は、そうした理論・技術を応用しつつ発展している実務の現状に関して解説し、その背後にある学術研究については別途、杉原 [2011] にまとめる。学術理論や実証分析に関心がある読者は、同稿と照らし合わせつつ読み進めていただきたい。なお、取引実務とその背後にある学術研究を対比しつつ解説する試みは、本稿および杉原 [2011] 独自のものである。

なお、本稿では、実務の現状を解説した後に、アルゴリズム取引や代替市場を巡る問題点や課題について市場参加者の見方を簡単にまとめている。多様な取引戦略や注文付合せの形態等についてできる限り客観的に紹介するが、それらが市場参加者にとって公平なものであるか、社会厚生の上昇に資するかといった議論に対して、本稿は深く踏み込むものではない。そうした取引が先んじて行われている米英においても、市場慣行や規制の改善に向けて現在も検討が続いている段階にあり、なお流動的な面もある。なお、代替市場の歴史と取引所の競合、規制を巡る議論については、大崎 [2009a, b] などに詳しい。

本稿の構成は以下のとおりである。2節では、取引コストを構成する個々の要素を整理するとともに、その削減の重要性について解説する。3節では最良執行と最適執行戦略について解説した後、機関投資家が利用する大口取引向けアルゴリズム取引の戦略等について整理する。また、その他のアルゴリズム取引として、高頻度取引、統計的裁定取引などについてもみていく。次に4節では、多様な代替市場を分類するとともに、投資家がそれをどういった動機から利用しているかについて整理する。また、その特徴を日米欧の発展段階に応じてみていく。5節では、アルゴリズム取引や代替市場を利用する際に投資家が行う執行分析について解説する。最後に6節では、現在の問題点や課題について市場参加者の見方をまとめるとともに、それに対する規制の動向などについても触れる。7節では、本稿のまとめと展望を記す。

2. 取引コスト

(1) 取引コストの分類

経済学において取引コストとは、経済取引を行う際に発生する費用の総称として用いられている。ファイナンスにおいて取引コストとは、金融商品を市場で売買する際に取引主体が意思決定した価格に上乗せされるプレミアム（意思決定した価格と売買の結果受け払いする価格の差）として定義される。Kissell [2006]によると、投資家が売買を行う際に発生する取引コストは、一般に以下によって構成される。

- 取引手数料：取引所等に支払う売買手数料（fees）、証券会社に支払う委託手数料（commission）や口座維持管理手数料
- 投資に伴うコスト：遅延コスト（delay costs）、税金（taxes）
- 売買に伴うコスト：マーケット・インパクト、タイミング・コスト（timing costs）、スプレッド（spreads）
- その他のコスト：機会コスト（opportunity costs）

ここで、遅延コストとは、投資家が売買の意思決定を行った後、市場で取引の執行を開始するまでの間に価格が変動した場合に、想定する価格と取引を執行する直前の価格に差が生じることにより発生する費用である¹。マーケット・インパクトとは、取引を市場で執行する直前の市場価格と執行に際して実際に支払う価格に差が生じることによって発生する費用である。また、タイミング・コストとは、取引の執行中に価格や市場流動性が変動することに伴う事後的な費用であり²、スプレッドとは、ビッド・オファー・スプレッドの内側の価格で執行できないことに伴うコストである^{3,4}。さらに機会コストとは、市場の流動性が低いあるいは価格が想定外の方向に遷移したなどの理由から、取引が執行できなかったことによる逸失利益を指す⁵。

1 遅延コストは、投資の意思決定から執行までに発生するコストと考え、投資に伴うコストに分類しているが、価格変動に伴う費用と考え、売買に伴うコストにも分類できる。

2 タイミング・コストは、ボラティリティ・コスト（volatility costs）とも呼ばれる。Kissell [2006]では、執行中の市場価格のボラティリティだけでなくトレンド（ドリフト）もコストに影響を与えることから、トレンドによるコスト（price trend）とボラティリティによるコスト（timing risk）を区別している。本稿では、こうした2つのコストは、ともに執行中の価格変動によって発生するタイミング・コストと捉える。なお、タイミング・コストは、リスク回避的な投資家を想定したものであり、正負どちらの値も取りうる。また、タイミング・コストを、取引コスト全体に対して事前にどの程度織り込むかは、投資家のリスク回避度に依存する。

3 例えば仲値が市場の実勢価格であるとする、成行注文に伴うスプレッドはビッド・オファー・スプレッドの半分を取引量を乗じた額となる。なお、成行注文はスプレッドをコストとして支払うが、指値注文は流動性を供給する対価としてスプレッドを受け取る。成行注文と指値注文の差異は3節(3)イ.で解説する。

4 近年では、ビッド・オファー・スプレッドの内側の価格帯にも発注できる仕組みが登場している。これについては3節(7)および4節(3)イ.で解説する。

5 機会コストも、タイミング・コストと同様に事後的に観察される費用であり、事前に機会コストをどの程度織り込むかについては、投資家のリスク回避度に依存する。

表 1 取引コストの分類

	固定費	変動費
直接費用	取引手数料	スプレッド、税金
間接費用	N/A	遅延コスト、マーケット・インパクト タイミング・コスト、機会コスト

備考：税金は、売買高等に応じて課税されるのが一般的であり、変動費に分類される。

これらのうちマーケット・インパクトは、流動性需要（liquidity demands）と取引情報（information content）の流布の2つによって説明が可能であると考えられている。流動性需要に伴うコスト（流動性の需要コスト）は、取引主体が市場に流動性を要求するのに対し、取引相手方が当該流動性を提供することの対価として支払うコストである。また、取引情報の流布に伴うコスト（情報の流布コスト）は、市場が売買情報を割安・割高のシグナルであると受け取り、それによって価格水準が変化することに伴うコストである。流動性がある程度見込める市場では、前者は比較的短時間で減衰するのに対して、後者は長時間持続すると考えられる。したがって、マーケット・インパクトは、さらに一時的インパクト（temporary impact）と恒久的インパクト（permanent impact）の2つに分けて考えられることがある。また、マーケット・インパクトは、流動性需要コストの観点から、取引額が大きいほど、また、取引対象商品の流動性が低いほど大きくなると考えられる。また、情報の流布コストの観点からは、取引情報が広がりやすいほど大きくなると考えられる⁶。

なお、Kissell [2006]によると、上述のコストは一般的に固定費か変動費か、事前に観察可能か否か（直接か間接か）の観点から表1のように分類できる。表からわかるように、大半のコストは変動費であり、また事前に観察困難な間接費用に分類される。これは、投資家が大半のコストを制御できる可能性がある一方で、同時に何らかの手法で予測する必要があることを示唆している。

(2) 取引コストの削減

イ. インプリメンテーション・ショートフォール

機関投資家が保有するポートフォリオの収益は、資産に応じた投資比率を的確に設定し、市場の状況や見通しの変化に合わせて変更することによって向上すると考えられている。しかし、そうした際に投資家は、自らが意思決定した価格で資産を購入・売却できるとは限らない。上述の取引コストのため、通常、投資を意思決定した価格から計算される想定上の損益と執行後に判明する実際の損益は乖離する。Perold [1988]は、当該乖離をインプリメンテーション・ショートフォール（implementation shortfall: IS）と定義した。ISは、言い換えるとポートフォリオを変化させる際に発

6 これに関連して、遅延コストや機会コストは取引の意思が市場に流布することで上昇する傾向がある。

生ずる取引コストを統合した概念である⁷。

Wagner and Glass [2001] あるいは Kissell [2006] によると、IS は数学的に次のようになる。分量 X の投資を意思決定した時点の最良気配を S_0 とする。証券会社に発注後、トレーダーは価格 S_i で x_i の分量を、 I 回に分けて執行するとする ($i = 1, 2, \dots, I; X \geq \sum_{i=1}^I x_i$)。取引終了後、価格が S_N である時点で評価すると、IS は、

$$\begin{aligned}
 \text{IS} &= \underbrace{(S_N - S_0)X}_{\text{想定上の損益}} - \underbrace{\left\{ \sum_{i=1}^I (S_N - S_i)x_i - (\text{固定費}) \right\}}_{\text{実際の損益}} \\
 &= \underbrace{(S_1 - S_0)X}_{\text{遅延コスト}} + \underbrace{\sum_{i=1}^I (S_i - S_1)x_i}_{\text{売買に伴うコスト}} + \underbrace{\left(X - \sum_{i=1}^I x_i \right) (S_N - S_1) + (\text{固定費})}_{\text{機会コスト}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

と分解できる。第1項は、執行を開始した価格と投資の意思決定を行った価格との差に予定取引量を乗じた額であるから遅延コストを表している。第2項は、執行を開始する時点の価格と実際の取引価格とが乖離することに伴う損益、すなわち売買に伴うコスト全体を表している。また、第3項は、未執行残高に執行開始以降に生じた価格差を乗じた額であるから機会コストを表している。このように、IS は税金を除く取引コストを総称した概念である⁸。

ロ. 取引コスト削減の重要性

機関投資家が取引を行う背景となる事象には、ポートフォリオの構築のほか、ポートフォリオ・リバランス、キャッシュ・フロー対応（解約等に応えるための資産売買）、投資政策の変更、ポートフォリオ・マネージャの交替がある。こうした事象は、相当程度の頻度で起きることから、その都度発生する取引コストがポートフォリオのネット損益（total return）に占める割合も相応に大きくなる⁹。また、機関投資家の運用資産規模が大きくなるほど運用パフォーマンスが低下するとの結果を得ている実証分析は数多く、その要因に取引コストが挙げられている¹⁰。このように取引コストの削減は、投資政策の策定や投資比率の設定と同様に投資のパフォーマンス向上にとって重要である。

7 仮に手数料等の固定の取引コストがなく、意思決定した瞬間に取引を成行注文で一括執行する場合には、IS はマーケット・インパクトとスプレッドの和となる。しかし、時間をかけて分割執行する場合には、IS にはタイミング・コストや機会コストが含まれるため、次の (1) 式ようになる。

8 本稿では、特に断らない限り IS と取引コストを同様の概念として解説する。また、後述のアルゴリズム取引の一種であるインプリメンテーション・ショートフォール戦略（IS 戦略）は、IS の概念を応用した取引戦略であるが、費用としての IS とアルゴリズム取引手法の IS を区別するため、本稿では前者を IS、後者を IS 戦略あるいは IS 法と呼ぶ。

9 例えば、Chalmers, Edelen, and Kadlec [2000]、Edelen [1999]などを参照。

10 近年では、Chen *et al.* [2004]、Yan [2008]、Chan *et al.* [2009]などが実証している。

表2 取引コストの推計値

(単位: bps)

	手数料	遅延コスト	スプレッド	マーケット・インパクトとタイミング・コストの和	機会コスト
高流動性銘柄	7.4	9.5	1.9	35.6	11.7
95% 分位点	18.2	257.0	3.1	615.9	961.9
5% 分位点	0.3	-256.5	0.7	-583.8	-806.3
低流動性銘柄	54.7	49.3	36.0	109.6	17.0
95% 分位点	79.5	409.8	52.6	848.3	1,371.1
5% 分位点	1.1	-424.4	8.0	-457.9	-2,320.0

備考: 2008 年第 1 四半期の米国株式市場の取引サンプル・データから推計したもの。いずれの数値も取引金額加重平均コストを取引金額に対する比率としてベース・ポイント単位で表記したもの。

資料: Borkovec and Heidle [2010] を参考に作成

2 節(1)に示した取引コスト発生の背景を考えると、投資家は、取引のタイミングを市場の状況に応じて的確に設定し市場の流動性を可能な限り取り込むとともに、取引情報の流布を抑えることで取引コストを削減できると考えられる。表 1 に示した固定費に分類されるコストは、手数料が低い執行市場を選択することで削減できる。また、変動費に分類される取引コストのうちスプレッドと税金は観察可能であり、取引執行前にその規模をある程度想定することができるほか、遅延コストは投資の意思決定から執行までの時間を短縮することにより削減できる。しかし、マーケット・インパクト、タイミング・コスト、機会コストは、資産の種類や市場の状況に応じて変わりやすく不確実性が大きいと、他のコストと比べて制御が難しいと考えられる。さらに、そうしたコストは、他の取引コストよりも大きいことが知られている。

Borkovec and Heidle [2010] は、米国の ITG 社 (Investment Technology Group, Inc.) 等を経由した 2008 年 1~3 月の約 150 万件の取引データを基に、取引コストの要素別に金額加重平均値と上下 5% 分位点を推計している (表 2)。まず平均値をみると、流動性の高低にかかわらずマーケット・インパクトとタイミング・コストの和が最も大きい¹¹。次いで、高流動性銘柄では機会コストが大きく、低流動性銘柄では手数料や遅延コストが大きいとの結果が得られている。一方で、分位点の推定値からコストの変化幅をみると、流動性の高低にかかわらず機会コストと、マーケット・インパクトとタイミング・コストの和の変化幅は非常に大きい一方で、スプレッドや手数料の変化幅は小さい¹²。すなわち、機会コストと、マーケット・イン

11 マーケット・インパクトとタイミング・コストを分離するためには、投資家のリスク回避度を踏まえた何らかのモデルが必要となる。表 2 では、モデルを用いず、両コストを合算した値を示している。

12 タイミング・コスト、機会コストは、執行中に価格が執行主体に有利となる方向に動いた場合負となることがある。

パクトとタイミング・コストの和は、市場の状況に応じて幅広く変化しうるため制御が他のコストより難しい一方で、執行の効率性を高めることで削減できる余地が大きいともいえる。

実務では、これらのコストを予測し制御することで、取引コストを可能な限り削減する試みが進んでいる。こうした試みは、(i)最適執行戦略を構築し、市場動向に応じてアルゴリズム取引を行う、(ii)代替市場を活用するという2つの取組みによって実現されている。(i)では、主にマーケット・インパクト（流動性需要コスト）とタイミング・コスト、機会コストの低減が企図されている。これについては、次の3節で解説する。また、(ii)では、主にマーケット・インパクト（取引情報の流布コスト）、機会コスト、スプレッドおよび固定費の低減が企図されている。これについては、4節でみていく。

3. アルゴリズム取引

アルゴリズム取引とは、あらかじめ定められたアルゴリズムに従って機械的に売買する取引の執行形態である。古くは1980年代半ばから米国の株式市場や為替市場でプログラム取引として行われてきているものであり、目新しいものではない¹³。しかし、コンピュータ処理能力の向上と投資家の取引コスト削減ニーズの高まり等を背景に、10年ほど前からアルゴリズム取引は高度化・複雑化してきている。ここでは、こうした近年の発展を踏まえ、アルゴリズム取引の動向を整理するとともに、その背後にある執行戦略についてもみていく。

(1) 最良執行と最適執行戦略

イ. 最良執行

最良執行 (best execution) とは、顧客の投資目的を達成する最良の条件で取引を執行する方針や方法を指す。Wagner and Edwards [1993] あるいは Macey and O'Hara [1997] によると、最良執行に関する詳細な定義は国や地域によって相違があるものの、通常、取引の執行する主体の義務として認識されている。特に米国では、古くから数多くの取引の場が存在することから、最良執行への意識が高い。現在、米欧では、最良執行は、最良の条件を提示する市場で執行する投資家や証券会社 (broker-dealer) の規制上の義務として規定されている¹⁴。日本では、2004 (平成 16) 年の証

13 1980~90年代の株式のプログラム取引については、Jarrow, Maksimovic, and Ziemba [1995] の第10章などに詳しい。

14 米国では、1975年から、最良気配を提示する市場以外での執行を原則禁止するトレード・スルー規制 (現在は注文保護規則と改称) が施行されている。その後、修正・拡張を経て、現在、最良執行義務はレギュレーション NMS (Regulation National Market System) II-B.4 で規定されている (U.S. Securities and

券取引法の改正以降、金融商品取引業者に対して最良執行に関する方針の策定と開示等が義務付けられている¹⁵。

最良執行義務は、最良な執行価格、低い取引コスト、迅速な取引の執行、決済リスクの低減、顧客から得る手数料の忠実な利用¹⁶など、多様な面について顧客の利益を最大化する広い概念として認識されている。このうち、価格・コスト面および取引の迅速性に係る最良執行義務を実現する具体的な手段として、Kissell, Glantz, and Malamut [2004] では、(A)投資家が設定する執行に係るベンチマークに最も近い執行、あるいは(B) IS が最も小さいと期待される執行が想定されている。ここで、執行に係るベンチマークは、投資家の投資目的と整合するよう個々に設定されるものであり、VWAP (volume-weighted average price; 出来高加重平均価格)¹⁷や TWAP (time-weighted average price; 日中平均価格) が広く参照されている¹⁸。

□. 最適執行戦略

Bertsimas and Lo [1998] あるいは Almgren and Chriss [2000] によると、最適執行戦略とは、取引に係るリスクが与えられたもとで IS を最小化する戦略と定義されている。すなわち、上述の最良執行を実現する手段の(B)に相当し、通常、IS を構成する要素の中でも予測と制御が難しいマーケット・インパクト、機会コスト、タイミング・コストを同時に最小にする執行戦略が想定されている。マーケット・インパクトは取引額が増すほど増大する特徴があるため、投資家が大口の取引を市場で一度に執行すると、マーケット・インパクトが増しその分取引コストも大きくなる。そのため投資家は、大口の注文を子注文 (child orders; sliced orders) に分割し、ある程度の時間をかけて執行することでマーケット・インパクトをできる限り抑制しようとする。一方で、執行に長い時間をかけるほど、価格変動に伴うタイミング・コストが上昇するほか、投資家の意図しない方向に価格が変動し、あらかじめ予定していた時刻までに執行を完了することができない機会コストも高まってしまう。このように、マーケット・インパクトとタイミング・コストあるいは機会コストにはトレードオフの関係がある。図 1 には、当該関係を執行にかける時間とコストを対比している。マーケット・インパクトは執行時間の減少関数となる一方で、タイミ

Exchange Commission [2005])。また欧州では、欧州金融商品市場指令 (The Market in Financial Instrument Directive) Level 2 の第 5 章に規定されている (European Commission [2006])。

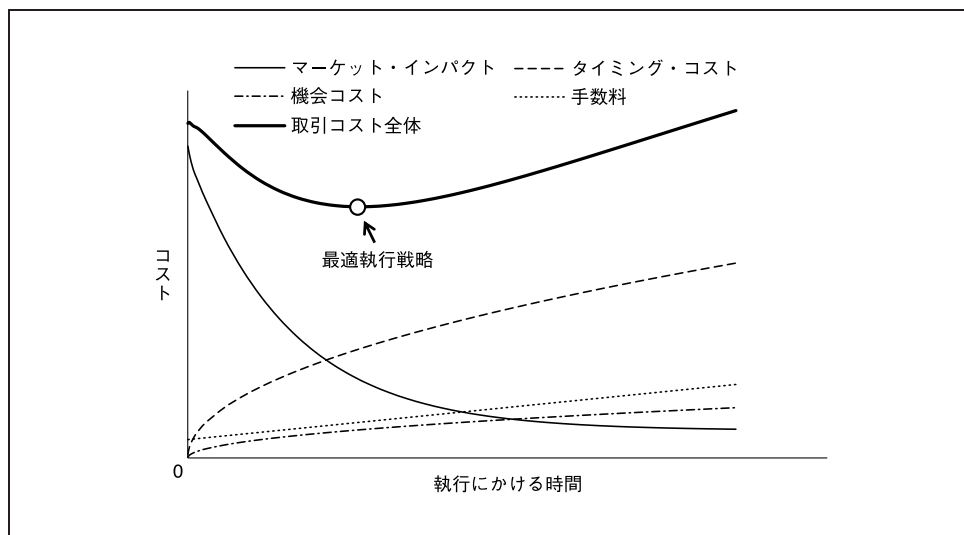
15 金融商品取引法第四十条の二に規定されている。

16 米英のガイドラインでは、証券会社が顧客から受け取る手数料は、執行および調査の 2 つの目的での利用に限っており、またそれぞれを分離するよう求めている (手数料のアンバンドリング)。わが国では、こうした点について法令で明確に規定されておらず、どのような形態が適当であるのかについて議論が進んでいる。

17 VWAP の概念については Berkowitz, Logue, and Noser [1988] を参照。

18 VWAP は、通常、出来高と取引価格を掛け合わせた値の一定期間における平均値として与えられる。TWAP は、時間加重平均価格であり、適当な間隔で測定した日中の取引価格の平均値として与えられる。そのほか、前日終値や OHLC (open high low close; 寄付・日中最高値・日中最安値・終値の平均値) などもベンチマークとされる。

図1 取引コスト要素とそれらのトレードオフ（概念図）



備考：取引コスト全体は、マーケット・インパクト、タイミング・コスト、機会コスト、および手数料の合計値。

ング・コストおよび機会コストは一般に増加関数となる¹⁹。また、手数料も時間をかけて分割執行するほど取引回数が増すため徐々に増大する。そうしたコストを足し上げると、取引コスト全体は執行時間に関する下に凸の関数となるため、それが最小となる最適な執行時間（執行速度）が必ず存在する。最適執行戦略は、こうした最適な執行速度として設定される。

上述のように、最適執行戦略では執行の速度をいかに決めるかがポイントとなる。すなわち、過去の市場動向や執行中の市場の変化に応じて子注文への分割の仕方や子注文の発注タイミングを的確に変化させることによって達成できる。しかし、マーケット・インパクトやタイミング・コストは事後的に判明するコストであるため、最適執行戦略を構築するにはそうしたコストを予測しなくてはならず、予測されたコストには不確実性が伴う。例えば、ある分量を売買した場合にどの程度のマーケット・インパクトが想定されるか、近い将来価格がどの程度変動するか、現在の市場状況が将来想定される市場状況と比べて良いか悪いか、資産間の価格変動や流動性にはどのような関係があるかなどはすべて不確実である。こうした不確実性に対しては、モデルや過去の市場データを基に確率・統計的に推計する手法が用いられている。

19 タイミング・コストや機会コストについて、執行前にどのような関数を仮定するかは、投資家のリスク回避度や想定する価格変動モデルに依存する。さらに機会コストは、その評価時点や評価方法にも依存するため、その関数形は必ずしも明確ではない。図1では、価格がブラウン運動に従って拡散するとの想定で、タイミング・コストや機会コストが取引時間の0.5乗に比例して拡大すると仮定している。

(2) アルゴリズム取引の枠組み

最適執行戦略の実現には、あらかじめ定められたアルゴリズムに従って機械的に売買するアルゴリズム取引が用いられることが多い。上述のように、最良執行の手段(B)を実現する最適執行戦略の執行量や執行タイミングは、モデルや過去データに基づき数値として推計される。そうした情報を効果的に活用するにはアルゴリズム取引が有効である。また、ベンチマークに基づいた最良執行の手段(A)においても、アルゴリズム取引が用いられることがある。その場合には、自己の執行状況とベンチマークを逐次照合し、その乖離を修正しつつ執行するアルゴリズムが用いられる。

Palmer [2009]によると、一般的な取引で用いられるアルゴリズムは、投資家の取引戦略やベンチマークに基づいて大口注文を子注文に分割する場合の最適な分割方法や執行タイミングを市場の状況に応じて判断する役割を果たしている。また、アルゴリズムは、市場を監視し、投資家の戦略に見合う注文が到来した場合に、その機会を可能な限り逃さず執行する役割も果たしている。こうした判断および執行はコンピュータがアルゴリズムに基づいて行うが、アルゴリズムのロジック、その入力値(パラメータ)およびベンチマークは投資家が設定する。資産の種類や銘柄によって流動性や価格変動の特徴が異なるほか、投資家の執行スタイルも異なることから、アルゴリズムやパラメータはそうした情報に基づいてきめ細かく設定される。

図2には、アルゴリズム取引の基本的な枠組みを示した。アルゴリズム取引を行う投資家は、アルゴリズムの計算や実行を行うアルゴリズム取引プラットフォーム(algorithmic trading platform: ATP)に、発注する金額やアルゴリズムの種類、そのパラメータなどの情報を送る²⁰。ATPは、蓄積している過去の市場情報を参照しつつ、同時に現在の市場から得られる価格や流動性などの情報を取り込み、アルゴリズムに基づいて市場に発注する分量や執行タイミングを計算する。その際、ATPはニュースや経済・金融統計といった市場外の情報も計算に取り入れることがある。ATPは、さらに、計算結果に基づいて市場に発注し、取引結果を市場から受け取る売買執行の役割も果たす。子注文をすべて執行し終わると、ATPは投資家に執行価格や金額等の取引結果を報告する。

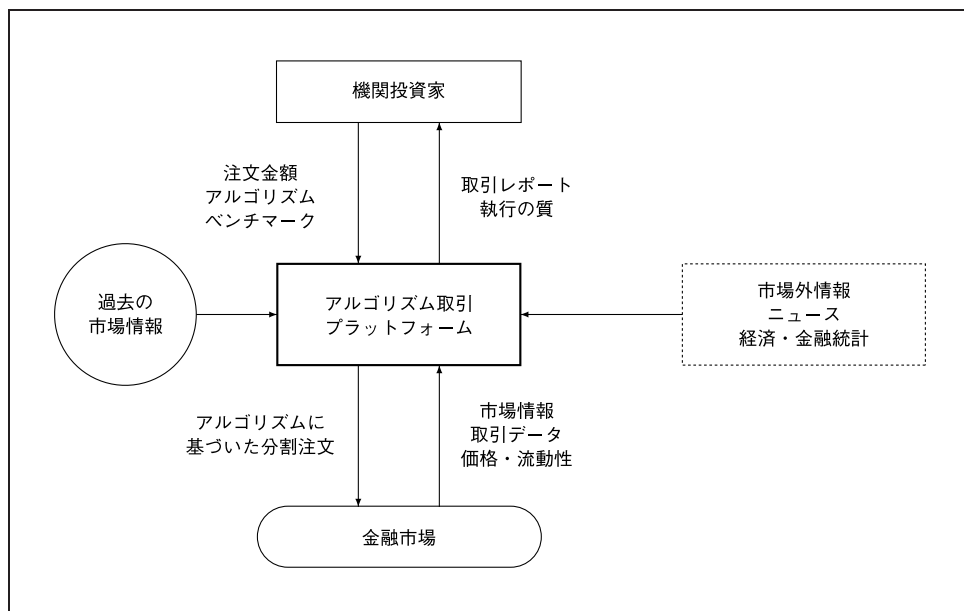
投資家は、証券会社や情報ベンダー²¹が構築したアルゴリズムの中から目的・戦略に応じて選択し、パラメータ等を設定して利用している²²。近年では、投資家の細かな取引戦略に応じて証券会社や情報ベンダーがアルゴリズムを作り込むケースも増

20 パラメータには、例えば、大口注文の分量、執行開始時刻と執行時間、子注文の価格・分量の範囲などがある。

21 特に注文管理システム(order management system: OMS)あるいは執行管理システム(execution management system: EMS)を構築・提供するベンダーが、同システム内にATPを組み込むかたちで提供するケースが多い。

22 証券会社が機関投資家に提供する大口取引向けのアルゴリズムは3節(4)で解説する。

図2 アルゴリズム取引の基本的な枠組み



えている。また、アルゴリズムの構築や実装を従来より簡便に行うことができるアプリケーションの普及や²³、投資家が証券会社のトレーダーと同程度に執行を制御できる DMA (direct market access) の浸透に伴い²⁴、投資家自身がアルゴリズムの構築・実装・実行まですべてを制御することも可能になっている。

(3) アルゴリズム取引を活用する動機

アルゴリズム取引は、一般的に上述のような最良執行の実現手段として活用されている。このほか、従来からプログラム取引として行われてきている取引形態が発展した投資手段としてのアルゴリズム取引も存在する。ここでは、そうしたアルゴリズム取引の背景にある取引主体の動機や目的として、イ. 取引コストや注文固有リスクの削減、ロ. 取引執行事務やマーケット・メイクの自動化、ハ. 市場のモニターと取引機会の発見、ニ. 売買速度の向上や高頻度な取引、ホ. 複数資産の同時執行の5つを取り上げ解説する²⁵。

23 これについては3節(8)の脚注92を参照。

24 DMA とは、投資家が、証券会社のトレーダーを介さず市場に発注する仕組み。証券会社のトレーダーを介さず、証券会社が提供する発注システムを介して取引する。DMA は、投資家があたかも直接市場にアクセスしているように取引できる仕組みとなっている。

25 ここでの解説は、Donefer [2010] や平塚 [2008] を参考にしている。

イ. 取引コストや注文固有リスクの削減

東証などの注文駆動型市場 (order-driven market)、および、ニューヨーク証券取引所 (New York Stock Exchange: NYSE)、ロンドン証券取引所 (London Stock Exchange: LSE) などのハイブリッド型市場²⁶への基本的な売買指図には、指値注文 (limit order) と成行注文 (market order) の2種類がある²⁷。表3に示すように、指値注文は市場に流動性を供給するのに対し、成行注文は流動性を需要・消費することから、そのメリット・デメリットは異なる。成行注文で一括執行する場合、即時性が確保されタイミング・コストや機会コストは発生しないが、2節(2)で解説したように、流動性を需要することに伴うマーケット・インパクトが発生するほかスプレッドを支払わなくてはならない。一方で、指値注文は、取引主体の希望する価格で執行できスプレッドを支払わなくてよいほか、流動性を供給するためマーケット・インパクトが成行注文より通常小さいが、取引意思情報の流布に伴う機会コストや遅延コストが生じうるほか²⁸、未約定リスク²⁹、無償のオプション性³⁰、逆選択リスク (adverse selection risk)³¹といったリスクが内在しており、それに伴う潜在的なコストを支払わなければならない³²。このように考えると、投資家にとって指値・成行注文のリスク・リターン特性は互いに相互補完的な関係にあるといえる。投資家がアルゴリズム取引を活用する動機の一つには、上述のような指値・成行注文に潜在

26 NYSE や LSE は、マーケット・メイカー等が取引の仲介を行うことがあるため、注文駆動型市場と呼値駆動型市場 (quote-driven market) の混合型 (ハイブリッド型) 市場として分類される。後述の4節(1)イ. を参照。また、NYSE のハイブリッド型市場への移行については大崎 [2004] を参照。

27 取引所によっては、成行および指値の基本的な売買指図に付随条件 (発注オプション) を付すことができ、それによって多種多様な指図が可能となる。詳しくは3節(7)を参照。

28 取引意思情報の流布は、2節(1)の脚注6で述べたように遅延コストの増大につながる。指値を市場に提示すると、それが最良執行価格に近い場合には板情報として公開されるが、これは売買の意思を流布していることになる。特に発注金額が大きい場合は、市場参加者に約定したい大口注文を抱えているという手の内を見透かされることで価格が不利な方向に動く可能性をはらんでいる。

29 未約定リスクとは、指値注文が取引主体が希望する時刻までに執行されないリスクであり機会コストを高める。指値注文では、執行価格が確保される一方で、執行に要する時間が不確実であるという執行価格と執行時間のトレードオフが存在する。

30 無償のオプション性とは、指値を提示している投資家が、他の市場参加者に対して、指定した価格で売買できる権利を無償で提供していることを指す。すなわち、指値を提示している投資家は、オプションの売却と類似した経済的效果を提供しているにもかかわらず、その対価 (オプション・プレミアム) を受け取ることができないという暗黙のコストを負っている。これは言い換えると、市場流動性の提供には暗黙のコストが伴うことを意味しており、この点で、当該コストは売買意思情報の流布を背景とした機会コストや遅延コストと類似している。指値注文のオプション性に関する理論については、Chacko, Jurek, and Stafford [2008] を参照。

31 逆選択リスクとは、指値を提示している市場参加者が、情報優位にある他の市場参加者 (informed trader) から、不利な方向の売買を仕掛けられるリスクである。これに関連して、指値注文は取引主体が想定する価格帯から価格が変化する度に指値注文を取り消し、必要があれば新しい価格帯に注文を入れ直さなくてはならない。そうしないと、有利になる機会を逃すばかりか不利な価格を提示してしまう可能性もある。逆選択リスクは、マーケット・メイカーがさらされるリスクでもある (3節(5)イ.)。

32 指値注文は、潜在するリスクが成行注文より大きい、その分パフォーマンスがよいことが知られている。例えば、Harris and Hasbrouck [1996] による NYSE の取引データを用いた分析では、ビッド・オファー・スプレッドが最小である銘柄において指値注文のパフォーマンスが成行注文を上回るとの結果が得られている。

表3 指値注文、成行注文のメリット・デメリット

	メリット	デメリット
成行注文	<ul style="list-style-type: none"> ・即時性が確保されタイミング・コストが発生しない。 ・一括執行の場合には機会コストが発生しない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・流動性を需要するためマーケット・インパクト（流動性需要コスト）が過大になりがち。 ・スプレッドを支払う必要がある。
指値注文	<ul style="list-style-type: none"> ・取引主体の望む価格で執行できる可能性がある。 ・流動性を供給するため、マーケット・インパクトが小さくて済む。 ・スプレッドを支払わなくてよい。 ・一定以上の指値注文を提示すると、市場によってはリポートを受け取れる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・情報優位な市場参加者から逆選択されるリスクがある。 ・未約定リスクがあり機会コストが大きい。 ・無償のオプション性を市場に提供することとなる。取引意思を市場に提示することで遅延コストや機会コストが上昇する可能性がある。

するリスクやデメリットを抑えつつ各注文のメリットを享受し、低コストかつ迅速に執行することにある。

ロ. 取引執行事務やマーケット・メイクの自動化

証券会社では、従来、投資家から受けた注文の執行、あるいは自己のポジションのヘッジ³³を、トレーダーが市場の状況に応じて行っていた。アルゴリズム取引やDMAが普及することで、こうした執行やヘッジに係る事務が自動化・精緻化されるとともに、トレーダーの役割が従来の取引を執行する役割から取引の質を管理・監視する役割に変貌していく。こうした点は、1人のトレーダーがより多くの銘柄を取り扱うことができるようになるなどコストの削減につながるものである。また、旧米ナスダック市場のような呼値駆動型市場（quote-driven market）では³⁴、マーケット・メイカーが常時売買価格を提示し取引の相手方となる役割を果たしているが、このマーケット・メイクをアルゴリズムに従って行う機械的マーケット・メイクも進んでいる。これも、従来は人が行っていた売買価格の提示、自己のポジション（在庫）管理やリスク管理を、アルゴリズムに従って機械的に行うものである³⁵。

ハ. 市場のモニターと取引機会の発見

アルゴリズム取引の中には、市場をモニターし、取引主体のニーズと合致する注文が到来した場合に、その機会を逃さず執行する機会発見型（opportunity）の形態がある³⁶。また、近年では、統計的裁定取引やクオンツ取引（quantitative trading）といった取引手法にもアルゴリズム取引が応用されている³⁷。このように市場参加者

33 例えば、証券会社が顧客に売却したオプションをデルタ・ヘッジするための原資産売買などがある。

34 ナスダック市場は、現在ハイブリッド型市場に移行している。

35 機械的マーケット・メイクは、注文駆動型市場にも応用され、後述3節(5)イ.に示す高頻度取引の一形態に発展している。

36 後述の3節(4)ロ.で解説する。

37 後述の3節(5)で解説する。

は、市場のモニターと取引機会の発見をアルゴリズムによってより効率的に行っている。

ニ. 売買速度の向上や高頻度な取引

市場が効率化すると、取引リスクを低減させるために、他の市場参加者より早く市場情報に反応したい、売買をより速く多数回行いたいとの動機が働く。アルゴリズム取引は、コンピュータが執行するため、人間より速く情報に反応し執行することができる。同時に、利益が得られる取引を多数回繰り返したいという需要もあり、そうした場合にもアルゴリズム取引が有効である³⁸。

ホ. 複数資産の同時執行

多数の銘柄を同時に執行するバスケット取引 (basket trade) や商品横断的なポートフォリオ取引 (portfolio trade)³⁹において、1人のトレーダーが多くの銘柄・商品をモニターし執行するには手間がかかるほか遅延コストも発生しうる。また、ある銘柄を売買した際に、同商品に内在する一部のリスクをヘッジするなどの目的で同時に他の銘柄を売買するペア取引 (pair trade) でもアルゴリズム取引が活用されることがある。アルゴリズム取引は、こうした複数の資産・銘柄の同時取引を容易にする⁴⁰。

上記イ.あるいはハ.を企図としたアルゴリズムの取引戦略については、主に次の3節(4)で、上記ロ.ハ.ニ.ホ.を目的とした取引戦略については、主に3節(5)で解説する。

(4) 大口取引向けアルゴリズム取引戦略

アルゴリズムは投資家の執行戦略や執行市場の特性に応じてさまざまに作り込まれるため、その種類は多岐にわたる。ここでは、証券会社が機関投資家向けに提供するアルゴリズム取引戦略のうち、主に大口取引に利用される戦略の代表的なものに焦点を絞り解説する⁴¹。

イ. スタティック戦略とダイナミック戦略

表4には、大口取引向けアルゴリズム取引戦略の分類、目的、発注手法を掲載している。大口取引向けアルゴリズム取引戦略は、まずスタティック (静学的) 戦略とダイナミック (動学的) 戦略に分類される。スタティック戦略とは、過去の市場

38 後述3節(5)イ.に示す高頻度取引では、こういった動機に基づいた市場参加者が多い。

39 例えば、複数の株式、指数先物、為替の同時執行が考えられる。

40 アルゴリズム取引の前身であるプログラム取引は、古くはこうした目的から発展してきた経緯がある。また、こうした銘柄・商品横断的なアルゴリズムは後述する統計的裁定取引で多用されている。

41 Johnson [2010] や Kim [2007] などを参考にしている。

表 4 大口取引向けアルゴリズム取引戦略の典型例

分類	戦略名	目的・動機	発注手法	
スタティック戦略	ベンチマーク型	VWAP (volume-weighted average price)	大口取引の執行価格を VWAP に近づけたい。時間的制約が小さい。	大口注文を過去の平均的な日中出来高分布に応じた割合で分割し、適当な時間間隔で執行する。
		TWAP (time-weighted average price)	大口取引の執行価格を日中平均価格に近づけたい。價格的制約が小さい。	大口注文を均等に分割して等間隔あるいは適当なタイミングで執行する。
		MOC (market on close)	取引コストを抑えつつ、平均執行価格を終値に近づけたい。	引けにかけて、過去の市場出来高に従って分割した株数を執行する。モデルを用いて、最適な執行開始時刻と執行量を計算する。
	コスト型	IS (implementation shortfall)	取引コストを抑えたい。マーケット・インパクトとタイミング・コストのトレードオフを最適化しつつ、一定時間内に取引を完了させたい。	最適執行戦略に基づいて執行する。マーケット・インパクト、タイミング・コスト、機会コストが同時に最小となるように大口注文を分割執行する。
ダイナミック戦略	ベンチマーク型	POV (percentage of volume)	市場流動性に合わせて売買したい。VWAP の精度を高めたい。	VWAP 戦略のダイナミック版。日中の市場出来高をモニターし、出来高に対する自己の売買高の比率が一定となるように、出来高に追従して執行する。
		ダイナミック MOC	大口取引の執行価格を終値に近づけつつ、市場環境に応じて有利な条件で執行したい。	MOC 戦略のダイナミック版。市場環境に応じて最適な分割株数や執行開始タイミングを計算する。
	コスト型	AS (adaptive shortfall)	IS 戦略を市場環境に合わせてダイナミックに適用し、取引コストをさらに制御したい。	IS 戦略のダイナミック版。市場環境に応じて最適な売買額・売買タイミングを逐次再計算しつつ、分割執行する。
	参加型	アイスバーグ (iceberg)	指値板上の注文を大きくしたくない。希望執行価格で少しずつ自動執行したい。執行価格を制御したい。	指値板情報に応じて最適化された分割発注株数を指値注文する。前の注文がすべて取引完了するまで次の発注を行わない。
		ペッグ (pegging)	指値板を厚くすることなく、最良気配値で執行したい。時間的制約は小さいが、マーケット・インパクトを抑制したい。	指値板情報に応じて最適化された株数を最良気配値（あるいは仲値から一定水準乖離した価格等）に自動追従するかたちで指値注文する。前の注文がすべて取引完了するまで次の発注を行わない。
		インライン (price inline)	市場流動性に合わせて売買しつつ、市場環境に応じて有利な条件で執行したい。	POV 戦略の発展版。市場出来高に追従して執行するが、ベンチマーク対比で有利な市場環境が実現した場合には、より積極的に（あるいは保守的に）執行する。
	機会発見型	ウェイト・パウンズ (wait & pounce)	指値板を厚くせずに、条件に見合う価格・分量が到来した場合に限り取引したい。執行株数や時間的制約は小さい。	指値板情報をモニタリングし、条件に見合う指値が提示された瞬間に成行注文等を入れ、取引を成立させる。
		戦略スイッチ (switch)	市場環境に応じて戦略を切り替え、有利な機会を確保しつつ、執行速度とマーケット・インパクトの最小化を図りたい。	市場環境に応じて戦略を入れ替える。また、ある戦略に基づいて取引を行ったが希望する時間内に終了しなかった場合に、残余分を成行注文などで積極的に発注する。

- 備考：1) ペッグ、アイスバーグの各戦略は、一部の市場で指値注文のオプションとして受け付けるようになってきているため、アルゴリズム取引に分類されないこともある（3 節(7)を参照）。
- 2) アルゴリズム取引には、表中で紹介している機関投資家の大口取引向け戦略のほかに、後述する高頻度取引や統計的裁定取引といった戦略もある。それらについては、3 節(5)で解説する。

資料：Johnson [2010] ほか各種資料を参考に著者が作成。

の動向に応じて分割執行額とタイミングを執行前にすべて決定し、それに従って取引を執行するタイプである。取引執行中に価格・流動性・ボラティリティといった市場環境が変化した場合でも執行額やタイミングを変更することはない。それに対してダイナミック戦略とは、市場の動向に応じて戦略を調整しつつスタティック戦略を上回るパフォーマンスを目指すタイプである。近年はダイナミック型のアルゴリズムが増えてきている。

ロ. 目的別分類

さらにアルゴリズム取引戦略は、その目的に応じてベンチマーク型、コスト型、参加型 (participation)、機会発見型に分けられる⁴²。ベンチマーク型では、投資家が設定するベンチマークに近づく執行となるように戦略が組まれる⁴³。同型としてよく知られているのは VWAP 戦略である。同戦略は、取引主体の売買高加重平均価格が市場の出来高加重平均価格に近づくことを目指して設計されている。古典的な VWAP 戦略は、過去の典型的な日中出来高の時間変化に応じて売却額を決めるスタティック戦略が中心であったが、近年では、POV (percentage of volume) 戦略と呼ばれる VWAP 戦略のダイナミック版の利用が増えている。同戦略では、執行中の市場の出来高に追従するかたちで取引を執行し VWAP 戦略を上回るパフォーマンスを目指している。このほか、MOC (market on close) 戦略と呼ばれる終値をベンチマークとする戦略もある。一般に終値で一括購入するとマーケット・インパクトが大きくなり不利であるため、MOC 戦略は、取引時間帯の終盤にかけて徐々に執行する。売買を開始する最適な時刻および執行速度は、モデルや過去データに基づいて決められる⁴⁴。

コスト型戦略は、投資家のリスク回避度に応じて取引コストを最小化する最適執行戦略を設定し、それに基づいて執行する形態である⁴⁵。コスト型としては、インプリメンテーション・ショートフォール戦略 (IS 戦略) と、IS 戦略のダイナミック版であるアダプティブ・ショートフォール (adaptive shortfall: AS) 戦略が広く用いられている。IS 戦略は、過去データと数理モデルに基づいて計算された最適な執行速度で執行するスタティック戦略である。同戦略は、3 節(1)に示したように、モデルによる取引コストの予測値に基づいてマーケット・インパクト、タイミング・コスト、機会コストを同時に最小化することを目指す。一方、AS 戦略は、IS

42 アルゴリズムの分類は、先行研究によってまちまちである。例えば、Johnson [2010] は、ベンチマーク型と参加型の一部を、まとめてインパクト駆動アルゴリズムとして分類している。また、Yang and Jiu [2006] では、スタティック戦略アルゴリズムをスケジュール駆動アルゴリズム (schedule-driven algorithm) と分類する一方、ダイナミックなベンチマーク型・参加型・コスト型アルゴリズムを評価型アルゴリズム (evaluative algorithm) と分類している。

43 上述の 3 節(1)イ. に示した最良執行手段の(A)に相当する。

44 このほか、ベンチマーク型でしばしば利用される戦略に TWAP 戦略がある。同戦略では、日中の平均価格に近づくように大口取引を均等に分割して執行する最も単純な戦略の 1 つであるが、市場流動性が低い局面で過度なマーケット・インパクトを支払うことになりうるため VWAP 戦略と比べて効率性が落ちる。

45 上述の 3 節(1)イ. に示した最良執行手段の(B)に相当する。

戦略の執行速度を市場環境に応じて逐次調整することで IS 戦略を上回るパフォーマンスを目指すダイナミック戦略である。AS 戦略には、積極型 (aggressive in the money: AIM) と保守型 (passive in the money: PIM) が存在する。AIM はベンチマークに対して有利な市場環境でより積極的に執行する一方で、PIM はそうした環境において逆に保守的に執行する⁴⁶。Kissell and Malamut [2006] によると、この結果、AIM の取引コストの期待値はベンチマークより下がる一方で取引コストがベンチマークを上回るリスクが増大する。逆に PIM では、同期待値は上昇する一方でリスクは低下する⁴⁷。コスト型の戦略には、取引コストに関する理論モデルが用いられている。

参加型戦略は、取引主体が指値板情報や最良気配値をできる限り変化させないように注文を執行するかたちで、市場に参加する戦略形態である。注文規模や売買意思情報の流布をできるだけ抑えることで、マーケット・インパクトを低減させるとともに、価格が取引主体の意図しない方向に遷移するのを防ぐ。例えば、アイスバーグ (iceberg) 戦略では、大口注文の執行中であることを市場に悟られないように、指値板をできる限り変化させず少量ずつ自動執行する⁴⁸。また、ペグ (pegging) 戦略では、例えば最良気配値に自動追従するように指値注文を入れることで最良な価格で売買することを目指す。インライン (price inline) 戦略は、上述の AIM、PIM の考え方を取り入れることで POV 戦略を発展させた戦略である。なお、参加型戦略は、市場環境に応じた取引である特性上そのスタティック戦略は存在しない。

機会発見型戦略は、市場をモニターし、取引主体が有利であると考える条件に合致する市場環境が実現された場合に限り、即座に執行するタイプの戦略である。執行にかかる時間的制約が大きくない場合に用いられ、アルゴリズムは取引主体に有利な市場環境を逃さないようにする。例えばウェイト・パウンズ (wait and pounce) 戦略では、取引主体が望む価格と分量の指値注文が市場に到来した瞬間に、その分量だけを発注し同指値注文との取引を成立させる。このほか、複数のアルゴリズムを用意し、市場環境に応じて戦略を自動的に切り替える戦略スイッチなどもある。こうした機会発見型についても、特性上そのスタティック戦略は存在しない。

こうした大口注文の執行戦略アルゴリズムとは別に、高頻度取引や統計的裁定取引等でもアルゴリズム取引が活用されている。それらについては次の 3 節 (5) で解説する。また、複数の市場で取引が可能である場合、どの市場に発注するのが最適であるのかを機械的に判断する最適注文回送 (smart order routing: SOR) もアルゴリ

46 例えば、ベンチマークが 100 円で売り注文を AS 戦略によって行う場合、AIM では、市場価格が 100 円を上回る局面や市場流動性が高いと判断される局面において、IS 戦略から計算される売却額よりも多く売却する一方 PIM では売却額を減らす。

47 Kissell and Malamut [2006] によると、AIM では、取引コストの分布が正方向 (高コスト方向) に歪むのに対して、PIM では負方向に歪む。これについては杉原 [2011] で解説する。

48 アイスバーグ戦略の名称は、水面上に現れる氷山 (iceberg) が全体の一角であることに倣ってつけられている。

ズム取引の一種であると考えられている。SORは代替市場と密接な関係があるため4節(5)で別途解説する。

(5) 高頻度取引、統計的裁定取引、クオンツ取引

高頻度取引、統計的裁定取引、クオンツ取引は、米国を中心に発展してきている取引手法である。こうした取引のほとんどは、アルゴリズムに基づいて機械的に執行されている。ただし、高頻度取引等の戦略は、3節(4)に示したような機関投資家の大口取引向けアルゴリズム取引戦略とは異なる特徴を有する。すなわち、高頻度取引等を行う主体は、取引コスト削減を企図した戦略と逆のポジションをとることで、投資家が負担する取引コストの一部を間接的に収益源としていることが多い。また流動性需給の観点からは、3節(4)に示したアルゴリズム取引主体は主として流動性を需要するのに対して、高頻度取引等は主として流動性を供給する⁴⁹。したがって、高頻度取引等の手法や背後にある戦略を理解することは、アルゴリズム取引を巡る全体像を理解するうえで重要である。

イ. 高頻度取引

高頻度取引とは、短期間の売買を高速で繰り返す取引手法であり、米国を中心に近年急速な広がりをみせている^{50,51}。1つの取引に係るポジションの保有時間は、短い取引で数ミリ秒～数秒、長い取引でも1日未満と、夜間をまたぐポジションはほとんど保有しない。高頻度取引では、個々の取引の損益は非常に小さいものの、それを高頻度で多数繰り返すことで利益を生み出しようと考えられている。高頻度取引は、高速で売買を行う特性上、ほとんどがアルゴリズム取引によって機械的に執行されている。Aldridge [2009a]によると、高頻度取引のうち、複数銘柄の裁定を目的とした取引戦略⁵²以外の戦略は、(a)機械的流動性供給戦略 (automated liquidity

49 高頻度取引は、市場に流動性を供給しているといわれているが、最近の実証研究 (Kirilenko *et al.* [2010]) では、流動性の消費 (主に指値注文の取消しによる) も大きいことが指摘されている。

50 高頻度取引に厳密な定義があるわけではないが、U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission [2010b] の Appendix A では、その特徴として次の5つが挙げられている。(i)超高速のコンピュータ・プログラムを用いて注文を生成・回送・執行する、(ii)取引所のコロケーション・サービス (3節(8)の脚注91を参照)を利用する、(iii)ポジションの保有時間が著しく短い、(iv)取引所へ非常に多くの発注を行う一方、注文の取消しも非常に多い、(v)ポジションを翌日まで持ち越すことがほとんどない。

51 高頻度取引を専門とするファンドは、現在、米国 (ニューヨーク、ニュージャージー、シカゴ、カンザスシティ、コネティカット)のほか、英国 (ロンドン)、シンガポールに拠点を置き、主に為替、株式およびそれらの派生商品を対象に取引を行っている。高頻度取引業者の割合は、全米の市場参加者の2%程度であるが、米国株式市場への注文数の50~60%超、欧州の25%以上が高頻度取引によるものとの推計もある (例えば、Fabozzi, Focardi, and Kolm [2010])。わが国市場へは、2006年2月の大阪証券取引所 (大証)の注文付合せシステムの高速化および2008年11月のコロケーション (脚注91参照)の導入、2010年1月の東証アローヘッドの導入を契機に参入しつつある。

52 本稿では、マーケット・メイクや短期間の流動性供給に類似する機械的な取引戦略を高頻度取引に分類し、複数銘柄にわたる高頻度取引は次の統計的裁定取引に分類する。

表5 高頻度取引戦略の分類（裁定取引を除く）

戦略	機械的流動性供給	マーケット・マイクロストラクチャー	イベント
手法	流動性を供給し、その対価を得る	流動性を供給するとともに、注文フローに伴う情報の非対称性から価格の変化を先読みする	ニュース等の情報が価格に与えるインパクトやセンチメントの変化から価格の変化を先読みする
主な利用情報	自己のポジション	市場内の情報（注文フロー、出来高等）	市場外の情報（ニュースや経済統計など）
ポジションの保有時間	数ミリ秒～数秒	数ミリ秒～数分	数秒～数十分
主な収益源	<ul style="list-style-type: none"> ・ビッド・オファー・スプレッド ・マーケット・インパクト（流動性の需要コスト） ・リベート 	<ul style="list-style-type: none"> ・マーケット・インパクト（情報の流布コスト） ・ビッド・オファー・スプレッド ・リベート 	<ul style="list-style-type: none"> ・市場外情報が引き起こすマーケット・インパクト
主なリスク	<ul style="list-style-type: none"> ・在庫リスク ・逆選択リスク 	<ul style="list-style-type: none"> ・在庫リスク ・価格変化方向を読み誤るリスク 	<ul style="list-style-type: none"> ・市場の反応を読み誤るリスク
理論モデル・関連技術	<ul style="list-style-type: none"> ・在庫モデル 	<ul style="list-style-type: none"> ・情報の非対称性モデル ・注文フローの確率過程 	<ul style="list-style-type: none"> ・情報ベースの価格付け ・ニュース・マイニング

provision)、(b)マーケット・マイクロストラクチャー戦略（market microstructure trading）、(c)イベント戦略（event trading）の3つに大別される⁵³。表5では、そうした戦略別にみた特徴を簡単にまとめている⁵⁴。

(a)機械的流動性供給戦略は、マーケット・メイカーと類似のポジションをとり、ビッド／オファーを提示するとともに、指値注文による少額売買を高頻度で繰り返す、市場に流動性を供給する。片方のサイドで売買が成立した後、市場価格が大きく変化する前に反対サイドで執行しポジションを閉じる⁵⁵。取引相手方が支払うスプレッドや流動性需要コスト、リベート⁵⁶を収益源とする。典型的なポジションの保

53 当該分類では、取引主体が売買に利用する情報の種類に応じて区分している。こうした分類のほかに、高頻度取引が探索する取引機会のタイプに応じた分類もある。例えば U.S. Securities and Exchange Commission [2010] では、受動的マーケット・メイク（passive market making; 本稿の機械的流動性供給戦略に相当）、裁定取引（arbitrage; 市場間、資産間、商品間の非効率性を取引機会とするもの；本稿では統計的裁定取引に分類）、構造型（structural; 市場の構造的欠陥を取引機会とするもの）、指向型（directional; 価格変化の方向を予想して取引機会とするもの；本稿のマーケット・マイクロストラクチャーおよびイベント取引が相当）の4つに分類している。

54 本稿では、戦略分類を概説するとどめるが、個別具体的な高頻度取引戦略については、Durbin [2010] に詳しい。

55 ただし、価格が想定以上に動いた場合あるいは構築したポジションと逆方向に遷移した場合には、成行注文によりポジションを閉じることもある。

56 リベートとは、一定以上の規模の指値注文を一定時間以上提示する投資家に対して、取引所や代替市場を運営する主体が、当該注文が執行された割合に応じて支払う非常に少額の報酬のこと。例えば、NYSE やドイツ証券取引所（Deutsche Börse）などでは、成行で執行した投資家からフィーを徴求する一方で、その

有時間は1分未満とされ、すべてアルゴリズムによって機械的に執行されている⁵⁷。当該戦略では、価格が大きく変化した場合に想定する価格でポジションを閉じることができない在庫リスクや未約定リスク、逆選択リスクを抱える⁵⁸。

(b)マーケット・マイクロストラクチャー戦略は、価格、出来高、注文フローといった市場内情報を用いることで逆選択リスクを低減することを企図した機械的流動性供給戦略の発展版である。注文フローの偏りや積極性⁵⁹、ビッド・オファー・スプレッドの変化といったマーケット・マイクロストラクチャーの動きを分析し、価格の変化方向を確率統計的に予想することでポジションを調節し、より積極的あるいは消極的に売買する⁶⁰。典型的なポジションの保有時間は10分未満とされる⁶¹。

(c)イベント戦略とは、日中取引時間帯に市場外から流れ込むニュースや経済統計といった市場外情報が市場価格に与えるインパクトから収益を得ることを目指す取引である。情報を収集するとともにそれが価格に与えるインパクトや方向性を予測し、イベントにいち早く反応することで収益を得ようとする。近年では、定性的なニュース情報を定量化（ニュース・マイニング）し、アルゴリズム取引に活用する動きもみられている⁶²。市場価格が十分に動いた後にポジションを閉じるため、ポジションの保有時間は(a)、(b)より長く、1時間未満とされる。

ロ. 統計的裁定取引

統計的裁定取引とは、数理統計的な手法を用いて価格の歪みをいち早く発見することで収益を得ようとする取引形態である。典型的なポジションの保有時間は1日未満とされる⁶³。金融市場では、市場参加者のセンチメントの変化や一時的な流動性の不足、資産間あるいは市場間の情報伝達の遅延などを背景に、短期間に理論的・

多くを流動性提供に対するリベートとして指値投資家に支払っている。当該体系は、メイカー・テイカー制（maker-taker model）と呼ばれる。わが国では、チャイエクソ（Chi-X）が同体系を導入している。一方、東証（現物株）では、現在のところ証券会社からの注文件数に応じて増減する手数料体系となっており、メイカー・テイカー制は導入されていない。

57 Hasbrouck and Saar [2009] による実証分析では、2004年の米ナスダック市場に到来する指値注文の36.69%が2秒以内に取り消されているとの結果が得られている。これは高頻度な取引による流動性供給の拡大と、機械的流動性供給のポジション保有時間が2004年の時点で既に数秒という短時間であったことを示唆するものである。

58 当該戦略は、マーケット・メイカーの在庫モデルを前提として構築されていることがある。そうしたモデルの一部は杉原 [2011] で紹介する。

59 注文フローの積極性は、例えば指値注文と成行注文の比率など、注文フローが価格に積極的に働きかけようとしているか否かを表す指標で計量される。

60 ここで積極的・消極的とは、売買行動が価格にインパクトを与えるか否かと関係する。例えば注文フロー等から価格が上昇すると予想する際には、購入は成行注文や最良買い気配より高めの指値注文によって積極的に（価格にインパクトを与えるかたちで）行う一方、売り注文は最良売り気配より高めの指値注文などにより消極的に（価格にインパクトを与えないかたちで）行うといった戦略がとられる。

61 当該戦略は、注文フローに付随する情報の非対称性の大きさを予測するモデルを前提として構築されていることがある。そうしたモデルの一部については杉原 [2011] で紹介する。

62 ニュース・マイニング技術やイベント取引の理論モデルは杉原 [2011] で紹介する。

63 本稿では、統計的裁定取引を高頻度取引と別に分類しているが、高速・高頻度に行われる裁定取引を高頻度取引の一形態として分類することもできる。

統計的に非合理的な価格が形成されることがある⁶⁴。統計的裁定取引戦略は、そうした非合理的な市場価格が時間の経過に伴い合理的な価格に平均回帰するとの前提で組み立てられている。統計的裁定取引戦略には、金融工学に基づいた理論価格と市場価格の乖離を取引機会とする形態（理論駆動型戦略）⁶⁵と、過去の価格トレンドや収益率変動パターンからの著しい統計的乖離を取引機会とするテクニカル分析に類似した形態（データ駆動型戦略）⁶⁶の主に2形態がある⁶⁷。

ハ. クオンツ取引

クオンツ取引は、計量的・数理的に分析可能な情報を幅広く集め、取引機会を探索する。ブラック・ボックス取引とも呼ばれ、個々の具体的な戦略の詳細はほとんど明らかになっていないが、クオンツ取引に分類される戦略は非常に幅広いとみられる⁶⁸。株式市場を対象とした戦略では、バリュー／グロース、順張り／逆張りといった伝統的取引手法を計量モデル化するとともに、取引コスト・モデルやポートフォリオ理論と組み合わせ効率化した戦略から、ヘッジファンドに類似したマーケット・ニュートラル戦略、市場をリバース・エンジニアし価格変動や市場流動性に再帰的に現れるパターンを人工知能によって分析（データ・マイニング）し、類似のパターンが再来した場合に取引機会とする統計的裁定取引の発展版までがある。ポジションの保有時間は1日未満から数週間とされ、短期ではあるが一般に高頻度取引より長い。

二. 大口取引向けアルゴリズム取引との類似点・相違点

表6には、こうした高頻度取引等と3節(4)で紹介した大口取引向けアルゴリズム取引について、その類似点・相違点をまとめている。大口取引向けアルゴリズム取引は主に投資期間が中長期である機関投資家が利用するのに対して、高頻度取引等は、それを専門とする独立取引業者（proprietary trading firm）や「モデル系」と呼ばれる一部のヘッジファンドのほか、証券会社や傘下のファンド、CTA（commodity

64 統計的裁定取引が取引機会とする短時間の裁定機会には急性的非効率性（acute inefficiency）と呼ばれる。これに対して、数ヶ月から数年といった長期間持続する非効率性は慢性的非効率性（chronic inefficiency）と呼ばれる。

65 理論駆動型戦略の典型例としては、現先スプレッド（ベース）の乖離を裁定する取引、指数型ETF（上場投資信託）とその構成銘柄の価格差を裁定する取引、オプションのプット・コール・パリティを裁定する取引、バリエーション・スワップ・レートと、ヨーロッパ・オプションのバスケット価格の乖離を裁定する取引（杉原 [2010] の補論3参照）、為替相場の三角裁定取引などがある。

66 データ駆動型戦略の典型例としては、過去数期間の収益率 R の平均 $E[R]$ と分散 $V[R]$ を求め、足許の収益率が $E(R) - 2\sqrt{V[R]}$ を下回った場合購入し、 $E(R) + 2\sqrt{V[R]}$ を上回った場合売却するといった収益率ジャンプ取引、小型株と大型株の価格への情報反映速度の差異を収益源とする情報遅延取引、国債の銘柄全体から推定される滑らかなイールド・カーブに比して割高な銘柄を売却し割安な銘柄を購入するボックス取引、国債を保有するとともに同期間の金利スワップを支払うアセット・スワップ取引などがある。

67 統計的裁定取引と人工知能については、杉原 [2011] で解説する。

68 クオンツ取引については、Kestner [2003]、Tortoriello [2008]、Narang [2009]、Brown [2010]、Fabozzi, Focardi, and Kolm [2010] などの文献がある。

表6 大口取引向けアルゴリズム取引と高頻度取引等との類似点・相違点

	大口取引向け アルゴリズム取引	高頻度取引	統計的裁定取引・ クオンツ取引
主な利用主体	・中長期投資の機関投資家	・独立取引業者 ・ヘッジファンド ・証券会社	・ヘッジファンド ・独立取引業者 ・証券会社の自己勘定
アルゴリズムの 主な利用目的	・取引コストの削減 ・取引機会の発見	・売買収益 ・マーケット・メイク	・売買収益 ・取引機会の発見 ・取引コストの削減
執行に要する 時間	数分～数日	数ミリ秒～数秒	数ミリ秒～数日
ポジションの 保有時間	中～長期	超短期	短期
流動性の需給	主に需要	供給目的だが需要も	需給いずれも
利点	・執行の効率化 ・マーケット・インパクトの削減	・市場への流動性供給 ・ビッド・オファー・スプレッドの縮小	・市場の効率化、歪みの是正
問題点・課題	・リバース・エンジニアリングのリスク	・不安定な流動性供給 ・売買システムへの過大負荷	・群集行動的な売買 ・資産相関、連動性を過度に高める恐れ
背後にある 主な理論・技術	・最適執行戦略 ・確率制御 ・オペレーションズ・リサーチ	・マーケット・マイクロストラクチャー ・時系列解析 ・ニュース・マイニング	・金融工学 ・人工知能、データ・マイニング ・時系列解析

trading advisor) などによって行われている⁶⁹。

Aldridge [2009a]によると、高頻度取引等を行う投資家のメリットとして、リターン／リスク特性が一般的なポートフォリオと異なるためリスクの分散化に役立つ、夜間のポジション保有リスクを削減することができるといった点が挙げられている。また、社会厚生上のメリットとしては、市場に流動性を供給する、市場の歪みを是正し、市場の効率性を高める役割を果たすといった点が挙げられている⁷⁰。しかし一方で、市場のボラティリティが大きい局面で一斉に取引額を落とすことがあり、市場への流動性の供給が不安定になるといった点、あるいは反対に、高頻度取引等は市場のファンダメンタルズではなく、価格の微小変化を先読みして売買することから、こうした機械的な売買主体が市場の大勢を占めると、価格がファンダメンタルズから乖離するリスクが高まるといった点も指摘されている。また、高頻度取引等は、取引所への発注数が多くその取消しも頻繁に行うことから売買システムへの負荷が大きい点、類似のモデルや価格パターンに基づいて売買することから、群集行動的な価格形成を誘発するとの懸念など、課題もいくつか指摘されている⁷¹。

69 米国では、過去に金融機関の情報技術者等であった個人が引退後に行っているケースもある。

70 ただし、脚注49で解説したように、高頻度取引は流動性の消費も大きいことが最近の研究でわかっている。

71 こうした点は、6節(2)でも解説する。

(6) アルゴリズム取引の利用状況

注文データから、アルゴリズム取引であるか、人を介した注文であるかを区別することは通常困難であるため、アルゴリズム取引の規模を正確に示す統計はない。ただ、電子注文の電文数や、証券会社が顧客向けに提供するアルゴリズムの売買高を、アルゴリズム取引の代替指標とすることで、その規模を調査している研究は一部に存在する⁷²。そうした文献を参考にすると、アルゴリズム取引が全取引に占めるシェアは、米国の株式市場で約6~7割⁷³、欧州の株式市場で5割程度⁷⁴、主要な為替市場で4~7割⁷⁵と、既に半数近く、あるいはそれ以上の取引がアルゴリズムによって行われていると推計されている。一方、わが国株式市場では、アルゴリズム取引の規模は米国と比べまだ小さく、過半には達していないとみられている⁷⁶。

また、戦略別にみたアルゴリズム取引の利用状況に関する統計も存在しない。ただ、これについては、証券会社が大口取引を行う顧客向けに提供するアルゴリズムの利用状況を個々に整理した情報が存在する。そうした情報からわが国機関投資家のアルゴリズム取引戦略の利用状況を推察すると、VWAP戦略が5~7割程度と圧倒的に多く、次いでPOVやIS戦略がそれぞれ1割程度となっているようである。これは、現在のわが国機関投資家の多くが、取引コストの削減よりむしろベンチマークに近い執行を行ったか否かの観点から執行の質を判断していることを示唆するものである。一方、米欧ではベンチマーク型のほかコスト型アルゴリズムやダイナミック戦略の利用も多いようである。

(7) 発注オプションの多様化

米欧では、アルゴリズム取引が普及するにつれて、証券会社が従来、大口取引向けアルゴリズム取引の品揃えの1つとして機関投資家に提供していた発注形態を、

72 当該市場規模については、Chaboud *et al.* [2009]、Hendershott, Jones, and Menkveld [2010] といった学術研究のほかに、アイト・グループ社 (Aite Group, LLC) やタブ・グループ社 (The Tabb Group, LLC) といった米国の金融系コンサルティング会社などでも調査している。

73 Hendershott, Jones, and Menkveld [2010] あるいは O'Hara [2007] による。例えば O'Hara [2007] では、2006年6月第3週のNYSE取引高に占めるアルゴリズム取引の割合は62.6%に達するとしている。

74 Hendershott and Riordan [2009] によるドイツ証券取引所で取引されたDAX構成30銘柄を調査した結果(2008年1月時点)。当該文献では、全取引に占めるアルゴリズム取引の割合は、取引金額が大きくなるほど低下するとの結果も得られている。

75 Chaboud *et al.* [2009] の調査による。2006~07年のEBS(脚注153参照)を経由したユーロ/ドル、ドル/円、ユーロ/円の約定において、売り手・買い手の少なくともどちらか一方がコンピュータ接続による発注である場合の割合を示す。

76 わが国市場のアルゴリズム取引規模を調査した学術研究はまだみられていないが、最近の東証の資料(東京証券取引所 [2010])によると、2010年央時点で、コロケーション(co-location; 脚注91参照)を利用した注文件数が全注文件数の4分の1程度を占めているとの調査結果がある。コロケーションは、アルゴリズム取引の一種である高頻度取引等で利用されており、わが国株式市場でもアルゴリズム取引が拡大しつつあることが示唆される。

取引所が指値・成行注文に付随するオプションとして受け付けるようになっている。例えば NYSE は、証券会社経由の発注形態として現在 24 種受け付けているほか、取引所フロアのブローカー（floor broker）や DMM（designated market maker）⁷⁷を加えると現在 33 種の発注形態がある⁷⁸。発注オプションは、指値の滞在時間に関するもの（duration instruction）⁷⁹、注文の達成割合に関するもの（fill instruction）⁸⁰、イベントに基づいて発注の可否を判断するもの（linking instruction）⁸¹、注文の他市場への回送に関するもの（routing instruction）などさまざまである。3 節(4)に示したペッグやアイスバーグ戦略は、米欧では取引所への注文指図の一形態となっている^{82,83}。

多様化する発注形態のうち、特に注目されるものに IOC（immediate or cancel）注文、隠れた注文（hidden order）、仲値注文（center-point order）がある。IOC 注文は即時執行されない分量が自動的に取り消されるオプション付きの指値または成行注文である⁸⁴。後述する高頻度取引で多用される形態であり、現在、NYSE への注文指図のうち最大の割合を占めているといわれている。隠れた注文は、指値注文板に開示しない指値注文である^{85,86}。仲値注文は、常に市場の最良気配の中間価格（仲値）で売買するように決められた指値または成行注文である⁸⁷。なお、IOC 注文と隠れた注文は関連している。すなわち、隠れた注文の存在を確認する目的で、小額の IOC 注文をさまざまな価格帯に出す市場参加者が存在するといわれている⁸⁸。

77 NYSE では、取引所フロアでマーケット・メイクを行っていたスペシャリストの役割を拡張し、DMM と呼ばれる新しいマーケット・メイカーを導入している。

78 詳細は New York Stock Exchange [2010] を参照。

79 例えば当日約定されない場合取り消される注文や、約定あるいは取り消されない限り翌営業日（あるいは 1 週間といった指定の期間）だけ持ち越される注文などがある。

80 例えば、指定した分量約定するまで滞在する指値注文や、指定した最低限の分量執行されない限り即座に取り消される指値注文などの形態がある。後述の IOC や FOK は注文の達成割合に関する発注オプションの代表例である。

81 例えば、価格が指定した価格以上に上昇した場合に買い注文を出す、あるいは指定価格以下に下落した場合に売り注文を出す逆指値注文などがある。

82 NYSE では、アイスバーグ戦略型の注文を“block reserve order”と呼んでいる。

83 なお、わが国では、PTS（脚注 96 参照）である SBI ジャパンネクストやチャイエックス・ジャパンにおいて、アイスバーグやペッグの注文指図が可能となっている。

84 IOC と類似の発注オプションに FOK（fill or kill）がある。FOK は、注文するすべての分量が即時に執行されない限り注文すべてが即座に取り消される指値注文である。

85 NYSE では、隠れた指値注文をダーク・リザーブ（dark reserve）と呼んでいる。ダーク・リザーブは、最良気配の内側、外側、最良気配上のいずれの価格帯にも提示できる。また、アイスバーグ注文は、その一部を開示しないという意味で隠れた注文の一形態である。

86 NYSE のほかに、ドイツ証券取引所、LSE の SETS（stock exchange electronic trading services）、トロント証券取引所、ユーロネクスト、マドリッド証券取引所（Bolsa de Madrid）、ターコイス（Turquoise）、チャイエックス可視（Chi-X visible）など、多くの取引所、取引システムで売買指図の 1 つとして隠れた注文（主にアイスバーグ注文）が可能となっている。わが国でも、一部の PTS（脚注 96 参照）でアイスバーグ注文を受け付けている。隠れた注文については、後述の 4 節(3)でも触れる。

87 豪州証券取引所（Australian Securities Exchange: ASX）、ドイツ証券取引所の Xetra などで行われている。ASX では、仲値注文は他の仲値注文とのみ付け合わされ、通常の注文とは付け合わされない。

88 こうした手法の一部はゲーミングあるいはフィッシングと呼ばれており、本来の隠れた注文の目的を阻害するとして、一部で問題視されている。この点については 6 節(3)ロ. で解説する。

(8) アルゴリズム取引の背後にある理論と技術

イ. アルゴリズム取引戦略の理論

取引コスト削減を企図したアルゴリズム取引戦略の要は、取引コストの各要素をいかに精緻に予測し、執行を効率化できるかにある。2節(2)で解説したように、こうしたコストの予測には不確実性が伴うため、数理モデルと過去の市場データを基に確率・統計的に推定する必要がある。特に、取引コスト全体の削減を企図するコスト型・参加型アルゴリズムの背後には最適執行戦略の理論モデルが応用されている。また、高頻度取引においても、マーケット・メイカーの在庫リスクや逆選択問題といった古くから知られているマーケット・マイクロストラクチャー理論⁸⁹のほかに、計量経済学の時系列解析やテキスト・マイニング技術などが応用されている。また、統計的裁定取引やクオンツ取引には、金融工学の価格付け理論や時系列解析のほかに、テクニカル分析や、データ・マイニング、テキスト・マイニングといった人工知能など、幅広い学術研究が応用されている(表6)。こうした戦略の背後にある学術研究は、別途、杉原[2011]でまとめる。

なお、市場参加者が個々の理論を応用して、どのように新しい戦略を構築していくかについては、証券会社や投資家の知的財産であるため、一般には公開されていない。ただ、実務家が行う戦略を数学的に解釈する動機から、公開されていない戦略に関しても理論研究が進んできている。こうした学術研究は、実務で直接利用されているとは限らないものの、取引戦略を具体的に理解するために有用であることから、杉原[2011]で整理する。

ロ. アルゴリズム取引を支える情報技術

アルゴリズム取引の実現には、数理モデルのほかに情報技術が重要である。そうした技術としては、注文情報電文の規格化⁹⁰、遅延の低減を実現する売買システムとコロケーション(co-location)⁹¹、アルゴリズム構築を容易にするアプリケーショ

89 こうした理論については、O'Hara [1995] に詳しい。

90 アルゴリズム取引等の電子取引に特化した標準プロトコルとして、1990年代に金融情報交換(financial information exchange: FIX)プロトコルが開発され、現在世界の多くの金融商品の電子売買に幅広く利用されている。

91 3節(3)で解説したように、高頻度取引等では、取引主体が発注してから市場に注文が届くまでの時間、および市場価格、出来高、指値板といった情報が取引主体に到来するまでの時間の2つをできる限り短縮したいというニーズがある。こうした時間は注文の遅延(latency)と呼ばれ、OMSや取引所の注文付合せシステムでは遅延を低減させる仕組みが導入されている。現在、当該遅延はミリ秒のレベルまで削減されてきており、高頻度取引を行う市場参加者は、マイクロ秒(1マイクロ秒は1秒の百万分の1)単位の遅延の低減を目指している。もっとも、海外市場に発注する場合、物理的な距離ゆえ最速のネットワークを経由しても数十～数百ミリ秒の遅延が発生する(例えば、エクスポネンシャルeファイナンス社の最速ネットワークを利用した場合、ロンドンとニューヨーク間の遅延が68ミリ秒、東京とニューヨーク間は246ミリ秒となっている)。売買システム間の物理的な距離と執行速度や取引コストの関係に関する実証分析としては、Garvey and Wu [2010]がある。こうした中、物理的な距離を削減することで遅延を限界まで低減するコロケーションと呼ばれるサービスが取引所等から提供されるようになっている。コロケーションと

ン⁹²、メモリ上に展開する高速なデータベース⁹³などが挙げられる。詳しくは、Kim [2007]、Johnson [2010]などを参照。

4. 代替市場

本稿において代替市場とは、東証、NYSE、LSEといった伝統的な取引所の立会取引⁹⁴以外の取引の場を指す。代替市場には、取引所の立会外（場外）取引、証券会社やその関連会社のほか情報ベンダーやファンド等がブローカー登録し運営する私設の市場がある⁹⁵。代替市場のうち私設の取引システムについて、米国では主に代替取引システム（alternative trading systems: ATS）、欧州では多角的取引ファシリティー（multilateral trading facilities: MTF）、わが国では私設取引システム（proprietary trading systems: PTS）⁹⁶と呼ばれているが、本稿ではこうした取引所以外の取引システムと取引所の立会外取引（主に大口取引、バスケット取引向けの定時付合せ）を合わせて代替市場と呼ぶ⁹⁷。

近年米欧を中心に、取引所に集まる流動性に加え代替市場に集まる流動性も活用することで取引コストを削減する動きが進んでいる。2節(1)に記したように、マー

は取引所の注文付合せシステムが載る高速な LAN 上に、取引主体のアルゴリズム等を格納できる発注システムを設置するサービスであり、東証、大証、NYSE、LSE など世界的に実施されている。東証のコロケーション利用状況については、脚注 76 を参照。なお、米国では、コロケーションの平等・公平な利用に向けて、規制が強化される可能性がある（U.S. Commodity Futures Trading Commission [2010]）。

92 アルゴリズムは、通常 C++ や Java といったオブジェクト指向型言語で構築されている。しかし近年は、投資家のアルゴリズム構築を補助するミドルウェアが登場し、従来より容易にアルゴリズムを構築できるようになっている。例えばプログレス・ソフトウェア社のアパマ（Apama）という商品は、スクリプト言語と GUI によって、簡便かつ視覚的にアルゴリズム構築が行えるようになっているほか、利用頻度の高いアルゴリズムはあらかじめ雛型として提供されている。

93 アルゴリズム取引では、リアルタイムの情報を即座に取引に活用したいとのニーズがある。こうしたニーズを満たす情報技術として複合イベント処理（complex event processing）がある。複合イベント処理とは、市場から到来するデータをハードディスクに格納することなくメモリ上に展開する（オンメモリ・データベース）ことでデータへのアクセス時間を短縮し、高速なイベント検知やリアルタイムの集計などを可能とする技術である。当該技術をアルゴリズム取引に応用した商品がサイベース社などから提供されている。取引における複合イベント処理の利用については、DeLoach and Wootton [2009] などの文献がある。

94 現在、ほとんどの取引所の立会取引は電子化されているが、取引所が設定する立会時間内に個別競争売買（オークション）によって注文を付け合わせる市場は、引き続き立会取引と呼ばれている。

95 このほか米国では、私設の取引システムが大規模化し、取引所に転換する例が相次いでいる。こうした市場は、取引所転換後も NYSE やナスダック等の上場銘柄を売買対象としていることから、代替市場に分類する。

96 わが国では、1998 年の取引所集中義務の撤廃により、PTS の設立が法律上認められた。現在、PTS の設立認可、価格決定方式、取引報告等については、金融商品取引法および関連する政令で規定されている。こうした PTS の法令面については、山下・神田 [2010] に詳しい。また、PTS の価格決定方式については、脚注 104 を参照。

97 これら以外の呼称として、米国では電子コミュニケーション・ネットワーク（electronic communication network: ECN）、欧州では SI（systematic internalisers）などもある。また、大口取引を定時に付け合わせる私設の代替市場は、特にクロッシング・ネットワーク（crossing network）とも呼ばれている。個々の呼称の違いは、地域や発展形態等の違いによるが、本稿では、それらの相違の詳細や発展の歴史について立ち入らない。

ケット・インパクトは市場の流動性が低いほど、また取引情報が広がるほど大きくなる特徴を有している。遅延コストや機会コストは、取引の意思が市場に流布することで増大する特徴がある。代替市場を活用して売買対象商品の流動性をできる限り取り込むとともに、こうした情報の流布を抑制することでマーケット・インパクトを削減する試みが、近年、米欧を中心に進んできている。本節では、そうした代替市場の現状についてみていく。

(1) 市場の分類

代替市場における注文付合せの仕組みは多岐にわたる。新しい注文付合せ形態の発展、証券会社の内部付合せや取引所の立会外取引の進展に加え、取引所も巻き込んだ市場間競争の拡大を背景に代替市場を巡る環境は多様化・複雑化している。表7には、Johnson [2010] を参考にしつつ、現在の代替市場および取引所の形態を筆者の判断に基づいて分類するとともに、それぞれの分類に該当する日米欧市場の例を記している⁹⁸。代替市場は、駆動要因のほか、注文付合せの頻度、価格決定方式、注文情報開示の有無によって分類できる。以下では、それらについて個々にみていく。

イ. 駆動要因

駆動要因としては、呼値駆動型 (quote-driven)、注文駆動型 (order-driven) およびそれらの混合であるハイブリッド型、および宣伝駆動型 (advertisement-based) の4タイプに分けられる。呼値駆動型は、マーケット・メイカー (ディーラー) が常にビッド/オファー (呼値) および取引可能な分量を提示し、取引の相手方となる。米国のナスダック市場が従来とってきた注文付合せ形態がその典型といわれる⁹⁹。同タイプの市場では、マーケット・メイカーが市場の需給に応じて呼値を変化させることで価格が変化するほか、マーケット・メイカーが示している分量以上の取引を望む主体が現れた場合に、マーケット・メイカーと当該取引主体が価格等の交渉を行うことでも価格が変化する。したがって、呼値駆動型市場ではマーケット・メイカーという流動性の供給主体が価格形成を主導している。一方、注文駆動型は、指値注文板 (central limit order book) に市場参加者の注文を集め、付け合わせるタイプの市場である。東証や大阪証券取引所など、わが国ではこのタイプの市場が中心である。注文駆動型市場は、比較的流動性が高い銘柄について採用されており、流動性の需要主体が価格形成を主導している。ハイブリッド型は、呼値駆動型と注文駆動型の双方の仕組みを併用しているタイプである。指値注文板に市場参加者の注文を集めるとともに、指定されたマーケット・メイカーが呼値を提示することで、

98 代替市場の付合せ形態は多様化しているため、明快に分類することが困難な場合がある。表7中に例示している市場の一部には、必ずしも例示されている区分のみに該当するとは限らない市場もある。

99 ナスダック市場は、以前は純粋な呼値駆動型市場であったが、現在はハイブリッド型市場に移行している。

表 7 市場の分類と日米欧市場の例

注文付合せ頻度	価格決定方式	駆動要因			
		注文駆動型 (流動性需要主体主導)	ハイブリッド型 (呼値駆動と注文駆動を併用)	呼値駆動型 (流動性供給主体主導)	宣伝駆動型
	オープン・オークション	東証 <i>arrowhead</i> 大証 <i>Hercules</i> 、 JASDAQ DirectEdge BATS LSE <i>SETS</i> Instinet CBX-ASIA	東証 <i>Tdex+</i> NYSE、 <i>Amex</i> NASDAQ LSE <i>SETSqx</i> 、 Turquoise Chi-X <i>visible</i> ICAP <i>EBS-Spot</i>	LSE <i>SEAG</i> 、 <i>EQS</i>	
連続	ブラインド・オークション	Instinet CBX NYBX	Chi-Delta		
	相対交渉				Liquidnet
	既定価格(仲値)		BIDS (midpoint peg)		BLOCKalert Pipeline ICAP BlockCross
	内部付合せ		証券会社の内部付合せ Level BIDS (limit orders)		
定時 (コール)	オープン・オークション		NYSE <i>Arca</i> (<i>limit orders</i>) LSE <i>SETSqx</i> (<i>periodic</i>)		
	ブラインド・オークション	Euronext <i>illiquid</i>	NYSE <i>Arca</i> (<i>market orders</i>)		
	既定価格(VWAP等)	東証 ToSTNeT-2 大証 J-Net Instinet JapanCrossing ITG POSIT	NYSE MatchPoint		
	相対交渉	東証 ToSTNeT-1 大証 J-Net NYSE <i>block cross</i>			
リクエスト	内部付合せ	個別の内部付合せ			
	相対交渉			店頭市場	店頭市場

- 備考：1) 斜体表示は取引所の立会取引に相当する市場。
 2) シャドローは、本稿の定義による非公開市場の形態。
 3) 市場の例は、日米欧の株式市場と為替市場を対象とし、2010年4月現在の状況を基に作成している。
 4) 分類については、脚注98・101・103・114・117を参照。

資料：各市場の運営会社の公開情報、および Johnson [2010] や Mittal [2008] の分類を参考に作成。

常に取引可能な環境を提供する工夫が施されている。ハイブリッド型は、近年増加してきているタイプである。具体的には、ナスダック市場のようにマーケット・メイカー等の売買気配を指値注文板の形式で開示している市場や、LSEのSETSqx (stock exchange electronic trading services—quotes and crosses) のように流動性の低い銘柄を対象として呼値駆動にコール・オークション¹⁰⁰を組み合わせている市場など多様である¹⁰¹。最後に宣伝駆動型は、取引意思情報 (indication of interest: IOI)

100 後述の4節(1)ロ.を参照。

101 表7のハイブリッド型には、マーケット・メイカー制度と指値注文板の双方を取り入れている市場の

を市場に宣伝することで取引の機会を作るタイプの市場である。IOI では、到来した注文の概算量について出来高に対する比率などのかたちで伝達されることがあるが、価格情報は一般に伝達されない。また他の3タイプと異なり、宣伝駆動型は常時売買を可能とする仕組みではない。

ロ. 注文付合せの頻度

次に、注文付合せの頻度は、連続、定時 (periodic crossing; コール)、リクエストの3つに分類できる¹⁰²。連続タイプは、取引時間帯に、価格優先・時間優先の原則に従い、売りと買いの両サイドで連続的に注文を付け合わせる連続ダブル・オークション (continuous double auction) が中心である。取引所の立会取引にはこのタイプが多い。一方、定時タイプは、日中の決められた時刻に市場の流動性を集め売買を一度に付け合わせるコール・オークションである。同タイプは、取引所の立会外取引ほか一部の代替市場でも採用されている。リクエストは、取引主体の要望に応じて証券会社が取引相手方を探し付け合わせるタイプである。エキブチックな金融派生商品など参加者が限定されている店頭市場 (over-the-counter market: OTC) はこのタイプに属する¹⁰³。

ハ. 価格決定方式

また、価格決定方式としては、注文情報が市場参加者に開示されるオープン・オークション (open auction) と開示されないブラインド・オークション (blind auction) のほか、相対交渉 (negotiated)、既定価格 (predetermined)、内部付合せ (internalization) の各方式に分類できる¹⁰⁴。オープン・オークションは、一般に取引所の立会取引で採用されている手法であり、注文情報とその付合せの過程を指値注文板として公開することで市場に価格発見機能を提供している。これに対して、ブラインド・オークションとは、注文情報が開示されないオークションである。取引所が運営する立会外取引の多くは、通常ブラインド・オークション方式で行われている¹⁰⁵。次

ほかに、証券会社の自己勘定や代替市場の運営主体が積極的に売買の相手方となりうる市場も分類している。

102 東証のように、寄引では時刻指定のコール (バッチ)・オークション (いわゆる板寄せ)、日中は連続オークションの形態をとっている「連続コール」の形態もある。これらを連続オークションと分けて厳密に分類することもできるが、本稿では連続コールの形態を連続オークションに含めている。

103 宣伝駆動型市場はリクエストに応じた市場と考えることも可能であるが、常時注文を受け付け、付合せが可能となっていることを踏まえ、表7では連続市場に分類している。

104 わが国 PTS では、市場価格売買方式、顧客間交渉方式、顧客注文対当方式、売買気配提示方式、オークション方式の5つの価格決定方式が規定されている。それぞれを本稿の価格決定方式等の分類に照らすと、市場価格売買方式は既定価格に、顧客間交渉方式は相対交渉に、顧客注文対当方式はブラインド・オークションの一部と内部付合せに、売買気配提示方式は呼値駆動型に、オークション方式は注文駆動あるいはハイブリッド型のオープン・オークションにそれぞれ相当する。このうち、オークション方式は、取引所の立会取引と同等な注文付合せの仕組みであるが、現在、認可 PTS が本方式を採用するに当たっては、数量制限 (オークション方式による取引高全体が市場全体の1%未満であり、かつ個別銘柄の取引高が市場全体の10%未満) が設けられている (金融市場開設の免許を取得すれば当該制限は除外される)。

105 こうしたオークションの仕組みおよび理論は上田 [2010] に詳しい。

に、相対交渉方式は、取引相手方が見つかった場合に、相対で取引価格や分量を交渉する方式である。既定価格方式は、あらかじめ決められた価格決定方式に従って取引するタイプである。売り手と買い手が提示する売値と買値の中間価格（仲値）で取引する仲値方式（mid-point cross）のほか、定時型市場では直前の VWAP や終値などで取引する方式もある¹⁰⁶。一般に取引量および価格について、事前に交渉できない仕組みとなっている。最後に、内部付合せは証券会社に到来した注文プール内で取引可能な組合せが存在した場合に、取引所や他の代替市場に発注することなく証券会社の内部で付け合わせる方式である¹⁰⁷。

二. 注文情報の開示の有無（公開市場・非公開市場とダークプール）

こうした代替市場のもう1つの重要な切り口として、注文情報、最良気配値、注文付合せ過程に関する開示の有無がある。取引所の立会取引は、価格発見機能を高める目的で指値注文板の情報を開示するオープン・オークション方式の公開市場（open market、displayed market）が多い¹⁰⁸。また、指値注文全体は開示しないものの、呼値あるいは最良気配値を開示することで価格発見機能を提供している公開市場もある¹⁰⁹。一方で、注文情報、最良気配値、注文付合せ過程のいずれも開示しない市場は、非公開市場（non-displayed market）と呼ばれる¹¹⁰。さらに、非公開市場のうち、特に市場の透明性が低い証券会社の内部付合せやそれが発展した形態、および宣伝駆動型の代替市場の一部は「ダークプール」（dark liquidity pool）と呼ばれる^{111、112}。非公開市場では、価格発見機能を取引所に委ねる一方、取引の匿名性を高めることで、取引情報の流布に付随するマーケット・インパクトの低減が企図されている。表7では、非公開市場の形態をシャドーで示している。また、市場の透明性と取引形態の分類については別途、表8にまとめている。

非公開市場には、注文付合せ頻度でみると、連続、定時、リクエストのすべてのタイプがある。価格決定方式としては、ブラインド・オークションのほかに、相対交

106 ITG社のポジット（POSIT）や、NYSEが運営するマッチポイント（MatchPoint）では、直前の市場仲値で取引が行われる一方、インスティネット社（Instinet Inc.）のジャパン・クロッシング（JapanCrossing）では、終値のほか、それまでの市場価格から計算される VWAP に基づいて取引が行われている。

107 Rawal [2009]によると、内部付合せの相手方としては、他の顧客のみを大口注文、証券会社の在庫、同社のマーケット・メイカー、同社の自己勘定が可能性として考えられる。

108 例えば東証アローヘッドでは、ベスト・ビッド・オファーから上下8本の指値注文板の変化情報が開示されているほか、すべての注文情報が有償で提供されている。

109 流動性が低い銘柄を扱う株式市場や、外国為替の注文付合せシステムを運営する代替市場などが該当する。

110 当該定義に従うと、呼値駆動型市場はすべて公開市場に該当する一方、宣伝駆動型市場、証券会社の内部クロス、取引所が運営するブラインド・オークション方式の立会外取引等は非公開市場に分類される。

111 ダークプールは、本来、開示されていない注文プールという意味であったが、現在では、開示されていない注文を付け合わせる市場を指す用語となっている。ダークプールの定義については、先行研究・文献でもまちまちであり、明確な基準はない。先行研究では、価格発見機能を提供しない市場全体をダークプールとする広い定義（Mittal [2008]）から、証券会社の内部付合せのみをダークプールと呼ぶ狭い定義まで幅広い。また、米国の規制当局の資料では、ブラインド・オークション方式の取引所立会外取引は、通常ダークプールに含まれない。

112 ダークプールについては、Mittal [2008] や Banks [2010] などの文献がある。

表 8 市場の透明性と取引形態の分類

取引情報の透明性 (公開・非公開市場)		証券会社の内外	
		内部	外部
	公開市場		<ul style="list-style-type: none"> ・取引所の立会取引 ・代替市場のオープン・オークション
	非公開市場		<ul style="list-style-type: none"> ・取引所の立会外取引 ・代替市場のブラインド・オークション
	ダークプール	・証券会社の内部付合せ	<ul style="list-style-type: none"> ・宣伝駆動型の代替市場 ・複数の証券会社の合弁型ダークプール

備考：表中の破線・点線は、本稿の定義に基づいた公開市場と非公開市場、およびダークプールの境界。

涉、既定価格、内部付合せがある¹¹³。一般に非公開市場は大口注文を付け合わせることを目的とした市場であることから、駆動要因としては注文駆動型と宣伝駆動型が多いが、市場の運営主体や証券会社が取引の相手方となることがあるハイブリッド型もある¹¹⁴。また、一部の非公開市場では、一定量を超える大口注文に限り受け付けるほか、参加を機関投資家に限定しているものもある¹¹⁵。非公開市場の運営形態としては、取引所が運営する立会外取引のほか、大口取引の付合せを専門とするベンダーによるもの¹¹⁶、証券会社の内部付合せが発展したもの¹¹⁷がある。こうした非公開市場やダークプールの形態については Mittal [2008] に詳しい¹¹⁸。

(2) 代替市場の規模と日米欧の相違

代替市場の現状は日米欧でかなり異なっている。ここでは、最近5年ほどの日米欧の株式市場における代替市場の規模について、その相違点と共通点をみていく。

図3には、日米欧の株式市場の売買高シェアを取引所／代替市場別、公開／非公開市場別に分類している。(a)には、米国証券取引委員会 (U.S. Securities and Ex-

113 取引完了後にどの程度の情報が市場に開示されるかに関しては市場によってさまざまである。ブラインド・オークションの一部には、オークション後に取引が成立した価格や分量が公開されるタイプがある一方、オークション後の取引価格や分量が取引にかかわった主体のみに伝えられ、ほかには公開されないタイプ (例えば内部付合せ形態をとるダークプール) も存在する。

114 証券会社の内部付合せは、顧客からの注文以外に証券会社の自己勘定注文も含まれる可能性があり呼値駆動型の要素を持ち合わせていることから、表7ではハイブリッド型に分類している。

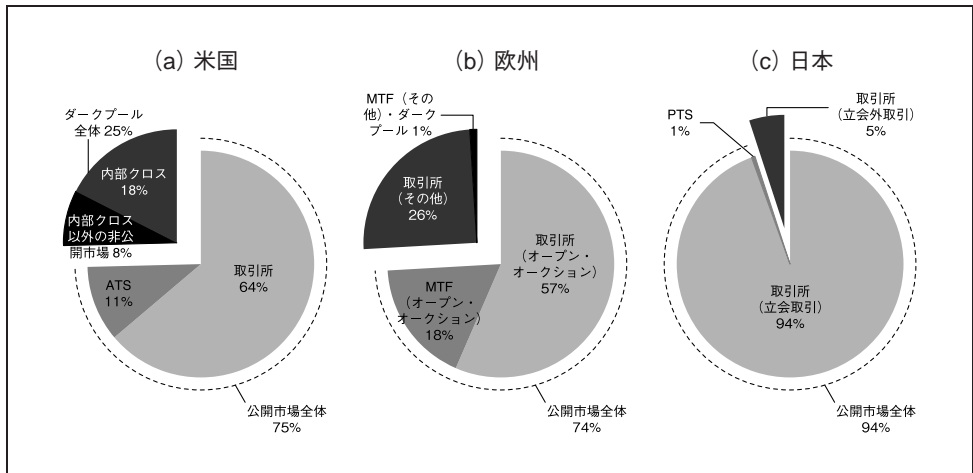
115 例えばリクイドネット (Liquidnet) が該当。

116 例えばインスティネット社は、オープン・オークション方式の市場とダークプールをともに運営している。

117 証券会社の一部門あるいは子会社として運営されているケースのほか、複数の証券会社の合弁会社として運営されているケースが多い (表7中のレベル [Level] とビッズ [BIDS] が該当する。なお、同形態は、証券会社の自己勘定注文が含まれる可能性があるためハイブリッド型に分類している)。またベンダーと証券会社の合弁形態 (表7中のブロック・アラート [BLOCKAlert] が該当) や取引所と代替市場の合弁形態 (ニューヨーク・ブロック取引所 [New York Block Exchange: NYBX] が該当) もある。

118 Mittal [2008] によると、このほか、大手のヘッジファンドや高頻度取引系ファンドがブローカー登録し運営しているダークプールもある。同形態は IOC 注文のみ受け付けることから、ピング先 (ping destination) と呼ばれている。

図3 日米欧株式市場における売買高の市場別シェア



備考：非公開市場である取引形態を分離して表示している。非公開市場の分類は、統計上の定義の相違から地域により異なるので比較の際には注意を要する。日本の非公開市場は、取引所の立会外取引のみを含み、証券会社の内部付合せとブラインド・オークション型、既定価格型のPTS取引は含まない（PTSはすべて公開市場に分類）。欧州の非公開市場は、取引所およびMTFの電子公開取引以外の取引であり、証券会社の内部付合せや店頭取引は含まない。一方、米国データはU.S. Securities and Exchange Commission [2010]による2009年9月時点の分類であり、非公開市場にはATSにおける非公開取引のほか証券会社の内部付合せが含まれる一方で、取引所が運営する定時・既定価格方式等の市場は公開市場（取引所）に分類される。また、2010年7月に米国代替市場大手のダイレクト・エッジ（Direct Edge）が取引所に転換したことから、図(a)のATSである個所の大半は、現在、取引所に分類される。米国は2009年9月時点のSECによる推計値、日欧は2010年上半期の統計データの平均値。

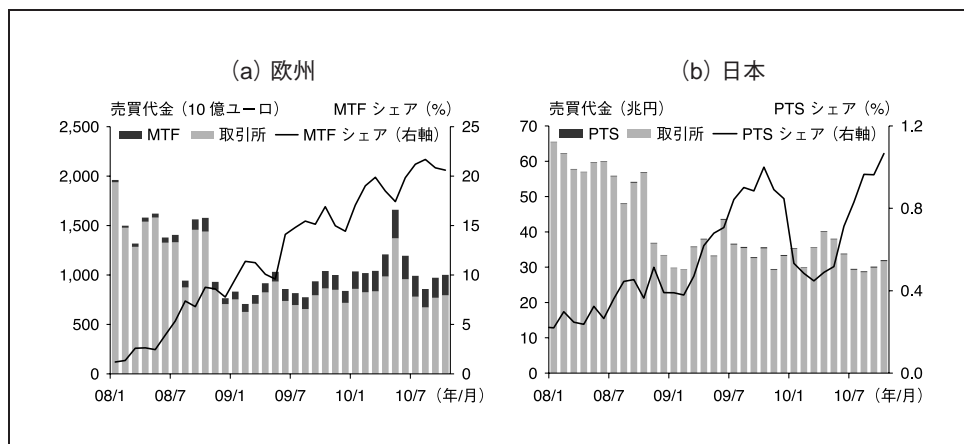
資料：U.S. Securities and Exchange Commission [2010]、FESE、日本証券業協会。

change Commission: SEC) 調査による2009年9月末時点の米国株式市場の取引高の執行場所別売買高シェアを示している。(b)には、欧州証券取引所連盟（Federation of European Securities Exchanges: FESE）が加盟する取引所・代替市場を対象に行っている毎月の取引件数・売買高に関する統計（2010年1～6月分）から算出した執行場所別売買高シェアを示している。(c)には、日本証券業協会が毎月集計・算出している取引所・PTS売買代金の統計（2010年1～6月分）から算出した売買高シェアを示している。統計上の定義の差異から各国データ（特に公開・非公開）の単純比較は難しいが、以下では、各国の特徴を簡単に整理する。

米国では、図3(a)にあるように、株式の3～4割がダークプールを含む代替市場で執行されているほか、非公開市場は全体の4分の1を占めている。米国では、古くから代替市場が売買シェアを拡大させてきた経緯から、代替市場のシェアが他国より大きい¹¹⁹。また、ダークプールも米国で発展してきた経緯から、その割合は他

119 米国における執行市場の多様化の歴史については、日本証券経済研究所 [2009]、大崎 [2009b]、清水 [2009] などに詳しい。

図4 日欧株式市場における売買高の推移（2008年1月～2010年10月）



資料：FESE、日本証券業協会。

国より大きい。なお、取引所の分類には、ATSとして運営を開始するもすぐに取引所に転換した旧ATS¹²⁰のほか、取引所によるATSの吸収合併¹²¹、取引所とATSの合併市場の設立¹²²などから、取引所と代替市場は規制の程度は異なるものの、投資家の執行場所としての差異は小さくなってきている。

欧州では、図3(b)にあるように、約2割がMTFで執行されているほか、非公開市場（取引所の立会外取引およびダークプール）は約4分の1を占めている¹²³。欧州では、欧州金融商品市場指令（The Market in Financial Instrument Directive: MiFID）が施行された2007年11月以降、MTFにおける取引が徐々に拡大している。図4(a)に示した欧州市場の売買高を時系列でみると、2009年以降売買代金が減る中でMTFのシェアは徐々に伸びてきている¹²⁴。欧州でも取引所によるMTFの買収が行われている¹²⁵。

わが国では、図3(c)に示したようにPTSにおける取引は非常に小さく、ほとんどが取引所で取引されている。また、約5%が公開市場以外で取引されているが、その大半が取引所の立会外取引となっている¹²⁶。図4(b)に示したPTS取引規模をみると、依然ごく小規模にとどまっているものの、長期的にはそのシェアを拡大させ

120 バッツ（BATS）は2006年にATS登録したが2008年には取引所に転換している。また、ダイレクト・エッジ（Direct Edge）も、2010年7月に取引所に移行している。

121 近年の例では、2005年4月のNYSEによるアーキペラゴ（Archipelago）の買収がある。

122 例えば近年では、2009年1月にNYSEとATSのピッツがNYBXを開始している。

123 図3(b)では、電子指値板での取引を公開市場に分類し、その他の非電子取引板取引は注文付合せの過程が公開されないと考え非公開市場に分類している。欧州のダークプール分類はFESEの定義による。また、統計に証券会社の内部付合せは含まれていない。

124 最近の欧州株式市場の国別にみた売買代金・件数の詳細な分析は吉川〔2009〕が行っている。

125 例えば、LSEは2010年2月に欧州大手MTFのターコイスを子会社化している。

126 PTSの一部は非公開市場の形態であるが、統計上区別できないことからすべて公開市場に分類している。

ている¹²⁷。

(3) 代替市場と取引コストの削減

イ. 企図されている取引コスト削減効果

代替市場は、一般に(i)取引所外の流動性を集めようとする、(ii)非公開市場では匿名性を高めている、(iii)一部では最良気配の内側で取引が可能である、(iv)取引手数料が取引所より低く設定されていることが多い、(v)多様な市場の主要銘柄を売買できる、(vi)高速・高精度な売買システムを謳っている、(vii)代替市場によっては時間外取引が可能であるという7つの特徴を有している。すなわち代替市場では、売買手数料とスプレッドという直接的な取引コストだけでなく、取引需要をできる限り広く取り込むとともに取引情報の流布を抑制する工夫を施すことによりマーケット・インパクトの削減も企図されている。ここでは、そうした代替市場のコスト面のメリットについて簡単に解説する。なお、代替市場を巡る問題点や課題も多く指摘されているが、それについては6節でまとめる。

上記(i)について、一部の代替市場では、取引所の立会取引に提示されない隠れた流動性(latent liquidity)を取り込むことで流動性需要コストを引き下げる効果が企図されている。例えば、平均的な売買高に比して大きい注文を有している投資家が、マーケット・インパクトへの危惧から日中の立会取引への発注をためらう可能性がある。こうした投資家が保有する売買需要は、需要としては存在しているものの、表面化していないことから、隠れた流動性と呼ばれている。価格発見機能を提供する市場に集まる売買需要に加えてこの隠れた流動性も取り込むことで、流動性需要コストが引き下げられマーケット・インパクトも低減する可能性があると考えられている¹²⁸。流動性需要コストの引下げ効果は市場に集まる流動性が高いほど大きいことから、定時・既定価格型のオークション形態がとられることが多い。すなわち、そうした市場は価格発見機能を放棄する一方で、定時型とし参加者を大口取引に限定することで、取引コストの削減効果を高めている。こうした点を企図した注文付合せは、取引所においても立会外取引として行われている。

(ii)について、非公開市場の匿名性は、取引情報や取引意思情報の流布抑制を通じて、マーケット・インパクトや機会コスト等の低減につながる可能性がある。3節(3)で示したように、市場への指値注文にはリスクや暗黙のコストが伴う。こうしたコストやリスクの一部は、注文の存在を隠すなど、その匿名性を高めることで回避できる可能性があると考えられている。特に大口取引で時間的制約が厳しい場合に

127 わが国の株式市場でPTS取引が広がらない背景としては、さまざまな点が指摘されている。例えば大崎[2009b]は、わが国PTSが主に個人投資家の取引ニーズに焦点を当てながら発展してきた経緯を指摘している。一方、深見[2010]は、わが国証券会社の最良執行義務が有効に機能していない可能性を指摘している。

128 この点については、代替市場での流動性が拡大すると取引所の流動性が低減する問題も指摘されている。それについては6節(1)で解説する。

効果が大いほか、立会取引での無用な情報の攪乱とそれに伴う価格の乱高下を抑制する効果があるのではないかと考えられている。

(iii)の最良気配の内側での取引可能性については、例えば、既定価格方式をとる代替市場では、仲値や VWAP で取引することによりオープン・オークション市場より有利な価格で執行できる可能性がある。また、相対交渉型の代替市場でも、仲値など最良気配の内側での取引を可能とすることで、スプレッドの削減が企図されている。なお(iii)および前述の(ii)に関連した仕組みは、取引所の立会取引にも取り入れられてきている。3節(7)で解説した取引所の隠れた注文が最良気配の内側に存在し、仮にそれが約定した場合にはスプレッドが低下する。こうした注文形態は、ダークプールや既定価格方式の代替市場の利点を、オープン・オークションに取り込んでいく試みといえる¹²⁹。

(iv)の手数料の低さは、直接的に取引コストを削減する。特に、高頻度取引など売買の頻度が高い取引を行う市場参加者、あるいは、低流動性銘柄の大口取引など多数回分割執行する必要がある投資家は、手数料が取引コスト全体に占める割合が大きくなることから、手数料が低い市場を選択する動機を有している¹³⁰。過去、米欧において代替市場の手数料の低さは、取引所の売買手数料の低下を促してきた面があったが、現在では当該手数料の差異は小さくなってきている。また、米英では取引所が流動性供給主体にリベートを支払う仕組みが導入されたことなどから¹³¹、手数料の低減を主目的とした代替市場の活用は少なくなってきているものと思われる¹³²。

(v)の多様な市場の主要銘柄を売買できるメリットは、欧州の代替市場の発展に貢献してきた経緯がある。代替市場の国境を超えた品揃えは、複数の国の主要銘柄を売買する市場参加者に対して利便性を提供する(大崎 [2009a])。すなわち、代替市場を利用することで、複数の国にトレーダーや OMS を配置することなく主要銘柄を執行できることから、設備投資・維持管理コストや人件費の削減という広い意味での取引コストの削減につながると考えられている。

(vi)について、代替市場の売買システムでは、より高速な執行を可能とすることにより流動性を集め一時的なマーケット・インパクトを抑える効果が期待されている。3節(5)で解説した高頻度取引等は、高速で執行できる市場に流動性を供給する特徴がある。そうした主体の流動性を取り込むことで、流動性を需要する投資家のマーケット・インパクトを削減できる可能性がある。また、代替市場の一部で提供されていた低遅延かつ高速な売買システムは、取引所を巻き込みつつ、市場全体の

129 これに関連して、代替市場では、呼値の刻みが取引所より細かく設定されていることがある。これは、投資家が求める価格により近い価格での執行を可能にするほか、取引所の立会取引における最良気配の内側で約定する可能性にもつながるものである。

130 2節(2)ロ.の表2に示した取引コストの各要素をみると、低流動性銘柄において手数料はマーケット・インパクト等に次ぐ大きさとなっている。

131 NYSE ユーロネクスト取引所では、2008年10月から、平均的な売買株数が多い取引主体に対してリベートを支払うインセンティブ・プログラムを開始している。リベートについては脚注56を参照。

132 委託手数料に関する詳細な実証分析としては Goldstein *et al.* [2009] がある。また、Borkovec and Heidle [2010] でも、一部の代替市場の手数料が世界的に低下してきていることを実証している。

売買システムの高速化・高精度化を促してきた面がある¹³³。

(vii)の時間外取引について、市場外情報によって取引所の立会時間外に金融商品の公正価値が変化する場合、翌日の寄付で売買するより即座に売買した方が得策であるとする市場参加者にとっては時間外取引を可能にする代替市場活用のメリットがある。

ロ. 実際の取引コスト削減効果

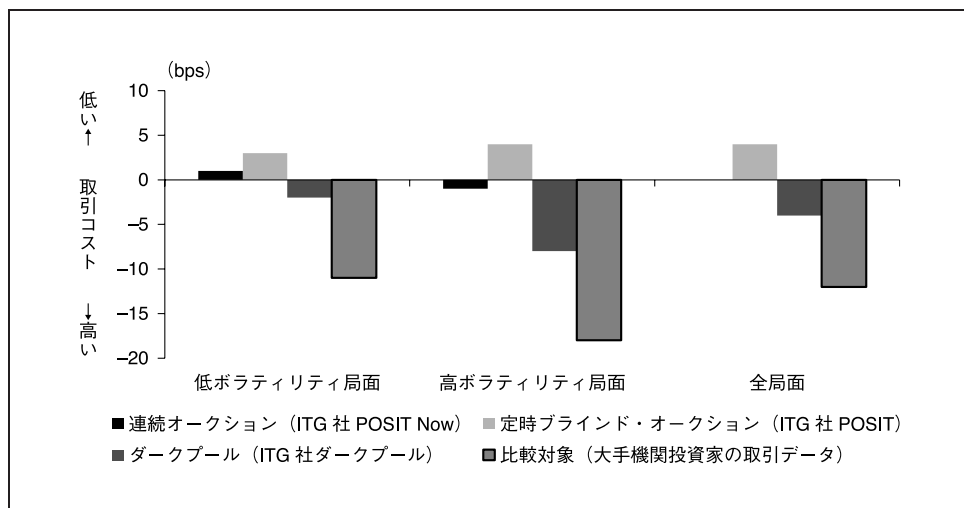
4節(3)イ.では、代替市場で期待されている取引コスト削減効果を整理したが、それらの効果は実際にどの程度であろうか。代替市場による取引コスト削減効果に関する実証分析は、学術研究としてはまだほとんど進んでおらず、代替市場の運営主体が自社システムの情宣を兼ねて分析している程度にとどまっている。ただそうした分析のうち、近年の大規模な取引データを用いた興味深い文献に Domowitz, Finkelshteyn, and Yegerman [2008] がある。彼らは、2007年に米国株式市場で取引された約2,000万件のデータを用いて、米国ITG社が運営する連続オープン・オークション、定時ブラインド・オークション、ダークプールそれぞれで執行した場合の平均的な取引コストを推計し、大手機関投資家の取引データベースから算出した取引コストと比較している。図5には、その結果を示している。それによると、同社が運営する代替市場における執行は、市場のボラティリティの高低によらず、連続オークション、定時ブラインド・オークション、ダークプールのいずれにおいても、比較対象の取引と比べ取引コストの引下げ効果があったとする結果が得られている。具体的には、ある大手機関投資家の取引データベースから算出した取引コスト全体と比較すると、これらの代替市場の平均的なコスト削減幅は、定時ブラインド・オークション型の市場で最も大きく15~20bps程度、次いで連続オークション型の代替市場が10~15bps程度、ダークプールが10bps程度となっている。

なお、ダークプールでの取引コスト削減効果が最も小さいとの結果が得られた背景として、Domowitz, Finkelshteyn, and Yegerman [2008]は、ダークプールでは執行に時間を要する点を挙げている。ダークプールは、取引相手の注文情報が参照できないほか、市場に集まる流動性が時間的に分散しているため、1つのダークプールで投資主体が希望する金額を執行することができず他市場に回送されることが多い。そうした間に発生する情報の流布やタイミング・コストの上昇が取引コスト削減効果を弱めていると分析している¹³⁴。

133 取引の高速化は、市場流動性が拡大することで社会厚生の上昇につながると肯定的に考える市場参加者がいる一方で、そうした点に否定的な見解もある。それについては、6節(4)で解説する。

134 Domowitz, Finkelshteyn, and Yegerman [2008]では、ダークプールにおいてすべての執行を終えるまでの間の時間と取引コストの削減幅を別途分析しており、取引に要する時間が長くなるほど、取引コストの削減幅が徐々に低下するとの結果を得ている。

図5 代替市場の取引コスト（対ベンチマーク）



備考：縦軸は対ベンチマークでみた取引コストの改善値（プラスはベンチマーク対比改善、マイナスは悪化）を示している。ベンチマークは、最良気配で成行売買（ビッドで売却しアスクで購入）した場合のISとしている。ITG社取引データのサンプル数は1,260万件、比較対象は約820万件となっている。データは2007年時点。

資料：Domowitz, Finkelshteyn, and Yegerman [2008] の図1を参考に作成

(4) 代替市場のメリット・デメリット

ここまで、取引コスト削減という観点から代替市場の利点をみてきたが、代替市場はなお発展途上にあり、課題や問題点も数多く指摘されている。そうした課題については主に6節でみていくが、ここでは取引所の立会取引と比較した際の代替市場のメリット・デメリットを整理しておく¹³⁵。

それらをまとめると表9のように整理できる。特に代替市場のデメリットとして、流動性が取引所より小さく、投資家が望む分量を常に執行できるとは限らないほか、取引所が通常備えている価格形成の安定性を担保する仕組みを備えていないことがある。また、代替市場に集まる流動性が拡大すると、最良執行義務がある市場参加者は、各種代替市場・取引所の流動性を統合的にモニターしなくてはならず、追加的コストが発生する。

このような点を含め、取引所、代替市場の双方にはメリット・デメリットがあるため、市場参加者は、執行においてそれらの使い分けを的確に行うことが重要となる。この点については、さらに5節(1)でもみていく。

135 ここでは、経済学的な面の比較を行うが、法制度面の論点については、日本銀行金融研究所 [1999] に整理されている。

表9 取引所の立会取引と代替市場のメリット・デメリット

	メリット	デメリット
取引所 (立会取引)	<ul style="list-style-type: none"> ・価格発見機能を提供し、売買の透明性が高い。 ・一般に流動性が高い。 ・サーキット・ブレーカーなど、価格形成の安定性を担保する仕組みが導入されていることが多い。 ・発行市場として企業に資金調達手段を提供する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・大口取引のマーケット・インパクトが大きくなりがちで、市場を混乱させる可能性がある。 ・寡占リスクがある。すなわち、取引所間の競合が小さいと、売買手数料等が高く設定される可能性や売買システムが改善されない可能性がある。
代替市場	<ul style="list-style-type: none"> ・マーケット・インパクトを低減させる工夫が施されている。 ・取引所に提示されない隠れた流動性を集めようとする。 ・取引所の最良気配の内側で取引できることがある。 ・売買手数料が低いことが多い。 ・米欧では、代替市場の売買システム間の競合により、高速で使い勝手のよい売買システムが登場してきた経緯がある。 ・多様な市場の主要銘柄を扱っている。 ・一部では時間外取引が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・価格発見機能を提供する市場が少なく、売買の透明性が低い。 ・流動性の分散化につながる。 ・フィッシングなど、代替市場のメリットを削ぐ市場参加者が存在する。 ・投資家は取引所と代替市場の気配を統合して見ていく必要があり、注文回送システムなどの追加的コストが発生する。 ・価格形成の安定性を担保する仕組みが導入されていないことが多い。 ・発行市場ではなく、企業の資金調達手段の多様化に寄与しない。

(5) 最適注文回送

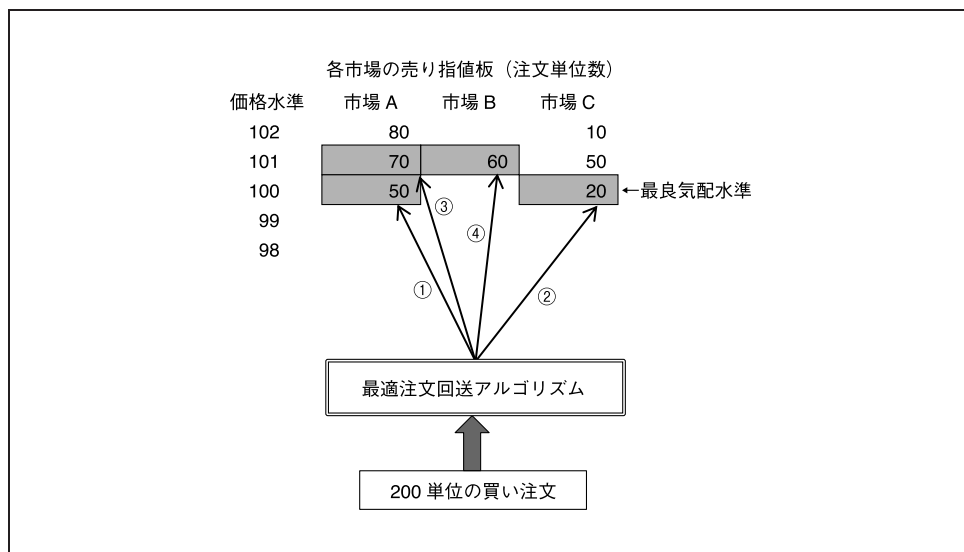
最良執行義務が課されている投資家は、最良の気配が提示される市場で最大限の分量を執行しなくてはならない。一方、代替市場の発展は、執行可能な場所の分散につながることから、投資家は最良の気配が提示されている市場を探索する必要がある。この点に対して、代替市場が発展している米国を中心に、最適注文回送（SOR）と呼ばれる仕組みが利用されている¹³⁶。SORとは、アルゴリズムに基づいて最良執行が可能な市場を探索し執行までを行うことを企図した仕組みである。

SORは、取引所や証券会社などで提供されている。一般に、複数の市場に提示されている最良気配値の水準に応じて市場・注文に優先順位を付し、価格水準が同一であれば優先順位が上位の市場から順に執行する。その際、個々の市場の指値注文板の状況に応じて自己の注引量を最適に分割する。

一般的なSORの例を図6に示した。例えばSORのアルゴリズムが投資家から200単位の買い注文を受け付ける場合を考える。このとき、売買の対象となる3つの市場A、B、Cにおいて、図に示したような売り指値注文が開示されているとする。また、SORは市場の優先順位をあらかじめ決めており、ここでは、A、B、Cの順に

136 SORに関連して、米国では、1975年から、注文を市場間で回送する市場間取引システム（Intermarket Trading System: ITS）が構築されている。その後、ITSは、自動執行システム（Computer Assisted Execution System: CAES）とリンクされ、執行までが自動で行われるようになっている。

図6 最適注文回送アルゴリズムの例



高いとする。こうした場合に、SOR は図に示している順に価格優先・市場優先で買い注文を執行していく¹³⁷。

なお、近年では、証券会社内外のダークプール（内部クロス）等を IOC 注文等によって探索した後、オープン・オークション型の代替市場および取引所の指値注文を探索することで、執行価格の改善を図る手法が広がっているようである。また、仮に希望する価格帯ですべての注文が執行されなかった場合、同価格帯への新たな注文の到来に対して指値注文や隠れた注文で執行するアルゴリズムを取り込んでいるものもある。基本的な SOR のアルゴリズムは上述のように比較的単純であるが、ダークプールや隠れた注文の存在を踏まえて最良気配を探索する SOR は、隠れた注文の存在有無やその数量が不確実であることから、それらを予測するモデルが用いられている¹³⁸。こうした SOR の理論については、杉原 [2011] で紹介する。

なお、わが国株式市場においては、最良気配を提示する市場で執行する義務は認識されているが、証券売買の大半が取引所に集まっていることから、SOR はまだほとんど浸透していない。

137 当該 SOR の形態は、複数市場の指値注文板の統合と、それに基づいた執行に類似している。一部の情報ベンダーでは、複数市場の指値注文板を統合した統合指値注文板情報を機関投資家等に提供するようになっている。

138 さらに、Rawal [2009] などによると、大口取引向けアルゴリズム取引と SOR を融合する試みも進んでいる。

5. 執行分析

アルゴリズム取引や代替市場を活用する際には、こういったアルゴリズムを用い、どの市場で執行するのが最適であるかについて、事前に過去の市場データなどを基に分析する必要がある。また、執行を行った後にも、執行が適切であったか、改善する余地はないかなどについて分析し、次の執行の改善につなげている投資家が多い。こうした取組みは、執行の事前分析 (pre-trade analysis)・事後分析 (post-trade analysis) と呼ばれており、投資家が最良執行を実現するために不可欠な過程である。ここでは、Kissell [2007, 2008]、Boni [2009]、Johnson [2010]などを参考に、そうした実務家が行う執行分析について解説する。

(1) 事前分析

事前分析は、(i)過去データと市場環境の分析、(ii)各取引コストの推計、(iii)戦略の構築・選択という3つのステップからなる。(i)の過去データの分析では、価格と取引高に関するデータが重要となる。価格データは、ベスト・ビッド／オファーの推移、同スプレッド、最終取引価格などが主に参照される。取引高データとしては、流動性の評価軸となる過去の日中平均売買高 (average daily volume: ADV) のほか、日中の売買高の時間的分布が重要となる。なお、こうしたデータは、銘柄による相違だけでなく曜日や月によっても異なるため、通常、過去1~3ヵ月ほどの情報が参照される。これら以外にも、発注可能な証券会社の委託手数料、執行市場の売買手数料といった情報も必要となる。

(ii)では、こうしたデータを基に、取引コストの各要素を推計する。コストのうち不確実性を伴うマーケット・インパクトやタイミング・コストなどについては、取引コストを推計するモデルが用いられる¹³⁹。また、本稿3節(5)で示した高頻度取引等においては、過去の市場データに照らして戦略の収益性がどの程度であるかといったバックテストが行われる。

最後に(iii)として、(i)、(ii)の分析に基づいて、執行形態・戦略を構築あるいは選択する。この際、執行がどの程度時間的制約を伴うものか(緊急性)、当日のADVが過去の平均的水準と比べて高いか低い(市場流動性)、希望取引額がADV対比どの程度大きい(取引規模)、ビッド・オファー・スプレッドが大きい銘柄であるか否か、希望価格と最良気配値は乖離しているかといった点が判断の基準となる。また、アルゴリズムの選択においては、市場の日中流動性パターンも重要になってくる。こうした市場環境に応じた戦略選択の判断については表10にまとめている。例えば、ADVがある程度高く、緊急性がそれほど高くなく、かつ希望取引額がADV対比大きくない銘柄について、取引コストを削減する目的で執行する場合、コ

139 モデルを用いたコストの推計結果については杉原 [2011] で紹介する。

表 10 市場環境と執行・戦略形態の選択

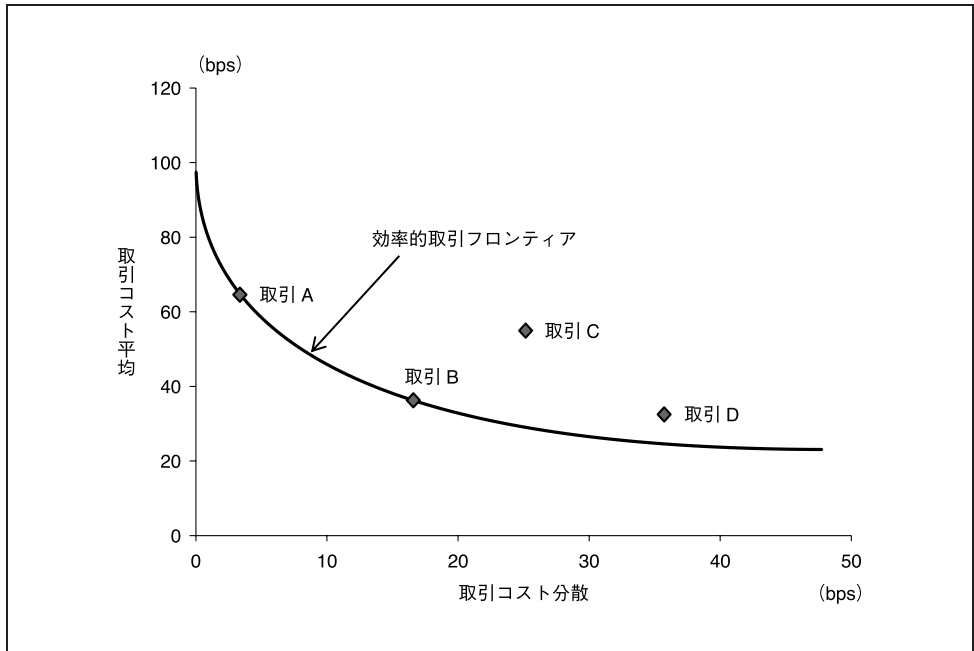
執行・戦略形態		適した市場環境					
		緊急性	市場流動性 (ADV)	希望取引額 ADV 比率	日中流動性 パターン	希望価格と 最良気配の 乖離	ビッド・ オファー・ スプレッド
伝統的 執行形態	指値注文	低～中	低～高	低	無関係	大	大
	成行注文	高	高	低	無関係	小	小
アルゴリ ズム取引	ベンチ マーク型	低～中	高	低	安定的	小	小～中
	コスト型	低～中	中～高	低～中	前半が高め	小	小～中
	参加型	低	低～中	中～高	不均一/ 変化大	小～中	中～大
	機会発見型	低	低～高	低	不均一/ 変化大	大	大
代替市場	定時 オークション	低	低	高	無関係	中～大	大
	ダークプール、 隠れた注文	低	低	高	無関係	中～大	大

スト型のアルゴリズム取引で執行するのが適している。ただ、コスト型アルゴリズムは、市場流動性が高いほど売買高を増やす傾向があるため、取引開始後に ADV が低い場合にはタイミング・コストが高まってしまう。そのため、ADV の分布が取引開始後しばらく高めであると予想される銘柄が、同アルゴリズムに適していると考えられる。

(2) 効率的取引フロンティア

事後分析に移る前に、Almgren and Chriss [2000] によって提案された効率的取引フロンティア (efficient trading frontier) について解説する。効率的取引フロンティアは、Markowitz [1952] の効率的投資フロンティアを取引コストに応用した概念であり、注文が発生した時点で想定されるリスクを所与として、取引コストが最小となる執行戦略全体として定義される。図 7 には、Makimoto and Sugihara [2010] のモデルから計算した効率的取引フロンティアの例を示している。縦軸に取引コストの平均値、横軸に同分散をとると、効率的取引フロンティアは下に凸の形状となる。任意の取引戦略はこのフロンティア上ないしそれより上の点として表示される。例えば図 7 には、取引 A～D を示した。このうち取引 A および B はフロンティア上に位置しており効率的な執行であるといえる。一方、取引 C および D はフロンティアより上に位置し、同じ取引リスクでよりコストの低い取引が存在することから非効率な取引であると判断できる。効率的取引フロンティアについては、次の 5 節(3) および杉原 [2011] で採り上げる。

図7 効率的取引フロンティアの例



備考：Makimoto and Sugihara [2010] のモデルから計算した効率的取引フロンティアの例。2 資産のケース。

(3) 事後分析

取引コストの事後分析は、(i)実現した取引コストの計算、(ii)取引コストの評価、(iii)アルゴリズムや執行市場の選択に対する評価の主に 3 つがある。(i)の取引コストの計算では、2 節(1)に示した取引コストの各要素を計算し、(1)式等に従って IS を算出する。

(ii)取引コストの評価には、対ベンチマーク評価と効率的取引フロンティアを用いた評価があり、いずれも投資のパフォーマンス評価と類似している。対ベンチマーク評価は、ベンチマーク型アルゴリズムなど、ベンチマークに近い執行を求める投資家が行っている。通常、ベンチマークに対する超過取引コストをトラッキング・エラー（超過コストの標準偏差）で除した値が低いほど執行のパフォーマンスが高いとする比較的単純な評価法が用いられている¹⁴⁰。このほか、Kissell and Glantz [2003] が提案した相対的パフォーマンス評価（relative performance measure: RPM）も対ベンチマーク評価法の 1 つとして知られている。同評価法は、売却執行の場合

140 投資パフォーマンス評価の情報比（information ratio）に相当。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RPM}_{\text{volume}} = \frac{\text{執行額} \mid \text{執行価格} > \text{ベンチマーク}}{\text{全執行額}}, \\ \text{RPM}_{\text{trades}} = \frac{\text{執行回数} \mid \text{執行価格} > \text{ベンチマーク}}{\text{全執行回数}}, \end{array} \right.$$

を計算し、それらの平均 $\text{RPM} = 0.5(\text{RPM}_{\text{volume}} + \text{RPM}_{\text{trades}})$ を評価基準とする。この平均 RPM が高いほど、執行が効率的であったと評価できる。

一方、効率的取引フロンティアを用いた評価は、コスト型アルゴリズムなど取引コストの削減を求める投資家が行っている。実現した取引コストの平均と分散を効率的取引フロンティアと比較することで、取引がどの程度効率的であったかを評価する。例えば図7の取引CおよびDは、取引コストの改善余地があると評価される¹⁴¹。

(iii)のアルゴリズムや執行市場の選択に関する事後的な評価手法もいくつか提案されている。ここでは、Kissell [2007] が提案したウィルコクソン=マン=ホイットニー検定 (Wilcoxon-Mann-Whitney ranks test)¹⁴²を用いた次のようなアルゴリズムの評価手法を解説する。例えば2つのアルゴリズムAとBを評価する投資家を想定し、同アルゴリズムに基づいた過去の執行サンプルが、アルゴリズムAについて m 回、アルゴリズムBについて n 回あるとする。 $m+n$ 回の取引コストを順位付けし¹⁴³、上位から順に r_1, r_2, \dots, r_{m+n} とする。ここで、アルゴリズムAのみの順位の和

$$a = \sum_{i=1}^{m+n} r_i \mathbf{1}\{r_i \in \text{アルゴリズム A}\},$$

を検定量とする。このとき、

$$Z_a = \frac{a - E[a]}{\sqrt{V[a]}}, \quad \text{ただし,} \quad E[a] = \frac{m(m+n+1)}{2}, \quad V[a] = \frac{mn(m+n+1)}{12}, \quad (2)$$

を考えると、 Z_a 値は、アルゴリズムAとBが同レベルのパフォーマンスであるときにゼロ近傍の値となる。一方、アルゴリズムAがBよりもパフォーマンスがよいときには、順位値が大きくなるため、 Z_a 値は正の値となる。したがって、 Z_a 値を片側 t 検定することで、AとBのパフォーマンスの優劣を評価できる。

141 なお、高頻度取引では、多数の取引のパフォーマンスを同時に分析する必要から、効率的取引フロンティアやベンチマークを用いた評価はあまり用いられない。代わりに Aldridge [2009b] が提案する TSA 法 (trading strategy accuracy method) などの手法が用いられているようである。TSA 法では、取引手法ごとにローレンツ曲線 (ここでは収益が得られた取引回数に関する累積確率を縦軸に、得られなかった取引の累積確率を横軸にとった曲線) を描くことで、どういった取引手法が統計的に有意に収益が得られたかを視覚的に分析する。

142 同検定については Mann and Whitney [1947] を参照。

143 具体的には、取引コストからベンチマークを差し引いた値をベンチマークで除した値を、順位決定に用いている。

6. アルゴリズム取引と代替市場を巡る課題

以上では、取引コストという切り口からアルゴリズム取引や代替市場がどのように利用されているかについてみてきた。こうした取引手段は、その目的にかんがみれば取引コストを削減し顧客の利益を拡大する効果が期待され、最良執行を行ううえで有効な取組みであるといえる。しかし一方で、アルゴリズム取引や代替市場はまだ発展途上であることから問題点や課題も数多く指摘されている。ここでは、そうした論点のうち重要な4つを紹介する。

(1) 代替市場の拡大と市場分断化

代替市場は、取引所に提示されない売買需要を集めようと試みるが、一方で、米欧での代替市場の拡大は、従来取引所に集まっていた流動性が多数の市場に分散する結果につながったと指摘する市場参加者が少なくない。当該論点は、市場分断化 (market fragmentation) と呼ばれ¹⁴⁴、代替市場を巡る重要な論点の1つとなっている。

4節(3)でみてきたように、個々の代替市場はそれぞれが最適であると考える注文付合せの仕組みを導入しているが、それが多数集まった場合に市場全体として最適であるとは限らない (O'Hara [2007])。代替市場の歴史が長い米国では、正確な統計はないものの、相当な割合の取引がNYSEを中心とした取引所から代替市場へ広く分散したといわれている。また、欧州株式市場でも近年、米国と同様の現象が起きつつあると指摘する市場参加者が多い¹⁴⁵。市場分断化を問題とする市場参加者からは、市場分断化により流動性の存在がかえってわかり難くなる、市場の全体像を把握し難くなる、複数の市場をモニターし注文を回送するための追加的コストが発生するといった見解¹⁴⁶のほか、規制の程度が異なる取引所と代替市場の競争は公平ではないとの見解もある。

一方で、市場分断化の対極にある市場の寡占に対するリスクを潜在的に意識する市場参加者も多い。米欧では、市場間の競争が促されたことで取引所の効率性が増し、売買システムが洗練されるとともに取引コストが低下した経緯から、市場の寡占や流動性の一極集中に対する懸念は大きい¹⁴⁷。近年の欧州における代替市場の拡

144 「市場の分裂」と呼ばれることもある。また、「分断」や「分裂」といった否定的な単語を用いず、「市場の分散」(market diversification) と呼ばれることもある。

145 ただ欧州については、図4(a)に示した統計データをみる限り市場全体の取引額の変動が代替市場の取引増加額より大きくなっており、取引所の流動性が代替市場に移っていると結論付けることは困難である。一方わが国では、流動性のほとんどが取引所に集中していることから市場分断化は懸念されていない。

146 これに関連して、清水 [2010] では、市場を統合的に監視するためのシステム整備や、規制の複雑化にかかるコストといった追加的コストも指摘されている。

147 これに関連して、1994年の、ナスダック市場を構成するマーケット・メイカーの談合疑惑も、市場の寡占が顕在化した一例として指摘されている。当該疑惑の背景となった分析については Christie, Harris, and Schultz [1994] を参照。

大は、取引コストの低下を促しているという調査結果¹⁴⁸があるほか、米国では代替市場が大規模になるにつれ、代替市場が取引所に転換あるいは吸収される例が相次いでおり、取引所と代替市場の境界は薄れつつある。また、市場間の裁定機会を探索する市場参加者の存在が市場の連動性や関係性を強化するため、市場が分断されているとする見方はおかしいとの見解もある¹⁴⁹。

市場分断化の問題には、市場流動性の獲得・拡大に向けたビジネス上の利害関係が絡むことが問題を複雑にしている。代替市場を運営する情報ベンダーや代替市場を構築してきた証券会社では、市場分断化はSORや指値注文板の統合といった技術によって克服できるとの考え方が多い。一方で、取引所や機関投資家などでは、仮にそうした技術が進歩しても流動性が集中した方が価格発見機能が強化されるとの見解¹⁵⁰があるほか、SORの導入といった追加的コストが発生しない伝統的な取引システムの方が全体としてみれば効率的であるとの考え方も少なくない。

これに対して規制当局は、流動性が複数の市場に分散することは問題とせず¹⁵¹、一部の代替市場の不公平・不透明な取引を排除する方向で規制を強化する流れにある。そもそも米欧では、市場の競争を促し、市場の寡占を排除するとともに効率性と透明性を高めることを企図して規制が緩和されてきた経緯があるが、近年では過度な市場間競争と不透明・不公平な市場の拡大を背景に、規制を一部修正しつつある¹⁵²。これについては、6節(3)でも解説する。

(2) アルゴリズム取引と価格形成

アルゴリズムによる売買が増加すると、人間の反射神経を超える速度で金融商品が売買されることから、価格形成に影響が出るのではないかと懸念がしばしば聞かれる。取引コストの削減を企図したアルゴリズム取引は、一般に日中の市場流動性の変動に合わせて分割執行することから、そうしたアルゴリズム取引の拡大はボラティリティを低下させる可能性がある。また、一般的な高頻度取引も、主として市場に流動性を供給することから平時には価格を安定させる方向に寄与している可能性がある。例えばChaboud *et al.* [2009]は、為替市場のATSであるEBS¹⁵³における2006～07年の取引データを解析した結果、実現ボラティリティ¹⁵⁴とアルゴリズム取引注文量¹⁵⁵の関係は低く、非アルゴリズム取引の注文フローが実現ボラティ

148 例えばMackay [2009]やBrandes and Domowitz [2010]がある。

149 例えば,Altunata, Rakhlin, and Waelbroeck [2009]によって示されている。

150 例えば, Schwartz [2010]がある。

151 米国や欧州では、市場全体の最良執行義務によって担保されているとの考え。

152 詳細は、U.S. Securities and Exchange Commission [2010]を参照。

153 EBSは、米ICAP社が運営する為替や貴金属のスポット取引を対象としたATSの1つである。

154 Chaboud *et al.* [2009]は、1分ごとに計測した収益率の2乗和として算出した実現ボラティリティを用いている。

155 EBSへの注文は、システムに付属するキーボードからの入力による注文と、コンピュータ接続(automated interface)による注文の2系統に分けられる。Chaboud *et al.* [2009]は、後者をアルゴリズム取引注文としている。同研究の詳細は杉原 [2011]でも紹介する。

リティの大部分を決めているとの結果を得ている¹⁵⁶。

しかし一方で、機械的なアルゴリズムは、想定外で前例のない出来事に対して、人間のように適切に対応できないという「アルゴリズム取引の脆弱性」が指摘されている¹⁵⁷。また、平時においても、アルゴリズム取引の多くは類似したアルゴリズムに基づき駆動していることから、売買が群集行動的になるのではないかとの見方もある¹⁵⁸。上述の Chaboud *et al.* [2009] でも、為替市場におけるアルゴリズム取引フロー間の時間的相関が高いことが示されている。これに関連して、高頻度取引主体による流動性供給が増加すると、同主体の在庫リスクを高めると判断される何らかのシグナルが発生した場合に、流動性の供給が一様に減少する、あるいは不安定化することで価格形成も不安定化する可能性が指摘されている¹⁵⁹。さらには、誤発注を急いで取り消したとしても、その間に大量の約定が発生してしまうとの懸念や、アルゴリズム取引を悪用し視覚的に判別できないかたちで相場操縦が行われるのではないかとの懸念もある¹⁶⁰。このように、アルゴリズム取引の増加が市場流動性や価格形成に与える影響についても、市場参加者の見方は分かれている。

こうした懸念を示す顕著な例として、フラッシュ・クラッシュ (flash crash) と呼ばれる価格の異常な乱高下がある。図 8 には、フラッシュ・クラッシュが発生した 2010 年 5 月 6 日の米国株式市場における一部銘柄の一時的な急落を示している。同日 14 時 40 分 (米国東部標準時、以下同) からわずか 15 分ほどの間に、ダウ工業株 30 種平均や S&P 500 株価指数が 6% ほど下落し、その後急速に値を戻す¹⁶¹ という不自然な価格の動きがみられた。それぞれの構成銘柄をみると、図 8 (b) に示した

156 これに関連して、2008 年 1 月のドイツ DAX 指数構成 30 銘柄に関するアルゴリズム取引の影響を調査した Hendershott and Riordan [2009] の実証分析によると、アルゴリズム取引がボラティリティを高めているとの証拠は得られず、むしろアルゴリズム取引は価格効率性を高めているとの結果が得られている。特に、市場全体の流動性が低くなる局面でアルゴリズムによる流動性供給の割合が上昇する一方、市場流動性が潤沢である局面では、アルゴリズム取引は流動性を消費する特徴 (すなわち市場の流動性を均す特徴) があることを実証している。また、Hendershott, Jones, and Menkveld [2010] では、2001~05 年の NYSE 株式銘柄を分析した結果、アルゴリズム取引は市場の流動性を高めるとともに、呼値の情報量も高めていると結論付けている。さらに、Brogaard [2010] による 2010 年 2 月の米国ナスダック銘柄の取引データを用いた高頻度取引の分析でも、高頻度取引は価格のボラティリティを引き下げる方向に寄与しており、また、市場の価格発見機能に対する高頻度取引注文の貢献度が、非高頻度取引注文より高いとの実証結果を得ている。

157 例えば、Nishimura [2010] を参照。

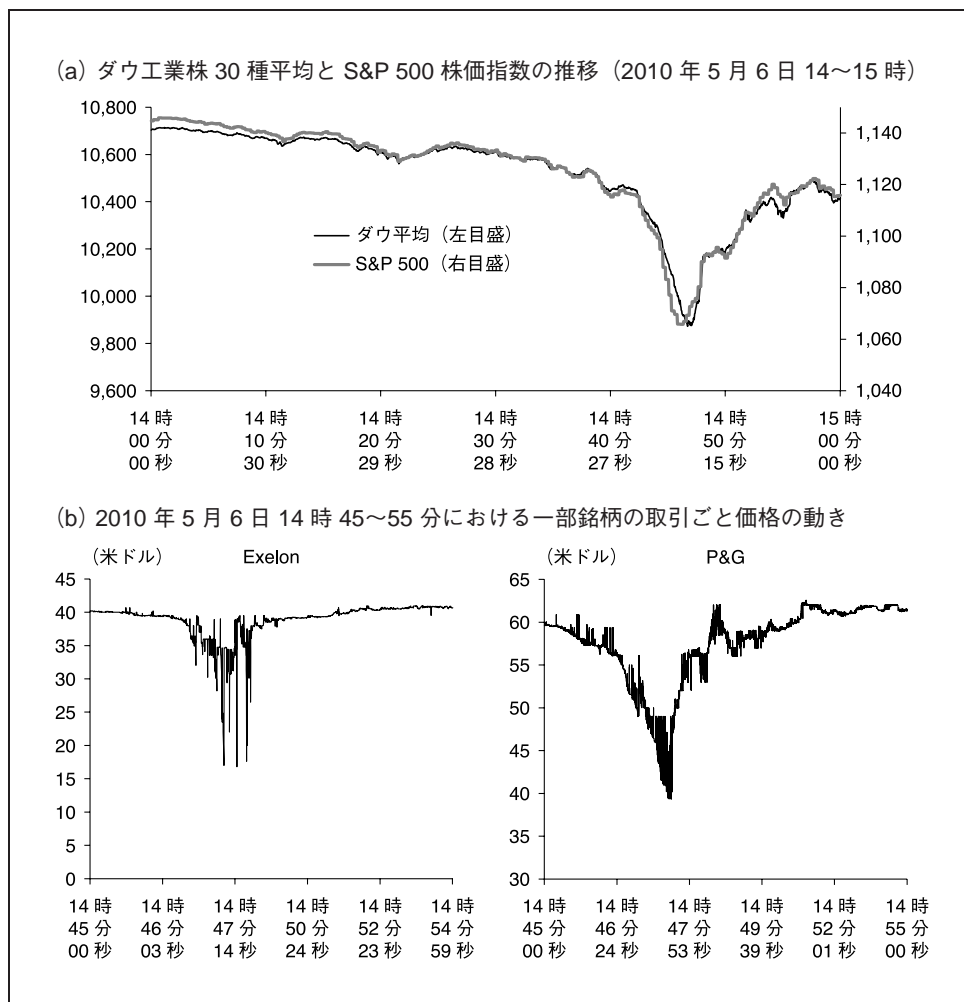
158 こうした点を指摘する文献には、例えば Brown [2010] がある。

159 取引所から常に気配値を提示することが義務付けられているマーケット・メイカーは、市場の異常を感知した際や自身が保有する在庫リスクが高まった場合に、約定しないよう指値水準を市場価格から大幅に引き離す設定をアルゴリズムに施していることがある。市場実勢から著しく乖離したこうした気配値は「スタブ・クォート」(stab quote) と呼ばれている。

160 これについては Nishimura [2010] を参照。これに関連して、東証や英国金融サービス機構では、こうしたアルゴリズム取引による高速の相場操縦やその他の不正を検知するためにアルゴリズムを用いているようである。

161 後述する U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission [2010a] の報告書によると、価格下落のきっかけとなった S&P 500 E ミニ先物で、14 時 45 分に 5 秒間売買停止された後、当該銘柄の市場流動性が急激に回復し価格が上昇したことがわかっている。一方、その他の銘柄では、それに幾分遅れるかたちで価格の急落と急上昇がみられている。

図8 フラッシュ・クラッシュの例：2010年5月6日の米国株価の動き



備考：(a)は2秒ごとに算出した指数値を、(b)はブルームバーグで参照可能なすべての取引価格をプロットしている。(a)、(b)とも取引所による異常価格での約定取消後の価格推移。

資料：ブルームバーグ

ように、例えばエクセロン (Exelon) 社の株価は 14 時 46 分まで 40 ドル近辺で推移していたが、その後 14 時 48 分までのわずか 2~3 分の間にその半値の 20 ドルを下回る価格で約定し、5 分後には再び 40 ドル台に価格が戻るという動きを示している¹⁶²。ダウ構成銘柄である P&G のような流動性が高い銘柄においても、同時刻帯において数分前の価格から 35% も下回る価格で約定している。

162 こうした銘柄は、1 セントという最低価格で約定したと報道されているが、午後 2 時 40 分の価格を 60% 以上下回った約定はすべて取り消されている。図 8 には同約定取消後の価格の推移を示している。

米商品先物取引委員会 (U.S. Commodity Futures Trading Commission: CFTC) と SEC による共同調査報告 (U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission [2010a]) によると、S&P 500 先物ミニ銘柄におけるアルゴリズムによる 1 つの大口売り注文の自動執行が、他のアルゴリズムを混乱させ、市場参加者の多くが取引を見合わせた結果、市場流動性が急減するとともに¹⁶³、異例なほどの価格の乱高下が引き起こされたと分析されている。また、アルゴリズムによる裁定取引がその影響を拡大させ、幅広い銘柄で価格の瞬落を招いたとされている¹⁶⁴。

さらに、フラッシュ・クラッシュのきっかけとなった S&P 500 E ミニ先物の投資家別売買状況やポジションを詳細に分析した Kirilenko *et al.* [2010] の研究では、フラッシュ・クラッシュの終盤にかけて流動性が急減する中で、一部の高頻度取引業者¹⁶⁵が売買を相対的に積極化したと指摘されている。これは、流動性が急減した市場、すなわち平時に高頻度取引業者の取引相手となる市場参加者が不在となった市場において、売買を停止しなかった一部の高頻度取引業者の間でアルゴリズムによる機械的な高速売買が繰り返されたことを示唆している¹⁶⁶。Kirilenko *et al.* [2010] は、こうした状況が、ごく短い時間に価格のボラティリティを高めたと結論付けている。

こうした分析は、(i) 高頻度取引はポジションの保有時間が著しく短時間であるため、高頻度取引だけでは、長時間にわたる大きな需給の偏りを均すことができない、(ii) 高頻度取引等は、市場のファンダメンタルズより、むしろ売買注文の偏りなどから価格の微小な変化の方向性を予想して高速に売買することから、市場の需給が偏る中でこうした機械的な市場参加者が市場の大勢を占めると、価格がファンダメンタルズから乖離するリスク (可能性) が急激に高まる¹⁶⁷という 2 点を示唆している。逆に、長期的な投資を行う投資家のみで構成される極端な市場を想定しても、流動性が十分に保たれず、価格は不安定になる可能性がある。このように考えると、

163 NYSE では極端な価格変動をみて電子取引システムでの売買を停止し、DMM を介した立会売買に切り替えた。また、ナスダックやパッツなどの大手取引所も NYSE への注文回送を停止した。それが機械的マーケット・メイカー等の流動性供給を一斉に止める結果となり、約定されない自動損切り注文が他の市場へ回送されたことも要因と考えられている。

164 市場流動性が枯渇する中、気配値を常に提示することを求められている機械的マーケット・メイカーがシグナルを感知して、買値を極端な低水準 (スタブ・クォート) まで切り下げたことも、一部の銘柄がファンダメンタルズから極端に乖離した非常に低い価格での約定が多発した原因の 1 つと考えられている。なお、市場分断化を背景に、価格の乱高下が発生した際、NYSE などで発動したサーキット・ブレーカー制度が市場全体で機能しなかったことも指摘されている。また、フラッシュ・クラッシュが発生した同時刻帯には、上場投資信託 (ETF) の乱高下が多く確認されており、統計的裁定取引の一種である ETF とその構成銘柄の裁定取引が、フラッシュ・クラッシュが多数の銘柄に波及した背景にあるとも考えられている。

165 Kirilenko *et al.* [2010] における高頻度取引の定義は、取引の仲介を行う業者 (195 社) の中で、とりわけ売買の頻度と規模が大きい上位 3% を占める 16 社としており、本稿の高頻度取引の定義より狭い。

166 Kirilenko *et al.* [2010] あるいは U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission [2010a] では、こうした状況を「厄介な状況」(hot potato) と表現している。

167 Nishimura [2010] 参照。

売買が高速化する中でも、市場参加者の戦略や投資期間、参照情報の多様性を常に維持することが、合理的な価格形成と市場の安定を保つうえで重要であることがわかる。

米国では、こうした乱高下を防止する観点から、価格が極端に変動した際に一時的に売買を停止する仕組み（サーキット・ブレーカー制度）が強化されてきている^{168,169}。また、証券会社が投資家のアルゴリズムを監視・管理する必要性なども指摘されている¹⁷⁰。さらに、高頻度取引の先進国である米国の規制当局は、フラッシュ・クラッシュの原因の1つの可能性として挙げられている高頻度取引や機械的マーケット・メイクについて、その悪質な形態を規制する方向にあるといわれている¹⁷¹。

(3) 非公開市場、ダークプールと市場の透明性

非公開市場、特にダークプールについて、注文が開示されないことに伴うさまざまな課題が指摘されている。ここでは、イ. 取引情報を開示しないことに伴う市場効率性や透明性への影響と、ロ. 連続型のダークプールにおける情報流布抑制効果に関する課題の2つについて解説する¹⁷²。

イ. 市場効率性・価格透明性への影響

4節(4)の表9でも指摘したが、非公開市場やダークプールのデメリットの1つに、透明性の低さがある。ダークプールの前身となる証券会社の店内付合せ等は、従来はそれほど大規模に行われていなかったとされるが、4節(2)の図3に示したように、米国株式市場では、近年、こうした不透明な市場が相当な割合を占めるようになってきている。これが、市場全体の透明性や効率性を阻害するのではないかの懸念につながっている。一方、米国では、市場全体に占める売買高シェアが5%以下の代替市場は、最良気配を開示することが義務付けられていない。また、宣伝駆動型のダークプールの一部は、上述の売買情報の流布に対する懸念に配慮し、代替市場に参加可能

168 米国では、S&P 500に採用されている個別銘柄について、寄付後・引け前の一定時間を除く日中取引時間帯に5分間で10%以上価格が下落した際に当該銘柄の売買を5分間停止する仕組みが試験的に導入されている。

169 わが国では、こうした市場の安全面の仕組みとして、東証では、需給の一方的な偏りによる価格変動を防止する観点から特別気配制度が導入されているほか、アローヘッドの稼働と合わせるかたちで急速な買上がり／売下がり防止する連続約定気配制度が導入されている。

170 わが国の証券会社には、誤発注の執行防止の観点から、一定規模を超える大口の顧客注文の市場への発注を制限することが求められている（日本証券業協会「協会員における注文管理体制の整備に関する規則」の第5条）。

171 例えば、大量の指値注文を提示し、それを直後に取り消す注文水増し（quote stuffing）と呼ばれる取引を行う主体があり、これは高速な相場操縦（見せ玉）に相当する可能性があるとして、SECが調査しているとの報道がある。

172 当該点を論じている最近の文献としてはO'Hara [2010] などがある。

な機関投資家に限って売買意思情報を配信している¹⁷³。こうした点については、市場の透明性や価格発見機能を阻害する可能性があるものとして米英を中心に規制強化の動きが進んでいる。U.S. Securities and Exchange Commission [2009] では、売買高シェアが 0.25% 以上 5% 以下の中・小規模な米国の ATS も、原則として最良気配の開示義務を負うことが提案されている。同時に、約定の可能性が高い取引意思情報 (auctionable IOI) について、最良気配情報と同等にすべての投資家に開示することを原則義務付けることも提案されている¹⁷⁴。ただ、大口取引のマーケット・インパクトを低減させるというダークプールの本来の目的にかんがみ、1 万株以上あるいは 20 万ドル以上の取引需要については、引き続き気配の開示義務は課されない予定である。

ロ. ダークプールと逆選択問題

2 つめの課題として、Mittal [2008] や Saraiya and Mittal [2009] に示されているフィッシングと売買需要情報の流布について紹介する。一般にダークプールでは、売買需要の情報を開示しないことがマーケット・インパクト抑制につながるとして流動性を集めている面がある。しかし、Mittal [2008] や Saraiya and Mittal [2009] によると、ダークプールではフィッシング¹⁷⁵によって隠れた流動性を探査する市場参加者がいるほか、注文が執行されず回送されることが多く、また、証券会社が運営するダークプールでは証券会社の自己勘定注文が混在している可能性があるため、取引意思情報が流布する可能性があることを指摘している。こうした際、仮にフィッシングを行う主体や証券会社が情報優位にある場合には、投資家は逆選択のリスクにさらされる。これは、注文付け過程を開示しないことを期待して利用している投資家の期待を裏切るものであるとして一部で懸念されている。

こうした懸念に対して一部の連続型ダークプールでは、参加者を一部の機関投資家だけに制限する、仲値での約定に限定する、一定規模以上の注文に限定する、証券会社の自己売買フローが混在しないことを確約するなど、利用者の懸念を排除する工夫が施されている。また Saraiya and Mittal [2009] や Altunata, Rakhlin, and Waelbroeck [2009] のように、ダークプールであっても大口の注文を長時間提示せず、IOC 注文やダークプールに適したアルゴリズムなどを活用することで、逆選択リスクを低減すべきとの指摘もなされている。U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission [2010b] によると、実際、米国株式市場での 1 売買当たりの取引株数は、定時オークション型の非公開市場でお

173 さらに、Rawal [2009] では、一部のダークプールでは、市場の最良気配の内側に非開示の注文を入れることができ、それゆえ価格形成機能を有しているとも考えられるが、その一方でそうした注文はすべての市場参加者が参照できるものではない点なども指摘されている。

174 米国では、すべての取引所における最良気配 (価格、注文数および売り買いの別) を全米最良気配 (national best bid and offer: NBBO) として開示することが義務付けられている。NBBO は、統合気配表示システム (Composite Quotation System: CQS) によって、市場参加者に伝達されている。

175 フィッシングは、ゲーミングとも呼ばれ、さまざまな価格帯に IOC 注文あるいは小口の FOK 注文を出し隠れた注文の存在を探査することで、自己の執行の改善に活用する手法のことである。3 節(7)を参照。

そよ5万株弱であるのに対して、宣伝駆動型以外の連続型ダークプール（主に証券会社が運営する内部付合せ）では平均300株未満と、市場平均並みの小口売買となっている。

(4) 取引の高速化と社会厚生

高頻度取引を中心とした一部のアルゴリズム取引では、ミリ秒、マイクロ秒といった非常に短い遅延を短縮し、執行速度を限界まで高めることによって利益を追求している面がある。こうした取引の高速化が、社会インフラの1つである金融市場の厚生を高めるものであるのかは自明ではなく、それに対する市場参加者の見方は分かれている。

取引の高速化に好意的な立場の市場参加者からは、新たな情報がいち早く市場価格に反映されれば、それだけ資源配分が効率化されるとの見解が聞かれている。取引の高速化を重視している高頻度取引等は、ビッド・オファー・スプレッドの低減に貢献してきたとの見方もある。また、そもそも高頻度取引等は、技術革新をいち早くビジネスに結び付けたものが利益を得るという資本主義・競争主義の原則が、金融取引にも広がってきた結果に過ぎず、金融市場であるからといって技術革新を阻害してはならないとの意見もある。

一方、人間の反射神経を超えるまでの取引の高速化に懐疑的な立場の市場参加者からは、取引の高速化を進めることによる社会厚生上の限界効用は小さいという主張が聞かれている。取引を高速化するためのインフラ投資に係るコストを踏まえると、ネットでみて社会厚生を高めるといふより、ゼロサム・ゲームのような状況に到達している可能性がある。この場合、取引の高速化に対応する技術を有している市場参加者に利益の多くが流れる結果となるのではないかとの懸念がある。また、コロケーション等を利用し、他者より早く得た市場情報を取引に活用できる技術を有する主体が、そうではない主体より有利な条件で取引できることがあるのは公平ではないとの見方もある。

上記は現段階の論点を整理したに過ぎず、それらの客観的な検証がなされているわけではないが、今後の金融取引を見通すうえで重要なポイントとなっていく可能性がある。

7. おわりに

本稿では、近年発展してきているアルゴリズム取引と代替市場の活用を巡る市場参加者の取組みの現状について、取引コストの削減という切り口からみてきた。特に、その背後にある多種多様な執行戦略や注文付合せの形態に注目し、分類・整理してきた。それらの多くは、従来、人の手を介して行われていた金融商品の取引執

行、流動性の供給、情報の収集等を、アルゴリズム、数理モデル、人工知能等を活用して機械的・数理的かつ大規模に行うものである。しかし、それらは「電子取引」と一括できるほど単純ではなく、注文数の増加や小口化、執行速度の上昇、新しい発注形態の登場やマーケット・メイクの自動化といったマーケット・マイクロストラクチャーの変化を通じて価格形成メカニズムに影響を与えうるほか、金融市場や金融取引の仕組み・在り方に関する議論にもつながっていくものであることを示してきた。

アルゴリズム取引や代替市場の活用は、現在、国や地域によって濃淡があるものの、主に主要国の為替市場と株式市場および派生商品市場で行われるようになってきている。そうした市場では売買の高速化が顕著であり、ときに人間の反射神経を超えるほど高速な価格変動がみられることがある。本稿では米国の株式市場でアルゴリズム取引が既に6割に達しているとの見方を紹介したが、アルゴリズム取引が拡大し売買が自動化・高速化すると、金融市場はコンピュータ対コンピュータの競争になっていく面がある。しかし、金融商品の売買執行がすべて自動化・機械化されるとも考えにくい。アルゴリズム取引には取引コストの精緻な最小化や取引機会の瞬時の発見といった優れた面がある一方で、人間が経験や直観に基づいて判断することの利点や優位性もある。アルゴリズム取引はアルゴリズムで想定されている状況には強いが、想定外のイベントが発生した際には対応できない。また、ニュース情報や市場のセンチメント、人間のリスク回避性や直観など、曖昧な情報を完全に定量化・機械化することはできない。さらにアルゴリズム取引では、一度戦略を構築・実装したらそれで終わりではなく、人間によって執行の質を管理・監視することが必要となる。このように人知とアルゴリズムは相互に補完的であり、組み合わせることで相乗効果を高めるとする視点が重要になってくると考えられる。

アルゴリズム取引や代替市場は、本来、大口取引の取引コストを削減する、あるいは流動性を供給するなどの目的で開発が進んできているものであり、それらの発展は、市場の流動性を高め個々の取引執行を効率化することを本稿では指摘した。しかし一方で、類似のアルゴリズムに基づいた売買が群集行動的な行き過ぎた価格形成を引き起こす可能性や、流動性の分散化を通じて必ずしも市場全体の効率性にはつながらない可能性も指摘した。また、一部には、フィッシングや高速な見せ玉の可能性のある注文を出すなど、アルゴリズム取引や代替市場を悪用し市場を攪乱する主体がいるといわれているほか、手数料を支払った一部の市場参加者が有利な条件で執行できる仕組みが登場してきており、公平性・透明性の観点からの問題・課題も指摘されている。このように、アルゴリズム取引や代替市場を巡る環境は完全に整備されているとはいえない。アルゴリズムによる執行の在り方などのルールや規制は、米欧においてもまだ流動的であり、国・市場によって相違している面がある。そういった市場整備・規制上の残された課題が多い分野でもある。

なお、本稿では、取引コスト削減を企図した実務の取組みの重要なポイントを解説することに焦点を当てた。実務についてさらに知識を深めたい読者は、本稿で紹介している個々の文献のほか、実務家向け研究誌や Johnson [2010] などの書籍を参

考にされたい。また、実務の背後にある理論などの学術研究に関心がある読者は杉原 [2011] を参照されたい。

本稿で紹介した多様な執行戦略や注文付合せ形態の一部は成熟してきている一方、黎明期ともいえる段階のものもある。今後も新しいアイデアが実現されていく一方で、それらの取捨選択も進んでいくであろう。長期的には、市場参加者のニーズにより合致した代替市場やアルゴリズムが生き残っていくと考えられる。また、アルゴリズム取引等は、主要国の株式市場や派生商品市場、為替市場のほかに、債券市場や新興国の株式市場などにも今後浸透していく可能性がある。今後もアルゴリズム取引や代替市場の活用を巡る実務の取組みをみていく必要がある。

参考文献

- 上田晃三、「オークションの理論と実際：金融市場への応用」、『金融研究』第29巻第1号、日本銀行金融研究所、2010年、47～90頁
- 大崎貞和、「ニューヨーク証券取引所のハイブリッド市場構想」、『野村資本市場クォーターリー』第8巻第2号、2004年
- 、「株式市場間競争と日本市場の課題」、金融庁金融研究研修センター研究会報告書『金融危機後の金融・資本市場をめぐる課題』DP2009-4、2009年a
- 、「証券取引所の競合と統合」、『法律時報』第81巻第11号、2009年b、22～27頁
- 清水葉子、「アメリカの市場分裂は深刻化しているのか？～ダークプールの拡大について～」、『証研レポート』第1653巻、2009年、42～51頁
- 、「統合監査追跡システムに関するSEC提案について」、『証研レポート』第1661巻、2010年、40～46頁
- 杉原慶彦、「わが国株式市場のモデルフリー・インプライド・ボラティリティ」、『金融研究』第29巻第2号、日本銀行金融研究所、2010年、73～120頁
- 、「執行戦略と取引コストに関する研究の進展」、IMES ディスカッション・ペーパー・シリーズ、日本銀行金融研究所、2011年（forthcoming）
- 東京証券取引所、「arrowhead 稼働後6ヶ月の運転状況について」、プレゼンテーション資料「arrowheadのIT Japan Award 2010 経済産業大臣賞（グランプリ）受賞について」、2010年
- 日本銀行金融研究所、「金融取引における公正（fairness）の概念」、『金融研究』第18巻第5号、日本銀行金融研究所、1999年、1～62頁
- 日本証券経済研究所、『図説アメリカの証券市場（2009年度版）』、財団法人日本証券経済研究所編、2009年
- 平塚 崇、「日本の投資家は電子取引をどのように理解しているか」、Trade Tech Japan 2008 プレゼンテーション資料、2008年
- 深見泰孝、「我が国のPTSの現状と課題について」、『証研レポート』第1661巻、2010年、59～76頁
- 山下友信・神田秀樹、『金融商品取引法概説』、有斐閣、2010年
- 吉川真裕、「ヨーロッパの市場間競争～取引所、MTF、ダークプール」、『証研レポート』第1654巻、2009年、27～38頁
- Aldridge, Irene, *High-Frequency Trading*, Wiley Trading, 2009a.
- , “Measuring Accuracy of Trading Strategies,” *The Journal of Trading*, 4 (3), 2009b, pp. 17–25.
- Almgren, Robert, and Neil Chriss, “Optimal Execution of Portfolio Transactions,” *Journal of Risk*, 3 (2), 2000, pp. 5–39.

- Altunata, Serhan, Dmitry Rakhlin, and Henri Waelbroeck, “Adverse Selection vs. Opportunistic Savings in Dark Aggregators,” *The Journal of Trading*, 5 (1), 2009, pp. 16–28.
- Banks, Erik, *Dark Pools: The Structure and Future of Off-Exchange Trading and Liquidity*, Palgrave Macmillan, 2010.
- Berkowitz, Stephen A., Dennis E. Logue, and Eugene A. Noser, “The Total Costs of Transacting on the NYSE,” *The Journal of Finance*, 43, 1988, pp. 97–112.
- Bertsimas, Dimitris, and Andrew W. Lo, “Optimal Control of Execution Costs,” *Journal of Financial Markets*, 1, 1998, pp. 237–268.
- Boni, Leslie, “Grading Broker Algorithms,” *The Journal of Trading*, 4 (4), 2009, pp. 50–61.
- Borkovec, Milan, and Hans G. Heidle, “Building and Evaluating a Transaction Cost Model: A Primer,” *The Journal of Trading*, 5 (2), 2010, pp. 57–77.
- Brandes, Yossi, and Ian Domowitz, “Alternative Trading Systems in Europe: Trading Performance by European Venues Post-MiFID,” *The Journal of Trading*, 5 (3), 2010, pp. 17–30.
- Brogaard, Jonathan A., “High Frequency Trading and Its Impact on Market Quality,” working paper, Kellogg School of Management, Northwestern University, 2010 (<http://ssrn.com/abstract=1641387>).
- Brown, Brian R., *Chasing the Same Signals*, Wiley Trading, 2010.
- Chaboud, Alain, Benjamin Chiquoine, Erik Hjalmarsson, and Clara Vega, “Rise of the Machines: Algorithmic Trading in the Foreign Exchange Market,” Board of Governors of the Federal Reserve System, International Finance Discussion Paper No. 980, 2009.
- Chacko, George C., Jakub W. Jurek, and Erik Stafford, “The Price of Immediacy,” *The Journal of Finance*, 63 (3), 2008, pp. 1253–1290.
- Chalmers, John M. R., Roger M. Edelen, and Gregory B. Kadlec, “Transaction-Cost Expenditures and the Relative Performance of Mutual Funds,” Working Paper No. 00-02, The Wharton School, University of Pennsylvania, 2000.
- Chan, Howard W. H., Robert W. Faff, David R. Gallagher, and Adrian Looi, “Fund Size, Transaction Costs and Performance: Size Matters!” *Australian Journal of Management*, 34 (1), 2009, pp. 73–96.
- Chen, Joseph, Harrison Hong, Ming Huang, and Jeffrey D. Kubik, “Does Fund Size Erode Mutual Fund Performance? The Role of Liquidity and Organization,” *The American Economic Review*, 94 (4), 2004, pp. 1276–1302.
- Christie, William G., Jeffrey H. Harris, and Paul H. Schultz, “Why Did NASDAQ Market Makers Stop Avoiding Odd-Eighth Quotes?” *The Journal of Finance*, 49 (5), 1994, pp. 1841–1860.

- DeLoach, Don, and Jeff Wootton, "Applying Event Processing to Electronic Trading," *The Journal of Trading*, 4 (3), 2009, pp. 56–58.
- Domowitz, Ian, Ilya Finkelshteyn, and Henry Yegerman, "Cul de Sacs and Highways: An Optical Tour of Dark Pool Trading Performance," Investment Technology Group, Inc., 2008.
- Donefer, Bernard S., "Algos Gone Wild: Risk in the World of Automated Trading Strategies," *The Journal of Trading*, 5 (2), 2010, pp. 31–34.
- Durbin, Michael, *All about High-Frequency Trading*, McGraw-Hill, 2010.
- Edelen, Roger M., "Investor Flows and the Assessed Performance of Open-End Mutual Funds," *Journal of Financial Economics*, 53, 1999, pp. 439–466.
- European Commission, "MiFID Implementing (Level 2) Directive," 2006 (http://ec.europa.eu/internal_market/securities/isd/mifid_en.htm).
- Fabozzi, Frank J., Sergio M. Focardi, and Petter N. Kolm, *Quantitative Equity Investing: Techniques and Strategies*, Wiley, 2010.
- Garvey, Ryan, and Fei Wu, "Speed, Distance, and Electronic Trading: New Evidence on Why Location Matters," *Journal of Financial Markets*, 13 (4), 2010, pp. 367–396.
- Goldstein, Michael A., Paul Irvine, Eugene Kandel, and Zvi Wiener, "Brokerage Commissions and Institutional Trading Patterns," *The Review of Financial Studies*, 22 (12), 2009, pp. 5175–5212.
- Harris, Lawrence, and Joel Hasbrouck, "Market vs. Limit Orders: The SuperDOT Evidence on Order Submission Strategy," *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 31 (2), 1996, pp. 213–231.
- Hasbrouck, Joel, and Gideon Saar, "Technology and Liquidity Provision: The Blurring of Traditional Definitions," *Journal of Financial Markets*, 12, 2009, pp. 143–172.
- Hendershott, Terrence, and Ryan Riordan, "Algorithmic Trading and Information," NET Institute Working Paper No. 09-08, 2009.
- , Charles M. Jones, and Albert J. Menkveld, "Does Algorithmic Trading Improve Liquidity?" *The Journal of Finance*, 2010 (forthcoming).
- Jarrow, Robert A., Vojislav Maksimovic, and William T. Ziemba, *Handbook in Operational Research and Management Science Vol. 9: Finance*, Elsevier Science Publishers B.V., 1995.
- Johnson, Barry, *Algorithmic Trading and DMA: An Introduction to Direct Access Trading Strategies*, 4Myeloma Press, 2010.
- Kestner, Lars, *Quantitative Trading Strategies: Harnessing the Power of Quantitative Techniques to Create a Winning Trading Program*, McGraw-Hill, 2003.
- Kim, Kendall, *Electronic and Algorithmic Trading Technology*, Academic Press, Elsevier, 2007.

- Kirilenko, Andrei, Albert S. Kyle, Mehrdad Samadi, and Tugkan Tuzun, “The Flash Crash: The Impact of High Frequency Trading on an Electronic Market,” Working Paper, 2010 (available at <http://ssrn.com/abstract=1686004>).
- Kissell, Robert, “The Expanded Implementation Shortfall: Understanding Transaction Cost Components,” *The Journal of Trading*, 1 (3), 2006, pp. 6–16.
- , “Statistical Methods to Compare Algorithmic Performance,” *The Journal of Trading*, 2 (2), 2007, pp. 53–62.
- , “Transaction Cost Analysis: A Practical Framework to Measure Costs and Evaluate Performance,” *The Journal of Trading*, 3 (2), 2008, pp. 29–37.
- , and Morton Glantz, *Optimal Trading Strategies*, Amacom Books, 2003.
- , and Roberto Malamut, “Algorithmic Decision Making Framework,” *The Journal of Trading*, 1 (1), 2006, pp. 82–91.
- , Morton Glantz, and Roberto Malamut, “A Practical Framework for Estimating Transaction Costs and Developing Optimal Trading Strategies to Achieve Best Execution,” *Financial Research Letters*, 1, 2004, pp. 35–46.
- Macey, Jonathan R., and Maureen O’Hara, “The Law and Economics of Best Execution,” *Journal of Financial Intermediation*, 6, 1997, pp. 188–223.
- Mackay, Tony, “Dancing with the New Boys: How the Interaction between Exchanges and Alternative Exchange Venues Can Improve Capital Markets for Everyone,” Trade Tech Japan 2009, presentation materials, 2009.
- Makimoto, Naoki, and Yoshihiko Sugihara, “Optimal Execution of Multiasset Block Orders under Stochastic Liquidity,” IMES Discussion Paper No. 2010-E-25, Bank of Japan, 2010.
- Mann, Henry B., and Douglas R. Whitney, “On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger than the Other,” *The Annals of Mathematical Statistics*, 18 (1), 1947, pp. 50–60.
- Markowitz, Harry M., “Portfolio Selection,” *The Journal of Finance*, 7 (1), 1952, pp. 77–91.
- Mittal, Hitesh, “Are You Playing in a Toxic Dark Pool? A Guide to Preventing Information Leakage,” *The Journal of Trading*, 3 (3), 2008, pp. 20–33.
- Narang, Rishi K., *Inside the Black Box*, Wiley Finance, 2009.
- New York Stock Exchange, “Equities Quick Reference Guide,” 2010 (http://www.nyse.com/pdfs/nyse_equities_QRG.pdf).
- Nishimura, Kiyohiko G., “Electronic Trading and Financial Markets,” speech at the Paris EUROPLACE International Financial Forum in Tokyo, 2010 (<http://www.boj.or.jp/en/type/press/koen07/ko1011d.htm>).
- O’Hara, Maureen, *Market Microstructure Theory*, Blackwell Publishers, 1995.
- , “Optimal Microstructures,” *European Financial Management*, 13 (5), 2007, pp. 825–832.

- , “What Is a Quote?” *The Journal of Trading*, 5 (2), 2010, pp. 11–16.
- Palmer, Max, “Algorithmic Trading: A Primer,” *The Journal of Trading*, 4 (3), 2009, pp. 30–35.
- Perold, André F., “The Implementation Shortfall: Paper versus Reality,” *Journal of Portfolio Management*, 14 (3), 1988, pp. 4–9.
- Rawal, Dhiren, “Bringing Intelligent Decision-Making to Order Routing,” *The Journal of Trading*, 5 (1), 2009, pp. 30–34.
- Saraiya, Nigam, and Hitesh Mittal, “Understanding and Avoiding Adverse Selection in Dark Pools,” Investment Technology Group, Inc., 2009.
- Schwartz, Robert A., “Dark Pools, Fragmented Markets, and the Quality of Price Discovery,” *The Journal of Trading*, 5 (2), 2010, pp. 17–22.
- Tortoriello, Richard, *Quantitative Strategies for Achieving Alpha*, McGraw-Hill, 2008.
- U.S. Commodity Futures Trading Commission, “Proposed Rules: Co-location/ Proximity Hosting Services,” *Federal Register*, 75 (112), 2010.
- U.S. Commodity Futures Trading Commission and Securities and Exchange Commission, “Findings Regarding the Market Events of May 6, 2010,” 2010a (<http://www.sec.gov/news/studies/2010/marketevents-report.pdf>).
- , “Preliminary Findings Regarding the Market Events of May 6, 2010,” 2010b (<http://www.sec.gov/sec-cftc-prelimreport.pdf>).
- U.S. Securities and Exchange Commission, “Regulation NMS,” Release No. 34-51808, 2005 (<http://www.sec.gov/rules/final/34-51808.pdf>).
- , “Regulation of Non-public Trading Interest,” Release No. 34-60997, 2009 (<http://www.sec.gov/rules/proposed/2009/34-60997.pdf>).
- , “Concept Release on Equity Market Structure,” Release No. 34-61358, 2010 (<http://www.sec.gov/rules/concept/2010/34-61358.pdf>).
- Wagner, Wayne H., and Mark Edwards, “Best Execution,” *Financial Analyst Journal*, 49 (1), 1993, pp. 65–71.
- , and Stevens Glass, “What Every Plan Sponsor Needs to Know about Transaction Costs,” *Transaction Costs: A Cutting-Edge Guide to Best Execution*, 2001 (1), 2001, pp. 20–35.
- Yan, Xuemin, “Liquidity, Investment Style, and the Relation between Fund Size and Fund Performance,” *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 43, 2008, pp. 741–767.
- Yang, Jian, and Brett Jiu, “Algorithm Selection: A Quantitative Approach,” *Algorithmic Trading II*, Institutional Investor Inc., 2006.

