

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	佐藤優輝
論文題目	Microscopic theory for the financial price formation in the presence of order-splitting traders (和文：注文分割取引者の影響を考慮した価格形成のミクロ理論)		
（論文内容の要旨） 本論文は、金融市場における注文分割行動に着目し、理論的・データ解析的にトレーダーの意思決定ダイナミクスを解き明かしている。ここでの「注文分割」とは機関投資家を実務的に採用する取引戦略である。機関投資家は大口取引を行う時、大口注文を小口注文に分割しており、市場の価格形成に非常に大きな影響を与えていると言われている。しかし、注文分割行動を実データで調査するためには、個々のトレーダーの注文行動を追跡調査できるような高精度のミクロデータが必要であり、その実態を定量的に把握することが困難だった。そこで本論文では、機関投資家の注文分割行動が市場全体にどのように影響するかを、ミクロデータを用いて包括的に調査した。 第2章では、本研究に用いた東京証券取引所（東証）のミクロデータの詳細と取引ルールの概要が記述されている。 第3章では、機関投資家の注文分割行動をミクロな立場から数理的に論じている。本研究の基となる数理モデルはリロ・マイク・ファーマー（LMF）モデルである。LMFモデルは機関投資家の注文分割行動を確率過程の立場から記述するモデルである。本章では実データ分析を意識し、トレーダー毎の戦略多様性を取り込んだ一般化LMFモデルを提案し、その厳密解を導出している。 第4章では、東証ミクロデータ解析を通じて、一般化LMFモデルの理論的予言を検証している。東証のアカウントの単位である仮想サーバーを適切に付け合わせることで、個々のトレーダーレベルで注文のダイナミクスを調べ上げている。また、統計的なクラスタリング手法を開発し、注文分割トレーダーを特定した。更には注文分割トレーダーの注文分割回数の分布を調べ上げ、LMFモデルの予言が実際のデータにおいて定量的に成立しているかどうかを、肯定的な形で検証している。 第5章では、機関投資家の注文分割行動が市場取引価格に与える影響を分析している。成行注文によって生じる価格変化は「価格インパクト」と呼ばれており、価格インパクトは注文量に関して非線形に増大する。ここで、非線形性を特徴づける指数は典型的には0.5程度であることが知られており、この経験則は「平方根則」と呼ばれている。本章では、平方根則を特徴づける指数を精密に測定し、誤差の範囲で、東証上の全ての銘柄に対して平方根則が普遍的に成り立つことを実証した。 第6章では、第3章～第5章で得られた知見をまとめ上げ、注文分割行動が市場全体での価格形成にどのような影響を与えるかを考察している。価格インパクトの平方根則を組み込んだLMFモデルを提案し、その解析的性質を導出した。結果、価格インパクトの平方根則は、市場取引価格がブラウン運動に従う上で重要な役割を果たしていることを主張している。 以上のように、本論文では、「機関投資家の注文分割行動」をキーワードとして、様々な切り口から分析を行い、理論的のみならず実証的にも市場の動力学を解き明かしている。第7章では、本博士論文を通じて明らかにされたことをまとめるとともに、どのような未解決問題が残っているかを、その展望とともに論じている。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

金融市場では取引が完全に電子化され、市場内のイベントを精密に記録した高頻度データが利用できるようになってきた。しかし、機関投資家の注文行動をアカウントレベルで追跡調査したマイクロデータ分析は容易ではなく、今まで様々な未解決問題が残ってきた。たとえば、本博士論文が扱った「LMFモデルが予測するスケーリング関係式の検証(第3章、第4章)」や、「平方根則の普遍性の検証(第5章)」はその典型である。また、「成行注文が予測可能であるにもかかわらず、取引価格はブラウン運動に従うのだろうか?」という問いは、分野の初期から続く重要問題だが、氏は平方根則とLMFモデルを統合する形で理論的に問いに答えている(第6章)。

第3章では、LMFモデルにトレーダーの戦略多様性を取り込んだ新たなモデルを提案している。原論文のLMFモデルはトレーダーの戦略多様性が存在せず、実データと比較する上で不整合な部分が存在する。本章では戦略多様性が存在する場合でも頑健に成立する2つの関係式を導出した。多体確率過程を厳密に解き、実データと比較する上で最適な形に結果を整理したことは、氏の高い数理能力を示している。

第4章では、東証上のマイクロデータを用いてLMFモデルの予言を定量的に検証している。個々のトレーダーの注文分割行動を分析し、第3章で提示された理論的關係式が実データで成立することを示している。LMF理論は提唱されてから18年間に渡り未検証の難問であり、本結果は当該分野に大きな影響を与えたと評価できる。

第5章では、注文分割によって生じる価格インパクトの平方根則を論じた。ここで「平方根則を特徴づけるべき指数は、全ての銘柄で同一だろうか?」というある種の普遍性に関して、業界では長年の論争があった。本章はこの論争に決着をつけ、「平方根則は普遍スケーリング則である」と結論付けた。本結果は、先行研究が提案した複数の理論モデルを棄却するため、非常に大きな波及効果を与えると期待できる。

第6章では第2～5章で確立した知見を理論的に統合するものである。市場経験則として「成行注文の流れは非常に長期に渡って予測できる」ことが知られており、その因果関係をLMFモデルが説明する。しかし、成行注文流の長期予測可能性は、価格のブラウン運動的な振る舞いと一見矛盾する。これは経済物理学の初期から取り組まれて来た問題であった。そこで第6章では第2～5章の知見を踏まえ、「平方根則こそが価格がブラウン運動に従う原因である」ことを示唆する理論モデルを提案する。これは挑戦的な主張であり、今後検証が待たれる魅力的な予言である。

このように本博士論文は、近年利用が可能になったばかりのマイクロデータを余すことなく活用し、金融の経済物理学の複数の重要問題を解決した点が高く評価できる。本論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

令和8年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降