

# 審査の結果の要旨

氏名 高 婷婷

本論文は5章で構成される。

第1章では研究の動機と目的が述べられている。百年以上に渡って、金融学分野において現象論的な研究が圧倒的に多いが、近年経済物理学の出現により金融市場に現れる複雑挙動の背後に働くメカニクスの研究が盛んに行われてきた。このような背景下、量子物理に内在する不確実性を利用して金融市場における揺らぎをモデル化する試み、いわゆる量子金融学の研究が始まっている。ただし、これまでの金融市場の量子化モデルの研究はまだ早期段階で、価格リターンのファットテール、ボラティリティ・クラスタリングと言った金融商品価格運動における基本的な統計性質の再現はまだできていない。本研究は金融市場の状態量の量子的定義及びその時間発展方程式の導出を行い、この方程式の解を用いて上述の金融市場価格運動の基本的な統計性質を再現することを目的とする。

第2章では、価格リターンの波動関数を定義し、価格運動の量子モデルの定式化を行っている。波動関数の支配方程式は粒子波動二重性を表すシュレディンガー方程式で、この支配方程式の確立には適切なハミルトニアン演算子を導出することが必要である。著者は金融市場の超過注文(Order Excess)に着目し、金融市場を構成する各種のトレーダーの取引行動及びリスク回避による超過注文の変化を定式化することにより、超過注文の時間発展方程式の導出を行った。さらに、超過注文の方程式から得られた価格運動に働くポテンシャルを量子モデルのハミルトニアン演算子に導入する。このように確立された波動関数の支配方程式は非調和量子振動子の方程式になり、解の形はハミルトニアンにある3つのパラメーターに左右される。この3つのパラメーターはマーケットメイカーの働きを示す $\gamma (>0)$ 、トレンドフォロワーとコントラリアンの競争を示す $c$ 、及びリスク回避の強度を示す $k$ となっている。本章の最後の部分では、この3つのパラメーターを用いて、各々の市場状態を区別し、エネルギー準位が基底状態となる時にそれぞれの波動関数の解とリターンの分布関数の形式を分析した。

第3章は、2章で得られる波動関数の解を用いて実市場のデータの分布関数を表す内容で構成される。実市場のデータは流動性の高い株市場の代表的指数である Nikkei 225(日本市場)、SSECI(中国市場)、S&P 500(米国市場)の10年間(1996-2016)の日次と月次記録である。月次データの分布関数は Gaussian に近い、2章で述べられていた流動性の高い( $\gamma \gg \text{abs}(c)$ )時の解で表すことができる。一方、日次データの分布関数の尖度が高く、ファットテールになっている。このような統計性質を表すには、異なるエネルギー準位及びポテンシャルでの波動関数の解の重ね合わせが必要である。論文の図 3.2 及び表 3.2 と 3.3 に示した通り、著者は10個のエネルギー準位及び2つのポテンシャルで得られた量子モデルの解を用いて、3つの市場指数の分布関数にフィッティングすることができた。市場流動性が低くなる( $\gamma < \text{abs}(c)$ )場合、量子モデルの解析解としての分布関数は2つピークを持つ bimodal になり、実データとの直接比較はできなくなるが、本研

究ではチャートリストの取引戦略を利用して実データに対するフィルターリングの手法を提案し、トレンドフォロアーが支配するときの市場データを抽出した。また、抽出データと解析解の一致性が図 3.7, 3.11, 3.12 に示された。

第 4 章は量子モデルの動的特性に関する内容である。価格リターンにおけるボラティリティ・クラスタリング現象は、リターンの 2 乗の時系列データの自己相関関数の遅い減衰として特徴づけられている。量子モデルでこの現象の再現するために、まずリターンの期待値の時系列データの自己相関関数の減衰特性を捉える必要がある。本研究では、**Nikkei 225** のデータを用いて価格リターンの確率過程モデルである **GARCH** プロセスに対するキャリブレーションを行い、シミュレーションと理論の両方の結果により期待リターンの時間発展にクラスタリング構造の存在を示した。次に、市場の取引量による価格リターンの分布関数の形の変化に着目し、量子モデルのエネルギー準位と市場の取引量の関連性を示した。更に、**Nikkei 225** の日次取引量に閾値を設け、取引量の時系列が閾値の周りの運動を利用してエネルギー準位の跳躍の動的モデル化を行った。最終的に、エネルギー準位の跳躍モデルと波動関数の時間発展方程式のカップリングより、価格のリターンにおける自己相関関数の遅い減衰を示し(図 4.8) 、ボラティリティ・クラスタリング現象を再現した。

第 5 章の内容は本論文の結論と将来の研究への展望となる。

本論文は金融市場を量子力学的手法でモデル化するという独特な研究であり、論理的にきちんとステップを踏みつつ、学術上の独創性と有用性のある成果が挙げており、本論文は博士の学位論文として合格と認められる。

したがって、博士（環境学）の学位を授与できると認める。

以上 1 9 8 3 字