

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	柿中 晋治
論文題目	Power Law Systems and Heterogeneous Fractal Properties of Cryptocurrency Markets (暗号通貨の価格変動におけるべき乗則性とフラクタル性)		
(論文内容の要旨) 暗号通貨市場は新しく、その価格変動の特徴は、数理的な観点においても、経済学的観点から見ても、ほとんど明らかでなかった。 本論文は、発展著しい暗号通貨市場に対し、その価格変動の様子を非線形物理的アプローチから明らかにし、行動ファイナンス理論と結びつけることによって現象解明を試みる。特に、価格変動の分布と相関構造に関して、実データから経験的に観測されるアノマリー現象を物理的に、そして経済的な意味から説明づけることに注力している。 本論文は全8章で構成されている。 第1章では研究の背景と暗号通貨市場に対する基礎知識の概要が述べられている。第2章以降で用いられる用語の定義のほか、実データの分析に必要な手法の概要についてまとめている。 第2章では、安定分布のパラメータを推定する新たなアプローチを提案している。推定に必要な特性関数上の2点の選択を柔軟に工夫することで、任意のパラメータ領域で推定可能な汎用性の高い手法を実現している。個別のパラメータだけでなく、分布全体に対する推定精度が向上することも確認している。 第3章では、暗号通貨市場の価格変動分布に対する安定分布の説明力を議論している。安定分布と片側べき分布の両観点から実データフィッティングを行い、分布モデルとしての妥当性を統計的に検証している。その結果、両方のべき乗則によって統一的な特徴づけが可能であることを確認している。 第4章では、暗号通貨市場の自己相関構造、特にコロナショック前後における時系列構造変化をフラクタル相関の枠組みから調べている。その結果、パンデミック発生以降は市場効率性が短期・長期スケールおよびブル・ベア市場で変動する様子が明らかにされている。具体的には、マルチフラクタル性や市場非効率性が短期的には悪化する一方で長期的には良化するというねじれ現象が観測されている。このような現象が発生する要因に関しても議論を行っている。 第5章では、暗号通貨市場の価格変動とボラティリティ変動との間にある相互相関構造をフラクタル相関の枠組みから調査している。両者との相関部分にはランダムではないフラクタルな揺らぎが存在することが確認されている。また、それらの揺らぎにはマルチフラクタル性に加えて特徴的な非対称性を有することも併せて明らかにしている。 第6章では、価格の下落が価格の上昇よりもその収益率におけるボラティリティが増幅される現象である「レバレッジ効果」について、暗号通貨市場における効果の有無および性質を、行動ファイナンスと経済物理学の両観点から検証している。さらに伝統的な経済時系列分析手法とは異なる切り口であるフラクタル回帰分析を活用し、非対称性検出が可能なモデルを提案している。 第7章では、ポートフォリオの最適配分を決める伝統的な平均分散アプローチにフラクタル相互相関の概念を組み入れたアプローチを提案している。さらに再配分の際には、投資家のスケール嗜好性が強気相場・弱気相場で変化することを考慮に入れることで分散効果を高め、より柔軟なポートフォリオ選択が行える手法を与えている。 第8章では、本論文のまとめを述べるとともに、これらの暗号通貨価格変動の実データ解析に基づく研究が物理学、ファイナンス、経済学等の分野横断的な視点から学術貢献していることを述べ、さらには実社会へ応用そして還元できる期待がされることを踏まえて今後の研究課題に言及している。			

(論文審査の結果の要旨)

一般に、金融市場において価格変動の本質を探り、その挙動や特徴を理解することは、リスク管理や金融経済の発展において重要な役割を担っている。

暗号通貨は、暗号技術に基づく新しい“通貨”としての特徴を持つ資産であり、本論文では、暗号通貨市場の価格変動を、マルチフラクタルやべき乗則といった経済物理学的視点とレバレッジ効果といった経済学的観点の両面から分析した。本研究で得られた主な研究成果は以下の通りである。

1. 特性関数に基づく、汎用性の高い安定分布のパラメーター推定方法を提案し、提案手法が既存手法と比較して最も高い精度であることを数値実験によって立証した。
2. 1. の安定分布パラメーター推定方法を、暗号通貨市場の価格変動の実データに適用し、暗号通貨は裾が厚いファットテールな分布に従い、分布全体で見ると安定分布タイプのべき乗則、テール部分のみを見るとキュービク則タイプのべき乗則に従うことを初めて明らかにし、暗号通貨市場の価格変動の分析をする上で有益となる知見を与えた。
3. 暗号通貨の価格変動の非効率性をマルチフラクタル性の観点で調べ、短期スケールの非効率性の主要因は分布のファットテール性である一方、長期スケールの非効率性を生み出す主要因は、上昇相場においては分布のファットテール性であり、下落相場においては系列相関であることを明らかにした。特に、COVID-19ショック発生前後の期間は、短期スケールで非効率性を高めたが、長期スケールでは逆に非効率性が弱まったことを明らかにした。
4. 暗号通貨の価格変動とボラティリティとの間にマルチフラクタル的な相互相関があることを初めて明らかにした。更に、ブル市場の方がベア市場よりも長期記憶性が高いことを示した。
5. レバレッジ効果を検出する数理モデルを構築し、レバレッジ/逆レバレッジ効果にスケール依存性があることを発見した。メジャーな暗号通貨(Bitcoin・Ethereum)においては通常のマーケットと同様のレバレッジ効果を示す一方、マイナーな暗号通貨においては、通常とは逆の逆レバレッジ効果を示すことを明らかにした。
6. 資産間の相互相関におけるマルチスケール性及びマルチフラクタル性を組み入れた新しいマルチスケール・マルチフラクタルなポートフォリオ手法を提案し、既存の平均分散ポートフォリオ理論に基づくアプローチと比較して、リスク指標の改善および分散効果の向上といった新手法導入の効果を確認した。

以上、本論文は、汎用性の高い安定分布推定手法を提案するとともに、暗号通貨の価格変動の実データに基づき、価格変動分布が普遍的にべき乗則に従うことを明らかにするとともに、暗号通貨の価格変動の非効率性、レバレッジ効果といった経済学的な特徴をマルチフラタル解析の観点で解析した。更には、マルチフラクタル相関に基づく実用可能性の高いポートフォリオモデルを構築し、その効果を検証した。これらの研究成果は、普遍性の高い学術上の知見だけでなく、実用上の応用可能性をもたらす知見になり得るものである。

以上により、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和5年2月16日に実施した論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文の令和6年3月1日以降のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： 令和5年4月1日以降