

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 新井 優太
 学位 博士 (理学)
 学位記番号 新大院博 (理) 第 396 号
 学位授与の日付 平成 27 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博士論文名 ランダム行列理論と複素主成分分析 : 株式市場における相関構造への応用

論文審査委員 主査 教授・家富 洋
 副査 教授・田中 環
 副査 教授・山田 修司
 副査 教授・三浦 毅
 副査 准教授・蛭川 潤一
 副査 准教授・奥西 巧一

博士論文の要旨

主成分分析法を使って多変量時系列データに含まれる真の相関構造を解明する際に、ランダム行列理論(RMT)は統計的に有意な主成分を抽出するための明解な判定規準を与える。ランダム行列とは行列要素がランダムな確率変数からなる行列である。本論文の目的は、静的(同時刻)相関の検出に対してのみ有効である従来の分析方法を、動的(異時刻)相関を効果的に検出できるように拡張することである。具体的には、ヒルベルト変換とRMTを組み合わせ、新しい相関分析手法(複素主成分分析)を確立する。その際に必要なランダム行列理論の一般化を行う。さらに、新手法を株式市場に応用し、市場の背後に隠れた株価間の動的相関構造を明らかにすることである。

論文は5つの章とテクニカルな内容をもつ5つの付録から構成されている。まず第1章では先行研究についてレビューされ、研究の位置づけが行われている。特に、時系列データの有限サイズ性(RMTは無次元の行列を仮定)や自己相関性(疑似相互相関を導く)など、RMTを主成分の判定規準として用いる際の注意が述べられている。これらも申請者の研究に基づくものである。幸い、本研究が対象とする株価データにおいては、有限サイズ効果や自己相関効果は無視できることが数値シミュレーションによって確認することができる。

続く第2章では、解析データの紹介と本研究の基盤となる複素主成分分析法(CPCA)の説明が行われている。CPCAは、時系列データをヒルベルト変換を使って複素化することから出発する。得られた複素時系列に対して主成分分析を適用すると、位相の異なる時系列同士の相関抽出が可能になるため、従来の手法では抽出されにくかった動的な相関構造の抽出・解析が期待できる。応じて、時系列の実部と虚部が独立ではないため(ヒルベルト変換で関係)、統計ノイズを除去するための帰無仮説となるRMTの固有値分布表式や固有ベクトル成分分布を拡張する必要がある、それらの一般化表式が求められている。なお、主成分分析、ヒルベルト変換およびRMTの方法論の詳細については付録にまとめられている。

さらにCPCAを米国の株価データ(S&P500)へ応用することによって得られた複素相関行列の固有値と付随する固有ベクトルに関する結果が提示されている。固有ベクトルの各成分は複素数であり、その位相には各固有モードにおける株価変動に関する動的情報が反映される。特に固有モード間の同期現象やリーマンショックの影響について詳しい解析がある。

第3章では複素相関行列を隣接行列と読み替えてネットワークを構築し、株価間の動的相関構造をネットワーク的に捉える新しい試みが述べられている。各ノード(株価)対をつなぐリンクには複素数の重み(ノード間の複素相関係数)がつき、その位相は株価間のリード・ラグ関係を表す。位相を同じくする株価を同期株価コミュニティと抽出することによって、市場全体の動的相関構造が明らかにされている。市場全体の運動に乗った「重心系」からみると、市場内におけるフラストレーション構造(互いに反相関係にある3極構造)の存在が、従来の主成分分析によってすでに明らかにされている。本研究はそのような新奇な相関構造が動的相関レベルで実現していることを確認する。

第4章では、市場モードとフラストレーション構造との関係を明らかにするための第1歩として、2値化された株価変動に対する3体相関が調べられている。得られた結果は、3体相関が市場を安定化する方向に働くことが示されている。詳しい定式化は付録にある。

第5章では、本研究のまとめがなされ、今後の課題が提示されている。

審査結果の要旨

申請者は、ランダム行列理論(RMT)、Hilbert変換および主成分分析を組み合わせた複素主成分分析(CPCA)を開発した。CPCAでは、多変量時系列データはHilbert変換を用いて複素化され、その位相情報から時系列間の同期性やリード・ラグ関係などの動的相関構造についての知見を得ることができる。CPCAそのものは1980年代初頭に提案された手法であるが、RMTと組み合わせた点が申請者による新しい寄与である。RMTは統計検定の帰無仮説として意味のある主成分を理論的に明確化する(現実のデータにおいては、真の情報はノイズの海の中に潜んでいることがしばしばである)。従来の主成分判定基準は半経験的なものである。また、通常の主成分分析に基づく静的な(同時刻の)相関構造の探索については、これまで多くの先行研究がある。しかし、変量同士がいつも同時に反応しているわけではなく、ある一定時間の遅延の後に反応するというケースも容易に想像される。

さらに、申請者はこの新手法を株価データに応用し、これまで知られていなかった市場における様々な動的相関構造を明らかにした。特筆すべき成果として、固有モード間の同期現象の発見や同期株価コミュニティの抽出などがある。

加えて、本研究で新しく開発されたCPCAは客観的な検定方法を提供し、株式市場ばかりではなく、多変量時系列データに含まれる動的相関構造を検出する画期的手法として今後幅広い分野で用いられるものと期待される。また、多数の自由度が少数の自由度に縮約されることにより、数理モデルの構築が容易になるという効用もある。

本論文の主要な研究成果は、査読付き論文4編(英文)で報告され、学位申請の必要条件を満足している。また、統計数理解析研究所共同研究レポートにおいても計5報(和文)が掲載されている。

以上のように本論文は数多くの学術的に重要な研究成果を含み、博士(理学)の学位論文として十分価値のあるものと判定した。