

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26245028

研究課題名(和文) 経済・金融多変量データのベイズモデリングと政策・行動の確率的評価

研究課題名(英文) Bayesian modeling of multivariate economic and financial data and Probabilistic evaluation of policy and behavior

研究代表者

大森 裕浩 (Omori, Yasuhiro)

東京大学・大学院経済学研究科(経済学部)・教授

研究者番号：60251188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,700,000円

研究成果の概要(和文)：株式の収益率などの多変量金融時系列は、その分散や相関係数が時間を通じて変動することが知られている。その変動を予測することは、ポートフォリオの最適化など投資の統計的リスク管理にとって重要である。本研究ではその計量経済モデルをいくつか構築し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いたモデル・パラメータの推定方法を開発した。特に日中取引などの高頻度データを考慮することで、推定や予測の精度を改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

年金などの資産の運用は、通常株式や債券などを組み合わせて行っており、それぞれの資産のウェイトは、それらのリターンやリスクを考慮して決められる。これらのリターンやリスクは、日々変動していることが知られており、そのモデル化がポートフォリオの最適化や統計的リスク管理にとって重要である。このため、本研究では、このリスクの変動を多変量確率的ボラティリティ変動モデルとしてモデル化し、推定・予測方法を開発した。このモデルではパラメータ数が非常に多く従来の方法では推定が困難になるが、ベイジアン・アプローチを用いたマルコフ連鎖モンテカルロ法によって、その問題を克服している。

研究成果の概要(英文)：It is well-known that the variances and correlations are time-varying for the multivariate financial time series such as multiple stock returns. To predict such dynamics is very important for the risk management of the investment such as the portfolio optimization. We propose several econometric models for these multivariate financial time series and the efficient estimation methods using Markov chain Monte Carlo simulation. By incorporating additional information based on high frequency data, we improved the precision of the estimation and the prediction.

研究分野：ベイズ統計学

キーワード：ベイジアン・アプローチ マルコフ連鎖モンテカルロ法 確率的ボラティリティ 実現ボラティリティ
ポートフォリオ最適化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

経済や金融の多変量データの統計モデルにおいては、さまざまなデータ生成過程の複雑な動学的構造を表現するためには非常に多くの潜在変数を導入することが必要となっている。特に多変量の金融時系列では時間を通じて変動する分散共分散行列のモデル・パラメータの個数が急激に増加する傾向にあり、 p 変量データのボラティリティ・モデリングでは、分散・共分散が $p(p+1)/2$ 個となり、これらについて動学的構造を設定してパラメータ推定をすることになる。しかし、最尤法など従来型のアプローチではパラメータ推定は困難であることが多い。尤度関数を求めるために潜在変数に関して次元の高い多重積分を解くことは容易ではなく、パラメータ数が多い場合には尤度関数を最大化することもまた難しい。

この問題を解決するため、本研究ではベイズ・アプローチを採用する。具体的には、パラメータに関する事前情報とデータ及び潜在変数に関する情報を統合して得られる多変量事後密度関数に基づいて統計的推測を行う。パラメータの各成分についてはその周辺事後分布を用いて行うが、多変量確率密度関数を数値積分することは難しいので、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法というシミュレーション法により多重積分の困難を克服し、事後分布に基づく統計的推論を行うことができ、またさらに将来の観測値とその関数の予測分布を求めることもできる。MCMC 法は、マルコフ連鎖を利用して確率分布からの乱数発生を行うので、サンプリングの効率性という点では独立標本に比べてやや劣るものの、多変量分布からの確率標本を比較的容易に発生することができる。得られた確率標本を事後分布からの確率標本とすることで事後分布に関する統計的推論を行うことが容易にできる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、経済・金融の多変量データのための新しい計量経済モデルを、ベイズ・アプローチを採用することにより開発・評価することである。具体的には、(1) MCMC モンテカルロ法という計算統計学の手法を用いて母数の推定方法を開発し、さらに(2) 経済政策・投資行動のシミュレーションを行うことにより経済変数の予測確率分布を求めてモデル比較や予測評価を行う。

まず、資産収益率などの金融多変量データのボラティリティ変動モデルでは、さまざまな構造を持つモデルを開発し、選択された資産の組み合わせであるポートフォリオのパフォーマンス、収益率の将来のボラティリティ予測、収益率の分位点であるバリューアットリスク (VaR) の予測、収益率のある分位点以下の条件付き期待値である期待ショートフォールの評価・比較を行うことである。

次に、さまざまなマイクロ・マクロ経済データのベイズ計量経済分析では、予算制約式が非線形になる場合(通増型あるいは通減型ブロック料金)における、離散・連続選択行動モデルに基づくガス需要関数や電気需要関数の厳密推定と価格政策シミュレーションを行うほか、情報の非対称性やモラルハザードを考慮した歯科保険の購買行動の計量経済分析、航空産業における寡占3企業(ANA, JAL, JAS)による航空路線への市場参入ゲームの計量経済分析、マクロ経済の時変係数多変量時系列モデルによるシミュレーション分析、医療消費において重要となる入院の需要を推定のほか、社会調査のデータ分析などについても研究を行う。

3. 研究の方法

株式収益率の確率的ボラティリティ変動 (SV) モデルについて、1次元モデルについては、これまでに考えられてこなかったデータの重要な特性を考慮するため、大森・渡部・高橋が歪みのある分布のクラスの一つを用いて拡張を行い、分位点や将来のボラティリティなどの予測の評価を行った。特に高頻度データをモデルに取り組み新しい実現 SV モデル (RSV モデル) を構築した。渡部・高橋はさらに一般化不均一自己回帰分散 (GARCH) 過程を基礎としたモデルの拡張として、Threshold や smooth transition などを考慮したモデルを構築し、さらに、日経 225 を用いた金融データの分析も行った。また大森・國濱は株価収益率の極値の時系列モデルについても新しいモデルを構築し、モデル・パラメータの推定方法やフィルタリングの方法の開発を行った。

多次元モデルについては、大森・石原・黒瀬が、因子構造・均一相関構造・共分散行列のコレスキー分解に基づく構造・複数の実現尺度を用いた観測方程式などを考慮したモデルの提案と、その MCMC 法による推定方法の開発を行った。入江はポートフォリオにおける資産選択の意思決定の問題をモデル化した。

またマイクロ経済データの計量経済分析では、大森が需要関数や電気需要関数の厳密推定と価格政策シミュレーション、歯科保険の購買行動の分析、航空路線への市場参入ゲームの計量経済分析を行った。マクロ経済データの分析では、渡部・石原が、マルコフスイッチングモデルを拡張したモデルによる景気循環の分析や時変多変量自己回帰モデルを用いた分析を行った。この他、石原は医療経済データの分析、国濱は社会調査データの分析を行った。

研究内容は、2014年度～2018年度統計関連学会連合大会(東京大学)、国際ベイズ分析学会世界

大会 (ISBA2014, ISBA2016, ISBA2018), 国際ベイズ分析学会アジア大会 (ISBA-EAC2016, ISBA-EAC2017, ISBA-EAC2018)、計算・計量ファイナンス学会 (CFE2014, CFE2015, CFE2016, CFE2017, CFE2018), Econometrics and Statistics (EcoSta2017, EcoSta2018)、The China Meeting of Econometric Society、シンガポール国立大学、関西計量経済研究会 (共催)、ベイズ研究集会 (主催) など 国内および海外における様々な機会において招待講演も含めて研究発表も積極的に行った。さらに研究成果について

Applied Stochastic Models in Business and Industry、Computational Economics, Computational Statistics and Data Analysis(3 論文)、Econometrics and Statistics、Econometric reviews(2 論文)、Empirical Economics, International Journal of Forecasting、Journal of Applied Statistics, Japanese Economic Review (3 論文)、Journal of Financial Econometrics、Journal of the Japanese and International Economies, Monetary and Economic Studies、Statistics and its Interface、経済研究(4 論文)、日本統計学会誌(2 論文)などのほか、研究書「Current Trends in Bayesian Methodology with Applications」に掲載・掲載予定とした。

4. 研究成果

[A] 金融多変量データのベイズモデリングと投資行動の確率的評価

(1) 1 変量ボラティリティ変動モデル

まず、確率的ボラティリティ変動 (SV) モデルの観測方程式に、高頻度データを用いた観測方程式を追加した実現確率的ボラティリティ変動 (RSV) モデルを考え、ボラティリティの長期記憶性も考慮したモデルについて、その MCMC 法による推定方法を提案し実証分析を行った (Shirota, Hizu and Omori (2014), Omori and Watanabe (2015))。また、金融資産収益率のボラティリティが好況期には平均的に低く、不況期には平均的に高くなることから、ボラティリティ平均の変動を、平滑推移関数を用いて定式化し、MCMC 法によるベイズ推定法を提案し、日米の株価指数データに適用した(高橋(2014))。さらに RSV モデルにおいて金融収益率分布の裾の厚さと非対称性を捉えられる一般化双曲非対称 t 分布を用いて拡張したモデルを提案して、日米の株価指数を用い、特に株価変動の激しい時期において、拡張された RSV モデルを用いることによりボラティリティ予測と収益率の分位点予測のパフォーマンスが改善されることを示した (Takahashi, Watanabe and Omori (2015))。

一方、ボラティリティ変動を表現するモデルクラスの一つである分散不均一自己回帰 (GARCH) モデルを拡張して Threshold Realized GARCH モデルとそのベイズ推定法を提案した。それを日米の株価指数に応用し、Value-at-Risk の精度が高まることを示した (Chen and Watanabe (2019))。また、様々な平滑推移 GARCH モデルを 19 カ国の株価指数に MCMC を用いてベイズ推定した (Chen, Weng and Watanabe (2017))。このほか、Heterogeneous Autoregressive モデルのパラメータと誤差分散を時変に拡張しそのベイズ推定法を提案した。それを日本の株価指数に応用し、ボラティリティの予測精度が高まることを示した。また SV モデルを日中のボラティリティ変動を表すモデルに拡張しそのベイズ推定法を提案した。それを日本の株価指数に応用し、ボラティリティの予測精度が高まることを示した。このほか、一変量金融資産日次収益率データとその四本値から得られる指標の同時モデリングにより、潜在変数である収益率の分散項の推定を行った。

(2) 多変量ボラティリティ変動モデル

多変量株価収益率のための多変量 SV モデルにおいて、相関係数が時間を通じて変動するモデルを、行列指数関数や均一相関係数モデルなどを用いて提案し推定方法の開発や実証分析を行った。行列指数関数を用いて定式化では、異なる株式間のレバレッジ効果も導入した (Ishihara, Omori and Asai (2016))。また均一相関係数モデルでは、すべての株価収益率の相関係数が同一であるが時間を通じて変動するモデルを考えてモデル・パラメータのベイズ推定法を提案し、実証分析を行った (Kurose and Omori (2016))。さらに多変量株価収益率に動的な構造を持つ因子を導入して、誤差項に裾の厚い分布などを考慮した複数のモデルの提案・推定方法の開発を行い、ポートフォリオの最適化の観点から、モデル比較を行い、提案モデルが優れていることを示した (Ishihara and Omori (2017))。このほか、実現共分散行列の情報を加えたコレスキー分解に基づくモデルを提案し、MCMC 法による推定方法を開発した (Shirota, Omori, Lopes, Piao (2017))。さらに性質の異なる複数の種類の実現ボラティリティを SV モデルに導入する方法を提案し、日本のデータで暦効果の影響を調べた。収益率の予測精度の向上だけでなく、収益率の様々な種類の変動を分離し、解釈しやすい推測結果を得ることができた (石原(2014))。

一方、ボラティリティを含む多変量状態空間モデルの逐次的分析と、それに伴う意思決定の問題に関する研究についても行った。多数の株式の収益率に関するポートフォリオ最適化問題を考察し、ポートフォリオにはスパース性が導入され、提案手法が 200 以上の銘柄から、少数の株式を選択できることを確認した。さらに多変量データに対して有用な縮小事前分布を組み

入れたモデルの開発について研究した。

(3) 金融データの計量経済分析

日経 225 の分散リスク・プレミアムが日本の信用スプレッドと景気一致指数の予測に有用であること、日経 225 の実現ボラティリティがオプション価格の導出に有用であることを明らかにした (Ubukata and Watanabe (2014a))。真の資産価格が連続時間モデルに従う場合に、離散時間で観測されるマイクロストラクチャーノイズを含む価格から計算される実現ボラティリティの理論モデルの推定法を提案し、円ドルレートの実現ボラティリティに応用した (Ubukata and Watanabe (2014b))。さらに日経 225 の分散リスク・プレミアムが日本の将来の景気変動や景気下降確率に対して予測力を持ち、その予測力は超過債券プレミアムよりも高いことを明らかにした (渡部 (2016))。このほか、日経 225 先物ミニ市場における注文不均衡と価格変化の関係を単純な注文板モデルに基づいて分析し、また S&P500E-mini 先物について、注文不均衡と取引価格変化率の関係をより詳細に分析した (高橋 (2016))。また日経 225 先物市場の日中流動性を Inverse Limit Order Book Slope と呼ばれる指標を用いて分析した (高橋 (2018))。

また、リスク評価に重要な極値の時系列モデルを状態空間モデルの枠組みで提案して MCMC 法による推定方法を開発し、日次株価収益率の月間最小値や 1 時間ごとの電気消費量の月間最大値の実証分析を行った (Nakajima, Kunihama and Omori (2017))。

[B] 経済多変量データのベイズモデリングと政策・行動の確率的評価

(1) マクロ経済の計量経済分析

日本の景気一致指数に通常のマルコフスイッチングモデルを当てはめると、金融危機や東日本大震災の時期だけを景気後退期、それ以外の時期をすべて景気拡張期と推定するが、誤差項の分布を t 分布にするか分散を確率ボラティリティモデルによって定式化すると、そうした問題が解消されることを明らかにした (Watanabe (2014))。また、循環型・推移型両方のタイプの構造変化モデルについての近年の研究のサーベイを行い、マルコフスイッチング SV モデルを景気動向指数に応用して景気循環の推定を行った (石原・渡部 (2015))。特に (1) 誤差項の分布を t 分布にする、(2) 分散を確率ボラティリティ変動モデルで定式化する、(3) 構造変化を加える、といった拡張を行い、MCMC を用いてベイズ推定した。その結果、これらの拡張により、金融危機や東日本大震災を含む期間でも景気の転換点を正確に推定できることを明らかにした。

この他、時変多変量自己回帰モデルを MCMC 法によりベイズ推定することで、近年、日本の輸出量は為替レートに対する感応度が低下している一方で、世界景気に対する感応度が上昇していることを明らかにした (中島・渡部 (2017))。

(2) 経済政策の計量経済分析

ブロック料金制のガス需要関数の計量経済モデルを構築し、そのモデル・パラメータのための MCMC 法による推定方法を開発、ガス料金価格体系を変化させた場合の政策評価を行った (Miyawaki, Omori and Hibiki (2016, 2018))。さらに米国の歯科保険市場におけるモラルハザードと選択を識別するために市場参入ゲーム分析に基づく計量経済モデルを構築し、モラルハザードとともに逆選択が存在することを明らかにした (Sugawara and Omori (2017))。また航空産業における寡占 3 企業 (ANA, JAL, JAS) による航空路線への市場参入ゲームの計量経済モデルを提案し、MCMC 法による推定方法の開発および実証分析を行った (Onishi and Omori (2016))。

このほか、医療消費において重要となる、入院の需要を推定することを目的とした分析手法を開発した。近年、在院期間の短縮だけでなく、再入院率の低下の重要性も指摘されているため、繰り返し入院のある場合に対し、米国医療消費調査パネルデータから総入院日数のデータを作成し、保険による内生性を考慮した複合ポアソン回帰モデルを提案し分析を行った。

このほか、時間的従属性が存在し、観測尺度が異なるような多変量データを分析するためのノンパラメトリックベイズモデルを考案し、関連するパラメータ推定のための MCMC アルゴリズムを提案した。新たな手法は既存の手法に比べ、より柔軟に相関の時間的変化を表すことができ、また計算時間の短縮と予測精度の大幅な改善を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 30 件)

- (1) Koji Miyawaki, Yasuhiro Omori and Akira Hibiki (2018) "Discrete/Continuous choice model on the nonconvex budget set," *Econometric Reviews*, 37-2, 89-113. January 2018. DOI:10.1080/07474938.2015.1032166 査読有.
- (2) Shinichiro Shirota, Yasuhiro Omori, Hedibert. F. Lopes and Haixiang Piao (2017), "Cholesky realized stochastic volatility model," *Econometrics and Statistics*, 3,

- 34-59. July 2017 DOI: 10.1016/j.ecosta.2016.08.003 査読有.
- (3) Shinya Sugawara and Yasuhiro Omori (2017), "An econometric analysis of insurance markets with separate identification for moral hazard and selection," Computational Economics, 50-3, 473-502. October 2017. DOI:10.1007/s10614-016-9594-z 査読有.
- (4) Cathy W. S. Chen, Monica M. C. Weng, and Toshiaki Watanabe (2017) "Bayesian forecasting of Value-at-Risk based on variant smooth transition heteroskedastic models," Statistics and Its Interface, 10(3), 451-470. 2017. DOI: dx.doi.org/10.4310/SII.2017.v10.n3.a9 査読有.
- (5) Makoto Takahashi, Toshiaki Watanabe and Yasuhiro Omori (2016), "Volatility and quantile forecasts by realized stochastic volatility models with generalized hyperbolic distribution," International Journal of Forecasting, 32-2, 437-457. April 2016. DOI:10.1016/j.ijforecast.2015.07.005 査読有.
- 他 25 件

[学会発表] (計 89 件)

- (1) 2019年3月25日 International Workshop on "One Belt & One Road" 青山学院大学. 渡部敏明・中島上智 "High-frequency stochastic volatility models for the Japanese stock" (招待講演)
- (2) 2019年2月27日 Computation and Econometrics Workshop, GRIPS, Tokyo. Yasuhiro Omori "Comments on 'Efficiently Combining Pseudo Marginal and Particle Gibbs Sampling' by Kohn et al."
- (3) 2019年1月31日 科研プロジェクト「経済統計・政府統計の理論と応用からの提言」研究会、小島ホール、東京大学. 山内雄太・大森裕浩 "Multivariate realized stochastic volatility with dynamic pairwise correlations"
- (4) 2018年12月16日 12th International Conference on Computational and Financial Econometrics (CFE2018), University of Pisa, Pisa, Italy. 渡部敏明・中島上智 "High-frequency stochastic volatility models for the Japanese stock" (招待講演)
- (5) 2018年12月16日 12th International Conference on Computational and Financial Econometrics (CFE2018), University of Pisa, Pisa, Italy. 入江薫・栗屋直・大森裕浩 "Filtering for stochastic volatility models with leverage by mixture approximation"

他84件

[図書] (計 1 件)

大森裕浩 (2017) 『コア・テキスト計量経済学』新世社. 362 ページ. 2017年12月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者氏名：大森 裕浩
ローマ字氏名：Yasuhiro Omori
所属研究機関名：東京大学
部局名：経済学研究科
職名：教授
研究者番号 (8桁)：6 0 2 5 1 1 8 8

(2) 研究分担者

研究分担者氏名：渡部 敏明
ローマ字氏名：Toshiaki Watanabe
所属研究機関名：一橋大学
部局名：経済研究所
職名：教授
研究者番号 (8桁)：9 0 2 5 4 1 3 5

研究分担者氏名：黒瀬 雄大
ローマ字氏名：Yuta Kurose
所属研究機関名：筑波大学
部局名：システム情報系
職名：助教
研究者番号 (8桁)：2 0 7 1 3 9 1 0

研究分担者氏名：高橋 慎
ローマ字氏名：Makoto Takahashi
所属研究機関名：法政大学
部局名：経営学部

職名：准教授
研究者番号（8桁）：20723852

研究分担者氏名：入江 薫
ローマ字氏名：Kaoru Irie
所属研究機関名：東京大学
部局名：経済学研究科
職名：講師
研究者番号（8桁）：20789169

研究分担者氏名：國濱 剛
ローマ字氏名：Tsuyoshi Kunihama
所属研究機関名：関西学院大学
部局名：経済学部
職名：講師
研究者番号（8桁）：40779716

研究分担者氏名：石原 庸博
ローマ字氏名：Tsunehiro Ishihara
所属研究機関名：大阪経済大学
部局名：経営学部
職名：講師
研究者番号（8桁）：60609072

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。