

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K01551

研究課題名（和文）認識論理を用いた構造型アプローチによる金融的確率ジャンプの発生メカニズムの研究

研究課題名（英文）A Study on the Generation Mechanism of Financial Probability Jumps based on a Structural Approach using Epistemic Logic

研究代表者

足立 高德（Adachi, Takanori）

東京都立大学・経営学研究科・教授

研究者番号：60733722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金融危機などのリスク・イベントでみられる確率ジャンプの発生メカニズムを数理論理学の一分野である認識論理を用いた構造型アプローチによる解析を試みた。具体的には認識論理のモデルとして用いられる圏論を用い、従来のように時点ごとに確率測度が変化するだけでなく時点ごとに確率空間も変動する主観的フィルトレーション(SF)という概念を導入し、金融モデル開発のための全く新しい枠組みを開発した。本研究ではSFの理論的解析とともに、異なるSFを持った複数の参加者がいる人工市場モデルによるシミュレーションを行い、例えば物忘れのある参加者がいる場合でも価格決定メカニズムが存在することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、従来実務的には使われることが少なかった構造型アプローチを認識論理学あるいは信念論理学というまったく数理ファイナンスでは使われたことのない道具の助けを借りて定式化し、実用化に向けて高頻度データ等のいわゆるビッグデータを使い実証実験を目指すという大変独創的且つ野心的なものであった。本研究の結果は、個々の参加者の主観的歴史認識を考慮して市場解析を行えることから、取引所の板情報のミクロ分析や金融機関のリスク管理のツールを始めとして広い応用が考えられる。昨今の難しい金融情勢に日々直面している金融機関、金融監督庁を含む多くの潜在的ユーザを考えると、本研究は時宜を得た意義深いものと言えるだろう。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempted to analyze the mechanism of probability jumps observed in risk events such as financial crises using a structural approach based on epistemic logic, a branch of mathematical logic.

Specifically, we developed a completely new framework for developing financial models by introducing the concept of subjective filtration (SF), in which not only the probability measure changes from point to point but also the probability space changes from point to point, using category theory, which is used as a model of epistemic logic. In addition to the theoretical analysis of SF, we also perform simulations using an artificial market model with multiple participants who have different SF, and show that a price-determination mechanism exists even when there are participants who are forgetful, for example.

研究分野：数理ファイナンス・確率論

キーワード：圏論的確率論 主観的フィルトレーション 市場均衡価格 機械学習

1 研究開始当初の背景

株価の変動などの金融現象は確率微分方程式を使って表現するのが標準的な手法である。このとき用いる確率変動は連続なブラウン運動だけでなく、不連続なジャンプを含むレヴィ過程などを使うことも試みられている。特に昨今、電子取引の主要プレイヤーとして注目されている高頻度取引などでは、ミリ秒以下の短い時間で市場を観察して投資機会を探るため、取引所内の板情報（価格と数量を指定した指値注文の集積情報）が不連続に変化するさまを捉えることが重要になっている。こうした変化は微小確率ジャンプと捉えることができ、様々なタイプの市場参加者の思惑の集積によって発生すると考えられるが、確率微分方程式に乗せにくいという理由もあってまだ十分な理論ができていない。

これらマイクロなジャンプとは別に、企業の倒産などによって発生する信用リスク・イベントのような市場により大きなインパクトを与えるジャンプもある。こちらは金融危機などを招き社会的にも大きな問題となりうる確率ジャンプであり、金融機関のリスク管理などでも大変重要な中心的論点である。

数理ファイナンス理論でこの種のジャンプを扱うには構造型および誘導型というふたつのアプローチがある。構造型アプローチは、企業内部の状態（(企業価値や負債総額など)の変化を確率過程と捉え、たとえば企業価値が負債総額を下回った時に倒産が発生するという仮定のもとに、確率過程の excursion 理論などを使って解析する。また誘導型アプローチは、倒産の原因には立ち入らず、外部から観測した倒産イベントを、例えばポワソン過程などを用いて表現し、それによって得られた intensity などのパラメタを使って将来の予測をする。

ふたつのアプローチは一長一短があるが、こと予測に関しては現状では誘導型に軍配が上がっている。理由の1つに観測者である市場参加者には企業内部のデータを直接観測する手立てがないというのがあるが、倒産原因にも踏み込んで説明することができる構造型アプローチの可能性を考えると誘導型に及ばないという現状は残念である。

2 研究の目的

本研究は、前項で述べたマイクロとマクロのふたつのジャンプに代表されるような金融現象を記述する際にみられる確率ジャンプの発生メカニズムを、数理論理学の認識論理を用いたまったく新しい構造型アプローチによって解析することを目的とする。いわば、予測力をあげることによって構造型の復権を狙った研究と捉えることもできる。また理論的解析のみでなく、実用化に向けて高頻度データ等のいわゆるビッグデータを使い実証実験を目指す。

3 研究の方法

認識論理のモデルとしては、Kirpke モデルを利用するのが標準的である [van Benthem(2011)]。特にトポス上で認識論理の解釈にはいわゆる Kripke-Joyal semantics が用いられる。そこで本研究でもその出発点として圏論的モデルを利用し、[Adachi(2014)] で研究代表者の足立が開発した確率過程圏 χ を基礎にすることとした。すなわち、時間ドメインを表す圏から χ を一般化した確率圏 **Prob** への関手として市場参加者（エージェント）の主観的歴史認識を表現する主観的フィルトレーション (SF) を定義し、理論面と実装面の双方の基礎とした。

また実装面でのシミュレーションに用いる実証データとして JPX から購入した FlexFull 株価ティックデータを用いるため、データとそれを操作するための C++ および Python ライブラリの整備も行うこととした。

4 研究成果

研究成果は理論面と実装面の2種類に分かれる。

4.1 理論面

4.1.1 確率圏と一般化フィルトレーション

最初に確率過程圏 χ を拡張して確率圏 **Prob** を定義する [Adachi and Ryu(2019)].

定義 4.1. [確率圏]

1. 2つの確率空間 $\bar{\Omega} = (\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ と $\bar{\Omega}' = (\Omega', \mathcal{F}', \mathbb{P}')$ の間の可測関数 $f : \bar{\Omega} \rightarrow \bar{\Omega}'$ は,

$$\mathbb{P} \circ f^{-1} \ll \mathbb{P}' \quad (\text{絶対連続})$$

のとき, 零保存 (**null-preserving**) と呼ぶ.

2. すべての確率空間とその間の零保存関数の集まりは圏 (**category**) を成す. この圏を **Prob** で表し確率圏と呼ぶ.

研究代表者の足立と研究分担者の琉は, **Prob** の射に沿って確率変数が2つの確率空間をまたがって変遷する一般化条件付き期待値が関手になることを示した後, 独立性など確率論で扱う基本的性質が **Prob** でどのように扱えるかを明らかにした [Adachi and Ryu(2019)] [Ryu(2020)].

次にフィルトレーションの一般化を行う [Adachi, Nakajima, and Ryu(2019)] [Adachi, Nakajima, and Ryu(2020)] [足立-中島-琉 (2020)].

フィルトレーションは, 時間とともに増加する情報集合を表すが, このときの時刻の集合を時間領域 (**time domain**) と呼び \mathcal{T} で表す. 時間領域は, 最小元 0 を持つ全順序集合 (**totally ordered set**) であるが, その要素をオブジェクト (**object**), またふたつのオブジェクト s と t が $s \leq t$ の関係があるとき t から s に唯一の射 (**arrow**) があると考えると圏とみなせる.

定義 4.2. 一般化フィルトレーション (**generalized filtration**) F とは, 圏 \mathcal{T} から圏 **Prob** への関手 (**functor**) $F : \mathcal{T} \rightarrow \mathbf{Prob}$ である.

従来の古典的フィルトレーションでは世界の情報が時間の経過とともに増えていくと考える. これは極めて自然であるように思えるが, ある意味全知全能の神の視点であり, 個々人の持つ情報量が時間とともに常に増大するかといえば, それはちょっと違うだろう. 人は物忘れをするし, 勘違いもする. そうした個人が持つ情報の変遷は, だから減ることもあるだろうし, 客観的な情報とは異なる形の経験として記憶されていることもある. 一般化フィルトレーションはそういった情報の変遷を表現する, いわば主観的フィルトレーション (**subjective filtration**) を定義していると考えることができ, 認識論理のモデルとしても使用できる.

4.1.2 二項資産価格モデル上のフィルトレーション

4.1.1 節で導入したフィルトレーションの具体例として, Shreve [Shreve(2005)] で使われた離散時間二項資産価格モデル上の unusual なフィルトレーションを観た.

時刻 t の確率空間は $B_t := \{0, 1\}^{(0, t]^0}$, $\mathcal{F}_t := 2^{B_t}$, 確率測度 $\mathbb{P}_t : \mathcal{F}_t \rightarrow [0, 1]$ を, 予め $s \in (0, \infty)^0$ で定義しておいた定数 $p_s \in (0, 1)$ を使って $\omega \in B_t$ に対して, 以下のように定義する.

$$\mathbb{P}_t(\{\omega\}) := \prod_{s \in (0, t]^0} (p_s)^{\omega(s)} (1 - p_s)^{1 - \omega(s)}$$

定義 4.3 ($f_{s,t}$ の2つの候補). s, t を $s < t$ なる \mathcal{T} のオブジェクトとする.

1. **full** _{s,t}

$$\begin{array}{ccc} \bar{B}_s & \xleftarrow{\text{full}_{s,t}} & \bar{B}_t \\ \Psi & & \Psi \\ \omega \upharpoonright_{(0,s]^0} & \xleftarrow{\quad} & \upharpoonright \omega \end{array}$$

2. $\text{drop}_{s,t}$

$$\begin{array}{ccc} \bar{B}_s & \xleftarrow{\text{drop}_{s,t}} & \bar{B}_t \\ \Psi & & \Psi \\ \text{full}_{s,t}(\omega) \times \mathbb{1}_{(0,s]^0} & \xleftarrow{\quad} & \upharpoonright \omega \end{array}$$

定義 4.4 ((主観的) フィルトレーションの例). s, t を $s < t$ なる任意の \mathcal{T} のオブジェクトとする.

1. 古典的フィルトレーション (classical filtration): $\text{Full} : \mathcal{T} \rightarrow \text{Prob}$

$$\text{Full}(l_{s,t}) := \text{full}_{s,t}$$

2. 脱落フィルトレーション (dropped filtration): $\text{Drop}_{\alpha,\beta} : \mathcal{T} \rightarrow \text{Prob}$ ただし $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ は定数.

$$\text{Drop}_{\alpha,\beta}(l_{s,t}) := \begin{cases} \text{drop}_{s,t} & (t \neq s \in [\alpha, \beta]^0) \\ \text{full}_{s,t} & (\text{そうでなければ}) \end{cases}$$

つまり彼女は, $[\alpha, \beta]$ の間に起こったイベントを忘れている.

このとき, 以下の定理が成り立つ.

定理 4.5 ([Adachi, Nakajima, and Ryu(2019)]). 脱落フィルトレーション $\text{Drop}_{\alpha,\beta}$ に関するリスク中立フィルトレーションが存在する.

この定理は, 脱落フィルトレーションを主観的フィルトレーションとして持っている人も, 証券 Y の価格付けを行えることを示しており, 本研究での最も重要な成果の一つである.

4.2 実装面

4.2.1 二項資産価格モデル上での主観的フィルトレーションの実装

4.1.2 節で開発した主観的フィルトレーションは極めて自由度が高いため, 一般的に市場均衡価格を計算する解析解は得られない. そこで主観的フィルトレーションが市場均衡価格にどのように影響を与えるかについて考察するために, [Nakajima(2020)] や [Nakajima(2022)] で市場均衡価格を論じている研究分担者の中島が理論的に仕様を固め, 研究代表者の足立が Python で実装することにより, シミュレーションで市場均衡価格を計算することを試みた.

実装では, 確率空間, 一般化フィルトレーション, エージェント, 株式などをそれぞれ表現する **SpaceB**, **Filtration**, **Agent**, **Stock** なる Python クラスを記述し, それらを動かす **Evaluator** クラスを実装することで人口市場を動作させた. その上で市場均衡価格を求めるために Scipy の **optimize** を使って不動点算出を試みたが, 残念ながら今回の研究期間内では計算をうまく収束させることができなかった. 今後は Scipy::**optimize** を使う研究をさらに進めるとともに, 機械学習を使って近似解を求めることも試みよう計画している.

4.2.2 マルチエージェント・モデルへの応用

異なる主観的フィルトレーションを持つ複数のエージェントが, 東京証券取引所で株式取引を行ったならば, どのような振る舞いをするか. この問題を研究するために, マルチエージェントの人工市場モデルを構築した.

データとしては, 日本証券取引所から購入した Flex Full ヒストリカル・データを利用することとした. このデータは 1 日分のティックデータが, 圧縮しても 1-3G バイトというバイナリ型のビッグデータで, そのまま Python で処理するのは時間的に困難であった. そこで研究代表者の足立が C++ で必要な銘柄のデータを抽出する高速に動

くライブラリを作成し、それを足立の博士課程の学生である成富祐輔氏が Python で解析するという段取りで実装を行った [成富-足立 (2020)] [Naritomi and Adachi(2020)] [Adachi and Naritomi(2021)] [Naritomi(2023)].

このとき、オリジナルのヒストリカル・データだけでなく、敵対的生成ネットワーク (GAN) を使って生成したデータも付加して、エージェントたちの振る舞いやその結果としての市場の動きを研究した..

実験の結果、いくつかの局面で実データだけを用いた学習よりも、拡張データも用いた学習のほうがエージェントが賢く振る舞うことなどが観測されたので、その結果を国際学会を含むいくつかの学会で発表した。

現在は、拡張データによる学習が主観的フィルトレーションにどのように影響し、さらにそうした経緯で時間発展した主観的フィルトレーションが、市場での微小ジャンプにどのように繋がるかを研究している。

参考文献

- [Adachi(2014)] Takanori Adachi. Toward categorical risk measure theory. *Theory and Applications of Categories*, 29(14):389–405, 2014.
- [Adachi and Naritomi(2021)] Takanori Adachi and Yusuke Naritomi. Discrete signature and its application to finance. arXiv:2112.09342 [q-fin.MF], Dec 20 2021.
- [Adachi and Ryu(2019)] Takanori Adachi and Yoshihiro Ryu. A category of probability spaces. *J. Math. Sci. Univ. Tokyo*, 26(2):201–221, 2019.
- [Adachi, Nakajima, and Ryu(2019)] Takanori Adachi, Katsushi Nakajima, and Yoshihiro Ryu. A binomial asset pricing model in a categorical setting. arXiv:1905.01894 [q-fin.MF], May 6 2019.
- [Adachi, Nakajima, and Ryu(2020)] Takanori Adachi, Katsushi Nakajima, and Yoshihiro Ryu. Generalized filtrations and its application to binomial asset pricing models. arXiv:2011.08531 [q-fin.MF], Nov 17 2020.
- [Nakajima(2020)] Katsushi Nakajima. Commodity spot and futures prices under supply, demand, and financial trading: Single input–output model. *Asia-Pacific Financial Markets*, 27:35–59, 2020.
- [Nakajima(2022)] Katsushi Nakajima. Equilibrium pricing of commodity spot and forward under incomplete markets with implications on convenience yield. *Annals of Finance*, 18:35–80, 2022.
- [Naritomi(2023)] Yusuke Naritomi. *A Study on Order Generation in High Frequency Trading with Generative Adversarial Network*. Ph.D. thesis, Tokyo Metropolitan University, 2023.
- [Naritomi and Adachi(2020)] Yusuke Naritomi and Takanori Adachi. Data augmentation of high frequency financial data using generative adversarial network. In *2020 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, pages 641–648, 2020. doi: 10.1109/WIAT50758.2020.00097. IEEE Xplore: 24 June 2021.
- [Ryu(2020)] Yoshihiro Ryu. *Essays on Non-Classical Random Variables*. Ph.D. thesis, Ritsumeikan University, 2020.
- [Shreve(2005)] Steven E. Shreve. *Stochastic Calculus for Finance I; The Binomial Asset Pricing Model*. Springer-Verlag, New York, 2005.
- [van Benthem(2011)] Johan van Benthem. *Logical Dynamics of Information and Interaction*. Cambridge University Press, 2011.
- [成富-足立 (2020)] 成富祐輔, 足立高德. 高頻度金融データと GAN を用いたデータ拡張. In *Proc. of 53rd JAFEE Workshop*, Aug 29 2020.
- [足立-中島-琉 (2020)] 足立高德, 中島克志, 琉佳動. 一般化フィルトレーションと二項資産価格モデル. *オペレーションズ・リサーチ*, 65(7):351–358, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yusuke Naritomi, Takanori Adachi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Data Augmentation of High Frequency Financial Data Using Generative Adversarial Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Xplore	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takanori Adachi, Yusuke Naritomi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Discrete signature and its application to finance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katsushi Nakajima	4. 巻 18
2. 論文標題 Equilibrium pricing of commodity spot and forward under incomplete markets with implications on convenience yield	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annals of Finance	6. 最初と最後の頁 35-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10436-021-00402-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 足立高德, 中島克志, 琉 佳勲	4. 巻 65
2. 論文標題 一般化フィルトレーションと二項資産価格モデル	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 351-358
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takanori Adachi, Yoshihiro Ryu	4. 巻 26
2. 論文標題 A Category of Probability Spaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Sciences - The University of Tokyo	6. 最初と最後の頁 201-221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuya Takaishi, Takanori Adachi	4. 巻 27
2. 論文標題 Market efficiency, liquidity, and multifractality of Bitcoin: A dynamic study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Financial Markets	6. 最初と最後の頁 145-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10690-019-09286-0	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsushi Nakajima	4. 巻 27
2. 論文標題 Commodity Spot and Futures Prices Under Supply, Demand, and Financial Trading: Single Input-Output Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Financial Markets	6. 最初と最後の頁 25-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10690-019-09280-6	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Saito, T.Adachi, T.Nakatsuma, A.Takahashi, H.Tsuda and N.Yoshino	4. 巻 25
2. 論文標題 Trading and Ordering Patterns of Market Participants in High Frequency Trading Environment - Empirical Study in the Japanese Stock Market-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Financial Markets	6. 最初と最後の頁 179-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10690-018-9245-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuya Takaishi, Takanori Adachi	4. 巻 172
2. 論文標題 Taylor Effect in Bitcoin Time Series	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Economics Letters	6. 最初と最後の頁 5-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 足立高德	4. 巻 31(3)
2. 論文標題 アルゴリズム取引の問題点と今後の課題	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 先物・オプションレポート	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Market equilibrium with subjective filtrations
3. 学会等名 The 7th Workshop on Application of Categorical Probability Theory to Finance
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanori Adachi
2. 発表標題 Discrete signature and its application to finance
3. 学会等名 2021 KAFE-SKKU International Conference on Finance
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Equilibrium among agents having different subjective filtrations
3. 学会等名 The 8th Workshop on Application of Categorical Probability Theory to Finance
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 アルゴリズム取引の問題点と今後の課題
3. 学会等名 金融レジリアンス情報学（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 一般化フィルトレーションと二項資産価格モデル
3. 学会等名 2020年度数理経済学研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Filtration Engineering
3. 学会等名 The 6th Workshop on Application of Categorical Probability Theory to Finance
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島克志
2. 発表標題 Equilibrium Price of Commodity Derivative Markets
3. 学会等名 RCAPS Current Research Seminar
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 学びとキャリアビルディング -- アルゴリズム取引の解説を交えて --
3. 学会等名 経営システム特別講義（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A binomial asset pricing model in a categorical setting
3. 学会等名 計量経済学ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 アルゴリズム取引の問題点と今後の課題
3. 学会等名 大和証券セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A binomial asset pricing model in a categorical setting
3. 学会等名 KAFE-JAFEE Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A binomial asset pricing model in a categorical setting
3. 学会等名 JAFEE Summer Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 New examples of generalized filtrations
3. 学会等名 The 4th ACPF
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 アルゴリズム取引の問題点と今後の課題
3. 学会等名 第16回東京ファイナンス・フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A binomial asset pricing model in a categorical setting
3. 学会等名 YNU-Nanzan Finance Workshop 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 アルゴリズム取引の実
3. 学会等名 証券流通市場の機能に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A binomial asset pricing model in a categorical setting
3. 学会等名 The Quantitative Methods in Finance 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Generalized filtrations and its applications to binomial asset pricing models
3. 学会等名 The 2nd SMU-TMU Joint Workshop on Mathematical Finance and Financial Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Generalized Filtrations and Beyond
3. 学会等名 The 5th ACPF
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島克志
2. 発表標題 The Dynamics of Commodity Spot, Forward, Futures Prices and Convenience Yield
3. 学会等名 数理ファイナンスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島克志
2. 発表標題 The Equilibrium Price of Commodity Spot and Forward with Convenience Yield
3. 学会等名 第53回丸の内QFセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 アルゴリズム取引の実際
3. 学会等名 データサイエンス松本キャンプ2018（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A test bed example for categorical probability theory
3. 学会等名 The 2nd workshop on Application of Categorical Probability to Finance
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 Reference Rate Methodologies of Cryptocurrencies
3. 学会等名 第4回TMUシンポジウム「ブロックチェーン技術の展開」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 A Dementia Example of Categorical Probability Theory
3. 学会等名 The 3rd workshop on Application of Categorical Probability to Finance
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立高德
2. 発表標題 圏論的確率論のファイナンスへの応用
3. 学会等名 MTECセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takanori Adachi
2. 発表標題 Binomial asset pricing models in a categorical setting
3. 学会等名 The 1st SMU-TMU Joint Workshop on Mathematical Finance and Financial Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Nakajima
2. 発表標題 The Dynamics of Commodity Spot, Forward, Futures Prices and Convenience Yield
3. 学会等名 10th World Congress of The Bachelier Finance Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushi Nakajima
2. 発表標題 The Generic Existence of Equilibrium when the Financial and Commodity Markets are Incomplete
3. 学会等名 JAFEE 2018 夏季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushi Nakajima
2. 発表標題 Commodity Spot, Forward Prices, and Convenience Yield under Incomplete Market
3. 学会等名 71st European Meeting of the Econometric Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 足立高德	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 184
3. 書名 アルゴリズム取引	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 リファレンス出力システム、リファレンス出力方法及びリファレンス出力 プログラム	発明者 足立高德・谷保明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PY20181303	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中島 克志 (Nakajima Katsushi) (90721572)	立命館アジア太平洋大学・国際経営学部・准教授 (37503)	
研究分担者	琉 佳勲 (Ryu Yoshihiro) (90827560)	立命館大学・理工学部・助手 (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------