

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24530203

研究課題名(和文) 実証的基礎を持つ限定合理的な意思決定モデルの構築

研究課題名(英文) Empirical foundations of the bounded rationality in economic decision making

研究代表者

下川 哲矢 (Shimokawa, Tetsuya)

東京理科大学・経営学部・教授

研究者番号：30366447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、行動経済学や神経経済学の進展により経済意思決定への理解が進んでいる。このような研究の流れに立って投資意思決定モデルの精緻化を行った。具体的には以下の点を明らかにした。

意思決定の個人差や時系列での変化の要因を特定し、これらを取り込んだアンサンブル学習モデルが人々の意思決定予測精度を大幅に向上させること
・生体反応のマルチモダリティ計測から、各生体反応とマーケットイベントの関連や、意思決定モデルの精度を向上させる生体反応の特定
・更に、ここで実験から観測された意思決定モデルは、実際の市場で観測されるリターン分布に関する統計的事実とも整合性を持つこと

研究成果の概要(英文)：Recently, Behavioral economics and Neuroeconomics have brought new findings of human decision makings and improved our understandings on how people behave in economic situations. Following this trend, we tried to refine models of human investment behaviors. What we showed in this project are as follows.

1. We detected what kinds of factors bring regime switches between decision making models in an artificial financial market, and showed that an ensemble forecasting model which is relevant to the regime switch and individual differences can improve the accuracy of forecast. 2. Using a multi-modal estimation of biological responsiveness, we inquired how market events and the biological responsiveness are related and detected what kind of the responsiveness is effective to improve decision making model. 3. Our agent-based simulation showed that the decision making model we got from economic experiments has a consistency to the financial stylized facts which are observed in real markets.

研究分野：意思決定理論

キーワード：経済理論 意思決定 行動経済学 神経経済学 実験経済学 統計的学習理論

1. 研究開始当初の背景

近年、行動経済学や神経経済学における実験結果の蓄積により経済意思決定への理解が進んでいる。このような研究の流れに立って、我々もこれまで経済意思決定モデルを構築し、さらにそれと市場価格形成との関係について検討を行ってきた。

具体的には、投資意思決定要因として、新たに「損益に対する非対称な反応」や「未確定利益の影響」の有用性を見出し、意思決定モデルとしても、従来の線形の強化学習モデルよりも非線形を捉えることのできる3層パーセプトロンによる定式化のほうがより適切であることを示した。さらに、functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS)における投資意思決定実験では、前頭前野内側部や眼窩野に対応する部位の脳血流を予測ファクターとして採用することで、被験者の投資行動に関する予測の精度を大幅に改善することを明らかにした。また、そのような意思決定バイアスと金融市場において観測される資産価格形成に関する統計的性質 (Financial Stylized Facts、以下 FSF) の関係について研究を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、このような研究の流れに立って、これまで得られた意思決定に関する成果を、三つの側面から発展させることにより、意思決定モデルの更なる精緻化を目指した。

第一の発展は、行動経済学における学習モデルの精緻化である。我々は、これまでの研究において、各個人の意思決定要因は多様であり個人差が非常に大きいこと、さらに、同一の個人であっても何らかの要因によって意思決定レジームが変化していることを観測しており、意思決定モデルの精度向上のために、これらに対応することは非常に重要であると認識している。ここでは、このような観測結果を踏まえて、「個人差」と「レジ

ムスイッチ」を意思決定モデルに取り込む。

第二の発展は、神経経済学の分野で得られた知見の積極的な利用による精緻化である。我々は、これまで fNIRS によって測定した脳情報を行動学習モデルに導入して、モデルの予測精度が大幅に向上しうることを示した。これは生体情報が、意思決定に対して何らかの重要な情報を持つことを意味している。ここでは、この分析を、脳波 (EEG)、皮膚電導反応 (SCR)、容積脈波 (BVP)、心電 (ECG) 等の、意思決定の記述に何らかの有効性を持つことが期待される測定デバイスに拡張し、意思決定モデルへの生体情報導入の徹底を図る。

第三の発展は、意思決定モデルの市場均衡との関係からの検証である。もしある意思決定モデルが市場参加者の行動様式を的確に記述しているならば、当然その集合である市場の振る舞いとも整合性を持つはずである。具体的には、市場収益率に関する統計的性質と、観測から得られた意思決定モデルとの整合性を検討する。特にここでは、上記の「意思決定モデルの個人差」および「意思決定レジームの状況による変化」を取りこんだエージェントベース市場シミュレーションを行うことでこれを検証する。

3. 研究の方法

先の「研究目的」を達成するためにいくつかの実験システムを構築し、比較的大規模な経済実験を行ったが、以下はその中心的なシステムである。

実験システムの概要

不確実性下での意思決定を特定するために、Lohrenz et al. (2007) と同様の株式投資実験 (Sequential Investment Task: SIT) を行った。SIT 実験では、流動性が十分大きく、個々の市場参加者の意思決定が市場価格に影響を及ぼさないような環境における投資行動や生体反応を観測する。被験者は初期に総資産として 100 万円を保有しており、リス

ク資産（ここでは株式）と安全資産（ここでは預金）に投資する比率を毎期決定する。投資比率は実験中いつでも変更することができ、決定された株式投資比率に応じた金額が株式に投資され、残った資産は預金(利率は0%)に回される。株式への投資額は株価の変動に応じて変化する。

刺激提示

刺激提示画面には価格のチャート、現在の投資比率、現在値、保有株数、保有株総価値、総利益、実現利益、未実現利益の情報を表示する。使用した価格列データはS&P500の日次データであり、4種類のpathを用いた。投資比率は-100%~100%の間、10%刻みで調整可能である。

測定部位 (multi-modality)

本研究では、脳波(EEG)、事象関連電位(ERP)、脳血中ヘモグロビン濃度変化(背外側前頭前野(DLPFC)・眼窩野(OFC))、皮膚コンダクタンス反応(SCR)、容積脈波(BVP)、心電(ECG)、瞬目(Eyeblick)の生体反応を測定した(図1参照)。

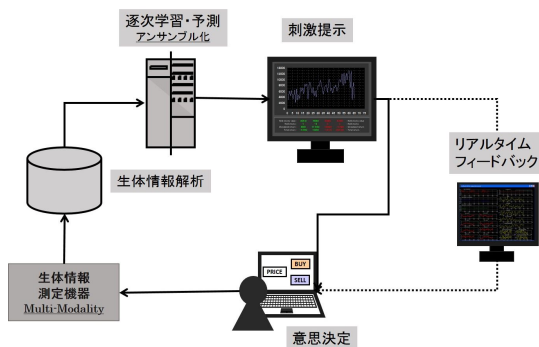


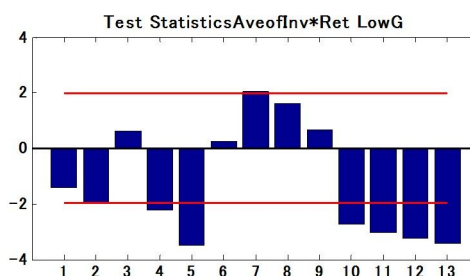
図1 実験システム

4. 研究成果

(1) 行動経済学における学習モデルの精緻化 個人差が生じる要因の特定。

各個人の習熟度、性別、特定刺激に対する学習機会や刺激を経験した時間的間隔などを検討した。特に印象深いのは、学習（ここでは投資パフォーマンスの違い）の効果に関連した結果である。マーケットイベントとの関係では、パフォーマンスが悪い人ほどリター

ンの高次のモーメント（収益率分散や尖度）に大きく影響されること、未実現利益やフィクティブエラーにも大きく影響されていることがわかった。また、後述するように生体反応も大きかった。これは投資パフォーマンスを阻害する意思決定バイアスがどのようなイベントから引き起こされているのかを部分的に特定したものとと言える。一方、パフォーマンスの良い人ほど、時系列統計モデル（AR-GARCH）の予測と整合性を持つ傾向があった（図2参照）。



- 1.PriceMA 2.PriceMoment 3.PriceForecast
- 4.ReturnMA 5.ReturnMoment 6.ReturnForecast
- 7.ARInvestmentMA 8.ARInvestmentMoment 9.Asset
- 10.UnrealizedGain 11.FictiveError 12.Reinforce TD 13.NIRS

図2 投資パフォーマンスと投資行動決定要因

(2) 行動経済学における学習モデルの精緻化 レジームスイッチの要因の特定。

ここでは特に、市場変動（収益率分散の増減、収益率トレンドの変化、非常に大きな価格の下落といったレアイベント）および意思決定バイアス要因（未実現損益の増減、フィクティブエラーなど）を、検討対象とした。その結果、価格の過去の移動平均からの大きな乖離、トレンドの反転、収益率分散や尖度の増加が、人々の意思決定モデルを変化させていることがわかった。特に、価格の過去の移動平均からの大きな乖離が進んでいる場合には強化学習や experience-weighted attraction EWA といった比較的単純なモデルが、トレンドの反転や収益率分散の増加が生じている場合は、サポートベクターマシン

SVM や3層パーセプトロン TLP などといった複雑なモデルのパフォーマンスが良くなる傾向がある。これらの結果は、従来の学習モデルの適用範囲を限定する意味を持つものと思われる(図3参照)。

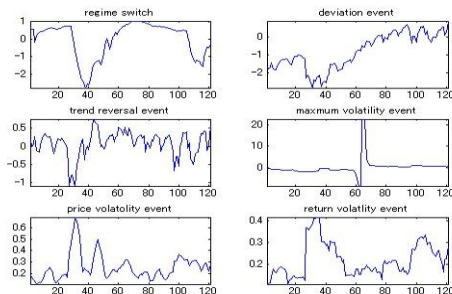


図3 マーケットイベントと投資意思決定モデル変化

(3) 行動経済学における学習モデルの精緻化
意思決定モデルの精緻化

また、個人差やレジュームスイッチを反映させるために、アンサンブル化した意思決定モデルを構築し、その予測精度を検証した。具体的には、RL、仮想プレイ FP、EWA、SVM のモデルタイプそれぞれ、300・304・334・364 器の予測器を作成し、逐次学習および全 1304 予測器によるアンサンブル予測を行った。アンサンブルモデルの予測は、正答率 (accuracy) の上位 50 モデルの多数決で決定する。このモデルは従来の代表的なモデルと比較して、予測精度を大きく改善させた(平均 0.82771、標準偏差 0.06489 表 1 参照)。

	ensemble	無予測基準	RL	FP	EWA	SVM
average	0.82771	0.60653	0.54884	0.49992	0.55806	0.67293
standard deviation	0.06489	0.097607	0.088871	0.045413	0.066295	0.14685
max	0.94215	0.8843	0.86777	0.69421	0.83471	0.98347
min	0.61157	0.50413	0.22314	0.32231	0.35537	0.38843

表 1 各行動モデルの予測精度比較

(4) 神経経済学によって得られた知見の積極的な利用
意思決定モデルの精緻化
マルチモダリティ化によって、どのような生体情報(あるいはその組み合わせ)が意思

決定予測に有効かを検証した(図4参照)。この図は、各実験データにおいて、投資予測モデルのファクターとして、どのような要素が採用されているか(情報量基準を基に選択した)を表している。この分析から、事象関連電位 ERP と fNIRS データの組み合わせが予測力(精度と安定性)を向上させることがわかった。さらに瞬き頻度データも有効であるが、これは正確な測定が難しい。また先行研究の Lo=Repin(2002)とは異なり、我々の分析では皮膚コンダクタンス反応 SCR の有効性は乏しかった。これは ERP に SCR の情報が含まれるからであると考えている。

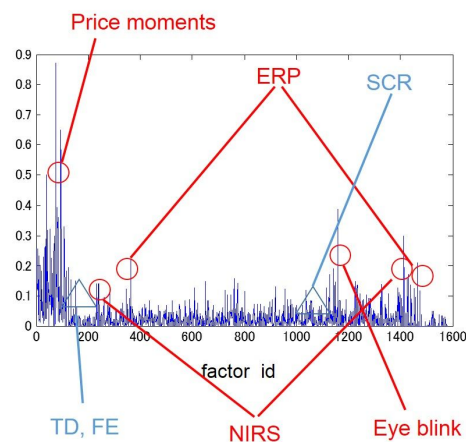


図4 生体情報のマルチモダリティ測定と投資行動決定要因

(5) 神経経済学によって得られた知見の積極的な利用
マーケットイベントと情動反応の関係の特定。

市場収益率分散の増加や収益率トレンドの変化といったマーケットイベントと、生体情報の関係を検証した。マーケットイベントと生体情報との関係では、以下のことがわかった。まず生体情報が大きく反応するマーケットイベントは、価格の過去の移動平均からの大きな乖離、トレンドの反転、収益率分散の増加、リターン尖度の増加である。これらの多くは(2)で述べたレジュームスイッチ要因と一致している。ERP はトレンドの反転やリターン尖度の増加に素早く反応し、NIRS は

価格の過去の移動平均からの大きな乖離と収益率分散の増加に対応することが多い。これらの生体情報は、投資家の情動的側面をある程度反映していると考えることができ、これらのマーケットイベントが投資行動欲に有効であることから、投資行動と情動反応の関係が強いことが推測できる。

(6) 神経経済学によって得られた知見の積極的な利用 市場における学習効果と生体反応の関係の特定。

市場における学習の効果、あるいは投資上級者とそうでない者との意思決定の差異を明らかにするために、経験の多寡と生体反応にどのような関係があるのかを検証した。経験の多寡など学習と生体反応の関係については、一般にパフォーマンスの悪い人ほど生体情報の振れ幅は大きく、特にリターンのモーメントが上昇した時に大きく反応することが観測された(図2参照)。

(7) 金融統計学の知見を利用した市場均衡との関係からの検証

もしある意思決定モデルが市場参加者の行動様式を的確に記述しているならば、当然その集合である市場の振る舞いとも整合性を持つはずである。市場において観測される収益率に関する統計的性質(FSF)と、実験から得られた意思決定モデルとの整合性を検討した。特に今回の分析では、「市場における淘汰プレッシャー」を考慮することによって、観測された意思決定モデルが市場淘汰に対して、進化論的に安定的であるか否かを検討した。

具体的には、観測されたいくつの性質を持った意思決定モデルを22種類作成し、人工市場における検証を行った。個人差に関してはエージェントの差異で、またレジュームスイッチについては進化論的な意思決定ルールの淘汰(GA アルゴリズムによる)でモデ

ル化している。人工市場で高いパフォーマンスを示す行動ルールを持つエージェントは繁栄し、そうでないものは淘汰されるといった進化論的なエージェントベースシミュレーション分析を行った。

その結果、(1)淘汰基準を一定額以上のロスとした場合、ロス回避性や利得と損益の非対称性、マーケットイベントへの敏感性といった上記で観測された性質を持った意思決定ルールが、進化的に安定的な意思決定になりうること、(2)そのようなエージェントの割合や市場環境(情報の非対称性や流動性の欠乏)次第では、合理的な主体の存在する完全競争下においても、限定合理的な意思決定ルールは長期的に生存しうること、(3)そのようなエージェントが存在する場合、エージェント間の取引から形成される市場価格は、収益率分散の強い正の自己相関や収益率分布の大尖度等と言ったFSFと整合性を持つこと、などを確認した。これらの結果の一部は、論文 Kinoshita et al(2013)に発表されている。

(8) 意思決定モデルを反映した投資支援システムや訓練システムの構築

これらの観測や意思決定モデルの構築を基にいくつかの金融投資や金融市場設計に関するシステムの構築を行った。論文 Shimokawa et al(2012)では、市場データに基づく市場予測モデルに、投資家の生体情報を加味する(市場価格予測に有効なデータのみを選択的に利用する)ことで、投資予測を向上させるシステムを構築した。また論文 Kinoshita et al(2012)では、市場参加者の生体情報を基に行動を予測し、市場を安定化させるようなマーケットメイカー・エージェントを導入した取引市場システム(スマートマーケット)を構築した。更に、投資パフォーマンスの良い人のデータと悪い人のそれを比較し、フィードバックすることで上達を促す投資訓練システムも試作した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

Tetsuya Shimokawa, Kanta Kinoshita, Kazuhiro Miyagawa, Tadanobu Misawa, (2012), A Brain Information-aided Intelligent Investment System, *Decision Support Systems*, Elsevier. Volume 54, Issue 1, pp 336-344
doi:10.1016/j.dss.2012.05.041

参沢匡将, 後藤かをり, 下川哲矢, 広林茂樹, NIRS を用いた未知情報判別に関する検討, (2012), 電気学会論文誌 E, 132 巻 10 号 頁 348 ~ 354. <http://doi.org/10.1541/ieejmas.132.348>

Kanta Kinoshita, Kazuhiro Miyagawa, Tetsuya Shimokawa, (2012), Intelligent Market: A Brain-Computer Interface for Analyzing Investment Behavior and Market Stability, *Neurocomputing: Learning, Architectures and Modeling*, ed.Elizabeth T. Mueller pp 1-31.
https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=21112

Kanta Kinoshita, Kyoko Suzuki, Tetsuya Shimokawa, (2013), Evolutionary Foundation of Bounded Rationality in a Financial Market, *The IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Volume:17, Issue 4, pp 528 - 544. doi: 10.1109/TEVC.2012.2208465

〔学会発表〕(計7件)

Satoshi Sanno, Tadanobu Misawa, Tetsuya Shimokawa, Shigeki Hirobayashi, NIRS-based brain-computer interface for cursor control using brain activity in the prefrontal cortex, The 13th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2012 年 12 月 Phuket Thailand.

Yurie Mitsuda, Kaori Goto, Tadanobu Misawa, Tetsuya Shimokawa, Prefrontal cortex activation during evaluation of product price: A NIRS study, The 13th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2012 年 12 月 Phuket Thailand.

Kazuo Nomura, Tadanobu Misawa, Tetsuya Shimokawa, Shigeki Hirobayashi, Study on the process of linguistic transmission by multi-agent simulation, The 13th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2012 年 12 月 Phuket Thailand.

光田友里恵, 後藤かをり, 参沢匡将, 下川哲矢, 広林茂樹, NIRS を用いた価格評価時の前頭前野

における脳活動傾向に関する考察, 2012 年度人工知能学会全国大会, 2012 年 06 月 山口市、山口県。

下川哲矢, 意思決定モデルの検討: 神経経済学の立場から, 「経済学の自然主義化を考える」シンポジウム(招待講演), 2012 年 11 月 23 日 ~ 2012, 中央大学後楽園キャンパス 文京区 東京都

日下部友彦, 森岡拓郎, 下川哲矢, 脳情報を用いた戦略的狀況下における利他性と合理性の分析, 情報処理学会 第 76 回全国大会 2014.3.11 電気通信大学 足立区 東京都

森岡拓郎, 下川哲矢, 戦略的狀況下における意思決定予測: 行動と脳情報の観点から, 情報処理学会 第 76 回全国大会 2014.3.12 電気通信大学 足立区 東京都

〔図書〕(計1件)

下川哲矢, 意思決定モデルの精緻化は何をもたらすのか(神経経済学の立場から), 『経済学に脳と心は必要か?』川越 敏司, 瀧澤 弘和 編著, 河出書房新社 (2013), 第 2 章.

〔産業財産権〕

取得状況(計2件)

名称: 脳情報から人間の選好を判別する方法及びその装置

発明者: 下川哲矢 参沢匡将

権利者: 学校法人 東京理科大学

種類: 特許

番号: 5 3 2 8 0 3 0 号

出願年月日: 2009 年 7 月 9 日

取得年月日: 2013 年 8 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: 投資行動における人間の行動を判別する方法及びその装置

発明者: 下川哲矢 参沢匡将

権利者: 学校法人 東京理科大学

種類: 特許

番号: 5 4 6 7 4 5 3 号

出願年月日: 2009 年 7 月 9 日

取得年月日: 2014 年 2 月 7 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

Shimokawa Lab. +Projects

<http://www.ms.kuki.tus.ac.jp/KMSLab/shimokawa/projects.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下川 哲矢 (SHIMOKAWA Tetsuya)

東京理科大学・経営学部経営学科・教授

研究者番号: 3 0 3 6 6 4 4 7