

令和元年6月21日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K03559

研究課題名(和文) 通時的意識決定モデルの精緻化とアノマリーの解決

研究課題名(英文) Inter-temporal judgment and its anomalies

研究代表者

下川 哲矢 (Shimokawa, Tetsuya)

東京理科大学・経営学部ビジネスエコノミクス学科・教授

研究者番号：30366447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：通時的な意識決定は経済理論で中心的な役割を果たしてきた。経済理論では、一般的に、指数割引関数、選好関係の安定性、さらには各時点での効用の独立性が前提とされる。しかしながら、1980年代以降本格化した心理学的な側面からの膨大な実証分析結果は、これらの前提がほとんど認知的基盤の無いものであることを明らかにしている。本研究では、我々がこれまで蓄積してきた研究資源を活かすことで、実証的基礎を持つ通時的意識決定モデルの構築を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通時的な意識決定は経済理論で中心的な役割を果たしてきた。もし仮に通時的な意識決定モデルが妥当性を欠くものであれば、現代経済理論の、特にマクロ経済学や金融理論の、多くの部分において、その基礎が揺らぐことになる。本研究は、マクロ経済学や金融理論において中心的な役割を果たす通時的意識決定モデルに、「行動経済学・神経経済学」、「マクロ計量経済学・金融統計学」の観点から、より強固な実証的基礎づけを与える試みである。

研究成果の概要(英文)：Inter-temporal judgment has played an essential role in economic studies and cognitive science. Discount utility models consisting of a stable temporal utility and a discount factor have been widely used in both research fields as the dominant model to depict human judgement due to their ease of analysis. Nevertheless, many empirical studies have suggested that discount utility models have a limited ability to describe people's behavior. The current study intends to propose a versatile, statistical framework that mines human decision making from observable behaviors. Assuming people use the framework in many decision problems, it would be valid to expect that the use of such a decision-making model could serve as the superior depiction of observed judgements and anomalies thereof. The model presented here would succeed to some extent in depicting observed behavior and serving a coherent explanation for well-known anomalies.

研究分野：意思決定

キーワード：意思決定 行動経済学 統計的パターン認識 神経経済学

1. 研究開始当初の背景

学術的背景

通時的な意思決定は経済理論で中心的な役割を果たしてきた。経済理論では、一般的に、指数割引関数、選好関係の安定性、さらには各時点での効用の独立性が前提とされる (Koopmans(1960, *Econometrica*))。しかしながら、1980年代以降本格化した心理学的側面からの膨大な実証分析結果は、これらの前提がほとんど認知的基盤の無いものであることを明らかにしている (Thaler (1981, *Econ. Letters*), Loewenstein and Prelec (1993, *Psych. Rev.*), Read et al (2000, *J. Risk & Unc.*))。これらの解決を目指していくつかの重要なモデルも提案されているものの (Laibson(1997, *Q. J. Econ.*), Becker and Murphy (1988, *J. Poli. Econ.*))、現時点において、時間選好率の推定あるいは通時的意決定モデルの構築は、成功しているとは言いがたい。依然、実験において観測される時間選好率は、非常に幅が大きく、かつ収束する傾向にない (Frederick et al(2002, *J. Econ. Lite.*))。もし仮に通時的な意思決定モデルが妥当性を欠くものであれば、現代経済理論の、特にマクロ経済学や金融理論の、多くの部分において、その基礎が揺らぐことになる。

我々はこれまで、不確実性下における意思決定モデルの構築とその応用が研究対象であったが、この不確実性下における意思決定問題と、本研究課題である通時的な意思決定問題は、多くの共通点を持っている。実際、両者は、「多様な要因の存在」、「選好の非定常性」、「大きな個人差の存在」といった、同様の乗り越えるべき分析課題を共有しており、両者を同じ問題と見做し、共通のフレームで扱おうとする研究も多い (Prelec and Loewenstein(1991, *Manag. Sci.*), Loewenstein and Prelec (1992, *Quart. J. Econ.*))。

2. 研究の目的

本研究では、我々がこれまで蓄積してきた「脳・生体情報データ収集システム」、「統計的分析手法の開発」、「エージェントベース・シミュレーションによる人工市場分析」といった研究資源を活かすことで、実証的基礎を持つ通時的意決定モデルの構築を目指した。これは、マクロ経済学や金融理論において中心的な役割を果たす通時的意決定モデルに、「行動経済学・神経経済学」、「マクロ計量経済学・金融統計学」の観点から、より強固な実証的基礎づけを与える試みである。具体的には以下の課題に注目して分析を行った。

(1) 時間選好に関わる多くの要因の整理：通常、時間選好は時間選好率という一つのパラメータでモデル化されるが、現実には多くの要因が人々の時間選好を決定している。しかしながら、果たしてこれらがどのように互いに影響し、またどの程度、人々の時間選好に影響しているのかといった点については、包括的な分析は行われていない。ここではこれらの要因の関係性や重要度を、統計的な観点から出来るだけ包括的に分析し明らかにする。

(2) 選好関係の通時的不安定性に関する検証：通常、経済モデルでは選好関係や効用関数は安定的なものと仮定される。しかしながら近年の認知心理学や脳科学の知見は一致してこの前提を否定している。これらの分野では、人々の選好関係は経緯や体調、気分や情動などに大きな影響を受けると考えられている。ここでは、脳情報をはじめとする生体情報のマルチモーダル計測を用いて、気分や情動が、どのように選好関係の変化をもたらすのかを明らかにする。

(3) 消費の通時的独立性に関する検証：通常、経済モデルでは通時的な消費系列は、各時点での独立性を持つと仮定される。たとえばある時点の選好関係は他の時点の消費によって影響を受けない。しかしながら、いくつかの実験結果は、消費系列全体の振る舞いによって人々の選好関係は影響を受けることを報告している。この点について、どのような範囲で意思決定していると考えるのが適切であるか、主に統計的モデル選択の視点から検証し明らかにする。

(4) 個人差の影響：通時的意決定に限らず個人差の存在は、意思決定において非常に重要な問題であり、モデルの構築においても、この個人差要因を適切に処理しなければ、精度の良いモデルの構築はできない。ここでは、この問題について、心理学的観点からの被験者属性による分類だけでなく、統計的なアプローチを用いて明らかにする。

(5) アノマリーの解決：経済学への貢献の観点からは、上記の から の分析から得られた通時的意決定モデルが、意思決定アノマリーや市場アノマリー (既存の代表的なモデルでは説明できない観測された統計的事実) を説明可能かどうか検証する必要がある。ここではこれらについて、意思決定モデルとの整合性を検証し、これによって意思決定モデルの経済学における有効性を示す。

3. 研究の方法

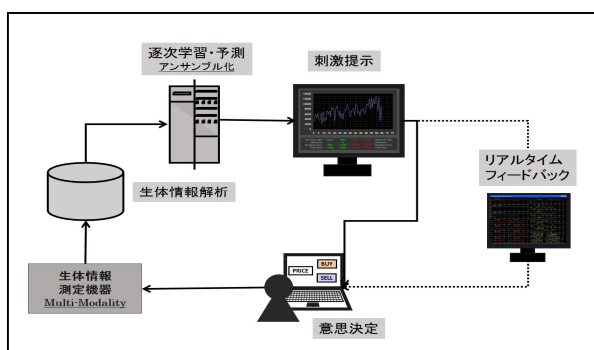
上記の課題を解決するために本研究では以下の実験を行った。

実験 1：この実験では、統計解析により既存の研究で明らかにされた多くの要因の非線形関係や包含関係などを明らかにすることを視野に、これらの要因をできるだけ多く包括的に実験に取り込むことが目標とされた。実験では、選好の不安定性や形状 (Loewenstein and Prelec (1992, *Quart. J. Econ.*), McClure et al(2007, *J. Neurosci.*))、不確実性の存在 (Prelec and Loewenstein(1991, *Manag. Sci.*))、経緯や習慣形成の影響 (Becker and Murphy (1988, *J. Poli. Econ.*))、肉体的な状態 (Loewenstein (2000, *Ame. Econ. Rev.*), Bernheim and Rangel (2004, *Ame. Econ. Rev.*))、情動や衝動性 (Loewenstein et al. (2001, *Psyc. Bulletin*))、イメージの容易性 (Benzion, Rapoport, and Yagil (1989, *Manag. Sci.*)) が検討された。この実験では、出

来るだけ多くのサンプル数を確保するために生体情報の取得は行わず、行動データのみを収集した。解答方法による差異の影響を排除するために、2項選択方式とマッチング方式を併用した。

実験2：選好関係・効用関数の通時的な変化は、Multi-self モデルを用いて語られることが近年支配的になっている(Loewenstein (1996, Org. B. & H.D.), McClure et al(2007, J. Neurosci.))。このモデルでは意思決定の情動的側面と理性的側面の区分が明示的に扱われる。本研究では、脳情報をはじめとする生体情報を活用することで、情動的側面が通時的選好関係の変化にどのように影響するのかを特定する。この目的のために、脳情報近赤外光測定(fNIRS) 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よるマルチモーダル計測を行い、意思決定モデルへの生体情報導入の徹底を図る。具体的には、(a)情動反応と選好逆転現象の関係(特に情動反応が近視眼的な選好を惹起するか否か) (b)市場における学習効果と生体反応の関係(経験の多寡は、生体反応にどのような変化をもたらすか否か)を特定する。データ分析では、代表的な意思決定モデルの統計的アンサンブル学習を使用することで、選好関係の変化を記述する。

この実験の実施において困難な点は、生体情報測定デバイスを multi-modality 化することにより、転送・計算量が飛躍的に増加するという点である。生体情報は、一般に時間解像度が非常に高く、刺激への反応も瞬時に観測する必要がある。この問題に対応するため、0.1 ミリ秒単位の高い時間解像度でデータを取得・制御できる実験システムを設計する必要がある(図1)。



実験2における実験システム

実験3：この実験では、消費の通時的独立性の仮定を検証することを目的として、簡単な選択課題を行った。具体的には、通常の各時点で一つの商品や報酬を選ぶのではなく、連続した複数時点でまたがる商品や報酬の列について、被験者に選択してもらった。この実験において、実験実施上の困難な点は少ない。分析面では、1期消費での意思決定モデルを逐次的に繰り返した予測と、連続した消費の意思決定モデルとの予測を、クロス評価における精度比較することで、両者が原理的に同じものなのか、あるいはまったく異なるものとして扱うべきなのかを明らかにする。

4. 研究成果

以下、上述の課題ごとに分析結果を要約する。

課題(1) (時間選好に関わる多くの要因の整理)では、不確実性の存在、経験の経緯や習慣形成の影響、肉体的な状態、情動や衝動性、イメージの容易性に関して検討した。この課題の分析において、最も重要でかつ難しい点は、比較的少ないサンプル数から多くの要因の複雑な関係を解析しなくてはならないことである。実験サンプルを出来るだけ多く確保するのは無論であるが、やはり統計的手法を駆使する必要がある。今年度の研究では、分析手法については、予定していた階層ベイズ推定による3層パーセプトロンによる分析だけでなく、疎性を持つカーネル法や自己符号化学習型 Deep Neural Network (以下 DNN と記載する)による分析も併用し、推定手法や前提とする関数系に分析結果が依存しないよう配慮した。

DNN を用いた分析では、各要因が一定の影響を持つものの、不確実性の存在、経験の経緯(習慣形成の影響)とイメージの容易性が強い影響を持つことが分かった。特に、特定の経験やイメージの容易性については、人々がこれらの意思決定のベンチマークとして使用していることを突き止め、更にそれを Eye-tracking データや反応速度データも用いて確認した。今回の実験データに限って言えば、予測の最小二乗誤差では DNN が最小であるものの、交差検定結果やハイパーパラメータ周辺尤度や赤池のベイズ情報量基準といった情報量基準による判断では疎性を持つカーネル法が最も優れていた。これは DNN が過学習傾向にあることを意味すると思われる。この知見は以降の通時的意思決定のモデル化に活かされた。以下の表は、疎性を持つカーネル法とこの分野の代表的なモデルとの予測精度比較である。

表：カーネル法の交差評価の結果

確率効用モデル	指数割引型効用モデル	双曲割引型効用モデル	カーネル線形回帰モデル	我々のモデル
0.221763	0.231554	0.235261	0.525263	0.154036

代表的なモデルと我々のモデルの予測精度（テストサンプルにおける正答確率）である。選択肢の属性ベクトルを線形モデルで評価した確率効用モデル（Logit 型）が比較モデルの中では一番優れており、次いで指数割引型、双曲割引型モデルとなる。選択肢の属性ベクトルをカーネル線形モデルで評価したモデル（ただしカーネルの選択は行わない）は予測が大きく低下しておりオーバーフィットに陥っていると予測される。

課題(2)（選好関係の通時的不安定性に関する検証）では、脳情報近赤外光測定（fNIRS）、脳波（EEG）、皮膚電導反応（SCR）、容積脈波（BVP）、心電（ECG）に加え、視線データ（Eye-tracker）も用いた multi-modal な測定システムを作成し、通時的意思決定のモデル化における情動的要因の導入について検討した。脳情報をはじめとする生体情報を活用することで、情動的側面が通時的選好関係の変化（非定常性）にどのように影響するのかを特定し、意思決定モデルへの生体情報導入の徹底を図るのが一つの目的である。また、当初予定しなかったが、Eye-tracking データと反応速度データの取得も行動実験と同時に行った。具体的には、コンピュータベースの実験システムを制作し、被験者の GUI 上の視線と刺激定時からの反応速度を計測した。

DNN を各生体情報の選択行動への有意性の検証では、事象関連電位（EEG）と fNIRS の組み合わせが優れ、それに Eye-tracker を加えることで飛躍的に予測精度が向上することが分かった。また、情動反応と選好逆転現象の関係（特に情動反応が近視眼的な選好を惹起するか否か）について、疎性を持つカーネル法によるモデル化により、近視眼的な選好を再現することが可能であり、かつそこでベンチマークとなった選択肢については、事象関連電位（P300）や fNIRS の眼窩部における酸化ヘモグロビン濃度変化に有意な差があることが確認された。意思決定におけるベンチマークの存在については Eye-tracking data から確認された。ただし、当初予定していた市場における学習効果と生体反応の関係（経験の多寡は、生体反応にどのような変化をもたらすか否か）については、有意な結果を特定するには至らなかった。以下のグラフは、ベンチマークの前後における生体情報の分布差である。

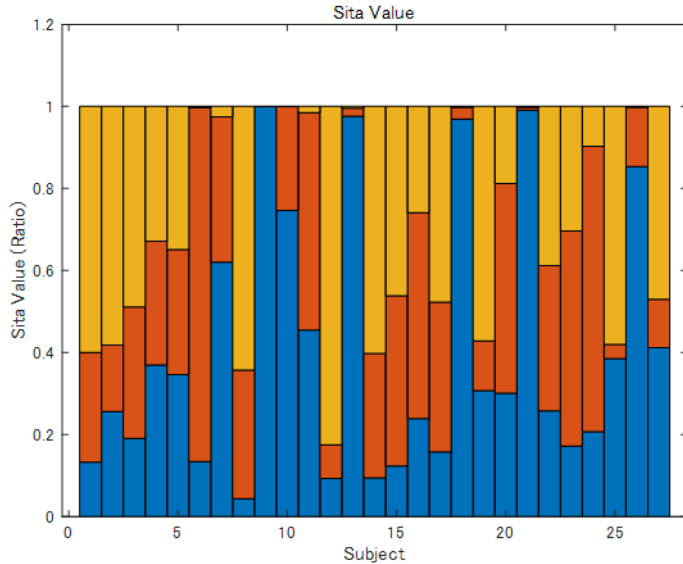
課題(3)（消費の通時的独立性に関する検証）については、実験 3 や実験 1 のデータを基に、各期の独立した消費ではなく消費系列を予測する多変量型の DNN を用いて予測の向上を検討した。分析面では、上記で得た 1 期消費での意思決定モデルを逐次的に繰り返した予測と、連続した消費の意思決定モデルとの予測を、クロス評価における精度比較することで、両者が原理的に同じものなのか、あるいはまったく異なるものとして扱うべきなのかを明らかにしようとした。その結果、過去 5 期間の消費系列をセットとしてた予測が優れていることが分かった。これは人々の意思決定において、通時的な独立性が成立していないことを意味することと解釈している。

課題(4)（個人差の影響）個人差の問題を解決することは、正確なモデルの推定・構築のために非常に重要である。一般に意思決定実験において、被験者の属性や実験時の状況によって、大きな個人差が存在する。個人差の問題を解決することは、正確なモデルの推定・構築のために非常に重要である。実際、今回の実験でも、DNN を用いた分析においても、カーネル法を用いた分析においても大きな影響が存在することが確認された。

この問題を解決するために、上記の実験において、個人差を分析する上でよく用いられる性格（たとえば 5 要因モデル）や心理的状态、ならびに被験者の属性に関するアンケートを実施し、個人差の原因となる属性をモデルに取り込むことで個人差の影響を吸収しようとしたが、有効な結果は得られなかった。その一方で、ディリクレ過程を用いたノンパラメトリックベイズ法により、統計的に個人差を持つグループを分類することは一定の有効性を持ち、今回のデータでは 4 から 5 個のグループに分類された。以下は、疎性を持つカーネル法を用いた場合に、重視される要因の個人差を表している。

個人差のグラフ

横軸は被験者番号を、縦軸は要因の重要度を正規化し色別に示したものである。

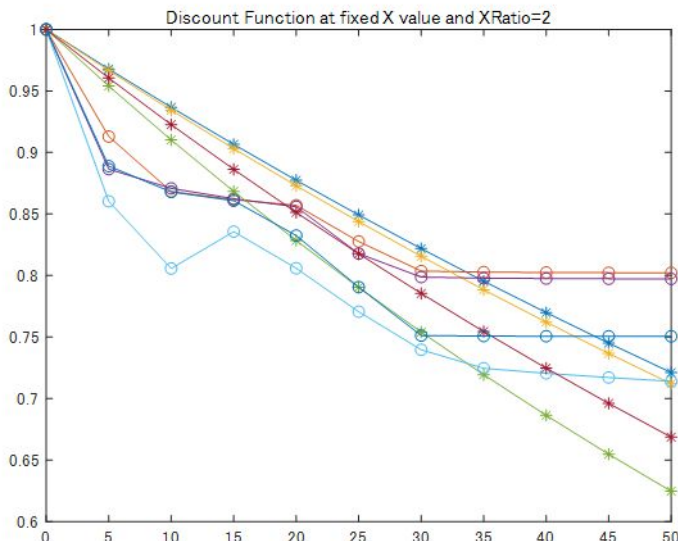


課題(5) (アノマリーの解決) については、上記の疎性を持つカーネルモデルを中心に分析した。アノマリーには大きく分けて、個人レベルで観測される意思決定アノマリーと、マクロの市場レベルにおいて観測される市場アノマリーがある。ここでは、これら両面から、実験で得られた意思決定モデルを評価した。意思決定アノマリーとしては、時間割引率の通時変化、量効果、損益非対称効果、選択範囲効果といった、この分野で良く知られた事実をベンチマークとした。今回得られたモデルによる検証では、これらいずれの意思決定アノマリーも再現可能（整合性を持つ）との結果を得た。これらの結果は、課題 や の知見からえられた意思決定モデルの妥当性を間接的に示していると考えられる。

また、市場アノマリーとしては、所得（ここでは得られる利潤）と消費の過剰な相関、資産の通時的な分配行動に関わるリスクプレミアムパズルといった統計的事実をベンチマークとした（Frederick et al(2002, J. Econ. Lite.), Read(2004, Handbook of Judgment and Decision Making)）。市場アノマリー分析においては、個人の意思決定レベルでは検証できず、何らかの集計化をする必要がある。そこでここでは、人工市場を用いたエージェントベース・シミュレーションを用いた。このうち、後者については整合的な結果を確認している。ただし、現時点において、十分な分析は行えていない。

今回のモデル化から得られた時間割引率のグラフ

横軸は利得が得られるのに要する遅延時間を縦軸は割引因子を表す。推定されたモデルから Simulate された割引因子と、同様な平均割引率を持つ指数型割引因子を表している。4つの報酬額（-23450,-135,135,23450）ごとに示されている。○は我々のモデルから Simulate されたもの、*は指数型割引因子のものを表す。我々のモデルが、双曲割引に似た割引率の変化（低下）を持つことが見て取れる。注目すべきは、その割引率が一様でないことである。



5．主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

(1)金融実務応用を視野に入れた最も効率的な生体情報のマルチモーダル測定について、樋口稚菜，宮川和大，下川哲矢(東理大) 情報処理学会第81回全国大会 福岡大学 2019.3.16

(2)脳情報を利用した自律的投資システムの開発 -人工市場実験による検証，仲里慎司，宮川和大，下川哲矢(東理大)情報処理学会第81回全国大会 福岡大学 2019.3.16

(3)ディープラーニングを用いた人間の利他行動要因の特定：コーズマーケティングへの応用，高田康起，下川哲矢(東理大) 情報処理学会第79回全国大会 名古屋大学 2017.3.16

(4)人工市場における人間の投資意思決定モデルの精緻化 ～脳情報ならび 視覚情報を用いて～，今川裕貴(一橋大)，下川哲矢(東理大)情報処理学会第79回全国大会 名古屋大学 2017.3.16

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.rs.tus.ac.jp/simokawa/>

6．研究組織

(1)研究分担者

研究代表者個人による研究である。

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。