

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03124

研究課題名(和文)市場アノマリー軽減の学習アルゴリズムとその神経基盤

研究課題名(英文) Learning algorithm and neural basis of reducing market anomalies

研究代表者

松元 健二 (MATSUMOTO, Kenji)

玉川大学・脳科学研究所・教授

研究者番号：50300900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：指数型バイアス付きベイズ更新モデルにより、人間の確率判断の認知バイアスの多くを説明できることを明らかにした。更にその神経回路モデルが、電気生理実験の結果を説明し、精神疾患の症状をも統一的に説明することを明らかにした。これを経済的意思決定に適用し、認知バイアスを市場での学習によって消去する際に用いているアルゴリズム特定中である。また、行動経済学と行動変容理論を組み合わせた新たな行動モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：We proposed an exponentially biased Bayesian update model with its underlying neural circuits, which can explain most cognitive biases in human probability judgments as well as electrophysiological findings on experimental animals. The model also provides a unified account for some psychiatric diseases. We applied the model to determine the learning algorithm to diminish the cognitive bias in an experimentally designed market. In addition, we proposed a new behavior change theory that is consistent to the findings in behavioral economics.

研究分野：認知神経科学

キーワード：ニューロエコノミクス 認知バイアス 学習アルゴリズム 脳

1. 研究開始当初の背景

(1) 人間は他者との関係を把握し、その関係によって主観的な価値を変えている。

経済学では従来、他者との関係性によらない選好に基づいて人間は意思決定し、行動を選択すると見なしてきたが、社会的選好に関する近年の研究は、利他性や互惠性、公平性など他者との関係が人間の選好に強く影響することを明らかにしている(Fehr and Schmidt, 1999)。また、自分と他者との間で選択肢の数が不公平なとき、公平なときよりも主観的な嬉しさの報告の値が低いこと、またそれに対応して、主観的な嬉しさを表現する脳内領域(脳内報酬系)の一部である前頭前野腹内側部の活動が低くなっていることを私たちは明らかにした(Aoki et al., 2014)。

(2) 私たちの意思決定の基礎となるさまざまな対象や行動についての選好は、学習によって変化する(Sutton & Barto, 1998)。その際、自分自身の行動とその結果だけではなく、他者の行動とその結果からも学習が進むこと(観察学習)が知られている(Bandura, 1986; Mazur, 2006)。神経経済学研究としては、他者の行動の結果に基づく学習信号に対応した活動を前頭前野腹内側部が示すことを報告されている(Suzuki et al., 2012)。

(3) 市場は独自の問題を孕んでいる。

社会的環境における意思決定を扱ったこれまでの神経経済学研究は、自分と他者間の公平性の表現や、他者の行動とその結果を自分の行動の学習に利用する基本的なメカニズムの解明に主眼を置いてきた。そのため、自分一人に対して他者一人というミニマムな社会関係の中で、極めて単純な選択行動の学習場面が想定されてきた。しかし市場にお

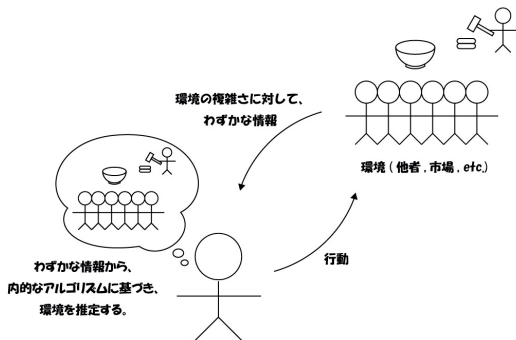


図1

いては、他者の行動の結果として表れる価格などの情報に基づいて、他者を含む環境のモデルを推定する必要がある。このようなモデル推定問題では、各財の価格などから得られる情報の次元数よりも、環境の次元数の方がはるかに大きく、解が一意に決まらない不良設定問題となっている。したがって得られる限られた情報から、もっと複雑な環境モデルを推定する人間の内的アルゴリズムが必要となる(図1)。

(4) 市場アノマリー：市場における「錯視」

不良設定問題を解く場合には一般に、必ずしも正しくない前提を想定することになる。視覚においては、網膜上に投影された2次元情報から3次元の外見モデルを推定する不良設定問題を解いており、想定した前提が正しくなかったときには、錯視が生じる。市場においても、従来の合理的経済理論では説明されない価格変動を示すことがあり、これを行動経済学者は「市場アノマリー」と呼んだ。市場アノマリーはいわば市場における「錯視」と考えることもできる。

(5) 市場アノマリーの主な要因の一つとして、個々人の認知バイアスが考えられる。実験経済学の分野において、個人内の認知バイアスによって生じた市場アノマリーを、繰り返し学習によって消去する実験が試みられてきた(例えば Kluger and Wyatt, 2004)。しかし、その学習の際に使われるアルゴリズムについては詳しく探求されておらず、その学習アルゴリズムの生物学的実体についてもほとんど何も分かっていない。

2. 研究の目的

さまざまな認知バイアスの中でも、特に適用範囲が広く本質的だと考えられる人間の確率判断のベイズ推定からの乖離(基準率の無視、代表性バイアス、アンカリングと調整等)に着目し、この認知バイアスを市場での学習によって消去するとき人間が採用しているアルゴリズムを解明し、その学習アルゴリズムの神経基盤を解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) ベイズ推定からの乖離度測定課題、およびベイズ推定からの乖離を消去するためのオークション学習課題を作成し、数名の被験者が同時に参加する集団行動実験を行った(図2)。

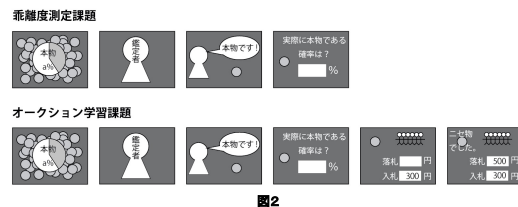


図2

ベイズ推定からの乖離度測定課題は、事前確率と尤度から、事後確率を答えてもらう課題とした。この課題を導入するにあたり、①ベイズの公式を知らない被験者に限定する、②事前確率と尤度を具体的で異質な確率として呈示する、③ベイズの公式を用いた暗算が困難な数値を用いる、という3つの工夫をすることにより、ベイズ推定から乖離した被験者の直観に内在するアルゴリズムを検出できる。具体的には、本物のコイン(1枚の価値は¥1000)とニセ物のコイン(1枚の価値は¥0)が混ざったコインの山が画面上に表示され、続いてコインの山の中の本物の割合

(事前確率)が円グラフで表示される。そして、一定の正確さ(尤度)を持つコインの鑑定者が画面に現れ、この鑑定者が本物だと鑑定したコインが、実際に本物である確率(事後確率)を被験者に入力回答してもらった。コインの中の本物の割合とコインの鑑定者の正確さを試行毎に変え、それらに対する回答から、被験者のベイズ推定からの乖離の度合いを定量的に算出した。

ベイズ推定からの乖離を消去するためのオークション学習課題は、乖離度測定課題と異なり、コインの山のの中の本物の割合を固定し、画面には一人の鑑定者が繰り返し(数十回)現れ、毎回、コインの山から本物だと思うコインを探し、そのコインをセカンドプライスオークション(最高額の入札者が、2番目の入札額で落札する方式で、各人の入札額がそれぞれの支払い意思額と一致する)にかけた。被験者は、そのコインが実際に本物である確率を入力回答した後、最大の利得を上げること考えて入札した。その後、誰がいくらで落札したか、および実際に本物のコインだったかどうかの情報が返された。

オークション学習課題後に、乖離度測定課題を再度行うことにより、オークション市場での繰り返し学習によってベイズ推定からの乖離がどのように変化したかを調べ、バイアス付きベイズ更新モデルによって表現されるベイズ推定からの乖離バイアスのパラメータをそれぞれの程度更新するか、入札額のランダムさをどの程度にするかなどのパラメータを含むモデルを見出した。

(2) 脳活動計測実験を実施し、絞り込んだ学習アルゴリズムが脳内でどのように実現されているかを調べるため、コインの山の中の本物の割合(事前確率)、コインの鑑定者の正確さ(尤度)、本物だと鑑定されたコインが実際に本物である確率(事後確率)の値が相関しないように設計された、脳部位同定用の乖離度測定課題を遂行中の脳活動をfMRIを用いて計測した。

これらの実験を元に、ベイズ推定からの乖離を市場での学習によって消去する際に人間が採用していると考えられるアルゴリズムの考察および神経回路での実装方法の検討をおこなった。また、本研究で見出されたベイズ推定からの乖離を説明するバイアス付きベイズ更新モデルが、人間のさまざまな直感的ではない行動をどこまで説明できるか、その範囲を検討した。

4. 研究成果

本研究において考察を進めてきた人間の確率判断の最適なベイズ推定からの乖離を表現する指数型バイアス付きベイズ更新モデル(図3)は、基準率の無視、代表性バイアス、保守性バイアス、アンカリングと調整などの主だった確率判断の認知バイアスをほとんど説明することができることを明らかにした。

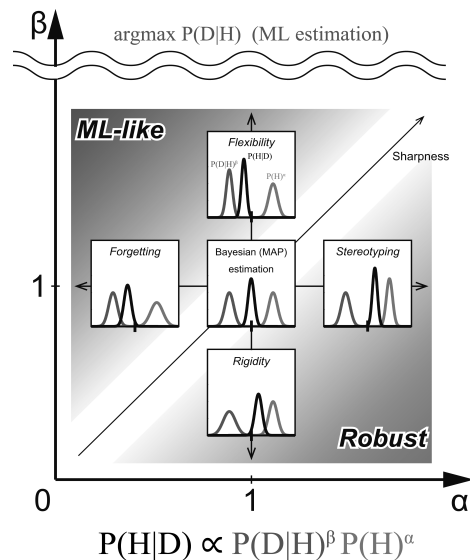


図3

さらに、指数型バイアス付きベイズ更新モデルをパラメータ推定の文脈に適用すると、最尤推定、ベイズ推定、最大事後確率推定といった推定方法の中間的な推定方法を提案できることをも明らかにした。

また、本研究で提案した、指数型バイアス付きベイズ更新モデルの神経回路モデル(図4)は、サルの電気生理実験と確率分布の神経回路におけるコーディングに関する先行研究の実験結果を説明するばかりでなく、注意、ワーキングメモリなどの認知制御に関する先行研究と結びつけることにより、統合失調症、

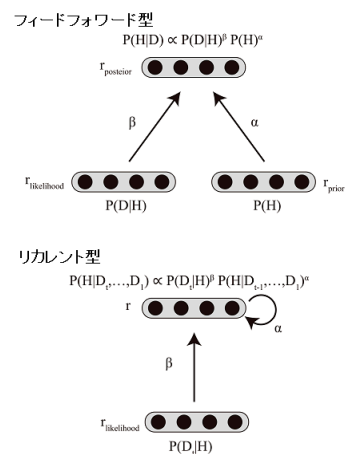


図4

自閉症スペクトラム症候群、注意欠陥・多動性障害、アルツハイマー病といった精神疾患の症状を神経修飾物質の働きと組み合わせることで統一的に説明できることが明らかになってきた。この内容をまとめた論文を現在投稿中である。

計40名から取得した、ベイズ推定からの乖離度測定課題およびベイズ推定からの乖離を消去するためのオークション学習課題のfMRI実験のデータ解析をおこなうことで、ベイズ推定からの乖離度測定課題を遂行中の脳活動を解析することにより事前確率、尤度、事後確率に相関する脳部位が同定された。これらの部位のオークション課題を遂行中の活動を調べることで、経済的意思決定に関するバイアス付きベイズ更新モデルのパラメータに相関する脳部位を同定し、更にベイズ推定からの乖離を市場での学習によって消

去する際にどのようなアルゴリズムを人間が採用しているかを特定するための解析を進行中である。

またこれらの結果を踏まえつつ、社会的環境における代表的な行動変容理論である計画的行動理論や社会的認知理論を現代の意思決定理論の観点からとらえなおした(図5)。

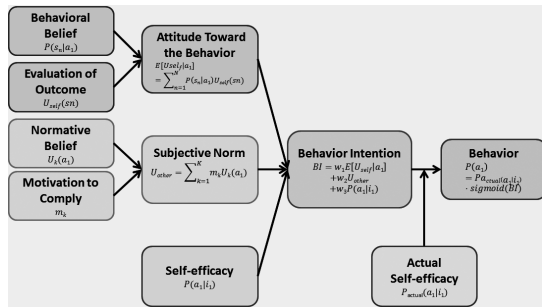


図5

さらにそれに基づき、行動経済学的なモデルと併用可能な新たな行動変容理論を提案した研究(図6)をとりまとめ、論文を執筆中である。

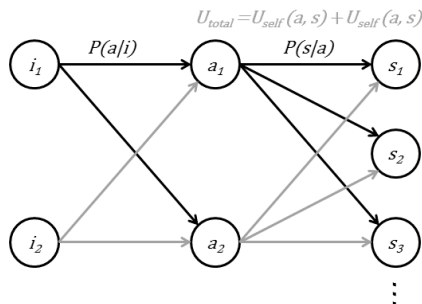


図6

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 6 件)

- ① Kazuyoshi Takeda, Tomiki Sumiyoshi, Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Satoru Ikezawa, Kenji Matsumoto, Kazuyuki Nakagome, Neural Correlates for Intrinsic Motivational Deficits of Schizophrenia; Implications for Therapeutics of Cognitive Impairment, *Front. Psychiatry*, 査読有, Vol. 9, 2018, 178, DOI:10.3389/fpsyt.2018.00178
- ② Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Adam N. Phillips, Kenji Matsumoto, The Neural Basis of Changing Social Norms through Persuasion, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 7, 2017, 16295, DOI:10.1038/s41598-017-16572-2
- ③ Kazuyoshi Takeda, Madoka Matsumoto, Yousuke Ogata, Keiko Maida, Hiroki

Murakami, Kou Murayama, Keigo Shimoji, Takashi Hanakawa, Kenji Matsumoto, Kazuyuki Nakagome, Impaired prefrontal activity to regulate the intrinsic motivation-action link in schizophrenia, *NeuroImage: Clinical*, 査読有, Vol. 16, 2017, pp.32-42, DOI:10.1016/j.nicl.2017.07.003

- ④ Ayaka Sugiura, Ryuta Aoki, Kou Murayama, Yukihiro Yomogida, Tomoki Haji, Atsuko Saito, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto Regional gray matter volume in the posterior precuneus is associated with general self-efficacy, *Neuroreport*, 査読有, Vol. 27, No. 18, 2016, pp.1350-1353, DOI:10.1097/WNR.0000000000000702

- ⑤ Hideyuki Takahashi, Keise Izuma, Madoka Matsumoto, Kenji Matsumoto, Takashi Omori, The anterior insula tracks behavioral entropy during an interpersonal competitive game, *PloS one*, 査読有, Vol. 10, No. 6, 2015, e0123329, DOI:10.1371/journal.pone.0123329

- ⑥ Sotaro Shimada, Madoka Matsumoto, Hidefumi Takahashi, Yukihiro Yomogida, Kenji Matsumoto, Coordinated activation of premotor and ventromedial prefrontal cortices during vicarious reward, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 査読有, Vol. 11, No. 3, 2015, pp.508-515, DOI:10.1093/scan/nsv134

[学会発表] (計 24 件)

- ① Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Matsumori, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Profiles of intentionality/morality judgments in autism spectrum disorder, 第20回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2018
- ② 松元健二、人間の脳の働きを特徴付ける内発的動機づけと高度な社会性、パフォーマンス・マネジメント革新フォーラム2018、2018
- ③ 松元健二、社会に生きるための動機づけの神経基盤、応用脳科学コンソーシアム、2018
- ④ 松元健二、説得による社会規範の変化を基礎づける脳活動、規範経済学研究会、2018
- ⑤ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida,

- Kousuke Asada, Kaosu Matsumori, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, 次世代脳2017年度冬のシンポジウム, 2017
- ⑥ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Matsumori, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, 国際自閉症カンファレンス東京2017, 2017
- ⑦ Kaosu Matsumori, Yukihiro Yomogida, Kenji Matsumoto, A Decision Theoretic Model Incorporating Social Norm and Self-efficacy, 玉川大学脳科学ワークショップ, 石和温泉郷のリゾート旅館 華やぎの章 慶山, 2017
- ⑧ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Matsumori, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Neural mechanisms underlying the diminished side-effect effect in autism spectrum disorders, 玉川大学脳科学ワークショップ, 石和温泉郷のリゾート旅館 華やぎの章 慶山, 2017
- ⑨ Kaosu Matsumori, Yukihiro Yomogida, Kenji Matsumoto, A Reinforcement Learning model Incorporating Social Norm and Self-efficacy, 玉川大学私学戦略ワークショップ, 2017
- ⑩ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Abe, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, 玉川大学私学戦略ワークショップ, 2017
- ⑪ Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Adam N. Phillips, Kenji Matsumoto, The Neural Basis of Changing Social Norms through Persuasion, 玉川大学私学戦略ワークショップ, 2017
- ⑫ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Abe, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, Society for Neuroscience 2016, 2016
- ⑬ Ayaka Sugiura, Yukihiro Yomogida, Kazuki Iijima, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto, Performance decrement induced by increasing social incentive, Society for Neuroscience 2016, 2016
- ⑭ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Abe, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, Society for Social Neuroscience 2016 Annual Meeting, 2016
- ⑮ Ayaka Sugiura, Yukihiro Yomogida, Kazuki Iijima, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto, Performance decrement induced by increasing social incentive, Society for Social Neuroscience 2016 Annual Meeting, 2016
- ⑯ 松元 健二, 社会規範が変わるとき—説得の脳科学, 脳コミュニケーション研究センターシンポジウム2016, 2016
- ⑰ 松森 嘉織好, 社会的認知理論および計画的行動理論の数理モデル, 第75回日本公衆衛生学会総会, 2016
- ⑱ Kenji Matsumoto, Yukihiro Yomogida, The Neural Basis of Changing Social Norms through Persuasion, ICP2016/日本心理学会第80回大会, 2016
- ⑲ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida, Kousuke Asada, Kaosu Abe, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagawa, Kenji Matsumoto, Excessive association between negative intentionality and immorality is diminished in autism spectrum disorder, 第39回日本神経科学大会, 2016
- ⑳ Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Adam N. Phillips, Kenji Matsumoto, The Neural Basis of Changing Social Norms through Persuasion, 第18回日本ヒト脳機能マッピング学会, 2016
- ㉑ Kaosu Abe, Yukihiro Yomogida, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Adam N. Phillips, Yasuharu Koike, Kenji Matsumoto, Elimination of Market Anomalies in Auctions is only Apparent, 第5回玉川大学脳科学リトリート, 2016
- ㉒ Kazuki Iijima, Yukihiro Yomogida,

Kousuke Asada, Kaosu Abe, Ayaka Sugiura, Shinichiro Kumagaya, Kenji Matsumoto, The neural basis of influence from moral judgment to intentionality attribution in individuals with autistic spectrum disorders, 第5回玉川大学脳科学リトリート, 2016

- ②③ Yukihiro Yomogida, The Neural Basis of Changing Social Norms Through Persuasion, 第5回玉川大学脳科学リトリート, 2016
- ②④ Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Adam N. Phillips, Kenji Matsumoto, The Neural Basis of Changing Social Norms through Persuasion, The First International Workshop on the Neurobiology of Social Influence, 2015

[図書] (計 2件)

- ① Kou Murayama, Keise Izuma, Ryuta Aoki, and Kenji Matsumoto, “Your choice” motivates you in the brain: The emergence of autonomy neuroscience. In: *Recent Developments in Neuroscience Research on Human Motivation*, (Advances in Motivation and Achievement 19), ed. Sung-il Kim, Johnmarshall Reeve, Mimi Bong, Emerald Publishing Group, 2016, pp. 95-125.
- ② 松元健二監訳、尾澤和幸訳、ケン・アシユウエル著、終風舎、『ビジュアル版 脳と心と身体の図鑑』、2015、351

[その他]

玉川大学脳科学研究所松元研究室 HP
http://www.tamagawa.ac.jp/teachers/matsumoto/matsumoto_lab_jp/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松元 健二 (MATSUMOTO, Kenji)
玉川大学・脳科学研究所・教授
研究者番号：50300900

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

小池 康晴 (KOIKE, Yasuharu)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号：10302978

(4) 研究協力者

松森 嘉織好 (MATSUMORI, Kaosu)
蓬田 幸人 (YOMOGIDA, Yukihiro)
飯島 和樹 (IIJIMA, Kazuki)
青木 隆太 (AOKI, Ryuta)
出馬 圭世 (IZUMA, Keisei)
鈴木 真介 (SUZUKI, Shinsuke)
村山 航 (MURAYAMA, Kou)
榭 美知子 (SAKAKI, Michiko)
Jerome Foo (FOO, Jerome)
杉浦 綾香 (SUGIURA, Ayaka)