

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11458

研究課題名(和文) 逆ベイズ推定を用いた人の多様な価値観を動的に反映する経済行動モデルの研究開発

研究課題名(英文) Behavior Model Reflecting Dynamical Values of Humans using Inverse Bayesian Inference

研究代表者

笹井 一人 (Sasai, Kazuto)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：00532219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ある一定の周波数によって同期され計算される電子計算機とは異なり、人間の意志決定は非同期かつ連続的に到着する環境からの情報を処理するシステムであるといえる。しかしながら、従来の経済行動に関するエージェントモデルは、同期された時間経過を前提としたために合理的に振る舞うか、それともノイズを含んだ非合理的な振舞いを見せるかの二元論に回収されてきた。本研究では、そのような同期的な意志決定における時間原理に対して、非同期的な時間に基づく意志決定モデルとして、ベイズ・逆ベイズ推論に基づく意志決定モデルに基づいた分析を行うことで、二元論に膠着しない人間の意志決定に関する理論を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した非同期的時間に基づくエージェントの意志決定モデルは、合理性と非合理性の二元論、つまり行動決定の内在性と外在性の問題に関する理論的考察を与えるものであるといえる。事実、ベイズ・逆ベイズ推論は自由意志に基づく意志決定モデルとしての分析も与えられており、本研究はそのような理論的研究が実際の社会とどのような関わりを持つのか、という考察を与えている点において、学術的意義のある成果であると考えている。

研究成果の概要(英文)：Human decision-making is a system to process asynchronously and continuously incoming data from the environment differ from computer systems executed in synchronized time. However, the agent-based modeling of human decision-making in microscopic economy has to follow the synchronous time, and therefore the principal of the agents reveals a duality between rationality and irrationality. This research proposes a novel decision-making model which makes a decision by using the theory of Inverse Bayesian inference derived from asynchronous time. This model improves the dualism of the human decision-making in economy in a alternative way from the previously proposed theories.

研究分野：複雑系科学

キーワード：非同期的相互作用 マルチエージェントシステム オークション ベイズ・逆ベイズ推論 適応戦略
べき分布 間欠性 レヴィ・ウォーク

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

人の意志決定に関する分析において近年着目されているものとして、ベイズ推定に基づく行動モデルがある。ベイズ推定による人の意志決定モデルは、経済行動のみならず、認知神経科学の分野でも注目されているモデルである。ベイズ推定は、事前の仮説分布と観測された仮説からデータが生成される確率に基づいて、あるデータが仮説から生成される確率を算出する理論である。ベイズの理論は、十分な観測事象がそろっていない状態でも、推論を行うことができ、また逐次的な推定を繰り返すことで、その都度得られたデータを基に、仮説の確率分布を正しいものにしていくことが可能である。反面、ベイズの手法は、観測事象からの過学習を防ぐために事前確率をうまく設定しておく必要がある。イタリアの物理学者 Arecchi は、ベイズの公式を事後確率とデータの一般的な性質から、事前確率を導くような選択も可能であると主張し、これを逆ベイズ推定と名付けた。逆ベイズ推定は、公式としては成立するが、実際の推定を行う際には、事後の情報から事前の情報を生成しなければならないために、原理的には不可能であった。ところが、郡司らの行った最新の研究では、Areccchi の逆ベイズ推定を、データの近似によるモデル化、つまりデータの分布から尤度を推定する操作ととらえて、通常のベイズ推定と逆ベイズ推定を対称的な操作として再定義し、これらを組み合わせることで、逆ベイズによって仮説のモデルを変更しながらベイズ推定を行う、ベイズ・逆ベイズ (Bayesian inverse Bayesian, BIB) 推定として計算可能な推定手法として構築することに成功した。図1に従来のベイズ推定、逆ベイズ推定、そして双方向ベイズ推定の関係性を示した。BIB 推定は、仮説を柔軟に変化させながらデータの推定を行う手法であるため、常に変化する不確実な世界の中で意志決定をする場合に優位であることが示されている。

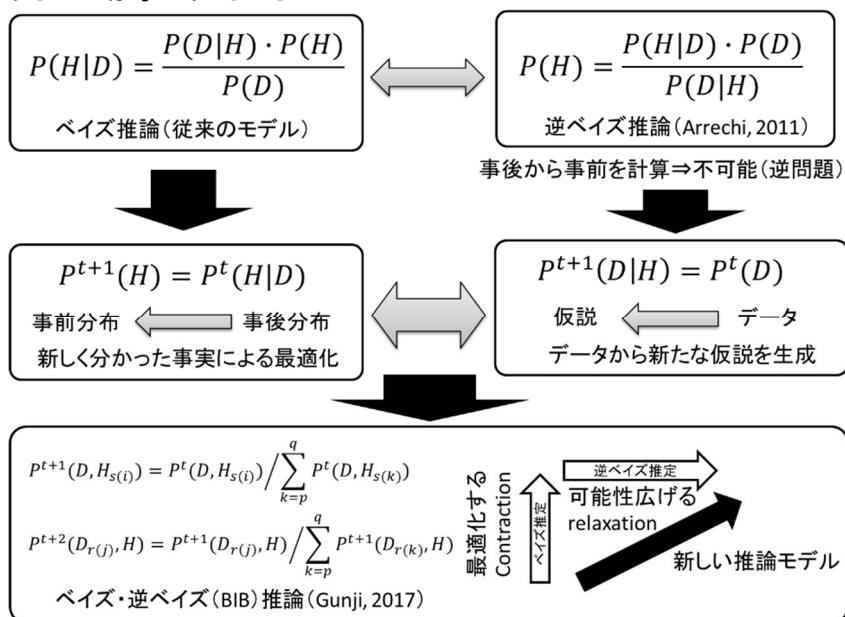


図1 ベイズ・逆ベイズ (Bayesian-Inverse Bayesian, BIB) 推論

2. 研究の目的

申請者はこれまで、市場モデルにおける相互作用の非同期性が、多様な価値観を生成し、それがマクロレベルの高い不確実性が出現することと深く関わることを示してきた。さらに、非同期的な相互作用と多様な価値観の生成は、エージェントの行動モデルが、合理性に基づいたもの、非合理性に基づいたものの両方で同様に見られることを示した。これは、経済行動のモデルを適切に分析するためには、エージェントの行動が合理的か非合理的かだけでなく、相互作用によってエージェントに入力される観測データが時間的な関連性を持って連続的に流入するような場合には、その変化しうる環境に如何にして適応していくかという問題を扱う重要性を示唆している。本研究では、これまでの合理性(通常のベイズ推定は合理的な行動選択の一種と考えられる)や非合理性の議論を超えて、非同期かつ連続的にやってくる観測データに対して、逆ベイズ推定を用いて環境条件に内部モデルを変化させて適応する、新しい経済行動モデルを提案することを目的とする。実際に非同期で連続した時間の中で発生する経済行動を対象として、逆ベイズを含めた双方向ベイズ推定の理論を応用するものである。従来の人間の行動原理に関する合理性概念が、内在的なものであるか、外在的であるかという論争に帰着してきたことを考えると、本研究の目的は、このような二元論的な人間の経済行動における合理性の考え方を打破し、新たな領域へと踏み出すことであると置きかえることも可能であろう。

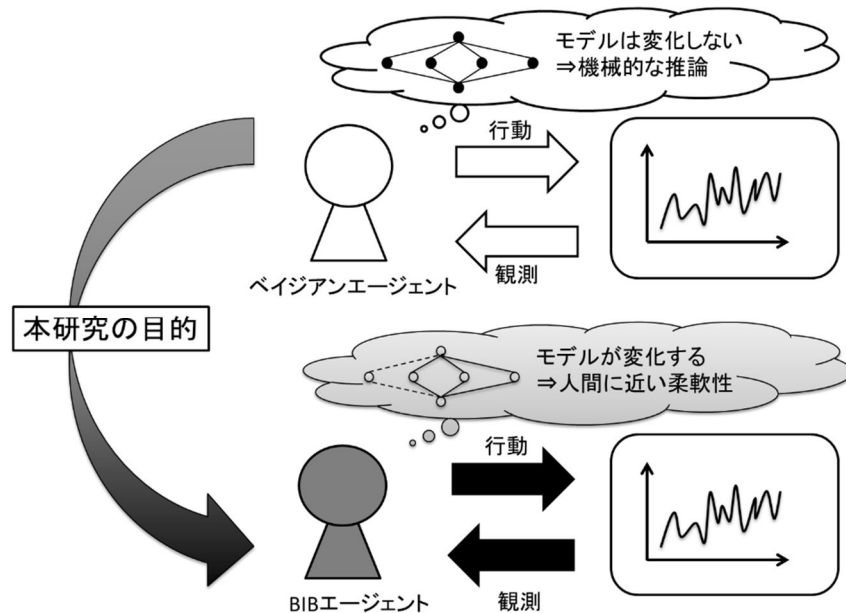


図2 BIB エージェント

3. 研究の方法

本研究では、まず我々がこれまで研究を行ってきた市場モデルにおける非同期性の概念について、より深い考察を行うことで、本研究の目指す多様な価値観のモデル化を行う。具体的には、文献 [1] で用いた、連続時間ダブルオークションのシステムにおける取引タイミングの非同期性に関する、未解決の問題であったパラメータ依存性の起源に関する問題解決を行い、その結論として、意志決定に関わる時間の問題を考察した。Bagnall [2] が行った連続時間ダブルオークションにおけるエージェントの適応行動モデルの研究 [3] では、Cliff [4] が提案している Zero-Intelligence Plus (ZIP) モデルおよび GD モデルが用いられている。ZIP アルゴリズムは、オークション(最大入札額を投じた参加者が商品を落札できる仕組み)における入札価格を決定する際に、前回のオークション結果(買えた・買えなかった)に基づいて、次回の入札額を決定するアルゴリズムである。オークション参加者は、商品が買えなかった場合には、それぞれのアルゴリズムで定義されている次回の価格決定要因変更戦略に基づいて、例えば買い手の場合には価格を上げる、売り手の場合は下げるなどの応答を行う。オークション結果に基づいた適応行動によって、落札価格は均衡を保つ価格へと収束する。一般的なオークションモデルは、一回のオークションにおいて、市場に参加する全てのエージェントが入札を行う。これに対して、本研究では、確率的に一部のエージェントが入札を許される、つまり入札に締め切りが存在し、エージェントが入札するかしないかを考える時間が発生すると仮定し、これを非同期的相互作用と呼ぶ。ZIP アルゴリズムにおける合理性は、オークションの結果と、価格の上げ下げが一致していることが重要であるため、ひとたび非同期性が規定されると、締め切りに遅れたために最高額を入札するつもりであったエージェントが落札に失敗する可能性が出てくる。このため、戦略と結果の間に齟齬が生じる可能性が出てくる。先行研究 [5] においては、確率パラメータの小さい領域、つまり極端に短い締め切りを設定した際に、適応戦略の平均および落札価格の時間変化が Stylized Facts と呼ばれる実際の市場に見られる現象が現れることが分かった。非同期的な相互作用の導入によって、合理性にねじれが生じ、それによって多様な価値観が生成されることで、その様な現象が得られるのではないかと考察されたが、その詳しい要因に関する詳細な考察が得られていなかった。よって、本研究で提案している多様な価値観を実現するための BIB 推論をどのように適応するかを検討するためには、まずその要因に関する考察をする必要がある。その上で、得られた価値観に関する考察によって得られた要因に対して BIB 推論を適応したモデルを検討し、BIB 推論による経済行動モデルとして確立することを目標として研究を行った。

4. 研究成果

本研究における最初の研究成果として先行研究である非同期的相互作用における多様な価値観の生成要因に関する考察を行った。図3に非同期相互作用によってえられる特徴的な挙動を示している。特徴的な結果としては、非同期相互作用によって適応戦略が間欠的に変化することである。(3)、(4)に示しているのは、間欠的挙動の変化量および大きな変化が現れる間隔がべき分布(Power-law)を示すということである。特に大きな変化の間隔がべき分布を示すことは、Volatility clustering と呼ばれる現象である。本研究成果では、この現象が発生する要因を、適応戦略における最適入札額の推定箇所にあると考えた。ZIP アルゴリズムにおいて、エージェントは直前のオークション結果において、もし落札に成功した場合には、最適入札額を少し下げ、逆の場合には少し上げる。Bagnall [2] が研究したオークションモデルでは、入札時にエージェン

トが想定した商品価値に対して、利益率をかけて入札を行う。ここで、オークション失敗時には、もし想定価格が落札価格を下回っていた場合には、利益が得られないために最適入札額は、実際の入札額に等しくなると考えられているが、本研究成果では、それに対して、もし仮に利益が得られないと分かった場合には、逆に利益率を増加するように最適入札額を想定するようモデルを変更してみたところ、図4に示すように、先行研究に比べて明らかに広いパラメータ領域において、間欠的な挙動が得られることが分かった。これは、最適入札額の推定プロセスにおいて合理性が有効ではない状況において、エージェントの行動を規定することが、間欠的な挙動を生む要因となっていることが示され、このことからエージェントの合理性における多様性を考慮することが、市場モデルにおいて Stylized Facts を説明するモデルとして重要であることを示した。

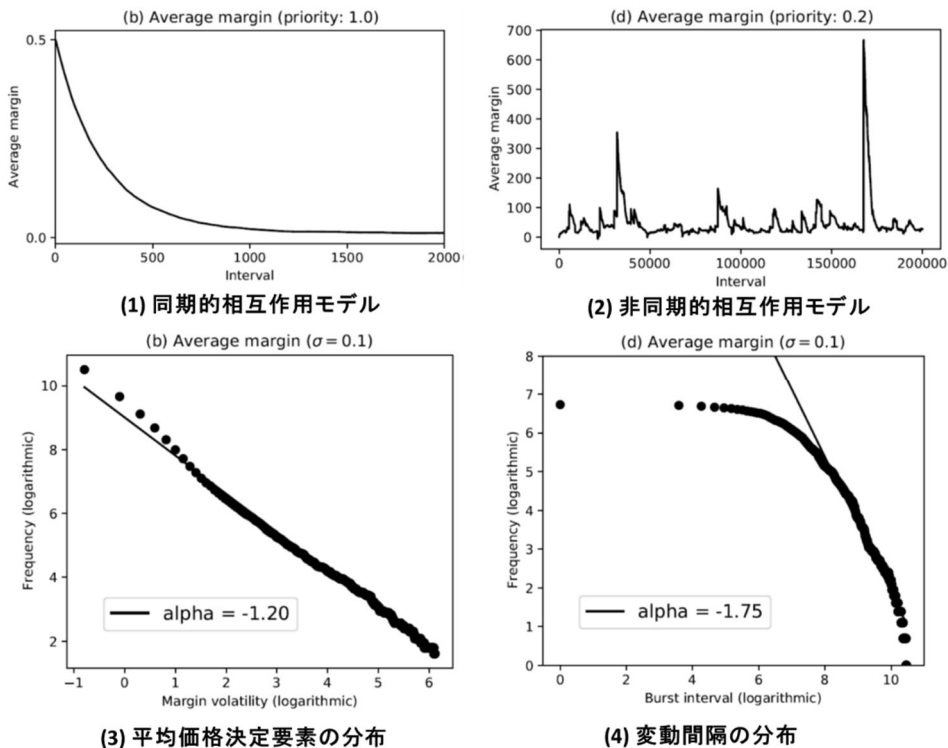


図3 非同期相互作用モデルの研究成果

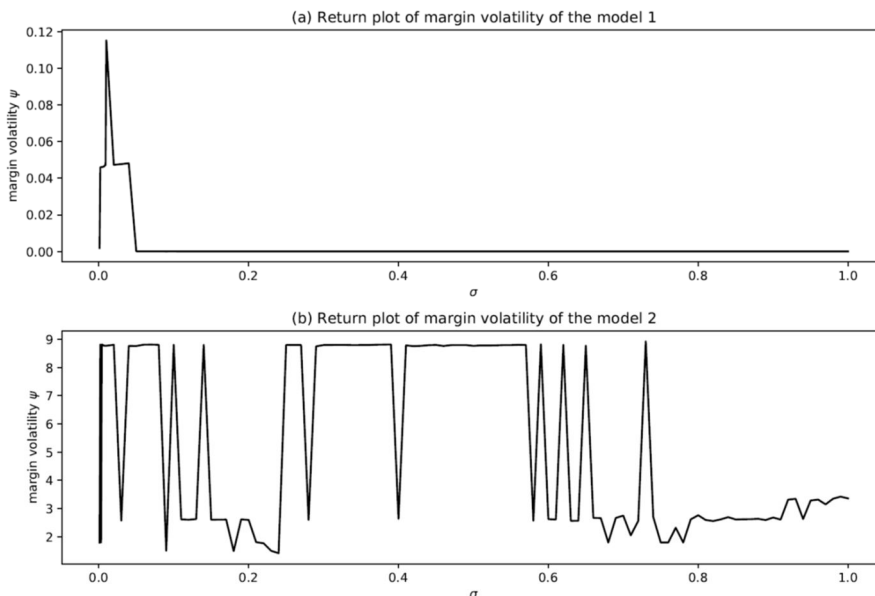


図4 逆的最適入札額の推定モデルによる効果

次の成果として、市場モデルにおける BIB 推論導入の可能性に関して検討し発表を行っている。株式市場や為替市場などの時事刻々と取引状況が変化する市場のモデルとして、ダブルオークションモデルに関する研究が多く行われてきた。ダブルオークションモデルは、売り手と買い手がそれぞれ希望価格を入札し、希望の一致する注文の間で取引が成立するような仕組みである。本研究では、中でも近年最も現実の市場をよく反映しているモデルとして多数の研究がな

されているオーダーブックモデルに着目する。オーダーブックモデルでは、売り手と買い手がそれぞれ注文を出すことは従来のモデルと同様であるが、その注文価格を決定するための戦略として、{Fundamentalist Chartist Random}の3タイプの戦略が定義されている。Fundamentalistは、その名の通りファンダメンタルズに基づき価格を決定する戦略であり、Chartistは、市場価格の変動のみに着目する戦略、そしてRandomは、過去の履歴と無関係にランダムな価格決定を行う戦略である。オーダーブックモデルにおいて3つの戦略は、重み付けにより調整される仕組みになっている。Fundamentalistはある値を目標とした戦略であり、それに対してChartistは、時系列の移動平均への収束を目指す戦略である。さらにノイズ項が加わることにより、3者のダイナミクスが相互的に作用し、間欠的な挙動が得られる。この重み付けを適切に調節することにより、実際の市場に見られるベキ則などの性質が再現される。しかしながら、ここで大きな疑問として、異なる戦略はどこから来て、何によって制御されているのか、ということである。本研究では郡司らの提案した逆ベイズ推論に基づく確率推論の手法をオーダーブックモデルに適用することで、異種性の意味を再定義しながら確率推論により戦略の選択を行う新しいオーダーブックモデルを提案した。今、ある時刻 t において得られたリターンを r とすると、ある重み付条件下で得られるリターンの確率は、 $f(r|w)$ として表現され、事前確率 $g(w)$ が与えられることで、ベイズの公式により事後分布 $g(w|r)$ が求められる。一方で、郡司らの提案する逆ベイズ推論は、従来のベイズ推論に加えて、過去のデータに基づいて仮説を更新するダイナミクスを導入した。これにより、市場と自身の予測のズレが、仮説として組み込まれることとなり、時間発展上で生成される異質さを内部に取り込むための装置として機能することを示した。

<引用文献>

- K. Friston et al., "The anatomy of choice: active inference and agency", *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 7, No. 598, pp. 1-18, 2013.
- F.T. Arecchi, "Chaotic neuron dynamics, synchronization and feature binding", *Physica A*, Vol. 338, pp. 218-237, 2003.
- Y.-P. Gunji et al., "Inverse Bayesian inference as a key of consciousness featuring a macroscopic quantum logical structure", *Biosystems*, Vol. 152, pp. 33-65, 2017.
- K. Sasai, Y.-P. Gunji, T. Kinoshita, "Intermittent Behavior Induced By Asynchronous Interactions In A Continuous Double Auction Model," *Advances in Complex Systems*, Vol. 20, No. 02n03, pp. 1750005 (21 pages), 2017.
- K. Sasai, Y.-P. Gunji, T. Kinoshita, "Extremely localized interaction in a market model," *Artificial Life and Robotics*, Vol. 22, No. 1, pp. 125-129, 2017.
- A. Bagnall, I. Toft, "Autonomous Adaptive Agents for Single Seller Sealed Bid Auctions," *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* Vol. 12, pp. 259-292, 2006.
- K. Sasai, "Asynchronous time-space model for evolutionary market," *Biosystems*, Vol. 198, pp. 104272, 2020.
- 笹井一人, "人工市場におけるエージェントの経済行動に関わる「異質さ」の起源," 共創学会第3回年次大会予稿集, 2019.
- T. Lux, M. Marchesi, "VOLATILITY CLUSTERING IN FINANCIAL MARKETS: A MICROSIMULATION OF INTERACTING AGENTS," *International Journal of Theoretical and Applied Finance* Vol. 3, pp. 675-702, 2000.
- J. Wang, H. Zhu, D. Li, "Price Dynamics in an Order-Driven Market with Bayesian Learning," *Complexity*, Vol. 2018(8254068), pp. 1-15, 2018.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Sasai Kazuto	4. 巻 198
2. 論文標題 Asynchronous time?space model for evolutionary market	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biosystems	6. 最初と最後の頁 104272 ~ 104272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.biosystems.2020.104272	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 笹井一人
2. 発表標題 予期の非同期性が生み出す逸脱
3. 学会等名 共創学会第8回競争学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笹井一人
2. 発表標題 人工市場におけるエージェントの経済行動に関わる「異質さ」の起源
3. 学会等名 共創学会第3回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuto Sasai, Yukio Gunji, Tetsuo Kinoshita
2. 発表標題 A Double Auction Model based on Weak Observation
3. 学会等名 Conference on Complex Systems 2018 (CCS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹井一人, 福谷遼太, 木下哲男
2. 発表標題 人・エージェント共同体に基づく共創システム
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門部会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹井一人, 星野拓也, 松村洋志, 福谷遼太, 木下哲男
2. 発表標題 人とエージェントの協働による自律適応システムへ向けて
3. 学会等名 共創学会第2回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

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