

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Modelling of decision-making process
by inverse Bayesian inference

逆ベイズ推定を用いた
意思決定プロセスのモデル化

申 請 者

Youichi	HORII
堀井	洋一

Department of Intermedia Studies,
Research on Biological Expression

2018年7月

約30年前に議論されたモンティ・ホール問題や三囚人問題では、経験的知識に依存して確率が変わるという表現が物議を醸し、主観確率という概念が自然科学の中で正当に議論されることは殆どなかった。それはただ哲学者や精神分析の専門家が議論するものに過ぎなかった。認知科学、脳科学で、主観確率を推定の基礎に据えるベイズ推定の使用が常態化し、多くの認知的錯覚がこれによって説明されるようになった現在にあって、それはまさに隔世の感がある。

しかしベイズ推定は閉じた条件のもとでの効率的推論に過ぎず、不安定で開いた条件のもとで意思決定する人間や生物にとって、特殊な条件を設定した理想的推論と言わざるを得ない。不確定性のもとでの意思決定を理解するため、確率論自体に非可換性を用いた量子確率論の導入や、主観的条件付き確率の導入など、様々な試みが展開されているが、開かれた環境に起因した不確定性という観点には、未だ目が向けられていない。他方、閉じた環境での採餌効率化と開いた外部への探索のバランスという問題は、近年、レヴィ歩行として生態学で扱われつつあり、開かれた不安定な環境のもとでの意思決定は、普遍的問題として広がりを見せ始めている。

本研究は、この開かれた環境のもとでの意思決定過程を、二つのモデルで実装し、実験を通してその有効性を示している。第一のモデルは、ベイズ推定に対して逆ベイズ推定と呼ばれる推定を導入し、ベイズ推定と逆ベイズ推定の併用によって、意思決定を実行するモデルである。ここでの逆ベイズ推定は、経験的データの集積を用いて仮説の尤度を変えていく過程であり、意思決定者が所有する複数仮説の確率を変えても、仮説自体を変えることはないベイズ推定を、開かれた環境において補完するものとなっている。本研究は、この第一のモデルを用い、二つの現象が説明できることを明らかにしている。第一の現象は、探索歩行において、局所的判断における誤差が一方向的偏向をもたらす現象であり、認知実験を通して本研究で初めて見つけたものである。第二の現象は、選挙戦に認められる、勝ち馬に乗る（バンドワゴン効果）もしくはその逆の雪崩現象である。第二のモデルは、特定の条件外部に開かれた記号使用が、条件内部の合理的判断に内在する形式を持つもので、表計算ソフトして実装している。既存の表計算ソフトと比較した、使用効率実験が実施され、記号の自由な使用の効果により、誤算に関する格段の減少が認められ、アプローチの妥当性が評価されている。

本論文は、7章から構成されている。以下に各章の概要と評価を述べる。

第1章は、序論である。因果推論における誤謬など様々な認知的錯覚について論じた後、本研究で述べたアプローチの妥当性について述べている。

第2章は、本研究全体に通底する、閉じた条件における効率化と、条件を自ら開いていく操作の接続というモデルについて概説し、ここから、ベイズ推定と逆ベイズ推定の接続という実装、および、自由な記号の使用を内在した記号指向型の言語モデルという実装が可能となることを論じている。また

各々について，さらに実験系や表計算ソフトとしての実装が実現されることが概説され，論文全体の見取り図についても述べている．

第3章は，ベイズ推定と逆ベイズ推定の接続というモデル一般を提案し，その意義について概説している．ベイズ推定は，意思決定者が複数の仮説を持ち，仮説の確率を経験に基いて計算し，確率の高い仮説を意思決定の根拠とする推定方法である．各仮説は，仮説の下でのデータの条件付き確率（尤度）によって定義され，仮説の確率は，得られたデータの下での仮説の条件付き確率によって逐次変更される．この変更を許した確率が，主観確率と呼ばれるベイズ推定の中心概念となっている．ここでは，この変更と対称的に，仮説の下でのデータの条件付き確率を，得られたデータの確率によって逐次変更する逆ベイズ推定を定義し，ベイズ推定と逆ベイズ推定の接続によって，意思決定モデルを構成しているが，データや仮説の数，パラメータ値を変えて計算し，ベイズのみによる推定と比較してその有効性を示している．

第4章では，記号の自由な使用を内在した言語モデルを提案することで，開かれた環境下での，環境内部の効率的計算を表現し，表計算ソフトとしてこれを実装している．既存の表計算ソフトが，様々な計算上の記号や記号間の関係を，ワークシート上のセルおよびそのアドレスで空間的に固定しているのに対し，本研究で提案する表計算ソフトは，記号や記号間の関係を項目として区別するに留め，空間に固定しない．これによって計算の制約を緩め，想定外部の計算について自由を担保している．この表計算の使用実験を実施し，既存の表計算ソフトと比較した結果，相対的に極めて高い効率（計算正答率）が得られ，本研究のアプローチの正当性が確かめられた．

第5章では，局所的な視界のみを利用して，指示された向きに歩き続けるという実験系が提案され，実験結果がベイズ・逆ベイズ推定によって評価されている．実験系は，モニター上で可能な探索ゲームとして実装され，被験者が卓上で可能な実験が実現された．局所的な視界が壁と天井で隔てられる条件，開かれた視界でありながら，区別のない棒状目印の遠近感のみをたよりに歩行する条件，歩行中見えない他者によって進行を妨げられる条件など，様々な条件下で直進歩行実験が実施された．複数の条件において，局所的な判断誤差が何度か繰り返し替えされる時，その少ない反復が増幅され，歩行に一方向的偏向が生まれる現象が認められた．この現象は，逆ベイズ推定の効果により，微小な局所的判断が仮説の中で増幅され，ベイズ推定が偏向を選択し続けることで，説明できることが示された．特にベイズ推定のみを用いた意思決定によっては，この現象がうまく説明できないことも示された．

第6章では，集団の意思決定過程に見出される，周囲への同調・反発の効果が，ベイズ・逆ベイズ推定の接続モデルによって説明されている．周囲への同調，反発は各々，バンドワゴン効果，アンダードッグ効果として知られ，選挙実験や株価の変動などにも認められている．本研究では，アメリカ大統領選の世論調査データを解析し，或る時点での調査結果と前回の調査結果とが

正の相関を持つ時バンドワゴン効果，負の相関を持つ時アンダードッグ効果と定義して，その時系列を解析した．その結果，大統領選挙戦ではアンダードッグ効果が顕著に認められ，アンダードッグ効果によって選挙戦が接戦になるという相関が得られた．ベイズ推定の場合，バンドワゴン効果は説明可能だが，アンダードッグ効果になると，逆ベイズ推定の効果の寄与が必要となり，大統領選における世論調査の変遷はベイズ・逆ベイズ推定の接続によって初めてうまく説明できることが示された．

第7章では，本研究から得られた成果がまとめられ，残された研究課題と今後の研究の方向性について述べている．

以上をまとめると，本学位論文は，特定の環境・条件のもとで効率的決定を目標としながらも，その環境が外部に開かれ，極めて不安定な状況下で実現されることを余儀なくされる，人間の意思決定をモデル化し，様々な具体的計算モデルや計算ソフトとして実装し，さらに実験を通してその正当性を示した先駆的研究といえる．現在，認知科学・脳科学を席卷しているベイズ推定の自然な拡張として逆ベイズ推定・ベイズ推定の接続を一般化し，これによって，条件を閉じながら開くという，一見矛盾した意思決定を様々な形式で実装した本研究は，人間の意思決定のみならず様々な生物の行動も解読可能と期待され，高い学術的価値を持つとともに，表現工学の発展に寄与するものと評価できる．以上から本論文を博士（工学）の学位論文として相応しいものとして認める．

2018年6月

審査員

主査 早稲田大学教授 理学博士 東北大学 郡司 幸夫

早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 尾形 哲也

早稲田大学教授 博士（人間科学） 早稲田大学 河合 隆史