

Graduate School of Fundamental Science and Engineering
Waseda University

博士論文概要

Doctoral Thesis Synopsis

論文題目
Thesis Theme

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
(Applicant Name)

Youichi	HORII
堀井	洋一

Department of Intermedia Studies,
Research on Biological Expression

May, 2018

人間は不確定な情報に基づいて行動し、客観的に見れば非合理的な判断を下すことがある。状況が突然変化するような不確定な環境で、何らかの意思決定を行うプロセスのモデル化は、人間の認知過程の理解だけでなく、実環境に適応できる知的システムを構築する上で重要である。Mach(1980)は不確定な情報を元にした人間の意思決定プロセスは、確率的な推定によるものであると示唆した。Gigerenzer(1995)は人間の思考はベイズ推定に沿っているとし、Knill(2004)も人間はベイズ的認知システムであり、特殊な入力に対して急激に反応することはないと主張した。これに対し、Arecchi(2011)は、ベイズ推定に相補的な認知的計算過程である逆ベイズ推定を提唱した。これとは別に、Gunji(2016)は尤度そのものを更新する逆ベイズ推定を提唱・定式化した。

人間の意思決定とは、ある特定の前提から出発して帰結へと向かうプロセスである。さらに、最初の前提を疑って新たな前提を探索し、次の帰結に向かう。このように前提から帰結に向かう縮小のプロセスと、新たな前提を探索する拡大のプロセスを繰り返すことによって、人間は自らの意思決定や他人との合意形成を継続することができる。人間の意思決定プロセスのモデル化に多数用いられてきたベイズ推定は、尤度と事前確率の集合を前提として出発する。ベイズの定理より事後確率を計算し、次のステップの事前確率を事後確率で更新する。これは前提から帰結に向かう縮小のプロセスであり、新たな前提を探索する拡大の手続きは用意されていない。これに対し、Gunji(2016)が提唱した逆ベイズ推定では、ベイズ推定の計算後に、過去の履歴を用いて尤度そのものを更新する。すなわち、新たな前提を探索する拡大のプロセスの手続きである。本論文では、以下の3つのケースで意思決定の縮小と拡大のプロセスを検証する。すなわち、「合理性を志向する合意形成」、「個人の意思決定プロセス」、および「集団の意思決定プロセス」である。

まず、Chapter 3 では、逆ベイズ推定の計算方法と、計算時に用いるパラメータが推定結果に与える影響について述べる。ベイズ推定では、尤度 $P(d|h_i)$ と事前確率 $P(h_i)$ である仮説 h_i の集合を前提として出発する。出現したデータ d によりベイズの定理から事後確率 $P(h_i|d)$ を計算する。さらに、次のステップ $t+1$ の事前確率 $P^{t+1}(h_i)$ を事後確率 $P(h_i|d)$ で更新する。例えば事前確率が最大の尤度がベイズ推定結果であり、縮小のプロセスである。逆ベイズ推定では、ベイズ推定の計算後に、例えば過去の履歴 $P_{past}^t(d)$ を用いて尤度そのものを更新する。逆ベイズ推定では、過去の履歴を計算する際に必要な複数のパラメータが存在する。これらが推定結果に与える影響についても述べる。

Chapter 4 では「合理性を志向する合意形成」について述べる。合意形成の過程では、課題を解決するためのロジックを固定化する縮小のプロセスと、ロジックを流動化する拡大のプロセスが繰り返される。縮小のプロセスでは不確定要素を含んだままロジックの固定化が試みられる。固定化されたロジックに含まれる

不確定要素が全体に与える影響は感度分析等によって表出され、拡大のプロセスではロジックを構成する新たな要素が探索される。たとえば、何らかの COST 構造に関する合意形成を行う場合、もし各ステークホルダーの価値基準が一致していなければ、それぞれの立場の合理性は異なる。少なくとも、価値基準を共有した上で、ロジックを構築する必要がある。例えば、共有すべきロジックが、数値化できる要素と、要素間の関係式で定義できるとする。簡単なロジックであれば手書きで十分であるが、要素の数が増えていくとコンピュータを用いた計算が必要となる。これらの目的のための専用ツールも市販されているが、柔軟性が高いプログラミング言語の利用も可能である。しかしながら、すべてのステークホルダーがプログラミング言語を習得しているわけではなく、専用ツールも広く普及しているわけではない。そのため、ロジックの構築と共有には汎用的な表計算ソフトが多く使われている。しかしながら、スプレッドシートの 86% に誤入力が存在し、40 セルあたりに一つのエラーが存在するという報告もある。多くの表計算ソフトの操作は直観的で、習得する障壁は低いものの、従来の表計算ソフトには、これらの誤入力を誘発し、合理的なロジックの固定化と流動化を阻害する根本的な問題がある。すなわち、(1) 入力 (= 値 / 数式) と出力 (= 計算結果) に同じセルを使用、(2) 参照や数式の被演算子はセルのアドレスで表現、(3) 数式は演算子と被演算子の組み合わせで記述、(4) 各セルで扱える値は一つ、である。これに対し、(1) 入力と出力を明確に分離し、(2) 項目の名称 (文字列) を識別子として利用し、(3) 演算子と被演算子を分離して記述し、(4) 項目の値の幅を定義できるような言語とツールを開発した。従来の表計算ソフトとの比較実験を行ったところ、作業時間は 70% 削減し、誤入力は 83% 低減した。項目間の関係やデータの推移の可視化によりロジックを固定化し、不確定要素が取りうる値の範囲で変化させたときに全体に与える影響を分析することで、新たな要素を探索するといったロジックの流動化を円滑に行うことが可能となった。

しかしながら、どれだけ注意を払っても、人間は非合理的な意思決定を頻繁に行う。Chapter 5 では、「個人の意思決定プロセス」について述べる。意思決定プロセスには、最適解の選択による縮小のプロセスと、それまでとは異なる方法論を探索する拡大のプロセスが存在する。非合理的判断を含む個人の意思決定プロセスのデータを収集するために、仮想空間の迷路を進む実験を行った。被験者はスタート位置の正面に向かってなるべくまっすぐ進むように促される。4 種類の 3 次元モデルについて、被験者のみが操作する場合と、不確定性を高めるためにソフトウェアがランダムに介在する場合の、合計 8 タスクを行った。最終到達点と正しいゴールとのずれ、判断時間、正しい方向から離れる非合理的な選択の割合は、不確定性の違いに対して差は見られなかった。しかしながら、ベイズ推定および逆ベイズ推定でモデル化したところ、不確定性が高いほど、逆ベイズ推定の方がベイズ推定よりも高い精度で推定できる傾向にあった。実験開始直後の

被験者は、最適解と思われる選択を行う縮小プロセスの段階にあり、その後、突然ゴールから逸脱していると気づき、戻るための方法を探索する拡大プロセスに切り替わったと考えられる。特に不確実性が高い場合に、このようなケースが多発したため、逆ベイズ推定の精度が高かったといえる。このように、不確実性が高く、急に意思決定の方法そのものが変化する場合には、逆ベイズ推定によるモデル化が有効であることを示した。

さらに、Chapter 6 では、「集団の意思決定プロセス」について述べる。集団の意思決定には、周囲との同調と反発による意見の集約と発散がある。周囲の意見に同調する現象をバンドワゴン効果、反発する現象はアンダードッグ効果と呼ばれる。バンドワゴン効果は意見が集約する縮小のプロセスであり、アンダードッグ効果は意見が発散する拡大のプロセスといえる。選挙時の世論調査の結果によるこれらの効果は、古くから定式化され、仮想的な投票実験を通じて研究されている。また、金融市場や企業の技術導入の際にも同様な効果が認められることが知られている。この Chapter では、2016 年米国大統領選挙時の 4 社の世論調査の推移データを用いて検証した。前回の調査結果の支持率と今回の支持率の変化を線形回帰した際に、正の相関があればバンドワゴン効果が、負の相関があればアンダードッグ効果が認められるといえる。検証の結果、アンダードッグ効果を示す負の相関がみられた。アンダードッグ効果は接戦になる傾向にあり、実際、両候補の支持率は最後まで 50%前後を推移していた。また、支持政党別に調べたところ、支持政党なしのグループでは、さらにアンダードッグ効果の傾向が強かった。線形回帰モデルによる推定値と実際の推移との平均二乗誤差は、4 社の平均で 1.10%であった。また、ベイズ推定および逆ベイズ推定によるモデルの平均二乗誤差は、それぞれ 0.40%、0.24%であり、逆ベイズ推定が最も有効なモデルといえる。これは、ベイズ推定はバンドワゴン効果の結果をもたらす傾向が強いため、今回のデータには適合しにくかったためと考えられる。一方逆ベイズ推定は、どちらの効果にも適用できると考えられる。さらに、集団の意思決定の別の例である、株価、為替などの経済指標にも適用できることを示した。

最後に、Chapter 7 では新しい社会の調和に向けた構想について述べる。現実世界では、多数の意思決定者が絡み、不確実性が高く、様々なステークホルダーがそれぞれの動機で意思決定を行う。合理的に合意形成を行うために、価値基準を共有し、ロジックを構築する方法論を模索してきた(Chapter 4)。しかしながら、人間は頻繁に非合理的な判断を行う。適切な合意形成を形成するためには、人間の意思決定プロセスの理解に立ち戻る必要があった。非合理的判断を含む個人の意思決定プロセス(Chapter 5)、および周囲の意見に影響される集団の意思決定プロセス (Chapter 6)のモデル化は、有効な手段となる。今後は、縮小と拡大を繰り返す意思決定プロセスのモデルを組み込むことにより、新しい社会の調和をもたらす意思決定および合意形成の方法論を確立する。

早稲田大学 博士(工学) 学位申請 研究業績書

堀井 洋一 印

(2018年 7月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者(申請者含む)
本博士論文に関する論文	○“Financial Information Description Language and Visualization / Analysis Tools”, Computer Languages, Systems & Structures 50, 31-52, (2017/6), Youichi Horry ○“Modeling of decision-making process for moving straight using inverse Bayesian inference”, BioSystems 163, 70-81, (2018/1), Youichi Horry, Ai Yoshinari, Yurina Nakamoto, Yukio-Pegio Gunji ○“逆ベイズ推定を用いた意思決定のモデル化”、計測自動制御学会論文誌 Vol.54 No.1 31-38, (2018/1), 堀井洋一、吉成愛、中本百合菜、郡司ペギオ幸夫
講演	○“逆ベイズ推定を用いた意思決定のモデル化”、計測自動制御学会, (2017), 堀井洋一、吉成愛、中本百合菜、郡司ペギオ幸夫 ○“直進歩行を阻む脳:逆ベイズ推定を用いた意思決定のモデル化”、第 11 回内部観測研究会+第 28 回計測自動制御学会 SI 部門共創システム部会研究会 (2017/2), 堀井洋一、吉成愛、中本百合菜、郡司ペギオ幸夫 ○“逆ベイズ推論が決める、勝ち馬に乗るか否か”、第 12 回内部観測研究会+第 29 回計測自動制御学会 SI 部門共創システム部会研究会, (2018/3), 堀井洋一
特許	“事業性分析装置” 特開 2017-111695 (2017/6), 堀井洋一 “事業性評価装置、事業性評価方法及び事業性評価プログラム” 特開 2015-032023 (2015/2), 堀井洋一 “リスクシナリオ分析システム及びリスクシナリオ分析方法” W02013/179338 (2013/12), 堀井洋一

早稲田大学 博士(工学) 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者(申請者含む)
その他の論文	<p>“What the form tells to us (Master thesis)”, Graduate school of Science, Kobe University, (1990/3), Youichi Horry</p> <p>“秋芳洞における石灰華段丘(百枚皿)の形状解析とその成因”, 日本洞窟学会第 15 巻 34-41, (1990/10), 堀井洋一, 下岡広志, 浅山勇介, 森永速男, 庫本 正</p> <p>“Hardness analysis of metallic particles in ordinary chondrites”, NIPR Symposium on Antarctic Meteorites 3, 254-263, (1990/10), Horii, Y.; Fujii, N.; Takeda, H.</p> <p>“Graphical User Interface for MIDI Signal Generation and Sound Synthesis”, International Computer Music Conference ICMC '94, Aarhus, 276-279, (1994/9), Youichi Horry</p> <p>“Tour into the picture: using a spidery mesh interface to make animation from a single image.” Proc. SIGGRAPH '97 (Los Angeles, California, August 3-8,1997), 225-232, (1997/8), Youichi Horry, Ken Anjyo, Kiyoshi Arai</p> <p>“A Passive-style buttonless mobile terminal,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 49, No. 3 530-535, (2003/8), Horry, Y., Nakajima, I., Hoshino, T., Maruyama, Y.</p>
その他の講演	<p>“セル・オートマトンを用いた音楽の認知過程モデル” 計測自動制御学会第19回パターン計測部会研究会, (1992/6), 堀井洋一</p> <p>“任意の視点移動を実現する対話的画像再合成” 情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会, 96-CG-83,pp.37-42, (1996/12), 堀井洋一、新井清志</p> <p>“コンドライトにおける衝撃の影響”,地震学会講演予稿集,1988,2,152-152,地震学会, (1988), 堀井洋一、藤井直之、武田弘</p> <p>“隕石における衝撃の影響(I)”, 地震学会秋期大会予稿集 p152 B66, (1988), 堀井洋一、藤井直之、武田弘</p> <p>“隕石における衝撃の影響-2”, 地震学会講演予稿集,1989,1,280-280, 地震学会, (1989), 堀井洋一、藤井直之、武田弘</p> <p>“Mechanical and Morphological Characterization of Shock Effects in Antarctic Meteorites (2) Hardness & Grain Shape Analysis of Metallic Particles,” Antarctic Meteorites XIV. Papers presented to the 14th Symposium on Antarctic Meteorites, NIPR, Tokyo, 6-8 June 1989, p.78-80, (1989), Horii, Y.; Fujii, N.; Takeda, H.</p> <p>“表象主義以降の認知モデル——聴音の錯覚を例として”, 音楽情報科学研究会 夏のシンポジウム, (1990), 堀井洋一</p>