

令和元年6月8日現在

機関番号：30110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01165

研究課題名(和文) ランダム化比較実験とベイジアンネットワークによる因果推論の論理と哲学に関する研究

研究課題名(英文) Logical and philosophical research on causal inference of randomization design and of Bayesian network analysis

研究代表者

森元 良太 (Ryota, Morimoto)

北海道医療大学・リハビリテーション科学部・准教授

研究者番号：70648500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、因果関係を推定する方法の論理構造の解明、因果概念の哲学的分析、推定法考案者の思想的背景の究明を通じて、科学における因果推論の哲学的意義を明らかにするものである。具体的には、実際の科学における代表的な2つの因果の推定法であるランダム化比較実験とベイジアンネットワークによる統計的因果推論を考察し、以下の3点を明らかにした。(1)両推定法の諸前提と論理構造の共通点と相違点、(2)両推定法における因果概念の意義を明らかにする。(3)両推定法を考案したR. フィッシャーとS. ライトの科学観を明らかにし、両者の思想的背景が両推定法へ及ぼした影響を解き明かした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

因果関係を特定することは科学の目標の1つであり、実際の科学で利用されている因果推定の哲学的意義を明らかにすることは、哲学のみならず科学においても重要な課題である。本研究は、哲学で伝統的におこなわれてきた因果概念の分析の成果を踏まえ、現代科学において利用されている因果推定の方法を具体的に究明するものである。それにより、科学で実際に用いられる因果概念の分析という哲学的成果だけでなく、科学の主要な目標を定めるといふ科学者にとっても有益な成果が期待できる。

研究成果の概要(英文)： This research aims to clarify the meaning of causal inferences in science from philosophical point of view. There are two major causal inferences in statistics; randomization design and Bayesian network analysis. I analyze the logical structures and the concept of causation in these methods. I also investigate how the founders of them, Ronald Fisher and Sewall Wright, thought about science and causation.

The following is the result of my research. In randomization design of experiments, statistical independence which is one of the significant property of randomization excludes confounding variables that cannot be held constant. On the other hand, in Bayesian network analysis, strong ignoability which is a weaker requirement than randomization makes us to estimate causal variables and strong ignoability satisfies when variables are statistical independent.

研究分野：科学哲学

キーワード：科学哲学 統計学の哲学 ランダム化比較実験 ベイジアンネットワーク 因果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

科学の目的の1つに、現象の背後にある因果関係を特定することがある(W. Salmon 1984)。現代の知識の特徴は科学的知識にあり、因果推論の論理構造、哲学的意義、思想的背景を明らかにすることは現代において重要な課題である。

哲学では、「因果とは何か」という形而上学的な問題が古くから論じられる一方で、「因果をどのように推定するのか」という認識論的問題については議論が十分に尽くされていない。しかし、J. パール(2000)による「ベイジアンネットワークによる統計的因果推論」が科学者だけでなく哲学者にも議論を呼び、哲学では因果推定に関する議論が活発化している。ベイジアンネットワークは、グラフ理論によって出来事間の関係を表し、確率論のベイズの定理によってその出来事の生起確率を計算することで、因果関係を推定する統計手法のことである。一方、因果関係の推定法としては、20世紀前半に進化生物学者のR. フィッシャーが考案した「ランダム化による比較実験」という広く用いられる手法があり、これにより得られた結果はエヴィデンス水準の高いものとして信頼されている。ベイジアンネットワークによる統計的因果推論とランダム化比較実験では、同じ「因果」という言葉が用いられているが意味は異なる。因果関係の特定は科学の目的であり、両推定法で想定される因果概念を比較し検討することは、科学の本性を明らかにする上でも必須の課題である。

ベイジアンネットワークについての哲学的な研究は近年進められつつあるのに対し、ランダム化比較実験についての哲学的分析は1980年代から90年代に多少行われた程度で、議論は少ない。それゆえ、哲学の観点から両推定法を比較し因果概念を分析する研究は国内外においてほとんどない。また、ベイジアンネットワークの基礎である「パス解析」という統計手法は、フィッシャーと同じ進化生物学者のS. ライトによって考案されたものであるが、フィッシャーとライトは進化論および科学についての考え方をめぐり激しい論争を繰り広げた。それゆえ、二人の科学観は両者の因果推論や因果概念についての考え方の違いに深くかかわっていることが予想される。このような背景のもと、本研究では、因果関係を推定する方法の論理構造、およびその思想的背景を分析することにより、科学における因果推論の哲学的意義を多角的に解明する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、哲学・論理・歴史の3つの観点から因果推定を分析し、因果概念および科学の本性をめぐる哲学の議論を参照しながら、以下の3点を明らかにすることである。

(1)ランダム化比較実験法とベイジアンネットワークによる統計的因果推論における諸前提、及び因果推定の論理構造を究明したうえで、二つの因果推定法の共通点と相違点を突き止める。

(2)因果概念の分析に関するこれまでの哲学の成果をもとに、ランダム化比較実験法とベイジアンネットワークによる統計的因果推論それぞれにおける因果概念を分析する。とくに、因果概念の分析について近年注目を集めているW. サーモンのマーク伝達説、J. ウッドワードの介入説、P. ダウの保存量説を参考に、二つの因果推論法における因果概念の意味の違いを明らかにする。

(3)ランダム化比較実験法を考案したR. フィッシャーと、ベイジアンネットワークのもとになっているパス解析を考案したS. ライトの科学や因果についての考え方を調べ、その考え方が(1)で明らかにした因果推論の論理構造、及び(2)で明らかにした因果概念に与える影響を解明する。

3. 研究の方法

科学における因果推論の哲学的意義を明らかにするため、以下の研究計画にしたがい、因果関係の推定法の論理構造及びその思想的背景の分析を進めた。

(1)ランダム化比較実験については実験計画法及び統計学に関する文献、ベイジアンネットワークについてはJ. パールの一次文献及び関連文献を精読し、両手法の前提と論理構造を究明した。まず、ランダム化比較実験を解説している「実験計画法」および「統計学」の文献の収集と整理・解析をおこなった。また、フィッシャーの*Statistical Methods for Research Worker* (1926)や*The Design of Experiments* (1935)などの一次文献を精読するとともに、C. ホーソンとP. アーバックの*Scientific Reasoning* (1989)などのランダム化比較実験に対する批判文献を綿密に検討した。これらの資料を検討することにより、ランダム化比較実験の諸前提、及びその諸前提から因果を推定する論理構造を突き止めるとともに、ランダム化比較実験の適用範囲を究明した。

次に、ベイジアンネットワークによる統計的因果推論の概説書であるJ. パールの*Causality* (2000)、及びR. ネアポリタンの*Learning Bayesian Networks* (2004)、B. シブレイの*Cause and Correlation in Biology* (2000)などの関連文献を整理し解析をおこなった。これらの資料を精読することで、ベイジアンネットワークの諸前提、及びその諸前提から因果を推定する論理構造を突き止めた。また、ベイジアンネットワークによる統計的因果推論で前提とされている因果マルコフ条件と呼ばれるものへの批判献など(たとえば、W. Salmon 1984、E. Sober 1988)を綿密に検討し、ベイジアンネットワークの可能性と限界を探った。

(2)因果概念に関する哲学の文献を精読し、そこでの成果を参考することで、ランダム化比

較実験とベイジアンネットワークによる統計的因果推論で想定されている因果概念を分析した。哲学における因果概念の分析成果をまとめるため、E. ソーサ&M. トーリー編の *Causation* (1994) や H. ビービーら編の *The Oxford Handbook of Causation* (2009) などを精読し、哲学における因果概念の研究成果をまとめた。また、科学哲学での因果概念をめぐる議論も整理した。とくに、W. サーマンの *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World* (1984)、J. ウッドワードの *Making Things Happen* (2003)、P. ダウの *Physical Causation* (2000) などの近年注目されている文献を精読し、綿密に検討した。

これらの因果概念をめぐる哲学での研究成果を踏まえ、ランダム化比較実験とベイジアンネットワークによる統計的因果推論で想定されている因果概念を分析した。そのために、科学哲学と確率・統計の哲学に関連する文献を精読した。とくに、N. カートライトの *Hunting Causes and Using Them* (2007)、J. ウィリアムソンの *Bayesian Nets and Causality* (2005)、P. スパーツら編の *Causation, Prediction, and Search* (2000) など関連書籍を綿密に検討し、ランダム化比較実験とベイジアンネットワークによる統計的因果推論における因果概念を分析して、科学における因果推論の哲学的意義を明らかにした。

(3) 2つの因果推定法の土台を構築したフィッシャーとライトの科学観及び思想的背景を探求するため、フィッシャーとライトの一次文献及び関連する歴史文献を精読した。フィッシャーの思想的背景を調査するため、彼の *The Design of Experiments* (1935) や著作集 *The Collected Papers of R. A. Fisher* (1971-1974) などの一次文献、および B. フィッシャーの *R. A. Fisher* (1978) や F. イェーツ & K. マサーの *Ronald Aylmer Fisher* (1963) などの思想史の文献を精読し、フィッシャーの科学観や因果概念を究明した。また、パス解析を考案したライトの思想的背景を調べるため、ライトの論文集 *Evolution and the Genetics of Populations* (1984) や *Evolution* (1986) などの一次文献、及び W. プロバインの *Sewall Wright and Evolutionary Biology* (1986) などの思想史の文献を精読した。さらに、フィッシャーとライトの思想の比較については、M. モリソンの *Unifying Scientific Theories* (2000)、V. スモコビツェイスの *Unifying Biology* (1996)、P. ボウラーの *Evolution* (1984) などの生物学史関連の文献をもとにおこなった。

因果推論の歴史的背景を究明するため、統計学の歴史に関する文献を調査した。とくに、I. ハッキングの *Emergence of Probability* (2006) や *The Taming of Chance* (2006)、S. ステイグラーの *The History of Statistics* (1986)、T. ポーターの *The Rise of Statistical Thinking* (1988) などの歴史文献を詳細に検討した。また、J. カダンら編の *Rethinking the Foundations of Statistics* (1999) や S. バンドパッダエ & M. フォスター編の *Philosophy of Statistics* (2011) などの統計学の哲学関連の文献を精読し、因果推論の哲学的意義を考察した。

4. 研究成果

哲学・論理・歴史の観点から多角的に因果推論を分析し、以下の成果が得られた。

(1) まず、ランダム化比較実験法の論理構造を明らかにするため、P. アーバックによるランダム化比較実験への批判的な議論と、それに対する D. パピノーによる再反論の論点を整理し、また論争で十分に論じられていない点を明らかにした。この分析を通じて、ランダム化が母集団からのランダムな抽出、等確率な抽出、標本分布の不偏性、処置のランダム割付けという複数の意味で理解され、混乱が生じていることを突き止めた。そのうえで、ランダム化は区画へのランダム割付けの意味であることを明らかにしたが、その一方でこれらの概念は必ずしも明確に区別できないことも示した。

次に、ランダム化比較実験法および因果概念に関する文献を精読することで、ランダム化により因果関係を推定する際に、交絡要因を排除しようとする、および統計的独立性を利用していることを明らかにした。また、因果概念が J. ウッドワードの介入説と整合的であることも示した。

(2) ベイジアンネットワークは、グラフ理論によって出来事間の関係を表し、確率論のベイズの定理によってその出来事の生起確率を計算することで、因果関係を推定する統計手法のことである。J. パールの *Causality* (2000)、B. シブレイの *Cause and Correlation in Biology* (2000)、宮川雅巳の『統計的因果推論』(2004) などから、ベイジアンネットワークの諸前提、およびその諸前提から因果を推定する論理構造を明らかにした。ベイジアンネットワークでは、非巡回的有向独立グラフを用いて因果が推定される。因果推定のためには交絡因子による疑似相関を排除する必要があり、そのためにマルコフ性や有向分離を利用して変数間の独立性を判定することを確認した。次に、ベイジアンネットワークにおける因果概念に関して、P. ローゼンバウムの *Observation & Experiment* (2017) などを精読することで、ベイジアンネットワークでは「強い意味での無視可能性」というランダム化よりも弱い要請から因果を推定でき、かつその際に傾向スコアを用いることを示した。強い意味での無視可能性は変数間の独立性が満たされれば成立すること、および傾向スコアはランダム化のような反事実的な量を必要としないことを明らかにした。

(3) フィッシャーの思想的背景を調査するため、彼の一次文献や彼に関する思想史の文献を調査した。それにより、フィッシャーは科学について保守的な態度であることが明らかになった。フィッシャーは、真偽のわからない仮説を採択するような大胆な態度を科学で採るべきではないと考えていた。彼によると、科学の営みは新たな仮説を形成し、それを棄却し続けるも

のである。一方、ライトの思想的背景を究明するため、彼の一次文献や彼に関する思想史の文献を調査した。それにより、ライトが科学ではすべての可能性を考慮し、直接的な因果関係を明らかにすることが理想的な方法と考え、そのための数学的手法を提示したことを明らかにした。だが、ライトの方法は因果関係を特定するというよりも、因果関係を想定したうえでの、因果関係の効果の大きさを測るものであった。また、当時はフィッシャーの実験計画法による因果の究明法が主流であり、ライトのパス解析による因果推論はほとんど無視されたという歴史的背景も明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

森元良太、「擬人主義はまじな科学的研究プログラムか 最節約性と統計的仮説検定に基づく議論」、『哲学』、査読有、142号、2019、269-286。

森元良太、島谷健一郎、「鳥類学における統計学：計算より概念 P 値を出す統計，モデルベースの統計」、『日本鳥学会誌』、依頼有、2018、151-153。

森元良太、「進化論は因果的な理論か」、『哲学年報』、査読有、63号、2017、43-63。

中山直之、田辺尚、山本祐太、北村明子、遠藤晃祥、森元良太、「行動分析学からみたリハビリテーションとQOL」、『リハビリテーションと応用行動分析学』、依頼有、6巻、2016、31-53。

〔学会発表〕(計 13 件)

森元良太、「頻度主義とベイズ主義の処方せん 副作用の説明も忘れずに」、『日本心理学会、招待有、2018。

森元良太、「考え方から入る統計学再入門 科学哲学の視点から」、『リハビリテーションのための応用行動分析学研究会、招待有、2018。

森元良太、「進化生物学から現代統計学へ：科学と科学哲学の関わり」、『日本生物地理学会、招待有、2018。

森元良太、「生物学における認識論的還元を抗して」、『精神医学の哲学研究会、招待有、2018。

森元良太、「統計学におけるコペルニクス革命 集団的思考を禁じるものはなにもない」、『日本生態学会、招待有、2018。

森元良太、「科学哲学からみた統計学の考え方 もしも考え方に重きをおく統計学の解説があったら」、『EZOゼミ、招待有、2018。

森元良太、「統計学に万能薬はない ベイズ？ 検定？ それとも？」、『日本心理学会、招待有、2017。

森元良太、「科学哲学の視点からみた統計解析の考え方」、『日本鳥学会、招待有、2017。

森元良太、「セラピストのための統計学の哲学入門」、『リハビリテーションのための応用行動分析学研究会、招待有、2017。

森元良太、「統計を使うと科学的に何が言えるの 有意性検定と仮説検定の違いを中心に」、『リスク解析のための統計教育に関する研究会、招待有、2017。

森元良太、「進化論の観点から支援ターゲットを再考しよう」、『認知行動療法学会、招待有、2016。

森元良太、「ランダム化比較実験における『ランダム』とは何か」、『生物学基礎論研究会、2016。

森元良太、「セラピストのための科学哲学事始め 統計学の哲学入門」、『リハビリテーションのための応用行動分析学研究会、招待有、2016。

〔図書〕(計 1 件)

森元良太、田中泉史、『生物学の哲学入門』、勁草書房、2016、222。

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。