

# まえがき

本書は、Judea Pearl によって提案された構造的因果モデルの基本的な考え方を解説することを目的として執筆したものである。構造的因果モデル（ときとして、Pearl 流の因果推論とも呼ばれる）は、現在の因果推論研究の基礎理論を支える数理モデル（因果モデル）の一つといえる。構造的因果モデルのなかでも、とりわけベイジアンネットワークに立脚した因果ダイアグラムの理論が、人工知能の分野において精力的に研究されていることはよく知られているところであろう。また、Judea Pearl は人工知能の分野に確率的アプローチを導入したパイオニアでもある。それゆえに、Judea Pearl は、しばしば

“one of the giants in the field of artificial intelligence” (Richard Korf, UCLA 教授; Marlys, 2004)

と称されることがある。このような Judea Pearl に対する評価が誇張されたものではないことは、ベンジャミン・フランクリン・メダル（2008 年）や ACM チューリング賞（2011 年）といった、名だたる国際学術賞を数多く受賞していること、そして 2003 年に ACM/AAAI アレン・ニューウェル賞を受賞した際にも

“his ideas have revolutionized the understanding of causality in statistics, psychology, medicine, and the social sciences”

と評されたことからわかっていただけるであろう。

一方、統計科学の分野ではどうだろうか。おそらくは、構造的因果モデルと双璧をなす因果モデルであり、Donald Rubin によって提案された潜在反応モデル（ときとして、Rubin 流の因果推論とも呼ばれる）になじみがある研究

者や実務家のほうが多いのではないだろうか。実際、Pearl 流の因果推論と比べると、国内外を問わず、Rubin 流の因果推論のフレームワークに基づいて執筆された因果推論の解説記事や書籍（たとえば、岩崎, 2015; 星野, 2009）を目にすることが多いように感じる。このような状況もあって、Rubin 流の因果推論のほうが優れていると考えている研究者や実務家が少なからずいるように思われる。また、読者のなかには、研究集会やセミナーにおいて、Pearl 流の因果推論と Rubin 流の因果推論のどちらが優れているのかが議論されている場面に出会った方もいるであろう。筆者の理解が正しければ、因果推論を運用するという立場においては、両者の流儀から得られる解析結果に差異はない。したがって、このような優劣関係に関する議論はまったく無意味である。一方、哲学的背景や議論の出発点については、2つの流儀の違いを理解しておくことが新たな因果推論技術を開発する手助けとなることがある。

このような状況を踏まえて、本書に書かれている内容の多くは、筆者が今まで行ったチュートリアル・セミナー講演や特別講演、解説論文を大幅に加筆・修正したものである。そのため、筆者が覚えている範囲で恐縮ではあるが、本書にはセミナー等々で参加者からいただいた質問に対する筆者の回答も直接的あるいは間接的な形式で含まれている。また、本書は因果推論に対する筆者の理解を整理する意味での記述や、あえて議論を促すことを意図した記述も含まれている。その意味で、本書が対象とする読者は、因果推論に関心の高い実務家、研究者、学生であり、因果推論の初学者にとっては必ずしも親切的な記述となっていないかもしれない。加えて、Pearl (2009a) “*Causality: Models, Reasoning and Inference*” (黒木訳 (2009) 『統計的因果推論—モデル・推論・推測—』(共立出版))と同様に、本書も推定対象となる因果的尺度とその識別可能性問題を重点的に取り上げ、その統計的推測理論については数理統計学の専門書にゆだねるという立場をとっている。

本書はこのような立場にしたがっていることもあり、本書を読むにあたって必要となる数理的予備知識としては、大学初年度に習う線形代数（行列計算、固有値計算）、多項式方程式の解法、確率統計、古典的な線形回帰分析、実験計画法の基本事項が理解できていれば十分である。ただし、因果推論で用いられる計算方法や概念には独特なものがある。このことを考慮して、因果推論に関する定理や性質の一般的な証明は原著論文に譲ることにして、本

書では、簡単な計算例をとおして理解できるように配慮した。また、Judea Pearlが執筆する一連の書籍や論文には、淡々と書かれている文章のなかに大きな意味をもつもの、我々にとっては重要な記述であるにもかかわらず、そのことを気にせず書かれているものがある。そのことを踏まえて、本書では、数理的な論理や導出法よりも背後にある考え方を説明するのに紙面を割くように心がけた。

本書は8章から構成されている。第1章では因果推論の考え方を概観している。本章では第2章以降で定義する用語が未定義のまま使われているところがあるが、このことが気になる読者は、本章を読み飛ばしていただいてもかまわない。第2章は本書を読むにあたって必要な知識をまとめている。読者にとっては、すでに知っている内容もあるかもしれない。その意味で、本章も読み飛ばしても第3章以降を読むのに大きな影響はないと考えている。第3章は、構造的因果モデルの基本的な考え方と、因果効果の識別可能性問題において大きな役割を果たしているバックドア基準を解説している。第4章と第5章は、有向グラフを用いた因果推論に関する話題として、因果効果の識別可能性問題を取り上げている。第6章は、構造的因果モデルから潜在反応変数がどのように構成されるのかといった疑問に答えることを目的として書かれている。本章を読めば、有向グラフを用いた因果推論の長所をわかっていただけであろう。第7章と第8章は、構造的因果モデルの威力が遺憾なく発揮される話題として、原因の確率、媒介分析とその周辺の話題について概観している。なお、本書の内容は筆者の理解に基づいているため、Judea PearlやDonald Rubinといった因果推論研究者が意図しているものであるかどうかは定かではない。また、因果推論を解説するためには科学哲学的側面と数理科学的側面の両方をフォローしなければならず、最新の因果推論研究についても触れながら、構造的因果モデルを過不足なく解説するのはなかなか難しいものである。構造的因果モデルに関する必要最低限の知識については適切に解説しているつもりであるが、読者のみなさまから忌憚のないコメントをいただくと幸甚である。

本書の執筆は、2014年10月に共立出版の信沢孝一氏から書籍出版に関する打診のメールをいただいたことから始まっている。その当時、ビッグデータ・ブームも相まって、セミナー等で相関関係と因果関係の区別がされていない

講演を聞いたり、データがあれば何でもできると勘違いしている研究者や実務家に出会ったりする機会が増え、言葉にならない危機感をもっていた。また、日本国内においても因果推論に対する関心が高まりつつある一方で、構造的因果モデルに対する理解が不十分な講演やブログを数多くみかけるようになっていた。このようなことが、本書を執筆する決心をしたきっかけとなっている。このタイミングで、本書執筆の機会を与えてくれた信沢氏に心よりお礼申し上げたい。また、本書を執筆するに当たり、早稲田大学の永田靖教授、横浜市立大学の田栗正隆准教授、東京大学の篠崎智大助教、岡山大学の鈴木越治助教、国立環境研究所の林岳彦主任研究員、日本イーライリリーの蔡志紅博士には初稿を通読していただき、多くの助言をいただいた。これらの方々からいただいたコメントはいずれも丁寧でかつ洞察に富んだものであり、本書の執筆だけでなく、これから因果推論の研究を進めていくうえで貴重な財産となるものばかりであった。さらに、UCLA の Judea Pearl には、個人的なメールのやりとりについて、本書へ掲載する許可をいただいた。UCLA での在外研究以来、現在もなお Judea Pearl とその秘書である Kaoru Mulvihill には、研究面や私生活面で気にかけていただいております。恩師の一人ともいえる存在である。加えて、共立出版の菅沼正裕氏には編集という立場からさまざまなアドバイスをいただいただけでなく、ケアレス・ミスも指摘していただいた。そのような菅沼氏の丁寧な編集態度に感心させられた次第である。これらの方々はこの場を借りてお礼申し上げたい。最後に、出版が予定よりも遅れてしまい、関係各者にご迷惑をおかけしたことを心からお詫び申し上げたい。

2017 年 4 月

黒木 学