

統計的因果推論

現象の因果関係の有無や因果効果の強さをデータを用いて実証すること

- 2019 & 2021年ノーベル経済学賞(通称)の関連領域



世界の貧困を改善するための実験的アプローチに関する功績



因果関係の分析への方法論的貢献

統計的因果推論の問題意識

1. 事象間に因果関係はあるのか？
2. 因果効果はどのくらいか？
政策Aは非実施と比べて経済効果が100億円
政策Aは非実施と比べて経済効果が100円

本授業での主眼: 因果効果の測り方の入門レベル紹介

#メモ 経済経営の問題ととても相性が良い。ここ数年、私のゼミ生・大学院生の卒論・修論では統計的因果推論を勉強・利用したいという学生が一気に増えたという印象

数理統計 補助資料 ～統計的因果推論とは？～

2024年度2学期: 月曜1限, 水曜3限
担当教員: 石垣 司

補足: 因果関係の有無について

どのような時に因果関係が存在すると言えるのか？

- [哲学] ヒュームの懐疑論
あらゆる現象の因果関係は人間がそのように認識しているだけだという懐疑を持った時、その懐疑を完全に払拭することはできない
- [物理学] シュレディンガー方程式
量子の物理現象は(波動関数の意味で)確率的に生じる
- [疫学] ヒルの因果性の判定基準
疫学研究で因果関係の有無の判断基準として9つの条件を採用



David Hume
1711-1776



Erwin Schrödinger
1887-1961



Bradford Hill
1897-1991

本授業で扱う因果関係は、日常会話で用いられる程度のゆるい意味での因果関係である

2つの因果推論のアプローチ

統計的因果推論の2大流派

- 反実仮想アプローチ
Donald Rubinが実験研究から観察研究へ拡張
- 構造的因果モデル
Judea Pearl により提唱(ベイジアンネットワークの命名者)



Judea Pearl
1936-



Donald Rubin
1943-



黒木, 構造的因果モデルの基礎, 共立出版, 2017



J. Pearl et al., [訳] 落海, 入門 統計的因果推論, 朝倉書店, 2019

本授業ではRubin流の反実仮想アプローチを紹介

- 理由: 計量経済学で用いられる回帰分析などを道具として利用することが多く、経済学・経営学部の学生と相性がよいため

反実仮想アプローチによる因果効果

処置を受けたときと受けない時の効果の差

- 例: ある薬を飲んだ場合と飲まない場合の病気の改善度の差
- 例: ある政策を実行した場合としなかった場合の経済効果の差
- 例: ある販促活動を行った場合と行わなかった場合の購買量の差



※薬を飲んだときの病気の改善度ではないことに注意

- モチベーションは「薬を飲んだから治った」と「薬を飲まなくても治った」の違い(薬の因果効果)を明らかにしたい

5

因果効果の測定の難しさ

因果推論の根本問題(Holland 1986)

- ある1つの主体に関して、処置を行った場合の結果と処置を行わなかった場合の結果の両方を観測することはできない
- 反実仮想: 事実と反対の事象を想定すること



どうするのか?

- ある1つの主体に関する因果効果の測定はあきらめる
- その代わりに、ある集団に関する因果効果を測定する

6

反実仮想アプローチの数理的表記

因果効果の数理的記述

- y_1 : 処置を行った場合の結果変数(確率変数)
- y_0 : 処置を行わなかった場合の結果変数(確率変数)
- 主体 i ($i = 1, \dots, N$)
- $y_{i,1}$: 主体 i に処置を行った場合に観測できる標本
- $y_{i,0}$: 主体 i に処置を行わなかった場合に観測できる標本
- $y_{i,1}$ と $y_{i,0}$ のどちらかが反実仮想で観測不可能

- 主体 i の因果効果 $y_{i,1} - y_{i,0}$ は測定不可能

Rubinの因果効果(平均処置効果)の定義

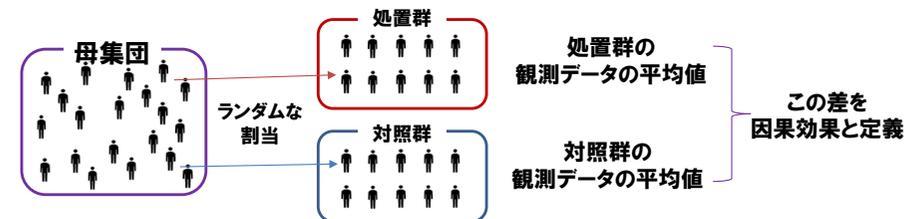
$$E[y_1 - y_0] = E[y_1] - E[y_0]$$

7

実験による因果効果の推定

ランダム化比較試験

- ある集団を、処置を行うグループ(処置群)と処置を行わないグループ(対照群)にランダムに分け、両グループの平均の差を処置を行った場合の因果効果とする
- 実験を行って標本(データ)を取得



- 例: 同じ病気の罹患者を複数名集めて処置群と対照群に分割し、処置群には薬を飲ませて対照群には薬を飲ませないという実験を行い因果効果を測定

#1 処置を介入と呼ぶこともある。また、処置と介入を分けて考える場合もある。本授業では処置で用語を統一。
 #2 医療や製薬ではより厳密なダブルブラインド法(2重盲検法)が利用されることがある

ランダム化比較試験の数理的表記

因果効果の不偏推定量

- z : 割当変数。ある主体が処置群に割り当てられた場合 $z = 1$, 対照群に割り当てられた場合 $z = 0$ となる確率変数

z_i : 観測できる主体 i の割り当て(標本・データ)

N_1, N_0 : それぞれ処置群と対照群に割当られた主体の数

- 割当がランダムの場合の平均処置効果

$$E[y_1 - y_0] = E[y_1|z = 1] - E[y_0|z = 0]$$

条件付き期待値 $E[y|z = 1]$ は、処置群に割り当てられた主体に関する結果変数の期待値という意味

- 平均処置効果の推定量

$$\hat{E}[y_1 - y_0] = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^N z_i y_{i,1} - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^N (1 - z_i) y_{i,0}$$

割り当てがランダムるとき不偏推定量

9

経済・経営分野のランダム化比較試験の実例 #1

ケニアの小学校での教育年数増加のための支援

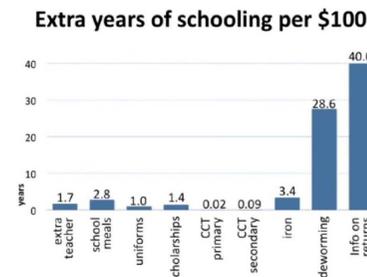
(Miguel & Kremer 2004)

- 不衛生な環境による体調不良が高い欠席率の原因か?
- 75の小学校を3群に分け, 処置群25校/対照群25校に分け, 処置群には虫下し薬を配布(1998~99年の実験)
- 全体傾向として対照群の児童と比べて処置群の児童は少なくとも一人当たり0.14年出席が増加

- その他の施策

(教員増加, 給食, 制服支給, 奨学金, 金銭的支援, 鉄分補給, 教育に対するリターンの説明)

との費用対効果の比較



#1 前頁では単純化のため2群で説明。例えば3群(a,b), (A,b), (a,B)に分けることでaとA, bとBの違いの検証も可能

Miguel & Kremer, Worms: Identifying Impacts on Education and Health in the Presence of Treatment Externalities, Econometrica, 72(1), 159-217, 2004
Duflo, Social experiments to fight poverty, TED, <https://www.globalcitizen.org/en/content/esther-duflo-social-experiments-to-fight-poverty/>

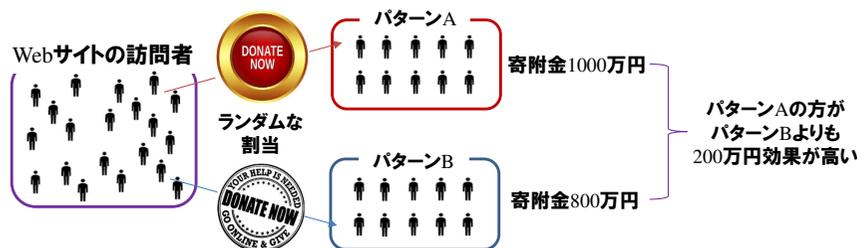
経済・経営分野のランダム化比較試験の実例 #2

A/Bテスト

- Webサイトの訪問者やダイレクトメールの送付者等に対してランダムに異なるパターンの画像やデザインを提示し, それらがクリック率, 購買率, 滞留時間などの結果変数に与える影響を検証する手法

Webサイト上では低コストで実施可能

母集団がWebサイトの訪問者であることに注意



※2008年アメリカ大統領選挙時のオバマ大統領のWebサイトの事例がよく知られているが, 出典はディレクター本人の著書とブログのみのため割愛

世界的潮流~根拠に基づく医療

EBM: Evidence Based Medicine

- 「医師の個人的な経験や慣習などに依存した治療法を排除し, 科学的に検証された最新の研究成果に基づいて医療を実践すること。1990年代に提唱され, 西洋医学の医療において重要視されている」(デジタル大辞泉)

- エビデンスレベルにより根拠の強さを分類

レベル	説明
1a	ランダム化比較試験のメタアナリシス
1b	少なくとも一つのランダム化比較試験
2a	ランダム割付を伴わない同時コントロールを伴うコホート研究
2b	ランダム割付を伴わない過去のコントロールを伴うコホート研究
3	症例対照研究(ケースコントロール, 後ろ向き研究)
4	処置前後の比較の前後比較, 対照群を伴わない研究
5	症例報告, ケースシリーズ
6	専門家個人の意見(専門家委員会報告を含む)



シン & エルンスト, [訳]青木, 代替医療解剖 新潮文庫, 2013

#1 近代以降の医学の発展は, 迷信や偶然的治癒(濁血(しゃけつ)等)との闘いの一面がある。上記の「代替医療解剖」はお勧め 12

世界的潮流～根拠に基づく政策立案

EBPM: Evidence Based Policy Making

- 1990年代の英国が発祥とされる概念
- 2016年 米国 EBPMのための基盤整備法
- 2017年 日本 EBPM推進委員会

EBPMの推進

・「統計改革推進会議 最終取りまとめ」(平成29年5月19日統計改革推進会議決定)等を踏まえ、EBPM(エビデンス・ベースト・ポリシー・メイキング、証拠に基づく政策立案)を推進しています。

EBPM推進委員会等

政府全体でEBPMを推進する体制として、「EBPM推進委員会」を開催しております。
 ※ 令和3年10月～ データ戦略推進ワーキンググループ主官代理決定により開催
 平成29年7月～令和3年8月 官民データ活用推進基本計画実行委員会会長決定により開催

【主な決定事項等】

- ・「EBPMを推進するための人材の確保・育成等に関する方針」(平成30年4月27日)
- ・「統計等データの提供状況の判断のためのガイドライン」(平成30年4月27日)
- ・「課題検討ワーキンググループ取りまとめ」(令和3年6月23日) 概要 本体
- ・「データ活用ワーキンググループ取りまとめ」(令和3年6月23日) 概要 本体

内閣府 政府の行政改革: <https://www.gyokaku.go.jp/ebpm/index.html>

根拠に基づく○○:究極的に知りたいのは因果効果

13

社会科学における因果効果の測定の難しさ

ランダム化比較試験は実験(ランダムな割り当て)が必要

経済学・経営学で得られるデータの多くは観察データであり、ランダムな割り当てができない

- 観察データ: 社会や人間のありようを反映したランダム割り当てされていない非実験データ
- 本質的理由(例:日本のマクロ経済指標), 倫理的理由(例:小学校教育の有無), 社会的理由(例:被災者義援金の分配), コスト面などからランダムな割り当てができない場合がある
- 人間の行動を対象とする場合, 割り当てをすることで調査対象者の行動が変化してしまう場合がある(ホーソン効果, ピグマリオン効果など)

非ランダム割り当てでは, p.9 の推定量は不偏推定量とはならない

14

Rubinの因果モデル

反実仮定の観測不可能な変数(潜在的な結果変数: Potential outcomes)を統計的欠損値の問題として定式化した

観察データのように割り当てがランダムではない場合でも, 主体の共変量調整により因果効果を推定可能な枠組みを提供

お勧めの入門書&参考書



15

演習問題

割当てがランダムの場合の平均処置効果は

$$E[y_1 - y_0] = E[y_1] - E[y_0] \\ = E[y_1 | z = 1] - E[y_0 | z = 0]$$

となることを示しなさい。また, 割当てがランダムではないときに, 上式が成り立たない理由も答えなさい。

ヒント:

- 上式が成り立つためには $P(y_1 | z) = P(y_1)$ が成り立つ必要がある

16