

The importance of decision making in causal learning from interventions

DAVID M. SOBEL, TAMAR KUSHNIR

Memory&Cognition (2007) Vol.34(2), Pp.411-419

INTRODUCTION

- 因果関係の重要性
 - 因果関係は、将来の成果を予測し、過去の出来事を説明し、情報を分類することを可能にする (Gopnik&Meltzoff, 1997; Murphy&Medin, 1985; Sperber, Premack&Premack, 1995; Wellman&Gelman, 1992)。
- 因果関係はどのように学習されるのか？
 - 事象間の相関関係は、因果関係を知る良い指標になり得る反面、因果関係を特定するには不十分である (Bacon, 1620)。→ 他の指標に頼らなければならない。
 - ◇ 相関関係から因果関係をどの程度推測できるかについて (Tenenbaum et. al., 2003)。
 - 因果関係の学習の多くは、介入活動 (intervention) によって成される。
 - ◇ 介入活動は、学習者に以下の二点を与える。
 - 条件付き確率情報 (conditional probability information)
 - 定義: 変数 X に介入したら、変数 Y が変化する確立についての情報
 - 因果関係の特定, 説明において重要 (Pearl, 2000; Woodward, 2003)
 - 時間的情報 (temporal information) ←本実験では扱わない
 - 定義: 原因に対する介入が、結果に及ぼす影響についての情報
 - 介入された変数は、後続あるいは同時発生する事象の原因とみなされるべき (Lagnado & Sloman, 2004)
 - ◇ 人間は、自分あるいは他者が故意に行った操作を介入活動とみなすことで、観測された素のデータからよりも、効率よく学ぶことができる (Gopnik et. al., 2004 他)。
- 介入活動に関する先行研究
 - ◇ 比較的単純な (2, 3 要因の) 因果関係に対して、介入活動がどのような影響を及ぼすかについて焦点が当てられてきた。
 - But 実生活では、さらに多くの要因を持つ複雑な因果関係ネットワークが当たり前
 - 学習者自らが要因に介入できる場合は、介入することで因果関係の理解が促進されるかもしれない
 - ◇ 介入活動から因果関係を学ぶためには、まず「何に介入するか」を決定する必要がある。
 - 介入活動は、学習者に (特定の) 意思決定を要求する
 - この要求に応えられたら、因果関係の理解に近づける？
 - 「実験をして得たデータと、観察から得たデータ (両方とも同じデータとする) を用いた場合、前者を利用した群の方が因果関係の理解が深かった」という趣旨の研究は新しくない (Larish & Anderson, 1995; Gibson, 1979)

Experiment 1

- 目的

- 介入活動の有無が、条件付き確率に対する意思決定能力に影響を与えるかどうかを検討すること。

- Method

- **Participants:** 学部生 34 人（男女比はほぼ半々）。謝金として\$7 を与えた。
- **Materials:** 19inch モニタ&デスクトップ PC (DELL Dimension 9100)
- **Procedure:**

1. 実験内容文の提示

“サイエンス博士の研究所には、彼が作ったゲームがたくさんあります。各ゲームには、赤・白・青・黄の4色のライトがあり、各ライトには、0個、1個、または多くのセンサが取り付けられています。各センサは、赤色光・青色光・白色光・黄色光のいずれかに敏感であり、対応している色の光を感知すると、各センサに接続されているライトを点灯させます。たとえば、黄色のセンサに赤色のライトが接続されている場合は、黄色のライトが点灯するたびに赤色のライトも点灯します。しかし、これは光速で起こるため、目視では赤と黄色のライトが一緒に作動したように見えるだけです。また、ライトにセンサが取り付けられていない可能性もあります。時にサイエンス博士は、ライトをどのように配線するか非常に注意しています。しかしある時には、不注意によって、センサをライトに取り付けていなかったりもします。”

2. 参加者を2群にわける

- 学習者自身が要因（と思ったもの）に介入することができる「自己介入群」と、介入活動群の各人と1:1でペアになっていて、その介入活動を観察するだけの「介入観察群」に振り分けた（参加者の奇数番号を介入活動群に、偶数番号を観察群とした）。つまり、両群ともに、得られる情報量は同じで、ただ介入活動の有無だけが異なる。

→ 介入活動の有無が、意思決定に影響を与えるかを測る

3. Training Phase

- 両群とも、指示文を読んだ後、介入または観察を開始する前に、バケツの使用についてのトレーニングを受けた。モニタには、3つのライト（緑、紫、灰色）と3つのボタンが表示された。各ボタンは、ライトのいずれか1つを起動させた。彼らは、サイエンス博士がライトとセンサを全て繋げていたことを伝えられた。
- 参加者には、介入によって、灰色のライトが紫のライトを、紫のライトが緑のライトを点灯させることがわかったが、灰色のライトが緑のライトを点灯させる直接の原因であるかどうかを知ることができなかったことが伝えられ、どうすればそれを知ることが出来るかを問われた。

その結果、彼らは、バケツを紫のライトに繋がっているセンサに被せ、灰色のライトを点灯させることによって、灰色が緑色の直接的原因であるのか、紫のライトを介した間接的原因であるのかを区別できることを示した。この介入は、灰色が緑色を引き起こさなかったことを示した。従って、彼らは直接的なリンクが存在しないことを明らかにした。

4. Test Phase and Question

- ✓ 両群ともに、モニタに4つのボタンと4つのライト(色はランダム)が表示される。その後、サイエンス博士は各ボタンをライトに配線したことを知らせた。
- ✓ それぞれの因果関係を理解することが目的であることを伝え、考えるヒントとして図1を提示した(図1の因果構造は全て Test Phase で出題された)。
- ✓ また、センサは80%の確立でしか起動せず、その場合は接続先のライトも点灯しないことを伝えた。
- ✓ 各参加者に提示されるライトをセンサの因果関係は、図1のA~Dのうちからランダムにひとつ選ばれた。どのモデルも被験者数は同じだった。
- ✓ メモを取り、質問に答える際に参照することは認めた。
- ✓ どの介入がどのような結果を喚起したかという事実は、繰り返し見ることができた
→ これを「データ参照」と呼ぶ

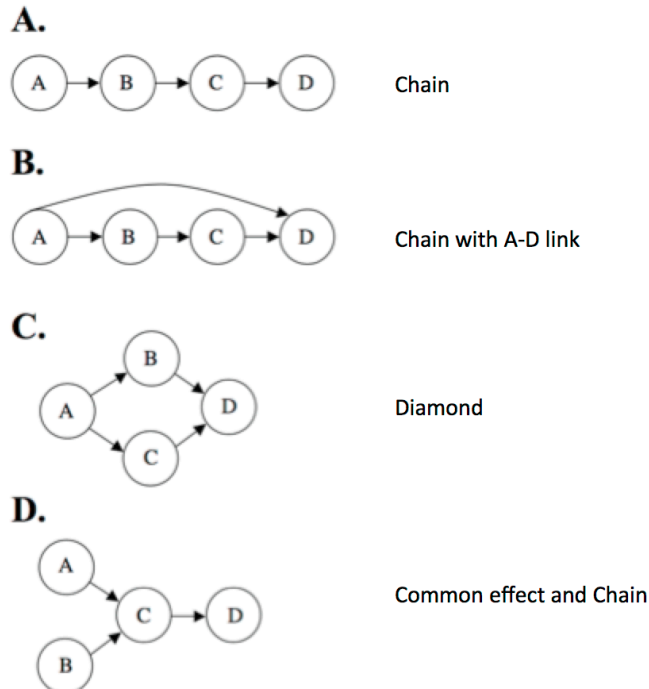


図1

- 自己介入群
 - 学習中は、自分のペースで、自分が望む回数だけボタンを押して、その結果を観察させた。ボタンを押すと、対応するライトの光が0.5秒間画面に現れた。

- また、サイエンス博士がライト（およびそのセンサ）の上に置くことができる黒いバケツを与えて、光を排除するよう要求した。その後、自己介入群は、ボタンに加え、バケツの位置も自由に決めることができるようになる。
- 自己介入群は、ライトとセンサの関係性を確信できるまで、ボタンを押したり、バケツを操作したりするように指示された。ただ、最低 25 回ライトをオンにしなければならない。

- 介入観察群

- 介入観察群は、モニタに表示された博士のアイコンが、ボタンを押してライトを点灯させたり、バケツを動かしたりするのを見て、その因果関係を考えるよう指示された。
- 博士のアイコンがボタンまで移動し、押すのを見た。また、アイコンは比較的ゆっくり移動し、特定のボタンに到達するまでに約3~5秒かかった。この時間のおかげで、実際に介入を観察する前に、何を意図した介入なのかを参加者が読み取ることができた。

- ✓ Question

- 参加者がモデルの因果構造を学ぶのに十分な数の介入を行った（または同じデータを観察した）後、彼らは因果構造の質問に応えた。
参加者は、どの色ライトと、どのセンサとが結びついていてるかについて尋ねられた。つまり、どの色のライトが、（センサを介して）どの色のライトを誘発するかについて問われた。
- 12個の因果構造の質問（Yes/Noで答えられるもの）をランダムに提示
 - ◇ ex) 「ライトXにセンサYが繋がっていましたか？」
 - また、質問を解釈する際の潜在的な誤りを排除するために、それぞれの質問には付随質問がなされた（ex: 「別の言い方をすれば、ライトXとライトYがあった場合、ライトXが点灯すれば、ライトYも点灯するだろうか？」）
- このようなYes/Noクエスチョンに答えた後、0から100までのスケールで回答の信頼度を評価してもらった。0は完全な憶測で、100は確信を持って答えたものとする。

- Results

- 1 問正解する毎に 1 点、不正解を 0 点とし、その合計を求めた（max 12 点、表 1）。
- 自己介入群の 54%、介入観察群の 29%が満点だった。
- 4（因果構造モデル）* 2（自己介入群/介入観察群）の 2 要因分散分析
 - ◇ 全モデルにおいて、自己介入群の方が介入観察群よりも平均点が高かった。（全モデルとも 5%水準で有意）

- ◇ モデルによる平均点の差は見られなかった。相互作用も見られなかった。
 - 介入の有無が平均点に影響を与えた？
- ◇ Chain を除く 3 つのモデルにおいて、満点に相応する点数を取った参加者の割合は 53% : 18% で、前者（自己介入群）の方が高かった ($\chi^2(1, N=34)=4.64, p<.05$)。

Table 1
Accuracy on the Causal Structure Questions and Percentages of
the Learners Who Responded Correctly (%C)
on All 12 Questions in Experiment 1

Model	Condition					
	Self-Intervention			Observation of Intervention		
	Accuracy			Accuracy		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	%C	<i>M</i>	<i>SD</i>	%C
Chain	11.18	1.29	59	9.88	2.23	35
Diamond	11.06	0.75	24	9.47	2.50	24
Chain with A→D link	11.06	1.20	53	9.35	2.85	24
Common effect and chain	11.65	0.86	82	9.18	3.38	35

Note—Accuracy responses are out of a maximum of 12.

表 1

- 因果構造の特定において重要データ参照と正答率の相関
 - ◇ 重要データ参照の数は、因果構造の質問の正答率と相関しなかった。
 - ◇ 重要データ参照の割合も、両群からのデータが組み合わせられたときの因果構造の質問に対する正答率と相関しなかった。
 - 一方で、自己介入群の正答率のみを参照した場合、3 モデル(Chain [$r(17)=.470, p<.05$], Common effect and Chain [$r(17)=.782, p=.05$], Chain with an A→D link [$r(17)=.774, p<.05$])において相関が見られた。
 - しかし、介入観察群のそれとの相関は一切見られなかった。
- Summary
 - 以上の結果が出たが、条件間の正答率の差を断言するには、いくつか問題がある
 - ◇ 行動の有無が、解答の精度に影響を与えているのではないか？
 - ◇ 介入群の方が、観察群より有効な介入を発見した。このことこそが、介入群と観察群の違いなのではないか？
 - これらを踏まえて、実験 2 では、サイエンス博士に指示された通りに介入を行う「強制介入群」を設け、実験を行うこととした。
 - ◇ なお、博士によって指示される介入には、有効な介入が含まれている。
 - ◇ Experiment1 の介入観察群と同様、扱うデータは自己介入群の誰かが行ったもの。

Experiment2

● 目的

- 行動の有無が、因果関係の把握に影響を与えているかどうかを検討すること。
- ✧ 意思決定を伴う介入と、指示された介入を行うだけとでは、差が見られるのか？
- ✧ Experiment1 で観察された自己介入と介入観察の間の差異が、行動の有無によって得られる「重要な介入の気付き」や「因果理解の動機付け」だった場合、正答率は2条件間で変わるべきではない。

● Method

- Participants: 学部生 48 人（男女比はほぼ半々）。謝金として\$7 を与えた。
- Materials: Experiment1 と同じ
- Procedure: Experiment1 と同じ

● Results

- 自己介入群の 49%、強制介入群の 20%が満点だった。
- 4 (因果構造モデル) * 2 (自己介入群/強制介入群) の 2 要因分散分析
 - ✧ 自己介入群は、強制介入群と比べてより高い正答率を示した。
 - ただ行動を行うだけでなく、意思決定の有無が因果関係の把握に影響している
 - ✧ モデル間の交互作用、主効果はともに見られなかった。
 - ✧ 4 つのうち 3 つのモデルにおいて、満点に相応する点数を取った参加者の割合は 46% : 13%で、前者（自己介入群）の方が高かった($\chi^2(1, N=47)=4.65, p<.05$)。
 - ✧ 各群を個別に検討したところ、自己介入条件において、Chain with A→D link モデルの問題に対する重要な介入の発見率と正答率の間に正相関が見られた [$r(24)=.633, p<.01$].
 - 他の 3 モデルにおいて、こういった相関関係は見られなかった。
 - また、強制介入群においては、どのモデルの場合も相関が見られなかった。

● Summary

- 実験 1, 2 では、どのような介入が因果関係の学習において有益な影響を与えるかを示唆したが、どのようにそうしているかについては触れていない。このことに言及するために、考えるべきことは以下の 2 点である。
 - ✧ 自己介入群が、納得するまで観察することができていたこと
 - 実験 1 と実験 2 の両方において、正答率と介入の総数との間に相関はなかった。
 - ✧ 介入毎にこれまでのデータを参照し、検討することができたこと
 - これによって、自己介入群は、いくつかの介入が他の介入よりも有益であると判断していた可能性がある。

Experiment3

- 目的

- 推論の順序に適ったデータ参照が、次の介入箇所の判断、ひいては因果関係の把握を促進させているのではないか？

- Method

- Participants: 学部生 24 人（男女比はほぼ半々）。謝金として\$7 を与えた。
- Materials: Experiment1 と同じ
- Procedure: Experiment1 をベースにした（以下変更点）

- ◇ 今回は、群分けせず、全参加者がサイエンス博士による介入を観察した。

- ◇ 観察は、構造化された条件およびスクランブルされた条件の下で行われた。

- 構造化条件: 介入は特定の順番で提示される。実験 1 の結果から、介入群が主に取っていた順番を参考にした。

- スクランブル条件: 介入はランダムな順番で提示される。

- ◇ 流れ:

最初に、サイエンス博士は 8 回ライトをそれぞれ点灯させた。続いて、博士は 40 回介入した。この介入は、因果関係を把握するのに重要かつ十分な数であった。

- ex) Chain モデルの場合、ライト B をバケツで覆い、ライト A を点灯した。その後、同様に、Light C をカバーし、Light B を点灯した。

- スクランブル条件では、参加者は同じ 40 の介入を観察したが、提示順序はランダム。

- ◇ Training phase を省き、バケツの役割は文章で示した。

- ◇ Chain モデル（図 1A）と Common effect and Chain モデル（図 1D）の因果構造を持つ課題が与えられ、各因果関係を推測するように求められた。

- Results

- 参加者内の分散分析を行った結果、構造化条件とスクランブル条件において差は見られなかった（表 2）。

**Accuracy on the Causal Structure Questions and Percentages
of the Learners Who Responded Correctly (%C)
on All 12 Questions in Experiment 3**

Model	Condition					
	Structured Interventions			Scrambled Interventions		
	Accuracy			Accuracy		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	%C	<i>M</i>	<i>SD</i>	%C
Chain	11.54	1.22	83	11.25	1.26	67
Common effect and chain	11.79	0.59	88	11.13	1.23	54

Note—Accuracy responses are out of a maximum of 12.

表 2

- モデル別に考慮すると、Common effect and Chain モデルにおいては、構造化条件の方がより正確に推測できていた[t(23)=2.80, p<.01]。Chain モデルにおいても、有意差は見られなかったものの、同様の傾向があった[t(23)=1.66, p<.11]。
- 構造化条件の 85%，スクランブル条件の 60%が満点だった。

General Discussion

- なぜ介入は学習や推論の役に立つか？
 - どの変数に介入するかを決定することは、介入と成果の関係を把握し、因果構造の推論に重要となるデータをきちんと認識する機会を与えるから
 - ◇ 実験 1 では、介入を行う群と観察のみ行う群とを比較した結果、同じ情報量にも関わらず、介入を行った人たちのほうが、より高い正答率を示した。
- 参照データの順序による効果
 - 介入の有無だけではなく、観察したデータの曖昧さを解消するために、どのデータを観察する必要があるのかを認識し、そのデータを観察することができれば、因果関係の把握が促進されることを示唆している。
- 本研究の限界
 - 条件付き確率に限った推論についての研究だったこと
 - ◇ 幼い子供でさえ、結果（事象）に先行する潜在的な原因が存在することを認識している（Bullock, Gelman&Baillargeon, 1982）。このような時間的情報は、因果関係を把握する上で明らかに大きな役割を果たす（Lagnado&Sloman, 2004; White, 2000）。
 - イベントが自発的に起こらないものだったこと
 - ◇ Sobel (2005) は、本研究と同様の環境を用いて、学習者が自らの介入の影響を観察した。その際、自発的に起こる現象を観察できる環境に変換していた。このパラダイムにおいて、同様の自己介入群の正答率は、現在のデータと比較して大きな低下を示さなかった。