

## Inferring Hidden Causal Structure

Tamar Kushnir, Alison Gopnik, Chris Lucas, Laura Schulz

*Cognitive Science*, 2010, Vol.34, Pp.148–160

### 1. Introduction

- 人間の日常的な理論は、観察されなかった（できなかった）原因について推論する能力に依存している（Gelman&Wellman, 1991; Gopnik&Meltzoff, 1997; Murphy&Medin, 1985）が、観察された事象から観察できない事象をどのように知ることができるのか？
- 因果メカニズム（causal mechanism）や因果律の原理によって、観察できない原因を知ることができる（Gelman&Wellman, 1991; Schulz&Sommerville, 2006）が、大抵の場合、そこから得られる知識は不完全である。
- 従来、因果関係の把握や学習に関する研究は、観察された原因間関係に限定されてきた（Gopnik et al, 2001, 2004; Lagnado&Sloman, 2004,2006; Steyvers et al, 2003）。しかし、これらの研究では、観察された変数に関連する可能性のある因果構造の中から選択させた上、観察できない原因がないことが明示されている。つまり、選択肢を与えられない上、隠れた因果構造を明らかにできるかどうかはまだわかっていない（Kushnir, Gopnik, Schulz&Danks, 2003）。
- 本研究では、観察できない因果構造について自発的な推論を行うことができるかどうかについて考える。
  - 先行研究と同じ点: 事象に対して、変数同士の因果を繋ぐ線をどのように書くのかを調べた。
  - 先行研究と異なる点: 変数は最初から設定されておらず、何を変数として置くかは参加者に委ねられた。
- 仮説: 参加者は、自発的に隠れた因果関係を推論する（実験1）。さらに、参加者が元々描くことができる可能性のある因果構造（実験2）および、特定の物理的因果メカニズム（実験3）の知識とは無関係に、隠れた因果構造について推論できる。

### 2. Experiment1

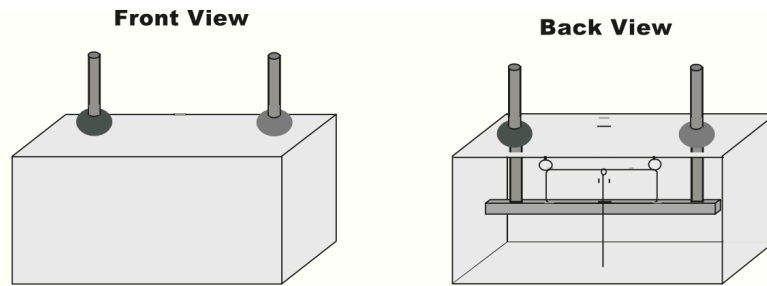
→ 隠れた（直接観測できない）因果関係に対する推論を行うかどうか。

因果構造を選択式ではなく、描画してもらおう形でも、先行研究と同様の結果が得られるかどうか。

#### 2.1. Method

- **Participants:** 46人の学部生。11~12人で構成される4グループに分割。
- **Materials:** スティックボールマシン（図1。以降「マシン」）
  - 真ん中の縦紐を引っ張ることで両棒を一度に動かすことができ、上から棒を上下することで片方ずつ棒を動かすことができる。

- 参加者は正面からしか見ることができず、内部構造についての説明は受けなかった。その状態で、以下3つのいずれかの原因を予想する



(図1)

- ◇ 一方のスティックが他方のスティックを動かす
- ◇ 両方のスティックが独立して動く
- ◇ 両方のスティックを一緒に動かす
- 関連 (association) 試行において、実験者が棒を（一緒に、あるいは別々に）後ろから上下に動かし、参加者は2本の棒の動きの間関係性を観察・推測した。このとき、1つの要因で片方(中央の四角柱から棒を取り外すことが可能)ないしは両方の棒が動く。
- 介入 (intervention) 試行において、実験者が1本の棒を手が見える形で動かし、参加者はそれが他の棒にどのような影響を与えるかを観察した。このとき、片方の棒のみが動く。

## ● Procedure

- トレーニングフェーズ

変数同士の因果を繋ぐ線をどのように書くのかを調べるために、以下の5つの例を用いて因果（以下「因果関係図」）を描画するトレーニングを行った。

- ◇ ドミノ A がドミノ B を倒した（図2で例示）。
- ◇ ドミノ B がドミノ A を倒した。
- ◇ ドミノ C がドミノ A・B を倒した。
- ◇ ドミノ C がドミノ A を、ドミノ D がドミノ B を倒した。
- ◇ デーブルの上にあるドミノ X が自然と床に落ちた。



図2

最後の例「デーブルの上にあるドミノが自然と1つ床に落ちた。」では、“hidden cause”を意味するⓐが原因として用いられた。

➤ テストフェーズ

- ◇ 実験者は2人。ひとりがタスクを参加者に説明し、実験で介入（外側からの操作）を行った。もうひとりマシンを内側から操作した。内容は以下 Familiarization を用いた。

● Familiarization

「棒 A を動かすと棒 B も連動して動く」という結論が、両棒が4回一緒に動き、介入なしで2回単独で動いたときに推測された。Griffiths et al (2004) によると、マシン上のこの動きのパターンは、75%の確率で参加者にその因果関係を予想させた。このことから、人間の因果推論は決定論的ではなく、統計的に導かれていると言える。

➤ One observed-cause condition

- ◇ 実験者は棒 A を6回操作した。そのうち4回は、ABの両棒が動いた。残りの2回はAを動かし、Bは動かなかった。このとき、Aに対する操作時、AとBは連動して動く判断された。学習者は、AがBを引き起こすと結論づけるべきである。

➤ Common unobserved-cause condition

- ◇ 関連試行では、両棒は4回一緒に動いた。その後、実験者はAに2回介入し、結果として、BはAが原因で動かなかった。また、実験者はBに2回介入し、同様にAはBが原因で動かなかった。したがって、AとBは関連試行の段階では強く相関していたが、介入試行後では独立していた。したがって学習者は、AとBの隠れた共通原因の存在を推測すべきである。

➤ Independent unobserved-causes condition

- ◇ 関連試行では、棒は別々に2回、一緒に1回動いた。実験者はAに2回介入し、BはAが原因で動かなかった。その後、実験者はBに2回介入し、同様にAはBが原因で動かなかった。しかし、関連試行におけるAとBの相関は弱かった。学習者は、AとBの独立した原因があると結論づけるべきである。

➤ Pointing control condition

- ◇ 関連試行では、両棒は4回一緒に動いた。その後、Aを2回単独で動かし、指差し(Pointing)を行った。同様のことをBにも行った。指差しは、棒を動かした後に行った。この条件は、隠れた原因でのパフォーマンスのための2つの潜在的な代替仮説、すなわち連想学習と顕著性を除外するために含まれていた。このようなジェスチャーの効果は大きくなり、棒が独立して動き、それに追従して指差しが行われた場合でも、参加者は根本的な因果構造の理解が曖昧なままであると推測できる。

- 各試行後参加者は因果構造に対応するグラフを描くように指示された。


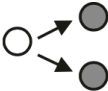
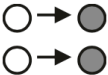
- Coding

- 応答は、(1) 一つの原因、(2) 隠れた共通原因、(3) 隠れた独立した原因、(4) その他のいずれかに分類された。回答の 80% は 1, 2, 3 のどれかである。残りの 20% は、複数の構造（横に並んでいるか、同じグラフに重なっている、6%）、あるいは循環的・結合的・または共通原因を含むと解釈される可能性（6.5%）、または他の点で不明であった（7.6%）。
- コーディングは、第一著者と、本研究の質問と試行のオーダーを知らない人の 2 人によって行われ、98% の回答に同意が見られた。また、隠れた共通原因の対応について 100% 合意していた。

## 2.2. Results and discussion

- すべての参加者が、トレーニングフェーズで正しい因果関係図を描いた。さらに、テストフェーズでは、応答は、与えられた因果構造の選択肢（Kushnir et al, 2003）の中から選ぶように参加者に求めたものと一致していた。  
→したがって、因果関係図の描画は、将来の研究における因果推論を評価する有望な方法であると言える。
- Table 1 は、各条件における各タイプの因果関係図を描いた参加者の割合を示している。始めの 3 条件における最多回答は、最も可能性の高い関係図となった。観察された原因の 1 つの状態では、71.7% が正しい 1 つのケースの構造を描いた。共通の観察されない原因の状態では、58.7% が隠れた共通原因グラフを描いた。独立した観察されない原因条件では、52.2% が独立原因グラフを描いた。

Table 1  
Percentage of responses in each of the test conditions in Experiment 1

Graph Drawn	Condition			
	One Observed	Common Unobserved	Independent Unobserved	Pointing Control
	71.7 <sup>a</sup>	4.3	0	6.5
	6.5	58.7	28.3	39.1
	8.7	17.4	52.2	26.1
Other	13	19.6	19.6	28.3

- 参加者間比較は、McNemar 検定（変化率に関する両側二項検定）を用いて行ったところ、すべてのテストは 0.001 で有意だった。参加者が増えるにつれて、条件 1（One Observed）では 1 つの原因グラフが描画されたが、条件 2（31 対 0）または条件 3（33 対 0）は発生しなかった。さらに、条件 2 でも、条件 1（24 対 0）や条件 3（16 対 2）ではなく、隠れた共通原因グラフが描画されました。最後に、より多くの参加者が条件 3 では独立原因グラフを描画したが、条件 1（20 対 0）または条件 2（16 対 0）は描画しなかった。

- **Pointing control condition** (条件 4) では、参加者は正しい因果構造について正しく知ることはできないままだと予測した。結果として、参加者は、1つの原因グラフ (6.5%) を選択する可能性は低かった。共通原因と独立原因応答には差がなかった。

### 3. Experiment2

- **Experiment1** では、参加者に最小限のトレーニングを行ったが、そのフィードバックを全く与えないままテストに取り組んでもらった。
- しかし、トレーニングを受けた参加者であっても、**Pointing control condition** において、共通原因と独立原因を見出す人がいた。これは、潜在的にそういった反応を支持するよう参加者に偏っている可能性がある。そこで **Experiment2** では、この可能性を排除するために異なる因果関係図で参加者をトレーニングした。

#### 3.1. Method

- **Participants:** 44 人の学部生。11 人で構成される 4 グループに分割。
- **Materials:** **Experiment1** と同様。
- **Procedure:**


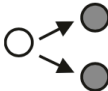
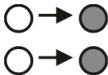
トレーニングは、共通の原因と独立した原因の因果関係図の描画を行った。

➤ 共通の効果：ドミノ A と B がドミノ C を倒した。

➤ チェーン：ドミノ C はドミノ A を倒し、ドミノ A はドミノ B を倒した。

描画された図は、**Experiment1** で使用した基準によってコード化した。トレーニングフェーズでのエラーは見られなかった。テストフェーズでは、図の 86% は 1, 2, 3 のいずれかにコード化された。

Table 2  
Percentage of responses in each of the test conditions in Experiment 2

Graph Drawn	Condition			
	One Observed	Common Unobserved	Independent Unobserved	Pointing Control
	88.6 <sup>a</sup>	9.1	6.8	20.5
	0	47.7	29.5	29.5
	0	25.0	50.0	27.3
Other	11.4 <sup>b</sup>	18.2	13.6	22.7

#### 3.2. Results and discussion

- 条件 4 と条件 2, 3 の間の因果構造の比較は、実験 1 と同じ結果を示した。条件 2 (11 対 3;  $p < 0.05$ ) で隠れた原因グラフを描いた参加者が増えた。ポインティングコントロールよりも条件 3 (12

対 2,  $p < .01$ ) で独立した原因グラフを描いた。したがって、参加者は、適切な関連と介入を含んでいたときにのみ構造を正しく推論した。

#### 4. Experiment3

- Experiment2 の結果は、参加者がデータから正しい構造を推定するだけでなく、構造そのものの仮説を生成できることを示唆している。
- 一方で、スティックボールマシンという物理的な制約を持つ Material が、参加者が元々身につけている因果構造についての推論を引き起こしている可能性もある (Griffiths et al, 2004)。
- この可能性を調べるために、Experiment2 を、電子的制約による因果メカニズムを使用して再度行った。なお、電子的なメカニズムに関する直感は、物理的なものに関するそれよりも複雑であるとされる (Koslowski, 1996)。

##### 4.1. Method

- Participants: Experiment2 の 44 人+学部生 11 人 (うちトレーニングフェーズでミスをした学生 1 人を除いて 10 人) の、計 54 人を 4 グループに分けて行った。
- Materials:  
2 台ある箱の上には、それぞれオレンジ色のパネルが設置されており、電源をオンにするとパネルが点灯し、短いメロディが流れる仕組みになっている。  
関連試行では、片方または両方の装置が、1つの隠しスイッチによって起動する。一方で、介入試行では、それぞれのオレンジ色のパネルを押してひとつずつ同時に起動させるか、片方だけ起動させるかのどちらかである。

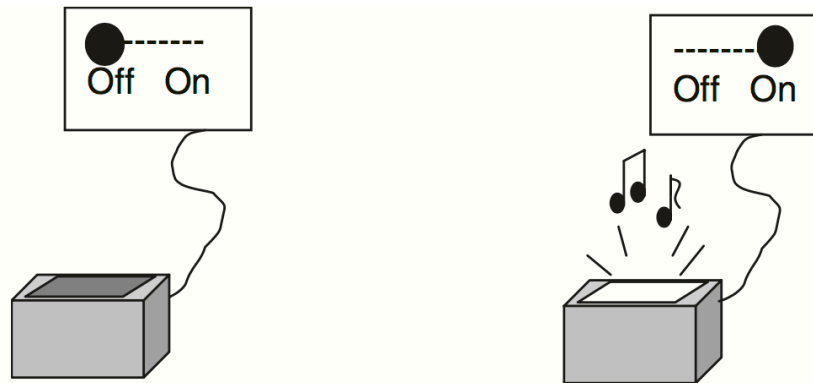

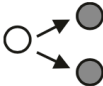
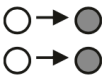


Fig. 2. A drawing of the electrical devices used in Experiment 3 (switches were hidden from view).

- Procedure:  
参加者は、Experiment2 の過程を一通り体験した後、本実験に取り掛かった。
- Results and discussion
  - 全体的に、本実験の結果は、Experiment1, 2 と似た結果となった (Table 3 参照)。
  - Common Unobserved (隠れた共通原因) においては参加者の 48.1% が、Independent Unobserved (隠れた独立原因) においては 33.3% が正しく描画することができた。
  - 予想どおり、実験 3 では、実験 2 ではわずか 16% (実験 1 では 20% のみ) しか見られな

かった「その他」としてコード化された応答がわずかに多くなった（実験3では31%）。これは、電子デバイスが因果構造のより複雑な仮説を引き起こすという予測と一致した。しかし、実験間のこういった違いにもかかわらず、参加者の大多数は、各条件において自発的に適切な構造を生成する証拠を使用した。

Table 3  
Percentage of responses in each of the test conditions in Experiment 3

Graph Drawn	Condition			
	One Observed	Common Unobserved	Independent Unobserved	Pointing Control
	63 <sup>a</sup>	13	11.1	25.9
	7.4	48.1	24.1	24.1
	5.6	7.4	33.3	13
Other	24	31.5	31.5	37

## 5. General discussion

- 因果関係の理解を確かめるために、原因の明示や選択式の因果構造を提示することなく、最小限の訓練をしさえすれば、隠れ変数を含む因果グラフを自発的に描くことができることを示した。
- 3つの実験すべてにおいて、参加者は、介入の下で関連が保持されていないことを観察したとき、隠れた共通原因を含む適切なグラフを描いた。さらに、参加者は観察された関連なし（条件3）の介入の同じパターンを観察したとき、独立した原因を正確に推測することができた。
- 従来の研究では、人間の因果推論は因果構造の知識に大きく依存していることが示されてきた（Ahn et al, 1995; Koslowski, 1996）が、この研究では、人々が同じ証拠パターンから隠された共通原因を正しく推論できることを示している。