

# 因果構造の学習における課題の複雑性と判断方略の変化 —観察と介入に関する実験的検討—

## Strategy Changes as a Function of Task Complexity in Causal Structure Learning: Observations and Interventions

齋藤元幸<sup>†</sup>, 嶋崎恒雄<sup>‡</sup>  
Motoyuki Saito, Tsuneo Shimazaki

<sup>†</sup> 関西学院大学文学研究科, <sup>‡</sup> 関西学院大学文学部  
Graduate School of Humanities, Kwansai Gakuin University, School of Humanities, Kwansai Gakuin University  
m-saito@kwansai.ac.jp

### Abstract

Saito and Shimazaki (in prep.) demonstrated that people emphasized covariation rather than temporal order as a cue to causal structure, whereas Lagnado and Sloman (2006) showed the opposite results that temporal order overrode covariation. The authors proposed the interpretation that these conflicting findings resulted from task complexity, since covariation becomes more complicated as the number of variables increases. Experiment 1 investigated the relationship between the judgment strategy (i.e., covariation vs. temporal order) and the number of variables comprising a causal structure. The results revealed that the tendency to emphasize covariation cues or to rely upon temporal order cues changes as a function of task complexity. In Experiment 2, where participants learned a causal structure by active interventions, the results show that participants consistently preferred covariation cues. The differences between observation and intervention are discussed.

**Keywords** — Causal Learning, Causal Structure, Covariation, Temporal Order, Intervention

### 1. 序論

因果の知識は事象の予測や制御に必要不可欠であるが、複雑に絡み合った事象の中から因果関係を見つけ出すことは容易ではない。因果構造を学習する際の手がかりとして、共変動や時間順序が挙げられる。共変動 (covariation) とは事象の共変関係のことであり、2値2事象の場合は2×2の分割表を用いて表現される。時間順序 (temporal order) とは学習者が事象の状態を観察する順序であり、原因は結果に先行することから有力な手がかりとして機能することもあるが、結果事象を先に観察する場合には誤

った因果関係を導くこともある。例えば、事象Xが事象Yを発生させている事態 (i.e.,  $X \rightarrow Y$ ) において事象Yの生起を観察してから事象Xの生起を観察した場合、事象Yが事象Xに影響したという正反対の因果関係 (i.e.,  $X \leftarrow Y$ ) が示唆される。

これらの手がかりは、隠れた原因が存在しない状況においてより有益なものとなる。事象Xと事象Yが共変関係にある場合、3種類の因果構造が想定される (i.e.,  $X \rightarrow Y$ ,  $X \leftarrow Y$ , or  $X \leftarrow Z \rightarrow Y$ )。隠れた原因が存在しないのであれば、事象Xと事象Yが共通原因Zによって発生しているという可能性は排除される。

この事態において事象Xが単独で生起している場合、原因が無い時に結果は存在し得ないことから、事象Xが事象Yを発生させているという因果構造 (i.e.,  $X \rightarrow Y$ ) が推測される。

Lagnado and Sloman (2006) は、事象Aが事象Bを発生させ、事象Bが事象Cと事象Dを発生させている事態 (i.e.,  $A \rightarrow B \rightarrow C \ \& \ D$ ) において、実験参加者に実際の因果関係とは異なる順序 (e.g.,  $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B$ ) でそれらの状態を観察させ、共変動手がかりと時間順序手がかりのどちらに基づいて因果構造を判断するか検討した。実験の結果、実験参加者は時間順序手がかりが当てにならないと教示されていたにも関わらず、4事象で構成される因果構造を時間順序手がかりに基づいて判断していた。同様の傾向は共変動手がかりから因果構造を推測する方法を教示に明示したWhite (2006) においても確認されている。一方、Saito and Shimazaki (in

prep.) は、2事象から成る因果構造の判断において、時間順序手がかりよりも共変動手がかりが優先されることを報告している。

これらの相反する知見は課題の複雑性の観点から解釈可能である。因果構造を構成する事象の数やそれらを結びつけるパスの数の増加に伴って共変動情報は複雑になり、そこから因果関係を見出すことは困難になる。Lagnado and Sloman (2006) では4事象の因果構造が、White (2006) では5事象の因果構造が、Saito and Shimazaki (in prep.) では2事象の因果構造が用いられており、事象の数によって判断方略が変化したと考えられる。そこで本研究では、課題の複雑性の一つとして因果構造を構成する事象の数に着目し、課題の複雑性によって判断方略に変化が見られるか否か検討を行った。

## 2. 実験1

### 2.1 方法

**実験参加者および実験計画** 大学生24名が実験に参加した。実験は実験参加者内計画で行われ、参加者は出現する事象の数が異なる3つの課題 (i.e., 3事象, 4事象, 5事象) を遂行した。

**実験課題** 実験課題は教示、学習フェイズ、テストフェイズによって構成されていた。教示では、微生物の研究者になったつもりで、一種類の微生物が入られた容器において他の微生物の発生の有無を観察し、数種類の微生物の間どのような因果関係が存在するか考えるよう求めた。因果関係の判断を可能にするために、実験参加者には以下の情報が与えられた。(i) ある生物が他の生物を発生させる場合でも必ず発生させるとは限らない。(ii) 生物以外の他の原因によって生物が発生することはない。(iii) 生物が発生しているか否かは順番に判明する。ただし、生物の状態 (生起もしくは非生起) を観察する時間順序と因果の方向性が一致するとは限らない。

学習フェイズは、一つの容器における生物の有無を観察するのを1試行として全40試行で構成されて

いた。試行はディスプレイ上に表示された「NEXT」というボタンをクリックすることで開始され、複数の生物に「？」と書かれた状態が表示され、1秒ごとに生物の状態が表示された。共変動と時間順序のどちらの手がかりを重視しているか査定するために、生物の状態を観察する時間順序と実際の因果関係は異なったものになっていた (Figure 1)。全ての生物の状態が判明してから1秒経過後、最初の画面に移行した。

テストフェイズでは、複数の生物が描かれた図に因果関係があると思う場合は原因から結果に対して矢印を描くように指示した。結果の分析には、手がかりと一致する回答の数を手がかりが示唆する矢印の数で割り、手がかりの使用率を算出した。例えば、3事象条件において事象Aが事象Bと事象Cを発生させていると回答した場合、共変動手がかりと時間順序手がかりの使用率は共に50%となる。

### 2.2 結果および考察

Figure 2に各条件における共変動手がかりと時間順序手がかりの使用率を示す。手がかり (共変動 vs. 時間順序) × 事象の数 (3事象 vs. 4事象 vs. 5事象) の二要因分散分析の結果、事象の数の主効果 ( $F(2, 46) = 9.31, p < .001$ ) および手がかりと事象の数の交互作用 ( $F(2, 46) = 9.66, p < .001$ ) が有意であった。単純主効果の検定を行ったところ、3事象条件では共変動手がかりが優先される傾向が見られたのに対して ( $F(1, 69) = 3.36, p < .10$ )、5事象条件では

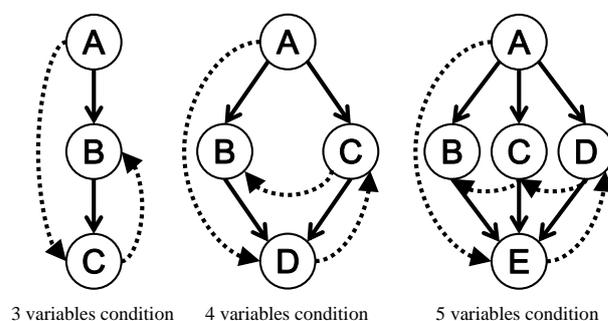


Figure 1: Causal structures in Experiment 1. Continuous lines represent causal relations, whereas dotted lines indicate temporal orders. Causes produce their effects at 80 percent.

時間順序手がかりが優先されることが明らかとなった ( $F(1, 69) = 7.94, p < .01$ ). これらの結果は課題の複雑性によって判断方略が異なることを示唆している。

### 3. 実験2

因果構造を学習する主要な方法として、観察 (observation) と介入 (intervention) という二つの方法が存在する。観察とは変数の自動的な振る舞いを観測することであり、介入とは変数に対して何らかの操作を加えることである (cf. Pearl, 2000)。観察によって因果構造を学習するよりも、介入による学習の方が因果構造を正しく学習できることは多くの研究によって示されてきた (e.g., Lagnado & Sloman, 2004; Sobel & Kushnir, 2006; Steyvers, Tenenbaum, Wagenmaker, & Blum, 2003)。

実験1では、観察によって因果構造を学習する場合に課題の複雑性に依って判断方略が変化することが示されたが、介入による学習事態において課題の複雑性がどのような効果を持つかは明らかにされていない。そこで実験2では、因果構造の学習方法を観察から介入へと変更し、介入による学習における課題の複雑性と判断方略の関係を検討した。

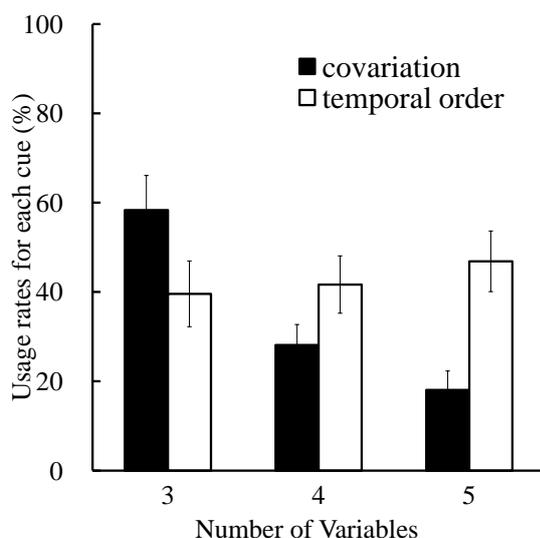


Figure 2: Usage rates for covariation cues and temporal order cues in Experiment 1. Error bars reflect standard errors.

### 3.1 方法

**実験参加者および実験計画** 大学生24名が実験に参加した。実験1と同様に、実験は実験参加者内計画で行われ、参加者は出現する事象の数が異なる3つの課題 (i.e., 3事象, 4事象, 5事象) を遂行した。

**実験課題** 実験課題は実験1とほぼ同様であったが、因果構造の学習方法が異なっていた。学習フェイズにおいて、実験参加者には容器の中に入れる微生物を毎試行選択することが求められた。選択後に「NEXT」と書かれたボタンをクリックすると、実際の因果関係とは異なる順序で生物の状態が表示された。テストフェイズは実験1と同様であった。

### 3.2 結果および考察

Figure 3に各条件における共変動手がかりと時間順序手がかりの使用率を示す。手がかり (共変動 vs. 時間順序) × 事象の数 (3事象 vs. 4事象 vs. 5事象) の二要因分散分析の結果、手がかりの主効果 ( $F(1, 23) = 11.06, p < .001$ ) および事象の数の主効果 ( $F(2, 46) = 7.39, p < .01$ ) が有意であり、手がかりと事象の数の交互作用が有意傾向であった ( $F(2, 46) = 3.11, p < .10$ )。観察による学習とは異なり、介入による学習では課題の複雑性によって判断方略が共変動手がかりから時間順序手がかりへと変化するこ

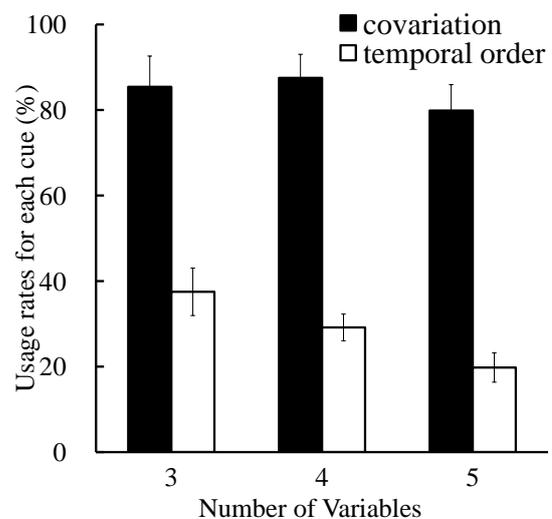


Figure 3: Usage rates for covariation cues and temporal order cues in Experiment 2. Error bars reflect standard errors.

はなかった。なお、事象の数の増加に伴って時間順序手がかりの使用率が低下している傾向が見られたが、これは多くの実験参加者が最初の原因事象から最終的な結果事象に対してリンクを引いており、時間順序手がかりが示唆する総リンク数が条件間で異なることに由来するものであった。

#### 4. 総合論議

本研究では因果構造の学習における課題の複雑性と判断方略の関係について検討を行った。実験の結果、観察による学習では事象の数が少ない場合には共変動手がかりを、事象の数が多き場合には時間順序手がかりを重視することが明らかとなった(実験1)。これらの知見は時間順序手がかりに基づく判断を報告している Lagnado and Sloman (2006) や White (2006) だけでなく、共変動手がかりに基づく判断を報告している Saito and Shimazaki (in prep.) とも一致しており、相反する二つの知見に対して統一的な見解をもたらすものである。また、介入による学習では課題の複雑性の変化に伴う判断方略の変化は見られなかった(実験2)。

観察による学習(実験1)と介入による学習(実験2)で違いが見られたことは、両者のメカニズムが異なっていることを示唆している。因果構造の学習における観察と介入の相違点に関して以下の二点が考えられる。第一に、共変動手がかりの変化が挙げられる。観察とは異なり、介入を行った際には共変動手がかりはより有益なものとなる(e.g., Steyvers et al., 2003)。例えば、事象Xと事象Yの共変関係によって3種類の因果構造(i.e.,  $X \rightarrow Y$ ,  $X \leftarrow Y$ , or  $X \leftarrow Z \rightarrow Y$ )が示唆される事態において、事象Xを操作して事象Yに影響がなければ、事象Xが事象Yに影響するという因果関係(i.e.,  $X \rightarrow Y$ )は排除される。介入によって共変動手がかりがより有益になり、その使用が促進されたと考えられる。第二に、時間順序手がかりの信頼性が挙げられる。事象の状態を観察して因果構造を学習している場合には時間順序手

がかりが実際の因果関係と一致しているか否か判断することは困難であるが、介入を行う場合には時間順序手がかりが有効であるか否か検証することができる。時間順序手がかりが有効でないことに気付いた結果、時間順序手がかりの使用率が低くなったと思われる。介入による因果構造の学習の促進はこれらの差異に由来すると考えられる。

因果構造の学習に関する既存のモデルでは観察と介入の違いは十分考慮されていないが、本研究の結果はこれらを区別して考える必要性を示している。観察による因果構造の学習と介入による因果構造の学習の両者を包括的に説明するモデルの構築が求められる。また、モデリングを通してどのように事象を操作することが最適であるか、実験参加者の介入対象の選択は最適であるか検討することも望まれる。

#### 参考文献

- Lagnado, D. A., & Sloman, S. A. (2004). The advantage of timely intervention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **30**, 856-876.
- Lagnado, D. A., & Sloman, S. A. (2006). Time as a guide to cause. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **32**, 451-460.
- Pearl, J. (2000). *Causality: Models, reasoning and inference*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Saito, M., & Shimazaki, T. (in prep.). *Rethinking the use of covariation in causal structure learning*.
- Sobel, D. M. & Kushnir, T. (2006). The importance of decision making in causal learning from interventions. *Memory & Cognition*, **34**, 411-419.
- Steyvers, M., Tenenbaum, J. B., Wagenmakers, E. J., & Blum, B. (2003). Inferring causal networks from observations and interventions. *Cognitive Science*, **27**, 453-489.
- White, P. A. (2006). How well is causal structure inferred from cooccurrence information? *European Journal of Cognitive Psychology*, **18**, 454-480.