

Evidence for abstract, schematic knowledge of three spatial diagram representations

Novick, L. R., Hurley, S. M. and Francis, M.
Memory & Cognition, 1999, 27 (2), 288-308

◆ はじめに

➤ **Diagrams as Tools for Thinking**

- ◇ 多くの先行研究において教科書の中に略図を使用することは学習に効果があると認められてきた
(e.g., Hegarty & Just, 1993; Levin, 1989; Mayer & Gallini, 1990; Sweller, Chandler, Tierney, & Cooper, 1990)
- ◇ 問題解決においても略図は重要な役割を果たす
 - 生物学における減数分裂の問題解決(Kindfield, 1993/1994)
 - エキスパートのほうが, より問題の本質に焦点を当てた略図を描いた
 - 思考のためのツールとしてよりよくチューニングしている

➤ **Spatial Diagram Representations**

- ◇ 略図の有用性についての近年の研究は遺伝学や幾何学という狭い分野を対象としてきた(e.g., Kindfield 1993/1994; Koedinger & Anderson, 1990)
- ◇ 一般的な目的における略図の使用やそれに対する人々の知識に関する研究はほとんどない
 - 本研究では広く様々な文脈に適応できる, 3つの空間的な略図に焦点を当てる
 - 階層図 (hierarchy)
 - 行列 (matrix)
 - ネットワーク (network)
- ◇ また, これらの略図は分析的な推論を含む様な様々な問題解決に有効である (Butler, 1993)
- ◇ 空間的な略図に関する人々の知識や使用を理解することは, 心理学者にとって重要である
 - 非言語的な表現は日常的な場面でも形式的な領域でも偏在する (Barwise and Etchemendy, 1991)
 - 空間的な略図表現は, 表面上は異なって見える問題間の構造的な共通点に光を当てる(Novick, 1990; Novick & Hmelo, 1994)
 - ← 問題構造の理解が熟達化の重要なファクターである(e.g., Chi, Feltovich, & Glaser, 1981; Schoenfeld & Herrmann, 1982)
 - 空間的な略図表現は学習と問題解決を促進する
 1. 複雑な状況を単純化し, 不必要な情報を省いて表現するから (see. e.g., Lynch, 1990; Winn, 1989)
 2. 抽象的な概念を, なじみ深いものの中にマッピングすることによってより具体的に示すから (e.g., Winn, 1989)
 3. 計算的な探索過程や文章の演繹的推論の代わりに, 視覚的な推論を用いるから (Barwise & Etchemendy, 1991; Larkin & Simon, 1987)
 - その他にも学習と問題解決に略図が有効であるという先行研究は多い (e.g., Bartram, 1980; Carroll, Thomas, & Malhotra, 1980; Day, 1988; Guri-Rozenblit, 1988; McGuinness, 1986; Novick & Hmelo, 1994; S. H. Schwartz, 1971).

➤ **The Nature of Solvers' Spatial Diagram Knowledge**

- ◇ このように略図表現の有用性がよく知られているにもかかわらず, 問題解決者

の知識についてはほとんど知られていない

◇ 初期の先行研究

- 演繹的な問題解決において成績が良かったのは、どのような表象を生成した解決者か (S. H. Schwartz, 1971)
 - 行列表現 > ネットワーク表現 = 文章表現
- 問題の手がかりとしての情報をどのように変化させるか (S. H. Schwartz and Fattaleh, 1972)
 - 文章表現, ネットワーク表現 → 行列表現 : 45%
 - 行列表現 → その他 : 17%

◇ 略図表現に適した状況に関する知識

- 過去の成功例の転移(Novick, 1990; Novick & Hmelo, 1994).
- それぞれの表現に関する抽象的なスキーマ (Koedinger and Anderson, 1990)
 - 行列表現の使用に関するスキーマ
 1. 2つの異なる組がある
 2. それらはまとめることはできない
 3. すべての可能な組み合わせを考えなければならない
 4. 項目間のつながりは方向性を持たないものである

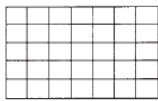
➤ **Representations With and Without Canonical Spatial Embodiments**

- ◇ 規範的な例が一意に存在するかどうか
 - 3つの空間的略図は一意に決定する (Figure 1 参照)
 - それ以外の表現 (Figure 2 参照)
- ◇ 本研究では Figure 1 に加えて、表象の転移に関する先行研究(Novick & Hmelo, 1994)で扱った 部分 - 全体図も実験で使用する
- ◇ 部分 - 全体図は Figure 2 の上の2つのように一貫したスキーマがない (Francis, 1995)

A hierarchy or branching structure



A matrix with rows and columns



A network or system of paths



Figure 1. Representation category probes used in Experiments 1–3 for the three spatial diagram representations.

Wholes divided into parts

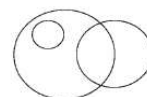
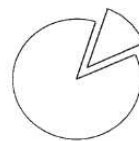
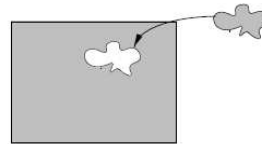


Figure 2. Alternative representation category probes for the part–whole representation. The final probe was used in Experiments 1 and 2.

➤ Overview of the Present Research

- ◇ 3つの空間的な略図の適用状況に関する知識についての性質を検討するために、後述する *selection task* を用いた
 - 課題：12-15の短い文章問題に最も適した表現をそれぞれ選ぶ
 - 情報の種類を操作し、略図の適用の助けになる情報はどれかを検討
 1. 空間的な略図に関して持っている一般的な知識か (Experiments 1-3)
 2. 実験者が提供した詳細な例題か (Experiments 1 and 3)
 3. 上記二つの両方か (Experiment 1)
- ◇ もし、実験参加者が3つの空間的な略図表現に関する抽象的なスキーマを持っているならば、提供された例によらずに、それぞれの状況に適した表現を正確に選択するだろう
- ◇ 反対に、もし抽象的なスキーマを持っていないならば、逆の結果となるだろう
- ◇ 実験1 では、大学生は3つの空間的な略図についてのスキーマを持っていることが示唆された。
- ◇ 実験2,3 においては、実験1の結果についての疑いについて検討した
 - 実験3 において実験1 とは異なる手続きを用いても、略図についてのスキーマが確かめられた

◆ EXPERIMENT 1

➤ Method

- ◇ **Subjects.** 60名の大学生を、3つの条件に20名ずつランダムに配置
- ◇ **Selection task.**
 - 15の文章題に最も適した略図表現を4つの候補の中から選ぶ
 - 4つの表現それぞれについて、3つの問題が最適な構造 (Appendix A 参照)
 - それ以外の3題は4つの表現に適さない
 - 実験参加者は理解を助けるのに最適だと思う表現を選択する
 - どれも適さないと思うときは「該当なし」を選択
 - 確信度を評定(1 _ *not at all sure*; 4 _ *very sure*)
 - 回答時間：各問題につき、1分45秒
 - 15題をランダム順に冊子にしたものを4種類
 - 慣れるために最初に練習問題 2種 (正答は「該当なし」)

◇ Design.

- 実験条件
 - **general category 条件**
 - ◇ それぞれのタイプの表現について持っている一般的な知識に片っ端からアクセスするのを助ける課題を与えられる
 - ◇ それぞれ4つの表現について出来るだけ多くの例を考える課題 (各5分)
 - **specific example 条件**
 - ◇ 各表現の使用について特定の詳細な例題を与えられる
 - 階層表現：ファンタジーゲームの主人公のレベル (Appendix B)
 - 行列表現：女の子のシャツとズボンの組み合わせの確率
 - ネットワーク表現：橋でつながっている小島を行き来するルートを考える (1つの橋を通るのは1回だけ)
 - 部分 - 全体表現：石を持っている子供と貝を持っている子供について、片方しかもっていない子どもと両方持っている子

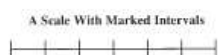
供の数について

- category + examples 条件
 - ◇ 上記二つを両方行う
 - ◇ 先に general category 課題, そのあと specific example 課題

◇ Procedure.

- 2-6名の小グループで実施
- 最大 90 分と教示
- category + example 条件以外は時間調整のため, 先にフィラー課題を実施
 - アナグラム課題
- 先に条件ごとの課題を行い, それから全条件とも選択課題を行う
- 「問題解決や理解を助けるための様々な表現に興味があります. それぞれの問題についてどれが最も理解の助けになるか選んでください」
 - 表現のタイプとは (Figure 3a 参照)
 - そのほかの例 (Figure 3b 参照)
- 回答用紙の選択肢の表現は条件ごとに異なる
 - general category 条件
 - ◇ 表現のカテゴリ名から選ぶ
 - specific example 条件
 - ◇ 例題の名前から選ぶ
 - fantasy game example, clothing example, islands example, rock and shell example
 - category + examples 条件
 - ◇ カテゴリ名と例題名の両方

(a) Labeled diagram for the example representation:



(b) Applications given for the example representation:

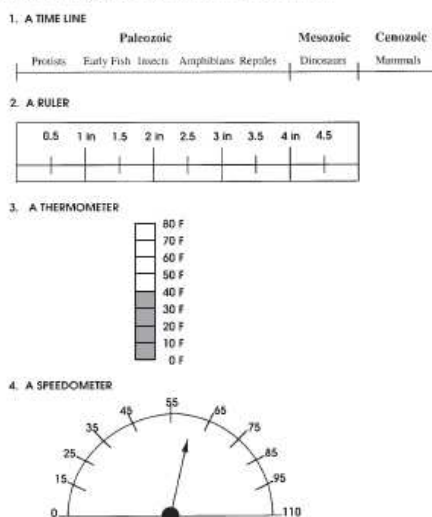


Figure 3. The labeled diagram (a) and applications (b) for the example representation used in Experiments 1-3.

➤ Predictions

- ◇ 本実験の目的は標準的な学生が, 空間的な略図表現についての一般的な知識を持っているのか, それとも利用可能な例を適用しているだけなのかを検討すること

- ◇ 例の適用仮説
 - 予想1: general category 条件の選択課題の成績は悪く, チャンスレベルに近いだろう
 - 予想2: specific example 条件の成績は, general category 条件よりもいいだろう
- ◇ 一般的な知識 (スキーマ) 仮説
 - 予想1: general category 条件の成績はチャンスレベルより高くなるだろう
 - 予想2: general category 条件の成績は, specific example 条件よりもいいだろう
 - 文脈に依存した知識よりより抽象的な概念のほうが別の問題に適用させやすい (schema-based transfer vs. example-based transfer; Holyoak, 1985)
 - 予想3: general category 条件の成績は天井よりは低いだろう
 - 知識の性質から
 - schema-based なら, 一貫したスキーマがないと思われる nonspatial (部分 - 全体図) と spatial (3つの略図) の間に交互作用が検出されるだろう

➤ **Results**

◇ **Absolute level of performance on the selection task.**

- それぞれの条件の成績をチャンスレベルと, 最大値とで比較 (Table 1 参照)
- どの条件もチャンスよりはよく, 最大値よりは悪かった

Table 1
Observed Performance on the Selection Task in Each Condition of Experiment 1
Compared to Chance Expectation and to Maximum Performance

Type of Representation*	Proportion Correct	Comparison to Chance†	Comparison to Maximum
Specific example			
Spatial	.36	$t(19) = 6.06, p < .001$	$t(19) = -24.03, p < .001$
Nonspatial	.56	$t(19) = 9.25, p < .001$	$t(19) = -11.40, p < .001$
General category			
Spatial	.58	$t(19) = 9.73, p < .001$	$t(19) = -10.58, p < .001$
Nonspatial	.50	$t(19) = 7.16, p < .001$	$t(19) = -11.94, p < .001$
Category + Examples			
Spatial	.61	$t(19) = 15.74, p < .001$	$t(19) = -14.89, p < .001$
Nonspatial	.61	$t(19) = 10.54, p < .001$	$t(19) = -10.11, p < .001$

*Spatial refers to hierarchy, matrix, and network, whereas nonspatial refers to part- whole and none of the above.

†Chance performance is .20 correct.

◇ **Selection task performance as a function of condition and type of representation.**

- 識別得点を算出
 - 正答率 ($x/3$) - 誤答率 ($y/12$)
 - 完全に識別: 1, チャンスレベル: 0
 - spatial 表現とnonspatial 表現をそれぞれまとめて条件ごとに平均を算出
 - 全条件の平均: .42.

- 3 (condition) × 2 (type of representation) の混合分散分析
 - 条件の主効果有意 [$F(2,57) = 8.68, MSe = 0.0430, p < .001$]
 - 表現の主効果有意傾向 [$F(1,57) = 3.40, MSe = 0.0237, p < .08$]
 - 交互作用有意 [$F(2,57) = 8.81, p < .001$] (Figure 4 参照)

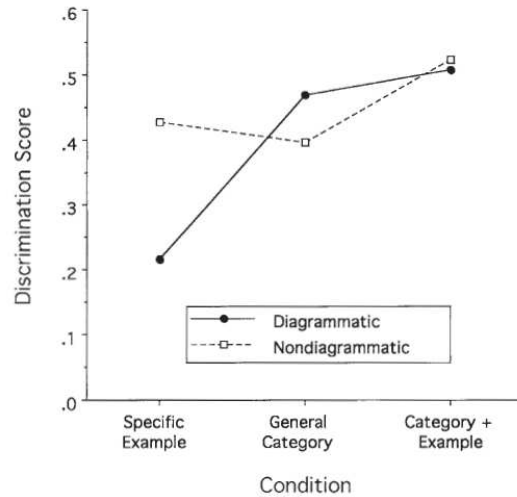
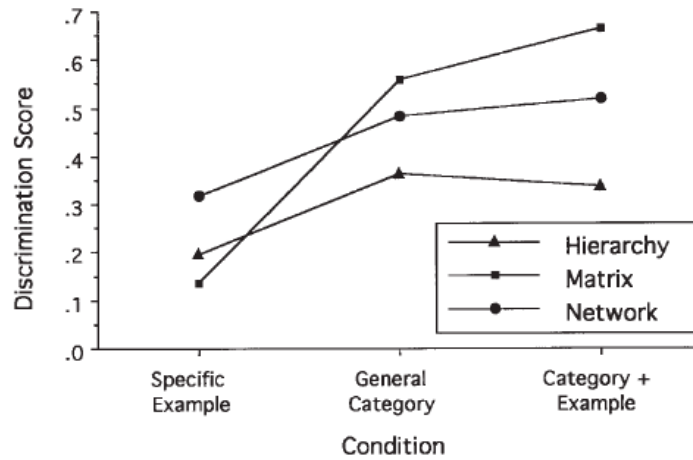


Figure 4. Mean discrimination scores for spatial and nonspatial representations as a function of experimental condition in Experiment 1.

- ◇ 条件間比較を表現の種類ごとに行った
 - general category 条件 vs. specific example 条件
 - spatial 表現 : general category 条件 > specific example 条件 [$F(1,57) = 23.31, MSe = 0.0271, p < .001$]
 - nonspatial 表現 : 有意差なし [$F(1,57) < 1, MSe = 0.0395$]
- ◇ category + examples 条件 vs. その他2条件
 - spatial 表現 : category + examples 条件 > その他2条件 [$F(1,57) = 13.10, p < .001$]
 - nonspatial 表現 : category + examples 条件 > その他2条件 [$F(1,57) = 4.19, p < .05$]
 - これは general category に example の知識が加わったから
 ← category + examples 条件 vs. general category 条件 : 有意差なし [$F(1,38) < 1, MSe = 0.0285$]
- Figure 5 は表現のタイプごとのグラフ

(a) Spatial Representations:



(b) Nonspatial Representations:

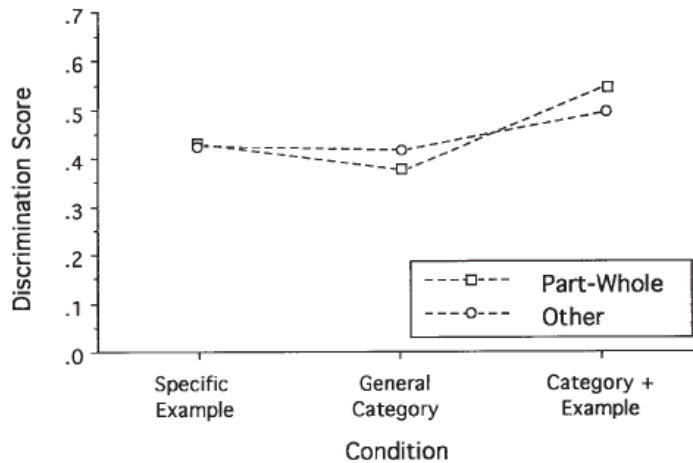


Figure 5. Mean discrimination scores for each type of representation as a function of experimental condition in Experiment 1. The results for the spatial representations are shown in (a), and the results for the nonspatial representations are shown in (b).

◇ Performance on the example problems.

- specific example 条件の成績が悪かったのは例が理解できていなかったからではないか
- 以下を0/1尺度で分析 (部分点 0.5 点)
 - (1) 例の図表が完成できていたか
 - (2) 問題に正答していたか
- 行列表現, ネットワーク表現, 部分 - 全体表現について分析
 - 階層表現は長いので回答がばらけたため除外
- 結果は Table 2 参照
 - spatial 表現: 実験参加者の 96% が図表を完成, 76% が問題に正答

Table 2
Performance on the Example Problems in Experiments 1 and 3

Representation/Measure	Experiment 1	Experiment 3
Hierarchy		
Representation use	.92	.73
Accuracy	.70	.62
Matrix		
Representation use	.93	1.00
Accuracy	.83	.86
Network		
Representation use	.93	.95
Accuracy	.75	.86
Part-whole		
Representation use	.97	—
Accuracy	.95	—

Note—The part-whole representation was not used in Experiment 3.

➤ **Discussion**

- ◇ 例をたくさん生成することは一般的な図表に関する知識（スキーマ）にアクセスすることに有効であるというわれわれの仮定に基づけば
 - この実験結果は学生は空間的な略図に関する規範的なスキーマを持っているという仮説を支持
 - 特筆すべきは, spatial 表現でのみ general category 条件 > specific example 条件だったこと
- ◇ しかし, その他の解釈の可能性をExperiments 2 と 3 で確かめなければならない
 - たくさんの例を生成することによって, 状況に合わせた表現を帰納的に得ることができたのではないか
 - 抽象的なスキーマに基づく, ということは仮説と合致するが, 「もともと持っていた」というより, 実験中に獲得したということになる
 - しかし, 特に教示していないのに5分以内に抽象化するという事は考えにくい
 - Experiment 3 において, 例を生成する時間を 70% 短縮してこの点を検討する (5分 → 1.5分)
 - Experiment 1 > Experiment 3 ならば, 実験中の学習の効果である
 - general category 条件は特定のタイプの表現と例を結びつける課題を要求されていたので, 成績が良かったのではないか
 - Experimental 3 において純粹 (purer) 知識促進課題を加えてこの点を検討する
 - 実験参加者自らが生成した例に基づいて転移させていたのではないか
 - general category 条件が一番多くの例を持っていた
 - 生成された例の平均
 - ◇ 階層表現 4.55, 行列表現 3.40, ネットワーク表現 4.10, 部分-全体表現 2.35
 - Experimental 2 で検討

◆ **EXPERIMENT 2**

- もし自分で生成した例を転移に利用していたら
 - (1) 適した例を多く生成した実験参加者ほど成績が良い

- (2) 特定のタイプの例を多く生成すれば、そのタイプの成績がよくなる
 ← 棄却するための仮説
- Experiment 2 では全被験者を general category 条件 に配置し、Experiment 1 の general category 条件の結果と比較する
 - **Method**
 - ◇ **Subjects.** 大学生 38 名(17 women and 21 men). 最大2時間15分, 謝金 \$15
 - ◇ **Materials and Procedure.**
 - ほぼ Experiment 1 と同じ
 - 例を生成する時間を5分→4分
 - **Results**
 - ◇ **Example-based reasoning predictions.**
 - 本実験の目的は例生成課題が選択課題の成績を促進するかどうかの検討
 - 生成された例をコーディングし、カウントしなければならない
 - ◇ **Coding the generation data.**
 - 4つの表現をさらに細かく分類
 - 階層表現→7つ, 行列表現→5つ, ネットワーク表現→4つ, 部分 - 全体表現→6つ
 - 2名の著者が独立してコーディン: 相関 .76
 - Table 3 は, 生成された例の数と割合
 - 適していた例: Experiment 1 の 74%, Experiment 2 の 81%

Table 3
Descriptive Data for the Number of Tokens and the Proportion of Types
Generated for Each Representation in Experiment 2 and in the General
Category Condition of Experiment 1

Representation	Number of Tokens				Proportion of Types			
	Experiment 2		Experiment 1		Experiment 2		Experiment 1	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Hierarchy	3.66	1.55	4.55	1.85	.36	.15	.41	.12
Matrix	3.61	1.78	3.40	1.27	.46	.19	.36	.14
Network	3.08	1.60	4.10	2.22	.53	.23	.54	.30
Part-whole	2.08	1.19	2.35	1.50	.18	.12	.19	.08
<i>M</i>	3.11	1.10	3.60	0.92	.38	.11	.38	.12

Note—*N* = 38 for Experiment 2; *N* = 20 for Experiment 1.

- ◇ **Global correlations between the generation and selection tasks.**
 - Table 4 は生成された例と選択課題の相関
 - どの指標においても有意な相関は見られなかった
- ◇ **A finer grained comparison of performance on the generation and selection tasks.**
 - Table 5はより細かい分類による相関
 - ほとんどの指標において有意な相関なし
 - 部分 - 全体表現の中のthe member/collectionにおいてのみ正の相関が有意

Table 4
Performance on the Selection Task and Correlations Between the Generation and Selection Tasks for Each Representation in Experiment 2 and in the General Category Condition of Experiment 1

Representation	Selection Task				Correlation Between Tokens and Selection		Correlation Between Types and Selection	
	Discrimination Score				Experiment 2	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 1
	Experiment 2		Experiment 1					
<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>					
Hierarchy	.26	.29	.36	.27	.07	.12	.27	-.08
Matrix	.61	.32	.56	.34	-.02	.33	-.15	.15
Network	.32	.20	.48	.31	.14	-.26	.01	.05
Part-whole	.46	.32	.37	.26	.23	-.04	.15	-.19

Note—In Experiment 2, the critical value of r for $p < .05$ with $df = 36$ is approximately .32. In Experiment 1, the critical value of r for $p < .05$ with $df = 18$ is approximately .44.

Table 5
Correlations Between the Number of Tokens of a Particular Type Generated and Accuracy on Selection Problems of That Type in Experiment 2 and the General Category Condition of Experiment 1

Representation	Type of Example	No. Tokens Generated of This Type				Proportion Correct on This Type of Selection Problem				Token by Selection Correlation	
		Experiment 2		Experiment 1		Experiment 2		Experiment 1		Experiment 2	Experiment 1
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>		
Hierarchy	Descent	1.16	0.82	1.50	0.76	.61	.50	.85	.37	.29	-.09
	Series of choices	0.34	0.58	0.25	0.91	.26	.45	.25	.44	.16	.36
	Categorical classification	0.26	0.55	1.00	1.12	.29	.46	.30	.47	.01	.30
Matrix	Associated characteristic	1.74	1.13	1.30	1.49	.82	.32	.70	.38	.09	.07
	Logical consequence	0.47	0.60	0.35	0.59	.66	.48	.80	.41	.11	-.13
Network	Associative relationships	0.42	0.68	0.50	0.69	.39	.50	.45	.51	.29	-.23
	Flow through the network	1.29	0.96	1.85	1.42	.47	.31	.60	.31	.26	-.02
Part-Whole	Member/collection	0.24	0.49	0.25	0.55	.47	.51	.45	.51	.41*	.51*
	Component/integral-object	0.66	0.94	0.70	1.17	.63	.49	.65	.49	.07	-.10
	Place/area	0.16	0.44	0.05	0.22	.53	.51	.30	.47	.10	-.15

* $p < .05$.

➤ **Discussion**

- ◇ 本実験の結果は生成した例の転移仮説の棄却を支持する
 - 空間的な略図表現において、生成された例の量と、選択課題の識別得点の間に有意な相関はなかった
 - 部分 - 全体表現の一部は正の相関がみられたが、これは、図表の適用は例による推論でも促進されるという先行研究と合致する
 - Experiment 1 と Experiment 2 で同様の傾向が得られたことはこの結果の信頼性を高めた

◆ **EXPERIMENT 3**

- 本実験では Experiment 1 の考察において出てきた2つの問題点を検討する
 - ◇ general category 条件の成績がよかったのは、自分が生成した例から抽象概念を帰納したからではないか
 - 例を生成する時間を極端に短くしてみる
 - ◇ general category 条件の成績がよかったのは、たくさんの例をそれぞれの表現に当てはめていくという練習効果なのではないか
 - general category で例を生成しない条件と例を生成する条件を比較
 - ◇ 部分 - 全体表現は今回は使用しない

➤ **Method**

- ◇ **Subjects.** 大学生 65 名

◇ **Design.**

● 実験条件

- general category (generate) 条件：23名
 - ◇ Experiment 1,2 と同じ
 - ◇ ただし、例を考える時間はそれぞれ1.5分間
- general category (familiarize) 条件：21名
 - ◇ general category (generate) 条件と同じ略図の分類を書いた紙を渡される
 - ◇ 「次の課題に備えて心の中で（略図の概念を？）はっきりさせてください」（20分間）
“so that you’ll have clearly in mind what each one is like when you do the next task.”
- specific examples 条件
 - ◇ Experiment 1 と同じ

◇ **Procedure and Materials.**

- ほぼ Experiment 1 と同じ
- 時間：約60分
- 全12問中、3問が「該当なし」課題
 - 簡単すぎた問題や、specific examples の課題で使用した例に表面的にも構造的にも似すぎているものは変更した

➢ **Predictions**

- ◇ 学生が空間的な略図に関する一般的で抽象的なスキーマを使用して、最適な表現を選択しているなら、
 - general category (generate) 条件 > specific example 条件
 - general category (generate) 条件 \approx general category (familiarize) 条件

➢ **Results and Discussion**

◇ **Selection task performance as a function of condition and type of representation.**

- Experiment 1 と同様に識別得点を spatial 表現と nonspatial 表現に分けて算出した
- Figure 6 に示した結果は Experiment 1 と一貫している
- さらに、general category (generate) 条件 \approx general category (familiarize) 条件 一般的なスキーマ

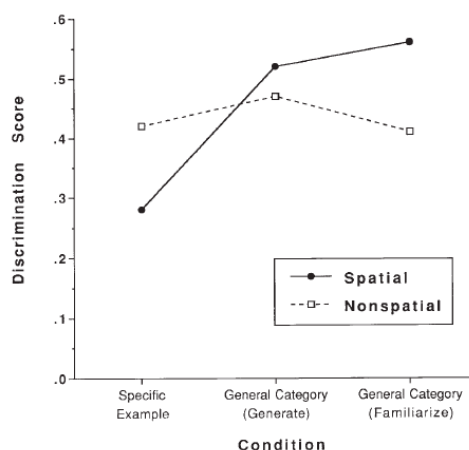


Figure 6. Mean discrimination scores for spatial and nonspatial representations as a function of experimental condition in Experiment 3.

- 分散分析

spatial 表現 / nonspatial 表現

(1) 2つの general category 条件 vs. specific example 条件

(2) general category (generate) 条件 vs. general category (familiarize) 条件

- spatial と nonspatial の違いなし [$F(1,62) < 1$, $MSe = 0.0630$]
- general category 条件間にも違いなし [$F(1,62) < 1$, $MSe = 0.1240$]
 - ◇ general category 条件間と spatial/nonspatial に交互作用なし [$F(1,62) < 1$]
- 2つの general category 条件と specific example 条件に条件の主効果あり [$F(1,62) = 4.41$, $p < .04$]
 - ◇ general category / specific example 条件と spatial/nonspatial に交互作用あり [$F(1,62) = 6.37$, $p < .02$]

◇ **Reconsidering the training and transfer appropriate processing explanations.**

- 本実験の結果から2つの疑義は否定された
 - 例の生成時間が1.5分でも general category の成績がよかった
 - general category 条件間の成績に差がなかった

◇ **Is the poor performance in the specific example condition due to using misleading example problems?**

- 例の理解はできていた (Table 2 参照)
- 例の適用のミスリーディングによるものか?

◆ GENERAL DISCUSSION

➤ **Summary of Results and Methodological Considerations**

◇ 3つの実験は、学生が空間的な略図をスキーマを用いて適用できるということを示した

➤ **On Schemas for Spatial Diagram Representations**

◇ 本研究は3つの空間的な略図には、抽象的なスキーマが存在するということを示した