

Effects of knowledge and display design on comprehension of complex graphics.

Matt Canham, Mary Hegarty, (2010), Learning and Instruction 20, 155-166.

1 Introduction

- グラフ理解のモデルはグラフィテラシーの教育理論に大きく影響する(Ainsworth, 2006; Schnotz & Bannert, 2003)
- グラフ理解のモデル (Bertin, 1983; Carpenter & Shah, 1998; Pinker, 1990)
 - ①画像の要素のエンコードする
 - ◇ 線グラフには異なる傾斜の線が示されている
 - ②エンコードした要素の概念上の関係性を思い出す
 - ◇ 上方への傾斜線は量の増加を示す
 - ③グラフの要素と概念上の関係を結びつける
 - ◇ 上方への傾斜線はストックの価値の増加を表す
- ボトムアップ処理とトップダウン処理の相互作用に影響される
 - グラフの表示形式(Shah, Mayer, & Hegarty, 1999; Simkin & Hastie, 1986)
 - グラフ知識(Koerner, 2005; Shah, Freedman, & Vekiri, 2005)
 - 領域知識(Freedman & Shah, 2002; Lowe, 1993)
- 従来のグラフ理解のモデルはいくつかの限界がある(Trafton & Trickett, 2001; Trickett & Trafton, 2006)
 - ①相対的にシンプルな表示の理解を優先する
 - ◇ 2~3 変数やデータ点がダース以下の棒グラフや線グラフなど(Carpenter & Shah, 1998; Simkin & Hastie, 1986)
 - ◇ より複雑なグラフはタスクに関連する情報の選択を困難にする
 - ②最近の研究は、単純なタスクを用いており、表示された情報から新しい情報を推論しなければならない状況はめったにない(Trafton & Trickett, 2001)
 - ◇ グラフから価値を読み取る(Lohse, 1993; Peebles & Cheng, 2003)
 - ◇ 表象されたデータの傾向を記述(Carpenter & Shah, 1998; Shah & Carpenter, 1995)
 - ③グラフ理解のどのステージにおいて、知識が理解に影響するかを明確にしていない(Shah et al., 2005, p. 461)
 - ④どんなグラフ表象の特徴と知識効果が相互作用するかを明確にしていない
- 本研究は、相対的に複雑なグラフの理解を実験
 - 気象地図を提示
 - 表示された情報をエンコードするだけでなく、推論する必要があるタスク
- 表示の複雑さと参加者の領域知識の両方を操作した影響を検討
 - 知識と表示形式間の相互作用の可能性を明らかにするため

- タスクパフォーマンス時の参加者の眼球運動測定
 - どのような視線がグラフからエンコードした情報の選択とその情報から行われた推論の両方に影響するかを検討するため

1.1 The experimental task

- 気象学の領域におけるグラフ理解タスク使用
 - 気象地図は複雑さが異なる
 - ◇ 一つの変数のみを示すこともあるが、一般的には複数の変数を同時に示す (Hoffman, Detweiler, Conway, & Lipton, 1993)
 - 気象地図の理解は、領域知識を利用し、表示された情報以上の情報を得られる
 - ◇ Ex. 天気予報士が気象地図を見るとき、現在の気象状態を読み取るだけでなく、表示された情報から、今後どのように天気が変わるかも推論する
- 本論文の実験では、2種類の気象地図を使用(Figure1)
 - 場所+気圧情報のみ
 - 場所+気圧と気温の情報
- 矢印が風の吹いている実際の方向を示しているかどうかを判断するタスク
 - 矢印は風の方向の可能性を示す
- 風の方向は気圧のパターンの知識から推論できる
 - 気温はタスクに無関係な情報
- 風の方向は最も近い気圧系により影響を受ける

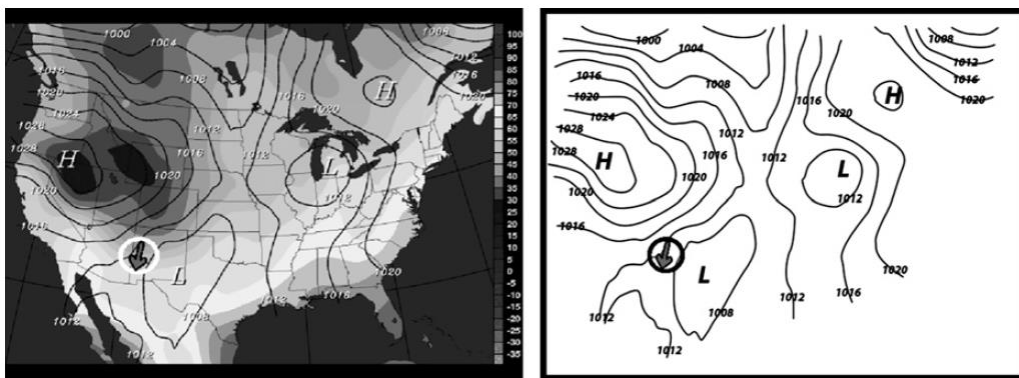
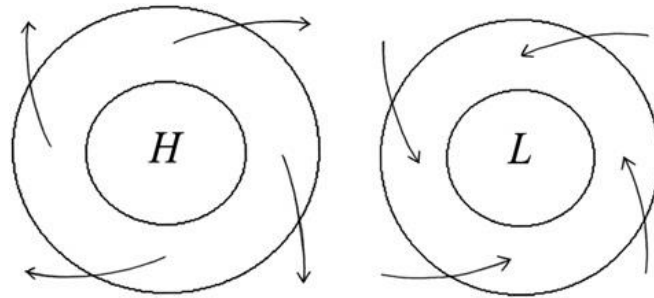


Fig. 1. Examples of pressure-plus-temperature and pressure-only maps in Experiment 1.

- 気圧から風の方向を推論するための二つの気象原理(Ahrens, 2000)
 - 気圧傾度原理
 - ◇ 空気（風）は高気圧エリアから低気圧エリアへ吹く傾向にある

- コリオリ現象
 - ◇ 北半球では、空気は高気圧系の周囲では時計回りの方向に回り、低気圧系の周囲では反時計回りの方向に回る



2 Experiment1

- 参加者の視線測定と推論課題のパフォーマンスは、関連する気象原理を習った前後で実験された
 - 仮説①：推論タスクの正確さは気象原理の知識をどれくらい獲得できたかによって向上する
- グラフ表示と知識の相互作用の可能性を検討するために、関連する情報だけの場合と、無関係な情報も加えた場合のパフォーマンスで比較した
 - 仮説②：無関係な情報はパフォーマンスを損なわせ、反応時間が長くなるか正確さが低くなる
 - 仮説③：それらの影響は教育後に減少する
- 気象学知識の獲得は、参加者のタスクパフォーマンスと同様、視線に影響するか
 - 仮説④：もし領域知識がグラフのどこを観察するのかに影響するなら、教育前に比べて教育後は、批判的なタスク情報（矢印に最も近い気圧系）を見る時間が相対的に長くなり、無関係な情報（気温）を見る時間は短くなる
 - ◇ もし領域知識が、表示のどこを見たかは関係なく、グラフに表示された情報がエンコードされたあとに適用されるなら、教育の前後で異なる視線は観察されない

2.1 Method

- 参加者：16名（男性7名、女性9名；18～22歳）
 - 正式な気象学の知識はなかった
 - 1人の参加者のデータは眼球運動測定の状態が悪かったので除外
- 課題：
 - 気象地図(Figure 1)
 - ◇ オンライン(Weather World 2010 Project, 2000)から引用
 - ◇ 過去10年の異なるデータにおける北アメリカの実際の天気状態を提示

- 気圧と気温の地図：気温（色）と気圧（等圧線）
- 気圧だけの地図：等圧線と気圧系のみ
- ◇ それぞれのトライアルは、仮説的な風方向を示した矢印と円の描かれたターゲット地域の地図を一つ提示
 - 正しい矢印：矢印は正しい方向を示す
 - 反対の矢印：矢印は、例えば 180° 反対方向を示す
 - 気圧傾度矢印：矢印は低気圧系の中か、高気圧系の外に直接配置した
 - つまり気圧傾度原理を獲得していれば分かる風の方向
- ◇ トータル 60 試行
 - 2 種類の地図×3 種類の矢印×10 年分のデータ
 - 教育前に 30 試行、教育後に残り 30 試行をランダムに提示
- チュートリアル
 - ◇ 気圧傾度原理とコリオリ現象についてパワーポイントで提示
 - ◇ どのようにそれらの要素が風の動きに影響するかを説明し、3 つの事例を例示
- 原理の知識に対するアンケート
 - ◇ 4 項目のアンケート
 - どの方向に風は吹き込むか？
 - 北半球において、空気はどのように気圧系周辺で循環するか？
 - ◇ 参加者はチュートリアル後、気象原理の知識を評定
- 手続き
 - 参加者は個別に実験した
 - ①アイトラッカーのキャリブレーション
 - ②6 施行の練習後、教育前の 30 試行を実施
 - ③チュートリアル
 - ◇ それぞれのペース実施し、質問も可能
 - ④気象原理の知識アンケートに解答し、フィードバックを得た
 - ◇ もし参加者が多くの質問で間違えた場合、正当を見つけるために再度チュートリアルを見ることができた
 - ⑤アイトラッカーをもう一度キャリブレーションし、教育後の 30 試行を実施
- 視線計測のコーディング
 - 分析のため、図面を推論に関連するエリアと無関連のエリアに定義づけた
 - ◇ 関連エリア：矢印を含む円、矢印に最も近い気圧系
 - ◇ 無関連エリア：気温を含むその他のエリア
 - 凝視点の数と総凝視時間は高い相関を得た($r = .98$)
 - ◇ 故に総凝視時間の分析のみを報告する

2.2 Results and discussion

2.2.1 Effects of knowledge and display on accuracy

- 2 (教育前後) × 2 (地図) × 3 (矢印) の分散分析 (Table 1)

Table 1
Means (and SD) of accuracy (proportion correct) in Experiment 1 for the two maps.

Arrow	Before instruction	After instruction
Pressure-plus-temperature map		
Correct	.64 (.22)	.85 (.21)
Opposite	.56 (.24)	.96 (.11)
Pressure gradient	.40 (.39)	.44 (.29)
Pressure-only map		
Correct	.53 (.29)	.80 (.23)
Opposite	.56 (.25)	.96 (.11)
Pressure gradient	.36 (.34)	.53 (.28)

- 仮説①：パフォーマンスは教育前 ($M = .51, SD = .13$) から教育後 ($M = .76, SD = .10$) にかけて促進される ($F(1, 14) = 28.30, p < .001$)
- 仮説②：気圧のみの地図 ($M = .64, SD = .06$) と気圧と気温の地図 ($M = .62, SD = .07$) の間に有意差はなかった ($F(1, 14) < 1$)
- 仮説③：地図と教育の相互作用は有意ではなかった ($F(1, 14) < 1$)
- 矢印の主効果は有意 ($F(2, 28) = 14.71, p < .001$)
 - 気圧傾度矢印におけるパフォーマンスは他の二つの矢印のパフォーマンスより劣っていた
 - ◇ もし参加者が気圧傾度原理を理解していれば、この矢印を却下することはなかっただろう
- 気象原理知識アンケートのパフォーマンス ($M = 3.07, SD = 1.03$)
 - 教育後の矢印の正確さと知識アンケートの相関は有意でなかった
 - ◇ 正しい矢印： $r = .15$
 - ◇ 反対の矢印： $r = .21$
 - ◇ 気圧傾度矢印： $r = .24$

2.2.2 Effects of knowledge and display on eye fixations

- 2 (教育前後) × 2 (地図) の分散分析 (Table 2)

Table 2
Means (and SD) of proportion of looking time on different regions of the maps in Experiment 1.

Region	Before instruction	After instruction
Pressure-plus-temperature map		
Closest pressure system	.47 (.14)	.64 (.12)
Arrow	.25 (.18)	.21 (.11)
All irrelevant regions	.36 (.14)	.23 (.11)
Temperature scale	.03 (.04)	.01 (.01)
Pressure-only map		
Closest pressure system	.51 (.13)	.68 (.11)
Arrow	.24 (.18)	.24 (.09)
All irrelevant regions	.36 (.16)	.21 (.09)
Temperature scale	n/a	n/a

- 教育前 ($M = .49$, $SD = .11$) より教育後 ($M = .66$, $SD = .10$) の方が最も近い気圧系を見ていた時間の割合が有意に高かった ($F(1, 14) = 23.25$, $p < .001$)
- その他は有意ではなかった
 - 地図の種類: $F(1, 14) = 2.22$, $p = .16$
 - 地図と教育の交互作用: $F(1, 14) < 1$
- 矢印を見ていた時間の割合は、地図の種類、教育、交互作用において有意でなかった
 - 地図の種類: $F(1, 14) = 3.93$, $p = .07$
 - 教育: $F(1, 14) = 1.35$, $p = .27$
 - 交互作用: $F(1, 14) = 2.71$, $p = .12$
- 仮説④: 教育前に比べて教育後はタスクに無関係な情報を見る時間が減る
 - タスクに無関係なエリアを見ている割合を比較
 - 教育前 ($M = .36$, $SD = .14$) から教育後 ($M = .22$, $SD = .09$) に有意に減少する ($F(1, 14) = 16.54$, $p = .001$)
 - 地図の種類、および交互作用は有意でなかった ($F(1, 14) < 1$)
- タスクに無関係な気温への探索が教育前後で減るか
 - 気圧と気温の地図は 30 試行 ($M = 4.46$, $SD = 5.58$)
 - 教育前の探索時間は低かった ($M = .03$, $SD = .04$) が、教育後の探索時間はさらに低くなった ($M = .007$, $SD = .008$)
 - 仮説④: 参加者は教育後より教育前の方がより気温を観察した ($t(14) = 2.21$, $p < .04$)

- 参加者は、教育前にも矢印の近くの気圧系を多くの割合（49%）で観察していた
 - 先行研究では、参加者の約半分が、教育前から、どうやって気圧から風の方向を推測するかは知らないが、気圧が風の方向を予測するための関連因子であることは知っていた(Hegarty, Canham, & Kriz, 2006)

3 Experiment 2

- 実験 1 において、地図の種類は推論パフォーマンスに影響しなかった
 - 一つの可能性として、地図の種類は参加者内で操作された
 - 他の可能性として、気圧のみの地図はタスクに関連する情報のみが提示されていてよりシンプルだが、気圧のみが書かれた気象地図を見ることがない人々にとって、身近でなく、根拠が明確でなかった
 - ◇ 気圧のみの地図の親密さの欠如は、シンプルさのポジティブな影響をキャンセルした
- 2 種類の気象地図におけるパフォーマンスを参加者間で比較
 - 仮説②を検討するため
- 仮説⑤：もし気圧のみの地図の非親密さがシンプルさのポジティブな影響をキャンセルするのなら、パフォーマンスが地図の種類において同等になる
- 実験 1 において見られた教育の影響を追試する
 - 人は教育前に比べて教育後により良いパフォーマンスをする（仮説①）

3.1 Method

- 参加者：40 名（女性 22 名，男性 18 名；年齢 18～22 歳）
 - 20 名ずつ、気圧のみ条件と気圧と気温条件に分けた
- 課題：
 - 気象地図は過去 10 年の異なるデータから作成
 - 実験 1 で使用した地図と似たデザイン
 - 実験 1 のように、それぞれの地図は、仮説的な風の方向を示した矢印を含んだ
 - 10 のデータで 3 つのバージョンの地図（正しい矢印、反対の矢印、気圧傾度矢印）、30 試行を、教育前と教育後のそれぞれで提示
 - チュートリアルと気象原理知識アンケートは実験 1 で使用したものと同一
 - 実験 2 では、気象学の背景知識の尺度（15 項目からなる選択式のアンケート）を含んだ
- 手続き：
 - 1 条件 10 人のグループで実験を実施
 - ①気象学の背景知識の調査を実施
 - ②6 試行の練習後、実験試行 30 試行を提示
 - ③パワーポイントのチュートリアルを提示
 - ◇ 参加者は質問可能

- ④気象原理知識アンケートを終え、解答のフィードバックを得る
 - ◇ チュートリアルがもう一度提示され、正しい答えを確認するためにチュートリアルを見直すように指示
- ⑤実験試行 30 試行実施

3.2 Results and discussion

- 2 条件の参加者の背景知識は異ならなかった ($t(38) = .16, ns.$)
 - 気圧のみ条件 : $M = 5.65, SD = 1.72$
 - 気圧と気温条件 : $M = 5.55, SD = 2.26$
- 気象原理知識アンケートの平均正答数は 2 条件間で異ならなかった ($t(38) = 1.87, p = .07$)
 - 気圧のみ条件 : $M = 3.35, SD = .81$
 - 気圧と気温条件 : $M = 2.85, SD = .88$

3.2.1 Effects of knowledge and display on accuracy

- 2 (教育前後) × 2 (地図) × 3 (矢印) の分散分析 (Table 3)

Table 3
Means (and SD) of accuracy (proportion correct) in Experiment 2 for the two maps.

Arrow	Before instruction	After instruction
Pressure-plus-temperature map		
Correct	.54 (.14)	.78 (.20)
Opposite	.58 (.21)	.85 (.20)
Pressure gradient	.35 (.22)	.29 (.27)
Pressure-only map		
Correct	.61 (.27)	.82 (.13)
Opposite	.59 (.28)	.86 (.20)
Pressure gradient	.45 (.26)	.65 (.29)

- 教育前 ($M = .52, SD = .06$) から教育後 ($M = .71, SD = .11$) にかけてパフォーマンスは促進した ($F(1, 38) = 49.81, p < .001$)
 - 実験 1 と同様、仮説①を支持
- 地図の種類の主効果が有意 ($F(1, 38) = 11.40, p < .001$)
 - 気圧のみの地図を見た参加者の方が全体的により良いパフォーマンスをした
 - ◇ 気圧のみ条件 : $M = .67, SD = .08$
 - ◇ 気圧と気温条件 : $M = .57, SD = .08$
- 地図の種類と教育の交互作用は有意ではなかった ($F(1, 38) = 2.06, p = .16$)
- 矢印の主効果は有意 ($F(2, 76) = 36.06, p < .001$)
 - 実験 1 と一致

- 矢印の種類と地図の種類の交互作用も有意 ($F(2, 76) = 4.38, p = .01$)
 - 単純主効果は、気圧傾度矢印における地図の種類に有意な影響が示された ($F(1, 38) = 18.31, p < .001$)
 - 正しい矢印と反対の矢印は両者とも有意ではなかった ($F(1, 38) = 1.8, p > .19$)
- 地図の種類が矢印のパフォーマンスに有意な影響を示す可能性は少ない
 - どちらの地図においても、正しい矢印も誤った矢印も教育後の正確さは高いため
- 実験 2 は実験 1 の結果を再現した
 - 教育後の推論タスクのパフォーマンスは向上した
- 実験 2 の結果、地図の種類を参加者間で操作した場合、仮説②は支持される
 - タスクに関係ない情報を加えられた地図のせいで、パフォーマンスは相対的に損なわれる
- 仮説⑤の気圧のみの地図の親しみのなさがシンプルさのポジティブな影響をキャンセルする証拠はなかった

4 General discussion

- 実験 1 では、参加者がタスクに関連する情報の観察に多くの時間を使い、関連する気象原理の教育後は関連情報の観察時間の割合は増したことを示した
 - これらに、優れた推論パフォーマンスも付随した
 - 知識は情報選択のプロセスと選択した情報を推論、解釈するプロセスの両方に影響する
- 実験 2 では、タスクに無関係な情報を取り除くことは、パフォーマンスを向上させ、よい表示デザインは、生徒の地図の理解を手助けできることを示した
- 本研究は、グラフ理解の基礎理論に貢献する
 - 教育においてどのようなグラフ表示を使うかを報告できる
 - 知識は画像表象の中で人が注意を払うものに影響し、結果として、エンコードする情報にも影響する
- いくつかの先行研究では、専門家はタスクに関連する表示の表象により注意を向けることを示している(Chase & Simon, 1973; Lowe, 1993, 1994, 1996; Reingold et al., 2001)
 - しかし、専門知識はその領域における 10 年以上の経験に反映される(Ericsson & Charness, 1994)
 - 本研究では、画像表象の注意が、10~15 分の概念の教育で変えられた
- 気象学の領域の先行研究では、ノービスとエキスパートの気象地図に対する焦点の当て方の違いが間接的な基盤だった(Lowe, 1993, 1994, 1996)
 - 実験 1 では、眼球運動測定により、より直接的な証拠を提供した
 - ◇ 知識によって、人々がテーマ的に関連のある情報により注意を払い、無関係な情報の注意が減ることを示した

- 何人かの科学者は、効果的なグラフの理論を主張した(Bertin, 1983; Kosslyn, 1989; Tufte, 1983)
 - しかし、それらの妥当性はわずかな経験に基づく
- 本研究は、「初心者に使用するグラフデザインは必要以上多くの情報を示すべきではない」という理論のための新しい証拠を示した
 - 実験 2 では、タスクに関連する気圧情報に関連しない気温を追加した地図によってパフォーマンスの正確さは減った
- 無関係な情報は、タスクに関連する情報の注意をそらしてしまうかもしれない
 - 参加者が両方の地図を見た実験 1 では、タスクに関連する情報の注視点やパフォーマンスが地図によって異ならなかった
 - 無関係な情報の地図と同じくらいタスクに関連のある情報のみの地図を見せることで、注意を反らす影響を消去できる可能性を示す
- グラフ理解の先行研究は相対的にシンプルな表示に焦点を置いていた(Carpenter & Shah, 1998; Kornner, 2005; Lohse, 1993; Simkin & Hastie, 1986)
 - 本研究では、複雑なグラフを理解する課題によって、課題に関連する情報の選択の重要性を強調し、知識とグラフデザインの両方がどのように情報選択のプロセスを促進できるかを示した
- 今後の課題
 - どのように気象原理を教えるかについて
 - エキスパートの気象学者が気象地図内のタスクに無関係な変数に影響されるかどうかを検討すること