

Graphs as Aids to Knowledge Construction: Signaling Techniques for Guiding the Process of Graph Comprehension

Priti Shah, Richard E. Mayer, and Mary Hegarty

University of California, Santa Barbara

Journal of Educational Psychology, Vol. 91, No. 4, 690-702, 1999

◆ Abstract

- 文章の中で量的な情報を表現する際に、視覚的な表現がしばしば用いられるが、見る側は、関連情報を理解できなかつたり学習できなかつたりすることがある
- 認知的な分析によれば、グラフの解釈は以下の過程を含む
 - (a) 比較的単純なパターンの知覚と、量的な指標とグラフのパターンの関連付けの過程
 - (b) より複雑で間違った推論を起しやすい心的な変換の過程
- 実験1では、間違った過程を最小にし、パターンの連合過程を最大にすることによって見る側の解釈を改善するようにグラフを再デザインできることを確認した
- 実験2と3では、実験者はグラフの解釈に重要な要因を分離させた
 - ◇ 関連情報を視覚的なチャンクを形作るように知覚的にグループ化させると、見る人は関連した傾向を記述する
 - ◇ 関連情報を知覚的にグループ化させないと関連した傾向の理解しなくなりがちである

◆ はじめに

- グラフは教科書や科学的な雑誌、一般的な印刷物のいたるところにある (Kaput, 1987; Kosslyn, 1994; Mayer, 1993b; Mayer, Sims, & Tajika, 1995)
- しかし人々は、グラフに描かれている量的な情報を理解したり説明したりすることに困難をもつことがある (Culbertson & Powers, 1959; Guthrie, Weber, & Kimmerly, 1993; Leinhardt, Zaslavsky, & Stein, 1990; Mayer, 1993b; Mayer et al., 1995; Shah & Carpenter, 1995; Vernon, 1946, 1950)
 - ◇ Figure 1 のグラフはアメリカの中学校の歴史の教科書の中に実際に掲載されているグラフ (Armento, Nash, Salter, & Wixson, 1991)
 - 南北戦争に至るまでの南部と北部における都市と田舎の人口の変化のグラフ
 - 北部は田舎型社会から都市型に変化しているのに対し、南部は田舎型社会のままである
 - 人口の変化の違いが南北戦争につながる要素であったということを読みとらなければならない
 - しかし学生は実験1において、南部と北部における都市と田舎の人口の割合の違いについては言及するが、教科書の著者の意図したことは読み落としがちであった
- Figure 1 やその他のグラフは難解である
 - ◇ 技術的には正確に表現してあるが、メインポイントを効果的に表現しているわけではない (Kosslyn, 1994)
 - 人口の割合を比較するために必要な情報は提示してあるが、読み手がこのグラフから抽出するのは難しい

Northern and Southern Populations, 1820-1860

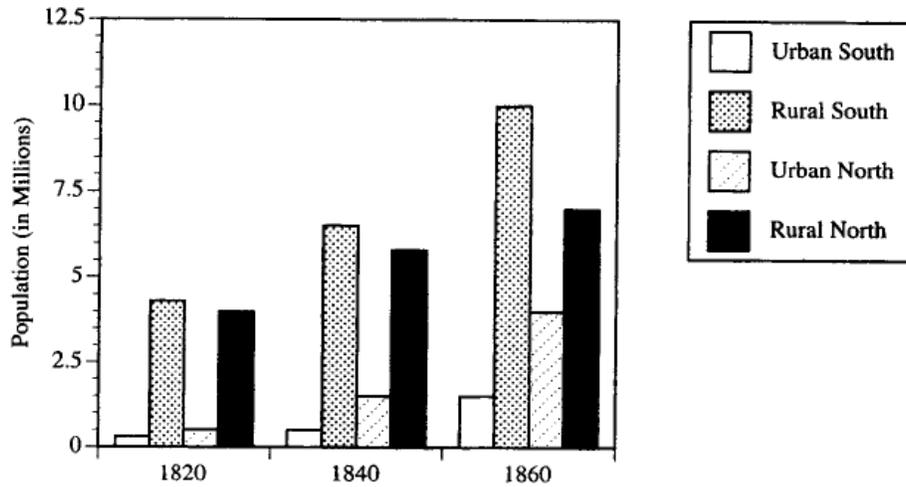


Figure 1. A graph adapted from an eighth-grade history textbook that presents the population in the North and South leading up to the Civil War.

- 同じデータを Figure 2 のように心的な計算をしなくてもよいような表現に変えると、南部と北部の都市化傾向の違いについて読み取りやすくなる
- ✧ Figure 1 から Figure 2 はグラフ理解の認知的分析に基づいた3つのデザイン原則に照らして再構成した
 1. 年間 (across-years) の変化の傾向を強調するために折れ線グラフにした
 2. 心的な計算を減らすために左のグラフの y 軸を割合にした
 3. 複雑さを減らすために、一つのグラフあたりのデータポイントを6つにした

Northern and Southern Populations, 1820-1860

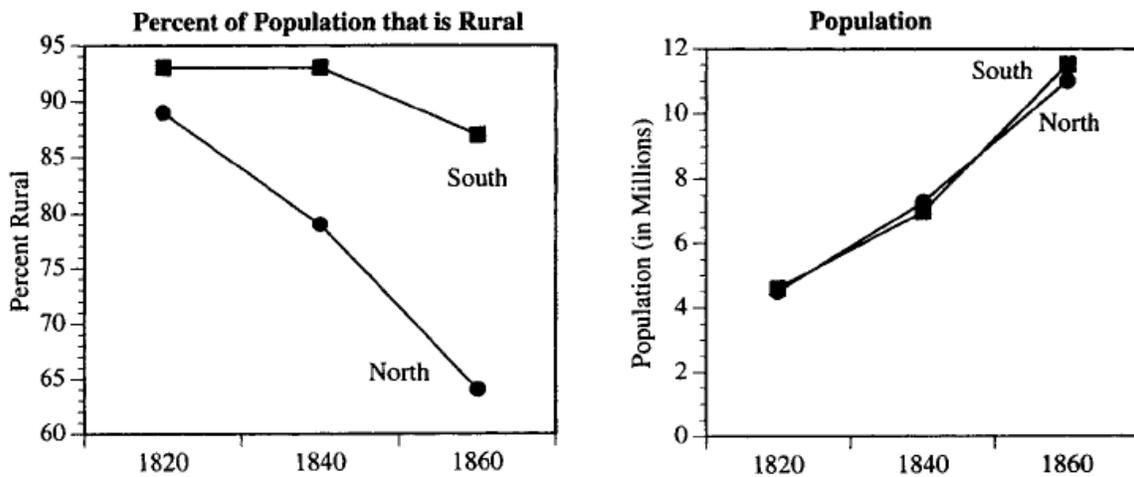


Figure 2. A set of graphs that depict the identical quantitative information as in Figure 1, but that we expected would help people identify the important quantitative information.

- グラフは *information-telling viewpoint* ではなく *knowledge construction viewpoint* に基づいて表現されなければならない
- その他、グラフの理解には、読み手の事前知識も影響する
- 本研究の目的はグラフの理解過程の認知モデルを利用して、グラフの解釈の仕方に影響を与える要因を同定することである
- 本研究の一連の実験の結果は、教授の文脈の中で量的な情報をどのように表現するかの基本ガイドラインとなるであろう(Mayer, 1993a)

◆ Graphs in Social Science

- グラフ理解に関する先行研究の多くは、単純なグラフの解釈に焦点をあてたものであった
 - ☆ しかし、任意の文脈の中でグラフの理解や生成をしようとするとき、これらのスキルを意味のあるデータの解釈に適用させることができない(Leinhardt et al., 1990)
- 社会科学で用いられるようなグラフは、傾向の比較や関係などを伝達することや、文章で述べていることの補助を目的として描かれている
 - ☆ このときのグラフの読み手の課題には、文章とグラフの関連の理解や(Hunter, Crismore, & Pearson, 1987), データが何を意味しているのかの理解 (Lehrer & Romberg, 1996; Scardamalia, Bereiter, & Lamon, 1994) が含まれる
- 本研究では社会科学で用いられるグラフを使用して、意味のあるデータについてのグラフから人々はどのようにデータの傾向や関係性を理解するかについて検討する

◆ Model of Graph Interpretation

- 主要な認知モデルによれば、グラフの解釈は大きく3つの過程を伴う(Benin, 1983; Carpenter & Shah, 1998; Cleveland, 1994; Cleveland & McGill, 1984, 1985; Lohse, 1993; Pinker, 1990; Shah, 1995; Shah & Carpenter, 1995)
 1. 視覚的な配列のコード化と視覚的な特徴の同定を行う
(e.g., a straight line slanting downward)
 2. 表現されている数量情報や関係性の同定を行う
(e.g., a decreasing linear relationship between x and y)
 3. 量的な関係性と変数との関連付けを行う
(e.g., population vs. year)
- 本研究では2番目(数量情報や傾向の同定)の過程に焦点をあてる
 - ☆ 数量情報や傾向の読み取りのモデルには2種類の過程がある(Carpenter & Shah, 1998; Casner & Larkin, 1989; Pinker, 1990; Shah & Carpenter, 1995)
 1. 視覚的なまとまり(*visual chunk*)をエンコードし、そのまとまりを数量情報や関係性と自動的に関連付けられる過程
 - 直接的な関連付けが可能のため、正確で素早い解釈が可能(Casner & Larkin, 1989; Shah & Carpenter, 1995)
 2. 視覚的なまとまりが数量情報や関係性と結びつきにくく、複雑で間違いやすい過程
 - 読み手が情報を変換しなければならず、解釈が不正確になったり不完全になったりする(Casner & Larkin, 1989; Hegarty, Carpenter, & Just, 1991; Shah & Carpenter, 1995)
 - ☆ 上記のモデルによれば、視覚的なまとまりを強化し、情報変換の必要性を最小にすることで、グラフの解釈を改善させることができる

- 実験1では複雑な過程を減らすことにより、グラフの解釈を向上させることができるかを、社会科学的なグラフを用いて検討した
- 実験2ではグラフのフォーマットと尺度がグラフの解釈にどう影響するかを検討した
- 実験3ではグラフの特定のフォーマットか知覚的な組織化のどちらが（もしくは両方が）解釈に大きく影響するかを検討した

◆ Experiment 1

- 情報量的には等価だが、視覚的なまとまりや情報の変換の必要性を変化させたグラフを使用して、言語データから以下の仮説を検討した
 - ◇ 元のグラフよりもパターンの知覚しやすさを増大し、複雑で間違いやすい過程を最小化するように改善したグラフのほうが、グラフの解釈が向上する

- *Method*

- *Participants, design*

- ◇ 大学生16名
- ◇ 1要因被験者内計画：3つのオリジナルグラフと3つの改良グラフ

- *materials*

- ◇ オリジナルグラフ (Figure 1 を含む)
 - アメリカの歴史教科書に掲載されているグラフ
 - 著者が主張していることが明示されていないグラフ
- ◇ 改良グラフ (Figure 2 を含む)
 - オリジナルグラフを以下の手続きで改良
 1. 1つのグラフあたりの変数を減らすためにグラフを2つに分ける
 2. そのうちの1つのグラフの従属変数を割合に変換する
 3. 3つのうち2つのグラフにおいて、棒グラフから折れ線グラフにフォーマットを変更
- ◇ カウンターバランスのため、2セットのグラフを用意
 - Set 1(これらを改良したものはSet 2)
 - the number of urban and rural inhabitants in the North and the South in three time periods (2 X 2 X 3)
 - the number of immigrants from five nations in three time periods (5 X 3)
 - the median income of men and women workers in six time periods (2X6)
 - Set 2(これらを改良したものはSet 1)
 - the number of tons of domestic and imported grain consumed in the United States and the USSR in three time periods (2 X 2 X 3)
 - the number of animals on the prairie for five animal types in three three time periods (5 X 3)
 - the unemployment rate for African Americans and White Americans in six time periods (2 X 6)
- ◇ アンケート
 - 統計と数学の履修について
 - Scholastic Aptitude Test (SAT) 得点
 - いろんなグラフをみた経験

- *Procedure.*

- ◇ 個人実験
 1. 簡単なグラフで言語化の練習（記述と発話）

- 提示されたグラフを見て簡単な記述と発話/テープで発話を録音 ×6回
- アンケートに回答

➤ *Coding verbal descriptions.*

- ◇ それぞれのグラフについての記述・発話のコーディング
 - (a) a *within-year comparison*
 - (b) an *across-years trend description*
 - (c) a *mixed description*
 - (d) *other*
- ◇ 2名の評定者の一致率は 83%
 - 一致しなかったものは第一評定者のコーディングを採用
 - 一致率が高かったため実験2, 3では評定者は1名にした
- ◇ 実験参加者ごとに、それぞれのカテゴリにおけるオリジナルグラフと改良グラフの割合を計算

➤ *Results and Discussion*

- ◇ この結果はグラフから読み取る情報は、グラフのフォーマットと特徴に影響を受けるといふ仮説を支持
- ◇ 改良グラフを見たときのほうが *across-years* についての記述・発話が多かった
 - Figure 3 参照. revised graphs : $M = .81$, original graphs : $M = .44$
 - $F(1, 15) = 22.09, p < .01$
- ◇ オリジナル」グラフを見たときのほうが *within-years* についての記述・発話が多かった
 - Figure 3 参照. original graphs : $M = .29$, revised graphs : $M = .04$
 - $F(1, 15) = 10.39, p < .01$
- ◇ mixed カテゴリではグラフフォーマットの違いによる有意差はなかった
 - $M = .20$
- ◇ 文脈に沿った解釈は *across-years*.
- ◇ オリジナルグラフについての記述は改良グラフよりも長かったのにもかかわらず (*across-years* についての記述は少なかった)

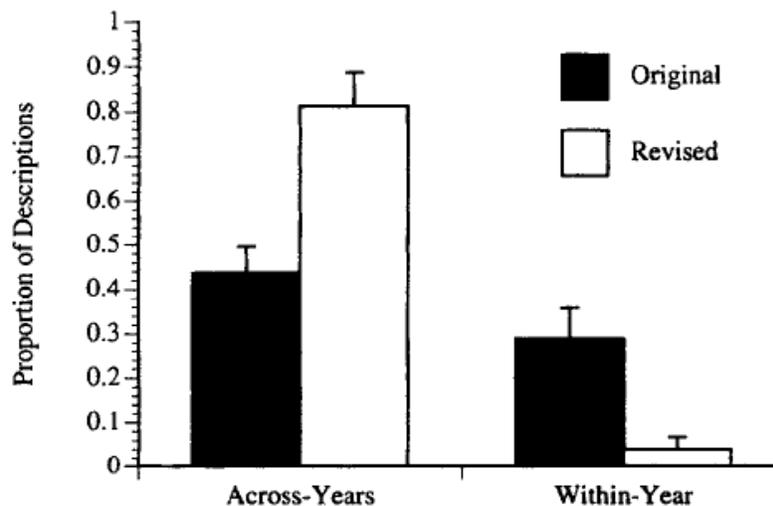


Figure 3. Proportion of viewers generating across-years and within-year descriptions for the original and revised graphs in Experiment 1.

- *Summary*
 - ◇ 実験1ではグラフの再構成によって、グラフの著者が意図するような解釈をガイドすることができることを示した
 - ◇ グラフのフォーマットの効果は読み手の持っている課題による(Carswell & Wickens, 1987)
 - 時間内での比較をするのだったらオリジナルグラフが適していただろう
 - 時間間での比較では改良グラフのような折れ線グラフがいただろう

- ◆ Experiment 2
 - 実験1では改良の際にグラフフォーマット（棒グラフから折れ線グラフへ）とscale（とグラフの数）の2点で改良した
 - 実験2ではどの特徴がどのように解釈に影響したのかを検討する
 - 仮説
 - ◇ どちらも visual chunk にかかわる表現のため、それぞれ解釈に影響を与える
 - *Method*
 - ◇ *Participants, design, and materials.*
 - ◇ 大学生40名
 - ◇ 2 X 2 X 4 の混合計画
 - 要因1（被験者内）：グラフのフォーマット（棒グラフ vs. 折れ線グラフ）
 - 要因2（被験者内）：y 軸のスケール（絶対量のグラフ1つ vs. 割合のグラフ1つと全体量のグラフ1つ）
 - 要因3（被験者間）：グラフのセット（4セット）
 - ◇ 8つのグラフ（3つの変数を含む棒グラフ）についてそれぞれ4つの表現：グラフのフォーマット/y 軸のスケール（Figure 4 参照）
 - ◇ 8×4の32個のグラフを4セットに分割
 - ◇ 1セットにつき10名の実験参加者
 - ◇ *Procedure.*
 - 実験1と同様
 - 事後にグラフの内容について true-false テスト
 - *Results and Discussion*
 - ◇ Figure 5 はそれぞれの条件におけるacross-years と within-year についての記述の割合
 - ◇ 実験1と同様の分析：absolute bar (original) と percentage line (revised) の比較
 - across-years : $F(1, 39) = 20.57, p < .01$
revised (percentage line) graph ($M = .86$) > original (absolute bar) graph ($M = .52$)
 - within-year : $F(1, 39) = 21.90, p < .01$
original graph ($M = .33$) > revised graph ($M = .04$)
 - 実験1と一貫した結果
 - ◇ グラフの解釈に大きな影響を与えるのはグラフのフォーマットか、それともスケールか
 - 折れ線グラフか棒グラフかは予想通りの結果
 - across-years
 - ◇ 折れ線グラフ($M = .84$) > 棒グラフ($M = .46$)
 - ◇ $F(1, 39) = 53.9, p < .01$

- within-year
 - ◇ 棒グラフ ($M = .33$) > 折れ線グラフ ($M = .05$)
 - ◇ $F(1, 39) = 29.1, p < .01$
- 折れ線グラフは $x-y$ の傾向を表現するのに適している
- ◇ 事後の true-false 記憶テスト
 - 1つのグラフにつき、それぞれ absolute facts と absolute trends, percentage facts と percentage trends に関する質問
 - グラフが絶対量の情報を持っている方が、絶対量について正しく回答できた
 - absolute scale ($M = .74$) > percentage scale ($M = .64$); $F(1, 39) = 17.6, p < .01$
 - グラフが割合情報を持っている方がの関係性について正しく回答できた
 - percentage scale ($M = .84$) > absolute scale ($M = .68$); $F(1, 39) = 42.4, p < .01$
- 記憶に基づいて絶対量と割合の変換をすることの困難さを示唆している
 - ※ 特に絶対量→割合変換において

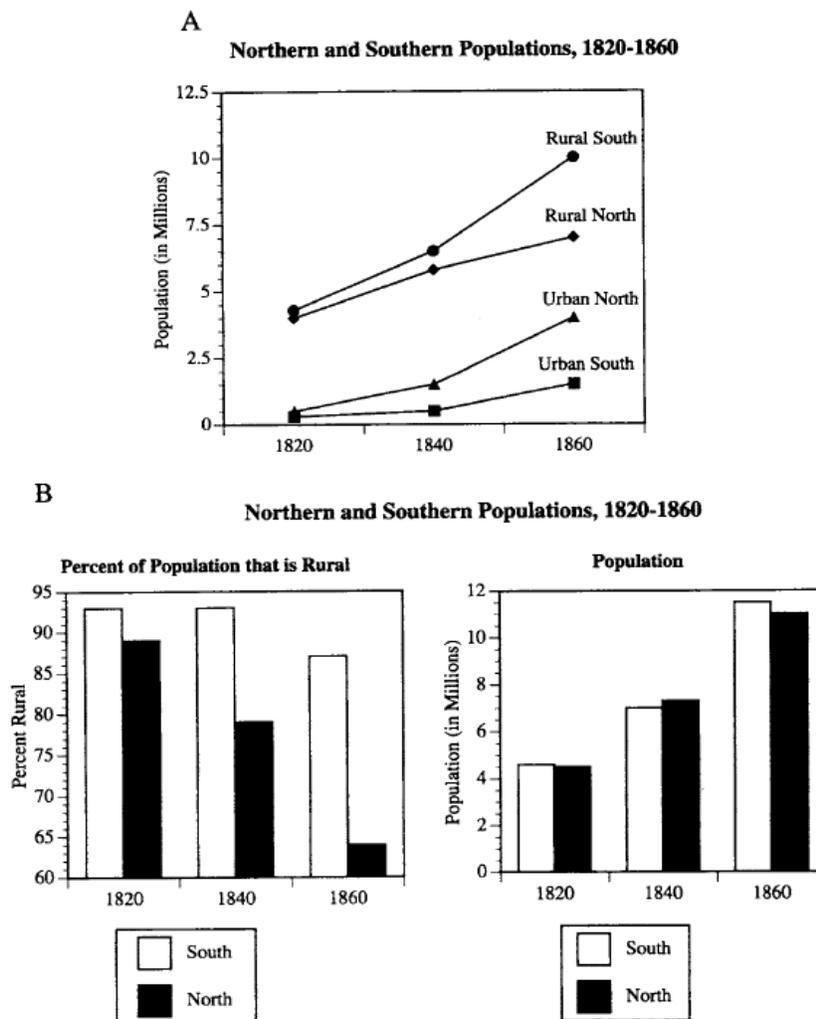


Figure 4. The two new graph types created for Experiment 2. The absolute line (4A) and percentage (4B) bar graph versions of the identical pre-Civil War population data used in Experiment 2.

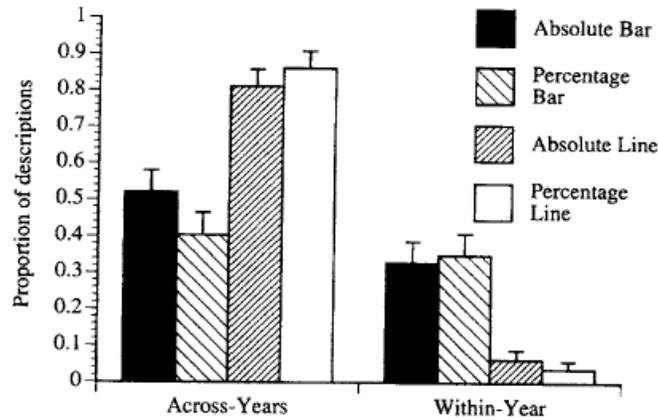


Figure 5. Proportion of viewers generating across-years and within-year descriptions for the four graph types in Experiment 2.

➤ Summary

- ◇ 実験2ではグラフの解釈に影響を与えるグラフの特徴について検討した
 - 傾向を示す時には折れ線グラフが適しており，量的な情報を表す時には棒グラフが適している

◆ Experiment 3

- 実験3の目的は実験1と実験2の結果から考えられる仮説の検討である
 - ◇ the *format-only hypothesis* : 線グラフは傾向を読み取る手がかりとなり，棒グラフは事実（量的情報）を読み取る手がかりとなる
 - ◇ the *perceptual organization hypothesis* : グラフの解釈には，グラフのフォーマットだけでなく視覚的なチャンクの表現も影響を与えている
 - 適切な知覚的チャンクで表現すれば，誤った推論過程によらずにグラフの解釈が行えるはずである
 - 本研究ではゲシュタルト心理学に基づいてチャンクを表現
 - ◇ 折れ線グラフは線でつながっているものがひとまとまり (connectedness)
 - ◇ 棒グラフは近接しているものがひとまとまり (proximity)
- Figure 6 を使用して検討
 - ◇ もし *format-only hypothesis* が正しいなら，*across-years* の記述においては 6A と 6C が多くなり，*within-year* の記述においては 6B と 6D が多くなるはずである
 - ◇ もし *perceptual organization hypothesis* が正しいなら，*across-years* の記述においては 6A と 6B が多くなり，*within-year* の記述においては 6C と 6D が多くなるはずである
- Method
 - ◇ *Participants, design, and materials.*
 - 大学生12名
 - 2 X 2 X 4 混合計画
 - 要因1 (被験者内) : グラフフォーマット (線グラフ vs. 棒グラフ)

- 要因2 (被験者内) : 視覚的なチャンク (within-year vs. across-years)
- 要因3 (被験者間) : グラフのセット
 - ◇ 8個のグラフについて4つの表現
 - bar-within : 棒グラフで within-year のまとめ
 - bar-across : 棒グラフで across-years のまとめ
 - line-within : 線グラフで within-year のまとめ
 - line-across : 線グラフで across-years のまとめ
 - ◇ 32個のグラフを4つのセットに分けて各セット3名ずつ

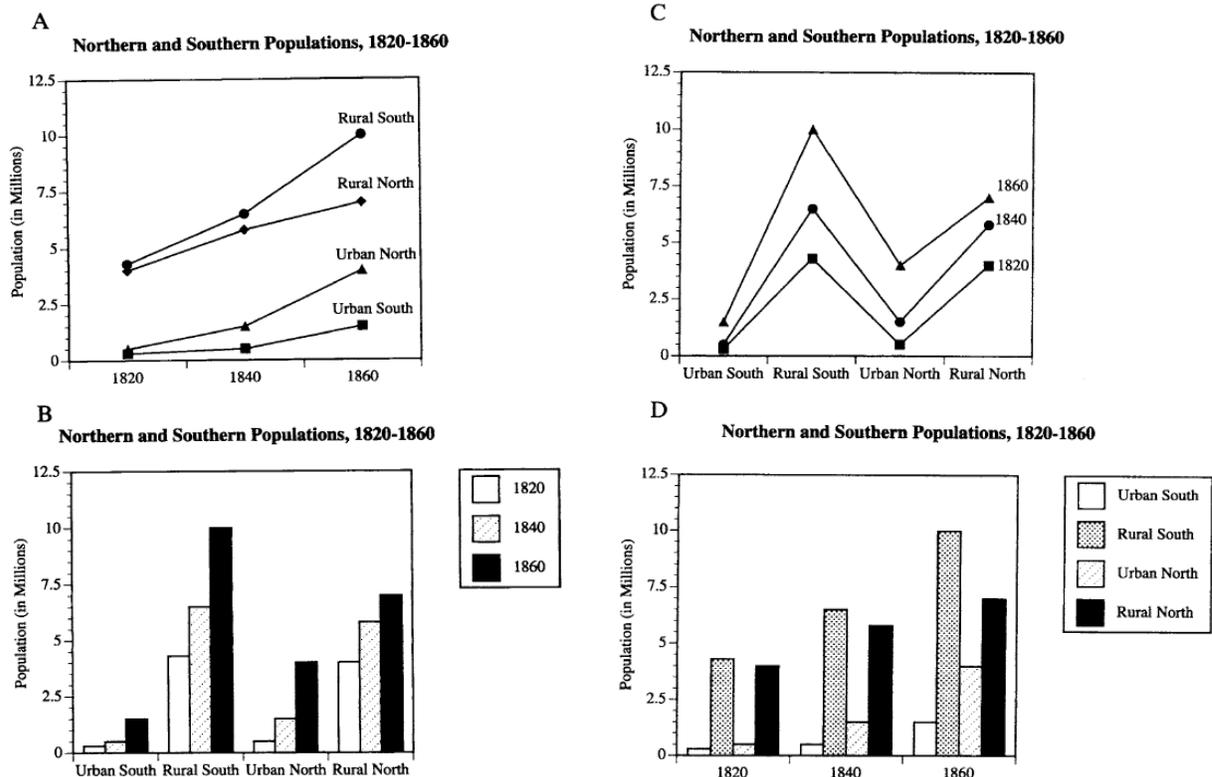


Figure 6. Figures 6A and 6B depict line (6A) and bar (6B) graph versions of the pre-Civil War population data, which, by proximity and connectedness, have visual chunks that emphasize historical trends; these graphs are examples of the across-years visual chunk graphs used in Experiment 3. Figures 6C and 6D (opposite) depict line (6C) and bar (6D) graph versions of the pre-Civil War population data, which, by proximity and connectedness, have visual chunks that emphasize within-year comparisons; these graphs are examples of the within-year visual chunk graphs used in Experiment 3.

➤ Results and Discussion

- ◇ Figure 7 は4つのグラフの種類ごとの across-years と within-year についての叙述の割合
 - perceptual organization hypothesis を支持する結果
 - across-years についての叙述についての分析
 - ◇ across-years のまとめを強調したグラフにおいては歴史的な傾向 (across-years) についての叙述が多かった

- across-years chunks ($M = .67$) > within-year chunks ($M = .19$)
- $F(1, 11) = 17.9, p < .01$
- ◇ フォーマットの主効果(bar vs. line)有意ではなかった ($F(1, 11) = 1.1$)
- ◇ 要因1と要因2の交互作用が有意であった
 - $F(1, 11) = 7.5, p < .05$
 - 線グラフにおける across-years chunk の効果がより大きい
 - 傾向の解釈には棒グラフよりも線グラフのほうが効果が大きいという実験2の結果と一貫している
- within-year についての叙述についての分析
 - ◇ visual chunks の主効果はなし ($F(1, 11) = 11.0$)
 - within-year chunks ($M = .29$) / across-years chunks ($M = .04$)
 - ◇ フォーマットの主効果は有意傾向 ($F(1, 11) = 3.66, p = .08$)
 - ◇ 要因1と要因2の交互作用は有意ではなかった ($F(1, 11) = 0.47, p > .10$)
- ◇ この実験ではグラフとして標準的なもの (6A, 6D) と不自然なもの (6B, 6C) があつた
 - 実験1, 2においては”other”カテゴリの叙述は少なかったがこの実験では多くなった ($M = .24$)
 - 一般的なグラフ (6A, 6D) と不自然なグラフ (6B, 6C) における”other”の割合を比較
 - 不自然なもの ($M = .40$) > 標準的なもの ($M = .08$)
 - $F(1, 11) = 19.8, p < .01$
- ◇ “mixed” の叙述についてはグラフのタイプによる有意差はなかった ($M = .17$)
 - $F(1, 11) = 0.31, > .10$
- Summary
 - ◇ 実験3では知覚的な推論の難易度の操作するためには、グラフのフォーマットの変化よりも、どの情報をグループ化して表示するかが効果的であることを確かめた

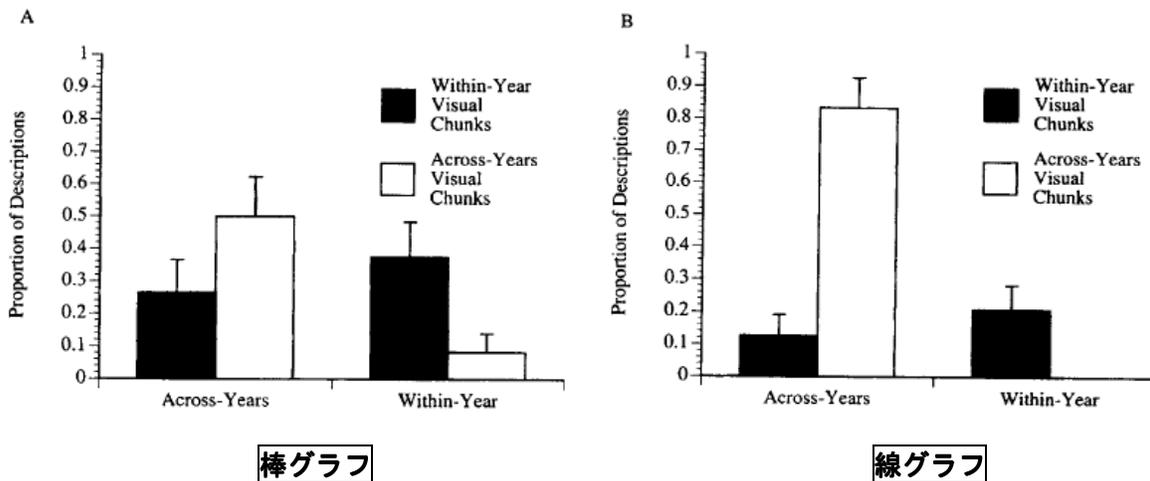


Figure 7. Proportion of viewers generating across-years and within-year descriptions for the four graph types in Experiment 3. For bar graphs (7A) and line graphs (7B), viewers described across-years trends when the across-years trends were plotted closely together or connected (across-years visual chunks). Viewers described within-year trends when they were plotted closely together in bar graphs or connected by lines (within-year visual chunks).

◆ General Discussion

- 人々は社会的科学的なグラフの解釈において、(グラフの) 著者の意図したメッセージをしばしば読み取りそこなう
 - ◇ 本研究の実験参加者の多くが、教科書のオリジナルグラフから著者の意図を読み取ることができなかった
 - ◇ しかし、3つの認知的な原則に照らしてグラフを改良することで、グラフから *across-years* の傾向を読み取りやすくすることができた
- 実験1ではグラフのフォーマットとスケールを変え、2つに分割することによって、グラフを改良し、複雑な解釈に効果があることを示した
- 実験2ではグラフのフォーマットとスケールが解釈に与える影響を検討し、グラフのフォーマットに大きな効果がある可能性を示した
- 実験3ではグラフのフォーマットと知覚的な組織化が解釈に与える影響を検討し、知覚的なチャンクに大きな効果があることを示した

- *Implications for a Model of Graph Interpretation*
 - ◇ グラフの解釈は知覚的なチャンクに影響される
 - 線グラフが時間的な変化を表す時、より強い効果が表れる
 - ◇ 複雑で日常的なデータについてのグラフにおけるフォーマットの効果を確かめた

- *Implications for a Model of Document Reading*
 - ◇ 本研究の知見は、一般的な文章と視覚的な表現の処理モデルにも適応できる
 - ◇ Mosenthal model(1996; Mosenthal & Kirsch, 1992)
 - *task-type* と *document-type* の組み合わせによって、単純な *locate processes* から複雑な *cycle and integration processes* をたどる
 - 本研究では *task type*(within-year or across-years comparisons) と *document type* (*bar graph vs. line graph*) の相互作用として理解できる
 - 関連情報が視覚的なまとまりとして表現されると対応付けが簡単になる
→ *locate processes*

- *Implications for the Design of Textbook Graphs*
 - ◇ 本研究はグラフデザインの原則についての研究の発展に貢献する(Kosslyn, 1994)
 1. 線グラフは *x-y* 関係の傾向を強調する。3つ以上の変数がある時は、最も重要な関係性を *x* と *y* にプロットすべきである
 2. 棒グラフは近くにあるもの同士の比較を強調する。3つ以上の変数がある時は最も重要な関係を近くに配置すべきである
 3. 線グラフは *x-y* 関係を強調するバイアスがあり、二つの独立変数が同じくらい重要ならば、棒グラフを使用すべきである。逆に特定の傾向が最も重要な時は線グラフを使用すべきである
 4. *y* 軸のスケールには、理解すべきゴールが、関係性なのか絶対量的な情報なのかを反映させるべきである。なぜなら人々にとって異なるスケールへの変換は困難だからである

◇ ふろく

● 実験 1 の記述例

➤ across-years にカテゴリ

- ◇ The percent of the population that is rural decreases over time, but there is a greater decrease for the northern population that is rural than the southern population. The total population increases in both the North and the South almost equally over time.
- ◇ The first graph the southern population was about the rural population was about really high 90%, it went down a little but it was still up like 88%, whereas the northern population started at 90% but it went down till 1860. It gradually decreased all the way down till approximately 65%.

➤ within-years にカテゴリ

- ◇ In 1820, the greatest population was the rural South, and then the rural North, and then the urban North, then the urban South. And in 1840 same, but greater amounts in the population. And in 1860, it went rural South, rural North, urban North, and urban South. Same . . . [reads values of the points].
- ◇ The population in 1820 the rural South is more than the North, and it's the still is the same in 1840, the rural South is larger than the north but the rural North in 1860 the urban South has increased again but not as large amount as the urban North which is a large, has grown up to about 4,4.5 million when it started out less than .5 million . . . [repeats the same information].