

[資 料]

## 可視化におけるグラフィック特性の 認知に関する考察

地 道 正 行  
前 田 真 之 介

### I はじめに

近年、コンピュータ環境におけるハードウェア・ソフトウェアの急速な発展によって、データを多様な方法によって分析することが容易となり、そのことが手法の理論面からの研究を促進するといった好循環が起こっているように思われる。このように発展めざましいデータ分析法には、データの可視化 (visualization) によって統計モデリングに対する知見を得るためのものと、適切な統計モデルを仮定したもとの統計的手法を援用するものがある。後者については近年理論的な面での発展が続いているように思われるが、前者の可視化に関しては、Tafte (1990、1997、2001、2006) などの優れた文献や Cleveland and McGill (1984) によって指摘されているように一種のガイドラインのようなものはあるものの、その理論面からの研究はまだ発展段階にあると思われる。さらに、実際にコンピュータ環境を用いてデータを可視化する際は、ソフトウェアのデフォルト設定と作成者の技量や経験、センス等の固有技術的なものに依存する部分が大いことは否めない。この問題に対して、本稿では、より効果的にデータを可視化するために重要となるグラフィック特性 (graphical property) の認知についての調査をふまえた考察とそれにもとづく簡単な結果を与える。

本稿の構成は以下のようなものである。まず、II節では可視化の重要性を

理解するための簡単な例を与えた後、可視化の定義を与える。その際、可視化の表層的・深層的な観点からの2種類の定義を与え、前者の意味では可視化がデータを視覚属性へマッピングしたもの、すなわち視覚表現 (visual representation) であることと、さらに後者の意味では人間が外界からの視覚的な情報を精神内部の表現として構築する認知活動であることに言及する。次に、Ⅲ節では視覚表現を一般的に作成するための過程を考察し、特に前注意過程 (preattentive process) で処理される視覚属性を用いた符号化の重要性や、グラフィック特性などの定義すべき視覚構造 (visual structure) の種類とその知覚に関する正確さに関する先行研究について述べる。さらに、Ⅳ節では、グラフィック特性の認知に関する考察として、3次元散布図 (3-dimensional scatter plot) に関する問題点の指摘と、その改良であるバブルチャート (bubble chart) の円の大きさに関する認知に関する問題について作業仮説の設定とそれに関する調査にもとづいた統計的仮説検定による検証を行う。最後に、Ⅴ節では本稿の総括と今後の課題を与える。なお、本稿で議論する可視化という用語は主にデータ可視化 (data visualization) の意味で利用していることに注意しよう。

## Ⅱ 可視化

### 1. 可視化の例

可視化の重要性を理解するために、簡単な例を Mazza (2009) から以下に引用する。

例1 以下の数値の中から最大値と最小値を求めよ。

320 260 380 280 420 400

この問に対する最も単純な解法は、すべての数字を読み取り、その大小関係について1つずつ比較することであるが、そのためには(個人差はあるものの) 相応の時間を要し、思考能力に負荷をかけることになる。

一方、図1に示すように数字の大きさに比例した長さのバーを並べた場合

を考えよう。まず、一見することによって、420に対応するバーの長さが最も長いことからこの値が最も大きいことがわかる。また、(少し注意が必要であるが) 260に対応するバーが最も短いことからこの値が最小であることがわかる。このことは視覚的に数値の順序がわかることを示しており、数値のみの比較によって結果が導かれたわけではないことに注意しよう。

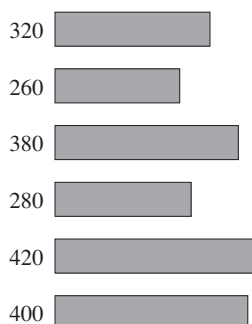


図1：可視化の例 (Mazza (2009) を参考に筆者作成)

## 2. 可視化の表層的定義

可視化 (visualization) は、通常の辞書では、

直接見ることができない事象・情報・関係などを、図表・画像など  
見ることができる形にすること

と定義される。(松村編 (2006-2008) 参照。) このことは、一見しただけではわからない対象の特性を視覚的に認識できるような形式に変換することであり、より簡潔には、「見えない何かを見える形にすること」といえよう。(ここでは可視化の表層的定義と呼ぶことにする。) 例1では、数字の大きさという特性を「バーの長さ」に置き換えることによって、人間の視覚によって処理されるように変換し、数値の大小関係を即座に認識できるようにした例といえる。

例1における「バーの長さ」は、情報可視化 (information visualization) の分野では、視覚属性 (visual attribute) と呼ばれ、人間にとって認識され

やすいとされている。(Mazza (2009) 参照。) この仮説が成り立つもので、データを視覚属性にマッピングすることによって、人間の認識を促進させることが期待されることに注意しよう。

### 3. 可視化の深層的定义

前項では可視化の(表層的)定義について述べたが、Mazza (2009) によれば、

*With these considerations we can summarise that visualisation is a cognitive activity, facilitated by graphical external representations from which people construct internal mental representation of the world.*

とある。(Spence (2014)、Ware (2013) も参照。) このことは可視化には、単にデータからグラフィックを作成することにとどまらず、人間が外界からの視覚的な情報を精神内部の表現として構築する認知活動をさす用語としての定義もあることに注意しよう。(ここでは、これを深層的定义と呼ぶこととする。) よって、データから単に作成されたグラフィックスと区別する必要がある、このように表層的な意味での可視化によって作成されたものは、視覚表現 (visual representation) と呼ばれることがあることに注意しよう。(Mazza (2009) 参照。)

### 4. データの視覚属性へのマッピング

可視化に関する表層的・深層的定义の位置づけを人がデータを理解する際のプロセスのモデルである Shedroff (1994) の理解の連続体 (continuum of understanding) によって説明する。(図2参照) 視覚表現が作成される、すなわち表層的な意味で可視化が行われるのは、このモデルにおけるデータと情報の間に位置すると考えらる。一方、深層的な意味での可視化は、精神内部で起こる現象であるから、それが位置するのはこのモデルにおける情報と知識の間であると考えられる。この考察から、(深層的な意味での) 可視化を行うためには、まず視覚表現を作成する必要があることがわかる。



図2：Shedroff の理解の連続体 (Shedroff (1994)、Mazza (2009) を参考)に筆者作成)

視覚表現は、データを視覚属性にマッピングすることによって作成されるが、その際の指針を得るため、扱うデータの種類と視覚属性の種類を以下に与える。まず、対象とするデータの種類の種類は抽象データ (abstract data) とする。ここで、抽象データとは、物理的な空間と対応を持たないデータのことであり、ある意味で「よい」座標や視覚属性を与えることによって視覚表現を作成する必要がある<sup>1)</sup>。次に視覚属性 (のカテゴリー) としては、色 (color)、形 (form)、空間位置 (spatial position)、動き (motion) がある。これらの視覚属性は、視覚の認知能力によって前注意過程 (preattentive process) で処理されるといわれており (Few (2012)、Ware (2013) 参照。)、この特性から言語化が難しい複雑な情報を視覚属性にマッピングすることによって人間にとって瞬時に理解できるという効果を生み出すことがわかる<sup>2)</sup>。さらに、データに関する複数の情報を視覚属性へマッピングすることで、それらの特性を同時に理解できるような視覚表現を作成できる可能性がある。ただし、Tafte (2001) の指摘 (“Avoid distorting what the data have to say.”) にあるように、データの解釈を歪めたり、誤った解釈を作り出すようなマッピングは避ける必要があることに注意しよう。

- 1) たとえば、地球を取り巻くオゾン層の穴と密度のように物理的な空間との対応を持つデータとそれ以外のものを区別する用語として抽象データという用語を利用している。(Mazza (2009) も参照。)
- 2) なお、前注意過程で処理される視覚属性に関する研究として Tresiman (1985) がしばしば引用され、ここであげた視覚属性以外にも様々なものが存在することが指摘されている。

### Ⅲ 視覚表現の作成

前節において、データが持つ情報を瞬時に理解するための視覚表現の作成には前注意過程で処理される視覚属性へデータをマッピングすることが重要であることを述べたが、ここではその作成の流れを Mazza (2009) に従って確認する。図3における外側のボックスに書かれている項目がステップの名称で、その中の内側のボックスのラベルがそのステップで定義すべき項目である。

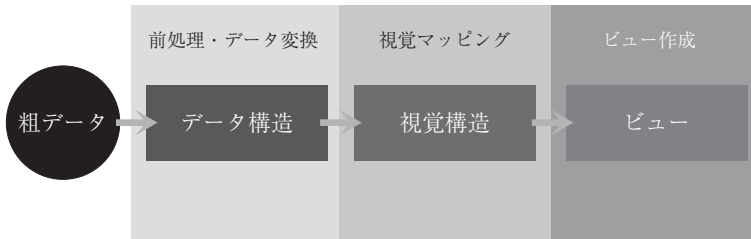


図3：視覚表現を作成するための流れ（Mazza (2009) を参考に筆者作成）

まず、最初のステップである「前処理・データ変換」では、粗データ (raw data) をソフトウェアで処理できるように論理的な構造を持たせたり<sup>3)</sup>、外れ値や欠損値の有無などを調べ、処理できるような修正を施し、ソフトウェアに読み込んで利用できるようにする段階である。次に、視覚マッピング (visual mapping) とはデータ構造に対して視覚属性などの構造すなわち、視覚構造 (visual structure) へマッピングすることである。最後に、ビューは視覚構造に従って可視化された最終的な結果であり、実際のコンピュータの画面へ表示されたものである。

定義すべき視覚構造としては、空間基板 (spatial substrate)、グラフィッ

3) ここでは、粗データに対して論理的な構造を与え、ソフトウェアによって効率的に扱うことができるようにしたものをデータ構造 (data structure) と呼ぶこととする。S、R 言語に用意されているデータフレーム (data frame) はデータ構造の典型的な例と考えることができる。

ク要素 (graphical element)、グラフィック特性 (graphical property) があり、それぞれに以下のようなものがある。

**空間基板** データをプロットするための基板となる空間である。空間としては、「線」、「面」、「立体」の中から決定する。なお、空間基板の軸として、データの尺度に応じて、定量的なものか類別的 (順序または名義) なものかも明確にする必要がある。

**グラフィック要素** 空間基板の中に配置する各データを表す要素のことである。グラフィック要素には、図4に与えられるようなものが考えられる。

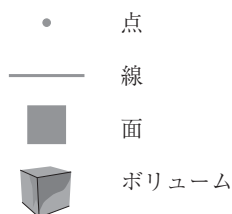


図4：グラフィック要素の種類 (Mazza (2009) を参考に筆者作成)

**グラフィック特性** 各グラフィック要素に対して与えられる視覚的特性のことで、網膜変数 (retinal variable) などとも呼ばれる。このグラフィック特性には、図5に与えられるようなものが考えられる。



図5：グラフィック特性の種類 (Mazza (2009) を参考に筆者作成)

なお、実際に視覚構造を定義する順序は、

空間基板→グラフィック要素→グラフィック特性

で行われることに注意しよう。

注意 1（定量的なデータに関する知覚に関する正確さ）知覚に関する先行研究として Cleveland and McGill (1984) があり、定量的なデータをグラフィック要素あるいは空間要素にマッピングした際の知覚の正確さとして、以下のような順序があるということが報告されていることに注意しよう。

- 位置
- 長さ
- 面積
- ボリューム
- 色・テクスチャ



図 6：定量データの知覚の正確さ（Cleveland and McGill (1984) を参考に筆者作成）

例 1 はこの結果と照らして考えると、視認性が高いと思われるグラフィック要素であるバーの「長さ」に数値をマッピングすることによって、数値の羅列のみを見るだけでは分かりにくい大小関係に関する視認性を高めることに成功した典型的な例と考えることができる。

## IV 散布図における認知に関する一つの問題

### 1. 3次元散布図とバブルチャートにおける問題

これまでの議論で、視覚構造を空間基板、グラフィック要素、グラフィック特性の順で適切に定義することによって視覚表現を作成できることがわかったが、このことを実際にデータの散布図を作成することに当てはめて考える。

まず、2変量のデータであれば、空間基板を「平面」とし、グラフィック



要素を「点」、グラフィック特性としては適当な「大きさ (サイズ)」、「形」、場合によっては「色」を選択すれば、注意1で指摘された定量データの知覚が最も正確といわれている「位置」という属性のみを用いて2次元散布図という視覚表現を適切なソフトウェアを利用してコンピュータ画面に描画(ビュー)できることに注意しよう。

次に、3変量のデータに対しては空間基板を「空間」とし、グラフィック要素を「点」、グラフィック特性としては適当な「大きさ (サイズ)」、「形」を選択すれば3次元散布図を描くことによって視覚表現が得られる。この視覚表現は2次元散布図を3次元的に自然に拡張したものと考えることができるけれども、この視覚表現には点が点の後ろに隠れる隠蔽 (occlusion) という問題が起こったり、隠蔽が起こらなかったとしても点の正確な位置を把握することが困難であるという問題を避けることができないことに注意が必要である。この問題に対して、3変量のうち2変量を二次元散布図、1変量をグラフィック特性である適当な「大きさ (サイズ)」の「円」にマッピングするというアイデアが考えられ、この視覚表現はバブルチャート (bubble chart) と呼ばれる<sup>4)</sup>。

バブルチャートは「円」というグラフィック特性を持つが、その「大きさ (サイズ)」という属性には「面積」もちろんあるが、「径」(「半径」、「直径」) または「円周」といった「長さ」に関する「大きさ」も考えることができる。これらのうちどちらの属性がその「大きさ」として適切かというプリミティブな問題が考えられる<sup>5)</sup>。

---

4) バブルチャートは、データが非正の値を持つ場合は特別な扱いが必要となることに留意されたい。また、隠蔽の問題はバブルチャートにおいても起こる可能性があることに注意しよう。

5) Cleveland and R. McGill (1984) では、  
*a circle has an area associated with it, but it also has a length, and a person shown circles might well judge diameters or circumferences rather than areas, particularly if told to do so.*  
と指摘されている。

## 2. 円の大きさの認知に関する予備調査

円の大きさの認知に関する問題に対して以下のような方法で調査を行った。

調査媒体：Google Forms (Facebook 上で情報を拡散)

被験者数：295人

調査仕様：図7を提示し、

「円の大きさとその円が表す定量的な値の関係を調べています。ご協力の程、よろしくお願いいたします。なお、この調査の結果は、情報可視化の研究以外には使用しないことをお約束いたします。また、この調査は、心理テスト等ではありません。もちろん正解も存在しません。単純に人間の脳の働きを調べています。」

と前置きした上で、

### 質問文

「上の画像で、真ん中の円が100という大きさを表すとすると、その2倍の大きさを表す円は、ABCDEFのうちどれだと感じますか？」

という質問を行った。

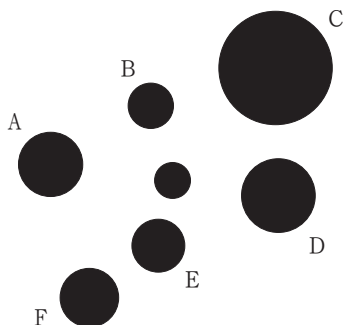


図7：円の大きさの認知に関する調査に利用した図

この調査の結果は図8のように与えられた。

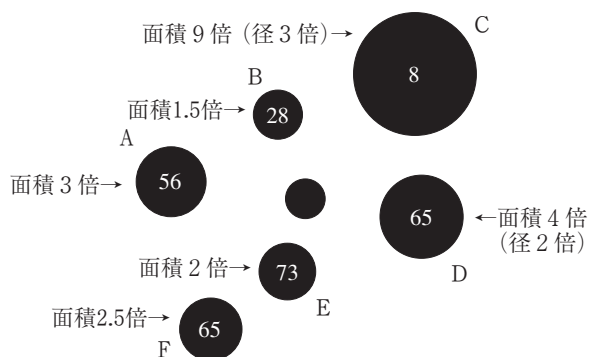


図 8：円の大きさの認知に関する調査結果

この結果は極端に小さい B と極端に大きい C 以外の 4 つの場合に見解が分かれたものとなっていることに注意しよう。

### 3. バブルチャートにおける円の大きさの認知に関する作業仮説と統計的仮説検定

バブルチャートを作成する際にどのパターンが最も自然に「2 倍」と認知されるかということを検証するために予備調査の考えを反映させて以下の作業仮説を立てた。

#### 作業仮説

円の大きさを 2 倍と認知するのは「半径」と「面積」がそれぞれ 2 倍となる場合の間にある

また、予備調査の結果をふまえて上位の 3 パターン、

- (P1) 面積が 2 倍 (半径  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1.4$ ) 倍) の場合
- (P2) 面積が 2.5 倍 (半径  $\sqrt{10}/2$  ( $\approx 1.6$ ) 倍) の場合
- (P3) 面積が 4 倍 (半径 2 倍) の場合

に絞って考え、この仮説を統計的に検定するために以下のような統計的仮説を立てた：

$$(H1) \begin{cases} H_0 & : \pi_1 = \pi_2 \\ H_1 & : \pi_1 < \pi_2 \end{cases}, \quad (H2) \begin{cases} H_0 & : \pi_2 = \pi_3 \\ H_1 & : \pi_2 > \pi_3 \end{cases}$$

ここで、 $\pi_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) はパターン (Pi) を妥当と認知する割合 (母比率) である。

この作業仮説を検証するために以下のような仕様で調査を行った。

調査媒体：Google Forms (Facebook 上で情報を拡散)

被験者数：188人

調査仕様：調査のページに到着順に、

「バブルチャートすなわち、円の大きさをもって3つ目の次元の定量的な値を表す散布図において、円の大きさとその円が表す定量的な値の関係を調べています。ご協力よろしくお願いたします。なお、この調査の結果は、情報可視化の研究以外には使用しないことをお約束いたします。また、この調査は、心理テスト等ではありません。もちろん正解も存在しません。単純に人間の脳の働きを調べています。」

と前置きした上で、図9<sup>6)</sup>のパターン (P1)、(P2)、(P3) の中から一種類だけをランダムに表示させ以下の質問を与えた。

質問文

「上の図のバブルが、左から順に100 200 300という値を表すとすれば、各円の大きさの関係は妥当だと思えますか?」

この調査の結果を表1に与える。

有意水準を  $\alpha=0.01$  とし、この結果を利用して仮説 (H1) と (H2) に対する比率の差の検定 (例えば、稲垣他 (2013) 参照。) を行うと、ともに有意となり<sup>7)</sup>、帰無仮説が棄却され、対立仮説が採択される。よって、面積が

6) 円の大きさの候補について被験者の認知を助けるためにここではそれぞれの場合に応じた3つの円を用意した。

7) p 値はそれぞれ、0.0087、0.0013で与えられる。

表 1：集計結果

パターン	妥当である	妥当でない	計
(P1)	43	20	63
(P2)	54	9	63
(P3)	39	23	62

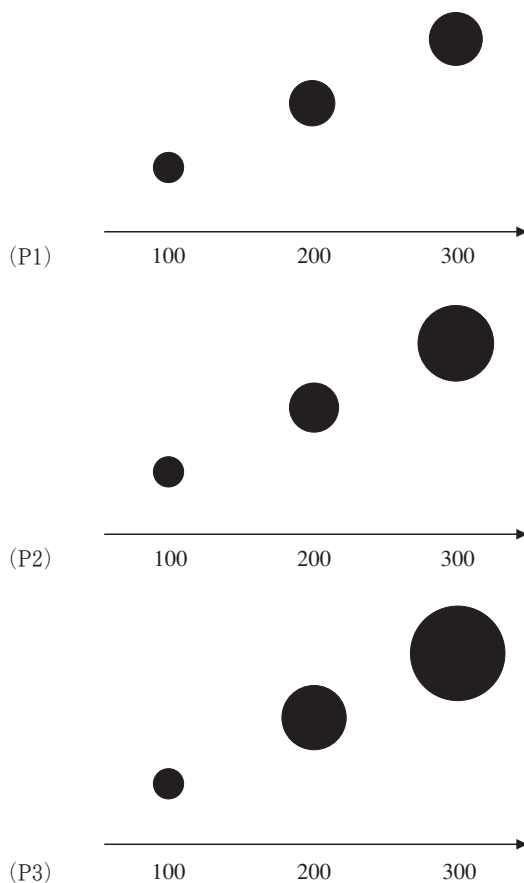


図 9：バブルチャートにおける円の大きさの認知に関する調査に利用した図：  
 順に (P1) 面積 2 倍 (半径  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1.4$ ) 倍)、(P2) 面積 2.5 倍 (半径  $\sqrt{10}/2$  ( $\approx 1.6$ ) 倍)、(P3) 面積 4 倍 (半径 2 倍) の場合

2倍のものよりも2.5倍のものが妥当であるということと、面積が4倍（半径が2倍）のものよりも2.5倍のものが妥当であると統計的には推測される<sup>8)</sup>。

## V おわりに

本稿では、データ可視化における基礎的な事項について述べた後、コンピュータ環境による効果的なデータの可視化を行う際に重要となるグラフィック特性の認知についての調査をふまえた簡単な結果を与えた。この結果は、暫定的ではあるもののバブルチャートを描く際に円の大きさを設定するための一つの指針を与えることに注意しよう。ただし、この結果はあくまでも作業仮説にもとづくものであり、バブルチャートの円の大きさとしてより適切なものがある可能性があることは指摘しておきたい。なお、このことを実際に検証する方法としては、ここで行ったように面積が「2倍」、「2.5倍」、「4倍」のような大きさに関する情報を事前に与えるのではなく、動的かつインタラクティブな方法で被験者によって描かれた円を観測することによって、円の「適切な大きさ」を推測することが考えられる。なお、この問題を含むその他のグラフィック特性（色（color）等）についても今後の研究テーマとしたい。

（筆者（地道）は関西学院大学商学部教授）

（筆者（前田）は関西学院大学大学院商学研究科博士課程前期課程）

付記：本稿は2014年8月23日に関西学院大学梅田キャンパスで開催された国際数理科学協会年次大会における報告（タイトル：「ビジュアルライゼーションにおけるグラフィック特性の認知に関する考察」）における原稿に加筆・修正を加えたものである。

---

8) ここでは、対立仮説として片側の場合を考えるために単独に2種類の仮説検定を行ったが、3つの母比率に対する帰無仮説族を考え多重比較を行うことも可能であることに注意しよう。なお、詳細は省くがライアンの方法とテューキーの方法を用いた多重比較の結果も単独で行った検定の結果と同様に、有意となったことを補足として述べておこう。

## 参考文献

- [ 1 ] Cleveland, W. S. and R. McGill (1984) Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 79, pp. 531-554.
- [ 2 ] Few, S. (2012) *Show Me the Numbers: Designing Tables and Graphs to Enlighten, Second Edition*, Analytics Press.
- [ 3 ] 稲垣宣生、吉田光雄、山根芳知、地道正行 (2007) 『データ解析の数理 統計学講義』、裳華房.
- [ 4 ] 松村編 (2006-2008) 『スーパー大辞林3.0』、三省堂.
- [ 5 ] Mazza, R. (2009) *Introduction to Information Visualization*, Springer.  
(中本浩訳 (2011) 『情報を見える形にする技術』、ポーンデジタル.)
- [ 6 ] Shedroff, N. (1994) *Information interaction design: A unified field theory of design*, <http://www.nathan.com/thoughts/unified/>.
- [ 7 ] Spence, R. (2014) *Information Visualization: An Introduction, Third Edition*, Addison-Wesley.
- [ 8 ] Tresiman, A. (1985) Preattentive processing in vision, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 31 No. 2, pp. 156-177.
- [ 9 ] Tufte, E. R. (1990) *Envisioning Information*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- [ 10 ] Tufte, E. R. (1997) *Visual Explanations*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- [ 11 ] Tufte, E. R. (2001) *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press, Cheshire, Connecticut.
- [ 12 ] Tufte, E. R. (2006) *Beautiful Evidence*, Graphics Press, LLC.
- [ 13 ] Ware, C. (2013) *Information Visualization: Perception for Design, Third Edition*, Morgan Kaufmann.