

# 情報視覚化の認知研究：背景説明

## Cognitive Studies of Information Visualizations: Backgrounds

佐藤 有理<sup>†</sup>, 下嶋 篤<sup>‡</sup>  
Yuri Sato, Atsushi Shimojima

<sup>†</sup>ブライトン大学 計算・工学・数学部 <sup>‡</sup>同志社大学 文化情報学部  
School of Computing, Engineering and Mathematics, University of Brighton,  
Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University  
y.sato@brighton.ac.uk, ashimoji@mail.doshisha.ac.jp

### Abstract

We discuss some backgrounds of cognitive studies of information visualizations as an introduction to the organized session “cognitive theory and application of information visualization.” First, we explain the cognitive efficacy of diagrammatic representations in human reasoning, including cognitive potentials such as free ride, over-specificity, and auto-consistency. Second, we illustrate some recent developments in cognitive studies of data and abstract information visualizations, focussing on global information processing in graph comprehension, complex-knowledge representation in ontology engineering, automatic caption generation from images, and design choice levels.

**Keywords** — information visualization, external representation, diagrammatic representation, graph, map, chart, infographics, diagrammatic reasoning.

### 1. はじめに

情報を視覚化するという行為は私たちの文化に広く深く入り込んでいる。それは、忘れないように誰かの名前を書き留めるという日常的な行動から、計算機を使って多次元的な大規模データを精巧なグラフに表現するという高度に専門化された行動にまで至る。ここでいう「情報の視覚化」は、かならずしも視覚認知の対象でないものも含め、広くアイデア、概念、データ、知識、思想を、一定の規則にしたがって外的な平面や空間に投射する行為を指している。こうして産出される視覚表現は、新たに知覚・解釈・理解されることによって、記憶、思考、伝達、学習を補助する機能をもっており、分散認知の主要なツールであると言える。本発表では、オーガナイズド・セッション「情報視覚化の認知理論と応用」の序論として、情報視覚化の認知研究に関する背景説明を提供する。

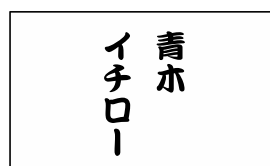


図 1

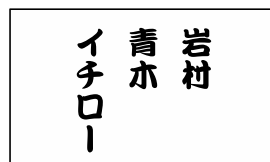


図 2

### 2. 視覚表現の有効性

本稿ではまず、Shimojima [24] に基づき、多くの図形表現において共通して見られる、認知的に利用可能な特性を抽出し、それを紹介する。複数の前提にあたる情報を一つの図形として描くだけで、結論にあたる情報が自動的に表示されるといふ「タダ乗り (free ride)」、ある種の抽象情報を図で表現できない「過剰な特定性 (over-specificity)」、矛盾のある情報を表現できない「自己整合性 (auto-consistency)」などである。いずれの例においても、演繹推論のプロセスの一部が外的な対象である図形の操作によって肩代わりされたり、阻害されたりする。この点で、視覚表現・図形表現を用いた推論は「分散認知」の利点と難点の両方を証示する典型例であるといえる。

#### 2.1 タダ乗り

例として、イチローと松井と岩村と青木と新庄の5名の野球選手についての情報を、ポジション図 (名前が左にあれば、その名前の主は右にある名前の主よりもすぐれていることを意味する) で表現するケースを考える。図1は前提1情報「イチローは青木よりもすぐれている」を表す。さら

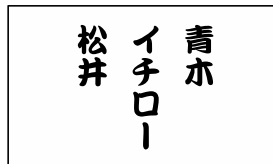


図 3

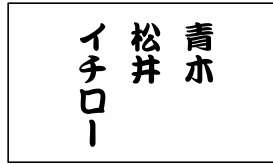


図 4

に、この図形表現に「青木は岩村よりもすぐれている」の前提2情報を書き加える(図2)。すると、「イチローは岩村よりもすぐれている」という結論情報が、自動的に表せている。

これはポジション図のみならず多くの図形表現系が持つ、利用可能な特性を例示している。すなわち、前提にあたる情報の集まりを一つの図形として描くと、結論にあたる情報が描けている。このプロセスでは、頭の中で行なわれる演繹推論(前提から結論が帰結するかの判断)の一部が省略され、外的な図形を認識・解釈するという課題に置き換わっている。これを、推論における「タダ乗り (free ride)」といい、従来から多くの研究者によって指摘されてきた図の特性である [1, 13, 26]。

## 2.2 過剰な特定性

次に、前提1「松井は青木よりもすぐれている」と前提2「イチローは青木よりもすぐれている」の情報を表現するケースを考えよう。この情報だけからでは、松井とイチローのどちらがすぐれているか決まらないので、図3のように描くか、図4のように描くかという選択に迫られる。もちろん、このような不確定な側面のある情報の集まりを図として描くことを諦めるという道もあるが、ここではそのような道をとらずに、あくまでひとつの(一列の)図形として描くことにする<sup>1</sup>。図3を選べば、「松井はイチローよりもすぐれている」という必ずしも妥当な帰結とは言えない情報が表示されるし、図4を選べば、「イチローは松井よりもすぐれている」というこれまた必ず妥当とは言えない情報が表示される。

このプロセスでは、図形を描くという行為が、妥当でない結論を選択し、表示するという行為

<sup>1</sup>何が一つの図形表現かは、表現系の表現力の強さによって異なる(近年の図形論理の研究[27]を参照)

にあたってしまう。このような図形表現の特性は「特定性 (specificity)」とか、「過剰な特定性 (over-specificity)」と呼ばれる [23, 28]。

## 2.3 自己整合性

次に、前提1「イチローは青木よりもすぐれている」と前提2「青木は新庄よりもすぐれている」と前提3「新庄はイチローよりもすぐれている」の情報を表現するケースを考えよう。ここで、イチローを青木の左に置くことによって前提1を図形として表現することができるが、そのあと、前提2において新庄をどこに置けばいいだろうか。仮に、新庄を青木の右に置くとすると、新庄をイチローの左に置くという前提3の要求に応えられない。あるいは、前提3に従って新庄をイチローの左に置くと、今度は前提2の要求に応えられない。

このように、図形は一定の種類の矛盾した情報を一度に表現することができない。言い換えれば、図に描ける情報は、その種の矛盾を免れている。したがって、図形を描くという操作は、情報の集合が整合的か(矛盾はないか)を頭の中で判定する行為を代替することができる。このような図形表現の特性を「自己整合性 (auto-consistency)」と呼ぶ [2, 12]。

## 3. 情報視覚化の認知研究の最近の動向

次に、データ可視化と抽象情報視覚化それぞれの認知研究の最近の展開について解説を行う。

### 3.1 ローカル処理とグローバル処理

初期の研究では、比較的単純なグラフィック表現が研究対象にされることが多かったが、近年の研究の1つの特徴として、現実で使用されるようなある程度複雑なグラフィック表現に対象を拡大し、その認知過程が分析されている。その影響として、データを視覚化したグラフィック表現の理解過程における、ボトムアップ的なローカル情報処理だけでなく、トップダウン的なグローバル情報処理の重要性が指摘されている。

例えば、コロプレス(階級区分)地図を使った Ratwani et al. [17]の研究では、パターン認識によって情報の視覚クラスタが形成され、さらに視覚クラスタは認知的な処理においてグラフにおける一般的な傾向を考えるために使われることを、言語プロトコルと眼球運動の計測実験から明らかにした。さらに、Ratwani & Trafton [16]は、折れ線グラフ、棒グラフ、円グラフ、ドーナツグラフの情報抽出において、それらに共通するグラフスキーマが

存在することを議論している。Hegarty et al. [10] は、天気図の理解におけるボトムアップ的な視覚デザインの効果と、トップダウン的な学習の効果の相互作用について、正答率と視線停留データから議論している。

## 3.2 計算機科学の波

### 3.2.1 オントロジー工学

抽象情報、特に論理情報における人間の思考は、これまでも認知科学の主要な研究対象であった。例えば、標準的な量化子を伴う定言の三段論法や、条件法や選言などの結合子を伴う推論である [6]。最近の展開として、特に計算機科学の方面から、より複雑な論理情報にかかわる人間の思考に注目が集まっている。例えば、オントロジーとして記述されるような複雑な世界知識を扱う場合、従来の研究で取り扱われてきた一項述語 ( $Small(x)$ ,  $Square(x)$  など) から二項述語 ( $SameSize(x, y)$ ,  $SameShape(x, y)$  など) へと思考の範囲が拡大される。

通常、これらは何かしらの形式言語 (例えば、ウェブオントロジー言語: OWL) を使って記述され、推論や判断などの様々な思考において利用される。Horridge et al. [11] では、OWL ユーザ (必ずしも論理学に精通しているわけではない) を対象とした実験において、OWL によって記述された文間の含意関係判断の認知的複雑さが検討されている。Nguyen et al. [14, 15] では、OWL 文を自然言語文 (制御された自然言語) に翻訳し、それを用いて、特別な訓練をしていないノービスを対象として同様の実験を行っている。いずれの実験においても、オントロジーにおいて登場する多くの演繹規則を含む推論を、人間が正しく遂行することの困難さが示されている。

このような状況もあり、現在、多数の情報視覚化システムが提供され、その認知評価を巡る議論も含め、多くの関心を集めている<sup>2</sup>。ただし、Dudás et al. [5] において示されているように、例えば、OWL 言語と同等の表現力を持つ視覚化表現系はそれほど多くはない。そして、そのような表現系は、すべからず空間的制約のみを利用した図形表現ではなく、第2章で解説した認知的に利用可能な特性も多くの場合成り立たない。現在のところ、このような複雑なケースを包括的に扱うための道具立ては、十分に整っているとは言い難い。以下では、このような状況を改善することに (将来的

<sup>2</sup>例えば、Journal of Web Semanticsにおいて、Visualization and Interaction for Ontologies and Linked Data 特集号が2017年に刊行され、同名の国際会議も定期的に開催されている。

に) 何らかの形で寄与する可能性のあるアプローチについて言及しておこう。

### 3.2.2 画像の説明文自動生成

オントロジーにおけるような複雑化した視覚化システムでは、視覚的に直接把握可能な部分と、知識によって補足的に理解可能となっている部分を区別することが重要である。これを考える際に、自然言語処理の限界で近年盛んな「画像の説明文の自動生成技術」 [3]<sup>3</sup> を利用することは可能だろうか。ある画像の意味内容を表す自然言語文が意図通り自動生成されるが、別の画像ではそうでない場合、前者の画像は統語的な構造と意味の対応が直接的であり、後者は恣意的な規則によって間接的に対応づけられているといえるかもしれない。

これまでの図的推論の研究においても、統語的な構造と意味の対応関係に注目し、図形表現の意味理解における有効性を説明する試みは行われてきた [9]。しかし、具体的にその関係を判定する手段は十分に提供されてこなかった。現在のところは、自動生成されるキャプションにそこまでの精度はないようだが、この技術に基づいた認知研究は将来的に可能な方向性の一つとして期待できる。

### 3.2.3 視覚表現のデザイン選択の4つのレベル

個別の視覚表現系を対象にばらばらに認知評価が行われ、一般的な知見を得られないという事態を防ぐために、視覚表現のデザイン選択の際の基準を確立することが重要である。Blake et al. [4] における視覚表現のデザイン選択の3つのレベル (記述・位相・グラフィクス) に、ここでは表記ユニットのレベル (notational choice) を加えて説明を行う。

- 表記ユニット (notational choice)
- 記述 (descriptive choice)
- 位相 (topological choice)
- グラフィクス (graphical choice)

表す意味は同じだが、統語的な構造が異なる視覚表現について、どちらのデザインを選択すると理解し易く、要求されている課題において使い勝手が良いかが各レベルごとに検討される。上位のレベルでは下位のレベルにおける違いは無視され、下位のレベルでは上位のレベルにおける選択の結果は引き継がれる。最も上位の表記ユニット

<sup>3</sup>簡単に利用可能なツールとして、例えば、Microsoft 提供 CaptionBot: <https://www.captionbot.ai>

のレベルでは、表記を構成するユニットが異なるもの間で選択が行われる。例えば、概念の関係をグラフで表すのかツリーで表すのかの選択がこれにあたる[8, 21]。記述のレベルでは、同じ表記ユニットを持つ視覚表現において直接的に記述されていることの違いが反映される。例えば、円Aが円Bに含まれる図は $A \subseteq B$ の意味情報を直接記述し、円Aの内側で円Bの外側の領域に影が付いている図は $A \cap \bar{B} = \emptyset$ の意味情報を直接記述している(両者の意味情報は同値である)。いわゆるオイラー図とヴェン図の比較はこのレベルの選択である[19, 20]。位相のレベルでは、例えば、上のオイラー図において円Aと円Bに接地点を設けるか否かの選択が該当する。いわゆるwell-formedness[7, 18]はこのレベルで扱われる。グラフィックスのレベルでは、それ以外の図形を構成するオブジェクトの形や色や角度などによる違いが扱われる[4, 22]。概念の何を根本的なものとして捉えるかによって、構成される視覚表現は最も大きく異なる。表面的な比較に陥らないためにも、まずは表記ユニットのレベルにおいて、タイプとして異なる視覚表現から比較検討を行っていくことが重要である。

#### 4. おわりに

古くはアリストテレス以来、様々な分野の研究者が情報の視覚化について思考し、観察し、実験してきた。こうした関心は、1980年代末以降、論理学・人工知能研究・認知心理学の協同を生みだし、現在では「図的表現・推論の理論と応用」という定期的な国際会議<sup>4</sup>に継承されている。

しかし、情報の視覚化という現象がさまざまな形態と機能をもって現れることと、個別の研究を媒介する共通のフォーラムがいまだ少ないことにより、多くの場合、視覚化の研究は異なる分野でちりぢりに行われているというのが現状である。

そこで、オーガナイズド・セッション「情報視覚化の認知理論と応用」では、広く情報の視覚化に関心をもつ認知研究者のもと、理論、実験、観察等、研究方法の違いに拘泥せず、研究の成果を発表し、議論する場を提供したい。互いの研究成果や研究方法を参照し合って、より広い観点から視覚化という現象にアプローチするきっかけを作る。これにより、視覚化の観点から、人間の分散認知のメカニズムに光を当て、また、そうした理論的研究と連動して、より効果的な視覚化のデザインやその利用方法、視覚化の濫用に対する対策など、視覚化の実践をよりよく進めるための指針を探索する。

<sup>4</sup><http://www.diagrams-conference.org/international-conference-theory-and-application-diagrams>

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究 (B) 15H02716 の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Barwise, J., & Etchemendy, J. (1991/1996). Visual information and valid reasoning. In W. Zimmerman & S. Cunningham (Eds.), *Visualization in Teaching and Learning Mathematics, MAA Notes, No. 19* (pp. 9–24). Reprinted in G. Allwein & J. Barwise (Eds.). (1996). *Logical Reasoning with Diagrams* (pp. 3–26). New York: Oxford University Press.
- [2] Barwise, J., & Etchemendy, J. (1995). Heterogeneous logic. In J. Glasgow, N. H. Narayanan, & B. Chanrasekaran (Eds.), *Diagrammatic Reasoning: Cognitive and Computational Perspectives* (pp. 211–234), Menlo Park, CA: AAAI Press.
- [3] Bernardi, R., Cakici, R., Elliott, D., Erdem, A., Erdem, E., Ikizler-Cinbis, N., Keller, F., Muscat, A., & Plank, B. (2016). Automatic description generation from images: A survey of models, datasets, and evaluation measures. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 55, 409–442.
- [4] Blake, A., Stapleton, G., Rodgers, P., & Howse, J. (2016). The impact of topological and graphical choices on the perception of Euler diagrams. *Information Sciences*, 330, 455–482.
- [5] Dudáš, M., Zamazal, O., & Svátek, V. (2014). Roadmapping and navigating in the ontology visualization landscape. In *Proceedings of the 19th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, LNAI 8876* (pp. 137–152). Switzerland: Springer.
- [6] Evans, J. S. B. T., Newstead, S. E., & Byrne, R. J. (1993). *Human Reasoning: The Psychology of Deduction*. Hove, England: Erlbaum.
- [7] Fish, A., Khazaei, B., & Roast, C. (2011). User-comprehension of Euler diagrams. *Journal of Visual Languages and Computing*, 22, 340–354.
- [8] Fu, B., Noy, N. F., & Storey, M. A. (2017). Eye tracking the user experience-An evaluation of ontology visualization techniques. *Semantic Web*, 8, 23–41.
- [9] Gurr, C. A., Lee, J., & Stenning, K. (1998). Theories of diagrammatic reasoning: Distinguishing component problems. *Minds and Machines*, 8, 533–557.
- [10] Hegarty, M., Canham, M. S., & Fabrikant, S. I. (2010). Thinking about the weather: How display salience and knowledge affect performance in a graphic inference task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 37–53.
- [11] Horridge, M., Bail, S., Parsia, B., & Sattler, U. (2013). Toward cognitive support for OWL justifications. *Knowledge-Based Systems*, 53, 66–79.
- [12] Lemon, O., & Pratt, I. (1997). Spatial logic and the complexity of diagrammatic reasoning. *Machine Graphics and Vision*, 6, 89–108.
- [13] Lindsay, R. K. (1998). Images and inference. In J. Glasgow, N. H. Narayanan, & B. Chanrasekaran (Eds.), *Diagrammatic Reasoning: Cognitive and Computational Perspectives* (pp. 111–135), Menlo Park, CA: AAAI Press.
- [14] Nguyen, T. A. T., Power, R., Piwek, P., & Williams, S. (2012). Measuring the understandability of deduction rules for OWL. In *Proceedings of the First International Workshop on Debugging Ontologies and On-*

- tology Mappings, LECP 79* (pp. 1-12), Linköping University Electronic Press.
- [15] Nguyen, T. A. T., Power, R., Piwek, P., & Williams, S. (2013) Predicting the understandability of OWL inferences. In *Proceedings of 10th Extended Semantic Web Conference, LNCS 7882* (pp. 109-123). Berlin Heidelberg: Springer.
- [16] Ratwani, R. M., & Trafton, J. G. (2008). Shedding light on the graph schema: Perceptual features versus invariant structure. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 757-762.
- [17] Ratwani, R. M., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2008). Thinking graphically: Connecting vision and cognition during graph comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14, 36-49.
- [18] Rodgers, P., Zhang, L., & Purchase, H. (2012). Wellformedness properties in Euler diagrams: Which should be used?. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18, 1089-1100.
- [19] Rodgers, P., Stapleton, G., & Chapman, P. (2015). Visualizing sets with linear diagrams. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 22, 27:1-39.
- [20] Sato, Y., & Mineshima, K. (2015). How diagrams can support syllogistic reasoning: an experimental study. *Journal of Logic, Language and Information*, 24, 409-455.
- [21] Sato, Y., Stapleton, G., Jamnik, M., Shams, Z., & Blake, A. (2017). How network-based and set-based visualizations aid consistency checking in ontologies. Accepted for publication in *Proceedings of 10th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction* (5 pages). ACM.
- [22] Sato, Y., Wajima, Y., & Ueda, K. (2014). Visual bias of diagram in logical reasoning. In *Proceedings of 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 2342-2347). Austin, TX: Cognitive Science Society.
- [23] Shimojima, A. (1996). *On the Efficacy of Representation*. PhD thesis, Department of Philosophy, Indiana University.
- [24] Shimojima, A. (2015). *Semantic Properties of Diagrams and Their Cognitive Potentials*. Stanford, CA: CSLI Publications.
- [25] Shimojima, A., & Katagiri, Y. (2013). An eye-tracking study of exploitations of spatial constraints in diagrammatic reasoning. *Cognitive Science*, 37, 211-254.
- [26] Sloman, A. (1971). Interactions between philosophy and artificial intelligence: The role of intuition and non-logical reasoning in intelligence. *Artificial Intelligence*, 2, 209-225.
- [27] Stapleton, G. (2005). A survey of reasoning systems based on Euler diagrams. In *Proceedings of Euler Diagrams 2004, ENTCS 134* (pp. 127-151). Amsterdam: Elsevier.
- [28] Stenning, K., & Oberlander, J. (1995). A cognitive theory of graphical and linguistic reasoning. *Cognitive Science*, 19, 97-140.