

Title	手本との類似に基づく観点の発見
Author(s)	森田, 純哉; 永井, 由佳里
Citation	第五回知識創造支援システムシンポジウム報告書: 48-55
Issue Date	2008-03-14
Type	Conference Paper
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/4466
Rights	本著作物の著作権は著者に帰属します。
Description	第五回知識創造支援システムシンポジウム, 主催: 日本創造学会, 北陸先端科学技術大学院大学, 共催: 石川県産業創出支援機構文部科学省知的クラスター創成事業金沢地域「アウェアホームのためのアウェア技術の開発研究」, 開催: 平成20年2月21日～23日, 報告書発行: 平成20年3月14日

手本との類似に基づく観点の発見

森田 純哉 永井 由佳里

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

{j-morita, ynagai}@jaist.ac.jp

[概要] 人間による類似性の認知は、様々な観点（バイアス）によって影響を受ける。類似性認知や類推における観点を区別する要因の 1 つが、表層的類似と構造的類似の区別である。これまで、この要因は、生成的な課題において検討されてこなかった。本研究では、計算機モデルを利用した新たな分析手法を開発し、生成的類推における観点を分析した。実験において、被験者は提示された事例をアレンジするオリジナルのグラフィックを生成した。グラフィックの生成は 2 回繰り返された。生成されたグラフィックは、計算機モデルを利用して分析された。結果、はじめに生成されたグラフィックは、手本と表層的にも構造的にも類似したものであった。しかし、2 回目の生成では、2 種類の類似が分離した。この結果は、従来の類推の研究と整合するものであると同時に、生成における観点の変化を示すものである。

Similarity Computations for Viewpoint Discovery

Junya Morita Yukari Nagai

School of Knowledge Science

Japan Advanced Institute of Science and Technology

[Abstract] In studies of similarity cognition, the distinction between surface and structural similarity has been repeatedly investigated. However, this distinction has not been investigated in a generative analogy where target representations are not provided in advance. This study uses computational methods to analyze how this distinction is involved in generative analogy. In the experiment, participants were given an example and asked to generate an original graphic by modifying the example. The procedure was repeated twice. The result indicated that the first graphics that the participants generated were similar in both surface and structural features to the presented example. However, the second graphics that they generated varied in the degree of surface and structural similarity. This result may indicate characteristics of generative analogy but is also compatible with the results of previous studies of analogical reasoning.

1. はじめに

類似性の計算は、人間、および計算機による知的処理の基盤である。特に、既知のベースとの類似を利用し、直面するターゲットに対する推論を構築する類推は、学習や科学的発見において中心的な役割を果たすものとして知られてきた。この考えのもと、これまでに、類推に関する多くの心

理実験、計算機モデルの研究が行われてきた。

近年、類推の計算機モデル研究では、これまでに構築されてきた枠組みを、複雑な状況へ適用する拡張がなされている。その 1 つのトピックが、グラフィック間の対応を発見する視覚的類推である。たとえば、Forbus [5] は、フリーハンドで描かれたグラフィック間での対応を計算するモデル

を構築した。また、Ferguson [2] は、同型ではないグラフィックを柔軟に対応付けるモデルを提案した。これらの研究は、進展の著しい計算機資源を有効に利用したものであり、類推の認知科学的な研究に新たな展開を導くものといえる。

その一方で、計算機モデルが適用される心理学的研究においては、これに対応する転換がなされていない。確かに、近年の研究では、モデルに基づく詳細な要因が操作され、かつ複雑な刺激が用いられるようになった。しかし、そこで扱われる課題は、類似性や異同の判断、あるいは対応付けが主であり、従来までの研究と大きな変化はない。

著者らは、今までに検討されてきた課題は、ターゲットが事前に定められている種類の類推と考える。それに対して、現実世界では、ベースを参考にしながら、ターゲットを自由に作り上げる生成的類推も行われる。たとえば、美術制作は、モチーフの観察と模倣を通して新たな表現を開拓するものであり、類推と強い関係のある領域である。生成的領域を対象とした心理学的研究としては、美術教育における模倣による学習を扱ったもの [8]、先行する絵画をコピーすることによる芸術家の制作を検討したもの [10] を挙げることができる。しかし、従来のモデル研究と連続する形式的な分析を示す研究は行われていない。

本研究が取り組むのは、生成に関わる心理学的研究とモデル研究の隔たりである。この隔たりを埋めるために、類推の計算機モデルを、人間の生成的活動へ適用し、その性質を、従来の類推の理論に即して検討する。著者らは、このような問題にアプローチするためには、計算機モデルによって、人間が生成したデータを直接的に分析することが有効と考えている。以下、従来の類推研究を概観し、本研究の検討課題を述べる。

2. 検討課題

人間による類推と計算機による類推の最も大きな違いは、観点（あるいはバイアス）の存在である。人間が主観的に認識する類似は、暗黙的な観

点によって変化する。それに対して、計算機による出力の変化は、明示的な要因によって説明される。従来の研究では、人間に特有の観点を明らかにするために、計算機モデルによる対比が用いられてきた。

人間による類似の観点を検討する 1 つの基準が、表層的類似と構造的類似である。表層的類似は、オブジェクトの属性の類似を意味し、構造的類似は、オブジェクト間の関係構造の類似を意味する。構造写像理論 [6] では、述語論理的な表現を利用することで、述語の表層的類似（単 1 の引数をとる述語の対応）と構造的類似（複数の引数をとる述語の対応）を区別した。

構造写像理論では、構造的に類似し、表層的に類似しないベースを利用した類推こそが、高度な思考の特徴とされた。そして、この理論に基づく多くの心理学的研究によって、人間にとって、構造のみが類似するベースを利用した類推が容易ではないことが示された。通常の状態において、人間は、表層と構造の両者を含む「字義通りの類似」に影響を受けた類推を行うとされた [7]。構造的特徴に基づく類推を行えるのは、経験をつんだ熟達者に限られていることが明らかになった [9]。

本研究の目的は、表層的類似と構造的類似という観点の区別が、生成的類推にどのように関与するのかを検討することである。特に、そのような影響が経験の蓄積によってどう変化するのかを検討する。以下、本研究が採用した課題、および生成的類推の分析方法を示す。

3. 対象課題

本研究では、美術・デザイン領域における基礎教育からアイデアを得た課題を設定した。石橋ら [8] が検討したように、この領域では、手本をコピーすることによる学習がしばしば行われる。本研究では、特に、提示された手本を参考にしながらオリジナルのグラフィックを生成する課題を設定した。このような状況は、岡田ら [10] が指摘する Analogical Modification に基づく生成であると

いえる。

被験者に生成させるグラフィックの種類としては、美術教育で用いられる平面構成とした。平面構成とは、幾何図形などの単純なオブジェクトを、平面上に配置する課題である。図形を適切に配置した統一感のあるグラフィックの構成が目指される。この課題をとおして獲得が目指される能力は、要素間の関係を適切に調整することであり、構造写像理論の前提と親和性が高い。

本研究が採用した具体的な課題環境は、図 1 のスクリーンショットに示される。この環境において、ユーザは、提示される手本事例（右パネル）を参考に、自身の作品（左パネル）を構成する。グラフィックは、幾何図形を平面に配置することで構成される。平面上には、最大で 25 の図形を配置できる。幾何図形の属性は画面下のメニューによって選択される。ここで選択可能な属性は、x 軸方向の位置、y 軸方向の位置、サイズ、濃度、形状の 5 次元である。これらの次元は、現実の平面構成において操作される次元と対応している。

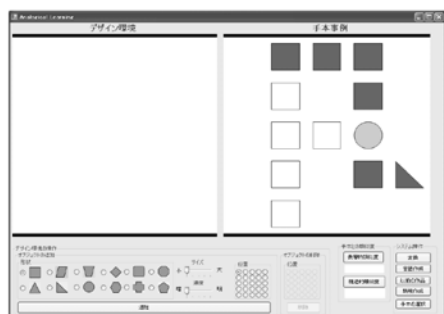


図 1：課題環境のユーザインタフェース

4. 空間生成の分析手法

上記環境において生成されたグラフィックと手本との類似を計算する。その際、表層的な類似と構造的な類似の両者を計算し、生成されるグラフィックの特徴を数量化する。表層的に類似したグラフィックを生成した被験者は、手本の表層的な特徴に観点を設定したとみなす。また、構造的に類似したグラフィックが生成された場合は、手本の構造的な特徴が生成に影響を及ぼしたとみなす。続いて、本研究における類似計算の手法を示す。

4.1 コーディング

類似の計算に先立ち、課題環境上のグラフィックを述語論理的な表現へと自動的に変換する。変換された命題の例を図 2 に示す。図 2 には、以下 2 種類の命題が示されている。

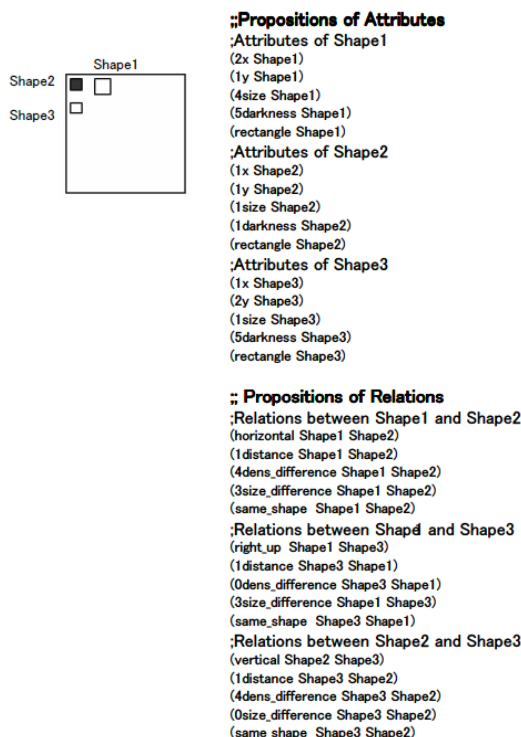


図 2：コーディングの例

- 属性表現:グラフィック中に含まれる全てのオブジェクトについて、先述した属性の次元ごとにその値を命題として表したものである。たとえば、(2x shape1) は Shape1 が x 軸 2 の位置に置かれていることを示す。
- 関係表現:グラフィックに含まれる全てのオブジェクトのペアについて、関係の次元ごとにその値を命題として表したものである。関係の次元は、距離、方向、濃度差、サイズの違い、形状の異同である。これらの値は、上記 1 において生成された命題から取得される。2つのオブジェクトの x 軸・y 軸の値から、距離と方向の値を取得する。濃度、サイズ、形状のそれぞれの属性値から対応する関係の値を取得する。

4.2 表層的類似

表層的類似は、ベースとターゲットでの属性の共有として計算する。数値化の方法は、Forbus:95によって提案された **Content Vector Match** を参考にした。特に、本研究では、記号表現に含まれる属性値の頻度を、次元ごとにカウントし、特徴ベクトルを構築する。そして、各次元におけるターゲットの特徴ベクトルとベースの特徴ベクトルの内積を算出し、それを平均する。なお、内積の算出に先立ち、特徴ベクトルを単位ベクトル化する。これにより、表層的類似の値は **0-1** の範囲となる。

4.3 構造的類似

構造的類似は、ベースとターゲットでの最大の共通構造として計算する。構造の共通性は、ベースに含まれる述語の構造を、ターゲットに含まれる述語の構造へ一貫して写像することで得る。構造的に一貫した写像とは、並列結合性（述語の対応付けに続き、引数を対応付ける）、1対1対応（ベースの要素とターゲットの要素が多対1、1対多対応にならない）の制約を満たすものである [6]。

図 3 は、本研究で扱う構造的類似の図的な説明である。上段と中段に、ベースとターゲットに対応するグラフィックと関係構造のネットワークが示される。ネットワーク中の楕円のノードが述語を表す。述語は引数となるオブジェクトとエッジで結合する。実線のエッジは述語の第 1 引数、点線のエッジは第 2 引数を表す。引数の順序に意味がない述語の場合は、ともに実線で結合する。図中の最下段に、ベースとターゲット間での共通構造が示される。

構造的類似の大きさ（構造的類似度）は、共通構造に含まれる述語の数とする。図 3 の場合、その値は **10** になる（図中、“size”に記載）。この値は、ターゲットの大きさとグローバルマップの大きさとの割合をとることで、**0-1** の範囲にする（図中、括弧内に記載）。

一般に、このような共通構造は、グラフマッチングのアルゴリズムによって抽出できる。本研究では、特に、**SME (Structure-Mapping Engine; [1])** に準拠したアルゴリズムを採用した。以下、本研究

における構造的類似の計算処理を、簡単に示す。

局所対応の構成 ベースとターゲットに含まれる命題を対応付ける。以後、これによって構成される対応を **P-match (Propositional-match)** と呼ぶ。

P-match の構成では、**SME** と同様、対応付けに 2 つの制約を設ける。第 1 に、2 つの命題間で述語が共通するもののみの対応を構成する。第 2 に、属性の対応付けを構成せず、関係のみを対応付けの対象とする。このような制約を、ターゲットに含まれる全命題とベースに含まれる全命題の全ての組み合わせについて適用し、得られた **P-match** を 1 つのリストに格納する。

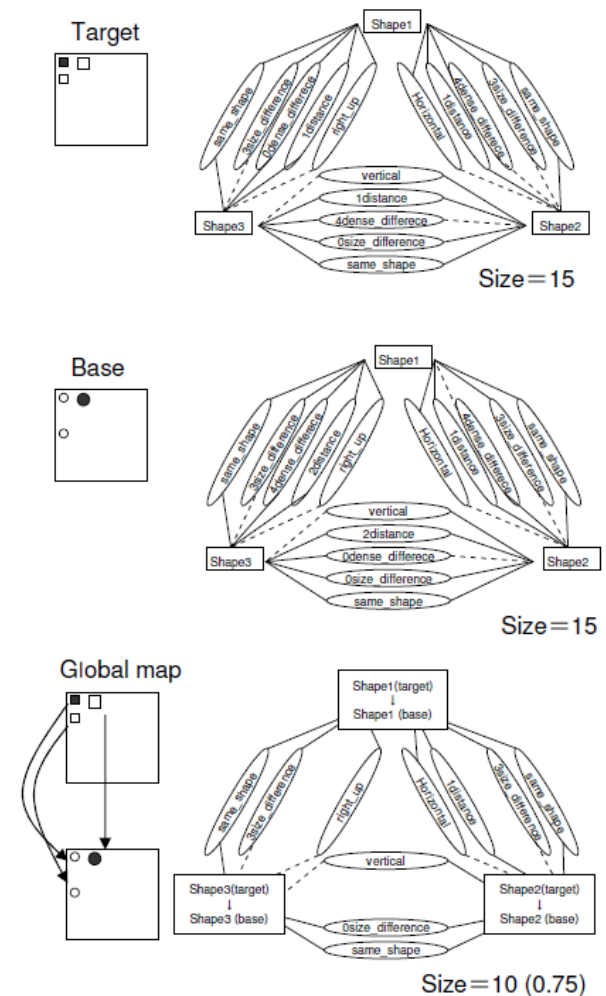


図 3: 共通構造の例

全体対応の構成 **P-match** を結合し、ベースからターゲットへの全体的な対応を構成する。ここでは、リスト中の **P-match** を順序付け、上位の **P-match** か

ら段階的にそれを結合するアルゴリズムを採用する [4]。本研究における P-match の順序付けには、全体の P-match リストにおける当該 P-match が持つ 2 つの O-match の出現頻度と共起頻度を加算した重みを用いる。

順位付けの後、選択された P-match と、格納リストにおける他の P-match との矛盾を調べる。ここで、 $P\text{-match}_i$ が $P\text{-match}_j$ と矛盾するとは、 $P\text{-match}_i$ における O-match の要素が、 $P\text{-match}_j$ における O-match において別の要素と結合することを意味する。このような矛盾した要素をリストから削除する。そして、残った P-match について、再度順位付けと矛盾した P-match の削除を行う。この処理を、リスト中に矛盾した P-match が存在している間、繰り返す。そして、最後に残った要素を結合し、ベースとターゲットの共通構造とする。なお、この処理の間に、矛盾した複数の P-match が最上位になった場合、それぞれの P-match を選択した上での Gmap を計算し、いずれか大きい Gmap を選択する。

5. 実験

グラフィックの生成に及ぼす表層的特徴と構造的特徴の影響を検討する実験を実施した。実験の焦点は、2 種類の類似による生成への影響が、経験によってどのように変化するかを検討することであった。経験による変化は、順序の効果として検討した。つまり、被験者に、グラフィックの生成を 2 回行わせる。平面構成という課題を知らない被験者にとって、2 回目の生成は、はじめの生成よりも、経験の多い状況とみなすことができる。

5.1 被験者

北陸先端科学技術大学院大学博士前期課程に在学する被験者 19 名が参加した。大部分の被験者は、平面構成に関わる基礎的な知識を有さなかった。

5.2 材料

図 4 に示す 2 つのグラフィックを、被験者へ提示する手本事例とした。これらは、北陸先端科学技術大学院の博士学生である 1 名の制作者が、課題環境を用いて、自由に生成したものである。こ

の制作者は、美術大学を卒業し、建築学の修士課程を修了したものである。現在は、陶芸作家として芸術作品の制作に従事している。

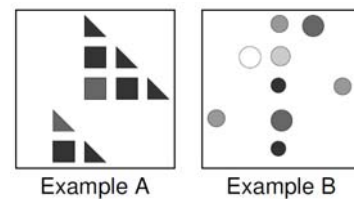


図 4: 実験に利用した事例

5.3 手続き

実験は個別に行われた。実験において、被験者は 2 つの事例を提示され、それぞれを参考にオリジナルのグラフィックを生成した。実験の手続きは、次のようなものであった。

教示 はじめに、被験者は、「この実験が手本に基づく平面構成の学習」を扱うものであると説明を受けた。その後、彼らは、「提示された事例を参考に、美しく創造的なグラフィックを生成してください」と教示された。その際、「必ず、手本事例を参考にするように」と強調された。さらに、「創造的なグラフィックをデザインすること」と、「手本事例を参考にすること」が、実験の要件であると明確に伝えられた。

前半セッション 課題環境の操作に関する説明と練習の後、被験者は、図 4 に示される事例の 1 つを提示された。その後、制限時間 30 分の間に、彼らオリジナルのグラフィックを生成した。

後半セッション 前半セッションにおいて被験者が生成を終えた後、実験者は、課題環境に新たな手本事例を提示した。被験者は、前半セッションと同様、制限時間 30 分の間に、グラフィックを生成した。なお、前半セッションと後半セッションで提示するグラフィックについて、被験者間でカウンターバランスをとった（10 名は Example A、9 名は Example B をはじめに提示された）。

6. 結果

被験者によって生成されたグラフィックについ

て、手本となった事例との類似を計算し、事例の生成に及ぼす表層的特徴と構造的特徴の影響を数値化した。そして、その影響が、前半と後半でどのように変化するのかを検討した。

6. 1 表層的類似と構造的類似の平均値

まず、前半・後半のそれぞれのセッションにおける、手本事例との表層的特徴、構造的特徴の平均値を検討した。その際、影響の有無を判断するために、そのとき手本とはしていない事例との類似 (Example A を参考に生成されたグラフィックについては、Example B との類似) を統制条件として設定した。

図 5 に前半と後半の各セッションにおける 2 種類の類似の平均値を示す。2 つの類似度のそれぞれを従属変数とし、2 (base の種類: influence, control) × 2 (順序: 1st, 2nd) 分散分析を実施した。結果、2 つの類似度ともに、順序の主効果 (表層的類似: $F(1, 18) = 0.00, n.s.$ 構造的類似: $F(1, 18) = 0.02, n.s.$)、交互作用 (表層的類似 $IF(1, 18) = 0.09, n.s.$ 構造的類似: $F(1, 18) = 0.11, n.s.$) は認められず、base の主効果 (表層的類似: $F(1, 18) = 29.07, p < .01$, 構造的類似: $F(1, 18) = 7.74, p < .05$) のみ有意となった。つまり、2 種類の類似度ともに、そのとき手本とはしていない事例との類似度よりも、手本とした事例との類似度が高かった。

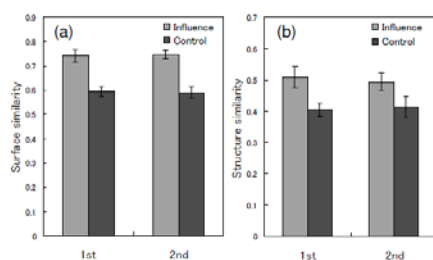


図 5: (a) 表層的類似の平均, (b) 構造的類似の平均。
エラーバーは標準誤差をあらわす。

6. 2 類似度の相互関係

上記の分析は、前半と後半に関わらず、生成的類推において、字義通りの類似が支配的であることを示す。この結果は、構造へのシフトを示すものではない。しかし、この結果から、経験による変

化がなかったと結論づけることはできない。独立な平均を検討しただけでは、個人単位における表層的特徴と構造的特徴の影響を検討できないからである。

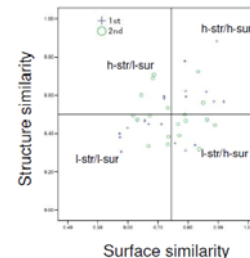


図 6: グラフィックの散布図

そこで、被験者の生成したグラフィックを、表層的類似度と構造的類似度の 2 軸にプロットした (図 7)。ここから、前半と後半のそれぞれにおける表層的類似度と構造的類似度の相関係数を算出した。結果、前半において有意な相関が認められ ($r(17) = .561, p < .05$)、後半では有意な相関が認められなかった ($r(17) = -.118, n.s.$)。

ここから、前半における生成では、表層的類似と構造的類似が分離されない字義通りの類似が支配的であったとの解釈が導かれる。しかし、相関が消滅した後半については、字義通りの類似が支配的であったと単純に考えることはできない。つまり、後半では、表層的には類似しないが構造的に類似した事例を生成した被験者、逆に表層的に類似するものの構造的に類似しないグラフィックを生成した被験者が存在したといえる。以下、類似の分離が生じたケースを具体的に示す。

6. 3 ケーススタディ

ケースの選定にあたり、図 6 を、表層的類似と構造的類似の平均値を基準として、4 つのエリアに区分した (図中で 2 本の実線によって区切られたエリア)。その後、各エリアの代表的な事例を、2 つの平均値からの標準化された距離が最も大きい事例として定義した (図中で、h-str/h-sur, h-str/l-sur, l-str/h-sur, l-str/l-sur と表記した事例)。

図 7 は、著者らが開発した類似度の視覚化インタフェースの上で、各ケースを分析した結果であ

る。インタフェースの左側には、類似計算の対象となった 2 つのグラフィックが示される。グラフィック上に重ね書きされている直線は、構造的類似に基づくオブジェクトの対応を示している。また、オブジェクト上の円の大きさは、そのオブジェクトが持つ対応数に比例している。システム右側のグラフには、2 種類の類似度の大きさが示される。グラフ中で、各類似度における 5 次元の相対的な関与は、色分けされて示されている。

ここから、表層的類似と構造的類似が分離する状況を推測できる。 $h\text{-str}/h\text{-sur}$ や $l\text{-str}/l\text{-sur}$ をみると、表層的類似と構造的類似で、対応する次元が類似度に関与する比率がほぼ等しくなっている。それに対し、 $h\text{-str}/l\text{-sur}$ や $l\text{-str}/h\text{-sur}$ は表層的類似と構造的類似のそれぞれで、関与の大きい次元が異なっている。 $h\text{-str}/l\text{-sur}$ では、表層的類似における x 軸の値が低いものにも関わらず、構造的類似における距離や方向の関与が大きくなっている。また、 $l\text{-str}/h\text{-sur}$ は、表層的類似における濃度やサイズの関与が大きい、構造的類似では、それらの関与が低くなっている。

つまり、2 つの類似が分離したケースでは、表層的類似と構造的類似の間で、対応する次元の関与が一貫していなかった。この理由は、2 つの類似度の計算処理の違いに求められる。属性値の共通性から計算される表層的類似に対し、構造的類似は相対的な値によって計算される。よって、 $h\text{-str}/l\text{-sur}$ のような、 x 軸方向へオブジェクトの位置を平行移動したようなグラフィックに対し、構造的類似は頑健である。また、表層的類似は次元の平均として算出されるが、構造的類似は、対立する Gmap 間での綱引きのような処理を通して出力される。そのため、 $l\text{-str}/h\text{-sur}$ のように、次元単体でみたときに類似していても、次元が統合されることで一貫的な対応が取れないことがある。

7. 考察

実験の結果、表層的類似と構造的類似の両者が、統制を上回った。特に、前半においては、両者の

相関も高かった。この結果は、字義通りの類似が支配的という知見と一致する。このように、本研究では、グラフィックの生成という文脈において、従来の研究と連続する知見を得た。このことは、類推の理論を用いることで、生成における観点の問題が検討できることを示している。

しかし、経験の効果としては、従来の知見と整合する結果は得られなかった。代わりに観察されたのは、2 つの類似の分離である。後半では、表層的類似と構造的類似が分離し、表層のみ、あるいは構造のみが類似するグラフィックが生成された。

これに対する 1 つの解釈は、経験によって、グラフィックの構造的特徴と表層の特徴が区別されるようになったというものである。つまり、事例を利用した生成という文脈においては、構造を単純にコピーするよりも、2 つの特徴を区別し、独創的に事例を利用することのほうが好まれると考える。このような解釈は、経験によって、構造的特徴に気づくことができるようになるという従来の知見と矛盾したものではない。むしろ、従来の知見と連続した形で、生成的類推を特徴付けるものといえる。

ただし、本研究には、設定した計算手法の限界がある。本研究における類似計算では、従来の研究で重視されてきた高階の関係 (Higher order relation) を組み入れていない。高階の関係とは、下位命題を引数とする関係的命題である。従来の研究において、高階の関係を含む要素の対応が、人間の類推で特別な役割を果たすことが示されてきた [6,7]。これらによれば、本研究が扱ったような 1 階の関係は、気づくのが容易な構造的特徴であるとされる。

本研究が、高階の関係を計算に含めなかった理由は、計算処理の明示性を重視したためである。視覚的類推の計算処理において、高階の関係を設定する方法は明らかなものではない。視覚的類推に関わる従来の研究では、高階の关系到準じる処理として、制作者の意図を含める [5]、類似したオブジェクトをまとめるチャンクを採用する [2] な

どが提案されている。しかし、これらの処理を、本研究で扱った課題へ適用する場合、類似計算に恣意的な仮定が入り込む。本研究の手法は、単純ではあるものの、生成的データの特徴づけ、人間の観点を浮き彫りにする基準としての役割は果たすと考えている。

参考文献

- [1] Falkenhainer, B., Forbus, K., & Gentner, D. (1989). The structure-mapping engine: Algorithm and example. *Artificial Intelligence*, 41, 1–63.
- [2] Ferguson, R. W. (2007). On the mediation of levels of similarity in analogical comparisons. In *Analogies: Integrating multiple cognitive abilities* (pp. 15–20). Universitat Osnabrueck.
- [3] Forbus, K., Gentner, D., & Law, K. (1995). MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval. *Cognitive Science*, 19, 141–205.
- [4] Forbus, K., & Oblinger, D. (1990). Making sme greedy and pragmatic. In *Proceedings of the 12th annual conference of the cognitive science society* (pp. 61–68). Lawrence Erlbaum.
- [5] Forbus, K., & Usher, J. (2002). Sketching for knowledge capture: A progress report. In *Proceedings of the 7th international conference on intelligent user interfaces* (pp. 71–77). ACM Press.

- [6] Gentner, D. (1983). Structure mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155–170.
- [7] Gentner, D., Rattermann, M., & Forbus, K. (1993). The role of similarity in transfer: Separating retrievability for inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25, 524–575.
- [8] Ishibashi, K., & Okada, T. (2004). How copying artwork affects students' artistic creativity. In *Proceedings of the 26th annual conference of the cognitive science society* (pp. 618–623).
- [9] Novick, L. R. (1988). Analogical transfer, problem similarity, and expertise. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14, 510–520.
- [10] Okada, Y., Yokochi, S., Ishibashi, K., Namba, K., & Ueda, K. (2007). Analogies: Integrating multiple cognitive abilities. In *Analogies: Integrating multiple cognitive abilities* (pp. 47–50). Universitat Osnabrueck.

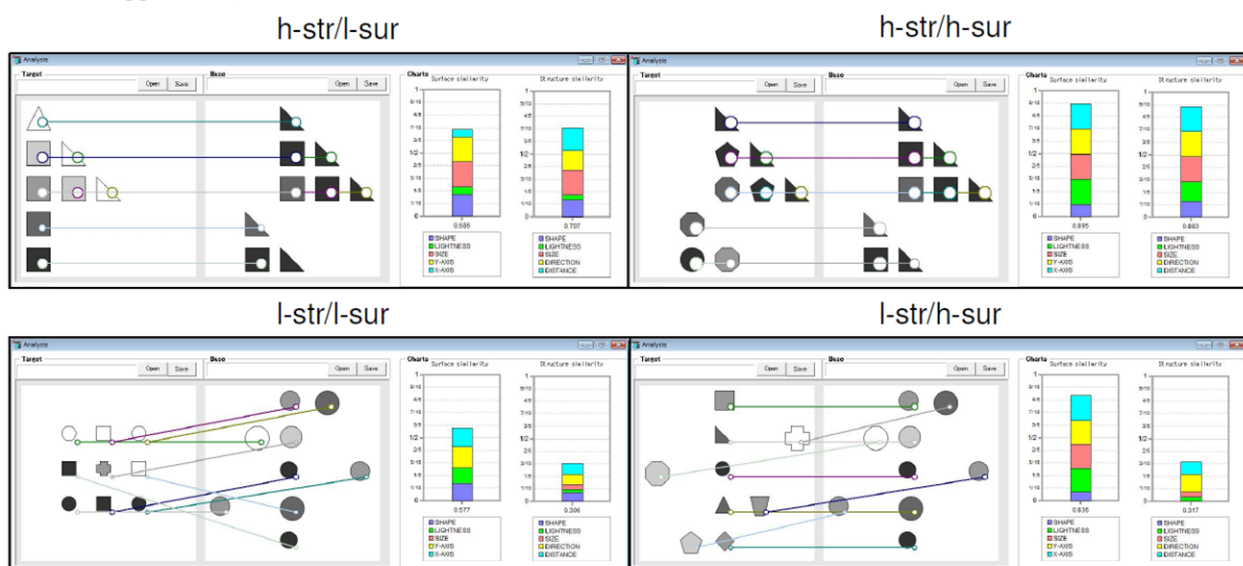


図7: ケーススタディ