

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03017

研究課題名（和文）図的表現を用いた思考トレーニングによる空間的知能への影響およびその客観的評価

研究課題名（英文）Effects of thinking training using graphical representations on spatial intelligence and its objective evaluation

研究代表者

杉尾 武志（Sugio, Takeshi）

同志社大学・文化情報学部・教授

研究者番号：60335205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、どのような視覚属性が大域的読解と関連するのか、大域的読解が行われていることを眼球運動といった客観的な指標から判断することができるのか、そして図的表現に対する意味的処理の神経基盤を明らかにすることを行った。その結果、図的表現を構成する複数の視覚属性同士が共通した感情を喚起させる場合に、大域的読解が増加することが明らかにされた。次に、視覚刺激に対する注意を向ける範囲の違いを眼球運動パターンから求められる指標によって定量化できることが示された。最後に、図的表現に対する意味的処理が左下頭頂小葉において行われていることがfMRIを用いた実験により明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的および社会的意義は以下の通りである。まず、図的表現に対する読解の個人差を客観的に評価するための指標（眼球運動パターンから求められる大域性を示す値および左下頭頂小葉の活動）を明らかにした。客観的な評価手法が確立することにより、個々の学習者に対してどのようなトレーニングが必要となるかを判断できる。次に、図的表現を構成する視覚属性間の適合性を考慮することで、大域的読解が促進されることが示された。このことは、個々の空間能力に関わらず図的表現によって重要な情報を提供するうえで、全体的に適合したデザインを用いることが重要であることを意味している。

研究成果の概要（英文）：The present study sought to determine what visual attributes are associated with global reading, whether it is possible to determine from objective measures such as eye movements that global reading is taking place, and the neural basis of semantic processing for graphical representations. The results revealed that global reading dominated when the multiple visual attributes that make up the graphical representation evoke common emotions among each other. Next, it was shown that differences in the extent of attention to visual stimuli can be quantified by an index derived from eye movement patterns. Finally, fMRI experiments revealed that semantic processing for graphical representations occurs in the left inferior parietal lobule.

研究分野：認知心理学

キーワード：図的表現 個人差 評価方法 大域的読解

1. 研究開始当初の背景

(1) STEM教育における図的表現に対する大域的読解の役割

グラフや地図といった図的表現は、日常のさまざまな場面において用いられている。表現対象に意味づけをおこなうためには、図的表現に対して大域的に注意を向けて構成要素の空間関係を処理する必要がある(=大域的読解)。こうした構成要素の空間関係の把握は、Science(科学)、Technology(技術)、Engineering(工学)、Mathematics(数学)の頭文字をとって称されるSTEM領域において、データの比較等をおこなう際に必須となる。あらゆる領域において膨大なデータが蓄積されていく中で、データの視覚化により背後にある関係性を直感的にとらえようとする試みは、STEM領域に限らず、社会全般において共有すべき取り組みである。このように、大域的読解により図的表現の派生的意味を読み取る能力は、今後ますます重要になると予想される。

(2) 図的表現を用いた思考トレーニングは空間的知能を高めるか

近年、STEM教育における空間認識能力の重要性が調査研究を中心に明らかにされつつある(Wai et al., 2009)。さらに、こうした空間認識能力がトレーニングにより向上することも多くの研究で実証されつつある(Uttal et al., 2013)。しかし、どのようなメカニズムによってトレーニングが空間認識能力を向上させるのか、そしてSTEM領域科目の成績の上昇につながるのかについては未だ明らかでない点が多い(Stieff & Uttal, 2015)。

一方で、コンピュータグラフィックスなどのビジュアライゼーション技術の進展により、データのインタラクティブな視覚化が身近なものとなってきた(Google社のストリートビュー等)。今後も次々と新しく登場していく技術を使いこなすためには、空間的思考を適応的におこなう能力が求められる(=空間的知能)。空間的知能は、課題遂行において心的イメージの必要性を判断する能力と、外的表現を適切に用いる能力から構成される(Hegarty, 2010)。後者はメタ表現能力と呼ばれ、表現の新たな作成、課題に対して最適な表現の選択、特定の表現が課題遂行を促進することの理解等を支えている。メタ表現能力は、情報やデータの性質による最適な表現形式の違いや、表現の選択におけるバイアスなどを学ぶことにより向上させることが可能である。図的表現を用いた思考は、解決すべき問題の構造と図的表現の間で構成要素ごとにマッピングをおこなうため、より抽象的な特性に注意を向けることが必要となる。その結果として、メタ表現能力の向上につながることを期待される。

2. 研究の目的

(1) 図的表現の大域的読解における視覚属性の役割

思考において図的表現を用いることで、情報をまとめた構造として整理することができる。その結果として、計算負荷が高い言語的推論の代わりに多くの認知資源を必要としない知覚的推論をおこなうことが可能となる。知覚的推論により、空間的に表現された要素間の関係を効率的にとらえることができる。要素間の関係を正しくとらえることは、図的表現における情報から何かしらの予測をおこなう上で不可欠である。しかしながら、図的表現に対して大域的に注意を向けて空間関係をとらえることができるかどうかは、さまざまな要因に依存している。

先行研究(Bar & Neta, 2006)および予備調査から、複雑さや角の有無といった視覚特徴が、その対象物に対して抱く快感情に影響することが明らかにされている。さらに、視覚情報処理において、快感情が処理の空間的範囲を拡大することも明らかにされている(Huntsinger, 2013)。これらの知見をふまえて、グラフのデザインによって快感情が喚起された条件では、より大域的な視覚情報処理がおこなわれ、結果としてグラフが表すデータの大域的特性について読み取りがなされるといった仮説が立てられた。

何かしらの実験や調査の結果をグラフとして提示するためには、たとえば棒の高さといったグラフが表現している内容と直接結びついた視覚属性をどう表現するかだけでは十分とはいえない。情報デザインにおいてしばしばとりあげられるような情報の見やすさや分かりやすさと認知心理学における知覚的体制化の役割をふまえると、棒グラフにおける棒の横幅や棒同士の間隔、棒の角の丸さといった視覚属性はグラフにおいて表現されている情報そのものには関連しないものの、グラフによる情報を作成者から読み取る側に伝達するという観点からは非常に重要である。こうした棒グラフの読み取り課題において直接的には関連しない視覚属性が読み取りの際の方略に影響するののかについて検討をおこなった。棒などの視覚要素の角の丸さといった属性は、好ましさや情動に影響することが多くの実験から明らかにされている。課題に無関連な視覚属性に対して何らかの好ましさや情動に変化が生じることで、視覚的注意を向ける範囲に影響し、その結果トップダウン的な視覚認知に影響する可能性がある。

(2) 空間特性の認知に関する指標としての眼球運動の有効性

これまで図的表現の読解について大域的および局所的といった2つの処理が存在することが明らかにされてきた。これら2つの処理に対する比重は、図的表現を構成する要素の視覚属性といったボトムアップ的な要因だけでなく、課題の特性や読み手の図的表現に関するリテラシー

といったトップダウン的な要因にも依存している (Carswell, Emery, & Lonon, 1993; Shah & Freedman, 2011)。読みに関する先行研究において、眼球運動から得られるデータが読みのスキルによる処理の違いを反映することが明らかにされている (Ashby et al., 2005)。このように、眼球運動は課題遂行中の認知過程や関連した能力の個人差を反映すると考えられ、読み以外の視覚認知が関わる課題において大域的および局所的といった 2 つの処理の関与を効果的にとらえることができる可能性がある。

本研究では、視覚表現の製作者の意図とそれらの読み手や観察者全般の理解の差異が眼球運動のどのような特性に反映されるかを検討することをおこなった。こうした生み出す側の意図と観察する側の理解の差異が明瞭な視覚刺激として、マジックの未経験者と経験者がそれぞれ実演したテーブルマジックの動画を使用することとした。観客の注意を誘導するためのミスディレクションと呼ばれる手法がマジックを成功させるためには不可欠であり、同じマジックであっても手順通りに実行するだけの場合と、意識的にミスディレクションをおこないながら実行する場合では眼球運動のパターンに違いが生じることが考えられる。ミスディレクションが有効に機能している場合は、画面における特定の範囲により限定的に観客の注意を向けさせることができると仮定できる。一方でミスディレクションが有効に機能していない場合は、画面におけるさまざまな要素に対して視線が自由に向けられるため、結果としてより広範囲に渡る眼球運動のパターンが観察されると仮定できる。

(3) 言語と図的表現に対する事象の理解の神経基盤

図的表現の活用が STEM 領域における効果的な学習をもたらすためには、図的表現がどのような事象を表しているのかについての理解が必要となる (Tversky, Heiser, & Morrison, 2013)。こうした事象の理解は意味的処理において中心的な役割を果たしていると考えられる。こうした図的表現に対する事象理解の神経基盤を明らかにすることで、学習者の領域に関する理解の程度を定量的に計測できる可能性がある。文章などの言語刺激を材料として、事象理解や意味処理の基盤を検討した先行研究は数多く存在しているが、異なる言語間、または言語と画像刺激間での共通した事象理解の神経基盤を検討した研究はこれまでみられてこなかった。

3. 研究の方法

(1) 図的表現のテーマと視覚属性と読み手の読解の関係

視覚属性がどのような感情価をもたらすかに関する知見をふまえ、喚起された感情価が図的表現の読み取りに与える影響について検討をおこなった。図的表現の一つであるグラフを対象に、そのデザインを構成する視覚特徴 (全体的な複雑さ、および角の有無) が、グラフに対する読み取り時の方略の違いとどのように関係しているかについて調査を実施した。

刺激に用いたグラフは、2 (複雑さ-低・高) × 2 (頂点-鋭角的・曲線的) × 2 (グラフの種類-社会統計的・実験的) の 8 条件用いた。刺激として、本調査 1 とは異なるデータセットから作成された棒グラフを用いた。刺激は、2 つの独立変数と 1 つの従属変数からなるデータセットから作成された棒グラフを用いた。棒グラフの横幅が大きいグラフを複雑さ-低条件 (14.75mm)、小さいグラフを複雑さ-高条件 (2.5mm) とした。棒グラフの頂点が鋭角的なグラフ・曲線的なグラフについて、鋭角的なグラフでは、実験 1 と同様のグラフに四角い枠線を追加したグラフを用いた。曲線的なグラフは、棒グラフの角部分を、直径 10 ピクセルの 4 分の 1 の円に、凡例部分を直径 5 ピクセルの円に置き換え、枠線部分の角を丸くしたグラフを用いた。

グラフのデータセットは、2 要因の交互作用と主効果があるもの、交互作用はあるが主効果はないもの、交互作用がなく 2 要因の主効果があるものの 3 種類を用いた。データラベルは、実験的な結果を示したグラフを 2 組、社会統計の結果を示したグラフを 2 組、計 4 組使用した。実験的な結果を示したグラフについて、1 組目は、あるスポーツの経験年数と行なった時間の朝・昼・夜によるエラー率の変化を表したグラフを用いた。x 軸にあるスポーツの経験年数の少・中・多、y 軸にスポーツのエラー率、凡例に朝・昼・夜を示した。実験的な結果の 2 組目は、ストレスと気温の高・中・低による活力のレベルの変化を表したグラフを用いた。x 軸にストレスの高・中・低、y 軸に活力のレベル、凡例に気温の高・中・低を示したグラフであった。社会統計の結果を示したものについて、1 組目は、年ごとの、地方の北・中央・南による人口の変化を表したグラフを用いた。x 軸に 1820 年・1840 年・1860 年、y 軸に人口、凡例に北・中央・南を示したグラフであった。社会統計の結果の 2 組目は、年ごとの居住場所の農村部・郊外・都心部による人口の変化を表したグラフを用いた。x 軸に 1900 年・1950 年・2000 年、y 軸に人口、凡例に農村部・郊外・都心部を示したグラフであった。

各参加者に対して、4 組のうち 1 つのグラフが提示された。参加者は、データラベルに従い「下記のグラフは、あるスポーツの経験年数と行なった時間の朝・昼・夜によるエラー率の変化を表したものです。このグラフを元に、経験年数・行なった時間がエラー率にどのような影響を与えているかについて、以下の回答記入欄に述べてください。」といった教示にしたがって、自由記述にて回答した。制限時間は特に設けなかった。本調査 1 と同様に、参加者の回答の中で、ローカルな回答とグローバルな回答に関する記述を、Carswell (1993) に従ってカウントした。

(2) 空間特性の認知に関する客観的指標としての眼球運動の利用

課題では、同じマジックを経験者が実演した動画をみる条件と初心者による条件に参加者を

割り当てて、3種類の動画を見ている際の眼球運動を Tobii Pro フュージョンを用いて計測した（時間分解能 250Hz）。

このように同じ視覚情報に対する注意の移動パターンの違いを眼球運動からとらえることができると考えられる。こうした眼球運動パターンの局所的・大域的な違いを Krejtz らが定義したを用いて定量化することで有効に評価できるかどうかについて検討をおこなった。は眼球運動の系列における停留時間とサッカーの振幅について、系列全体で標準化した値をもとに両者の差分をとったもので、値が正となる場合は停留時間が相対的に長いのに対してサッカーの振幅が小さいことを意味しており、局所的な領域内でより精緻に情報の獲得および処理が行われていることを示している。一方で、値が負となる場合は、停留時間に対してサッカーの振幅が相対的に大きいことを示しており、視覚表現全体を粗く走査しているモードにあることを意味している。こうした指標が視覚表現に対する注意パターンの分類に有効であるかどうか、さらにどのような要因と関連しているかを検証することで、ターゲットとなる領域の知識やスキルの違いが理解や学習に及ぼす影響を評価できる。

（3）言語と図的表現に対する事象の理解の神経基盤

一連の画像と文章でそれぞれ表現された内容（ストーリー）理解の過程について、日本語と中国語のバイリンガル（ $n = 32$ ）を対象にし、その脳内基盤の共通性および特異性を脳機能イメージング（fMRI）で検討した。共通性と特異性の検討にあたっては多変量解析手法のひとつである MVPA（mutli-voxel pattern analysis）を用いた。

4．研究成果

（1）図的表現の大域的読解における視覚属性の役割

調査結果に対して、グラフを構成する角についてまるめることで角を無くしたデザインと、そのまま残したデザインとの間の比較もおこなうことで、観察者が快感情を喚起させると考えられる複雑さと角の有無が、それぞれ読み取り時の空間的範囲に同じような形で関係するのかが検討された。

実験データおよび社会統計データそれぞれ2種類に計4種類のデータについて、棒グラフの棒の横幅および輪郭（角が丸まっているかどうか）を操作し、読み取った内容を自由記述にて回答を求めた。自由記述の内容は記述がデータ以外の個所やデータの一部のみ言及しているか（局所的）、データ全体を統合した記述となっているか（大域的）によってコード化された。結果は対数線形モデルにより検討をおこない、データの種類、回答と横幅および輪郭のそれぞれの組み合わせについて2次の交互作用がみられた。残差分析の結果、社会統計のデータについてのみ局所と大域の両方についての読み取りが増加することが明らかにされた。このことは、グラフにおける数値のどのような側面が課題遂行に必要であるかと関係している。さらに、「細くて角がある」場合と「太くて丸みがある」場合に局所と大域の両方についての読み取りが増加しており、このことは無関連な視覚属性であっても属性間の適合性が高いことで視覚処理の範囲が広がった可能性を示している。感覚間協応がグラフの読み取りといった空間課題の遂行に影響する可能性を示しており、文化的な影響を今後検討する余地があると考えられる。これらの結果は、日本心理学会第84回大会にて発表された。

（2）空間特性の認知に関する客観的指標としての眼球運動の利用

その結果、初心者による実演を見ている際には大域的な眼球運動モードが優勢であったのに対して、経験者による実演の場合は局所的な眼球運動モードが多くみられた。マジックごとに導入、ミスディレクション、示し（マジックで用いた対象がどのような状態になっているかを示し、観客を「驚かせる」フェーズ）に分けて、フェーズと演者の経験の混合計画として検討した結果、演者の経験の主効果のみ有意となった。このことはミスディレクションの効果が動画における後続箇所でもみられることを示しており、観客に対する注意の誘導がボトムアップ的だけでなく、観客の構えなどによるトップダウン的な要因の役割も大きいことを意味している。さらに、事後アンケートでは、実験参加者は初心者と経験者を有意に識別できていなかったことから、こうしたトップダウン的な要因が必ずしも意識的に働いているわけではないことが明らかにされた。こうした結果は、図的表現を含む視覚表現に対する眼球運動パターンの誘導効果が、視覚表現上での特徴によってボトムアップ的におこなわれた後でも無意識的に持続することを示している。今後、より広範囲での視覚刺激を用いるとともに、どのような特徴を用いた視覚的注意の誘導がその効果を持続させて、後続する視覚刺激の理解・学習に影響するかを明らかにしていく必要がある。なお、本結果については現在発表に向けて準備中である。

（3）言語と図的表現に対する事象の理解の神経基盤

結果から、左半球の下前頭回（ブローカ野）では、言語理解に対する特異的な反応が得られた。一方で言語ネットワークを構成する左半球の下頭頂小葉において、言語および画像に共通した内容理解に関する神経基盤が明らかとなった。これらは物体や事象に関する多感覚的な情報が収斂する領域であると考えられている。今後、図的表現に対する理解に関わる能力がこれらの活動とどう関連しているかを検討する必要がある。なお、本研究は *Frontiers in Human Neuroscience* 誌上にて発表された。

< 引用文献 >

Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 817-835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>

Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352-402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>

Stieff, M., & Uttal, D. (2015). How much can spatial training improve STEM achievement? *Educational Psychology Review*, 27(4), 607-615. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9304-8>

Hegarty, M. (2010). Components of spatial intelligence. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (pp. 265-297). Elsevier Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)52007-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)52007-3)

Bar, M., & Neta, M. (2006). Humans prefer curved visual objects. *Psychological Science*, 17(8), 645-648. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01759.x>

Huntsinger, J. R. (2013). Does emotion directly tune the scope of attention? *Current Directions in Psychological Science*, 22(4), 265-270. <https://doi.org/10.1177/0963721413480364>

Carswell, C. M., Emery, C., & Lonon, A. M. (1993). Stimulus complexity and information integration in the spontaneous interpretations of line graphs. *Applied Cognitive Psychology*, 7(4), 341-357. <https://doi.org/10.1002/acp.2350070407>

Shah, P., & Freedman, E. G. (2011). Bar and line graph comprehension: an interaction of top-down and bottom-up processes. *Topics in cognitive science*, 3(3), 560-578. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01066.x>

Ashby, J., Rayner, K., & Clifton, C. (2005). Eye Movements of Highly Skilled and Average Readers: Differential Effects of Frequency and Predictability. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 58(6), 1065-1086. <https://doi.org/10.1080/02724980443000476>

Tversky, B., Heiser, J., & Morrison, J. (2013). Space, time, and story. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 47-76). Elsevier Academic Press.

Krejtz, K., Duchowski, A. T., Krejtz, I., Szarkowska, A., & Kopacz, A. (2016). Discerning ambient/focal attention with coefficient K. *ACM Transactions on Applied Perception*, 13(3), 11-20. <https://doi.org/10.1145/2896452>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Haruki Yusuke, Ogawa Kenji	4. 巻 53
2. 論文標題 Role of anatomical insular subdivisions in interoception: Interoceptive attention and accuracy have dissociable substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 15157-15157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ejn.15157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yang Huixiang, Hu Zhengfei, Imai Fumihito, Yang Yuxiang, Ogawa Kenji	4. 巻 746
2. 論文標題 Effects of neurofeedback on the activities of motor-related areas by using motor execution and imagery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 135653 ~ 135653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neulet.2021.135653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ogawa K., Mitsui K., Imai F., & Nishida S.	4. 巻 202
2. 論文標題 Long-term training-dependent representation of individual finger movements in the primary motor cortex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neuroimage.	6. 最初と最後の頁 116051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2019.116051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hu Z., Yang H., Yang Y., Nishida S., Madden C., Ventre-Dominey J., Dominey PF., & Ogawa K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Common neural system for sentence and picture comprehension across languages: a Chinese-Japanese bilingual study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnhum.2019.00380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉尾武志
2. 発表標題 グラフの視覚属性が読み取り方略の選択に与える影響
3. 学会等名 日本心理学会 第84回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川健二
2. 発表標題 共感性と視点取得に関わる神経基盤と発達過程
3. 学会等名 第10回社会神経科学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊惠翔, 今井史, 小川健二
2. 発表標題 心的時間測定法、運動イメージの質問紙法 および時間感覚能力の関係性に関する検討
3. 学会等名 日本イメージ心理学会第21回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井史, 篠崎淳, 齊藤秀和, 長濱宏史, 櫻井佑樹, 長峯隆, 小川健二
2. 発表標題 運動実行と筋感覚運動イメージに共通した一次運動野の神経表象
3. 学会等名 日本イメージ心理学会第21回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ogawa K.
2. 発表標題 Principles of fMRI multivariate analysis and its applications in cognitive neuroscience
3. 学会等名 The Conference of Data Science, Statistics & Visualisation (DSSV2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小川 健二 (Ogawa Kenji) (50586021)	北海道大学・文学研究院・准教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------