

氏 名	いけ だ たか し 池 田 尊 司
学位(専攻分野)	博 士 (文 学)
学 位 記 番 号	文 博 第 434 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	文 学 研 究 科 行 動 文 化 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	ワーキングメモリにおける色彩情報の処理過程

論文調査委員	(主 査) 教 授 苧 阪 直 行	教 授 櫻 井 芳 雄	准教授 蘆 田 宏
--------	----------------------	-------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

色彩の知覚に関する研究は実験心理学の主要なテーマであった。色の表象は波長などの物理特性と直接的に対応するが、その高次表象は必ずしもそうではない。たとえば、色を観察したとき表れる記憶表象には知覚性のもの以外にも言語や感情が随伴した表象が含まれるが、これらについての認知神経科学的研究は非常に少ない。本論文は、言語や感情とかがわる色の高次表象について、それが記憶、判断や評価とどうかかわるかについて、さまざまな認知課題を通して検討している。

色の記憶を扱う枠組みとしてワーキングメモリは重要である。ワーキングメモリの記憶モデルでは、言語と視覚という2つの独立した貯蔵システムを想定し、これらが注意による制御システムによって統括されると考える。ボトムアップに決まる貯蔵内容に対し、そのときの必要性や目的に応じた情報の更新や不必要な情報の抑制をトップダウン的に制御していると考えられている。色の視覚的および言語的側面を検討する際には有用なモデルであるといえる。本論文ではこのようなトップダウン制御とボトムアップ処理という枠組の中で、色の美的判断や評価といった感情的側面をも説明しうることを実験的に検討する試みを行っている。つまり、ワーキングメモリのモデルを拡張した、色の多面的な情報処理過程を包括的に説明しうる色彩認識のモデルの提案である。

実験的検討には主に認知神経科学的手法が用いられているが、これは情報処理過程の脳内神経基盤の裏づけを得ることでモデルの妥当性がより高くなるためである。色彩の認知と保持にかかわる知覚的、言語的および感情的モジュールがどのような脳内基盤をもつのか、またどのように活動するのかを脳の機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて検討している。

第1章では色の記憶と、それとかがわるワーキングメモリ、そして色の知覚の神経基盤について概説している。色の記憶研究は歴史が古く、記憶の中で色がどのように扱われているのかという問題に対しては、様々な研究が行われてきた。記憶に取り込まれた色は不明瞭で、再認時には元の色を再現できないことが知られている。最近、「赤い色」や「青い色」といった色の言語的カテゴリという枠組で色相の変化を説明できると考えられるようになってきた。

色の知覚の神経基盤については、後頭葉から側頭葉にかけて存在する第4次視覚野が色知覚に重要であり、この領域の損傷が脳性の色覚異常を引き起こすことを紹介している。しかし、第4次視覚野で行われている色知覚の結果を受けた高次表象がどの脳領域で処理されているのかはまだ解明が進んでおらず、その検討の必要性が指摘されている。

第2章では色の記憶が視覚と言語とどうかかわるかを行動実験から検討している。測色学的に定義された、微妙な色合いの異なる色刺激をコンピュータ画面に生成表示して、青に近い緑色を記憶し、その直後に弁別課題を行った場合、青とカテゴリ化される色とは弁別が容易になるが、逆に緑とカテゴリ化される色とは混同されやすいことが判明した。青と緑の関係を逆転させても同様の現象が生じ、また色のカテゴリによる効果は心理物理学的に規定される色空間内での距離を等しくしても生じることがわかった。しかし、言語的な情報を抑制するとカテゴリの効果は消失し、色空間における距離に応じて弁別の難易度が変わることが示された。緑から青にかけての多くの色について、記憶保持中の色との対応関係を検討したところ、緑および青のカテゴリに属する色は最も典型的な色相 (フォーカル色) へと誘導されていることがわかり、この効果も

やはり言語的な情報を抑制することによって消失することが明らかにされた。以上の結果から、言語的な影響のもとに記憶中の色は表象内部で書き換えられているという可能性が示唆された。カテゴリの影響は言語的干渉課題によって消失することから、これは知覚メカニズムに基づく永続的な変容ではなく、言語的な変調作用であるといえるだろう。

第3章では色の記憶における視覚的側面と言語的側面の神経基盤を検討している。第2章で検討を行った色のカテゴリという視覚的および言語的側面を切り分ける有効な手段を利用して、言語性および視覚性の神経ネットワークの分離を試みた。赤と青のように複数のカテゴリにまたがる色の記憶は言語的な効果が加わっており、1つのカテゴリ内に収まる色同士を記憶させた場合と比較して言語性ネットワークの活動が高まっていると考えられる。逆にカテゴリ内に収まる場合には同等の成績を得るために視覚性ネットワークの活動を高める必要がある。純粋な言語性課題として色の単語記憶課題も加え、3条件間での脳活動の比較を行っている。実験の結果、脳の前頭前野の腹外側領域に顕著な活性化の差がみられ、脳の左半球では言語的負荷、右半球では視覚的負荷に応じてそれぞれ活動量が増加することが判明した。同様の活動がみられた領域としては頭頂葉があり、こちらは同時に記憶すべき対象の数に応じて活動が変化した。色の記憶において頭頂葉は記憶すべき対象の数だけ貯蔵スペースを提供し、前頭前野は色同士の関係性を状況に応じて判断し、視覚と言語に対して注意資源を適切に配分していたものと考えられる。ここまでは記憶における視覚と言語との関わりを検討している。

第4章では視覚と言語に加えて、色彩認知のもう1つの柱となる感情的側面を検討するため、美的評価という認知機能を認知神経科学的な実験を通して調べている。複数の色を組み合わせると、隣接する色からの対比や同化の効果を受けて、単色で観察した場合と比較して色の感情的印象が変化することが知られている色彩調和理論では、このような変化は、色の組み合わせと密接にかかわると考えられている。しかし単色同士の物理的特徴から調和感を推定する試みは成功したとはいえない状況である。従来からの研究では、調和と色知覚は単純な総和的な関係にはないことが判明している。そこで、これに加えて感情評価の次元を導入することで新たなモデルが提案されている。調和配色とニュートラルな配色とでは反応や判断までにかかる時間に差があることから、ボトムアップ的に決まる評価についてさらなる評価を行うシステムを考えた。これらの仮説に対して認知神経科学的な手法で実験的吟味を行い、ボトムアップ的に評定される感情価とそれに対する調整を行っている脳内領域を個別に特定できるかどうかを検討している。検討の結果、報酬や報酬期待とも深くかかわる側坐核や眼窩前頭皮質が調和感の評定そのものにかかわり、反応までに要する時間と相関する領域として前部帯状回が特定できた。前部帯状回は前頭前野とともにワーキングメモリの注意制御を担う重要な領域である点が重要であることも指摘された。

第5章では以上の研究成果をまとめ、色の記憶保持や評価とかかわるワーキングメモリが、前頭前野、とくに下前頭回を含む前頭前野腹外側部や背外側部および前部帯状回の柔軟な目的に応じた注意制御系のもとで作動していること、さらに制御を受ける対象が主に視覚パッファである右頭頂葉、言語的パッファである左頭頂葉、さらに感情価を表現する左眼窩前頭皮質であることをモデルで予測しその妥当性を明らかにしている。眼の網膜に入力された電磁波はまず後頭葉のV4で知覚的な色の1次表象として成立し、これらが頭頂葉で言語的修飾を受け、さらに眼窩前頭皮質で感情的修飾を受けて色彩記憶の高次表象を形成することが実験的に解明された。

論文審査の結果の要旨

本論文は色の記憶にかかわる知覚、言語や感情の諸側面を、実験心理学的および認知脳科学的アプローチで実験的に検討したものである。

色の記憶研究では、記憶の中で色がどのように保持され変容を受けるのかに興味をもたれてきた。とくに、記憶から色を想起する場合、知覚、言語や感情がどのような影響をおよぼすのかについての関心をもたれてきた。しかし、その実験心理学的検討は少なく、また認知脳科学的視点からの検討は皆無に近かった。論者は、このような視覚的、言語的、あるいは感情的な色の記憶が営まれている仕組みとして、注意の制御システムをもつ視覚性と言語性のワーキングメモリを想定している。課題の検証にあたっては、心理実験とその課題遂行下での機能的磁気共鳴画像法（fMRI）を組み合わせることで実施することによって、非常にユニークでアイデアに富んだ一連の実験を試みている。

第1章では色の記憶と、それとかかわるワーキングメモリ、そして色の知覚の神経基盤について概観している。色の記憶研究は歴史が古く、記憶の中で色がどのように保持されているのかという問題については、様々な研究が行われてきた。記

憶に取り込まれた色は不明瞭で、再認時には元の色を正確に再現できないことが知られている。また、色の言語的カテゴリ化が記憶中の色相の変化とかかわるという考えが述べられている。色の知覚の神経基盤については、第4次視覚野で行われている色情報の処理の後、言語や感情の修飾を受けた色の高次表象の形成がどの脳領域とかかわるのかについてはまだ解明が進んでおらず、その検討の必要性が指摘されている。

第2章では色の記憶が視覚や言語とどうかわるかを検討している。測色学的に定義された、微妙に色差の異なる色刺激をコンピュータ画面に生成表示して、青に近い緑色を記憶させ、その直後に弁別課題を行わせた場合、青とカテゴリ化される色とは弁別が容易になるが、逆に緑とカテゴリ化される色とは混同されやすいことが判明した。一方、言語的な情報を抑制するとカテゴリの効果は消失し、色空間における距離に応じて弁別の難易度が変わることが示された。緑から青にかけての多くの色について、記憶保持中の色との対応関係を検討したところ、緑および青のカテゴリに属する色は最も典型的な色（フォーカル色）へと誘導されていることがわかった。以上の結果から、言語的なカテゴリ化の影響のもとに記憶中の色は表象内部で書き換えられているという新発見が見出された。これは言語的な影響による変調効果の一種であることを示したもので高く評価できる。

第3章では色の記憶における視覚的および言語的側面の神経基盤を検討している。第2章で検討を行った色のカテゴリ化という視覚と言語を切り分ける有効な手段を用いて、視覚性および言語性の神経ネットワークの分離を試みている。赤と青のように複数のカテゴリにまたがる色の記憶は言語的符号化が優位であり、1つのカテゴリ内に収まる色同士を記憶させた場合より言語性ネットワークの活動が高まると推定される。反対に、同一のカテゴリ内に含まれる色の場合には同等の成績を得るために視覚性ネットワークの活動を高める必要があると考えられる。カテゴリ間とカテゴリ内の色の条件に、言語性課題として色の単語の記憶課題を加え、3条件をfMRIを用いて比較している。実験の結果、脳の前頭前野の腹外側領域に顕著な活性化の差がみられ、脳の左半球では言語的負荷、右半球では視覚的負荷に応じてそれぞれ活性量が増加することが判明した。同様の活動がみられた別の領域として頭頂葉があり、こちらは同時に記憶すべき対象の個数に応じて活動が変化した。色の記憶において、頭頂葉は記憶すべき対象の数だけ貯蔵スペースを提供し、前頭前野は色同士のカテゴリの関係性に応じて視覚と言語のネットワークに対して注意資源を適切に配分していることが解明された。赤と青のような大きな色差をもつ色は言語化され主として左半球で保持されるが、青緑と緑のような色差の小さい色は視覚的に保持され主として右半球で保持されていることをfMRIを用いてはじめて解明したもので、ワーキングメモリ研究の上でも非常に価値ある発見といえる。

第4章では、色彩の記憶や認知のもう1つの柱となる感情的側面を認知神経科学的な実験を通して検討している。複数の色を組み合わせると、隣接する色からの対比や同化の効果を受けて、単色で観察した場合と比べて色の感情的印象が変化することが知られている。このような配色によって生まれる色の組み合わせから生じる美しさの評価は、単色の知覚的評価の総和としては導かれないことから、感情評価の次元を導入することで新たなモデルを提案している。具体的には調和をもたらす配色ともたらさない配色とでは反応までの時間差があることから、論者は感覚知覚的な初期過程の後に統合的評価を行う高次な脳内領域を想定し、この領域が個別に特定できるかどうかを検証している。その結果、調和感を表象する領域として報酬や報酬期待とかかわる側坐核や眼窩前頭皮質を、また反応までに要する時間と相関する領域として前部帯状回を見出している。前部帯状回は前頭前野とともにワーキングメモリの注意制御を担う重要な領域である点から考えると、視覚や言語のワーキングメモリの概念を色の調和感情にかかわるワーキングメモリまで拡張できる可能性を示した点で重要な貢献であると評価できる。

第5章では以上の研究成果をまとめ、色の記憶保持や評価とかかわるワーキングメモリが、前頭前野、とくに下前頭回を含む前頭前野腹外側部や背外側部および前部帯状回などの注意制御系のもとで作動していることの意義を考察している。色相の記憶保持において、視覚、言語や感情がそれぞれ独自の寄与をなしており、対応する脳領域が特定できることを認知脳科学的手法を駆使して解明した功績は高く評価できる。感情とかかわる色彩の記憶情報の処理についての検討には、今後検討すべき問題が残されているものの、本論文が工夫された実験によって重要な新発見を見出していることは間違いなく、その価値を損なうものではない。論者の今後の研究に大いに期待したい。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。平成二十年一月八日、

調査委員三名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。