

氏名	もり た とも よ 守 田 知 代
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第205号
学位授与の日付	平成15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	人間・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	Neural substrates of human color perception revealed by the McCollough effect (マッカロー効果を用いたヒト色知覚に関わる神経機構の解明)
論文調査委員	(主査) 教授 松村道一 教授 江島義道 教授 前川 覚 教授 定藤規弘(岡崎国立共同研究機構生理学研究所)

論 文 内 容 の 要 旨

われわれは、色彩豊かな世界に暮らしている。目に届くのは、ある波長成分を持つ光であるが、そこから特定の色の内的な経験(色感覚)を生み出しているのは、われわれの脳である。しかし、色感覚に関わる神経機構はまだ明らかにされていない。なぜなら、実際の色刺激を呈示すると、入力された光の波長処理に関わる神経機構から、意識的な色感覚に関わる神経機構を分離できないためである。そこで実際の色入力を行わずに、色を知覚できる状態をつくることでその問題の解決を目指した。本研究では、マッカロー効果と呼ばれる錯覚現象を用いた。マッカロー効果とは、互いに直交する方向成分をもち、補色関係にある縞模様刺激(誘導刺激)(例:緑色の水平縞, マゼンダ色の垂直縞)を交互に数秒ずつ合計数分間呈示すると、その後、白黒の縞が方向によって誘導時の補色に薄く色づいて見える現象である(例の場合、水平方向にマゼンダ色, 垂直方向に緑色)。

行動学実験1では、錯覚で知覚される色の強度と、呈示する縞模様のテスト刺激の方向との関係性を調べた。その結果、誘導刺激の方向と同じ方向のテスト刺激を見たとき、最も強い錯覚が生じ、方向が異なるに従って錯覚の強度は線形に減少した。この結果に基づき、機能的核磁気共鳴画像法を用いたfMRI実験1の実験計画を策定した。

行動学実験2では、fMRI実験2を行う前段階として、誘導時間経過にともなうマッカロー効果の変化を行動学的に調べた。2分間の誘導と効果の測定を交互に5回繰り返した。その結果、マッカロー効果は時間とともに指数関数的に増加し、およそ10分間で飽和状態に近づいた。ここで得られた誘導効果の時間的変化を示す近似曲線をfMRI実験2の解析で用いた。

fMRI実験1では、実際の色を知覚している時と、錯覚の色を知覚している時の脳活動を測定し、色感覚に関与する脳領域の特定を試みた。マッカロー効果を誘導するために、色と縞を組み合わせた誘導刺激を10分間呈示した。この誘導刺激呈示の前後に白黒からなる縞模様のテスト刺激を呈示するセッションを設け、そのテスト刺激を見ている時の被験者の脳活動を測定し比較した。ここで、2つのグループを用意した。誘導後のセッション中、色に注意を向けるようあらかじめ指示したINFORMEDグループ(6名)と、特になにも指示しないUNINFORMED(15名)グループの2つである。実験の結果、マッカロー効果が被験者全員にほぼ同程度誘導されていたことは実験終了後に確認できたにも関わらず、UNINFORMEDグループ15名のうち、8名はfMRI実験の最中に色がついて見えることに気づいていたが、残りの7名は気づいていなかった。fMRI測定の結果、実際の色刺激に対して、両側の第四次視覚野(V4)を含めた視覚領域が有意な活動を示した。この結果は、先行研究の結果を支持するものであった。これらの活動領域内で、マッカロー効果誘導後のテスト刺激に対する反応を調べたところ、左側V4の前方領域は、錯覚の色に気づいていたグループでは活動が見られたものの、気づかなかったグループでは活動が見られなかった。さらに、この領域の活動強度は、被験者が報告する錯覚強度と有意に相関していた。これらの結果から左側V4の前方領域は、実際の色・錯覚の色の両方に対する色感覚に関与していることが示唆された。一方、左側V4の後方領域では、色への気づきに関係なくすべての群において、マッカロー効果誘導前よりも誘

導後に有意な活動増加が認められた。この結果により、左側 V4 の後方領域はマッカロー効果誘導自体に何らかの関与をしていることが示唆された。また、右側 V4 領域は、左側とは異なり、色についての情報を与えられていた INFORMED グループにおいて非常に高い活動が見られた。この結果は、右側 V4 領域の活動が、色に対する注意によって調整されていることを示唆するものである。

また、fMRI 実験 2 では、マッカロー効果の誘導に関与する脳領域の特定を試みた。行動学実験 2 で測定したマッカロー効果の時間的変化と相関する活動変化を示す脳領域が、マッカロー効果誘導に関与しているという仮説をもとに、fMRI を用いてマッカロー効果誘導中の脳活動を測定した。その結果、両側 V4 の後方領域の活動のみが、マッカロー効果の時間的変化と有意に相関していた。この結果は、fMRI 実験 1 の結果と矛盾しないものであった。

結論として、実際の色刺激に対して V4 領域は広範囲にわたって賦活するものの、中でも色自覚に関与するのは V4 の前方領域であることが分かった。また、本研究では、線分方向に依存した錯覚の色知覚が生じるマッカロー効果を用いたが、V4 の後方領域がこのマッカロー効果の誘導に、大きく関わっていることを示唆する結果を得た。近年、fMRI 実験によりヒト V4 内に下位領域が存在することが明らかにされつつあるが、本研究ではヒト V4 内の下位領域における機能的差異をはじめて明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本研究は、イメージング装置 fMRI（機能的核磁気共鳴画像法）を用いて、ヒトの色知覚に関わる神経機構の解明を試みたものである。これまで、さまざまな動物実験により、色が生じる以前の光の処理過程に関する神経生理学的な知見が多く得られてきたが、生体の脳機能を計測できる装置が急速に進歩したことにより、ヒトの色情報の処理に関わる脳機能についても解明が進んでいる。ところが、色の感覚がどのようにして生じるかという色知覚の本質的な問題についてほとんど解明されていない。それは、実際の色刺激を呈示すると、入力された光の波長処理に関わる神経機構と、意識的な感覚に関わる高次の神経機構とを分離できない問題が存在しているためである。本研究はマッカロー効果と呼ばれる錯覚現象を用いることで、その問題の解決策を見出した。マッカロー効果とは、誘導刺激として特定の色と縞を組み合わせた刺激を数分間呈示すると、その後、白黒の縞が方向によって誘導時の補色に薄く色づいて見える現象である。マッカロー効果は、一般的な色の残像現象よりも効果が長時間持続することや、一旦誘導すれば、白黒の縞刺激を与えるだけで色知覚を誘発できること、さらに、被験者の意図に関わらずほぼ全員に生じることなど、錯覚の色知覚を引き起こすための多くのメリットを持ち合わせている。実際の色入力を行わずに色を自覚できる状態を作り出すことで、色感覚に関わる神経機構の分離を目指したところが、独創的な点として評価に値する。

本研究では、まずいくつかの行動学実験を行うことで、マッカロー効果のもつ特徴を定量化し、その後、色感覚に関わる神経機構の分離に適した fMRI 実験のパラダイムを策定した。fMRI をはじめとしたイメージング手法には、さまざまな長所・短所があり、これらの特色を十分に把握して認知心理学的パラダイムの作成を行うことが非常に重要とされている。マッカロー効果を誘導する前後で同一の刺激を呈示しているにも関わらず、被験者の色への自覚が異なる。色感覚固有の神経機構の分離を行うために、マッカロー効果誘導の前後において同一の白黒縞刺激を呈示し、被験者がそれを見ている時の脳活動を比較する方法を採用した。このように fMRI データ解析の制限範囲内で趣向を凝らし、マッカロー効果の特質を生かした実験パラダイムを作成できたことが、実験を成功へと導いたと考えられる。

実験の結果、色に関して先験的な情報が与えられない場合に、実験中、錯覚の色に気づいていた人と、気づかなかった人の 2 群に分かれた。ヒトの色知覚が、色に対する注意によって影響を受けることを行動学的に示した結果である。本研究において、同じ刺激を呈示しているにも関わらず、色を感じるという被験者の内的な事象（主観）の違いが生まれることを示し、またその違いを反映する脳活動の違いを探ることにより、色感覚に対する神経機構を明らかにしたことが、これまでのヒト脳機能研究にはない意義深い点といえる。この研究結果は、他のモダリティ感覚の処理をつかさどる脳領域内にも内的な感覚に関与する脳領域の存在を示唆しており、今後の脳機能研究に問題を提起するものである。

これまでのイメージング研究により、ヒトの第四次視覚野（V4）が色知覚に関与することが明らかにされてきたが、本研究では、V4 の前方に位置する下位領域が、色の自覚に重要であることを示唆する結果を得た。被験者間の主観の違いを

反映した活動が、V4の前方領域に見られたことに加えて、個人内における錯覚の色強度に 관련된活動変化も捉えられたことで、V4の前方領域の色感覚への関与がより確実なものに近づいた。V4領域が、2つの下位領域から成ることは数年前に報告されたばかりであるが、2領域間における機能の差異を実証したのは、本研究が最初であり、その新奇性は評価に値する。さらに、錯覚の色を知覚している際に、V4の前方領域だけではなく注意関連領域として知られている前頭連合野にも賦活が見られた。つまり色知覚には色への注意が必要であるという行動学的なデータを、脳機能の観点から裏付けることができた。

以上のように、本学位申請論文は、特殊な色の錯覚現象を用いることにより、色知覚に関与する脳領域を明らかにしたものである。また、色知覚は、外的な刺激とヒトの内的な状態の相互作用によって成り立つことを示したもので、人間と環境のかかわりの諸相についての実証的研究を目指して創設された人間・環境学専攻、自然環境学講座にふさわしい内容を備えた研究といえる。

よって、本論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月6日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。