

機能的磁気共鳴画像法による色相配列課題における V4 α 野の活動仲泊 聡¹⁾, 北原 健二¹⁾, 神立 敦¹⁾, 田中雄一郎¹⁾, 武内 弘明²⁾, 宮内 哲³⁾¹⁾東京慈恵会医科大学眼科学講座, ²⁾東京慈恵会医科大学放射線医学講座, ³⁾通信総合研究所

要 約

背景：近年、大脳における情報処理が次第に明らかになり、ヒト色覚中枢といわれた V4 野のさらに前方にも、色に関連した応答を示す領野の存在が推定され、V4 α 野と呼ばれている。一方、大脳性色覚異常の症例研究は、色相配列検査に誤答する患者の病巣が、仮性同色表を誤読する患者の病巣に比べ、より前方に位置していることを示している。

目的と方法：V4 α 野に着目し、色相配列検査時にこの領域にどのような活動があるかについて、機能的磁気共鳴画像法を用いて検討した。より実際の色相配列検査に近い課題での実験と、その一部分を抽出した課題での

実験を行った。

結果：正常被験者の V4 α 野と考えられる領域に反応を検出した。

結論：色相配列検査で色覚異常と診断された、V4 野よりも前方の領域にその病巣が存在した非典型的な大脳性色覚異常の症例の存在から考えても、V4 α 野が色相配列検査遂行に何らかの関連を持つ情報処理を行っていることが推定できる。(日眼会誌 106 : 694—700, 2002)

キーワード：後頭葉, ヒト, 脳梗塞, 色覚, 脳機能マッピング

Functional MRI Activation in Area V4 α During a Hue Arrangement TestSatoshi Nakadomari¹⁾, Kenji Kitahara¹⁾, Atsushi Kandatsu¹⁾
Yuichiro Tanaka¹⁾, Hiroaki Takeuchi²⁾ and Satoru Miyauchi³⁾¹⁾Department of Ophthalmology, The Jikei University School of Medicine²⁾Department of Radiology, The Jikei University School of Medicine³⁾Communication Research Laboratory

Abstract

Background : Recent studies of cerebral information processing have shown that area V4 α , the area anterior to area V4, which is known as the human color center, is also associated with color. However, our clinical study has shown that lesions associated with hue arrangement test failures are more anterior than those associated with pseudoisochromatic plate test failure.

Purpose and Methods : We studied area V4 α , and planned two functional magnetic resonance experiments for V4 α activity during the hue arrangement test. The task in the first experiment was virtual simulation of the hue arrangement test. The second experiment involved a task more specific

to color information processing.

Results : We found significant activity in area V4 α in healthy subjects.

Conclusions : We have reported that one of our patients with a more anterior lesion excluding area V4 had dyschromatopsia, as revealed by a panel D-15 test. Our experimental data and the clinical findings suggest that area V4 α plays an important role in processing during the hue arrangement test. (J Jpn Ophthalmol Soc 106 : 694—700, 2002)

Key words : Occipital lobe, Human, Infarction, Color perception, Brain mapping

I 緒 言

大脳病変に伴って生じる色覚異常は、大脳性色覚異常と呼称され、現時点では後頭側頭葉の底部にある側副溝

周辺の舌状回・紡錘回にその責任病巣が存在すると考えられている¹⁾。我々は 1992 年から大脳障害例について色覚検査と色認知検査に工夫を加え、ヒトの大脳における色の情報処理を理解するためのデータを集め、色相配列

別刷請求先：105-8461 東京都港区西新橋 3-25-8 東京慈恵会医科大学眼科学講座 仲泊 聡
(平成 13 年 11 月 12 日受付, 平成 14 年 6 月 19 日改訂受理)

Reprint requests to : Satoshi Nakadomari, M. D. Department of Ophthalmology, The Jikei University School of Medicine, 3-25-8 Nishi-shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8461, Japan

(Received November 12, 2001 and accepted in revised form June 19, 2002)

検査に誤答する患者の病巣が仮性同色表を誤読する患者の病巣に比べ、より前方に位置していることを示した²⁾。また、これまでに例のない下 1/4 同名半盲を伴う大脳性色覚異常と診断された症例を経験し報告³⁾した。この症例は Farnsworth dichotomous test panel D-15(以下、PD-15)で異常と診断されたが、その病巣は当時ヒトの色覚中枢とされていた V4 野より前方の鳥距溝の下側の領域から左頭頂後頭溝に沿って上下に広がりをもって存在し、後方では鳥距溝の上側の領域に達していた。当時、我々はこの上方部の病巣によって左の視放線が障害され、下方部の病巣が視放線を障害することなく色覚中枢を障害したものと考え、V4 野よりさらに前方の皮質領野に色覚関連領野の存在を推定した³⁾。

一方、最近の脳機能画像法を用いた多くの研究によって、有彩色刺激と無彩色刺激を観察した場合の反応差から、脳底部に色覚に関連すると考えられる部位が同定されている^{4)~8)}。我々もこの手法を研究に取り入れ検討してきた⁹⁾。さらに最近の研究は、それより前方部分にも色覚に関連した皮質が存在していることを示している¹⁰⁾。Bartels ら¹¹⁾はこの領野全体を V4 複合体と呼び、後方の V4 野とより前方の V4 α 野とに区分できると述べている。

そこで今回、我々はこの V4 α 野に着目し、色相配列検査時にこの領域にどのような活動がみられるかについて、機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: 以下、fMRI)を用いて検討した。

II 実験方法

1. 実験 1

被験者は、色覚異常がない右利き男性ボランティア 3 名であった。すべての被験者において、インフォームド・コンセントが得られた後に実験を施行した。MRI 装置は、1.5 T の臨床機(Sierra, General Electric Medical Systems, 七沢病院)で、撮像条件は、fast RF spoiled gradient echo(FSPGR) without a preparation, TR: 70 msec, TE: 59 msec, flip angle: 40 degree, FoV: 250×250 mm, matrix: 128×128, thickness: 6 mm であった。撮像したスライス、V4 α 野に相当する領域を含むように頭頂後頭溝に沿った冠状断を選択した。

視覚刺激は、明度配列課題のための明度の異なる 15 個の無彩色視標と、色相配列課題のための 15 個の有彩色視標とした。各視標は直径 2.5 cm の円形視標で、視角 0.6 度であった。これらの視覚刺激は、パーソナルコンピュータ(Macintosh 5300 cs)で作製され、液晶プロジェクター(EPSON ELP 3300)から被験者の足下に設置した白色半透明のアクリルスクリーンに投影された。被験者は、眼前の傾斜プリズムを介してこれを観察し、トラックボールで視覚刺激を操作した。

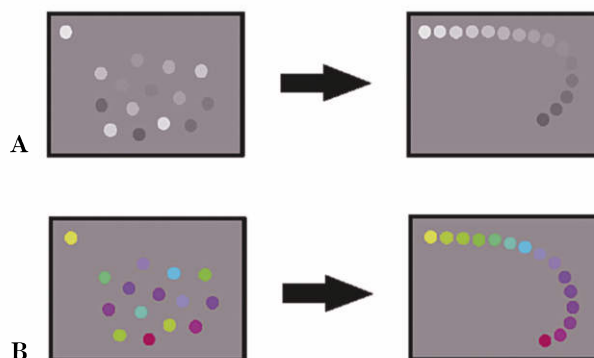


図 1 実験 1 の課題。

A: 明度配列課題 B: 色相配列課題

対照条件として、明度配列課題用の視標(図 1A)を明度順に並べる課題を与えた。刺激条件としては、色相配列課題用の視標を色相順に配列させた(図 1B)。これは、PD-15 を模した課題であるが、視標の明度は PD-15 のように均一ではなく、対照条件の各視標の明度に準じて明度差をつけた。

実験は 5 つのセッションから成り、対照条件、刺激条件、対照条件、刺激条件、対照条件という順で施行した。各セッションで撮像を各 6 回行った。

原画像に二次元 Gaussian filter(半値幅 8 mm 半径)で smoothing を行った後、各画素毎の信号変化を Box-car 参照関数と相関検定した。相関係数から t 分布換算し、5% 水準で有意な変化を示したピクセルが 10 個以上集まったクラスターを着色して、同一平面の T1 強調画像上に示した。この解析は、パーソナルコンピュータ(Pentium II, 333 Mhz, 512 MB RAM)において、MRI-win(自主開発 fMRI 解析ソフト、Windows 98 用)を用いて行った。

2. 実験 2

被験者は、色覚異常がない右利き男性 4 名で、書面でのインフォームド・コンセントの後、実験に参加した。実験 1 と同様の刺激提示系を用いて、MRI 機能画像を 1.5 T 臨床機(Magnetom Vision Plus, Siemens, 神奈川県ハビリテーション病院)を用いて撮像した。

視覚刺激は、実験 1 で使用した刺激のうち、互いに色相の近い 3 種の円形色視標を正三角形の頂点の位置に配したものであった(図 2)。固視目標は、これら 3 色の色視標の中央とし、上方の色視標を参照刺激とし、下方の 2 つの色視標のうちどちらが参照刺激に近いかを比較する課題を与えた。そして、2 秒毎に 3 色の色視標の色を変えて提示し、この刺激の類似性を比較した時(刺激条件)と見ているだけの時(対照条件)との差を検討した。下方の 2 つの色視標は、参照刺激に近い方が右にある場合と左にある場合を同数用意し、疑似ランダム順で提示した。2 秒毎に 1 scan(6 スライス)、1 実験(8 分)で



図 2 実験 2 の課題。

色相比較課題。3 種の色視標の中央を固視し、上方の色視標を参照刺激とし、下方の 2 つの色視標のうちどちらが参照刺激に近いかを比較する課題を与えた。2 秒毎に 3 種の色視標の色を変えて提示し、この刺激の類似性を比較した時 (刺激条件) と見ているだけの時 (対照条件) との差を検討した。

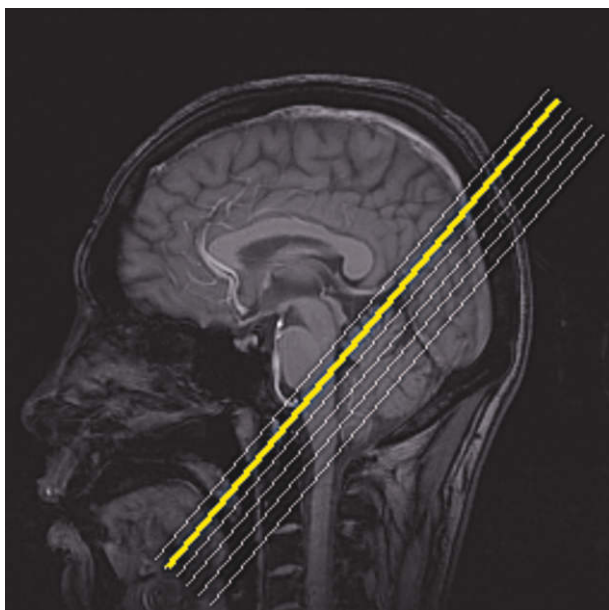


図 3 実験 2 の撮像面。

正常被験者の矢状断 magnetic resonance imaging (以下, MRI)。図中の黄線は、実験 1 で用いた撮像面に極力合わせた面である。

240 scan を施行し、合計 1,440 枚の機能画像を得た。この間、20 秒毎に音声で「やめ」、「はじめ」と指示し、刺激条件と対照条件を 20 秒毎に繰り返した。

MRI の設定は、1 shot gradient echo EPI, TR : 2,000 ms, TE : 66 ms, flip angle : 90 degree, matrix : 128 × 128, FoV : 256 × 256 mm, thickness : 6 mm であった。スライス面は、実験 1 のスライス面に平行な 6 枚であった。図 3 に、スライス面の位置を示す画

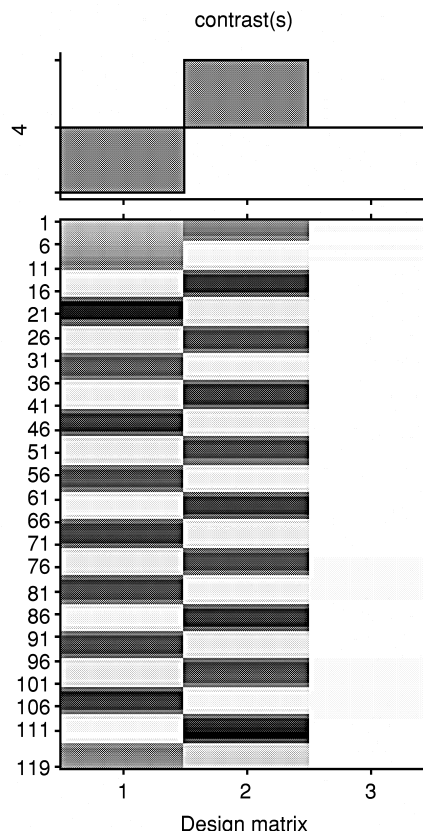


図 4 Statistical Parametric Mapping 99 (以下, SPM 99) で用いたデザインマトリクス。

像を示す。図中の黄線は、実験 1 で用いたスライス面に極力合わせた面である。また、被験者のうちの 1 名 (被験者 A) は、活動部位の脳内定位の目的でスライス面を AP ライン (前交連と後交連を結ぶ線) に平行な水平断面とし、TR = 4,000 ms で 1 scan で 16 切片 (voxel size = 2 × 2 × 7.5 mm) を 120 scan 撮像する設定で行った。この設定では標本数を犠牲にする反面、スライス面が多く全脳にわたるデータを収集することができる。

得られた MRI 機能画像データについて解析前処理として頭部の動き補正を Statistical Parametric Mapping 99 (以下, SPM 99, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) を用いて行った後、実験 1 と同様に Box-car 参照関数との間における相関係数を計算し、0.01% 水準で有意差のあるピクセルを着色して原画像上に表示した。

一方、AP ラインに平行な水平断面で撮像したデータは、頭部の動き補正を行った後 Talairach の標準脳に合わせる変形を行い、三次元 Gaussian filter (半値幅 4 mm 半径) で smoothing を行った後、SPM 99 の Box-car 参照関数を利用した block design の解析マトリクス (図 4) を用いた解析を行った。結果は uncorrected $p < 0.003$, extent threshold > 40 voxels で、同様の標準化を行った同一被験者の T1 強調画像に活動部位を表示した。

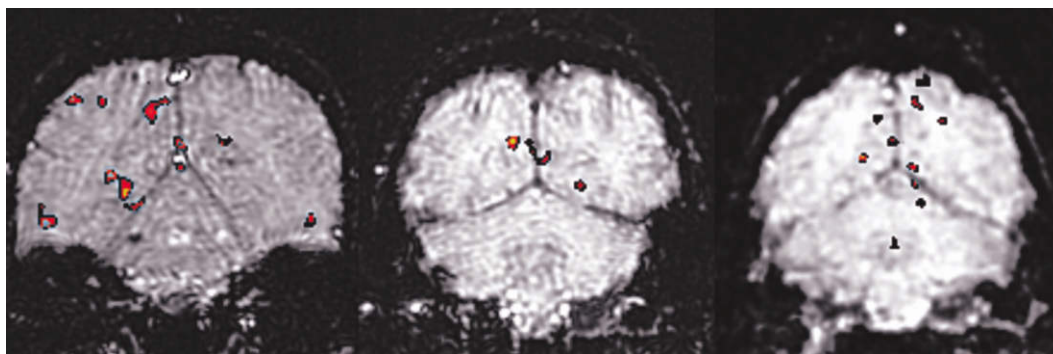


図 5 色相配列課題施行時の脳活動(実験 1)。

色相配列課題施行時に信号上昇が有意であった部分機能画像上に表示した(左から被験者 A, B, C)。図中黒ピクセルは 5% 水準, 赤は 1% 水準, 黄は 0.1% 水準で有意差が判定できた部分である。被験者全員の脳底部に不明確ながら応答があった。

III 結 果

1. 実 験 1

実験 1 の色相配列課題(刺激条件)と明度配列課題(対照条件)との比較実験では, 被験者全員の脳底部に不明確ながら反応があった(図 5)。図中の黒ピクセルは 5% 水準, 赤は 1% 水準, 黄は 0.1% 水準で有意差が判定できた部分を示している。しかし, 本実験ではスライス面を一面しか設定できなかったため, この前後の領域で反対側に活動があったかどうかは不明であった。

2. 実 験 2

被験者全員の左後頭葉下部に明確な反応があった(図 6)。最前面と最後面の画像は動き補正後変形したため割愛した。したがって, 図中の黄円は, 目標のスライス面にあり, いずれも左後頭葉下部の V4 α 野近傍に活動が生じていることを示している。また, 後頭葉下部以外に, 鳥距溝付近と頭頂間溝付近にも反応を検出した。

図 7 に, AP ラインに平行な水平断面で撮像したデータから得られた結果を示す。反応のあった部位とその標準脳での座標は, 左 V4 野(-22, -82, -16), 左 V4 α 野近傍(-14, -64, -6), 鳥距溝付近(-8, -102, 2)であった。さらに, この解析からは左後頭葉外側面(-28, -102, 2), Brodmann 46 野付近(-46, -4, 32)にも反応を検出した。

IV 考 按

本実験は, PD-15 で色覚異常と診断されたが, その病巣が当時ヒトの色覚中枢とされていた V4 野より前方の領域に存在した非典型的な大脳性色覚異常の症例⁹⁾を経験したことが契機となったものである。まず, この症例について以下に簡単に紹介する。

症例は, 58 歳の右利きの男性である。1992 年 7 月 6 日, 起床後に右側が見えにくいことに気が付き, 7 月 16 日に当科を受診した。生来, 視野異常や色覚異常を指摘されたことはなく, 意識清明で見当識障害がなく, 神経

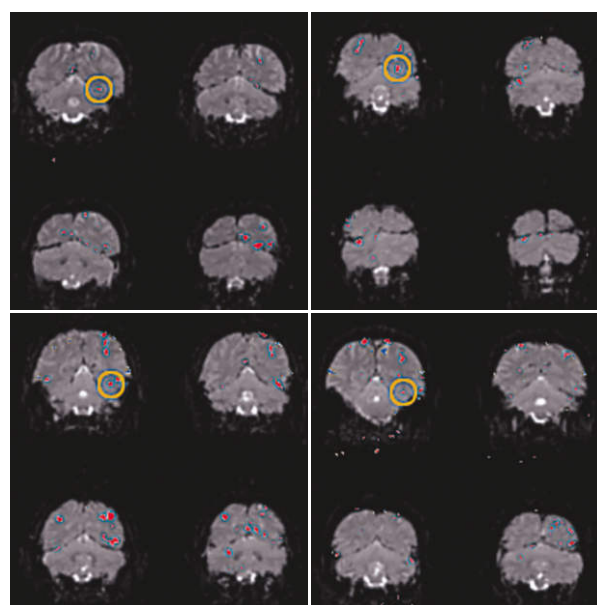


図 6 色相比較課題施行時の脳活動(実験 2)。

色相比較課題施行時に信号上昇が有意であった部分($p < 0.0001$)を着色して機能画像上に表示した(左上が被験者 A, 左下が B, 右上が D, 右下が E)。最前面と最後面の画像は動き補正後変形したため割愛した。図中の黄円は, 目標のスライス面にあり, いずれも左下部後頭葉の V4 α 野近傍に活動が生じていることを示している。被験者全員の左下部後頭葉に反応を検出した。

心理学的および神経学的に著変はみられなかった。視力は右眼 1.2(矯正不能), 左眼 1.2(矯正不能), Goldmann 視野検査で右下 1/4 同名半盲と診断した。石原色覚検査表(以下, 石原表)および標準色覚検査表第 2 部では異常がなかったが, PD-15 検査中には色の判断が困難であることを自覚しており, PD-15 で両眼とも先天色覚異常にみられるような特定のパターンには属さない異常を示した。MRI では左後頭葉前部内側面に脳梗塞と考えられる病変を検出した(図 8)。

本症例の下部病巣は, V4 野の位置に比べかなり前方にしか存在していなかった。一方, V4 α 野の標準脳で

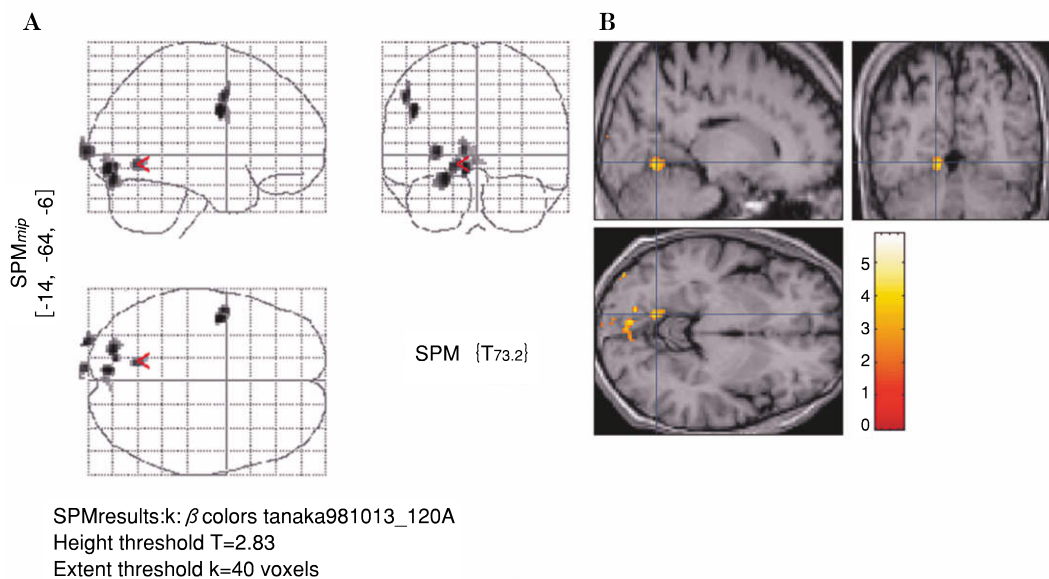


図 7 色相比較課題施行時の活動部位の脳内定位。

前交連と後交連を結ぶ線に平行な水平断面で撮像したデータから得られた結果を uncorrected $p < 0.003$, extent threshold > 40 voxels で 3 方向の透視図上および同様の標準化を行った同一被験者の T1 強調画像上に表示した。反応のあった部位とその標準脳での座標は、左 V4 野(-22, -82, -16), 左 V4 α 野近傍(-14, -64, -6), 鳥距溝付近(-8, -102, 2), そしてこの解析からは左後頭葉外側面(-28, -102, 2), Brodmann 46 野付近(-46, -4, 32)の反応も検出された。

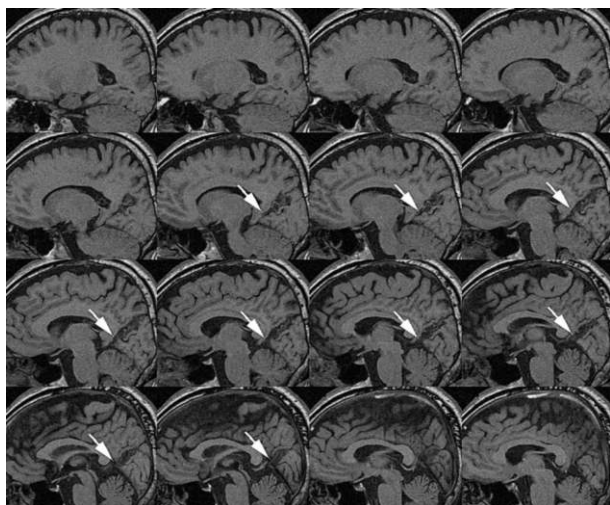


図 8 非典型大脳性色覚異常症例の頭部 MRI T1 強調画像(左脳矢状断)。

MRI では左後頭葉前部内側面に脳梗塞と考えられる病変を検出した。その下部病巣は、V4 野の位置に比べかなり前方にしか存在していなかった。一方、V4 α 野の標準脳での正中矢状面からの距離は、約 2~3 cm ほどと考えられるが、本症例での病巣は、正中から 1.4 cm までであり、その脳回は、紡錘回ではなく舌状回から海馬傍回であった。

の正中矢状面からの距離は、約 2~3 cm ほどと考えられるが、本症例での病巣は、正中から 1.4 cm までであり、その脳回は紡錘回ではなく、舌状回から海馬傍回であった。しかし、病初期にのみ異常を生じ、早期に改善

したことを考えると、当時、脳浮腫などによる機能障害がより外側の領野、すなわち V4 α 野に及んでいた可能性が十分に考えられた。

1. 実験 1 の考察

実験 1 は、我々の初期の fMRI 実験であり、装置的限制が多い中で行ったものである。したがって、信頼性の点からは十分とはいえないものの、その結果は、「V4 野よりかなり前方の領域で色相配列検査に関連した情報処理が行われている」という、我々の仮説を支持していた。しかし、実験 1 には下記の問題点が考えられ、より信頼性の高いデータを得るためには改良が必要であると考えられた。

1) MRI 内でトラックボールを使用するために生じるノイズの除去が十分でないため、signal/noise 比が小さくない可能性がある。

2) 1 実験に 1 スライス面の撮像しか得られないことから、スライス面の選択を誤ると結果が異なる可能性がある。

3) $n=30$ での統計検定であるため、有意水準の高い結果が得られにくい。

4) 今回の課題ではトラックボールを動かす指の運動や頻繁な眼球運動のため、頭部の動きが生じやすく、結果に影響している可能性がある。

5) 他の fMRI 研究にも共通していえることであるが、「有彩色の観察」と「無彩色の観察」の差分が、果たして本当に「色覚」なのであろうか。この差分は、一つに彩度差のある視対象の観察時の脳活動の変動をみてい

るに過ぎないことが考えられる。「色」という範疇でとらえる視覚情報は、彩度という一次元のものであるはずがない。この点が明らかでない状況で、色情報処理のメカニズムを「有彩色の観察」と「無彩色の観察」の差分という実験パラダイムでとらえようとする自体に無理があることが考えられる。

6) そもそも、前述の症例の PD-15 の異常が患者の色覚異常に由来しているのかという本質的な部分での疑問も拭いきれない。これを確認しなければ、本症例の PD-15 の異常を色覚異常と判定することができないが、患者の検査を工夫し再検査するにも、本症例の色覚検査の異常は短期間に回復し、それはかなわなかった。そこで、今回の課題をさらに色覚に関して純粋なものとする必要があると考えられた。

2. 実験 2 の考察

実験 2 では、実験 1 で考えられた上記の問題点を考慮し、色相配列課題を施行する際に働く認知過程のうち、より「色情報処理」の役割の主要部分を抽出する目的で、類似色の選択課題を採用した。これを用いて、より純化された「色」に関わる脳活動を引き出すことを試みたのである。

その結果、左 V4 α 野近傍にこの課題に関連した反応を検出した。定位に用いた一被験者の V4 α 野の標準座標は、-14, -64, -6 であり、正中矢状面からの距離を表す x 座標が 14 mm であり、これまでに報告された V4 α 野の座標よりも内側に位置していた。これは脳回の個体差によるものであるかも知れないし、また、症例の病巣がやはりより内側に位置していたことから考えて、V4 α 野とは異なった領域が関与している可能性もある。現時点では、日本人の V4 α 野の範囲が定められていないために、今回、浮き彫りにされた部分が V4 α 野として同定してよいかについては確定できない。しかし、本結果は「V4 野より前方の領域で色相配列検査に関連した情報処理が行われている」という我々の仮説が正しかったということが示されたといえる。また、この部位の色に関連した活動は「2 つのどちらが参照刺激により近いかを吟味する」という「判断」を伴うという特徴がある。したがって、判断が伴う色の処理ではこの領域が関与しているかも知れない。

3. 色情報処理における V4 α 野の役割に対する考察

Beauchamp ら¹⁰⁾は我々の実験に類似した実験を行っている。彼らは色相配列検査を行う際の「最後に序列が正しいか確認する」という部分を抽出したともいえる課題を用い、fMRI 実験を行った。同時に、「有彩色の観察」と「無彩色の観察」の差分を検出する手法を用いて「色」に関わる前後 2 つの領域(V4 野と V4 α 野に相当)を抽出し、その上で、「判断」を要した場合には、前方領域(すなわち V4 α 野)の活動が上昇したと述べている。しかし、その「判断」による差が有意なものである

かどうかについては言及していない。我々の結果は、「判断」の有無で有意差があるからこそ活動部位が同定できたのであって、これを証明したといえる。しかし、ここで生じた有意差は V4 α 野特有のものではなく、V4 野や鳥距溝付近でも生じていることが示された。このことから、Beauchamp らの主張にあるように V4 α 野のみが「判断」で活性化される訳ではないということが推定できる。

Corbetta ら¹²⁾も色に対する「注意」によって後頭葉底部が活性化することを示している。これを Bartels ら¹¹⁾は fMRI を用いて追試した。色にかかわらず最近の fMRI 研究は、「注意」が脳内の特定部位の反応性を増強するというを示している¹³⁾。実験 2 の結果が「判断」ではなく、この「注意」によるものであるかどうかは今のところ明言できない。なぜなら「注意」せずに「判断」することは困難であり、また Corbetta らや Bartels らの実験も注意のみならず「判断」を要する課題であるからである。

V4 α 野が障害されていながら V4 野が保存されていた可能性のある前述の症例が、石原表のような仮性同色表は正解しても PD-15 という色相配列課題を誤ったということと、この色相配列検査をしているとき以外はこれといって色覚異常を自覚することがなかったということから、V4 α 野に関するいくつかの仮説を導くことができるかも知れない。

それは、第 1 に「左 V4 α 野は波長弁別と図地分離との関連が薄いらしい」という仮説である。石原表検査は、波長弁別を基本とする色における図地分離が可能でないと正読できない課題である。視覚情報処理経路の腹側路は、視対象弁別に主に関わると考えられており、V4 野の選択的損傷でこれらの障害が予想されている¹⁴⁾。しかし、本症例ではこれらが保たれていないと施行困難であるはずの石原表が難なく判読可能であった。このことは、V4 α 野がこれらの認知機構にそれほど関わっていないということを推定している。

第 2 に、実験 2 から「色の比較」という「判断」に V4 α 野が重要な役割を担っているということが改めて示されたが、これは本症例によって PD-15 という色相配列検査が一時的ではあったにせよ確実に障害されていたことから考えられる。fMRI 実験のような賦活実験の最大の弱点は、信号変化の統計値の低下が神経活動の低下をそのまま意味できないところにある。これは、様々なアーティファクトによる場合もあるし、他の神経活動との予期せぬ相互関係である場合も否定できない。ところが、神経心理学的知見は、脱落機能を明確に検出することができる。この点が賦活実験に明らかに勝る点であろう。この観点から、Beauchamp ら¹⁰⁾や、我々の fMRI 実験からだけでは、V4 α 野の活動と色に関わる「判断」との間の連関は推定の域を出ない。しかし、本症例が左

V4 α 野が障害されていたとすれば、これで PD-15 に関わる「判断」ができなくなったこととの連関がより強く判定できるのではないだろうか。

そして第 3 に、色の「意識」に左 V4 α 野があまり関係していないということが導ける。Zeki ら¹⁵⁾は特殊な大脳性色覚異常の患者に fMRI を適用し、この点について考察している。彼らの患者は、皮質盲がありながら、色はわかるという自覚があった。fMRI 実験の結果、この患者の V1 野と V2 野の応答は明確であったが、V4 野の応答が減弱していた。このことから、彼らは色の「意識化」に V4 野がそれほど重要ではないかも知れないと述べている。しかし、この症例の研究では V4 α 野については言及されていない。本症例において、色相配列検査の時点を除くと色覚異常の自覚がいっさいなかったことから、左 V4 α 野が色の「意識化」にあまり関連していないということが推定できる。

以上、本稿では、以前に報告した非典型的な大脳性色覚異常の患者の病巣とその症状をヒントにして計画された正常者の色覚中枢に関する fMRI 実験を通して、本症例の病態について検討した。このような大脳性色覚異常の個々の症例の病態の理解には、正常脳での色覚のメカニズムの解明が必要不可欠と考えられる。fMRI 実験は徐々にこれを解明していくものと思われるが、逆に個々の大脳性色覚異常の患者の訴えや検査結果には、今回のように色覚のメカニズムにせまる新たな切り口を提供してくれるものがあるものと思われる。今後も症例を重ねるとともに詳細な問診と検査を通じてさらなるヒントを見つけていく努力が必要であろう。今後 fMRI を患者に適用し、その予後判断や改善状況の評価が可能になるように、臨床検査上の色覚に関わる認知過程と脳内活動との関連について、さらに検討していくことが必要であると思われる。

実験 1 の実施に当たり、多大なご協力をいただきました東京医科大学老年医学科の馬原孝彦博士、七沢病院放射線科の中森昭敏博士、実験 2 の環境を整えるに当たり、技術提供をいただきました東京工業大学の内川恵二教授、斎藤真広氏に深謝いたします。また、NTT コミュニケーション科学基礎研究所の栗木一郎博士と宝仙学園短大の市原恭代助教授には、有意義なご助言を多数いただきました。深謝いたします。なお、本研究の一部は、通信総合研究所のプレイクスルー-21 の助成を受けた。

文 献

- 1) Zeki S : A century of cerebral achromatopsia. *Brain* 113 : 1721—1777, 1990.
- 2) 田中雄一郎, 北原健二, 仲泊 聡, 久米川浩一, 馬

原孝彦 : MRI による大脳性色覚異常の病巣解析. *日眼会誌* 106 : 154—161, 2002.

- 3) Nakadomari S, Kitahara K, Kamada K : Cerebral dyschromatopsia with right homonymous inferior quadrantanopsia : A case report. *Jikei Med J* 46 : 109—112, 1999.
- 4) Lueck CJ, Zeki S, Friston KJ, Deiber MP, Cope P, Cunningham VJ, et al : The colour centre in the cerebral cortex of man. *Nature* 340 : 386—389, 1989.
- 5) Sakai K, Watanabe E, Onodera Y, Uchida I, Kato H, Yamamoto E, et al : Functional mapping of the human colour centre with echo-planar magnetic resonance imaging. *Proc R Soc Lond B* 261 : 89—98, 1995.
- 6) Kleinschmidt A, Lee BB, Requardt M, Frahm J : Functional mapping of color processing by magnetic resonance imaging of responses to selective P- and M-pathway stimulation. *Exp Brain Res* 110 : 279—288, 1996.
- 7) McKeefry DJ, Zeki S : The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging. *Brain* 120 : 2229—2242, 1997.
- 8) Zeki S, Marini L : Three cortical stages of colour processing in the human brain. *Brain* 121 : 1669—1685, 1998.
- 9) 久米川浩一, 仲泊 聡, 武内弘明, 北原健二, 神立 敦, 吉田希望, 他 : 神奈川県リハビリテーション病院における機能的核磁気共鳴画像法の実践. *神奈川県リハ紀要* 25 : 79—82, 1998.
- 10) Beauchamp MS, Haxby JV, Jennings JE, De Yoe EA : An fMRI version of the Farnsworth-Munsell-100 Hue test reveals multiple color-selective areas in human ventral occipitotemporal cortex. *Cereb Cortex* 9 : 257—263, 1999.
- 11) Bartels A, Zeki S : The architecture of the colour center in the human visual brain : New results and a review. *Eur J Neurosci* 12 : 172—193, 2000.
- 12) Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Petersen SE : Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. *Science* 248 : 1556—1559, 1990.
- 13) Kastner S, De Weerd P, Desimone R, Ungerleider LG : Mechanisms of directed attention in the human extrastriate cortex as revealed by functional MRI. *Science* 282 : 108—111, 1998.
- 14) Schiller PH : Effect of lesions in visual cortical area V4 on the recognition of transformed objects. *Nature* 376 : 342—344, 1995.
- 15) Zeki S, Aglioti S, McKeefry D, Berlucchi G : The neurological basis of conscious color perception in a blind patient. *Proc Natl Acad Sci USA* 96 : 14124—14129, 1999.