

2色覚者のカテゴリカルカラーネーミングに及ぼす 視覚的手掛けり

西田 浩聰, 福田 一帆, 内川 恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科

本研究では、2色覚者（ディスクロゲン）が、色名を付ける際の視覚的手掛けりについて検討した。被験者は、2色覚者と正常色覚者（トライクロメタリズム）の2群である。被験者は、各々の色名を付ける際の視覚的手掛けりを、視覚的属性（明度、彩度、純度）の組合せによって分類した。結果、2色覚者の視覚的手掛けりは、正常色覚者と比較して、明度と彩度の組合せによる手掛けりが多かった。また、2色覚者の視覚的手掛けりは、正常色覚者と比較して、明度と純度の組合せによる手掛けりが少なかった。

視 覚 の 科 学
Japanese Journal of Visual Science

原 著

2色覚者のカテゴリカルカラーネーミングに及ぼす 視覚的手掛けり

西田 浩聰, 福田 一帆, 内川 恵二

東京工業大学大学院総合理工学研究科

Visual Cues for Categorical Color Naming of Dichromats

Hirotoshi Nishita, Kazuho Fukuda and Keiji Uchikawa

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering Tokyo Institute of Technology

1. 2型2色覚者はそれぞれ網膜状のL錐体、M錐体を欠損し、赤緑方向の色弁別ができないにもかかわらず、日常的には赤や緑の色名も使っている。本研究では、2色覚者の3色覚的なカテゴリカルカラーネーミングがどのような視覚的手掛けりを使って可能であるのかを明らかにするために、刺激呈示条件を制限してカテゴリカルカラーネーミング実験を行った。その結果、2色覚者は実際の色票を観察すると3色覚者と同様なカラーネーミングをするが、刺激をモニター上に呈示したり、小視野や短時間呈示にすると赤緑方向の色名の区別が劣化し、更に刺激の等輝度呈示では全く色名を混同してしまうことが示された。この結果から2色覚者は色票の輝度（明度）を重要な手掛けりとし、3色覚的なカテゴリカルカラーネーミングを行っていることが明らかとなった。

(視覚の科学 34: 134–147, 2013)

キーワード：2色覚者、カテゴリカルカラーネーミング、視覚的手掛けり、色覚異常、OSA 色票

Protanopes and deutanopes use red and green color names in their everyday lives, although they retrospectively lack L cones or M cone in the retina, so cannot discriminate colors in the red-green direction. In this study, we carried out categorical color naming experiments under restricted stimulus-presenting conditions, in order to explore the visual cues dichromats use in performing trichromat-like categorical color naming. It was shown that when the dichromats observed real color chips, they could perform trichromat-like categorical color naming, whereas use of a monitor to present color stimuli, and small-field or brief duration, degraded their performance. Furthermore, when the stimuli were presented in equal-luminance condition, the subjects completely confused color names in the red-green direction. These results clearly indicate that dichromats utilize the luminance (lightness) of color chips as a critical visual cue in performing trichromat-like categorical color naming.

(Jpn J Vis Sci 34: 134-147, 2013)

Key Words : Dichromats, Categorical color naming, Visual cues, Color deficiency, OSA color chips

1. はじめに

3色覚者は分光感度の異なる3種類のL, M, S錐体応答を基にして、色を三次元的に知覚している。3色覚者の色覚特性については、これまでに分光感度、色弁別や等色などの基本的な特性から、色の見え方、カ

ラーニングや色の記憶などの認識レベルの特性に至るまで様々な面から調べられ、錐体からそれに続く色覚メカニズムが明らかにされてきている¹⁾。一方、錐体の何種類かを欠損した色覚異常者については、等色、色弁別、分光感度などの基本的な特性はよく調べられている^{1, 2)}ものの、色の見え方やカラーネーミン

別刷請求先：226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G2-1 東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム専攻 内川恵二
(2013年10月8日受理)

Reprint requests to: Keiji Uchikawa Tokyo Institute of Technology, Department of Information Processing
G2-1-4259 Ngatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8502, Japan
(Received and accepted October 8, 2013)

グなどの特性を実験的に調べた研究は3色覚者に比べると少なく、そのため、色覚異常者が日常の環境において色をどのように見て、認識しているかについてはまだ明らかになっていない点が多い。

1種類の錐体を欠損した先天的色覚異常者は1型2色覚者（L錐体欠損）、2型2色覚者（M錐体欠損）、3型2色覚者（S錐体欠損）に分類され、それぞれ、M錐体とS錐体、L錐体とS錐体、L錐体とM錐体の2種類の錐体から二次元の色空間を形成し、それに基づいて色を知覚している。そのため2色覚者の色弁別能は三次元の色空間をもつ3色覚者に比べると劣り、弁別できない色が存在することになる。

1, 2型2色覚者は、それぞれM錐体とS錐体、あるいはL錐体とS錐体しかもっていないため、反対色チャンネルのうち赤緑（L-M）チャンネルがなく、輝度（MあるいはL）チャンネルと黄青（M-SあるいはL-S）チャンネルで色を見ている、つまり、明るさと黄青の色みは知覚できるが、赤緑の色みは知覚できないと考えられている。ところが、日常生活では、1, 2型2色覚者も3色覚者と同様に赤や緑の色名を使うことが知られ、実験的にも赤、緑の色名を使い分けていることが報告^{3, 4)}されている。

Montag and Boynton⁵⁾は2色覚者の用いる色名について詳しく調べるために、OSA色票を刺激として用い、自由な色名によるカテゴリカルカラーネーミング実験を行った。その結果、2色覚者も3色覚者と同様に、11基本色名（red, green, blue, yellow, brown, orange, purple, pink, white, black, gray）を使用し、更に基本色名の方がそれ以外の色名を使用した場合よりも一致度が高く、応答時間が短いこと、また、基本色名で呼ばれた色票の重心（セントロイド）は三次元色空間全体に広がって分布することを明らかにした。この結果から2色覚者は日常的な視覚環境では3色覚者とほとんど同様に色名を用い、カテゴリカル色知覚を行っていることがわかった。

もし、2色覚者が輝度チャンネルと1種類の色チャンネルで色を見ているのであれば、色を3色覚者と同様に知覚することはできず、したがって色名も3色覚者と同様にはならないはずである。2色覚者の用いる色名が3色覚者のものと類似しているとすれば、それは2色覚者がこれらのチャンネル応答以外の何らかの手掛かりを用いて、色名を答えていることになる。このような手掛けりとして、これまでに、桿体の寄与、残存錐体の影響、非線形擬似的赤緑反対色チャ

ンネルの存在などが提案されてきた。

桿体の寄与については、Montag and Boynton⁵⁾が桿体を明順応により飽和させることで桿体の影響を排除した条件でカテゴリカルカラーネーミングを行うと、2色覚者は3色覚者のカラーネーミングができなくなることを示した。彼らは2色覚者では桿体の寄与により3色覚的なカラーネーミングを行っていることを示唆したが、後日、Montag⁶⁾はこの実験では桿体ではなく、残存錐体が寄与したことを示し、自らの仮説を訂正している。しかし、桿体が色の見えへ全く寄与できないわけではなく、例えば薄明視環境下では3色覚者でも色の見えには桿体の寄与があることが報告^{7, 8)}されている。

残存錐体の影響については、Nagy ら⁹⁾が桿体を飽和させたカラーネーミング実験で桿体の影響を排除しても、刺激のサイズが大きいと2色覚者は3色覚者のカラーネーミングを行うこと、更に、小視野では3色覚者のカラーネーミングができなくなることを示し、その結果、周辺視野での残存錐体の色の見えへの影響を指摘した。そのほかの研究でも、1, 2型2色覚者の多くは刺激サイズが大きくなると（およそ8°以上）、ある程度赤緑方向を弁別できることが報告^{10, 11)}されている。Montag⁶⁾は小視野、短時間、高明順応の刺激呈示条件下でカテゴリカルカラーネーミング実験を行い、その結果、残存錐体がカラーネーミングに寄与するには長時間、大視野の足し合わせが必要なことを示した。

一方、Wachtler ら¹²⁾は遺伝子検査により1種類の錐体が完全に欠損している2色覚者にカラーネーミング実験を行い、完全欠損の2色覚者でも赤と緑の色名を使用することを示した。カラーネーミングの結果には420~450nmの波長に対し、青だけでなく赤の応答があることや、長波長で赤と黄の応答が混合することから、L錐体またはM錐体から非線形変換により擬似的な赤緑チャンネルを作るモデルを提案している。

以上示したように、手掛けりとしていくつかの可能性が挙げられているが、2色覚者がどの手掛けりを実際に使っているか、あるいはこれ以外にも手掛けりがあるのかについてはまだ十分に調べられていない。例えば、明所視、小刺激、短時間呈示のような桿体や残存錐体の影響を排除した刺激呈示条件では、2色覚者のカラーネーミングはかなり劣化し、3色覚者のカラーネーミングとは異なることがあるが、それでも赤緑の

応答があることから、2色覚者はほかの手掛けりを用いている可能性もある。また、2色覚者では欠損した錐体の位置に今ある錐体が置き換わるので、刺激条件によっては錐体検出感度が3色覚者よりもよくなるという報告^{13, 14)}もあることから、3色覚者が使えない手掛けりを使っている可能性もある。あるいは、2色覚者は輝度チャンネルと1種類の色チャンネルで色を二次元的に知覚していたとしても、表面の明るさ(明度)と色み(色度)を組み合わせて、3色覚者の色名に対応させているという可能性もある。

本研究では、これまで挙げられていた手掛けりを含めて、2色覚者はどのような可能な手掛けりを使って3色覚者と同様なカテゴリカルカラーネーミングを行うか調べ、2色覚者のカテゴリカル色知覚のメカニズムを明らかにすることを目的とする。刺激呈示条件として、実際の色票を日常の環境と同じように被験者が自由に観察できる色票条件(実験1)をコントロール条件とした。テスト条件としては、CRTモニター上に色票刺激をシミュレートし、それを標準視野サイズと時間制限なしで観察するが、被験者が色票を自由に観察できないモニター条件(実験2)、桿体と残存錐体の影響を除去するために中心小窓のみに刺激を呈示する小視野条件(実験3)および短時間呈示条件(実験4)、更に明るさの手掛けりを除去するために等輝度条件(実験5)を設定した。

2. 実験1：色票条件

1) 目的

コントロール条件として、色票を刺激として用い、日常の環境と同じように被験者が色票を自由に手を持って観察できる条件を設定し、実験2以降の実験結果に対する参考結果を求める。

2) 装置と刺激

実験刺激にはOSA色標本¹⁾から全424枚の色票を使用した。暗室ブース内で上部から液晶プロジェクター(ELP-7250, EPSON社)によりテスト色票とその周囲(横52cm×縦40cm)の机上面が照明される(図1左)。照明光のJudd修正色度はD65($x'=0.313$, $y'=0.329$)、テスト色票面での照度は500lx(輝度: $20.5\text{cd}/\text{m}^2$)である。

テスト色票は中央に直径2.5cmの円形の穴の空いた正方形(6×6cm)の灰色Judd修正色度($x'=0.340$, $y'=0.377$)の紙で覆われ、被験者はこの穴を通して色票を観察する。テスト色票が置かれた机上面にはこれと同じ灰色の紙が貼られている。

3) 手続き

被験者は実験ブース内に入り、まず3分間、照明光下で明順応する。その後、テスト色票が実験者によって1枚ずつ机上に置かれ、被験者はそのテスト色票を手を持って自由に観察する。視距離は約60cmである。机上には11基本色名がそれぞれ書かれた11個の小箱が置かれ、被験者はテスト色票をその中の一つの箱に入れることでカテゴリカルカラーネーミングを行う。観察時間には制限はない。結果として、ほとんどの被験者は約5秒以内に応答した。OSA色票424枚の試行を1セッションとし、被験者1名で

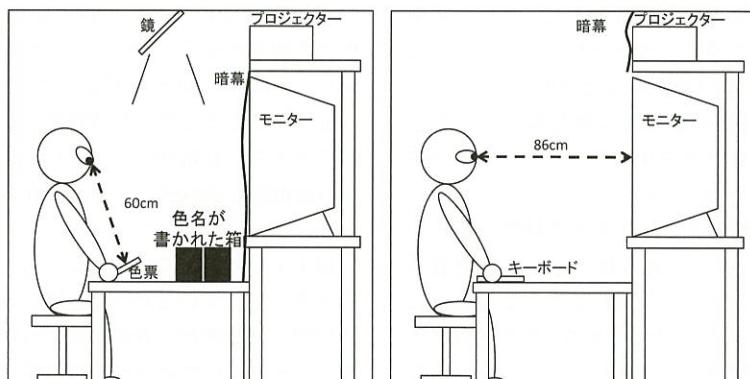


図1 実験ブースと装置図

左：実験1で用いた実験ブースを示す。色票は中央に直径2.5cmの円形の穴の空いた正方形(6×6cm)の灰色の紙で覆われ、被験者はこの穴を通して色票を観察する。

右：実験2で用いた実験ブースを示す。刺激はモニター上に呈示される。

2セッションを行った。

4) 被験者

被験者は3色覚者2名(HN0, HM0), 1型2色覚者3名(KS1, AY1, YY1), 2型2色覚者2名(HH2, TN2)である。被験者は全員男性で、視力または矯正視力正常である。3色覚者は石原式色覚検査票で色覚正常を確認した。2色覚者は石原式色覚検査票、アノマロスコープ、遺伝子検査によりその型を判別した。なお、各被験者名に付いている最後の数字0, 1, 2はそれぞれの被験者の色覚の型をあらわしている。0が3色覚者、1が1型2色覚者、2が2型2色覚者である。

4) 結果

OSA色空間はL軸が明度、j, g軸がそれぞれほぼ黄青方向、赤緑方向をあらわす均等色空間である¹⁾。実験結果はOSA色空間上に示す。図2に応答結果の例として、3色覚者HN0(左図)と1型2色覚者KS1(右図)のL=-1, -2のテスト色票に対する応答結果を示す。(j, g)の奇数番号組上の点がL=-1, 偶数番号組上の点がL=-2の色票に対応している。各シンボルが応答色名をあらわし、各点の外側の大シンボルが1回目、内側の小シンボルが2回目の応答結果を示し、両者は重ねて示されている。

図2より、まず、左側の3色覚者の色名応答は過去の研究¹⁾とよく一致し、色名ごとのカテゴリーでまとまった領域を形成している。これはほかの明度レ

ベルでも同様である。次に、右側の2色覚者の色名応答は3色覚者とは多少異なっているが、2色覚者でも各色名カテゴリーはほぼ固まってあらわれている。g軸に沿った赤緑方向の色票に対しても、緑、灰、ピンク、赤のように色名で区別していることがわかる。ほかの明度レベルでも、同様に2色覚者の色名応答には緑、ピンク、オレンジ、赤の色名があらわれ、それらの色名で色票を分類している。

全被験者の色名応答がどのようにj-g平面上に分布しているかをみるために、色名応答結果のセントロイド(重心)を被験者別に図3に示す。セントロイドとは、ある色名を与えた色票のL, j, g値をその色名の応答回数の重みを付けて平均した値である。各シンボルの色が色名をあらわし、円の直径が応答回数を示す。図3中、1型と2型2色覚者の結果には、セントロイド分布と比較するためにそれぞれの混同色線^{注1)}を重ねてプロットしてある。

図3より、3色覚者HN0とHM0の各色のセントロイドの分布は外側へ広がり、その配置は両被験者間でよく一致していることがわかる。一方、2色覚者KS1, YY1, HH2, TN2のセントロイドの広がりは3色覚者よりも狭くなっているが、その配置は3色覚者と類似している。ただし、2色覚者AY1のセントロイド分布はほかの2色覚者とは異なり、青と黄を結ぶ線上に集まるような傾向を示している。これは、AY1は赤緑方向の色名をg軸方向の色み、つまり3色覚者にとっての赤みと緑みといった色みを使わないで用いていることを示す。KS1, YY1, TN2では黒の応答がなかった。

図4にL軸方向のセントロイド分布を示す。各色のセントロイドは3色覚者HN0とHM0ではほとんど同様な分布を示している。1型と2型2色覚者と共に通している特徴は、白、黄、青、赤、灰の明度分布は3色覚者の分布と類似していることである。その上で、1型2色覚者KS1, AY1, YY1ではピンク、オレンジ、紫の明度が低く、緑、茶の明度分布には3名の被験者を通して一貫性がない。2型2色覚者

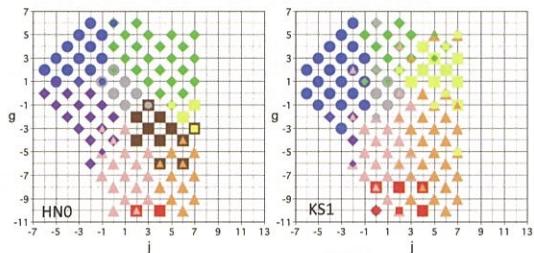


図2 実験1の応答結果の1例

左:3色覚者HN0

右:1型2色覚者KS1。L=-1, -2のテスト色票に対する応答結果を示す。(j, g)の奇数番号組上の点がL=-1, 偶数番号組上の点がL=-2のテスト色票を示す。各シンボルに対する色名を下記に示す。各点の外側の大シンボルが1回目、内側の小シンボルが2回目の応答結果を示し、両者は重ねて示されている。

- : 青, ◆: 緑, ■: 黄, ▲: 赤, ▨: 茶, ●: 黑
- ▲: オレンジ, ♦: 紫, ▲: ピンク, ○: 白, ●: 灰

脚注1) OSA色空間¹⁾は実際の色票を用いて作られた均等色空間であるため、LMS錐体空間の線形変換空間ではなく、また両者の非線形変換式も存在しない。したがって2色覚者の混同色線をOSA空間内に引くことは極めて困難である。ここでは、OSA L=-2とL=-1の色票をMacLeod-Boynton色度図上にプロットして、そこに混同色線を引くことで、色票と混同色線の関係を調べ、その結果を用いて図3に混同色線の概略図を示すこととした。

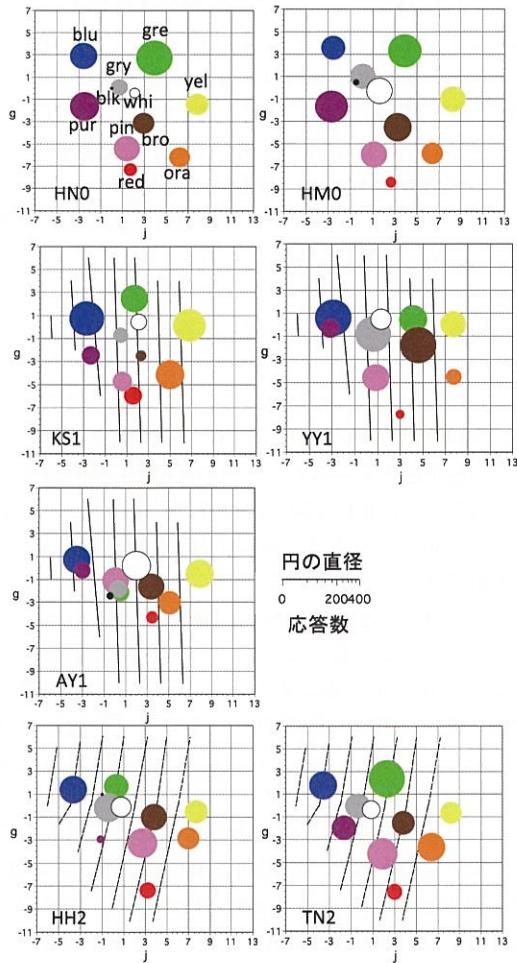


図3 実験1(色票条件)での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイド(重心)の(j, g)平面内の分布
各シンボルの色が色名をあらわし、円の直径が応答回数を示す。1型2色覚者(KS1, YY1, AY1)および2型2色覚者(HH2, TN2)のパネルにはそれぞれの型の混同色線を重ねてプロットしている。
red:赤, gre:緑, yel:黄, blu:青, bro:茶, ora:オレンジ, pur:紫, pin:ピンク, whi:白, gry:灰, blk:黒

HH2, TN2ではピンク, オレンジ, 茶の分布は3色覚者と類似しているが、緑と紫の分布は異なり、かつ2名の被験者間で一致していない。

被験者や刺激呈示条件による色名分布の違いを定量的に示すために、次式に示す類似性指標SIを導入した。この指標は参照者あるいは参照条件の色名分布に対して、ほかの被験者あるいはほかの条件での色名分

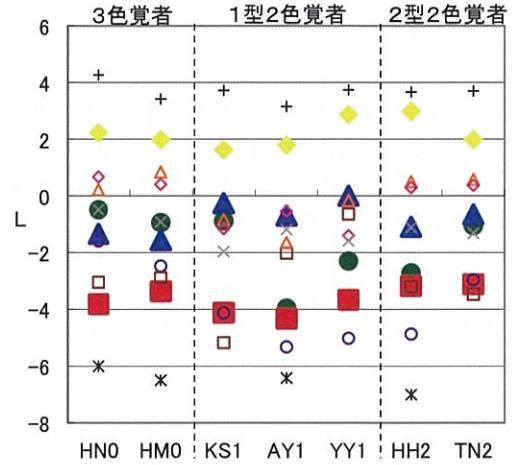


図4 実験1(色票条件)での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイド(重心)のL軸方向の分布
各シンボルが色名をあらわす。
●:緑, ■:赤, ▲:青, ◆:黄, ○:紫, □:茶, △:オレンジ, ◇:ピンク, ×:灰, +:白, *:黒

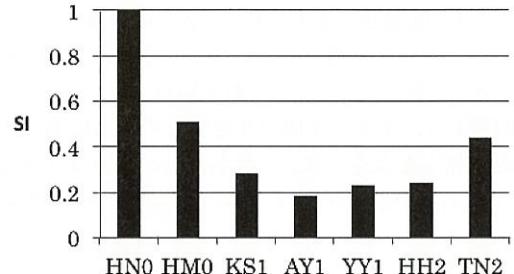


図5 実験1(色票条件)での各被験者の類似性指標SI
被験者HNOを参照者にしている。類似性指標SIの詳細については本文を参照すること。

布がどの程度オーバーラップしているかを示す指標である。

$$SI_a = \frac{N_{aR}}{N_{aR} + N_{aX} - N_{aR}}$$

ここで、

SI_a:ある色名aに対する類似性指標(similarity index)

N_{aR}:参照者(あるいは条件)Rにおいて色名aで呼ばれた色票の合計枚数。カラーネーミングを複数回行った場合はその回数の重みを付けて枚数を計算する。

N_{aX}:比較被験者(あるいは比較条件)Xにおいて

色名 a で呼ばれた色票の合計枚数。

Narx：参照者（あるいは条件）R と比較被験者（あるいは比較条件）X の両者において色名 a で呼ばれた色票の合計枚数。カラーネーミングを複数回行った場合は上と同様に、その回数の重みを付けて枚数を計算する。

ここで、SI は SIA のすべての色名に対する平均値とする。

実験 1 では、被験者間の比較を行うために、参照者 R として 3 色覚者 HN0 を用いた。図 5 に SI を被験者別に示す。HN0 は参照者であるので SI=1 であるが、もう 1 人の 3 色覚者 HM0 は SI=0.51 となり、同じ 3 色覚者でも個人差があり、色名分布のオーバーラップは 50% ほどであることがわかる。

一方、2 色覚者では KS1 が SI=0.28, AY1 が SI=0.19, YY1 が SI=0.23, HH2 が SI=0.24 であり、3 色覚者と比較して SI は約半分の値になっている。ただし、TN2 は SI=0.44 であり、3 色覚者 HM0 よりも小さい値であるが他の 2 色覚者よりも大きな値となっている。

3. 実験 2：モニター条件

1) 目的

実験 2 以降の実験では、CRT モニター上に色票刺激をシミュレートして呈示するが、まず、実際の色票呈示に比較して、モニター呈示によって被験者の結果に差が出るかどうかを調べる。

2) 装置と刺激

暗室ブース内に CRT モニター (GDM-F400, SONY 社) を設置して、モニター上で刺激呈示を行った (図 1 右)。被験者の頭部は頸台により固定し、視距離は 86cm、テスト刺激の形状と大きさは実験 1 と等しく円形視角 2.4° である。テスト刺激は D65 照明光下の OSA 色票をシミュレートしたものであるが、モニターでは呈示可能な輝度に上限があるため、刺激のなかの最大輝度値が実験 1 の 0.73 倍となるように全テスト刺激の輝度を減少させた。テスト刺激の色度は実験 1 の刺激と L, M, S 錐体色度が等しくなるように決めた。L, M, S 錐体の分光感度は Stockman ら¹⁵⁾のものを用いた。周辺光は実験 1 と同じ色度の灰色であり、輝度は 20.5cd/m²とした。大きさは視角横 22° × 縦 17° である。

CRT モニターの R, G, B 蛍光体の分光測光には分光放射輝度計 (PR-650, Photo Research 社) を用

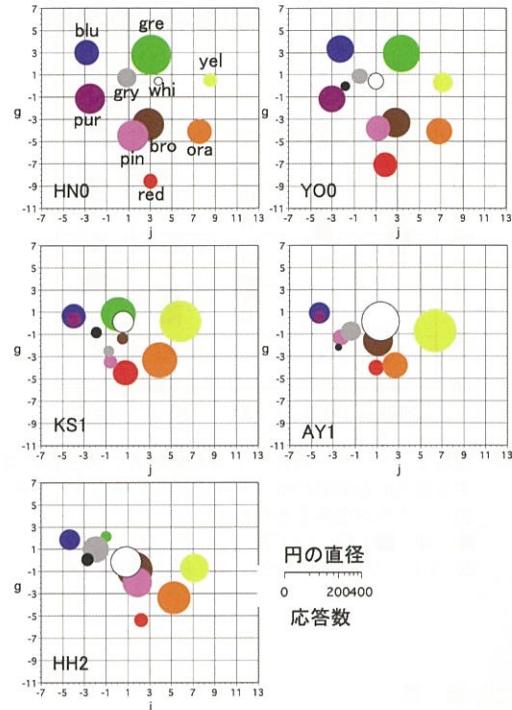


図 6 実験 2 (モニター条件) での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイド (重心) の (j, g) 平面内の分布
各シンボルの色が色名をあらわし、円の直径が応答回数を示す。

red : 赤, gre : 緑, yell : 黄, blu : 青, bro : 茶,
ora : オレンジ, pur : 紫, pin : ピンク, whi : 白,
gry : 灰, blk : 黒

い、輝度値の校正には輝度計 (BM-8, トプコン社) を用いた。

3) 手続き

被験者はまず、モニター上に呈示される周辺光に 3 分間明順応する。その後、モニター上にランダムな順序で呈示されるテスト刺激を観察し、その色名を 11 基本色名から選択し、キーボード応答によりカテゴリカルカラーネーミングを行う。色名を選択するとテスト刺激の呈示が終了し、被験者がキーボードを押すことで次のテスト刺激が呈示される。全テスト刺激 424 色の試行を 1 セッションとし、各被験者は計 2 セッションを行った。

4) 被験者

被験者は 3 色覚者 2 名 (HN0, YO0), 1 型 2 色覚者 2 名 (KS1, AY1), 2 型 2 色覚者 1 名 (HH2) である。YO0 以外の被験者は実験 1 と重複している。

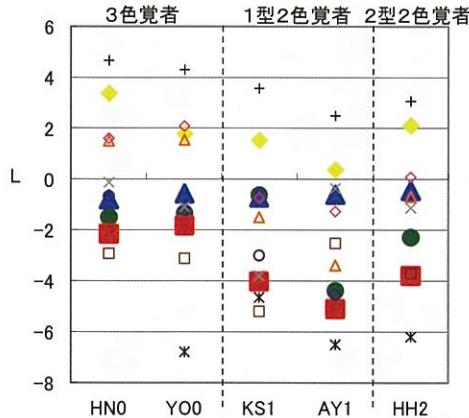


図7 実験2(モニター条件)での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイドのL軸方向の分布
各シンボルが色名をあらわす。

●: 緑, ■: 赤, ▲: 青, ◆: 黄, ○: 紫, □: 茶,
△: オレンジ, ◇: ピンク, ×: 灰, +: 白, *: 黒

5) 結 果

各色名応答のセントロイドをj-g平面上(図6)とL軸上(図7)に示す。被験者 HN0 では黒、HH2 では紫の色名が使われなかった。

図6より、3色覚者 HN0 と YO0 では、各色のセントロイドの配置が互いによく一致し、更に、HN0 では実験1の色票条件の結果ともよく一致している。

2色覚者 KS1 では、実験1の色票条件に比べると、赤緑方向のセントロイドの広がりがかなり狭くなっている。AY1 では色票条件と同様にセントロイドの分布は黄青方向の線上に潰れ、HH2 でもセントロイドはやや傾いた黄青方向に揃っている。

図7より3色覚者 HN0 と YO0 の L 軸方向のセントロイド分布は図3の色票条件の分布と赤と黒以外ではほぼ同様である。1型2色覚者 KS1 と AY1、2型2色覚者 HH2 は3名とも、図4の色票条件とほぼ同様の分布をしている。

なお、3色覚者の赤と黒の応答が色票条件とモニター条件で異なるのは、OSA 色票には赤と黒の色票数が少なく¹⁾、ここでは色票のモニター呈示によって色の見えが多少変化し、赤と黒の色名に対応する刺激のわずかな変動が、そもそも刺激数が少ないとために結果に影響してしまったのではないかと推測される。

図12に実験2(モニター条件)と実験1(色票条

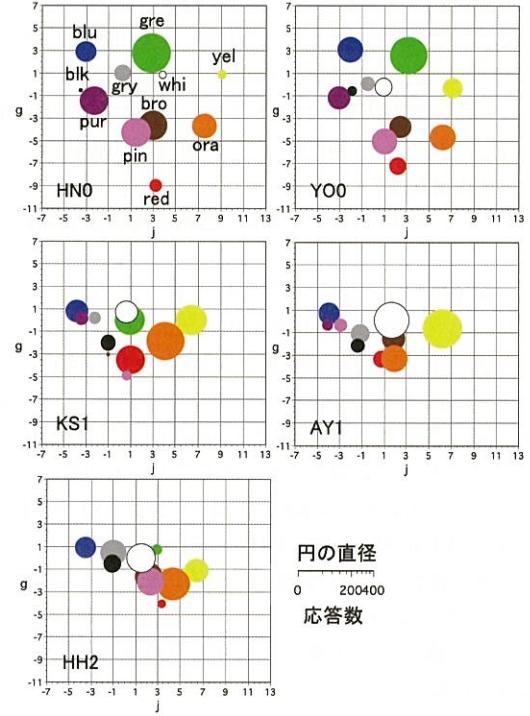


図8 実験3(小視野条件)での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイド(重心)の(j, g)面上の分布
各シンボルの色が色名をあらわし、円の直径が応答回数を示す。

red: 赤, gre: 緑, yel: 黄, blu: 青, bro: 茶,
ora: オレンジ, pur: 紫, pin: ピンク, whi: 白,
gry: 灰, blk: 黒

件)間での類似性指標 SI を被験者別に示す。ここでは、色票条件を参照条件としている。この結果をみると、3色覚者 HN0 では、モニター条件は色票条件に比較して約 0.4 の類似性を示すが、2色覚者では類似性指標が約 0.2~0.3 であり、2色覚者の方がモニター条件での色名分布がより大きく異なっていることがわかる。

4. 実験3と4: 小視野条件と短時間呈示条件

1) 目的

桿体は中心小窓には存在しないことが知られている¹⁾。実験3では小視野刺激を用いて中心小窓に刺激を呈示し、桿体の影響を除去する。また、残存錐体が応答するには刺激の長時間呈示が必要とされている⁶⁾。実験4では短時間呈示にして残存錐体の影響を除去する。

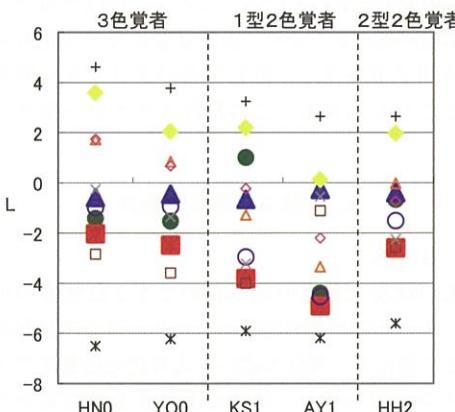


図9 実験3（小視野条件）での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイドのL軸上の分布
各シンボルの色が色名をあらわす。

●：緑，■：赤，▲：青，▽：黄，○：紫，□：茶，△：オレンジ，◊：ピンク，×：灰，+：白，*：黒

2) 刺激と手続き

実験3では刺激の大きさを円形視角30°、実験4では刺激の呈示時間を50msとした。ほかの実験条件と手続きは実験2と同様である。

3) 被験者

被験者は実験2と同じ3色覚者2名(HN0, YO0), 1型2色覚者2名(KS1, AY1), 2型2色覚者1名(HH2)である。

4) 結果

図8と図9のそれぞれに、実験3の小視野条件での色名応答のセントロイド分布をj-g面上およびL軸上に示す。図6のモニター条件でのj-g面上の分布と比較すると、3色覚者HN0とYO0ではモニター条件とほとんど違いがないことがわかる。また3名の2色覚者でも、図8ではセントロイド分布の広がりが更に狭くなっているものの、図6とはほとんど差がみられない。図9のL軸上の分布もすべての被験者において図7のモニター条件と大きな違いはみられない。

図10と図11に、実験4の短時間呈示条件での色名応答のセントロイド分布をj-g面上とL軸上にそれぞれ示す。図10と図6のモニター条件を比較すると、すべての被験者で大きな差はないことがわかる。また、図8の小視野条件の結果ともよく一致している。図11のL軸上の分布についても図7のモニター条件と大きな差はなく、図9の小視野条件ともよく

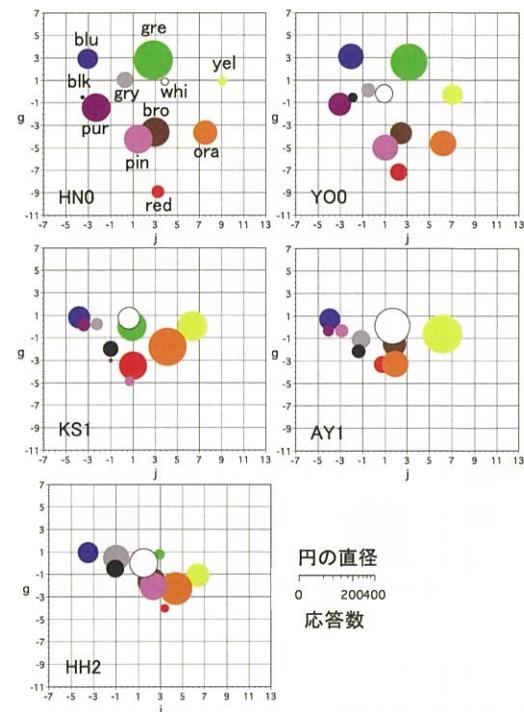


図10 実験4（短時間呈示条件）での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイド（重心）の(j, g)面上の分布
各シンボルの色が色名をあらわし、円の直径が応答回数を示す。
red : 赤, gre : 緑, yel : 黄, blu : 青, bro : 茶, ora : オレンジ, pur : 紫, pin : ピンク, whi : 白, gry : 灰, blk : 黒

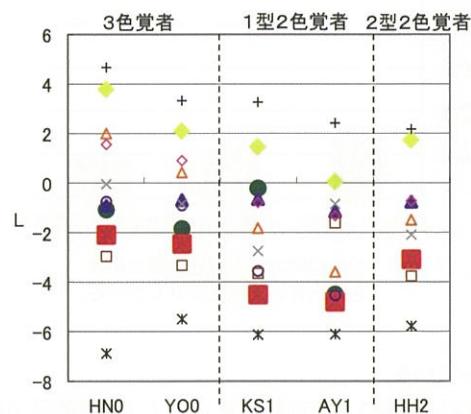


図11 実験4（短時間呈示条件）での全被験者の各色票に対する色名応答結果のセントロイドのL軸上の分布
各シンボルの色が色名をあらわす。

●：緑，■：赤，▲：青，▽：黄，○：紫，□：茶，△：オレンジ，◊：ピンク，×：灰，+：白，*：黒

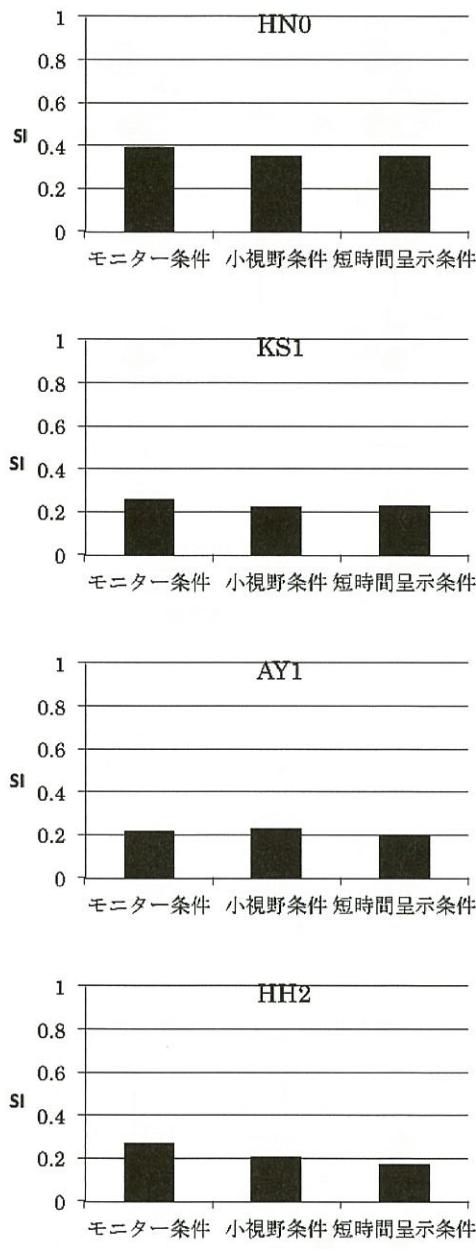


図12 各条件間での類似性指標の比較
色票条件を参照条件としている。

一致している。

図12に実験3（小視野条件）と4（短時間呈示条件）と実験1（色票条件）間での類似性指標SIを被験者別に示す。ここでは、色票条件を参照条件としている。この結果をみると、3色覚者HN0では、小視野条件と短時間条件とともに色票条件に比較して約

0.4の類似性を示している。しかし、2色覚者では類似性指標が約0.2であり、2色覚者の方が小視野条件と短時間呈示条件での色名分布がより大きく異なっていることがわかる。この特性はモニター条件とほぼ等しい。

5. 実験5：等輝度条件

1) 目的

刺激の輝度と色度の組み合わせを3色覚者の色名に対応させることも可能であるため、ここでは刺激を等輝度に揃えて、輝度の違いにより色名応答ができない条件で実験を行い、刺激の輝度を2色覚者が用いているかどうかを調べる。

2) 刺激と手続き

実験に用いたテスト刺激の色度はjudd修正x'y'色度図上でモニターで呈示できる色域内から0.025ステップの等間隔で選んだ。参照刺激は白色(x'=0.340, y'=0.377), 輝度を10, 25, 40 cd/m²の3レベルとした。全テスト刺激数はそれぞれの輝度レベルで138個(10 cd/m²), 113個(25 cd/m²), 84個(40 cd/m²)となり、合計335個である。

2色覚者の分光感度は3色覚者のものとは異なるため、等輝度刺激を作成するためには被験者ごとに輝度合わせをしなければならない。ここでは、準備実験で2色覚者と3色覚者すべての被験者が交照法により、参照刺激にテスト刺激の輝度合わせを行い、等輝度刺激を作成した。

交照法で用いた刺激視野は視角2.4°、周辺光はモニター条件と同じ灰色刺激である。テスト刺激として、モニターに呈示できる色域の外周からそれぞれの輝度レベルに合わせて23点(10 cd/m²), 23点(25 cd/m²), 22点(40 cd/m²)を選んだ。交照法の刺激時間周波数は15Hzとした。輝度合わせは調整法により行われ、繰り返し試行回数は2回とした。次に、これらの選択された点で挟むそのほかの外周の刺激の輝度をX' Y' Z'空間内の距離により線形で重み付けをして計算により求める。最後に、色域内側の点の刺激については、この点を挟む左右外周の2点、あるいは上下外周の2点から、それぞれ、距離の線形重み付けをして輝度を計算し、最終的には両者の平均値を刺激の輝度とした。

本実験では、被験者は各輝度レベルの刺激に対してカテゴリカルカラーネーミングを行った。この実験手続きは実験2と同様である。

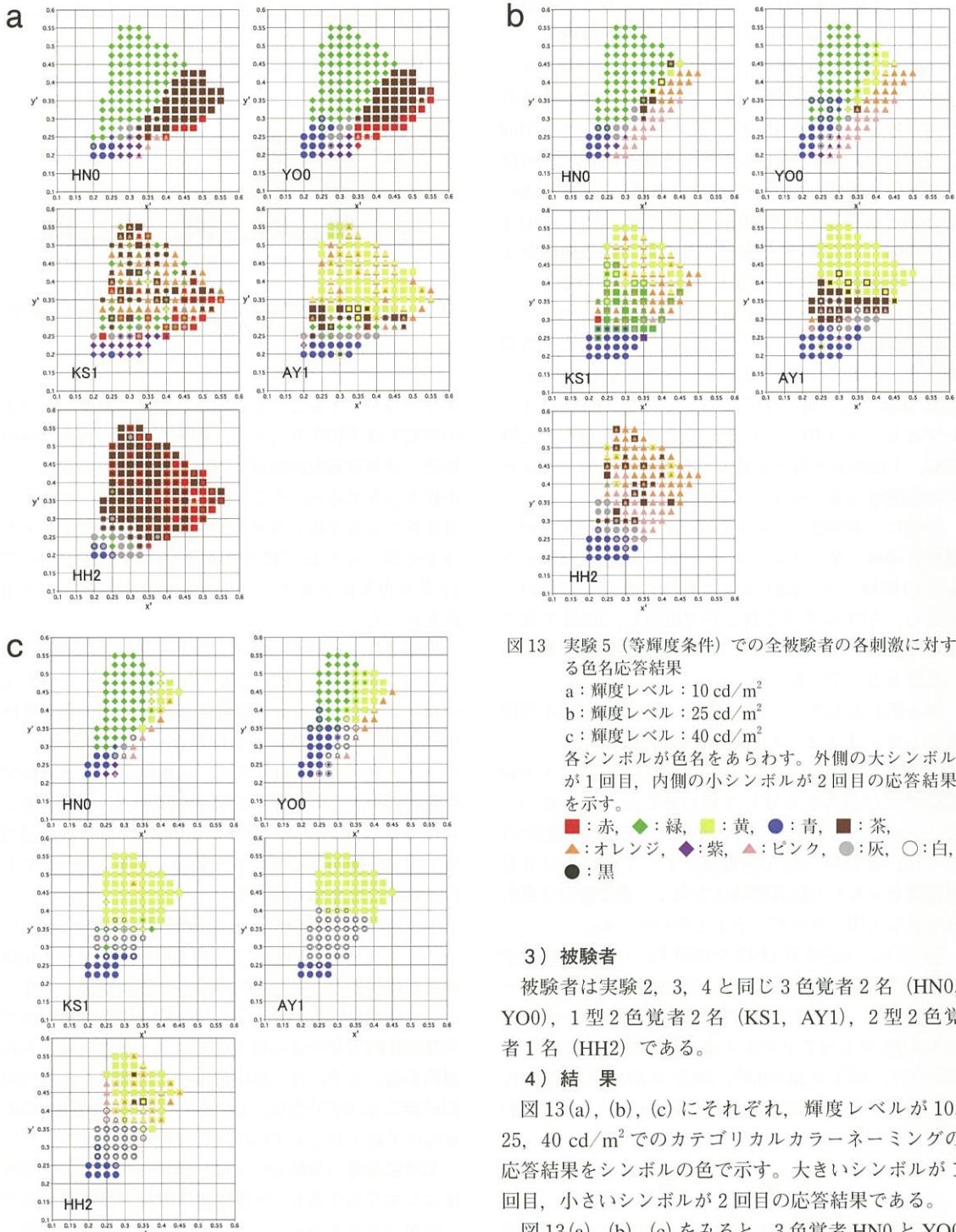


図13 実験5(等輝度条件)での全被験者の各刺激に対する色名応答結果

a: 輝度レベル: $10 \text{ cd}/\text{m}^2$

b: 輝度レベル: $25 \text{ cd}/\text{m}^2$

c: 輝度レベル: $40 \text{ cd}/\text{m}^2$

各シンボルが色名をあらわす。外側の大シンボルが1回目、内側の小シンボルが2回目の応答結果を示す。

■: 赤, ♦: 緑, □: 黄, ●: 青, ■: 茶,
 ▲: オレンジ, ♦: 紫, ▲: ピンク, ○: 灰, ○: 白,
 ●: 黒

3) 被験者

被験者は実験2, 3, 4と同じ3色覚者2名(HN0, YO0), 1型2色覚者2名(KS1, AY1), 2型2色覚者1名(HH2)である。

4) 結果

図13(a), (b), (c)にそれぞれ、輝度レベルが 10 , 25 , $40 \text{ cd}/\text{m}^2$ でのカテゴリカルカラーネーミングの応答結果をシンボルの色で示す。大きいシンボルが1回目、小さいシンボルが2回目の応答結果である。

図13(a), (b), (c)をみると、3色覚者HN0とYO0はすべての輝度レベルで互いによく一致した色名を使用し、カラーカテゴリー領域の境界も明瞭にあらわれている。

一方、2色覚者はすべての輝度レベルで3色覚者とは異なった特徴を示している。まず、低輝度レベル 10 cd/m^2 (図13(a)) では、3色覚者が緑、茶、赤と区別している刺激領域に対して KS1 は一貫した色名を用いることができず、緑、茶、オレンジ、赤を混同して用いている。AY1 はほとんど黄と応答し、HH2 は茶と赤を混同して用いている。ただし、3色覚者が青と紫と応答した刺激領域に対しては、KS1 と AY1 は紫や青、HH2 は青や灰で、その他の刺激領域とは異なった色名を用いて安定した応答をしている。

次に、中輝度レベル 25 cd/m^2 (図13(b)) では、3色覚者が緑、黄、オレンジ、ピンクと応答した刺激領域に対して KS1 は黄、緑、オレンジを混同して用い、AY1 はほとんど黄や茶で応答している。HH2 はオレンジとピンクを用いている。ここでも図13(a) と同様に、3色覚者が青と応答した刺激領域に対してはどの2色覚者も青で安定して応答している。

最後に、高輝度レベル 40 cd/m^2 (図13(c)) では3色覚者が緑、黄、オレンジと応答した刺激領域 ($y' > 0.35$ の領域) を、KS1 は3点を除きすべて黄と白で応答し、AY1 はすべて黄と白で応答し、HH2 ではオレンジ、ピンク、茶が混在しているものの黄が最も多い応答となっている。

以上示したように、どの輝度レベルでも刺激を等輝度にしてしまうと、2色覚者は緑から黄、オレンジ、茶、ピンク、赤といった赤緑方向に色みが変化する刺激領域では色名を安定して用いることができないこと、しかし、黄青方向に色みが変化する刺激領域に対しては、黄領域では2色覚者によって用いられる色名は異なるものの応答領域は安定し、青領域では色名も安定して用いられていることがわかった。

図14に、3色覚者 HN0 を参照者にした場合の各被験者の類似性指標 SI を示す。3色覚者の YO0 は $SI = 0.49$ となり、3色覚者間の色名分布のオーバーラップは約 50% であることがわかる。2色覚者では KS1 が $SI = 0.17$ 、AY1 が $SI = 0.07$ 、HH2 が $SI = 0.15$ であり、3色覚者とは色名分布が大きく異なっていることがわかる。

6. 考 察

本研究では1, 2型2色覚者が弁別できないはずの赤と緑がなぜ彼らの日常的に用いる色名にはあらわれているのか、2色覚者が3色覚者と同様なカategoriカルカラーネーミングを可能にする視覚的手掛かりは何

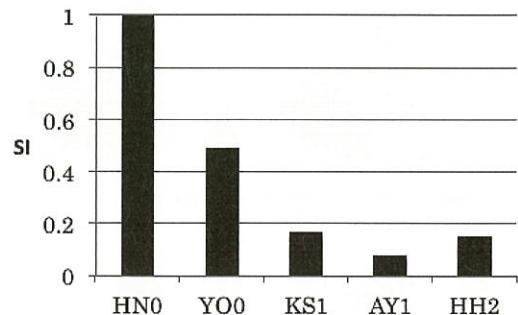


図14 実験5(等輝度条件)での各被験者の類似性指標 SI
3色覚者 HN0 を参照者にしている。

かを明らかにすることを目的とした。これまでの過去の研究では手掛かりとして、桿体の寄与、残存錐体の影響、非線形擬似的赤緑反対色チャンネルの存在などが提案されてきた。そこで本研究ではまず、これらの可能性のある手掛かりが実際に役立つものであるかどうかを調べるために様々な刺激呈示の条件を用いて11基本色名によるカategoriカルカラーネーミング実験を行った。

色票条件(実験1)では、ほとんどの2色覚者の色名のセントロイドは3色覚者のものとよく一致していた。しかし、1名の2色覚者は赤緑方向の色名を区別して用い、3色覚者とは異なる結果を示した。モニター条件(実験2)では、2色覚者の赤緑方向での色名のセントロイドの分離が悪くなり、3色覚者とは明らかに違いがみられた。これらの結果は2色覚者の視覚手掛かりはモニター条件でかなり失われるものであることを示している。

小視野条件(実験3)と短時間呈示条件(実験4)ではモニター条件に比べて、色名の区別にやや劣化はあるもののほとんど色名のあらわれ方には違いがないという結果が得られた。もし視覚的手掛かりが桿体や残存錐体の寄与であるならばモニター条件では色名の混同が起こらず、むしろ小視野や短時間呈示条件で混同が起こるはずである。したがって桿体や残存錐体の寄与は手掛かりとしての可能性は低いといえる。

等輝度条件(実験5)では、刺激を各被験者で等輝度にして呈示すると、2色覚者は赤緑方向の色名を全く区別できなくなることを示した。L, M錐体応答の非線形変換により擬似的な赤緑チャンネルが存在し、それが手掛かりとなっているのであれば、等輝度条件でも赤緑の区別ができるはずである。したがって擬似

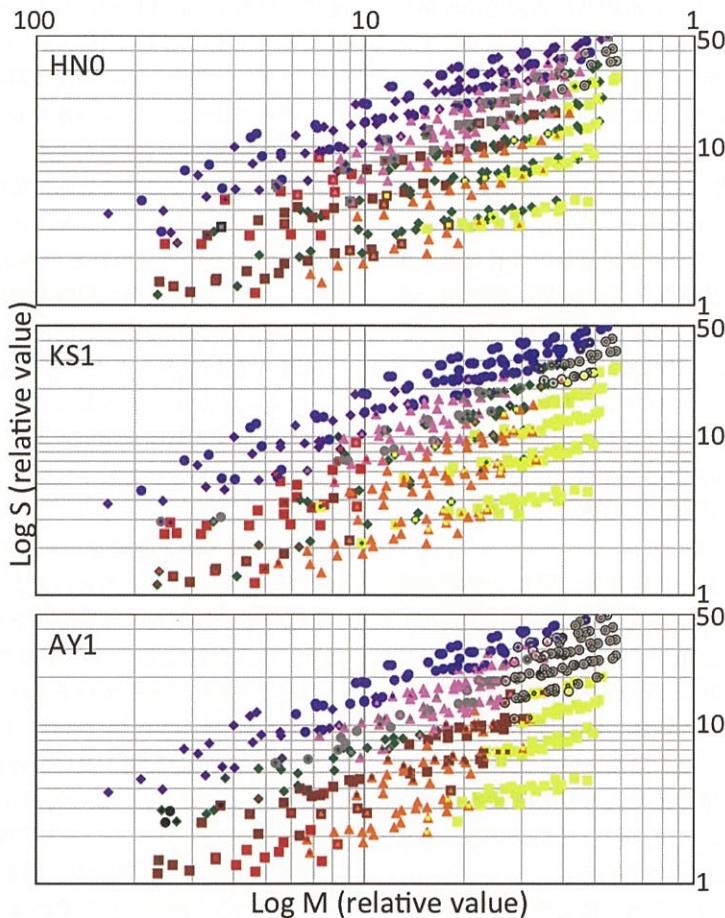


図15 実験1(色票条件)での3色覚者HN0,1型2色覚者KS1とAY1の応答結果の(M, S)錐体面上の分布
縦、横軸は対数である。各シンボルが色名をあらわす。外側の大シンボルが1回目、内側の小シンボルが2回目の応答結果を示す。
 ●:青, ◆:緑, □:黄, ■:赤, ▨:茶, ▲:オレンジ, ◆:紫, ▲:ピンク,
 ○:白, ●:灰, ●:黒

的な赤緑チャンネルが手掛かりとなっている可能性も低い。

以上の結果から、2色覚者が利用している視覚的手掛けりはモニター条件でかなり失われ、小視野と短時間呈示条件では更に利用が困難になり、等輝度条件では全く使えなくなるという特性をもっていることがわかった。しかし、等輝度条件では、赤緑方向とは異なり、2色覚者の黄青方向の色名の区別には劣化はなかった。これらの結果を考え合わせると、2色覚者は赤緑方向の色名を使うときには刺激の輝度(明度)を手掛けりとして利用し、黄青方向の色名では利用しない、つまり、赤緑方向は輝度チャンネル応答に、黄青

方向は黄青チャンネル応答に基づいて色名応答をするという仮説が導出される。

そこで、2色覚者の色名応答を更に詳細に調べるために、錐体応答空間に各刺激に対する色名をあらわしてみる。図15に実験1の色票条件での3色覚者HN0, 1型2色覚者KS1とAY1の応答結果を(M, S)錐体面上にプロットして示す。1型2色覚者はL錐体を欠損しているので、横軸と縦軸にはそれぞれM錐体応答とS錐体応答(対数)をとった。

図15からわかることは、これら3被験者に共通している特徴が、まず、グラフパネルの右上に白、そこから左斜め下に向かって灰が分布し、プロット領域の

ほぼ中央に右上から左下へと直線状に無彩色領域が存在していることである。次に、この無彩色領域を上下に挟んで上側に青と紫、下側に黄とオレンジが分布し、無彩色領域と重なるようにピンクが分布していることである。

3色覚者と2色覚者とで異なる点は、3色覚者では青と紫は重なって分布し、また、黄とオレンジも重なって分布しているが、2色覚者では青と紫も黄とオレンジもほとんど重ならず、M値（輝度値）が大きい方に青や黄、小さい方に紫やオレンジの分布があるということである。これは、3色覚者ではL値の違い、つまり赤緑（L-M）チャンネルの赤みの違いで青と紫、あるいは黄とオレンジを区別でき輝度値を使う必要はないが、2色覚者では赤緑（L-M）チャンネルがないためM値（輝度値）の違いで区別しなければならないことを示している。

緑の分布は3色覚者と2色覚者、更に2色覚者間でもかなり異なっている。3色覚者では緑は黄とオレンジに重なるように分布しているが、2色覚者KS1では緑は無彩色領域の白と灰の間の高輝度領域に分布し、AY1では緑は無彩色領域の低輝度領域に分布している。これらから、KS1は無彩色で高輝度の刺激を緑と呼び、AY1は無彩色で低輝度の刺激を緑と呼んでいるが、いずれにしても両者とも緑の応答に輝度の違いを利用していることがわかる。

ピンクについては、3色覚者ではL値の違いを使って灰とピンクの区別をしているが、2色覚者では黄青方向のわずかな彩度と輝度値を利用してピンクと応答しているのである。

2型2色覚者HH2については、AY1とほぼ同様な傾向を示したのでここでは省略するが、ただしピンクが、AY1では灰の上下両側に分布しているのに対し、HH2では灰と黄の間に分布していることが異なっていた。

以上示したように、2色覚者の色名応答は詳細にみると、2色覚者は輝度チャンネル応答に基づいて赤緑方向の色名応答をしているとする仮説が支持されることがわかる。2色覚者は色チャンネルとしては黄青応答のみでも輝度の違いを利用することにより、図3のような3色覚者と類似の色名セントロイドの分布をもてるといえよう。

モニター条件で2色覚者の色名の区別が劣化したのは、色票条件のように色票を手に持って傾け、照明のある角度を変化させることにより色票表面の輝度

変化を見るような手段がとれず、その明度を正しく判断することができなくなつたためであると推測できる。つまり、明度が高い表面は明度が低い表面に比べて、照明が強くあたっている部分と弱くあたっている部分では反射光の輝度差が大きいので、このわずかな輝度変化を捉えることで表面の明度をより正しく判断することができるということである。また、小視野や短時間呈示条件で2色覚者の色名の区別が更に悪くなつたのは、2色覚者は刺激の輝度（明度）を判断するには刺激の面積と観察時間が必要であるが、それが十分与えられなかつたためであると考えられる。図7～11を比較するとわかるように、黄青方向の色名応答は小視野や短時間呈示でも赤緑方向の色名応答に比べると変化が小さいことからも、赤緑方向の色名判断は異なつたメカニズムで行つていることがわかる。刺激表面の明度は2色覚者にとっては色名応答の重要な視覚的手掛かりであるといえよう。

2色覚者が擬似的3色型応答を可能とするのは、自然物、人工物を含めたすべての表面色が三次元錐体空間内で一様に分布しているわけではなく、白は輝度が高い（L, M, S値が大きい）、彩度が高い色は輝度が小さい、黄色は輝度が高い、赤は輝度が低いなどの特徴をもつて分布し、この特徴が表面色をM-S平面やL-S平面に投影してある程度保たれているからと考えられる。2色覚者が、経験から学んだこの特徴、すなわち、輝度（LあるいはM応答）軸と黄/青（L-SあるいはM-S応答）軸で張る平面内での特徴を使って色名応答をすると、完全な一致でないにしても、3色覚者の色名と近似的には一致するからである。

本研究では、1, 2型2色覚者がL錐体、M錐体を欠損し、赤緑方向の色弁別ができないにもかかわらず、日常的には赤や緑の色名も使い、3色覚者のカテゴリカルカラーネーミングを行つてはいるが、そのためにはどのような視覚的手掛かりを使つていているかを明らかにすることを目的として、刺激呈示条件を制限したカテゴリカルカラーネーミング実験を行つた。その結果、2色覚者は実際の色票を観察すると3色覚者と同様なカテゴリカルカラーネーミングをするが、刺激をモニター上に呈示し、小視野や短時間呈示にすると赤緑方向の色名の区別が劣化し、更に刺激の等輝度呈示では全く色名を混同してしまうことが示された。また、錐体空間内での応答結果の分析により、色票条件では刺激の輝度の違いにより色名を使い分けることが可能であることがわかった。これらの考察から、2色

覚者は色票の輝度（明度）を重要な手掛かりとし、3色覚的なカテゴリカルカラーネーミングを行っていることが明らかとなった。

文 献

- 1) 内川恵二：色覚のメカニズム—色を見る仕組みー，朝倉書店，東京，1998.
- 2) Boynton RM: Human Color Vision. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1979.
- 3) Boynton RM & Scheibner H: On the perception of red by "red-blind" observers. *Acta Chromatica* 1: 205-220, 1967.
- 4) Jameson D & Hurvich LM: Dichromatic color language: "Reds" and "greens" don't look alike but their colors do. *Sens Processes* 2: 146-155, 1978.
- 5) Montag ED & Boynton RM: Rod influence in dichromatic surface color perception. *Vision Res* 27: 2153-2162, 1987.
- 6) Montag ED: Surface color naming in dichromats. *Vision Res* 34: 2137-2151, 1994.
- 7) Shevell SK, Sun Y & Neitz M: Protanomaly without darkened red is deutanopia with rods. *Vision Res* 48: 2599-2603, 2008.
- 8) Pokorny J, Lutze M et al: The color of night: Sur face color categorization by color defective observers under dim illuminations. *Vis Neurosci* 25: 475-480, 2008.
- 9) Nagy AL & Boynton RM: Large-field color naming of dichromats with rods bleached. *J Opt Soc Am* 69: 1259-1265, 1979.
- 10) Smith VC & Pokorny J: Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *J Opt Soc Am* 67: 213-220, 1977.
- 11) Nagy AL: Large-field substitution Rayleigh matches of dichromats. *J Opt Soc Am* 70: 778-784, 1980.
- 12) Wachtler T, Dohrmann U & Hertel R: Modeling color percepts of dichromats. *Vision Res* 44: 2843-2855, 2004.
- 13) Sharpe LT, Stockman A et al: Red, green, and red-green hybrid pigments in the human retina: Correlations between deduced protein sequences and psychophysically measured spectral sensitivities. *J Neurosci* 18: 10053-10069, 1998.
- 14) Sharpe LT, de Luca E et al: Advantages and disadvantages of human dichromacy. *J Vis* 6: 213-223, 2006.
- 15) Stockman A, MacLeod DIA & Johnson NE: Isolation of the middle- and long-wavelength sensitive cones in normal trichromats. *J Opt Soc Am* 10: 2491-2521, 1993.

発行所 日本眼科紀要会

567-0047 茨木市美穂ヶ丘3-6 山本ビル302号室 ☎072-623-7878
