Color Science Association of Japan

日本色彩学会誌　第34巻　第2号　2010年　164—167

特集「色彩視の発達」

色彩感覚の発達

Experience in early infancy for color perception

杉田　陽一　Yoichi Sugita

産業技術総合研究所　脳神経情報研究部門
Neuroscience Research Institute, AIST

1. はじめに

照射光の波長成分が大きく変化しても、ヒトは物体の色を正しく認識できる。たとえば、晴れた日の日中、真っ赤な夕焼けのとき、あるいは蛍光灯の光で照明されているとき、物体から眼に入る光の波長成分は大きく変化している。それでも、リンゴは赤くバナナは黄色に見える。この「色の恒常性」は、眼に入射する光の波長そのものには「色彩」情報が欠けていることを示している。

眼に入る光の性質が大きく変化しても、対象物の「色」は変化せず同じように知覚されるのは、「色」が網膜から大脳皮質に至る神経結合の連鎖によって創り出されるからに他ならない。そうであれば、視覚野の眼優位性カラムや方位選択性細胞あるいは運動方向選択性細胞に見られるように、生後間もない時期の視覚環境によって、「色」に対する応答も大きく変化すると予測される。本稿では、初期経験が色覚の発達に及ぼす影響について概説する。

2. 色覚における初期経験の効果

大脳皮質は、生後しばらくの間の生育環境に応じて、感覚情報の処理様式を大きく変化させることが知られている。さらに、乳幼児期に起こった変化は、その後の経験によって再び変えることが極めて困難な非可逆的なものであることも明らかにされている。だから、生まれた直後から数ヶ月間、色を見せずに育てれば、後に豊かな色彩環境の中で生育させても、色覚に重篤な障害が現れるだろうと考えられていた。ところが、生後数ヶ月間「色」を経験させなくても、色彩感覚の発達が損なわれることはなかったという実験結果が相次いで報告された。たとえば、生後2週令から3ヶ月間程、ブタオザル（*Macaca nemestrina*）を暗室で育てても、色覚に異常は見られなかった[1]。また、正常な色覚を持つヒトがマンセル色票を全く弁別出来ないような薄暗い部屋で、リスザル（*Saimiri sciureus*）の赤ちゃんを生後4ヶ月間育てても、色彩感覚に正常ザルとの違いは全く見られなかったという[2]。さらに、生後3ヶ月間、カニクイザル（*Macaca fascicularis*）の赤ちゃんを長波長の単色光の照明だけで育てても、その後の色覚の発達に障害は全く認められなかった[3),4)]。このような実験結果から、初期経験が色覚に及ぼす影響は、あるとしても極めて少ないと考えられてきた。しかし、最近になって、生まれて間もないサルを1年間、色相、明度、あるいは彩度が、物体認識の手がかりになりえないような視覚環境下で飼育すると、色の分類あるいは色の恒常性に重篤な障害生じて、その後、通常の飼育環境下で長期間育てても、一向に回復の兆しが見えないという実験結果が報告された[5]。この事実は、「色彩感覚」が生得的なものではなく、経験によって獲得されるということを示している。

3. 単色光照明下での飼育

自然の光（太陽光）や一般の照明光（蛍光灯や白熱灯など）は、眼に見える全ての波長成分を含んでいる。しかし、単一の波長成分しか含まない単色光で照明されると、光の強さの濃淡しか検出できず、物体の「色」を検出することは不可能となる。

生まれて間もないサルを、1年間、単色光の照明だけで飼育し、色を認識できないようにして育てた。このとき、網膜にある3種類の色受容細胞（錐状体）を全て賦活（活性化）できるように、単色光の波長を1分間毎に赤・緑・青に変化させた。このように、波長を変化させることで、物体色の色相と彩度が変化するだけでなく、明度も大きく変化する。したがって、ある瞬間に記憶した物体色の3要素が、次の瞬間には全く異なっていることになる。このようにして育てたサルの

NII-Electronic Library Service

Color Science Association of Japan

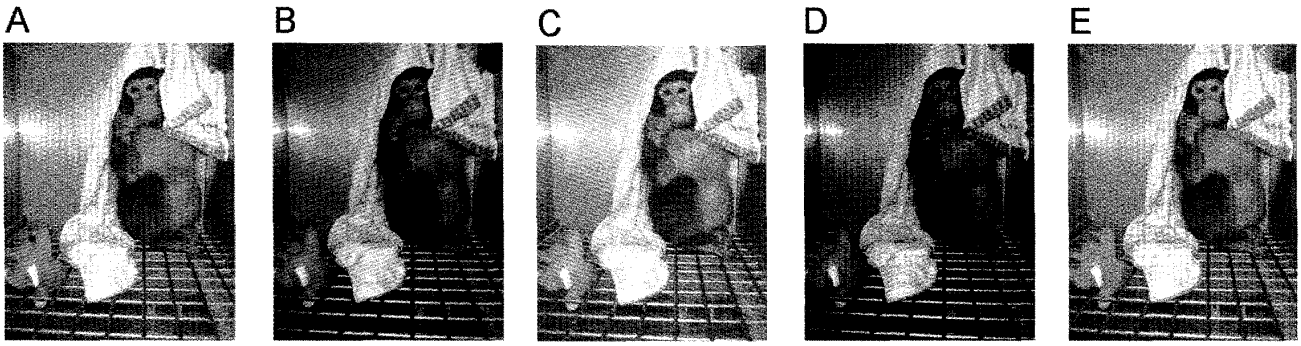

図1　単色光照明のイメージ
(A)：通常の照明条件下の写真。(B)：長波長(赤)、(C)：中波長(緑)、(D)：短波長(青)の光照明のイメージ写真。単色光で照明されると、(E)：白黒写真と同じように、サルの体の色、赤い首輪、タオルの模様の色あるいは人形の色は全く識別できない。

色覚を検討した。

4. 単色光サルの色の弁別

最初に、単色光サルが明暗の見本合わせ課題を遂行できるか否かを調べた。ディスプレー上の中央下部に見本となる四角形を提示し、サルが見本に触れたら、上部左右に選択肢となる比較刺激を提示した。見本と同じ輝度の比較刺激に触れると、報酬(ジュース)が与えられる。

明暗見本合わせ課題において、単色光サルは正常サルと殆ど変わらない成績を収めることが出来た。ところが、明暗見本合わせ課題の後に行った色の見本合わせ課題では、これらのグループの成績に大きな違いが現れた(図3)。

等輝度に調整した赤・黄・緑・青の4種類の刺激を用意して、明暗課題と全く同じ手続きで訓練を行った。すると、正常サルは、即座に明暗課題で学習した同じものを選択するという規則を色課題に適用できたのに対して、単色光サルは規則を全く適用できなかった。そして、課題遂行のために、再び長期間にわたる訓練を必要とした。以上の結果は、色を認識することなく育っても、長期間の訓練によって光の波長成分の弁別が可能であることを示している。

5. 単色光サルの色の類似性判断

色の見本合わせ課題を十分に訓練した後で、単色光サルが色をどのように分類しているか検討した。等輝度に調整した15種類の「色」を用意して、そのうち6組について、類似色を選択するように訓練した(表1)。この類似色選択課題を十分に訓練した後に、15種類

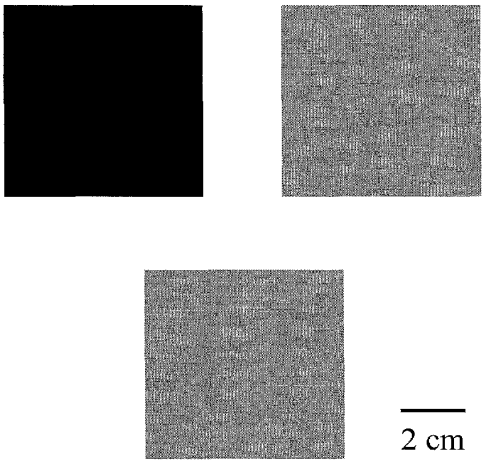

図2　見本合わせ課題に用いた刺激の配置
中央下部の四角形と同じ輝度の比較刺激(この場合は、上部右側)に触れると報酬が与えられる。

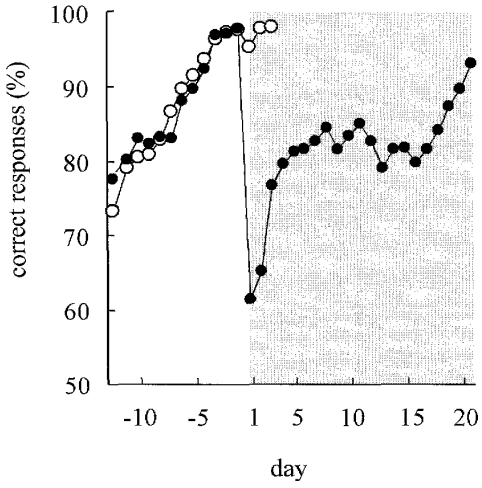

図3　見本合わせ課題の成績
白丸は正常サル、黒丸は単色光サルの成績を表している。明暗課題の成績が達成基準(3日間連続して正答率95%以上)に達して色課題に移行した日を1日目として表記している。

NII-Electronic Library Service

Color Science Association of Japan

表1　Combination of stimulus color in CIE coordinates (x, y)

Sample or target	Distracter
(0.578,0.366), (0.563,0.307)	(0.235, 0.352)
(0.345,0.553), (0.294,0.55)	(0.406, 0.218)
(0.191,0.094), (0.165,0.118)	(0.479, 0.447)
(0.517,0.416), (0.445,0.474)	(0.147, 0.069)
(0.457,0.246), (0.35,0.184)	(0.308, 0.575)
(0.252,0.406), (0.225,0.308)	(0.608, 0.338)

の色から3種類を選ぶ全ての組み合わせについて、サルがどのような判断を行うか調べた。選択した比較刺激の色が、選択されなかった比較刺激と比べて、より見本の色に似ていると考えて、結果を多次元尺度構成法で分析した。

正常サルの結果は、赤、緑、青の3色が、それぞれ最も離れた位置に付置され、3原色を基準にして類似性判断を行っていたことが伺える。この結果は、全く同じ装置と手続きで得られたヒトの結果と極めて良く似ていた。しかし、単色光サルの結果には、そのような規則性が全く認められず、でたらめに判断していた結果のようにも見えた（図4）。以上の結果は、単色光サルは、長期間の訓練によって、刺激の波長成分の弁別は可能になるものの、正常サルとは極めて異なった色の分類を行っていることを示している。

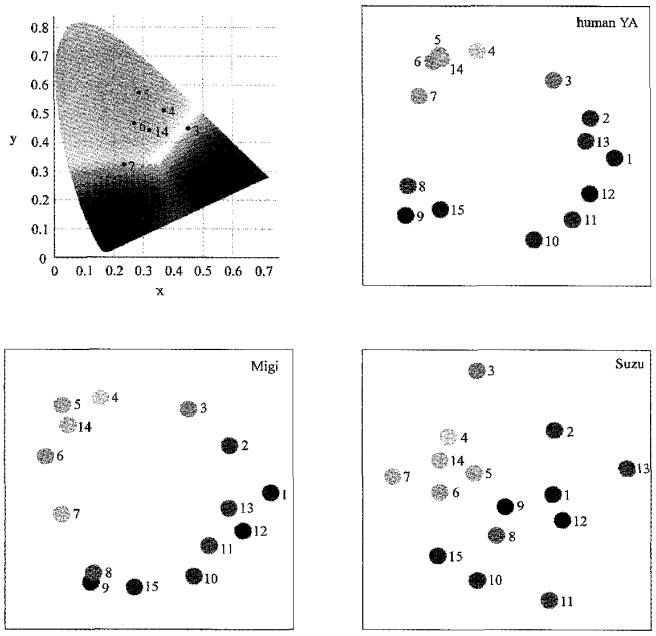

図4　類似性判断に用いた刺激と結果
同じ手続きで得られたヒトの結果（右上）と正常サルの結果（左下）は極めて良く似ているが、単色光サルの結果（右下）には全く規則性が認められない。

6. 単色光サルにおける色の恒常性

最後に、20種類のマンセル色票を用いて、単色光サルにおける色の恒常性について検討した。まず、モンドリアンパターンを背景にして、赤（正確には赤みがかったピンク；5R6/8）、緑（5G6/8）、青（5B6/8）の色票をそれぞれ黒の色票と対にして、透明なタッチスクリーンの背後に提示し、短波長（470nm）、中波長（530nm）、長波長（630nm）の超高輝度発光ダイオードを用いて照明した。そして、赤が提示されたときには赤の色票を、緑もしくは青が提示されたときには黒の色票を選択するように訓練した。その後、20種類の色票全てを使って、単色光サルが「赤」を同定できるか否かを調べた。その結果、色を見せずに育てた単色光サルも赤に似た色のカードを選択し、正常サルの成績と変わらないことが明らかになった。

次に、赤の色票が反射していた光のCIExy色度を測定し、全く同じ光を黄色の色票（5Y6/8）が反射するように発光ダイオードの光量を変えて、再び色の同定課題を行った。この条件下でも、ヒトの眼には、5Y6/8の色票は黄色に見え5R6/8の色票は赤に見える。また、正常サルは、この照明条件下でも正確に赤の色票を選択し、ヒトと同じ色の恒常性を持っていることが明らかになった。ところが、単色光サルは、赤の色票を選択することなく、黄色の色票を選択した（図5）。この結果は、単色光サルが、色の弁別が出来たとしても、その判断は光の波長成分に基ずいたものであり、色の恒常性は備わっていないことを示している。

7. おわりに

単色光サルの色彩感覚の障害は、その後数年間の視覚経験あるいは訓練によっても矯正されることがなかった。これらの事実は、乳幼児期の視覚体験が、色彩感覚の発達に決定的な影響を与えることを示している。一方、色の恒常性は第4次視覚野（V4）の働きによって実現されていると長い間考えられてきたが、最近の実験結果は、少なくとも恒常性の一部は既に第一次視覚野において達成されていることを示している。単色光サルの細胞応答と正常サルの応答を比較検討することによって、恒常性を実現している神経回路の解明に大きく前進できるものと期待している。

NII-Electronic Library Service

Color Science Association of Japan

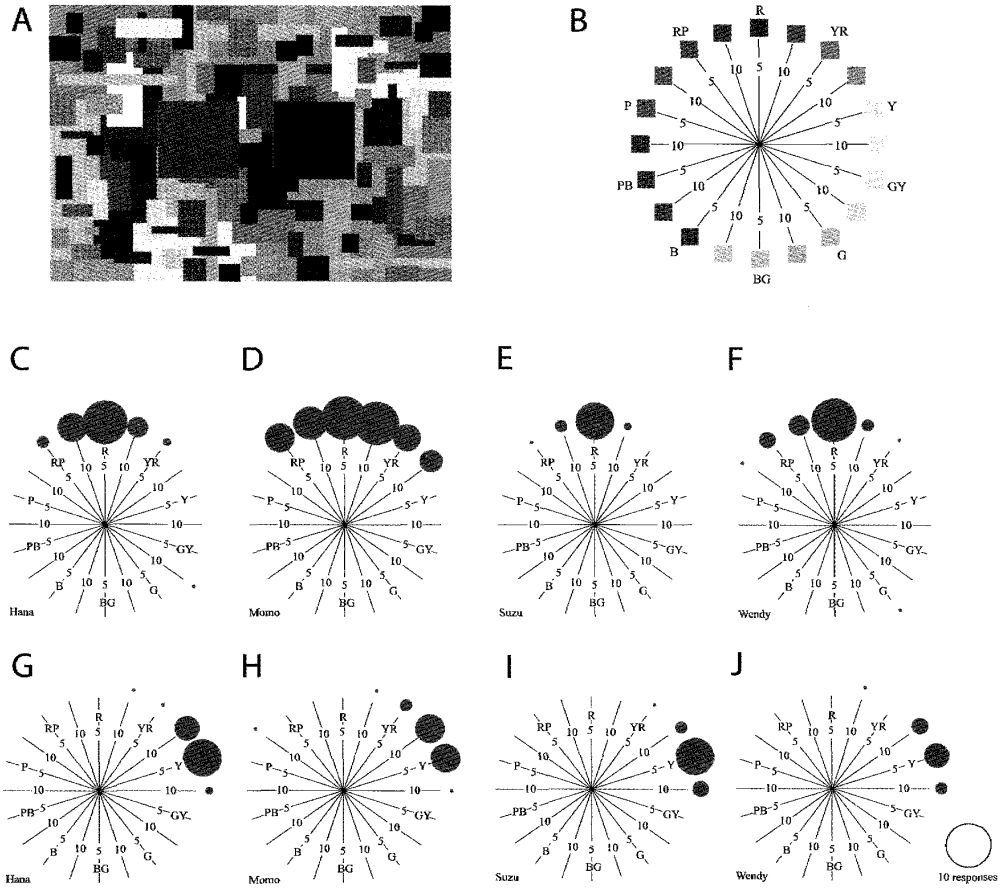

図5　実験に用いた刺激および結果

(A)：モンドリアン図形（幾何学的な抽象図形）に埋め込んだ赤と黒の正方形。(B)：実験に用いた20種類のマンセル色。各々の色は黒色と対にして呈示した。赤（5R）の正方形があるときには赤の正方形、無いときには黒の正方形に触れると、報酬（グレープジュース）を得ることができる。(C)-(F)：太陽光に近似した波長成分で照明したときの結果。若干の反応般化がみられる。(G)-(J)：長波長成分を増やして照明したときの結果。色を見せずに育てたサルは、赤（5R）ではなく黄（5Y）を選択した。なお、実験は、20種類の色紙にたいして、それぞれ10回ずつ行った。反応の回数を円の直径で示している。たとえば、赤（5R）を10回中10回とも触れると、大きな円が5Rの位置に描かれる。一度も触れることがなかった色の位置は空欄になっている。

参考文献

1) R. Boothe, D.Y. Teller, and G.P. Sakett: Trichromacy in normally reared and light deprived infant monkeys (*Macaca nemestrina*). Vision Research 15 (1975) 1187-1191.
2) S. Di, J. Neitz, and G.H. Jacobs: Early color deprivation and subsequent color vision in a dichromatic monkey. Vision Research 27 (1987) 2009-2013.
3) E. Brenner, J. Schelvis, and J.F.W. Nuboer: Early color deprivation in a monkey (*Macaca fasciculris*). Vision Research 25 (1985) 1337-1339.
4) E. Brenner, F. Cornelissen, and J.F.W. Nuboer: Striking absence of long-lasting effects of early color deprivation on monkey vision. Developmental Psychobiology 23 (1990) 441-448.
5) Y. Sugita: Experience in early infancy is indispensable for color perception. Current Biology 14 (2004) 1267-1271.

NII-Electronic Library Service