

解説

色覚検査の歴史(4)

History of Colour Vision Test

太田 安雄 Yasuo OHTA

東京医科大学名誉教授
MD Professor Emeritus Tokyo Medical University

5.その他の色覚検査法

1) 網膜のスペクトル感度測定

Young (1802, 1807)^{1) 2)} は、人間の網膜は3種の異なった視細胞をもち、それらは刺激により1組は赤色光に、他の1組は緑色光に、そして第3の1組は青紫光に感じる。そして、それぞれ別個に色光を感じるが、3種の色光の刺激を混合して1つにまとめて感受するために、自然や人工の物体の色の種類が無数にあるように感じられるという仮説を発表し、Helmholtz (1852)³⁾ は、これを体系化して、人の網膜内には3つの基本的な色(赤、緑、青)に対して興奮する3種の視物質が存在し、それらの視物質の興奮の割合に応じて信号を脳へ中継し、脳で信号が混合されて色覚を生じると考えた。

しかしYoung-Helmholtz説に従えば、赤色盲と緑色盲の人は、網膜の錐体にある赤受容器と緑受容器が機能を消失したものとして説明されていて、3色説では黄色は赤受容器と緑受容器が混ざりあってできるので、赤緑色盲の人に黄色が見えるという矛盾が生じる。

一方、Hering (1878)⁴⁾ の説によると、色盲は錐体の機能が失われたのではなく、視覚系のもっと奥にある神経構造の血管によるものであると説明され、この場合もまた対をなしている赤緑のどちらかが、どこかで機能不全を起こしたとすれば、片方はどのようにして機能するのかという疑問が生じる。

1964年、Young-Helmholtz説を裏づける新事実がMacNichol Jr.⁵⁾ とMarksら、WaldとBrownが指導する2つの研究チームによって、ほとんど同時に発表された。どちらの研究者も、人間を含む数多くの脊椎動物について個々の網膜の錐体の吸収特性を調べ、受容器である細胞内に3種の感光色素のあることを証

明した。

すなわちMarks (1964)⁶⁾ は顕微分光測光法を用いて、ヒトの中心窩錐体外節から青：445nm, 緑：535nm, 赤：570nmなる値を得た。また全く別の手法によるヒトの眼についての実験が、BrownおよびWald (1964)⁷⁾ によって選択的色順応法を用いて独立におこなわれ、上記と類似の3値が得られた。かくして錐体物質に3種の存在が明らかとなり、視細胞レベルに於ける3色説的な仕組みが明らかにされたわけである。

MacNicholは次のように要約している。

「色覚は、受容器レベルではYoung-Helmholtz説に一致し、視神経及びそれ以後のレベルではHering説に一致する、少なくとも2つの段階からなる過程が存在すると考えられる。それぞれの受容器から脳に向かう専用の通路はなく、3原色情報は網膜の上で何らかの形で加工され、1つ1つの網膜の神経節細胞により、on-off信号に符号化されて、視覚中枢へ伝達されるものであろう」と述べている。

色覚に関する研究のむずかしさは、光のエネルギーを脳へ送って色の信号に変えるという生理学的過程と、脳でその信号が解読される心理学的過程の両方が色覚に関与しているところにある。Youngは色覚を純粋に生理学的な作用として説明し、3原色の組み合わせからどんな色も自由に作り出せることを明らかにしたが、その後においてHeringは、色に対する人間の反応をもとにして、反対色説を提唱した。この両者の説は正しいことが証明されつつある。Young-Helmholtzの3色説に加えて、Heringの色対立説の機構を加えたJudd (1947)⁸⁾ の色覚段階説 stage theoryなどもこの2つの説を証明する1つのモデルである。

Waldの用いた選択的色順応法selective color adaptation procedureとは、錐体受容器の3種の色素のうち1ないし2種に色順応させて、それと他の受容器の機能を分離させて研究する方法で、非常に高い輝度の各種の順応光で順応させたあと、視角1°の検査光をrod free areaに提示し、検査光の波長を変えて増分域を測定する方法である。

Wald (1964)はこの方法により3種の分光感度曲線を得た。順応光には黄、紫、青を使う。黄の順応光で照射すると赤受容体と緑受容体が退色し、その状態で分光感度を求めると青受容器の分光感度が求められる。すなわち黄順応で438nmの青受容体の分光感度が得られる。同様に紫順応では548nmの緑受容体の、青順応では580nmの赤受容体の分光感度がえられている。

2) 後天色覚異常に選択的色順応法を用いた色覚検査

筆者らはWaldの手法に準じ、同様の方法で選択的色順応法により、後天色覚異常の代表的疾患である中心性漿液性網脈絡膜症(通称中心性網膜炎)に対し色覚検査を行った。^{9) 10)} 本器は三双製作所製で、和気典二氏(現中京大学教授)の監修によるものである。

本疾患は中年男子に好発し、片眼性で心身の過労

が誘因とされている。病変は黄斑の中心に認められる1~2乳頭径円形のむくみ(漿液性網膜神経上皮剥離)である。像がゆがんだり、小さく見えたり、中心暗点や、軽度の視力低下を伴うことがある。剥離は網膜色素上皮に限局性に発生するバリア機能の異常によるもので、蛍光眼底造影によってこの異常は確認できる。剥離は通常3ヶ月位で自然吸収されるが、網膜色素上皮部位へのレーザー光凝固で吸収を早めることができる。本症は中心固視が可能で視力も比較的良好なものが多い疾患である。被験眼はすべて矯正視力1.0を有するもので、中心固視の可能なものである。

図1は、本器による色覚正常者の中心窩における暗順応時およびyellow, purple, blue順応時のスペクトル感度曲線を示している。

検査は、初診時(図2)と、光凝固治療後3ヶ月目(図3)5ヶ月目(図4)の成績を正常者の成績と比較して検討した。図5は100 hue testによる本症の初診時、図6は本症5ヶ月目の100 hue testの成績を示している。図4の5ヶ月目のスペクトル感度曲線の成績と比較してみると、スペクトル感度曲線は目立った改善は認められないが、100 hue testの成績は著明に改善しているのが判る。

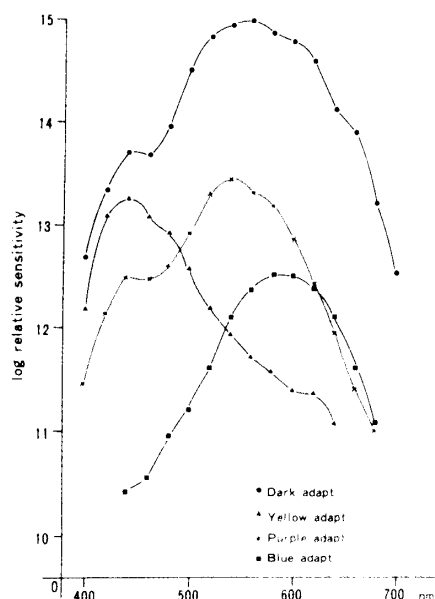


図1 正常者の中心窩における暗順応時、yellow, purple, blue 順応時のスペクトル感度曲線を示す。

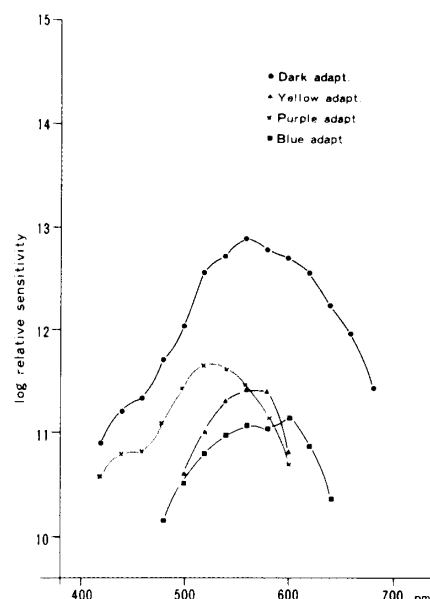


図2 中心性漿液性網脈絡網症(初診時)の成績を示す。

暗順応時、purple, blue 順応時はスペクトル全域に感度低下を認めるが、yellow順応時、青に対する感度が著明に低下し、ピークは長波長側に移動している。

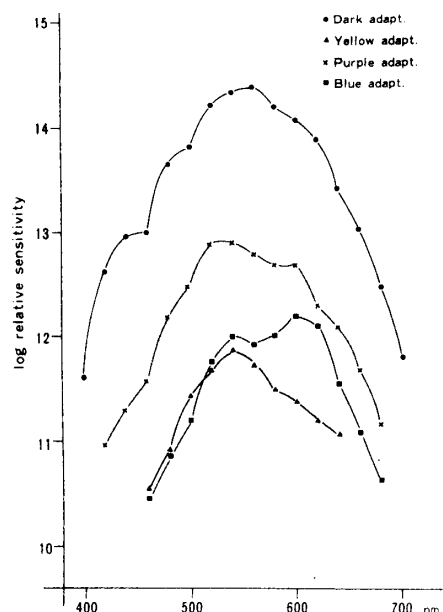


図3 中心性漿液性網脈絡網症光凝固後3ヶ月目の成績を示す。

暗順応時、purple, blue 順応時では全体に感度が上昇しているが、yellow順応時、青の感度はやや上昇が見られるものの、なお強く障害されている。

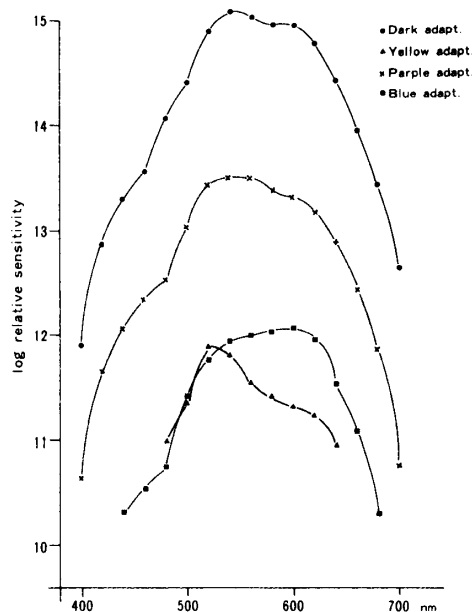


図4 中心性漿液性網脈絡網症光凝固治療後5ヶ月目の成績を示す。

Yellow 順応時の青に対する感度の低下は依然回復していない。

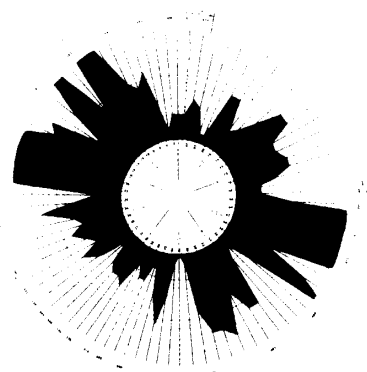


図5 中心性漿液性網脈絡網症(初診時)の100 hue test の成績を示す。

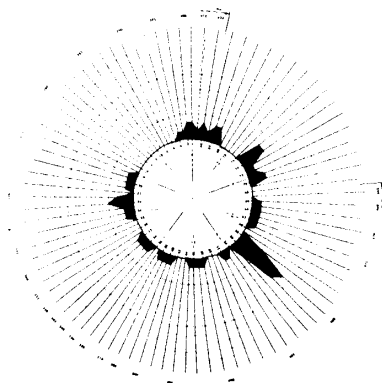


図6 中心性漿液性網脈絡網症光凝固後5ヶ月目の100 hue test の成績を示す。

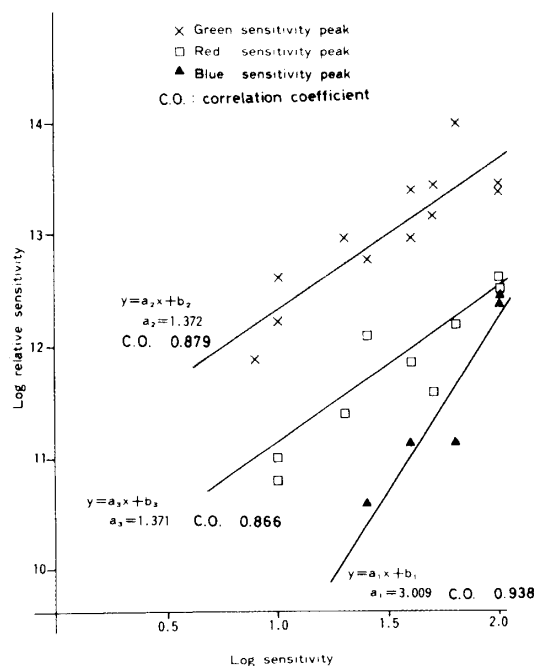


図7 中心性漿液性網脈絡網症12人12眼の選択的順応法によるピーク閾値と中心窩閾値との関係を示す。
横軸：中心量的光覚視野計による中心窩閾値。
縦軸：選択的順応法で得られた各スペクトル感度曲線の閾値のピーク。

中心窩の白色光に対する感度の低下は、blue, green, red の感覚閾値の障害と比例するが、blueの障害が最も強く、red, green の障害は同じ比率で障害されている。

図7は、本症の12人12眼の選択的順応法によるピーク閾値と中心窩閾値の関係を示したものであるが、何れもBlueの閾値が低下している。このように赤、緑、青3種の錐体視物質の回復速度を比較して見ると青の回復が極端に遅いことが判る。

3) 加齢に伴う色覚の変化

図9aは、40 hue test を用いて10歳から50歳代までの正常者100人の色相弁別能を調べたものである。加齢に伴って誤数は増加するが、全年齢層にわたって、赤～黄赤、青緑～青の部分に混同が多いことが認められる。¹¹⁾

図9bは、Pickford-Nicolsonアノマロスコープを用いて、10歳から70歳までの正常者男女74名に対し、緑～青、黄～青、赤～緑の混色色光を、一定の色光と比色均等させて、色光識別能を検査した。どの組み合わせも、20歳代がもっとも良く、年齢の増加に伴って識別能は低下し、40歳代を境にして低下は著明となった。また、どの年齢層でも、黄～青の識別能がもっとも悪いのが認められた。¹²⁾ 本器による我々の実験成績は内外の著書に引用されている。

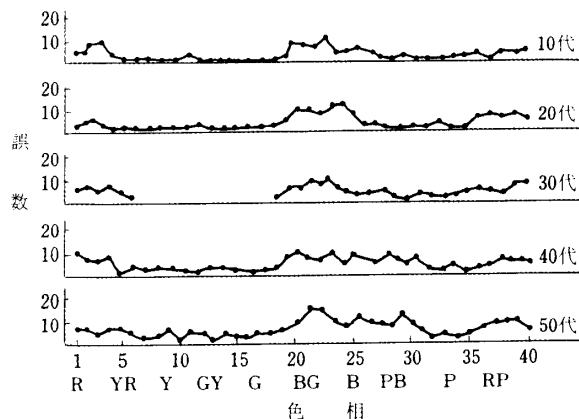
図9cは、Lovibond Colour Vision analyserによる飽和度識別能の検査成績をみると、正常者の黄から緑、青から紫の飽和度識別能はいずれも30歳代を境として低下が目立っており、年齢の増加により低下は著明となるのが認められた。¹³⁾

これらの加齢による青黄感覚の低下は、主として老化による水晶体の黄変が主因と思われるが、黄斑の着色もその一因と考えられている。

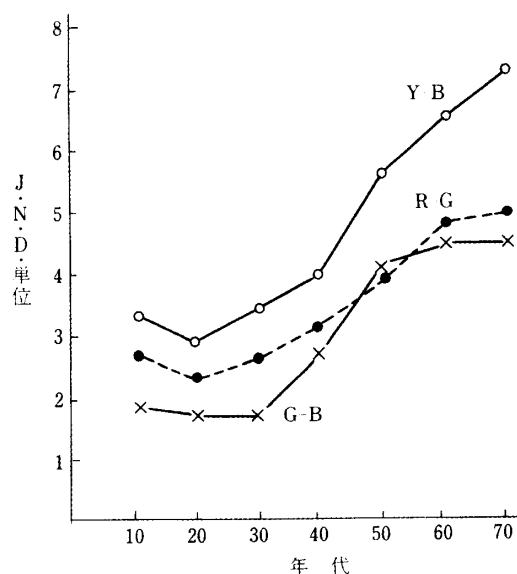
4) 視野の拡大に伴う色覚障害の変化

筆者は昭和62年2月NHKテレビ放送 特集番組ETV8「見直される色覚異常」出演の折、色覚異常者が一般社会生活上、正常者が考慮するほどの色の間違いのないことの根拠に、大きな視野で事象を観察していることを挙げた。一般の鏡検機器はすべて覗き穴から見るようにできていてその視野はほぼ2°である。色覚検査時に臨床的に用いるアノマロスコープも、2°10′視野で行われた結果を以って最終判定していることを説明し、一般の事象は、はるかに大きい視野で観察していることが色覚異常者の大きな見間違いのないことの一因に通じることを解説した。

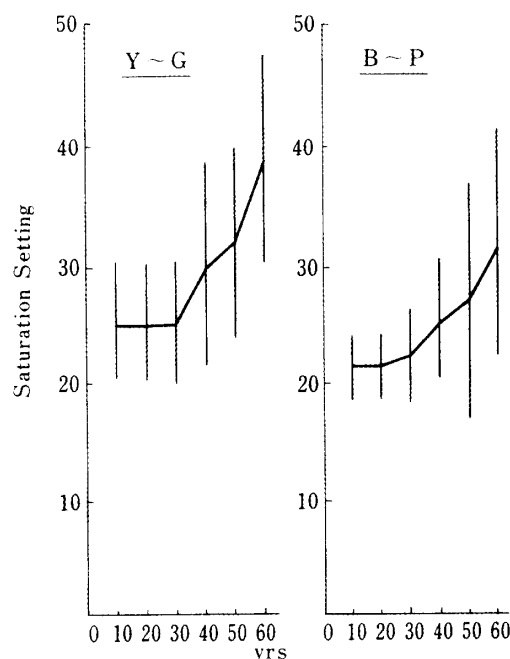
昭和64年6月、筆者はイタリアで行われた第10回国際色覚異常学会大会の講演で、先天色覚異常者に



a. 40色相配列検査



b. 色光識別能検査



c. 飽和度識別能検査

図9 加齢に伴う色覚の変化

対し、視野の大きさを中心 2° から 6° 、 10° 、 15° 、 20° に変化可能な色覚検査用の機器(図10)を製作して、上半円と下半円の色視野の色相均等比較実験を行い、視野の拡大に伴って色彩混同が改善する成績を示し、特に軽度の色覚異常者(色弱)では間違いが少なくなる事実を証明した。¹⁴⁾さらに筆者等の別の実験ではPanel D-15テストのCapを 2° から 8° 視野とした時色覚障害の改善する例をあげている。¹⁵⁾

併しながら最近の実社会における色彩の応用範囲は非常に広く、各職場に於ける色の需要は益々増加しており、これらの実験の結果のみで、複雑な職場の色彩現場における色覚異常の問題が無条件に解決されたとは考えられないのが実状である。

5) 色彩を扱う職場の現況と色覚検査

眼科臨床で使用している色覚検査器は、色覚異常を調べる一手段としての「物差し」で、判定はあくまで学術上の判定であって、企業の職場で通用する検査としては満足するものではない。現実用いている職場の機器類を、色覚検査の対象として取り入れる必要がある。職場の機器に就いては、職場ごとに実際に使用する実物を用いて検査を行い、参考にすべきである。職業適性用の検査に安易に使用できる簡便な色覚検査法はない。この検査の実行には職場の緊密な協力が必要である。片手間ではなく真剣に取り組まなくては解決できないことを承知しなければならない。

米国の大手コンピュータ会社では、すでに20年前に色覚異常者のVisual Display Unit (VDU) 対応について「色覚異常者と正常者に対する視機能テスト」を施

行している。すなわちVerriestら¹⁶⁾は、色覚正常者70名(16~30歳、32~44歳、54~66歳)、色覚異常者61名(第1色弱14名、第1色盲16名、第2色弱15名、第2色盲16名)に対し14色をVDUに表示し、色覚検査を施行した(表1、図11)。以下にその結果を示すと次の通りである。

(1) 2色名の呼称テスト：メーカー指定による色名に対し、正常者が呼称した色名には多くのばらつきがあった。正常者では、文字サイズ、提示法、学習効果の影響が見られたが、色覚異常者の成績ははるかに劣っていた。

(2) 2色の識別テスト：正常者では、2色同時提示よりも、順次提示の場合、第3色覚異常混同軸に沿った色の間違いがみられた。異なる刺激に対し、3色型異常者(色弱)よりも2色型異常者(色盲)が同色と答えたものが多かった。同一刺激に対し、異なると答えた者は2色型異常者より3色型異常者のほうが多か

表1 CIE 色度図上における Visual Display Unit (VDU) の14色光の色度と輝度

Colors Used	Chromaticity Coordinates x	y	Luminance $\log_{10} \text{cd.m}^{-2}$
(1) Blue	0.149	0.073	1.33
(2) Green	0.302	0.566	2.01
(3) Cyan	0.237	0.333	1.80
(4) Red	0.643	0.339	1.65
(5) Magenta	0.325	0.180	1.42
(6) Brown	0.534	0.415	1.78
(7) White	0.292	0.287	2.11
(9) Light Blue	0.189	0.195	1.86
(10) Light Green	0.289	0.428	2.13
(11) Light Cyan	0.257	0.295	2.13
(12) Light Red	0.435	0.293	1.88
(13) Light Magenta	0.308	0.199	1.89
(14) Yellow	0.431	0.478	2.16
(15) High-Intensity White	0.306	0.301	2.15

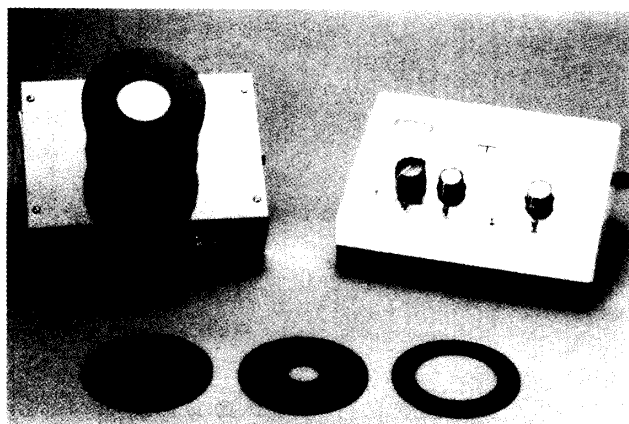


図10 視野の大きさを中心 2° から 6° 、 10° 、 15° 、 20° に変化させる色覚検査用機器の主要部を示す

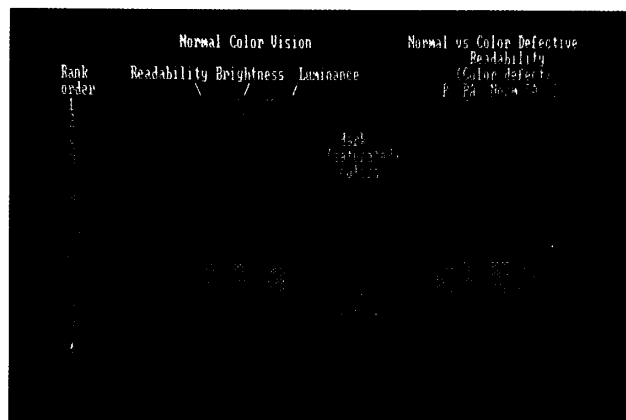


図11 見やすい色のランク：Visual Display Unit (VDU) の色光の明るさと輝度
P：第1色盲、PA：第1色弱、D：第2色盲、DA：第2色弱

った。間違いが最も多く見られた色は、C.I.E色度図の混同軸の収束点(集合点)から容易に予想できた。

(3) 色名呼称と色識別テスト：高齢正常者は若年正常者より劣り、男性は女性より劣った。反応時間は作業の難易度により差があったが、しかし加齢差があるために、個人間のレベルではあまり当てにならなかった。

(4) 目立つ色の選択テスト：白文字を配列したなかでの色文字発見テストでは、高齢者の成績が劣ったが、正常者と比較して、色覚異常者が必ずしも劣っているとは限らなかった。

(5) 以上の結果から色覚正常者と比較した場合、先天色覚異常者は、VDUにおける色名呼称、色識別、色合わせ作業はかなり困難と思われた。正常高齢者中、少数のものに若年者と比較して視機能低下がみられた。色覚異常発生率男8%、女0.4%(註：本邦では全人口に対する割合は男約4.5%、女約0.2%とされる)と、今後のカラーVDU使用増加を考え合わせるとき、これらの問題点を検討することは重要であるが、そのためにはVDUの新しいハード、ならびにソフトの設計が行われるべきであり、またVDUを使用する仕事場の照明などにも検討の余地があると述べている。

本邦に於ける同様の実験として、長谷川敬氏のNHK技術研究所における色覚異常者に対するカラーテレビジョンによるVDU実験があるが、この原著が

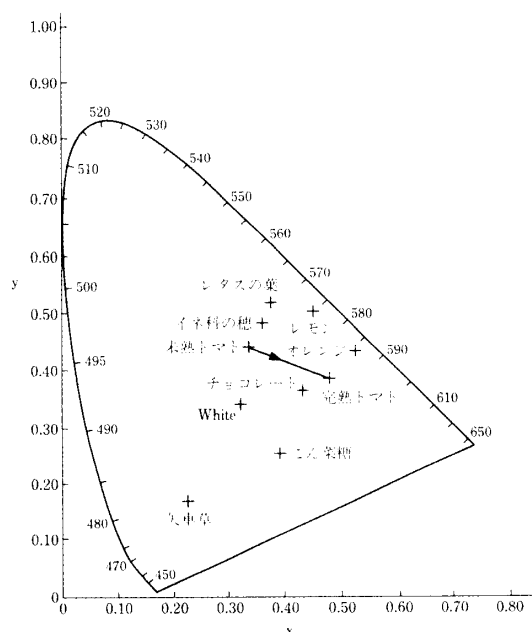


図12 CIE 色度図上の一般食品の色度

(Voke 1980を太田改変)

入手できず、残念ながら詳しい報告ができないが、この試みは貴重なものと思われる。

このように使用している機器の実物を用い、色覚検査を行う事は極めて重要なことである。

図12はVoke¹⁷⁾によって示されたごく普通の食品の色をCIE 色度図上に記したものである。図中の矢印は未熟なトマトが完熟したトマトになる段階の移り変わりを示している。この2つは混同線上にあるため見間違えやすい。

かつて筆者は、青果市場の仲買いを職とする20歳の男性に同じような話をされたことがある。ピーマンや萵と赤い野菜を間違えることがあり、枝豆の新鮮なものと、そうでないものとの区別が出来ないことがあるという。職業柄早朝(夜明け)の勤務であり、職場の採光状態や照明光源を考えたとき、いかに慣れた職業であるとしても無理であろうと考えた。本人は早く自己の色覚異常に気付き、適切な検査とアドバイスがあれば、現在の職業にはつかなかったであろうと述懐していた。本人の色覚検査の結果は、いずれの検査においても強度第2色覚異常と判定された。

就職先の会社がどのような色作業を行う職場か作業内容が判れば指導が楽になり、色覚異常者にとっても、その恩恵は大きいと思われる。色彩表示によって機器を分類する必要がある職場などは、会社側が協力して色彩混同を起こさないような色を使用すれば、大きな効果があると考えられる。

産業界は現在に至るまで、色覚異常者の受け入れに無関心であった。無用な差別を廃し、優秀な人材を適材適所に配置するためにも、職業適性用色覚検査の確立が急がれるのである。

6) 各国の色覚異常者に対する交通機関の対応¹⁸⁾

表2は、諸外国の交通機関が色覚異常者に対しどのように対応しているかを示している。この表は1972年におけるヨーロッパ諸国の公式色覚検査基準を示す資料である。(完)

以上、「色覚検査の歴史」について4号にわたり、貴重な学会誌の紙面を戴き連載してきた。稿を終わるにあたり、本文記述や、文献等について御気付きの点があれば何かと御教示戴ければ幸甚である。

最後に本稿の執筆にご賛同下さった編集委員の方々、事務局に厚く御礼を申し上げ掲筆する次第である。

表2 ヨーロッパ諸国における公式色覚検査基準¹⁸⁾ (太田改変)

国名	自家用車	トロリー・バス・タクシー	鉄道	飛行パイロット (民間/軍用)	海運・海軍	陸軍	テスト法
オーストリア	Protanopes, achromats を除く	Protanopes, achromats を除く	Protanopes, achromats を除く	Protanopes, achromats を除く	—	—	① Stilling, Velhagen または Ishihara ② Nagel Anomaloscope (疑いのとき)
ハンガリー	Protanopes, achromats を除く	正常者に限定	正常者に限定 (Nagel を常用)	—	—	—	① Stilling, Rabkin または Ishihara. ② Nagel Anomaloscope
フィンランド	制限なし	トロリーは制限なし バス・タクシーは achromats を除く	カテゴリー 1~5 は正常者に限定 カテゴリー 6 は制限なし	正常者に限定	正常者 航海士は制限あり	運送は正常者 一般軍人は制限なし	① Velhagen は鉄道, 海軍関係 ② Ishihara は陸軍, 空軍関係
スウェーデン	制限なし	トロリー・タクシーは制限なし バスは正常者に限定	信号関係は正常者に限定	正常者, または特に強度でない PA, DA, 軍用はアノマロスコプで正常均等	正常者	—	① Boström, Boström-Kugelberg ② Anomaloscope (疑いのとき)
ノルウェー	制限なし	制限なし	正常者に限定	正常者, ただし軽・中度の異常はある程度許容することあり	—	—	
デンマーク	制限なし	制限なし	信号関係は正常者に限定	飛行技術者を除きパイロットは正常者に限定	正常者	制限なし	① Ishihara, Boström または Boström-Kugelberg を一回テストでパスすること ② Nagel Anomaloscope (疑いのとき)
フランス	制限なし	制限なし	ノーマル 3 級: 色信号灯のみ	自家用パイロットおよび航路士は正常者に限定 ヘリコプターパイロットのみ lantern を合格すること	航海士は制限あり	機関銃手を除き制限なし	① Ishihara, coloured lights, Beyne lantern を 5m の距離で空軍と陸軍でテスト
オランダ	制限なし	トロリー・タクシーは制限なし バス運転手, 船上勤務のロックキーパー, 航海士などは赤, 緑信号識別可能なること 救急車の運転手も正常者であること	正常者に限定	軽度の deutan は可	パイロット, 運転手, 海上従事者, 水兵, assembler H-R-R 中・軽度のものは可		① Ishihara または H-R-R 表 ② Anomaloscope (疑いのとき)
西ドイツ	制限なし	2 種類の検査表とアノマロスコプにより中程度の deutans, protans, tritans は可	正常者に限定	職業パイロットは正常者に限定 自家用パイロットの場合には PA/DA を可とすることあり	正常者	正常者	① Ishihara, Boström, または Velhagen ② Anomaloscope (疑いのとき)
南アフリカ	制限なし	制限なし	信号灯の赤を識別できれば Ishihara で不合格でも安全と認め, 可とすることもある	民間パイロットのみ信号灯の赤を識別できれば Ishihara で不合格でも安全と認め, 可とすることもある	—	—	① Ishihara ② signal red
カナダ	制限なし	救急車, 消防車の運転手, 職業運転手は正常者に限定 消防手の中程度赤, 緑混同は許容される	13~16 正解 (Ishihara 16 plates)	民間 22~24 正解 (Ishihara 24 plates) 昼間飛行: 赤フラッシュ信号を確認できることに限定 商業飛行: 13~16 正解 (Ishihara 16 plates)	lantern による赤, 緑混同は可	—	① Ishihara ② Coloured lantern
イスラエル	制限なし	制限なし	特定のものは正常者に限定	乗員と航空監督者は正常者	甲板員は正常者, 他は強度を除く	—	① Ishihara ② signal light 識別
ベルギー	制限なし	トロリーは制限なし バス・タクシーは protanopes, achromats を除く	特定のものは正常者に限定 カテゴリー E は制限なし	民間, 職業パイロットは Ishihara で正常, 自家用の場合は Beyne lantern で正常	Ishihara による正常者	軍人は achromats を除く Protanopes, achromats は通常の範疇より省く	① Ishihara ② panel D-15 をタクシー, バス運転手, 陸軍で行う ③ Holmgren wools を鉄道関係者の一部に行う

色覚国際基準: 空欄はその範疇にないデータを示す。すべての基準は 1972 年のものである。

色覚検査の歴史(4) 文献

- 1) Young, T.: On the theory of light and colours. Phil. Trans. 92: 12-48, 1802.
- 2) Young, T.: Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts vol. 2, (London: Johnson) pp 315-316, 1807. (quoted by Judd 1943 and Sherman 1981)
- 3) Von Helmholtz, H.: On the theory of compound colours. Phil. Mag. 4: 519, 1852.
- 4) Hering, E.: Outlines of a Theory of the Light Sense. trans L.M. Hurvich and D. Jameson (1964) (Cambridge, Ma: Harvard University Press)
- 5) Mac Nichol, E.F. Jr.: Three-pigment colour vision. Sci. Am. 211: 48-56, 1964.
- 6) Marks, W.B., Doble, W.H., & MacNichol, E.F.: Visual pigments of single primate cones. Science 143: 1181~1183, 1964.
- 7) Wald, G.: The receptor of human color vision. Science, 145: 1007~1016, 1964.
- 8) Judd, D.B.: Current views on colour blindness. Docum. Ophthal. 3: 251-287, 1947.
- 9) 太田安雄、関 明、宮本 正: 中心性漿液性網脈絡膜症における網膜のスペクトル感度測定について、臨床眼科 35: 643~648, 1981.
- 10) Ohta, Y., Miyamoto, T., Seki, A. and Kajigaya, Y.: On spectral sensitivity of the receptors in central serous chorioretinopathy. Docum. Ophthal. Proc. Series, 33: 389~398, 1982.
- 11) 太田安雄: 40 hue testの改良、日眼会誌 70: 798~801, 1966.
- 12) Ohta, Y., Kato, H.: Colour perception change with age. Test results by P-N anomaloscope. Mod. Probl. Ophthal. 17: 345~352, 1976.
- 13) 小暮慎二: 飽和度識別能に関する研究 第1報 正常者の色覚について、日眼会誌 84: 537~544, 1980.
- 14) Ohta, Y.: Change in color vision for prototype anomaloscope with a visual field of 2 to 20 deg. Colour Vision Deficiencies 10, Kluwer Academic Publishers. 3~11, 1991
- 15) 白石弘志、野寄 忍、大浜敬子、花房 晶、宮本 正、太田安雄: Panel D-15の2°視野と8°視野における比較検討、日眼会誌 91: 771~775, 1985.
- 16) Verriest, G. Andrew, I. Uvrijls, A.: IBM Hursley Technical Report. TR. 12. 241. 1985.
- 17) Voke, J.: Colour Vision Testing- in Specific Industries and Professions. Academic House, 24/28 Oval Road, Keeler, London, 1980.
- 18) Fletcher, R., Voke, J.: Official colour vision standards in the UK. Defective Colour Vision 499-508, Adam Hilger. 1985.