

# 等色関数の個人差による色の見え方の問題

中野 靖久

## Individual Difference of Color Matching Functions and Its Effects on Color Perception

Yasuhisa NAKANO

Color matching functions are the very front end of the visual system concerning with the color sensation and perception. In this article, how these functions will affect color sensation and perception for individuals is described. It is difficult, however, to predict how color perception changes according to the changes of color matching functions because of the adaptive feature of the visual system. It is possible, instead, to evaluate individual difference of color sensation using failure of metameric match. How it can be evaluated is discussed in detail.

**Key words:** color matching functions, individual difference, color perception, metamerism

等色関数は色の感覚・知覚を語る上で最もフロントエンドに位置する重要な関数である。国際照明委員会 (CIE) は Guild と Wright の等色実験データをもとに 1931 年測色標準観測者の等色関数を制定し、これを用いて色を定量的に表す XYZ 表色系を確立した。この表色系の意味するところは、同じ座標を与える色光はスペクトル分布が異なっても標準観測者にとって同じ色に見える、すなわち条件等色が成り立つということである。自然の景色がテレビ画面上でほぼ同じように再現できるのは、自然の物体が発するスペクトルをそのまま再現しているのではなく、テレビ画面を構成している赤、緑、青の蛍光体の発光量を調整して実際色と条件等色するように色を再現しているためである。これを実現するために標準観測者の等色関数が活用されており、条件等色は日常生活でいつも経験している現象である。しかし、この表色系はさまざまな状況で問題を生じる。CIE1931 測色標準観測者は視野角が  $4^\circ$  以下の刺激に対して適用可能であり、これより大きい視野角をもつ刺激に対しては上記の条件等色が成り立たなくなる。そのおもな原因は視野の中心部分に存在する黄斑色素であり、この問題を解決するために CIE は Stiles-Burch および Speranskaya による  $10^\circ$  視野の等色実験データをもとに

1964 年測色補助標準観測者の等色関数を制定した。図 1 に 1931 年測色標準観測者と 1964 年測色補助標準観測者の XYZ 等色関数を示す。このように等色関数は網膜以前の眼球光学系による光の吸収の影響を受けるが、黄斑色素の濃度は個人差が大きく、また水晶体の黄変は本特集号の篠森氏の解説にあるように加齢によって進行することが知られている。したがって、同じ視野条件でも個人間で等色関数が異なることが予想され、ある観測者にとって条件等色している色刺激対でも、別の観測者にとっては異なる色に見える可能性がある。本特集号の山口氏・大澤氏の解説で述べられるように、現在さまざまな場面でこうした問題が顕在化している。本稿では等色関数の個人差と色の見えの関係について、色覚の基礎理論に基づいて解説することにより問題の理解の一助としたい。

### 1. 等色関数の個人差と色の見え

色の見えを議論するとき注意しなければならないのは、対象となる色そのものに対する感覚を議論するのか、2つの色の違いに対する感覚を議論するのかということである。色の見えという場合、前者をイメージすることが多いと思われるが、知覚的な色がそれぞれの個人の心的イメー

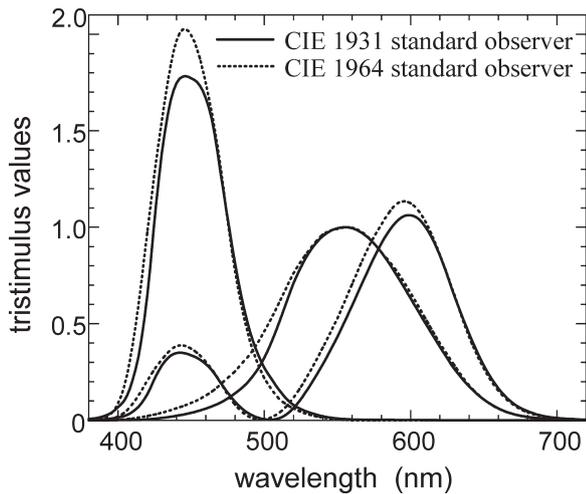


図1 1931年測色標準観測者と1964年測色補助標準観測者のXYZ等色関数。

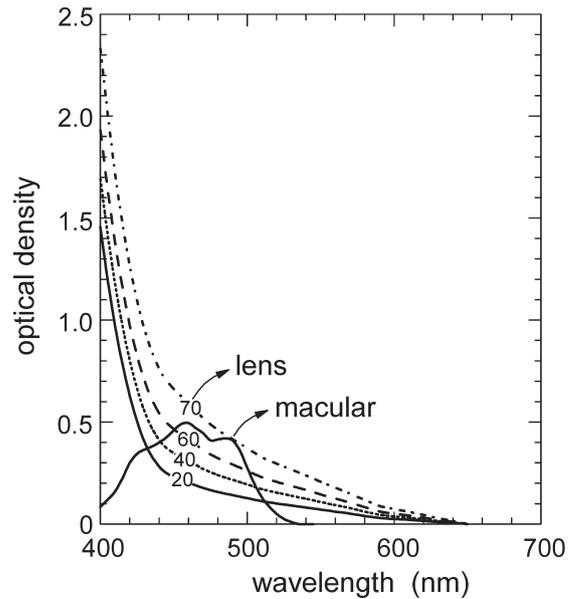


図2 水晶体 (lens) と黄斑色素 (macular) の分光光学濃度。

ジの中でどのように映っているのかを直接調べるすべはなく、現在用いられている実験手法はユニーク色（知覚的に他の色相を含まない純粋な色、赤、緑、黄、青の4色）の知覚やカテゴリカルカラーネーミングなどによる言葉を介した間接的な方法である。2つの色の違いに対する感覚は閾値やカラーマッチングなどの直接的な方法で調べることができるが、逆に個々の色の見えに関しては何も情報を与えない。ここではまず、前者の色の見えに対する等色関数の個人差の影響について述べる。

### 1.1 眼球光学系

光は網膜に到達する以前に、眼球のさまざまな媒質により吸収されてしまう。これらの媒質を総称して眼球光学系と呼ぶが、可視域に吸収をもつおもな媒質は水晶体と黄斑色素である。水晶体はピント調節のため収縮するレンズの部分であり、コラーゲンなどのタンパク質が層状に重なった構造をしている。年齢とともに水晶体は硬化し色が黄変する。図2はPokornyら<sup>1)</sup>によるモデルで予測した水晶体の分光濃度の年齢による変化を表す。黄斑色素は中心窩の直径約5°の領域をおおう色素で、その分光濃度は図2のように400~520 nmに吸収をもち、濃度の高さは個人差が大きいといわれている<sup>2)</sup>。Stockmanら<sup>3)</sup>は等色関数から錐体分光感度を求めるために、水晶体と黄斑色素の分光濃度のより精密な推定を行っている。

水晶体や黄斑色素は単なる光学フィルターとして働き、網膜の神経活動には影響を与えない。これらの濃度の変化が色の見えにどのような影響を与えるかを調べた研究としては、岡嶋ら<sup>4)</sup>の研究やHibinoら<sup>5)</sup>の研究がある。前者は水晶体の分光濃度を模擬した黄色メガネを若年者がかけることにより加齢を模擬し、30分の順応後に色票のカテゴリ

カルカラーネーミングを行う実験で、メガネをかけた場合とそうでない場合の結果に顕著な違いが生じないことから、色恒常性メカニズムにより色の見えは補償されると結論付けている。後者はキャンセレーション法により測定した青-黄反対色関数において、青みと黄みのバランス点が中心視と周辺視でほとんど変わらないこと、個人の黄斑色素の濃度を推定し黄斑色素により短波長の色光が吸収を受けることを考慮して補正をかけるとバランス点がずれてしまうことから、中心視では短波長の吸収を補うように青みに対する感度を上げる何らかのメカニズムが存在すると結論付けている。

### 1.2 錐体

等色関数の個人差の原因となり得るもうひとつの要素は、錐体分光感度の個人差である。網膜にはL、M、Sの3種の錐体が存在し、これらの分光感度と等色関数はお互い線形変換で移りあう<sup>3,6-7)</sup>。錐体分光感度の個人差の原因としては、L錐体、M錐体に含まれる視物質を作るための遺伝子の違い<sup>8)</sup>、網膜上でのL錐体とM錐体の存在比の違いなどが挙げられる。前者はL錐体、M錐体に含まれる視物質の分光吸光度におけるピーク波長にわずかな違いを生じさせる<sup>9)</sup>が、色の見え自体に大きな影響を及ぼすことはないと考えられている。また、後者のL、M錐体の存在比の違いについても、かなり大きな個人差があるにもかかわらず、ユニーク黄の波長はほとんど変わらないといわれている<sup>10)</sup>。

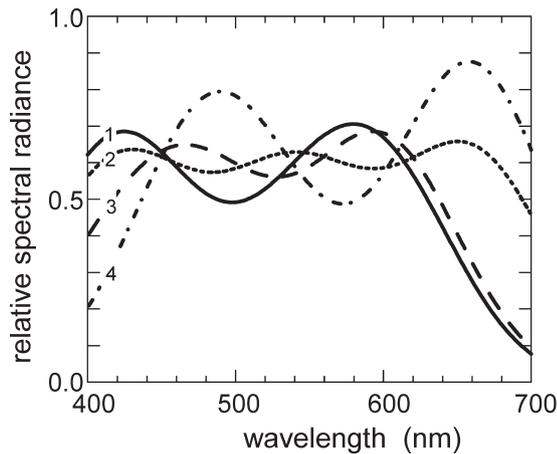


図3 CIE1931 標準観測者に対する4つの条件等色群. これらはすべて等エネルギー白色と条件等色する.

## 2. 等色関数の個人差と条件等色

このように、等色関数の違いが知覚的な色見えに及ぼす影響は、少なくとも言葉を介して見る限りにおいてはほとんどないといえる。しかし、条件等色（スペクトルが異なっても知覚的には同じ色に見えること）に対する影響はかなり顕著に現れる。ここでは、等色関数の違いが条件等色に及ぼす影響について述べる。

### 2.1 水晶体の濃度の違いによる条件等色のずれ

図3は、CIE1931 標準観測者にとって等エネルギー白色と同じ色に知覚される4つの異なる分光放射輝度分布を示している。この4つのスペクトルに対する色度座標をCIE1976  $u'v'$  色度図にプロットすると、すべてEの点(+)に乗る。ここで、水晶体の濃度が標準観測者のものと異なる被験者がこれらの条件等色した白色を見た場合、どのように見えるかを考えてみる。

標準観測者の水晶体の濃度は不明であるが、後述するようにCIE1931 標準観測者は短波長領域で系統的に実際の感度よりも低く見積もられていること、最近のわれわれの測定（山内氏の記事参照）では40代の被験者がCIE1931 等色関数と近いデータを示すことから、仮に標準観測者の年齢を40歳とする。図2で示したように、年齢と水晶体の濃度の関係はモデル式<sup>1)</sup>を用いて予測できるので、標準観測者に比べて若年者（15歳）と高齢者（65歳）の水晶体濃度を推定することができる。水晶体は単なるフィルターとして機能すると仮定し、若年者、高齢者の等色関数はこのフィルターの違いを補正すればまったく同じであるとして、標準観測者を15歳、65歳に変える色メガネの分光透過率を計算する。15歳にするための色メガネの透過率は1より大きくなり、現実には作ることができないが、計算の便宜上そのようなメガネをかけた状況を想定する。標準観測

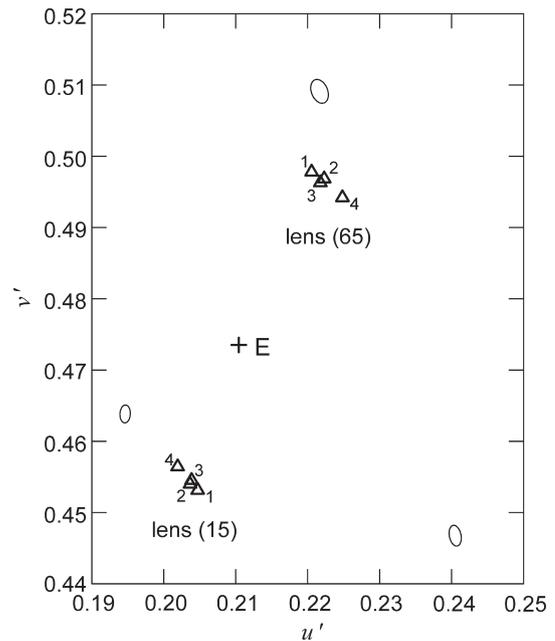


図4 図3の条件等色群に対するCIE1976  $u'v'$  色度座標。標準観測者の等色関数を用いた場合(+), 15歳相当の水晶体濃度をもつ観測者の等色関数を用いた場合( $\Delta$ : lens (15)), 65歳相当の水晶体濃度をもつ観測者の等色関数を用いた場合( $\Delta$ : lens (65))の比較。

者の等色関数を用いてこれらの色メガネをかけたときの  $u'v'$  色度座標を計算すると、図4の $\Delta$ のようになる。それぞれのシンボルの横に示した数字は、図3のスペクトルにつけられた番号に対応する。若年者の色度座標は全体に青方向にシフトし、高齢者の色度座標は全体に黄色方向にシフトする。しかしこのシフトは、順応や色恒常性メカニズムにより、色見えにはそれほど大きな影響を及ぼさないのは前述のとおりである。ここでの問題は、標準観測者では4つのスペクトルがすべて等エネルギー白色Eの色度座標(+)と一致するのに対して、若年者、高齢者では色度座標が分散し、異なる座標にプロットされることである。これは、標準観測者における条件等色が若年者、高齢者では破れることを示している。図4に示した実線の楕円はこの座標付近におけるMacAdamの色弁別楕円を等倍率で示したものであり、これと比べてもスペクトル1と4は十分に弁別可能であることがわかる。条件等色の外れの理論的限界の解析に関しては照明の変化に伴う場合のOhtaとWyszeckiによる研究<sup>11)</sup>が知られているが、この解析方法は等色関数の違いに伴う条件等色の外れにも応用可能であると考えられる<sup>12)</sup>。

### 2.2 錐体分光感度の違いによる条件等色のずれ

正常な三色型色覚をもつ者の間でも遺伝子の違いによりL錐体分光感度のピーク波長が数nmずれることが知られ

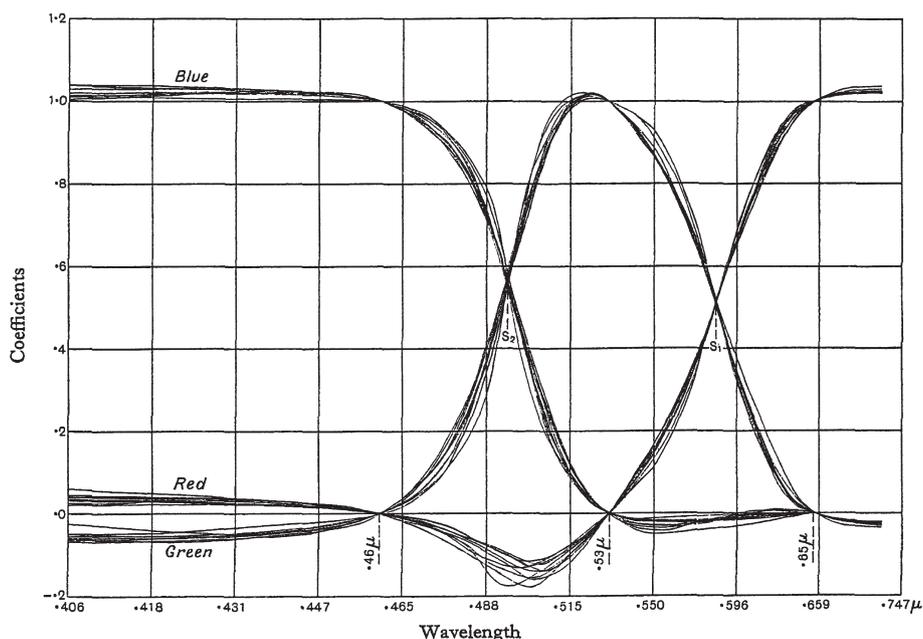


図5 Wright<sup>16)</sup>による10名の被験者のスペクトル色度座標。

ている<sup>9)</sup>。この違いは前述のように色の見えにはほとんど影響を与えないが、条件等色のずれとしては検出可能である。この場合、色覚検査で使われるアノマロスコープという装置を使用する。540 nm より長波長ではS錐体の感度がほとんどゼロになるため、緑の単色光 (545 nm) と赤の単色光 (670 nm) を適当な割合で混色すると、黄色の単色光 (589 nm) と条件等色することができる。これを Rayleigh マッチといい、アノマロスコープは Rayleigh マッチに必要な緑と赤の強度比を求める装置である。Neitz と Jacobs<sup>13)</sup> は正常な三色型色覚をもつ被験者の Rayleigh マッチにおける緑と赤の強度比の分布が二峰性を示すことから、L錐体の視物質には2つの異なる型が存在すると結論した。そして実際に異なるアミノ酸配列をもつL錐体の視物質が Winderickx ら<sup>14)</sup> によって見いだされた。

580 nm 付近は波長弁別能力が最も高くなる波長であり、1 nm 以下の波長弁別が可能である。アノマロスコープはこの特性を利用した精度のよい等色装置といえる。錐体分光感度の違いによる条件等色のずれはこのような精度のよい装置でようやく見つかる程度のずれであり、日常生活への影響はほとんどないと考えられる。

1.2 節で論じた網膜上でのL錐体とM錐体の存在比の個人差による条件等色のずれは原理的にあり得ない。なぜなら、錐体レベルで等色していれば存在比が変わっても等色がずれることはないからである。

### 3. CIE 等色関数

#### 3.1 CIE1931 測色標準観測者

2.1 節において水晶体の光学濃度の違いにより個人間で条件等色にずれが生じることを示したが、CIE1931 測色標準観測者はある事情によりもともと短波長領域の感度が実際よりも低く見積もられている。その事情はCIE1931 等色関数を導く手順の中に隠されている。

CIE1931 測色標準観測者は Guild<sup>15)</sup> による7名と Wright<sup>16)</sup> による10名の等色実験データをもとに作られている。等色関数の実験データは等エネルギーの単色光  $E_\lambda$  に等色するのに必要な R, G, B 原刺激の強度 (三刺激値),  $R = \bar{r}(\lambda)$ ,  $G = \bar{g}(\lambda)$ ,  $B = \bar{b}(\lambda)$  として与えられる。Wright は等色関数の個人差を軽減するため、三刺激値そのままを平均するのではなく、いったんそれぞれの色度座標を求め平均をとった。スペクトルの色度座標は

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= \frac{\bar{r}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ g(\lambda) &= \frac{\bar{g}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ b(\lambda) &= \frac{\bar{b}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられるので、被験者間の眼球光学系の濃度の違いは分子、分母でキャンセルされる。さらに、Wright は  $b(494 \text{ nm}) = g(494 \text{ nm})$ ,  $g(582.5 \text{ nm}) = r(582.5 \text{ nm})$  となるように、三原色の単位の比を被験者ごとに調整し、個人差の軽減を図った。Wright の論文<sup>16)</sup> に載っている10名の

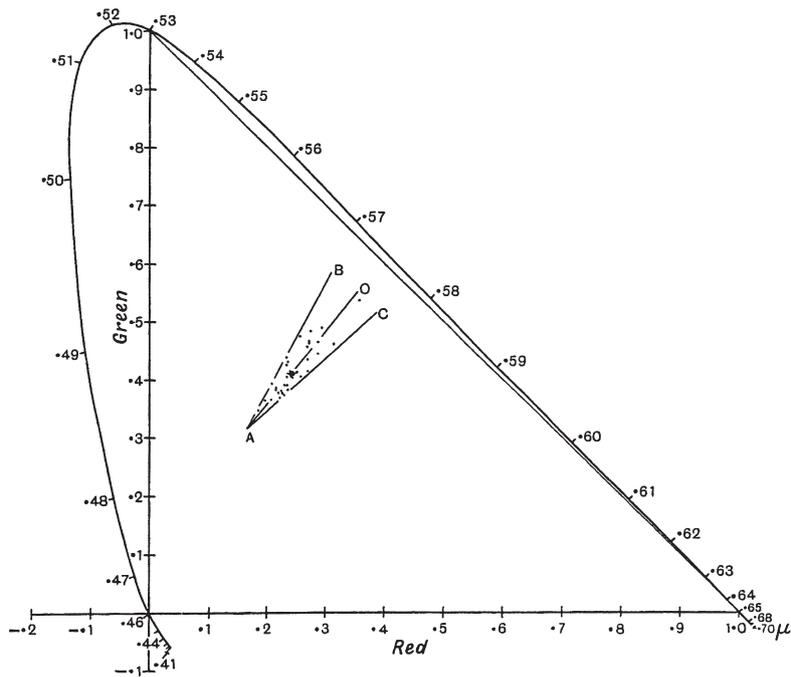


図6 Wright<sup>16)</sup>による36名の被験者の4800 K白色光の色度座標。

観測者によるスペクトルの色度座標データを図5に示す。

この図から原刺激の波長(460, 530, 650 nm)では原理的にすべての被験者の色度座標は一致するのに加えて、494, 582.5 nmの波長でも一致するようになっているのがわかる(S<sub>2</sub>, S<sub>1</sub>と書かれた場所)。元の三刺激値のデータにどれだけの個人差があったのかはわからないが、この図を見る限り個人差はかなり小さくなっていることがわかる。この方法により、単色光の色度座標に関しては個人差を軽減することができるが、複合光の色度座標に関してはあまり効果がない。実際Wrightは同一の白色光に対してR, G, B原刺激で等色する実験を別の36名に対して行い、上記の10名の等色関数から求めた色度座標にプロットし、図6の結果を得ている。このように、同じ白色であるにもかかわらず、その色度座標は被験者により大きく異なることがわかる。その原因が眼球光学系の濃度の個人差にあることはWright自身も言及し、WyszeckiとStilesの“Color Science”でも詳しく解析されている<sup>17)</sup>。図6のような色度座標をWDW法による色度図と呼び、個人差を取り除く優れた方法として解説されていることが多いが、個人差が取り除かれるのは単色光だけであり、実用的に重要な複合光に対しては効力がないということはあまり触れられていないように思う。

ここからCIE1931等色関数を得るには、さらにもう一段階手が増えられている。それは、1924年にCIEが定義した標準比視感度関数 $V(\lambda)$ と等色関数を結びつけるための

操作である。 $V(\lambda)$ はおもに交照法で求められた比視感度関数であるが、これが等色関数の線形結合で表せると仮定する。すなわち、

$$V(\lambda) = l_r \cdot \bar{r}(\lambda) + l_g \cdot \bar{g}(\lambda) + l_b \cdot \bar{b}(\lambda) \quad (2)$$

であり、ここで、 $l_r, l_g, l_b$ は明度係数と呼ばれる定数である。式(1)と(2)から簡単な計算により、

$$\begin{aligned} \bar{r}(\lambda) &= \frac{r(\lambda)}{l_r \cdot r(\lambda) + l_g \cdot g(\lambda) + l_b \cdot b(\lambda)} V(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) &= \frac{g(\lambda)}{l_r \cdot r(\lambda) + l_g \cdot g(\lambda) + l_b \cdot b(\lambda)} V(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) &= \frac{b(\lambda)}{l_r \cdot r(\lambda) + l_g \cdot g(\lambda) + l_b \cdot b(\lambda)} V(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

が導かれる<sup>18)</sup>。ここで、 $\int \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int \bar{b}(\lambda) d\lambda$ という規格化条件(等エネルギー白色に対して三刺激値が等しくなるという条件)により $l_r : l_g : l_b$ の比を定め、 $l_r + l_g + l_b = 1$ という拘束条件を付加することにより数値を定めれば、等色関数 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ が定まる。CIE1931測色標準観測者等色関数はこのようにスペクトルの色度座標データと $V(\lambda)$ を用いて定義されており、したがって、標準観測者の眼球光学系の濃度は $V(\lambda)$ の測定にかかわった被験者の平均的な濃度が反映されることになる。しかし、 $V(\lambda)$ 関数は釣鐘型の滑らかな関数にするため、短波長領域の感度が実際よりも低く見積もられており、交照法による測定データの単純な平均にはなっていない。この問題は古くから知られており、Judd<sup>19)</sup>やVos<sup>20)</sup>が修正を試

み, CIE でも修正比視感度関数  $V_m(\lambda)$  を 1990 年に報告している<sup>21)</sup>. 図7に  $V(\lambda)$  と  $V_m(\lambda)$  の比較を示す. このように  $V(\lambda)$  およびこれに基づいた標準観測者等色関数はあたかも水晶体濃度の高い眼をもつ被験者のように振舞う.

### 3.2 CIE1964 測色補助標準観測者

前述のように, 黄斑色素は中心窩の直径約  $5^\circ$  の範囲にのみ存在し, 周辺には存在しないので, 大きな視野角をもつ色の測色には CIE1931 測色標準観測者ではなく,  $10^\circ$  視野の等色実験データに基づいた CIE1964 測色補助標準観測者を用いる必要がある.  $10^\circ$  視野の等色実験を行った Stiles と Burch<sup>22)</sup> および Speranskaya<sup>23)</sup> のデータに基づく CIE1964 測色補助標準観測者は, CIE1931 標準観測者に比べて人為的な操作は少なく, より素直な方法で導かれる. 図8に Stiles と Burch による 49 名の RGB 等色関数を示す. これは, 等エネルギーの単色光  $E_\lambda$  に等色するのに必要な R, G, B 原刺激の強度 (三刺激値) としての等色関数である. 横軸の単位は波長ではなく波数であり, 原刺激 R, G, B の波数は  $15500, 19000, 22500 \text{ cm}^{-1}$  であるが, 波長に直すと  $444.4, 526.3, 645.2 \text{ nm}$  となる. このデータと Speranskaya による 18 名のデータを同じ原刺激に変換したものの重み付け平均が, そのまま CIE1964RGB 等色関

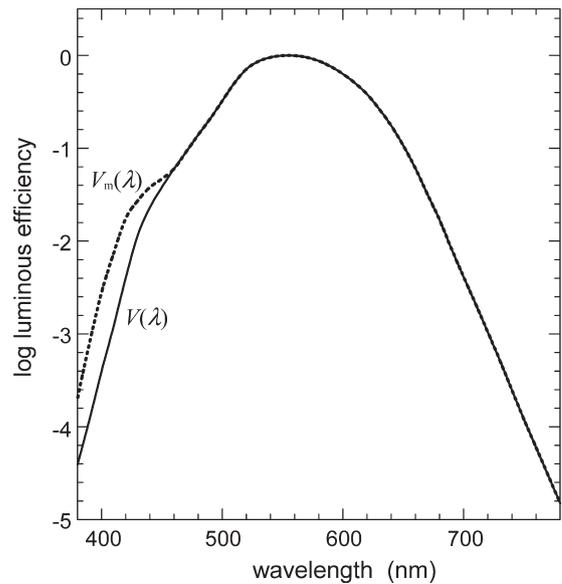


図7 CIE1924  $V(\lambda)$  と CIE1988  $V_m(\lambda)$ <sup>21)</sup> の比較.

数として採用された. RGB 表色系から XYZ 表色系への変換は, CIE1931 とほぼ同じ原理にしたがっている<sup>24)</sup>.

図8をみるとかなりの個人差があることがみてとれるが, 個人の等色関数が変わると条件等色のずれがどれだけ生じるかを評価しておくことは重要である. CIE でもこの

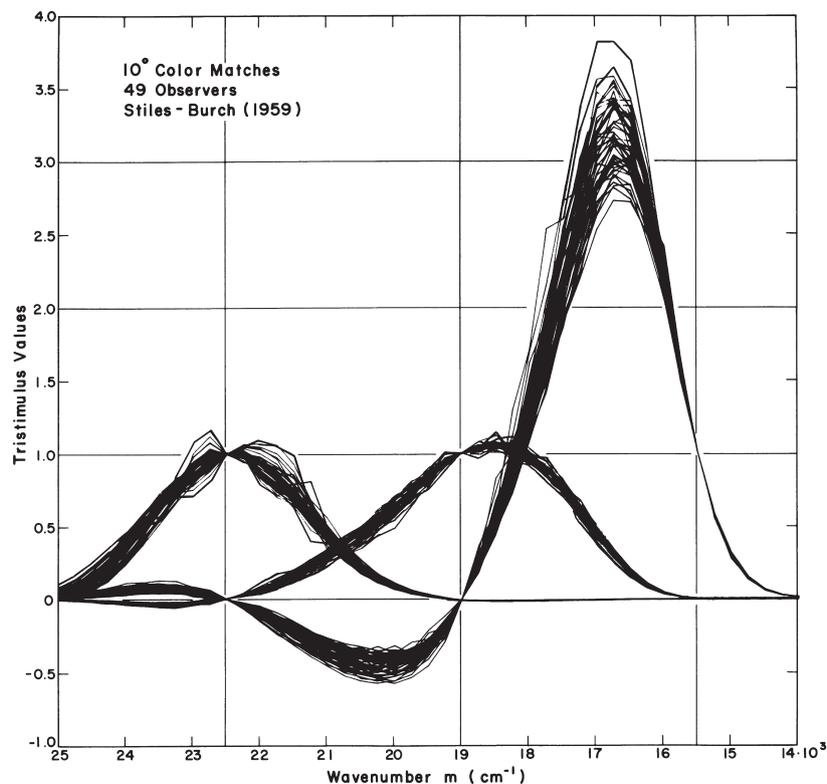


図8 Stiles と Burch<sup>22)</sup> による 49 名の RGB 等色関数.

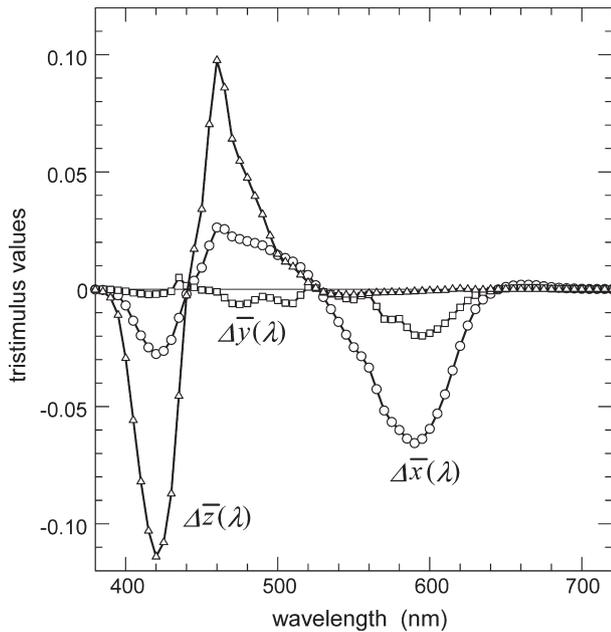


図9 観測者条件等色指数の計算に用いる偏差関数<sup>27)</sup>. ○:  $\Delta\bar{x}(\lambda)$ , □:  $\Delta\bar{y}(\lambda)$ , △:  $\Delta\bar{z}(\lambda)$ .

問題に取り組み、観測者条件等色指数 (observer metamorphism index) という評価指数の提案を行っている<sup>25-27)</sup>.

#### 4. 観測者条件等色指数

図8のRGB等色関数をXYZ系に変換し、それぞれの標準偏差を求めると図9のようになる。標準観測者のXYZ等色関数にそれぞれの標準偏差を加えた等色関数をもつ観測者を偏差基準観測者 (standard deviate observer) と呼び、ある照明の下で標準観測者にとってほぼ条件等色する2つの試料をこの偏差基準観測者が見たときの色差の大きさによって、その試料対の条件等色の度合い (観測者間の変動の大きさ) を評価する。これが観測者条件等色指数である。

観測者条件等色指数の具体的な計算方法を例を挙げて説明する<sup>25)</sup>。まず、ある照明下で標準観測者にとってほぼ条件等色する2つの試料を用意する。図10は標準の光D65の下でCIE1964測色補助標準観測者にとってほぼ条件等色する2つの試料の分光反射率を示している。観察している照明下における試料1と2の標準観測者に対するXYZ三刺激値を  $(X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1})$ ,  $(X_{r2}, Y_{r2}, Z_{r2})$  とする。三刺激値の計算には、完全拡散反射面に対して  $Y=100$  となるように規格化された照明を用いる。D65照明下で計算すると今の場合、 $(30.29, 24.41, 4.325)$ ,  $(30.31, 24.42, 4.320)$  である。これに対し、標準観測者のXYZ等色関数に図9の偏差関数を加えた偏差基準観測者の等色関数を用いて計算したXYZ三刺激値を  $(X_{d1}, Y_{d1}, Z_{d1})$ ,  $(X_{d2}, Y_{d2}, Z_{d2})$

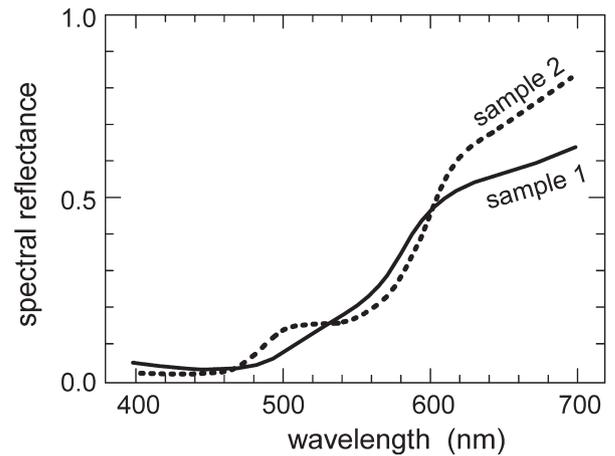


図10 標準の光D65の下でCIE1964測色補助標準観測者にとって条件等色となる2つの色票の分光反射率<sup>25)</sup>.

とする。今の場合、 $(29.22, 24.09, 4.333)$ ,  $(29.36, 24.11, 4.402)$  となる。ここで、2つの色票が完全に条件等色していない場合を考慮し、試料2に対する偏差基準観測者のXYZ三刺激値を以下のように補正する。

$$\begin{aligned} X'_{d2} &= X_{d2} \cdot \frac{X_{r1}}{X_{r2}} \\ Y'_{d2} &= Y_{d2} \cdot \frac{Y_{r1}}{Y_{r2}} \\ Z'_{d2} &= Z_{d2} \cdot \frac{Z_{r1}}{Z_{r2}} \end{aligned} \quad (4)$$

これは、偏差基準観測者における試料1と試料2の三刺激値の変化比  $X_{d1}/X_{d2}$ ,  $Y_{d1}/Y_{d2}$ ,  $Z_{d1}/Z_{d2}$  が標準観測者でもともと観測された変化比  $X_{r1}/X_{r2}$ ,  $Y_{r1}/Y_{r2}$ ,  $Z_{r1}/Z_{r2}$  と等しい場合  $(X'_{d2}, Y'_{d2}, Z'_{d2}) = (X_{d1}, Y_{d1}, Z_{d1})$  とするための補正であることがわかる。今の場合  $(X'_{d2}, Y'_{d2}, Z'_{d2}) = (29.34, 24.10, 4.407)$  である。そして、偏差基準観測者の試料1と試料2に対する三刺激値  $(X_{d1}, Y_{d1}, Z_{d1})$ ,  $(X'_{d2}, Y'_{d2}, Z'_{d2})$  からCIE1976  $L^*a^*b^*$  均等色空間上で色差  $\Delta E^*_{ab}$  を計算する。 $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  は、 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  から

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ b^* &= 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

で計算され、色差は  $L^*a^*b^*$  空間上での2色間のユークリッド距離

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} \quad (6)$$

によって計算される。ここで、 $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  は観測照明の下での完全拡散反射面に対する標準観測者のXYZ三刺激値

で、D65のCIE1964測色補助標準観測者における値は(94.81, 100.00, 107.32)である。偏差基準観測者に対する $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ を計算する場合も、標準観測者の $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$ の値を用いて計算を行う点は、注意が必要である。実際に計算を行うと今の場合 $(L^*_1, a^*_1, b^*_1) = (56.18, 26.63, 55.83)$ ,  $(L^*_2, a^*_2, b^*_2) = (56.19, 27.04, 55.46)$ ,  $\Delta E^*_{ab} = 0.56$ となる。この計算結果が観測者条件等色指数であることを明示するために $M_{obs,10}(D65) = 0.56$ のように表す。 $M_{obs}$ は観測者条件等色指数であること、添え字の10は10°視野等色関数すなわちCIE1964測色補助標準観測者に対するものであること、括弧内のD65はD65照明下における評価であることを示している。2°視野等色関数すなわちCIE1931標準観測者に対しても、同じ図9の標準偏差関数を用いて観測者条件等色指数を求めることができる。

観測者条件等色指数の値は、値が大きいほど観測者によってその2つの試料が異なって見える可能性が高く、条件等色の度合いが低いことを示している。その度合いを等級で区分するために、CIEでは表1のような等級区分を定めている。上の例の場合等級はCとなる。

等色関数の個人差によって色の見え方が変わるのかと問われれば、感覚・知覚的な色という意味では大きな変化は生じないといえる。しかし、条件等色の破れという形では個人差の影響ははっきり表れる。その個人差の一番大きな原因となっているのは加齢による水晶体の光学濃度の増加である。図9の偏差関数でも $\Delta\bar{e}(\lambda)$ が短波長領域で大きな値をもつのはこのためと考えられる。CIEの観測者条件等色度の評価方法でも、年齢の違いによる条件等色のずれを評価する方法として、それぞれの偏差関数の前に係数 $0.064N - 2.31$  ( $N$ は年齢)をかけて標準観測者の等色関数に加えたものをその年齢における等色関数と定め、ある年齢の観測者にとってほぼ条件等色する試料対を別の年齢の観測者が見たときの色差を条件等色年齢指数とすることを提案している。しかし、図9では短波長の成分だけでなく、長波長領域で $\Delta\bar{e}(\lambda)$ に大きな成分が現れている。これは年齢に依存して増大する因子であるのかどうかは不明である。

このように、等色関数に個人差があることははっきり認識され、その原因もある程度わかっているが、これまで個人差の解析に使われたデータは図8に示したStiles-Burchのものだけであり、すべての原因が解明されているわけではない。また、CIE1931標準観測者は3.1節で説明した理由のため、正しく平均的な観測者を代表していないという問題もある。さらに最近、等色の加法性に疑問を投げかけ

表1 観測者条件等色指数の等級区分。

観測者条件等色指数	等級
0.2以下のとき	A
0.2を超えて0.5以下のとき	B
0.5を超えるとき	C

る研究者も現れ<sup>28-30)</sup>、CIEでも等色関数を再検討するために1999年に技術委員会TC1-56「等色関数の検討」を発足し、現在も活動を行っている。これまで等色関数は確固として確立された存在として疑いの眼を向けることなく使われてきたが、来年は標準観測者の誕生から75周年という節目を迎え、今日の新しい技術でもう一度等色関数を見直す時期に来ているのかもしれない。

## 文 献

- 1) J. Pokorny, V. C. Smith and M. Lutze: "Aging of the human lens," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1437-1440.
- 2) W. D. Wright: "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours," *Trans. Opt. Soc.*, **30** (1929) 141-164.
- 3) A. Stockman, D. I. A. MacLeod and N. E. Johnson: "Spectral sensitivities of the human cones," *J. Opt. Soc. Am.*, **10** (1993) 2491-2521.
- 4) 岡嶋克典, 高瀬正典: "マンセル色票の色名呼称における高齢者水晶体擬似フィルタ装着の効果," *照明学会誌*, **84** (2000) 838-842.
- 5) H. Hibino: "Red-green and yellow-blue opponent-color responses as a function of retinal eccentricity," *Vision Res.*, **32** (1992) 1955-1964.
- 6) J. J. Vos and P. L. Walraven: "On the derivation of the foveal receptor primaries," *Vision Res.*, **11** (1971) 799-818.
- 7) V. C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vision Res.*, **15** (1975) 161-171.
- 8) J. Nathans, T. P. Piantanida, R. L. Eddy, T. B. Shows and D. S. Hogness: "Molecular genetics of inherited variation in human color vision," *Science*, **232** (1986) 203-210.
- 9) M. Neitz and J. Neitz: "Numbers and ratios of visual pigment genes for normal red-green colorvision," *Science*, **267** (1995) 1013-1016.
- 10) D. H. Brainard, A. Roorda, Y. Yamauchi, J. B. Calderone, A. Metha, M. Neitz, J. Neitz, D. R. Williams and G. H. Jacobs: "Functional consequences of the relative numbers of L and M cones," *J. Opt. Soc. Am.*, **17** (2000) 607-614.
- 11) N. Ohta and G. Wyszecki: "Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers viewed under different illuminants," *J. Opt. Soc. Am.*, **65** (1975) 327-333.
- 12) 大田 登: *色彩工学* (東京電機大学出版局, 1993) pp. 198-203.
- 13) J. Neitz and G. H. Jacobs: "Polymorphism in normal human color vision and its mechanism," *Vision Res.*, **30** (1990) 621-636.
- 14) J. Winderickx, D. T. Lindsey, E. Sanocki, D. Y. Teller, A. G. Motulsky and S. S. Deeb: "Polymorphism in red photopigment underlies variation in color matching," *Nature*, **356** (1992) 431-433.
- 15) J. Guild: "The colorimetric properties of the spectrum," *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, **230** (1931) 149-187.

- 16) W. D. Wright: "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours," *Trans. Opt. Soc.*, **30** (1928-1929) 141-164.
- 17) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1982) pp. 343-354.
- 18) 大田 登: 色彩工学 (東京電機大学出版局, 1993) pp. 98-100.
- 19) D. B. Judd: "Report of U. S. secretariat committee on colorimetry and artificial daylight," *Proceedings of the 12th Session of the CIE*, Vol. 1 (CIE, 1951), TC-7, p. 11.
- 20) J. J. Vos: "Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer," *Color Res. Appl.*, **3** (1978) 125-128.
- 21) CIE TC1-20: "CIE 1988 2° spectral luminous efficiency function for photopic vision", *CIE publication*, No. 86 (1990).
- 22) W. S. Stiles and J. M. Burch: "N. P. L. colour-matching investigation: Final report," *Opt. Acta*, **6** (1959) 1-26.
- 23) N. I. Speranskaya: "Determination of spectrum color coordinates for twenty-seven normal observers," *Opt. Spectrosc.*, **7** (1959) 424-429.
- 24) P. W. Trezona: "Derivation of the 1964 CIE 10° XYZ colour-matching functions and their applicability in photometry," *Color Res. Appl.*, **26** (2001) 67-75.
- 25) 大田 登: 色彩工学 (東京電機大学出版局, 1993) pp. 241-246.
- 26) CIE TC1-07: "Special metamerism index: Change in observer", *CIE publication*, No. 80 (1989).
- 27) 小松原仁, 平井敏夫, 馬場護郎: 色彩. JIS ハンドブック 61 (日本規格協会, 2004) pp. 382-385.
- 28) W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part I. Introduction. The visual colorimeter-spectroradiometer. Experimental results," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 79-122.
- 29) W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part II. Discussion," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 162-186.
- 30) W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part III. Discussion (continued)," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 240-262.

(2005年2月28日受理)