色の標準化とその取り扱いについて

財日本色彩研究所 平井敏夫

Standardization for Colors and Color Control

Toshio Hirai

Japan Color Research Institute

1. まえがき

エレクトロニクス技術のめざましい進展によって、最近の測色器械は多彩な機能を備えたものが多くなってきた。また、パーソナルコンピュータの普及も著しく、製品の色彩管理をするのには大変便利になったように思われる。

しかし、それらの機能を使い分けて、十分に活用するためには、測色器械が計測しているデータの意味をよく理解しておく必要がある。色を計量的に管理するとはいっても、製品の色は最終的には、人の目によって見られるものであるから、測色値はあくまでも色を製造していく過程における管理手段に使うべきものである。測色値に頼り過ぎると、目をつぶって色を見ているようなことにもなりかねない。

色は誰でもが自由に見ることができ、見ることによって、すぐに理解できる。それが「色」なのである。しかし、色の見かたを標準化することによって、色の見え方を定め、それによって色を数値的に扱うのであり、また、それを前提にして測色器械を人の代わりにして、色彩管理に活用できるのである。

そこで、色を標準化する手続きとその取り扱いについて述べる。

2. 色を見る条件

2.1 色の見え方

色は暗やみでは見えない。目を閉じてみることではできない。また、見る物体が視界になければ見ることはできない。色は光と物体と目の関連で認められる視覚の現象である。

色が認められるまでの過程は図1¹⁾に示すように、光源から放射された光が物体に当たり、そこで反射あるいは透過した光が目に入る。その光は目の網膜を刺

Fig. 1 The processes of color vision.

激して、これによって生じた視神経の活動が脳に伝えられて、そこで色の感覚が生ずる。そして物体の色として認識されるのである。こうして見える色を物体色という。また、物体色には表面色と透過色との区別がある。前者は物体から反射した光によって生ずる色であり、後者は物体を透過した光によって生ずる色である。

また、目を光源に向けると光源から放射された光が直接目に入る。その光によって生ずる色は、光源の色として認識される。こうして見える色を光源色という。

われわれが見ている色はこのうちのいずれかである。しかし、日頃の生活の中で色を見ると、このような認識過程を意識して見ていない。視線を向けて物を見る。そこに「色の付いた物がある」と思って見ている。また、色が照明や見方の違いによって異なって見えたりすることも知っている。例えば、「同じ色」でも異なった照明のもとで見ると違った色に見えるし、単色で塗られた箱の絵を画くとき、箱の3方の面を濃淡を変えて色を塗り分ける。3方の面が同じ色であってもそれぞれの面の色の見え方が違うことを知っているか

らである。

物体の色を「この色だ」と定めるには、その物体がいつでも、どこでも、だれにでも同じ色に見えるようにしておかなければならない。つまり、客観的に色を見る方法を決めておく必要がある。

2.2 照明方法

そのためには、まず照明のあり方を整えておかなければならない。照明のあり方を決める主な要因は光源から出る光の質、強さ、方向である。照明関係の国際的に標準化を図る審議機関として、国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage: 略称 CIE) がある。その CIE で「標準の光」を定めた。標準の光には A, C, D₆₅ などが定められていて、そのなかでも色を見るための照明光源として、標準の光 D₆₅ を基準にしている。

標準の光 D₆₅ は、色温度が約 6500 K の紫外波長域を含む平均的な昼光を意味する。自然昼光は時々刻々と変わっていくが、これを数多く実測し統計的手法で処理して、各々の色温度における昼光の代表を定めた。このようにして、CIE が規定した光を CIE 昼光といい、種々の色温度における昼光が規定されている。

標準の光 C は、可視波長域の平均的な昼光で代表される光であるが、本来は標準の光 A (タングステン電球の光) に DG フィルターをかけて、色温度を約 6774 K に点灯して得られる人工光である。DG フィルターは R. Davis と S. Gibson が考案した 2 層の溶液フィルターである。

図 2 にこれらの標準の光の分光分布の例を示す。

2.3 観察方法

われわれは目から、物の形状、色、質感、あるいは、大きさ、位置、周りの状況……などさまざまな視覚情

Fig. 2 Relative spectral power distributions of CIE standard illuminants C, D₆₅, D₅₅ and D₇₅.

報を得て、その物についてのさまざまな印象や感情をいだいたり、連想したりして行動に結びつけて生活している。

ところで、照明の環境が整ったとしても、色は見る状況によって違った見え方をすることもある。

例えば、インテリア デザインなどで、色見本を見て決めた色が実際の壁面に塗り上がったとき、明るく派手に見えてしまうことがある。このような現象を色の面積効果という。一般に面積の大きい色は小さい面に比べて明るく、彩度が高く見える傾向がある。従って、同じ大きさの面で比較する必要がある。

2つの色が相互に影響し、その相違が強調されて見える現象を色対比という。強調のされかたによって、それぞれ色相対比、明度対比、彩度対比などの種類がある。例えば、ある色を暗い背景に置くと明るい色に見え、明るい背景に置くと暗い色に見える。また、ある色を彩度の高い背景に置くとくすんだ色に見え、彩度の低い背景に置くとあざやかな色に見える。だから、色を見るときは背景を整えておかなければならない。

半つやの表面の色や透明感のある色、金属感のある色などは、それを見る角度のわずかな差によって明るく輝いて見えたり、暗い色に見えたりする。それゆえ、色を見るときの方向を決めておかなければならない。

2.4 色の比較方法

以上の例のように、照明の方法や観察の仕方によって色の見え方が違うので、色の観察条件を標準化しておく必要がある。その規格が JIS Z 8723 (表面色の比較方法) である。次にその要約を述べるが、規格の詳細については JIS を参照されたい。

(1) 適用範囲

この方法は表面色の比較に用いる。ただし、完全鏡面や鏡面に近い面には適用しない。

(2) 照明光源

照明に用いる光源は、標準の光 D₆₅ かこれに準ずる光源^{*)}を用いる。

(3) 作業面照度

色を比較する作業面の照度は 500 ルクス (lx) 以上が必要で、なるべくなら 1000 ルクス以上でまぶしくない程度の照度範囲で、かつ均等な照明が望ましい。

(4) 照明と観察方向

45° 方向からの照明では真上から観察し、真上からの照明では 45° 方向から観察する。また、あらゆる方向から均等に照明されているときは、真上または 45° 方向から観察する。

(5) 配置

比較する色は互いに隣接して並べ、色の面が同一の

平面に並ぶように配置する。

(6) 背景の調整

色の周囲を整え、色の大きさを同じにするためにマスクを用いる。マスクの表面は光沢や蛍光がなく、均質な無彩色とする。無彩色の明るさは比較する色の明度に近いものがよい。

(7) 色の面の大きさ

比較する色の面の大きさは視角で 2° 以上とする。

(8) 観察者

正常な色覚を有する者であること。

*) : 例えば、北空昼光、標準照明装置あるいは演色性のよい光源など。

3. 色の測定

3.1 CIE の表色方法

以上に述べた色の認識されるまでの過程から分かるように、物体の色は照明する光源の質、光に対する物体の反射特性及び光に対する目の感度によって決まるので、あらかじめ光源の分光分布と目の分光感度（等色関数という。図3を参照）を規定しておけば、色は

Fig. 3 The CIE 1931 standard color matching functions.

その物体の分光反射率のあり方によって決まる。CIE はこうした考え方で色を表示する方法を標準化した。我が国では XYZ 系による色の表示方法として JIS Z 8701 に制定されており、研究分野のみならず企業での色彩管理や調色管理などに広く使われている。

この方法の色表示の形式は、(1)式によって計算された3つの値 X , Y , Z で色を表示する。この X , Y , Z の値を色の三刺激値という。

$$\begin{aligned} X &= K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $S(\lambda)$ は照明に用いた標準の光の分光分布、 $R(\lambda)$ は物体の分光反射率、 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数、 K は $1/\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$ で与えられる定数である。

(1)式の意味は、標準の光の下で、ある物体を観測者が見たときの色の感覚を3つの数値に置き換えて表現したものである。実際の計算は 380 nm ~ 780 nm (工業的には 400 nm ~ 700 nm) の範囲を 5 nm, 10 nm あるいは 20 nm の間隔で各波長ごとに掛け算し、それを総計して求める。図4に計算手順例を示す。

また、標準の光の分光分布、等色関数及び定数 K は既知の値なので、あらかじめこれを乗算した数表（重係数表という）が用意されていて、普通これを使う。

色を X , Y , Z の値で表すことができると、これらを座標軸にして色の位置を3次元の座標系で図示することができる。

3.2 UCS の表色方法

物体の色がどんな色であるかを絶対的に決めることも重要であるが、製品の色彩管理をする場合、標準色に対して試料色がどのような位置にあるのか、試料色がどう違うのか、標準色と差がないといえるのか等々を知りたいことの方が多い。

三刺激値は色を空間座標で表示しているのだから、2つの色の差（色差）はそれぞれの色の座標間の距離で数的に表すことができる。しかし、その幾何学的距離（計測量）と色差の見え（感覚量）との間に対応がないと実用性に乏しい。事実、CIE の表色系は表面色の色差管理に向かないのである。

色を表示するための座標系は数多くあるが、色差の量を表すのに都合よく作られた色の座標系を UCS [均等色空間 (uniform color space)] という。

長年にわたり色差の研究がなされ、いろいろな UCS や色差計算の公式が提案され、実用もされてきたが標準化という立場から、国際的に統一した色差の表示方法を規定することが望まれたため、CIE では提案されてきた種々の UCS や色差計算公式について検討をした。その結果、1975年の CIE ロンドン大会で2つの UCS と色差計算方法を採用し、CIE (1976) 勧告として発表した。これを受けて、ISO (国際標準化機構) をはじめ各国での規格の見直しがなされた。

次に、その UCS と色差計算式の概略を示す。詳細は JIS Z 8730 (色差表示方法) を参照されたい。

1) $L^*a^*b^*$ 表色系及び色差公式

E. Q. Adams (1942) が提案した $V_x V_y V_z$ 表色系に近似させ、式を簡略にした UCS で(2)式によって定義される数値で表す。

Fig. 4 The way in which the CIE tristimulus values
X, Y and Z of a color are obtained

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 X_n 、 Y_n 、 Z_n は照明に用いた標準の光の三刺激値、 X 、 Y 、 Z は対象としている物体色の三刺激値である。

色差計算は(3)式による。

$$JE^* = [(JL^*)^2 + (Ja^*)^2 + (Jb^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

2) $L^*u^*v^*$ 表色系及び色差公式

CIE が 1964 年に暫定的に提案した $U^*V^*W^*$ 表色系を修正した UCS で、(4)及び(5)式によって定義される数値で表す。

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_n) \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u' &= 4Y/(X+15Y+3Z) \\ v' &= 9Y/(X+15Y+3Z) \\ u'_n &= 4Y_n/(X_n+15Y_n+3Z_n) \\ v'_n &= 9Y_n/(X_n+15Y_n+3Z_n) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 X_n 、 Y_n 、 Z_n は照明に用いた標準の光の三刺激値、 X 、 Y 、 Z は対象としている物体色の三刺激値である。

色差計算は(6)式による。

$$JE^* = [(JL^*)^2 + (Ju^*)^2 + (Jv^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

我が国でも 1978 年に JIS を見直して、1980 年に改正された規格票が刊行された。JIS では上記の CIE 勧告の UCS のほかに、工業界の事情を考慮して、旧規格にある色差表示方法も併記し、当分の間、旧規格にある色差表示の方法も残すことにしてあるが、現在市販されている標準的な測色器械のほとんどはこれらに対応できるように作られている。なお、通常の色彩管理には $L^*a^*b^*$ 表色系が使われる。

3.3 色の測定方法

色を測定する方法は目視比較方法、混合等色方法、刺激値直読方法、分光測色方法の 4 種類に大別される。目視比較方法と混合等色方法は、体系づけられた色のスケールと試料とを目視によって比較し評価する方法である。目視比較方法で物体色標準に使用するスケールには、例えば、JIS 標準色票 (JIS Z 8721 準拠) があり、それに掲載されている色票と試料色とを比較し、色票に付けられている三属性の記号 (色相、明度、彩度) で表示する。目視評価を行う場合は、JIS Z

8723 に規定された色の比較条件の下で行うことが大切である。

刺激値直読方法や分光測色方法は JIS Z 8722 (物体色の測定方法) などに規定されている条件に準拠して作られた測色器械を使って、色を計量的に評価する方法である。現在の色彩管理に活用されている工業計測では分光測色方法が主流を占めているようである。

分光測色方法は試料色の分光反射率 (又は分光透過率) を測定し、規定された方法で計算処理を行い、CIE 表示や UCS など体系化されている色空間の座標を求める方法である。

次に、測色に関して規定されている諸条件の概要を示す。

(1) 光学系の種類

方法 a) 2 光路光学系

方法 b) 1 光路光学系

(2) 照明受光条件の種類

条件 a) 45° 照明, 0° 受光

条件 b) 0° 照明, 45° 受光

条件 c) d (又は D) 照明, 0° 受光

条件 d) 0° 照明, d (又は D) 受光

(3) 計算用照明光の種類

標準の光 i) A ii) D_{65} iii) C

補助標準の光 i) D_{50} ii) D_{55} iii) D_{75} 等

試料光 i) F_6 ii) F_8 iii) F_{10} 等

(4) 等色関数の種類

条件 1) 2° 視野条件における等色関数

条件 2) 10° 視野条件における等色関数

(5) 重価係数の種類

5 nm 間隔の重価係数による計算方法

10 nm 間隔の重価係数による計算方法

20 nm 間隔の重価係数による計算方法

このように測色条件にはいろいろな種類があるので測定する場合、これらの条件のどれであるかを明確にしておく必要がある。

[例] 1 光路光学系, 条件 d), D_{65} , 条件 1),

20 nm 間隔の重価係数による測色条件。

4. メタメリズムとその評価

1 枚の色紙を半分に切って、これを並べて見ると同じ色に見える。当然、色材も同質である。また、ある色と等しく見える色を、別の色材の混色で作ることもできる。例えば、オレンジ色は黄と赤との混色でもできるし、緑は黄と青とで作ることができる。

前者のように同質の色対の関係にある色をアイソメリズム (isomerism) といい、後者のような関係にあ

る色をメタメリズム (metamerism) という。

アイソメリズムの関係にある色は分光分布が同質なので、どんな照明の下で見ても「同じ色」に見える。メタメリズムの関係にある色は特定の照明の下では視覚的に等しく見えても、分光分布が異なるために、別の照明の下では違った色に見えることがある。図5にメタメリズムの関係にある色対の例を示す。

Fig. 5 Examples of metameric objects.

一般に、色の比較作業は北窓昼光や標準照明装置の下で行われる。この場合、おおよその色を指示するために与えられた色見本との比較であったり、初めて作る色であるならば、前記比色方法で合格しているか否かを判定しても問題は起らない。しかし、標準の色が将来、製品として組み合わされる部品を代表する色見本であったり、また、過去に製造したことのある製品のロットを代表する見本であるときは注意をする必要がある。その理由は、ユーザー側で製品同士を並置して見比べることが多いので、著しいメタメリズムの現象が起きていて色違いのクレームになることがあるからである。その対策として、標準照明装置の下で比色をするとともに、もう一つ別の照明、例えば電燈光の下で比色を行い、両方の照明において色差の少ないことを確認しておくようにする。

目標色と試料色との間で、メタメリズムがどの程度発生するかを定量的に予測できれば調色作業や色検査作業をする上で都合がよい。

メタメリズムの評価方法の JIS は 1984 年に制定された。その方法の概略はつぎのとおりである。

- (1) 目標色と試料色を準備する。
- (2) 基準照明光に標準の光 D_{65} を用いて測色する。
- (3) 試験照明光に標準の光 A を用いて測色する。
- (4) 目標色のそれぞれの照明光における刺激値から補正係数を計算し、試料色の試験照明光での三刺

激値を補正する。

- (5) 試験照明光での、目標色の三刺激値と補正した試料色の三刺激値を L^* , a^* , b^* に変換して、色差 ΔE^* を計算する。
- (6) その値を条件等色指数といい、 M で表す。
- (7) 条件等色指数は次のように表示する。

例 1. $M(D_{65} : A) = 2.0$

例 2. $M_{10}(D_{65} : A, F_6) = (4.3, 3.8)$

条件等色指数は、例えば、 $M_{10}(D_{65} : A) = 5.2$ ならば、目標色と試料色とを 10 度視野条件で、標準の光 D_{65} の下で完全に色差を 0 に合わせたとしても、標準の光 A の下では色差が 5.2 程度発生するであろうという意味の推定値である。

なお、試料照明光には標準の光 A のほかに、必要に応じて、一般形白色蛍光ランプ (F_6)、演色改善形昼白色蛍光ランプ (F_8) あるいは 3 波長帯形蛍光ランプ (F_{10}) などを用いることもある。詳しくは JIS Z 8719 (物体色の条件等色度の評価方法) を参照されたい。最近の測色器械の中には、この評価計算のプログラムが組込まれている機種も市販されている。また、分光反射率の測定値があれば計算で求められる。

5. 白さの評価

紙などの白さを評価する方法に、例えば、ハンター白白色度などがある。

白さの評価には心理的意義を主体にした方法と物理的意義を主体にした方法とがある。

一般に、「白さ」の表現は心理的評価尺度の用語として使われることが多いが、その中には「好ましい白さ」の評価要素が含まれているので、例えば、素材の種類によって「白さ」の評価の仕方が異なってくる場合もある²⁾。例えば、布地の白さと紙の白さを同列に評価できないし、また、好ましい白さは時代と共に変わるかもしれない。

物理的な評価は光の反射率が高いものほど「白い」として、規定照明における理想的白からの色差の大小で比較する方法で、例えば次の(7)式で表わされる。

$$W = 100 - \Delta E^*(L^*, a^*, b^*) \quad (7)$$

「白白色度」の評価方法にはこれら両者の意義を勘案して作られたものも多い³⁾。

例えば、 $457.0 \pm 0.5 \text{ nm}$ の 1 波長を採り、その波長における反射率を測定して白白色度とする方法や次の(8)式による方法などがある。

$$W = 4B - 3Y \quad (8)$$

ここで、 $B=kZ$ で、 Y と Z は三刺激値である。なお、 k は定数で、標準の光を用いるときは 0.847 を、キセノン標準白色光源を用いるときは 0.935 とする。

白色度を評価するに当たり、どのような方法を用いるかは当事者の間で定めるべきものであるが、評価する目的とデータの意味をよく理解して使うことが大切である。特に、紙や布地の白さの評価の問題の中には蛍光を含む場合と含まない場合とがあり、両者を同一視して評価することは難しいので注意を要する。

周知のとおり、蛍光色は短波長光を吸収して長波長光で反射する性質があるから、分光した光を照明してその光の反射光を計測しても蛍光の性質を捉ええることはできない。蛍光の性質を捉ええるためには紫外域を含む標準の光を照明し、蛍光色から反射された光を

分光して計測する必要がある⁴⁾。しかし、現在ではまだ検討中なので、蛍光色の測定方法は基本規格の JIS として制定されてはいない。

上記のように光学系を変えた場合の測定事例の一つとして、蛍光を含まない上質紙と蛍光を含むカード紙の分光測定結果を図 6 に示し参考に供する。

また、蛍光を含む色と含まない色とを比較する場合の評価方法の例⁵⁾を次に挙げる。

$$W = 100 - [(100 - W^*)^2 + (U^* - U_p^*)^2 + (V^* - V_p^*)^2]^{1/2} \quad (9)$$

ここで、 U^* 、 V^* 、 W^* は CIE(1967)UCS で、 $U_p^* = -5.59$ 、 $V_p^* = -16.12$ である。

6. あとがき

この原稿は 1985 年 11 月 14 日に工業技術院筑波共用講堂で行われた紙パルプ技術協会の年次大会で講演した要旨を基にして、一部加筆直して作成したものである。当日はカラースライドを使って色の見え方の説明もしたがここでは省略してある。また、紙面の都合で要旨には掲載しなかった白さの評価方法についての事例を 2、3 加えた。

現在、蛍光色の測定方法⁶⁾や白色度の評価方法の標準化の見直しがなされつつあり、今後の研究成果に期待するところの方が大きいかもしれないけれど、ご参考に供する次第である。

文 献

- 1) 川上元郎：カラーマッチング入門 理工出版 (1970)
- 2) 納谷嘉信：産業色彩学 朝倉書店 (1980) 184
- 3) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック 東大出版会 (1980) 289
- 4) D. B. Judd, G. Wyszecki: Color in Business Science and Industry John Wiley & Sons (1975) 219
- 5) 委員会報告：色科ニューズ 14 (1968) 26
- 6) 森 礼於，一条 隆：日本色彩学会誌 9 (1985) 42 等

Fig. 6 Examples of the spectral radiance factor distributions measured a non-fluorescent paper and a fluorescent paper with different instruments.