

## シリーズ解説 表色系 第5回

## “色再現・色管理・色の見え”

## Color Reproduction / Color Management / Color Appearance

小林光夫 KOBAYASI, Mituo 電気通信大学 The University of Electro-Communications

## 1. 見た目に良い色とほんとうの色

ふだん見ているテレビで、色がヘンだと思ったことがありますか？ この頃のテレビは品質も安定しているので、そのようなことはあまりないでしょうか。もし色が悪いと感じたときには、たいてい放送局側に責任があると思うし、万一テレビ受像機が悪いときも、適当に色調整をして、見た目にヘンでなければそれですみます。このような場合には、見た目に良い色、記憶にある色、あるいは自分が美しいと思う色であればよく、ほんとうの色は何かという考えには至らないでしょう。

パソコンやインターネットでの色の扱いはどうでしょうか。パソコンに接続されたCRT(ブラウン管)やLCD(液晶ディスプレイ)の画面で、インターネットのホームページや送られてきたメールの画像を見たり、デジタルカメラやスキャナで取り込んだ画像を見たりするときも、色がヘンならば元の画像が悪いと思うのがふつうだし、もし色調整をするにしても、見た目に良ければそれで良しとするのがふつうです。

ところが、何かの色を記録したり分析したりしようと思ったとき、はたとほんとうの色は何か、正しい色とは何かという疑問が生じます。たとえばCRT画面に表示されている色をプリンタに出そうとすると、なかなかうまく色が合わないのがふつうです。どちらが正しい色でしょうか。デジタルカメラやスキャナで取り込んだ画像の色は、ほんとうはどのような色なのか、よく考えてみるとわからなくなります。

光が人間の目を通して心(脳)の中に生じさせる色を、デジタルカメラやスキャナなどから色情報として入力したり、色情報をCRTやプリンタなどから出力したりすることを色再現(color reproduction)といいます。そして、色再現の際に色情報を“正しく”とか“見た目によく”とか、人間の思いのまま

に扱うことを、色管理(color management)といいます。色管理はコンピュータを用いて行なうことがほとんどなので、とくにcomputer color management(略してCCM)とも呼ばれます。

色再現や色管理は、じつはたいへん難しい問題です。良い色とは何か、正しい色とは何か、万人に共通な色情報は何かなど哲学的・科学的な問題から、色情報を入出力する機械の開発・設計など技術的・工学的な問題、さらには色情報の扱い方の標準や規格を決める政策的な問題など幅広く、現在さかんに研究が続けられています。

## 2. 色管理の二つの方式

色再現のための機器は、デジタルカメラやスキャナなど色情報を入力するための入力機器と、CRT装置、プロジェクタ、プリンタなど色情報を出力するための出力機器に大別されます。

入力機器を通して得られる色情報は、等色関数に似せた分光感度をもつ3種類のセンサの3種の出力値 $R, G, B$ であることが多いし、また、出力機器を通して色を出すための色情報は、やはり $R, G, B$ という三つの数値の組であることが多いのです<sup>1</sup>。これらの値すなわち $RGB$ 値は、それぞれ色の赤、緑、青成分といった意味ではありますが、その数値と測色値との関係は機器に依存しており、また公開されていないのが現状です。この関係を調べて正しく色再現を行なうこと、すなわち、入力機器を通して得られた $RGB$ 値から $XYZ$ 三刺激値を求めることや、出力機器を通して出された色の $XYZ$ 三刺激値が望みの値になるように $RGB$ 値をきめることは、色再現の専

<sup>1</sup> プリンタでは、実際はC(cyan,青),M(magenta,紫),Y(yellow,黄)。(これらにB(black,黒)を加えることもある)の印刷インキを用いて印刷が行われる。これらの量を直接制御して色を定めることもできるが一般人には難しいので、CRTと同様に $R, G, B$ によって色を定めるようにしてあることが多い。

専門的な難しい問題となります。

パソコンやインターネットの利用者は、一般には色再現の専門家でもプログラムでもありませんから、自分でこのような問題を解決し、色管理をすることは難しいでしょう。身近に色情報を扱えるようになっている今日、一般の人が色管理を行なうためには、

(a) 既成のソフトウェアに入出力機器に関する色管理情報を組み込む方法

= ICC プロファイルの利用。

(b) 標準化された色情報が扱える入出力機器を用いる方法

= sRGB の採用

のどちらかになります。

(a)は、入出力機器のRGB値とXYZ三刺激値などの測色値との関係を記述した情報——これをICC

プロファイルという<sup>2</sup>——を、あらかじめWindowsとかMac-OSなどのコンピュータ操作システムやPhotoshopなどの画像編集ソフトウェアに組み込んでおき、利用者はこれを介して色情報を扱うことにする方式です(図1)。スキャナやプリンタなどは、この方式で利用されることが多いようです。この方式では、ICCプロファイルの用意された機器ならばどのような機器でも接続でき、色管理の自由度が大きいのですが、ICCプロファイルの利用法は簡単ではありませんので、素人が自作のプログラムで色管理するのは難しいでしょう。また、入出力の際、必ず表色値変換を伴いますので、計算時間などのコンピュータの資源を使ってしまいます。

(b)は、入出力機器の扱うRGB値を標準化・規格化し、測色値との関係を明らかにしておく方式です。

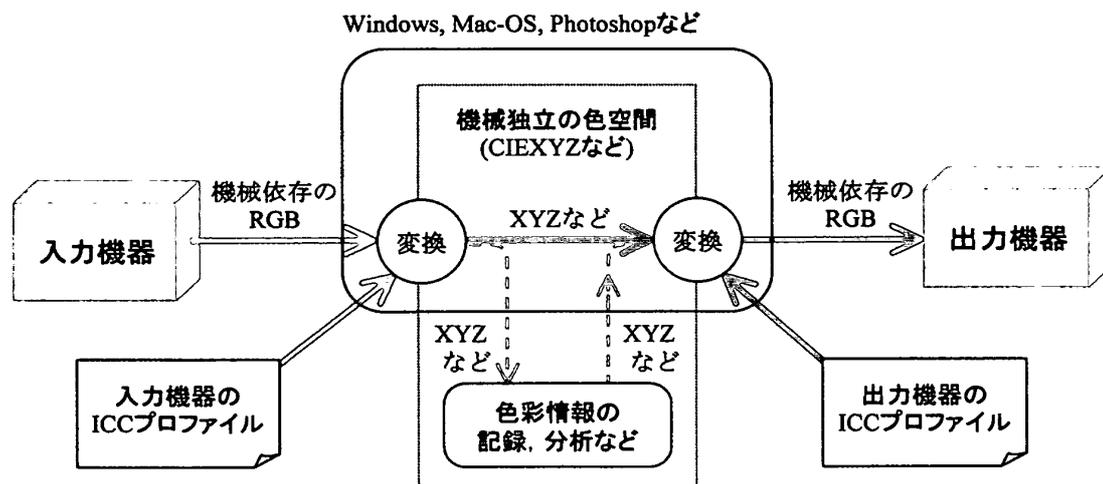


図1 ICCプロファイルを利用する色管理

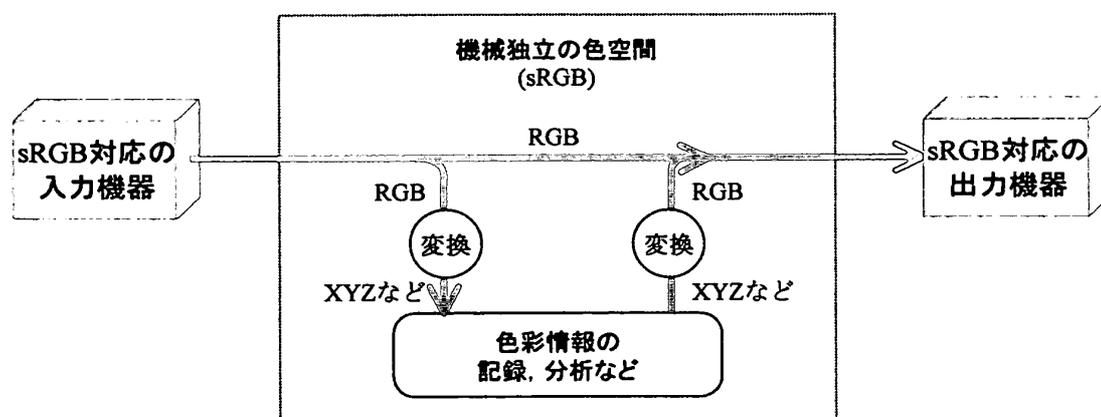


図2 sRGBを採用した色管理

<sup>2</sup> ICCとはInternational Color Consortiumの略。ICC profileは、ICCが提唱している色管理の枠組み。色再現機器の色彩特性情報を記録するプロファイルの仕様を規定している。

<sup>3</sup> sRGBとはstandard RGBのこと。Hewlett-Packard社とMicrosoft社が共同で開発した標準のRGB-XYZ変換方式。IEC(International Electrotechnical Commission)から国際標準の色管理方式として発行された。

この方式の代表がsRGB方式です<sup>3</sup>。sRGB方式では、規格にあった機器ならばどのような機器でも簡単に接続でき、素人でも色管理ができます(図2)。また、いちいちRGB値と測色値との変換をしなくても済むことから、計算時間などのコンピュータの資源を節約できる利点があります。最近のデジタルカメラ、CRT、LCD、プロジェクタなどは、sRGB規格に準拠したものが多くなりつつあります。

### 3. sRGB方式におけるRGB値とXYZ三刺激値との関係

sRGBは、多くのパソコンで使われているCRT装置の特性を標準化したものといえます。

多くのCRTでは、RGB値をそれぞれ0から255まで変化させて、色光を出しています。とくに、 $R:G:B=1:1:1$ の割合で混合させると無彩色を呈し、 $R=G=B=0$ だと“黒”、 $R=G=B=255$ だと“白”となります。

それでは、 $R:G:B$ を1:1:1に保ったまま0から255まで変えると、CRT画面上の無彩色の輝度はRGB値に比例して変わるかということ、そうではありません。多くのCRTでは、RGB値が増加するにつれ急激に輝度が増加します。この増加の仕方は、ガンマ $\gamma$ を2~3程度の定数として、おおむね

$$\text{相対輝度} \propto (\text{RGB値})^\gamma$$

のように書けます( $\propto$ は比例することを表す記号)。このことから、この性質をCRTの“ $\gamma$ 特性”と呼ぶことがあります<sup>4</sup>。図3に、 $\gamma=2, 2.5, 3$ のときの $\gamma$ 特

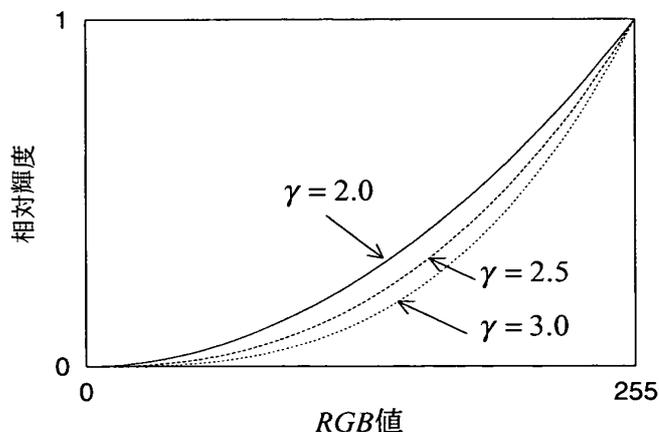


図3  $\gamma$ 特性

<sup>4</sup>  $\gamma$ 関数と呼ぶ人もいますが、数学ではガンマ関数という別の関数( $\Gamma$ 関数)を指しますのでこの呼び方は避けたほうが無難でしょう。

性を示します。

sRGBでは、RGB値を与えたときにCRTが出す色とXYZ三刺激値の関係を、多くのCRTの $\gamma$ 特性を考慮し、次のように決めています。

まず、各0から255の整数値をとるRGB値を255で割って0から1の実数値とし、ついで

$$\begin{aligned} R' &= f(R/255), \\ G' &= f(G/255), \\ B' &= f(B/255) \end{aligned} \quad (1)$$

によって $R', G', B'$ を求めます。右辺の $f(\cdot)$ は

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{12.92}x, & x \leq 0.04045 \text{のとき} \\ \left(\frac{x+0.055}{1.055}\right)^{2.4}, & x > 0.04045 \text{のとき} \end{cases} \quad (2)$$

で定義される関数であり、 $\gamma$ 特性を表しています。図4に $f(x)$ のグラフを示します。

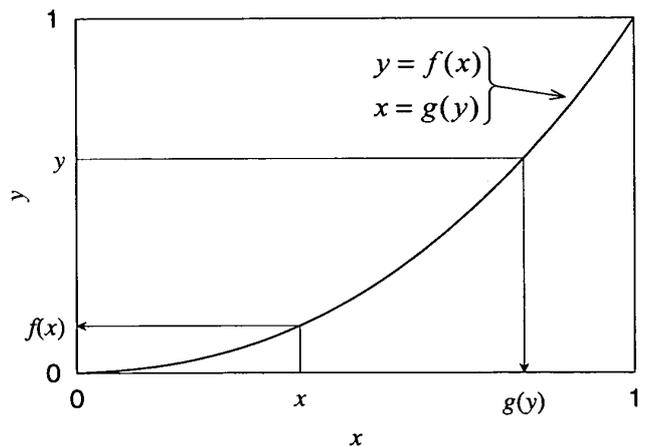


図4 sRGBの $\gamma$ 特性

式(1)により $R, G, B$ から $R', G', B'$ を求める過程を、 $\gamma$ 変換と呼ぶことにしましょう。 $\gamma$ 変換のつぎは、

$$\begin{aligned} X &= 0.4124R' + 0.3576G' + 0.1805B', \\ Y &= 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B', \\ Z &= 0.0193R' + 0.1192G' + 0.9505B' \end{aligned} \quad (3)$$

という一次変換(一次式による変換を一次変換と呼びます)によりXYZ値( $X, Y, Z$ )を求めます(図5)。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \xrightarrow[\gamma\text{変換}]{} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{一次変換}]{} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

図5 RGB値からXYZ値への変換過程

こうして求められたXYZ値は、 $R', G', B'$ が0から1の値であることから、やはり0から1程度の値となります。 $RGB$ 値として $R=G=B=255$ とするとCRTは白を発色しますので、その輝度を測っておき、XYZ値にその輝度値分の倍率を掛けると、光源色としての三刺激値が得られます。なお、物体色としてのXYZ三刺激値を得るには、100倍します。

ここで $R=G=B=255$ に対応するXYZ値を求めてみましょう。まず $\gamma$ 変換(1)により $R'=G'=B'=1$ が得られ、ついで一次変換(3)により $X=0.9505$ ,  $Y=1$ ,  $Z=1.089$ が得られます。この $X, Y, Z$ の値をそれぞれ100倍すると、じつは、標準の光 $D_{65}$ 光を完全拡散反射面に当てたときの物体色のXYZ三刺激値になっています。すなわち、sRGBが想定しているCRTの白色は、 $D_{65}$ 光のもとでの“白”を意味していることがわかります(図6)。

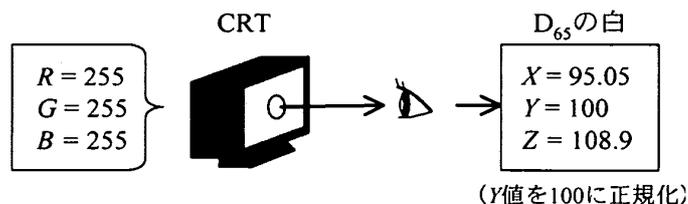


図6 sRGBの白

さてこんどは、与えられたXYZ三刺激値をもつ色をCRTに出すにはどのようなRGB値を与えたらよいか、を考えてみましょう。

上の変換過程を逆にたどることにします。一次変換(3)は、 $R', G', B'$ についての3元連立1次方程式とみなせますので、これを $R', G', B'$ について解くと、やはり一次変換

$$\begin{aligned} R' &= 3.2406X - 1.5372Y - 0.4986Z, \\ G' &= -0.9689X + 1.8758Y - 0.0415Z, \\ B' &= 0.0557X - 0.2040Y - 1.0570Z \end{aligned} \quad (4)$$

が得られます。この一次変換は式(5)の逆変換となっています。そこでまず、与えられた $X, Y, Z$ を式(4)に代入して(すなわち一次逆変換(4)をほどこして) $R', G', B'$ を得ます。 $X, Y, Z$ が物体色の三刺激値として与えられている場合は、あらかじめ100で割っておきます。

つぎに、 $\gamma$ 変換の式(1)を $R, G, B$ について解き、“逆 $\gamma$ 変換”

$$R = \text{round}(255 \times g(R')),$$

$$G = \text{round}(255 \times g(G')), \quad (5)$$

$$B = \text{round}(255 \times g(B'))$$

により $R, G, B$ を得ます。式(5)の右辺の $\text{round}(\cdot)$ は四捨五入を表わします。また関数 $g(y)$ は、先の $f(x)$ の逆関数であり

$$g(y) = \begin{cases} 12.92y, & y \leq 0.0031308 \text{ のとき} \\ 1.055y^{1.0/2.4} - 0.055, & y > 0.0031308 \text{ のとき} \end{cases} \quad (6)$$

のように表わせます(図4参照)。 $R', G', B'$ を $g$ で変換した値は0から1の値ですから、それぞれ255倍して四捨五入すれば、0から255の範囲の整数値として $R, G, B$ が得られます(図7)。

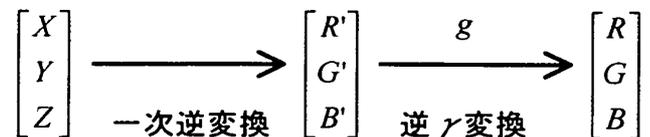


図7 XYZ値からRGB値への変換過程

以上が、多くのCRTの性質をもとに標準化された $RGB$ 、すなわちsRGB規格です。最近のLCDやプロジェクタはsRGB規格のものが増えてきました。LCDの場合のsRGB規格はCRTと同様に解釈すればよいのですが、プロジェクタの場合は、完全拡散反射面に投影したときの色に対してsRGB規格を考えることとなります(図8)。デジタルカメラについては5節で述べます。

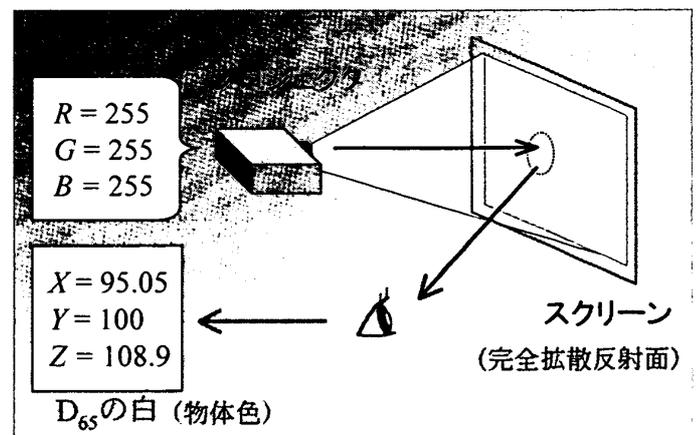


図8 sRGB規格のプロジェクタ

#### 4. sRGBの色域

前回の解説“光の色と物の色”で、テレビ(NTSC)で出せる色の範囲を示しました。それとsRGBの規格に合うCRTで出せる色の範囲は同じでしょう

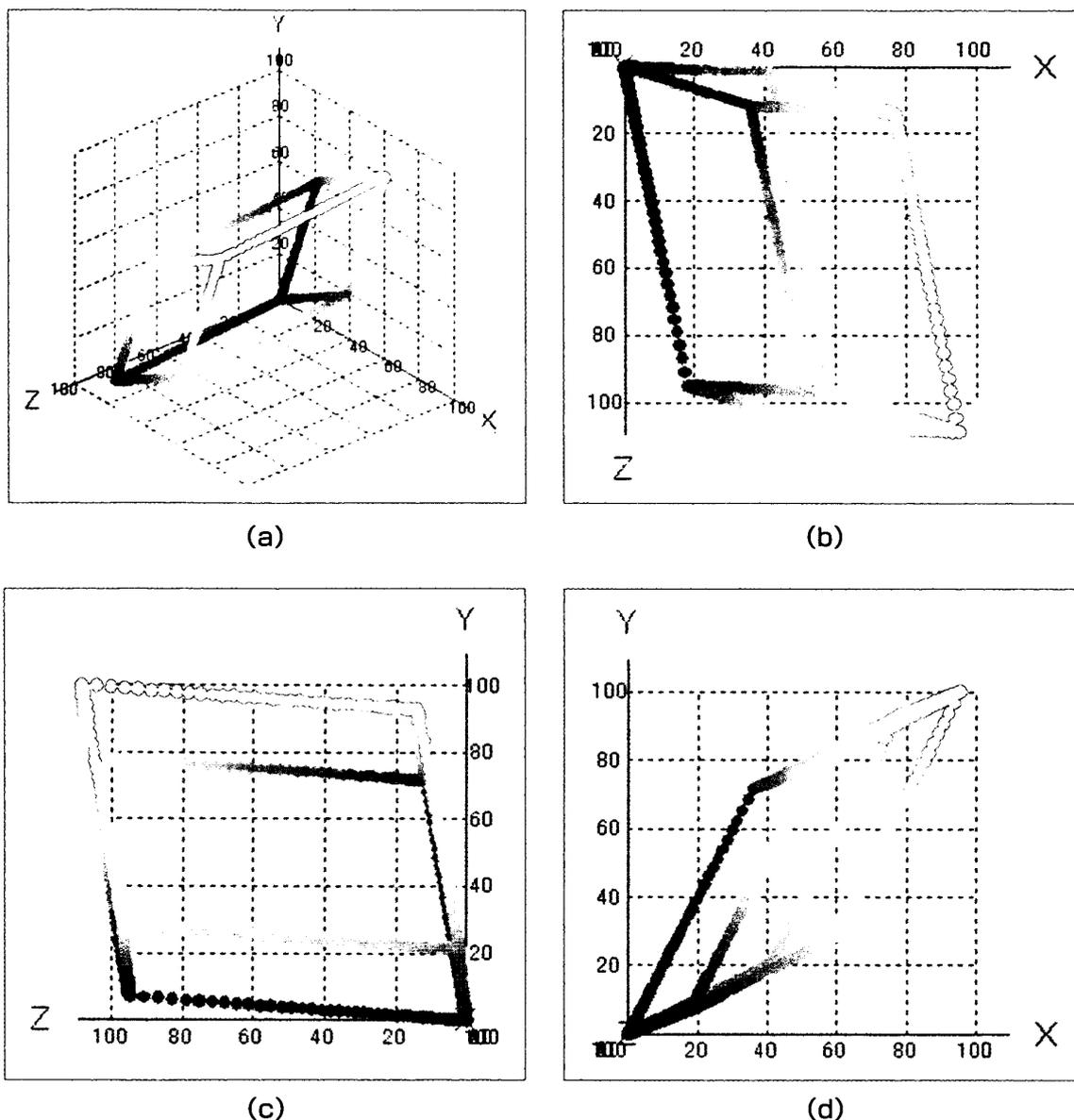


図9  $XYZ$  色空間における sRGB の色域 (立体図と平面図)

か. sRGB の  $RGB$  値と  $XYZ$  値との関係が式 (1), (2), (3) によって示されましたので,  $R, G, B$  をそれぞれ 0 から 255 まで 1 ずつ変え, すべての  $R, G, B$  の組合せについて得られた  $XYZ$  値を  $XYZ$  色空間にプロットしてみます. 結果は図9のようになります. (a)が立体図, (b), (c), (d)はそれぞれ  $ZX$  面,  $YZ$  面,  $XY$  面へ投影したときの平面図です.  $X, Y, Z$  各軸の目盛りは, 物体色と比較することを考慮して,  $D_{65}$  光の  $Y$  値が 100 となるように 100 倍してあります. 再現できる色の範囲——これを色域(color gamut)という——が, 平行 6 面体となっていることがわかります. 原点から  $X, Y, Z$  各軸の方向へ伸びている赤, 緑, 青色の稜線と, 前回解説 p.305 の図 4 に示したテレビの原色光の色ベクトルとを見比べると, ほとんど同じ方向を向いていることがわかります.

より詳しく見るために, sRGB の色域とテレビの色域を  $xy$  色度図にプロットすると, 図 10 のようになります. sRGB の色域はテレビの色域より若干せまいことがわかるでしょう.

こんどは, いろいろな物の色が  $RGB$  色空間ではどのようなところにくるのか見てみることにします. NCS(Natural Color System)というスウェーデンで開発された表色系があります (これについては, 本シリーズ最終回で解説する予定). Scandinavian Colour Institute AB から出版されている NCS の色票集 "atlas 96" には, 1750 種の色票が採録されており, これらの色票の  $D_{65}$  光の照明下で測った  $XYZ$  三刺激値のデータがフロッピーディスクの形で販売されています. このデータのうち, 黄, 赤, 青, 緑, およびその中間色相, 計 8 色相の  $XYZ$  値を, 式

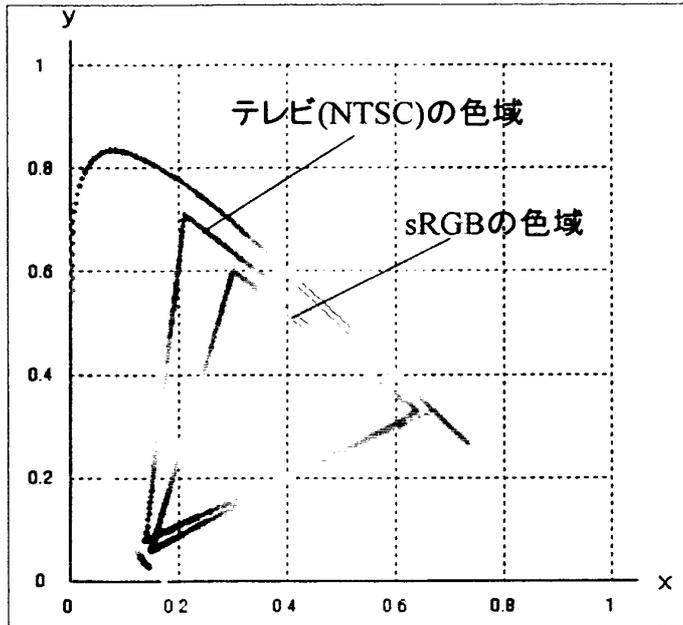
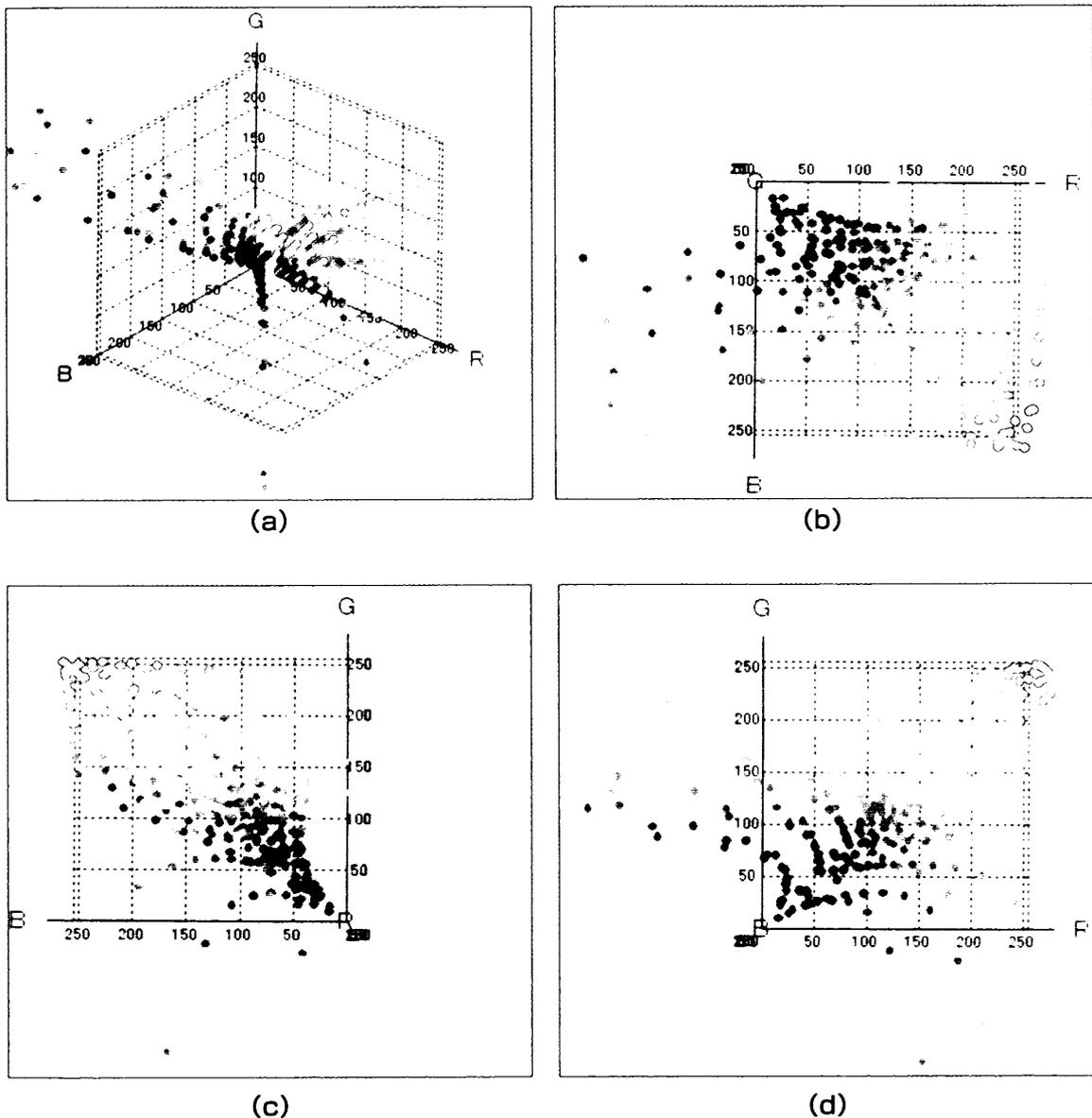


図 10 テレビ(NTSC)の色域と sRGB の色域

(4),(5),(6)により  $RGB$  値に変換すると、値が負になったり 255 を超えたりするものがでてきます。sRGB の規格ではそのような値はそれぞれ 0 や 255 で置き換えることになっているのですが、ここではあえてそのままの値で  $RGB$  色空間にプロットしてみました(図 11)。  $RGB$  色空間における sRGB の色域は、  $RGB$  値がいずれも 0 から 255 の値をとる立方体ですが、それをはみ出す色がたくさんあることがわかります。

以上でわかるように、sRGB はすべての色を表現できる体系ではなく、表色系としての評価は低いかもしれません。しかし、いろいろな入出力機器に対する簡単な色管理を実現した点での評価は高く、それゆえ急速に普及してきたのだと思います。現在、sRGB の色域を修正し、多くの色が表現できる体系に拡大する試みが行なわれていますので、今後の動向に期待し

図 11  $RGB$  色空間における NCS 色票の色分布

たいものです。

### 5. 色再現の難しさ

さて、ここまでCRTの色を中心に話をしてきましたが、デジタルカメラやスキャナ、あるいはプリンタの色はどうでしょうか。

図12は、デジタルカメラで物体の色情報をRGB値として取り込んでいる様子を描いたものです。このとき、人間の目で物体を見たときの色を表わす測色値とRGBとの関係は、もしカメラがsRGB規格のものであったら、3節に述べた関係式をみたくのでしょうか。理想的にはそうであってほしいと思います。しかし、現実にはそううまくはいきません。

市販のデジタルカメラの出力がsRGB規格に準拠しているとしても、カメラに写される実際の情景は

色々な物体で構成されており、その色は前節で示した色域を超えるものがたくさんあり得ます。そして、“そういう色は出せません”と出さないカメラは売れるでしょうか。普通のカメラは出せない色であっても似せた色、あるいは見た目に良い色となるように変換をして出すにちがひありません。色域に入らない色を、色域内に入るように変換することを、色域変換(gamut mapping)と呼びますが、普通のカメラは必ずや色域変換を行なっています。

カメラによる撮影では別の問題も生じます。それは、普通のカメラには被写体の輝度や光源の色温度がわからない、ということです。カメラの露出は手動や自動できまりますが、正確に被写体の輝度を検出しているわけではありません。また、たいいていカメラには“ホワイトバランス”という機能があり、手動や自動

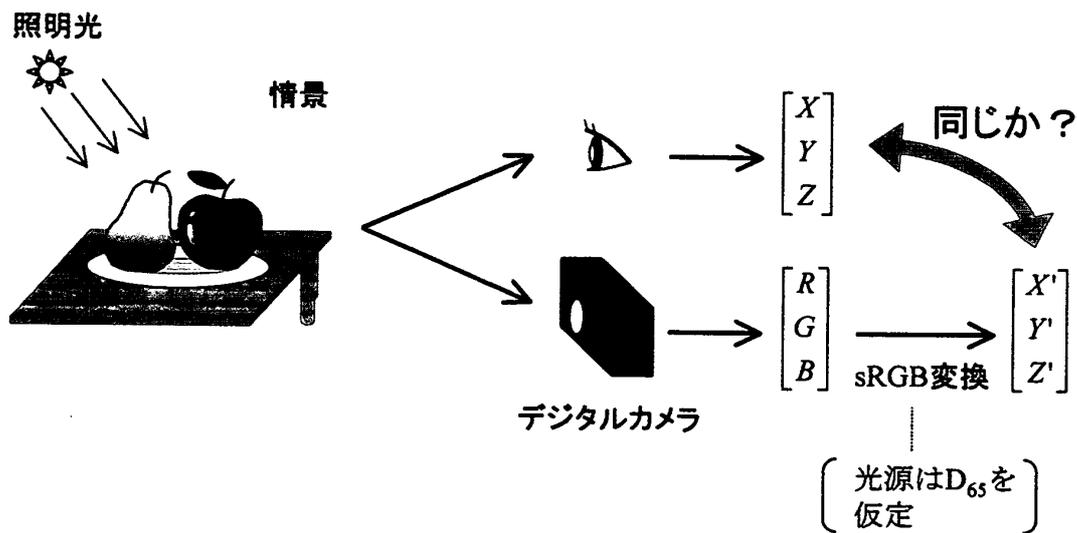


図12 入力における色再現の問題

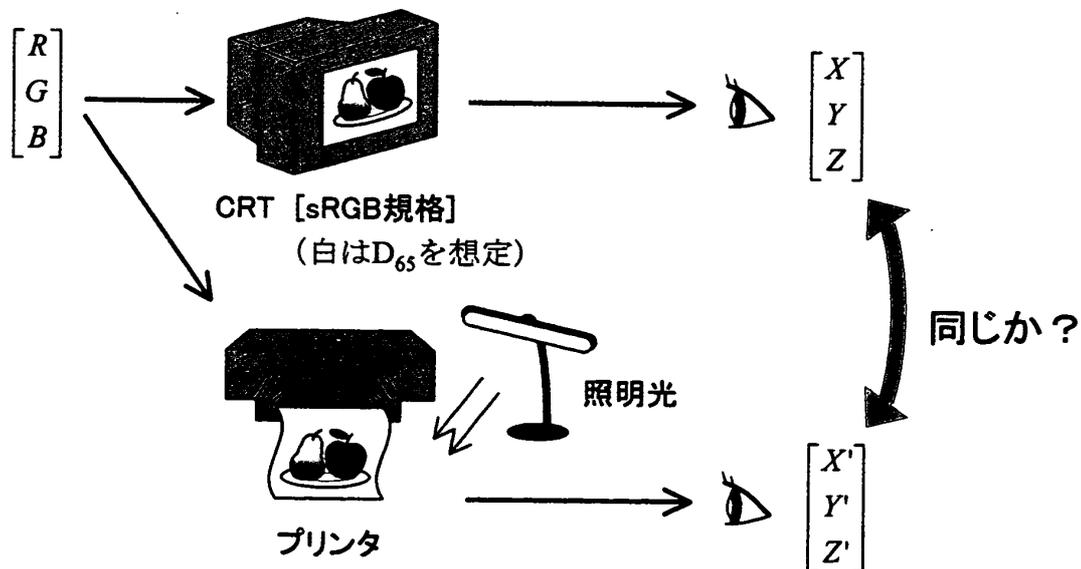


図13 出力における色再現の問題

で光源の色温度を検知することができますが、それとておよそのものであり、正確な光源の分光分布や色温度はわからないのです。したがって、カメラは物体色としての測色値を正確に計算することはできません。じつは、カメラが得た外界の情報からいかに美しい画像を作り出すかは、カメラメーカーの腕のふるいどころであり、出力のRGB値はカメラが作り出した良く見える色のXYZ値と対応しているのだ、と解釈せざるをえないのです。

なお、もう一つの代表的な画像入力装置であるスキャナにも色域や光源の問題がありますが、最近ではsRGB対応の機種も出てきているようです。

つぎに、出力側のプリンタについて考えてみましょう。図13を見て下さい。sRGB規格のCRTで出した色と、sRGB規格のプリンタ（そういうものがあるとして）で出した色は、同じ色でしょうか。

理想的には、印刷結果をD<sub>65</sub>光下で見たときそのようになってほしいのです。しかしじっさいは、プリンタの色域はCRTの色域とは異なるので、色域変換が行なわれます。また普通のオフィスの照明は色温度5000Kぐらいですから、印刷結果をD<sub>65</sub>光下で見るのとは違った色を呈します。さらに印刷用紙は、近頃では反射率の低い（視感反射率70%程度の）

再生紙を使ったり、あるいは紙の黄みを打ち消すために蛍光増白をして青白くした紙を使ったりすることが多く、測色的に正しい色を出すのは、至難のわざです。

このように、普通のデジタルカメラやスキャナあるいはプリンタといった入出力機器では、色域の問題や照明光の問題で、RGB値と測色値の対応が明らかな“測色的な色再現”はなされていないのが実情です。ただし、各機器メーカーともたいへんな努力をして色を良く見せる工夫を重ねており、そのおかげでわれわれは美しい色彩画像を見ているわけですから、入出力機器の性能の向上や色再現に関する理論的分析が進めば、色彩情報の記録や分析に耐える測色的な色再現も可能になるのではないかと思います。

## 6. “同じ色”とはどういうことか

前節で、CRTの色とプリンタの色を同じにすることの難しさにふれました。ところで、“同じ色”ということとは、どういうことなのでしょう。

もちろん、同じ物を見ても人によって感じる色は違うかもしれませんが、ここでは人による違いは除き、標準観測者の目で考えることにします。また、色は単独で現われることはなく、いろいろな色が複雑に配置されて情景が構成されます。そして、隣り合う色によ

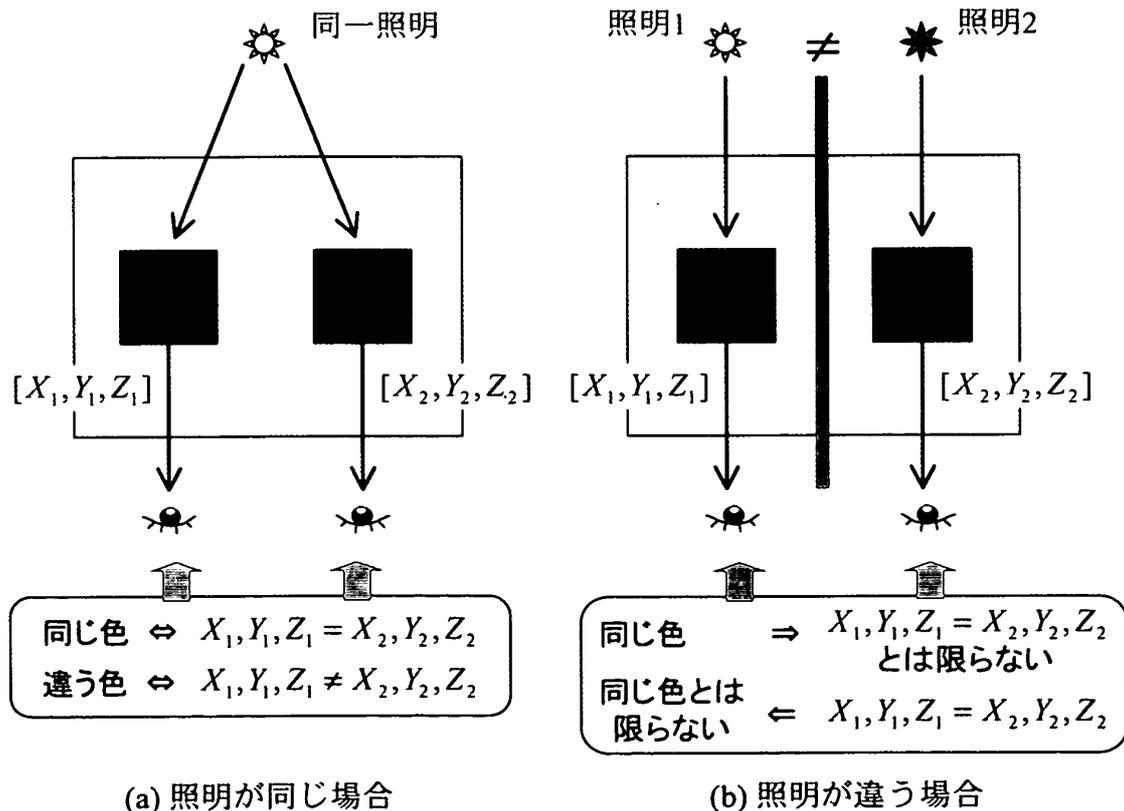


図14 同じ色か否か

って対比や同化が起きたりしますが、このような複雑な視環境もここでは考えないことにします。

そうすると、もっとも簡単な視環境は、同一背景上に二つの物を置いて同一の照明光を当てた場合です。この場合は、双方のXYZ三刺激値が一致していれば同じ色、一致しなければ違う色と考えてよいでしょう。二つのものがぴったりくっついて置かれていれば、等色関数を導いたときと同様の二分視野ですから、上のことは保証されます。少し離して置いたとしても、等色判定は難しくなるかもしれませんが、上のことは成り立つと考えてよいと思います(図14a)。

つぎに、同一背景上に少し離して二つの物を置き、それぞれに違う照明を当てたとします。そして二つの照明光が混ざらないように間についたてを置き、左目で左の物を、右目で右の物を見たとします(図14b)。

たとえば、左側に蛍光灯の白い光を、右側に電灯の黄色っぽい光を当て、たとえば反射率が一定の白い紙を見ると、はじめは左側の紙は白っぽく、右側の紙は黄色っぽく見えますが、次第に目が慣れてくるとどちらも同じ白色に見えてきます。すなわち、“色の見え(color appearance)”が同じになったわけです。このとき、左右の紙の反射率は同じであっても照明光が違いますので、XYZ三刺激値は明らかに異なります。このことから、異なる照明下では、XYZ三刺激値が同じであっても同じ色を呈するとはいえないことも、わかります。

以上をすこし一般的に言うと、色の見えが同じであっても測色値が同じであるとは限らない、測色値が同じであっても色の見えは同じとは限らない、ということになります。

照明光に目が順応し、照明光の多少の違いが色感覚に反映されない状態を、色順応(color adaptation)と呼びます。また、多少照明が変わっても物の色は変わらないという現象は、色恒常(color constancy)と呼ばれています。

## 7. 異なる照明光のもとで同じ色を与えるには

同じ物であっても照明光が違えばXYZ三刺激値は一般に異なることを知りました。逆に、どのようなXYZ三刺激値をもってれば、異なる照明下で同じ色の見えを呈するようになるのでしょうか。

この問に対するもっとも簡単な答えに、フォン・クリース(J. von Kries, 1853-1928)の色順応モデルがあります。フォン・クリースのモデルは、

“目には分光感度の異なる3種のセンサがあり、与えられた照明光に順応するとセンサの感度が調節され、標準の照明光との違いがわからなくなる”

という仮説から導かれます。じっさい、網膜には3種の異なる分光感度をもつ錐体(cone)という視細胞があります。そして、その分光感度——基本分光感度(fundamental spectral sensitivity)という——は等色関数からたとえば次のように計算されます(Estévez-Hunt-Pointerによる[1, p.408])。

$$\begin{aligned}\bar{l}(\lambda) &= 0.3982\bar{x}(\lambda) + 0.7040\bar{y}(\lambda) - 0.0804\bar{z}(\lambda), \\ \bar{m}(\lambda) &= -0.2268\bar{x}(\lambda) + 1.1679\bar{y}(\lambda) + 0.0458\bar{z}(\lambda), \\ \bar{s}(\lambda) &= 0 \cdot \bar{x}(\lambda) + 0 \cdot \bar{y}(\lambda) + 0.8458\bar{z}(\lambda).\end{aligned}\quad (6)$$

基本分光感度 $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ のグラフを図15に示します<sup>5</sup>。この分光感度をセンサの感度だとすると、分光分布 $P(\lambda)$ の光が目に入ったときのセンサの応答 $L, M, S$ は、次のようにして求められます。

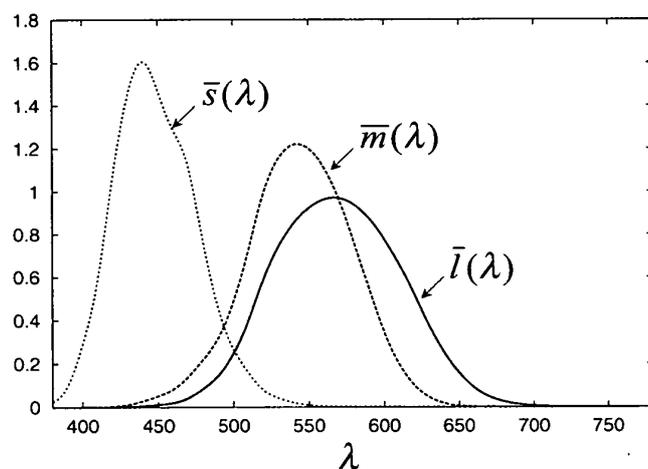


図15 基本分光感度

まず、 $L$ について前回解説p.308の記法 $\langle \dots \rangle$ を用いて計算すると

$$\begin{aligned}L &= \langle \bar{l}, P \rangle \\ &= \langle 0.3982\bar{x} + 0.7040\bar{y} - 0.0804\bar{z}, P \rangle \\ &= 0.3982\langle \bar{x}, P \rangle + 0.7040\langle \bar{y}, P \rangle - 0.0804\langle \bar{z}, P \rangle \\ &= 0.3982X + 0.7040Y - 0.0804Z\end{aligned}$$

<sup>5</sup> 分光感度のピークの位置が長波長、中波長、短波長にあることから $l$ (long),  $m$ (middle),  $s$ (short)の字をあてることが多い。書物によっては $r, g, b$ をあてることもあるが、他の $R, G, B$ と混合しないように注意しなければならない。

と書けることがわかります。ここに、 $X = \langle \bar{x}, P \rangle$ ,  $Y = \langle \bar{y}, P \rangle$ ,  $Z = \langle \bar{z}, P \rangle$ とおきました。(X, Y, Z)は光Pの与える三刺激値です。

M, Sについても同様にして計算できますので、

$$\begin{aligned} L &= 0.3982X + 0.7040Y - 0.0804Z, \\ M &= -0.2268X + 1.1679Y + 0.0458Z, \\ S &= 0 \cdot X + 0 \cdot Y + 0.8458Z \end{aligned} \quad (7)$$

という(X, Y, Z)から(L, M, S)を求める一次変換が得られます。(L, M, S)は基本三刺激値と呼ばれます。

さて、標準の照明光と異なる照明光が与えられると、センサの感度が $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$ からそれぞれ $k_L \bar{l}(\lambda)$ ,  $k_M \bar{m}(\lambda)$ ,  $k_S \bar{s}(\lambda)$ に変わり、この照明光に対する基本三刺激値が標準の照明光の基本三刺激値に一致するように、調節が行なわれるものとします。適当な倍率を表わす $k_L, k_M, k_S (>0)$ は、フォン・クリースの係数と呼ばれています。

標準の照明光の基本三刺激値を $(L_0, M_0, S_0)$ 、与えられた照明光の基本三刺激値を $(L'_0, M'_0, S'_0)$ とすると、上の調節の結果は

$$L_0 = k_L L'_0, \quad M_0 = k_M M'_0, \quad S_0 = k_S S'_0 \quad (8)$$

のようになります。<sup>6</sup>

与えられた照明光下で基本三刺激値が $(L', M', S')$ となる物体の、標準の照明光下の基本三刺激値 $(L, M, S)$ は、センサが調節されたうえでの値になるわけですから、やはり式(8)と同様に

$$L = k_L L', \quad M = k_M M', \quad S = k_S S' \quad (9)$$

で与えられることとなります。ここで、式(8)と式(9)からフォン・クリースの係数を消去すると

$$\frac{L}{L_0} = \frac{L'}{L'_0}, \quad \frac{M}{M_0} = \frac{M'}{M'_0}, \quad \frac{S}{S_0} = \frac{S'}{S'_0} \quad (10)$$

が得られますが、この式は“照明光の基本三刺激値と物体からの反射光の基本三刺激値との比( $L/L_0$ など)が同じであれば、色の見えも同じである”ことを示す関係式として、たいへん有名です。

さて、与えられた照明光下で三刺激値が $(X', Y', Z')$ である色の標準照明光下での三刺激値 $(X, Y, Z)$ は、次のようにして求められます。

まず、標準の照明光および与えられた照明光のXYZ三刺激値から、式(7)によりそれぞれの基本三刺激値が計算できるので、式(8)から、フォン・クリースの係数

$$k_L = L_0/L'_0, \quad k_M = M_0/M'_0, \quad k_S = S_0/S'_0 \quad (11)$$

が得られます。

つぎに、 $(X', Y', Z')$ を式(7)の右辺に代入し対応する基本三刺激値 $(L', M', S')$ を求めます。そこで式(9)から $(L, M, S)$ を求め式(7)の左辺に代入しますと、式(7)はX, Y, Zの連立一次方程式になります。これを解くと $(X, Y, Z)$ が求まるわけです。

ややこしいので、問題および計算の手順をまとめておきます。なお、この計算法はフォン・クリース変換と呼ばれています。

#### ＜フォン・クリース変換＞

##### 問題：

与えられた照明光および標準の照明光の三刺激値がそれぞれ $(X'_0, Y'_0, Z'_0)$ および $(X_0, Y_0, Z_0)$ であるとき、与えられた照明光下での三刺激値が $(X', Y', Z')$ である色と同じ色を表わす標準の照明光下の三刺激値 $(X, Y, Z)$ を求める。

##### 計算の手順：

- i) まず、式(7)を用いて $(X'_0, Y'_0, Z'_0)$ から $(L'_0, M'_0, S'_0)$ を求める。  
同様に、式(7)を用いて $(X_0, Y_0, Z_0)$ から $(L_0, M_0, S_0)$ を求める。
- ii) つぎに、式(11)により $(k_L, k_M, k_S)$ を求める。
- iii) ふたたび式(7)を用いて $(X', Y', Z')$ から $(L', M', S')$ を求める。
- iv) 式(9)を用いて $(k_L, k_M, k_S)$ および $(L', M', S')$ から $(L, M, S)$ を求める。
- v) 式(7)をX, Y, Zについての連立一次方程式とみて解き、 $(X, Y, Z)$ を求める。

これまでは理論的な話をしてきましたので、ここで具体的なデータに対しフォン・クリース変換を行なってみましょう。

前回解説p.309の表3には、赤、黄、緑、青、紫の5色の有彩色紙と白、灰、黒の3色の無彩色紙の、C光照明下の三刺激値が載っていました。これらの色のD<sub>65</sub>光照

<sup>6</sup>  $L = \langle \bar{l}, P \rangle$ の式から、 $\bar{l}(\lambda)$ が $k_L \bar{l}(\lambda)$ に変わればLは $k_L L$ になることがわかる。M, Sについても同様。(L, M, S)を照明光の基本三刺激値 $(L_0, M_0, S_0)$ とすれば、式(8)が成立。

明下の三刺激値を計算してみます。(D<sub>65</sub>光を標準の照明光と考えます。)

表1 照明光の色

照明光	X	Y	Z	x	y
A	109.85	100.00	35.58	0.4476	0.4074
C	98.07	100.00	118.23	0.3101	0.3162
D <sub>65</sub>	95.04	100.00	108.89	0.3127	0.3290
D <sub>50</sub>	96.42	100.00	82.49	0.3457	0.3585

表1に、完全拡散反射面に異なる4つの照明光を当てたときのXYZ三刺激値とxy色度座標を示してあります。表1の最下行の照明光D<sub>50</sub>とは、写真や印刷物を見るとき標準として用いられる光です。

表1からC光およびD<sub>65</sub>光の三刺激値を読みとり、フォン・クリースの係数を計算すると

$$k_L = 99.49/99.95 = 0.9954,$$

$$k_M = 100.2/99.96 = 1.003,$$

$$k_S = 92.10/100.0 = 0.9210$$

が得られます。つぎに、各色紙の基本三刺激値を計算し、さいごにD<sub>65</sub>下のXYZ三刺激値を計算します。この計算は手計算でやるとたいへんですので、コンピュータで計算した結果を表2に示します。C光下で三刺激値が(X', Y', Z')となる色と、D<sub>65</sub>光下で三刺激値が(X, Y, Z)となる色の見えが一致するわけです。

図16に、各色のxy色度座標を示します。○印がC光下、×印がD<sub>65</sub>光下のものです。D<sub>65</sub>光下の点がC光下の点より若干上方向にずれていますね。すなわち、測色的にはxy色度座標の上でこのくらいの違いがあってはじめて、C光とD<sub>65</sub>光の照明光の違い

がキャンセルされ、色の見えが同じになるのです。

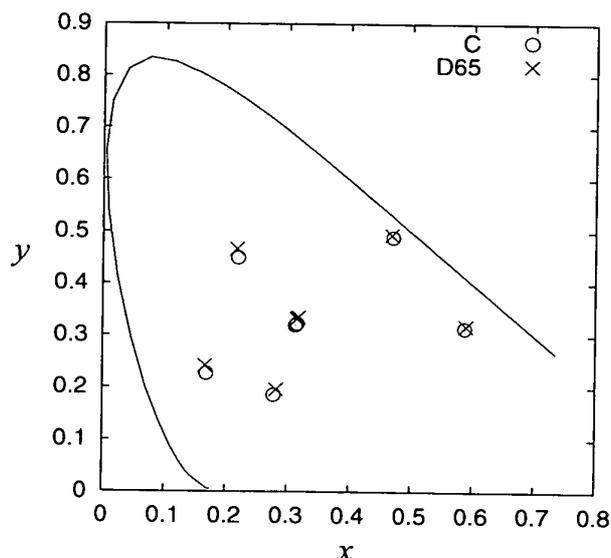


図16 色紙のxy色度座標

フォン・クリース変換を応用して、CRTの色(D<sub>65</sub>白色)とプリンタの色(D<sub>50</sub>白色)の色の見えを合わせることができます。どのような三刺激値の色をプリンタに出せばCRTの色と同じに見えるでしょうか。読者の宿題としておきます。

フォン・クリースのモデルは、照明光の違いがそれほど大きくないときは、実際とかなりよく合うとされています。しかし、明るいところで印刷物を見る場合や、暗いところでテレビを見る場合など、視環境の違いには単なる照明光の色の違いだけでなく照度の違いも含まれるなど、複雑な要件がからんできます。そのようないろいろな視環境の違いに対応できる色順応モデルや色の見えモデルが開発されています。1997年に京都で開かれたAIC (Association Internationale de la Couleur, 国際色彩学会)

表2 同じ色の見えを与えるC光下の三刺激値とD<sub>65</sub>光下の三刺激値

色紙	C光						D <sub>65</sub> 光					
	X'	Y'	Z'	L'	M'	S'	X	Y	Z	L	M	S
赤	23.0	12.3	3.9	17.5	9.3	3.3	22.8	12.3	3.6	17.4	9.4	3.0
黄	58.0	60.4	5.1	65.2	57.6	4.3	57.2	60.3	4.7	64.9	57.7	4.0
緑	7.3	15.0	11.0	12.5	16.3	9.3	7.0	15.0	10.2	12.5	16.4	8.6
青	8.9	12.1	32.2	9.5	13.5	27.3	8.3	12.1	29.7	9.4	13.6	25.1
紫	15.5	10.4	30.1	11.1	10.0	25.4	14.9	10.4	27.7	11.0	10.0	23.4
白	83.2	84.9	95.7	85.2	84.7	80.9	80.7	84.9	88.1	84.9	84.9	74.5
灰	18.8	19.2	22.2	19.2	19.2	18.8	18.2	19.2	20.4	19.1	19.2	17.3
黒	1.3	1.3	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2

の折に策定されたCIECAM97s[2]はその一つです。sRGB規格も、視環境の違いはCIECAM97sによって吸収することを推奨しています。

\* \* \*

今回は、色彩学の教科書にはあまり載っていないことを書きましたが、書き足りないことがたくさんあります。さらに詳しく知りたい方は、色再現の基礎については文献[3]か、色管理の動向については文献[4]が参考になるかと思えます。

#### 参考文献

- [1] 日本色彩学会 編：新編 色彩科学ハンドブック [第2版]，東京大学出版会，1998.
- [2] M. R. Luo, R.W.G. Hunt : The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM97s), Color Res. Appl., vol.23, no.3, pp.138-146(1998).
- [3] 大田 登：色再現工学の基礎，コロナ社，1997.
- [4] 加藤直哉：様々な標準色空間の位置付けとその産業界へのインパクト，カラーフォーラムJAPAN 2000論文集，pp.25-34，2000.