

ソフトコピーの色再現

住友化学工業(株) 精密化学品研究所
中塚 木代春

Color Reproduction in Soft Copy

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Fine Chemicals Research Laboratory
Kiyoharu NAKATSUKA

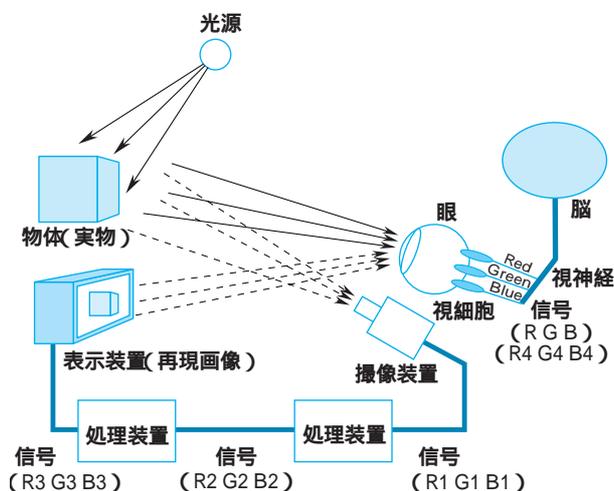
Permanent images on photographs and printings are called hard copy, on the other hand temporary images on displays are called soft copy. According to the recent wide use of computer networks, manipulation of images in multi media becomes widespread. Then new subjects on color reproduction are raised, and are being extensively studied. In this article, the color reproduction concerned with solid state imaging device and soft copy is described at the colorimetric point of view.

はじめに

ソフトコピーとは耳慣れない言葉かもしれないが、写真や印刷などのハードコピーに対する用語であり、ディスプレイ上で固定されない一時的な画像のことである。また、画素ごとに被写体と色合わせして画像を形成することを色再現(color reproduction)と呼んでいる。インターネットなどコンピュータ・ネットワークの普及により、マルチメディアでの画像の取り扱いが一般化し、色再現に関しても従来の入力と出力とが一体となったシステムとは異なり、新たな問題

が出ている。以下にソフトコピーの色再現に関して、測色的な側面から説明する。なお、本稿は日本色彩学会誌に同じタイトルで発表したものを、当社状況に合わせて全面的に書き換えたものである。当社には液晶ディスプレイ(LCD)用の光学フィルム、顔料分散レジスト及びカラーフィルタ、EL(electro luminescence) 撮像素子用カラーレジストなどがあり、ソフトコピーには関連が深い。当社の事業と関連があり且つ文献などでは見られない事項をなるべく多く取り入れるようにした。ただし理解を容易にするため、一部厳密さに欠ける記述があることをご了承願いたい。

第1図 実物と再現画像と眼から脳への信号



色感覚、色の知覚

第1図に示すように、光源(照明光) 物体(反射または透過光) 眼の網膜上の視細胞(神経伝達信号) 視神経(神経伝達信号) 脳、の経路をたどって色が知覚される。色を弁別できる視細胞には、赤、緑、青に感度を持つ3種類のものがある。神経伝達信号が網膜から脳に伝わる間に変換されて4種類の信号になることが知られているが、網膜の段階では3原色(three primaries)である。これが色の3原色説(trichromatic theory)の生理的な裏付けである。CRTディスプレイなどほとんどの表示装置は発光体であり、第1図で光源と物体とが一体になったものと考えることができる。

色の測定、表示

今、3種の色の光がありそれぞれ[R][G][B]で表すことにする。この光をそれぞれR1、G1、B1の強さ(量)で混合(白色スクリーンの上で重ねあわせるか、または直接網膜上で重ねあわせる)してできた光の色を[C1]で表すことにする。そして、上記の光の混合の操作を、

$$[C1] = R1[R] + G1[G] + B1[B] \quad (1)$$

と書くことにする。光の強さを変えて、それぞれR2、G2、B2としたときは、

$$[C2] = R2[R] + G2[G] + B2[B] \quad (2)$$

と表される。また、[R]と[G]とをR1、G1の量で混合した光の色を[C1]、[R]と[B]をB1の強さで混合した色と同じであったとすると、

$$[C1] + B1[B] = R1[R] + G1[G] \quad (3)$$

と表される。これを变形して、

$$[C1] = R1[R] + G1[G] - B1[B] \quad (4)$$

と表記することにする。このようにして光の混合(加法混色 = additive color mixing)を表記する式を、等色式(color equation)という。この等色式で線型変換(一次変換)が許される(物理的意味を失わない)というのがGrassmanの法則であり、3原色説を数学的に定式化したものである。Grassmanの法則によれば、

$$a[C1] = a(R1[R] + G1[G] + B1[B]) = aR1[R] + aG1[G] + aB1[B] \quad (5)$$

$$[M] = [C1] + [C2] = (R1 + R2)[R] + (G1 + G2)[G] + (B1 + B2)[B] \quad (6)$$

などの等色式が成立する。等色式を用いると、全ての色が、[R][G][B]を単位ベクトルとする3次元ベクトル空間の1点として表せることになる。この

ベクトル空間を色空間(color space)という。ここで、[R][G][B]の各混合量R、G、Bを三刺激値(tristimulus values)という。単位ベクトル[R][G][B]つまり3原色を規定すれば、全ての色が3刺激値で表示できることになる。座標変換により、ある3原色での三刺激値を別の3原色の三刺激値に変換することも可能である。また、実在しない3原色に対応する三刺激値も、座標変換により求めることが可能である。この座標変換は線形変換だから一般に、

$$\begin{bmatrix} R2 \\ G2 \\ B2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 \\ a2 & b2 & c2 \\ a3 & b3 & c3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R1 \\ G1 \\ B1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

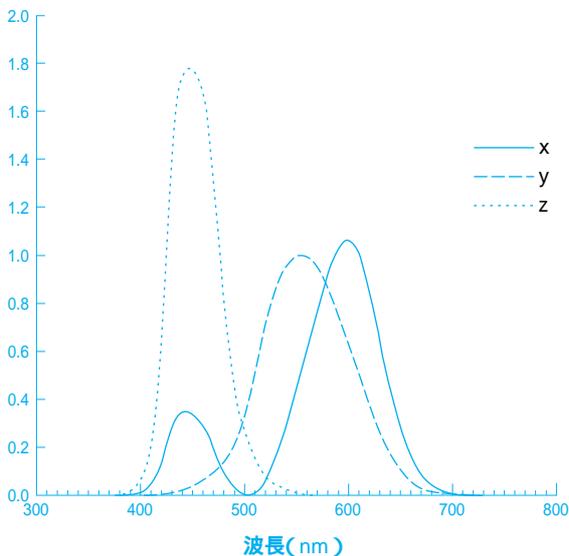
により表される。R1、G1、B1が元の三刺激値、R2、G2、B2が変換後の三刺激値である。

国際照明委員会(CIE = Commission International de l'Eclairage)では、心理物理的方法(psychophysical method)による測定データを基に種々の制限を加えた上で基準の3原色を決め、可視光の波長域における単色光(monochromatic light)の三刺激値を決めた。この単色光の三刺激値と波長との関係を等色関数(color matching functions)という。CIEの基準の3原色を[X][Y][Z]三刺激値をX、Y、Z、等色関数をx(λ)、y(λ)、z(λ)と表記することになっている。全ての光は単色光の集まりであるから、光の分光組成を測定すれば、等色関数によりこの光の三刺激値を計算することができる。CIEの等色関数を第2図に示す。ところで、この[X][Y][Z]は実在しない色(虚の色 = imaginary color)が選んである。[X][Z]は明るさゼロの色にしてある。すると全ての色の明るさは三刺激値のYのみによって表示できることになる。次に色度(chromaticity) x、y、zを

$$\begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \\ z &= Z / (X + Y + Z) \end{aligned} \quad (8)$$

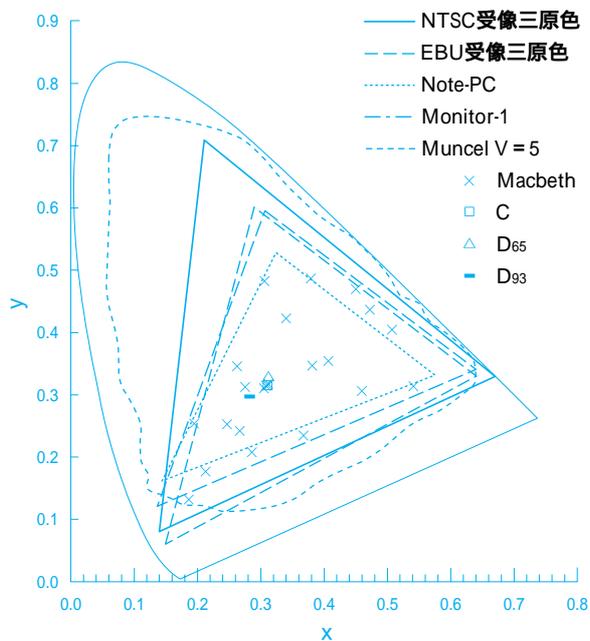
と定義すると、z = 1 - x - yが成立するから、x、y、Yによって色を表示することもできる。こうするとx、yによって、明るさ(brightness)は別にして(三刺激値の大きさを無視して)、色を2次元で表示できるようになる。x-y平面をCIE x-y色度図(chromaticity diagram)という。第3図aにCIE x-y色度図を示す。この図で、馬蹄形の線は単色光の軌跡であり、spectrum locusという。この軌跡で右端が可視光の長波長端で赤色、最上部の爪先に当たる部分が可視光の波長の中心付近の緑色、左下が短波長端の青色に対応している。青と赤とを結ぶ直線部分は単色光にはなく、青色光と赤色光とを混合してできる色である。実在の色は全てこの馬蹄形の中に入る。白色、灰色、黒色(これらは明るさが異なるだけ)などの無彩色

第2図 CIE 1931 Color Matching Functions

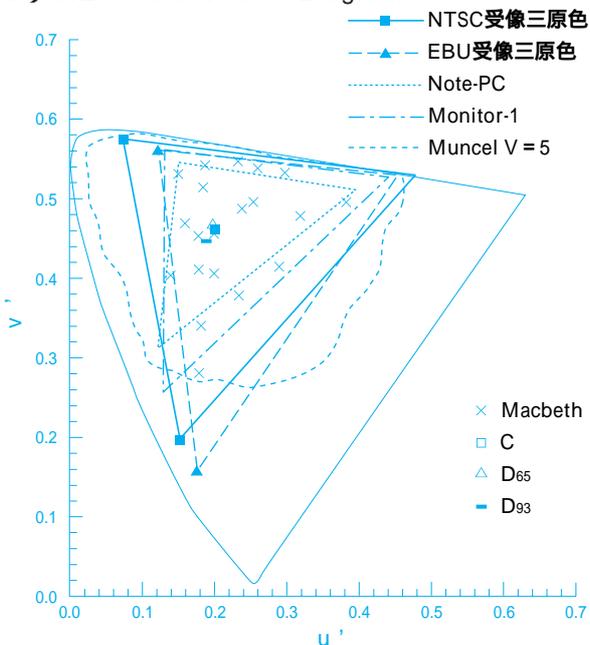


第3図

a) CIE 1931 Chromaticity Diagram



b) CIE 1976 u'v' UCS Diagram

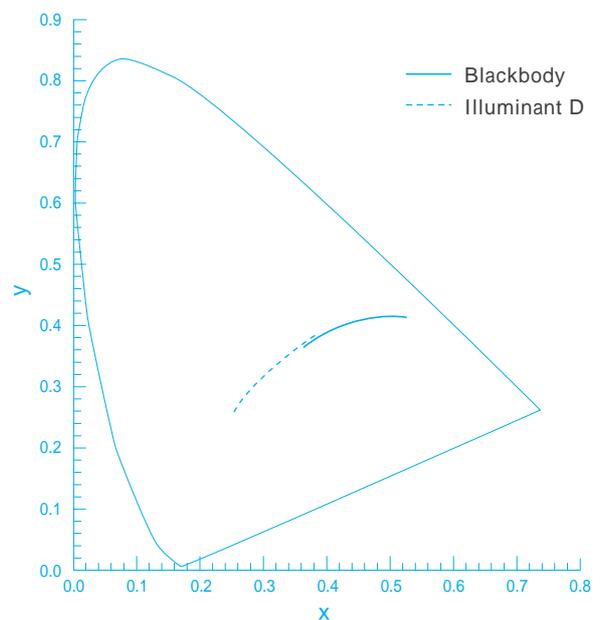


(neutral color)は、馬蹄形の中央付近のC及びD65で示されるあたりにある。

非発光の物体はこれを照明する光源によって色が変化する。したがって、物体の色(物体色 = object color)を規定するには照明する光源の規定が必要である。CIEでは測色用の標準の光(Illuminant)を決めている。自然日光として、標準の光C(タングステンランプに色フィルタをかけて実現する)と標準の光D65(日光の実測値を基にスペクトルを決定、現実の人工光源はなく、計算にのみ利用できる)がある。タングステンランプの印加電圧をゼロから徐々に上げ

て行くと、発光色は赤、黄、白と順次青白くなって行く。この発光色の变化は、タングステンフィラメントの温度上昇によるものである。温度と放射光のスペクトルとの関係は、プランクの法則(Planck's law of radiation)により計算できる。プランクの法則は光を全く反射しない黒体(blackbody)について成立し、この放射を黒体放射(blackbody radiation)という。黒体放射の色は第4図に示す軌跡を描く。黒体放射は種々のランプまたは白色(完全白色面からの反射光は照明光と同じ)の基準とされる。黒体放射の色はその時の黒体の温度で表すことができ、この温度を絶対温度で表したものを色温度(color temperature)という。種々の光源は一般に黒体ではないから、その発光色は黒体放射の色とは少し異なる。しかし、便宜的に最も近い色の黒体の温度で光源の色を表示することがある。これを相関色温度(correlated color temperature)という。自然光も朝夕、正午頃、晴天、曇天と条件により異なる。CIEでは実測値に基づき、種々の相関色温度の自然光のスペクトルを定めた。CIE Illuminant Dという。上記D65は、相関色温度6,500 KのIlluminant Dであり、日光の代表である。第4図にはCIE Illuminant Dの軌跡も示した。

第4図 黒体放射及び標準の光Dの軌跡



<カラーテレビジョン>

現在のカラーテレビジョンは白黒テレビとの互換性を考慮して開発された。すなわち、カラーテレビの放送を従来の白黒テレビでも見られるようにする必要があった。この時、上記CIEのx、y、Yによる色の表示方法が大いに役立った。映像信号をx、y、Yにして放送し、白黒テレビではY信号のみを表示するよう

にするわけである。カラーテレビでは、Y信号による白黒画像の上にx、y信号によって彩色することになる。これは塗り絵のような感じである。実際にはx、y信号を多少変換するとともに情報量を減らして(圧縮して)送信している。

ディスプレイの三原色

ディスプレイの三原色がバラバラでは色再現が困難になるから、カラーテレビジョン・システムではCRTの三原色を規定している。CRTの三原色は、日本や米国ではNTSC(National Television Standards Committee)で決めたものである。欧州ではEBU(European Broadcasting Union)の規格がある。その他にコンピュータのディスプレイも含め、SMPTE-C、SMPTE-204M、ITU.BT-601(旧CCIR)、ITU.BT-709、Kodak Photo YCC(これもディスプレイの規格)、HP-MS sRGBなど多数の規格がある。第3図aにNTSC及びEBUの三原色を比較して示す。LCDについても、カラーテレビジョン用途であればNTSCやEBUの規格に合わせるべきであるが、図に示すように大きくずれている。

x-y色度図上でディスプレイの三原色で作る三角形の内部の色のみがこのディスプレイで表示できる色の範囲である。この表示可能範囲をディスプレイの色再現範囲または色再現域(color gamut)という。第3図aを見るとCRTの色再現域はかなり狭く、再現できない色が多数あることがわかる。特にEBU規格のディスプレイの色再現域が狭く、NTSCの約70%である。紙に絵の具を塗って作ったマンセル色票(Munsell Book of Color)の明度(Value)5のものをプロットすると、第3図aに示すようにかなりの部分が色再現域からはみ出してしまふ。しかしながら、自然の物体の色は一般にもっと狭い範囲に分布していて、実用上差し支えないとされている。第3図aにMacbethとして示したものは、色再現の評価用に広く用いられるGretagMacbeth Color Checker Chartのプロットである。このチャートは自然の物体の色をまんべんなく集め、分光反射率までかなり正確に再現したものとの評価を得ている。このチャートが何とか全部収まる程度であるから、実用上差し支えないと考えることができそうである。LCDの色再現域は更に狭く、特にノートパソコン用のLCDではGretagMacbeth Color Checker Chartもはみ出す部分が多い。LCDの色再現域が狭いのは、LCDセルの構造上の問題、偏光板やカラーフィルタの透過率、バックライト用蛍光体など種々の原因が重なっているためである。さらに、ノートパソコンでは電池の節約の必要上、カラーフィルタの色を淡くして明るさを稼

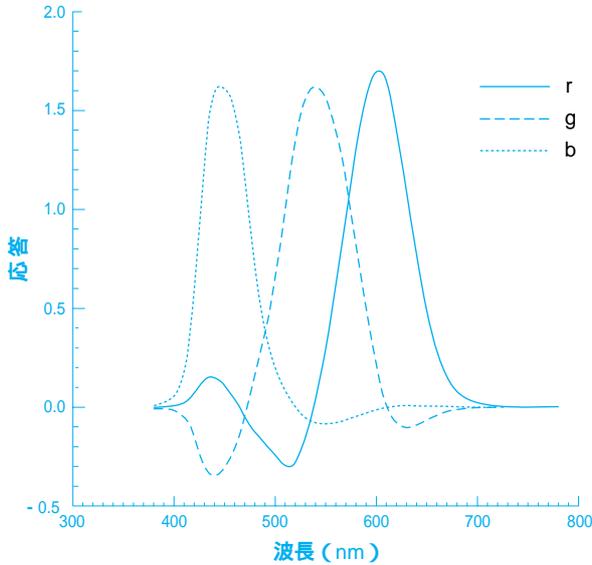
ぐため、色再現域が大きく犠牲になっている。

ここで、第3図bについて説明する。CIE x-y色度図は、2つの色光を混合した色の色度が元の光の色度点を結ぶ直線上に並び、色再現域も三角形で表せるなど利点が多いが、視覚的な等歩度性がない。色度図上で等距離にある二つの色を見たとき、色度図の場所により同程度の色の差には見えないのである。つまり、色度図の場所により縮尺が異なっているといえることができる。等歩度性を向上するため、CIE XYZ空間の座標変換が提案されている。等歩度性を向上した色空間は、均等色空間(UCS = uniform color space)と呼ばれる。これらは一般には非線型の変換でありGrassmanの法則が成立しないが、CIE 1976 u-v色度図はx-y色度図と同様に2つの色光を混合した色が直線上に並ぶ。したがって、色再現域も三角形で表せる。第3図bは第3図aをCIE 1976 u-v色度図に直したものである。これで見るとCRTの色再現域は赤-黄-青の部分が狭いといえる。またNTSCに対してEBUの色再現域の広さは約90%であり、実質的に同等である。EBUの色再現域はNTSCに対して、緑の部分を多少削って青の部分を広げている。本来、色再現域はCIE 1976 u-v色度図などのUCS上で検討すべきであるが、特にLCDの分野ではx-y色度図を用いるのが一般化している。

撮像装置の等色感度

先にCIEの3原色 $[X]$ $[Y]$ $[Z]$ に対応して等色関数 $x(\lambda)$ $y(\lambda)$ $z(\lambda)$ が決められたと説明した。光源を出て物体で反射または透過して眼に入射する光の分光分布を測定すれば、等色関数 $x(\lambda)$ $y(\lambda)$ $z(\lambda)$ を用いてこの光の三刺激値 X 、 Y 、 Z を求めることができる。この三刺激値は眼に入射する光と同じ色を作るために必要な3原色 $[X]$ $[Y]$ $[Z]$ の混合量であった。ディスプレイ上でこの同じ色を表示するには、 X 、 Y 、 Z をディスプレイの3原色 $[R]$ $[G]$ $[B]$ に対応する三刺激値 R 、 G 、 B に変換する必要がある。または、CIEの等色関数 $x(\lambda)$ $y(\lambda)$ $z(\lambda)$ $[R]$ $[G]$ $[B]$ に対応する等色関数 $r(\lambda)$ $g(\lambda)$ $b(\lambda)$ に変換して、撮像装置の分光感度(spectral sensitivity)をこれに合わせる必要がある。この分光感度を等色感度(color matching sensitivity)という。この変換は式(7)によってなされる。第5図に、NTSCの3原色に対応する撮像装置の等色感度を示す。この等色感度には負の部分がある。これは色再現域に入らない色が存在するためである。たとえば $[C]$ を波長620nmの単色光とすると G の値が負であるから、等色式では $[C] = R[R] - |G[G] + B[B]$ つまり $[C] + |G[G] = R[R] + B[B]$ という意味である。

第5図 NTSC 受像三原色対応の等色感度

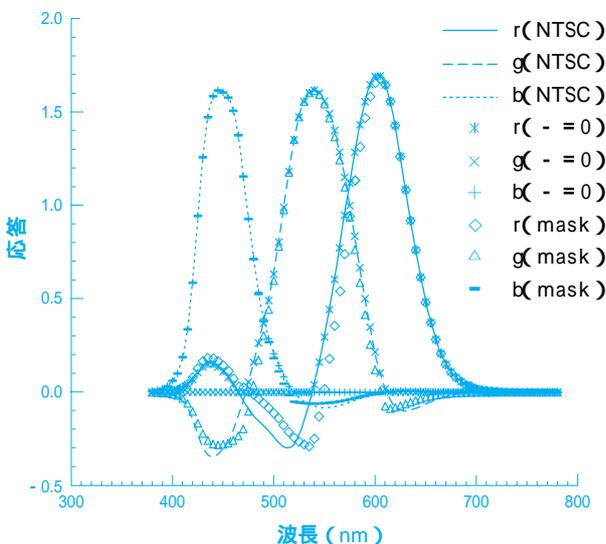


撮像系で負の感度を実現することは可能だが、ディスプレイ上では負の値は表示できない。そこでこの負の部分の取り扱い方が問題となり、(1)負の部分がゼロになるよう修正する、(2)等色感度はそのままにして出力信号(表示装置の駆動信号)の負の値をゼロに置き換えるなどの方法が取られる。等色感度の負の部分は、負の部分がゼロになるよう修正した分光感度 $r(\lambda)$ $g(\lambda)$ $b(\lambda)$ の撮像装置の出力信号を用いて、

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= r(\lambda) - m_1 g(\lambda) - n_1 b(\lambda) \\ g(\lambda) &= g(\lambda) - m_2 r(\lambda) - n_2 b(\lambda) \quad (9) \\ b(\lambda) &= b(\lambda) - m_3 r(\lambda) - n_3 g(\lambda) \end{aligned}$$

で近似的に作り出せる。完全には一致しないので、負の部分の面積が等しくなるように調節するのが一般的である。第6図に例を示す。この方法は、写真や印刷の分野では古くから、red、green、blue の各色

第6図 NTSC 受像三原色対応の等色感度の実現

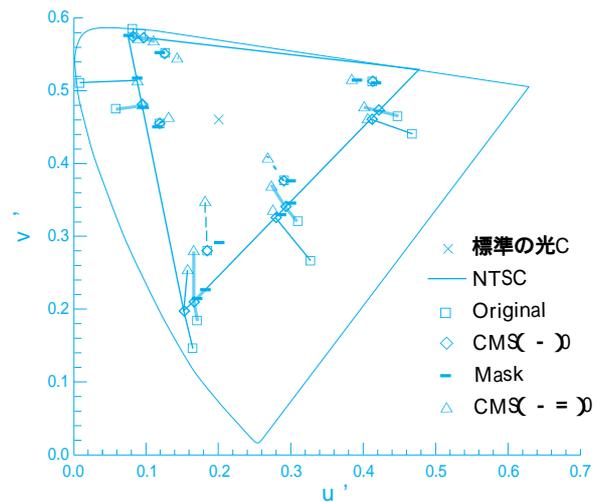


分解ネガを適当な濃度で作成して重ねることにより行われていた。マスキングと呼ばれている。現在では(9)式による電気的信号処理の方が一般的である。図から、マスキングを行うと分光感度の正の部分も変化してしまうことがわかる。

それでは色再現域の外側の色はどうなるのであろうか。これは第7図に示すように、撮像装置の分光感度によって異なる。図で、は元の色、は等色感度をそのままにして出力信号の負の値のみをゼロに置き換えた時の表示色(上記(2)の方法)であり、色再現域の外側の色は全て色再現域を表す三角形の辺上に集まる。色再現域内の色は正しく表示される。-はマスキングで作出した信号で負の値のみをゼロに置き換えた時の表示色であり、上記とは少しずれるが色再現域外の色は三角形の辺上に集まる。また、色再現域内の色は少しずれるがほぼ正しく表示される。

は等色感度の負の部分でゼロに置き換えたときの表示色(上記(1)の方法)であり、表示色は全体に無彩色寄りにならずに色再現域の外側の色は三角形の辺上に集まる。また、色再現域内の色は少しずれるがほぼ正しく表示される。は等色感度の負の部分でゼロに置き換えたときの表示色(上記(1)の方法)であり、表示色は全体に無彩色寄りにずれてくすんだ色になり、どの色も正確な色再現はできなくなる。このように撮像装置の分光感度は色再現に大きく影響するので、この調整方法について種々検討されており、上記以外にもいろいろな方法がある。

第7図 CIE u'v' UCS Diagram 撮像素子の分光感度と再現色



デバイス・インディペンデント・カラー

撮像装置の最適分光感度は等色感度であるが、これはディスプレイの3原色に応じて変える必要がある。特にLCDの3原色はCRTのものとは大きく違っており、またメーカーや品種によっても異なるから、各々のディスプレイの3原色に応じて撮像装置の分光感度を調整していたのでは、マルチメディア上での色彩画像

の取り扱いが困難になる。幸いにもGrassmanの法則により、ある特定の3原色に対応する三刺激値を他の3原色に対応する値に変換することが可能であるから、撮像装置の分光感度(すなわち想定しているディスプレイの3原色)さえ明確であれば、個々のディスプレイの三刺激値(すなわち表示用の色信号)が求められる。CIEのX、Y、Zなどは明確に規定された三刺激値であるから、マルチメディア上で共通に利用できる。このように個々のディスプレイ(デバイス)に依存しない色情報をデバイス・インディペンデント・カラー(device independent color)と呼んでいる。また上記の三刺激値の変換など、マルチメディア上で色情報の処理をカラーマネージメント(color management)と呼ぶ。ところが上記等色感度の項で説明したように、理想的な感度を実現することは困難である。また感度の負の部分はどう扱うかも一定ではないから、デバイス・インディペンデント・カラーの実現には問題が多く残されている。

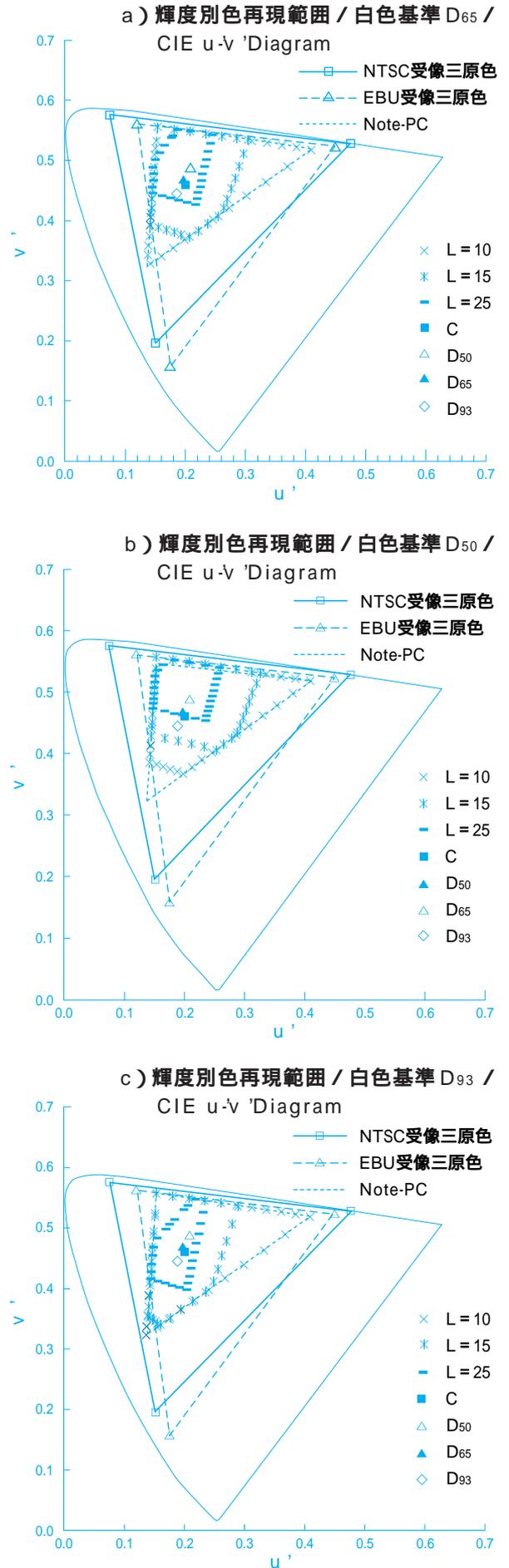
最高輝度と色再現範囲

色の明るさ(輝度 = luminance)により色再現範囲が異なる。第8図a～cには一定輝度での色再現範囲を、L = 10、15、25(相対値)の輝度レベルで示した。輝度の高い色の再現範囲が急激に狭くなることが知られる。CRTもLCDも同様である。この色再現範囲と輝度との関係は、ディスプレイの最高輝度を変えると変化する。最高輝度が高いほど、高輝度色の再現範囲が広がる。限界は、三原色の色度点で決まる三角形の範囲(色再現域)である。したがって高輝度色の再現範囲を広げるためには、ディスプレイの最高輝度を高める努力が必要になるが、消費電力や耐久性の点から制限される。

基準白色と色再現範囲

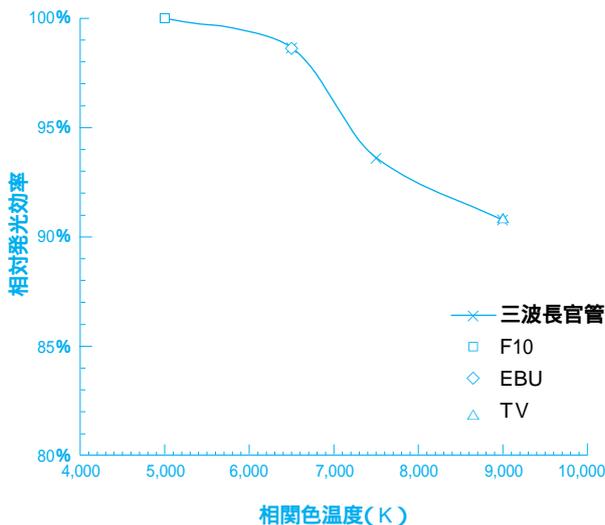
三原色のうち最も輝度が低いのはblueである。したがって、blueの輝度を高めると高輝度色の再現範囲が広がる。CRTの白色の基準は、NTSCは標準の光C、EBUでは標準の光D₆₅と決められている。しかしながら、blueの輝度を高めると白色点は高色温度側に移動するため、家庭用テレビ受像機では白色の相関色温度が約9,300 Kになっている。第8図a～cにノートパソコン用LCDの白色の相関色温度を5,000、6,500、9,300 Kと変えたときの色再現範囲の変化を示した。相関色温度が高くなるに従い、高輝度色の再現範囲が広がっている。テレビを店頭でデモすると、相関色温度の高いものが先に売れるとのことである。ところがLCDは相関色温度が低めで、

第8図



一般に5,000 ~ 6,500 K のものが多い。これはバックライト用冷陰極蛍光管に使用されるblueの蛍光体の発光効率が悪く、輝度を上げるためblueの蛍光体量を増やすと消費電力が増加するからである。電池駆動を前提としないモニタ用のLCDでは、CRTと同様に白色の相関色温度を高く設定する傾向にある。第9図にバックライト用冷陰極蛍光管の相関色温度と発光効率の例を示しておく。

第9図 バックライトの相関色温度と発光効率の例



色再現の目標

上記では特に言及しなかったが、色再現をどこまで正確に実現するかという問題がある。Hunt¹⁾はこの問題を提起して、下記の分類を行った。

- 分光色再現： spectral color reproduction
- 測色色再現： colorimetric color reproduction
- 正確な色再現： exact color reproduction
- 等価な色再現： equivalent color reproduction
- 対応する色再現： corresponding color reproduction
- 好ましい色再現： preferred color reproduction

この分類は写真を念頭に置いたもので、必ずしもソフトコピーに当てはまるわけではないが簡単に説明する。分光色再現、測色色再現、正確な色再現は被写体と再現画像との測光または測色値の一致を目標とするものである。したがって、物理的な検討によって色再現性の向上を図ることができる。とはいいながら、上記のように等色感度の近似誤差や負の感度を実現する方法など未解決の課題が残されている。次に等価な色再現と対応する色再現とは、いずれも色の見え(color appearance)の一致を目標とするものであり、心理的要素が強くなる。「色の見え」を単純に均等色空間の座標値(三刺激値とは言わない)で表すことにしても、多くのディスプレイがそうで

あるように発光体の均等色空間は充分には定式化されていないので、アプローチが困難である。最後の好ましい色再現は、なじみ深い被写体を好ましい色に再現することを目標とするものである。ほとんど完全に心理実験によるアプローチである。好ましい肌色の研究が各所で行われたが、必ずしも確定できていない。今のところ、測色的色再現、正確な色再現を目標に物理的なアプローチを行い、最終的には心理的方法により好ましい色再現を追求するというのが一般的であると思われる。なお、分光色再現に関連して multispectral imaging の研究が盛んになってきている。

すこし話がそれるが、「好ましく再現される色」の研究もなされた。テレビ写りの良い化粧品はどんな色か？ 結婚式の記念写真で、茶色に写らない礼服の黒をどうするか？ というようなことであり、礼服用にタキシードブラックという染料まで市販されたことがある。

色のモード

繊維、プラスチック、インキや塗料などの着色工業においては、厳密な色合わせを日常大量に行っている。これら着色工業においてはCCM(コンピュータカラーマッチング、Computer Color Matching、Computer Colorant Formulation)が広く用いられている。CCMによると、検知限界(JND、Just Noticeable Difference)に近い $E_{ab}^* = 0.2$ (説明は省略)程度の厳密な色合わせも可能である。しかし、測色的には正確に色が合っているにも関わらず、色見本と同じ色に見えない場合がある。たとえば紗など隙間が多く透けて見える編織物の色を、紙に絵の具を塗った色見本で指定されたときなどにこの問題が生ずることが多い。物体の色は、質感、透明感、大きさなどその物体の種々の属性または様相の影響を受けて知覚される。様相が大きく異なる場合には、測色的には同一の色をならべても同じ色には見えないことがある。

色は、測色における基準である開口色の他に、光源色(JIS Z8105では物体色と区別している)や物体色(この中には、フィルムカラー、容積色、透明平面色、鏡映色、光沢、不透明表面色(JISでは単に表面色)などがあげられる)に分類されることがある。この分類を色のモードという。色再現の場合、被写体とソフトコピー(ディスプレイ)とは色のモードが大きく異なるのが一般的である。また、加法混色(一般に発光的)が主体のソフトコピーと、減法混色(非発光)のハードコピーとの比較に関しても同様に色のモードに関する困難が積みまとうことになる。

おわりに

かなり偏った内容になってしまったが、当社に関連深い事項を取り上げて色再現の問題を考えてみた。残された課題が多いことが改めて認識された。なお、色再現に関してガンマの問題は重要だが、ここでは「ガンマはギリシャ語だからわからない(It may be Gamma to you, but it's Greek to me¹³)」という論文を紹介するにとどめておく。

引用文献

- 1) R. W. G. Hunt : Objectives in colour reproduction, J. Phot. Sci., 18, pp.205 - 215 (1970)
- 2) 金子 隆芳著 : 「色の科学」, 朝倉書店 (1995)
- 3) テレビジョン学会編 : 「測色と色彩心理」, 日本放送出版協会 (1970)
- 4) 納谷 嘉信著 : 「産業色彩学」, 朝倉書店 (1980)
- 5) 池田 光男著 : 「視覚の心理物理学」, 森北出版株式会社 (1975)
- 6) 池田 光男著 : 「眼は何を見ているか」, 平凡社 (1988)
- 7) 大田 登著 : 「色彩工学」, 東京電気大学出版局

(1993)

- 8) 大田 登著 : 「色再現工学の基礎」, コロナ社 (1997)
- 9) 日本色彩学会編 : 「色彩科学ハンドブック」第2版, 東京大学出版会 (1998)
- 10) Terry Benzschawel : “Colorimetry of Displays”, SID Seminar, 8. 1 - 43 (1987)
- 11) Peter A. Keller : “Electronic Display Measurement”, John Wiley & Sons, Inc. (1997)
- 12) CIE TC8 : “Image Technology”,
<http://www.colour.org/>
- 13) <http://www.parc.xerox.com/red/members/stone/vrml-cfwg/gamma/default.html>

PROFILE



中塚 木代春

Kiyoharu NAKATSUKA

住友化学工業株式会社
精密化学品研究所
リサーチフェロー