

Optics of Color Filter

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
IT-Related Chemicals Research Laboratory
Kiyoharu NAKATSUKA

Theoretical limits of characteristics of color-filters for LCDs are investigated. The results and design tools for (1) chromaticity of 3-primaries, (2) lightness, pigment particle size, (4) light loss by ITO, (5) special color filter for LED back light, and (6) microscopic spectrophotometry are presented.

はじめに

情報電子分野の発展は目覚ましく、当社もこの分野に経営資源を重点的に配分することになっている。研究の現場としては、急激に変化する顧客の要望に応じて、日々新しい提案を続けて行かなければならない。そのためには、幅広い基礎技術の蓄積と高い融通性が必要であるが、これには限界がある。ここで重要になるのが、技術進歩の見通しを立て、技術の限界を見きわめることであると考えている。半導体リソグラフィーの分野では、利用する光の波長と微細化の限界とがかなり明確になっている。このため、g、i線から、KrF、ArF、F₂などのエキシマ光源へと短波長側へシフトしている。

表示材料の分野では、これほど明確で広く認められたものはない。しかし、同様の見通しを立てることはでき、ある技術の限界を知ることも可能である。このような見通しに基づき、思考と試行とを節約して、研究開発の効率化を図ることが可能になると考えている。

ここではLCD用カラーフィルタに限定して、

1. 三原色は何色か
2. カラーフィルタはどこまで明るくできるか
3. 顔料はどこまで細かくすれば良いか
4. 透明導電膜によるロス無くせないか
5. LEDバックライト用カラーフィルタをどう作るか
6. 微小な画素の色をどう測定するか

に関する光学的考察と基礎データとを紹介する。

光は見えない。煙の中を進行するサーチライトの光など、限られた状況では見るができるが、TVを見ている隣の人の眼に入って行く光を観察することはできない。煙や霧の中にも、観察できない。このため、光の話は直感的な理解が難しい。なるべく直感的にわかりやすくするため、図を多く用いて、表や数式の記載を避けた。詳細な技術内容に関しては、文献を参照願いたい。

1. 三原色は何色か

後の説明のための準備として、三原色の話をする。この節では、特に断らない限り、出典はG. Wyszecki and W. S. Stiles, "Color Science"¹⁾である。

三原色説/三原色は赤緑青である

ヤング - ヘルムホルツの三色説によれば、

- (1) 視覚系には3種類の光受容器または神経線維がある
- (2) これらの光受容器はそれぞれ、赤 - 橙、緑、青 - 紫の領域にピークを持つ互いに重なり合う分光感度を持っている
- (3) 色の感覚は、これら3種類の光受容器からの信号の合計(線形結合)で決まる

であり、三原色は生理的に赤、緑、青ということになる。

色のベクトル表示/三原色は無数にあった

ベクトル解析の草分けであるグラスマンはベクトルを使って、三原色説を定式化した(グラスマンの法

則) ある強度の三原色を単位ベクトルとして、全ての色が3次元空間の一点(位置ベクトル)として表せるというのである。ここで、 $A = B$ は色刺激(色光) A と B とが同じ色に見える(等色する)、 $A + B$ は色光 A に B を混合(加法混色)する、 A は色光 A の強度を 倍に増減することを表すものとし、 $A - B = C$ は $A = C + B$ を表すことにした。このようにすると座標変換が可能であり、生理的な意味はともかく、任意の線形独立な色刺激(同一平面上にない/どんな割合で2色を混合しても、他の1色とは等色できない)が三原色になりうる。

CIE 1931 表色系

このグラスマンの法則を利用して、国際照明委員会(CIE/Commission International de l'Eclairage/1931年)の表色システム(表色系)が出来上がった。この表色系では色をXYZ空間の点(X, Y, Z)で表すことにし、X、Y、Zを三刺激値(tristimulus values)と呼ぶことにした。CIE表色系での3種類の光受容器の分光感度をFig. 1に示す。ただし、この分光感度は生理的なものではなく、等色関数(color matching functions)と呼ばれる。おまけに、三原色は実在しない色光を選んで、三刺激値Yのみで明るさを表せるようにしている。つまりX及びZに対応する原色は明るさゼロの色光である。このようにすると、 $x = X/(X + Y + Z)$ 、 $y = Y/(X + Y + Z)$ として色を2次元のグラフで表して、明るさはY値で別途表示できるようになる。(x, y)を色度座標(chromaticity coordinate)このグラフを色度図(chromaticity diagram)という。色度座標を単に色度ということもある。CIE 1931色度図をFig. 2に示す。馬蹄形の線は単色光の軌跡であり、そのnm単位の波長を記入してある。380nmと780nmの点を結ぶ直線はこの色光を種々の割合で加法混色した時の軌跡であり、対応する単色光は無い。実在の色は全てこの馬蹄形で囲まれた範

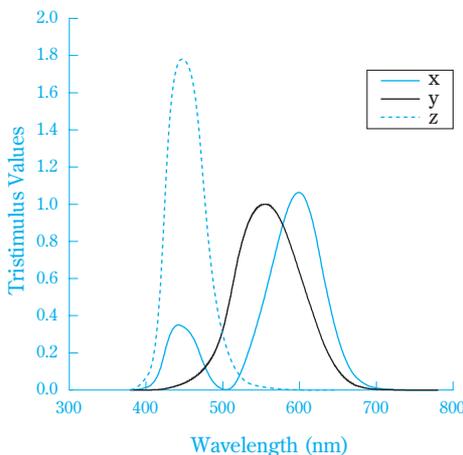


Fig. 1 CIE 1931 color matching functions

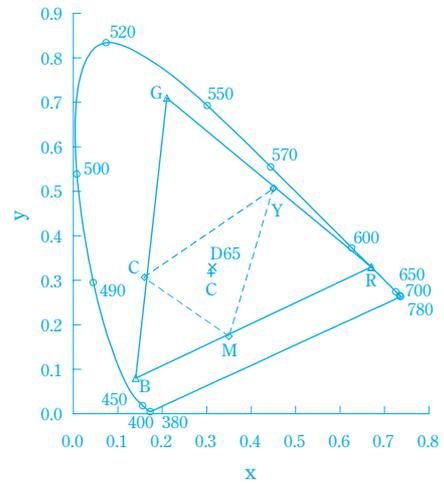


Fig. 2 CIE 1931 chromaticity diagram

囲内にプロットされる。CIE表色系により、色光の分光強度分布を測定すればその色の三刺激値や色度座標が求まり、任意の色光が表示できる。

最近(1997年)、グラスマンのベクトル表記をリファインして、CIE 1931等色関数を求める方法を丁寧に説明した論文が発表されている²⁾。

物体色と光源

カラーフィルタや染色物など非発光の物体の色(物体色/object color)は、これらの物体からの透過光または反射光の分光分布から計算できる。物体色の三刺激値は、完全白色面(分光透過率または反射率が全波長域で1.0(100%))のY値で正規化する。物体の分光透過率または分光反射率とそれらを照明する光の分光分布との積が物体からの透過光または反射光の分光分布であるから、物体色の測定では照明光源の規定が必要になる。CIEは物体色測定用の標準の光も規定している。これらは分光分布の数値で規定されており、現実の光源(light source)と区別して標準の光(standard illuminant)と呼ぶことにした。Fig. 2には、標準の光D65とCを示した。D65は平均的な自然光の実測値を基に決められた。標準の光Cは同じ目的の光を白熱灯に色フィルタをかけて実現するために作られたもので、標準光源の作成法も規定された。現在、標準の光CはCIEの標準からは削除されたが、表示材料の分野では今も広く使われている。LCDの場合には、バックライトが照明光源となることは明らかだが、カラーフィルタの色指定は標準の光Cによる色度座標が用いられることが多い。

四原色/色再現域の拡大

2つの色光を加法混色した色の色度座標は2つの色光に対応する点を結ぶ直線上にあるということが、グラスマンの法則から導かれる。つまり、全ての色は色度図上で凸集合(直感的に凹みの無い図形を考えればよい)を形成する。3色の場合には、対応する3点

を頂点とする三角形の上にある。負の混色も認めらるなら、2点を結ぶ延長線上の色も作れる。3色の場合、任意の線形独立な三原色で全ての色が作れることは上記のとおりである。しかしながら、CRT、PDP、ELやLCDなどの表示装置では負の混色ができない。したがって、表示装置で表示可能な色の範囲（色再現範囲、色再現域/color gamut）は装置の三原色の選定で決まる。色度図上で三原色の作る三角形の面積が大きいほど、この装置で表示できる色の範囲が広いことになる。この面積を色再現範囲または色再現域ということもある。ベクトル表示では、何れかの原色の上へ色度座標の原点を移動して、残り2点の新しい位置ベクトルの外積の1/2が色再現域になる。内積に関しては、物理的意味がない。

Fig. 2からわかるように、表示装置の場合には三原色をどのように選んでも、全ての色を表示することはできない。赤緑青を三原色にしたときに最も色再現域が広がるので、一般に最も多く用いられている。さらに色再現域を広げるため、原色を一つ追加して色再現域を四角形することが考えられた。これが四原色であり、五原色、六原色と増やして行くと色再現域は少しずつ広がるが、分光装置が必要になる。これらは撮像、記録及び伝送系との関係もあり、実用化が難しい。撮像装置では光を電気信号に変換するのみだから、負の混色も認められ、線形独立ならどのような三原色を選んでも差し支えない。実際、Fig. 2のC、M、Yで示す三原色が主としてビデオカメラに採用されている。このような三原色はFig. 2に見られるように、 $C = G + B$ 、 $M = B + R$ 、 $Y = R + G$ だから、カラーフィルタによる光のロスが少なく、高感度化できるメリットがある。しかし、ノイズや下記のメタメリズムの問題もあり、撮像装置においても三原色の選定は重要であり、研究が続けられている。

色の鮮やかさ

前記の説明から明らかなように、馬蹄形の中心部は白、灰、黒などの無彩色、周辺に近づくほど鮮やかな色になる。したがって、白色（通常D₆₅）点からの離れ具合を、色の鮮やかさの目安とすることがある。つまり、白色光と単色光の混合比を色の鮮やかさの目安にするのである。厳密には、刺激純度（excitation purity）が定義されているが、詳細は省略する。

メタメリズム

三原色説から容易に想像できるように、分光分布が異なっても等色する場合がある。この現象を条件等色（メタメリズム/metamerism）といい、このような一対の色光を条件等色対（metameric pair）という。物体色の場合には、分光透過率または反射率が異なり、ある照明光下では等色するが、別の照明の下では別の色に見えるということになる。ある一

つの色に対して、条件等色対は無限に存在する。ある色見本と同じ色のカラーフィルタを作る場合には注意が必要である。表示材料の分野では、メタメリズムが忘れられていることがある。

三原色説の再検討

グラスマンの法則によれば、実在の色は色度図上で凸集合になり、CIE1931表色系のデータはそうになっていた。しかし、場合によっては凸集合にならず、グラスマンの法則が成立しないことが知られている³⁾。メタメリズムの程度が大きい（色光の分光分布の相違が大きい）時には特に注意が必要である⁴⁾。J. Zolid⁵⁾は、個人差を補正すれば、この問題をかなり改善できるとしている。しかし、三原色説の“色の感覚は、3種類の光受容器からの信号の線形結合で決まる”という仮定が原因であることが古くから指摘されていた。光受容器から大脳までの信号伝達系の応答の非線形性に関しては、今も研究が続けられている⁶⁾。

CIEの等色関数は3種類の光受容器の分光感度ということもできるが、生理的なものではない。網膜の顕微分光測光により、赤、緑、青に対応する光吸収特性を持った3種類の光受容器の存在が確かめられている。この3種類の光受容器をL、M、S（Long, Middle, Short wavelength sensitive）と命名して、分光感度や非線形特性の研究が続けられている⁷⁾。

2. カラーフィルタはどこまで明るくできるか

カラーフィルタはできるだけ鮮やかな色で、明るくすることが求められる。低消費電力で見栄え良くという要請である。それでは、カラーフィルタはどこまで明るくできるか。理論的な限界があるのか。Fig. 3は一般的なLCD-TV用カラーフィルタの分光透過率である。このカラーフィルタを使ったLCDの色再現域は、NTSC（National Television System Committee）規格の三原色の色再現域を基準（100%）として72%である。光源は、標準の光Cを用いた。この色再現域を保ったまま明るく（三刺激値のY値を大きく）するために、赤、緑、青の各色の分光透過率のピークを高くすることを試みる。Fig. 3に示すカラー

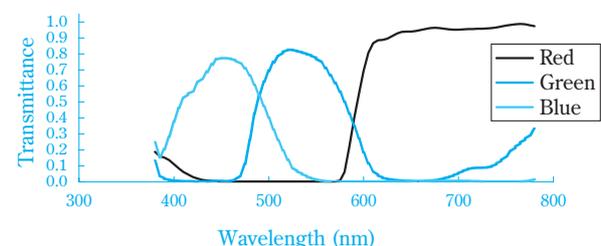


Fig. 3 Spectral transmittance of Color Filters for LCD-TV

フィルタの透過率の各ピークを1.0に引き伸ばしたものの透過率をFig. 4に示す。スロープの部分は確率分布のガウス関数で近似し、赤、緑、青の各色の色度はFig. 3のカラーフィルタと4桁まで一致させた。したがって、色再現域は変わらない。このピークの引き伸ばしによって、赤、緑、青の各色のY値は、それぞれ、18.4 18.5、55.3 70.3、9.0 12.6と増加した。赤は元々ピークが高いため、ほとんど明るくなっていない。

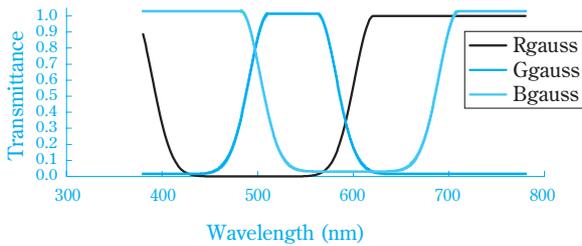


Fig. 4 Spectral transmittance of Ideal color filters having peak tops of 1.0. The chromaticity coordinates are same as that of the color filters indicated in Fig. 3.

さらに明るくするには、光を透過する波長の範囲を広げる必要があるが、こうすると色度が変化して薄い色になってしまう。そこで、スロープの部分なくして、垂直立ち上げ、立ち下げにして（ガウス分布の分散をゼロにする）色度の変化を補償したものをFig. 5に示す。この図の透過率が理論的に最も明るい色である（詳細は、文献1）を参照。これを最明色（optimal color）という。この最明色もFig. 4の場合と同様に、色度を4桁まで合わせてある。なお、Fig. 4及び5は見やすくするため、赤、緑、青の透過率カーブを縦方向に少しずつズラしてある。

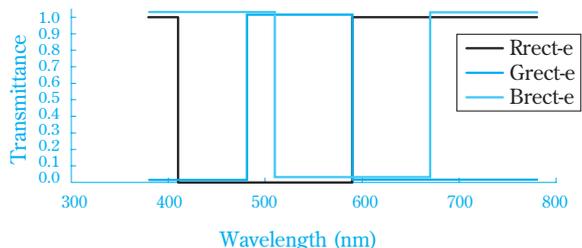


Fig. 5 Spectral transmittance of optimal colors. The chromaticity coordinates are same as that of the color filters indicated in Fig. 3.

それでは、最明色の明るさはどうか。Fig. 6にそれぞれの色再現域と白表示のY値（赤、緑、青のY値の平均）を示す。図には、ノートPC用のカラーフィルタとその最明色をも示した。限界値までには未だ

相当の距離がある。ここで、ノートPC用とTV用とは不連続になっていて、つながらないのが気になる。これは、ノートPC用とTV用とは三原色の色度座標が異なるためである。ノートPC用は、緑を黄緑寄りに、青を水色寄りにズラして、明るさを稼いでいる。赤は橙寄りにずらすとY値が高くなるが、このカラーフィルタではそうしていない。Fig. 7にこれらのカラーフィルタの色度を示す。

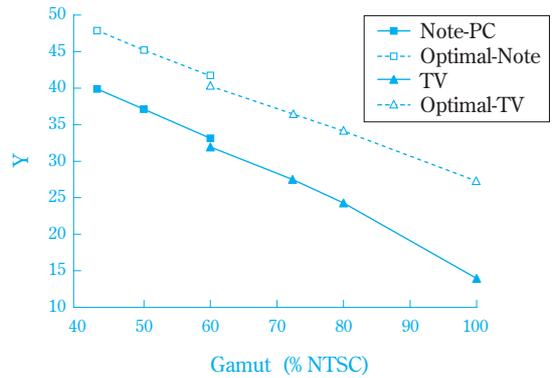


Fig. 6 Gamut vs. Y values of color filters for TV, note-PC and there optimal colors.

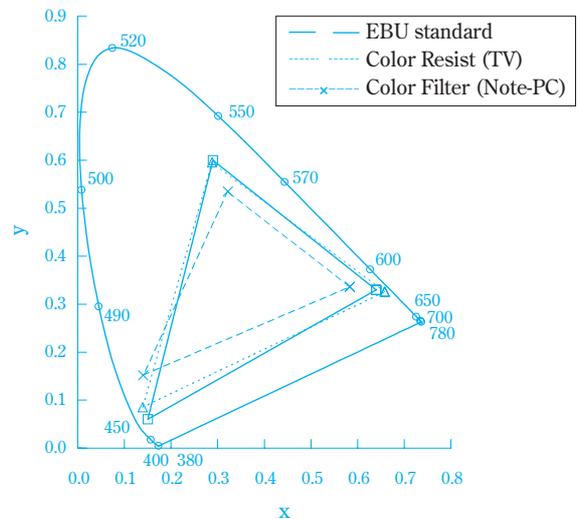


Fig. 7 Chromaticity coordinates of various primaries

Fig. 7にはEBU規格（European Broadcasting Union）の三原色も示した。この三原色はハイビジョン用やマイクロソフトが提唱して国際規格になったsRGB規格（コンピュータのモニターディスプレイ）とも実質的に同一であり、現在のTVの三原色の代表といえる。この規格はCRTを想定して決めたものであり、青の原色は最明色でもY値が8.6と著しく暗くなってしまふ。このため、現実のTV用カラーフィルタは青の色度をノートPCの時と同様に少しズラして

ある。色再現域を同じにするため、赤の色度を高純度に行っている。こうすると赤は暗くなるが、青の明るさを重視したものである。

表示材料の分野では、「××社が画期的に明るいTV用カラーフィルタを開発した。そのデータはである。」というような話が流れることがある。このときに、最明色など上記の計算を行なうと、惑わされることが無い。

3. 顔料はどこまで細かくすれば良いか

最明色と現実のカラーフィルタの明るさの間には、未だ相当の開きがあった。さらに明るいカラーフィルタを作るためには、顔料を微粒化すればよいといわれている。ならば、どこまで細かくすれば良いのか。粒径1.0 μm の顔料(C. I. Pigment Violet 23)を、0.001 μm まで微粒化したときの分光透過率の変化を計

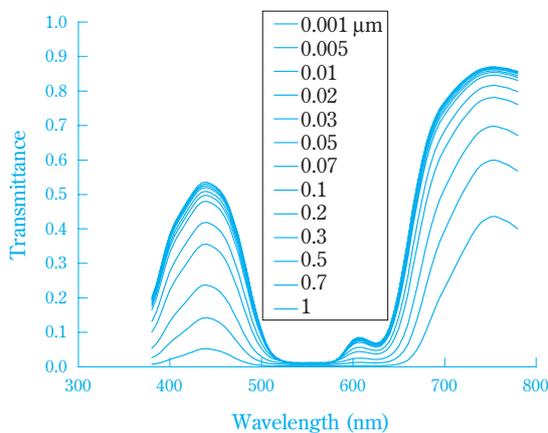


Fig. 8 Spectral transmittances of various particle sizes of C. I. Pigment Violet 23

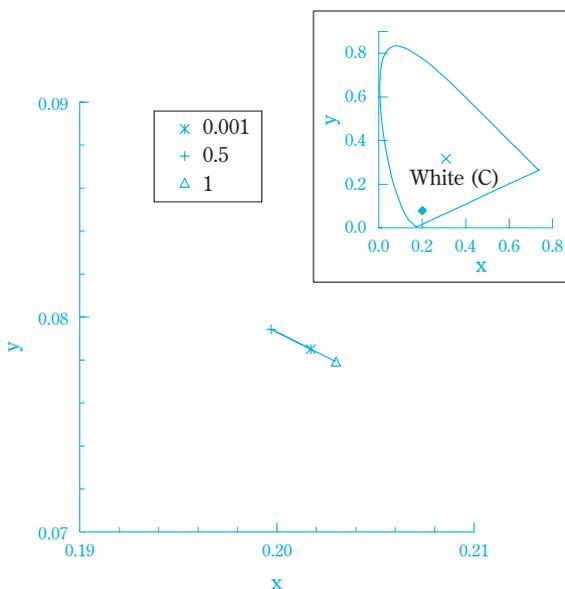


Fig. 9 Chromaticity diagram of various particle sizes of C. I. Pigment Violet 23

算した結果をFig. 8に示した。微粒化すると顔料の着色力と色相が変化する。色相は別の顔料を添加しないと補正できないが、顔料の濃度(添加量)を調整して鮮明度が一定になるようにしてある。鮮明度の指標は、色度図上で白色(ここでは標準の光C)からの距離とした(Fig. 9参照)。Fig. 8に見られるように、顔料を微粒化すると、透過率のピークが高くなり、立上りと立下りの傾斜が急峻になって、最明色の曲線に近づいてくる。しかし、0.02 μm つまり20nmあたりからは変化が少なくなってくる。このときのY値の変化をFig. 10に示す。この図からも20nm付近でY値の増加が限界に近づくことがわかる。したがって、この顔料は20nm程度まで細かくすれば良く、それ以上微粒にしても明るさ向上の効果は小さい。

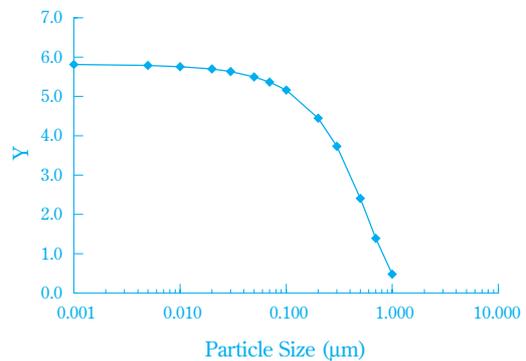


Fig. 10 Particle size vs. Y curve. C. I. Pigment Violet 23

上記の計算で明るさに関する目安が得られたが、LCD用のカラーフィルタでは顔料による光の散乱が重大な問題となる。LCDは偏光度がフォーナイン(99.99%)程度の偏光板を使っているから、散乱でわずかでも偏光度が乱れると表示特性が劣化するからである。光の散乱も顔料の微粒化によって少なくできる。LCD用のカラーフィルタの散乱度合いを、カラーフィルタを2枚の偏光板で挟み、偏光板を平行にしたときの透過率(Y値)と直交にしたときの透過率の比で表す。これをコントラスト(contrast ratio)と呼んでいる。(コントラスト)=(Y 平行偏光板)/(Y 直交偏光板)。このコントラストも計算で求められるが、ここでは実験データを示す。この実験では、まず形状が近似で粒径がそろった、粒径のみ異なる複数の顔料を作成し、次にこれらを一次粒子にまで完全に分散してカラーレジストを作成する必要がある。このような実験は、当社のような顔料メーカーでないと、設備的にも技術的にも実施困難である。この実験の結果をFig. 11に示す。顔料は、C. I. Pigment Red 177である。図では、粒径を比表面積(g 当たりの表面積、 m^2/g)で表示してある。球状の顔

料の粒径は比表面積に反比例し、この顔料の場合(比重が関連する) $60\text{m}^2/\text{g}$ は $0.067\mu\text{m}$ 、 $120\text{m}^2/\text{g}$ は $0.033\mu\text{m}$ に対応する。 $0.033\mu\text{m}$ まで微粒にしても、コントラストが頭打ちになることは無く、限界が見えない。 Fig. 12 にミー散乱の式で計算した粒径の異なる C. I. Pigment Red 177 の散乱係数 (scattering efficiency) を示す。この図からも、コントラストに関しては限界が無いことが知られる。必要なだけ微粒化すればよい。また図に見られるように、粒径が大きくなると急激に散乱が増加するから、平均粒径を細かくしても粗粒があると意味がない。

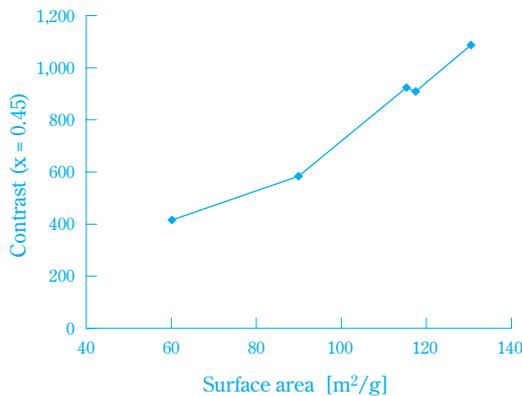


Fig. 11 Surface area vs. Contrast curve

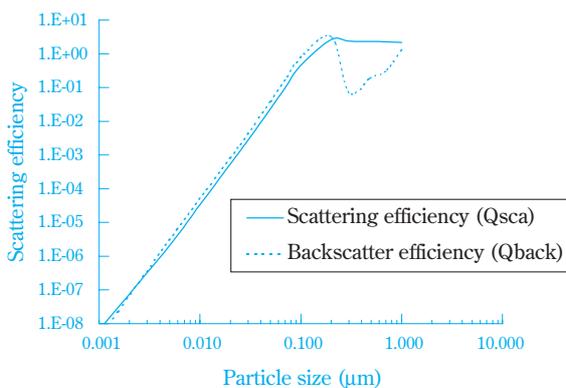


Fig. 12 Particle size vs. scattering efficiency of C. I. Pigment Red 177, the wavelength is 550 nm

上記の計算は、ミーやレイレイの光散乱モデルを使って先ず単一粒子の散乱特性を計算する⁸⁾。ミー散乱の式の効率的な計算法が開発され^{9, 10)}、パソコンで計算可能になっている。しかし、これらのモデルは球形粒子に限定されるため、T-マトリックスモデル¹¹⁾やカップルドウェイブ解析¹²⁾などを利用することも行なわれている。これらの計算には、顔料の分光複素屈折率(実数部が屈折率、虚数部が吸光度)が必要であり、顔料の単結晶を作成する必要があっ

た¹³⁾。しかし、顔料粉体をプレスで固めたものでも十分な精度が得られるとの報告もある¹⁴⁾。次に、この単一粒子の散乱特性から、多数の粒子による多重散乱の計算を行なって、着色膜の透過率や反射率を求める。この多重散乱の計算は、radiative transferの式¹⁵⁾が必要である。実用的には、有限要素法的に空間を分割して、計算を簡略化した多光束法^{16)~18)}を利用する。

余談だが、太陽光が大気中の気体分子で散乱された青空からの光はs偏光成分が強い。Fig. 12 に示した顔料の散乱光の角度分布を極座標表示したものを Fig. 13 に示す。0.50、0.10、0.01 は粒径で μm 単位、S は散乱光のs偏光成分(紙面に垂直な偏光、独語のsenkrechtのsをとったもの/電磁波解析ではTE mode)、P はp偏光成分(紙面に平行、英語のparallelのp/電磁波ではTM mode)、Uは無偏光でs、p偏光成分の平均である。粒径が小さくなると光の進行方向の前後に均等に散乱光が現れるようになる。また、小粒径になると偏光成分のかたよりも強くなる。青空からの光の偏光は、この現象による。

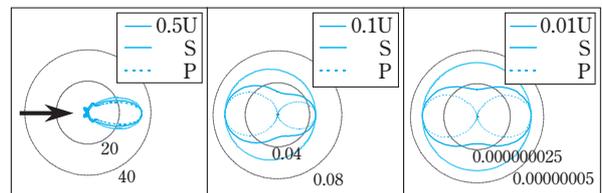


Fig. 13 Polar plot of scattered light by C. I. Pigment Red 177. The diameters are 0.50, 0.10, 0.01 μm . U:unpolarized, S:s-polarized, P:p-polarized

4. 透明導電膜による光の損失を無くせないか

カラーフィルタの上には、オーバーコート、透明導電膜(通常、ITO)や配向膜が付けられる。この内、ITOは屈折率が高いため、反射による光の損失が大きい。ITO付きのカラーフィルタを測定すると10%近い損失があることがわかる。ところが、これに配向膜(PI)を付けると、損失が2-3%にまで改善される。これは配向膜が反射防止膜として働いているためと考えられる。そこで、配向膜の厚みを変えて、さらに損失を減らせないかと考えるのであるが、そうは行かない。配向膜と液晶の屈折率が近いため、少々厚みを変えても損失は変化しない。液晶セル内では、配向膜があっても無くても、ITOによる反射損失はほとんど変わらない。Fig. 14に、カラーフィルタ単独、ITO付き、ITOと配向膜付き、及びITOに直接液晶が接しているときの分光透過率の計算結果を示す。ただし、ガラス基板などの反射は無視してある。

図の計算結果は、上記の実験結果と良く一致している。また、液晶セル内では、配向膜がほとんど反射防止の役を果たしていないことも認められる。

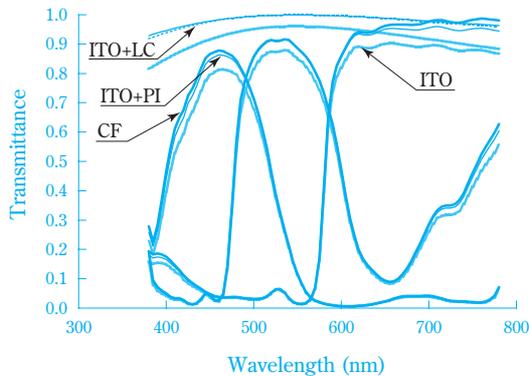


Fig. 14 Light losses of color filters caused by ITO. CF:color filters without ITO, ITO:with ITO, ITO+PI:with ITO and orientation layer, ITO+LC:with ITO without orientation layer and with liquid crystal

しかし、ITOの厚みの影響は大きい。Fig. 15に示すように、配向膜があってもITOの膜厚によって透過率は変化する。これをY値にして膜厚との対比をFig. 16に示す。この場合、最適値は140nm付近に

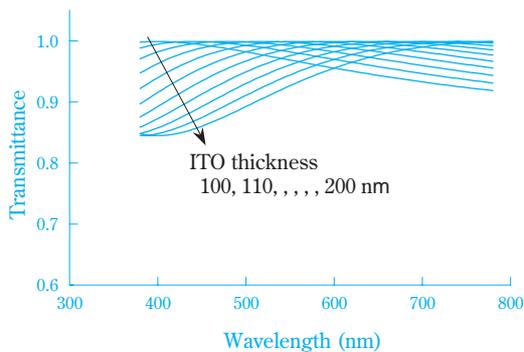


Fig. 15 Spectral transmittance of various thickness of ITO layers with PI

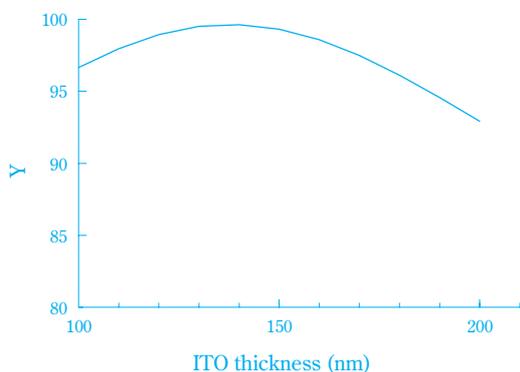


Fig. 16 Thickness vs. Y values of ITO layers with PI

ある。ITOは作成条件によって複素屈折率が変化するから、実測しておく必要がある。

以上の計算は、次のようにする⁸⁾。各膜の複素屈折率を測定しておいて、これに膜厚を含めた特性マトリックスを作成して、膜の積層順に積算して多層膜全体の特性マトリックスを求める。得られたマトリックスの要素を使って透過率や反射率を求める。

5. LEDバックライト用カラーフィルタをどう作るか

DTP (desk top publishing) やインターネットショッピングなどの普及により、従来のEBUやsRGB規格の色再現域を超える広色再現域のディスプレイの必要性が高まってきた¹⁹⁾。これに伴い、LCD分野では、LEDを使ったバックライト用のカラーフィルタを求められることが多くなった。

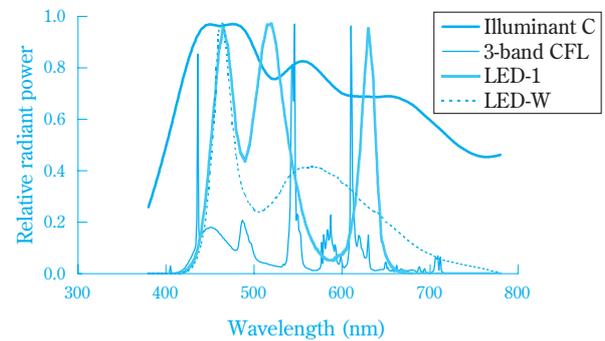


Fig. 17 Spectral power distribution of several back lights and illuminant C. 3-band CFL : 3-band type cold cathode fluorescent lamp, LED-1: Red, Green and Blue LED's, LED-W: white LED

Fig. 17に、各種バックライト用光源の分光分布を示す。標準の光Cは連続スペクトルであるが、図のLED-1で示す赤、緑、青の三色のLEDを組み合わせたものは、効率的に赤、緑、青のみの光を出す。従来から広く使われている三波長冷陰極蛍光灯も、赤、緑、青の部分に鋭い輝線があるが、その他の波長の光も多いことがわかる(図の3-band CFL)。なお、図のLED-Wで示す白色LEDは連続スペクトルを発光するものであり、ここで注目する広色再現域のディスプレイ用のバックライトとしては不向きである。これらの三波長冷陰極蛍光灯やLEDの分光分布は一例であり、種々の特性のものがある。また、赤、緑、青の三色のLEDを組み合わせたものは、色毎に発光強度の調整が可能である。LEDをバックライトにして広色再現域のLCDを作るときには、カラーフィルタに何か特別な工夫が必要かどうか。

Fig. 6に示したTV用カラーフィルタに上記の各種バックライトを組み合わせたとときの色再現域と白色表

示のY値 (Y_{white}) との関係を図. 18 に示す。このカラーフィルタは標準の光Cで色再現域72%に設計したものであり、 Y_{white} は27.5である。カラーフィルタはそのままにして、バックライトを三波長冷陰極蛍光灯にすると、色再現域は75%、 Y_{white} は27.7と増加する。さらにバックライトを赤、緑、青のLEDを組み合わせると、色再現域は94%、 Y_{white} は30.1になる。このようにカラーフィルタに何ら手を加えなくても、LEDバックライトを使うと色再現域が大幅に広がり、明るさも増加する。このカラーフィルタを少しだけ変更すれば色再現域100%も達成でき、 Y_{white} は28.1になった。図. 19には、これらのカラーフィルタとバックライトの組み合わせの色再現域を示した。標準の光Cで色再現域72%に

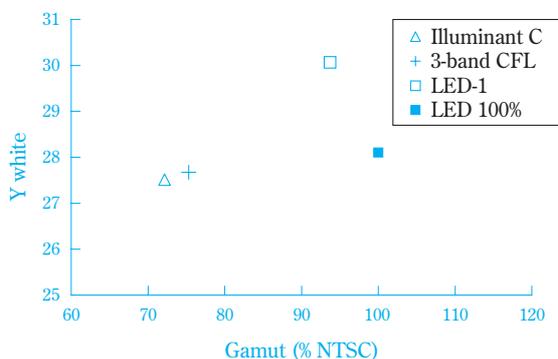


Fig. 18 Gamuts vs. Y_{white} of the color filter shown in Fig. 6 with several back lights, 3-band CFL: 3-band type cold cathode fluorescent lamp, LED-1: combination of Red, Green and Blue LEDs, LED 100%: slightly modified color filter with LED-1

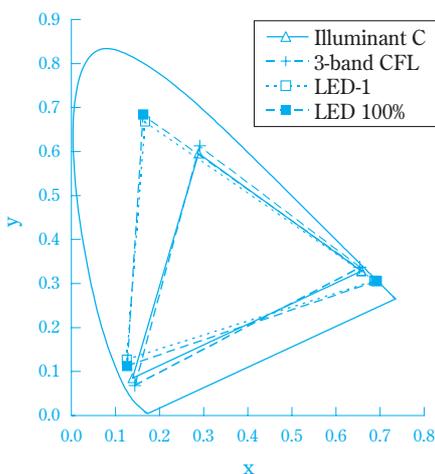


Fig. 19 Color gamuts of the color filter indicated in Fig. 6 with several back lights, 3-band CFL: 3-band type cold cathode fluorescent lamp, LED-1: combination of Red, Green and Blue LEDs, LED 100%: slightly modified color filter with LED-1

設計したものとLEDバックライト用の色再現域100%のものとはあまり相違が無く、極わずかだけ修正すれば良いことがわかる。ところが、図. 6 に示したように、標準の光Cで色再現域100%のカラーフィルタを作ろうとすると、 Y_{white} が14程度と非常に暗いものしかできない。またこのときの最明色の Y_{white} は27.3であるから、LEDバックライトを用いると、標準の光Cが基準の最明色よりも明るいカラーフィルタが実現できることになる。こうなると「最明色は必ずしも最明色ならず」という話になりそうであるが、物体色の三刺激値が完全白色面のY値で正規化してあることを思い出す必要がある。赤、緑、青の三色のLEDを組み合わせると、効率的に赤、緑、青のみの光を出す、標準の光Cは連続スペクトルで赤、緑、青以外の光を多く含んでいるからである。最明色に限らず物体色に関しては、照明光を規定する必要があることは前記のとおりである。

以上は、標準の光Cで色再現域72%に設計したカラーフィルタのバックライトを変更したり、またカラーフィルタの色をわずかに変更したときの話であり、LEDバックライトと組み合わせるときの三原色がNTSCの規格と同じ色度になっているか否か、や白色表示の色度が規定の値になっているかどうかなどの問題は無視している。また、赤、緑、青のカラーレジストの顔料濃度や膜厚についても考えていない。例えば、上記の標準の光Cで色再現域100%のカラーフィルタは膜厚または顔料濃度を、色再現域72%のときの約3倍にする必要があり、実質的に製作不可能である。実用的なカラーフィルタを設計するためには、以上の他に黒または灰色表示のときの色度も規定する必要がある。このような設計作業を、試行錯誤やマトリックス的なデータに基づいて実施することは極めて非効率であり、最適解を得ることは望み得ない。効率的な最適化手法が必要である。

上記のような色設計は、染顔料メーカーで日常実施していることとほとんど変わらない。最適化手法も、染顔料の製造や応用に用いているもの²⁰⁾を多少修正することで適用可能である。コンピュータカラーマッチングを中心とする色管理用の手法であり、顔料など着色剤のデータをベースとして、上記の最適化が行なえる。文献²⁰⁾が出版された頃是非線形の連立方程式を解くのに苦労したと聞いているが、その後Allenの方法²¹⁾が発表され、種々の最適化計算法²²⁾²³⁾が利用可能になり、収束が遅いとか、局所解に陥ること無く容易に最適解が得られるようになった。また、線形計画法も利用可能になり²⁴⁾、第2、第3最適値など複数の解の情報を得ることも可能である。最適化計算に乗らない信頼性と色特性とのトレードオフの検討を行なうときなどには、この第2、第3の最適値

が大いに役立つ。

6. カラーフィルタの微小な画素の色をどう測定するか
カラーフィルタの三原色の各画素は、 $50 \times 200 \sim 80 \times 300 \mu\text{m}$ 程度の微小な長方形であり、この色を測定するためには、顕微鏡と分光光度計を組み合わせた顕微分光光度計が用いられる。位置合わせの容易さなどから直径 $30 \mu\text{m}$ 程度の部分を測定するのが一般的である。通常の分光光度計は直径 3mm 程度の部分を測定するから、単純計算では顕微分光光度計の光量は通常の 100ppm 程度しかないことになる。またこれは顕微分光測光に限らないが、分光器は $380 \sim 780 \text{nm}$ の可視光の波長範囲から半値幅が 3nm 程度の部分を取り出すものであり、単純計算で光量が 1% 以下になる。以上のようにカラーフィルタの各画素の色測定は、光量が少ない悪条件になる。少しでも光量を稼ぐため、開口数NA（ステッパのNAと同じ）の大きい対物レンズを用いる。

カバーガラスによる球面収差という異様に聞こえるかも知れないが、収斂または発散する光束に対しては理想的な平行平板であっても球面収差が生じる（例えば、点光源から屈折率 1.5 のMMA板に入射した複数の光線をスネルの法則で計算し、これを延長して見ると一点では交わらないことが確かめられる）。これを球面収差というかどうかは別として、顕微鏡のように対物レンズの間近に物体がある場合には、カバーガラスなどの平行平板による収差が問題になり、対物レンズはJISに規定のカバーガラスを使うことを前提にして設計してある^{25) 26)}。したがって、カバーガラスを用いない場合には、像が悪くなる。高NAのレンズほどこの影響が大きい。光量が極めて少ないうえにカバーガラスの問題もあるから、測定値を十分に校正しておく必要がある。分光光度計の校正または点検の簡便な方法は、複数の色ガラスフィルタや光学結晶を用いて行なう^{27)~29)}ものである。

簡易型の顕微分光光度計の中には、光学系の一部に光ファイバを使ったものがある。単一モードのファイバならまだ良いが、多モードのもの（通常はこれ）は光漏れが発生しやすく、組付けられたファイバの曲率のわずかな変化のみならず、振動や温度の影響も受けやすい³⁰⁾。漏洩する光量の変化が波長毎に異なるから、文字通り簡易型である。

余談だが、球面収差はレンズの曲率を小さくするほど減少する。したがって、高屈折率の材料を使った曲率の小さいレンズは同じ焦点距離の低屈折率材料のレンズよりも球面収差が少ない。屈折率の高いダイヤモンドでレンズを作るのは難しいから、曲率が小さく焦点距離の長いレンズを複数組み合わせて短焦点の対物レンズを作る²⁶⁾。曲率を小さくした極限がカ

バーガラスなどの平行平板であるが、収斂または発散の角度が大きい場合（高NAレンズに対応）には、球面収差が残るのである。組み合わせレンズは収差の補正に有効であるが、色収差の補正は凸レンズと凹レンズを組み合わせる必要がある。ヒトの眼は解剖図を見るとわかるように、凸レンズのみの組み合わせになっている。このため色収差が補正されておらず、ひどい状況になっている。赤（ 700nm ）と青（ 400nm ）の間では約 2 ディオプタの収差がある³¹⁾。眼鏡屋や本屋の店頭に置いてある老眼鏡の $+2$ と記載されたもの（ 2 ディオプタの凸レンズで、焦点距離 $1/2 \text{m}$ という意味）で試してみると、 2 ディオプタの大きさが理解しやすい。

おわりに

光学的考察と基礎データにより、技術的な見通しを良くして、カラーフィルタ関連材料開発の効率化を図るための努力をしてきた。この一端を、以上に紹介した。電磁気に関するマックスウェルの式が電波（電磁波）の存在を予言していたように、技術的な見通しを良くし、予測につながる知識が重要である。ここに紹介したような努力を今後とも続けて行きたいと考えている。

引用文献

- 1) G. Wyszecki and W. S. Stiles, "Color Science, Second Edition", John Wiley & Sons, 1982
- 2) Hugh S. Fairman, Michael H. Brill, Henry Hemmendinger, Color Res. Appl., 22, 11 - 23 (1997)
- 3) 例えば, W. A. Thornton, Color Res. Appl., 17, 240 - 262 (1992)
- 4) W. A. Thornton, Color Res. Appl., 23, 402 - 407 (1998)
- 5) J. Zolid, Color Res. Appl., 25, 416 - 422 (2000)
- 6) Y. Nayatani and H. Sobagaki, Color Res. Appl., 25, 32 - 42 (2000)
- 7) 篠森, 映像情報メディア学会誌, 58, 313 - 318 (2004)
- 8) M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press (1964)
- 9) W. J. Lentz, Appl. Opt., 15, 668 - 671 (1976)
- 10) W. J. Wiscombe, Appl. Opt., 19, 1505 - 1509 (1980)
- 11) J. J. Joshi, H. S. Shah, R. V. Mehta, Color Res. Appl., 28, 308 - 316 (2003)
- 12) J. M. Jarem, PIER, 19, 109 - 127 (1998)
- 13) V. D. H. Pahlke, Farbe und Lack, 73, Nr. 5,

- 410 - 417 (1967)
- 14) J. L. Musfeldt, D. B. Tanner, A. J. Paine, J. Opt. Soc. Am. A, 10, 2648 - 2657 (1993)
- 15) S. Chandrasechal, "Radiative Transfer", Dover Publications, Inc. (1960)
- 16) P. S. Mudgett and W. Richards, Appl. Opt., 10, No. 7, 1485 - 1502 (1971)
- 17) P. S. Mudgett and W. Richards, J. Colloid Interface Sci., 39, No. 3, 551 - 563 (1972)
- 18) F. W. Billmeyer and W. Richards, J. Color & Appearance, 2, No. 2, 4 - 11 (1973)
- 19) 谷添, 杉浦, 画像電子学会誌, 32, 722 - 729 (2003)
- 20) 村田, 「工業測色学」, 住友化学工業株式会社, (1968)
- 21) E. W. Allen, J. Opt. Soc. Am., 64, 991 - 993 (1974)
- 22) G. Sharma, Color Res. Appl., 25, 333 - 348 (2000)
- 23) 矢部, 八巻, 「非線形計画法」, 朝倉書店 (1999)
- 24) P. R. Belanger, J. Opt. Soc. Am., 64, 1541 - 1544 (1974)
- 25) JIS R 3702, 「顕微鏡用カバーガラス」
- 26) 久保田, 「光学」, 岩波書店 (1964)
- 27) J. A. Van den Akker, J. Opt. Soc. Am., 33, 257 - 259 (1943)
- 28) K. S. Gibson, H. J. Keegan, J. Opt. Soc. Am., 28, 372 - 385 (1938)
- 29) O. D. D. Soares, J. L. C. Costa, Applied Optics, 38, 2007 - 2013 (1999)
- 30) 河野, 「光結合系の基礎と応用 第二版」, 現代工学社 (1998)
- 31) 内川, 映像情報メディア学会誌, 56, 1462 - 1463 (2002)

PROFILE



中塚 木代春

Kiyoharu NAKATSUKA

住友化学工業株式会社
情報電子化学品研究所
リサーチフェロー