

光学

第 10 章 測光・測色

黒田和男

1 放射量と測光量

本章では，光の明るさと色について考察する。光源や像の明るさは，光源から放出される，あるいは，スクリーン上に入射する光のエネルギーによって決まる。したがって，測光学の基本は光のエネルギー，あるいは，単位面積を単位時間内に通過する光のエネルギーすなわちパワー (=エネルギー密度/時間) を測ることにある。

エネルギー (単位は J, ジュール) やパワー (単位は W, ワット) は基本的な物理量として明確な定義が与えられているが，人間が眼に感じる明るさを測るためには，これは適当ではない。例えば，どんなに強い光束があっても，それが赤外線や紫外線であれば人間の眼は感じない*¹。また，ワットで測ると同じ強さの光でも，赤，緑，青など色によって眼の感じる明るさは異なる。色による明るさの感じ方の差を視感度とって，標準的な人間の視感度というものが国際規格*²で定められている (図 1)。このように視感度を考慮した光の強さは lm(ルーメン) という単位で測られる。したがって

*¹ ただし，強い赤外線が当たると熱いと感じ，ひどいときは火傷をするし，強い紫外線を眼に入れるといわゆる雪目になり涙が止まらなくなる。

*² 国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) が決めた規格。

測光学には W を単位とした物理的な測光学と, lm を単位とする心理物理学的な測光学の二つがある。前者を**放射測光学** (radiometry), 後者を単に**測光学** (photometry) という。radiometry と photometry は視感度曲線を媒介して 1 対 1 に結ばれているので, 両者は平行して論じることができる。用語は, 日本語では radiometry の量には「放射」という接頭語を付けて, photometry の対応する量と区別することになっている。

測光学は幾何光学を基礎に置く体系であり, 回折や干渉の効果は考慮しない。ここでは, 光源のある点からある方向の放射される光の強度 (明るさ) を出発点とする。

1.1 標準観測者

光電場の 2 乗に比例する光強度のスペクトル密度を $e(\lambda)$ とする。人の眼が感じる明るさ f は

$$f(\lambda) = K(\lambda)e(\lambda) \quad (1)$$

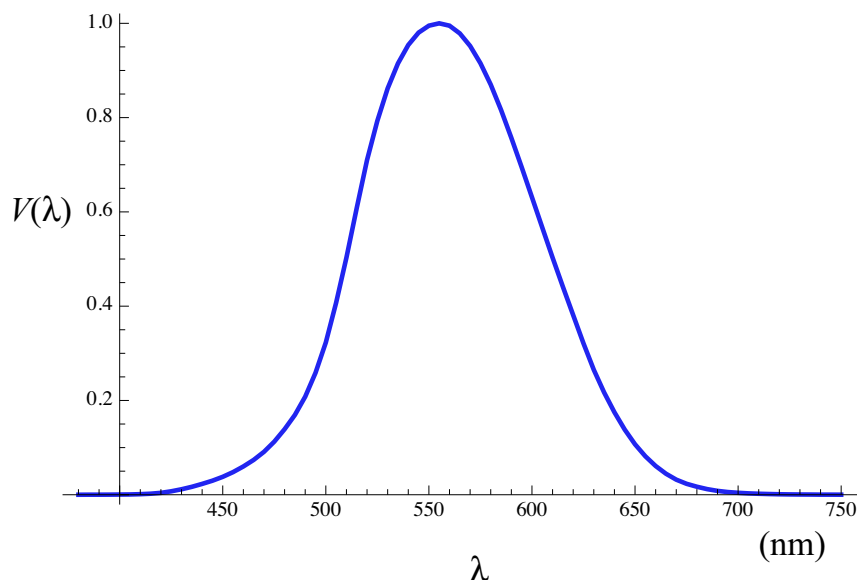


図 1 視感度曲線

と書ける。この式は、人の感覚の強さがエネルギー密度に比例することを前提とする。人間の眼は、夏の炎天下の明るさ (10^5 lx) から、星明かり (10^{-3} lx) まで^{*3}、非常に広い範囲の明るさに順応できる。眼に入る光量は瞳孔で調整できるが、調整量はせいぜい 10 から 20 倍程度である。この広い範囲を線形で反応できるとは思えない。感度が明るさに比例するというのは、近似に過ぎず、強度のある狭い範囲に限られる。実際、次節に述べる通り、人間の眼の視細胞には桿体と錐体に二種類があつて、明るい所と暗い所で視細胞を切り替えている。

変換の係数 $K(\lambda)$ を**スペクトル視感度** (spectral luminosity) という^{*4}。 $K(\lambda)$ の最大値を K_m と置き、スペクトル視感度を

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \quad (2)$$

と表現する。 $V(\lambda)$ を**比視感度** (relative luminosity) という。視感度は明るい所 (錐体) と暗い所 (桿体) で異なる。図 1 の $V(\lambda)$ は明所視の視感度である。最大視感度は波長 $\lambda = 555$ nm にあり、現在の標準では、明るさをルーメン (lm)、光の物理的な強さを W で表して

$$K_m = 638 \text{ lm/W} \quad (3)$$

と決められている。 $K(\lambda)$ を介して、物理的な光の強度 (放射測光量) から心理物理的な明るさ (測光量) へ変換できる。放射量と測光量は対応するから、本章では、放射量を左に、測光量を右に並列して書くことにする。

^{*3} lx は照度の単位ルクス。1.4 節を見よ。

^{*4} 異なる波長、すなわち異なる色の明るさを表す量であるが、実験で求めるのは簡単ではない。例えば、赤色と緑色の光の明るさを比べるとする。物理量としてはパワーの計測をすればよいから問題はない。ところが、心理物理量の計測は難しい。同じ色であつても定量的な比較 (例えば、右の方が左より 1.5 倍明るいというような比較) はできない。同じ明るさである、とか、右の方が左より明るいといった判断が下せるだけである。さらに、赤色と緑色を見せられて、どちらが明るいかと聞かれても、簡単には答えられないだろう。実際には、近い色を順次比べて行く方法 (step-by-step method) や、二色を高速に切り替えてちらつきの有無を問う方法 (flicker method) などで計測する。

1.2 点光源の光度

観測点から見た光源の大きさ（視直径）が、回折による解像限界以下のとき、点光源と見なすことができる。例えば夜空の恒星がこれに当たる。点光源から、微小立体角 $d\Omega$ の円錐内に放射される光の強度 $dF(d\Phi)$ を

$$dF = I_r d\Omega \qquad d\Phi = I d\Omega \qquad (4)$$

と書く。ただし

$$F = \int F_\lambda d\lambda \qquad \Phi = \int K(\lambda) F_\lambda d\lambda \qquad (5)$$

である。 F を**放射束** (radiant flux), Φ を**光束** (flux) という。放射束の単位は W, 光束の単位は**ルーメン** [lm] である。単位立体角当たりの放射束 I_r を**放射強度** (radiant intensity)[W/sr] *⁵, 対応する測光量 I を**光度** (luminous intensity) といい, 単位は**カンデラ** [cd = lm/sr] が用いられる。

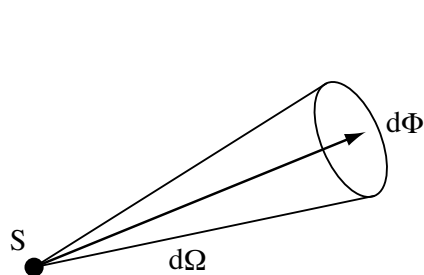


図2 点光源の光度

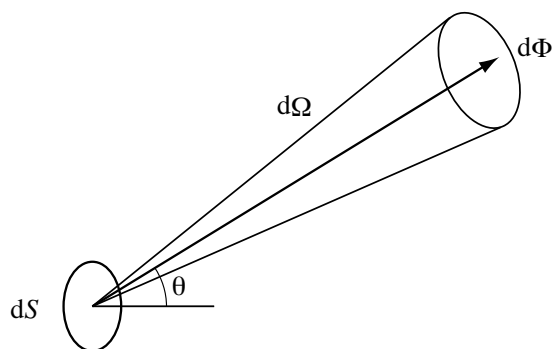


図3 面光源の輝度

*⁵ sr は立体角の単位ステラジアン。全立体角は 4π sr である。

1.3 面光源の輝度

次に拡がりのある光源を考える。光源という場合、電球のように自分自身で光るものだけではなく、他の光源に照らされて光っているものも含める。太陽の下で建物やランプで照らされた人物も光源である。面光源を考えると、光源上の各点はそれぞれ空間の各方向に光を放出しているが、その強さ(単位面積、単位立体角あたりの)を輝度という。したがって、輝度は面光源上の位置と光束の方向の関数である。

面光源上の微小面積 dS から、法線から θ の方向に微小立体角 $d\Omega$ の円錐の中に放射される放射束(光束)を $dF(d\Phi)$ とすると

$$dF = L_r \cos \theta dS d\Omega \qquad d\Phi = L \cos \theta dS d\Omega \qquad (6)$$

と表すことができる。単位面積単位立体角当たりの放射束 L_r を**放射輝度**(radiance)[W/(m²sr)], 単位面積単位立体角当たりの光束 L を**輝度**(luminance)[cd/m²] という。なお, $dS \cos \theta$ は, 観測点から見た微小面積 dS の見かけの面積である。

光源全体が放出するパワーが同じであっても、光源の面積や光源から出る光の拡がり(指向性)が異なると、輝度は異なる。例えば、100Wの電球と1Wのレーザー光を比べると、光源全体のパワーは電球の方が100倍も強いが、電球は全方向にわたって光を出すのに対して、レーザーは非常に狭い特定の方向にしか光を出さないので、正面の輝度で比べると、レーザーの方が何桁も大きな値になる。

1.4 照度と発散度

光源によって照らされる面の明るさは照度で測られる。これは単位面積当たりの入射光のパワーである。ある微小面積 dS が受ける全放射束(光束)

を $dF(d\Phi)$ として

$$dF = E_r dS \qquad d\Phi = E dS \qquad (7)$$

と表す。単位面積の受ける放射束 E_r を**放射照度** (irradiance)[W/m²], 単位面積の受ける光束 E を**照度** (illuminance) という。照度の単位には, **ルクス** [lx = lm/m²] が用いられる。

一方, 面光源の微小面積 dS が放射する全放射束 (光束) を $dF(d\Phi)$ として

$$dF = M_r dS \qquad d\Phi = M dS \qquad (8)$$

と表す。単位面積当たりに放射される放射束 M_r を**放射発散度** (radiant exitance)[W/m²], 単位面積当たりに放射される光束 M を**光束発散度** (luminous exitance)[lm/m²] という。

点光源で照らされた面上の微小面積 dS における照度を求めよう。点光源を頂点, 微小面積を底面とする円錐の張る立体角 $d\Omega$ は $d\Omega = dS \cos \theta / d^2$ で与えられる (図 4)。ここで, θ は, dS の法線と, 点光源と dS の中心を結ぶ直線との間の角度 (入射角) である。よって, 照度は

$$E_r = \frac{I_r}{d^2} \cos \theta \qquad E = \frac{I}{d^2} \cos \theta \qquad (9)$$

で与えられる。特に $\theta = 0$ のとき, すなわち dS が点光源と dS を結ぶ直線に対し垂直の場合を法線照度という。上の結果から, 照度は点光源からの距離 d の 2 乗に逆比例し, 入射角の余弦に比例することがわかる。

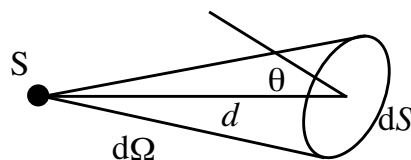


図 4 微小面積の張る立体角

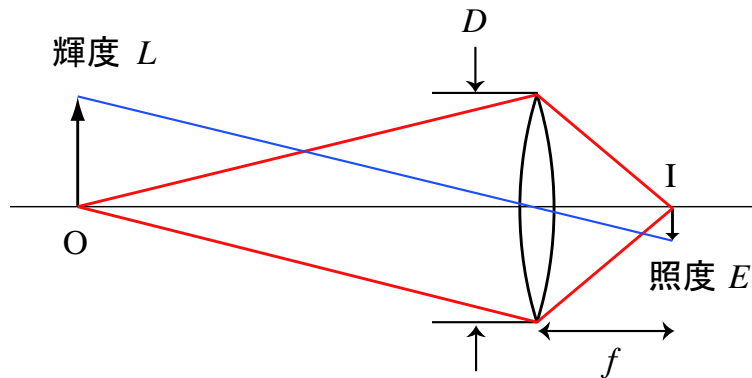


図5 像の照度

次に面光源を結像したときの像の照度を考えよう (図5)。人の眼やカメラで輝度 $L_r(L)$ の物体を結像したとき、物体距離は十分大きいとして、像の照度は

$$E_r = \frac{\pi L_r}{4F^2} \qquad E = \frac{\pi L}{4F^2} \qquad (10)$$

で与えられる。ただし、 $F = f/D$ はレンズの F ナンバーである。像の照度は輝度に比例し、 F ナンバーの2乗に反比例する。 F ナンバーの小さいレンズを明るいレンズと呼ぶのはこのためである。

1.5 完全拡散面

輝度が方向によらず一定となる面、すなわち、放射束が $\cos \theta$ に比例する面を、**完全拡散面**、または**ランベルト (Lambert) 面**という。完全拡散面の例として、酸化マグネシウム (MgO) を塗った白色の面がある。

完全拡散面では、一様に照明されていればどの向きにも輝度が一定であるから、面の形状によらず一様な明るさに見える。例えば、月の表面はほぼ完全拡散面であると見なせる。満月は球であるが、球面のどの位置も同じ明るさに見えるから、立体感が失われ円盤のように見える。

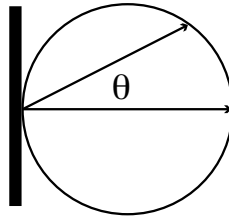


図6 完全拡散面

1.6 輝度不変則

輝度は単位面積単位立体角当たりの光強度 (光束) である。面光源を光学系で結像すると、像はその後の光学系では光源の働きをするから、像の輝度というのを考えることができる。ところが、3章で学んだヘルムホルツ・ラグランジュの不変式によれば、結像の横倍率 β と角倍率 γ は反比例の関係にある。すなわち、面光源上の微小面積を dS 、微小立体角を $d\Omega$ とし、 dS を結像したときの像の面積を dS' 、光束の像空間における立体角を $d\Omega'$ とする。倍率の定義から、 $dS' = \beta^2 dS$ 、 $d\Omega' = \gamma^2 d\Omega$ であるが、 $\beta\gamma = 1$ の関係があるから、 $dS' d\Omega' = dS d\Omega$ である。これから光学系に吸収がなければ、放射輝度について

$$L'_r = L_r \quad (11)$$

が成り立つ。すなわち、像の輝度は元の面光源の輝度に等しい。これを**輝度不変則** (conservation of radiance) という。

面光源の見た目の明るさは輝度で決まる。よって、輝度が等しい面光源の明るさは、結像の条件にはよらない。すなわち、観測点からの距離によらない*6。これは、点光源が距離の2乗に比例して暗くなるのと対照的である。

例えば、道路沿いに並ぶ街灯を思い出そう。近くの街灯は大きく見え、遠

*6 もちろん、物体の大きさが解像力以下になるまで遠ざかると、点光源になってしまい、輝度は定義できなくなる。

くになるほど小さく見える。しかし、街灯の見た目の明るさ（輝度）は変わらない。一方、その街灯の光で本を読もうとするときは、照度が効いてくるから、遠くの街灯は何の役にも立たない。

2 視覚と色

異なる波長の可視光は、ヒトには色の違いとして認識される。太陽光は色がついていない白色に感じられるが、これはいろいろな波長の光が混じったために白色と感じられるのである。いろいろな波長の光が混じった光を、波長の異なる光に分けることを分光といい、単色光を波長の順に並べたものを**スペクトル** (spectrum) という。いわゆる虹の7色（波長の短い方から：紫（堇）、藍、青、緑、黄、橙（だいだい）、赤）は、白色光（太陽光）のスペクトルを表現したものである（図7）。

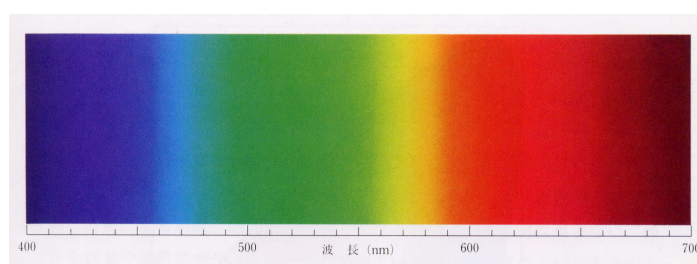


図7 白色光のスペクトル

2.1 眼

眼は、被写体の像を網膜上に結ぶ結像光学系と、光を検知し、脳に信号を送る検出系からなる。

図8に示す通り、結像光学系は、外から順に、角膜、水様液で満たされた前房、水晶体、硝子体で構成される。角膜 (cornea) はコラーゲン繊維 ($n = 1.55$) と基質 ($n = 1.354$) が規則正しく格子状に配列した構造の透明

体で、眼球を保護している。眼のパワー（屈折力）の大部分は角膜の前面が担っている。水晶体 (crystalline lens) は屈折率が内部で 1.424 から表面で 1.377 まで変化する層状物質で、屈折率分布型レンズになっている。この構造の利点は、屈折率が一樣な単レンズより収差を低く抑えることができることにある。水晶体の端は毛様筋 (ciliary muscle) で引っ張られていて、毛様筋の運動でレンズ形状を変化させ、焦点を調整する。水様液 (aqueous humor) と硝子体液 (vitreous humor) は屈折率が水に近い液体 ($n = 1.336$) でできていて、光学的には角膜と水晶体の間を繋ぐと同時に、眼球の形状を保持し、さらに、眼内組織への栄養補給の役割も果たしている。水晶体の前に、絞りの役割も持つ虹彩 (iris) がある。

網膜 (retina) は、厚さが約 0.3 mm の透明膜で、表側に視神経、裏側に視細胞がある。視細胞は、光を電気に変える光電素子の役割を果たす。表側には、視細胞で発生した電気信号を伝える視神経のネットワークがあり、情報を脳まで伝達する。視神経を束ねて外に配管する部分が盲点で、ここには視細胞が存在せず、光に対する感度がない。しかし、脳が適切に情報処理をす

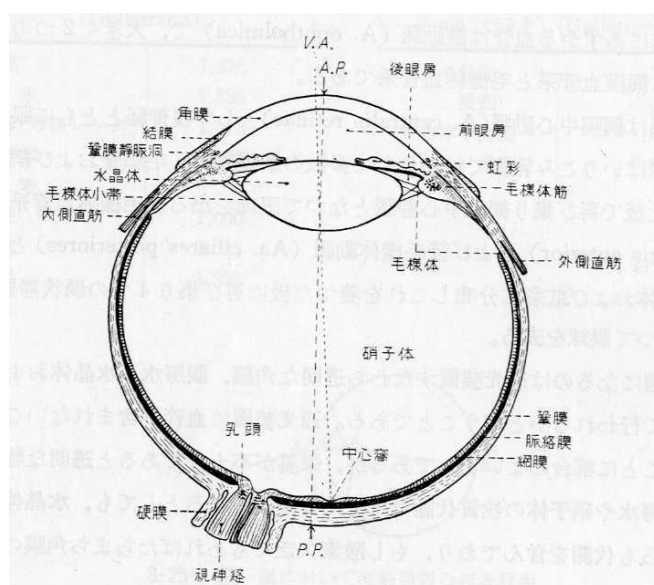


図8 ヒトの右眼 (水平断面図)

るため、普段の生活では盲点の存在に気付くことはない。

視細胞には、ダイナミックレンジを拡げる（順応性を高める）ために、もっぱら暗いところで働き、高感度に光を検出する**桿体** (rod) と、明所で明暗と色を識別する**錐体** (cone) の2種類の視細胞が存在する。前者を暗所視 (scotopic)、後者を明所視 (photopic) という。錐体はまた、分光感度特性が異なる感光物質（視物質）が含まれる3つの種類に分けられ、それぞれ、赤、緑、青の3色成分を検出し、信号化する。図9はこの3種類の錐状体の吸収スペクトルの計測値である。

桿体には色を識別する能力は無いから、われわれは暗所では物の色を区別することはできない。2種類の視細胞は網膜上に分布しているが、それは一様ではない。中心部分には錐体が多数密に分布し、高分解能で物体を識別することができるようになっていく。この部分は黄色く見えるところから黄斑部 (yellow spot) と呼ばれる。一方、高分解能を要求されない周辺部には桿体が多く分布する。従って暗所では、視野の中心より周辺の方が物がよく見える。

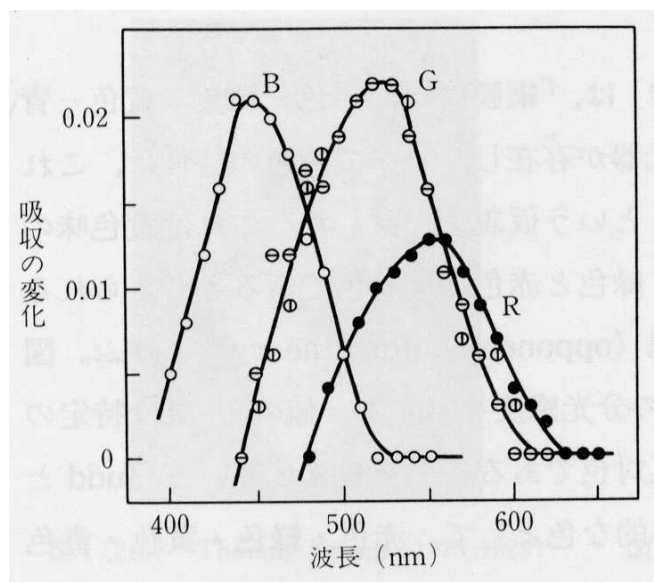


図9 ヒトの錐状体の分光吸収

2.2 色表現：顕色系

色を表すにはいくつかの方法があるが、大きく分けて、**顕色系**と**混色系**がある。顕色系は、沢山ある色を見え方によって分類する。**色相** (hue) は、赤、緑、黄、青など色の種類を表す。同じ赤色でも、明るい赤と暗い赤がある。これを区別するが**明度** (lightness) である。さらに、同じ明度の赤色でも、鮮やかな赤とくすんだ赤がある。これが**彩度** (chroma) である。これらを**色の三属性**という。これらに適当に数値を割り振って色を分類できる。その代表的なものがマンセル (Mansell) 表色系である。図 10 はマンセル表色系を3次元的に表した立体模型で、縦軸に明度、軸の回りの回転角に色相、軸からの放射方向への距離に彩度を取る。中心軸の一番上が白、一番下が黒を表す。

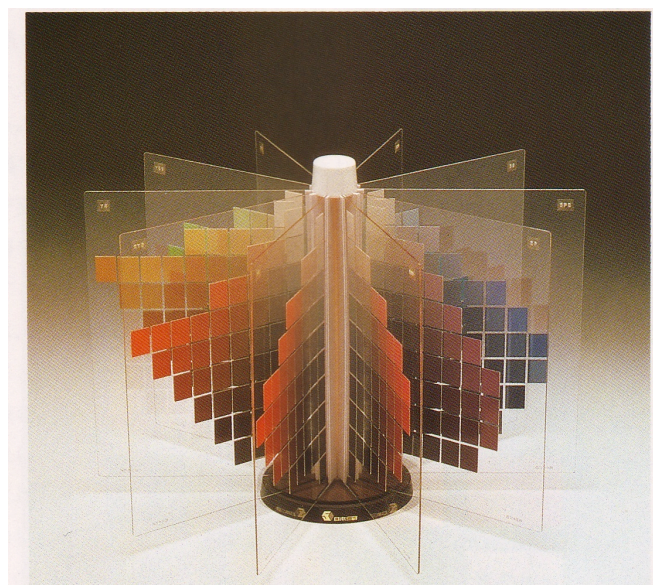


図 10 マンセル表色系

2.3 色表現：混色系

2.3.1 RGB 表色系

混色系は、色をいくつかの基本的な色を混ぜたものとして表す。混色には、スポットライトを重ねるような加法混色と、絵の具を重ねるような減法混色がある。前者では多数の色を重ねると白くなるが、後者では黒くなる。加法混色による表色系は、全ての色を赤 [R]、緑 [G]、青 [B] の三色の重ね合わせで表現できるという実験事実に基づく色の表現法である。この表色系での大前提は加法法則が成り立つことである。与えられた色を、三原色の混色で表すことを**色合わせ**あるいは**等色** (color matching) という。ある色 [F] が、三原色を重み (R, G, B) で重ねたときに等色化されることを

$$[F] = R[R] + G[G] + B[B] \quad (12)$$

と表す。 (R, G, B) で色 [F] を表現することができる。この重み係数を**三刺激値** (tristimulus values) という。もちろんこの操作が意味を持つためには、あらかじめ [R]、[G]、[B] が決められていなければならない。実際には、国際的な団体である CIE で定められている。

実際にわれわれが感じる光の色は、スペクトルによって決まる。そこで、波長 λ の単色光に対する三刺激値を $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ とする。加法法則が成り立つことを前提としているので、スペクトル分布 $P(\lambda)$ の光に対する三刺激値は

$$A = \int P(\lambda) \bar{a}(\lambda) d\lambda, \quad A = (R, G, B), a = (r, g, b) \quad (13)$$

と積分で求めることができる。このような表色系を RGB 表色系という。図 11 は RGB 表色系の等色関数をプロットしたものであるが、不便なことに負の値が出てくる。色合わせでは引き算はあり得ない。単色光 [F] に対し、RGB の重みをどのように変化させても等色化できないことがある。そこで、[F] と [R] を重ねたものと、[G] と [B] を重ねたものを等色化して、[F]

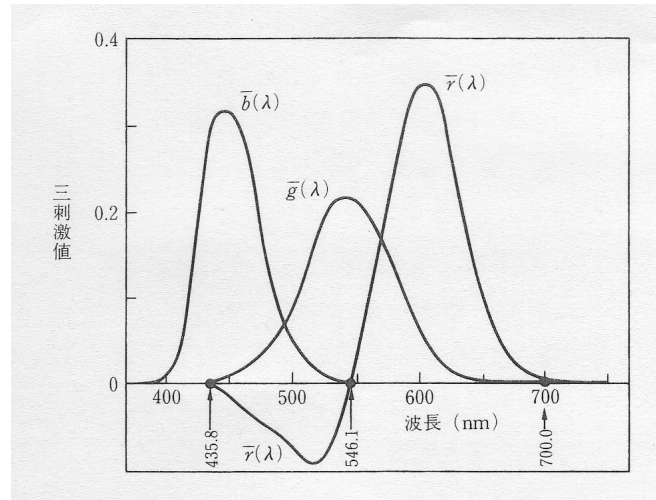


図 11 rgb 等色関数

+ $R[R] = G[G] + B[B]$ という結果を得たとき、 $(-R, G, B)$ を等色係数とする。これが負の係数の意味である。

2.3.2 XYZ 表色系

等色関数に負の値がでるのは不便である。加法混色系では線形演算が許されるから、RGB の重ね合わせで基準となる三原色を定義しなおし、負の値が出て来ないようにすることができる。このようなものの一つが XYZ 表色系である。XYZ 表色系の等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を図 12 に示す。XYZ 表色系の等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ は、式 (2) の視感度曲線に等しくとる。式 (13) と同様に、光のスペクトル $P(\lambda)$ に 3 種の等色関数をかけて積分した値 (X, Y, Z)

で色を表すことができる*7。

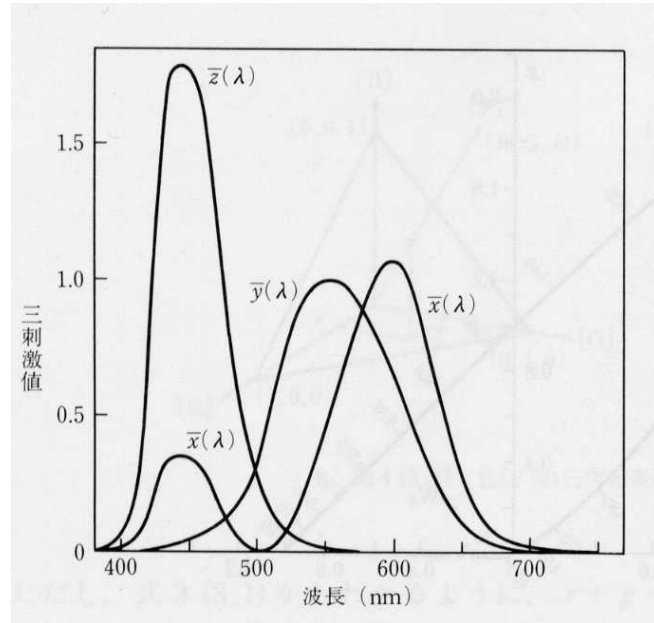


図 12 xyz 等色関数

三刺激値は3次元空間の値を取るが、そのうちの一つは明るさに対応するから、色は2次元空間で表現できる。このため、強度で規格化し、 (X, Y, Z) から

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (14)$$

を求める。 (x, y) 面上に実際の色を描いたのが、図 13 の xy 色度図 (chromaticity diagram) である。この馬蹄形の外縁の曲線部分はレーザーのよう

*7 RGB 表色系と XYZ 表色系は線形の関係にあり、互いに変換できる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.41844 & -0.15866 & -0.08283 \\ -0.09117 & 0.25242 & 0.01570 \\ 0.00092 & -0.00255 & 0.17858 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

な単色光 (スペクトル色) を表す。赤と紫を結ぶ直線部分はスペクトルの存在しない部分である。原理的に、この図形の外には色は存在しない。内部には、三原色の加法混色で表現される色が表示される。中央に白色がある。白色点は、三刺激値が等しい点 ($X = Y = Z$) と定義されるので、色度は $x = y = 1/3$ である、

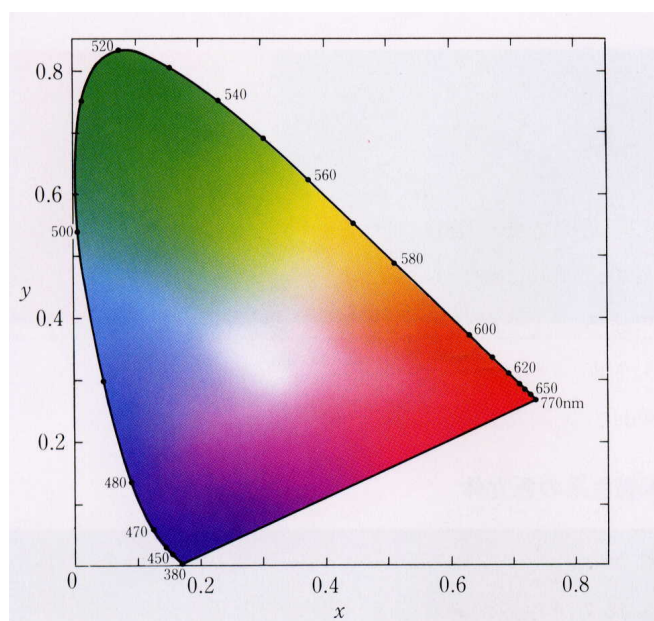


図 13 xy 色度図

この他、 XYZ 表色系に近いものとして $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系がある。この二つは、色を比べる時の視野が異なる。すなわち、 XYZ 表色系では視野角は 2° と比較的狭い領域に設定されている。これを 10° 視野に拡げて標準化したのが $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系である。要するに、等色関数を決定する実験条件の違いを反映したものである。ただし、両者の差はそれほど大きくない。

2.3.3 均等表色系

自然に存在する色は xy 色度図上の点で表されるが、2 点間ば幾何学的な距離が、対応する 2 色の知覚的な差に等しいとは言えない。すなわち、 xy 色度図の上の色の分布は均等ではない。そのため、より均等な色度図がいくつか提案されている。それが uv 表色系および $u'v'$ 表色系である。それらは、 xy 表色系と次の関係で結ばれる。

$$\begin{aligned}u &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\v &= \frac{6y}{-2x + 12y + 3} = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}\end{aligned}\tag{15}$$

および

$$\begin{aligned}u' &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\v' &= \frac{9y}{-2x + 12y + 3} = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}\end{aligned}\tag{16}$$

2.3.4 均等色空間

xy 表色系や $u'v'$ 表色系では色は区別できるが、明るさの情報が失われている。XYZ 三刺激のうち Y が明度を表すので、 (x, y, Y) や (u', v', Y) で色相と明度を表すことができる。しかしこれらのパラメータは、色空間としては均等ではない。 Y は光の物理的なエネルギーに比例する量であるが、人間が感じる明度は光のエネルギーに比例しない。実際、光が強くなると、感覚は飽和する傾向にある。近似的には明度は Y の立方根に比例する。これを考慮して CIE により導入されたのが、CIELAB 色空間、および、CIELUV

色空間である。これらは次のように定義される。

$$\begin{aligned}L^* &= 116 \frac{\sqrt[3]{Y}}{\sqrt[3]{Y_n}} - 16 \\a^* &= 500 \left[\frac{\sqrt[3]{X}}{\sqrt[3]{X_n}} - \frac{\sqrt[3]{Y}}{\sqrt[3]{Y_n}} \right] \\b^* &= 200 \left[\frac{\sqrt[3]{Y}}{\sqrt[3]{Y_n}} - \frac{\sqrt[3]{Z}}{\sqrt[3]{Z_n}} \right]\end{aligned}\tag{17}$$

ここで、 X_n, Y_n, Z_n は同じ照明を用いて完全拡散面を照射したときの三刺激値である。CIELUV は、 $u'v'$ を用いて

$$\begin{aligned}L^* &= 116 \frac{\sqrt[3]{Y}}{\sqrt[3]{Y_n}} - 16 \\u^* &= 13L^*(u' - u'_n) \\v^* &= 13L^*(v' - v'_n)\end{aligned}\tag{18}$$

と定義される。