

光学

第9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。光の強度を物理的な計測器で計測した値を基に築かれた体系を**放射測光学** (radiometry) という。これに対し、人間の眼が感じる明るさを基にする議論を**測光学** (photometry) という。測光学で扱う量は、人間の感覚を基礎に置くので、**心理物理量**と呼ばれる。すなわち測光学は心理物理量を扱う学問であるが、理論体系は放射測光学と完全に1対1の対応関係がある。

測光学は幾何光学を基礎に置く体系である。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。

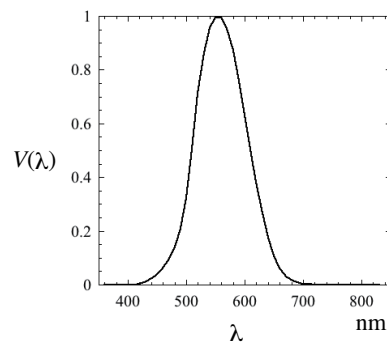


図1 視感度曲線

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

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

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。変換の係数 $K(\lambda)$ を**スペクトル視感度** (spectral luminosity) という。 $K(\lambda)$ 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 (図 1)。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

$$K_m = 683 \text{ lm/W} \quad (3)$$

と決められている。 $K(\lambda)$ を介して、物理的な光の強度 (放射量) から光の明るさ (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。

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。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 を

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

と書く。ただし

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

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]^{*1}, 対応する測光量 I を**光度** (luminous intensity) といひ, 単位は**カンデラ** [$cd = lm/sr$] が用いられる。

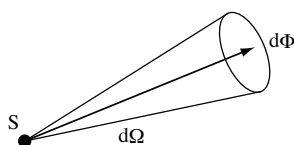


図 2 点光源の光度

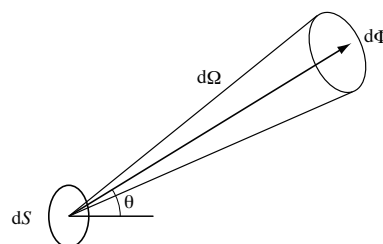


図 3 面光源の輝度

1.3 面光源の輝度

次に拡がりのある光源を考える。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

$$dF = B_r \cos \theta dS d\Omega \quad d\Phi = B \cos \theta dS d\Omega \quad (6)$$

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 B_r を**放射輝度** (radiance)[$W/(m^2 sr)$], 単位面積単位立体角当たりの光束 B を**輝度** (luminance)[cd/m^2] 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。

^{*1} sr は立体角の単位ステラジアン。

1.4 照度と発散度

照らされる面の明るさを照度という。ある微小面積 dS が受ける全放射束を dF 、全光束を $d\Phi$ 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を dF 、全光束を $d\Phi$ 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]、単位面積当たり放射される光束 M を**光束発散度** (luminous exitance)[lm/m²] という。

1.5 点光源による照度

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る。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。

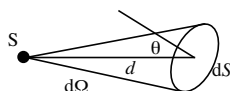


図 4 微小面積の張る立体角

1.6 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ど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。

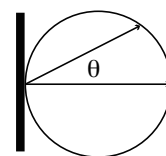


図 5 完全拡散面

1.7 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、 $dS'd\Omega' = dSd\Omega$ である。これから光学系に吸収がなければ、輝度について、 $B' = B$ 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。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、遠く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6)。

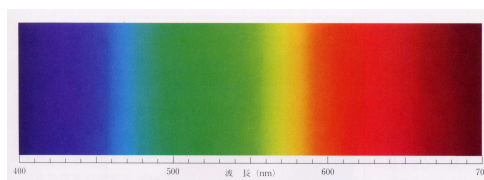


図6 白色光のスペクトル

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7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、表側に視細胞があり、光を電気に変える光電素子の役割を果たす。裏側には、視細胞で発生した電気信号を伝える視神経が集まり、情報を脳まで伝達する。

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。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8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る。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

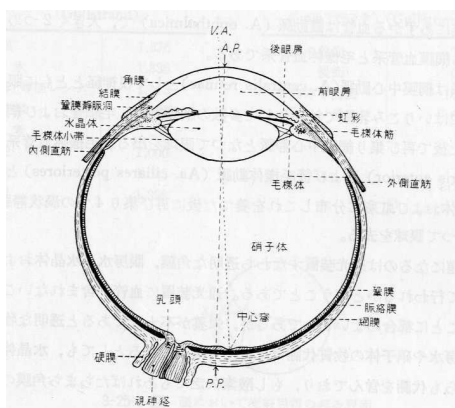


図7 ヒトの眼 (水平断面図)

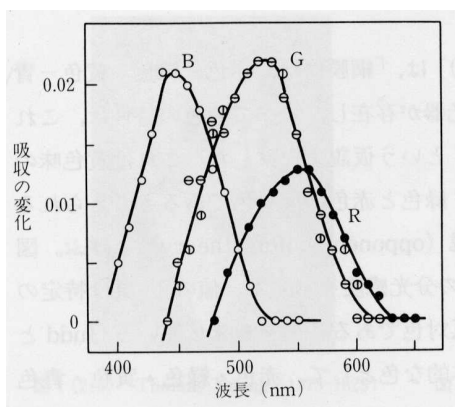


図8 ヒトの錐状体の分光吸収

の方が物がよく見える。

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るため、普段の生活では盲点の存在に気付くことはない。

2.2 色

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9はマンセル表色系を3次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。

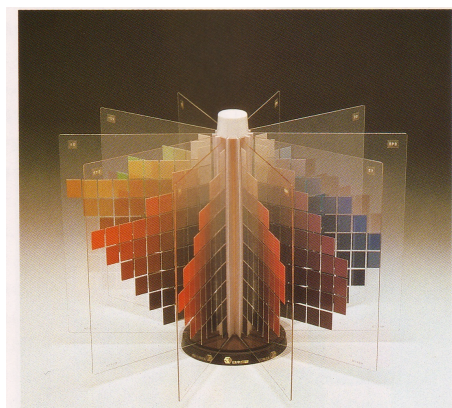


図9 マンセル表色系

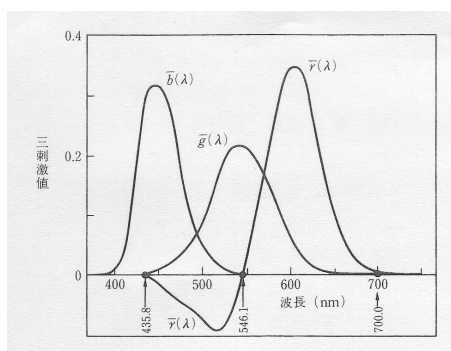


図10 *rgb* 等色関数

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

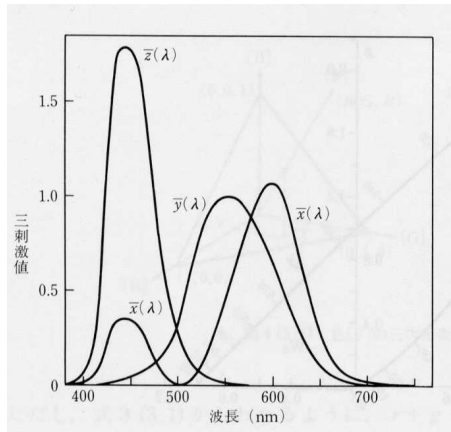


図 11 xyz 等色関数

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定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

$$[F] = R[R] + G[G] + B[B] \quad (10)$$

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国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Éclairage, 略して 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。加法定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

$$A = \int P(\lambda)\bar{a}(\lambda)d\lambda, \quad A = (R, G, B), a = (r, g, b) \quad (11)$$

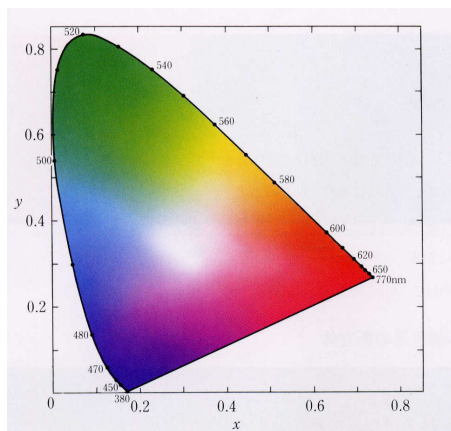


図 12 xy 色度図

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 10 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、 $[F] + R[R] = G[G] + B[B]$ 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。

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 11 に示す。式 (11) 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。

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

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (12)$$

を求める。 (x, y) 面上に実際の色を描いたのが、図 12 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。