

第 1 章 光と色の基礎

本章では建築光環境を考える上で必要となる基礎知識を概説する。

光環境の基礎となる光と色の特徴について、基礎知識と建築への応用的知識を織り交ぜながら解説する。次に光と色の表現方法について、測光量と表色系やそれぞれの関係性について述べる。最後に光と色の効果について、受容器である眼の構造や情報処理プロセス、生理的・心理的効果について解説する。

1.1 光と色の特徴

1.1.1 光とは何か

光の性質を解明しようと古代から探求がなされてきた。光は電磁波の1種であり、波の特性を持つと捉え、それによって挙動を説明しようとする波動光学 (Physical Optics, Wave Optics) の考え方がある。ニュートンのプリズムを用いた光の分光の実験は有名な例である。しかし、特にエネルギーの観点から波動光学では説明できない挙動 (例えば、光のエネルギーが波長に依存する現象についてなど)について、光を光子 (Photon) と捉える量子光学 (Quantum Optics) も発達した。レンズなどの研究で発展した幾何光学 (Geometric Optics) の分野は、波長ごとの挙動の違いではなく、光を光線と捉えて方向など光の経路に主眼を置いている。単純なモデルで検討できるため、現代でも光学機器の分野で利用されている。レンズと像の形成の関係について学んだ際に用いたことも思い出せるだろう。

本書では、建築環境工学において必要とされる知識に主眼を置き、伝搬に関しては幾何光学的な考え方で解説し、光と色と視覚情報については波長を含めた説明を行う。

1.1.2 電磁波の波長ごとの名称と特徴

電磁波は波長により特徴が異なる。図 1-1 に波長と名称を図示する。

(1) 可視光

人の視細胞が感じることができる光、可視光は 380～780nm の範囲である (図 1-2)。短い波長から紫、藍、青、緑、黄、橙、赤と異なる色に見える。可視光より短い波長範囲は紫外線、長い波長範囲は赤外線である。国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Eclairage, 以下 CIE) では、可視光だけでなく、周辺の紫外線と赤外線を含む範囲を「光」として定義している。本書では、建築環境に関する赤外線・紫外線の特徴を説明しているが、明記がない限り「光」は可視光を指すものとする。

(2) 短波長の電磁波

紫外線 (Ultra-Violet) は可視光よりも短い波長の電磁波であり、約 10～380nm の範囲を指す (分野に

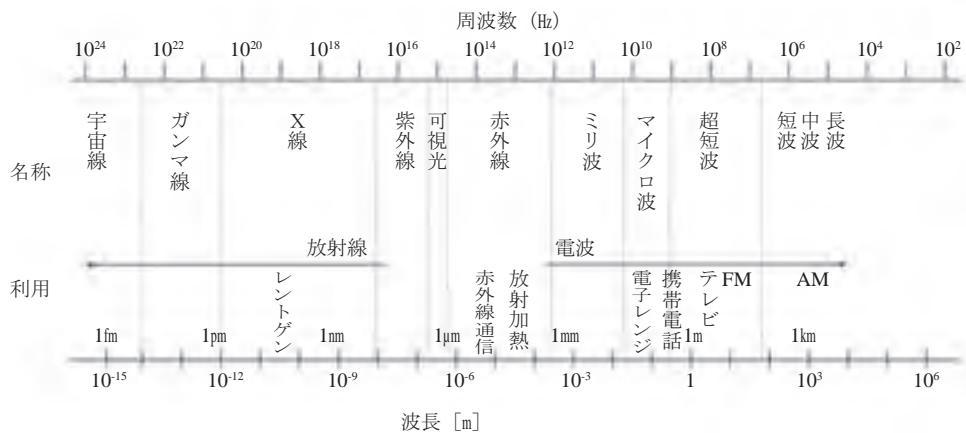


図 1-1 電磁波の名称と範囲、代表的な利用例

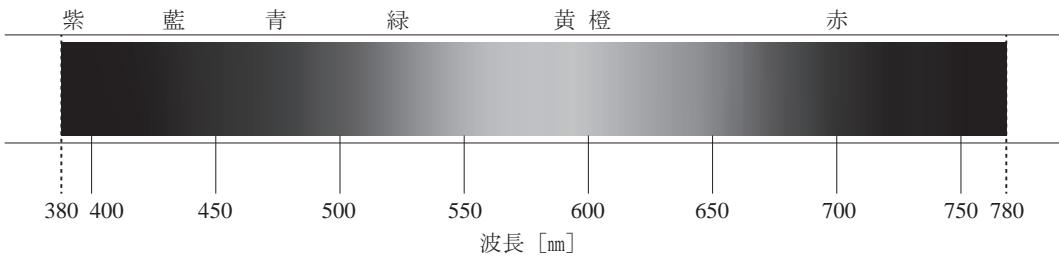


図 1-2 可視光の範囲と色

より違いはある）。人体に対する影響から（詳しくは 1.3.5 (2), 3.1.2）UV-A (320~380nm)¹⁾, UV-B (280~320nm), UV-C (280~200nm), 真空紫外線 (10~200nm) に分けられる。CIE では UV-A (315~400nm), UV-B (280~315nm), UV-C (100~280nm) と分けている。

紫外線より波長がさらに短くなると X 線や γ (ガンマ) 線, 宇宙線などがある。より強い化学作用があり、レントゲンなどの医療的利用が有名である。

(3) 長波長の電磁波

赤外線 (Infra-Red) は可視光よりも長い波長の電磁波であり、780nm~1mm (= 10^6 nm) の範囲（学問によって多少分類が異なる）を指す。CIE では、IR-A (780~1400nm), IR-B (1.4~3μm), IR-C (3~1000 μm) と区分している。日本での区分では遠赤外線や近赤外線などがある。

赤外線よりも波長が長いものは大まかに電波と区分され、波長の長さなどからミリ波、マイクロ波（波長の長さが μm だからではなく、研究当初 (1930 年代) は電磁波の中で短い波長だったため小さいという意味で micro と命名されたとの説がある²⁾）、超短波、短波、中波、長波と区分されている。利用別に周波数帯を設けることで、電子レンジから携帯電話、テレビ、ラジオなど生活上欠かせない電波の利用を円滑に行っている。

1.1.3 光の挙動

光は均質な媒介の中を進むとき、直進し、最短の光路を通ることが知られている（Fermat の原理）。一方で、異なる性質の媒介が接している境界面において、挙動が変化する。境界面、例えば開口部に設置されているガラス面を例にとって説明する（図 1-3）。空気の屈折率を N_1 、ガラスの屈折率を N_2 とおく。ガラス面に対して太陽光が①入射した場合、外気に接しているガラス面において②反射し、時にはガラス面が鏡のように映り込み現象を発生させる。また、光の一部はガラス面で③屈折して透過し、一部は熱エネルギーとしてガラスに④吸収される。またガラス面と室内側の空気の面でも反射・屈折が生じ、最終的に一部の光は室内へと⑤透過する。

光の挙動としては、上記に挙げた反射、屈折、透過、吸収の他に干渉、回折などがある。干渉は、波の挙動の 1 種で 2 つ以上の波の位相が強め合ったり、弱め合ったりする現象である。また、回折はスリットなどの小さな隙間を光が通過する際、スリット後方に回り込む現象である。いずれの場合も建築学における時間的、空間的スケールからするならば、細かな検討が必要な範囲ではない。以下、建築環境工学において重要な反射と透過を中心に説明する。

1.1.4 反射

まず光の反射の特性、すなわち、入射光と反射光との関係を図 1-3 を用いて説明する。境界面に対する法線との角度をそれぞれ入射角 θ_1 と反射角 θ_2 とすると、 $\theta_1 = -\theta_2$ であることが知られている。これは、2 つの媒介の屈折率 N を用いた Snell の法則（式（1-1））が反射光においては、 $N_2 = -N_1$ となるためである。

$$N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_3 \quad (1-1)$$

吸収がないと仮定した場合、入射光 $\theta_1 = 0^\circ$ の反射率 R は式（1-2）のようになる。

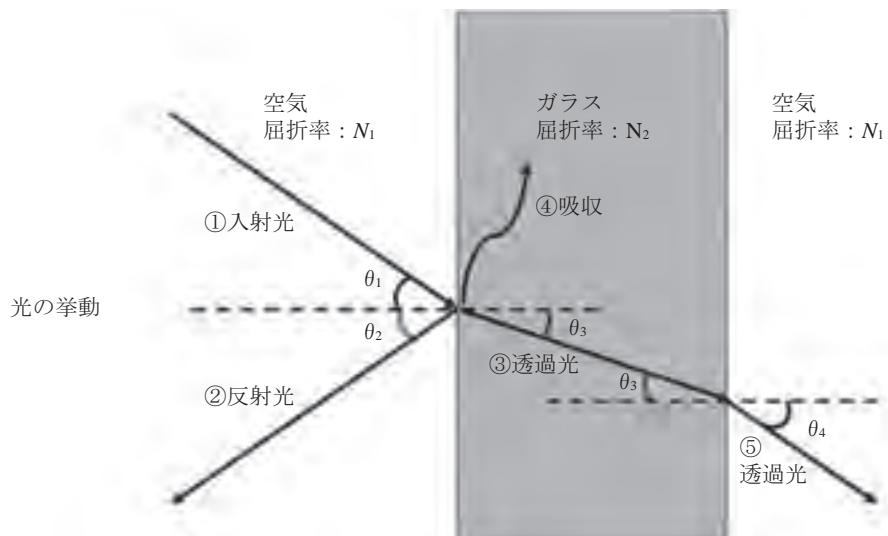


図 1-3 境界面での光の挙動

$$R = \left(\frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \right)^2 \quad (1-2)$$

例えば図1-3で示した状況のように、 N_1 を空気の屈折率1.0003、 N_2 をガラスの屈折率1.5とした場合、反射率 R は0.04と算出できる。公表されている反射率は入射角度などの条件が明記されている。

(1) 全反射

屈折率がより大きい媒介から入射する場合（例えば図1-3のガラス右面から空気への光の伝搬）、全反射という現象が起こり得る。全反射とは、屈折・透過することなく境界面においてすべて反射する状態であり、全反射が発生しうる閾値は臨界角(θ_c)と呼び、式(1-1)において、 $\theta_3=90^\circ$ が成立する θ_1 である。

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{ただし } N_1 > N_2) \quad (1-3)$$

さきほどのガラス面と室内空気との境界面の場合、 $\theta_c=41.8^\circ$ となる。すなわち、図1-3において、 θ_3 が41.8°よりも大きい場合、室内へと光は透過せずにすべて反射する。逆算すれば確認できるが、それを発生させる外気からの入射光 θ_1 は90°となる。これはガラスを挟んでいる空気の屈折率が同一だからである。この全反射の原理を用いている身近な技術として光ファイバーがあげられる。全反射を繰り返すことでガラスケーブル内を光が効率よく反射しながら（透過や吸収によるエネルギー損失がなく）進むことができる。

(2) 反射面の特性

面の特性に応じて反射特性は異なる（図1-4）。入射平面と同一平面、かつ図1-3で $\theta_1=-\theta_2$ となるように反射する場合を正反射といい、金属面や鏡面など光沢のある素材で生じる。一方、表面の凹凸などで拡散されることを拡散反射といい、マットな素材で生じる。照明の分野では、昼光光源や人工光源の直接光だけではなく、室内面による反射の影響を検討する。その場合、室内面が二次光源的な役割を果たすのだが、どの方向にどれくらいの光が反射したかを予測する必要が生じる。そこで単純化するために全方向に均一に反射する理想面を仮定する。このような理想的な反射特性を生じさせる面を「均等拡散面」と呼び、どの方向から見ても輝度（1.2.1を参照）が均一になる面と定義されている。この理想面を用いると照明計算や予測を行うことが簡易になるため、照明シミュレーションなどでも均等拡散面であることが前提となっている場合が多い。一般的な素材では図1-4Bのように正反射成分と拡散反射成分が混ざっている場合が多い。

入射角に対する反射角の対応は先に述べた正反射と拡散反射などに分類されるが、物体面のどこで反射が起こるかに応じて表面反射と内部反射に分類される。金属面では光が透過しないため表面反射が発生する。同様に光沢のあるものでも真珠は複数層の各層で内部反射が発生し、色に深みを加えている。

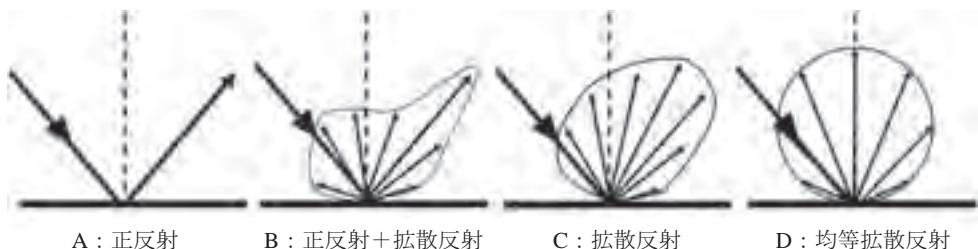


図 1-4 さまざまな面の反射特性

表 1-1 正反射材料の反射率（垂直入射の全反射率）³⁾

材料名	反射率[%]	材料名	反射率[%]
アルミ特殊合金電解研磨面	90～95	透明ガラス	10～12
銅、鋼	50～60	ガラス鏡面（アルミ合金）	80～85

表 1-2 拡散性材料の反射率（45° 入射の全反射率）³⁾

材料名	反射率[%]	材料名	反射率[%]
全乳白ガラス	60～70	畳	50～60
すりガラス	15～25	淡色ビニールタイル	40～70
木材、オイルステイン	10～20	濃色ビニールタイル	10～20
石材一般	20～50	淡色カーテン	30～50
砂利、コンクリート、舗石	15～30	白漆喰壁	75～85

(3) 反射率

反射率とは、入射したエネルギーに対して反射したエネルギーの割合を示したものである。先に述べたように、入射角が浅くなると正反射性が強くなるなど、入射角や面の凹凸によって反射の特性が異なる。そのため入射する光の特性と、光が入射する物質の反射の特性を明確にすることが重要である。一般的に用いられている反射率とは、入射光束（人の感度を加味した光のエネルギー；詳しくは 1.2.1) に対する反射光束の比であり、視感反射率とも呼び、一般に ρ (ロー) で表す。建築分野において用いられる代表的な材料の反射率を表 1-1・2 に示す。

電磁波は波長によってさまざまな特性が異なるように、電磁波に対する物体（光が照射される物）の反応も波長によって異なる（詳しくは 2.1.4）。受照面の波長ごとの反射特性、すなわち面の分光特性として分光反射率や分光透過率などがあり、物の色に関係する特性である。

1.1.5 透過

透過性のある代表的な建材は、開口部などに用いられるガラスである。ガラス面に入射する光の入射角により、反射率も異なり、透過した際の屈折率も異なるため、最終的に室内へと透過する透過率も異なってくる。境界面の特性に応じて透過も同様に、図 1-3 に図示した幾何光学的な光線をたどるものを正透過といい、さまざまな方向に拡散するものを拡散透過と分類する。反射率同様、一般的な

透過率は入射光束に対する透過光束の比で表し、視感透過率と呼ばれ、一般に τ (タウ)で表す。物体内部での拡散性に応じて、透明、半透明、半拡散、拡散及び偏った方向性のある指向性と透過性状を分類できる。表1-3に主だった窓材料や窓装備の透過率を示す。

反射特性同様、入射角度に応じて透過特性が異なり、また波長によっても異なる。図1-5はガラスの種類ごとに入射角に対する透過率を示したグラフである。また各種板ガラスの波長による透過率の違い(分光透過率)を図1-6に示す。

表1-3 窓材料・窓装備の透過率(拡散入射に対する拡散透過)

材料名	厚さ [mm]	透過性状	透過率 [%]
透明ガラス	3~19	透明	83~90
高性能熱反ガラス	6	透明	8~66
すりガラス	3	拡散	90
型板ガラス	4, 6	拡散	89~90
乳白合わせガラス	3 + 3	拡散	62~67
厚地カーテン	—	拡散	0.1~1
淡色薄地カーテン 濃色薄地カーテン	—	拡散	10~30 1~5
障子紙	—	拡散	35~50
大理石薄板	—	拡散	5~20

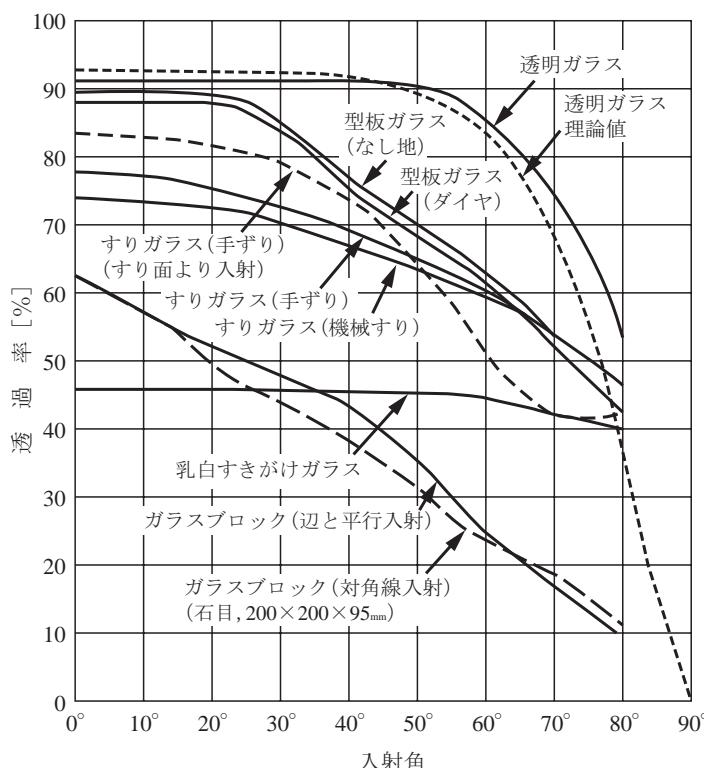


図1-5 ガラスの入射角別の透過率

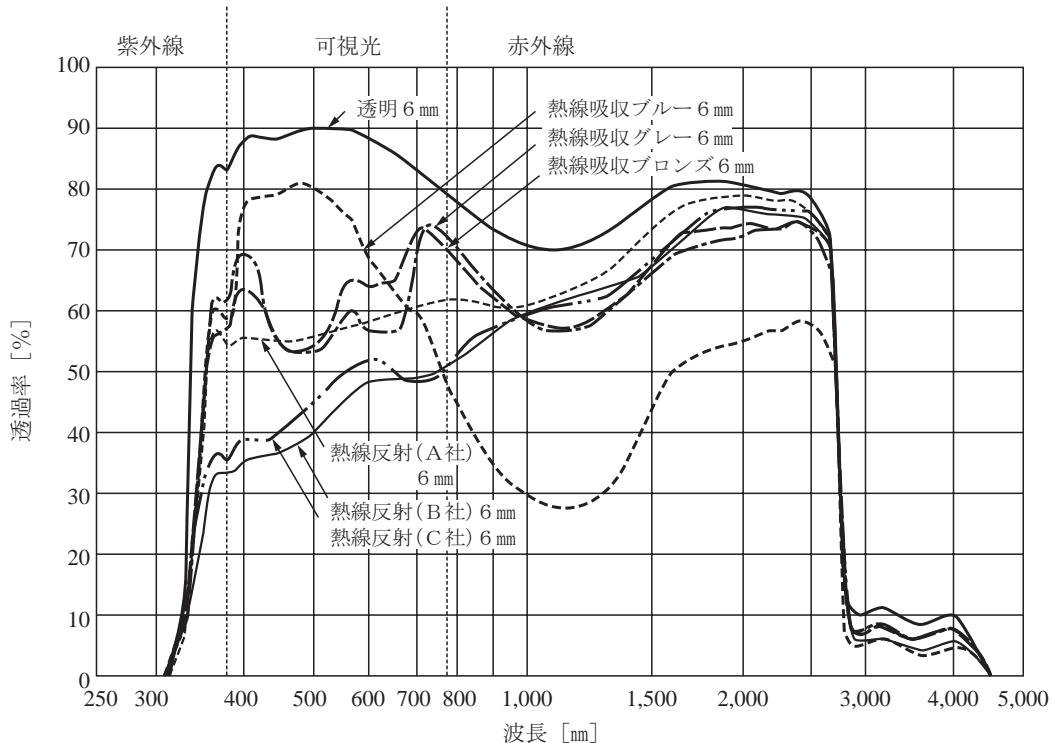


図 1-6 さまざまな種類のガラスの分光透過率

1.1.6 屈折・吸収

(1) 屈折

前述したように、異なる性質の媒介の中では光の進む速度が異なり、境界面において光路が屈折し、Snell の法則が成立することが知られている。光の速度は波長によって違いが生じるため、波長による屈折率の違いが生じ、ガラス等では分光（または分散）の現象がみられる。現象としては、プリズムによる分光の実験や虹などが挙げられる。

(2) 吸収

入射した光は反射、透過（屈折）、もしくは吸収される。反射率と同様に、吸収率も波長により異なる。図 1-6 に示されている通り、透明ガラスは赤外線域の透過率は高いが、窓ガラスの中でも Low-E ガラスは遠赤外線領域の透過率を低めており、日射による熱負荷を軽減することができる（図 1-7）。

(3) 偏光

光の進行方向に対して垂直な平面で電場と磁場が振幅を繰り返しているが、ある方向に偏りが生じる場合がある（図 1-8）。その状態を偏光と呼び、自然光の中でもガラス面へ反射した光などは偏りが生じることが知られている。偏光フィルムは、ある特定の方向の光のみを透過させることができるので、偏光を作り出すことができる。偏光の原理を用いている身近な技術として 3D 映像があげられる。偏光フィルムを用いた眼鏡を着用して偏光された 2 種類の映像を見ると、左右別の映像として見ること

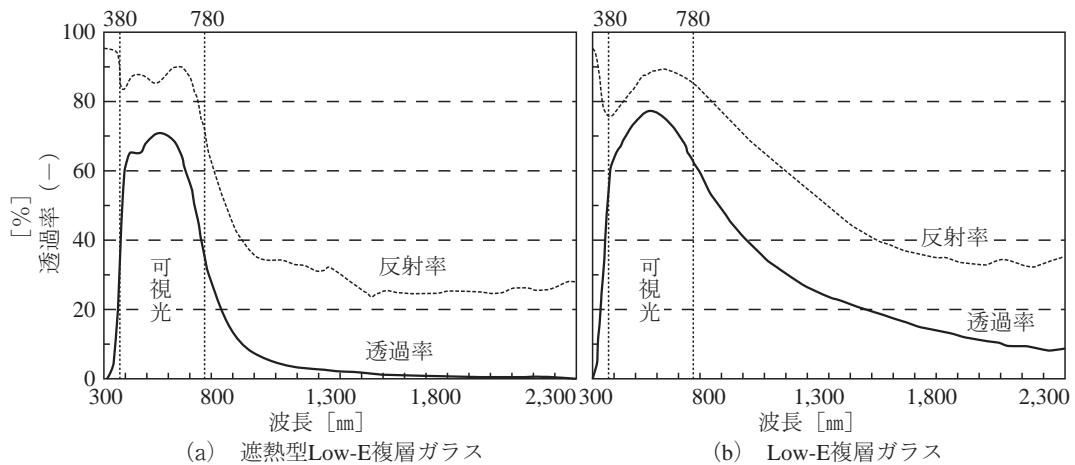
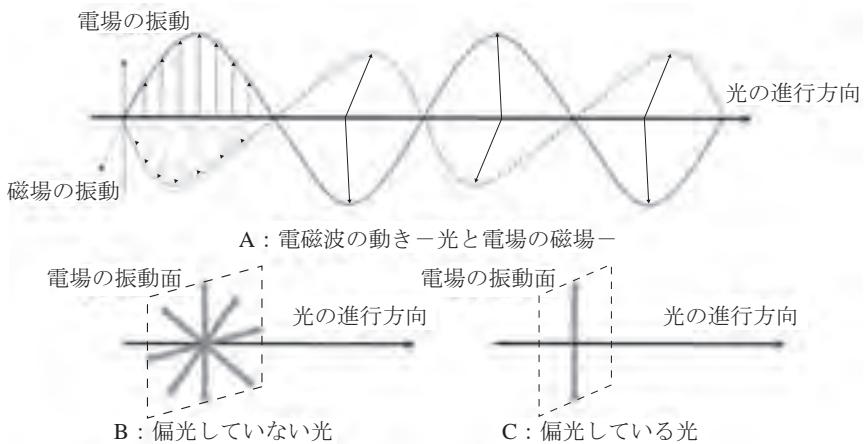


図 1-7 Low-E ガラスの波長別透過率と反射率

図 1-8 光と偏光²⁾

とができ、奥行きを感じることができる。液晶ディスプレイなどにも偏光の技術が用いられている。

1.1.7 色とは何か

色とは何かを語る上で「何の色であるか」は切り離せない。JIS Z8105-2000には、視覚に関する色の用語として、「物体色、物体知覚色」、「表面色」、「開口色」、「発光（知覚）色」、「非発光（知覚）色、非発光物体色」が挙げられている。以下、「発光色」、「物体色」、「容積色」、「面色」、「開口色」について説明を加える。

(1) 発光色

光は電磁波の1種であると述べたが、電磁波の波長によって我々の眼が知覚する色は異なる。ある特定の波長のみがエネルギーとして存在するような単色光（レーザー光など）は別にして、現実はさまざまな波長の光が混ざった状態で存在しているため、主波長による記載、色温度（詳しくは2.3.3）

表記や混色の原理を用いて色を表現する。波長ごとのエネルギーを示したものを分光分布と呼び、光源により特性が異なっている。同様の色に知覚されたとしても分光分布が光源によって異なる。図1-9に例を示す（詳しくは4.2.1）。

光源から発せられたエネルギーから色を知覚する場合に「発光色」と呼ぶ。

(2) 物体色

物体色の場合、光源から発せられたエネルギーをその物体が反射、一部を吸収することで光源の色とは異なった色を発することができる。物体表面の光学特性として分光反射率があることを先に述べたが、光源の分光分布と物の分光反射率を掛け合わせた結果、物体表面からの反射光の分光分布が分かる。最終的に人がどの色を感じるかは、さらに視細胞の波長ごとの感じやすさも関係している（詳しくは1.3）。すなわち、赤いものが「赤い」と知覚されるためには、①その物を照らしている光源が発しているエネルギーに、赤の範囲（700nm付近）のエネルギーが十分にあり、②その物の反射特性（分光反射率）が赤の範囲を反射し、かつ他の波長範囲を吸収し、③見ている人の視細胞が赤の範囲の光を知覚し、脳内で「赤い」と知覚処理するという一連の流れが必要となる。各色の分光反射率を図1-10に示す。

(3) 容積色（透明色、空間色）

瓶に入れられた液体の色など限られた空間内で透過している色を容積色、透明色、空間色と呼ぶ。物体色の場合は、入射光に対して透過光はほとんどなく、反射か吸収される。一方、容積色もしくは透明色や空間色と呼ばれる色の様相は、入射光に対して透過光も存在する。ワイングラスに入ったロゼワインがよい例だろう。ロゼワインを通してみた視野はピンクがかり、入射光に対して長波長（赤）の範囲の波長を反射、透過していることが分かる。

(4) 面色

面色とは、容積色のように範囲が限定されたものではなく、青空のように距離感が曖昧な中で、色

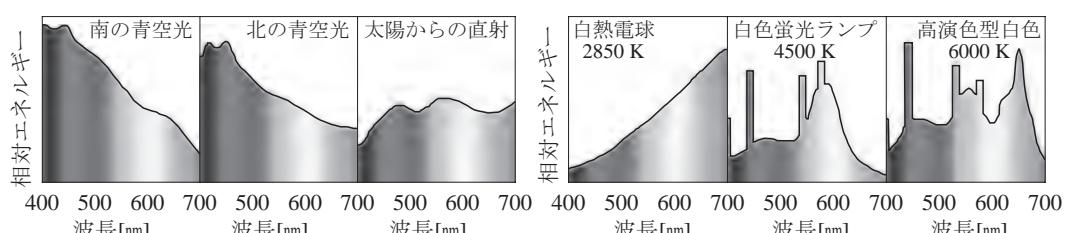


図1-9 自然光と人工光源の分光分布

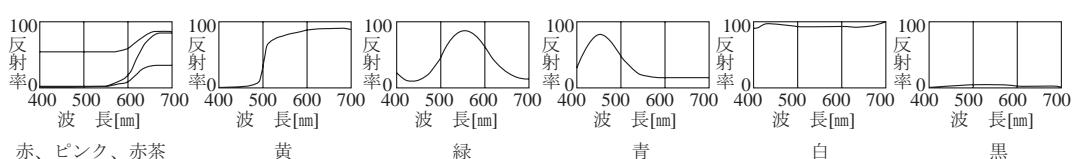


図1-10 各色の分光反射率

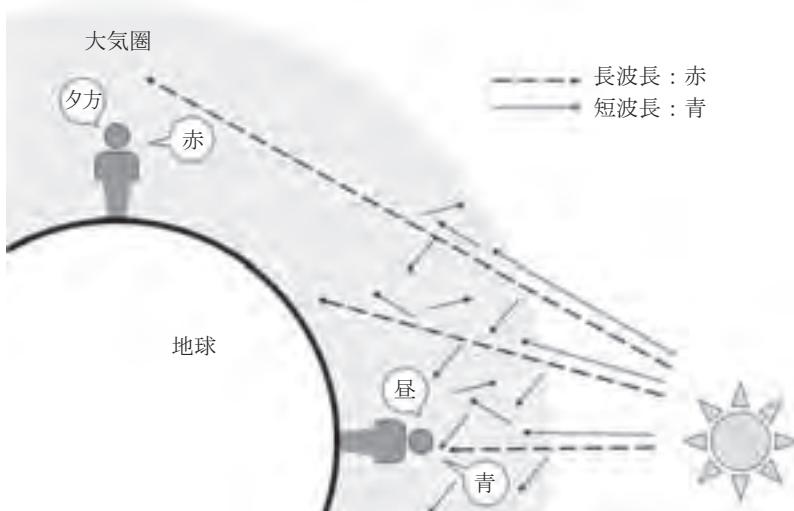


図 1-11 太陽の光と時刻による色の変化のモデル

が満ちている状態を指す。晴れた昼間の空は青く、夕暮れ時の空は赤いのはなぜなのか。太陽光が大気中の分子により散乱（レイリー散乱）する。短い波長の青の方が散乱されやすいため、青の光を感じて昼間の空が青く見える。一方、夕暮れ時は、太陽高度が低く、地球に対して浅い角度で太陽光が入射するため、日中よりも大気圏中の移動距離が長い。その結果、空気中のさまざまな物質に反射し、短い波長の紫や青が多く拡散されてしまうため、拡散されにくい長波長の赤が地表まで達し、赤く見えるとされている。図 1-11 に単純な太陽光の色の継時変化のモデルを示す。

(5) 開口色

色の知覚には光源の特性、物体表面の特性だけでなく、視細胞の特性、脳内の高次な情報処理が伴う。色を認識する際には、これまでの経験など「色」そのものではない情報から色を識別していることが多い。開口色とは、そのような周辺情報（光源の特徴や物体の特性、周辺色による対比）の影響を排除して色を知覚する方法のひとつであり、小さい開口を通して知覚する色のことである。

1.2 光と色の表現方法



1.2.1 測光量

光をデザインするためには、人の眼の特性と光源の特性に合わせた方法で光を測定し、規定する必要がある。その光の表し方を 5 つ紹介する。

(1) 光束

光束とは、光のエネルギー量を表しており、人の感じ方を考慮した心理物理量であることが特徴である。先に述べた通り、光源に応じて波長ごとのエネルギーが異なる。また、人の視細胞も波長ごとに感じやすさが異なる。人間の感覚にもたらす影響を検討するには、感じやすさに応じて補正する必

要がある。これらを踏まえ、以下のように光束 Φ は定義されている。単位は lm (ルーメン) とされている。 K_m は最大比視感度であり、683lm/W と定められている。 $\lambda [nm]$ は波長であり、 $\Phi_e(\lambda)$ は波長ごとの光源のエネルギーの関数 [W/nm]、 $V(\lambda)$ は波長ごとの標準比視感度 (詳しくは 1.3.1) の関数を示している。

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1-4)$$

光源の出力を示す際に用いられる指標であり、全方向に光源から発せられる人の視覚にとって有効なエネルギーを示している。

(2) 光度

点光源から発せられる光束のうち、特定の方向に向かっているものを示した指標として、光度が定義されている。単位立体角あたりの光束と定義される。単位は cd (カンデラ) (= lm/sr) であり、以下のように光度 I 、光束 Φ 、立体角 ω を用いて定義される。

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1-5)$$

配光は点光源の方向別光度を示しており、光源から発せられる光の方向性を示し、光源の大きさはないものと考える。照明器具からの光の広がりを示す配光曲線は角度別の光度の値を分布で示したものである (詳しくは 4.5)。

視角は、図 1-12 に示した通り視点において視対象が張る角であり、見た目の大ささである。視角 $\theta [rad]$ は円弧 $c[m]$ と視点を中心とする半径 $r[m]$ を用いて次のように示される。

$$\theta = \frac{c}{r} \quad (1-6)$$

視角は二次元であるが、三次元に展開したものが立体角である。立体角は、見た目の面積、三次元の角度とも言い換えられ、単位は sr (ステラジアン) である。半径 1m の球体の表面積 $1m^2$ をなす角が 1sr と定義される。立体角 $\omega [sr]$ は半径 $r[m]$ の球体表面上に投影した部分の面積 $S [m^2]$ を用いて次のように表す。

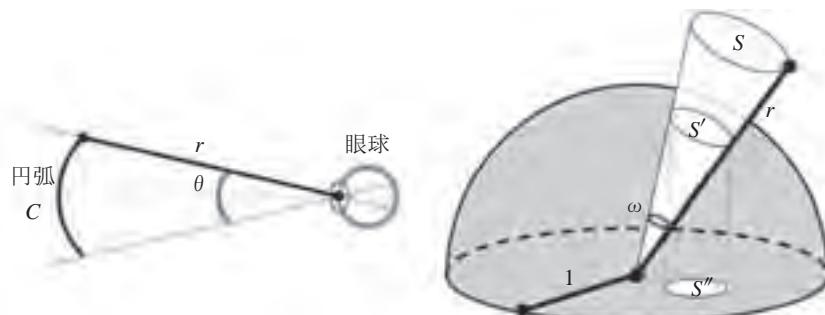
視角 θ 立体角 ω 、立体角投射率 S''/π

図 1-12 視角、立体角、立体角投射率

$$\omega = S'/l^2 = S/r^2 \quad (1-7)$$

一般的には視対象の面積と視対象までの距離を用いて概算される。さらに、ある測定面へ投影された面積を検討する場合（詳しくは2.2.1）、測定面へ投影された面積との比率を示した立体角投射率を用いる。立体角投射率 C は、底円に投影された面積 S'' [m²] と半径を用いて次のように示される。

$$C = S'' / \pi \quad (1-8)$$

ランバートの余弦法則：均等拡散面上に入射した結果の反射特性、発光特性、透過特性はいずれも球面上に広がることを示す。法線方向を I_n 、ある任意の角 θ に発せられた光度を I_θ とした場合、次式が成り立つ。

$$dI_\theta = dI_n \cos\theta \quad (1-9)$$

(3) 照度

照度 E とは、単位面積あたりに入射する光束量であり、単位は lx（ルクス）（= lm/m²）で表される。

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1-10)$$

面が照らされる度合い、すなわち作業面にあたる光の量を示していることから、作業に必要な明るさが担保されているのか、確認するための指標として設計で用いられる。JIS の照明基準総則 JIS Z9110-2010においても、空間用途や作業内容に応じた推奨照度が掲載されている（詳しくは5.2）。

余弦法則：受照面に対して入射する光が法線方向ではなく、角度をもって入射する場合、角度 θ 方向の照度 E_θ は法線方向の照度 E_n を用いて次のように表現される。

$$E_\theta = E_n \cos\theta \quad (1-11)$$

図1-13に示したように、エネルギー密度が同じ光が角度をもって入射すると、単位面積上では同じ量の光束が入らないため、 $\cos\theta$ 分減じられる。これを余弦法則と呼ぶ。

(4) 光束発散度

光束発散度 M は、有機ELなどの面光源の光の強さを表す際に用いられ、単位面積あたりの光の量である。単位面積から発せられる光の量であり、次元は照度と同じ lm/m² であるが、面に入射する（照度）か、面から発せられる（光束発散度）かによる違いである。

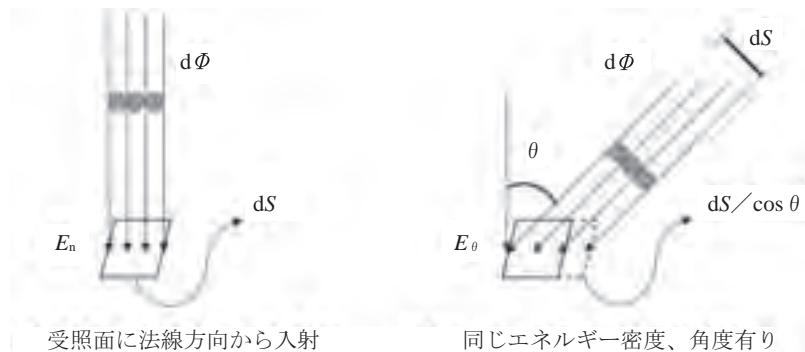


図1-13 照度と余弦法則

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1-12)$$

(5) 輝度

輝度は、光源もしくはある面の単位面積から任意の方向に発せられた光の量を表しており、単位は cd/m^2 ($= \text{lum}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$) である。ある点を見た際に眼に入る光の強さを表しており、明るさ知覚との関連性が知られている。観測点（観測点）と見ている面（測定対象面）の関係性（角度）によって測定値が異なるため（観測点の決定、光源や内装面の決定などが関係）、明るさとの関連性が知られていながら設計段階で用いることはあまりなかった。照明シミュレーションの発達により、輝度値の予測が可能となり、輝度に基づく設計もなされつつある⁴⁾。均等拡散面を仮定することで計算を簡易に行う場合もある。

輝度の定義を図 1-14 に示した。輝度とは単位面積の発光面から観測方向に向けて発せられる光の強さ（光度）である。観測方向の角度に応じて見た目の面積 ($dS \cos \theta$) が変わるために、次のように表される。

$$L = \frac{dI_\theta}{dS \cos \theta} \quad (1-13)$$

また輝度は次の図 1-15 のようにも示すことができる。

$$L = \frac{dE}{d\omega} \quad (1-14)$$

測定点と視点が同一の場合、輝度と眼球内で視対象が占める立体角との積は網膜上の照度となる。輝度が人の感じる明るさとの関連が深いことを、ここからも知ることができる。

1.2.2 測光量間の関係

1.2.1 で示した 5 つの測光量は、規定している光が異なるため、測る目的や対象に応じて用いる測光量を変える必要がある。測光量間の関係を知つていれば、直接測定できなくても関連から推定することができる。



図 1-14 輝度の定義

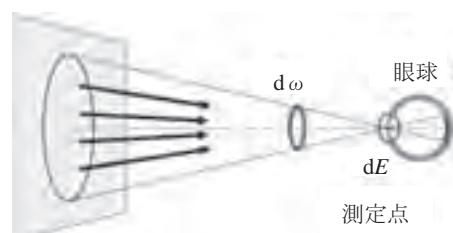


図 1-15 輝度と明るさの関係

(1) 光度と照度 :

(a)逆二乗則：光源からある方向に発せられた光（光度）がその方向にある面に当たる。光度の定義（式（1-5））と照度の定義（式（1-10）），立体角の定義（式（1-7））を用いて，式（1-15）のように関係性が整理される。受照面との距離が離れると，光源の見た目の面積（立体角）が小さくなるため，照度も小さくなる。

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{dS} \times \frac{dS}{d\omega \cdot r^2} = \frac{d\Phi}{d\omega} \times \frac{1}{r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (1-15)$$

(b)点光源からの直接照度：余弦法則と逆二乗則を合わせて考えると以下のような式となる。点光源から発せられる光度 I [cd] と受照面での照度 E_θ [lx] は，光源と受照面との距離 r [m] と光度と受照面とのなす角（光の進行方向に対して法線面との角） θ [rad] を用いて表される。

$$E_\theta = \frac{I}{r^2} \cos\theta \quad (1-16)$$

(2) 照度と光束発散度：光が単位面積に入射した光束量が照度，単位面積から発せられた光束量が光束発散度であることを踏まえると，入射した光束に対して反射した光束の比率を表した面の反射率 ρ や透過率 τ を用いて以下の関係式が成り立つ。

$$M = \rho E \quad (1-17)$$

$$M = \tau E$$

(3) 光束発散度と輝度：単位面積から発せられた光束のうち，ある方向に限定された光を輝度として表す。均等拡散面はどの方向でも輝度が等しい面であるため，ランバートの余弦法則（式（1-9））が成立する。また，均等拡散面から発せられる光束は法線光度の π 倍（解説は 2.2.1 式（2.12～2.15））であることから，その面上の輝度 L [cd/m²] の定義（式（1-13））と光束発散度 M [lm/m²] の定義（式（1-12））を用いて次の関係で表される。

$$L = \frac{dI_\theta}{dS \cos\theta} = \frac{dI_\theta}{dS \cos\theta} \times \frac{dI_n \cos\theta}{dI_\theta} \times \frac{dS \times M}{d\Phi} \times \frac{d\Phi}{\pi dI_n} = \frac{M}{\pi} \quad (1-18)$$

(4) 照度と輝度：均等拡散面上の照度 E [lx] と輝度 L [cd/m²] には，透過率 τ ，反射率 ρ を用いて以下のように示される。

$$L = \frac{\rho}{\pi} E \quad (1-19)$$

$$L = \frac{\tau}{\pi} E \quad (1-20)$$

1.2.3 色の表現方法

色の表現方法について，代表的なものを紹介する。

(1) 慣用色名：何の色であるかということに派生して分かりやすく色名が固有名称として付けられ

ているのが慣用色名である。「ねずみ色」や「うぐいす色」など想起されるだろう。

(2) 系統色名：慣用色名では一対一対応となり、膨大な色名を覚えなければならないが、ある法則をもって色を表現する方法を系統色名という。基本の色名に加えて修飾語を付加する形となっている。基本の色名は「赤」「黄」「緑」「青」「紫」などであり、修飾語とは「鮮やかな」「くすんだ」などの色味に関するものと「明るい」「暗い」などの明るさに関するものがある。

(3) 表色系：系統色名である程度の秩序をもって色を表現することが可能であるが、「赤」と「橙」の境目はどの辺りかなど、人による判断基準が異なるため、他の人にその色を正確に伝える場合には厳密な色の表現が求められる。系統色名をさらに数値などを用いて表現する方法が表色系である（表1-4）。

(a) 色の属性

色の特性を表現するのに必要な属性は3つあるとされている。任意の数値を用いて色が規定されるには、3つのデータが必要ということである。三属性とは、色合い、明るさ、鮮やかさであり、物体色の場合、色相、明度、彩度と表現され、光源色の場合は主波長、輝度、刺激純度と表現される。

(b) 表色系の種類—混色系

色を体系的に表す際に3つのデータの値（刺激値）によって規定する方法を用いているのが混色系（Color Mixing System）である。混色の原理としては、概念的にはエネルギーを足していく加法混色（白に近づく）と、概念的にはエネルギーの引き算である減法混色（黒に近づく）がある。

光源の色は加法混色の特性を持っている。パソコン画面の表記としてRGB（赤、緑、青）が用いられるが、これらは加法混色の三原色であり、三刺激の値でさまざまな色を作り出すことが可能である。CIEでは単色光を規定してその線型関数で色を表す方法としてRGB表色系を定義した（表1-4）（パソコン表記のものとは異なるため注意）。

減法混色の場合、絵の具やプリンターのインクなどが代表的である。減法混色の三原色はCMY（シアン、マゼンタ、イエロー）となっており、加法混色の三原色の補色の関係にある。

CIEが1931年に提案したRGB表色系では関数に負の値が発生する場合があるため、係数が正となるような仮想的な三原刺激（三原色のようだが、仮想であるためこのように表記）を設定した表色系にXYZ表色系がある。CIEによって規定されているため、CIE表色系とも呼ばれている。Yが測光的な役割を果たし、輝度値との関連が見られる。XとZは原理的には明るさを持たない色度を示す刺激として用いられる（詳しくは1.2.4）。他に数値の間隔が色度の差の感覚に沿うよう補正された等色空間での表色系に $L^*a^*b^*$ や $L^*u^*v^*$ などがある。それぞれ L^* が明度、その他の2つの刺激を用いて色度を表す。

(c) 表色系の種類—顕色系

色の属性に沿った形で表記した表色系に顕色系（Color Appearance System）がある。系統色名のそれぞれの度合いを数値化したような体系となっている（表1-5）。代表的なものにマンセル表色系があり、色相をマンセルヒュー、明度をマンセルバリュー、彩度をマンセルクロマとして表記し、アルファ

表 1-4 代表的な混色系の表色系まとめ⁵⁾

表色系	原理・特徴	式
RGB	混色系の三原色を用いた表記。各刺激度を表記	$L = l_r R + l_g G + l_b B$ を用いて各 RGB の等色関数が決定される R : 700.0 nm G : 546.1 nm B : 435.8 nm
XYZ	仮想の三原刺激を設定し、人の知覚できる範囲を表現。Yは明るさの情報、X, Zと合わせて色の情報をもつ	$X = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$ $Y = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$ $Z = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$ K _m : 最大視感度 683 [lm/W]
Yxy	XYZ 表色系とともに、合成変数 x, y を算出。Yが視感反射率を、xy で色を表現する	$x = \frac{X}{X+Y+Z}$ $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$
L* u* v*	XYZ 表色系においては、数値の変化と波長間隔が均等ではないため、近づくよう補正された表色系。L*が明るさ、残りで色を表現 (CIE 1976 L* u* v*)	$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$ $\left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \right)$ $L_m^* = 903.3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)$ $\left(\frac{Y}{Y_0} \leq 0.008856 \right)$ $u^* = 13L^* (u' - u'_0)$ $v^* = 13L^* (v' - v'_0)$ $u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad v' = \frac{9X}{X+15Y+3Z}$ $u'_0 = \frac{4X_0}{X_0+15Y_0+3Z_0} \quad v'_0 = \frac{9X_0}{X_0+15Y_0+3Z_0}$ なお、X ₀ , Y ₀ , Z ₀ は基準白色面を基準光源下で測定した値である
L* a* b*	XYZ 表色系においては数値の変化と色の知覚の変化が同等ではないため、より色覚に近づけた表色系（等色空間）。L*が明るさ、残りで色を表現 (CIE 1976 L* a* b*)	$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$ $a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$ $b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$ $\left(\frac{X}{X_0}, \left(\frac{Y}{Y_0} \right), \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right) > 0.008856$
CIECAM02	Brightness, Lightness, Colorfulness, Chroma, Saturation, Hue の 6 要因が関係。色順応などの知覚現象を考慮した表色系	

ベットと数値を用いて表現する（詳しくは 1.2.5）。その他にも、白、純色、黒を頂点とした正三角形を回転させた色立体を用いるオストワルト表色系やマンセル表色系を基に 12 のトーン（色調）による分類を配置した PCCS 表色系などがある。

表 1-5 代表的な顔色系の表色系まとめ

表色系	色相環の表現体系	明度×彩度の表現体系	特徴	利用例
マンセル	R, Y, G, B, P と YR, GY, BG, PB, RP, 10までの数値	明度 10 段階 彩度は色相・明度によって異なる	色の特定（定位）にすぐれている	JIS
オストワルト	R, Y, G, B と間の O (橙), P (紫), T (青緑), LF (黄緑) を各 3 段階表記	白度 (W), 黒度 (B), 純色度 (F) を%表記。WBF の 3 つの%の和は常に 100%	実験的に混色系のシステムに基づいて作成されたが、表記としては顔色系的表記。ヘーリングの反対色説に基づく	
NCS	R, Y, G, B を各 10 分割	白度 (W), 黒度 (S), 不変色相の純度 (C) を%表記。WSC の 3 つの%の和は常に 100%	オストワルトの後継と言われている。不变色相を使用し、それぞれの割合を表記することで、色見本がなくとも色の定位が可能なシステム	スウェーデンの工業規格
PCCS	24 色	12 のトーン (色調) による分類による	同一トーン配色など、色の組み合わせの際によく用いられる	日本色彩研究所体系

1.2.4 XYZ 表色系

混色系の表色系の代表として XYZ 表色系について詳しく述べる。先に述べたように仮想の三原刺激 X, Y, Z を以下の式に基づき設定している。 Y は明るさを表現するため、 $\bar{y}(\lambda)$ は標準比視感度曲線 $V(\lambda)$ と等しくなるように設定されている（図 1-16）。

$$X = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

K_m : 最大視感度 [lm/W] (= 683)

XYZ では三次元空間への表記となるため、一般的には以下のように作成した合成変数 x, y を用いて色度を表記する。 Y は明るさ、 x, y で色を表示するという方法となる（図 1-17）。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

x, y を用いて二次元表記したものを xy 色度図（図 1-17）と呼び、この図の帆のような形状の内側が人の知覚できる色とされている。白色は (0.333, 0.333) に位置し ($X=Y=Z$)、帆の内側の曲線が黒体の温度に応じた色を示した「完全放射体軌跡」となっている。光源の色味を示すときに用いられる色温度とは、この黒体の温度に由来した値であり、太陽と発光原理が異なる光源からの光の色を表示する場合は近似的に相関色温度 [K] として示す（発光原理が異なる光源でも色味を示すため。詳しくは 2.3.3, 4.2.1)。

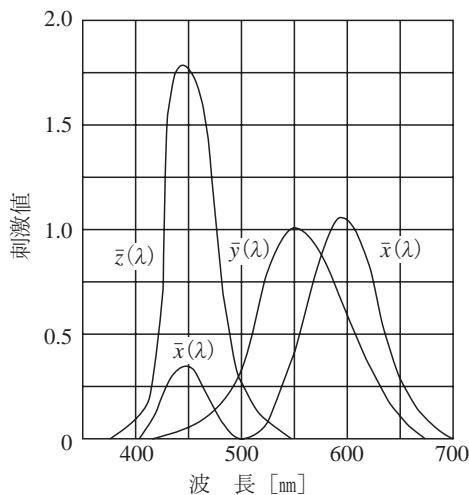


図 1-16 XYZ 表色系における等色関数

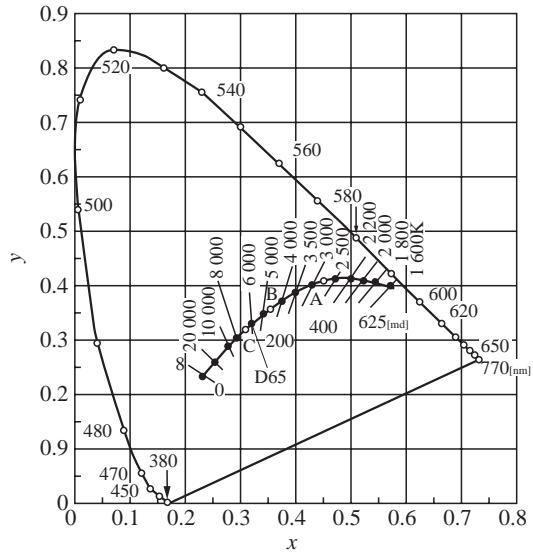


図 1-17 xy 色度図と完全放射体軌跡

2 色の色を混ぜた場合、元の 2 色を xy 色度図上で表記し、それらを結んだ線上に混色の結果が表記される。元の色の混合割合で線分上の位置が特定される。補色を足し合わせると白色に近くなるわけであるが、白色 (0.333, 0.333) を中心として通る線分の両端が補色の関係にあるということを示している。

XYZ 表色系は主に光源色の表示のために用いられるが、CIE が定めた測色用の標準光源を用いて照らせば、物体色の色も表示できる。標準光源とは A, C, D₆₅など種類があり、対応するものがそれぞれ A は白熱電球 (2900K), C (6774K) と D₆₅ (6504K) は昼光 (6500K) となっている。

1.2.5 マンセル表色系

マンセル表色系は発明者である米国の A. H. Munsell に名前が由来している。1905 年に創案、1943 年に提案された改良版が現在使用されているものである。日本工業規格 JIS での物体色などの表示方法はこれに基づいたものである。

色の属性である色相、明度、彩度に伴った表記方法である。色相は近い色が隣り合って円形に並ぶようにされており、色相環(図 1-19)と呼ばれている。表記は色相(Hue), 明度(Value), 彩度(Chroma)の順に HV/C と表記する(例えば 7.5R4/15)。色相は基本 5 色の赤(R), 黄色(Y), 緑(G), 青(B), 紫(P) と中間色(YR, GY, BG, PB, RP)の計 10 記号と、10までの数値を組み合わせて表される。理論上は 100 区分であるが、一般的には数値を 2.5 刻みとした 40 区分の表記が用いられる。色相環の対角に存在する 2 色は補色関係にある。明度は 0 から 10 の値を取り、0 が理想的な黒、10 が理想的な白である。モノトーン、すなわち無彩色は彩度・色相の属性の情報がないため、頭文字の N の後に明度の値(数値)を用いて表記する(例えば、N9.5 など)。彩度は色相、明度によって最大値が異なり、図 1-18 に記したように、色立体で表記した場合、いびつな形になっている。黄色は明度が高い範

囲の彩度が高く、赤や青などは明度が中範囲の色の彩度がもっとも高くなっている。ある色相の最大彩度の色を純色と呼ぶ（図1-20の断面の最左色）。

表色系の間には、条件によっては互換性があることが確認されている。視感反射率Y[%]とマン

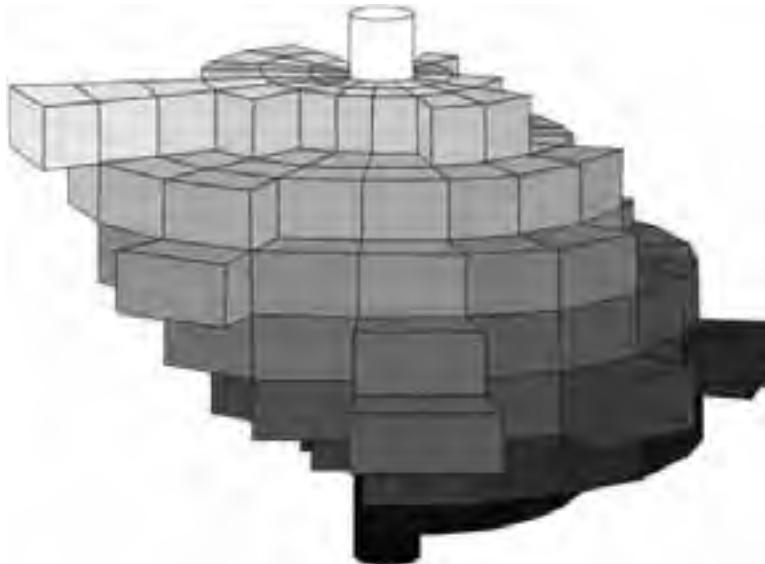


図1-18 色立体

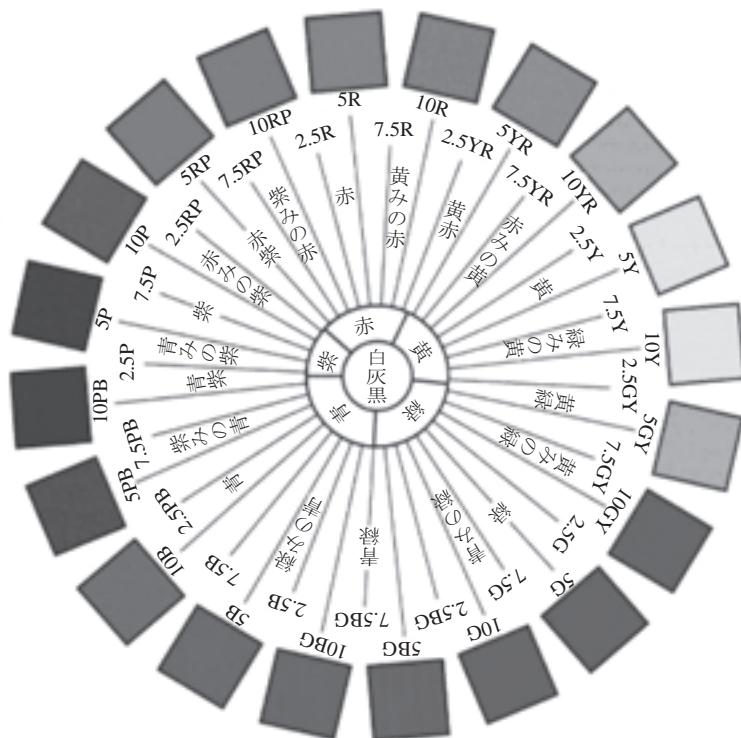


図1-19 色相環

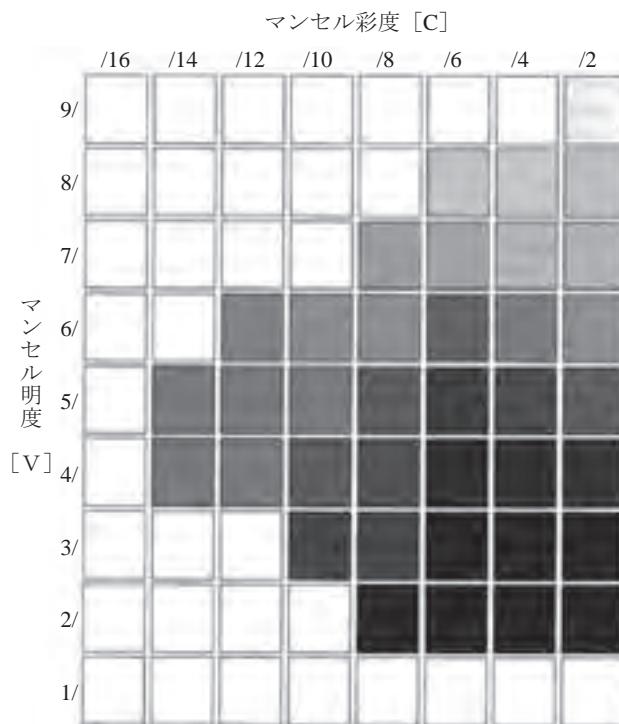


図 1-20 明度対彩度

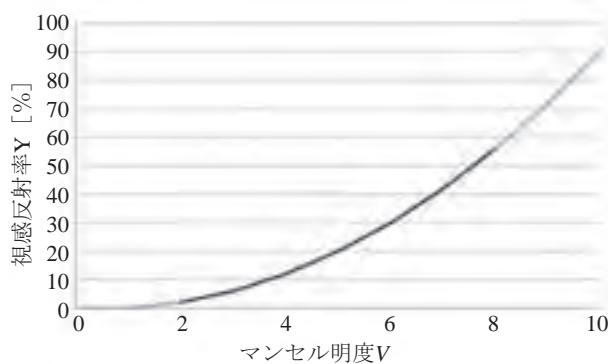


図 1-21 マンセル明度と視感反射率の関係

セル明度はいずれも色の明るさを示すが、図 1-21 に示すように、マンセル明度 V が 2~8 の値の間では以下の関係が成り立つ。

$$Y = V(V - 1) \quad \text{ただし } (2 < V < 8) \quad (1-21)$$

他にも対応式は存在するが、本式がよく用いられる。標準光源にて照射した物体の色も XYZ 表色系にて表記することが可能である。またその測定値を用いて $L^*a^*b^*$ や $L^*u^*v^*$ の値に換算できる。

1.3 光と色の効果

1.3.1 視覚情報処理

眼から取り入れる情報には、明るさ・色彩の知覚だけでなく、形や奥行きなど運動に必要な情報も含まれる。視覚は五感の内のひとつであるが、他の感覚より情報量が多いため、情報の取得の段階や処理の段階で情報を取捨選択していることなどが特徴として挙げられる。

(1) 眼球構造

一日の光環境は月明りから昼間の昼光まで幅広く変動をしている。それら幅広い明るさの状態に対応するため、2段階の調整を行っている。眼球の構造を図1-22に示す。

まず、眼球に入る光を調整する段階として、虹彩の収縮により、瞳孔の大きさを調整させる。明るいところでは絞り（最小直径 2 mm程度）、暗いところでは開いて光をなるべく多く取り込む（最大直径 8 mm程度）ようにしている。光はその後、水晶体、硝子体を通り、網膜上で像を結ぶ。網膜上には視細胞が配列している。視神経が集まって脳へと繋がっている部分は視細胞がなく、盲点（視神経乳頭）となっている。それらの視細胞のうち、どの視細胞が反応するかを変えることで光に対する感度（感光度）を変化させ、明るさの変動に対応している（2段階目の調整）。視細胞は大区分として 2 種類ある。暗いところで優位に働く杆体（桿体）と明るいところで優位に働く錐体に分かれる。杆体は網膜の周辺部分、すなわち視野内の周辺部分の見えに関係する。約 1 億 2500 万個あり、感度が高く、動きなど運動に敏感に反応する。しかし、1 種類しかないため、色の知覚はできない。一方、錐体は SML の 3 種類存在し、感度が最大となる波長が異なる。短波長域に反応する S 锥体、中波長域に反応する M 锥体、長波長域に反応する L 锥体の 3 種類である。錐体は網膜上の中心窓付近、すなわち中心視野に関わる部分に約 600 万個ある。明るい所で優位に働き、形や色の知覚のための情報を取得する。3 種類の錐体視細胞の分光感度をそれぞれ最大値で正規化した標準分光感度を図 1-23 に示す。

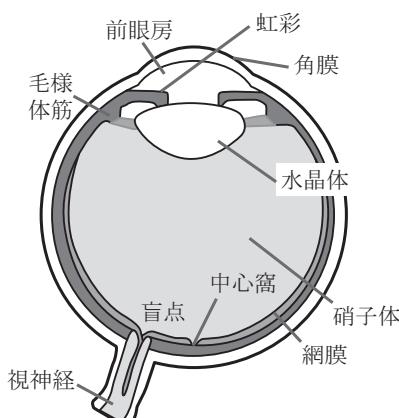


図 1-22 眼球の構造

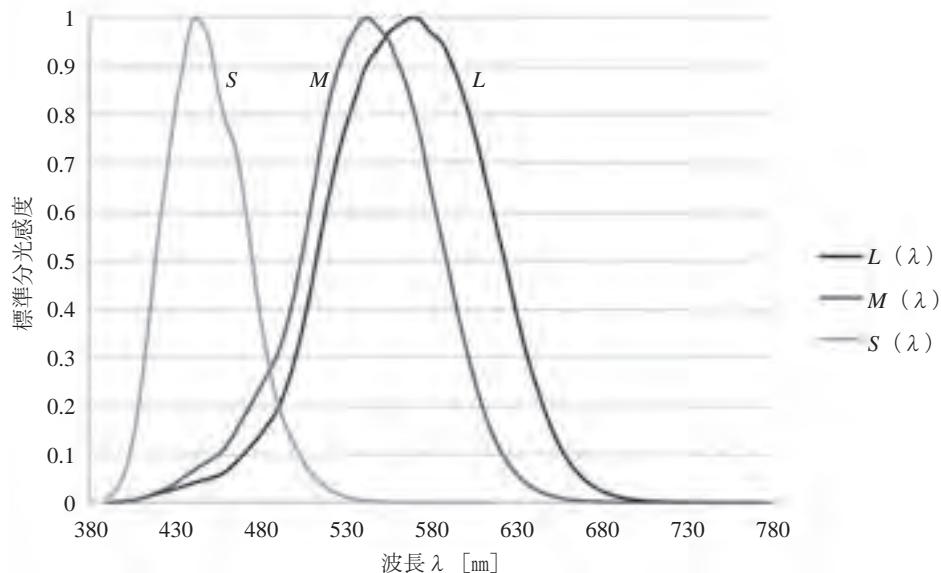


図 1-23 SML 錐体の標準分光感度

網膜上に配列している視細胞が光によって刺激され、電気的な信号を脳に送る。大脳皮質視覚野へ信号が送られ、視覚情報として知覚される。周辺視野（視野の周縁部）で視覚情報を取得しても色が見えなくなるという現象は起こらないが、これは周辺視野に関わる杆体が色を知覚できているということではなく、脳内で補完処理や視野内の映像構成がなされているためである。

(2) 順応

光の幅広い明るさのレンジに対応するため、瞳孔の大きさを調節したり、反応させる視細胞の変化により、網膜の感光度を変化させたりして対応している。感光度を変化させる、すなわち優位に働く視細胞を変化させることを「順応」と呼ぶ。暗い所を見るために視細胞の感度を高める状態へ移行する過程を「暗順応」と呼ぶ。逆に明るい所を見るために、視細胞の感度を落とす状態へ移行する過程を「明順応」と呼ぶ。明順応は早く移行する。一方、暗順応には錐体の感度を上げて、暗い所見えるように変化させる過程と、杆体の働きを促す過程とがあるため、30分程度時間がかかるといわれている（図1-24）。杆体の外節部にはロドプシン（Rhodopsin）と呼ばれる物質があり、光量子を吸収すると反応し変色する性質がある。このロドプシンの退色が引き金となり、生理的な機構が視細胞の感度の調整を行っていると考えられている。このような視物質が順応の主要因ではないことが明らかになっているものの、退色の再生過程の時間変化が順応状態の時間変化と酷似しているため、関連性があると思われている。杆体が優位に働いている状態を「暗所視」、錐体が優位に働いている状態を「明所視」、中間の状態を「薄明視」と呼び、光環境の状態と視細胞との働きを結び付けて状態を区分している。

周辺環境の明るさに順応している状態において、明るさの著しく異なるものを見るときに見にくくなる現象がおこる。シルエット（Silhouette）現象とは、明るい窓面を背にした人の顔が暗くて見にくく

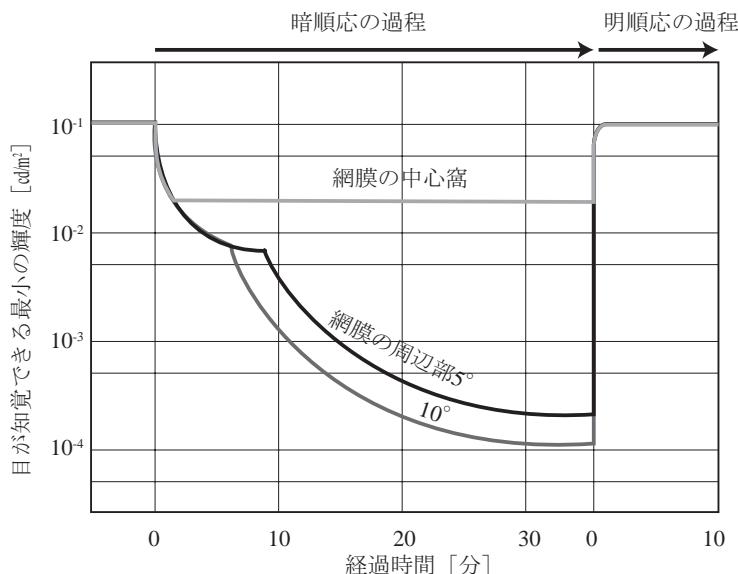


図 1-24 順応状態と時間変化

い状態を指す。これは、明るい窓面の輝度に順応している状態で、暗い視対象を見る場合に对比が著しく激しい場合に起こり得る。暗順応している状態で明るい視対象を見る方が逆の場合よりも見やすい。例えば、よしずを用いて室内外を区切る場合、室内から屋外は見やすいが、逆の屋外から室内は見にくくなる。

(3) 比視感度

視細胞によって分光感度、すなわち「波長に応じた感度」が異なる。視細胞が光を感じる度合いを示す視感度は単位時間あたりのエネルギーに対する反応の度合いを示したものであり、単位はlm/Wである。可視光域380～780nmの中で、明所視の場合は555nmの波長の感度がもっとも高く、683lm/Wである。暗所視での最大視感度は507nmにおける1700lm/Wであり、ピーク部分の波長と感度が異なる（感度は約2.5倍）という特徴がある。明所視と暗所視の視感度は、それぞれの最大視感度で基準化された標準比視感度がCIEにより定められている（図1-25）。

周囲の明るさの変化で色の見え方が変化する現象として以下の2つが代表的である。

- ・**ブルキンエ現象**：標準比視感度曲線（図1-25）のピークが明所視と暗所視で異なっているため、夕方徐々に暗くなるにつれて、短波長帯の感度が向上することで鮮やかにみえる。一方、長波長帯の感度が減少することでくすんで見えるようになる。
- ・**ベゼルト・ブリュッケ現象**：輝度によって色の見え方が変化する現象を指す。高輝度では、橙や黄緑は黄色味が増し、青緑や青紫は青味が増す。一方低輝度では、橙や赤紫は赤味が増し、黄緑や青緑は緑色に近づく。輝度によって見え方に変動が起きない色を不变色相と呼び、赤、黄、緑、青の4色である。

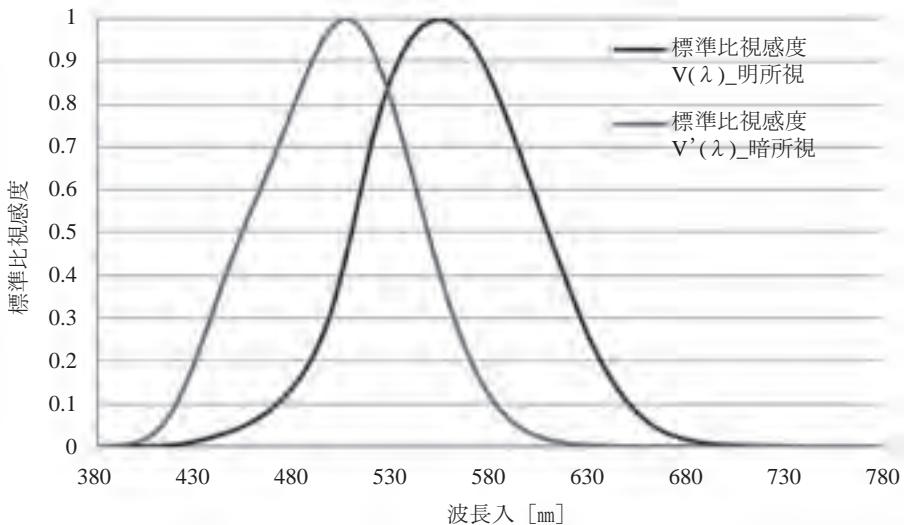


図 1-25 標準比視感度曲線

(4) 視覚特性

ウェーバー・フェヒナーの法則：物理的刺激と感覚との関連について、ウェーバー・フェヒナーの法則が成り立つことが知られている。聴覚より当てはまりは良くないが、明るさ知覚などでは関係性が認められている。ウェーバーの法則は物理的刺激の増加率が一定であるとした法則である。すなわち、原刺激 S 、 ΔS を刺激の増分としたときに、相対弁別閾 K （大小の判断ができる最小刺激量である弁別閾と原刺激との比）との関係を以下のようにあらわせる。

$$\frac{\Delta S}{S} = K \quad (1-22)$$

一般的にはウェーバー比として知られ、刺激の種類や原刺激の範囲によってその値は異なる。

フェヒナーの法則は、ウェーバー比が感覚量の増分に比例すると捉えたものであり、ウェーバーの法則と合わせて、以下の式（1-23）がウェーバー・フェヒナーの法則として知られている。物理刺激が等比的に増加するとき、感覚量が等差的に変化することを示している。

$$R = k \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (1-23)$$

これらの心理特性と物理特性との関係性を踏まえた上で、測光量との関係性を解説する（詳しくは2.3.3）。

視覚特性の能力を測る指標のひとつに視力がある。ランドルト環（C字のもの）の欠損部分の弁別閾により測定する。視角を一定にするため距離を固定するのはもちろんであるが、明視性の他の条件に関する測定時の明るさ、対比（白黒）も規定されている（詳しくは2.3.5）。近年では自動視力計を用いて測定する場合が多い。

視覚特性の別の指標としては、どの範囲が見えるかという視野がある。日本人の平均として、左右

が 100° ，仰角（上方）が 60° ，俯角（下方）が 70° とされている。中心窓（半径視角 2.5 度）に錐体がもっとも多く分布し，注視点がカラーとして認識できる。周辺に行くにしたがって杆体が多く分布するようになる。光環境の分野では便宜上，2 度と 10 度が区分として多く用いられる。2 度は中心視，10 度はより大きな視対象を対象とする場合に用いる。視野は静止状態か運動状態かによっても異なる。

視覚特性の特徴としては，外界の三次元の情報を眼の網膜上で像（二次元）に変換して情報を取り込み，脳で三次元の情報として再構成している。三次元の情報として再構成する，すなわち奥行き知覚は，物体の立体的な情報だけでなく，視対象までの距離の把握などを含む。左右の眼の見え方の違い（両眼視差），眼球の回転運動，評価者もしくは視対象の移動に伴う見え方の違いや，速度の違いなどの情報を基に脳内で処理されており，これに加え過去の記憶・経験の情報も用いられる。

見え方は個人差が大きく，加齢や眼精疲労によって影響を受ける。加齢により水晶体の弾力性の低下，硝子体の黄化や混濁化が生じる。また視細胞の視感度が低下することも知られている。これらにより焦点機能が低下し（いわゆるピントが合わない），暗い所で見えにくく，明るい所でまぶしく感じるなどの症状が現れる（詳しくは 2.3.5）。疲労によって充血や目がかすむなどの症状が現れることがあるが，いくつかの原因が考えられる。過度な眼球運動や長時間の注視（遠方の緑を注視する場合には疲労があまり出ないことや高輝度だと短時間でも，疲労が発生するなどの例外はある），過度な対比のある光環境での作業などが原因として挙げられる。

（5）色覚

色の知覚のメカニズムについてはさまざまな説が提唱されているが，ここでは代表的なものを紹介する。ヤング・ヘルムホルツの三原色説とは，Young (1802) による説と Helmholtz (1867) による説を合わせたもので，三色説 (Trichromatic Theory) とも呼ばれている。表色系（1.2.3. 色の表現方法）において，3 つの情報により色が定位できることを述べたが，三次元的に表現する取組みは A. S. Forssius (1611) までさかのぼるとされている。3 つの錐体 (SML) の存在が直接測定によって確認され，三色説が実証されたのは 1967 年 (Tomita ら) になってからである。

次に，色対比や反対色の原理，残像現象など三色説により説明できない現象を説明しようとして Hering (1878) がヘーリングの反対色説 (Opponent-Colors Theory) を提唱した。これは緑と赤，青と黄を反対色の対として知覚するメカニズムがあることを提案しており，赤緑色や青黄色が存在しない理由を説明するものとなった。Jameson & Hurvich (1955) は自分らを被験者として，拮抗する反対色の対の反応量を定量的に示し，メカニズムの存在を明らかにした。現在では三色説と反対色説が段階的に生じることを示した段階説 (Zone Theory) が有力である。初期の段階では三色説が，脳内の情報処理の過程で反対色説のモデルが適応できるとの説である。

各錐体の感度は個人差があるため，同じように色が知覚できているとは限らない。大きく見え方が異なる色覚異常には先天的または後天的な原因がある。見え方の違いを違いの程度（全色盲；1 色覚，色盲；2 色覚，色弱；異常 3 色覚）と種類 (*L* 錐体；1 型, *M* 錐体；2 型, *S* 錐体；3 型) によって名称・

分類されている。多くは2色覚や異常3色覚であり、1型や2型が多い。日本人では男子が約5%，女子が約0.2%の頻度で発生しているが、多くは日常生活に問題がない程度である。

(6) 色順応

視細胞が周辺の明るさに順応するのと同じように、視細胞が色に順応する。近年では減少傾向にあるが、メンテナンスの難しいトンネルなどでは長寿命の低圧ナトリウムランプが用いられてきた。低圧ナトリウムランプはオレンジ色の光であり、トンネルに入るとすべてがオレンジ色のフィルタがかかったように見える。しかし、長いトンネルをしばらく走っていると、そのフィルタがなく周辺が元の色に見えているように認識され、これは色順応した結果である。

一方、白い壁は夕日で照らされ「物理的には」オレンジ色であったとしても、「白」であると認識される場合がある。既知の色に関しては、光源の色にかかわらず物体の色が白色光源で照らされた状態であると認識される場合があり、これを色の恒常性と呼ぶ。

加齢に伴い水晶体が黄変し、分光透過率が変化するので、低波長の青色など青年が識別できる色を識別できない場合があるが(5.4.2の図5-14)，長期間にわたる色順応を行っているので、全体的な色の見えはあまり変わらない。

1.3.2 見やすさ

空間を快適にするための照明の目的には大きく分けて2つある。まずは視対象が正しく認識できること、すなわち明視性がある。次に空間の用途に即して整備するため、雰囲気性(演出性)(詳しくは1.3.3)も求められる。この2つの目的を達成するため、昼光照明と人工照明を合わせて計画する。視覚的に快適であることと省エネルギーによって達成されていることなどがさらに求められる。

(1) 明視性

明視の四条件は、視対象の大きさ、明るさ、視対象と背景の輝度対比、視認時間である。一つ目は視対象が大きいほど見えやすいことを示している。これは視野の中で占める割合(視角)を指し、視対象との距離も包含した概念である。二つ目は明るさであるが、視対象が明るいほど見えやすいことを指す。三つ目は対比であるが、これは視対象と周辺と、対比が大きいほど視対象が際立って明視性が高まる事を示す。四つ目は時間であり、注視できる時間の長さが長いほど(視対象、観察者ともに動きがないこと)見やすいということを示す。時間は観察者の要因が大きいため、一般的の視作業においては時間を除いた三要素を明視三要素(大きさ、明るさ、対比)として見やすさを評価する。

(2) 視認性

明視性とは、意識が向いた視対象の見えやすさを考慮する指標であるのに対し、視認性とは視線方向においてある対象を認識するかを考慮する指標である。眼を開けている時には視覚情報を取り入れ続けているが、すべての情報を意識しているわけではない。主にサインの評価の指標として使われ、配色と対比の影響が大きい。周辺との対比があるほど視認性が高まる。色相、明度、彩度の中でも明度の差が周辺とある方の視認性が良い。配色の中では黒地に黄色や白地に赤の視認性が高い。

(3) 誘目性

視認性は視線方向にある対象物に関する指標であったが、誘目性はさらに広域の範囲において、眼を惹くか、また目立つかを示した指標である。同様にサインなどの評価に用いられ、色や配色の影響が大きい。一般的に高彩度の誘目性が高い。色相の中では赤がもっとも高く、青、緑と続く。黄色と紫は条件によるが、他の色も順応状態や背景の色によって変動する。

1.3.3 光の好ましさ

好ましさにもさまざまな次元、側面がある。Hewitt の快適性に関する研究では、求められる性能の次元として Useful, Comfort, Pleasantness の 3つがあるとした。求められる性能に応じた設計・評価が求められる。本項では用いられる評価項目と関連する事柄について記載する。各評価項目の定量的な定義や把握については第 2 章にて取り扱う。

(1) 明るさ知覚

視対象の明るさ、空間の明るさが十分であるかを検討するため、人の知覚と測光量との関係性を示した明るさ感研究が多くなされてきた。多くは明視性の四条件の内の明るさと対比を項目として取り入れた指標を提案している（詳しくは 2.3.1）。

(2) 演色性

視対象の色が正しく再現されているか、すなわち自然光の下で見る状態に近いのかを示した指標に演色性がある。物の色を知覚するためには、光源の分光特性が対象物の反射特性が高い波長を含んでいること、物の反射特性、さらに我々の眼の分光感度が関係している。演色性は特に光源の分光特性が自然光と比べて類似しているかを示した指標である。演色性の指標として平均演色性評価指数が長年用いられてきた（詳しくは 2.3.4）。

(3) グレア

グレアは、光源などの高輝度のものが視野内に存在することによって、見にくさや不快感をもたらす現象である。グレアが視覚機能に与える影響による分類としては、不快感をもたらす不快グレアと、視認性が低下する効果をもたらす減能グレア（視力低下グレアともいう）に分けることができる。また、グレア源によって分類すれば、直接高輝度光源が視界に入る直接グレアと、ガラス面や反射率の高い面に光が反射したことによって発生する反射グレアに分けることができる。反射グレアの 1種で視対象と反射光とが同一面に存在するかのように見える現象を光幕反射と呼ぶ。高輝度部分と周辺との輝度対比、高輝度部分の視野内での位置などを変数として定量化されている（詳しくは 2.3.2）。

(4) モデリング

好ましく見えるというのは、多くが自然光の下で見える見え方に近いことに起因する。光の方向性の項目についても同様であり、斜め上から照らされている状態が一般的に自然に見えるものである。立体感を適正に整えることをモデリングといい、光の方向性や周辺と視対象の明るさの対比が関係する。怪談を話す時には懐中電灯を下から照らして不気味な雰囲気を演出するのは逆の効果を狙ったも

のである。拡散した光で照らすと凹凸が際立たず、平坦な印象となる。一方、指向性の強い光で照らすと凹凸の影が発生し、立体感が得られる。このバランスを検討するための指標としてベクトル・スカラー比がある（詳しくは2.3.6）。

1.3.4 色の好ましさ

(1) 色彩感覚

色の好ましさを語る上で色彩がもたらす心理的影響について考慮するのは重要である。

(a)色彩感覚：色彩によって感情や印象を引き起こすことを色彩感覚と呼び、暖色は暖かさ、寒色は冷たさを想起するのに代表される。高彩度のものが活気のある印象、低彩度のものが落ち着きをもたらすこと、高明度のものが陽気で低明度のものが陰気な雰囲気をもたらすことなどが知られている。

(b)色彩連想：感情にとどまらず、抽象的な概念や具体的な物を連想させるに至ることを色彩連想と呼ぶ。例えば、菓子のパッケージに紫色、ピンク色、赤色、橙色が表示されている場合、多くの人はぶどう味、桃味、リンゴ味、オレンジ味であると連想するだろう。これらは具体的な物の連想となる。抽象的な概念の連想としては、例えば白が清潔感や神聖さを表し、黄色が希望を、紫が優雅さを連想させることを指す。

(c)色彩象徴：色彩連想がさらにある社会において広く受け入れられている場合、色彩象徴として国旗や制度、特定の対象の象徴として用いられる。このように色の印象と色による視認性を高める効果を見込んでコーポレートカラーを設定する企業も多い。同業種で別の色を用いることで赤の○○は会社A、青の○○は会社Bなどと区別しやすくなる。

これら色彩と感覚との関連を考慮し、JISでは安全色を設定している。危険を知らせる赤や注意を促す黄色、安全を示す緑などが代表的である。安全色に用いる色は、マンセルによる色指定がなされている（詳しくは5.4.1）。

(2) 色の知覚効果

色の見え方にもさまざまな効果があることが知られている。一部を簡潔に紹介する。

(a)温熱感：色によって暖かさや冷たさの感覚がもたらされる。暖かい印象の色を暖色（赤系統の長波長の色相）、冷たい印象の色を寒色（青系統の短波長の色相）と呼ぶ。

(b)覚醒・緊張：暖色は興奮作用があり、興奮色とも呼ばれる。一方寒色は鎮静作用があり、鎮静色とも呼ばれる。

(c)大きさ：一般的にも用いられるが、実際の大きさよりも大きく見える色を膨脹色と呼び、暖色、高明度の色がそれにあたる。一方、実際よりも小さく見える色を収縮色と呼び、寒色、低明度の色を指す。同様の効果であるが、膨脹色は周囲よりも飛び出して見えることから進出色、収縮色は周囲よりも遠くに見えることから後退色と呼ばれる。

(d)重量感：一般に、高明度の色や暖色は軽く感じられ、低明度の色や寒色は重く感じられる。

(e)時間：ファーストフード店では回転を速めるために経過時間を長く感じる高彩度の暖色を用いるという話もあるが、実際の時間よりも長く滞在して満足するという効果が得られる。一方高彩度の寒色は経過時間が短く感じられ、実際の時間よりも短く感じられるため、待合室の内装などに有効である。

(f)面積効果：大きい面積に単色の色を配置すると、小さい色見本よりも明度・彩度ともに高くなつたように見える現象である。また低明度・低彩度の色は大面積でより明度・彩度ともに低くなる傾向がある。建築においては、壁面・床面・天井面において単色を配置することがあるため、注意が必要である。

(g)記憶色：思い出は美化されると言うが、記憶の中で色は変化し、実際の色に比べて一般的には、より高彩度または高明度になる傾向がある。

(3) 配色の効果

多くの場合、色は複数で用いられ、隣接する2色の組み合わせによりさまざまな効果をもたらす。対比は隣接する2色の差が強調される。同時に隣接する2色を見る場合を同時対比、同時にではなく1色ずつ引き続いてみる場合を継時対比と呼ぶ。対比の種類には以下のようなものがある。

(a)明度対比：明度の異なる2色で高明度の方はより明るく、低明度の方はより暗く見える（図1-26）。

中央の灰色は左右同じであるが黒に囲まれた方がより白く、白に囲まれた方がより黒く見える。

(b)彩度対比：彩度の異なる2色で、高彩度の方はより鮮やかに、低彩度の方はよりくすんでみえる。

(c)色相対比：類似した色相の2色が並んだ時、それぞれの差がより強調される。例えば赤と橙色が隣接する場合、赤はより赤く、橙色はより黄色味を増して見える。

(d)補色対比：補色関係にある2色が並んだ時、それぞれの彩度が高く見える。

これら対比に起因する現象をいくつか紹介する。

(e)マッハ効果：縁辺効果とも呼ばれるが、明度対比（輝度対比）が生じることで輪郭が際立つ現象。

マッハ効果は側抑制の概念によっても説明される現象である。側抑制は、網膜上に光刺激が当たると興奮が誘導される部位と拮抗的に抑制が誘導される部位とが発生することを提唱している原理であるが、辺縁の存在によって側抑制が働き、際立って見えることになる。側抑制により輪郭検出が容易となり、階段の上り下りなど日常生活の行動を円滑に行うことができている（図1-27）。

(f)ハーマングリッド効果：黒地に白の格子柄の図形において、明度対比が生じるが、格子の交点の部分には部分的に対比が生じないことから交点の部分に黒い円形の影が見える現象。

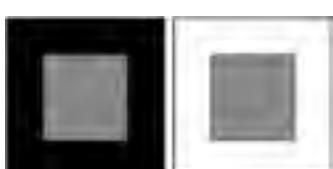


図1-26 明度対比

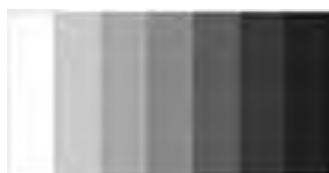


図1-27 マッハ効果

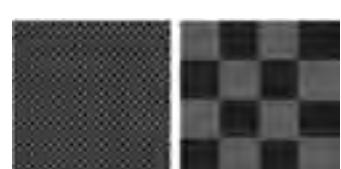


図1-28 同化効果

(g) リープマン効果：隣接する2色の明度差がない時、境界が曖昧になる現象である。高彩度の場合、ちらつきとして見える場合がある。

(h) 同化現象：隣接する2色の柄が一般的に大きい場合、対比の効果が見られる。一方、柄が小さい場合、逆の同化効果が見られる。同化現象とは、囲まれている色が囲んでいる色に近づくことを指す。例えば、スーパーなどで市販されているオクラを包装している緑のネットはその現象を利用しておらず、ネットを鮮やかな緑色にすることで、同化現象により中のオクラも鮮やかに見える（図1-28）。

1.3.5 視覚以外の効果

周辺の光環境は視覚以外にも効果を及ぼす。

(1) サーカディアンリズム

サーカディアンリズムとは、生体リズムであり、ヒトはおよそ24時間で一周期である。このリズムに基づきホルモンの分泌などが行われ、体温や血圧など活動に応じて上下する。太陽光を浴びることでリズムを調整する（本来は25時間の周期を24時間に同調させている）ことが知られていた。2002年に第三の光受容体として内因性先感受性網膜神経節細胞(ipRGC細胞)を哺乳類が保有していることが発見された。この細胞は視覚情報を知覚するために用いるのではなく、取り込む光によって体内時計（サーカディアンリズム）を調整するなどの機能があることが確認されている。リズムが崩れると睡眠障害など身体の不調につながることが知られている。

(2) 紫外線域の影響

紫外線は可視光よりも短い波長の部分を指し、人体に対する影響を踏まえUV-A(315~400nm), UV-B(280~315nm), UV-C(100~280nm)の3つに区分されている。UV-Aは大気にあまり吸収されずに地表に到達する（太陽から排出される紫外線の5.8%）が、人体・生物への影響は少ない。UV-Bは大部分がオゾン層により吸収され、残りが地表に到達する（太陽から排出される紫外線の0.2%）ため、オゾン層の量に依存する。ビタミンDの生成を促進するなどの効果がある一方で材料の劣化、変色などをもたらす。UV-Cはほとんど上空のオゾンや酸素分子によって吸収されて地表には到達しないが、被爆した場合にはDNAを損傷するなど人体・生物への影響は大きい（詳しくは3.1.2）。

(3) 赤外線域の影響

赤外線は可視光よりも長い波長の部分を指し、紫外線同様に波長に応じて区分されているが、分野によって区分が異なるので注意が必要である。波長が短いものは加熱や赤外線カメラ、通信などに利用されており、長波長の物は放射加熱やレーザー加工に利用される。人体・生物には温熱効果があり、白内障の発生にも影響を与える。

参考文献

- 1) 平手小太郎：建築光環境・視環境、数理工学社、2011.

- 2) 江馬一弘：人に話したくなる物理 身近な10話，丸善株式会社，2006.
- 3) 板硝子協会 建築環境WG 情報提供 2016.12.
- 4) 照明環境基準刊行小委員会：日本建築学会環境基準AIJES-L0002-2016 照明環境規準・同解説，日本建築学会，2016.
- 5) 大山正 他：感覚知覚ハンドブック，誠信書房，2013.