

令和6年度文部科学省委託
「地方やデジタル分野における専修学校理系転換等推進」事業

デジタルの色彩

基礎編

工業専門課程 ITデジタルクリエイター科のカリキュラム開発

このテキストで解説する「デジタルの色彩」とはコンピュータであつかう色彩のことです。

はじめに

デジタル分野における色彩表現の基礎を理解するためには、デジタル表現の特性を把握することに加えて、その技術が構築された理論的な背景を知る必要があります。色の物理的要因である光が科学的に扱われるようになってから 300 年余り、色を知覚する仕組みについては仮説段階を経て、網膜上にある色知覚の光感細胞が確かめられてからまだ 60 年です。日本におけるカラーテレビの放送が 1960 年なのでフルカラーの表現技術は、色知覚の生理的メカニズムの実証過程と並行して歩んできたといってもよいでしょう。このテキストの役割は、デジタル表現のなかで使用する色彩を、思い通りに表示する技術や知識を習得することです。そのためには色をコントロールの対象として扱うことのできる技能が必要となりますが、それは物理的な光や生理的な視細胞の反応を数量として扱う考え方を学ぶことに他なりません。これは色の定量化ですが、本文前半では先人の業績をまとめることによって色の定量化の話を中心に紹介し、後半はデジタル色彩の解説になります。

視覚情報の複製

現在、視覚情報の大量複製技術として 2 種類の方法が確立されています。

ひとつは「印刷技術」、もうひとつはコンピュータやスマホなどの「デジタル技術」です。このふたつの複製の再現技術は、共通するところと相違ある部分があります。

テーマが色彩なのでここではフルカラーの複製を前提にして解説します。

視覚情報:写真やイラスト、図形、記号、文字などの視覚的要素を組み合わせて構成されたグラフィックなど。

印刷技術とデジタル技術

大量複製技術としての共通点

様々なオリジナルの色を安定して大量に複製する技術の条件

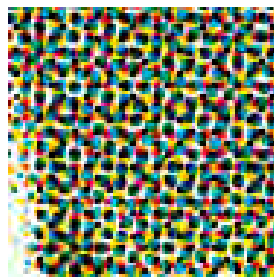
- ・できるだけ少ない色数の原色で、できるだけ多くの色を再現する。

印刷技術とデジタル技術

色再現のための素材やプロセスの相違

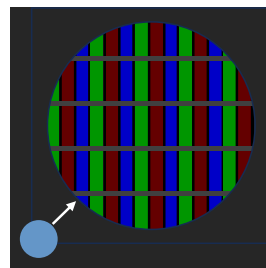
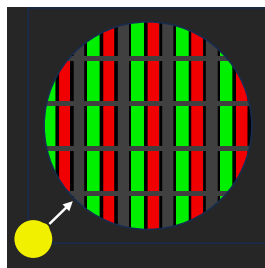
印刷技術（フルカラー）の原色

透明カラーインク



デジタル技術の原色

発光素子



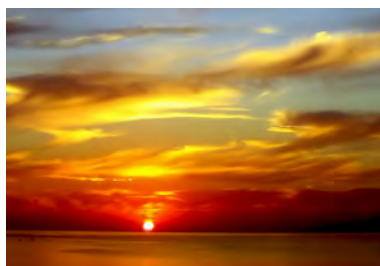
視覚情報の特性



私たちは様々な環境の中で色を見えています。
屋外の色、室内の色。これらの色は、太陽の光や照明の光が
ものに当たり、その反射によって生まれた色です。



私たちの見ている色は、ものの色だけではありません。
夕陽や暖炉の炎のように、光の色を直接見る場合もあり
ます。そして、ものの色はものの色らしく、光の色は光
らしく見えています。



ゆれる炎のあるマグダラのマリア
(1638-40 頃)
Georges de La Tour

ところが、絵画に描かれた
「ろうそく」は、絵の具で描
かれたにもかかわらず炎が
光っているように見えます。

光の色で表現されたパソ
コンの画像も光の色では
なくものの色に見えます。



「色の見え方」は、対象がどのように知覚されているかを分類するときに
用いられる用語で「色の見えのモード（様相）」ともいいます。これは対
象の色を生じさせる素材（光や色材）について分類したものではなく、
どのように見えているかを示したものです。

左は絵の具で表した「発光（知覚）色」、上は発光素子（光）で表した「物
体（知覚）色」です。

対象の見えは、対象の色の数値（例えば「色相」「明度」「彩度」や「主波長」
「輝度」「飽和度」）で決定するものではなく、周辺の色との関係において
決定します。

視覚情報を制作する上では重要なポイントです。

デジタルの色彩＜基礎編＞目次

1章 色彩の科学

1.1 色を見るしくみ	2
1.2 視感覚	14
1.3 色彩の知覚	17
1.4 光源と測光	31
1.5 混色とカラーマッチング	38
1.6 色の表示方法	45
1.7 色測定の基礎	57

2章 デジタルの色彩

2.1 はじめに	70
2.2 コンピュータ環境における色表現	70
2.3 コンピュータ環境における色再現領域	71
2.4 カラーマネージメントシステム	73
2.5 コンピュータにおける画像データ	74
2.6 画像ファイルの形式	77
2.7 Web コンテンツ等のアクセシビリティ	81

1 章 色彩の科学

1.1 色を見るしくみ

1.1.1 光と色

(1) 光一波としての特徴一

1) 直進性

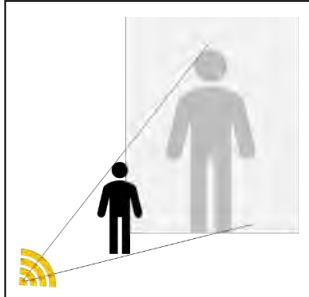


図 1-1-1 光の直進性

LED ランプなどの人工照明の光は、空気中を伝わって照明しようとする物体に到達する。人物が今、非常に小さい光源(点光源という)から出た光によって照らされて場合、人物の後ろの壁には人型の影ができる（図 1-1-1）。その人型は、光源と人物の輪郭を通る直線と壁面との交点を結んだ線によって作られており、あたかも、光が直進しているように見える。マクロ的視点では重力の影響を受けて曲がることが知られているが、左図は光が同じ媒質（ここでは空気）の中では直進することを示したものである。

ホイヘンスは、光が水面に生じる波と同じように 3 次元的に周期的な振動を繰り返しながら伝わっていくとしている。つまり、光の進行方向に対して垂直な波である横波と仮定する（図 1-1-2）。横波の性質を表す指標として、ある波の山から次の山までの距離である波長（記号： λ 、ラムダ）、単位時間あたりにおける山の数である振動数（記号： ν 、ニュー）及び山の高さに相当する振幅（記号： a 、アンプリチュード）が用いられる。波長と振動数との間には次の関係がある。

$$\lambda = v / \nu$$

ここで、 v は光の速度で、真空中では $v = 2.998 \times 10^8 (\text{m/s}) \approx \text{秒速約 } 30 \text{ 万 km}$

波長の振動・光の進行方向・光速

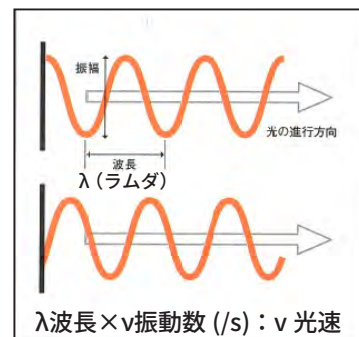


図 1-1-2 横波としての光

2) 屈折

魚を網ですくおうとすると、うまくいかないことが多い。魚がいると思って網を入れても、その位置ではなくもう少し深い所に魚がいることによる。小さな魚から反射した光が海水と空気との境界で屈折して目に到達したように見える（図 1-1-3-1）。

空気や海水などの媒質の種類によって、その中を通過するときに光の速度が変化することによるが、真空中の光の速度（ $v=c$ ）と媒質中の光の速度（ $v=v_i$ ）との比を屈折率（記号： n ）という。

$$n_i = c / v_i$$

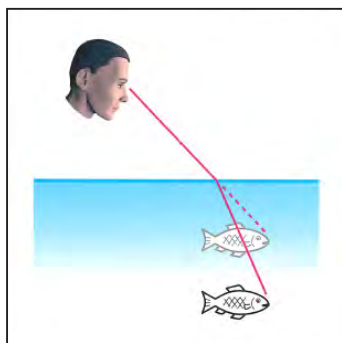


図 1-1-3-1 水中の魚の位置

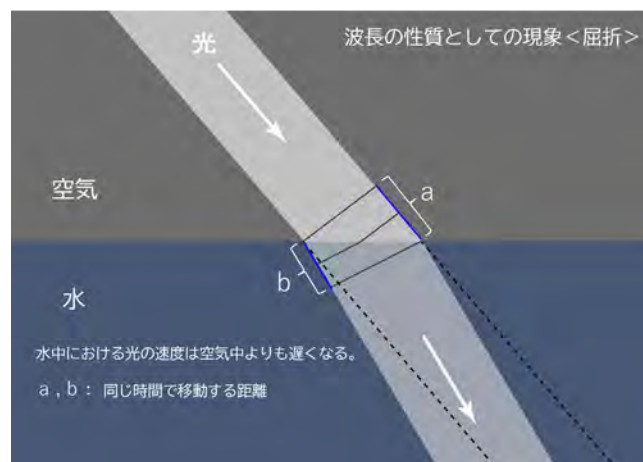
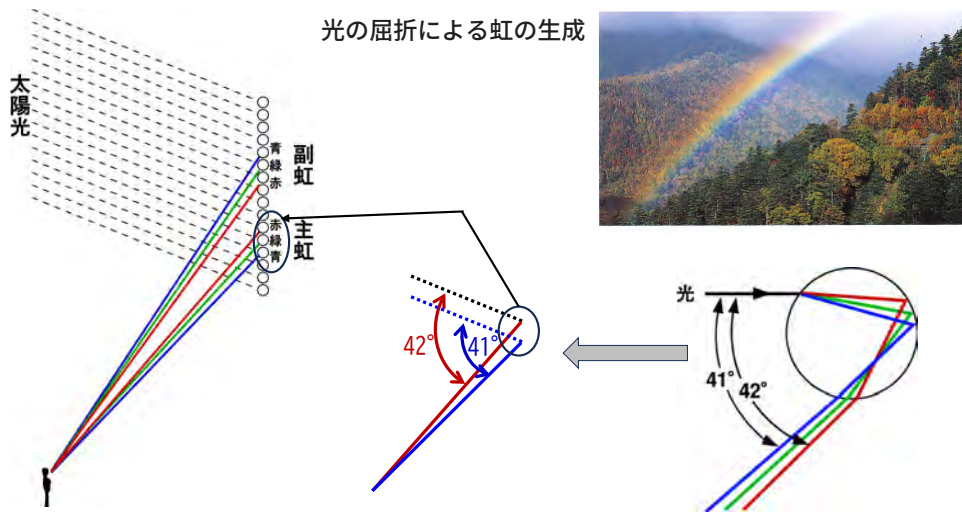


図 1-1-3-2 光の屈折

雨上がりに空気中に浮遊しているたくさんの水滴に光が差し込むと、空気中からの光は水面に入ることによって屈折され、さらに光が水滴の中で反射し、空気中に屈折して出てくる。

屈折率は光の波長によって異なるため、見る角度によってさまざまな色を見ることができる。これが虹の色が見えるしくみであり、虹は太陽を背にしたときに見ることができる。(図 1-1-4)。



3) 干渉

図 1-1-5 右上図には、波長が同じ 2 つの横波が示されている。2 つの横波の違いは、図の左端を振動の起点と考えると、振動の開始時間の差であることがわかる。これを位相の違いという。

光の干渉によるシャボン玉

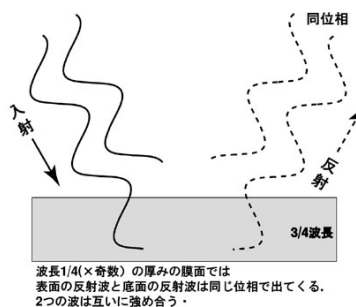
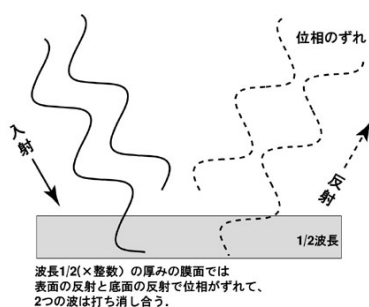
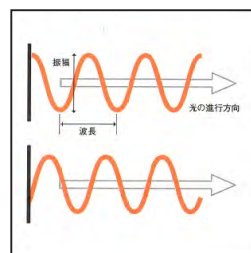
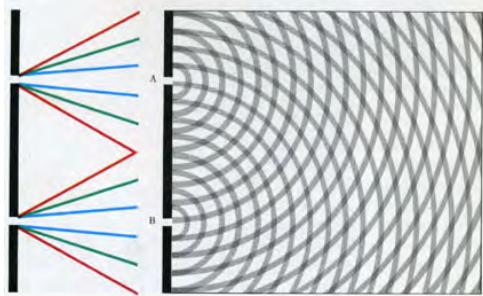


図 1-5 光の干渉

表面での反射光と、油膜に入り込んで再び反射して出てくる光とでは、光の進んだ距離が異なるために位相差が生じる。その結果、波の山の位置が重なりあったり、谷の位置が重なったり、様々な重なり具合になる。山と山が重なった場合は明るく（強め合いの干渉）、山と谷が重なった場合は暗くなる（弱め合いの干渉）。屈折率は波長によって異なることと油膜は厚さが均一でないこと、油膜自体が対流していることなどから、見る角度によって明るく見える波長が変化するので様々な色が観察される。シャボン玉も同じ理由による。このような現象を光の薄膜干渉という。

4) 回折

水面を伝わる波が水中に立てられた柱にあたると、波はそこで遮られる。しかし、よく観察すると、波が回り込んだように柱の裏の水面が揺れていることがわかる。光の波長はとても短いので、目で確認することは難しいが、光についても同様の現象が生じている。光のこのような性質を光の回折という。



平面に多くの溝を等間隔につけ、光が回折する性質を利用して光をスペクトルに分ける。



図 1-1-6 光の回折

5) 光の散乱

障害物が柱でなく大気中に浮遊している分子のように波長と同じ程度かそれ以下の大きさになると、光はその分子を回り込むようにして方向を変える。このような状態を光が散乱しているという。散乱の度合いは長い波長より短い波長の方がより強くなる。日中に空が青く見えるのは、短い波長の光が多く散乱するためである。また、逆に夕焼けや朝焼けが赤く見えるのは、短い波長に比べて、長い波長の光の散乱が少ないためであり、自分から遠く位置する太陽からの光は長波長側の赤や橙の光が遠くまで届くのである（図 1-1-7）。

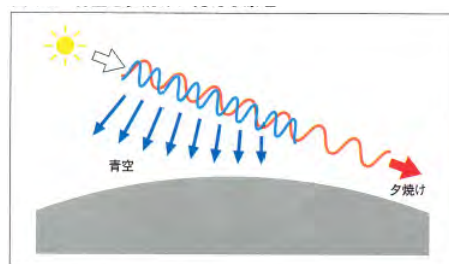
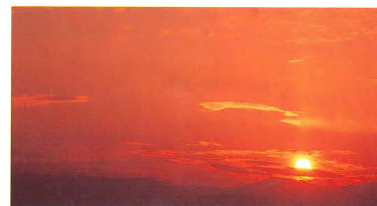
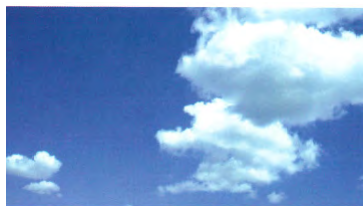
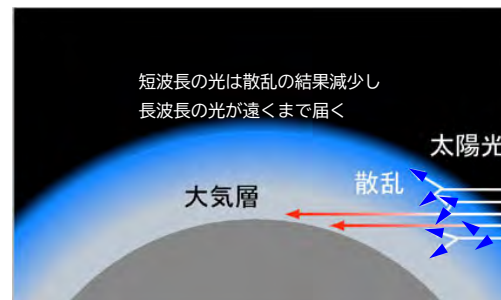
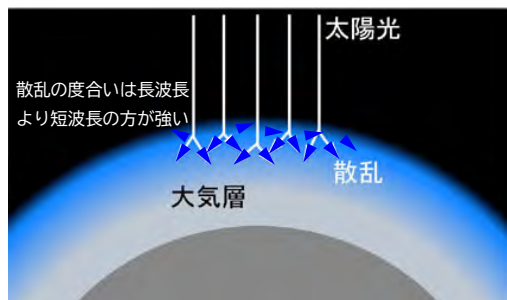


図 1-1-7 青空と夕焼けの見える原理

1.1.2 色彩生理学

(1) 色情報の処理経路と各機関のはたらき

1) 眼のしくみ

視覚情報の処理は、直径約 24mm の 10 円玉の大きさ程のほぼ球状の眼から始まる。眼は光の取り入れ口であるとともに、最初の情報処理をも行う場所でもあるので、脳の出先機関ともいわれる。その構造を図 1-1-8 に示す。

2) 角膜から網膜までの流れ

眼球表面にある無色透明な角膜に届いた光は、以下の流れを経て、眼球内面に広がる厚みがわずか 0.15 ～ 0.4mm の網膜 (retina) まで進む。網膜までは、光の量と方向の光学的な調整過程が行われる。

①眼の表面を覆う角膜 (cornea) において、光は眼球内で最大の屈折を行う。

②その光は前眼房室 (眼房水) を通り抜け、取り込む光の量を調整している虹彩 (iris) に到達する。虹彩 (俗に言う茶目) は部屋のブラインドのようなもので、周辺の明るさに応じて、光の取り込み口である黒目中央の瞳孔 (pupil) の直径を約 1mm (非常に明るい場合) ～ 9mm (非常に暗い場合) の範囲で変化させて、眼球内に入る光の量を調節している。少ない光の環境では効率よく光を取り込もうと瞳孔を広げるのである。

③水晶体 (lens) は厚みを変えてピント調節を行う透明の層状組織である。この調節は毛様体筋の緊張と弛緩と水晶体自体の弾力性によって行われている。

④水晶体を通り抜けた光は、硝子体 (しょうしたい) という 99%水分のゲル状の組織を通過して網膜に届く。

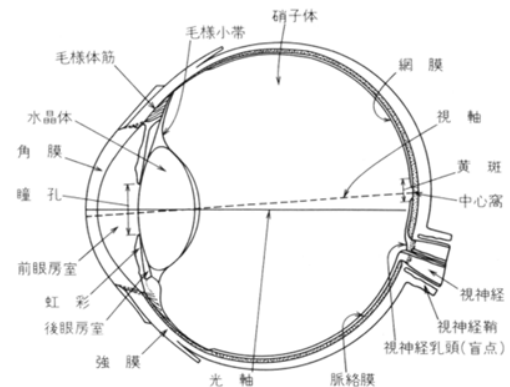


図 1-1-8 右目を上から見て水平に切った眼球内

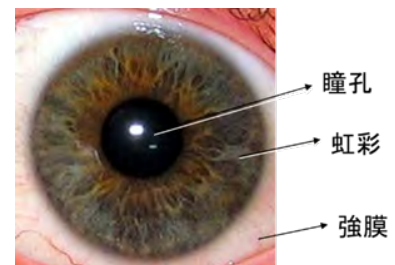


図 1-1-9 強膜・虹彩・瞳孔

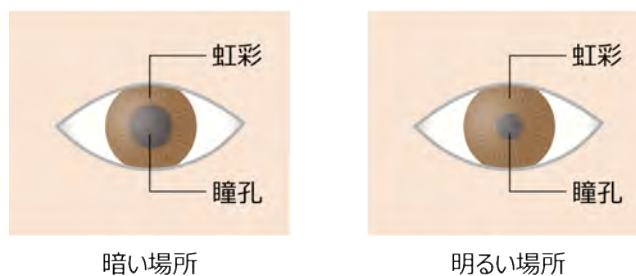


図 1-1-10 明るさによる瞳孔の直径変化

3) 網膜の構造

網膜は光を感知し、その光情報から対象物の明るさや色、運動、遠近等について最初の分析処理を行う 10 層からなる神経組織である。とても薄い膜であるが、分析処理能力に長けている。

光は網膜にある数々の細胞層を通り抜け、9 層目にある視細胞 (光受容器) によって受け止められる。最も外側の 10 層目は色素上皮細胞といい、視細胞の機能維持や視細胞の代謝物質の処理などを行っている。いわば、重要な視細胞を保護する役割を担っている。視細胞層から出力される電気的信号は折り返し、光情報を分析・処理しながら網膜上層に向かって進む (図 1-1-11)。

①視細胞

視細胞には、先端が円錐の形をした錐体細胞 (cone) と杆体細胞 (rod) の 2 種類がある。これらは網膜上

の分布と働きが異なる。

錐体細胞は網膜中央部に多く、明るい場所で働き、それによって色や細かい物を捉えることができる。このことから、錐体細胞は高解像度カラーフィルムと喩えられる。錐体細胞が密集した網膜中央部には中心窩（fovea）と呼ばれる直径約 0.35 mm の小さな凹みがある。この部位では錐体の形状は錐状でなく針のように細長い形状をしている。錐体細胞には、波長別の感度特性（分光感度）が異なる 3 種類の錐体細胞がある。長い波長光に対する感度が高いものが L 錐体（L（long）：ピーク波長は約 560nm）、次いで M 錐体（M（middle）：ピーク波長は 530nm）、そしてより短い波長光への感度が高いのが S 錐体（S（short）：ピーク波長は 420nm）と呼ばれる。これら 3 種類の錐体細胞により、光は色分解される。錐体細胞は網膜上に蜂の巣状に並んでおり、その数は、L・M・S の順に少なくなり、個人差は大きい、割合をみると順に 64%、32%、4%だといわれている。

L 錐体と M 錐体の波長別の分光感度は非常に似ている。それは進化の過程で、もともと L 錐体のみであったものが分化をしたためと考えられている。私たちが赤から黄緑までの細かな色の違いを捉えることができるのはこうした L 錐体と M 錐体のわずかな応答の違いによって引き起こされるのである。

一方、網膜周辺部には高感度白黒フィルムといえる杆体細胞が多く分布している。暗い夜道を歩くときに、路面を視野の中心で見ると、視線を少し上げて視野の周辺部分で路面を見る足元が見えやすくなるのはこのためである。錐体細胞は明るい環境で、杆体細胞は暗い夜に働く。その切り替わりのときに起こるのがプルキンエ現象（→ P.20）である。プルキンエという名前は、この現象を発見したチェコの生理学者ヤン・エヴァンゲリスタ・プルキンエから来ている。

この現象は、杆体細胞が錐体細胞よりも短波長の光に対する感度が高いために生じる。真っ暗闇だと杆体細胞しか働かないために色は見えないが、薄暗い環境では錐体細胞と杆体細胞が同時に働くために色の識別が可能であり、杆体細胞が感度の良い短い波長の青系の色がより明るく感じられるようになる現象である。ここで、錐体が働く、物の色や形が鮮明に分かる時を明所視、物の色と形がいくらかわかる、薄暗い環境のことを薄明視（錐体と杆体が同時に働く）、杆体だけが働く物の明暗だけがおぼろげに分かる時を暗所視という。

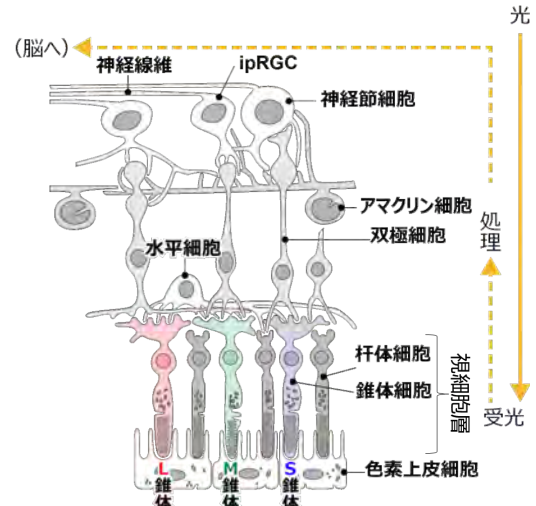


図 1-1-11 網膜の構造

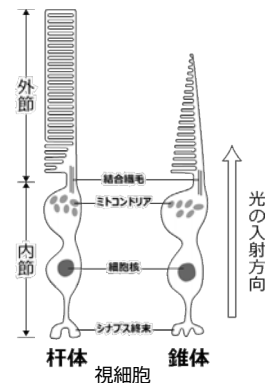
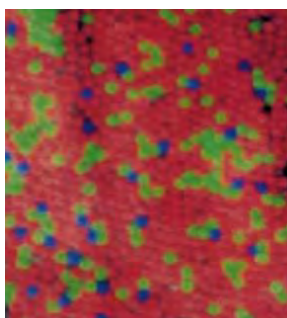
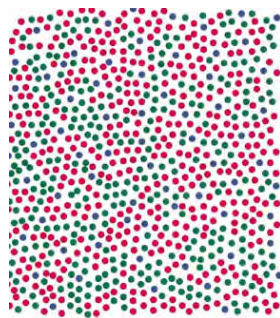


図 1-1-12 錐体と杆体



ヒトの網膜の L、M、S 錐体の分布
(Austin Roorda & David R Williams,
Nature, 397, 520-522, 1999)
L > M > S の順に多い



サルの網膜における 3 種類の錐体の分布
(Roorda, Metha, Lennie & Williams, Vision
Res, 41, 1291-1306, 2001)
L > M > S の順に多い

図 1-1-13 視細胞の網膜上の分布

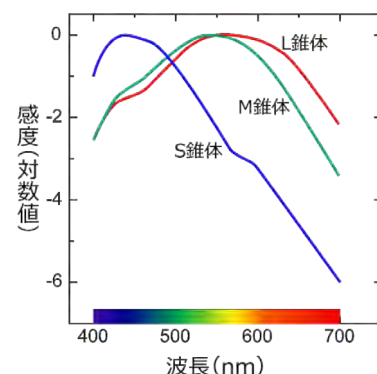


図 1-1-14 錐体の波長別分光感度特性

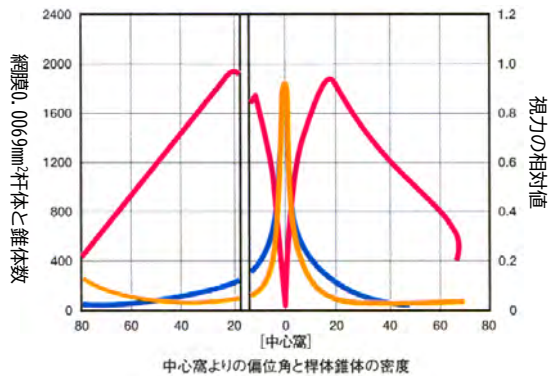


図 1-1-15 網膜上における視細胞の分布

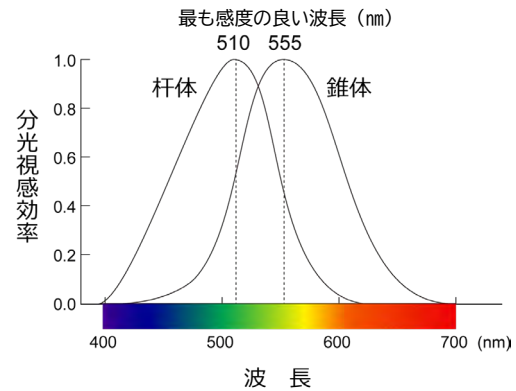


図 1-1-16 錐体と杆体の分光感度

表 1-1-1 錐体細胞と杆体細胞の比較

	錐体細胞	杆体細胞
分布	中心窩に多い	周辺部に多い
色	識別できる	識別できない
感度	低い	高い
解像度	高い	低い

杆<かん>体細胞は光の感<かん>度が高い と覚えよう。

②水平細胞

錐体細胞と杆体細胞からの出力を受けて、横同士の細胞との連結を持つ水平細胞に送られ、波長特性（色）に応じた処理が行われる。補色残像の成立にはこの細胞が関係していると考えられている。また、水平細胞は環境の光の変化に応じて、感度を調整する役割をも担っている。これにより視覚系全体が明暗環境の適応することを助けている。

③双極細胞

次の双極細胞では、空間に関する分析も処理に加えられる。網膜には、光が当たると興奮する部位（オン領域）と、逆に光により反応が抑制され、消したときに興奮する部位（オフ領域）とがある。網膜から出力される信号は神経繊維の束を流れるが、ある 1 本の神経繊維の反応に影響を与える網膜範囲のことを受容野という。受容野は 2 重円の構造となっており、中心部がオン部位、周辺がオフ部位の「オン中心型細胞」と、その反対の「オフ中心型細胞」等がある。前者は白スポット、後者は黒スポットにもっとも良く反応する。最終的に、双極細胞では色彩と空間とが組み合わされた分析ユニットにより、色と空間の分析が進められ、より高次の視覚情報として神経節細胞へ伝達する重要な役割を担っている。

④神経節細胞

網膜における視覚情報処理の最終段階を担う非常に重要な細胞である。③の双極細胞までは、細胞の電位変化が伝達されていたが、神経節細胞で単位時間当たりのパルスの頻度へと変換する（活動電位を発生させる）。神経節細胞の軸索が束になって神経線維となり、網膜の視神経乳頭（⑤参照）から脳へ出たところで視神経と名称を変え、視覚情報を脳へ伝達する。

⑤視神経乳頭（盲点）

神経節細胞からの出力は網膜内側表面に到達した後、その表面に沿って神経繊維を流れ、盲点にあたる網膜部位の視神経乳頭から外に出て、脳に向けて進む。例えるならば、視神経乳頭は室内のコードを室外に出すための壁穴のようなもので、視細胞は存在しない。そのためそこでは光を感じることはできない。視神経乳頭（盲点）の位置は、両眼の正面外側、鼻側に約 15 度である。ただし、物は見えないはずの部位があるにもかかわらず、

デジタルの色彩＜基礎編＞

視野の一部に欠けた部分が感じられないのは、脳が勝手に補填しているためである。図 1-1-17 に盲点の観察法を示す。

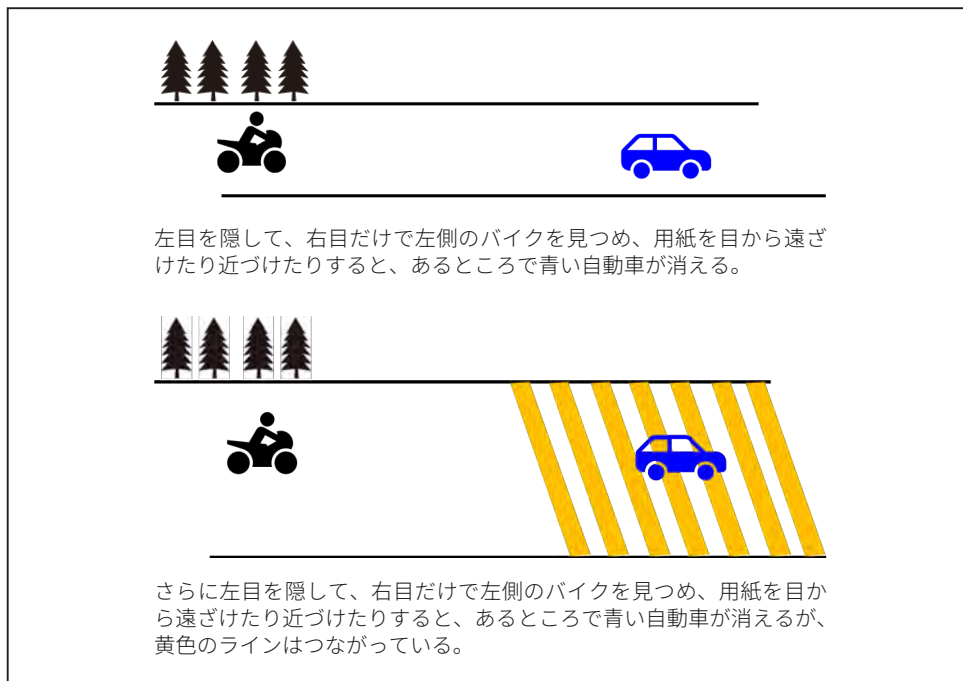


図 1-1-17 盲点の観察

⑥視覚伝送路と中枢

左右それぞれの眼から出た視神経は、視野の左右位置に応じて、その半分ずつが異なる経路に振り分けられる。その結果、どちらの眼についても、左視野の情報は右脳に、右視野の情報は左脳に送られる（図 1-1-18 参照）。振り分けられる位置では視神経の半分が交叉するので、この部位は視交叉（しこうさ）と呼ばれる。

次いで、視覚情報は脳の左右に1つずつある外側膝状体（がいそくしつじょうたい）に到着する。対象物から脳までの情報伝達路はマグノセル（大細胞）層とパルボセル（小細胞）層から構成され、色、形、時間に関する処理が分業されて行われている。視交叉から先の視神経は視索と名を変え、さらに途中から、放射状に広がる視放線と名が変わる。最後には後頭部に位置する大脳視覚領（v1）に到達する。視覚領では、視覚の重要さに応じてその領域の広さが異なる。このようにして、大脳で光は色彩感覚となり、記憶などの情緒的側面も加わり、さまざまな色の世界が認知される。

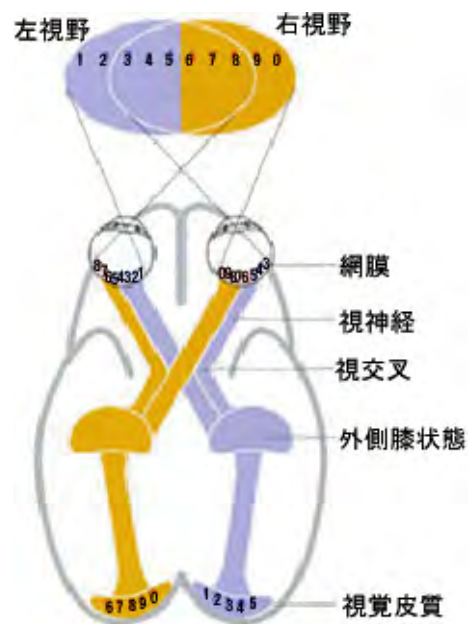


図 1-1-18 対象物から脳までの情報伝達路

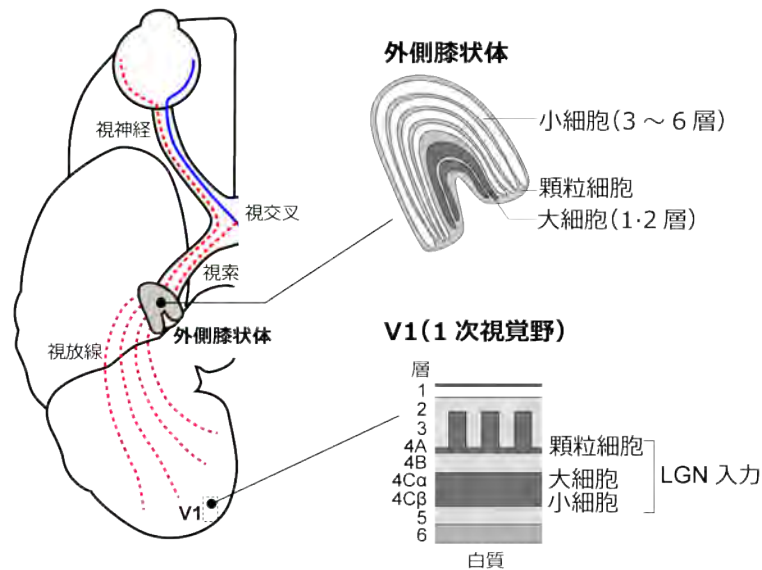


図 1-1-19 外側膝状体と一次視覚野

(2) 色覚理論

どのような仕組みで色が見えるのかについて、これまで提唱されてきた代表的な3つの理論を述べる。

1) 三原色説

三原色説とは、ヤングが1802年に発表し、ヘルムホルツが1868年に完成させた色覚理論である。そのためヤングーヘルムホルツ説ともいう。この理論では、網膜に波長別の分解特性が異なる3種類の物質があることを想定している（図1-1-20）。それぞれの最大感度は長波長、中波長、短波長であり、各々が引き起こす感覚が、赤、緑、青に対応する。ある光が網膜にやってくると、3種類の物質がどの程度ずつ応答するかにより、赤、緑、青の分量が求められる。3種のすべてが興奮すればそれは白、すべてが興奮しないとすると黒、あとは3種の神経の興奮の程度によって、無限の色が感じられる。三原色説は混色理論に由来する色覚説であり、混色の事実は明快に説明できる。ただし、残像がどうして起こるのかについてはこの三原色説ではうまく説明することができない。

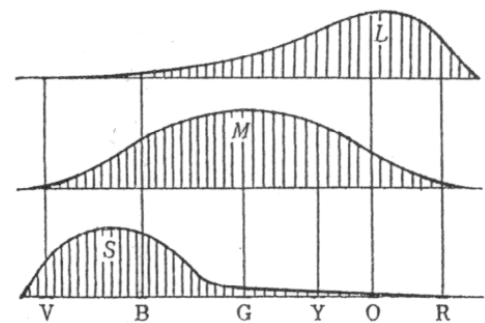


図 1-1-20 三原色説における3種の基本感覚曲線

2) 反対色説

反対色説はヘリングにより1874年に発表された。彼は色の基本感覚として赤ー緑、黄ー青、白ー黒の3組の反対色を仮定した。これは次のような観察結果に基づく。ある色を見たときに、同時に赤みと緑みを感じることはできない上、黄みと青みも同時には感じることはできない。そのため、ヘリングは、網膜に白ー黒物質、赤ー緑物質、黄ー青物質という3つのコンポーネントがあると仮定し、それぞれの物質は光によって、同化と異化という対立的な化学的变化を起こすと考えた。同化は、黒、緑、青の感覚をもたらし、異化は白、赤、

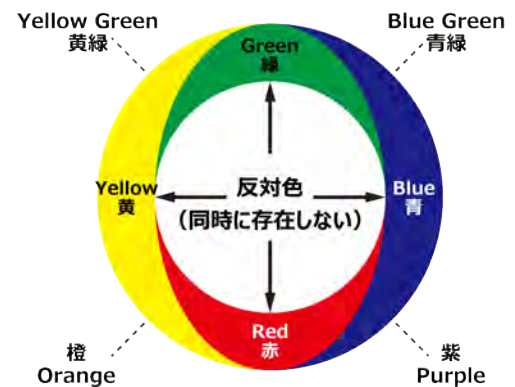


図 1-1-21 反対色説の仕組み

デジタルの色彩＜基礎編＞

黄を生むのである。図 1-1-22 に同化、異化を模式的に示した。

例えば 520nm の光は、黄／青ユニットで異化が起こることで黄色が生まれ、赤／緑ユニットでは異化作用により緑が生まれる。したがって黄と緑の出力から、その光は黄緑として感じられる。また、470nm の光は黄／青ユニットで同化作用が起こって青が生まれ、赤／緑ユニットでは同化と異化が均衡するため無色となり、この光は青色に見える。なお、白／黒ユニットは明るさのレベルに対応し、同化で白、異化で黒、中間がグレーとなる。グレーの場合、そこに白と黒の両色が感じられると仮定している。

反対色説は、順応、対比、残像現象といった色覚現象を説明するのに都合が良い。

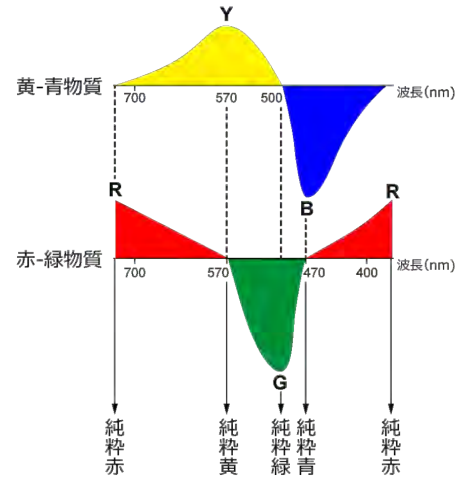


図 1-1-22 反対色説による色反応模式図

3) 段階説

この説では、網膜段階では三原色説に、それ以降の神経段階では反対色説にしたがうように光が処理されて色覚が生まれると考える。

1920 年代以降、さまざまな研究者が提唱している色覚理論はこのバリエーションである。ここではそれらの模式的なモデルにより解説する（図 1-1-23）。

第 1 段階は、錐体細胞による光の RGB 分解の過程である。先に述べたように錐体細胞には、長い波長、中程度の波長、短い波長に感度の高い L・M・S の 3 種類の細胞がある。つまり、光の中に含まれる赤、緑、青成分を 3 種の錐体が測り取る。

第 2 段階では、3 種類の錐体からの出力が、網膜表層や外側膝状体において、①赤か緑、

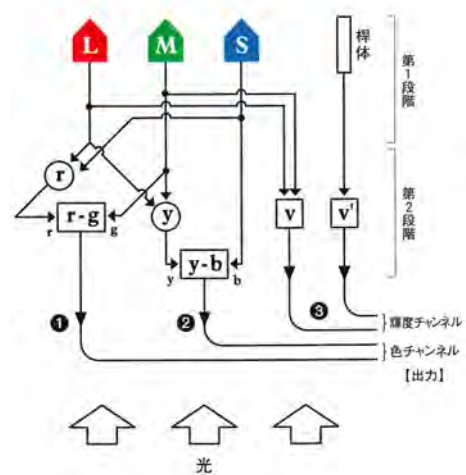


図 1-1-23 段階説の模式図

②黄か青、③明るさレベルという 3 つの要素に変換される。このうち①と②は色チャンネル、③は輝度チャンネルと呼ばれる。

①赤／緑：L 錐体と M 錐体からの出力は、r-g ユニットで減算され、L の興奮が M よりも大きい場合には、「赤」、L の興奮が M よりも小さい場合には「緑」が出力される。L>M が赤みを帯び、L<M が緑みを帯びるといった具合である。

②黄／青：L 錐体と M 錐体からの出力を Y ユニットが合計し「黄」が生まれる。その出力と B 錐体の出力との差によって、「黄」か「青」が切り替えられる。つまり、 $S > (L + M)$ の時に青みを帯び、 $S < (L + M)$ の時に黄みを帯びる。

③明るさのレベルは、L 錐体と M 錐体からの出力が、Y ユニットで合計されたものである。逆にいうと、明るさのレベルに S 錐体は関与しない。また、桿体細胞からの出力も明るさレベルをとらえるために用いられている。

そして、色と明るさ情報は脳視覚領において色感覚となる。

(3) 色覚異常と高齢者の色覚

1) 色覚異常

色覚異常とは、ある特定の色同士が、明度が等しい場合に識別できない、あるいは識別しにくい色覚特性のことをさす。

色覚異常には、錐体細胞の欠損や働きの不全が引き起こす先天性のものと、心因性あるいは眼底や脳の疾患などから生じる後天性のものがある。前者は遺伝によって起こる。その割合は、日本人男性の約 5%、女性で約 0.2% といわれ、人種では、フランス人、アメリカ人、黄色人種、アフリカ系の順に多く、順に男性の 10%、8%、5%、1～2% である。

①分類

先天性の色覚異常は、3 種類の錐体の数や働きの程度から、表 1-1-2 のように分類される。色覚異常のタイプで最も多いのは、「異常 3 色型」と「2 色型」である。これらのうち L 錐体の異常がみられるものは合わせて「第 1 色覚異常」と総称される。同様に、M 錐体に異常がみられるものは第 2 色覚異常と呼ばれる。なお S 錐体に異常がみられる第 3 色覚異常は極めてまれである。

表 1-1-2 色覚異常の分類

色覚特性の名称			錐体			桿体	日本人男性 における 割合	CUDO による呼称
			L	M	S			
正常色覚	3色覚	正常3色覚	●	●	●	■	95%	C型
色覚異常	1型色覚	1型3色覚	▲	●	●	■	1.5%	P型弱度
		1型2色覚	—	●	●	■		P型強度
	2型色覚	2型3色覚	●	▲	●	■	3.5%	D型弱度
		2型2色覚	●	—	●	■		D型強度
	3型色覚	3型3色覚	●	●	▲	■	極めてまれ	T型
		3型2色覚	●	●	—	■		
	1色覚	錐体1色覚	● ● ● いずれか1つのみ			■	極めてまれ	A型
		桿体1色覚	—	—	—	■	極めてまれ	

●：錐体が正常にはたらいている ▲：波長感受特性が●とは異なる —：もたない

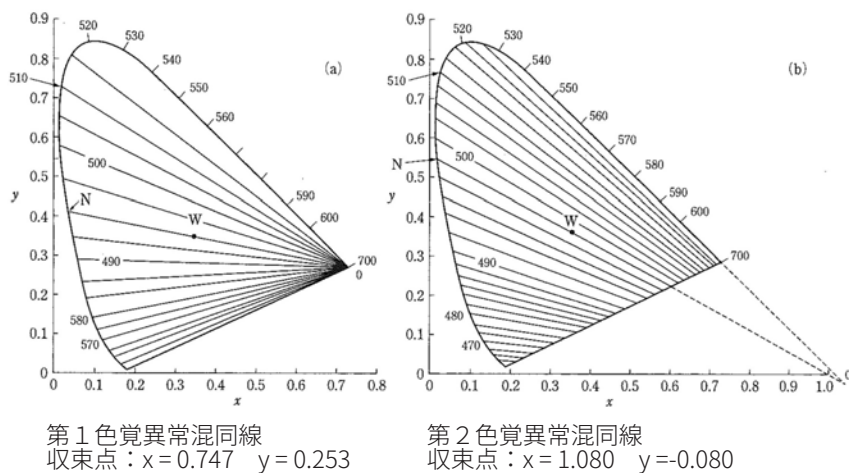


図 1-1-24 第1色覚異常と第2色覚異常の混同線

②混同色

第1異常と第2異常のそれぞれについて、色度図上に、混同されてしまう色を線で表す（図 1-1-24）。図で、同じ混同線上の色は明度が等しいと、区別できないことを示している。

第1異常の混同線が色度図の赤の端のところで消えているのは、赤を見たときに暗く見えなくなるからである。

③色彩設計上の注意

色覚異常の人は、照明が暗かったり、対象物が小さかったり、急いで見なければならぬような時に、色の識別低下が著しくなる。そうした際にもわかりやすくするためには、まずは背景と文字や図との明度差をきちんとつけることが最も有効である

2) 高齢者の色覚

水晶体の色は、乳児のときは無色透明であるが、年を取るにつれ徐々に黄色く着色され、80代ともなるとほとんどオレンジ色になっている。

その結果、図 1-1-25 に示すように、短波長の光（青）は水晶体でかなり吸収されてしまう。このように水晶体の波長別透過率が変化することで、また、細胞が老化することで、高齢者は黄色と白や、青とダークグレイをはじめとする色彩の識別能力が低下する。

しかしながら、水晶体の黄変は少しずつ進むために、色順応（1.3.2(4) 参照）が生じる。そこで、水晶体が黄変したからといって白い紙がオレンジ色に見えるようになるのではなく、白い紙は依然白として認識できる。高齢者になっても色彩の同定能力はあまり変化せず、色彩識別能力が大きく低下するのである。また、水晶体が濁る病気である白内障の割合も増え、60代後半で6割、80代後半ではほぼその全員が白内障となることで、対象物がはっきりと見えにくくなる。

そこで、高齢者にとって見やすい環境としては、背景と対象との明度差をつける、あるいは照明を明るくするなどの対処が必要とされる。そうすることで実は誰にとってもわかりやすい環境が作られる。こうした動きをユニバーサルデザインという

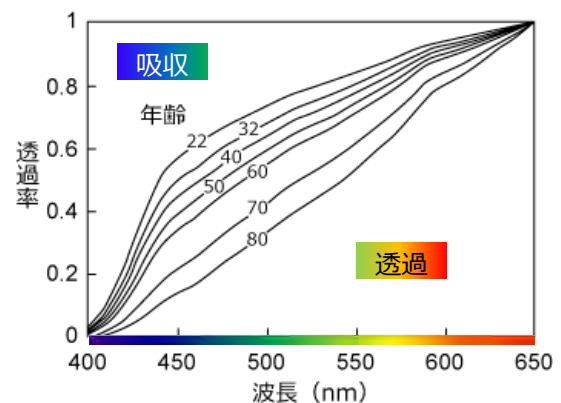
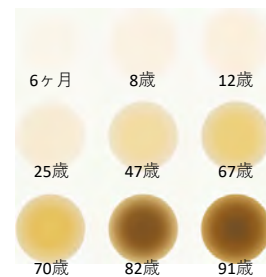


図 1-1-25 年齢による水晶体の波長別透過率



Lerman, S. (1980) に基づく

図 1-1-26 水晶体の黄変

(4) 動物の色覚

1) 研究法

動物の色覚を調べる方法はいくつかある。

例えば、錐体細胞が何種類あるかを解剖学的に調べたり、感光色素の種類を化学的に分析するというように、組織の存在から推測するやり方がある。この場合、錐体細胞が1種類しかないとき明暗の区別しかできないと判断され、2種類以上あれば色覚が存在していると推測できる。他にも、視細胞の伝達物質が色光にどのように応答するかを調べる神経生理学的方法や、動物が色を手がかりにして電気ショックを避けることができるかというように、色を信号とした行動変化から判断する方法がある。

2) 動物の色覚

表 1-3 に、さまざまな動物の色覚について示す。色覚を持つ動物は昼間に活動するものが多いのに対して、色覚が無く、明るさの違いしかわからない動物や色を区別する能力が劣る動物は、夜間や海中で活動するもの

が多いことが分かる。

例えば、昼行性のチョウは色を区別できるが、夜行性のガの多くは区別できない。海中深くに生息する魚やタコ、イカに色覚はなく、浅いところを泳ぐ魚は色覚を持つ。昆虫も色覚を持つが、人が「赤」として見る長波長は見ることとはできず、逆に人が「青紫」と感じる短波長よりも、さらに波長の短い紫外線を見ることができる。昆虫の目は、小さな目が数多く集まった複眼である。長い波長の光は、複眼の縁で進路を曲げられてしまう度合いが強く、視細胞に結像しにくいために、より短い波長の光をとらえるようになったと考えられている。

表 1-1-3 さまざまな動物の色覚
(鈴木光太郎、動物は世界を動見るか、新曜社、1995 より部分的に引用)

動物名	4 型	3 型	2 型	1 型	研究種類
ヒト		● 1			A
サル		● 1	● 2		A
イヌ			●		A
ネコ			●		B
ウシ		●			C
ブタ			●		A
ラット				●	A
ハト		●			A
カメ		●			A
カエル		●			A
コイ		●			B
ミツバチ		●			B
アキアカネ	●				B
モンシロチョウ	●				C
ゴキブリ			●		B
エビ			●		A
カニ				●	B
タコ				●	C

1 カニクイザル
2 アカゲザル

A：化学的研究 (組織)
B：生理学的研究 (細胞活動)
C：行動的研究 (を手掛かりとした反応)

1.2 視感覚

暗い室内での、充電ランプの光の見え方はシンプルである。光の強さと波長ごとのエネルギー分布によって決まる。このような目に入る光から作られる基本的な見えの感覚のことを「視感覚」という。

それに対して、視野に複数の対象が存在し、対象と背景としてとらえられる日常的な見えのことは「視知覚」という。視知覚は対象からの光の性質だけでは決まらず、より複雑である。色はその周りの色の影響を受け、例えば同じグレイでも白背景では暗く、黒背景だと明るいグレイに変化して見える。また対象の大きさによっても色の見えは変化する。

本章では基本的な視感覚のうち、特に明暗に関わる感覚について述べる。

1.2.1 明暗の感覚

(1) 分光視感効率－波長別の明るさ感

私たちは約 380nm ～ 780nm の波長の電磁波を光として見る。光は波長に応じた虹色に見えるが、それぞれの色の明るさには違いがあり、同じエネルギーでも黄色や黄緑の光は明るく、赤や青い光は暗く見える。

明るい場所で最も明るく感じるのは、黄緑色に見える 555nm 付近の波長の光である。波長ごとの明るさ感への関与の程度は、最も感度が高い波長の光に感じる明るさを 1 としたときの、同じエネルギーの他の波長の光に対する明るさの比によって図示できる。これを分光視感効率という（図 1-2-1）。波長に対する明るさの感覚には個人差があるため、CIE（国際照明委員会）では、明るい場所での波長に対する人の平均的な感度特性を実験から求め、「CIE 標準分光視感効率」 $[V(\lambda)]$ ヴィ・ラムダとして 1924 年に発表した。なお、そこで想定された人は標準観測者、正式には CIE 測光標準観測者と呼ばれる。

暗い場所になると感度特性が全体に短波長方向にずれ、最高感度は 510nm 付近の緑色の光となる。暗い場所での分光視感効率を CIE は 1951 年に発表した。

図 1-2-2 に、明るい場所で働く錐体と、暗いで働く杆体の分光視感効率を示した。同じ波長の光から感じる明るさが、環境の明るさによって変化することが分かる。それはプルキンエ現象と呼ばれ第 3 章で解説する。

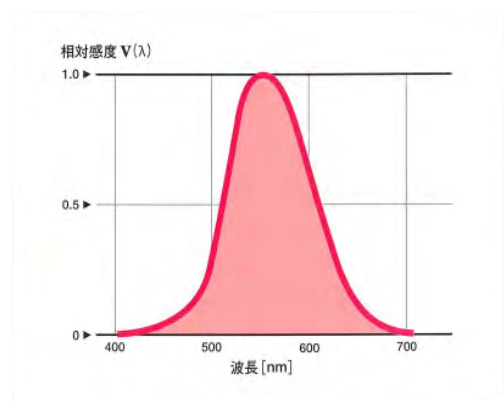


図 1-2-1 CIE 標準分光視感効率

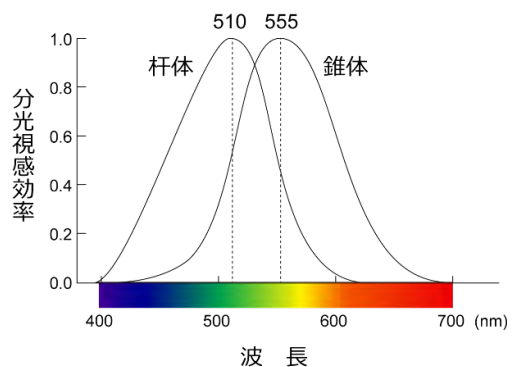


図 1-2-2 錐体と杆体の分光視感効率

(2) 分光視感効率を求める方法

分光視感効率を求める方法には、交照法（フリッカー法）や直接比較法（明るさマッチング法）などある。図 1-2-3 の左に示す交照法では、参照光（一般に白色光）と単色光を同じ位置に交互に素早く提示し、明るさが違うと見えるちらつきが最も小さくなるように単色光の強さを調整して、単色光の強度を求める。図 1-2-3 右の直接比較法は、参照光を上半円に提示し、下の半円に提示した単色光の明るさを調整させ、上下が同じ明るさに見えるようになったときの単色光の強度

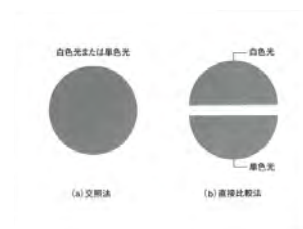


図 1-2-3 光色の明るさ合わせの方法

を計測する方法である。

1.2.2 明るさの感覚—程度と識別

(1) ウェーバーの法則

暗い場所では、光のわずかな明るさの変化も感じられるが、明るいところでは少しの明るさの変化では違いが分からない。やっとなんかを感じることができる刺激の量の違いのことを弁別閾というが、上記の例に示したように、弁別閾は一定ではなく刺激の強さによって変化する。

重さを例に説明しよう。ある人が 100g と 105g を持ち、重さの違いがやっと分かったとする。そこで 1000g の物の場合では同じ 5g 違いの 1005g とでは重さの違いは分からず、100 対 105 の比率に当たる 50g 違いの 1050g になって重さの区別がつくようになる。

こうした刺激の量と刺激の弁別閾との関係について、ドイツの生理学者ウェーバーは実験結果から、「基準となる刺激の強さと、弁別閾の比は一定である」という傾向をみつけた。それは後にウェーバーの法則とよばれ、次の式で表すことができる。

$$\Delta R / R = k \quad R: \text{刺激の強さ} \quad \Delta R: \text{弁別閾 (違いが感じられる刺激の最小量)} \quad k: \text{定数}$$

(2) ウェーバー・フェヒナーの法則

ウェーバーの弟子のフェヒナーは、感覚の大きさを弁別閾を単位として表すことを考え、ウェーバーの法則を発展させて、刺激の強さの感覚の程度について、「感覚量は、刺激の強さの対数に比例する」と述べた。これがウェーバー・フェヒナーの法則である。

$$E = k \log R \quad E: \text{感覚の強さ} \quad k: \text{定数} \quad R: \text{刺激の強さ}$$

例えば、1つのランプを2つに増やしたときの明るさ感の変化と、それと同じくらいの明るさ変化を感じるには、もう1つランプを足した3個ではなく、2の2乗の4個のランプが必要になる。さらに4個のランプを同程度明るくするには、2の3乗の8個のランプがいるということになる。

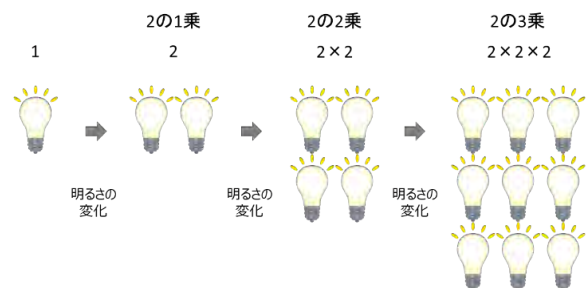


図 1-2-4 ウェーバー・フェヒナーの法則
明るさの変化が等しく感じられるランプの数

この法則を売値を例に説明してみる。100円のお菓子が80円で売られているとかなり安い感じがするが、1000円が20円引きで980円ではほとんど安くなっている感じがしない。100:80と同じ比率の1000:800の800円になれば同じ程度の安さだと感じる。このように人の感覚や印象は、刺激量の差ではなく割合によるというのがこの法則が示すところである。

1.2.3 明暗順応

夜に室内灯を消すと、一瞬真っ暗闇の中にいるように、まわりのものが見えなくなってしまう。しかし、しばらくして暗闇になれると結構明るいもので、まわりのものもうっすらと識別できるようになることを経験する。逆に、暗いトンネルから急に明るい外に出ると少しの間まぶしく感じるが、すぐに目が慣れる。このようなある状態に慣れることを順応といい、前者は「暗順応」、後者は「明順応」と呼ばれる。

例えば、明るいところから暗いところへ移った場合に身体でどのような変化が起きるかを考えてみる。暗いところでは光が弱いので、第一に、光をできるだけ多く目に取り入れることが必要であり、第二には光をより敏感に感じる必要がある。これをカメラに置き換えてみると、第一はレンズの絞りを開放近くまで広げること

デジタルの色彩＜基礎編＞

であり、第二はセンサーの感度を高くすることに相当する。人の視覚系でいえば、瞳孔径の変化と網膜上にある光を感じる2種の視細胞の切り替えに相当する。特に重要なのは光を感じる視細胞の切り替えである。明るいところでは主に錐体が活動し、暗いところでは主として杆体が活動し、それぞれを「明所視」、「暗所視」という。また、明所視から暗所視に移行する中間の状態を「薄明視」という（図 1-2-5）。

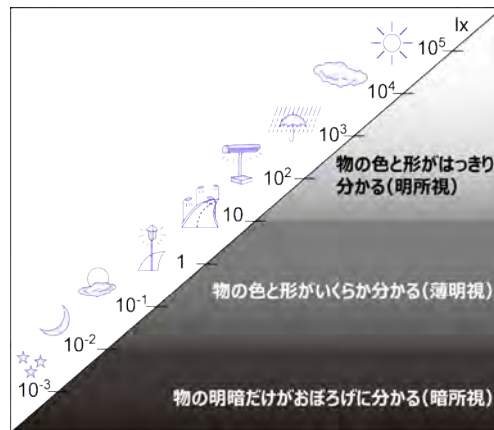


図 1-2-5 明所視・薄明視・暗所視

暗室において光を認めることができる最小の明るさを「光覚閾」という。部屋を真っ暗にした瞬間からの時間経過に伴う光覚閾の変化を「暗順応曲線」という（図 1-2-6）。はじめの数分間は見ることのできる明るさが急速に低下し、その後も徐々に低下して、30 分以上かけて最大の感度になる。暗順応曲線は最初の 5 分後くらいに一旦平らになってから、再度低下していくような変化をするが、最初の変化が錐体の順応過程を、その後の曲線が杆体の順応過程を表していると考えられている。

暗いところから明るいところに出た時のまぶしさへの明順応は、暗順応に要する時間より短く、0.2 秒程度で順応は起こる。

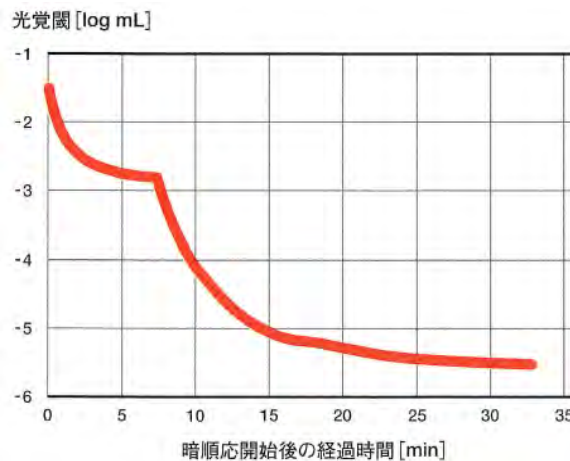


図 1-2-6 暗順応曲線

1.3 色彩の知覚

1.3.1 色の分類

(1) 光の経路による物理的分類

光が目到達するまでの経路の違いによれば、色は大きくは2種類に分類される。一つは、光源そのものが発する光からの色で「光源色」、もう一つは光源からの光を受けた物体からの光から見える色で「物体色」という。

光源色には、夕日、花火、ネオンサイン、LED ランプなどの色がある。単独の光源の色の場合には茶色や黒はない。光源色には明るいー暗いの感覚はあるが、物体色のように白みや黒みは感じられない。物体色には、物体表面で反射した光から生まれる日常よく見かける「表面色」と、ステンドグラス、セロファン、グラスに入ったワインなどのように透明の物体を通過した光から生まれる「透過色」がある。

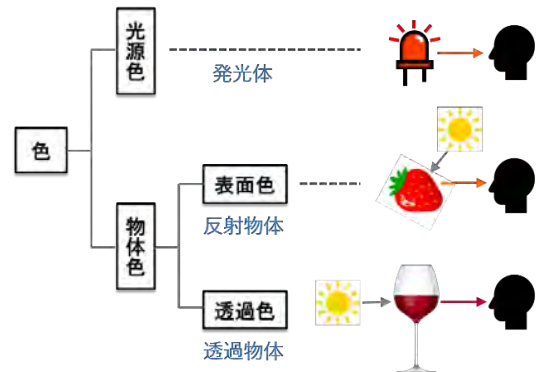


図 1-3-1 光の経路による色の分類

(2) 色の現れ方による現象的分類

1) 光源色モードと物体色モード

青空と、それと同じ色をした箱とでは、同じ青でもその見え方は異なる。前者は純粋に色だけがあるように見え、こうした色の現れ方を「光源色モード」による見えという。一方、後者では色は対象物表面がもつ性質と認識され、質感を持ち、色までの距離や向きが明確である。こちらは「物体色モード」による見えという。

色がどのような色の見えとして現れるかは、実際に対象が光っているか、あるいは光を反射しているかだけでは決まらない。例えば、テレビは発光する光源色であるが、わたしたちは画面の風景を物体色モードで見る。一方、夜空に輝く月は太陽光を反射した物体色であるが、光り輝く光源色モードの色として見る。物体色モードの色には白さー黒さが感じられるが、光源色モードになるとそれは明るさー暗さの次元に変わる。

図 1-3-2 上段は、光源色が光源色モードと物体色モードで見られるケース、下段には物体色が物体色モードと光源色モードで見えるケースを示した。

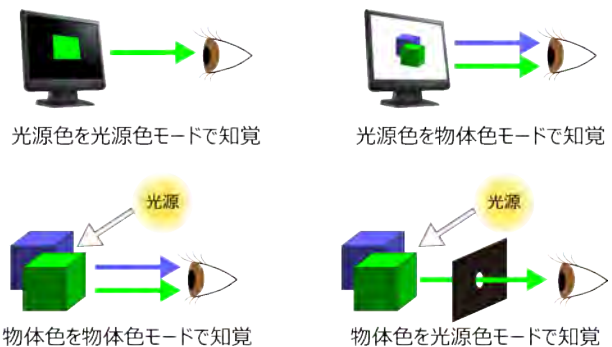


図 1-3-2 色の現れ方(モード)の色々

2) 色の現れ方による分類

色がどのような見え方をして現れるかという現象的な特徴による色の分類を最初に試みたのはドイツの心理学者カッツであった。その後、OSA（アメリカ光学会）や JIS（日本産業規格）においても同様な分類が行われている。

カッツによる色の現れ方のタイプについて主なものを以下に示す。

・面色（film color）

澄んだ青空のように、純粋に色だけがある感じがして、実体感、テクスチャ、陰影がなく、奥行きがあいまいで、どこまでも入り込んでいけそうで、その面は視線に直角に位置するような見え方をする色。

デジタルの色彩＜基礎編＞

・表面色（surface color）

目の前のイチゴの色のように、普段、最も多く目にする色の見え方である。その色は対象表面に属して見え、その面は明確な距離に位置し、傾きを持ち、不透明感、光沢などのテクスチャも感じられる。

・空間色（volume color）

グラスに入ったワインのように、ある空間の中を満たしているように感じられる色。ある容積を占める色の現れである。色の存在感がその内部にも感じられる。容積色ともいう。

・透明面色（transparent film color）

色のついたフィルターを視野の一部に置いて見ると、フィルターの越しの色は着色され、透明感も感じられる。そうした色の現れ方のこと。

他にも、カッツは鏡映色（鏡に映った物の色の見え方）、光沢、光輝（ろうそくの炎のような見え方）、灼熱（焼けた鉄のように内部が光で満ちているように見える物体の色の見え方）などの分類を行っている。

・開口色

小さな穴があいた黒い衝立を用意し、穴の位置にピントを合わせたまま、そこから物体表面を見ると、穴に見える色が面色の様相に変わる。こうした色の現れのことを JIS では開口色（aperture color）と呼ぶ。図 1-3-4 は、通常の物体色モードで見ると「茶色い椎茸」が、衝立の穴から光源色モードで見ると「暗くぼんやりしたオレンジ色の光」に変化して見える例を示したものである。



図 1-3-3 色の現れ方のタイプ

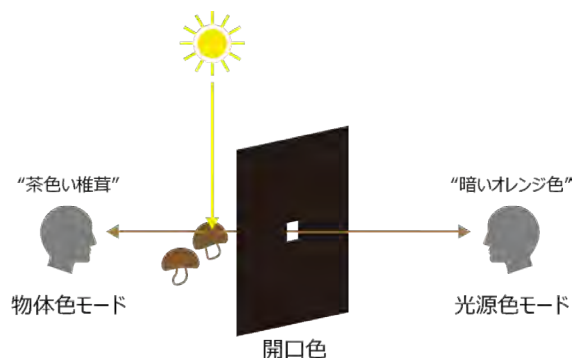


図 1-3-4 色のモードの違いによる対象の見え方の変化

1.3.2 色知覚にみられるさまざまな現象

(1) 照明光の属性に関係するもの

1) 色の恒常性

昼光の下で白く見える紙は、色々な照明ランプや夕陽の中でも依然として白い紙に見える。また、照明をいくら強くしても黒い紙は黒のままである。このように照明光が変わり、物体からの分光放射の特性が変化しても、色の見えは比較的安定して保持される性質がある。これが「色の恒常性」である。

図 1-3-5 に模式的に示すように、色の恒常性は、その場の照明光の分光特性に応じて、視覚システムが目の波長別の応答特性（分光視感効率）を変化させることで成立する。上段の昼光下の例では、眼は昼光の波長バランスに順応した波長別感度となっている。短波長をやや多く反射する物体で昼光は反射され、その波長別エネルギー分布を昼光に順応した目がとらえて、うすい青に見える。下段では、眼は長い波長の光を多く含む、赤みのある光に順応し短い波長の光への感度が高まっている。その状態で対象からの反射光の波長別エネルギー分布をとらえることで、昼光下と同様にうすい青に見えることができる。

2) プルキンエ現象

色の見え方は周囲の明るさによって変化する。昼間は明るく見えていた赤い花が、陽が沈んで少し経つと暗く沈んだ色に見え、緑の葉や青い標識の方が相対的に赤い花よりも明るく見えるようになる。このように、十分に明るい明所視と比べて、薄明視になると、緑や青などの、波長が短い光の色が明るく見える現象をプルキンエ現象という。プルキンエはこの現象を初めて記述したチェコスロバキアの実験生理学者の名である。

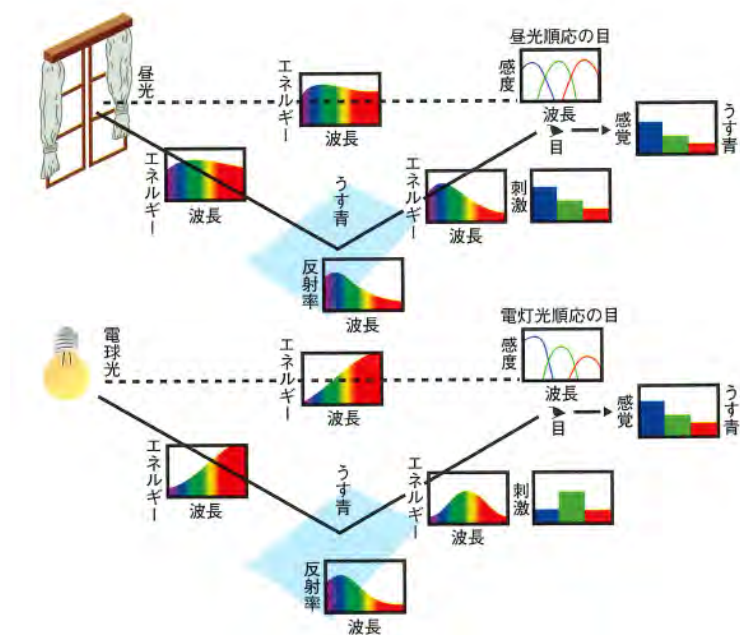


図 1-3-5 色の恒常性

この現象は、最大感度の波長が周辺照度が低くなると短波長側、つまり青の方にシフトすることで起こる。図 1-3-6 は、昼間は明るく見えていた赤い傘が、日が沈んで辺りが暗くなると暗くなり、反対の青い傘の方が明るく見えることを示している。

3) 色のついた影

影はいつもグレイというわけではない。積雪の陰や、白い壁に落ちた枝の影、これらは青みがかって見えることが多い。

こうした色のついた影の例を、ゲーテも観察している。「夕方、燃えているロウソクを白い紙の上に置き、夕日の方向との間に一本の鉛筆を立てる。すると夕日に照らされた白い紙の上に落ちるロウソクによる鉛筆の影は美しい青色に見える（ゲーテ『色彩論』より）。これはロウソクの赤みを帯びた光による影が、補色の青緑に見える現象で、色のついた影という。

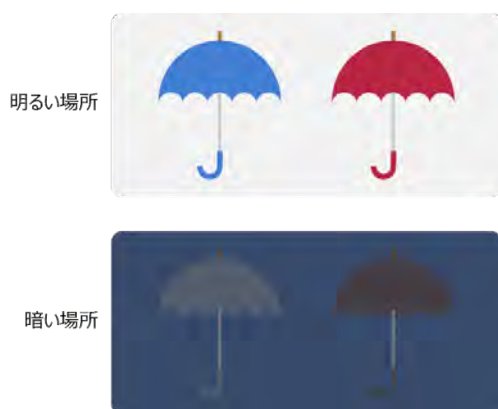


図 1-3-6 プルキンエ現象

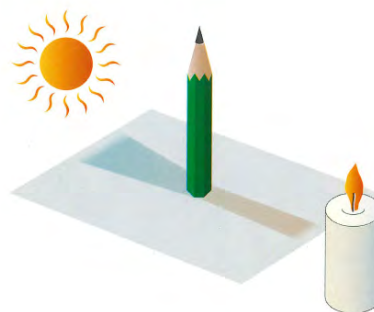


図 1-3-7 色のついた影

(2) 刺激の強度や純度による影響

1) ベゾルト＝ブリュッケ現象 ー光の強弱による色相変化

オレンジ色の光を強くすると、黄色の方に色相が少しずれて見える。このように、同じ色の光でも、その強さを変えると色相が変化して見えることがある。これをベゾルト＝ブリュッケ現象という。

図 1-3-8 は、単色光の強さを変えたときに、同じ色相に見える波長を線で結んだものである。光の強さを変えても色相が変わらないようにするには、その線の位置の波長にすればよい。例えば、550nm の黄緑色の暗い光を色相は変えずに明るくするには、波長を短く（緑方向に）する必要がある。あるいは、暗い黄緑の光を強くすると色相が黄色方向にずれて見えると読むこともできる。また、線と線との間がその色に見える範囲と言えるので、光が明るくなると黄色と青に見える波長の範囲が広くなり、暗くなると赤と緑の波長範囲が広がると読むこともできる。

図 1-3-8 中で線が垂直に伸びている波長では、光の強さが変わっても色相が変化しない。これは不変色相と呼ばれ、青、緑、黄（緑みの黄）、赤（赤い光に青い光を少し加えた光）が報告されることが多い。

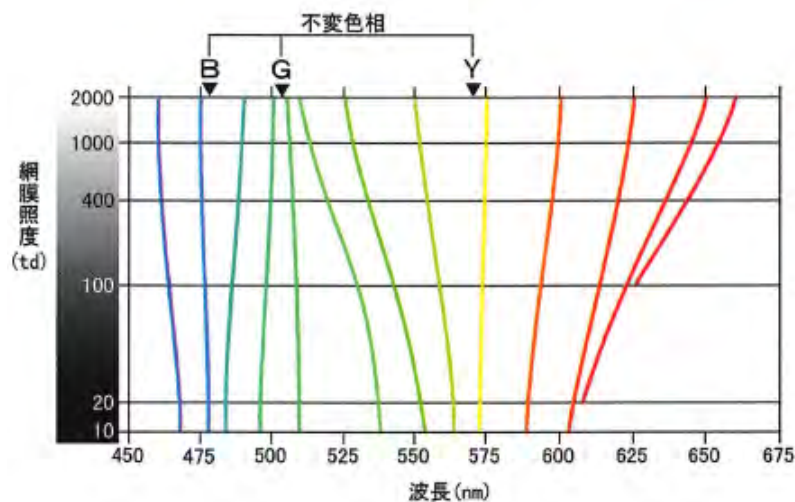


図 1-3-8 ベゾルト＝ブリュッケ現象

2) アブニー効果 ー光の純度による色相変化

色相の変化は、ベゾルト＝ブリュッケ現象のような色光の強さだけでなく、色光の純度によっても起こる。黄色に近い色相の色光の純度を上げると、色相が黄色に近づいて見える。このように、波長が同じでも色の純度が変わると色相が変化して見え、この現象は発見者の名を取りアブニー効果という。アブニーは、光の明るさは一定にしたまま、鮮やかな色光に白色光を加えて刺激純度を落としたときの色相変化について報告した。

図 1-3-9 は、色度図上に、同じ色相に見えるマンセル明度 5 の色の軌跡を線で結んだものである。例えば 5G の放射線は図の外側（鮮やか）に向けて左曲がりとなり青の色相方向にズレている。つまり緑を鮮やかにしたときに同じ緑の色相に見せるためには、やや青方向にズラす必要がある。また、同じ緑の色光のまま純度を上げると、黄色方向に色相がズレて見えるようになる。

アブニー効果において、刺激純度が変わっても色相が変化しない不変色相があり、典型的な黄色（577nm）がその例である。

図 1-3-10 は、明度ごとに同じ色相に見える色を色度図に示したものである。例えば 10GY のところにある複数の曲線で説明すると、右側の短い曲線が高明度、左の長い曲線になるほど明度が低い色である。複数の曲線が横にずれているのが、明るさ違いによる色相ズレのベゾルト＝ブリュッケ現象を表している。一本の曲線が色度図の外側に湾曲していることが、純度違いによる色相ズレのアブニー効果を表している。

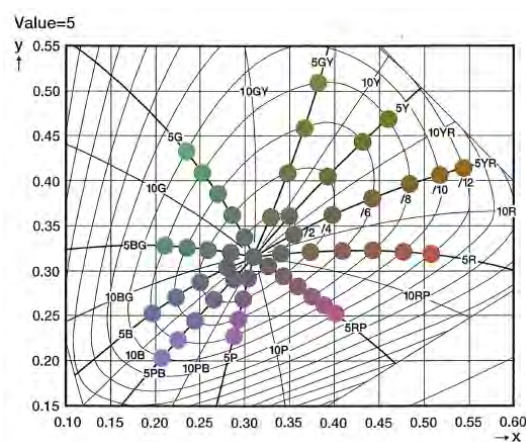


図 1-3-9 アブニー効果

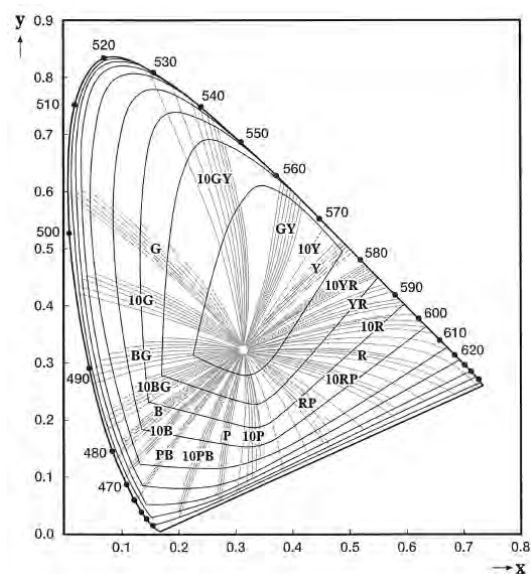


図 1-3-10 明るさ変化と純度変化に応じて
同じ色相に見える色の軌跡

(3) 刺激の空間的属性による影響

1) 網膜位置と色覚

視野の中心部では様々な色を見ることができるが、周辺では知覚できる色は少なくなる。

図 1-3-11 は、色を同定することができる視野の範囲を示したもので色視野という。OSA（アメリカ光学会）による本図によれば、正常色覚の場合、視野の中心部では赤緑黄青を同定することができるが、もう少し周辺になると、赤と緑の色を認めることができなくなり、黄と青の系統のみがとらえられるようになる。さらに周辺では色の違いが分からず、明るさの違いのみの無彩色の感覚となることがわかる。

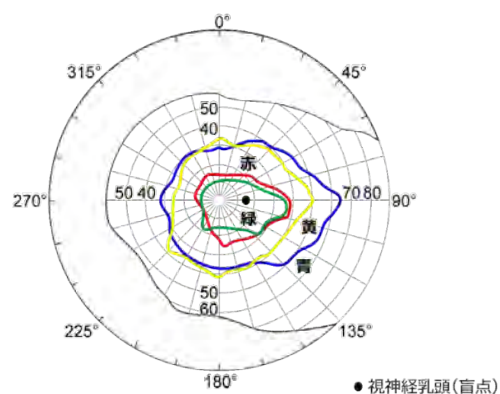


圖 1-3-11 色視野

2) 面積效果

同じ色の対象物でも、面積が変わると色の見え方や印象は変化する。これを色の面積効果という。

① 色が視野の大部分を占める場合

鮮やかな赤い壁の前に立ってしばらくすると、くすんだ赤、ついには灰色に近づいて見えるようになる。視野全体を1色が覆いつくすと、その色みは徐々に低下し無彩色に近づいて見えるようになる。色順応のはたらきによるものである。

② 対象が非常に小さい場合

対象が非常に小さく、視角で 10 分（1 度は 60 分。1 m 先の 3mm 程度）以下の場合には、明るい黄色や黄緑や明るい灰色などは白っぽく、暗い青や青紫などは黒に、そして赤やオレンジや赤紫はピンク、明るい青や青緑は緑に変化して見える。見ることができる色の中から、黄色と青の系統がなくなり、白、黒、赤、緑の 4 色にまとまって見えるようになる。海に浮かぶ遠く離れた黄色いゴムボートが白い波と区別しにくくなるのはこのためである。

これは、短い波長の光をよく感じる S 錐体が働かない 3 型色覚と似た色の見え方であることから、小面積

デジタルの色彩＜基礎編＞

第三色覚異常と呼ばれる。刺激サイズの低下を刺激強度の縮減ととらえれば、刺激の強度が低下すると「青－黄」成分が低下するというベゾルトーブリュッケ現象と同列の現象といえる。こうした見え方は、面積以外に、観察時間が短かったり、照明が暗すぎるなど、観察条件が悪い場合でも起きる。

③ 対象が視角数度～数十度の場合

建物の外壁やカーテンなどの色は、小さなサンプルを見て検討することが多い。その場合、実際の壁やカーテンの色は、小さな色見本に比べると一般に明るく、派手な色に変化して感じられることが多い。狭義の、色の面積効果とはこうした視角数度から数十度の範囲における色の見えや印象の変化のことを指す。

面積の変化による色の見え方の変化は、対象色が高明度で低明度の薄い色であれば、彩度はあまり変化せず主に明度が上昇して見えること、また、中明度の対象では明度はあまり変わらず彩度が高くなって見えるという報告がある。

色を選ぶときには、こうした面積効果があることに注意し、できるだけ大きな色見本を用意することが望ましい。小さなサンプルで選ばなければならない場合は、大きくなると明るく鮮やかに見えるので、やや控えめの色を選ぶようにするとよい。



図 1-3-12 色の面積効果イメージ

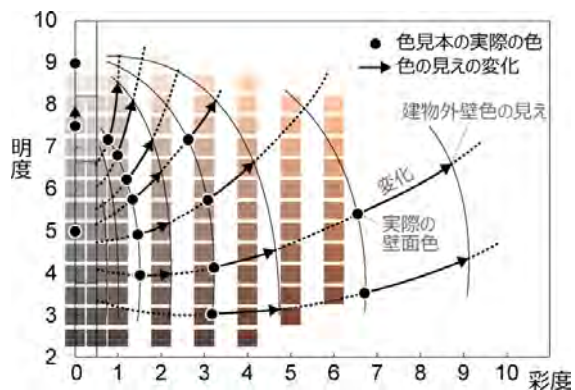


図 1-3-13 面積効果による見えの色の变化

(4) 時間的要因による影響

1) 色順応

目の順応は照明光への明暗順応だけではなく、色に対しても起こる。太陽光や電灯光など照明の色が変化しても、目は比較的それを中性化（順応水準という）し、それを白色化する方向に感覚特性を変化させる傾向がある。これを色順応（color adaptation）という。色感覚の中性点である白色点を、照明光に応じて変化させることが色順応という働きであり、色順応により物体からの反射光の分光分布が補正され、照明光が変化しても物体の色はある程度変化せず、安定して見える。こうした性質のことを色の恒常性という。

例えば、色のついたサングラスをかけると、最初は対象物にその色がついて見えるが、徐々にその色への色順応が起こり、通常の色見えに近づくように色見えが変化する。

また、同じ対象色をしばらく見続けていると、徐々にその色みが薄れ無彩色に近づいて見えるようになってくるといふ現象も、その提示色により色感覚の中性点が移動するという意味で色順応といえる。

2) 網膜残像色

残像色とは、ある刺激を見た後に、目を閉じたり他の面に目を移したときに感じられる色である。例えば、白い紙に描かれた赤い円を、目を動かさずにしばらくじっと見つめた後、視線を白い紙の円の無い部分に移すと、赤い円のあった視野のところに、薄くぼんやりした青緑の円が浮かんで見える。これは補色残像（陰性残像）と呼ばれ、残像色は元の色と明暗や色相が反対の関係になっている。

原刺激を見た後、後で見る色（先ほどの例では紙の白）の輝度が高いと補色残像が見えるが、目を閉じたり

後で見る色の輝度が低いと元の色と色相や明度が同じ残像が見えることもある。これは正の残像（陽性残像）と呼ばれる。

補色残像が見える理由は神経細胞の疲労によって説明される（図 1-3-14）。すなわち、たとえば「赤」を見続けていると、その色を感じている神経細胞がその色に順応し（疲労しと言い換えても良い）、「赤」への感度低下が起こる。その状態で、白い刺激を提示すると、赤に対する感度が低下している分、反対の青緑の感度が相対的に高くなる。そのため、すべての波長の光を含む白い対象が、うすく青緑色に色づく。提示色と補色残像の関係は心理補色と呼ばれ、混色により無彩色となる 2 色の関係（物理補色）とはやや異なる。また、残像色は、青空の色に代表されるような面色の見え方として現れる。

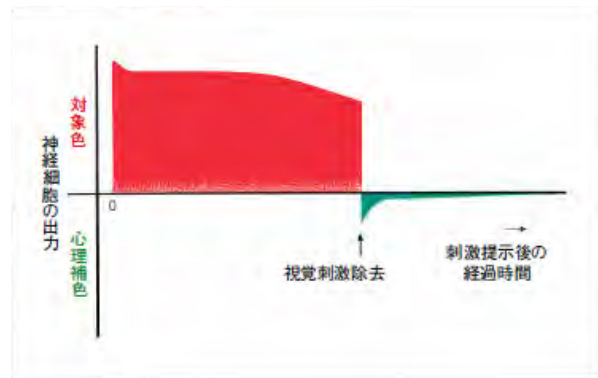
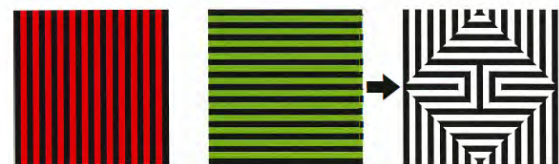


図 1-3-14 神経細胞の疲労と補色残像

3) マッカロー効果

マッカロー効果は次のようにして体験できる（図 1-3-15 参照）。

赤と黒の縦縞が交互に描かれた図版と、緑と黒の横縞の図版とを用意し、二つの図版を交互に繰り返して観察させ、合計数分間見続けさせる。そこで、白黒の縦縞や横縞が描かれた図版を見ると、白い縦縞がうすい緑に、白い横縞がうすいピンクに色づいて見える。色の情報と模様の方角の情報を組み合わせ処理していることがわかる。



数分間、交互に観察する。

図 1-3-15 マッカロー効果

補色残像の場合、残像は網膜残像として、最初に見続けた対象位置に対応する網膜に生じている。それは試しに目を動かすと残像が移動することからわかる。それに対してマッカローが発見したこの現象の場合、残像色は、網膜上の位置に規定されず、縞の方向によって変化する。つまり、この現象は網膜段階で起こるのではなく、脳で対象物の方向を認知した以降に起こるものであることが示唆される。また、マッカロー効果は刺激を長時間見続けると数時間もしくは数ヶ月も続くことが報告されているため、効果の確認時には注意してほしい。

4) 主観色

白と黒だけの線や面で構成された図版を回転させたり、細かなストライプ線を見せたりすることで、元の図になかった色みが見られる現象、及びその色のことを主観色と呼ぶ。

主観色の最も有名なパターンは、ベンハムのコマであろう（図 1-3-16）。回転させると、外側から内側に向かって、異なる色がリング状に現れる。逆回転させると、外から内側に現れる色の順序は逆になる。照明の種類や明るさを変えても色は変化し、色の見え方にも個人差がある。図のパターン以外にも多くの主観色パターンが提案されている。

主観色が見える原因としては、3 種類の錐体細胞の光応答における時間特性が異なることが関係していると言われているが、まだ明らかにはなっていない。3 種類の錐体で、光を受容してか

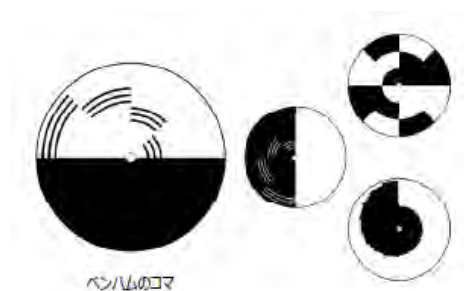


図 1-3-16 主観色を発生する円板

ら色感覚が生じるまでの立ち上がり時間や、色感覚が消失するまでの立ち下がり時間に違いがある。コマの回転で短時間に白黒パターンが繰り返し呈示されることにより、3種類の錐体からの出力に時間的なズレを起こし色が見えるという説である。しかし錐体へ続く網膜の細胞や脳の関与を示す実験もあり、主観色が見えるメカニズムはまだ完全には解明されていない。

(5) 色の相互作用

1) 色の対比

日常、私たちの視界では、ある1色が単独で存在することは稀であり、多くの場合は視野の中をさまざまな色が占めている。そして、他の色との関係で色見え方は影響を受ける。

ある色に、他の色が近接して提示された場合、その色見え方が単独で見るときとは異なって見える現象の一つに、色の対比（color contrast）がある。色の対比現象は、空間的に近接した色の間だけでなく、二つの色を続けて提示したときのように、時間的に近接させても生じる。前者の対比は同時対比（simultaneous contrast）、後者を継時対比（successive contrast）という。

色の対比は色相だけでなく、明度や彩度についても起こり、それぞれ、色相對比、明度対比、彩度対比と呼ばれる。図 1-3-17 に色の対比による見えの変化例を示す。図では色の3属性において独立的に起こる色の対比を示しているが、日常的にはそれらが組み合わされて色の対比効果が生まれている。

- ・明度対比…内側のグレーは、背景が白のときはより暗く、背景が黒のときはより明るく見える。
- ・色相對比…内側の青緑は、背景が青紫のときはより緑寄りに、背景が緑のときはより青みがかって見える。
- ・彩度対比…内側の赤は、背景が鮮やかな赤のときはよりくすんで見え、背景がグレーのときはより鮮やかに見える。

図 1-3-17 色の対比

図 1-3-18 は、色相對比における色見えの変化イメージを色相環上で示したものである。背景色（誘導色）に対して色相がより離れるよう図色（被誘導色）の見えが変化する。

図 1-3-19 に、隣接色（誘導色）の対比作用によって、ある色（被誘導色）の見えがどのように変化したかの結果を示した。xy 色度図上に誘導色と被誘導色が、色度図中央の白色点を挟んで直線になる位置にあれば、物理補色の関係ということになるが、誘導色、被誘導色はそれからずれていることがわかる。



図 1-3-18 色相對比における色変化のイメージ

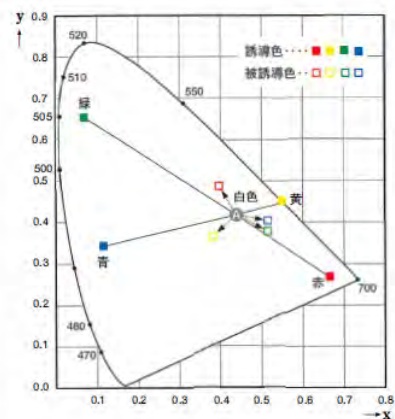


図 1-3-19 誘導色と被誘導色の関係

2) 色の同化

ある色の見えが、近接する色に影響を受けて変化する現象は対比だけではなく、逆に近接する色に近づくように見えるものもある。これは色の同化（assimilation）と呼ばれ、対象色に別の色を少量挿入することで、対象色が挿入された色に近づくように変化して見える現象のことをいう。例えば、グレーの領域に細い黒線を細かく引くと、そのグレーは単独で見るよりも暗く見えるような現象を指す。

色の対比と同様、色の同化も色の3属性それぞれで見られる（図 1-3-20）。

- ・明度の同化…グレーの四角の中に、細い白い線を数多く引いた図と、黒い線を引いた図を作ると、白い線を挿入されたグレーの方が、黒い線のものよりも明るいグレーに見える。
- ・色相の同化…赤い図形に黄色の細線を書き入れると、赤が黄みに寄って見える。また同じ赤い図形であっても、赤紫の細線を書き入れると、赤はより紫みに寄って見える。
- ・彩度の同化…赤い図形にグレーの細線を入れると、その赤は線を入れる前よりも彩度が落ちて見え、鮮やかな赤い細線を入れると、より鮮やかに見える。

同化現象が起きているときにはどのような色で構成されているか、色を区別して見ることができる。非常に細かい模様など、色を見分けられないほどになるとその現象は混色に変わる。

図 1-3-21 は同じ2色を使って色相対比と色相同化を表したものである。左上では図の青緑（被誘導色）が背景の黄（誘導色）によって、単独で見るよりも青みに寄って見える。左下では左上と同じ2色であるが、黄の細縞によって青緑がより黄みに寄って見える。また右上は左上と背景色のみを変えた図であるが、青緑（被誘導色）背景の紫（誘導色）によって、より緑みに寄って見える。右下は右上と同じ2色だが、青緑は紫の細縞によってより青みに寄って見える。

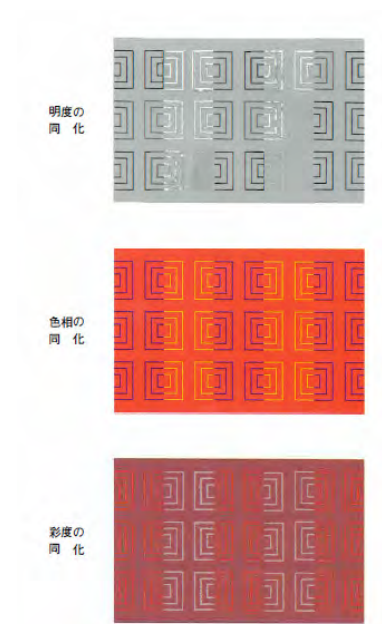


図 1-3-20 色の同化

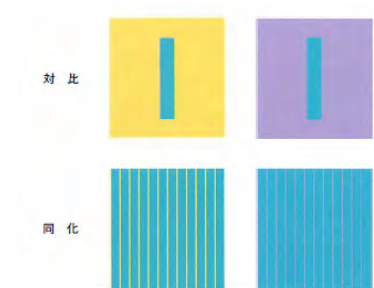


図 1-3-21 同じ2色を使った色相対比と色相同化

3) 縁辺対比

色の異なる二つ以上の領域が隣接すると、その境界付近で著しい対比現象が起こることがある。この現象は縁辺対比と呼ばれる。

図 1-3-22 に示すように白から黒にかけて徐々に明度を変化させたグラデーションパタンの場合ターンの場合、より暗いグレーに接したグレーは、その境界線近くが明るく見え、明るいグレーに近い部分は暗く見える。つまり、境界の明度差を強調するように色の見え方は変化する。図下段では目に入る光強度と、知覚される明るさを示している。線の違いからわかるように、人の視覚系では物理量の関係をそのまま出力するのではなく、物理量の急激な変化が存在する部分ではその変化をより強調して出力する特性がある。それが縁辺対比という現象として表れる。

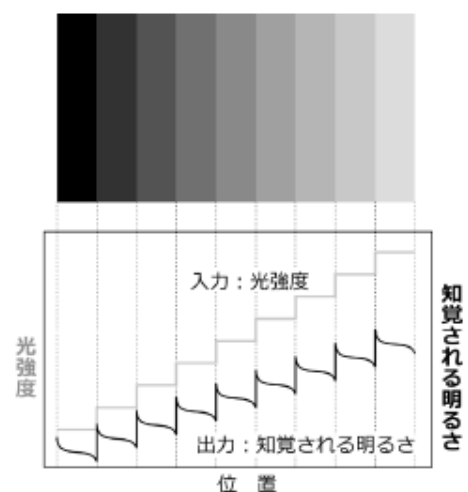


図 1-3-22 縁辺対比

デジタルの色彩<基礎編>

縁辺対比は、網膜の神経節細胞で起こる神経系での側抑制により生じる。図 1-3-23 にその機構の模式図を示した。神経節細胞は一つの光感細胞とつながっているだけでなく、それに隣接する光感細胞とのリンクがあり、神経節細胞からの出力は、それらを総合して行われる。その際、隣接部が明るく、隣接する光感細胞からの入力が大きいと、その分、神経節細胞からの出力は抑制されて弱められるという性質がある。これが側抑制（lateral inhibition）である。そこで、隣接部が明るい、その分、出力が抑制されることで暗く感じられ、反対に隣接部がより暗いと反応の抑制が弱くなり明るく見えるのである。



図 1-3-23 側抑制に関する模式図

4) マッハバンド

図 1-3-24 に示すような円盤を高速で回転させると、白い星型円盤では明るいグレーの細いリングが、黒い星型円盤では黒っぽい細いリングが、円盤の中ほどに見える。このように、光の強さが急激に変化する部位で知覚される明暗の帯は一般にマッハバンドと呼ばれ、特に円盤を回転させた場合に現れる輪をマッハリングという。図 1-3-24 の下段には円板上の位置に対する光の強度と見えの明るさを示した。光の強度が急激に変化する部分では縁辺対比と同じメカニズムがはたらき、その変化が強調されるためリングが見える。

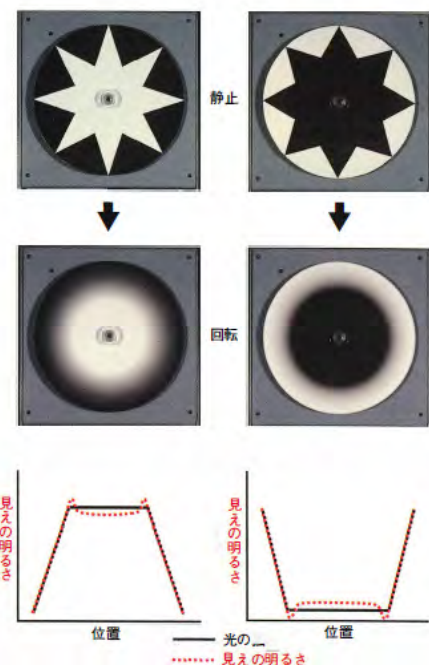


図 1-3-24 マッハリング

5) ハーランドット

図 1-3-25 は黒い紙に白い線を格子状に描いた、ハーランドットと呼ばれるパターンである。白い線の交点あたりにぼんやりした黒い点のようなものが見える。これはハーランドットと呼ばれる。この点は注視しているところには見えず、視野周辺に現れる。ハーランドットは有彩色でも見ることができる。

ハーランドットが見える理由は以下のように説明される。網膜にある神経細胞には、中心が明るく周囲が暗いパターンに反応するタイプのものがある。白線の交点のところは、白い道の途中よりも、周辺が明るくなっているため、神経細胞の反応が弱くなり、そのため少し暗く見えるというのである。そして、この反応領域は視野の中心ではとても小さいため、交点でも道の途中でも応答に違いがなくなってしまうために、ハーランドットが消えてしまうのである。したがって、格子線の太さをかなり細くすれば視野の中心でもハーランドットを見ることが出来る。また、白い線を直線ではない線に変えるとドットが見えなくなることから、直線であることも関係しているとみられている。

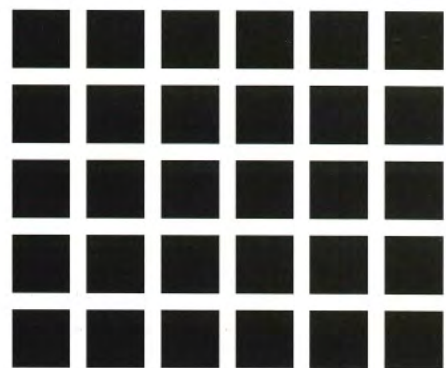


図 1-3-25 ハーランドット

6) クレイク - オブライエン - コーンスウィート効果

図 1-3-26 の円板を高速で回転させると、円板の外側は明るいグレー、内側は暗いグレーというように二つの明暗領域に分かれて見える。もし、光の反射量のみに応じて明暗を感じるとすれば、外側と内側の境界部分に明るいグレーと暗いグレーとの細いラインが見られ、他の部分は同じ明るさのグレーに見えるはずである。この現象は、発見者3人の名を連ねて、クレイク - オブライエン - コーンスウィート効果と呼ばれている。

少し丸めた白紙のような、反射率が徐々に変化している面を見たときに、私たちはそれを同じ明度の面と感じる傾向が強い。クレイク - オブライエン - コーンスウィート効果では、反射率が急激に変わる円板の中ほどの部分で、領域の縁が検出される。そして、その縁から離れるにつれて、徐々に明度が変化していても、そこは同じ明度としてとらえられる。したがって、縁の検出と明暗認知とが組み合わさることで、縁の部分で感じられた明るさの違いがそれぞれの領域全体に波及し、明るい縁に接した領域は明るい面として、暗い縁に接した領域は全体が暗い面として認知されるのである。

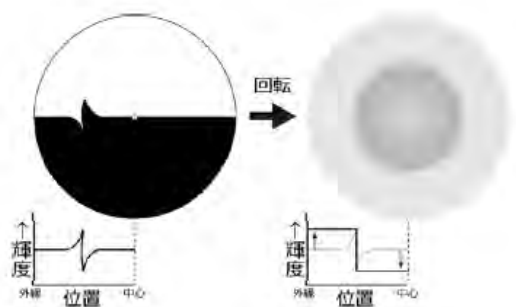


図 1-3-26 クレイク - オブライエン - コーンスウィート効果

7) エーレンシュタイン効果とネオンカラー効果

図 1-3-27 のように細い格子模様の交差点の部分が抜けた図形を見ると、その抜けた部分が背景よりも明るい円盤のように見える。実際には輪郭は描かれていないため、円盤が見えるのは錯視によるものである。これをエーレンシュタイン効果と呼ぶ。このように実際には存在しない輪郭があるように感じられる輪郭のことを主観的輪郭という。この円盤は格子よりも少し手前にあるように見える。

この図の抜けた交差点の部分を、例えば薄い黄色で小さな十字線でつなぐと、黄色が円盤状にほのかに広がって見える。ちょうどネオン管が発光しているように見えることからネオンカラー効果と呼ばれる。この色のにじみは明るさの変化があるところまで波及すると考えられ、エーレンシュタイン効果で述べた主観的輪郭の範囲まで広がると考えることができる。

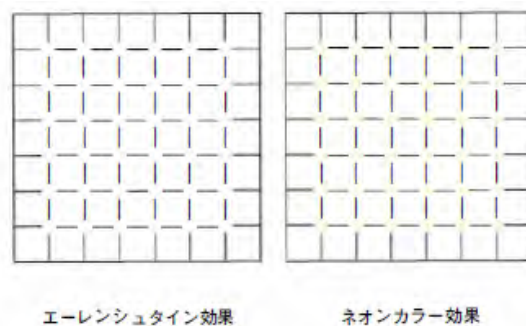


図 1-3-27 エーレンシュタイン効果とネオンカラー効果

8) 透明視

図 1-3-28 のように、二つの物体を上下に重ね合わせるように配置した図において、重なる部分を、その二つの図の色を混色した色とすると、片方の物体を透かし、他方の物体が透けて見えるという見え方（半透明）となる。これを透明視という。なお、二つの図は片方が上に見えたり下に見えたりと、上下関係が変わる。

この図を4色から成る複雑な多角形のパーツが平面に並んでいるように見ることも可能であるが、それにはやや無理がある。これは背景の四角内部に、十字と長方形の一部分が重なっているように見えるのが簡潔であり自然である。人がパターンを知覚する際に見られるこのような性質は、ゲシュタルト心理学では「ブレ



図 1-3-28 透明視

グナンツの法則」と呼んでいる。

(6) 記憶色

ある色を見せて記憶させてから、一定時間後に色票などからその色を選ばせると、実際に観察した色とやや異なることがある。色の記憶（color memory）は、一般的に実際の色よりも彩度が高くなる傾向がみられる。また、特定の者や対象について、イメージとして記憶されている色のことを記憶色（memory color）という。これは例えばバナナを何度も見る経験をすることで、バナナに対する典型的な色を知識として保持しているイメージの色であり、実際の色を観察後に再度同じ色を選ぶ、というような色の記憶とは区別される。

記憶色の場合、対象色の特徴を強調する、またその対象にとって好ましく感じられる方向に変化するという傾向がみられる。明るい色イメージを持つ対象はより明るく、野菜や果物のように鮮やかな色のほうが好ましい、美味しそうと感じる対象はより鮮やかな色に変化する。

なお、対象色をなに色としてカテゴリー化するかによっても色記憶は変化する。同じ青緑色を提示しても、「青」と分類した場合と「緑」と分類した場合では、前者はより青みに、後者はより緑みに記憶が変化するといふように、どの色カテゴリーとして認識するかによって変化の仕方に違いがみられる。

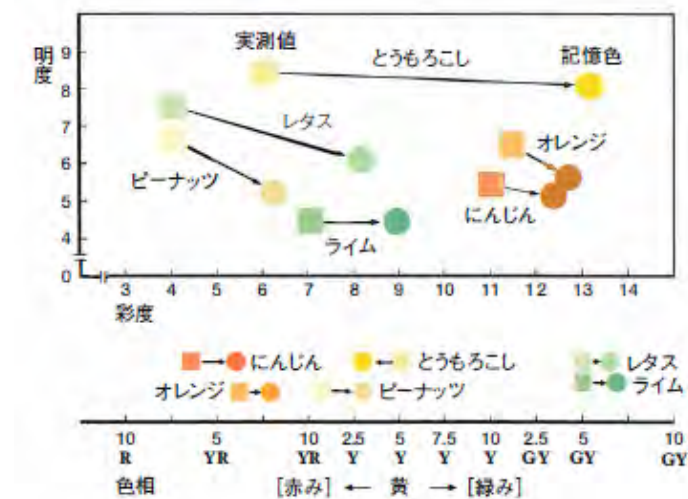


図 1-3-29 食用植物の実測値と記憶色

1.3.3 色の視覚的機能

(1) 視認性

色によって、対象の見つけやすさ、読みやすさ、区別しやすさなどの機能的な面から効果を高めることができる。視認性とは、対象物を注視した場合のその認めやすさのことである。対象の存在を確認できる最遠距離（視認距離）や対象の見やすさ評価値等によって表される。

表面色の視認性は、対象と背景との明度差に強く規定される。彩度差や色相差も影響するがその効果は明度差に比べると弱い。図 1-3-30 を見ると、白背景のときは黒の視認距離が最も長く、視認性が高いといえる。また、背景が暗い場合は同じく明度差の大きい白や黄の視認性が高い。対象物が文字や記号などの場合には、その読み取りやすさが問題となり、この場合には特に可読性と呼ばれる。

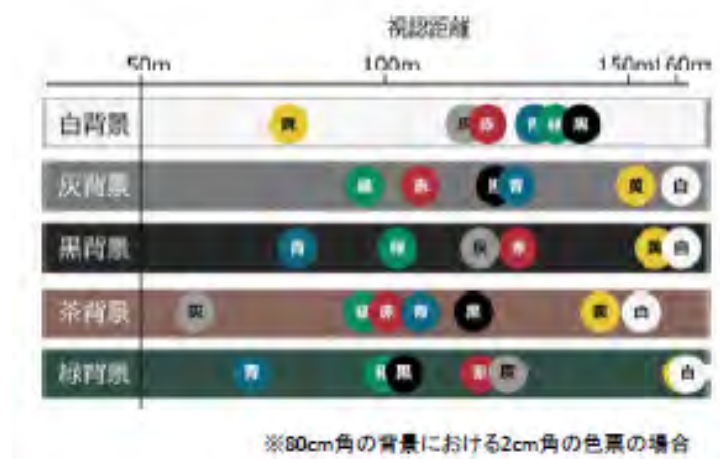


図 1-3-30 代表的な色の視認性

(2) 誘目性

色の誘目性とは、視野中にある複数の色のそれぞれの色が目を引きつける度合い（選択的知覚のされやすさ）のことを指す。いわゆる「目立ちやすさ」のことである。

誘目性は、一般に無彩色より有彩色の方が高く、彩度、明度は高いほど、また色相では赤や黄といった暖色系の方が高い傾向がみられる（図 1-3-31）。道端にある赤いポストや、レスキュー隊員のオレンジの制服などは誘目性が高い色の例である。

誘目性は視認性と異なり、背景明度の影響が弱く、また記憶・感情・欲求といった心理要因によっても変化するといわれている。

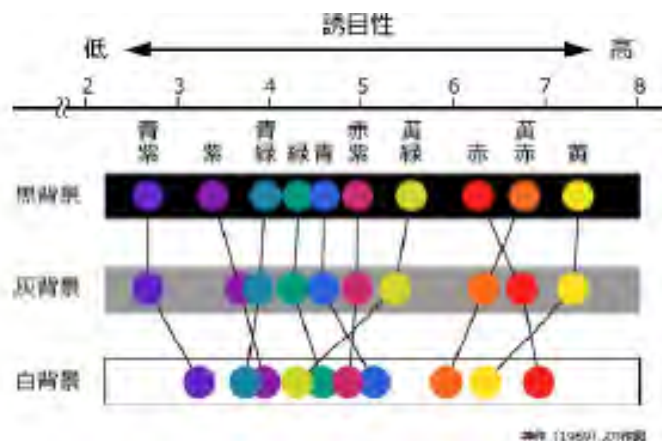


図 1-3-31 代表的な色の誘目性

(3) 識別性

鉄道路線図で路線ごとに異なる色を付けたり、サーモグラフで温度に応じて赤、黄、緑、青と色分けするように、同じまたは類似の対象を色の違いによって区別することは多い。これは、色の識別性を利用して情報を付加することで対象の認知をわかりやすくしている例である。色数を不用意に増やすと識別性が下がるので注意が必要である。

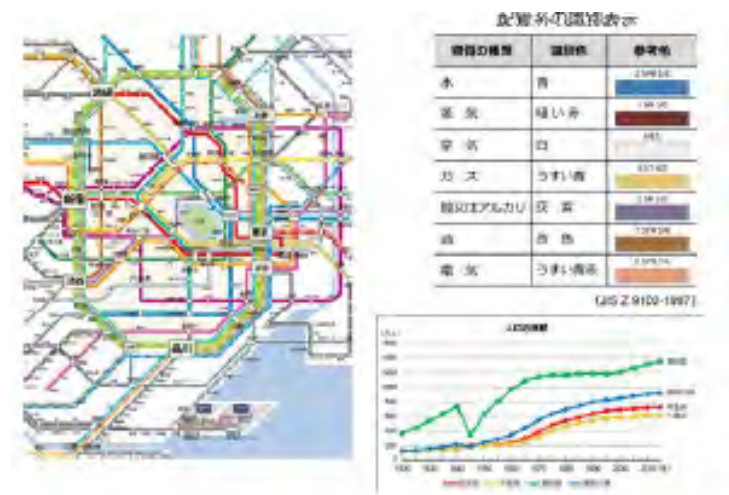


図 1-3-32 代表的な色の誘目性

1.4 光源と測光

1.4.1 測光

放射エネルギーの増減は人が感じる明るさ感に影響を与えるが、目の感度は光の波長ごとに異なるため、分光分布曲線の形の変化も明るさ感に影響する。放射エネルギーと明るさの関係は、光に対する人の感度特性を考慮して、分光視感効率と最大視感効果を介して考える必要がある。測光量とは、放射を分光視感効率と最大視感効果度に基づいて目の感度に変換した量のことをいう。

(1) 測光量

ろうソクを灯すと、いろいろな方向に熱エネルギーが放出される。このエネルギーは放射として伝播されるが、単位時間内に伝播される放射の量を放射束の Φ_e （単位：W）という。この放射束を分光視感効率と最大視感効果度で評価した値を光束 Φ_v （単位：lm、ルーメン）といい、次式で表す。

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

ここで、

K_m ：最大視感効果度で、683lm/W

$V(\lambda)$ ：分光視感効率

$\int$ ：積分範囲は定義上 $0 \sim \infty$ nm であるが、実用上 380 ~ 780nm で差し支えない。

光束は、ろうソクから放射される光の量であるが、ろうソクと観察者との位置関係から次のような量を定義することができるが、光束を含めてこれらを基本測光量という。

① 光度

ろうソクからの光はあらゆる方向に放射されるが、ろうソクを見ている人間にはろうソクからある方向に放射される光が観察されるだけである。今、ろうソクを中心とした球（図 1-4-1）を考えると、ある方向に放射される光束は、角度 α を頂角とする円錐によって切られた球面積を通過した光束に相当する。そこで、球面積を通過する光束の密度を求めると便利であることがわかる。しかし、この球面積 A はろうソクからの距離 r の大小によって変化するので、球面積 A を r^2 で除した量を定義し、立体角（記号： ω 、オメガ）と呼ぶことにする。光束の立体角当たりの密度を光度（記号： I 、単位：cd、カンデラ）といい、次式で表す。

$$I = \Phi_v / \omega$$

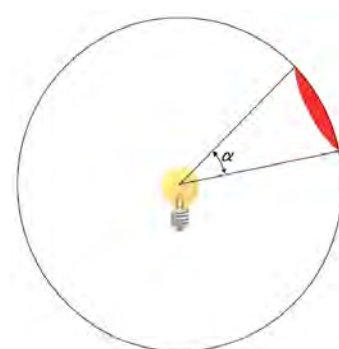


図 1-4-1 光度と立体角

② 照度

光度は、ろうソクから見たときに、ある方向に放射される光束の量を表したものであるが、ろうソクによって照明されている側から見ると、ろうソクによって照らされている面にどのくらいの光束が到達しているかが問題となる。このときの明るさを照度（記号： E 、単位 lx、ルクス）といい、照明されている面積を A として次式で表す。

$$E = \Phi_v / A$$

今、照明されている面が図 1-4-2 のようにろうソクに対して傾いている場合には、光束が当たっている面の面積が $A / \cos \theta$ に変化するので、照度は次のようになる。照度が入射角 θ の余弦に比例するので、入射角の余弦法則という。

$$E = (\Phi_v / A) \cos \theta$$

面積 A は距離 r の二乗に比例する（図 1-4-2 参照）ことから、光源からの距離の二乗に反比例して照度は低下する。これを照度の逆二乗の法則という。太陽や人工光源によって得られる照度の、おおよその値を図 1-4-3 に示す。

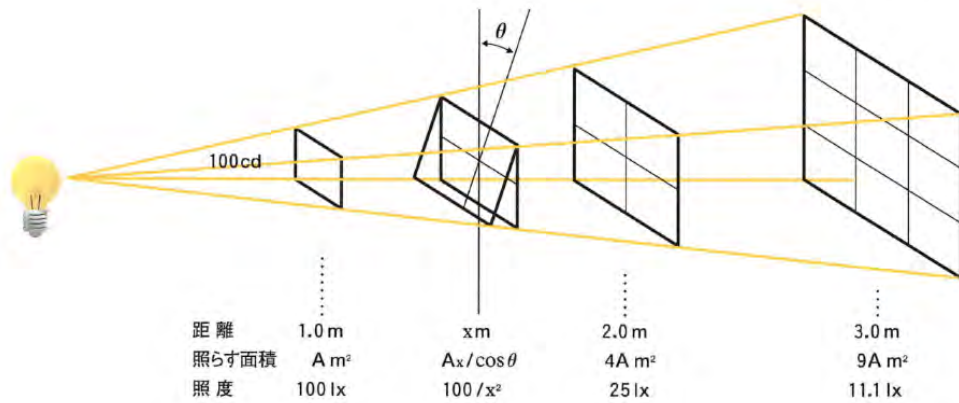


図 1-4-2 照度の逆二乗の法則と入射角の余弦法則

③ 輝度

ロウソクを直接見た時に、輝いて見える。この明るさが光度に比例するだろうことは光度の定義から容易に想像できる。ただし、ロウソクはある大きさを持った光源であるので光源の大きさにも関係していることが考えられる。日常で、小さい光源の方が大きい光源に比べてまぶしく感じられることが多いことから想像できることである。この明るさを輝度（記号:L、単位 cd/ m²）といい、光源の面積を A とすると、観察角度によって光源の見かけの面積が $A \cdot \cos \theta$ で変化するため、輝度を次式で表す。

$$L = I / (A \cdot \cos \theta)$$

ここで、 θ は光源の法線に対する観察角度である。

図 1-4-2 で示されるように、照度は光源との距離によって変化するが、輝度は距離に関係なく、光源を見る角度によって変化する光源の見かけの明るさを表す量である。

輝度はロウソク（一次光源という）で照らされている物体の表面（二次光源という）から反射された光の明るさにも適用できる。その場合には、一次光源によって照明されている面の照度 E と二次光源面の反射率 R から次式によって計算する。

$$L = (R / \pi) E$$

④ 測光量の相互関係

1.4.2 の表 1-4-2 に示したランプ効率が 15.2lm/W の 100W 白色塗装電球を例として測光量の相互関係を数値として示すと次のようになる。

(a) 電球からの光束は

$$\Phi_v = 100W \times 15.2lm/W = 1520lm$$

となる。

(b) 電球からの光束が全空間に均等に放射さると、立体角の定義から球面の表面積（ $4 \pi R^2$ ）を球半径 R² で割った値、 4π が立体角になるための光度は

$$I = \Phi_v / \omega = 1520lm / 4 \pi = 121.0cd$$

となる。

(c) 電球を天井から吊して点灯したときに下から見た電球の直径を 60mm とすると、電球の大きさは半径 60mm の円板状に見えるので、電球の輝度は

$$L = I / (A \cdot \cos \theta) = I / \pi r^2 = 121.0 / (3.14 \times 0.03^2) = 42816.7cd / m^2 \text{ となる。}$$

(d) 白熱電球の直下 1m の机上面での照度は、距離 r の逆二乗則から、

$$E = I / r^2 = 121.0cd / 1^2 = 121.0lx \text{ となる。}$$

(e) 机上面に置かれた反射率 76.69%（明度 9）の白色紙の輝度は

$$L = (R / \pi) E = (0.7669 / 3.14) 121.0 = 29.55cd / m^2$$

となる。同様に、反射率 3.048%（明度 2）の黒色紙の輝度は

$$L = 1.17 \text{ cd/m}^2$$

となり、反射率の違う紙を見ているときの明るさの関係に対応している。

図 1-4-3 と比較すると、100W 白色塗装電球では電気スタンドと同じか、やや明るい照度が得られることになる。

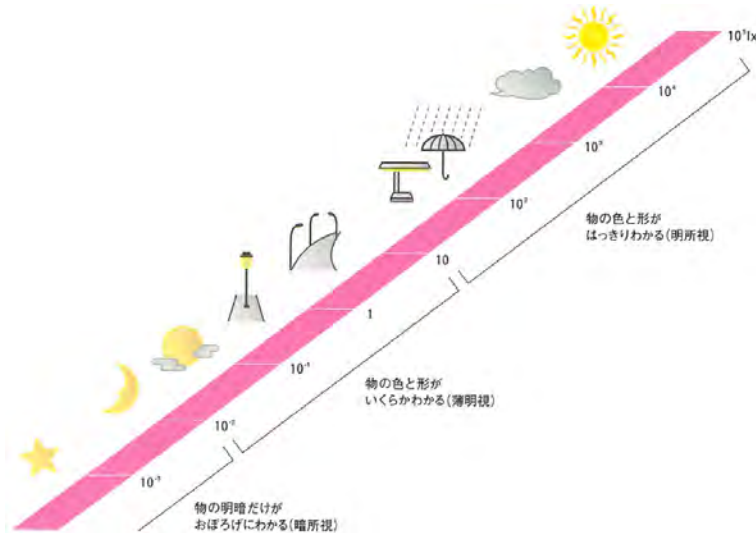


図 1-4-3 自然光や人工光源で得られる照度値

(2) 輝度、照度の測定

照度の測定は、図 1-4-4 のように光度が既知である電球と試験電球とで照明した面の明るさを観察して、両者が等しくなる距離 r_s 及び r_t を求め、距離の逆二乗の法則から計算によって求めることができるが、最近では光電素子を用いた物理測定が一般的に行われている。

照度を測定するには放射束を分光視感効率で評価した光束を測定する必要があるので、分光視感効率に一致した特性を持つ測定器で測定する。このような測定器を $V(\lambda)$ 受光器という。 $V(\lambda)$ 受光器には、放射を吸収することによって起電力（電圧）が生じる光電池とフィルタを組み合わせた受光器が用いられる。また、照度には入射角の余弦法則（1-4-1-1 参照）が成立するので、その補正用に、余弦則に従って曲面が変化する半球状の白色拡散透過板を受光部の前面に取り付けて測定する。照度計の外観図を図 1-4-5(a) に示す。

輝度の測定にも、照度測定と同様に $V(\lambda)$ 受光器を用いた物理測定が行われる。原理的にはレンズを使って、単位立体角当たりの一次光源及び二次光源からの光束が輝度→光度→光束との関係から輝度に比例するので、その光束によって照明される測定器内の受光面の照度を測定すれば、照度→光束→光度→輝度の関係から輝度に換算することができる。この意味では輝度測定も照度測定とみなすことができる。輝度計の外観図を図 1-4-5(b) に示す。

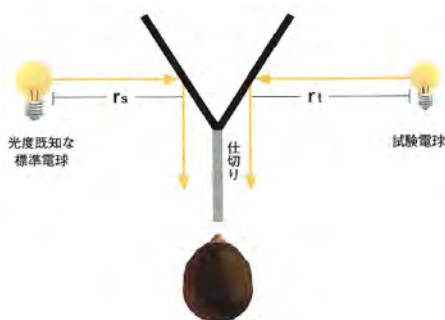


図 1-4-4 照度の視感測定



図 1-4-5 照度計および輝度計の外観図

1.4.2 光源の種類と特性

(1) 光源の種類

光を放出する物体を光源という。したがって、一次光源も二次光源も含むことになるが、この項では一次光源について述べる。昼光を別にすれば一次光源は、ロウソクや白熱電球のように熱による放射（熱放射という）と、蛍光灯のように気体中の放電による放射とに大別することができる。光源の分類と具体的なランプの種類との対応を図 1-4-6 に示す。図 1-4-6 以外にも、光源として発光ダイオード、EL ランプ（エレクトロルミネッセンス）や蛍光（ホトルミネッセンス）などが利用されている。

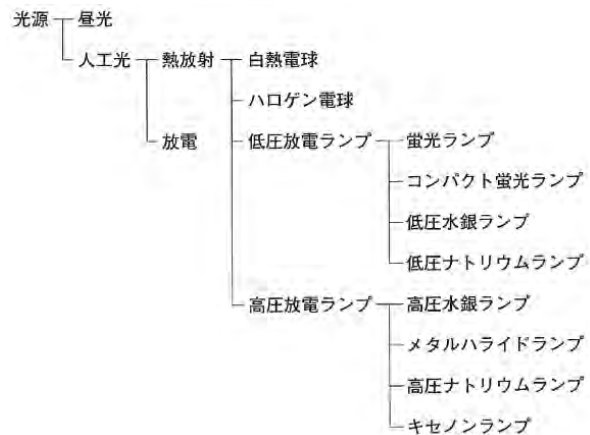


図 1-4-6 光源の分類

(2) 光色

白熱電球のフィラメント（発光部）に使われているタングステンの融点は約 3650K（K はケルビンと読み、摂氏 0 度は 273K に対応する）である。実際には、この融点より低い温度で点灯するようにフィラメントに流れる電流を調節して用いる。今、点灯電圧を徐々に上げていくと、次第にフィラメントが熱せられ可視放射が観察されるようになる。この時の光の色（光色）はフィラメントの温度に対応して変化することがわかる。可視放射が観察される状態を白熱という。燃焼温度が 1000K 未満では、暗い赤色に見えるが、温度が上昇するとともに明るくなり（可視放射が多く放出される）、3000K ぐらいになると普段見ている白熱電球のように赤みを帯びた白色に見える。更に燃焼温度を上げることが出来る物質があるとすると、5000K ぐらいでは白色に、6000K ぐらいでは青みを帯びた白色に変化する。この変化の様子を放射束の強度分布と色空間での座標（1.6.3(1) 参照）で表すと図 1-4-7 及び図 1-4-8 のようになる。図 1-4-7 は、室内照明に利用している白熱電球からは可視放射より長い波長の赤外放射が多く出ており、放射の一部だけを利用していることを示している。

タングステンをはじめ実在する物質はエネルギーを 100% 放射に変換できないが、100% 放射に変換することができる理想的な物体を黒体という。図 1-4-8 は黒体の光色の変化を示したもので、光色の変化の軌跡を黒体軌跡という。黒体の軌跡は燃焼温度だけに依存するので、燃焼温度がわかれば光色もわかる関係にある。このため、光色を燃焼温度で表すことができる。このような表示を色温度という。図 1-4-8 には黒体軌跡と交差する線が示されているが、この線を等色温度線という。この線は黒体軌跡に直交しており、この線上にある光色は交差する黒体軌跡からの距離が最短であることを示している。

実際の光源の光色は黒体軌跡上にあることはごくまれで黒体軌跡の近傍にある。そこで一般に、この等色温

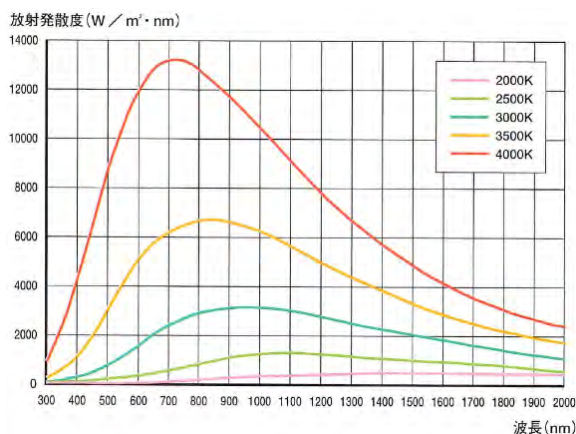


図 1-4-7 黒体の分光放射発散度

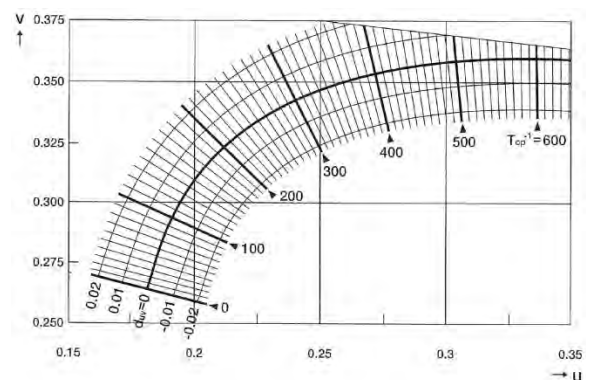


図 1-4-8 黒体の色度軌跡と等色温度線

度線を使って最も近い黒体軌跡の値を求めて色温度表示をする。この場合の色温度を相関色温度と呼び、厳密には色温度と区別して用いる。

放電ランプの代表的なランプである蛍光ランプは、光色によって5種類のランプが市販されている。黒体軌跡と蛍光ランプの光色区分を比較すると図1-4-9のようになる。色温度の低い光色から電球色（記号：L）、温白色（記号：WW）、白色（記号：W）、昼白色（記号：N）及び昼光色（記号：D）という。

(3) 演色

相関色温度の等しい昼光（基準光という）と昼光色蛍光ランプ（試験光という）で、同じ色票を照明した結果を比べると違った色（図1-4-10）に見える。これは可視波長での放射束の波長に対する相対的な強度分布（相対分光分布という）の違いによって生じる効果で、演色性という。演色性は、照明光の違いによって生じる試験光からの反射光の違い（図1-4-11）と順応による色知覚のズレによって生じる変化である。演色性の評価には表1-4-1に示す試験色が用いられる。

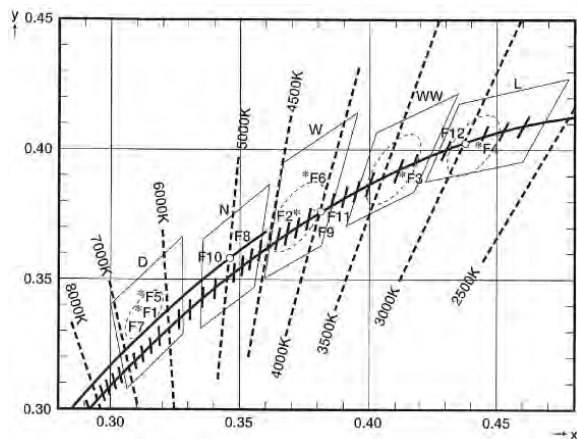


図1-4-9 蛍光ランプの色度区分

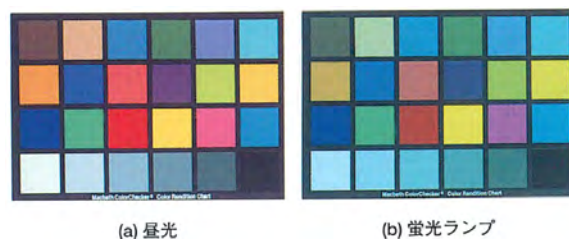


図1-4-10 演色性による色の違い

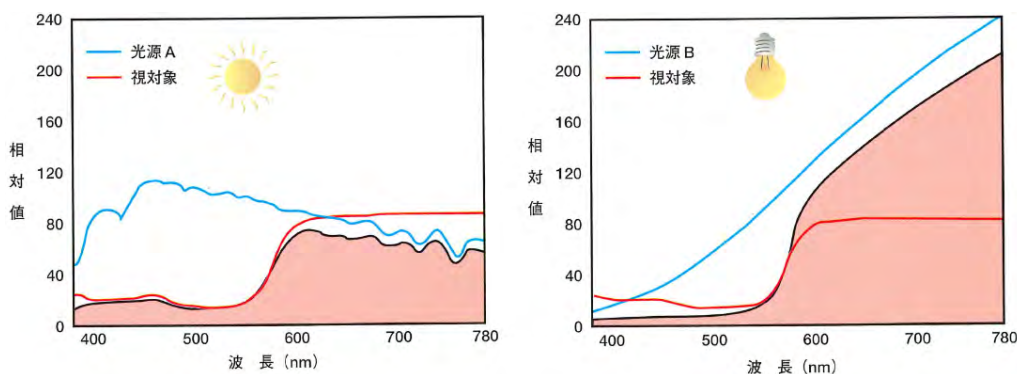


図1-4-11 光源の違いによる反射率の特性

試験色番号1～8は、赤から赤紫までの比較的穏やかな色で、平均的な色の演色性を評価するときに使用される。試験色番号9～12は鮮やかな色で、13～15は演色性が気になる身近な色、欧米人の肌色、葉色及び日本人の肌色である。演色性の良し悪しは演色評価数（記号：R）で表すが、基準光と試験光で試験色を照明した場合の色差 ΔE (1.6.3(2) 参照) から次式によって計算する。基準光には、相関色温度が5000K未満のときは黒体を、5000K以上のときは昼光（CIE 昼光という）を用いる。ただし、蛍光ランプの場合に限って、4600K以上の昼白色蛍光ランプには基準光として昼光を用いる約束になっている。

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$$

$$R_a = (\sum R_i) / 8$$

ここで、 R_i ：特殊演色評価数

R_a ：平均演色評価数で、試験色1～8の R_i の平均値

表 1-4-1 演色性評価用試験色の種類

試験色番号	マンセル記号	色名	備考
1	7.5 R6/4	くすんだ黄みの赤	
2	5 Y8/4	明るい灰みの黄	
3	5 GY6/6	くすんだ黄緑	
4	2.5 G6/6	くすんだ緑	
5	10 BG6/6	くすんだ青緑	
6	5 PB6/8	明るい紫みの青	
7	2.5 P6/8	明るい青紫	
8	10 P6/8	明るい赤みの紫	
9	4.5 R4/13	あざやかな赤	
10	5 Y8/10	黄	
11	4.5 G5/8	緑	
12	3 PB3/11	こい青	
13	5 YR8/4	明るい灰みの黄赤	肌色色票
14	5 GY4/4	暗い灰みの黄緑	葉色色票
15	1 YR6/4	灰みの黄赤	肌色(日本人)

(4) 効率と寿命

白熱電球はフィラメントからの熱放射を利用したもので可視放射だけでなく紫外放射や赤外放射を含んでいる。また、ガラス球や口金も熱せられるので、放射以外にもエネルギーが使われるために損失が生じる。可視放射として有効に利用される光束に対する消費した電力の比を効率という。

また、白熱電球はタングステンの融点以下で点灯するようにしているが、フィラメント面の温度は均一でなく、場所によってタングステンが蒸発して細くなって光束が低下し、しまいには断線して使用できなくなることがある。蛍光灯についても、管端のフィラメントから供給される電子によって放電が開始されるので、この電子放出物質が消耗する（蛍光灯の両端が黒くなるのは、このことによる）と使用できなくなる。このように光源が使用できなくなるか光束の低下がある基準に達するまでの時間を寿命という。

(5) 各人工光源の特性

白熱電球や放電ランプの光色、演色性、効率及び寿命を表 1-4-2 に示す。

(6) 標準光源

図 1-4-11 から、照明光が変化することで色の見え方が変化することが想像できる。このため、色の表示や測色結果を表示する場合に、どのような照明光を利用したのかわかるようにする必要がある。しかし、前節までに述べたように、様々な光源があり、光源からは相対分光分布の異なる光が放出されている。これらの照明光を、その都度測定するのは煩雑であり実用的ではない。そこで、測色結果を表示するための規準となる照

表 1-4-2 人工光源の特性例

光源の種類	定格電力 (w)	全光束 (lm)	ランプ効率 (lm/W)	総合効率 (lm/W)	色温度 (K)	平均演色評価数 (Ra)	定格寿命 (h)
白熱電球	白熱電球						
	一般照明用 (白色塗装)	60 810	13.5	13.5	2850	100	1000
	ハロゲン電球 片口金形	100 1520	15.2	15.2	2850	100	1000
蛍光灯	電球形蛍光灯 ランプ						
	球形・円筒形 (電球色)	15 810	54	54.0	2800	84	6000
	球形・円筒形 (昼白色)	15 780	52	52.0	5000	88	6000
	直管形蛍光灯 ランプ						
	スタータ形 (白色)	37 3100	84	70	4200	61	12000
	3 波長形 (昼白色)	37 3560	96	81	5000	88	12000
	ラビッドスタート形 (白色)	36 3000	83	77	4200	61	12000
	3 波長形 (昼白色)	36 3450	96	86	5000	88	12000
	高周波点灯専用形 (Hf) (昼白色)	32 3200	100	86	5000	88	12000
	色評価用蛍光灯 ランプ (昼白色)	40 2250	56	49	5000	99	5000
	環形蛍光灯 ランプ						
	スタータ形・3 波長形 (昼白色)	28 2100	75	62	5000	88	6000
	水銀ランプ	400 20500	51	48	5800	14	12000
	水銀ランプ 蛍光水銀ランプ	400 22000	55	52	3900	40	12000
	安定器 内蔵形水銀ランプ	500 14000	28	28	4500	40	9000
HID ランプ	メタルハライドランプ						
	高演色形 (Sn 系)	400 19000	48	41	4600	90	6000
	高演色形 (両口金形) (Dy-TI 系)	250 20000	80	76	4300	85	6000
	高圧ナトリウムランプ						
	演色改善形 高演色形	360 36000 400 21500	100 54	92 50	2150 2500	60 85	12000 9000
低圧ナトリウムランプ		180 31500	175	140	1740	-44	9000

明光を取り決めて使用することになっている。この照明光を標準イルミナント（標準の光）という。CIE によって相対分光分布が規定された標準イルミナントには次の 2 種類があり、一般に、イルミナント D_{65} が用いられる。

イルミナント A：温度が 2856K の黒体の放射。白熱電球で実現できる。

イルミナント D_{65} ：紫外部を含めた相関色温度が 6504K の平均的な昼光。

標準イルミナントの相対分光分布を図 1-4-12 に示す。イルミナント D_{65} はアメリカ、イギリス及びカナダでの昼光観測の結果を数学的に解析して相対分光分布を規定したもので、これを実現した実用的な光源（標準光源という）は、現在までに開発されていない。

なお、日本の尼崎、長岡、厚木での昼光観測の結果は、3ヶ国での結果と概ね一致していることがわかっている。標準イルミナントと同じような意味で補助的に用いる幾つかのイルミナントが規定されているが、これらを補助標準イルミナントという。

補助標準イルミナントには、先の 3ヶ国での観測結果から求められた相関色温度 5003K (D_{50})、5503K (D_{55})、及び 7504K (D_{75}) のイルミナントがある。CIE では、相関色温度が 4000K ～ 20000K までの昼光の相対分光分布を計算によって求める方法を規定しており、この方法によって求めたイルミナントを CIE 昼光イルミナントと呼んでいる。標準イルミナント D_{65} や補助標準イルミナントは、CIE 昼光イルミナントから特定の相関色温度を選んで定めたものである。

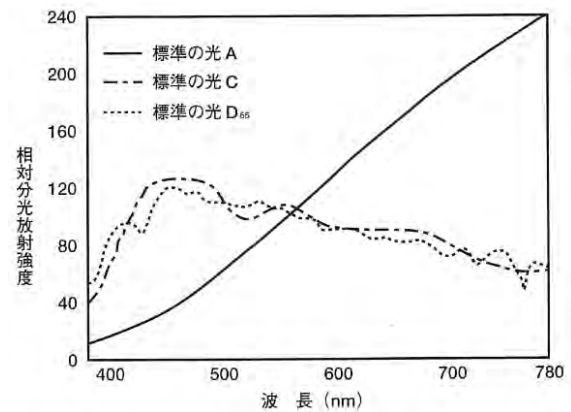


図 1-4-12 標準イルミナントの相対分光分布

1.5 混色とカラーマッチング

1.5.1 混色

(1) 等色と混色

色は目に入ってくる光の強さや成分で決まる。太陽から降り注ぐ光を細い光束にしてプリズムに通すと、虹のように連続した色光（スペクトル）が現れる。これにより、白っぽく見える太陽の光は、多くの色が混ざりあった光であることが分かる。このスペクトルから、黄色の光を取り出し、スクリーンの一方に照射する。さらにその隣に、赤と緑の光も取り出しそれぞれの光の強さを調節しながら重ねると、最初に照射した黄色と同じ黄色に見えることがある（図 1-5-1）。このように、成分の異なる二つの色が同じ色に見えることを等色、二つ以上の色から別の一つの色を作ることを混色という。混色によって光の色の成分が様々なかたちで増減するが、これによって様々な混色方法を理解することができる。



図 1-5-1

(2) 加法混色

光の強さの足し算によって説明できる混色の原理で、1本の懐中電灯で照らした明るさより2本の懐中電灯で照らした明るさの方がより明るいように、色光と色光を混ぜたとき、もとの色光より混色後の色光の方が明るくなる混色の原理である（図 1-5-2）。

原色 R、G、B をそれぞれの光量 r 、 g 、 b で混色したときの色を I とすると、その結果は次式で表され、この原理をグラスマンの法則という。

$$I \equiv rR + gG + bB$$

白い光や同じ色の光の光量を増やしていくと明るさが増すことでこの現象を確認できる。また、例えば赤と青のように異なる色光を混ぜると両方の光を含んだ紫の色光となる。

加法混色は次の3つの方法で確認できる。

1) 同時加法混色

加法混色の基本となる混色の原理で、色光の混色で代表される。複数の色光で1カ所を同時に照らし、それぞれの色光の強さを変えると様々な色を作り出すことができる。作り出せる色域（色の範囲）は元となる色光の色や数により異なり、最も少ない数の色光で最も広い色域になる組み合わせが赤、緑、青の3色である。この3色を加法混色の三原色という（図 1-5-3）。この原理は舞台照明などで様々な色光を作り出す技術として使われる。

原色 R、G、B をそれぞれの光の強さ r 、 g 、 b で混色したときの色を I とすると、次式で表される。

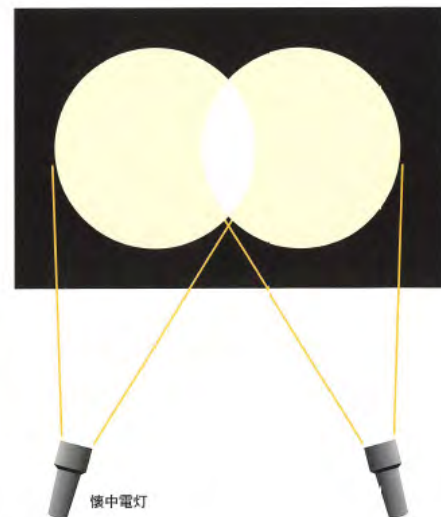


図 1-5-2

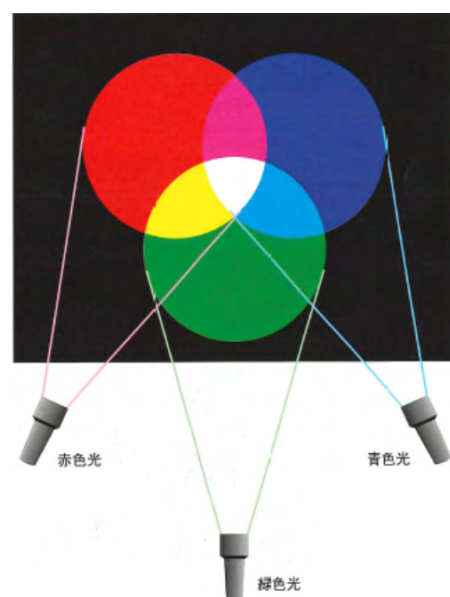


図 1-5-3 加法混色の三原色

$$I \equiv rR + gG + bB$$

2) 並置加法混色

方眼紙の升目を白と黒で市松模様に塗り分け、この方眼紙の模様が判らなくなるまで離れて見ると、灰色に塗られているように見える。このとき白と黒の升目の数の比率を変えると灰色の明るさが変わって見える。平面的に細かく塗り分けられた2色が、目の分解能力を超えたところで見える混色である（図 1-5-4）。

原色 R、G、B をそれぞれの面積比率 r 、 g 、 b で混色したときの色を I とすると、次式で表される。

$$I \equiv rR + gG + bB$$

例えば、布地は縦糸と横糸によって編まれているが縦横の糸の色を変えて編むと市松模様になる。この布地を糸目が見えないくらいの距離で見るとあたかも1色の布地として見える。このような現象は身近に数多く見ることができる。

3) 継時加法混色

白い紙と黒い紙を用意して瞬時に切り替えて交互に見るとき、1色1色を見ている時間が長いときは別々の色として見えるが、時間が短いと目が色の切り替えに対応できずに灰色に見える。このとき白と黒の時間の比率を変えると灰色の明るさが変わって見える。時間的に細かく塗り分けられた2色が、目の分解能力を超えたところで見える混色である。

原色 R、G、B をそれぞれの時間比率 r 、 g 、 b で混色したときの色を I とすると、次式で表される。

$$I \equiv rR + gG + bB$$

この混色は身近な生活の中で見ることは少ないが、円盤の色を塗り分けて回転させるなどの方法により見ることができる（図 1-5-5）。

同時加法混色が、混色することによって元の色より明るくなるのに対して、並置加法混色と継時加法混色は一つの色が増えれば他方の色の割合が減るため、混色された色の明るさが明るい原色と暗い原色の間の明るさになることから中間混色と呼ばれることがある。

(3) 減法混色

光の吸収によって説明できる混色の原理で、色付きガラスなど透過性材料の重ね合わせに代表される混色である。懐中電灯の前に灰色のガラス板を置くと光の一部が吸収され、透過する光は減少する。さらに灰色ガラスを重ねると光はさらに弱められ、より暗い灰色となる。灰色のガラス板の厚みや濃さを増やせば光はさらに減少し透過光は弱くなる。

ガラス板の透過率を T 、ガラス板に当たる光の強さを I 、ガラス板を通り抜ける光の強さ O は次式で表される。

$$O = I \times T$$

ガラス板が2枚になれば次式で表される。

$$O = I \times T_1 \times T_2$$

カラーフィルムの重ね合わせは、減法混色の原理に基づいている。

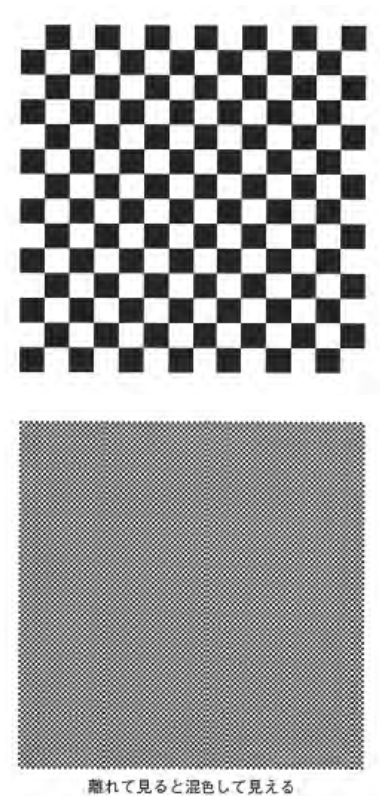


図 1-5-4 並置加法混色

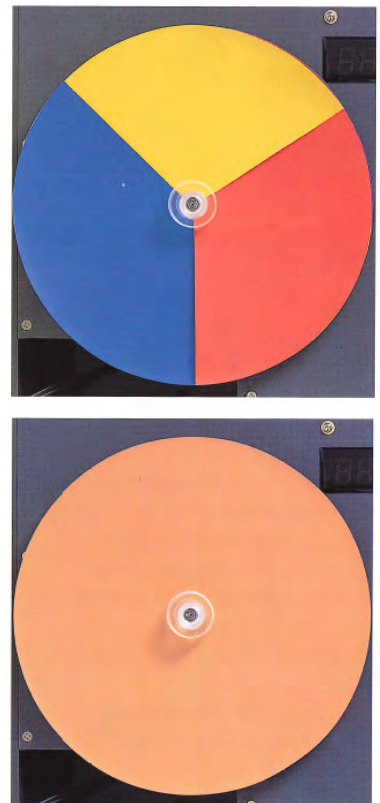


図 1-5-5 回転円盤による混色

デジタルの色彩＜基礎編＞

カラーフィルムは光が透過するとき特定の色を吸収し、残りの色が通り抜ける。図 1-5-7 で緑みの青（シアン）のフィルムは赤を、黄色のフィルムは青の光を吸収する。その結果、白色光をあてると緑の色が透過する。このように吸収によって光が減少することから、減法混色といわれるが、その原理は引き算ではなく、物質（ここではフィルム）の透過率の掛け算になる（図 1-5-8 分光透過率のグラフ参照）。

減法混色の原理は昔のカースライドフィルムに 응용されている。カースライドフィルムには 3 種類の感光層が重なっており、赤、緑、青それぞれの光の強さに応じて反応する。フィルムを現像することによって各層はその補色であるシアン、マゼンタ、イエローに着色されるが、強く感光された部分は薄く、逆に感光の弱い部分は濃く着色される。イエロー、マゼンタ、シアンのそれぞれに着色された各層の減法混色により、撮影された写真の色がスライドフィルムに再現される（図 1-5-9）。

(4) 三原色

混色によって様々な色を作り出すとき、元の色を原色と呼ぶ。混色の際に作り出される色は、原色とその混合量（あるいは比率）で決まる。二つの原色を混色すると作りだせる色は二つの原色の間の色のみだが、三つの原色を混色すると三原色を頂点とする三角形の色域の中の色を作り出すこ

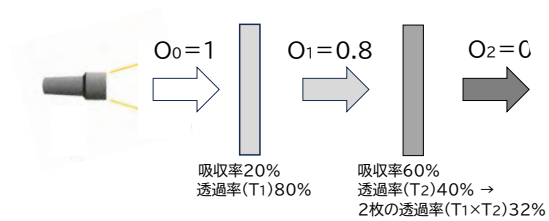


図 1-5-6

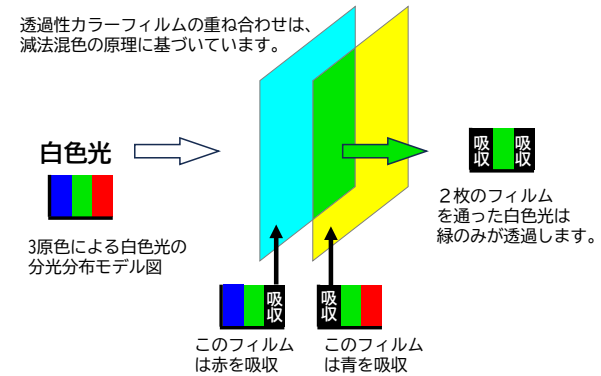


図 1-5-7 減法混色の様子

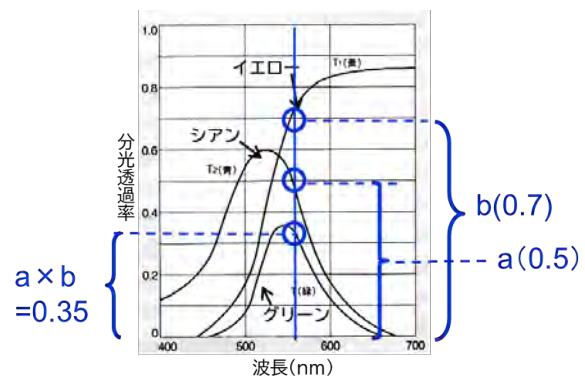


図 1-5-8

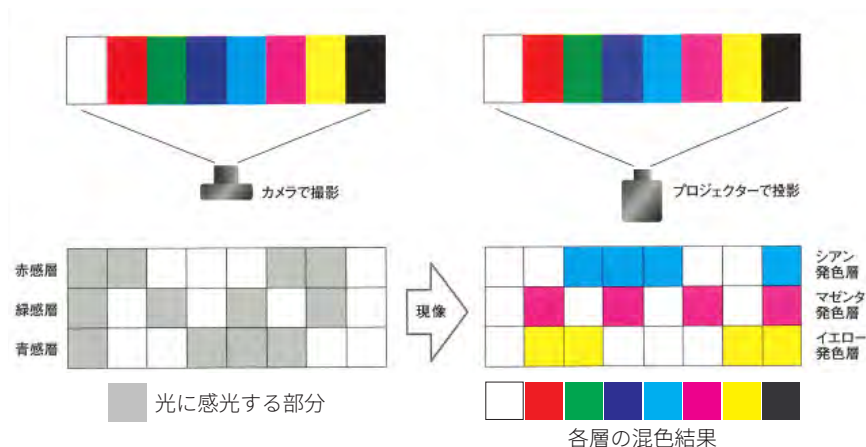


図 1-5-9 カースライドフィルムの発色の原理

とができる。三角形が最も大きくなるように三原色を選べば、すべての色を作り出すことができる。このような理想的な三原色の組み合わせが、加法混色では赤（R）、緑（G）、青（B）であり、減法混色ではイエロー（Y）、マゼンタ（M）、シアン（C）である。これらの6色の関係は分光分布を見るとわかりやすい（図 1-5-10）。

光の三原色である赤、緑、青の分光分布模式図では、一つの原色の波長範囲は他の原色の波長範囲と重なることはなく、またどこにも属さない波長領域もない。3色が混色されると白となる（図 1-5-11）。

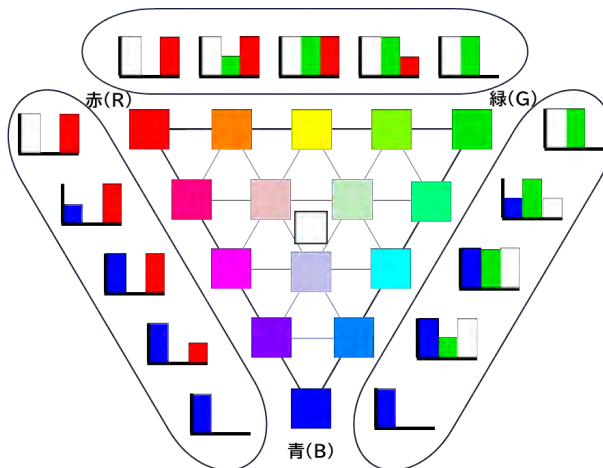


図 1-5-10 加法混色の三原色とその混色および分光分布模式図

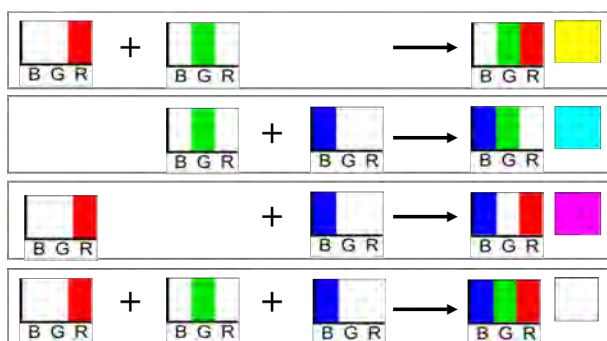


図 1-5-11 加法混色の三原色と減法混色の三原色

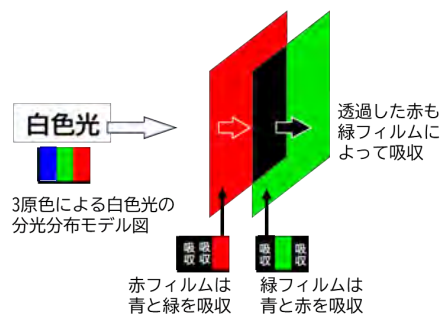


図 1-5-12 減法混色の原理

減法混色は光の吸収による混色であり、赤と緑のフィルムを重ねる（減法混色）と透過する光はなくなり重ねた部分は黒となる（図 1-5-12）。

色の知覚は3種類の錐体細胞の興奮度の割合によるので、これを自在にコントロールできる色が赤・緑・青である。この3色を足し算によってコントロールするのが加法混色で、引き算によるのが減法混色である。

引き算とは白色光から赤を吸収する色、緑を吸収する色、青を吸収する色である（図 1-5-13）。

減法混色の三原色による三角形を図 1-5-14 に示す。頂点から内側に入ると徐々に暗くなるのが分かる。

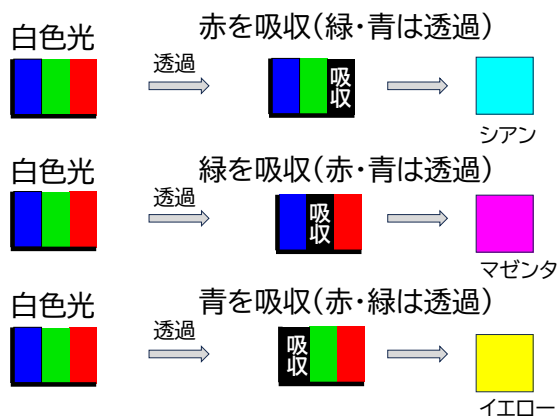


図 1-5-13 減法混色における三原色の生成

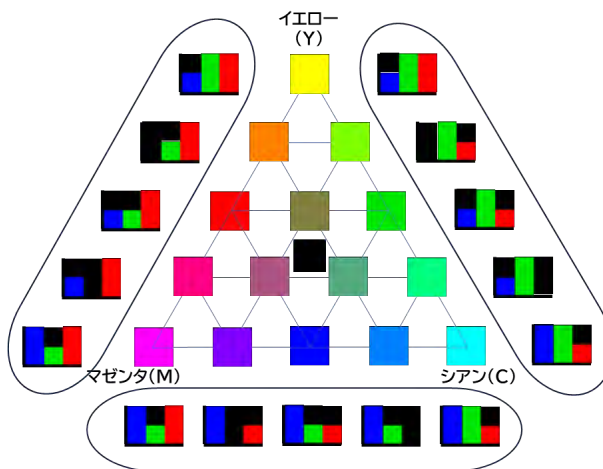


図 1-5-14 減法混色の三原色とその混色および分光分布模式図

デジタルの色彩＜基礎編＞

また、例えば、青とイエローを加法混色すると白になる。分光分布を見ると互いを補う関係にあることがわかる。このような関係を補色関係、互いの色を補色という。分光分布という物理的な特性から見た補色であるので物理補色と呼ぶこともある（図 1-5-16）。

それぞれの原色の関係を表すと次式で表されます。

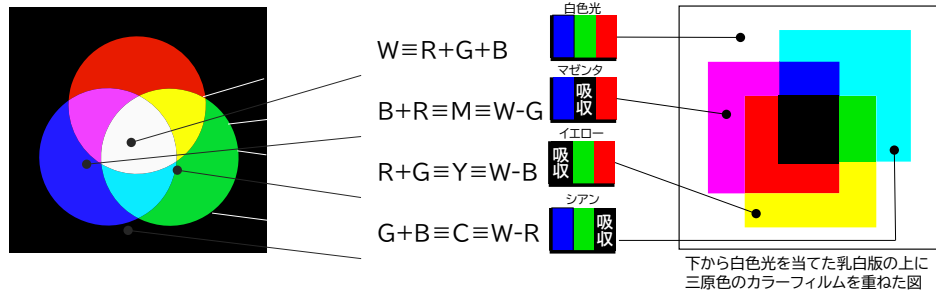


図 1-5-15

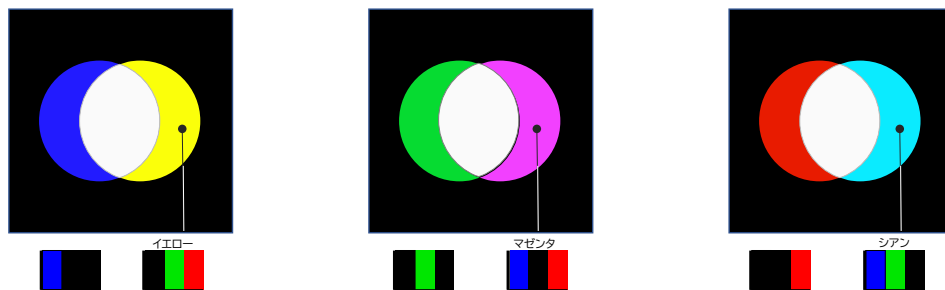


図 1-5-16 物理補色

(5) 色材の混色

我々の身の回りにある様々な色材は、加法混色や減法混色のように単純な原理通りではなく、減法混色と加法混色が複雑に関与し合っている。光は物に当たると、反射、吸収、透過する。但し、それらの割合はそれぞれの物質や構造によって異なる。透明な物や染料は吸収と透過が多く、不透明な物や顔料は反射と吸収が多い。混色を考えるとときにはこのように光の挙動を考える。

1) 塗料の混色

塗料は顔料の他、乾燥して堅くなる結合剤と結合剤を柔らかく保つ溶剤が主な原料である。塗布された塗料は溶剤が蒸発して顔料を抱え込んだまま結合剤が固化することによって堅い塗膜となる。結合剤は通常無色または無色に近い透明であるので塗料の色は顔料によって決まる。塗膜に光が当たると、光は塗膜の中で顔料に当たり反射する。反射した光はその角度に応じて表面方向に戻ったり、顔料の隙間を塗膜の奥に進んでいき、そこでまた他の顔料に当たる。塗膜が薄い場合、光は基材となる金属や板に当たり表面方向に反射する。結果として反射を繰り返すたびに顔料の色に応じて光は減少する。表面近くで反射したり、運よく奥から戻ることのできた光が塗膜の色として見える。この過程は減法混色と考えること

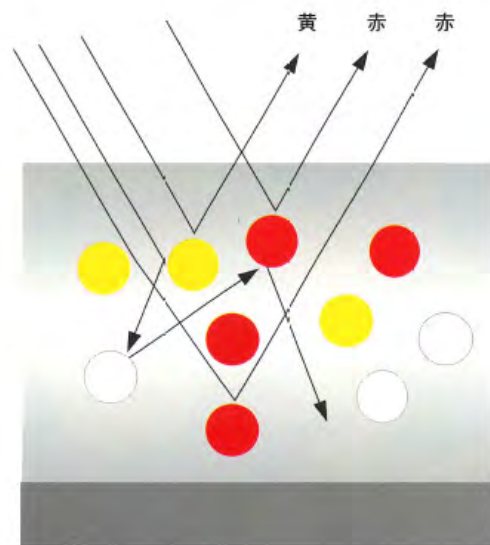


図 1-5-17 塗料の混色

ができるが、塗膜の表面では顔料が不規則に並び並置加法混色の様子を示している。

したがって塗料の混色は減法混色と加法混色の混在した混色であるといえる。塗膜が薄かったり塗料中の顔料の濃度が低いと塗膜の透過率が高くなって、下地が透けてしまい、塗料本来の色が出ないことがある。絵の具やクレヨンも結合剤と顔料の種類や割合が異なるが原理は塗料と同様である。

2) 印刷インキの混色

印刷インキは顔料や染料と結合剤が主な原料である。塗料同様にインキ膜の中に入った光は、顔料に当たったりあるは染料を透過したり、隙間を通り奥へと進みながら反射や透過を繰り返す。印刷におけるインキの膜厚はきわめて薄く、インキ膜に入った光は基材である紙まで届き反射して再びインキ膜の中を戻るので、基材の反射率が大きく影響する。

印刷に用いられる混色の方法には次の3種がある。①インキそのものを目的の色にして印刷するもので原色となるインキを適時調色して特練色インキと呼ばれるインキを作って印刷する方法。調色には熟練技術が必要なためカラーファインダーのような配合比の書かれた色見本を用いることが多い。②3色の原色インキをそれぞれの版を作って重ね刷りし、紙の上で混色をする。それぞれの版は網点と呼ばれる微少な点の膜厚を変えずに大きさを変えることによって濃淡をだす方法。凸版印刷や平版印刷で利用される。③②と類似しているが網点の大きさを変えずに膜厚を変えることによって濃淡をだす方法。グラビア印刷で利用される。②と③で利用される網点印刷では、三原色の透過性の高いインクが重ね刷りによって必要に応じて重なるため、減法混色の様子を示す。実際にはインク量を節約するため、黒色インクを使用して4色を原色として、重ね刷りされる。また各インキの網点の大きさの違いやわずかな位置ずれのため、いくつもの色が現れ、並置加法混色の様子も示す。その結果網点印刷では減法混色と並置加法混色が混在した混色である。

3) 繊維の混色

繊維の着色は通常染色という方法をとる。染色は染料を繊維に染み込ませたり、繊維の中で化学反応を起こして発色させたりして色を染める。染料は顔料と異なって、繊維に染み込むため結合剤は不要であるが、染料が解け出すのを防ぐ定着処理が必要となる。染料は繊維に染み込み、1本1本の繊維が1色に染まる。

繊維を白色の光を散乱する物質と考えれば、染料は反射する光を吸収する物質である。反射すべき光が染料の染色力や濃度に応じて吸収されることによって繊維は着色される。複数の染料で染色されるとそれぞれの染料の染色力や濃度に応じて光が吸収されるが、染料によって染色力が異なるため、染料の配合比と混色結果は必ずしも一致しない。

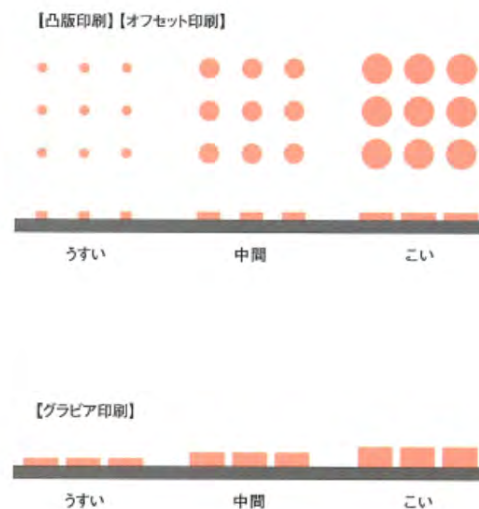


図 1-5-18 塗料の混色



図 1-5-19 塗料の混色

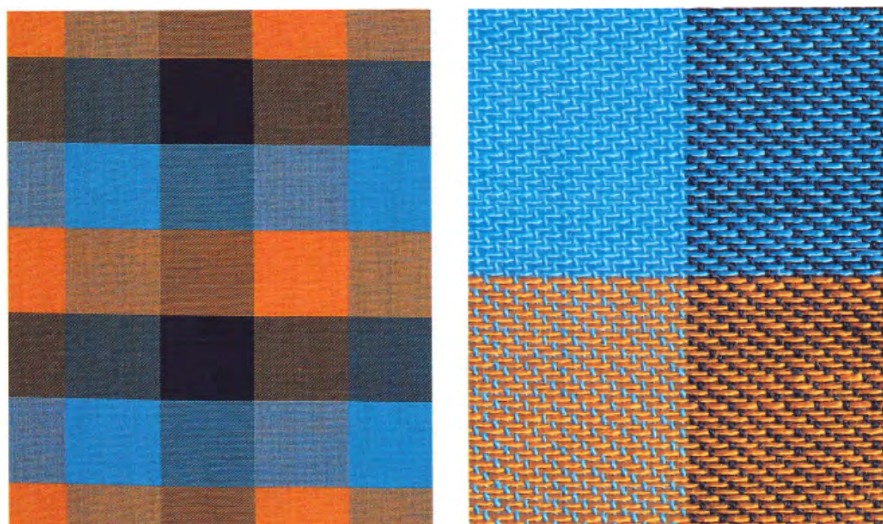


図 1-5-20 経糸と横糸による混色と拡大写真

染色された繊維は束ねられて糸となり、あるいは糸となってから染色される。束ねられる際に異なる色の糸が混ぜられるところでも混色が起こる。繊維と繊維の隙間に入った光は奥へ進むうちに消滅することが多いため、糸の表面に並んだ繊維による並置加法混色と考えることができる。最近では繊維の表面をメッキによって着色する技術もある。

4) プラスチックの混色

プラスチックの混色は、透明か不透明かでその特性が異なる。透明プラスチックの場合、主に染料系の色材によって着色される。光の散乱（不規則な反射）はほとんどないため、混色の過程は減法混色と考えられる。

一方、不透明なプラスチックの場合、プラスチック自身が散乱性を持つため、染料系、顔料系どちらの着色剤でも利用できる。顔料系の着色剤を用いた場合、混色原理は塗料と同様と考えられる。プラスチックはそれ自身が支持体であり、かなりの厚みで使用されることが多いため、顔料の割合が多すぎるとプラスチックの強度が低くなることがあるので、塗料などに比べると含有量はそれほど多くない。

1.5.2 カラーマッチング

(1) カラーマッチングの考え方

カラーマッチングとは、色を作る技術のことをさす言葉である。色を作るにはどんな色を作るかという目的があり、どんな材料で作るかという出発点がある。絵を描くとき、空を描こうとすれば空の色が目的であり、絵の具が出発点となる。この出発点と目的を結ぶ技術がカラーマッチングである。白と黒を混ぜると灰色になることはほとんどの人が知っているが、補色である黄と青を混ぜたらどんな色になるかを答えられる人はそれほど多くない。

カラーマッチングとは、色材の特性を理解し、最適な原色、配合比（量）、工程、コスト、予想色差などを総合的に判断して目的の色を作る技術である。また、調色作業では、原色選定のミスや、濃色の入れすぎなど経験不足によるやり直しを余儀なくされることがしばしばあるが、コンピュータを使ったカラーマッチングでは、事前に収集したデータを使って机上計算によって混色結果を予測するため、失敗による色材の無駄を省くことができることが大きな特徴である。実際には、使用する色材に合わせた混色理論に基づき、原色や配合比の組み合わせを複数算出し、コストや予想色差などをもとに最適な原色、配合比を決定する。実際に混色作業を行うと原料のばらつき、計量誤差、混色工程の不安定さなどの原因で予測とのズレが生じる。この場合、修正調色を予測することで精度の向上を図る。

1.6 色の表示方法

1.6.1 色名による色の表示

面積を伝えるときに「手のひらサイズ」「畳1枚分」などと言うが「手のひら」は厳密には人によってことなるが概ね同じ大きさ言える。「畳1枚」は通常 90cm × 180cm であるから、ほぼ正確な大きさを伝えることができる。さらに正確に伝えたいときには物差しで測ることになる。色の場合も同様に「みかん色」のように誰でも知っているようなものに例えたり、色の物差しや測定器を使って数値化してより正確に色を伝える。その時々で必要な表示方法を選択する。

(1) 慣用色名

色を物の名前に例えたり、共通の知識や経験に基づく言葉によって表現する方法。例えば空のような色を「空色」、土のような色を「土色」と呼ぶ。その多くは日常生活の中で自然と学ぶものですが、白人の肌も黒人の肌も「肌色」であり、「スカレット」と「紅赤」は同じ色であるように、一つの色名が二つの色を表したり、同じ色に二つの名前がついてしまうなどの不都合がある（図 1-6-1）。

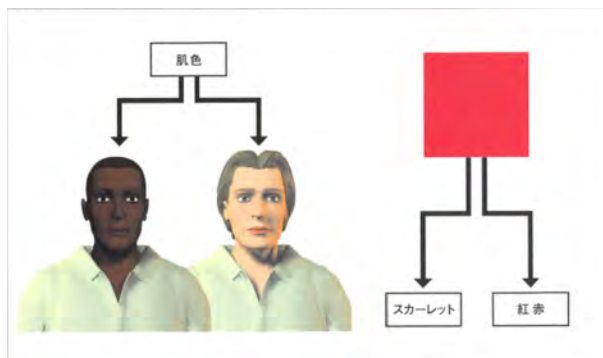


図 1-6-1

慣用色名は人種や生活地域など文化、習慣や知識と密接に関わるのでグローバルな場面では注意が必要である。ほとんどの慣用色名は物の名前に由来するため「～色」のように「色」を付けることによって色名となる。

(2) 系統色名

無数にある色を一定のルールに沿って、似たもの同士で分類してそのグループに名前を付ける方法。そのルールの基本は、①赤、黄、緑、青、紫の5色相を基本とし、必要に応じて細分する。②明暗と鮮やかさに応じて色の印象を10区分程度に分類する。①の基本色相名の前に色相を細分化する修飾語と②の修飾語をつなげて系統色名とする。②はトーンと呼ばれることが多い。

系統色名は通常数十から数百に分類されそれぞれの区分に名前がつけられる。代表的な系統色名は、およそ7500もの色名が収録されているISCC－NBSの「Dictionary of Color Names」やおよそ170色が収録されているJIS「物体色の色名（JIS Z8102）」、JAFCAの「BASIC COLOR CODE」、PCCS系統色名などがあり、分類の仕方はそれぞれ異なり、「Dictionary of Color Names」と「BASIC COLOR CODE」はともに267区分、PCCS系統色名は230区分となっている。

「物体色の色名（JIS Z8102）」では195区分とし、系統色名を次のように定めている。

系統色名は、基本色名またはそれに修飾語を付けたものとし、以下の基本色名と修飾語を用いる。

有彩色

- ・基本色名（10種）

赤、黄赤、黄、黄緑、緑、青緑、青、青紫、紫、赤紫

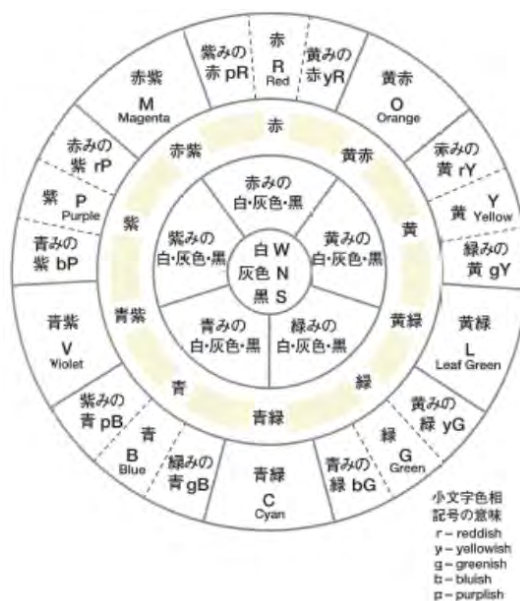


図 1-6-2 JIS 系統色名の色相関係

デジタルの色彩＜基礎編＞

・色相に関する修飾語（5 種）

赤みの、黄みの、緑みの、青みの、紫みの

・有彩色の明度及び彩度に関する修飾語（11 種）

あざやかな、明るい、こい、うすい、くすんだ、暗い、ごくうすい、明るい灰、灰、暗い灰、ごく暗い

このうち、彩度の低い色を表す 5 種の修飾語（暗い、ごくうすい、明るい灰、灰、暗い灰、ごく暗い）は色相に関する修飾語と重複してはならない。

無彩色

・無彩色の基本色名（3 種）

白、灰色、黒

・無彩色の明度に関する修飾語（2 種）

明るい、暗い

系統色名では、ほとんどの場合、区分の範囲として区分間の境界線が示され、この境界線は、調査などによって得られた色彩データを分類整理するときなどに役立つ。しかし、系統色名は区分ごとの名称ではあり、区分内の代表的な色に対して与えられた色名であることから、区分内のすべての色に適用しようとすると、境界線をはさむ接近した 2 色を別の色名で表現することとなり、違和感を与えることがある。したがって境界線は分類のために便宜的につけたものと考えるべきである。

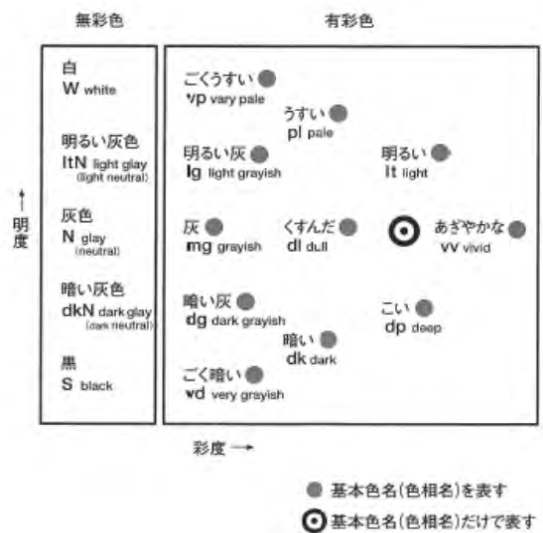


図 1-6-3 JIS 系統色名の明度及び彩度の相互関係

1.6.2 表色系による色の表示

(1) 混色系

1) CIE 表色系

色は照明する光と物とそれを見る人の目によって決まる。照明から出た光が物体に当たり反射（あるいは透過）して目に入り、その光刺激が色として知覚される。このとき、光が強ければ明るく、弱ければ暗く、また赤い光が強ければ赤く見える。物の色は照らす照明の色によって変わったり、見る人の視覚特性の個人差によっても変わる。しかし、照明と見る人を決めてしまえば物の色を人が受ける光刺激の強さで表すことができる。

CIE（国際照明委員会）が、照明と見る人の特性を仮想的に決めて、その条件で色を見た時の刺激の強さを数値で表すのが CIE 表色系で、1931 年に XYZ 表色系と RGB 表色系を定めた。

1-1) RGB 表色系

「混色」の章で触れたように、三原色の混色によってほとんどの色を作ることができる（図 1-6-4 参照）。光の三原色を混ぜ合わせて、ある光の色と等色させる実験を行うと（図 1-6-5 参照）、ほとんどの光の色が光の三原色で作出せることがわかる。つまり、ほとんどの色は、三原色の混合量で表すことができる。

1930 年頃、ギルドとライトはそれぞれ次のような実験を行った。原色となる赤、緑、青の極めてあざやかな 3 色の色光と、可視波長の任意の色光を用意し、様々な波長の色光と同じ色を三原色の混色によって作りだし、そのときの混合量を調べた。ギルドとライトの実験は原色の色が多少異なったがそれを補正すると、同等の結果となった。CIE は 1931 年にこの実験結果をもとに人の目の

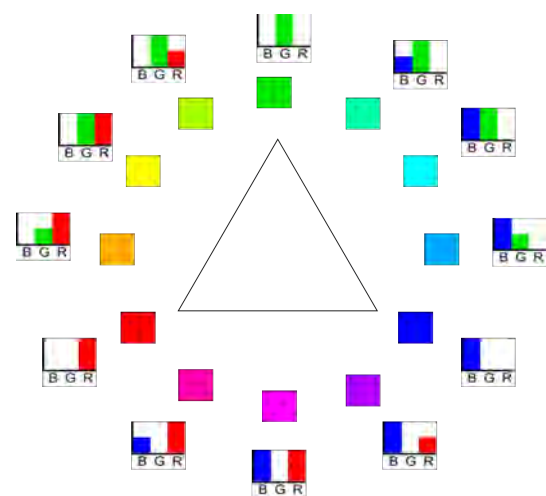


図 1-6-4 光の三原色の混色で作成した色相環

波長ごとの感度に相当する等色関数 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ を用いた RGB 表色系を定めた。

等色関数とは、スペクトルの各波長の色を、三原色の R、G、B を混色して等色するための混色比率を表したものである。

光の三原色は〈R、G、B〉であるが、CIE（国際照明委員会）は等色実験を行う三原色として、R が 700nm、G が 546.1nm、B は 435.8nm の単色光を定めている。この RGB の混合量で表す表色系を、RGB 表色系と言う。なお、コンピュータの RGB とは異なる。

等色関数 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ には負の数値を持つなど使用に当たって不便が多いため、これらを改善した XYZ 表色系も定めた。

RGB 表色系と XYZ 表色系の間には次の関係がある。

$$X = 2.7989R + 1.7517G + 1.1302B$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B$$

$$Z = 0.0565G + 5.5943B$$

あるいは

$$R = 0.41844X - 0.15866Y - 0.08283Z$$

$$G = -0.09117X + 0.25242Y + 0.01570Z$$

$$B = 0.00092X - 0.00255Y + 0.17858Z$$

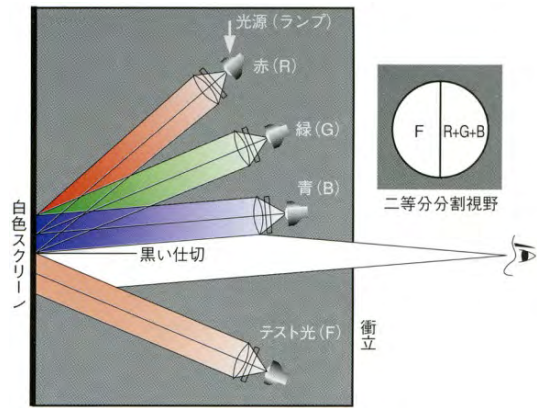


図 1-6-5 光の三原色の混色による等色の概念図

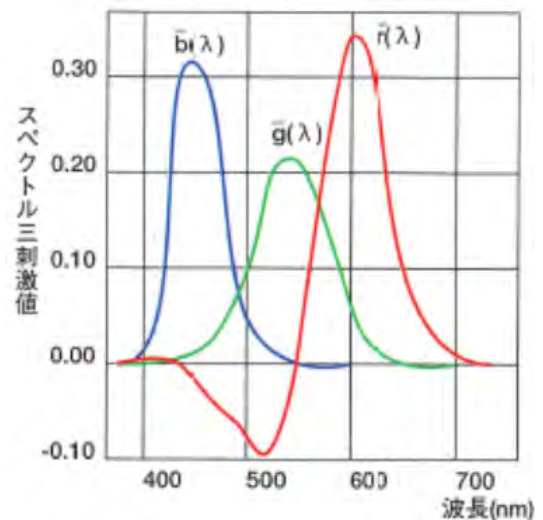
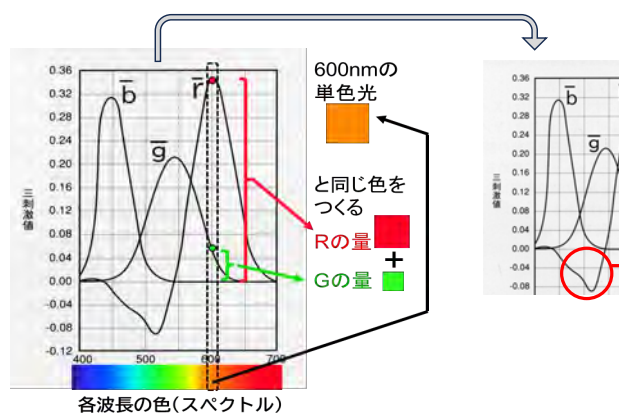


図 1-6-6 RGB 表色系の等色関数



各波長の単色光と同じ色を作るための、R、G、B の混合量に基づいた関数。
等色関数を示したグラフは、各単波長と等色する R、G、B の比率を波長ごとに表したグラフ。

図 1-6-7 等色関数とは

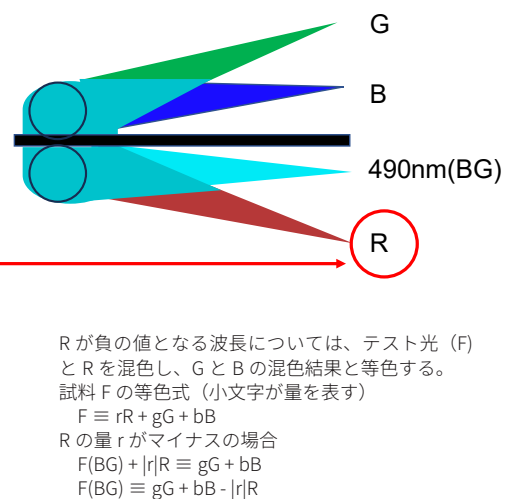


図 1-6-8 490nm の単色光を R・G・B で等色する場合の混色模式図

デジタルの色彩＜基礎編＞

<色度図>

試料色 F を R、G、B の混合量で表すとすべての色を 3 種類の値で表示することができるが、その値の幅は試料 F の明るさに対応して無限に存在することになる。一般的に色を伝達する場合、色みの特徴を指すケースが多く、それを色度と呼び、明るさと切り離して記述する。

色度は三刺激値 RGB 総和の各刺激値の割合で表す。F の三刺激値を R、G、B とすると F の色度座標 r 、 g 、 b は以下のとおりである。

$$r = R / (R + G + B)$$

$$g = G / (R + G + B)$$

$$b = B / (R + G + B)$$

r 、 g 、 b は $r + g + b = 1$ の関係があるので、色度座標はこのうち 2 つを用いて表され、現在 rg 色度座標として r 、 g の値が用いられている。

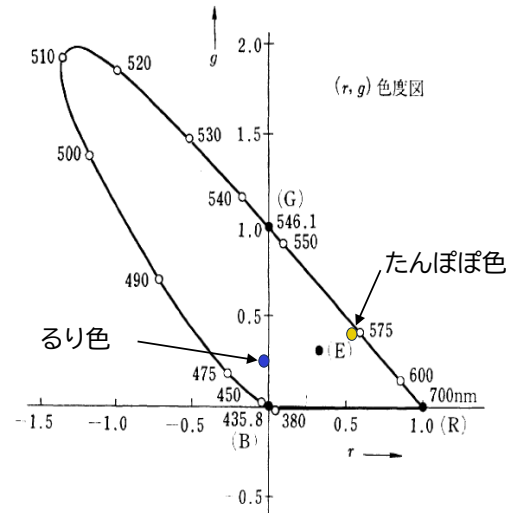


図 1-6-9 rg 色度図 (CIE1931)

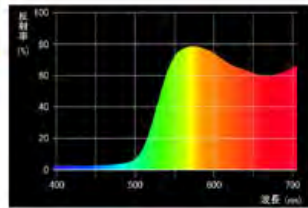
< RGB 表色系 表記事例 >

たんぽぽ色



5Y 8/14

分光反射率



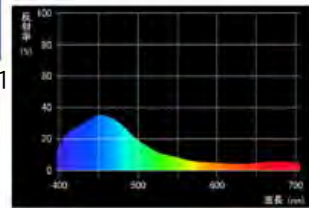
R=13.15 G=9.63 B=0.68
r=0.56 g=0.41

るり色



6PB 3.5/11

分光反射率



R=-0.12 G=1.92 B=6.07
r=-0.02 g=0.24

図 1-6-10 RGB 表色系表記事例

1-2) XYZ 表色系

< RGB 表色系の改善が望まれる点 >

RGB 表色系について、以下のように幾つかの改良点にむけた作業が行われた。 rg 色度図の形が細長く (図 1-6-9 参照)、多くの色を分かりやすく表示できる形状が望ましい。また、等色関数 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ には負の数値を持つことから使用に当たって不便である。さらに、等色関数 $\bar{g}(\lambda)$ のグラフの形が目の分光感度を表すグラフの形に類似していることから、三刺激値 G を色光の輝度に対応させると合理的である。

スペクトルの各単色光と等色するために必要な RGB 原刺激の比率を、図 1-6-6 に示したが、このデータを基に変換を行い、マイナス値が出ない架空の原刺激 XYZ を求める。スペクトルの各単色光と等色するのに必要な XYZ 原刺激の値を、スペクトル三刺激値と言い、この特性を等色関数という。これを図 1-6-11 に示す。

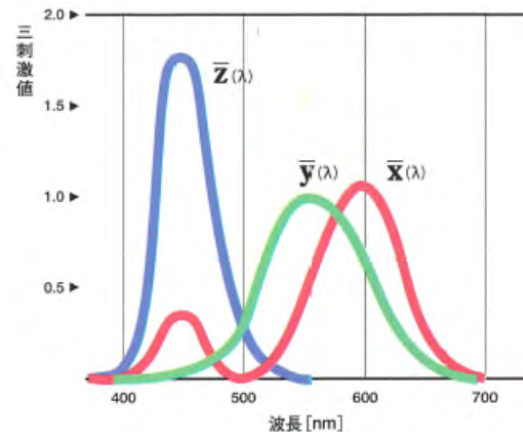


図 1-6-11 XYZ 等色関数

人間の網膜上には、色覚に関係する 3 種類の錐体が存在する。それぞれ、長波長領域（赤）、中波長領域（緑）、短波長領域（青）の光に強く応答する 3 種類の錐体である。これが光の三原色と深い関わりがあることは既に述べたが、この XYZ についても、この 3 種類の錐体の光に対する特性を間接的に表現していると考えることができる。

CIE は人の目の分光感度に相当する等色関数を定めた。XYZ 表色系の等色関数は、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ の 3 種があり、それぞれ主に、赤、緑、青の光に高い感度を持つセンサーに相当する。

目に入った光はその分光分布と、等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ によって三つの刺激 X、Y、Z（三刺激値 XYZ）に集約される。このことは $\bar{x}(\lambda)$ という感度を持つ赤に感じる X センサーと、 $\bar{y}(\lambda)$ という感度を持つ緑の感じる Y センサーと、 $\bar{z}(\lambda)$ という感度を持つ青に感じる Z センサーに相当し、そのセンサーの出力が三刺激値 XYZ であると考えるとわかりやすい。XYZ 表色系の等色関数は、エネルギーが波長に関わらず等しい「等エネルギー白色光」の時、三刺激値 XYZ がともに等しく、かつ、Y の分光特性が標準比視感度に等しくなるように、さらに等色関数にマイナスの数値が出ないように RGB 表色系の等色関数を数学的に変換したものである。

CIE が 1931 年に定めた等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は視野角 2 度つまり目から 50cm のところにある約 2cm 弱の物を見ているときの見え方を想定している。色の見えに関する多くの実験は視野角 2 度で行われてきたが、実務で色比較などを行う場合、もっと大きな視野角で行われることが多いので、1964 年に、視野角 10 度つまり目から 50cm のところにある約 9cm 弱の物を見ているときの見え方を想定した等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ が定められた。これは視野角の大きさにより色も見え方が異なることによるものである。等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を持つ架空の人を CIE1931 標準観測者、等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ を持つ架空の人を CIE1964 補助標準観測者といい、XYZ 表色系を CIE1931 標準表色系、等色関数に $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ を使用した $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系を CIE1964 補助標準表色系という。

以下の数式は 2 度視野の等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ で示す。

光源の色を表示する場合次の式を用いる。

$$X = K \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

このとき、K は Y をその光源の輝度などの測光量に一致させるための係数。

$S(\lambda)$ ：照明光の分光分布

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ：XYZ 表色系の等色関数

$\int$ ：積分範囲は 380 ～ 780nm

物体の色を表示する場合、光源の光が物体によって反射または透過するので、物体の分光反射率あるいは分光透過率を掛け合わせる。また、光源には CIE が定めた標準の光を用いる。

物体の反射色を表示する場合、次の式を用いる。

$$X = K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int S(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$K = 100 / \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$S(\lambda)$ ：照明光の分光分布

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ：XYZ 表色系の等色関数

$R(\lambda)$ ：物体の分光反射率

$\int$ ：積分範囲は 380 ～ 780nm

物体の透過色を表示する場合、次の式を用いる。

$$X = K \int S(\lambda) T(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int S(\lambda) T(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

デジタルの色彩＜基礎編＞

$$Z = K \int S(\lambda)T(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

$$K = 100 / \int S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda$$

$S(\lambda)$ ：照明光の分光分布

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ：XYZ 表色系の等色関数

$T(\lambda)$ ：物体の分光透過率

$\int$ ：積分範囲は 380 ～ 780nm

XYZ 表色系の xy 色度は次の式による。

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

XYZ 表色系は、測色における最も基本的な表色系として扱われており、三刺激値 XYZ から各種の表色系に数値計算によって変換できる。また色差を求める際にも重要となる。

＜ XYZ 表色系 表記事例＞

日本人の肌の色

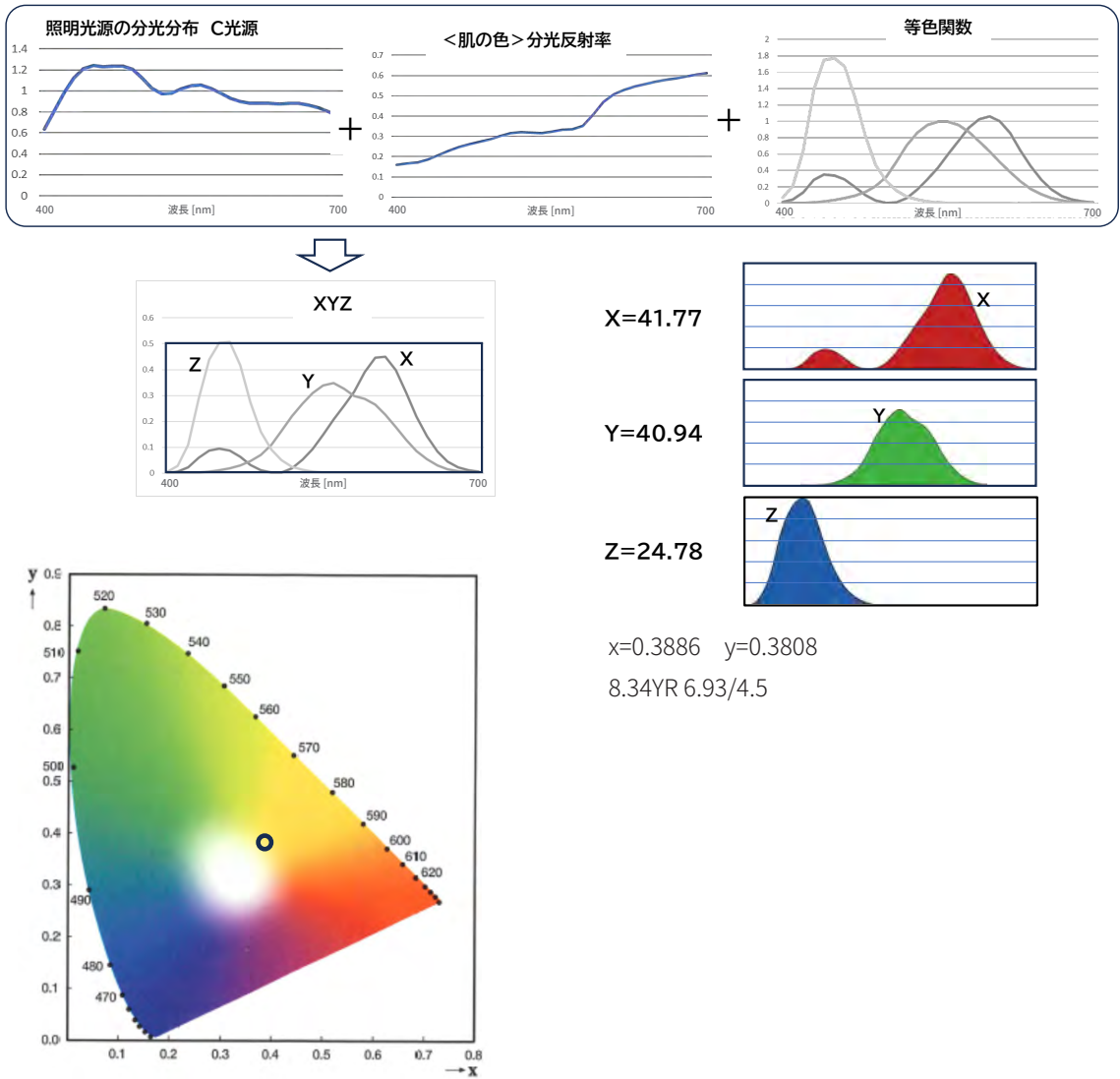


図 1-6-12 XYZ 表色系の xy 色度図

2) オストワルト表色系

1919 年にオストワルトが発表したもので、「周辺の色とともに知覚される関係色と呼ばれる色は、理想的な白、理想的な黒、理想的な純色である完全色の 3 色によって混色円板による混色で等色することができるとして、その比率で色を表すものである。完全色は反射率が波長によって 0% か 100% のいずれかという特殊な分光分布を持つ理想の純色である。完全色の分光分布はその形から四つに分類でき、タイプ 1 は短波長側と長波長側の反射率が 0% で中間の波長の反射率が 100% となる凸型。タイプ 2 は短波長側と長波長側の反射率が 100% で中間の波長の反射率が 0% となる凹型。タイプ 3 は短波長側の反射率が 0% で長波長側の反射率が 100%。タイプ 4 は短波長側の反射率が 100% で長波長側の反射率が 0%。反射率が 0% から 100% あるいは 100% から 0% に変わる波長を変えると主波長と純度が変わる。それぞれの主波長において、最も純度の高い色をその主波長の完全色とする。

オストワルト表色系の色相は、ヘリングの四原色である yellow、ultramarine、red、seagreen をもとに、中間に orange、turquoise、purple、leafgreen を加えた 8 色相とし、さらにそれぞれの色相を 3 分割した 24 色相で構成される。各色相には 1 から 24 の番号が付けられている。

関係色は理想的な白、理想的な黒、完全色の混色ですから等色相面は正三角形となり、色空間の形は白と黒を軸として正三角形を回転させた両円錐形となる。等色相面で白色量、黒色量、完全色量の和が 1 であるから、白色量と黒色量が決まると完全色量が決まる。

色量は 1 ～ 0 を 15 段階に分割し、a ～ p の記号で黒色量、白色量の順に表す。色相番号と合わせて、例えば色相が orange (=5) で、白色量が 0.891 (=I)、黒色量が 0.4377 (=c) ならば「5Ic」のように表記する。無彩色の場合、白色量記号と黒色量記号が同じで、aa、cc…となるが a、c と簡略化して表示する。

現在知られているオストワルト表色系は測色学的な検討に基づき修正が加えられたものである。

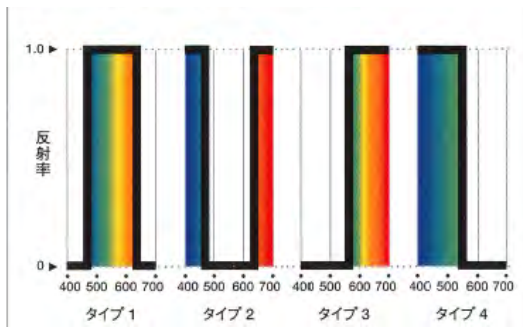


図 1-6-13 オストワルト完全色の分光分布

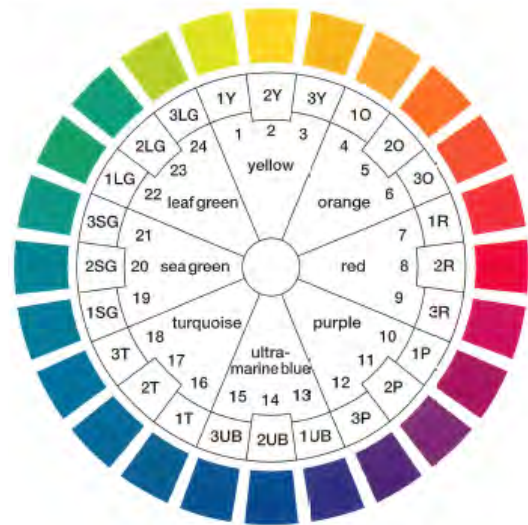


図 1-6-14 オストワルト表色系の色相分割とその記号

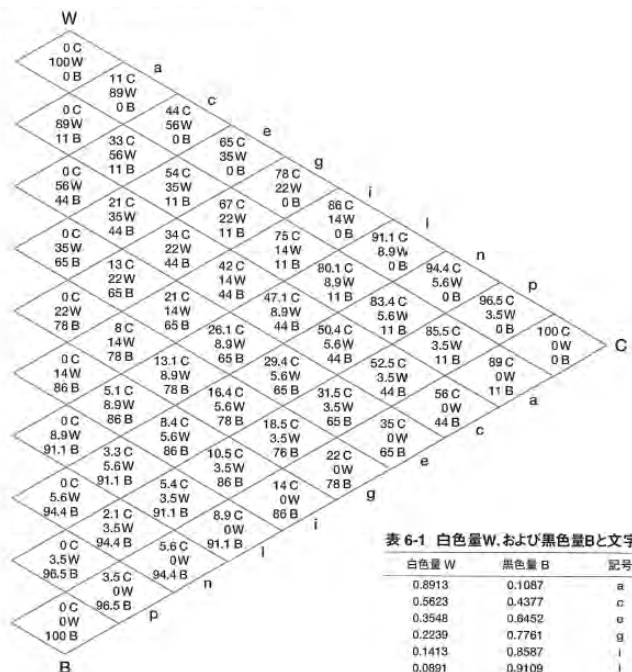


表 6-1 白色量 W、および黒色量 B と文字記号

白色量 W	黒色量 B	記号
0.8913	0.1087	a
0.5623	0.4377	c
0.3548	0.6452	e
0.2239	0.7761	g
0.1413	0.8587	i
0.0891	0.9109	j
0.0562	0.9438	n
0.0355	0.9645	p

図 1-6-15 オストワルト表色系の同色相三角形

(2) 顕色系

1) マンセル表色系

1905年に画家マンセルが考案した色知覚の三つの属性に従って系統的に色を配置したもので、1915年に“Munsell Atlas of Color”として色票集が出版された。

マンセル表色系は物体表面の色知覚に基づいた心理的な色の属性を色相、明度、彩度の三つとした。色相は色相差が等間隔に見える主要な五つの色（R、Y、G、B、P）と、五つの中間色（YR、GY、BG、PB、RP）を決め、10の色相とした。それぞれの色相ごとに5を中心とした0から10までの目盛りを等間隔に振って、全色相を100とした。色票集はこれを40分割して2.5間隔の40色相で作られている。

明度は視覚的に等間隔になるように白を10、黒を0とし10から0までの10段階に目盛りを振った。このとき明度Vと視感反射率Yの関係を $V=10Y^{1/2}$ と仮定して行った。

彩度は発案当時最もあざやかであった色を10、同じ明度の無彩色を0として継時加法混色による時間比によって決められた。マンセル表色系をxy色度図に表すと彩度10以下は、彩度間隔がほぼ等間隔に並んでいることからその様子がうかがえる。彩度10以上は後に追加されたものである。

その後、“Munsell Book of Color”をOSA（アメリカ光学会）が測色・検討・修正して1943年に明度Vと視感反射率Yとの関係と各色の色度が定められ、修正マンセル表色系として公表した。このことによって他の表色系との相互の変換が可能となった。現在、マンセル表色系という修正マンセル表色系を指す。日本では「JIS Z 8721 色の表示—三属性による表示」として定められている。

OSAによる明度Vと視感反射率Yとの関係は

$$100Y / Y_{\text{mgo}} = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5$$

となる。 Y_{mgo} は当時、MgO（酸化マグネシウム）を基準とする規約反射率で測定をされていたことを意味する。

マンセル表色系では、色相・明度・彩度を次のように表示する。

$$\frac{2.5R}{\text{色相}} \quad \frac{5}{\text{明度}} \quad \frac{8}{\text{彩度}}$$

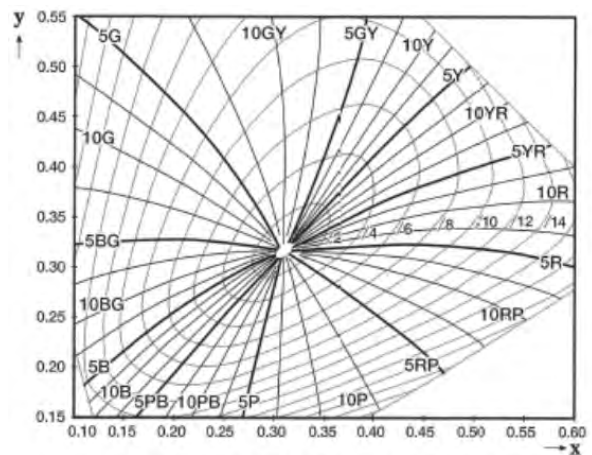


図 1-6-16 マンセル色票の色度座標（明度 5 の場合）

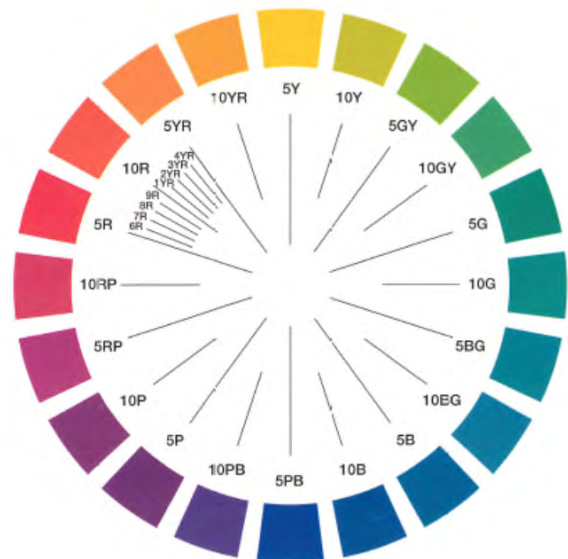


図 1-6-17 マンセル表色系の色相環

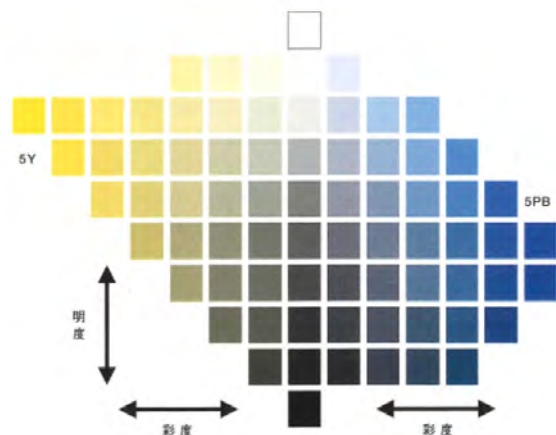


図 1-6-18 マンセル表色系の等色相面（5Y-5PB）

1.6.3 均等色空間

色度図上の2点間の距離を感覚的な色の差に比例するような表色系を均等色空間 UCS (uniform chromaticness scale) 表色系といい、その色度図を UCS 色度図という。

UCS 表色系は多くの変遷を繰り返している。その流れを以下に追ってみる。

(1) 弁別楕円

色の表示は、前述の各種の表色系を用いて数字や記号で表示することができる。

二つの色がそれぞれ数字で表示されると、2色の色の差は数字の差で表すことができる。同じ程度の色の差に見える緑色2色の対と青2色の対を xy 色度図に表示してみると2色間の色差を表す2点間の距離が大きく異なることがわかる。

1942年マッカダムは xy 色度図上の25色についてそれぞれの周辺色との等色実験を行い、見分けることのできる最小の色度差を調べた。この色度差を示した楕円を弁別楕円と言う。この結果から xy 色度図上の2点間の距離は感覚的な色の差に比例しないことが明らかになった。

マッカダムは UCS 表色系として UYW 表色系を発表した。

$$U = (2/3)X$$

$$V = Y$$

$$W = -(1/2)X + (3/2)Y + (1/2)Z$$

UYW 表色系の色度は

$$u = U / (U + V + W)$$

$$v = V / (U + V + W)$$

CIE は 1960 年になって CIE1960UCS 色度図として、この uv 色度図を推奨することを決め、色度を次のように決めた。

$$u = 4x / (-2x + 12y + 3)$$

$$v = 6y / (-2x + 12y + 3)$$

この色度を XYZ 表色系の XYZ で表すと

$$u = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v = 6Y / (X + 15Y + 3Z)$$

となる。

CIE は 1976 年に uv 色度図をさらに改善した色度を次のように決め、CIE1976UCS 色度図として推奨した。

$$u' = 4x' / (-2x' + 12y' + 3)$$

$$v' = 9y' / (-2x' + 12y' + 3)$$

この色度を XYZ 表色系の XYZ で表すと

$$u' = 4X' / (X' + 15Y' + 3Z')$$

$$v' = 9Y' / (X' + 15Y' + 3Z')$$

となる。

(2) CIE 均等知覚色空間

u' v' 色度は明るさを除外して、色度のみが色域全体に対してほぼ均等になるように考えられているのに対

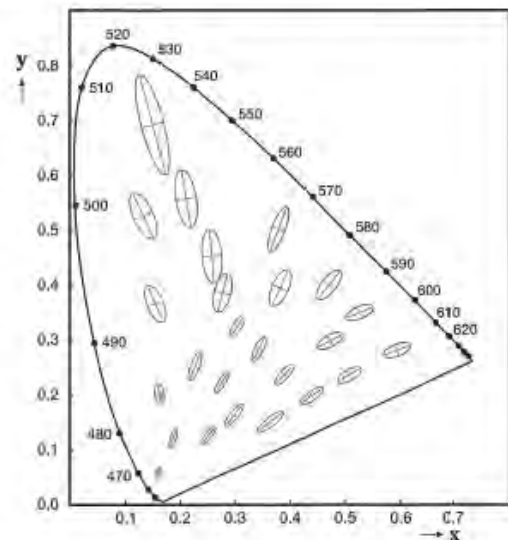


図 1-6-19 xy 色度上のマッカダムの偏差楕円
(図は偏差楕円を 10 倍にして拡大している)

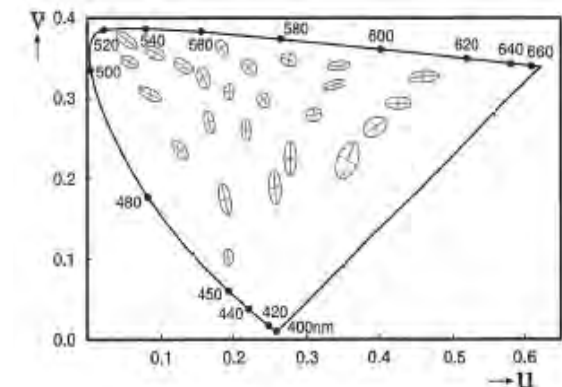


図 1-6-20 uv 色度上のマッカダムの偏差楕円
(図は偏差楕円を 10 倍にして拡大している)

デジタルの色彩＜基礎編＞

して、小さな色差において色相や明度や彩度のどの差に対しても、均等に表せるように考えられた表色系を均等知覚色空間 ULCS (uniform lightness-chromaticness scale) 表色系という。

ULCS は 1940 年頃から色差を表すために開発され、アダムスの色差式、ハンターの色差式などが用いられた。

アダムスの色差式は三刺激値 XYZ のそれぞれにマンセル明度の関数を当てはめ、 V_x, V_y, V_z として、次式によって色差 ΔE を求めた。

$$\Delta E = \{ (0.23 \Delta V_y)^2 + [\Delta (V_x - V_y)]^2 + [0.4 \Delta (V_z - V_y)]^2 \}^{1/2}$$

Δ (デルタ) は差を意味し、 ΔV_y は 2 色の V_y の差を表す。 $\Delta (V_x - V_y)$ 、 $\Delta (V_z - V_y)$ も同様である。

ハンターの色差式は三刺激値 XYZ からハンター表色系 (Lab 表色系とも呼ばれる) に変換し、2 点間の距離を次式によって色差 ΔE を求めた。

$$L = 10Y^{1/2}$$

$$a = 17.5(1.02X - Y)/Y^{1/2}$$

$$b = 7(Y - 0.847Z)/Y^{1/2}$$

但し、この式は標準の光 C におけるもの。

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

CIE は 1964 年に $U^*V^*W^*$ 表色系を推奨した。

$U^*V^*W^*$ 表色系は、マンセル明度の 10 倍にほぼ等しい明度指数 W^* と色度指数 U^* 、 V^* で表され、 W^* は視感反射率 Y から、 U^* 、 V^* は uv 色度から次式で求まる。

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17$$

$$U^* = 13W^*(u - u_n)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_n)$$

u_n 、 v_n は照明光源の uv 色度である。

CIE は 1975 年に次の 2 つの表色系と色差式を推奨した。

1) $L^*u^*v^*$ 表色系

$L^*u^*v^*$ 表色系は $U^*V^*W^*$ 表色系改良したもので CIELUV 表色系とも言う。

明度指数 L^* と色度指数 u^* 、 v^* で表す。改良点は明度指数の関数の変更と、黄一青の程度を表す指数 V^* を 1.5 倍し、色度指数の記号を u^* 、 v^* としたことである。以下に式を示す。

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

但し $Y/Y_n > 0.01$ の場合。

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z)$$

このとき u'_n 、 v'_n は照明光源で完全拡散面を照らしたときの u' 、 v' 。

$L^*u^*v^*$ 表色系での色差は次式で表される。

$$\Delta E_{uv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

$L^*u^*v^*$ 表色系は $U^*V^*W^*$ 表色系に置き換わるものとされた。

2) $L^*a^*b^*$ 表色系

$L^*a^*b^*$ 表色系は、アダムスの色差式の元になった均等知覚色空間を改良したもので CIELAB 表色系とも言う。

明度指数 L^* と色度指数 a^* 、 b^* で表す。明度指数の関数や色相変化の方向は $L^*u^*v^*$ 表色系と共通にした。

以下に式を示す。

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

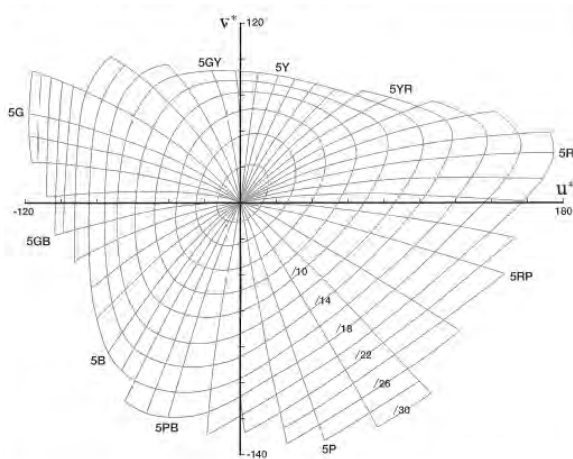


図 1-6-21 マンセル色票の色度座標 u^*v^*
(明度 5 の場合)

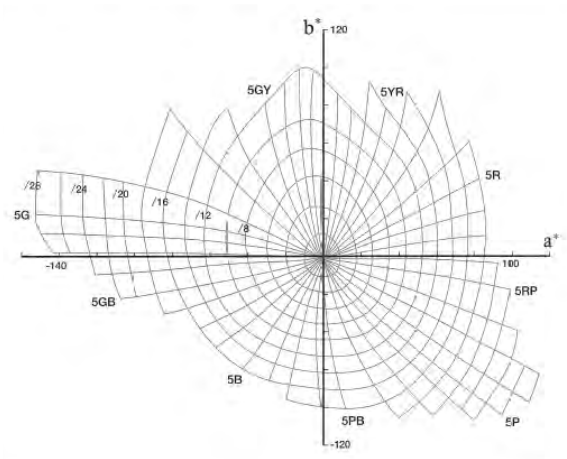


図 1-6-22 マンセル色票の色度座標 a^*b^*
(明度 5 の場合)

但し $Y/Y_n > 0.01$ の場合。

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

但し、 $X/X_n > 0.01$ 、 $Y/Y_n > 0.01$ 、 $Z/Z_n > 0.01$ の場合。

このとき X_n 、 Y_n 、 Z_n は照明光源で完全拡散面を照らしたときの XYZ。

$L^*a^*b^*$ 表色系での色差は次式で表される。

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

3) メトリック量

$L^*u^*v^*$ 表色系、 $L^*a^*b^*$ 表色系では、明度指数とおおむね赤、緑、黄、青を表す二つの色度指数で表される一方、マンセル表色系のように色相、明度、彩度のような三属性で表す方法としてメトリック量の定義が追加された。メトリック量は $L^*u^*v^*$ 表色系、 $L^*a^*b^*$ 表色系における色相、明度、彩度に相当する表現である。

メトリック明度 L^* は、明度指数 L^* をそのままとし、次式で表す。

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

但し $Y/Y_n > 0.01$ の場合。

メトリッククロマ C^* は u^*v^* (また a^*b^*) 座標での原点からの距離とし、次式で表す。

$$C^* = [(u^*)^2 + (v^*)^2]^{1/2}$$

または

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$$

メトリック色相角 H° は、 u^*v^* (また a^*b^*) 座標での原点を結ぶ色相線の角度とし、次式で表し 1 回転で 360 度とする。

$$H^\circ = (180^\circ/\pi) \tan^{-1}(v^*/u^*)$$

または

$$H^\circ = (180^\circ/\pi) \tan^{-1}(a^*/b^*)$$

メトリック明度 L^* とメトリッククロマ C^* は 2 色を比較するときそれぞれの差 ΔL^* 、 ΔC^* を求めればよいが、メトリック色相角 H° の差を求めると同じ角度差でもクロマが異なると色相差の見え方が異なる。そのため、色差

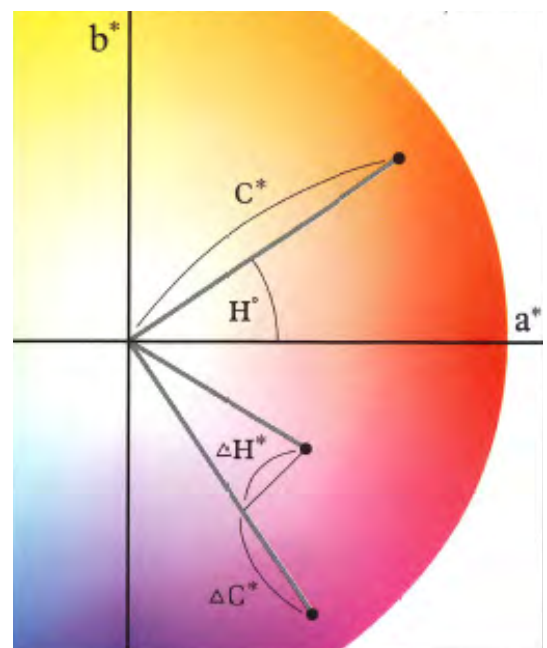


図 1-6-23 メトリッククロマとメトリック色相角

デジタルの色彩＜基礎編＞

は明度差と彩度差と色相差に分解できることを利用して、次式でメトリック色相差を求める。

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2]^{1/2}$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{1/2}$$

但し ΔE は ΔE^*_{ab} または ΔE^*_{uv}

1.7 色測定の基礎

1.7.1 何のために測るのか

いうまでもなく、測色とは色をはかることである。色とは何か？はさておき、「はかるとは何か？」調べてみよう。広辞苑を引くと、

【測る・量る・計る・図る】量の解らないものに対して大体的見当をつける意。①数量をはかる。②物事を推し考える。③相談する。④企てる。⑤機会をうかがう。⑥欺く。などその用例が多く載っているが、ここで扱うのは、①、②の意味といったところであろう。

また、現代国語例解辞典には、測、量、計の使い分けの目安が次のように出ている。

(を) 測る：長さ、高さ、深さ、速さ、面積、角度、血圧。

(を) 量る：重さ、分量、容積。

(を) 計る：数量、時間、国の将来。

測・量両用：気持ち、真意、能力、性能。

計・量両用：効果、呼吸。

もう少し専門的に、JISの計測用語を調べてみると、「特定の目的をもって、事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し、実施し、その結果を用い所期の目的を達成させること」とある。これを「色」に当てはめて説明すれば、①目的をもって、②色のものさしを作る、③色のものさしをあてがって比べる、④その結果を使って所期の目的を果たす、ということになるだろうか。ここで、色のものさしとは、色を表す方法、手段のことであるから、CIE 表色系をはじめ、各種の表色についての説明をしなければならないが、その詳細はここでは省略する（6章参照）。

色の測定には、まず、目的があり、色の計測結果がその目的を達成するのに役立っていないと計測をした意味がないということである。

1.7.2 どのように色のものさしを作るか

物の大きさをはかることは、物と物とを直接比較することから始まったという。色をはかるのも、当然、見比べるという基本動作から始る。

まず、色と色とを見比べることによって、互いに同じかどうかを確かめる。同じであることが望ましいか、



図 1-7-1 色のものさしの例

同じであることが望ましくないかの二者択一で評価する。色の測定には、同じであることが確かめられて、第一ラウンドの比較作業は終わるが、同じでないときは、色と色がどのように違っているのかを知ろうとする。つまり、その差がどのような差であるかという判断が必要であり、その結果によって色の価値を評価する。判断の基準は、必要としている色であるのか、好ましい色であるといえるのか、または、好ましい方向に違っているのか、好ましくない方向に違っているのか、好ましくないくらいに違っているのかを判断する。さらに、再現性のある判断ができるように、より定量的に評価する必要性が生まれ、色のものさしを作ることになる。

色のものさしには、例えば、色の濃淡や明暗を変化させた一次元スケール、色相の変化と濃淡の変化とを組み合わせた二次元スケール、各種表色系にみるように立体的に展開した三次元スケールなどのいくつかの種類がある。

ところで、混色によっていろいろな色を作り、これを体系化するとき、そのまとめかたを次のように分類することもある。

- ①混色系（color mixture systems）：光の物理的混色を基準とした体系。
- ②顕色系（color appearance systems）：感覚尺度を基準にした物体色の体系。
- ③色材混合系（colorant mixture systems）：色材処方と実現した色の対応の体系。

1.7.3 どのように比べるか（色測定の種類）

色を測定する方法は、①視感によって測色する方法と②機器によって物理的に測色する方法との2種類に大別される。さらにそれぞれを細分することができるが、ここでは、JISに制定されている方法について概観する。なお、測色方法とJISに対応する規格番号を次の図1-7-2に示す。

視感を利用して行う方法には、視感比較方法と混合等色方法とがあり、前者は既存のカラースケールと試料色を視感によって直接比較し、カラースケールが示す色記号や目盛を読んで測定値とする。後者は比較に便利のように比色専用の装置を作り、この装置を利用して視感測定を行う。このような視感利用の測色方法は、色を見る条件、例えば照明や観察条件、周辺の視環境条件などについて厳密に規定しておくことが重要である。

測色機器を利用して行う方法には、分光測色方法と刺激値直読方法とがある。現在では、比較的オーソドックスな分光測色方法が広く利用されているが、野外調査のために携帯用として作られた簡易型色彩計の中に刺激値直読式の機器がある。機器利用の色の測定方法では、測色器械の製作精度の他に、仕様上の光学的諸条件や計算処理方法についても、体系的な標準化が必要である。



図 1-7-2 色の測定方法の分類と対応 JIS

1.7.4 目視によって比べる

1) 色の見え方

色は暗やみでは見えないし、目を閉じても見ることはいできない。また、物が視界になればその物の色を見ることができない。色が見えるということは、光と物と目との関連によって認められる視覚の現象であるといえる。

色が認められるまでの過程は、光源から放射された光が物体に当たり、物体の表面で反射してきた光、あるいは物体を透過してきた光が目に入る。その光は目の網膜を刺激して、その刺激によって生じた視神経の活動が脳に伝えられて、そこで、色の感覚が生じる。そして、物体の色として認識される。こうして見える色を

「物体色」という。

また、目を光源に向けると、光源から反射された光が直接目に入る。その光の刺激によって色の感覚が生じ、光源の色として認識される。こうして見える色を「光源色」という。われわれが普通に見ている色はこのうちのいずれかである。つまり、照明環境や見る条件の違いによって、さまざまに変わって見える物体の色を「この色だ」と特定するためにはその物体がいつでも、どこでも、誰にでも、同じ色の感じに見えるような条件を標準化しておくことが必要なのである。

2) 色の比較方法

照明の条件や観察のしかたによって、色の見えかたが違ってくるので、色を「この色だ」と特定し、それを表示する方法を定めるためには、色を見る条件を規定しておく必要がある。そこで、色の観察条件の要約を次に述べる。詳細については JIS Z 8723（表面色の視感比較方法）を参照されたい。

[JIS 規格の要約]

- (1) 適用範囲 この方法は表面色の比較に用いる。ただし、鏡面には適用しない。
- (2) 照明光源 照明用光源は、標準の光 D65 かこれに準ずる光源を用いる。
- (3) 作業面照度 色を比較する作業面の照度は 500 ルクス以上であること。できれば 1,000 ルクス以上でまぶしくない程度の照度で、かつ、均一に照明する。
- (4) 照明、観察方向 45 度方向からの照明では真上から観察し、真上方向からの照明では 45 度方向から観察する。あらゆる方向から均等に照明するときは、真上か、45 度方向から観察する。
- (5) 配置 比較する色は隣接して並べ、同一の平面に並ぶように配置する。
- (6) 背景 比較する色の背景や周囲を整え、色の面積を等しくするためにマスクを使う。マスクは光沢や蛍光のない無彩色で、比較色に近い明度のものが望ましい。
- (7) 色の大きさ 比較する色の面積は、視角で 2 度以上 10 度程度とする。
- (8) 観察者 正常な色覚を有する者であること。着色レンズの眼鏡を使用しない。

1.7.5 機械で比べる（機械による測色方法）

1) CIE の表色方法

前途の色の認識過程からもわかるように、物体の色は、光源から出る光の質、それを受ける物体の反射特性、光に対する目の感度によって決まるので、あらかじめ、光源から出る光の分光分布と目の分光感度を標準化しておけば、物体の分光反射率のあり方によって決まる。CIE ではこうした考え方で色の表示方法を標準化した。わが国では XYZ 系による色の表示方法として JIS Z 8701 に制定されている。

2) 分光測色方法の諸条件

JIS Z 8722（色の測定方法－反射及び透過物体色）によれば、分光測色方法の測定条件には次の種類が規定されていて、測定に際してどの条件を使用して測定したかを明記しておくことになっている。

[諸条件の種類]

[1] 分光測光器

種類 1) 第 1 種分光測光器

種類 2) 第 2 種分光測光器

[2] 照明及び受光の幾何学的条件

条件 a) 45 度照明 -0 度受光

条件 b) 0 度照明 -45 度受光

条件 c) d（または D）度照明－0 度受光 [d－n or D]

条件 d) 0 度照明－d（または D）度受光 [n-d or D]

デジタルの色彩＜基礎編＞

[3] 反射率の測定

方法 a 2 光路光学系

方法 b 1 光路光学系

[4] 測定用照明光

標準の光 ① A、② D₆₅、③ C

補助標準の光 ① D₅₀、② D₅₅、③ D₇₅、④ B

試料の光 ① F6、② F8、③ F10

[5] 等色関数の種類

種類 a) 2 度視野条件の等色関数

種類 b) 10 度視野条件の等色関数

[6] 計算用重価係数

種類 a) 5nm 等間隔重価係数

種類 b) 10nm 等間隔重価係数

種類 c) 20nm 等間隔重価係数

[7] 色表示系の種類

種類 1) XYZ

種類 2) Yxy

種類 3) L*a*b*

種類 4) L*u*v*

種類 5) V_xV_yX_z

種類 6) Lab

種類 7) その他

3) 機器測色の実際例

色彩管理に測色機器を利用するためには、製品などの検査対象物及び検査項目を検討吟味の上、これら測色の諸条件を使い分けていく必要がある。

[事例 1]

機種名：日本電色工業(株)製 SE2000 の場合 [1998 年現在]

1) 分光測光器：第 2 種分光測光器

2) 照明－受光条件：条件 b) 0° 照明 -45° 受光

3) 反射率の測定：方法 b) 1 光路光学系

4) 測色用光源の種類：標準の光 D₆₅ [光源の種類を変更できる]

5) 等色関数の種類：種類 a) 2° 視野条件 [10° 視野条件に変更できる]

6) 重価係数の種類：種類 c) 10nm 等間隔波長方法

7) 色表示の種類：反射率 R_λ、XYZ、L*a*b*、ΔE*_{ab}

1.7.6 色差の表示方法

(1) 物理量と心理量の相関関係

色は目で見て感じるものであるから、それによって受ける感覚の強さは心理量である。また、光の強さや反射率、あるいは、色材の目方や染料の濃度といった計量値は物理量である。感覚を起こす原因となっているものを心理学用語で刺激というが、一般に、刺激の計量値は物理量の場合が多い。感覚の変化の様相や感じ方の強弱を量的に表現するためには、感覚の変化に対応する物理的変化の量との相関関係を調べて、感覚量の尺度を作ることがある。

物理量と心理量との対応を表したものに、フェヒナーの法則というのがある。刺激の強さと感覚の強さについての法則で、ウェーバーの法則から導き出されたもので、感覚の強さは刺激の強さの対数に比例する、あるいは、刺激が等比級数的に変化すると感覚は等差的に変化するというものである。

ウェーバーの法則では、例えば、重さを感じる時、最初の重さを R とし、重くなったと感じるために必要な最小の増加を ΔR とすると、 $\Delta R/R=K$ （一定）という関係があるという。したがって、感覚の変化量を dE とすれば、

$$dE = dR/R$$

これを積分して次の式を得る。

$$E = k \log_e R$$

この法則をウェーバー＝フェヒナーの法則という。必ずしもこの法則のとおりにはならないが、近似的な予測式としてよく使用される。

(2) CIE-UCS の表色方法

物体の色がどんな色であるかを絶対番地的に決めることも重要であるが、色彩を計測管理する場合は、試料色が目標色に合致しているのか、目標色に対してどう違うのかなど、相対関係を知りたいことが多い。三刺激値 XYZ は色を空間座標で表示しているのだから、目標色と試料色との差（色差）はそれぞれの色座標間の距離で数量的に表すことができる。しかし、その幾何学的距離（計測量）と色差の見え（感覚量）との間に相応の相関がないと実用性に乏しくなる。事実、CIE 表色系は色差の管理に向かない。CIE では種々の均等知覚色空間（UCS）や色差公式の検討をした結果、1975 年のロンドンで行われた CIE 大会で 2 種類の UCS と色差公式を採択し、翌年 CIE 勧告として公表した。これを受けて、ISO（国際標準化機構）をはじめ各国の規格の見直しがなされた。わが国でも 1978 年に JIS が見直されたが、工業界の事情を考慮して、CIE 勧告の他に旧規格の色差表示の方法も併記された。現在市販の標準的な測色器械はこれらに対応している。なお、通常の色管理には $L^*a^*b^*$ 表色系が使われる。

1.7.7 測色データの活用

色彩管理のなかで、測色器械を用いて製品の色を計量し、色差を管理する方法が普及している。例えば、XYZ や $L^*a^*b^*$ のように三つの数値を組にして一つの色を表示するようになっている。つまり、色の表示値は三次元の座標系（色空間）の位置を表しているのである。また、目標色（target color）と試料色（sample color）との色の差の計量値は、この座標上の 2 点間の幾何学的距離を計算して、色差 ΔE^* で表示することになっている。普通、この色差値を使って、製品の色差管理を行うのが一般的な方法となっている。

試料色が目標色と一致しているかどうかを色差値で調べて、その違いの程度によって色の合否だけを判断する色差管理の場合はよいが、それだけでは測色したデータを十分に活用しているとはいえない。例えば、製造工程においては目標色に対して試料色がどのように違っているのかを目で見た感じ方（色相差・明度差・彩度差）と対応させた情報として知りたい場合も多いし、また、調色工程における色修正の手立てやロット管理を行う上での色材の「ききぐあい」をチェックしたい場合もある。そこで、色彩管理に活用される測色応用の事例をいくつか紹介しよう。

(1) 偏色判定

調色作業は、目標色とその許容差が決まっていれば、作ろうとしている色をその範囲に誘導することによって完了する。しかし、目標色と試料色とを較べて「色差が大きい」ならば、色を修正しなければならない。そのためには、試料色が目標色からどのように偏っているのかを正確に判断する必要がある。このように、色対の色の偏りを判断する行為を偏色判定という。

誰でもが、色を色相、明るさ、鮮やかさの三属性の成分に分解して感じとれるのだから、この感覚を利用し

て偏色の判断をするのが便利である。感覚的に三属性の成分差を判断するためには、ある程度の訓練をする必要があるけれども、短期間ですぐできるようになる。また、測色値はこの感覚と対応がとれているので、偏色判定を測色器械に肩代わりさせて作業の能率化を図ることができる。このように測色データを使って、試料の色を目標の色へ誘導していく調色方法を偏色判定方法という。

(2) メタメリズムの評価

1 枚の色紙を半分に切って、これを並べて見比べると同じ色に見える。当然、使われている色材も同じである。また、ある色と等しく見える色を、別の種類の色材を混色して作ることもできる。例えば、だいたい（橙）色は黄と赤の混色でできるし、緑は黄と青で作ることもできる。前者のような色対をアイソメリズム（isomerism）、後者のような色対をメタメリズム（metamerism）という。アイソメリズムの関係にある色対は分光反射率が同質なので、どんな照明の下で見ても同じ色に見える。メタメリズムの関係にある色対は特定の照明の下では視覚的に等しく見えても、分光反射率が異なっているため、別の照明の下では違った色に見えることがある。

一般に、調色の比色作業は北空昼光や標準照明装置の下で行われるが、目標色が大体の色を指示するための色見本であったり、初めて作る色の見本であるときは、この比色作業で合否判定をしていても問題はないだろう。しかし、目標色が部品を代表する見本であったり、過去に調色したことがあるロットを代表する見本であったりするときには注意が必要である。それは、ユーザー側で部品同士を組み合わせたり、ロットの違う製品同士を組み合わせで見比べられることが多いので、メタメリズムが顕著であると色違いクレームの対象になることがあるからである。

その対策として、標準の照明下で比色するとともに、もう一つ別の照明下で比色を行って、両照明下で色差が小さいことを確認しておくといよい。例えば、北空昼光の下で調色し検査する。さらに、電灯光の下で検査する。両照明の下で、目標色と試料色とに色差が少なければ、メタメリズムの程度も少ないと判断するのである。

目標色と試験色との間でメタメリズムがどの程度発生するかを定量的に予測できれば、調色作業や色検査作業をする上で都合がよい。

メタメリズムの評価方法はに制定されている。その方法の概略は次のとおりである。

[メタメリズムの評価方法]

- (1) 目標色と試料色を準備する。
- (2) 基準照明光に標準の光 D65 を用いて測色する。
- (3) 試験照明光に標準の光 A を用いて測色する。
- (4) 目標色のそれぞれの照明光における三刺激値から補正係数を計算し、試料色の試験照明光での三刺激値を補正する。
- (5) 試験照明光での、目標色の三刺激値と補正した試料色の三刺激値を $L^*a^*b^*$ に変換して、色差 ΔE を計算する。
- (6) その値を条件等色指数といい、M で表す。
- (7) 条件等色指数 M は次のように表示する。

例 1 : $M_{10}(D_{65}:A) = 5.2$

例 2 : $M(D_{65}:A, F6) = (4.3, 3.8)$

条件等色指数の意味は、例 1 の場合では、目標色と試料色とを 10 度視野条件で標準の光の下 D_{65} で完全に色差を 0 に合せたととしても、標準の光 A の下では色差が 5.2 程度発生するかもしれないという意味の推定値で

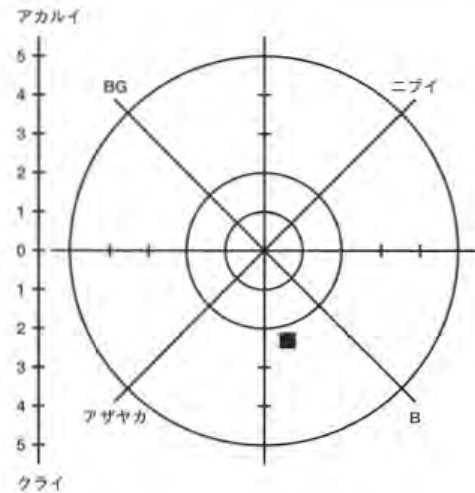


図 1-7-3 偏色判定図の例（緑みの青の場合）

ある。

なお、試料照明光は標準の光 A のほかに、一般形白色蛍光ランプ (F6)、演色改善形昼白色蛍光ランプ (F8)、三波長形蛍光ランプ (F10) などを用いることもある。詳しくは JIS Z 8719 (条件等式指数－照明光条件等色度の評価方法) を参照されたい。

(3) 蛍光色・白さの評価

紙などの白さを評価する方法に、例えば、ハンター白色度などがある。白さの評価には心理的意義を主体にした方法と、物理的意義を主体にした方法とがある。

一般に、「白さ」の表現は心理的評価尺度の用語として使われることが多いが、その中には「好ましい白さ」の評価要素が含まれているので、素材の種類によって「白さ」の評価が異なるのが自然である。例えば、布地の白さと紙の白さを同列に評価できないし、歯の白さや肌の白さは測色学的な白さではない。また、「好ましい白さ」は時代により変遷するのかもしれない。

物理的な評価では光の反射率が高いものほど「白い」として、規定照明における理想的白からの色差の大小で比較する方法で、例えば、次の式で表される。

$$W = 100 - \Delta E^*_{ab}$$

「白色度」の評価方法には物理的な評価と、心理的な評価の両者の意味を勘案して作られたものも多い。例えば、単色光 $457.0 \pm 0.5\text{nm}$ の波長を採り、その波長における反射率を測定して白色度とする方法や、次式による方法などがある。

$$W = 4B - 3Y$$

ここで、 $B=kZ$ で、 Y 、 Z は三刺激値である。なお、 k は定数で、標準の光 C を用いるときは 0.847 を、キセノン標準白色光源を用いるときは 0.935 とする。

白色度を評価するに当たり、どのような方法を用いるかは受渡当事者間で定めるべきものであるが、評価する目的とデータの意味をよく理解して使うことが大切である。特に、紙や布地の白さの評価の問題の中には蛍光を含む場合と含まない場合とがあり、両者を同一視して刊面することは難しいので注意を要する。周知のとおり、蛍光色は短波長光を吸収して長波長光で反射する性質があるから、分光した光を照明してその光の反射光を計測しても蛍光の性質を捉えることはできない。蛍光の性質を捉えるためには紫外域を含む標準光を照明し、蛍光物体から反射された光を分光して計測する必要がある。また、蛍光を含む色と含まない色とを比較する場合の評価方法の例を次に挙げる。

$$W = 100 - [(100 - W^*)^2 + (U^* - U^*_p)^2 + (V^* - V^*_p)^2]^{1/2}$$

ここで、 U^* 、 V^* 、 W^* は CIE(1967)UCS で

$$U^*_p = -5.59$$

$$V^*_p = -16.12 \text{ である。}$$

なお、蛍光色の測定方法や白色度の評価方法は JIS 化されているが、実用については今後に期するところも大きい。

1.7.8 材質感

同じに見える色でも、表面がなめらかでつやがある場合と表面がざらざらしてつやがない場合とでは、それらから受ける印象はまるで違ってくる。私たちは見ることによって、それが金属である、石材である、木材である、プラスチックである、皮革である、布地である、紙である、というようにその材質を認知することができる。このように、物体の材質の差異を区別できる感覚を起こす物体表面の特性要因を材質感という。

私たちはさらに細かく、例えば布地で、ウール、シルク、コットン、化繊 ... などとそれぞれの材料固有の質的な差異を感知できるし、糸の撚り方や布の織り方によって、布地の風合いの差異を感知することもできる。

形、色、材質 (テクスチャ) の三つをデザインの三要素という。形 (シルエット)、色 (カラー) と同様に、

こうしたさまざまな材質は自動車、アパレル、インテリアなどの超高度なデザインが要求される産業の製品には欠かせない造形要素であり、品質構成要素でもある。当然、その種類や水準が色彩管理の対象となるのである。

1.7.9 金色と銀色

JIS 色名の慣用色名に金色、銀色が載っているが、不思議なことに、三属性記号が付されていない。つまり、マンセル記号で表示すると別の色と混同してしまい、表示できないのである。その理由はメタリック感という質感を伴っている色だからである。

塗料用語で、普通のエナメルで仕上げた色をソリッドカラーといい、このエナメルにアルミニウムの微粉末の適量を加えて金属感を加味した仕上げ色をメタリックカラーという。例えば、やや明るめの灰色に金属感を加味すると、表面の色はにぶい銀色に見える。これにつや感を付加すると、磨き上げられた銀色の質感が得られる。また、やや赤みの黄色に金属感を加味すると、にぶい金色に見える。これにつや感を付加すると、磨き上げられた金色の質感が得られる。アルミ粉の代わりに雲母（マイカ）、真珠（パール）などの微粉末を混ぜた仕上り面は、金属感とはちょっと違った新しい質感をもつ、おもしろい表面仕上りになる。

ところで、物質が金属か非金属かの違いによって、光の物理的反射の特性に差異ができるので、見かけ上の金色は得られでも「金の色」とは微妙に違ってくる。以上述べたことから、まだまだ多くの分析と検討を重ねていく必要があることがわかる。

1.7.10 カラーアピアランス

色が呈示条件や材質などの差によって、変化して見える主観的な色の現れ方をカラーアピアランス（color appearance）という。つまり、「色の見え」のことである。

色の本質は、見ることによって知覚され認知された心理的現象であるから、色彩管理の対象は、本来、このカラーアピアランスをマネージメントすることにほかならない。しかし芸術の分野、例えば絵画の本質は、作者の訴えたい精神を具体的な絵画で表現して、見る人に感動を与えることであるが、その表現はキャンバスに絵の具を塗布し、絵の具がかもした表情をコントロールしながら作品を完成させることにある。

同じように、色彩管理の実践は、製品の見えの原因になる外観の表面構成要素をコントロールすることによって、製品のカラーアピアランスがより高度に、有効に機能するように完成させていく管理行為である。つまり、管理対象物の物理的要因をコントロールすることによって、対象物の心理的効果をより高度に、より高級な価値へとグレードアップしていく技術的なマネージメント行為の総称である。

したがって、カラーアピアランスをコントロールする対象要素は、色の三属性のほかに、つや感や材質感に關係する物理的な諸要因を探し出して、これらを言量化し、改善していく工夫と行為が大切である。そのためには、対象物が光に対してどのような反射や透過などの挙動を示すのかを知るために、光の空間分布（配光特性）を計測し、主要因のデータ化を図っていく必要がある。

例えば、反射光の空間分布から、

(1) 拡散反射光成分（7-13 参照）を計測することで色の評価を

(2) 正反射光成分を計測することで光沢感の評価を

(3) 特定角の拡散反射光成分を計測することでメタリック感の評価を

していくような計測・検査管理体制は、工夫された将来の色彩管理手法の一つであろう。

1.7.11 光沢の評価

材質や表面構造などによって生じる、物体表面の視覚属性を材質感（テクスチャー）といっている。材質感をかもしだす主な視覚的要素は、物体を見たときのつや感、凹凸感、透明感、深み感、厚み感、金属感、しば模様…などがあげられる。これらの材質感要素は、測色上で扱う色の視覚属性と異なるけれども、色彩計画や色彩管理を遂行する上での重要な対象属性である。そこで、このような色と材質感との関わり合いの評価の

方法について考えてみる。

1) 光沢

JIS の用語によると、光沢は「反射光の空間分布によって生じる、物体表面に関する視知覚の属性」で、正反射光成分の大小や、反射光の配光曲線の先鋭さなどに関係すると説明されている。

光沢はその見え方によって、ダイヤモンド光沢、真珠光沢、樹脂光沢、絹糸光沢、金属光沢などのように質感の差を表現するのに使われることもあるし、つやがある、半つやである、つやがにぶい、つやがないなどのように光沢のつきぐあいの程度の差を表すこともある。

一般に、つやとか光沢感という用語は心理的な要素を含めた概念を表すのに用いられ、光沢という用語は物体表面が光を正反射することによって生じる視覚属性を表すときに使われている。前者を主観的光沢、後者を客観的光沢ということもある。つまり、光沢にも質と量があり、その両面から評価する必要があるということである。

光沢度は物体表面の正反射光の強さや表面に映る像の鮮明さなどを一次元的な数値で表すことによって光沢の程度を表現しようとする方法である。その表現方法は、物体表面が光を反射する性質をどのように捉えるか、その方法によって、次のように分類している。

- (1) 変角光度分布 (goniophotometric distribution)
- (2) 鏡面光沢度 (specular gloss)
- (3) 対比光沢度 (contrast gloss)
- (4) 鮮明度光沢度 (distinctness of image gloss)

2) 変角光度分布 (配光特性)

図 1-7-4 のように、光源の位置と試料面に対する入射角を固定し、入射点を中心にして入射面内で受光器を回転させながら、それぞれの受光角における反射光の強さを計測して、受光器の回転角と受光量の関係を空間分布で表したものを変角光度分布という。変角光度分布の表し方には部分反射光束と、面輝度による表示方法とがある。

①部分反射光束による表示

入射した光束について、試料面 S から反射した光を全て受けるようにしたとき、受光に有効な試料の面積は $S \cos \theta'$ となるので、反射光の強度 $I_{\theta'}$ は次の式で表せる。

$$I_{\theta'} = I_0 R \cos \theta'$$

例えば、完全拡散面の変角光度分布を部分反射光束で表すと図 1-7-5 のようになる。

②面輝度による表示

一定の角度で試料面の広い部分を照明し、その反射光について一定の絞りを通して受光すると、試料の面輝度を測定することができる。そのときの反射強度 $I_{\theta'}$ は次

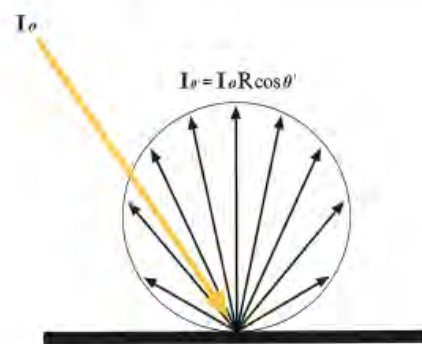


図 1-7-4 偏角光度分布測定概念図

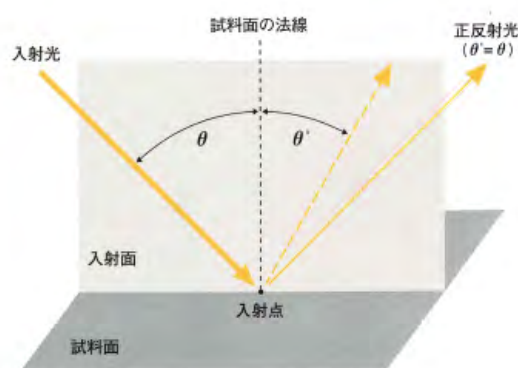


図 1-7-5 部分反射光束による表示

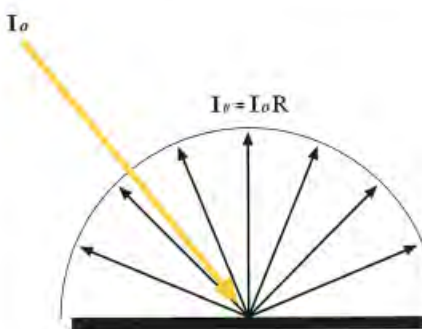


図 1-7-6 面輝度による表示

の式で表せる。

$$I_{\theta'} = I_0 R$$

例えば、完全拡散面の変角光度分布を面輝度で表すと図 1-7-6 のようになる。

3) 鏡面光沢度

①鏡面光沢度の測定原理

規定された入射角 θ に対して、試料面からの鏡面反射光束を ϕ_s 測定する。ただし、同一条件における屈折率 $n=1.567$ のガラス表面の鏡面反射光束 ϕ_{0s} を基準として、その比で表す。

$$G_s(\theta) = (\phi_s / \phi_{0s}) \times 100(\%)$$

②鏡面光沢度の使い分け

鏡面光沢度は測定する対象により、次のように使い分ける。

- (1) 85 度鏡面光沢度 [Gs(85)]：紙、繊維維などあまり光沢のない対象に適用。
- (2) 75 度鏡面光沢度 [Gs(75)]：ほぼ上記に同じ。
- (3) 60 度鏡面光沢度 [Gs(60)]：塗装面、タイル、珪瑯など光沢範囲の広い範囲を測定する場合など一般的対象物に適用。
- (4) 45 度鏡面光沢度 [Gs(45)]：ほぼ上記に同じ。
- (5) 20 度鏡面光沢度 [Gs(20)]：比較的光沢度の高い塗装面や金属面同士の比較などに適用。

通常の評価には 60 度鏡面光沢度で測定するが、その値が 70% を超えるような対象物同士を比較するときには 20 度鏡面光沢度を利用し、また、10% を超えないような対象物同士を比較するときには、75 度鏡面光沢度や 85 度鏡面光沢度を利用して光沢の評価をすると、光沢度の差異が強調されて仕分けやすくなる利点がある。しかし、入射角の異なる鏡面光沢度の値を比べても物理的な意味をなさない。

4) 鮮明度光沢度

試料の表面に標準図形を映し、その反射像を目視によって観測して、像の鮮明性を限度スケールと比較判断する。そして、スケールの表示によってその表面の光沢度を評価しようという方法である。画像の映りぐあいで判定するので、なめらかで比較的高光沢度の表面検査に利用される。図 1-7-8 には鮮明度光沢度の概念図と測定器の事例を示す。

※ここでは、紙面の都合で対比光沢度は割愛する。

1.7.12 メタリック感の評価

金色や銀色に見られるように、仕上り表面に金属感を

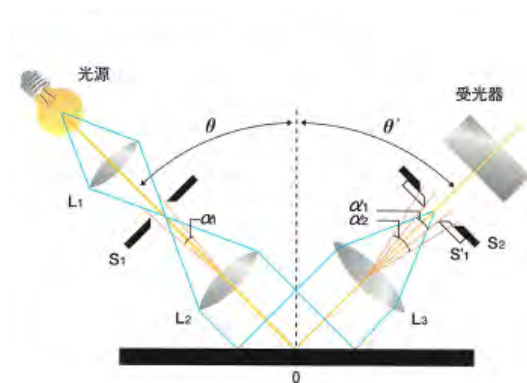


図 1-7-7 鏡面光沢度測定器の概念図

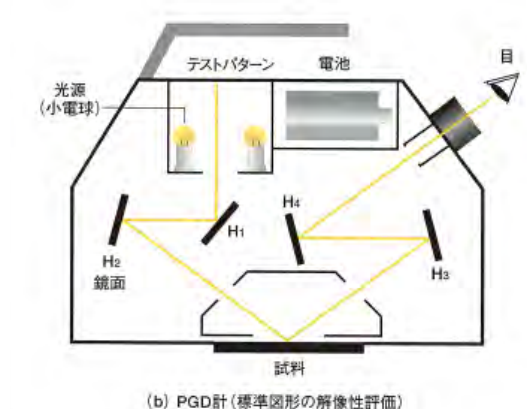
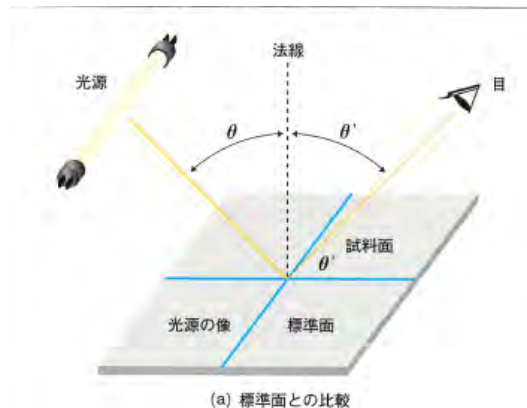


図 1-7-8 鮮明度光沢度の概念と測定器の事例

もっている製品がある。メッキを施した表面、アルマイト加工したアルミ表面、アルミ粉を混ぜて塗装した塗面などである。これらの表面の仕上り外観を管理するとき、通常の測色条件における色の測定・評価だけでは充分でない場合がある。そのような場合、これらの試料面の変角光度分布を調べてみると金属感のない材料の表面と著しい違いが見られる。

[変角光度分布測定の事例]

図 1-7-9 は、金属感のないソリッドグレーとアルミ粉を混ぜて塗装したメタリックシルバーの変角光度分布を測定した結果である。入射角を 45 度に固定し、受光角 θ' を -70 度から +70 度まで変化させて、それぞれの受光角における反射光量を測定した結果である。0 度受光（真上観察に相当）の場合にはソリッドグレーとメタリックシルバーは大差がないという測定結果であるが、受光角を - 側にするとメタリックシルバーの明るさはソリッドグレーに比べ著しく小さくなり暗くなる。+ 側にするとメタリックシルバーの明るさはソリッドグレーに比べて著しく大きくなり、明るい方に変化していることがわかる。つまり、メタリック感をもつものは、観察する方向のわずかな角度の差によって双方の明るさが逆転するくらい著しく変化する性質があることがわかる。

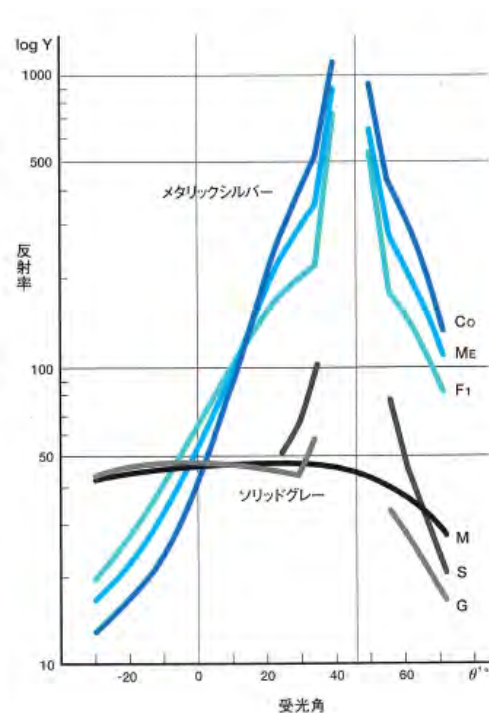


図 1-7-9 変角光度分布の様子

1.7.13 色と空間光度分布

一般に色は色材層内からの拡散反射光によって生じる視覚属性であり、光沢は表面からの正反射光や散乱光によって生じる視覚属性であると説明されている。染料、顔料、塗料、インキ、プラスチックなどの非金属材料で構成されている物体表面では、表面に入射した光の一部が色材層の界面を通過して層内に入り、層内で吸収されたり散乱されたりしながら、再び、色材層の界面に至り、層外へ出ていく。その光の一部が目に入って色の感覚を生じる。

また、色材層固有の屈折率により、入射した光の一部は界面で正反射され、その光が目に入って光沢感を生じさせる。前者の反射光は色材層内で選択吸収された拡散反射光成分（有色）であり、後者の反射光は照明光源固有の光質をもった正反射光成分（白色）である。

金属感をもつ表面では、図 1-7-9 の変角光度分布の様子や、図 1-7-10 の光学メカニズムからわかるように、色をかもしだす拡散反射光成分と、光沢をかもしだす正反射光成分とがあり、その他に、正反射角の方向に広がりをもった拡散反射光成分、つまり、方向性をもった拡散反射光成分とがあると解釈できる。それらの光学的メカニズムは図 1-7-11 のように表すことができる。

したがって、メタリック感をもつ表面色の計測管理を行うには、測色の規定条件における測定値（拡散反射光）と光沢の規定条件における測定値（正反射光）のほかに特定角度における方向性拡散反射光の強度を捕らえておかねばならないと考えている。例えば、45 度照明条件で

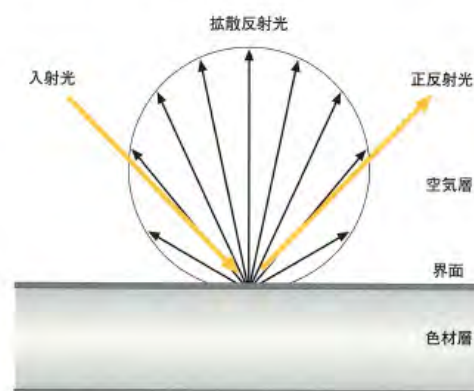


図 1-7-10 色材層の光学メカニズム

デジタルの色彩＜基礎編＞

は、0 度受光で色を、45 度受光で光沢を、20 度受光でメタリック感を、のように評価するのである。

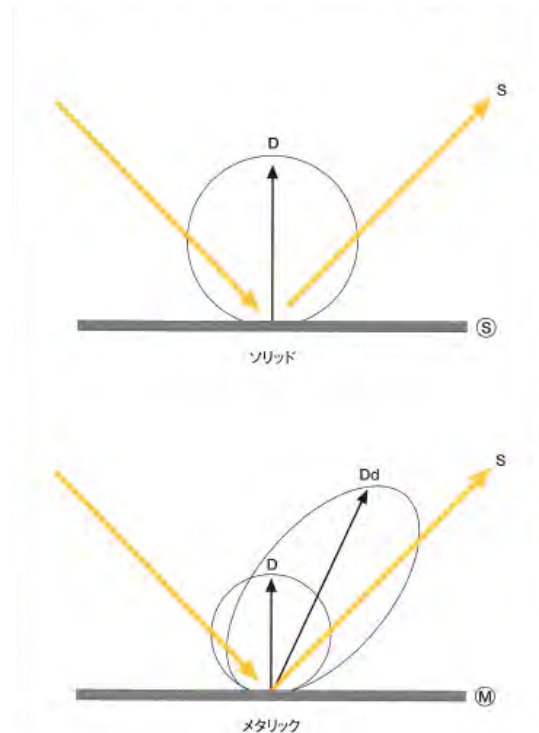


図 1-7-11 ソリッドカラーとメタリックカラーの変角光度分布の差

2 章 デジタルの色彩

2.1 はじめに

デジタル技術の発展により、私たちをとりまくウェブサイト、アプリ、広告、そして身の回りのあらゆる製品にはデジタルによる色彩表現が溢れ、今後さらに進化し、多様化すると考えられる。

このように発展する色彩のデジタル表現を活用できるようにするため、ここではコンピュータにおける色彩の扱い方や表現方法について、その基礎を学習する。

2.2 コンピュータ環境における色表現

コンピュータ上で色を表現する色空間（カラースペース）はいくつかあるが、代表的なものとして RGB 色空間、CMYK 色空間、HSB 色空間などがある。それぞれの色空間の特徴や用途を理解し、使い分けの必要がある。

2.2.1 RGB 色空間

RGB は一般に、Web デザインやディスプレイ上で表示する作品など、画面上に表示する色を指定するのに用いられる方法で、色光の三原色 R=Red（赤）、G=Green（緑）、B=Blue（青）のそれぞれの量を数値で表す方法である。この RGB は、光を重ね合わせて色を作る加法混色の原理に基づいた色空間の一つである。RGB 全ての値が最小値であれば黒、全てが最大値であれば理論上は純粋な白となり、全ての色は RGB の組み合わせで表現することになる。

現在一般的に用いられている JPEG や PNG などのフルカラー画像の場合、RGB それぞれ 0 ～ 255 の 256 段階の色が指定できる（256 の 3 乗）。RGB の指定には 0 ～ 255 の整数値、#00 ～ #FF の 16 進数、0 ～ 100% の割合などが用いられる。

RGB で表現された色は、表示デバイスによって見え方が変わる場合がある。これは、各デバイスのディスプレイが異なる色域を持っているためである。一般的に Web デザインなどで使用される RGB は、sRGB と呼ばれる色空間である。sRGB は、一般的なディスプレイで再現できる色域を定義したものである。

2.2.2 CMYK 色空間

CMYK は、コンピュータによる出版物の編集（Desktop Publishing: DTP）をはじめ、印刷全般で広く使用される色指定方法である。色料の三原色であるシアン（C）、マゼンタ（M）、イエロー（Y）、および黒（K）の 4 色の配合比率をそれぞれ 0% ～ 100% の範囲で変化させることで、さまざまな色を表現する。

CMY は減法混色の三原色なので、理論的には CMY3 色を 100% 混ぜ合わせれば完全な黒色になるはずだが、現実のインクでは完全な黒色にはならない。そのため、より深い黒色や、より鮮やかな色を表現するために、K（Key plate）が加えられている。CMYK の色域は RGB の色域よりも狭いため、RGB で作成された画像を CMYK に変換する際には、色の変化に注意が必要である。

2.2.3 HSV（HSB）色空間と HSL 色空間

HSV（Hue・Saturation・Value）と HSB（Hue・Saturation・Brightness）は、ほぼ同じ意味で用いられる色空間である。RGB が光の三原色である赤、緑、青の量を直接指定するのに対し、HSV（HSB）や HSL は、人間が色を認識する際に重要な 3 つの要素である色相、彩度、明度（または輝度）を用いて、より直感的な色指定を可能にしている。

色相（Hue）：色の種類を表し、HSV（HSB）と HLS とともに 0° から 360° までの範囲で表される。赤・緑・青（RGB）とシアン・マゼンタ・イエロー（CMY）を色相順に 60° ずつ等間隔で配置するので、0°（赤）、60°（イエロー）、120°（緑）、180°（シアン）、240°（青）、300°（マゼンタ）となる。

彩度（Saturation）：色の鮮やかさを表し、0% が無彩色（灰色）、100% が最も鮮やかな色（純色）に対応する。

明度 (Value / Brightness) / 輝度 (Lightness) : 色の明るさを表わしている。HSV/HSB では、0 が黒、100 が最も明るい色 (純色) に対応し、HLS では、0 が黒、50 が最も彩度の高い色、100 が白に対応する。

HSV は、光源色を表現するのに適しており、HLS は物体色を表現するのに適している。しかし、どちらの色空間でも、ある程度の柔軟性を持って色を表現することができる。

2.2.4 Lab 色空間

一部のソフトウェアには Lab 色空間を扱えるものがある。Lab 色空間は、人間の視覚系をより忠実に再現することを目指した色空間で、RGB や CMYK といったデバイス依存の色空間に比べ、デバイスに左右されないという特徴がある。

L: Lightness の略で、明度を表す。白が 100、黒が 0 となり、数値が大きくなるほど明るくなる。

a: Red-Green 軸を表し、正の値は赤みの度合い、負の値は緑みの度合いを示す。

b: Yellow-Blue 軸を表し、正の値は黄みの度合い、負の値は青みの度合いを示す。

高度な画像処理を行ったり、正確な色補正や色調整、異なるデバイス間での色の一貫性を保つ必要がある場合には、特に有効なカラースペースである。

2.3 コンピュータ環境における色再現領域

使用する色空間やデバイスディスプレイ、プリンター、カメラなどによって、再現できる色の範囲は異なっている。この再現できる色の範囲を特に「ガモット」と呼ぶ。ガモットは、色空間が定義する色の表現方法の中で、実際に表現可能な色の範囲を示している。

コンピュータ環境において、色空間ごとのガモットの範囲を理解することは非常に重要である。なぜなら、ガモットの違いが、異なるデバイス間で色が異なって見える原因となるからである。デザインの意図を正確に表現するため、印刷物とディスプレイ上の画像の色を一致させるため、そしてさまざまなデバイスで見たときに同じ色に見えるようにするためには、色空間とガモットに関する知識が不可欠である。

2.3.1 sRGB 色空間

sRGB (エスアールジービー) は、モニター、プリンター、および World Wide Web で使用されることを目的として開発された標準の RGB 色空間である。さまざまなデバイス間で色彩を統一し、Web 上での画像表示を標準化するために、ヒューレット・パッカードとマイクロソフトによって 1996 年に共同で作成され、その後、国際電気標準会議 (IEC) によって IEC 61966-2-1:1999 として標準化された国際標準規格となった。

sRGB は、一般的なディスプレイやプリンターで正確に色が表現できるように設計されているため、汎用性が高いという特徴がある。しかし、Adobe RGB など、より広い色域をカバーする色空間と比較すると、表現できる色の範囲が狭く、特に鮮やかな色に関しては、若干表現力が劣る場合がある。

2.3.2 Adobe RGB 色空間

Adobe RGB は、1998 年に Adobe Systems が開発した、sRGB よりも広い色域をカバーする色空間

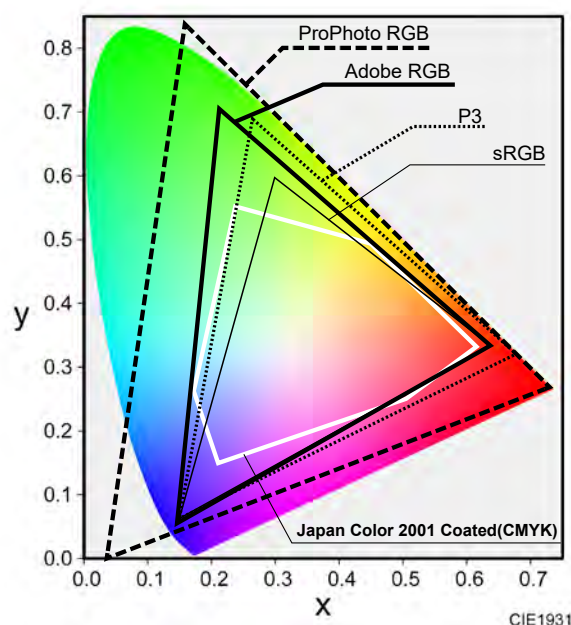


図 2-3-1 各種色空間のガモット

である。特に、印刷業界やデジタルカメラの画像データの保存など、より広範囲な色を必要とする場合に適している。Adobe RGB は、sRGB に比べて緑色や青色の表現に優れており、自然な風景写真や、鮮やかな色彩のグラフィックデザインなど、より高品質な画像表現を可能にしている。

しかし、すべてのデバイスが Adobe RGB の全範囲を正確に再現できるわけではない。一般的なディスプレイでは、Adobe RGB の広範囲な色を正確に表示できないことがある。そのため、Adobe RGB で制作した画像を一般的なディスプレイで確認する場合は、色が正確に表示されない可能性がある点に注意が必要である。

2.3.3 Display-P3 色空間

Apple が導入した Display P3 は、映画産業 HDR（高ダイナミックレンジ）向けに開発された DCI-P3 をベースに、スマートフォンやタブレットなどのディスプレイに最適化された色空間である。DCI-P3 よりも色域が広く、特に緑色と赤色の表現に優れており、より鮮やかで自然な色を表現できる。sRGB と比較して、色域は約 25% 広くなるとされている。

2.3.4 ProPhoto RGB 色空間

Kodak が開発した ProPhoto RGB は、人間の目が理論上認識できる色域をほぼカバーする、非常に広色域なカラー空間である。デジタルカメラの RAW データや高品質な画像編集ソフトウェアなどで広くサポートされており、高度な写真編集やアーカイブ、デジタルシネマなど、非常に高い色精度が要求される分野で利用されている。

ただし、ProPhoto RGB の広大な色域を完全に再現できるディスプレイや印刷機は限られており、一般的なデバイスでは、一部の色が正確に表示されない場合がある。

2.3.5 入出力装置の色再現領域

また、色空間だけではなく入出力装置により、色再現領域は異なってくる。

●ディスプレイモニター

一般的なモニターでは sRGB が基本だが、色の再現領域はあまり広くはない。

高性能モニターには、Adobe RGB や Display-P3 をサポートするものもあり、写真編集や映像制作などに使用される。また、HDR ディスプレイは高輝度で広色域なディスプレイで、よりリアルな映像表現が可能だが、対応コンテンツが限られている。

●プリンター

プリンターは基本は CMYK（シアン・マゼンタ・イエロー・ブラック）インクを使うため、RGB とはガモットが異なり、RGB が再現できる一部の色が印刷では再現できない場合がある。インクジェットプリンターには CMYK 以外のインク（ライトシアン、ライトマゼンタ、フォトブラックなど）を加えることで、色域を広くしているものもある。

●デジタルカメラ

デジタルカメラは、sRGB や Adobe RGB で記録できるが、一眼レフタイプのデジタルカメラにはカメラセンサーが捉えた生の画像データで、最も広い色域を持つデータ形式（RAW データ）で保存できるものもある。

2.4 カラーマネージメントシステム

DTP 作業や画像処理の過程において、ディスプレイ上で設計している色と、印刷などで出力される色は一致して見える必要があるが、実際には作業空間の変化、ディスプレイの特性、出力機の特性などの違いによって、完全に一致させることは難しい。この問題を解決するため、カラーマネージメント（色彩管理）が行われる。

2.4.1 カラーマネージメントとは

カラーマネージメントとは、デジタル画像処理において、さまざまな機器（カメラ・モニター・プリンターなど）で色を正確に再現するために、共通の色基準に沿って統一して運用することである。これを実現するためのシステムがカラーマネージメントシステム（CMS: Color Management System）である。

デジタルカメラやスキャナといった入力装置、ディスプレイやプリンタなどの出力装置は、機器ごとに色特性や再現できる色の範囲が異なっている。そのため同一の画像データを扱っていても、それぞれの機器によって再現される色が異なってくるので、完全に一致させることはできない。

しかし、カラーマネージメントシステムでは、それぞれ異なっている機器の色（デバイス依存色）を一旦機器に依存しない $L^*a^*b^*$ などのカラー空間内に変換し（デバイス独立色）、他の機器で利用する場合は、その機器に応じたカラー空間に変換して、それぞれに色をなるべく忠実に再現することが、カラーマネージメントシステムの基本的な考え方である。このカラー空間の変換に必要となるのが ICC プロファイルである。

2.4.2 ICC プロファイル

ICC プロファイルとは、ICC（International Color Consortium）が定義した書式に基づいたデバイスプロファイルで、デバイス（モニター、プリンター、スキャナーなど）が持つ色の再現特性を数値化し、ファイルにまとめたものである。

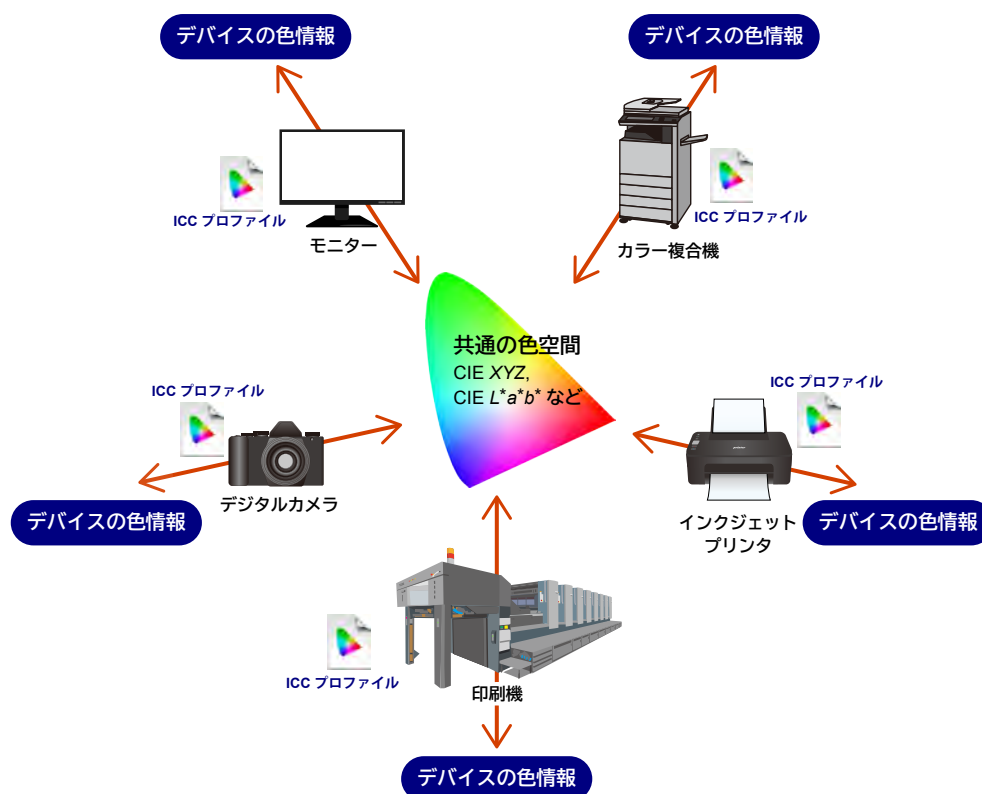


図 2-4-1 カラーマネージメントシステムの概略図

これにより、異なるデバイス間で色情報をやり取りする際に、それぞれのプロファイルを参照し、色を正確に変換したり、再現できない色を可能な範囲内で最も近い色に変換したりすることができる。

2.4.3 モニターの色温度

コンピュータで画像や動画を扱う際に、正確な色を再現するためにカラーマネジメントが非常に重要である。その中でも、色温度^{*}の管理は正確な色再現に欠かせない要素の一つである。

色温度は、コンピュータの作業を行っている色空間によって推奨される色温度が異なっていたり、用途によって最適な値が異なってくる。

印刷などの出版物を扱う場合は、モニターや作業環境の色温度設定は 5000K にすることが、業界標準となっている。

Web デザインなどのデジタルコンテンツなど、ディスプレイ上で閲覧される場合、一般的なディスプレイの色温度に近く、Web 上で見た色と実際の表示が近くなるように 6500K に設定する。

色温度設定を行うことで、デバイス間の色彩の差を軽減し、印刷物とディスプレイ上の色のずれを少なくすることができる。しかし、色温度設定だけでは、すべての色のズレを解消することはできない。正確な色再現のためには、カラープロファイルの作成や、ディスプレイのキャリブレーションなど、より高度な設定が必要となる場合がある。

^{*} 色温度は、光源の色がどの程度白熱した金属の温度の色に近いかを表す指標で、ケルビン（K）で表され、数値が低いほど黄色みがかかり、高いほど青みがかて見える。

2.5 コンピュータにおける画像データ

2.5.1 アナログ画像とデジタル画像

アナログ画像とデジタル画像は異なった仕組みで画像を表現しており、それぞれの特徴や違いを理解しておく必要がある。

絵画やフィルム写真といったアナログ画像は、色や明暗が滑らかに連続的に変化する情報として表現されるので、粒状感がない非常に細かいディテールまで表現することができる。アナログ画像である絵画やフィルム写真などは複製や編集が難しく、物理的な媒体であるため、経年による劣化で褪色したりすることもある。

一方、コンピュータで表示されるデジタル画像は、ピクセル（画素）と呼ばれる小さな点の集合として表現され、各ピクセルに色や明暗の情報が割り当てられおり、画像全体が離散的な数値データとして構成されている。そのため、画像の精細さはピクセル数に依存することになり、ピクセルが多い（高解像度）ほど細かなディテールを保つことができる。デジタル画像は、複製や編集が容易で、デジタル媒体に保存することで、劣化せずに長期保存することが可能である。

近年ではデジタル技術の進歩により、デジタル画像の高画質化が進んできたため、アナログ画像とデジタ



図 2-5-1 アナログとデジタルのイメージ

ル画像の差異が小さくなっていると言える。

2.5.2 画像のデジタル化

絵画や写真といったアナログ形式の画像を、コンピュータ上で扱えるデジタルデータに変換するプロセスを「画像のデジタル化」という。このデジタル化は、画像の保存、加工、共有、さらには新たな技術との連携において、数多くのメリットをもたらすと考えられる。

まず、デジタルデータは物理的な劣化を受けにくいため、長期間にわたって安定した保存が可能である。また、コンピュータを用いれば、画像のトリミング、色調調整、サイズ変更など、さまざまな加工が自由にできる。さらに、インターネットを通じて世界中の誰とでも画像を共有することが容易になり、情報伝達の幅が大きく広がる。近年では、画像認識技術の発展により、画像の内容を自動的に検索できるようになり、画像検索の精度が飛躍的に向上している。

しかし、デジタル化には注意すべき点も存在する。デジタル化の過程で、元の画像の細かな情報が失われ、画質が劣化する場合もある。特に、高画質な画像をデジタル化するほど、データ量が膨大になり、保存容量や処理能力を必要とする。また、デジタルデータは簡単に複製できるため、著作権の侵害に繋がりがやすいという問題も孕んでいる。

近年、デジタル化技術は目覚ましい発展を遂げ、より高画質で効率的なデジタル化が可能となっている。しかし、デジタル化のメリットと課題を理解し、適切な方法で画像をデジタル化することが重要である。

画像のデジタル化は大きく分けて、次のような標準化、量子化、符号化の3つのステップで行われる。

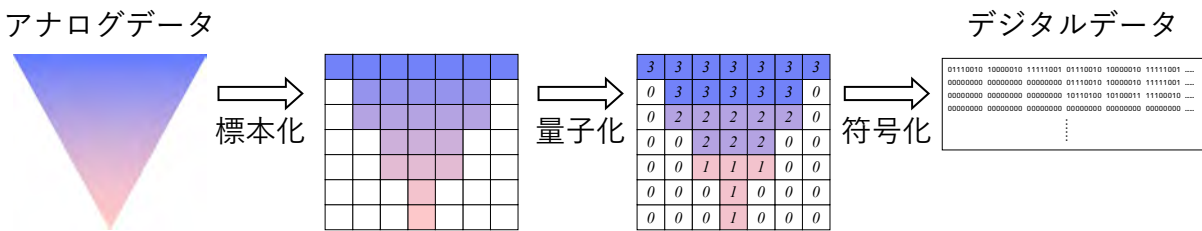


図 2-5-2 標準化・量子化・符号化

2.5.2.1 標準化

標準化は空間的に連続分布しているアナログ画像を、離散的な画素に分割し、各画素の輝度値をサンプリングするプロセスである。簡単に言えば、連続的な画像を一定間隔の画素（ピクセル）で表現することである。

細かく標準化するほど解像度は高くなり、細部まで表現できる。いっぽう、標準化が不足すると、線や曲線などに発生する階段状のギザギザであるジャギーが目立つようになり、モアレが発生したり、細部が潰れてしまったりするが、このような現象をエイリアシング (aliasing) という。

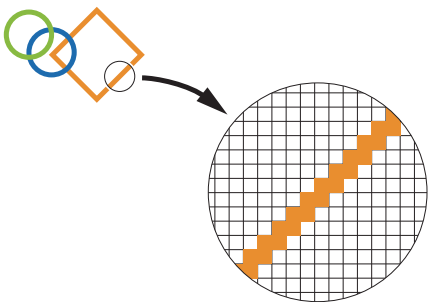


図 2-5-3 ジャギー

●画素 (pixel)

デジタル画像は、画像を縦・横それぞれ有限個の点の並びに分けて、その各点ごとの濃淡や色をデータの最小単位とする。この点を画素またはピクセル (pixel) と呼び、画像は画素が敷き詰められた平面と考えることができる。

モノクローム画像では、画素には明るさ（濃淡）の数値が、カラー画像の場合は RGB などのカラーに対応した数値が格納される。

デジタルの色彩＜基礎編＞

なお、画像の解像度は画像を構成するピクセル数を表し、水平方向のピクセル数×垂直方向のピクセル数で表される。

2.5.2.2 量子化

量子化は、各画素の輝度値を、あらかじめ定められた有限個のレベルに近似することである。簡単に言えば、各ピクセルの色をあらかじめ定められた色の中から選ぶことである。例えば、白黒画像であれば、白を「1」、黒を「0」といったように2段階（1ビット）に量子化する（2値画像ともいう）。カラー画像では、RGB（赤・緑・青）ごとに標本化と量子化が行われる。各色ごとに256レベル（8ビット）で量子化すると、16,777,216（256の3乗）レベルということになる。

量子化が不足すると、画像が荒く見えたり、本来はスムーズに移行する濃淡に段差が生じたり、ノイズが目立ったりする。

2.5.2.3 符号化

符号化は、量子化された各画素の値を、コンピュータで扱える形式のコード（0と1の2進数のビット列）に変換する過程である。

この段階で、後述するデータの圧縮などを行うことで、データ量を削減することもできる。

2.5.2.4 アンチエイリアシング

標本化の結果として生じてしまったエイリアシングを目立たなくするための処理のことをアンチエイリアシング（antialiasing）という。

図2-5-6のように、線が画素を斜めに横切るような場合、その線が画素に占める割合から、図と地の中間の明るさ、あるいは中間の色をその画素に割り当てる。

このようなアンチエイリアシングを適用することで、線や領域の境界部を滑らかに表示したり、低解像度であっても滑らかな画像を得ることができるが、画像の境界部分がぼやけて感じられることもある。

2.5.3 ラスタ画像とベクタ画像

デジタル画像は大きく2つのタイプに分類される。一つがラスタ画像、もう一つがベクタ画像である。どちらも画像データだが、その構成や特徴が大きく異なる。

ラスタ画像はビットマップ画像とも呼ばれ、画像を明るさの明暗や色のついた点（ピクセル）の集合として表現する。ピクセルの集まりは2次元配列として表現され、写真のような複雑な色やグラデーションを表現するのに適しているが、画像の拡大などを行うとピクセルが粗くなり、ジャギーなどが発生して画質が低下する。

ベクタ画像は、ピクセル単位ではなく、点と線（ベクトル）の情報をもとに図形を描き、その図形（オブジェクト）単位で色を指定する。ベクター画像は数式で形状が表現されているため、拡大・縮小といった変形を行っ

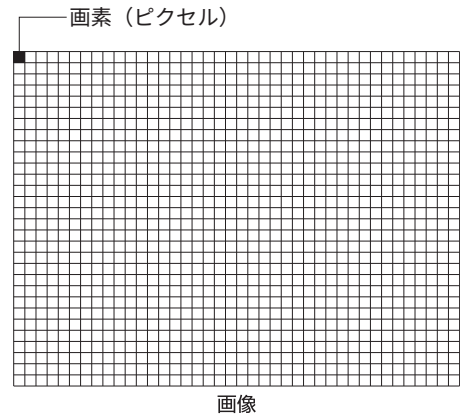


図 2-5-4 画素（ピクセル）



図 2-5-5 量子化の不足
空の色がスムーズに移行しない

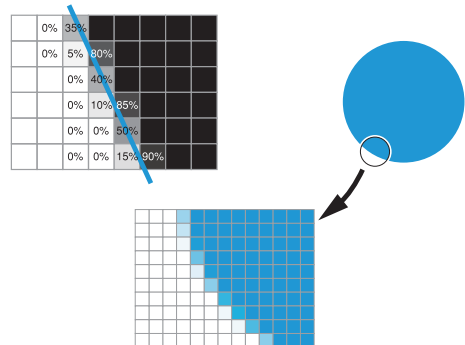


図 2-5-6 アンチエイリアシングの概念図

でも滑らかな線が維持されるので、画像の劣化は生じない。

同じように円が描かれていたとしても、ラスタ形式の画像であればピクセルが円状に分布しているというだけで、それを見た人間がそのピクセルの集合を円として解釈しているので、コンピュータ内部のデータとしては特に円という形状についての情報は含まれていない。一方ベクタ形式の画像では形や線、色などの情報が数式や座標で定義されているため、コンピュータ内部に円としての情報が記録されている。

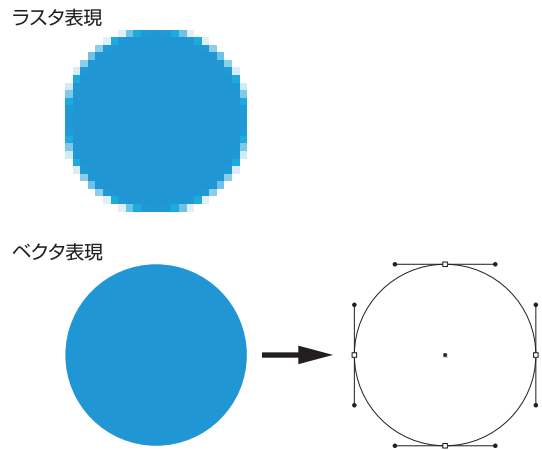


図 2-5-7 ラスタ画像とベクタ画像

2.6 画像ファイルの形式

コンピュータの画像ファイルには、ソフトウェア固有のフォーマットと汎用フォーマットがある。

ソフトウェア固有のフォーマットは、特定のソフトウェアでしか開くことができないが、そのソフトウェア独自の機能や情報などを保存できるように最適化されている。

一方、汎用フォーマットは多くの画像編集ソフトや閲覧ソフトで読み書きすることができ、互換性が高いため広く利用されているが、特定のソフトウェアの情報は失われることがある。

汎用フォーマットには JPEG、PNG、GIF、TIFF など、さまざまな形式が存在する。これら多様な形式が存在する理由は、それぞれの画像ファイルに求められる特徴や用途が異なっているためである。どのような用途で画像ファイルを利用するかを明確にすることで、最適な形式を選択する必要がある。

以下に画像ファイルの圧縮の概略と、いくつかの汎用フォーマットの代表的な画像ファイル形式についてその特徴を述べる。

2.6.1 圧縮と伸張

画像データは文章などのテキストデータに比べてデータ量が多く、ファイルサイズが大きくなりがちで、画像の保存スペースや、インターネットでのファイル転送時間の増加の一因となっている。

このような増加を避けるため、画像データの持つ情報を保持したまま、データのサイズを小さくする処理が行われるが、その処理のことを圧縮（compression）といい、この圧縮されたデータを元に戻す処理のことを伸張（decompression）という。

画像データや音声データなどの圧縮には、大きく分けて可逆圧縮と非可逆圧縮の2種類がある。

可逆圧縮は元の画像や音声データを完全に復元できる圧縮方式である。圧縮による品質の低下はないが、圧縮率は非可逆圧縮よりも低い。圧縮でロスが生じないという意味でロスレス圧縮（Lossless Compression）とも呼ばれる。PNG や GIF などの画像形式は可逆圧縮を行っている。

一方、非可逆圧縮は元の画像や音声データを完全には復元できない圧縮方式である。圧縮により品質は低下するが、圧縮率を高くすることで、ファイルサイズを小さくしたりすることができる。圧縮でロスが生じるという意味でロシー圧縮（Lossy Compression）とも呼ばれる。写真画像などによく用いられている JPEG は非可逆圧縮を行っている。

画像の圧縮は主に次のような方法が用いられる。

- ・色の情報をより少ない段階にまとめることで色数を減らし、データ量を削減する。
- ・画像データを周波数成分に分解し、人間の目が敏感でない高周波成分を削除する
- ・出現頻度の高いデータに対して短い符号を割り当てることで、データの符号化効率を高め、圧縮率を向上させる。

画像の可逆圧縮と非可逆圧縮には上記のような特徴があるので、画像の種類や画像の用途などで使い分ける必要がある。

画質を多少低下させても画像のファイルサイズなどを小さくしたい場合には、JPEG などのロシー圧縮が適しているが、画像を劣化させたくない場合は TIFF、PNG や WebP といったロスレス圧縮形式で保存する必要がある。

また、コンピュータで画像の編集作業を行う場合、JPEG などの非可逆圧縮による保存を繰り返すと画像の劣化が蓄積されていくので、画像に何度も編集を加える必要がある場合は、圧縮をしない BMP 形式、可逆圧縮の TIFF、あるいはグラフィックスソフトの独自形式で保存して作業を行い、JPEG にする必要があるのであれば、全ての編集を終えたあとに、JPEG として保存して利用すべきである。

2.6.2 JPEG

写真などの画像によく使われている JPEG は、1990 年に制定された静止画の圧縮・展開に関する国際標準規格の一つで、ISO により設置された専門家組織” Joint Photographic Experts Group” の略称がその名称となっている。

画像を圧縮する際に、一部のデータを切り捨てることにより、ファイルサイズを小さくしている。圧縮率を任意に指定することができ、圧縮の方式により 1/10 ～ 1/100 程度になるが、圧縮率を高くすればそれだけ切り捨てられるデータが多くなるため、ファイルサイズは小さくなるが画質は低下する。最高画質に設定してもロシー圧縮 (lossy compression) なので、必ず画像の劣化が生じる。画像の使用目的に合わせて、ファイルサイズと画質とのバランスを取る必要がある。JPEG による圧縮を繰り返すと画像の劣化が進んでしまうので、注意が必要である。

JPEG はフルカラー (256 の 3 乗: 16,777,216) 色を扱うことができるので、写真やイメージなど、色の階調の変化が大きい画像の処理に適しているが、小さい画像や色数が少ない画像にはあまり適していない。イラストやロゴなどの画像に使用すると、単色で均一に描かれた部分などにムラが感じられるようなこともあり、データサイズも GIF 等より大きくなってしまうこともある。

2.6.3 GIF

GIF (Graphics Interchange Format) は、JPEG と並んで広く利用されている画像形式の一つである。JPEG が写真などの連続色調の画像に適しているのに対し、GIF はイラストやアイコン、シンプルなアニメーションに適している。

GIF は可逆圧縮方式を採用しているため、画像を繰り返し保存しても品質が劣化しない。また、背景を透明にすることができ、他の画像との合成が容易である。さらに、アニメーション GIF という拡張仕様で簡単なアニメーションを作成することも可能である。

しかし、GIF は最大 256 色しか扱えないため、写真のような複雑なグラデーション表現には不向きである。また、ファイルサイズが大きくなる傾向があり、高画質なアニメーションを作成するには不向きな場合がある。

GIF は、Web ページで手軽に利用できる便利な画像フォーマットだが、上記の制限を理解した上で適切な画像形式を選択することが重要である。

●インデックスカラー

GIF は 1 つの画素の色情報を 8 ビットで表現する 8 ビットカラーを採用しているため、表現できる色の数は 28 (2 の 8 乗) の 256 色となる。

また、GIF の特徴の一つが、インデックスカラーを用いている点である。

インデックスカラーとは、画像内に使われている色をすべてパレットと呼ばれるリストに登録し、各色に番号 (インデックス) を割り当てる方式である。画像内の各ピクセルは、そのパレット内の色の番号で表現されるため、実際の色の情報ではなく、番号のみを保存すればよい。

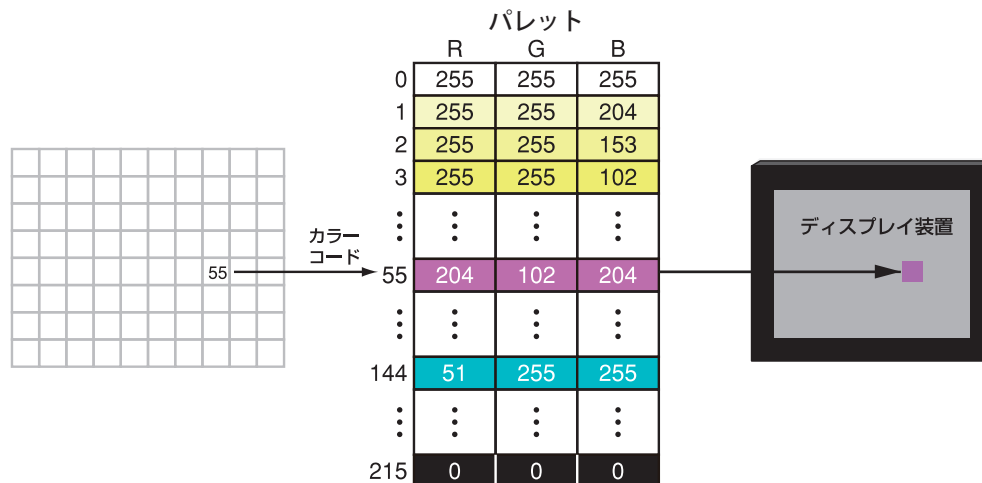


図 2-6-1 インデックスカラー

図 2-6-1 のように、画像内の各色の情報が、パレット内の番号に対応付けられる。

インデックスカラーは、色数を制限していることから、データ容量を小さくすることができ、画像処理も高速に行うことができる。また、アニメーション GIF のようなシンプルなアニメーションに適している。一方、表現できる色数が限られていることから、写真などの複雑な色合いを表現するには適さず、グラデーションなども色数が不足して画質が劣化する場合もある。

GIF で表示しようとする画像中に 256 色以上の色調がある場合、ディザリング (dithering) などの技術を使って、階調をシミュレートすることがある。

ディザリングとは、使用可能な色が少ない環境において、パレットに含まれていない色を表現するために、異なった色を 2 種類以上並べることで、並置加法混色の原理で近似的に色を再現する方法である。この手法により少ない色数であらゆる色を擬似的に表現することができる。

ディザリングでは元の画像の情報をある程度捨てて近似的な色で表現するため、細部の情報が失われて鮮明さが低下することもあるが、見かけ上は表示できる色が増えるので、色の変化のある写真などでは有効である。しかし、同じ色で塗りつぶすパターンの多いイラスト状の画像では、ベタ塗りの中に別の色点々が表示され、見苦しくなることがある。そのため、一般的には写真画像などにはディザリングを用いても、イラストやアイコンなどにはディザリングをしないほうが良いとされている。

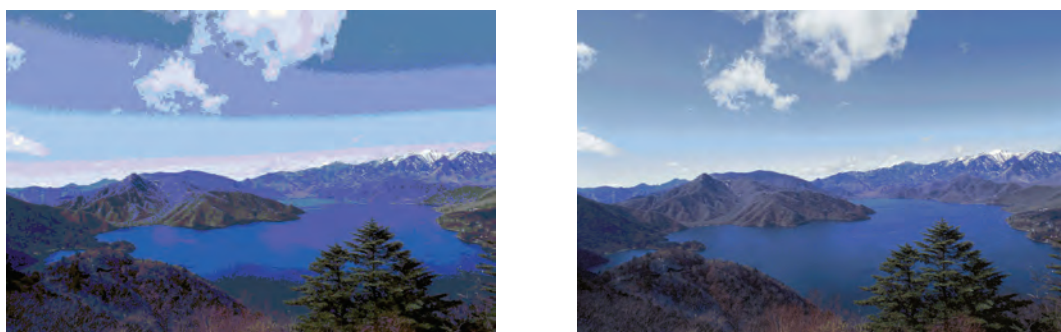


図 2-6-2 ディザリング無し (左)・ディザリング有り (右)

2.6.4 PNG

PNG 形式は Portable Network Graphics の略で、一時期特許問題が発生した GIF の代替として、1996 年に W3C (World Wide Web Consortium) によって開発されたフォーマットである。

可逆圧縮となっていること、背景の透過処理ができることなどは GIF と同様であるが、GIF のようにアニメー

デジタルの色彩＜基礎編＞

ションをサポートしていない。

PNG には PNG-8 と PNG-24 と呼ばれる 2 つの形式がある。PNG-8 は GIF と同様にインデックスカラーを用いて 256 色までの画像に対応し、GIF の代替として使用されることが多い。PNG-24 はフルカラーに対応しており、写真やグラフィックデザインなど、高品質な画像に適しているが、可逆圧縮を採用しているため、写真などの画像は JPEG に比べると圧縮率が低く、ファイルが大きくなる傾向がある。

GIF と完全に置き換わることはなかったが、現在では多くの Web ブラウザや画像ビューワー、画像編集ソフトで広くサポートされている。

2.6.5 TIFF

TIFF（ティーフォ：Tagged Image File Format）は、1986 年にマイクロソフトとアルダス（現アドビによって買収）が共同開発し、その後多くの企業によって標準化が進められた画像ファイルフォーマットである。画像データだけでなく、解像度、色数、圧縮方法などのさまざまな情報をファイル内に埋め込むことができ、異なるソフトウェア間でもデータの互換性を保ちやすく、アプリケーションに依存しにくいフォーマットとして広く普及している。

TIFF は、RGB、CMYK、グレースケールなど多くの色空間に対応し、多種多様なデバイスやプリントに適している。データ圧縮には可逆圧縮と非可逆圧縮の両方をサポートしており、編集前のオリジナルデータを高品質で保存したい場合は可逆圧縮が、ファイルサイズを大幅に削減したい場合は非可逆圧縮が選択できる。

TIFF は、複数の画像を「ページ」と呼ばれる単位で一つのファイルに格納することが可能である。これにより、複数のレイヤーを持つ画像や、異なる解像度の画像をまとめて管理できる。

このように、TIFF は高画質保持、柔軟なデータ構造、高い互換性など、多くの利点を備えた画像形式で、今後も画像処理や保存の分野で広く利用される形式である。

しかし、他の画像フォーマット（JPEG、PNG など）と比較した場合、一般的にファイルサイズが大きくなる傾向がある。

2.6.6 WebP

WebP（ウェッピー）は、Google が開発し 2010 年に発表された新しい画像形式で、ファイルの拡張子は「.webp」である。Web ページの読み込み速度を向上させることを目的として開発され、JPEG や PNG よりも高圧縮率で、画像ファイルサイズを大幅に削減することができる。

WebP は、非可逆圧縮と可逆圧縮の両方をサポートしており、アルファチャネル、透過背景、シンプルなアニメーションも作成可能となっている。これらの特徴から、Web ページの画像だけでなく、アプリのアイコンやバナーなど、さまざまな用途に利用されている。

しかし、WebP は比較的新しいフォーマットであるため、すべてのブラウザやデバイスでサポートされているわけではない。古いブラウザやモバイルデバイスでは、WebP 画像が表示されないことがあるため、Web ページで WebP を使用する場合は、JPEG や PNG などの一般的な画像形式も用意しておくことが推奨されている。

2.6.7 SVG

SVG (Scalable Vector Graphics) は、W3C が標準化を進めているベクター画像形式である。1999 年に初版 (1.0) が勧告され、現在は 2.0 の策定が進められている。

SVG は、ビットマップ画像（JPEG、GIF、PNG など）とは異なり、ベクター画像であるため、拡大縮小しても画質が劣化しない。このため、ロゴ、アイコン、イラストなど、高品質でスケーラブルな画像が必要な場合に適している。

SVG は、XML 形式で記述されるため、テキストエディタで簡単に編集したり、プログラムから生成することも容易である。また、CSS や JavaScript と組み合わせ、アニメーションやインタラクティブな要素を追

加することも可能である。

SVG は 2017 年頃まではあまりサポートされてこなかったが、その後新しいブラウザなどが SVG に対応し、現在では大部分のブラウザとベクターファイル用描画アプリで簡単に処理できるようになったことから、Web ページで広く利用されるようになってきている。SVG は、ベクター形式であるため、ラスタ画像に比べてファイルサイズが小さく、Web ページの表示速度を向上させることができる。

現在、ホームページなどで一般的に利用できるベクター画像形式は、SVG が最も広く普及しており、標準的な選択肢となっている。

2.6.8 RAW

RAW フォーマットは、デジタルカメラで撮影された未加工の画像データ形式である。

JPEG や PNG などの一般的な画像フォーマットとは異なり、RAW ファイルにはカメラが取得したセンサー情報がほとんど加工せずに保存されるため、メーカーやカメラモデルによって、記録される情報の種類やビット深度が異なる。

また、JPEG などのように、決まった拡張子があるわけではなく、RAW 形式のファイルには、メーカーやカメラモデルによって異なる拡張子が使用されている。

RAW フォーマットには以下のような特徴がある。

- ・RAW フォーマットは圧縮されていないため、画質の劣化がない。色の階調や詳細が豊富に保持される。
- ・露出、ホワイトバランス、彩度などを撮影後に自由に調整することで、クリエイティブな編集ができる。
- ・ダイナミックレンジが広く、ハイライトやシャドウの情報が豊富に含まれているため、明るい部分や暗い部分の細部を保持しながら編集できる。
- ・RAW ファイル自体を直接変更するのではなく、編集結果を保存したり別フォーマット（JPEG、TIFF など）に変換して使用する非破壊編集である。

これらの優れた特徴があるが、RAW ファイルはサイズが大きく、この形式に対応した専用ソフトウェアを使って閲覧や編集をする必要がある。

一般的な JPEG や PNG などのように手軽に扱うことができないが、高画質で柔軟な編集を求めるプロフェッショナルが必要とするフォーマットである。

デジタルカメラで撮影された RAW ファイルの画像の明るさ、コントラスト、色などを調整し最終的な画像を作り上げ、汎用で扱えるファイル形式（JPEG、TIFF など）に変換するプロセスのことを「現像」と呼ぶ。

2.7 Web コンテンツ等のアクセシビリティ

現在では、インターネットの普及により、スマートフォンや PC による情報やサービスの提供が急速に拡大している。このことは健常者と呼ばれる人ばかりではなく、何らかの障害を持った方や、高齢者などにも同様の影響を及ぼしている。

インターネット上の情報には、誰もがアクセスして利用する権利があり、それは障害を持った方でも高齢者でも例外ではない。しかし、ネット上の Web サイトなどには、必ずしも全ての人にとって利用しやすくなっているわけではない。では、どこをどのようにすれば誰もが利用できるようにできるのだろうか。

ウェブで使用される各種技術の標準化を推進するために設立された標準化団体である W3C（World Wide Web Consortium: ワールド・ワイド・ウェブ・コンソーシアム）の Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) は、Web コンテンツを誰もが利用できるようにするための国際的なガイドラインである。WCAG は、以下の 4 つの原則に基づいている。

1. 知覚可能: 情報とユーザーインターフェースの要素が、ユーザーに知覚できることを保証する。
2. 操作可能: ユーザーインターフェースの要素が、ユーザーに操作できることを保証する。

デジタルの色彩＜基礎編＞

3. 理解可能：情報とユーザーインターフェースが、ユーザーに理解できることを保証する。
4. 強固：さまざまな技術を使用したユーザーエージェント（例えば、支援技術）によってアクセスできることを保証する。

WCAG は 1999 年に 1.0 が W3C 勧告となり、2008 年 12 月に勧告されたバージョン 2.0 (WCAG 2.0) は、その後 2012 年に ISO/IEC によって国際規格にもなり、広く世界中で利用されていた。2018 年 6 月には後継バージョンとして WCAG 2.1 が、2023 年 10 月には WCAG 2.2* が勧告された。

WCAG には「レベル A」「レベル AA」「レベル AAA」という 3 つの適合レベルが定義されている。

「レベル A」は最低限のアクセシビリティ要件を満たすレベルで、すべてのウェブサイトが最低限満たすべき基準である。

「レベル AA」は一般的なアクセシビリティ要件を満たすレベルで、実用的かつ包括的な基準で、多くの組織で推奨されている。

「レベル AAA」は最高レベルのアクセシビリティ要件を満たすレベルで、すべてのウェブサイトにおいて達成するのは難しく、特殊なケース（例：特定のユーザーグループ向けサイト）に適用されることが多い。

● WCAG における色とコントラスト

赤と緑など特定の色を区別しにくい色覚特性の人や、コントラストが低いと文字などを読み取ることが困難な低視力の人などにとって、WCAG の中でも色とコントラストは特に重要な要素である。

色については、レベル A のレベルで、「色が、情報を伝える、動作を示す、反応を促す、又は視覚的な要素を判別するための唯一の視覚的手段になっていない」という基準となっているが、簡単に言えば「色だけで何かを区別したり、重要な情報を伝えたりしない」ということである（図 2-7-1）。

コントラストについては、レベル AA とレベル AAA の 2 つのレベルがある。

レベル AA では「一般的なテキストではコントラスト比が少なくとも 4.5:1 であること（図 2-7-2）。ただし、サイズの大きなテキストなどでは、少なくとも 3:1 のコントラスト比があること」とされ、レベル AAA では「一般的なテキストではコントラスト比が少なくとも 7:1 であること。ただし、サイズの大きなテキストなどでは、少なくとも 4.5:1 のコントラスト比があること」とされている。

WCAG は、基本的には Web コンテンツのアクセシビリティに関するガイドラインだが、その原則はアプリやソフトウェアなど、他のデジタルコンテンツにも広く応用できる。WCAG の原則に基づいた、アクセシブルなデザインは、すべてのユーザーにとってより良い体験を提供し、社会の包摂性を高めることにつながる。

なお、WCAG の呼び方には厳密に決まったものはないが、「ウィーケーグ」、「ウィーケグ」などと発音される。WCAG 3.0 は策定が進められているが、2024 年末現在まだ草稿の段階であるという。

*WCAG 2.2 の日本語訳が [<https://waic.jp/translations/WCAG22/>] で公開されている。

● コントラスト比 (contrast ratio)

なお、ここで用いられているコントラスト比は、以下のように定義されている。

$$(L1 + 0.05) / (L2 + 0.05)$$

ここでは、L1 は、明るいほうの色の相対輝度、L2 は、暗いほうの色の相対輝度である。

なお、相対輝度 (relative luminance) は、最も暗い黒を 0 に、最も明るい白を 1 に正規化した色空間内の任意の点の相対的な明るさであり、以下のように定義される。

sRGB 色空間においては、色の相対輝度は、 $L = 0.2126 * R + 0.7152 * G + 0.0722 * B$ と定義されており、R、G 及び B は以下のように定義される：

$$RsRGB \leq 0.04045 \text{ の場合 } R = RsRGB / 12.92、\text{ そうでない場合 } R = ((RsRGB + 0.055) / 1.055) ^{2.4}$$

$G_{sRGB} \leq 0.04045$ の場合 $G = G_{sRGB} / 12.92$ 、そうでない場合 $G = ((G_{sRGB} + 0.055) / 1.055) ^{2.4}$

$B_{sRGB} \leq 0.04045$ の場合 $B = B_{sRGB} / 12.92$ 、そうでない場合 $B = ((B_{sRGB} + 0.055) / 1.055) ^{2.4}$

そして、 R_{sRGB} 、 G_{sRGB} 、及び B_{sRGB} は、次のように定義される：

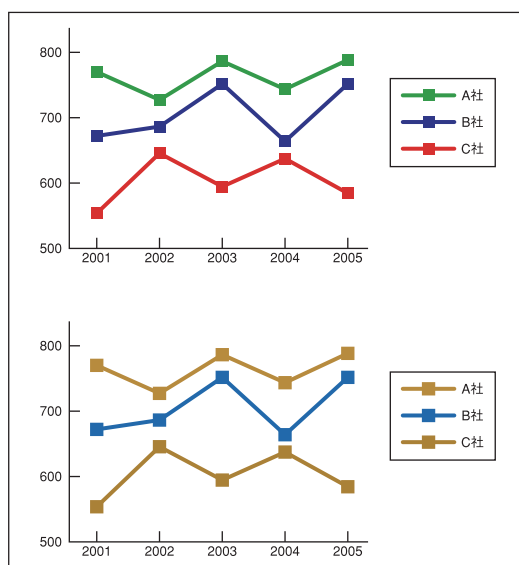
$$R_{sRGB} = R_{8bit} / 255$$

$$G_{sRGB} = G_{8bit} / 255$$

$$B_{sRGB} = B_{8bit} / 255$$

上記のコントラスト比を計算してくれる Web サイトも利用できる

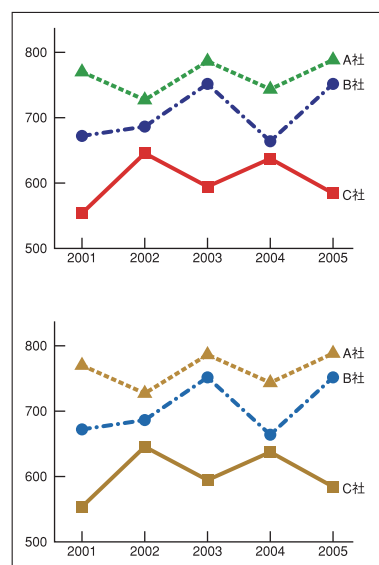
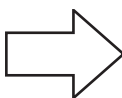
例：<https://color.adobe.com/ja/create/color-contrast-analyzer>



線の色だけで会社を判断させているため、赤と緑など特定の色を区別しにくい色覚特性の人には分かりづらい。

下図はソフトウェアにより色覚をシミュレートしたもの。

図 2-7-1(a) 色だけで線を区別させている例



マーカーや線種を変更したり、社名を図中に加えたりすることで、色以外で区別することができる。

下図はソフトウェアにより色覚をシミュレートしたもの。

図 2-7-1(b) 色以外の属性も変化させた例

一般的なテキスト
ではコントラスト
比が少なくとも
4.5:1 であること

文字 RGB (30, 30, 200)
背景 RGB (149, 115, 255)
コントラスト比 2.98:1

図 2-7-2(a) レベル AA でも不合格

一般的なテキスト
ではコントラスト
比が少なくとも
4.5:1 であること

文字 RGB (30, 30, 200)
背景 RGB (194, 155, 255)
コントラスト比 4.54:1

図 2-7-2(b) レベル AA で合格

一般的なテキスト
ではコントラスト
比が少なくとも
4.5:1 であること

文字 RGB (30, 30, 200)
背景 RGB (247, 202, 255)
コントラスト比 7.16:1

図 2-7-2(c) レベル AAA で合格

令和6年度「地方やデジタル分野における専修学校理系転換等推進事業」
工業専門課程 I Tデジタルクリエイター科のカリキュラム開発

デジタルの色彩 基礎編

令和7年2月

学校法人第一平田学園 中国デザイン専門学校
〒700-0842 岡山県岡山市北区船頭町12
電話：086-225-0791

●本書の内容を無断で転記、掲載することは禁じます。