コンピュータグラフィックス

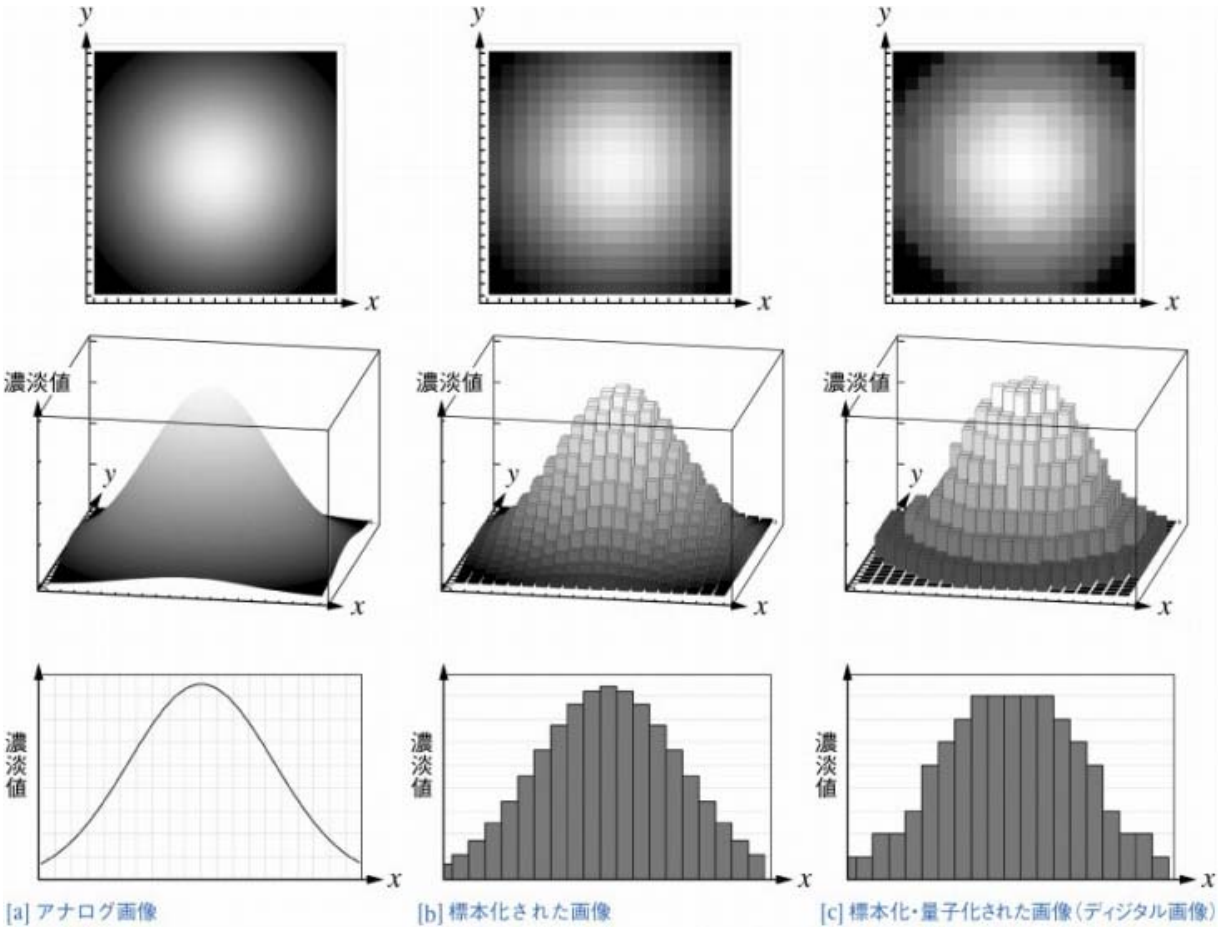
12. 画像処理1

教科書P.194-213

佐藤証 西9-613
akashi.satoh@uec.ac.jp

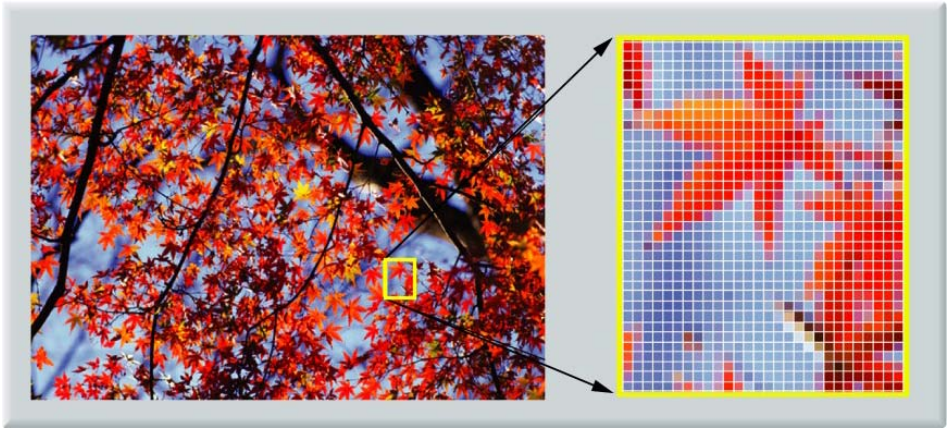
アナログ画像とディジタル画像

- どこまで拡大しても濃淡が連続的なアナログ画像は標本化と量子化によりディジタル画像に変換される
  - ① 標本化：離散的な位置にある濃淡信号を取り出す
  - ② 量子化：連続量の濃淡値を有限レベルの離散値に変換

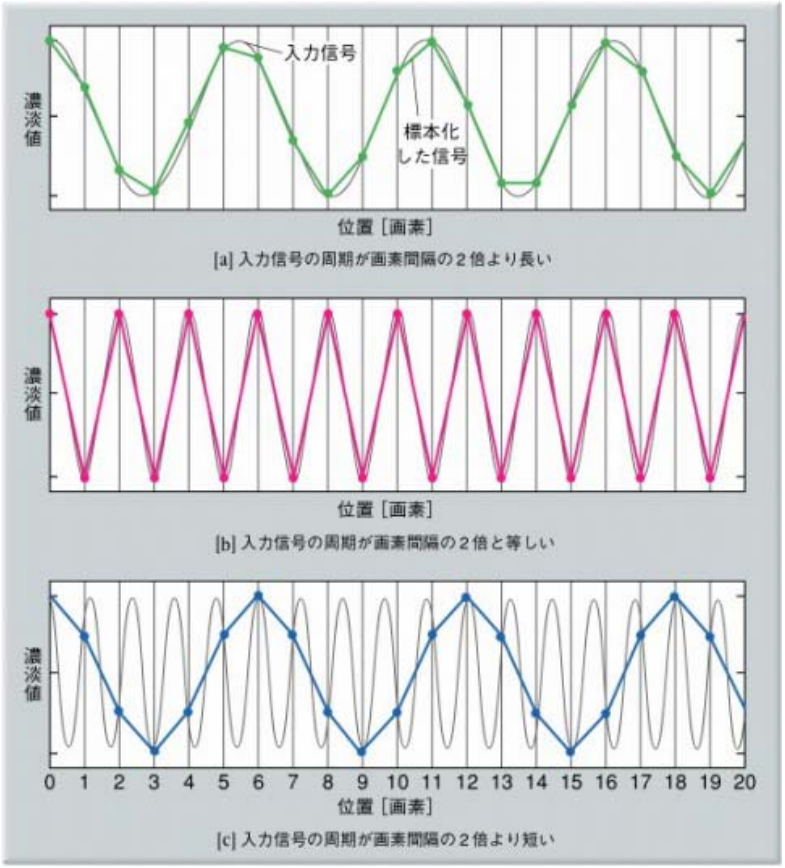


画像の標本化

- 2次元のアナログ画像に対して等間隔に配置した標本点での光強度を取り出す
- 画像上の位置に対して光強度が正弦波状に変化するアナログ画像は正弦波の周期の1/2よりも小さな感覚で標本化すれば元の画像が再現できる(標本化定理)
- 標本化間隔がこれより大きいと偽の信号が現れる(エイリアシング)



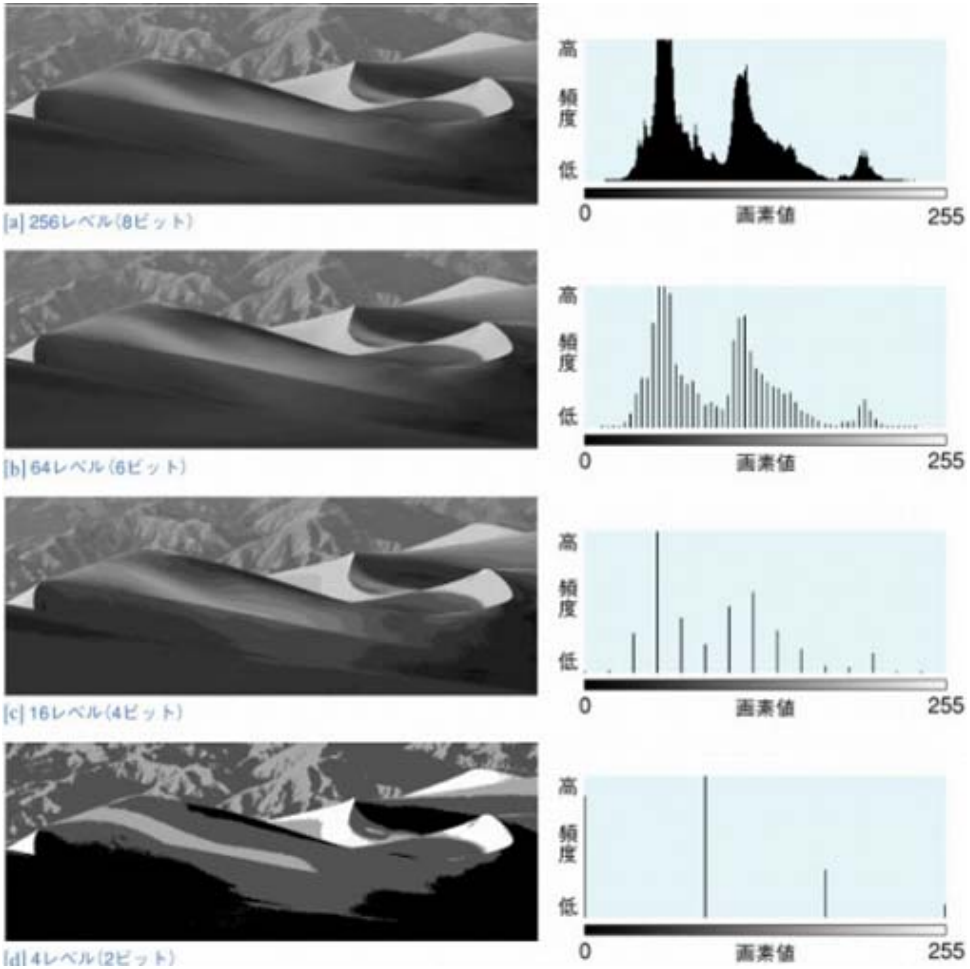
ディジタル画像における標本化



標本化した濃淡値の信号

画像の量子化

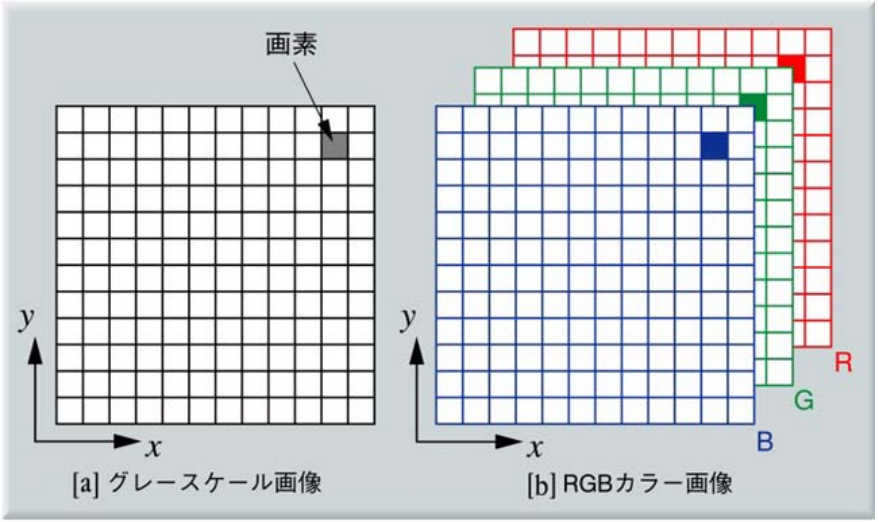
- 標本化したアナログ値を有限レベルの数値に変化する処理
- 量子化後の画素の値を画素地と呼ぶ
- 連続的な値を離散的な有限個の数値に置き換えるので丸め誤差(量子化誤差)が生じる
- 量子化が2レベルの画像を2値画像，中間の灰色のレベルも表すときグレースケール画像と呼ぶ
- 量子化レベルが少ないと1段階変化するところに等高線のような境界の疑似輪郭(疑似エッジ)が現れる



量子化レベル数が異なる画像とヒストグラム

グレースケール画像とカラー画像

- グレースケール画像は明るさの情報だけを持つ
- カラー画像は三原色のそれぞれの画素値を持ち，三原色にR,G,Bを用いたものが一般的でRGBカラー画像と呼ばれる

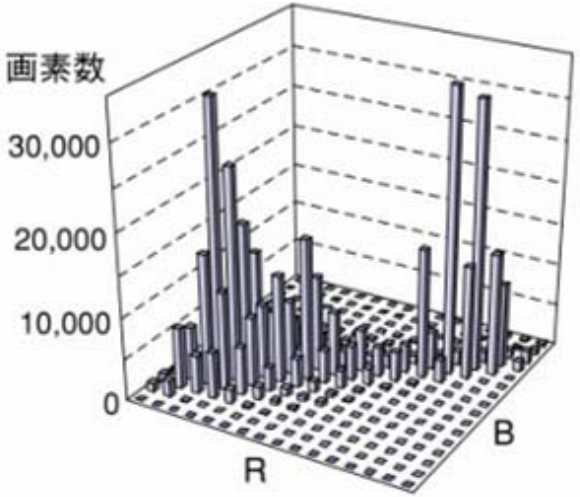


グレースケール画像とRGBカラー画像

画像サイズ	量子化レベル数	グレースケール／カラー	データサイズ
720 × 480	2（1ビット）	（2値）	約 42KB
720 × 480	256 （8ビット）	グレースケール	約 338KB
720 × 480	256 （8ビット）	カラー	約 0.99MB
2,048 × 1,536	256 （8ビット）	グレースケール	3MB
2,048 × 1,536	256 （8ビット）	カラー	9MB
2,048 ×1,536	4,096（12ビット）	カラー	13.5MB

限定色表示

- 入力画像が持つ色数を出力可能な色数に限定して出力することを限定色表示と呼ぶ
- 出力可能な色を全て並べたカラーマップから変換前後の値を表にしたルックアップテーブルを作成する
- 均等量子化法：色空間の量子化を均等に粗くする
- 頻度法：入力画像のカラーヒストグラムのピークに近い色を優先的に表示色として用いる



[d] RGBヒストグラム空間（実際の色空間は3次元であるが，表示のため2次元空間で表現している）

[a] 原画像

[b] 均等量子化法

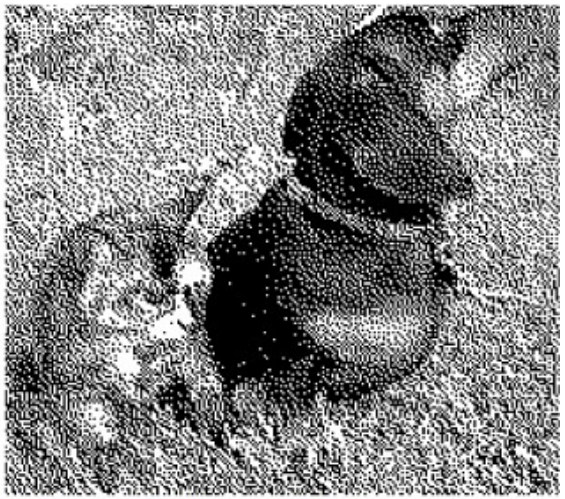
[c] 頻度法

ハーフトーニング

- 2値画像で空間的な白黒パターンの疎密を利用して濃淡の表行う手法
  - 濃度パターン法
  - ディザ法
  - 誤差拡散法

[a] 原画像（濃淡画像）

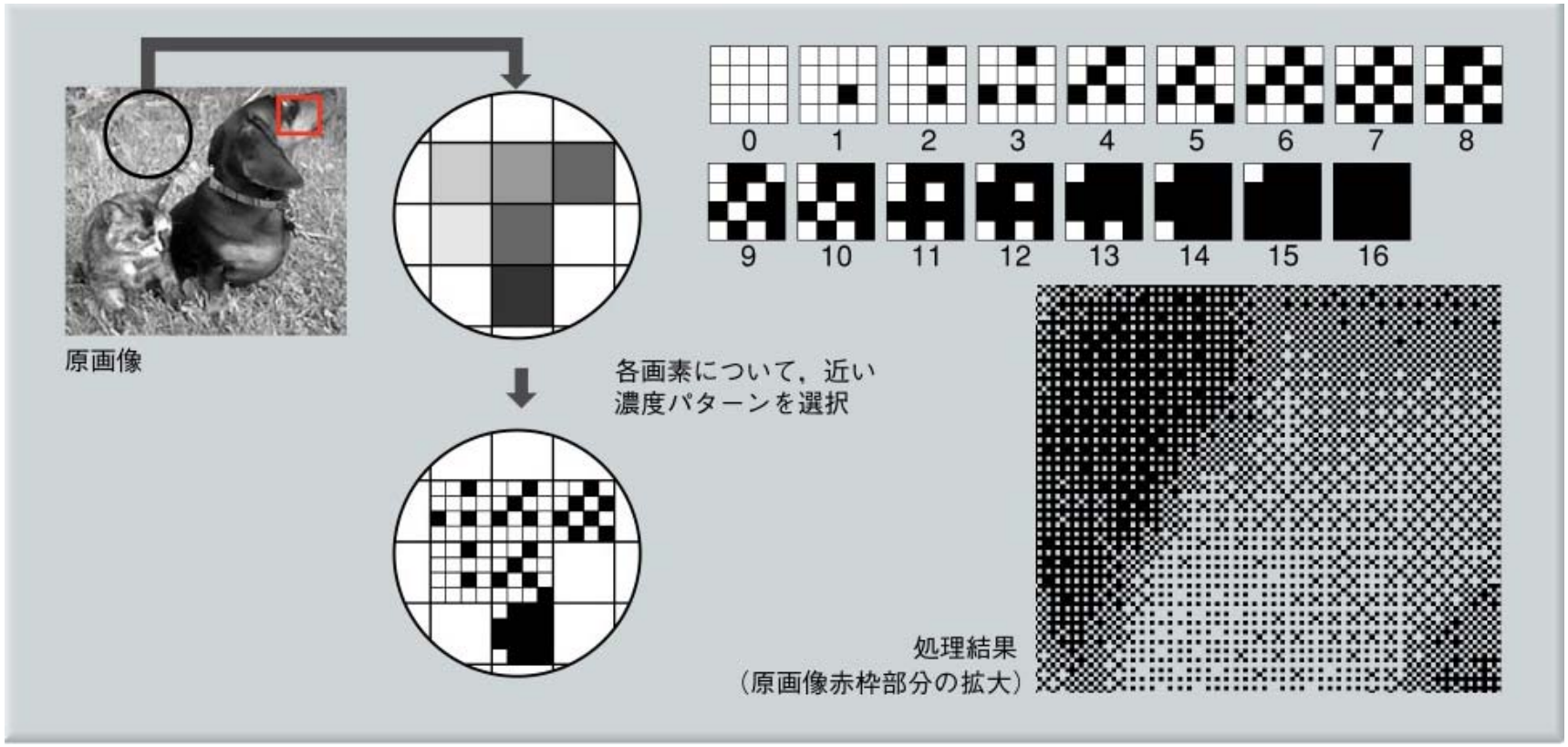
[b] 2値画像



[c] ハーフトーニング

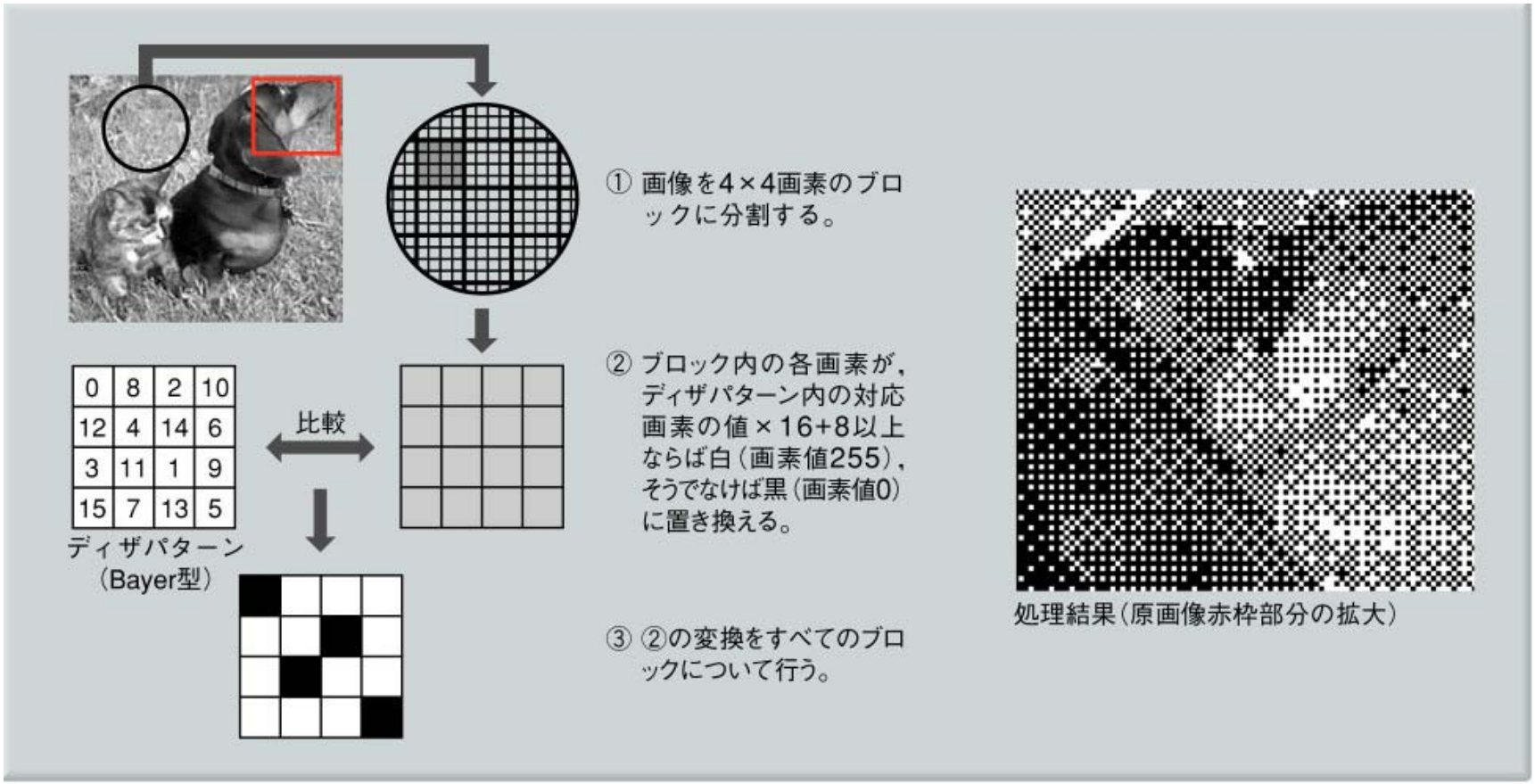
濃度パターン法

- 原画像の1画素に対して数画素からなる2値画像のパターンを割り当てる
- 減画像が$N \times N$画素のとき$4N \times 4N$の2値画像となる



ディザ法

- ディザパターン(通常は4×4)を用意しディザパターンの値と減画像の各画素の画素値を比較し，その大小で画素を白にするか黒にするか決定する



誤差拡散法

- 処理対象画素値 f と2値化した値 g との誤差 $e=f-g$ を周辺画素に分散し，誤差 e をキャンセルするように未処理画像の画素値を補正しながら補整し画像全体の各画素値を白か黒か決定する

画像の左上の画素から順に，白（画素値255）か黒（画素値0）に置き換える処理を行うものとする。

① 処理対象画素の画素値をfとするとき，
$f>127$　白（255）に置き換える。
$f\leqq127$　黒（0）に置き換える。
そして，置き換えたあとの誤差をeとする。

② 未処理画素領域（図の淡い灰色の領域）のうち，処理対象画素周辺の数画素（図の濃い灰色で示した4画素）に誤差eを分散させて濃度を変更する。

③ ①と②の処理をすべての画素について順に行う。

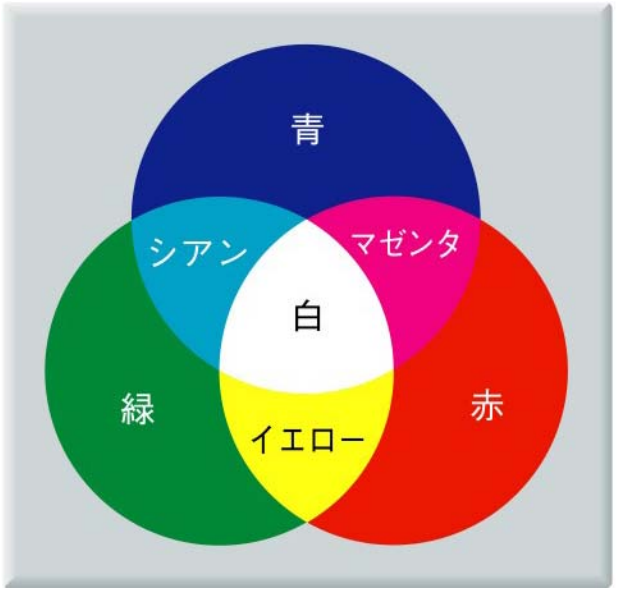
誤差eを分散させる式の例

$$f_1' = f_1 + (5/16)\,e$$
$$f_2' = f_2 + (3/16)\,e$$
$$f_3' = f_3 + (5/16)\,e$$
$$f_4' = f_4 + (3/16)\,e$$

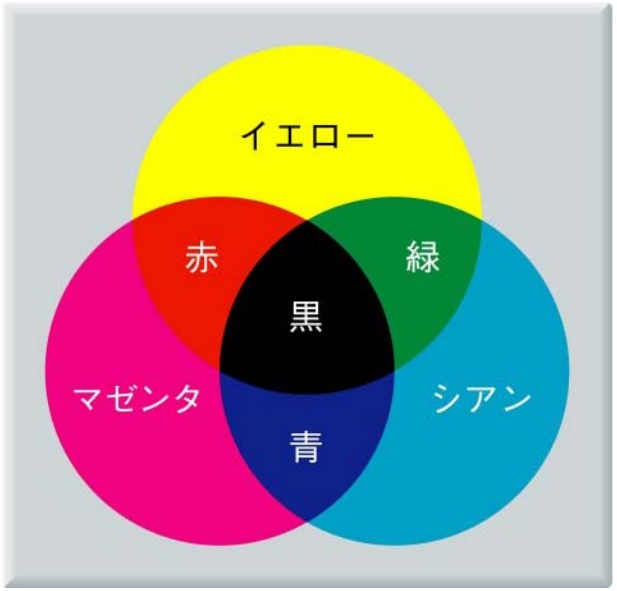
処理結果（原画像赤枠部分の拡大）

加法混色と減法混色

- 加法混色
  - 色を混ぜる毎に明るさが増加して白に近づく
  - 光の三原色として知られるR,G,B
  - カラーテレビ，CRT，劇場のスポットライト等
- 減法混色
  - 色を混ぜる毎に明るさが減少して黒に近づく
  - 三原色はシアン(C),マゼンタ(M),イエロー(Y)
  - 水彩絵の具やカラー印刷，色セロファンの重ね合わせ等



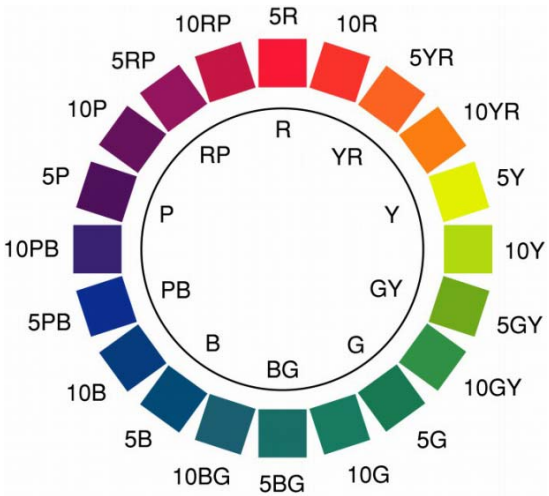
加法混色



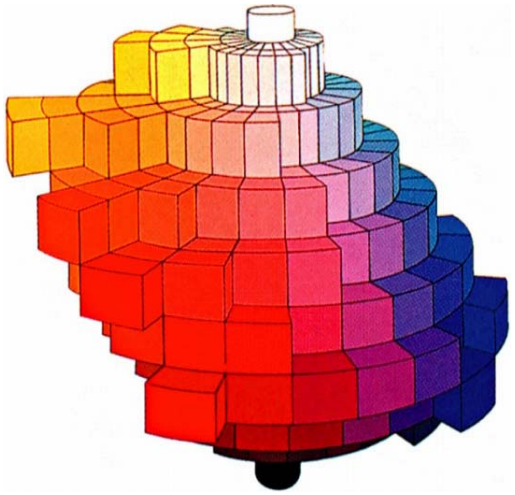
減法混色

マンセル表色系

- 色を指標に基づいて体系的に表したものを表色系と呼ぶ
- 心理的な観点から「色相」「明度」「彩度」の三属性(知覚三空間)で定義したものの代表的がマンセル色素系
  - 色相：色の違いを示す属性．R,Y,G,B,Pの５色を基本に中間色YR,GY,BG,PB,RPを配し，さらに間を10等分
  - 明度：明るさを示す属性．黒(0)～白(10)まで11段階に等分割
  - 彩度：鮮やかさを示す属性．各色相と明度ごとに無彩色(灰色)から最も鮮やかな色までを等間隔で区切る
- 感覚的にはわかりやすいが定量的には扱いにくい



マンセルの色相環



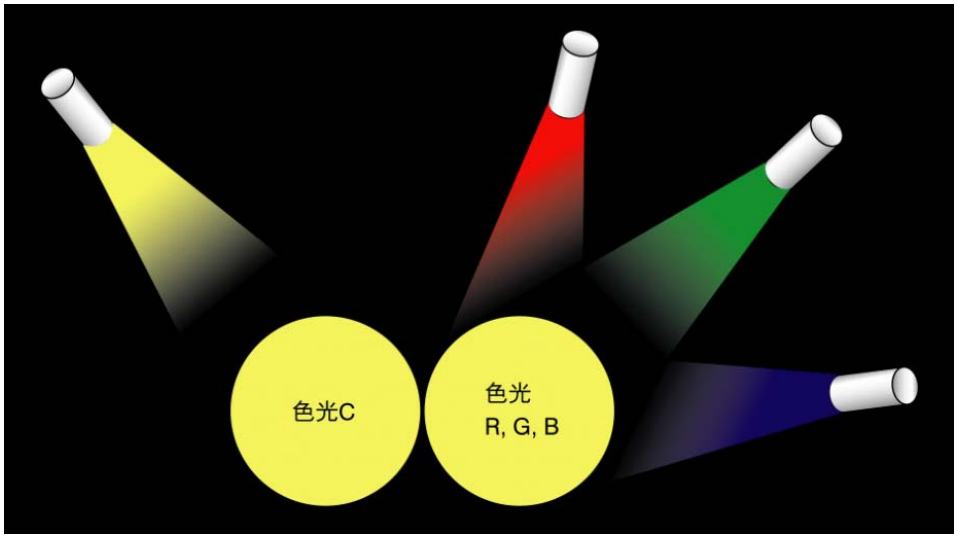
マンセルの色立体

RGB表色系

- RGB色素系は国際照明委員会が定めた色を定量的に扱う代表で波長435.8nm(B),546.1nm(G),700.0nm(R)を用いる
- 白いスクリーンへ当てた色光Cと色刺激(知覚を起こさせる光の照射)R,G,Bを調整した色光が区別できなくなったとき等色したと呼び三刺激値r, g, b の次式で表す

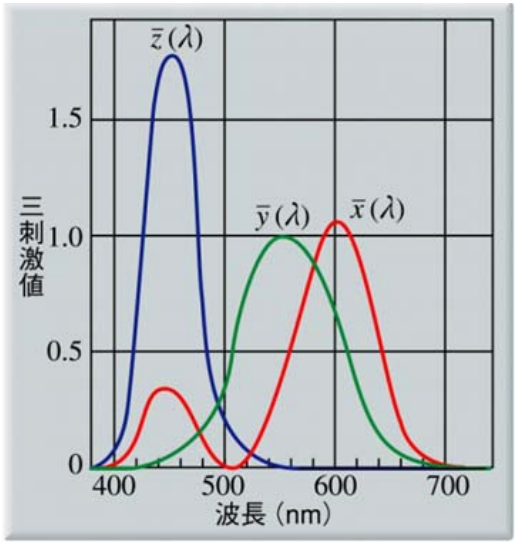
$$C = rR + gG + bB$$

- r, g, b を調整してもCと等色しない場合は，原刺激R,G,BをCに加えることで等色させることができる
  - r, g, b に不の値を認めることで上式が成立

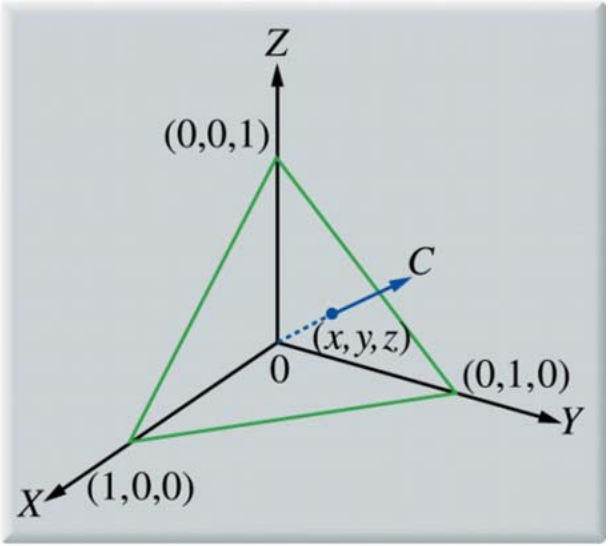


XYZ表色系

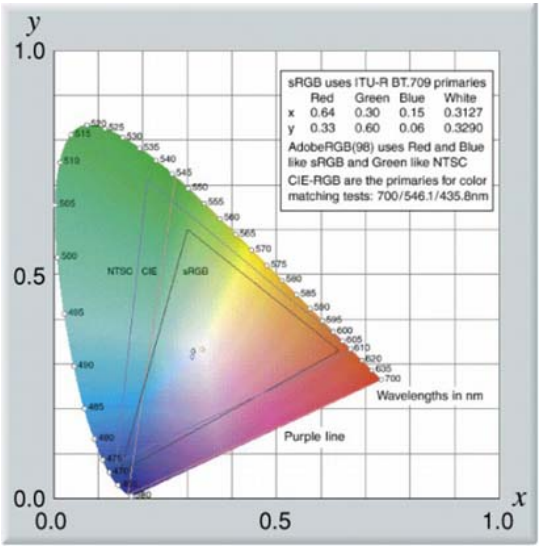
- 等エネルギー白色(可視波長の強さが同じ)の単色光の三刺激値をスペクトル三刺激値，その関数を等色関数と呼ぶ
- 負の値を取るRGBのスペクトル三刺激値は扱いにくいため，XYZ表色系では仮想的な三刺激値$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$を定める
- XYZ直交座標で原点と$C(X,Y,Z)$を通るベクトルで色を表現
- 明るさを無視すると色C座標(1,0,0) (0,1,0) (0,0,1)の三角形とベクトルの交点(x,y,z)で規定でき$x + y + z = 1$なので色度座標(x,y,z)は2次元座標(x,y)で表現できこれをxy色度図と呼ぶ



XYZ表色系の等色関数のグラフ



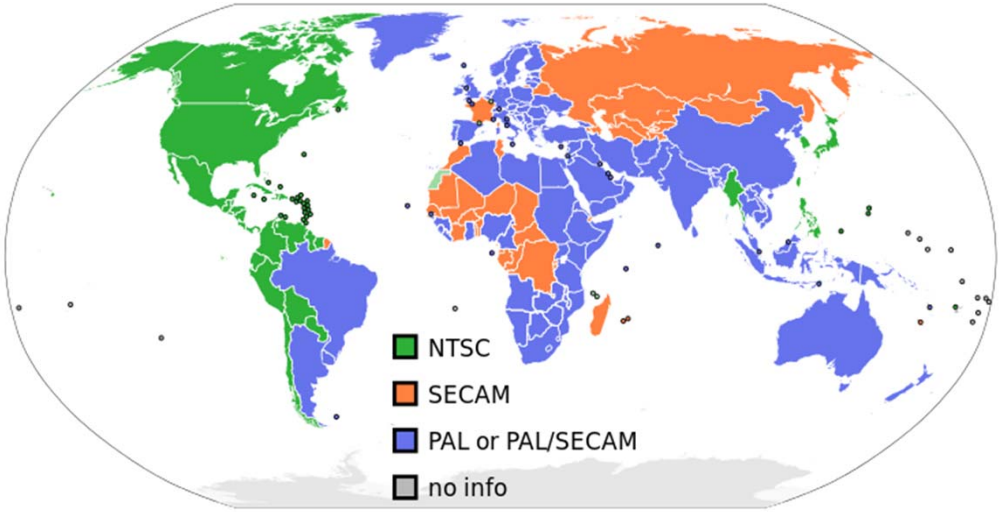
色度座標



xy色度図

YIQ表色系

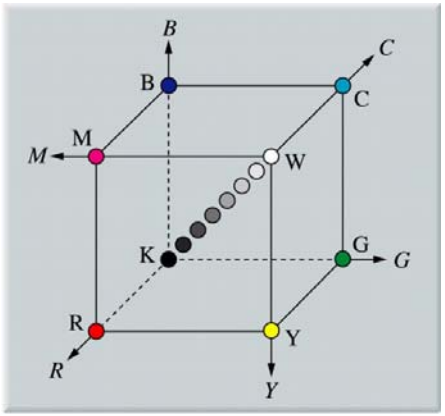
- 色の3次元空間を，Ｙ：輝度，Ｉ：オレンジ~シアン，Ｑ：緑～マゼンタに分けて表現する方法
- 日米のビデオ信号規格NTSC(National Television System Committee)で用いられる
- カラー画像からY成分だけを取り出すことで，白黒(グレースケール)画像が容易に得られる
- Ｙ,I,Q成分に対する人間の目の分解能比は4:1:0.5と評価されており、RGBで4:4:4の信号をYIQで4:1:0.5に変換することで、劣化を感じさせずに情報量を大幅に削減



カラーモデル

- RGBモデルとCMYモデル：通常のCRTやプリンタの制御信号の強さは発光輝度や濃度と比例しないが，CGでは出力装置を単純な加法混合色装置や減法混合色装置にモデル化

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ m \\ y \end{pmatrix} = 1$$

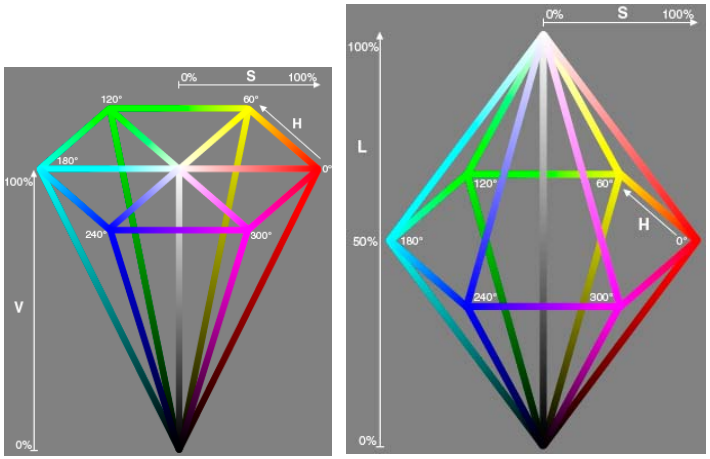


RGBモデルとCMYモデルの概念図

- YIQモデル：RGBモデルから次式で変換

$$\begin{pmatrix} y \\ i \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.522 & 0.311 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- 三属性に基づくモデル：直感的にわかりやすい色相,明度,彩度を利用
  - 六角錐モデルはRGBモデルを変形し，立方体をWの方向から平行投影
  - 双六角錐モデルはRGBモデルの立方体の6点R,Y,G,C,B,Mを同一平面上の正6角形に配置したもの



六角錐モデルと双六角錐モデル

ラスタ化による図形の描画

2点A(x_A, y_A),B(x_B, y_B)を端点を含む直線の式は

$$y = {}^{\Delta y}/_{\Delta x}(x - x_A) + y_A$$

$$\Delta x = (x_B - x_A),\ \Delta y = (y_B - y_A)$$

画素の中心から真の線分のy方向への誤差はx座標が1増えると

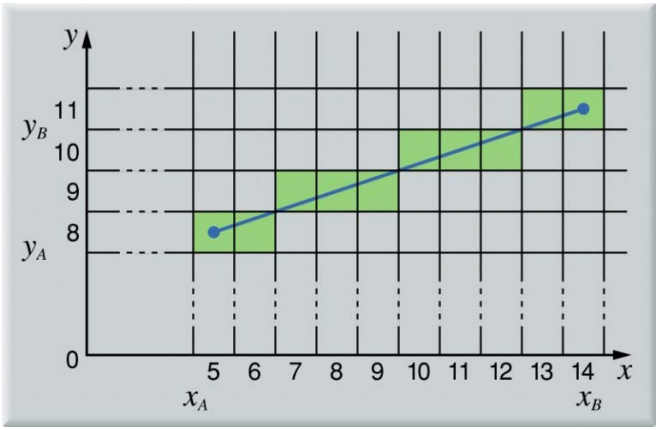
$$e_{(x,y)} \leftarrow e_{(x+1,y)} = e_{(x,y)} + {}^{\Delta y}/_{\Delta x}$$

$e_{(x,y)} > 0.5$ならば塗る画素のy座標を1増やして

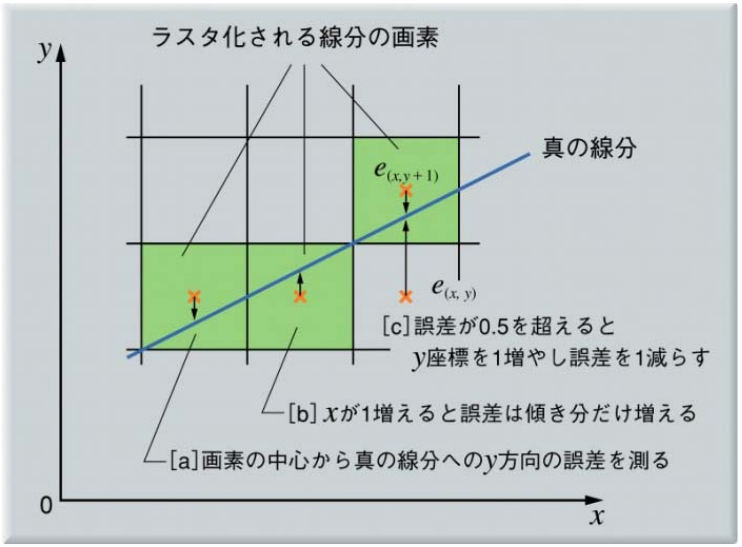
$$e_{(x,y)} \leftarrow e_{(x,y+1)} = e_{(x,y)} - 1$$

```
x=x_A；
y=y_A；
dx=x_B−x_A；
dy=y_B−y_A；
e=dy/dx；/*最初からx_A+1での誤差を入れておく*/
xをx_Aからx_Bまで1ずつ増やしながらつぎの処理を繰り返す
{
        画素(x, y)を塗る；
        もしe > 0.5 ならば/*式(6.8)*/
        {
            y=y+1；
            e=e−1；        /*式(6.9)*/
        }
        e=e+dy/dx；     /*式(6.7)*/
}
```

線分のラスタ化アルゴリズム



ラスタ化された線分



ラスタ化された線分と真の線分の誤差

プレゼンハムのアルゴリズム

実数加算をなくし正負の判定を簡単にするため $e_{(x,y)}$ を0.5減らし，分母をなくすため$2\Delta x$を掛ける

$$e'_{(x,y)} = 2\Delta x(e_{(x,y)} - 0.5)$$

$$e'_{(x,y)} \leftarrow e'_{(x+1,y)} = e'_{(x,y)} + 2\Delta y$$

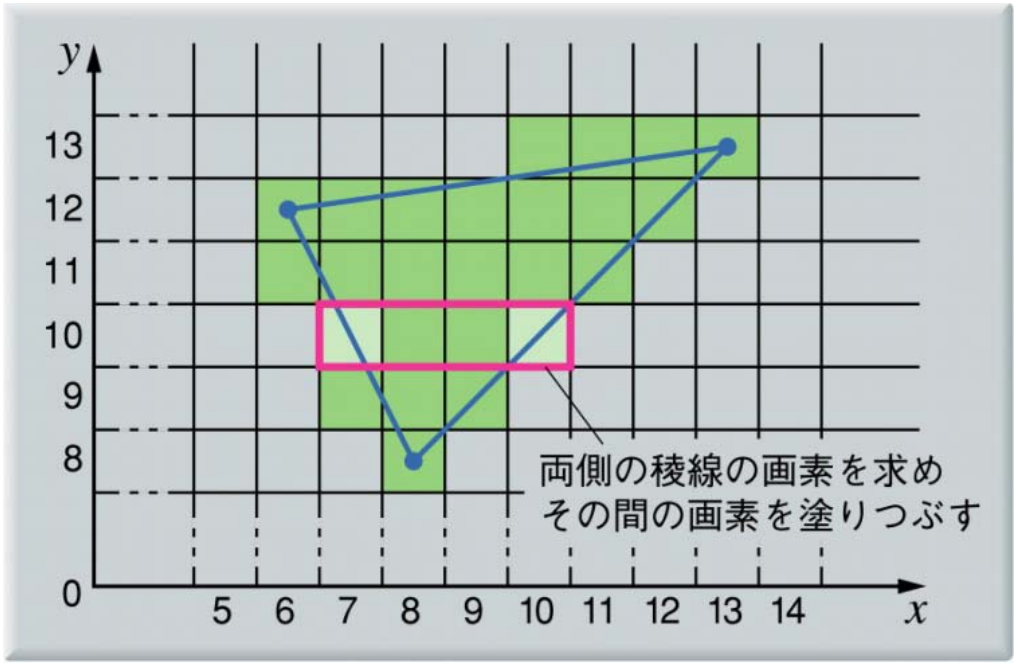
$e'_{(x,y)}$>0ならば

$$e'_{(x,y)} \leftarrow e'_{(x,y+1)} = e'_{(x,y)} e'_{(x,y)} - 1$$

```
x=x_A；
y=y_A；
dx=x_B−x_A；
dy=y_B−y_A；
e=2*dy−dx；/*最初からx_A+1での誤差を入れておく*/
xをx_Aからx_Bまで1ずつ増やしながらつぎの処理を繰り返す
{
        画素(x, y)を塗る；
        もしe>0ならば        /*式(6.12)*/
        {
            y=y+1；
            e=e−2*dx；       /*式(6.13)*/
        }
        e=e+2*dy；          /*式(6.11)*/
}
```

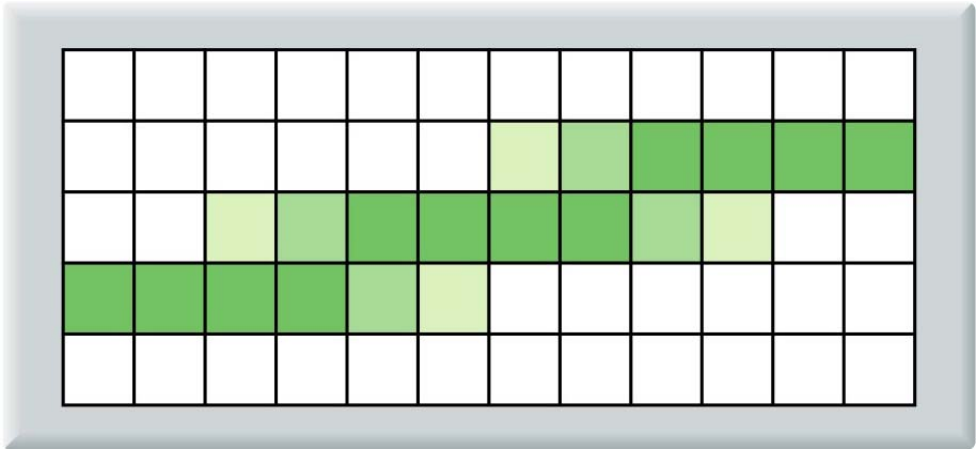
円とポリゴンのラスタ化

- ミッチェナーのアルゴリズムはプレゼンハムと同様の考えで，整数加減算，シフト演算，符号判定だけで円の高速塗りつぶし描画を実現
- ポリゴンのラスタ化はスキャンラインに沿って左側の稜線から右側の稜線までの画像を塗りつぶす
  - 稜線の座標は線分のラスタ化のアルゴリズムで得られる



アンチエイリアシング

- 斜め線や多角形の境界部分にジャギーが生じたり，細い線や物体が寸断される現象をエイリアシングと呼ぶ
  - デジタル変換時の標本化により，線や境界部で点は表示/非表示の一方しか選択できないことに起因



斜め線に対するアンチエイリアシング

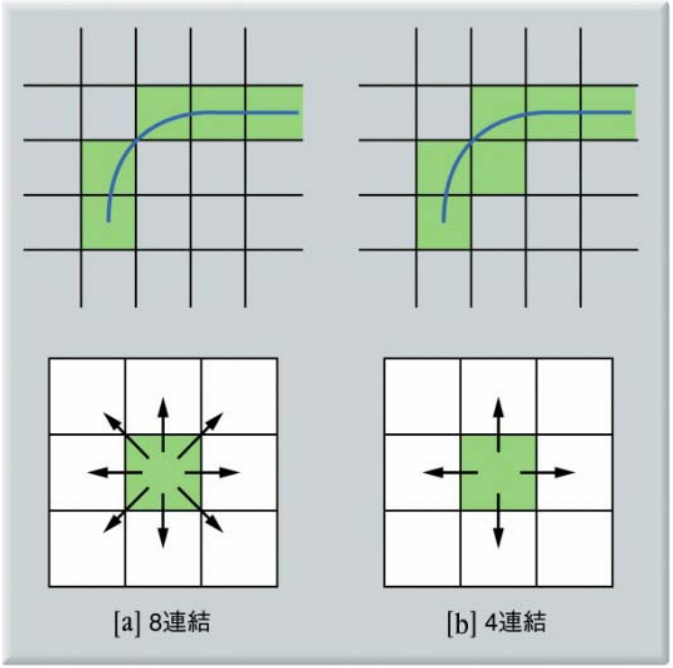
- 階段状の画素部分に中間色の画素を配置して目立たなくすることをアンチエイリアシングと呼ぶ
  - 境界部がなめらかになり，細かい領域の寸断や規則パターンのモアレが軽減される

[a] 原画像　[b] 処理結果

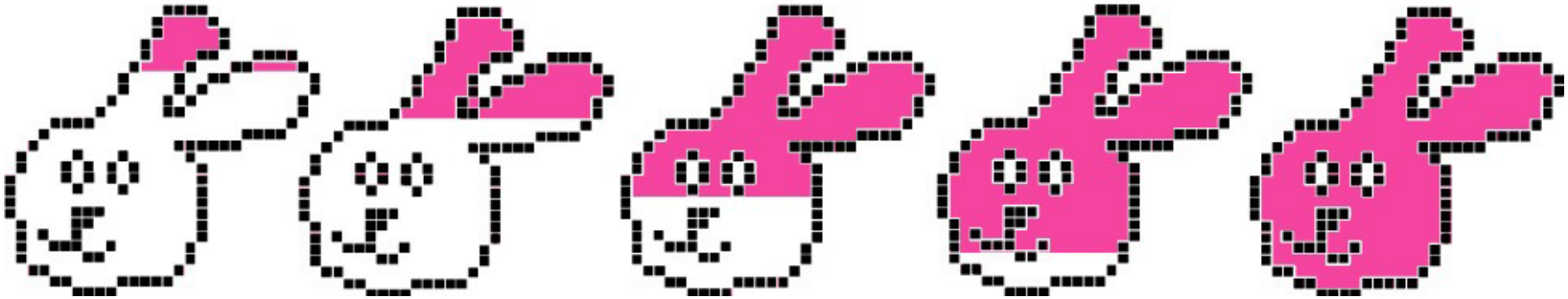
画像に対するアンチエイリアシング

塗りつぶし処理

- スキャンラインと塗りつぶし対象の閉領域との交点で奇数番目と偶数番目の間を塗りつぶす
  - スキャンラインが閉領域や頂点と接している場合などの処理は単純でない
  - 斜めの画素がつながっているとみなす8連結とつながっていないとみなす4連結がある



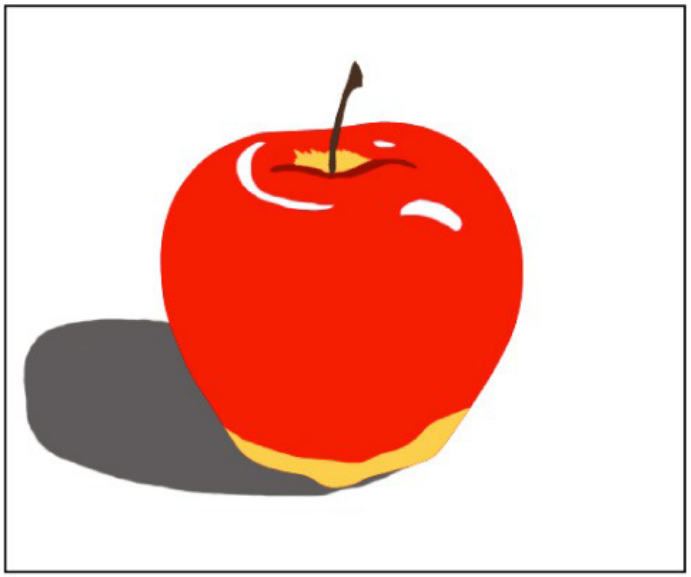
8連結と４連結



8スキャンラインごとに内外を判定する方法

ブラシ処理

- ある小さなパターンをブラシに見立て，ディスプレ上で移動させることで描画を行う
- 後塗りを優先する方法，既に描かれている背景部分の色とブラシの色との演算結果を描画する方法，ブラシを消しゴムとして軌跡に合わせて消去する方法等がある



[a] ブラシを用いない画像

[b] ブラシ処理による画像

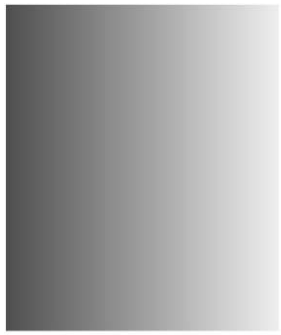
グラデーション生成

- ある領域や境界の色を緩やかに変化させることをグラデーションと呼ぶ
- x軸上の座標x_{A}とx_{B}の位置に色$c_{\mathrm{A}}(r_{\mathrm{A}}, g_{\mathrm{A}}, b_{\mathrm{A}})$と$c_{\mathrm{B}}(r_{\mathrm{B}}, g_{\mathrm{B}}, b_{\mathrm{B}})$を持を持つ2点A,Bがあるとき，線分の任意の座標$x_{\mathrm{P}}$にある点Pの色$c_{\mathrm{P}}(r_{\mathrm{P}}, g_{\mathrm{P}}, b_{\mathrm{P}})$の1次元的な補完(線形補完)は

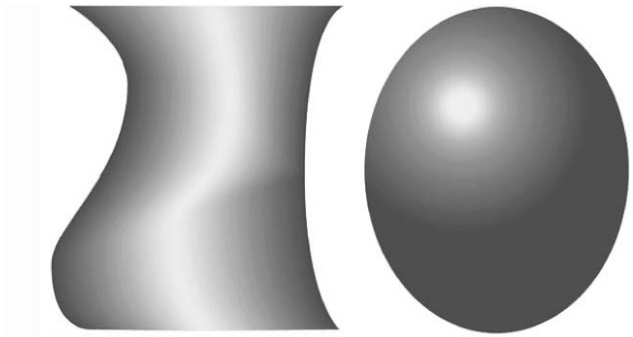
$$c_{\mathrm{P}} = (1-t)c_{\mathrm{A}} + tc_{\mathrm{B}} \qquad t = \frac{x_{\mathrm{P}} - x_{\mathrm{A}}}{x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}}}$$

- tの代わりに$f(t)$として2次関数や対数関数での補完も可能

$$c_{\mathrm{P}} = (1-f(t))c_{\mathrm{A}} + f(t)c_{\mathrm{B}}$$
$$f(0) = 0, f(1) = 1$$



[a] 1次元的グラデーション



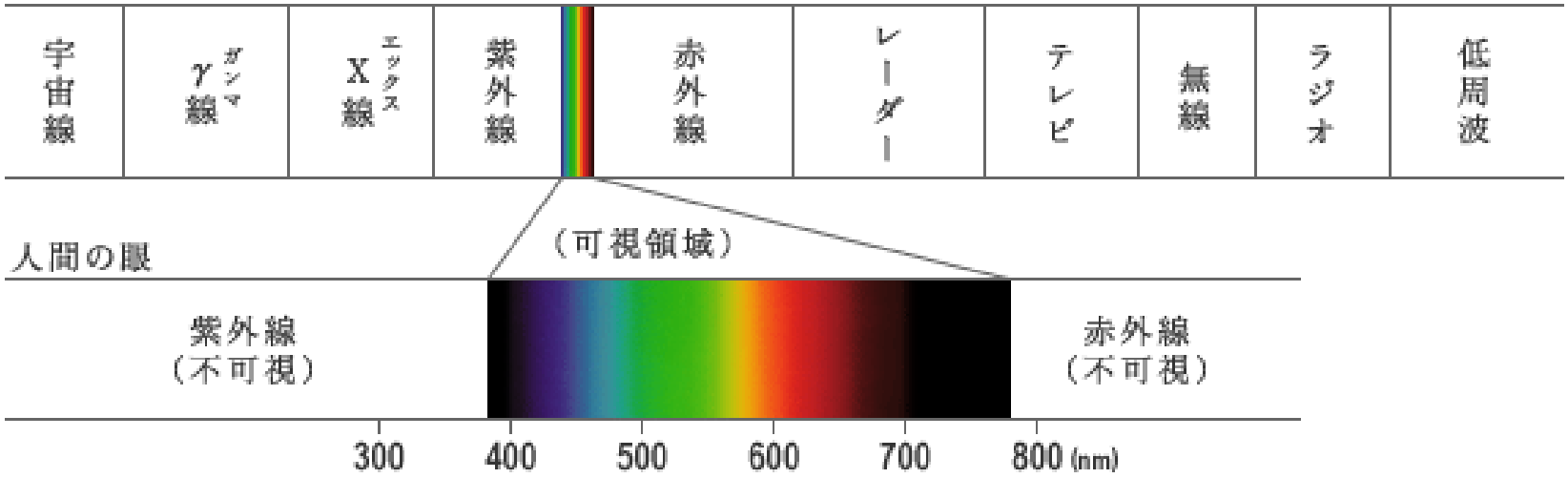
[b] 2次元的グラデーション

グラデーションの例

グラデーションを用いた画像

色の感覚を引き起こす光

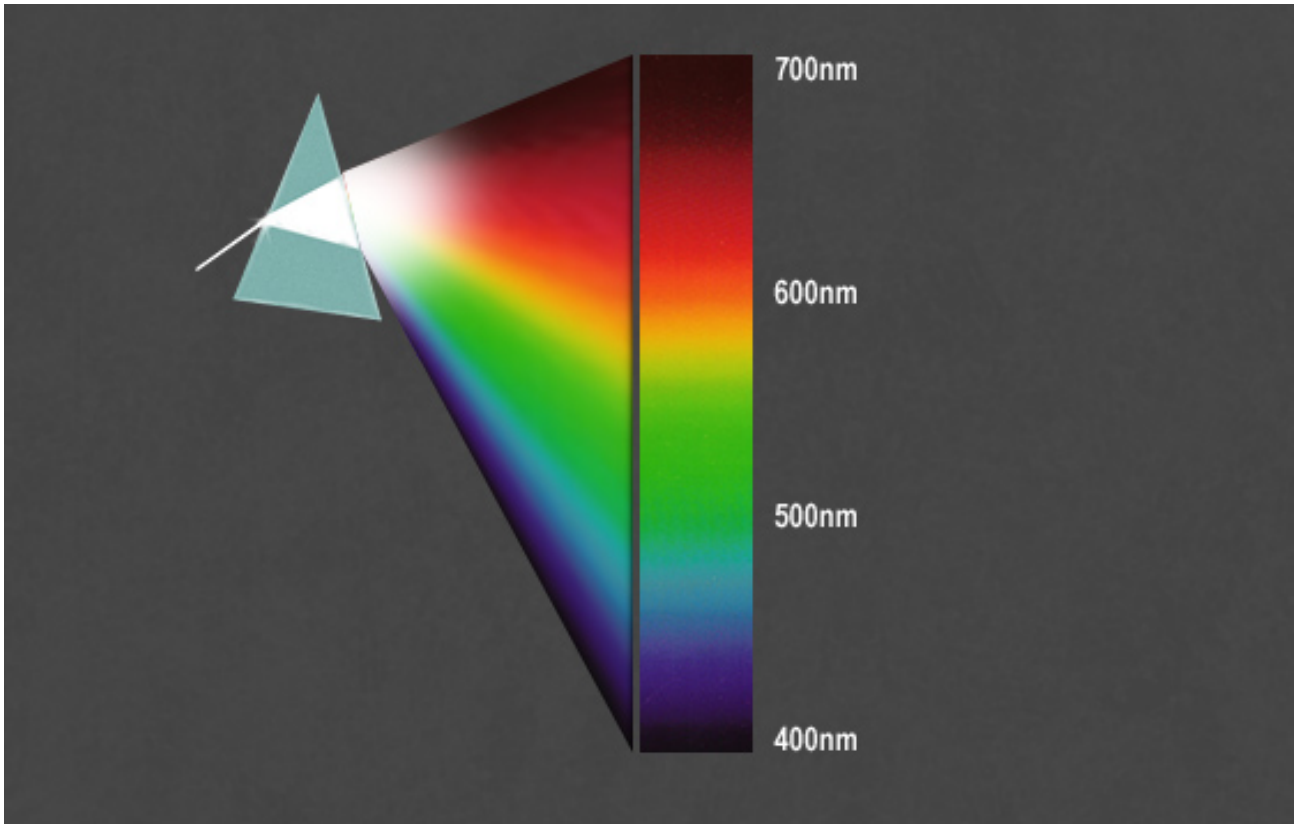
- 電磁波の一種である光は眼に入り色という感覚を起こす
- 光自体は色ではなく，目が光の強弱と波長の相違を刺激として感じ，脳が働いて色を識別する
- 電磁波の中の人間の目に見える範囲を可視領域と呼ぶ
  - 波長の幅は360～400nmから760～830nmと極めて狭い
  - 人間と他の動物では可視領域が異なり、例えばトンボ340nm～620nmで、赤の波長を感じないが紫外線を見ることができる
  - サルやハトの可視領域は、人間に非常に近い



知っておきたい、色の話　http://www.sharp.co.jp/aquos/technology/color/

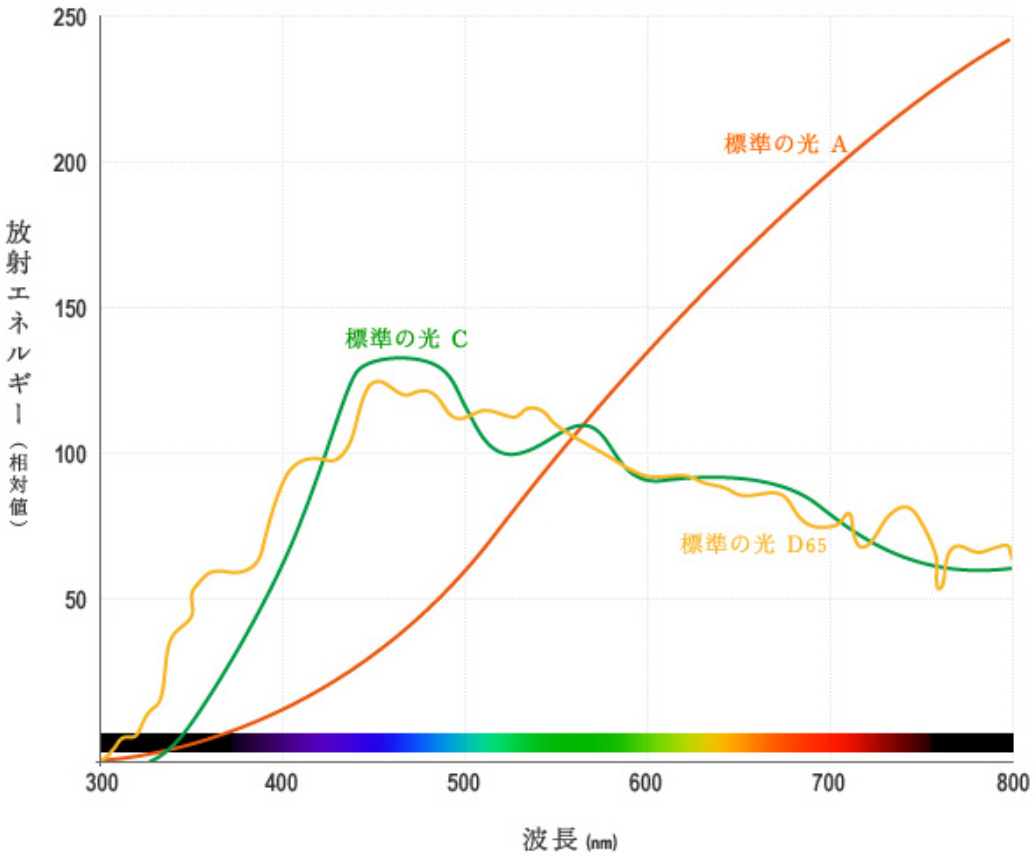
色の感覚を引き起こす光

- 人間の目に見える光(可視光)は，赤橙黄緑青藍紫の虹の７色に分けて表現され，白色の太陽光はプリズムで７色に分かれることから，太陽光スペクトルと呼ばれる



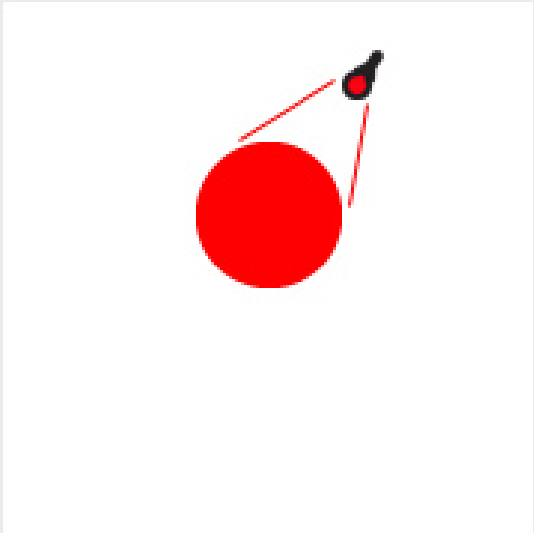
光の種類

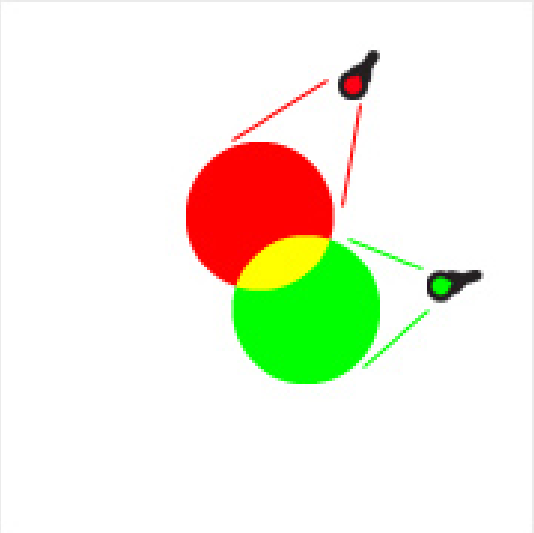
- 光源の種類が異なると同じ物体色でも眼が感知する刺激が異なるため，国際照明委員会（Commission Internationale de l'Eclairage：CIE）は、色を正確に測定する「標準の光」(標準イルミナント)を制定
  - 標準の光A：白熱電球で照明する物体色の表示用
  - 標準の光D65：太陽光に近く，標準的な昼光で照明する物体色の表示用．色を見るための基準
  - 標準の光C：太陽光を模したもの．「補助標準の光C」と呼ばれ，D65を置き換える傾向にある

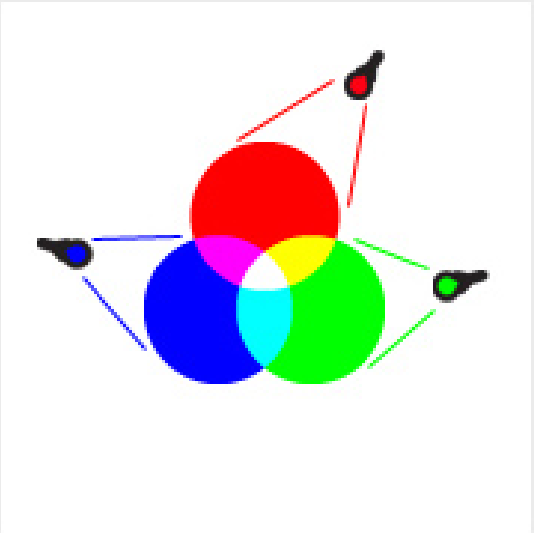


色の三原色～色光の3原色

- さまざまな色を作り出すもとの色が３原色
- 原色には“色光の３原色”と“色材の３原色”の２つがある
- 色光の３原色は，赤(Ｒ)・緑(Ｇ)・青(Ｂ)で、混ぜれば明るさが増し、全部を混ぜると白色になる

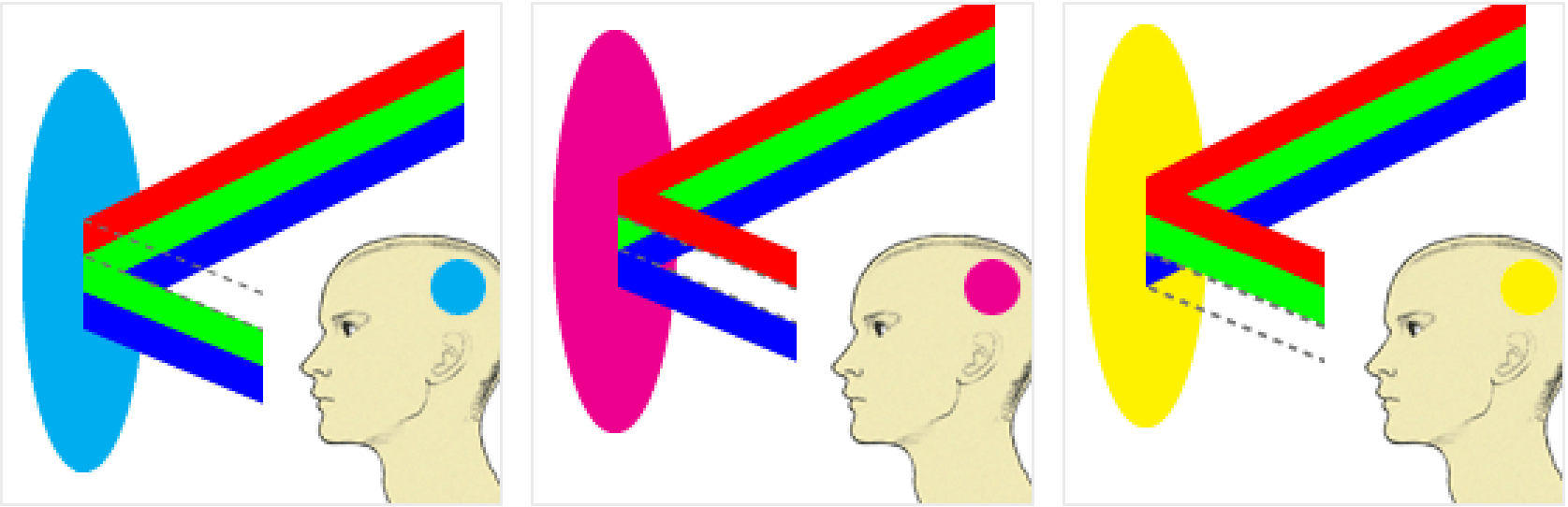






色の3原色～色材の3原色

- “色材の色”は物体に当たった光の吸収と反射で生じる
  - 赤が吸収され緑と青の光が反射する物体はシアン(Ｃ)
  - 緑が吸収され赤と青の光が反射する物体はマゼンタ(Ｍ)
  - 青が吸収され赤と緑の光が反射する物体はイエロー(Ｙ)
- “色材の３原色”はＣＭＹで表記され、色を混ぜると暗くなり，ＣＭＹを全部を混ぜると黒になる



3原色発見の歴史

- 1720年頃フランスのカラー印刷の発明者ル・ブランはCMYの色材の混合でほとんどの色が再現できることを実証
  - カラーコピーのトナーCMYKは、黒(Ｋ)が加わっている
- 1801年イギリスの物理学者ヤングは，人間の目はRGBの刺激に反応する機能を持ち，色光の３原色の存在を証明
- 後にドイツの生理学者ヘルムホルツがこの考えを発展させ具体的に数値化を示した
  - テレビなどの映像再生機ではＲＧＢの色光がよく使われる

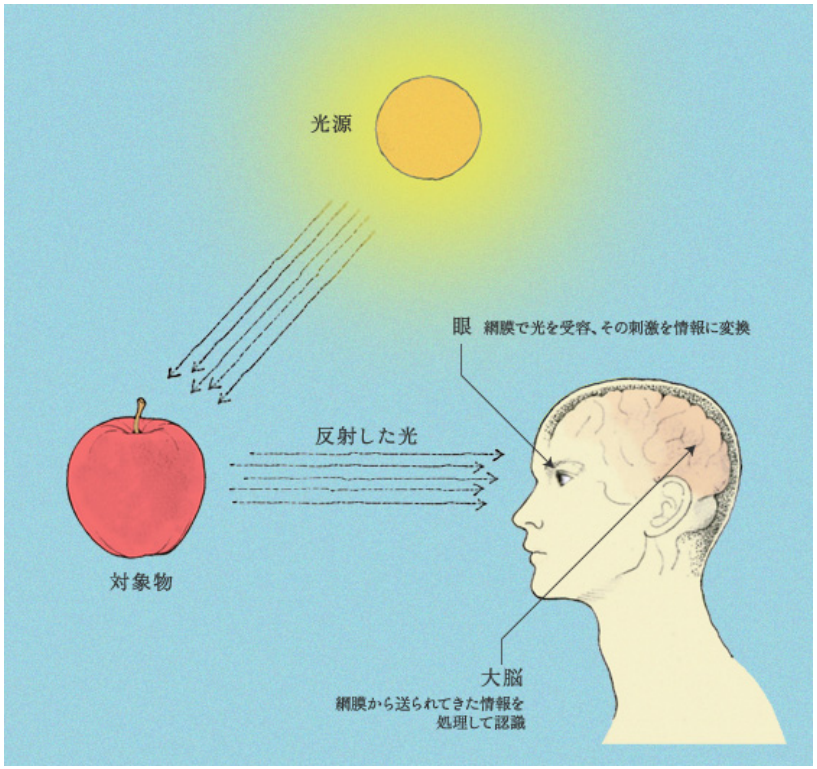
Jacob Christoph Le Blon
(1667-1741)

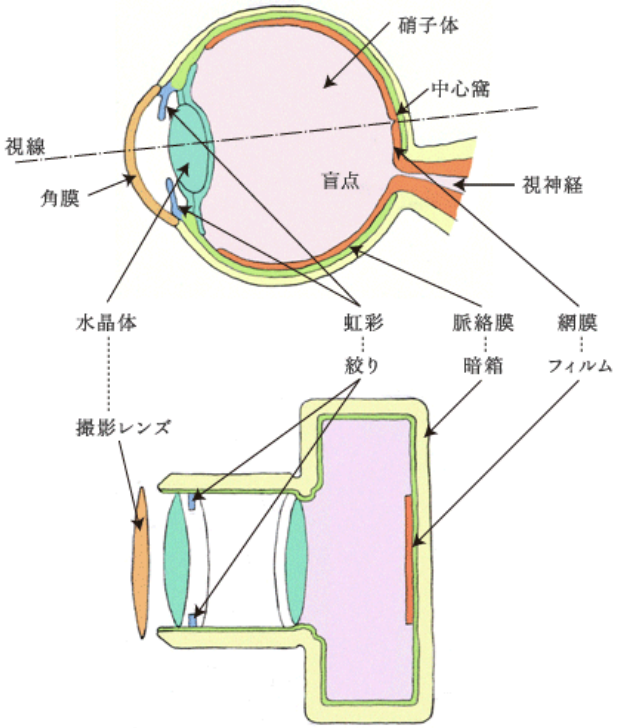
Thomas Young
(1773-1829)

Helmann Ludwig Ferdinand
von Helmholtz (1821-1894)

眼の構造と役割

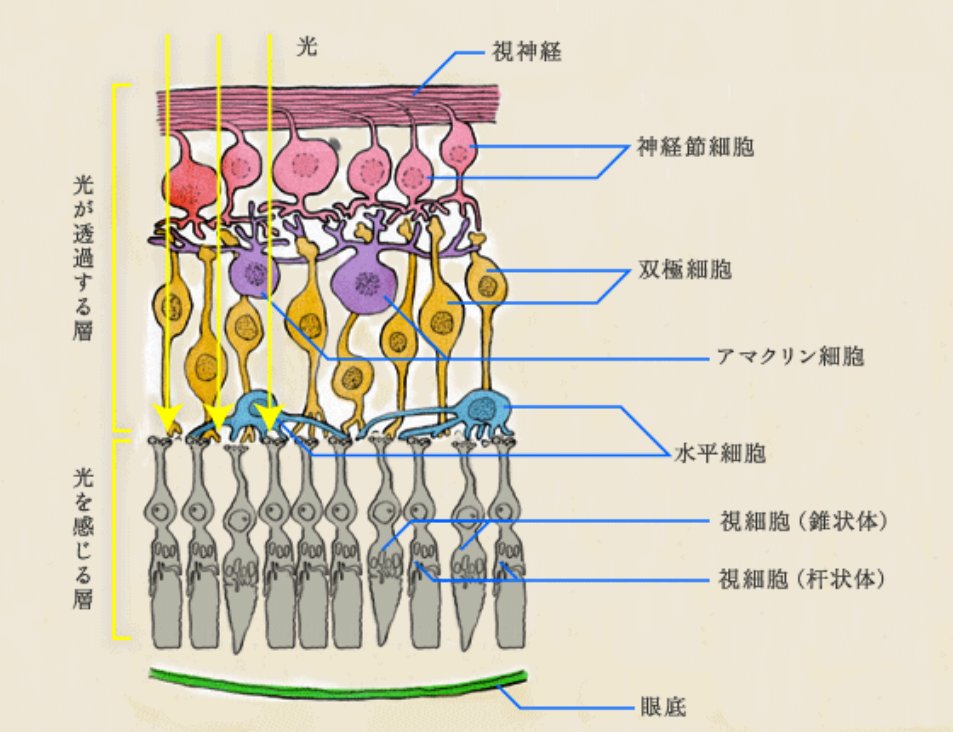
- 眼は「入ってきた光を色情報に変換し、その情報を脳へ送る」という役割りを担う直径約24mmの白い球体で、強膜，脈絡膜，網膜で覆われている
- 眼の構造をカメラと比較すると
  - レンズに相当する水晶体と角膜により焦点距離 を調節
  - 絞りに相当する虹彩により入射する光の量を調節
  - フィルムに相当する網膜の視細胞により光(色)を識別





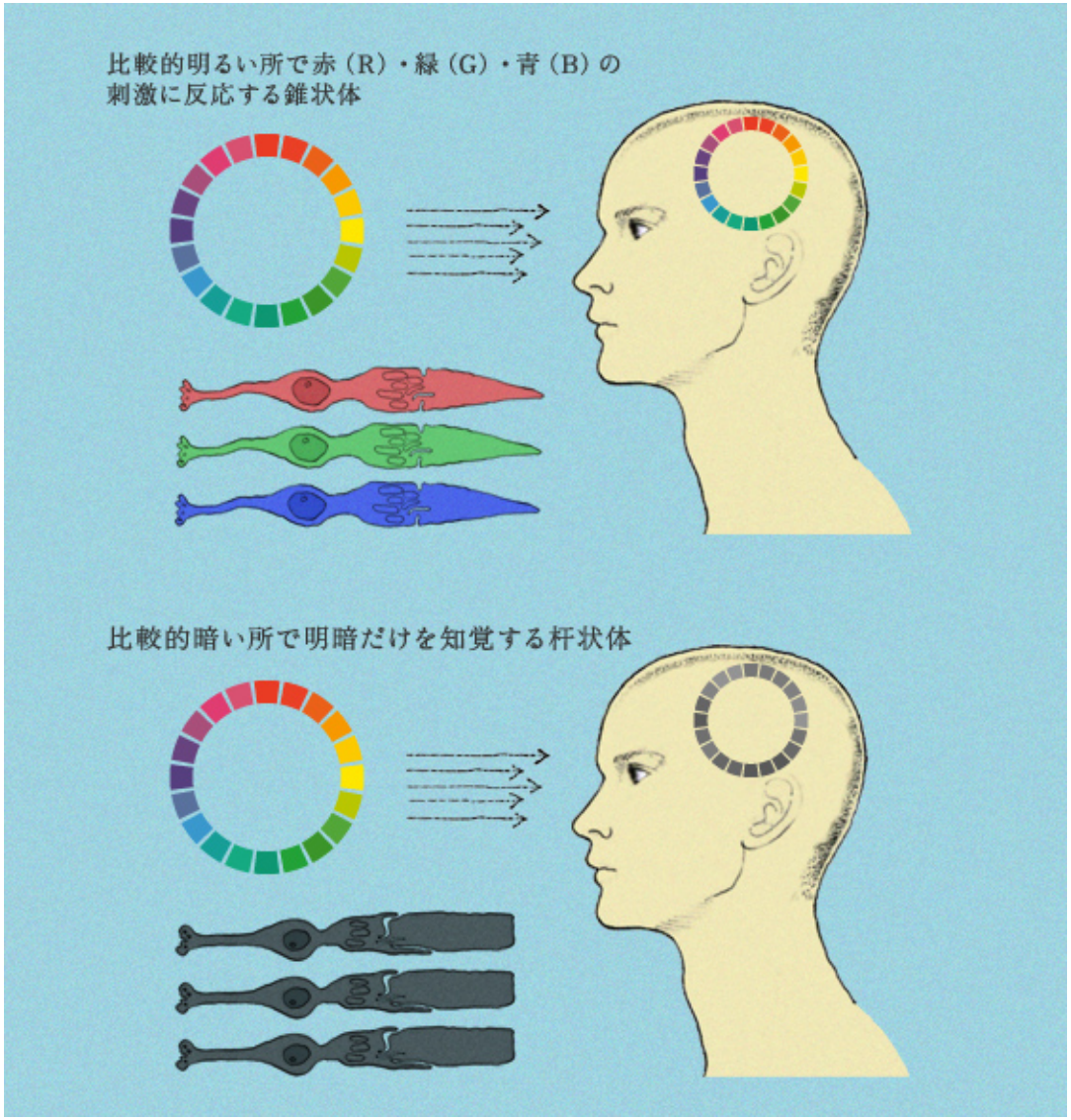
網膜の機能

- 網膜は眼に入ってきた光を色情報に変換する役割りを持つ
- 厚さ0.3mmの透明膜で数種類の細胞からなる複雑な構造
- 光は表面層を通過して，感光性を持つ視細胞に到達
- 表面層は最奥にある視細胞からの信号を受けて脳に伝達する神経節細胞で覆われる
- 中層部に位置するアマクリン細胞，双極細胞，水平細胞は，視細胞から神経節細胞へ信号を効率よく伝達する割りを担う

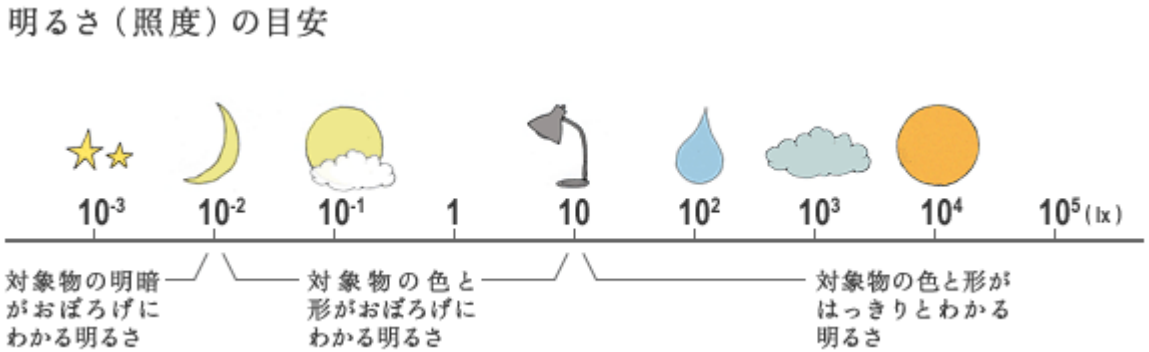


網膜の機能

- 感光性をもつ視細胞には、比較的暗い所で明暗だけを知覚する杆状体と比較的明るい所でRGBの刺激に反応する錐状体の2種類がある
- 網膜はカメラのフィルムに例えると高感度の白黒フィルムと中程度のカラーフィルムから構成される

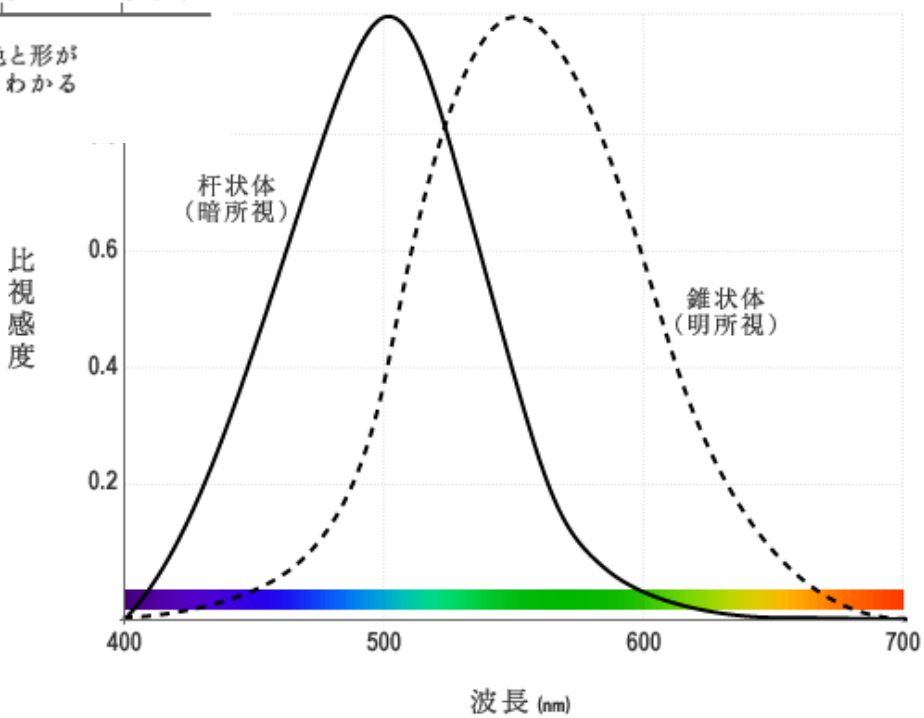


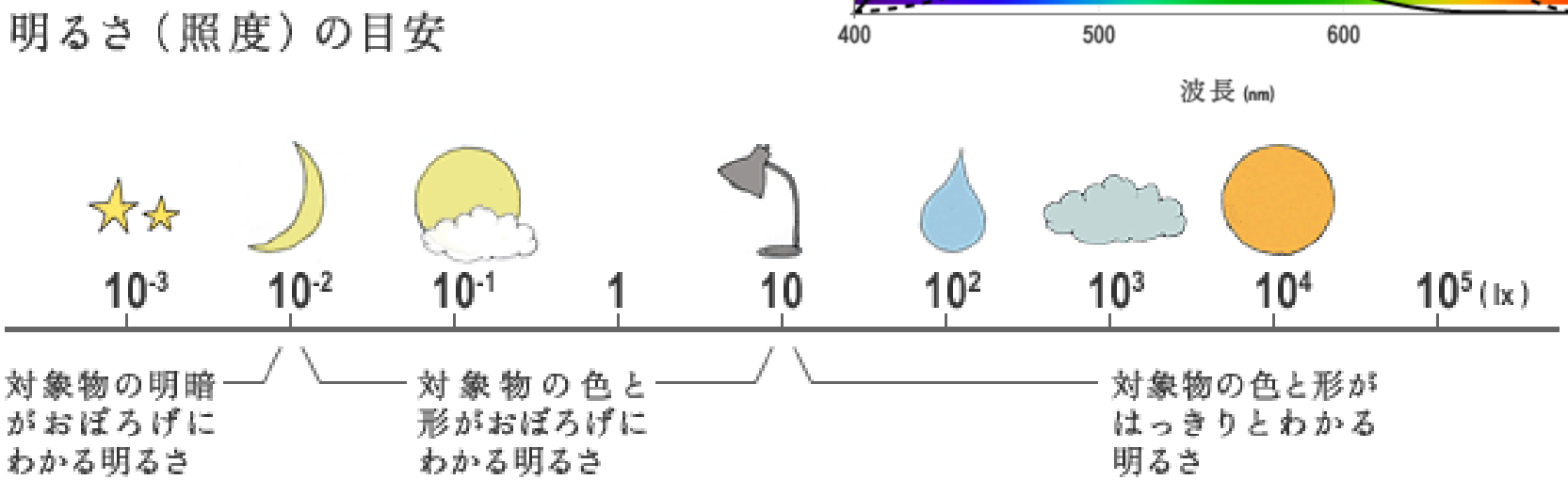
度



瞳孔の大きさを変え、眼に取り込む光量を調節

- 瞳孔径の変化だけでは不十分なため、杆状体と錐状体で役割りを分担して網膜の感度を大幅に変えている





明るさの感度

- 暗所視：ごく暗い光で杆状体のみが働く状態
- 薄明視：薄明るく杆状体と錐状体の両方が働く状態
- 明所視：明るく強い光で錐状体のみが働く状態
- 昼間は赤や黄を鮮やかに感じ、青や緑は黒ずんで見える
- 夕方は青や緑が鮮やかに見え、赤や黄が暗く見える

昼

昼間は赤や黄を鮮やかに感じ、青や緑は黒ずんで見えます。

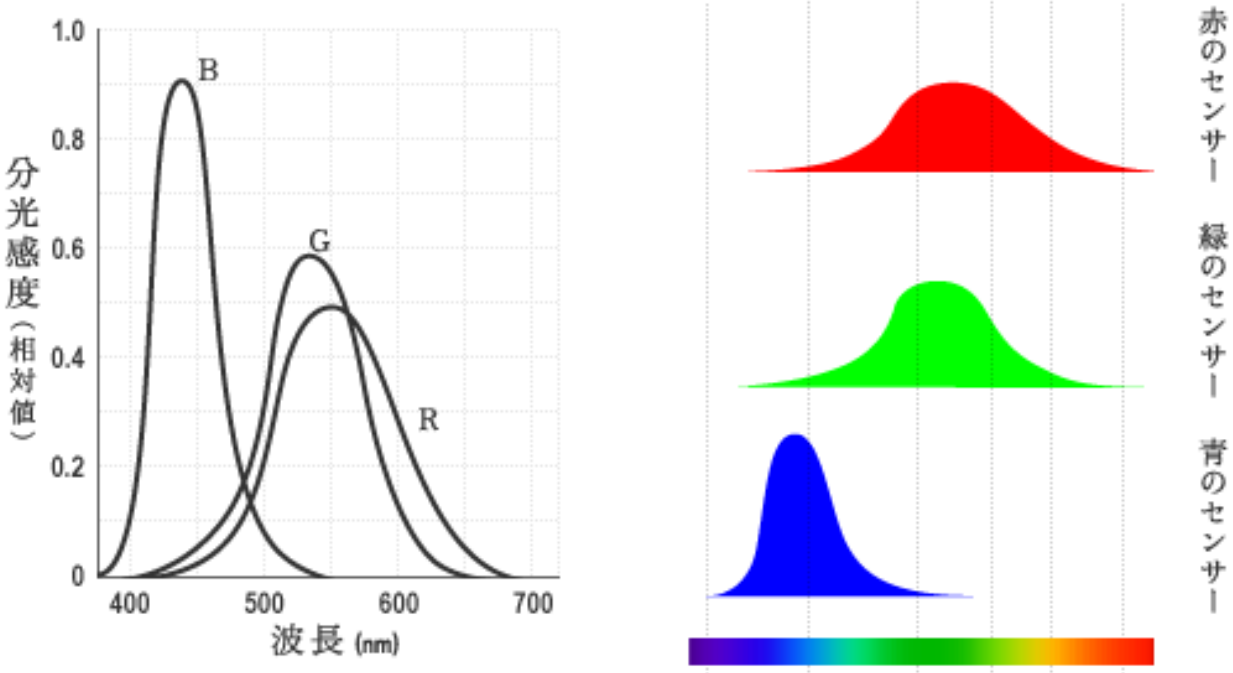
夜

夕方は青や緑を鮮やかに感じ、赤や黄色が暗く見えます。

色覚モデル～3原色説

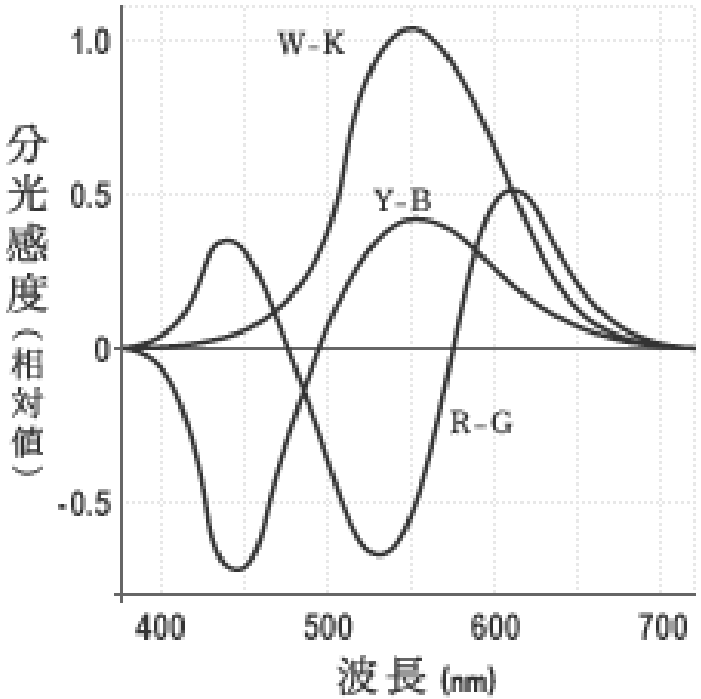
- 網膜にはRGBに応答する３種類のセンサーがあり、その応答量の割合で色を感じ分ける
- RGBの光の混合でほとんどの色が再現される実験に基づき理論的に導き出されたものではないが，現在のテレビ，写真，印刷等は全て３原色説に基づいて開発されている

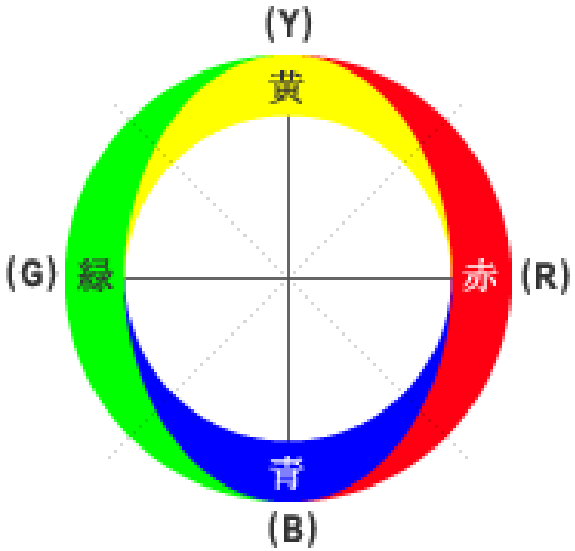
3原色説におけるセンサーの感度



色覚モデル～反対色説

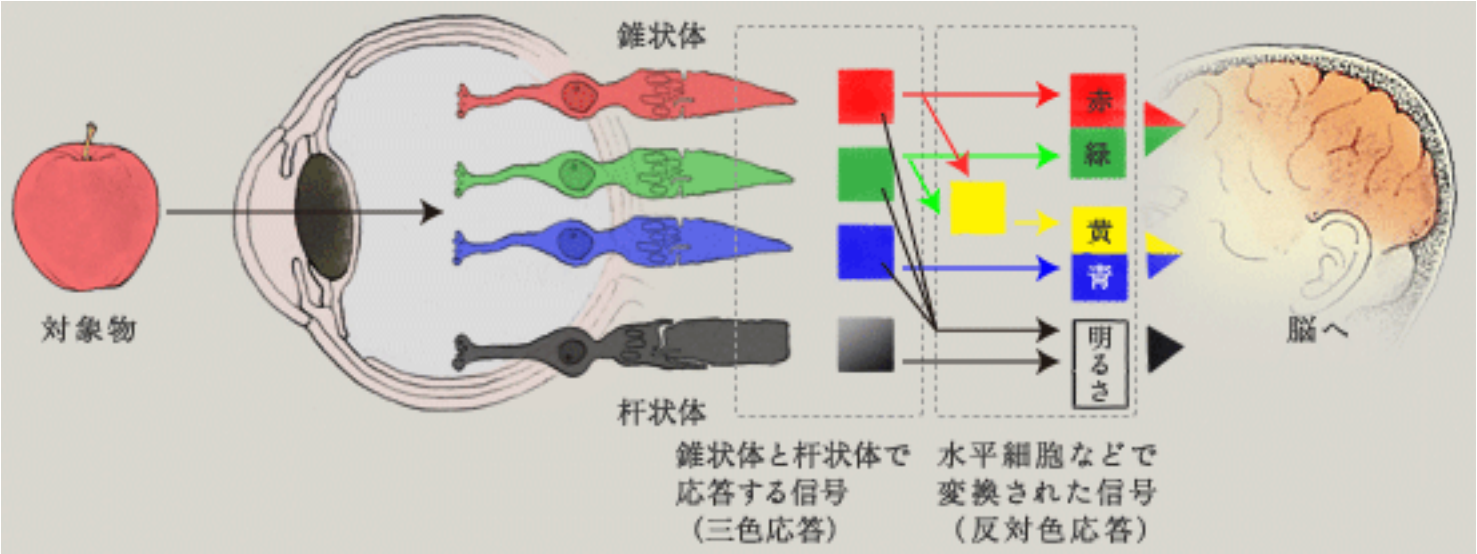
- 網膜は，赤－緑，黄－青，白－黒に応答する３種類のセンサーを持ち、その応答量の割合で色を感じ分ける
- 黄色味の赤色はあるが緑色味の赤色はなく，緑色と赤色は反対の位置にある反対色であるという経験的事実に基づく
- 反対色説は基本的な色として，赤・緑・黄・青の4種類を考えるので、”4色説”とも呼ばれる





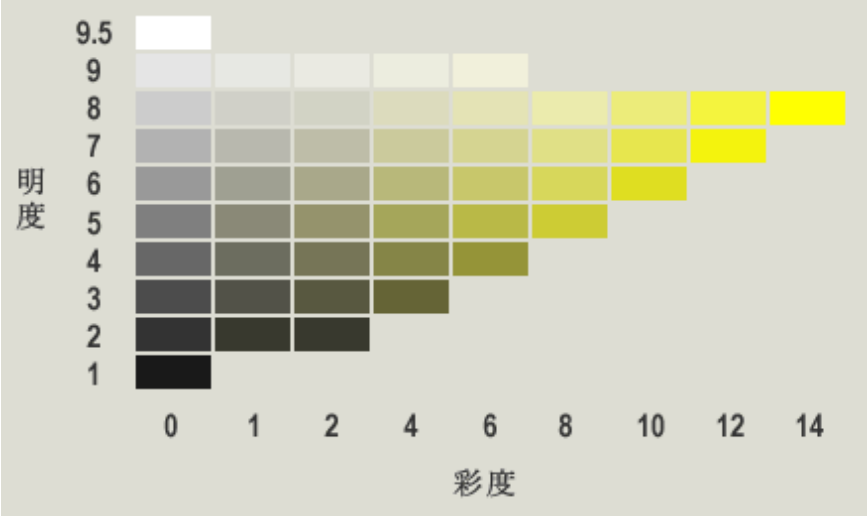
色覚モデル～段階説

- 近年の測定技術の進歩により錐状体の３原色応答が実証され“３原色説”が色覚の仕組みの説明に最適とされてきた
- 別の実験では明るさの応答と反対色の応答を示したことから「錐状体が３色応答で発生した電気信号を，視細胞の中層部にある各種細胞が反対色説に従う信号処理を施して脳に伝達する」と考えるように
- さらに暗所視で働く杆状体も一部の機能を担うことが実証され、「網膜に存在する３種の錐状体と杆状体が、巧みに役割り分担と協働作業を行い、人の活動範囲における広い明るさと色の変化に対応して、視覚を制御している」という考え方が一般的に
- 現在では人の眼は最初に３原色応答で色を感じ，反対色応答の信号に変換して脳へ伝達する「段階説」が有力とされている



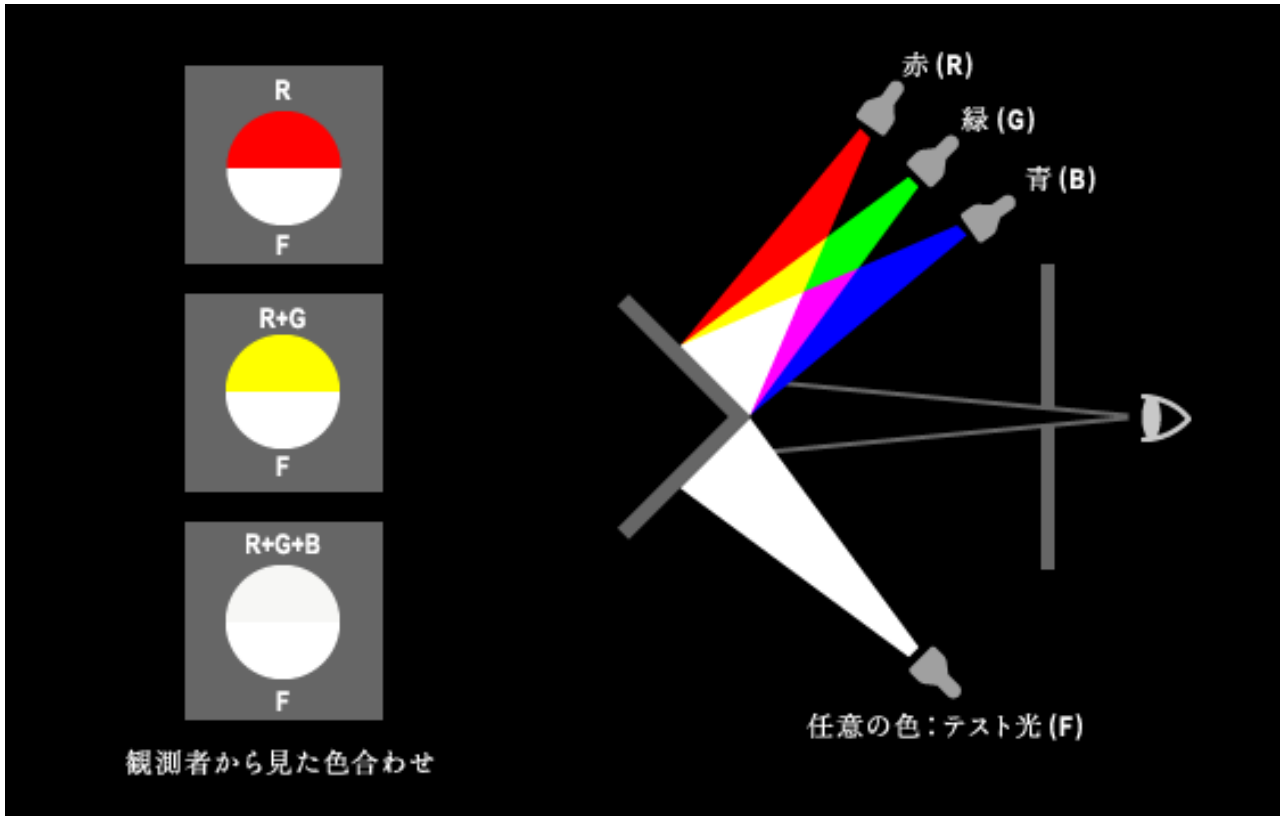
顕色系の表色～マンセル表色系

- 20世紀初頭にアメリカの画家マンセルが提唱した「マンセル表色系」は、色見本を用いる顕色系の代表
- 色の３属性の色相(RGB等の種類)・明度(明暗感覚)・彩度(鮮やかさ)に基づいて体系化
- 顕色系は色見本で直感的に理解しやすいが，色の説明の精度が低く数値計算で色を割り出す作業には馴染まない
- 色票を用いる顕色系は他に，オストワルト表色系，DIN表色系，OSA表色系などがある。



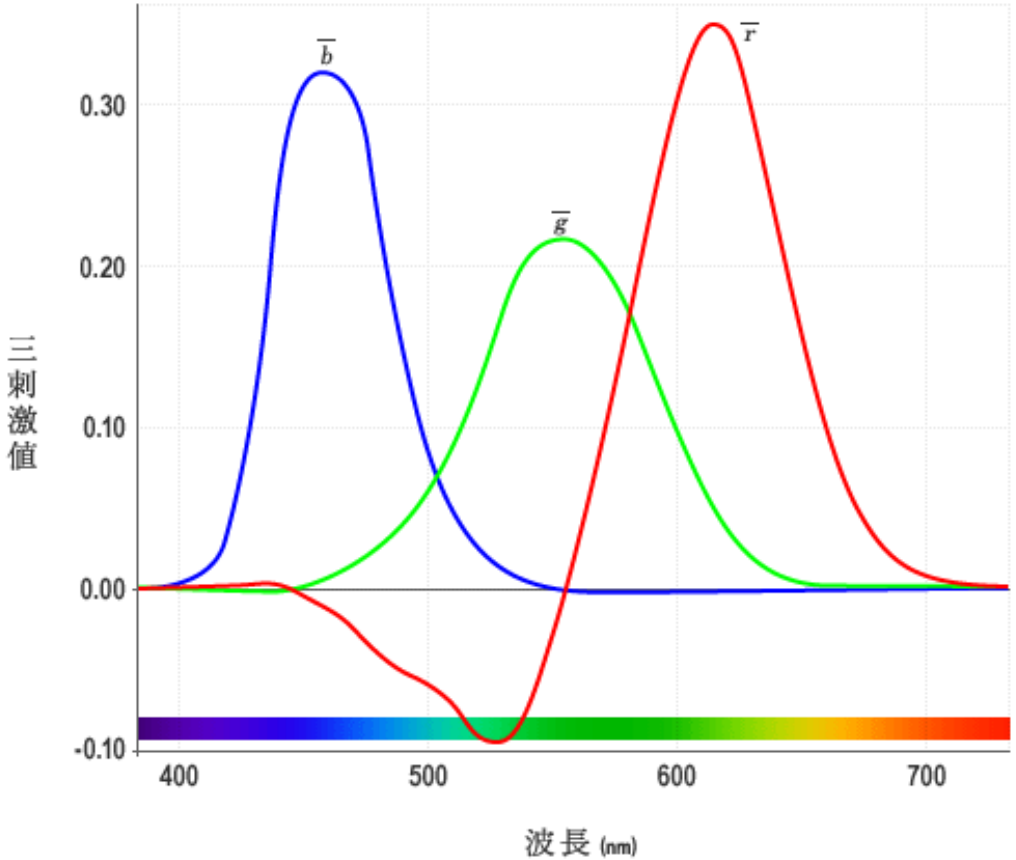
混色系の表色・CIE表色系

- 印刷物や物体の色を表す顕色系体系とは別に，ほとんどの色光はRGBの混合で作れるという実験事実に基づいた混色系の体系
- RGBの光の強度を調節・混色し，物の色と見比べながら色を等しくしていく方法で，“色合わせ”や“等色”と呼ぶ



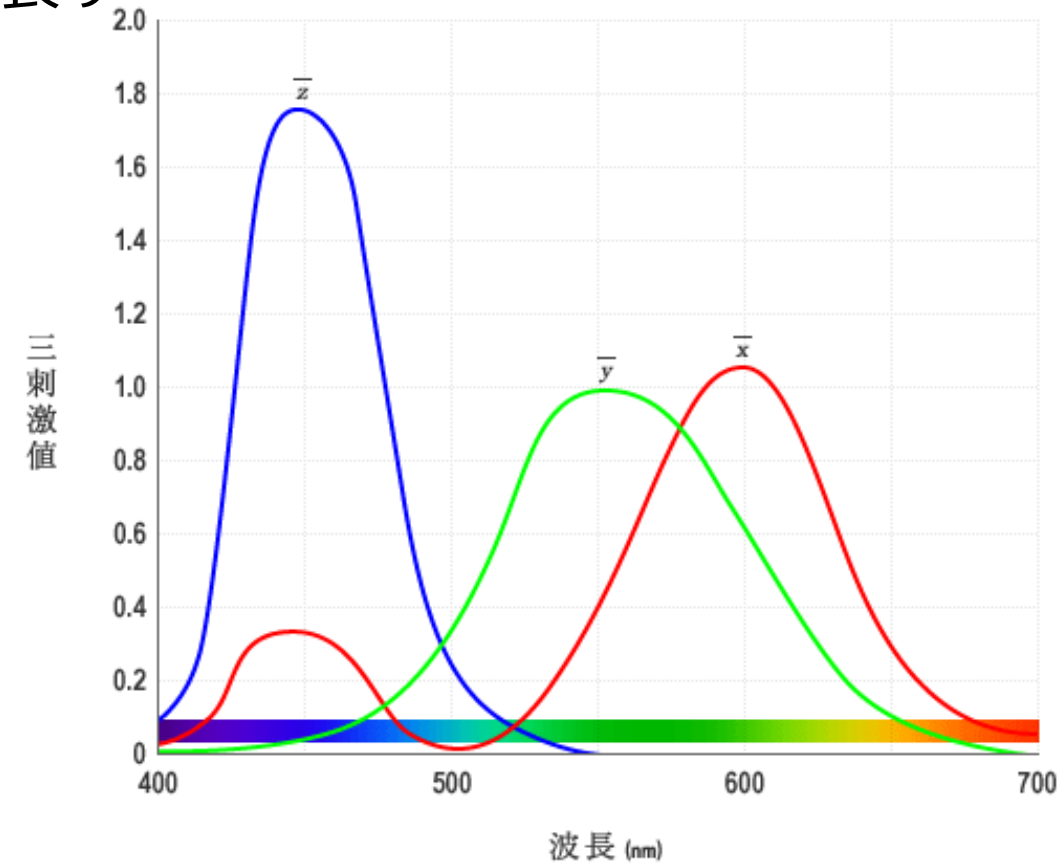
混色系の表色・CIE表色系～RGB表色系

- 等色するために必要なRGBの混色の度合い“三刺激値”を各の波長毎に求めたものを等色関数と呼ぶ
- CIEが定めた等色関数に基づいて色を表す体系を“RGB表色系”と呼ぶ



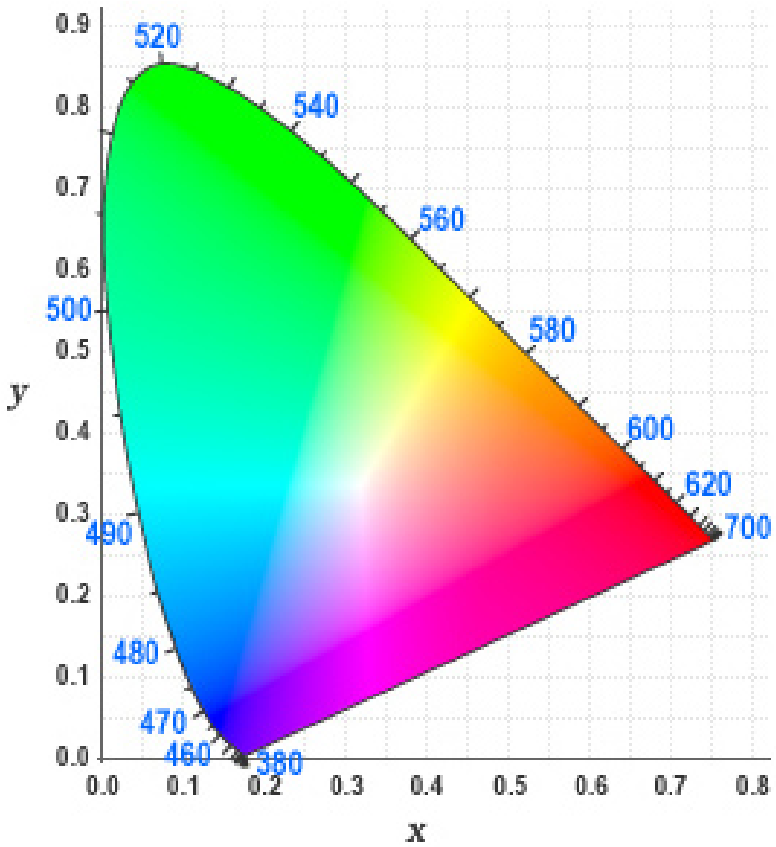
混色系の表色・CIE表色系～XYZ表色系

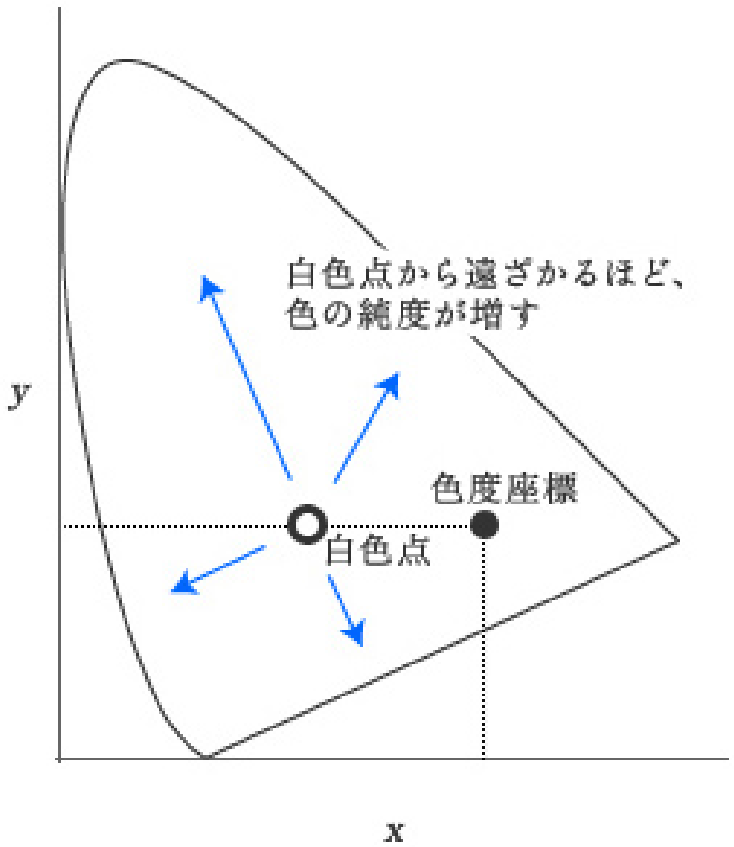
- RGB表色系は関数に負の値があることが扱いにくく、光源の輝度を直接表現できないなどの難点があるため、新たに三刺激値をXYZとしたXYZ表色系が導入された
- Xは赤の成分，Yは明るさ(輝度)を含む緑の成分，Zは青の成分を表す



混色系の表色・CIE表色系～xy色度図

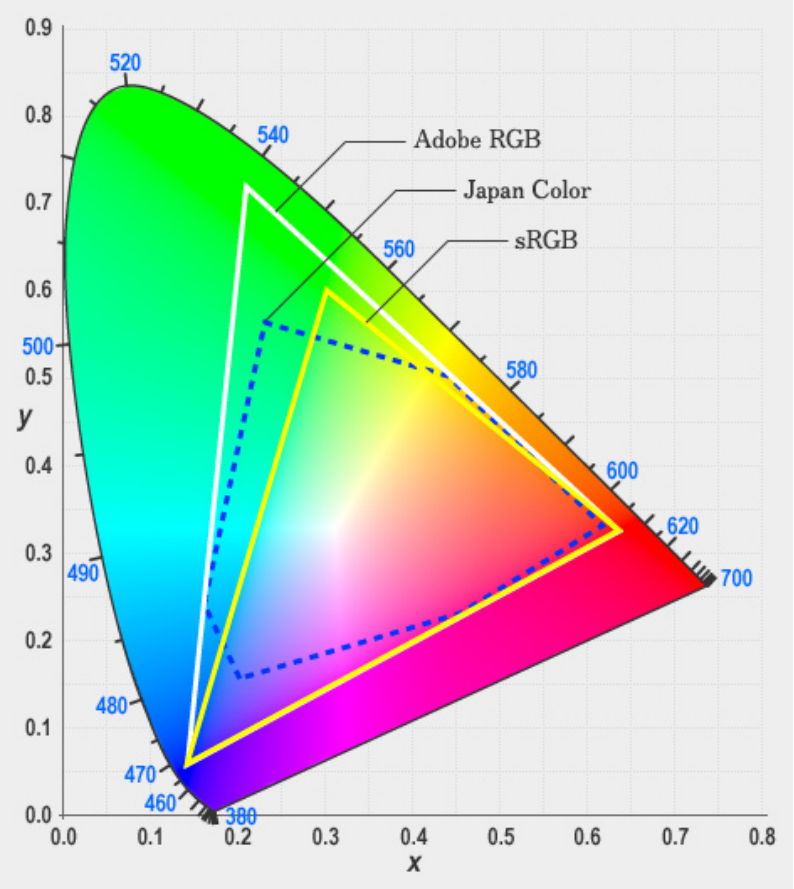
- CIE表色系の３次元の色空間の表示することが難しいため２次元に投影した色度図が使用される
  - XYZ表色系からはxy色度図が得られ，馬蹄型グラフは人の目が認識できる全ての色の範囲を表す





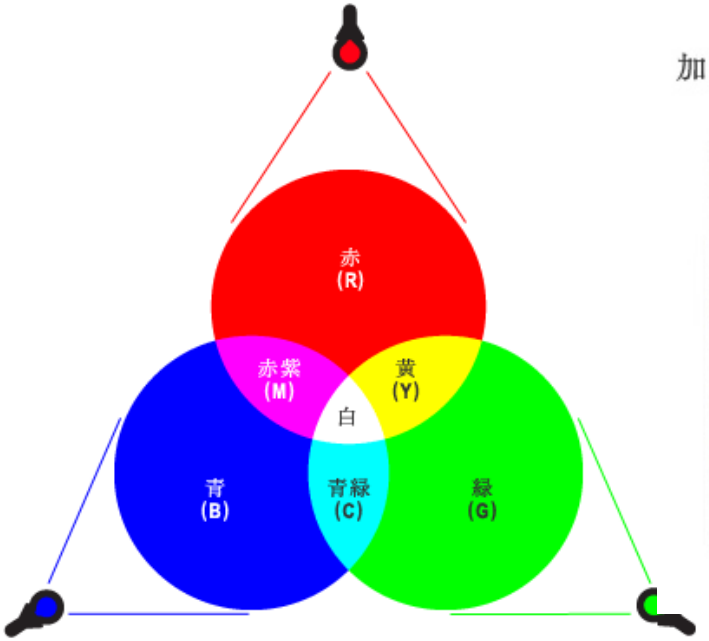
さまざまな色域基準

- RGBで再現される色域には国際電気標準会議(IEC)が規定したsRGBとアドビシステムズ社が規定したAdobe RGBの規格が存在
  - sRGBはJapan ColorのCMYKよりも色再現域範囲が広いが，CRTディスプレイでの色再現が目的なため一定の限度がある
  - Adobe RGBは色範囲が広く高輝度の色再現が可能で，PCモニタやデジカメなどで使用される
  - Japan Color：カラー製版印刷のための規格で、印刷データの転送やカラーマネージメントの分野で利用され共通指標のひとつ．米国のSWOP，欧州のEuro Standardなど同種の標準がある

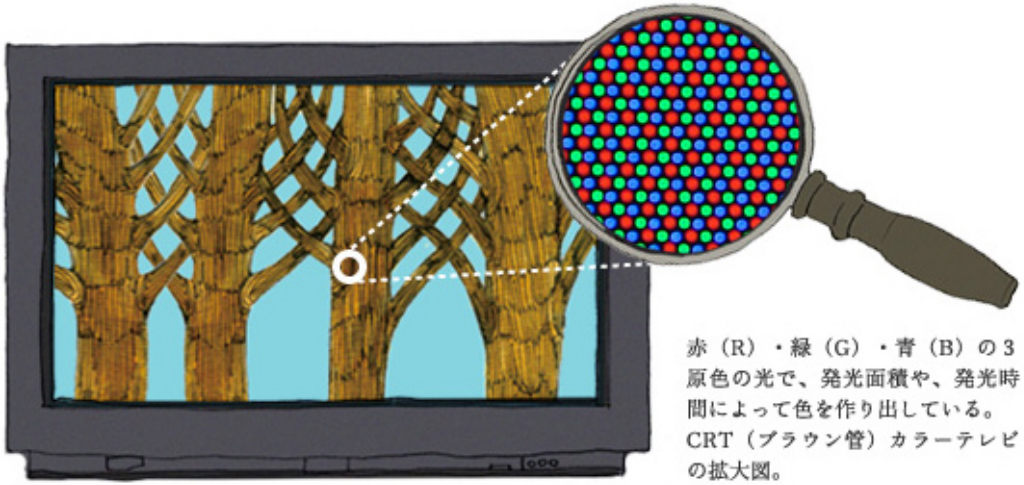


2つの混色原理～加法混色

- RGBの３原色の光の強さを調整し１箇所に投影することで色を再現する方法
  - 混色の段階で色の明るさが足し算的に明るくなる
- テレビやPCディスプレイなどには、加法混色の中の中間混色と呼ばれる技術が使われる
  - 3原色の光の混色面積や混色時間の比率が人の眼の中で処理され，各色の中間の明るさとなり混ざったように見える



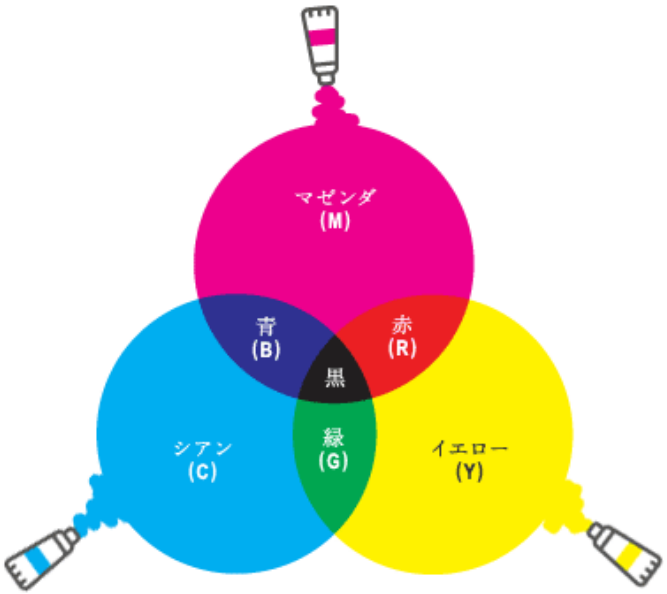
加法混色の例

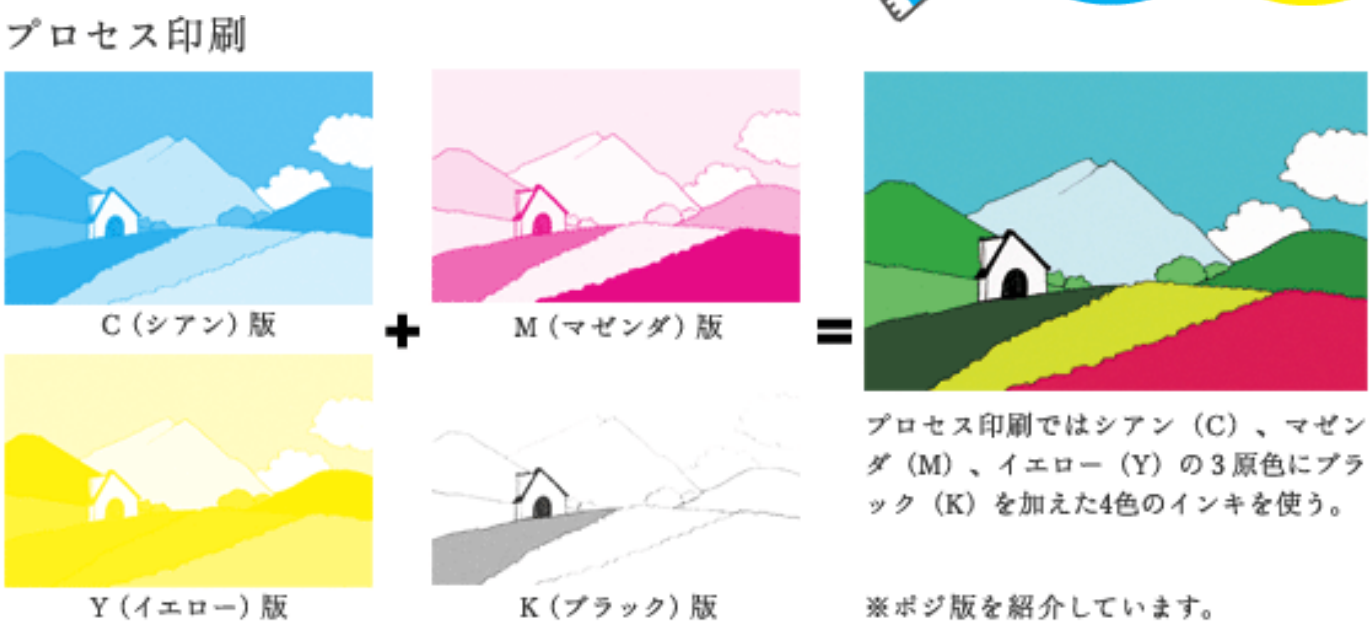


赤（R）・緑（G）・青（B）の３原色の光で、発光面積や、発光時間によって色を作り出している。CRT（ブラウン管）カラーテレビの拡大図。

2つの混色原理～減法混色

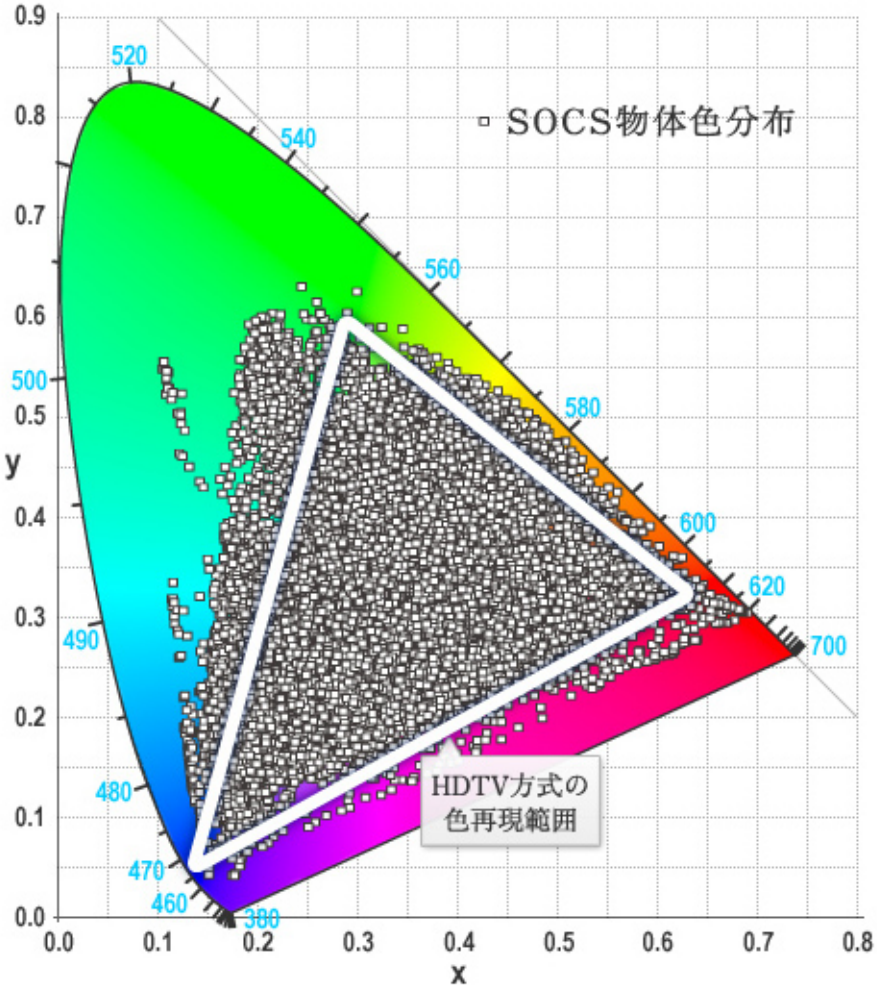
- カラー印刷やカラー写真のプリントなどのように，色材の３原色であるCMYを絵の具で混ぜるように混合する方法
- 光を吸収させる(＝明るさが減少)ために「減法混色」と呼ばれる





カラーマネジメントの世界

- 異なる出力再生機でも正しい色を再現するには，各カラーシステムを正確に変換するカラーマネジメントが必要
- CIE表色系を介せば，どのような色信号・色情報も受け渡し可能で，正しい色再現を実現する有効な手段

色再現技術の広がり

- テレビの色再現規格であるNTSC，BT.709は人間が認識できる全ての色を含んではいない
- SOCS(Standard Object Color Spectram) 物体色分布は、カラー画像入力装置の評価・設計のために物体色の分光反射率を体系的に収集・整理して発行されたデータベース
- 現在のテレビで再現できる範囲の外にも多くのSOCSが存在