

ディジタルメディア処理

担当: 井尻 敏

カメラ



画像の取得方法・人間の視覚

達成目標

- デジタル画像の取得方法に関する基礎的な用語を正しく利用できる
 - デジタルカメラの基礎的な構造と機能を説明できる
 - 人間の視覚系の基礎的な構造と機能を説明できる

Contents

- デジタルカメラ
- 人間の視覚

カメラとは

- 光を計測・記録する装置
- 一般に、外部からの光を集めレンズ、と、光の強度を記録する装置（フィルム/撮影素子）から構成される

・フィルムカメラ

集めた光をフィルム上に記録
現像：フィルムに化学処理を施しネガに
プリント：銀塩プリント/印刷



CC0
<https://pixabay.com>



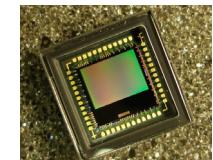
© FUJIFILM, 2017
<http://fujifilm.jp/>

・デジタルカメラ

集めた光を撮影素子(CCD・CMOS)により電気的に記憶
センサ上にフォトダイオードが配列されておりこの数
が解像度を決める



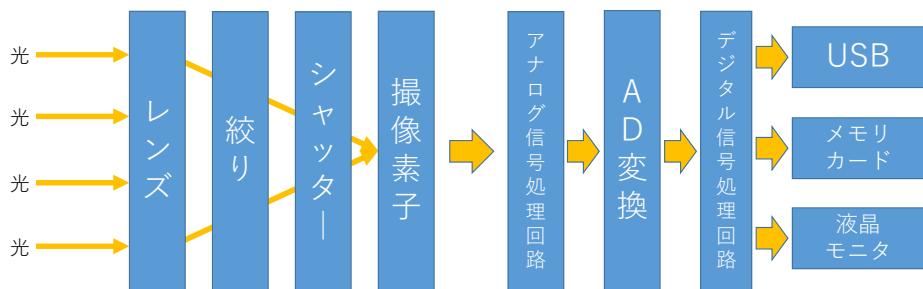
Nikon D7000 とズームレンズ
By Filya1 [CC-BY-SA 3.0]
from wikipedia



CMOS Image Sensor
By Filya1 [CC-BY-SA 3.0]
from wikipedia

デジタルカメラの構造

- 光はレンズを通り撮像素子上に像を結ぶ
- 光の量を調整するための、絞りとシャッターが存在
- 撮像素子 (CCD/CMOS) にて得られた信号は、A/D変換後、画像処理される
- 画像処理部では、ノイズ除去や階調・色調補正処理が行われ、画像が生成される



デジタルカメラの種類



COOLPIX W300
1/2.3型
6.2×4.7



Nikon1 AW1
1型
13.2×8.8



D5300
APS-C
23.5x15.6



D500
APS-C
23.5x15.7



D5
フルサイズ
35.9 x 23.9

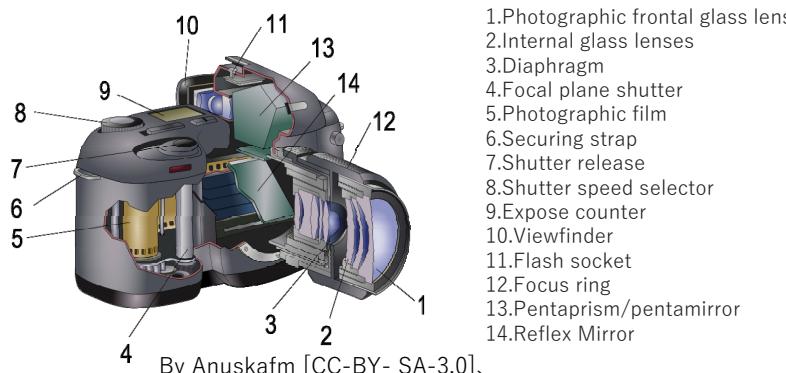
コンデジ
レンズ交換不可
撮像素子は小さい

ミラーレス一眼
レンズ交換可
撮像素子は中～大
ミラーを持たない

一眼レフデジタルカメラ
レンズ交換可
内部にミラーを持ち、撮影された写真をファイ
ンダーから確認できる

画像は<http://www.nikon-image.com/products/>より引用
© 2017 Nikon Corporation / Nikon Imaging Japan Inc.

一眼レフカメラの構造



一眼レフカメラ (Single-lens reflex camera) は、反射鏡によりレンズを通じた光をファインダースクリーンに結像させる。
これにより見たままの写真を撮影できる。

参考→ <http://www.nikon-image.com/enjoy/phototech/manual/01/01.html>

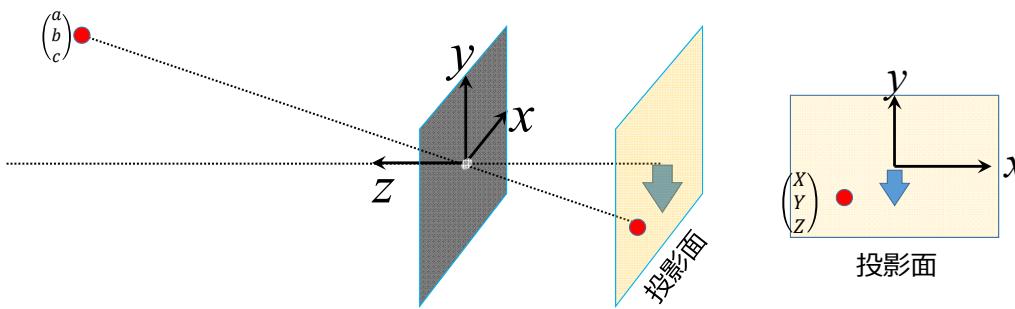
一眼レフカメラの構造



露光時間1/10のシャッターを 960fpsで撮影

画像生成の幾何学モデル

- カメラによる撮影では、3次元物体を2次元画像として記録する
- 3次元空間から発せられる光を集め、撮像素子（2次元平面）上に像を結ばせる
- 3D → 2D 変換に関する2種の幾何学モデルを紹介する
 - ピンホールカメラモデル
 - 薄肉レンズモデル
 - (厚肉レンズモデル)



- 光学中心を原点にとる3次元空間において
- 投影面は $z = -f$ の平面となる (f は焦点距離)
 - 点 $A: (a, b, c)$ の投影面上の座標 (X, Y, Z) は…

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} =$$

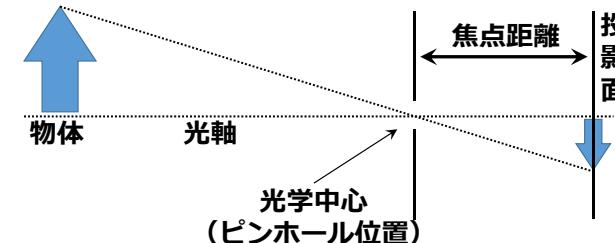
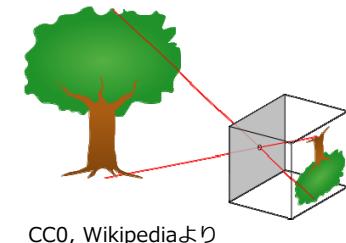
Note:

- 像は上下左右が反転する
- 奥行によるぼけは生じないのでピント調節不要

ピンホールカメラ

暗箱に小さな針穴（ピンホール）を開けると、被写体から出た針穴が穴を通り、案内箱の面に像を作る。この現象を利用したカメラ。

レンズではなく針穴を利用した撮影法

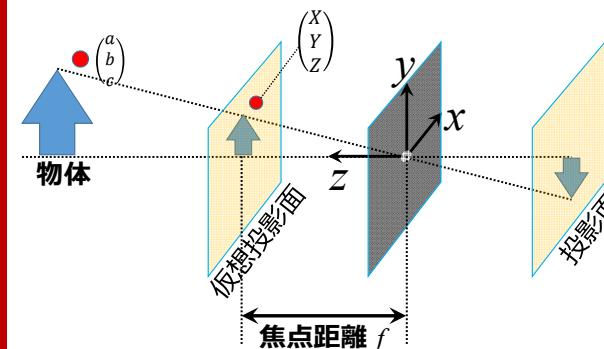


※光軸とは光学中心を通り
投影面に垂直な直線

※ピンホールモデルでは光学中心
と投影面の距離が焦点距離に

透視投影モデル

- ピンホールカメラモデル：投影像の上下左右が反転
→ アルゴリズム設計・実装時にややこしい
→ 透視投影モデルが利用される



透視投影モデル

- 左図の通り仮想的な投影面を配置
- 点 $A: (a, b, c)$ の投影面上の座標は

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} =$$

※光学の講義ではないので詳細は省いた説明です

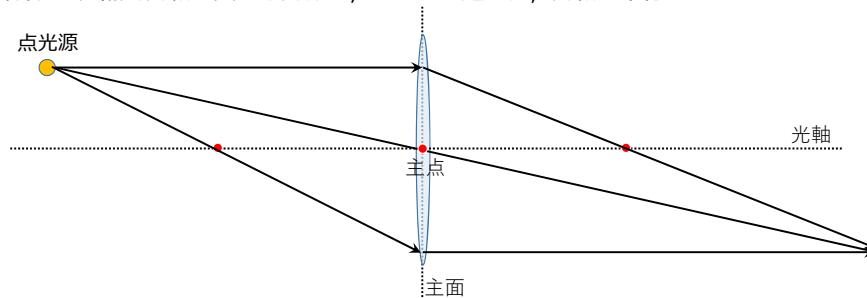
薄肉(うすにく)レンズモデル

- ・**薄肉レンズモデル**: 厚みを無視できるレンズ

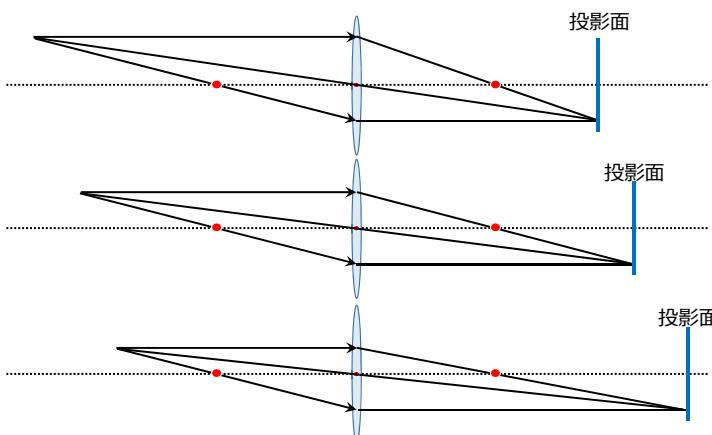
※ 光線はレンズ入射時・出射時に屈折するが厚みを無視し「主面」にて一度だけ屈折すると仮定する

- ・**焦点距離fと開口径D**により特性を表現できる

- ・ 特徴1: 光軸に平行な光線は、レンズ通過後、焦点で光軸と交わる
- ・ 特徴2: **主点**(主面と光軸の交点)を通る光線は直進する
- ・ 特徴3: 焦点で光軸と交わる光線は、レンズを通過後、光軸と平行に

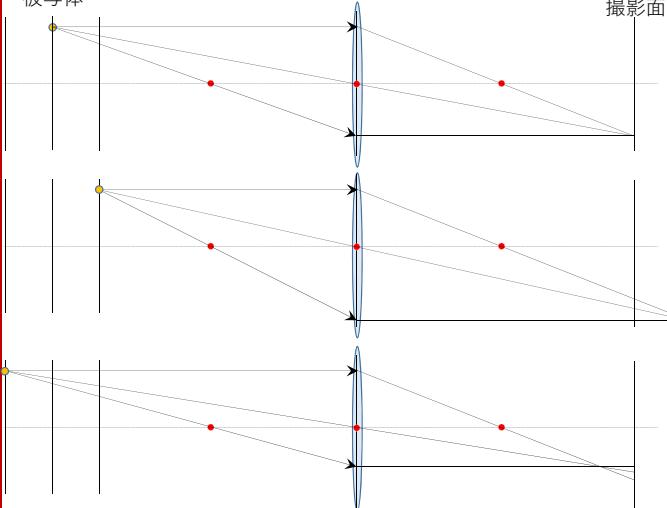


- 投影面を動かすと結像する位置（ピントの合う位置）が変化する
- ・ 投影面が遠いほど近くのものにピントが合う
 - ・ 投影面がレンズに近いほど遠くにピントが合う



ピンボケ: レンズと撮影面を固定し、被写体を前後に動かすと、、、

被写体



被写体が撮影面で像を結ぶので明瞭



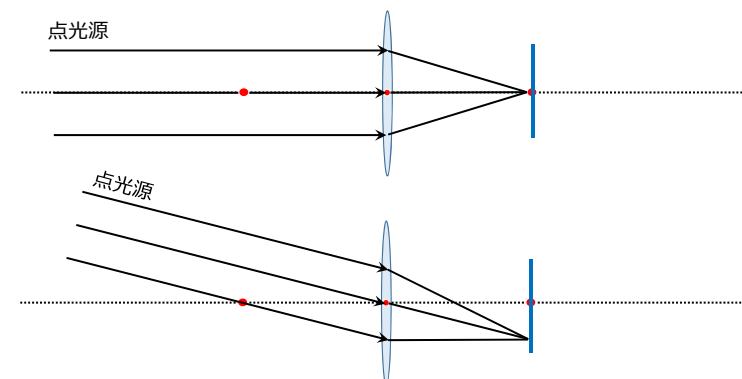
点が円状に広がった像を作る → ボケる



点が円状に広がった像を作る → ボケる

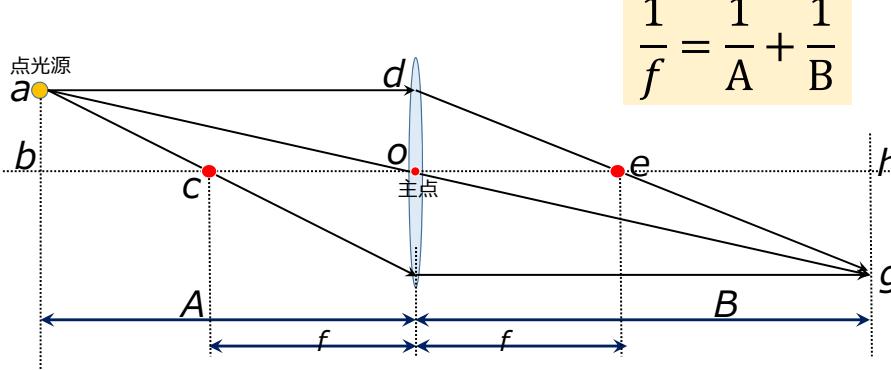
焦点位置に投影面を配置した場合

- ・ 無限遠にある点光源は平行光線となる
- ・ この平行光線はちょうど焦点位置にて像を結ぶ



薄肉レンズモデル：ガウスのレンズ公式

焦点距離 f の薄肉レンズモデルについて、レンズから A の距離にある物体が、レンズから B の距離にある投影面にて像を結ぶ
 f, A, B には次の関係が成り立つ



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{A} + \frac{1}{B}$$

(参考) ガウスのレンズ公式を証明せよ

- ado : gho が相似なので
- $A:B=ab:gh \rightarrow A * gh = B * ab \rightarrow gh / ab = B/A$
- doe : ghe が相似なので
- $do : hg = f : B-f \rightarrow ab * (B-f) = hg * f \rightarrow hg / ab = (B-f) / f$
- do = abの関係を利用した
- $\rightarrow Bf = AB - Af$
- $\rightarrow 1/A + 1/B = 1/f$
- $A = BF / (B-f)$
- $f=24\text{ mm} B=30\text{ mm}$ の場合
 $A = BF / (B-f) = 720/6 = 120\text{ mm}$
- $f=24\text{ mm} B=24.1\text{ mm}$ の場合
 $A = BF / (B-f) = 5784\text{ mm}$

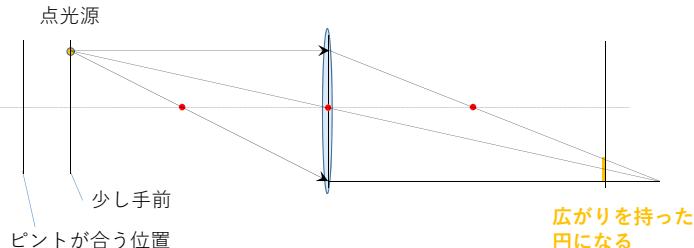
被写界深度 (1/3)

被写界深度: ピントが合って見える深度のこと

結像する位置から前後に被写体を動かすと、点が広がりを持つ円として像を結ぶ

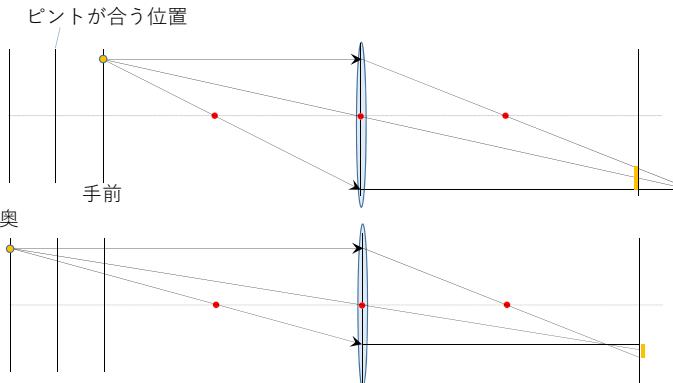
この円が十分小さければピントが合って見える

- この円を錯乱円と呼ぶ
- 十分小さい → センサの画素よりも小さい



被写界深度 (2/3)

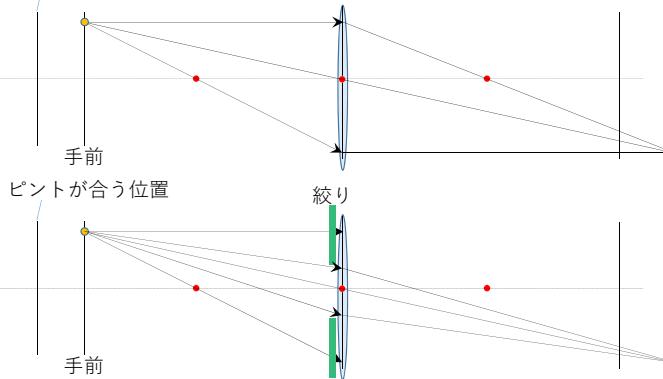
被写体を、ピントが合う位置から、同じ距離だけ手前/奥に動かすと手前のほうが錯乱円が大きくなる → 手前のほうがボケやすい（被写界深度が浅い）



被写界深度 (3/3)

レンズに絞りを配置し入射光を中心付近のみに制限する
→ 錯乱円が小さくなり、被写界深度が深くなる

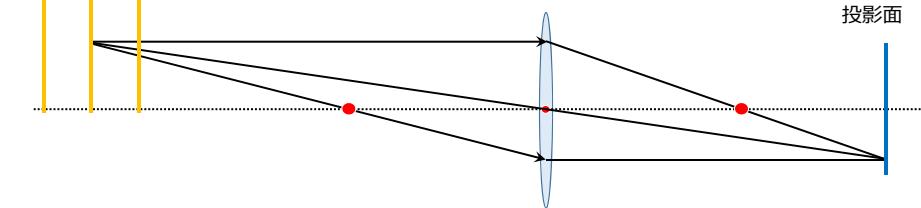
ピントが合う位置



練習問題

Bに焦点が合うよう投影面を配置したとき,
Bの奥(A)と手前(C)ではどちらがよりぼけるか?
その理由を簡潔に説明せよ。

A B C



(参考) 厚肉レンズモデル

レンズ厚みを無視できないレンズモデル

主点（主平面）が2つ存在

後側主平面・後側主点・後側焦点 ※読み方はこうそく

- レンズ左側から来る平行光の入射光と出射光の交点が成す面を後側主平面（後側主点P'）と呼ぶ
- レンズ左側から来る平行光が集まる位置を後側焦点F' と呼ぶ

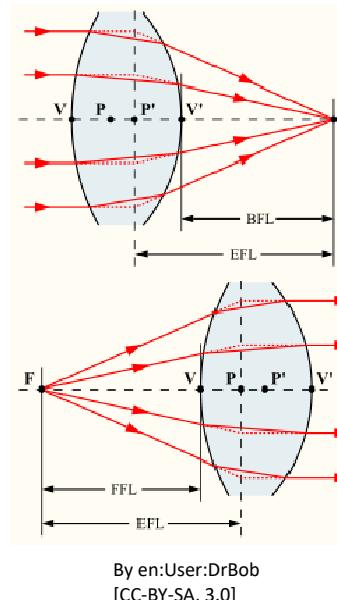
前側主平面・前側主点・前側焦点 ※読み方はぜんそく

- レンズ右側から来る平行光の入射光と出射光の交点が成す面を前側主平面（前側主点P'）と呼ぶ
- レンズ右側（撮像素子側）から入射した平行光が集まる位置を前側焦点と呼ぶ

FFL (front focal length): レンズ面(左)から前側焦点までの距離

BFL (back focal length): レンズ面(右)から後側焦点までの距離

EFL (Effective Focal Length): レンズの前側主点から前側焦点までの距離 or 後側主点から後側焦点までの距離（前後で等しい）



(参考) Lens maker's formula

球面レンズの焦点距離を導出のため レンズメーカーの公式が知られる

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \left(\frac{d}{n} \right) \left(\frac{(n - 1)^2}{R_1 R_2} \right)$$

n : レンズの屈折率

R1: 左側のレンズの曲率

R2: 右側のレンズの曲率

d : レンズの厚み

F : 焦点距離

薄肉レンズではd=0となる

参考: 薄肉レンズに関する導出

<https://www.youtube.com/watch?v=NIA0ZY50Hm0>

<https://www.youtube.com/watch?v=JRvYTvjzbSA>

まとめ：デジタルカメラ

- 最も一般的な画像取得装置であるデジカメの基本について紹介
- デジタルカメラの種類
 - コンデジ, ミラーレス一眼, 一眼レフ
- 画像生成の幾何モデル
 - ピンホールカメラ
 - 薄肉レンズ
 - 参考: 厚肉レンズ
- 被写界深度

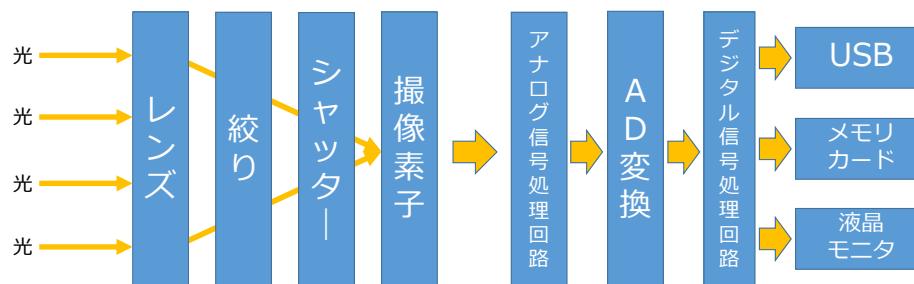


撮影パラメータ

撮影パラメータ

カメラ撮影の際、所望の絵を得るために各種パラメータを調整する

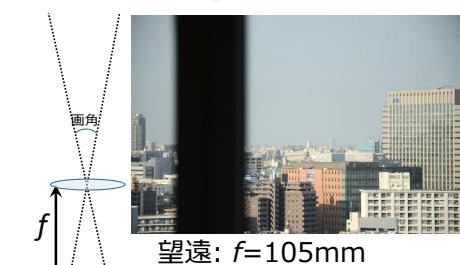
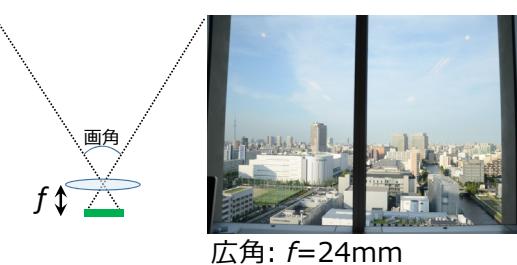
- 撮影画角
- 絞り
- シャッタースピード（露光時間）
- ISO感度
- ピント



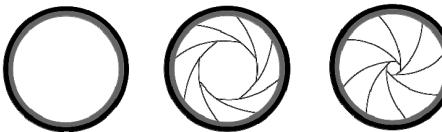
画角

- 画角とは撮影範囲のこと
- 素子サイズとレンズの焦点距離により定まる
- カメラ本体により素子サイズが定まる
 - フルサイズ - APS-C - 1型 - などなど（一般的に大きいと高い）
- レンズにより焦点距離が定まる
 - 単焦点レンズ：焦点距離を変更できないレンズ
 - ズームレンズ：焦点距離を変更できるレンズ

写真はD7000にて撮影
素子サイズAPS-C



絞り (F値)



By Allophos
[CC-BY-SA, 3.0]
From Wikipedia

- ・絞りとは、光量調整のためレンズ直径を調整できる機構のこと
 - ・絞る (F値-大) : 光量が減り、被写界深度が深くなる (ボケにくくなる)
 - ・開く (F値-小) : 光量が増え、被写界深度が浅くなる (よくボケる)
- ・F値 (F-number) とは、レンズの集光性能を表す量
F値 = 焦点距離 / レンズ直径 と定義される
 - ・F値が小さい → 多くの光を取り込む
 - ・F値が大きい → 取り込む光は少ない
 - ・“絞り”により直径Dを小さくすることでF値を調整できる

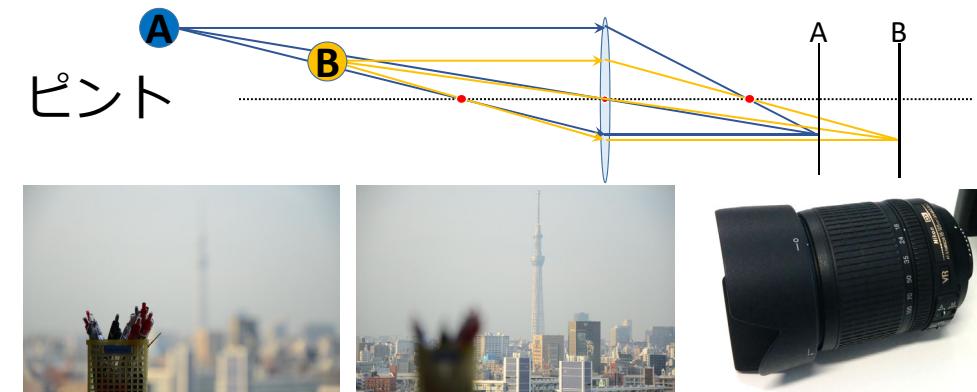
ISO感度

- ・ISO感度とは、撮像素子の感度のこと
 - ・もともとはフィルムの感度のこと。
 - ・夜は高い感度のフィルムを使う、などとして使い分けていた
- ・カメラの機種によっては、ISO感度を設定できるものも多い
- ・ISO100に対してISO400は4倍の感度になる
- ・一般的に感度を上げるとノイズが増える
- ・Sony α7の感度は ISO400,000以上!
- ・<https://www.youtube.com/watch?v=JjWqI7kfrUM>



シャッタースピード (露光時間)

- ・シャッタースピード (露光時間) とは、撮像素子に光を当てる時間のこと
- ・露光時間を2倍にすると、光量が2倍になり、画像は2倍明るくなる
 - ・メカニカルシャッター：物理的な機構で露光時間を調整
 - ・電子シャッター：電子的な制御で露光時間を調整
- ・露光時間が長い → 画像は明るく、動いているものはボケる
- ・露光時間が短い → 画像は暗く、動いているものもボケにくい



- ・レンズと撮像素子の距離を変化させることでピント調節
 - ・オートフォーカス：画像処理によりカメラが自動でピントを合わせる
 - ・マニュアルフォーカス：フォーカスリングをまわすことでピントを調整できる
- ※実際のカメラレンズのピント調節はもう少し複雑な機構になっている

ピント調節の例

ピンホールカメラと違いレンズは広い面積で光を集めるのでブランドの奥の像も復元できる



ピント調節の例

ピンホールカメラと違いレンズは広い面積で光を集めるのでブランドの奥の像も復元できる



まとめ：撮影パラメータ

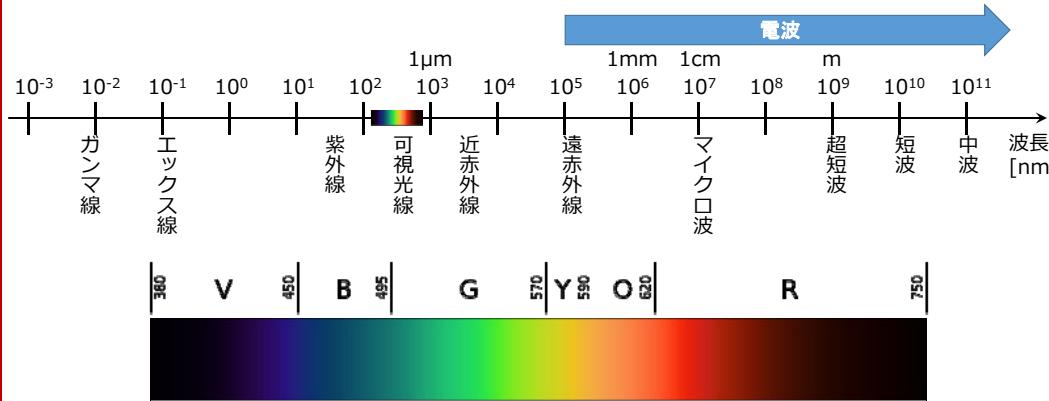
- ・画角
- ・絞り
- ・シャッタースピード（露光時間）
- ・ピント
- ・[参考:撮影パラメータ](#)



人間の視覚

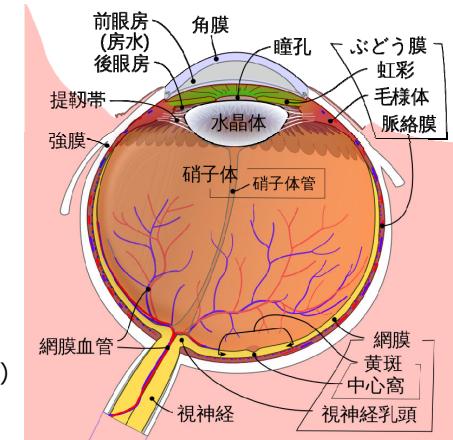
可視光

- 可視光とは電磁波のうち人の目で見えるもの
- 波長：約400nm～約800nm



人間の視覚

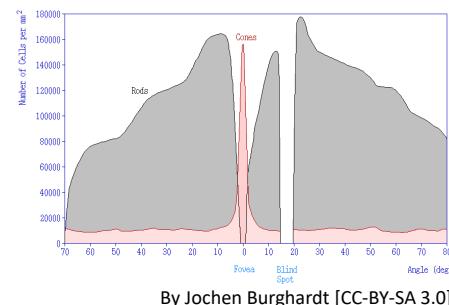
- 人間の眼球は直径約24mmの球状
- 主要な組織と機能は以下の通り
 - 角膜：集光
 - 水晶体：焦点調整
 - 虹彩：光量調整（絞り）
 - 網膜：光を電気的な信号に変換
 - 中心窓：中心視野（注視物はここに結像）
- 網膜には2種類の視細胞が分布する
 - 錐体**：色に関する情報を得る
 - L錐体(赤錐体), M錐体(緑錐体), S錐体(青錐体)
 - 桿体**：弱い光の明るさ情報を得る



By Rhcastilhos (translated by Hatsukari715) [CC0]

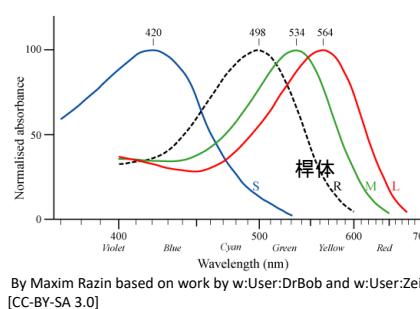
錐体細胞(Cone cell)

- 680万個程度
- 中心窓周囲2度付近に分布
- 比較的明るい光に反応 ($> 0.01\text{cd}/\text{m}^2$)
- L錐体(赤錐体), M錐体(緑錐体), S錐体(青錐体)**の三種が存在し, 色情報を判別
- 生まれつき3種の錐体を持たない人も多い (日本人男性5%, 女性0.2%)



桿体細胞(Rod cell)

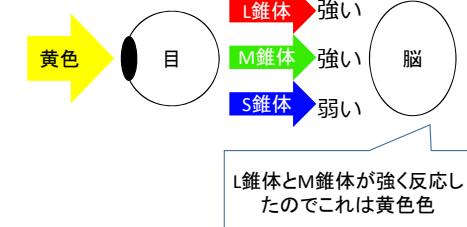
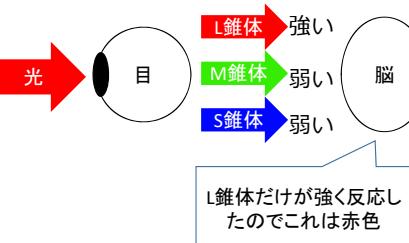
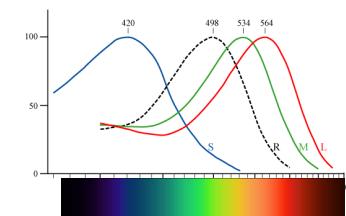
- 1億2500万個程度
- 中心窓ではなく視覚10°付近に分布
- 比較的くらいうる光に反応 ($< 3.0\text{cd}/\text{m}^2$)
- 暗所視**：暗所では桿体のみが働くためものの形は分かるが色は認識できない
- そらし目**：非常に暗いもの（星など）を見る場合, 周辺視野を利用すると良く見える



人の色の感じ方

- 人は **L錐体**, **M錐体**, **S錐体** を利用して色を知覚する

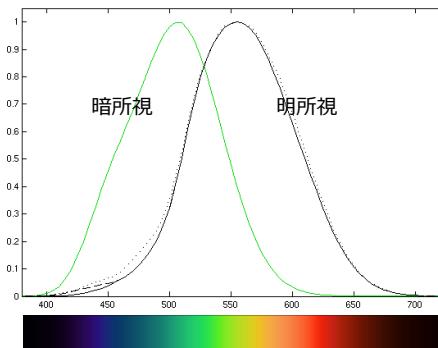
イメージ...



人の感じる明るさ

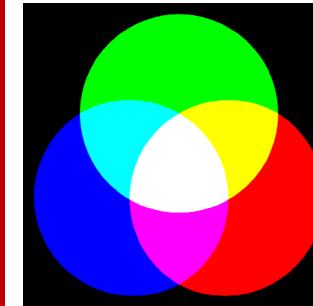
- 人の目は光の波長によって感じる明るさが異なる
 - 紫外線/赤外線: どんなに強くても見えない
 - 緑付近: 明るく見える
 - 青付近: 強い光でも暗く見える
- 感じる明るさは、明所視・暗所視でも変化
 - 明所視の感度のピーク: 555nm付近
 - 暗所視の感度のピーク: 507nm付近
- 放射量と測光量
 - ある光源が放出する光のエネルギーを放射量[W]と呼ぶ
 - 人が知覚できるのはその一部のみなので、、、
 - 照明器具では、放射量に人の視覚感度で重み付けを行なった測光量 [lm(ルーメン)]という単位が利用される

標準分光視感光率



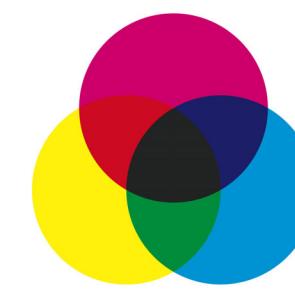
練習問題：何故、色の三原色はあるのに音の三原音はないか？両方とも波なのに。

[By Quark67(Modified color by Monami) CC3]



光の三原色 (加法混合)
Red/Green/Blueの光を混合すれば様々な色を作れる

[By Quark67(Modified color by Monami) CC3]



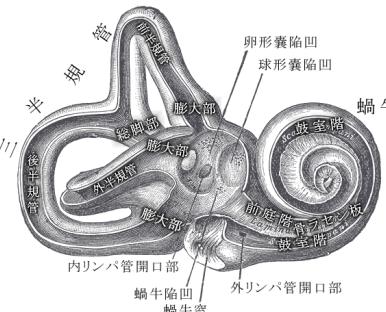
色の三原色 (減法混合)
Cian/Yellow/Magentaの塗料を混合すれば様々な色を作れる

Yellow: Blueを吸収
Magenta : greenを吸収
Cian : Redを吸収

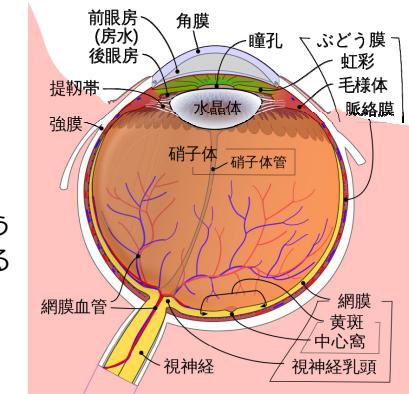
(参考) 人の聴覚

- 蝸牛内部にある有盲細胞により音を知覚
 - 蝸牛: 螺旋状の構造をした器官
 - 有毛細胞: 蝸牛の基底膜に約15000個配置される
- 音の周波数により異なる有毛細胞が反応する→人は異なる周波数を聞き分けることができる

NIHが制作した動画 →
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Journey_of_Sound_to_the_Brain.ogg



- 電磁波のうち波長400~800nmの可視光を認識できる
- 目の構造
 - 角膜、水晶体、虹彩、網膜
- 視細胞
 - 錐体: 明るい光に反応し、色の識別を担う
 - 桿体: 暗い光に反応し、明るさを識別する
 - 明所視・暗所視
 - そらし目
 - 色の認識法
- 測光量



By Rhcastilhos (translated by HatsuKari715) [CC0]

表色系

- ・色を定量的に表すことを**表色** (Color specification) といい、表色のための一連の規定と定義を**表色系** (Color System) という。
- ・表色系には、**顯色系**と**混色系**がある
- ・**顯色系**
 - ・色の見え方に基づいて構築された体系
 - ・例) マンセル表色系
- ・**混色系**
 - ・ある色と等色にするための色の混合割合に基づいて構築された体系
 - ・例) CIE-RGB

表色系（参考資料）

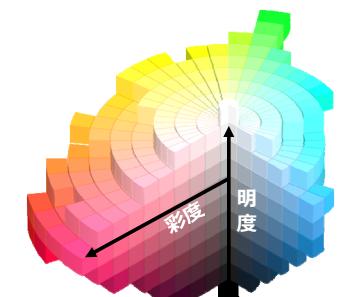
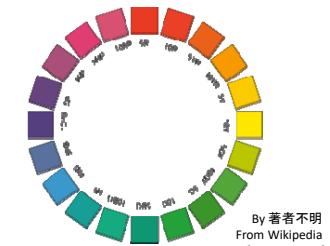
参考文献

「大田登著、色彩工学」
※わかりやすかったのでお勧めです。

マンセル表色系

- ・米国の画家 Munsellが1905年に考案し、米国光学会 (OSA)が1930年代に尺度を修正した表色系
 - ・心理学的な観点から、3属性で定義
- 色相:** 色の違いを表す属性。赤黄緑青緑を円上に配置し、円全体を100等分（色相環）。各色相には“10R”などの名前がつく。
- 明度:** 色の明るさを表す属性で、黒～白を11段階に分割。
- 彩度:** 色の鮮やかさを表す属性で、無彩色から最も鮮やかな色まで等分割に区切る。
- ・ある資料のマンセル記号（色相・明度・彩度）を求めるには、資料と色票を見比べ最も一致する色票を探す
 - ・ある色が（色相1.6YR、明度6.3、彩度3.9）ならば、「1.6YR6.3/3.9」とマンセル記号で表記できる

※色票とぴったり一致しない場合は視感評価で少数第一位を決定
※色票とは、実際の色見本のこと（amazonなどで買える）



By SharkD [CC-BY-SA 3.0]

加法混色と減法混色

・混色

- 複数の色の光を混ぜて別の色の光を作ること
- 赤・緑・青をうまく混ぜると任意の色を作れる

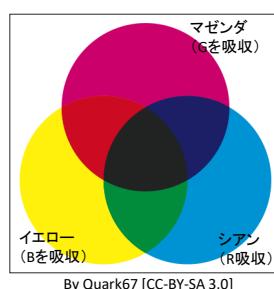
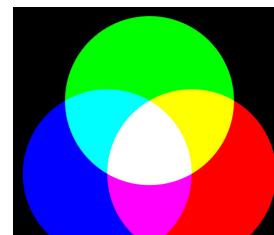
・加法混色

- 複数の色の光が同時に目に入射して生じる混色のこと
- 黒い背景に色を持った光を加えていく
- 通常、赤・緑・青の3色の光を利用する

・減法混色

- 白い紙に複数の塗料を混ぜて色を作る、または、複数重ねた色つきフィルタ越しに白色光を見るような混色
- フィルタや塗料は白色光から特定スペクトルを除去する
- 通常、シアン・マゼンダ・イエローの3色を利用する

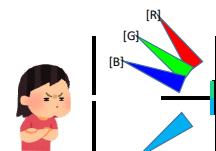
→ 3色の混合で任意の色ができるのって実は結構不思議では？音は混ぜられる？



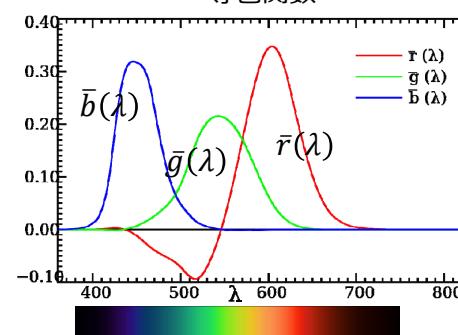
CIE RGB系

・原刺激として以下の単色光を用意

- [R] : 700nm,
- [G] : 546.1nm,
- [B] : 435.8nm
- [R]:[G]:[B] = 1.0 : 4.5907 : 0.0607
で混色すると白色に（測光量単位）



等色関数



・等色実験: 様々な波長の単色光に対し等色となる原刺激の光量を測定する

→ 等色関数 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ が得られる

・CIE: 国際照明委員会は1931年にGuildのデータ（観測者7人）とWrightのデータ（観測者10人）の平均を取って等色関数を採用

等色（色合わせ: color matching）

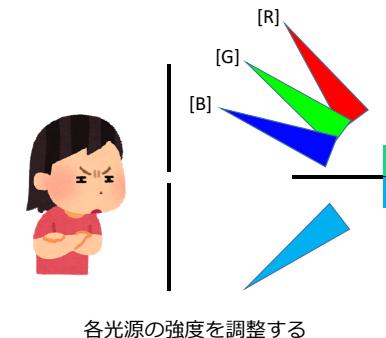
- 試料光[F]と見た目の色が一致するよう、赤色[R], 緑色[G], 青色[B]の混合割合を調整する手法
- [R][G][B]それぞれをr,g,bだけ混合して、試料光[F]と同じ見た目が得られたとき

$$[F] \equiv r[R] + g[G] + b[B]$$

と表記する

※等色は「人が等しく見える」ように混合した割合である

※等号の左辺の色と右辺の色に含まれるスペクトル分布が同じという意味ではない

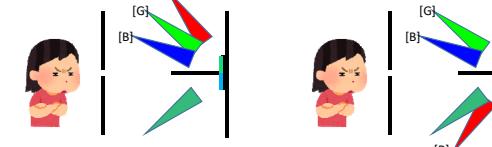


CIE RGB系

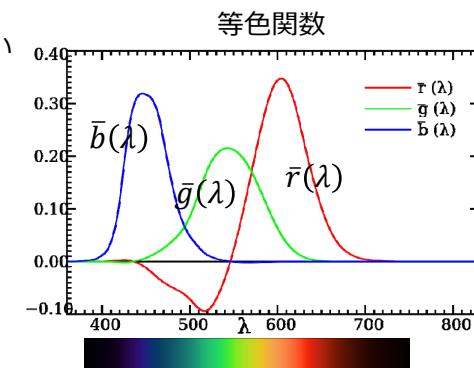
・等色関数 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ に負値がある…

- 『赤緑青の原刺激で任意の色を表現できる』は正しくなく、どう混ぜても色合せできない単色光があった

・試料光側に色を足して色合せした



等色関数



CIE RGB系

- 等色関数 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ があると…
- 任意の“単色光”を再現する原刺激の混合割合が分かる
- 単色でない任意の光 F も再現できる

$$r = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda,$$

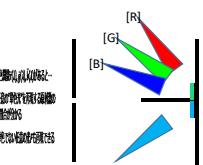
$$g = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda,$$

$$b = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda,$$

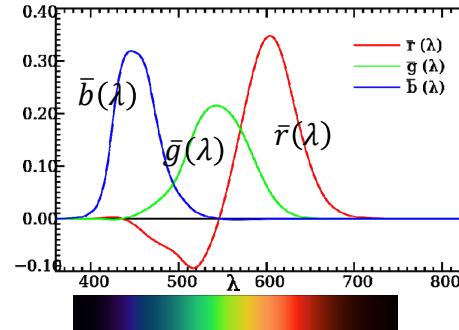
※ $F(\lambda)$ は再現したい光の分光分布

※ r, g, b は $F(\lambda)$ を再現する原刺激の混合量

これで色を (r, g, b) の 3 値で表現できるようになった。



等色関数



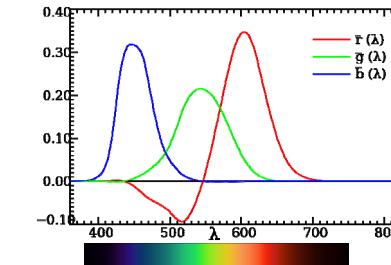
CIE RGB 色度図

等色関数より任意の単色光を表現する
R700nm, G546.1nm, B435.8nm の割合が分かる

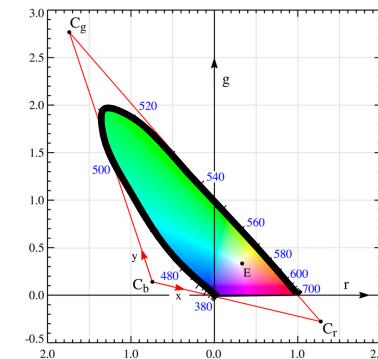
明るさを無視するため下記の通り変換

$$r = R/(R+G+B), \quad g = G/(R+G+B), \quad b = B/(R+G+B)$$

※ $r+g+b=1$ に注意



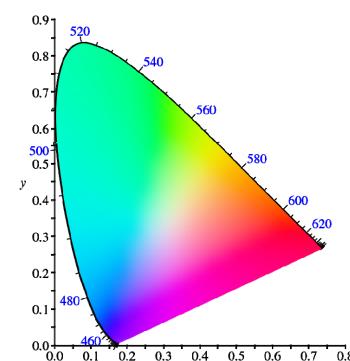
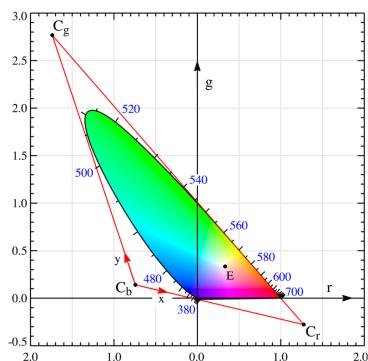
すべての色を $r-g$ 空間にプロットしたものを **色度図** と呼ぶ



- 外縁部分が単色光に対応
- 任意の色は外縁の内側に存在（単色光の混合で表現可能）
- r が負値もとる

CIE RGB → XYZ色度図

- CIE RGB 色度図は r が負値を含むため扱いにくい
- 座標変換を施した CIE XYZ 色度図が広く用いられる、



まとめ：表色系

- 色を定量的に表すことを **表色** といい、表色のための一連の規定と定義を **表色系** という。
- 顯色系：色の見え方に基づいて構築された体系（マンセル表色系）
- 混色系：色の混合割合に基づいて構築された体系（CIE-RGB）
- 加法混色と減法混色
- 等色（色合わせ：color matching）
- CIE-RGB表色系