

宇宙の観測と技術

第2章 星空を見る

5. 星空を目で見る

人の目は夜空に星を識別することができる。実際、星空を眺めると様々な明るさの星を認識できるが、人類は肉眼で見える星の明るさをランクづけして「1等星～6等星」と表現している。星座早見盤や星空案内図では、通常、この伝統的なランクづけに乗っ取って星の明るさをシンボルとして表現する。

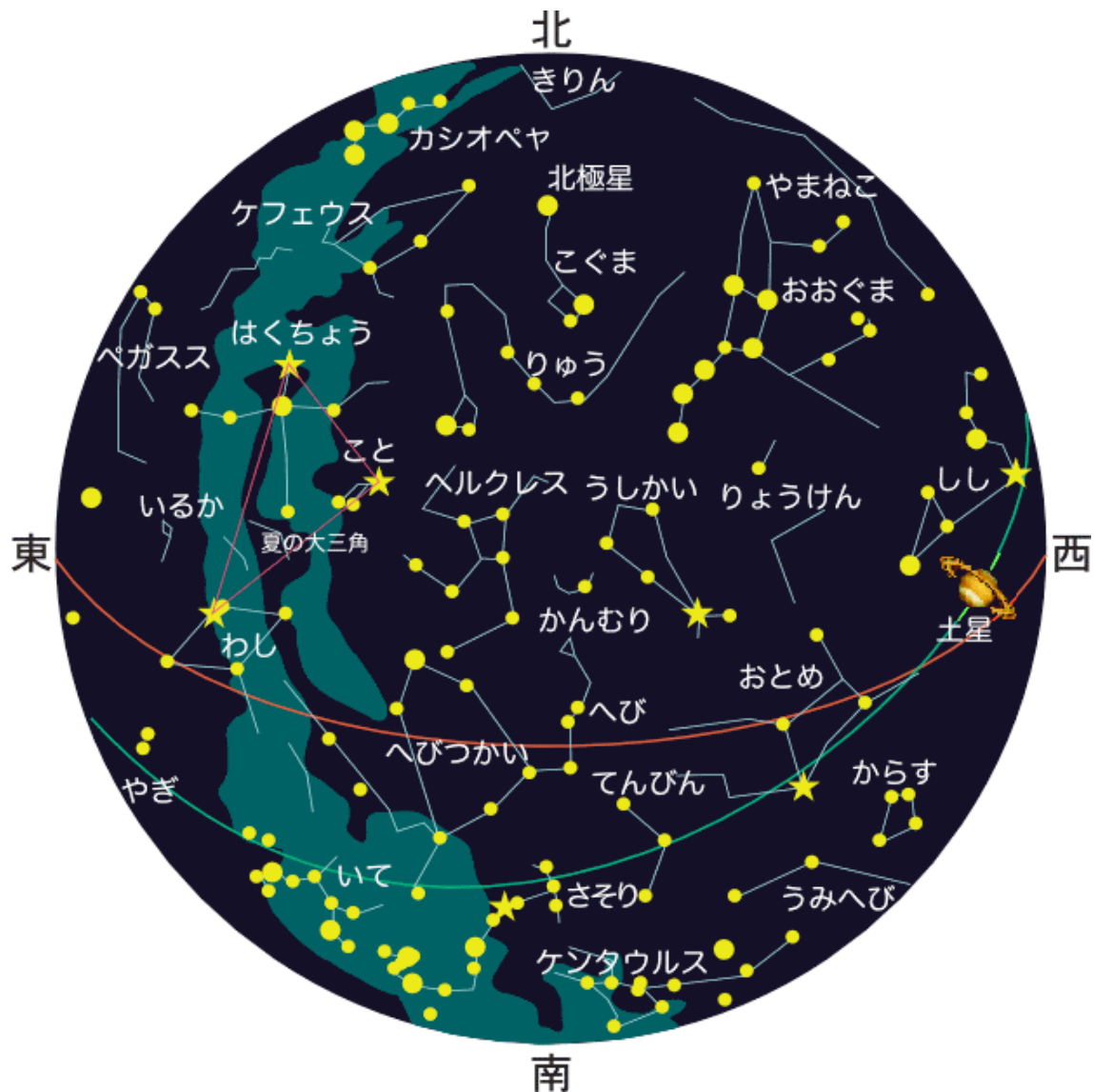
下図は2009年の夏の星空案内図であるが、ここでは星の明るさを

星型 → 1等星

大丸 → 2等星

小丸 → 3等星

で表現している。ここで注意することは星の明るさは明るいものを小さな数字で表すことである。また肉眼で確認できる限界を6等星としている。



5-1. 天体の明るさ

等星という明るさのランクづけは、星空を眺めるのには十分であっても天体観測で定量的な測定をするのにはあいまいさが大きい。そこで古来からある、このランクづけに合うように定量的に定義した天体の明るさを等級単位として次のように定めている。

- 1) こと座の1等星「ベガ」を0等級（基準）とする
- 2) 明るさ（光の量）は5等級明るくなる（減る）毎に100倍

この単位は「等級」と言われる。1等級の差があるとやってくる光の量（単位時間、単位面積にやってくるエネルギー）は、およそ2.5倍違う。

$$m_1 - m_2 = -2.512 \log (S_1/S_2)$$

$$S_1/S_2 = 10^{-0.4(m_1-m_2)}$$

m_1, m_2 : 天体1と天体2の等級

S_1, S_2 : 天体1と天体2の光量

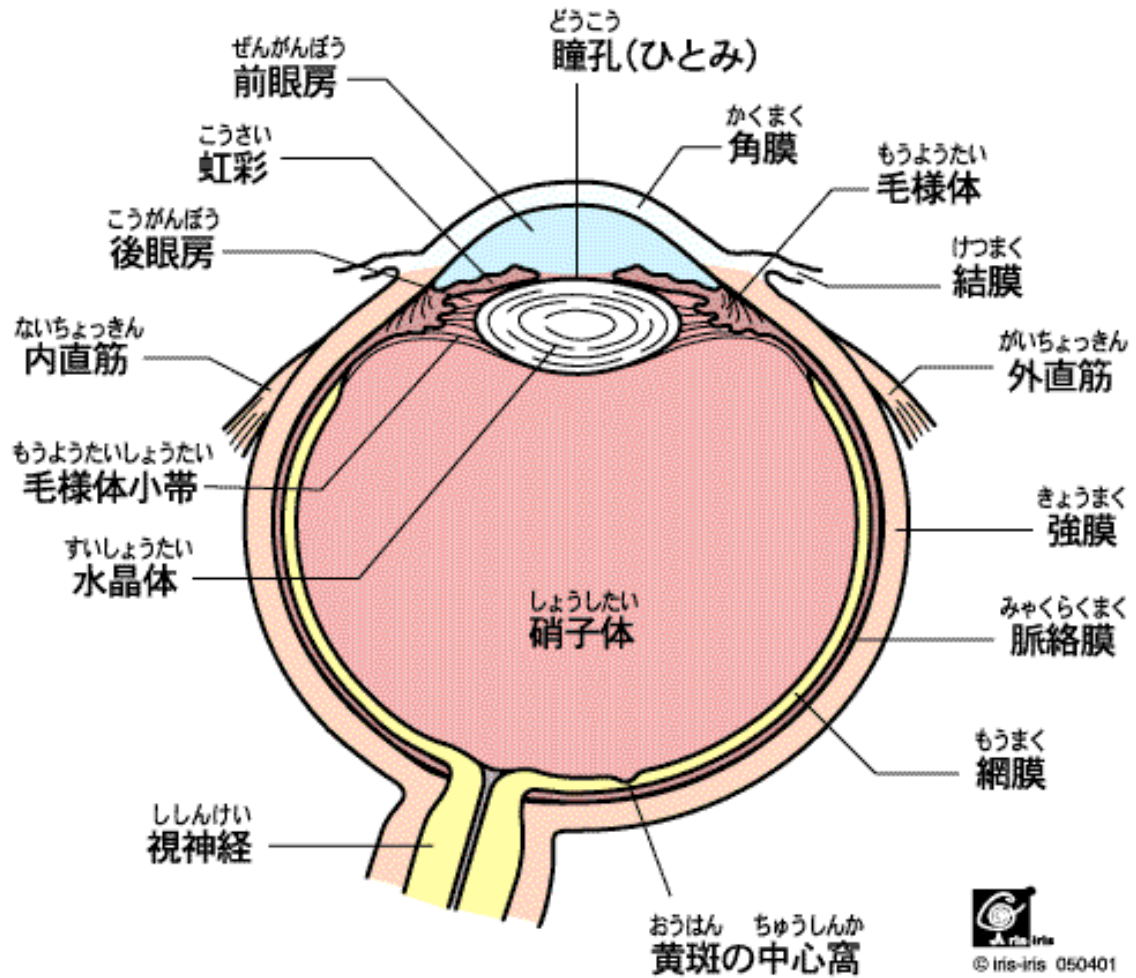
この式から肉眼で感覚的に感じる明るさは、現実にやって来る光量を対数スケールで測ったものであることがわかる。

5-2. 目の構造

目は星空を観察する最も基本的な受光器である。

め こうぞう

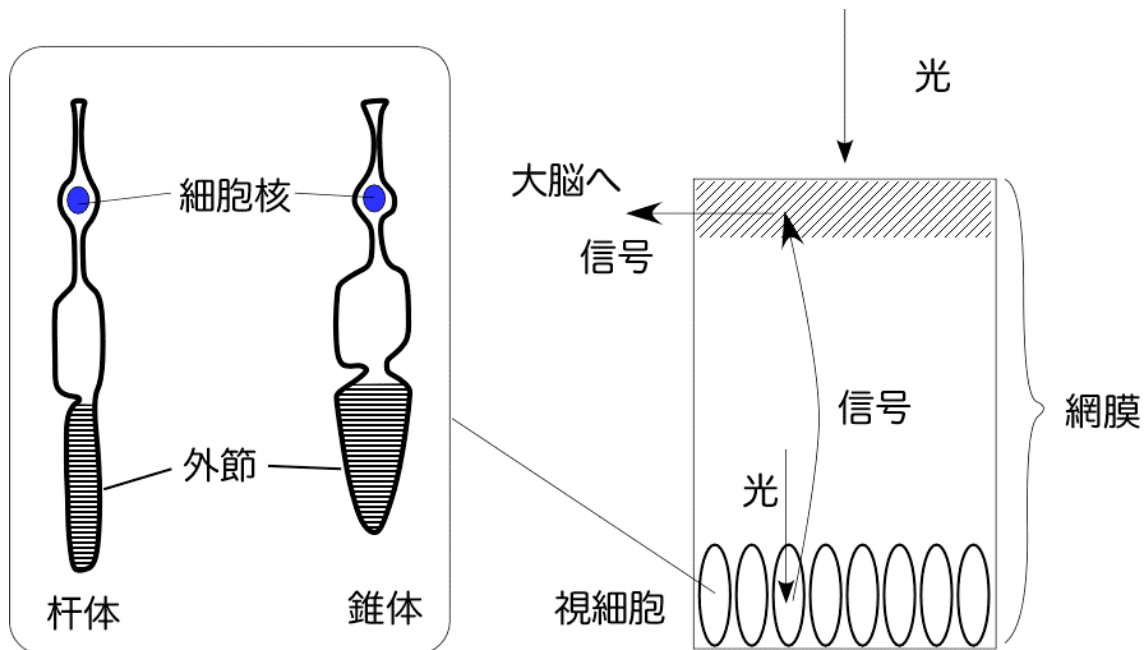
■ 目の構造 (右眼球の水平断)



水晶体と呼ばれるレンズによって焦点を結び、網膜に周囲の映像を投影する。網膜は視細胞という光を感じる細胞で埋められている。網膜上の場所毎の視細胞の ON/OFF で映像を認識していることになる。

5-3. 目の感度

網膜に投影された映像（光）は、網膜を透過して網膜の下側に並んでいる視細胞の中にある視物質によって吸収される。光を吸収した視細胞は信号を出し、その信号は神経系によって網膜表面側を伝って大脳へと伝達されて映像を認識する。

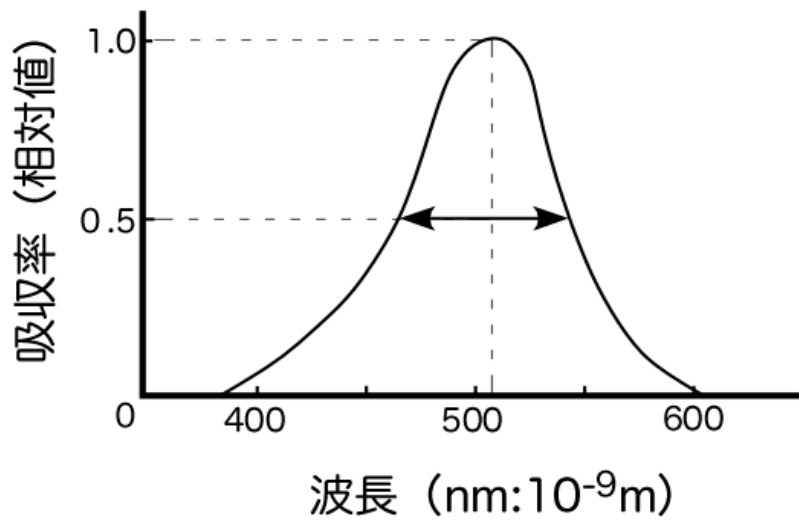


視細胞には桿体と錐体があり、それぞれ以下のような特徴を持っている。

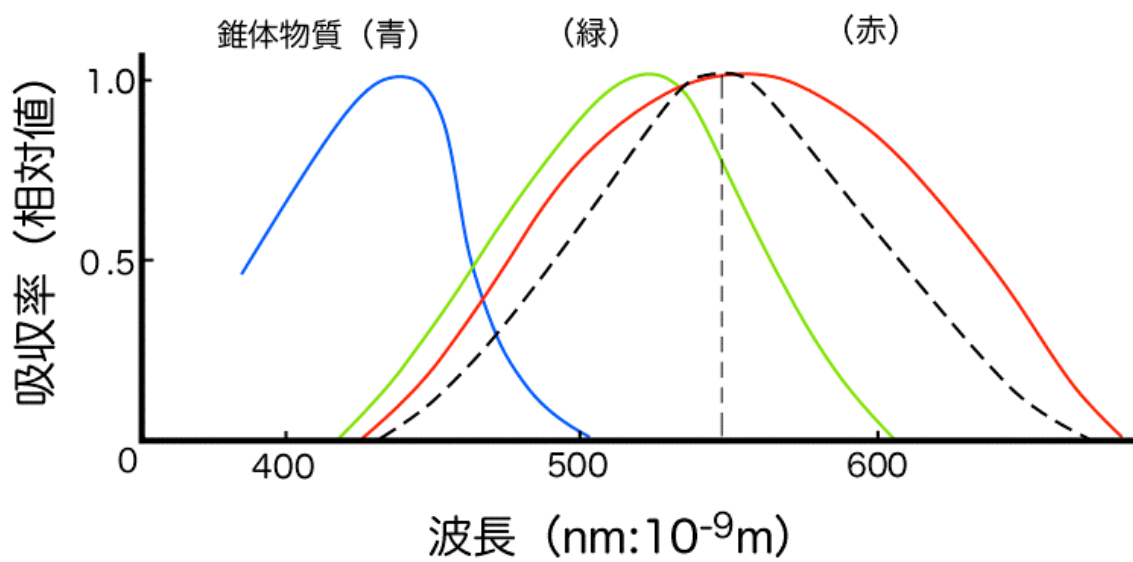
- | | | | | |
|-----|---|-----------|---|-----------------|
| 視細胞 | — | 桿体 (Rod) | | (高感度：光子1個にも反応) |
| | | | | |
| | — | 錐体 (Cone) | — | 赤錐体 |
| | | | | 緑錐体 |
| | | | | 青錐体 |
| | | | | (低感度：各3原色の光に反応) |

人の目は暗い場所では白黒モードになっていて、明るくなってくると色がついて見える。3原色を ON/OFF して色を表現する仕組みはテレビやカメラと同じである。

肉眼で星空を観察すると暗い星は6等級まで認識することができる。また星の色は1等級まで判別できる。桿体と錐体の感度は100倍程度違うと考えられる。



桿体物質の吸収率（桿体細胞の感度特性）



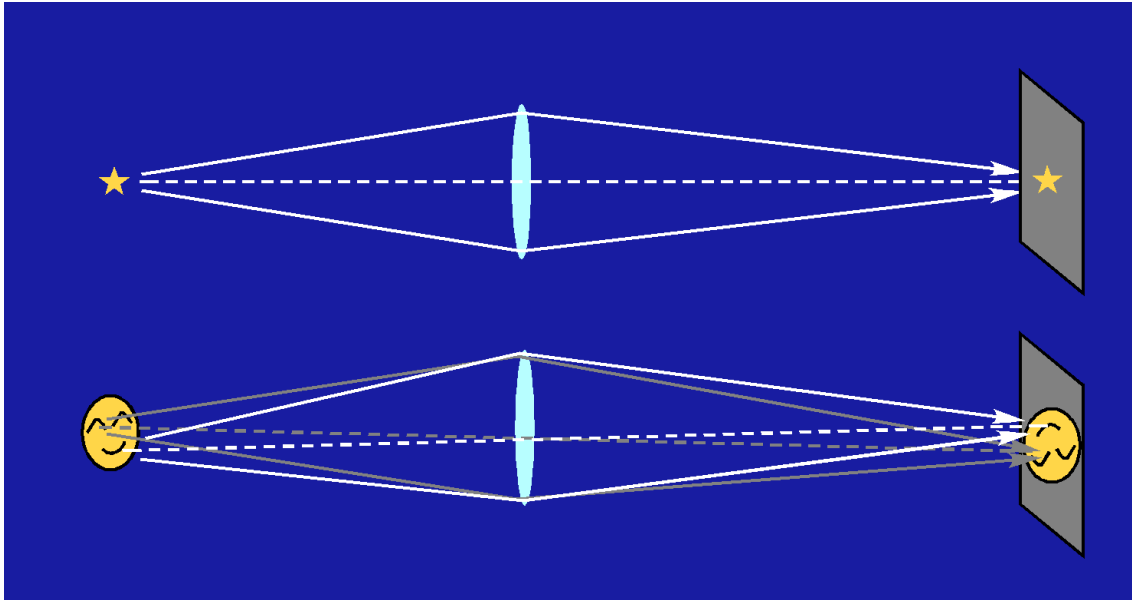
錐体物質の吸収率（錐体細胞の感度特性）

人間の目（日常的に使う錐体）の感度特性は、錐体物質の青・緑・赤それぞれの特性を合成したものとなる（破線）。そのピークは 550nm にある。

目の感度特性で測った星の明るさを「V 等級（Visual magnitude）」と言う。

5-4. 目の光学系

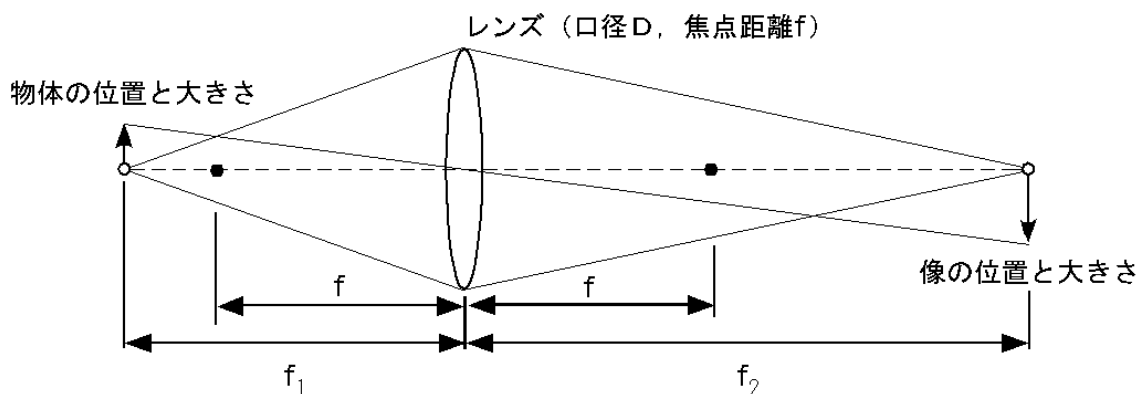
目は水晶体というレンズ1個で網膜に像を結び、網膜上の視細胞群で映像を認識している。そもそもレンズの光を集める作用でどうして像ができるのか。それを示したのが下図である。



レンズは一点から出た光を反対側の一点に集める。そして面光源（映像）は点光源の集まりである。各点から出た光はレンズ反対側の面上に集まり像を作る（結像する）。この面を焦点面（像面）と言う。

レンズの仕様を決める主な数値は3つある。

- 口径 : D → レンズの直径で集光力と分解能に関係する
- 焦点距離 : f → 像のできる位置と像の大きさに関係する
- F比 : f/D → 像の明るさに関係する



物体の位置 f_1 (レンズからの距離) と像の位置 f_2 (レンズからの距離)、焦点距離 f との間には

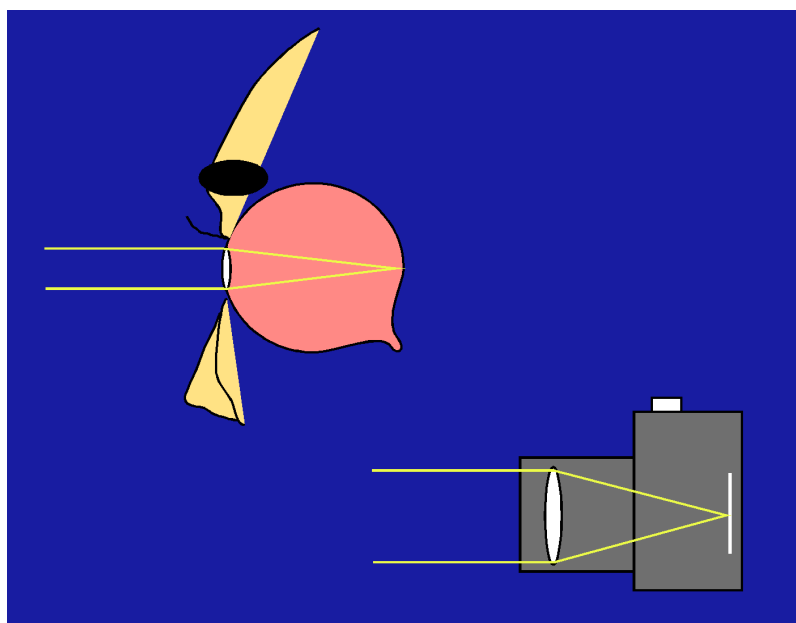
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

の関係がある。これを「レンズの公式」と言う。ここで f_1 と f_2 はともに焦点距離 f より大きいものとする。このような一般的条件下でレンズの作る像は実像と呼ばれる。実像は物体に対して倒立 (逆立ちして見たような形) になる。

レンズの作る像としては、 f_1 が f よりも小さい場合にできる虚像というものがあるが直接見ることはできない。

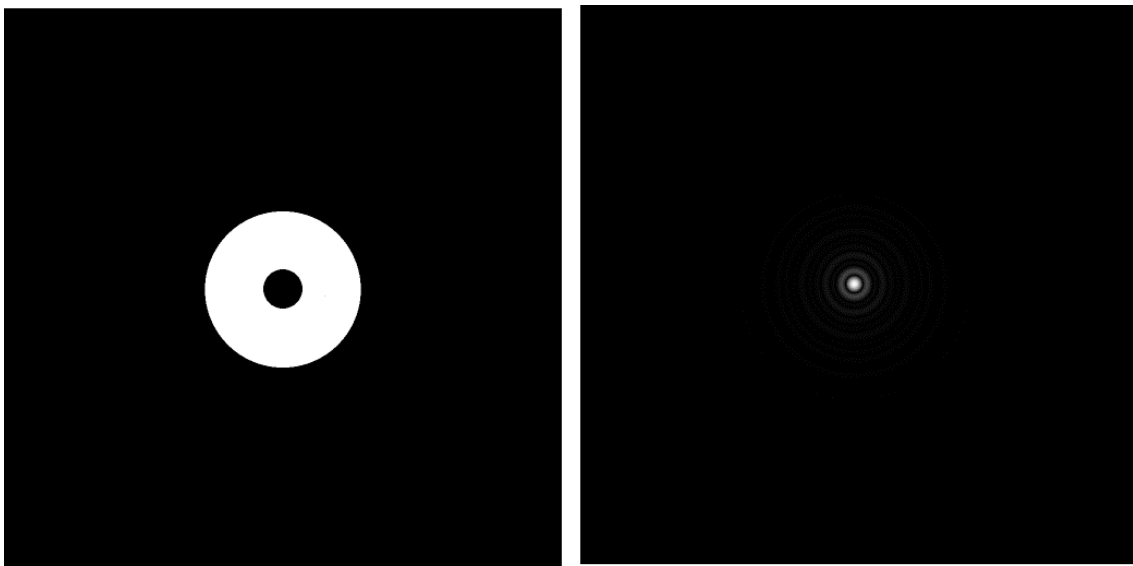
例えば新聞の文字をルーペで拡大して読むことがある。この場合、ルーペの作る虚像を目が実像として網膜に写して見ることになる。虚像の向きは正立である。

目は近くにある物から遠くにあるものまでピントを合わせることができる。目でもカメラでも見たい物 (撮りたい物) とレンズとの距離を好き勝手に調節することはできない。目の水晶体と網膜との距離 (カメラの受光素子とレンズとの距離) は決まっていて動かない。目やカメラではピントを合わせるためにレンズの焦点距離をわずかに変化させて、網膜や受光素子上に焦点面が来るように調節しているのである。



5-5, 目の分解能

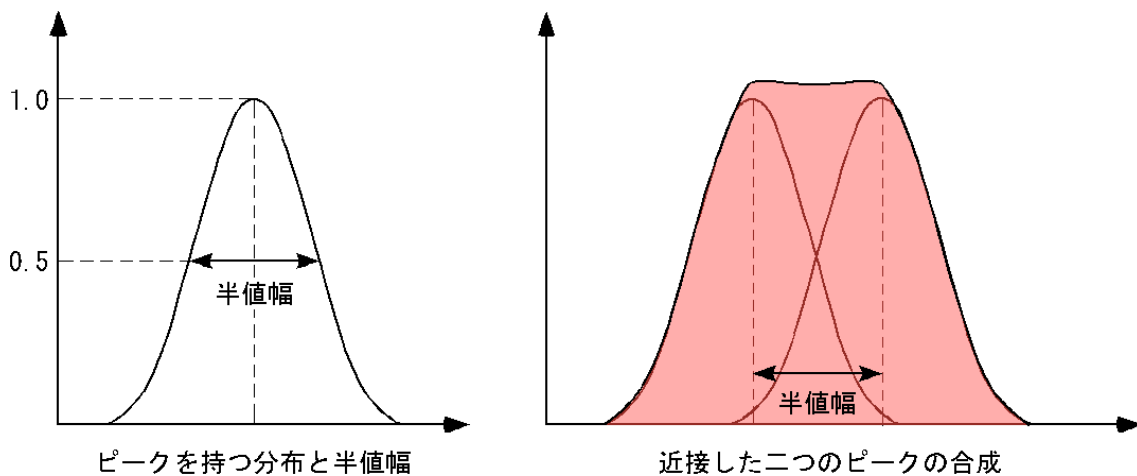
レンズを使うと一点から出た光を焦点面上の一点に集められるとした。幾何学的には確かそうであるが厳密には幾何学で言う点にはならない。光は電磁波という波であり、波は波長に対応するスケールで見ると干渉と言う現象を起こして強弱のパターンを作る。レンズで集められた光も焦点面上ではレンズ全体を通して来た光が狭いところに押し込められた結果、干渉（強めあいと弱めあい）を起こしてパターンを作る。この干渉パターンの形状（回折像）はレンズの入射面（開口）形状によって決まる。



開口関数（一般的な反射望遠鏡）

干渉パターン（回折像）

レンズ（光学系の透過率分布）形状と大きさ、光の波長が決まると回折像の拡がりも決まる。回折像中心となるピーク値の半分になる場所の拡がり（半値幅）を分解能と言う。



光学では「ドーズの限界（特に天文）」と「レイリー限界」という定義が用いられる。これらは半値幅による分解能と定義が異なるが結果はほぼ同じである。しかし半値幅の方が計測分野全般に対して応用性がある。ここではあえて半値幅による定義だけを紹介しておく。

口径 D のレンズ、観測波長 λ の時の分解能はレイリー限界の式（半値幅の定義とあまり変わらない）は

$$1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{ラジアン：弧度法による角度})$$

と与えられる。

目の視細胞（錐体3種）の総合的な感度特性から波長 λ を 550nm ($550 \times 10^{-6}\text{mm}$)。口径 D を暗闇で瞳孔が開いた状態の直径 6mm とすると

$$\text{目の分解能} = 1.22 \times (550 \times 10^{-6}) \div 6 = 1.12 \times 10^{-4} \text{ (ラジアン)}$$

ラジアンは1周を 2π で表す単位であるから

$$\begin{aligned} 1 \text{ ラジアン} &= 180^\circ / \pi = 57.3 \text{ 度} \\ &= 3440 \text{ 分角} \\ &= 2.06 \times 10^5 \text{ 秒角} \end{aligned}$$

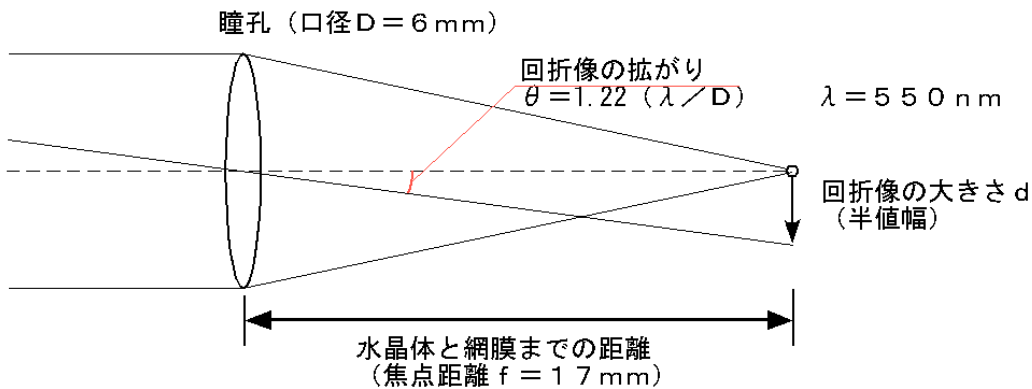
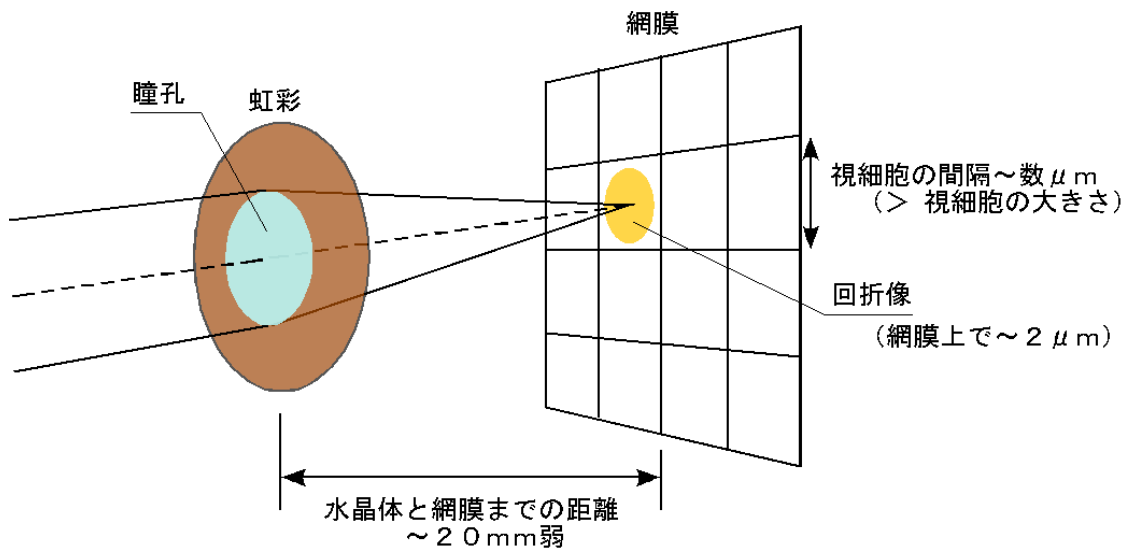
よって

$$\begin{aligned} \text{目の分解能} &= 6.4 \times 10^{-3} \text{ 度} \\ &= 0.4 \text{ 分角} \\ &= 23 \text{ 秒角} \end{aligned}$$

ということになる。

ところが人の目の分解能はそんなに良くない！

なぜか？



網膜上での回折像の大きさ d の計算

$$d = f \cdot \tan \theta$$

弧度法の旨味の一つは近似にある。角度 θ が小さいとき、三角関数 $\sin \theta$ 、 $\tan \theta$ はラジアンで表した角度 θ そのものの値で近似できる。

$$\sin \theta = \tan \theta = \theta$$

例えば θ が 1° の時： $\sin \theta = 0.017452$

$$\tan \theta = 0.017455$$

$$\theta \text{ rad} = 0.017453$$

$$d = 17\text{mm} \times (1.12 \times 10^{-4}) = 1.90 \times 10^{-3}\text{mm} (\sim 2 \mu\text{m})$$

目が網膜上に光を集めることができる大きさは視細胞 1 個とほぼ同じである。

目の光学的分解能を網膜上で識別するためには、二つの分離したピークを明暗として網膜上の2カ所で認識しなければならない。そのためには視細胞の大きさと間隔が $1\ \mu\text{m}$ 以下である必要がある。

光学系と受光系（視細胞）の総合性能としての分解能は、網膜上で $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 相当。角度にしておよそ1分角程度となる。

お楽しみ問題

月の表面にはクレーターと呼ばれる大小の穴（円形の凹み）があることが知られている。しかし望遠鏡を使わず肉眼で月を見てもクレーターの存在は認識できない。それはなぜか。

参考データ

月の視直径	～32分角
月の直径	～3500 km
月までの距離	～38万 km
目立つクレーターの直径	300 km以下

#成績には関係ありません。興味があったら考えてみてください。



5-6, サンプリング

レンズなどで集めた光はある大きさを持った拡がりとなり、「光学系の分解能」が決まる。しかし映像を認識したり記録したりする網膜の視細胞やカメラの受光素子（CCD や CMOS）が、投影された実像の明暗を、どのくらいの緻密さで取得できるかも分解能に直接関係する。

信号を空間的あるいは時間的に、どれだけ緻密に記録するかをサンプリングという。一般に光学系など信号を出す装置の性能を活かすには、分解能の半分以下の間隔でサンプリングしなければならない。

