

光学

第4章 光学機器

黒田和男

1 はじめに

本章では、代表的な光学機器である、顕微鏡と望遠鏡を取り上げ、基本的な性質を論じる。

2 単レンズ

2.1 拡大鏡

最も単純な光学機器は単一の凸レンズ、すなわち、拡大鏡 (loupe)、あるいは、虫眼鏡である。ヒトがものを観測するとき、個人差はあるが、20~30 cm 程度に離れたときが最も見やすい。そこで 250 mm を明視の距離という。拡大鏡では、図 1 にあるように、物体を物体側焦点のわずかレンズ寄りにおき、拡大された像を観測者から明視の距離に作る。よって、レンズの焦点距離を f 、レンズの像側の焦点 F' から測った像までの距離 L を明視距離 250 mm に等しいとすると、結像の倍率 (拡大率) は $m = L/f = 250/f$ となる。例えば、数倍程度の倍率の拡大鏡であれば、レンズの焦点距離は 10 cm 程度と手ごろな値となる。実際には拡大鏡は眼にできるだけ近づけ

て使う。この場合は図1において $L - f = 250 \text{ mm}$ となるから、拡大率は $m = 1 + 250/f$ となる。

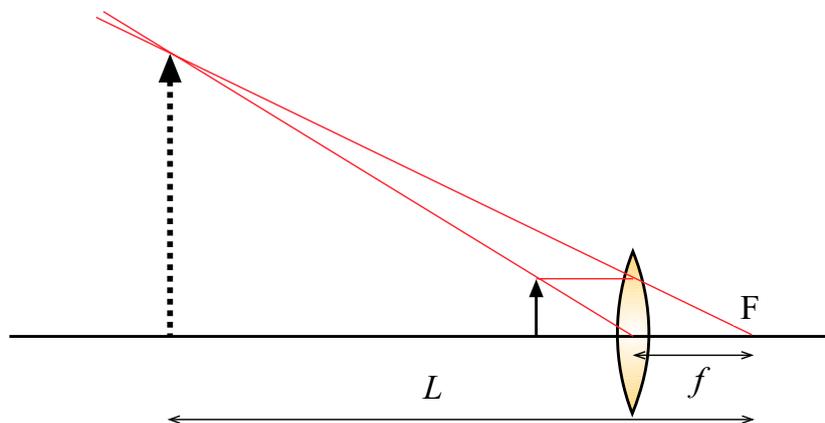


図1 拡大鏡

倍率を上げるためには焦点距離を短くしなくてはならない。図2は1700年頃にレーウエンフック (Leeuwenhoek) によって作られた球レンズの単式顕微鏡である。驚くことに、単レンズでありながら100倍以上の倍率を実現した。

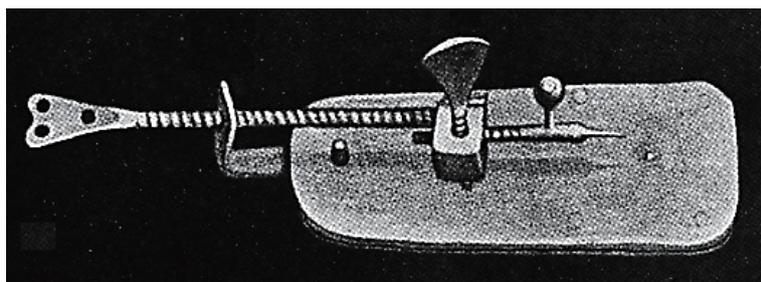


図2 レーウエンフックの単式顕微鏡

2.2 色消しレンズ

単レンズは、部分的にはプリズムと同じような形をしているから、分散の効果から逃れられない。光学材料の屈折率 n は、波長 λ によって異なるから、単レンズの焦点距離も波長によって異なる。このように、結像特性が光の波長によって変化することを**色収差** (chromatic aberration) という。例えば拡大鏡で白色の物体を観測するとその縁が色づいて見えることがある。これは、色収差によるものである。

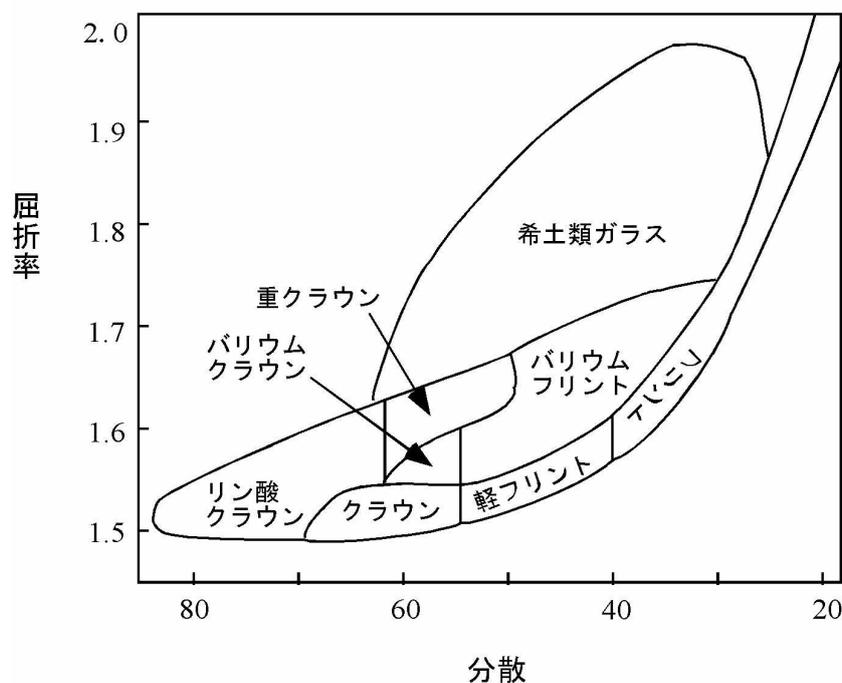


図3 光学ガラスの分散の分布地図

分散の大きさはアッベ (Abbe) 数 ν で表される。

$$\nu = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \cong \frac{n - 1}{\Delta n} \quad (1)$$

ただし、 n_C, n_F はそれぞれ、水素の C 線 $\lambda_C = 656.27 \text{ nm}$ と F 線 $\lambda_F =$

486.13 nm における屈折率を表し、 n_d はヘリウムの d 線 $\lambda_d = 587.56$ nm での屈折率を表す。アッベ数は分散の逆数であるから、アッベ数が小さいほど分散は大きい。普通のガラスは、屈折率が大きいほど分散も大きくなり、したがって、アッベ数は小さくなる傾向がある。図 3 は、縦軸に屈折率、横軸にアッベ数（普通のグラフの描き方と逆向きに、右から左に向かって数値が大きくなることに注意）をとり、光学ガラスの分布具合を地図に表したものである。

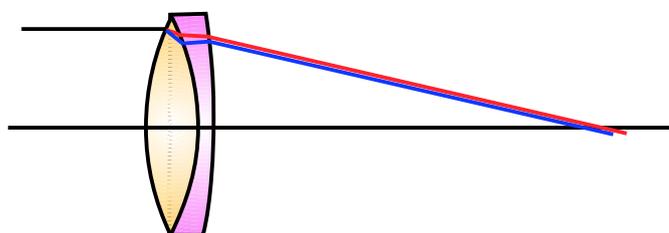


図 4 色消しレンズ

色収差を補正したレンズを色消しレンズ (achromatic lens) という。薄肉単レンズの焦点距離は第 3 章の式 (1) で与えられる。

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

この式を微分して、屈折率が変わることによる焦点距離の変化を求めると

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta n}{n - 1} = -\frac{1}{\nu} \quad (3)$$

となり、アッベ数の逆数で与えられる。この色収差を補正するため、図 4 のように、分散の異なるガラスでできた 2 枚の薄肉単レンズを密着して貼り合わせたダブレット (doublet) を考えよう。薄肉単レンズを密着させたとき、合成レンズのパワーは個々のレンズのパワーの和で与えられる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (4)$$

ここで、 f_1 と f_2 はそれぞれ単レンズの焦点距離である。よって、ダブルレットの色消し条件は

$$-\frac{\Delta f}{f^2} = \frac{1}{f_1\nu_1} + \frac{1}{f_2\nu_2} = 0 \quad (5)$$

で与えられる。式 (4) と式 (5) を同時に満足するように2つの単レンズの材質とパワーを選べば、色消しレンズになる。アッベ数は普通の光学材料では正になるから、2つのレンズの屈折力は異符号になり、凸レンズと凹レンズを組み合わせたものになる。また、2種類のガラスのアッベ数はできるだけ異なっている方がよい。通常は分散の小さいクラウンガラスと分散の大きいフリントガラスの組み合わせる。このように設計された色消しダブルレットは高級な単レンズとしてよく用いられている。

2枚の薄肉単レンズを離して配置した場合は、同一のガラス材料を用いたり、凸レンズだけで色消し条件を満たすことが可能になる。レンズ間隔が d のとき、合成焦点距離は

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (6)$$

で与えられる。このときの色収差は

$$-\frac{\Delta f}{f^2} = \frac{1}{f_1\nu_1} + \frac{1}{f_2\nu_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \left(\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2} \right) \quad (7)$$

となる。よって、色消しの条件は

$$f_1\nu_1 + f_2\nu_2 - (\nu_1 + \nu_2)d = 0 \quad (8)$$

となる。これと式 (6) を連立して解を求めればよいが、パラメーターが3つあるので無限の可能性がある。例えば、2つの薄肉単レンズに同一のガラスを用いても、 $2d = f_1 + f_2$ にとれば、色消し条件を満たすことができる。

厚肉レンズや分離した複合レンズの場合は、焦点距離だけではなく、主点や焦点の位置も波長によって変化する。このため、焦点距離についての色収差を取除いても、結像倍率に色収差が発生する。結像においてはこれも除去

する必要がある。式 (8) の場合は、焦点距離の色収差は取れているが、焦点あるいは主点位置の色収差は残っている。従って、このままでは直接の結像には使えない。しかし、光線の角度だけが重要である望遠鏡の接眼レンズには使える。第 5.1 節に使用例を挙げる。

2.3 非球面単レンズ

CD や DVD などの光ディスクメモリーのピックアップにも、単レンズが使われている。初期はガラスの組み合わせレンズが使われたが、その後、プラスチックを用いた非球面レンズが開発され、現在では非球面プラスチックレンズに置き替えられている。ガラスでは非球面に加工するのは大変であったが、プラスチックの射出成型技術などを用い、非球面単レンズを安価で大量に作れるようになったのが要因である。とくに、光ディスク用のレンズでは、光源がレーザーであるから色収差が問題にならず、単レンズであっても高性能なレンズを作ることが可能である。

表 1 各種光ディスクの仕様

	CD	DVD	BD
レーザー波長	780 nm	650 nm	405 nm
対物レンズ NA	0.45	0.6	0.85
記録容量 (片面)	640 MB	4.7 GB	25 GB
スポット径 (λ/NA)	1.73 μm	1.08 μm	0.48 μm
カバー層の厚さ	1.2 mm	0.6 mm	0.1 mm

図 6 は光ディスク用ピックアップの構成例である。半導体レーザーから出た光は、偏光ビームスプリッターを透過した後、コリメートレンズで平行光に変換され、対物レンズでディスク面に集光される。反射光は偏光ビームスプリッターで反射された後、光検出器で検出される。1/4 波長板は、ディス

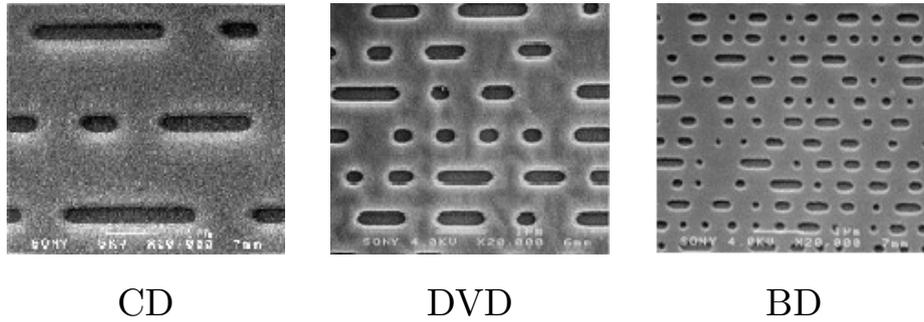


図5 ピットの比較。同一尺度でとった電子顕微鏡写真。

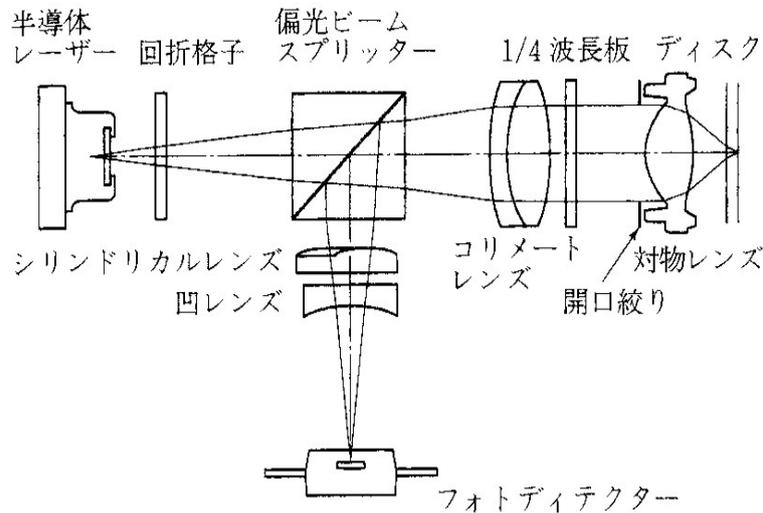


図6 光ピックアップの構成

クから戻る光が偏光ビームスプリッターで反射され光検出器に向かうように、偏光状態を変える。また、回折格子は、トラッキング（レーザー光スポットが光ディスクのトラックの中央に来るように位置を制御すること）に用いられ、シリンドリカル（円筒）レンズは自動焦点調節に用いられる。この例ではコリメートレンズが用いられているが、レーザー光を直接対物レンズに入射して集光する方式も広く使われている。また、トラッキングや自動焦点調節もいろいろな方法が採用されている。

3 顕微鏡

3.1 光学系

単レンズの拡大鏡では、高倍率を得ようとするとも焦点距離を短くする必要があり、レンズの作成が難しくなる。例えば、100 倍の倍率を実現するには、焦点距離 2 mm ないし 3 mm のレンズが必要になる。屈折率 1.5 のガラスの球レンズでこれを作ると、球の半径は 1.33 mm から 2 mm となり、豆粒のように小さなレンズになってしまう。この欠陥を改善したのが複式顕微鏡である。フックの法則で有名なイギリスのロバート・フック (Robert

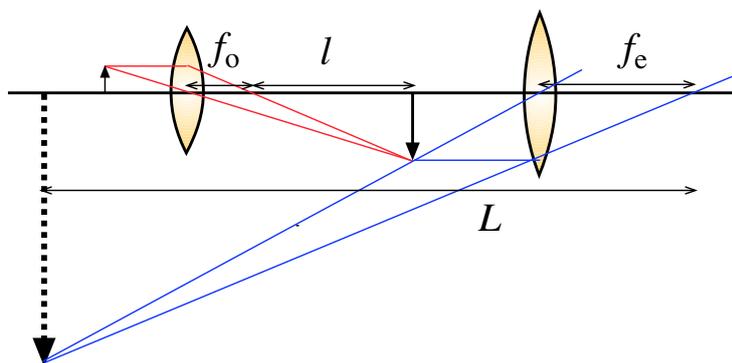


図 7 顕微鏡

Hooke) は、複式顕微鏡を使って手書きのスケッチ図を集大成し、1665 年に「ミクログラフィア」(Micrographia) を出版した。この本はその後長い間、細胞や微生物の構造を紹介する標準的な教科書として影響力を保った。とはいえ、当時の複式顕微鏡は決して性能のよいものではなかった。高倍率の顕微鏡では、むしろ図 2 のような単式顕微鏡の方がずっとよかった。顕微鏡の性能が飛躍的に上がったのは、ツァイス社のアッベ (Abbe) の業績によるところが大きい。

顕微鏡 (microscope) は、物体の近くに置く対物レンズ (objective) と、眼

の直前に置く接眼レンズ (eyepiece) の 2 組のレンズからなる。接眼レンズが、拡大鏡のレンズに相当する。対物レンズは、物体の拡大実像を接眼レンズの焦点の近くに結ぶ。100 倍の倍率を得るためには、例えば、対物レンズで 10 倍に拡大し、接眼レンズでさらに 10 倍拡大すればよい。このように、対物レンズと接眼レンズに役割を分担させることにより、優れた性能の光学系が可能になる。

図 7 は顕微鏡の光学系である。対物レンズの焦点距離を f_o 、対物レンズの像側焦点から対物レンズによって作られる実像までの距離を l とすると、対物レンズによる結像倍率は $M_o = -l/f_o$ となる。同様に、接眼レンズによる結像倍率は、焦点距離を f_e 、像側焦点から像までの距離を $L(> 0)$ とす

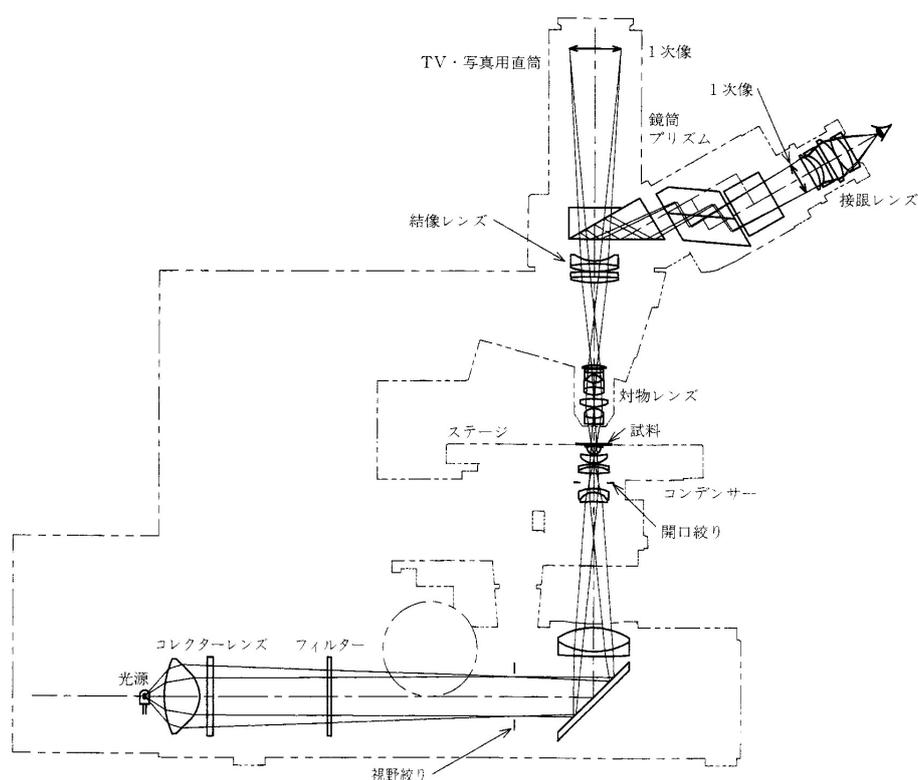


図 8 生物顕微鏡

ると、 $M_e = L/f_e$ で与えられる。以上から、総合倍率 M は

$$M = M_o M_e = -\frac{lL}{f_o f_e} \quad (9)$$

となる。典型的には、 $L = 250 \text{ mm}$ である。最近では、直接眼で観測するのではなく、TV カメラで像を撮りディスプレイ上に表示することが多い。この場合は、接眼レンズの代わりに、撮像用のレンズが取り付けられる。図 8 は生物顕微鏡の光路図の例である。

3.2 対物レンズ

顕微鏡の対物レンズ (objective) は、生物顕微鏡用と金属顕微鏡用に分けられる。生物の観測では、試料はプレパラートでカバーされるので、プレパラートを使用することを前提にレンズ設計がなされている。したがって、生物顕微鏡でプレパラートなしの試料を観測すると、性能が落ちる。

対物レンズの仕様は、倍率と NA で表される。対物レンズの解像限界は、レンズの収差がほとんどないとすると、回折の効果できまる。回折理論によると、解像限界 s は

$$s \approx 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (10)$$

で与えられる。ここで、 λ は光の波長、 NA は開口数である。高倍率のレンズは、高分解能でなければ意味がないから、 NA を高い値に取る。空気中では NA の最大値は 1 であるが、屈折率 n の媒質中では最大値は n まで大きくできる。実際、100 倍を超えるような高倍率の対物レンズでは、試料と対物レンズの先端を屈折率の高い油につけ、1 を超える NA を実現している。このような対物レンズを液浸 (liquid immersion) 式の対物レンズという。

図 7 では、対物レンズが直接中間像を結ぶとしたが、対物レンズは無窮遠に像を結び、これと結像レンズを組み合わせ、中間像を形成する方式もある。これを無窮遠補正の対物レンズという。無窮遠補正では、対物レンズと

結像レンズの間は平行光束になるから、偏光素子やフィルターを挿入して使うときに、中間像の形成される位置が移動せず、さらに、余計な収差の発生を抑えられるので都合が良い。

対物レンズの先端から、焦点までの距離を作動距離 (working distance) という。これの大きい対物レンズほど、試料の扱いが容易になり、望ましい。特に、物体の表面ではなく、内部を観測するときには有利になる。

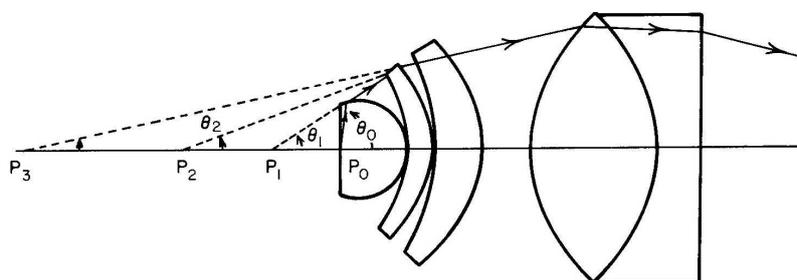


図9 顕微鏡対物レンズの例

図9は対物レンズの構成の一例である。いきなり一枚のレンズで結像すると収差が大きくなりシャープな像が得られない。図の物体側の3枚のレンズは、光線の傾きを少しずつ光軸に平行にする機能を果たしている。像側の2枚のレンズで実像を結ばせる。このように、光線を少しずつ曲げることで収差の発生を抑えることができる。図10にいくつかの対物レンズのカットモデルを示す。各対物レンズの付けられた数字は、倍率と開口数 (NA) を表す。左端の対物レンズは、倍率が100倍で、 $NA = 1.32$ を意味する。空気中では NA は1以下であるから、この対物レンズは液浸で使うように設計されている。

3.3 照明光学系

試料がほとんど透明な生物顕微鏡では、物体を裏側から照明する。一方、試料が不透明な金属顕微鏡では、半透鏡を用い対物レンズ側から照明する

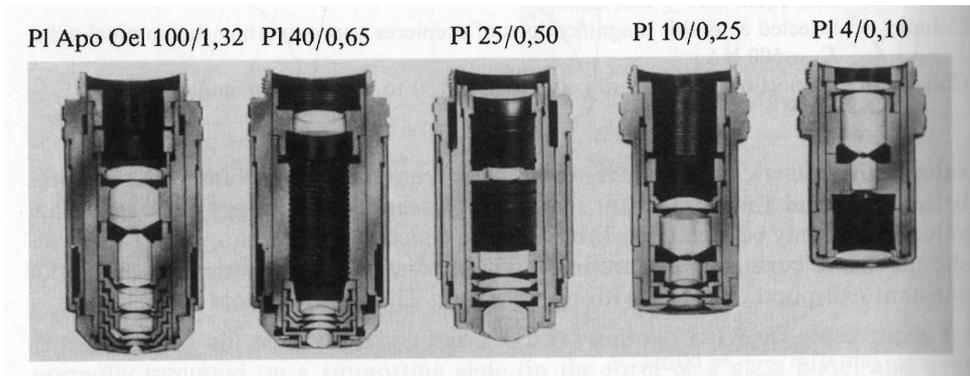


図 10 顕微鏡対物レンズのカットモデル

(落射照明)。

顕微鏡の照明光学系には、臨界 (critical) 照明, または, ケーラー (Köhler) 照明が用いられる。臨界照明は, 図 11 のように, コンデンサー (condenser) 光学系 C で照明光源 S の像を試料面上 A に結ぶ方式である。この照明法では, 光源にむらがあるとそれがそのまま照明光に現れてしまうという欠点がある。

一方, ケーラー照明では, 図 12 のように, 光源または光源の像 S をコンデンサー C の物体側の焦点面上に置く。光源の各点から出た光はコンデンサーで平行光線となり, これが試料面 A を照明する。すなわち, ケーラー照明では, いろいろな方向の平行光線の集まりで, 試料を照明することになる。この方式では, 光源に強度むらがあっても, 照明は一様になる。対物レンズが取り込むことが出来る照明光の角度拡がり, は, 対物レンズの NA_o で決まり, 一方, 照明光自体の角度拡がり, は, コンデンサーの NA_c で決まる。照明光の空間的なコヒーレンスは, 両者の NA の比 $\sigma = NA_c/NA_o$ で決まる。 $\sigma \geq 1$ の場合をインコヒーレント照明, $\sigma = 0$ をコヒーレント照明, その中間を部分的コヒーレント照明という。照明光のコヒーレンスは, 顕微鏡の分解能を決める重要な要素である。

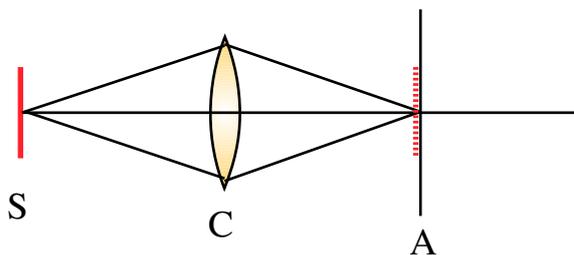


図 11 臨界照明

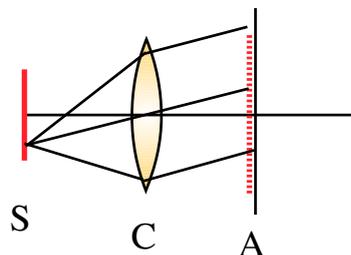


図 12 ケーラー照明

3.4 特殊な顕微鏡

3.4.1 暗視野顕微鏡

照明光を斜めに入れ、対物レンズに照明光が直接入らないようにした顕微鏡を暗視野顕微鏡 (dark field microscope) という。物体が存在すると、照明光が散乱または回折され、対物レンズにも散乱光の一部が取り込まれる。したがって、物体があると、真っ暗な背景の中に明るい点が輝くことになる。微小な物体など、明視野の中ではコントラストが低く、散乱光の検出が難しい物体の観測に適する。特に、極微粒子など分解能以下の小さい物体に対し、物体の形状を正しく見ることはできないが、物体の存在を検出することができるので有効である。また、細胞の内部の構造など、通常の顕微鏡では観測が難しい試料も観測できる。

3.4.2 位相差顕微鏡

普通の顕微鏡では、物体による光の散乱や吸収を検出できるが、透明だが屈折率や厚さが周囲と異なる物体 (位相物体) は見るできない。多くの微生物試料は本来透明であり、顕微鏡観測には、色素を用いた染色が必要であった。位相差顕微鏡 (phase contrast microscope) は、微小な位相差を強度の差として検出できるようにした顕微鏡である。位相差顕微鏡を発明したゼルニケ (Zernike) は 1953 年にノーベル物理学賞を授賞した。

位相差検出の原理は次の通り。位相が周期的に変化する位相格子の結像を考えよう。透明な物体でも、位相差があれば光は回折する。位相差が小さいとすると、物体の位相分布は $\exp[i\delta \sin(Kx)] \approx 1 + i\delta \sin(Kx)$ となる。この式で1は回折されずに物体を透過する0次光を表す。像面では、0次光と回折光 $i\delta \sin(Kx)$ が重なり像を形成するが、0次光と回折光は 90° 位相が異なるため、強度は $|1 + i\delta \sin(Kx)|^2 \approx 1$ となり、位相分布は観測されない。そこで、0次光と回折光を空間的に分離し（0次光と回折光は進行方向が異なるので、レンズの焦点面上で、異なる点に収束する）、0次光に 90° の位相差をつけると、強度は $|1 + \delta \sin(Kx)|^2 \approx 1 + 2\delta \sin(Kx)$ となり、位相差に比例する強度分布が現れる。こうして、位相差を強度差に変換することが可能になる。

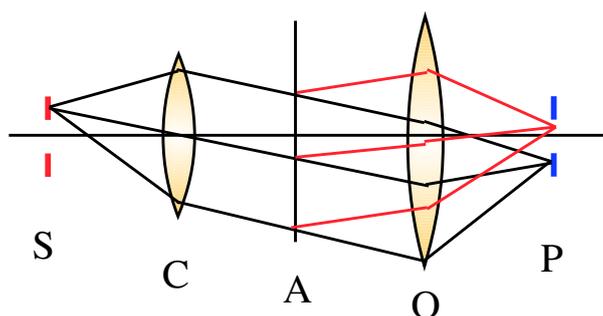


図 13 位相差顕微鏡

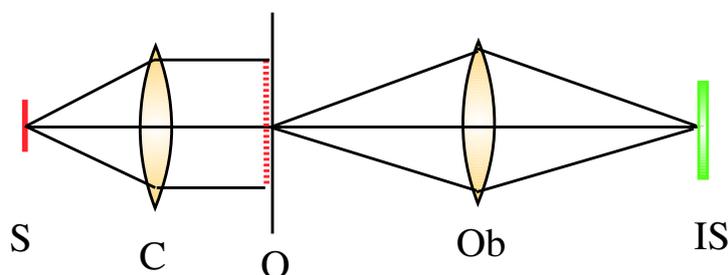


図 14 普通の顕微鏡

実際の顕微鏡では、図 13 のようにケーラー照明の光源の位置にリング状の絞りを置き。リング状の光源 S を使用する。物体がなければ、対物レンズの後側焦点面にリング上絞りの像ができる。この位置に、リング状の 90° 位相板 P を置く。こうすると、0 次光は物体によって回折されずにそのまま通過するから、位相板により 90° 位相がずれる。ところが、物体に回折された光は、リング状の位相板の、内側または外側部分を通過するから、位相の変化を受けない。この結果、位相差が強度差に変換され、透明な位相物体が観測できるようになる。

3.4.3 レーザー走査顕微鏡

通常の顕微鏡では試料全体を照明し、そこからの散乱光や回折光を観測する (図 14)。レーザー走査型顕微鏡 (laser scanning microscope) は、レーザー光を微細なスポットに絞り、その位置における吸収や散乱の大きさを測定する顕微鏡である (図 15)。1 回の測定では、レーザーのスポットが当たっている点の情報しか得られないが、試料を走査することにより、画像の情報を得ることができる。特に、共焦点 (confocal) 型では、検出系にも対物レンズを用い、スポットの中心の強度を検出する (図 16)。レーザーのスポットは平面内だけではなく、光軸方向にも絞られているので共焦点型の配置では、深さ方向にも分解能を持つ。これを利用すると、試料を 3 次元的に観測することが可能になる。試料を走査しなくてはならず、1 枚の画像を得るのに時間がかかるのが難点であったが、データの取り込みの改良により高速化が実現している。

4 ステッパー縮小投影レンズ

現代の光学系で、解像力と画面の大きさにおいて最も過酷な条件を課せられるのは、半導体チップ露光装置 (ステッパー) の投影レンズである (図 17)。解像力を上げるため、光源波長は短くなっている。はじめは水銀ラン

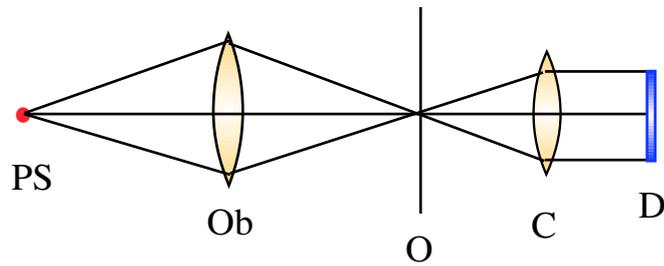


図 15 走査顕微鏡

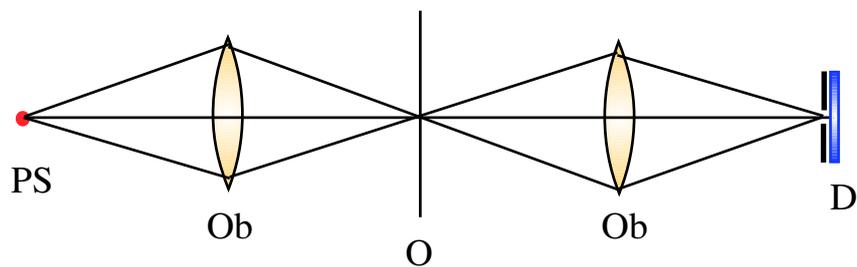


図 16 共焦点型走査顕微鏡

プの紫外線（g 線 436 nm、i 線 365nm）を用いていたが、さらに波長を短くするため、248 nm の KrF エキシマーレーザー光が実用化され、さらに、193 nm の ArF エキシマーレーザーも使われるようになってきた。波長が短くなると普通のガラスは吸収があって使えず、石英ガラスなどごく限られた光学材料しか使えない。ステッパーでは、解像力だけではなく、焦点深度も問題になる。半導体チップの露光は 1 回だけでは済まず、いろいろなパターンを何度も重ねて露光する必要がある。このため、始めは平坦であった半導体表面にパターンの有無による高低差がつく。従って、ピントが合った面から上下に離れた面でもシャープに結像することが望ましい。結像理論によれば、焦点深度 d は

$$d = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (11)$$

で与えられる。ここで、係数 k_2 は 1 程度の定数である。分母が NA の 2 乗になっていることに注意されたい。解像力を上げるだけであれば、波長を短くしても NA を大きくしても効果は同じであるが、焦点深度を考慮すると、波長を短くするほうが、 NA を大きくするより有利であることが分かる。このため、ステッパーでは、波長を短くするほうに努力が向けられているのである。最近では、波長が 13.5 nm の極端紫外光（軟 x 線）を使った露光装置が研究されている。しかし、反射鏡や屈折レンズはまだ性能が不十分で、実用になるものはない。また、光源の開発もこれからの課題である。

一方、生物顕微鏡で用いられた液浸の技術が半導体露光装置にも使われはじめ、成功を収めつつある。

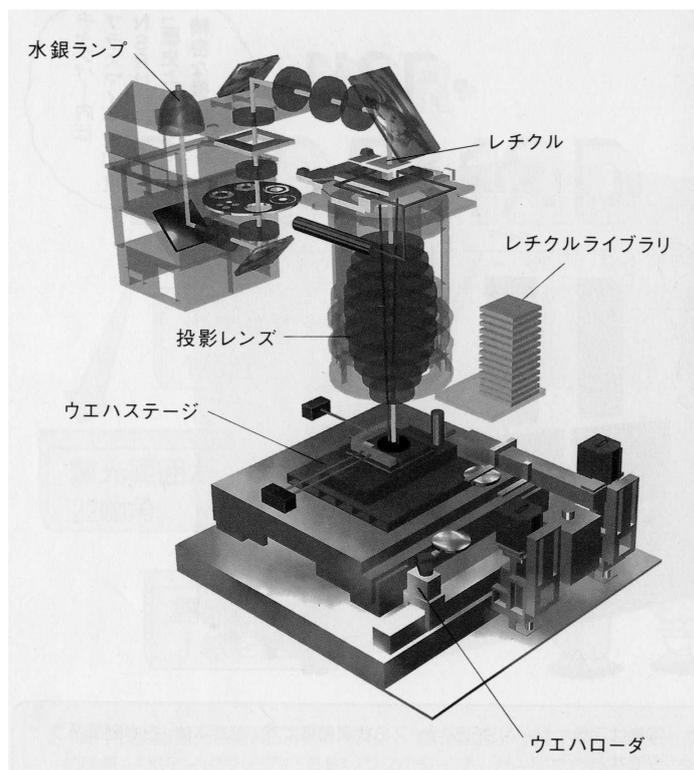


図 17 半導体露光装置

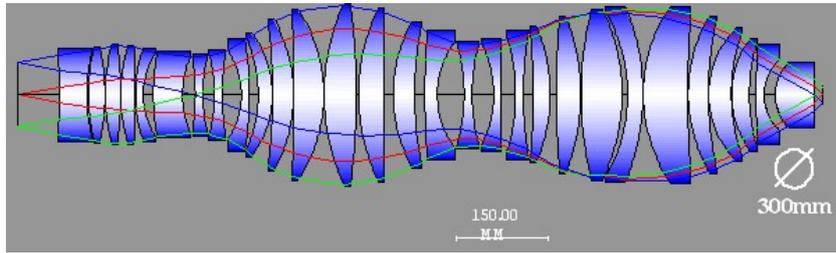


図 18 ステッパー用縮小投影レンズ

5 望遠鏡

5.1 屈折望遠鏡

遠くにある物体を拡大して見る光学機器が望遠鏡 (telescope) である。また、2つの望遠鏡を並べ、両眼で見えるようにしたものが双眼鏡 (binocular) である。望遠鏡は、ガラスのレンズを使う屈折型と、放物面鏡などを使う反射型に分けられる。屈折型を例にとって望遠鏡の原理を考えよう。

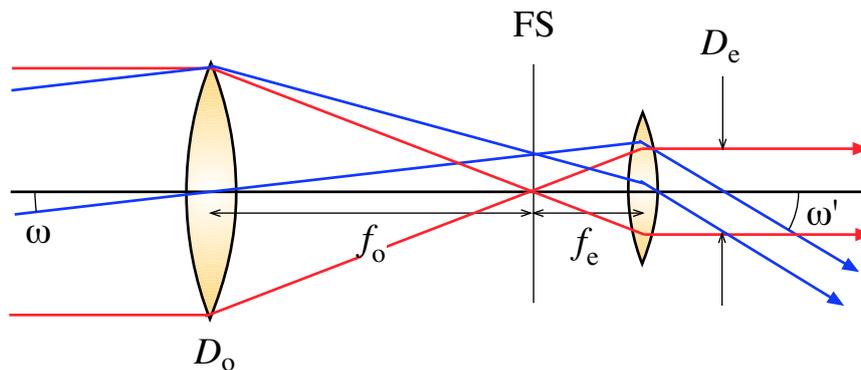


図 19 ケプラー式望遠鏡

望遠鏡の光学系は、焦点が有限距離にないアフォーカル系となっていて、基本的に2つのレンズの組み合わせで出来上がっている。物体に向かうレン

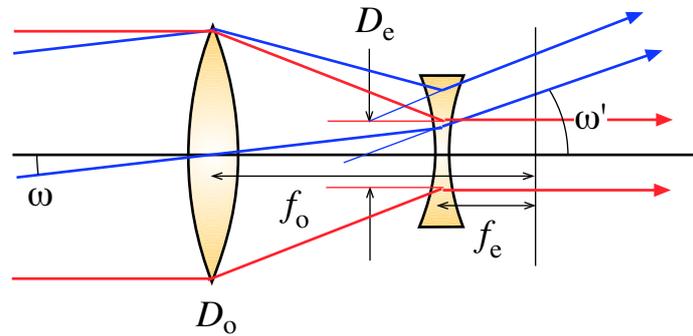


図 20 ガリレオ式望遠鏡

ズは、焦点距離の長い凸レンズで、これを対物レンズ (objective) という。第 2 のレンズは、目に当てて像を観測する部分で、接眼レンズ (eye piece) という。図 19 に示すように接眼レンズが凸レンズのものをケプラー (Kepler) 式望遠鏡といい、図 20 に示すように接眼レンズに凹レンズを使うものをガリレオ (Galileo) 式望遠鏡という。どちらの方式でも、対物レンズの像側焦点の位置に接眼レンズの物体側焦点を重ねるように配置する。

対物レンズの焦点距離を $f_o > 0$ 、接眼レンズの焦点距離を f_e とする。ケプラー式では f_e は正であり、ガリレオ式では負である。対物レンズと接眼レンズの間の距離は $d = f_o + f_e$ であるから、ガリレオ式の方が全長は短くなる。

望遠鏡の倍率は、結像の横倍率では与えられない。なぜなら、物体も像も遠方にある場合、われわれが目で見えて感じる大きさは、物体や像の大きさそのものではなく、光線が光軸となす角度 (視角) によって決まるからである。上図にあるように、入射光線の視角を ω 、射出光線の視角を ω' とすると、倍率 m は角倍率 γ に等しくなり

$$m = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{f_o}{f_e} \quad (12)$$

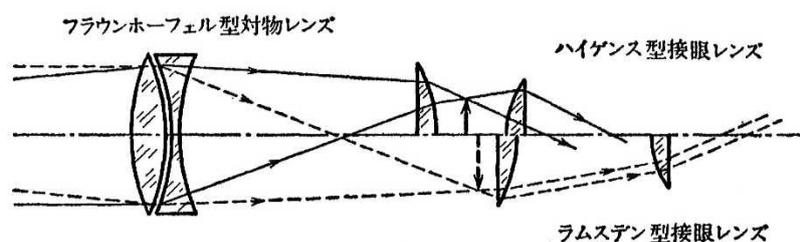
で与えられる。ケプラー式では倒立像が見えるので、倍率 m は負になる。ガリレオ式では像は正立する。

同じ対物レンズを用い、同じ倍率であれば、ガリレオ式の方が全長を短くでき、かつ、正立像が得られる。したがって、ガリレオ式の方が優れているように思えるが、実際にはそうは言えない。この2つの方式では見え方が異なるのである。それは、射出瞳の位置の違いによる。望遠鏡の入射瞳は対物レンズそのものになる。よって、対物レンズの接眼レンズによる像が射出瞳になる。ケプラー式では、射出瞳は図 19 の D_e の位置にできる。この位置に、観測者の眼の瞳（瞳孔）を合せば、全視界を見ることができる。このことから、射出瞳をアイリング (eye ring) という。明るさを損なわないためには、射出瞳の直径 D_e を瞳孔の直径 (昼間で 2~3 mm, 夜間では 7~8 mm) にほぼ一致させればよい。一方、ガリレオ式では、射出瞳は、接眼レンズの対物レンズ寄りに、すなわち、望遠鏡の鏡筒の内部の D_e の位置にできる。これでは、眼の瞳孔を射出瞳に一致させることは不可能である。結局、われわれは眼から離れた孔（射出瞳）を通して向こう側を見ることになるから、全視野を一度に見るのは難しくなる。これが、2つの方式の決定的な違いで、ケプラー式が広く使われる理由である。地上では倒立像が見えるのでは使いものにならないから、プリズムやリレーレンズを用いて、正立像が得られるように工夫されている。これに対しガリレオ式は、オペラグラスなど、光学系の簡単な低倍率の双眼鏡に用いられる程度である。

ケプラー式では、対物レンズの像側の焦点の位置 FS に、一度、無限遠物体の像ができるから、この位置に絞りを置けば、これが視野絞り (field stop) になる。ガリレオ式では、この位置は接眼レンズの右側に来るから、視野絞りを置くことは不可能である。よって、ガリレオ式では、視野の境界はぼける。

最後に、分解能を議論しよう。対物レンズの球面収差が十分補正されていれば、視野の中央における、点像強度分布の拡がり回折効果で決まる。光の波長を λ 、対物レンズの直径を D_o とすると、回折による拡がり角は $\theta \approx \lambda/D_o$ となる。この角度が、望遠鏡の分解能を与える。よって、口径の大きい望遠鏡ほど高分解能になる。ただし、大気屈折率が温度の不規則な

分布によってゆらぐため、ある程度以上口径を大きくすると、それ以上口径を大きくしても分解能は変わらない。ただし、口径は分解能だけではなく、像の明るさを決める重要な因子である。像の明るさは、口径と焦点距離の比で定義される F 数 ($F = f_o/D_o$) の 2 乗に比例する。口径の大きい、したがって、F 数の小さいレンズほど明るい像が得られる。



1.7 図 望遠鏡のレンズ系

図 21 色消しレンズを用いた屈折型望遠鏡

実際の光学系では、色収差の補正が重要になる。図 21 は対物レンズに 2 枚貼り合わせの色消しレンズ (Fraunhofer 型対物レンズ) を用いた例である。接眼レンズにも、式 (8) を満たし焦点距離の色収差を補正した 2 枚組のレンズを用いている。この色収差補正では、焦点距離は補正できるが、主点位置の色収差は取除けない。しかし、望遠鏡の接眼レンズでは光線が同じ方向に平行に出てくれば、横にズレていても構わないので、このような色収差補正が可能となる。図 21 には、2 種類の接眼レンズが描かれている。上の Huygens 型接眼レンズは、色消し条件 (8) を満足するように設計されている。この場合は、中間像が接眼レンズの内部にできる。下の Ramsden 型接眼レンズでは、色消し条件から僅かに外れるが、中間像が接眼レンズの外にできるので、十字線や目盛板を入れるのに都合が良い。

5.2 反射望遠鏡

反射望遠鏡には色収差が存在しないから，広い波長域で使うことができるのが，最大の特長である。主鏡は物体側に光を集めるから，入射光線をできるだけ妨げないように小型の副鏡を置き，接眼レンズまで光線を送る。この副鏡と接眼レンズの組み合わせにはいろいろな方式が考えられている。

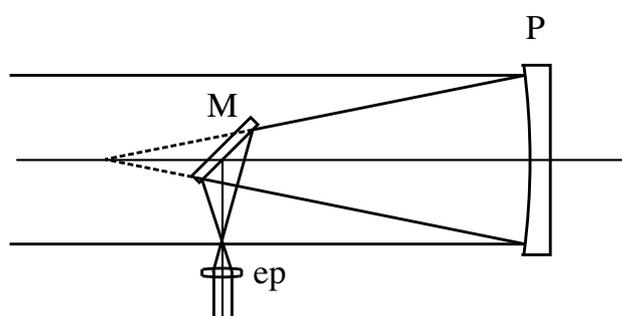


図 22 ニュートン式。P:放物面鏡，M:平面鏡，ep:接眼鏡。

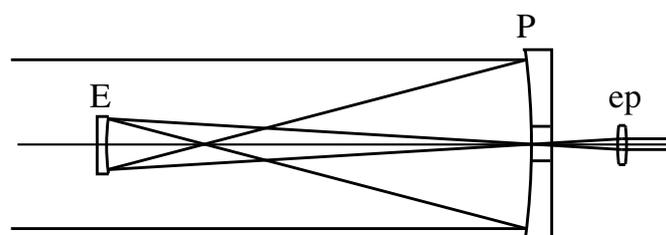


図 23 グレゴリー式。P:放物面鏡，E:楕円面鏡，ep:接眼鏡。

ニュートン (Newton) 式 (図 22) は，放物面鏡の主鏡で反射された光束を，平面鏡で光軸を直角に折り曲げ，光線を接眼鏡に導く。グレゴリー (Gregory) 式 (図 23) やカセグレン (Cassegrain) 式 (図 24) では，主鏡の中心に孔を開け，光線を外に取り出す。グレゴリー式では楕円面鏡を用い，カセグレン式では副鏡に双曲面鏡を用いる。図から分かる通り，カセグレン型

の法がグレゴリー型よりも主鏡と副鏡の間の距離が短くなる。大口径の望遠鏡になると、大きさの点でカセグレン型の方が優れている。され、この二つの方式では、楕円面あるいは双曲面の一方の焦点を、放物面の焦点と一致させ、それぞれもう一方の焦点へ無収差で結像する。すなわち、光軸に平行な光線束が放物面鏡に入射すると、全ての光線は、副鏡の焦点に集まる。接眼鏡の焦点をこの点に一致させれば、屈折望遠鏡と同様な光学系が形成される。これらの方式では、主鏡と副鏡に非球面反射鏡を用いるため、球面収差のない結像が実現する。しかし、コマ収差の補正がされていないので、光軸から外れた物体の像には大きなコマ収差が発生する。したがって、良好な画像が得られる視野は、球面系の場合に比べ、非常に狭くなる。この欠点を克服すべく、球面収差だけでなくコマ収差を補正するタイプの望遠鏡がいくつか提案されている。そのうち最も成功したのがリッチー・クレチエン (Ritchey-Chrétien) 型である。これはカセグレン型の変形であるが、主鏡と副鏡の両方に双曲面を配することにより、球面とコマの両方を補正し、広い視野角を得ている。ハッブル (Hubble) 宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡でこの方式が採用された。

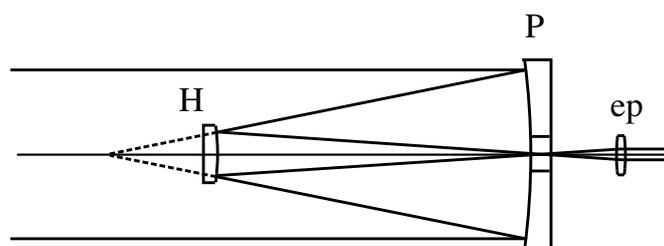


図 24 カセグレン式。P:放物面鏡, H:双曲面鏡, ep:接眼鏡。

5.3 シュミットカメラ

反射望遠鏡では、主鏡に放物面鏡が用いられる。放物面鏡は、軸上では球面収差が完全に補正されている。しかし、軸から少し外れると、コマ収差が

発生する。このため，良好な像が得られるのは，光軸の極近傍に限られる。

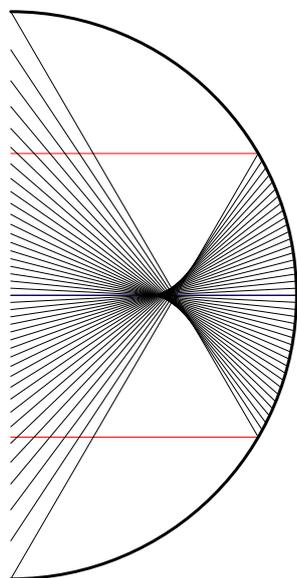


図 25 球面収差

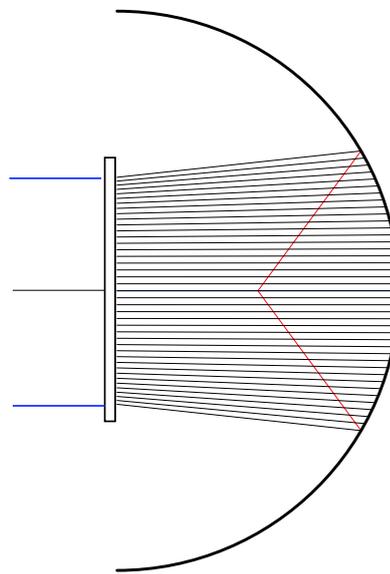


図 26 シュミット補正版による球面収差補正

図 25 は球面鏡に光軸に平行な光線束が入射したときの結像光束を描いたものである。球面収差が残ることが判る。しかし一方で，球面鏡は回転対称性があるから，絞りを球面の曲率中心（焦点距離の 2 倍）の位置におけば，どの方向から入った平行光線も同じ収差を持つ。そこで，広い視野で良好な画像が得られるように，主鏡に球面を用い，いろいろな方向からの入射光線に対し球面収差を打ち消すように設計された非球面形状の板を，主鏡の曲率中心の近くに置く（図 26）。これを，シュミット (Schmidt) の補正板といい，これを備え，広い視野を写真撮影できる望遠鏡をシュミットカメラという。