

# 眼 光 学 の 基 礎

魚 里 博

奈良県立医科大学眼科学教室

〒634 奈良県橿原市四条町840

## 1. 眼球光学系の光学特性

### A. 涙液層 (tear film)

主涙腺, 副涙腺, 結膜杯細胞等の分泌物が混合したものが涙液であるが, 角膜表面を覆い涙液の薄い層を形成している. これを角膜前涙液膜 (precorneal tear film) と呼ぶ. これは角膜の透明性維持のみならず, 角膜面を光学的に平滑化するうえでも重要であり, いわば, 眼の光学系の生理学的最前線といえる. 厚さは, 約10 $\mu$ m前後で, 平均的な涙液分泌量は約1.2ml/minで, 涙液量の平均は約7.0ml程度である. また正常時のpHは約7.4位で屈折率は1.336から1.337程度といわれている.

### B. 角 膜 (cornea)

角膜は血管のない透明な組織であり, 上皮, ボーマン膜実質, デスメ膜, 内皮よりなっており, 眼光学系の解剖学的最前線である. 空気との境界面であり, しかも屈折率差の最も大きい曲面であるので, その屈折率と曲面の形状は眼屈折系で最も大きなウェイトを占めるものである. 角膜は, 一般にほぼ10から11mmの円形または, 横楕円形をしており, その中心厚は約0.5mm程度である.

角膜の曲率半径は, 前面が約7.7mm, 後面が約6.6mmで, 全体として凹面のメニスカスレンズ形状をしている. 角膜の彎曲度は, 角膜曲率半径で与えられている中央部の値に比べて周辺部では大きく偏平となっており, 完全な球面形状ではない. 一般的には, 水平方向と垂直方向の曲率半径は異なり, 前者が後者より大きく生理的な角膜乱視は直乱視が多い.

角膜の屈折率は1.335から1.337程度である. 従って, 角膜の屈折力は前面が  $R_1 = (n_1 - 1.0) / r_1 \approx 48$  Diopter, 後面が  $R_2 = (n_2 - n_1) / r_2 \approx -6$  Diopter 程度で, 角膜の全屈折力は約43D程度である.

### C. 前 房 (anterior chamber)

角膜後面と水晶体前面の間を前房というが, ここには, 屈折率1.335から1.337程度の前房水が満たされており, 眼球形状保持のため重要である. 角膜後面から水晶体前面までの間隔を前房深度 (anterior chamber depth) というが, 約3mm程度である. 一般的に幼児では浅く, 20才位で最も深く, さらに年齢とともに再び浅くなる傾向がある. また, 近視眼では深く, 遠視眼では浅い傾向にある.

#### D. 瞳孔 (pupil)

瞳孔そのものは、眼球光学系の屈折の要素として直接の働きはないが、眼内に入る光量を制限し、その収縮によって、眼の焦点深度を高め、かつ角膜や水晶体による球面収差や色収差の減少に役立っている。瞳孔は、ほぼ正円形で、光量により約2mm から8mm の間でその径を変化させる。また、両眼の瞳孔間距離は、輻湊や両眼視のみならず眼鏡調整上も極めて重要である。なお、我々が見ている瞳孔は、実際の瞳孔の角膜屈折による虚像を見ているため、正しくは、入射瞳 (entrance pupil) と呼ばれる。

#### E. 水晶体 (crystalline lens)

水晶体は、水晶体核を中心に約2000層にもおよぶ薄い層がたまねぎの様に包み込んだ構造を有し、一種の両凸レンズの形状をしている。その屈折力は約20D 程度で眼屈折力の約1/3を負担しているが、さらに、レンズの曲率半径を増して、近くの物体にピントを合わせる調節作用 (動的屈折とも言う) の役割を演じ、最大調節時には約30D 以上の屈折力となり、眼の光学系の中で、角膜と共に最も重要である。

形状は、大きさが約9mm, 中心部厚さが約4 から5mm 程度で、その曲率半径は調節にともない大きく変化するが、無調節時には前面が10から11mm, 後面が6 から7mm で、強く調節した際には前面が5 から6mm, 後面が5mm 程度に変化する。また、調節時には後面の位置はそれほど変化しないが、レンズ前面は角膜側へ膨らんで、前房深度が2.7mm 程度と浅くなる。

水晶体の屈折率は大変特徴的である。すなわち、屈折率は一様ではなく、中心部が高く、周辺の皮質部が低い屈折率分布型レンズとなっている。水晶体核では約1.40で、表層部では1.38程度で約0.02から0.03程の屈折率差がある。

#### F. 硝子体 (vitreous body)

水晶体後面と網膜の間には、硝子体と呼ばれるゲル状の透明組織が満たされており、眼球の形態維持や各組織の保護の役割を果たしている。成人硝子体の容積は約4 ml で、眼球組織の約4/5を占めている。また屈折率は約1.335から1.337程度で、ほぼ前房水と同程度である。

#### G. 網膜 (retina)

網膜はカメラのフィルム面に相当し、眼球透光体を通過してきた光の受光面であり、特にそのうちで光受容体の視細胞の密度がきわめて高い部分 (中心窩) があり、中心視力を決定する。そのため、網膜面の感度はカメラのフィルムや CCD の受光素子のごとく一様ではなく、きわめて特徴的な分布特性を有している。またこの中心窩の方向は、いわゆる眼の光学系の軸上ではなく、わずかに耳側に偏心している。角膜前面からの網膜面までの距離を一般に眼軸長と呼ぶが、その平均値は約23から24mm 程度である。

## 2. 模型眼

### A. 眼球のモデル

模型眼 (schematic eye) とは、各屈折系の光学常数の実測値あるいはそれに近い値を基準にして常数を定め作成したもので眼球光学系の標準的なモデルである。模型眼をさらに簡素化したものを省略眼 (reduced eye) と呼んで区別する場合がある。一般に各屈折面は球面で、水晶体屈折率は均質 (あるいは核質と皮質に分割) として仮定されている。実際の眼球は個体差

も大きく、各屈折面は非球面であり、水晶体の屈折率は分布を有している。また各屈折面で決まる光軸 (optical axis) は一般に一致していない。従って、光軸近傍の概算的な理論計算には十分威力を発揮するが、収差や結像特性などを詳細に検討する場合必ずしも十分とはいえない。

眼球の光学常数を模型化して基準化し、理論的取扱の簡単となるように各要素の数値を定めた模型眼には、古くより各種のものが用いられている。その代表的なものが Gullstrand の模型眼で、その他に Helmholtz や LeGrand の模型眼をはじめ、Donders, Lawrence や Listing の省略眼などがある。そのほか最近では屈折面の非球面性と水晶体の屈折率分布を考慮した中尾らによる精密模型眼もある。

## B. Gullstrand の模型眼

模型眼のうち最もよく用いられているもので、精密模型眼 (模型眼 No.1 または要式眼ともいう) と略式模型眼 (模型眼 No.2 または略式眼ともいう) とがあり、それぞれ調節休止時と極度調節時の両者の数値が与えられている。これらの数値を表2-1と図2-1にそれぞれ示す。

精密模型眼では、角膜の曲率半径 ( $r_1$ ) は7.7mm で、空気 ( $n_1=1.0$ ) と角膜実質 ( $n_2=1.376$ ) の2つの媒質の境界面を形成している。後面の曲率半径 ( $r_2$ ) は6.8mm で角膜と房水 ( $n_3=1.336$ ) の境界を形成している。角膜の中心厚さ ( $d$ ) は0.5mm であるから、角膜の全面屈折力 ( $D_1$ ) は、

$$\begin{aligned} D_1 &= (n_2 - n_1) / r_1 = (1.376 - 1.0) / 7.7 \times 10^{-3} \\ &= 48.83 \text{ (D)} \end{aligned} \quad (2-1)$$

また後面屈折力 ( $D_2$ ) は

$$\begin{aligned} D_2 &= (n_3 - n_2) / r_2 = (1.336 - 1.376) / 6.8 \times 10^{-3} \\ &= -5.88 \text{ (D)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

となる。したがって、角膜の全屈折力 ( $D_c$ ) は

$$\begin{aligned} D_c &= D_1 + D_2 - (d / n_2) \cdot D_1 \cdot D_2 \\ &= 43.05 \text{ (D)} \end{aligned} \quad (2-3)$$

である。また角膜の主点位置はそれぞれの屈折面より

$$e = d \cdot D_2 / n_2 \cdot D_c = -0.0496 \text{ mm} \quad (2-4)$$

$$e' = -d \cdot n_3 \cdot D_1 / n_2 \cdot D_c = -0.5506 \text{ mm} \quad (2-5)$$

となり、角膜前面から像側主点位置までの距離は、 $e' + d$  より  $-0.0506$  mm となる。これより角膜主点位置はほぼ角膜前面と考えて差し支えない。

水晶体は、中心の核質部で屈折率が高く、周辺部に行くにつれて屈折率が低くなっている屈折率分布型レンズであるが、精密模型眼では核質 (1.406) と皮質 (1.386) の屈折率を2つに分割したものを考えており、略式眼では均質屈折率 (1.413) としている。水晶体前後面の曲率半径は、10.0,  $-6.0$ mm で、最大調節時にはそれぞれ5.33,  $-5.33$ mm の両凸レンズである。

水晶体の厚みは3.6mm（最大調節時は4.0mm）で、角膜前面より水晶体前面までの距離は3.6mm（最大調節時は3.2mm）となっている。

水晶体の全屈折力（ $D_L$ ）は、前面と後面の屈折力を  $D_1$ 、 $D_2$  とすれば、

$$\begin{aligned} D_L &= D_1 + D_2 - (d_L / n_4) \cdot D_1 \cdot D_2 \\ &= 19.11 \text{ (D)} \end{aligned} \quad (2-6)$$

ただし、 $d_L$  は水晶体の厚さ（ $3.6 \times 10^{-3} \text{m}$ ）、 $n_4$  は水晶体の同格屈折率（1.4085）である。また水晶体の前後面の屈折力は

$$D_1 = (1.4085 - 1.336) / 10 \times 10^{-3} = 7.25 \text{ (D)}$$

$$D_2 = (1.336 - 1.4085) / -6.0 \times 10^{-3} = 12.083 \text{ (D)}$$

である。また最大調節時には水晶体の屈折力は33.06（D）となり、その差は13.96（D）となるが、全眼系での主点における屈折力に換算すると9.6（D）となり、近点位置は102.3mmである。

眼球全体の屈折力は58.64（D）であるが、眼軸長が24mmあるためこの精密模型眼では約1.0（D）の遠視眼となっている。また略式眼では全屈折力が59.74（D）で、ほぼ正視眼（正確には+0.1（D）の近視眼）である。

### C. 省略眼（reduced eye）

前述の模型眼をさらに簡素化し、屈折面を1面とし、空気と眼内液（ $n=1.3365$ から1.333程度）の境界面のみとしたものである。これらには、Donders, Lawrence, Listing などがある。表2-2にこれらの値を示す。これらのなかで、Listing のものが最も簡単で、屈折力を60（D）の単一球面（曲率半径5.55mm）が角膜の後方2mmのところに位置し、水と空気を隔てるもので、物側焦点距離（ $f$ ）=-16.65mm、像側焦点距離（ $f'$ ）=22.22mmとなっている。

### D. その他の模型眼

おもにヨーロッパ成人の統計データに基づいた LeGrand の模型眼（1946年）を表2-3に示す。精密眼と略式眼の2種類があり、それぞれ調節休止時と調節時の数値が与えられている。この略式眼では前房水、硝子体および角膜の屈折率はいずれも1.336と等しく、角膜の厚みは0と考えている。精密および略式眼ともに約7（D）の調節が可能である。

また図2-2には Emsley による Gullstrand 略式眼の修正眼と省略眼を示す。この2つの眼をその像側焦点位置を一致させて重ね合わせると、省略眼の主点位置は模型眼の2つの主点位置の間に位置する。この省略眼の屈折面は、実際の角膜頂点より約 $1 \cdot 2/3$ だけ後方に位置しているので、頂間距離12mmを仮定するとき、この省略眼では $13 \cdot 2/3 \text{mm}$ の値を採用しなければならない。

### 3. 眼の軸と角度

眼球の軸や角度は、眼球光学系やその構造を調べる上で重要のみならず、斜視や眼位検査などの臨床上もきわめて重要である。古くより生理光学の分野では、眼の軸として視軸、光軸、瞳孔中心線、注視線や照準線などが、また眼の角度としてはアルファー、ガンマー、クッパーおよびラムダ角などが用いられている。しかし、現在においても、これらの軸や角度の定義が正しく認識されていなかったり、誤って使用されたりしている場合も多い。

#### A. 眼の参照軸

眼球の軸としては、表3-1および図3-1に示すように、古くから各種のものが用いられている。大別すれば、注視方向を規定するものと、光学系の参照軸を規定するものがある。

##### 1) 視 軸

視軸 (visual axis) は視線 (visual line) とも呼ばれるが、固視点 (fixation point) と眼の第1節点 (anterior nodal point) を結ぶ線、または、眼の中心窩と固視点を結び眼の節点を通る線で定義される。厳密には、固視点と第1節点を結ぶ線 (物体空間での視軸) と第2節点と網膜中心窩を結ぶ線 (像空間での視軸) とは一本の線ではなく互いに平行な2本の線であるが、両節点の間隔は高々0.3mm程度であるから、一本の直線と近似できる。

視軸を規定する中心窩および節点の同定はきわめて困難であり、また眼が非共軸光学系であるため視軸の他覚的な測定は一般に不可能である。正確に視軸に位置を決定するには、固視点から放射される指向性の高いX線が必要となる。X線は眼の光学系を屈折せずに透過し、十分高いエネルギーがあれば光受容体を刺激することが出来る。X線により刺激された点と固視点を自覚的に重ね合わせたものが真の視軸を与えるが、このような方法は実際的ではなくかつきわめて危険である。従って、視軸は、眼の絶対的な注視方向を決める上で重要であるが、現実にはその決定が難しいため、あくまでの定義上の概念的な軸と考えるべきである。

##### 2) 注視線

注視線 (fixation axis) は、眼の回転中心、つまり眼球回旋点 (center of rotation) と固視点を結ぶ線で定義される。ところで、眼は剛体のように1点を中心として回転するものではないため、その回旋中心の決定は不可能に近い。臨床的には、眼球回旋点を角膜後方約13mmと仮定して、注視線を求めていることが多いが、注視線の臨床的意義はあまりない。

##### 3) 照準線

照準線 (line of sight) は、眼の入射瞳 (entrance pupil) 中心と固視点を結ぶ線で定義されるものである。入射瞳とは、角膜の屈折によって生じる実瞳孔の見かけの像である。この照準線の定義には、臨床的にも実測できる見かけの瞳孔を参照点としており、定義がきわめて明快であり、またその位置の決定も容易である。この線は、固視点から入射瞳に入る光線束の代表光線であり、いわゆる幾何光学での主光線 (chief ray または principal ray) に相当するものである。また、固視点から入射瞳の中心を通過して眼にはいる光線は、射出瞳の中心を通過して網膜中心窩に達する。物体空間での照準線と像空間での照準線は、視軸のように平行ではないため、物体空間での照準線の延長上に中心窩が存在しないが、屈折された照準線上に中心窩が存在する。

このため、測定困難な視軸よりも優先して照準線を用いるべきである。Bennettらは、この照準線こそが眼の注視方向を決定する最も重要な軸であり、これを視軸と定義すべきだと

述べている。しかし、このような呼び方はかえって混乱を拡大させる恐れがある。

#### 4) 光軸

光軸 (optic axis) は、眼の全ての光学系の曲率中心を通る線、またはこの線に最も近似的な線で定義される。しかし、角膜と水晶体の光軸は共軸ではなく、一般に傾いているし、水晶体の屈折率分布を考慮すると水晶体の光軸の定義も難しい。従って、真の光軸は、厳密には定義できず、4つの Purkinje-Sanson 像を最も近く結ぶ線が、最良の近似的な眼の光軸であるといえる。後述するように、水晶体による Purkinje-Sanson 像 (第3及び第4像) はその明るさがきわめて暗いため通常の臨床的検査では観察が困難である。

#### 5) 瞳孔中心線

瞳孔中心線 (pupillary axis) は、眼の入射瞳中心を通り角膜表面に垂直な線で定義される。このように瞳孔中心線はその定義がきわめて明快でかつその位置の決定も容易である。その定義から明らかなように、瞳孔中心線は、角膜前面の曲率中心をも通り、検者が光源の真後ろから注意深く観察し、角膜反射像を被検者の瞳孔中心に位置させることで容易に決定できる。従って、瞳孔中心線は角膜の光軸と考えてよく、ときには眼の光軸の代わりに用いることもある (Gullstrand の Optic axis と呼ばれる)。

#### 6) 眼軸

以上の他に、眼軸 (geometrical axis) と呼ばれるものが用いられることもあるが、これは眼の前極と後極とを結ぶ線で定義される。角膜頂点から眼球後極部までを外眼軸、角膜頂点から網膜中心窩までを内眼軸と呼んで区別することもある。前者の外眼軸長は X 線撮影法で求められ、後者の内眼軸長は X 線光覚法や超音波法などの測定で求められるものである。しかし、眼の屈折系が共軸でかつ軸対称ではないので、一般に眼軸と光軸とは一致しない。

以上のように眼球光学系の参照軸には各種のものが用いられているが、眼の注視方向としては照準線、また眼球光学系の参照軸としては瞳孔中心線が、それぞれ最も重要である。

## B. 眼の角度

一般に網膜中心窩は、眼の解剖学的軸すなわち眼軸、もしくはそれに比較的近い眼の光軸上にはなく、ごくわずかながら耳側に偏心している。そのため、正常の眼球光学系においても、いわゆる生理的斜視角が存在する。この角度として古くより生理光学の分野では、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\kappa$  および  $\lambda$  角が用いられている (図3-2、表3-2)。しかし、従来より眼の軸の定義が曖昧であったために、またこれらの角度もさらに曖昧なものとなっている。

#### 1) アルファ角

$\alpha$  角 (angle alpha) は、眼の視軸と光軸のなす角で定義される。しかし、前述したように視軸や光軸の臨床的決定は不可能に近く、そのためこの  $\alpha$  角の測定も不可能に近い。そのため、この  $\alpha$  角は、あくまでも眼の生理的斜視角の定義上または概念的なものであると考えべきであろう。

#### 2) ガンマー角

$\gamma$  角 (angle gamma) は、眼の光軸と注視線とのなす角で定義される。この角度も測定困難な光軸と注視線を含むため、臨床的に定義通り  $\gamma$  角を求めることは不可能である。特に眼球回旋点という臨床的にも測定困難な参照点を用いている注視線と、非共軸光学系である眼の光軸をも参照軸に用いていることは、この角度も臨床的にはその意義がきわめて低く、専ら  $\alpha$  角と同様に定義上ないしは概念上の角度と理解した方が望ましい。

#### 3) カッパ角

κ角 (angle kappa) は、眼の視軸と瞳孔中心線のなす角で定義される。この角度は、眼科臨床において古くより用いられているが、測定困難な視軸を含むため、正確には求められない。一つには視軸の考え方による相違や視軸と照準線との混同のために混乱が起こっているものと考えられる。現在測定されているκ角の大部分は、後述するλ角と同じものを測定していることが多い。

#### 4) ラムダ角

λ角 (angle lambda) は、眼の照準線と瞳孔中心線のなす角で定義される。この角度は、臨床的に測定可能な瞳孔中心線と照準線のなす角であるため、その測定はきわめて簡単・容易である。従来用いられてきたκやγ角は、ここで言うところのλ角に近いものであると思われる。もちろん眼科臨床で汎用されているκ角とここで定義しているλ角との相違は、もし仮に眼の視軸や光軸が正しく測定できたとしてもその相違はきわめて小さく、その測定精度からして両者の相違は臨床的には無視できる。しかし、両者の差が小さいからといって、両者の定義を混同して良いと言うわけでは決してない。

以上のように、定義の明快さ、及び測定の容易さから、眼科臨床で測定が可能なのはλ角のみであることは明かであり、κ角やγ角よりもλ角をより優先して用いるべきである。

## 4. 眼の収差

幾何光学では、一つの物点から出た光線は反射または屈折により理想的には再び1点に集まる。このような理想的な写像からのズレを収差 (aberration) といい、これには大別して光学系の分散による色収差 (chromatic aberration) と、単色光を用いてもなお生じる単色収差 (monochromatic aberration) の2つがある。ところで、級数展開を用いれば

$$\sin \theta = \theta - (\theta^3 / 3!) + (\theta^5 / 5!) - \dots \quad (4-1)$$

と表せるが、右辺の第1項のみをとれば良いような、つまり光軸付近の狭い領域 (では Gauss の光学が成立するから、その範囲) を Gauss の空間または近軸領域と呼ぶ。同様に最初の第2項までとれば良いような領域を (研究者の名をとって) ザイデル (Seidel) 領域と呼ぶ。収差論で重要な5つの収差をザイデル収差というのはこれによっている。ザイデル収差は、別名球面収差 (広義の) とも呼ばれるが、大別すれば球面収差 (狭義の)、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲収差の5つに分類される。

このような収差の中で、眼の光学系において重要なものは、色収差、球面収差 (狭義の) および非点収差である。特にこの内で、色収差と球面収差は最も重要である。その主な理由は、光軸外の物点より生じる軸外収差に対しては、網膜面が平面でなく湾曲していることと、周辺網膜では中心窩に比較して解像力が著しく低いことなどの網膜の構造と機能による。また、第1種スタイルズ・クロフォード (Stiles-Crawford) 効果と呼ばれる光向感度差に起因するものがあげられる。これは、瞳孔の中心を通る光と周辺部を通る光とを比較すると、同じエネルギーであっても後者の方がはるかに暗く感じる現象である。さらに、我々の眼は、見ようとする物体の像が常に網膜中心窩にくるように自然に眼球を動かしていることなどによる。

### A. 色収差

屈折光学系においては、近軸領域であっても分散 (dispersion) のため光の波長によって焦

点位置および焦点距離が変化する。特に焦点の位置が波長により変化することを軸上色収差という。また焦点距離が波長によって変化するとき、主軸より外れた点の像に色収差が生じるので、これを軸外色収差、または倍率色収差という。

眼の色収差の存在については古くより知られているが、通常の条件下では主観的に感じられないのは、視感度曲線が明所視では555nmの波長の光に最大感度を示し支配的であるのに対し、スペクトルの両端で感度が低下するためである。眼の色収差に関する報告は数多いが、その1例を図4-1に示す。破線は12名の被検者のついでの測定値の最大と最小を示し、○印はその平均値を示している。ここでは波長578nmでの収差を0にとっている。

省略眼による理論計算では、 $fd=16.5\text{mm}$ 、 $\nu=56.4$ とすれば、軸上色収差は約0.3mm、横(倍率)色収差は約0.16mmとなり、これは瞳孔径を4.0mmとしたときの回折によるエアリーディスク0.034mmより著しく大きなものとなる。図4-1よりスペクトルの両端で約1.5-2.0D程度の屈折力差を認め、もし物体の位置を眼前55cm、瞳孔径を4.0mmとして、C線(656nm)に焦点を合わせるとすれば、G線の像は0.144mmの直径のボケ像を生じる。

色収差の年齢による影響を図4-2に示す。軸上色収差は年齢と共に減少していくことが認められる。色収差の各屈折要素による寄与は、色収差を分析する上できわめて重要であるが、図4-3に示すように、水晶体の色収差は、眼球光学系全体によるものの約28.5%が寄与しているといえる。

また眼の調節による色収差への影響は、適度の調節の場合にはあまり調節に依存しないようである。しかし、波長の違いによる焦点位置の変化は図4-4に示すように、観察距離(調節刺激量)により大きく依存する。図中破線はIvanoffによるもの(0-2.5D)、実線はMillodotらによるもの(0.8-8.3D)である。

このような色収差は、精密屈折検査法として赤緑テスト(red-green test)として臨床の場で応用されている他、最近の屈折検査機器にも用いられている。そのため、各種の検査機器の目盛り較正上きわめて重要である。

## B. 球面収差

軸上物点からの光線が1点に集束せずに広がりをもつ収差を球面収差(spherical aberration)という。図4-5に示すように、像空間で光線が光軸を切る点をP、近軸像面を切る点をQとするとき、近軸像点 $P_0$ を基準として、 $P_0P$ を縦球面収差、 $P_0Q$ を横球面収差といい、単に球面収差と言えば一般に前者をさすことが多い。横軸には球面収差量 $P_0P$ をとり、縦軸には、物点が無限遠の場合には入射光線の高さ $h$ またはFナンバーを、有限距離の場合には、開口数NAをとる。

眼の球面収差については数多くの報告があるが、無調節時には正の球面収差が、調節時(近方視のとき)には負の球面収差を示すといわれている。そして、この中間域(眼前50cm前後)では球面収差が0になるといわれている。これらの結果を図4-6に示す。またIvanoffの結果(図4-6)によれば、無調節時で+0.3D、約160nmとなり、調節による変化は少なく、1.5-2.0Dの調節時に最も球面収差は小さくなる。図中の理論値で示した曲線は、球面光学系でしかも均一屈折率を仮定したGullstrandの模型眼より求めたものである。このように実測値の収差が小さいことは、明らかに屈折面の非球面性と水晶体の屈折率分布によるものと考えられる。つまり、人眼では、角膜の曲率は周辺部ほど小さく、その断面形状がメニスカス状であることや、水晶体の屈折率が中心から周辺にかけて小さくなっていることで球面収差を少なくする構造になっている。また瞳孔が縮瞳することにより、周辺光束を遮り球面収差を小さくしている。し



かし、あまり瞳孔が小さくなると、回折の影響が現れてくる。

### C. 非点収差

軸外物点からの光線束が一度線状に結像したあと再びそれと垂直な方向に線状に結像するような収差を非点収差 (astigmatism) という。眼の非点収差は周辺視力と関連して重要であるが、中心視力と比較して周辺視力は著しく低いいため眼の球面収差ほどは重要ではない。平面物対の像は湾曲するが、この湾曲面を **Petzval 面** という。Gullstrand の模型眼を用いて計算すれば、Petzval 面は約-17mm の曲率半径を有するが、網膜面のそれは約-12mm でありかなり相違している (図4-7)。また、網膜面を境にして非点収差の正切像面 (meridional image) と子午像面 (sagittal image) とが位置するので、**最小錯乱円** (circle of least confusion) の位置は網膜面にきわめて近く合理的である。

## 5. 瞳 孔

絞り (stop) は、結像に用いられる光線束の範囲を制限し、像の明るさや結像される範囲を決める働きをする。また像の焦点深度及び収差との関連もある。結像に関与するのは光学系を通過することの出来る光線のみである。光学系を通過する光線束は、レンズの縁や枠あるいは眼の絞りである瞳孔など、光線束の開きを制限する可能性のあるもの (これを一般に「絞り」と呼ぶ) により制限される。これらの絞りのうちで最も有効に光線束を制限する働きをしているものを開口絞り (aperture stop) と言う。

開口絞りを決定するには、各々の絞りと考えている物点との間にある光学系の部分によって物体空間に生じる各々の絞りの像を考えなければならない。それらの像のうち物点において最小の角をはるものを入射瞳 (entrance pupil) と言う。また、その像空間における像を射出瞳 (exit pupil) と言う。射出瞳は像空間において像点に収束してくる光線束の開きを制限している。図5-1には、一般的な光学系における入射瞳、射出瞳および開口絞りの決定法を示す。図5-1では、P、Q、R の3つの絞りが開口絞りとなる可能性があるが、Qが開口絞りとなる。したがって、レンズPによるQの像であるQ'が入射瞳、またレンズRによるQの像Q''が射出瞳となる。

開口絞りの他にもう一つ別の種類の絞りがある。これは結像される物体の範囲、すなわち視野を制限する絞りであり、**視野絞り** (field stop) と呼ばれる。

次に眼の入射瞳と射出瞳を考えよう。

### A. 入射瞳

眼に入射してくる光線束は、瞳孔よりもむしろ角膜により生じる瞳孔の像によって制限される。この像が眼の入射瞳となる。いま図5-2に示すような配置を考えると、実瞳孔面は水晶体前面にあって、角膜前面より  $l = -3.60\text{mm}$  の位置とする。角膜の屈折力を  $K = 43.08\text{D}$  とする。瞳孔中心Bから出た光は角膜で屈折されあたかもB'から来ているように観察される。この見かけの位置が角膜を通して見た見かけの瞳孔 (入射瞳) 位置である。前房の屈折率を  $n = 1.336$  とすれば、入射瞳の角膜前面よりの距離  $l'$  は

$$(1/l') = (n/l) + K \quad (5-1)$$

より、 $l' = -3.05\text{mm}$  となる。また、見かけの瞳孔 (入射瞳) の拡大率 (倍率) M は

$$M=nl'/l$$

(5-2)

より  $M=+1.13$  となり、約13%の拡大率となる。+の符号は正立像を意味する。例えば実瞳孔径が4mm あれば、見かけの瞳孔径（入射瞳孔径）は約4.5mmである。眼科の臨床で瞳孔径を測定する場合、この見かけの瞳孔径、つまり入射瞳孔径を一般に用いているので、実際の瞳孔径ではないことに注意すべきである。

## B. 射出瞳

眼の射出瞳は、水晶体の屈折により生じる実瞳孔の像である。図5-3に示すように瞳孔中心Bから出た光は水晶体の後面で屈折されあたかもB'から来るかのように観察される。このB'が実瞳孔の見かけの位置であり、射出瞳面である。水晶体の厚みを  $l=3.60\text{mm}$ 、水晶体の後面屈折力を  $K=12.83\text{D}$ 、硝子体の屈折率を  $nv=1.336$  とすれば、射出瞳の水晶体後面から計った距離  $l'$  は

$$(nv/l') = (nc/l) + K \quad (5-3)$$

より、 $l'=-3.52\text{mm}$  となり、射出瞳は実瞳孔から0.8mm 後方に位置している。また射出瞳の拡大率は  $M=+1.03$  となり、約3%拡大される。

眼の光学系において、入射瞳と射出瞳はお互いに共役 (conjugate) 関係にある、つまり物体と像との関係にある。眼の入射瞳と射出瞳の位置と相対的な大きさを図5-4に示す。

## 6. プルキンエ・サンソン (Purkinje-Sanson) 像

角膜や水晶体の屈折面で生じる光源の反射像を Purkinje-Sanson 像または単に Purkinje 像という。眼位検査やケラトメーターによる角膜曲率半径の測定のみならず角膜の厚みや水晶体の曲率半径を測定する pachometry にも用いられている。Purkinje-Sanson 像には一般に I, II, III および IV までの4つの反射像がよく用いられる。これ以外に多重反射によるものもあるが、一般にその明るさがきわめて暗いためほとんど観測できない。

Purkinje-Sanson 第1および第2像は角膜の前面と後面による反射像で、第3および第4像は水晶体の前面と後面による反射像である。Gullstrand の模型眼を用いて計算した Purkinje-Sanson 像の光学特性を図6-1および表6-1に示す。Purkinje 第1像は別名角膜反射像 (corneal light reflex) と呼ばれ、眼科臨床で最もよく利用されているものである。なぜなら、第1像に比較して他の第2から4像はその明るさがきわめて暗いため、通常の観察条件ではほとんど認められない。しかし、第1像の角膜反射像はきわめて明るいため、ケラトメーターでの角膜曲率半径の測定やレフラクトメーターでの被検眼のアライメント用に用いたり、眼位検査での指標に用いたりされている。

ところで、この角膜反射像の位置はどこにあるのであろうか？ 角膜面上、前房、水晶体それとももっと後方の硝子体中に出来ているのであろうか？ 答えは瞳孔面より後方の水晶体付近に出来ている。角膜表面の曲率半径は約7.8mm 程度であるから、光源の位置が無限遠方とすれば、その像（虚像）は角膜曲面の焦点位置  $7.8/2=3.9\text{mm}$ （角膜表面より）に出来る。光源の位置が眼前有限の距離にあったとしても、その像位置は高々数  $\mu\text{m}$  角膜に近づくのみである。また瞳孔面は角膜表面より約3.6mm の位置にあるが、その入射瞳は約3mm に位置するため、角膜

反射像は見かけの瞳孔（入射瞳）の後方約1 mmに出来ていると考えて差し支えない。その他のPurkinje-Sanson像の位置は図6-1および表6-1に示す通りである。第1から第3像までは正立虚像であるのに対し、第4像のみは倒立の実像である。また第3および第4像は調節にともないその大きさと結像位置が変化する。

最近の白内障の手術療法である眼内レンズ移植手術が盛んになっているが、このような人工の眼内レンズ移植眼でのPurkinje-Sanson像の光学特性は、前述の有水晶体眼のものとは大きく異なっている。図6-2および表6-2にその計算結果を示すが、ここでは代表的な後房型眼内レンズ（平凸）の例を示す。

当然ながら、第3および第4像の大きさや結像位置のみならず、明るさ（相対強度）が有水晶体眼のそれらと大きく異なることがわかる。特に眼内レンズによる像が明るいことは、従来できなかった眼内レンズの各種検査が可能となっている。その大きな原因は、水晶体の屈折率に比較して、眼内レンズの屈折率が1.495前後と高いために、屈折率差が大きくなりひいては反射率が高くなっているためである。

## 7. 眼の分光特性

### A. 眼透光体の分光透過率分布

光が眼に入射すると、約4%（垂直入射の場合）が角膜の表面反射により損失するが、大部分の光は眼の屈折系である角膜、房水、水晶体、硝子体の順にわずかづつ吸収されながら網膜に達する。一見して透明に見える角膜、房水、水晶体、硝子体などのいわゆる透光体も光の波長によって透過や吸収特性が異なる。人眼の平均的な分光特性を図7-1に示す。このような眼の各組織での光の透過性や吸収性は、光による障害と重要な関係を有する。眼球透光体の透過特性は、波長域で約450nmから1400nmまで透過性を有するが、それ以外の紫外線や赤外線ではほとんど網膜まで達しない。200nmから450nmまでの光に対して、各組織はおのの著明な吸収を示すが、これは主に組織中に含まれるタンパク質やアミノ酸による。450nmから1400nmまでの各組織での吸収はおおむね蒸留水の吸収に一致している。

角膜における紫外線の吸収は著しいが、水晶体での紫外線の吸収もさらに大きい。従って、眼に入る紫外線の大部分は角膜と水晶体により吸収されて、網膜には達しない。臨床的にも、網膜が紫外線で障害されることはほとんどないが、角膜はしばしば紫外線眼炎を起こす。角膜における紫外線の吸収特性を図7-2に示す。280nmより短波長の紫外線ではほとんど角膜において吸収され、360nmの波長でも角膜で約34%、水晶体で約52%、房水と硝子体で残りの14%が吸収されて、網膜までは達しない。最近のエキシマレーザーによる角膜手術の試みが始まっているが、波長200nm前後の紫外線での角膜による吸収特性が優れていることによるものである。

一方、近赤外線は紫外線のように角膜や水晶体ではほとんど吸収されずに比較的眼球の深部まで達する。1300nm以上の遠赤外線は眼球組織の水分、とくに前房水や硝子体液によりほとんど吸収される。

### B. 加齢による変化

眼球組織の分光特性は、年齢により大きく変化する。これは主に角膜や水晶体での紫外線や赤外線の吸収により混濁が伴って来るためである。図7-3には眼球組織のうち特に角膜と水晶体における透過および吸収特性を示す。高齢になるにしたがって、全体的に吸収が増えて透過

特性が低下してくる。特に短波長での透過率の低下が著しい。

このようなことは、白内障患者の眼内レンズ移植手術に伴う透過特性の変化は、手術前後で大きく異なるため、術後の視機能にも大きく影響を及ぼす。

### C. 網膜の分光特性

眼底は、入射する光の波長に対して異なる特性を有する各種の層からなっている（図7-4）。したがって、ほぼ380nm から780nm の連続スペクトルを有する白色光で眼底を照明すれば、各種波長成分に対してそれぞれの各層でさまざまな反射、吸収、透過の現象が生じる。眼底での反射特性は、一般に短波長（青色光）ほど網膜表層部、つまり神経線維層での反射が強く、中間波長（緑色光）では色素上皮層付近が、また長波長（赤色光）になるほど網膜深層部から脈絡膜層付近の反射が強くなる。そのため眼底写真をとる場合、単色光を用いて眼底を撮影する方法もとられている。通常の白色光源によるカラー眼底写真よりも、単色光による方が可視度（コントラスト）の良い像が得られる。このような網膜での分光特性は、眼底写真や検査のみならず、後述するレーザーによる網膜光凝固にとってもきわめて重要な問題である。

網膜色素上皮および脈絡膜での光の吸収特性を図7-5に示す。人眼とウサギの吸収特性はよく類似しているが、猿とは長波長域での特性がかなり異なっている。レーザー光凝固における網膜の凝固特性は、おもに眼透光体の透過率と網膜での吸収率との積により決まり、この値（凝固能率とも呼ばれる）が高いほどそのレーザー光の波長は眼透光体での損失が少なく、網膜に吸収されやすいことになる。図7-6には各種眼科用レーザーの発振波長と網膜での凝固能率との関係を示す。一般に可視域にあるレーザー光の網膜凝固の効率が高いことがわかる。また図7-7にはレーザー光の波長とメラニン、酸化ヘモグロビンやキサントフィルの吸収特性の関係を示す。