

眼内レンズ度数決定のための要素

根岸一乃

慶應義塾大学医学部眼科学教室

Factors Determining an Intraocular Lens Power

Kazuno Negishi

Department of Ophthalmology, Keio University School of Medicine

眼内レンズ (IOL) 度数決定のための主要素について概説した。眼軸長測定の方法には、超音波式と光干渉による方法 (光学式) がある。光学式は、非接触にて測定可能で、測定時間が短く (1 回約 0.5 秒)、手技が容易で精度が高いが、角膜混濁や進行した白内障、硝子体出血など、視軸上に強い混濁を有する症例では測定困難となる症例が多い。現状では双方の計測を使い分け、データを取捨選択することが重要である。近年、増加している角膜屈折矯正手術後眼をはじめとする角膜形状異常眼では、IOL 度数予測精度が不十分であるが、少なくとも屈折矯正手術前の測定データの存在は、予測精度向上のために有用である。屈折矯正手術前のデータを保管しておくことも臨床上重要であると考えられる。
(視覚の科学 28: 3-5, 2007)

キーワード：眼内レンズ，眼軸長，角膜屈折力，角膜形状異常眼，屈折矯正手術

The major factors in determining intraocular lens power were reviewed. There are two main methods of measuring axial length: ultrasound and optical coherence. The optical method is non-contact, instant (0.5 seconds per measurement), easy to operate and accurate, although it cannot be used in cases with dense opacity on the visual axis, such as corneal opacity, dense cataract or vitreous hemorrhage. At present, it is important to intraocular lens power select the appropriate method and select the data. The predictability is insufficient in eyes with abnormal corneal shape, such as post-corneal refractive surgery eyes, which have increased in number recently. Data before refractive surgery should at least be useful in improving predictability. Therefore, it is clinically important to keep data obtained before refractive surgery.

(Jpn J Vis Sci 28: 3-5, 2007)

Key Words: Intraocular lens, Axial length, Corneal refractive power, Eyes with an abnormal corneal shape, Refractive surgery

1. はじめに

白内障手術が進歩し、よりよい quality of vision が求められている現在、正確な術後屈折度数予測は重要性を増している。数年前までは許容されていた術後屈折度数予測のずれも、現在ではトラブルの原因になり得る。現状において、眼内レンズ (以下 IOL) 度数は、眼軸長、角膜屈折力および前房深度などの計測結果によって計算されるが、その評価誤差が術

後屈折に及ぼす影響は、眼軸長 1 mm につき 2.5 D、角膜屈折力 1 D につき 0.9 D、前房深度 1 mm につき 1.5 D (正視眼) であると報告されている¹⁾。本稿では IOL 度数決定のための主要素について概説する。

2. 眼軸長の評価

眼軸長測定の方法には、超音波式と光干渉を利用した光学式がある。超音波式による測定は最も一般的な測定法であるが、接触検査で検者の熟練度によ

別刷請求先：160-8852 東京都新宿区信濃町35 慶應義塾大学医学部眼科学教室 根岸一乃
(2007年1月7日受理)

Reprint requests to: Kazuno Negishi Dept of Ophthalmol, Keio Univ School of Med
35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo 160-8582, Japan
(Received and accepted January 7, 2007)

り測定精度が異なることが欠点である。超音波式による眼軸長測定機器の誤差は0.1mm程度とされているが、白内障術後の予測屈折値の誤差の許容範囲が $\pm 0.5D$ であるとすると、眼軸長評価誤差の許容範囲は0.2mm程度である。したがって、超音波式による測定の場合、計測誤差が大きくなるよう測定データをその場でチェックして取捨選択することが重要である。測定値がばらついている場合は、固視不良、後部ぶどう腫、外傷後、角膜の圧迫、プローブ先端の異物の存在などを考慮して、必要に応じて計測をし直す。また、測定波形が典型的でない場合、眼軸長が屈折値に相関しない場合も計測ミスを考え、必要に応じて計測し直すことが重要である。

一方、近年普及している光学式測定は、非接触にて測定可能で、測定時間が短く（1回約0.5秒）、手技が容易で精度が高い。光学式測定機器の誤差は0.03mm以下とされている。したがって、光学式の場合、眼軸長の測定誤差による影響はかなり排除できる。点眼麻酔が不要であり、超音波式では測定困難な瞬目過多の症例や眼振を認める症例、体位保持が困難な症例、恐怖感の強い症例、小児などの症例でも比較的容易に測定可能である。検者の熟練度による測定値のばらつきもない。また、光軸上ではなく常に視軸上で測定するため、高度近視症例では後部ぶどう腫など眼球形状の影響を受けることなく、より正確に安定して眼軸長が測定できるという利点がある（図1）。

しかし一方では、角膜混濁や進行した白内障、硝子体出血などの視軸上に強い混濁を有する症例では検出できる光の強度が低下するため、測定困難とな

る症例が多いという問題点もある。全体の7~12%程度は眼軸長測定が不能であるという報告もある²⁾。データ使用時の注意点として、超音波Aモード測定では角膜表面~内境界膜までの距離を光軸上で測定するのに対し、光学式眼軸長測定では涙液表面~網膜色素上皮までの距離を視軸上で計測していることに留意すべきである。ただし、市販されているIOLMaster™で測定値として表示される際は統計学的に求めた内境界膜までの距離の想定値に置き換えられて表示されている。それでも眼軸長が超音波Aモードより0.15~0.30mm程度長く測定されるので、測定値をIOL度数計算に用いる場合、当然A定数も超音波とは変える必要がある。IOLMaster™のユーザーグループのホームページ（<http://www.augenklinik.uni-wuerzburg.de/eulib/const.htm>）からIOLMaster™で測定した場合のA定数の情報を得ることもできる。また、超音波式および光学式計測機器にはA定数を最適化するソフトがついており、術者ごとに術後屈折をフィードバックして、パーソナルA定数を作成することも予測精度向上に有用である。

3. 角膜屈折力の評価（角膜屈折矯正手術後）

現在、通常の術前検査においてはオートケラトメータの測定値がIOL度数計算に用いられている。しかし、近年急激に増加している角膜屈折矯正手術後眼をはじめとする角膜形状異常眼において、この値を用いることには問題がある。すなわち、オートケラトメータでは角膜をトーリック面と仮定して角膜前面中央3mm付近の円周上を測定していること、換算屈折率を使用していることが誤差につながる。更に、

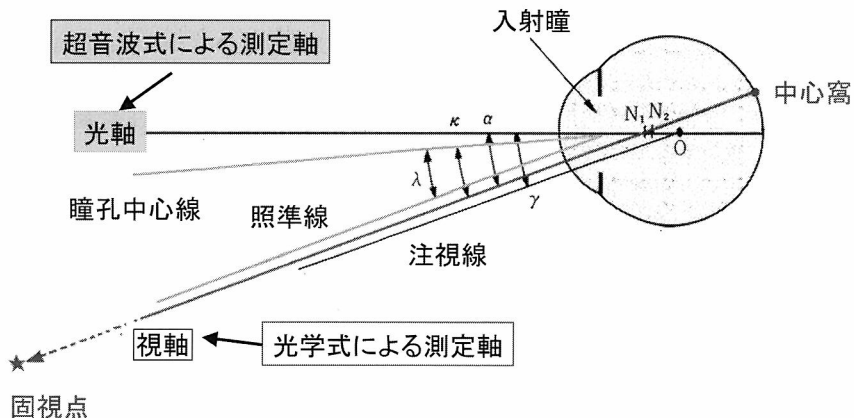


図1 眼軸長の測定軸

現在用いられている第三世代のIOL計算式(SRK/T, Holladay式など)では, 角膜屈折力を前房深度の予測にも用いるため, 角膜屈折力の測定誤差は前房深度の評価ミスにもつながる。角膜屈折矯正手術後の角膜屈折力の評価法としては, 角膜屈折矯正前の測定データを用いるClinical History method (History-derived method) と, 術前データを用いないその他の方法(Contact Lens Overcorrection method, 角膜形状解析装置による測定など)がある³⁾。

近年は, 角膜の前後面の形状を測定できる角膜形状解析装置によって実測した角膜屈折力の値が用いられることが多い。代表的なものはオーブスキャンのTotal optical powerやペンタカムのTrue net power, Equevalent K readingsなどであるが, これらを用いた角膜形状異常眼におけるIOL度数の予測精度は必ずしも良好ではない。Aramberriは前房深度の予測に術前のオートケラト値, 角膜屈折力の計算に術後のオートケラト値を用いるDouble-K method⁴⁾を発表している。この方法は, 術後データのみから計算するよりは精度が良好であるが, 通常の内障IOL度数計算と比較すると不十分であり, また術前データの存在が必須であることが欠点である。その他にも角膜屈折力の評価ではなく, 角膜屈折矯正手術の矯正量を用いて角膜屈折矯正手術後のIOL度数を予測する方法(Feiz-Mannis method⁵⁾)が発表されているが, 予測精度は十分ではなく, また術前データが必要であることも欠点である。

4. おわりに

正常眼におけるIOL度数の予測精度は, 光学式測定による測定誤差の減少も手伝ってかなり向上している。角膜屈折矯正手術が急速に普及している現在, 角膜屈折矯正手術後も含めた角膜形状異常眼における予測精度の向上は急務であろう。将来的には, 角膜屈折矯正手術ばかりでなく, 有水晶体IOL挿入眼や二つの屈折矯正手術を組み合わせたBioptics術後眼など, 更に複雑な光学系をもつ白内障眼も出てくると考えられる。

前述のごとく, 角膜形状異常眼におけるIOL度数の予測精度は不十分であるが, 少なくとも屈折矯正手術前の測定データの存在は精度向上のために有用であり, これをなんらかの形で保管しておくことも現状においては临床上重要であると考えられる。

文 献

- 1) Shammam HJ: Intraocular Lens Power Calculations. 19, Slack, NJ, 2004.
- 2) Haigis W: Optical coherence biometry. Dev Ophthalmol 34: 11, 2002.
- 3) Hamilton DR & Hardten DR: Cataract surgery in patients with prior refractive surgery. Curr Opin Ophthalmol 14: 44-53, 2003.
- 4) Aramberri J: Intraocular lens power calculation after corneal refractive surgery: Double-K method. J Cataract Refract Surg 29: 2063-2068, 2003.
- 5) Feiz V, Moshirfar M et al: Nomogram-based intraocular lens power adjustment after myopic photorefractive keratectomy and LASIK: A new approach. Ophthalmology 112: 1381-1387, 2005.

不正乱視の基礎と臨床研究 (1) ザイデル収差とゼルニケ多項式の関係

大 沼 一 彦

千葉大学工学部メディカルシステム工学科

Fundamentals of Irregular Astigmatism and Clinical Research (1) Relation between Seidel Aberration and Zernike Polynomial

Kazuhiko Ohnuma

Department of Medical System Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University

波面センサーによって眼光学系の光学特性が測定でき、それらから導かれる網膜上の点像、またそれを使って得られる視標の網膜像が得られる時代になった。ほとんどの波面センサーでは波面収差の表現にゼルニケ多項式が用いられている。今まで眼光学では、収差はザイデルの収差として学んできた。コマ収差、球面収差といわれるのと同じ収差ではないかと考えるが、実際は少し異なるのである。ザイデルの収差とゼルニケ多項式の間をつなぐことができればより収差に対する理解が深まり、ゼルニケの収差表現が有効に利用されることが期待できる。更にこのような収差があるときに、どのような網膜像になるのか、またどのような見え方になるのかを知ることは有効であると考えられる。今回から5回にわたって、筆者が収差の解説および網膜像の特性を述べ、収差の研究をされている眼科医が臨床から得られた知見を述べる。 (視覚の科学 28: 6-14, 2007)

キーワード：ザイデル収差、波面収差、ゼルニケ多項式

Wavefront sensors measure the performance of eye optics. The point-spread function and optotype images on the retina can be derived and calculated from the measured wavefront. Most wavefront sensors use the Zernike polynomial to represent wavefront aberration. When we hear the terms "spherical aberration" and "coma aberration", we consider them the same as the Seidel aberration. But in fact they differ slightly. Understanding the relation between the Seidel aberration and the Zernike polynomial deepens understanding of aberration; it is expected that the Zernike expression will be used effectively. Furthermore, it is effective to know what kinds of images are cast on the retina by the eye with aberrations. I will describe aberration and the characteristic of retinal images in five times of serialization, and ophthalmologists who research aberration will describe the knowledge acquired from their clinical research.

(Jpn J Vis Sci 28: 6-14, 2007)

Key Words: Seidel aberration, Wavefront aberration, Zernike polynomial

別刷請求先：263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉大学工学部メディカルシステム工学科 大沼一彦
(2007年1月26日受理)

Reprint requests to: Kazuhiko Ohnuma Dept of Med System Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Univ
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan
(Received and accepted January 26, 2007)

1. はじめに

諸先輩方による眼光学の書籍では、収差が起きる原因とその呼び方をザイデルの表現によって分類している。そこでは、収差は光線の表現で行われていて、波面の形の表現は用いられていない。最近、quality of vision (QOV) が叫ばれ、波面センサー¹⁻³⁾が世の中に出てきて、いきなりゼルニケ多項式による収差の表現がこれに付随して出てきたので、非点収差、球面収差と聞いただけで、昔勉強したザイデルの収差と同じであると思っている方が大半ではないかと思われる。非点収差、球面収差でも実は違いがある。その違いをここではまず、ザイデルの収差を光線での説明から波面での説明へ直し、ゼルニケ多項式による波面収差の表現の考え方を示し、最後にザイデルとゼルニケの表現の関係を示す。ここでの説明にはわかりやすさに重点をおいたので、厳密さを求める方にはお叱りを受けるかもしれないが、ご容赦いただきたい。

2. ザイデルの5収差と波面

はじめに理想的なレンズの光線と波面について述べる。図1には無限遠から発する光が無収差レンズを通過して、点像を作っている様子が示してある。図1に示すように波面は光線に垂直な面である。その面をつなぐと焦点P(0, 0, R)を中心とする球面となる。式(1)であらわすと、Rを中心とした半径Rの球の式である。

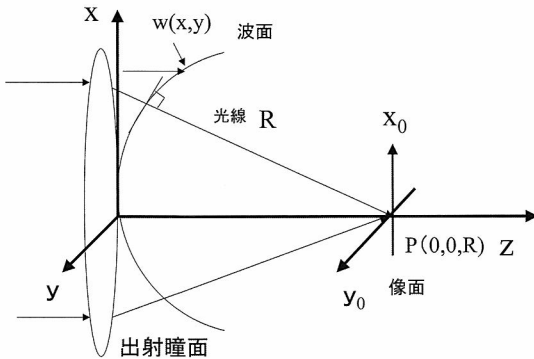


図1 波面と光線の関係
出射瞳面から距離Rにある像面(x₀, y₀)の中心点Pに集光する波面

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2 \dots\dots\dots (1)$$

式(1)を書き直すと、式(1')になる。

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2zR = 0 \dots\dots\dots (1')$$

式(1')で、R, x, yに比べてzが小さい場合を考え(現実もそうなのであるが)、z²を無視すると式(2)になる。

$$z = \frac{x^2 + y^2}{2R} \dots\dots\dots (2)$$

これが波面の式である。波面の式としてあらわすと、

$$w(x,y) = \frac{x^2 + y^2}{2R} = A(x^2 + y^2) \dots\dots\dots (3)$$

となる。つまり、波面は出射瞳面でのzの値であらわされる。ここで、A=1/2Rの関係がある。つまり、AがわかるとRがわかり、どこに収束する波面であるかがわかる。なんらかの要因でAが少し変化したとしよう、そうするとRが変わるということは焦点が移動することになる。つまり、デフォーカスである。

次に、波面と像面での移動の関係をみよう。図2に示すように、今度は波面から光線を求める。波面の傾きは波面を微分すればよい。光線はその微分した値に-1を掛けて求めることができる。高等学校で接線の傾きとその接線に直角に交わる直線の傾きを掛けると-1になると学んだことを思い出す。その直

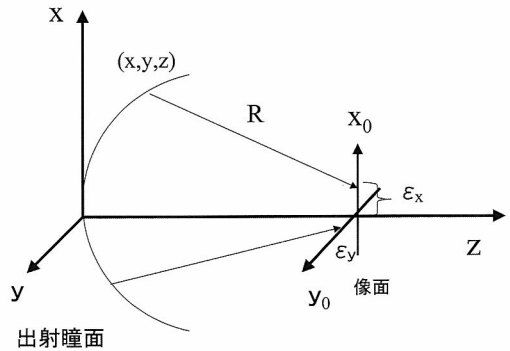


図2 収差のある波面
像面と、x軸においてε_xのズレを生じる。

線の傾きに像面までの距離 R を掛けると、像面での位置ズレ量になる。 x 方向の微小量を δx とすると、 x 方向の波面の傾き α_x は (4) 式で与えられる。

$$\alpha_x = \frac{w(x, y)}{\delta x} \dots\dots\dots (4)$$

また、像面での x 方向におけるズレ量を ε_x とすると、(5) 式で与えられる。

$$\varepsilon_x = -R\alpha_x = -R \frac{w(x, y)}{\delta x} \dots\dots\dots (5)$$

(5') 式は、出射瞳面の中心から周辺までの長さを 1 としたときの相対的な半径を h とするときのものである。

$$\varepsilon_x = -\frac{R}{h} \alpha_x = -\frac{R}{h} \frac{w(x, y)}{\delta x} \dots\dots\dots (5')$$

さて、これらの準備をして、波面を出射瞳の座標 (x, y) と像面の座標 (x_0, y_0) であらわしてみよう。このとき、像点が必ず x_0 上にあると仮定しても一般性が失われないので、レンズの波面は式 (6) で示される (O_h は高次の収差の項)。

$$\begin{aligned} w(x, y, x_0) &= w(x^2 + y^2, xx_0, x_0^2) \\ &= a_1(x^2 + y^2) + a_2xx_0 + a_3x_0^2 + b_1(x^2 + y^2)^2 \\ &\quad + b_2xx_0(x^2 + y^2) + b_3x_0^2(x^2 + y^2) \\ &\quad + b_4x_0^2(x^2 + y^2) + b_5xx_0^3 + b_6x_0^4 + O_h \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

これは、ここで扱うレンズが回転対称をしていることから導かれる。式 (6) がどうやって導かれるかについては、文献を参考にさせていただきたい^{4, 5)}。

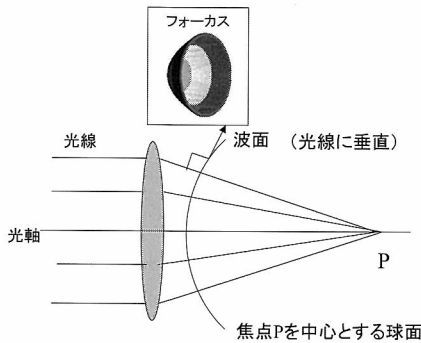


図3 理想レンズの波面
焦点Pに収束する。

a の係数がついているのは、2次の収差である。 a_1 の係数があるのは、先ほど述べたようにデフォーカスである。波面の形は図3に示す球面である。 a_2 の係数があるのはティルトである。これは次のように理解できる。 $x_0 = c$ (c は定数) となる場所で考えるとすると、波面は x に比例していることを示している。つまり、 x が増大すると波面もそれに比例して増大することであり、これは図4に示すように単純に傾いた面である。これに直行する光線もどの場所でも同じ傾きとなる。つまり、ある方向へ一様に傾いた光線である。プリズムのようなものを通過した波面である。これは、レンズが傾いたときに起きる。 a_3 の係数があるものは $x_0 = c$ で考えると、 x と y には関係しない量であることがわかる。そのため、これは点像には関係しない。

b の係数のついたものが4次の収差であり、はじめの5つがザイデルの5収差である。ザイデルの5収差を説明する前にもう一つ別の表現も示す。

図5に示すように x, y を半径 ρ と角度 θ であらわ

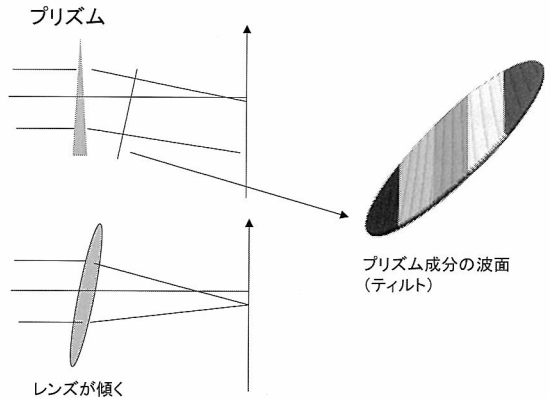


図4 ティルト
プリズム通過後の波面、レンズが傾くと発生する収差

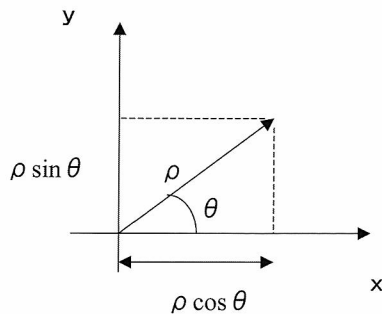


図5 座標変換

すと、 $x = \rho \cos \theta$, $y = \rho \sin \theta$ となる。式 (6) であらわされる波面を ρ , θ であらわすと $x^2 + y^2 = \rho^2$, $xx_0 = \rho \cos \theta$ となり, x_0 , ρ と $\cos \theta$ のべき乗の積の式であらわされることになり, 式 (7) ようになる。

$$w(x_0, \rho, \theta) = \sum_{j,m,n} w_{k,l,m} x_0^k \rho^l \cos^m \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$k = 2j + m, \quad l = 2n + m$$

式 (7) の一部を以下に展開して示す。

$$w(x_0, \rho, \theta) = w_{220} x_0^2 + w_{111} x_0 \rho \cos \theta + w_{020} \rho^2 + w_{040} \rho^4$$

$$+ w_{131} x_0 \rho^3 \cos \theta + w_{222} x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta$$

$$+ w_{220} x_0^2 \rho^2 + w_{311} x_0^3 \rho \cos \theta \quad \dots\dots\dots (7')$$

式 (6) の係数と $w_{i,j,k}$ の関係は, a_1, a_2, a_3 が, $w_{020}, w_{111}, w_{200}$ で, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 が, $w_{040}, w_{131}, w_{222}, w_{220}, w_{311}$ である。この波面の式のなかで, ザイデルの収差だけの部分を取り出す。つまり, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 の係数の項の部分でザイデルの収差係数 S_i であらわすと, 式 (8) となる。

$$w(x_0, \rho, \theta) = \frac{1}{8} S_1 \rho^4 + \frac{1}{2} S_2 x_0 \rho^3 \cos \theta$$

$$+ \frac{1}{2} S_3 x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{4} (S_3 + S_4) x_0^2 \rho^2$$

$$+ \frac{1}{2} S_5 x_0^3 \rho \cos \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

サイデルの収差係数と $w_{i,j,k}$ の関係を表 1 に示す。

それでは, ザイデルの 5 収差の波面を順に説明しよう。

1) 球面収差 (S_1)

図 6 には一般的な凸レンズに光軸に平行な平行光が入射したときに, レンズの周辺を通過した光が大

軸に早く交わる様子が示してある。図 6 の右側には, 入射高とその交わる点の位置関係が示されている。また, 光が一番収束するところを最小錯乱円の位置として示してある。従来のテキストではここまでであった。

それでは, 波面の考え方でみよう。レンズを通過した直後での光線に垂直な面をみると, 無収差の場合よりも周辺部が急峻であるのがわかる。これは無収差の場合の球面に, 新たに波面が加わったとみることができる。実は図 6 の上部に描いてあるように, 二つの波面の合成である。もう一つの波面の形状はレンズの中心からの距離 (半径 ρ とする) の 4 乗 $w_{040} \rho^4$ である。これがザイデル⁹⁾の球面収差の波面である。この図 6 では w_{040} は正で正の球面収差と呼ぶ。この球面収差のために一点に集まらないのである。像面での交点を求めるために, $w(x, y) = w_{040} \rho^4$ を式 (5') に代入すると, 像面での交点が次のように求められる。この波面は中心からの距離 ρ のみに依存するので $\delta x = \delta \rho$ となり, $\frac{\delta \rho^4}{\delta \rho} = 4 \rho^3$ となるので, 式 (9) となる。

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -\frac{4R}{h} w_{040} \rho^3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

これを見ると, 瞳の中心からの距離 ρ の 3 乗に比例して像がずれるのがわかる。それだけボケることになる。

2) コマ収差 (S_2)

図 7 はレンズの光軸から外れたところに置かれた点光源からの像をあらわしている。像は彗星が尾を引いた形をしているので, コマ (coma) 収差と呼ばれている。これは, レンズの周辺を通過した光が大

表 1 波面収差の係数とザイデル収差の関係

波面収差の係数	ザイデルの収差係数	数式による表現	呼称
w_{200}		x_0^2	ピストン
w_{111}		$x_0 \rho \cos \theta$	テイルト
w_{020}		ρ^2	(デ)フォーカス
w_{040}	$\frac{1}{8} S_1$	ρ^4	球面収差
w_{131}	$\frac{1}{2} S_2$	$x_0 \rho^3 \cos \theta$	コマ収差
w_{222}	$\frac{1}{2} S_3$	$x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta$	非点収差
w_{220}	$\frac{1}{4} (S_3 + S_4)$	$x_0^2 \rho^2$	像面湾曲
w_{311}	$\frac{1}{2} S_5$	$x_0^3 \rho \cos \theta$	歪曲収差

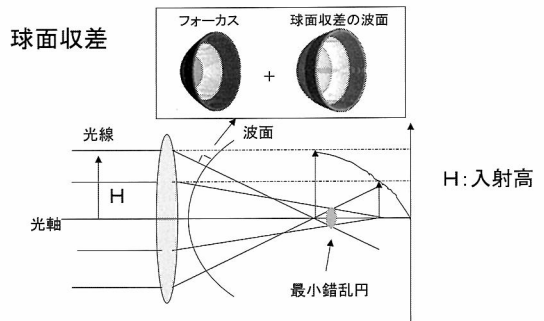


図 6 球面収差

きな円としての像を作る。その半径はレンズの中心からの距離に依存している。波面であらわすと、図7の右上に示すように上が凸で、下が凹んだ形をしている。ここで、図4で説明したように焦点を結ぶフォーカス成分もあるが、それは示していない。更にこの波面を式で示すと、 $x_0 \rho^3 \cos \theta$ となる。つまり、出射瞳の半径の3乗に比例し、また像面の位置 x_0 に比例してその値が大きくなり、これに $\cos \theta$ がかかっているため、 θ が -90° から 90° までは正の値でそれ以外は負の値となる。

像面での交点を求めると、式(10)となる。

$$\varepsilon_y = -\frac{2R}{h} w_{131} x_0 x y, \quad \varepsilon_x = -\frac{R}{h} w_{131} x_0 (3x^2 + y^2) \dots (10)$$

この ε_x と ε_y の関係は半径 $\frac{R}{h} w_{131} x_0 \rho^2$ と中心 $\frac{2R}{h} w_{131} x_0 \rho^2$

であらわせる円である。ここで h は瞳の半径である。その様子を図8に示す。

このような状態は、斜めから光が入る周辺視、laser in situ keratomileusis (以下 LASIK) で軸が外

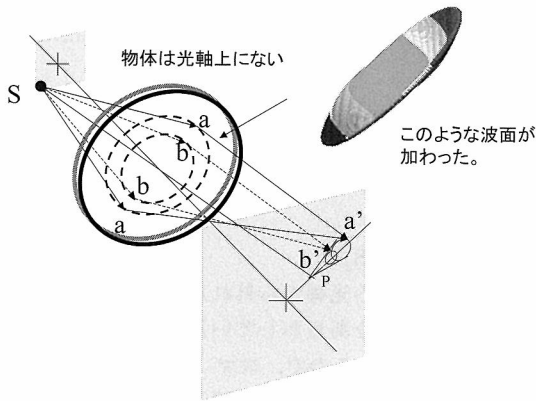
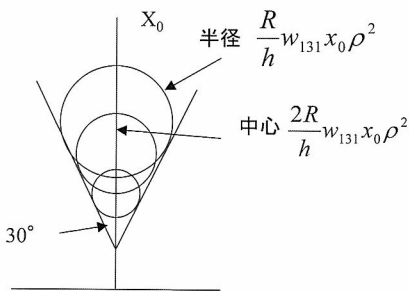


図7 コマ収差



像面

図8 コマ収差の点像

れて削った場合、intraocular lens (以下 IOL) が傾いた場合、また IOL が軸ずれを起こした場合に発生する収差である。

3) 非点収差 (S_3)

図9はこれもレンズの光軸から外れたところに置かれた点光源からの像をあらわしている。2箇所では焦点がみられる非点収差の例である。タンジェンシャル面とサジタル面では焦点が変わっている。この場合の波面をみると、図9の右下に示すように、タンジェンシャル面が進んでいるような波面である。なお、ここで焦点を結ぶフォーカス成分もあるが、それは示していない。波面の形をみると、平たい紙を一方向へ押し曲げたような形である。式でみると $x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta$ となる。つまり、 x_0 が大きくなると、その2乗に比例して波面の曲がり具合も大きくなることを示している。この式は 0° と 180° 方向で値が大きく、 90° と 270° 方向で0であることを示している。像面での交点を求めると、式(11)となる。

$$\varepsilon_y = -\frac{2R}{h} w_{222} x_0^2 x \dots \dots \dots (11)$$

これは、サジタル面には収差がないため、移動が起こらないことを示している。

この収差もコマ収差と同様に、周辺視、LASIKで軸が外れて削った場合、IOLが傾いた場合、またIOLが軸ずれを起こした場合に発生する。

4) 像面湾曲 (S_4)

この波面は、式(3)で示したフォーカスの波面である。式をみると $w_{200} x_0^2 \rho^2$ となっているので、像面での位置 x_0 の2乗に比例して、その量が変わるデフォーカスの波面である。つまり、像面において光軸の中心から離れると、焦点が短くなることを示している。像ができる場所がレンズの方へ近づいてくることに

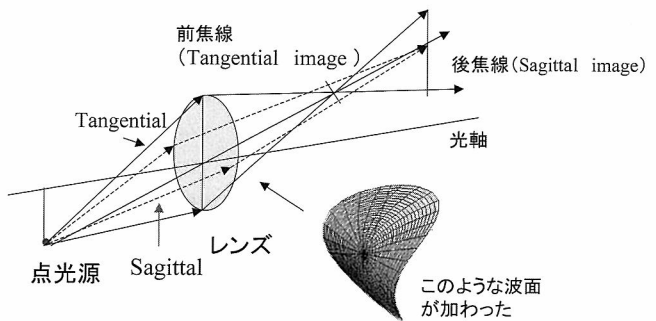


図9 非点収差

なる。その様子を図10に示す。この面をペッツパール面と呼んでいる。非点収差の波面の式とよく似ている。cosの項が違うだけである。非点収差と像面湾曲がある場合は、図11のようにタンジェンシャル面とサジタル面のフォーカスがずれることをあらわしている。

5) 歪曲収差 (S₅)

この波面は式 (6) の a₂ の係数で説明したティルトの波面である。式で示すと w₃₁₁x₀³ であるので、ティルトの量が、像面の位置 x₀ の3乗に比例して変わること示している。つまり、中心から離れていくと大きくティルトの量が変わる。図12にはβの角度で入射した光がプリズム成分によって角度を変えている様子が示してある。このようなときは w₃₁₁ の量が正で、樽のように膨れる。一方、負の時は糸巻きのようなになる。像面での交点は式 (12) で与えられる。

$$\epsilon_x = -\frac{R}{h} w_{311} x_0^3 \dots\dots\dots (12)$$

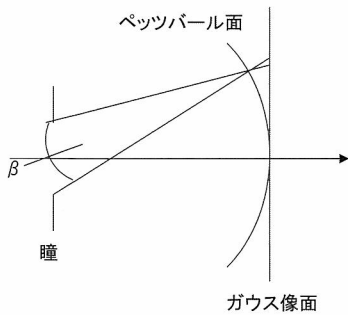


図10 像面湾曲
方向ごとに (角度β) デフォーカス量が異なる

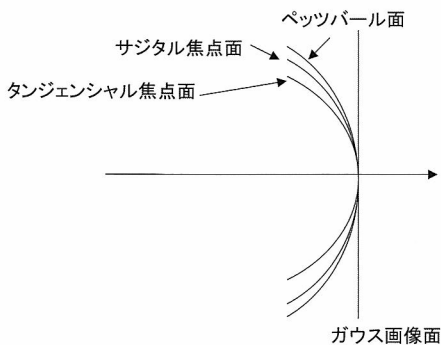


図11 非点収差があるときの像面湾曲

以上、説明してきた波面をまとめて図13に示す。ザイデル収差の波面について述べてきたが、像面での位置 x₀ に依存している項がいくつもあったのを見てきた。つまり、レンズへの入射角度によって収差量が変わることを示している。また、これまで光線として考えてきたこれらの収差がレンズを通過した後、どのような波面となるのかを理解されたと思う。それでは次にゼルニケ多項式との関係を説明する。

3. ゼルニケ多項式による収差の表現

今までは、軸上、軸外れの場合すべてについて述べてきたが、ゼルニケ多項式が扱うのは平行光線が光軸に平行に入射した場合である。つまり、軸外れは扱わない。このような表現は適切ではなく、「入射光線の方向の収差のみをあらわす。」といった方がいいと思う。つまり、ザイデルでは像面の座標 x₀ も収差の表現にはあったが、ゼルニケ多項式にはない。光軸に平行に入射したときにもコマ収差、非点収

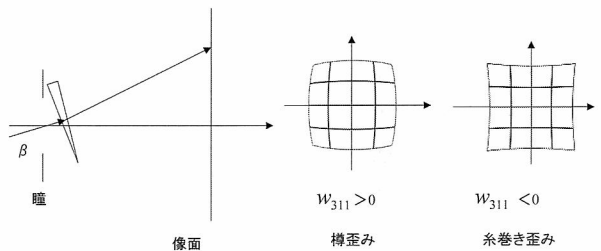


図12 歪曲収差

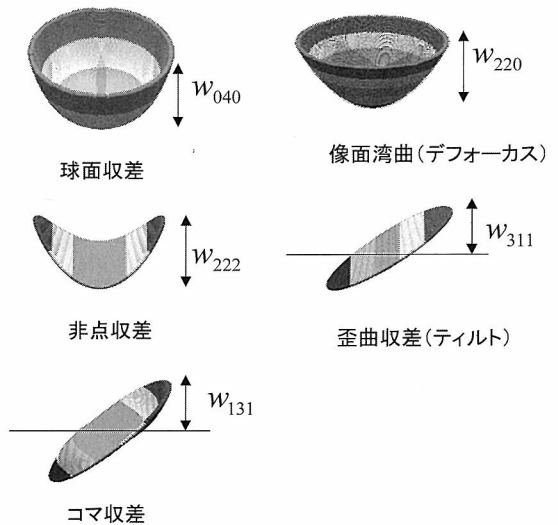


図13 ザイデル収差の波面のまとめ

差は発生する。図14に示すように、眼球光学系において角膜、水晶体を一つのレンズと考えると、その形状が回転対称でなくなるとこれらは発生する。それでは、像面湾曲、歪曲収差はどうするのだろうか？像面湾曲、歪曲収差についてはレンズに入射する光線の傾きを少しずつ変えた場合なので、像面湾曲、歪曲収差として全体的な形としては扱わないことになる。このときは、軸外れから光を入れたときのデフォーカス量とティルトの量であらわすことになる。ゼルニケ多項式が扱うのは、あくまでも入射方向のみの収差量である。

ゼルニケ多項式による収差の表現を図15に示す。これらはゼルニケの基本波面で、2次、3次、4次の波面である。1次はザイデルの収差のところで触れたプリズムによるティルトの波面で、方向の異なるのが二つあり、x方向とy方向に傾いた平面の波面

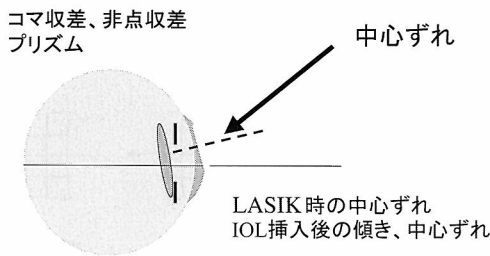


図14 眼球光学系における収差の発生原因

である。この波面に垂直な光線を考えると、どんなふうに光が振舞っているのかが想像できよう。ここのでの Z_2^{-2} と Z_2^2 が非点収差の波面と呼ばれている。 Z_2^0 はデフォーカスである。また、 Z_3^{-1} と Z_3^1 はコマ収差、 Z_3^{-3} と Z_3^3 はトレフォイル、 Z_4^0 は球面収差と呼ばれている。それではザイデルの収差のところでも述べた波面と見比べると、似ているけれどデフォーカスの波面以外は少しずつ違うことに気付かれたと思う。その違いは次のところで述べることにする。

次に、ゼルニケの基本的な考え方を図16に示す。ある波面が与えられたときに、そこに基本波面がどのくらい含まれているかを計算する。この例で説明すれば、非点収差が $0.2\mu\text{m}$ 、デフォーカスが $0.4\mu\text{m}$ 、球面収差が $0.2\mu\text{m}$ 含まれていることを示している。しかし、よく波面を観察していただきたい。ザイデルのところでも説明した非点収差の波面ではない。また、同様に球面収差も異なっている。なぜこのようなことになるのか、それはザイデルの基本波面は互いに独立した波面を選んだからである。互いに独立とはちょうどx、y平面のようなもので、この平面上の点と原点を結ぶ直線のベクトルがx成分とy成分に分けられて、それぞれがどのくらい含まれているかを調べるのと同じである。このときxとyは独立である。独立であるということは、xの値をyであらわすことはできないということである。このように波面を独立した基本波面の重み付け和で表現しようとしたのが、ゼルニケである。これは波面センサー

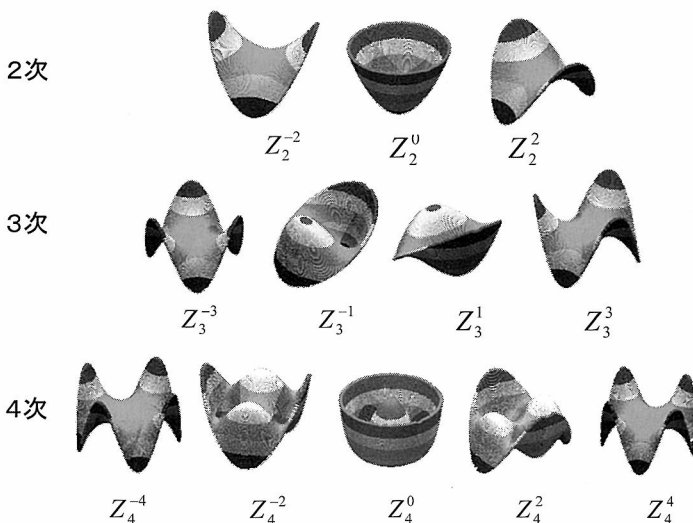


図15 ゼルニケの基本波面 2次、3次4次の波面

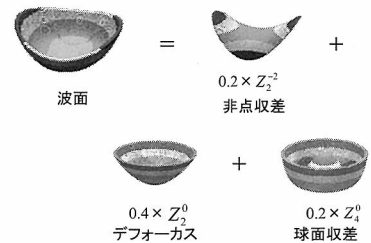


図16 ゼルニケの基本波面による任意の波面の表現

で測定された波面を独立した波面に分解してみても、どのような波面が含まれているかを調べるということに結びつく。ザイデルの方はそのような考え方ではない。しかし、そのために本来の物理的な現象から少しずれを生じるようになってしまった。これまで中心対称のレンズ系ばかり扱ってきたザイデルに加えて、新しい形の波面があることに注目されたい。例えば、3次収差の Z_3^{-3} 、 Z_3^3 はトレフォイルと呼ばれるものである。これらは、加齢とともにあらわれるもので、三重視の原因である。3次の収差であるトレフォイルとコマ収差をすべてひとまとめにして、その量の2乗和のルート（root mean square RMS）で、コマ収差、また同様に4次の収差をひとまとめにして球面収差として扱う場合がある。

4. ザイデルとゼルニケの関係

非点収差や球面収差は名前だけが同じで、ザイデルとゼルニケでは違いがあるのを理解されたと思う。そこで、その違いを詳細に調べてみよう。まずは非点収差である。図17に示すように、ゼルニケの非点収差の波面は鞍のような形をして Z_2^{-2} 、 Z_2^2 の2つある。式であらわすと、 $\sqrt{6}\sigma^2 \sin 2\theta$ と $\sqrt{6}\sigma^2 \cos 2\theta$ ($\sqrt{6}$ は係数で、標準化のためにつけてある) である。これらは、回転すると重なる波面である。さて、2番目の式を展開すると、 $\sqrt{6}\sigma^2 \cos 2\theta = \sqrt{6}\sigma^2 (2\cos^2 \theta - 1)$ となり、これはザイデルの非点収差の波面-デフォーカスの波面という形である。そのため、デフォーカスの波面をひっくり返したのを図に示す（ザイデル

の式のなかで x_0 が消えているが、これは $x_0=c$ のところの波面である)。つまり、光学系の焦点を求めるときにもここに含まれるデフォーカス成分を考慮することになる。それでは、像面での点像はどうかという、デフォーカス分が移動したところでは焦線となり、ザイデルの収差の像と同じである。デフォーカス分も入ったままでは丸い形の点像である。

その次は、コマ収差の波面である。図18に示すように、ゼルニケの基本波面では Z_3^{-1} 、 Z_3^1 の2つある。

その波面の式は $a\sqrt{8}(3\sigma^3 - 2\sigma)\sin\theta$, $a\sqrt{8}(3\sigma^3 - 2\sigma)\cos\theta$ である。これは図18に示すように、ザイデルのコマ収差とプリズムからできている。プリズムの波面は像を移動させるだけなので、点像はザイデルでもゼルニケでも同じである。

最後は球面収差 Z_4^0 である。図19に示すように、中心が盛り上がっている形をしている。これはザイデ

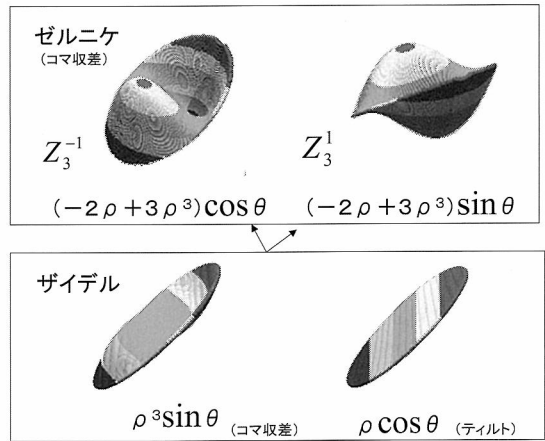


図18 ザイデルとゼルニケのコマ収差の波面の関係

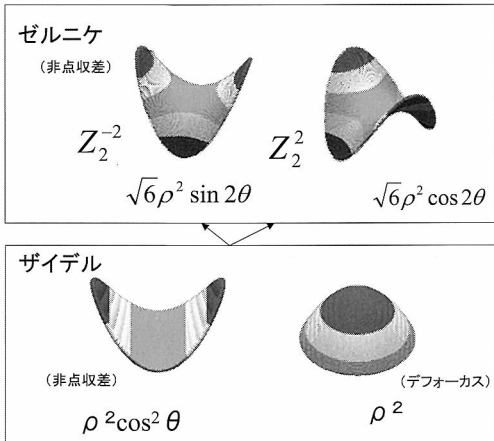


図17 ザイデルとゼルニケの非点収差の波面の関係

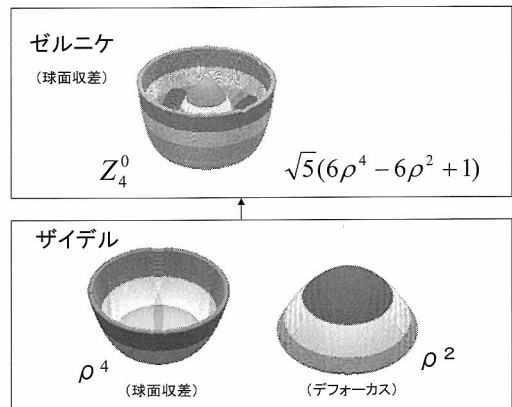


図19 ザイデルとゼルニケの球面収差の波面の関係

ルの球面収差とデフォーカスの波面からできている。式で示すと、 $a\sqrt{5(6\sigma^4 - 6\sigma^2 + 1)}$ となり、 ρ の4乗がザイデルの球面収差であり、 ρ の2乗がザイデルのデフォーカスである。つまり、デフォーカス成分がここにもあるので、焦点を求めるときには、球面収差の係数も考慮することになる。しかし、デフォーカス成分は焦点移動なので、その分だけ移動したところでの点像はザイデルもゼルニケも同じである。デフォーカス成分を入れたままでの点像はもちろん異なる。これは焦点移動が加わったときの球面収差の点像であり、大きな同心円の点像となる。プラス1が気になる方がいらっしやと思う。これは個々の波面は積分すると0になるように作ってある。プラス1はそのためである。

5. ま と め

今回は、ザイデルの収差とゼルニケの多項式の関係を述べた。結論からいえば、焦点移動やプリズム分が異なるだけで、その分を取り除いてみれば網膜上の点像の形には変化はない。更なる知識を得るためには、参考文献を読んでいただきたい。また、とくにアリゾナ大学の光学研究所のWyant先生のホームページ (<http://www.optics.arizona.edu/jowyant/>) にはたくさんの有用な教材や、ネットで楽しめるシミュレーションソフトがあるので、ぜひ参考にしていただきたい。

また、ここでは紹介しなかったが、角度を変える

と重なる波面がゼルニケの波面にはある。これらの係数と角度という表現であらわす方法⁶⁾もあるので、その方法も興味のある方は参考にさせていただきたい。

次回から4回にわたって、このような収差があるときの見え方⁷⁾についてシミュレーション結果を用いて解説する予定である。臨床の先生からは臨床的な知見を示されるので、比較されると理論だけではない問題もみつかると思われる。楽しみである。

ここで用いた多くの図は臨床眼科第60巻第13号(2006年12月号)の「屈折矯正手術に役立つ眼光学」から許可を得て一部改編して転載した。

文 献

- 1) 稗田 牧：Hartman-Shack センサー。前田直之，大鹿哲郎，不二門 尚編，角膜トポグラフィと波面センサー，120～125，メジカルビュー社，東京，2002。
- 2) 藤枝正直：OPD スキャン。前田直之，大鹿哲郎，不二門尚編，角膜トポグラフィと波面センサー，126～131，メジカルビュー社，東京，2002。
- 3) 黒田輝仁：Tschernign 収差計。前田直之，大鹿哲郎，不二門 尚編，角膜トポグラフィと波面センサー，132～134，メジカルビュー社，東京，2002。
- 4) 牛山善太：シミュレーション光学 第30回波面収差。写真工業 57: 94-97, 1999。
- 5) 牛山善太：シミュレーション光学 第32回波面収差展開式における収差の分類。写真工業 57: 102-106, 1999。
- 6) Campbell E: A New Method for Describing the Aberrations of the Eye Using Zernike Polynomials. Optom Vis Sci 80: 79-83, 2003。
- 7) 大沼一彦：眼光学の基礎－波面収差とPSF－。眼科 47: 345-356, 2005。

累進屈折力レンズの設計別種類と機能別用途

鈴木 綜太

東京眼鏡専門学校

Various Designs and Functions of Progressive Lenses

Sohta Suzuki

Tokyo Optometric College

従来からある単焦点レンズではレンズの屈折力が同じなら、レンズを通して得られる像は同じであった。しかし、累進屈折力レンズでは遠用部のレンズの屈折力が同じでも、レンズの加入度が異なるか、レンズの種類が異なればレンズを通して得られる像は同じではなくなる。前者はレンズの構造に原因があり、後者はレンズの設計に原因がある。そこで、遠用部のレンズの屈折力が同じ累進メガネについて、加入度を増加したときに起こる、レンズを通して得られる像の変化と加入度を変えずレンズの種類を変えたときに起こる、レンズを通して得られる像の変化を予測するために、累進屈折力レンズの度数分布を調査した。調査項目は、明視域を決定するのに必要な等価球面度数および明視域内の視力を予測するのに必要な円柱レンズ成分とした。累進屈折力レンズ5種類について、Add 1.00D, 2.00D, 3.00Dの3段階の加入度、計15枚のレンズの遠用部近用部それぞれの度数分布の測定結果を報告する。ここで得られたデータを利用して累進屈折力レンズを変更したとき、レンズを通して得られる像の予測が可能となった。(視覚の科学 28: 15-21, 2007)

キーワード：累進屈折力レンズ、レンズ構造、等価球面度数分布、乱視度数分布、加入度

If we look through lenses of equal refractive power, we see the same images. But with progressive lenses of the same refractive powers and with additional powers, we cannot see the same images. This is due to the structures and by designs of progressive lenses. We measured five types of progressive lenses. The three additional powers 1.00D, 2.00D and 3.00D were prepared for each progressive lens. We report the results and estimates of the lenses. Using these data, we can estimate the images that will be obtained with progressive lenses.

(Jpn J Vis Sci 28: 15-21, 2007)

Key Words: Progressive lens, Structure of the progressive lens, Distribution of spherical equivalent, Distribution of astigmatism, Additional power

1. はじめに

累進屈折力レンズは、当初「境目のない遠近両用レンズ」と呼ばれてから改良を重ねた結果、遠くから近くまで連続してどの距離も明視できるレンズとして、老視の人に欠かすことのできないメガネとなった。現在では何十種類もの累進屈折力レンズが市販されており、使用目的にあったレンズを見極めるの

が難しくなっている。たしかに、レンズメーカー各社は自社製品の特性図を発表して、レンズ選択の一助になるような努力をしているが、各社の表現方法が異なるため、その違いを明確に知ることは難しい。

単焦点球面レンズの時代では、屈折力が同じメガネなら同じ見え方をしていた(ただし、レンズ装用位置が同じ場合)。しかし、累進屈折力レンズは遠用度数、加入度が同じでも、レンズの種類が異なれば

別刷請求先：169-0073 東京都新宿区百人町2-26-10 東京眼鏡専門学校 鈴木綜太
(2007年1月11日受理)

Reprint requests to: Sohta Suzuki Tokyo Optometric College
2-26-10 Hyakunincho, Shinjyuku-ku, Tokyo 169-0073, Japan
(Received and accepted January 11, 2007)

見え方が違ってしまいます。また、遠用度数とレンズの種類が同じでも、加入度数が異なれば見え方が違ってしまいます。初めて累進屈折力レンズのメガネを使う人はもちろん、同じ種類のレンズの加入度を強くしただけのとき、今まで使っていたレンズとは違う種類のレンズに変えるときなど、今までと見え方がどう変化するかを予測することはレンズ選びで重要な課題になる。

本研究では、メガネに関係がある人なら誰でも、手軽に累進屈折力レンズの特性をつかめる方法を探ることを目的にした。

2. 方 法

レンズを測定する器具として最も普及しているレンズメータを使って、累進屈折力レンズの特性をつかむことを前提とする。

1) 測定部位

累進屈折力レンズには、遠用部の視力を重視したハードデザインレンズと歪み感の軽減を重視したソフトデザインレンズがある。それぞれのデザインの特徴を図1、2に示す。

図1、2から、遠用部水平方向の度数変化と近用部

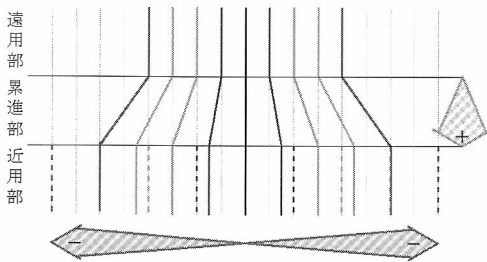


図1 ハードデザインレンズの構造

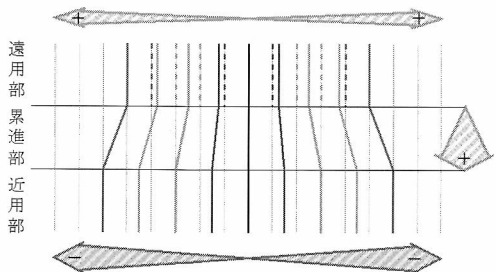


図2 ソフトデザインレンズの構造

水平方向の度数変化を調べれば、レンズを掛けたときのおよその様子を予想できることがわかる。累進部の長さや度数変化に関しては累進帯長の違いなど、項目が多く簡便さという趣旨から外れるので、今後の課題とした。

2) 横方向の測定の移動ステップ

中心窩の視角に相当するレンズ径を以下の仮定のもとに算出した。

眼の節点を角膜より7mm後方、レンズ角膜頂点間距離を12mm、中心窩の直径を視角5°と仮定すると、中心窩の視角に相当するレンズ径は約1.7mmとなる。

レンズメータの開口部は直径4mmなので、4mmステップで測定して十分な情報が得られると判断した。

3) 測定範囲

レンズの屈折力が大きく影響するのは注視線の通過部位である。そこで、注視野の測定を行った。視距離5m、30cm、35cm、40cmにおける両眼注視野を測定した。5mでの測定では垂直方向の測定が検査室の関係で制限されたが、近方視時と大きな違いはみられなかった。近方注視野の測定結果を図3に示す。

注視野に相当するレンズ径を以下の仮定のもとに算出した。

角膜より13mm後方に回旋点があり、レンズ角膜頂点間距離を12mmと仮定すると、注視野に相当するレンズ径は半径約21mmとなる。

4) レンズメータでの測定範囲と測定ステップ

上記の結果より測定を遠用部中心、近用部中心それぞれについて、水平方向に4mmステップ、中心より左右24mmと決定した。

5) 測定対象

代表的なレンズメーカー5社の一番出荷量の多い累進屈折力レンズについて、遠用部が平面でAdd

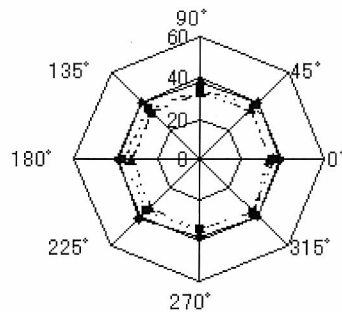


図3 近方注視野の測定結果

◆:30Binocular, ■:35Binocular, ▲:40Binocular

1.00 D, 2.00 D, 3.00 D のレンズを左右 2 組, 計60枚の等価球面度数, 乱視度数を測定した。測定は各レンズにつき 1 部位10回の測定を行った。

3. 測定結果

右眼用レンズの測定結果をハードデザインに近いものからソフトデザインに近いものの順に並べて, 図4~23に示す。

4. 考察に必要な資料

1) 球面度数の視力に与える影響

球面度数の変化が視力に与える影響を知るために, 正常な視覚をもつ成人 116 名 232 眼について, 人工的に屈折状態を変化させて視力に与える影響を調査した。結果を図24に示す。

図24より, プラス球面レンズが0.25 D 加わると視力が急激に低下することがわかる。一般に, 球面成分

は明視域内では視力に影響を与えないが, 明視域外では遠点, 近点からの距離に比例して視力は低下する。

2) 乱視成分の視力に与える影響

乱視成分があると明視域内では最小錯乱円視をするため, 乱視度数に比例して視力が低下する。明視域外では球面度数と同じように視力低下を起こすが, 網膜像に方向性を生じるため球面成分より形態覚が損なわれ, 視力低下は大きくなる。乱視成分が視力に与える影響を正常な視覚をもつ成人55名 110 眼の遠方視, 近方視それぞれについて調査した。図25~28にその結果を示す。

単眼より両眼の方が視力が高いこと, 信頼区間の下限でみると乱視成分が0.5 D を超えると視力が0.7 以下になり, 遠方視, 近方視ともに見難さを自覚するおそれがあることがわかる。とくに近用部においては, 最小錯乱円視となり, 安定した視力をもつ視野を狭めていることが理解できる。

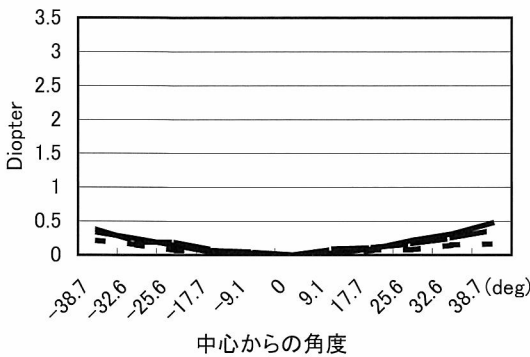


図4 A社遠用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

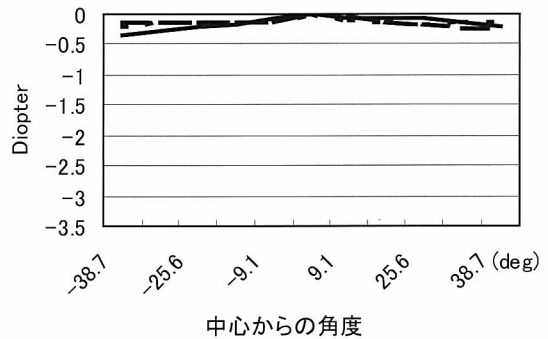


図5 A社遠用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

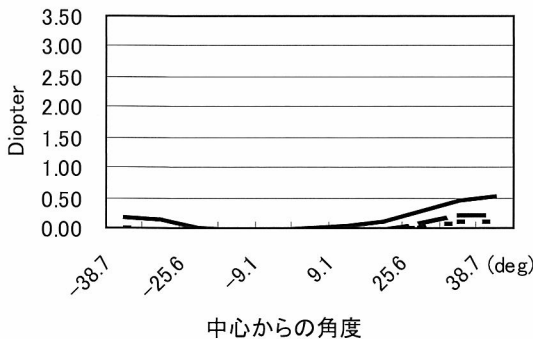


図6 B社遠用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

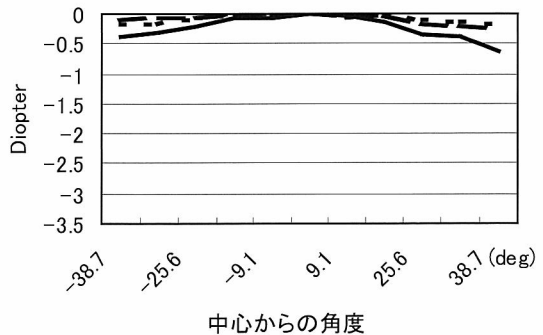


図7 B社遠用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

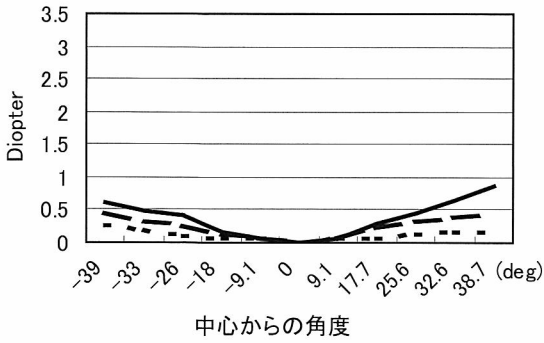


図8 C社遠用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

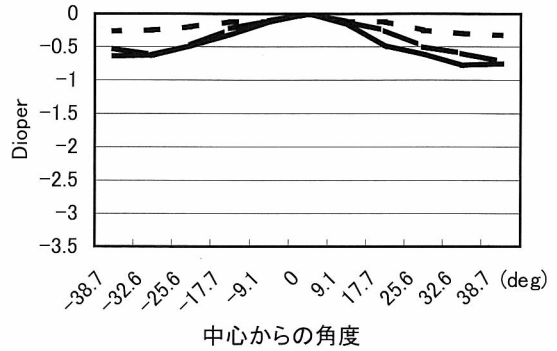


図9 C社遠用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

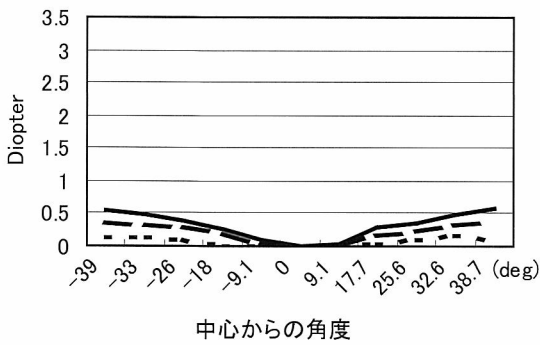


図10 D社遠用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

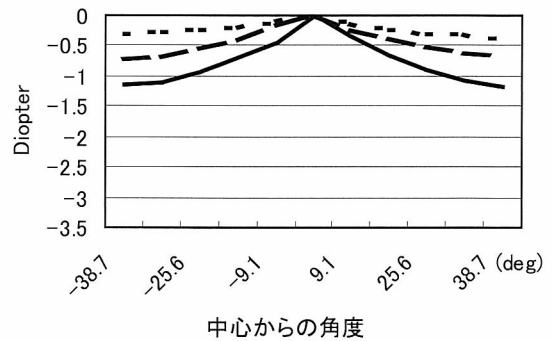


図11 D社遠用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

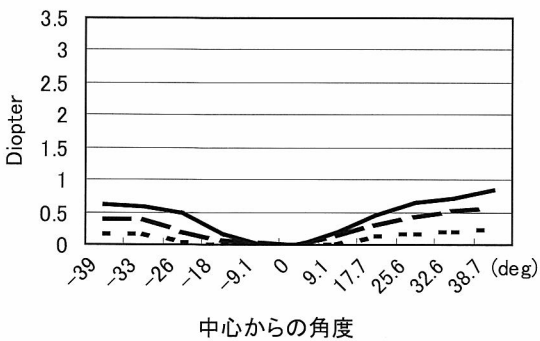


図12 E社遠用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

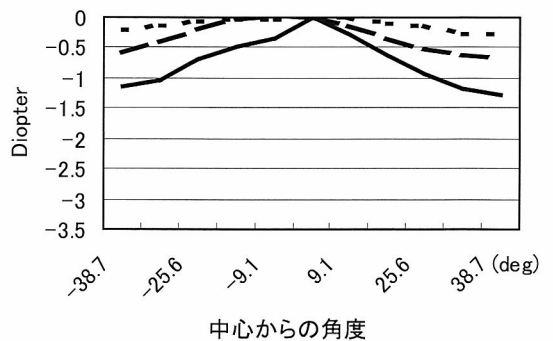


図13 E社遠用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

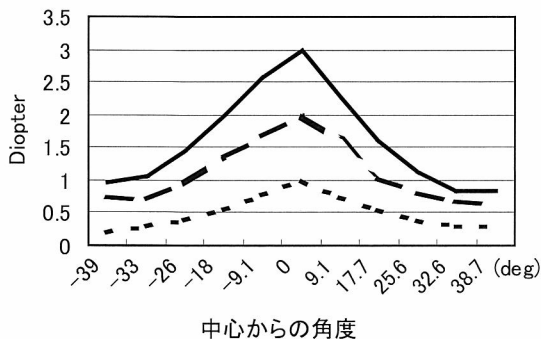


図14 A社近用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

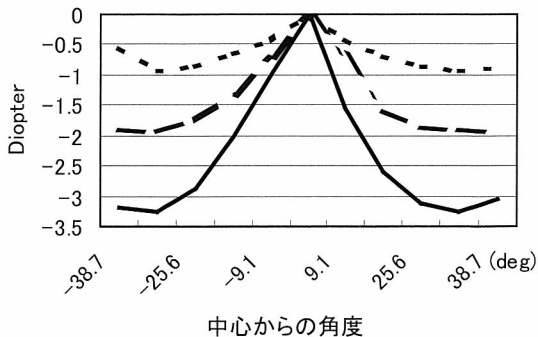


図15 A社近用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

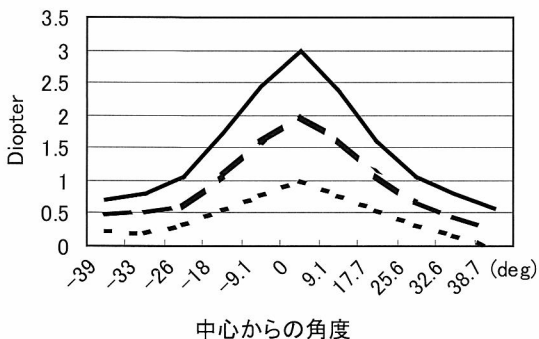


図16 B社近用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

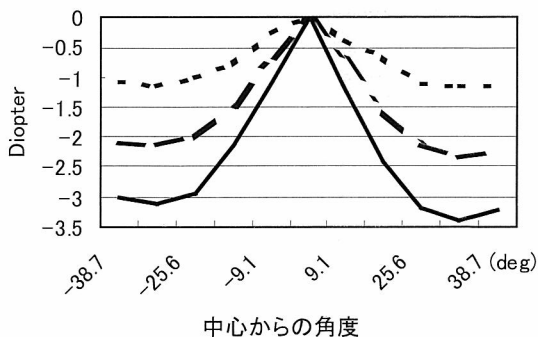


図17 B社近用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

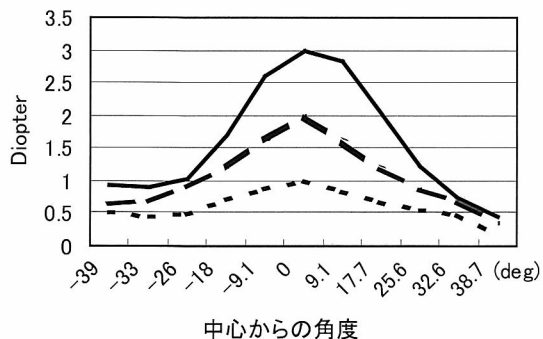


図18 C社近用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

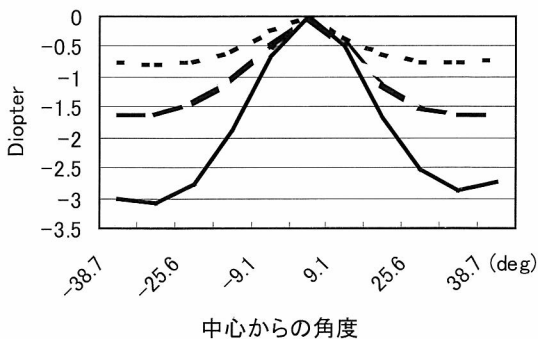


図19 C社近用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, —:Add 3.00D

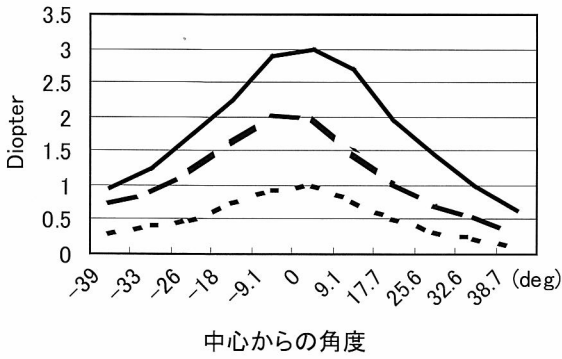


図20 D社近用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

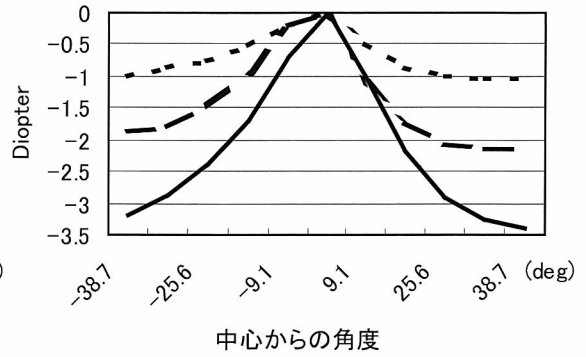


図21 D社近用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

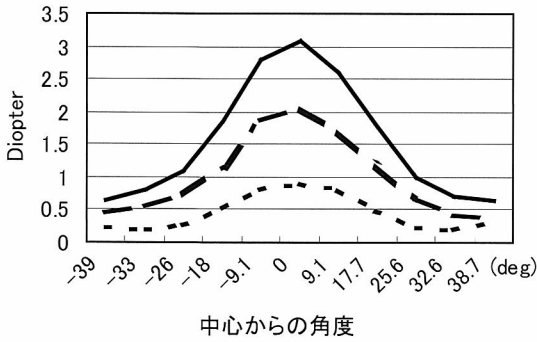


図22 E社近用部等価球面度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

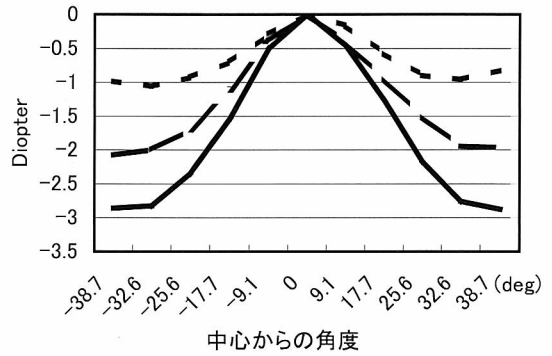


図23 E社近用部乱視度数分布
 -----:Add 1.00D, - - - -:Add 2.00D, ———:Add 3.00D

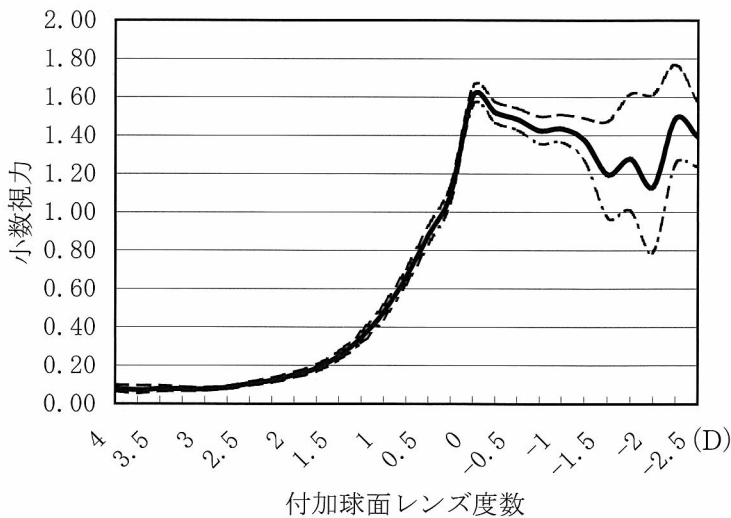


図24 球面度数の視力に与える影響
 ———:平均視力, -----:信頼区間上限, - - - -:信頼区間下限

乱視と遠方単眼視力（最小錯乱円視）

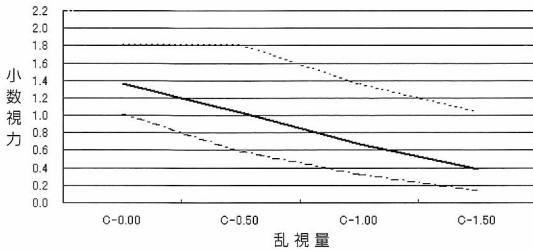


図25 乱視成分の遠方単眼視力に与える影響
 - - - - :95%信頼区間上限, ———:平均値,
 - · - · :95%信頼区間下限

乱視と遠方両眼視力（最小錯乱円視）

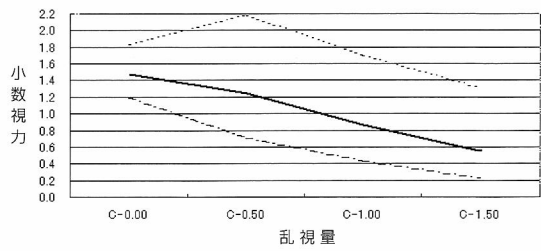


図26 乱視成分の遠方両眼視力に与える影響
 - - - - :95%信頼区間上限, ———:平均値,
 - · - · :95%信頼区間下限

乱視と近方単眼視力（最小錯乱円視）

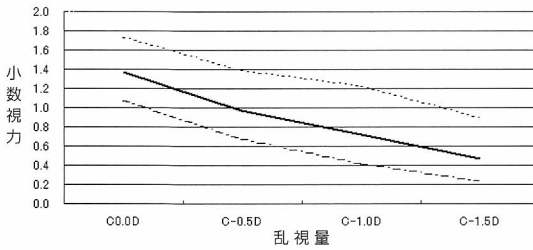


図27 乱視成分の近方単眼視力に与える影響
 - - - - :95%信頼区間上限, ———:平均値,
 - · - · :95%信頼区間下限

乱視と近方両眼視力（最小錯乱円視）

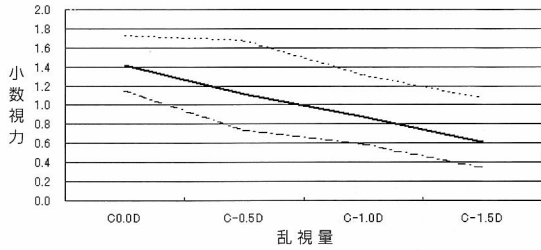


図28 乱視成分の近方両眼視力に与える影響
 - - - - :95%信頼区間上限, ———:平均値,
 - · - · :95%信頼区間下限

5. 考 察

最もハードデザインに近いA社のレンズと、最もソフトデザインに近いE社のレンズを比較すると、遠用部はA社のレンズは明視できる水平方向の視野が広いが、E社では加入度が強くなるにしたがって狭まっていることがみてとれる。一方、近用部をみると水平方向の視野は、A社のレンズは加入度が強くなるにしたがい著しく狭くなるが、E社はA社に比べれば広い領域を確保している。

同じ種類のレンズで、遠用部の屈折力が同じで加入度が増加したときをみってみる。A社のレンズは加入度が増えても側方部での乱視量の増加が少ないので、明視域内における視力低下は少ないが、加入度が増加するにつれ中心から25°付近よりボケが大きくなる。近用部の視力が安定している視野（乱視0.5D以下）は、Add 1.00Dで10°、Add 2.00Dで5°、Add 3.00Dで5°未満と順次減少している。一方、E社のレ

ンズは、Add 2.00Dで約25°、Add 3.00Dで約18°と非常に狭くなり、常に顔を視方向に向ける必要を生じる。近用部ではAdd 1.00Dで約18°、Add 2.00Dで約14°、Add 3.00Dで約9°と広くとられている。

同じ遠用度数、同じ加入度でのレンズ種類の交換を考えると、A社とB社の掛け代えやC社とD社の掛け代えでは、大きな違いを感じられないが、A社とC、D社の掛け代えは到底同じ度数のレンズとは感じられないことがわかる。

上述したように、同じ基準で各レンズを比較することで、今まで使っていたレンズを基準に抵抗なく掛け代えられるレンズを見つけることが可能になった。また、今まで使っていたレンズの不満を解決するために、我慢しなければならない違いもあらかじめ知ることができるようになった。

参 考 文 献

- 1) 石原 忍：小眼科学. 金原出版, 東京, 1973.

原 著

AC Master® を用いて測定したピロカルピン点眼後の水晶体厚の変化

前田 征宏*, 市川 一夫*, 宇陀 恵子**

*社会保険中京病院眼科, **中京眼科

Changes in Human Crystalline Lens Thickness after Application of Pilocarpine Eyedrops as Measured by AC Master®

Masahiro Maeda*, Kazuo Ichikawa* and Keiko Uda**

*Department of Ophthalmology, Social Insurance Chukyo Hospital, **Chukyo Eye Clinic

【目的】ピロカルピンは毛様筋収縮により人工的調節緊張状態を作り出すために用いられている。AC Master® (Zeiss) を用いて、ピロカルピン点眼前後に前房深度 (ACD), 水晶体厚 (LT) の変化を測定し、視覚刺激による調節と薬剤刺激による調節状態が同様であるかどうか検討する。

【方法】屈折異常以外の眼疾患を認めない正常眼10例10眼に対し、AC Master® を用いて2%ピロカルピン点眼前後に調節負荷を0~4D までかけ、ACD, LT を測定した。点眼後は15分ごとに90分後まで測定した。

【結果】点眼後LTは増加した。また、点眼後も調節負荷によりLTは変化し、調節は残存した。薬剤の影響は30~60分後に最大となり、その後徐々に戻りを認めた。点眼後水晶体後面の位置は時間とともに変化した。

【結論】点眼後も調節に伴う LT の変化を認め、また水晶体後面の位置変化を認めたことから、薬剤による調節状態では通常の調節と異なるということを考慮する必要性が示唆された。

(視覚の科学 28: 22-25, 2007)

キーワード: ピロカルピン, 調節, AC Master®, 水晶体厚, 水晶体後面

Purpose: Pilocarpine is used to induce accommodation because it contracts the ciliary muscle. We used the AC Master® (Zeiss) to examine crystalline lens thickness before and after pilocarpine application to determine whether there are any differences between stimulus-induced and drug-induced accommodation status of the anterior structures.

Methods: We measured 10 eyes of 10 normal volunteers with no history of ocular disease, trauma or surgery, other than ametropia. Anterior chamber depth and crystalline lens thickness were measured during accommodation before and after application of 2% pilocarpine. After pilocarpine application, measurements were taken every 15 minutes for 90 minutes.

Results: Crystalline lens thickness increased after pilocarpine application. There was residual accommodation, because crystalline lens thickness increased with accommodation after pilocarpine application. The maximum effect of the drug was seen 30 to 60 minute after application, the effect then gradually decreasing. The posterior surface of the crystalline lens moved.

Conclusion: These results suggest that we should take into consideration the possibility that drug-induced accommodation may differ from normal accommodation, because the change in crystalline lens thickness was seen during accommodation after pilocarpine application, and pilocarpine caused catastasis change in the posterior crystalline lens surface.

(Jpn J Vis Sci 28: 22-25, 2007)

Key Words: Pilocarpine, Accommodation, AC Master®, Crystalline lens thickness, Posterior surface of crystalline lens

別刷請求先: 457-8510 名古屋市南区三条1-1-10 社会保険中京病院眼科 前田征宏
(2006年10月18日受理)

Reprint requests to: Masahiro Maeda Dept of Ophthalmol, Social Insurance of Chukyo Hosp
1-1-10 Sanjo, Minami-ku, Nagoya 457-8510, Japan
(Received and accepted October 18, 2006)

1. 緒 言

遠見矯正下で近方の物体を見る際には調節を行うが、調節時には縮瞳・輻湊とともに毛様筋の収縮による水晶体の形状変化が生じる。この調節による水晶体の変化は年齢とともに次第に衰え、老視となる。白内障手術が進歩した現在、視力の回復は可能であるが、失った調節力の回復ははまだ残された課題である。この白内障術後調節力の喪失を克服するべく、調節眼内レンズ、lens refillingなどの方法が検討されている^{1,2)}。

これらの調節眼内レンズやlens refillingに調節力があるかどうかを実験的に検証するため、人工的調節状態を作り出す目的でピロカルピンが用いられてきた。ピロカルピンは副交感神経刺激薬であり、副交感神経末端から放出されるアセチルコリンと同様の作用をもつ。眼球においては毛様筋、瞳孔括約筋に存在するムスカリン受容体に作用し、毛様筋の収縮および縮瞳を来す。日常臨床ではピロカルピン点眼薬は、毛様筋収縮により強膜岬を後方に牽引し線維柱帯網を開大させて房水流出抵抗を減少させ眼圧を下降するとともに、周辺虹彩を線維柱帯から引き離し隅角を開大させるために緑内障の治療に広く用いられている薬剤³⁾である。

視覚刺激による調節反応では毛様筋の収縮および縮瞳が生じるため、屈折状態の実験でピロカルピンが用いられている。しかし、ピロカルピン点眼によっても水晶体の形状変化を来し、前房深度が減少するという報告^{4,5)}はこれまでもあるが、視覚刺激による調節に伴う水晶体の変化と、薬剤刺激による調節に伴う水晶体の変化が果たして同じものかという報告は、これまでKoeppleらの報告のみである⁶⁾。Koeppleらは、視覚刺激による水晶体の変化とピロカルピンによる水晶体の変化が老年者では異なり、若年者では同様の変化を来すと報告している。

今回我々はAC Master[®] (Zeiss) を用いて、2%ピロカルピン (2% サンプル[®]) 点眼後水晶体・前房深度の変化を測定し、視覚刺激および薬剤刺激による調節の違いを、水晶体厚の調節に伴う変化および水晶体の角膜からの位置という観点で点眼後の時間経過とともに測定し、検討したので報告する。

AC Master[®]とは850 nmの半導体レーザー光をビームスプリッターで二つの光に分け、可動反射ミラーを用いて、一方の光路長を変化させることにより光

路差を作り出し、光干渉することで光学的に角膜厚(以下CT)、前房深度(以下ACD)、水晶体厚(以下LT)を測定する非接触型の前眼部測定装置である。被験者は顎台に顎をのせ、固視目標を注視する。検者は測定画面を見ながら固視目標を移動し、微調整を行う。測定時間は約1秒である。同様の測定原理を用いた眼科測定機器にIOL Master[®] (Zeiss) があり、白内障手術術前検査において眼軸長を正確に測定するために広く用いられている。

その測定原理やIOL Master[®]との違い、高い再現性、その他の原理を用いた機器との相関などが報告され、正常眼における調節時のLTの変化が報告されている⁷⁻¹⁰⁾。AC Master[®]では無散瞳での測定、調節負荷をかけた状態での測定が可能である。AC Master[®]では焦点距離からジオプターを計算し、指標を本体内で移動させることによって調節負荷を行っている。調節に伴い輻湊が生じるが、AC Master[®]はPurkinje-Sanson第1, 3, 4像を重ね合わせることによりアライメントをとり測定を行うため、AC Master[®]は常に光軸上で測定を行うことができる。

2. 方 法

対象は屈折異常以外の眼疾患、手術歴および外傷歴をもたない健常者10例10眼で、男性4名(検査前平均等価球面度数 -1.9 ± 2.2 D, 平均年齢 30.8 ± 4.3 歳)、女性6名(検査前平均等価球面度数 -2.0 ± 2.2 D, 平均年齢 28.5 ± 4.5 歳)である。検眼は無作為に選び、右眼4眼・左眼6眼に対し、2%ピロカルピン点眼を用いて実験を行った。実験中は非検眼を遮蔽した。

2%ピロカルピン点眼の点眼回数による効果の違いをみるため、以下の二つの実験を行った。

1) 1回点眼実験

2%ピロカルピン点眼1滴を結膜嚢に点眼し、点眼後90分後まで15分ごとにAC Master[®]を用いてACD、LTを測定した。同時に内部指標による調節刺激を0~4Dまで0.5D刻みで与え、同様にACDおよびLTを測定した。各測定直前に屈折検査を行い、完全矯正となるよう球面および円柱レンズを用いて矯正した。

2) 2回点眼実験

初回点眼から5分後に更に1滴点眼を追加し、1回点眼実験と同様に90分後まで15分ごとに検査を行った。

1回点眼実験と2回点眼実験は薬剤の残存効果を

除去するため、1週間以上の間隔をあけて行った。屈折検査時室内は600ルクス (lux), AC Master® 測定時室内は0 luxであった。波長850 nmの条件下では角膜、前房水、水晶体の屈折率はそれぞれ1.3851, 1.3454, 1.4065を用いている¹³⁾。

ACDは涙液層から水晶体前面までの距離を、LTは水晶体前面から水晶体後面までの距離をあらわすため、ACDを水晶体前面の位置、ACD+LTを水晶体後面の位置として検討した。

3. 結 果

1) 点眼後の近視化

2%ピロカルピン2回点眼後は全症例で近視化を来し、平均で $-2.2 \pm 1.5D$ の変化を認めた。性差は認めなかったが、近視化の程度には $-5.0 \sim -0.5D$ と個人差がみられた。その最大効果は30~60分後にみられた。

1回点眼実験では個人差が大きく、屈折変化を生じない症例も認めた。

2) 点眼後の調節に伴う変化

ピロカルピン点眼後のLTの変化量を図1, 2に示す。

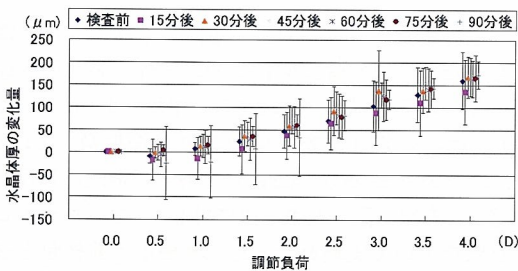


図1 1回点眼後調節負荷における水晶体厚の変化
横軸に調節負荷量、縦軸に点眼後各経過時間の調節負荷量0Dを基準とした、水晶体厚の変化量を示す。

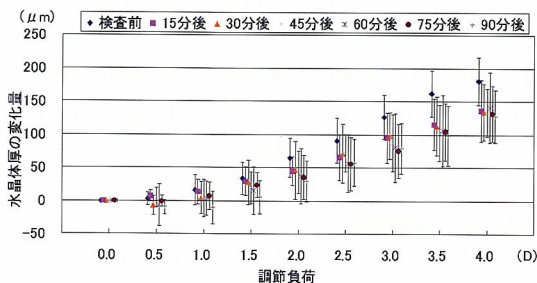


図2 2回点眼後調節負荷における水晶体厚の変化
横軸に調節負荷量、縦軸に点眼後各経過時間の調節負荷量0Dを基準とした、水晶体厚の変化量を示す。

2%ピロカルピン点眼後も調節刺激を与えるとLTは増加した。調節刺激1~4Dにかけて1D当たりのLTの変化量は、1回点眼実験においては点眼前後でLTの変化量に差を認めなかった(図1)が、2回点眼実験においては点眼前の $55.1 \pm 7.3 \mu m/D$ に比べ、点眼後15~90分間で $41.0 \pm 16.1 \sim 46.1 \pm 11.5 \mu m/D$ とやや減弱する傾向があった(図2)。

3) 点眼後の水晶体厚

ピロカルピン点眼後の水晶体前面および後面の位置変化を図3, 4に示す。

2%ピロカルピン点眼後15分後には調節刺激を与えずともLTの肥厚を認めた。図1および図3で示す1回点眼実験では、点眼後90分後にはLTの戻りがみられたが、図2および図4で示す2回点眼実験では90分後もLTは増加したままであった。また、点眼15分

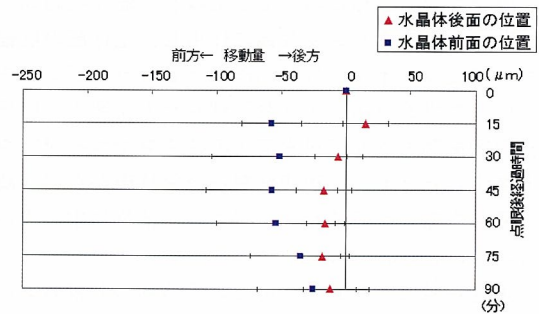


図3 1回点眼後水晶体前面および後面の位置変化
横軸に点眼前の水晶体前面、後面の位置を基準点とした変化量、縦軸に点眼後の経過時間を示す。図では左に移動した場合、基準点より角膜側に移動し、右に移動した場合は基準点より硝子体側に移動したことを示す。

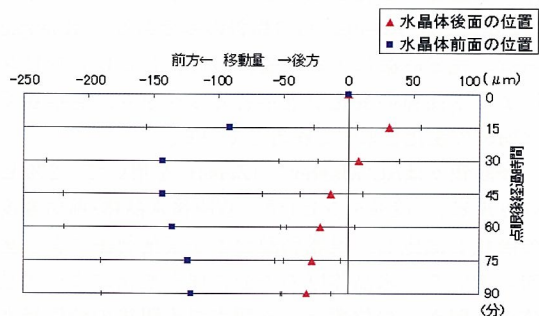


図4 2回点眼後水晶体前面および後面の位置変化
横軸に点眼前の水晶体前面、後面の位置を基準点とした変化量、縦軸に点眼後の経過時間を示す。図では左に移動した場合は基準点より角膜側に移動し、右に移動した場合は基準点より硝子体側に移動したことを示す。

後では水晶体前面の前方移動と後面の後方移動がみられ、その後水晶体全体が前方に移動する傾向があった。LTは点眼後45～60分後が最大となった。

4. 考 按

ピロカルピン点眼後の屈折変化についてはこれまで30分後に最大となるという報告がある¹²⁾が、我々の測定でもすべての症例で近視化を来し、そのLTに与える最大効果は個人差があるが、2回点眼では点眼後30～60分以内に認められた。

AC Master[®]を用いた正常眼における調節刺激を与えた実験では、水晶体前面が前方移動し、水晶体後面が大きく動くことはないという結果を過去に我々は報告した⁷⁾。また、他の報告でも正常水晶体の調節時の変化では、水晶体後面はほぼ静止もしくは後方移動しているといわれている¹³⁾。

ピロカルピン点眼におけるLTの変化は薬剤負荷をしない場合と異なり、点眼15分後には水晶体前面が前方移動し、後面が後方移動する傾向にあった。その後点眼後30分過ぎから水晶体全体が前方に移動し、後面も前方に移動した。LTは30～60分後に最大となり、その後LTは減少した。これは通常の調節時における水晶体の動態と異なり、点眼後水晶体の位置および厚みが時間とともに変化していることを示す。

また、点眼によりLTが変化しても、更に調節刺激を与えるとLTは変化し、2%ピロカルピン2回点眼においても調節能力が消失していないことがわかる。

AC Master[®]による測定の再現性は、他の前眼部測定装置と比べ高く、測定誤差は数 μm 程度と酒井らは報告しており⁹⁾、今回の結果は装置の測定誤差ではなく、薬剤の作用によるものであると考えられる。

ピロカルピンはこれまで、調節状態を人工的に作り出すために広く用いられているが、水晶体後面が視覚刺激による調節時と異なり前方に移動することが本実験で明らかとなった。また点眼後の経過時間とともに水晶体の位置、厚みが変化しており、調節力は減弱する傾向を認めるが、まだ自己の調節力が残存していることが明らかとなった。

白内障手術後の調節力の喪失を克服するため、調節機能をもった眼内レンズを開発・検討する際に、薬剤を用いて調節力・調節状態を論じる場合は、水晶体の形状および位置に与える薬剤の影響を考慮すべきことが示唆された。

文 献

- 1) Cumming JS, Slade SG, Chayet A, AT-45 Study Group: Clinical evaluation of the model AT-45 silicone accommodating intraocular lens: Results of feasibility and the initial phase of a Food and Drug Administration clinical trial. *Ophthalmology* 108: 2005-2009, 2001.
- 2) Koopmans SA, Terwee T et al: Accommodative lens refilling in rhesus monkeys. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 47: 2976-2984, 2006.
- 3) 吉富健志: 緑内障の薬物治療 専門医からの情報提供 緑内障治療点眼薬 副交感神経刺激薬. 薬局 52: 1851-1854, 2001.
- 4) 羽淵由紀子, 永田豊文^註: 眼内レンズ挿入眼における毛様体筋の緊張・弛緩と前房深度との関係. 眼紀 42: 1729-1784, 1981.
- 5) 中泉裕子, 谷口智子^註: 正常および偽水晶体眼前房深度の画像計測. 眼科手術 4: 299-301, 1991.
- 6) Koeppele C, Findl O et al: Comparison of pilocarpine-induced and stimulus-driven accommodation in phakic eyes. *Exp Eye Res* 80: 795-800, 2005.
- 7) 前田征宏, 市川一夫^註: AC Masterによる調節に伴う角膜厚, 前房深度および水晶体厚の変化. *IOL&RS* 20: 57-61, 2006.
- 8) Meinhardt B, Stachs O et al: Evaluation of biometric methods for measuring the anterior chamber depth in the non-contact mode. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 15: 1-6, 2005.
- 9) 酒井幸弘, 宇陀恵子^註: 前房深度測定の比較. 視覚の科学 26: 98-101, 2005.
- 10) Sacu S, Findl O et al: Optical biometry of the anterior eye segment: Interexaminer and intraexaminer reliability of AC Master. *J Cataract Refract Surg* 31: 2334-2339, 2005.
- 11) Drexler W, Hitzenberger CK et al: Investigation of dispersion effects in ocular media by multiple wavelength partial coherence interferometry. *Exp Eye Res* 66: 25-33, 1998.
- 12) Brown HS, Gerald M et al: Visual effects of pilocarpine in glaucoma. *Arch Ophthalmol* 94: 1716-1719, 1976.
- 13) Moses RA: *Adler's Physiology of the Eye*. Moses RA ed, 7th Ed, 310, CV Mosby, St Louis, 1981.

白内障視環境下におけるディスプレイ装置に対する色覚特性に関する研究

藤田 徹也*, 中嶋 芳雄**, 高松 衛**

*富山大学芸術文化学部, **富山大学大学院理工学研究科

Properties of Color Vision in Video Display Terminals in the Cataractous Vision Environment

Tetsuya Fujita*, Yoshio Nakashima**, Mamoru Takamatsu**

*Faculty of Art and Design, University of Toyama,

**Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

本研究では白内障視環境下における色覚特性を求めるために、色覚閾値法（低輝度領域）および明るさマッチング法（中輝度領域）を用いて、呈示した刺激光に対する被験者応答を白内障再現ゴーグルを装着した場合とそうでない場合について測定した。実験の結果、ディスプレイ装置（VDT）における青色（HSV色相240°）を中心とする色相領域は通常時でも感度が比較的低く、白内障視環境下では更に感度の低下がみられた。この傾向は中輝度領域でより顕著であった。換言すると、比感度はHSV色相210°～270°の領域で低下するが、B成分に対してRまたはG成分が等分以上含まれる位相領域では感度が改善されることが定量的に明らかになった。よって、白内障の人に対してVDT上で情報呈示を行う際に、黒色を背景色とした画面において青系統の色を表示色として単独で使用する場合、その視認性に問題を生じる可能性があることがわかった。

（視覚の科学 28: 26-30, 2007）

キーワード：白内障視環境, 白内障再現ゴーグル, ディスプレイ装置, 色覚閾値法, 明るさマッチング法

In this experiment, to evaluate the color vision properties characteristic of cataract, we measured test stimulus light circle sensitivities using the color vision threshold method (low brightness range) and the brightness matching method (middle brightness range), corresponding to both normal state and goggle-equipped cataract state. The results show that sensitivity turned relatively low in the blue region (HSV hue 240 degrees), and especially low in the cataractous vision environment. This tendency was more remarkable in the middle brightness range. In other words, relative sensitivity decreases in the HSV hue region from 210 to 270 degrees, but this loss can be recovered by increasing R or G component light, so as to be greater than B component light. Therefore, it becomes clear that, to people with symptoms of cataract, video display terminal (VDT) low visibility might occur when blue or blue-region color is used as foreground against a black background.

(Jpn J Vis Sci 28: 26-30, 2007)

Key Words: Cataractous vision environment, Cataract experiencing goggle, Video display terminal, Color vision threshold method, Brightness matching method

別刷請求先：933-8588 高岡市二上町180 富山大学芸術文化学部 藤田徹也
(2007年1月5日受理)

Reprint requests to: Tetsuya Fujita Faculty of Art and Design, Univ of Toyama
180 Futagami-machi, Takaoka 933-8588, Japan

(Received and accepted January 5, 2007)

1. 緒 言

水晶体の加齢変化すなわち黄変化・白濁化などを要因とする色覚の劣化は、すべての人に起こり得る老化現象の一つである。その程度が進行し、光の透過が阻止される症状が老人性白内障である。白内障患者の眼球の水晶体の分光透過率は、とくに400～500nmの短波長領域で著しく低下することが知られている^{1,2)}。高齢社会の到来を迎え、このような老化による色覚障害への対応は重要な課題の一つとなっている。

ところで近年、情報表示装置としてディスプレイ装置（以下 VDT）が普及し、コンピュータだけでなく、銀行のATMや空港のチェックイン端末などに広く用いられるようになった。また、VDTに表示される画面のデザインおよびインタフェースについては、JIS X 8341-2³⁾の制定にみられるように高齢者や障害者などに配慮した配色・画面設計の指針が標準化されつつある。しかし、依然としてその配慮が十分でないケースも多いのが現状であり、視覚バリアフリーに向けての取り組みが求められている。

一方、これまでの白内障視環境下における色の見え方を定量化する研究においては、標準色票などの物体色を観測する手法が多く用いられてきた⁴⁾。しかし、光源色であるVDTの色に対する見え方について言及した報告は極めて少ないのが現状である。

そこで本研究では、VDT画面表示色の最適化を図ることを目指して、白内障再現ゴーグルを用いて、白内障視環境下における色覚特性に関する基礎的なデータを収集することをその目的とする。

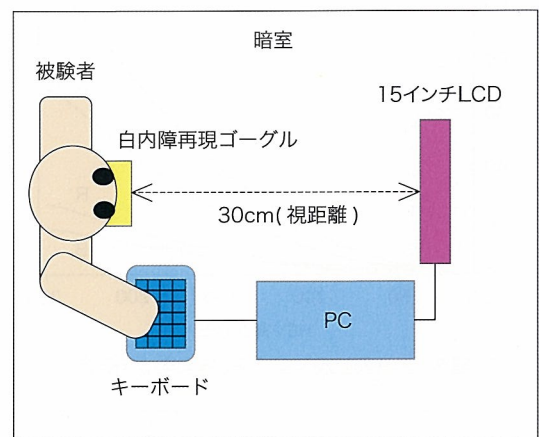
2. 実験方法

本研究では白内障視環境下における色覚特性を求めするために、色覚閾値法による低輝度領域での実験（以下 実験Ⅰ）および明るさマッチング法による中輝度領域での実験（以下 実験Ⅱ）を実施した。実験装置の概要を図1に示す。実験は暗室にて行った。本実験では円形テスト刺激光をVDT（液晶ディスプレイ）の中央部に呈示する。実験ⅠおよびⅡにおける呈示画面はそれぞれ図1 (b), (c) のとおりである。被験者の頭部は顎台にて固定する。また被験者は、キーボード操作により、テスト刺激光の輝度を調整することができる。なお刺激光に対する表色系としては、コンピュータグラフィクスにおいて一般的に用いられ

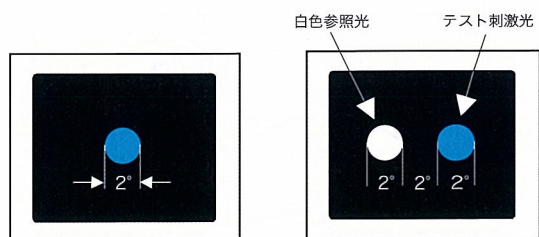
るHSV表色系を用いた⁵⁾。HSV表色系はRGB加法混色系を変換し、色相、輝度および彩度で表示したものである。そこで今回はRGB各255階調を、色相（0°～359°）、輝度（0～255）、彩度（0～255）に対応させた。またRGB（赤、緑、青）からHSV（色相、彩度、輝度）への変換はSmithの定義⁶⁾（円錐モデル）を採用した。

実験Ⅰでは、被験者は図1 (b) のテスト刺激光のHSV輝度をV=82（白色光で10cd/m²に相当）から徐々に減少させ、刺激は検出できるが色がわからなくなる時点（色覚閾値）で応答する。また実験Ⅱでは、図1 (c) 右側のテスト刺激光のHSV輝度を調整して、左側の白色参照光（15cd/m²）と明るさが同一と感じられる点で応答する。この手順を、白内障再現ゴーグルを装着した場合（白内障視環境下）とそうでない場合において実施する。このゴーグルは70歳代以降にみられる強度の老人性白内障をシミュレートしたものである⁷⁾。

測定に使用したテスト刺激光は、HSV色相で0°か



(a) 実験装置の概要



(b) 実験Ⅰの呈示画面
(色覚閾値法)

(c) 実験Ⅱの呈示画面
(明るさマッチング法)

図1 実験状況

LCD：液晶ディスプレイ

PC：パーソナルコンピュータ

表1 HSV輝度V=97(白色光 15cd/m²相当)におけるxy色度

表示色		色度 (CIE1931 XYZ 表色系)		
HSV 色相	略称	Y(cd/m ²)	x	y
0°	R	3.5	0.564	0.332
30°	RY	5.1	0.510	0.382
60°	Y	12.3	0.407	0.471
90°	YG	9.7	0.321	0.528
120°	G	8.9	0.293	0.546
150°	GC	9.3	0.267	0.472
180°	C	11.3	0.215	0.315
210°	CB	4.1	0.172	0.176
240°	B	2.6	0.156	0.127
270°	BM	3.2	0.185	0.141
300°	M	5.7	0.285	0.188
330°	MR	3.7	0.451	0.275
-	W	15.0	0.291	0.316

ら30°間隔の12色および白色であり、いずれも最高彩度のものを用いた。この12色の彩度値Sは輝度値Vに等しい。表1にV=97(白色光で輝度15cd/m²に相当)のときの各色の色度(国際照明委員会1931表色系)の測光値を示す。また、図2にHSV輝度値に対するCIE1931表色系輝度(以下CIE輝度)の測光値を、R,G,BおよびWの各色についてプロットしたものを示す。

各被験者への12色および白色(実験Iのみ)のテスト刺激光の呈示を1セッションとし、白内障視環境下5セッション、そうでない場合5セッションの計10セッションを行った。また、暗室への入室時には20分間、白内障再現ゴーグル装着時には30分間の順応を行った。被験者は19~20歳の色覚正常者5名(実験I)および6名(実験II)である。

3. 結果

実験結果を図3に示す。図3(a)は色覚閾値法(実験I)による実験における色覚閾値(HSV輝度)を、また図3(b)は明るさマッチング法(実験II)における被験者観測値を、ゴーグル装着時およびそうでない場合についてHSV色相の位相順にプロットしたものである。なお、図3(a)の右端には基準色としての白色(W)のデータも合わせてプロットした。点線はゴーグル装着時、細実線はそうでない場合の各被験者の平均値を示す。黒丸太実線は前者の、黒三角実線は後者の場合の被験者の平均値を示す。ここで両平均値の差(dT)は白内障再現ゴーグル装着による、すなわち白内障による影響をあらわすものとなる。色覚閾値法による実験(実験I)の結果、白内障視環境下ではそうでない場合に比べて、すべての

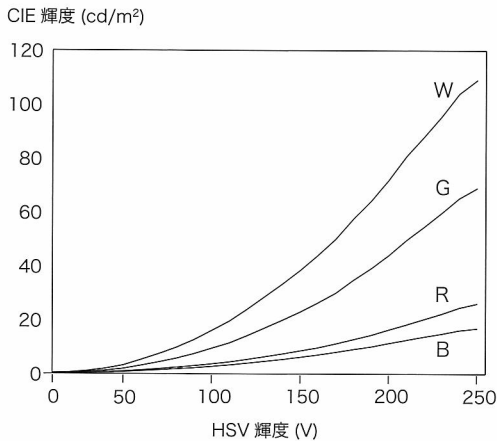
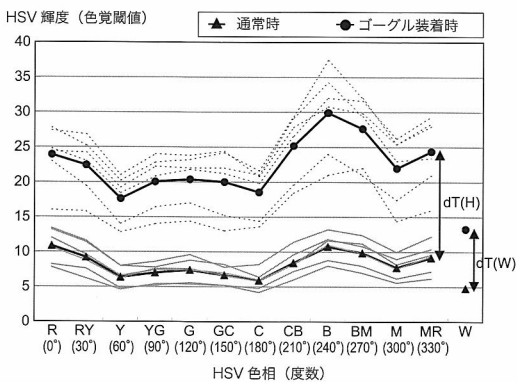
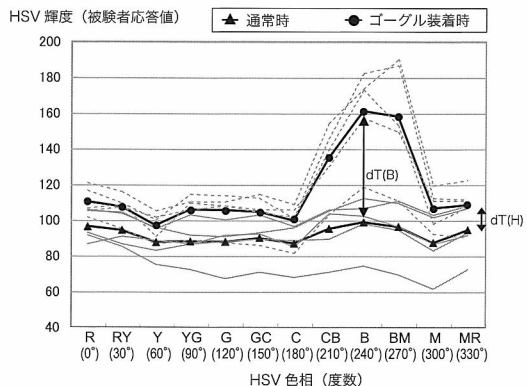


図2 HSV輝度値に対するCIE輝度の測光値



(a) 色覚閾値法による測定(実験I)



(b) 明るさマッチング法による測定(実験II)

図3 実験結果

HSV色相において閾値の上昇，すなわち感度の低下がみられ，感度の低下はすべての色相において有意であった ($p < 0.001$, Wについては $p < 0.005$)。なお，本稿では感度低下の検定手法として t 検定を用いている。色相別の分布をみると，Y(HSV色相 60° ，以下括弧内は度数をあらわす)，C(180°)，M(300°)において極小値をとる一方，R(0°)およびB(240°)においては極大値を示している。とくに白内障視環境下ではBにおける閾値の上昇，すなわち感度低下の度合いが大きく，Bでの閾値差はBM(270°)を除いた各色相の閾値差と比較して有意に大きい ($p < 0.01$, MR(330°)については $p < 0.05$) 結果が得られた。

明るさマッチング法による実験(実験II)においても色覚閾値法による実験におけると同様の結果が示された。すなわち，すべての色相において有意な感度の低下がみられ ($p < 0.001$)，色相別分布では，Y, C, Mで極小値をとり，またR, Bで極大値をとっている。また，実験Iにおいても青系統($210^\circ \sim 270^\circ$)の位相領域における感度の低下がみられたが，実験IIではこの領域における白内障視環境下での被験者応答値が急激に上昇しており，CB(210°)，B, BMにおける被験者応答値差は，他の色相における応答値差と比較して有意に大きい ($p < 0.001$)。よって中輝度の白内障視環境下では，青系統の位相領域における感度低下の傾向がとくに顕著であることが明らかになった。

4. 考 按

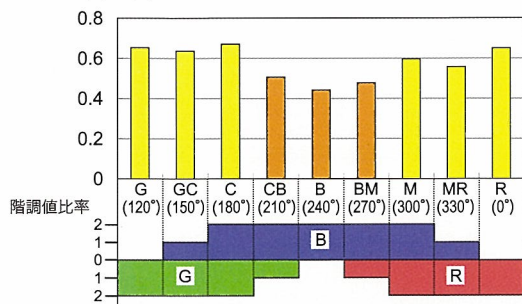
図4は，実験Iおよび実験IIで得られた実験結果の傾向をよりわかりやすく表示したものである。すなわち図4(a)のヒストグラムは，図3(a)(実験I)における白色に対する閾値差 $dT(W)$ を各色相の $dT(H)$

で割ったものがある。また図4(b)のヒストグラムは，図3(b)(実験II)における青色に対する応答値差 $dT(B)$ を各色相の $dT(H)$ で割ったものである。これは各色相に対する比感度に相当するものである。図4より，青系統での感度低下がうかがえる。一方，横軸の表示色相をR,G,B各色の階調値の比率として表示したものを横軸の下のブロック図として示す。実験Iおよび実験IIのいずれの場合においても，青色の光源に対して，赤色または緑色の光源が等分以上の比率で含まれる位相領域では感度が向上していることがわかる。とくに実験Iと比較した場合，実験IIにおいてその程度が著しい。

本実験は低・中度の輝度および彩度の条件下での実験ではあるが，白内障の人に対してVDT上で情報呈示を行う際に，黒色を背景色とした画面において青系統の色を表示色として単独で使用する場合，コントラストの低下によってその視認性に問題を生じる可能性があることがわかった。その対策の一つとして，光源となる青色光の輝度の上方補正が有効であると考えられる。

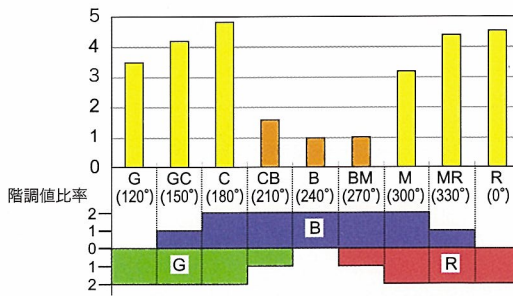
例えば，実験IIにおけるR,G,Bの各光源色のゴーグル装着による被験者応答値の増加率はそれぞれ1.14, 1.20, 1.63であるから，青色光の増加率も他の光源色と同等の1.14~1.20にするためには，青色光におけるゴーグル装着時の被験者応答値の平均値161.4を113.0~118.9の範囲にまで減少させる必要がある。図5は図2に基づき，HSV輝度 $80 \sim 170$ の領域におけるR,G,B各色のCIE輝度の測光値を，最小二乗法による2次の近似曲線として表示したものである。また，図中にR,G,B各色に対する被験者応答値の平均値 $g(R)$, $g(G)$, $g(B)$ (ゴーグル装着時)， $n(R)$, $n(G)$, $n(B)$ (そうでない場合)に対応した点を示す。 $g(G)$

比感度 $dT(w)/dT(H)$



(a) 色覚閾値法 (実験I)

比感度 $dT(B)/dT(H)$



(b) 明るさマッチング法 (実験II)

図4 B(240°)を中心とした領域の比感度およびR,G,B各色の階調値比率

CIE輝度 L (cd/m^2)

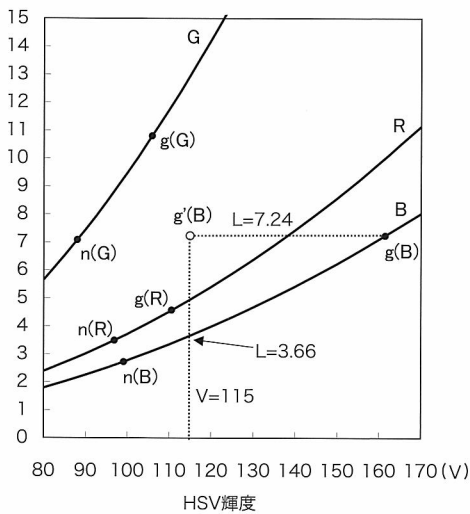


図5 青色光CIE輝度の上方補正

このCIE輝度は近似式より $7.24 \text{ cd}/\text{m}^2$ となる。このとき青色光に対する望ましい被験者観測値 $g'(G)$ のHSV輝度を $H=115$ と仮定すると、このHSV輝度値に対する補正前の青色光CIE輝度は近似式より $3.66 \text{ cd}/\text{m}^2$ となるから、このHSV輝度において $7.24 - 3.66 = 3.58 \text{ cd}/\text{m}^2$ の上方補正が必要であることになる。ただし、この補正値はあくまでも実験IIのデータに基づいて算出されたものに過ぎない。青色光に対する適切な補正値および補正関数を決定するためには、より多くの実

験データを収集・分析し、更に青色光が補正された環境下での実証テストが必要である。

また、液晶ディスプレイのように白色バックライト光をフィルタリングして表示する種類のVDTでは、上限を超えて青色光の輝度を補正することができない場合がある。この場合は、図4に示されているとおり、青系統の代わりに、表示色として他の光源色が青色に対して同等以上の割合で含まれるHSV色相領域の色を使用すると感覚が向上し、視認性を改善する効果があると考えられる。

文 献

- 1) 市川一夫：眼内レンズと水晶体の分光透過性. あたらしい眼科 9 : 1159-1160, 1992.
- 2) 吉田あこ, 桜庭晶子：高齢者の視覚-視界黄変化の実態とシミュレーション-. カラーフォーラムJAPAN1996 講演論文集 79-86, 1996.
- 3) 日本工業標準調査会：高齢者・障害者等配慮設計指針-情報通信における機器, ソフトウェアおよびサービス-第2部：情報処理装置. 日本規格協会, 東京, 2004.
- 4) 池田光男, 久住亜津沙^註：白内障疑似体験ゴーグルによる色票の見えの変化. 日本色彩学会誌 27:113-124, 2003.
- 5) Foley JD, van Dam A et al : Computer Graphics. 2nd Ed, 584-595, Addison-Wesley, 1990.
- 6) Smith AR : Color Gamut Transform Pairs. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 12 : 12-19, 1978.
- 7) The Government of Ontario, Canada : "Through Other Eyes" Program. Committee Transcripts : Standing Committee on Estimates-February 19, 1991.

網膜内因性信号測定装置

(東京医療センター臨床研究センター, 理化学研究所脳統合機能研究チーム) 花園 元
 ((株)ニデック) 柴田 尚久
 ((株)ニデック) 楠城 紹生
 (理化学研究所脳統合機能研究チーム) 谷藤 学
 (東京医療センター臨床研究センター, 理化学研究所脳統合機能研究チーム) 角田 和繁

1. はじめに

眼科における画像診断技術は近年、目覚ましい進歩をとげてきた。たとえば干渉断層計(以下OCT)は、検眼鏡によって捉えることのできない網膜微細構造の観察を可能にするものであり、網膜疾患の診断、治療に関する従来の常識を一変させるほど臨床応用価値の高いものである。しかしOCTや、走査型レーザー検眼鏡(SLO)などの画像診断法は解剖学的構造の把握を目的としており、これによって視細胞をはじめとする網膜の神経活動を捉えることはできない。したがって、網膜機能(神経活動)の他覚的評価のためには、電気生理学的検査である網膜電図(ERG)が今でも主要な役割を果たしている。

我々のグループでは、神経活動に伴って組織の光反射率が変化する現象を利用した計測法(内因性信号計測法)を眼底に応用し、網膜の神経活動を非侵襲的にイメージングする方法を開発することに成功した(網膜内因性信号測定装置: Functional Retinography)。

2. 測定原理

網膜内因性信号測定装置では、神経活動に伴って神経組織の微細構造や光反射率が変化する現象を利用している。実際の計測法は、神経組織をcharge-coupled device(以下CCD)カメラでイメージングし、刺激前と刺激後の画像を重ね合わせて比較するという非常に単純なものである。刺激後に画像の明るさ

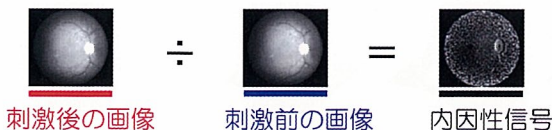


図1 内因性信号の計測方法

が変化している部分が神経活動の起きた領域に相当し、通常は神経活動の高い領域がより暗くみえる(図1)。

3. 測定方法

開発のための動物実験では、ヒトとほぼ同じ解剖学的構造をもつニホンザル、アカゲザルの眼底を用いている。全身麻酔下において非動化した眼底を、ニデック製眼底カメラを改良した観察系を用いて

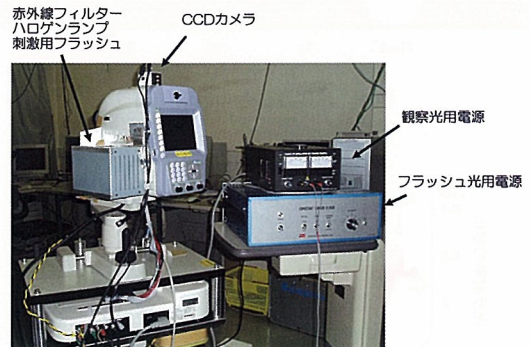


図2 網膜内因性信号計測装置の外観

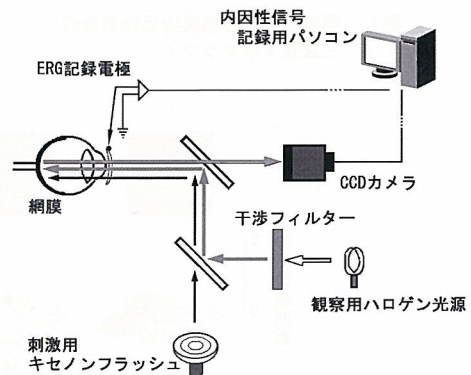


図3 網膜内因性信号計測装置の概要

CCD カメラでモニターする (図2, 3)。眼底観察用のハロゲン光は、赤外線フィルターを透過して眼底後極部を照明する。解像度640×480ピクセル、毎秒30フレームのCCDカメラによって眼底からの光反射率変化を持続的に記録する。測定開始から0.5秒後に眼底後極部全体を白色キセノンフラッシュにて刺激する。1回の測定は通常5~10秒間行う。

刺激前0.5秒間の平均画像の反射率と、刺激後の画像における反射率との比をピクセルごとに計算し、その比を256階調にスケーリングし画像化する (図4)。

4. 測定結果

フラッシュによるびまん性刺激によって視細胞が活動すると、網膜全体の反射率が低下し画像では黒く描出される。この内因性信号は刺激後150msecにピークをもつ早い反応で、中心窩で最も強い。信号強度

刺激後の差分画像(赤外光)

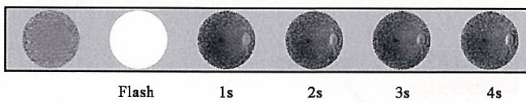


図4 内因性信号の時間経過

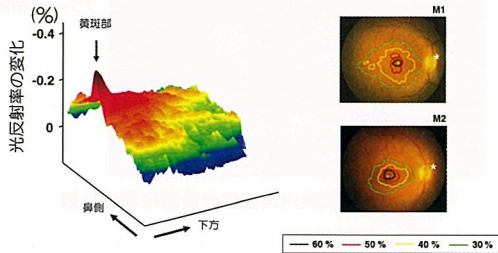


図5 明順応下での網膜内因性信号の三次元トポグラフィ

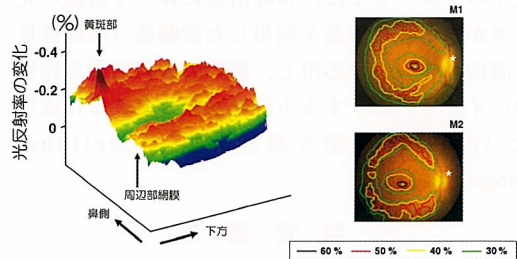


図6 暗順応下での網膜内因性信号の三次元トポグラフィ

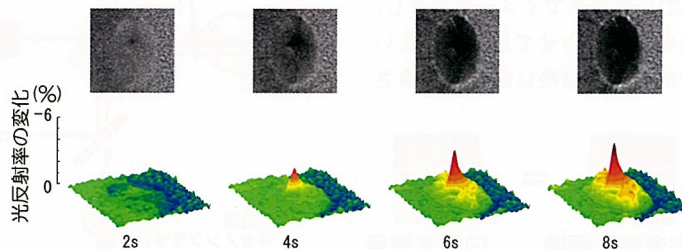


図7 視神経乳頭部の内因性信号の三次元トポグラフィ

を疑似カラーで表示すると、明順応下では中心窩に内因性信号の急峻なピークを認め、周辺部に向かって減少する (図5) が、暗順応下では中心窩に加えて周辺部にドーナツ状のピークを認める (図6)。内因性信号のピークは中心窩では錐体視細胞に、周辺部では桿体視細胞の解剖学的な分布によく一致しており、網膜内因性信号は網膜外層の機能をよく反映していると思われた。

更に視神経乳頭部に注目すると、ここでは網膜面とは異なりフラッシュ刺激後にゆっくりと信号が強くなっていく。これは刺激後の血流増加を反映した光散乱強度変化と考えられ、中心動静脈に相当する視神経乳頭中央部に急峻なピークがみられる (図7)。

5. 網膜内因性信号のバリエーション

前項では、観察光として赤外光、刺激としてびまん性フラッシュ刺激を用いた例を挙げてきたが、網膜内因性信号計測装置は、測定条件・刺激条件を様々に変化させることで信号起源の異なる反応を測定することができる。

1) 局所刺激による内因性信号

網膜内因性信号計測装置の眼底網膜との共役面にフィルターを設置することで局所フラッシュ刺激を



図8 フラッシュ部分刺激に対する内因性信号

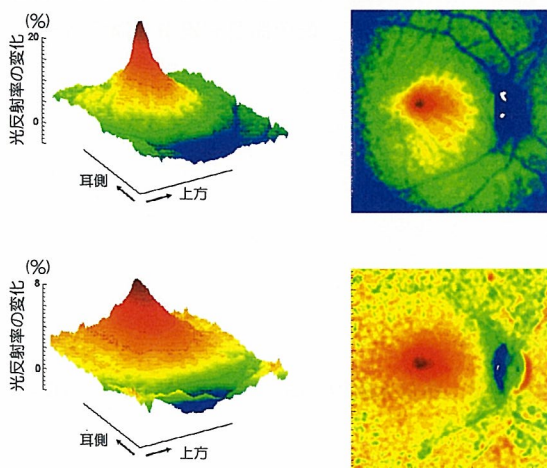


図9 カラーフィルターを用いて測定した褪色反応のトポグラフィ (上:570nm 下:630nm)

行うことができる。刺激部位に相当する網膜のみから内因性信号が記録される (図8)。

2) 可視光を用いた眼底観察による内因性信号

眼底観察光として可視光を用いることで視細胞外層の色素褪色変化 (bleaching) を捉えることができる。これは、赤外光での内因性信号の測定とは異なり、褪色変化が起きた部分の網膜の反射率が上がる (明るくなる) 反応であるが、630 nm の観察光では5%以上、570 nm の観察光では10%以上の大きな反射率変化が中心窩において認められる (図9)。

3) 経強膜電気刺激による内因性信号

経強膜電気刺激により電的に網膜を刺激し内因性信号を測定すると、フラッシュ刺激でみられた中心窩の信号ピークがみられず、網膜後極部全域でほ

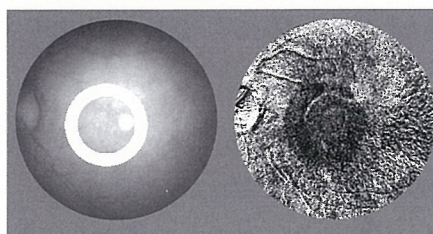


図10 フラッシュ部分刺激に対する内因性信号 (ヒト網膜, 覚醒下)

ぼ同程度の内因性信号がみられた。信号分布は明順応および暗順応の状態でも変わりはなく、信号発生 の起源として網膜内層の寄与が大きいと思われる。

6. ま と め

網膜内因性信号計測装置の原理・測定方法および可能性について測定結果を挙げて述べた。覚醒下のヒトでは、測定は可能なものの動物眼ほどの安定した結果を得るには至っていない (図10)。しかし近い将来臨床応用が実現すれば、網膜神経機能の客観的な評価法として疾患の早期発見や早期治療につながる ことが期待される。

参 考 文 献

- 1) Tsunoda K, Oguchi Y et al : Mapping cone- and rod-induced retinal responsiveness in macaque retina by optical imaging. Invest Ophthalmol Vis Sci 45: 3820-3826, 2004.
- 2) Hanazono G, Tsunoda K et al : Intrinsic signal imaging in macaque's retina reveals different types of flash-induced light reflectance changes of different origins. Invest Ophthalmol Vis Sci, in press.

第18回 日本眼科学会専門医認定試験問題解答と解説 (眼光学・屈折・調節関係)

東京医科歯科大学 所 敬

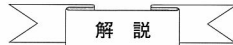
第18回 日本眼科学会専門医試験は2006年6月9（金）、10日（土）の2日間にわたり全共連ビルと日本海運倶楽部で行われた。眼光学・屈折・調節関係の問題は一般問題100題中11問、臨床問題50題中1問であった。昨年に比べて多く出題された。

一般問題 100問中11問

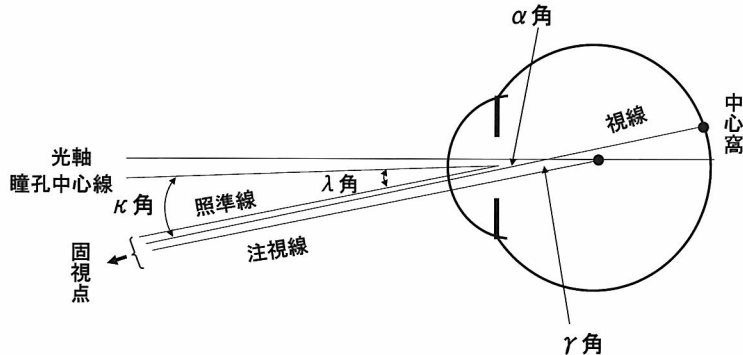
4 照準線と瞳孔中心線をなす角はどれか。

- a α 角 b β 角 c γ 角 d κ 角 e λ 角

解答：e



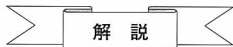
眼球の軸と角度との関係は下図（魚里 博：第IV章 眼球光学．西信元嗣編，眼光学の基礎，127，図IV-3，金原出版，東京，1999から引用，改変）のごとくである。



14 cd/m^2 が単位として用いられるのはどれか。

- a 輝度 b 光度 c 彩度 d 照度 e 明度

解答：a



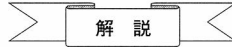
光度の単位は cd ，照度の単位は lx ，彩度は色の「鮮やかさ」の度合いを純色100として，混合された純色成分の比率，明度は黒を0，白を10としたときの明るさの度合いを示す。

64 屈折で正しいのはどれか。2つ選べ。

- a 不正乱視は眼鏡で矯正可能である。
b 単色光線では色収差は起こらない。

- c コントラスト感度は夜間視力を反映する。
- d 2mmの瞳孔径では回折現象により解像力は低下する。
- e 5mmの瞳孔径では角膜の球面収差は視力に影響しない。

解答：b, c

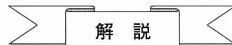


不正乱視は角膜、水晶体などで起こるが、いずれも眼鏡では矯正できない。角膜不正乱視はコンタクトレンズで矯正可能なことが多い。単色光線ではSeidel収差は起こるが、色収差は起こらない。夜間ではコントラストが低下するのでコントラスト感度を反映する。理想的な瞳孔径は2.4mmといわれていて、2mmの瞳孔径では解像力は低下しない。5mmの瞳孔径では球面収差が視力に影響する可能性がある。

65 角膜形状解析が診断に有用なのはどれか。2つ選べ。

- a 円錐角膜
- b 水疱性角膜症
- c ペルーシド角膜辺縁変性
- d 格子状角膜ジストロフィ
- e 膠様滴状角膜ジストロフィ

解答：a, c



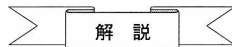
角膜形状解析は角膜前面に不正乱視があるときに有用な検査法である。円錐角膜は角膜が突出し、角膜の変形がみられる疾患、ペルーシド角膜辺縁変性は角膜辺縁透明変性ともいわれ、角膜下方の周辺（角膜輪部から2mm程度上方）が突出し、4時～8時付近の水平に細長い部位の角膜が菲薄化する疾患で、非炎症性で円錐角膜の類似疾患とされている。水疱性角膜症は角膜内皮細胞障害、格子状角膜ジストロフィと膠様滴状角膜ジストロフィは角膜実質に混濁のみられる疾患である。

65 白内障手術で、+22.00Dの眼内レンズ挿入を予定していた。術中に後嚢を破損したため、嚢外に挿入することとした。

目標術後屈折度数に近づけるために眼内レンズ度数はどれか。

- a +18.00D b +20.50D c +22.00D d +23.50D e +26.00D

解答：b



眼の屈折度は角膜屈折力と水晶体屈折力で決まる。角膜屈折力を $D_1=40D$ 、眼内レンズ屈折力を $D_2=22D$ 、前房深度(m)（角膜頂点から眼内レンズ前面までの距離）を d （嚢内固定の場合を $4\text{mm} \left[\frac{4}{10^3}\text{m} \right]$ 、嚢外固定の場合は $2\text{mm} \left[\frac{2}{10^3}\text{m} \right]$ とする）、前房水の屈折率を $n=1.336$ とすれば、眼の全屈折力 D (D)は

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 \cdot D_2 \text{ であらわせる。前房深度が } 4\text{mm} \text{ のとき第 } 3 \text{ 項は}$$

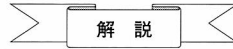
$$\frac{d}{n} D_1 \cdot D_2 = \frac{4}{1.336 \times 10^3} \times 40 \times 22 = 2.6 \text{ となる。前房深度が } 2\text{mm} \text{ になると、この値は } 1.3 \text{ になり、} 22 - 1.3 = 20.7(D)$$

となり、bが妥当である。

66 視力が0.9から1.0に上昇した視力比と0.1から0.2に上昇した視力比との割合で最も近いのはどれか。

- a 1:1 b 1:3 c 1:4 d 3:4 e 5:9

解答：e

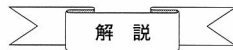


視力が0.9から1.0に上昇した視力比は $1.0/0.9=1.1$ 、0.1から0.2に上昇した視力比は $0.2/0.1=2$ である。
 $1.1:2=1:1.8=5:9$ になる。

68 波面高次収差で正しいのはどれか。2つ選べ。

- a 正視眼では少ない。
 b 加齢に伴い増加する。
 c コマ収差が含まれる。
 d 視機能評価に用いられない。
 e 角膜屈折矯正手術で増加する。

解答：正答はb, c, eであり、不適切問題と思われる。

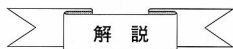


波面高次収差は正視眼で少ないとは限らない。加齢に伴い水晶体の変化が起こり、波面高次収差は増加する。コマ収差や球面収差は波面高次収差に含まれる。最近では視機能評価に用いられている。角膜屈折矯正手術には角膜を手術の場としたものが含まれる (laser in situ keratomileusis (LASIK), photorefractive keratectomy (PRK), laser epithelial keratomileusis (LASEK), radial keratotomy (RK) など) ので術後に増加する。以上から正答はb, c, eとなり、正答はないと考える。b, cは問題ないので、出題者は角膜屈折矯正手術を wavefront-guided LASIK を想定していたのであろうか。

69 0.50D のクロスシリンダはどれか。

- a $+0.50D \ominus \text{cyl} - 0.50D$
 b $+0.50D \ominus \text{cyl} - 1.00D$
 c $+0.50D \ominus \text{cyl} + 0.50D$
 d $+0.50D \ominus \text{cyl} + 1.00D$
 e $+1.00D \ominus \text{cyl} - 0.50D$

解答：b

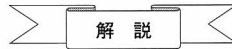


0.50D のクロスシリンダは $-0.50D$ の円柱レンズの軸と $+0.50D$ の円柱レンズの軸を互い直角に組み合わせたレンズである。

$$\begin{array}{l} -0.50D \\ \perp \\ \quad +0.50D \end{array}$$

- 70 両眼ともに正視で調節力が1.00Dの人に、近用部に3.00Dを加入した二重焦点眼鏡を処方した。この眼鏡で明視できない範囲はどれか。
- a 33cm～25cmまで
 - b 1m～33cmまで
 - c 2m～1mまで
 - d 3m～2mまで
 - e 5m～3mまで

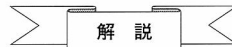
解答：b



正視で1.00Dの調節力があれば、無限遠～1mまで明視できる。二重焦点レンズの近用部に3.00Dのレンズを加入すれば、このレンズによる遠点は33cmで、調節力が1.00Dあるので、 $3.00 + 1.00 = 4.00\text{D}$ すなわち25cmまで見える。したがって、二重焦点レンズの遠用部では無限遠～1mまでと、33cm～25cmまでが明視可能である。そこで、1m～33cmの間が明視できない範囲である。

- 74 乳児の視力検査で正しいのはどれか。2つ選べ。
- a Landolt 環字ひとつ視標
 - b PL 視力検査器
 - c 縞視力カード
 - d 点視力カード
 - e 森実式ドットカード

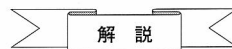
解答：b, c



Landolt 環字ひとつ視標で測定できるのは3歳以降である。点視力カードや森実式ドットカードは幼児に用いられる。乳児にはPL 視力検査器や縞視力カード (Teller acuity cards など) が使われる。

- 81 電気性眼炎の原因となるのはどれか。
- a 短波長紫外線
 - b 長波長紫外線
 - c 可視光線
 - d 近赤外線
 - e 遠赤外線

解答：a



電気性眼炎は角膜障害である。紫外線は短波長紫外線 (UVC 290nm)、中波長紫外線 (UVB 291～320nm)、長波長紫外線 (UVA 321～400nm) に分けられる。UVCはオゾン層で吸収されて、地表には到達しない。UVAは水晶体まで到達して白内障の原因になる。UVBは角膜で吸収されて角膜障害の原因になる。設問には中波長

紫外線はないので、aでよいと思われる。

臨床問題 50問中1問

24 正視眼の Amsler チャート検査時、チャートを網膜に投影したものを別図24に示す。
正しいのは別図のどれか。

- a ①
- b ②
- c ③
- d ④
- e ⑤

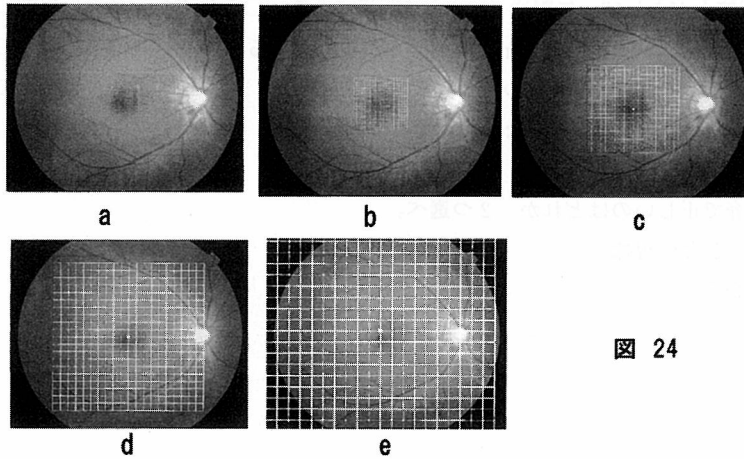


図 24

解答：c

解説

Amsler チャートは検査距離 28~30 cmで、 $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ に 1° おきに引かれた碁盤の目からなり、中心視野異常を検出する表である。中心窩~乳頭までは約 15° 、乳頭の横径は約 5° 、縦径は約 7° であるから、網膜に投影される像は中心窩から鼻側、耳側に 10° ずつになるので、正答はcになる。

第36回 視能訓練士国家試験問題解答と解説 (眼光学・屈折・調節関係)

東京医科歯科大学 所 敬

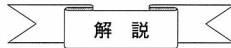
第36回 視能訓練士国家試験問題中、眼光学・屈折・調節関連問題の解答と解説を述べる。

午前

7 加齢による遠見視力低下の主な原因はどれか。

- a 角膜内皮細胞減少
- b 水晶体混濁
- c 毛様体筋力低下
- d 網膜視細胞減少
- e 視神経伝達遅延

解答：b

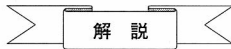


加齢による生理的遠見視力低下には、水晶体透過性低下、網膜視細胞減少も関係するが、主な原因としては網膜～中枢までの機能低下ともいわれている。加齢によるとは生理的変化を意味するようにも思われるが、水晶体混濁は白内障という疾患も想定される。加齢により白内障が起こり、遠見視力低下が起こると考えるのか、問題としてはやや不適切と思われる。

15 視力検査で正しいのはどれか。

- a 検査室の明るさは、1,000 lx以上とする。
- b 標準視力表の視標と背景の白地とのコントラストは90%以上とする。
- c 字づまり視力表では被検眼の位置を視標0.5の高さに合わせる。
- d 幼児では字づまり視力表を用いる。
- e 近見視力の標準検査距離は40 cmとする。

解答：b



検査室の明るさは、50 lx以上で視標輝度をこえないことである。字づまり視力表は被検眼の位置を1.0の視標の高さに合わせることになっている。読み分け困難があるため、6～8歳までは字ひとつ視力表を用いる。近見視力の標準検査距離は30 cmである。

19 視覚的補助具のうち光学的補助具でないのはどれか。

- a 単眼鏡
- b 拡大鏡

- c 弱視眼鏡
- d 強度凸レンズ
- e タイポスコープ

解答：e

解 説

単眼鏡，拡大鏡，弱視眼鏡，強度凸レンズは光学的補助具である。タイポスコープとは紙などに適当な窓を開けて，読んだり，書いたりする位置を限定して，見やすくするものである。

- 24 明所視比視感度のピーク波長 (nm) はどれか。
 a 780 b 555 c 507 d 430 e 380

解答：b

解 説

明るさの感度は波長によって決まる。最大感度を1として比較値で示したのが比視感度である。明所視での最高比視感度は波長555nm，暗所視では510nmである。そこで，明所では黄緑が最も明るく見え，黄昏時には青緑が最も明るく見える。この現象をPurkinje移動という。

- 27 視力0.5のLandolt環の切れ目の視角はどれか。
 a 1分 b 2分 c 3分 d 4分 e 5分

解答：b

解 説

視力は最小可視角(分)の逆数である。すなわち， $視力0.5 = 1 / \text{最小可視角(分)}$ で最小可視角は2分になる。

- 28 小数視力1.0のlogMAR(最小可視角の常用対数)はどれか。
 a -1 b 0.0 c 0.1 d 0.2 e 0.3

解答：b

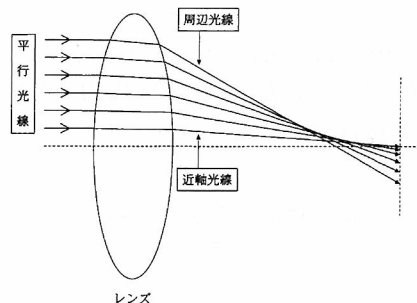
解 説

小数視力1.0の最小可視角は1分である。そこで， $\log 1 = 0$ である。

- 31 図に示す収差はどれか。

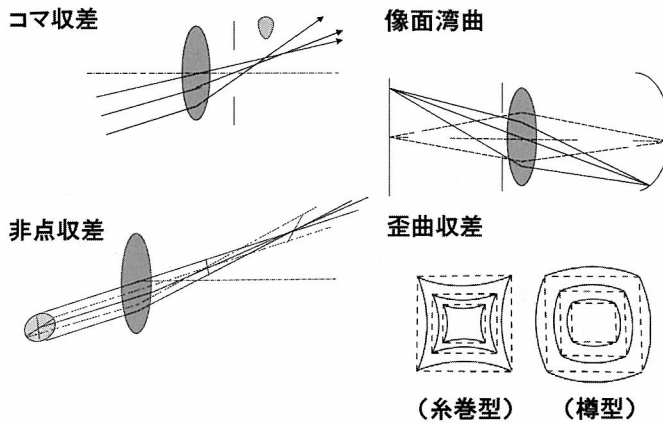
- a 球面収差
- b コマ収差
- c 非点収差
- d 像面湾曲
- e 歪曲収差

解答：a



解 説

その他の収差については、下図のごとくである。



32 誤っている組合せはどれか。

- a 照度——lx
- b 輝度——cd
- c 屈折力——D
- d 立体視——sec of arc
- e プリズム偏角—— Δ

解答：b

解 説

cd は光度の単位で、輝度は cd/m^2 である。

33 屈折率が最も高いのはどれか。

- a 空気
- b 角膜
- c 房水
- d 水晶体
- e 硝子体

解答：d

解 説

空気は 1 (正式には真空中)、角膜は 1.376 (同格屈折率 1.3375)、房水 1.336、水晶体 (正式模型眼の同格屈折率 1.409、略式模型眼 1.413)、硝子体 1.336 である。

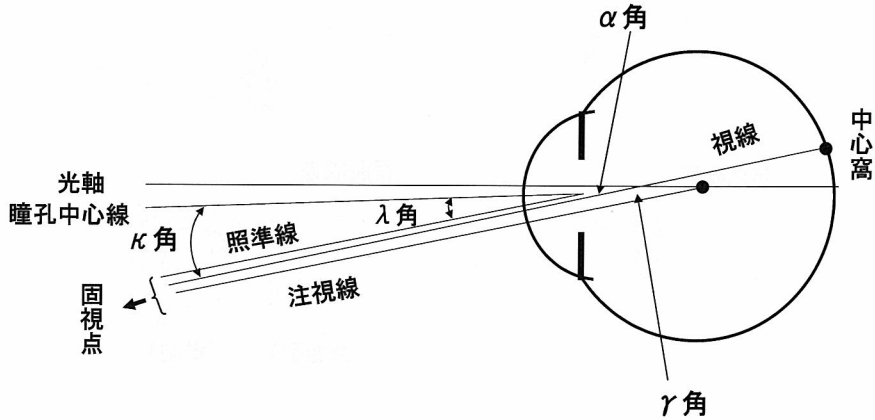
34 視軸と光軸のなす角はどれか。

- a α 角
- b β 角
- c γ 角
- d κ 角
- e λ 角

解答：a

解説

視軸と光軸との関係は下図（魚里 博：第IV章 眼球光学. 西信元嗣編, 眼光学の基礎, 127, 図IV-3, 金原出版, 東京, 1999から引用, 改変）のごとくである。



- 35 誤っているのはどれか。
- a 縮瞳すると網膜照度が低下する。
 - b 縮瞳すると焦点深度が深くなる。
 - c 縮瞳すると球面収差が大きくなる。
 - d 縮瞳すると回折の影響が強くなる。
 - e 2~3mm の瞳孔径で網膜像は最も鮮明になる。
- 解答：c

解説

縮瞳すると網膜照度が低下し、焦点深度は深く、球面収差は小さくなり、回折の影響は大きくなる。散瞳すると網膜照度は増加し、焦点深度は浅く、球面収差は大きくなる。

- 36 よく用いられる模型眼はどれか。
- a Bielschowsky
 - b Goldmann
 - c Gullstrand
 - d Hirschberg
 - e Snellen
- 解答：c

解説

よく用いられる模型眼は Gullstrand 模型眼と Helmholtz 模型眼である。

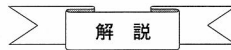
37 非調節時の模型眼常数に最も近い組合せはどれか。

角膜前面

曲率半径 (mm) 眼軸長 (mm)

- a 7.8 ————— 22.2
- b 8.7 ————— 22.2
- c 7.8 ————— 24.0
- d 8.7 ————— 24.0
- e 7.8 ————— 32.0

解答：c

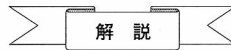


Gullstrand 模型眼では角膜前面曲率半径は 7.7 mm, 眼軸長は 24.0 mm である。

38 乱視で正しいのはどれか。

- a 遠視性単性乱視の最小錯乱円は網膜面よりも後方にある。
- b 近視性複性乱視の後焦線は網膜面上にある。
- c 雑性乱視の前焦線は網膜面上にある。
- d 近視性直乱視の前焦線は水平方向に収束する。
- e 遠視性倒乱視の後焦線は垂直方向に収束する。

解答：正答は a, d であり, 不適切問題である。



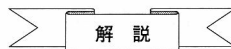
遠視性単乱視の前焦線は網膜面にあるので, 最小錯乱円は網膜より後方にある。近視性複乱視の後焦線が網膜上にあれば, 近視性単乱視である。雑性乱視はある経線は遠視, 他の経線は近視であるので, 前焦線は網膜面より前方にある。近視性直乱視では前焦線は水平, 後焦線は垂直で, 遠視性倒乱視では前焦線は垂直, 後焦線は水平である。そこで, 正答は a と d で 2 つあり, 不適切問題である。

39 遠点および近点距離を測定した結果, 角膜面より前方それぞれ 50 cm, 12.5 cm であった。

コンタクトレンズによる完全矯正度数と調節力の組合せで正しいのはどれか。

- a -2.00D ————— 6D
- b -2.00D ————— 8D
- c -2.00D ————— 10D
- d +2.00D ————— 6D
- e +2.00D ————— 10D

解答：a



遠点が 50 cm の完全矯正度数は -2.00D で, 調節力は $1/\text{近点} - 1/\text{遠点}$ であるから, $1/0.125 - 1/0.5 = 6(D)$ になる。

40 眼内レンズの度数決定に必要な検査はどれか。2つ選べ。

- a 視力
- b 色覚
- c 眼軸長
- d 調節力
- e 角膜屈折力

解答：c, e

解説

一般的な眼内レンズの度数の決定式にはSRK式がある。すなわち、 $P=A-2.5L-0.9K$ (P (D)：正視にするための眼内レンズの屈折力, A：眼内レンズのタイプによる常数, L (mm)：眼軸長, K (D)：強弱主経線上の角膜屈折力の平均値) である。

43 小数視力0.2に相当する縞視力 (cycle/degree) はどれか。

- a 1 b 2 c 4 d 6 e 10

解答：d

解説

縞視力を30で割ったものが小数視力である。したがって、 $0.2 = \text{縞視力}/30$ であるから、縞視力は6 cycles/degree である。

44 乳児の視力検査法で適切でないのはどれか。2つ選べ。

- a 視運動性眼振
- b 視覚誘発電位
- c ドットカード
- d 並列視力表
- e preferential looking (PL) 法

解答：c, d

解説

ドットカードは幼児に、並列視力表は6～8歳以上で用いられる。

45 自覚的屈折検査で正しいのはどれか。

- a 検眼レンズの頂間距離は8mm である。
- b メニスカスレンズは表裏反転しても同様に使用できる。
- c 前焦点が網膜面に一致する球面レンズ屈折力を求める。
- d 放射線乱視表の最もはやけて見える方向がマイナス円柱レンズの軸である。
- e 赤緑試験では緑色の視標がはっきり見える状態にする。

解答：d


 解説

検眼レンズの頂間距離は 12mm, 眼鏡レンズ屈折力はレンズ後頂点から焦点までの距離の逆数で決まるので, メニスカスレンズは表裏反転して使用できない。放射線乱視表では後焦線を網膜面におき, 凹円柱レンズで矯正する。クロスシリンダーでは最小錯乱円が網膜上に一致する状態で円柱レンズを求める。赤緑試験では赤色の視標と緑色の視標が同じように見える状態にする。

46 自覚的屈折検査の結果を以下に示す。

(1.2 × +1.75D)

(1.5 × +2.00D)

(1.5 × +2.25D)

(1.5 × +2.50D)

(1.2 × +2.75D)

屈折度はどれか。

a +1.75D b +2.00D c +2.25D d +2.50D e +2.75D

解答：d


 解説

最高の視力を得たプラス側のレンズを自覚的屈折度という。

47 角膜頂点から近点が前方 20 cm, 調節力が 3D である。

遠点はどれか。

a 前方 12.5 cm

b 前方 50 cm

c 前方 100 cm

d 後方 20 cm

e 後方 50 cm

解答：b


 解説

近点が 20 cm であるので, 調節力は 5D 必要である。調節力は 3D であるので, この眼は -2D である。したがって, 遠点は前方 50 cm にある。

70 ミドリン P® に含まれるのはどれか。2つ選べ。

a 硫酸アトロピン

b 塩酸オキシプロカイン

c 塩酸フェニレフリン

d 塩酸ピロカルピン

e トロピカミド

解答：c, e

解説

ミドリンP®とは、トロピカミドと塩酸フェニレフリンとの合剤である。

74 コンタクトレンズの合併症はどれか。2つ選べ。

- a 老人環
- b 円錐角膜
- c 眼瞼下垂
- d 結膜フリクテン
- e 角膜内皮障害

解答：c, e

解説

酸素不足による角膜内皮障害、ハードコンタクトレンズに眼瞼下垂がみられることがある。

88 片眼のときよりも両眼開放下で遠見裸眼視力が低下するのはどれか。

- a 斜位近視
- b 潜伏眼振
- c 不同視弱視
- d 調節性内斜視
- e 眼振阻止症候群

解答：a

解説

間欠性外斜視では片眼のときには視力が良好であっても、両眼視で眼位が正位になったときには強い輻湊が働くので、調節の過緊張状態を引き起こし、視力は低下する。これを斜位近視という。

98 幼児期から学童期の屈折異常弱視の検査に適切な点眼薬はどれか。2つ選べ。

- a エピネフリン
- b トロピカミド
- c 硫酸アトロピン
- d 塩酸フェニレフリン
- e 塩酸シクロペントラート

解答：c, e

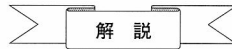
解説

小児の遠視の場合には、6歳未満では0.5%、6歳以上では1%アトロピンを両眼に1日3回3～7日点眼後に検査する。近視の場合には1%塩酸シクロペントラートを5分ごとに2回点眼して1時間後に検査する。

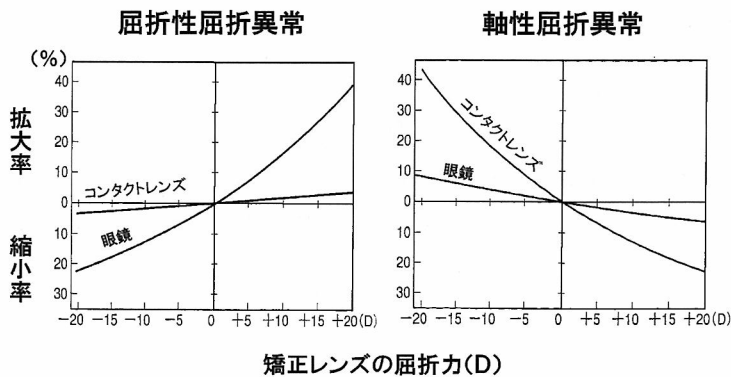
午後

- 8 眼鏡とコンタクトレンズとの比較で正しいのはどれか。
- a 屈折性近視の不同視では左右眼の像の大きさの差は眼鏡の方が大きい。
 - b 軸性近視の不同視では左右眼の像の大きさの差は眼鏡の方が大きい。
 - c 近視眼では調節は眼鏡の方が多く必要である。
 - d 遠視眼では調節は眼鏡の方が少なくてすむ。
 - e 近視眼では輻湊は眼鏡の方が多く必要である。

解答：a



眼鏡レンズは凸レンズでは拡大，凹レンズでは縮小があるため，屈折性近視では近視の程度が強い眼では像の縮小がみられるが，コンタクトレンズではレンズが角膜上にあるために，拡大・縮小は起こらない。軸性近視では眼軸が長いと網膜像は大きくなるが，眼鏡には縮小効果があるために，コンタクトレンズより拡大効果



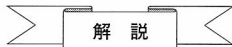
があらわれない。

眼鏡では見かけの調節があり，近視では調節は少なくてよく，遠視では調節量は多く必要である。したがって，近視矯正の凹レンズ眼鏡では近方視で正視眼に比べて調節は少なくてよく，輻湊方向にプリズム基底があるので輻湊は少なくてすむ。

- 10 二重焦点眼鏡が適応となるのはどれか。2つ選べ。

- a 屈折性調節性内斜視
- b 非屈折性調節性内斜視
- c 部分調節性内斜視
- d 非調節性輻湊過多
- e 後天（基礎型）内斜視

解答：b, d



遠視を伴う屈折性調節性内斜視は単焦点レンズでよい。部分調節性内斜視では単焦点レンズで矯正後，残余斜視角に対しては手術適応になる。後天（基礎型）内斜視は屈折矯正の適応にならない。非屈折性調節性内斜

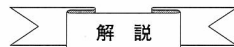
視は A/C 比が高いもので二重焦点眼鏡の適応になる。非調節性輻湊型内斜視は遠見眼位が正位または軽度の内斜視であるのに対し、近見では強い内斜視を示すもので、過剰な近接性輻湊による内斜視である。これは、非屈折性調節性内斜視と似ているが、近見に +3.00D 付加しても近見斜視角が改善しないことが非屈折性調節性内斜視との鑑別点ともいわれている。しかし、二重焦点眼鏡を装用させて経過をみる方法もあるので、2つ選ぶならば d になる。

34 7歳の女兒。学校健診で視力障害を指摘され来院した。検査距離 50 cm で検影法を行った結果、45°方向は +4.0D の検影レンズで、135°方向はレンズなしで中和した。

他覚的屈折度はどれか。

- a cyl + 4.00D Ax45°
- b cyl + 4.00D Ax135°
- c + 2.00D ⊂ cyl - 2.00D Ax45°
- d + 2.00D ⊂ cyl - 4.00D Ax135°
- e + 2.00D ⊂ cyl - 4.00D Ax45°

解答：e



検査距離が 50 cm であるから、検影レンズなしで中和すれば -2.00D、検影レンズ +2.00D で中和すれば正視である。したがって、検影レンズ度から 2.00D を引いた値がその眼の屈折度になる。そこで、この問題での屈折度は



であるので、e が正解である。