

---

 総 説
 

---

## 不正乱視の基礎と臨床研究 (3-1) 球面収差の基礎

大沼一彦

国立大学法人千葉大学大学院工学研究科

### Fundamentals of Irregular Astigmatism and Clinical Research (3-1) Spherical Aberration

Kazuhiko Ohnuma

Graduate School of Engineering, National University Corporation Chiba University

前回、コマ収差の特長とコマ収差があるときのシミュレーション網膜像を紹介した。今回は球面収差を取り上げる。球面収差の光線による説明、点像強度分布 (point spread function, PSF) の特徴、開口絞りとの関係、球面レンズの形と収差の関係を述べる。次に、自作のソフトによるランドルト環の網膜上のシミュレーション像を供覧しながら、偽調節の特徴、最良像点の移動、他収差があるときの影響を述べる。

(視覚の科学 28: 132-139, 2007)

キーワード：球面収差，波面収差，ゼルニケ多項式，偽調節

The features of coma aberration and simulated retina images created using the eye optics with coma aberration were explained previously. The present paper addresses spherical aberration. The features of spherical aberration, the role of aperture in point spread function (PSF), and the relation between lens form and aberration quantity are described using light rays. Also described, with display of simulated images of the Landolt ring on the retina, obtained using my own software, are the features of apparent accommodation caused by spherical aberration alone and in combination with other aberrations.

(Jpn J Vis Sci 28: 132- 139, 2007)

Key Words: Spherical aberration, Wavefront aberration, Zernike polynomial, Apparent accommodation

#### 1. はじめに

光学のテキスト<sup>1,2)</sup>にならって、幾何光学的に球面収差が起きる様子と、球面収差の特徴を述べる。

次に、波面を用いて網膜上の点像強度分布を求め、ランドルト環視標を用いたシミュレーション網膜像より、球面収差には偽調節の効果、コントラストの低

下があること、また、瞳孔の変化で最良像点の位置が変化することを示す。これは、非球面眼内レンズや、laser *in situ* keratomileusis (LASIK) における球面収差を理解するのに役立つと考える。更に、球面収差と他の収差が混在したときの偽調節の効果がどのようになるかを述べる。

---

 別刷請求先：263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 国立大学法人千葉大学大学院工学研究科 大沼一彦  
(2007年10月9日受理)

 Reprint requests to: Kazuhiko Ohnuma Graduate School of Engineering, National Univ Corp Chiba Univ  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan  
(Received and accepted October 9, 2007)

2. 幾何光学による球面収差の説明

はじめに、光線を使って球面収差を説明する<sup>2)</sup>。図1に両凸レンズの光軸に平行な光が入射したときの結像の様子を示してある。図1の上部に示す場合では、レンズの周辺部を通過した光はレンズから近いところに、また中心を通過した光はレンズから遠いところに結像している。つまり、レンズの通過位置(レンズ中心からの距離  $h$ ) で結像位置が異なることになる。図1に示す場合はレンズの周辺部を通過する光ほど、レンズに近いところで光軸と交わっている。この場合を正の球面収差と呼ぶ。この収差の量は、縦球面収差 (longitudinal spherical aberration 以下 Long SA) と横球面収差 (lateral spherical aberration 以下 Lat SA) であらわされる。ここで、レンズ中心付近を通過する光の光軸との交点までの距離を  $S_c$ 、レンズの周辺部で高さ  $h$  を通過する光の光軸との交点までの距離を  $S_h$  とすると、縦球面収差は Long SA =  $S_h - S_c$  とあらわせる。従来、球面収差の様子は図1の下部に示すように、レンズへの入射高と光軸との交点の関係であらわされている。図1の上図の光の集光状態をみると、最小になるところが存在する。この位置はレンズの近軸(中心付近)を通過する光の光軸との交点よりもレンズ寄りである。さて、Long SA とレンズの形状から決まる shape factor と、物体と像の位置で決まる position factor, 屈折率, 入射高の間には次の関係がある<sup>3)</sup>。

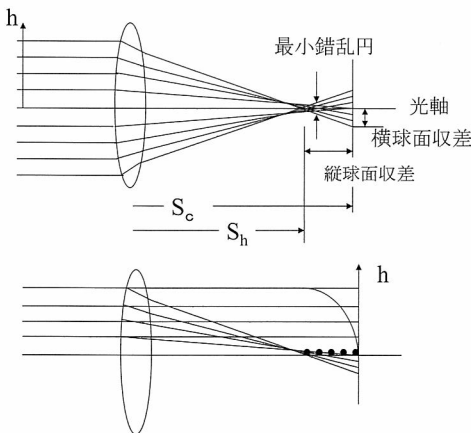


図1 球面収差  
 上：正の球面収差のときの縦球面収差，横球面収差，最小錯乱円を示す。  
 下：入射光のレンズ中心からの高さ  $h$  と光軸との交点位置の関係を示す。

$$L_s = \frac{h^2}{8f^3} \times \frac{1}{n(n-1)} \left[ \frac{n+2}{n-1} q^2 + 4(n+1)pq + (3n+2)(n-1)p^2 + \frac{n^3}{n-1} \right] \dots (1)$$

ここで、 $f$ はレンズの焦点距離、 $L_s$ は  $S_h$  と  $S_c$  から次式で与えられる。

$$L_s = \frac{1}{s_h} - \frac{1}{s_c} \dots (2)$$

更に、 $p$  は position factor で、物体と像の位置で決まる値であり、 $q$  は shape factor で、レンズの前後の曲率半径で決まる値であり、次式で与えられる。

$$p = \frac{s' - s}{s' + s} \dots (3)$$

$$q = \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \dots (4)$$

ここで、 $s, s'$  はレンズから物体までの距離と像までの距離であり、 $r_1$  と  $r_2$  はレンズの曲率半径である。

さて、球面収差が最小となる shape factor を探すために、(1) 式を  $q$  で微分してみると、次式となる。

$$\frac{dL_s}{dq} = \frac{h^2}{8f^3} \left[ \frac{2(n+2)q + 4(n-1)(n+1)p}{n(n-1)^2} \right] \dots (5)$$

この式が0になる  $q$  の値は

$$q = -\frac{2(n^2 - 1)p}{n + 2} \dots (6)$$

となる。

仮に、無限遠からの平行光の場合では、 $s = \infty$  より  $p = -1$  であり、レンズの屈折率  $n = 1.5$  の場合では、 $q = 0.714$  となる。このとき、Long SAは最小になるが0ではない。そのときのレンズの曲率半径は(4)式を変形して、

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{q - 1}{q + 1} \dots (7)$$

となるので、

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{0.714 - 1}{0.714 + 1} = -0.167$$

となる。 $f = 20 \text{ mm}$  のときは、

$$r_1 = \frac{2f(n-1)}{q+1}, \quad r_2 = \frac{2f(n-1)}{q-1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

より,

$$r_1 = \frac{20}{0.714+1} = 11.67\text{mm}, \quad r_2 = \frac{20}{0.714-1} = -69.93\text{mm}$$

となる。つまり、裏面のカーブが前面に比べて緩やかであることになる。

さて、Long SA=Sh-Sc=-Sh×Sc×Lsとなるが、Lsはディオプターの差とみることができるので、Lsの値をh=4mmと6mmの場合で求めると、図2に示すようになる。これをみてもわかるように、開口絞り（眼の場合は瞳孔）が小さくなると、球面収差量が小さくなるのがわかる。また、先ほど示した縦球面収差が最小になるところでも0にはならないことがわかる。

これらから考えると、角膜を二つの球面と考え空气中に置かれていたとすると、かなり大きな球面収差をもつことがわかる。

球面収差をなくする方法は、片面を非球面にすることが考えられる。その応用例が非球面眼内レンズ（以下 IOL）にあるので、次の節で説明をする。

### 3. IOL 挿入眼における球面収差とその補正

角膜は、6mm開口で0.2~0.3μm くらいの正の球

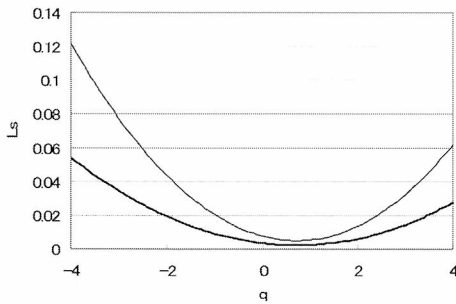


図2 形状と開口の球面収差への影響  
h（入射高）が4mmと6mmの場合のレンズの形状ファクターqと縦球面収差量の関係を示す。図下にはそのときのレンズ形状を示す。  
—— h : 4mm  
—— h : 6mm

面収差をもっている<sup>9)</sup>。このため、両面とも球面である IOL を挿入すると、更に球面収差が増大することになる。図3の上部には両面球面の IOL を挿入した場合の様子を示している。このシミュレーションは（株）オプトの OPTAS によるもので、その条件は、角膜の前面の曲率半径 7.7mm、後の曲率半径 6.8mm、厚さ 0.5mm、屈折率 1.378（波長 546.07nm）であり、後面から IOL までの距離を 3.6mm、IOL は両凸で、曲率半径 20mm、屈折率 1.540 である。図3から IOL 周辺の光がレンズに近い方で光軸と交わっているのがわかる。このときの球面収差量は 0.84μm（6mm 瞳孔径）である。一方、図3の下に示すのは、レンズの球面形状に r<sup>4</sup>（半径の4乗）の係数を -0.00064 を

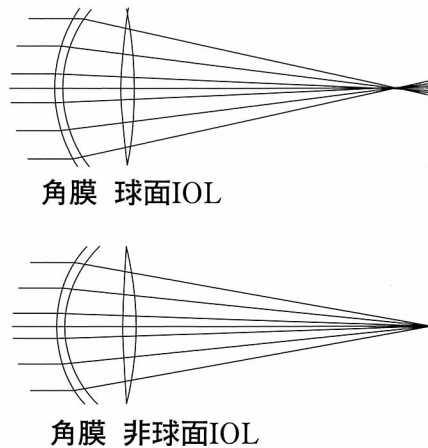


図3 球面眼内レンズ（IOL）と非球面 IOL の球面収差

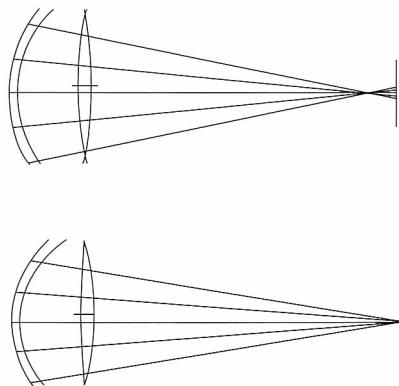


図4 ティルト時の収差の変化  
0.5mm x 方向へずれたときの球面 IOL と非球面 IOL の球面収差を示す。

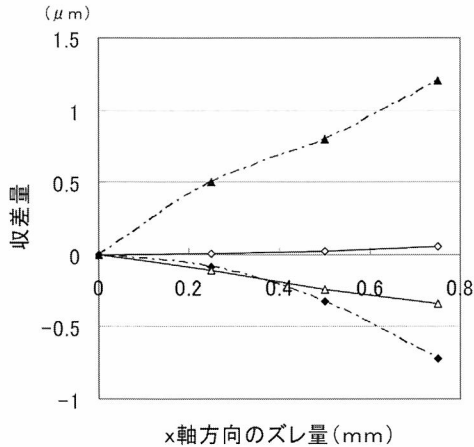


図5 ティルト時の非点収差とコマ収差の変化  
非球面レンズの方がティルトに伴う非点収差とコマ収差の増大が大きい。

- ◇— : z3 (球面)
- ◆— : z3 (非球面)
- △— : z7 (球面)
- ▲— : z7 (非球面)

付加した非球面の場合の例である。このときの球面収差量は  $0.0015\mu\text{m}$  で、ほとんど0の状態であり、近軸焦点にすべての光線が集まっているのがわかる。

少し球面収差の話からずれるが、IOLがx軸に0.5mmずれたときの光線の様子を図4に示す。図4からもわかるように、非球面レンズの方が上下の対称性がずれているのがみられる。このときは、どちらの場合にもプリズム成分、非点収差、コマ収差があらわれる。x軸方向にIOLが0.25mm, 0.5mm, 0.75mmずれたときの非点収差、コマ収差の量を比較したものを図5に示す。これを見ると、非球面レンズの方がはるかに大きいことがわかる。また、ここでは示さないが、回転に対してもプリズム成分、非点収差、コマ収差があらわれ、球面、非球面ともにその量はほぼ同じである。これより、非球面レンズを処方するときは、光軸からのズレがないように入れなくてはならない。あるいは、ズレに対して非点収差、コマ収差があらわれにくいような工夫が望まれる。話を元に戻すが、x方向へのズレがあっても球面収差の量はほとんど同じである。また、ズレのために生じるコマ収差のために、球面収差を0にした効果であるフォーカス点付近の像のコントラストは低下することになり、偽調節の効果で見える範囲が広がる。このことは前回の総説のところに示して

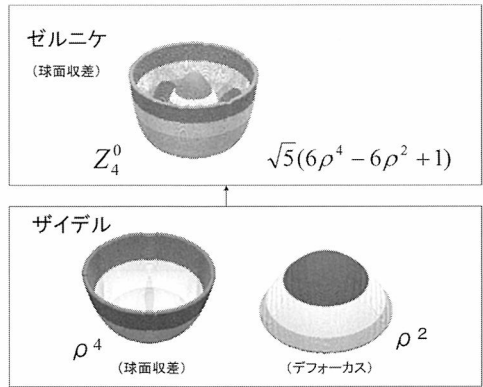


図6 ゼルニケとザイデルの球面収差の違い  
ゼルニケ表現の球面収差にはデフォーカスが含まれている。

あるので、参考にしていただきたい。

#### 4. PSF と網膜上の光学像

前々回<sup>9)</sup>、球面収差の波面を式であらわすと  $a\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$  となることを示した。ここで、 $\rho$  はレンズ出射瞳面の中心からの距離、つまり半径である。その様子が図6の右上に示してある。図6に示すように、ゼルニケの球面収差はザイデルの球面収差とデフォーカス成分からできている。そのため、レンズ設計のソフトで解析すると、球面収差が大きくなるとデフォーカス成分も大きくなるので、おかしいなと思うことがあるが、これは、ゼルニケの球面収差をあらわすなかに、デフォーカス成分が含まれているからである。

さて、このような波面の網膜上の点像は次式によって得られる。波面を  $w(x, y)$  として、焦点面での振幅を  $a$  とすると、次の式によって  $a$  が求まる。

$$a(u, v) = \iint \exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}w(x, y)) \exp(-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xu + yv)) dx dy \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $f$  は眼球光学系の焦点距離、 $\lambda$  は光の波長、 $u$  と  $v$  は網膜面上の座標である。

焦点面での振幅と、点像強度 (point spread function 以下 PSF) は次の (10) 式で与えられる。

$$PSF(u, v) = a(x, y) a^*(x, y) \dots\dots\dots (10)$$

視標の見え方は、視標を色々な距離に置いて、そのときの点像を求めて、コンボルーション演算によって網膜上の光学像を求める。式であらわすと次のよ



うになる。

$$I(u,v) = PSF_i(u,v) \otimes s(u,v) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $I(u, v)$  は網膜像であり、 $s(u, v)$  は視標である。 $PSF_i(u, v)$  と書いたのは距離ごとの PSF の意味であり、距離ごとにデフォーカス成分が加味されるので、PSF の形が変化するのである。

はじめに、瞳孔径が5, 4, 3, 2mm のときで、1 m に

フォーカスが合っていて、すべての収差が補正されている状態で、0.15 D ほどの距離に視標を置いたときのシミュレーションによる網膜上の光学像を図7, 8に示す。これは、IOL 挿入眼で収差が補正された状態で、遠点が1 m (-1D) になった状態と考えていただければよいと思う。これをみると、瞳孔が大きいときは本当にフォーカスしている1 m のところ

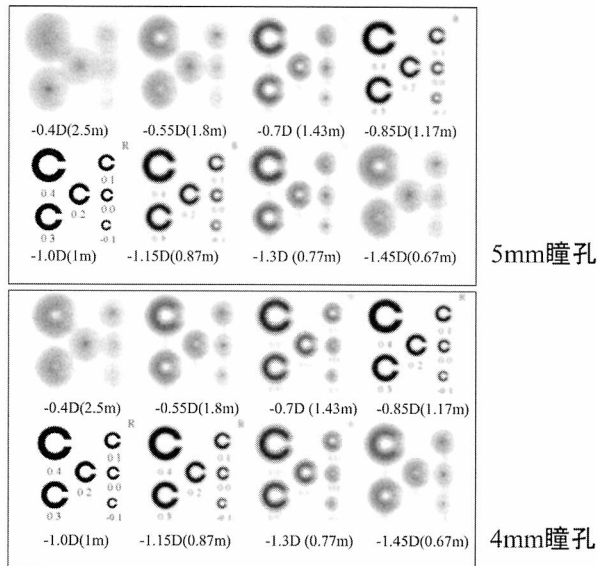


図7 無収差時の網膜上の光学像  
上：瞳孔径 5 mm，下：瞳孔径 4 mm  
1 m にフォーカスが合った状態での 0.15 D ほどの像を示す。

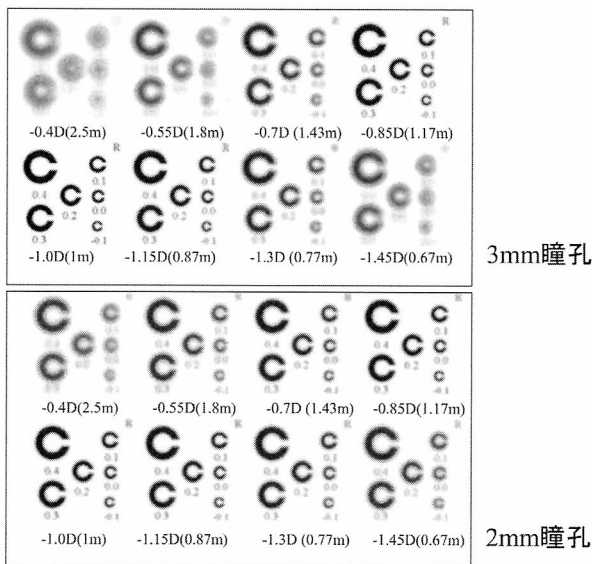


図8 無収差時の網膜上の光学像  
上：瞳孔径 3 mm，下：瞳孔径 2 mm  
1 m にフォーカスが合った状態での 0.15 D ほどの像を示す。

の像のコントラストは高いが、それ以外はぼけているのがわかる。もし、任意の距離でどうなるかを考えれば、その分だけずらして考えればよい。たとえば無限遠にフォーカスがあると、手前0.15D (6.7m) くらいまでしかシャープには見えないことがわかる。また、瞳孔が小さくなるにしたがって、見える範囲が広がるのがわかる。

次に、球面収差が $0.2\mu\text{m}$  (6mm 瞳孔での値) あるときの5mm 瞳孔径のときのPSFを図9に示す。これをみると、最小錯乱円が $-1.15\text{D}$ から $-1.3\text{D}$ のあたりにあることがわかる。つまり、正の球面収差のために、コントラストのある像の位置は手前に移動していることがわかる。0.15D から0.3Dの近視化である。つまり、昼間の瞳孔が2mm くらいで夜に5mm になると、球面収差があれば近視化が起きる。

このPSFだけでは、像がどのように見えるかを判断するのは難しいので、ランドルト環を用いたシミュレーションにより、網膜上の光学像を示す。球面収差量は $0.2\mu\text{m}$  (6mm 瞳孔での値) で、瞳孔径が5, 4, 3, 2mm と変化したときのものを図10, 11, 12, 13に示す。5mm の瞳孔での像をみると、PSF から予測していたように、フォーカス位置よりも手前に視標を

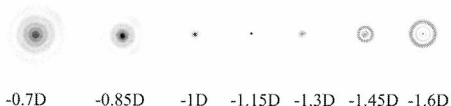


図9 球面収差とpoint spread function (PSF)  
1mにフォーカスして、球面収差 $0.2\mu\text{m}$  (6mm 瞳孔) で5mm 瞳孔時の0.15D ごとのPSFを示す。

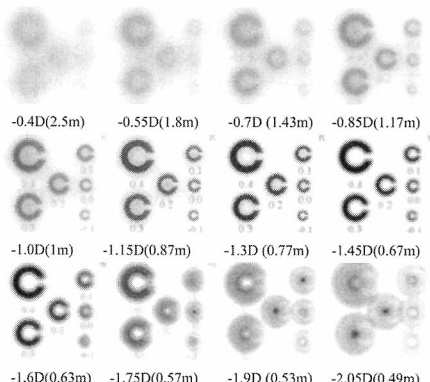


図10 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差 $0.2\mu\text{m}$ , 1mにフォーカス, 瞳孔径5mmの場合で、0.15D ごとの網膜上の光学像を示す。

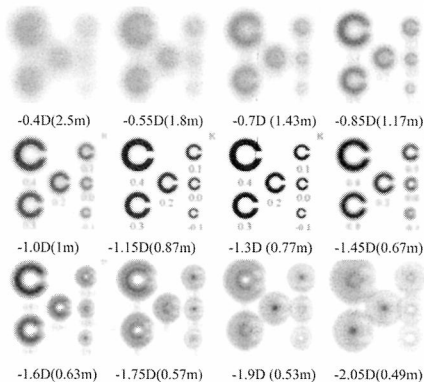


図11 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差 $0.2\mu\text{m}$ , 1mにフォーカス, 瞳孔径4mmの場合で、0.15D ごとの網膜上の光学像を示す。

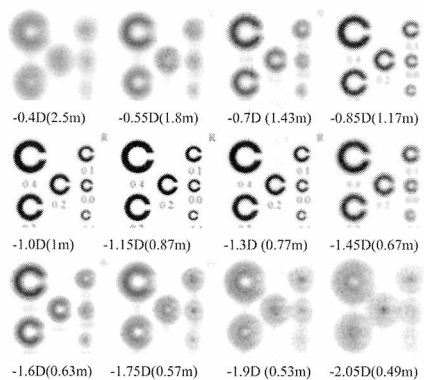


図12 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差 $0.2\mu\text{m}$ , 1mにフォーカス, 瞳孔径3mmの場合で、0.15D ごとの網膜上の光学像を示す。

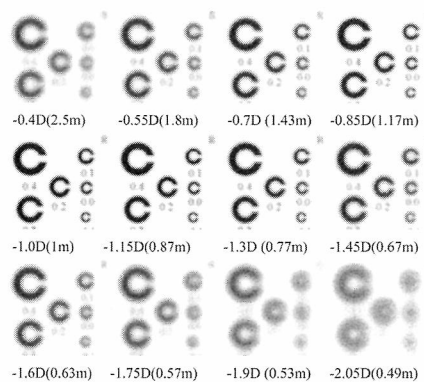


図13 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差 $0.2\mu\text{m}$ , 1mにフォーカス, 瞳孔径2mmの場合で、0.15D ごとの網膜上の光学像を示す。

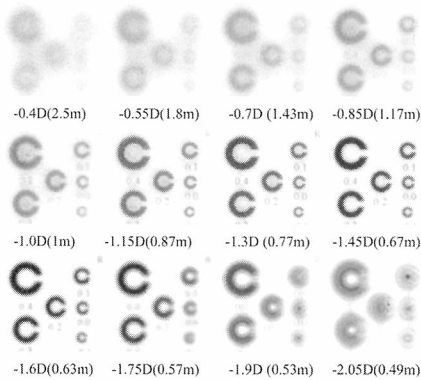


図14 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差  $0.4\mu\text{m}$ 、1m にフォーカス、  
瞳孔径 4mm の場合で、0.15D ごとの  
網膜上の光学像を示す。

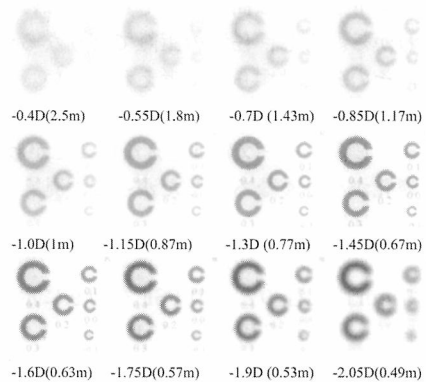


図16 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差  $0.8\mu\text{m}$ 、1m にフォーカス、  
瞳孔径 4mm の場合で、0.15D ごとの  
網膜上の光学像を示す。

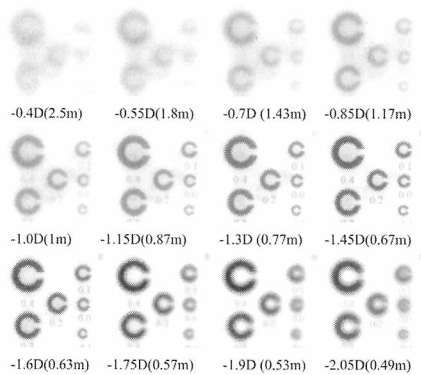


図15 球面収差と網膜上の光学像  
球面収差  $0.6\mu\text{m}$ 、1m にフォーカス、  
瞳孔径 4mm の場合で、0.15D ごとの  
網膜上の光学像を示す。

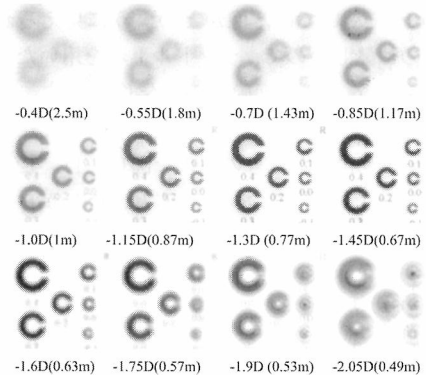


図17 球面収差とコマ収差が混在するときの  
網膜上の光学像  
球面収差  $4\mu\text{m}$ 、コマ収差  $0.2\mu\text{m}$  で  
1m にフォーカス、瞳孔径 4mm の場  
合で、0.15D ごとの網膜上の光学像を  
示す。

置いたときに、コントラストの高い像が得られているのがわかる。瞳孔を 4, 3, 2mm と閉じていくと、コントラストの高い像が得られる視標の位置はフォーカス位置、この場合では 1m (-1D) のところへと近づいていくのが観察される。また、2mm ではほとんど図 8 に示した無収差の像に近いのがわかる。このように、瞳孔のコントラストへの役割は大きいのがわかる。

次に、球面収差の量を  $0.4, 0.6, 0.8\mu\text{m}$  と増大させたときで、瞳孔径が  $4\text{mm}\Phi$  のときのシミュレーション網膜像を図14, 15, 16に示す。これを見ると、コントラストの高い像が得られる視標位置は球面収差量が  $0.2\mu\text{m}$  のときよりも更に手前にくるのがわかる。しかし、収差量に比例して手前にくるのではなく、

$0.6\text{D}$  くらいでとどまるようである。コントラストは球面収差量が増大するにしたがって全体的に落ちていく。これを偽調節と呼んでよいかどうか？であるが、解像して見える範囲は広がっていくのがわかる。

最後に、球面収差  $0.4\mu\text{m}$  (6mm 瞳孔での値) にコマ収差が  $0.2\mu\text{m}$  加わるとどのように見えるかのシミュレーションを図17に示す。この結果をみると、コマ収差の影響は少ないのがわかる。

## 5. まとめ

ここでは、球面収差の幾何光学的説明、波面を使ったシミュレーションによる各距離に置かれた視標の網膜像の説明を紹介した。正の球面収差による近視

化が収差量とどのような関係なのかも理解していただけだと思う。最近では IOL で、角膜の球面収差を打ち消すようなものに関心が高まっているが、ここで示したように、フォーカスした距離で瞳孔が大きいときにコントラストの高い像を得ることはできるが、解像する範囲が狭くなることを理解されたと思う。また、球面収差がある場合、それにコマ収差が加味されても、それほど像には変化がないことを理解されたと思われる。

ここでは示さなかったが、もし、IOL を挿入して負の球面収差のある眼になると、瞳孔を開くと遠視化が起きて遠方が見えるようになる。このような IOL があってもよいように筆者は思うが、いかがだろうか。

また、少し脱線して、IOL が軸をはずしたときに球面収差を 0 にする非球面 IOL では、コマ収差や非

点収差が球面 IOL よりも大きいことを示したが、これらを押さえるような新しい IOL のデザインを考えて、世に出していただくことを期待する。

#### 文 献

- 1) Jenkins FA & White HE : Chapter 9, Lens aberrations. Fundamental of Optics, 3rd Ed, 130-168, Kogakusha Co, LTD, Tokyo, 1975.
- 2) Eugene Hect 著, 尾崎義治, 朝倉利光訳: 第 6 章 幾何光学 II. ヘクト光学 I, 382-389, 丸善株, 東京, 2002.
- 3) Beiko GH, Haiqis W & Steinmueller A: Distribution of corneal spherical aberration in a comprehensive ophthalmology practice and whether keratometry can predict aberration values. J Cataract Refract Surg 33: 848-858, 2007.
- 4) 大沼一彦: 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. 視覚の科学 28: 6-14, 2007.

## 総 説

不正乱視の基礎と臨床研究 (3-2)  
球面収差の臨床前田 征宏<sup>1)</sup>, 孫 政基<sup>2)</sup>, 市川 一夫<sup>1)</sup><sup>1)</sup> 社会保険中京病院眼科<sup>2)</sup> 板橋貿易株式会社

## Clinical Situation of Spherical Aberration

Masahiro Maeda<sup>1)</sup>, Sun Zhengji<sup>2)</sup> and Kazuo Ichikawa<sup>1)</sup><sup>1)</sup> Department of Ophthalmology Social Insurance Chukyo Hospital<sup>2)</sup> Itabashi Trading Co.,Ltd.

球面収差の基礎について (3-1) で説明された。今回はその臨床応用ということで、非球面レンズの歴史、眼球球面収差の変化、現在市販されている非球面眼内レンズを紹介し、今後の非球面眼内レンズを用いた白内障手術について述べる。  
(視覚の科学 28: 140-145, 2007)

キーワード: 球面収差, 非球面レンズ, 眼内レンズ挿入眼

The fundamentals of spherical aberration were explained in the preceding issue. In this issue, we introduce the history of the aspheric lens, the changes in human spherical aberration and the commercially available aspheric intraocular lenses. Also discussed is the future of cataract surgery with aspheric intraocular lenses.  
(Jpn J Vis Sci 28: 140- 145, 2007)

Key Words: Spherical aberration, Aspheric lens, Pseudophakia

## 1. はじめに

前稿までに球面収差の基礎と光学シミュレーションについて示された。ここでは非球面レンズの歴史、眼球球面収差の加齢に伴う変化、現在市販されている非球面眼内レンズ (以下 IOL) の紹介と、白内障手術の今後についての検討を述べる。

## 2. 収差と非球面レンズ

これまでに述べられてきたように、収差は以下の5種類の単色収差

- 1) 球面収差
- 2) コマ収差
- 3) 非点収差

4) 像面歪曲

5) 歪曲収差

と、以下の2種類の色収差に分類される。

6) 縦色収差 (軸上色収差)

7) 横色収差 (倍率色収差)

最初の5種類の収差は色に関係なく生じる単色収差で、研究者の名前をとってザイデルの5収差と呼ばれる。

あとの二つは色収差と呼ばれ、レンズの分散が原因となって光線の色の違いによって生じる収差である。分散が生じる程度を数量化して示すためにアッペ数 $v$ が用いられ、アッペ数が大きいほど色収差が小さく、逆にアッペ数が小さいほど色収差が大きい。また、縦色収差と球面収差はレンズの光軸上にもあ

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  
(2007年10月9日受理)

Reprint requests to: Masahiro Maeda, MD Dept of Ophthalmol Social Insurance Chukyo Hosp  
1-1-10 Sanjo, Minami-ku, Nagoya 457-8510, Japan  
(Received and accepted October 9, 2007)

らわれる収差である。

通常の光学レンズはレンズ中心から周辺部まで単一の曲率をもつ球面レンズであり、前稿の球面収差の基礎で示されたように、平行な光線がレンズの周辺部を通過するときには（遠軸光線）、焦点はレンズにより近い方に結び、また光線がレンズの中心部付近を通過するときには（近軸光線）、焦点はレンズからより離れた位置に結ぶ。このように光軸上の焦点位置がずれるものが、これまでに述べられてきた球面収差である。その収差によって、レンズ中心を通過して結ばれた焦点の周りに、レンズ周辺部を通過した光線によってボケが生じ、シャープではない、すっきりしない結像になる。

近軸光線よりも遠軸光線がより強く屈折される場合の収差を正の球面収差といい、遠軸光線よりも近軸光線がより強く屈折される場合の収差は負の球面収差といわれる。

それに対して、我々が日常耳にする非球面（眼内）レンズは中心から周辺までの曲率が連続して変化し、レンズの曲率変化によって近軸光線と遠軸光線両方の焦点位置を重ね合わせる。これによって、球面収差を補正すると同時に、光のエネルギー損失が減少するため、良好な結像と光学性能が得られる。

### 3. 非球面レンズの歴史

写真レンズでは前項の収差をいかに抑え、被写体の像をできるだけ鮮明かつ正確にフィルム上に作るため、100年以上にわたって改良を重ねられてきた。しかしながら、何枚かの正負のレンズを組み合わせても、ある程度収差を小さくすることは可能であるが、すべての収差を完全に除去することは不可能である。

球面のみから構成されるレンズに非球面を導入すると、レンズの自由度が増し収差補正上の有力な手段となる。

非球面を使った有名な光学系に、1931年に発明された天文用のシュミットカメラがある。反射望遠鏡の凹面鏡の球面収差を補正するために、非球面の補正板が瞳位置に置かれた。

通常の写真レンズに非球面が導入されたのは、1966年に発表されたライカ M 用のノクチルックス (Noctilux) 50 mm F1.2 が最初である。これにより開放時のフレアが格段に軽減され、Noct が示すように開放で撮る夜景の描写で非球面の効能が最もよく発

揮されている。一方、非球面の効能を主として歪曲のコントロールに利用した、OP フィッシュアイニッコール 10 mm F5.6 などのレンズもある。このレンズでは正射影にするため、大幅な負の歪曲を第一面の非球面で発生させている。

非球面といえば無収差の光学系を連想する人もいるかと思うが、上記のように収差補正に有力な武器と自由度が加わったと考えるのが正しい。非球面によってその面自身で発生する収差を抑制したり、他の面で発生したフレアを打ち消したりすることができる。

現在、非球面レンズは日常生活によく使用されている。高級一眼レフカメラは1枚以上の非球面レンズを用い、またデジタルカメラ、ビデオカメラ、CD、DVD、CCD (charge-coupled device) カメラにも非球面レンズが使われている。眼科では白内障手術後の無水晶体眼屈折矯正手術において、世界で初めて非球面レンズが使われた。現在は近視矯正用高級眼鏡にも非球面レンズが多い。眼科検査によくみられる眼底検査機器、細隙灯顕微鏡にも非球面レンズが入っている。球面収差を補正するために、眼底カメラ、オルソケラトロロジーにも非球面レンズを使っている。

### 4. 眼球球面収差

ヒトの眼球に対する解剖研究によると、眼球の光学システム各屈折面はすべて非球面である。1972年、Pomerantseff は Gullstrand の角膜が中心部と周辺部の曲率が異なっている非球面である原理に基づき、眼球モデルを設計した。その眼球モデルは角膜の前面と後面を含め、全199個の屈折面より構成され、また水晶体も非球面である。ヒトの眼球収差は眼の各構成部分の屈折面により生じ、角膜の形状を変えて像の質を改善できる<sup>2)</sup>。

#### 1) 角膜の収差

通常角膜は中心部より周辺部はフラットである。中心部が凸であり、周辺部がフラットになる形状は prolate といわれる。同形状の特徴は中心部の屈折力が大きく、周辺部の屈折力が小さい。それに対して、周辺部より中心部が扁平である形状は oblate といわれ、laser in situ keratomileusis (以下 LASIK) あるいは photorefractive keratectomy (以下 PRK) 術後によくみられる形状である。

Beiko ら<sup>3)</sup>、Holladay ら<sup>4)</sup>、Wang ら<sup>5)</sup>は、それぞれ 6 mm 瞳孔径の正常者の角膜球面収差を測定



し、 $+0.275\mu\text{m}$  近辺を中心とした正規分布になっていたと報告している。また、加齢によってこの収差は変化を認めないことも報告されている。

### 2) 水晶体の収差

一方、ヒト水晶体の球面収差は加齢とともに変化する。若年者の水晶体は負の球面収差を有するが、加齢とともに水晶体の形状変化を生じ、正の球面収差を生じる<sup>6)</sup>。

### 3) 球面 IOL

球面 IOL では、周辺部より中心部の屈折力が強いいため正の球面収差を有する。そのため、角膜の正の球面収差を打ち消すことができない。

### 4) 非球面 IOL

非球面 IOL では負の球面収差、あるいは IOL 自体の収差がゼロのため、角膜の正の球面収差を打ち消すことができ、眼球全体の球面収差は増加しない。

### 5) 眼球全体の球面収差

若年者では角膜の正の球面収差を水晶体の負の球面収差が打ち消すことができるため、眼球全体の光学性能を保つことができる。しかしながら、加齢に伴う水晶体の形状変化により正の球面収差が増大することで、眼球内球面収差のバランスが崩れ眼球全体の球面収差は加齢とともに大きくなるため、網膜像にボケが生じる。

球面 IOL も高齢者の水晶体と同様に正の球面収差をもつため、角膜の正の球面収差を補正することができず、眼球全体の球面収差が増大するために網膜の鮮明度が低下する。一方、非球面 IOL が有する負の球面収差は角膜の正の球面収差を打ち消すことができ、眼球全体の球面収差のバランスが保たれ、若年者同様にシャープな結像を得られる (図 1)。

## 5. 非球面 IOL

非球面 IOL とは、眼球収差の分析データに基づき IOL の表面を非球面形状に加工されたレンズである。その目的は先に述べたように無収差を作り出すことではなく、主に角膜が有する正の球面収差を打ち消し、偽水晶体眼全体の球面収差量を補正することによって、網膜結像の鮮明度を向上することである。Wernerら<sup>7)</sup>は、非球面 IOL は眼球全体の球面収差を最小限に補正でき、球面 IOL に比べ結像の鮮明度が明らかに優れていると報告している。Holladay ら<sup>8)</sup>は、非球面 IOL の挿入によって角膜の球面収差を補正でき、網膜像の鮮明度が向上したと報告し、Mester ら<sup>9)</sup>および大谷ら<sup>10)</sup>は、同一症例に対し片眼に非球面 IOL、僚眼に球面 IOL を挿入し、3 ヶ月後、非球面 IOL 挿入眼の低照度コントラストが有意に良好であり球面収差も有意に減少し、前面を改良した IOL の使用に

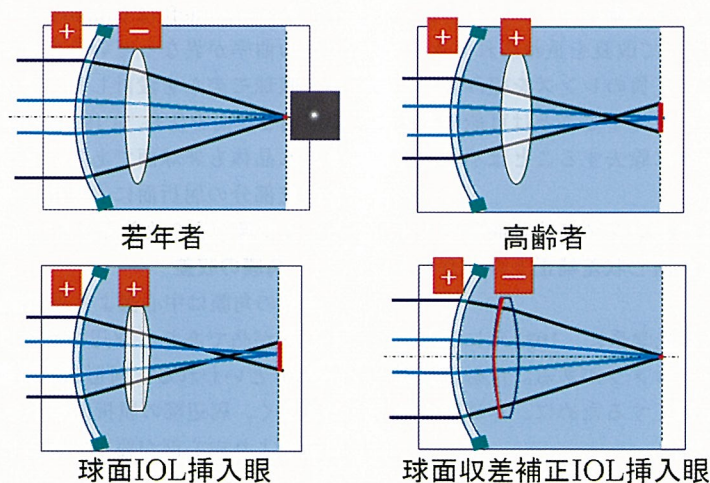


図1 球面収差の変化

若年者では角膜の正の球面収差を水晶体の負の球面収差が補正しているが、加齢に伴い水晶体の球面収差が負から正へと変化する。球面眼内レンズ (IOL) では角膜の正の球面収差を補正できないが、非球面 IOL では若年者のように補正することができる。

よって、IOL挿入後の球面収差増加の問題を回避すると同時に、コントラスト感度および暗所視機能を向上できると報告している。

### 1) 最初の非球面 IOL

調べ得る限り、世界で初めての非球面 IOL は、中国において1985年に姚らがポリメチルメタクリレート（以下 PMMA）素材の非球面 IOL の設計、作製に成功したものである。同 IOL の光学部はPMMA素材であり、ループの素材はポリプロピレン（PP）、光学部直径 6 mm、中心厚 0.95 mm、度数範囲は +18～+24 D であった。前面は凸レンズであり、後面は非球面設計であった。姚ら<sup>10)</sup>は同非球面レンズの設計、臨床データについて検討した。潘ら<sup>11)</sup>も非球面 IOL 結像の鮮明度が高いと発表している。

### 2) フォールダブル非球面 IOL

現在日本では、AMO、CANON STAAR、Alcon、HOYA の 4 社から非球面 IOL が発売されている。それらの主な仕様を表 1 に示す。

AMO の TECNIS シリコン（Z9000）は世界最初のフォールダブル非球面 IOL であり、アメリカ FDA（Food and Drug Administration）に最初に承認された

非球面 IOL であった。Z9000 は Pharmacia911A 型フォールダブル球面 IOL の改良品であり、両者の形状は同様だが、Z9000 の前面は非球面設計である。光学部素材はシリコンであり、直径 6mm、両凸シャープエッジ、modified prolate 形状といわれ、周辺部の厚みを増し、非球面を作り出している。支持部材料はポリフッ化ビニリデン（PVDF）3 ピース後房型フォールダブル IOL である。TECNIS IOL は負の球面収差（ $-0.27 \mu\text{m}$ ）を有し、角膜の正の球面収差（ $+0.275 \mu\text{m}$ ）を打ち消すことによって、眼球全体の球面収差をゼロにする設計である。Z9000 は現在生産を終了し、TECNIS CL（シリコン製、Z9002）、TECNIS Acrylic（アクリル製、ZA9003）の 2 種類の素材の非球面レンズが販売されている。TECNIS Acrylic はアクリルレンズであるが、アッペ数が大きいことも特徴であり、縦色収差が少ないと考えられる。両者とも眼球全球面収差をゼロにする設計思想である。

CANON STAAR の AQ-310Ai/AQ-Ni は AQ-310NV をベースに開発された非球面 IOL/着色非球面 IOL である。光学部の素材はシリコンであり、直径 6 mm、両凸シャープエッジであり、支持部材料はポリイミ

表 1 現在市販されている非球面眼内レンズ（IOL）の一覧

仕 様	製 品					
	TECNIS CL (AMO)	TECNIS Acrylic (AMO)	AQ-310Ai (CANON STAAR)	AQ-Ni (CANON STAAR)	AcrySof IQ (Alcon)	AF-1 FY-60AD (HOYA)
IOL 種類	3 ピース		3 ピース		1 ピース	1 ピース
光学部素材	シリコン	アクリル	シリコン		アクリル	アクリル
支持部材質/デザイン	PMMA/modified C		ポリイミド/C型		アクリル/StableForce	PMMA/modified C
支持部角度	10°	5°	10°		0°	5°
光学部直径 (mm)	6		6		6	6
全長 (mm)	13.0		12.5		13.0	12.5
エッジ加工	OptiEdge Design		Square		Square	Square
屈折率	1.46(35°C)	1.470(35°C)	1.413	1.413	1.55	1.52
非球面特徴	前面非球面		前面非球面		後面非球面	前面非球面
度数範囲 (D)	+10.0～+30.0 0.5間隔		+12.5～+28.5 0.5間隔		+6.0～+30.0 0.5間隔	+6.0～+30.0 0.5間隔
インジェクター	リユーザブル (Silverシリーズ)	リユーザブル (Emeraldシリーズ)	一体型ディスポ (KS-3Ai)	一体型ディスポ (KS-AiN)	リユーザブル (Monarch II)	リユーザブル (HOYA-IS)

PMMA：ポリメチルメタクリレート



表2 若年健常眼, 球面眼内レンズおよび各種非球面 IOL の角膜収差補正後の結果

球面収差	若年健常眼	球面レンズ	AMO	CANON STAAR	Bausch& Lomb	Alcon	HOYA
角膜	+	+	+	+	+	+	+
水晶体(IOL)	-	+	-	-	0	-	-
補正後結果	+	++	0	+	+	+	+

ド, 3ピース後房型フォールダブル IOL である。AQ-310Ai/AQ-Ni は前面が非球面設計であり, 光学部の周辺部はフラットになり, 中心厚は従来の球面 IOL より 10% 薄くなった。そのため, 従来の球面 IOL よりも小さな切開創からの挿入が可能となった。本 IOL も負の球面収差を有するが, 同 IOL の設計は開発初期臨床データより, 角膜の球面収差は  $+0.295\mu\text{m}$ , 眼球全体の残存球面収差が  $+0.18\mu\text{m}$  とし (メーカー公称値), 球面収差補正量として  $-0.11\sim-0.15\mu\text{m}$  なることを目標として設計されている。

Alcon の AcrySof IQ は AcrySof をベースに開発された着色非球面 IOL であり, 型番は SN60WF である。光学部素材は紫外線・青光線吸収剤が入った疎水性アクリルである。光学部直径 6mm, 両凸シャープエッジ, 支持部素材は光学部と同様の 1ピース後房型フォールダブル IOL である。同製品は AcrySof Natural の後面を非球面に加工することによって, IOL 全体に負の球面収差が生じる。AcrySof IQ も AcrySof Natural に比べ中心部の厚みを 5%, 体積で約 9% 減らすことで, より小さな切開創からの挿入が可能となっている。AcrySof IQ の設計コンセプトは CANON STAAR 社と類似する。AcrySof IQ 球面収差設計値は  $-0.20$  であり, 角膜の正収差補正後, 眼球全体の残存球面収差を  $+0.1\mu\text{m}$  となるように開発されている。着色レンズは素材の着色の度合いが均一であり, そのため周辺部の色が薄くなり瞳孔径が大きくなると色が薄くなる。

HOYA の非球面レンズ FY-60AD は YA60BBR をベースに 2007 年 7 月に発売された。設計コンセプトは「IOL が眼球内に固定された場合, わずかな偏みは起こり得ることであり, その際に増加する収差を少なくする」というものであり, ABC (aspheric balanced curve) デザインと謳っている。球面収差設計値は  $-0.18$  であり, AcrySof と類似する。FY-60AD も中心部を薄くしたデザインである。

上記以外に, Bausch & Lomb の SofPort は旧 SofPort SE (LI61SE) をベースに開発された非球面

IOL である。光学部はシリコン素材で, 直径 6mm, 両凸シャープエッジ, ループは青色 PMMA 素材である。SofPort の前面, 後面とも非球面設計で, 中心部より周辺まで同様な屈折率で設計されている。前述のような負の球面収差を有する非球面 IOL と違い, SofPort は IOL が偏位してもコマ収差, 乱視など他種類の収差が生じないように, IOL 自体はゼロ収差に設計されている。偽水晶体眼の球面収差は IOL の偏位, あるいは瞳孔径の変化によって変わらないことが特徴である。

上記で紹介した各種の非球面 IOL はそれぞれの基本設計思想が異なるため, 非球面係数と IOL 自体が有する収差値も異なる。若年健常眼, 球面 IOL および各種非球面 IOL の角膜収差補正後の結果を表 2 に示す。

## 6. 非球面 IOL と瞳孔径

先に述べたように, 球面収差は近軸光線と遠軸光線の焦点のずれによるものであるため, 瞳孔径が大きいほど IOL の周辺部を通過する光線の量が増え, 球面収差は大きくなる。逆の言い方をすれば, 非球面 IOL は瞳孔径が小さければ球面 IOL と大きな違いを生じない。明所で瞳孔径が 2mm 以下の場合, 球面 IOL でも眼球視機能に影響するほどの収差を生じない。一方, 暗所あるいは薄暮時, 瞳孔径が 5mm 以上になる場合, 非球面 IOL はその特徴を発揮する。非球面 IOL は, 瞳孔径の大きな若年白内障患者あるいは夜間運転など暗所視力が必要な患者に対して有用と考えられ, 非球面 IOL では制動距離と夜間運転の安全性を改善するとの報告がある<sup>12)</sup>。

## 7. 非球面 IOL の偏位と傾き

先に述べた AMO, CANON STAAR, Alcon 社の各非球面 IOL は, X 軸方向のずれに対してそれぞれ 0.8mm, 0.5mm, 0.4mm, 傾きに対してはそれぞれ  $10^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$  まで視機能に影響がないと公表している。しかし, 前稿の球面収差の基礎で述べられたように, 光軸からずれが生じたとき, 非球面 IOL は球面 IOL

よりも非点収差，コマ収差が大きくなる。したがって，非球面 IOL は中心固定が重要になってくるが，各社のレンズそれぞれの中心固定が良好であったとの報告がある<sup>13, 14)</sup>。HOYA 社の FY-60AD は発売後間もないため報告はないが，偏心が 0.5 mm までは球面 IOL よりも優れたコントラストが得られるとしている。

## 8. 白内障手術の今後

非球面 IOL は波面収差技術によって生産されたものであるが，wavefront LASIK のように患者一人一人に合わせて IOL をカスタマイズするわけではない。しかしながら，非球面 IOL に関する数多くの研究結果は，非球面 IOL が白内障患者の矯正視力，暗所でのコントラスト感度，全体視機能を実際に向上できることを証明しており，IOL の球面収差補正量も様々である。近い将来，白内障手術は術前の角膜球面収差に合わせて，その患者にとってベストと考えられる IOL を選択し，付加価値を伴った屈折矯正手段となると考えられ，その際に非球面 IOL は最適な選択になるであろうと考えられる。

## 文 献

- 1) 小倉敏布：写真レンズの基礎と発展．朝日ソノラマ 192-195, 2003.
- 2) 趙 秋玲, 王 肇圻, 张 春书：非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用．光子学报 31: 1380-1381, 2002.
- 3) Beiko GH, Haigis W & Steinmueller A: Distribution of

corneal spherical aberration in a comprehensive ophthalmology practice and whether keratometry can predict aberration values. J Cataract Refract Surg 33: 848-858, 2007.

- 4) Holladay JT, Piers PA et al: A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes. J Refract Surg 18: 683-691, 2002.
- 5) Wang L, Dai E et al: Optical aberrations of the human anterior cornea. J Cataract Refract Surg 29:1514-1521, 2003.
- 6) Artal P, Berrio E et al: Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 19: 137-143, 2002.
- 7) Werner W & Roth EH: Image properties of spherical aspheric intraocular lens. Klin Monatsbl Augenheilkd 214: 246-250, 1999.
- 8) Mester U, Dillinger P & Anterist N: Impact of a modified optic design on visual function: Clinical comparative study. J Cataract Refract Surg 29: 652-660, 2003.
- 9) 大谷紳一郎, 宮田和典：非球面眼内レンズ．眼科手術 18: 353-355, 2005.
- 10) 姚 克, 陆 道炎：非球面等视像后房型人工晶体的临床应用．中华眼科杂志 25: 262-264, 1989
- 11) 潘 永称, 汤 萍：非球面等视像后房型人工晶体的临床应用．蚌埠医药 10(3): 5-7, 1992.
- 12) Owsley C, Stalvey BT et al: Visual risk factors for crash involvement in older drivers with cataract. Arch Ophthalmol 119: 881-887, 2001.
- 13) Nejima R, Miyai T et al: Prospective intrapatient comparison of 6.0-millimeter optic single-piece and 3-piece hydrophobic acrylic foldable intraocular lenses. Ophthalmology 113: 585-590, 2006.
- 14) 魚里 博, 川守田拓志：囊内に圧縮固定された眼内レンズの光学特性変化．眼科手術 19: 541-545, 2006.

---

 総 説
 

---

## 高齢者の視認性と視覚的注意

和氣典二<sup>1)</sup>, 葭田貴子<sup>2)</sup>, 和氣洋美<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 中京大学心理学部, <sup>2)</sup> 東京大学工学部, <sup>3)</sup> 神奈川大学人間科学部

## Visual Performance in Elderly Persons

Tenji Wake<sup>1)</sup>, Takako Yoshida<sup>2)</sup> and Hiromi Wake<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> School of Psychology, Chukyo University

<sup>2)</sup> School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>3)</sup> Department of Human Science, Kanagawa University

---

この報告では、視認性や視覚的注意という観点から高齢者の特性を論じた。視認性については、明視性や可読性の新しい観点からの測定法を提案した。第一の方法は、一定の条件の下で実験者が指示する文字を観察者に読み取らせるという方法である。その結果によると、照明光による照度が低くなったり、コントラストが小さくなったり、文字が小さくなると、可読性は低下する。とくに、高齢者は若年者に比べて暗い照明、低コントラスト、小さい文字になると、成績が著しく低下する。更に読みやすさと正答率の関係をみると、照度が低いところで、高齢者は正答率が高くて読みやすさの程度が低い。第二の方法は、固視点を中心にして一定の視野範囲内（提示視野内）に視標を提示して正答率を求めるというものである。その結果、提示視野が大きくなると明視性が低下する。とくに、明視性の低下は高齢者に著しい。視覚探索では、高齢者と若年者の比較を目標刺激と妨害刺激との色差を変数に行った。それによると、目標刺激検出の反応時間は若年者より高齢者の方が長く、臨界色差も大きい。更に、近年数多く取り上げられている変化の見落としについて、加齢の効果を検討した。その結果では、高齢者群の反応時間は若年者群のそれより長かった。高齢者では提示刺激数が増えたり、提示時間が短いときに若年者より長くなる。更に、one shot 法を用いると、高齢者の方が顕著に成績が劣っていた。(視覚の科学 28: 146-156, 2007)

キーワード：視認性，視覚的注意，高齢者

---

We propose two methods of examining readability and legibility. In the one method, the subjects read letters on a white background pointed out by the experimenter. The other method involves identifying the color and shape of a target presented within a certain visual field around a fixation point (presented field). Results are as follows; (1) Readability decreases with decrease in letter size, contrast between letter and background, and illuminance. (2) Visual performance in elderly persons is lower than that in younger persons under poor conditions (low illuminance, small letters and low contrast). (3) The percent correct of color and shape for elderly persons is lower than for younger persons with a large presented field. In visual search examination, the color difference between target and distracter is varied. The reaction time of elderly persons is longer than that of younger persons with a large presented field. The critical color difference for elderly persons is larger than that for younger persons. We also introduce the findings for change blindness in order to understand the information processing system. The results for the one-shot paradigm imply that percent correct of elderly persons is lower than that of younger adults.(Jpn J Vis Sci 28: 146- 156, 2007)

Key Words: Readability, Visual attention, Elderly persons

---

別刷請求先：143-0025 東京都大田区南馬込1-33-13 和氣典二  
(2007年9月10日受理)

Reprint requests to: Tenji Wake

Minamimagome 1-33-13, Ota-ku, Tokyo 143-0025, Japan

(Received and accepted September 10, 2007)

## 1. ま え が き

最近我々は、高齢者の quality of life (以下QOL) の研究を進めている。その一環として、視覚関連テスト (VFQ-25, 日本語 Ver 1.3) を健常高齢者 (0.7以上の視力を有するもの) と高齢ロービジョン者 (0.3以下の視力を有するもの) に適用した結果によると、高齢ロービジョン者の遠見視力と近見視力の評定点が顕著に低いことを見出した。更に日常行動の困難さを調べると、視認性、家事・身だしなみ、身の回り行動の3因子が抽出された。とくに、視認性因子は遠見視力と近見視力と強く関係する (吉本直美ら: 高齢視覚障害者の QOL について. 日本人間工学会第47回大会, 2006) ことが指摘された。だが、家事因子や身の回り因子はもの見やすさや見つけやすさとも関係しているように思える。他方、遠方の路面の情報を自動車の車内に提示することが行われている。その一つが night vision system である。これを利用しようとする、視認性以外に視覚的注意が問題となる<sup>1, 2)</sup>。そこで、視認性と視覚的注意に関する研究を概観する。

その課題に関して、ここでは以下の二点に関して述べる。1) 高齢者や眼疾病の視認性を日常場面に近い観点から検討する。2) より自然な場面に近い自然画像などを実験刺激として用いることにより、場面のもつ文脈や観察者の関心などが場面内で視線や注意を向けられる対象位置の決定に及ぼす影響を考慮する。

## 2. 加齢による視機能の変化

種々の生理的機能は加齢とともに低下する。視機能といえども加齢による低下は否応なく進行する。その様子を模式的にあらわしたものが図 1a である。高齢者の視覚機能の特徴は水晶体の透過率の低下、縮瞳、散乱光の増大、調節機能の低下に加えて眼疾患にかかりやすいことを挙げることができる。その結果として、グレアに弱い、視力の低下、視野の感度の変化、色覚の変化などが観察される。とくに、市川<sup>3)</sup>が指摘するように、50歳を過ぎると加齢による視力の低下が顕著に観察される。これを図 1a にあてはめると、視機能といえども例外でないことがわかる。そこに眼疾病があらわれると、視力の低下や視野の感度の低下が急激にあらわれる。更に、若年者と高齢者の違いは、図 1b のように環境が悪い条件になると観察されるのではないだろうか。たとえば、低い照明や妨害物のなかから目標刺激を見つけ出すというときに若年者はほとんど影響されなくても、高齢者は大きな影響を受ける。ここでは、図 1b に関する事柄を視認性や視覚的注意の面から考えてみる。合わせて、これらに関するいくつかの知見を紹介する。

## 3. 高齢者の視認性

古くから研究されている視認性の研究は、1点を固視して光の検出閾、色の識別閾や文字の可読閾を測定する。このようにして得られた結果は視覚の基

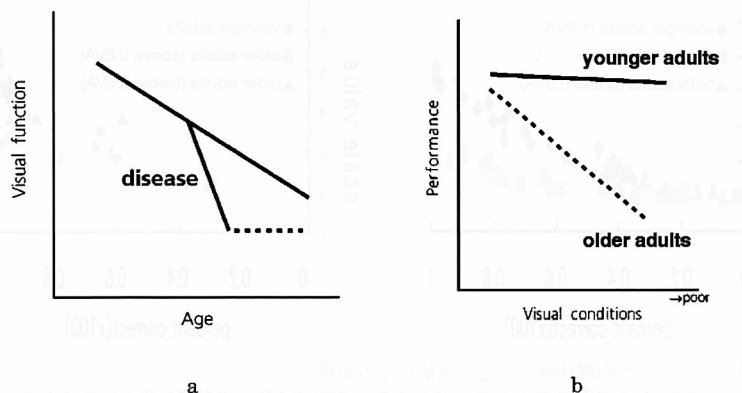


図1 加齢による視機能の低下および種々の条件における高齢者と若年者の視覚パフォーマンスの比較



礎的研究としては有効であるが、日常生活とかけ離れたものである。また、このような測定は時間がかかる場合が多く、被験者とくに高齢者やロービジョン者に多大な負担をかける。このようなことを念頭に視認性の簡便な測定法を提案した。

1) 視認性の簡便な測定法

視認性の測定においてどのような情報を得たいかは重要な問題である。例えば、2色閾法は色覚のメカニズムを知るといことで用いられてきた。だが、その方法を用いた実験は測定時間がかかりすぎるとい欠点があり、高齢者や眼疾病を有する人に適用しにくい。また、日常生活とはかけ離れた条件のもとで行われるため、それらの知見を日常生活に直接利用できない。そこで、簡便法の提案が待たれていた。

被験者から30cm前方の台の上に漢字やひらがな文字を提示する。実験者が任意に指示した文字を被験者は声を出して読む。ある一つの条件で10個の文字を読ませ、その正答率を求めた。このテスト文字を照明する光源は3波長蛍光ランプであり、その色温度は3,000K、5,000K、6,700Kの3種である。被験者は若年者群（大学生）と高齢者群（65～74歳）であり、若年者群の視力は矯正視力を含んで1.0以上、高齢者群の視力も1.0以上であったが、近視力は0.3～1.0までばらついていた。そこで、近視力が0.6以上と0.5以下の2グループに分けてデータを整理した。この実験では正答率と同時に読みやすさの程度を評定尺度法で求めた。文字を照明する照度は変えられ、

正答率と読みやすさを求めた。文字の大きさは $0.38^\circ \times 0.38^\circ$ である。それによると、低照度のところで若年者群、高齢者群A（0.6以上）、高齢者群B（0.5以下）に顕著な差が観察され、若年者群、高齢者群A、高齢者群Bの順に正答率が低下している。この結果には加齢の効果と視力の効果が含まれる<sup>2)</sup>。そこで筆者は、白内障の手術を受け、人工水晶体を装着した視力1.0以上の高齢者群の成績を視力1.0以上の若年者群と比較した。若年者群はどの照度のもとでも90%以上の正答率を示しているが、高齢者群は広汎な照度にわたって低い成績を示した。視力は若年者群とほぼ等しいから、成績の低下は加齢の効果であると考えられる。とくに、照度の低いところで高齢者群の成績は若年者群に比べて低かった。これは条件の悪いところで高齢者群と若年者群の間に差が出るという図1bの考えが支持されていることを示している。

この研究結果では、照度以外に文字の大きさ、文字と背景とのコントラストの効果も示されている。その上、ひらがな文字は漢字より高い正答率を示すが、光源の色温度が変わっても若年者ならびに高齢者の成績はほぼ変わらない。また、この研究では上述のように読みやすさの程度を評定尺度で測定している。使用した評定尺度は7段階評価である。それによると、照度が高くなると読みやすさの程度も高くなっている。また、コントラストが大きくなったり文字が大きくなったりすると、評定値も高くなる。しかも、若年者群の評定は高齢者群のそれより高い

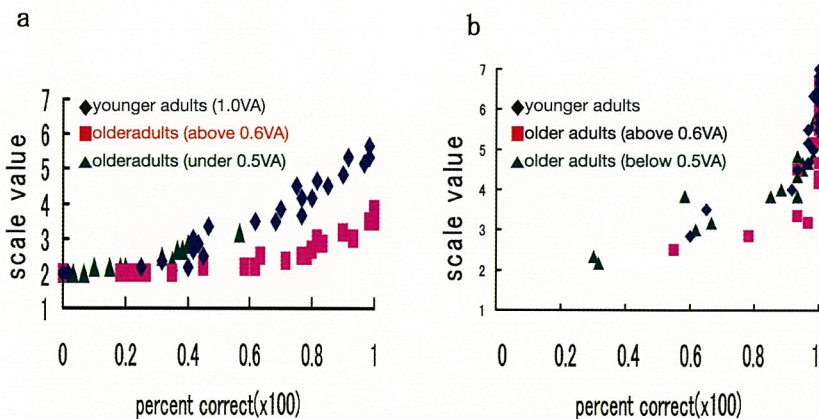


図2 正答率と心理評価（評定尺度値）との関係  
3,000Kの照明光のもとで、若年者群、高齢者A群、高齢者B群の結果である。  
aは30 lx、bは1,000 lxの照度ときの正答率と読みやすさに関する評定尺度の尺度値である。（文献2）より引用）

し、視力0.6以上の高齢者群の方が0.5以下の高齢者群より高い。そこで、正答率と評定値との関係を示したものが図2に示されている。図2aは10lxのときの結果であり、図2bは1,000lxのときである。図2aによると、正答率が高いところでは若年者の評定値は高い。だが、高齢者の評定値は必ずしも高くなっていない。図2bのように照度が高いときには、若年者と高齢者の差が小さくなっている。つまり、読みやすいという心理的評価はある程度正答率に依存するようである。だが、100%の正答率を示しても、高齢者のなかには低い評定値を示す人がいる。

## 2) 周辺視機能を含む視認性

日常生活では1点固視の状態では視対象を見ることはほぼなく、次々と眼を動かしたり、色々なものに注意を向ける。そこで、自然視に近い状態で視認性を測定する方法を検討した。両眼で一点を固視している状況で、実験者があらかじめ決めた視野範囲内に視標を提示する。この視野を提示視野と呼ぶ。この提示視野を変数にして正答率を求める。この方法の特徴は、一点を固視するが眼球の動きや注意を移動することを認めていることである。ここで用いた視標は $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ のコの字のパターンであり、その方向が上下左右で変えられる。視標の色はアカ、キ、ミドリ、アオである。視標の輝度は $58.0 \text{ cd/m}^2$ であり、同じ輝度のシロ背景に重ねて提示される。色視標を色名で報告したり、コの字パターンの方向（形状）を報告する。視標の提示時間は200msecである。

この測定法の特徴は提示視野の大きさに対する正答率をプロットすることができるので、周辺視の機能についての情報がある程度知ることができることにある。ここで、視力が1.0と0.3のときのデータをみよう<sup>9)</sup>。まず、色名法の結果と形状報告法の結果を比較すると、色名法の結果の方が形状報告法の結果より高い正答率を示している。この研究に参加した観察者は、若年者群が6名と高齢者群が6名である。若年者群は視力1.0以上であり、高齢者群は白内障手術を受け、術後2週間～1年を経過している。彼らの視力は1.0以上である。結果は図3aとbに示されている。それによると、若年者群では視力0.3の形状報告の結果以外は提示視野が広がっても正答率は低下しないが、高齢者群の場合には提示視野が広がるにつれて正答率は低下する。また、色名法の成績の方が形状報告のものより優れている。これらの知見はすでに報告されているものと矛盾しない。

この事実は眼球を動かすとか、注意が移動しているということの説明されない。この研究では刺激が提示されるまで固視点を見ているので、提示視野が拡大すると周辺視となり、成績の低下が生じるのかもしれない。そこで、提示時間を300 msecにして眼球や注意を移動しやすくしても、提示視野が拡大すると成績は低下していた。いずれにせよ、提示視野が拡大するとか、視力が低下するというように観察条件が悪くなると、高齢者群の成績は若年者より顕著に低下するという図1bの考えを支持している。

## 3) 色差の効果

上記の研究では色指標が用いられている。すると、背景との色差が成績に影響することが考えられる。現実には、シロとアカの色差はシロとミドリの色差より大きいにもかかわらず、シロ背景のアカとアオ視標の成績はミドリとキ視標の成績より高いという結果が得られている。これは色差では説明しにくいことを示している。そこで、背景の色をマゼンタ、シアン、キに変え、視標をアカ、キ、ミドリ、アオにした。ただしキ背景のときにはキ視標でなくシロ視標にした。視標と背景の輝度は $58.0 \text{ cd/m}^2$ であり、色度のみが異なっている。その結果をみると、マゼンタ背景のときはアカやキ視標の成績が大きな提示視野のところで低く、キ背景ではミドリ視標の、シアン背景ではキ視標の成績が低下している。そこで、それらの結果を視標と背景との色差と正答率との関係を検討したところ、若年者・高齢者とも色差の効果は観察されていなかった<sup>9)</sup>。

## 4. 視覚的注意

日常生活では、見えにくいというより見つけ出しにくいということが度々問題になる。だが、他の人にその部位を指摘されたり、一度その存在に気づいたりすると、次回からは容易に気づく。何故、このようなことが生じるのか。また、高齢者は若年者より気づきにくいのであろうか。

### 1) 視覚的探索 (visual search)

目標刺激の周りに妨害刺激があると、目標刺激と妨害刺激が類似しているほど目標刺激の検出は難しいが、大きく異なっていれば容易に検出できる<sup>9)</sup>。前者が逐次処理の場合であり、後者が並列処理の場合である。この並列処理をポップアウトという。これについて我々の研究をみよう。図4のような刺激画面を用いて、一つだけ他とは異なる文字を検出し、定められた



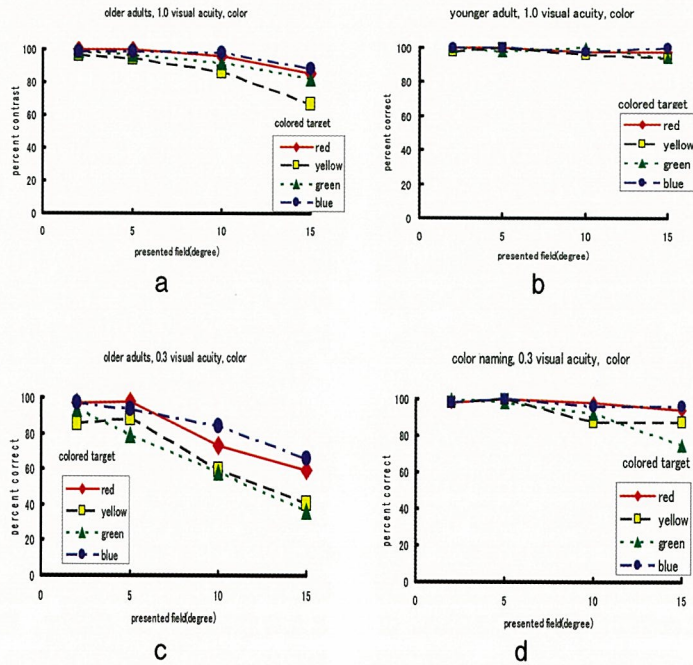


図3 a 高齢者群と若年者群の提示視野に対する色名報告の正答率  
 a：高齢者群（両眼視力：1.0），b：若年者群（両眼視力：1.0），c：高齢者（両眼視力：0.3），d：若年者（両眼視力：0.3），同じ視力のもとでも，高齢者の成績は若年者より低い。（文献2）より引用

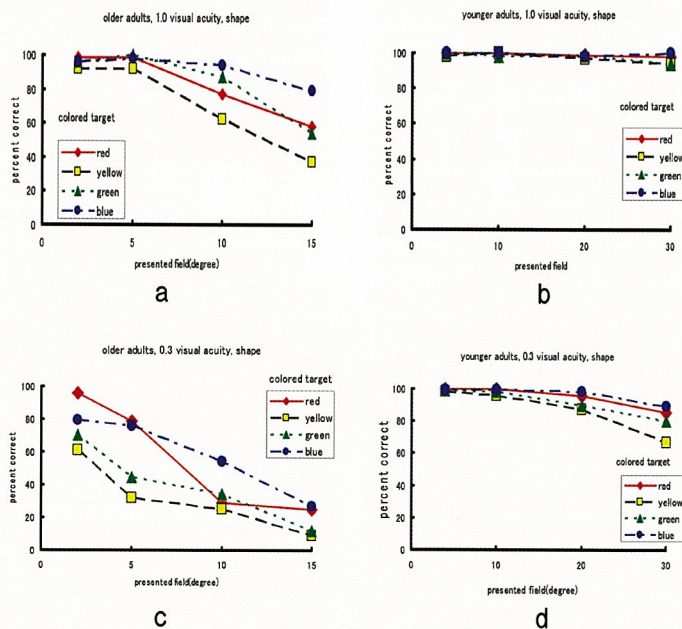


図3 b 高齢者と若年者の提示視野に対する形状報告の正答率  
 a：高齢者（両眼視力：1.0），b：若年者（両眼視力：1.0），c：高齢者（両眼視力：0.3），d：若年者（両眼視力：0.3），視力が同じでも，高齢者の形状報告の成績は若年者より低い。（文献2）より引用

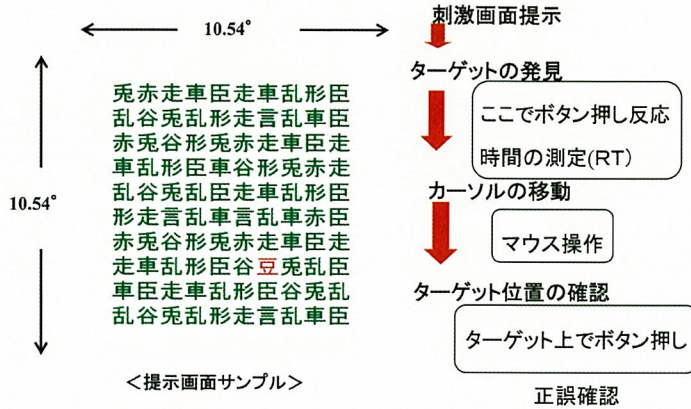


図4 視覚的探索の実験画面のサンプルと手続き  
実験は明室でなされた。(文献1,2)より引用)

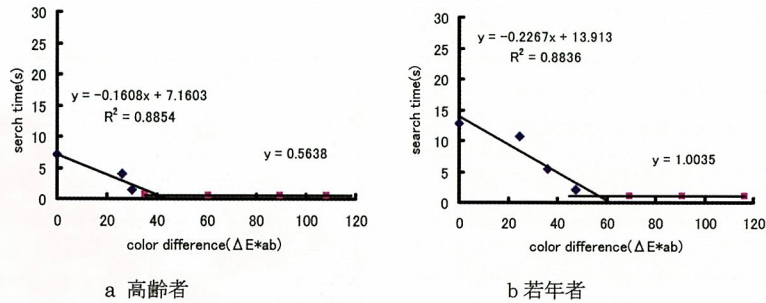


図5 視覚的探索における色差の効果  
若年者の臨界色差 ( $\Delta E^*ab$ ) は41.02であり, 高齢者の臨界色差 ( $\Delta E^*ab$ ) は56.95である。(文献1,2)より引用)

ボタンを押すことによって反応時間を求める。この画面では豆がアカ字であり, 他はミドリ文字である。アカ文字が目標刺激であり, ミドリ文字が妨害刺激である。ところで, 高齢者も若年者と同様にポップアウトすることは知られている<sup>1, 2, 4-6)</sup>。また, 高齢者群も若年者群も色差が大きいアオとシアン ( $\Delta E^*ab = 57.02$ ) やミドリとキ ( $\Delta E^*ab = 32.38$ ) の組み合わせでは, 提示文字数が増しても反応時間は増大しないが, ウスムラサキ同士 ( $\Delta E^*ab = 0$ ) や色差の小さいキミドリとキ ( $\Delta E^*ab = 11.06$ ) の組み合わせでは, 反応時間は文字数の増大とともに増大している。すると, 色差が小さければ, 逐次的な処理が行われていると考えることができる。だが, 色差が大きければ提示文字数が増しても反応時間は増大しないから, ポップアウトしていると解釈することができる<sup>4)</sup>。これらの

知見は若年者群と高齢者群に共通して認められているから, 両者は似た情報処理をしているとみなせる。高齢者が若年者と同じ処理をしていることは多くの研究によって支持されている<sup>6-9)</sup>。

それでは, 目標刺激と妨害刺激との類似性の程度を変えると, 逐次処理からポップアウトまで変わることになる<sup>10)</sup>。その処理の変化点を臨界色差<sup>1)</sup>として高齢者群と若年者群に異なる違いがあるかを検討した。図5は反応時間と色差との関係のみたものである。図5によると, 色差の増大とともに反応時間は徐々に低下する。それ以上の色差になると反応時間は低下せず一定値を示すようになる。その境目が臨界色差である。高齢者群と若年者群を比較すると, 若年者群の方が色差の小さいところでの反応時間は短いし, 臨界色差も小さい。若年者群は視力が低下



しても反応時間はさほど影響されないが、高齢者群は視力が低下すると反応時間は顕著に長くなる。若年者群と高齢者群のこのような違いは何を意味しているか。一つには高齢者群は認知過程の種々の情報処理レベルでの処理速度が若年者より遅れ、これが累積して反応成績を低下させる<sup>11, 12)</sup>。これは一般的遅延仮説である。この考えに対して、妨害刺激による干渉量という情報処理過程を問題とする考えがある。妨害刺激が少ない場合には、若年者と高齢者とは差がないが、妨害刺激がある数以上に増えると、高齢者の成績は低下する<sup>13, 14)</sup>という考えである。これらの考えは現時点ではどちらも支持されているが、後者は図1bから予測される。

## 2) 周辺視あるいは注意の外側

ここ数年、二つの画像を時間的・空間的に比較して間違い探しをしたり、短時間に同時に提示される複数のものを認識して報告したりするのが簡単ではないというデモンストレーションが色々紹介されている。これらのデモンストレーションには、近年の高次脳機能研究から得られた知見を忠実に転用したものが見受けられる。図6にそれらのうち変化の見落とし (change blindness) と呼ばれる例を示す。AとB (ごく一部のみAと異なる) の二つの画像を継時的に提示するが、それらの間にブランクを設ける。すると、変化しているものの検出は容易でなくなる。このようなデモンストレーションをみると、人は案外視野全体を見ているつもりでも、自分が興味や関心を向けたものしか見ていないことに気づく。眼球なし注意を動かせる状態にしている、観察者の興味や関心に拘束されてしまい、一定の空間内のどこを注視したり、注意しているかに偏りが生じる。

更に、視野検査のように人工的に色や形の見え方を評価すると、文字の可読性や色の識別性は錐体密度の変化に応じて、つまり偏心度にしたがって低下する。だが、日常経験する視野はそれに反してその隅々まで高い空間解像度を保っているように見えるし、色も周辺部までははっきりと見える。だから、我々が日常経験する視野は何らかの“動作原理”によってこれを感じさせないようにしているとも考えられる。このように考えると、日常経験する視野の大部分は網膜上の視感度を表現しているのではなく、むしろ眼球運動や視覚的注意といった空間探索行動と脳内処理によってもっともらしく作られた仮想表象、ないし巨大な錯視を見せられているのではない

かという議論が成立する<sup>15, 16)</sup>。

## 5. 変化の見落とし

O'Reganら<sup>17)</sup>は、これらの問題の一端を自動車運転時のフロントガラスの光景を模したデモンストレーションで鮮やかに示した。彼らはコンピュータの同一画面位置に交互によく似た2枚の画像を継時的に提示し、変化して見えるものを検出するという課題を与えた。2枚の画像が入れ替わる際に自動車のフロントガラスに一瞬泥がはねたような (mud splash) マスクが飛び散ると、観察者は画面の変化になかなか気付かない。更に、当該変化に注意を促されるまでは、あたかも同一の刺激が連続提示されているように感じられる。これは変化の見落とし課題と呼ばれ、多くの例が報告されている<sup>18, 19)</sup>。たとえばフリッカー法といわれるように泥はねの代わりに2枚の画



図6 自然画像を用いた変化盲刺激の例<sup>1)</sup>  
以下のインターネットのページから、文献17)の刺激を体験することができる。  
[http://nivea.psych.univ-paris5.fr/Mudsplash/Nature\\_Supp\\_Inf/Movies/Movie\\_List.html](http://nivea.psych.univ-paris5.fr/Mudsplash/Nature_Supp_Inf/Movies/Movie_List.html)  
また、本文に記載された他の見落とし課題のいくつかは、以下のURLからみることができる。  
[http://viscog.beckman.uiuc.edu/djs\\_lab/demos.html](http://viscog.beckman.uiuc.edu/djs_lab/demos.html)



像の間に一定時間以上ブランク画面が挿入される場合<sup>20)</sup>、瞬きやサッカード眼球運動の間に画像が入れ替わる場合<sup>20, 21)</sup>、視対象が短期間遮蔽されその間に変化する場合<sup>22)</sup>、刺激変化が徐々に生じる場合などにも同様に変化の見落としが生じることが知られている<sup>23)</sup>。

### 1) 視覚情報の処理と見落とし

ところで、サッカード眼球運動は毎秒4回前後生じるので、日常生活における視対象の変化、例えば信号の色の変化や自動車の出現を見落とす可能性はかなり高い計算になるが、実際の日常生活では見落としは頻繁には起こらない。なぜ頻繁に起こらないかについてはいくつかの説明がある。そのうち有力なものの一つに、日常場面では視対象の変化は輝度変化や低次仮現運動といった過渡的な信号 (visual transient) を伴っており、これらは人間の注意を引きやすいために、眼球が静止している間にこの信号が観察者の注意を変化対象位置へ誘導するので見落としが回避されるという考えである<sup>23, 24)</sup>。事実、観察者の注意が変化しているものに向けられていれば、変化は容易に知覚される。また、一度変化に気づいてしまうと観察者は変化対象に容易に注意を向けることができるため、変化の見落としは繰り返されない。

このほかに変化の見落としの特性として、眼球の注視位置は必ずしも変化検出位置を予測していない。だから、注視したからといって変化を必ず検出していることにはならない。これは、中心視というより視覚的注意が向けられている位置が重要である<sup>25)</sup>ことを示している。また、一度に変化が検出可能な情報量、は静止している画面では視対象数にして4±1個程度である<sup>26, 27)</sup>が、画面内を動く視対象の場合には1～2個程度に減少するようである<sup>28)</sup>。したがって、自動車運転時のように複数の視対象が視野内を刻々と運動するような状況では、静止している対象よりも対象の変化に対して見落としが生じやすい状況になっている。

### 2) 変化の見落としと加齢

筆者らは最近、変化の見落としについて高齢者群と若年者群の比較をした<sup>2)</sup>。使用した画面のサンプルは図7に示されている。この研究では、目標刺激の色が変わる場合と方向が変わる場合とがある。この変化を検出して反応時間を求めるわけだが、off-time (ブランク画面) は200 msecで固定され、セットサイズ (刺激数) と on-time (提示時間) が変えられた。この研究では、観察者が応答するまで実験画面は繰

り返し提示され、画面提示から応答までの反応時間が測定された。その結果によると、セットサイズが増えると反応時間が長くなる、ということはどの提示時間でも認められる。これは逐次探索がなされていることを示しており、葭田ら<sup>29)</sup>の結果と矛盾していない。また、高齢者群は若年者群より長い反応時間を示している。つまり、高齢者は若年者より変化検出が容易でないことになる。何故なのであろうか。そこで Rensink ら<sup>20)</sup> にならい、次式に基づいてブランク画面の提示時間の間を保持する項目数 (hold) を求めた。

$$\text{hold} = \frac{(\text{on-time} + \text{off-time})}{\text{search slope}}$$

ただし、search slopeはセットサイズに対してプロットされた反応時間の勾配、これは1個の刺激を処理する時間でもある。高齢者群も若年者群も提示時間が長くなると、保持する項目数は増大する。若年者の方向の変化検出では、提示時間が800 msecのとき約9.5個、色検出が7.5個、高齢者の方向検出では6.8個、色検出では7個であるというように、保持項目数は若年者の方が高齢者より多い。

高齢者群と若年者群の反応時間の差は何を意味するのであろうか。この研究では200 msecのブランクが設けられている。その間、第1画面が記憶にとどめられ、それと第2画面との照合が行われると考えられる。このような記憶過程をワーキングメモリ (作動記憶) と考える (Yoshida et al: Visual search for change is memory limited, but tactile search for change is process limited. 45th Annual meeting of the

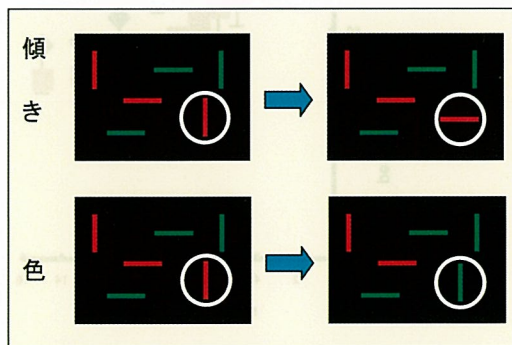


図7 変化の見落としの画面のサンプル  
上段は方向の変化、下段は色の変化である (和氣, 未発表)。



Psychonomic Society, 2004) と、この記憶に加齢の効果があらわれたといえるかもしれない。また、Rensink らの考えが正しければこのときの保持項目数に加齢の効果があらわれたということになる。

この問題を取り上げるため、我々は one-shot 法を採用した。第1画面と第2画面はブランクを挟んで1回だけ提示される。このとき提示時間は800 msecであり、ブランク時間は400 msecである。また、上述の研究と同様に色と方向の検出の正答率を求めた。その結果は図8に示されている。色の変化の場合、セットサイズが8個までは高齢者群と若年者群の間に差は認められていないが、セットサイズがそれ以上になると、高齢者群の正答率は若年者群のそれよりわずかに低い。方向の場合には、セットサイズが4個までは両群に差はないが、それよりセットサイズが増え、高齢者群の方が若年者群のものよりわずかに低くなっている。しかも、両群ともに方向変化の方が色変化より正答率が低い。これらの知見は記憶における加齢の効果を示すものであろうが、図1bのように高齢者は妨害刺激の数が増えると若年者より影響されるようである。だが、両群の差はごくわずかであり、加齢の効果がワーキングメモリの差だけではないように思える。

### 3) 注意の構えと不注意による見落とし

1980~1990年代にかけての視覚的探索研究では、空白の画面に刺激が1個提示される場合や非常に顕著 (salient) で目立つポップアウト刺激が提示される場合には、他の視覚対象に注意を焦点化していても

容易に気付くとされていた<sup>30)</sup>。今日では、これらの刺激ですら他の部位に強く注意が向けられる(焦点化)場合や実験参加の経験のない人を観察者とした場合には、見落としが生じたり、うまく報告されないということが議論されている<sup>31, 32)</sup>。更に視野内を移動する視対象を注意しながら追跡している場合にも同様の知見が認められる<sup>33, 34)</sup>。これを持続性不注意盲 (sustained inattentive blindness) という。

これらの状況で共通するのは、刺激に対する予期や期待が乏しいことにより、検出すべき顕著な刺激に対して注意の空間的な配分や注意の構えが不適切な状態になっている点である。これは、観察者の予期や期待に基づく注意の構えが適切でなければ、静止している閾上の刺激であっても、潜在的に見落とされる可能性がある。それゆえ、注意や注視といった観察者の関心を適切に保ったり、聴覚や触覚などのほかモダリティから警告信号を与えることによって視覚的注意を適切な方向に誘導したりすることは、医用機器や道路交通安全などの応用的見地から今後とも重要である。

### 4) 自然画像は認識しやすいか

眼球運動や視覚的注意といった興味ないし関心が向けられている空間の外側の領域はどうなっているのだろうか。高次視覚情報処理が及ばない暗黒世界 (dark side) なのだろうか。注意の焦点化は眼球を動かして中心視領域を特定の空間や対象にもってきたり、視覚的注意を特定の空間ないし対象に向けるということである。では、注意の焦点化がなさ

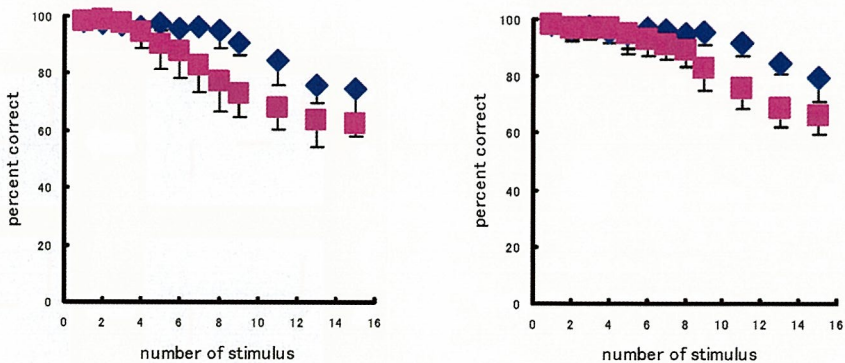


図8 One shot法による若年者と高齢者の比較  
 左図は高齢者、右図は若年者の結果である。色の変化の方が方向の変化より正答率が高い。なお、若年者の方が高齢者より正答率が高い(和氣, 未発表)。  
 ◆: 色, ■: 方向

れている部位の外側はどうなっているのでしょうか。注意の焦点化の外側でも、動物や乗り物の自然画像は高速で容易に検出できるという<sup>35)</sup>。これが超高速カテゴリー化 (ultra rapid categorization) といわれるものである。この現象は図6のような自動車などを刺激とした場合の種々の見落とし研究と矛盾する。そのため、この矛盾を解決するための研究が行われている。また、観察者が変化に気づかなくても、眼球運動などの運動指標が視覚対象の変化を敏感に反映していることもある<sup>36, 37)</sup>。このような視覚システムのあたる種無意識化・自動化された側面と、視環境設計や種々の機器を使用するときとの関係について、今後とも検討されるべきである。

## 6. 最後 に

高齢者と若年者の違いは視力などの生体内の機能低下や環境状況がよくないときに顕著にあらわれてくる。ここに加齢の問題の本質があるように思える。つまり、視覚刺激入力側だけの問題ではなく、高次の情報処理の問題も加齢による機能低下に含まれる。ここで、加齢の影響を説明すると思える三つの見解がある。1) 基本的な処理レベルが低下しているので、認知的処理時間が遅れる。2) 記憶・注意の資源量に代表される心理的側面の資源容量に関係する機能が加齢に伴って低下する。3) ワーキングメモリへの入出力制御と抑制処理が加齢の影響を受ける。いずれの論議ももっともな面があるが、従来、入力側の影響だけを考えてきた事柄に対する反省もあろう。現在の研究の趨勢をみると、視覚をはじめ他の感覚系の研究は記憶などより高次の処理を含めて考えようとしている。それは一つの方向には違いないが、それには今後の研究がどの方向に向かうかという問題も含まれる。

## 文 献

- 和氣典二, 葎田貴子: 視覚特性. 照明学会編, 市街地交差点の交通視環境に関する研究調査委員会報告書, 53-63, 照明学会, 東京, 2007.
- 和氣典二, 葎田貴子, 和氣洋美: 高齢ロービジョン者の視覚. 和氣典二編, 高齢視覚障害者の認知機能と環境設計に関する研究, 平成14年-平成17年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)(1)) 成果報告書 9-34, 2007.
- 市川 宏: 老化と眼の機能. 臨眼 35: 9-26, 1981.
- 棚倉佳代, 和氣典二: 高齢者における並列処理と逐次処理—色差を変数とした場合. 日本人間工学会誌 38: 254-255, 2002.
- 和氣典二: ロービジョン者の視行動とバリアフリー. 眼鏡ジャーナル 6: 3-12, 2002.
- Wake T, Wake H et al: The effect of the color differences and the position of target on visual search in low acuity vision. Proceedings of the Fifteen Annual Meeting of the International Society for Psychophysics 384-388, 1999.
- Madden DJ: Selective attention and visual search; Revision of an allocation model and application to age differences. J Exp Psychol Hum Percept Perform, 18: 821-836, 1992.
- MaCalley LT, Bouwhuis DG & Juola JF: Age changes in the distribution of visual attention. J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci 10: 34-47, 1995.
- Humphrey DG & Kramer AF: Age differences in visual search for feature, conjunction, and triple-conjunction target. Psychol Aging 12: 704-717, 1997.
- 和氣典二: 視覚探索における臨界色差について. 視覚の科学 24: 36-40, 2003.
- Cerela J: Generalized slowing in Brinley plots. J Gerontol Psychol Sci Soc Sci 49: 65-71, 1990.
- Salthouse TA: Speed of behavior and its implications for cognition. In: Birren JE & Schaie KW eds, Handbook of the Psychology of Aging, 2nd Ed, 400-426, Van Nostrand Reinhold, New York, 1985.
- Allen PA, Weber TA & Madden DJ: Adult age differences in attention: Filtering or selection? J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci, 49: 213-222, 1994.
- Kotary L & Hoyer W: Aging and the ability to inhibit distracter information in visual selective attention. Exp Aging Res 21: 159-171, 1995.
- O'Regan JK & Noë A: A sensorimotor account of vision and visual consciousness. Behav Brain Sci 24: 883-917, 2001.
- Rensink RA: The dynamic representation of scenes. Visual Cognition 7: 17-42, 2000.
- O'Regan JK, Rensink RA & Clark JJ: Change-blindness as a result of 'mudsplashes'. Nature 398: 34, 1999. (Supplementary information: [http://nivea.psych.univ-paris5.fr/Mudsplash/Nature\\_Supp\\_Inf/Movies/Movie\\_List.html](http://nivea.psych.univ-paris5.fr/Mudsplash/Nature_Supp_Inf/Movies/Movie_List.html)).
- Rensink RA: Seeing, sensing, and scrutinizing, Vision Res 40: 1469-1487, 2000.
- 横澤一彦, 大谷智子: 見落とし現象における表象と注意—非注意による見落としと変化の見落とし—. 心理学評論 46: 482-500, 2003.
- Rensink RA, O'Regan JK & Clark JJ: To see or not to see: The need for attention to perceive changes in sense. Psychol Sci 8: 368-373, 1997.
- Grims J: On the failure to detect changes in scenes across saccades. In: Akins K ed, Perception Vol 2, 89-110, Oxford University Press, New York, 1996.
- Simons DJ & Levin DT: Failure to detect changes to people in a real world interaction. Psychon Bull Rev 5: 644-649, 1998.
- Simons DJ, Franconeri SL & Reimer RL: Change blindness in the absence of a visual disruption. Perception 29: 1143-1154, 2000.
- Kanai R & Verstraten FA: Visual transients without fea-

- ture changes are sufficient for the percept of a change. *Vision Res* 44: 2233-2240, 2004.
- 25) O'Regan JK, Deubel H et al: Picture changes during blinks: Looking without seeing and seeing without looking. *Visual Cognition* 7: 191-211, 2000.
  - 26) Luck SJ & Vogel EK: The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature* 390: 279-281, 1997.
  - 27) Wheeler ME & Treisman AM: Binding in short-term visual memory. *J Exp Psychol Gen* 131: 48-64, 2002.
  - 28) Saiki J: Spatiotemporal characteristics of dynamic feature binding in visual working memory. *Vision Res* 43: 2107-2123, 2003.
  - 29) 葭田貴子, 山口亜友美, 和氣典二: 視覚変化盲と触覚変化盲の記憶要素数はひとしいか. *Vision* 17: 139-142, 2005.
  - 30) Braun J: Divided attention: Narrowing the gap between brain and behavior. In: Parasuraman R ed, *The Attentive Brain*, 327-351, MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
  - 31) Mack A & Rock I: *Inattentional Blindness*. MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
  - 32) Wolfe JM: Inattentional Amnesia. In: Coltheart V ed, *Feeling Memories*, 71-94, MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
  - 33) Most SB, Simons DJ et al: How not to be seen: The contribution of similarity and selective ignoring to sustained inattentional blindness. *Psychol Sci* 12: 9-17, 2001.
  - 34) Simons DJ & Chabris CF: Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception* 28: 1059-1074, 1999.
  - 35) Li F, Van ullen R et al: Rapid natural scene categorization in the near absence of attention. *Proc Natl Acad Sci USA* 99: 9596-9601, 2002.
  - 36) Fernandez-Duque D & Thornton IM: Change detection without awareness: Do explicit reports underestimate the representation of change in the visual system? *Visual Cognition* 7: 323-344, 2000.
  - 37) Hayhoe MM, Bensinger DG & Ballard DH: Task constraints in visual working memory. *Vision Res* 38: 125-137, 1998.
-

## 視機能向上のための補助具—その選び方

川嶋 常多

株式会社エッセンバツハ光学ジャパン

### Aids for Improving in Visual Function – How to Select Them

Tsunekazu Kawashima

Eschenbach Optik of Japan Co., Ltd.

ものを拡大して見ることは、視覚障害をもつ人々がその残された視機能を活用して、日々の生活の質を向上させるための非常に有効な手段である。見たいものを拡大することによって、本を読んだり、テレビを鑑賞したり、ホビーを楽しんだりということが容易になるからである。しかし、ルーペはその構造が簡単であるがゆえに、使用目的に合った一品を選ぶのが難しいという一面もある。カタログ上の仕様や価格だけで判断すると、とんだ粗悪品を手にすることもある。必要倍率、照明の影響、使用目的とのマッチングなど、これらの問題を解明しながら使用目的に合った良質のルーペを正しく選ぶためのノウハウを提供し、アイケア・プロフェッショナルの人々への一助となれば幸いである。

(視覚の科学 28: 157-161, 2007)

キーワード：必要最低限の倍率、良質の照明—必要倍率の低減

For those with visual impediment magnification is one of the most effective means of making the best use of their remaining visual acuity. Magnification can help the visually impaired with daily activities such as reading, watching television, or enjoying hobbies. However, selecting a magnifier appropriate to your purpose is not easy because of the magnifier's simple structure. If you select a magnifier by reason only of its specifications and an attractive price written in a catalogue, you sometimes may get poor-quality goods. How to determine the magnification that is needed, how to evaluate the impact of illumination, how to select the magnifier best suited to the vision task .... these points should be clarified in selecting a proper magnifier of high quality. Eschenbach would be pleased if our technical know-how regarding the above points proved helpful to eye-care professionals.

(Jpn J Vis Sci 28: 157- 161, 2007)

Key Words: Magnification should be as lower as possible,

Optimum illumination system can reduce the magnification needed

#### 1. はじめに

視機能向上のための補助具の代表的なもの一つに、ものを拡大して見るためのルーペがある。ものを拡大して見るというごく簡単な方法が、なぜ視力や視覚に障害をもつ人々の視機能向上のために用いられる最も一般的で、かつ有効な手段の一つといえ

るのか。

眼鏡を用いることで眼の焦点は網膜上に合ったとしても、細かい文字を読むために眼にかかる負担は加齢とともに大きいものとなる。このような場合にルーペを用いて対象物を拡大することは、大きな文字で印刷された書物を読むのと同じ結果を意味することになるからである。

別刷請求先：101-0048 東京都千代田区神田司町 2-15-4 (株)エッセンバツハ光学ジャパン 川嶋常多  
(2007年1月18日受理)

Reprint requests to: Tsunekazu Kawashima Eschenbach Optik of Japan Co., Ltd.  
2-15-4 Kanda Tsukasa-cho, Chiyada-ku, Tokyo 101-0048, Japan  
(Received and accepted January 18, 2007)

また、網膜色素変性症や糖尿病による網膜症のような眼の疾患のために視野の一部に暗点が生じている場合、拡大されていない小さな文字がその暗点によって完全に隠されてしまう範囲と、拡大された文字が隠される範囲とを比較してみると、拡大された対象物を読み取る方が、隠される範囲が少ないので全体を把握しやすくなる(図1a, bを比較)。

ものを読むことによって眼から入る情報が、私達の生活にとって量的にも一番多く、かつ質的にも非常に重要であることを考えると、この「拡大」という作業は眼になんらかの障害をもつ人々にとって、非常に大切な意味をもってくる。しかし、多くの品種や倍率のなかから、個々の患者の使用目的に最も合った一品をどのようにして選んだらよいかということは、非常に初歩的な事柄ではあるものの、一面それに直面した場合に誰しもが困惑する問題の一つといえるかもしれない。そこで、先回の講演のなかから「ロービジョン・エイドとしてのルーペを選定するための基本ルール」の部分を詳述することで、アイケア・プロフェSSIONALの人々が行う日常業務のなかで少しばかりお役に立てれば、と考える。

「ロービジョン」という用語は、「眼の疾患をもつ人々に残されている残存視力」という意味として捉えることができる。したがって、加齢によるものも含めてなんらかの視覚障害をもつ人々が、より快適な日常生活を送れるようにするための補助具全体を「ロービジョン・エイド」と呼んでおり、そのなかには弱視眼鏡などの特殊な補助具だけではなく、各種ルーペ全体が含まれる。そのなかから、どのようにして使用目的に合ったものを選ぶか、その手順を七つのステップにまとめて紹介する。

## 2. ロービジョン・エイドとしてのルーペ選定のための七つのステップ

基本ルールは、倍率はできるだけ低く、明かりは必要なだけ多く、である。

**STEP 1:** 患者が現在眼科医などから適切なケアを受けており、最近測定した屈折値に合った眼鏡を使用しているかどうかを確認する。

ルーペなどのロービジョン・エイドは、矯正された視力だけでは足りない部分を補うための補助具である。この点で、まだルーペと老眼鏡とを混同している向きが見受けられ、販売政策上コスト効率のよい老眼鏡と競合するのでルーペの扱いを敬遠するという眼鏡店も存在するようである。しかし、ロービジョン・エイドの販売で成功している多くの店舗は、老眼鏡をより効果的に使用する補助具としてルーペを併売することで、全体の売上向上に役立っている。

このことを考えると、レンズ設計やルーペ本体のデザインを行う際に、眼鏡を掛けた状態で使いやすいようにするというコンセプトが必要である。

**STEP 2:** 患者が視覚を用いてなにを行いたいと希望しているのかを聞き出す。

使用目的に合わせてルーペを選んでいくと、異なった数種類のものが必要になる場合が多い。生活全体の質をよりよくするためには、1本のルーペだけですべてを賄うという考え方を捨てる必要がある。長時間読書を楽しむために使用するルーペと、外出先で商品のタグに印刷されている小さな文字を読み取るためのルーペとは、レンズの倍率も全体の形状もおのずと異なったものとなる。色々な生活の場面に合わせて複数の補助具を選ぶことによって、生活全

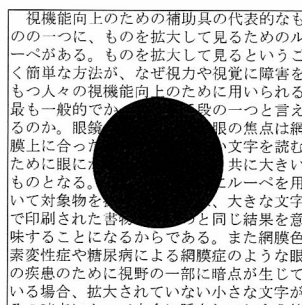
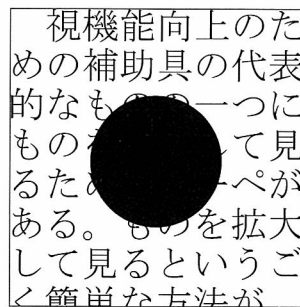


図1 a: 普通の字



b: 拡大された字



体の質の向上を図ることができる。

目的に合わせたルーペをどのように選定したらよいかは、STEP 5で詳細に説明する。

### STEP 3：必要とされる倍率を決める。

我々は、1) 屋外での活動には0.1、2) テレビを観るには0.5～0.6、3) 40 cm 離れた位置で文字を読み取るには0.5～0.8の視力が最低必要である、という一つの基準を設定している。

この基準値を患者の現行矯正視力で割って得た数値が、ルーペの必要倍率を決める目安となる。例えば、矯正視力0.1の患者が上記の目的で選ぶ場合、必要倍率の目安は次のようになる。

- (1) ほとんどの活動には補助具は不要かもしれないが、外出先でバスの運行表などの細かい文字を読み取るために単眼鏡が1本あれば便利さが増す。
- (2)  $0.5 \sim 0.6 \div 0.1 = 5$  倍～6 倍
- (3)  $0.5 \sim 0.8 \div 0.1 = 5$  倍～8 倍

このときに注意すべきことは、「視力」と「見え方」とは違うので、この基準で選んだルーペを実際に使用して最適な「見え方」のものを選ぶ。

#### ルーペの倍率について：

「市販されているルーペを実際に試してみると、同じ倍率が表示されているのにメーカーによって拡大のされ方が異なることがある」という苦情をよく耳にする。そこでルーペの倍率がどのように決められているかを紹介する。

国際標準化機構（以下 ISO）の新しい規定によれば、ルーペの倍率はそのレンズのディオプター値を4で割った数値を用いることになっている（ISO 15253:2000）。すべてのメーカーが、すべての拡大鏡の倍率表示にこの計算式を適用すれば問題はないのだが、現状では次のような事情を考慮しなければならない。

ルーペに関してこの新しい規定が実際にいつから実施されるかは現時点では未定であり、その間の過渡期的基準としてはDIN58383:1971-12を援用したEN ISO 15253 Jan.2001が適用されている。その「3.15項 倍率」というなかの3.15.3項には「将来は適用されなくなる」という注釈付きで、DIN58383で規定されている「カタログ上に記載してよい倍率（＝算出された数値+1）」という倍率表示を用いてもよいという基準を認めている。

このDIN58383:1971-12の2.2項を説明すると、そ

こでは拡大鏡を（1）「ルーペ」（焦点距離が短く、3倍以上の倍率のもの）と（2）「読書用レンズ」（焦点距離が125 mmより長く、倍率が3倍未満のもの）の二つに分類している。そして同3.1.2項には「読書用レンズ」の倍率に関する計算式が示されており、「この場合には算出された倍率に1を加えた数値をカタログ上に記載してもよい」と規定されている。この規定が現在でも種々の文献のなかで紹介されていることもあり、ISO 15253:2000の新しい規定が実施されるまでの過渡期においては、「読書用レンズ」については「算出された数値+1」を用いてもよいとされている。

我々は上記のDIN58383:1971-12の2.2項にしたがって、12ディオプター未満の「読書用レンズ」については、1を加えた数値を倍率としてカタログ上に表示している。このような過渡期的現状を考えると、低倍率の読書用ルーペについては表示されている倍率よりも、カタログ上に記載されているディオプター値を基準として選ぶことをお薦めする。

### STEP 4：照明の影響を考慮する。

加齢に伴いものを読むときに必要とされる光の量は、「10歳を1として60歳ではその15倍」というデータがある（フィリップス社刊行物「Licht」1985年6月号より）。この現実を考えると、手持ち式、置き型、スタンド式のすべてに良質の照明を内蔵したモデルがあることは非常に有効となる。電源としては、手持ち式にはバッテリー方式、置き型にはバッテリー方式とAC方式、スタンド式にはAC方式が、それぞれ採用されている。

ライトルーペの光源としては、従来から使用されている小型のタングステンランプ、キセノンランプ、蛍光ランプに加えて、最近では白色発光ダイオード（以下 LED）も多くの機種に採用されている。機種を選定する際には実際に点灯した状態で試し、使用者が眩しさを感じないで使える光源を内蔵しているものを選ぶことが重要である（使用者の環境照明については、STEP 6を参照）。

内蔵された照明を用いることによって得られるメリットの一つは、使用する倍率を低めることができるという点にある。何ディオプター下げられるかという具体的な数値を出すことは、人によって「見え方」に多様性があるため一概にはいえないが、1～2段階低い倍率のもので用が足りることは実験的に裏付けられている。使用する倍率が低ければ低いほ



ど目の疲れは軽減され、読書スピードは増大するので、このメリットは非常に大きな意味をもつ。

その点で置き型のライトルーベと書見台との併用が長時間の読書には最適の組み合わせとして欧米では定着しているが、日本の市場ではあまり受け入れられていなかった。それは、従来のキセノンランプを使用した場合に、バッテリー方式では電池の寿命の問題があり、またAC直結方式では電源コードが煩わしいという問題があったためと思われる。しかしLEDの採用により、バッテリー方式でも長時間の継続使用が可能となった。

書見台を併用すると、光軸に対してまっすぐ視線を落とせる姿勢を保つことができるので、理想的な条件で長時間の読書や文献の調査を行うことが可能となる(図2)。レンズと対象物との間隔が一定している点も、継続的に長時間使用するためには大きな助けとなる。今後日本の市場でも需要の拡大が見込める機種の一つといえよう。

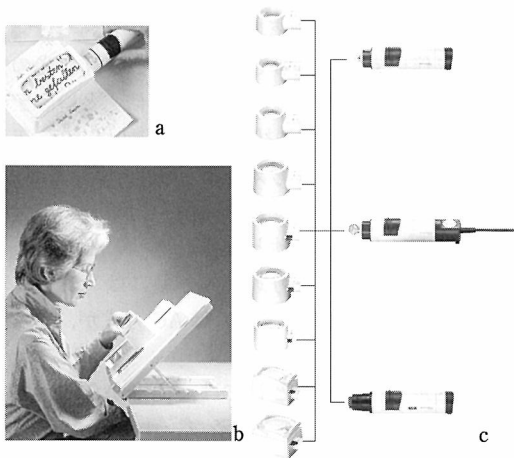


図2 a:置き型ライトルーベ「システム・パリオ」の使用例  
 b:書見台の併用による理想的な使用例  
 c:レンズヘッドと光源部との組み合わせ

**STEP 5: 使用目的に合ったルーベを選択する。**

これまでにSTEP2～STEP4で得てきた情報に基づいて、使用目的に合ったルーベを何種類か選択して実際に試してみる。ルーベを選ぶ際に最も重要なことは、使用目的に合った機種のなかでその人が見える最低の倍率のものを選ぶことである。そのためには倍率の高いものから順に倍率を下げて試していき、必要最低の倍率を見極めることが肝要である。そうすることで、できるだけ視野も広く焦点合わせ

も楽なルーベを選ぶことができる。

しかし、350種類以上の商品のなかからどの機種を取り出すかということは、そう簡単なことではない。そこでエッセンバツハ光学ジャパンでは、主要商品を使用目的別に仕分けした8ページからなる特製のチャートを用意して希望される人に提供している。

このチャートについて少し説明すると、そこには主要商品が次のカテゴリーに大別され、それぞれ低倍率のものから高倍率のものまで機種ごとに分類されて並べられている。

- 1) 近方視用 手持ちで短時間使用 両眼視用/単眼視用  
 商品のラベル、価格タグ、電話番号などの読み取り
- 2) 近方視用 置き型または眼鏡式で長時間使用 両眼視用  
 新聞、書籍、文献などを読むこと、両手を使った作業
- 3) 近方視用 置き型または眼鏡式で長時間使用 単眼視用  
 文献、細かい資料の調査、両手を使った作業
- 4) 中・遠方視用 手持ちで短時間使用 単眼視用  
 道路標識、バス停の表示、駅の時刻表、料金表などの読み取り
- 5) 中・遠方視用 眼鏡式で長時間使用 両眼視用  
 テレビ、映画の鑑賞、スポーツ観戦など

そしてチャートの最後には、「薦める立場からも、使用する立場からも扱いやすい」代表的な7種類の商品群を概略説明したページが加えられており、ルーベの取り扱いにあまり慣れていなくても対応できるような気遣いが示されている。

**STEP 6: 正しい使い方と手入れの方法について実際にトレーニングを行う。**

置き型ルーベの場合はレンズと対象物の間隔が固定されているので、眼の位置をどのくらいレンズから離れたら最も見やすいかという点だけを実際に試してみればよい。一方、手持ちルーベの場合には、眼とレンズ、レンズと対象物との間隔をそれぞれ少しずつ変化させて、同じレンズでも見える範囲や拡大率が一定ではないことや、焦点をどのように合わせるのかを実際に試して、そのレンズの特性を理解してもらう必要がある。低倍率の読書用のルーベの場合は比較的簡単に慣れることができるが、微細な

対象物の検査などに使う高倍率のルーペの場合には、使い方を誤ると逆像や歪みが発生することがある点に留意しなければならない。

とくに非球面レンズの場合、歪みのない理想的な拡大像を得るためには、レンズと眼との間隔を正しくセットすることが大切である。我々が提供する非球面ルーペには、それぞれのレンズに必要な眼との間隔が本体上にプリントされているので(図3)、それに従うことで理想的な拡大像を得ることができる。



図3 非球面ルーペ本体上の表示事項

ライトルーペを効果的に使用するためには、使用する環境にも次のような注意を払う必要がある。

- (1) テーブルの表面や近くの窓などにみられるギラギラした眩しい状態を少なくする。
- (2) 周囲の光の均一化を図る。
- (3) 使用者の手元に入ってくる光の方向を考慮する。
- (4) レンズ面への映り込みをなくすために、天井のスポットライトを用いない。

#### 手入れについて：

レンズ面にほこりがついたままの状態では、レンズ拭きクロスなどで擦ってしまうとコーティングを傷

つけてしまうので、刷毛やブローアなどでほこりを払ってから軽く拭くようにする。またレンズ表面に施されているコーティングを損傷しないため、アルコールまたは有機系の溶剤でレンズの汚れを拭き取することを避けるように徹底する。

**STEP 7：**使用してみて実際に適しているかどうかを調べるために、患者を再訪問するなどして接触を図る。

このステップを踏むことによって、実生活上で正しく使用されているかどうかの確認ができるので、患者に対してより効果的な利用方法を提供したり、また違う使用目的の補助具を提案したりすることが可能となり、信頼性の向上につながる。

### 3. おわりに

ものを拡大して見るというごく簡単な方法が、視覚障害をもつ人々にとっては、その残された視機能を活かすための有用な助けになることは否めない。視覚障害をもつ人の数が年々増加傾向にある現状を考えると、それらの人々が残された視力を用いてより質の高い日常生活を送れるように援助することは、イケア・プロフェッショナルとして働くものにとって避けて通ることのできない分野であるといえよう。

ロービジョン者という範囲には入らないものの、加齢により読書用眼鏡の使用を余儀なくされている人々にとっても、眼鏡の補助具としてルーペを使用することは、眼の疲労を軽減させる点で非常に有用な手段である。そのことは、眼に障害をもたない若い人の場合ですら、微細な作業をする際にルーペを使用することによって作業の能率が上がるとともに作業ミスの防止にも役立つということが、産業界において実証されている事実からも明らかである。

このように、「視機能向上のための補助具」としてルーペが果たす役割は、その構造の簡単さからは計り知れないほど大きいものといえよう。

原 著

## 瞬目が瞳孔径と他覚屈折値に与える影響

山本真也<sup>1)</sup>, 川守田拓志<sup>2)</sup>, 中山奈々美<sup>2)</sup>, 魚里 博<sup>1, 2, 3)</sup><sup>1)</sup> 北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学<sup>2)</sup> 北里大学大学院医療系研究科眼科学<sup>3)</sup> 北里大学医療衛生学部視覚機能療法学専攻

## Effect of Blinking on Pupil Diameter and Objective Refraction

Shinya Yamamoto<sup>1)</sup>, Takushi Kawamorita<sup>2)</sup>,  
Nanami Nakayama<sup>2)</sup> and Hiroshi Uozato<sup>1, 2, 3)</sup><sup>1)</sup> Department of Visual Science, Kitasato University Graduate School of Medical Sciences<sup>2)</sup> Department of Ophthalmology, Kitasato University Graduate School of Medical Sciences<sup>3)</sup> Department of Orthoptics and Visual Science, Kitasato University School of Allied Health Sciences

目的：瞬目が瞳孔径と他覚屈折値に与える影響について検討した。

方法：対象は健常被験者18名18眼である。測定には、両眼開放下で瞳孔径および他覚屈折値の経時測定が可能な両眼開放型オートレフラクトメータ WAM-5500（グランド精工社）を用いた。

結果：瞳孔径は、瞬目後に短時間の縮瞳を認めた。その変化は、瞬目に要する時間が長いとき有意に大きくなり、強く瞬目すると変化は更に大きくなった。他覚屈折値は、すばやく軽い瞬目時では有意な変化は認めなかったが、瞬目を強く行ったときや、瞬目に要する時間が長いとき、短時間の近視化を認めた。

結論：瞬目パターンにより、瞳孔径変化量の違いや短時間の近視化が認められた。これらは他覚屈折値や自覚屈折値の測定に影響を与えている可能性が示唆された。（視覚の科学 28: 162-167, 2007）

キーワード：瞬目, 瞳孔径, 他覚屈折値, 涙液, 両眼開放型オートレフラクトメータ

Purpose: We investigated the effect of blinking on pupil diameter and objective refraction.

Methods: Pupil diameter and objective refraction were measured simultaneously in 18 eyes, using binocular auto ref/keratometer (WAM-5500), under binocular viewing condition.

Results: Pupil diameters exhibited significant temporary miosis after blinking. Pupil change after blinking is dependent on blinking strength and blinking duration. Objective refraction was not changed significantly in light blinking, but temporary myopia was significant when blinking duration was long and blinking was strong.

Conclusions: The results suggest that in the visual function test, blinking has an effect on subjective and objective refraction. (Jpn J Vis Sci 28: 162- 167, 2007)

Key Words: Blinking, Pupil diameter, Objective refraction, Tear, Binocular auto ref/keratometer

別刷請求先：228-8555 相模原市北里 1-15-1 北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学 魚里 博  
(2007年10月2日受理)

Reprint requests to: Hiroshi Uozato, PhD Dept of Ophthalmology & Visual Science, Kitasato Univ Graduate School of Medical Sciences

1-15-1 Kitasato, Sagami-hara 228-8555, Japan

(Received and accepted October 2, 2007)

## 1. 緒 言

瞬目とは、開眼状態から短時間で閉眼を経て再び開眼状態へと戻る眼瞼運動をいう<sup>1)</sup>。我々は日常、無意識に瞬目を行い、その目的は、角膜の湿潤、眼筋の緊張解除、網膜の入力補正などである<sup>2)</sup>。また、オキュラーサーフェスを正常に保ち、かつ、眼球光学系において光学的結像特性を高める上で重要な役割をもつ<sup>3)</sup>。

これまで、瞬目後の視機能に与える要因として、涙液<sup>4)</sup>、収差<sup>5)</sup>などによる影響が報告されている。しかしながら、閉眼状態から開眼すると直後に短時間縮瞳が起きることは知られており<sup>6)</sup>、瞬目後の瞳孔の変化は視機能に影響を与える重要な因子と考えるが、過去に報告はなかった。そこで今回我々は、瞬目における瞳孔径や他覚屈折値の変化がどの程度起こり得るかについて検討したので報告する。

## 2. 方 法

### 1) 対 象

対象は、屈折異常以外に眼科的および全身的疾患のない正常被検者18名18眼、平均年齢 $21.2 \pm 2.0$ 歳(20~27歳)である。ハードコンタクトレンズ装用者、弱視、斜視の者は除外した。遠見視力表1.0のランドルト環の分離を弁別できた度数を遠見矯正値とし、瞳孔径と他覚屈折値の同時測定を行った。自覚的平均等価球面值は $-2.85 \pm 2.69$ Dである。被検眼は、全例右眼とした。

### 2) 測定機器

瞳孔径および他覚屈折値の計測は、両眼開放型オートレフラクトメータWAM-5500と解析ソフトWCS-1(グランド精工社)を用いた。本装置は解析ソフトWCS-1を用いることで瞳孔径と他覚屈折値(等価球面值)の経時的同時計測が可能である。本装置による瞳孔径と他覚屈折値のサンプリング周波数は5Hzとなっており、それぞれ0.1mm、0.01D単位で計測された。

### 3) 測定方法

室内照度を約500lxに設定し、遠見5mに提示された小数視力1.0のランドルト環視標を固視させ、5秒ごとに瞬目を行わせた。

瞬目直前の1秒間に測定された瞳孔径および他覚屈折値の平均値を瞬目前基礎値とした。瞬目後の変化は、(1)瞳孔径の変化が1/2になったときの瞳孔径

およびそのときの他覚屈折値、(2)最も縮瞳した瞳孔最小値およびそのときの他覚屈折値、(3)瞳孔が最小から散瞳して瞳孔径変化の63%まで回復したときの瞳孔径およびそのときの他覚屈折値、(4)最も近視化した他覚屈折値、(5)最も遠視化した他覚屈折値、(6)瞳孔基礎値時の他覚屈折値、を採用した。また、(1)~(4)に要した時間、そして、瞳孔径が最小値から基礎値までの変化に要した時間や他覚屈折値が(4)から基礎値、(4)から(5)、(5)から基礎値までの変化に要した時間を評価した。

各瞬目パターンにおいて3回測定し、その平均を各々の代表値とした。瞬目前基礎値1秒間における瞳孔径、他覚屈折値の変化が著しい場合や、固視モニター観察のもと睫毛や上眼瞼の影響が疑われた場合、再度測定を行った。

### 4) 瞬目パターン

すばやく軽い瞬目と強い瞬目を行わせ、それぞれ両眼と単眼で比較した。また、「軽く」、「強く」を指示して閉眼させ、1秒後に開眼を行わせた。更に閉眼時間を2秒、3秒と行った。

### 5) 統計解析

測定により得られた瞳孔径と他覚屈折値において、瞬目前後の変化を比較しWilcoxon符号付順位検定と反復測定分散分析(repeated measure ANOVA)を行った。

## 3. 結 果

各瞬目パターンにおける瞬目前後の変化を表1に示す(測定する諸因子を図1、軽い瞬目と強い瞬目を行ったときの各測定点の平均を図2に示す)。

### 1) 瞳孔径

瞬目後、短時間の有意な縮瞳が認められた(Wilcoxon符号付順位検定、 $p < 0.01$ ) (図3)。瞬目に要する時間が長いとき、瞳孔の変化量は有意に大きくなり(ANOVA、 $p < 0.05$ )、瞬目を強く行ったとき、変化はより大きくなった(ANOVA、 $p < 0.05$ ) (図4、5)。単眼と両眼では、有意な変化は認められなかった(Wilcoxon符号付順位検定、 $p > 0.05$ )。

### 2) 他覚屈折値

瞬目後、軽い瞬目では有意な変化は認められなかった(Wilcoxon符号付順位検定、 $p > 0.05$ )。瞳孔最小値のとき、わずかな近視化が認められたが、特徴的な変化は認められず、瞬目前後において基礎値を中心に鋸状や波状様の変化を示した。しかし、瞬目を

表1 各測定点における瞬目前後の瞳孔径と他覚屈折値の変化：両眼下と単眼下における軽い瞬目と強い瞬目の比較

瞳孔径	測定値		両眼		単眼	
			軽い瞬目	強い瞬目	軽い瞬目	強い瞬目
瞳孔径	測定値	P1：瞬目前基礎値	5.16 ± 0.61	5.08 ± 0.69	5.98 ± 0.70	5.86 ± 0.78
		P2：瞬目後最小値	4.57 ± 0.64	4.26 ± 0.57	5.47 ± 0.78	4.94 ± 0.72
	時間	T1：瞳孔径の変化の1/2まで変化するのに要した時間	0.54 ± 0.13	0.56 ± 0.10	0.49 ± 0.07	0.55 ± 0.09
		T2：瞳孔最小値までの時間	0.78 ± 0.14	0.83 ± 0.09	0.78 ± 0.11	0.83 ± 0.12
		T3：瞳孔が最小から散瞳して瞳孔径変化の63%まで回復するのに要した時間	1.01 ± 0.33	1.05 ± 0.33	0.88 ± 0.30	1.01 ± 0.28
T4：瞳孔最小値からbaseまでの時間		1.73 ± 0.42	1.86 ± 0.37	1.47 ± 0.37	1.84 ± 0.43	
他覚屈折値	測定値	R1：瞬目前基礎値	-0.74 ± 0.24	-0.76 ± 0.25	-0.75 ± 0.25	-0.77 ± 0.27
		R2：最大屈折変化値(-)	-	-0.99 ± 0.23	-	-1.01 ± 0.28
		R3：瞳孔径の変化が1/2まで変化したときの他覚屈折値	-	-0.85 ± 0.24	-	-0.88 ± 0.28
		R4：瞳孔最小値時の他覚屈折値	-0.78 ± 0.24	-0.80 ± 0.27	-0.77 ± 0.26	-0.82 ± 0.28
		R5：最大屈折変化値(+)	-	-0.64 ± 0.24	-	-0.69 ± 0.26
		R6：瞳孔径変化が最小値から63%まで回復したときの他覚屈折値	-	-0.74 ± 0.26	-	-0.76 ± 0.26
		R7：瞳孔base時の他覚屈折値	-0.69 ± 0.23	-0.70 ± 0.24	-0.67 ± 0.41	-0.69 ± 0.26
	時間	T1'：瞬目前基礎値～最大屈折変化値(近視化)までの時間	-	0.13 ± 0.16	-	0.25 ± 0.20
		T2'：最大屈折変化値(近視化)～SE値baseまでの時間	-	0.87 ± 0.33	-	0.71 ± 0.28
		T3'：最大屈折変化値(近視化)～最大屈折変化値(遠視化)までの時間	-	1.63 ± 0.44	-	1.44 ± 0.40
		T4'：最大屈折変化値(遠視化)～SE値baseまでの時間	-	0.75 ± 0.42	-	0.62 ± 0.36

SE：spherical equivalent 等価球面

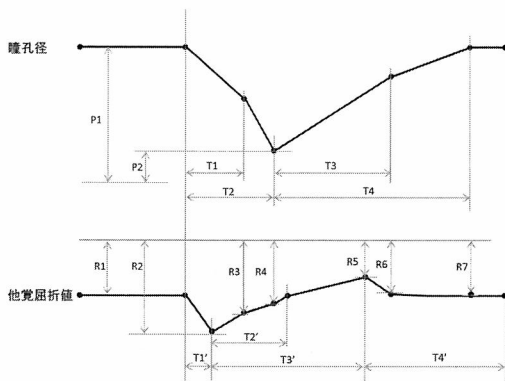


図1 測定諸因子

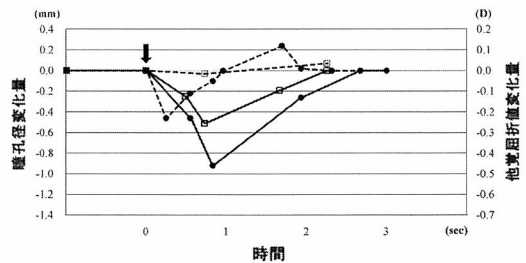


図2 瞬目前後の瞳孔径と他覚屈折値の経時的変化：軽い瞬目と強い瞬目の比較

↓：瞬目時

- ：軽い瞬目(瞳孔径), ●：強い瞬目(瞳孔径),
- ：軽い瞬目(他覚屈折値), ●：強い瞬目(他覚屈折値)

強く行ったときは、瞬目前基礎値 -0.77 ± 0.27 D、瞬目後 0.25 ± 0.2 秒後に最大屈折変化値 -1.01 ± 0.28 D と短時間の近視化が認められた (Wilcoxon 符号付順位検定, p < 0.01) (図 6, 7)。瞬目に要する時間が

長いときも、同様に短時間の有意な近視化を認めた (Wilcoxon 符号付順位検定, p < 0.01)。単眼と両眼では有意な変化は認められなかった (Wilcoxon 符号付順位検定, p > 0.05)。

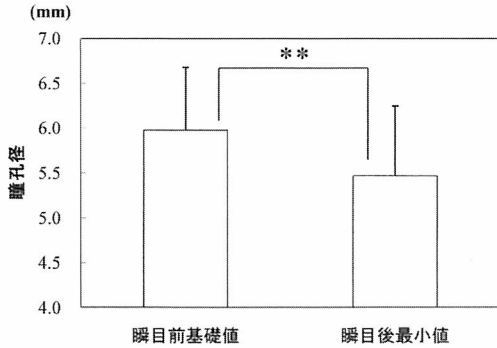


図3 瞬目前後の瞳孔径の変化：軽い瞬目  
\*\*：p < 0.01

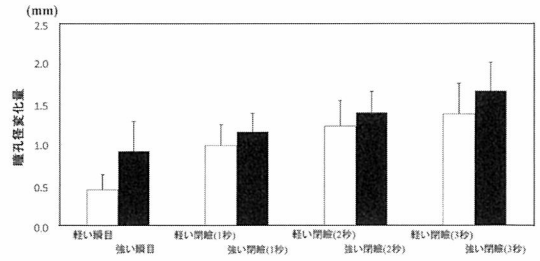


図4 各瞬目パターンにおける瞳孔径変化量  
ANOVA, p < 0.05

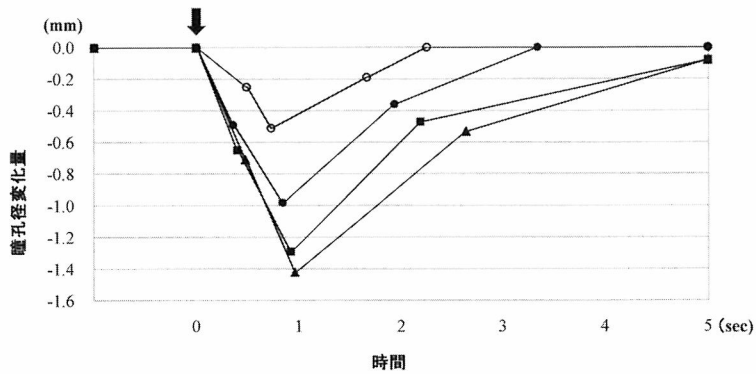


図5 各瞬目パターンにおける瞳孔径の経時変化 ↓：瞬目後  
○：軽い瞬目, ●：軽い閉眼 1秒, ■：軽い閉眼 2秒, ▲：軽い閉眼 3秒

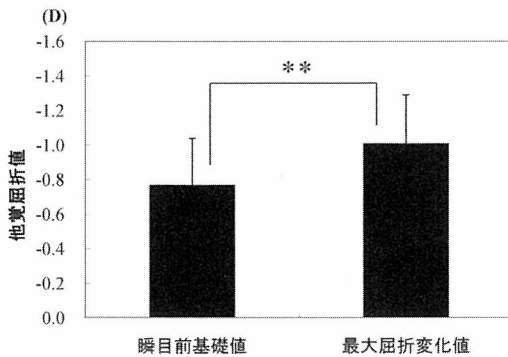


図6 瞬目前後の他覚屈折値の変化：強い瞬目  
\*\*：p < 0.01

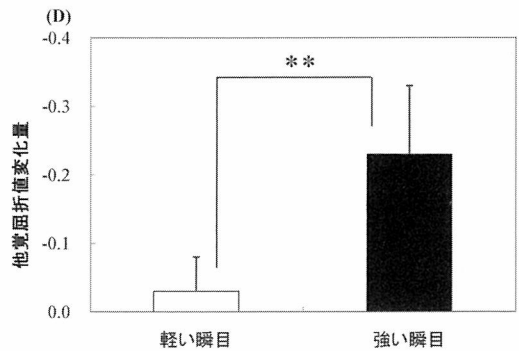


図7 瞬目後の他覚屈折値変化量：軽い瞬目と強い瞬目の比較  
\*\*：p < 0.01

#### 4. 考 按

本検討により、瞬目後に短時間の縮瞳と瞬目のパ

ターンによって短時間の近視化が認められた。瞳孔径の変化は収差<sup>7)</sup>、網膜照度<sup>8)</sup>、スタイルズ・クロフォード効果<sup>9)</sup>、瞳孔中心の偏位<sup>10)</sup>などが関与して網膜像の

質を変化させ、視機能に最も影響を与える要因の一つ<sup>10)</sup>である。検討結果により、瞬目後の瞳孔変化は網膜像の質の向上や焦点深度に寄与し、視機能に影響を与えている重要な因子である可能性が示唆された。

瞳孔径は、瞬目後に短時間の縮瞳が有意に認められた。この現象は、閉瞼によって光が一時的に遮断されたために起こる<sup>9)</sup>と報告されるが、正確な機序は不明である。今回の検討において、瞬目後の瞳孔径の変化量は、瞬目に要する時間が長いほど有意に大きくなり、強く瞬目すると変化は更に大きくなった。強く瞬目すると通常要しない眼窩部眼輪筋の収縮が起き、眼瞼の厚みが増す。その結果、光に対する遮断効果は強くなる。瞬目後の瞳孔径は、瞬目の強さや光遮断時間に影響を受け、光に対する感受性が増すことでより縮小していることが示唆された。また、瞬目の強さに関して、閉瞼を強く行おうとする意志が脳高次機能に影響し、瞳孔径変化を大きくした原因の一つである可能性も考えられる。

他覚屈折値は、軽い瞬目では有意な変化は認めなかった。しかし、強く瞬目を行ったときや瞬目に要する時間が長いとき、短時間の近視化が有意に認められた。両者の違いを検討したところ、眼瞼圧が角膜に及ぼす影響<sup>12)</sup>や、縮瞳に伴った屈折の変動<sup>13)</sup>、あるいは閉瞼時の視覚遮断に伴う dark focus の影響により調節が介入し変化したものと考えた。今回の結果では、開瞼直後が最も近視化しており、その後遠視化していくことから、短時間の近視化は角膜形状の変化というよりは閉瞼時に調節系が関与している可能性が高いと考えられた。

瞬目パターンにより短時間の近視化を認めたが、瞳孔径が最も縮小する約1秒後には基礎値に戻り、瞳孔径変化とは時間差を認め視機能への影響は小さく、むしろ瞳孔径の変化が視機能により影響を与えているのではないかと考える。このことは像の質を高めたいときに意識的に瞬目を行う<sup>2)</sup>ということに関係があると考え。我々は無意識に瞬目を行いその回数は1分間に20回程度<sup>14)</sup>、すなわち3秒に1回行っていることになる。この頻度は、心理物理的な影響により変化し、また、ドライアイ患者では瞬目に要する時間が長く、その時間のばらつきが大きいとの報告がある<sup>15)</sup>。このことは様々な要因により瞬目前後での瞳孔径や他覚屈折値の変化量に影響を与えていると示唆される。また、ドライアイ患者では「見にくさ」を訴えるにもかかわらず視力検査では良好な結

果を示すことが多い。これは、従来涙液の動的変化の影響を受けるためと考えられてきた。しかしながら、健常眼でも閾値付近から瞬目によって視力が1~2段階程度向上することは珍しくなく、高速トポグラフィを用いた Németh ら<sup>16)</sup>の報告によると、瞬目後1~3秒くらいまで涙液層は不安定であるとし、Montés-Micó ら<sup>17)</sup>は、約6秒後に角膜収差が最小になると報告している。瞬目直後は一時的に網膜像の質が低下しているものと思われるが、瞬目後の短時間縮瞳が、この収差変化を軽減させている可能性が考えられる。そして、瞬目時間の延長や強く瞬目を行うことで一時的に網膜像の質の向上や焦点深度により貢献し、視機能に影響を与えているのではないかと考える。我々は今回、視機能への影響を検討していないが、今後は環境照度が瞳孔変化量に与える影響や、瞳孔変化がどの程度、視力やコントラスト感度に影響を与えるかについて検討を行う予定である。

今回の検討により、日常行う瞬目は、短時間の縮瞳により網膜像の質の向上に寄与し、涙液の動的変化とともに安定した視機能を得るための合目的な反応であると考えられる。また、瞬目に要する時間が長いときや強く瞬目を行ったとき、瞳孔径の変化量の違いや短時間の近視化を認め、他覚屈折値や自覚屈折値に影響を与えている可能性が示唆された。

## 文 献

- 1) 石川 哲, 石川 均<sup>註</sup>: 神経眼科用語辞典. 日本神経眼科学会編, 22, メジカルビュー社, 東京, 2003.
- 2) 平岡満里: 瞳孔の生理と分析法. 神眼 11: 383-390, 1994.
- 3) 魚里 博, 平井宏明<sup>註</sup>: 眼光学の基礎. 西信元嗣編, 119-143, 金原出版, 東京, 2003.
- 4) Goto E, Yagi Y et al: Impaired functional visual acuity of dry eye patients. Am J Ophthalmol 133: 181-186, 2002.
- 5) 川守田拓志, 魚里 博: 涙液が角膜収差の時間的変化に与える影響. 眼紀 56: 3-6, 2005.
- 6) 大野新治: 瞳孔反応の概要. 眼科 27: 725-731, 1985.
- 7) 魚里 博, 川守田拓志: 両眼視と単眼視下の視機能に及ぼす瞳孔径と収差の影響. あたらしい眼科 22: 93-95, 2005.
- 8) Wilson M, Campbell M & Simonet P: Change of pupil centration with change of illumination and pupil size. Optom Vis Sci 69: 129-136, 1992.
- 9) Smith G & Atchison DA: The Eye and Visual Optical Instruments. 308-309, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- 10) Uozato H & Guyton DL: Centering corneal surgical procedures. Am J Ophthalmol 103: 264-275, 1987.
- 11) Applegate RA: Glenn Fry Award Lecture 2002: Wavefront sensing, ideal corrections, and visual perfor-

- mance. *Optom Vis Sci* 81: 167-177, 2004.
- 12) David M & Jonathan W: The lids influence on corneal shape. *Cornea* 19: 336-342, 2000.
- 13) 中山奈々美, 川守田拓志, 魚里 博: グレアが他覚屈折値と瞳孔径に及ぼす影響. *視覚の科学* 28: 72-76, 2007.
- 14) 佐藤直樹, 山田昌和, 坪田一男: VDT作業とドライアイの関係. *あたらしい眼科* 9: 2103-2106, 1992.
- 15) 島崎 潤: 瞬目とオキュラーサーフェス. *神眼* 20: 37-42, 2003.
- 16) Németh J, Erdélyi B et al: High-speed videotopographic measurement of tear film build-up time. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43: 1783-1790, 2002.
- 17) Montés-Micó R, AlióJL et al: Temporal changes in optical quality of air—Tear film interface at anterior cornea after blink. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 45: 1752-1757, 2004.
-



原 著

## 瞬目による瞳孔径と高次波面収差の経時的变化

川守田拓志<sup>1)</sup>, 山本真也<sup>2)</sup>, 中山奈々美<sup>1)</sup>, 魚里 博<sup>1,2,3)</sup><sup>1)</sup> 北里大学大学院医療系研究科眼科学, <sup>2)</sup> 北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学,<sup>3)</sup> 北里大学医療衛生学部視覚機能療法学専攻

## Temporal Changes in Pupil Diameter and Wavefront Higher-Order Aberration after Blinking

Takushi Kawamorita<sup>1)</sup>, Shinya Yamamoto<sup>2)</sup>, Nanami Nakayama<sup>1)</sup> and Hiroshi Uozato<sup>1,2,3)</sup><sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Kitasato University Graduate School of Medical Sciences<sup>2)</sup>Department of Visual Science, Kitasato University Graduate School of Medical Sciences<sup>3)</sup>Departments of Orthoptics and Visual Science, School of Allied Health Science, Kitasato University

【目的】瞬目が瞳孔径と高次収差に与える影響について検討した。また、両眼開放下と単眼視下の比較、瞬目の強さにおける比較も行った。

【方法】被検者は眼科的疾患を有さない17名17眼（平均年齢21.3±2.1歳，20～27歳）である。本実験は、両眼開放下で瞳孔径および他覚屈折値の経時測定が可能なオートレフラクトメータWAM-5500と解析ソフトWCS-1（グランド精工社）を用いた。測定値は瞬目前基礎値、瞬目後最小瞳孔径が評価された。収差の測定にはOPD-Scan II ARK-10000®（Nidek社）を用いた。また、自然瞳孔径に対応した高次収差量を算出するため、Schwiegerlingのアルゴリズム（JOSA, 2002）を用い、各々の瞳孔径での高次収差の総和を再計算し、比較を行った。

【結果】単眼視下瞳孔径は瞬目前基礎値5.90±0.70mm、瞬目後最小値5.39±0.77mmと有意に縮小し（ $p<0.01$ ）、高次収差の総和は瞬目前基礎値0.33±0.13 $\mu\text{m}$ 、瞬目後最小値0.25±0.11 $\mu\text{m}$ と有意に減少した（ $p<0.01$ ）。瞬目後の高次収差の変化は瞬目を強く行ったときに有意に大きくなった。瞳孔径と高次収差は単眼視下で有意に大きかったが、瞬目前後における両者の変化量は有意差を認めなかった。

【結論】瞬目後に起こる瞳孔径の縮小は、高次収差を減少させ、網膜像の質の向上に寄与し、その結果、視機能に影響を与えている可能性が示唆された。  
（視覚の科学 28: 168–171, 2007）

キーワード：瞬目，瞳孔，高次収差，両眼視，単眼視

Purpose: To investigate how natural pupil activity under binocular and monocular conditions affects wavefront aberrations.

Methods: Included in this study were 17 eyes of 17 subjects (mean age: 21.3±2.1 years). Undilated pupil diameters before and after blinking were measured with an auto refractometer (WAM-5500, Grand Seiko, Japan) connected to a laptop PC and analyzed using the proprietary software (WCS-1, Grand Seiko, Japan). Aberrometric measurements were taken with an optical pass difference-based wavefront sensor (OPD-Scan II ARK-10000®, Nidek, Japan). Zernike coefficients were recalculated for each pupil diameter under binocular and monocular conditions, using Schwiegerling's algorithm.

Results: Under monocular and binocular conditions, pupil diameter and total higher-order aberration were significantly smaller after blinking ( $p<0.01$ ). Changes in pupil diameter and total higher-order aberration after blinking were related to blinking intensity.

Conclusions: These results suggest that decreased pupil diameter after blinking produces lower wavefront aberrations, resulting in better retinal image quality.

（Jpn J Vis Sci 28: 168-171, 2007）

Key Words: Blink, Pupil diameter, Higher-order aberration, Binocular vision, Monocular vision

別刷請求先：228-8555 相模原市北里1-15-1 北里大学医療系研究科眼科学 魚里 博  
（2007年10月2日受理）

Reprint requests to: Hiroshi Uozato, PhD Det of Ophthalmol & Visual Science, Kitasato Univ Graduate School of Medical Sciences

1-15-1 Kitasato, Sagamihara 228-8555, Japan

(Received and accepted October 2, 2007)

## 1. 緒 言

視力検査において、視力値が瞬目により1~2段階向上することは経験するところであるが、これは主に涙液の影響と考えられてきた<sup>1, 2)</sup>。しかし、瞳孔径は瞬目により一過性の縮瞳が起こることは知られている<sup>3-5)</sup>。瞳孔径の変化は収差や網膜照度、焦点深度を変化させ、視機能に最も大きな影響を与える因子の一つである。しかし、視力検査において瞳孔径の影響が考慮されるのは散瞳時程度であり、検査中における動的な瞳孔変化に関する報告は少ない<sup>6, 7)</sup>。また近年、瞳孔径依存型の光学的屈折矯正法あるいは治療法が増加し<sup>8, 9)</sup>、瞳孔径と収差、視機能との関係を調査することは重要な課題である。そこで今回我々は、瞬目時の瞳孔変化がどの程度網膜像の質に寄与するか調査を行った。

## 2. 方 法

対象は、屈折異常以外に眼科的疾患を有さない被検者17名17眼、平均年齢 $21.3 \pm 2.1$ 歳(20~27歳)である。片眼矯正視力1.0未満の者やハードコンタクトレンズ装用者、弱視、斜視の者は除外した。自覚的平均等価球面値は $-2.16 \pm 3.00$ Dである。被検眼は、全例右眼とした。

眼球全体の高次収差の計測は、OPD-Scan II ARK-10000®(Nidek社)を用い、解析径は6.0mm、Zernike多項式にて算出される3次~6次までのZernike係数を評価した。収差計測は暗室にて自然瞳孔径で行い、収差計測時の瞳孔径が6.0mm未満の被検者は除外された。また、自然瞳孔径に対応した高

次収差量を算出するため、Schwiegerlingのアルゴリズムを用い、OPD-Scan IIによる解析径6.0mmのZernike係数を、自然瞳孔径に対応したZernike係数に再展開した<sup>10)</sup>。Schwiegerlingのアルゴリズムは外挿法の原理が応用され、ある解析径のZernike係数(original expansion coefficients)を任意の瞳孔径におけるZernike係数(new expansion coefficients)へ再展開し、推定する方法である。

瞳孔径の計測は、両眼開放型オートレフラクトメータWAM-5500と解析ソフトWCS-1(グランド精工社)を用いた。本装置は瞳孔径と他覚屈折値の経時的同時計測が可能である。本装置による瞳孔径のサンプリング周波数は5Hzとなっており、それぞれ0.1mm単位で計測された。瞳孔径は非調節麻痺下で計測され、自然瞳孔水平径(入射瞳径)が評価された。

環境照度は約500lxに設定し、検眼レンズによる遠見屈折矯正下で遠見5mに提示された視力計の小數視力1.0のランドルト環視標を固視させた。5秒ごとに瞬目を行わせた。瞬目直前の1秒間に測定された瞳孔径の平均値を瞬目前基礎値とし、最も縮瞳した瞳孔最小値と比較した。各瞬目パターンにおいて3回測定し、その平均を各々の値とした。瞬目前基礎値1秒間における瞳孔径の変動が大きい場合や、固視モニター観察のもと睫毛や上眼瞼の影響が疑われた場合、再度測定を行った。すばやく軽い瞬目と強い瞬目を行わせ、それぞれ両眼と単眼で比較した。

統計解析には、Wilcoxon符号付順位検定を用い、有意水準は5%未満とした。

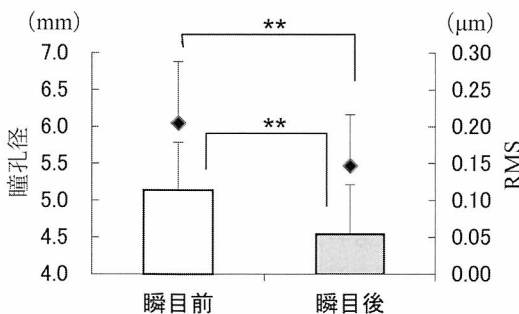


図1 両眼開放下における瞬目前後の瞳孔径と高次収差の総和

棒グラフは瞳孔径(左軸)を、プロットはroot mean square (RMS)(右軸)を示している。

RMS: root mean square, \*\*:  $p < 0.01$

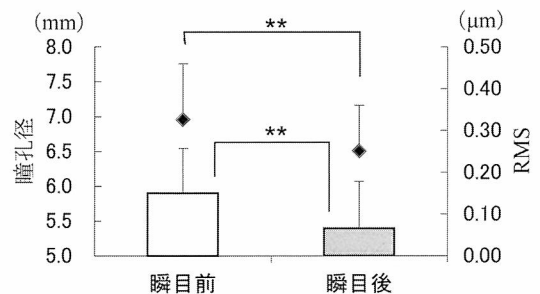


図2 単眼視下における瞬目前後の瞳孔径と高次収差の総和  
棒グラフは瞳孔径(左軸)を、プロットはRMS(右軸)を示している。

\*\* :  $p < 0.01$

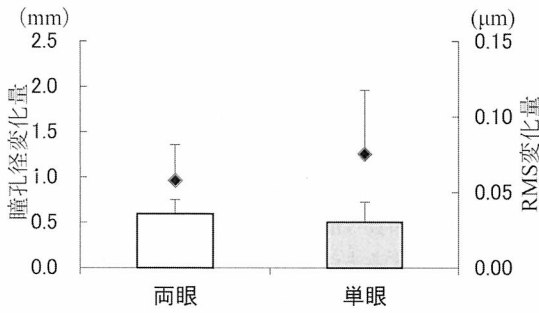


図3 瞬目前後の瞳孔径と高次収差の総和の変化量：瞬目の強さによる比較  
棒グラフは瞳孔径変化量の絶対値（左軸）を，プロットはRMS 変化量の絶対値（右軸）を示している。

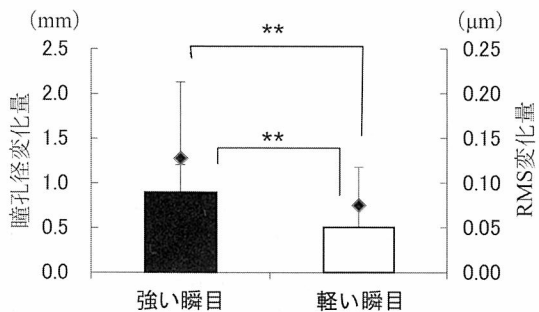


図4 瞬目前後の瞳孔径と高次収差の総和の変化量：両眼開放下と単眼視下の比較  
棒グラフは瞳孔径変化量の絶対値（左軸）を，プロットはRMS 変化量の絶対値（右軸）を示している。  
\*\*:  $p < 0.01$

### 3. 結 果

#### 1) 瞬目前後の瞳孔径

瞳孔径基礎値は，両眼開放下に比べ単眼視下で有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。両眼開放下および単眼視下における瞳孔径は，瞬目後有意に減少した ( $p < 0.01$ ) (図 1, 2)。瞬目を強く行ったとき，瞳孔の変化量は有意に大きくなった ( $p < 0.01$ ) (図 3)。また，両眼開放下および単眼視下における瞬目前後の瞳孔変化量は，有意差を認めなかった ( $p > 0.05$ ) (図 4)。

#### 2) 瞬目前後の高次収差の総和

OPD-Scan II による解析径 6.0 mm の平均高次収差の総和，コマ様収差，球面様収差は，各々  $0.31 \pm 0.06 \mu\text{m}$ ， $0.25 \pm 0.07 \mu\text{m}$ ， $0.18 \pm 0.05 \mu\text{m}$ であった。

両眼開放下および単眼視下瞳孔径に対応した高次収差の総和は，瞬目後有意に減少した ( $p < 0.01$ ) (図

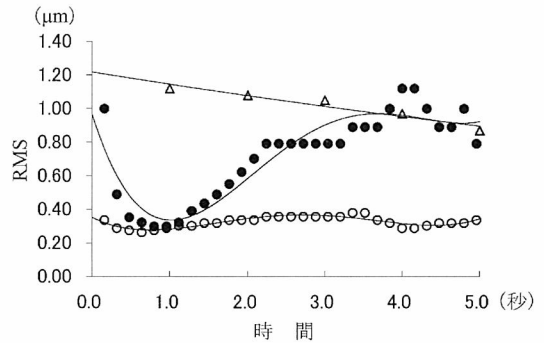


図5 瞬目後の高次収差の代表波形  
●：高次収差が大きく，かつ瞬目前後の瞳孔変化が大きな眼  
○：高次収差が小さく，かつ瞳孔変化が小さな眼  
△：Montés-Micó R<sup>ら</sup>の固定解析径 7.0 mm における角膜収差。曲線は，多項式近似曲線を示している。

1, 2)。また，瞬目を強く行ったとき，高次収差の変化量は有意に大きくなった ( $p < 0.01$ ) (図 3)。また，両眼開放下および単眼視下では有意な変化は認められなかった ( $p > 0.05$ ) が，単眼視下で上昇傾向を示した (図 4)。

高次収差が大きく，かつ瞬目前後の瞳孔変化が大きな眼と，高次収差が小さく，かつ瞳孔変化が小さな眼の代表波形を図 5 に示している。

### 4. 考 按

本検討により，瞳孔径と高次収差は瞬目後有意に減少することを確認した。また，その変化量は瞬目の強さに依存した。

瞬目後の瞳孔径に関する過去の報告について，大野<sup>ら</sup>はこの瞳孔変化を報告し，我々の結果も一致した。山本<sup>ら</sup>は，瞬目後の瞳孔変化は対光反応に似た波形を示し，光の遮断効果や光遮断時間に依存することを報告した。また，0.3 秒以上光が遮断されないこの現象は起きないことが知られている<sup>9)</sup>。この瞳孔反応は，網膜照度の変化に伴う反射により起こる雑音と考えられる一方で，機能的な役割も示唆される。一つは収差の減少である。眼球光学系においては，一般的に瞳孔径が拡大すると収差が増加し，縮小すると収差は減少する<sup>10)</sup>。したがって，今回の結果より瞬目後に瞳孔径が一過性に減少し，収差の減少と網膜結像特性の向上を招き，その結果，視機能に影響を与えることを示唆している。高速ビデオトポ

グラフィを用いた Németh ら<sup>12)</sup>の報告によると、瞬目後3秒くらいまで涙液層の影響により角膜不整化の指標である surface asymmetry index (SAI) や surface regularity index (SRI) が高値を示すとし、Montés-Micós ら<sup>13)</sup>も、瞬目直後の角膜収差は高く約6秒で最小になると報告している。瞬目後の瞳孔変化は1秒で最小になり、3秒程度の変化である<sup>9)</sup>ことから、涙液による収差変化を補償している可能性が高い。もう一つは焦点深度の拡大である。瞬目により瞬間的に遮断された像の位置検出や、あるいは明視域を広げて焦点外の像の鮮明化に寄与している可能性がある。したがって、これらが涙液の影響以外で視力検査における瞬目後の視力値の上昇の一因になることが予想される。

また、この現象に関する眼科臨床上の影響についてはほとんど報告されていないが、他覚屈折値に影響を与える可能性が報告されている<sup>9)</sup>。また、図5に示すように収差が大きく、かつ瞳孔変化が大きい眼や強い瞬目を行う眼では、より影響を受ける可能性がある。とくに、角膜屈折矯正手術や白内障手術を施行した眼<sup>14, 15)</sup>、円錐角膜眼<sup>16)</sup>など、眼球光学系の収差が瞳孔変化によって大きく変化しやすい症例では、臨床上市視機能への影響が問題になる可能性があり、調査が必要とされる。

本実験系の制限として収差推定が挙げられる。今回算出された自然瞳孔径に対応した高次収差は、実測値でなく Schwiegerling のアルゴリズムによって数学的に算出された推定値である。以前我々は、解析径6.0mmから4.0mmへの推定精度(95%信頼区間)は $\pm 0.03\mu\text{m}$ 、解析径4.0mmから6.0mmへの推定精度は $\pm 0.15\mu\text{m}$ と報告した(川守田, 魚里: 第42回日本眼科学学会, 2006)。また本検討では、涙液の影響が小さな瞬目開眼後5秒付近で取得した収差係数を使用した<sup>9)</sup>が、Montés-Micós らによると瞬目開眼直後から5秒にかけて、高次収差の総和 RMS (root mean square) 値が、解析径3.0mmで $0.02\mu\text{m}$ 程度<sup>12)</sup>、解析径7.0mmで $0.4\mu\text{m}$ 程度<sup>13)</sup>変化すると報告されている。したがって、瞳孔変化に伴う収差の変化量は、本結果以上に大きくなると予想される。また、本検討により得られた収差の結果は、瞬目開眼後5秒付近で取得した収差係数を推定に使用したという仮定の上で解釈される必要がある。

今回我々は、両眼開放型オートレフラクトメータ

WAM-5500 と解析ソフト WCS-1, 収差計 OPD-Scan II, Schwiegerling のアルゴリズムを用い、瞬目前後ににおける瞳孔径と収差の関係について検討した。その結果、瞳孔径と高次収差は瞬目後一過性に減少し、これらが網膜像の質の向上と焦点深度に寄与することで視機能に影響を与えていると考えられた。

## 文 献

- 1) Ishida R, Kojima T et al: The application of a new continuous functional visual acuity measurement system in dry eye syndromes. *Am J Ophthalmol* 139: 253-258, 2005.
- 2) Goto E, Yagi Y et al: Impaired functional visual acuity of dry eye patients. *Am J Ophthalmol* 133: 181-186, 2002.
- 3) 大野新治: 瞳孔反応の概要. *眼科* 27: 725-731, 1985.
- 4) 石川 哲, 石川 均 編: 神経眼科用語辞典. 日本神経眼科学会編, 22, メジカルビュー社, 東京, 2003.
- 5) 山本真也, 川守田拓志 編: 瞬目が瞳孔径と他覚屈折値に与える影響. *視覚の科学* 28: 162-167, 2007.
- 6) 川守田拓志, 魚里 博: 両眼視と単眼視下における瞳孔径が昼間視と薄暮視下の視機能に与える影響. *視覚の科学* 26: 71-75, 2005.
- 7) 魚里 博, 川守田拓志: 両眼視と単眼視下の視機能に及ぼす瞳孔径と収差の影響. *あたらしい眼科* 22: 93-95, 2005.
- 8) Schallhorn SC, Kaupp SE et al: Pupil size and quality of vision after LASIK. *Ophthalmology* 110: 1606-1614, 2003.
- 9) Kawamori T & Uozato H: Modulation transfer function and pupil size in multifocal and monofocal intraocular lenses *in vitro*. *J Cataract Refract Surg* 31: 2379-2385, 2005.
- 10) Schwiegerling J: Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes. *J Opt Soc Am A* 19: 1937-1945, 2002.
- 11) Howland HC: High order wave aberration of eyes. *Ophthalm Physiol Opt* 22: 434-439, 2002.
- 12) Németh J, Erdélyi B et al: High-speed videotopographic measurement of tear film build-up time. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43: 1783-1790, 2002.
- 13) Montés-Micó R, Alió JL & Charman WN: Dynamic changes in the tear film in dry eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 46: 1615-1619, 2005.
- 14) Aizawa D, Shimizu K et al: Clinical outcomes of wavefront-guided laser in situ keratomileusis: 6-Month follow-up. *J Cataract Refract Surg* 29: 1507-1513, 2003.
- 15) Miller JM, Anwaruddin R et al: Higher order aberrations in normal, dilated, intraocular lens, and laser in situ keratomileusis corneas. *J Refract Surg* 18: S579-S583, 2002.
- 16) Applegate RA, Hilmantel G et al: Corneal first surface optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg* 16: 507-514, 2004.
- 17) Montés-Micó R: Role of the tear film in the optical quality of the human eye. *J Refract Surg* 33: 1631-1635, 2007.

## 解 説

## 第19回 日本眼科学会専門医認定試験問題と解答

(眼光学・屈折・調節関係)

東京医科歯科大学 所 敬

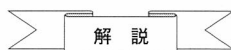
第19回日本眼科学会専門医試験は2007年6月8(金)、9日(土)の2日間にわたり渋谷のフォーラム8で行われた。眼光学・屈折・調節関係の問題は一般問題100題中8問、臨床問題50題中1問であった。

## 一般問題 100問中8問

3 角膜の屈折率はどれか。

- a. 1.37   b. 7.37   c. 7.70   d. 14.90   e. 19.10

解答：a



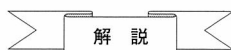
角膜の屈折率はGullstrandの模型眼で1.376、同格屈折率は1.3375である。

**コメント** 屈折率が7とか、二桁の屈折率はナンセンスな選択肢である。的確な選択肢を考える必要がある。

4 水晶体で正しいのはどれか。2つ選べ。

- a. 紫外線を吸収する。  
 b. 屈折力は約43Dである。  
 c. 水晶体上皮細胞は分裂しない。  
 d. 曲率半径は前面が後面より小さい。  
 e. 加齢とともに不溶性蛋白質が増加する。

解答：a, e

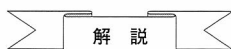


紫外線は短波長紫外線(UVC, 290nm以下)、中波長紫外線(UVB, 291~320nm)、長波長紫外線(UVA, 321~400nm)に分けられる。UVCはオゾン層で吸収されて地表には到達しない。UVBは角膜で吸収され、UVAは水晶体まで到達して白内障の原因になるといわれている。加齢とともに水晶体に不溶性タンパク質が増加して白内障の原因になる。水晶体屈折力は約20Dである。水晶体上皮細胞は赤道部で細胞分裂をする。無調節時の水晶体の前面曲率半径は約10mm、後面は約6mmである。

19 厚生労働省ガイドラインによるVDT作業者の配置前健康診断の検査項目にないのはどれか。2つ選べ。

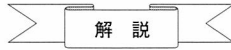
- a. 視力   b. 眼圧   c. 眼位   d. 眼球運動   e. 調節機能

解答：b, d



VDT作業者の配置前健康診断の眼科的検査項目は、視力、屈折、眼位、調節機能などである。

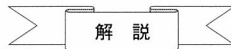
- 31 角膜で加齢変化はどれか。3つ選べ。  
a. 老人環 b. 血管侵入 c. 倒乱視化 d. 角膜厚増加 e. 内皮細胞密度減少  
解答：a, c, e



血管侵入と角膜厚増加は加齢変化というより病的変化である。

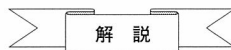
コメント 老人環は適切な選択肢か，疑問である。

- 58 遠点が角膜頂点から後方 95 mm にあり，頂点間距離 15 mm でレンズの第 2 焦点が遠点位置に一致する眼鏡レンズで矯正される。  
この眼鏡レンズの屈折力 (D) はどれか。  
a. +6.50 b. +9.00 c. +10.50 d. +12.50 e. +15.00  
解答：b



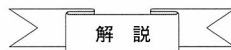
眼鏡レンズの後面から遠点までの距離は， $95 + 15 = 110(\text{mm}) = 0.11(\text{m})$  である。したがって，矯正眼鏡レンズ度は  $\frac{1}{0.11} = 9.09(\text{D})$

- 59 5m 試視力表の 0.5 の視標が，7m の距離で判別できる視力はどれか。  
a. 0.2 b. 0.4 c. 0.5 d. 0.7 e. 0.9  
解答：d



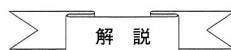
5m で 0.5 の視標の最小可視角は  $2'$  である。この視角の視標を 7m で見るときの最小可視角は  $2 \times \frac{5}{7} = 1.42$  であるから，視力は  $\frac{1}{1.42} = 0.70$  になる。

- 88 多焦点コンタクトレンズに関係するのはどれか。  
a. 回折 b. 吸収 c. 散乱 d. 反射 e. 偏光  
解答：a



回折型の遠近両用コンタクトレンズでは遠方は屈折，近方は一次回折を使用している。吸収，散乱，反射はすべてのレンズで起こり，偏光は偏光板などで起こる。

- 92 1950年代に我が国で施行された近視矯正手術（放射状角膜切開）の合併症はどれか。  
a. 角膜破裂 b. 再近視化 c. 角膜感染症 d. 水疱性角膜症 e. 低眼圧黄斑症  
解答：d



1950年代に我が国で施行された近視矯正手術は佐藤 勉氏による角膜両面放射状切開術で，角膜を上皮面と

内皮面から切開を加えた手術である。そこで、10～20年後に重篤な合併症として水疱性角膜症を起こした。

臨床問題 50問中1問

- 5 83歳の女性。15年前から緑内障で通院加療している。視力は右0.1(0.4×-1.00D), 左0.2(0.5×-0.50D)。眼圧は右14mmHg, 左13mmHg。視野および障害程度等級表を別図5A, 5B, 5Cに示す。

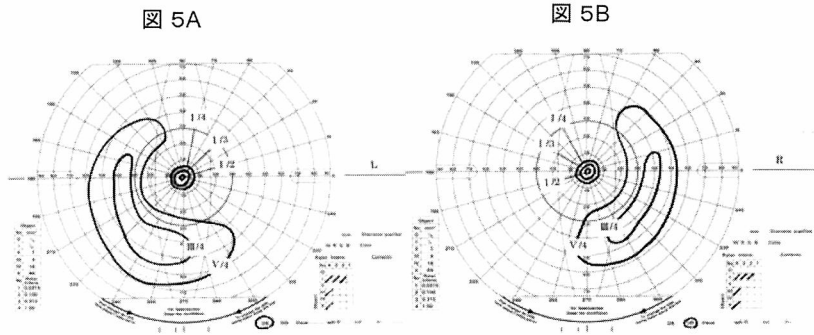


図5C 身体障害者障害程度等級表(その1)

級別	視覚障害
1級	両眼の視力(万国式試視力表によって測ったものをいい、屈折異常のある者については、きょう正視力について測ったものをいう。以下同じ。)の和が0.01以下のもの
2級	1 両眼の視力の和が0.02以上0.04以下のもの
	2 両眼の視野がそれぞれ10度以内でかつ両眼による視野について視能率による損失率が95パーセント以上のもの
3級	1 両眼の視力の和が0.05以上0.08以下のもの
	2 両眼の視野がそれぞれ10度以内でかつ両眼による視野について視能率による損失率が90パーセント以上のもの
4級	1 両眼の視力の和が0.09以上0.12以下のもの
	2 両眼の視野がそれぞれ10度以内のもの
5級	1 両眼の視力の和が0.13以上0.2以下のもの
	2 両眼による視野の2分の1以上が欠けているもの
6級	1眼の視力が0.02以下、他眼の視力が0.6以下のもので、両眼の視力の和が0.2を超えるもの

身体障害者診断はどれか。

- a. 2級 b. 3級 c. 4級 d. 5級 e. 6級

解答：d

解説

表5Cから5級に相当する。ここでいう視野障害の視能率は、視野計で八方向の残存視野の角度を測定し、それらの合計値を560で除したもの(%)である。560は平均的日本人の八方向の合計値である。損失率とは(100%-視能率)である。



## 第37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37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

- 4 誤っているのはどれか。
- a. 散瞳で焦点深度が深くなる。
  - b. 散瞳で球面収差が大きくなる。
  - c. 交感神経麻痺では縮瞳する。
  - d. 動眼神経麻痺では散瞳する。
  - e. Adie 症候群では脱神経過敏症がある。

解答：a

解 説

散瞳すると焦点深度が浅くなり、球面収差は増大する。瞳孔は交感神経の刺激で散瞳し、麻痺で縮瞳する。また、副交感神経（動眼神経）刺激で縮瞳し、麻痺で散瞳する。Adie 症候群では、正常瞳孔では反応しない程度の濃度の副交感作神経動薬（メコリールまたは塩酸ピロカルピンなど）で強い縮瞳があり、これは脱神経過敏による。

- 24 立体視差の単位はどれか。
- a. msec
  - b. diopter
  - c. sec of arc
  - d. meter angle
  - e. prism diopter

解答：c

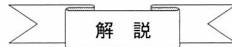
解 説

msec は秒の1/10で時間の単位。diopter は屈折力の単位。meter angle は輻湊角の単位。prism diopter はプリズム角の単位。

- 30 誤っているのはどれか。
- a. 視力は2点間の最小分離能を示す。
  - b. 中心窩で見たときの視力が最も良い。
  - c. 視神経乳頭上の視力は0.1程度である。

- d. 両眼視力は片眼視力に比べて良好である。
- e. 小児では字ひとつ視力の方が字づまり視力より良い。

解答：c



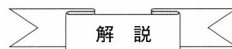
視神経乳頭上の視力はマリOTT盲点上で0である。視神経乳頭付近の網膜では0.1程度の視力である。

- 31 外径 37.5 mm の Landolt 環を 5 m の距離でかろうじて識別できた。

視力はどれか。

- a. 0.9    b. 0.7    c. 0.5    d. 0.3    e. 0.1

解答：正答なし



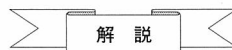
Landolt 環は外径の  $\frac{1}{5}$  が環の幅、切れ目の幅である。したがって、外径 37.5 mm の切れ目の幅は 7.5 mm である。視力 1.0 すなわち視角  $1'$  の Landolt 環の切れ目の幅は 1.5 mm であるから、7.5 mm は  $5'$  に相当する。最小可視角の逆数が視力なので、 $\frac{1}{5} = 0.2$  になる。

**コメント** 選択肢には 0.2 はないので、不適切問題である。

- 33 Seidel 収差でないのはどれか。

- a. 色収差    b. 球面収差    c. コマ収差    d. 非点収差    e. 歪曲収差

解答：a

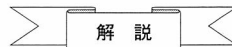


Seidel の 5 収差とは球面収差、コマ収差、非点収差、歪曲収差のほかに像面湾曲がある。

- 34 誤っているのはどれか。

- a. プリズムは光線を基底方向に曲げる。
- b. プリズムを通して見た物体の像は虚像である。
- c. プリズムを通して見た物体の像は基底の方へ偏位する。
- d. レンズ系の像空間にプリズムを挿入すると像は基底の方へ偏位する。
- e. 凹レンズの光学中心を下方偏位すると基底上方のプリズム効果となる。

解答：b



プリズムを通して見る物体は実像で、虚像にはならない。

- 35 logMAR の値が 1.0 の視力はどれか。

- a. 0.1    b. 0.3    c. 0.5    d. 1.0    e. 2.0

解答：a

解説

$\log x = 1.0$  で、 $x = 10$  である。最小可視角が  $10'$  の小数視力は  $0.1$  である。

36 調節時に最も大きな眼屈折変化をきたすのはどれか。

- a. 眼軸長
- b. 前房深度
- c. 水晶体
- d. 角膜曲率
- e. 水晶体前面曲率

解答：e

解説

調節は毛様体筋のうちの輪状筋が収縮して、毛様体小帯が弛緩するために水晶体の前面曲率が増す現象である。

38 視力発達の障害になりにくいのはどれか。

- a. 近視
- b. 遠視
- c. 乱視
- d. 斜視
- e. 不同視

解答：a

解説

弱視には遠視性弱視、斜視弱視、不同視弱視のほか、経線弱視がある。このうち、経線弱視の存在は人間では問題がある。近視は近くの物体は網膜上に明瞭な像が写るので、弱視にはなりにくい。

40 二焦点眼鏡の像の跳躍で誤っているのはどれか。

- a. 遠用と近用の境界部で起こる。
- b. 像の跳躍は境界部のプリズム効果が原因である。
- c. 近視眼の場合にはフラットトップで跳躍が大きい。
- d. 遠視眼の場合にはラウンドトップで跳躍が小さい。
- e. フランクリンタイプ（エグゼクティブタイプ）では像の跳躍はない。

解答：c

解説

近用部（小玉）の中心が境界線までの距離が大きいほど跳躍は大きい。したがってラウンドトップよりフラットトップの方が跳躍は小さい。

41 視力検査の結果、右  $0.2(1.2 \times -2.00 D \text{ cyl} -1.00 D \text{ Ax } 90^\circ)$  である。

正しいのはどれか。

- a. 等価球面度数は  $-2.50 D$  である。
- b. 乱視の強主経線は  $90^\circ$  である。

- c. 前焦線に球面度数を合わせて乱視の矯正を行う。
- d. -1.50 D の矯正では、赤緑2色試験で緑の方がはっきり見える。
- e. 放射線乱視表の最も鮮明な方向がマイナス円柱レンズの軸である。

解答：a

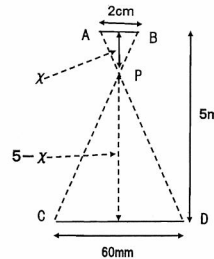
解 説

等価球面度数は（球面レンズ度 +  $\frac{1}{2}$  円柱度）であるので -2.50D である。円柱レンズの度数が  $90^\circ$  なので強主経線は  $180^\circ$ ，放射線乱視表を使うときには後焦線に球面レンズ度を合わせて、また、クロスシリンダーを用いるときには球面度数を最小錯乱円に合わせて乱視の矯正をする。-1.50D の矯正では近視の低矯正になるので、赤緑2色試験では赤の方がはっきり見える。放射線乱視表のボケている方向にマイナス円柱レンズの軸を入れる。

48 Pola test 5 m の距離で立体視標が交差性に 2 cm ずれているとき、瞳孔間距離 60 mm の人が見ると飛び出して見える距離はどれか。

- a. 50 cm
- b. 75 cm
- c. 100 cm
- d. 125 cm
- e. 150 cm

解答：d



解 説

$\triangle ABP$  と  $\triangle CDP$  とは相似であるから、 $\chi : (5 - \chi) = 2 : 6$  である。したがって、 $\chi = 1.25 \text{ m} = 125 \text{ cm}$

65 硫酸アトロピンの副作用でないのはどれか。

- a. 頻脈    b. 下痢    c. 口渴    d. 眼圧上昇    e. 顔面紅潮

解答：b

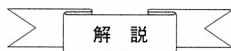
解 説

硫酸アトロピンは副交感神経麻痺薬である。そこで、交感神経興奮作用が表面に出てくることもある。心拍数の増加による頻脈、唾液腺の分泌抑制のための口渴、散瞳による眼圧上昇、血管拡張による顔面紅潮がある。このほか、腸の蠕動の抑制による便秘が起こる。そこで、b の下痢が副作用でない。

67 正しいのはどれか。

- a. 点眼の1滴は約  $1 \mu\text{l}$  である。
- b. 2 剤点眼では点眼間隔をあける。
- c. 低濃度の点眼薬は頻回点眼する。
- d. 点眼後開眼して全身吸収を防ぐ。
- e. 点眼瓶の先端は眼瞼縁に接触させる。

解答：b

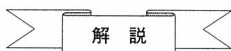


点眼の1滴は約50  $\mu$ lである。

86 誤っているのはどれか。

- a. 若年者には倒乱視が多い。
- b. 球面収差は調節によって変動する。
- c. 遠視では老視の自覚症状の発現が早い。
- d. 混合乱視の前焦線は網膜より前にある。
- e. 早期発生近視は眼軸長の過伸展が主因である。

解答：a

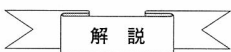


乱視の推移は幼児期には倒乱視，小学校に入学する頃から直乱視に移行し，その後，倒乱視が増加して40歳くらいで倒乱視が直乱視より多くなる傾向にある。

91 矯正下の両眼視力でWHOによるロービジョンの基準はどれか。

- a. 0.01 以上 0.5 未満
- b. 0.02 以上 0.3 未満
- c. 0.02 以上 0.5 未満
- d. 0.05 以上 0.3 未満
- e. 0.05 以上 0.5 未満

解答：d



WHOのロービジョンの基準を知らないと正答が得られない。我が国では社会的に0.04以上0.3未満を弱視という。

午後

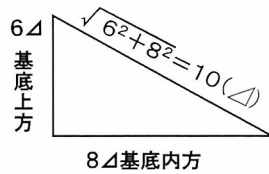
4 内方偏位8 $\Delta$ ，上方偏位6 $\Delta$ を中和するプリズム量とプリズム基底方向の組み合わせで正しいのはどれか。

- a. 9 $\Delta$  ——— 耳側上方
- b. 10 $\Delta$  ——— 耳側下方
- c. 11 $\Delta$  ——— 耳側上方
- d. 12 $\Delta$  ——— 耳側下方
- e. 13 $\Delta$  ——— 耳側上方

解答：b

解説

計算式は下図のようになる。



16 遠視性屈折異常弱視児が眼鏡を外すと内斜視になる。

考えられるのはどれか。

- a. 開散麻痺
- b. 外転神経麻痺
- c. 重症筋無力症
- d. 調節性内斜視
- e. 交代性上斜位

解答：d

解説

調節性内斜視が考えられる。

17 弱視が両眼に発症し得るのはどれか。2つ選べ。

- a. 斜視弱視
- b. 不同視弱視
- c. 屈折異常弱視
- d. 微小斜視弱視
- e. 形態覚遮断弱視

解答：c, e

解説

斜視，不同視，微小斜視では通常，片眼は正常の矯正視力をもつ。

24 二重焦点レンズの処方が適応となる内斜視はどれか。

- a. 遠見斜視角 = 近見斜視角
- b. 遠見斜視角 > 近見斜視角
- c. 遠見斜視角 < 近見斜視角
- d. 上方斜視角 > 下方斜視角
- e. 上方斜視角 < 下方斜視角

解答：c


 解説

遠見斜視角より近見斜視角の大きい症例に二焦点レンズが必要になる。

32 30歳の男性。不同視を以下の眼鏡で矯正されている。

右： $+2.00\text{ D} \ominus \text{cyl} -3.00\text{ D Ax } 90^\circ$

左： $-2.00\text{ D} \ominus \text{cyl} -2.00\text{ D Ax } 90^\circ$

眼鏡レンズの光学中心から 10 mm 下方を通して近方視するとき、プリズム効果によって上下方向の複視を訴えている。

対応で誤っているのはどれか。

- 角膜の屈折矯正手術で矯正する。
- コンタクトレンズで矯正する。
- 左眼レンズの加工によりプリズム効果を減少させる。
- 眼鏡レンズの光学中心を両眼とも 5 mm 下げる。
- 眼鏡レンズの光学中心間距離を瞳孔間距離よりも大きくする。

解答：e


 解説

眼鏡レンズの光学中心から 10 mm 下方では、右眼では Prentice の公式から  $2\Delta$  基底上方、左眼では  $2\Delta$  基底下方のプリズム効果がある。角膜屈折矯正手術、コンタクトレンズ矯正ではプリズム効果がないために複視は生じない。また、左眼レンズにプリズム効果を減じる加工をすれば対処できる。また、光学中心を 5 mm 下げるとプリズム効果は半減する。眼鏡レンズの光学中心距離を瞳孔間距離より大きくしても上下方向の複視を減じることはできない。

33 10歳の男児。角膜頂点を基準に調節遠点と調節近点を測定すると、それぞれ、眼後方 20 cm と眼前 20 cm である。

誤っているのはどれか。

- 屈折度は遠視である。
- 調節力は 10D である。
- 眼鏡での矯正度数は +5.00D である。
- CL 矯正では近点位置は眼前 10 cm となる。
- CL 矯正よりも眼鏡矯正の方が近方調節時の負担が大きい。

解答：d


 解説

調節遠点が眼後方 20 cm であるから、5D の遠視である。また、調節近点が眼前 20 cm であるので、5D の遠視を考えると、調節力は 10D になる。遠視眼では、眼鏡矯正は CL 矯正より調節力を必要とするので（見かけの調節が負の方向に働く）、眼鏡矯正の方が近方調節時の負担は大きい。CL 矯正では見かけの調節力はないので近点位置は 20 cm である。



- 34 60歳の男性。片眼の白内障のため水晶体摘出術を受けた。術後の遠点は角膜面から後方 85 mm である。この無水晶体眼の矯正で不等像の影響が最も少ないのはどれか。
- 角膜上で +11.75 D のコンタクトレンズ
  - + 10.00 D で頂間距離 15 mm の眼鏡レンズ
  - 眼前 115 mm で +5.00 D の手持ちレンズ
  - 眼前 250 mm で +3.00 D の手持ちレンズ
  - 眼前 415 mm で +2.00 D の手持ちレンズ

解答：a

解説

眼鏡による網膜像の拡大効果は  $SM \div dL$ 。ここで、 $SM(\%)$ ：眼鏡レンズによる拡大・縮小、 $d(\text{cm})$ ：角膜頂点からレンズ後面までの距離、 $L(\text{D})$ ：レンズ度、である。a は  $0 \times +11.75$ 、b は  $1.5 \times +10.00$ 、c は  $11.5 \times +5.00$ 、d は  $25.0 \times +3.00$ 、e は  $41.5 \times +2.00$  で、不等像視の最も少ないのは a になる。

- 35 20歳の女性。コンタクトレンズの処方を希望して来院した。ハードコンタクトレンズ (BC 8.10/ P +5.50/ S 8.8) を処方したところ、フィッティング検査ではベースカーブが 0.10 mm フラットで、適正矯正の追加屈折値は -0.75 D である。

ベースカーブが 8.00 mm の場合の適切なレンズ屈折力はどれか。

ただし、BC: base curve, P: power, S: size である。

- +3.75 D
- +4.25 D
- +4.75 D
- +5.25 D
- +5.75 D

解答：c

解説

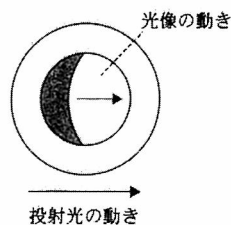
0.10 mm フラットであるので、BC を 8.00 mm に変更したところ追加矯正は -0.75D である。したがって、屈折力は  $+5.50 - 0.75 = +4.75\text{D}$  である。

- 36 開散光を用いて 50 cm の距離で検影したとき得られる所見を図に示す。

考えられるのはどれか。2つ選べ。

- 5 D の近視
- 3 D の近視
- 2 D の近視
- 正視
- 1 D の遠視

解答：d, e



解説

この図で光影の動きは 50 cm の検影距離で同行であるから、2D 未満の近視、正視、遠視である。2D の近視では中和、2D を超える近視では逆行である。

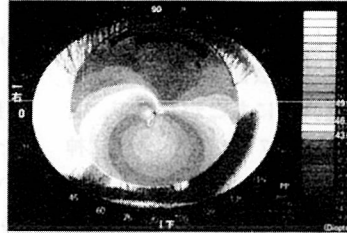
41 21歳の男性。視力低下を主訴に来院した。右眼視力は $0.3(0.6 \times -2.50D \subset cyl -5.25D Ax120^\circ)$ 。ケラトスコープ測定結果に基づく角膜トポグラフィ（角膜表面各地点での曲率半径をもとに計算した角膜屈折力の分布を地図状に表示したもの）（別冊 No. 2）を別に示す。

適切な視力の矯正方法はどれか。

(別冊 No. 2) 問題 4 1

- a. 眼内レンズ
- b. プリズムレンズ
- c. 多焦点眼鏡レンズ
- d. ソフトコンタクトレンズ
- e. ハードコンタクトレンズ

解答：e



解説

乱視が強いこと、角膜トポグラフィ所見で角膜の頂点は角膜中心より下方にあること、などから診断は円錐角膜である。円錐角膜の適切な視力矯正法としては、ハードコンタクトレンズである。