
 総 説

眼内レンズ挿入眼の収差と偽調節

根岸 一乃

慶應義塾大学医学部眼科学講座

Aberration and Pseudoaccommodation in a Pseudophakic Eye

Kazuno Negishi

Department of Ophthalmology, Keio University School of Medicine

眼内レンズ (IOL) 挿入眼における収差と偽調節の関係について、網膜像シミュレーションを行い、検討した。その結果、IOL 挿入眼の偽調節にはコマ収差および球面収差が関与している可能性があると考えられた。また、組み合わせによっては、単独の収差よりも複数の収差が存在した方が、偽調節量が大きくなると考えられた。概して、遠方明視および近方明視を狙った場合のどちらにおいても、許容される屈折誤差は 0.5 D 未満と考えられた。

(視覚の科学 26: 2-7, 2005)

キーワード: 眼内レンズ, 偽調節, 球面収差, コマ収差

The relation between aberration and pseudoaccommodation in a pseudophakic eye was studied by simulating retinal images. The results showed that coma and spherical aberrations might be related to pseudoaccommodation in the pseudophakic eye. Plural aberrations sometimes produce more pseudoaccommodation than single aberrations, according to the combination. Generally speaking, the allowable error of target refraction is under 0.5 D when the target refraction is both distant and near.

(Jpn J Vis Sci 25: 2-7, 2005)

Key Words: Intraocular lens, Pseudoaccommodation, Spherical aberration, Coma aberration

1. はじめに

近年、白内障手術後患者の術後視機能への要求度は確実に上がっている。これに伴い、眼内レンズ (以下 IOL) の開発は、安全性および手術操作性の向上ばかりでなく、術後の quality of vision (以下 QOV) の向上にも重点がおかれている。

IOL 挿入眼の QOV に影響を与える因子としては、IOL の光学特性、および IOL 挿入後の解剖学的問題や生体反応などが挙げられるが、現状で残されている最も大きな問題点は調節力の欠如であろう。最近

では種々の多焦点 IOL¹⁻⁹⁾ や調節 IOL⁴⁻⁹⁾ などが発売されているが、いずれも完全とはいえない。一方、単焦点 IOL 挿入眼の一部にはいわゆる「偽調節」によって遠近とも日常生活に必要な視力が得られるものがあることは以前から知られている¹⁰⁾。近年、波面収差測定が可能となり、偽調節に収差の存在が関与していることが報告された^{11, 12)} が、「偽調節」時の視覚の quality については詳細に検討されていない。本稿では IOL 挿入眼における収差と偽調節について、網膜像シミュレーションを中心に検討し、まとめた。

 別刷請求先: 160-8582 東京都新宿区信濃町 35 慶應義塾大学医学部眼科学講座 根岸一乃
(2005年2月21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 February 21, 2005)

2. 正常眼と偽水晶体眼の収差の違い

偽水晶体眼の収差については過去に報告されている^{13, 14)}。

球面 IOL 挿入眼の収差は白内障術前および同年代正常眼の収差と有意差がないが、若年正常眼よりは有意に大きい。この理由は、角膜は正の球面収差をもつが、若年者では水晶体が負の球面収差をもつため角膜の収差が代償され、眼球全体の収差が軽減されるのに対して、球面 IOL は正の球面収差をもつため、角膜の球面収差が代償されず、光学的な性能が低下するからである^{13, 14)} (図1)。また、IOL の球面収差はレンズパワーとともに大きくなるため、眼球全体の球面収差もそれにつれて大きくなる¹⁴⁾。最近このような問題の解決を目指した非球面 IOL が臨床応

用されている^{15, 16)}。このレンズは角膜の球面収差を代償するように設計された IOL で、コントラスト感度の上昇、とくに瞳孔が散大して球面収差の影響が強くなる夜間の視機能の向上が報告されている^{15, 16)}。しかし、過去に報告されているように、収差は、コマ収差をはじめとして、IOL の偽調節に関与している可能性がある^{11, 12)}。多焦点 IOL などの一部の特殊なレンズを除き、調節力の欠如は現在の IOL の最も大きな問題点であるので、極端な光学性能の低下がなければ、偽調節を与える収差はむしろ QOV の向上につながる可能性もあると考えられる。

3. 偽調節への単色収差の影響

それでは、IOL 挿入眼の収差が偽調節に与える影響はどの程度だろうか。一般に収差が点像に与える影響は表1のごとくである。これらの影響について網膜像シミュレーションソフト Retinage™を用いて、網膜像シミュレーションを行った結果が図2である。シミュレーションに使用した収差量は球面 IOL 挿入眼10眼の平均収差量を基準として決定したが、図3のみ結果をわかりやすくするため収差量を $0.4\mu\text{m}$ に増やした。図2では IOL の焦点を2mに合わせた場合(-0.5 D)のコマ収差の有無による偽調節効果についてシミュレーションしている。収差がない場合と比較すると、コマ収差がある方が偽調節幅が広いことがわかる。また、図3のシミュレーション結果から偽調節効果は方向によらないことがわかる。球面収差、非点収差についても同様にシミュレーションすると、球面収差は偽調節効果が認められるが、非点収差には偽調節効果がないことがわかった(図4, 5)。また、収差の組み合わせによっては単独よりも偽調節効果が大きいこともわかった(図6)。このように、IOL 挿入眼において収差は偽調節に役立っていることがわかった。多焦点および調節 IOL が臨

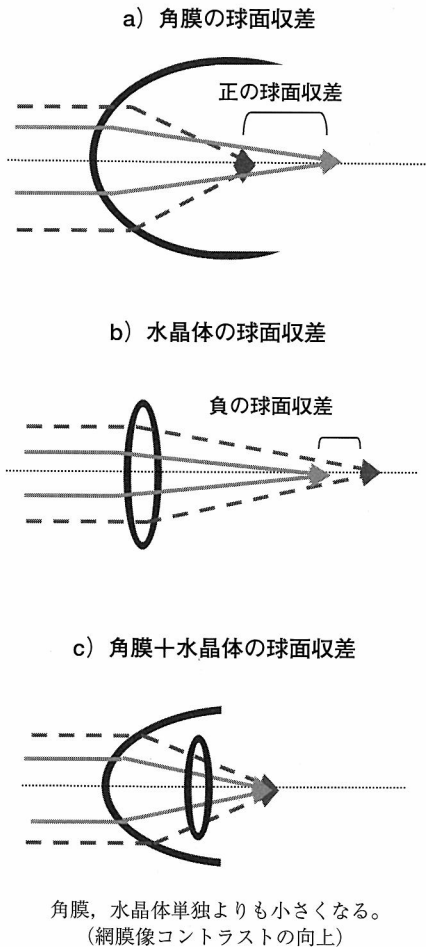


図1 正常眼における収差

表1 収差の点像への影響

収差	点像
プリズム $Z_{1,2}$	横移動
非点収差 $Z_{3,5}$	ボケ
Defocus Z_4	焦点距離の変化
コマ収差 $Z_{7,8}$	ボケ
球面収差 Z_{12}	焦点距離の変化, ボケ

ゼルニケの球面収差には Defocus 成分が含まれる

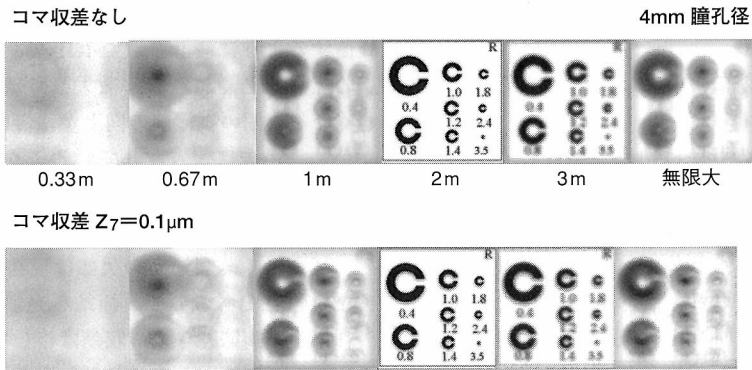


図2 コマ収差と偽調節
 コマ収差は偽調節の作用あり。

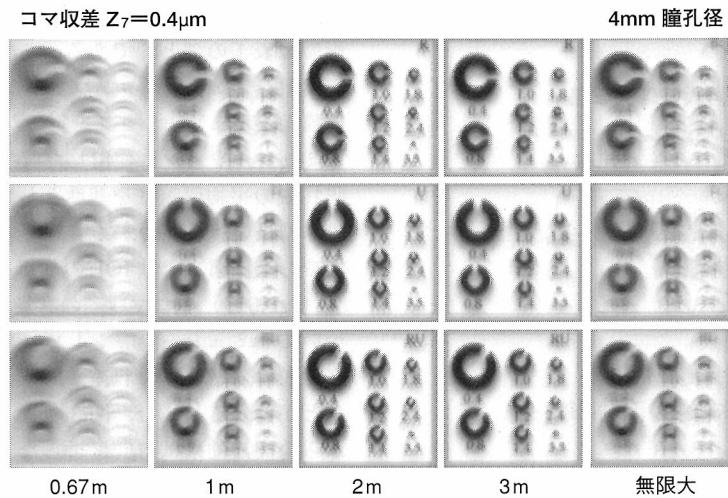


図3 コマ収差と偽調節 (方向性)
 方向によらず偽調節あり。

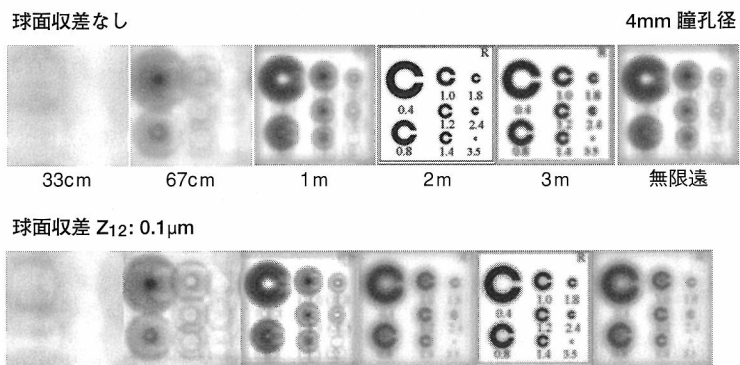


図4 球面収差と偽調節
 球面収差は偽調節の作用あり。

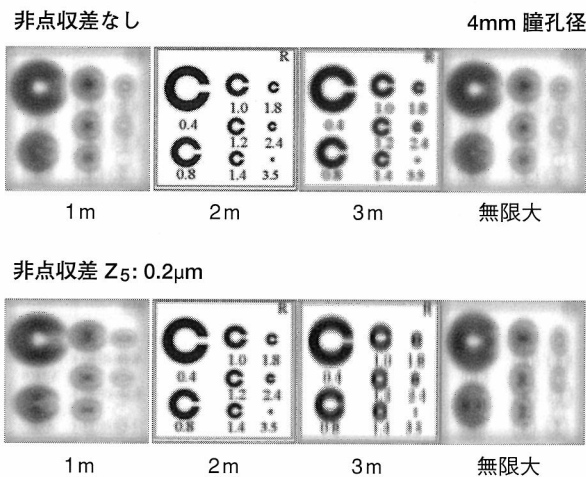


図5 非点収差と偽調節
非点収差は偽調節とは関係ない。

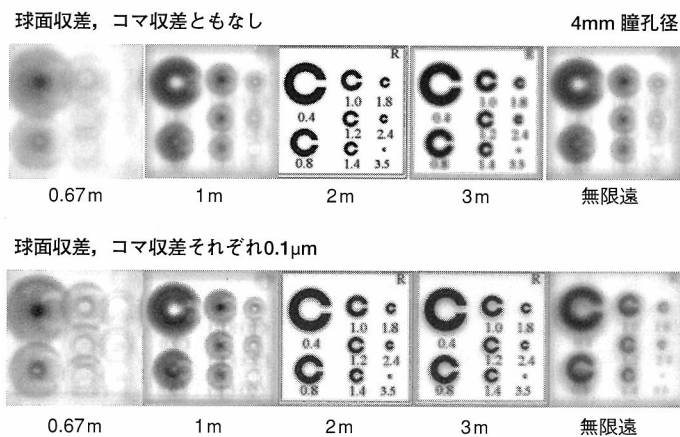


図6 球面収差+コマ収差と偽調節
焦点が遠方に移動する。単独の収差よりも偽調節効果大きい。

床応用されているものの、IOLによる完璧な調節が存在しない現状において、前述の非球面IOLのように、低収差で網膜像コントラストの改善を目指すのと、収差を残して偽調節効果などを狙うのとどちらがメリットがあるかは今後の課題であろう。

4. 偽調節からみたIOL度数予測誤差の許容範囲

さて、白内障術後に良好な視力が得られることが当然となっている現在では、IOL度数の予測誤差は大きな問題の一つとなっている。それでは、偽調節

まで考慮した場合、予測誤差の許容範囲はどの程度だろうか。瞳孔径が小さいほど明視域が広いことは当然だが、紙面の都合もあり、1例として3mm瞳孔径の場合を図に示す。図7は屈折が0～-1Dのときの各距離における見え方をそれぞれシミュレーションしたものである。単純化のため、高次収差はないものとした。この場合、焦点位置が無限大(0D)のとき、無限遠～2m付近までが明視域であることがわかる。次に屈折が-0.5Dになった場合、明視域は無限遠～1m付近であり、遠方をまだ明視できるが、

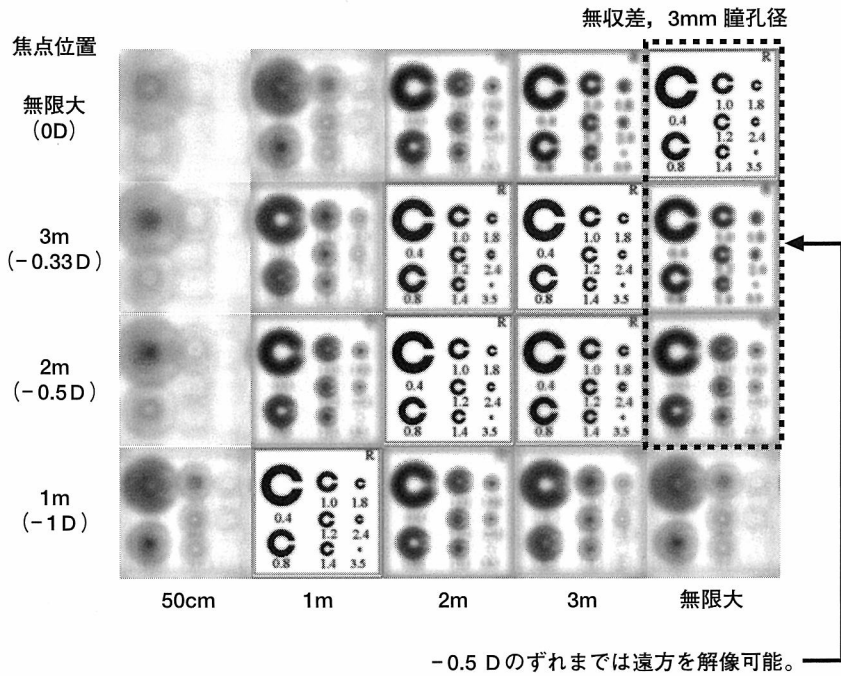


図7 単焦点眼内レンズ (IOL) と偽調節 (遠方狙い)

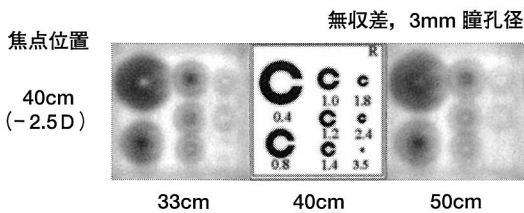


図8 単焦点IOLと偽調節 (近方狙い)
0.5Dのずれでもかなり像がぼける。

屈折が-1Dになると明視域は3m付近～1m付近までとなり、もはや遠方は明視できないことが予測される。このシミュレーションでは神経系の影響は含まれていないが、この結果から、概して、遠方明視を狙ってIOLを挿入した場合、許容される予測誤差は-0.5D以内であることがわかる。同様に、図8は屈折が-2.5Dの場合の明視域を示すが、この場合は屈折が0.5Dずれただけでかなり視標がぼけるのがわかる。近見は患者自らが対象までの距離を比較的簡単に調節することが可能 (読書時の本の位置など)ではあるが、厳密に言えば許容範囲は0.5D未満と考えられる。

以上より、モノフォーカルIOLにおいて、IOL度数の予測精度の向上は非常に重要な課題であると考えられた。

5. おわりに

今回のシミュレーションから、本来調節力のない単焦点IOL挿入眼においても多少の偽調節があり、それらは全体としての収差や瞳孔径に影響を受けることが推察された。近年、IOLの調節力欠如を改善するべく、新しいタイプの多焦点IOLや調節IOLの開発が行われているが、これらについてもIOLそのものの光学特性だけでなく、生体眼に挿入されたときの条件、すなわちIOL挿入眼全体としての収差や瞳孔径などを考慮して、性能を改良していくべきであると考えられる。

稿を終えるにあたり、全般にわたり、ご協力、ご教示をたまわりました千葉大学工学部助教授 大沼一彦先生に深謝いたします。

文 献

- 1) Bellucci R: Multifocal intraocular lenses. *Curr Opin Ophthalmol* 16: 33-37, 2005.
- 2) Sen HN, Sarikkola AU et al: Quality of vision after AMO Array multifocal intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 30: 2483-2493, 2004.
- 3) Alio JL, Tavolato M et al: Near vision restoration with refractive lens exchange and pseudoaccommodating and multifocal refractive and diffractive intraocular lenses. Comparative clinical study. *J Cataract Refract Surg* 30: 2494-2503, 2004.
- 4) Dick HB: Accommodative intraocular lenses: Current status. *Curr Opin Ophthalmol* 16: 8-26, 2005.
- 5) Findl O, Kriechbaum K et al: Laser interferometric assessment of pilocarpine-induced movement of an accommodating intraocular lens. *Ophthalmology* 111: 1515-1521, 2004.
- 6) Kuchle M, Seitz B et al: Comparison of 6-month results of implantation of the 1CU accommodative intraocular lens with conventional intraocular lens. *Ophthalmology* 111: 318-324, 2004.
- 7) Dogru M, Honda R et al: Early visual results with the 1CU-accommodating intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 31: 895-902, 2005.
- 8) Cumming JS, Slade SG & Chayet A: Clinical evaluation of the model AT-45 silicone accommodating intraocular lens. *Ophthalmology* 108: 2005-2009, 2001.
- 9) Mastropasqua L, Toto L et al: Clinical study of the 1CU accommodating intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 29: 1307-1312, 2003.
- 10) Hillman JS & Bradbury JA: Apparent accommodation by myopic astigmatism with monofocal intraocular lenses. *Eur J Implant Refract Surg* 2: 101-104, 1990.
- 11) Fukuyama M, Oshika T et al: Relationship between apparent accommodation and corneal multifocality in pseudophakic eyes. *Ophthalmology* 106: 1178-1181, 1999.
- 12) Oshika T, Mimura T et al: Apparent accommodation and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43: 2882-2886, 2002.
- 13) Guirao A, Redondo M et al: Corneal optical aberrations and retinal image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted. *Arch Ophthalmol* 120: 1143-1151, 2002.
- 14) Barbero S, Marcos S & Jimenez-Alfaro I: Optical aberrations of intraocular lenses measured in vivo and in vitro. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 20: 1841-1851, 2003.
- 15) Packer M, Fine IH et al: Improved functional vision with a modified prolate intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 30: 986-992, 2004.
- 16) Kershner RM: Retinal image contrast and functional visual performance with aspheric, silicone, and acrylic intraocular lenses. Prospective evaluation. *J Cataract Refract Surg* 29: 1684-1694, 2003.

原 著

動的視野検査における孤立暗点の計測アルゴリズムに関する研究

鈴木 尚人

株式会社ニデック 医療機器開発部

Research on an Algorithm for Measuring Isolated Scotomata in Kinetic Perimetry

Naoto Suzuki

R&D Department, NIDEK Co., LTD

緑内障などの検査に視野検査が行われている。動的視野検査は周辺視野の評価可能などの理由で、静的視野検査とともに行われている。孤立暗点の計測は手動で視標を提示して行うため、熟練の検査者であっても短時間の計測は困難であった。動的視野検査の自動化の試みは古くからあるが、実用化されていない。そこで、孤立暗点の推定位置を自動で提示し、検査の簡略化を図るアルゴリズムを提案する。実験は Goldmann 式動的視野計を用いて15名の検査を行い、イソプターの曲率と孤立暗点の重心の関係を求めた。結果は2本のイソプター間距離と孤立暗点の重心の相関係数が0.774となり、強い相関が存在した。

(視覚の科学 26: 8-12, 2005)

キーワード：動的視野検査, 孤立暗点, アルゴリズム

Perimetry is conducted for visual field testing in glaucoma. Kinetic perimetry and static perimetry are conducted because they enable the inspection and evaluation of the surrounding visual field. All optometrists or doctors must display many visual points manually to measure isolated scotomata. This takes considerable time, even for a skilled optometrist. Though an automated kinetic perimeter has not yet been made practicable, the author suggests some algorithms for estimating the positions of isolated scotomata and shortening perimetry time. In this experiment, 15 persons were inspected by Goldmann kinetic perimeter to research the relation between isopter curvatures and the centers of isolated scotomata. Results show the correlation coefficient between the distances of two isopters and the centers of the isolated scotomata to be 0.774, a high level of correlation.

(Jpn J Vis Sci 26: 8-12, 2005)

Key Words: Kinetic perimetry, Isolated scotomata, Algorithm

1. はじめに

緑内障^{1, 2)}、網膜色素変性症およびその他の網膜疾患³⁾、頭蓋内疾患⁴⁾、心因性視野障害⁵⁾などの疾患は視野検査の対象となる^{6, 7)}。視野検査は静的視野検査と

動的視野検査に分かれる。静的視野検査⁸⁾は視標位置を固定して提示する検査方法で、初期緑内障性視野障害の検出率が高く、各測定点の感度が数値化されるので、様々な統計処理⁹⁾により客観的な診断や経過観察¹⁰⁾が可能である^{11, 12)}。統計処理を使用して、臨床

別刷請求先：443-0038 愛知県蒲郡市拾石町前浜34-14 (株)ニデック医療機器開発部網膜診断機器グループ
網膜診断機器開発チーム 鈴木尚人
(2005年6月22日受理)

Reprint requests to: Naoto Suzuki Product Development, Retina Group, R&D Dept, NIDEK Co., LTD.
34-14 Maehama, Hiroishi-cho, Gamagori 443-0038, Japan
(Received and accepted June 22, 2005)

応用する試みも行われている^{13, 14)}。そのため、視野検査において主流になりつつある。一方、動的視野検査は周辺視野の評価や視野の全体像がつかめる、視力の弱い患者でも評価可能、長期観察が可能など¹⁵⁾の特徴があり、使用頻度が高い¹⁶⁻¹⁸⁾。

現状での動的視野計測は孤立暗点位置を計測するのに手動で視標を提示して行うため、熟練の検査者であっても、短時間での計測は困難であった^{4, 8)}。動的視野検査を自動化する試みは古くから行われてきたが、不完全であり、一般化していない¹⁹⁾。そこで動的視野検査において、孤立暗点位置の計測をできるだけ簡易に行えるようにするために、孤立暗点位置を推定し、視標の提示を自動で行えるアルゴリズムを提案する。

2. 方法および結果

1) 実験

Goldmann 視野計を用いて動的視野計測を行った。対象は無作為に選んだ15眼（男性7眼、女性8眼：緑内障3眼、下垂体近傍疾患11眼、視力障害1眼）で、年齢13～63歳（ 33.3 ± 16.2 歳、平均値±標準偏差）である。また右眼が8眼、左眼が7眼であった。紙に印刷された動的視野データを、左90°～右90°間が180mmになるように拡大コピーし、そのコピーした紙に描かれている数本のイソプターを方眼の升目のついたトレース紙に写し書きした。左90°～右90°間が180mmになるように拡大コピーしたため、トレース方眼紙の経度方向は1mmが視野の1°を示す。図1の四角い囲み範囲Aにあるイソプター I_{in} の凹みとイソプター I_{out} の中間に存在する孤立暗点（図1灰色の領域S）の重心 $G (X_G, Y_G)$ を求める。孤立暗点の面積 S を図1のように幅0.5°、上底 $L_i (^\circ)$ 、下底 $L_{i-1} (^\circ)$ ($i=0, 1, 2, \dots, n$) の $n+1$ 本の台形の短冊に

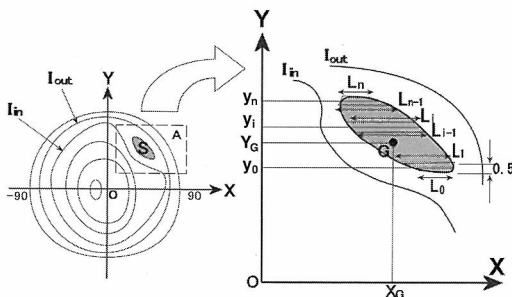


図1 孤立暗点領域の重心

分ける。各短冊の中央部のY座標 y_i とその長さ L_i を①式に代入し、重心 G のY座標 Y_G を求める。

$$Y_G = \frac{\int y dS}{S} \doteq \frac{\sum_{i=0}^n y_i \times (L_i + L_{i-1}) \times 0.5 \times 0.5}{\sum_{i=0}^n (L_i + L_{i-1}) \times 0.5 \times 0.5} \dots\dots\dots ①$$

S：孤立暗点の面積

①式に $Y \rightarrow X$ と入れ替えて上記と同様な方法で X_G について求める。

2) 重心の推定

次に①式で求めた重心 G をイソプターの曲率から推定した。図2のようにイソプター I_{in} 上の点で曲率が0（ゼロ）になる点を各々点 B, C と選ぶ。

点 B および C は窪みの両側にあり、曲率の中心が眼の中心窩側にあり、曲率半径が最小になる点である。また点 \blacktriangle の曲率の中心はイソプター I_{out} 側になる。線分 BC を等間隔1°ごとに分け、線分 BC からイソプター I_{in} に垂線を引き、その交点を B_i ($i=1, 2, \dots, n$) とする。 B_i と B_{i+1} の中点 \blacktriangle を通り、 B_i と B_{i+1} を通る直線 H_i に垂直な直線を直線 V_i とする。点 B および C から直線 V_i までの距離をそれぞれ d_{iB}, d_{iC} とする。 $|d_{iB} - d_{iC}|$ が最小になる場合の点 \blacktriangle を O' とする。また、図3のように直線 V_i を Y' 軸とし、直線 H_i を X' 軸とする。

この $X' Y'$ 座標系での孤立暗点の重心 G の座標 (X_G', Y_G') を求める。 X_G' は $-1.54 \sim 9.9^\circ$ ($1.25 \pm 2.78^\circ$ 、平均値±標準偏差) となり、重心 G は Y' 軸付近にあることがわかる。 Y_G' はイソプター I_{in} と I_{out} の距離と関係がある。 Y_G' はイソプター I_{in} と I_{out} 間が狭い場合に小さい値になり、広い場合に大きな値となる。そのため、イソプター I_{out} と Y' 軸との交点の Y' 座標を Y_{max}' とする。 Y_G' と Y_{max}' との相関係数お

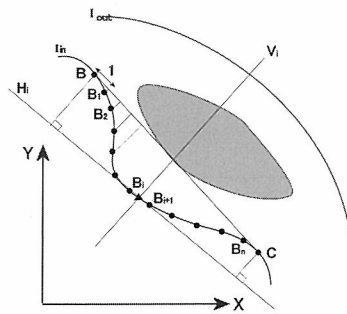


図2 イソプター I_{in} での座標系

よび回帰直線を求める。

相関係数	回帰直線	p 値 (有意確率)
0.774	$Y_G' = 0.5049Y_{max}' - 2.0989 \dots \textcircled{2}$	0.000705

相関係数は0.774となり、高い相関があった。また p 値 (有意確率) = 0.000705 < 0.05 となり、回帰直線 ②式は有意水準 0.05 において意味があることを確認した。図 4 に Y_G' と Y_{max}' との関係を示す。

次に15眼分の視野データの Y_{max}' をそれぞれ②式に代入し、Y' 座標 \bar{Y}_G' を求める。(X' 座標, Y' 座標) = (0, \bar{Y}_G') となる点を推定重心 \bar{G} とする。

3) 孤立暗点の範囲

\bar{G} が図 5 の孤立暗点の範囲 (濃い灰色領域) に入るのは15眼中7眼であった。

残りの8眼は点 \bar{G} を開始点とし、視標を動的に動かし、領域 BCDE の中にある孤立暗点を探すことを考える。視標の提示方法は上記の結果で孤立暗点の重心が Y' 軸付近であったことから、Y' 軸に沿って行う。図 5 で孤立暗点が Y' 軸を通り、Y' 座標値の大き

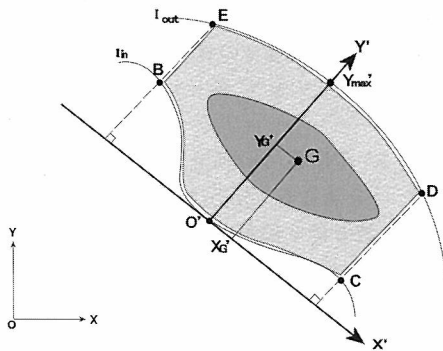


図3 イソプターの凹領域における座標変換

い点を F_{up} , 小さい点を F_{down} とする。点 \bar{G} は Y' 座標が F_{up} よりも大きい場合の \bar{G}_{up} と、小さい場合の \bar{G}_{down} との2とおりが考えられる。 \bar{G} が図 5 の孤立暗点の範囲 (濃い灰色領域) に入らなかった8眼のうち、 \bar{G}_{up} 5眼, \bar{G}_{down} 3眼であった。そのため、視標を提示する軌跡は最初、点 $\bar{G} \rightarrow$ 点 O' とする。もし点 $\bar{G}-O'$ 間に孤立暗点がない場合は点 $\bar{G} \rightarrow$ 点 Y'_{max} とする。孤立暗点を見つけるのに必要な角度を求める。点 \bar{G} が \bar{G}_{up} である場合の角度は (\bar{G}_{up} の Y' 座標) - (F_{up} の Y' 座標) となる。また、点 \bar{G} が \bar{G}_{down} である場合は (\bar{G}_{down} の Y' 座標) + (F_{down} の Y' 座標) となる。点 \bar{G} から孤立暗点を求めるのに要する角度は $0.98 \sim 85.3^\circ$ ($19.83 \pm 31.92^\circ$, 平均値 \pm 標準偏差) となった。

4) 輪郭の決定法

図 6 は孤立暗点の輪郭の決定方法を示す。図 6 左は点 \bar{G} が孤立暗点内にある場合で、点 \bar{G} から孤立暗点の輪郭を探す。また、図 6 右は点 \bar{G} が孤立暗点外にある場合 (\bar{G}_{down} または \bar{G}_{up}) で、点 F_{down} と点 F_{up} の中点を点 F_{mid} とする。

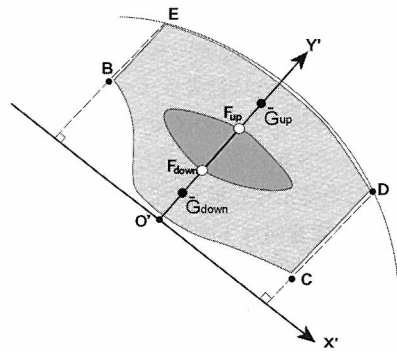


図5 視標提示方法

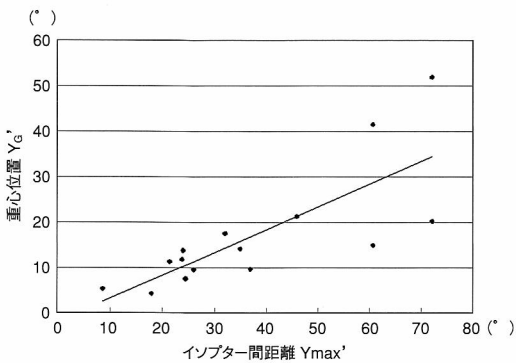


図4 孤立暗点の重心 Y_G' とイソプター間距離 Y_{max}'

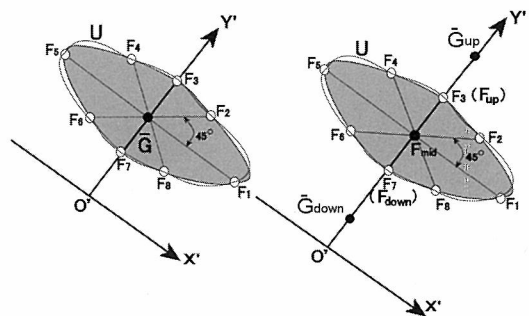


図6 暗点の輪郭

点 \bar{G} および点 F_{mid} は孤立暗点の内部にあるため、点 \bar{G} (点 F_{mid}) から視標を遠心的に提示して輪郭を探すことを考える。以下、孤立暗点の輪郭を探す方法は点 \bar{G} および点 F_{mid} は同一であるため、点 \bar{G} のみの記載とする。点 \bar{G} から X' 軸に平行な直線をとリ、輪郭と重なった点を F_1 とする。点 \bar{G} から放射状に 45° 間隔でそれぞれ $F_2 \sim F_8$ を求める。例えば、 F_2 は直線 $\bar{G}F_1$ と直線 $\bar{G}F_2$ のなす角度が 45° を示す点となる。点 $F_1 \sim F_8$ の (X' 座標, Y' 座標) = (FX'_i, FY'_i) とする ($i=1 \sim 8$)。点 $F_1 \sim F_8$ を通るスプライン曲線^{20, 21)} U を求め、曲線 U 内部の面積 S_U を求める。 S_U と孤立暗点面積 S を比較する。9 個の閉曲線データ点 $F_1 (FX'_1, FY'_1)$, 点 $F_2 (FX'_2, FY'_2)$, \dots , 点 $F_8 (FX'_8, FY'_8)$, 点 $F_9 (FX'_9, FY'_9)$ を用いて 3 次の周期スプラインによる閉曲線を求める。ここで点 F_9 の座標は点 F_1 と同一であり、 $FX'_9=FX'_1$, $FY'_9=FY'_1$ とし、閉曲線として求めるために使用する。助変数 $\theta = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{FY'}{FX'}$ とする。接点 ξ_i は 3 次関数で、9 個の閉曲線データを用いるため、

$$\begin{aligned} \xi_i &= \theta_{i+8} - (\theta_9 - \theta_1) & (i = -2, -1, 0) \\ \xi_i &= \theta_i - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{FY'}{FX'} & (i = 1, \dots, 9) \quad \dots\dots\dots ③ \\ \xi_i &= \theta_{i-8} + (\theta_9 - \theta_1) & (i = 10, 11, 12) \end{aligned}$$

となる。

3 次のスプライン, $x(\theta), y(\theta)$ は

$$\begin{aligned} x(\theta) &= \sum_{j=1}^2 \alpha_{j-2} \cdot \{N_{j-2,4}(\theta) + N_{j+6,4}(\theta)\} \\ &+ \sum_{j=1}^5 \alpha_j \cdot N_{j,4}(\theta) + \alpha_6 \cdot \{N_{-2,4}(\theta) + N_{6,4}(\theta)\} \quad \dots\dots\dots ④ \end{aligned}$$

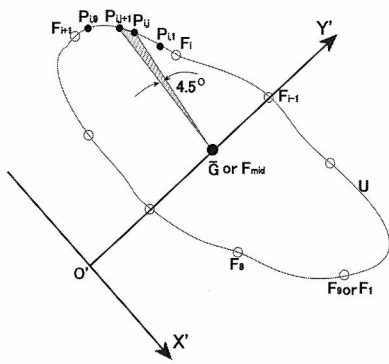


図7 曲線 U 内部の面積

$$\begin{aligned} y(\theta) &= \sum_{j=1}^2 \beta_{j-2} \cdot \{N_{j-2,4}(\theta) + N_{j+6,4}(\theta)\} \\ &+ \sum_{j=1}^5 \beta_j \cdot N_{j,4}(\theta) + \beta_6 \cdot \{N_{-2,4}(\theta) + N_{6,4}(\theta)\} \quad \dots\dots\dots ④ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{k,l}(\theta) &= \frac{\xi_{k+l} - \theta}{\xi_{k+l} - \xi_{k+1}} \cdot N_{k+1, l-1}(\theta) + \frac{\theta - \xi_k}{\xi_{k+l-1} - \xi_k} \cdot N_{k, l-1}(\theta) \\ &(k = -2, -1, \dots, 10 : l = 2, 3, 4) \quad \dots\dots\dots ⑤ \end{aligned}$$

$$N_{k,1}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\xi_k \leq \theta < \xi_{k+1}) \\ 0 & (\theta < \xi_k, \theta \geq \xi_{k+1}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots ⑥$$

となる。③式の助変数 θ_i を考慮して、点 $F_1 \sim F_8$ を④～⑥に代入し B-スプラインの値を計算すると、それぞれ 8 元連立 1 次方程式が得られる。これらの式から、 α_i, β_i ($i=-1 \sim 6$) を得る。求めた、 α_i, β_i をそれぞれ④式に代入し、 $x(\theta), y(\theta)$ を得る。

求めた $x(\theta), y(\theta)$ 式から閉曲線 U 内部の面積 S_U を計算する。図 7 のように閉曲線 U 上の点 F_i ($i=1 \sim 9$) と F_{i+1} の間に点 $P_{i,j}$ ($j=1 \sim 9$) をとり、 $\angle PX_{i,j} \bar{G} P_{i,j+1} = 4.5^\circ$ とする。点 $P_{i,j}$ の X' 座標, Y' 座標をそれぞれ $(PX_{i,j}, PY_{i,j})$ とする。 S_U は $\triangle P_{i,j} \bar{G} P_{i,j+1}$ の和 ($i=1 \sim 8, j=0 \sim 9$) を求め、⑦～⑨式を得る。

$$S_U = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=0}^9 \frac{1}{2} |PX_{i,j} \cdot PY_{i,j+1} - PX_{i,j+1} \cdot PY_{i,j}| \quad \dots\dots\dots ⑦$$

$$P_{i,0} = F_i \quad \dots\dots\dots ⑧$$

$$P_{i,10} = F_{i+1} \quad \dots\dots\dots ⑨$$

そこで S_U および S を用いて⑩式より求めると、

$$\text{面積割合} = \frac{S_U}{S} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots ⑩$$

面積割合	平均値(%)	標準偏差(%)
点 \bar{G} が孤立暗点内の場合	96.25	5.57
点 \bar{G} が孤立暗点外の場合	100.92	10.52
計	98.74	8.62

3. 考 察

1) 実験

動的視野計測で孤立暗点を探す場合はインプターの窪み付近を丹念に視標提示して行うため、インプターの曲率から孤立暗点の場所を推定できないか試みた。孤立暗点の推定には領域の重心を用いて、視野データをトレース紙に書き写し、目盛りを読み取っ

て求めた。

2) 重心の推定

インプターの曲率と孤立暗点の重心位置との関係性を求めた。重心はインプター上の点の接線に垂直な線（法線）上の付近にあることがわかったが、これは動的視野検査者が孤立暗点を探す際、インプターの窪み付近を丹念に検査すること⁹⁾からも、一致する。また、重心は2本のインプター間と相関がある結果が出た。相関係数は0.774と予想していたよりも高い値であった。今後、より多くの被験者のデータで引き続き検討をしていく。

3) 孤立暗点の範囲

推定重心 \bar{G} が孤立暗点の範囲に入るのは15眼中7眼であり、46.7%の割合でほぼ半分であった。残りの8眼は推定重心位置から孤立暗点の領域を探していく。孤立暗点の重心がY'軸付近にある結果を踏まえ、Y'軸に沿って視標を提示することを考える。視標提示方法は必ずしも動的にする必要はなく、Y'軸上を等間隔ごと、静止視標を提示していてもよい。しかし、視標提示の間隔を何度にするのが最適であるかは今後の課題とする。

4) 輪郭の決定法

点 \bar{G} （または点 F_{mid} ）から孤立暗点の輪郭を求めるため、点 \bar{G} から 45° ごとに放射状線を引き、孤立暗点の輪郭点をそれぞれ点 $F_1 \sim F_8$ とした。この点 $F_1 \sim F_8$ を使いB-スプライン関数を用いて曲線Uを求め、曲線U内の面積 S_U と孤立暗点の面積 S とで比較を行った。比較は面積割合 (%) で示し、点 \bar{G} が孤立暗点の内部か外部かによって区別して比較した。点 \bar{G} が孤立暗点内の場合には $96.26 \pm 5.5\%$ (平均値 \pm 標準偏差) となり、やや小さい値となったが、誤差も平均約4%弱となり、曲線Uが孤立暗点の輪郭とほぼ同一であるとみなしてもよいと思う。点 \bar{G} が孤立暗点外の場合には $100.92 \pm 10.52\%$ (平均値 \pm 標準偏差) となり、誤差も平均1%弱となり、上記の場合と同様に曲線Uが孤立暗点の輪郭とほぼ同一であるとみなしてよいと思う。最後に、点 \bar{G} の孤立暗点の内外を総計すると、 $98.74 \pm 8.62\%$ (平均値 \pm 標準偏差) となり、誤差も平均1.3%と大変小さい値となった。そのため、8点を用いたB-スプライン曲線Uが孤立暗点を満た

す曲線であるといえる。

文 献

- 1) 塚原重雄, 細田源浩: 緑内障の疫学 - 失明原因第3位 -. あたらしい眼科 16: 893-898, 1999.
- 2) 二井宏紀: 緑内障の早期発見方法. あたらしい眼科 16: 933-937, 1999.
- 3) 井上正則: 網膜疾患の視野異常の評価. あたらしい眼科 11: 1015-1020, 1994.
- 4) 勝島晴美: ゴールドマン視野検査の基本をマスターしよう! 眼科ケア 5: 701-706, 2003.
- 5) 山出新一: 心因性視野異常の評価. あたらしい眼科 11: 1029-1036, 1994.
- 6) 大西克尚編: 緑内障の検査. 日眼会誌 107: 138-142, 2003.
- 7) 川瀬和秀, 稲積幸介他: 緑内障・眼圧の展望 - 2001年度 -. 眼科 46: 117-138, 2004.
- 8) 山本哲也, 勝島晴美, 内堀恭孝: a. 緑内障視野障害の特色. b. Goldmann 視野計による診断. c. Humphrey 視野計による診断. 本田孔士編, 眼科診療プラクティス28, 視野のすべて. 10-26, 文光堂, 東京, 1997.
- 9) 鶴木一彦: ハンフリー視野におけるトータル偏差とパターン偏差. Frontier in Glaucoma 2: 98-99, 2001.
- 10) 東 郁郎: 緑内障 診断と治療の最前線. 66-78, 診療新社, 東京, 1996.
- 11) 河野吉喜, 山本哲也: 視野検査の解釈 - ハンフリー視野計を中心に -. 臨眼 50 (増): 53-56, 1996.
- 12) 松本長太: 視野検査の解釈 - オクトバス視野計を中心に -. 臨眼 50 (増): 57-60, 1996.
- 13) Musch DC, Lichter PR et al: The collaborative initial glaucoma treatment study. Ophthalmology 106: 635-662, 1999.
- 14) 鈴木尚人: 半自動診断機能を持つ視野計の研究 - フェジィ医療診断におけるアルゴリズム -. 視覚の科学 24: 125-131, 2003.
- 15) Kwon YH, Kim C et al: Rate of visual field loss long-term visual outcome in primary open-angle glaucoma. Am J Ophthalmol 132: 47-56, 2001.
- 16) 湖崎 淳: 視野検査評価 動的視野は頼りになるか. 臨眼 50 (増): 62-64, 1996.
- 17) 勝島晴美, 岡崎裕子: 緑内障初期視野異常の新しい検出法 - Goldmann 視野計による中心部精密視野計測法 -. 眼紀 36: 558-564, 1985.
- 18) 勝島晴美: Goldmann 動的視野の注目点. 根木 昭編, 眼科診療プラクティス10, 緑内障診療の進め方, 80-83, 文光堂, 東京, 1994.
- 19) 溝上國義: 自動視野計の長所と短所. あたらしい眼科 11: 987-993, 1994.
- 20) 桜井 明編: スプライン関数入門. 88-145, 東京電機大学出版局, 東京, 1981.
- 21) Chui CK: 情報科学セミナー マルチスプライン. 1-14, 東京電機大学出版局, 東京, 1991.

レンズ特性とその選択について

高橋文男

株式会社 ニコン・エシロール 戦略企画本部

Lens Characteristics and Selection

Fumio Takahashi

Nikon-Essilor Co., Ltd. Strategic Planning Division

眼鏡レンズは設計・材料・表面処理など各種要素技術を組み合わせることによって、光学特性や透過特性などで特徴ある各種製品が実現されている。詳細についてはこれまで5回にわたりそれぞれの専門家に解説していただいた。ここではこれらの製品のなかから装用する方に適した性能特性をもつ眼鏡レンズを選んでいただくことを目的に、眼鏡レンズの選択についてまとめた。

一方、最近の光学性能を追求した単焦点レンズや累進レンズが実用化され、なかには処方度数ごとにレンズ径などに応じてレンズ性能を最適化する設計が行われている。このような性能重視で設計を行うと、装用状態で光学収差を最大限削減して処方度数になるような設計が行われるため、従来方式の測定とは値が異なることが生じてくる。このような屈折力測定について追加する。
(視覚の科学 26: 13-21, 2005)

キーワード：眼鏡レンズ設計，レンズ材料，表面処理，透過特性，加入屈折力

Spectacle lenses present various specific features, in terms of optical properties, transmission and other characteristics, that result from the combination of such technical elements as design, material and surface treatment. This was detailed by 5 experts in a previous volume. The aim of the present paper is to address the issue of selection among those various combinations, so as to arrive at a spectacle lens that fits the needs of the wearer.

In particular, some recently introduced unifocal and progressive lenses aim at optical performance through design optimization based on prescription power, as well as on other parameters such as lens diameter etc. In such cases, the lens design target is to obtain maximum reduction of optical aberration in the wearing condition, but this can result in a different lens power value when measured in the traditional way. This paper also discusses the issue of refractive power measurement.
(Jpn J Vis Sci 26: 13-21, 2005)

Key Words: Spectacle lens design, Lens material, Surface treatment, Transmittance specification, Addition power

1. はじめに

「眼鏡レンズの選択」というテーマでこれまで5回にわたり、レンズ設計・材料・表面処理の要素技術、

更に材料および表面処理から得られる透過特性について、それぞれの分野の専門家に執筆していただいた。一枚二面からなる眼鏡レンズであるが、最近の製品は先端の要素技術を取り込んで新しい機能特性

別刷請求先：130-0026 東京都墨田区両国2-10-8 住友不動産両国ビル ㈱ニコン・エシロール 戦略企画本部
高橋文男

(2005年6月16日受理)

Reprint requests to: Fumio Takahashi Nikon-Essilor Co., Ltd. Strategic Planning Div.

Sumitomo-Fudosan-Ryogoku Building, 10-8 Ryogoku 2-chome Sumidaku, Tokyo 130-0026, Japan

(Received and accepted June 16, 2005)

をもつ製品が開発されていることがわかりいただけたことと思う。

本稿では、これまで執筆していただいた内容を踏まえ、眼鏡レンズの選択について私見を加えてまとめた。眼鏡レンズを使用する目的や環境などに応じて、どのような選択肢があるかを知っていただき、眼鏡レンズを選ぶ上で参考となれば幸いである。

一方、装用状態の光学性能を重視して設計された累進屈折力レンズ（以下 累進レンズ）は、従来方式で測定した屈折力が処方度数と一致しないため、両方の度数を表示する、いわゆる二重表記を採用している。これは測定基準位置がフィッティングポイントと一致していないことから生じるものである。ここでは累進レンズに特有な屈折力測定について補足する。

2. 眼鏡レンズの種類とその選択

眼鏡レンズは主としてレンズの設計、材料、表面処理からなる三つの基本的な構成要素によって特徴付けられる。これまでにそれぞれ詳しく説明していただいたように、これら構成要素の組み合わせによって色々な機能性能および透過特性をもつ製品が実現されている。まず、種類について要約してそのあとで選択について触れる。

2.1 光学設計にかかわるレンズの種類

光学設計においては製作範囲内のすべての度数レンズに対して、収差が削減され最適な屈折力を備えた屈折面の配置を目標としている。屈折面の配置に関しては従来から、外面に球面、非球面、累進面、多焦点面などを、内面に球面、トロイダル面、非ト

ロイダル面などを配置することで設計されてきた。近年になって、これら外面に配置していた屈折面を内面に移した製品、外面に付加していた屈折力成分を両面に分割配分した製品、一部屈折力成分と外面で発生した収差成分を内面で融合補正する製品など、それぞれに特徴あるレンズが開発されている。元々内面に配置されていた乱視度数面（トロイダル面や非トロイダル面）は、これら内面に移した屈折力成分と融合される。これらレンズは一般に「内面・・・」もしくは「両面・・・」という名称で呼ばれている。これらの製品は概略で表1のように分類できる。加えて、装用者の処方度数ごとにレンズ口径内で光学性能の最適化を行う最適化設計製品、ものを見るとき目の線のくせや装用状態を測定してレンズ設計に反映させる個別設計製品、近用部の正確なアライメントのためにインセット量を個別に合わせる製品、などもある。設計技術およびフリーフォーム加工技術の進展によって最適化・個別化などで特徴付けられた内面化や両面化された製品が増えてきている。詳しくはこの企画の第1回と第2回を執筆していただいた木谷 明氏の解説^{1,2)}をご覧ください。

2.2 材料にかかわるレンズの種類

眼鏡レンズの種類は、材料にはガラスとプラスチックがあり、このほかに成形・製造方法の違いや屈折率の違いなどが加わる。詳しくは本企画の第3回目に執筆していただいた川村隆之氏の解説³⁾をご覧ください。高屈折率材料を使用するメリットは、同じ面屈折力を得るにも屈折率の高い材料の方が曲率半径を大きくでき、累進レンズなどで加入屈折力を附加したときでも曲率半径の変化量が小さくて済む

表1 設計にかかわる屈折面の種類およびレンズの種類

度数種類	各種屈折面	左記の屈折面位置	レンズの種類名称	備 考
球面度数S	球面	両面	球面レンズ	一般的な球面度数レンズ
	非球面	外面 or 内面 or 両面	xx 非球面レンズ	回転対称非球面
乱視度数C	トロイダル面	内面	トーリックレンズ	両主経線の断面形状が円形
	非トロイダル面	内面	非トーリックレンズ	少なくとも一方の主経線の断面形状が非円形
加入度数A (特注)	累進面	外面 or 内面 or 両面	xx 累進レンズ	内面、両面のとき、乱視面は内面に融合
	多焦点屈折面	外面 or 内面	zz 多焦点レンズ	乱視面の融合はなし

備考：“xx”には屈折面の配置によって外面、内面 or 両面のなかから該当する名称が入る

“zz”には同様に外面 or 内面のどちらかが入る

単焦点レンズの種類はSとCの組み合わせ、累進レンズおよび多焦点レンズはSとCにAが組み合わさる

ことから、同じ屈折力であればレンズを薄くできることにある。しかも軽量化も可能である。これらの効果は強度レンズほど、またレンズ径が大きいほど大きく、弱度レンズや小さな口径のレンズでは効果が小さくなる。一方、色収差の目安となるアッペ数の値は高屈折率材料ほど小さくなるため、レンズの色収差は大きくなる傾向にある。薄さと軽さを重視する眼鏡レンズは単レンズのまま使用せざるを得ないので色収差の補正は難しい。現在製品化されているプラスチック材料で最も高い屈折率は1.74、アッ

ペ数は33である（表2）。なお、眼鏡レンズの製品価格はレンズ材料の屈折率による寄与が最大で、高屈折率レンズほど高価である。このほかに設計および附加した表面処理などの機能特性でも上下する。

2.3 表面処理にかかわるレンズの種類

光学設計以外で形成される眼鏡レンズの性能特性は、材料自体の性質と附加された表面処理の性能特性で決まる。表面処理によってプラスチック材料自体に不足する性能特性を補完したり、新たな性能特性をもたせるなど、プラスチック材料と表面処理と

表2 材料にかかわるレンズの種類

レンズの種類	主な屈折率/ アッペ数	備 考	
超高屈折率プラスチックレンズ	1.74 / 33	薄いレンズができる	↑ 高価
	1.70 / 36		
	1.67 / 32		
高屈折率プラスチックレンズ	1.60 / 42	アッペ数が高い	↑ 高価
中屈折率プラスチックレンズ	1.56 / 37		
低屈折率プラスチックレンズ	1.50 / 58		
超高屈折率ガラスレンズ	1.807 / 34.4	最も薄くできる（※）	↑ 高価
高屈折率ガラスレンズ	1.701 / 43		
中屈折率ガラスレンズ	1.605 / 41.2		

（※）：プラスチックとガラスともに最大屈折率材料の比較であるが、静荷重試験を通すためにガラスレンズは厚めの中心厚を採用している関係で、マイナス中強度数の範囲だけはプラスチックレンズの方が薄くなる

表3 表面処理とレンズの種類

表面処理	レンズの種類	備 考
染色	カラーレンズ	ファッション性、 業界統一カラー「アリアーテ」
	遮光レンズ	医療用
	フォトクロミックレンズ	光の強弱で可逆的に着色 褪り込みによるものもある
プライマーコート	（プライマーコート付レンズ）	耐衝撃性、耐静荷重の向上 ハードコート処理前に付ける
ハードコート	（ハードコート付レンズ）	耐擦傷性の向上
反射防止膜	単層膜コート付レンズ 多層膜コート付レンズ	前後二面の多重反射で生ずるゴースト・ フレアを減少。フラッシュ撮影時レンズ 面の反射による映り込みを軽減する ※メーカーごとに製品名がある
撥水膜	（撥水膜付レンズ）	水ヤケ防止
撥油膜	（撥油膜付レンズ）	清拭性向上 ※メーカーごとに製品名がある
防曇	防曇レンズ	曇り防止

は切っても切れない関係にある(表3)。詳しくは第4回目の小笠原 恒氏の解説⁹⁾をご覧ください。

プラスチックレンズに不可欠な表面処理は、耐擦傷性を高めるハードコートであり、レンズ面の反射を

表4 透過特性とレンズの種類

透過特性	レンズの種類	備考
着色領域、濃度変化	均一カラーレンズ グラディエントカラーレンズ	無色はクリアレンズ(無色レンズ)
レンズ濃度(視感透過率)	0~4の5段階のカテゴリ によるレンズ区分	高濃度および各信号色に対して相対視感度減衰率:Q値が一定の値より小さければ運転不適合
直線偏光	偏光レンズ	反射面(水平)からの光をカット 偏光の程度は偏光度で表示
可逆的濃度可変	フォトクロミックレンズ	短波長光線により可逆的に着退色 ブルー、ブラウン、グレーなど

分光特性		
紫外線吸収	紫外線カット, UV 400 レンズ	400 nm より短い紫外線を吸収
可視光線減光	カラーレンズ各色	業界統一カラー「アリアーテ」など
赤外線減光	赤外線減光	多層反射防止膜でも減光効果をもつものがある
視感度最大波長域の減光	防眩レンズ	視感度が最も高い 550~580 nm を減光
青色波長以下を吸収	医療用遮光レンズ	500 nm より短い波長を吸収 (イエロー色は約 420 nm 以下)

表5 特注とレンズの種類

特注項目	レンズの種類	備考
単焦点レンズ範囲拡大	強度レンズ (Sph & Cyl) 中間度数 プリズムレンズ	0.125D とびなど
老視用(近用部附加)	累進レンズ 多焦点レンズ	プラスチック, ガラス プラスチック, ガラス熔着型など
設計(単焦点, 累進)	最適化設計 カスタマイズ	度数性能向上, 見る 累進レンズのインセット指定など
表面処理	染色カラーレンズ プライマーコート 反射防止コート各種 撥水, 撥油コート 防曇コート	遮光レンズ
偏光フィルター	偏光レンズ	水平面からの反射光削減
薄型化, 枠入最適化	偏心レンズ 径指定 フレーム形状指定 中心厚, 縁厚, コバ厚指定	径確保, プリズム確保(ただし非球面レンズは不可) 枠に最適なレンズサイズ 形状データ送信: オンライン, FAX, 基本パターンなど ツープイント枠の強度確保など
枠入れ加工	玉形・ヤゲン加工 ツープイント用加工	形状データ送信: オンライン(仕上がり状態確認後 注文可能) フレーム現品

※レンズ性能特性の附加に関しては、各社および製品ごとに対応が異なるため特注受注の可否は各社レンズガイドを参照していただくか、または各社窓口にお問い合わせ願いたい

減らす反射防止膜、汚れを拭きやすくする撥水撥油コートである。また眼を守るということからすれば機械的強度を高めるプライマーや紫外線をカットするUV400加工も不可欠な仕様である。

2.4 透過特性にかかわるレンズの種類

レンズ材料自体に紫外線吸収剤や染料などを練り込むことや、上述した染色などの表面処理や偏光フィルターを挟み込むことで、色々な分光特性や遮光特性をもったレンズが製品化されている（表4）。その

なかでも、眼に有害な紫外線や青色光であるUV-B（280～315nm）およびUV-A（315～380nm）をカットしたUV400レンズは白レンズの常用レンズとしても使えるので有用である。可視光線の波長は380～780nmであり、この波長域の分光分布特性を与えることによってファッション性豊かな様々なカラーレンズが実現できる。なお、カラーレンズについては現在、「アリアーテ」と称して各社共通の統一カラーが提供できるようになっている。

表6 眼鏡レンズの選択

要求性能特性	レンズ種類または処理・加工
外観・見栄え・ファッション	
フラットなレンズ	非球面レンズ、高屈折率レンズ
薄いレンズ	高屈折率レンズ（高いほど効果大）、非球面レンズ、マイナス強度レンズの場合はフレーム形状に沿って縁厚を削り落とし滑らかな面に仕上げる*、累進レンズのプリズムシニング加工*
軽いレンズ	プラスチックレンズ、高屈折率レンズ、非球面レンズ、径指定*（プラスレンズを枠に入る最適径で加工*）、マイナス強度レンズの場合はフレーム形状に沿って縁厚を削り落とし滑らかな面に仕上げる*、累進レンズのプリズムシニング加工*
レンズ面での反射光減少	多層反射防止膜、単層反射防止膜：高屈折率材料ほど有用
掛けごこち・使いごこち <見え>	
周辺まで鮮明な視野の確保	最適化設計*、非球面レンズ、きついカーブの球面設計
度数性能の最適化	最適化設計*、両面非球面レンズ、非球面+非トロイダル面
フレアゴースト減少	多層反射防止膜、単層反射防止膜
汚れを拭きやすい	撥油コート付き、撥水コート付き、
水面や道路面からの反射光減少	偏光*
曇りにくい	防曇コート*+界面活性剤
クリア感	高透過率材料、多層反射防止膜、単層反射防止膜
色収差が少ない	高アッベ数材料（低屈折率材料のレンズ）
<見え以外>	
掛けていることを忘れそう	フラットなレンズ、薄いレンズ、軽いレンズの組み合わせ
眼の保護 <光線からの保護>	
紫外線カット	染色*または材料練り込みのUV400
防眩など分光による機能付与	材料練り込み、染色*、フィルター貼り合せ
光の強度でレンズ濃度や色が 変わりまぶしさを軽減する	フォトクロミックレンズ*
まぶしさを軽減する	防眩レンズ、遮光レンズ*、フォトクロミックレンズ*
<割れにくい・耐久性>	
割れにくい	プライマー処理、中心厚を増したレンズ*
表面に傷が付きにくい	ハードコート
購入価格	
安価	球面設計、低屈折率材料、単層反射防止膜
高価	最適化レンズ*、超高屈折率材料、多層反射防止膜、プライマー付き

色がもつ感覚的な作用を反映させることで、眼にやさしい、疲れにくい、掛けやすいレンズなどが期待できるが、色の誤認を与えるような彩度の高いカラーレンズや透過率が極端に低いレンズは自動車の運転などの用途に向かないため要注意である。詳しくは第5回目に執筆していただいた高橋龍五氏の解説⁹⁾をご覧ください。

2.5 特注によるレンズ種類

比較的需要の多い単焦点レンズの弱度範囲は量産品である在庫品として供給されているが、需要が少ない強度範囲は特注品として供給されている。また、累進レンズや多焦点レンズは全範囲が特注である。このほかに特定の表面処理や2.1の設計の項でも述べた各種個別化製品および最適化製品はすべて特注である。また、プラスレンズをフレームに最適な大きさと薄く軽くする目的でも受注加工している。このように、特注によって眼鏡レンズの個別化、多様化が進んでいる。表5は、現在当社で対応している一般的な特注受注の内容をまとめたものである。全体的には各社とも類似の内容であるが、それぞれに特

色を出しているところがあるので、詳しくは各社が発行しているレンズガイドを参照されたい。

2.6 眼鏡レンズの選択について

ここでは要求性能から、レンズの種類または必要な加工処理（特注も含む）がひけるようにしてみた（表6）。累進レンズおよび多焦点レンズに関する項目は表7にまとめた。*印は現在特注（当社例）である。

3. 累進レンズの屈折力測定

眼鏡レンズの屈折力は、無限遠からの光束を光軸と平行にレンズ前面へ入射させたとき、レンズ後面頂点から後側焦点までの距離（m単位）の逆数と定義されている。レンズ装用状態を想定したとき、眼に実際に作用するレンズの屈折力とその測定が厳密に一致するのは、限られた条件のときだけである。

3.1 屈折力測定と実際に眼に作用するレンズ屈折力

(1) 遠用部屈折力

眼鏡レンズの度数性能は装用状態を想定した図1

表7 累進レンズ・多焦点レンズなどに特有な性能に関して（すべて特注）

要求性能特性	レンズ種類または処理・加工
累進レンズの適用	
老視初期、近方視で疲れる	低加入度常用累進レンズ、低加入度近々累進レンズなど
常用（屋外および屋内）	常用として販売されている累進レンズ
常用（主に屋外・遠方視重視）	ソフト設計累進レンズ、累進帯が長めの累進レンズ
パソコン、デスクワーク	近々累進レンズ、中近累進レンズ、度数調整した累進レンズ
読書、近用作業	近々累進レンズ、中近累進レンズ、ハード設計累進レンズ
スポーツ（遠中重視）	ソフト設計累進レンズ、加入度を調整した多焦点レンズ
ドライブなど	ソフト設計累進レンズ、累進帯が長めの累進レンズ
天地幅の小さいフレームに	累進帯が短い累進レンズ（累進帯長9～10mm程度）
<最適化>	
すべての度数範囲で高い光学性能	度数性能最適化設計累進レンズ
装用者の目線のくせと頭の動き	視紋測定による最適化設計累進レンズ
<個別化（カスタマイズ）>	
通常の近用部位置が合わない	インセット量可変累進レンズ
近方視のとき幅狭しない	インセットなし累進レンズ
目線が下がらない	累進帯の長さが短い累進レンズ
多焦点レンズの適用	
高齢、高加入度処方で累進レンズの経験なし	多焦点（二重焦点、三重焦点、EX型）レンズ
強い不同視眼	スラブオフ加工多焦点レンズ、（単焦点近用レンズ）
遠近とも広く安定した視野	EX型多焦点レンズ、小玉の大きな多焦点レンズ
広く安定した近用視野	EX型多焦点レンズ、小玉の大きな多焦点レンズ、（単焦点近用レンズ）

のような配置で評価する。このとき必要な屈折補正度数 D は、眼球の回旋点を中心としてレンズの後面頂点に接する基準球面 BS 上の点から回旋点を通り遠点球面 FS までの直線距離 L [m 単位] の逆数 ($1/L$) である。理想的なレンズは、回旋点を通るすべての光線が遠点球面 FS 上に結像するレンズであるが、実際は非点収差や像面湾曲収差などの影響で、図 1 のように遠点球面 FS を外れ互いに直交する二つの焦線として結像し、その最小錯乱円位置が最良像面となる。このとき、基準球面 BS から回旋点を通り最良像面までの直線距離の逆数が、実際に眼に作用する屈折力に相当する。

単焦点レンズの光学中心で行う一般的な屈折力測定は、図 1 で眼の回旋点を通るレンズの光軸上の屈折力に相当し、装用状態における度数評価とレンズの屈折力測定が一致する唯一の状態である。レンズ周辺部で実際に眼に作用する屈折力を測定するには、レンズに対して基準球面 BS に接するようにレンズメータの当て台を置き、そのときの回旋角方向で屈折力測定を行うことになるため特別な工具が必要である。レンズ当て台を直接レンズ後面に当てた従来の測定では、基準位置の違いと測定光線の方向の違いから度数差が生じる。

累進レンズは、図 2 のように遠用部測定基準位置がレンズのフィッティングポイントから 6~8 mm 離

れた位置に設定されているため、度数差が生じることになる。ことに度数性能の最適化設計を進めると装用状態で処方度数となるため、従来方法で測定してしまうと処方度数が得られないという問題が起きる。この解決策としては二重表記と呼ばれている、処方度数とともにレンズメータ測定での読み値を併記する方法が採用されている。

(2) 加入屈折力

従来、加入屈折力は、レンズ前面にレンズ当てを当てて加入屈折力を測定する、すなわち近用部の前側屈折力から遠用部の前側屈折力を差し引いた値として扱われてきた。この理由は、レンズ前面に附加された加入屈折力で無限遠からの光線が加入屈折力の逆数であらわされる距離に結像することから、眼の調節力を全く使わないでその物体距離にピントが合うことに相当する (図 3)。レンズの中心厚および後面屈折力が遠用部と同じであれば近軸の結像式が成立する。これは検眼の際に遠用の処方度数を決めた後、仮枠の前側にプラスしたレンズの度数が加入屈折力となることにも合致している。

しかし、累進レンズの近用部の測定基準位置は遠用部フィッティングポイントから遠用部以上に離れるために、近用部の測定基準位置における基準球面 (BS) からの隔たり、回旋方向と測定光線の角度差などによって度数差も大きくなる傾向にある。一般に

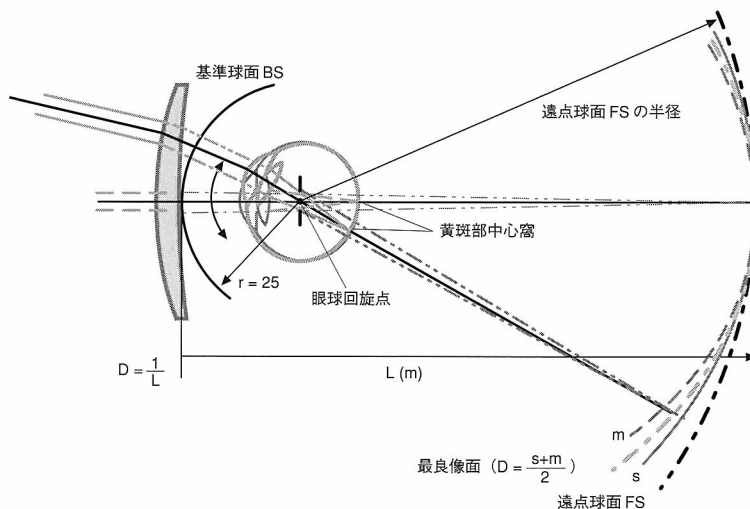


図 1 眼鏡レンズの屈折力測定とレンズ装用状態

眼鏡レンズの理想的な屈折力は基準球面 BS から回旋点を通り遠点球面 FS までの距離 L の逆数であらわされる。レンズ周辺部で屈折力を測定するには特別な工具を使用しない限り、レンズ後面から基準球面 BS までの距離が影響し光線の方向も異なる。

装用状態で性能向上を図り、近用部の結像関係から加入屈折力を求めると、従来方式の測定値に比べて多少弱めに出る傾向がある。加入屈折力を確認する方法は、レンズ製品ごとに測定位置が異なることから、正確に測定しようとする製品ごとのアライメ

ントシートなどの準備が必要である。累進レンズには図2に示すようにアライメント用水平基準マークの近傍のレンズ面に永久マークの加入屈折力が刻印されているので、まずこれを参考にさせていただきたい。

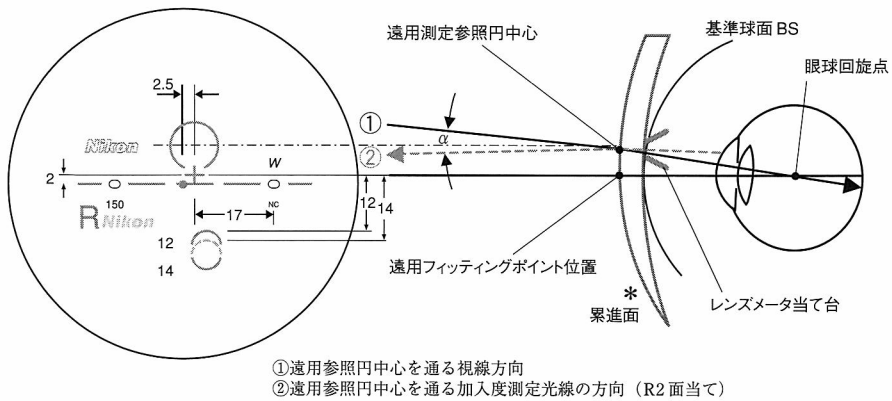


図2 累進レンズの二重表記

フィッティングポイント (+マーク) と測定基準点 (参照円中心) の位置が一致しないこと、測定基準点で装用状態の視線方向と測定光線方向に角度差 α が生じることによって度数差が生じる。ことに光学性能重視のレンズは装用状態で処方度数になるように設計されるため、測定値は異なる。

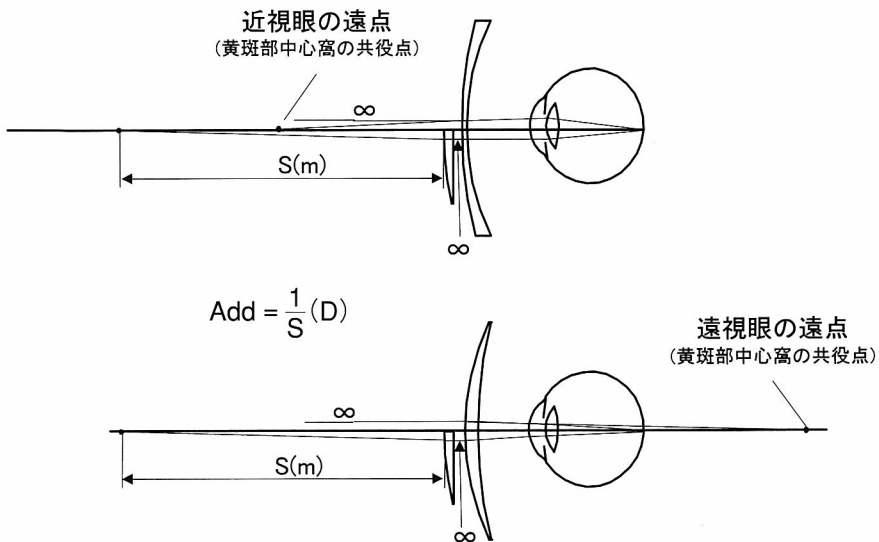


図3 加入屈折力の測定原理

従来方式における加入屈折力の測定原理は上図のように説明されるが、実際の装用では回旋角の違いなどの影響を受け、度数差が生じる。

4. おわりに

既成老眼鏡を除けば、眼鏡は装用する人ごとにその処方度数や瞳孔間距離など個人の特徴を反映させて作られるオーダーメイドの製品である。その結果完成した眼鏡は、世界に一つしかないものである。最近では性能的な面でもそれぞれのオーダーに合わせて最適化して供給する製品が増加してきている。

眼鏡レンズは朝起床してから就寝まで、装用者の活動範囲すべての場面で常用されることが多いことから、眼鏡レンズを選択するにあたっては、使用する環境や状態を把握していただき、最適な眼鏡レンズの機能特性を選択していただきたい。

眼鏡レンズのメーカーとしては、最終ユーザーである個人向けの情報発信や啓蒙活動が不足気味では

あるが、各社ともインターネットのホームページが充実してこの辺の情報が入手しやすくなっているので活用していただきたい。

文 献

- 1) 木谷 明：レンズ特性とその選択について，視覚の科学 24: 139-143, 2003.
- 2) 木谷 明：レンズ特性とその選択について（その2），視覚の科学 25: 25-29, 2004.
- 3) 川村隆之：レンズ特性とその選択について（材料），視覚の科学 25: 51-56, 2004.
- 4) 小笠原 恒：レンズ特性とその選択について（表面処理），視覚の科学 25: 82-88, 2004.
- 5) 高橋龍五：透過特性と眼鏡レンズの選択について，視覚の科学 25: 120-125, 2004.
- 6) 高橋文男：累進屈折力レンズのチェック方法，Practical Ophthalmology 82，眼鏡のトラブル，78-79，文光堂，東京，2002.

 最近のトピックス

PENTACAM —前眼部 3D 解析装置

(中央産業貿易(株) 外国部) 石崎 忠

1. はじめに

ドイツ・オクルス社製 Pentacam のデザインと性能について初めて世に問うたのは2002年 Orlando の American Academy of Ophthalmology (以下 AAO) における同社の evening seminar でのプレゼンテーションであった。翌年、ヨーロッパ、アメリカをはじめ日本でも発売が開始され、世界中に普及しつつある。昨年、ヨーロッパ (DOC, ESCRS) そしてアメリカ (AAO) でこの装置の技術・性能についての symposium, seminar が次々と開催され、世界で最初の回転式シャインブルー (Scheimpflug) カメラとして大きな関心を集めた。

発売当時のソフトウェア Version は 1.01 であったがその後次々と改良、バージョンアップがなされ、現在は V1.10 となり、色々な新しい機能が加えられ、またより一層正確で信頼のできる測定結果が得られるようになった。例えば現在では、測定データの Excel シート表示が可能になっており、更に隅角の測定位置が画面に表示される機能も新しく追加された。

2. 測定原理

オートマチックで回転するシャインブルー・カメラがブルーのスリット光で照明された前眼部を 180° スキャンして角膜と前房 (散瞳すれば水晶体も) 全体 360° を 2 秒間で撮影する。1 回の撮影で 50 枚のシャインブルー像が撮影され、1 枚当たり 500 の測定ポイント、合計 25,000 の測定ポイントから計算された height データにより前眼部の正確な 3 次元立体再構築を行う。測定は非接触で行われ、角膜の前面から水晶体の後面までの画像を作る。

3. 測定方法

まず、前眼部のどの部分を検査・測定するかを決定し、それに応じて検査プログラムの設定を選択する。患者の顎を顎台にのせて、瞳孔の中心をアライメントして画面に瞳孔があらわれるようにする。ジョ

イスティックを操作して画面を見ながら中心合わせの微調整を行う。撮影はオートマチックリリースで行うか、フットスイッチを踏むか Scan ボタンを押して (マニュアル) 撮影する。

白内障および眼内レンズを観察する場合を除いて他のすべての検査は無散瞳で行われる。

4. 検査機能・解析

Pentacam は前眼部の多くの各種パターンの測定と解析を行う。

1) シャインブルー画像

画像は角膜の前面から水晶体の後面までカバーする。

2) デンシトメトリー

ブルーの照明光によって水晶体全体の白内障の解析を行う。Sub-capsular layer を含むレンズ全体のデンシトメトリー、すなわち白内障の進行度を自動的に定量的に測定する。

3) 前眼部の解析

前房の測定データは 3 次元のモデルから計算される。隅角、前房深度、前房の容積はもとより、カラー表示による前房深度マップ、角膜厚、角膜の容積、水晶体の厚み、角膜厚による眼圧の補正、などを計算して、画面に表示する。

4) トポグラフィ

角膜前面および後面のトポグラフィもできるので true elevation map を作る (Placido リングで生じる問題を排除)。トポグラフィマップ (sagittal, tangential)、角膜前面、後面の K 値、True Net Power マップを作る。

5) パキメトリー

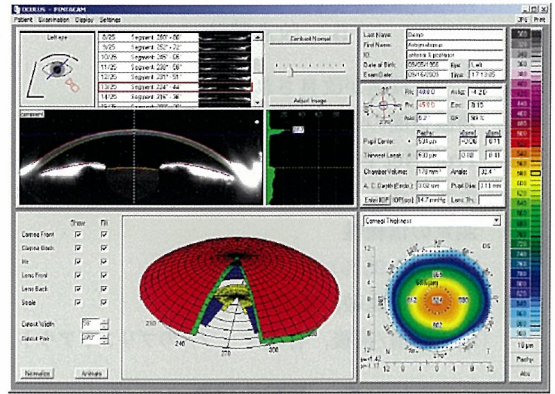
瞳孔中心の厚みの表示、角膜頂点の厚みの表示、角膜の最も薄い部位の表示を行う。

6) 3次元アニメーション

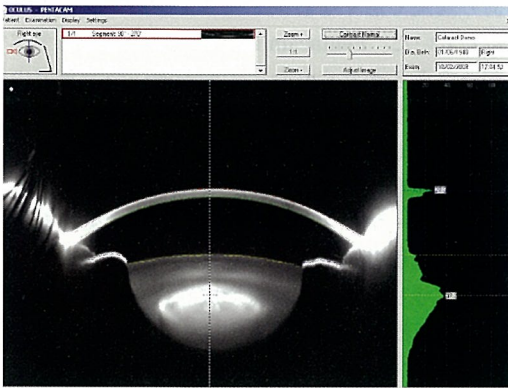
角膜、虹彩、水晶体の位置をアニメーション表示 (患者説明用) する。



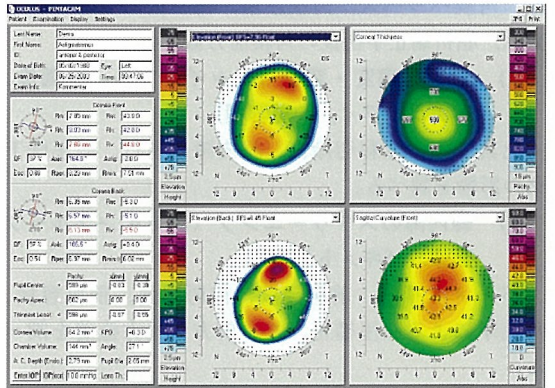
Pentacamの全貌



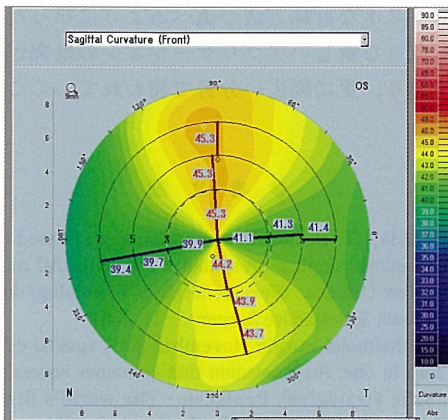
測定データ全体図のディスプレイ



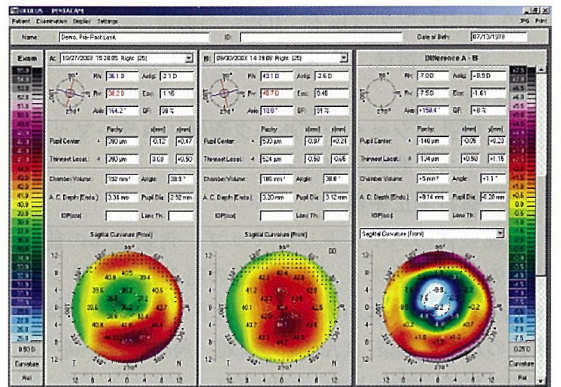
白内障とデンストメトリー



4種のカラーマップの表示



角膜前面のトポグラフィ



術前・術後の比較と変化量

5. 改良機能

次のような機能が改良された。

1) 角膜後面の影響

True Net Power マップと角膜前面マップとの差をチェックする（‘KPD’値）。

2) 測定の信頼性

‘QF’（>95%）。

3) マップの比較, 差の表示

（例：術前/術後, 各種マップ）のプリントアウト。

6. 測定の対象

1) 角膜の病変（シャインプルーク画像, True Net Power マップ）

穿孔性病変, 角膜移植の管理, 円錐角膜, 球状角膜, 角膜ヘルペス, 角膜膿瘍, 角膜後面曲率マップ表示, 屈折矯正手術後の角膜前方偏位を示す。

2) 前房の病変・変化（シャインプルーク画像, トポグラフィ, 前房容積）

色素障害, 虹彩切除術, 緑内障の進行, 眼圧降下薬の影響を調べる。

3) 緑内障のスクリーニング（シャインプルーク画像, パキメトリー）

パキメトリー, 前房深度, 前房隅角, 前房容積, 角膜厚による眼圧補正, 虹彩前方・後方癒着を調べる。

4) 水晶体の変化, 眼内レンズの偏位（シャインプルーク画像, パキメトリー）

(1) 白内障と混濁の定量

白内障の形態, 後発白内障, 白内障の進行度を調べる。

(2) 眼内レンズ（以下 IOL）の偏位

白内障術後, phakic IOL 挿入後, レンズの偏位を調べる。

5) 瞳孔（シャインプルーク画像, カラーマップ）

サイズ, 形状を調べる。

6) 屈折矯正手術

角膜全体のパキメトリーマップ, 角膜全体の前面, 後面のトポグラフィ, A-scan との組み合わせで κ 角, laser in situ keratomileusis（以下 LASIK）術前, 術後の比較と観察, LASIK の問題, 角膜混濁を調べる。

7) Refractive lens exchange

前房深度, 前房深度マップ, 前房の解剖, True

Net Power（角膜後面 elevation の測定による術後の IOL 計算の改善）, 経過観察を調べる。

8) 眼外傷（シャインプルーク画像）

翼状片, 角膜輪部上の血管の病変, 前房内異物等の検出。

7. ま と め

「PENTACAM の新しい技術は, 屈折矯正手術医にとって従来型の術前データを測定することを諦めさせるきっかけとなるだろう」と, Jack T. Holladay は New Orleans で開かれた 2004 年の AAO の educational seminar で述べた¹⁾。

この educational seminar におけるもう一人の演者の Michael W. Belin は, 彼の講演を次のように結んでいる。「我々の病院では, 難しい症例の場合は二つの別の病院で色々な器械を使って評価, 診断するようにしていた。Pentacam はそれ一つで必要なすべてのデータを与えてくれた。この器械一つで角膜の曲率, 前・後面の elevation, 角膜の厚みをすべて正確に, 信頼のできる方法でやりとげた」。更に他の 3 人の演者も装置の評価について, 「この装置は眼内の変化をモニターすることはもとより, 白内障患者や屈折矯正手術患者を今までよりも広い範囲で治療することに寄与し, よって臨床で広く役立てることを可能にする」と語った。

冒頭に述べたように, Pentacam の発売以来ソフトウェアのアップデートが現在まで 10 回以上も行われ, 改良は日進月歩前進している。例えば, 前房隅角の計算パラメータは角膜後面や虹彩の形状が一定でないことを考慮して, シャインプルーク画像をチェックして最適な計算方法が選べるようになった。ほかにも色々な新しいアプリケーションの研究が続けられており, 更に幅広い分野で使われていくことであろう。

参 考 文 献

- 1) Holladay JT, Belin MW et al: Monograph based on an educational seminar presented at the 2004 AAO meeting in New Orleans. Next-Generation Technology for the Cataract & Refractive Surgery 1-11, 2004.
- 2) Ophthalmochirurgie November 2004 special edition- 'Five in one: An innovation that combines several diagnostic strategies', Pentacam-The world's first 3D-Scheimpflug Camera, Kaden Verlag, 1-2, 2004.