
 総 説

Quality of Vision と幾何光学

所 敬

東京医科歯科大学

Quality of Vision and Geometrical Optics

Takashi Tokoro

Tokyo Medical and Dental University

屈折状態は主として幾何光学で説明できる。屈折異常を矯正する球面レンズや円柱レンズは簡単な幾何光学計算で、また、非球面レンズや老視を矯正する累進屈折力レンズは光線追跡法で設計されている。一方、眼の幾何光学的特性として、眼球の光軸と視軸との不一致、固視微動、調節微動、調節ラグ、収差などがある。これらは幾何光学的には不利であるが、眼光学ではこれらに適応、補正効果などが働いてこれらを補っている。以上のことから、幾何光学は眼光学にとって不利な面もあるが、基本的には **quality of vision** に役立っている。
(視覚の科学 25: 60-65, 2004)

キーワード：幾何光学，視覚の質 (QOV)，眼光学，光学的特性，屈折異常

Refractive states of the eye can be largely explained by geometrical optics. The spherical and cylindrical lenses that correct refractive error are designed using the simple geometrical lens formula, and the aspheric and progressive power lenses that correct presbyopia are designed using the ray-tracing method. On the other hand, the eye has characteristics of geometrical optics, e.g., the difference between optical and visual axes, wandering fixation, fluctuation of accommodation, accommodation lag and aberrations. These are disadvantageous conditions in geometrical optics, but are compensated in ophthalmological optics by individual adaptation. Although geometrical optics seems to be disadvantageous vis-a-vis ophthalmological optics, it is basically important for quality of vision.

(Jpn J Vis Sci 25: 60-65, 2004)

Key Words: Geometrical optics, Quality of vision, Ophthalmological optics, Characteristics of optics, Refractive error

1. はじめに

幾何光学には三つの法則がある。すなわち、1) 均質な媒質を通過する光は直進する、2) 異なる媒質の境界を通過する光は反射および屈折する (Snell の法則)、3) 個々の光線は互いに干渉しない、などである。この他の光に関する現象すなわち、光の干渉、回折、偏光、散乱などは物理光学で扱われる。

幾何光学を利用した眼科の疾患には遠視、近視、

乱視などの屈折異常や老視がある。これらの検査や矯正理論には幾何光学が使われて quality of vision (以下 QOV) に役立っている。屈折異常や老視の矯正には眼鏡やコンタクトレンズ (以下 CL) などの矯正用補助具が用いられているが、これらの設計にも幾何光学が使われている。そして、光線追跡法などを用いて非球面レンズや収差を考慮した累進屈折力レンズの設計がなされている。このほか、眼科用光学器械の設計には主として幾何光学が使われている。

別刷請求先：221-0852 横浜市神奈川区三ツ沢下町13-24 所 敬
(2005年1月6日受理)

Reprint requests to: Takashi Tokoro
13-24 Mitsuzawashimo-cho, Kanagawa-ku, Yokohama 221-0852, Japan
(Received and accepted January 6, 2005)

一方、眼には幾何光学では十分に説明できない特性がある。例えば、眼球の光軸と視軸との不一致、固視微動と調節微動、調節ラグなどは幾何光学的には欠点とも考えられる現象である。このほか、球面収差、色収差、軸外収差などに対しても眼は適応、調整、網膜や中枢での補正効果などが働いて QOV を保っている。

2. 眼と幾何光学との歴史¹⁻³⁾

眼と幾何光学の歴史は古く、幾何光学の基礎を築いたのは Kepler (1571~1630) で、Snell (1591~1626) は光の反射・屈折の法則を発表した。その後、Newton によって遠視の存在、Young によって乱視の存在、Donders によって老視と遠視との区別などが行われた。また、調節に関しては Young により調節の学説が出され、Helmholtz によって調節機構が実証された。模型眼は眼光学の発展に寄与してきたが、これには Helmholtz, Gullstrand などの模型眼がある。屈折矯正法としての眼鏡は16世紀ごろから用いられていたが、CLは19世紀の後半、眼内レンズ（以下 IOL）や屈折矯正手術は20世紀に入ってからはじめられた。このほか、Gullstrand が細隙灯顕微鏡を発明して以来、幾何光学を利用して種々の眼科用検査機器や治療機器が開発されてきた（表1）。

模型眼とは眼球光学系の光学定数実測値あるいは

表1 眼と幾何光学関連の歴史

Bacon, R (1214~1294) : 初めて老眼の矯正に凸レンズ使用
Kepler, J (1571~1630) : 幾何光学の基礎, 近視の存在
Snell, W (1591~1626) : Snell の法則
Descartes, R (1596~1650) : 屈折の法則の追認
Newton, I (1642~1727) : 遠視の存在
Young, T (1773~1829) : 調節学説, 乱視の存在
Paetz & Flohr (1875) : Diopter 単位の検眼レンズセット作成
Donders, FC (1818~1889) : 老視と遠視の区別
von Helmholtz, HLF (1821~1894) : 調節機構の実証, 模型眼, 検眼鏡の原理
Gullstrand, A (1862~1930) : 細隙灯顕微鏡の発明, 模型眼
Fick, AE (1888); Kalt, E; Mueller, A (1889) : コンタクトレンズを紹介
Ridley, H (1906~2001) : 最初の IOL の手術
Barraquer, JI (1916~1998) : 屈折矯正手術の創始者

その平均的近似値を用いて定数を定め、一般に屈折面を球面、屈折率を均質なものと仮定して作製したものである。したがって、眼球光学系の標準的モデルと考えられる。このモデルは主として近軸計算に用いられる。模型眼は Helmholtz, Gullstrand のほかに LeGrand その他がある。また、省略眼には Donders, Lawrence, Listing などがある。

3. 眼とレンズとの関係

屈折矯正法に眼鏡レンズ, CL, IOL と屈折矯正手術とがある。屈折矯正手術は主として角膜を手術の場としているが、水晶体の前方にレンズを挿入する有水晶体 IOL (phakic IOL) もある。これらは装用されるレンズの位置が異なるので、レンズの装用位置による矯正効果、網膜像の拡大・縮小効果、プリズム効果などの違いが出るが、これらも幾何光学計算で知ることができる⁴⁾。レンズ設計にはレンズのデザインとレンズの材質のうちでも屈折率が大きく影響する。そこで、眼鏡, CL, IOL などについて、デザインと材質としての屈折率の面から述べる。

1) 眼鏡レンズ

眼鏡レンズには単焦点レンズのほかに老視用の遠近両用レンズがある。遠近両用レンズには、多焦点レンズ（二重焦点レンズ, 三重焦点レンズ）と累進屈折力レンズとがある。

単焦点レンズには形態的には両凸, 両凹, 平凸, 平凹, 凸凹のメニスカスレンズがある。また最近では、光線追跡法を用いて薄く軽く収差の少ない非球面レンズが作製されている。レンズの形態が違おうと主点位置も異なり、眼鏡を角膜頂点から 12mm の位置に装用した場合に眼に対する矯正力が異なる。そこで、眼鏡レンズではレンズ後頂点からレンズの焦点までの距離の逆数で眼鏡レンズ度を決めている（後頂点屈折力またはバックフォーカス）。累進屈折力レンズでは幾何光学を利用した新しい設計のレンズが出てきている。前面は球面または非球面、後面は累進面とトロイダル面（円弧と同一面内にあり円弧の曲率中心を通らない軸の回りに回転させて得られた面の一部）のレンズ（内面累進設計）；累進屈折力を縦方向と横方向の成分に分けて前後面に振り分けたレンズ（両面複合累進設計）；前面累進面、後面累進面で収差を調整したレンズ（両面累進設計）のほかに、光学性能の最適化およびレンズ仕様での個別設計のカスタムメイドレンズなどがある⁵⁾。

材質としては、最近では鉛あるいはチタンを混ぜた高屈折率レンズが発売され、およそ4Dをこえると薄くて軽いレンズになる。しかし、アッペ数が低くなり色収差がでるので、アッペ数が30以下にならないことが望ましい(表2)。

2) CL

CLのデザインでは、球面レンズ、トーリックレンズ(少なくとも一つのトロイダル面をもつレンズ)のほかに遠近両用レンズもあるが、眼鏡レンズほど普及していない。遠近両用CLには二重焦点レンズとして、交代視型と同時視型(同心円型と回折型)とがある。このほか、累進屈折力レンズがある。

CLの材質の進歩は目覚ましい。1950年代にポリメチルメタクリレート(以下 PMMA)ハードレンズ、1960年代に含水性ソフトレンズ、1970年代にガス透過性ハードレンズ、1980年代に高含水性ソフトレンズ、1990年代にソフトレンズのディスプレイ化、2000年代にシリコンハイドロゲルレンズと発展してきている⁶⁾。CL素材の屈折率は、hydroxy ethyl methacrylate(以下 HEMA)が1.43, fluorosilicone acrylateが1.44, silicone acrylateが1.47, PMMAが1.49, styreneが1.53で材質による大きな違いはないが、高屈折率素材ほど同一パワーであれば薄くできる。

3) IOL

IOLのデザインでは、球面レンズ、トーリックレンズのほか、多焦点レンズとして屈折型(2ゾーン型, 3ゾーン型, 5ゾーン型), 回折型, 屈折率分布型などがある。IOLの材質の屈折率はPMMAが1.49, HEMAが1.43, siliconeが1.43, acrylが1.47, 1.55, hydrogelが1.474である。

表2 眼鏡レンズの材質(屈折率, アッペ数, 比重)

	屈折率	アッペ数	比重
クラウン硝子	1.523	58.5	2.54
CR-39	1.498	58.7	1.32

高屈折率レンズ(鉛, チタン)

	屈折率	アッペ数	比重
硝子	1.835	31.5	3.59
プラスチック	1.70	31	1.43

IOLの計算式では近軸式や光線追跡法の幾何光学式を用いたFyodorovの式, Binkhorstの式, SRK/T式(術後の前房深度を角膜曲率半径と眼軸長から予測), Hoffer Q式(personal anterior chamber depth-PACDを使用), Holladay式(surgeon factor-SFを使用)がある。このほかに、経験式にはSRK式, SRK II式などがある⁹⁾。

4) 屈折矯正手術

レーザー屈折矯正手術にはPRK(photorefractive keratectomy), LASIK(laser in situ keratomileusis), LASEK(laser epithelial keratomileusis)がある。いままでは幾何光学が主体であったが、現在は波動光学を用いたwavefront-guided LASIKが主体になっている。

5) 屈折矯正法による quality of life(以下 QOL)

Berry(2003)による414名のアンケート調査によると、眼鏡ではpositiveとnegativeのコメントが同数であったが、CLではpositiveがnegativeの2倍、屈折矯正手術では4倍であり、屈折矯正手術, CL, 眼鏡の順でQOLが高い報告がされている⁷⁾。屈折矯正手術は米国では約150万件、日本では約5万件であり、日本でのこのような調査が待たれる。

4. 眼の幾何学的特性

眼は幾何光学的には欠陥と思われる構造として、光軸と視軸の不一致、固視微動と調節微動、調節ラグ、球面収差、軸外収差、色収差などがあるが、これらは眼球の構造、構成上合目的との考えもある。

1) 光軸と視軸の不一致

光学的に対称軸になる光軸は視軸とは一般的に異なっていて、そのずれは約5°である(図1)。瞳孔距離

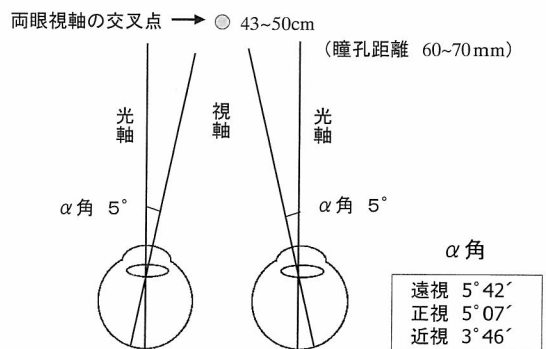


図1 光軸と視軸の違い

離を 60~70 mm, α 角を 5° とすれば, 両眼の視線が交叉する位置は, 眼前約 45~50 cm で調節状態は約 2D に相当する⁸⁾. Ivanoff (1962) によると, 1~2D の調節状態で球面収差は最も小さくなると報告されていて⁹⁾, 両眼視する際には最も容易な点とも考えられる (図 2).

2) 固視微動と調節微動

人眼では固視微動は 1~1.5 cycles/sec ごとに 5~30' があり¹⁰⁾, カメラでいう手振れが起こっている状態で幾何光学的には欠陥ともいえる。しかし, 固視微動を止めると見えなくなるといわれていて^{11, 12)}, この固視微動が実質的に分解能を高めている可能性がある。このほか, 調節微動が 1~2 cycles/sec ごとに 0.1D 程度あり^{13, 14)}, 常にピントずれが起こっている状態にある。

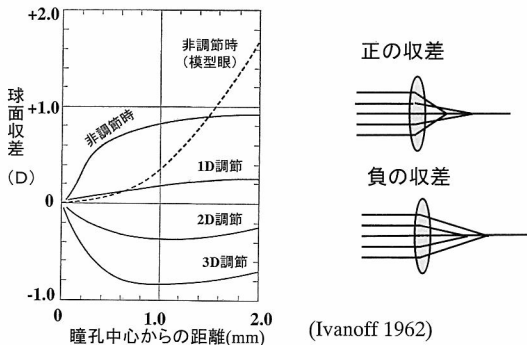


図 2 調節と球面収差
非調節時で模型眼の値に比べて実験値が小さいのは屈折面の非球面性, 水晶体屈折率の不均一性によると考えられる。

3) 調節ラグ

調節刺激量と調節反応量との関係は図 3 のごとくである⁹⁾. この図で 45° の点線は網膜に結像するための調節刺激量と反応量との理論的直線である。R は近点距離計などの調節刺激量から求められたものであり, R' は赤外線オプテーターなどで調節反応量を実際に測定して求められた調節力である。調節刺激がない場合にも調節反応は 45° の直線より上方にあり, 調節緊張状態にある。これを調節安静位, 夜間近視, 空間近視などといわれている。また, 調節反応曲線と 45° の直線との交点を静止点といい, 光学的に最もよい点とされている。その後は調節刺激が増しても調節刺激に相当する調節反応量は少ない。すなわち, 目標を注視した場合, 眼の注視点は視標目標より若干遠方にあることになる。言い換えれば, 眼は規定の調節をしていないことになり, これを調節ラグと呼んでいる。このように調節したときには焦点が網膜より後方にあることになり, 幾何光学的にはピントずれの状態である (図 4)。

4) 収差

レンズの収差として Seidel の 5 収差がある。軸上収差として球面収差, 軸外収差としてはコマ収差, 非点収差, 湾曲, 歪曲などである (図 5)。

眼における球面収差は遠方視の場合には正の球面収差であるが, 軸に近い光線は水晶体の核の屈折率が高いのでこの球面収差が補正される可能性がある。また, Stiles-Crawford 効果 (図 6)¹⁵⁾で, 周辺からの光線は瞳孔径が 6 mm では網膜上の感度は約 1/3 程度になり, 球面収差の影響は少なくなる構造になっている。

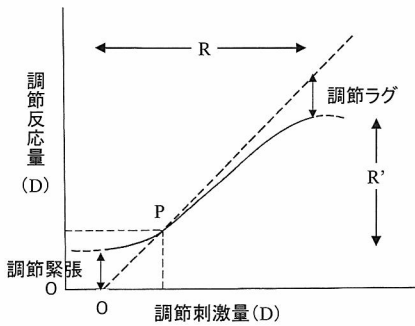


図 3 調節刺激量と調節反応量
P: 静止点, R: 調節刺激量, R': 調節反応量

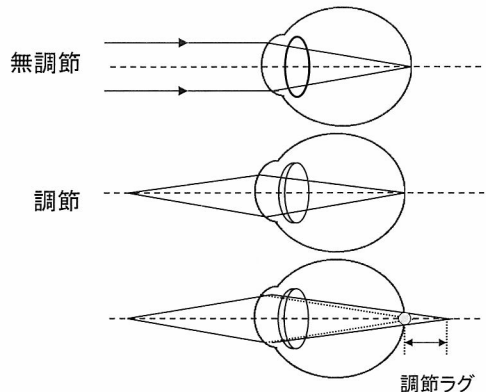


図 4 調節ラグ

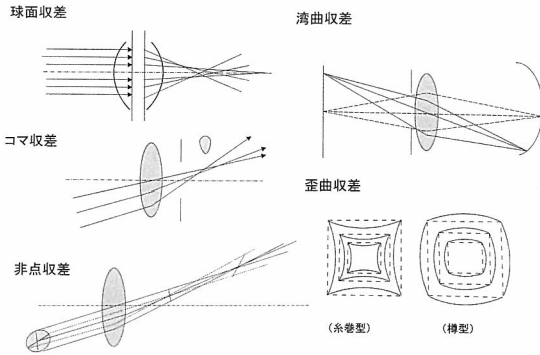


図5 単色光によるレンズ収差 (Seidelの5収差)

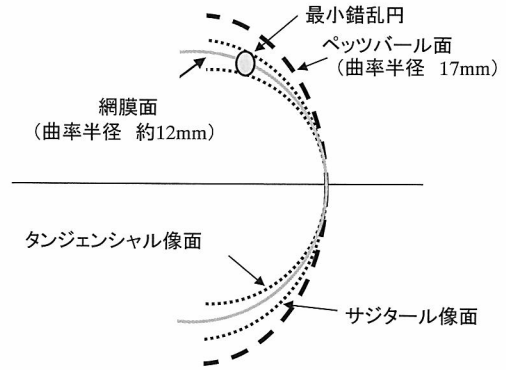


図7 Petzval面

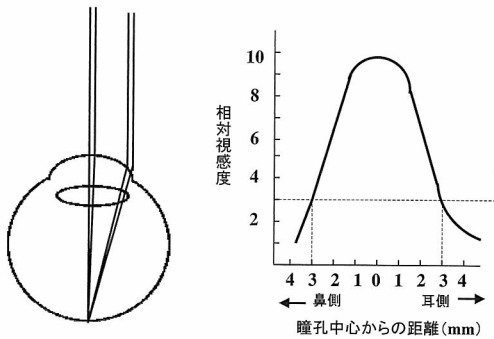


図6 Stiles-Crawford 効果

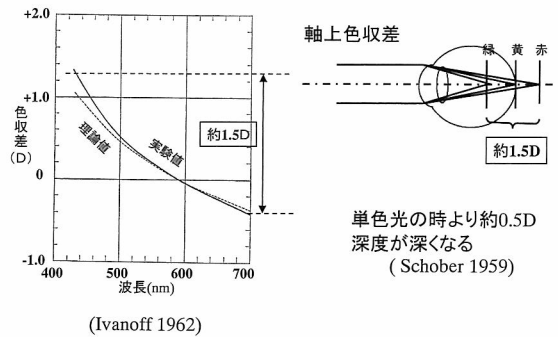


図8 眼の色収差

周辺視と関連して比較的重要なのは非点収差である。模型眼について網膜面上で湾曲を求めると (Petzval 面)⁹⁾、図7のごとく約 17 mm の曲率半径になるが、実際の網膜の曲率半径は約 12 mm である。そこで、非点収差を計算すると図のごとくとなり、非点収差がない場合よりも最小錯乱円の位置が実際の網膜面に近くなる。このことから人間の眼の合目的性も考えられる。しかし、この計算は模型眼についてであり、実証的でないことに注意する必要がある。

色収差には軸上色収差と倍率色収差がある。白色光の場合には倍率の色収差のために像のボケがみられる。また、軸上色収差ではピントずれが起こる。Ivanoff (1962) によると、400~700 nm 間で 1.5D の差があるといわれている (図8)⁹⁾。Schober (1959)¹⁶⁾は色収差により、単色光のときより約 0.5D 焦点深度が深くなると述べている。そこで、眼の軸上色収差は焦点深度を深めている可能性もある。

5. まとめ

- 1) 眼科領域では基本的には幾何光学の考えで理解できる領域は広く、QOV を考えていく上で今後も基礎となる幾何光学の考えは大切と思われる。
- 2) 眼光学系は幾何光学的に欠陥があるようであるが、自然設計の合目的性が考えられる。

文 献

- 1) Duke-Elder S: The history of ophthalmic optics. System of Ophthalmology Vol V, 3-23, The CV Mosby, St Louis, 1970.
- 2) Den Tonkelaar I, Henkes HE & van Leersum GK: Eye and Instruments. Batavian Lion, Amsterdam, 1996.
- 3) 大庭紀雄編: Practical Ophthalmology. 眼科学の歴史, 16, 文光堂, 東京, 2003.
- 4) 所 敬: 挿入眼内レンズの度数の計算. 166-168, 調節力と調節域 201-202, 眼鏡 217-245, コンタクトレンズ 246-265, 屈折異常とその矯正 (第4版), 金

- 原出版, 東京, 2004.
- 5) 高橋文男: 累進屈折力レンズ-最近の進歩. あたらしい眼科 21: 1455-1460, 2004.
 - 6) 所 敬: シリコンハイドロゲルレンズ. 眼科 47, 印刷中.
 - 7) Berry S, Mangione CM et al: Development of the national eye institute refractive error correction quality of life questionnaire. *Ophthalmology* 110: 2285-2291, 2003.
 - 8) 大頭 仁: 眼球の光学. 応用物理学会 光学懇話会編, 生理光学, 36-58, 朝倉書店, 東京, 1975.
 - 9) Bennett AG & Francis JL: Curvature of the image. *Aberrations of the Eye*, 92-93, 126-131, Academic Press, New York and London, 1962.
 - 10) 林 慎一: 固視眼球微動の研究. 第2報 固視微動の生理学的研究. 日眼会誌 63: 4387-4402, 1959.
 - 11) Riggs LA, Ratliff F et al: The disappearance of steadily fixated visual test object. *J Opt Soc Am* 43: 495-501, 1953.
 - 12) Ditchburn RW, Fender DH & Mayne S: Vision with controlled movements of the retinal image. *J Physiol* 145: 98-107, 1959.
 - 13) Campbell FW & Robson JG: High-speed infrared optometer. *J Opt Soc Am* 49: 268-272, 1959.
 - 14) 鈴木昭弘: 調節微動の研究. 日眼会誌 79:1257-1272, 1975.
 - 15) Westheimer G: Stiles Crawford effect. In: Kaufman PL & Alm A eds, *Adler's Physiology of the Eye*, 10th Ed, 450-452, CV Mosby, St Louis, 2002.
 - 16) 一色真幸: めがねのレンズ. 応用物理学会 光学懇話会編, 生理光学, 72-89, 朝倉書店, 東京, 1975.
-

原 著

自覚屈折検査第一法と第二法の比較

川尾美樹*, 名和良晃**, 上田哲生**, 芳本 宏*, 中川皓夫**, 松田賢昌**,
増田紀子*, 原 嘉昭**

*町立大淀病院眼科, **奈良県立医科大学眼科学教室

Comparison between the First Method and the Second Method of Measuring Subject Refraction

Miki Kawao*, Yoshiaki Nawa**, Tetsuo Ueda**, Hiroshi Yoshimoto*,
Akio Nakagawa**, Takamasa Matsuda**, Noriko Masuda** and Yoshiaki Hara**

*Department of Ophthalmology, Oyodo Hospital,

**Department of Ophthalmology, Nara Medical University

屈折異常以外に異常を認めない健康成人23名46眼(20~31歳)に対して、従来から広く行われている自覚屈折検査第一法と、奈良県立医科大学で伝統的に行われている自覚屈折検査第二法を両方施行して比較した。自覚第一法による自覚的等価球面屈折値(平均値±標準偏差)は -1.04 ± 1.85 Dであり、第二法による自覚的屈折値は -0.68 ± 1.84 Dであった。自覚第二法の方が有意にプラス寄りの値が検出された($p < 0.05$)。また、46眼中42眼に自覚第二法でプラス寄りのデータを得られた。両者の差は 0.35 ± 0.51 D(平均値±標準偏差)であった。また、今回の研究中に自覚第二法が有用であった症例を選んで報告する。

(視覚の科学 25: 66-70, 2004)

キーワード: 自覚第一法, 自覚第二法, 過矯正, 低矯正

We measured the subject refraction of 46 eyes of 23 healthy adult patients (20-31 years old) without any ocular diseases except refractive errors, comparing the "first" method that has been most frequently used in Japan and the "second" method that has been traditionally used in the Department of Ophthalmology, Nara Medical University. The spherical equivalent of refraction measured with the first method was -1.04 ± 1.85 D (mean \pm standard deviation), whereas that measured with the second method was -0.68 ± 1.84 D. The refraction obtained with the second method was significantly less myopic (deviated to the direction of plus) ($p < 0.05$). Among the 46 eyes examined, 42 eyes were measured to be less myopic with the second method. The difference between the methods was 0.35 ± 0.51 D (mean \pm standard deviation). In addition, we present cases in which the second method was useful.

(Jpn J Vis Sci 25: 66-70, 2004)

Key Words: The first method, The second method, Overcorrection, Undercorrection

1. 緒 言

屈折検査は、眼科の日常診療における最も重要な検査のうちの一つである。屈折検査にはスキアスコ

プなどを用いる他角的屈折検査と、自覚的屈折検査がある。自覚的屈折検査の方法はDondersのレンズ交換法がよく知られていて、従来から多くの施設で行われている¹⁾。これに対して奈良県立医科大学では

別刷請求先: 638-8521 奈良県吉野郡大淀町下淵 353-1 町立大淀病院眼科 川尾美樹
(2004年10月6日受理)

Reprint requests to: Miki Kawao, ORT Dept of Ophthalmol, Oyodo Hospital
353-1 Shimobuchi, Oyodo-cho, Yoshino, Nara 638-8521, Japan
(Received and accepted October 6, 2004)

中尾が在職中に眼鏡外来で行っていた方法、いわゆる奈良医大方式が伝統的に用いられている²⁻⁵⁾。この方法は中尾が多数の患者を検査して試行錯誤の上、最も優れていると判断した方法である。我々は便宜上前者の方法を自覚第一法、後者を自覚第二法と呼んでいる。

この眼鏡外来では眼鏡が合わなかった多くの患者が日本全国から来院され、正しい屈折度数を診断されて満足して帰って行った。中尾は3年間775眼の検眼を行ったところ、自覚第一法は自覚第二法に比べ81.9%が過矯正となり、平均過矯正量は等価球面屈折度数に換算して0.66Dであった^{4, 5)}。この方法は眼鏡外来での臨床実践が先行しており、第一法と第二法を定量的に比較した検討は少なかった。

最近屈折矯正手術が進歩し、眼鏡、コンタクトレンズ（以下 CL）の材質も向上した。これからますます屈折状態の正確な評価が必要になってくると思われる。しかし、眼科診療ではいまだにオートレフラクトメータが過信され、正確な自覚屈折検査が行われていないことが多いと考える。

そこで今回我々は、自覚第二法の有用性について再検討し、ある条件下で自覚第一法との比較を行ったので報告する。

2. 対象および方法

当研究はヘルシンキ宣言を遵守して行われている。対象は町立大淀病院の健康な職員、または屈折異常以外に眼科的疾患を認めない同院の患者23名46眼で、平均年齢 25.5 ± 3.0 歳（20～31歳）、平均等価球面自覚的屈折度数 -0.68 ± 1.84 diopter (D)（自覚第二法での値、S: $-4.25 \sim +2.25$ D, C: $0 \sim -1.75$ D）であった。

方法は同一被験者に対し1人の視能訓練士（以下 ORT）が自覚第一法で自覚的屈折検査を施行した。別の日にもう1人のORTが自覚第二法で自覚的屈折検査を行った。両者の時間差は多くても1カ月以内であった。両者の測定間には眼鏡、CLの度数変更はなく、CL装用、着脱期間の差、眼精疲労の差、1日の時間帯の差はなかった。検査室、視力表は同じものを使用し、照度の差はないようにした。本検査で最も重要なことであるが、互いの検査データは伏せておき、第三者による集計が終了するまでは互いの検査データがわからないようにして恣意が介入しないようにした。次に、検査方法の詳細について示す。

1) 自覚第一法（表1）

まずオートレフラクトメータ（KR8100、トプコン）にて他覚的屈折検査を行った。次に片眼ずつ遮蔽して自覚的屈折検査を行った。まず他覚的屈折検査の値を参考にして視力が0.1程度となるプラス寄りのレンズを装用させた。レンズを少しずつマイナス寄りに変えていき、最高視力の得られる最もプラス寄りのレンズ、すなわち最小錯乱円に相当すると思われる部位の自覚屈折度数を求めた。次に他覚的屈折検査から得られた乱視度数の1/2を雲霧した。このとき後焦線が網膜上にあると推定されるが、この状態で放射状乱視表を用いた乱視検出および矯正を行った。その後、球面レンズの微調整を行い、最高視力の得られる最もプラス寄りのレンズを求めた。一眼の検査が終了するとその眼を遮蔽し、他眼の検査を同様に施行した。

2) 自覚第二法（奈良医大方式 表2）

まずオートレフラクトメータ（KR8100、トプコン）で他覚的屈折検査を行った。視力が0.1程度の見え方になるプラス寄りのレンズを両眼に装用させた。本来の自覚第二法ではここで30分以上の雲霧を行うが、今回の研究条件ではそれは行っていない。両眼開放

表1 自覚第一法

他覚的屈折検査	
↓	
自覚的屈折検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 最小錯乱円を求める 2. 他覚的屈折検査値の乱視量の1/2量の雲霧をする 3. 乱視検出および矯正 4. 球面レンズを微調整し、最高視力の得られるレンズを求める

表2 自覚第二法（奈良医大方式）

他覚的屈折検査	
↓	
自覚的屈折検査	<p>両眼雲霧法 0.1程度の見え方の+側のレンズを装用</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 検査眼の雲霧を徐々に減らしていく (他眼の雲霧はそのまま—両眼開放) 2. 0.5～0.6程度見えてきたら乱視検出および矯正 3. 球面レンズの微調整 4. 先と同様に0.1程度の見え方の+側のレンズを装用し、両眼分離を行う

表3 自覚第一法と自覚第二法の違い

	第一法	第二法
両眼分離法	遮蔽板	0.1程度の見え方になるプラス側のレンズ
雲霧方法		0.1程度の見え方になるプラス側のレンズを両眼に30~40分装用
乱視検出法	網膜上に後焦線がある状態での乱視検出および矯正	低矯正乱視検出法 網膜より前に前・後焦線がある状態での乱視検出および矯正

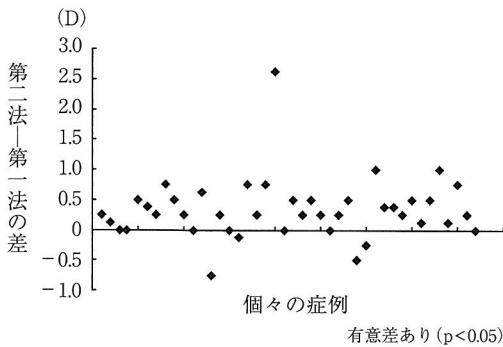


図1 第一法と第二法の差

下で検査眼の反対の眼を雲霧した状態で、検査眼のレンズを徐々にマイナス寄りに変えていった。検査眼の視力が0.5~0.6程度になった時点、すなわちまだ最小錯乱円に達していないと思われる段階で放射状乱視表を用いた乱視検出および矯正を行った（低矯正乱視検出法）。その後、球面レンズの微調整を行い最高視力の得られる最もプラス寄りのレンズを求めた。

検査が終了すると他眼の検査に移る前に検査終了眼を再び0.1程度の見え方になるようにプラス側のレンズを装用して雲霧した。他眼の検査は検査終了眼が雲霧され開放されている状態で同様に施行した。

表3に各検査法の違いをまとめたものを示す。

自覚第一法と第二法で得られた自覚的屈折値を等価球面度数に変換し、両者を対応のあるt検定で比較した。また、それぞれの乱視値を同様に比較した。

また、今回の研究の過程でとくに自覚第二法が有用であると感じられた症例があったので、経過を報告する。更に以前眼光学学会で発表した自覚第二法を用いたCL装用下での屈折検査について供覧する。

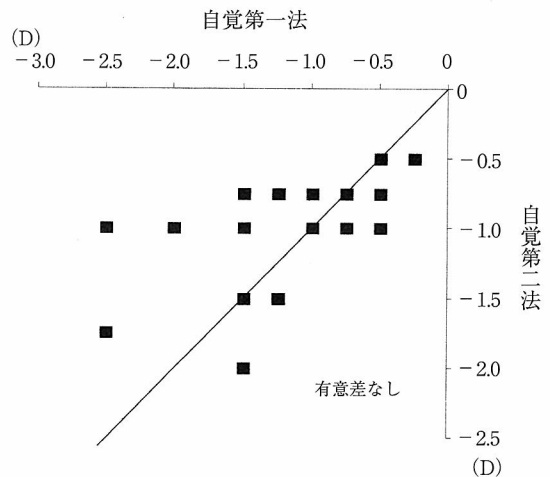


図2 乱視度数の比較

3. 結果

1) 結果

自覚第一法による自覚的等価球面屈折値（平均値±標準偏差）は -1.04 ± 1.85 Dで、第二法による自覚的屈折値は -0.68 ± 1.84 Dであった。自覚第二法の方が有意にプラス寄りの値となった（ $p < 0.05$ ）（図1）。

また、全体に対する割合では、46眼中42眼（91.3%）に自覚第二法でプラス寄りのデータを得られた。自覚第一法と第二法の等価球面屈折値の差は平均 0.35 ± 0.51 Dであった。

乱視量については自覚第一法が -0.97 ± 0.63 Dで、自覚第二法が -0.79 ± 0.41 Dであり、両者の間で有意差を認めなかった（図2）。

2) 自覚第二法が有用であった症例報告

27歳女性、潜伏眼振の既往がある。次に検査結果を示す。

表4 各検査方法の長所・短所

	長 所	短 所
第一法	・短時間でできる ・遮蔽板の利用により検者側の手順ミスが少ない	・最小錯乱円を求めるので調節が介入しやすい ・乱視の検出に調節が介入しやすく、不安定 ・潜伏眼振の影響を受けやすい
第二法	・最初に両眼分離を行うので調節の介入を防ぐ ・日常視に近いため潜伏眼振の影響を受けにくい ・低矯正乱視検出法を行うので第一法に比べ乱視の検出が安定している	・0.1から徐々に雲霧量を減らすため時間を要する ・プラス側のレンズを用いた雲霧による不快感

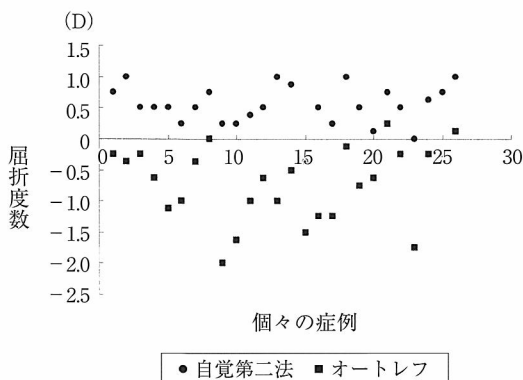


図3 ソフトコンタクトレンズ上でのオートレフラクトメータと自覚第二法の比較

<右 眼>

他覚的屈折検査 S-3.75D=C-1.25D Ax176°

自覚第一法 S-2.25D=C-1.5D Ax170°

自覚第二法 S-1.25D=C-1.0D Ax170°

<左 眼>

他覚的屈折検査 S-6.75D=C-2.0D Ax172°

自覚第一法 S-5.25D=C-2.0D Ax170°

自覚第二法 S-5.0D=C-1.0D Ax10°

両眼とも自覚第二法でプラス寄りの値が得られているが、右眼でとくに顕著な差が生じた。被検者によると、自覚第二法は視標が固視しやすく、検査中の精神的ストレスが少なかったと述べている(表4)。

3) 健康なソフトコンタクトレンズ(以下 SCL) 装用者によるオートレフラクトメータと自覚第二法を比較した結果

自覚第二法が有用な1例として、中川らが報告した一部を供覧する(中川皓夫:正確な調節近点から

屈折矯正を評価する。平成14年度日本眼光学学会・ME学会抄録集)。他の病院、医院、CL量販店などで処方された近視矯正SCLを装用している健康な成人に対して、SCL上からオートレフラクトメータと自覚第二法と両方測定して比較したものである。オートレフラクトメータでは低矯正を示しているが、SCL上から自覚第二法を行うと大部分のSCLが過矯正であるという、驚くべき結果を示した(図3)。この研究においても自覚第二法の有用性が示されている。

4. 考 按

自覚屈折検査第二法の特徴は、両眼開放による検査、両眼プラスレンズ装用による雲霧、および低矯正下乱視検査法である。

両眼開放による自覚的屈折検査については古くから Miles⁶⁾、Jager⁷⁾によって紹介されている。両眼開放下では片眼遮蔽と比較して日常視に近く、調節の緊張が生じにくく、また潜伏眼振の影響を受けにくいと考えられる^{6,7)}。原田らは、他眼の視力を0.6~0.9くらいにした状態での検査を提唱した⁸⁾が、これは隔像が得られる反面、自覚的屈折検査が他眼視力の影響を受けて評価しにくくなることがある。

雲霧方法については調節麻痺薬による検査は今回行っていないので別の機会に譲るが、斜視や調節力の強い若年齢者に対する検査には必要であり、重要であると考ええる。ただし屈折矯正手術の術前検査において、サイプレジン点眼を試行しても約75%の症例で点眼前後の屈折変化が0.5D未満であったという報告もあり⁹⁾、調節麻痺薬も過信はできず、決して自覚的屈折検査をおろそかにしてはいけないと考えている。

プラスレンズ装用による雲霧方法は古くから行われているが、所の総説がある¹⁰⁾。最近大辻らは両眼開放、+3D 負荷、30分雲霧の方法を提唱しているが、彼らはこの方法で0.25 D 程度のプラス寄りの値が得られると報告している¹¹⁾。自覚第二法の原法による両眼開放、プラスレンズによる30~40分の雲霧法は時間がかかるので、忙しい日常診療で全例に行うのは適当ではない。ただし眼鏡処方や眼精疲労、眼鏡過矯正の例などには施行した方がいい⁹⁾。今回の研究では原法と同じ方法の雲霧法は行っておらず、これについては別の機会に報告したいと思っている。

低矯正下乱視検査法は中尾が提唱した²⁻⁵⁾。自覚第一法では最小錯乱円までもってくる時に調節が介入する可能性がある。調節時に乱視軸が変動することは古くから知られており、調節が介入しにくい低矯正の段階での乱視検査は上記変動を受けにくく有利であると考えられる。また、正確に乱視を同定することによって不必要な過度の球面度数の加入が妨げることがわかっている⁹⁾。

今回の検討では等価球面屈折度数について、自覚第二法は自覚第一法に比べ平均約0.35 D プラス寄りに測定された。今回は雲霧を行っていないので、両眼開放下の検査と、低矯正下での乱視検査法という二つの因子によって両者の差が生じたと考えられる。すなわち、自覚第二法の方がより調節が緩和された状態で測定が可能であったと思われる。自覚第二法原法による雲霧を加えると、この差が更に大きくなると考えられ、中尾らが報告した0.66 D という値^{4, 5)}に近付くのではないかと考えている。

乱視度数、すなわち検出された乱視量の絶対値に関しては両者の間で有意差はなかった。ただし自覚第二法の方が変動の少ない、安定した乱視軸の検出が可能であったとの印象がある。中尾は167眼の検討で、自覚第一法で乱視検出は34.7%であったが自覚第二法では97.0%であり、自覚第二法で他覚的屈折検査による乱視との一致が88%であると述べている⁹⁾。我々は別の機会に、複数回の測定のばらつきをみるなど、検討方法を変えてこの点での比較を行い、中尾らの主張を裏付けたいと考えている。

症例検討では、予測していたとおり潜伏眼振の症例について自覚第二法の方がプラス寄りの値となっ

た上、患者の検査中の精神的ストレスを軽減させる効果があった。この例をみても、日常診療において潜伏眼振に対して過矯正の眼鏡処方を行われている例が数多くあると推定された。この症例以外にも自覚第二法が有効であった症例が数多くあり、別の機会に詳しく述べたいと思っている。

以前中川が発表した、SCL上からのオートレフラクトメータと自覚第二法の比較をみると、自覚屈折検査の重要性が理解できる。日常診療においてオートレフラクトメータを盲目的に信用し、不適当な視力検査や過矯正の眼鏡処方、CL処方が行われている例が多いと思われる。この例をみると、一見適正処方にみえるSCLが大部分は過矯正であることがわかる。この患者達はCL量販店ばかりでなく眼科専門医の開業医での処方も含まれている。正しい自覚屈折検査の啓発が必要であることが実感できるが、このことは項を改めて詳しく述べたいと思っている。

今回の検討はまだ端緒であり、自覚屈折検査については更に詳しく検討を行っていく予定である。日常診療において、時間がかかって面倒だと思われがちな自覚屈折検査の重要性を再認識していくべきであると考えている。

文 献

- 1) 増田寛次郎：眼科学大系1 眼科診断学・眼機能. 387-394, 中山書店, 東京, 1998.
- 2) 中尾主一：間違っているメガネのかけ方選び方. 168-169, 日本書籍, 東京, 1979.
- 3) 中尾主一：眼鏡処方. 眼科 Mook 18, 125-134, 金原出版, 東京, 1982.
- 4) 中尾主一：眼鏡処方. 新臨床眼科全書, 61-87, 金原出版, 東京, 1987.
- 5) 中尾主一：屈折異常矯正の問題点, 殊に角膜乱視について. 眼臨 94: 289-290, 2000.
- 6) Miles PW: Binocular refraction. Am J Ophthalmol 31: 1460-1466, 1948.
- 7) Jager A: Die binokulare brillenbestimmung. Klin Monatsbl Augenheilkd 121: 485-487, 1952.
- 8) 原田政美, 内田幸男：両眼視による屈折矯正. 眼臨 50: 6-9, 1956.
- 9) Waring GO III: Examination and selection of patients for refractive keratotomy. In: Waring GO III ed, Refractive Keratotomy, 317-318, Mosby, St Louis, 1992.
- 10) 所 敬：自覚的屈折検査の手順. 眼科 25: 725-732, 1983.
- 11) 大辻順子, 内海 隆他：若年者近視例における雲霧法における有用性. 眼臨 97: 47-49, 2003.

水晶体の波面収差解析方法

石井和彦¹⁾, 大沼一彦²⁾, 根岸一乃³⁾, 大野健司⁴⁾, 野田 徹⁴⁾

¹⁾千葉大学大学院自然科学研究科, ²⁾国立大学法人千葉大学工学部, ³⁾慶應義塾大学医学部眼科学教室,

⁴⁾独立行政法人国立病院機構東京医療センター眼科

Wavefront Aberration Analysis of Crystalline Lenses

Kazuhiko Ishii¹⁾, Kazuhiko Ohnuma²⁾, Kazuno Negishi³⁾, Kenji Ohno⁴⁾, Toru Noda⁴⁾

¹⁾Chiba University Graduate School of Science and Technology,

²⁾National University Corporation Chiba University Faculty of Engineering,

³⁾Department of Ophthalmology, Keio University School of Medicine;

⁴⁾Department of Ophthalmology, National Hospital Organization Tokyo Medical Center

波面センサーにより眼球光学系の波面収差を測定し、また、角膜表面の形状計測データから角膜の波面収差を計算で求め、この二つのデータから眼球内部の収差解析の報告がある。眼球内部の光学特性は、角膜裏面、水晶体からなるので、それが一体となった解析である。ここでは、角膜表面の形状データに、角膜裏面の形状計測データを加えて波面収差解析を行うことで、水晶体のみの波面収差を求める方法を提案する。その方法は角膜表裏面を多項式近似し、波面センサーで得られた波面収差から光線の方向ベクトルを求め、その光線を水晶体の前面まで光線追跡し、その光路長から波面を求めるものである。この手法の精度を眼内レンズ挿入眼のデータで確認した。また、本手法を水晶体の情報が未知である有水晶体眼に適用した結果、角膜での乱視成分を水晶体が補正していることを確認した。
(視覚の科学 25: 71-77, 2004)

キーワード：水晶体, 波面収差, 光線追跡, ゼルニケ多項式

Aberration analysis of the inner optical system of eye has been reported by using the data of wavefront sensor and the aberration analysis of the anterior surface of cornea, but crystalline lenses themselves has not yet been analyzed. Here, we propose a new method for the aberration analysis of crystalline lenses using the anterior and posterior shape of cornea and the wave front aberration of eye optics. In the method, polynomial expression approximation represents the cornea's shape. A number of rays obtained by wavefront differential are traced from the anterior surface of cornea to the crystalline lens. The accuracy of this method is tested by comparing the estimated data and the design data of intraocular lens (IOL) using eyes with IOL. Also, we show a result that the crystalline lens partially corrects the astigmatism of cornea.
(Jpn J Vis Sci 25: 71-77, 2004)

Key Words: Crystalline lenses, Wavefront aberration, Ray-tracing, Zernike polynomial

1. 緒 言

現在、波面センサーが眼球光学系の収差測定に利用されている。また、ビデオケラトスコプを用い

て角膜表面形状を測定し、角膜表面がもつ屈折力分布解析や、角膜表面の収差解析がなされている。この二つの収差解析から眼球光学系内部の収差解析をした報告がある^{1, 2)}。また、眼球光学系内部の解析に

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工学部メディカルシステム工学科 大沼一彦 (2004年11月22日受理)

Reprint requests to: Kazuhiko Ohnuma National Univ Corporation Chiba Univ Faculty of Engineering 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

(Received and accepted November 22, 2004)

は別の方法もある。それは、角膜前面での屈折をキャンセルする工夫をして、波面センサーで測定⁶⁾するのである。これらの方法で解析している光学特性は、角膜後面と水晶体である。

その報告のなかに、角膜前面の収差を眼球光学系内部が完全ではないが補正しているという結果⁷⁾がある。しかも、どの収差をも補正しているとの報告⁸⁾もある。また、加齢⁹⁾とともに補正されにくくなるようである。更に、波面センサーとビデオケラトスコープを使う実験では、照準線と瞳孔中心線のなす λ 角のズレが問題となり、収差解析に誤差があらわれることを指摘する報告¹⁰⁾もある。

前述したように、これらの報告では眼球光学系内部の収差解析であり、角膜後面の形状による特性から水晶体までを含めた評価方法である。ここでは、これらの報告とは異なり、水晶体のみの収差解析をする新しい方法を提案する。水晶体のみの波面収差解析が可能となれば、眼内レンズ（以下 IOL）挿入手術後におけるレンズの位置ズレ、傾きによって生じる波面の収差解析や、白内障初期で白濁前の屈折率の変化による波面収差の変化の測定などが行えるようになると思われる。ここで提案する方法は視覚光学系の全波面収差、角膜前後形状のデータを用いて光線追跡を行い、水晶体の前面までの光路長から水晶体の前面での波面を求め、その収差解析を行う方法である。

2. 方 法

1) 波面センサーによる眼球光学系波面収差測定とゼルニケ多項式による表現

波面センサーを用いて眼球光学系全体の波面収差測定^{6,7)}を行う。波面センサーでは、細いレーザー光を瞳孔中心から入射し、網膜中心から反射してくる光線をマイクロレンズアレイにより微小面ごとに結像させる。そしてその像の基準点からの移動量から眼の収差を求めることができる。この波面センサーで得られる眼の波面収差 $W(x, y)$ は、

$$W(x, y) = \sum_i C_i Z_i(x, y) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_i はゼルニケ係数であり、 $Z_i(x, y)$ はゼルニケ多項式である。(1) 式は

$$W(x, y) = \sum_i N_i Z_i(x, y) \dots\dots\dots (2)$$

とあらわすこともできる。 N_i は正規化定数で Optical

Society of America (OSA) より推奨されている^{6,7)}が、ここでは、単純に各収差の大きさを知れば十分であるので (1) 式を使用した。また、ゼルニケ多項式は 4 次の項 ($i=14$) までとした。

2) レイトレーシング

波面センサーによる測定から得られた眼球光学系波面収差 $W(x, y)$ より、光線の方向を求める。このとき、光線の方向ベクトルは $W(x, y)$ を x, y 方向に微分することで得られる。図 1 に示すように、この波面から求めた光線は瞳孔から出て行く光線であるが、この光線を逆に戻していき、水晶体前面まで光線をたどることを提案する。この方法で、角膜前面から水晶体前面までの光路長を求める。求めた光路長と波面収差⁶⁾の関係から波面収差を求める。各光線において、角膜前面から水晶体前面までの光路長と波面収差の関係は

$$W = -(l - l_{mean}) \dots\dots\dots (3)$$

であらわされる。ここで l_{mean} は平均光路長である。このようにして求めた波面収差 W をゼルニケ展開することで、水晶体の波面収差解析を行う。

この方法を行うにあたり、次のような仮定をしている。眼球光学系波面収差 $W(x, y)$ は、本来であれば眼球光学系の射出瞳の位置での値であるが、収差の値が大きくない場合は角膜前面での値として扱っても問題ない。例えば、4 mm 瞳孔径で、2D の近視の

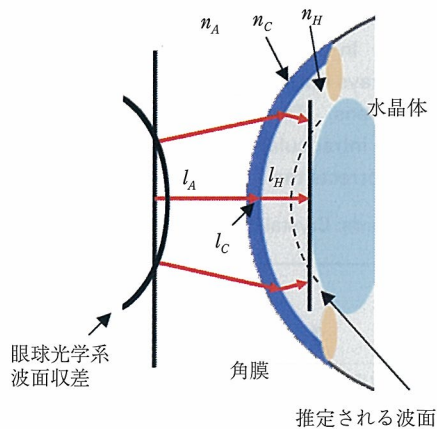


図 1 レイトレーシングで求める水晶体前面での波面収差 n_A : 空気の屈折率, n_c : 角膜の屈折率, n_H : 房水の屈折率, l_A : 空気中の光路長, l_c : 角膜中の光路長, l_H : 房水中の光路長

場合、 $c_4 = 2\mu\text{m}$ で、50 cm のところに収束する波面である。瞳と角膜間の距離約 3 mm ずれたところの波面は瞳面の波面と大きな変化がないことが想像できる。また、平均光路長 l_{mean} をひいたのは、波面収差を考えるとときに理想波面を無限遠に進む平行光と考えているためである。そのため、ゼルニケ展開したときの 0 次の値が 0 となる。

波面収差解析には光路長と波面の関係ではなくて、光線の方向ベクトルと波面の関係を使った別の手法⁹⁾もある。それは、水晶体前面での光線ベクトルを求めて、その x, y 成分を使って、波面を求める手法である。波面のそれぞれの方向での微分と、ゼルニケの関係は式であらわすと、次のようになる。この式で、左辺は光線の x, y 方向の傾きをあらわしている。

$$\frac{\delta W(x, y)}{\delta x} = \frac{\delta(\sum_i C_i Z_i(x, y))}{\delta x}$$

$$\frac{\delta W(x, y)}{\delta y} = \frac{\delta(\sum_i C_i Z_i(x, y))}{\delta y} \dots\dots\dots (4)$$

これは波面センサーでシャッターハルトマンセンサーのデータからゼルニケ展開をするときに用いられる方法である。ここではこの手法は用いなかった。それは、(3) 式で示した光路長と波面の関係から求める波面を重回帰分析でゼルニケ展開する方が容易であるためである。

次に、光路長から波面収差を求める方法の詳細を述べる。角膜から出射したところの波面から光線を求めて、角膜の方向にレイトレーシングを行うときには、光線が角膜表裏面を通過する位置と角度を正確に求める必要があるが、角膜表裏面形状測定により得られる値は離散値である。このため、本論文では以下のような多項式による近似を行った。

$$H(x, y) = \sum_{i=0}^8 \sum_{j=0}^8 a_i b_j x^i y^j \dots\dots\dots (5)$$

ここで $H(x, y)$ は瞳孔を中心とした角膜の高さであり、 a_i, b_j は係数である。本研究では近似精度を保つため 8 次元の多項式近似とした。これらの係数は重回帰分析を用いることで求める。8 次までの式であらわすことにより、局所的に大きな変化がなければ近似としては十分な精度であると考えられる。

また、レイトレーシングを行う際には、各媒体間では光の屈折が起こるが、各媒体での屈折は

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \dots\dots\dots (6)$$

であらわされるスネルの法則により求める。 n_1, n_2 は入射、出射側の屈折率、 θ_1, θ_2 は入射、出射角である。水晶体前面までのレイトレーシングを行う際に光線が通過する媒体は、空気、角膜、房水である。

本手法では、まず、3 次元空間で光線を追跡し、角膜前面との交点を求め、交点における法線ベクトルを求めて、法線ベクトルと入射光線を含む面で、スネルの法則を適応して屈折方向を求めている。更に同様なことを角膜後面でも行っている。

スネルの法則に従いレイトレーシングを行うことにより得られる水晶体前面までの光路長 l は、

$$l = n_A \cdot l_A + n_C \cdot l_C + n_H \cdot l_H \dots\dots\dots (7)$$

で、 n_A, n_C, n_H は空気、角膜、房水の屈折率、 l_A, l_C, l_H は空気、角膜、房水中の光線の距離である。

水晶体前面までの光路長から (3) 式の関係より、水晶体前面の波面収差を得ることが出来る。求めた光路長から式 (1) のように波面 $W(x, y)$ をゼルニケ多項式によりあらわした。多項式の係数は重回帰分析の手法で求めた。

3. 測定装置と検証方法、および被験眼

1) 測定に用いた装置と数値

眼球光学系全体の波面解析にはトプコンの波面センサー KR-9000 PW[®] を用いた。角膜表裏面形状測定にはオープスキャン IIz[®] (キヤノン販売) を用いた。オープスキャンでは、左右 45° 方向からスリット光を角膜に照射して、角膜表裏面における反射光を正面方向のカメラで撮影し、三角法により角膜表裏面形状を取得する。外部に取り出せるデータのサンプリング間隔は 0.1 mm で、範囲は -5.0 ~ 5.0 mm である。解析には、前房深度、眼軸長が必要であるが、これらはオープスキャンの値と Zeiss 社の IOLMaster[®] を用いて測定した値を使用した。

また、レイトレーシングに用いた波長は 560 nm で、空気、角膜、房水の屈折率 n_A, n_C, n_H の値は、

$$n_A = 1.0, \quad n_C = 1.3782, \quad n_H = 1.3384$$

を用いた。

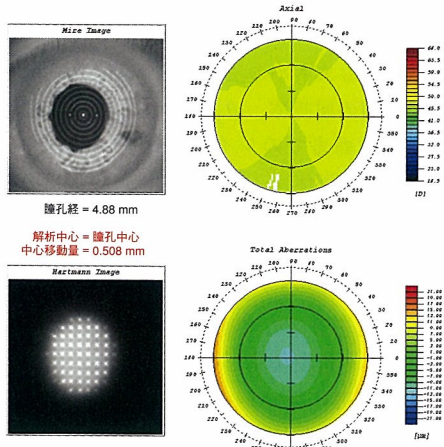


図2 (a) 被験眼1のマイヤー像(左上), 瞳孔径4mmの範囲を解析, 角膜表面屈折力マップ(右上), ハルトマン像(左下), 全波面収差マップ(右下)

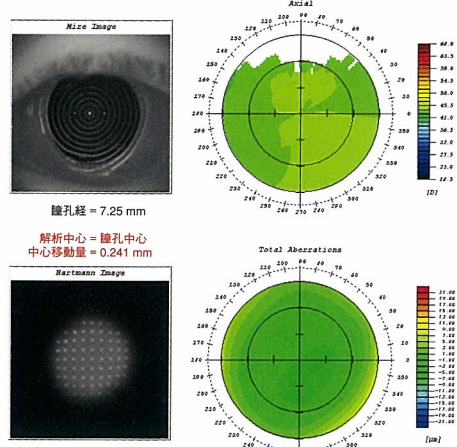


図2 (b) 被験眼2のマイヤー像(左上), 瞳孔径6mmの範囲を解析, 角膜表面屈折力マップ(右上), ハルトマン像(左下), 全波面収差マップ(右下)

2) 光学設計ソフトによるデフォーカス成分の比較

本手法で求めた値の精度を眼内レンズ挿入眼においては比較することができる。それは、眼内レンズが光軸上に置かれたと仮定して、測定によって得られた眼底から眼内レンズまでの距離、眼内レンズの屈折率、曲率半径を用いてIOL前面(角膜側)の波面を求めることができる。IOLの中心が光軸に置かれたと仮定すると、網膜上の点光源からの発散光がIOLを通過した波面であるので、収差は、大きなデフォーカス Z_4 と、わずかの球面収差 Z_{12} である。それ以外の収差はあらわれない。大きなデフォーカス量となるのは、網膜に置かれた仮想の点光源から発した光のIOL通過後の波面は発散光となり、その虚像は網膜の後ろに位置するためである。IOLから虚像までの距離はディオプターであらわすと約25Dとなり、4mm瞳孔でのゼルニケ係数では $25\mu\text{m}$ となる。ここでは、市販の光学設計ソフトOPTAS-PULS[®](サイバネットシステム)を用いて、IOL前面の波面を求めて、デフォーカス量をもって本提案手法との比較を行った。

3) 被験眼

(1) IOL挿入眼

IOL挿入眼の波面を被験眼として用いた。それは、2)のところでも説明したように、別のソフトを用いて、提案手法の精度を確認できるからである。

表1 被験眼1, 2の眼内レンズデータ, 前房深度, 水晶体網膜間距離

	被験眼1	被験眼2
レンズ名	AR40e	AQ110NV
術後	3ヵ月	1ヵ月
レンズパワー [D]	20	20.5
水晶体～網膜 [mm]	17.87	19.67
前房深度 [mm]	4.77	3.84

被験眼は2眼である。図2 (a), (b)に被験眼1, 2のデータを示す。この図の左上は角膜表面形状測定時のマイヤー像であり、右上は角膜表面屈折力(パワー)マップ, 左下はシャッカーハルトマン像, 右下は全収差マップである。図2 (a)は解析範囲が瞳孔径4mmのデータで、水平方向に角膜表面屈折力が大きく角膜は倒乱視で、全収差マップをみると、中心が遅れていて近眼であることがわかるが、角膜による乱視は打ち消されている。

一方、図2 (b)で示す被験眼2は、解析の瞳孔径が6mmである。角膜の屈折力マップをみると、右下にパワーがわずかに強く、コマ収差をもつであろうことが予想される。しかし、全収差マップをみると、収差がほとんどないことを示している。被験眼のIOLの種類, 前房深度などのデータを表1に示す。また、本手法による解析は瞳孔径4mmの範囲で行っ

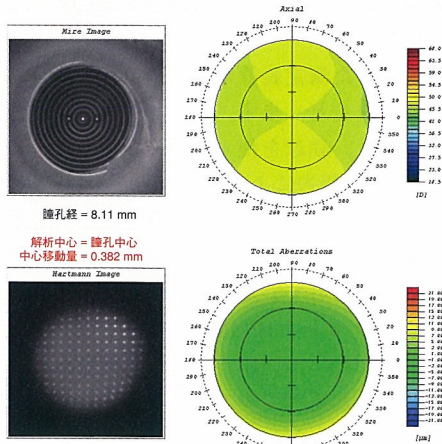


図3 有水晶体眼のマイヤー像 (左上), 角膜表面屈折力マップ (右上), ハルトマン像 (左下), 全波面収差マップ (右下)

た。

(2) 有水晶体眼

有水晶体眼の被験眼は1眼であり, 図3に被験者の波面センサーデータを示す。このデータの上部に示す角膜屈折力から直乱視であることがわかる。また, 波面のデータでは非点収差はみられない。これは, 眼球光学系内部で直乱視を打ち消しているからである。

4. 実験結果

本手法によって得られたIOL挿入眼のIOL前面での波面収差解析結果を図4 (a), (b) に示す。同時に光学設計ソフトによる波面収差を示してあるが, ここでは, IOLのデフォーカス成分の値を比較する。

波面の特徴をあらわすために, デフォーカス成分を取り除いた波面収差マップを図5 (a), (b) に示す。

図4に示すデフォーカス Z_4 成分で比較すると, 被験眼1では約4%, 被験眼2では約7%の誤差があることがわかる。

本手法による波面解析結果にはデフォーカス成分以外でも若干の収差がみられる。図2 (a), (b) で示す波面センサーのデータと図5 (a), (b) とを比較すると, 角膜表面の屈折力分布を補正するような形となっているのがわかる。この収差は先ほど述べたが, IOLの傾き, 中心ズレによるものと思われる。ただ, このデータからどれくらいIOLがずれているのかを求

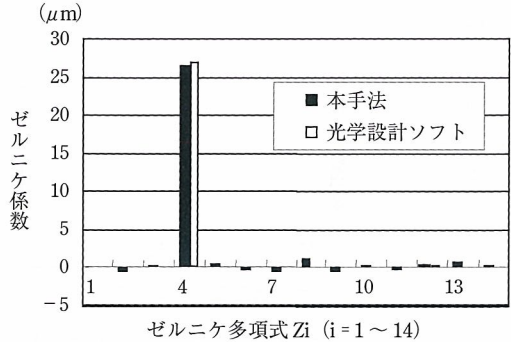


図4 (a) 被験眼1の波面収差解析データ 光学設計ソフトによる解析データとの比較

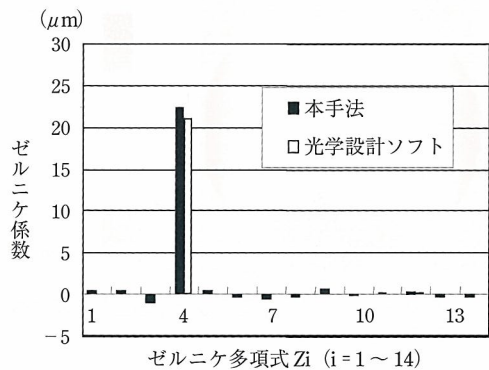


図4 (b) 被験眼2の波面収差解析データ 光学設計ソフトによる解析データとの比較

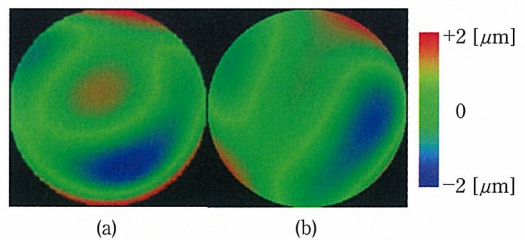


図5 デフォーカス成分を取り除いた眼内レンズ前面での波面収差 a: 被験眼1, b: 被験眼2

めることは難しい。それは, IOLの傾きと中心ズレはそれぞれ各収差に関係しているからである。

次に, 水晶体の情報が未知である有水晶体眼に対して波面収差解析を行った結果を図6に示す。

また, デフォーカス成分を取り除いた水晶体の波面収差マップを図7に示す。

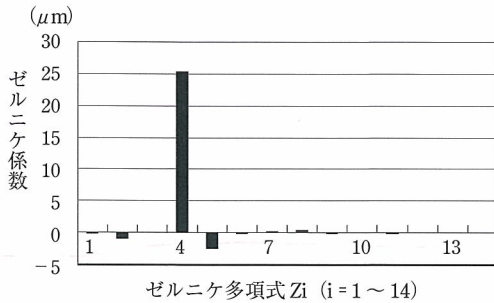


図6 有水晶体眼の水晶体前面の波面収差解析データ

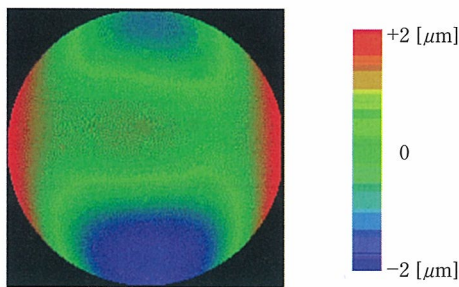


図7 デフォーカス成分を取り除いた水晶体前面での波面収差

先ほども述べたように、波面センサーでの角膜屈折力から直乱視であるが、波面のデータには非点収差はみられない。これは、眼球光学系内部で、直乱視を打ち消しているからである。本手法による水晶体前面での解析結果からも非点収差の項がやや大きく、水晶体自体が角膜のもつ非点収差特性を打ち消しているのがわかる。

5. 考 察

ここでは、波面センサー、オープスキャン、IOLMaster[®]を用い、眼球光学系の波面収差や角膜表裏面形状を測定し、レイトレーシングを行うことにより水晶体の波面収差解析の方法を提案して、実験によりその精度確認を行った。

IOL 挿入眼 2 眼による波面収差解析では、最大 7% の誤差がみられた。これは緒言でも触れたが、波面センサーとビデオケラトスコープを使う実験では、照準線と瞳孔中心線のなす角のズレが問題となり、収差解析に誤差があらわれることを指摘する報告⁹⁾があるように、波面センサーとオープスキャンで

の測定時における角度ズレに起因するのではないかと思われる。

今回使用した測定装置から得られるデータの誤差を検試してみると、まず、オープスキャンの測定精度については、鉄球を使って測定精度を求めた報告がある¹⁰⁾。その報告によれば、±0.05 mm の平均バイアスがかかっている、95% の信頼性があり研究には十分であると述べている。この値からみると、少し誤差の要因となっている可能性はある。また、ポリメチルメタクリレート (PMMA) の球体、非球面体を用いた報告¹¹⁾では、中心部で 0.2 μm、周辺部で 0.7 μm の誤差があると述べている。一方、今回使用したトプコンの波面センサーの測定精度についての報告はない。シャック-ハルトマンを使う波面センサーでの測定における光学系の最適設計についての説明¹²⁾はあるので、これに沿って考えれば原理的には、トプコンの波面センサーは問題ないと思われるが、やはり、今後、調べる必要があると考える。また、IOLMaster[®]の精度については、超音波測定装置との比較報告¹³⁾があり、超音波の装置より優れていることが述べられており、十分と考える。しかし、他の装置との同時測定ではないところが問題と考える。

以上から考えると、波面センサーの精度確認をすることも大切であるが、すべてのデータの同時測定が可能装置を作るのが、本手法の測定精度の向上のために目指す方向に思える。このような装置を作製後、白内障初期の波面収差解析に応用したいと考える。

文 献

- 1) He JC, Gwiazda J et al: Wave-front aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 20: 1155-1163, 2003.
- 2) Artal P, Guirao A et al: Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye. J Vision 1: 1-8, 2001.
- 3) Dorransoro C, Barbero S et al: On-eye measurement of optical performance of rigid gas permeable contact lenses based on ocular and corneal aberrometry. Optom Vis Sci 80: 115-125, 2003.
- 4) 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.
- 5) Salmon TO & Thibos LN: Videokeratoscope-line-of-sight misalignment and its effect on measurements of corneal and internal ocular aberrations. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 19: 657-669, 2002.
- 6) 前田直之, 大鹿哲郎, 不二門 尚: 角膜トポグラフィ

- と波面センサー. 第1版, 96-103, 120-125, メジカルビュー社, 東京, 2002.
- 7) MacRae SM, Krueger RR & Applegate RA: Customized corneal ablation. *The Quest for Super Vision*, 67-78, 348-361, SLACK Incorporated, USA, 2001.
 - 8) 三橋俊文: IV ウェーブフロント Q1 ウェーブフロントって何ですか?. *あたらしい眼科* 18 (臨増): 41-44, 2001.
 - 9) Krueger RR, Applegate RA & MacRae SM: The quest for super vision II. 85-90, SLACK Inc, USA, 2004.
 - 10) Pérez JG, Cerviño A et al: Accuracy and precision of EyeSys and Orbscan Systems on calibrated spherical test surfaces. *Eye Contact Lens* 30: 74-78, 2004.
 - 11) Cairns G, McGhee CN et al: Accuracy of orbscan II slit-scanning elevation topography. *J Cataract Refract Surg* 28: 2181-2187, 2002.
 - 12) Krueger RR, Applegate RA & MacRae SM: The quest for super vision II. 131-136, SLACK Inc, USA, 2004.
 - 13) Connors R 3rd, Boseman P 3rd & Olson RJ: Accuracy and reproducibility of biometry using partial coherence interferometry. *J Cataract Refract Surg* 28: 235-238, 2002.
-

原 著

IT 機器使用後の休息と調節機能変化

高橋 奈々子, 加藤 未央, 梶田 雅義

梶田眼科

Change of Accommodative Function Post-Rest after Video Display Terminal Works

Nanako Takahashi, Mio Katoh and Masayoshi Kajita

Kajita Eye Clinic

目的：IT 機器使用によって変化した調節機能の回復が休息の取り方によって異なるか、また休息後に同じ作業を継続した場合の調節機能の変化に差があるのかについて検討した。

方法：IT 作業は、0.75 D の過矯正眼鏡を装用し、30 cm の距離で、単純なゲームを30分間行った。休息は通常のアイマスク（アイマスク群）あるいは温罨法マスク（温罨法群）を使用して20分間閉眼を行った。休息後に再度同じ IT 作業を行った。

結果：休息後の他覚的屈折値は休息前に比べて、アイマスク群では近視化を示し、温罨法群では遠視化を示した。温罨法群では調節微動の高周波成分出現頻度が休息後では低下し、休息後の作業後には著しく上昇した。調節反応量は休息後に増加したが、休息後の作業後には著しく低下した。

結論：温罨法は調節緊張を緩和させるが、休息後に調節を維持するのが困難な状態になっており、温罨法は作業終了時に行うのが望ましいことが示唆された。 (視覚の科学 25: 78-81, 2004)

キーワード：眼精疲労, 調節, 屈折, 温罨法

Purpose: It is well known that some change in accommodative function appears after VDT (video display terminal) work. We examined whether there was any difference in the recovery process between rest taken with a normal eye mask and rest taken with a hot fomented eye mask.

Method: A simple video game was done with -0.75 diopter over-corrected eye glasses for 30 minutes. After that, some took rest with the normal eye mask (group A) and others took rest with the hot fomented eye mask (group B) for 20 minutes.

Result: Comparing post-rest to pre-rest, objective refraction shifted in the minus direction in group A and in the plus direction in group B. The HFC (frequency of high frequency component of accommodative micro-fluctuation) decreased after rest and extremely increased after the post-rest VDT work in group B. The accommodative response rate increased after rest and extremely decreased after post-rest VDT work in group B.

Conclusion: The hot fomented eye mask makes accommodation relax. However, it is difficult for the ciliary muscle to constrict after using the hot fomented eye mask. It is suggested that the hot fomented eye mask is useful after finishing work of the day. (Jpn J Vis Sci 25: 78-81, 2004)

Key Words: Asthenopia, Accommodation, Refraction, Hot fomentation

別刷請求先：108-0023 東京都港区芝浦3-6-3 協栄ビル4階 梶田眼科 高橋奈々子
(2004年11月24日受理)

Reprint requests to: Nanako Takahashi Kajita Eye Clinic
3-6-3 Cyome #4F Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan
(Received and accepted November 24, 2004)

1. 緒 言

IT 機器の開発は卓上型から携帯型へと進化している。それに伴い、video display terminal は小型軽量化が進み、表示情報の細密化が進んでいる。小さな文字や精細な画像を見るためには視距離を短くする必要があり、そのために、調節には大きな負担が加わる。短時間の IT 機器の操作でも調節機能に変化が生じることが報告されており^{1,2)}、調節機能の回復に有効な休息の取り方を見出すことが急務となっている。

今回、IT 機器操作の間に、通常のアイマスクと温翳法アイマスク（以下 温翳法）を用いて休息をとったときの調節機能の変化について調査を行った。温翳法による休息では調節力の回復が有効に図れるという報告があるが、他覚的な検査所見は得られていない。我々は、調節微動解析装置を用いて、調節微動の高周波成分出現頻度の変化を記録し、調節疲労によって生じた機能変化が休息によって回復する過程を調査し、新たな知見を得たので報告する。

2. 対象および方法

軽度の屈折異常以外には眼疾患を有さないボランティアを対象とした。対象の年齢は19～35歳に分布しており、女性7名、男性11名の計18名であった。対象の等価球面屈折値は+1.25～-1.00D に分布していた（図1）。

調査項目はオートレフラクトメータ（ニデック社製 ARK 720）による他覚的屈折値、および調節微動解析装置（ニデック社製 AA-1）を用いて、調節負

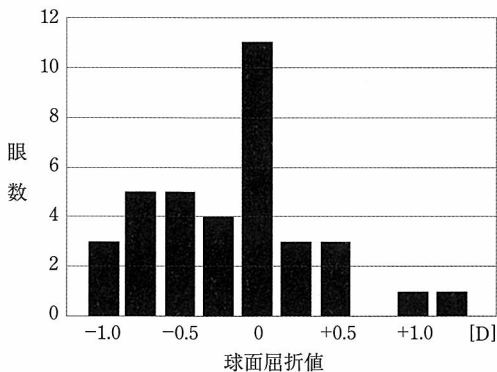


図1 対象の球面屈折値の分布
球面屈折値は-1.00～+1.25D に分布している。

荷+0.5～-3.0D で記録したときの最低屈折値と最高屈折値との差（以下 調節反応量）と、屈折値が最低屈折値と0.0～-0.75D 差の範囲にあるときの調節微動の高周波成分出現頻度の平均値（以下 HFC 値）の3項目とした。事前のアンケートとして、「日頃、眼が疲れやすいか？」という質問に対して、「0. 非常に疲れやすい, 1. 疲れやすい, 2. 時々疲れる, 3. あまり疲れない, 4. 全く疲れない」の5段階評価で回答を得た。

調査は以下の手順で進めた。

- 1) 初回の他覚的屈折値の測定
- 2) 初回の調節微動解析装置による測定
- 3) 初回の IT 機器操作30分間（遠方完全矯正屈折値に-0.75D を負荷した過矯正レンズを眼鏡試験枠に入れて装着させた。ハンディースクリーンゲーム機（任天堂社ゲームボーイ）を眼から30cm の位置に固定できるように、ゲーム機に紐をつけて、作業者の首に掛けた。ゲームには単純な落ちものゲームを採用し、得点を競わせた）
- 4) 2 回目の他覚的屈折値の測定
- 5) 2 回目の調節微動解析装置による測定
- 6) 休息20分間（休息方法はアイマスクを使用する群（アイマスク群）と温翳法を使用する群（温翳法群）の2群に分けた。温翳法には花王社製アイフィール温熱シートを用いた。対象の群分けは、採用順に乱数表を用いて、無造作に行った）
- 7) 3 回目の他覚的屈折値の測定
- 8) 3 回目の調節微動解析装置による測定
- 9) 2 回目の IT 機器操作ビデオゲーム30分間（3）と同じ方法による）
- 10) 4 回目の他覚的屈折値の測定
- 11) 4 回目の調節微動解析装置による測定

3. 結 果

他覚的屈折値の平均値は、アイマスク群では作業後、休息後および休息後の作業後で、それぞれ -0.07 ± 0.65 D, -0.21 ± 0.71 D, -0.14 ± 0.85 D であり、休息後には近視化を示したが、休息後の作業後では、休息前の状態に復していた。これに対して、温翳法群では、それぞれ -0.22 ± 0.60 D, -0.19 ± 0.58 D, -0.01 ± 0.66 D であり、休息後の変化は認めなかったが、休息後の作業後には著しい遠視化を認めた（図2）。高周波成分出現頻度（以下 HFC 値）の平均値はアイマスク群では作業後、休息後および休息後の作業後

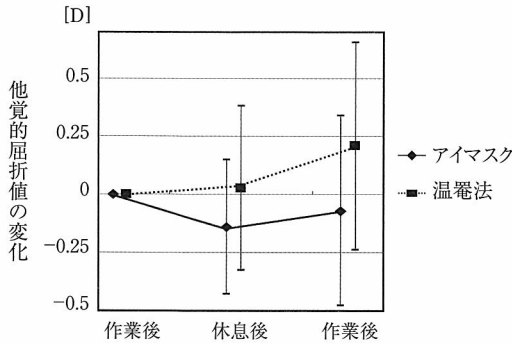


図2 他覚的屈折値の変化
アイマスク群では休息後の屈折値が近視化を示したのに対して、温罨法群では遠視化を示した。

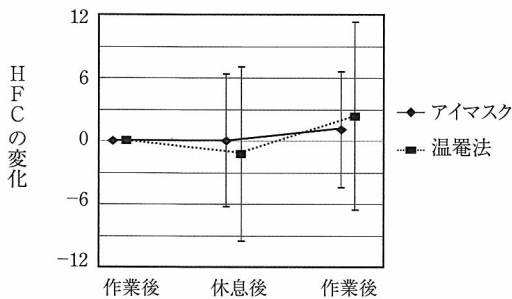


図3 調節反応量が0.00～-0.75 Dにおける高周波成分出現頻度の平均値 (HFC 値) の変化
温罨法群では休息によってHFC値が減少し、その後の作業では大幅に増加している。

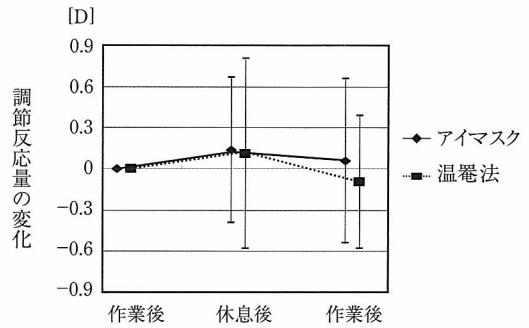


図4 調節負荷 +0.50～-3.00 D に対する調節反応量の変化
休息後の作業後では温罨法群は初回作業後より調節反応量が減少している。

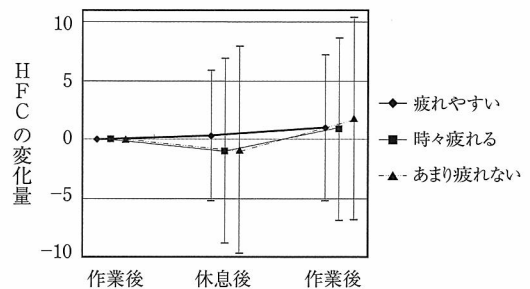


図5 アンケート結果とHFC値
疲れやすいと回答した対象者は作業後、休息後、休息後の作業後とHFC値が上昇し続けている。

に、それぞれ 54.7 ± 8.4 , 54.7 ± 6.0 , 55.7 ± 5.6 であり、休息後にはほとんど変化を示さなかったが、休息後の作業後には増加を示した。温罨法群では、それぞれ 57.2 ± 7.5 , 55.9 ± 6.3 , 58.3 ± 6.2 であり、休息後には減少を示したが、休息後の作業後には著しい増加を認めた (図3)。調節反応量の平均値は、アイマスク群では作業後、休息後および休息後の作業後で、それぞれ -2.01 ± 0.50 D, -2.15 ± 0.60 D, -2.07 ± 0.70 D であり、休息後の調節反応量はわずかに増加を示したが、休息後の作業後には、初回作業後の値に近づいた。これに対して温罨法群では、それぞれ -2.11 ± 0.70 D, -2.22 ± 0.68 D, -2.01 ± 0.80 D であり、休息後にはアイマスク群と同様に増加を示したが、休息後の作業後には初回作業後の値よりも、減少を示した (図4)。また、アンケート結果では、眼が疲れやすいと答えた5名10眼の1回目作業後、休息後、休息後の作業後

のHFC値はそれぞれ 54.6 ± 9.5 , 54.9 ± 6.8 , 55.5 ± 7.7 であり、休息後のHFC値は1回目作業後の値とほとんど変化はなく、休息後の作業後では増加を示した。これに対して、アンケート結果で「時々疲れる」と答えた10名20眼、および「あまり疲れない」と答えた3名6眼では、それぞれ 57.8 ± 6.9 , 56.8 ± 6.0 , 58.7 ± 4.9 および 52.0 ± 7.8 , 51.0 ± 2.9 , 53.8 ± 2.9 であり、休息後には低下を示したが、休息後の作業後には初回作業後よりも増加を示した (図5)。

4. 考 按

調節微動の周波数成分は0.6 Hz未満の低周波成分と1.0～2.3 Hzの高周波成分に分けられる。低周波成分は調節運動そのものに起因し、高周波成分は水晶体屈力の振動に起因し、毛様体の活動状態を反映すると考えられている³⁻⁷⁾。そして、調節負荷と調節

微動の高周波成分との間には相関があり、毛様体筋にかかる負荷が大きくなると、HFC値が増すことが明らかになっている⁸⁾。今回は、IT機器使用による調節機能への影響と、その後の休息による調節機能の回復状態、更に休息後の作業による調節機能への影響について、他覚的屈折値、HFC値および調節反応量の変化をもとに検討を行った。

IT作業によって変化した調節機能が、休息のとり方によってどのように異なるかを検討するため、作業後の調節機能を基準として、休息後と休息後の作業後の状態を比較検討した。

オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は、アイマスク群では初回作業後から休息後に -0.14 ± 0.15 Dで近視化を示すものが多く、休息後の作業後には休息前の状態に復していた。これに対して、温罨法群では、休息後にはほとんど変化を認めなかったが、休息後作業の後には $+0.21 \pm 0.66$ Dで遠視化を示すものが多かった(図2)。

調節反応量が $0 \sim -0.75$ Dの範囲にあるときのHFC値(図3)は、アイマスクで休息した場合は、休息後にはほとんど変化がみられず、休息後の作業後にはわずかに増加したが、測定中に有意な変化は認めなかった($p > 0.05$)。温罨法で休息した場合は、休息後には減少を示した($p = 0.26$)が、休息後の作業後には有意に増加した($p = 0.04$)。単純なアイマスクではIT作業によって変化した調節機能に対してなんら影響を及ぼさないのに対して、温罨法による休息では、毛様体筋の緊張緩和が得られるが、休息後の作業後では、休息前以上の調節努力が必要な状態になっていることが示唆される。調節負荷が $+0.50 \sim -3.00$ Dに対する調節反応量の変化(図4)では、休息後にはアイマスク群、および温罨法群ともに同じような上昇を呈していたが、有意な変化ではなかった。休息後の作業後でもアイマスク群、および温罨法群ともに同様な変化を示したが、アイマスク群は休息前よりも 0.06 D増加していたのに対して、温罨法群は休息前より 0.10 D減少していた($p = 0.05$)。このこと

から、通常のアイマスクによる休息はその後の作業にほとんど影響を及ぼさないのに対して、温罨法による休息後には調節を緊張状態に維持するのが困難な状態になっていることが示唆される。

単純に閉眼して休息をとる場合と温罨法によって休息をとる場合では、調節機能に異なった反応が得られることが示唆された。休息後にも作業がある場合には温罨法を用いた休息は望ましくなく、最終作業の後の温罨法は効果的であると考えられた。

日常の目の疲労感に対するアンケート結果とHFC値の変化では(図5)、時々疲れるあるいはあまり疲れないと答えた対象者では休息後にHFC値減少を認めたが、日頃眼が疲れやすいと感じている対象者では、休息後にもHFCの減少を呈さず、作業後、休息後、休息後の作業後とHFC値が上昇し続けた。対象者人数が少数のため、統計学的な検定はできないが、日頃疲れやすいと感じている人では休息によっても毛様体筋はリラックスし難いという臨床上の印象と相関する結果を示した。日頃疲れやすいと感じている人の調節機能を回復させるための有効な休息方法の搜索が急務であると考えられた。

文 献

- 1) 鈴木昭弘：眼精疲労の研究。眼紀 29: 237-254, 1978.
- 2) 梶田雅義：調節疲労と調節微動。視覚の科学 17: 66-71, 1996.
- 3) Campbell FW, Rebsor JG & Westheimer G: Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. J Physiol 145: 579-585, 1959.
- 4) 鈴木昭弘：微動調節の研究。日眼会誌 79: 1257-1271, 1975.
- 5) Winn B, Pugh JR et al: Arterial pulse modulates steady-state ocular accommodation. Curr Eye Res 9: 971-975, 1990.
- 6) Winn B & Gilmartin B: Current perspective on microfluctuations of accommodation. Ophthal Physiol Opt 12: 252-256, 1992.
- 7) 奥山文雄：調節微動。視覚の科学 15: 15-22, 1994.
- 8) 梶田雅義、伊藤由美子他：調節微動による調節安静位の検出。日眼会誌 101: 413-416, 1997.
- 9) 梶田雅義：調節応答と微動。眼科 40: 169-177, 1998.

解 説

レンズ特性とその選択について（表面処理）

小笠原 恒

(株)ニコン・エシロール 研究開発部

Treatment Characteristics on Organic Ophthalmic Lenses and Choose of Lens Treatment

Hisashi Ogasawara

R&D Department Nikon-Essilor Co., Ltd.

眼鏡用プラスチックレンズは様々な表面処理が施されてきている。これらの表面処理には、プラスチック素材の欠点を改善するために施されているものや、新たな機能、価値を付加するものがある。眼鏡用プラスチックレンズに施されている表面処理には染色、調光、ハードコート、プライマーコート、反射防止膜、撥水膜などがある。表面処理選択に際して理解しておくべき表面処理技術の機能、特性について解説する。

(視覚の科学 25: 82-88, 2004)

キーワード：眼鏡用プラスチックレンズ、ハードコート、反射防止膜、染色、プライマーコート

An organic ophthalmic lens can have different types of surface treatment. These treatments aim to improve the properties, performance and functions of the plastic lens, for example, tinting, photochromism, enhancement of abrasion resistance, anti reflective coating, hydrophobic coating, etc. I would like to explain these characteristics and provide some pieces of advice in order to choose an appropriate treatment for your lens.

(Jpn J Vis Sci 25: 82-88, 2004)

Key Words: Organic ophthalmic lens, Hard coat, Anti refractive coat, Tinting, Primer coat

1. はじめに

眼鏡レンズにおいてプラスチックレンズの占める割合は90%以上といわれている。プラスチック素材が眼鏡レンズとしてこれほどまでに伸びた背景には、ガラスにはない特徴、つまり低比重、易加工性、耐衝撃性などを有していることと、プラスチック素材の高屈折率化によるところは大きい。しかし、プラスチック素材には、耐擦傷性、耐薬品性、耐熱性などの欠点があり、これらの欠点の改善なくして眼鏡レンズとしての普及はなかったともいえる。これらプラスチックレンズの欠点の改善は、様々な表面処

理を施すことによって実現されている（図1）。本稿では、これらの眼鏡用プラスチックレンズに施される表面処理技術について解説する。

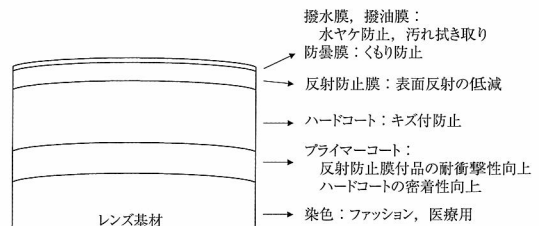


図1 眼鏡用プラスチックレンズの表面処理

別刷請求先：213-0012 川崎市高津区坂戸3-2-1 KSP R&D-A212 (株)ニコン・エシロール 研究開発部
小笠原 恒

(2004年11月2日受理)

Reprint requests to: Hisashi Ogasawara Nikon-Essilor Co., Ltd. R&D Department
KSP R&D-A212, 3-2-1 Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki 213-0012, Japan

(Received and accepted November 2, 2004)

2. 染色

最初に一般的なプラスチックレンズの染色工程(ポット染色)の概略を図2に示す。

- 1) 80～90℃に加温された温水に秤量された染料、界面活性剤、助剤などを入れ十分に攪拌し、染浴を調整する。染料には分散染料、油性染料などが使用される。
- 2) 処方レンズを準備して十分に洗浄する。
- 3) 1)で調整された染浴にレンズを浸漬し、所定の濃度になったら染浴から出す。レンズ全体を染浴に浸漬するとフルカラーレンズ、レンズ全体を染浴に漬けずレンズの約半分を上下させながら徐々に引き上げると、グラディエントカラーレンズを得ることができる。
- 4) 所定濃度に染色されたレンズを洗浄し、オーブンで焼き締める。この工程によりレンズに入り込んだ染料を安定化させる。
- 5) でき上がったレンズの色調、外観を検査して、次工程へ。

図2の工程のようにプラスチックレンズの染色は、ガラスレンズに比べ容易に行うことができる。また、染料の配合を変えることで比較的容易に多種多様な色彩を得ることができる。このような利点はプラスチックの易染色性という特徴によるものであるが、近年のプラスチック素材の高屈折率化に伴いプラスチックレンズの染色が難しくなりつつあり、高度な技術が必要となってきている。そこで最近では新染色法として、昇華染色法⁹⁾やインクジェットを使った染色法⁹⁾が見出されてきている。

染色レンズにおいて重要な品質特性は、耐候性(退色)と色調合わせなどである。退色は紫外線や温度などによって色が薄くなったり、変わったりする

ことであり、プラスチックレンズの素材や染料の違いによって変わる。

染色レンズはファッション以外に、遮光レンズなど医療用としても用いられている。遮光レンズとは、眼に有害な紫外線を100%カットするほかに、散乱の多い低波長域をカットして、羞明感を和らげ、コントラストを向上させる働きをする。また、厚生省の告示(平成2年3月22日厚生省告示第61号および62号)により、身体障害者福祉法および児童福祉法の規定に基づく「補装具」に遮光眼鏡が加わり、眼科医の診断のもとに必要と認められた場合には、遮光眼鏡(フレーム、両眼レンズ)の購入に対して国の補助金が支給される。

3. 調光⁹⁾

紫外線(および短波長の可視光線～青色光)の照射を受けると着色し、遮断すると退色し元に戻る機序を繰り返す特性を調光という。このような機能をレンズに付加させたものが調光レンズである。プラスチック調光レンズは調光特性を発現する物質をプラスチックレンズ内部に分散して作製される。調光物質をレンズ内部に分散させる方法としては、プラスチックレンズ原料にあらかじめ調光物質を混ぜ込んでから型に流し込んで成形する方法と、染色加工と同様な方法で成形させたレンズに含浸させる方法などがある。

プラスチック調光レンズにおいても青色以外にブラウンやグレーなどに発色するものが実用化されている。プラスチック調光レンズは当初ガラス調光レンズに比べ着色、退色の反応速度が遅かったが、大幅に改善されほぼ同等な調光特性になっている。また最近では、プラスチック調光レンズの高屈折率化が着実に進んでいる。

4. ハードコート^{4, 5)}

プラスチック素材を眼鏡レンズとして使用するために致命的な欠点として耐擦傷性が低いことが挙げられる。眼鏡レンズはほぼ毎日なにかしらの形で擦られるため、耐擦傷性の確保は最低限改善しなくてはならない欠点である。プラスチック素材におけるこの欠点を克服しガラス並の表面硬度を可能にしたのが、ハードコートである。耐擦傷性以外のプラスチック素材の欠点に関しても、ハードコートで大部分が改善されている。

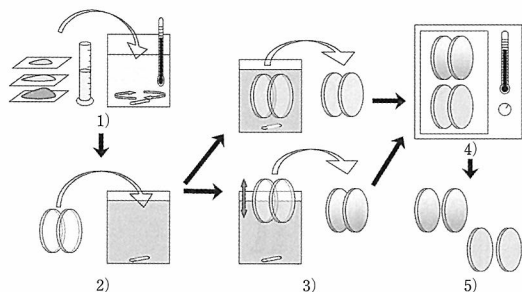


図2 一般的な染色レンズの製造工程

ハードコートは製膜法、材料、硬化方法によってそれぞれ、乾式法と湿式法、シリコン系とアクリル系、熱硬化型と紫外線硬化型に分類される。眼鏡用レンズの場合、生産性と高いレベルの表面硬度が要求されるため、ほとんどの場合、表面硬度に優れた熱硬化型のハードコートは湿式法にて製膜される。図3に眼鏡レンズにおける一般的なハードコート工程の概略を示す。

- 1) ハード液の原料となるシランカップリング剤、シリカゾル、硬化触媒、界面活性剤、溶媒を処方に従って秤量し、手順に沿って加えて攪拌しハード液を調合する。
 - 2) 十分に攪拌した後、ハード液をろ過する。ろ過されたハード液は劣化を防ぐために低温に保つ。
 - 3) レンズを治具に固定する。
 - 4) ハードコートする前にレンズを十分に洗浄し、乾燥させる。
 - 5) 治具に固定されたレンズをハード液中に浸漬させた後引き上げる。このように、ハード液に浸漬させて塗膜する方法をディップコート法といい、大量生産に適している。他の湿式塗膜法として塗膜均一性に優れたスピンコート法があるが、生産性に劣る。
 - 6) ハード膜を塗膜したレンズを、検査できる程度に硬化させる。この工程を予備乾燥という。
 - 7) 予備乾燥したレンズの外観を検査する。
 - 8) 外観適合品をオープンで硬化する。この工程を本乾燥という。
 - 9) ハードコート完成。次工程へ。
- ハードコートには、耐擦傷性のほかに密着性、耐

光性、耐薬品性などの特性も要求される。耐擦傷性はいうまでもなく傷つき防止である。密着性はレンズ素材とハードコートだけではなく、ハードコート上に形成される後述の反射防止膜との密着性も十分に確保する必要がある。十分な密着性を得るために、レンズを洗浄するときに化学処理や物理的処理を施す場合もある。耐光性の悪いレンズは、紫外線の照射によりレンズが黄変したり、密着性が劣化したりする。また眼鏡レンズは、装用中様々な薬品に接することが想定され、それらの薬品に耐え得ることも要求される。これら様々な要求特性を満たし、今日ではハードコートさせていない眼鏡用プラスチックレンズなどないといってもいいほど、ハードコート付きレンズが一般的になっている。

プラスチックレンズ素材の屈折率が上がるにつれて、レンズとハード膜との間に干渉縞が生じ外観上好ましくない。そのため、ハード膜の屈折率を上げた高屈折率タイプのハードコートが開発され、高屈折率レンズに施されている。

5. プライマーコート³⁾

ハードコートの前に施されるコートを総じてプライマーコートという。レンズに耐衝撃性または剛性を付与したり、ハードコートとレンズの密着性を向上したりする機能などをプライマーコートで付加することができる。

アメリカでは、Food and Drug Administration（以下 FDA）によって眼鏡レンズの耐衝撃性を確保することが義務付けられている。FDAで要求されている耐衝撃性の基準は、16gの剛球を1.27mの高さか

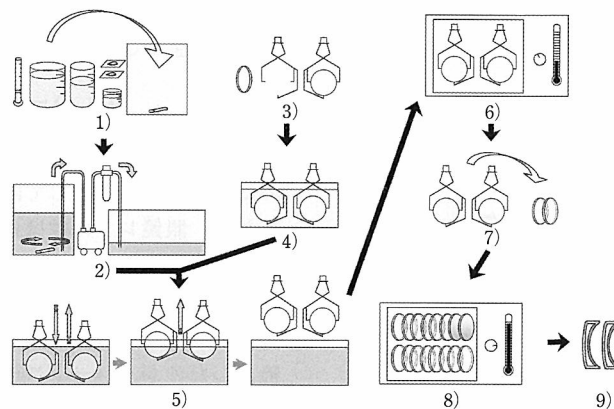


図3 一般的なハードコート工程

らレンズ面上に落下させて破損しないことである。プラスチック素材は耐衝撃性に優れた特徴があるので、素材自体ではこの基準を余裕でクリアできる。しかし耐衝撃性に優れたプラスチックレンズでも、前述のハードコート、後述の反射防止膜を形成することによってガラスほどではないが硬くもろくなって、FDAの基準を満たさなくなってしまう。そのため、レンズの中心厚を厚く設定する、またはプライマーコートをしてレンズに耐衝撃性を付加する必要がある。前者の方法であればレンズが厚く重くなり、外観、機能上好ましくない。一方後者は、犠牲にする特性はほとんどなく要求を満たすことができる。そのため、ほとんどのFDA対応の眼鏡用プラスチックレンズはプライマーコートが施されている。

2000年、JIS規格にISO規格に準じる形でレンズの機械的強度にかかわる規定が追加された。JIS規格にて規定された機械的強度の基準は、直径22mmのスチール剛球を $100 \pm 2\text{N}$ でレンズに10秒間押しつけたときに、2片以上に破碎しないことである。プラスチック素材の高屈折率化に伴いレンズ素材自体がもろくなってきており、ハードコートと反射防止膜が形成されるとこの基準を満たさないことがある。FDA基準への対応と同様な方法でこの基準を満たすことができるが、中心厚を厚くすると高屈折率化の利点であるレンズ厚が犠牲になってしまうため、プライマーコートによる対応が一般的である。プライマーコートの屈折率もハードコート同様、高屈折率タイプが開発され施されている。

プライマーコートはハードコート同様ディッピング法で形成されるのが一般的である。プライマーコートは図3の工程4の後に、工程5と同様の方法で塗膜し、工程6と同じように乾燥させて形成する。その後図3の工程5からの工程を続けることで、比較的容易にプライマーコート付きレンズを得ることができる。

6. 反射防止膜⁹⁾

眼鏡レンズに入射した光は、レンズ表面によりその一部が反射され損失する。眼鏡レンズにおいては、反射による明るさの損失は約8%とわずかであるが、比較的暗い場所に蛍光灯のような光源があると、それがレンズ面に反射してゴースト（二重像、幽霊像）やフレア（迷光）を作ったりする。ゴーストとは、レンズを直接通過してくる光によってできる像とは

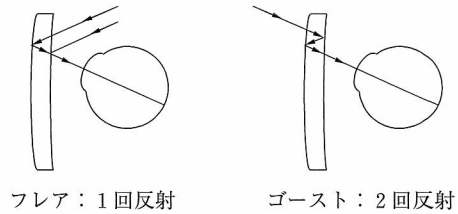


図4 レンズ反射の例

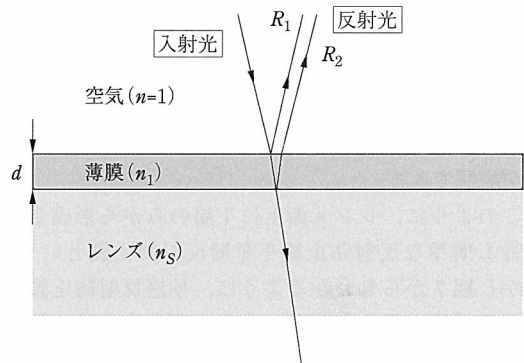


図5 反射の原理

別に、レンズ表面での反射を繰り返してくる光によってできる像をいい、同様の現象でピントのあっていない状態をフレアという（図4）。また、レンズ表面の反射によりレンズにギラツキが生じて美観上よくないこともある。このようなレンズ表面の反射を取り除くために施される表面処理を反射防止膜という。

次に、反射防止膜の原理について簡単に解説する。一般に、空気に接するレンズ面に屈折率がレンズの屈折率より小さい透明な薄膜を形成すると、その厚さに関係なく反射率はレンズだけの場合より小さくなる。図5のように、屈折率 n_s のレンズ表面に屈折率 n_1 で厚さ d の薄膜を形成したものに光を垂直に入射したとき、膜の両面における反射光を R_1 および R_2 とする。この R_1 、 R_2 それぞれの反射光が互いに重なり合い、干渉して次の条件を満たすときに反射光は打ち消し合うことになる。

$$n_1 = \sqrt{n_s} \quad n_s: \text{レンズ屈折率} \quad n_1: \text{膜の屈折率} \dots (1)$$

$$n_1 \times d = \frac{\lambda}{4} \quad \lambda: \text{波長} \quad d: \text{膜の厚さ} \dots (2)$$

(1) 式は R_1 、 R_2 の振幅が同じになることを意味し、

(2) 式は R_1 の波の山が R_2 の波の谷となることを示す(図5, 6)。(2) 式は膜の厚さを制御することによって満たすことは容易であるが, (1) 式は膜の材料選択の問題なので満足することは難しくなる。例えば, 屈折率 1.50 のレンズの場合には膜物質の屈折率は $n_1=1.27$ となるが, 実的にそのような低屈折率な膜物質は存在しない。そのため, できるだけこの n_1 に近いもので代用することになる。ガラスレンズの場合, 実用的な物質としてフッ化マグネシウム (MgF_2 , $n_1=1.38$) が使用される。この場合, レンズ屈折率 (n_s) が高いほど振幅条件を満たす割合が高くなるので, 反射率を小さくすることができる。図7に n_s の異なるレンズを用いた場合の反射特性を示しているが, これからも n_s が高いほど反射率を小さくすることが理解できる。

このように, レンズ面上に1層のみから形成された最も簡単な反射防止膜を単層反射防止膜という。しかし図7からもわかるように, 単層反射防止膜では基準波長を最小に反射率は高くなる。基準波長以

外の反射を小さくしたり, 基準波長での反射率を更に下げたりすることを, 層数を増やすことにより実現しているのが多層反射防止膜である。多層膜については理論および計算が複雑であるので本稿では省略する。図7に多層反射防止膜の反射特性を示しているが, 反射防止膜を多層化することにより幅広い波長域で反射率が小さくなって, 反射特性が大幅に改善されていることがわかる。反射防止膜は表面反射の高い高屈折率レンズのみならず, ほとんどの眼鏡用プラスチックレンズに施されており, その大部分が多層反射防止膜である。

7. 撥水膜・撥油膜

反射防止膜を形成したレンズは, その表面で水滴が乾燥すると拭いても取れにくい水跡(水ヤケ)がついてしまうという問題があった。そこで現在では, ほとんどの反射防止膜付きレンズには撥水膜が製膜され, 水ヤケを防ぎ, 指紋や皮脂などの汚れを拭き取りやすくしている。撥水基を有する物質を反射防止膜上に製膜することで撥水膜を形成することができる。2001年あたりからは更に撥水性を向上させた撥油膜が商品として展開されている。撥水膜は分子量数百レベルのフルオロカーボン鎖が反射防止膜表面に結合しているのに対して, 撥油膜では結合しているフルオロカーボン鎖の分子量が数千レベルと長鎖となっている。そのため, 撥油膜は反射防止膜表面をフルオロカーボン鎖が隙間なく覆い, その結果油分をはじき, 撥水膜より更に皮脂や汚れが付きにくく付いても拭き取りやすい。表1に撥水膜と撥油

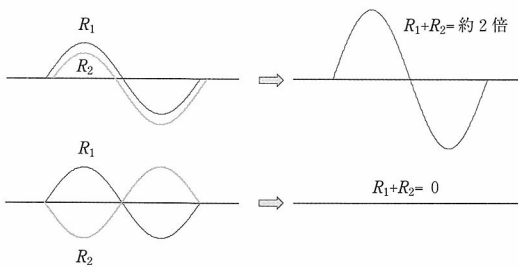


図6 波の重ね合わせと干渉

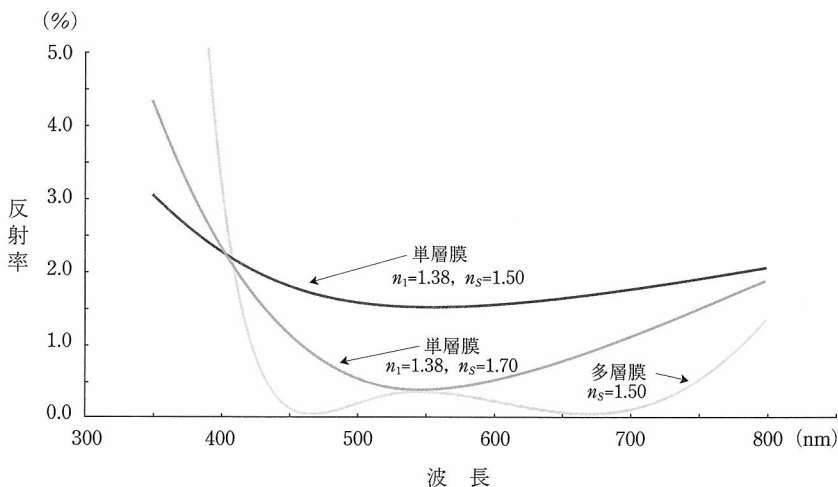


図7 反射防止膜の反射特性

表1 撥水膜と撥油膜の特性比較

膜種	分子量	特性		
		転落角(オレイン酸)	テープ剥離強度	動摩擦係数
撥水膜	数百	20~30°	1.0N/19mm	0.25~0.35
撥油膜	数千	2~5°	0.10~0.15N/19mm	0.05~0.15

膜の特性比較を示す。これらの物性値から撥油膜が撥水膜より汚れがつきやすく、かつ汚れを拭き取りやすいことがわかる。

8. 防曇

くもりの現象は、外気と材料の温度差によって起こる。材料の表面温度が露点以下の状況になったとき無数の水滴が表面に付着して光を散乱するのがくもりの状況になる(図8-1)。このくもりの状態を解決する手法として以下の方法が考えられる。

1) 結露しない表面構造の形成

結露しないためには表面温度を露点以上にする。自動車のリヤウィンドウやサイドミラーに発熱線を装着して露点以上にしているのがこの例である。しかしこの方法は、眼鏡レンズへの展開は難しい。

2) 吸収性表面構造の形成

水蒸気が表面に凝集し結露する前に、水分子が表面から内部に速やかに吸収されるような表面構造を形成する。ろ紙が水滴を吸収するような表面構造を形成しているのがこの例である。しかし吸水性のある表面構造膜は一般的に膜硬度が弱く、眼鏡レンズでは実用化されていない。

3) 表面親水性構造の形成

水蒸気が表面に凝集して結露し水滴を形成するときに、表面の水に対するぬれ性が非常に良好だと水滴を形成する前に水が表面上にぬれ広がっていく。その結果水が薄い膜をつくり、水分子が表面を均一に広がっているため光散乱が起こらず、見かけ上くもりがみられないような表面をつくる(図8-3)。レンズ表面に界面活性剤を塗布して親水性を得るのが一般的な方法である(図8-2)。この方法は有効な手法であるが、界面活性剤塗布による透明性の低下、効果の長期持続性において課題がある。近年、商品化している防曇コートレンズは主にこの方法を利用している。効果を維持するためには手入れをこまめに行うことが必要とされている。

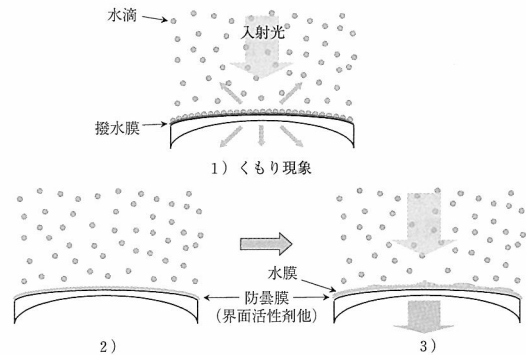


図8 表面親水性処理による防曇膜の仕組み

4) 超撥水性表面構造の形成

表面に結露が生じたとき、小さな水滴を形成させないで大きな水滴に成長させ、表面からその水滴を転落させる。この方法は、劣化のない完全に水をはじく超撥水膜をどのように得るかが課題である。なぜならば、性能の劣化によって中途半端な撥水性ではかえってくもりが生じてしまうからである。現在安定な超撥水膜を得る研究が盛んに行われており、今後期待できる技術の一つである。

9. 表面処理の選定について

眼鏡用プラスチックレンズの表面処理技術について解説してきたが、各表面処理の特性を十分に理解して各種表面処理を選定することが重要である。以下に選定にあたっての考え方を記す。

染色：オプションにて加工される。ファッション、用途に合わせて好みの色調にオーダーが可能であり、目的に合うように違った色調の眼鏡を複数所有する装用者が増えてきている。染色濃度によっては運転に適さない場合があるので、注意が必要である。

調光：室内外で眼鏡を変えることなく使用したい場合に適している。ただし、色調や屈折率に制限があるので選択の幅はやや少ない。

ハードコート：耐擦傷性、耐薬品性などプラスチック素材の欠点改善のため必須な表面処理であるため、標準加工されている。

プライマーコート：JIS規格などを満足するために標準加工されているものとオプション加工されるものがある。プラスチックレンズでも衝撃によってレンズが割れてしまうことはある。その際レンズ破片が飛散して目に入ってしまうことが予想できる。プライマーコート処理により耐衝撃性を向上させることは、このような事故を防ぐのに非常に有効である。

反射防止膜：一部の低屈折率レンズを除き一般的には標準加工されている。とくに高屈折率レンズは表面反射が低屈折率レンズに比べて大きくなるので、反射防止膜は美観上有効である。ゴースト、フレアなどの偽像や反射によるギラツキが気になる場合に選択するとよい。

撥水膜・撥油膜・防曇膜：最表面に施されることからレンズの表面性能を決める。撥水膜は標準加工されており、撥油膜の一部には標準加工されているものもある。防曇膜はオプションにて加工される。汚れを気にする装用者の場合には撥油膜、くもりが煩わしい場合は防曇膜を選択するとよい。

10. ま と め

眼鏡プラスチックレンズは表面処理技術の進歩によって、プラスチックの欠点を改善し、新機能を付加させたりしている。しかし、プラスチックレンズにはまだ改善しなければならない欠点が残されているのも事実である。今度更なる技術の進歩により、残されているプラスチックレンズの欠点が改善され、また新たな機能が付加されたより魅力的な眼鏡レンズが登場してくることが楽しみである。

文 献

- 1) 特開 2002-258002：プラスチックレンズの染色方法及び該方法を用いて得られるプラスチックレンズ。稲垣康弘，犬塚 稔，2002.9.11，日本，2002.
- 2) 特許第 3075403 号：着色光学用プラスチックレンズの製造方法。青山昌弘，姜 健，1999.2.12，日本，2000.
- 3) 高橋文男：眼鏡レンズの材料と特性。眼科 41: 611-620, 1999.
- 4) 新田孝之：最近の眼鏡レンズの動向。光技術コンタクト 26: 553-565, 1988.
- 5) 阿部 修：プラスチックハードコート材料。(株)シーエムシー編集部，122-134，(株)シーエムシー，東京都，2000.
- 6) 角田光雄，小石真純：防曇化技術。工業材料 29: 110-115, 1981.