

## 眼内レンズ挿入眼における色収差

永田 豊文<sup>1)</sup>, 久保田滋之<sup>1)</sup>, 渡邊 郁緒<sup>1)</sup>, 青島 真一<sup>2)</sup><sup>1)</sup>浜松医科大学眼科学教室, <sup>2)</sup>聖隷三方原病院眼科

## 要 約

目 的: Polymethylmethacrylate (以下, PMMA) 製眼内レンズを挿入した眼, およびソフトアクリル製眼内レンズのアクリソフ®を挿入した眼の色収差を正常水晶体眼と比較検討する。

対象と方法: PMMA レンズ挿入眼 48 眼, アクリソフ®挿入眼 49 眼, 正常水晶体眼 27 眼を対象とし, Bobier & Sivak の色光検影法を用いて軸上色収差を測定した。さらに, これらの軸上色収差を近軸光線追跡法により理論的に算出した。

結 果: 500 nm と 640 nm 間の軸上色収差の計測値は, PMMA 眼は  $0.75 \pm 0.18$  (平均値  $\pm$  標準偏差) D, アク

リソフ眼は  $1.20 \pm 0.22$  D, 正常水晶体眼は  $0.82 \pm 0.16$  D であった。理論値は, PMMA 眼は 0.64 D, アクリソフ眼は 0.98 D, 正常水晶体眼は 0.74 D であった。

結 論: PMMA 眼は正常水晶体眼と同等の色収差をもつが, アクリソフ眼には有意に大きな色収差がある。アクリソフ®を挿入した眼では網膜像の質が低下する可能性がある。(日眼会誌 103: 237—242, 1999)

キーワード: 色収差, 眼内レンズ, アクリソフ®, PMMA, 色光検影法

## Chromatic Aberration in Pseudophakic Eyes

Toyofumi Nagata<sup>1)</sup>, Shigeyuki Kubota<sup>1)</sup>, Ikuo Watanabe<sup>1)</sup> and Shinichi Aoshima<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Hamamatsu University School of Medicine<sup>2)</sup>Department of Ophthalmology, Seirei Mikatabara Hospital

## Abstract

**Purpose:** To evaluate the chromatic aberration of the eyes with a poly (methylmethacrylate) (PMMA) intraocular lens or a soft acrylic intraocular lens (AcrySof®), by comparing them with normal eyes.

**Subjects and methods:** The longitudinal chromatic aberration (LCA) of the eye was measured by a modified chromoretinoscopy of Bobier & Sivak, for 48 eyes with a PMMA intraocular lens, 49 eyes with an AcrySof®, and 27 eyes with a normal lens. In addition, these LCAs were calculated theoretically by the paraxial ray-tracing technique with a personal computer.

**Results:** The average values of the LCA between the wavelengths of 500 nm and 640 nm were  $0.75 \pm$

$0.18$  D (mean  $\pm$  standard deviation) in PMMA eyes,  $1.20 \pm 0.22$  D in AcrySof® eyes, and  $0.82 \pm 0.16$  D in normal eyes. The calculated LCA was 0.64 D in the PMMA eye, 0.98 D in the AcrySof® eye, and 0.74 D in the normal eye (Gullstrand's thematic eye).

**Conclusion:** The PMMA eyes had chromatic aberrations almost equal to those of the normal eyes, whereas the AcrySof® eyes have significantly larger aberrations. Therefore, we conclude that quality of the retinal image is reduced in eyes with an AcrySof® lens. (J Jpn Ophthalmol Soc 103: 237—242, 1999)

Key words: Chromatic aberration, Intraocular lens, AcrySof®, PMMA, Chromoretinoscopy

## I 緒 言

光は波長によって異なった屈折率を有しており, 自然光のような多色光がレンズを通過すると, それぞれの光は分散し, 各波長毎に異なった位置に焦点を結ぶ。これを

色収差と呼び, さまざまな生理機能に関与しているとされている<sup>1)~5)</sup>。色収差を生み出す主な光学要素は角膜と水晶体であり, 水晶体の色収差は眼球全体の約 30% 程度と考えられてきた<sup>6)</sup>。しかし, 近年眼内レンズ挿入術が普及するにつれ, さまざまな素材の眼内レンズが作られる

別刷請求先: 431-3192 浜松市半田町 3600 浜松医科大学眼科学教室 永田 豊文

(平成 10 年 7 月 13 日受付, 平成 10 年 10 月 8 日改訂受理)

Reprint requests to: Toyofumi Nagata, M.D. Department of Ophthalmology, Hamamatsu University School of Medicine, 3600 Handa-cho, Hamamatsu 431-3192, Japan

(Received July 13, 1998 and accepted in revised form October 8, 1998)



ようになり,その中には屈折率やアッペ数が人の水晶体のそれとかなり隔たっているものもある.特に小切開対応の眼内レンズは,光学部を薄くするために素材の屈折率が高くなる傾向があり,これに伴ってアッペ数が小さくなることが多い.

このような眼内レンズが挿入された眼では,眼全体としての色収差が本来の生理的な範囲を大きく逸脱する可能性がある.一般的な polymethylmethacrylate (以下, PMMA) 製眼内レンズのアッペ数は 58 であるのに対し,最近本邦で多用されるようになったアルコン社のソフトアクリル製眼内レンズ,アクリソフ®は屈折率が 1.55 と高く,そのアッペ数は 37(メーカー提供値)と低い.人の水晶体のアッペ数が 50 といわれているので<sup>7)8)</sup>,アクリソフ®が挿入された眼では色収差が大きくなるはずであり,その影響が懸念される.

今回,我々は眼内レンズ挿入眼と正常水晶体眼について客観的に色収差を測定した.また,コンピュータを用いた近軸光線追跡により,これらの眼の色収差を計算した.

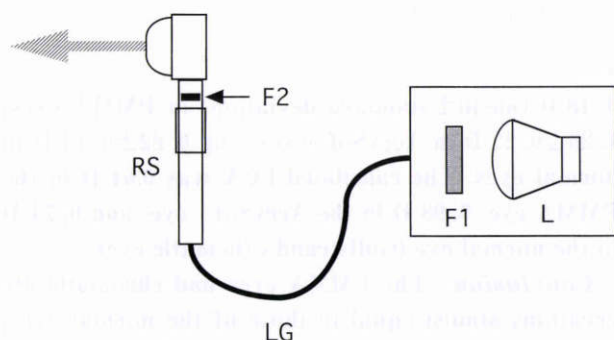


図 1 色光検影器(chromoretinoscopy)の概略図.

RS:retinoscope, F1: 干渉フィルター(赤:ピーク波長 640 nm),F2:ゼラチンフィルター(青:ピーク波長 500 nm),L: タングステンハロゲンランプ,LG: ライトガイド

## II 対象および方法

### 1. Chromoretinoscopy による色収差の測定

対象は,PMMA 製眼内レンズが挿入された眼(以下, PMMA 眼)49 眼,アクリソフ®が挿入された眼(以下,アクリソフ眼)48 眼,および白内障のない正常水晶体をもつ眼(以下,正常水晶体眼)27 眼である.

PMMA 眼に挿入された眼内レンズのモデルは数種類あり,それらの光学部はすべて両凸型であるが,直径は 6 ~7 mm とまちまちである.アクリソフ眼に挿入された眼内レンズはすべてアルコン社 MA 60 BM で,光学部の直径が 6 mm で両凸型である.眼内レンズ挿入眼に施行された術式は,continuous circular capsulorhexis を作製し,超音波乳化吸引術を施行した後,眼内レンズを嚢内に挿入したものである.これらの眼では術後の検査において,眼内レンズ支持部が嚢内に固定され,眼内レンズの著しい偏位や傾斜がないことが確認されている.3 群の概要を表 1 に示した.PMMA 群とアクリソフ群の間で,年齢,術後経過期間,角膜乱視量,角膜曲率および眼内レンズ度数の差はない(t 検定).正常水晶体群の眼の屈折値は -2 D ~ +2 D の範囲内にある.また,正常水晶体群の年齢は他の 2 群に比べ若いものの,いずれも 55 歳以上の高齢者である.

測定装置は Bobier ら<sup>9)10)</sup>が発表した色光検影法(chromoretinoscopy)を参考にして製作したもので,その模式図を図 1 に示した.光源のタングステンハロゲンランプの前にフィルターを設置することにより,さまざまな色の光を発生させることができるレチノスコプである.赤色光を発生させるためにピーク波長 640 nm,半値幅が 10 nm の干渉フィルターを用いた.また,青色光を発生させるフィルターとしては,干渉フィルターでは光量が不十分であったため,ゼラチンフィルターを用いた.このゼラチンフィルターはピーク波長が 500 nm,半値幅が約 50 nm のバンドパスフィルターである.ゼラチンフィルターは熱に弱いので,タングステンハロゲンランプの直

表 1 対象の概要

|                              | 眼数                   | 年齢<br>(平均値±標準偏差)      | 角膜乱視量<br>(平均値±標準偏差) | 角膜曲率半径***<br>(平均値±標準偏差) |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| PMMA 群*                      | 48                   | 73±7歳                 | 1.10±0.66D          | 7.60±0.20mm             |
| アクリソフ群**                     | 49                   | 74±7歳                 | 0.89±0.50D          | 7.65±0.27mm             |
| 正常水晶体群                       | 27                   | 66±6歳                 | 測定値なし               | 測定値なし                   |
| PMMA: polymethylmethacrylate |                      |                       |                     |                         |
|                              | 術後経過期間<br>(平均値±標準偏差) | 眼内レンズ度数<br>(平均値±標準偏差) | 眼内レンズ<br>光学部形状      | 眼内レンズ<br>光学部径           |
| PMMA 群                       | 19±11月               | 22.0±1.2D             | 両凸                  | 6.0~7.0mm               |
| アクリソフ群                       | 22±9月                | 22.4±1.1D             | 両凸                  | 6.0mm                   |
| 正常水晶体群                       |                      |                       |                     |                         |

\*: PMMA 製眼内レンズ挿入眼群 \*\*: アクリソフ挿入眼群 \*\*\*: 平均角膜前面曲率半径を記載



表 2 色収差の計算に使用した数値

|                    | 角膜前面<br>曲率半径 | 角膜後面<br>曲率半径 | 角膜<br>中心厚 | 角膜<br>屈折率 | 角膜<br>アッベ数 | 前房深度  | 前房<br>屈折率 | 前房<br>アッベ数 |
|--------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|------------|-------|-----------|------------|
| PMMA 眼             | 7.7mm        | 6.8mm        | 0.5mm     | 1.376     | 56         | 3.8mm | 1.336     | 52         |
| アクリソフ眼             | 7.7mm        | 6.8mm        | 0.5mm     | 1.376     | 56         | 3.9mm | 1.336     | 52         |
| 正常水晶体眼(グルストランド模型眼) | 7.7mm        | 6.8mm        | 0.5mm     | 1.376     | 56         | 3.1mm | 1.336     | 52         |

|                    | レンズ前面<br>曲率半径 | レンズ後面<br>曲率半径 | レンズ<br>中心厚 | レンズ<br>屈折率 | レンズ<br>アッベ数 | 硝子体屈折率 | 硝子体<br>アッベ数 |
|--------------------|---------------|---------------|------------|------------|-------------|--------|-------------|
| PMMA 眼             | 30.00mm       | -9.40mm       | 0.89mm     | 1.49       | 58          | 1.336  | 53          |
| アクリソフ眼             | 32.17mm       | -14.28mm      | 0.86mm     | 1.55       | 37          | 1.336  | 53          |
| 正常水晶体眼(グルストランド模型眼) | 10mm          | -6mm          | 3.6mm      | 1.41       | 50          | 1.336  | 53          |

前に置くことができず、ライトガイドの先端部に設置した。

測定方法の実際は以下のとおりである。まず、被検眼をミドリン P<sup>®</sup> で散瞳した。これは調節の影響<sup>11)12)</sup>を除き、静的な状態での色収差を測定するためである。また、散瞳により、瞳孔の径や形が測定に及ぼす影響を除くことを意図した。次に、chromoretinoscope を用いて、赤色光による検影法と青色光による検影法を別々に施行した。この検影法は原法と同様に水平経線についてのみ行なった。それぞれで得られた屈折値の差を色収差(軸上色収差)とした。なお、今回の測定単位は 0.25 D であった。

## 2. 近軸光線追跡による色収差の計算

光学設計プログラム、ZEMAX<sup>®</sup> (Focus Software, Inc)を用いた近軸光線追跡により、PMMA 眼、アクリソフ眼、および正常水晶体眼における軸上色収差を計算した。PMMA 眼に挿入されたと想定した眼内レンズはメニコン社 UV 25 BN、アクリソフ眼に挿入されたと想定したレンズはアルコン社 MA 60 BM である。これらはともに直径が 6 mm で、後方凸が強い両凸型の光学部をもつスリーピースタイプの眼内レンズである。レンズ度数は PMMA 眼、アクリソフ眼とも 22 D を想定した。正常水晶体眼はグルストランド模型眼で代用した。

表 2 に入力データを示した。角膜の曲率と厚さは三者ともグルストランド模型眼の値を用いた。眼内レンズの曲率、屈折率、アッベ数はメーカーから情報提供されたものである。角膜、前房、水晶体、および硝子体の屈折率はグルストランド模型眼からのものを、また、これらのアッベ数は Le Grand<sup>7)</sup> のデータから魚里<sup>8)</sup> が算出したものを使用した。PMMA 眼とアクリソフ眼の前房深度はニデック社 EAS 1000 を使用して臨床例から得た。この臨床例のうち PMMA 眼は 11 眼で、すべて UV 25 BN が挿入されており、アクリソフ眼は 18 眼で、すべて MA 60 BM が挿入されている。挿入されていた眼内レンズの度数は、それぞれ  $21.8 \pm 1.3$  (平均値  $\pm$  標準偏差) D、 $22.1 \pm 1.4$  D であり、差はなかった。

計算の具体的手順は次の通りである。まず、無限遠から

入射した d 線 (587.6 nm) の近軸光線が硝子体中に焦点を結ぶ位置を求めた。これは、上記のデータを入力すると本プログラムによって自動的に計算される。次に、この位置に 500 nm または 640 nm の光線が焦点を結ぶために必要な眼鏡度数をそれぞれ求めた。矯正眼鏡レンズは眼前 12 mm の位置にあり、屈折率を 1.50、厚さを 0 mm と仮定した。この眼鏡レンズの曲率半径を手入力で少しずつ変えていき、500 nm または 640 nm の光線が d 線の焦点距離に一致するような曲率半径を求めた。眼鏡レンズ度数は「1,000/曲率半径」により算出した。このようにして得られた矯正眼鏡度数の絶対値の和を、500 nm と 640 nm 間の軸上色収差とした。

## III 結 果

### 1. Chromoretinoscopy による色収差の測定結果 (表 3 a)

PMMA 眼の色収差は正常水晶体眼のそれとほぼ同等であった。しかし、アクリソフ眼には PMMA 眼や正常水晶体眼に比べ、有意に大きな色収差が存在した (t 検定,  $p < 0.001$ )。

正常水晶体眼における色光検影法は光像の動きがわかりやすく施行が容易であり、個体間のばらつきが少なかった。これに対し、眼内レンズ挿入眼における色光検影法は光像の動きが複雑で、中和点の判定が難しい例が少なからずあった。この現象は眼内レンズが水晶体と比べ球面収差が大きいためではないかと考えたが、このような例では、光像の動きのパターンが変化した位置を中和点とした。

### 2. 近軸光線追跡による色収差の計算結果 (表 3 b)

500 nm と 640 nm 間の軸上色収差は、PMMA 眼では 0.64 D、アクリソフ眼では 0.98 D、正常水晶体眼(グルストランド模型眼で代用)では 0.74 D であった。アクリソフ眼の色収差は PMMA 眼や正常水晶体眼に比べ大きかった。



表 3a 色光検影法による色収差の測定結果

| 500nm と 640nm 間の軸上色収差 |                  |
|-----------------------|------------------|
| PMMA 眼                | $0.75 \pm 0.18D$ |
| アクリソフ眼                | $1.20 \pm 0.22D$ |
| 正常水晶体眼                | $0.82 \pm 0.16D$ |

表 3b 近軸光線追跡による色収差の計算結果

|                        | 矯正眼鏡度数 |                |        | 軸上色収差 |
|------------------------|--------|----------------|--------|-------|
|                        | 500nm  | 589nm<br>(d 線) | 640nm  |       |
| PMMA 眼                 | -0.45D | 0              | +0.19D | 0.64D |
| アクリソフ眼                 | -0.69D | 0              | +0.29D | 0.98D |
| 正常水晶体眼(グル<br>ストランド模型眼) | -0.53D | 0              | +0.21D | 0.74D |

#### IV 考 按

人の眼における色収差の測定は、多くの研究者によってさまざまな方法でなされてきた。500 nm と 640 nm 間の色収差は、0.75 D (Wald ら<sup>13)</sup>), 0.75 D (Bedford ら<sup>14)</sup>), 0.8 D (Charman ら<sup>15)</sup>), 0.8 D (Millodot<sup>16)</sup>), 約 0.8 D (Howarth ら<sup>17)</sup>), 0.7 D (Thibos ら<sup>18)</sup>) などの報告がある。今回の色光検影法による正常水晶体眼での測定結果は 0.82 D であり、過去の報告とほぼ一致していた。したがって、測定法に大きな問題はないと考える。近軸光線追跡によって算出された色収差の値は、色光検影法によって得られたものに比べ小さかった。これは、角膜や水晶体や硝子体のアッペ数を実際の被検者のものより高めに見積もっている可能性があること、あるいは、青色フィルターの半値幅が広いために中和点の決定が近視側にずれた可能性があることによると考えている。しかし、色光検影法による測定結果も近軸光線追跡による計算結果も同様な傾向を示した。すなわち、PMMA 眼の色収差は正常水晶体眼のそれとほぼ同等であるのに対し、アクリソフ眼には PMMA 眼や正常水晶体眼の約 1.5 倍の色収差が存在することが判明した。

健常な人の眼には常に色収差が存在するので、色収差が存在すること自体は生理的なことと考えられる。例えば、色収差が老視の調節力を補っているとする説<sup>2)3)</sup>や、色収差が調節をコントロールしているという説<sup>4)5)</sup>がある。また、網膜に有害な青色光の焦点が色収差によって網膜から遠ざかるとすれば、眼にとって有利である。さらに、色収差が眼内レンズ挿入眼におけるいわゆる偽調節の一因となっている可能性もある。

しかし、色収差が大きいと眼の生理機能にとって好ましくない影響が生じる可能性がある。その例を以下に挙げる。

##### 1) 網膜像におけるコントラストの低下

多色光である白色光に対する眼光学系の modulation

transfer function (MTF) やコントラスト感度は、単色光に対するそれらよりも低下するといわれている<sup>19)~22)</sup>。これは、さまざまな波長の光の集合である白色光の網膜像においては、色収差のために焦点のあっている光もあればそうでない光もあり、焦点ずれした光の像によって網膜像全体のコントラストが低下するためである。また、Whitefoot ら<sup>3)</sup>は特殊なレンズを用いて人眼の色収差を 2 倍にしたところ、低コントラストにおける最高視力が著明に低下したと述べている。したがって、色収差の大きな眼ほど網膜像のコントラストが低下していると考えられる。アクリソフ眼のコントラスト感度は PMMA 眼のそれよりも低いとする報告<sup>23)</sup>があるが、アクリソフ眼の色収差が大きなことがその一因となっている可能性もある。

2) 瞳孔偏位や瞳孔の部分遮蔽により網膜像の質が低下する

瞳孔偏位は白内障手術にしばしばみられる合併症であるが、瞳孔偏位が起これば横色収差が顕著になる<sup>24)25)</sup>。我々がコンピュータを用いて行った光線追跡法による計算では、1 mm の瞳孔偏位が生じた場合、5 m 先の暗い背景の中で同じ位置にある 480 nm の青色の物体と 640 nm の赤色の物体は、PMMA 眼を通してみると 4.6 mm、アクリソフ眼を通してみると 6.9 mm ずれてみえる。さらに、横色収差により眼光学系 MTF やコントラスト感度が低下することが報告<sup>26)27)</sup>されている。したがって、アクリソフ眼に瞳孔偏位があると、コントラスト感度が低下したり、物体の配色により大きな複視が起こる可能性がある。また、瞳孔偏位がなくとも眼瞼下垂により瞳孔が一部遮蔽されても横色収差が顕著になるので、アクリソフ眼の術後に眼瞼下垂がある場合にも同様な懸念がある。

##### 3) 夜間近視の増大

人の眼は暗所で近視化することが古くから知られており、夜間近視と呼ばれている。人の眼の視感度は、明所においては 555 nm 付近の光に対して最も高くなり、暗所においては 505 nm 付近の光に対して最も高くなる (Purkinje shift)。色収差により短波長の光ほど焦点距離が短いため、暗所で眼は近視化するという理論から、かつては色収差が夜間近視の重要な原因の一つとされてきた<sup>13)28)29)</sup>。近年は、暗所では調節が軽度近視化した状態に落ちつくことが夜間近視の主たる原因と考えられるようになった<sup>30)31)</sup>。しかし、調節力のない眼内レンズ挿入眼においては、暗所では Purkinje shift と色収差による近視化が目立ってくる可能性がある。したがって、色収差が大きなアクリソフ眼は、PMMA 眼や老視眼に比べて夜間近視が強くなると考えられる。

##### 4) 低照度下での色覚の低下

正常者でも低照度下では色覚が異常を示すことが知られており、視細胞に到達する光の量が少ないことが原因と考えられている<sup>32)</sup>。アクリソフ眼での色覚低下の報告



はないが、色収差の大きな眼では網膜に焦点を結んでいる光以外の波長の光は網膜面でのエネルギーが小さくなるはずである。低照度下では色覚に何らかの異常が生じるかも知れない。

上記のうち、1)、2)の現象は、すでに多くの研究がその背景にあり、色収差の大きな眼内レンズを挿入することへの現実的な警鐘と考えるべきである。3)、4)の現象は、現時点では想像の域はでないが、今後色収差の大きな眼内レンズを挿入する際には留意していく必要があると思われる。

このように、眼内レンズ挿入眼における色収差の存在はさまざまな影響をはらんでいるが、最近の眼内レンズの開発は色収差の影響を考慮してなされているとはいいがたい。小切開手術の普及に伴い、今後眼内レンズが手術手技の都合に合わせて開発されていくと、生理的な範囲を大きく逸脱した色収差をもつ眼内レンズが次々と生み出される可能性がある。そのような眼内レンズが微妙なコントラストや色彩の識別を要する職業の人や小児に挿入されると、後に失業や視機能の発達障害につながる恐れさえある。今、我々白内障術者は手術の簡便さや術後早期の視力回復のみにとらわれず、より生理的な光学特性をもつ眼内レンズ挿入眼を生み出すべく、検討を重ねていくことが大切である。

実験装置の製作に当たり、ご協力をいただいた株式会社ナイツ長山三洋氏に感謝いたします。

なお、本文の要旨は第 102 回日本眼科学会総会(福岡、1998 年)において報告した。

## 文 献

- 1) **Sivak JG, Bobier CW**: Accommodation and chromatic aberration in young children. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 17: 705—709, 1978.
- 2) **行田尚義**: 色光による老人性遠視眼の視力. 視覚の科学 13: 175—178, 1992.
- 3) **Whitehoo HD, Charman WN**: Hyperchromatic lenses as potential aids for the presbyope. *Ophthalmic Physiol Opt* 15: 13—22, 1995.
- 4) **Kruger PB, Mathews S, Aggarwala KR, Sanchez N**: Chromatic aberration and ocular focus: Fincham revisited. *Vision Res* 33: 1397—1411, 1993.
- 5) **Kruger PB, Nowbatsing S, Aggarwala KR, Mathews S**: Small amounts of chromatic aberration influence dynamic accommodation. *Optom Vision Sci* 72: 656—666, 1995.
- 6) **Sivak JG, Millodot M**: Axial chromatic aberration of the crystalline lens. *Atti Fond Contrti 1 st raz Ottica* 30: 173—177, 1975.
- 7) **Le Grand Y**: Form and Space Vision (translated by Millodot M and Heath GG). Indiana University Press, Bloomington and London, 5—23, 1967.
- 8) **魚里 博**: 眼のアップ度数. 視覚の科学 15 別冊: 41, 1994.
- 9) **Bobier CW, Sivak JG**: Chromoretinoscopy. *Vision Res* 18: 247—250, 1978.
- 10) **Bobier CW, Sivak JG**: Chromoretinoscopy and its instrumentation. *Am J Optom Physiol Opt* 57: 106—108, 1980.
- 11) **Jenkins TCA**: Aberration of the eye and their effects on vision. Part II. *Br J Physiol Opt* 20: 161—201, 1963.
- 12) **Sivak JG, Millodot M**: Axial chromatic aberration of eye with achromatizing lens. *J Opt Soc Am* 64: 1724—1725, 1974.
- 13) **Wald G, Griffin DR**: The change in refractive power of the human eye in dim and bright light. *J Opt Soc Am* 37: 321—336, 1947.
- 14) **Bedford RE, Wyszecki G**: Axial chromatic aberration of the human eye. *J Opt Soc Am* 47: 564—565, 1957.
- 15) **Charman WN, Jennings JAM**: Objective measurement of the longitudinal chromatic aberration of the human eye. *Vision Res* 16: 999—1005, 1976.
- 16) **Millodot M**: The influence of age on the chromatic aberration of the eye. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 198: 235—243, 1976.
- 17) **Howarth PA, Zhang X, Bradley A, Still DL, Thibos LN**: Does the chromatic aberration of the eye vary with age? *J Opt Soc Am [A]* 5: 2087—2092, 1988.
- 18) **Thibos LN, Ye M, Zhang X, Bradley A**: The chromatic eye: A new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans. *Appl Opt* 31: 3594—3600, 1992.
- 19) **Campbell FW, Gubisch RW**: The effect of chromatic aberration on visual acuity. *J Physiol* 192: 345—358, 1967.
- 20) **van Meeteren A**: Calculations on the optical modulation transfer function of the human eye for white light. *Optica Acta* 21: 395—412, 1974.
- 21) **Thibos LN, Bradley A, Zhang X**: Effect of ocular chromatic aberration on monocular visual performance. *Optom Vision Sci* 68: 599—607, 1991.
- 22) **Bradley A**: Perceptual manifestations of imperfect optics in the human eye: Attempts to correct for ocular chromatic aberration. *Optom Vision Sci* 69: 515—521, 1992.
- 23) **Kohnen S, Ferrer A, Brauweiler P**: Visual function in pseudophakic eyes with poly (methyl methacrylate), silicone, and acrylic intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 22: 1303—1307, 1996.
- 24) **Thibos LN, Bradley A, Still DL, Zhang X, Howarth PA**: Theory and measurement of ocular chromatic aberration. *Vision Res* 30: 33—49, 1990.
- 25) **Rynders M, Lidkea B, Chisholm W, Thibos LN**: Statistical distribution of foveal transverse chromatic aberration, pupil centration, and angle  $\phi$  in a population of young adult eyes. *J Opt Soc Am A*

- 12: 2348—2357, 1995.
- 26) **Thibos LN**: Calculation of the influence of lateral chromatic aberration on image quality across the visual field. *J Opt Soc Am [A]* 4: 1673—1680, 1987.
- 27) **Artal P, Marcos S, Iglesias I, Green DG**: Optical modulation transfer and contrast sensitivity with decentered small pupils in the human eye. *Vision Res* 36: 3575—3586, 1996.
- 28) **村田 博**: 夜間近視に関する研究. 第2報 低照度に於ける眼屈折の変化. *日眼会誌* 63: 1660—1673, 1959.
- 29) **矢田 宏**: 夜間近視と凹レンズ効果. *日眼会誌* 64: 487—507, 1960.
- 30) **Leibowitz HW, Owens DA**: Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. *J Opt Soc Am* 65: 1121—1128, 1975.
- 31) **Hope GM, Rubin ML**: Night myopia. *Surv Ophthalmol* 29: 129—136, 1984.
- 32) **市川一夫, 長坂智子, 宮川典子, 市川 宏**: 低照度下色覚異常の研究. *眼臨* 79: 1116—1124, 1985.