

眼内レンズ挿入眼における夜間近視のシミュレーション

青島 真一, 永田 豊文, 渡邊 郁緒

浜松医科大学眼科学教室

要 約

目 的：調節力のない眼内レンズ挿入眼では、プルキンエシフトと色収差による夜間近視が存在する可能性がある。模型眼を用い、夜間近視に伴う網膜像の変化を眼内レンズの素材別にシミュレートする。

方 法：模型眼に polymethylmethacrylate (以下, PMMA), ソフトアクリル, 高屈折シリコーン製眼内レンズのいずれかを挿入し, 560 nm のスリット光が焦点を結ぶように網膜面の位置を決定し, 明所視での正視状態とした。この模型眼に 505 nm のスリット光を入射すると網膜面の線像はぼけるが, これを暗所視で近視化した

状態とした。各々の状態において modulation transfer function (以下, MTF) の計算と線像の撮影を行った。

結 果：MTF の低下と線像のぼけは, PMMA < ソフトアクリル < 高屈折シリコーンの順に大きかった。

結 論：ソフトアクリルや高屈折シリコーンの眼内レンズを挿入した眼では, 色収差による夜間近視が大きくなる可能性がある。(日眼会誌 104 : 324—327, 2000)

キーワード：夜間近視, 色収差, プルキンエシフト, 眼内レンズ

Simulation of Night Myopia in Pseudophakic Eyes

Shinichi Aoshima, Toyofumi Nagata and Ikuo Watanabe

Department of Ophthalmology, Hamamatsu University School of Medicine

Abstract

Purpose : Eyes with an intraocular lens (IOL) implanted that have no accommodative ability are likely to have night myopia caused by Purkinje's shift and chromatic aberration. We evaluated the changes in retinal images caused by night myopia in various IOL - implanted eyes by simulation using model eyes.

Methods : A polymethylmethacrylate (PMMA) IOL, soft acrylic IOLs, and high-refractive-index silicone IOLs were prepared, and inserted into the model eye. The image plane of the model eye was determined as the line image at which a slit light of 560 nm was best focused, which was regarded as emmetropic condition under photopic vision. A slit light of 505 nm was then directed into the model eye. Its line image on the image plane was blurred, which

was regarded as myopic condition under scotopic vision. Under each condition, the modulation transfer functions (MTF) were calculated and the line images were photographed.

Results : The degree of reduction of MTF and blurring of the line image under the night myopic condition was in the order of PMMA < soft acrylic < high refractive index silicone IOL.

Conclusion : Eyes with a soft acrylic or high-refractive-index silicone IOL may have more intense night myopia caused by chromatic aberration. (J Jpn Ophthalmol Soc 104 : 324—327, 2000)

Key words : Night myopia, Chromatic aberration, Purkinje's shift, Intraocular lens

I 緒 言

光は媒質を通過する際、波長ごとに屈折率が異なる。このため、自然光のように多くの波長を含む多色光がレンズを通過すると、光は分散し、異なった位置に焦点を結ぶ。すなわち、青色のような短波長光の焦点距離は短く、

赤色のような長波長光の焦点距離は長い。これは色収差と呼ばれ、ヒトの眼球光学系にも存在する。また、網膜にはプルキンエシフトと呼ばれる現象がみられ、視感度のピークが明所では 555 nm 付近にあるものが、暗所では 505 nm 付近に移行する。このような色収差とプルキンエシフトの関係から、ヒトの眼は暗所では近視化すると考

別刷請求先：433-8558 浜松市三方原町 3453 聖隷三方原病院眼科 青島 真一
(平成 11 年 8 月 5 日受付, 平成 11 年 11 月 25 日改訂受理)

Reprint requests to: Shinichi Aoshima, M.D. Department of Ophthalmology, Seirei Mikatabara Hospital, 3453 Mikatabara-cho, Hamamatsu 433-8558, Japan

(Received August 5, 1999 and accepted in revised form November 25, 1999)

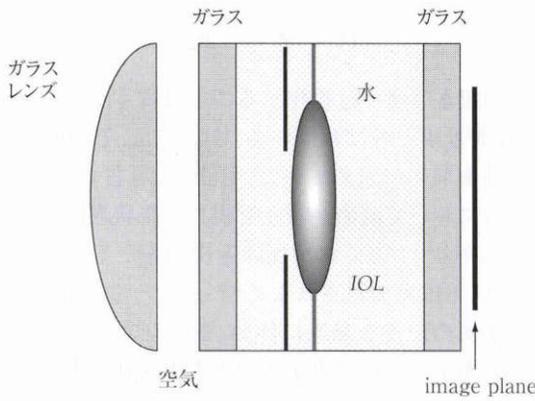


図 1 模型眼の概要.

表 1 模型眼に挿入した眼内レンズの概要

レンズの素材	モデル名(度数)	光学部型	アッペ数	屈折率
PMMA	UV25BN (22D)	両凸	58	1.49
ソフトアクリル	MA60BM (22D)	両凸	37	1.55
高屈折シリコーン	SI30NB (22D)	両凸	不明	1.46

PMMA : polymethacrylate

えられ、夜間近視の一因とされてきた^{1)~3)}。近年、眼内レンズ挿入術が普及するにつれ、様々な素材の眼内レンズが登場するようになった。その中には、正常の水晶体よりもアッペ数がかなり低いレンズもあり、このようなレンズを挿入した眼は色収差が大きくなる⁴⁾⁵⁾。色収差が大きくなった眼は夜間近視が強くなる可能性があり、これを検討することは、眼内レンズ挿入眼の視機能の特異性を知る上で意義あることと思われる。今回、我々は polymethylmethacrylate (以下、PMMA) 製眼内レンズ、ソフトアクリル製眼内レンズ、高屈折シリコーン製眼内レンズを模型眼に挿入し、夜間近視の状況をシミュレートした。

II 方 法

図 1 のような模型眼を作製し、眼内レンズを挿入した。この模型眼の角膜に相当するレンズは屈折力が 29 D、

アッペ数が 64 であり、ヒトの角膜(屈折力 40 D、アッペ数 56⁶⁾)よりも色収差が小さいと考えられる。挿入した眼内レンズは、PMMA レンズとしてメニコン社 UV 25 BN、ソフトアクリルレンズとしてアルコン社 MA 60 BM、高屈折シリコーンレンズとして SI 30 NB であり、性状の詳細は表 1 に記した。これらの眼内レンズ挿入模型眼の色収差は我々がかつて行った検討⁵⁾によると、PMMA < ソフトアクリル < 高屈折シリコーンの順に大きい。次いで、図 2 のごとく、模型眼を modulation transfer function (以下、MTF) 測定用光学ベンチ(イメージサイエンス社)に設置した。この装置では、光源の前に干渉フィルタを置くことにより様々な波長のスリット光を模型眼に入射できる。さらに、イメージアナライザーにより模型眼の網膜面(結像面)に映ったスリット光の線像を解析し、MTF⁷⁾の算出ができる。また、線像を直接観察・写真撮影することが可能である。

明所で正視に矯正された眼内レンズ挿入眼が、暗所に移動した場合に夜間近視の影響をどのように受けるかをシミュレートするため、以下の手順により実験を行った。

1) まず、明所視感度が最も高い 560 nm のスリット光を模型眼に入射した。次いで、イメージアナライザーにより、スリット光の結像面における線像のコントラストが最良になるように結像面の位置を決定した。この状態は、明所において正視に矯正された眼を模している。結像面の線像から MTF を計算した。

2) 1) の状態の模型眼に、今度は暗所視感度が最も高い 505 nm のスリット光を模型眼に入射した。505 nm の光は手前に焦点を結ぶため、結像面に映った線像はぼけている。この状態は、明所で正視に矯正された眼にとって、暗所では感度の高い 505 nm の光が手前に焦点を結ぶ、すなわち、夜間近視になった状態を模している。この線像から MTF を計算し、さらに線像の写真撮影を行った。なお、実際の眼では明所と暗所では瞳孔径が異なるはずであるが、今回の検討では考慮せず、模型眼の瞳孔はともに直径 3 mm とした。

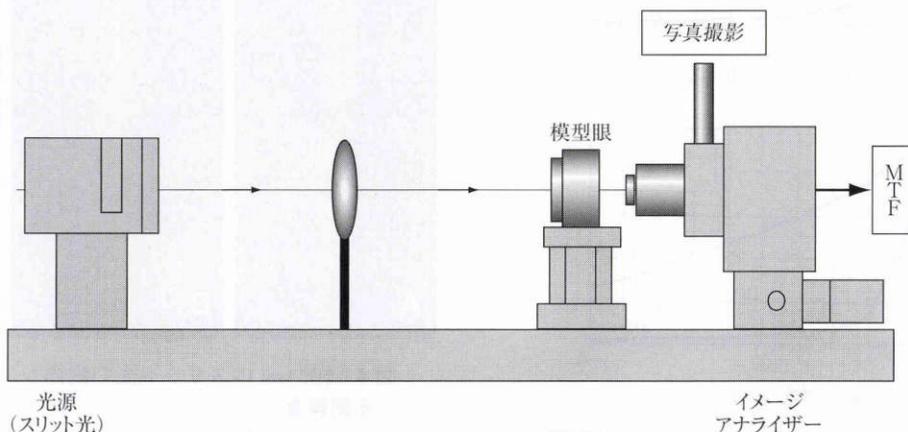


図 2 Modulation transfer function (MTF) 測定用光学ベンチの概要.

III 結 果

1. 明所視感度が最も高い 560 nm の光で正視に矯正された眼内レンズ挿入眼は、暗所視感度が最も高い 505 nm の光に対して MTF の低下を示した。

その低下の程度を眼内レンズ別に比較すると、PMMA < ソフトアクリル < 高屈折シリコーンの順に大きかった (図 3)。

2. 明所視感度が最も高い 560 nm の光で正視に矯正された眼内レンズ挿入眼において、暗所視感度が最も高い 505 nm の光による網膜像はぼけていた。

そのぼけの程度を眼内レンズ別に比較すると、PMMA < ソフトアクリル < 高屈折シリコーンの順にぼけが大きかった (図 4)。

今回使用した模型眼の角膜に相当するレンズは、ヒトの角膜よりも色収差が小さいと考えられるため、模型眼全体としての色収差は、実際の眼内レンズ挿入眼よりも小さいはずである。したがって、上記の結果は、各眼内レンズ挿入眼の相対的な差を反映している。

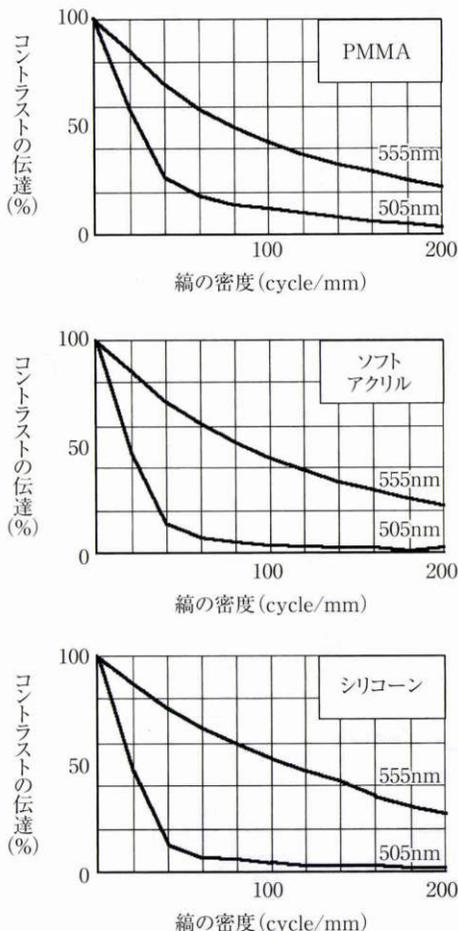


図 3 505 nm の光に対する眼内レンズ挿入模型眼の MTF.

IV 考 按

ヒトの眼が暗所で近視化することは古くから知られており、夜間近視と呼ばれている。かつては、その原因を色収差や球面収差に求めていた。しかし、現在では、ヒトの眼は暗所において調節が軽度近視化した状態に落ちつくことがわかり^{8)~10)}、これが夜間近視の主たる要因と考えられ、色収差は重要視されなくなった。ところが、近年の白内障手術の急速な発展に伴い、眼内レンズ挿入眼という新しい光学系を持つ眼が多数生み出されるようになった。眼内レンズ挿入眼には調節力がなく、調節による夜間近視は起こり得ない。さらに、調節によって適当な波長の光を網膜面に移動させることができないために色収差は固定しており、眼内レンズ挿入眼では正常眼に比べて色収差の影響が強いはずである¹¹⁾。したがって、暗所において、プルキンエシフトにより視感度のピークが 505 nm に移行した場合、眼内レンズ挿入眼では色収差による近視化が顕性化する可能性がある。そして、その程度はアッベ数の小さな眼内レンズを挿入した眼ほど大きくなると思われる。この近視化の程度は、近軸光線についてのみであれば簡単に計算できる。グルストランド模型眼の水晶体を眼内レンズに置き換えた場合について、我々が光学設計プログラム OPTAS[®] (オプト) を用いて行った計算によると、PMMA レンズ挿入眼では -0.29 D、ソフトアクリルレンズ挿入眼では -0.4 D の近視化が起こることになる (シリコーンレンズはアッベ数が不明なため計算できないが、それ以上の近視化となる)。しかし、実際の眼では瞳孔内を多数の光線が通過しており、これらの光線群のどこを焦点とするかは容易に判断できない。このため、今回は線像のぼけの大きさにより、夜間近視の大きさを視覚的に比較することを試みた。

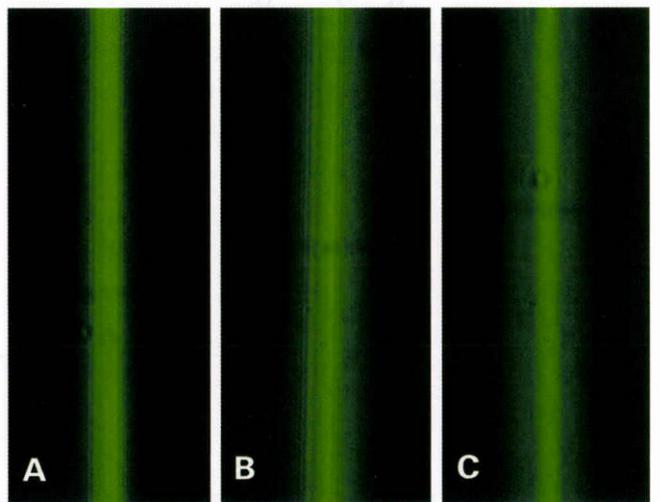


図 4 505 nm のスリット光の眼内レンズ挿入眼における網膜像。

A : polymethylmethacrylate (PMMA), B : ソフトアクリル, C : 高屈折シリコーンレンズ

今回の実験から、560 nm の光の焦点が網膜上にある眼内レンズ挿入眼では、505 nm の光は網膜の手前に焦点を結んでいるため、505 nm の光による網膜像はぼけ、そのぼけは PMMA<ソフトアクリル<高屈折シリコンレンズの順に大きいことが判明した。したがって、暗所でプルキンエシフトが起こると、560 nm の光で正視に矯正された眼内レンズ挿入眼は近視になり、近視化の程度は PMMA<ソフトアクリル<高屈折シリコンレンズの順に大きいことが理論上予想される。

しかし、プルキンエシフトは錐体視から杆体視に移行する現象であるため、色収差による夜間近視は杆体にとって近視になるということであり、明所視における近視とは根本的に異なる。すなわち、杆体にとって近視状態になるとどのような見え方になるのかは明らかでない。中心窩には杆体は存在しないので、杆体視において近視になっても大きな影響はないのではないかと、という疑問もある。しかし、中心窩の中央から 0.4° 離れると杆体が現れ、 1° 以上離れた位置では杆体の密度は錐体を上回る。さらに、暗順応下では、 $1\sim 4^\circ$ の部位における杆体の感度はかなり高い¹²⁾。網膜に映る像は中心窩だけでなく、その周囲の部位にも広がっているため、杆体も暗所では中心視力における役割は大きいと思われる。したがって、我々は杆体視においても近視化が大きいと日常行為に影響があると推測している。今後、杆体視の状態にした上での視力検査など臨床的検討を追加していく必要がある。

ヒトの生活に伴う行為の中には暗所で行うものも多い。夜間の自転車走行はありふれた日常行為であるが、暗い照明や無灯火のもとに行われているのが現状である。夜間の飛行機や船の操縦など、暗所において繊細な作業を求められる職業もある。このようなケースでは夜間近視の影響は重大である。また、ある種の網膜変性疾患の患者では錐体機能が障害され、杆体視が重要な視機能になっている場合があり¹³⁾、色収差による夜間近視の影響が無視できないと思われる。

眼内レンズ挿入術は今後もますます普及していくであろうが、手術手技優先の素材開発は視機能の悪化をもた

らす可能性を秘めている。例えば、色収差は大きすぎても小さすぎても良くない。大きすぎると今回検討した夜間近視が起こったり、コントラストが低下する可能性がある。また、小さすぎると一点に様々な波長が集中し、網膜障害を来す可能性もある。眼内レンズの選択や開発は、色収差についても考慮が払われるべきである。

文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 矢田 宏: 夜間近視と凹レンズ効果. 日眼会誌 64: 487—507, 1960.
- 4) 永田豊文, 久保田滋之, 渡邊郁緒, 青島真一: 眼内レンズ挿入眼における色収差. 日眼会誌 103: 237—242, 1998.
- 5) 永田豊文, 久保田滋之: 眼内レンズ挿入模型眼における色収差の観察. IOL & RS 12: 245—248, 1998.
- 6) Le Grand Y: Form and Space Vision (translated by Millodot M and Heath GG). Indiana University Press, Bloomington and London, 5—23, 1967.
- 7) 山本敏雄: Modulation transfer function. 眼科 19: 1095—1101, 1977.
- 8) Leibowitz HW, Owens DA: Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. J Opt Soc Am 65: 1121—1128, 1975.
- 9) Leibowitz HW, Owens DA: Anomalous myopias and the intermediate dark focus of accommodation. Science 189: 646—648, 1975.
- 10) Hope GM, Rubin ML: Night myopia. Surv Ophthalmol 29: 123—136, 1984.
- 11) 魚里 博: 眼の色収差. 視覚の科学 15 別冊: 34—35, 1994.
- 12) Pirenne MH: Vision and the eye. 2nd edition. Chapman and Hall Ltd, London, 39—45, 1967.
- 13) 大庭紀雄: 原発性網膜変性. 塚原 勇(編): 眼科臨床全書 第 8 卷 B. 金原出版, 東京, 97—130, 1983.