

最近の眼内レンズと評価方法

平山典夫

Recent Intraocular Lenses and Evaluation Methods

Norio HIRAYAMA

Explanation on intraocular lenses (IOLs), especially foldable lens and multi-focal lens, and some methods giving information on retinal images are given. The simulation is based on the convolution of the function on the source pattern and the point spread function of the eye under the considered conditions. The eye model system is built up with CCD camera, eye model and personal computer. Both methods give us images corresponding to retinal images. The contrast sensitivities for green, blue, and red light are measured to examine the influence of the lens materials with different Abbe's numbers. These information on images constructed by the eye including IOL is valuable for evaluating IOL.

Key words: intraocular lens, simulation, convolution, eye model, contrast sensitivity

眼内レンズ (intraocular lens) は、白内障手術で摘出される水晶体がもつレンズ機能を代替するために挿入される医療用具である。眼内に移植される医療用具であるため、レンズとしての性能だけでなく生体への安全性も確認されたのち販売される。

ここでは、新しい眼内レンズであるフォルダブルレンズ、多焦点レンズを中心に設計の概要および評価方法について述べる。

1. 眼内レンズの設計

1.1 形状

眼内レンズ (図1) は、中心の光学部 (optics) および昆虫の触覚のような形状をした支持部 (loop) から成る後房眼内レンズが主流である。

大きな光学部は大きな角膜切開創を必要とするために、術後乱視を避けるため制約を受ける。また、直接網膜に至る光を避ける必要から光学部を小さくすることにも制約がある。この相反する要求の解決策がレンズを折り畳み挿入するというアイデアであり、これを実現したのが軟性材料

を使用するフォルダブルレンズである (図2)。

1.2 材料

従来の光学部材料は PMMA (ポリメチルメタクリレート) で、プラスチックレンズの材料として広く使用されているものと同じであり、古くは有機ガラスといわれていたこともある硬質材料である。

フォルダブルレンズの光学部材料には、ゴム系材料としてアクリル樹脂とシリコン樹脂、そして含水ゲル系材料として PHEMA (ポリヒドロキシメチルメタクリレート) 樹脂が使用されている。含水ゲル樹脂は、スポンジのように物理的空間に水を吸い込むのではなく、分子間に水を含む性質をもつ材料でソフトコンタクトレンズの材料に使用されているタイプのものである。表1¹⁾のとおり、フォルダブルレンズを実現した軟性材料のアッペ数は、従来使用されてきた PMMA と比較すると小さい。この色収差に関する報告については、評価方法 (2章3節) で取り上げる。

1.3 レンズの断面形状

レンズの断面形状は、平凸型、両凸型そしてメニスカス型のものが使用されている。

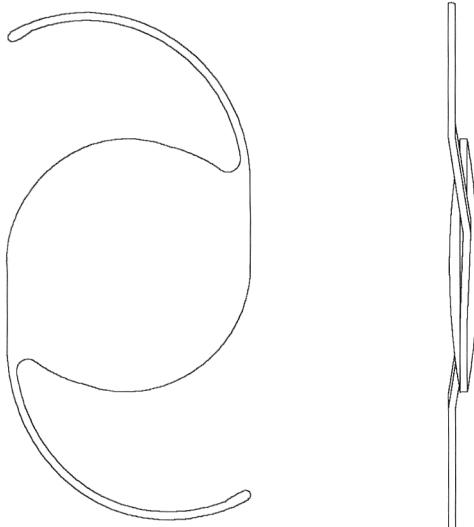


図1 眼内レンズ。

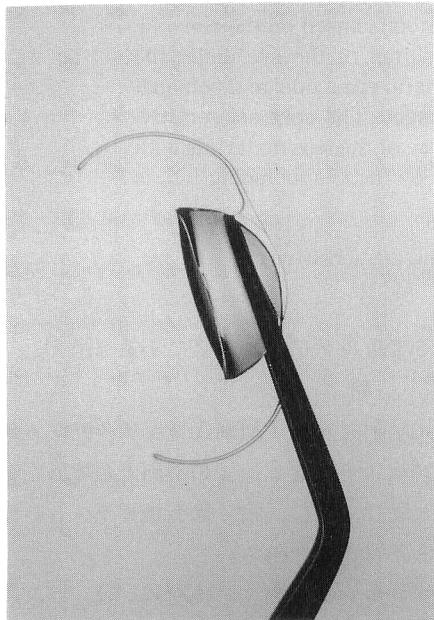


図2 フォルダブルレンズ（折り畳んだ状態）。

光学的には収差（球面収差、コマ収差）を小さくするためベンディングを行うと両凸型からやや平凸型に近い形状がすぐれている²⁾。

両凸型の場合、レンズ後面（角膜側）と後囊（水晶体と硝子体を隔てていたもので、白内障摘出の際に残される）との接触が後発白内障の抑制効果があるとの報告³⁾があり、その期待もあった。

メニスカス型の登場には、術前の強度近視を術後に正視に近くするとの考え方からマイナス度数の眼内レンズが求められた。

1.4 多焦点レンズ

眼内レンズは白内障摘出術・眼内レンズ挿入術の進歩、

表1 光学部材料のアッペ数。

	PMMA	アクリル	シリコン	含水ゲル	水晶体
アッペ数	58	37	56.7	52.9	50

保険適用という患者負担の軽減もあり、厚く重い眼鏡や、老人にとって扱いが難しいコンタクトレンズに代わり普及してきた。しかし、単焦点レンズであるための限界もあり、それを改善するべく、多焦点設計を取り入れたものが製品化されている⁴⁾。

屈折原理に基づくものと回折原理に基づくものがあり、屈折原理に基づく多焦点レンズでは、眼鏡レンズの場合と異なり遠用部と近用部が同心円状に配置されている。中心から遠用部と近用部と配置するもの、その逆に配置するもの、遠用部と近用部を交互に配置するものがある。

回折原理に基づく多焦点レンズでは、凸面（角膜側）で屈折した光線の一部が、凹面の溝（格子として作用）により別の焦点を結ぶことにより2つの焦点をもたせている。

眼内に移植された眼内レンズにはあらゆる距離から出た光線が入射する。つまり遠方からの光線を網膜上に結像するよう設計された部分にも、遠方からの光線だけではなく近方からの光線も入射する状況にある。したがって、像のコントラストが低下すると予想される。単焦点レンズと多焦点レンズの結像性能については、評価方法（2章）のところで取り上げる。

2. 眼内レンズの評価方法

移植された眼内レンズが網膜上につくる像を直接測定・評価することができない現状から、コンピューターによる網膜像シミュレーションおよび模型眼による網膜像観察、最後にコントラスト感度測定による色収差評価について、最近の眼内レンズである多焦点眼内レンズおよびフォルダブルレンズを対象とした報告について述べる。

2.1 コンピューター・シミュレーション

祁ら⁵⁾は眼内レンズが挿入された眼光学系が網膜上につくる像を、光学理論に基づきモニター上に画像としてシミュレートしている。

この方法は、光学系がつくる像の光強度分布は原画像（ぼけのない理想像）の光強度分布と点状広がり関数（PSF）との畳み込み演算であるという原理に基づいて行っている。つまり、原画像の光強度分布を $f(x, y)$ 、点 (x, y) におけるPSFを $p(x, y, u, v)$ とすると一般に実際像の光強度分布 $f'(x, y)$ は

$$f'(x, y) = \iint f(x, y) p(x, y, u-x, v-y) du dv$$

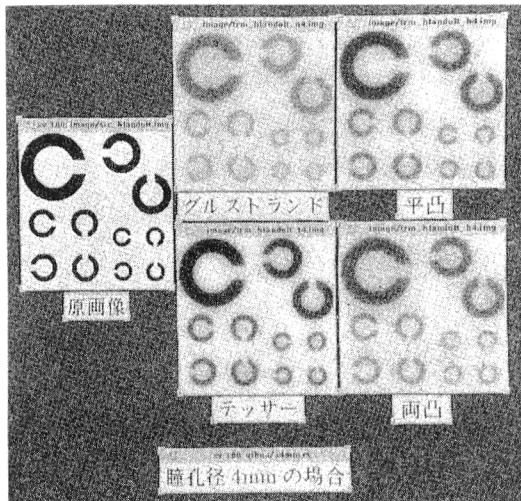


図3 ランドルト環のシミュレーション像。

となる。

この報告では、シミュレーションしたい指標の光強度分布を $f(x, y)$ として、また PSF は模擬眼・眼内レンズというシミュレートしたい光学系のパラメーターや指標までの距離・瞳孔径といったシミュレーション条件に応じて光線追跡法で計算し、これらについて畳み込み演算を行い、その結果をモニター上に画像で示した。ランドルト環指標のシミュレーション像は、網膜上の光軸を中心とする 0.25 mm 四方に相当し、画角にして 1.25° で、軸上の PSF をすべての画素に適用している。

図3は、グルストランドの模擬眼の水晶体部分を平凸型レンズ、両凸型レンズおよび収差の少ないテッサータイプのレンズに替えた模擬眼による画像を、瞳孔径が 4 mm の場合についてシミュレートしたものである。レンズ単体の違いが、眼光学系トータルが網膜上につくる像としてシミュレートされている。

コンピューターによるシミュレーションは、現実には実施できない状況も PSF 計算の工夫により可能となるため、発展性のある評価手法と考えられる。最近では、眼球の回旋・3次元対象物体・動画を得る方法の基本としても利用されている⁶⁾。

2.2 模 型 眼

眼内レンズ評価用の模型眼システム⁷⁾は、写真レンズ、水槽、CCD カメラ、パーソナルコンピューターから構成されている(図4)。写真レンズ ($f=35 \text{ mm}$, $F:2$) は、角膜から水晶体への入射角にほぼ等しくなるよう選ばれている。水槽は虹彩に相当するアーチャーと眼内レンズを水中にセットできる構造となっている。CCD カメラに投影された像は、パーソナルコンピューターを経てモニターに表

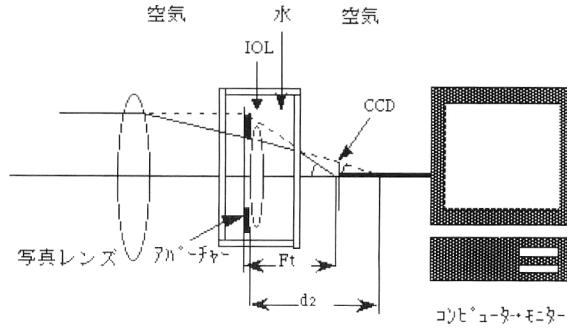


図4 模型眼システム。

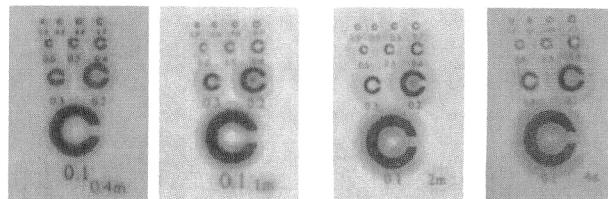


図5 多焦点眼内レンズの模型眼像。

示されるとともに画像データを保存することが可能となっている。

この模型眼の光学要素の構成をみると、明らかに人眼とは異なってはいるが、CCD を含めたこの模型眼の MTF (modulation transfer function) は、人眼相当の模型眼の MTF に視神経・脳の MTF を含めた MTF にほぼ近いことが確認されている。

ここでは多焦点レンズに関する報告について述べる⁸⁾。対象となった多焦点眼内レンズは、中心から遠用部、近用部が交互に 5つ配置されたタイプの眼内レンズである。解像力チャートとしては、視力検査でお馴染みのランドルト環を使用しているが、距離 4 m, 3 m, 2 m, 2 m, 0.5 m, 0.4 m(この眼内レンズの近方加入度 2.8 D, IOL 上では 3.5 D に相当) での解像力を測定するために、提示する距離ごとに応じて、視力で 0.1 から 1.0 まで 0.1 きざみで作成している。アーチャー径は昼間の明るさでの特性をみるために、3 mm とされている(図5)。

また、比較のため単焦点眼内レンズについても 1 m, 2 m, 4 m の距離に合わせて移植された場合について撮像、分析している(図6, 図7)。

得られた画像は、おのののレンズがつくる像をビジュアルに示すことにより、解像力とランドルト環像の画質の関係が単純ではなく、理想である高い解像力と高いコントラストはともに実現できていないことなどを示している。解像力チャートに代わり新聞紙面の利用も可能であるため、移植後の見え方を一般の人にもわかりやすく示すことができるところから、術前に多焦点眼内レンズ採択の判断材

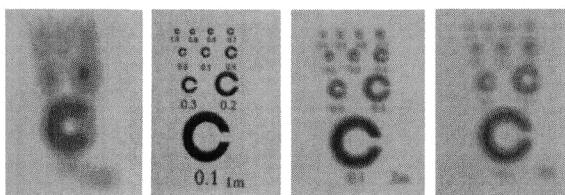


図6 単焦点眼内レンズの模型眼像（1 mに焦点を合わせて挿入）。

表2 軸上色収差。

	500 nm と 640 nm 間の軸上色収差	
	色光検影法	近軸光線追跡法
PMMA 眼	0.75±0.18 D	0.64 D
アクリル眼	1.20±0.22 D	0.98 D
正常水晶体眼	0.82±0.16 D	0.74 D

料を与えるので、インフォームド・コンセントへの利用の可能性を示唆している。

2.3 フォルダブルレンズの色収差評価

永田ら⁹⁾は、フォルダブルレンズのアッペ数は従来から使用してきた材料に比べて小さく、眼内レンズの色収差が大きくなるとの観点から、改良した検影法により軸上色収差を測定し報告している。

ここでは、フィルターを用いて赤色光 (640 nm) と青色光 (500 nm) を準備し、網膜上にできる光像の測定から眼の屈折値を測定し、各色の光线下で得られた屈折値の差を軸上色収差として報告している。

また、グルストランド模型眼をベースに、PMMA レンズ・アクリルレンズを挿入した眼および正常眼について、近軸光線追跡法により上記条件下の軸上色収差を求めている。

これらの結果(表2)から、アッペ数の小さい材料からつくる眼内レンズについて、色収差の視覚への影響の可能性を報告している。

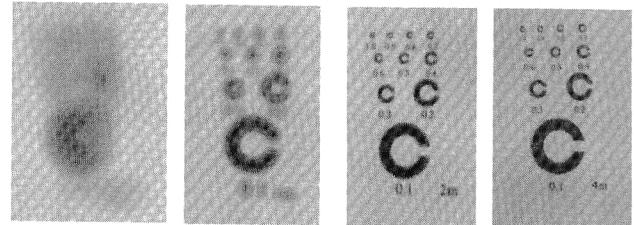


図7 単焦点眼内レンズの模型眼像（4 mに焦点を合わせて挿入）。

根岸¹⁰⁾は、永田らの他覚的方法に対して自覚的方法であるコントラスト感度測定法を用いて、アッペ数の異なる材料からつくられた眼内レンズ挿入眼について色収差の評価を行った。

コントラスト感度は、コントラストや空間周波数が異なる指標群を青色光 (470 nm), 緑色光 (549 nm), 赤色光 (630 nm) および白色光下で提示し、被験者が認識できる限界の指標を選んだ結果をもとに求めている(図8)。

緑色光下でのコントラスト感度は眼内レンズの材料に依存しないこと、白色光下のアクリルレンズで認められたコントラスト感度の差は色収差の影響と考えられることから、アッペ数が小さいことで視機能を低下させる可能性があることが示唆されると報告している一方、被験者を対象としたアンケート調査では、必ずしも日常生活において色収差の影響を自覚してはいないとも報告している¹⁰⁾。

多くの光学機器では、機器がつくる像を人眼でみているため、収差のない像をつくる設計が追求される。一方、眼内レンズは眼内に移植され眼光学系の一部となり網膜上に像をつくることになるので、眼内レンズ単体ではなく、眼内レンズを含む眼光学系がつくる像を評価することは重要なと思われる。

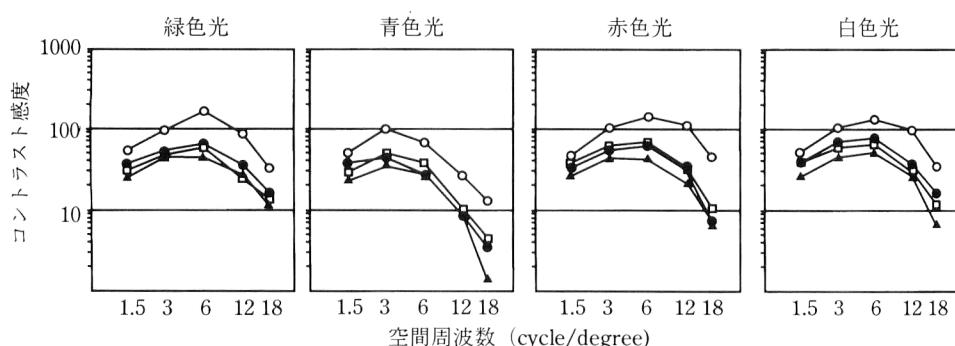


図8 眼内レンズ挿入眼のコントラスト感度。○：有水晶体眼、●：シリコンレンズ、□：PMMA レンズ、▲：アクリルレンズ。

文 献

- 1) 根岸一乃：“色収差”，IOL & RS, **15** (2001) 9-12.
- 2) 魚里 博：“眼内レンズ(IOL)の光学特性”，IOL & RS, **15** (2001) 26-32.
- 3) 三宅謙作：“後発白内障(囊混濁)”，三島濟一，塚原 勇，植村 恭夫編，眼内レンズ，眼科MOOK No. 47 (金原出版，東京，1992) pp. 199-209.
- 4) 庄司信行，清水公也：“多焦点レンズ”，眼科手術, **7** (1994) 41-49.
- 5) 邦 華，根津孝也，下條 朗，平山典夫，池田五郎，大沼一彦：“眼光学系の像のシミュレーション”，視覚の科学, **15** (1994) 171-176.
- 6) 邦 華，田中郁香，江守康文：“累進レンズの見え方のシミュレーション”，視覚の科学, **21** (2000) 52-58.
- 7) 大沼一彦，塩川安彦，杉野太郎，馬嶋慶直，平山典夫，湊 篤朗：“IOLの像観装置の周波数特性と臨床との比較”，視覚の科学, **19** (1998) 58-63.
- 8) 大沼一彦：“多焦点眼内レンズの光学像とその評価”，あたらしい眼科, **18** (2001) 395-400.
- 9) 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”，日眼誌, **103** (1999) 237-242.
- 10) K. Negishi, K. Ohnuma, N. Hirayama, T. Noda: "Effect of chromatic aberration on contrast sensitivity in pseudophakic eyes," Arch. Ophthalmol., **119** (2001) 1154-1158.

(2001年7月30日受理)