水晶体混濁の散乱が結像に及ぼす影響

-模型混濁水晶体による検討―

坂本 保夫,中泉 裕子,佐々木一之 金沢医科大学眼科学教室

要 約

ヒト核白内障,後嚢下白内障に相当する混濁を有する 模型水晶体を作製し,これを介して得られる外界の物体 像の画質と混濁程度の関係を評価した.核混濁模型水晶 体は polymethylmethacrylate (PMMA)を素材とし,両 凸型の眼内レンズの形状に加工した.混濁は親水・疎水 性の両モノマーを重合させて生成した.紫外線吸収,透過 の2タイプを作製した.後嚢下混濁模型は紫外線吸収眼 内レンズの後面にハードコンタクトレンズを密着させ, 両レンズの間隙に白色微粒子懸濁液(ルチル酸化チタン 粒子:平均粒子径0.2µm,主溶剤:ノルマルヘプタン) の濃度・範囲を変えて塗布・乾燥させて作製した.核混 濁模型での撮影は35 mm スチールカメラを用い,模型 を空気中に保持した状態で行った.後嚢下混濁模型は水 中で保持できるシミュレーションカメラ(仮称)を用い た.紫外線透過タイプの核混濁模型から得られた像は,吸 収タイプに比べ画質の低下が顕著であった.混濁の増大 に伴い画像のコントラストは低下したが,光透過率が透 明模型より 20% 減衰しても画質の低下は僅かであり, 60% の透過率でも物体の認識は可能であった.後嚢下混 濁模型では混濁の拡がりが大きくても,中心混濁が散乱 光強度で 130 cct までは画質への影響はほとんどなかっ た.本検討は二種の白内障眼の網膜投影像を模型眼で一 義的にシミュレートしたものである.(日眼会誌 102: 312—318, 1998)

キーワード: 白内障, 模型混濁水晶体, 核白内障, 後囊下 白内障, シミュレーション, 結像

Influence of Light Scattering in the Opaque Lens on the Ability to Focus —Examination Utilizing Opacified Model Lenses—

Yasuo Sakamoto, Hiroko Nakaizumi and Kazuyuki Sasaki Department of Ophthalmology, Kanazawa Medical University

Abstract

In order to objectively evaluate the relationship between the quality of images which will be reflected on the retina, through opaque lenses and the grade of opacification, model lenses of nuclear cataract and subcapsular cataract were manufactured. The nuclear cataract model lenses were made of polymethylmethacrylate (PMMA) with and without a cut off wavelength below 380 nm. The lens shape was the biconvex intraocular lens (IOL) type and the opacification was achieved by polymerization of both hydrophile and lyophobic monomers. The model of subcapsular opacification was composed of ultraviolet (UV)-cut IOL and a hard contact lens (HCL). The HCL was attached behind the IOL and whitish corpuscles (T₁O₂, mean diameter of particle= $0.2\,\mu$ m) were inserted into the gap between the lenses. Utilizing a still camera with 35 mm film, images were photographed through the nuclear opacified model lenses and evaluated. The model of the subcapsular opacified lens was examined by a simulation camera (CCD) in which the lens was held in water. The image quality obtained from the non-UV absorbed nuclear opacification type lens was markedly poor compared with that from the UV absorbed type lens. Although image contrast became worse with increased nuclear opacification, the worsening of image quality was slight in the opacified lens with a 20% reduction of light transmission. It was even possible to recognize photographed subjects through an opacified lens with 60% transmission. Images through the subcapsular opacified model lenses were not influenced by the opacified area in the models with up to 130 cct light scattering intensity at the central part of opacification. Although the study aimed to simply simulate images reflected on the retina through two types of cataractous lenses, the results obtained showed useful objective information concerning images seen through cataractous eves. (J Jpn Ophthalmol Soc 102: 312-318, 1998)

Key words : Cataract, Opacified model lens, Nuclear cataract, Subcapsular cataract, Simulation, Focus of image

別刷請求先:920-0265 石川県河北郡内灘町大学1-1 金沢医科大学眼科学教室 坂本 保夫 (平成9年8月4日受付,平成9年12月22日改訂受理)

Reprint requests to: Yasuo Sakamoto M.D. Department of Ophthalmology, Kanazawa Medical University. 1–1 Daigaku, Uchinada-machi, Kahoku-gun, Ishikawa-ken 920–0265, Japan (Received August 4, 1997 and accepted in revised form December 22, 1997)

I 緒 言

日常臨床の中で白内障の診断,治療方針の決定にはそ の視機能評価が要求される.視力検査をはじめとする 様々な検査10-3が行われているが,そのいずれもが患者の 自覚によるものである.経験豊かな眼科医なら水晶体混 濁の程度,局在により白内障患者の視機能障害程度は大 方推定できるが,混濁形態・程度によってはこれが必ず しも容易でないことがある.我々はこれまでに外界の物 体からの光が白内障眼を通して網膜に投影される時,水 晶体混濁が網膜への投影像にどれほど影響を及ぼすかに ついて検討をしてきた1~0.その意図するところは、白内 障眼の視機能の一部でも客観的に評価してみたいという ことにある.具体的には動物眼を含む生体眼水晶体から その光透過に関する諸情報を検出して、これを基に混濁 模型水晶体を作製し、この模型水晶体を介した投影像の 結像状態から白内障眼のみえ方をシミュレートする試み に入った.白内障の基本3病型には皮質混濁,核混濁,囊 下混濁があるが,この中で比較的模型作製の容易なもの が核混濁模型であるため、2枚のガラスレンズの空隙に ラテックス粒子の懸濁液を封入して作製した核混濁模型 水晶体をもって予備検討を行った⁶.本研究は、この結果 を参考に新たな模擬核混濁水晶体,囊下混濁水晶体を作 製し,2種の撮影装置(35 mm スチールカメラ, CCD カメ ラ)を介してこれらを透過した外界像の結像状態をみた ものである.

Ⅱ 実験方法

1. 模型水晶体

1) 核混濁模型水晶体

Polymethylmethacrylate (PMMA)を素材に眼内レンズ(両凸型)形状の模型水晶体を作製した.模型は260 nm 以上の光を透過する紫外線透過モデルとヒト水晶体の透 過波長域と同等な紫外線吸収モデル(380 nm 以下の光を カット)の二つのタイプとした.核混濁は親水性モノマー と疎水性モノマーを重合させることにより生成し,両タ イプとも3種の混濁程度を有する模型を作製した.図1 にタイプ別の分光透過率を示した.対照は,混濁のない模 型の透過率曲線である.紫外線吸収モデルのNo.1,2およ びNo.3 模型の混濁程度はヒトの純粋な核白内障の程度 I, II, III(日本白内障疫学研究班分類^{¬¬})に相当する.模型 の透過率は透明レンズが約90%,No.1~3がそれぞれ約 80%,70%,60% である.

2) 後囊下混濁模型水晶体

後嚢下混濁模型の材料には紫外線吸収眼内レンズ〔両 凸型眼内レンズ(IOL)〕とハードコンタクトレンズ (HCL)を用いた.両レンズを密着させ,IOL後面とHCL 内面の曲率差を利用して狭い空間を作り,この空間に薄 層の混濁を作った.混濁にはルチル酸化チタンの白色微



紫外線透過モデルは波長260 nm 以上の光を通し,吸収 モデルは380 nm 以下をカットする. 対照は約90%の透過率を有する.No.1,2 および3 はそれ ぞれ日本白内障疫学研究班分類の程度 I,Ⅱ,Ⅲに相当す るが,紫外線吸収モデルの No.3 はⅡとⅢの境界にある.

粒子(平均粒子径:0.2 µm)とノルマルヘプタンの懸濁 液を用い,HCLの内面にこれを塗布・乾燥させた.混濁 濃度と塗布範囲を変えた1組6種類の後嚢下混濁模型を 2組作製した.1組は屋内の撮影実験に用い,他の1組を 屋外での撮影に用いた(図2).模型の混濁度とその拡が りは,水中で撮影した Scheimpflug スリット像からの散 乱光強度で評価した(図3).対照には,白色微粒子を塗布 しない模型を用いた.

2. 模型混濁水晶体を介した外界像の記録

1) 35 mm スチールカメラ

核混濁模型水晶体は通常の 35 mm スチールカメラ(一 眼レフ)を改造して撮影実験を行った.標準撮影レンズの レンズ部および可変絞りを取り外し,模型水晶体を(空気 中で)保持できるようにした.開口絞りには 3 mm 径の円 形絞りを用いた.撮影媒体には白黒ネガフィルムを用い た.撮影対象は屋外で1,3,5 m に配置した人物とした.

2) シミュレーションカメラ

囊下混濁模型水晶体での撮影実験には既報[®]の仮称シ ミュレーションカメラ(図4)を用いた.この装置は撮影 媒体に charge coupled device(CCD)カメラを用いてお



図2 後囊下混濁模型の混濁程度と拡がり.

モデル No.1~6 は屋内用, No.7~8 は屋外用. No.1, 2, 7, 8 は混濁程度 I, No.3, 4, 9, 10 は程度Ⅱ, No.5, 6, 11, 12 は程度Ⅲに相当する.



図3 後囊下混濁模型の Scheimpflug スリット像から計測した散乱光強度.

模型 No.7~12 の混濁度と拡がりを示した. 散乱光強度は 0~255 の整数値(cct)で, 計測値は 15×15 pixels の 範囲の平均である.

○: 対照, ●: No.7, △: No.8, ▲: No.9, □: No.10, ■: No.11, ×: No.12



図4 シミュレーションカメラの構造.

カメラはレンズ,模型ホルダー, charge coupled device (CCD)カメラから成り,模型ホルダー内は蒸留水で満 たせる構造となっている.撮影像は NTSC のビデオ信号として出力される. IOL:眼内レンズ, HCL:ハードコンタクトレンズ 平成10年5月10日

り,模型レンズ前後面の表面散乱を抑えることを目的に レンズを水中(蒸留水)で保持している.撮影は距離5m に設置したランドルト環視標および点光源,さらに屋外 で5,10mに配置した人物を対象として行った.

Ⅲ 結 果

1. 核混濁模型水晶体を介した撮影画像

スチールカメラにより撮影された外界の人物像を図5 に示した.核混濁度の上昇(透過率の低下)に伴い,画像の コントラストは低下し,その傾向は紫外線吸収モデルよ り透過モデルの方が顕著であった.紫外線吸収モデルで は,混濁が程度II(透過率約70%)になってもほとんど解 像力の低下は認められなかったが,程度IIIになると画 質の低下は明らかとなった.ただし,程度IIIの混濁で あっても物体の認識は可能な像が得られた.透過率が30 ~40%(紫外線透過モデル No.3)に低下すると外界の像は もはや結像されなかった.

2. 後囊下混濁模型水晶体を介した撮影画像

画像はすべてシミュレーションカメラにより撮影した.

1) ランドルト環視標

混濁のない対照模型はランドルト環視標の0.8まで解 像できた.この値をもって本撮影系の最高解像力とし,各 混濁模型による値を相対的に評価した. 視標の切れ目は densitometry により検出した.

レンズ光軸付近の混濁度が130 cct(散乱光強度値, cct:0~255の整数値で画像のグレースケールを表す.0 は黒,255 は白)までの No.1~3の模型では,いずれもラ ンドルト環視標の0.7 まで解像できた(0.058 log unit の 低下).また,この混濁程度では混濁の拡がりによる差は 認められなかった.混濁度がこれを超えると視標の値は 低下し,後囊下全面が混濁している No.6の模型では,画 像の明度が極端に低下し,解像限界はランドルト環視標 の0.2 であった(0.602 log unit の低下,図 6).

2) 点 光 源

点光源を対象とした撮影像を図7に示した.点光源に おいてもランドルト環視標の実験同様, No.3 模型までの 軽度な混濁では光源の拡がりには差を認めなかったが, これを超えると混濁度に伴うフレアーの影響が認められ た. No.6 の模型では混濁状態が不規則なためか, フレ アーの形状は円形にはならず指向性を認めた.

3)人物像

混濁の程度,拡がりが増加するに従い,画像の明度・コントラストは低下した.2-1),2)の実験同様,模型の中心 混濁度が約130 cct(No.9)までは画質の低下は僅かで あったが,混濁の拡がりに伴うフレアーの増加が若干認



図5 核混濁模型を通して得られた像.

スチールカメラを使用し,空気中で保持した核混濁模型を通して得られた像である.図下は紫外線透過模型の Scheimpflug スリット像である.混濁の増加に伴い画質(コントラスト)は低下しているが,紫外線吸収モデル での像は混濁程度Ⅲでも物体の認識は可能であった.



後嚢下混濁模型 No.1~6 をシミュレーションカメラに装着して撮影した.撮影距離は5m である.No.1~3 は ランドルト環視標の 0.7 まで解像できたが(0.058 log unit の低下),これを超えた混濁では顕著に解像力が低 下した(No.6:0.602 log unit の低下).



図7 点光源を対象として後嚢下混濁模型で撮影した像.

撮影距離 5 m で,シミュレーションカメラを用いた. 模型は No.1~6 を用いた. 各撮影像の左は用いた模型の Scheimpflug スリット像である. No.4 以降の像では光源の拡がりが認められ, No.6 では拡がりに方向性を認 めた.

められた.これを超える混濁では画像の明度の低下が顕 著であり, No.11の混濁程度になると僅かに物体が認識 される程度であった(図8).

IV 考 按

ヒト白内障の病型は混濁部位により皮質・核・囊下の 3タイプに分けられるが,最も多いのは皮質タイプで,混 合タイプがこれに次ぐ.今回検討した核,囊下単独の混濁 水晶体は疫学的にみても決して多くはない⁹.しかし,こ の2種の混濁は視軸上またはこれに近い部位に発症する にも拘わらず,細隙灯顕微鏡による混濁程度判定と視機 能検査値が一致しないことが多く,これら症例の視機能 評価は皮質型に比べ容易ではない.また,皮質混濁は多彩 な形状を示し,模型作製上,混濁の形状を規定し難いなど の理由から,今回は核・後囊下混濁に絞って検討を行っ た.

本検討に先立ち,ヒト生体眼水晶体を材料にその光学 特性を検討した.光学特性としては屈折¹⁰,散乱¹¹⁾,透過¹²⁾ など幾つかのパラメーターがあるが,我々はこの中の散 乱と透過に着目した.囊外摘出法により採取されたヒト



図8 後嚢下混濁模型で屋外の人物を撮影した像. 撮影は晴天の屋外で行った.撮影対象の人物は5mと10mに配置した.模型はNo.7~12,カメラはシミュ レーションカメラを用いた.No.10以上の混濁では画像のコントラスト,明度の低下を認めた.

水晶体の核部を材料に分光透過率を測定し、これと混濁 程度との関連をみるとともに、生体眼から得られる同一 水晶体核部の散乱光強度との関係もみた^{4,9}. PMMA を素 材とした核混濁模型の Scheimpflug スリット像から混 濁部分の散乱光強度を計測することができるため、これ をもって模型水晶体の混濁がヒト核白内障眼のどの程度 の混濁に相当するかおおよそ推定できる. 今回作製した 核混濁模型は、白内障分類⁷の中の程度 I~III に相当する 3種である.

核混濁模型では、これを通して結像される像の鮮明度 をスチールカメラのフィルム面上で評価した.図5に示 したように、紫外線吸収模型と透過模型の間に大きな差 がみられ、紫外線透過模型では明らかな画質の低下を来 していた.この差の原因はまさに透過波長域にある.紫外 線透過模型では260~400 nmの光を90%以上透過し、短 波長域の光量は吸収模型よりも多い.つまり、紫外線透過 模型では屈折率の異なる光が多く存在し、色収差が大き い.また、短波長の光は長波長のものより透過性が低く、 混濁での散乱が大きいためにこの差が生じたのであろ う.各種眼内レンズに対して本実験系を適用すれば、臨床 で経験する偽水晶体眼患者の色視症や眩しさ¹³の様子も ある程度推定できると思われる.

一方, ヒトの分光透過率に近い紫外線吸収模型では, 透 過率が20% 程度減衰(混濁程度 II) しても像の鮮明度は 若干低下するにとどまっていた.また, これ以上に透過率 が減衰すると画質は明らかに低下するが, 対象の識別は まだ可能であった.スチールカメラでの撮影では模型を 空気中で保持して行ったが, これを水中で保持すると模 型レンズ表面の散乱が抑えられ, 図5 に示した以上の鮮 明な像が得られるはずである.本報とは別に, 混濁のない 眼内レンズを用いて水中と空気中で保持した状態でのレ ンズの解像力を USAF 1951 チャート(光学系機能や写 真処理の過程における数量許容誤差の決定に用いる最も 一般的なテストチャート, 63×63×1.5 mm 寸法のガラ ス基盤の中央に15×15 mmの大きさのパターンを蒸着 したもの)を用いて検討した結果,水中では空気中の約 1.5 倍の解像力を有していた.ヒト核白内障症例(核部の 着色を含む)において中等度以上の混濁を呈していても, 顕著な視力低下を来さないことが多い.今回の結果は,こ の現象を実験的ではあるが客観的に確認したものと考え る.

嚢下混濁模型も幾種かの模型作製を試みた.当初は眼内レンズ後面を直接,研磨または微粒子を付着して作製したが,水晶体後嚢に相当する薄層の部分がないこと、レンズ後面が疎らになり,形状も混濁程度に伴って変わることなどの理由から,今回のような眼内レンズとコンタクトレンズの間隙を利用した嚢下混濁模型水晶体とした.模型水晶体の混濁程度もそのScheimpflugスリット像の散乱光強度からヒト後嚢下混濁の程度I~IIIに対応したものが作製できた.この模型水晶体での撮影実験には新たに開発した仮称シミュレーションカメラ*を用いた.スチールカメラと異なり模型レンズを水中で保持できるように改良し,観察・記録をリアルタイムに行えるように撮影媒体にCCDカメラを用いた.本システムは,距離5mでランドルト環視標の0.8まで解像できる性能を有する.

模型 No.7~9の撮影像を比較すると,明らかな後囊下 混濁があっても中心部の濁りが薄ければ,5m 程度離れ た距離の投影像ならその質の低下は少ないことが具体的 に示された.後囊下混濁程度の増加に伴い模型を通して 得られる像の明度低下を認めた.これは,撮影の際の開口 絞りを3mmの円形と固定したためと考える.生体眼で は外界からの入射光量が低下した場合,瞳孔径が大きく なる.実際には本実験で得られた像よりも明るい像が投 影されているものと推定される.しかし,瞳孔径の拡大に 伴い被写体深度は減少し,周辺の混濁(拡がり)にも影響 され画質の低下を来すことも考えられる.絞り径と囊下 混濁の拡がりにおける画質低下については今後の検討が 必要であるが,核混濁に対しては絞り3mm径と6mm 径について,本実験とは別に解像力(USAF 1951 チャー ト,撮影距離1m)を比較している.3mm径では混濁増 加に伴い,解像力は対照模型:0.94mm/lineからNo.3 模型:0.52mm/lineへと低下したが,6mm径では0.56 mm/line(対照)から0.42mm/line(No.3)へと低下の程 度は少ないものの,混濁が少ない場合でも3mm径の場 合に比べ解像力が半減していた.よって,薄い後嚢下混濁 でも水晶体周辺まで拡がり,瞳孔径が大きい場合,本実験 で得られた画質より予想以上に低下しているものと思わ れる.臨床的に日常経験している後嚢下白内障患者の見 え方をここまで推定した試みはこれまでにはなく,眼科 臨床医にとっては極めて興味ある情報である.

白内障眼における視覚の障害は,外界からの光の透過 が混濁水晶体を通過する際にブロックされることに起因 するが,外界からの刺激の認識にはその他の因子も関与 する.本検討で試みたシミュレーションのみをもって認 識される投影像と考えるものではないが,白内障眼の認 識する外界像のある部分はシミュレーションでとらえら れているものと考える.混濁水晶体による光通過障害の 評価に主観的要素が入っていないのがこの試みの最大の 特徴である.生体眼でとらえられる混濁部の散乱光強度 を指標に模型水晶体をもってヒト白内障と同等の混濁を 作製したが,この作製に至った根拠は既報の実験結果⁴に 基づいたものであり,妥当性はあると考える.

白内障の臨床の中で患者の訴える視機能障害のおおよ そは,経験豊富な眼科医なら混濁の局在,程度から第三者 的にも理由をもって評価できる.しかし,一部の混濁,特 に中等度までの核白内障眼の視機能障害の評価は必ずし も容易でない²³.混濁水晶体の分光透過率までも考えた 上で,シミュレートされた透過像から得られた情報はこ れまでにはないものである.理論的には皮質白内障の模 型水晶体作製もできないわけではなく,我々の最終目標 も様々な程度の皮質白内障モデルでの同様な検討にあ る.臨床研究としての白内障手術適応決定,新しい眼内レ ンズの開発などを考える上で,将来的にも発展してよい 研究分野と考える.

核白内障模擬水晶体作製にご協力いただいた HOYA レン ズ株式会社,三友規久夫氏ならびに眼内レンズを提供して下 さいました株式会社メニコンに感謝します. 本研究は文部省平成7,8年度科学研究費(No.07671939,基 盤研究(C9(2),佐々木一之)の助成を受けた.記して謝意を表 する.

文 献

- 1) 中泉裕子,柴田崇志,小島明里,市川典子,佐々木ー 之:白内障患者の視力評価法の検討Ⅱ.眼科 31: 269-275,1989.
- 2) 吉田健一,林 幸子,中嶋順子,野村桃世,山出新一, 弓削経夫:コントラスト感度からみた白内障眼の視 機能.あたらしい眼科 10:317-322,1993.
- 大頭 仁,河原哲夫:視覚系の空間周波数特性とその臨床眼科学への応用.東京医学 83:63-70,1975.
- Nishimoto K, Sasaki K: In vivo light scattering intensity in the lens versus in vitro spectral transmission in the nuclear region. Ophthalmic Res 27: 1-11, 1995.
- 5) 坂本保夫,西本圭之輔,佐々木一之:模型水晶体より 推定したヒト核白内障眼の視機能評価.臨眼 49: 161-166,1995.
- 5) 坂本保夫:水晶体の光透過特性. 視覚の科学 15: 198-205, 1994.
- 7) 佐々木一之,柴田崇志,尾羽澤大,藤原隆明,小暮文 雄,小原喜隆,他:白内障分類試案.日眼会誌 93: 796-800,1989.
- 8) 坂本保夫,江森康文,佐々木一之:混濁水晶体・偽水 晶体眼の網膜投影像評価法―シミュレーションカメ ラの開発―.金医大誌 21:508-511,1997.
- 9) 佐々木ー之,小野雅司,青木巧喜,加藤信世,森根 優,中泉裕子,他:生活環境の異なる三地域に在住す る住民を対象とした白内障の疫学調査―第1報有所 見率,病型を中心として―.日眼会誌 99:204―211, 1995.
- 坂本保夫: Scheimpflug スリット画像から得られる 前眼部屈折要素の情報.視覚の科学 17:2—10, 1996.
- 11) Fujisawa K, Sasaki K: Changes in light scattering intensity of the transparent lenses of subjects selected from population-based surveys depending on age: Analysis through Scheimpflug images. Ophthalmic Res 27: 89—101, 1995.
- Bettner EA, Wolter JR: Transmission of the ocular media. Invest Ophthalmol 1:776–783, 1962.
- 13) 市川-夫: 眼内レンズ(5)術後視機能の異常と評価 「色視症」. 眼科手術 5:249-257, 1992.