

論文

水晶体着色による色見え方変化の心理物理的測定

森 礼 於*・河本康太郎*・秋山 順悦*・土方 清乃**・東 堯***

A Psychophysical Measurement of the Perceived Color Change by the Crystalline Lens Browning

Leo Mori, Kohtaro Kohmoto, Jun-etsu Akiyama,

Tohshiba R & D Center

Kiyono Hijikata and

Tohshiba Central Hospital

Takashi Azuma

Tohshiba Lighting Equipment Corp.

Abstract

Perceived color difference of a surface color between phakic and aphakic eyes has been measured using the binocular color matching technique for a 71 years old subject who, though aphakic on one eye, has a normal lens in the other eye. The same color chips were illuminated separately and presented for respective eyes. The subject adjusted the color of the illumination for one eye till both the color chips appeared to match.

The results of the color matching in a dark surround were quite reproducible, while those in a light surround deviated occasionally with the change of the chromatic adaptation. The perceived color changes in the dark surround are mostly predicted from the color stimulus change caused from the crystalline lens browning, but there still remains some systematic unpredictable errors.

1. まえがき

ヒトの目の水晶体は、紫外部から可視の青緑部にかけての分光透過率が年齢と共に低下し、その結果色覚にも影響することは良く知られている。今回たまたま筆者の一人が老人性白内障の治療のため、右眼水晶体の全摘出手術を行なった。摘出後の右眼では、青系統の色が鮮やかに見えるなど、非摘出の左眼との間に明確な色覚の差を確認した。このことに関連する測定データも古くから種々報告されているが、両眼による物体色見え方の差をXYZ表色系と関連づけて測定した例は知られていない。そこでこの機会を利用して、両眼の色見え方の差を心理物理的な方法で測定して、水晶体着色の影響を直接的に定量化することを試みた。その結果を水晶体の分光透過率データとも比較する。従来からのデータと合わせて今後の高齢化社会における照明と色彩の問題を検討

する基礎資料となることを期待する。

2. 従来の結果

年齢による水晶体の着色についての測定は古くから行なわれ、中泉¹⁾は摘出水晶体について写真分光測光を行なうと共に4~82才の水晶体の着色を水彩えのぐで模写した。Wealeら^{2,3)}は420~650nmの視感分光測光を行ない、Boettnerら⁴⁾は0~75才の9例について220nm~2.8 μ mの正透過率及び拡散透過率を測定した。また宇治⁵⁾は干渉フィルタによって透明水晶体4例、白内障水晶体20例の可視部分光透過率を求めている。

また水晶体の着色による色覚の変化についての報告も古くからある。前田⁶⁾は8~80才の85名の正常色覚者で片眼無水晶体の被験者に、片眼に黄又は青フィルタを掛けて両眼それぞれ無彩色紙を見させて、両眼で等しく見える色フィルタを選択させたり、片眼で見た無彩色と他眼で等色する黄又は青の有彩色紙を選択させる実験を行なった。この結果の記載は半定量的で、今日の色の表示に直接には換算できないことは残念である。

* 東京芝浦電気(株)総合研究所

** 東京芝浦電気(株)東芝中央病院

*** 東芝電材(株)

Wright⁷⁾ 及び Ruddock⁸⁾ は年齢の異なる被験者の視感等色の差から水晶体の着色の主波長を 576.4 nm 及び 579.5 nm と推定した。Lakowski⁹⁾ は水晶体摘出眼と有水晶体眼（片眼摘出，他眼健全者 5 名を含む）についてアノマロスコプ測定を行ない，70~82才の正常な摘出眼は，15~25才若返ると述べた。Gunkelら¹⁰⁾ は暗所視比視感度の年齢変化を測定して，青紫端単色光の刺激域は 0.11 log 単位/年で年齢と共に増加し，水晶体摘出眼では 1log 単位以上も刺激域が減少することを示した。

以上の他にも水晶体の着色の測定と，その効果についての報文は多いが，左右の水晶体摘出眼と非摘出眼との色の見え方の差を直接に測定したものは前田の報文⁹⁾ 以外には見当らない。この文献は筆者らの実験の後に知ったものであるが，筆者らの実験は結果的にはこの報文の結果を，1名の被験者によってではあるが，近代測色学の方法で追試し，定量化したものとなった。

3. 被験者

被験者は，1912年生れ，1982年70才で老人性白内障によって右眼視力が0.05に低下したため，同年11月に右眼水晶体全摘出手術を行なった。経過は良好で，1983年4月現在アンバー着色コンタクトレンズによって矯正視力1.2に回復している。なお，左眼は視力1.2で正常である。

以下に述べる両眼視等色実験は，コンタクトレンズ着用以前の2月上旬と中旬の2回にわたって行なった。従って被験者はぼけた右眼の像と尖鋭な左眼の像との両眼視等色を行なうので，後述のような大きさの色票を用いた。被験者は，視感測光・測色の経験があったために，前記のような色覚の差に問題意識を持ってから直ちに有

効な視感実験を企画し，実行することが可能となった。なお被験者が色彩学の専門家であるだけに，他の実験者は実験の準備中及び実行中に被験者に判定や調整の方向，程度などに先入観を与える言動がないようにとくに留意した。

4. 実験条件

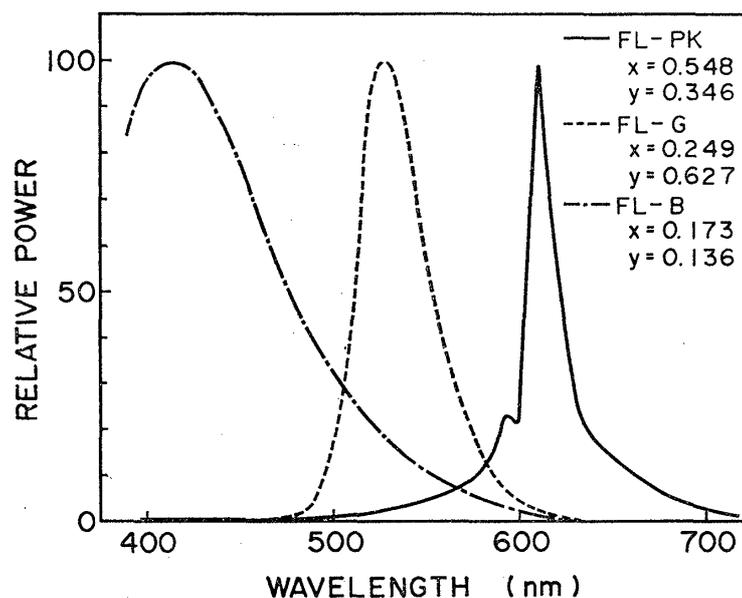
4.1. 実験装置及び光源

実験装置は，大きさ約0.7m×0.7m×0.7mの照明ブースを2個，机の上に隣接して並べたものである。両ブースの間から前側に白色のつい立を立てて，両ブースの光が互に混らないようにすると共に，左右両ブースはそれぞれ左眼（非摘出眼）又は右眼（水晶体摘出眼）の一方のみで同時に見られるようにした。等色実験の状況を Fig. 1 に示す。

両ブースの天井には，20ワット形の桃色（PK），緑（G），青（B）3原色蛍光ランプ各3本ずつを取付け，着せ掛けオパールガラス板を通して混色してブース底面を照明する。Fig. 2 に PK, G, B 蛍光ランプの相対分光分



Fig. 1 両眼等色実験の状況



RELATIVE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION

Fig. 2 3原色蛍光ランプの相対分光分布（線スペクトルを除く）

布(水銀線スペクトルは省略)を示す。図に記入した色度座標 x, y は、水銀の線スペクトルまで含めたランプとしての色度座標である。各ランプの回路には調光器を挿入して、被験者が一方の照明ブースについては3原色蛍光ランプを1色ごとに独立に、他方のブースについては混合比を変えずに全体の照度を調節できるようにしてある。

4.2. 試験色票及び背景

試験色票には、CIE 演色評価用試験色 Nos. 1~12 に近似する(財)日本色彩研究所製の半光沢色票12色(中明度彩度の8色と赤・黄・緑・青の純色4色)とN9.5に近い白色マット紙をそれぞれ210mm×150mmに長方形として用いた。この色票はブース底面に縦向きに置いて、斜め前方から見て視角は約8°(縦)×11°(横)になる。

これらの色票を観測する背景は、白及び黒の2種類を用いた。白背景には、照明ブース内面の白色塗装面(N8.5)をそのまま用い、この場合はブース底面中央に270mm×350mm(10°×25°)の長方形のN6無彩色紙(半光沢)を置いた。後述する実験シリーズ1ではこのN6色紙を比較観測し、シリーズ2ではN6色紙のほぼ中央に前記色票を順次に提示した。シリーズ3及び4は黒背景により、ブース内側正面と底面には黒ビロード布、両側面には黒らしゃ紙を張り、色票はその底面中央に提示した。Fig. 1は黒背景での実験情況を示している。

4.3. 実験方法

被験者は、2つの照明ブースの前にFig. 1のように位置して、左右両ブースに提示される同等な色票を左右それぞれの目で観測し、両方の色の見えが近似するように3原色の照明光を調光した。前述のように被験者には右眼の像はぼけているので、その中央部分の色と左眼の色票の像とを等色させるようにした。実験シリーズ2以降では、照明光への色順応があまり進まないように、調整には時間を掛けず、随時両眼を閉じて休息するように留意した。また両眼混色や両眼の交互作用の影響をさけるために、随時片眼ずつ閉じて各単眼での見え方を比較した。

被験者が調光して両眼等色を終えたつど、実験者が左右の両色票の色度と輝度を東京光学製の色彩輝度計BM-5によって直接測定した。この色彩計の色度座標の測定再現性は±0.001程度であって、系統誤差は±0.01近くになる場合もあるが、この実験目的には支障はないと考え特別な校正は行なわなかった。なぜならば、この場合比較測定する両色票は分光反射率が同一で、照明光の3色成分の構成比だけが異なるものである。その条件等色の度合は小さく、色彩計の系統誤差の影響も少ないと考えられるからである。4.2に示した色票の観測視角からは $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系による測色を行なう方が適しているが、測定器の都合もあり、また上記のように条

件等色度の小さい場合の測定であるので、以下XYZ表色系の測定値で代用する。

照明の3色光比を固定した側のブース(以下に述べるシリーズ4以外は左側)は、白色色票提示の場合の色度座標は $x=0.338\pm 0.001$, $y=0.380\pm 0.002$ [相関色温度5250 K, 偏差+0.013(uv)], 輝度は $500\pm 6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ にほぼ保たれた。

実験は次の4シリーズを2週間隔てた2日にわたって行なった。

- (1) 白背景上のN6色紙の両眼等色を休息をはさんで10回。照明は非摘出眼(左)側固定、摘出側可変〔以下(3)まで同様〕。
- (2) 白背景のN6色紙上に提示した試験色Nos. 9~12を無作為順に計3回両眼等色。
- (3) 黒背景上の試験色Nos. 1~8を各3回, Nos. 9~12を各4回, 白色を6回両眼等色。
- (4) 照明を摘出眼(右)側固定, 非摘出眼側可変とし, 黒背景上の試験色Nos. 2, 4, 6, 8及び白色を各2回両眼等色。

5. 両眼等色実験の結果

上記の4シリーズの両眼等色実験の結果を、CIE 1931色度図上にそれぞれFig. 3~6に示す。

シリーズ1(Fig. 3)は、ほぼ同等に照明して灰色色紙のみを置いた両ブースを被験者が見て、十分な色差が認められ、また等色調光もできたので予備試験として繰返し等色を行なったものである。図中の数字は等色の回数を示すものであるが、第4回等色から等色色度は大きく変動してしまった。このような無彩色視野による両眼等色では、両眼がそれぞれの視野に色順応して色度とは無関係に見かけの等色が成立つためと考えられる。第4回と第5回の等色の間には、十分な休息時間をおいているがその効果は僅かしか出ていない。

シリーズ2(Fig. 4)は、上記の結果から白背景では高彩度の試験色のみに限って、比較的手早く観測等色を行なった結果である。一応系統的な色ずれはみられるが、各等色時ごとの色順応状態の変動のためか、等色結果の変動は次のFig. 5よりも大きい。

シリーズ3(Fig. 5)は、照明光に対する色順応を少なくするように黒背景としたもので、今回の実験の主要部分をなす。この等色は前記の2日間にまたがって行なったが、測定日による差は認められず、また繰返しの両眼等色の変動は他の場合よりも小さかった。左右両眼の色度の差は、青緑、青、青紫、紫及び白の試験色に対して大きく、黄緑、緑に近い色について小さかった。

シリーズ4(Fig. 6)は、非摘出眼(左)側の照明を可変として、被験者が摘出眼では中程度の青がとくに鮮やかに見えるという程度を直接に計測することを試みたものである。しかしこの場合は被験者はなかなか両眼の等色が行なえず、調整に長時間を要して繰返しの回数を

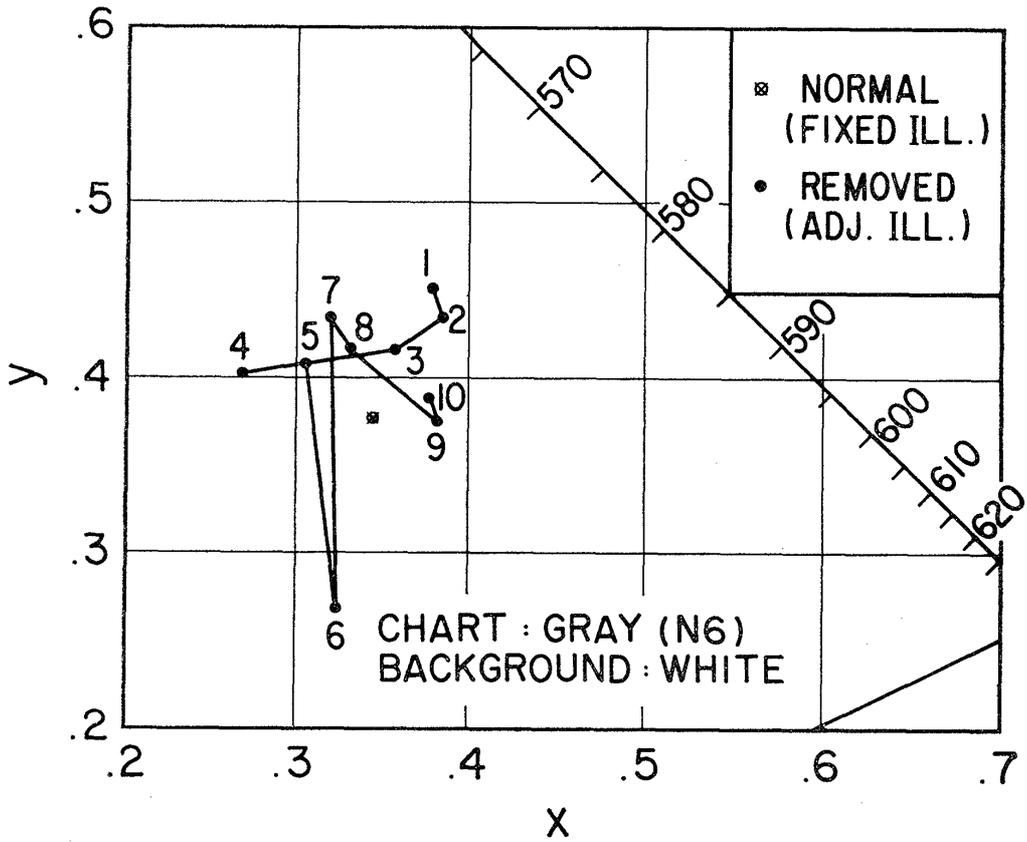


Fig. 3 白背景上の N6 色紙の繰返し等色結果

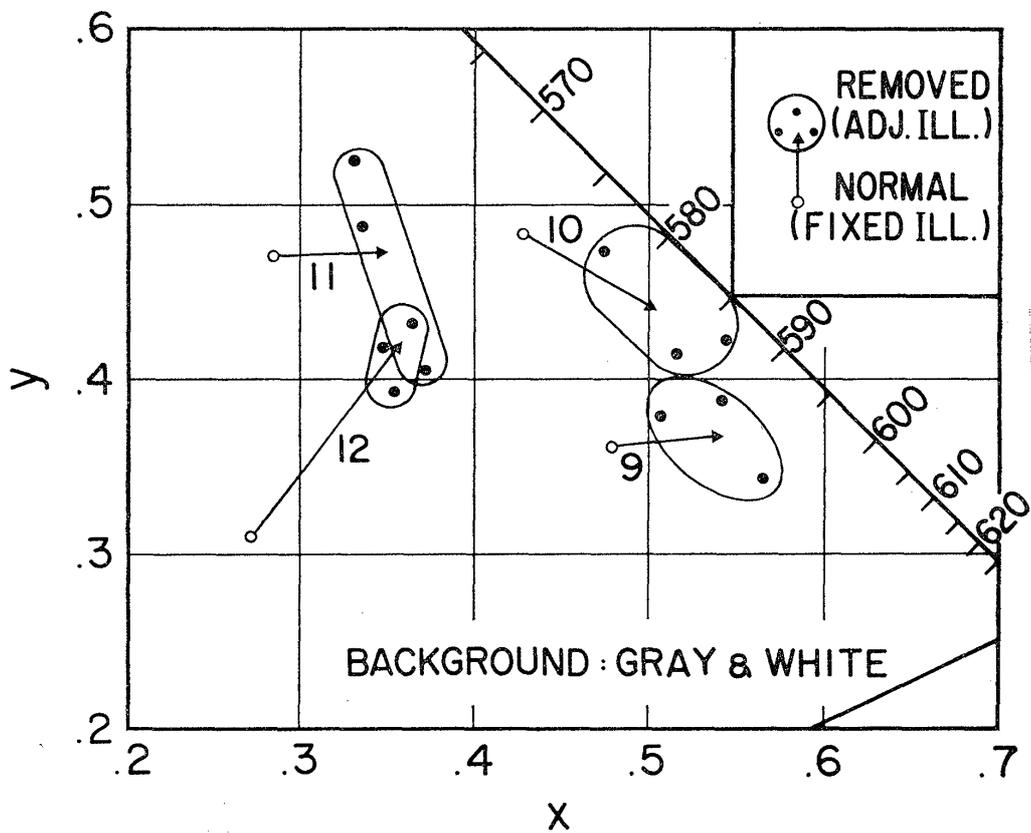


Fig. 4 白背景の N6 色紙上に提示した高彩度色票の等色結果

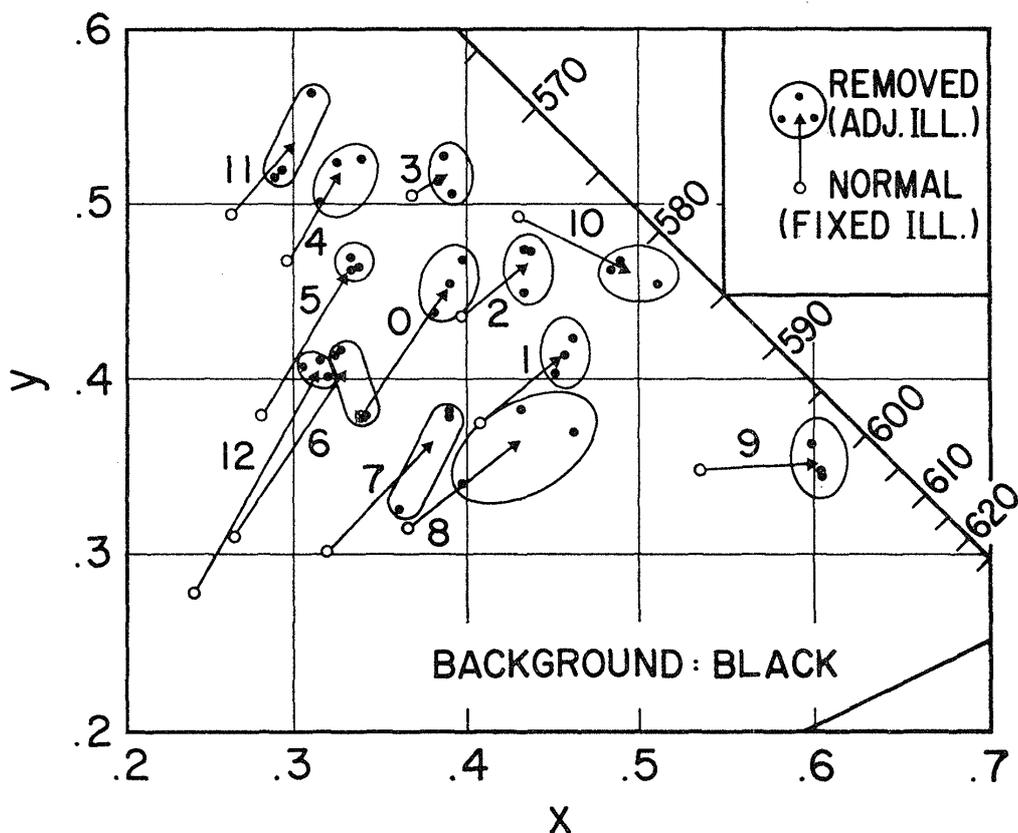


Fig. 5 黒背景上の各種色紙の等色結果

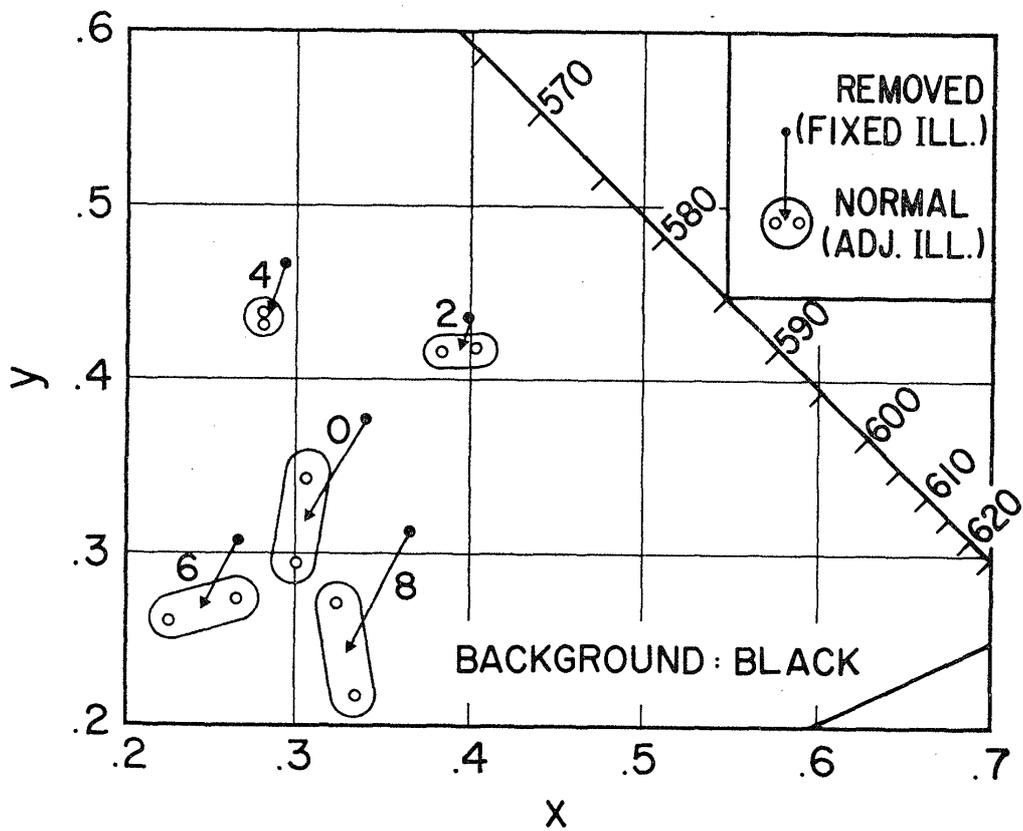


Fig. 6 非摘出眼側を可変とした黒背景上の中彩度色票の等色結果

増すことができなかつた。これまでの等色で右眼（摘出眼）の視野の色を変化させたときにはその像がぼけていたために、鮮明に見える左眼視野との等色は比較的容易であつたのに対して、この等色では左眼の表面テクスチャーまで見える視野の色を右眼のぼけた視野と等色させることに困難の原因があつたと思われる。

6. 摘出水晶体の分光透過率

以上のように両眼等色によって両眼の色感覚の差を定量測定した被験者の摘出水晶体についてその分光透過率の測定値があれば、視感測定された色感覚変化と、分光測色で計算される色刺激値変化とが直接に比較できる。しかし、手術の時点ではこのような実験を計画していなかつたので、被験者本人の摘出水晶体を保管して分光測定することは行なつていなかつた。そこでその後摘出手術を行なつた別の老人性白内障患者数名の摘出後2日以内生理的食塩水中に保存した水晶体の分光透過率を測定した。その結果を Fig. 7 に示す。この測定は積分球によって全拡散透過率を測定しているのので、拡散性の白内障水晶体についても分光透過特性を表していると考えられる。しかし上述のようにこの測定値は、被験者の摘出水晶体のものではないし、また仮に被験者のものが測定できていたにしても、摘出していない健全な眼の水晶体（これが等色実験の対象となつた）の着色の程度が摘出眼と同程度であるという保証はないので、参考データであるにすぎない。

このような事情はあるにせよ、等色実験の結果と水晶体の分光透過率による色刺激値変化とを比較することは興味がある。Fig. 8 は4種類の分光透過率 (Fig. 7) による色刺激値変化を点線で、Fig. 5 に示した平均等色結果の色感覚変化を実線で示している。この結果は次のようにまとめられる。

- (1) 全般に色感覚変化実測値と色刺激値変化計算値とは、少くとも色ずれの方向についてよく合っている。
- (2) 色ずれの大きさは、一般に色感覚変化実測値の方が小さい。
- (3) 上記の中でも、白、中彩度の赤、青緑、青及び高彩度の赤、黄、青に対する差は小さいが、中彩度の黄、黄緑、緑、紫、赤紫及び高彩度の緑に対する差が大きい。

この結果によって、水晶体摘出眼と非摘出眼との色覚差は主原因は水晶体の着色（黄変）によることは再確認される。ここで(2)の原因としては、摘出眼の分光測定を行なつた験体が等色実験を行なつた被験者よりも高齢であつて黄変がより進行していた可能性があることと、被験者のシリーズ(3)の黒背景による等色実験であつても若干の色順応効果が働いて色刺激値変化を補正したことがあると考えられる。しかし(3)のように試験色によって色ずれの大きさが変わることについては十分な説明はできない。

なお、Fig. 8 の実線 (Fig. 5) の色感覚変化が色温度変換フィルターによって生じていると仮定して、白色付

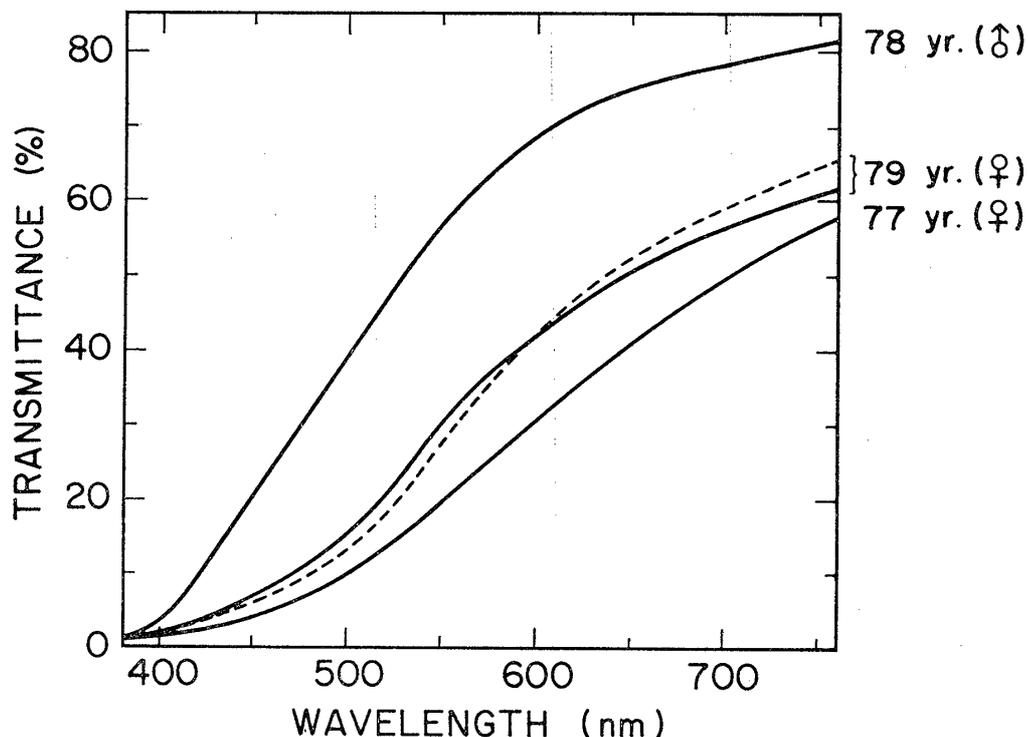


Fig. 7 老人性白内障の摘出水晶体の分光透過率

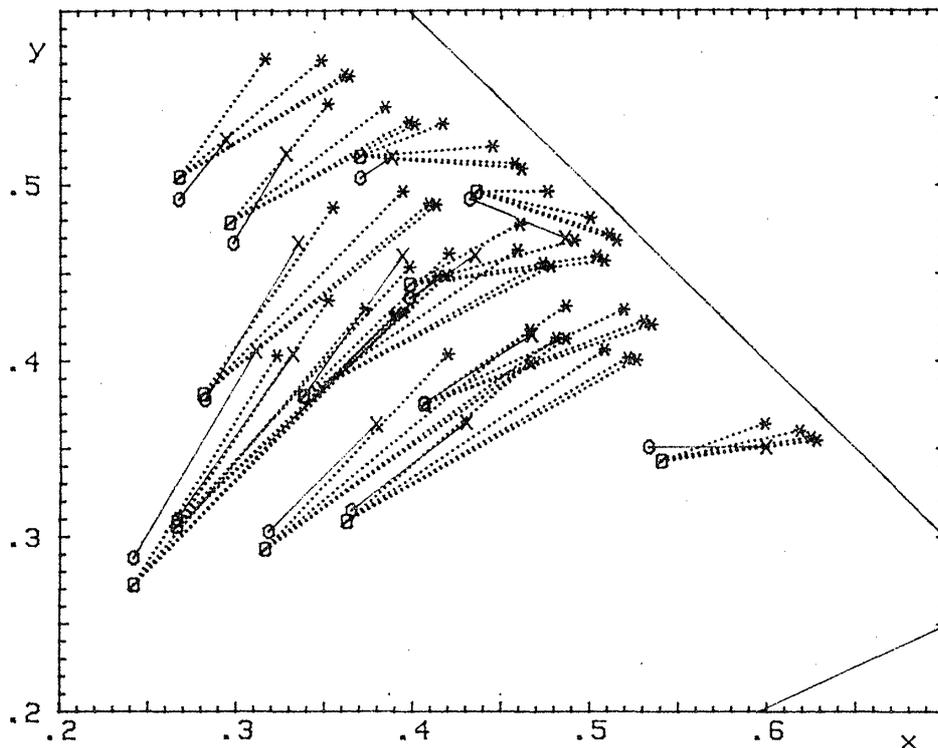


Fig. 8 等色による色感覚変化の測定値(実線)と水晶体分光透過率からの色刺激値変化の計算値(点線)の比較

近の等色値からその色温度変換フィルターの性能を推定すると、逆数相関色温度で約 60 MK^{-1} (従来のミレッドに相当する単位, JIS 色に関する用語¹¹⁾参照) の色温度変換能力であって、これは JIS の A3 程度の色温度変換フィルター¹²⁾に相当する。

7. 結論

唯一人の被験者ではあるが、水晶体摘出後の色覚の変化を、健常側と比較する両眼等色実験によって、種々の周囲視野条件で心理物理的に測定して、その結果を他の験体に対する物理測定結果とも比較した。その結果次のことが明らかになった。

- (1) 片眼水晶体摘出後の左右両眼の色覚差は、同一物体色を左右両眼の照明光の色を調節して等色する両眼視等色実験の方法によって定量計測ができる。
- (2) その両眼視等色の結果は、照明光に対する色順応が行なわれやすい白背景のときには変動が大きい、照明光への色順応が行なわれにくい黒背景のときには再現性が良い。
- (3) 上記の黒背景の場合の色覚変化の測定値は、水晶体の着色による色刺激値の変化によって大略は説明できて、その色変化に色温度変換(低下)フィルタの性質に似ている。
- (4) この黒背景の場合の色覚変化についても、色刺激値変化だけでは説明できない個々の色変化がある。

以上のように直接に実験から得られた結論に加えて、筆者等は年齢による水晶体着色の影響の大きさを再認識

した。これは今後の高齢化社会において色彩や照明について考えるときに見逃してはならないことであろう。水晶体の着色が大きい人であっても、多くの場合は色順応効果によって着色が少ない人と大差はない色感覚を得ていると想像されるが、それだけに照明光への色順応が行なわれやすい条件とそうでない場合とで、同じ照明光下の同じ物体色でも異なってみえることも考えられる。今後このような面の研究も行なわれることを期待する。

8. あとがき

この研究は計画的に行なったものではなくて、いわば自然発生的に連名者が能力、知識、材料を少しずつ持ち寄ったものである。従って全体としてのバランスに欠ける点はお許しを頂きたい。

本報告をまとめるにあたって文献の検索について特に愛知医科大学鈴木昭弘教授のご教示によるところが多かった。厚くお礼申し上げます。

文献6)の中で故金沢寿吉当会元会長が新理学士としてその研究を援助されたことを知り、改めて先輩への敬意を深めた。本論文を金沢先生の霊に捧げる。

参考文献

- 1) 中泉正徳: 邦人水晶体の色彩その年齢的变化並びに可視光線の吸収, 日眼会誌 30(1926)701-703
- 2) R. A. Weale: Light absorption by the lens of the human eye, *Opt. Acta* 1 (1954) 107-110
- 3) F. S. Said & R. A. Weale: The variation with

- age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens, *Gerontologia* **3** (1959) 213-223
- 4) E. A. Boettner & J. R. Wolter : Transmission of the ocular media, *Investig. Ophthalmol.* **1** (1962) 776-783
- 5) 宇治幸隆 : ヒト水晶体の可視光吸収が ERG に及ぼす影響について, 第1報水晶体の波長別吸収スペクトル, 日眼会誌 **79** (1975) 1154-1162
- 6) 前田太郎 : 無水晶体眼に於ける色覚に就て, 日眼会誌 **38** (1934) 1270-1304
- 7) W. D. Wright "Research in Normal and Defective Colour Vision", Henry Kimpton, London (1946)
- 8) K. H. Ruddock : The effect of age upon colour vision II. Change with age in light transmission of ocular media, *Vision Res.* **5** (1965) 47-58
- 9) R. Lakowski : Is the deterioration of colour discrimination with age due to lens or retinal change? *Farbe* **11** (1962) 69-86
- 10) R. D. Gunkel & P. Goras : Change in scotopic visibility thresholds with age, *Arch. Ophthalmol.* **69** (1963) 38-43
- 11) JIS Z 8105-1982 : 色に関する用語
- 12) JIS B 7125-1957 : 写真用色温度変換フィルター
(受付 昭和58年8月16日)