

遮光レンズ装用による視機能へ  
与える影響の研究

(Study of influence on visual function by absorptive lenses)

2020 年 3 月

長 尾 祥 奈

山口大学大学院創成科学研究科

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 遮光レンズが視機能に影響を与えると予想される指標	2
1.3 研究の目的と論文の構成	3
第2章 指標測定方法の検討	5
2.1 はじめに	5
2.2 指標測定方法検討の実験方法	5
2.3 固視変動、瞳孔径への影響の結果	8
2.4 指標測定方法の検討の考察	13
第3章 遮光レンズの色による固視安定性への影響	14
3.1 はじめに	14
3.2 固視安定性への影響に関する実験	15
3.2.1 実験対象	15
3.2.2 実験方法	15
3.2.3 解析方法	17
3.3 固視安定性への影響の検討の結果	18
3.4 固視安定性への影響の考察	24
3.4.1 測定値の信頼性	24
3.4.2 固視に影響を及ぼす要因	24
3.5 固視安定性への影響のまとめ	26
第4章 遮光レンズが固視へ及ぼす年齢差の影響	27
4.1 はじめに	27
4.2 実験計画	28
4.2.1 実験対象	28
4.2.2 実験方法	28
4.2.3 解析方法	30
4.3 瞳孔径、固視変動の結果	31
4.3.1 固視変動の比較	31
4.3.2 瞳孔径の比較	32
4.3.3 視感透過率が近似で色系統の異なる2色の比較と相関分析	33

<u>4.4 年齢差が与える影響に関する考察</u> .....	34
<u>4.5 年齢差の影響のまとめ</u> .....	35
<u>第5章 遮光レンズの瞳孔径と固視に対する色系統別の影響</u> .....	36
<u>5.1 はじめに</u> .....	36
<u>5.2 対象と方法</u> .....	37
<u>5.2.1 対象</u> .....	37
<u>5.2.2 実験方法</u> .....	37
<u>5.2.3 解析方法</u> .....	39
<u>5.3 色系統に着目した解析結果</u> .....	40
<u>5.3.1 固視変動の比較</u> .....	40
<u>5.3.2 瞳孔径の比較</u> .....	42
<u>5.2.3 相関分析の比較</u> .....	43
<u>5.4 瞳孔径と固視に対する色系統別の影響の考察</u> .....	44
<u>5.5 色系統別の影響のまとめ</u> .....	45
<u>第6章 結論</u> .....	46
<u>参考文献</u> .....	48

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

近年、急激な高齢化に伴い、低視力であるロービジョン人口が増加している。ロービジョンとなる原因疾患は様々であるが、ロービジョン者には様々な眼疾患が起こり、羞明の訴えが多い傾向がある。羞明の要因は、先天性または外傷による後天的な無虹彩などによる眼内への入射光増加のほか、前眼部疾患や白内障など中間透光体の混濁に伴う散乱光など多岐にわたり、その発生機序が解明されていないものも多い<sup>1)</sup>。羞明に対しての治療法は確立されていない。このため羞明の軽減には、主な原因となる短波長光を特異的に遮断する遮光眼鏡が有効といわれている<sup>2)</sup>。

遮光眼鏡とは、まぶしさの要因となる500nm以下の短波長光を効果的に遮断し、それ以外の光を出来るだけ多く通すよう作られた特殊カラーフィルターレンズの総称である。カラーバリエーションは豊富にあるがその一部を提示する(図1)。



図1.市販されている遮光レンズのカラーバリエーションの一部

現在、本邦では主に東海光学株式会社と HOYA 株式会社により一般市販されている。市販されている色は各社とも年々増え、黄色系、緑系だけでなく、様々な色展開がされ、カラーバリエーションは年々増加している。

カラーバリエーションが増加しているにも関わらず、臨床における遮光レンズの選定方法に関する問題点を指摘することができる。それは、色の選択肢が多岐にわたるにも関わらず、客観的な方法が報告されていないという問題である。羞明の訴えに応じて主に視感透過率を目安に色の濃度を選択することが多いが、主に使用する患者自身の自覚に頼っているのが現状である。南ら<sup>3)</sup>は大阪医科大学における遮光眼鏡の処方の実際について報告している。また、石井ら<sup>4)</sup>は遮光レンズ装用によるコントラスト感度に着目した処方を検討した報告を行っている。しかしながら、患者によっては見え方の改善よりも色の好みや外観を優先させる場合もあるため、遮光眼鏡の購入後に患者が期待する改善を満足に得られずにほとんど使われないケースもある。また、羞明がどの程度改善しているか、また視機能がどのように変化しているかに着目した報告も少ない。南ら<sup>3)</sup>も色に対する抵抗もあり、外見的な不満もみられたと報告している。

さらに、乳幼児などの自覚的応答が困難な患者に遮光眼鏡処方を行う際には、開瞼の可否や嫌悪反応の観察などで色を選択するしか方法がない<sup>5)</sup>。また、ロービジョン者においても低視力のため、自覚的応答が困難な場合がみられる。さらに近年の急速な高齢化に伴い認知機能の低下した症例においても遮光レンズを処方する機会が増える可能性が考えられる。このような場合には自覚的応答で装用テストを施行し、処方を行うことは困難を極めると推察できる。

## 1.2 遮光レンズが視機能に与える影響を評価するための指標

500nm 以下の短波長光の大部分を遮断する Yellow 系レンズの装用は、コントラスト感度を向上させる効果があることが報告されている<sup>6)</sup>。一方で、Yellow 系レンズは、瞳孔を散大させたとの報告がある<sup>7)</sup>。これは、Yellow 系レンズで遮断される波長域に縮瞳の誘発と持続に関与する内因性光感受性網膜神経節細胞活性の最適波長(470nm)<sup>8)</sup>が含まれているためと推測できる。遮光レンズには様々な色系統があり、視感透過率や短波長光透過率はレンズの色により異なるため、それらによって瞳孔へ与える影響にも差を生じる可能性がある。遮光レンズが視機能に与える影響を考えると、視感透過率だけでなく短波長光透過率にも着目し、それらに伴う瞳孔径の変化が重要な指標になると考えられる。

弱視、斜視症例における患眼において、固視の安定性と視力には強い相関を認めるとの報告がある<sup>9)</sup>。弱視眼で固視の不安定さが大きいといわれており、視機能との相関が認められる。このことから固視の安定性は、視機能に与える影響の指標として有用ではないかと考える。

### 1.3 研究の目的と論文の構成

今後は急速な高齢化に伴い、自覚的応答が困難な症例がより増加する可能性が考えられる。また客観的な方法を検討することにより、より効果的な処方出来る可能性が考えられるため、遮光レンズの色が視機能へ与える影響を調べ、客観的な選択方法を検討することを本研究の目的とし、研究を施行した。

遮光眼鏡は、室内用・屋外用の2種類で処方されることが一般的であるが、本研究では室内用、特に使用機会が年々増加していると考えられるパソコンなどモニターを見る環境下により検討を行った。ロービジョン者においてもタブレット端末やスマートフォンなどを使用することは推奨され始めており、今後使用機会がより増えることが考えられる。

本論文の構成に関しては図2に示した通りである。まず実験を始めるにあたり、実験環境の構築を行い、実験方法の検討、検討項目の検討を行った。過去の報告<sup>9)</sup>から弱視症例において固視の安定性の低下が見られるということがある。このため、固視安定性を視機能の評価に使用できる可能性を考え、検討項目としての適切さを検討した。さらに、遮光レンズ装用により、瞳孔径が変化することも考えられる。瞳孔が散大することにより視機能が低下することから瞳孔径についても検討を行うこととし、2つの因子の測定方法、精度を含めた実験方法を実験1で構築した。この実験1について第2章で述べる。

実験2では、遮光レンズの色系統は様々であるが、主に選択されているGreen系とYellow系に着目し、遮光レンズの色の与える影響に関して検討を行った。色系統によりカットしている波長が異なり、視感透過率が同等であったとしてもコントラスト感度以外の影響が異なる<sup>6)</sup>可能性も考えた。瞳孔径に影響を与える470nm<sup>8)</sup>が与える影響も大きいと考えたためこれを検討するため実験を施行した。この内容については第3章で述べる。

瞳孔径は年齢により差が見られることが報告されている<sup>10)</sup>。このため、縮瞳傾向である高齢者では遮光レンズが瞳孔径へ与える可能性は少ないのではないかと考え、実

験 3 を構築した。若年者ほど瞳孔径へ影響が大きく、その結果固視変動へ与える影響  
が大きい可能性を考えた実験を施行した。この内容については第 4 章で述べる。

さらに、実験 2 では Green 系と Yellow 系のみ検討したが最近はカラーバリエーシ  
ョンが増え、色系統の選択肢が増えていることに着目した。色系統により視機能への  
影響は異なる可能性を考え、実験 4 を施行した。この内容については第 5 章で述べる。

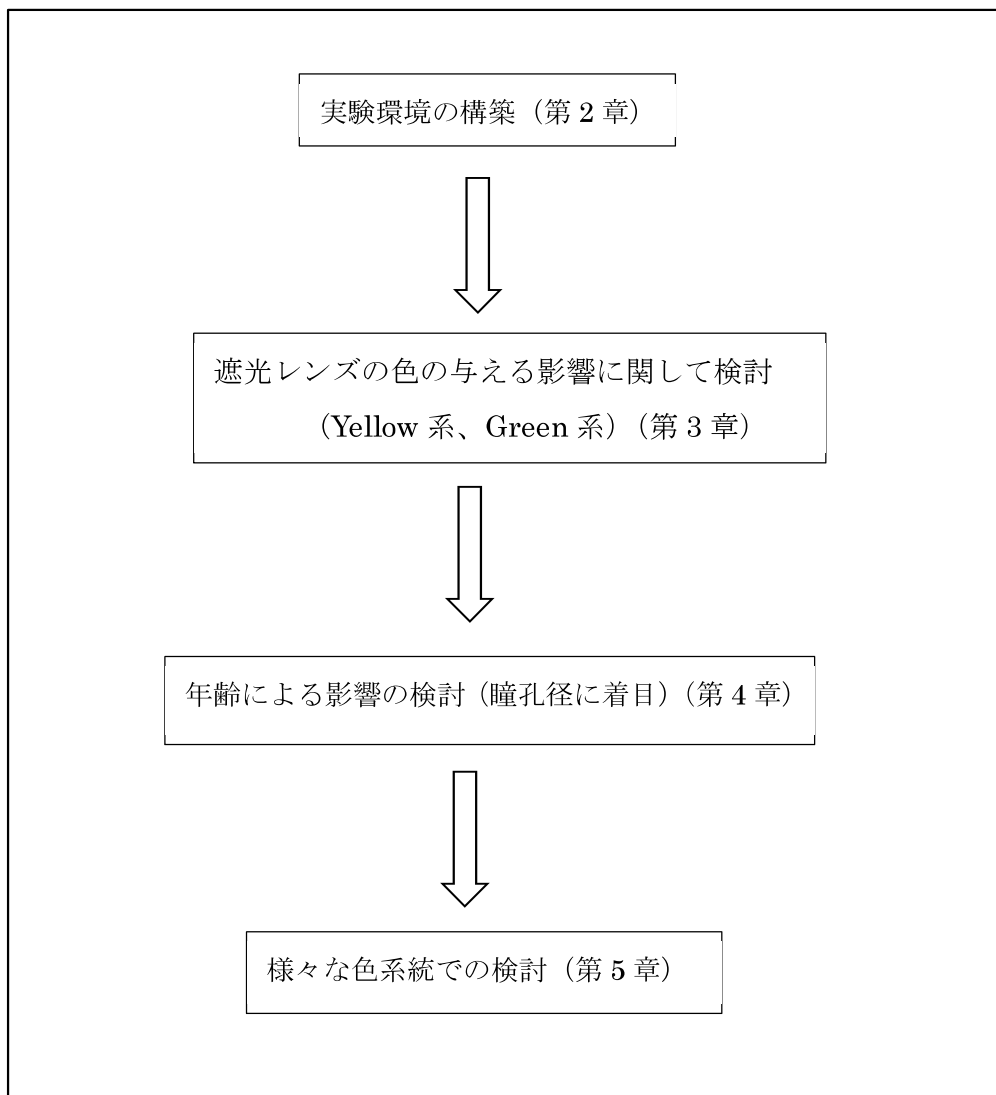


図 2 本論文の構成について

## 第 2 章 指標測定方法の検討

### 2.1 実験目的

第 1 章は実験の評価項目として遮光レンズが視機能に影響を与えると予想される指標として瞳孔径や固視変動をあげた。本実験の目的は、それらの評価をどのように行うかについての検討を行うことである。実験環境の構築と、実験視標、解析方法を設定するため、実験を施行した。感透過率の異なる遮光レンズを用い、選択する色や視感透過率の違いによって固視の安定性や瞳孔径への影響が見られるかを検討した。

### 2.2 指標測定方法検討の実験方法

対象は、矯正視力 1.0 以上であり、屈折異常以外に眼科的疾患のない 11 例（男性 7 例、女性 4 例）、平均年齢は  $24.9 \pm 3.1$  歳（22~33 歳）である。実験開始前に調節力の影響を考慮し、眼前 60cm にて被験者が視標を明視できることを確認し、眼鏡レンズのコーティングの影響を考え、裸眼またはコンタクトレンズによる屈折矯正下にて実験を施行した。

固視の動きと瞳孔径を視線追跡装置 TobiiTX300X（Tobii 社製、スウェーデン）にて測定した。この装置は、近赤外線カメラを内蔵しており、瞳孔と角膜からの反射により視線の動きを記録する。

実験は 23 インチ LCD モニター（1980×1080 ピクセル）を使用し、両眼開放下で視距離 60cm にて施行した。このモニターは LED 光源を使用しているが、その分光分布を図 3 に示す。

プログラミング言語である Processing(Ver3.0)にて視角 0.275 度の「X」視標を作成した。この視標の初期設定のコントラストを 100%として、そこから 45%、30%、15%とコントラストを低下させた計 4 種類の視標をモニターの中央部に提示し、固視目標とした。

遮光レンズには、色系統と視感透過率を考慮し、東海光学社製 STG シリーズの SP、NL、YG、FR、AC、YL、OY、RO の 8 種類(図 1)を用い、遮光レンズ非装用状態を control とした。それぞれ遮光レンズの視感透過率、470nm 透過率を、表 1 に示す。視感透過率、470nm の波長域の透過率を公開されている各レンズの分光透過曲線から確認した。



表 1 各遮光レンズの視感透過率、470nm 透過率

	AC	SP	YL	OY	NL	YG	RO	FR
視感透過率(%)	89	78	66	53	50	38	28	20
470nm透過率(%)	55	60	0	0	47	0	0	10

実験中、遮光レンズを眼前 12mm に固定し、これらの条件下で測定頻度 300Hz にて、17 秒間の視線の動き、瞳孔径を計測した。視標提示順序と遮光レンズの色の使用順序に関しては、瞳孔径、固視変動への影響を考慮し、無作為に選択して施行した。視線の動きは、モニター上の視線位置として座標で表し、「X」視標を注視している間の視線位置を固視点と定義した。

解析には測定開始 2 秒経過後からの 15 秒間のデータを使用し、瞬目のデータは除いた。実験では両眼のデータを測定したが、解析には優位眼のデータのみを用いた。

固視の動きは以下のように算出した。指標観察中の 15 秒間にモニター中の固視点の位置をピクセル座標として測定し、指標を提示したモニター中央からのずれに対し観察距離を基に視角に換算して固視点の座標とした。次に、15 秒間の平均座標（視角）を求め、これを「固視中心」( $A_x, A_y$ ) とした。そして、時刻  $t$  の固視点の座標（視角）が  $(x(t), y(t))$  のとき、式(1)で固視中心からの固視点の距離(以下  $D(t)$ )を算出した。

$$D(t) = \sqrt{[x(t) - A_x]^2 + [y(t) - A_y]^2} \quad (1)$$

そして、式(2)のように  $D(t)$  の 15 秒間における平均値を「固視変動」 $J$  とした。

$$J = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M D(i\Delta t) \quad (2)$$

ここで、 $M$  はサンプル数 4500 であり、 $\Delta t$  は 1/300[s] である。

また、瞳孔径に関しては、15 秒間の平均瞳孔径を算出し使用した。

各コントラスト条件での固視変動と瞳孔径について Friedman 検定を行った。また、瞳孔径と視感透過率の相関を Spearman 順位相関係数にて調べた。なお統計学的検討には、SPSS 22.0(IBM)を使用し、有意水準 5%未満を統計学的有意差ありとした。

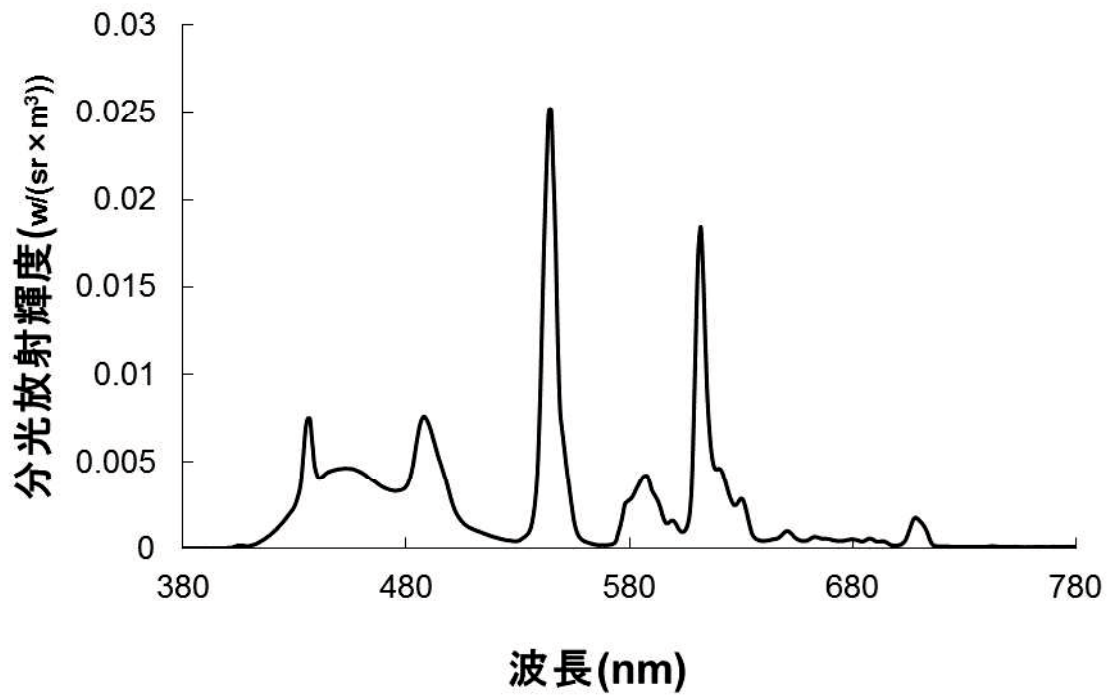


図 3 実験に使用したモニターの分光分布

## 2.3 固視変動、瞳孔径への影響の結果

本実験での全被験者の control、遮光レンズの色ごとの固視変動を図 4(a), 4(b)に示す。各グラフの色名横の ( ) 内は視感透過率を示している。縦軸を固視変動 (度) とし、箱ひげ図の箱の上下端はそれぞれ 75%、25%点のデータ値、内部の線は中央値、ひげの上端は最大値、下端は最小値を示す。固視に関して、全体的に視感透過率が高くなるほど変動は大きくなる傾向があり ( $p < 0.01$ )、視感透過率が最も低い FR で固視は最も不安定となり、被験者により固視変動に大きな差がみられた。視標コントラストによる固視変動の量的変化に関しては、どの色においても統計学的有意差は認めなかったが、使用したレンズ色の中で視感透過率が比較的高い YL では、コントラスト低下に伴い固視の安定性が低下する傾向がみられた ( $p = 0.07$ )。

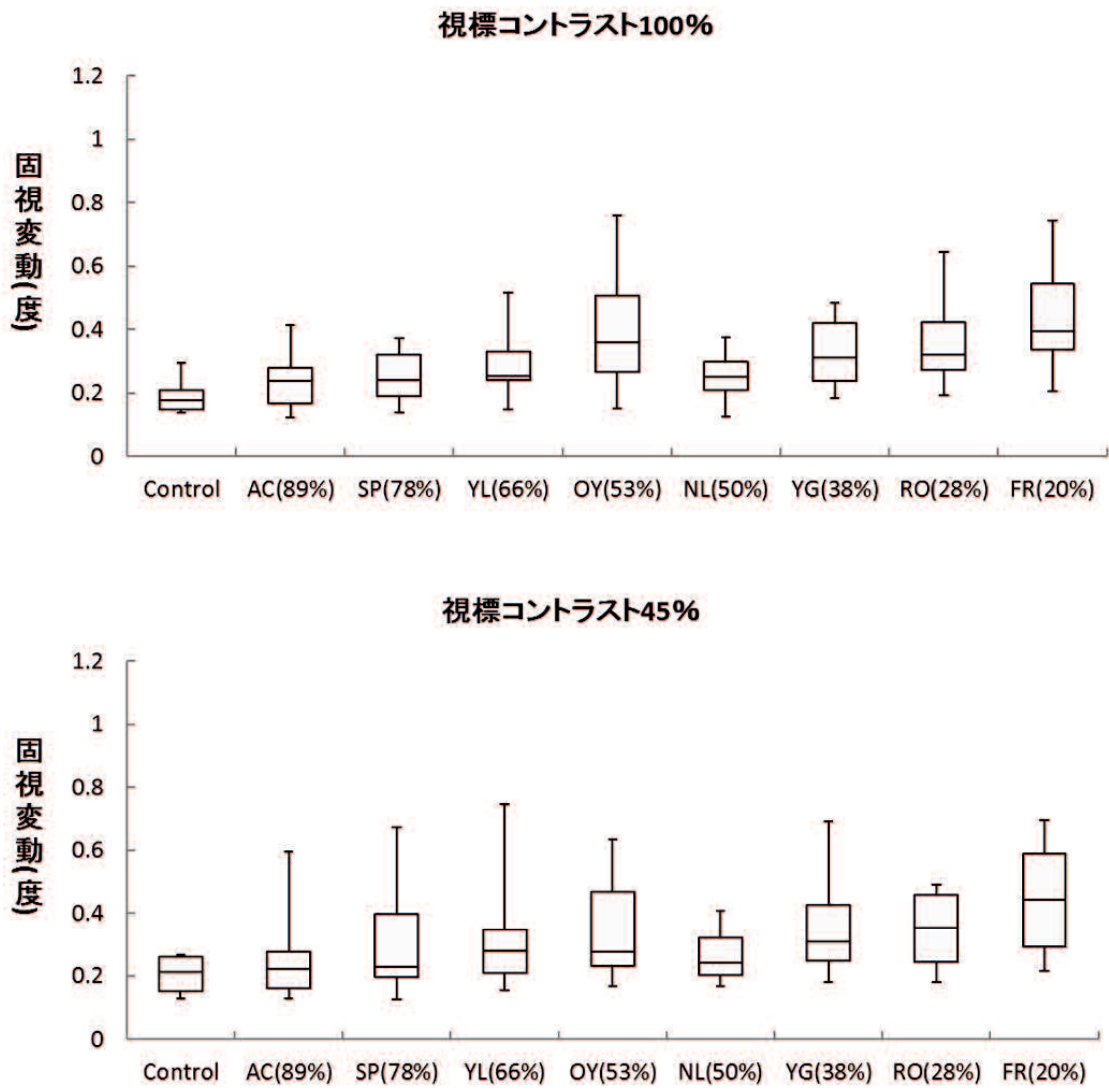


図 4(a) 遮光レンズ装用による固視変動の比較(1)

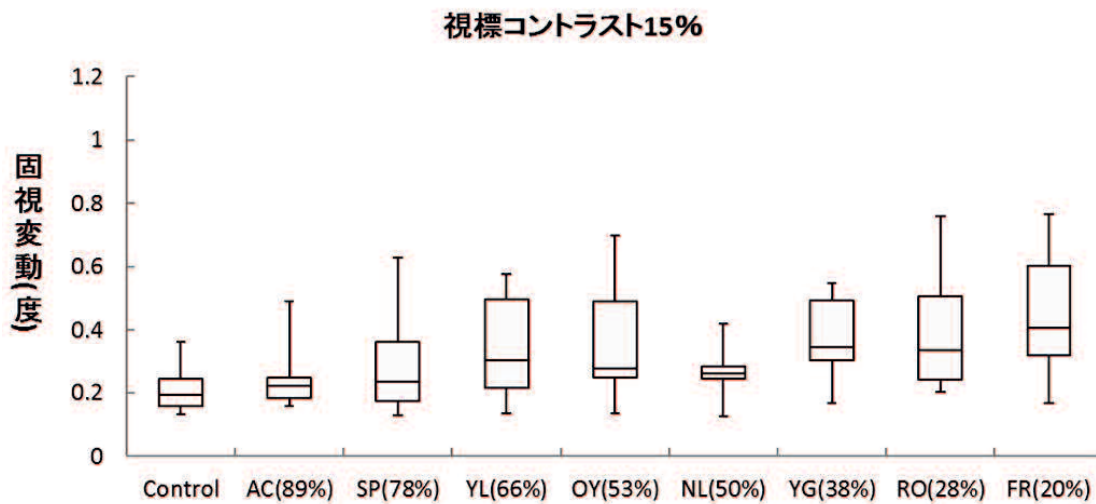
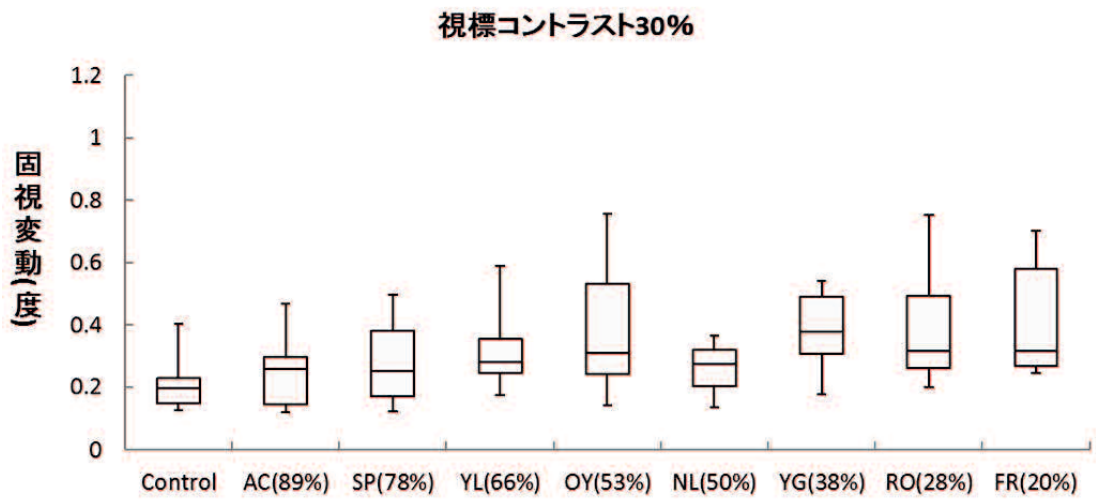


図 4(b) 遮光レンズ装用による固視変動の比較(2)

本実験での全被験者の遮光レンズ色別の瞳孔径を図 5(a), 5(b)に示す。各グラフの色名横の ( ) 内は視感透過率を示している。縦軸を固視変動 (度) とし、箱ひげ図の箱の上下端はそれぞれ 75%、25%点のデータ値、内部の線は中央値、ひげの上端は最大値、下端は最小値を示す。レンズ色により瞳孔径に有意な差を認め( $p < 0.01$ )、固視変動と同様に視感透過率の低い FR で最も瞳孔径が大きかった。平均瞳孔径が 3mm 以上となっていたレンズに着目すると、500nm 以下の波長域の光が高度に遮断されていた。

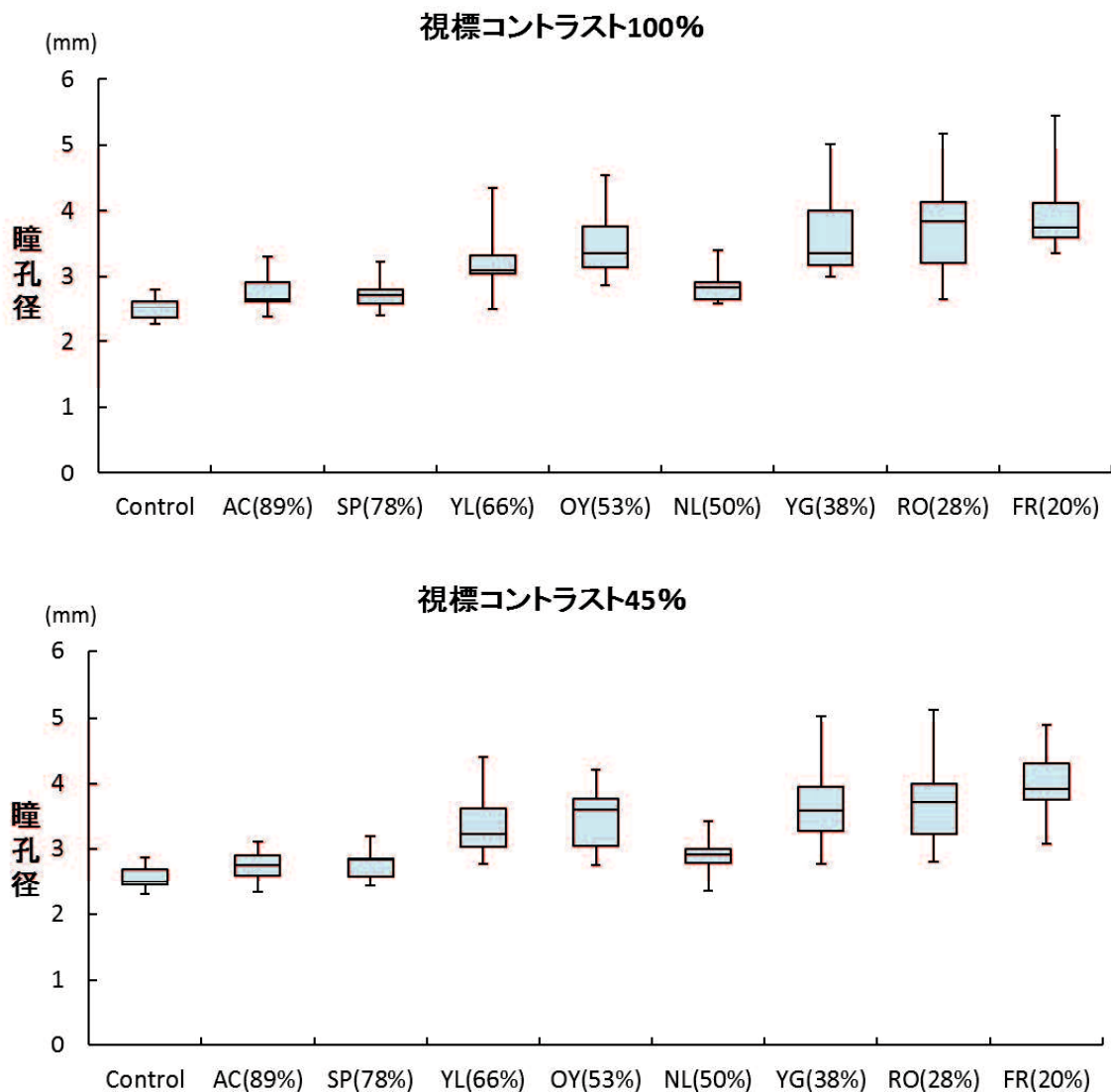


図 5(a) 遮光レンズ装用による瞳孔径の比較(1)

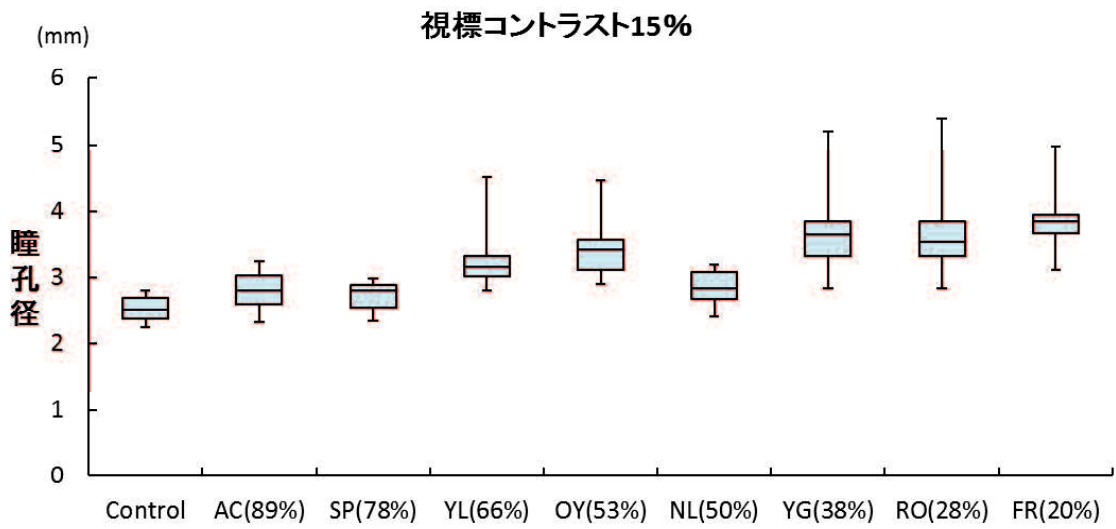
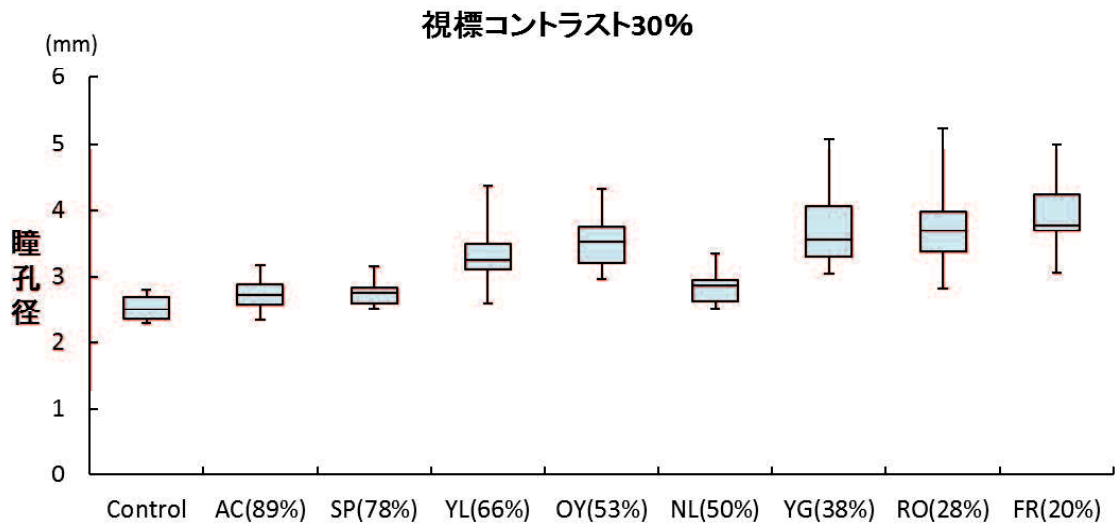


図 5(b) 遮光レンズ装用による瞳孔径の比較(2)

## 2.4 指標測定方法の検討の考察

今回の検討結果から、選択した遮光レンズの色により瞳孔径に有意な差を認めた。視感透過率と瞳孔径には強い負の相関がみられ、視感透過率が低くなるほど瞳孔が散大していた。瞳孔系と視感透過率には強い相関が見られ、瞳孔径と視感透過率が有意に影響し、瞳孔径が大きくなると固視が不安定になる傾向がみられた。瞳孔が散大することにより収差が増加するが、これが固視変動の増大を引き起こした可能性が考えられる。本検討において、遮光レンズの視感透過率が高くなると、瞳孔径と固視変動ともに個人差が大きくなり、ばらつきが見られることがわかった。瞳孔径には個人差が大きく、瞳孔が大きくなることにより収差も大きくなり、その結果固視変動が大きくなる可能性があり、瞳孔径の個人差がばらつきを誘発している可能性がある。このことを踏まえた解析が今後は必要であると考え。今後より詳細な検討が必要であるということが明らかとなった。このため、本研究では固視変動、瞳孔径に着目し検討を行うこととした。



## 第3章 遮光レンズの色による固視安定性への影響

### 3.1 実験の目的

臨床における遮光眼鏡の選定は、色の選択が多岐にわたるにも関わらず、患者自身の自覚に頼らざるを得ないのが現状である。そして、羞明の訴えに応じて主に視感透過率を目安に色の濃度を選択している場合も多い。このため患者によっては見え方の改善よりも色の好みや外観を優先させる場合もあるため、遮光眼鏡の購入後に患者が期待する改善を満足に得られずにほとんど使われないケースも経験する。また、乳幼児など自己応答が難しい患者に処方する際は、他覚的に選択する方法がとられている<sup>5)</sup>。これらの色選択方法では日常生活の視環境において患者の視機能に最も適切か否かを他覚的に推量し、選択することは難しいことから、遮光眼鏡を一定期間貸し出し、実生活での使用感を確認したうえで処方することが望ましい。しかし遮光眼鏡の貸し出しは施設によって困難な場合もあり、また一度に多種類のレンズを貸し出すことも実質的に難しい。以上の点からも遮光レンズ装用による視機能への影響をエビデンスに基づいて考慮し、効率よく患者の視機能の状態に応じた色選択をする方法を検討する必要がある。

このような遮光眼鏡を選定する際の客観的な材料とすべく、本研究では遮光レンズ装用による固視の安定性と瞳孔径への影響に注目し、2種類の遮光レンズの色系統（Yellow系、Green系）で視感透過率の近似した組み合わせでどのような差がみられるかについて比較検討した。

実験仮説1は、第2章で遮光レンズの視感透過率が低下するほど固視安定性と瞳孔径は大きくなるということが明らかとなったが、視感透過率が同等の場合は瞳孔径に影響を与える470nm透過率が影響する可能性があるとした。

視感透過率が同等であっても色系統によりカットしている波長が異なり、コントラスト感度以外の影響が異なる<sup>6)</sup>可能性を考え、本実験では視感透過率が同等であるが、色系統が異なる2系統を用いた。

実験仮説1は、以下の項目をたてた。

同様な視感透過率であるレンズで比較を行うと、470nmの透過率が高いレンズが瞳孔径に与える影響が小さくなり、その結果固視変動も小さく、視機能への影響が少な

い結果になる。

この仮説を検討するため、本実験を施行した。

## 3.2 固視安定性への影響に関する実験

### 3.2.1 実験対象

被験者は、矯正視力 1.0 以上、屈折異常以外に眼疾患のない平均年齢  $22.6 \pm 1.6$  才 (21~27 才) の 11 名 (男性 8 名、女性 3 名) で、眼前 60cm にて視標が明視できることを確認した。

### 3.2.2 実験方法

実験は眼鏡レンズのコーティングの影響を考え、裸眼またはソフトコンタクトレンズによる屈折矯正下にて施行した。遮光レンズは視感透過率と色系統による差を検討するため、東海光学社製 STG シリーズのうち、500nm 以下の短波長光の大部分を遮断する Yellow 系レンズ (YL、OY、RO) と短波長光を部分的に透過する Green 系レンズ (SP、NL、FR) の計 6 種類について検討した。なお遮光レンズ非装用状態を control とした。

被験者の視線の動きと瞳孔径を観察する手段として、内蔵している近赤外線カメラにより瞳孔と角膜からの反射を記録し、視線の動きを連続的に捉えることのできる視線追跡装置 TobiiTX300X (Tobii 社製、スウェーデン) を使用した。実験はこの装置で最も測定誤差の小さい 60cm の視距離に視標提示用の 24 インチ LCD モニター (1980×1080 ピクセル) を設置し、照度 600lx の条件下で両眼開放にて施行した。

実験に使用する視標については、単純な静的視標では固視動揺を非特異的に増大させる可能性があるため、固視刺激を強化する目的で一定の間隔で切れ目の方向の変化を加えたランドルト環を採用した。プログラミング言語 processing (Ver3.0) を用いて視力 0.3 相当のランドルト環視標 (外径 0.28 度、切れ目の視角 0.06 度) を作成した。視標コントラストに関しては、モノクロ 8bit256 段階のうち 0 を使用したものを 100%、179 を使用したものをコントラスト 30% と本実験では定義し、検討に用いた (視標背

景輝度：235.36cd/m<sup>2</sup>、視標輝度：100%群=8.61 cd/m<sup>2</sup>、30%群=90.46 cd/m<sup>2</sup>。

被験者の眼前に遮光レンズを装着後、視線追跡装置のキャリブレーションを行い、正確に測定が可能であることを確認したうえで実験を開始した。実験中、モニターの中央部にランドルト環視標を提示時間3秒で間隔を置かずに5回切れ目の方向を変えて連続的に計15秒間提示した。被験者にランドルト環の切れ目の方向を回答するよう指示するとともに、視標提示中の視線の動きを300Hzの測定頻度で計測し、同時に瞳孔径も測定した。

視標提示順序、遮光レンズの色の使用順序に関しては、順応による瞳孔径、疲労に伴う固視変動への影響を考慮し、無作為に選択して施行した。視線の動きは記録された角膜反射光から算出された画面上の視線の位置をピクセル座標で出力し、これをその時点での「固視点」とした。

### 3.2.3 解析方法

実験では両眼のデータを測定したが、解析には測定中の瞬目の動きを除いた優位眼のデータのみを用いた。なお優位眼は Hole in Card 法にて確認した。解析方法に関しては第 2 章と同様である。

各視標コントラスト条件での固視変動、瞳孔径について、Friedman 検定にて比較を行った。さらに視感透過率の近似する Green 系と Yellow 系の 3 つの組み合わせ (SP と YL、NL と OY、FR と RO) での各被験者の固視変動と瞳孔径を Wilcoxon 符号付き順位検定により比較した。

Green 系と Yellow 系の大きな違いは 500nm 以下の短波長光透過率にあるが、色系による差を比較する材料として、縮瞳に関与するとされる 470nm の波長域<sup>1)</sup>の透過率を公開されている各レンズの分光透過曲線から確認した。

Spearman 順位相関係数を用いて、固視変動に影響を与える要因として考えられる瞳孔径、視感透過率、470nm 透過率の固視変動との相関を調べるとともに、視感透過率、470nm 透過率の瞳孔径との相関を調べた。

統計学的検討には SPSS 22.0(IBM)を使用し、有意水準 5%未満を統計学的有意差ありとした。

### 3.3 固視安定性への影響に関する実験結果

今回の検討での全被験者の固視変動の範囲は全体で 0.15～1.15 度、瞳孔径は 2.38～5.15mm であった。なお全実験でのランドルト環の正答率は 100%であった。実験中の固視の動態の例として、被験者 1 名の control、NL、OY の条件での固視の全測定点をプロットしたグラフを図 6 に示す。

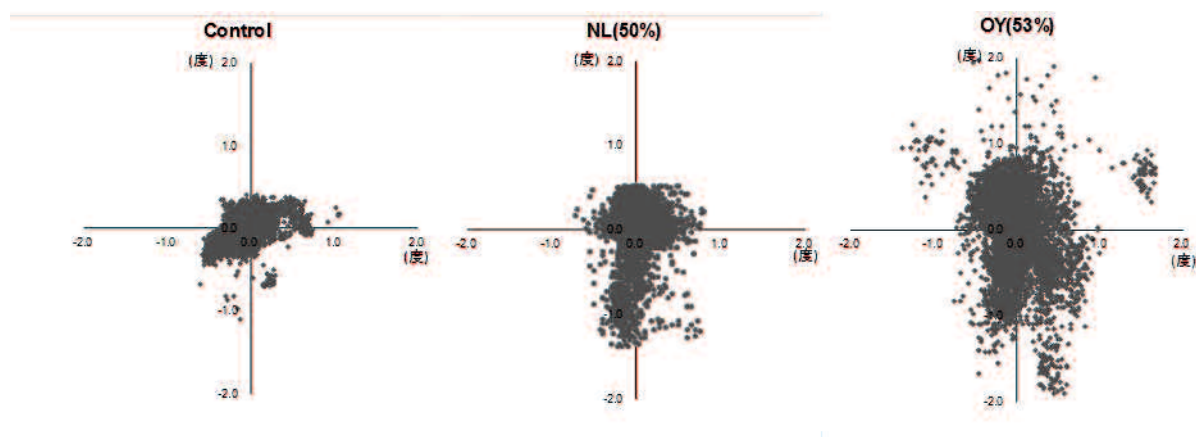


図 6 実験中の固視点の全測定結果の一例

本実験での全被験者の control と遮光レンズの色別の固視変動の結果を表 2、近似した視感透過率の各色系統の組み合わせでの固視変動の比較結果を図 7 に示す。遮光レンズの色により固視変動に有意な差を認め( $p<0.01$ )、全被験者で固視変動の平均値は control で最も小さく、RO で最も大きかった。100%群の FR と RO での比較( $p=0.15$ )を除き、Green 系が Yellow 系に比して固視変動が有意に小さかった( $p<0.05$ )。視感透過率が低いほど個人差が大きく、ばらつきが確認された。

全被験者の control と遮光レンズ別の瞳孔径の結果を表 3、近似した視感透過率の各色系統の組み合わせでの瞳孔径の比較結果を図 8 に示す。一実験中の瞳孔径の変動幅は、最も瞳孔径が小さかった被験者で 0.32mm、大きかった被験者で 1.90mm であり、平均瞳孔径が 3.5mm 以上の場合は変動幅が 1.00mm を超える結果であった。瞳孔径は遮光レンズの色により有意な差を認め( $p<0.01$ )、全被験者で平均瞳孔径は control で最も小さく、RO で最も大きかった。視感透過率 50%以上の SP と YL、NL と OY

での比較では Green 系で瞳孔径が有意に小さかったが ( $p<0.01$ )、視感透過率の低い FR と RO では有意差を認めなかった。

視標コントラスト別の比較では、検討した全てのレンズ条件で固視変動、瞳孔径で有意差を認めなかった。

固視に影響を及ぼすと考えられる要因を検討するため、固視変動と各因子の相関を比較した結果を表 4 に示す。今回検討した因子のうち、瞳孔径が固視変動と最も強い正の相関を示した。視感透過率と 470nm の短波長光透過率はいずれも瞳孔径と負の相関を示し、両者に大きな差を認めなかったが、これらと固視変動との間には 470nm 透過率で視感透過率よりも強い負の相関を認めた。

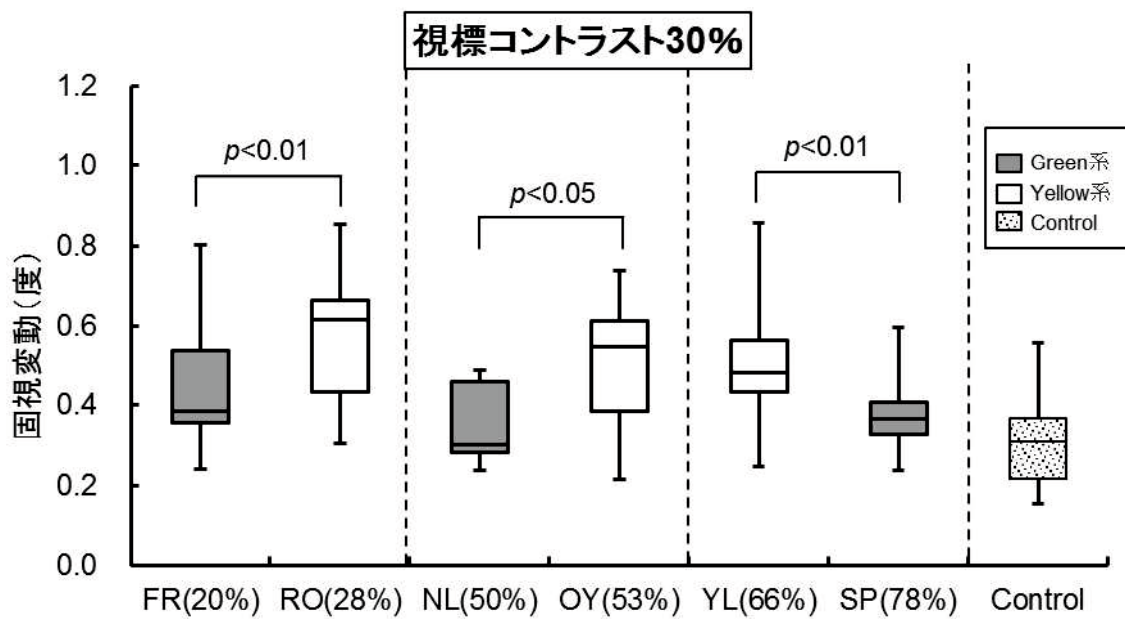
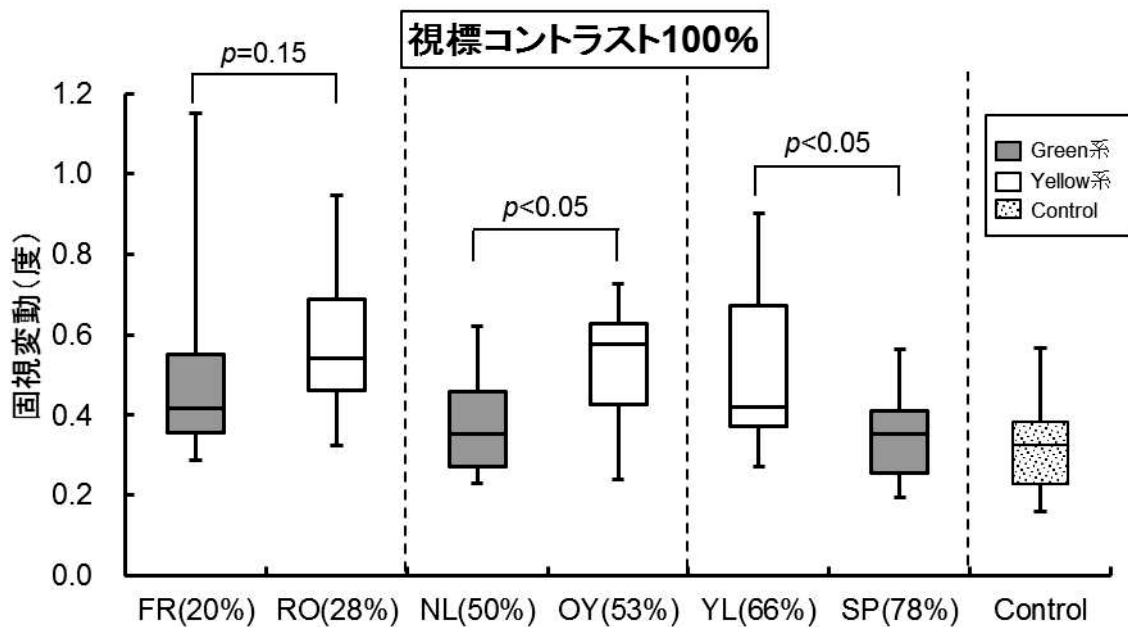


図7 遮光レンズ装用による固視変動の比較

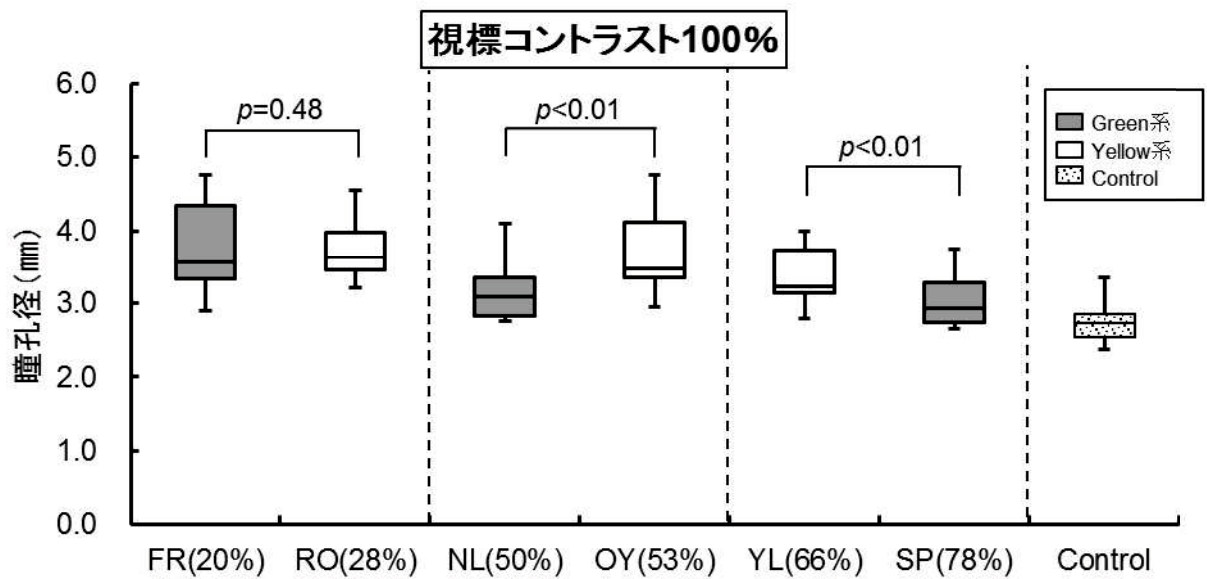
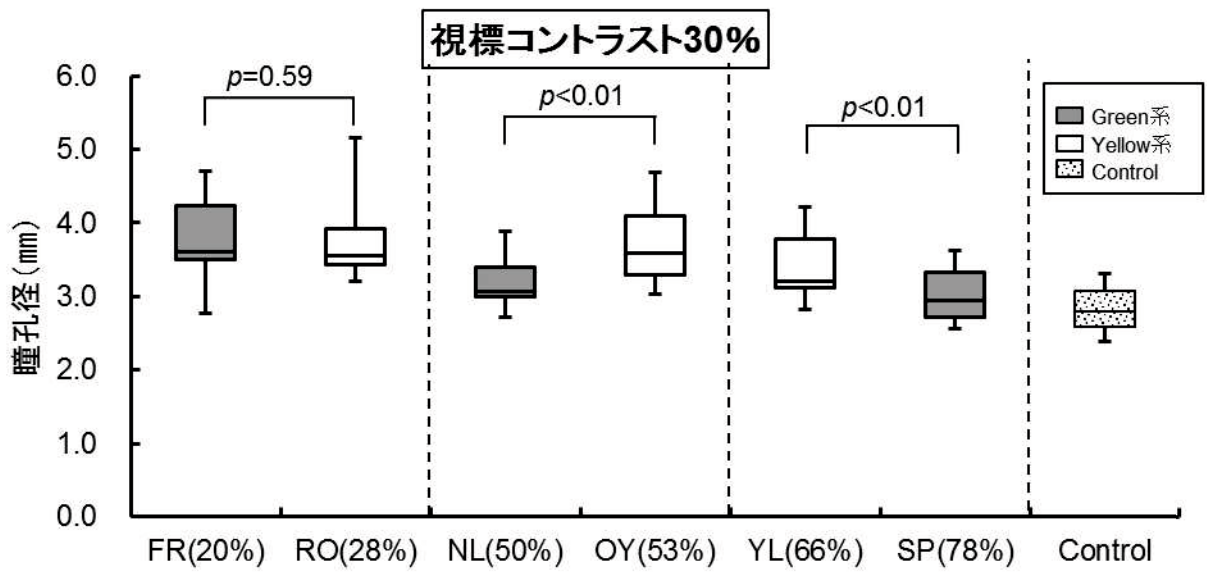


図8 遮光レンズ装用による瞳孔径の比較



表 2 遮光レンズ装用条件での固視変動の測定結果

	視感透過率(%)	470nm透過率(%)	視標コントラスト100%		視標コントラスト30%	
			固視変動(度)		固視変動(度)	
			中央値	(四分位範囲)	中央値	(四分位範囲)
Control	100	100	0.33	(0.23-0.38)	0.31	(0.22-0.37)
Green-SP	78	60	0.35	(0.26-0.41)	0.37	(0.33-0.41)
Yellow-YL	66	0	0.42	(0.37-0.67)	0.48	(0.43-0.57)
Green-NL	50	47	0.35	(0.27-0.46)	0.30	(0.28-0.46)
Yellow-OY	53	0	0.58	(0.43-0.63)	0.55	(0.55-0.61)
Green- FR	20	10	0.42	(0.36-0.55)	0.39	(0.36-0.54)
Yellow- RO	28	0	0.54	(0.46-0.69)	0.62	(0.43-0.66)

表 3 遮光レンズ装用条件での瞳孔径の測定結果

	視感透過率(%)	470nm透過率(%)	視標コントラスト100%		視標コントラスト30%	
			瞳孔径(mm)		瞳孔径(mm)	
			中央値	(四分位範囲)	中央値	(四分位範囲)
Control	100	100	2.73	(2.54-2.86)	2.80	(2.59-3.08)
Green-SP	78	60	2.94	(2.66-3.75)	2.94	(2.57-3.63)
Yellow-YL	66	0	3.24	(2.80-4.00)	3.21	(2.82-4.21)
Green-NL	50	47	3.09	(2.75-4.10)	3.07	(2.72-3.88)
Yellow-OY	53	0	3.48	(2.95-4.76)	3.59	(3.04-4.70)
Green- FR	20	10	3.57	(2.91-4.76)	3.60	(2.77-4.71)
Yellow- RO	28	0	3.63	(3.21-4.55)	3.56	(3.21-5.15)

表 4 各因子の相関分析結果

	瞳孔径	視感透過率	470nm透過率
固視変動	0.71	-0.29	-0.43
瞳孔径	—	-0.51	-0.49

※Spearman順位相関係数(いずれも $p < 0.001$ )

### 3.4 固視安定性への影響に関する実験の考察

#### 3.4.1 測定値の信頼性

今回の固視評価に使用した視線追跡装置 TobiiTX300 の精度は、300 ～600lx の明室下での両眼同時測定にて正確度 0.4 度、精密度 0.14 度であり、頭部の固定は不要で日常視に近い実験が可能とされている (<http://www.tobiipro.com/ja/product-listing/tobii-pro-tx300/>)。単眼測定と両眼測定では後者の方が正確度に優れると報告されており、片眼遮蔽による瞳孔径への影響を考慮し、本実験では両眼同時測定をしているが優位眼のみのデータを採用して固視状態を評価した。

視線追跡装置では、縮瞳により鼻側に測定上の瞳孔中心が偏位し、1.0mm の瞳孔径変化で 0.05mm (0.24 度) 程度のずれが生じるとの報告がある<sup>11)</sup>。今回の検討では、遮光レンズ装着後に色順応を兼ねたキャリブレーションを行っているが、測定中の被験者の瞳孔径は散瞳傾向にあるレンズで 1.0mm を超える変動が見られた。これは視標変化による調節刺激が加わった可能性が示唆されるが、縮瞳が起こるのはごく短時間であり、全体の固視変動への影響は小さいと考えられる。また、遮光レンズの色により被験者全員に瞳孔径の変化が起こっていたが、固視中心は各実験での 15 秒間の測定中の全データの平均座標を用いている。従って、各被験者、各遮光レンズの色における固視変動を評価するに当たっての「固視中心」のずれは問題にならない。ただし照度が極端に低下する環境下では測定不能例が出現するなど正確度が下がるとされているため、視感透過率が低い遮光レンズではアーチファクトが介入する可能性がある。しかし本研究においては全実験で問題なく測定が可能であった。

#### 3.4.2 固視に影響を及ぼす要因

今回の検討で、選択した遮光レンズの色により固視変動、瞳孔径とも有意な差を生じ、全体的には視感透過率が低くなるにつれて瞳孔径が大きくなり、固視変動も増大する傾向を認めた。

本実験では、同様な視感透過率であるレンズで比較を行うと、470nm の透過率が低いレンズが瞳孔径に与える影響が小さくなり、その結果固視変動も小さく、視機能への影響が少ない結果になるという仮説を立て、実験を施行したが仮説等同様、視感透過率が同等の場合、470nm 透過率が低い色系統で瞳孔径が大きく、固視変動も大きい

という結果であった。一方で仮説では着目していなかったが、視感透過率が低いほど瞳孔径に与える影響に個人差が大きいということが明らかになった。

色系統によりカットしている波長が異なり、視感透過率が同等であったとしてもコントラスト感度の影響が異なる報告がある<sup>6)</sup>。このことから他の視機能へも影響を与える可能性も考えた。さらに瞳孔径に影響を与える470nmが与える影響も大きいと考えた。これを検討するため実験を施行したが、仮説を支持する結果であった。

また、相関分析の結果、瞳孔径が固視に影響を及ぼす最も大きな要因であると考えられた。瞳孔は散大することにより収差が増加する<sup>6)</sup>。さらに散大に伴い視力やコントラスト感度といった視機能が低下するとの報告があり<sup>12)</sup>、収差が原因となって固視の安定化を妨げている可能性がある。

瞳孔径は視感透過率と中程度の相関を認めるが、固視変動との相関分析では470nm透過率が視感透過率よりも強い相関を示していた。470~480nmの波長域の光は内因性光感受性網膜神経節細胞活性の最適波長であり、これが縮瞳を引き起こすと共に、この細胞の脱分極が縮瞳持続に関与するとされている<sup>13)</sup>。また、石川ら<sup>14)</sup>は色光刺激(470 nm)にて持続的な縮瞳が生じることを確認したと報告している。視感透過率が80%を下回るYellow系レンズでは、500nm以下の短波長光の大部分を遮断しており、これまでの報告<sup>6)</sup>でもYellow系レンズで瞳孔が散大することが指摘されている。しかしGreen系レンズはYellow系よりも短波長光を部分的に透過している。

視感透過率50%以上のレンズでは、Yellow系がGreen系よりも有意な散瞳をきたしていたが、視感透過率の低いGreen系のFRとYellow系のROでは瞳孔径に有意差を認めず、ほぼ同等に散瞳していた。これは視感透過率が極端に低い場合、Green系であっても470nm透過率が低くなるとともに眼内に入る光量も低下することによって考えられる。しかしFRとROでは瞳孔径に有意差がないにもかかわらず視標コントラスト30%でのFRの固視変動がROより有意に小さく、視標コントラスト100%も統計学的有意差はないものの同様の傾向を認めた。視感透過率の低いレンズでは照度不足による視線追跡装置のアーチファクトの介入が否定できないが、相対的な比較でROよりも視感透過率が低く短波長光を10%程度透過するFRにおいて有意に固視の動揺が小さいという結果は注目すべき知見と考える。視標コントラストに関して、今回の検討では統計学的に各レンズ条件での固視への有意な影響は確認できなかった。田中ら<sup>15)</sup>は、コントラスト変化はフィルタの波長透過特性により異なり、さらに視対象によってもコントラスト変化は異なるとも報告している。今回の検討では、液晶モニターを使用しており、さらに本実験で設定した視標コントラスト検討条件では遮光

レンズ装用による影響が顕性化せず、視標コントラストを 30%よりさらに低下させた場合に有意な影響が生じる可能性は否定できない。しかし視標コントラストが 30%に低下した場合に瞳孔径に有意差のない FR と RO で固視変動に有意差を生じた結果は、視感透過率が低いレンズで短波長光透過率の違いが固視の安定化に影響を及ぼし、低いコントラスト条件でその差が顕性化したものと考えられる。

### 3.5 固視安定性への影響のまとめ

以上から、遮光レンズの色を選択する際は視感透過率だけでなく短波長光透過率にも注目し、これらの透過率が低いレンズでは瞳孔の散大を誘発するために固視の動揺をきたすおそれがあり、特に低視力者ではその影響がより顕著となる可能性があるという点に留意すべきである。

また瞳孔径は加齢により縮瞳する傾向にあることが報告されていることから<sup>16)</sup>、今後の課題として遮光レンズ装用での固視への影響の年齢差を検討する必要がある。

## 第4章 遮光レンズが固視へ及ぼす年齢差の影響

### 4.1 年齢差の影響に関する実験の目的

遮光レンズ装用による影響として、Yellow系レンズによりコントラスト感度は向上するが<sup>17)</sup>、500nm以下の短波長光の大部分を遮断することにより、瞳孔が散大するとの報告がある<sup>7)</sup>。この遮断される波長域には縮瞳の誘発と持続に関与する内因性光感受性網膜神経節細胞活性の最適波長(470~480nm)<sup>13)</sup>が含まれているためと推測できる。実験2にて影響が示唆された。さらに、遮光レンズには様々な色系統があり、視感透過率や短波長光透過率はレンズの色により異なるため、瞳孔へ与える影響にも差を生じると考えられる。さらに瞳孔径は20歳前後で最大となり、加齢に伴い縮瞳傾向が出現する<sup>18)</sup>。遮光レンズは様々な年齢層に処方されているにも関わらず、これまでに遮光レンズの色選択に関して年齢別の具体的な比較検討報告はない。しかしながらこの瞳孔径の加齢変化が加わることにより、遮光レンズ装用による視機能への影響に年齢差を生じる可能性がある。また、弱視、斜視症例における患眼の固視の安定性と視力には強い相関を認めるとの報告があり<sup>9)</sup>、固視の安定性が視機能に与える影響の指標として有用ではないかと考えた。

実験2において、視感透過率が同等の場合、470nm透過率により瞳孔径や固視変動に与える影響が異なるということが明らかとなった。このため、実験仮説2は瞳孔径に着目した。つまり、瞳孔径は年齢により差が見られることが報告されている<sup>10)</sup>。このため、縮瞳傾向である高齢者では遮光レンズが瞳孔径へ与える可能性は少ないのではないかと考えた。

これにより実験仮説2は以下の項目を立てた。

年齢により2群に分類し、比較すると若年群ほど瞳孔径へ影響が大きく、その結果固視変動へ与える影響が大きい結果となる可能性がある。

この仮説を検証するため本実験を施行した。

## 4.2 実験計画

### 4.2.1 実験対象

本研究では遮光レンズの基礎的な影響を検証すべく、白内障等の加齢に伴う器質的影響を除く目的で、被験者は20代、40代を対象とした。被験者は、矯正視力1.0以上で屈折異常以外に眼疾患のない20代群11名（21～27歳、平均 $22.6 \pm 1.6$ 歳）と40代群10名（40～49歳、平均 $44.3 \pm 3.5$ 歳）の計21名であり、実験前のインフォームドコンセントで同意を得た者を対象とした。被験者が眼前60cmにて視標を明視できることを確認し、眼鏡レンズのコーティングによる影響を考え、裸眼またはコンタクトレンズによる屈折矯正下にて実験を施行した。

### 4.2.2 実験方法

遮光レンズは視感透過率と短波長光透過率の差を考慮して東海光学社製STGシリーズのYellow系（AC, YL, OY, RO）とGreen系（SP, NL, YG, FR）の計8種類を用い、遮光レンズ非装用状態をcontrolとした。使用した遮光レンズの分光透過率を図9に示す。実験中の被験者の視線の動きと瞳孔径を計測するため、視線追跡装置TobiiTX300（Tobii社製、スウェーデン）を使用した。実験は、60cmの視距離にTobiiTX300に付属する視標提示用の23インチモニター（1980×1080）を設置し、照度600lxの明室にて施行した。TobiiTX300は、近赤外線カメラを内蔵し、瞳孔と角膜からの反射を記録することにより視線の動きを連続的に捉えることができる。また頭部の固定が不要で、300～600lxの明室における両眼開放下での正確度は0.3～0.4度、精密度は0.17～0.18度とされ、単眼測定よりも両眼同時測定で精度が高いと報告されている<sup>19)</sup>。このため両眼開放下にて実験を施行し、解析には瞬目による視線の動きを除いた優位眼のデータを使用した。

実験で用いた固視目標は、非特異的な固視の動揺を抑制すべく固視刺激を強化する目的で、ランドルト環視標を使用した。視標は、プログラミング言語であるProcessing（Ver3.0）を用い、視距離60cmにて視力0.3相当のサイズ（外径0.28度、切れ目の視角0.06度、視標背景輝度 $235.36 \text{ cd/m}^2$ 、視標輝度 $8.61 \text{ cd/m}^2$ ）で作成した。被験者に遮光レンズを検眼枠に入れて装用させ、順応時間中に視線追跡装置のキャリブレーションを行い、正確な測定が可能であることを確認後、実験を施行した。実験は、ラ

ンドルト環視標をモニター中央部に 3 秒間隔で 5 回切れ目の方向を変えながら計 15 秒間提示し、実験中の視線の動きと瞳孔径を測定頻度 300Hz で連続的に記録した。また、実験中は被験者に切れ目の方向を回答するよう指示した。なお使用した遮光レンズの色の使用順序は、順応による瞳孔径や疲労に伴う固視変動への影響を考慮し、無作為に選択した。

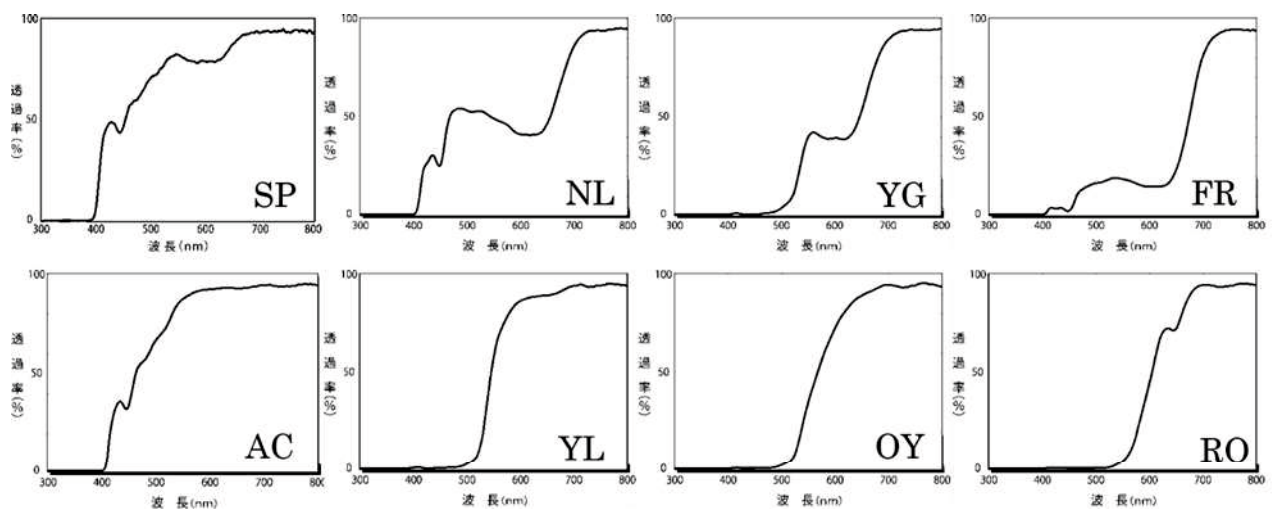


図 9 使用した遮光レンズの分光透過率



### 4.2.3 解析方法

固視変動に関してはこれまでの実験と同様  $D(\theta)$  を算出した。

固視と同時に記録した瞳孔径については、TX300 における測定精度は公開されていない。しかし被験者に瞳孔異常を認めないことから、瞳孔径の相対的变化を比較するため、各実験条件における瞬目時を除いた 15 秒間の平均瞳孔径を検討に用いた。

さらに固視変動と瞳孔径の遮光レンズ非装用状態からの変化を比較すべく、遮光レンズ装用時の値を control の値に対する比率に換算した補正値をそれぞれ求めた。

遮光レンズの色による固視変動と瞳孔径の差の有無について、各群で Friedman 検定を用いて確認した。また固視変動と瞳孔径の control を基準とした補正値について、Mann-Whitney U 検定で 2 群間の比較を行った。さらに、各群の固視変動と、瞳孔径および視感透過率との相関を Spearman 順位相関係数にて調べた。なお、統計学的検討には SPSS22.0(IBM)を使用し、有意水準 5%未満を統計学的有意差ありとした。

## 4.3 瞳孔径、固視変動の結果

### 4.3.1 固視変動の比較

今回の検討における全被験者の固視変動の範囲は、20代群で0.16~1.15度、40代群で0.17~1.61度で、全実験でのランドルト環の正答率は100%であった。各群での平均固視変動の結果(図10-A)から、両群ともに遮光レンズの色により有意な差を認めた( $p < 0.001$ )。20代群ではcontrolで最も変動が小さく( $0.33 \pm 0.13$ 度)、視感透過率が低くなるにつれ固視変動は増大し、ROで最も大きかった( $0.59 \pm 0.20$ 度)。40代群ではACで固視変動が最も小さく( $0.27 \pm 0.09$ 度)、YGで最も変動が大きかった( $0.63 \pm 0.38$ 度)。平均固視変動のcontrolを基準とした「補正值」での結果(図10-B)から、40代群は視感透過率が60%以上のレンズ(AC、SP、YL)において20代群より固視変動が有意に小さく( $p < 0.01$ )、controlと同等であったが、60%以下のレンズでは2群間で有意差を認めなかった。

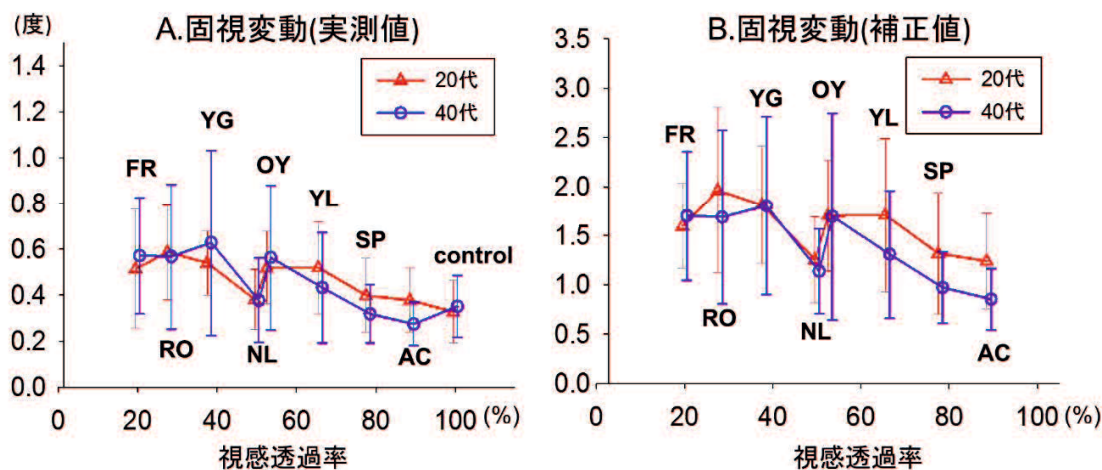


図10 固視変動の実測値およびcontrolを基準とした補正值での比較

### 4.3.2 瞳孔径の比較

全被験者の実験中の瞳孔径の範囲は、20代群で2.38~5.01mm、40代群で2.04~4.01mmであった。各群における平均瞳孔径の結果（図11-A）から、両群ともに視感透過率が低くなるにつれ散瞳傾向が出現し（ $p<0.001$ ）、controlで最も小さく（20代： $2.77\pm 0.31\text{mm}$ 、40代： $2.37\pm 0.19\text{mm}$ ）、ROで最も大きかった（20代： $3.75\pm 0.42\text{mm}$ 、40代： $3.19\pm 0.45\text{mm}$ ）。全実験を通して40代群は20代群より瞳孔径が有意に小さかった（ $p<0.05$ ）が、controlからの瞳孔径変化の割合は2群間で有意差を認めなかった（図11-B）。

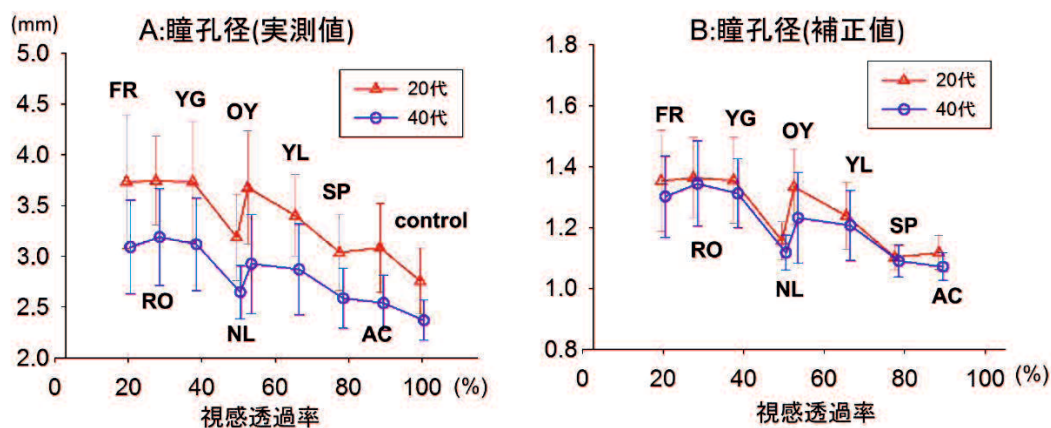


図 11 瞳孔径の実測値および control を基準とした補正值での比較

### 4.3.3 視感透過率が近似で色系統の異なる2色の比較と相関分析

視感透過率が近似した Yellow 系 OY (53%) と Green 系 NL (50%) の図 3、4 における急峻な変化に注目し、その固視変動と瞳孔径の実測値について比較した結果を表 5 に示す。OY は NL よりも 20 代では固視変動と瞳孔径がともに有意に大きかったが ( $p<0.01$ )、40 代では同様の傾向を認めるものの統計学的有意差はなかった。

固視変動と、瞳孔径および視感透過率との相関分析の結果を表 6 に示す。固視変動は、20 代群では瞳孔径と強い正の相関を示し ( $r_s=0.71$ )、視感透過率とは弱い負の相関を認めた ( $r_s=-0.33$ )。40 代群では 20 代群に比べ瞳孔径との相関が弱くなり ( $r_s=0.40$ )、負の相関を示した視感透過率 ( $r_s=-0.40$ ) と相関の程度は同等であった。

表 5 Yellow 系 OY と Green 系 NL の比較

20代	視感透過率	固視変動(度)	瞳孔径(mm)
(Yellow系) OY	53%	0.52±0.15	3.70±0.41
(Green系) NL	50%	0.38±0.12	3.19±0.41
2色間の群間比較p値		0.005	0.001

40代	視感透過率	固視変動(度)	瞳孔径(mm)
(Yellow系) OY	53%	0.56±0.30	2.93±0.46
(Green系) NL	50%	0.38±0.17	2.65±0.25
2色間の群間比較p値		0.21	0.06

Friedman検定

表 6 固視変動と、瞳孔径および視感透過率との相関分析

		20代		40代	
		瞳孔径	視感透過率	瞳孔径	視感透過率
Spearman 順位相関係数	相関係数	0.71	-0.33	0.40	-0.40
	p値	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

#### 4.4 年齢差が与える影響に関する考察

今回の検討において、遮光レンズの色により固視変動、瞳孔径で有意な差を認め、固視変動と瞳孔径が正の相関を示したことで、瞳孔径が固視変動に影響を与える大きな要因であることがわかった。つまり、実験仮説 2 は、年齢により 2 群に分類し、比較すると若年群ほど瞳孔径へ影響が大きく、その結果固視変動へ与える影響が大きいということであったが、本実験はこの仮説を支持する結果であった。さらに、本実験では、遮光レンズは視感透過率が 60% 以上の場合に瞳孔径の年齢差が大きく影響するが、視感透過率が低くなるほど年齢に関わらず固視が不安定となる傾向が示唆された。

瞳孔径は散大するに従い、眼光学系の収差が増加すると言われており<sup>20)</sup>、この収差が固視の動揺を誘発する可能性がある。また、視感透過率が中程度で近似する Yellow 系 OY と Green 系 NL での 20 代の実験結果では、500nm 以下の短波長光をほぼ遮断する OY で 50% 程度透過する NL より瞳孔径と固視変動が有意に大きく、短波長光透過率が固視の安定性に影響を及ぼすことが示唆された。

魚里ら<sup>12)</sup>の報告では、片眼遮蔽による単眼視は両眼視よりコントラスト感度が有意に低下したが、この原因として瞳孔径が平均 1mm 大きいことで収差が増加した可能性を指摘している。今回の検討では 20 代、40 代ともに瞳孔径が最小の control と最大の RO で 1mm 程度の差を認めたが、瞳孔径の実測値のベースラインは明らかに 40 代で小さかった。Campbell ら<sup>6)</sup>は 2.4mm の瞳孔径で網膜像の広がり最小になっているが、両群の瞳孔径の実測値に注目すると、40 代に比して 20 代では遮光レンズ装用で瞳孔径は敏感に反応して散大し、Yellow 系レンズでは 2.4mm より顕著に散瞳していた。このため、同じ瞳孔径 1mm の変化であっても、瞳孔径のベースラインが年齢により異なることで固視の安定性に差を生じた可能性が考えられる。

40 代では瞳孔径は視感透過率 60% 程度までの遮光レンズ装用下において 20 代の control よりもやや小さく、有意に固視変動が小さかった。縮瞳傾向がある場合に視感透過率が比較的高いレンズでは固視への影響は小さいと考えられる。しかし、視感透過率が低いレンズでは縮瞳傾向のある 40 代でも 20 代と同等に固視が不安定となっていた。視感透過率が 40% 未満のレンズでは Green 系であっても短波長光の透過率が低下するが、さらに網膜照度も低下する。加齢による縮瞳傾向が顕著な場合には網膜照度低下の影響をより強く受け、コントラスト感度が低下すると報告されている<sup>21)</sup>。このことから遮光レンズ装用による瞳孔径変化が小さい場合にも、視感透過率が低いレンズでは固視の動揺が誘発される可能性が高い。

## 4.5 年齢差の影響のまとめ

固視の安定性に影響する因子としては、若年者では瞳孔径が優位であるが、加齢に伴い視感透過率低下による網膜照度の影響が若年者よりも大きくなると考えられる。このため、遮光レンズの色選択に際してはこれら年齢による影響に留意し、特に視覚感受性期の小児に処方する場合、固視の安定性が視力と相関する<sup>9)</sup>ことから、短波長光透過率に配慮した色選択を念頭に置く必要がある。また縮瞳傾向にある高齢者では、日常の生活環境での照度を考慮し、視感透過率の極端に低いレンズは極力避けるか、処方時に網膜照度低下による影響を厳に説明すべきである。

本研究は、50歳未満の健常者を対象とした検討であったが、健常者と加齢黄斑変性症患者との比較で遮光レンズ装用の効果に差異が見られた報告もある<sup>22)</sup>。このため今後はさらに年齢層を拡大し、疾患ごとでの検討が必要であると考えられる。

## 第5章 遮光レンズの瞳孔径と固視に対する色系統別の影響

### 5.1 遮光レンズの瞳孔径と固視に対する色系統別の影響の検討の目的

極端な視機能低下をきたすロービジョン状態では羞明を伴うことが多く、羞明の軽減には短波長光を特異的に遮断する遮光レンズが有効とされている<sup>1)</sup>。遮光レンズは、羞明軽減が目的であるが、色の好みや外観もあるため、近年様々な色系統のレンズが発売されている。しかしながら遮光レンズの色系統が増えたにも関わらず、色選択の傾向については施設により様々な報告がある<sup>3,23)</sup>。しかしながら統一された選択基準は未だ確立されていない。さらに以前と比較し、色選択の幅が広がったことで適切な色選択がより困難となる可能性があるが、本邦で現在普及しているすべての色系統での視機能への影響について比較検討している報告はない。

また、遮光レンズ装用での視覚に関する研究において、Yellow系レンズによりコントラスト感度が向上するという報告がある<sup>15,24)</sup>。一方で遮光レンズ装用は、散瞳を引き起こすとの報告がある<sup>7)</sup>。これは、縮瞳の誘発と持続に関与する内因性光感受性網膜神経節細胞活性の最適波長(470~480nm)が、Yellow系レンズの多くでほぼ遮断されることによる現象と考えられる。これに対し、Yellow系以外の色系統では500nm以下の短波長光を一部透過するものが多い。しかし透過する波長域や程度も色系統により様々であり、瞳孔径への影響は異なる可能性がある。

第3章で述べたように、Yellow系と短波長光を一部透過するGreen系のレンズ装用での瞳孔径と固視の安定性を比較し、短波長光透過率の違いが固視の状態に大きく影響することがわかった<sup>25)</sup>。さらに瞳孔径は加齢により縮瞳傾向を示す<sup>18)</sup>。このため視機能への影響は年齢により異なる可能性がある。第4章で述べたようにYellow系とGreen系のレンズを用いて20代と40代を対象に年齢による固視の変動を比較した結果、視感透過率が60%以上のYellow系レンズでは40代の方が有意に固視変動は小さくなるが、視感透過率が60%以下のYellow系では両年代とも有意な散瞳をきたすとともに固視の動揺が見られることを明らかとした<sup>26)</sup>。

しかしながら、遮光レンズには複数の色系統があり、分光透過率曲線はレンズの色により異なるため、瞳孔へ与える影響にも差を生じる可能性が考えられる。このことから、実験仮説3として、以下を考えた。

これまで検討した Green 系、Yellow 系以外の色系統においてもこれまで同様の結果である可能性が高い。

この仮説を検証するため、視感透過率が 50%程度の遮光レンズの色系統における固視や瞳孔へ与える影響について比較検討を行った。470nm 透過率が低い Yellow 系と比較すると他の色系統では瞳孔径への影響が少なく、それにより固視変動への影響も少ないと考えられる。

## 5.2 対象と方法

### 5.2.1 対象

本研究では遮光レンズの基礎的な影響を検証すべく、白内障等の加齢に伴う器質的影響を除く目的で、被験者は 20 代を対象とした。被験者は、屈折異常以外に眼疾患のない 10 名（21～25 歳、平均  $22.7 \pm 1.2$  歳）であり、実験前のインフォームドコンセントで同意を得た者を対象とした。眼鏡レンズのコーティングによる影響を考慮し、被験者が裸眼またはソフトコンタクトレンズによる遠見屈折矯正下にて遠見視力 1.0 以上であり、眼前 60cm にて視標を明視できることを確認したうえで実験を施行した。

### 5.2.2 実験方法

遮光レンズは、HOYA 社製 RETINEX™ で視感透過率が 50%程度の Yellow 系 (OR)、Brown 系 (OBL)、Green 系 (DG)、Grey 系 (OG)、Purple 系 (PU) の 5 種類を使用し、遮光レンズ非装用状態を control とした。使用した遮光レンズの分光透過率を図 12、視感透過率および 470nm 光透過率を表 1 に示す。実験視標には、非特異的な固視動揺を軽減すべく固視を促す目的でランドルト環を使用した。視標作成は、プログラミング言語である Processing (Ver3.0) を用いて行い、視距離 60cm にて視力 0.3 相当のサイズ（外径 0.28 度、切れ目の視角 0.06 度、視標背景輝度  $235.36 \text{cd/m}^2$ 、視



標輝度  $8.61 \text{ cd/m}^2$ ) とした。

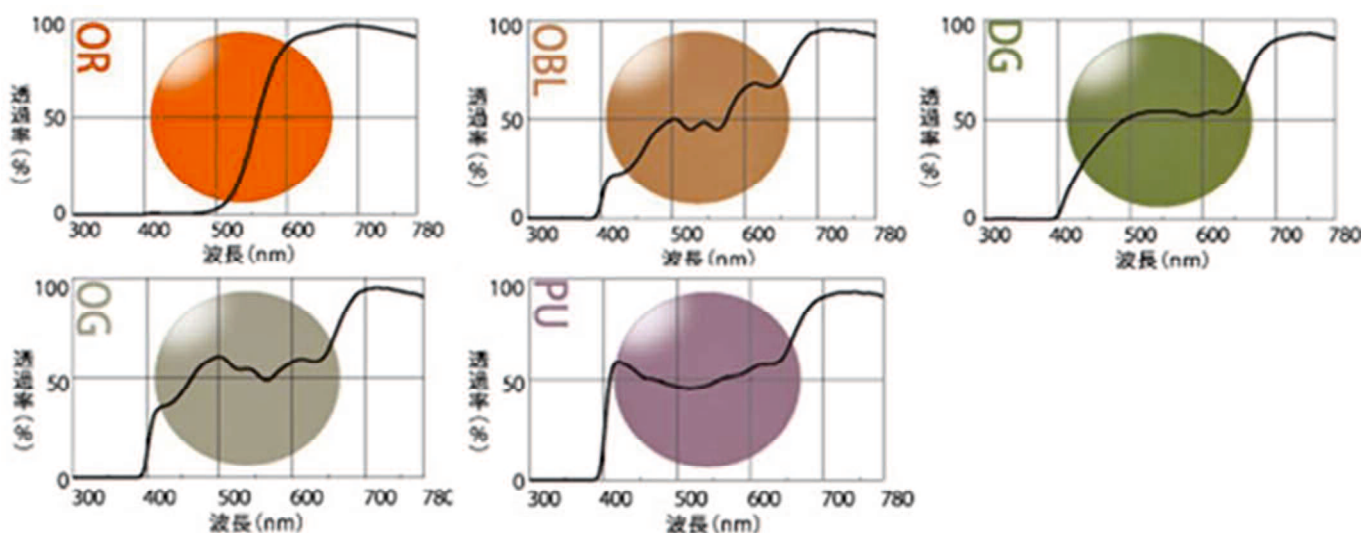


図 12 使用した遮光レンズの分光透過率曲線

視線追跡装置 TobiiTX300 (Tobii 社製、スウェーデン) を使用し、実験中の被験者の視線の動きと瞳孔径を計測した。実験は、視距離 60cm で TobiiTX300 に付属する視標提示用の 23 インチモニター (1980×1080 pixel) を設置し、明室 (照度 600lx) にて施行した。TobiiTX300 は、近赤外線カメラを内蔵し、瞳孔と角膜からの反射を測定頻度 300Hz で連続的に記録することにより視線の動きを連続的に捉えることができる。解析には瞬目による視線の動きを除いた優位眼のデータを使用した。

被験者に遮光レンズを装用させ、暗順応を兼ねて視線追跡装置のキャリブレーションを行い、正確な測定が可能であることを確認した後、実験を施行した。実験は、作成した視標をモニター中央部に 3 秒間隔で切れ目の方向を変えながら計 15 秒間提示した。視標への注視を確実にするため、切れ目の方向を答えるよう指示し、実験中の視線の動きと瞳孔径を連続的に記録した。なお使用した遮光レンズの色の使用順序は、順応による瞳孔径や疲労に伴う固視変動への影響を考慮し、無作為に選択した。

### 5.2.3 解析方法

視線追跡装置である TobiiTX300 により視線の位置として、出力されたピクセル座標をその時点での「固視点」とした。15 秒間で得られたデータを視角に換算したのち、解析に使用する全データの平均座標を算出した。これにより求められた座標を「固視中心」と定義した。各実験における平均座標をそれぞれ固視中心とした理由は、視線追跡装置を使用する際、縮瞳により測定上の瞳孔中心が鼻側に偏位し、1.0mm の瞳孔径変化で 0.24 度のずれが生じるとする報告<sup>19)</sup>があるためである。固視変動に関してはこれまでの実験と同様  $D(t)$  を算出した。

さらに被験者の屈折矯正状態では残余屈折異常や視距離による調節が個人差に影響する可能性があるため、同一個体内での固視変動と瞳孔径の遮光レンズ非装用状態からの変化を比較すべく、遮光レンズ装用時の値を control の値に対する比率に換算した補正値をそれぞれ算出した。

固視変動、瞳孔径の実測値および補正値での群間比較を Friedman 検定で行った。次いで各レンズ装用状態と control の状態に差があるかを、それぞれ実測値を用いて Wilcoxon 符号付き順位検定法で検討した。さらに各レンズ間の比較について、Sidak 法で p 値を補正して Wilcoxon 符号付き順位検定による多重比較を行った。また、各群の固視変動と、瞳孔径および 470nm 光透過率との相関を Spearman 順位相関係数にて調べた。なお、統計学的検討には SPSS22.0(IBM)を使用し、有意水準 5%未満を統計学的有意差ありとした。

## 5.3 色系統に着目した解析結果

### 5.3.1 固視変動の比較

今回の検討における全被験者の固視変動の実測値範囲は 0.12～1.67 度で、全実験でのランドルト環の正答率は 100%であった。実測値、補正值はそれぞれ表 7 に示す。

各群での被験者の固視変動の実測値平均において有意差を認め ( $p<0.001$ )、control で最も小さく (中央値, 範囲: 0.17 度, 0.15～0.69 度)、OR で最大で (0.88 度, 0.29～1.67 度)、この 2 条件の実測値平均の差の範囲は 0.14～1.22 度 (中央値: 0.51 度) であった。

control を基準とした「補正值」(図 13)においても、全体の群間比較では有意差を認め ( $p<0.001$ )、多重比較にて OR と DG、OR と OG 間で有意差を認めた ( $p<0.05$ )。また、OR を除く 4 色では群間の有意差を認めなかった ( $p=0.36$ )。

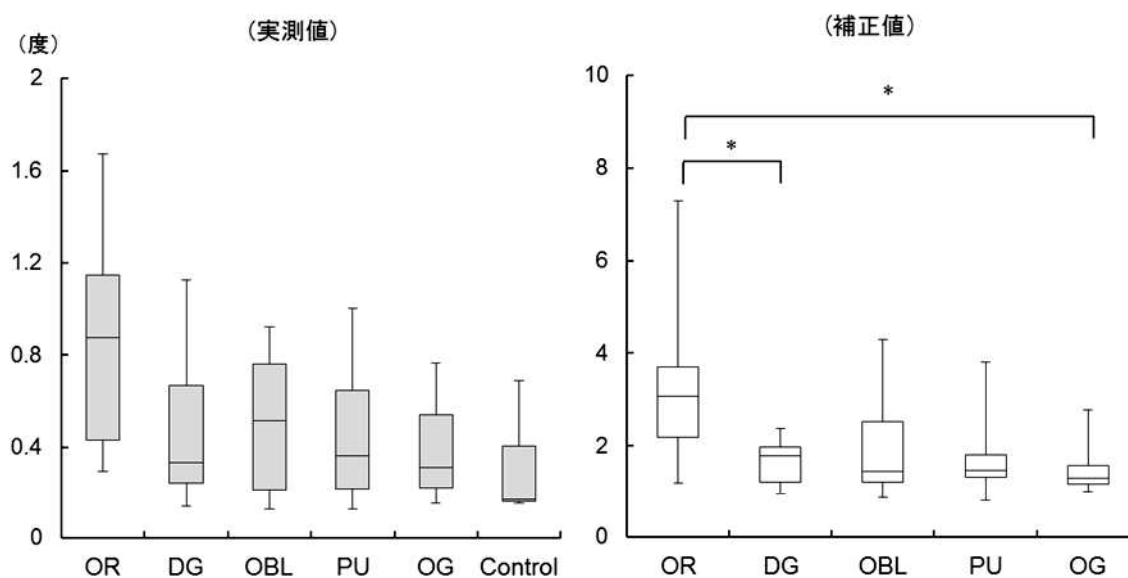


図 13 固視変動の実測値および補正值での比較

表 7 各レンズ条件での固視変動と瞳孔径

レンズ条件 (色系統)	視感 透過率 (%)	470nm 透過率 (%)	固視変動		瞳孔径	
			実測値 (度)	補正值	実測値 (mm)	補正值
			中央値 (四分位範囲)	中央値 (四分位範囲)	中央値 (四分位範囲)	中央値 (四分位範囲)
Control	100	100	0.17 (0.16-0.41)		2.65 (2.26-2.88)	
OR (Yellow)	47	0	0.88 (0.43-1.14)	3.07 (2.18-3.70)	3.43 (2.72-4.59)	1.30 (1.28-1.32)
DG (Green)	53	44	0.33 (0.25-0.67)	1.79 (1.22-1.97)	2.99 (2.42-3.57)	1.14 (1.09-1.20)
OBL (Brown)	52	45	0.51 (0.21-0.76)	1.44 (1.22-2.51)	3.10 (2.55-3.39)	1.16 (1.08-1.23)
PU (Purple)	50	48	0.36 (0.22-0.65)	1.48 (1.32-1.80)	2.93 (2.45-3.34)	1.11 (1.09-1.16)
OG (Gray)	55	54	0.31 (0.22-0.54)	1.31 (1.17-1.57)	3.00 (2.37-3.67)	1.10 (1.06-1.17)

### 5.3.2 瞳孔径の比較

全被験者の実験中の瞳孔径の実測値範囲は、2.26～4.59mm であった。実測値、補正值を表 7 に示す。

各群での瞳孔径の実測値平均において群間に有意差を認め ( $p<0.001$ )、control で最も小さく (2.65mm, 2.26～2.88mm)、OR で最大値を示し (3.43mm, 2.72～4.59mm)、この 2 条件の実測値平均の差の範囲は 0.46～1.86mm (中央値 : 0.78mm) であった。

control を基準とした「補正值」(図 14) においても、全体の群間比較では有意差を認め ( $p<0.001$ )、多重比較にて OR と他の 4 色すべての組み合わせにおいて有意差を認めた ( $p<0.05$ )。また、OR を除く 4 色では群間の有意差を認めなかった ( $p=0.29$ )。

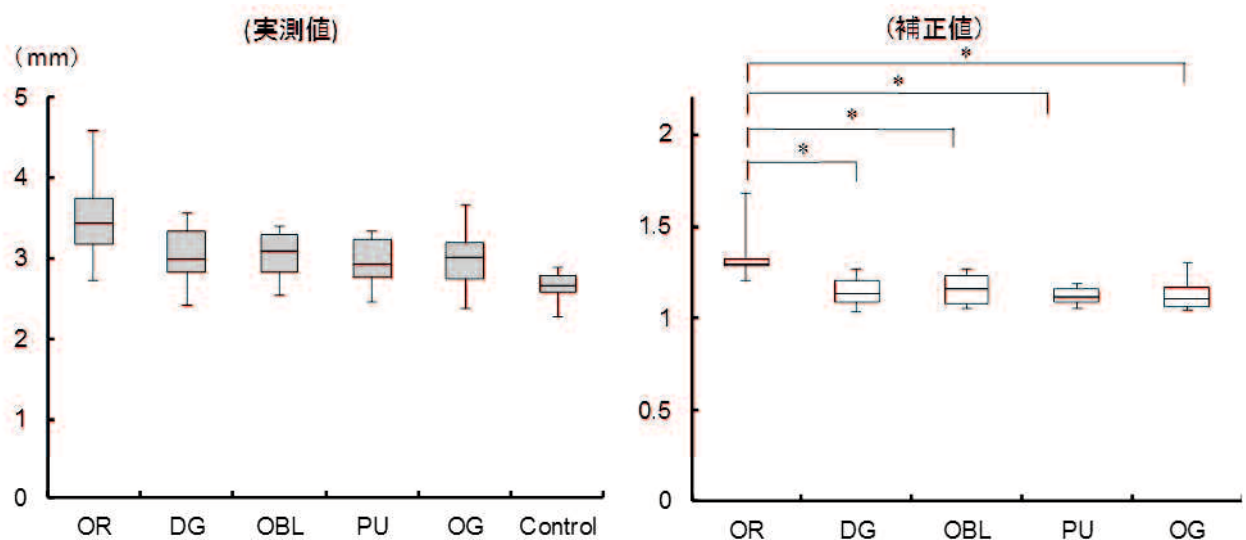


図 14 瞳孔径の実測値および補正值での比較

### 5.3.3 相関分析の比較

固視変動と瞳孔径の相関分析の結果を表 8、さらに固視変動と瞳孔径の 470nm 光透過率との相関分析の結果を表 9 に示す。

固視変動と瞳孔径では、実測値、補正值ともに正の相関を認めた。また 470nm 光透過率とは、固視変動、瞳孔径ともに負の相関を認め、相関の程度は瞳孔径で強かった。

表 8 固視変動と瞳孔径の相関

	実測値	補正值
相関係数	0.55	0.36
$p$ 値	<0.001	<0.05

表 9 470nm 透過率の固視変動および瞳孔径との相関

		実測値	補正值
固視変動	相関係数	-0.40	-0.39
	$p$ 値	<0.001	<0.01
瞳孔径	相関係数	-0.51	-0.49
	$p$ 値	<0.001	<0.01

## 5.4 瞳孔径と固視に対する色系統別の影響の考察

これまで Yellow 系と Green 系の 2 種の色系統で遮光レンズ装用による視機能への影響を検討してきた<sup>25,26)</sup>。しかし遮光レンズの色系統は多岐にわたるため、今回の検討で色系統の範囲を広げ、視感透過率が 50%程度の 5 種の色系統のレンズで固視変動と瞳孔径を比較した。その結果、いずれのレンズでも遮光レンズ非装用の状態に比して瞳孔は散大し、それに伴い固視変動が増大する傾向を認めた。しかしこの瞳孔径変化は Yellow 系 OR 以外の 4 色ではレンズ非装用の場合と有意差を認めず、OR のみが他の条件に比して有意な散瞳を呈していた。470nm 短波長光透過率を比較すると、Yellow 系 OR が 0%であったのに対し、他の 4 色は 50%前後で大きな差はなく、これが瞳孔径に影響与えたことで Yellow 系と他の 4 色の結果に差を生じた可能性がある。実験仮説 3 として、これまで検討した Green 系、Yellow 系以外の色系統においてもこれまで同様の結果であると立てたが、本実験において、これまで同様 470nm 透過率の低いレンズは、瞳孔径への影響が大きく、固視変動への影響が大きいという結果であり、470nm 透過率が与える影響は第 3 章、第 4 章で報告した Green 系と Yellow 系だけでなく、本実験で検討した他の色系統でも同様の結果で仮説を支持する結果となった。

また Campbell ら<sup>6)</sup>は 2.4mm の瞳孔径で網膜像の広がり最小になり、瞳孔が散大するにつれ収差が増加すると報告している。Yellow 系 OR では、他の 4 色に比べて瞳孔径が 2.4mm を大きく上回り、固視変動も有意に増大する傾向を認めたことから、この要因として収差の増加が関与する可能性は高い。さらに固視変動と瞳孔径の間に正の相関を認め、これらが 470nm 光透過率と負の相関を示していた。これらの結果は短波長光透過率が低い遮光レンズでは散瞳による固視の動揺を誘発するというこれまでの検討結果<sup>25,26)</sup>を裏付けている。

しかし、Yellow 系以外の 4 色について、固視変動と瞳孔径に統計学的有意差はなかったとはいえ、同列に評価することはできない。この 4 色で 470nm 光透過率に大きな差はなかったものの、図 12 の分光透過率曲線における 500nm 以下の短波長光透過率の分布は異なっており、450nm 以下の波長域に注目すると Purple 系 PU は最も透過率が高く、Brown 系 OBL が最も低いことが分かる。特に OBL では他の 3 色に比べ被験者間の瞳孔径にバラツキが見られ、この影響は固視変動にも反映されている。こ

のことから、500nm 以下の透過率は特定の波長域に限らず、より短い波長域の透過率も瞳孔径へ影響を及ぼす可能性がある。しかし使用したレンズの視感透過率や Yellow 系 OR 以外の 4 色の 470nm 透過率には幅があるため、今後はこれらの条件を統一し、色による影響を確認する必要がある。

## 5.5 色系統別の影響のまとめ

遮光レンズは視感透過率が近似していても短波長光透過率が低いレンズでは散瞳と固視の動揺をきたすことが示唆された。しかし色系統により短波長域の分光透過率曲線が異なるため瞳孔径への影響は均一ではなく、固視の安定性への影響は異なる可能性がある。中心暗点などにより固視が不安定な場合や、固視の安定と視力に相関が見られるとの報告がある<sup>9)</sup>。このため視覚感受性期の小児に遮光レンズを選定する際には、短波長光透過率に配慮し、固視の安定性に影響の少ない色を選択すべきと考える。

遮光レンズの効果についての健常者と加齢黄斑変性症患者との比較で、読書速度やコントラスト感度に差が見られるとする報告もある<sup>15,27)</sup>。このため、保有視機能に適した色選択の基準を作るには、年齢や疾患による傾向、偏心視の状況などを考慮した検討が今後求められる。



## 第6章 結論

選択する遮光レンズにより、固視変動、瞳孔径に与える影響が異なることが明らかとなった。

視感透過率が低いほど、瞳孔が散大し、その結果固視へ影響が見られる可能性が示唆された。瞳孔散大へ影響を与える 470nm 透過率が低い遮光レンズほどその傾向は大きくなる傾向があった。このことから遮光レンズの色を選択する際は、これまで着目されていた視感透過率だけでなく短波長光透過率にも注目すべきであると考えられる。つまり、臨床で遮光レンズを選択する際にはこれらの透過率が低いレンズでは瞳孔の散大を誘発するために固視の動揺をきたすおそれがあり、特にロービジョンといわれる低視力患者ではその影響がより顕著となる可能性があるという点に留意すべきである。ロービジョンの患者の視機能を最大限に使用するためにも遮光レンズが瞳孔径に影響を与える可能性があるということを考え、処方すべきである。

また、瞳孔径は加齢により縮瞳する傾向にあることが報告されている。本研究で年齢による影響を検討したところ、視感透過率が 60%以上の場合に瞳孔径の年齢差が大きく影響するが、視感透過率が低くなるほど年齢に関わらず固視が不安定となる傾向が示唆された。このことからレンズを選択する際は、年齢に関係なく、視感透過率が低いレンズでは瞳孔の散大が引き起こされ、その結果固視変動が誘発されると考えられる。つまり、ロービジョン者は高齢者に多いため、視感透過率が高いレンズにおいても注意が必要である。

レンズの色系統に着目すると、短波長光の大部分を遮断する Yellow 系レンズでは、瞳孔径への影響が大きく、たとえ視感透過率が高くても固視の動揺をきたす可能性があり、その影響は特に若年者に起こりやすいことが明らかとなった。同じ視感透過率であっても色系統によって視機能への影響が異なることが示唆された。

これらの点から、遮光レンズの色選択では、装用するレンズの色による瞳孔径への影響と加齢による縮瞳傾向に注意を払う必要がある。そして、視感透過率が低いレンズのみならず、たとえ視感透過率が比較的高いレンズであっても、短波長光遮断率が特に若年の低視力者の固視の安定性に影響を及ぼす可能性に留意することが求められる。

本研究では、遮光レンズの選択方法を検討するため固視変動、瞳孔径に着目し、検討を行った。その結果、選択した遮光レンズにより与える影響の大きさ異なることが明らかと

なった。これらの結果から遮光レンズを処方する際のより精密な選択基準検討のため、より日常視に近い視機能でも同様の結果が見られるかに関して検討が必要である。また、瞳孔が散大することに伴い、固視が不安定になることにより、正常者においても視機能への影響、つまり視力の低下が起これ、その結果眼精疲労などの影響も否定できない。このことから色の選択においては、視感透過率や短波長光遮断率も考え、レンズを選択するべきであるといえる。近年ブルーライトカットレンズなど様々な機能性レンズが発売されており、今後そのようなレンズにおいても検討が必要であるといえる、

さらに本研究により明らかになった 470nm 短波長光が固視変動や瞳孔径に与える影響を考慮したレンズ設計を検討する必要性が考えられる。また、パソコンモニターの短波長領域の波長の調整などからもアプローチが可能であれば羞明の軽減が可能である可能性も考えられる。

遮光レンズによらず、周波数分布の偏った人工的な光にさらされることが多い今日においては、「明るい暗い」という感覚を表す視感透過率や、「自然な見えの度合い」を表す演色性だけではなく、「見えやすさ」に強い影響のある 470nm 波長のような光を積極的に考慮していくことが、より健康的で生活しやすい環境構築につながっていくと考えられる。

本研究で採用した瞳孔径、固視変動を計測する実験手段は、有効であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 堀口浩史：特集 視覚心理と神経眼科 4.羞明のメカニズム. 神経眼科 26 : 382-395, 2009.
- 2) 野田知子： 3. 眼科でできるロービジョンケア 遮光眼鏡. 山本修一（編）：専門医のための眼科診療クオリファイ 26 ロービジョンケアの実際. 中山書店, 東京, 81-86, 2015.
- 3) 南 稔浩, 中村桂子, 澤ふみ子, 濱村美恵子, 稲泉令巳子, 清水みはる, 他：大阪医科大学における遮光眼鏡の検討. 日視会誌 36 : 133-139, 2007.
- 4) 石井雅子, 張替涼子, 臼井知聡, 福地健郎, 安部春樹: ロービジョン者の羞明と遮光眼鏡の効果 CAT2000 による検討. 眼紀 56:971-976, 2005.
- 5) 新井千賀子・中澤恵江・富田 和夫・千田 耕基: 自覚的応答が困難な重複障害児の遮光眼鏡の選定. 日視会誌, 28, 263-266, 2000.
- 6) Campbell FW, Green D : Optical and retinal factors affecting visual resolution. J Physiol 186 : 576-593, 1965.
- 7) Chung S.T. & Pease, P.: Effect of yellow filters on pupil size. Optometry and vision science, 59-62, 1999.
- 8) David M.B., Motoharu T.: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Science, 295, 1070-1073, 2002.
- 9) 大平 亮, 塩谷直子, 野村美香, 渡辺千草, 三浦一真, 高野雅彦：弱視、斜視における Micro Perimeter(MP-1)を用いた固視の検討. 日視会誌 43 : 81-86, 2010
- 10) 張 氷潔, 天野理恵, 他：日常視時における瞳孔径の年齢変化. 神経眼科 25(2):266-269, 2008
- 11) Jaschinski W : Pupil size affects measures of eye position in video eye tracking: implications for recording vergence accuracy. Journal of Eye Movement Research 9(4), 1-14, 2016.
- 12) 魚里 博：両眼視力と単眼視力. 日視会誌 35 : 61-66, 2006.
- 13) 小野寺朝美, 石川 均, 浅川 賢, 仲泊 聡：ヒトにおける内因性光感受性網膜神経節細胞活性の最適波長の対光反射による検討. 北里医学 40 : 83-87, 2010.
- 14) 石川 均: 瞳孔とメラノプシンによる光受容. 日本眼科学会雑誌 117(3), 246-269, 2013-03-10

- 15) 田中恵津子, 小田浩一: 光吸収フィルタ (遮光眼鏡) によるコントラスト変化. 視覚リハビリテーション研究 1(2): 86-93, 2012.
- 16) 張 氷潔, 天野理恵, 他: 日常視時における瞳孔径の年齢変化. 神経眼科 25(2):266-269, 2008
- 17) Rieger G: Improvement of contrast sensitivity with yellow filter glasses. Can J Ophthalmol 27(3): 137-138, 1992.
- 18) 浅川 賢, 石川 均: 瞳孔の加齢変化と老視矯正. あたらしい眼科 24: 1173-1178, 2007.
- 19) Tobii Pro TX300 accuracy and precision test report : <http://www.tobii.com/siteassets/tobii-pro/accuracy-and-precision-tests/tobii-tx300-eye-tracker-fw-1.1.1-accuracy-and-precision-test-report.pdf?v=1.1.1> (2020.1.25 閲覧)
- 20) Jaschinski W: Pupil size affects measures of eye position in video eye tracking: implications for recording vergence accuracy. Journal of Eye Movement Research 9(4), 1-14, 2016.
- 21) Sloane ME, Owsley C, Alvarez SL: Aging, senile miosis and spatial contrast sensitivity at low luminance. Vision Res 28: 1235-46, 1988.
- 22) 阿曾沼早苗, 不二門尚: 遮光眼鏡のロービジョン. あたらしい眼科 24: 1179-1186, 2007.
- 23) 楡井しのぶ, 堂山かさね, 国谷暁美, 小澤優貴, 勝又あかね, 石井祐子, 他: 井上眼科病院における遮光眼鏡の選定に影響を及ぼす因子. 日視会誌 39: 217-223, 2010.
- 24) Wolffsohn JS, Dinardo C, Vingrys AJ: Benefit of coloured lenses for age-related macular degeneration. Ophthalmic Physiol Opt. 22: 300-311, 2002.
- 25) 長尾祥奈, 澤田 園, 長 篤志: 遮光レンズの色による固視安定性への影響. 日本ロービジョン学会誌 17: 34-38, 2017.
- 26) 長尾祥奈, 澤田 園, 長 篤志: 遮光レンズが固視へ及ぼす年齢差の影響. 日視会誌 46: 63-70, 2017.
- 27) Eperjesi F, Fowler CW, Evans BJ: Effect of light filters on reading speed in normal and low vision due to age-related macular degeneration. Ophthalmic Physiol Opt 24: 17-25, 2004.