

# モノづくり設計支援のための水晶体混濁眼の ぼやけ表現と妥当性評価実験

西田 和磨<sup>\*1</sup> 塚田 敦史<sup>\*1</sup> 大寄 雄太<sup>\*1</sup>  
池田 卓美<sup>\*2</sup> 青井 清一<sup>\*3</sup> 張 彦芳<sup>\*4</sup>

## Blur expression due to opacity of ocular lens for design supporting system and evaluations on its validity

Kazuma Nishida<sup>\*1</sup>, Atsushi Tsukada<sup>\*1</sup>, Yuta Osaki<sup>\*1</sup>  
Takumi Ikeda<sup>\*2</sup>, Kiyokazu Aoi<sup>\*3</sup>, Zhang Yanfang<sup>\*4</sup>

**Abstract** - The purpose of this study is to develop supporting system. This supporting system enables designers to design things for people who have trouble with visual function. It focused on the opacity of the lens, which is common among elderly people. When the lens becomes turbid, the contour of objects is not clear and the boundary with the background becomes ambiguous. In other words, the visibility is blurred. In this study, using the data of point spread functions which medically measured, we constructed a representation method of blurring of lens opacified eyes. Therefore, reading experiments were conducted to evaluate its relevance. As a result blur representation system tends to be reproduced. But there are tasks. It is Individual differences in reading speed, learning effect. Therefore, it is considered necessary to increase the number of experimental participants.

**Keywords:** blur, opacified eyes , reading experiments, point spread function,

### 1. 緒言

我が国は超高齢社会である。今後さらなる高齢化が進展すると見込まれている。65歳以上の高齢者が自立と社会参加を行い、健全で活力のある社会の実現が必要となる。

この背景を基に、国土交通省はバリアフリー新法やバリアフリー整備ガイドラインを作成し、高齢者の自立と社会参加を促す社会づくりを進めてきた。バリアフリー設計への政策が打ち出される中で、注目すべきは視覚への配慮である。日常生活において外界からの情報の約8割以上が視覚を通じて得られるといわれている<sup>[1]</sup>。バリアフリー新法に関係する旅客施設においても、視覚による情報取得は移動時に極めて重要な手段である。しかし、70歳以上の90%が視機能に重要な水晶体に何らかのト

ラブルを抱えている<sup>[2]</sup>。高齢化が進む社会において、視覚による情報取得が困難と感じる高齢者は増加すると予想できる。例えば、リモコンで考えてみると、視機能にトラブルを抱えているとボタンの形や色、文字と背景などは大きく影響を与えていると考える。

そこで、モノづくりの設計者が視機能にトラブルを抱えている者に対応した設計が行える支援を考えた。高齢者によくみられる水晶体混濁眼に焦点を当てた。この水晶体の混濁が進行すると白内障と診断される。水晶体混濁眼の症状はぼやけ、色覚異常、まぶしさなどがある。その中でも本研究は、モノの輪郭がはっきりとせず、背景との境界が曖昧になるぼやけに焦点を当てた。初めに、水晶体混濁眼のぼやけを模擬するシステムを構築した。そして、水晶体混濁眼のぼやけを模擬するシステムの妥当性評価を行った。

### 2. 水晶体混濁眼のぼやけ

#### 2.1 ヒト眼球内における点拡がり関数

視界のぼやけは、ヒト眼球に入射した光を網膜にうまく結像できない場合に発生する。その光学系がどのように焦点を結ぶことができるかを示す値として点拡がり関

---

\*1: 名城大学  
\*2: 東洋インキ株式会社  
\*3: 元 TOTO 株式会社  
\*4: 4ALLdesign/九州大学  
\*1: Meijo University  
\*2: TOYO INK CO., LTD.  
\*3: Former TOTO LTD.  
\*4: 4allDesign/Kyusyu University

---

数 (Point Spread Function: 以下 PSF) がある。たとえば、点光源を収差の小さい光学系により結像させる場合、PSF はピークの鋭いものとなる。しかし、収差の大きい光学系の結像は、ぼんやりと広がった点像となる。

本研究では、水晶体混濁眼のぼやけの状態を表す値として PSF を使用することにより、画像に対しぼやけを表現していく。

## 2.2 白内障のぼやけ模擬

皮質白内障を対象に実験を行った阪本氏<sup>[2]</sup>によると、ぼやけは式 (1) で表せられる。式 (1) に含まれる SLP は、実験により計測された光の散乱程度を表すパラメータであり、阪本氏は回帰直線により式 (2) で求めることができる」と報告している。

$$PSF = \frac{SLP}{\varphi^2} [sr^{-1}] \quad (1)$$

$$\log SLP = a_i + 0.008477 \cdot Age \quad (2)$$

SLP: Stray – light parameter (テスト光源を当てた時の広がりを表すパラメータ) [deg<sup>2</sup>/sr]

$\varphi$ : stray-light 光源位置 (散乱角) [°]

Age: 年齢 [歳]

$a_i$ : 白内障の混濁程度を表す定数項 (表 1)

式 (3) は Stiles と Holladay による散乱光の測定から導出された<sup>[3]</sup>。式 (1), (2) より求めた散乱角  $\varphi = 10^\circ$  における PSF を  $a_{10}$  として、PSF と視野角  $\theta$  の関係を式 (3) より求めることができる。式 (3) 中の係数  $b$  は実験値で求まり、白内障の場合は -2.12 であると報告されている<sup>(3)</sup>。なお、視野角とはディスプレイなどを斜めから見た場合に、どの位の角度まで画面を正常に見ることが可能かを示す指標のことである。

$$PSF = a_{10} \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right)^b \quad (\theta > 1^\circ) \quad (3)$$

$\theta$ : 視野角 [°]

$a_{10}$ : 散乱角  $10^\circ$  における PSF

$b$ : 眼の状態による係数 (白内障は -2.12)

これにより白内障の PSF を求めることが可能になるが、視野角は  $1^\circ$  より大きい場合のみに適用できる制限がある。視野角の制限を無くすために式 (4) を近似させて使用することを考えた。式 (4) は CIE (国際照明委員会) に定義された晴眼者の PSF であり<sup>[4]</sup>、視野角の制限はない。

$$PSF = \left[ 1 - 0.08 \cdot \left(\frac{Age}{70}\right)^4 \right] \cdot \left[ \frac{9.2 \cdot 10^6}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{0.0046}\right)^2\right]^{1.5}} + \frac{1.5 \cdot 10^5}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{0.045}\right)^2\right]^{1.5}} \right]$$

$$+ \left\{ \left[ \frac{400}{1 + \left(\frac{\theta}{0.1}\right)^2} + 3 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 \right] + p \cdot \left[ \frac{1300}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{0.1}\right)^2\right]^{1.5}} + \frac{0.8}{\left[1 + \left(\frac{\theta}{0.1}\right)^2\right]^{0.5}} \right] \right\} \cdot \left[ 1 + 1.6 \cdot \left(\frac{Age}{70}\right)^4 \right] + 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot p \quad (4)$$

Age: 年齢 [歳]

$\theta$ : 視野角 [°]

$p$ : 虹彩の色による係数 (暗い茶色:  $p=0$ , 茶色:  $p=0.5$ , 青緑色:  $p=1.0$ )

図 1 は年齢 70 歳の皮質白内障の中心混濁を入力した場合の式 (3) と、年齢 70 歳を入力した場合の式 (4) を比較したものである。図より、同年齢で晴眼の PSF を表す式 (4) に比べ、白内障の PSF を表す式 (3) は、光がより散乱していることがわかる。これらの式を近似させるために、式 (3) より求めた PSF を式 (4) に代入し、白内障者と同等の PSF を持つ晴眼者の年齢 ( $Age^2$ ) を求めた式 (5)。このとき、視野角は  $10^\circ$  を基準に求めた。

日本人 ( $p=0$ ) を想定し、70 歳で皮質白内障中心混濁の場合は式 (3) より  $a_{10}=0.0174729$  であるので、この条件の白内障者の PSF は、年齢が 117 歳相当の晴眼者の PSF に近似する。その様子を表したものが 図 2 であり、2

表 1 皮質白内障の水晶体混濁状態と式 (2) の定数項との関係

Table 1 Relationship between the lens opacity state of cortical cataract and the constant term of equation (2)

皮質白内障群	群の状態説明	$a_i$
正常群	屈折異常以外に眼科的異常所見が認められない	0.7678
初発	瞳孔径 6.5mm よりも周辺にのみ混濁を認める	0.7373
5mm 透明	瞳孔径 5mm 内には混濁を認めない	0.8572
3mm 透明	瞳孔径 3mm 混濁を認めない	0.9423
3mm 混濁	瞳孔径 3mm 混濁を認めるが、瞳孔中心まで達していない	0.9977
中心混濁	瞳孔中心まで混濁が達している	1.1539
IOL 群	眼内レンズ挿入術が施行された症例	0.8224

つの曲線が近似していることを確認した。このことから、上記の方法により視野角の制限のない皮質白内障のぼやけを表現可能になった。

$$Age^2 = 70 \cdot$$

$$\sqrt[4]{\frac{a_{10}-0.05456-0.01179p}{0.06305+0.01487p}}$$

(5)

Age<sup>2</sup>:白内障相当の PSF をもつ晴眼者の年齢

a<sub>10</sub>:視野角 10°における PSF

p:虹彩の色による係数

### 2.3 晴眼者を基準とした相対的な白内障のぼやけ表現

これまで述べてきた白内障の PSF は、阪本氏の医学データに基づく PSF を使用している。しかし、これは測定値そのままであるために、白内障の絶対的な PSF である。晴眼者自身も PSF を持つため、白内障の PSF を補正することなく PSF を適用させるとぼやけが強く出すぎてしまう。そこで、式 (6) のように白内障の PSF を晴眼者基準とした相対的な PSF へと換算し、適用する。晴眼者は、デザイナーの年齢 AGE=30 歳と想定し、SLP<sub>NormalEye</sub> は式 (2) の SLP は正常群の値  $a_i=0.7678$  を用いた。式 (6) と式 (1) を比較した PSF を表 2 に示す。

$$PSF = \frac{SLP_{Cataract} - SLP_{NormalEye}}{\varphi^2} [1/sr] \quad (6)$$

SLP<sub>Cataract</sub> : 白内障者の SLP

SLP<sub>NormalEye</sub> : 晴眼者の SLP

$\varphi$  : stray-light 光源位置 (散乱角) [°]

### 3. 実験素材

評価法はミネソタ大学ロービジョン研究室と東京女子大学小田研究室で共同開発された MNREAD-J チャート (以下、MNREAD-J とする) を用いた読書評価法でした。これは、日本では主に視覚リハビリテーション分野で活用されている評価法である。MNREAD-J は渋谷らが白内障評価に使用した例もある<sup>[5]</sup>。MNREAD は 19 個の文章から構成されている。

測定方法について説明する。文字サイズの大きい文から読んでいただき、読めれば 1 段階小さな文字サイズの文を読んでいただく。これを文字サイズが小さくなる順に用意した文を読んでいただき、1 文字も読めなくなるまで繰り返す。そして、それぞれの文章を読むのかかった時間と誤って読んだ字や読み飛ばした文字を記録する。なお、視距離 30[cm] から読むのが基本で、30[cm] 以外から測定した場合も結果の換算が可能である。視距離の換算は、MNREAD の視距離換算表に従った。この測定から最大読書速度・読書視力・臨界文字サイズの 3 つのパラメータを算出できる。

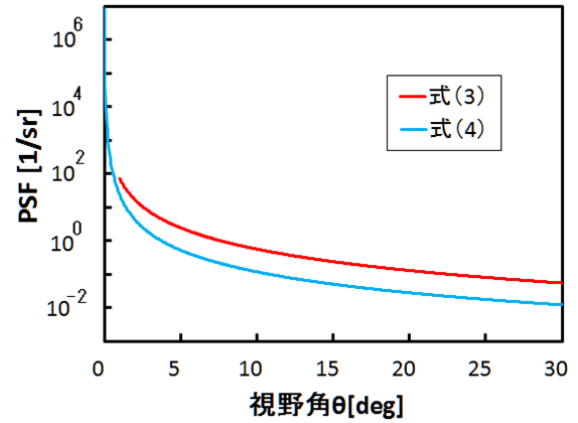


図 1 同年齢での PSF 比較  
Fig. 1 Comparison of PSF at the same age

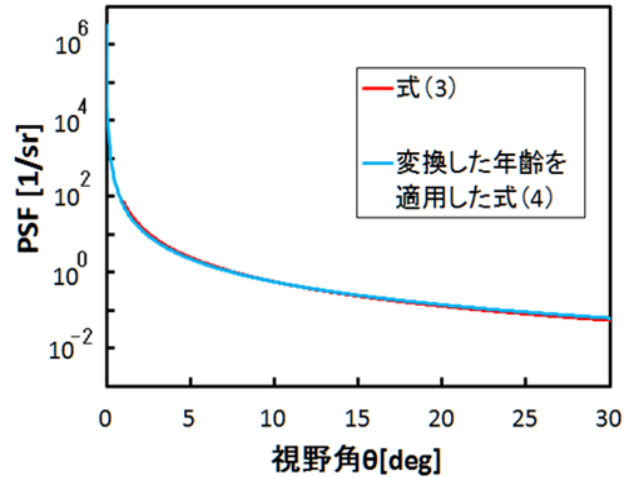


図 2 年齢変換による近似  
Fig. 2 Approximation by age conversion

表 2 散乱角 10° における晴眼基準にしていない PSF と晴眼基準の PSF

Table2 PSF values at a scattering angle of 10° based on sighted eyes or not.

皮質白内障群	式 (1)	式 (6)
正常群	0.10522	0
初発	0.09808	-0.007136
5mm 透明	0.12927	0.024050
3mm 透明	0.15725	0.052034
3mm 混濁	0.17865	0.073430
中心混濁	0.25598	0.150759
IOL 群	0.11931	0.014096

- ・最大読書速度（文字/分）  
文字サイズが最適な場合に読める最大速度
- ・読書視力(logMAR)  
何とかギリギリ読むことができる文字サイズ
- ・臨界文字サイズ(logMAR)  
最大読書速度で読める最小の文字

本研究では、実物の MNREAD のままではぼやけを模擬することができない。そのため、デジタル版の MNREAD-J を構築した。これには Adobe Indesign と Adobe Illustrator のソフトウェアを使用し、構築した。その際、MNREAD-J にある文の数が足りず同一の文を 2 回使用したが、極力学習効果がないように考慮して設定した。

## 4. 再現性読書実験

### 4.1 再現性の評価の方法

作成したデジタル版の MNREAD-J チャートが、実際の MNREAD-J を再現できているかを評価した。同一の実験協力者に、実物の MNREAD-J とデジタル版の MNREAD-J でそれぞれ読書実験を行い、3 つのパラメータの結果を比較する。差がなければ再現できていると考えた。

### 4.2 MNREAD-J 読書実験の条件と協力者属性

本実験は暗室で行った。視距離は 1.0[m] とし、チャート上の輝度は 60[cd/m<sup>2</sup>] とした。MNREAD の推奨輝度は 80[cd/m<sup>2</sup>] だが、これは暗室内に設置した照明（D50 相当の演色評価用蛍光灯）下で、実物の MNREAD-J チャート面の輝度は最も高くても 60 [cd/m<sup>2</sup>] であったためである。

視線の高さは MNREAD-J の中心になるように合わせた。視距離は、協力者の眼球と MNREAD-J との距離を測定した。読書実験は、実験協力者が文章を読み始めてから読み終わるまでを手元のストップウォッチで計測した。目線の高さ、視距離の測定、時間の計測については、以後のすべての実験と同様である。

デジタル版の MNREAD-J は実際の MNREAD-J の実験と同様に視距離は 1.0[m] とし、輝度は実物の読書実験に合わせて 60[cd/m<sup>2</sup>] とした。ディスプレイ（色覚ディスプレイ CX271-CN, 解像度 1920×1080[ppi], EIZO（株）製）の中心に用意された黒枠の中に文が表示される。協力者には文が表示されたら、読み始めていただく。この実験では PowerPoint で大きい文字の文から順番に文を表示させた。ただし、1 枚のスライドには 1 文のみを提示させ、各文のスライド間には白紙のスライドを挟んだ。これにより実験者が文を読むのかかった時間や、読み損じた文字を記録している最中は白紙のスライドを表示させた。

実験は若年者 8 名（男性 7 名、女性 1 名）に行った。

年齢は 22.5±0.5 歳で、1 名が裸眼で 7 名は矯正視力であった。眼の疾患は何もないことを、実験協力者の申告により確認した。

## 4.3 再現性確認実験の結果

実物とデジタル版それぞれの MNREAD-J の計測結果を表 3 に示す。実物とデジタル版それぞれで母平均の差の検定（t 検定）を行った。その結果、読書視力にのみ有意な差が現れた。

実験協力者からは、デジタル版で小さい文字の条件がより見えにくいとの回答があった。そこでディスプレイの解像度を上げてより小さい文字を表現できないかと考えた。解像度を上げてディスプレイの表現能力を上げるにより表現できていなかった文字がより鮮明に表現できる。しかしすでにディスプレイの解像度は最大だった。ゆえに、視距離は 1[m] として現状の条件（小数視力 1.270 相当の表現能力のディスプレイ）を限界として、高齢者と若年者間で妥当性評価することとした。

## 5. 妥当性評価実験

### 5.1 実験条件

表 4 は若年者と高齢者に提示する白内障処理条件である。若年者に対しては 10 条件行う。MNREAD-J は 19 個（文字サイズは 55pt～0.9pt）の文から構成されているので、10 条件行うためには 190 個の文が必要である。しかし、あらかじめ MNREAD-J で用意されている文は 51 個しかなかった。そこで文をランダムに振り分けることを考えた。振り分ける上で、同一白内障処理条件の中では重複しないようにしたが、どうしても異なる条件間では同じ文は出てきてしまう。そこで、異なる条件間では、同一の文が再提示されるときは、文字の大きさを大きい群と小さい群のカテゴリに分けて、大きさが近接せずに提示されるように考慮した。実験の環境条件については再現性確認実験とほぼ同じである。異なる点は、ディスプレイ輝度を MNREAD-J の推奨輝度 80[cd/m<sup>2</sup>] となるように確保した。

表 3 視距離 1[m] 実物とデジタル版における読書実験結果比較

Table3 Viewing distance 1 [m] real and digital version in comparison of reading experiment results

	実物	デジタル版	結果
最大読書速度 (文字/分)	436.13±51.88313	428.5±53.34557	
読書視力 (小数視力)	1.544±0.252837	1.27±0.223754	**
臨界文字サイズ (小数視力)	0.869±0.152349	0.811±0.219547	

表 4 提示する白内障処理条件, () 内は散乱角 10[°]  
相当の PSF 値

Table4 Conditions of opacity of ocular lens to be presented,  
denoting PSF values at scattering angle 10 [°] in  
parentheses of each condition.

	若年者	高齢者
1	80 歳 中心混濁(0.5738)	
2	80 歳 3mm 混濁(0.3688)	
3	80 歳 3mm 透明(0.3118)	
4	70 歳 中心混濁(0.4538)	
5	70 歳 3mm 混濁(0.2848)	
6	70 歳 3mm 透明(0.2378)	
7	60 歳 中心混濁(0.3548)	
8	60 歳 3mm 混濁(0.2148)	
9	60 歳 3mm 透明(0.1768)	
10	晴眼 (未処理の画像)	晴眼 (未処理の画像)

## 5.2 妥当性評価実験の協力者の属性

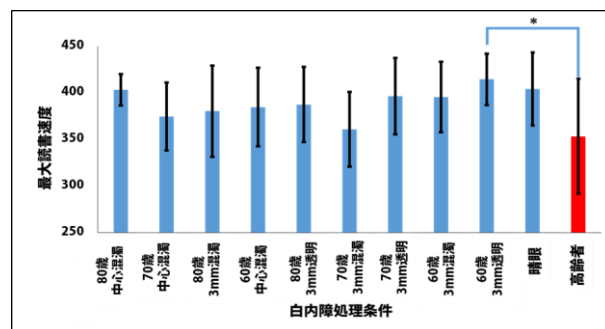
本実験は名城大学倫理審査委員会の承認を得て実施した。実験協力者には、あらかじめ実験の趣旨などを説明し、同意の下でご協力していただいた。実験協力者は若年者として男性 5 名、女性 5 名 (平均  $22.5 \pm 2.5$ )、高齢者 4 名 (白内障者 3 名) である。白内障者 3 名の年齢は  $75.5 \pm 1.5$  歳で白内障でない方の年齢は 73 歳であった。また、すべての方に実験は矯正視力で行っていただいた。そして実験を行った後に、実験協力者に実験を通しての感想などをインタビューした。

## 5.3 妥当性評価実験結果

図 3 は白内障処理条件に対する最大読書速度結果である。若年者は白内障処理を施した文を読んだ結果であり、高齢者は何も処理をしていない文を読んだ結果である。縦軸を最大読書速度 (文字/分)、横軸を白内障処理条件とした。横軸の白内障処理条件は右に向かうほど軽くなるように並べた。若年者の各条件と高齢者に差があるかをみるために、t 検定を行った。その結果、高齢者と 60 歳 3mm 混濁の条件にのみ有意差が現れた ( $p < 0.01$ )。図 4 は白内障処理条件に対する読書視力の結果である。MNREAD-J で出力される対数視力(logMAL)を少数視力に換算している。図より、白内障の状態 (ぼやけ程度) が軽くなるほど視力が上がっている傾向がわかる。若年者の各条件と高齢者に差があるか見るために、t 検定を行った。その結果、高齢者と晴眼にのみ有意な差があった ( $p < 0.01$ )。

図にはないが縦軸に臨界文字サイズ (少数視力値に換算)、横軸を白内障処理条件としての結果が若年者の各条件と高齢者とを t 検定により比較した。その結果、どの条

件に対しても有意な差がなかった。

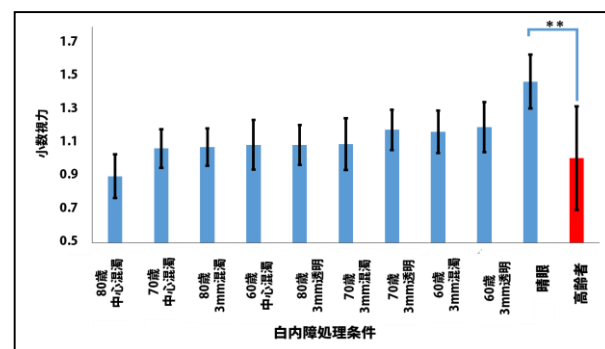


(\* :  $p < 0.05$  \*\* :

$p < 0.01$ )

図 3 水晶体混濁程度の条件における最大読書速度結果  
(文字/分)

Fig. 3 Results of maximum reading speed on lens opacity



(\* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$ )

図 4 水晶体混濁程度の条件における読書視力結果

Fig. 4 Reading visual acuity results on lens opacity

## 6. 考察

若年者に白内障ぼやけ模擬画像を提示した実験を行った結果と、高齢者に何も処理しない実験とを比較すると、最大読書速度、読書視力ともに差があった (図 3, 図 4)。図 4 から読書視力は晴眼の条件を提示した若年者と高齢者とは差があった。この図 3 と図 4 のデータについて渋谷らが片眼に対して白内障混濁別の読書実験結果と比較する<sup>[5]</sup>。図 3 において、晴眼と高齢者のデータを除いた白内障処理条件の最大読書速度の平均値は 385 (文字/分) であり、文献[5]が示す皮質白内障の平均値は 293 (文字/分) である。両者のデータには約 100 (文字/分) の差が生じているが、本実験は両眼で行い、文献データは片眼で行った結果であることから、それを考慮すると本実験における最大読書速度の結果は妥当であると考えられる。

さらに渋谷は、最大読書速度は混濁程度の差はなかったが年齢に影響されたと報告している<sup>(5)</sup>。本実験でも症状ごとにばらつきは少なかった傾向は、渋谷らの結果と同様であった。しかし、人によって文ごとに読みや

すい文と読みにくい文が存在した可能性がある。実際に、はっきり読める文字サイズであっても読みにくいために時間がかかってしまうということがあった。

次に読書視力について考える。図4を見ると読書視力は症状が進行するほど低下している傾向がある。渋谷らの実験でも読書視力は加齢による変化はみられず、症状の進行に伴い低下すると報告している<sup>[5]</sup>。これらの読書視力や最大読書速度の結果から、水晶体混濁のぼやけは再現できている傾向にある。

最後に臨界文字サイズについて考える。臨界文字サイズは水晶体混濁眼と晴眼では有意な相関があるとの報告がある<sup>[9]</sup>。症状が軽くなるにしたがい、視力が良くなると考えられる、しかし、本実験結果ではそのような傾向はみられず、症状ごとにばらつきが出てしまった。その原因は最大読書速度と同様に、人によって文ごとに読みやすい文と読みにくい文が存在したことが考えられる。ゆえに、白内障処理が重い条件でも、読みやすい文が提示されれば、より小さい文字サイズまで読めた可能性がある。逆に、白内障処理が軽い条件で、読みにくい文が提示されれば早い段階ではっきり読むことができなくなる。

今後は、読む速さや読みやすい文といった個人差や、学習効果に影響されない実験の考案が必要である。また、実験協力者を増やして評価することが課題である。

## 7. 結言

本研究では、設計者に対してのモノづくりの設計支援を目的に、設計者が設計するときにあらかじめ白内障のぼやけ状態でモノの視認を模擬できるシステムの構築を目指した。そのために、白内障の視覚特性のひとつである、ぼやけを画像上で表現するシステムの構築を行い、そのシステムの妥当性評価実験を行った。妥当性評価実験には、視覚リハビリテーションで使用するMNREAD-Jチャートのデジタル版を構築した。そして、これを用いて若年者と高齢者に妥当性評価実験を行った。これより、最大読書速度と読書視力の結果から水晶体混濁状態を模擬できている傾向があった。

## 参考文献

- [1] 阪本明子 “皮質白内障の光学特性と視機能”，金沢医科大学雑誌，28-3，pp.151-159，(2003)
- [2] 文献1のpp.153-154
- [3] van den Berg, T. J. T. P. “Analysis of intraocular straylight, especially in relation to age”Optom.Vis.Sci, 52-59,(1995).
- [4] Vos, J. J. and van den Berg, T. J. T. P. “Report on disability glare”,CIE collection, 1-9, (1999).
- [5] 渋谷：白内障混濁別の読書能力,日本白内障学会, Vol. 25, pp. 39-44, (2015)