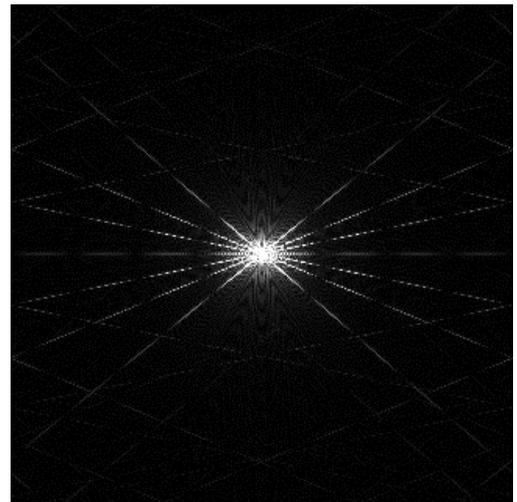


# グレア現象に関する研究

## 光学的要因と低減方法に迫る



愛媛県立松山南高等学校 光条研究班

渡部 真也 渡辺 斗真 高石 遼旺

## [目次]

<b>1</b>	要旨・概要	P 3
<b>2</b>	問題提起及び研究目的	P 4
1	研究の動機と背景	P 4
2	文献調査	P 4
3	本研究の目的	P 4
<b>3</b>	研究内容（研究方法、結果、考察）	P 5
	[簡易眼球モデル測定装置]	P 5
1	装置の構築と工夫	P 5
2	像の大きさ算出方法	P 6
	[観測] 自動車のヘッドライトによるグレア現象の観測	P 7
1	目的	P 7
2	観測方法	P 7
3	観測結果	P 8
4	考察	P 8
5	本研究の仮説と検証方法	P 9
	[実験 1] グレア現象によって見えなくなる物体による回折現象の検証	P 10
1	目的	P 10
2	実験方法	P 10
3	実験結果	P 11
4	考察	P 11
	[シミュレーション] まつ毛や瞳孔による回折像の検証	P 12
1	目的	P 12
2	理論	P 12
3	シミュレーション方法	P 12
4	シミュレーションで用いた入射光画像とシミュレーション結果	P 13
	[実験 2] 眼球の各構造が光像に与える影響	P 15
1	目的	P 15
2	実験方法	P 15
3	実験結果	P 16
4	考察	P 17
	[実験 3] 瞳孔径と光像の大きさの関係	P 19
1	目的	P 19
2	実験方法	P 19
3	実験結果	P 20
4	考察	P 20
	[実験 4] 光条の発生方向の検証	P 21
1	目的	P 21
2	実験方法	P 21

3	実験結果	P 21
4	考察	P 22
[調査]	観測者が視る目視像の検証	P 23
1	目的	P 23
2	調査方法	P 23
3	調査結果	P 23
4	考察	P 24
[実験 5]	視力についての検証	P 25
1	目的	P 25
2	実験方法	P 25
3	実験結果	P 25
4	考察	P 25
[実験 6]	グレア現象発生時における回折光の分布	P 26
1	目的	P 26
2	実験方法	P 26
3	実験結果	P 26
4	考察	P 27
[実験 7]	フィルターによるグレア現象低減についての検証	P 28
1	目的	P 28
2	実験方法	P 28
3	実験で用いた器具	P 28
4	実験結果	P 29
5	考察	P 33
4	結論	P 34
5	課題	P 34
6	展望	P 35
7	謝辞	P 35
8	参考文献	P 35
9	校内研究倫理審査委員会（IRB）の事前審査について	P 36
10	補足資料	P 36

## 1 要旨・概要

対向車のヘッドライトの光によって、目の前の歩行者が見えなくなる。このような夜間に複数の光源の光が交錯し、光源の正面に存在する観測者が周囲の物体を認識できなくなる現象を**グレア現象**という。グレア現象は交通事故を引き起こす要因の一つである。その光学的要因は、松岡らによって、まつ毛による回折現象であることが示されており、その回折像をグラフィックによって再現する手法が紹介されている<sup>1)</sup>。しかし、光を遮る要因としてまぶたや瞳孔、認識できなくなる物体自体から生じる回折光等、まつ毛以外の要因についても考える余地がある。そこで、本研究では、カメラを活用した簡易眼球モデルを構築し、眼球の条件に合わせて光像を得ることを試み、その結果を理論的に分析することにした。これらの手法により、具体的なグレア現象の光学的要因を明らかにすることを目的に研究を行った。研究の結果、グレア現象は、主に観測者のまつ毛と瞳孔による回折現象によって生成する円形像や光条が要因で生じることが分かった。また、通常時にはまつ毛の影響によって生じる光条の有無は、観測者のまつ毛の向きや長さによって条件が異なるために個人差があるが、グレア現象が生じる場合は、顔をしかめる場合が多く、まぶたが閉じかかっていることによってまつ毛が光を遮るために、回折光が生じる場合がほとんどであることや、強い光で顔をしかめることにより、まぶたでも光が回折し、鉛直方向に光条が生じるため、より強くグレア現象が発生することが分かった。また、波長の長い光を、緑色カラーフィルター等を用いて遮ることで、グレア現象の要因となる光条等の回折光を抑え、視界に必要な光を残すことに成功し、グレア現象を低減する手法を考案することができた。



図1 グレア現象

車の明かりが交錯し、正面の人が見えなくなっている。

## 2 問題提起及び研究目的

### 1 研究の動機と背景

夜間に複数の光源の光が交錯し、光源の正面に存在する観測者が周囲の物体を認識できなくなる現象をグレア現象という。グレア現象は交通事故を引き起こす要因の一つである。我々は、この現象の発生原因に興味を持つとともに、その低減方法を考案したいと考え、調査を開始した。

### 2 文献調査

#### 2.1 グレア現象の要因<sup>2)</sup>

グレア現象は、いくつかの発生要因が重なって生じる。主に知られているものを以下に示す。

- ・ 不能グレア…極度の高い輝度により視覚が一時的に大きく損なわれる状態
- ・ 減能グレア…光学的要因によって視機能が低減する状態
- ・ 不快グレア…眩しさによる不快感が生じた状態

本研究では、**光学的要因である減能グレアについて考察する。**

#### 2.2 グレア現象の光学的要因に関する先行文献と本研究の方向性

グレア現象の光学的要因は、松岡らによって、まつ毛による回折現象であることが示されており、その回折像をグラフィックによって再現する手法が紹介されている<sup>1)</sup>。しかし、まつ毛以外の眼の構造によって生じる像について言及した具体的研究は見当たらなかった。そこで我々は、光を遮る要因としてまぶたや瞳孔、認識できなくなる物体自体から生じる回折光等、まつ毛以外の要因についても考える余地があると考え、研究を進めることにした。

#### 2.3 回折光の理論式<sup>4)</sup>

凸レンズを通過する光がつくる回折像は、次に示すフラウンホーファー回折の理論式によって表されることが知られている。

$$u(x,y) = \frac{iA}{\lambda f} e^{-ikf} e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2f}} \iint u_0(\xi,\eta) e^{i2\pi(x\xi/\lambda f + y\eta/\lambda f)} d\xi d\eta \quad \text{式(1)}$$

$u(x,y)$  : 回折光の強度分関数  $A$  : 入射光の振幅  $f$  : レンズの焦点距離

$u_0(\xi,\eta)$  : 入射光の光強度分布関数  $k$  : 波数  $\lambda$  : 入射光の波長

網膜で結像する像はいずれも水晶体、つまり凸レンズを通過する光と似た振る舞いと考えることができる。

### 3 目的

グレア現象の光学的要因を明らかにし、グレア現象を低減する方法を提案すること。

### 3 研究内容（研究方法、結果、考察）

#### [簡易眼球モデル測定装置]

##### 1 装置の構築と工夫

眼球に入る光像を分析するために、カメラを眼球モデルとした装置を作製した。ヒトの眼（片目）でははっきりと認識している範囲は、レンズの焦点距離に換算すると 50 mm ほどであることが知られている<sup>3)</sup>。この焦点距離 50 mm のカメラ用レンズを標準レンズといい、本研究ではこれを使用した。また、図 4 のように通常のデジタル一眼レフカメラではハーフミラーで反射し、レンズに入った光の光路が二手に分かれてしまうため、正確な輝度を測定することが難しい。そこで、本研究ではハーフミラーがない構造であるミラーレス一眼レフカメラを使用した。さらに、まぶたやまつ毛、瞳孔の特徴を模したキャップを 3D プリンターで作製し、レンズに取り付けた。また、班員全員でいくつかの LED ライトを見た際の目視像と撮影された raw 画像（画像処理のない、無変換画像）を比較し、光源撮影像が目視像に最も近づくカメラ設定（ISO 値=320、シャッタースピード 1.00 s）に設定した。

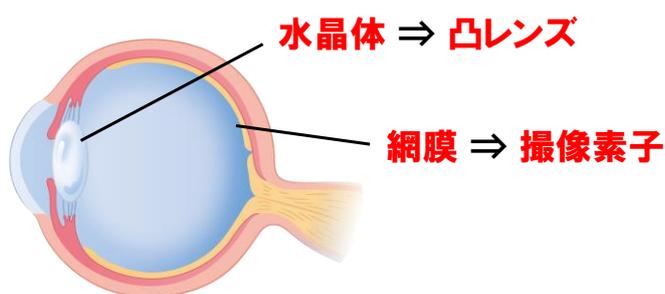


図 2 眼球模式図



図 3 簡易眼球モデル測定装置

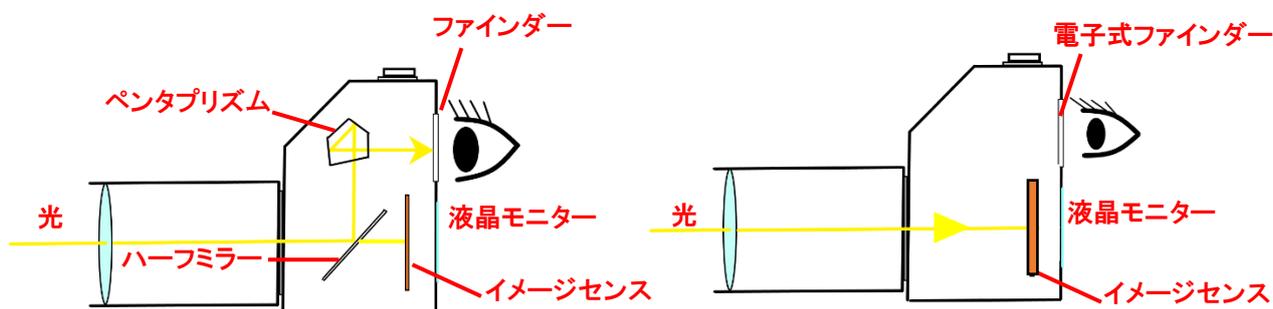


図 4 デジタル一眼レフカメラ(左)とミラーレス一眼レフカメラ(右)の比較  
デジタル一眼レフカメラでは、光路が二手に分かれてしまう。

## 2 像の大きさ算出方法

簡易眼球モデル測定装置を用いて、像の大きさを測定する方法を検討する。図5に示す罫線の書かれた紙（罫線間隔  $A = 6.0 \text{ mm}$ ）を簡易眼球モデル測定装置にて撮影する状況を考える。実験条件を次に示す写像公式

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \text{式(2)}$$

$a$ : 物体からレンズまでの距離  
 $b$ : レンズから結像位置までの距離  
 $f$ : 焦点距離

に代入し、 $b$  を算出して像の倍率  $\left| \frac{b}{a} \right|$  を求める。これによって画像の罫線間隔  $B[\text{mm}]$  は、次の式で得ることができる。

$$B = \left| \frac{b}{a} \right| \times A \quad \text{式(3)}$$

実際にこの罫線を撮影した際の撮影像の罫線間隔が  $C[\text{pixel}]$  であるとする、1 pixel 当たりの像の長さ  $D[\text{mm/pixel}]$  は

$$D = \frac{B}{C} \quad \text{式(4)}$$

である。本研究では、この数値を利用して、像の大きさを分析した。

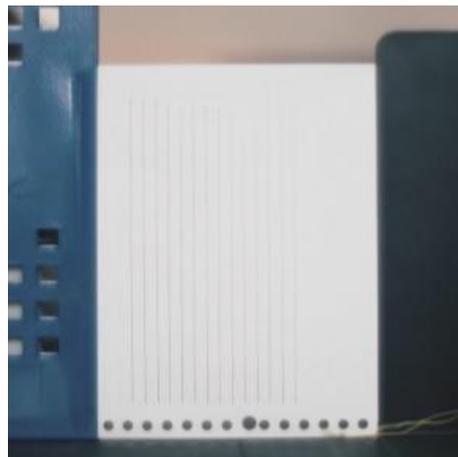


図5 罫線を書いた紙

罫線間隔  $C[\text{pixel}]$  を全て測定し、平均値を測定値とした。

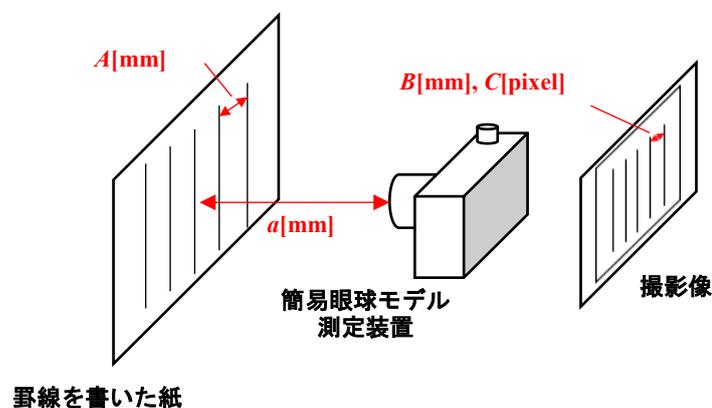


図6 像の大きさ測定方法

[観測]

自動車のヘッドライトによるグレア現象の観測

1 目的

自動車によって生じるグレア現象を確認する。

2 観測方法

自動車によって生じるグレア現象を確認するため、図7のように暗い場所で自動車の前にヒトが立つ際のグレア現象を観測した。また、図7の条件だけでなく、ヘッドライト、ヒト、観測者の位置関係の条件を変えることによるグレア現象が起こる条件の変化を確認した。

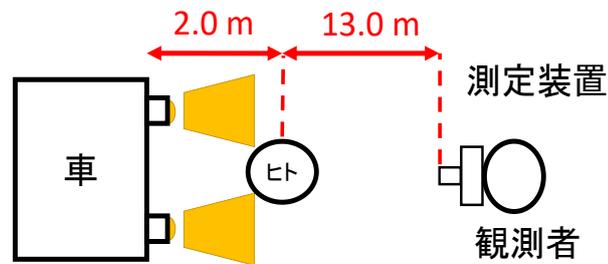


図7 観測 概略図

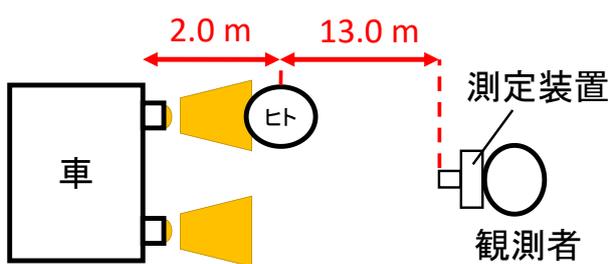


図8 観測

ヒトがライトの前に移動した場合

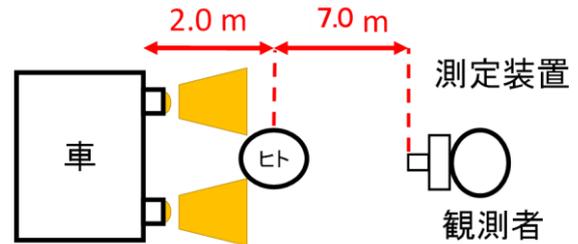


図9 観測

観測者がヒトに7.0m地点まで近づいた場合

### 3 観測結果

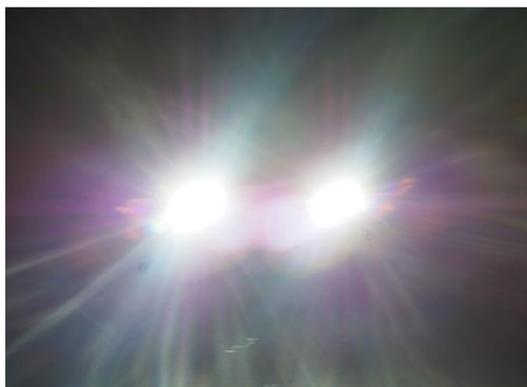


図 10 図7の条件による観測結果  
ヒトの像は確認できない。

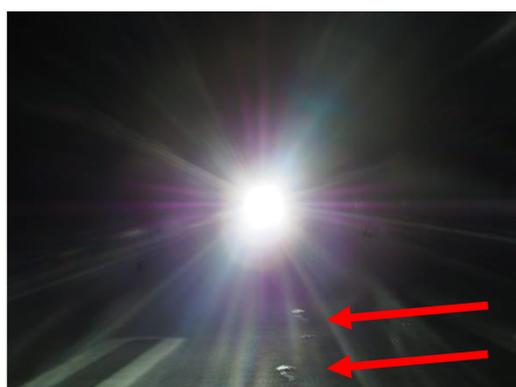


図 11 図8の条件による観測結果  
赤矢印の部分にヒトの像が確認できる。

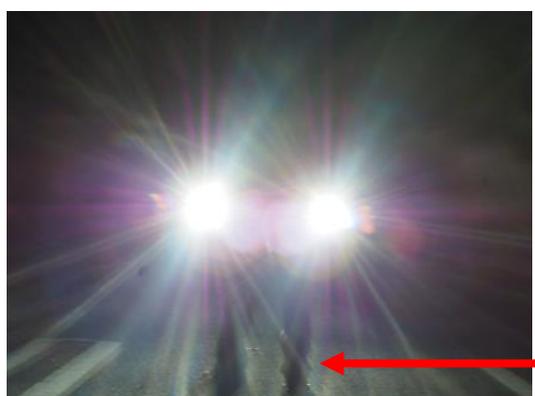


図 12 図9の条件による観測結果  
赤矢印の部分にヒトの像が確認できる。

### 4 考察

図 10 のようにライト中間にヒトがいる場合、グレア現象によって左右の光源による光像が重なり合い、それがヒトの像の手前で広がるために、ヒトの像が全く見えない。一方、ライト正面にヒトが来ると、図 11 のように、カメラに入る光が減光され、グレア現象も低減した。また、この場合にはヒトがライトの前に立っているが、光源の光がライトや車の縁などで回折して広がる場合、図 11 では右側のライトの光像もヒトの周囲から広がって見えるはずである。しかし、それが表れないことから、ヒトよりも観測者側において回折現象が起こっていると考えられる。

さらに、図 12 のように、図 10 ではグレア現象によって見えなくなっていたヒトに観測者が近づくと、観測者からヒトの像が見えるようになった。よって、グレア現象は、遮光物と観測者の距離が大きくなると、より強く発生することが分かった。

次に、光像の色について考察する。観測結果のいずれも、光像の外側が赤みがかっていることが分かる。これは、波長の長い光ほど回折しやすい性質によって、この現象が起きていると考えられる。

## 5 本研究の仮説と検証方法

### 5.1 仮説

図 10 の考察より、ヒトの像よりも観測者側で光が広がると考えた。このことから、少なくともグレア現象は、見えなくなる物体そのものが遮光することによって生じる回折光か、観測者のまつ毛、まぶた、瞳孔で生じる回折光によって発生すると考えられる。

### 5.2 検証方法

グレア現象で見えなくなる物体あるいは、観測者のまつ毛、まぶた、瞳孔それぞれのモデルに対してLEDライトの光を当て、簡易眼球モデルにて光像を観測する。観測された光像と回折理論に基づくシミュレーション結果を比較して、得られた光像が回折光によるものなのか、検証する。また、実際に目を見た像と実験で得られた像に相関があるかどうかを、許可を得た 100 人から聞き取り調査を行い、検証する。

## [実験 1]

### グレア現象によって見えなくなる物体（遮光物）による回折現象の検証

#### 1 目的

グレア現象によって観測者が認識できなくなる物体から生じる回折光を測定する。

#### 2 実験方法

- (1) 図 13 のような眼球モデルキャップを測定装置に取り付けた。
- (2) 暗室に図 14 に示す装置を設置し、図 15 のように光源の光の下半分を遮光した。
- (3) 光源と測定装置の距離を 2.0 m とし、遮光板と測定装置の距離  $x$  を 0.5 m～1.0 m の間で 0.1 m ずつ変更し、得られる光像をそれぞれ 10 回ずつ raw 形式で撮影した。
- (4) 得られる光像は、図 15 のような光条を伴った。画像解析ソフト「マカリ」にて観測された光条の長さ  $y$  を測定し、 $x$  と  $y$  の関係を分析した。

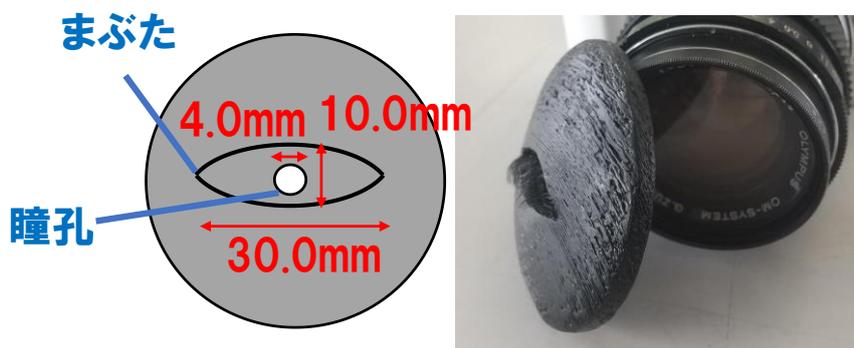


図 13 使用した眼球キャップ

まぶたの先から瞳孔までの奥行は 2.0 mm である。この寸法は、班員全員の眼を参考に決定した。

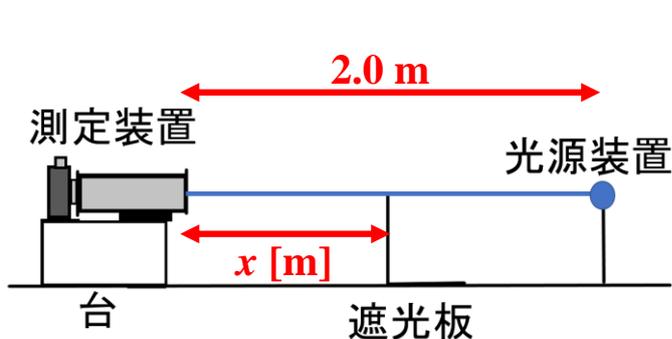


図 14 実験 1 装置図

測定位置での照度が 2000 lux となるよう設定した。  
3.0 mm 径の青色 LED を使用した。

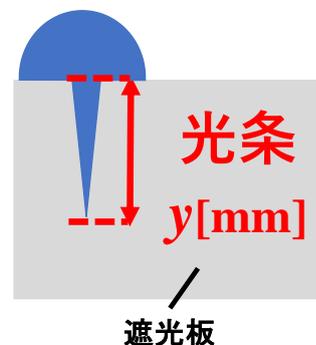


図 15 遮光の様子と観測された光条

### 3 実験結果

図 16 のように、遮光板によって一方向に遮光した場合に生じる光条の長さは、遮光物から観測者までの距離に依存するものの、非常に短かった。

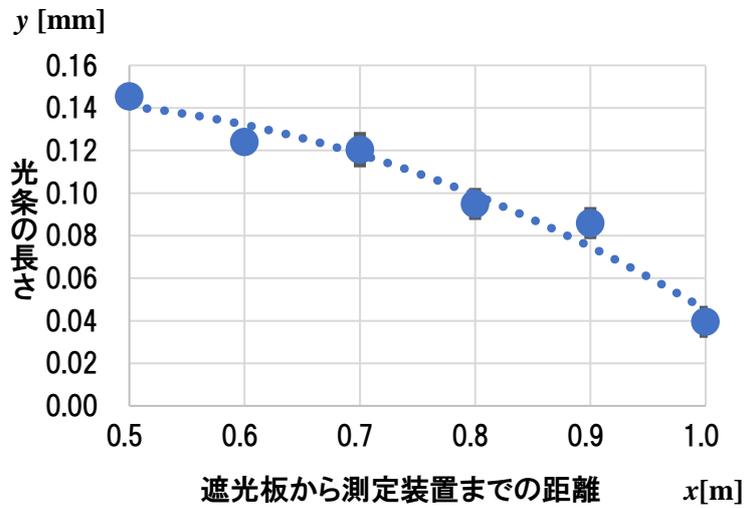


図 16 実験 1 の結果



図 17 得られた光像例

### 4 考察

図 16 より、生じた光条は、最大でも 0.15 mm と、写像公式 (2) から算出した光源の視直径 0.08 mm と大きな差は認められないため、光を遮る物体自体によって生じる回折光が、グレア現象の原因だとは考えにくい。

## まつ毛や瞳孔による回折像の検証

### 1 目的

回折理論による眼球周辺で生じるシミュレーション像を確認する。

### 2 理論<sup>4)5)6)</sup>

凸レンズを通過する光がつくる回折像は、式(1)で表される。式(1)の二重積分の部分は、フーリエ変換である。コンピュータで演算することを考える場合、積分を計算することはできないため、以下に示す二次元離散フーリエ変換 (DFT) に書き換えることにする。

$$u(x,y) = \frac{iA}{\lambda f} e^{-ikf} e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2f}} \sum_{\xi=0}^{N-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} \{u_0(\xi,\eta) e^{i2\pi(x\xi/\lambda f + y\eta/\lambda f)/N}\} \quad \text{式(5)}$$

$N$ : 入射光の光強度分布関数画像が正方形の場合における一辺当たりの画素数

この式を基にプログラミングを実行し、回折像を分析した。

### 3 シミュレーション方法

- (1) 瞳孔への入射光の強度分布関数を表す画像を draw ソフト「ペイント」にてグレースケールで作製した。画像は 3000 pixel×3000 pixel とした。
- (2) 図 18 に示す Python プログラムにて、式(5)の演算を行った。演算結果をグレースケール画像で出力すると、網膜で結像する像の予想図が得られる。この回折像の分析を行った。

```

import numpy as np
import cv2
from matplotlib import pyplot as plt
img = cv2.imread('nyuusyakou.png', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)/255
dft = cv2.dft(np.float32(img), flags = cv2.DFT_COMPLEX_OUTPUT)
dft_shift = np.fft.fftshift(dft)
n=3000
f=50
λ =600*10**(-6)
k=2*np.pi/λ
A=np.zeros((n, n))
B=np.zeros((n, n))
C=np.zeros((n, n))
D=np.zeros((n, n))
for y in range(n):
    for x in range(n):
        A[y][x]=k*f+((k/2/f)*((x*f*λ)**2+(y*f*λ)**2))
B=1/λ /f*np.sin(A)
C=1/λ /f*np.cos(A)
D=np.stack([B, C], axis=2)
E=cv2.magnitude(dft_shift[:, :, 0], dft_shift[:, :, 1])
F=cv2.magnitude(D[:, :, 0], D[:, :, 1])
magnitude_spectrum=E*F
plt.subplot(121),plt.imshow(img, cmap = 'gray')
plt.title('Input Image'), plt.xticks([], plt.yticks([]))
plt.subplot(122),plt.imshow(magnitude_spectrum, cmap = 'gray')
plt.title('Magnitude Spectrum')
plt.show()
plt.imsave('kaisetsukou.png', magnitude_spectrum, cmap = 'gray')

```

図 18 作成した回折光検証プログラム<sup>4)</sup>

#### 4 シミュレーションで用いた入射光画像とシミュレーション結果<sup>7)</sup>

図 19(内径 4.0 mm の瞳孔モデル)では、円環状の回折光 (エアリーディスク) と放射状の細かい光条が観測された。円環状の回折光はエアリーディスクと呼ばれており、円形孔を通過した回折光に見られる特徴である。しかし、この円環の明線間隔は、目視で確認できるほど大きくないため、結果のようにぼんやりとした円形像に見える。また、放射状の細かい光条は光量大きいほどはっきり見える傾向があった。

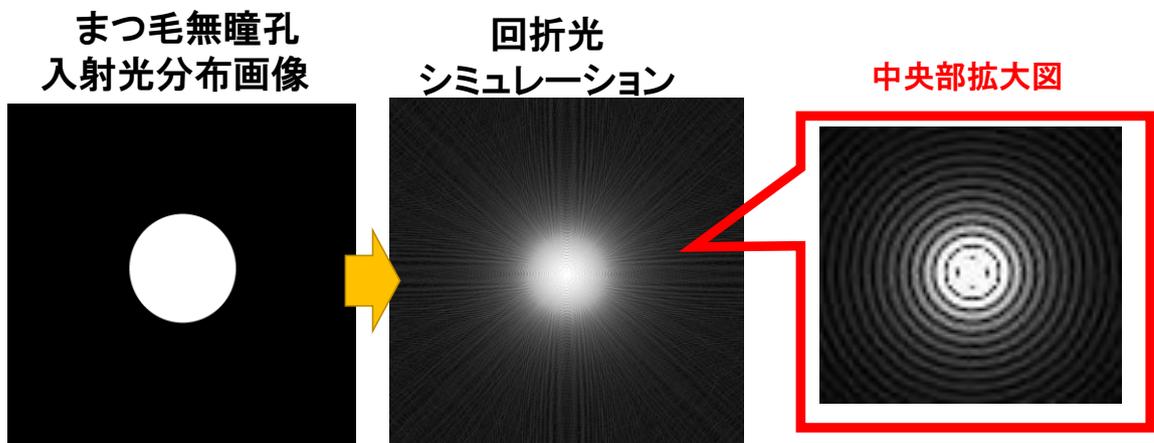


図 19 内径 4.0 mm の瞳孔を通過した光の回折像  
シミュレーション結果

図 20（内径 4.0mm の瞳孔に放射状のまつ毛を重ねたモデル）では、回折光において左右に放射状の光条とぼんやりとした円形像が重なって観測された。まつ毛を放射状にしたのは、図 21 のように眼球が丸いことによってまつ毛が放射状に広がって分布するためである。比較検証として図 22 のように図 20 の放射状のまつ毛を縦に変更したモデルも検証した。こちらは左右に走る光条が一本現れた。また、図 23 のように、瞳孔のない、まつ毛のみのモデルを検証したところ、円形像のない、放射状の光条のみが表れた。

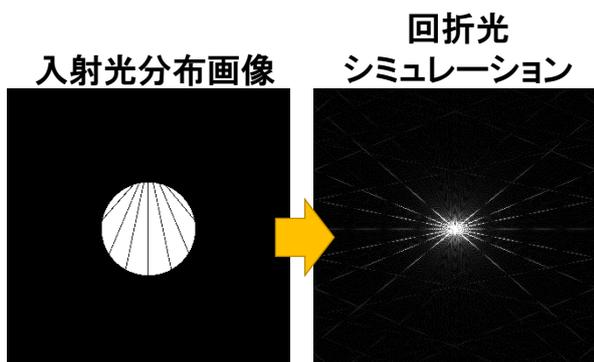


図 20 内径 4.0 mm の瞳孔、放射状に生えたまつ毛を通過した光の回折像 シミュレーション結果



図 21 まつ毛の方向

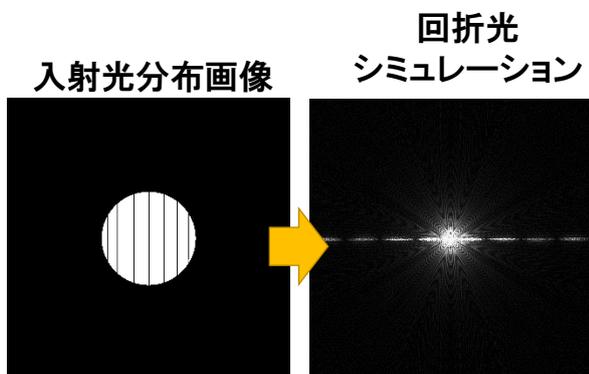


図 22 まつ毛有 鉛直方向に生えたまつ毛に対するシミュレーション結果

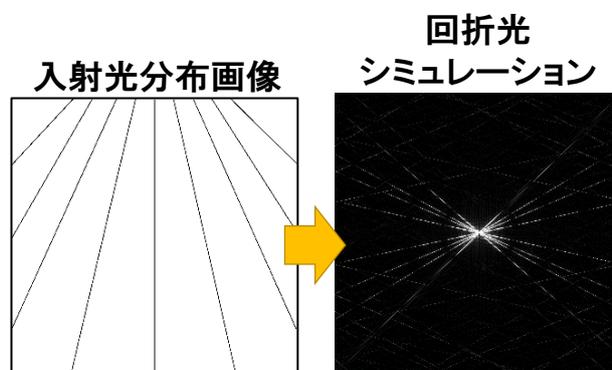


図 23 まつ毛のみ 放射状に生えたまつ毛に対するシミュレーション結果

[実験 2]

眼球の各構造が光像に与える影響

1 目的

得られる光像が影響を強く受ける眼球の構造を検証する。

2 実験方法

- (1) 図 24 に示す 5 つの眼球モデルキャップを 3D プリンターで作製し、簡易眼球モデル測定装置に取り付けた。
- (2) 図 25 に示す装置を暗室に設置し、光像を raw 形式で撮影した。
- (3) まぶた形状をモデル化した図 23 におけるモデル C ~ E に図 26 のような付けまつ毛を取り付け、(2) と同様の実験を行った。
- (4) 得られる光像における光源の中心からの像の長さ (最大値) を画像解析ソフト「マカリ」にて測定し、分析した。

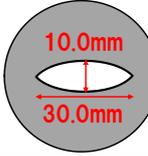
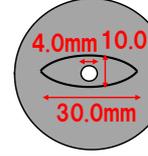
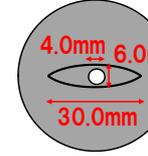
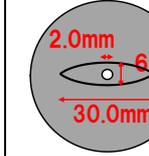
モデル名	モデルA	モデルB	モデルC	モデルD	モデルE
特徴	孔径 4.0 mm 瞳孔モデル	まぶた形状 モデル	孔径 4.0 mm 瞳孔 +まぶたモデル	孔径 4.0 mm 瞳孔 +しかめまぶたモデル	孔径 2.0 mm 瞳孔 +しかめまぶたモデル
キャップ概形					

図 24 実験 2 で使用するキャップの形状図

- ・眼球のどこで回折しているか検証するため、瞳孔やまぶた等、眼の要素の形に模したキャップを作製した。
- ・まぶたの寸法は班員の眼球における寸法を参考にし、瞳孔の寸法は、文献<sup>3)</sup>を参考にした。
- ・まぶたの先から瞳孔までの奥行は 2.0 mm である。班員の眼球における寸法を参考にした。

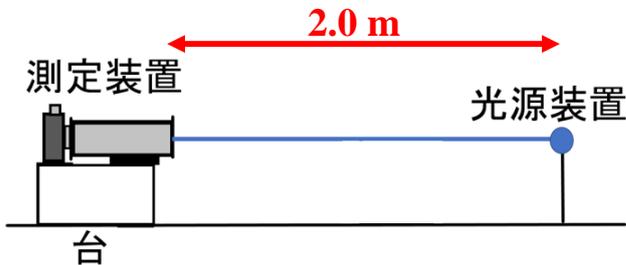


図 25 実験 2 装置図

測定位置での照度が 2000 lux となるよう設定した。  
3.0 mm 径の青色 LED を使用した。



図 26 使用した付けまつ毛  
市販のものを使用した。

3 実験結果

モデル名	モデルA	モデルB	モデルC	
			まつ毛無	まつ毛有
光像				
モデル名	モデルD		モデルE	
	まつ毛無	まつ毛有	まつ毛無	まつ毛有
光像				

図 27 実験 2 で発生した光像の写真  
この図は掲載のため jpg 化したものである。

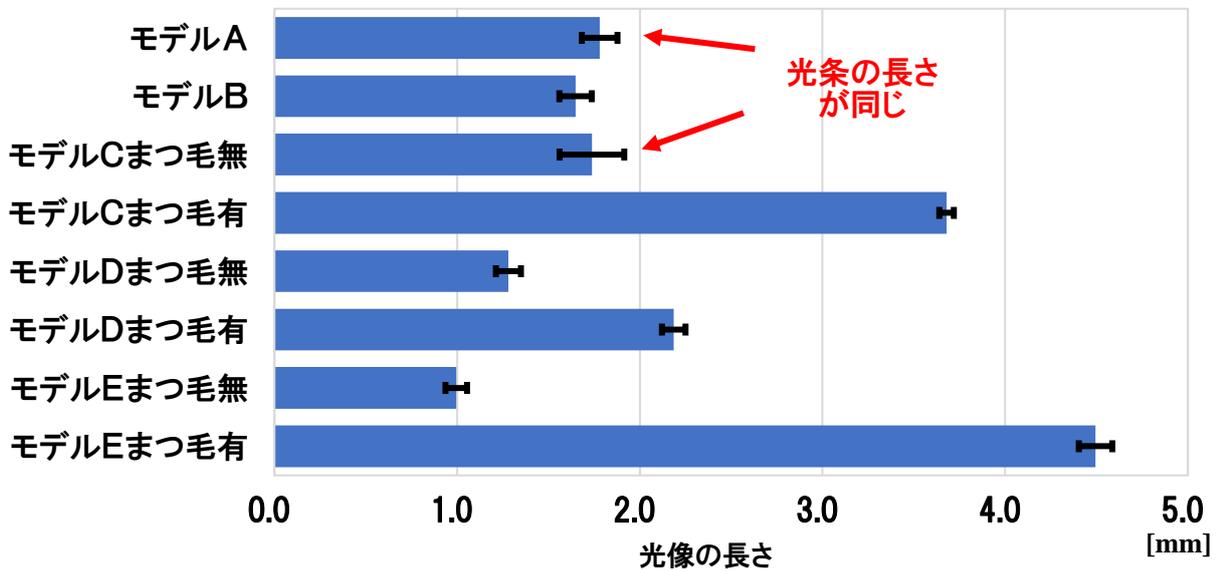
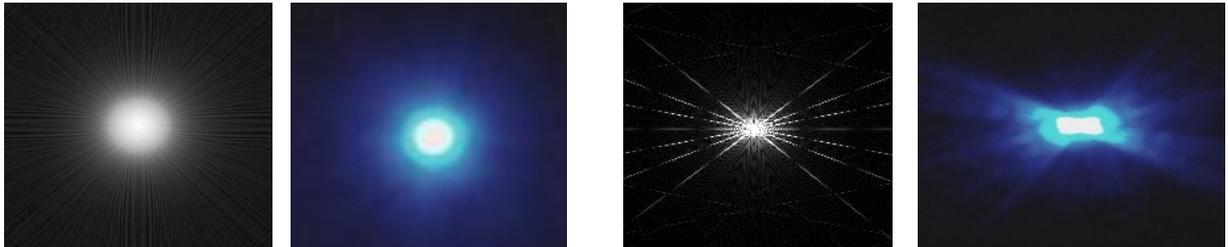


図 28 実験 2 光像の長さ

## 4 考察

### 4.1 シミュレーションとの比較

シミュレーション結果と**実験2**のモデルCを比較した。モデルCは、内径 4.0 mm の瞳孔、つけまつ毛を使用した点でシミュレーションの条件とほぼ同じである。つけまつ毛を付けたキャップはまぶた上方が球形の縁となっているため、まつげの広がり方は放射状になった。**図 29・図 30**より、シミュレーション結果と**実験2**モデルCの結果は酷似していることが分かる。シミュレーションは回折理論に基づいて計算した結果であることから、**実験2**で得られた像は、光の回折によって生じたと考えられる。



**図 29** 内径 4.0 mm の瞳孔を通過した光の回折像 **図 30** 内径 4.0 mm の瞳孔、放射状に生えたまつ毛を通過した光の回折像  
シミュレーションと**実験2**の比較  
シミュレーションと**実験2**の比較

### 4.2 顔をしかめない場合の考察

**図 27**より、モデルAとモデルC（まつ毛無）の光像の形状は円形であり一致している。一方、モデルBでは、光像は大きく変形した。また、**図 27**よりモデルAとモデルC（まつ毛無）の光像の長さは同じであり、モデルC（まつ毛無）の回折像にはまぶたの影響は反映されていないことが分かる。さらに、LEDライトの視直径 0.08 mm に対し、瞳孔の形状のみをモデル化したモデルAにおける光像の長さは 1.76 mm、視直径に換算すると 3.52 mm であり、本来の視直径に対して 100 倍近くの大きさとなっている。よって、光は瞳孔を通過することによって眼球内で大きく回折していると考えられる。以上の結果より、顔をしかめない場合、光像は瞳孔の影響を受け、まぶたの影響は受けないことが分かる。

### 4.3 顔をしかめる場合の考察

実際にグレア現象発生時のような強い光を見る場合、ヒトは顔をしかめる。このとき、まぶたの上下間距離は短くなり、瞳孔は毛様筋の収縮によって瞳孔径 2.00 mm 程度まで小さくなる。この影響を比較検討したものがモデルC～Eである。モデルCとモデルDの光像の形状を比較すると、**図 27**より、まつ毛の有無に関わらず、顔をしかめたモデルDの場合の方が像もやや縦長になる傾向が見られる。つまり、瞳孔が小さくない状態で顔をしかめると、まぶたの上下間距離が短くなる影響が、回折像に現れると考えられる。次に、モデルEについて考察する。モデルEでは、モデルDに比べて光像が鉛直方向にのびる影響は小さく、モデルCの像に似た形状が現れている。つまり、まぶたの上下間距離に対して瞳孔が大きくなければ、まぶたによる光像への影響は生じないと考えられる。

なお、研究班のメンバーで円形のライトを、顔をしかめて観察したところ、眼をつぶる少し手前までまぶたを閉じた場合に、光像が鉛直方向に大きく伸びる現象が例外なく生じた。この検証より、まぶたを大きく閉じる状況になるほど顔をしかめれば、まぶたによる光像への影響が現れることが分かった。

#### 4.4 まつ毛が光像に与える影響

モデルC～Eにおけるまつ毛無モデルとまつ毛有モデルを比較する。図 27 より、まつ毛を取り付けた場合、いずれも水平方向に対して放射状に長い光条が見られる。また、図 28 より、その光条の長さはいずれも、まつ毛が無い場合の光像の長さよりも長くなることが分かった。次にモデルCとモデルDを比較すると、まつ毛の有無に関わらず、光像の長さはモデルDの方が短くなっている。それに対して、モデルCとモデルEを比較すると、まつ毛無の場合はモデルEの方が光像の長さが短いに対して、まつ毛有の場合は、モデルEの方が長い結果となっている。

このような結果になった要因として、次に記す三つの効果が重なっていると考えた。第一に、顔をしかめ、瞳孔を小さくすることによって、眼球内に入る光が減光し、光像が小さくなる効果である。第二に、顔をしかめることで、まぶた上方と瞳孔が近くなるため、まつ毛が瞳孔前方の光を遮りやすくなり、まつ毛による回折光が生じやすくなる効果である。第三に、モデルDの場合に鉛直方向に像が伸びる影響が考えられる。モデルCとモデルDでは、光源の光量が同じであるのに対して、モデルDの方が鉛直方向に光が広がるために、水平方向に広がるために必要な光量が減少するので、モデルCで最も長い水平方向に成分を持つ光条の長さが短くなったと考えられる。

## [実験 3]

### 瞳孔径と光像の大きさの関係

#### 1 目的

ヒトの瞳孔の大きさは、環境によって瞳孔径 2～6 mm の間で変化することが知られている。そこで、瞳孔と同じ大きさの円形孔を付したキャップを簡易眼球モデル測定装置に取り付け、この領域における瞳孔径と瞳孔を光が通過した際に観測される光像の大きさを測定する。

#### 2 実験方法

- (1) 図 31 のような孔径 2.0～11.0 mm の円形孔の開いた眼球モデルキャップを 3D プリンターで作製した。
- (2) 図 32 に示すキャップをそれぞれ簡易眼球モデル測定装置に取り付け、図 25 に示す実験 2 と同じ装置で瞳孔径  $r$  と得られた円形の光像の直径  $R$  の関係を画像解析ソフト「マカリ」にて 10 回測定し、分析した。



図 31 作製した瞳孔モデルキャップ  
左から孔径 2 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mm, 9mm, 11 mm 遮光部は平面状である。

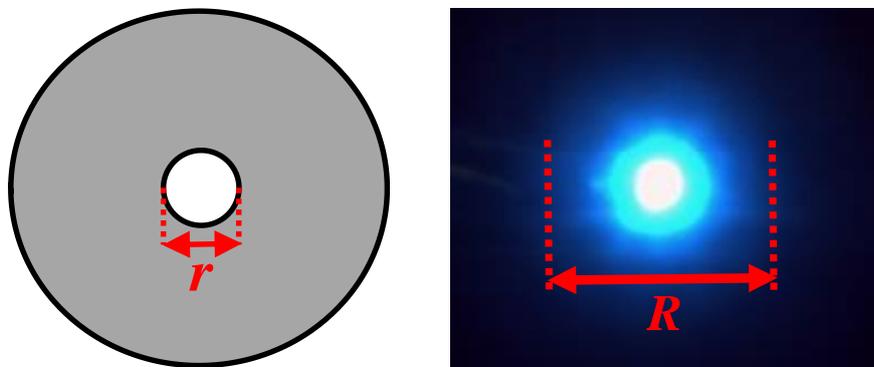


図 32 瞳孔モデルキャップの孔径  $r$  と得られた光像における直径  $R$

### 3 実験結果

いずれの孔径のキャップを用いても、**図 32(右)**のような円形の光像が得られた。孔径と光像の直径の関係は**図 33**のような相関がある。

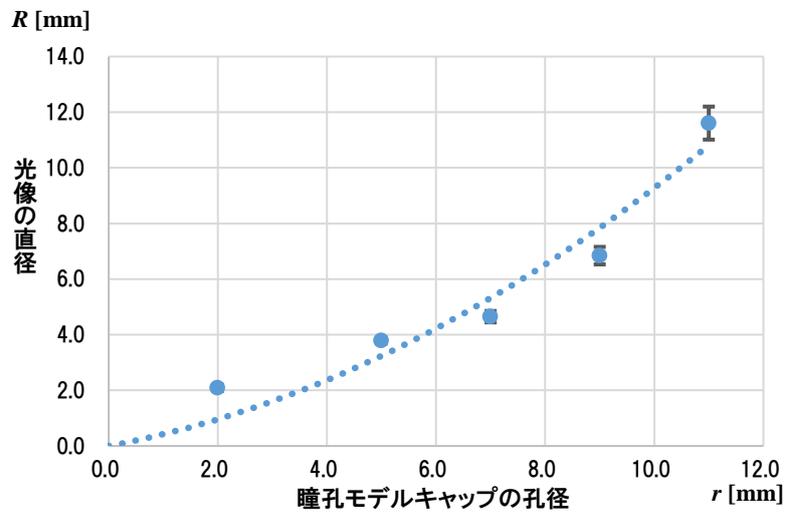


図 33 実験 3 の結果

### 4 考察

**図 33** より、孔径が小さいほど、光像の直径は小さいことが分かる。よって、瞳孔の役割として、明るい位置で眼球内に入る光量を減光することが確認された。一方、実験 2 と同様に、LED ライトの視直径  $0.08 \text{ mm}$  に対して 100 倍～150 倍の直径の円形像が得られており、いずれの場合でも光が眼球内で回折し、広がっていると考えられる。

## [実験 4]

### 光条の発生方向の検証

#### 1 目的

遮光方向と光条の向きを明らかにする。

#### 2 実験方法

- (1) 図 34 のように中心から各頂点への距離 2.5 mm の正三角形、正方形の孔のキャップを 3D プリンターで作製し、簡易眼球モデル測定装置に取り付けた。
- (2) 図 25 に示す装置で、実験 2 と同様の方法で光像を raw 形式で撮影した。
- (3) シミュレーションをこの実験の条件で実施した。

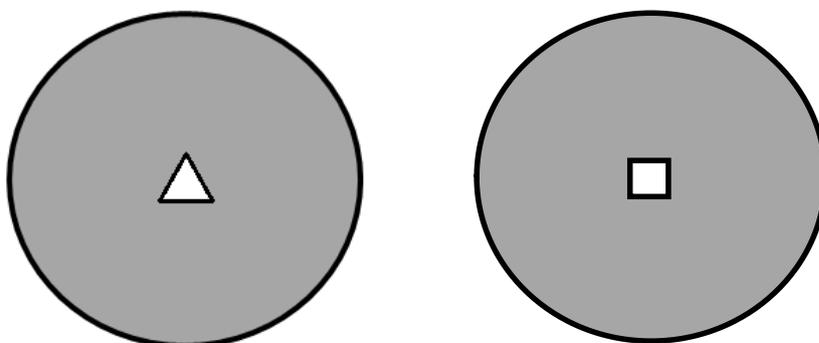


図 34 作製したキャップの形状図  
左 正三角形、右 正方形

#### 3 実験結果

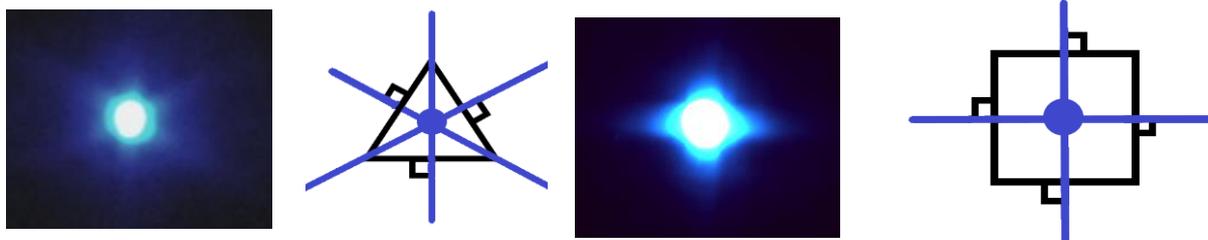


図 35 実験 4 で得られた光像と模式図

正三角形では 3 本、正方形では 2 本の光条が、遮光面に対して垂直な方向に発生した。

入射光分布画像

回折光  
シミュレーション

入射光分布画像

回折光  
シミュレーション

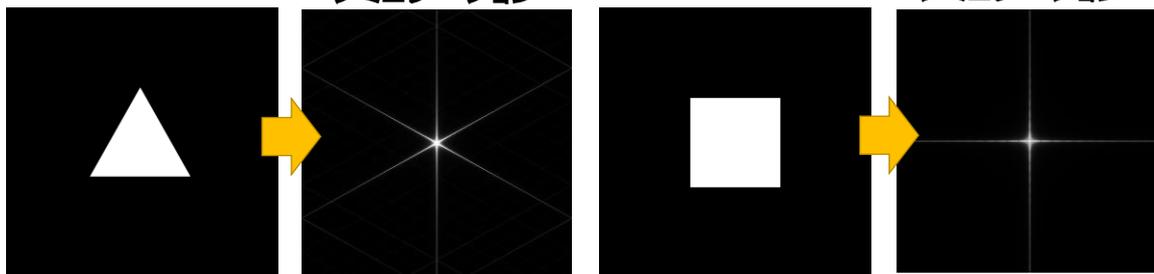


図 36 シミュレーションで得られた回折像  
図 35 の光条の向きと一致した。

#### 4 考察

図 35、図 36 より、光条は、遮光面と光源像の境界に対して垂直な方向に生じる規則があると考えられる。また、図 35 の結果が図 36 の実験結果と一致したことから、これらの光条が回折光であることも確認できた。

さらに、実験 1 における回折光が図 15 のように遮光面に対して垂直に光条が現れていることや、顔をしかめた際に、まぶたに対して垂直に光条が現れていること、まつ毛の光条がまつ毛に対して垂直に現れていること等、いずれの例もこの規則と合致している。以上のことから、光条は、必ず遮光面に対して垂直になることが示唆される。

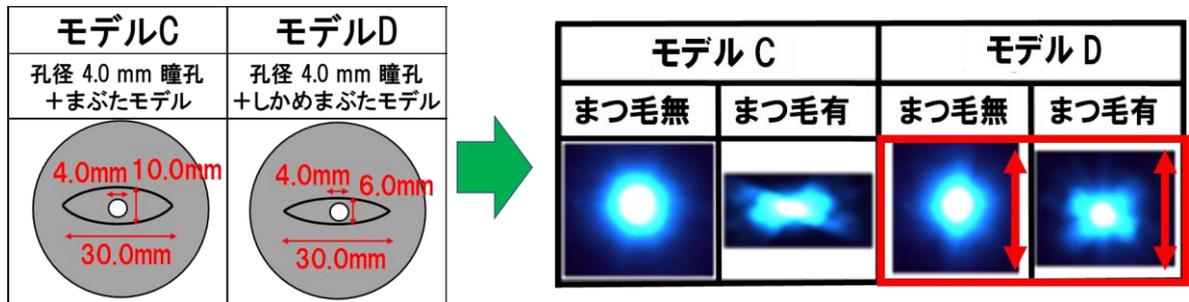


図 37 顔をしかめることによる光像の変化  
モデルDはモデルCに対して光像が縦長になる。

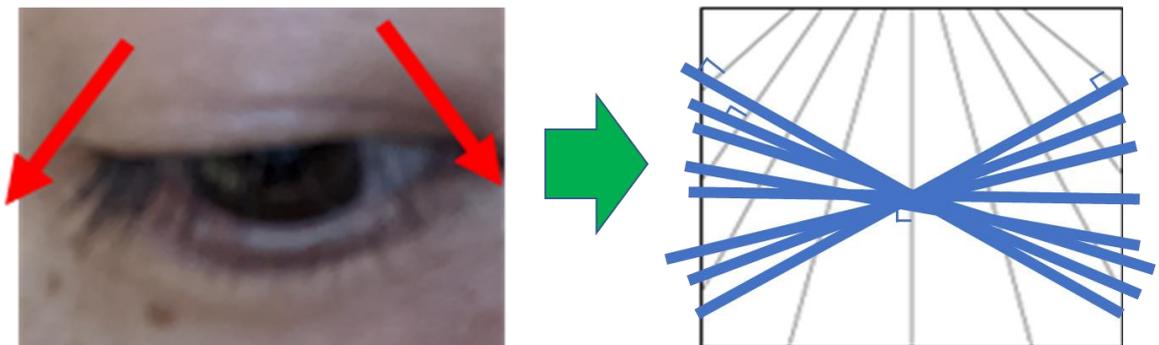


図 38 まつ毛によって生じる光条  
まつ毛によって生じる放射状の光条はまつ毛の向きに対して垂直である。

## [調査]

### 観測者が視る目視像の検証

#### 1 目的

実験2や実験3で得られた結果と観測者（ヒト）が実際に見た光像が等しいか確認する。また、像の見え方と年齢や視力、まつ毛の生え方に対して相関を取り、この3つの条件の関係性について検証する。

#### 2 調査方法<sup>7)</sup>

- (1) 100名の被験者に図39のような暗室内で丸いライトを正面から観察してもらい、見え方が実験2モデルC（図40）におけるまつ毛無の場合とまつ毛有の場合のどちらに近い、あるいは全く異なる像に見えるか検討していただいた。
- (2) (1)の調査結果別に、眼を横から撮影させてもらい、その特徴を確認した。
- (3) 被験者の年齢、視力を伺った。

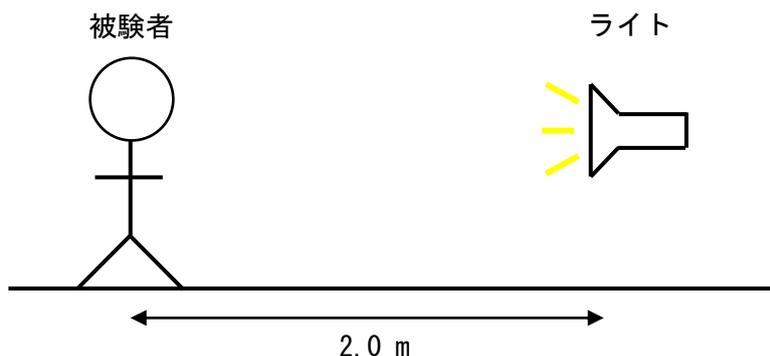


図39 調査方法

被験者とライトを2.0 m離れた。ライトは、直径3.0 cmの白色LEDである。

照度は被験者の位置で2000 luxになるように設定した。

調査は、暗室で行った。※本調査はIRBの審査を経て実施した。詳細は[9]参照。

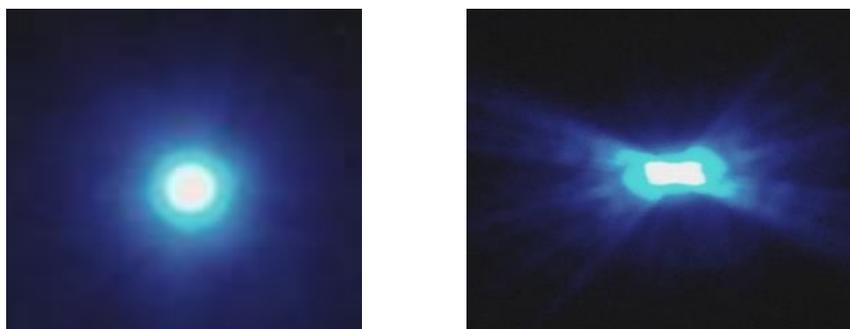


図40 被験者に確認していただいた像

左 実験2のモデルCまつ毛無 右 実験2のモデルCまつ毛有

### 3 調査結果

表 1 調査結果

図 40 と全く異なる像が見えた観測者はいなかった。

項目	$\chi$ 二乗分布表値		$\chi$ 二乗値	有意差の有無
	0.01	0.05		
有意水準	0.01	0.05		
まつ毛の向き (上、水平、下向き)	9.21	5.99	55.5	○
年齢 (0~20歳, 21歳~40歳, 41歳~60歳)	9.21	5.99	0.83	×
視力 (0.8以上, 0.8未満)	6.64	3.84	3.67	△

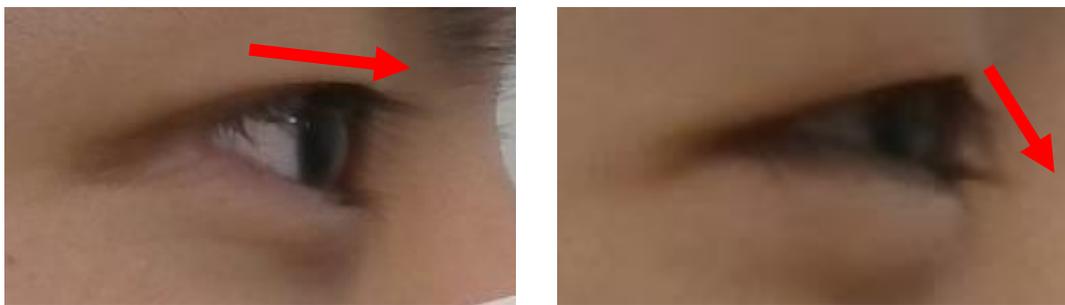


図 41 まつ毛無像に見えた観測者の眼 (左) とまつ毛有像に見えた観測者の眼 (右)  
左図は、まつ毛が上向きで視界を遮らない。右図はまつ毛が下向きで長く、視界を遮っている。

### 4 考察

表 1 より、全ての被験者が、いずれかの像が見えたと答えており、本研究による簡易眼球モデル測定装置が眼球のモデルとして妥当であることを確認できた。

被験者への聞き取りの結果、まつ毛無像に見えた人が 77 人であるのに対し、まつ毛有像に見えた人は 23 人であった。この理由について考察する。表 1 より  $\chi$  二乗検定の結果、まつ毛の向きが光像の見え方に影響していることが分かった。図 41 のようにまつ毛が下向きになると、瞳孔にまつ毛がかかり、光路を遮ることが影響するためと考えられる。しかし、まつ毛が瞳孔にかかっているにもかかわらず、まつ毛無像に視える例外も見られた。この例外の方を分析すると、皆視力が悪いことが分かった。さらに、年齢による影響はないことも分かった。

なお、顔をしかめた場合には、いずれの被験者もまつ毛有の像に近い回折像を確認するとともに、まぶたによる鉛直方向の光条も確認されると回答した。よって、グレア現象が生じる場合のような強い光を目にする場合、まつ毛有の状況になっている可能性が高いとも推察される。

## [実験5]

### 視力についての検証

#### 1 目的

実験2や実験3で得られた結果と観測者（ヒト）が実際に見た光像が等しいか確認する。

#### 2 実験方法

ピントが合っている状態の撮像素子とレンズの距離を始点として、1.0 mm ずつ変化させ、それぞれの距離に対する円形像の大きさと光条の長さを測定した。

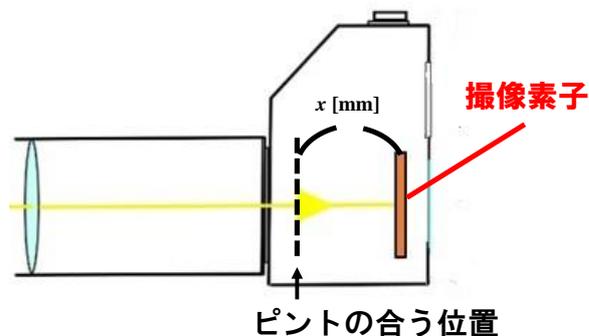


図42 実験5測定装置のイメージ図

#### 3 実験結果

ピントが合わなくなっていくほど、中心の円形像が大きくなり、光条は短くなった。

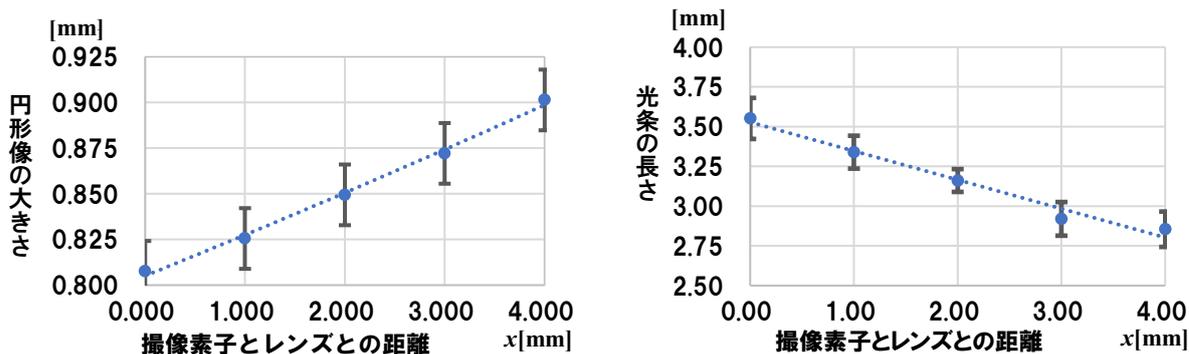


図43 実験5の結果

左 撮像素子とレンズの距離 と 円形像の大きさの関係  
右 撮像素子とレンズの距離 と 光条の長さの関係

#### 4 考察

図43のように、ピントが合わなくなることによって、円形像は大きくなり、光条の長さが短くなることが分かった。光条が短くなる理由は、円形像が広がることによって、光条の基となっているまつ毛にあたる光量が少なくなるためと考えられる。

## [実験6]

### グレア現象発生時における回折光の分布

#### 1 目的

ここまで使用した観測装置でグレア現象を生じさせ、その光学的発生要因を検証する。

#### 2 実験の方法

- (1) 実験2モデルCまつ毛有のキャップを簡易眼球モデル測定装置に装着した。
- (2) 図44に示す装置にて、グレア現象を発生させ、このとき生じる光像を撮影した。

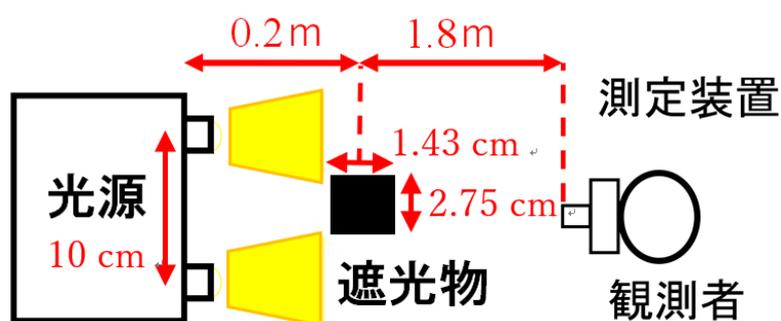


図44 実験6の装置概略図  
光源に 168300 lux, 3.0 mm 径の白色LEDを使用した。

#### 3 実験結果

図45のように遮光物を2つの光源から等距離に置き、それを正面から撮った場合(図46)が最もグレア現象が発生して遮光物が見えなくなった。また、遮光物や観測者が2つの光源から等距離の位置からずれると、グレア現象が低減した。

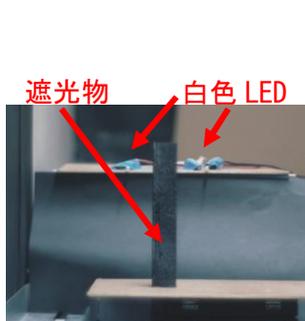


図45 実験6装置写真  
遮光物の高さは16.7cmである。



図46 実験6結果  
グレア現象で遮光物は見えない。



図47 遮光物を光源前に移動した場合  
図46よりも回折光が減光されている。



図48 測定装置を光源よりも右側に移動した場合  
遮光物の像が見える。

## 4 考察

### 4.1 グレア現象の光学的要因

図 46 より、光像は図 49 のまつ毛有像と酷似しており、まつ毛や瞳孔による回折光が交錯して、遮光物の像を遮っていることが分かる。光源が明るい場合、光条が長く見えるが、まつ毛による光条は隙間が大きいため、光条の効果だけでは、その隙間から遮光物が確認できそうである。しかし、実際には光条だけでなく、光源中央部周辺からぼんやり広がっている瞳孔由来の回折像が遮光物の像を遮っている。以上の考察から、グレア現象の光学的要因は、まつ毛による回折現象で生じる光条と、瞳孔による回折現象で生じる回折像が同時に生じ、この光が遮光物の像を遮ることで生じていると考えられる。

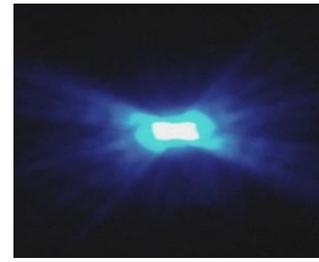


図 49 実験 2 モデル C  
まつ毛有像

### 4.2 グレア現象が強く生じる条件について

図 47 のように遮光物が、2つの光源から等距離の位置から外れば、グレア現象が低減された。また、図 48 のように、観測者がこの位置から外れても同様である。つまり、最もグレア現象が強く起こるのは、観測者と遮光物が2つの光源から等距離の位置にある場合である。また、顔をしかめる場合、先に述べたまぶたによる回折光により、より強いグレア現象が生じることも分かった。

## [実験7]

### フィルターによるグレア現象の低減についての検証

#### 1 目的

グレア現象の効果的な低減方法を検証すること。

#### 2 実験方法

- (1) 自然光LEDを光源に、デジタル分光器を用いて可視光領域のスペクトルを測定した。また、自然光LEDを図50に示すフィルターを介した場合に得られるスペクトルを測定した。
- (2) 遮光物を除いた**実験6**と同じ実験装置（光源は自然光LEDを、測定位置で2000 lux, 直径3.0 mmの円形光となるように設置した。）を用いて、測定装置に次に示すフィルターをそれぞれ取り付けた場合の光像を撮影し、得られる光像における光源の中心からの像の長さ（最大値）を画像解析ソフト「マカリ」にて測定し、分析した。
- (3) 図44に示す装置に、自然光LEDとフィルターを用いる条件でグレア現象を発生させ、このとき生じる光像を撮影した。

#### 3 実験で使用した器具



図50 使用したフィルター

左から カラーフィルター（灰色，青色，緑色，茶色，黄色，橙色，桃色，赤色）  
IRカットフィルター（赤外線及び、波長の長い光をカットする）  
UVカットフィルター（紫外線及び、波長の短い光をカットする）  
偏光フィルター



図51 デジタル分光器 樽ノ木技研「ezSpectra815V」  
回折格子を利用した分光器である。

## 4 実験結果

(1) 分光スペクトル 縦軸：光波強度（相対値） 横軸：波長[nm]

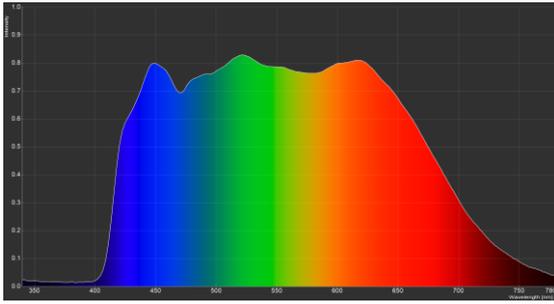


図 52 自然光LEDのスペクトル  
強度が波長によらず一定である。

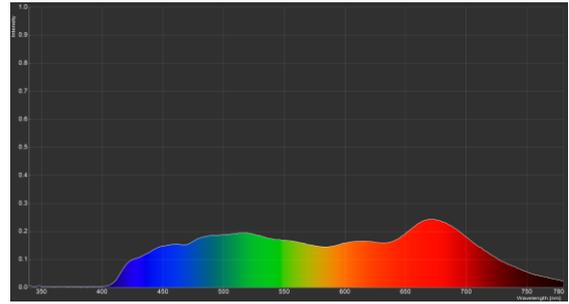


図 53 灰色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDのスペクトル  
全ての波長域で強度が低減している。

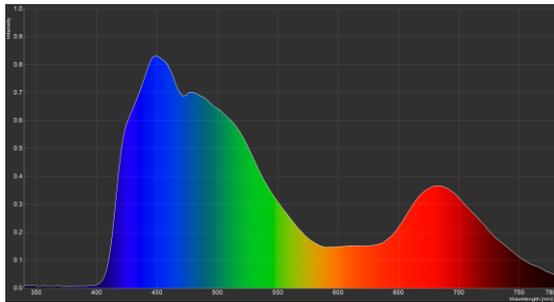


図 54 青色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDのスペクトル  
長波長域で強度が低減している。

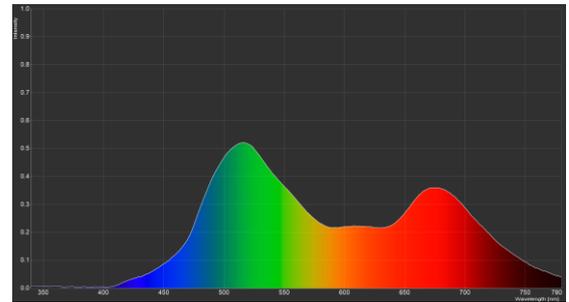


図 55 緑色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDのスペクトル  
青色や赤色の波長域の強度が低減している。

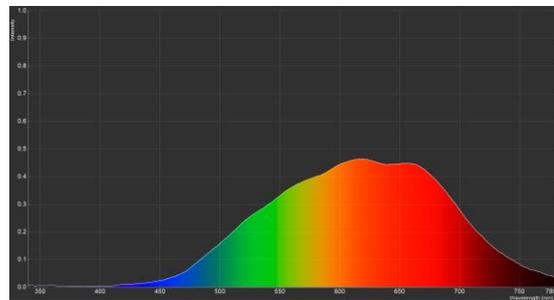


図 56 茶色フィルターを使用した場合の  
自然光LEDのスペクトル  
700 nm 以下の波長域の強度がゆるやかに  
低減している。

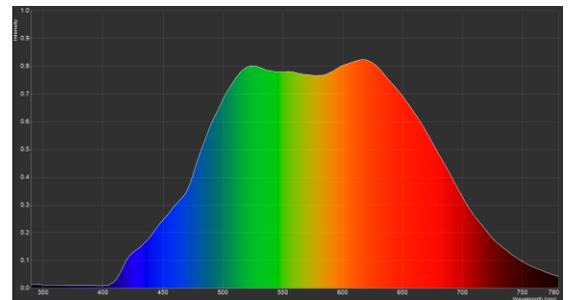


図 57 黄色フィルターを使用した場合の  
自然光LEDのスペクトル  
茶色と同傾向だが、低減率は小さい。

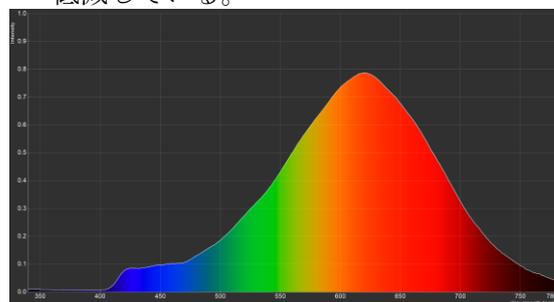


図 58 橙色フィルターを使用した場合の  
自然光LEDのスペクトル  
黄色フィルターよりもやや短波長域の  
低減率が大きい。

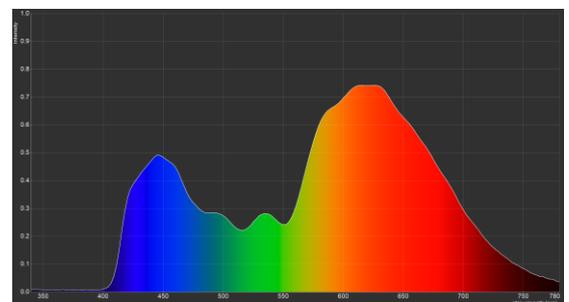


図 59 桃色フィルターを使用した場合の  
自然光LEDのスペクトル  
橙色フィルターよりも青色がやや強い。

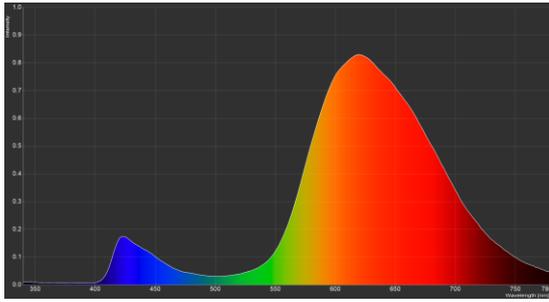


図 60 赤色フィルターを使用した場合の自然光LEDのスペクトル  
短波長域のスペクトル強度は低減しているが、赤色の強度が非常に強い。

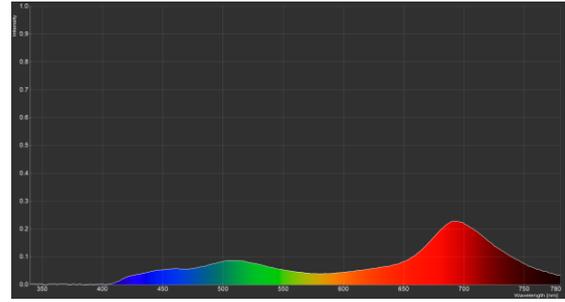


図 61 IRカットフィルターを使用した場合の自然光LEDのスペクトル  
全体的にスペクトル強度は低減しているが、やや暗めである。

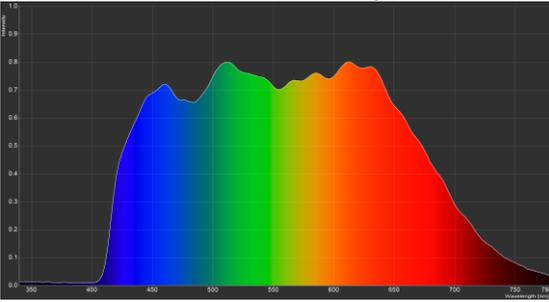


図 62 UVカットフィルターを使用した場合の自然光LEDのスペクトル  
図 52 のフィルターのない場合とほぼ同じである。

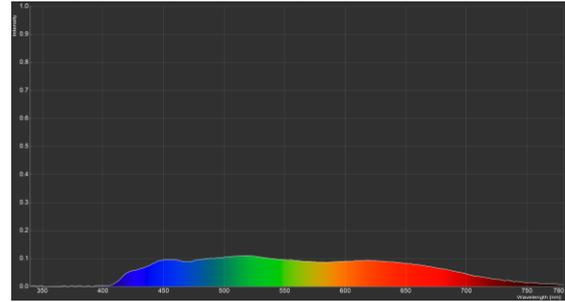


図 63 偏光フィルターを使用した場合の自然光LEDのスペクトル  
全体的にスペクトル強度は低減しているが、やや暗めである。

## (2) 像の長さ

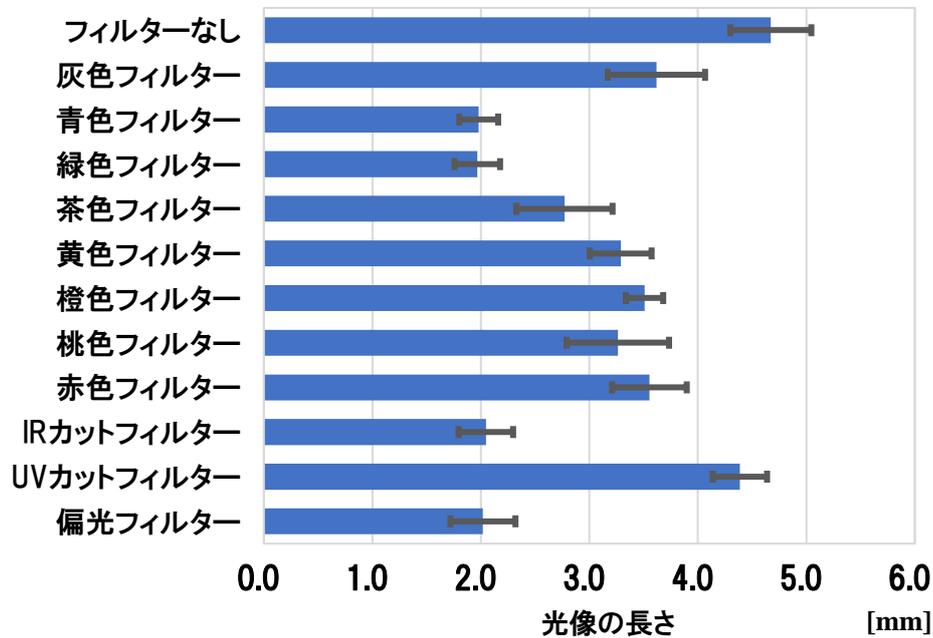


図 64 実験 7 光像の長さ

(3) フィルター使用時のグレア現象の様子



図 65 自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。



図 66 灰色フィルターを使用した場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。



図 67 青色フィルターを使用した場合の自然光LEDによるグレア現象  
白色光に比べると光源間の回折光が弱く、グレア現象が低減されている。

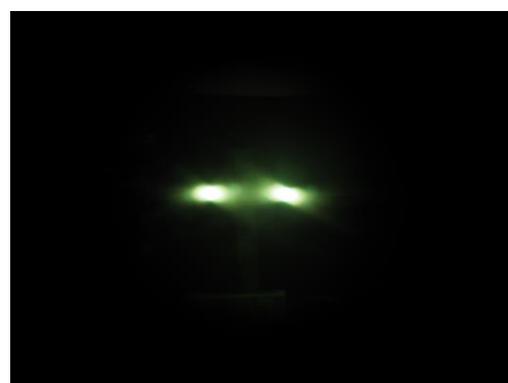


図 68 緑色フィルターを使用した場合の自然光LEDによるグレア現象  
白色光に比べると光源間の回折光が弱く、グレア現象が低減されている。



図 69 茶色フィルターを使用した場合の自然光LEDによるグレア現象  
白色光に比べると光源間の回折光がやや弱く、グレア現象が低減されている。



図 70 茶色フィルターを使用した場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。



図 71 橙色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。



図 72 桃色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。

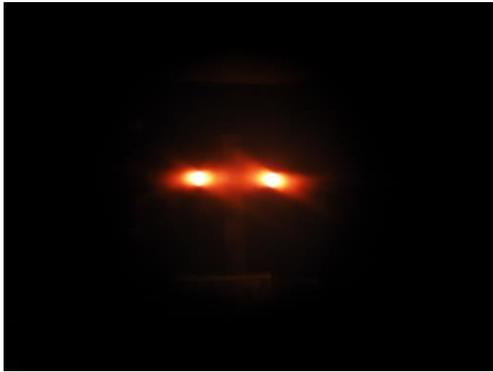


図 73 赤色フィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。



図 74 IRカットフィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光が強く低減されており、視野が暗い。



図 75 UVカットフィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光源間に強い回折光が見られる。

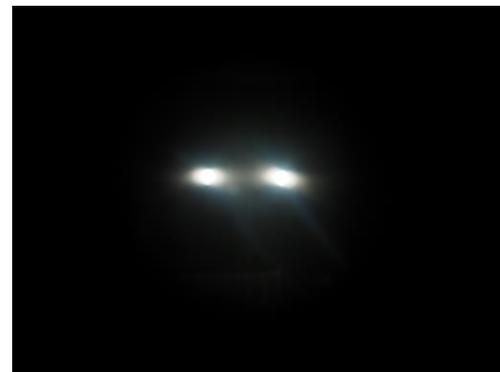


図 76 偏光フィルターを使用した  
場合の自然光LEDによるグレア現象  
光が強く低減されており、視野が暗い。

#### 4 考察

図 64 より、青色フィルター、緑色フィルター、I Rカットフィルター、偏光フィルターを用いたときに、光像の長さは短くなっていることが分かる。これらの場合の分光スペクトルを確認すると、いずれも波長の長い赤色の光を低減するフィルターを用いていることが分かる。これは、光の回折現象が、波長の長い光ほど生じやすい性質に起因していると考えられる。また、(3)の結果を見ても、上述の4つのフィルターを用いた際のグレア現象が、よく低減していることが分かる。

文献 9 によれば、青色の光は、回折しにくいものの散乱しやすい特徴があるので、長時間、青色光を見ていると光像がにじんだり、散らついたりしやすい。そのため、青色光は目の疲れを誘発しやすい性質がある。また、図 77 のように、実験 6 で使用したような一般的な白色LEDライトのスペクトルは、青色光の強度が非常に強い特徴がある。そのため、このような生物学的見地と現在使用されている白色LEDの実態、実験結果を合わせて考えれば、青色光と赤色光の両方を低減できれば良いことが分かる。

一方、交通事故防止につなげることを考えるならば、視野の適度な明るさについても考える必要がある。I Rカットフィルターや偏光フィルターについては、フィルター使用時に視野が必要以上に暗くなる点が課題点である。さらに、カラーフィルターを用いた場合には色味が変化して見えるため、自動車運転時等にガラスとしてフィルターを使用することを考える場合、信号灯の色等を正確に識別することが難しくなることが問題になる。以上のことを考慮して、グレア現象が低減された4つのフィルターのうち、青色が抑えられて視野が適度に明るく、色味が大きく変化しにくいフィルターを研究班内で吟味するため、フィルターを目に取り付けて周辺を歩き回ったところ、本実験で使用したフィルターの中では緑色が最適であることが分かった。緑色フィルターは、他のフィルターに比べると色味の変化は穏やかであった。これは、図 55 に示すように、フィルターを透過する光における色のバランスが適度にとれており、それに加えて青色や赤色のスペクトル強度を適度に低減できているからである。しかし、色味の変化が全くない訳ではないので、できるだけ色味の変化のないフィルターをさらに考案していくことが望まれる。

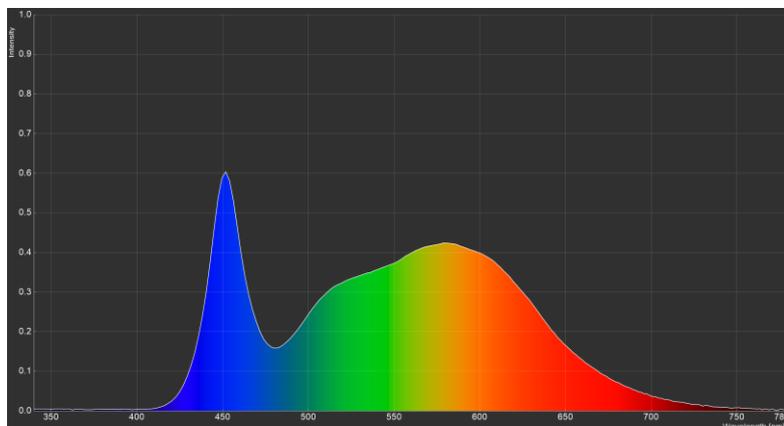


図 77 一般的な白色LEDのスペクトル

青色領域に非常に強いピークが見られる。

実験 6 における回折光が、青みがかかって見えるのはこのためである。

## 4 結論

### 1 グレア現象の光学的要因

- ・グレア現象は、主に観測者のまつ毛と瞳孔による回折現象によって生成する円形像や光条が要因で生じる。

### 2 グレア現象の強さについて

- ・2つの光源から生じるグレア現象は2つの光源から等距離の位置において最も強い状態で生じる。
- ・回折現象の性質より、波長の長い光の方が強く回折現象が生じやすい。

### 3 グレア現象に対する顔をしかめる影響やまつ毛の向きの影響について

- ・通常時、まつ毛の影響によって生じる光条の有無は、観測者のまつ毛の向きや長さによって条件が異なるために個人差がある。しかし、グレア現象が生じる場合は、顔をしかめる場合が多く、まぶたが閉じかかっていることによってまつ毛が光を遮るために、回折光が生じる場合がほとんどである。
- ・通常時、まぶたによる回折光は生じないが、強い光で顔をしかめることにより、まぶたでも光が回折し、鉛直方向に光条が生じるため、より強くグレア現象が発生する。

### 4 グレア現象に対する視力の影響について

- ・視力が低下すると、網膜に結像する像が円形に広がることによって、光とまつ毛や瞳孔との境界面にあたる光量が弱くなるために、光条が短くなる。

### 5 グレア現象を低減する方法について

- ・回折しやすい波長の長い光と散乱しやすい青色の光を、緑色フィルター等を用いて遮ることで、グレア現象を低減することができる。
- ・偏光板やI Rカットフィルターを利用した減光方法では、視界に入るべき光まで抑えられるため、自動車の運転手が利用するのではかえって危険である。

## 5 課題

- ・反射グレアについて、研究を深めること。
- ・グレア現象の光学的要因以外にも探究すること。
- ・雨天時と晴天時のグレア現象の違いについて、検証すること。
- ・車のフロントガラスやメガネ、路上の色が回折現象に与える影響について検証すること。
- ・フィルターを使用して、グレア現象を低減させる際に、色味の変化や適度な視野の明るさを担保する方法を検討すること。また、その最適な条件の検討において、アンケート調査を行って多数の被験者から統計データをとること。

## 6 今後の展望

グレア現象は交通事故の要因となっている。そこで、グレア現象の低減が実現できれば、この現象が原因となる雨天時や夜間の交通事故防止が期待できる。本研究において、グレア現象の光学的要因は、まぶたや瞳孔による回折光であることが明らかになった。回折現象は波長の長い光で特に強くなる性質があることから、波長の長い光をカットする方法でグレア現象を低減する交通事故予防ガラスの開発に本研究結果を応用できると考えている。

## 7 謝辞

本研究を進めるにあたり、生命倫理の観点からご助言下さった総合教育センター指導主事 稲葉 正和 先生や、条件設定についてご助言くださった総合教育センター指導主事 参河 厚史 先生、3Dプリンターの使用についてご協力くださった本校ICT教育支援員の東野 享省 氏に厚く御礼申し上げます。また、調査に御協力いただいた松山南高等学校生や先生方に感謝申し上げます。

## 8 参考文献

1. 松岡薫 (2004) まつ毛によって生じる回折光のシミュレーションとグレア表現への応用 (東京大学工学部電子情報工学科)
2. 川守田拓志 (2019) 眩しさの種類 (北里大学医療衛生学部)
3. 虹彩と瞳孔の不思議 (<https://www.santen.co.jp/ja/healthcare/eye/eyecare/wonders/iris.jsp>)
4. 牛山善太 (2013) 結像光学系によるフラウンホーファー回折像 (株式会社タイコ)
5. 松田隆夫 (2001) 二次元画像上の人物に対する距離の知覚 (立命館大学文学部)
6. OpenCV を使ったフーリエ変換  
([http://labs.eecs.tottori.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_transforms/py\\_fourier\\_transform/py\\_fourier\\_transform.html#opencv](http://labs.eecs.tottori.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_transforms/py_fourier_transform/py_fourier_transform.html#opencv))
7. 舟越和己 (2019) エアリーの円形開口の回折に関する論文 (すばる天文同好会)
8. カイ二乗検定とは何か (<https://www.business-research-lab.com/220705-2/>)
9. ブルーライトとは ([https://www.itolens.jp/eyesupport\\_bluelightcut\\_01](https://www.itolens.jp/eyesupport_bluelightcut_01))

## 9 校内研究倫理審査委員会（IRB）の事前審査について

本研究を進めるにあたり、P23[調査]で行った光像の見え方に関するアンケート調査について、以下の配慮を行った上で、研究を進めました。

- 1 光を見る際には、光源から被験者まで2.0m離れ、直視しても安全である2000luxに光量を調節した上で調査を行いました。
- 2 被験者の方々全員から調査を行うことについて同意を得ました。被験者が未成年の場合には保護者からも事前に同意を得ました。
- 3 以上のことを踏まえ、次の松山南高等学校研究倫理審査委員である3名の方々から事前審査を依頼し、承認を得ました。

本校学校医 高橋眼科院長 高橋 功 様  
 愛媛大学教育学研究科 教授 中本 剛 様  
 愛媛大学教育学研究科 教授 向 平和 様

以上3氏には、本審査に当たり、専門文献の確認を行っていただくなど、ご多忙のところ、慎重にご審査いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 10 補助資料

本研究における定量的データは、1条件当たり10回の試行を行い、その平均をとったものである。グラフのエラーバーは標準偏差を表している。以下に、その詳細データを表で示す。

表2 実験1 結果

光源から遮光板 までの距離[mm]	試行回数 結果の単位[mm]										平均 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0.5	0.144	0.142	0.148	0.146	0.144	0.146	0.148	0.139	0.153	0.144	0.145	0.0038
0.6	0.122	0.125	0.127	0.122	0.125	0.123	0.124	0.126	0.122	0.124	0.124	0.0018
0.7	0.12	0.118	0.126	0.13	0.114	0.108	0.124	0.117	0.125	0.122	0.120	0.0064
0.8	0.085	0.099	0.1	0.088	0.088	0.099	0.095	0.098	0.099	0.098	0.095	0.0057
0.9	0.082	0.088	0.077	0.095	0.092	0.083	0.086	0.079	0.088	0.089	0.086	0.0057
1.0	0.036	0.041	0.034	0.05	0.04	0.045	0.031	0.041	0.042	0.035	0.040	0.0056

表3 実験2 結果

モデル名	試行回数 結果の単位[mm]										平均 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
モデルA	1.72	1.75	1.68	1.85	1.68	1.66	1.94	1.94	1.78	1.80	1.78	0.10
モデルB	1.74	1.61	1.68	1.68	1.82	1.58	1.51	1.55	1.69	1.60	1.65	0.09
モデルCまつ毛無	1.78	1.80	1.75	1.39	1.57	1.84	1.64	1.68	1.83	2.10	1.74	0.18
モデルCまつ毛有	3.69	3.70	3.72	3.68	3.64	3.71	3.63	3.67	3.74	3.61	3.68	0.04
モデルDまつ毛無	1.26	1.26	1.31	1.36	1.20	1.19	1.31	1.21	1.41	1.31	1.28	0.07
モデルDまつ毛有	2.18	2.17	2.32	2.05	2.15	2.18	2.22	2.15	2.22	2.21	2.19	0.06
モデルEまつ毛無	1.01	0.99	0.98	0.91	1.09	1.05	0.99	0.92	0.94	1.08	1.00	0.06
モデルEまつ毛有	4.55	4.46	4.47	4.60	4.64	4.42	4.60	4.37	4.37	4.47	4.49	0.09

表 4 実験 3 結果

瞳孔モデルの 孔径[mm]	試行回数 結果の単位[mm]										平均 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2.00	2.27	1.88	2.08	1.84	2.35	2.10	2.01	2.10	2.46	1.94	2.10	0.20
5.00	3.96	3.44	3.70	3.98	3.77	3.88	3.48	3.86	3.58	3.97	3.76	0.20
7.00	4.54	5.31	4.92	4.57	4.18	4.37	4.19	4.95	4.68	4.73	4.64	0.36
9.00	7.09	7.73	7.41	6.52	6.04	6.28	6.35	7.54	7.23	6.42	6.86	0.60
11.00	10.60	10.54	10.57	11.83	13.46	10.84	12.68	11.64	13.48	10.89	11.7	1.18

表5 調査結果

視力は0.8以上を良い、0.8未満を悪いとしている。

○まつ毛の向き

実数値		上向き	水平	下向き	合計
	有り像	0	0	23	23
	無し像	22	43	12	77
		22	43	35	100
期待値		上向き	水平	下向き	
	有り像	5.06	9.89	8.05	
	無し像	16.94	33.11	26.95	
$\chi$ 二乗値		上向き	水平	下向き	合計
	有り像	5.06	9.89	27.8	
	無し像	1.51	2.95	8.29	55.5

○年齢

実数値		20歳まで	40歳まで	60歳まで	合計
	有り像	19	1	3	23
	無し像	57	7	13	77
	合計	76	8	16	100
期待値		20歳まで	40歳まで	60歳まで	
	有り像	17.48	1.84	3.68	
	無し像	58.52	6.16	12.32	
$\chi$ 二乗値		20歳まで	40歳まで	60歳まで	合計
	有り像	0.13	0.38	0.13	
	無し像	0.04	0.11	0.04	0.83

○視力

実数値		良い	悪い	合計
	有り像	19	4	23
	無し像	47	30	77
	合計	66	34	100
期待値		良い	悪い	
	有り像	15.2	7.8	
	無し像	50.8	26.2	
$\chi$ 二乗値		良い	悪い	合計
	有り像	0.96	1.87	
	無し像	0.29	0.56	3.67

表6 実験5結果 視力と光条の長さの関係

レンズと撮像素子の距離 x[mm]	試行回数 結果の単位[mm]										平均 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0.00	3.74	3.54	3.45	3.36	3.58	3.40	3.53	3.72	3.53	3.67	3.55	0.129
1.00	3.31	3.45	3.29	3.23	3.39	3.12	3.39	3.40	3.39	3.44	3.34	0.104
2.00	3.15	3.12	3.26	3.16	3.15	3.23	3.21	3.09	3.02	3.21	3.16	0.072
3.00	3.04	2.96	3.05	3.04	2.82	2.82	2.85	2.77	2.88	2.97	2.92	0.105
4.00	2.80	2.95	2.88	2.77	2.91	3.02	2.98	2.75	2.80	2.68	2.85	0.111

表7 実験5結果 視力と円形像の大きさの関係

レンズと撮像素子の距離 x[mm]	試行回数 結果の単位[mm]										平均 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0.00	0.819	0.888	0.776	0.950	0.725	0.721	0.861	0.742	0.794	0.799	0.808	0.0742
1.00	0.822	0.814	0.823	0.859	0.809	0.851	0.810	0.840	0.818	0.810	0.826	0.0181
2.00	0.850	0.843	0.850	0.866	0.835	0.824	0.872	0.852	0.870	0.834	0.850	0.0162
3.00	0.886	0.893	0.880	0.847	0.870	0.870	0.854	0.855	0.851	0.915	0.872	0.0217
4.00	0.902	0.881	0.855	0.897	0.920	0.859	0.962	0.891	0.869	0.977	0.901	0.0412

表8 実験7結果 フィルターの種類と光像の長さの関係

フィルターの色or種類	試行回数 結果の単位 [mm]										平均値 [mm]	標準偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
自然光LEDのみ(フィルターなし)	4.81	4.04	4.32	4.61	4.99	4.74	4.28	5.15	5.13	4.67	4.67	0.37
灰色フィルター	4.09	3.54	3.81	4.52	3.18	3.04	3.32	3.80	3.57	3.32	3.62	0.45
青色フィルター	1.80	2.01	1.86	2.33	1.92	1.84	1.87	2.24	1.87	2.06	1.98	0.18
緑色フィルター	1.97	1.96	1.96	2.40	1.88	2.25	1.79	1.94	1.84	1.69	1.97	0.21
茶色フィルター	3.49	2.93	2.61	2.61	3.51	2.36	2.25	2.62	2.40	2.93	2.77	0.44
黄色フィルター	3.91	3.38	3.03	3.03	3.18	3.15	3.26	3.10	3.21	3.64	3.29	0.28
橙色フィルター	3.14	3.66	3.70	3.50	3.39	3.69	3.46	3.39	3.53	3.62	3.51	0.17
桃色フィルター	3.86	3.91	3.14	3.93	3.37	2.88	2.87	2.72	2.93	3.03	3.26	0.47
赤色フィルター	3.48	3.92	3.48	3.77	3.47	3.82	3.84	3.47	3.59	2.71	3.55	0.34
IRカットフィルター	1.78	1.93	1.83	2.56	1.87	2.22	1.87	2.13	1.98	2.30	2.05	0.25
UVカットフィルター	4.43	4.61	4.66	4.05	4.16	4.59	4.09	4.73	4.29	4.27	4.39	0.25
偏光フィルター	1.76	2.03	2.22	2.17	2.67	1.87	1.78	1.60	2.09	2.01	2.02	0.30

以上である。