

グレア現象の発生条件 光学的要因に迫る

愛媛県立松山南高等学校 光条研究班

2年 渡部真也 渡辺斗真 高石遼旺

指導教諭 川井亮祐

1. 研究の背景及び目的

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¹⁾。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。



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

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。

2. 簡易眼球モデル測定装置

2.1 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²⁾。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ライトを見た際を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

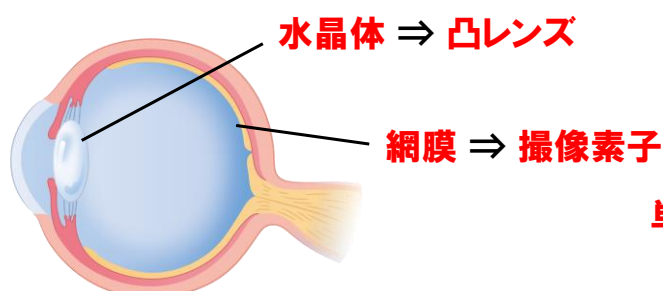


図2 眼球模式図



図3 簡易眼球モデル測定装置

値=320、シャッタースピード 1.00 s) に設定した。

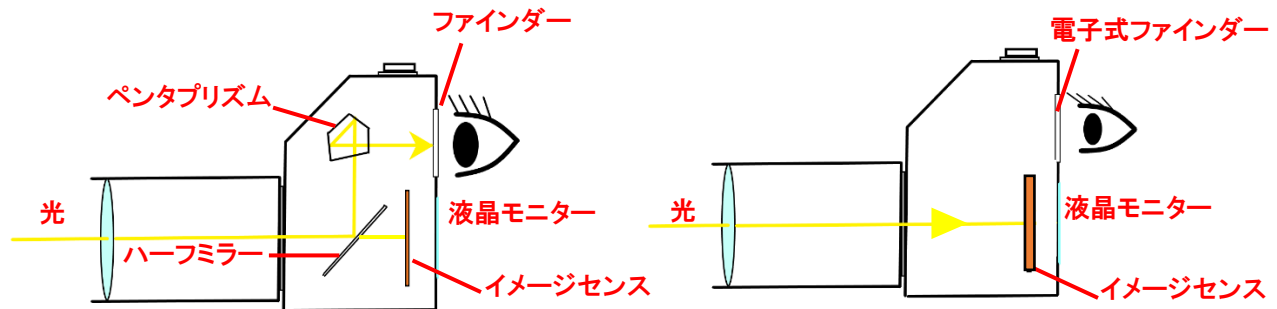


図4 デジタル一眼レフ(左)とミラーレス一眼レフ(右)の比較
デジタル一眼レフカメラでは、光路が二手に分かれてしまう。

2.2 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

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

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。

$$B = \left|\frac{b}{a}\right| \times A \quad \text{式(2)}$$

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

$$D = \frac{B}{C} \quad \text{式(3)}$$

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。

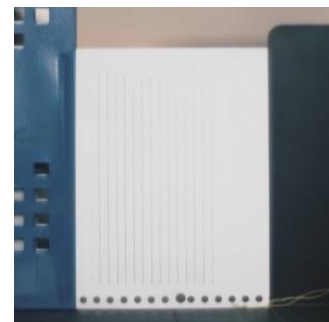


図5 罫線を書いた紙

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

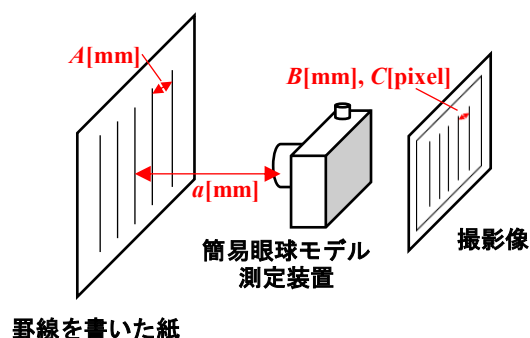


図6 像の大きさ測定方法

3. グレア現象の観測

3.1 目的

自動車によって生じるグレア現象を確認する。

3.2 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。

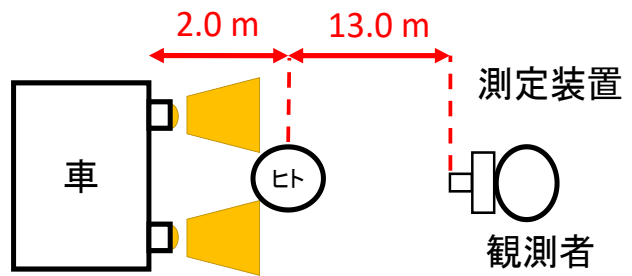


図7 観測 概略図

3.3 観測結果

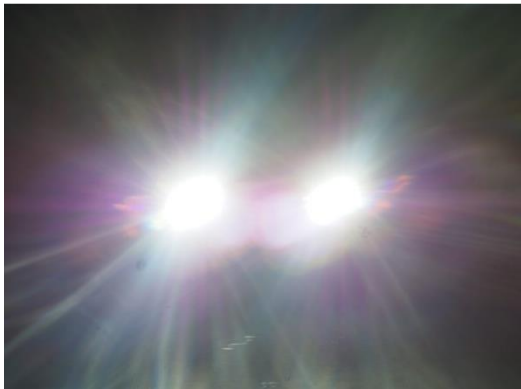


図8 図7の条件による観測結果
ヒトの像は確認できない。



図9 ヒトが右側のライト正面に
移動した場合

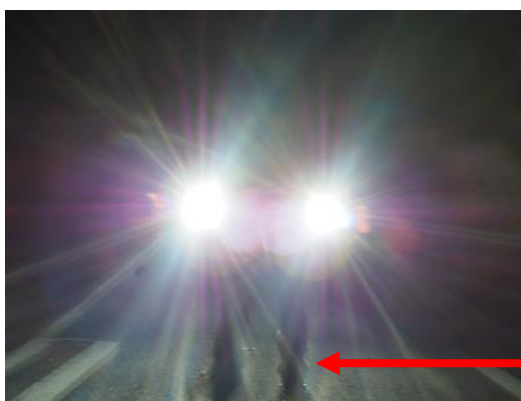


図10 観測者とヒトの距離が7.0 m
となるまで近づいた場合

赤矢印の部分にヒトの像が確認
できる。

3.4 考察

図8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9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、図10のように、グレア現象によって見えなくなっていたヒトが観測者に近づくと、ヒトの像が見えるようになった。よって、グレア現象は、光源に近い物体に対して、より強く発生することが分かった。

4. 仮説と検証方法

4.1 仮説

図8の考察より、ヒトの像の手前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で見えなくなる物体そのものが遮光することによって回折光が生じるか、観測者の眼球付近の遮蔽物である、まつ毛、まぶた、瞳孔で回折光が生じると考えた。

4.2 検証方法

グレア現象で見えなくなる物体、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。

5. 実験1 遮光物による回折とグレア現象の関係

5.1 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。

5.2 実験方法

- (1) 図11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12に示す装置を設置し、図13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13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[Pixel]を測定し、 x と光条の長さ[mm]の関係を分析した。

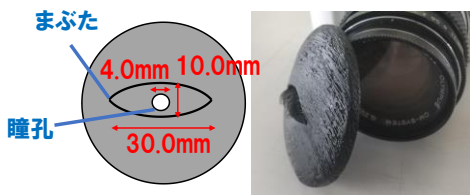


図11 使用した眼球キャップ
まぶたの先から瞳孔までの奥行は2.0 mmである。この寸法は、班員全員の眼を参考に決定した。

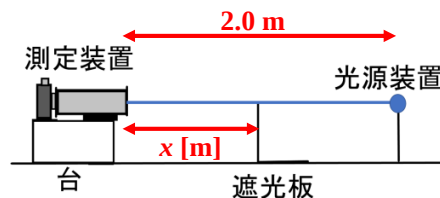


図12 実験1装置図
光源に5600 lux, 3.0 mm径の青色LEDを使用した。

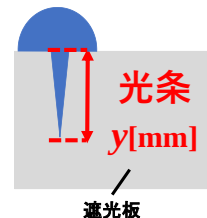


図13 遮光の様子と観測された光条

5.3 実験結果

図14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。

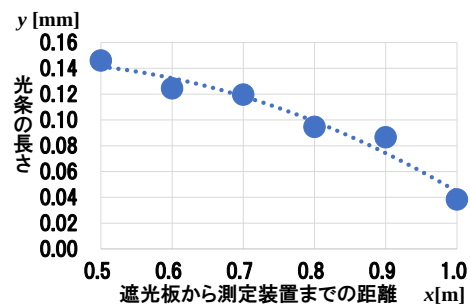


図14 実験1の結果

5.4 考察

生じた光条は、最大でも0.15 mmと短かすぎるため、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。



図15 得られた光像例

6. 実験2 眼球の各構造が光像に与える影響

6.1 目的

得られる光像が、眼球におけるどの構造の強い影響を受けるのか、検証する。

6.2 実験方法

- (1) 図 16 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 17 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 16 におけるモデル C～E に図 18 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 16 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、文献値⁶⁾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。

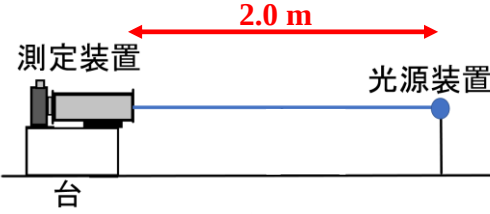


図 17 実験2 装置図

光源に 5600 lux, 3.0 mm 径の青色 LED を使用した。



図 18 使用した付けまつ毛
市販のものを使用した。

6.3 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 19 実験2で発生した光像の写真
この図は掲載のため jpeg 化したものである。

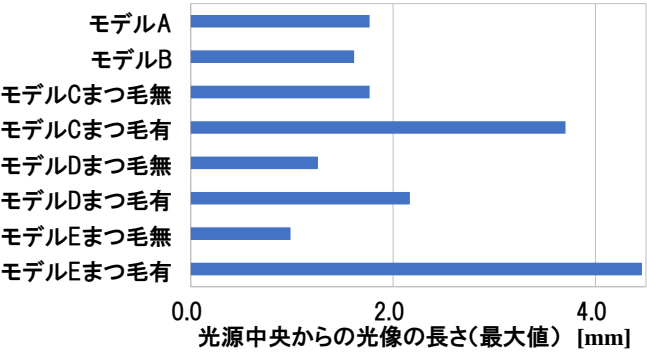


図 20 実験2 光像の長さ

6.4 考察

6.4.1 顔をしかめない場合の考察

図 19 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 20 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）の光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 ライトの視直径を写像公式から算出したところ、本実験の条件では、直径 3.0 mm の LED ライトの視直径は 0.08 mm となるはずであるのに対し、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。

6.4.2 顔をしかめる場合の考察

実際にグレア現象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 2.0 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 19 より、まつ毛の有無にかかわらず、顔をしかめたモデル D の場合の方が鉛直方向に光条が見られ、像もやや縦長になっている傾向が見られる。つまり、瞳孔が小さくならず、顔をしかめると、まぶたの上下間距離が短くなる影響が、光像に現れていると考えられる。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なっており、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。

6.4.3 まつ毛が光像に与える影響

モデル C～E におけるまつげ無モデルとまつげ有モデルを比較する。図 19 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 20 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いことが分かった。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のにに対して、まつ毛有の場合の光条は、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、次に記す二つの効果が重なっていると考えた。一つは、顔をしかめたり、瞳孔を小さくしたりすることによって眼球内に入る光を減光し、光像を小さくする効果である。もう一つは、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。こちらは、まつ毛の生えている方向によって効果の出方がまちまちになるため、モデル D とモデル E の光条の長さがモデル C に対して一律に同じ傾向にならなかったと考えられる。

7. 実験3 瞳孔径と光像の大きさの関係

7.1 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。

7.2 実験方法

- (1) 図 21 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) キャップを簡易眼球モデル測定装置に取り付け、図 17 のような実験 2 と同様の装置で図 22 に示す瞳孔径 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」にて測定し、分析した。



図 21 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, 9 mm, 11 mm
遮光部は平面上である。

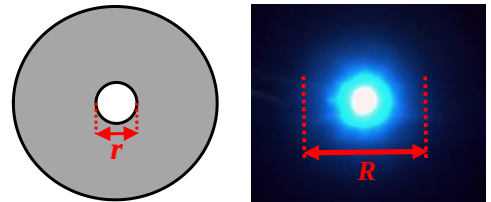


図 22 瞳孔モデルキャップの孔径 r
と得られた光像における直径 R

7.3 実験結果

いずれの孔径のキャップを用いても、図 22(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 23 のように相関があり、孔径が小さいほど、光像の直径は小さいことが分かる。

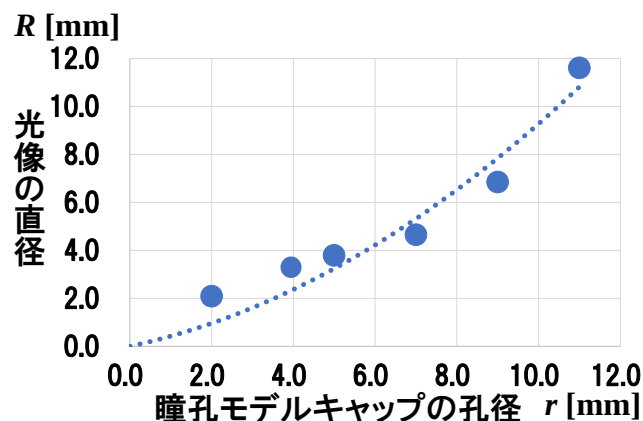


図 23 実験3の結果

7.4 考察

図 23 より、孔径が小さいほど、光像の直径は小さい。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明らかとなった。一方、実験 2 と同様に、LED ライトの視直径 0.08 mm の 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、広がっている可能性が高いと考えられる。

8. シミュレーション³⁾

8.1 目的

回折理論によるシミュレーション像と実験により得られた光像を比較することにより、ここまでの実験で得られた光像の広がり回折光であるかどうかを確認する。

8.2 理論

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。

$$u(x,y) = \frac{iA}{\lambda f} e^{-ikf} e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2f}} \iint u_0(\xi,\eta) e^{i2\pi(x\xi/\lambda f + y\eta/\lambda f)} d\xi d\eta \quad \text{式(4)}$$

$u(x,y)$: 回折光の強度関数 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 λ : 入射光の波長

式(4)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。

8.3 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。シミュレーションの条件は、実験2におけるモデルCのまつ毛有及びまつ毛無の2種類を検証した。
- (2) 図24に示す Python プログラムにて、式(5)の演算を行った。結果をグレースケール画像で出力し、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('nyuusyaku.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()
```

8.3 シミュレーション結果

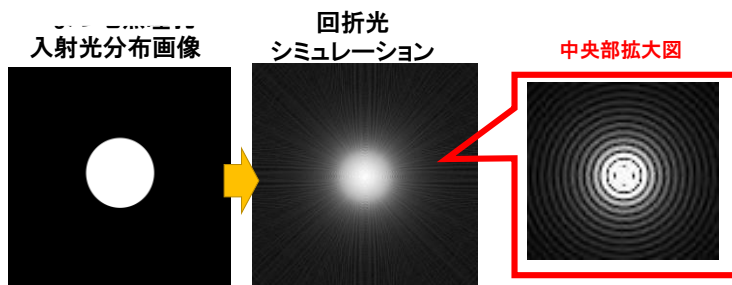


図25 まつ毛無シミュレーション結果

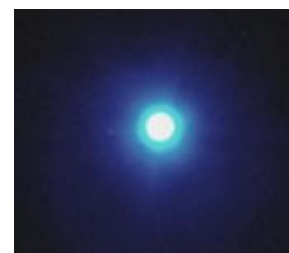


図26 実験2モデルC
まつ毛無の回折像
シミュレーション結果と酷似している

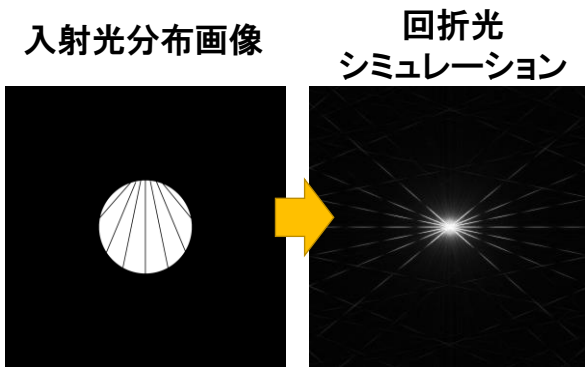


図 27 まつ毛有 放射状に生えたまつ毛
に対するシミュレーション結果

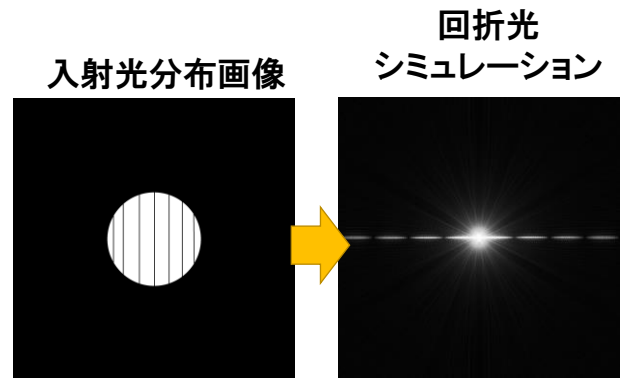


図 28 まつ毛有 鉛直方向に生えたまつ毛
に対するシミュレーション結果

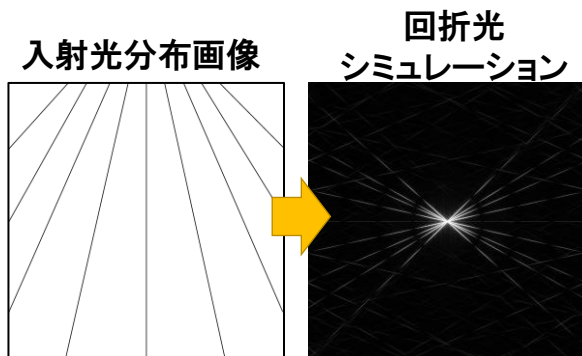


図 29 まつ毛のみ 放射状に生えたまつ毛
に対するシミュレーション結果

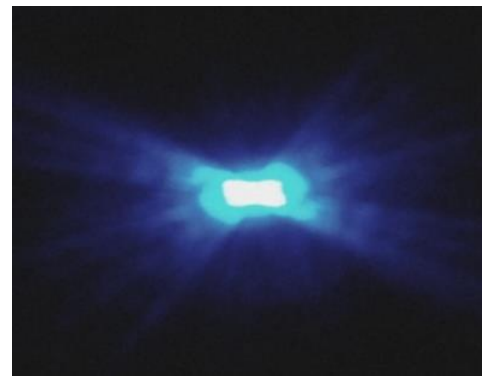


図 30 実験 2 モデル C まつ毛有の回折像
図 27 のシミュレーション結果と酷似
している。

8.4 考察

8.4.1 光像の特徴⁵⁾

図 25 より、まつ毛無の瞳孔のみのシミュレーションでは、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が大いほどはっきり見える傾向があった。まつ毛有のシミュレーションでは、図 27、図 28、の通り、まつ毛の生える方向によって結果が異なった。いずれも、まつ毛に対して垂直な方向に光条が現れている。

8.4.2 実験結果とシミュレーション結果の比較

シミュレーション結果（図 25、図 27）は実験 2 モデル C（図 26、図 30）の結果と酷似しており、ここまで議論してきた光像の広がり、瞳孔やまつ毛による回折光が要因で生じていることを確認できた。また、まつ毛有の結果が図 28 よりも図 27 と酷似したのは、図 31 のように眼球が球体に近い形をしていることで正面からまつ毛を観測した際に、まつ毛が放射状に広がっているからと考えられる。なお、図 27 と図 29 を比較すると、図 29 のまつ毛のみの影響による回折光には、光像中央部に広がった回折光が観測されていないことが分かる。よって、モデル C まつ毛有の回折像はまつ毛と瞳孔の両方の回折光が重なり合っていると考えられる。



図 31 まつ毛の方向

9. 実験4 光条の発生方向の検証

9.1 目的

遮光方向と光条の向きを明らかにする。

9.2 実験方法

- (1) 図 32 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 17 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。

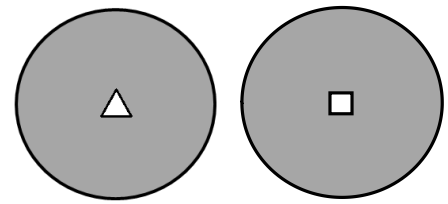


図 32 作製したキャップの形状図
左 正三角形、右 正方形

9.3 実験結果

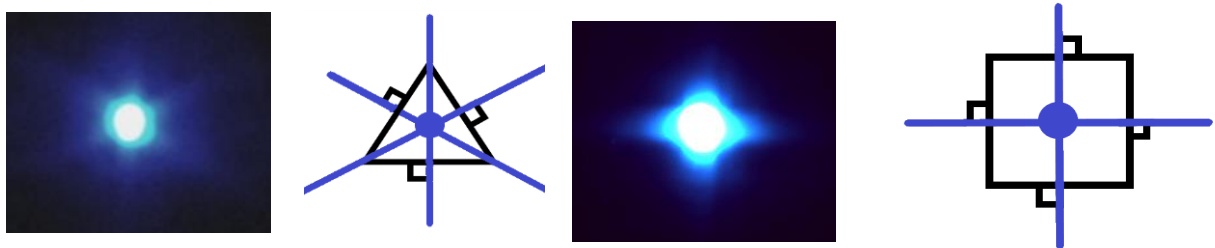


図 33 実験4で得られた光像と模式図

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。

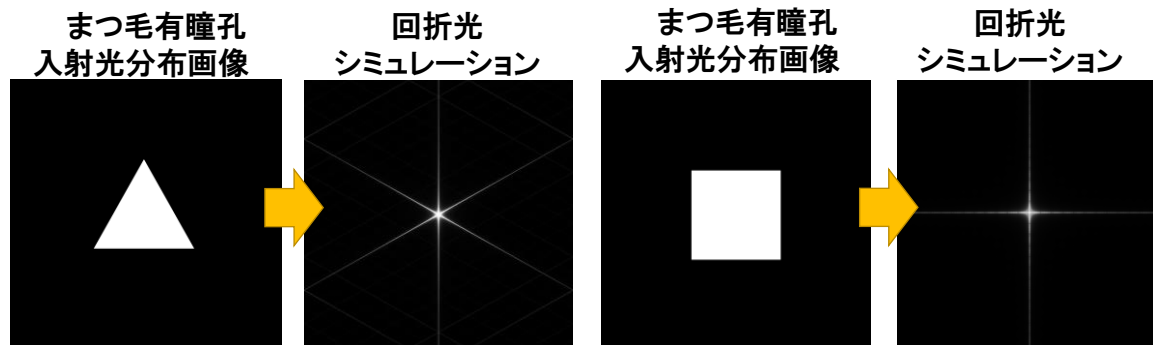


図 34 シミュレーションで得られた回折像

図 33 の光条の向きと一致した。

9.4 考察

図 33、図 34 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 34 の結果が実験結果と一致したことから、光条は回折光であることも分かった。

さらに、実験 1 における回折光が図 13 のように遮光板の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。

10. 調査 実際の目の回折

10.1 目的

実験2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。

10.2 調査方法

- (1) 60名の被験者に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35）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。

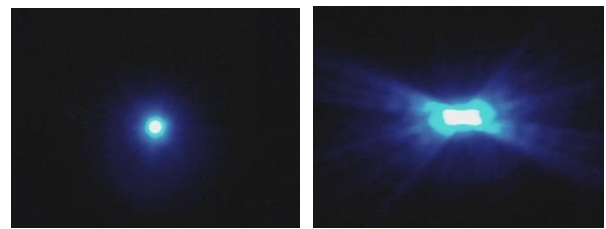


図35 被験者に確認していただいた像

左 実験2のモデルCまつ毛無し
右 実験2のモデルCまつ毛有り

10.3 調査結果

まつ毛有の像に見えた被験者は全体の25%、まつ毛無の像に見えた被験者は全体の75%であった。また、個別に眼を撮影させていただいた結果、まつ毛無に見えた観測者の眼はまつ毛が短く、上向きであることが多く、まつ毛有に見えたひとはまつ毛が下向きで長く、瞳孔前方をまつ毛が覆っていることが多いことが分かった。

表1 調査結果

図34と全く異なる像が見えた観測者はいなかった。

60人調べ	まつ毛有像 に見えた	まつ毛無像 に見えた
人数[人]	15	45
割合[%]	25	75

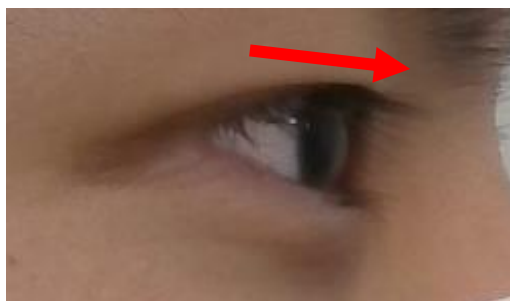


図36 まつ毛無像に見えた観測者の眼

まつ毛が上向きで視界を遮らない。

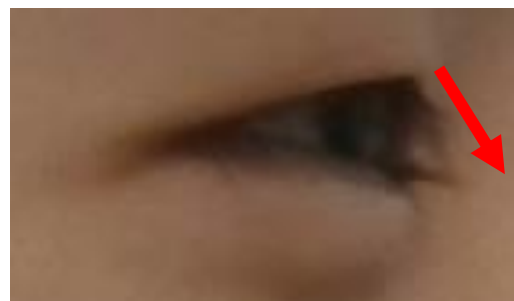


図37 まつ毛有像に見えた観測者の眼

まつ毛が下向きで長く、視界を遮っている。

10.4 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。

次に、まつ毛有像に見えた被験者とまつ毛無像に見えた被験者の割合は1:3であり、個人差があった。図36、図37の結果より、まつ毛の方向や長さによって、まつ毛が視界を遮る場合と遮らない場合に分けられるため、個人差が生じたと考えられる。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。

11. 実験5 グレア現象発生時における回折光の分布

11.1 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。

11.2 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38に示す装置にて、グレア現象を生じさせ、このとき生じる光像を撮影した。

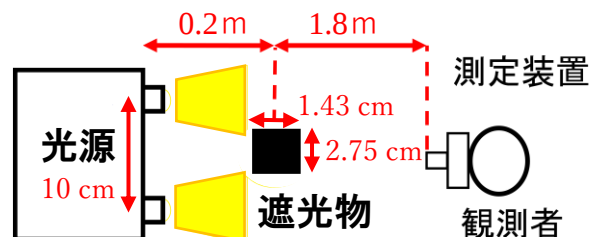


図38 実験5の装置概略図

光源に光源に 168300 lux, 3.0 mm 径の白色 LED を使用した。

11.3 実験結果

図39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40）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39 実験5装置写真
遮光物の高さは16.7 cmである。



図40 実験5結果
グレア現象で遮光物が見えない。



図41 遮光物を光源前に移動した場合
図40よりも回折光が減光されている。



図42 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。

11.4 考察

11.4.1 グレア現象の光学的要因

図40より、光像は図35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。光源の光が明るい場合、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。

11.4.2 グレア現象が強く生じる条件について

図41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れば、グレア現象が低減された。また、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。3章 観測結果の考察とも合わせれば、この条件を満たし、かつ光源と遮光物の距離が近いほど強くグレア現象が起こると考えられる。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。

12. 結論

- ・グレア現象は、主に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。
- ・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。

13. 今後の課題

- ・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。
- ・グレア現象を低減する条件を明らかにし、グレア現象を起こさない具体的方法を検討すること。

14. 感想

グレア現象の要因を一つずつ検証し、検証結果を積み重ねていくことについては、少しずつ真理が明らかになることが増え、とてもわくわくした。しかし、これまでに本研究ほど定量的に検証した例はなく、分析の方法に確立されたものがなかったので、その測定手法の検討には苦勞した。また、最終的に採用した分析手法に行きつく過程で、無駄になってしまったことも多いので、その吟味を慎重に行うことの重要性を強く感じた。シミュレーションでは、プログラム作成に何度も失敗するなど苦勞が絶えなかったが、シミュレーション結果と実験結果が一致した際の喜びはとても大きかった。

15. 謝辞

本研究を進めるにあたり、3Dプリンターの使用についてご助言、ご指導、ご協力くださった愛媛県立松山南高等学校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、調査の際に御協力いただいた松山南高等学校2年生の皆様に感謝申し上げます。

16. 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). 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)
- 3). 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)
- 4). 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)
- 5). 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)
- 6). 虹彩と瞳孔の不思議(<https://www.santen.co.jp/ja/healthcare/eye/eyecare/wonders/iris.jsp>)