

1. 研究の目的¹⁾²⁾

グレア現象とは複数の光源の光が交錯することで周囲の物体の視認が妨げられることをいう。これ



図 1 グレア現象

は交通事故の要因になるため、その原因を定量的に分析・究明し、グレア現象を低減する方法を考案することを目的に研究を行った。先行研究より、原因の一つはまつ毛による回折現象であることが示されているが、他の要因についても考える余地があるため、検証を行った。

2. 簡易眼球モデル測定装置³⁾

水晶体を単焦点レンズ(人間の眼に近い焦点距離 50mm の凸レンズ)、網膜を撮像素子に見立てることを



図 2 本研究で用いた測定装置

考え、ミラーレス一眼レフカメラを眼球モデルとした装置を作製した。そして、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。さらに、班員全員で撮影像が目視に最も近づくカメラ設定 (ISO 値 = 320, SS 値 = 1.0 s) を確認した。

3. 研究の仮説と検証方法

実際のグレア現象を確認するため、暗い場所で自動



図 3 観測結果

車の前にヒトが立つ際のグレア現象を観測した。また、ヒトの位置関係の条件を変えることによる光像の変化を確認したところ、図 3 のように光源と観測者の間にあるヒトの位置によって発生する光像に違いがあった。もし、遮光物よりも光源側で回折光が生じているならば、図 3 の観測結果はどちらからも二つの光源像が観測されるはずである。この観測事実から、次の仮説を立てた。

仮説 グレア現象の発生要因は遮光物よりも観測者側で発生する回折光である。本研究では遮光物及び、観測者のまぶた、まつ毛、瞳孔で生じる回折光の強度について検証し、グレア現象の光学的要因について検証した。

4. 実験方法

実験 1 暗室に図 4 に示す装置を設置し、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 ずつ変更して raw 形式で撮影し、画像解析ソフト「マカリ」を用いて光条の長さ y を計測した。

実験 2 キャップを表 1 のように変更し、遮光板を除いた実験 1 の装置で光像の大きさを計測した。まつ毛の有無による影響を検証する際には、キャップに付けまつ毛を取り付けて実験した。

調査 100 名の被験者に暗室で丸いライトを正面から観察してもらい、表 2 の像のどちらに近く見えるのか比較していただいた。また、像の見え方とまつ毛の生え方や年齢、視力との因果関係について χ 二乗検定を用いて検証した。⁸⁾

実験 3 図 6 のように、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 ずつ増やして光条の長さを中心でみられる円形

像の大きさを測定した。

実験4 図7のような、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、遮光板を除いた実験1の装置を用いて撮影した。

実験5 図8のような、瞳孔のモデルである孔径 $r = 2.0 \sim 11.0$ mmの円形の穴の開いたキャップをカメラに取り付け、遮光板を除いた実験1の装置を用いた際の光像の直径 R を計測した。

シミュレーション 4)5)6) レンズを通過する光は、フラウンホーファー回折を行う。

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

$u(x,y)$: 回折光の強度関数 A : 入射光の振幅

f : レンズの焦点距離 k : 波数

$u_0(\xi, \eta)$: 入射光の光強度分布関数

λ : 入射光の波長

この理論式及び入射光画像を用いて、プログラムを作成、画像処理を行い、回折像を確認した。

実験6 図9の装置(光源:白色LED2個)のように、光源間に物体を置いて光像の様子を撮影した。

実験7 遮光物を除いた図9の実験装置を用いて測定装置にカラーフィルター(灰色、青色、緑色、茶色、黄色、橙色、桃色、赤色の8種類)、UVカットフィルター、IRカットフィルター、偏光フィルターをそれぞれ取り付け、撮影した。

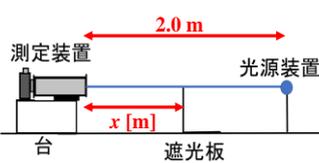


図4 実験1装置図

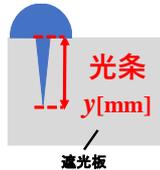


図5 遮光の様子と光源に5600Lux, 3.0mm径観測された光条

表1 実験2で用いたキャップ

| モデル名 | モデルA | モデルB | モデルC | モデルD | モデルE |
|--------|------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 条件 | 孔径4.0mm 瞳孔モデル | まぶた形状 モデル | 孔径4.0mm 瞳孔 +まぶたモデル | 孔径4.0mm 瞳孔 +しきめまぶたモデル | 孔径2.0mm 瞳孔 +しきめまぶたモデル |
| キャップ概形 | | | | | |

表2 実験4で被験者に見せた画像 → (実験2の結果)

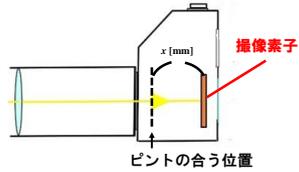


図6 実験3の測定装置イメージ図

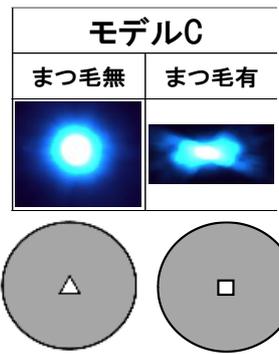


図7 実験4で取り付けるキャップの図

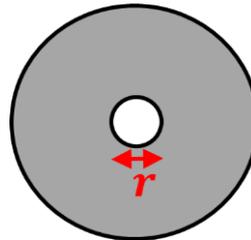


図8 実験5で用いたキャップ

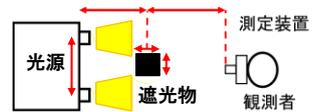


図9 実験6の装置図

5. 実験結果

次のような結果が得られた。

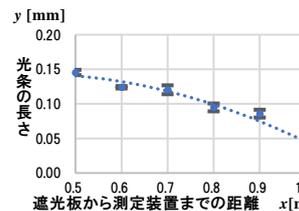


図10 実験1の結果

表3 実験2の結果

| モデル名 | モデルA | モデルB | モデルC | |
|------|------|------|------|------|
| | まつ毛無 | まつ毛有 | 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 | | | | |

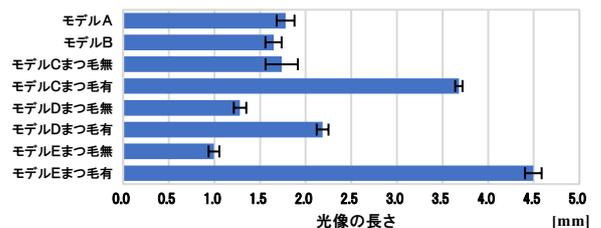


図11 実験2の結果

表4 調査の結果

| 項目 | χ^2 乗分布表値 | | χ^2 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 | △ |

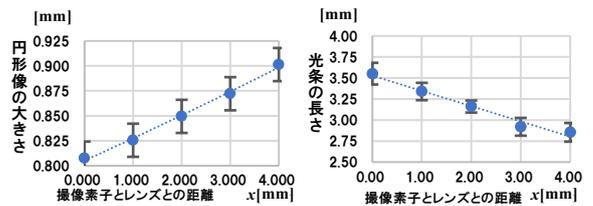


図12 実験3の結果

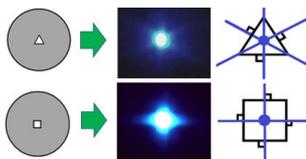


図 13 実験4の結果

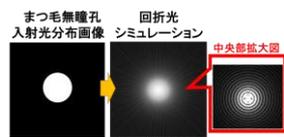


図 14 シミュレーションの結果1⁷⁾

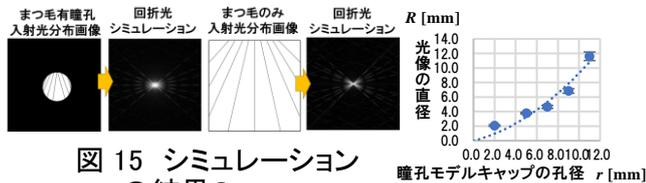


図 15 シミュレーションの結果2

図 16 実験5の結果

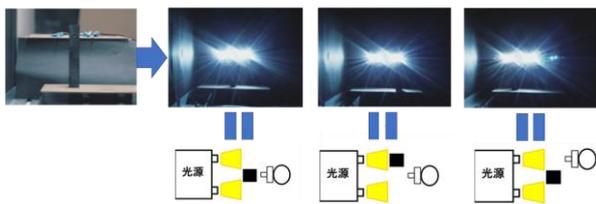


図 17 実験6の結果

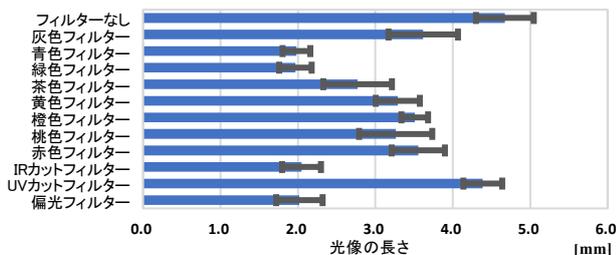


図 18 実験7の結果

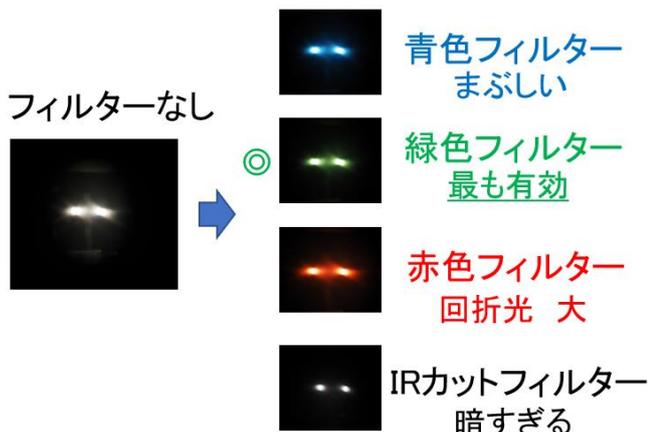


図 19 実験7の結果

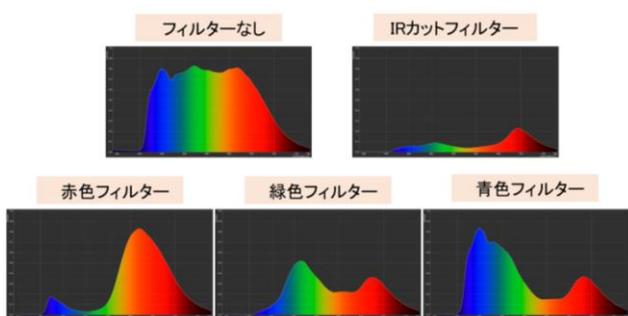


図 20 実験7で使用したカラーフィルターを介して白色光を見た際のスペクトル強度

6. 考察

(1) 遮光物による回折光の影響

図 10 より実験 1 で生じた光条の長さは光源の視直径である 0.08 mm とほぼ変わらず、遮光物による回折光がグレア現象の原因とは考えにくい。

(2) 観測者の眼の要素による回折光の影響

表 3、図 11 より、まぶた構造のないモデル A とまぶた構造のあるモデル C による実験結果を比較すると両者に差異がないことから、光像に対するまぶたの影響はないことが分かった。また、モデル C、D、E のいずれでも、まつ毛の有無で変化があり、まつ毛有の場合に放射状の光条が確認されることから、光像に対するまつ毛の影響はあると考えられる。さらに、モデル C に対して顔をしかめた際を想定してまぶたの上下間距離を半分にしたモデル D は縦に光像が長いことから、強い光を見て顔をしかめた際は、まぶたも光像に影響することが分かった。次に図 16 より、瞳孔径が小さくなるほど光像の長さも小さくなっており、瞳孔が強い光を遮る役割を担っていることが確認できるものの、光源の視直径 0.08 mm に対して、50~150 倍の大きさの光像が得られていることから、瞳孔による光像への影響は大きいことが分かる。調査では、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 4 より χ^2 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。これは、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。また、見え方は視力にも影響されることが分かり、視力が悪い人は像がにじむ影響によって、まつ毛無像になりやすいこと、年齢による影響はないことも分かった。以上より、光像の見え方はまつ毛の向きと視力が影響すると考えられる。さらに、表 2 に示した像以外

に見えた被験者は1人もいなかったことから、本研究の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。シミュレーションについて考察する。表2と図14、図15がよく一致した。以上のことから、ヒトが見る光像はまつ毛と瞳孔で生じた回折光によることが分かった。実験6について考察する。図17の光像は表2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。また、表2のまつ毛有像は図15のまつ毛有瞳孔のシミュレーション画像と酷似している。これより、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ことが分かる。以上より、グレア現象の光学的要因は、まつ毛と瞳孔で生じる回折光が重なり合い、遮光物の像を遮ることで生じていると考えられる。

(3) グレア現象を低減する方法

図18より、青色フィルター、緑色フィルター、IR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、図20より、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。

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、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。IR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、自動車運転時等にグ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20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。

7. 結論

グレア現象は、まつ毛やまぶたによる回折光によって生じる。また、強い光により顔をしかめると、まぶたでも回折現象が発生するようになり、より強くグレア現象が発生する。グレア現象は、赤色と青色を減光するフィルターを使用することで、効果的に低減できる。

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アンホーブナー回折像(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)
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. カイニ乗検定とは何か(<https://www.business-research-lab.com/220705-2/>)
9. ブルーライトとは(https://www.itolens.jp/eyesupport_bluelight_cut_01)