

回折レンズを用いた投影光学系における色収差の評価

機械科 志智 亘*

Evaluation of chromatic aberration in a projection optical system using a diffractive lens

Wataru SHICHI

Color blur of the image, which projected from an LED automotive headlight optical system using the hybrid lens, has evaluated. In the experiments, the spectral irradiance at the points surrounding a border of white light and dark on the projected image was measured. The measurements show that the border projected using hybrid lens is sharper than that using convex lens. In order to evaluate the color changing of the border, the colorimetric values u' , v' (CIE1976 color space) have been calculated from the measurements. These calculations show that the color change of the border using a hybrid lens is smaller than that using a convex lens. On the other hand, the blue flare occurs around the border due to the diffraction phenomenon by using hybrid lens were confirmed based on the experimental results and the colorimetric analysis. This report clarifies the problems to use a hybrid lens for the illumination system.

Keywords : diffractive lens, chromatic aberration, pattern projection

キーワード：回折レンズ、色収差、パターン投影

1 はじめに

近年、白色LED光源を用いた多くの照明システムにおいて樹脂レンズが使用されている。樹脂レンズはガラスレンズに比べて軽量化で成形性に優れているため、照明光学系の軽量化やコンパクト化が可能となる。照明システムにおいて光線を集光・発散させるための樹脂レンズは通常屈折現象が利用されている。屈折は光がレンズなどの物質を通過すると、光線の進行方向が変化する現象である。光線がどの程度屈折するかは、材料の屈折率に依存する。屈折率は材料により異なり、また波長依存性を持っている。このため、白色光の様な多数の波長で構成されている光が樹脂レンズを通過すると、レンズ材料の屈折率の波長依存性により、波長によって集光される距離（焦点距離）が異なる。このことにより白色光を用いて白黒のパターンを投影した際には、その輪郭付近に色ずれが生じる。このような現象は色収差と呼ばれる。これは設計した照明システムに意図しない色を生じさせるとともに、鮮鋭な白黒のパターンの投影を難しくすることを意味する。したがって、より正確に照明システムの光の投影性能を制御するためには色収差が少ないレンズを用いる必要がある。特に、集光能力が高い大口径かつ焦点距離が短い樹

脂単レンズはレンズ形状の曲率が大きいため色収差が顕著に生じる。ガラスレンズにおいては屈折率の波長依存性が異なる硝材を複数使用して色収差を補正するアクロマートレンズやアポクロマートレンズなどが存在する。一方の樹脂レンズにおいては色収差を補正することができる組み合わせが硝材と比べて非常に少なく、樹脂レンズにおけるアクロマートレンズやアポクロマートレンズはほとんど存在しない。一方で、樹脂レンズの色収差の補正方法として回折現象を用いる手法が知られている¹⁻⁴⁾。回折現象は光が障害物を通過した際に、その障害物の後ろ側に光が回り込む現象である。この性質を用いることで、屈折と同様に光を集光することができる。回折によって集光するレンズ（回折レンズ）は、微細な段差構造によって光を回折させて、その方向を変化させるため非常に薄い。回折レンズの焦点距離は材料と段差構造のパラメータによって決まる。また、屈折レンズでは長波長の方が短波長より焦点距離が長くなるが、回折レンズでは長波長の方が短波長より焦点距離が短くなるという屈折レンズとは逆の色収差を持つ。つまり、屈折レンズのレンズ曲面上に回折レンズの構造を付与することにより、屈折レンズで生じる色収差を回折レンズの色収差で補正することができる（これをハ

*) 現 照明音響科

イブリッドレンズと呼ぶ)。このレンズは既にカメラレンズや照明用レンズの一部に使用されている^{4, 5)}。ただし、回折レンズによる集光では、屈折とは異なる回折現象特有の問題点が生じることが知られている¹⁾。したがって、照明システム用途に応用する際には、その特性を十分に検討する必要がある。

これまでに我々は、白色LED光源を用いて白黒のナイフエッジパターンを投影する光学系における投影像の輪郭付近の色の変化が、投影レンズにハイブリッドレンズを使用することで、屈折レンズよりも小さくなることを報告した⁶⁾。今回我々はハイブリッドレンズの照明光学系への応用を目的とし、上記ハイブリッドレンズを自動車ヘッドライトの投影レンズに応用した際の投影像の色収差について調べた。

2 方法

本取り組みでは、照明システムへの応用として、白色LED光源を用いて白黒のパターンを投影する自動車のヘッドライトに着目し、その投影レンズにハイブリッドレンズを適用した際の、投影パターンの色収差について調べた。ヘッドライト光学系は市販の自動車ヘッドライトから光源・リフレクター・投影レンズからなる部分を取り出した(図1)。投影レンズには非球面ハイブリッドレンズ(68995, Edmund Optics Inc.)と、比較のための非球面プラスチックレンズ(66011, Edmund Optics Inc.)を用意した(型番は2016年に公開されていたもの)。図2はヘッドライト光学系の光源から20m前方のスクリーンに投影された像である。像は図中の明暗境界(カットライン)の中央の段差部分が結像する

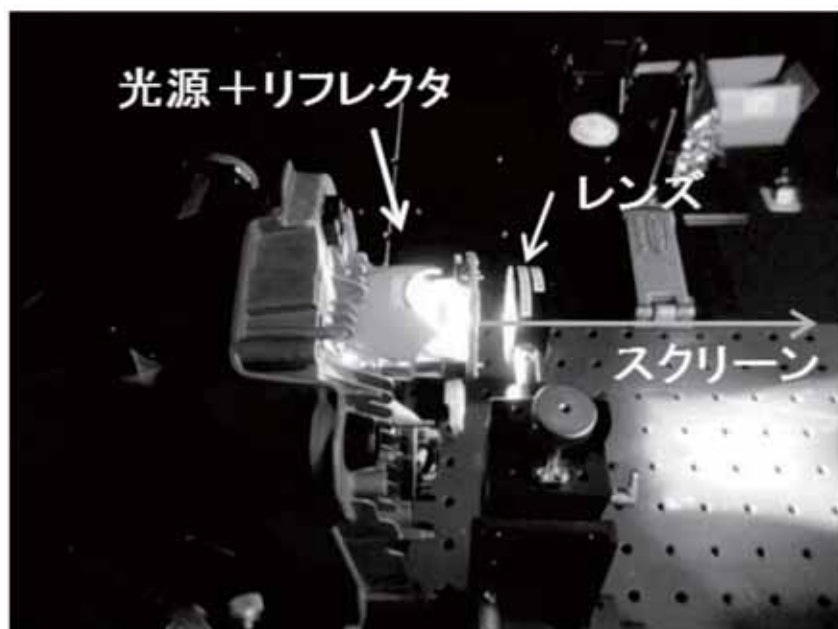


図1 上から見た自動車ヘッドライト光学系

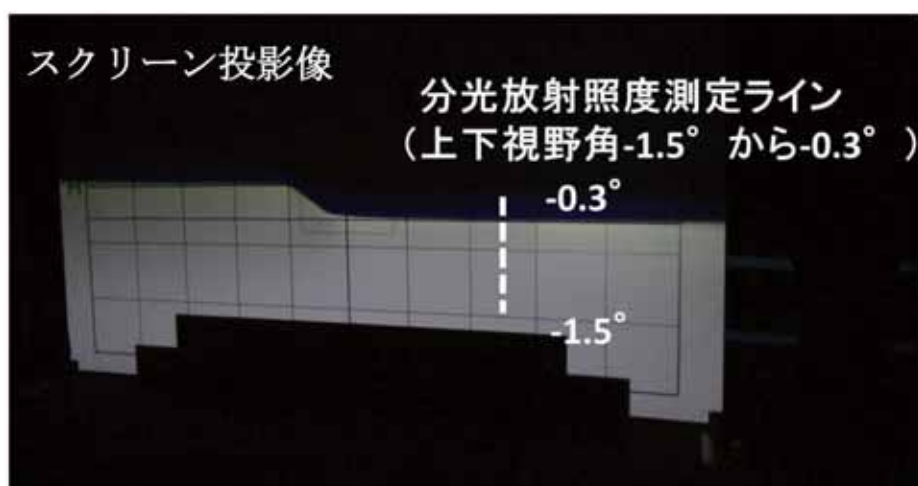


図2 自動車ヘッドライト光学系の投影像

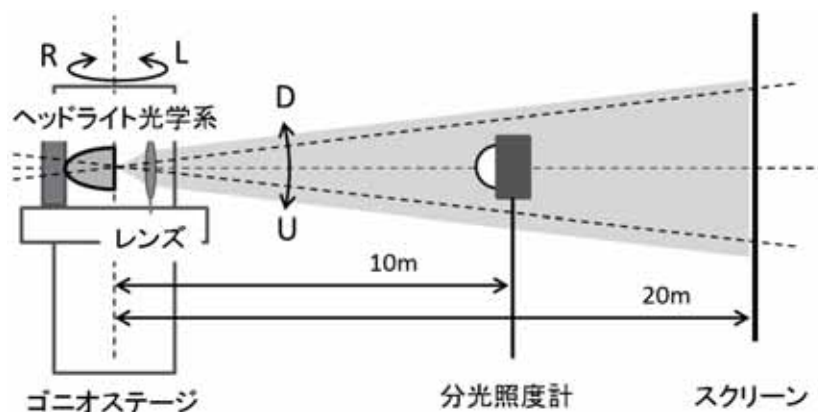


図3 測定光学系の概念図

ようにヘッドライト光学系の投影レンズの位置を調整した。カットラインの色のにじみの評価は、図中の破線部（光源からの上下視野角が -1.5° から -0.3° まで）の分光放射照度を 0.01° 刻みで測定し、その値からCIE 1976色度座標（ u' , v' ）（JIS Z8781-5）を求めた。（ u' , v' ）は人間が知覚する色と色の差（色差）に比例するように考案された量であるため、この値の変化を調べることでカットラインの色のにじみを定量的に評価することができる。分光放射照度は光源から10m前方（スクリーンから10m光源側）に配置した分光放射照度計で測定した。測定光学系の概念図を図3に示す。

3 結果および考察

図4に波長450nm、550nm、650nmの放射照度における測定結果を示す。図の（a）は投影レンズに非球面ハイブリッドレンズを使用した結果で、（b）は投影レンズに非球面プラスチックレンズを使用した結果である。図4（a）、（b）において放射照度が急激に変化している領域がカットライン付近である。図4（a）、（b）から非球面ハイブリッドレンズを使用した投影像のカットライン付近の放射照度は非球面プラスチックレンズに比べてどの波長もほぼ同じ視野角で変化している。一方で非球面ハイブリッドレンズの測定結果においては波長450nmの放射照度が投影像暗部（上下視野角が -0.5° 以上）においても値が下がりきっていないことなどが確認できた。

図5は各投影レンズを用いた際の測定領域におけるCIE 1976 均等色度図上での色の変化を示している。図において u' が小さく v' が小さい領域は青色の割合が高く、 u' が小さく v' が大きい領域は緑色の割合が高い。また u' と v' の両方の値が大きい領域は赤色の割合が高い。（ u' , v' ）が約（0.20, 0.46）の点が 2°

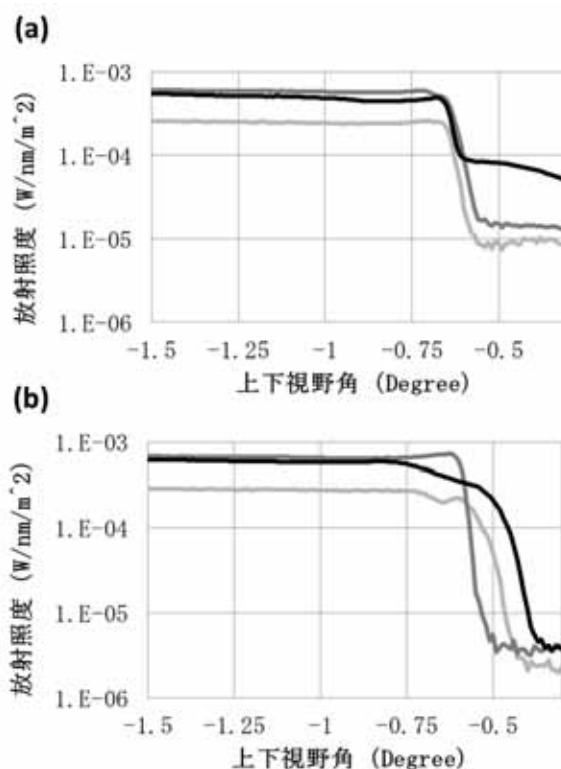
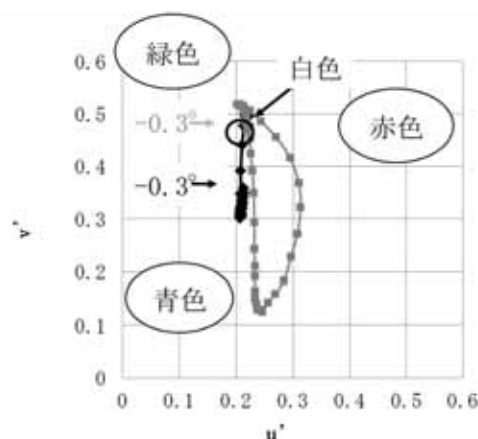


図4 測定上下視野における450nm, 550nm, 650nmの分光放射照度

(a)：非球面ハイブリッドレンズを用いてカットラインを投影したもの。
(b)：非球面プラスチックレンズを用いてカットラインを投影したもの。
— 450 nm, — 550 nm, — 650 nm

図5 測定上下視野位置における色度値(CIE1976 u' v')の色度図上の軌跡

—●—：非球面ハイブリッドレンズを用いてカットラインを投影したもの。
—■—：非球面プラスチックレンズを用いてカットラインを投影したもの。

標準観測者における標準光源Cの白色点となっている。図より非球面ハイブリッドレンズにより投影されたカットラインの色度図上の軌跡は非球面プラスチックレンズにより投影されたそれよりも小さいことがわかる。ただし、非球面ハイブリッドレンズの色度座標上の軌跡は測定した上下視野の暗部上限（ -0.3 度）においても青色の割合が高い領域であった。これらの傾向は前回の取組みで行った白色光源を用いたナイフエッジ投影像の色収差評価⁶⁾で行った測定と同様であった。

今回使用したハイブリッドレンズの回折効率はメーカーカタログによると波長587.5nmで最大になるように設計されており、波長450nmでは波長587.5nmの70%程度となっている。回折効率は、回折構造により光を集光できる割合を示している量である。集光されない光はスクリーン上で結像しないため、バックグラウンド光となる。したがって、波長450nm 付近の青色領域に相当する短波長側において回折効率が低いため、この波長領域の光は投影スクリーン上（結像面）で結像せずにバックグラウンド光となり、フレア現象が生じており、このためナイフエッジ投影像の暗部領域の青色光が他の色の光よりも高くなったと考えられる。

4 まとめ

自動車ヘッドライト光学系の投影レンズに非球面ハイブリッドレンズを使用した際の投影像におけるカットラインの色収差について、分光放射照度を測定し色度値を求め評価した。非球面ハイブリッドレンズを使用することによりカットライン投影像の色の变化が非球面プラスチックレンズに比べて抑えられることがわかった。一方で、回折レンズの回折効率によるフレア現象が生じることが確認できた。

今回の取組では照明システムにハイブリッドレンズを

適用した際の、投影像における輪郭の色の变化がプラスチックレンズに比べてどの程度低減するか、また回折効率によるフレア現象について、分光放射照度の値や色度値などの定量的な値を用いて議論した。これらの知見は回折レンズを用いた照明システムを設計するための有用な情報であると考えられる。

謝辞

この取組の一部は静岡大学電子工学研究所の共同研究プロジェクトの支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) 小野雄三 他：回折光学の基礎「回折光学素子入門」，増補改訂版（オプトロニクス社，東京），（社）応用物理学会日本光学会光設計研究グループ 監修，pp. 9－23（2006）
- 2) Ebstein, Steven M. : Nearly index-matched optics for aspherical, diffractive, and achromatic-phase diffractive elements. Optics Letters, 21(18), 1454-1456 (1996).
- 3) 鈴木等 他：回折光学素子を用いた光学設計. 光学, 25 (12) , 8-13 (1996).
- 4) 中井武彦 他：積層型回折光学素子の研究と光学系への適用方法. 日本写真学会誌, 65 (3), 180-185 (2001).
- 5) 是永継博 他：回折レンズの設計手法およびナノコンポジット材料による回折効率向上. 光学, 42 (7), 332-338 (2013).
- 6) 志智亘：回折現象を用いたレンズの照明用途応用に向けた検討. 静岡県工業技術研究所研究報告, 10, 9-10 (2017).