高出力 LED を用いた配光制御型照明器具の開発

正会員 浅川 久志 (丸茂電機株式会社) 非会員 馬場 洵子 (丸茂電機株式会社)

非会員 若木 守明 (東海大学)

Development of Light Distribution Controllable Luminaire Using High Power LEDs

Member Hisashi Asakawa (Marumo Electric Co., Ltd), Non Member Junko Baba (Marumo Electric Co., Ltd),
and Non Member Moriaki Wakaki (Tokai Univ.)

ABSTRACT

Luminaires that use high power LEDs are the most common kind in general use. To attain the desired brightness for practical applications, several of LEDs are required. Combining the luminous flux from each LED efficiently is important to control the light distribution. To do this, we fabricated a luminaire and obtained both the desired uniform light distribution and good uniformity of chromaticity over the whole light distribution.

KEYWORDS : stage lighting ,LED ,spot Light ,optical design, aspherical lens

1. はじめに

現在テレビスタジオや舞台における照明用光源として、ハロゲン電球が広く利用されている。これは、舞台照明用器具において、調光と配光の制御が非常に重要であることを反映した結果である。

発光効率を考えた場合、蛍光灯や HID のほうがはるかに優れている¹⁾。しかし、HID では電氣的な調光範囲が狭いこと、蛍光灯は光学系を使用して特定領域を照射する場合において、ハロゲン電球のフィラメントと比較した場合発光部が大きく、効率よく光源からの光を集めることができない問題がある。

また、舞台照明においては 0 ~ 100 % までのスムーズな調光が求められるため、サイリスタを用いた点弧位相角制御で電球に印加する電圧を変化させ調光を行っている²⁾。

このため、現在においてもほとんどの舞台照明器具の光源はハロゲン電球である。

また、舞台照明では舞台上を均一に照明することは無く、演目によって照射方向、照射範囲を変えた照明器具を多数用いる事がほとんどであることから、舞台用の照明器具は照射範囲の調節機構が装備されている。照射範囲の調整は、電球とレンズの間隔を可変させる方法とアパチャーに集光させ、アパチャーを投影するレンズ系の焦点距離を変え調整する方法があり、照明器具の用途、種類によって採用している方式が異なる。

舞台照明においても、省エネルギー化、CO₂排出量の削減が期待されており、白熱電球ではなく、より効率のよい新しい光源を用いた照明器具が必要である。

1990 年代に高輝度青色発光ダイオード (LED : Light Emitting Diode) が開発され³⁾、1996 年には高輝度青色発光ダイオードに

YAG 蛍光体を組み合わせた白色 LED が開発され照明光源として注目が集まっている⁴⁾。

また、近年白色 LED の発光効率の向上や高出力化によって舞台照明用光源として使用されてきている。舞台照明用の光源として考えた場合、LED は調光動作では非常に優秀であり、調光動作を行った場合の色度変化や応答性などは、現在のハロゲン電球よりも優れている。

しかし、舞台照明用で使用する場合以下の問題点を解決する必要がある。

(1) LED 単体での光束が少ない。

(2) 青色 LED と YAG 蛍光体の配光が異なり照射面での色むらが発生する⁵⁾。

(3) 複数の LED を使用した場合、各 LED 間での色のばらつきが大きい。従って上記問題点を解決する光学系が必要である。ハロゲン電球を用いて光学系を構築する場合には、図 1 のように、楕円面反射鏡を用いてアパチャーに集光しそのアパチャーを投影するケースが多いが、LED の場合は 1 灯あたりの光束が少なく、照明用として使用する場合には数個~数十個の LED を使用する必要がある、多数の光源から生じる光線を制御する方法が非常に重要となる。

そこで、複数の LED を配光制御型の照明装置として使用するため、本論文は高出力 LED を複数個用いた照明器具の光学系として、LED からの光をレンズアレイを用いてコリメートしコンデンサーレンズを用いたアパチャーに混合集光し、そのアパチャー光源像を結像光学系によって変倍投影することで、配光の制御を行った。

また、レンズアレイとコンデンサーレンズを用いることで、照射面の明るさのむらや、色のむらを解消した。

本論文の一部は平成 18 年度照明学会全国大会で講演を行った。

図1 ハロゲン電球を用いた配光制御型照明器具の構成図及び光線追跡図

Fig.1 Schematic diagram of light distribution controllable luminaire using halogen lamp and the result of ray tracing.

2. 照明器具の設計

2.1 照明器具全体の構成

実際の舞台用照明器具の主流として、ハロゲン電球 1000W 程度のもが使用されている。1000W のハロゲン電球では約 25,000lm の光束であり、この光源を用いた照明器具と同等のものを現在の LED の容量、効率で実現することは非現実的である。

今回は、省電力スタジオ向けの機材を目標に設計、試作を行った。設計を行った照明器具の全体構成を図2および図3に示す。

全体の構成は、図に示すように LED 光源を縦、横 8×8 に配列し計 64 個実装し、LED から光をレンズアレイと集光レンズを用いたアパチャーに集光し、そのアパチャー像を結像光学系により変倍投影することで、配光の制御が可能な LED の照明装置となっている。

2.2 光源

光源は、64 個の高出力 LED（日亜化学工業製 NCCW023, 42lm/個）を 8×8 で配置した。放熱を考慮した構造の躯体に取り付け、8 個ずつ直列に接続し 1 回路あたり 350mA の電流で駆動する定電流電源で点灯する構成とした。また、放熱を高めるために軸流ファンによる強制空冷を行った。

この光源の配光を制御する光学系の設計においては、光源からの光線の振る舞いを詳細に予測する目的で、光線追跡に用いる LED 光源のモデル構築を試みた。

今回の照明装置のように、光源に近接して光学部品を設置する場合においては LED の内部構造も考慮したモデル化が必要となる。モデル化に当たっては、LED のレンズ形状および蛍光体の寸法を測定した。レンズ形状のモデル化においては、式（1）に示す非球面方程式を用いて、最小自乗法で測定値とのフィッティングを行った。そして発光部分においては、蛍光体のみが発光しているモデル化を行い、各部分の発光強度は励起強度に比例すると考えた。

$$Z = \frac{C \cdot H^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot C^2 \cdot H^2}} + \sum A_n \cdot H^{2n} \dots (1)$$

Z: 光軸方向のサグ H: 光軸と直交する方向の高さ

C: 曲率半径の逆数 K: コーニック係数

A: 高次非球面項

図4に今回モデル化を行った LED のレンズ、発光部及び LED 全体のモデルを、図5に今回のモデルを用いたシミュレーションで得られた配光分布及び実測値を示す。実際の光源ユニット

を図6に示す。

図2 8×8LED アレイを用いた配光制御型照明器具の構成図及び光線追跡図（ナロー径）

Fig.2 Schematic diagram of light distribution controllable luminaire using 8×8 LED array and the result of ray tracing for narrow projecting diameter.

図3 8×8LED アレイを用いた配光制御型照明器具の構成図及び光線追跡図（ワイド径）

Fig.3 Schematic diagram of light distribution controllable luminaire using 8×8 LED array and the result of ray tracing for wide projecting diameter.

図4 光線追跡に用いた LED モデル（レンズ、蛍光体、全体）

Fig.4 LED models for lighting simulation (lens, phosphor and all parts)

図5 実測値とシミュレーション値の間の配光分布の比較

Fig.5 Measured and simulated angular distribution of emission intensity for model LED.

図6 実際の光源ユニット

Fig.6 Unit of LED light sources.

2.3 レンズアレイ

レンズアレイは、LED 1 個当たり 1 つのセルが対応する 12.5mm 角の PMMA (PolyMethyMethAcrylate, ポリメチルメタアクリレート-アクリル樹脂) 製矩形レンズを 64 個集積し、LED からの光をコリメートしている。このレンズアレイは、レンズ裏面から焦点位置までの距離を 13.5mm として設計を行った。これは焦点距離を長くするとコリメートした光線の乱れは少なくなり、その後のコンデンサーレンズでの集光効率も上がるが、同じ N.A.であれば当然 1 セルあたりの口径が大きくなり、装置が大型化してしまうことを考慮した結果である。また、設計においては主に球面収差の低減を目標に設計を行った。

図 7 にレンズアレイの 1 セルあたりのレンズ外観を示す。セルの形状は、図 7 に示すように平凸レンズ形状をしており、凸部は収差補正のためコーニック形状で製作されている。

2.4 コンデンサーレンズ

コンデンサーレンズは、レンズアレイでコリメートされた光をアパチャーに効率よく集光させることと、多数の光線を混合し、照度むら、色むらを解消する用途に用いている。照明系の全長を短くするため、単レンズとしては口径と比較し焦点距離が短く、Fno.は 0.93 となっている。

コンデンサーレンズもコリメートされた光をアパチャー部に効

率よく集光させる機能を最も重視しているため、球面収差を補正する設計となっており、凸面は非球面形状となっている。

今回設計を行ったコンデンサーレンズは $C=0.0145$, $K=-0.587$, 6 次までの非球面項を用いた形状で、材質は PMMA で設計、試作を行い口径 $\phi 50\text{mm}$ のアパチャーに集光した。

2.5 変倍結像レンズ

一般的な舞台照明器具では、たとえ変倍投影を行う照明器具でも 2 群 2 枚構成の結像レンズがほとんどで、収差補正を考慮しているレンズは少ない。

今回の照明器具に用いたレンズは、舞台照明用途としても結像特性を重視した設計となっているレンズ系を採用し、ハロゲン電球用照明器具と異なる点 (分光強度やアパチャー径) について確認を行い、今回の LED 照明器具に用いた。

この結像レンズは、3 群 3 枚の全長固定型ズームレンズを採用し、焦点距離 100mm~150mm までの変倍投影が可能である。光路図の一例を図 8 に示す。

また、各収差を補正するために各レンズで分散の異なる光学ガラスを使用し、更に非球面化することで収差補正を行っている。

使用している 3 枚のレンズのうち 2 枚のレンズについては、高次の非球面レンズを用いている。図 9 に変倍投影レンズの横収差図を示す。

照明用の光学系としては、ズーム全域における収差補正が十分になされている。

図7 レンズアレイ 1 セルあたりのレンズ外観

Fig.7 Shape and typical ray tracing of a collimating lens cell used for a lens array.

図8 変倍結像光学系と光線図

Fig.8 Schematic diagram of ray tracing for zoom optical system.

図9 変倍投影レンズの横収差図

Fig.9 Ray aberration curves of zoom optical system.

3. 照明器具の評価

照明器具の試作は、様々な条件で実験を行う目的で、光学ベンチ上で行った。試作を行った照明器具に対して、配光測定、照度むら、色むらの評価を行った。

試作を行った照明器具の外観を図10に示す。

図10 試作した照明システムの外観

Fig.10 Overview of fabricated lighting equipment system.

3.1 配光測定

配光測定においては、照射距離 3m で壁面に照射し壁面での照度を測定し、目視および配光測定結果から照度むらについて評価を行った。

図11に配光分布データを示す。照度むらの少ない良好な配光特性が得られた。また 照射距離 3m での中心照度は、照射径最小の 0.9m のとき 570lx、照射径最大の 1.5m のとき 300lx と実用的に使用できるレベルの照度および配光が得られた。

図11 照射距離 3mにおける照射径 4パターンでの配光分布

Fig.11 Measured illuminance distribution diagram at four zoom positions for the projection distance of 3m to the screen.

3.2 色むら

「1. はじめに」で述べたように、青色 LED に蛍光体を付加した白色 LED は、その構造上 LED チップから放射する青色光の配光特性と、青色光で励起発光を行う蛍光体の放射の配光特性が異なるため、照射する角度によって色が変わってしまう⁶⁾。そのため、今回試作をおこなった光学系においては、レンズアレイとコンデンサーレンズを用いて、アパチャーに効率よく集光させるとともに、LED からの光をホモジナイズし、照射された光の色むらを解消した。

図12に示すように LED 単体の場合では中心部の色度が $x = 0.2742$, $y = 0.2831$ と比較的青い光となっており、光軸から 16 度の位置では $x = 0.3114$, $y = 0.3704$ 、周辺部である 30 度の位置では $x = 0.3358$, $y = 0.3745$ となっており角度による色度の変化が顕著である。

目視での確認においても、はっきりと照射光中心部と周辺部では色が異なっていることが確認できる。

今回試作した照明器具の場合は結像光学系を用いてアパチャー部を投影しており、ズームの wide 端における照射角度が 11 度である。

角度を LED 単体と同一に比較できないが、基本的には中心部と周辺部の比較で同様の色むらの評価が可能である。

今回試作を行った照明器具の中心部の色度は $x=0.3220$, $y=0.3252$, 中間部である光軸から 5 度の位置では $x=0.3247$, $y=0.3294$, 周辺部の 10 度の位置では $x=0.3128$, $y=0.3178$ となっており, LED 単体での結果と比較した場合角度による色度の差が非常に少なくなっている。

図 12 単体の LED 及び試作した照明システムの角度による色度分布

Fig.12 Light emission angular dependence of chromaticity for single tip LED and fabricated LED lighting system.

4. まとめ

高出力白色 LED を用いて, 舞台照明用として使用に耐えうる配光制御型照明器具の開発を行った。

LED を照明器具として用いる際の問題点である配光制御の難しさを, 設計・試作した光学系においてほぼ解決し, 照度むらのない, スムーズな配光分布を得た。

また, 今回採用した光学系を用いることで, LED 単体および単純な集光系を用いた光学系で問題となる, 色むらについても非常に有効な解決法となることが認められた。

色むらにおいては, 今後さらに詳細な LED 内部のモデル化を行い, 青色と蛍光発光をそれぞれ考慮した光学系のシミュレーションを行う予定である。

スムーズな配光および照射範囲の変化が得られることが確認されたため, 今後は結像系の見直しを行いズーム比の拡大と更なる高容量化を行う予定である。

また, 本光学系は混色に対して有利な光学系であるため, 単色の LED を組み合わせてフルカラーでかつ色むらのない照明器具の製作を行う予定である。

この単色 LED を用いた照明器具においては, 立体画像が得られるホログラム再生照明に対して非常に効率の良い照明が得られることが期待されている⁷⁾。

参考文献

- (1) K.Takizawa, T.Fujii, H.Fujikake, T.Hirabayashi, Y.Tanaka, K.Hara, S.Takano, H.Asakawa and H.Kita: Liquid-crystal luminaire consisting of an optical shutter and a metal halide lamp, Appl. Opt. 36, 12-20 (1999).
- (2) H.Asakawa, J.Baba, A.Yaeda and M.Wakaki: Development of light distribution controllable luminaire using high Power LEDs, Proc.SPIE, 6486-36(2007).
- (3) S.Nakamura, T.Mukai and M.Senoh: Candela-Class High Brightness InGaN/AlGaIn Double-Hetero structure Blue-Light-Emitting Diodes, Appl. Phys.Lett, 64-13, pp.1687-1689(1994).
- (4) 田口常正: 白色 LED による 21 世紀のあかり, 照学誌 85-7, pp.273-276(2001).
- (5) 内田裕士, 田口常正: LED 光源近傍での光度の理論的考察, 照学大全, P.111(2002).
- (6) K.Yamada, Y.Imai and K.Ishii: A Study of the Light Source Device Composed of Blue LEDs and YAG Phosphor by Using Optical Simulation, J.IEIJ.86, 308-312(2002).
- (7) H.Asakawa, J.Baba, A.Yaeda and M.Wakaki: Development of lighting system for hologram using high Power LEDs, Proc.SPIE, 6486-36(2007).

(受付日 2007 年 8 月 21 日 / 採録日 2008 年 3 月 5 日)

浅川 久志 (正会員)

丸茂電機株式会社

〒144-0034 東京都大田区西糀谷 3-37-7

1963 年生まれ. 1985 年日本大学生産工学部機械工学科卒業. 同年, 丸茂電機株式会社入社. 現在開発部光学設計課. 照明器具の光学設計に従事. 東海大学講師 (非常勤)

馬場 洵子 (非会員)

丸茂電機株式会社

〒144-0034 東京都大田区西糀谷 3-37-7

1982 年生まれ. 2007 年東海大学大学院工学研究科光工学専攻修了. 同年, 丸茂電機株式会社入社. 現在開発部光学設計課. LED, ホログラム照明の研究に従事.

若木 守明 (非会員)

東海大学工学部光・画像工学科

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117

1948 年生まれ. 1975 年東京教育大学 (現筑波大学) 理学研究科物理学専攻修了. 博士 (理学)

現在, 東海大学工学研究科光工学専攻主任教授
日本物理学会, 応用物理学会, 日本光学会, 日本レーザー学会,
日本分光学会, OSA, SPIE 各会員