

論文

色見えを改善したLED照明器具の開発その2

岩永 敏秀^{*1)} 中村 広隆^{*2)} 白井 志朗^{*3)} 市原 茂^{*4)} 石原 正規^{*4)}

Development of new LED luminaire improved color appearance No.2

Toshihide Iwanaga^{*1)}, Hiroataka Nakamura^{*2)}, Shirou Shirai^{*3)}, Shigeru Ichihara^{*4)}, Masami Ishihara^{*4)}

It is important to consider the color appearance of objects to which the LED luminaire lights up in the spectral distribution design. However, it has been known that maximizing the effect of color appearance caused to decrease the luminous efficacy. In this study, we report both a spectral distribution design method to realize higher luminous efficacy without losing color appearance effect, and a trial LED lamp developed based on the method. With respect to the spectral distribution by this method, the luminous efficacy improvement of approximately 16% and 25% has been achieved for (1) daylight approximation and for (2) increasing the chroma of the color red respectively compared to the lamp without efficacy consideration.

キーワード: LED, 色見え, CIECAM02, 分光分布設計, 光源効率

Keywords: LED, Color appearance, CIECAM02, Spectral distribution design, Luminous efficacy

1. はじめに

LED照明器具は、高効率および長寿命の光源として急速に普及しているが、その一方で、照明した物体の色見えに課題があると指摘されている。例えば、赤色の見え方が良くない、色見えの評価方法として広く普及している演色評価数がLED照明の実際の見え方を正しく再現していない、といった課題がある⁽¹⁾。これらの課題に対して、平成22年度～24年度に実施した首都大学東京との共同研究^{*}により、色見えの改善に適したLEDの分光分布を導出し、その効果を確認した^{(2)~(5)}。

一方、色見えの改善を最大化するように分光分布を設計すると、光源効率が低下するという課題がある。そこで本研究では、色見えの効果を損なうことなく、光源効率を確保する分光分布設計方法の開発と本設計方法によるLEDランプの試作を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 色見えを考慮した分光分布設計方法の概要 首都大学東京との共同研究では、LED照明器具の色見えに関する視感評価実験、主成分分析および色見えモデル(CIECAM02⁽⁶⁾およびCIECAM02-UCS⁽⁷⁾)を利用した実験結果の解析を行い、分光分布設計に応用した。分光分布は、次のような手順で算出する。

青色LEDと青緑色、緑色、赤色の各蛍光体を用い、加法

混色して目的に適した白色光を合成する。このとき、次式で目的とする白色光の分光分布 $P(\lambda)$ を表すことができる。

$$P(\lambda) = k_1 \cdot P_b(\lambda) + k_2 \cdot P_{bg}(\lambda) + k_3 \cdot P_g(\lambda) + k_4 \cdot P_{r1}(\lambda) + k_5 \cdot P_{r2}(\lambda) \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式において、 $P(\lambda)$:求めたい白色光の分光分布、 $P_b(\lambda)$:青色LEDの分光分布、 $P_{bg}(\lambda)$:青緑色蛍光体の分光分布、 $P_g(\lambda)$:緑色蛍光体の分光分布、 $P_{r1}(\lambda)$:赤色蛍光体1の分光分布、 $P_{r2}(\lambda)$:赤色蛍光体2の分光分布、 λ :波長380 nm～780 nm、 $k_1 \sim k_5$:青色LEDおよび各蛍光体の混色比である。(1)式の分光分布のうち、相関色温度を一定値(今回は、5000 K)かつ色相差 Δh を一定値以下にする制約条件の下、①CIECAM02-UCSにより算出する昼光との色差 $\Delta E'$ を最小にする、または②色票番号9(高彩度の赤)の ΔQ_9 および ΔM_9 について、 $a_1 \Delta Q_9 + a_2 \Delta M_9$ を最大にするように係数 $k_1 \sim k_5$ の最適化計算を行った。ここで、 ΔQ_9 は高彩度の赤についての昼光とのブライトネス差であり、昼光との明るさの差を表す。また、 ΔM_9 は昼光とのカラフルネス差であり、昼光との鮮やかさの差を表す。最適化計算の方法としては、GRG(一般化簡約勾配法)を用いた。本設計方法により、それぞれ、①昼光との色差が小さく抑えられる(昼光の色見えに近い)効果、または②赤色の明るさ、鮮やかさを高める効果がある分光分布を実現することができる。

一方、上記の色見えの効果を最大化すべく設計すると、光源効率が低下するという課題がある。すなわち、青色LED励起の白色LEDでは、色見えの効果を改善するために赤色成分を増加させる必要があるが、眼の視感効率という点では、赤色成分の効率は低く、本成分を多く含む白色LEDの光源効率も低くなる。LEDを照明器具に使用するた

*事業名 都市課題解決のための技術戦略プログラム(東京都)

*1) 光音技術グループ

*2) 交流連携室

*3) 株式会社テラシア

*4) 首都大学東京

めには、色見えと光源効率のバランスも重要であり、色見え効果を損なうことなく、光源効率を確保する設計が必要である。

2. 2 色見えと光源効率のバランスのとれた設計方法の開発

色見えだけではなく、光源効率も考慮した分光分布設計を実施するため、次の検討を行った。色見えの効果を確保するために、首都大学との共同研究で実施した視感評価実験結果を利用し、昼光近似または赤色の鮮やかさを増す色見えの効果を確保できる $\Delta E'$ (色差) と ΔQM_n (赤色の明るさ・鮮やかさ) の閾値を、それぞれ次の通り導出した。

(1) 昼光近似の分光分布

視感評価実験は、試料光源と基準光源との一対比較により行った。評価用ブース2個を一組とし、左側に試料光源を、右側に基準光源を設置した。基準光源として、D50 蛍光ランプ (相関色温度5000 Kの昼光に近似した蛍光ランプ) などを用いた。図1に実験ブースの外観を示す。一組のブース底面中央部に同じ色票



図1. 実験ブースの外観

(演色評価数R1~R15を評価するための色票, 4 cm×4 cm) を一つずつ配置し、実験参加者には、その色票の見えを比較して評価することを求めた。色見えの評価に用いた色票の説明を表1に示す。相対的な見えの印象の程度を形容詞(「違って見える」, 「鮮やか」, 「明るい」など)に関して、「全くそう思わない (1)」 ~ 「非常にそう思う (7)」の7段階で答えさせた。(質問例: 右側の色に比べて、左側の色の方が、明るいですか?)。

表1. 色見え効果の評価に用いた色票

色票番号	色票の説明
1~8	中彩度・中明度の紫~赤
9	高彩度の赤
10	高彩度の黄
11	高彩度の緑
12	高彩度の青
13	西洋人の肌色
14	木の葉の色
15	日本人の肌色

本実験において、基準光源および試料光源ともにD50 蛍光ランプを設置したときの「違って見える」評定値の結果を図2に示す。被験者は、大学生10名とした。その結果、「違って見える」評定値の平均値は、約4点(どちらともいえない)であった。上記の実験は、ほぼ同一の相対分光分布下で比較しているため、光源の分光分布に起因する色見えの違いは生じないことが明らかである。この結果から、

光源による色見えの違いがないときの閾値として、4点を採用する。一方、試料光源として市販LEDランプ、蛍光ランプおよび白熱電球を用いた別実験で求めた「違って見える」評定値(実験値)と基準光源との色差 $\Delta E'$ (計算値)の相関関係を図3に示す。色差 $\Delta E'$ の対数値と「違って見える」評定値は正の相関関係にあり、評定値が4点のときの色差を外挿すると $\Delta E' \approx 2.2$ である。これより、基準光源との色見えの違いがないときの閾値を $\Delta E' < 2.2$ とする。

(2) 赤色の鮮やかさを増す分光分布

試料光源として市販LEDおよび蛍光ランプを設定した際の「明るい」評定値と「鮮やか」評定値が(基準光源に対して)ともに6点(「そう思う」)以上するとき、鮮やかさおよび明るさが明らかに増加しているとする。さらに本実験で求めた「明るい」評定値および「鮮やか」評定値(実験値)とCIECAM02-UCSの $\Delta QM_n = a_1 \Delta Q_n + a_2 \Delta M_n$ (計算値, ΔQ_n は基準光源とのブライトネス差, ΔM_n はカラフルネス差, a_1, a_2 は実験から求める定数, n は色票番号)の相関関係を図4, 5に示す。ややばらつきは大きいだが、 ΔQM_n と「明るい」評定値または「鮮やか」評定値はそれぞれ正の相関関係にあるといえる。「明るい」評定値または「鮮やか」評定値が6点のときの ΔQM_n を外挿すると、「明るい」評定値では $\Delta QM_n \approx 2.2$, 「鮮やか」評定値では $\Delta QM_n \approx 1.8$ であった。これより、昼光に比べて明らかに明るくかつ鮮やかに感じるときの閾値を $\Delta QM_n > 2.2$ とする。

次に(1)または(2)の閾値以内で最も効率の良い分光分布をGRG法を使用した最適化計算により、それぞれ算出した。最適化計算の制約条件としては、以下にまとめることができる。

- (a) 相関色温度を5000 K(昼白色)とする。
- (b) 色の変化(色相差 Δh)を設定値以下とする。
- (c) 昼光近似の分光分布の場合、閾値 $\Delta E' < 2.2$ とする。
- (d) 赤色の鮮やかさを増す分光分布の場合、 $\Delta QM_n > 2.2$ とする。

上記制約条件で、目的変数として光源効率を最大化するように最適化計算を行う。ここで、光源効率は、次のように算出する。

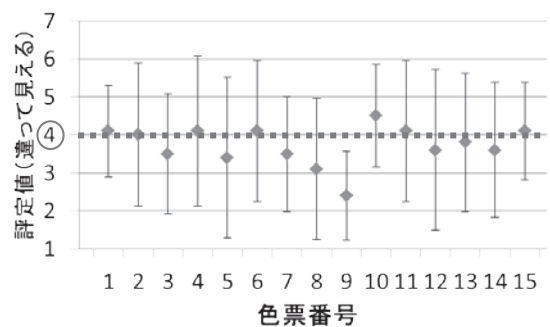


図2. D50 蛍光ランプ同士を比較したときの「違って見える」評定値

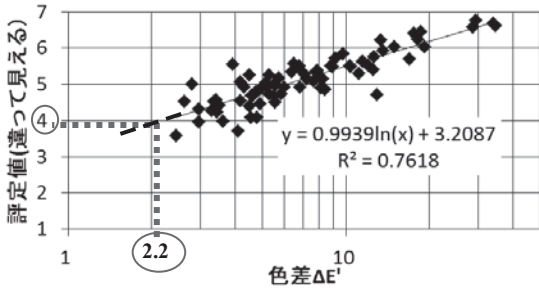


図3. 昼光との色差 $\Delta E'$ と評定値の相関

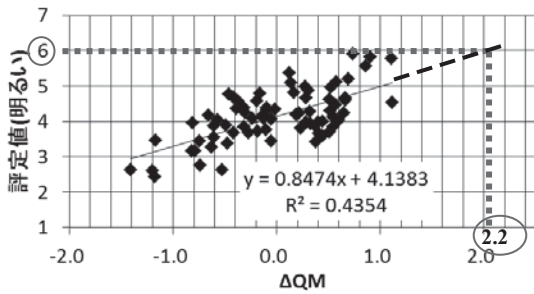


図4. 指標 ΔQM と「明るい」評定値の相関

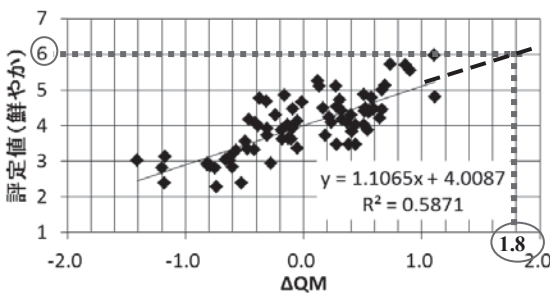


図5. 指標 ΔQM と「鮮やか」評定値の相関

設計する白色LEDの分光分布は式(1)で決まる。各分光分布が分光放射束(W/nm)の単位を持つとき、設計した白色LEDの全光束 Φ (lm)は、

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda \approx K_m \sum_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)\Delta\lambda \dots (2)$$

と表すことができる。ここで、 K_m は最大視感効果度(lm/W)、 $V(\lambda)$ は標準分光視感効率である。励起源である青色LEDへの投入電力を p (W)とすると、設計した白色LEDの光源効率 η は、次式で表すことができる。

$$\eta = \Phi / p \dots \dots \dots (3)$$

以上の設計方法により算出した分光分布例を図6に示す。表2には、バランスを考慮した分光分布の効率改善例を示す。効率考慮前に比べて、①“昼光近似”分光分布について16%、②“赤色鮮やか”分光分布について25%の光源効率向上を実現している。

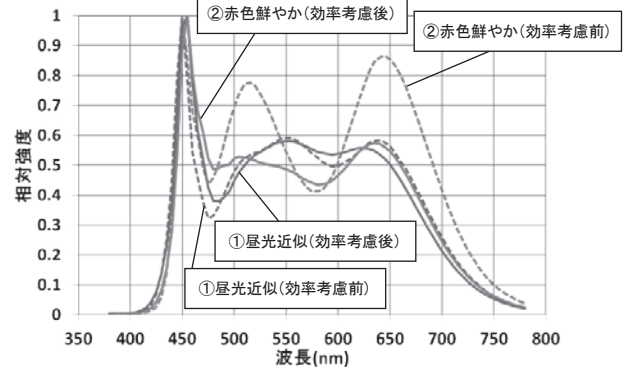


図6. 色見えと効率を考慮した分光分布の例

表2. 色見えと効率を考慮した分光分布設計による効率改善例

種類	効率考慮前 (lm/W)	効率考慮後 (lm/W)	色見えの閾値
①昼光近似	56	65	$\Delta E' < 2$ (青色を除く)
②赤色鮮やか	36	45	$\Delta QM_0 = 2.5$

2.3 本分光分布設計によるLEDランプの試作 図7に、本分光分布設計方法により製作したLEDチップを組み込んだLEDランプ(直管形)を示す。



図7. 試作した照明器具(直管形LEDランプ)の外観

3. 結果および考察

3.1 照明器具の評価(光学特性, 色見え) 試作した照明器具について、光学特性測定および色見えの効果について評価を行った。表3にランプ光束, 器具効率, 色見えの効果などを示す。配光特性では、1/2ビーム角が0-180°方向(ランプの長軸方向)で約100°, 90-270°方向(ランプの短軸方向)で約160°であった。JIS C 8159-2では直管LEDランプの下方, 頂角120°の円すい形の範囲内に70%を超えて光束を集中させてはならないと規定されている。この数値を配光特性から計算すると59%となり、規格を満たす拡散性が確保できている。

表3. 試作したLEDランプ(直管形)の効率・色見えの効果

	チップ効率 (lm/W)	ランプ光束 (lm)	器具効率 (lm/W)	色見えの効果
試作① (昼光近似)	96	3310	72	$\Delta E' < 2.2$ (色票12以外)
試作② (赤色鮮やか)	73	1640	61	$\Delta QM_0 > 2.2$

試作したLEDランプで照明したときの色見えの効果をそれぞれ図8および図9に示す。色見えの効果は、2.2で使用した色票を照明したときの $\Delta E'$ (基準光源との色差) および ΔQM_n ($=a_1\Delta Q_n + a_2\Delta M_n$, 基準光源とのブライトネス差とカラフルネス差を表す) で評価を行った。また、市販直管形LEDおよび市販蛍光ランプの評価結果も合わせて示す。試作①(昼光近似)について、色票12(高彩度の青色)を除いて、色見え効果の閾値($\Delta E' < 2.2$)を満足している。市販LEDランプおよび蛍光ランプに比べて、色差 $\Delta E'$ が小さく、基準光源(昼光)に、より近似したランプということができる。試作②(赤色鮮やか)について、色票9(高彩度の赤色)について、色見え効果の閾値($\Delta QM_9 > 2.2$)を満足している。また、市販LEDランプおよび蛍光ランプに比べて、 ΔQM_9 の値が大きく、赤色が鮮やかに見える効果が期待できる。

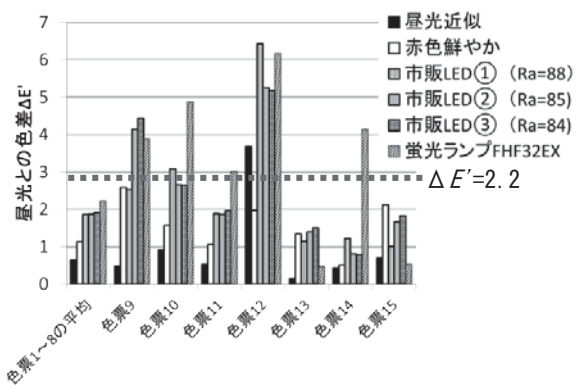


図8. 色みえの効果(昼光との色差)

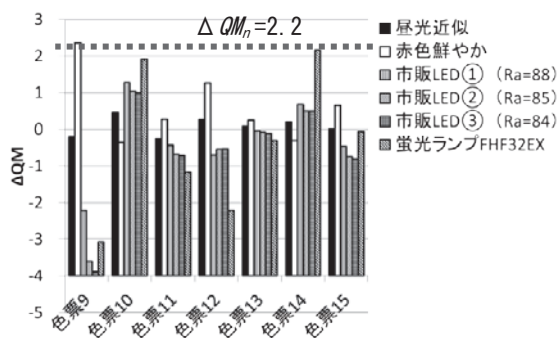


図9. 色みえの効果(鮮やかさの指標)

3.2 照明器具を室内に設置したときの省エネ効果の試算

試作①(昼光近似)と蛍光ランプ(ラピッドスタート型(以下, RS型とする)), 蛍光ランプ(高周波点灯型(以下, Hf型とする))を設置したときの消費電力の試算を行った。計算条件として、間口10 m, 奥行き10 m, 高さ2.8 mの室内天井に作業面照度(高さ0.8 m)が750 lxを確保するようにトラフ型照明器具を設置した。計算は、DIAL社の照明計算ソフトウェア dialuxを使用した。図10に試作①の計算結果を、表4に省エネ効果の試算結果を示す。蛍光ランプ(Hf型)に対しては電力削減にはつながらないが、蛍光ランプ(RS型)に比べると、約12%の電力削減効果が見込める。省エネルギーという観点からは、蛍光ランプ(RS型)を置き換えることによる電力削減が期待できる。

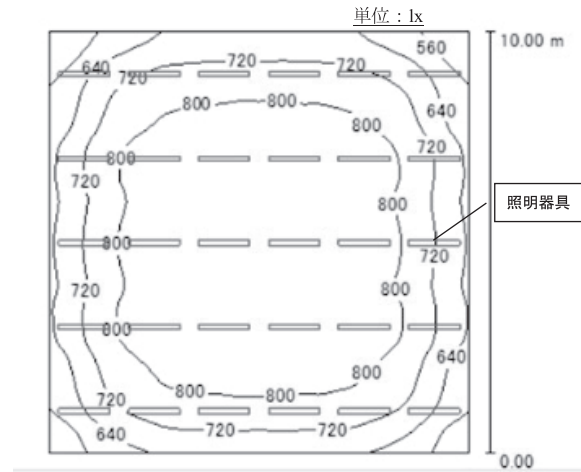


図10. 試作①の計算結果(照度分布)

表4. 省エネ効果の試算

	消費電力 (W)	必要灯数 (台)	総消費電力 (W)
試作①(昼光近似)	46	30	1380
蛍光ランプ(RS型)	45	35	1575
蛍光ランプ(Hf型)	45	24	1080

4. まとめ

色見えと光源効率のバランスに配慮した分光分布設計方法を開発し、本設計方法を活用したLEDチップおよび照明器具(直管形LEDランプ)の試作を行った。試作した照明器具は、色見えの効果を保ったまま、光源効率向上を実現できた。試作①(昼光近似)ランプについての省エネルギー効果を試算したところ、蛍光ランプ(RS型)に対しては約12%の電力削減効果が期待できる結果を得た。

(平成27年7月13日受付, 平成27年8月12日再受付)

文 献

- (1) Colour rendering of white LED light sources, CIE Publication 177 (2007)
- (2) 岩永敏秀, 中村広隆, 市原茂, 山下利之, 石原正規: 「光源の色見えの違いに関する視感評価実験」, 照明学会全国大会講演論文集, No.44, p.177 (2011)
- (3) 岩永敏秀, 中村広隆, 市原茂, 山下利之, 石原正規: 「色見えを改善したLED照明器具の試作」, 照明学会全国大会講演論文集, pp.9-18(2012)
- (4) 市原茂ほか: 「LED照明下での色彩評価」, 日本官能評価学会誌, Vol.15, No.1, p.49 (2011)
- (5) 岩永敏秀, 中村広隆, 市原茂, 山下利之, 下川昭夫, 石原正規: 「色見えを改善したLED照明器具の開発」, 東京都立産業技術研究センター研究報告, No.8, pp.26-29 (2013)
- (6) A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02, CIE Publication 159 (2004)
- (7) M.R.Luo, G.Cui and C.Li: "Uniform Colour Spaces Based on CIECAM02 Colour Appearance Model", Color Res.Appl.31-4, pp.320-330 (2006)