

論文

色見えを改善したLED照明器具の開発

岩永 敏秀^{*1)} 中村 広隆^{*2)} 市原 茂^{*3)} 山下 利之^{*3)} 下川 昭夫^{*3)} 石原 正規^{*3)}

Developing a new LED luminaire for improved color appearance

Toshihide Iwanaga^{*1)}, Hiroataka Nakamura^{*2)}, Shigeru Ichihara^{*3)}, Toshiyuki Yamashita^{*3)}, Akio Shimokawa^{*3)}, Masami Ishihara^{*3)}

We have developed a spectral distribution design method for color appearance by applying a color appearance model to visual experimental results using commercially available LEDs with mutually different spectra. Two prototype LED lights were developed by application of this design method, and the color appearance was estimated for the LEDs by visual experiment. As a result, compared to the commercial LEDs, the effects of 1) –reducing the color difference between illumination from the developed LED light and daylight illumination, and 2) –increasing the chroma of the color red have been shown.

キーワード：LED，色見え，CIECAM02，分光分布設計

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

1. はじめに

LED照明器具は，高効率，長寿命の光源として，非常に期待されているが，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，色見えの評価方法について，広く普及している演色評価数がLED照明の実際の色見えを正しく再現していないといった課題がある⁽¹⁾。

本研究では，首都大学東京との共同研究により，LED照明器具の色見えに関する視感評価実験，主成分分析及び色見えモデルを利用した実験結果の解析を行った^{(2)~(4)}。更に解析結果を受け，色見えの改善を行ったLEDの分光分布を導出し，照明器具の試作とその評価を行ったので報告する。

2. 市販照明器具の視感評価実験

2.1 実験方法 視感評価実験は，試験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，左側に試験光源を，右側に基準光源（D65蛍光ランプ）を設置した。図1に実験ブースの外観を示す。試験光源は，LED光源A（青色LED＋黄色蛍光体），LED光源B（青色LED＋RG蛍光体），LED光源C（紫外LED＋RGB蛍光体），電球形蛍光ランプ（3波長形），白熱電球の5種類とし，市販されている製品の中から選択した。一組のブース底面中央部に同じ色票（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（大学生45名）には，

その色票の色見えを比較して評価する事を求めた。相対的な見えの印象の程度を20個の形容詞(表1)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?)。



図1. 実験ブースの外観

表1. 評定に用いた形容詞

違って見える，鮮やか，明るい，赤みが強い，緑みが強い，青みが強い，黄みが強い，自然である，好ましい，落ち着いた，華やかな，気がやすまる，清潔な，重い，やわらかな，まろやかな，なめらかな，快い，しっとりした，上品な

この実験結果について，さらに主成分分析を施し，形容詞間の関係を把握し，その評価次元を明らかにした。実験及び分析結果について，各光源の分光分布等から計算されるCIECAM02-UCS⁽⁵⁾⁽⁶⁾の色差 $\Delta E'$ ，ブライトネスQ，カラフルネスMによる計算値との比較を行った。

2.2 実験結果と考察

2.2.1 “違って見える”評定値の結果 CIECAM02-UCSによる色差 $\Delta E'$ の計算値と視感評価実験による実験結果（質問「違って見える」に対する評定値の平均）を各光源毎に表したグラフを図2に示す。両者の相関係数は，LED光源A：0.70，LED光源B：0.87，LED光源C：0.83，

事業名 平成22,23,24年度 都市課題解決のための技術戦略プログラム

*1) 経営企画室

*2) 光音技術グループ

*3) 首都大学東京

蛍光ランプ: 0.38, 白熱電球: 0.76であった⁽²⁾。このように, CIECAM02-UCSによる色差の計算値は「基準光源と違って見える」という結果を相関係数0.38~0.87の範囲で予測している。また, 色差 $\Delta E'$ と実験結果全体の関係を図3に示す。

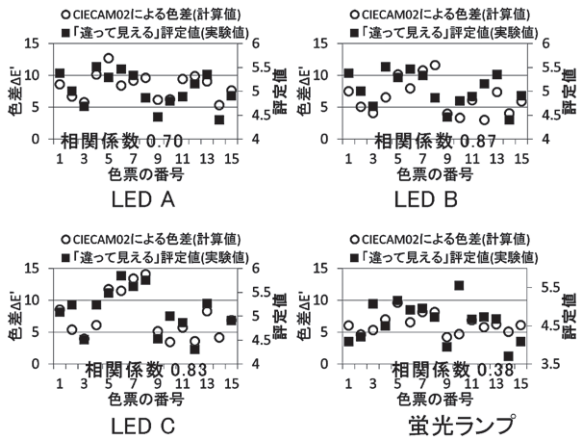


図2. CIECAM02-UCSによる色差と実験値の比較

演色性の評価方法として, 現在, 広く用いられている演色評価数は, $U^*V^*W^*$ 色空間を用いて算出される。 $U^*V^*W^*$ 色空間による色差 $\Delta E'$ と評定値との関係を図4に示す。図4では, (フォン・クリース型)色順応を考慮しない場合を示している。この時の決定係数 $R^2=0.17$ が得られ, 評定値との相関が十分ではない事を示している。また, 図にはないが, 色順応を考慮した場合も $R^2=0.04$ であり, 相関が良くない事がわかった。

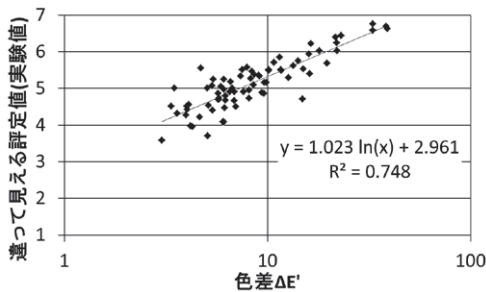


図3. CIECAM02-UCSによる色差と実験値の相関
実験値は, 色差(計算値)の対数に比例している

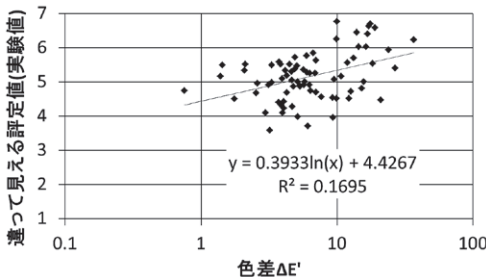


図4. $U^*V^*W^*$ 色空間による色差(計算値)と実験値の相関
(フォン・クリース型)色順応を考慮しない場合の結果について示している

色見えの差が出やすい様に, 上記の実験は, 基準光源の相関色温度を6500 K, 試験光源の相関色温度を約5000 Kとして行っている。しかし, 演色評価数は本来, 同じ(相関)

色温度同士の光源の見え方を評価するものであるので, 相関色温度5000 K (D50)の基準光源との比較測定も行った。D65との比較に比べてD50との比較は色差が小さくなるため, 評定値のばらつきが大きくなる。しかし, D50との比較についてもCIECAM02-UCSによる色差は評定値との相関が高く($R^2=0.60$), $U^*V^*W^*$ 色空間による色差は評定値との相関が低い($R^2=0.23$, “順応なし”)。

2. 2. 2 主成分分析の結果 次に“違って見える”評定値を除く19個の形容詞の評定値に主成分分析を適用した。その結果, 表2の5つの主成分が抽出された。

表2. 抽出された主成分

主成分	主成分負荷量の高かった用語
第1主成分	鮮やか, 明るい, 好ましい, 快い, 華やかな, 清潔な
第2主成分	気がやすまる, やわらかな, まろやかな, なめらかな, しっとりした
第3主成分	青みが強い, 黄みが強い(-)
第4主成分	重い
第5主成分	緑みが強い, 赤みが強い(-)

このうち, 第1主成分に着目した。第1主成分は, (鮮やか, 明るい, 好ましい, 快い, 華やかな, 清潔な)の形容詞で負荷量が高く, 鮮やかさ, 明るさ, 好ましさを表す指標であるといえる。第1主成分を説明するためにCIECAM02のブライトネスQとカラフルネスMによる重回帰分析を行った。用いた重回帰式を次に示す。

$$Y_n = a_0 + a_1 \cdot \Delta Q_n + a_2 \cdot \Delta M_n \dots\dots\dots (1)$$

ここで, a_0, a_1, a_2 : 回帰係数, Y_n : 主成分得点, ΔQ_n : 基準光源とのブライトネスの差, ΔM_n : 基準光源とのカラフルネスの差, n : 色票番号 ($n=1\sim 15$)である。 $Y_n, \Delta Q_n, \Delta M_n$ は, 規格化を行っている。分析の結果, LED光源3種類の回帰係数の平均値は, $a_0=0, a_1=0.39, a_2=0.26$ と算出された。この回帰式による主成分得点の実験値と予測値を図5に示す。

このうち, 色票番号9~15(高彩度色, 木の葉の色及び肌色についての色票)についての重相関係数は, LED光源A:

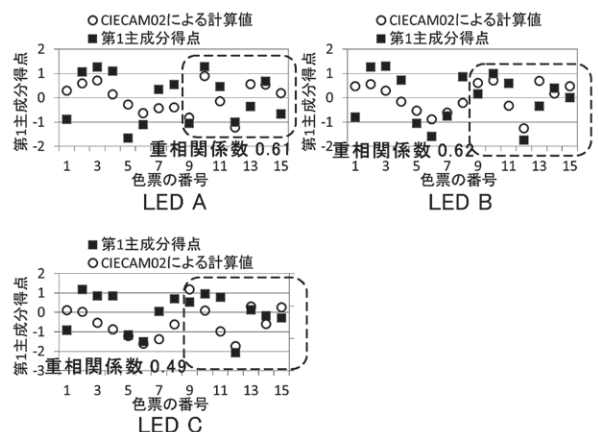


図5. 第1主成分得点の計算値と実験値の比較
相関係数は, 色票の番号9~15についての計算値と実験値の相関を表す

0.61，LED光源B：0.62，LED光源C：0.49，蛍光ランプ：0.76，白熱電球：0.78であった。また，色票9～15についての主成分得点全体と回帰式による予測値の関係を図6に示す。この結果，決定係数 $R^2=0.57$ の相関が得られた。この様に第1主成分得点をブライトネスQとカラフルネスMの重回帰式によって，ある程度予測する事ができると考えられる。

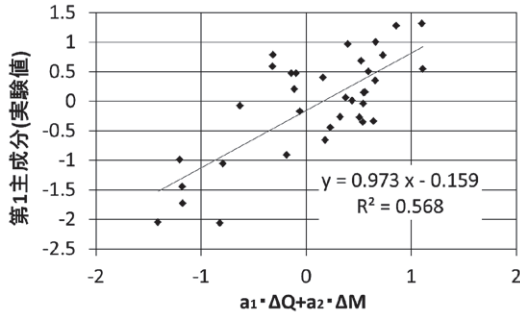


図6. CIECAM02による回帰式と実験値の相関

第1主成分は，CIECAM02のパラメータ(Q,M)の回帰式と相関関係を示す

3. 実験結果を利用した照明器具の試作

3.1 分光分布の設計 実験及び分析結果を受け，CIECAM02を用いた分光分布設計を行った。分光分布は，次の様な手順で算出した。白色LEDと青色，青緑色，緑色，赤色の単色LEDを用い，加法混色して目的に適した白色光を合成する。この時，次式で目的とする白色光の分光分布 $P(\lambda)$ を表す事ができる。

$$P(\lambda) = P_w(\lambda) + k_1 \cdot P_b(\lambda) + k_2 \cdot P_{bg}(\lambda) + k_3 \cdot P_g(\lambda) + k_4 \cdot P_r(\lambda) \dots \dots \dots (2)$$

上式において， $P(\lambda)$:求めたい白色光の分光分布， $P_w(\lambda)$:白色LEDの分光分布， $P_b(\lambda)$:青色LEDの分光分布， $P_{bg}(\lambda)$:青緑色LEDの分光分布， $P_g(\lambda)$:緑色LEDの分光分布， $P_r(\lambda)$:赤色LEDの分光分布， λ :波長380nm～780nm， $k_1 \sim k_4$:各LEDの混色比である。(2)式の分光分布のうち，相関色温度を一定値(今回は，5000K)及び色相差 Δh を一定値以下にする制約条件の下，①CIECAM02-UCSの色差 $\Delta E'$ を最小にする，及び②色票番号9(高彩度の赤)の ΔQ_9 及び ΔM_9 について， $0.39 \Delta Q_9 + 0.26 \Delta M_9$ を最大にする様に係数 $k_1 \sim k_4$ の最適化計算を行った。設計した分光分布の例を図7に示す。図8は，①の分光分布による色差の計算値であり，市販の高効率LEDに比べて，自然光(D50)との色差が小さく抑えられている(自然光の色見えに近い)事を示している。図9は，②の分光分布による $0.39 \Delta Q_9 + 0.26 \Delta M_9$ の計算値(第1主成分得点の予測値をあらわす)であり，色票番号9の第1主成分得点を増大させている。即ち，赤色の明るさ，鮮やかさなどを高める効果が期待できる。

LEDチップ，調色コントローラ，ダウンライト用筐体等を組み合わせ，上記の分光分布を有するダウンライト形LED照明器具の試作を行った。試作品は①白色LED(黄色+YAG蛍光体)+赤，青緑LEDを組み合わせさせたタイプと②

白色LED(黄色+YAG蛍光体)+赤，緑，青色LEDを組み合わせさせたタイプとした。

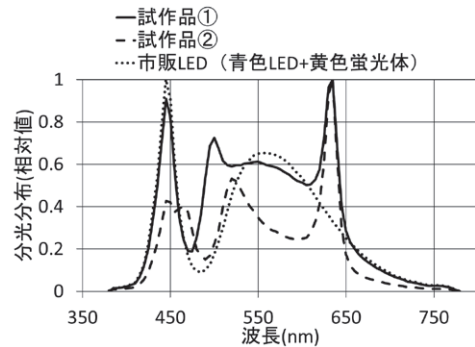


図7. 設計したLED照明器具の分光分布

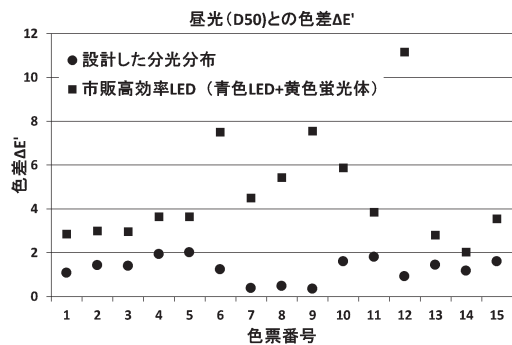


図8. 設計した分光分布(試作品①)と市販品の色差比較

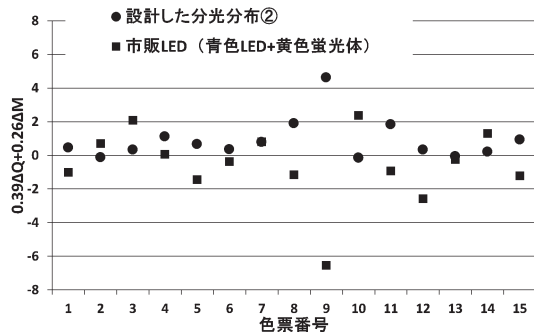


図9. 設計した分光分布(試作品②)と市販品の $0.39 \Delta Q_9 + 0.26 \Delta M_9$ の比較

3.2 試作照明器具の評価 被試験照明器具(ダウンライト形)は，試作品①(昼光の色見えに近い照明器具)，試作品②(赤色の明るさ，鮮やかさを高める照明器具)，市販LED照明器具(青色LED+黄色蛍光体タイプ， $R_a=70$)とした。基準光源としてD50(相関色温度5000Kの昼光)に近似した蛍光ランプを用いた。実験は，2章の実験で使用した評価箱を用い，次に示す実験条件で行った。暗箱2台の左側に被試験照明器具を，右側に基準光源を設置した。暗箱底面中央部の照度を450lxになる様に調整し，試作品①，②及び市販LED照明器具のもとで観察される演色評価用色票(全15色)の見えについて，11個の形容詞及び7段階尺度(非常にそう思う(7点)～どちらともいえない(4点)～全くそう思わない(1点))からなる質問紙を用いた印象評

価を行った。両暗箱には同じ色票の一つを配置し、被験者には、その見えを基準光源と比較して評価する事を求めた。被験者は31名(大学生16名, 中高年15名)とした。

3.3 結果と考察 図10に“違って見える”評定値の実験値と予測値を、図11に第1主成分得点の実験値と予測値をそれぞれ示す。実験値と予測値の良い相関が得られている。

図12は、試作品①と市販LEDについて、基準光源(D50に近似した蛍光灯)との“違って見える”評定値の差を表す。色票番号4, 5, 11, 14以外の色票について、試作品①の“違って見える”評定値は、市販LED照明器具のそれと比較して、有意に小さい、即ち基準光源との色見えの差が抑えられている事を示している。図13は、試作品②と市販LEDについて、形容詞「鮮やかさ」に対する評定値の比較である。試作品②は、市販LED照明器具と比較して、色票番号9(赤色の色票)の評定値が大きく上回っている、即ち赤色の鮮やかさを高める効果がある事を示している。

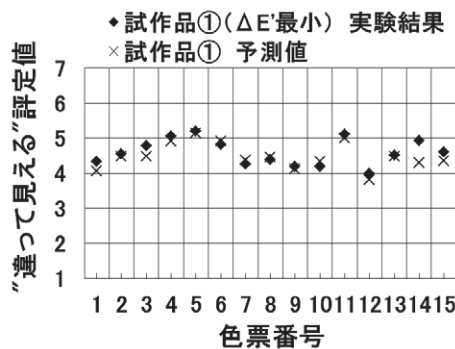


図10. “違って見える”評定値の実験値と予測値の比較

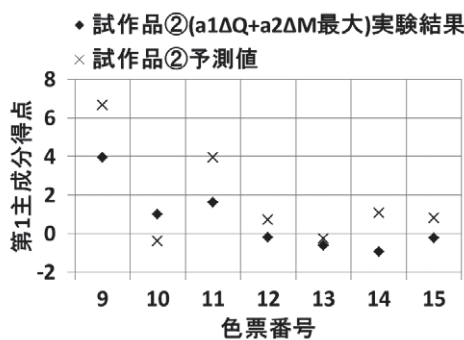


図11. 第1主成分得点の実験値と予測値の比較

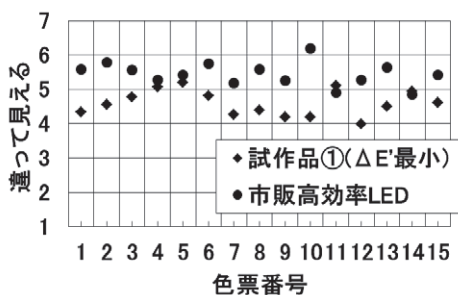


図12. 試作品①と市販LEDの“違って見える”評定値の比較
色票番号4,5,11,14を除いて、試作品①の方が有意に小さい

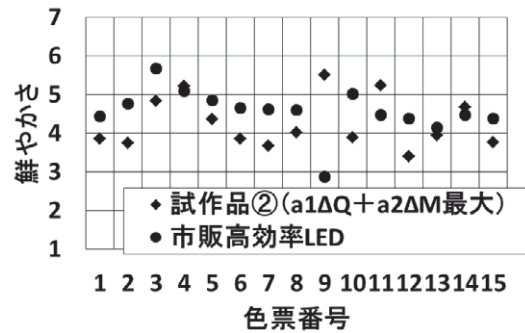


図13. 試作品②と市販LEDについて、形容詞「鮮やかさ」に対する評定値の比較

4. まとめ

市販LED照明器具について、視感評価実験を行い、色見えの評価を行った。実験結果に主成分分析と色見えモデル(CIECAM02)を適用する事で色見えの予測を行い、分光分布設計に応用できる事を示した。本分光分布設計を利用して、色見えを改善した照明器具の試作を行った。試作品の視感評価実験を実施した結果、分光分布設計で想定した①昼光の色見えに近い照明器具及び②赤色の明るさ、鮮やかさを高める効果を確認する事ができた。

本照明器具は、美術館・博物館、診療所、店舗照明など色の見え方に特に配慮すべき用途に適していると考えられる。製品化に当たっては、青色LEDと蛍光体を組み合わせたチップ構成などにより、効率の改善、器具の小型化や色の均一性向上などを図っていく必要がある。

謝辞

本研究は、東京都の「都市課題解決のための技術戦略プログラム」の支援により実施した。

(平成25年7月21日受付, 平成25年8月13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: 「光源の色み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: 「色みえを改善したLED照明器具の試作」, 照明学会全国大会講演論文集, No.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) A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02, CIE Publication 159 (2004)
- (6) 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)