

色の見え方を考慮したLED照明の分光分布

Spectral Power Distributions with Color Appearance of LED Light Sources

小谷 朋子

■ KOTANI Tomoko

青色発光ダイオード(LED)と黄色蛍光体を組み合わせた方式の白色LEDランプは、高効率で大きな光束が得られることから、現在は照明用途として一般的に利用されている。しかし、この方式では長波長域発光の成分が少ないため、特に赤色の見え方が劣るという問題がある。

この問題を解決するため、東芝ライテック(株)は、青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた方式の白色LEDに赤色(R)、緑色(G)、青色(B)のLEDを付加し、平均演色評価数(Ra)を向上させるとともに、色を鮮やかに見せる分光分布の光源を試作して主観評価実験を行った。この光源による照明環境では、白色LEDでの環境に比べて快適性や肌の色の見え方などの評価が高く、また低照度でも白色LEDと同等レベルの明るさ感が得られ省エネにつながる可能性を見いだすことができた。

White light-emitting diode (LED) lamps composed of a blue LED and yellow-emitting phosphor are widely used as illumination light sources due to their high efficiency and broad beam of light. However, this type of LED lamp is characterized by insufficient color-rendering performance, particularly the loss of red quality caused by the lack of long-wavelength radiation.

To clarify the ideal spectral power distribution of white LED lamps in order to improve their color appearance, Toshiba Lighting & Technology Corporation fabricated a prototype based on theoretical simulations in which red, green, and blue LEDs were combined with a white LED comprising a blue LED and yellow-emitting phosphor. From the results of subjective evaluation experiments, we confirmed that white LED light sources with more comfortable lighting effects can be realized by adding appropriate spectral power distribution to the red, green, and blue regions of existing white LED lamps.

1 まえがき

白色LEDは、その効率が日々向上しており、部屋全体の主照明や街路灯など一般照明用として利用され始めている。分光分布設計の点から見たLEDは、蛍光ランプとは異なり、蛍光体発光以外に管内の水銀蒸気放電による水銀可視輝線が存在しないため、LEDの分光分布だけの組合せで白色光源としての分光分布が設計できる。しかし、別の観点から見ると、一般照明光源として60年以上使用されてきた蛍光ランプは、水銀可視輝線と蛍光体発光の組合せによる分光分布の光源である。そのような光に慣れているわれわれにとって、LED発光だけの組合せによる分光分布では、視対象物の色の見え方、すなわち演色性にこれまでに経験したことがないような変化が生ずる可能性がある。

現在、白色光源として利用されているLEDランプは、効率が高く大きな光束が得られる、青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた方式が主流である。しかし、この方式では長波長域発光の成分が少ないため、特に赤色の見え方が劣るという問題があり、黄色蛍光体以外に赤色発光の蛍光体を追加して赤色の見え方を改善したLEDランプも開発されている。一般照明用LEDランプはまだ開発されたばかりで、今後ますますその性能は向上すると思われ、色の見え方に影響する分光分布

に着目して、一般照明用LEDランプの理想的な分光分布を明らかにすることは非常に重要である。

東芝ライテック(株)は、青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた方式の白色LEDランプの色の見え方を改善するため、分光分布の設計方法を明確にした。ここでは、この方式の白色LEDに、RGBのLEDを付加した場合の色の見え方の主観評価結果を述べる。

2 色の見え方の主観評価実験

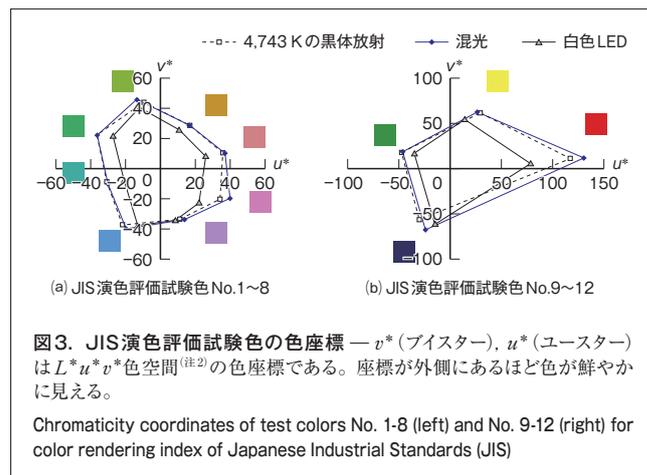
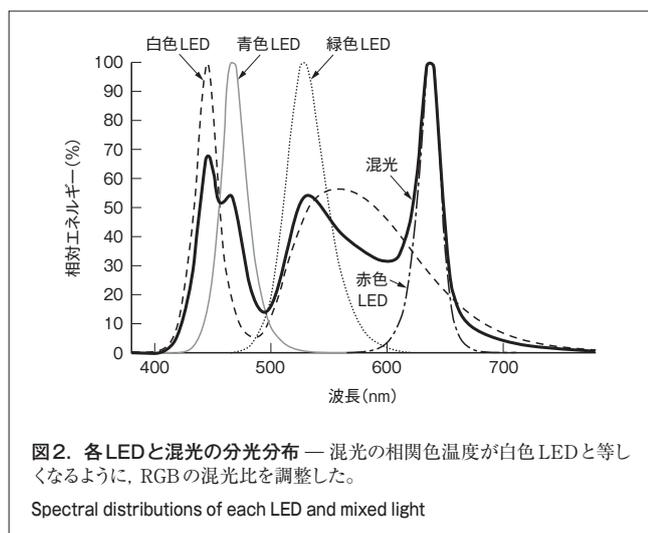
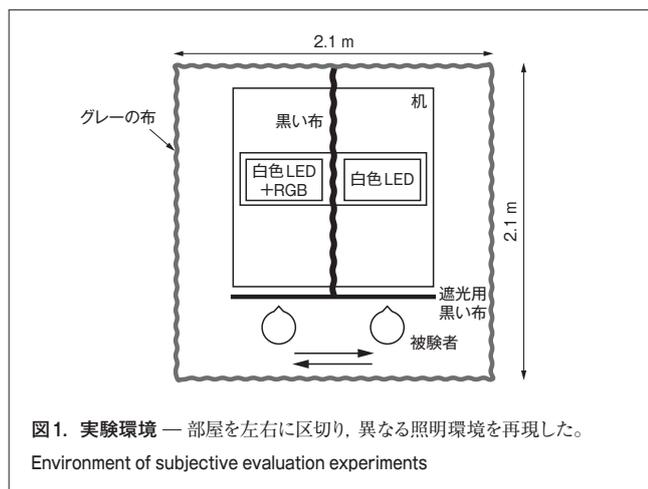
これまで光源の演色性について様々な研究が行われており、Judd氏やPracejus氏などによる色の好ましさに関する研究^{(1), (2)}や、光源の演色性が空間の明るさ感や目だち感に影響を及ぼす研究など、多くの報告がある^{(3), (4)}。現在もCIE(国際照明委員会)TC1-69“Color Rendition by White Light Sources”では、CIE演色評価数に代わる新しい評価数を開発しようとする動きがあり、世界各国でLEDランプによる色の見え方が研究されている。

当社は、白色LEDのベースライトに、RGBが一つにパッケージされたマルチチップを付加して混光し、部屋の印象、肌の色の見え方や明るさ感などを評価した。

2.1 実験条件

実験は、**図1**のように2.1(幅)×2.1(奥行き)×2.1(高さ) mの鉄枠で組んだブースの周囲をグレーの布で覆い、黒い布で左右に2分割した空間で実施した。ブース内には1.2(幅)×1.2(奥行き)×0.7(高さ) mの机を左右が均等になるように設置し、その上に黒い布を敷いて評価物を置いた。照明器具は、白色LEDの乳白パネル付きベースライトを用い、左半分にはマルチチップを180個付加して混光した。以下、実験に用いた白色LEDベースライトの光を“白色LED”，白色LEDとマルチチップのRGBを混ぜた光を“混光”と呼ぶ。実験時には光源が被験者の目に直接入らないよう、上から黒い布を垂らして遮光した。被験者は20代から50代の男女合計13名で、左右の環境を行き来して評価を行った。

実験に用いた白色LEDとRGBの各分光分布を**図2**に示す。混光は、相関色温度が白色LEDと等しい4743 Kで、黒体軌跡上の色度となるようにRGBの混光比を計算した。更にRaが90以上かつJIS(日本工業規格)演色評価試験色No.1~8の色域面積比^{(5)(注1)}が100を超えるように白色LEDとRGBの



混光比を検討した。その結果、RGBの分光分布と混光比から計算したRaは90、試験色No.1~8の色域面積比は106、試験色No.9~12の色域面積比は118であった。また、白色LEDの分光分布から計算したRaは58、色域面積比は試験色No.1~8が67、試験色No.9~12が68であった。

白色LED、混光、4,743 Kの黒体放射による試験色No.1~8及び試験色No.9~12の色座標を**図3**に示す。混光は白色LEDよりも赤、緑が外側にシフトしているが、外側に行くほど色が鮮やかに見えることを示している。

2.2 照明条件

照明条件は、白色LEDの直下の机上面(高さ0.7 m)の照度を300 lxになるよう調整し、混光側の照度を355 lxから165 lxの間で5段階に変化させた。実験に用いた照度条件を表1に示す。

今回は色の見え方に関する実験であるため、評価物として無彩色物体と有彩色物体を準備した。それぞれの条件を無彩色条件、有彩色条件と呼ぶ。無彩色物体は、机に黒い布を敷いた上に白い陶器の皿とコップ、モノクロ印刷されたカード、マクベスカラーチェッカ^(注3)の無彩色部分6色とした。有彩色物体は、茶系のチェックの布を敷いた上にマクベスカラーチェッカ、造花、6種類のカラフルな布、パン及びケーキの模型、白い陶器に入った観葉植物とした。有彩色の評価物の配置を**図4**に示す。

表1. 照度条件
Illuminance conditions

項目	白色LED(基準)	混光(白色LED + RGB)				
混光のパターン番号	—	1	2	3	4	5
器具直下の机上面照度(lx)	300	355	300	245	203	165
照度比(混光/白色LED)	1	1.18	1	0.82	0.68	0.55

(注1) 黒体放射による八角形の面積を100としたときの混光による八角形の面積。
(注2) CIEで定められた3次元の近似的な均等色空間。
(注3) 無光沢の24色から成る、ほぼA4サイズのカラーチャート(色票)で、色味判定に用いられる。



図4. 有彩色の評価物の配置 — 有彩色の評価物は色相が偏らないように色票や布、植物と食物を選択した。
Layout of color objects for evaluation

2.3 評価方法

評価項目は、部屋の印象に関する10項目と、混光を白色LEDと比較した場合の印象5項目で、有彩色条件では肌色の見え方3項目と色の見え方が好ましい評価物の選択を追加した(図5)。各評価項目は7段階評価とした。有彩色条件の評価手順は、以下のとおりである。

部屋の印象

かなり	少し	どちらか	どちらとも	どちらか	少し	かなり
快適な		というと	いえない	というと		不快な
明るい						暗い
自然な						不自然な
はっきりした						ぼんやりした
吉しい						楽しい
もやがかった						すっきりした
きらい						好き
満足な						不満な
渋い						華やかな
美しい						汚い

手をブースの中に入れ、肌色の見え方を評価してください。通常見慣れた色と比べて、どうですか。

かなり	少し	どちらか	どちらとも	どちらか	少し	かなり
良い		というと	いえない	というと		悪い
赤っぽく見える						黄っぽく見える
くすんだ						さえた

色の見え方が好ましい物に○をつけてください。(いくつでも)

部屋の印象は白色LEDに比べて、どうですか。

かなり	少し	どちらか	どちらとも	どちらか	少し	かなり
明るい		というと	いえない	というと		暗い
はっきりした						ぼんやりした
渋い						華やかな
もやがかった						すっきりした
刺激的な						穏やかな

図5. 有彩色条件の混光評価用紙 — 5種類の照度条件をランダムに提示して、部屋の印象、肌色の見え方、混光と白色LEDの比較を評価し、色の見え方が好ましい評価物の選択を追加した。
Questionnaires for evaluation in chromatic conditions

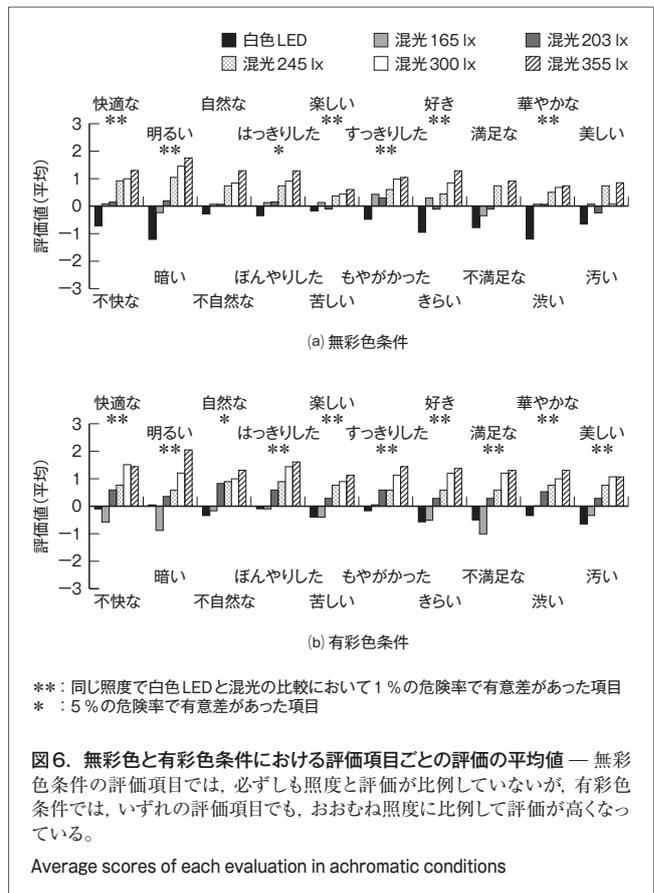
- (1) 右側の白色LEDの部屋に入室し、1分間順応する。
- (2) 部屋の印象について、7段階の評価項目にチェックする。
- (3) 手を伸ばして通常見慣れた肌の色と比べてどうかを評価する。
- (4) 評価物のうち、色見え方が好ましい物に○を付ける。
- (5) 左側の混光の部屋に入り、1分間順応する。
- (6) 部屋の印象と肌の色見え方を評価する。
- (7) 評価物のうち、色見え方が好ましい物に○を付ける。
- (8) 右と左の部屋を行き来し、白色LEDの部屋に比べて混光の部屋はどうか評価する。
- (9) 部屋から出る。

照度条件を変更して(5)~(9)を繰り返し、計5種類の照度条件をランダムに提示して評価した。

3 実験結果と考察

3.1 部屋の印象に関する評価

部屋の印象に関する評価について、全被験者の評価の平均値を項目ごとに図6に示す。無彩色条件では、“快適な-不快な”と“明るい-暗い”は照度が高くなるにつれて評価が高くなっているが、その他の項目では、照度と評価が必ずしも比例していない。有彩色条件では、いずれの評価項目においても



おおむね照度が高くなるにつれて評価が高くなっている。無彩色条件と比較すると、有彩色条件は全体的に評価が高い。

ここで、同じ照度 (300 lx) における白色LEDと混光による評価を分散分析により比較した結果、無彩色条件では“快適な-不快な”や“明るい-暗い”など六つの項目で1%の危険率で有意差が認められ、“はっきりした-ぼんやりした”では5%の危険率で有意差が認められた。有彩色条件では、“自然な-不自然な”の項目では5%の危険率で、それ以外の全項目では1%の危険率で有意差が認められた。

3.2 肌色の見え方に関する評価

肌色の見え方に関する評価では、いずれの評価項目においても白色LEDの評価は低く、混光の評価のほうが高い(図7)。“良い-悪い”と“さえた-くすんだ”では照度が高くなるほど評価が高い傾向が見られるが、“赤っぽく見える-黄っぽく見える”は照度による評価の差が小さく、照度よりも分光分布の影響が大きいとと言える。同じ照度における白色LEDと混光の評価を分散分析により比較した結果、全項目において危険率1%以下で有意差が認められた。したがって、肌の色の見え方は混光のほうが高い評価を得られていると言える。

3.3 明るさ感に関する評価

部屋を行き来して比較した評価において、無彩色及び有彩色条件の評価項目ごとに、全被験者のデータをプロットして回帰直線を求めた結果、相関係数が0.8を超える回帰直線が得られたのは、有彩色条件の“明るい-暗い”だけであった。横軸に混光と白色LEDの照度比、縦軸に評価値を取り全被験者のデータをプロットしたグラフと、回帰直線及び回帰式を図8に示す。この回帰式の相関係数は0.80であった。

この回帰直線の評価値0点は、白色LEDと混光で同じ明るさ感を得られる照度比を表している。回帰式より、評価値0点の照度比は0.74であったことから、混光した場合、白色LEDの0.74倍の照度で同じ明るさ感を得られたことがわかる。つまり、Raが高く色を鮮やかに見せる光源は、Raが低い光源よりも低照度で同等の明るさ感を得られることを示している。

ここで、明るさ感が同等となるよう混光の明るさを0.74倍に

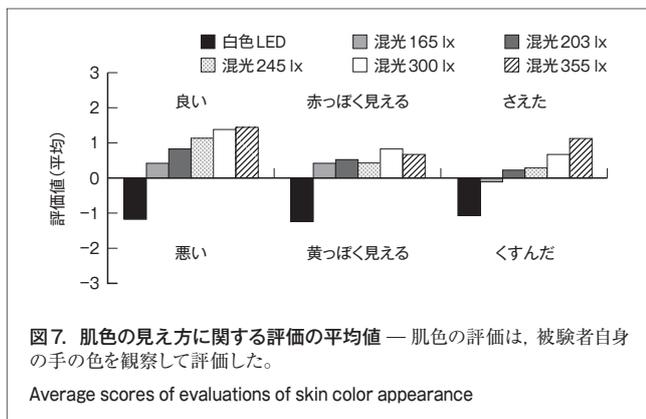


図7. 肌色の見え方に関する評価の平均値 — 肌色の評価は、被験者自身の手の色を観察して評価した。

Average scores of evaluations of skin color appearance

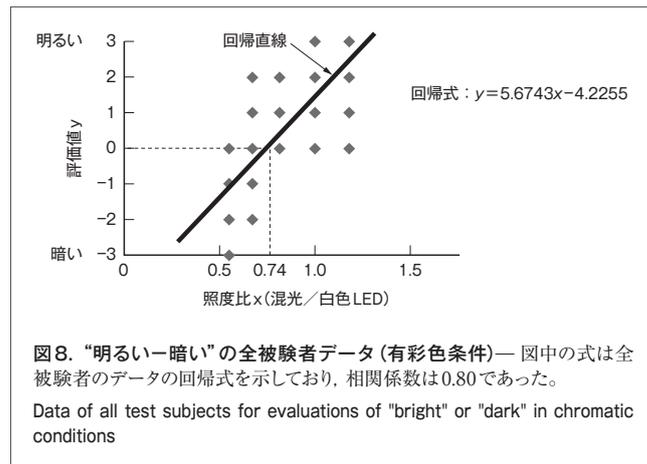


図8. “明るい-暗い”の全被験者データ(有彩色条件) — 図中の式は全被験者のデータの回帰式を示しており、相関係数は0.80であった。

Data of all test subjects for evaluations of "bright or dark" in chromatic conditions

落とすことが可能と仮定した場合、試作に用いた白色LED及びマルチチップの各光色の効率で計算した消費電力はわずかに増加したが、より効率が高いLEDを用いることにより省エネ効果が期待できる。

4 あとがき

色をきれいに、鮮やかに見せることは快適な要素の一つである。現在一般的に用いられている青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせた方式の白色LEDの分光分布にRGBの適切な分光分布を加えることで、快適で明るさ感が高い照明空間が実現でき、省エネ効果が得られる可能性を見いだすことができた。

白色LEDにRGBのLEDを付加する方式では、温度や経年劣化による出力や光色変化の制御、混光のためのLEDの配置や光学設計といった課題があるが、色の見え方が良く効率が高い、快適なLED照明環境の実現に取り組んでいく。

文献

- Judd, D. B. A flattery index for artificial illumination. *Illuminating Engineering*. 62, 10, 1967, p.593 - 598.
- Pracejus, W. G. Preliminary report on a new approach to color acceptance studies. *Illuminating Engineering*. 62, 12, 1967, p.531 - 534.
- 淵田隆義, ほか. 3波長帯形けい光ランプの照明効果. *照明学会誌*. 65, 10, 1981, p.526 - 533.
- 納谷嘉信, ほか. 光源の演色性による明るさ感と配色の目立ち感情の関連. *照明学会誌*. 70, 2, 1992, p.55 - 61.
- JIS Z 8726:1990, 光源の演色性評価方法.



小谷 朋子 KOTANI Tomoko

東芝ライテック(株) 技術本部 研究開発センター主務。
光環境の設計・評価技術の研究に従事。照明学会専門会員、
日本照明委員会理事。
Toshiba Lighting & Technology Corp.