

“好ましさ”に基づいたLED照明の演色性評価技術

Technology to Evaluate Color Rendering Properties of LED Lighting Based on Color Preferences

今井 良枝 小谷 朋子 淵田 隆義

■ IMAI Yoshie ■ KOTANI Tomoko ■ FUCHIDA Takayoshi

テレビやカメラ、印刷機など、色再現が重要な製品は数多く、それぞれに適した色づくりがある。色づくりの際には、人が好ましく感じるように色を再現する人中心の設計も求められている。照明分野では、これまで色を忠実に再現する評価が中心であったが、設計自由度の高いLED（発光ダイオード）照明の普及に伴い、人が感じる“好ましさ”の評価も必要とされている。

東芝は、様々な分光分布を持つLED照明の下で、日常生活になじみのある食べ物などを対象に主観評価を行い、色の鮮やかさや明るさが好ましさに関係していることを明らかにした。また、その結果を基に、照明の好ましさの主観評価と相関の高い評価指標を構築した。今回得られた評価指標は、今後のLED照明の色彩設計に活用されると期待できる。

Various products focused on high-level color reproduction capability, including televisions, digital cameras, and printing devices, are characterized by their color appearance. Human-centric design that is positively evaluated by users is an essential element of this color appearance. Particularly in the lighting field, in which the introduction of light-emitting diode (LED) systems with high design flexibility is expanding, there is a need for technologies to evaluate users' color preferences in addition to the conventional technologies to evaluate the fidelity of reproduction of objects' colors.

Toshiba has developed a technology to evaluate the color rendering properties of LED lighting based on color preferences. We have conducted subjective evaluation experiments using daily foods as sample objects under the condition of LED lighting with various spectral power distributions, and verified that the color preference depends on the saturation and luminance of objects' colors. As a result, we have derived an evaluation index that has a high correlation with color preferences, which is expected to contribute to the design of the color appearance of LED lighting.

1 まえがき

照明の色再現性能、すなわち演色性の評価には、一般に平均演色評価数 R_a が用いられている⁽¹⁾。この手法は、蛍光ランプ下の色が、比較基準である自然光や白熱電球下の色と等しいかどうかという色の忠実性の観点から評価するものであり、色の好ましさの評価は含まれていない。ところが日常生活では、色の忠実性が意識されることはあまりなく、食べ物がおいしそうに見える、あるいは肌がきれいに見えるといった、感性的な好ましさが優先されることが多い。

また、急速に普及するLED照明においては、日常生活での実際の感覚と R_a による評価値との違いが、従来の光源よりも更に大きくなるという報告もある⁽²⁾。これは、LED照明の分光分布と物体の分光反射率特性との相互的な効果により、蛍光ランプやHID（高輝度放電）ランプよりも色の見え方（以下、色の見えと記す）の違いが大きくなるためと推測されている。そのため、忠実な色再現ではなく色の好みなど色彩印象に基づいた演色性を評価する手法が望まれている。現在、CIE（国際照明委員会）の専門委員会 TC1-91: New Methods for Evaluating the Colour Quality of White-light Sourcesでは、忠実性以外の観点で、演色性を評価する手法を検討することに取り組んでおり、世界各国でLED照明による色の見えが研究されている。

東芝は、様々な分光分布を合成できる照明システムを試作してその照明下で色の見えの評価を行った結果、好ましさに基づいた演色性評価手法を構築した。ここでは、日常生活になじみのある物体を総合的に観察する主観評価実験の結果と、構築した評価手法の特長などを述べる。

2 色の見えの主観評価実験

LEDランプを含む各種光源の演色性に関する研究は多く、隣接する観察ブースそれぞれを異なる光源で照明して両者での見えを比較評価する研究⁽³⁾や、照明された物の色と記憶色（例えばバナナの色として想起する黄色）との差異に着目した研究⁽⁴⁾などがある。

当社は、主波長の異なる数種類のLEDを組み合わせることにより、分光分布を比較的自由に制御できる照明装置を試作し、その照明光に順応した状況で、色の見えの評価を行った。

2.1 主観評価システム

赤2色、赤だいたい、だいたい、黄、緑、青緑、青2色、及び白の合計10種類の単色LEDをランダムに平面に配置し、各単色LEDの輝度をコンピュータ制御することで総合的な発光として様々な分光分布を再現できる、LED照明装置を用いた主観評価システムを試作した（図1）。照明装置は1ユニットの大きさが幅1.2 m、奥行き0.5 mで、幅2.0 m、奥行き3.0 m、高さ2.3 mの評価



ブースの天井部分に3ユニット設置した。各ユニット間に蛍光ランプ器具も設置し、蛍光ランプ照明下での色の見えの評価も実施できるようにした。評価ブース内は、観察サンプル以外の色の影響をなくすため無彩色の灰色（マンセル色票N7相当）とした。

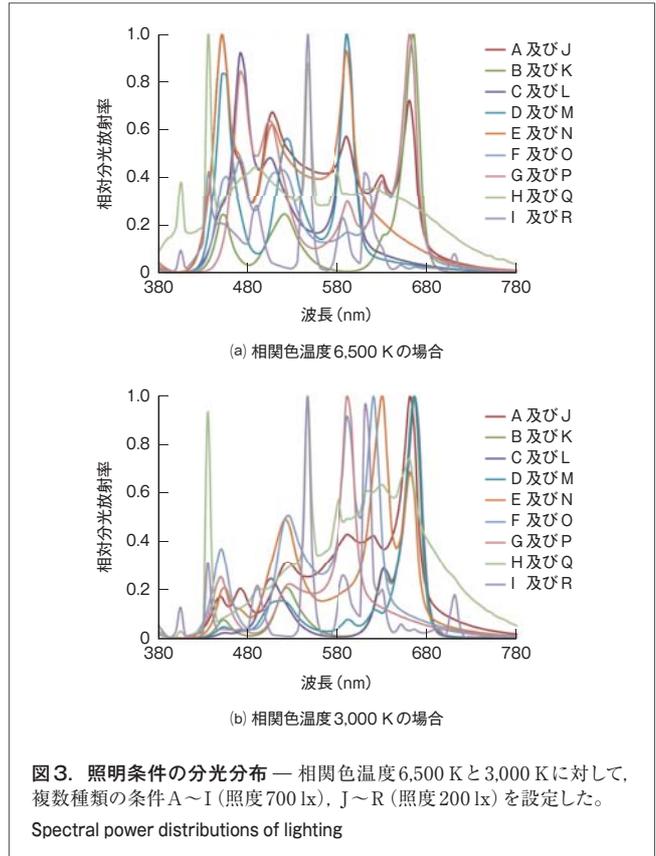
2.2 評価サンプル

りんごや、オレンジ、キュウリなどなじみの物は、個々に主観評価を行っており、好ましさは物体の色の鮮やかさと関係があることや、評価サンプルへの依存性があることを既に確認している⁽⁵⁾。そこで今回、多色配色の全体の色彩印象を総合的に判断できるように、身近なものの中から色相が偏らないように評価サンプルを選択した（図2）。

評価サンプルに対する色相の影響を明らかにするため、以下の3パターンを観察グループとした。

- (1) 全色相サンプル 全色相のサンプルが含まれる評価サンプル全体で、野菜や、果物、鮮魚、生肉などの食べ物に加え、観葉植物や着色された毛糸など（図2(a)）
- (2) 赤色相サンプル 赤や、だいたい、ピンク、茶などの赤色系サンプルで、りんごや赤色毛糸など（図2(b)）
- (3) 非赤色相サンプル 緑や、黄色、青などの赤色系色を除いたサンプルで、ピーマンや青色毛糸など（図2(c)）

また、評価時には被験者自身の手の甲に対しても色の見えを評価した。



2.3 照明条件

光色は、相関色温度が6,500 Kの昼光色と3,000 Kの電球色の2種類とした。また、照度は700 lx（明るい事務所照明）と、200 lx（家庭のリビング照明）に設定した。実験に使用した照明条件の分光分布を図3に示す。照明条件A～Iは高照度700 lxの場合であり、J～Rは低照度200 lxの場合である。また、A～GとJ～PはLEDランプであり、HとQは高演色形蛍光ランプ、IとRは三波長形蛍光ランプである。蛍光ランプの照度調整は、光源の分光分布の変化を避けるため、黒い画用紙あるいは黒い布を用いて蛍光ランプのガラス管部が露出する面積を調整することで行った。

2.4 実験条件

有効被験者は20代から50代の男女で、6,500 Kでは49名、3,000 Kでは44名であった。評価項目は、表1に示す形容詞対を使用し、各項目での評価は7段階評価とした。

実験は暗室に設置した評価ブースで行い、被験者は、着衣の色の影響が出ないように白衣を着用した。被験者は、まず、ブースの外で待機し、実験教示として「提示されたサンプルの印象についてあまり深刻に考えずに、全体を見て感じたとおりを記入してください」と指示され、実験開始とともにブースの中に入り、1分30秒の順応時間を取った。その後、全色相サンプル、非赤色相サンプル、赤色相サンプルの順に提示されたサンプルをそれぞれ評価した。この順番にしたのは、全色相

表1. 実験に用いた評価用の形容詞対

Adjective pairs used for evaluation in experiments

番号	形容詞対	
1	目だつ	目だたない
2	暖かい	涼しい
3	自然な	違和感のある
4	明るい	暗い
5	やわらかい	かたい
6	きれいな	汚い
7	さわやかな	重苦しい
8	好ましい	好ましくない
9	鮮やかな	くすんだ
10	おいしそうに見える	おいしそうに見えない
11	活発な	落ち着いた
12	快適な	不快な
13	いやされる	緊張する

サンプルの評価が赤色相サンプルの印象に引きずられる可能性がある」と推測したためである。サンプルの提示が一巡したら、被験者はブースの外で待機し、次の照明条件が設定された後、再びブースに入り、順に評価することを繰り返し行った。このとき、照明条件の順序はランダムな並びにし、順序の依存性を排除した。

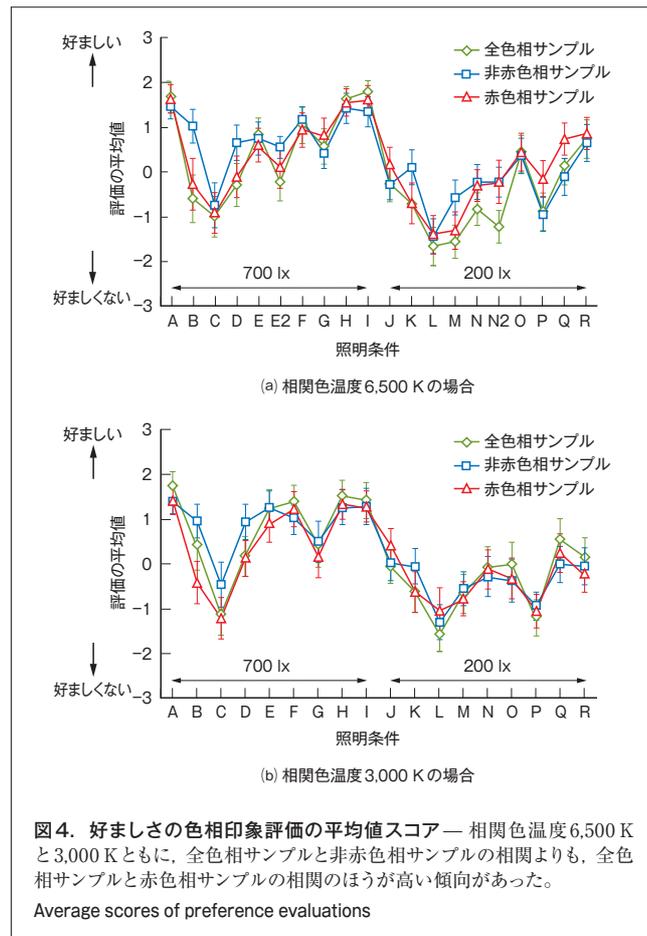
3 実験結果と考察

各照明下での評価サンプルに対する好ましさの印象評価結果について、全被験者の平均値を図4に示す。相関色温度6,500 K及び3,000 Kともに、照度700 lx (条件A～I) の評価が、照度200 lx (条件J～R) の評価よりも高く、高照度と低照度の結果には有意差が認められた。色の見えには照度依存性があることは、これまでの多くの研究で明らかにされているが、今回の評価結果でも同様の傾向を示した。これは、好ましさに基づいた演色評価には照度の影響を付加することが必要であることを示唆している。

また、色相ごとの評価サンプル群(全色相、赤色相、及び非赤色相)に対する主観評価結果について相関分析を行ったところ、全色相サンプルと赤色相サンプル間の相関のほうが、全色相サンプルと非赤色相サンプルの相関よりも高い傾向があった。赤色相サンプルが全体の評価に与える影響があると考えられる。そのため、全体の色彩印象を総合的に評価する際には、色相を考慮する必要があり、その中でも赤色相を重視する必要があることが示唆された。

4 好ましさの評価指標の構築

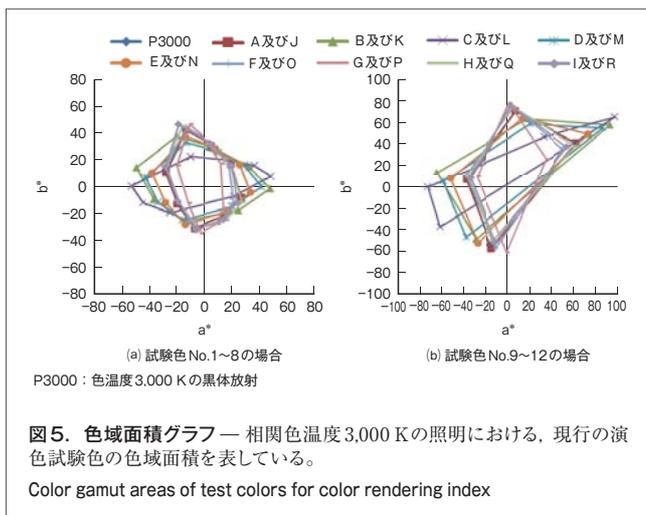
実験結果から、好ましさは明るさと相関があることが確認され、また鮮やかさも関係性がある⁽⁵⁾ことが以前の実験で示さ



れている。そこで、照明の明るさと鮮やかさを表す測色値を用いて、好ましさの評価値を表す手法を検討した。

鮮やかさを評価する代表的な値として、色域面積比がある⁽⁶⁾。色域面積比は、ある光源照明下における色域面積(複数の色票の測色座標を結んだ多角形の面積)を、基準とする光源照明下での色域面積で除算した比率である⁽⁶⁾。相関色温度3,000 Kの照明条件下で、CIELAB色空間^(注1)のa*-b*平面に現行の演色試験色の色域を示したのが図5である。試験色No.1～8(中彩度色)の色域が図5(a)で、No.9～12(高彩度色)の色域が図5(b)である。色域の大小や各試験色の測色座標の位置で光源の色再現性能が表現されている。同じ色域面積であっても、測色座標が異なれば再現色の傾向が異なることを意味している。例えば、照明条件A及びJとG及びPは、色域面積としては同じ程度だが、色域が広がる方向が異なり、A及びJはb*方向に、G及びPはa*方向に長い色域になっている。これは、A及びJは赤や緑の色が鮮やかに表現されるが、青や黄色は鮮やかに再現されないことを表している。G及びPはこの逆である。このような色域の拡大方向を考慮する必要性についても検討した。

(注1) CIEで策定された、明度L*と色座標a*及びb*の三つの数値で色を表して知覚的な色の距離を反映する均等色空間。



全色相サンプルだけに対する好ましさの評価値を用いて重回帰分析を行い、評価式(1)を求めた。

$$S = -2.3022 + 0.00549 \times R_9 + 0.00126 \times GA_{Qab} \quad (1)$$

ここで R_9 は現行演色評価方法による試験色No.9(高彩度の赤色)の特殊演色評価数⁽¹⁾であり、基準光源下の色とどの程度違っているかを示している。また GA_{Qab} は、CIEが定めた色の見えモデルCIECAM02色空間⁽⁷⁾における色域面積であり、明るさの違いなど周囲環境を考慮した色の見えモデルである。変数として R_9 が選択されたのは、全色相サンプルと赤色相サンプルに対する好ましさ評価の相関が高いことに起因する。全体の印象を評価する際に、色域拡大方向を考慮する色として、赤色相サンプルの影響が大きいかを意味している。

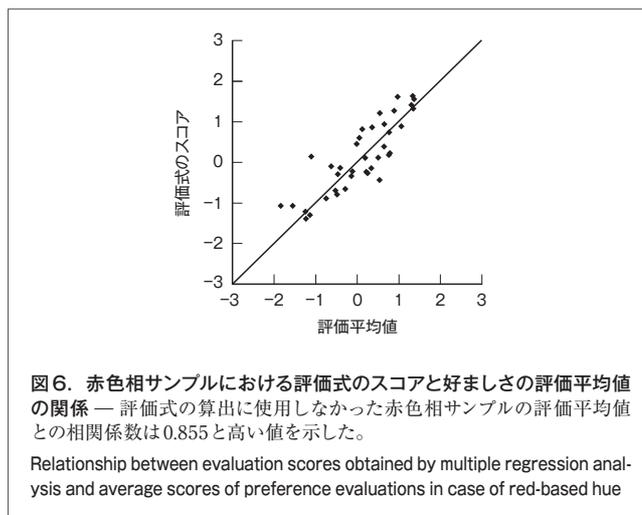
評価数 S と好ましさに対する主観評価平均値との相関係数は0.836であった。また、評価式の算出に用いなかったサンプルの評価平均値との相関係数は、非赤色相サンプルでは0.776であり、赤色相サンプルでは0.855であった。このときの赤色相サンプルの評価平均値スコアと、式(1)の評価式により算出したスコアのプロットを図6に示す。従来の R_a との相関係数は0.493、 GA_{Qab} との相関係数は0.171であり、従来手法と比較し、評価の精度が大幅に改善されたことが確認された。

5 あとがき

日常生活に近い様々な照明環境でなじみのある物体を観測する実験を行い、その結果を用いて、人の感じる好ましさと同関の高い評価指標を構築した。

LEDランプは、蛍光体の選択や単色LEDの組合せによって、その分光分布形状を比較的自由に設計することができるため、これまでの蛍光ランプとは異なる特徴的な演色効果を与えることができる。

今後は、快適なLED照明環境を実現するため、構築した評



価指標を適用し、人の感性を中心とした、LED照明の分光分布の設計に取り組んでいく。

ここでの成果は、独立行政法人(現 国立研究開発法人)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「LED照明利用技術に関わる評価技術開発」によるものである。

文 献

- (1) JIS Z 8726:1990. 光源の演色性評価方法。
- (2) CIE TC1-62. Colour Rendering of White LED Light Sources. Vienna, Austria, CIE, 2007, CIE177: 2007, 14p.
- (3) 須長正治 他. 演色性が異なる光源により照明された自然物体の色の印象. 日本色彩学会誌. **32**, SUPPLEMENT, 2008, p.126 - 127.
- (4) Smet, K. et al. Colour appearance rating of familiar real objects. Color Research and Application. **36**, 3, 2011, p.192 - 200.
- (5) Imai, Y. et al. "A Study of Color Rendering Properties based on Color Preference of the objects in Adaptation to LED Lighting". Proc. CIE Centenary Conference. Paris, France, 2013-04, CIE. 2013, p.369 - 374.
- (6) Thornton, W. A. Color-discrimination index. J. Opt. Soc. Am. **62**, 2, 1972, p.191 - 194.
- (7) CIE TC8-01. A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02. Vienna, Austria, CIE, 2004, CIE159: 2004, 22p.



今井 良枝 IMAI Yoshie, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター マルチメディアラボラトリー研究主務, 博士(工学)。映像の高画質化及び照明の評価技術の研究・開発に従事。映像情報メディア学会, 日本色彩学会, 照明学会会員。Multimedia Lab.



小谷 朋子 KOTANI Tomoko

東芝ライテック(株) 技術・品質統括部 研究開発センター参事。光環境の設計・評価技術の研究に従事。照明学会会員, 日本照明委員会理事。Toshiba Lighting & Technology Corp.



淵田 隆義 FUCHIDA Takayoshi, D.Eng.

女子美術大学大学院 美術研究科教授, 博士(工学)。(株)東芝及び東芝ライテック(株)での画像・照明評価技術の開発を経て, 2011年から現職。日本色彩学会会長。Graduate School of Joshibi University of Art and Design