美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究 (4) —低照度展示の美術品の色の見えを考慮した光源の分光分布—

正会員 中島 由貴 (女子美術大学大学院)

専門会員 淵田 隆義* (女子美術大学大学院)

Study of Museum Lighting : Optimum Lighting and Color Environment (4)

Spectral Power Distribution of Light Sources in Consideration of Color Appearance of Art Under Low Illuminance

Member Yuki Nakajima (Graduate School of Joshibi University of Art and Design) and

Fellow Member Takayoshi Fuchida (Graduate School of Joshibi University of Art and Design)

ABSTRACT

The purpose of this study was to design spectral power distributions of light sources while considering the color appearance and preservation of artwork under low illuminance by using a “color quality index” called $G_{X(E)}$. One of the spectral distributions obtained from theoretical calculations was reproduced by using a lighting device with six types of monochromatic LEDs. Subjective evaluation experiments were conducted under various light sources, and the prediction accuracy of $G_{X(E)}$ was verified.

Theoretical and subjective evaluation of the experiment revealed the following results: (1) The spectral power distribution with the maximum $G_{X(E)}$ at 10 lx was a narrow band distribution with red (630 nm), green (530 nm), and blue (470 nm), and it was called LED-RGB. (2) The subjective evaluation results corresponded well with $G_{X(E)}$, so $G_{X(E)}$ could be used to design spectral power distributions of museum lighting at a low illuminance. (3) The damage coefficient of LED-RGB was the same or smaller than that of fluorescent and halogen lamps.

We concluded that an LED-RGB with 630 nm, 530 nm, and 470 nm had the maximum $G_{X(E)}$, and it was an advantageous spectral distribution for art appreciation under low illuminance for the aspects of color appearance and damage.

KEYWORDS : museum lighting, color rendering properties, LED light source, spectral power distribution, illuminance

1. はじめに

美術館では光放射による美術品の損傷を最小限に抑えるために照度が厳しく制限され、耐光性の低い美術品にはより厳しい照度規制が設けられている。ディステンパー (Distemper, 漆, にかわ) を用いた日本画は耐光性に乏しく、推奨照度値は 50 lx 以下¹⁾であるが、筆者らが行った国内美術館の実態調査では 10 lx 以下の施設も確認した²⁾。数 lx の低照度下で鑑賞する美術品の色の見え方は高照度下と比べ大きく異なる。

LED ランプの性能向上は近年著しく、国内外の美術館で LED ランプの導入が進んでいる。LED ランプは蛍光灯と分光分布が異なることから、照明された美術品の色の見え方、すなわち演色性の問題が生じる。さらに、LED ランプから発せられる光には美術品の損傷の原因となる赤外線や紫外線がほとんど含まれていないため、美術館照明として有利であると考えられているが、美術品に用いられている材料によっては可視放射であっても損傷を引き起こす可能性が報告されている³⁾。このことから美術館に LED ランプを導入するためには、演色性および光化学的損傷の可能性を十分に検討する必要がある。

筆者らは、照度および分光分布が異なる照明下の色の見えに基づく印象を「色質 (しきしつ)」と定め、日本画など低照度での展示が余儀なくされる美術館照明のための新たな演色性評価方法として「色質評価数 $G_{X(E)}$ 」に基づいた演色性評価方法を提案した⁴⁾。

本稿では、 $G_{X(E)}$ が大きい分光分布ほど低照度下の美術鑑賞に有利であるとの前提のもと、(1) $G_{X(E)}$ を最大化した分光分布を設計、(2) 設計した分光分布照明下で物体色の見えを評価し $G_{X(E)}$ の精度を検証、(3) 設計した分光分布によって生じる美術品の変色色の可能性を損傷係数 (光化学的損傷係数) により確認した。

2. 低照度下で美術品を鑑賞するための光源の分光分布設計

2.1 CIE/JIS- R_a , R_i

光源の演色性は、照明された物体の色を忠実に色再現する考え方と好ましく見せる考え方の2つに大別できる。現在、国際的に用いられている光源の演色性評価方法は、CIE (国際照明委員会) /JIS (日本工業規格) で規定された忠実色再現に基づく評価方法であり、平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_i で表す (CIE13.3⁵⁾, JIS Z 8726-1990⁶⁾)。美術館においても高い R_a , R_i の光源を選定していることが多く、照明基準総則 (JIS Z 9110 : 2010)⁷⁾では、美術館は R_a 90 以上の光源を用いることを推奨している。しかし、筆者らは、先の研究において R_a , R_i が低照度下の色の見えに対応しておらず、美術館照明の指標として不十分であることを確認している⁸⁾。

2.2 色質評価数 $G_{X(E)}$ ⁴⁾

*) 投稿時の所属

筆者らは「様々な照度Eに設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさなどの色の見えが最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）」を「色質」と定義し、「色質」を評価する新しい演色性評価方法として「色質評価数 $G_{x(E)}$ 」を提案した⁴⁾。

$G_{x(E)}$ は、色の見えモデル CIECAM02⁹⁾の a_M 値（赤色－緑色成分）、 b_M 値（黄色－青色成分）、 M 値（カラフルネス）を用い、2次元平面上における高彩度試験色20色に対する基準光および試料光の色域面積比によって算出する。基準光は美術館・博物館用蛍光灯（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU、以下 FL-EDL）700 lx であり、すなわち $G_{x(E)}$ は基準光 FL-EDL700 lx に対する試料光の任意の照度下の「色質」を予測することができる。照度Eの試料光の色質評価数 $G_{x(E)}$ は、式

(1) ～ (7) により求める。CIECAM02 の計算条件は、 $Y_b = 20$ 、 $F = 1.0$ 、 $c = 0.69$ 、 $N_c = 1.0$ であり、順応輝度 L_A は照度から変換した値である。

$$\begin{aligned} G_{x(E)} &= 100(G_{T(E)}/G_R) \cdots \cdots \cdots (1) \\ G_R &= \sum_{i=1}^{20} (a_{Mi-1}b_{Mi} - b_{Mi-1}a_{Mi}) \cdots \cdots \cdots (2) \\ G_{T(E)} &= \sum_{i=1}^{20} (ax_i - bx_i) \cdots \cdots \cdots (3) \\ ax_i &= a_{Mi} \times W_{hi} \cdots \cdots \cdots (4) \\ bx_i &= b_{Mi} \times W_{hi} \cdots \cdots \cdots (5) \\ Rx_i &= 100 + 100((M_{iT(E)} - M_{iR})/M_{iR}) \cdots \cdots \cdots (6) \\ W_{hi} &= Rx_i/100 \cdots \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

但し $i = 1 \sim 20$

ここで、 G_R は基準光 FL-EDL700 lx 下での試験色20色の a_{Mi} 、 b_{Mi} から求めた色域面積であり、式 (2) により算出する。 $G_{T(E)}$ は式 (3) で得られる試料光 E lx 下での20色の色域面積であり、ただし色域面積の計算には a_{Mi} 、 b_{Mi} ではなく式 (4)、(5) により変換した ax_i 、 bx_i を用いる。なお ax_i 、 bx_i は、 a_{Mi} 、 b_{Mi} に式 (6)、(7) で得られる色相重み係数 W_{hi} を乗じた値である。

Rx_i は ΔM (CIECAM02 のカラフルネス差) であり、 $M_{iT(E)}$ は試験色 i 、試料光 E lx 下の M 値であり、 M_{iR} は試験色 i 、基準光 FL-EDL700 lx 下の M 値である。

W_{hi} は色相重み係数であり、試料光の Rx_i を 100 (基準光の Rx_i) で除したものである。 W_{hi} は試験色 No.1～No.3 (赤色から黄赤色)、No.9～No.11 (緑色)、No.18～No.20 (赤紫色) の色相範囲に適用され、それ以外の色相範囲は重みをかけず $W_{hi} = 1$ とする。

基準光と同じ「色質」は $G_{x(E)} = 100$ であり、100 以上は基準光よりも高い「色質」を有し、100 以下は低い「色質」であることを示す。なお分光分布によって $G_{x(E)}$ が負値となった場合は 0 とする。

2.3 $G_{x(E)}$ を最大化する分光分布の計算

本稿では、 $G_{x(E)}$ が高い光源ほど低照度下の美術鑑賞に適していると仮定し、分光放射照度計 CL-500A (コニカミノルタ社) で測定した単色 LED 光源6種類の分光分布を計算で合成することによって様々な白色光を作成し、10 lx の $G_{x(E)}$ ($G_{x(10)}$) が最大となる白色光の分光分布を求めた。

光色は完全放射体3060 K (色度: $x = 0.4327$, $y = 0.4026$) とし、計算に用いた単色光の中心波長は Red (中心波長630 nm)、Orange (590 nm)、Amber (590 nm)、Green (530 nm)、Blue Green (500 nm)、Blue (470 nm) の6種類とした (表1)。

分光分布合成計算では、各単色光の相対分光分布 (最大値100) のうち3種類 (Orange, Amber, Blue Green) を2.0%刻みで変化させ、残りの3種類 (Red, Green, Blue) を未知数とした124,950通りの分光分布を求めた。求めた分光分布から

表1 単色光6種類の中心波長、半値幅、色度 xy

Table 1 Center wavelength, half band width, xy coordinates of LED monochromatic lights.

単色光	主波長	半値幅	x	y
Red	630	25	0.7034	0.2963
Orange	590	90	0.5777	0.4175
Amber	590	105	0.5640	0.4310
Green	530	35	0.2027	0.7271
Blue Green	500	30	0.0782	0.5460
Blue	470	25	0.1210	0.0892

表2 分光分布合成計算による $G_{x(E)}$ が大きい上位5位の混合比率 (%)

Table 2 The top five mixing ratio of maximum of $G_{x(E)}$ calculation.

順位	$G_{x(10)}$	R_a	Red	Orange	Amber	Green	Blue Green	Blue
1	56	32	61.64	0.26	0.00	24.58	0.52	13.00
2	56	32	61.65	0.00	0.26	24.57	0.52	12.99
3	56	31	61.62	0.26	0.00	24.44	0.78	12.90
4	56	31	61.64	0.00	0.26	24.43	0.78	12.89
5	56	31	61.60	0.26	0.00	24.30	1.04	12.79

図1 $G_{x(E)}$ が大きい上位5位の相対分光分布

Fig.1 Relative spectral power distributions of the top five of $G_{x(E)}$.

表3 分光分布合成計算による R_a が大きい上位5位の混合比率 (%)

Table 3 The top five mixing ratio of maximum of R_a calculation.

順位	R_a	$G_{x(10)}$	Red	Orange	Amber	Green	Blue Green	Blue
1	95	38	37.34	0.50	25.01	14.36	0.00	22.79
2	95	38	37.35	1.00	24.46	14.40	0.00	22.78
3	95	38	37.37	1.49	23.92	14.45	0.00	22.78
4	95	38	37.38	1.99	23.37	14.49	0.00	22.77
5	95	38	37.39	2.48	22.83	14.53	0.00	22.77

図2 R_a が大きい上位5位の相対分光分布

Fig.2 Relative spectral power distributions of the top five of R_a .

$G_{x(10)}$ 、ならびに比較対象として R_a を算出し、 $G_{x(10)}$ および R_a が最大となる分光分布を抽出した。

表2に、 $G_{x(10)}$ の上位5位の混合比率 (%) を示し、相対分光分布を図1に示す。上位5位の $G_{x(10)}$ は $G_{x(10)} = 56$ であり、表2、図1にも示すように、これらの分光分布は分光パワーが僅かに異なるものの主に Red (630 nm)、Green (530 nm)、Blue (470 nm) による3波長形ではほぼ同一形状を示した。

表3は、合成計算で併せて求めた Ra の上位5位の混合比率である。上位5位は主に Red, Amber, Blue, Green の4色から成り、 $Ra=95$ であった。また、図2からも明らかなように、高い Ra が得られた分光分布は広帯域のなだらかな形状をもつ。

以上から、分光分布の形状は $Gx_{(10)}$ を最大化した場合と Ra を最大化した場合とで異なり、合成計算に用いた6単色光によって $Gx_{(10)}$ が最大となる分光分布は Red (630 nm), Green (530 nm), Blue (470 nm) による3色混合光であることを確認した。

3. 3色混合光照明下の色彩印象評価

低照度下の美術鑑賞に適した分光分布を求める方法として $Gx_{(E)}$ が妥当であるかを検証するために、前項で求めた3色混合光の分光分布を LED 光源システムで実際に合成し、その照明下において「色質」を主観評価することにより $Gx_{(E)}$ が主観評価と対応するかを確認した。

3.1 主観評価実験

(a) 実験方法

図3に示す評価観察ブースの左側を美術館用蛍光灯ランプ FL-EDL, 700lx で照明し、右側を照度可変のテスト光源で照明した。被験者は左眼で観察する FL-EDL 照明下の観察サンプルの色彩印象に対して、右眼で観察するテスト光源下の観察サンプルの色彩印象を比較評価した。被験者は色覚正常の女性8人(18歳~49歳, 4名は色彩評価に習熟, 4名は未経験)であった。

(b) 評価観察ブース

評価観察ブース(図3:奥行き61 cm, 横90 cm, 高さ116 cm, 内面はN6無光沢塗装)は暗室に設置した。ブースは中央を仕切り壁で二分し、左右で異なる照明条件を作り出すことが可能であった。

図3 評価観察ブース
Fig.3 Experimental booth.

表4 評価形容詞対
Table 4 Adjective pairs.

No.	(-) ↔ (+)
1	地味な—派手な
2	濁った—澄んだ
3	静的な—動的な
4	くすんだ—鮮やかな
5	活気のない—活気のある
6	重い—軽い
7	涼しい—暖かい
8	暗い—明るい
9	嫌いな—好きな
10	きたない—美しい
11	不快な—快適な

(c) 評価形容詞対

既報⁴⁾¹⁰⁾と同一の評価形容詞対11種類を用いた(表4)。評価尺度は「どちらでもない」を中心に、「やや」、「かなり」、「非常に」を両側に配置した7段階尺度とした。

(d) 照明条件

実験に用いた光源の相対分光分布を図4に示し、特性値(相関色温度 CCT, $Gx_{(700)}$, $Gx_{(10)}$, Ra , $R9$, 色度 xy , 偏差 Duv)を表5に示す。参照光源は FL-EDL とし、テスト光源は2.3で求めた3色混合光を再現した光源および比較用として追加した7種類の光源の計8種類とした。

テスト光源の内、①LED-RGB, ②LED-RAGB, ③LED-ROGB, ⑤6色LED, ⑦LED-AGBは、表1に示す単色LED光源6種類(Red, Orange, Amber, Green, Blue Green, Blue)を内蔵した照明装置によって作成した混合光である。①LED-RGBは、2.3で得た最大 $Gx_{(10)}$ の3色混合光(表2の順位1位, Red: 630 nm = 61%, Green: 530 nm = 24%, Blue: 470 nm = 13%, 照明装置

図4 実験に用いた光源の相対分光分布 左: 既存光, 右: 混合光
Fig.4 Relative spectral power distributions of the light sources used in the experiment.

表5 実験に用いた光源の特性値

コニカミノルタ社製 分光放射照度計 CL-500Aによる測定値(但し Gx を除く)。

Table 5 Colorimetric characteristics of the light sources used in the experiment.

	光源	略称	CCT	$Gx_{(700)}$	$Gx_{(10)}$	Ra	$R9$	x	y	Duv
参照光源	高演色形蛍光灯ランプ	FL-EDL	3060	100	38	96	95	0.4351	0.4077	0.0018
	3色混光LED	①LED-RGB	3050	166	59	21	-172	0.4262	0.3885	-0.0048
	4色混光LED	②LED-RAGB	3100	107	40	83	50	0.4228	0.3867	-0.0051
	4色混光LED	③LED-ROGB	3090	104	39	86	80	0.4280	0.3962	-0.0018
テスト光源	高演色形蛍光灯ランプ	④FL-EDL	3060	100	38	96	95	0.4351	0.4077	0.0018
	6色混光LED	⑤6色LED	3080	92	35	82	94	0.4348	0.4090	0.0023
	青色LED+黄色蛍光体	⑥LED-BY	3060	91	35	84	19	0.4303	0.3974	-0.0017
	3色混光LED	⑦LED-AGB	3140	83	32	84	19	0.4340	0.4155	0.0050
	一般形蛍光灯ランプ	⑧FL-WW	3460	67	27	55	-110	0.4111	0.4007	0.0030

の性能上小数点以下は切り捨て)を再現した光源であり、CL-500Aで測定した分光分布から求めた $G_{x(10)}$ (実測値)は $G_{x(10)}=59$ であった。2.3で得た最大 $G_{x(10)}$ (計算値)は $G_{x(10)}=56$ であり、実測値と計算値に差異があるが、これは照明装置の性能によるものである。その他、⑤6色LEDはRed, Orange, Amber, Green, Blue Green, Blueの6色全てを組み合わせた混合光であり、②LED-RAGBはRed, Amber, Green, Blueを組み合わせた混合光であることを指す。

④FL-EDLは参照光源と同一光源、⑧FL-WWは一般形蛍光灯、⑥LED-BYは青色LED励起黄色蛍光体発光の白色LEDランプである。

照度調節には分光反射率がほぼ波長非選択性を有する黒色木綿布地を用い、光源の下部に遮光フィルターとして設置した。参照光源(左ブース)の照度は机上上面700 lx一定であり、テスト光源(右ブース)の照度は700 lxと10 lxに設定した。

(c) 観察サンプル

既報¹⁰⁾と同一の多色配色を用いた。この多色配色は、日本画の画材である天然岩絵具および金箔で構成され、粒子径(5番, 9番, 11番, 白番)が異なる辰砂(赤色), 黄土(黄色), 緑青(緑色), 群青(青色)の天然岩絵具16色, および金箔4色(純金, 五毛色, 1号色, 2号色)の計20色である(図5)。各色票のサイズは5×5 cm, 20色はランダムな配色で黒色ボード紙(30×21 cm)に配置した。

図5 観察サンプル

赤:辰砂, 黄:黄土, 緑:緑青, 青:群青, 金:金箔。赤, 黄, 緑, 青に並置した数値は小さくなるほど粒子径が細かいことを表す。金箔は, 1:1号色, 2:2号色, 3:純金, 4:五毛色。

Fig.5 Evaluation stimulus.

(f) 実験手順および教示

実験手順は以下の通りである。

- ①被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約5分間の暗順応を行う。
- ②被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を3分間順応させる。
- ③実験者が左右のブース中央に同一の観察サンプルを配置する。
- ④被験者は左右それぞれの眼で観察サンプルを斜め上45°の位置から観察し、実験者が読み上げた評価形容詞対に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度または光源を変更した後、再び②からの手順を繰り返す。

②から⑤を1照明条件とし、被験者は16照明条件(光源8種類×照度2種類=16)を、日を変えランダムな順序で3回評価した。被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサン

プルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

3.2 実験結果および考察

(a) データ処理方法

主観評価に用いた7段階尺度は、各尺度間が主観的に等間隔であるとみなし、各尺度に対し+3から-3の数値を与えた。被験者は1照明条件につき3回の繰り返し評価を行っているため、3回の平均値を各被験者の主観評価値とした。

主観評価に対する個人差を調べるために、照度、形容詞対ごとに被験者8人の主観評価値に対して一元配置分散分析を実施した結果、700 lxではすべての形容詞対で有意差が認められなかったのに対し、10 lxでは“美しい-汚い($F(7, 56)=3.44, p<0.01$)”, “好きな-嫌いな($F(7, 56)=6.82, p<0.001$)”に有意差を確認した。これらの形容詞対は既報⁴⁾においても個人差が大きく、また被験者の内観調査でも低照度下の評価が二分化する傾向を確認している。したがって、10 lxでは嗜好の違いがより顕著となった可能性がある。本稿では有意差を確認した形容詞対も含めすべての形容詞対を用いて分析を行うこととし、照度、光源、形容詞対ごとに被験者8人の主観評価値の平均値(全被験者平均)を算出した。

因子分析にはSPSS Statistics 24, 分散分析および多重比較にはエクセル統計(ver. 2.15)を用いた。

(b) 因子分析

被験者8人の主観評価値(光源8×照度2×観察サンプル1×被験者8=128データセット)を用いて因子分析(最尤法, バリマックス回転)を行った。表6に因子分析結果を示す。

因子分析の結果、“鮮やかさ”や“明るさ”などに関係する第1因子, “美しさ”や“好ましさ”に関係する第2因子が抽出された(第2因子までの累積寄与率89%)。各因子に分類された評価形容詞対は既報⁴⁾で示した“色の質の因子”, “好ましさの因子”とほぼ同様の結果であることから、第1因子は“色の質の因子”, 第2因子は“好ましさの因子”と解釈できる。したがって、本実験で抽出した“色の質の因子”も既報⁴⁾で定義した「色質」と同義であると解釈した。

表6 因子分析結果(最尤法, バリマックス回転)

Table 6 Factor analysis results (maximum-likelihood, varimax rotation).

評価形容詞対	因子負荷量	
	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”
派手な-地味な	0.88	0.46
鮮やかな-くすんだ	0.86	0.48
動的な-静的な	0.85	0.47
活気のある-活気のない	0.85	0.49
澄んだ-濁った	0.84	0.49
明るい-暗い	0.84	0.48
軽い-重い	0.81	0.48
暖かい-涼しい	0.60	0.37
美しい-きたない	0.48	0.85
好きな-嫌いな	0.43	0.84
快適な-不快な	0.50	0.78
寄与率	55.13	34.33
累積寄与率	55.13	89.46

(c) 主観評価に対する照度および分光分布の影響

主観評価に対する照度および分光分布の影響を検討した。

図6に照明条件ごとの主観評価プロフィールを示す。縦軸は因子分析結果に基づいて因子ごとに並びかえた評価形容詞対、横軸は主観評価結果の平均値（全被験者平均）である。

図6の700 lxの主観評価プロフィールに示す灰色の太い実線（④EDL）は左右のブースともに④FL-EDL700 lx照明下で行われたコントロール実験（観察サンプルは図5の多色配色）の結果であり、すべての評価形容詞対で“0”近傍、すなわち“どちらでもない”を示した。参照側（左眼）、テスト側（右眼）で差がない場合の主観評価値を“0”と仮定し、④FL-EDL700 lxの被験者8人の主観評価値（11形容詞対）に対して1サンプルのt検定を行った結果、有意な差は認められなかった（ $t(87) = 0.09, p = 0.92$ ）。この結果は、本実験の両眼隔壁法による評価が左右眼の評価差なくほぼ正確に行われたことを意味する。

主観評価プロフィールの傾向は、図6に示すように光源および照度によって異なっている。700 lxでは光源によってプロフィールが“正值”から“負値”までばらつき、10 lxでは照度の低下にともなうプロフィールが全体的に負値側にシフトし、700 lxに比べ光源間のばらつきが縮小した。

図6 主観評価プロフィール

Fig.6 Subjective evaluation profiles.

各因子に対する光源の分光分布の影響をより詳細に検討するために、各因子の因子得点を算出し、光源間の因子得点の平均値に有意な差があるのかを照度ごとに分析した。なお、コントロール実験の結果である④FL-EDL700 lx との比較を行うために、10 lx の分析には④FL-EDL700 lx の結果を加えた。一元配置分散分析の結果、700 lx、10 lx ともに“色の質の因子”にの

み光源間の有意差が認められた（“色の質”700 lx（ $F(7, 56) = 71.16, p < 0.001$ ）、10 lx（ $F(8, 63) = 24.26, p < 0.001$ ）、“好ましさ”700 lx（ $F(7, 56) = 1.42, p = 0.22$ ）、10 lx（ $F(8, 63) = 0.48, p = 0.87$ ）。

図7に各照明条件の“色の質の因子”、“好ましさの因子”の因子得点の平均値を示す。縦軸は因子得点の平均値であり、横軸は光源の名称である。なお、横軸の光源の並びは、700 lxの“色の質の因子”の因子得点の平均値が降順になるよう並べかえてある。

図7に付記したアスタリスク（*）は、④FL-EDL700 lxの因子得点の平均値（対照群）と各テスト光源の因子得点の平均値を多重比較（Dunnett法）により分析した結果である。“色の質の因子”は、テスト光源が700 lx（図7左上）の場合、④FL-EDL700 lxよりも“正（たとえば、派手や鮮やか）”に評価されるグループ（①LED-RGB, ②LED-RAGB, ③LED-ROGB），“負（たとえば、地味やくすんだ）”に評価されるグループ（⑤6色LED, ⑥LED-BY, ⑦LED-AGB, ⑧FL-WW）の2グループにわかれた。テスト光源が10 lx（図7左下）のときにはすべての光源が④FL-EDL700 lxよりも有意に“負”と評価された。“好ましさの因子”は、700 lx（図7右上）、10 lx（図7右下）ともに光源および照度の影響が小さく、因子得点の平均値に変化が見られなかった。

先行研究では、演色性が異なる照明下において多色配色の印象評価に最も影響を及ぼすのは赤色の色再現^{4)10)–13)}であることが報告されている。また本実験と同一の多色配色を用いた既報¹⁰⁾でも、最も粒子径が小さく、最も高彩度の赤色（辰砂、白番）の影響が大きいことを明らかにしている。そこで、本実験においても被験者は“高彩度の赤色”に注目して評価を行ったと仮定し、多色配色の中で最も高彩度の赤色（辰砂、白番）の分光反射率（コニカミノルタ社製分光測色計CM-700d, SCI）を用いて、CIECAM02のM値（2.2項と同一の計算条件）を求め、式（8）により参照光源FL-EDL700 lxの M_R 値と各テスト光源700 lx、10 lxの M_T 値の差分 ΔM を算出した。

$$\Delta M = M_T - M_R \quad \text{..... (8)}$$

ここで、 M_T はテスト光源700 lxまたは10 lxの辰砂白番のM値であり、 M_R は参照光源FL-EDL700 lxの辰砂白番のM値である。

図8は700 lx、10 lxにおける各テスト光源の ΔM を示しており、縦軸が ΔM 、横軸が光源の名称である。横軸の光源の並びは、700 lxの ΔM が降順になるよう並べかえた。

ΔM において“0”はFL-EDL700 lxとテスト光源のカラフルネスが等しいことを示し、“正值”はFL-EDL700 lxよりもテスト光源のカラフルネスが高いこと、“負値”はFL-EDL700 lxよりもテスト光源のカラフルネスが低いことを意味する。図8に示す700 lxの ΔM の傾向、すなわち高照度下におけるテスト光源の赤色に対する色再現の特徴は“正值”と“負値”の2グループにわかれ、それぞれのグループに含まれている光源は700 lxの“色の質の因子”の因子得点（図7左上）の分類と類似している。したがって、高照度下の赤色の演色色再現の特徴ごとにグループ1（参照光源よりも赤色を高カラフルネスに演色する①LED-RGB, ②LED-RAGB, ③LED-ROGB, ⑤6色LED）、グループ2（参照光源よりも赤色を低カラフルネスに演色する⑥LED-BY, ⑦LED-AGB, ⑧FL-WW）にわけて700 lxの“色の質の因子”の因子得点の結果を考察する。

(1) 参照光源よりも赤色を高カラフルネスに演色するグループ：①LED-RGB, ②LED-RAGB, ③LED-ROGB, ⑤6色LED

図7 各照明条件に対する因子ごとの因子得点（平均値）

FL-EDL700 lxの因子得点平均値に対する多重比較（Dunnnett 法）結果：* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Fig.7 Factor score of “factor of color quality” and “factor of preference” for each lighting condition.

図8 FL-EDL700 lxと各テスト光源下の高彩度赤色（辰砂、白番）のカラフルネス差

Fig.8 ΔM between FL-EDL700 lx and each test light source (High saturated red, “Sinsya, Byaku-ban”).

主に赤色、緑色、青色の波長域に分光パワーが集中した分光分布である。これらの光源は参照光源と比較して赤色を鮮やかに演色（高カラフルネスに演色）する光源であり、これにより因子得点の平均値が正值となったと考えられる。なお、⑤6色LEDは、因子得点の平均値が負値であるのに対して ΔM は正值を示したが、これは⑤6色LEDの分光分布が①LED-RGB、②LED-RAGB、③LED-ROGBに比べてなだらかなためであり、赤色の演色色再現が参照光源とほぼ同等であったことに起因する。したがって、因子得点の平均値も他の光源と比較して“0”に近い値を示している。

(2) 参照光源よりも赤色を低カラフルネスに演色するグループ：⑥LED-BY、⑦LED-AGB、⑧FL-WW

広帯域のなだらかな分光分布を有するが、長波長域（赤色）の分光パワーが小さく、参照光源と比較して赤色をくすませて演色（低カラフルネスに演色）する光源である。すなわち、テスト光源下で観察する赤色が参照光源下で観察する赤色よりも低カラフルネスに知覚されたことによって因子得点の平均値が“負値”となったと考えられる。

なお、照度10 lxの“色の質の因子”の結果（図7左下）では、①LED-RGBの因子得点の平均値が④FL-EDLを含むその他の光源の因子得点の平均値よりも高い値を示した。これは、

①LED-RGBが赤色を最も鮮やかに演色（高カラフルネスに演色）する光源であり、図8右にも示すように、10 lxにおいてもその他の光源と比べて赤色の M 値が高いことに由来する。したがって、10 lx下においても赤色のカラフルネスが“色の質の因子”に影響を及ぼしたと考えられる。

以上の主観評価結果から、照度および分光分布が異なる照明下における“色の質の因子”の主観評価傾向は、光源の分光分布や赤色の演色色再現の特徴によっておおよそ説明できることを確認した。

(d) 主観評価値と $Gx_{(E)}$ の関係

“色の質の因子”の主観評価結果（因子得点の平均値）が $Gx_{(E)}$ と対応するかを検討した。図9は各光源の“色の質の因子”の因子得点の平均値を縦軸にとり、 R_a および $Gx_{(E)}$ をそれぞれ横軸に表したものである。図9（左）に示すように、 R_a は700 lx、10 lxともに因子得点の平均値と対応しない。これは、本実験で用いた8種類のテスト光源のうち、5種類の光源（②LED-RAGB、③LED-ROGB、⑤6色LED、⑥LED-BY、⑦LED-AGB）は R_a がほぼ同値（ R_a 82~86）であるにもかかわらず因子得点の平均値が大きく異なっていること、およびテスト光源の中で最も低い R_a を有する①LED-RGB（ R_a 21）の因子得点の平均値が最も高い値を示したことなどが原因である。すなわち、低照度下の美術鑑賞に適した光源を評価する指標として R_a は適

図9 “色の質の因子”の因子得点（平均値）と R_a , $G_{x(E)}$ の関係 左: R_a , 右: $G_{x(E)}$
 Fig.9 The relation between the factor score of “factor of color quality” and R_a , $G_{x(E)}$.

図10 各光源の相対損傷係数 D/lx ($FL-EDL$) = 100 左: 低級紙, 右: 水彩
 Fig.10 Relative damage coefficient of each light source.

していない。

一方、図9（右）に示す各光源の“色の質の因子”の因子得点の平均値と $G_{x(E)}$ の関係は、700 lx, 10 lx とともに強く相関している。また、2.3 の分光分布合成計算で得た3色混合光を再現した①LED-RGBは、照度によらず $G_{x(E)}$ および因子得点の平均値で最も高い値を示した。

以上のことから、“色の質の因子”の因子得点の平均値と $G_{x(E)}$ は良好に対応しており、2.3 で得た3色混合光の再現光である①LED-RGBは低照度下においてもその他の光源に比べ高い「色質」を有する光源であることが裏付けられた。

4. 光学的損傷係数の評価

美術品を光に曝露すると美術品に吸収された放射エネルギーが光化学反応をもたらし、変色などの損傷が生じる¹⁴⁾。美術館では展示資料である美術品の損傷を最小限にする必要があり、光源による変色の可能性を厳しく評価しなければならない。本稿では、ベルリン・モデル¹⁾の作用関数を用いて、2.3 の分光分布合成計算で得た3色混合光の再現光(①LED-RGB)の単位照度あたりの損傷係数を計算した。光源は、表5に示したテスト光源8種類および美術館で現在も用いられているハロゲンランプを対象とした。

ベルリン・モデルは露光による美術品の視覚的色変化、すなわち変色の可能性を予測するモデルであり、美術品を代表する材料の作用関数が提案されている。本稿では、主に近紫外域に応答する“低級紙（新聞紙）”，および光に対する応答度が日本画と同カテゴリーである“最高級紙上の水彩”の作用関数

を式（9）により算出した。

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \exp[-b(\lambda - 380)] \dots \dots \dots (9)$$

$S(\lambda)_{dm,rel}$ は作用関数であり、 b は材料ごとに与えられている定数である (b , 低級紙 = 0.038, 水彩 = 0.0115)。

損傷係数 D/lx (1 lx あたりの反応量) は、式 (10) により求めた。

$$D/lx = \sum_{380}^{780} E(\lambda) s(\lambda)_{dm,rel} \Delta\lambda / \sum_{380}^{780} E(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $E(\lambda)$ は同一照度で正規化した光源の分光分布、 $s(\lambda)_{dm,rel}$ は各材料の作用関数、 $V(\lambda)$ は標準分光視感効率を示し、 $\Delta\lambda$ は 5 nm である。波長範囲は 380 nm ~ 780 nm とした。

図10は各光源の低級紙および水彩の相対損傷係数を表しており、縦軸は光源の名称、横軸は④FL-EDLの D/lx を 100 としたときの各光源の相対損傷係数である。損傷係数の値が大きいほど、損傷の可能性が高いことを意味する。

図10（左）の低級紙において最も損傷係数が大きいのは⑧FL-WWであり、以下ハロゲンランプ、⑥LED-BY、④FL-EDL、①LED-RGB、②LED-RAGB、③LED-ROGB、⑤6色LED、⑦LED-AGBと続く。④FL-EDLよりも損傷係数が小さい光源は、すべてLED照明装置で作成した混合光であった。低級紙は紫外域～短波長域にかけて反応するため、短波長のエネルギーが小さい光源ほど損傷係数が小さくなる特徴を持つ。したがって、440 nm 以下にはほぼエネルギーを持たない混合光が有利となる

結果を示した。

図10(右)は水彩の損傷係数であるが、すべての光源が100前後の数値を示しており、低級紙に比べ光源間の差が小さい。これは水彩の作用関数が長波長側まで感度を持つため、光源の分光分布の影響が相殺されたことが原因であると考えられる。

以上から、①LED-RGBの損傷係数は美術館用蛍光灯④FL-EDLやハロゲンランプと比較して、低級紙では小さく、水彩ではほぼ同等であることを確認した。

5. 結論

本稿では、低照度下の美術鑑賞に適した光源の分光分布を検討するために、(1)筆者らが提案した色質評価数 $G_{x(E)}$ に基づいて分光分布を設計し、(2)分光分布合成計算で得た分光分布を再現したLEDランプ照明下で物体色の見えを評価することによって $G_{x(E)}$ が主観評価と対応するかを検証した。また(3)低級紙および水彩の作用関数を用いて、本稿で用いた光源の美術品に対する損傷の可能性を確認した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 6種類の単色光を合成して $G_{x(10)}$ が最大となる分光分布を求めた結果、赤色：630 nm、緑色：530 nm、青色：470 nmを合成した3色混合光で $G_{x(10)}$ が最大となった。
- (2) 分光分布合成計算で求めた最大 $G_{x(10)}$ の3色混合光を再現したLEDランプ(①LED-RGB)は、10 lx下においてその他の光源よりも高い「色質」を有していた。
- (3) 照度および分光分布が異なる照明下の「色質」の主観評価結果と $G_{x(E)}$ は良好に対応し、 $G_{x(E)}$ によって照度を考慮した美術館照明に適した分光分布を設計できる。
- (4) 光源①LED-RGBの損傷係数は、美術館・博物館用蛍光灯やハロゲンランプと比較して、低級紙では小さく、水彩ではほぼ同等である。

以上から、 $G_{x(E)}$ を最大化することによって求めた中心波長630 nm、530 nm、470 nmの3色混合光は、色の見え、および損傷に対する安全性から低照度下の美術鑑賞に適していると結論できる。

なお、ウコンやキハダなど特定の染料は400~500 nmの可視放射に反応して損傷を引き起こす³⁾ため、LEDランプによる美術品の光化学的作用については今後さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) CIE157: 2004. Control of damage to museum objects by optical radiation. CIE.
- 2) 中島, 澁田:「展示美術作品の最適視環境と美術館・博物館照明の色彩科学的関係性」, 女子美術大学研究紀要, 44, pp.79-89 (2014).
- 3) 石井, 森山, 戸田, 河本, 齊藤:「白色LEDランプに対する天然染料染色布とブルースケールの変退色挙動:美術・博物館用照明としての適性検証」, 照学誌, 91-2, pp.78-86 (2007).
- 4) 中島, 澁田:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究(3)―美術館・博物館展示照明における色質評価数の開発―」, 照学誌, 99-5, pp.263-269 (2015).
- 5) CIE No.13.3: 1995. Method of measuring and specifying colour rendering of light sources. CIE.
- 6) JIS Z 8726:1990. 光源の演色性評価方法. 日本規格協会.
- 7) JIS Z 9110:2010. 照明基準総則. 日本規格協会.
- 8) 中島, 澁田:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究―忠実色再現に基づく演色性評価方法と照度との関係―」, 照

学誌, 98-2, pp.68-73 (2014).

- 9) CIE 159: 2004. A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02. CIE.
- 10) 中島, 澁田:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究(2)―低照度下における色彩印象に対する赤色の影響―」, 照学誌, 99-2, pp.74-82 (2015).
- 11) Rea, M. S., and Freyssinier, J. P.: Color Rendering: Beyond Pride and Prejudice, Color Research and Application, 35-6, pp.401-409 (2010).
- 12) Royer, M. P., Wilkerson, A., Wei, M., Houser, K., and Davis, R.: Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape, Lighting Research & Technology, 49-8, pp.966-991 (2017).
- 13) Wei, M., and Houser, K., Systematic Changes in Gamut Size Affect Color Preference, LEUKOS, 13-1, pp.23-32 (2017).
- 14) 神庭:「博物館展示照明が色材料に及ぼす作用効果」, 照学誌, 74-4, pp.191-196 (1990).

(受付日 2018 年 12 月 5 日 / 採録日 2019 年 4 月 26 日)

中島 由貴 (正会員)

女子美術大学大学院

〒252-8538 神奈川県相模原市南区麻溝台1900
2015年, 女子美術大学大学院美術研究科博士後期課程修了。女子美術大学大学院研究員(2019年4月〜)。博士(美術)。照明学会, 日本色彩学会会員。

澁田 隆義 (専門会員)

女子美術大学大学院

(株)東芝, 東芝ライテック(株)に従事(〜2011年)。カナダ国立研究所(1982年〜1983年)。女子美術大学大学院教授(2011年〜2019年3月)。工学博士。東京理科大学・法政大学非常勤講師, 日本照明委員会元会長, 日本色彩学会元会長。