

高演色性LED照明による絵画の色覚空間における エントロピー計測と照明方法の評価

坂本 博康^{†1} 笠 駿介^{†1} 敷田 麻衣^{†1} 白川 康博^{†2}
加藤 隆之^{†3} 吉永 幸靖^{†1} 知足 美加子^{†1}

概要: 近年の低エネルギー消費化に向けて、美術館をはじめ一般の商店等においても展示用の照明を LED 光源へ置き換える動きが強まっており、そのための高演色性 LED ランプの研究開発が活発に進められている。

本報告では、特に絵画等の美術品に対する照明の光源や方法を画像解析の手法に基づき評価するための一指標を提案する。ヒトの視覚における XYZ 等色関数に従う色覚情報から $L^*a^*b^*$ 色差空間へ変換を行った後、この空間におけるヒストグラムのエントロピーを求め評価指標とする。これは、ヒトの知覚に与える色彩情報の多様さの指標であり、この観点から照明効果を評価する。重色の手法による油彩画の作品制作を高演色性 LED および昼白色蛍光灯の照明のもとで行った。これらの作品を対象とする評価実験の結果を報告する。

キーワード: 高演色性 LED, $L^*a^*b^*$ 等色空間, エントロピー, 透層技法, 照明効果の評価

Entropy Measurement in a Color Difference Space and Evaluation of Lighting Effects on Paintings by High Color Rendering LED's

Hiroyasu Sakamoto^{†1} Shunsuke Ryu^{†1} Mai Shikita^{†1} Yasuhiro Shirakawa^{†2}
Takayuki Kato^{†3} Yukiyasu Yoshinaga^{†1} Mikako Tomotari^{†1}

Abstract: In order to reduce energy consumption, art museums and also ordinary stores are replacing their display illumination by LED lighting. Researches and developments on high color rendering (HCR) LED's show active advances to supply these demands.

This report proposes an index for evaluating light sources and illuminating methods especially for art objects such as paintings. The index computes entropy of histogram in $L^*a^*b^*$ color matching space which is obtained from XYZ color matching functions of human color vision. The entropy tells us how diverse color information the displayed object has and evaluates the effect of illumination from this viewpoint. Art works on oil paintings were performed under both HCR LED's and fluorescent lights. Experimental results on evaluating these art works are reported in this paper.

Keywords: High Color Rendering LED, $L^*a^*b^*$ Color Matching Space, Entropy, Glaze, Evaluation of Lighting Effects.

1. はじめに

近年の社会の低エネルギー化に向けて多様な取り組みがなされている中で、照明の LED 化（特に白色 LED 化）は最近ますます加速度的に進められている。しかしながら、白色 LED に特有の光のまぶしさや照らされた物体色の他の光源からの違いなど、いくつかの欠点が生じつつあり、この欠点のために LED の導入をためらう場合も少なくないと考えられる。

このような場合の例として、美容や医療、多様な製品や商品の製造・制作の現場等がありえるが、特に典型的な例として各種の展示に関わる場、なかでも美術品の展示の場を挙げることができる。このような用途のために、高演色性の LED 照明の研究・開発が活発に行われている。照明による色の見えの良さを表す演色評価数には CIE や JIS により規格化された CRI (Color Rendering Index, または CIE Ra), QCS (Color Quality Scale) などがあるが、これらは光源自身

の演色性能の指標であり[1]、昼間の太陽光下で見た場合の評価が 100 となるように定められている。

現在、照明機器の各メーカーから示される美術館や博物館の照明計画の指針では、多くの考慮すべき指標が示されているが、色や見え方に関する指標には、色温度、平均演色評価数と特殊演色評価数、および放射熱による膨張・収縮や紫外線からの損傷防止を挙げるものも多く[2][3][4]、以下に述べる LED 特有のスペクトル特性を記載するものは多くない[5]。

人は太古の昔から太陽光の中で暮らし、その連続スペクトルの下で視覚の機能を進化させてきた。人工的な照明の発達過程において、白熱電球まではほとんど連続スペクトルを持つ光源が作られてきた。蛍光灯が出現してからは、短い波長の光で励起された複数の長い波長光の組合せにより見た目の白色光が得られているが、そのスペクトルの部分的に欠落した状態は太陽光の状態とは相当異なっており、その結果、物体の色が太陽光の下とは違って観察される状況が生じている。この違いは普通の LED 照明の下でもしばしば観察される。

^{†1} 九州大学 Kyushu University

^{†2} 東芝マテリアル株式会社 Toshiba Materials Co., LTD.

^{†3} 福岡教育大学 University of Teacher Education Fukuoka

本報告は、美術館等における美術作品の照明方法を評価するために、その展示状態において人間が知覚する色彩の多様性を指標とする方法を提案する。この方法は、前述のCRIやQCSなどの光源の評価指数とは異なり、ある展示物に当てる光源の種類や配置などによる作品の展示状態を総合的に評価する。具体的には、作品の展示状態を人間のXYZ三刺激値として入力した画像から、CIEのL*a*b*均等色空間へ変換して求めたヒストグラムを確率分布として、そのエントロピーにより色空間の多様性を評価する。

従来から、博物館や美術館の展示方法については学芸員をはじめとする専門家の多様な知見が蓄積されているが、照明方法に関しては主観評価に基づく経験によるものが大きいとされている[6]。また、美術館や博物館での展示照明では、舞台照明で用いられる特別な強調効果を極力避け、対象物が本来持つ自然な見え方と美しさを引き出す必要があると言われている。

作品展示だけでなく、作品の制作においても、照明は大きな影響を持つと考えられる。太陽光の下で制作された作品には太陽光による展示が望ましいが、現代の作品は蛍光灯等の下で制作されるものも多い。この場合も制作時と同じ光源での展示が望ましいと思われるが、制作と展示において異なるスペクトル特性の光源を使用すれば、特に悪い影響を受けると考えられる。

本研究では、透層技法による重色を駆使した油彩画の制作を、2通りの照明（昼白色蛍光灯、及び太陽光に近い連続スペクトル特性の高演色性LED）の下でそれぞれ行い、その定性的な評価を報告する。ここで、透層技法とは、油絵具をおつゆ状に溶いて透明に塗布する技法であり、異なる色を塗布することで、下層と上層の色が層状に重なり合って微妙な色合いを表現することができる重色の方法であり、絵画の標準的な手法の一つである。

以下、本報告の2節では国内外の美術館における展示用の照明方法の現況を著者らの調査した範囲で述べる。3節では、透層技法による油彩画制作について記し、各照明法に関する評価を述べる。4節では表色系および均等色空間を説明し、5節で色の多様性の評価法を提案し、実験方法と実験結果を説明する。6節で、考察とまとめを述べる。

2. 展示用照明の現況

従来の美術館や博物館における展示用照明はハロゲンランプが中心的役割を担っていた。その色温度は約2700K前後であるが、着色ガラスを装着して3000K～4000Kに調整した製品も存在する。

消費電力の低減のために高演色性蛍光灯も多用されており、蛍光物質の選択により相関色温度の範囲として約3000K（電球色）から7000K（クール色）が製造されている。普通の蛍光灯に比べれば、高演色性蛍光灯には可視光の範囲のスペクトルが幅広く含まれるが、明るさ感の増強や

色味の調節のために特定（3～4種類）のスペクトルのピークがその周りに比べて3～5倍の強度で含まれており、平滑な熱放射光源のスペクトルとは相当異なっている。

欧米では蛍光灯の使用が日本国内ほど多くないといわれる。また、欧米の照明における色温度の好みは国内より低い傾向があり、配光の方法も、日本の天井に設置した室全体の明かりに対して、部屋の端側に分散配置することが多いと言われている。

特に古い歴史を誇る欧州の美術館では外光を取り入れる傾向が強く、その自然光による演色性を最大限に利用できることから、館内の照明への関心と理解が意外に低いようである。曇天や日没による外光の明るさを補完するために照明を導入するのであるが、従来は通常の演色性の蛍光灯であったり、最近では省エネのためにLED照明の導入が始まっている。これらは外光の加算があれば、演色性が低くても絵画の美しさを損なうことは少ないが、外光が入らなくなると、絵画本来の、すなわち作者の意図した色彩表現を著しく損なうものとなる。このため、自然光に近い連続スペクトルのハロゲンランプを使うことが多いが、これは原理的に低い色温度となるため、必然的にオレンジ色の照明となる。この光は、白いカーテンや白い襷褌さえも黄ばんだ背景に埋めてしまう。フィルターを通してハロゲンランプの色温度を高めることもできるが、自然な光（太陽光のスペクトル）からずれるため、絵画に一方的な演出を施すことになる。いずれにしても、太陽光下で制作された絵画は、同じ光で照らすのが最も作者の意図を表現できると思われる。ことに透層技法による重色を駆使した油彩画は、各層で光の吸収・反射が幾度となく繰り返された結果として深い色合いを表現しているので、鑑賞に使われる光は特に重要な意味を持つことになる。

以上のような歴史を持つ欧州においても、近年の日本のLED技術が高く評価されると共に、照明が絵画にもたらす本質的な色彩の表現力が見直されつつある[7]。

3. 重色手法による油彩画の制作

絵画制作の重色の手法は、幾層にも絵具を塗り重ねることにより深く微妙な色合いを表現する方法として油彩画や水彩画などで用いられる。油彩画では特に透層の重色とは限らず、多くの色の絵具を多層に塗り重ねる描画法が一般的に行われ、重ね塗りの厚みによる立体的な画肌表現も重要な一手法である。透層による重色の場合は各層が非常に薄く、ずっと下方の層の色までが上層の色に影響を与えるように描くため、色を層状に重ねる混色の手法といえる。

重色の手法で描かれた油彩画では、各層の色を再現できる高演色性照明の効果が特に表れやすいと想定し、高演色性LEDと昼白色蛍光灯の異なる二種類の下でなるべく同じ構図と配色を持つように油彩画の制作を行った。図1にそれらの油彩画を示す。



(a) 昼白色蛍光灯下の描画 (b) 高演色性 LED 下の描画
 図 1. 制作された油絵

重ねた層の数は最小で 8 層, 最大で 19 層, 平均でおよそ 14 層である. 重層の手法に関して, 具体的にはテンペラ絵具と油絵具を併用して描いているため, 部分によってはテンペラ絵具の半透明な白色層と油絵具の透層が交互に重なっている. 白色層が少ない影の部分では色が下層から上層まで続く重層的な混色を見ることができる.

二種類の照明での制作環境は, 照度 700Lx 程度でそろえている. 色温度に関しては, 機材の関係上正確に合わせることができず昼白色蛍光灯では 4000K, 高演色性 LED では 3700K を使用した.

二点の作品は, 同じ構図と配色をおこなっているが, まったく同一の作品を制作しているわけではなく, それぞれの照明下で最良と感じる描画を行うことで, 完成作品に相違がでることを予測して取り組んだ. 高演色性 LED 下での制作では, 慣れた蛍光灯での制作に比べて, 微妙な色の変化を目視しながら進めることができた. そして完成した作品は, 色の高い再現性によって重層での混色効果が効果的に表れていると感じる. 逆に蛍光灯下でこの作品を目視すると, 色温度の差もあるが, ややあっさりした色合いに感じた.

作品の比較に関しては, 同じように描いた作品が同一の光源の下で見比べた際に色の見え方が異なることが確認できた. もともと色温度が異なる環境で制作しており, 周りの環境に大きく影響を受ける視覚では, 色温度の違いが明らかに関係しているため比較の根拠自体は弱い. しかし, 昼白色蛍光灯下で制作した作品を高演色性 LED で目視した際は, 意図した完成図よりも良い意味でより深みのある色を感じる異なった見え方をしていた.

また, 今回の作品比較からは逸れるが, 2 台の異なる色温度の高演色性 LED を照射することで, 寒色系と暖色系の両色が映えて輪郭がはっきりと描き出されるという意見がでてくる. 参考として試しに 5000K と 4000K の LED を用いて作品を照らしてみると, より色の再現性が増したように感じた. 美術館や画廊での作品展示空間では, 蛍光灯と電球色のスポットライトが併用されることが多いが, 制作時においてもこのような二種類の色温度の併用が彩色

を行う上で有効であり, 展示空間と同じ照明環境にそろえることで制作時と展示時の見え方の差を埋めることができると考えている.

4. 表色系と均等色空間

本節では色の体系的な表示のための表色系についてまとめ, 均等色空間のうちでも新しい CIEDE2000 を説明する. 以降の節で, この均等色空間内に観測対象画像の画素ごとの色を投票してエントロピーを求め, 色の多様性を評価する尺度として利用する.

表色系は大きく 2 つに分類されている. まず, 人の色知覚から導出された顕色系の分類があり, その代表例として, マンセル表色系があげられる. この表色系では色相 H を 20, 40 あるいは 100 に分割して, 明度 V を 0~10 の値で表し, 彩度 C の分割数は H と V の値により異なるが 1~24 に分割して表される. 色彩に関わる多様な業種における利便性の高い使用のために, 色標本の総数が数十から 2000 余りまで, 多くのマンセル色表 (色票) が市販されている.

次に, 混色系に分類される表色系は心理物理学的に導出されたものであり, CIE XYZ, CIE LUV, CIE LAB など多くの表色系が考案されている. この後の 2 者は最初の表色系を基に, 感覚的なある色差が色空間内のなるべく同じ距離に対応するように, 均等色空間を求めたものである.

4.1 CIE XYZ 表色系

この表色系は, 加色混合に関する心理物理実験の結果に基づき, 取扱いが容易となるようにこれを修正した規格として, 国際照明委員会 (CIE) により 1931 年に採択されたものであり, CIE1931 表色系とも呼ばれる.

光の波長を λ [nm] としたとき, ある分光分布 $P(\lambda)$ に対するこの表色系の刺激値 X は,

$$X = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

で求められる. Y と Z も同様の式で表される. 加重関数 $\bar{x}(\lambda)$ (および $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$) は CIE XYZ の等色関数と呼ばれ (図 2 の点線), それぞれ人の赤, 緑, 青の色知覚に関わる錐体細胞のスペクトル応答と関連がある.

色彩関連の解説で多用される xy 色度図は, 上の X, Y, Z をそれらの合計値 (光の明度に相当) で割って正規化した色度 x, y, z のうち x, y を平面上の 2 座標軸にとったものであり, その馬蹄形の内部座標により明るさを除くすべての色を表示できる.

4.2 CIE LUV 表色系

これは CIE が 1976 年に規格化した表色系であり, X, Y, Z から次式の L^*, u^*, v^* として求められる.

$$L^* = 116 h (Y/Y_n) - 16$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_n)$$

ここで、 $u' = 4X(X + 15Y + 3Z)$ 、 $v' = 9Y(X + 15Y + 3Z)$ であり、 Y_n, u'_n, v'_n は基準となる純白色に対する値を X_n, Y_n, Z_n として、あるいは、これらから上式で求めた値を表す。関数 $h(t)$ は次式で与えられる。

$$h(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & t \geq 0.008856 \\ 7.787t + 16/116, & t \leq 0.008856 \end{cases}$$

L^* は明度の成分を表し、 u^*, v^* は色彩の成分を表す。 u^*, v^* を使えば、色相の角度は $\tan^{-1}(v^*/u^*)$ で、クロマ(彩度)は $(u^{*2} + v^{*2})^{1/2}$ で表される。また、 u', v' を2座標軸にとった色平面は $u'v'$ 均等色度図と呼ばれ、4.1の xy 色度図とは少し異なる馬蹄形をしており、 xy 色度図とともに幅広く利用されている。

4.3 CIE LAB 表色系

これもCIEが1976年に規格化した表色系であり、 X, Y, Z から、4.2と同じ明度指数 L^* および次のクロマ指数 a^*, b^* として得られる。

$$a^* = 500 \{ h(X/X_n) - h(Y/Y_n) \}$$

$$b^* = 200 \{ h(Y/Y_n) - h(Z/Z_n) \}$$

この表色系においても4.2と同様に、色相角 h と彩度(クロマ) C^* はそれぞれ $h = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ 、 $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ で表される。しかし、上記の xy 色度図や $u'v'$ 均等色度図が示す馬蹄形とは異なり、CIELABの a^*b^* 平面はほぼ円環状に色相とクロマが広がっており、大まかに言えば、 a^* の正・負の方向がそれぞれ赤・緑の色相を、 b^* ではそれぞれ黄・青の色相を表す。

以上の式で、 $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n$ はすべて0~1の値をとり、従ってその関数 $h(t)$ も0~1となるので、 L^*, a^*, b^* の値域はそれぞれ0~100, $\pm 500, \pm 200$ となる。これから、もし $L^*a^*b^*$ 空間が正確な均等色色空間であれば、 a^*, b^* は L^* に比べてそれぞれ10倍、4倍の感覚上の分解能を持つことになる。この表色系による2色間の色差は、 L^*, a^*, b^* それぞれの差 $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$ を用いて次式で得られる。

$$\Delta E^*_{ab} = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

この表色系はクロマ C^* と色相角 h による極座標表現として、 L^*C^*h を用いて表記されることもある。実際、次項の色差式はこの表記の上でより良く定式化される。この表現による2色($L_1^*C_1^*h_1$), ($L_2^*C_2^*h_2$)間の各成分の差は、先の2成分の差、

$$\Delta L^* = L_1^* - L_2^*, \quad \Delta C^* = C_1^* - C_2^*,$$

と共に、色相差(Metric Hue-Difference) ΔH^* は、上式の成分を用いた極座標の直交系に添う四面体の辺の長さに関する公式から、次式で計算される。

$$\begin{aligned} \Delta H^* &= \{ \Delta E^*_{ab^2} - (\Delta L^{*2} + \Delta C^{*2}) \}^{1/2} \\ &= (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C^{*2})^{1/2} \end{aligned}$$

4.4 CIEDE2000 色差式

CIE LABが規格化された後、いろいろな心理物理的実験の結果から、この表色系における2色間の色差は必ずしも均等ではないことが判った。この不均等性を上記の C^*h 極座標上で述べると次のようになる：同じ色と知覚される等色領域は C^* 、 h の直交座標軸をそれぞれ長軸短軸とする楕円で表され、 C^* の増加と共に両軸の長さが概ね増大する。また、 b^* の負方向に添う領域では両軸が少なからず左向きに回転するという不規則性が見られる。

この不均等性と不規則性を補正するため、CIELAB空間の上でCIEDE2000色差式 ΔE_{00} が考案されている[8][1]。

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)$$

ここで、 $a' = a^*(1+G)$ 、 $G = 0.5[1 - \{\bar{C}^{*7}/(\bar{C}^{*7} + 25^7)\}^{1/2}]$ 、 $b' = b^*$ 、 $L' = L^*$ 、 $C' = (a'^2 + b'^2)^{1/2}$ 、 $h' = \tan^{-1}(b'/a')$ であり、 $\Delta H'$ は前項4.3の ΔH^* の式において C^*, a^*, b^* をそれぞれ C', a', b' と置き換えて求められる。また、バー付の記号は、対象2色の当該変量の平均値を表し、 h' の単位には角度を用いる。上式の加重係数 S_L, S_C, S_H は次式で得られる。

$$S_L = 1 + 0.015 (\bar{L}' - 50)^2 / \{20 + (\bar{L}' - 50)^2\}^{1/2}$$

$$S_C = 1 + 0.045 \bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015 \bar{C}' T$$

ここで、余弦関数の引数は角度で与えられるとして、

$$\begin{aligned} T &= 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30) + 0.24 \cos(2\bar{h}') \\ &\quad + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63) \end{aligned}$$

パラメトリック係数 k_L, k_C, k_H は特殊な観察条件のための補正係数であり、標準条件では1に設定される。本実験ではすべて1としている。 R_T は負の b' 軸のまわりで楕円体の主軸に回転を与えるもので、次式で計算される。

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C$$

ここで、

$$\Delta\theta = 30 \exp\{-(\bar{h}' - 275)^2 / 25^2\}$$

$$R_C = 2 \{ \bar{C}'^7 / (\bar{C}'^7 + 25^7) \}^{1/2}$$

加重係数 S_L, S_C, S_H の式は等しい色差を示す楕円体の3軸長の変化を示し、大まかに言えば、楕円体の体積はLAB空間の中心($L'=50, h'=C'=0$)付近で小さく、周囲になるほど大きい。また、この3軸は $a'b'$ 平面つまり $C'h'$ 平面内では傾くが、 L' 方向には傾かないことが判る。

本報告では、この色差式に従ってLAB空間を標本化し、色彩の多様性を評価する。

5. 均等色空間のエントロピーによる色彩評価

本節では、人の視覚特性に基づいて絵画の展示照明法の評価を行うために、展示状態における絵画を撮影した画像から CIEDE2000 均等色空間におけるエントロピーを求めて、指標を構成する。以下にその各段階を説明する。

5.1 CIEXYZ 等色関数に従う画像の入力

市販の高価な測定装置には XYZ 等色関数の特性を持った画像入力機能を有するものが存在するが、本報告ではより安価な写真用カラーフィルタを用いて、近似的にこの特性を得た。撮影に用いた計測用カラーカメラは東芝テレー(株)製の DU657MC であり、この CMOS イメージセンサの画素数は 2560×2560 である。

図 2 は本実験で使用した XYZ 等色関数の近似曲線(実線)と CIEXYZ 等色関数(視野角 2 度, 点線) [1]を示す。小さな近似誤差が見られるが、2 種類の CIEXYZ 等色関数(視野角 10 度の $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ と 2 度の XYZ)の間の差より小さく、個人差の範囲に入ると想定している。

図 3 には、図 1(b)の油絵画をこの近似等色関数により撮影し、左から X, Y, Z の順に白黒濃淡画像として並べている。用いた照明は、色温度 4200K と 3000K の高演色性 LED である。2 種の色温度の照明に対する図 1(b)の色彩の分布が良く反映されている。

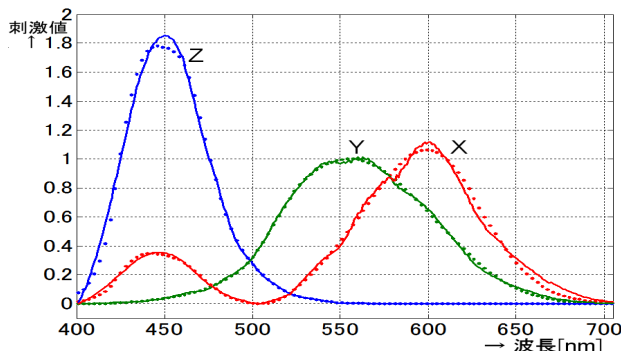


図 2. CIE1931 XYZ 等色関数とその近似曲線

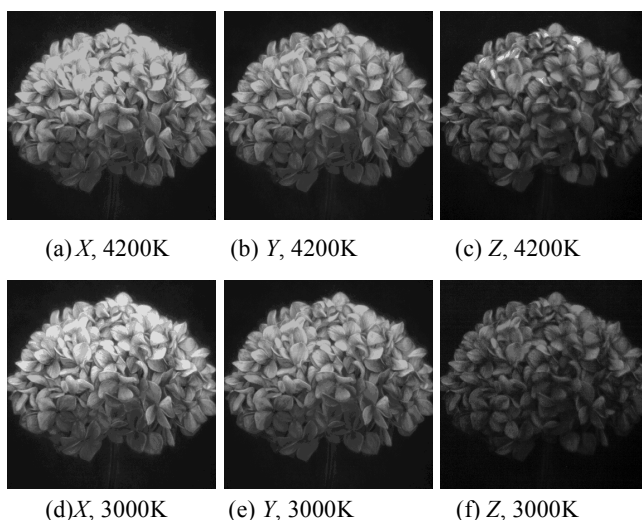


図 3. 近似的 XYZ 等色関数による入力画像

5.2 CIELAB への変換と等色差領域への投票

CIELUV や CIELAB における基準白色に対する X_n, Y_n, Z_n の値は、実際には CIE 規格の標準光源を MgO_2 などの純白色物質に照射して求められ、物体の色を光源の分光分布の影響なしに計測する際には必須である。しかし、本報告では光源も含めた反射光の評価を行うので計測不要であり、 X, Y, Z のとり得る最大値である 255 に設定する。

XYZ 表色系として取得した画像から、4.2 により LAB 表色系の L^*, a^*, b^*, C^*, h , さらに L', a', b', C', h' が求められる。図 3(a)~(c)から得た L', a', b' の画像を順に図 4(a),(b),(c)で示す。 L', a', b' の値の[最少, 最大] はそれぞれ [12.6, 100], [-149, 70.1], [-37.9, 49.8] である。この図の表示における明度の [最少値, 最大値] を、 L', a', b' でそれぞれ [0, 100], [-20, 200], [-50, 200] とした。これを 3 次元の空間に投票してヒストグラムを求める。

まず、CIEDE2000 色差式により投票のビンを作成する。この式は、隣接する 2 色により体積や主軸方向が変化する楕円体を表している。しかし、3 次元空間の中で 1 個のビンは最少でも 6 個のビンと隣接する ($a'b'$ または $C'h'$ 平面に限っても最少 4 個)。従って、隣接する全楕円体との位置関係に対して、それらの楕円体を互いに接触配置する問題の解決は極めて難しい。また、楕円体間を正確に接触配置できたとしても、隙間は残る。

そこで、本報告では、生成される楕円体の配置が重複や隙間をなるべく生じないように、次の方針で楕円体の中心位置を決定する。まず、 L' には a', b', C', h' の影響はないので、 L' の中央値 50 から上下へ向け、4.4 の S_L の式に従って数値列を決める。 a', b', C', h' については、まず $b=0$ として $C'=a'$ を S_C の式に従って [-500, 500] の範囲で決める。次に、上で決まった点 C' を通る同心円を描き、各円周上で S_H の式に従って点を取っていく。但し、 b' については [-200, 200] の範囲だけを求めればよい

上の方法で、 $\Delta L' = \Delta C' = \Delta H' = 1$, つまり $\Delta E_{00} = \sqrt{3}$ として構成された均等色差の領域の $a'b'$ 平面 ($L'=50$) における中心付近の様子を図 5 に示す。各等色領域を示す楕円の主軸の長さの変化、および色相角 275 度周りの主軸が極座標の直交軸方向から左向きに回転する様子が観察できる。このとき、 L' の分割数は 39、 L' の各分割について 3970 個の楕円体の領域が求められた。

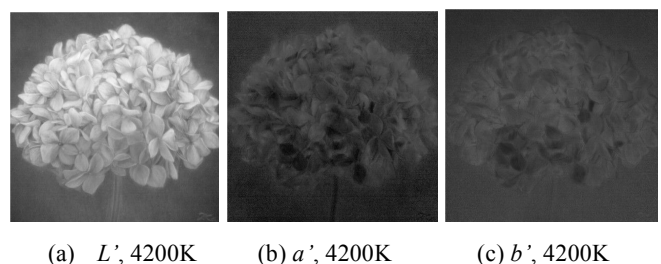


図 4. L', a', b' に変換された画像

以上のように構成された等色差領域のうち、各画素値から最も近いものを選び投票する。計算の効率化のために、各画素の L', a', b' の近傍領域（直方体）を切り出し、その中にある楕円体の中心との ΔE_{00} を求め、最小の色差値を選択している。

図6は、図4から求めた3次元 (L', a', b') 空間のヒストグラムを、 L' について累算して得た2次元 (a', b') 空間上のヒストグラム（縦軸は対数目盛）である。

5.3 実験方法

実験に用いる絵画は3節の油彩画作品2枚であり、一方は昼白色の蛍光灯下で、他方は太陽光に近いスペクトルを持つ高演色性LEDの下で描かれている。これらの撮影時の展示用照明には、電球型蛍光灯（東芝EFA15EN/10-PD, 10W）、電球型一般用LEDランプ（OHM LDA6N-G9, 5.5W）、高演色性LED電灯（スワン電器TM-20(5000K), TM-22(4200K), TM-23(3000K), 10W, LED素子は東芝マテリアル（株）製の5種類の器具を用いた。蛍光灯と一般用LEDランプは絵画の正面上方から照らし、後者の高演色性LEDは左右両側から同一または異なる色温度の光を当て、暗室内で黒い布の上に絵画をおいて撮影された。左右で異なる色温度による照明法は、3節の最後の段落に述べた現象を調査するために用いた。

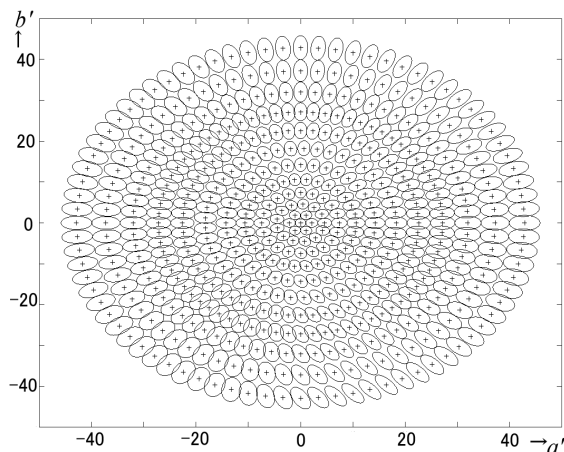


図5. CIEDE2000の $L'=50$ における等色差領域

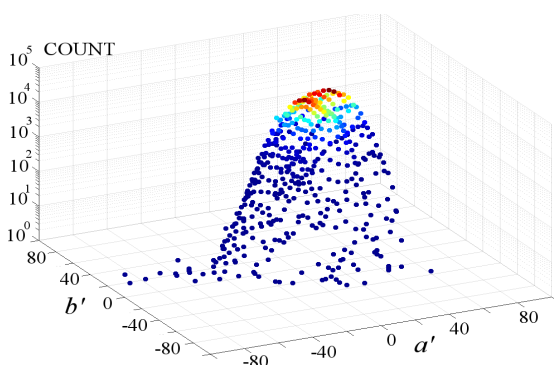


図6. 油彩画（図1(b), 図4）から得た3次元 (L', a', b') のヒストグラムを2次元 (a', b') に累積した図（縦軸:対数）

表1. エントロピーの計測結果（単位:bit）

No.	展示光の種類	図1(a)の結果	図1(b)の結果
1	3000K+3000K	8.014	7.605
2	3000K+4200K	8.035	7.734
3	3000K+5000K	8.041	7.729
4	4200K+4200K	7.983	7.659
5	4200K+5000K	7.926	7.664
6	5000K+5000K	7.990	7.739
7	蛍光ランプ	8.190	8.044
8	一般用LED	8.372	8.367

図7は用いた光源の分光分布特性のいくつかを示す。いずれも横軸は光波長[nm]、縦軸は光の相対強度である。図(a), (b), (c)は高演色LED単独であり、色温度がそれぞれ5000K, 4200K, 3000Kである。図(d)は5000K, 3000Kの高演色LEDを両方点灯、図(e)は一般用LED、図(f)は蛍光ランプである。相対色温度は(a)~(f)までそれぞれ4880K, 4280K, 2860K, 4340K, 5910K, 4750Kであった。

5.4 実験結果

表1にはいろいろな展示光に対するエントロピー計測の結果をまとめている。まず蛍光灯と一般用LEDの展示光下では、2枚の油彩画とも、高演色性LED下に比べて主観的に豊かな色彩感覚を感じないが、この感覚に反して高いエントロピーの値を得ている。この原因には、スペクトルの隙間を持つ照明下の画像に対してXYZ等色関数を近似する際に、画像のノイズが大きく増強される影響が挙げられる。実際、この処理の過程で得られた画像に相当強いノイズを含むものがしばしば見られる。

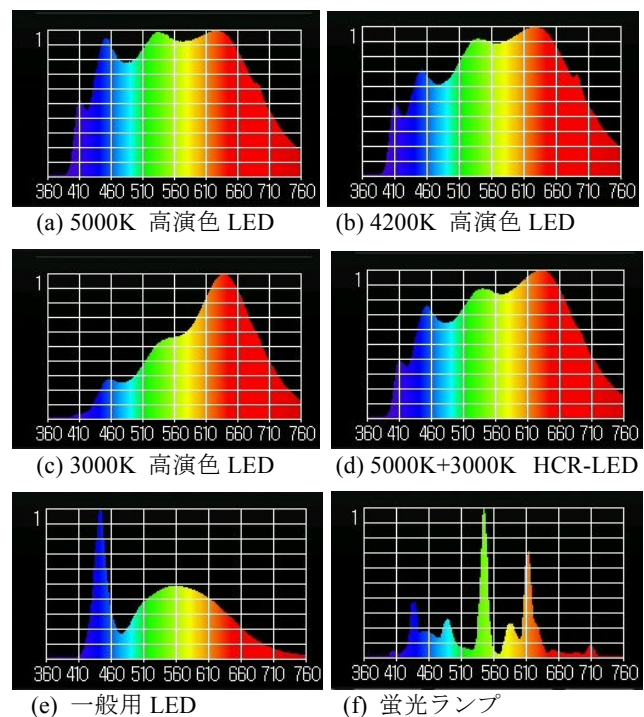


図7. 使用した光源の分光分布特性

表1の高演色性LED照明下の結果は、蛍光灯下の制作作品のほうが高い。これは3節の最後から2段落目に述べた「深みのある色」の印象とよく一致している。また、概して色温度の異なる照明の下でのエントロピーの方が高い傾向がある（これに反する結果もある）。事実、この計測結果にも前述のノイズが少なからず影響を与えている。

6. まとめ

美術作品をはじめとする多様な展示の場における照明の光源やその方法を定量的に評価する目的のために、人間の色覚空間内にとられたCIEDE2000規格に基づく均等色差領域を用いた色情報の多様性を評価するエントロピー指標の提案を行い、重色の手法を駆使して描かれた油彩画を対象に行った実験結果を報告した。

エントロピーの計測結果は、高演色性LEDについて概ね予想していた結果を得たが、蛍光灯と一般用LEDについては合理的な結果は得られていない。その原因の一つは前述のようにノイズである。このノイズの影響を減らすためには、撮影時において光量やシャッタースピード等を調整することが有効である。また、XYZ等色関数の近似誤差を減らすように、その近似方法を改善する必要がある。

元来、人間の色感覚は初めにXYZ等色関数のように幅広い帯域を持つものから順次処理されるので、これによって元の絵画などが有する詳細なスペクトルの構造は平滑化されてしまう。この平滑化は蛍光灯のような隙間だらけのスペクトルでも人間には白色と見える原因である。このような広帯域特性を経由すれば微妙な色合いの獲得や識別は困難となるので、近年の高度な色彩の処理にはマルチスペクトル画像処理の手法が多用されている。しかし、一種のジレンマではあるが、人の受ける色彩感覚をベースに物の見え方を評価する方法を考察するためには、人の感覚について構成されている理論を利用することは避けて通ることができない。

今回の評価法では、絵画の画面内の色彩配置など位置情報を全く考慮していない。今後は、上記の改善項目を解決すると共に、色彩配置の位置情報や人の色彩感覚に関わる他の要因を取り込んだ評価指標を考える必要がある。

参考文献

- [1] 日本色彩学会編. 新編色彩科学ハンドブック [第2版]. 東京大学出版会, 2011.
- [2] “美術館・博物館の照明”. <https://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/document/0209.html>, (参照 2016-12-05).
- [3] “美術館・博物館照明”. http://www.iwasaki.co.jp/info_lib/tech-data/plan/display/01.html, (参照 2016-12-05).
- [4] “LED照明施設例集 3)美術館・博物館”. http://jirei.tlt.co.jp/index.cgi?mode=detail&kt=01_01_06&id=2086, (参照 2016-12-05).
- [5] 山川昌彦, 谷口淳二. 自然光のスペクトルを再現した紫色励起白色LED“TRI=R”. 東芝レビュー. 2015, vol.70, no.11, pp.34-37.
- [6] 藤原工. 学芸員のための展示照明ハンドブック. 講談社, 2014.
- [7] “I LED di Rubens”. http://www.domusweb.it/it/notizie/2016/11/23/toshiba_materials_tri_r.html, (参照 2016-12-05).
- [8] Luo, M. R., Cui, G. and Rigg, B. The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula : CIE2000. Color research and application. 2001, vol.26, no. 5, pp.340-350.