高演色LEDで照明された絵画の均等色差空間における 色彩エントロピーと色彩多様性の評価

Evaluating Color Diversity by Color Entropy in an Equi-Color-Difference Space for Paintings Illuminated by Highly Color Rendering LEDs

正会員 坂本博康^{†1}, 白川康博^{†2}, 加藤隆之^{†3},
正会員 井上光平^{†1}, 笠駿介^{†4}, 知足美加子^{†1}

Hiroyasu Sakamoto^{†1}, Yasuhiro Shirakawa^{†2}, Takayuki Katoh^{†3},
Kohei Inoue^{†1}, Shunsuke Ryu^{†4} and Mikako Tomotari^{†1}

あらまし 近年の省エネルギー化に向け、美術館等の展示用照明をLED光源へ切り替える動きが加速化され、高演色(HCR)LEDの研究開発が急速に進んでいる。本論文は、照明展示された絵画の画像解析により、その絵画が人の色覚に与える色彩の多様性を評価する一指標を提案する。展示絵画のCIE XYZ画像からLAB画像へ変換した後、CIE DE2000均等色差空間内の画素頻度分布から確率分布を求め、色彩エントロピーと色彩多様度を新しく定義する。これを視覚系が受け取る色彩情報の多様性指標として用い、展示物の色の豊富さを定量的に評価する。4~93色の色紙を用いた実験から、提案指標の有効性が示された。さらに、HCRLEDまたは昼白色蛍光灯の照明下で制作された2枚の油彩画をHCRLEDまたは一般のLEDで照明した実験から、絵画制作と鑑賞の両方におけるHCRLEDの感性的な優位性を裏付ける数値結果が示された。

キーワード：高演色(HCR)LED、CIE DE2000色差式、色彩エントロピー、色彩多様度、照明設計の評価

1. ま え が き

近年の省エネルギー化に向け、照明のLED化は最近ますます加速されているが、従来の白色LEDに特有な色の見えの欠点から、LEDの導入を控える例も多い。色を重視する分野として、例えば美術品等の展示が挙げられる。このため高演色性(Highly Color Rendering: HCR)LEDの研究開発が活発であり、多様な特性の光源が開発され、その応用が急速に広まっている^{1)~3)}。

照明光源の発色の良さを表す演色評価数には、CIE(国際照明委員会)やJIS等の規格としてCRI(Color Rendering Index, Ra)が現在も主流である。しかしながら、白色LEDに用いるには多くの問題点が指摘されている⁴⁾。最近、新たな白色LEDの評価指標がCIEから提案されたが⁵⁾、その利用は限定的である。他方、美術館照明用LEDのためには、CIE CAM02⁶⁾色空間に基づく色質が光源の評価数

として提案されている⁷⁾。

展示の現場では、照度、色度、輝度、演色評価数、色温度等の測定値を参考に、照明具の種類や配置などが決められる。そこでは学芸員など展示担当者の知識や経験による感性的、主観的な判断の占める役割が大きい⁸⁾。一方、最近LEDの特性が多様化し、展示照明設計の可能性や複雑度が高まったと言われる⁹⁾。LEDによる照明設計の多くの研究は心理物理学的な主観評価に基づき^{10)~12)}、参照される客観的指標は上記の照度などに限られるので、色彩の豊かさに関する指標が望まれる。

他分野における豊かさ指標の例では、生態学の生物種の豊かさである種の多様性の指数として、情報エントロピーによるShannon-Weaver指数が知られている¹³⁾。また情報美学の分野では、絵画の情報エントロピーを色覚理論に準拠しない色空間の離散的確率分布から計算し、画家の色彩分析に応用した研究がある¹⁴⁾。画像や光学の分野では、色覚理論の最新の色差式により自然画像¹⁵⁾や光源¹⁶⁾が含む色彩の総個数を求めた研究もある。

本論文は、ある照明環境下で絵画等の展示物を鑑賞したときの色彩の豊かさを、色覚理論および情報エントロピーに基づいた“色彩の多様性”として定量的に評価するための一指標を提案する。色覚の色識別機能をCIELAB色空間のCIE DE2000色差式⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾に従う均等色差領域への

2018年10月12日受付, 2019年3月5日再受付, 2019年5月15日採録

†1九州大学 大学院芸術工学研究院

(〒815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1, TEL 092-553-4512)

†2東芝マテリアル(株)

(〒235-8522 横浜市磯子区新杉田町 8, TEL 045-770-3142)

†3福岡教育大学

(〒811-4192 宗像市赤間文教町 1-1, TEL 0940-35-1200)

†4九州大学 大学院芸術工学府

(現在 小糸製作所(株))

分割と量子化で表し、展示絵画の CIE XYZ 画像の各画素値から、明暗を含む 3 次元 LAB 色空間の頻度分布を求める。その情報エントロピーにより色彩エントロピーと色彩多様度を新たに定義して、展示品の色および照明の分光特性や照度分布等の特性を含めた色彩の多様性を評価する。

以下、2 章では本研究で測定対象とした油彩画の特性、およびその制作・展示用の照明の条件等について述べる。3 章では LAB 色空間を均等色差領域へ分割する方法を示し、4 章で色の多様性を色彩エントロピーと色彩多様度と呼ぶ指標で評価する新しい方法を提案する。5 章の実験では色紙（4～93 色組）と油彩画 2 枚を 3 種類の相関色温度（CCT）および 2 種類の LED で照明し、本提案法の有効性を検証する。油彩画の制作に用いた照明の効果も評価する。6 章でまとめを述べる。

2. 油彩画の制作と制作用・観賞用の照明

本研究では、提案指標の評価実験のために多様な色彩を呈する計測対象として、重色手法による油彩画を制作し検証する。この手法では異なる色の油絵具が幾重にも層状に塗布されるので、各層で光の吸収・反射が幾度も繰り返され深い色合いの混色を表現できる。従って、他の手法より制作と展示の光の性質は特に影響が大きい。同じアジサイを昼白色蛍光灯（ $Ra=80$ ）と HCRLED（ $Ra=97$ ）の下でそれぞれ描いたものを図 1 に示す。重ねた層の数は最小で 8、最大 19、平均約 14 である。両油彩画の表面の凹凸は、微細なものを除き見られない。

2 種類の照明の照度をサイズ 18×18 [cm] の作品中央で約 700 [lx] に揃えて制作し、その時、作品の（上部、下部）の照度は蛍光灯で約 (790, 670) [lx]、HCRLED では約 (760, 660) [lx] であった。両照明で上下 14 % 前後の照度差にも関わらず、制作中、作者はこの上下差を明るさ感の違いとして全く認識しなかった。現行機材の制約上、蛍光灯の CCT は約 4000 [K]、HCRLED では約 3700 [K] だった。先に蛍光灯下で図 1(a)（油彩画 a）を完成後、HCRLED 下で図 1(b)（油彩画 b）を制作した。

作者は両油彩画をできるだけ同じ構図と配色となるよう制作したが、全く同一の油彩画を完成しようと努めたわけではなく、各照明の下で最良の発色と感じる描画を行い、完成作品に生じる若干の相違を許容した。油彩画 a の制作時に比べ、油彩画 b の制作では HCRLED の下で微細な色の変化をより細かく見分けながら描画することが可能であった。

完成後の 2 作品を制作時の各光源下で比較すると、油彩画 b は油彩画 a に比べ、より効果的な重層の混色が目視で確認できる。他方、油彩画 b を蛍光灯下で見ると、HCRLED に比べ、ややあっさりした色合いに感じられる。また、油彩画 a を HCRLED 下で見ると、蛍光灯に比べより深みのある色が認められた。以上は作者の主観的・定性的な記述だが、制作過程及び完成品ともに HCRLED の方が蛍光灯よりも多様で見分けやすく深い色彩を視認可能であった。こ

のような感性上での優位性は、5 章の比較実験でも数値的に検証される。

この優位性の主な要因は、HCRLED が持つ昼光（日光＋天空光）に近い分光特性にあると思われる。実際、美術の領域では昼光は最上質の光とされる。多くの美術館では積極的に展示用の昼光を取り込む工夫を施している。作品制作時のアトリエの採光でも同様に、昼光を北側の高い窓から取り込むことが定石の一つである。

3. CIE LAB 色空間の均等色差領域への分割

CIELAB 色空間は CIEXYZ 色空間から付録の式（付・1）で求められる。CIE DE2000 色差式（付・3）は、一定の色差 ΔE_{00} と平均色 $(\bar{L}', \bar{C}', \bar{h}')$ を持つような 2 色組の集合が形成する楕円体の表面を表す。この色空間内に一定色差の楕円体を詰め込めれば、色彩空間を均等色差領域に分割し、ある色データ (L', C', h') に対して最小の色差を与える“代表値” $(\bar{L}', \bar{C}', \bar{h}')$ で置き換える量子化を実行できる。楕円体を隙間と重複が共に全く無いように配置することは不可能であるから、できるだけ密で一般的な配置をとり余分な隙間や重複を生じないという密接配置条件を満たすよう、以下の手順 (i)～(v) で均等色差領域に分割した。

(i) : L' の代表値 $\bar{L}'$ は、 C', h' とは独立に、与えられた ΔE_{00} 、 $\Delta C' = \Delta H' = 0$ とした式（付・3）、式（付・5）を用い、 $\bar{L}'$ の中心値 50 から上下に $\bar{L}'$ を逐次計算して求められる。

(ii) : C', h' （彩度、色相角）の均等色差領域は、式（付・3）で $\Delta L' = 0$ とした楕円を密接配置して求められる。まず、 C', h' 空間（ a', b' 空間）の原点（ $C' = a' = b' = 0$ ）を中心（代表値）とする直径 ΔE_{00} の円を置く。以降、1 周回を単位として彩度 $\bar{C}'$ を増加させるに伴い、式（付・3）の楕円で既設の楕円群（1 周目は円）の周りを囲み、均等色差領域への分割を順次拡張していく。

(iii) : 1 周回毎に密接配置条件の配置を得る手順を示す。まず式（付・3、付・6-7）に従う楕円の周列を、その 1 周上で隣合う楕円が接し、同時に内側の近傍の楕円にも接する位置に、色相角 $\bar{h}'$ が 360 度回転を 1 つ超えるまで順に作る。この楕円列の最後尾 2 個の内、その中心の $\bar{h}'$ が最初の楕円のそれに近い方（ N 番目とする）を選び、これと最初の楕円中心の $\bar{h}'$ との差 θ を求め、 i 番目（ $i=2, \dots, N-1$ ）の $\bar{h}'$ を $\theta(i-1)/(N-1)$ だけ原点周りに回転移動する。こ

(a) 昼白色蛍光灯下の作品, (b) HCRLED 下の作品

図 1 制作・測定した油彩画 ©T.Kato, 2016.

れにより 1 周内の楕円配置の一様性を確保する代償として楕円間の接触状態が乱され、楕円間に小さな分離または重複が起る。\$N\$ 番目以後の楕円を削除し、残りの各楕円の \$\overline{h'}\$ を固定のまま \$\overline{C'}\$ だけを調整して一つ内側の近隣の楕円と再度接触させる。

(iv): 各代表値 \$(\overline{C'}, \overline{h'})\$ の直角座標値 \$(a', b')\$ について、式 (付・4) (1 変数 \$a^*\$ の非線形方程式) を反復法で解き、\$a'\$ に対応する \$a^*\$ を求める。この \$a^*\$ と \$b^*(=b')\$ から、この代表値を用いるすべての色差計算に対する式 (付・4) の \$a^*\$ の倍数 (カギ括弧内の値) を得る。

(v): \$\overline{C'}\$ の増加と \$\overline{h'}\$ の周回および (iii), (iv) の手順を、\$\overline{C'}\$ が計測画像の処理に充分大きな値となるまで反復する。以降の実験におけるこの値は 170 までとした。

図 2 は領域分割の \$L'=50\$ とした \$(a', b')\$ 平面の断面図を示す。見やすいように \$\Delta E_{00}=2\$ とした。均等色差領域の楕円の面積や主軸方向、扁平率等の変化が観察できる。後述の実験では、この図より小さい \$\Delta E_{00}\$ の値を用いた。

観測した画像の各画素の \$L^*a^*b^*\$ 値から、代表値へ量子化する手順については後述する。なお、楕円体の表面は均等色差領域の量子化の境界 (閾値) とは限らない。

4. 均等色空間の色彩エントロピー評価

本章では、色覚特性に基づいて絵画の照明に対する色彩の多様性を評価するために、絵画の画像から CIELAB 均等色空間における色彩エントロピー \$H_s\$ および色彩多様度 \$S\$ の評価指標を定義する。

4.1 CIE XYZ 画像の入力と CIELAB への変換

実験では、CIE1931 の XYZ 等色関数準拠の光学フィルタを持つ 2 次元色彩輝度計 (コニカミノルタ製 CA-2000) を用いて XYZ 画像を取得する。最大の画素数は \$980 \times 980\$ であり、撮像素子の熱擾乱などによるノイズの影響を低減するため、この装置で選択可能な最大 256 フレームの平均値を取り込んだ¹⁹⁾。

式 (付・1) による \$X, Y, Z\$ から \$L^*, a^*, b^*\$ への変換には、基

図 2 CIEDE2000 色差式による LAB 空間の領域分割の断面。各楕円体の中心は量子化の代表値 \$(\overline{L'}, \overline{C'}, \overline{h'})\$

準白色に対する基準値 \$X_n, Y_n, Z_n\$ の値が必要である。JIS や CIE の測色法では、A, D65, D50 などの標準イルミナントを完全拡散反射板に照射して \$X_n, Y_n, Z_n\$ の値を求め、次に同じ光で対象物を照らし、光源の影響を除いた対象物の色を計測する⁶⁾。

しかし本研究は照明光源の特性を含めた色彩評価を目的とするため、標準イルミナントを用いない。2 章で述べたように、歴史的にも美術品の制作と鑑賞では太陽の昼光が最も望ましいと認識されており、昼光を基準とすることは最も合理的な選択と考えられる。

そこでまず、評価対象物の測定時と同じ設置条件で使用光源を拡散反射板 (ギガヘルツオプティック社製, ODM 98-F01) に照射し、画面全体の平均値 \$X_{av}, Y_{av}, Z_{av}\$ が示す当該光源の \$CCT\$ を求める⁶⁾。これと同じ \$CCT\$ の点を \$xy\$ 色度図の平均昼光軌跡 \$y = 2.870x - 3.000x^2 - 0.275\$ 上で定め²⁰⁾²¹⁾、その \$x, y, z\$ 値を \$Y_n = 100\$ と正規化し、基準値 \$X_n, Y_n, Z_n\$ として使用した。

視野全体の色調や明度の平均値および分散は光源や観察対象により変わるが、人の視覚では恒常性を保つための数種類の順応機能が知られている。光源の \$CCT\$ は光の色に関係するので、式 (付・1) の演算 \$X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n\$ は色順応機能に対応する。明暗順応に対応するためには、画像毎に \$L^*\$ の平均値をその値域の真中の値 50 に正規化した。輝度コントラスト順応に対しては、明度の分散を正規化するため標準偏差を 15 とした。

4.2 CIE DE2000 による色彩画像の量子化

ここでは、前節の \$(L^*, a^*, b^*)\$ から \$(L', a', b', C', h')\$ へ変換し、画素毎に 3 章の均等色差の楕円体領域のうち最小色差となる代表値 \$(\overline{L'}, \overline{C'}, \overline{h'})\$ へ量子化する。

まず \$L' = L^*\$ を \$(a^*, b^*)\$ とは独立に、3 章 (i) の代表値の中から式 (付・3) 右辺カギ括弧内の第 1 項の最小 2 乗誤差を与える \$\overline{L'}\$ へ量子化する。

次に \$(a^*, b^*)\$ から \$(a', b')\$ へ変換するため、\$(a^*, b^*)\$ を同一の 2 色と見なして式 (付・4) の \$a^*\$ の倍数を求め、仮の \$(a', b')\$ と \$(C', h')\$ を定める。この周囲でそれぞれ式 (付・6, 付・7) の 3 倍の近傍内にある代表値の候補を複数選択する。この各候補について付録 A.4 の色差計算を行って最小色差の代表値を選び、その頻度を 1 だけ累算し頻度分布を計算する。

4.3 色彩エントロピーと色彩多様度

画像の全画素に対して上の量子化と頻度の累算処理を行うと、LAB 空間の色彩頻度分布が得られ、これを全画素数で割れば色彩の生起確率分布 \$p_j\$ (\$j=1, \dots, J\$; \$J\$ は代表値の総数) が求められる。この離散的確率分布に情報理論における Shannon エントロピーを適用し、色彩エントロピー (Color entropy) \$H_s\$ を次式で定義する。

$$H_s = - \sum_{j=1}^J p_j \log_2(p_j). \quad [\text{bit}] \quad (1)$$

更に色彩の多様性を表す色彩多様度 (Color diversity) を、

$$S = 2^{H_s}, \quad (2)$$

で定義する．代表値の総数 J 個のうち頻度 1 以上のものが N 個，つまり N 個の識別可能な色が存在するとき，その確率 $\{p_j\}$ が全部等しいなら，離散的確率分布の最大エントロピー定理²²⁾ より， H_s と S はそれぞれの最大値 $\log_2(N)$ ， N をとり， S は画像中の色の総数に一致する．逆に，ある色がおもより大きな画素数を占めて確率分布が偏る（多様性が低下する）ほど， H_s と S は共に減少する．従って S は，最大エントロピーの場合を除き，画像や照明光の中の出現色を数え上げた値¹⁵⁾¹⁶⁾ より小さい．

色彩空間の量子化では，上記の $L', a', b', (L', C', h')$ 3次元空間で行う 3D 量子化に加え，確率分布を L' について累算後の $a', b', (C', h')$ で求めた 2D 量子化が可能である．後者は XYZ 色空間の xy 色度図と同様，明度によらない色彩多様性の評価になる．本文では美術品の色彩評価には 3D 量子化が適切であると考え，その結果を報告する．

5. 測定実験とその結果

5.1 実験方法

(1) 測定対象 図 1 の油彩画 a, b, および図 3 に例示する日本色彩研究所監修の色紙（トータルカラー，48 色組，93 色組）を対象に実験を行った．

油彩画のサイズは共に 18×18 [cm]（通称：S0 号）であり，中央の 15×15 [cm] を撮り込んだ．

色紙では前記 2 つの色組数に加え，48 色組のうち 1 番から昇順に奇数の色紙番号を 7, 14, 24 色だけ抽出したもの，および 1, 5, 9, 13 番の 4 色だけ抽出したもの，合計 6 種の色数を使った．全色組数とも (a^*, b^*) の原点周りを囲む，色相の偏りの少ない組合せである．後述の実験結果の説明のため，色のトーンの種類（文部科学省の学習指導要領）を記す．4, 7 色組は全色「さえた色」に分類され，14 色組ではこれに「薄い色，明るい色」の 2 分類が加わる．24, 48 色組では更に 3 分類（濃い・暗い色，灰味の色，無彩色）が加わる．無彩色を除き，分類毎に彩度や明度の違う色相角 1 周分の色が順に加わる．93 色組では更に追加されて 10 分類となる．

この色紙を，色彩輝度計の視野 15×15 [cm] 内で，色紙番号の昇順にできるだけ等しい面積となるようにずらして重

図 3 色紙の例．（左）7 色，（右）93 色
P-LED(5025[K]) で照明した RGB 画像

表 1 測定対象の LED 照明の特性．CCT の単位 [K]

型	公称 CCT	実測 CCT	実測 R_a	λ_p [nm]
P-LED	5000	5025	97.3	624
	4000	4095	97.0	629
	3000	3001	96.1	638
B-LED	5000	4993	71.3	445
	4000	3997	92.5	456
	3000	3176	93.5	627

ね，上から低反射ガラス板で押え，各色紙の長方形領域を観測面内で縦長に置いて測定した．なお，本色紙は汎用のため反射率・透過率とも均一ではない．

(2) 配置 水平な資料台の上方に色彩輝度計のレンズを鉛直下向き 40 [cm] の距離に置いた．油絵具の表面の鏡面反射を避けながら観測面ができるだけ均一照度となるように，同機種の LED 2 個を観測面の中心から左右に 22.5 [cm]，高さ 17 [cm] の位置に置いた．Testo 社製 540 型照度計を観測面中央に置き，定電流源を調節して左右の LED からそれぞれ 200 ± 1 [lx]，合計 400 ± 2 [lx] の照度に合せ，各測定の前後約 2 分間における照度の安定性を確認した．

(3) LED 光源 実験に用いた光源は紫色（Purple）光励起の HCRLED 素子（P-LED）または青色光励起の LED 素子（B-LED）であり，3 種の公称 CCT の素子を準備した．蛍光灯は変動要因が大きいため，測定対象の光源に用いない．HCR 型 P-LED ではすべて R_a が 96 以上のチップオンボード（COB）素子²³⁾（東芝マテリアル社製）に光拡散板と放熱板を付けて使用した．B-LED では 3000 [K] と 4000 [K] に R_a が 92 以上の COB 素子（Citizen 社製）を用いたが，5000 [K] の B-LED で R_a が 80 以上の物は実験当初入手困難で，今回は R_a が 71 の COB 素子（Cree 社製）を用いた．P-LED 用と同型の光拡散板を B-LED でも用い，照射条件をそろえるようにした．

上記の実験配置において実測した各 LED の特性を表 1 に示す．CCT の実測は 4.1 節の方法で行った．各 LED の

図 4 LED の分光分布．(a-c)P-LED，(d-f)B-LED．
公称 CCT [K] : (a,d) 5000, (b,e) 4000, (c,f) 3000.

表 2 P-LED の R_a 、色紙測定結果の H_s, S における 3001[K] の値を分母とする比の全色数組に関する平均値。

CCT [K]	R_a	H_s	S
5025	1.012	1.014	1.133
4095	1.009	1.011	1.101

演色係数 R_a と図 4 の分光特性、その最大値の波長 λ_p を分光放射照度計 MK-35N (UPRtec 社製) で取得した。P-LED は昼光に似た連続で平滑な分光特性を持つ。B-LED は 450[nm] 付近の青色励起成分のピークが鋭く、特に 5000[K] の B-LED ($R_a = 71.3$) は青緑と赤の成分の欠落が大きい。

(4) 測定時の照度分布の補正 本手法は照明の照度を含めた色彩多様性を評価し、例えばスポット光の有無による色彩多様性の違いも定量化できる。しかし本論文の以降の測定で、光源の種類による色彩多様性を数値的に比較するためには、測定画面の照度分布をそろえる必要がある。6 組の LED 素子と光拡散板の空間放射特性は少しずつ違うので、4.1 節の拡散反射板 (白板) の Y 画像を用いて、各光源の照度分布を補正する。まず 6 光源の白板 Y 画像の平均画像を求め、これを各光源の白板 Y 画像で画素毎に割った比を補正比画像とする。測定対象物の X, Y, Z 画像に当該の光源の補正比画像を画素毎に掛ければ、平均照度分布に準じた X, Y, Z 画像を得る。照明 6 種の全補正比の (最小, 平均, 最大, 標準偏差) の値はそれぞれ (0.918, 1.000, 1.134, 0.016) である。従って、本実験における最小照度 (画面の四隅) と最大照度 (画面中央の左右端) の差は最大 22% である。以下の全測定では、上記補正後の画像を用いた。

5.2 測定結果と考察

色差の設定では、工業製品の色彩管理で使われる許容色差の分類 (1 級～6 級)⁶⁾ の内、1 級 (厳格色差) の範囲 [0.3, 0.6] 内として、実際は L' の値域 [0, 100] の 8 ビット線形量子化の間隔 $\Delta E_{00} = 0.3906$ とした。式 (付・5) の非線形量子化では $\bar{L}'$ が 50 から離れるにつれてその間隔は広がるので、 $\bar{L}'$ に対する代表値の個数は $195 (< 2^8)$ である。

(1) 色紙の測定結果 色紙の照明光源には P-LED を用いた。図 5 は横軸を照明光源の CCT として、各色紙組の H_s と S の値を示す。各色の紙面の色の不均一性のため、4

図 5 色紙の色彩エントロピー H_s (左) と色彩多様度 S (右)
色数: 4(○), 7(△), 14(◇), 24(●), 48(▲), 93(◆)。

色の時でも H_s の値は 10.5 前後、 S の値は 1.46×10^3 前後の大きい値を示す。 H_s と S の値は色数の増加と共に増え、横軸の値によっても微増する。

後者の微増は主に光源の R_a の違いによると考えられる。表 2 の第 2 列には、表 1 の 3001[K] の P-LED を分母とする R_a の比、第 3, 4 列にはそれぞれ図 5 の折線毎に 3001[K] の値を分母とする H_s, S の比を各 CCT について平均した値を示す。 H_s と R_a の間に見られる一致は、各色数の制約下で組み合わせた色相の分布に偏りが無いためと考えられる。一方、計測対象の色相分布に偏りがあれば、 H_s の値はその分布を反映するので、 H_s と R_a が一致するとは限らない。表 2 の一致は、従来からの R_a が現在でも根強く利用されることへの一つの傍証と考えられる。

図 6 には、横軸に色紙の色数の対数を取り、色数毎にとった H_s の平均値を太い折線 (○印) で示し、その回帰直線を細線 (+印) で示す。折線の色数 4 から 7 の間の傾きは約 1 で、色数の増加に見合った H_s の増加である。色数 7, 14, 24 の間は約 2 の勾配をとるが、これは各色紙表面の不均一性によると思われる。色数 24 以上では、追加色の分類が増えて色同士の差が全体的に低下し、無彩色も加わるため、折線の勾配は 1 以下になる。図 6 の回帰直線の勾配は 1.219 であり、色紙数の増加より大きい増加を示しているため、各色紙表面の不均一性を考慮すれば、本提案法は色彩多様性の有効な評価尺度であると判断できる。

(2) 油彩画の測定結果 美術作品である油彩画では、P-LED と B-LED 間の照明効果の違いを示せるかが重要である。この照明効果には、作品制作におけるものと展示におけるものがある。

図 7 は、P-LED (実線) と B-LED (点線) の照明による油彩画の観測面全体の H_s と S を、照明光の実測 CCT を横軸にとり示す。P-LED による H_s と S の値は B-LED より全測定値において高い色彩多様性を示している。また、B-LED の 4993[K] における低い値は、この素子の大幅に低い R_a の値を明確に反映している。油彩画 b (P-LED 下の制作) は、公称 4000[K] と 5000[K] の照明光下で共に油彩画 a より高い H_s と S の値を示し、その差はそれぞれ約 0.051 以上、 3.7×10^3 以上である。これは P-LED と B-LED を照射した場合の比較であるが、2 章の P-LED と昼白色蛍光灯の照明の下、作者が作品制作中と完成後に感じた色彩

図 6 色彩エントロピー (○), その回帰直線 (+)
vs. 色紙枚数の対数

の見分け易さに対する P-LED の優位性と同じ傾向である。しかし、図 7 の公称 3000[K] では油彩画 a, b に小差の逆転があるので、次の検討を行った。

油彩画 a, b は共に前景と背景が明瞭に識別でき、前景の色彩多様性は背景に比べ明らかに高く、前景・背景の面積比は H_s と S に影響するが、両者の面積比は厳密に等しくはない。そこで、油彩画 a, b の花（実際は‘がく’）領域内に同位置・同形の大きな楕円をとり、その内側の色彩多様性を計算した。その結果を図 8 に示す。全画素数 960400 のうち、楕円内画素数は 509392 である。同一照明光下における油彩画 b, a 間の H_s の差は図 7 で -0.036~0.085 だが、図 8 では 0.14~0.20 へ増加し逆転は解消された。また油彩画 b を R_a が 92 以上の B-LED で照明したとき（○点線の 3176[K] と 3997[K]），P-LED 照明下の油彩画 a（△実線）と同等または上回る色彩多様性が得られた。これらの結果は、2 章に述べた描画時の制作者の主観的・定性的評価を数値的に裏付けると共に、制作時と鑑賞時の両照明光の品質が色彩多様性にとり重要なことを示唆している。

（3）測定値の誤差や変動の評価 本実験における光源の切替と測定領域の位置設定による測定誤差の評価のため、以下の 2 種の測定実験を行った。

まず色彩輝度計と油彩画 b の相対位置を固定したまま、3 種類の P-LED の切替に伴う光源位置と照度の微調整を合計 60 回繰り返して、P-LED の CCT 毎にそれぞれ 20 回撮り込み H_s を求めた。その結果、P-LED の CCT の昇順に、 H_s の（標準偏差 σ , 最大値-最小値）はそれぞれ (0.0122, 0.0362), (0.0065, 0.0216), (0.0031, 0.0114) が得られ、 H_s の測定誤差は $\pm 3\sigma$ からそれぞれ $\pm 0.037, \pm 0.020, \pm 0.009$, S のそれは $\pm 2.5\%, \pm 1.3\%, \pm 0.63\%$ と見積られる。低い CCT ほど誤差が大きい原因は、短波長成分の光量が小さくなることにある。実際、観測画像と基準白色の Z 成分が共に減れば、式 (付・1) の Z/Z_n の分子でノイズ成分の占める割合が増え、それが更に小さい分母の値で強められる。

本論文の以上の全測定実験では各測定対象と色彩輝度計の相対位置を固定のまま光源を切り替え、その度に光源位置と画面中心の照度を微調整した。

第 2 の実験では油彩画 b を、図 7 の測定位置の近傍で縦×横に約 18×14 [mm] の範囲（画素数で 116×90 ）を 5×4

図 7 絵画の色彩エントロピー H_s (左) と色彩多様度 S (右)。
△:油彩画 a, ○:油彩画 b, 実線:P-LED, 点線:B-LED。
横軸: 照明光の相関色温度 [K]。

分割して手で移動させて撮影し、微小回転を含む位置変動による測定値の変動を調べた。この時、前景（花の部分）と背景の面積比も変化する。4095[K] の P-LED を用いた時、 H_s の（標準偏差 σ , 最大値-最小値）は (0.0542, 0.169) となり、本測定において計測範囲と回転の相当の変動が起きた場合にも、 H_s の変動 ($\pm 3\sigma$) は高々 ± 0.16 , S では $\pm 11\%$ 程度と推定される。

6. む す び

美術品などに対する照明デザインの色彩効果を定量的に評価する一方法として、色彩の豊かさを表す色彩エントロピー H_s と色彩多様度 S を新たに定義し、その有効性を多色の色紙と重色技法の油彩画を用いた実験により検証した。色彩学分野では古くから色差や均等色空間の構成に関する研究が行われているが、色空間（特に LAB 空間）を均等色差の領域に分割したものを確率空間と見なす手法は筆者らの報告によるものが初出であると考えている²⁴⁾。

絵画作品を鑑賞する時は、制作時の照明と同じ光環境下で最も作者の意図が伝わりやすいと言われる。近い将来、美術館等の展示照明がほぼすべて LED に置き換わるとすれば、LED の制約の中で、制作時の印象をできるだけ変えずに作者の意図を良好に伝えるような展示照明デザインが幅広く要求されると思われる。

今後は本提案手法の応用として、等色領域の形状や位置の関連、および色を与える心理的效果なども評価項目に加えた指標の開発が重要である。このような指標は美術における評価も含むことになるので、絵画の美術的評価の研究²⁵⁾²⁶⁾への一助になることが期待される。

謝辞 有意義な示唆を頂いた査読者および色彩学の研究者の皆様に感謝申し上げます。また本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16H03019 の助成による。

〔文 献〕

- 1) 小谷: “LED のスペクトル制御による快適な光環境の実現に向けて”, 照学誌, **100**, 3, pp.108-111(2016)
- 2) 藤原: “LED による美術館照明の課題と今後”, 照学誌, **97**, 6, pp.302-307(2013)
- 3) 瀧田: “LED 照明の演色性と美術館・博物館の照明”, 照学誌, **97**, 6, pp.320-326(2013)
- 4) 瀧田, 橋本, 矢口: “CIE TC1-69 に提案された新しい光源の演色性評価方法 (CQS, CRI-CAM02UCS) の評価と検証～日本照明委員会 TC1-69 技術委員会による日本意見 (1)～”, 色学誌, **34**, supp., pp.76-77(2010)

図 8 絵画の色彩エントロピー H_s (左) と色彩多様度 S (右)。
△:油彩画 a, ○:油彩画 b, 実線:P-LED, 点線:B-LED。
横軸: 照明光の相関色温度 [K]。

- 5) 矢口：“新しい演色評価方法- CIE2017 色忠実度指数-”，色学誌，**41**，6，pp.260-266(2017)
- 6) 日本色彩学会編：“新編色彩科学ハンドブック [第3版]”，東京大学出版会，pp.551-584(2011)
- 7) 瀧田：“LED 照明の美術品鑑賞への影響-美術館展示照明における色質評価数の開発”，映情学誌，**71**，1，pp.24-29 (2017)
- 8) 藤原：“学芸員のための展示照明ハンドブック”，講談社 (2014)
- 9) 有本，大城，木下：“座談会 III：美術館照明のこれから”，照学誌，**100**，9，pp.421-423(2016)
- 10) Zhai, QY., Luo, M R. and Liu, XY.: “The impact of LED lighting parameters on viewing fine art paintings”, Lighting Res. Tech., **48**, 6, pp.711-725(2016)
- 11) Chen, HS., Chou, CJ., Luo, HW. and Luo, MR.: “Museum lighting environment: Designing a perception zone map and emotional response models”, Lighting Res. Tech. **48**, 5, pp.589-607(2016)
- 12) Vienot, F., Durand, M-L. and Mahler, E.: “Kruithof’s rule revisited using LED illumination”, J. Modern Optics, **56**, 13, pp.1433-1446(2009)
- 13) 海洋生物環境研究所：“生物の多様性指数 (1)”，<http://www.kaiseiken.or.jp/study/lib/news123kaisetu.pdf>(参照 2018-9-19)
- 14) Rigau, J., Feixas, M., Sbert, M. and Wallraven, W.: “Toward Auvers Period: Evolution of van Gogh’s Style”, Computational Aesthetics in Graphics, Visualization, and Imaging (2010)
- 15) Linhares, J.M.M., Pinto, P.D. and Nascimento, S.M.C.: “The number of discernible colors in natural scenes”, J. Opt. Soc. Am. -A, **25**, 12, pp.2918-2924(2008)
- 16) Perales, E., et al.: “Computing the Number of Distinguishable Colors under Several Illuminants and Light Sources”, Proc. CGIV 2006, Soc. Imaging Sci. Tech. pp.414-419(2006)
- 17) Luo, M. R., Cui, G. and Rigg, B.: “The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula: CIE2000”, Color Res. and Appl., **26**, 5, pp.340-350 (2001)
- 18) Sharma, G., Wu, W. and Dalal, E.N.: “The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations”, Color Res. and Appl., **30**, 1, pp.21-30 (2005)
- 19) コニカミノルタ (株): “2 次元色輝度計 CA-2000 シリーズ取扱説明書”，p.30，<https://www.konicaminolta.jp/instruments/support/faq/light/luminancemeter/ca2000/> (参照 2019-2-9)
- 20) Judd, D.B., MacAdam, D.L. and Wyszecki, G.: “Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature”, J. Opt. Soc. Am., **54**, 8, pp.1031-1040(1964)
- 21) 日本工業規格: “JIS Z8720, 測色用の標準イルミナント (標準の光) 及び標準光源”，<http://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html> (参照 2019.3.4)
- 22) 磯道：“情報理論”，コロナ社 (1980)
- 23) 山川，谷口：“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，**70**，11，pp.34-37(2015)
- 24) 坂本，他：“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”，情処学 CVIM 研資 2017-CVIM-205，4, pp.1-7(Jan. 2017)
- 25) Burns, K.: “Entropy and optimality in abstract art: An empirical test of visual aesthetics”, J. Math. and Arts, **9**, 3-4, pp.77-90(2015)
- 26) 小林：“絵画の色彩美と数理的解析の基礎”，色学誌，**31**，1，pp.34-41 (2007)

〈付 録〉

A. CIE LAB 色空間と CIE DE2000 色差

A.1 CIE LAB 色空間の色差⁶⁾

この色空間は CIE XYZ 色空間から，次式

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116 f(Y/Y_n) - 16, \\ a^* &= 500 \{f(X/X_n) - f(Y/Y_n)\}, \\ b^* &= 200 \{f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)\}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{付} \cdot 1)$$

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

により変換された直角座標系の色空間で表される．ここで， X_n, Y_n, Z_n は基準白色に対する基準値であり，それぞれ

の表記は CIE (JIS) に準拠している．同一の色空間は彩度 $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ と色相の角度 $h^* = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ の (L^*, C^*, h^*) 座標でも表される．

この色空間による 2 色間の色差 ΔE_{ab}^* は次式で表され，等色差領域は半径 ΔE_{ab}^* の球面である．

$$\Delta E_{ab}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (\text{付} \cdot 2)$$

A.2 CIE DE2000 色差式⁶⁾

CIELAB 規格の策定後，多くの心理物理実験から，色差は $L^*a^*b^*$ 色空間内で式 (付・2) のような均質性を持たないことが報告された．これを補正するため，新たな $L'C'H'$ 空間内で主軸長と傾きが変化する楕円体により，次の CIE DE2000 色差式が定められた．

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T(\overline{C'}, \overline{h'}) \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

バー付の変数は計測対象 2 色の各変数の平均値を表す．上式の両辺を 2 乗して ΔE_{00}^2 で割った式は楕円体を表し，これは $(\overline{L'}, \overline{C'}, \overline{h'})$ を原点とする局所的な直角座標系の 3 軸 $\Delta L', \Delta C', \Delta H'$ の空間で定義される． $R_T(\overline{C'}, \overline{h'}) = 0$ なら上の 3 軸に沿う楕円体の軸長 (直径) はそれぞれ $k_L S_L, k_C S_C, k_H S_H$ であり， $R_T(\overline{C'}, \overline{h'}) \neq 0$ なら楕円体は $\Delta L'$ 軸回りに回転し， $(\Delta C', \Delta H')$ 平面における断面 (楕円) の主軸長も変化する． $\Delta C'$ 軸， $\Delta H'$ 軸回りの回転はない．

式 (付・3) の $\Delta L', \Delta C'$ および $\Delta h'$ は，3 種の変換，

$$a' = a^* \left[1.5 - 0.5 \{ \overline{C'}^7 / (\overline{C'}^7 + 25^7) \}^{1/2} \right], \quad (\text{付} \cdot 4)$$

$L' = L^*$ および $b' = b^*$ によって得た L', a', b' を円筒座標 L', C', h' で表した 2 色間の座標差である． $\Delta H'$ は C'_1, C'_2 を 2 色の彩度として $\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2)$ と定義されるが，これは $\Delta h'$ を弧長で測った値で 1 次近似されることを次節に示す．補正係数 k_L, k_C, k_H は標準の観測条件の 1 とする．楕円体は L' 方向へ回転せず， ΔE_{00}^2 の $\Delta L'$ 成分は他の 2 成分との和に分離される．式 (付・3) の加重係数 S_L, S_C, S_H は次式で与えられる．

$$S_L = 1 + 0.015 (\overline{L'} - 50)^2 / \{ 20 + (\overline{L'} - 50)^2 \}^{1/2}, \quad (\text{付} \cdot 5)$$

$$S_C = 1 + 0.045 \overline{C'}, \quad (\text{付} \cdot 6)$$

$$S_H = 1 + 0.015 \overline{C'} T(\overline{h'}). \quad (\text{付} \cdot 7)$$

$\Delta L', \Delta C', \Delta H'$ の定義より，式 (付・3) は，マハラノビス距離に類似の，楕円体中心を通る直線が楕円体の表面と交わる 2 点間の色差という意味を持つ．

A.3 $\Delta H'$ の 1 次近似式

式 (付・3) で $\Delta L' = 0$ とした楕円を考える．次の $\Delta H'$ の 1 次近似式 (付・8) は，2 色の色差の計算には関係無いが，本研究の楕円の密な配置問題では考慮する必要がある．この式は $\Delta H'$ が楕円の h' 軸に沿う直径であることを意味す

るが、 ΔE_{00} の詳細な解説論文 17)18) にも見られない。

$$\Delta H' \cong 2 \overline{C'} \sin(\Delta h'_{\text{rad}}/2) \cong \overline{C'} \Delta h'_{\text{rad}} \quad (\text{付} \cdot 8)$$

ここで、 $\Delta h'_{\text{rad}}$ はラジアンを使う意味である。

楕円は中心に関し点対称であり、 $C'_i = \overline{C'} \pm \Delta C'/2$ (複号は $i=1, 2$) より、 $C'_1 C'_2 = \overline{C'}^2 - \Delta C'^2/4$ である。極座標 (C', h') で $|\Delta C'|$ の値は、楕円の長軸が C' 軸に沿い、2色 が長軸の両端点で最大となるから、図 2 の中心から 5 周目 より外側では、 $C'_1 C'_2$ の式の右辺第 2 項が第 1 項の 1/100 以下となり、1 次近似式 (付・8) が精度良く成り立つ。

本論文の 3 章の領域分割では 4 周目以内でも $\Delta H'$ の 1 次近似式を仮定して作図したが、4 章以降の色差計算では定義式通りに計算した。

A.4 量子化における色差計算の図解

ここでは 4.2 節の計算を図説する。付・図 1 は (a', b') 平面内の代表値 (○ 点) 周りの 2 つの色差値に対する同心楕円を示す。この代表値に対する 3 章 (iv) の a^* の倍数を用い、画像データ (a^*, b^*) から求めた (a', b') を Δ 点とする。式 (付・3) は、色相差 $\Delta H'$ 、彩度差 $\Delta C'$ である Δ 点と $\square$ 点 (楕円中心に関し点対称な 2 点) 間の色差値 $k\Delta E_{00}$ を与える (k は定数) ので、楕円の対称性から、 Δ 点と ○ 点の色差を上値の 1/2 と見なす。下図より、 $\Delta H'$ と $\Delta C'$ は Δ 点と ○ 点との差をそれぞれ 2 倍した値となる。

一方、 Δ 点と ○ 点の色差を直接計算するには、その中点を中心とする色差の楕円を使うことになり、 (a^*, b^*) 空間と (a', b') 空間の間の変換・逆変換を伴う再計算の必要が生じ、過大な計算負荷をかけるため、上述の計算法を用いた。

付・図 1 $\bar{h}' = 60$ 度付近にある量子化代表値 (○ 点) 周りの等色差 (ΔE_{00} , $k\Delta E_{00}$) の同心楕円と式差計算。

かとう たかゆき
加藤 隆之 2009 年筑波大大学院博士課程修了。同年福教大講師。2013 年同准教授。2000 年以降毎年二紀展出品 (2007 年奨励賞, 2013 年準会員賞)。油彩画制作および絵画組成を基にした教材開発を研究。博士 (芸術学)。二紀会準会員。

いのうえ こうへい
井上 光平 2000 年九芸工科大大学院博士後期課程修了。同年同大学助手。現在九大准教授。パターン認識画像処理、コンピュータビジョンに関する研究に従事。博士 (工学)。正会員。

りゅう しゅんすけ
笠 駿介 2017 年九大大学院修士課程修了。同年 (株) 小糸製作所入社。研究所勤務。在学中に美術品展示照明の評価の研究に従事。

ともたり みかこ
知足美加子 1995 年筑波大大学院修士課程修了。同年九芸工科大助手。現在九大准教授。国画会彫刻部会員、山岳修験道学会評議員。彫刻制作および文化財復原研究に従事。博士 (芸術学)。

さかもと ひろやす
坂本 博康 1977 年九工大大学院修士課程修了。同年同大学助手。1986 年九芸工科大講師。2003 年九大教授。2017 年同定年退職。名誉教授。画像計測、コンピュータビジョン等の研究に従事。博士 (工学)。正会員

しらかわ やすひろ
白川 康博 1980 年東工大大学院博士課程修了。同年 (株) 東京芝浦電気入社。現在東芝マテリアル (株) シニアフェロー。人に優しい光、ミュージアム向け白色 LED の開発と応用に従事。応物学会会員。工学博士。