

特集「美術館・博物館の展示空間における照明と色彩」 Light and Color for Exhibition Space in Museum

美術館・博物館の展示物の変退色 Fading and color change of museum objects

佐野 千絵
Chie Sano

東京文化財研究所名誉研究員
Tokyo National Research Institute of Cultural Properties

キーワード：照明, 変退色, 分光分布, 吸光, 積算照度

Keywords：museum lighting, fading, spectral distribution, absorbance, cumulative illuminance

1. はじめに

美術館・博物館における照明は、展示物を変退色させないこと、太陽光と同等な色彩感覚を再現できること、心理的に不快感を与えないこと、展示物の立体感を伝えることなどの役割がある。人の目の特性も理解して低照度で調和した照明空間を計画的に作り出し、展示物を目的に合わせて照明して、展示物への理解を深めるところに展示担当者の腕の見せどころがある。本稿は主に染織品を中心に、展示物の変退色がどのように起こるのかについて、光と物質の関係を中心に解説する。

2. 変退色とは

物体に白色光が照射された時、通り抜ける、すべて前面で反射する、一部分のエネルギーが吸収される、という3つの可能性がある。透過する場合、光が戻ってこないで私たちの脳は黒、あるいは透明な物体と認識する。また前面で反射した場合、白い物体と認識する。一部のエネルギーが物体に吸収され、吸収されなかった波長帯の光が反射する場合、有色の物体と認識する。

退色とは、主に彩度(色の鮮やかさ)が低下して、あるいは明度(色の明るさ)が大きくなり色褪せする現象であり、一方、変色とは退色を含む、色相(色味)・彩度・明度が変化する現象を指す。化学的に変退色は、色素そのものが光分解する、あるいは、発色源である色素を布に染着させていた媒染剤と分離することで起こり、水洗や機械的な摩擦により顔料が落ちることもある。

3. 変退色の測定方法

耐光堅牢度の測定は、染色布と変退色布の変退色度合いを、ブルースケール標準布(英語圏ではBlue

Wool Standard と呼ぶ)の退色と比較して視感で判定する(JIS L 0842, 0843)。ブルースケールは1～8級があり、数値が大きいほど耐光性が高いが、天然染料のうち黄色染料や緑色染料の耐光堅牢度はブルースケールの1～2級に相当するものが多く耐光性は低い。現代の合成染料の場合、3級、4級のブルースケールの使用頻度が高いとされる。

耐光堅牢度試験には露光方法が5種類ある。第1露光法は1つの試験片を1組のブルースケールと、第2露光法は複数の試験片を1組のブルースケールと同時に露光し、それぞれの試験片の染色堅牢度を試験するものである。第3露光法では1～8級の1組のブルースケールを用いずに、目的とするブルースケールとその1級低いブルースケールを露光する方法、第4露光法では目的とするブルースケールとともに露光し同等の染色堅牢度を持っているか試験する方法、第5露光法ではブルースケールは用いず、所定量の放射露光量で試験片を露光し試験する方法である。

一般的に用いられる第3露光法では、染色布とブルースケールの各試験片の面積の半分を不透明の覆いで覆い、光を照射する。時々、ブルースケールの覆いを開け、光を照射した部分と未照射部分のコントラストが、変退色用グレースケールの4号に相当する標準変色をしたか確認し、試験を終了する。

文化財保護分野では染織品に対して試験する場合、退色試験に用いる光源として太陽光に近い光を照射するキセノンアーク灯(JIS L-0842)を用いることが多い。一方、屋外塗装などの耐光堅牢度試験を行う場合には、紫外線カーボンアーク灯光(JIS L-0843)を用いる。

4. 変退色の程度と視感

人の目は、色相の違いには敏感であるが彩度の高い状況では色の違いを識別しにくい。また色によって

は、色相の違いに対する感度が異なる。明度が高くても低くても感度が低くなり、青色では色識別域の傾きが他の色とは異なる方向にずれることがわかっている。CIE LAB ($L^*a^*b^*$ 色空間) は、色を明度 L^* とクロマネティクス指数 a^* , b^* で構成した均等色空間で表したものであるが、先述の理由で、CIE LAB における色差 ΔE^*ab や Δa^*b^* の形状が異なり、色差値と視感による評価が異なることがある。

こうして求められた色差の数値は、並べて判定する場合には $\Delta E^*ab=1.2$ でほとんどの人が容易に色差を認めることができるとされている。しかし文化財のように唯一無二のものの場合では経時比較するしかなく、 $\Delta E^*ab=5.0$ (許容色差 B 級) をほぼ同一と認めることができるとする報告が多い¹⁾。

5. 照明 (分光分布や照度) と変退色の関係

照明の明るさは、人の目に入射した光が、555nm の波長の光に対して感度が最も高い視細胞の特性によって知覚されるもので、照射光の強度とは一致しない。

人の目が光に対して示す特性である比視感度では、明所と暗所で異なる特性を持つ。照度計は明所視での目の特性を考慮して、光の強度にフィルターをかけて人の目を感じる明るさ感を数値にしたものである。展示資料への影響が大きい紫や青の短波長の光に対して比視感度は低いため、照度の数値を制限しても展示資料の光による変退色を管理することはできない。

光の吸収が容易に起こる条件では、紫外から可視部の光で化学結合が破断する光化学反応が起こることがある。例えば波長 420nm (紫色) の光 1 モルの持つエネルギーは 285kJ であり、水銀の輝線 254nm の光 1 モルの持つエネルギーは 471kJ である。炭素-炭素の結合エネルギー 350kJ/mol であり、紫色の光で炭素-炭素の結合エネルギーは切断されない。254nm の光 1 モルの持つエネルギーは、一般の化学反応を起こすために必要な追加の活性化エネルギー約 100kJ/mol を加えても、炭素-炭素の結合エネルギーより十分に大きく、短波長の紫外線は通常の有機化合物の結合を切断し、分子を分解し他の化合物に変える力がある。

化合物の分子結合がどの波長の光を吸収するかは、吸光スペクトルを測定することで分かるが、化合物に特有のものであり、そのため、展示資料の光に対する特性は、個別に特有のものとなる。発色源には有機質の染料 (色素)、有機質の染料を無機材料に染め付けるあるいは金属等と沈殿させた有機顔料、無機顔料が

ある。無機顔料は結晶性が良く光励起された状態にいる時間が短いため、熱緩和が速く起こり、光分解に至ることは少ない。無機顔料に比べて有機質の染料は伝熱性が悪く、光によって励起された状態が長く続くため、有機質の染料は光による分解が起こりやすいと考えられている。有機質の染料は媒染剤とともに布に染着するが、発色時の構造が結晶化して伝熱性が良い場合、光励起された状態にいる時間が著しく短くなり、耐光性が良好になる。例えば、カルミン酸をアルミニウム媒染した場合、その耐光性は高くなる。

以下に分光分布と光退色について試験した例を示す²⁾。黄色染料のルチン (淡黄色)、ケルセチン (黄色)、クルクミン (鮮やかな黄色) を、JIS L 0830 染色堅牢度試験用絹布 (14 目付相当) にアルミニウム媒染で染め付けた布を、積分球付紫外可視近赤外分光光度計 (UV-3101PC, (株) 島津製作所) で測定した吸光スペクトルを図 1 に示す。縦軸は吸光度の最大値を 1 として規格化した相対値である。いずれも黄色の染料であるが、ルチンとクルクミンは可視光域に吸収帯が 1 つ (各 400nm, 430nm)、ケルセチンは 2 つ (458nm, 543nm) あり、吸収する光の波長が異なることが分かる。

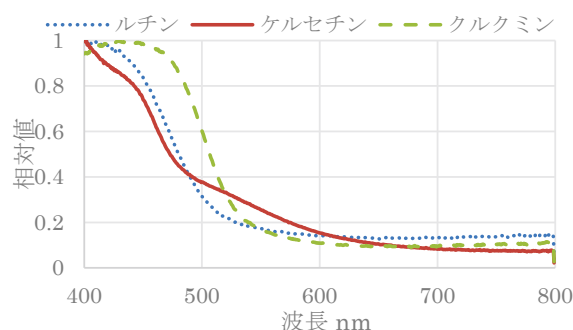


図1 試験した黄色染料の吸光スペクトル

これらの試験布に、紫外域を含む昼光で照らされている物体色の測定用光源である CIE 昼光の常用光源蛍光ランプ D₆₅ (図 2) を照射した。

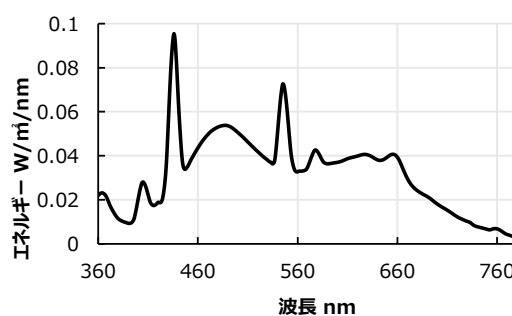


図2 常用光源蛍光ランプ D₆₅ の分光分布

試験片表面の照度は約 2,600 lx であった。全波長照射に加えて、440nm より長波長を透過するシャープカットフィルター（以下、S440nm と呼ぶ）、530nm より長波長を透過するシャープカットフィルター（以下、S530nm と呼ぶ）を曝露試験片と光源の間に設置し照射される光の短波長成分をカットして、一定時間ずつ照射した。試験に用いた光源の放射ピークは、短波長側から 405nm, 436nm, 545nm, 578nm にあり、S440nm では 405nm の放射を防ぐことはできるが 436nm のエネルギーの大きな放射を完全に防ぐことはできない。S530nm では、短波長側の 2 つの放射に加え 545nm 放射の大部分で吸収を生じないようにすると期待される。

クルクミン試験片について全波長を照射した場合の、7 日ごとに吸光スペクトルを測定して得た結果が図 3 である。曝露時間の経過とともに、450nm を吸収ピークとするピークが消失する様子が分かる。

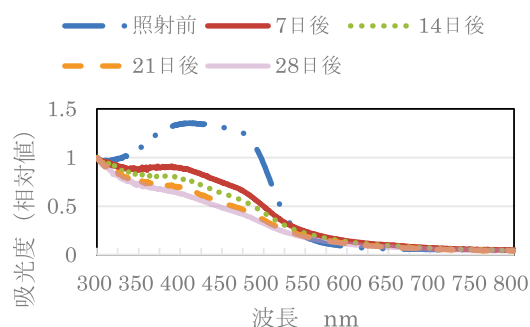


図3 クルクミン吸光スペクトルの変化(全波長照射)

S440nm, S530nm で短波長成分をカットした場合の色差の変化を図 4 にまとめた（試験片の n 値は 3）。

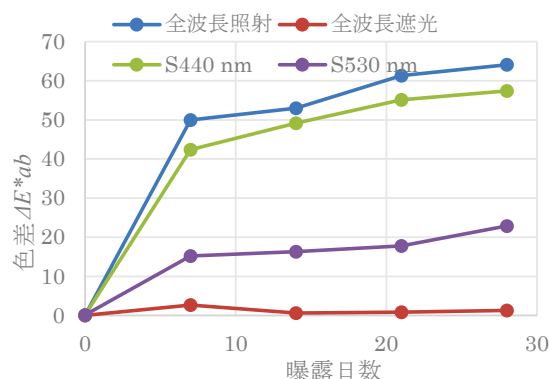


図4 短波長成分の放射をカットした場合のクルクミン染色布の色差変化

全波長域の照射に対して S440nm では 405nm の放射を防げたものの 436nm の強度の大きな放射を防げず、全波長域での照射と大差ない色差変化があった。一方、短波長側の 2 つの放射に加え 545nm 放射の大部分で吸収を生じないと期待された S530nm では、色差の変化は相当抑制されている。530nm より長波長側にはクルクミンには顕著な吸収はないが、試験に用いた蛍光灯では 545nm に強い放射があり、そのため色差変化が生じたと考えられる。

以上のように、展示物には各波長に対して固有の吸収特性があり、各染料は構造面での影響を受けて光励起状態にある時間も異なる。また光源は各波長ごとに放射エネルギーが異なり、この 3 つの性質が掛け合わされることによって、変退色の起こりやすさが変化する。光源が LED に変化しても、物体の吸光スペクトル、照明の分光放射分布、各波長の放射強度の関係は不変であり、変退色の予測は個別の展示資料の光に対する特性をどのように知ることができるか、に依存している。

6. 退色を防止するための具体的な管理基準

2018 年に改訂された『国宝・重要文化財の公開に関する取扱い要項』（文化庁、表 1）では、積算照度の考え方が取り入れられておらず、照度での管理が行われている。光源によっては、照度による管理では過少評価となるおそれもあるが、国宝・重要文化財については、その管理に文化庁は助言し、実質的に公開日数を制限することで、光による変退色を抑制することに成功している。退色の危険の高いものは年間延べ 30 日以内としている。

表1 国宝・重要文化財の公開に関する取扱い要項（平成 30 年 1 月 29 日）で規定されている照度（単位 ルクス）

原則（年間延べ 60 日以内）	150
絵画（油絵は年間延べ 150 日以内）	100
版画（年間延べ 30 日以内）	50
漆工品	100
甲冑類	100
染織品	80
書籍・典籍・古文書	100
近代の洋紙を利用した文書・典籍類、図面類、写真類	50
石、土、金属、ガラス等（年間 150 日以内）	制限なし

日本照明委員会では、展示物の耐光性を考慮し、また積算照度の考えを取り入れた博物館・美術館における照明基準を公開している³⁾。

7. 展示物の耐光性予測の現在の方法

一般的に、光源の放射する光の分光分布を知ることができるが、各展示物の吸光特性を知るのは困難である。そのため、その空間内でもっとも耐光性の少ない資料を変退色しないように管理することで、美術品や文化財を守ってきた。

米国商務省標準局（現・国立標準技術研究所 NIST）が歴史的文書の保存方法について調査研究⁴⁾した際には、低級な紙を用いて 365nm～546nm の波長の光によって生じる損傷について相対的に論じており、最終的にこの相対損傷度曲線（図 5）は 300nm～640nm に拡張された。この相対損傷度曲線は作用スペクトルと呼ばれ、展示物の種類や製造技術、時代によっていくらかの違いはあるが、紫外放射や短波長の可視光線による影響を概括したものといえよう。

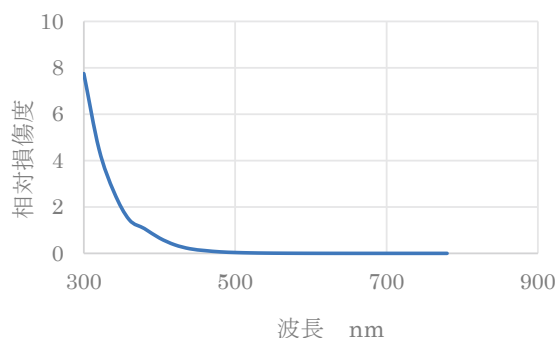


図5 harrisonの相対損傷度 D_r ⁵⁾

Harrison によって報告された相対損傷度 D_r を利用し、分光放射照度を考慮して光曝露量の指標である有効放射露光量を用いることで、従来の積算照度よりも適切に、展示物に光が与える影響を評価できると、Krochmann らは考えた^{6,7)}。有効放射露光量は Krochmann らの研究に基づいて提案されたモデルで、各波長での分光放射照度と作用スペクトルから有効放射照度を算出し、時間積分したものである。作用スペクトルに式 (1) を選択した報告⁸⁾があり、積算照度で評価した場合に比べて、劣化の進行度の近似が良くなったとのことである。

$$S(\lambda)_{dm,rel} = \exp[-b(\lambda - 360)] \cdot \dots \cdot \text{式 (1)}$$

式 (1) に現れる各資料に対する定数 b は、低級紙 0.038、最高級紙 0.0125、キャンバス上の油彩 0.0115、織物 0.0100、最高級紙上の水彩 0.0115 とされている。

また、米国ですでに美術館等での試験も始まっている方法として、人の目では退色が分からないほどの微細な直径に絞ったレーザー光を当てて色差の変化を計測し、資料の耐光性を実測から知り資料管理を行うマイクロフェイディング⁹⁾という方法も利用されている。

参考文献

- 1) 見城敏子: 光モニターの利用－展示照明の安全な使用のために－, 保存科学, 25, pp.37-42, 1986.
- 2) 相馬静乃, 吉田直人, 佐野千絵: 特定波長域を遮光した光照射下における黄色系染料を主とした有機染料の変退色挙動, 保存科学, 60, pp.51-60, 2021. 図3, 図5～7の一部を掲載.
- 3) 日本照明委員会: 博物館展示物の光放射による損傷の抑制 (CIE 157 2004: 日本語訳), 2005.
- 4) National Bureau of Standards, United States Department of Commerce: Preservation for the Declaration of Independence and the Constitution of the United States, 1951.
- 5) L. S. Harrison: Report on The Deteriorating Effect of Modern Light Sources, Metropolitan Museum of Art, 1954.
- 6) J. Krochmann: "Beleuchtung von lichtempfindlichen Ausstellungsstücken," *Restauro*, 94-3, pp.227-234, 1988.
- 7) G. S. Hilberg, S. Aydinl, J. Krochmann: "Zur Beleuchtung musealer Exponate," *Restauro*, 97-5, pp.313-321, 1991.
- 8) 黄川田翔, 吉田直人, 佐野千絵: 美術館・博物館の資料保護に向けた光曝露量の評価方法－染色布を事例に, 照明学会誌, 100-2, pp.74-81, 2016.
- 9) Paul M. Whitmore, Xun Pan, Catherine Bailie: Predicting the fading of objects: Identification of Fugitive Colorants through Direct non-destructive lightfastness measurements, *J. American Institute for Conservation*, 38, pp.395-409, 1999.