

彩色材料への直管形蛍光灯と  
白色LED光照射時における反射スペクトルの比較

吉田 直人・山田 祐子・石井 恭子

独立行政法人国立文化財機構  
東京文化財研究所

保存科学 第56号 別刷

平成28年度

# 〔報告〕 彩色材料への直管形蛍光灯と白色 LED 光 照射時における反射スペクトルの比較

吉田 直人・山田 祐子\*・石井 恭子

## 1. 目的

ハロゲンランプや蛍光灯の生産縮小が大きな契機となり、展示照明の白色 LED 化が進んでいる。白色 LED は赤外や紫外放射がほとんどなく、また、同じ色温度、照度のもとでは、美術館・博物館用の紫外線除去幕付き蛍光灯と比較しても資料の保存性に遜色ないことが示されている<sup>1,2)</sup>。その一方、従来光源からの転換によって、展示物の視覚的な印象に変化が生じたという声をよく耳にする。平成25年2月18日に東京文化財研究所において開催した“文化財の保存環境を考慮した博物館の省エネ化に関する研究会-LED 照明導入と省エネ-”に先立って行ったアンケートでは、絵画の発色が向上した、低照度でも明るく見えるなど肯定的な評価もある一方、白っぽい、暗い、ガラガラする、またそれまでの光源と同じ色温度、演色性のものを選んだにも関わらず、色味に相違を感じるといった戸惑いも少なからず見受けられた。また、照射や視線の角度によっても色彩の変化を感じるという指摘も聞かれる。照明によって空間の雰囲気等が変わることはあっても、鑑賞や調査の質は維持しなければならない。

生活環境における白色 LED と従来照明の比較については、特に蛍光灯との間で研究例が多く、大井らによる住宅での快適性に関するものや、久保らによる印刷物の色文字可読性についてのもなどが挙げられる<sup>3,4)</sup>。展示照明については、研究例は多くないものの、複数の色温度や演色性の蛍光灯と白色 LED のもとでの色彩の印象を、被検者による主観的評価によって調査した藤原による報告がある<sup>5)</sup>。また久保らも同様の観点から調査を行い、その結果から展示照明における色質評価方法の提案に結び付けている<sup>6)</sup>。

我々は、展示照明の白色 LED への転換に伴う色彩や印象変化について、光と被照射物表面との相互作用の面から、その原因へのアプローチを試みている。ある物体に対して人が知覚する色彩は、基本的には照射光の反射特性、被照射物表面での反射特性、および目の比視感度に依存する。従って、同じ対象であっても、光源の波長特性が異なれば、程度の差こそあれ色彩に変化が生じる<sup>7)</sup>。その上でもうひとつの要因として、特に LED の放射光は従来光源と比べて前方指向性が高いことが特徴であり、これが被照射物表面やその近傍における拡散反射の角度特性などに影響を与え、さらに鑑賞者の視覚に影響し、「発色が向上した」「ガラガラする」などの言葉として表される現象に繋がっているのではと考えている。これを検証するために今回は、日本画に使用されている顔料による彩色サンプルを用いて、同等の色温度の直管型蛍光灯と白色 LED で複数の照射角/検出角の組み合わせのもとで、ファイバー受光型分光器による反射スペクトルの測定、比較を行い、両光源間でのサンプル表面における光反射の相違について検証した。これは、同一サンプルの可視反射スペクトルは、積分球を有する機材による測定であれば、光源の種類や波長特性が異なっても不変であるのに対し、ファイバー受光型など積分球を持たない機材では、表面における照射光の反射や透過の状態に相違があれば、スペクトル

\*株式会社 修美

の相似性が下がるという観点による。

## 2. 実験

3 cm×5 cm 角の発泡スチロール板に貼り付けた和紙に、それぞれ胡粉、群青13番、松葉緑青13番、辰砂13番（すべて得應軒より入手）を膠によって、下地が見えない程度の厚さで塗布したサンプルに、暗室下でそれぞれ笠なしタイプの照明器具に取り付けた昼白色（相関色温度 5,000K）の直管型蛍光灯（松下電器産業 FL20S-N-EDL・NU）または白色 LED（パナソニック LDL20S-N/11/12）の光を照射し、光ファイバーによって受光した反射光のスペクトルを測定した。測定システムの画像、配置、両光源の発光特性を図 1 に示す。測定条件は下記のとおりである。

測定機器：下記の構成からなる可視反射スペクトル測定システム

- ・分光光度計 Oceanoptics 社製 FLAME-s
- ・石英製光ファイバー（400 $\mu$ m 径，長さ1.5m）

測定条件：

- ・白色校正：セラミック製標準白色板
- ・測定波長域：450～700nm（光源の発光強度が低く，スペクトルが安定しないため，450nm 未満は対象としなかった）

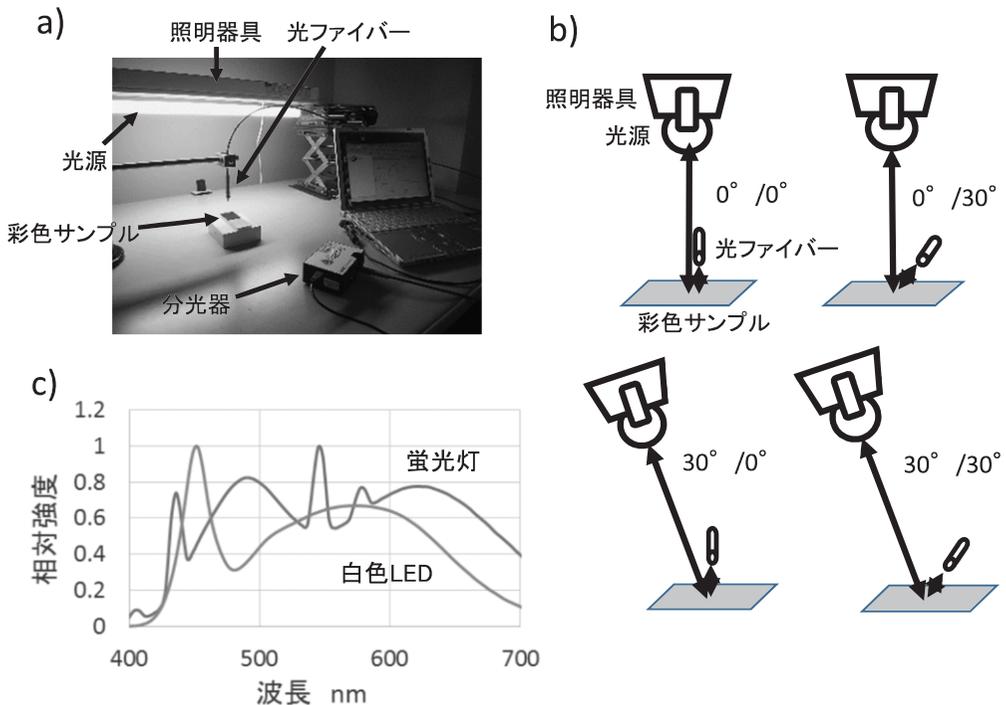


図 1 反射スペクトル測定システム

- システム構成
- 各照射角/検出角における位置関係（模式図）
- 各光源の発光特性

- ・測定時間：150ミリ秒（10回繰り返し測定の平均値）
- ・光源・サンプル間距離：30cm
- ・サンプル・光ファイバー先端間距離：3 cm
- ・照射角/検出角：（サンプル面の垂直方向に対して） $0^\circ/0^\circ$ 、 $0^\circ/30^\circ$ 、 $30^\circ/0^\circ$ 、 $30^\circ/30^\circ$ の4通り。

### 3. 結果

#### 3-1. 両光源間での反射スペクトル比較

蛍光灯、白色 LED 照射下における各サンプルの反射スペクトルを照射角/検出角の組み合わせごとに示したのが図2である。蛍光灯では、多くのサンプルで水銀からの輝線（主に546nm付近）による影響があるものの、両光源のものとのスペクトルには大きな相違は見受けられなかった。 $0^\circ/0^\circ$ と $0^\circ/30^\circ$ における辰砂13番では反射率に若干の差が生じたが、これはサンプルの色ムラの影響と考えられる。図2で示したスペクトルの同一性を確認するために、横軸を波長、蛍光灯と白色 LED での反射率をそれぞれ  $I_{FL}$ 、 $I_{LED}$  とし、 $I_{FL}/I_{LED}$  を縦軸としたプロットを図3に示す。水銀の輝線を除けば、胡粉ではすべての照射角/検出角の組み合わせにおいて、 $I_{FL}/I_{LED}$  の値全波長帯に渡って一定であった。他のサンプルについても、反射率が低い波長域ではノイズの影響によるぶれがあるものの同様であった。これは先に述べた同一性、つまり同じ照射角/検出角のもとでは、両光源間でのスペクトルにほとんど相違がないことを担保するものである。

#### 3-2. 各照射角/検出角のもとでの反射スペクトル比較

鑑賞や目視調査の状況を想定し、照射角を $30^\circ$ とした際の、検出角 $0^\circ$ と $30^\circ$ での反射スペクトルを図3に示したものと同じ手法で比較した。図2のスペクトルをもとに、横軸を波長、検出角 $0^\circ$ と $30^\circ$ での反射率をそれぞれ  $I_{30/0}$ 、 $I_{30/30}$  とし、 $I_{30/0}/I_{30/30}$  を縦軸としたプロットを図4に示す。胡粉ではどちらの光源でも全波長域でほぼ1.0と一定であり、検出角による相違はみられなかった。他のサンプルでは、両光源ともに、若干の数値の差はあるものの、共通して反射率の高い波長域（図2参照）では  $I_{30/0}/I_{30/30}$  は1.0に近く、小さい波長域ではこれが減少する傾向がみられた。これは、両光源ともに、吸収の大きい波長域での反射率が、検出角が $30^\circ$ の時に $0^\circ$ と比べて大きくなることを示すものである。

さらに、検出角を $30^\circ$ に固定した場合の照射角 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ での反射スペクトルを、横軸を波長、縦軸を  $I_{0/30}/I_{30/30}$  として比較した（図5）。相違の傾向は図4と同様であった。

これらの結果をもとに、群青13番、松葉緑青13番、辰砂13番の照射角/検出角がそれぞれ $30^\circ/0^\circ$ 、 $30^\circ/30^\circ$ での白色 LED 光照射時の反射スペクトルの比較を行った（図6）。いずれのサンプルでも共通して先に記した通り、反射率の高い波長域ではほとんど相違がなかった。一方、低い波長域では検出角 $30^\circ$ のほうが $0^\circ$ に比べて最大でも3%程度であるが、反射率の増大が認められた。これは $0^\circ/30^\circ$ 、 $30^\circ/30^\circ$ の比較でも同様であった。

### 4. 考察

前章で述べた通り、同じ相関色温度の直管形蛍光灯と白色 LED 光照射下での4通りの照射角/検出角のもと、顔料による彩色サンプルの反射スペクトル測定を行った結果、同じ組み合わせでは、両光源の間に反射スペクトルの相違は生じないことが判明した。これは、ガラス管に塗布された蛍光体から白色光を放射する蛍光灯に対して、白色 LED は管内に直列配置された実装型チップからの光放射のために前方指向性が高く、これが両光源間におけるサンプル表面での拡散反射の状態に差異を生じさせるという我々の想定とは異なるものであった。この理由に

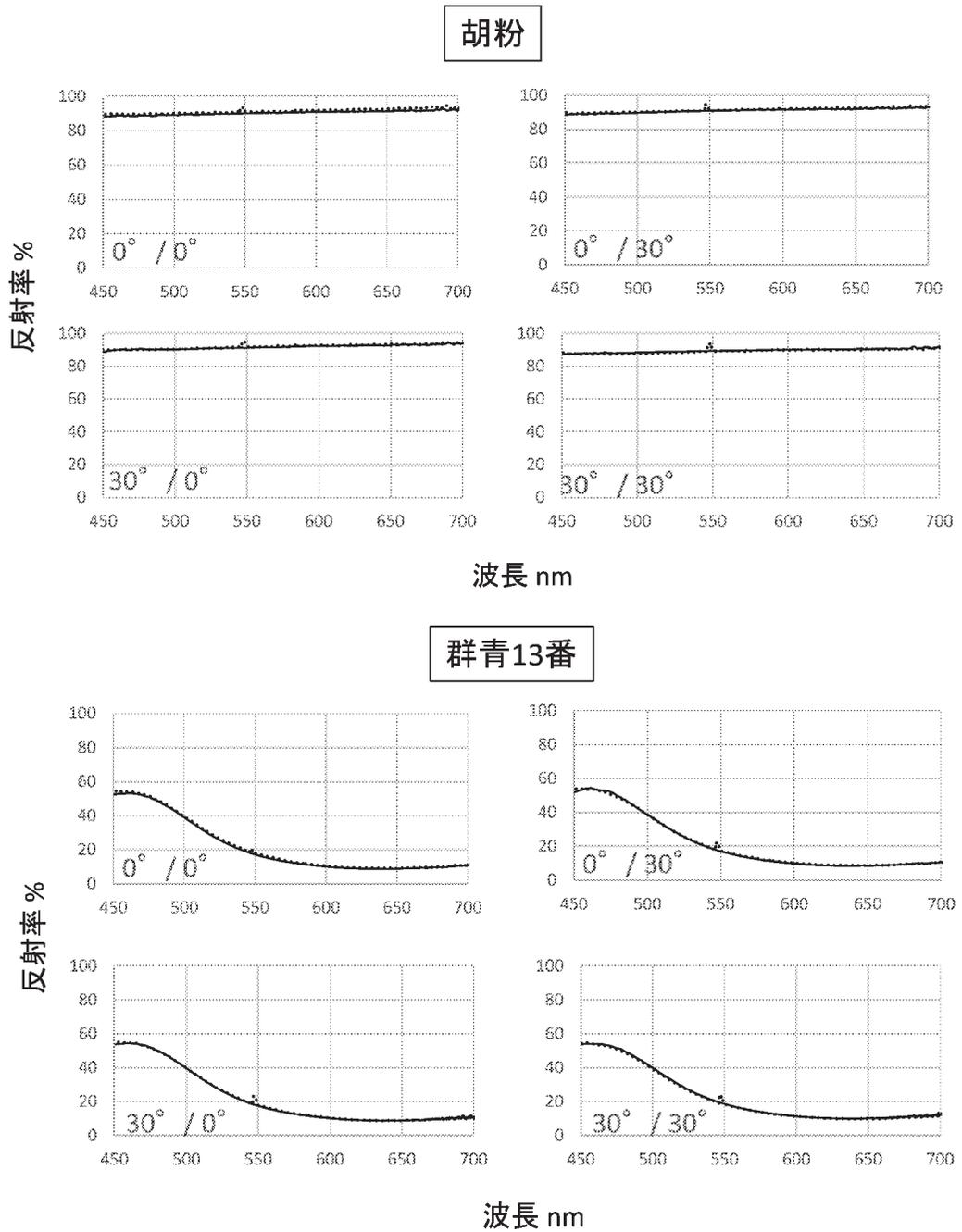
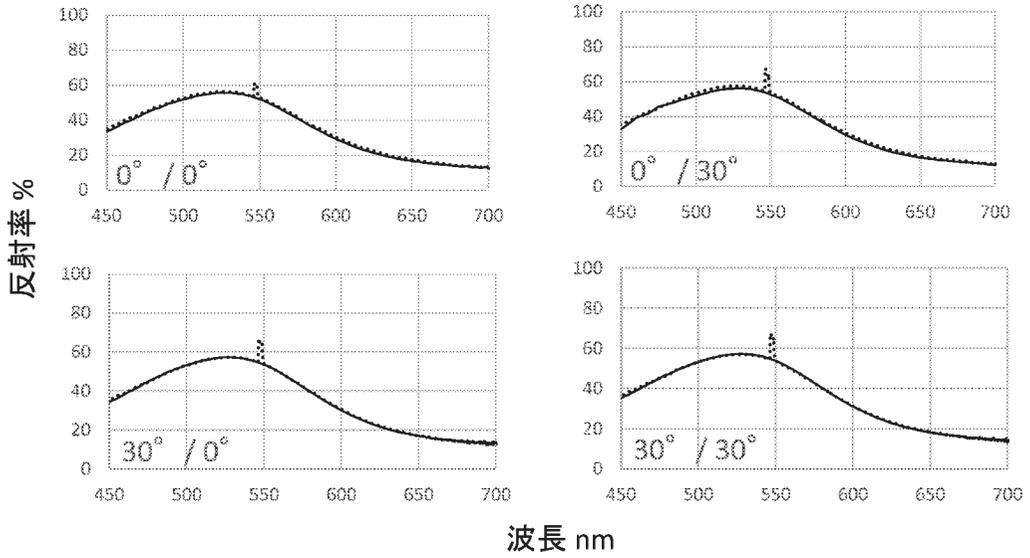


図2 各照射角/検出角での反射スペクトルの比較 (点線：蛍光灯, 実線：白色LED)

### 松葉緑青13番



### 辰砂13番

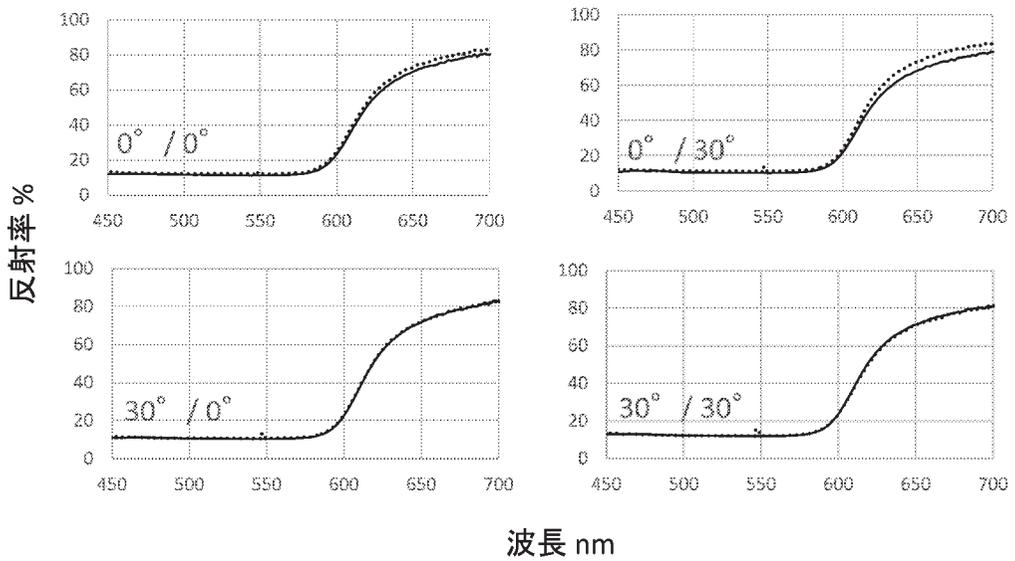


図2 続き

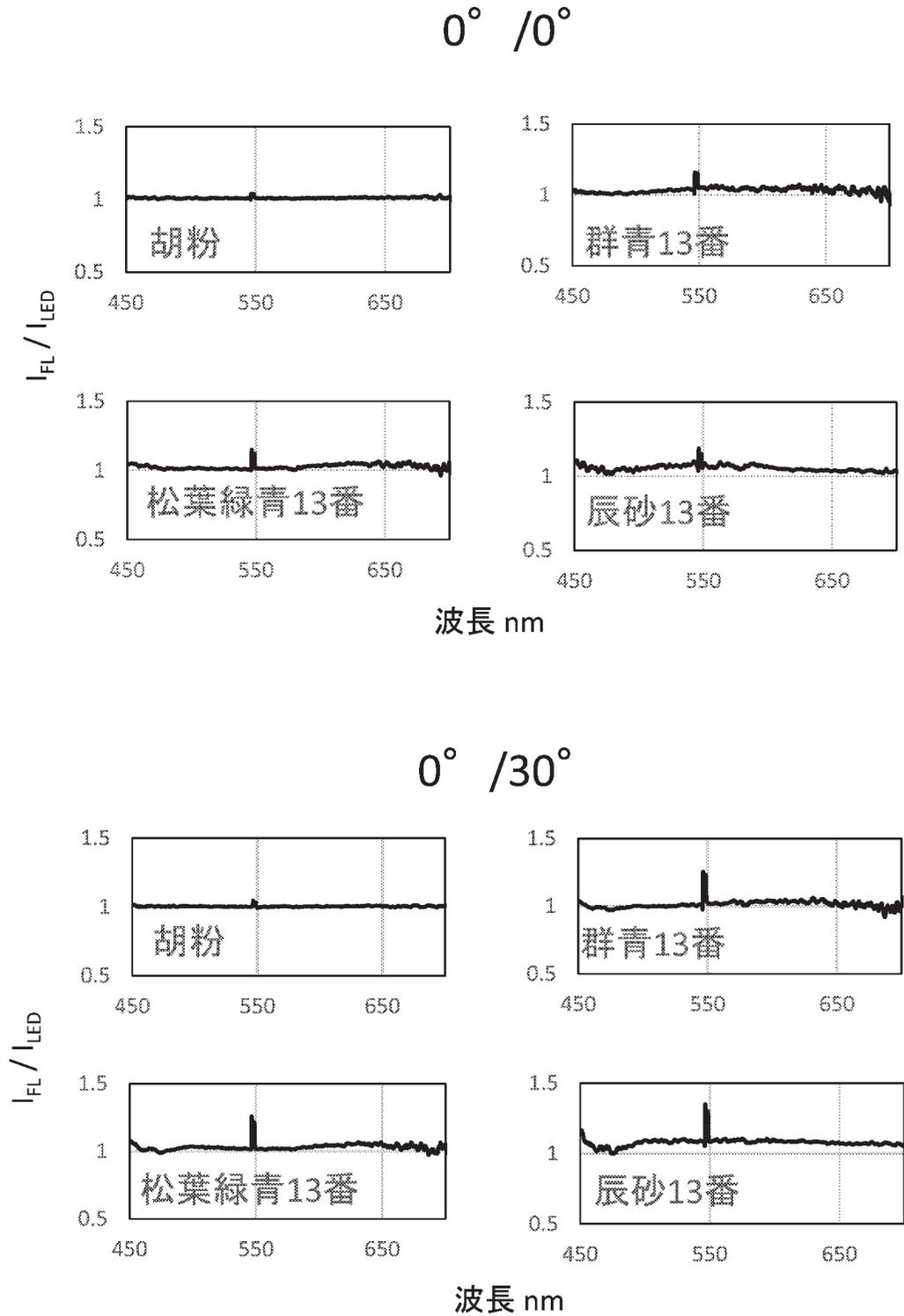
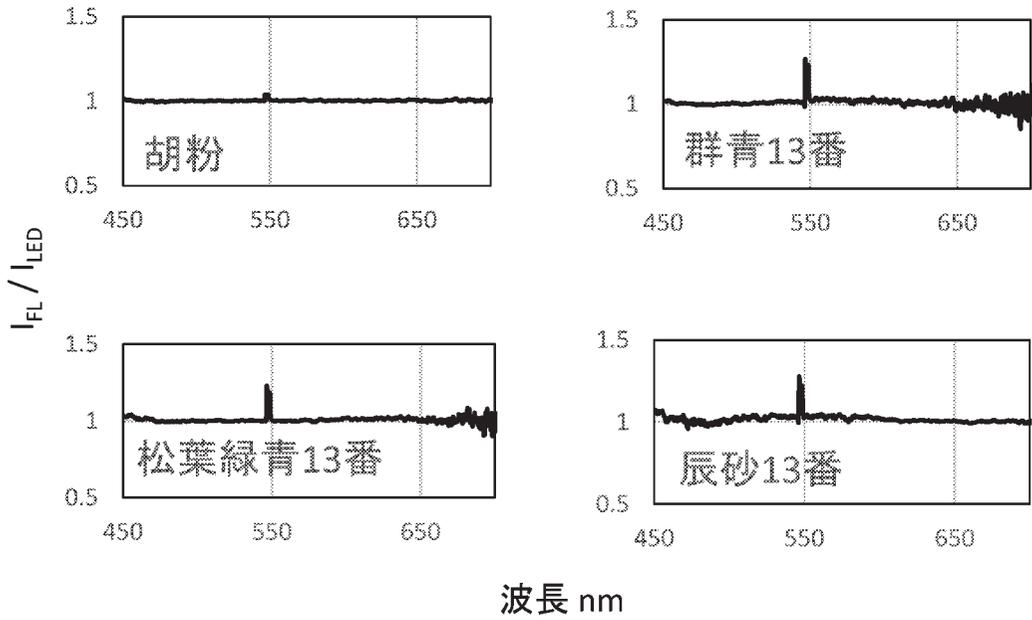


図3 照射角/検出角ごとの彩色サンプルの波長と  $I_{FL}/I_{LED}$  との関係

30° / 0°



30° / 30°

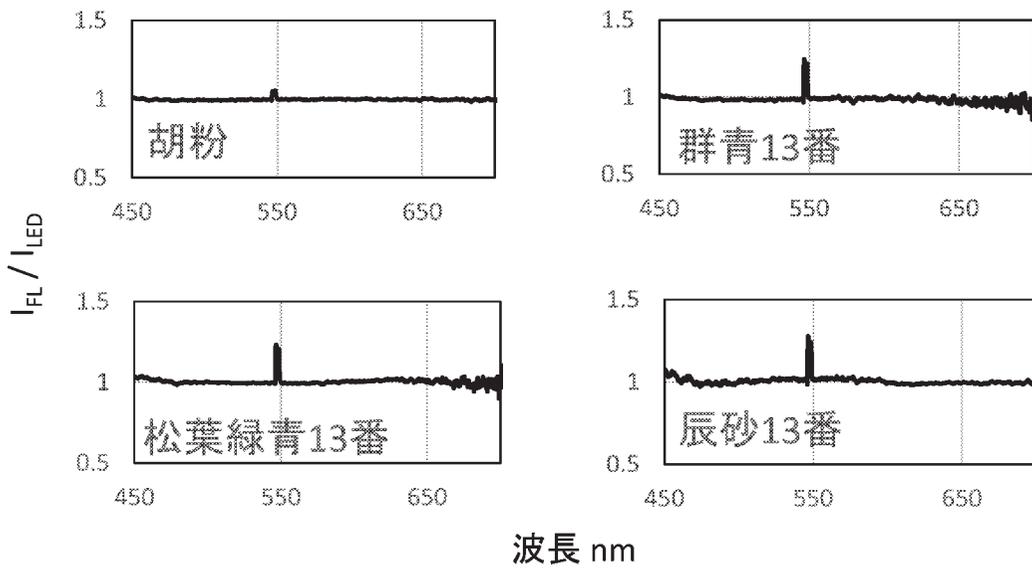


図3 続き

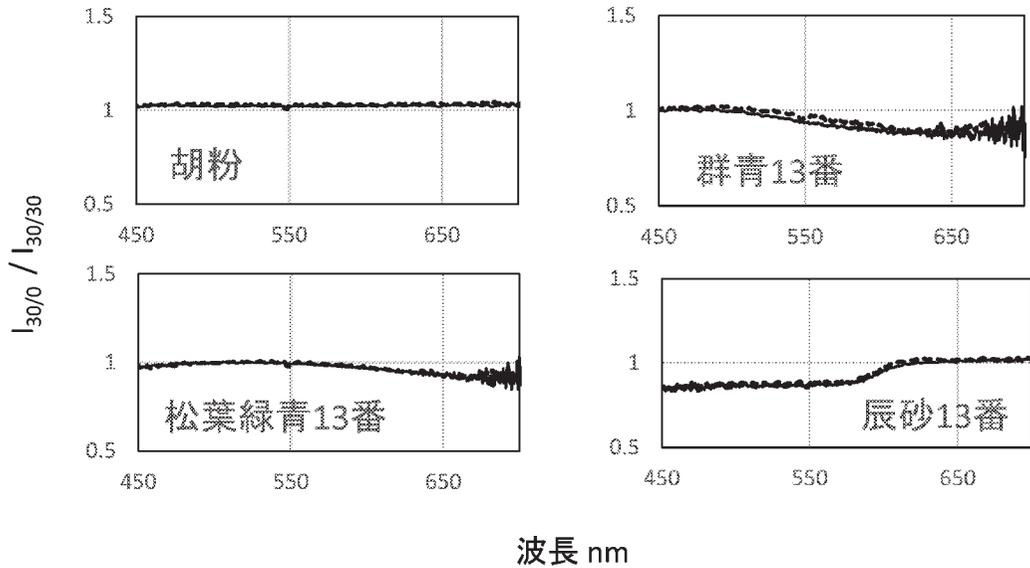


図4 波長と  $I_{30/0} / I_{30/30}$  との関係 (点線：蛍光灯，実線：白色 LED)

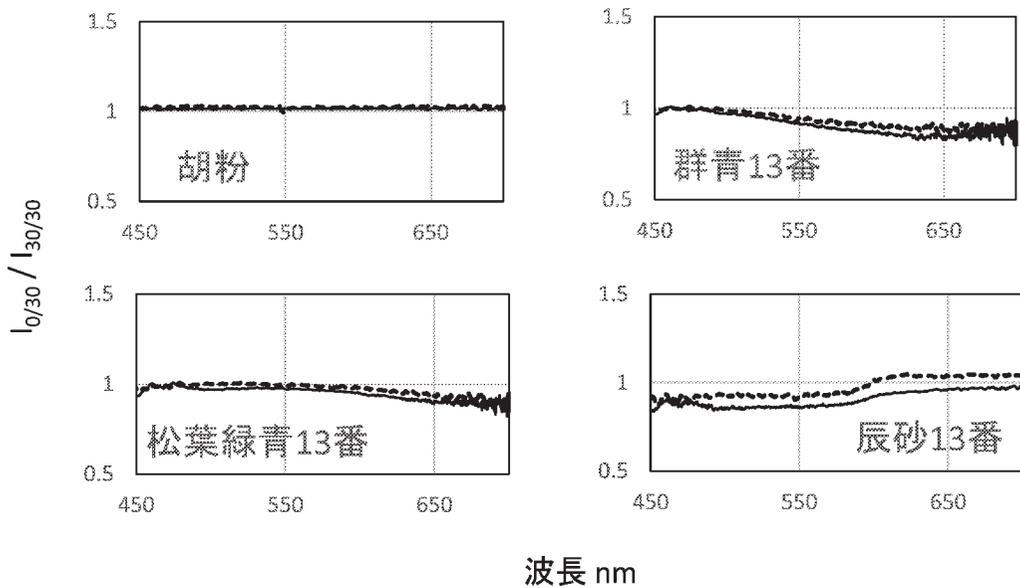


図5 波長と  $I_{0/30} / I_{30/30}$  との関係 (点線：蛍光灯，実線：白色 LED)

については、白色 LED のカバー管も蛍光灯同様に白色であり、放射光が十分拡散されるために、指向性に蛍光灯と大きな違いがなかったためと考えている。今後、スポットランプのような、より白色 LED と他の光源での指向性の違いが表れると考えられる照明での検証が必要であろう。

一方で今回の実験では、胡粉以外の彩色サンプルの反射スペクトルは、両光源に共通して、照射角と検出角によって若干の変化が生じることが判明した。図4～6で示した通り、照射角、

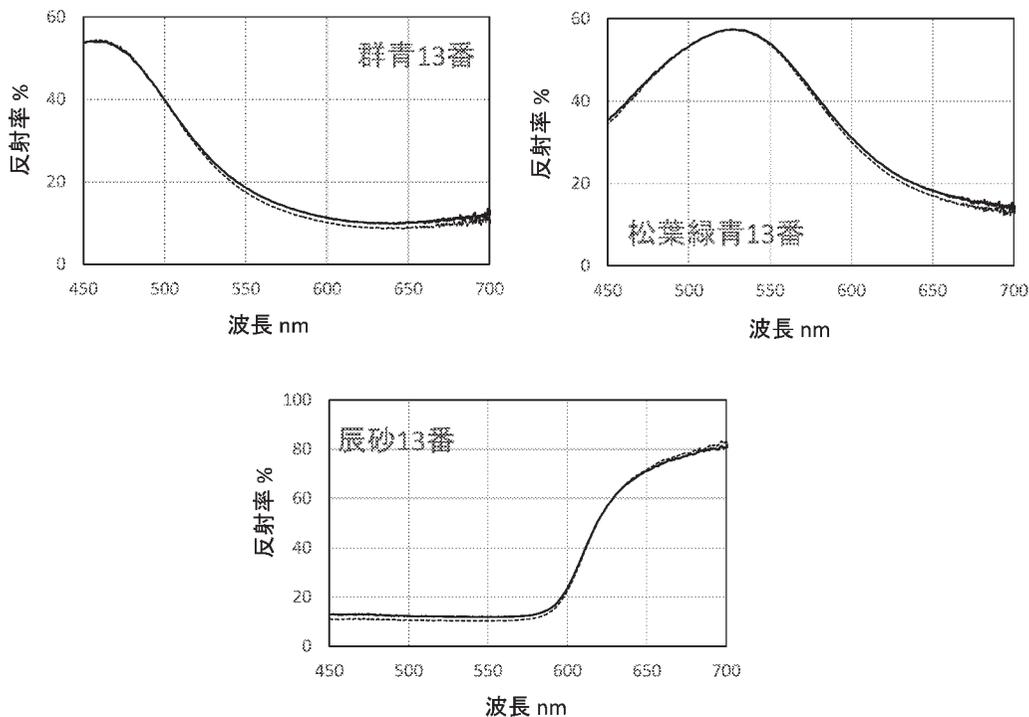


図6 白色 LED 光照射時の反射スペクトル  
(点線：30°/0°，実線：30°/30°)

検出角ともに30°の場合に、いずれかが0°の時に比べて、反射率の低い波長域で、その数値がやや増大する傾向が認められた。この増大は、サンプル表面が鏡面ではないため、その割合は小さいと考えられるものの、正反射光の寄与によるものであるという解釈が最も分かりやすい。一方、反射率の高い波長域での相違がみられなかったことに対しては、これでは説明ができない。サンプルに照射された光は、表面で反射するだけではなく、彩色層内に入射し、顔料粒子や支持体との衝突により乱反射し、吸収され、または層外に出るものが存在する。従って、今回の結果を解釈するには、層内における光の振る舞いも把握する必要がある。ひとつの仮定として、反射率の低い波長帯の光は層内で吸収されるため、反射スペクトルには反映されず、逆に反射率の高い波長帯の光は、層内を乱反射した後、多くがランダムな角度で層外に出ることから、表面での正反射の寄与を弱めている可能性を想定している。この仮定については、今後顔料粒子の粒径や彩色層の厚みをコントロールしたサンプル、また染料によるサンプルでも検証を進め、層内に透過した光の振る舞いを把握することによって妥当性を明らかにしたい。また、今回は測定波長域が450～700nmであったために色差を求めることが出来なかったが、スペクトルの相違は彩度の差として表れると考えられる。この差が視覚に与える影響についても今後の課題である。

## 5. まとめ

同じ照射角/検出角のもとでは、直管型蛍光灯と白色 LED 光照射時における、顔料による彩色サンプルの反射スペクトルに相違のないことが、今回の測定によって示された。一方、同一

光源でも照射角や検出角によって、反射スペクトルに相違の生じることを示す結果が得られた。画絹の表面状態が光の反射特性に影響することを示した先行研究がある<sup>8)</sup>。今回の結果も同様に光の角度が表面での拡散反射、さらに人が感じる色彩や印象に影響することを示唆するものであるといえる。今後もこの手法を用いて、他の材質や、またスポットライトなど展示に使用される他の種類の照明、またさらに実際の展示空間に近い条件で同様に検証を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 齊藤昌子、中村弥生、森山巖興、河本康太郎：白色 LED ランプの美術・博物館用照明としての適性—天然染料染色布の変退色—、照明学会誌 98(11) pp. 585-592 (2014)
- 2) 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 (2015)
- 3) 大井尚行、高橋浩伸：住宅居間における照度・色温度の好ましさに関する蛍光灯と LED の比較模型実験、日本建築学会環境系論文集、第638号、pp.421-426、2009.04.
- 4) 久保千穂、山岸未沙子、阿山みよし、山羽和夫：LED 照明と蛍光灯下での色文字の可読性、照明学会誌 97(5) pp. 255-268 (2013)
- 5) 藤原工：LED による美術館照明の課題と今後、照明学会誌、97(6)、pp.302-307
- 6) 中島由貴、瀧田隆義：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—、照明学会誌、99(5) pp.263-269 (2015)
- 7) 吉田直人：第3章“光と照明”、東京文化財研究所編『文化財の保存環境 pp.35-56 中央公論美術出版 (2011)
- 8) 山田祐子、志村明、秋本賀子、加藤雅人、吉田直人：画絹の生糸形状が発色に与える影響、文化財保存修復学会第38回大会研究発表要旨集、pp.56-57 (2016)

キーワード：白色 LED (White LEDs)；展示照明 (Museum Lighting)；拡散反射 (Diffuse Reflection)

## **Comparison of Visible Reflection Spectra of Color Materials Illuminated by Fluorescent and White LED Tube Lamps**

YOSHIDA Naoto, YAMADA Yuko\* and ISHII Kyoko

The difference in visible reflection spectra of four color materials painted on paper, illuminated by fluorescent and white LED tube lamps of the same color temperature, was investigated. Based on observed spectra, the following may be said.

- (1) In the same illuminating and detecting angles, no significant difference was observed from measured spectra with two types of lamp.
- (2) Changes in illuminating and detecting angles caused slight difference in spectra, which may affect to the observed hue of each color material.