

博物館におけるLED照明の現状：2015 年夏 国立民族学博物館展示場での実験データから

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2016-06-02 キーワード (Ja): キーワード (En): LED spotlight museum lighting lighting experiment optics properties technical 作成者: 園田, 直子, 日高, 真吾, 末森, 薫, 奥村, 泰之, 河村, 友佳子, 橋本, 沙知, 和高, 智美 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15021/00006073

博物館におけるLED照明の現状

—2015 年夏 国立民族学博物館展示場での実験データから—

園田直子* 日高真吾* 末森 薫* 奥村泰之** 河村友佳子***
橋本沙知*** 和高智美****

The Current State of LED Museum Lighting: Summer 2015

Naoko Sonoda, Shingo Hidaka, Kaoru Suemori, Yasuyuki Okumura,
Yukako Kawamura, Sachi Hashimoto, Tomomi Wadaka

美術館や博物館において LED 照明を展示照明として導入する事例が、近年、増えてきた。しかしながら、博物館等で LED 照明を用いるにあたっての明確な指針はまだなく、その選択基準は課題となっている。国立民族学博物館では、2015 年夏、展示照明の全 LED 化が決定した。そこで、国内外 9 社から 6 社 23 機種を選別し、25 測定の照明実験を実施したので、その結果を、実測値をもとにまとめる。なお、実験は、現時点での LED スポットライトの現状と傾向を明らかにすることが目的で、個別のメーカーや機種の優劣を論ずるものではない。

照明実験では、同一条件下での光学特性（分光分布、光量子束密度、色温度、演色性を、それぞれ照度最大値、100 lx、30 lx で測定）と、目視観察による「ものの」見え方の評価をおこなった。LED 照明が、紫外線や赤外線領域の波長をほぼ含まないことは、分光分布や光量子束密度からも確認できた。色温度は、市販の製品では 3000 K が主流であったが、民族資料の展示を想定した場合、2700 K と 3000 K を併用するか調色タイプがのぞましいというのが実験に立ち会った本館教職員の総意であった。また、これまでの LED 照明では演色性が悪いことが課題であったが、ハロゲンランプの演色性に匹敵する高演色性の LED スポットライトが製品化されていることが確認できた。調光機能は全調査

* 国立民族学博物館 文化資源研究センター

** 国立民族学博物館 情報管理施設情報課

*** 公益財団法人 元興寺文化財研究所

**** 合同会社 文化創造巧芸

Key Words : LED spotlight, museum lighting, lighting experiment, optics properties, technical requirements

キーワード : LED, 展示場照明, 照明実験, 光学特性, 技術的要件

機種で装備されていた。さらには、調色可能な機種、リモートコントロールできる機種など利便性の高い製品が市販されており、博物館で使用するにあたっての選択肢がひろがっている。本館では、これまでのハロゲンランプを対象とした技術的要件に、これらの結果を勘案し、新たに展示場照明のLEDスポットライトの選定にあたってもとめる性能の基本方針を策定した。

LEDの開発はめざましいが、本稿は新しい製品を検討するには基礎資料として活用できるものである。また、本稿は民族資料の展示を想定したものであるが、他の分野の博物館・美術館においても参考になる情報となっている。

Museums are increasingly using LEDs for lighting. However, there is no clear guidance yet concerning the selection of such lighting. In summer 2015, the National Museum of Ethnology, Japan (Minpaku) decided to introduce LED spotlights in all its exhibition galleries. That led us to conduct a lighting experiment, taking 25 measurements on 23 models from six manufacturers (selected from nine manufacturers from Japan and abroad). The results of the lighting experiment are summarized in this paper, based on the actual data. The aim of this paper is to evaluate and understand the actual performance of LED spotlights. There is no intention to discuss the relative superiority or inferiority of each manufacturer or model.

The lighting experiment consisted of measuring optical properties under the same conditions (spectral distribution, photon flux density, color temperature, color rendering, all measured under three illuminance levels: maximum value, 100 lx, and 30 lx), and of evaluating how “objects” looked like under each experimental condition. Spectral distribution and photon flux density measurements confirmed that LED spotlights did not shed UV or IR radiation. A color temperature of 3000 K seemed to be the major trend, but for displays in a museum of ethnology, we concluded that it was preferable to simultaneously use 2700 K and 3000 K spotlights (or a color temperature adjustable type).

The results of the lighting experiment demonstrated that color rendering of LED spotlights now equal that of halogen lamps. For all the models tested, it was possible to control the light by dimming. Moreover, we revealed that some models could adjust color temperature, while others had a remote-control function. Those results show that a wider choice is now available in the selection of museum lighting. In our museum, the technical requirements for LED spotlights are made based on the existing requirements for halogen lamps, and taking into consideration the above results.

The development of the LED is remarkably rapid, but we believe that this report can be utilized as a basic document to examine new products. Although it focused on the lighting used in exhibition displays at an ethnological museum, the information can also serve as a reference for other types of museums.

1 はじめに	3.2 光量子束密度
2 LED 照明実験の概要	3.3 色温度
2.1 実験の目的と対象機種	3.4 照度
2.2 実験方法	3.5 演色性
2.2.1 各照明の光学特性の測定	3.6 操作性
2.2.2 各照明下における「もの」の見え方の確認および記録	4 民博の展示で求める LED スポットライトの性能
2.2.3 特殊照明器具の見え方の確認	5 まとめ
3 実験結果	追補
3.1 分光分布	

1 はじめに

博物館展示において、光は不可欠な要素である。照明の光源には自然光と人工的な光があり、後者の歴史は、1879年の電球（エジソン、実用炭素電球）、1938年の蛍光灯（インマン他、熱陰極蛍光灯）、そして1996年のLED（light emitting diode、発光ダイオード）の発明と、60年ごとに大きな変革期を迎えてきた（照明学会編 2003: 4; 大谷・落合 2011: 132–133）。博物館の展示照明も、これまでは蛍光灯とハロゲンランプ（発光原理は白熱電球に準じる）が主流であったが、近年、その状況が大きく変化しつつある（佐野 2013: 301; 藤原 2013: 302–307）。

LED照明は、これまでの照明に比べて消費電力が少ない、小型、長寿命、点灯・消灯の速度が速いなど、多くの利点をもつ（照明学会編 2003: 127; 堀井 2011: 158–162）。その一方で、調光が利かない、直進性が強く周辺が暗い、演色性が悪いなどの欠点があった。演色性とは、同じ色の「もの」でも、照らす光によって色の見え方が変わる光源の性質のことであり、太陽光の下で見る色と同等の色を再現することが求められる博物館の照明では重要な指標である。したがって、演色性が悪いという欠点は博物館におけるLEDスポットライトの導入が遅れる要因ともなっていた。しかしながら、LED照明の開発が進み、これらの欠点を克服した製品が市販されるようになり、特に2010年以降には、その動向が多く報告されている（野口 2011: 145–151; 別所 2011: 138–144; 松本 2011: 163–167）。現在、美術館や博物館でも各種のLED照明

を展示照明として導入する事例が増えてきた（藤原・田中 2011: 168–170; 小林 2012: 4–26; 矢野 2012: 39–61; 和田 2012: 134–138; 木下 2013: 308–314; 森山 2013: 327–332; 石澤 2014: 1–6）。また、LED 照明が資料に及ぼす影響や LED 照明による色の見え方に関する研究も進められている（石井ほか 2007: 78–86; 齊藤 2013: 315–319; 齊藤 2014: 585–592; 中島 2014: 79–89）。しかしながら、博物館で LED 照明を用いるにあたっての明確な指針はまだなく、その選択基準はひとつの課題となっている（河本 2009: 139–140; 渕田 2013: 320–326; 藤原 2014: 148–149）。

国立民族学博物館（以下、民博）における LED スポットライトの利用については、従来使用してきたハロゲンランプの展示照明に比べて、演色性が悪いという点や複数の LED 素子を用いて照明する仕組みの LED スポットライトにおいて、それぞれの素子の影が映り込まないための拡散フィルターの開発の遅れなどの技術的な問題から、展示照明としての導入を見合わせてきた。一方で、消費電力が少ない、長寿命であるという LED の特性を活かすため、2008 年から開始した本館展示新構築の一環として、展示資料の照明ではなく、動線やバッファゾーン（写真 1）、サインパネルの照明として、随時導入していった。

しかし、民博では 2014 年度、これまで使用していたハロゲンランプのスポットラ



写真 1 バッファゾーンの照明

イトの生産が中止されたことに伴い、LEDの導入を検討せざるを得なくなった、そこで、本格的にLEDスポットライトの導入に向けた情報収集をおこない、検証した。筆者らを中心に、民族資料を想定した布（私物のストール）と木製品（木箱）などに複数の色温度のLEDスポットライトを照射し、検証した結果、木材を中心とした資料には、木の温もりを感じさせる暖かい見え方をする色温度2700 KのLEDスポットライト（LEDSP150 形中角 27 K 美光色 調光，パナソニック社），金属素材を中心とした資料には、すっきりと輪郭が見える色温度3000 KのLEDスポットライト（LEDSP150 形中角 30 K 美光色 調光，パナソニック社）を用いることとした。

2015年夏、展示照明の全LED化が決定した。LED照明の開発は日進月歩であることから、展示照明としてのLEDスポットライトの市場調査を改めておこない、入手可能な製品を対象にその性能について評価する照明実験を実施した。本稿では、照明実験の結果を総合的に検証し、LEDスポットライトの現時点での性能を明らかにする。その上で、民博が必要とするLEDスポットライトの性能を確立する。

LEDの開発はめざましく、より高性能の製品が近い将来あらわれてくると思われるが、本稿は、新しい製品を検討する際の基礎資料として活用できよう。また、本稿は民族資料の展示を想定したものであるが、他の分野の博物館・美術館においても参考になる情報であると考ええる。

2 LED照明実験の概要

2.1 実験の目的と対象機種

LED照明実験の目的は、同一条件下でのLEDスポットライトの光学特性を測定し、目視観察による「もの」の見え方の違いを評価し、それぞれのLEDスポットライトの性能を検証することである。

実験に先立ち、7月初旬から中旬にかけてLEDスポットライトに関する情報を国内外9社から収集し、各社から提示された製品情報をもとにその仕様を確認し、実測する機種を6社23機種に選別した。最終的には7月末の3日間、これらの機種をもとに25の測定を実施した¹⁾。表1に、実測したLEDスポットライトを白色に発光させるための励起源の種類、光の色を定量的な数値であらわす色温度、配光角、消費効率、消費電力、重量を、各メーカーから提示された製品情報をもとにまとめる。

なお、この実験は、2015年夏の時点でのLEDスポットライトの現状と傾向を明ら

表1 実測の対象としたLEDスポットライトの基本情報

メーカー	機種	測定 番号	励起源	色温度 (K)	配光角 (°)	消費効率 (lm/W)	消費電力 (W)	重量 (kg)
A	1	①	青色LED	2700	15	51.8	18.5	0.8
		②		～				
		③		4200				
	2	④	青色LED	3000	14	42.5	12	n/a
B	3	⑤	青色LED	3000	7	48.5	10	n/a
	4	⑥	青色LED	2700	10	21.2	22	1.5
	5	⑦	青色LED	3000	10	17.3	15	0.7
	6	⑧	青色LED	3000	18	58.7	15	0.7
C	7	⑨	青色LED	3000	15	54	19.9	0.8
	8	⑩	青色LED	3000	22	62	29.2	1.2
	9	⑪	青色LED	3000	22	62	36.5	2.7
	10	⑫	青色LED	3000	22	n/a	29.4	1.3
	11	⑬	青色LED	2700	16	67.3	13.8	n/a
D	12	⑭	紫色LED	2700	13	n/a	30	2
	13	⑮	紫色LED	3000	13	n/a	30	2
	14	⑯	青色LED	2700	20	30.7	26	1.3
	15	⑰	青色LED	3000	20	n/a	26	1.3
	16	⑱	青色LED	3000	17	33.3	18	1.2
	17	⑲	青色LED	3000	11	26.9	26	1.3
E	18	⑳	紫色LED	3000	10	60	20	1.5 ²⁾
	19	㉑	紫色LED	3500	10	60	20	1.5 ²⁾
	20	㉒	紫色LED	3000	20	60	20	1.5 ²⁾
	21	㉓	紫色LED	3500	20	60	20	1.5 ²⁾
F	22	㉔	青色LED	2700	23	55	16	0.9
	23	㉕	青色LED	3000	23	59.1	16	0.9

かにすることが目的で、個別のメーカーや機種の優劣を論ずるためのものではない。結果をまとめるにあたっては、表1の測定番号①～㉕で記述する。

2.2 実験方法

LED照明実験の実験場所には、民博本館展示場の「ナビひろば」(写真2)を選定した。ナビひろばは個別のスイッチでの照明制御が可能であるとともに、入口にシャッターが設置されている。したがって、ナビひろばのみ消灯して、シャッターを閉めることで開館時でも隣接する展示場の照明をある程度、遮光して実験をおこなうことができる。また展示場照明と同じ高さから照明することが可能であり、より実際の展示環境に近いデータを得ることができる。ナビひろばには、入口から見て右手奥の壁面に展示用のCPパネル³⁾が3枚(写真3)ある。これらは、本館展示場と共通



写真2 ナビひろば

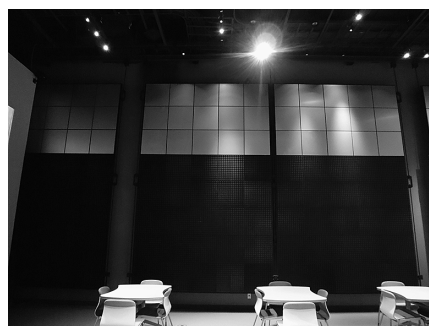


写真3 展示用のCPパネル

の展示パネルであることから、実験にて照明をあてる対象に選定した。

民博の展示場では資料の他に、解説文や写真、地図などが記されたパネルを照明で照らす場合がある。そこで、照射範囲を任意で区切ることのできるカッタースポットと照射範囲を均一に照らすことのできるウォールウォッシャーの2つの特殊照明の見え方を、目視で確認することとした。入口から見て右手壁面にある文字および写真が記されたキャプションパネルをカッタースポットで照らし、左手壁面の世界地図の記されたキャプションパネルをウォールウォッシャーで照らして見え方を確認した。照明を設置する場所は、ナビひろば中央に縦に走る配線ダクト（床上5.5m）を使用し、照明同士の干渉を考慮して照明の設置ポイントは5箇所とした。（図1）。

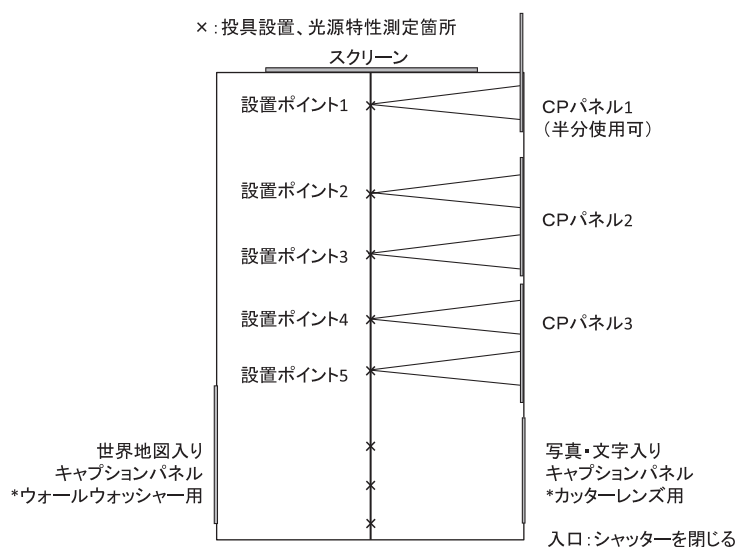


図1 照明実験模式図 (ナビひろば)

2.2.1 各照明の光学特性の測定

各照明の光学特性の測定では、床面よりレーザーポインターを照明にあて、各照明の直下を計測し、測定位置を定めた。測定の高さは、現在、民博の展示場で使用している展示台のうち最も低い高さのもの（0.17 m）を想定し、床上 0.2 m（光源からの距離 5.3 m）とした（写真 4）。



写真 4 光学特性の測定

また、光学特性の測定条件は、光源に照らされている面の明るさを表し、ルクス（lx）という単位で示される照度の値により設定することとし、最大値、100 lx、30 lx の三つの条件を基準として調光をおこなった。

光学特性の測定には下記の三つの機器を使用した。各照度計の仕様を表 2 にまとめる。

- a) 分光放射照度計（CL-500A, コニカミノルタ株式会社）
- b) スペクトルメーター（MK350S, UPRtek 社）
- c) デジタル照度計（LX-1332D, 株式会社カスタム）

a) は分光方式の照度計であり、照度、分光スペクトル、色温度、色座標、演色性といった光源の基本的な光学特性を測定することができる。

b) は LED 光源向けの分光方式のスペクトルメーターであり、CL-500A で測定可能な基本的光学特性を測定できるほか、光量子束密度や LED 素子の分類に使用する BIN コードを測定できる⁴⁾。またカメラが内蔵されており、測定ポイントの記録や輝

度分布を測定することが可能である⁵⁾。

c) は RGB フィルターセンサー（シリコンフォトダイオード）方式の照度計であり、標準電球と呼ばれるフィラメント型電球によって校正されている。そのため、蛍光灯や LED など標準光源と異なる波長特性を持つ光源の場合、必ずしも正確な数値が測定されるとは限らない。今回の実験においては、分光型の機器に比べ程度低い値が測定された。本機器は、測定値の変化を瞬時に確認でき、また、民博展示場のハロゲン光源の照度測定に通常用いていることから、本実験では灯具の調光をおこなう上での指標値の測定に用いた。

表 2 各照度計の仕様

	CL-500A	MK350S	LX-1332D
受光方式	分光方式	分光方式	RGB フィルター方式
受光センサー	n/a	CMOS リニアイメージセンサー	シリコンフォトダイオード
測定波長域	360 ～ 780 nm	380 nm ～ 780 nm	400 ～ 700 nm *555 nm をピークとして校正
波長幅	約 10 nm（半値幅）	約 12 nm（半値幅）	n/a
測定範囲	0.1 ～ 100,000 lx	20 ～ 70,000 lx	0.1 ～ 200,000 lx
露光時間	約 0.2 ～ 0.5 秒 オート：約 0.5 ～ 27 秒	0.006 ～ 5 秒	2.5 回 / 秒
照度精度	± 2% ± 1 dgt	± 5%	± (4% rdg + 5 dgt)/200, 2,000 lx, (5% rdg + 4 dgt)/20,000, 200,000 lx

2.2.2 各照明下における「もの」の見え方の確認および記録

各照明下における「もの」の見え方の確認および記録では、目視による見え方の確認とデジタルカメラによる記録撮影をおこなった（写真 5）。また、LED スポットライトで資料を照らす際の照度の下限值や、手作業や文字を読む上で必要となる照度の値を確認した。

「もの」の見え方を確認するための素材は、カラーチャート（x-rite カラーチェッカー CLASSIC / エックスライト社）、民博のポスター 2 種（赤系、青系）、木箱、私物のストール（赤系、青系）、金属製ブックエンド（グレー）、アクリルケースを使用した。これらの設置にあたっては、ポスターを CP パネルに貼付し、その他を CP パネル前に置いた机の上に設置した。民博の展示場では床下から 1.35 m を目線の高さの基準としていることから、ポスターの下辺およびカラーチャートの上辺が、その高さに来るように配置した（写真 6）。



写真5 デジタルカメラによる記録撮影



写真6 見え方の確認状況

照明は、直下の床面での中心照度を 100 lx に調整後、CP パネルに照明を振り、床下から 1.35 m の高さに照射範囲の中心が来るよう設置した。

デジタルカメラによる記録撮影の条件は、照明機器ごとの調整はおこなわず、すべて同一の露出に設定した。また RAW データ（イメージセンサーに当たった光の量を数値化した生データ）から画像を生成（RAW 現像（Develop））するため、カメラのホワイトバランス設定は AUTO とした。RAW 現像においては、カメラでのホワイトバランス設定は影響を及ぼさない。照明機器から照射される配光範囲がわかる程度の広い画角と、カラーチャートを中心とした狭い画角の二つのパターンを撮影することとし、レンズの両端の焦点距離がそれぞれ 24 mm, 70 mm の位置を撮影範囲に設定した。なお、この記録撮影では、それぞれの照明の絶対的な色を評価するのではなく、個々の照明機器の相対的な見え方の違いを検証することを主目的としたことから、RAW 現像にあたっては、実験時の見え方に近い画像を作成することに留意した。具体的には、RAW 現像時のパラメータのひとつであるホワイトバランス（白色点の色温度）について、キャリブレーションモニターを用いて実験時の目視での見え方（感じ方）に近似するよう調整し、その他の画像補正（色調、彩度、明度など）は一切おこなわないこととした。本報告書 3.3 に示す写真 7 は、ホワイトバランス 3800 K で RAW 現像したものである。使用機器、撮影条件、RAW 現像方法を下記にまとめる。

[使用機器]

一眼レフカメラ：CANON EOS 5D Mark III

レンズ：CANON EF24-70mm f/2.8L USM

[撮影条件]

ホワイトバランス：AUTO

撮影感度：ISO2500

シャッタースピード：1/30 秒

絞り：f8

[RAW 現像]

画像処理ソフト：Canon Digital Photo Professional Version 4.1.1.0

ホワイトバランス：3800 K

カラースペース：sRGB

2.2.3 特殊照明器具の見え方の確認

カッタースポットやウォールウォッシャーなどの特殊照明について、その見え方や照度分布の確認をおこなった。カッタースポットはナビひろばの入口から右手壁面にある文字および写真が記載されたパネルを文字、あるいは写真を切り抜く形で照射した。また、ウォールウォッシャーは入り口から左手壁面にある横長の世界地図のパネルに照射した。その上で、これらの照射結果を、デジタルカメラで記録画像を撮影すると共に、カメラ内蔵のスペクトルメーターにて輝度分布を記録した。

3 実験結果

3.1 分光分布

調査対象機種の白色 LED の励起源には、青色 LED と紫色 LED の 2 種があった。なお、LED 素子を自社製造しているメーカーはほとんどなく、大半は国内外のメーカーから選別して使用しているとのことであった。

青色 LED と、その光で励起される黄色を発光する蛍光体の組み合わせで白い光をつくるのが青色励起 LED である。現在、主流となっているのはこの方式である。一方、紫色 LED で赤・緑・青の蛍光体を励起させて白い光とするのが、紫色励起 LED である。紫色励起 LED は演色性がよくなるが、発光効率では青色励起 LED に劣る

(藤原 2014: 146–147)。

LED スポットライトとの比較のため、図2に、ハロゲンランプ（色温度 3000 K、照度 19 lx の測定結果）の分光分布を載せる。ハロゲンランプは、短波長領域の波長はほとんど含んでいないが、780 nm 以上の赤外線領域の波長を多く含むことが分かる。

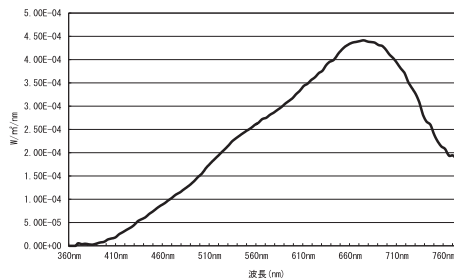


図2 ハロゲンランプ（3000 K）の分光分布（照度 19 lx で測定；CL-500A, コニカミノルタ株式会社）

図3に、各LED スポットライトの照度最大値、100 lx, 30 lx での分光分布を重ねて示す（y 軸はすべて $0 \sim 1.200\text{E-}02 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ で統一）。LED 照明は、その発光原理から、紫外線や赤外線領域の波長はほぼ含まない。分光分布からもそのことが確認できる。

青色励起 LED (①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑯, ⑰, ⑱, ⑲, ⑳, ㉑) の分光分布には、青色 LED の光に起因する 450 nm 付近にピークが見られ、このピークは色温度が高くなるほど、相対的に高くあらわれる。

紫色励起 LED (⑭, ⑮, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕) の分光分布をみると、450 nm（青色）、540 nm（緑色）、630 nm（赤色）付近の波長がやや強いが、全体はなだらかな分布である。紫色 LED に起因するピークは見られず、カットされていることが分かる。

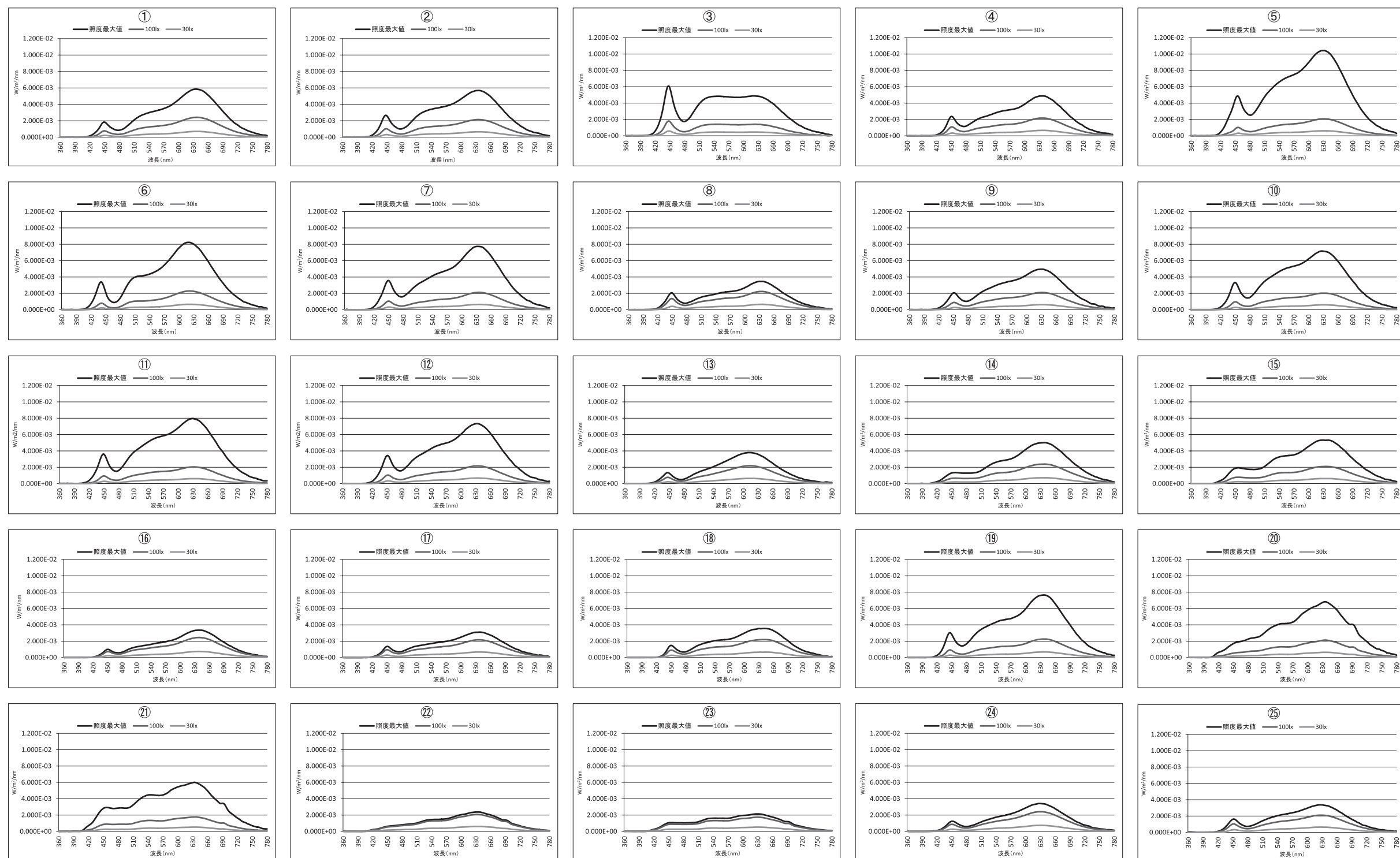


図3 LED スポットライトの分光分布（照度最大値，100 lx，30 lx で測定：CL-500A，コニカミノルタ株式会社）

3.2 光量子束密度

光量子束密度（PPF）とは、1秒あたり、1 m²あたりの光子の数をさし、単位は $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であらわす。そのため、エネルギーの高い紫外線など波長の短い光であっても、エネルギーの低い赤外線のような長波長側の光であっても、同じようにカウントされる。したがって光量子束密度は、光によって引き起こされる化学反応が、起きるか、起きないかが問われる化学や生物学の分野では基本となる概念といえる。およそその目安としては、光量子束密度は、真夏の直射日光で $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度、曇り空では $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度、蛍光灯の下では $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度となる。（Laboratory of Plant Physiology, Waseda University）。

表3に、各LEDスポットライトのPPF（400～700 nm）と、PPF-UV（380～399 nm）、PPF-B（400～499 nm）、PPF-G（500～599 nm）、PPF-R（600～699 nm）、PPF-NIR（700～780 nm）の実測値を載せる。図4には比較のために、LEDスポットライトと、外光、ハロゲンランプ、一般用蛍光灯のPPF-UV、PPF-B、PPF-G、PPF-R、PPF-NIRの100%積み上げ棒グラフを示し、以下にその所見を述べる。

- ・LEDスポットライトに共通するのは、外光よりもPPF-UV、PPF-B、PPF-NIRの割合が少ないこと、ハロゲンランプよりもPPF-NIRの割合が少ないこと、蛍光灯よりもPPF-Bの割合が少ないことである。また、青色LEDや紫色LEDという励起源により、PPF-UVやPPF-Bの割合が影響されることはないことが示唆される。個別にみると、PPF-Bは③、②①、②③が他よりも高く、PPF-Gはいずれも同程度、PPF-Rは③が他よりも低かった。LEDスポットライトの個体差は、調査対象機種種の間ではPPF-BとPPF-Rの割合にあらわれた。
- ・外光は、他の光源よりもPPF-UV、PPF-B、PPF-NIRの割合が多く、PPF-Rの割合は少ない。
- ・ハロゲンランプは、他の光源よりも短波長側の割合は少なく、長波長側の割合が多い。
- ・蛍光灯は、他の光源よりも短波長側の割合が多く、長波長側の割合は少ない。

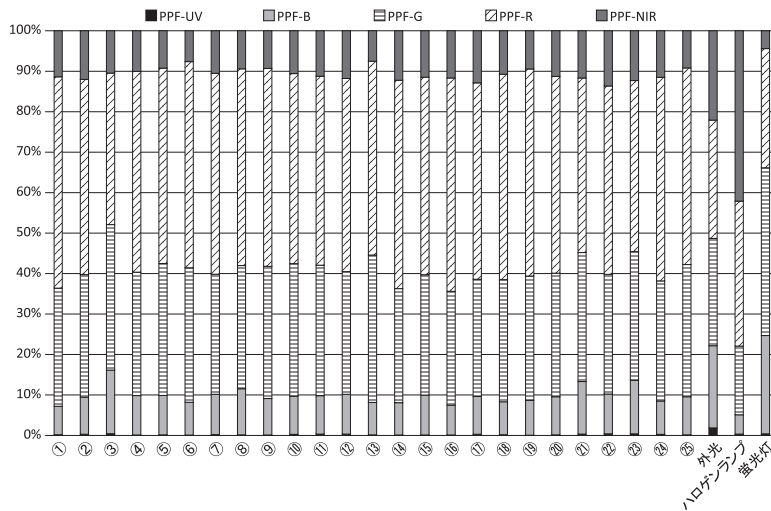


図4 LED スポットライト，外光，ハロゲンランプ，一般用蛍光灯の PPF-UV，PPF-B，PPF-G，PPF-R，PPF-NIR の 100% 積み上げ棒グラフ（測定：MK350S，UPRtek 社）

3.3 色温度

色温度は、光の色を定量的な数値であらわしたものであり、単位はケルビン（K）となる。一般に、色温度が高い（青白い）と涼しい、さわやかな印象を与える。色温度が低い（赤みがある）と落ち着いた暖かい雰囲気になる。

各社とも 3000 K（②，④，⑤，⑦，⑧，⑨，⑩，⑪，⑫，⑮，⑰，⑱，⑲，⑳，㉔，㉕）の製品を提示しており，3000 K が展示用 LED スポットライトの主流ということがうかがえる。2700 K の LED スポットライトは 4 社（①，⑥，⑬，⑭，⑯，㉔），3500 K では 1 社（㉑，㉒）であった。①，②，③は調色タイプで，同一機材で 2700 K ～ 4200 K の間で任意の色温度に設定できる。実測での最小値は 2700 K（①），最高値は 4400 K（③）であった。なお，④，⑯，⑰，⑱は 2700 K，3000 K，3500 K，4000 K で，⑭と⑮は 2700 K ～ 4700 K の間で色温度を指定して製品を購入することが可能ということであった。2700 K ～ 4000 K で受注生産が可能というメーカーからは，今回の実験では，3000 K の㉑，㉒と 3500 K の㉑，㉒の提示があった。

表 4 に，各 LED スポットライトの色温度の実測値をまとめる。調光をしぼる（照度を下げる）と，ハロゲンランプは色温度が低くなる（赤みが増す）が，LED 照明は色温度の変化はほぼ見られないか，逆にやや上がる傾向があった。色温度は，機種により若干前後するが，ほぼ仕様どおりの性能である。

表3 LED スポットライトの光量子束密度（照度最大値, 100 lx, 30 lx で測定：MK350S, UPRtek 社）

	①			②			③			④			⑤		
	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx
PPF	4.469466	1.868933	0.565315	4.701721	1.823344	0.597137	5.204249	1.587115	0.526799	3.955822	1.755164	0.543034	8.583328	1.729267	0.519314
PPF-UV	0.005452	0.003702	0.001948	0.008669	0.006535	0.005116	0.011249	0.007493	0.006359	0.004546	0.002453	0.001174	0.009482	0.002904	0.001539
PPF-B	0.349368	0.148037	0.047155	0.468942	0.189198	0.069474	0.917756	0.279491	0.098086	0.422199	0.189753	0.060014	0.918218	0.185419	0.057302
PPF-G	1.470912	0.614604	0.184873	1.628879	0.628218	0.201740	2.110919	0.638690	0.203887	1.342430	0.593459	0.182706	3.111068	0.620378	0.185140
PPF-R	2.633981	1.099847	0.331303	2.589002	0.999967	0.323784	2.163985	0.665067	0.223267	2.178934	0.966491	0.298610	4.530654	0.918636	0.275386
PPF-NIR	0.542875	0.239433	0.081620	0.558510	0.249252	0.113711	0.462661	0.185722	0.105706	0.432831	0.195357	0.064535	0.820131	0.175800	0.059846
	⑥			⑦			⑧			⑨			⑩		
	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx
PPF	6.272964	1.715563	0.489676	6.131310	1.708722	0.531311	2.796811	1.768205	0.529692	4.097751	1.729734	0.513519	6.018440	1.739072	0.537648
PPF-UV	0.006660	0.001229	0.000292	0.007408	0.003993	0.002234	0.003367	0.002648	0.001191	0.004498	0.002410	0.001059	0.008692	0.005233	0.003588
PPF-B	0.620866	0.150950	0.040862	0.656883	0.190175	0.061896	0.348029	0.222137	0.067688	0.406127	0.171306	0.051902	0.617792	0.183376	0.061701
PPF-G	2.324898	0.615849	0.174094	2.037002	0.565923	0.174773	0.940261	0.593607	0.177184	1.480850	0.621949	0.183049	2.226017	0.636952	0.193823
PPF-R	3.312130	0.944503	0.273489	3.418984	0.947371	0.292938	1.500476	0.947345	0.283274	2.199204	0.931548	0.277084	3.157852	0.913679	0.280435
PPF-NIR	0.529562	0.141597	0.040252	0.659706	0.200649	0.073330	0.283274	0.183573	0.058969	0.410912	0.177509	0.056516	0.613600	0.205605	0.084362
	⑪			⑫			⑬			⑭			⑮		
	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx
PPF	6.664660	1.765716	0.578561	6.002595	1.829559	0.625007	2.859325	1.657319	0.485523	3.936862	1.872422	0.567129	4.509797	1.760128	0.535802
PPF-UV	0.011522	0.006813	0.005324	0.011391	0.007228	0.005857	0.003563	0.002624	0.001243	0.004103	0.002290	0.001322	0.005239	0.002259	0.001302
PPF-B	0.683250	0.188703	0.069832	0.640874	0.204150	0.078439	0.247458	0.143744	0.042791	0.350088	0.170142	0.053029	0.493741	0.195596	0.060932
PPF-G	2.453668	0.641986	0.205766	2.086399	0.629114	0.210718	1.130021	0.652201	0.189916	1.262074	0.599687	0.181440	1.513957	0.590104	0.179278
PPF-R	3.509023	0.929804	0.301064	3.257447	0.990570	0.333690	1.475567	0.857700	0.251711	2.310261	1.095711	0.330568	2.486775	0.968447	0.293753
PPF-NIR	0.698951	0.223385	0.106803	0.672605	0.244513	0.119779	0.222451	0.134925	0.044558	0.546586	0.260407	0.083808	0.587016	0.227686	0.074690
	⑯			⑰			⑱			⑲			⑳		
	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx
PPF	2.574258	1.873873	0.569401	2.596369	1.864145	0.603356	2.899205	1.804001	0.545886	6.115185	1.772101	0.532159	5.528287	1.747974	0.527033
PPF-UV	0.003014	0.002279	0.001054	0.006670	0.006382	0.004960	0.003282	0.003302	0.001502	0.006377	0.001026	0.000181	0.005954	0.003126	0.001577
PPF-B	0.213283	0.155606	0.048516	0.274423	0.199759	0.072050	0.259411	0.164656	0.051337	0.596572	0.168343	0.049556	0.569339	0.184924	0.057146
PPF-G	0.820608	0.596018	0.180119	0.864991	0.619583	0.197695	0.982109	0.609583	0.183419	2.075945	0.599869	0.180039	1.906727	0.600568	0.180455
PPF-R	1.531016	1.115416	0.338683	1.448039	1.038278	0.331342	1.648390	1.023900	0.309313	3.423624	0.998354	0.300930	3.033410	0.956465	0.287606
PPF-NIR	0.338752	0.247030	0.078719	0.360575	0.275263	0.118592	0.328683	0.216953	0.070581	0.669381	0.184418	0.052592	0.676823	0.222110	0.072507
	㉑			㉒			㉓			㉔			㉕		
	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx	最大値	100 lx	30 lx
PPF	5.520601	1.688898	0.545782	2.075269	1.820979	0.619192	2.070682	1.693309	0.579784	2.645605	1.889756	0.622056	2.758281	1.724691	0.531347
PPF-UV	0.009440	0.006190	0.004877	0.008963	0.008520	0.007640	0.008313	0.007796	0.006695	0.005987	0.006075	0.004603	0.003061	0.002537	0.001135
PPF-B	0.782147	0.248430	0.085709	0.234061	0.207476	0.083015	0.310037	0.256219	0.095689	0.244675	0.176114	0.066382	0.287310	0.178820	0.056493
PPF-G	2.012815	0.609986	0.193455	0.711852	0.624199	0.207130	0.752684	0.614526	0.204598	0.887500	0.633511	0.204554	0.992094	0.619726	0.189098
PPF-R	2.709130	0.825243	0.264762	1.122148	0.982973	0.326663	1.001709	0.817387	0.277489	1.505227	1.074171	0.348997	1.471202	0.921292	0.284224
PPF-NIR	0.626933	0.222863	0.102398	0.320635	0.287634	0.145617	0.281057	0.238024	0.124576	0.318896	0.245945	0.109679	0.271842	0.174253	0.058342

表4 LED スポットライトの実測色温度

(照度最大値, 100 lx, 30 lx で測定:CL-500A, コニカミノルタ株式会社/MK350S, UPRtek 社)

3000 K	最大値	100 lx	30 lx
②	2998/2997	3012/3040	3007/3112
④	3026/3014	3045/3031	3054/3045
⑤	3093/3084	3091/3091	3095/3106
⑦	2891/2885	2952/2958	2956/2991
⑧	3092/3073	3120/3099	3149/3131
⑨	3009/3001	3032/3028	3041/3038
⑩	3113/3116	3134/3153	3136/3206
⑪	3103/3103	3120/3151	3126/3234
⑫	3006/3006	3027/3058	3027/3150
⑮	2992/2980	3027/3014	3034/3033
⑰	2963/2972	2976/3004	2999/3086
⑱	2898/2891	2911/2914	2921/2937
⑲	2968/2953	2980/2954	2982/2938
⑳	2976/2973	3026/3024	3028/3039
㉒	3013/3053	3022/3067	3057/3230
㉔	2986/2978	2990/2987	3003/2998

2700 K	最大値	100 lx	30 lx
①	2695/2699	2715/2727	2719/2750
⑥	2855/2850	2716/2710	2674/2658
⑬	2768/2791	2771/2796	2770/2803
⑭	2679/2678	2710/2707	2722/2727
⑯	2717/2712	2721/2713	2724/2724
㉔	2677/2696	2681/2719	2687/2800

3500 K	最大値	100 lx	30 lx
㉑	3520/3500	3585/3582	3585/3657
㉓	3585/3590	3606/3617	3644/3745

4400 K	最大値	100 lx	30 lx
③	4393/4337	4387/4354	4378/4403

「もの」の見え方については、22名の館内教職員によって目視確認の評価をおこなった。その結果、2700 Kは「木の質感がでる、黄味がつよい、温かみがある、おちつく、部屋の中の印象、民族資料などが日常生活で実際に使用されている場面での質感などを表現するのに向いている」、3000 Kは「青がきれい、クリアな色、白がぬける、すっきりしすぎる、屋外やショーケースの印象、水族館、自然科学系の標本資料やホロタイプ標本を鮮明にみせる展示に向いている」という意見があった。3000 Kは目が疲れやすいと感じる教職員もいた。アクリルケース内のクロスにうつる影の色は、2700 Kでは茶色味が強く、3000 Kは灰色味を帯びるなど、明らかに見え方が異なった。文字は、3000 Kのほうが2700 Kよりも見やすく、長時間見ても疲れなという声が聞かれた。色温度が高い3500 Kあるいは4400 Kでは、明らかに光が「白い」という印象であった。

演色性とも関連するが、同じ色温度の照明下でも、カラーチャートをはじめ、「もの」の見え方の印象に違いが認められた。これは個人の好みによるところも大きい。ため、いずれが好ましいか、客観的な判断はしがたかった。したがって、「もの」の見え方については、実際の展示資料を想定しつつ、自然光のなかで見える状態としてどの色温度が適しているかは、各博物館で検証したうえで判断することが望ましいといえる。なお、色温度に関する見え方の印象として、今回の実験に立ちあつた教職員の

意見をまとめると、さまざまな素材で構成される民族資料の展示として、2700 K と 3000 K いずれかひとつを選択するのは困難であり、展示場の雰囲気や展示資料の素材に応じて、使い分けることが望ましいという結果になった。

写真7に、各LED スポットライトで照射下のカラーチャートを示す。カラーチャートの下段6枚の無彩色は、2700 K や 3000 K の照明下（③と㉑と㉓以外）では茶色味が強く見えるが、3500 K 以上の照明下（③，㉑，㉓）ではそのようなことはない。2700 K と 3000 K では上述のように展示場の雰囲気や色の見え方が異なったが、いずれも一般には「電球色」に分類される色温度である。また、「温白色」の 3500 K 以上の色温度の照明下での写真と並べて比較すると、3000 K と 3500 K を境に、色の見え方が大きく異なってくることがみてとれる。

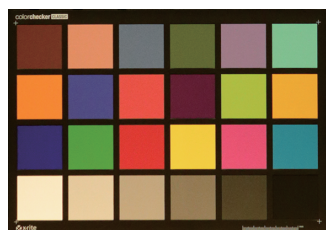
3.4 照度

照度は、光源に照らされている面の明るさを表し、ルクス (lx) という単位で示される。ひとの目に感じる明るさの感覚に近づけるため、ひとの目の感度を考慮し補正が加えられた数値である。

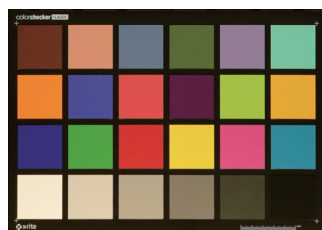
照度は、配光角が広がると下がる。表1で示したように配光角は各社で異なるため、統一した条件での測定はおこなえなかった。フィルターやレンズなどで配光角が変更できる場合は、配光角が最も狭くなる条件を優先して測定した。配光角が狭いと、光のとどく範囲に限られる。そのため、配光角が 10° 未満のスポットライトは、全体を照射するというより、特定の資料を強調するのに適する。

表5に、各LED スポットライトの照度の最大値（調光 100%，光源から 5.3 m の距離）を記す。実測結果を大きくまとめると、配光角 10° で 350 lx 前後、15° で 250 lx 前後、20° で 150 lx 前後となるが、⑩，⑪，⑫は配光角 22° で 350 lx 以上の値が得られている。これは消費電力が高いことだけでなく、LED の消費効率がよいことに起因していると思われる。実際は、展示照明で調光したり、レンズやフィルターを装備したり、資料との距離を変えたりすることで、適正な照度に調整して使用することになる。

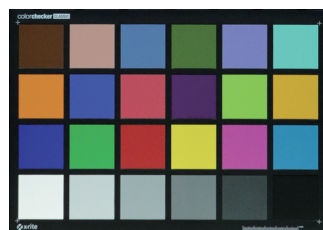
LED スポットライトを用いた今回の照明実験の条件下では、展示照明は 75 lx ～ 100 lx，ワークショップなど手作業を想定した場合は 150 lx 程度でも暗すぎることはなく、また布の地模様が視認できる照度の下限値は 35 lx 程度であった。おおまかにいうと、LED スポットライトは、ハロゲンランプの照度の半分の値で、同程度の明るさが感じられるというのが実験に立ち会った教職員の共通した印象であった。



①



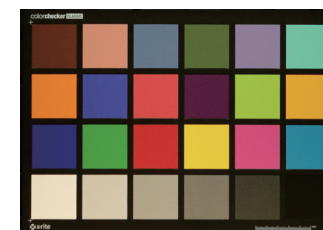
②



③



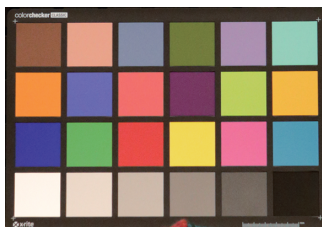
④



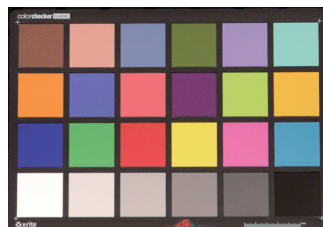
⑤



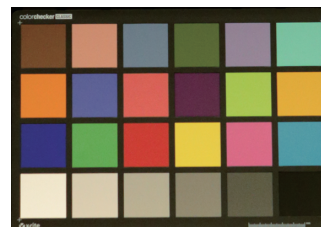
⑥



⑦



⑧



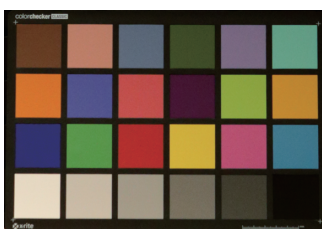
⑨



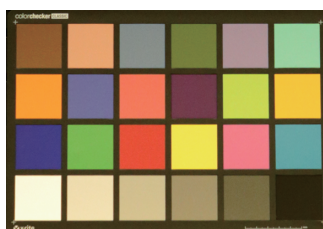
⑩



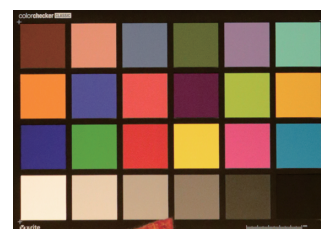
⑪



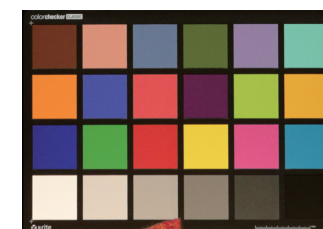
⑫



⑬



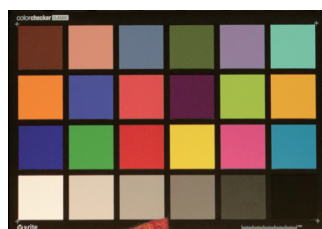
⑭



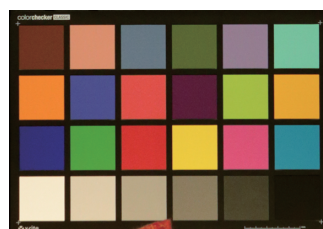
⑮



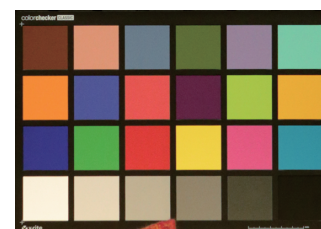
⑯



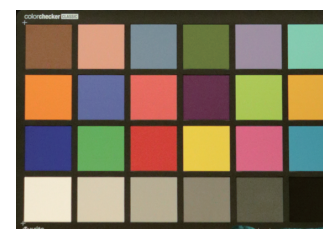
⑰



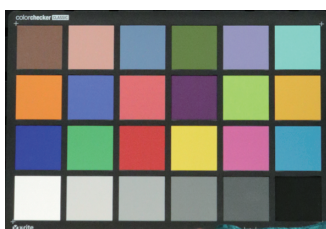
⑱



⑲



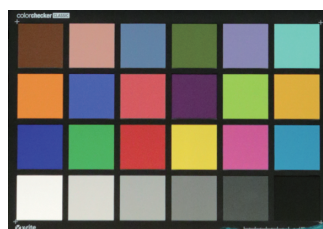
⑳



㉑



㉒



㉓



㉔



㉕

写真7 LED スポットライト下で撮影したカラーチャート

表5 LED スポットライトの照度最大値
(測定：CL-500A, コニカミノルタ株式会社 /MK350S, UPRtek 社)

3000 K	最大値 (lx)	2700 K	最大値 (lx)
②	268.2/274	①	249.5/253.7
④	225.9/228.0	⑥	388/388.7
⑤	519.4/520.2	⑬	184.6/187.6
⑦	345.5/349.7	⑭	218.8/220.6
⑧	157.8/160.1	⑯	139.6/142.4
⑨	242.8/248.1	⑳	149/153.4
⑩	364.7/368.9		
⑪	401.2/407.1	3500 K	最大値 (lx)
⑫	346.7/352.4	㉑	328.1/331.6
⑮	255.4/258.9	㉒	118.7/123.7
⑰	142.2/147.1		
⑱	165.6/166.7	4400 K	最大値 (lx)
⑲	347.7/352.9	③	329.6/331
㉑	321.3/322.5		
㉒	114.4/120.1		
㉓	164.6/166.8		

3.5 演色性

同じ色の「もの」でも、照らす光によって色の見え方が変わる。このような光源の性質を演色性とよび、平均演色評価数 (Ra) で示される。太陽の下で見たときと同じような色見え方をする照明を、演色性がよい照明とする。通常、博物館では平均演色評価数 Ra が 90 以上、美術館では 95 以上が望ましいとされている。なお、平均演色評価数 Ra は、R1 ～ R8 (一般に存在する色の代表) の演色評価数の平均値である。民博では、民族資料の展示ということで、赤色と青色の見え方にはとくに留意している。そこで、Ra とともに、特殊演色評価数の R9 (赤), R10 (黄), R11 (緑), R12 (青), R13 (西洋人の肌色), R14 (木の葉), R15 (日本人の肌色) の数値も評価の対象とした。

表6に、各LEDスポットライトのRaとR9～R15の実測値をまとめる。今回調査した全機種で調光可能であり、調光をしぼる(照度を下げる)と、演色性はほぼ変わらないか、やや上がる傾向がみられた。図5に、演色評価数と特殊演色評価数の比較がしやすいように、照度 100 lx 調光時の R1 ～ R15 の実測値のレーダーチャートを示す。すべての値が外枠(100)の円に近づくほど、演色性のよい光源となる。以下、表6の測定値のうち、照度 100 lx に調光時の演色評価数と特殊演色評価数を抜粋して色温度別に比較する。(数字の左側は CL-500A, コニカミノルタ株式会社, 右側は

MK350S, UPRtek 社とし, ○○/○○ と示す。測定値は小数点第1位で四捨五入した。)。

・ 2700 K

①, ⑥, ⑬, ⑭, ⑯, ⑳ の Ra は, それぞれ 97/97, 95/95, 86/86, 97/97, 97/97, 95/95 であった。R9 は, それぞれ 92/91, 64/61, 31/30, 88/87, 99/98, 76/76 であった。R12 は, それぞれ 88/93, 89/88, 75/77, 93/95, 93/94, 90/94 であった。まとめると, ①と⑭と⑯の演色性は非常によく, ㉔がそれに続く。R9 は, ㉔ではやや低く, ⑥は低い。⑬の Ra, R9, R12 はすべて他より低く, 演色性は悪い。

・ 3000 K

②, ④, ⑤, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑮, ⑰, ⑱, ㉑, ㉒, ㉓ の Ra は, それぞれ 96/96, 98/98, 97/97, 96/96, 95/96, 96/96, 95/95, 95/96, 98/98, 98/98, 98/97, 98/98, 97/97, 98/98, 98/98, 95/94 であった。R9 は, それぞれ 93/94, 98/99, 85/84, 98/98, 93/96, 83/82, 80/81, 82/83, 93/94, 95/94, 99/98, 94/93, 97/99, 92/90, 88/89, 81/74 であった。R12 は, それぞれ 85/91, 88/92, 82/85, 93/96, 93/96, 83/87, 79/84, 80/86, 87/93, 91/94, 92/96, 88/93, 95/98, 94/96, 94/97, 79/85 であった。まとめると, ②, ④, ⑦, ⑧, ⑫, ⑮, ⑰, ⑱, ㉑, ㉒ の演色性は非常によい。⑤, ⑨, ⑩, ⑪, ㉓ がそれに続く。このうち, ㉓ の R9 (赤) はやや低い。

・ 3500 K

㉔と㉕の Ra はともに 98/99, R9 はそれぞれ 93/94, 90/91, R12 はそれぞれ 89/92, 88/92 であった。まとめると, ㉔と㉕の演色性は非常によい。

・ 4400 K

③の Ra は 90/90, R9 は 72/71, R12 は 67/77 であった。まとめると, ③の演色性は, 同機材の 2700 K や 3000 K での測定と比較するとやや悪い。

3.6 操作性

⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬は, 調光と照射角度をワイヤレスでリモート制御できる。リモート機能は必要不可欠とはいえないが, 資料や展示を入れ替える場合, 操作の利便性が大きく違ってくる。

本体に電源スイッチがあるのは, ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥であった。調光した状態を維持したままで回路遮断ができるのは, 照明の作業現場では便利である。現状では電源スイッチはないが, 改造して回路遮断装置を付加することができるというメーカーもあった。

表 6 LED スポットライトの平均演色評価数（Ra），特殊演色評価数（R9 ～ R15）の実測値（照度最大値，100 lx，30 lx で測定：CL-500A，コニカミノルタ株式会社 /MK350S，UPRtek 社）

①

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	96.9/96.8	97.1/97.1	97.3/97.2
R9	89.2/87.7	91.6/90.7	92.9/93.0
R10	93.3/94.0	93.3/94.5	93.8/95.5
R11	93.7/93.8	93.6/93.3	93.6/93.0
R12	89.9/92.6	88.4/92.5	87.9/93.5
R13	99.5/99.4	99.7/99.6	99.5/99.1
R14	95.1/95.8	94.9/95.8	94.8/95.8
R15	98.1/97.4	98.7/98.2	99.2/98.9

⑥

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	94.5/94.2	95.1/94.6	95.2/94.6
R9	60.3/57.3	64.2/60.7	64.3/60.6
R10	95.1/95.3	99.1/99.2	99.5/99.6
R11	94.1/96.1	92.2/94.2	92.3/94.2
R12	89.2/87.3	89.4/87.5	90.3/88.5
R13	96.0/95.4	98.0/97.3	98.3/97.5
R14	99.2/99.3	99.2/98.7	99.2/98.5
R15	89.4/88.1	90.9/89.5	91.0/89.6

⑪

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	94.3/94.3	95.0/95.6	95.2/96.7
R9	77.3/76.9	81.6/83.1	82.7/89.0
R10	86.2/87.3	87.5/89.6	87.5/92.5
R11	95.9/96.6	97.0/97.3	97.0/96.8
R12	81.2/84.6	80.4/86.1	79.4/90.2
R13	94.7/95.0	95.5/96.4	95.6/98.1
R14	95.0/95.6	95.2/95.9	95.0/96.4
R15	93.2/93.0	94.2/95.0	94.5/97.3

⑬

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.2/97.1	97.2/97.1	96.6/96.8
R9	98.8/97.8	98.7/98.4	96.7/98.3
R10	97.0/96.7	96.9/96.2	95.8/95.4
R11	91.0/91.3	91.1/91.1	90.8/91.1
R12	93.7/94.7	93.3/94.1	91.4/92.7
R13	96.4/96.6	96.4/96.3	95.6/95.7
R14	97.7/98.2	97.7/98.2	97.7/98.2
R15	98.0/98.6	97.9/98.3	97.0/97.5

⑰

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	98.2/98.2	98.4/98.5	98.4/98.4
R9	88.6/87.6	93.4/93.8	93.8/98.0
R10	96.9/97.2	97.9/98.8	97.8/99.6
R11	99.3/99.1	99.0/98.0	99.0/96.8
R12	89.2/91.2	88.6/91.8	88.5/94.2
R13	99.6/99.8	98.6/98.6	98.5/97.6
R14	97.6/98.0	97.4/97.9	97.3/97.9
R15	97.8/97.6	98.3/99.0	98.4/98.6

②

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	95.8/95.9	96.2/96.4	96.6/96.6
R9	90.9/90.2	93.0/93.7	94.1/98.5
R10	90.8/91.8	91.2/93.1	91.9/95.8
R11	93.1/93.0	93.3/92.9	93.6/92.2
R12	86.6/90.0	85.1/90.6	84.8/94.6
R13	98.7/98.8	99.1/99.4	99.5/98.4
R14	94.4/95.2	94.4/95.4	94.5/95.9
R15	98.1/97.6	98.8/98.5	99.3/97.9

⑦

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	96.4/96.3	96.4/96.3	96.5/96.1
R9	95.2/93.1	97.8/98.3	97.3/97.1
R10	97.4/97.4	97.5/97.3	97.2/96.4
R11	92.5/92.6	92.1/92.0	92.4/91.9
R12	94.9/97.3	92.7/95.5	91.3/94.2
R13	97.4/97.7	96.5/96.5	96.1/95.8
R14	96.7/97.1	96.5/97.0	96.6/97.2
R15	97.6/97.9	96.2/96.6	95.9/95.6

⑫

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.0/96.9	97.9/97.7	98.1/97.4
R9	88.7/87.3	92.8/93.6	93.7/98.7
R10	94.3/94.9	95.6/97.0	96.3/98.2
R11	95.7/95.5	96.2/95.4	96.6/94.2
R12	88.5/92.3	86.8/92.5	85.8/94.8
R13	99.1/99.1	99.8/99.2	99.6/97.5
R14	96.2/96.7	96.4/97.0	96.5/97.5
R15	98.3/97.9	99.4/99.5	99.3/97.5

⑬

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.6/97.2	97.5/97.1	97.4/96.2
R9	98.0/97.8	98.8/98.3	97.0/93.8
R10	98.2/97.4	98.4/97.4	99.2/95.4
R11	93.0/92.6	92.6/92.0	92.6/91.1
R12	91.9/95.1	92.1/95.8	91.8/94.5
R13	97.3/97.0	97.2/96.8	97.2/95.5
R14	97.7/98.2	97.5/97.9	97.0/98.1
R15	98.4/98.2	97.9/97.5	97.5/95.5

⑰

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	98.0/98.0	98.1/98.0	97.8/97.3
R9	87.1/88.5	87.9/89.4	91.3/98.7
R10	98.5/99.5	98.5/99.3	98.7/96.0
R11	97.6/96.8	97.3/96.6	96.3/94.0
R12	94.2/96.6	94.1/96.6	93.9/94.1
R13	99.1/98.6	98.9/98.4	98.1/96.1
R14	97.9/98.7	97.9/98.7	97.6/98.7
R15	97.4/98.2	97.6/98.5	98.4/97.6

③

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	90.5/89.6	90.4/90.3	90.8/92.2
R9	73.4/67.8	72.4/70.6	73.4/79.5
R10	77.3/77.3	76.8/78.7	77.8/82.8
R11	91.3/91.4	91.1/92.0	91.4/93.1
R12	70.1/77.1	67.3/77.4	67.0/82.2
R13	91.4/90.5	90.9/91.1	91.3/93.5
R14	92.9/93.7	93.1/94.1	93.4/94.7
R15	91.3/89.3	90.5/90.1	90.8/93.2

⑧

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	95.4/95.6	95.4/95.5	95.3/95.3
R9	95.0/97.4	93.1/95.5	90.3/92.6
R10	96.3/96.6	96.3/96.4	95.9/95.8
R11	90.6/90.8	90.8/90.7	90.8/90.8
R12	94.0/96.5	92.9/95.6	90.8/93.8
R13	95.8/96.2	95.6/95.8	94.9/95.1
R14	96.3/96.7	96.3/96.7	96.3/96.8
R15	94.4/95.3	94.0/94.7	93.1/93.8

⑬

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	85.3/85.2	85.9/85.8	86.4/86.4
R9	28.6/27.5	30.6/29.8	32.4/32.3
R10	78.1/77.9	78.9/78.9	79.6/80.1
R11	83.7/83.7	84.6/84.6	85.1/85.3
R12	74.9/75.7	75.4/76.7	75.4/77.8
R13	84.8/84.4	85.5/85.1	86.0/85.9
R14	97.7/97.9	97.7/98.0	97.7/98.2
R15	78.2/77.5	78.9/78.3	79.5/79.2

⑬

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.9/97.7	98.0/97.8	98.1/97.8
R9	92.0/90.7	94.0/93.0	96.2/96.0
R10	97.0/97.8	97.6/98.5	98.5/99.6
R11	93.2/93.0	92.8/92.6	92.8/92.3
R12	88.3/92.5	88.1/92.5	87.3/92.4
R13	98.8/98.8	98.4/98.4	97.7/97.6
R14	96.4/97.1	96.4/97.1	96.4/97.2
R15	99.0/98.6	99.3/99.3	98.9/99.4

⑰

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	98.1/98.5	98.2/98.6	98.3/98.3
R9	88.4/89.7	89.7/91.2	93.2/98.9
R10	96.8/97.9	97.0/98.2	97.6/99.0
R11	99.3/98.8	99.6/98.6	99.2/96.5
R12	88.5/92.0	88.4/92.1	88.0/94.9
R13	99.5/99.5	99.4/99.2	98.7/97.3
R14	97.6/98.1	97.6/98.1	97.3/98.1
R15	97.7/98.4	97.8/98.8	98.2/98.0

④

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.8/97.6	97.7/97.5	97.6/97.3
R9	98.7/97.4	98.0/98.7	96.8/97.6
R10	98.7/98.7	98.9/98.6	98.7/98.2
R11	94.4/94.0	94.3/93.9	94.5/93.8
R12	89.5/93.1	88.4/92.1	87.3/91.4
R13	97.9/97.9	97.4/97.3	97.0/96.8
R14	96.9/97.2	97.0/97.3	97.0/97.3
R15	98.0/98.5	97.3/97.7	96.8/97.0

⑨

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	95.0/95.0	95.9/95.9	96.7/96.9
R9	77.8/76.6	82.5/81.5	84.9/85.0
R10	89.3/89.7	90.3/91.0	91.8/92.8
R11	96.5/96.8	97.3/97.6	98.1/98.1
R12	83.9/86.7	83.3/86.6	82.2/86.6
R13	96.0/95.9	96.7/96.8	97.5/97.9
R14	95.8/96.3	95.8/96.3	96.1/96.6
R15	94.0/93.5	95.2/94.9	95.9/96.2

⑭

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.3/97.1	97.4/97.3	97.5/97.2
R9	84.8/83.6	88.2/86.6	89.5/88.0
R10	97.8/98.0	98.5/98.5	98.5/98.5
R11	97.4/97.2	97.3/96.9	97.3/96.7
R12	93.3/95.0	92.9/94.6	92.7/95.0
R13	99.1/99.2	98.3/98.5	98.1/98.2
R14	97.3/97.7	97.2/97.6	96.9/97.4
R15	98.2/97.6	99.3/98.6	99.6/99.0

⑱

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.0/97.1	96.6/96.9	96.6/96.8
R9	99.0/97.8	96.7/98.7	96.2/98.5
R10	98.0/98.6	98.1/98.8	98.2/98.5
R11	91.1/91.1	90.8/90.7	90.8/90.9
R12	95.8/98.7	94.6/97.9	93.7/97.0
R13	97.7/97.7	97.3/97.3	97.1/97.2
R14	95.9/96.5	95.6/96.2	95.5/96.0
R15	98.2/98.5	97.5/98.0	97.2/98.0

⑳

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	94.9/94.9	95.1/95.2	95.9/96.4
R9	74.0/73.5	75.7/76.1	79.1/83.9
R10	93.6/94.2	93.1/94.1	95.0/97.2
R11	94.9/95.2	95.2/95.4	95.8/95.4
R12	89.9/93.4	89.6/93.7	89.2/95.8
R13	97.3/97.3	97.4/97.6	98.7/98.7
R14	97.1/97.7	96.7/97.3	96.8/97.9
R15	94.6/94.2	94.9/94.8	96.3/97.8

⑤

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	95.7/95.5	96.6/96.5	97.0/97.1
R9	81.2/79.7	85.0/84.1	86.5/85.9
R10	90.6/90.7	92.0/92.4	93.2/93.9
R11	96.3/96.5	97.2/97.2	97.6/97.6
R12	83.1/85.6	82.0/85.2	80.9/85.0
R13	97.0/96.8	97.3/98.0	98.6/98.7
R14	95.8/96.3	96.0/96.4	96.2/96.7
R15	95.5/94.9	96.6/96.3	97.0/97.1

⑩

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	94.1/94.1	94.7/95.2	95.0/96.1
R9	76.9/75.9	80.3/81.1	81.3/85.6
R10	86.4/87.0	87.0/88.7	87.3/90.9
R11	95.8/96.4	96.6/97.2	96.8/97.2
R12	80.4/83.5	79.3/84.4	78.5/87.3
R13	94.7/94.7	95.1/95.8	95.3/97.1
R14	95.1/95.7	95.2/95.9	95.2/96.2
R15	93.1/92.6	93.8/94.3	94.1/96.0

⑮

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	97.8/97.7	97.9/97.7	97.9/97.6
R9	91.3/90.3	94.9/93.5	95.4/94.4
R10	97.5/97.7	98.1/98.3	97.9/98.3
R11	97.4/96.9	97.1/96.4	97.1/96.3
R12	91.8/93.8	91.4/93.5	91.2/93.9
R13	98.5/98.5	97.7/97.8	97.6/97.6
R14	96.7/97.1	96.4/96.9	96.2/96.8
R15	99.6/99.5	98.5/99.3	98.3/98.7

⑳

	最大値	100 lx	30 lx
Ra	98.1/98.1	97.8/97.9	97.8/97.9
R9	86.6/85.1	91.7/90.3	92.4/91.6
R10	98.6/98.9	99.0/99.1	99.0/99.2
R11	97.7/97.7	96.0/96.0	95

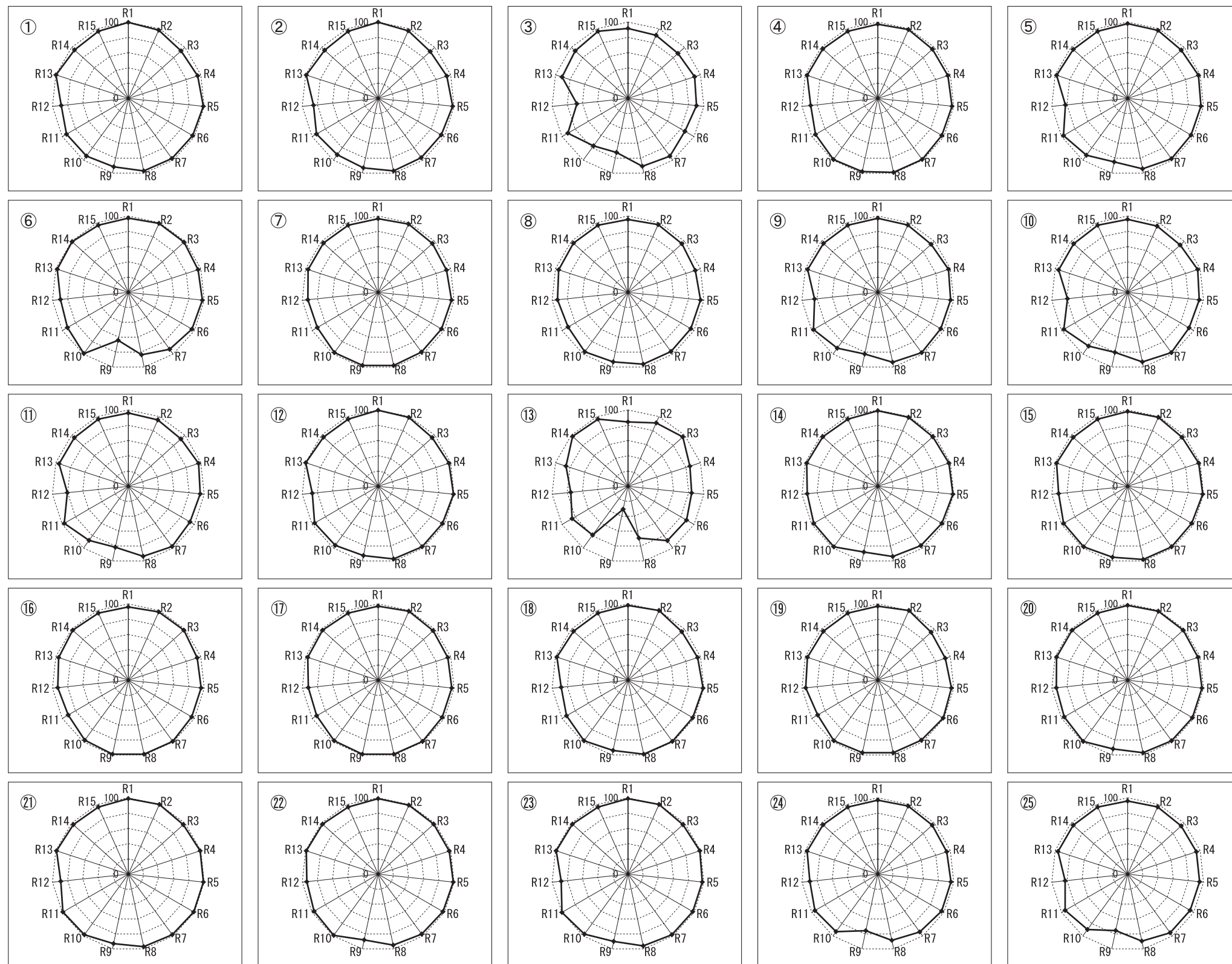


図5 LED スポットライトのRa, R1～R15のレーダーチャート（照度 100 lx で測定：CL-500A, コニカミノルタ株式会社）

4 民博の展示で求める LED スポットライトの性能

民博では、これまでのハロゲンランプを対象とした照射角度、操作性、オプション器具、安全対策、外観等の技術的要件に、上記照明実験の結果を勘案し、新たに展示場照明の LED スポットライトの選定にあたってもとめる性能の基本方針を策定した。これは、本館展示場、特別展示棟 1 階と 2 階（中央吹き抜け空間を除く）で使用するスポットライトを想定したもので、カッタースポット、ウォールウォッシャー、あるいは、特別展示棟の中央吹き抜け空間での使用が想定される大型ライトには必ずしもあてはまらない。

- ・ LED 化は、配線レールの開口溝から専用のプラグを介してスポットライトなどに電気を供給する既存の配線ダクトに設置できることとする。
- ・ 分光分布（紫外線、可視光線、赤外線）の提示を求め、紫外線・赤外線領域の波長を有さないこと、可視光領域の分光分布がなだらかであることを確認する。
- ・ LED 素子数は、調色タイプでなければ、影が重ならないワンコアタイプがのぞましい。照明が観覧者の目に入る場合を考え、とくに多粒タイプは防眩対策がとれるようにする。
- ・ 色温度は、2700 K と 3000 K の 2 種を併用するか、調色タイプとする。これは、照明実験の結果から、2700 K と 3000 K で展示場の雰囲気は異なるが、民族資料の展示として、いずれかひとつを選択するのは困難というのが目視確認を行った館内教職員 22 名の意見の総意であったためである。これは、特に民族資料の場合、有機質や無機物という素材の違うもの、あるいはそれらが複合素材として構成されるなど、多様な素材構成であることから、それらの素材の照明に適した色温度の照明が求められるためである。
- ・ 演色性がよいこととする。現状の LED スポットライトの性能は高いため、平均演色評価数 Ra は 95 以上とする。また、Ra と R1 ～ R15 の値の提示を求める。
- ・ 照度は、光源下 5.3 m（本館展示場の展示台を想定）の距離で 150 lx 程度は確保できるものとする。個別に調光（5% ～ 100%）が可能なものとする。また、調光しても色温度に大きな変化がないことを確認する。
- ・ 照射角度は、上下方向および水平方向の角度が可変で、調整後に角度が固定できるものとする。真下から水平方向への可変角度、および、水平方向の可変角度の提示を求める。

- ・操作性を鑑み、回路遮断スイッチは本体に装備されているか、もしくは追加で装着可能なものがのぞましい。また、電気関係の保護機能（負荷ショート保護、雷サージ保護など）の提示を求める。
- ・展示替えの頻度が高い企画展示場ではリモート機能を付加することがのぞましい。
- ・光拡散フィルター、バンドア（照明器具にとりつける光遮断用の羽板）、防眩対策などのオプション器具について提示を求める。
- ・安全対策として、照明器具の落下防止のワイヤーを有すること、ワイヤーの固定・取り外しができることとする。また、オプション器具にも落下防止対策を講じることとする。ガラスを使用している部分があれば、その安全対策の提示を求める。
- ・外観は、黒色と白色のふたつのタイプを想定している。本体の重量が1.5 kg 以下で、かつ片手で安全に扱える大きさであること（寸法を示すこと）とする。
- ・その他、電源電圧、消費電力、配光角（変更可能であれば、その配光角）、調光方式、光束値、消費効率、光源寿命、材質について、提示を求める。調色可能なタイプであれば、調色範囲の提示を求める。

5 まとめ

本稿では、2015 年夏時点での LED スポットライトの性能を検証した。これまでは、LED を用いた照明では演色性が悪いことが課題として指摘されていたが、技術開発が進められたことで、近年はハロゲンランプの演色性に匹敵するものが製品化されている。また、調光機能は全調査機種で装備されていた。さらに、調色可能な機種、リモートコントロールできる機種など利便性の高い製品が市販されており、特に博物館での使用の検討が盛んにおこなわれるようになる 2010 年段階と比較しても、博物館で使用するにあたっての選択肢が増えていることが確認できた。

従来、博物館において新たに照明を導入する場合、保存上問題となる紫外線量や赤外線量などの分光分布、見え方については演色性や色温度などの数値による判断で照明の選定がおこなわれることが多い。本稿ではこれらに加えて、照明がおこなわれる実際の展示方法を想定して、展示台を用いた展示や壁面を利用した展示での見え方の違いを、展示に関わる館内職員 22 名が検証した。その結果、多様な素材で構成されることを特徴とする民族資料の展示においては、照明による見え方の違いについて着目し、2つの色温度を併用した照明の必要性を明らかにできた。さらに、博物館における LED 照明の導入に当たって最も大きな弊害となっていた、従来のハロゲンラン

ブに比較して性能が及ばなかった演色性について詳細な情報収集をおこなった。とくに民族資料を対象とした場合に留意している赤色と青色の見え方について、Raとともに、特殊演色評価数のR9（赤）、R10（黄）、R11（緑）、R12（青）、R13（西洋人の肌色）、R14（木の葉）、R15（日本人の肌色）の数値も評価の対象とし、各LED照明の評価をおこなった。これらにより、今後、博物館においてLED照明を導入する上で、実際の展示環境や展示資料に適した極めて実践的な視点を提示することができたと考える。

一方で、新たな課題もある。今回の照明実験では、LEDスポットライトを用いると、ハロゲンランプの半分程度の照度の値で、同程度の明るさが感じられた。LEDスポットライトの照度の問題は、今後、再考する必要性を感じている。また、光量子束密度、なかでも紫外線と近赤外線の光量子束密度（PPF-UVとPPF-NIR）を、どのように保存科学の視点から検証できるかを考えていきたい。

本稿に記した民博が展示場照明にもとめるLEDスポットライトの性能は、LEDの開発が日進月歩であることを考えると、あくまでも2015年夏時点での要件と考えたほうがよい。今後、より高性能で利便性の高い製品が市販される可能性は非常に高く、また期待するところでもある。

追補

展示場でのスポットライト使用を目的にあげていたため、カッタースポット、ウォールウォッシャー、あるいは、リモートコントロール対応の大型ライトについては、調査対象としたすべてのメーカーから提示されたわけではない。効果確認ができたものに限られるが、参考までに所見をまとめる。

- ・カッタースポットは、照明を切り取って当てるときに使われる。照明箇所の周辺には、多少なりともレンズ収差があらわれる。使用にあたっては、実物での現場検証が不可欠である。

- ・ウォールウォッシャーを用いると、壁面をほぼ均一に照らすことができる。ウォールウォッシャーに特化した製品もあるが、スポットライトにオプションのレンズを加えることで、ウォールウォッシャーの機能を付加できるものもある。

- ・リモートコントロールの大型ライトは、Bluetoothタイプのほうが、赤外線タイプのものより操作性がよい。Bluetoothタイプは、タブレットから、配光角、調光、ライトの向き（上下方向、左右方向）の変更を簡便におこなうことができた。赤外線タイ

プは、通信がうまくできる位置、角度を見出すのに慣れが必要と思われる。光源からの距離 7.8 m での照度は調光により変わるが、今回調査した Bluetooth タイプでは 0.4 lx ~ 220 lx 弱（配光角 30°）、2.3 lx ~ 450 lx 弱（配光角 10°）、赤外線タイプでは 65 lx 弱 ~ 880 lx であった。

謝 辞

照明実験の実施にあたっては、本館の村田忠繁・西澤昌樹・松田万緒・佐々木隆夫・黛友明（企画課）、宇治真奈美・中村伸夫・安藤葉月（情報課）の各氏の協力をいただきました。「もの」の見え方の検証には、吉田憲司・野林厚志・上羽陽子（文化資源研究センター）の各氏をはじめ、部長会議のメンバーと文化資源研究センターの教員の皆さまに参加いただきました。また、照明実験用に機材を提供いただいたメーカーに感謝いたします。

注

- 1) A 社の機種 1 は色温度を変えられる調色タイプで、同一機材で 2700 K, 3000 K, 色温度の最大値の 3 条件で実測した。
- 2) ウォールウォッシャー用の器具を装着した際の重量。
- 3) 開館当初より使用されている、民博専用に作られた展示のためのシステムパネル。写真 3 では壁面の黒い部分が CP パネルである。
- 4) BIN は小分けに区切ることを意味し、BIN コードは LED 素子の色のばらつきを定量的に分類し、ランク付けすることなどに使用される。CL-500A で測定したデータについても、付属のソフトウェアを使用して分類することが可能である。
- 5) 照度分布については、反射光を捉えているため、対象物の発色に依存する。

参考文献

- 石井美恵・森山巖興・戸田雅宏・河本康太郎・齊藤昌子
 2007 「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」『照明学会誌』91(2): 78-86。
- 石澤佳也
 2014 「博物館 展示照明の全面 LED 化について」『平成 26 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集』新技術・新工法部門；No.18: 1-6。
- 大谷義彦・落合 勉
 2011 「総論 照明計画の役割と考え方」『照明学会誌』95(3): 132-137。
- 河本康太郎
 2009 「LED 照明の測定評価」『光学』38(3): 139-140。
- 木下史青
 2013 「LED を用いた博物館照明——東京国立博物館 東洋館の展示リニューアル」『照明学会誌』97(6): 308-314。
- 小林 仁
 2012 「自然光を追いかけて——大阪市立東洋陶磁美術館の展示用 LED 照明の導入をめぐる」『国際博物館の日記念シンポジウム「博物館 これからの見せ方・つたえ方」』: 4-26。

齊藤昌子

2013 「LED 照明と染織文化財の保全」『照明学会誌』 97(6): 315–319。

齊藤昌子・中村弥生・森山巖興・河村康太郎

2014 「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): 585–592。

佐野千絵

2013 「美術館・博物館用 LED 照明に期待する要素」『照明学会誌』 97(6): 301。

照明学会編

2003 『照明ハンドブック』第2版, 東京: オーム社。

中島由貴・渕田隆義

2014 「美術館・博物館の最適視環境に対する照明の影響に関する彩色科学的考察」『女子美術大学研究紀要』 44: 79–89。

野口公喜・西村唯史・岩井 彌

2011 「LED 照明に対する照明設計法」『照明学会誌』 95(3): 145–151。

藤原 工

2013 「LED による美術館照明の課題と今後」『照明学会誌』 97(6): 302–307。

2014 『学芸員のための展示照明ハンドブック』東京: 講談社。

藤原 工・田中晴美

2011 「山種美術館の照明デザイン」『照明学会誌』 95(3): 168–170。

渕田隆義

2013 「LED 照明の演色性と美術館・博物館照明」『照明学会誌』 97(6): 320–326。

別所 誠・小谷明子・大石崇文

2011 「LED 照明製品の選び方」『照明学会誌』 95(3): 138–144。

堀井めぐみ

2011 「LED 照明に期待される省エネルギーと空間設計」『照明学会誌』 95(3): 158–162。

松本 稔

2011 「LED 照明の課題と今後の展望」『照明学会誌』 95(3): 163–167。

森山巖興

2013 「ルーヴル美術館向け LED を用いた景観照明用器具の開発」『照明学会誌』 97(6): 327–332。

矢野賀一

2012 「東京国立博物館漆工展示室の改修プロセス——展示ケースの設計・監理を中心に」『MUSEUM』 637: 39–61。

早稲田大学植物生理学研究室

HP 2015 年 9 月 11 日アクセス「光の単位」<http://www.photosynthesis.jp/light.html>

和田 浩

2012 「博物館展示環境における LED 照明と排熱設計」『女子美術大学研究紀要』 42: 134–138。