■特集資料■ LED 変える美術館・博物館の照明

LED による美術館照明の課題と今後

A Problem and the Future of the Art Museum Illumination with the LED

正会員 藤 原 工
Takumi Fujiwara

1968年生。姫路出身。1991年筑波大学卒業。現在、㈱灯工会代表、岡山県立大学非常勤講師。共著『博物館資料保存論』など。

◀キー・ワード：美術館，LED，演色性，色温度可変，配光

◀KEYWORDS：museum，LED，color rendering，color temperature variable，luminous intensity distribution

ABSTRACT

The introduction to the art museum of the LED light advances now. However, there is not the standard of the LED light as the art museum use, and there are a lot of art museums where I introduced a wrong LED light into. I show a technique and the problem of the current LED light and think about the way of the future art museum illumination.

1. はじめに

美術館、博物館におけるLED照明の本格導入は、他分野施設と同じく2011年3月11日に発生した東日本大震災以降である。この2年のうちに多くの美術館、博物館にLED照明が導入されており、展示スペース以外も含め何らかの形でLED照明を導入した館は、全体の50%を超える勢いである。ただ、この性急なLED化については学芸員をはじめ美術館、博物館の現場からも同時に不安の声が上がっている。不安を抱えつつ導入を進めなくてはならないのも気の毒な話ではあるが、リニューアルに対する予算がこれまで付かず20～30年前の開館当初の照明器具をいまだに使い続けている館にとっては、次いつ来るかわからない千載一遇の機会である。不安がありつつも導入しなければならない理由がここにある。では、これら不安は何に起因しているのか。多くの学芸員はLED照明に関する情報の少なさをあげるが、その本質は、美術館、博物館用LEDというもの確立されていないという事実にある。つまり、いわゆるお墨付きのLED照明がないために、その取捨選択が照明の素人である学芸員に委ねられているわけだ。実は、これまでの美術館、博物館照明にはお墨付きがあった。例えば、蛍光灯では美術・博物館用蛍光灯が確立されており、それさえ選択しておけば大きな間違いはなかった。また、スポットライトで多く用いられるハロゲン電球も光源として安定しており、メーカーによる差というものあまり存在しなかった。ではLEDはどうだろうか。

LEDが実用化され、一般照明器具として市場に出たから既に10数年が経つ。当時に比べると現在のLEDも既に格段の進歩を遂げているがまだ途上であり、これからの性能は伸び続ける勢いである。とはいえ、美術館、博物館の現場においては現在が問題であり、照明界とし

ては今すぐにでも、その問いに答えなければならない状況にある。本稿では、これまでの美術館、博物館照明を再認識し、現在のLEDのもつ諸問題を確認しつつ、これからのSSL照明(固体素子照明)時代における美術館、博物館照明の在り方について考えたい。

2. これまでの美術館、博物館照明とLED化の流れ

美術館、博物館照明は、その黎明期は自然光が中心であり、その後、白熱電球、クールビーム電球、美術・博物館用蛍光灯ランプ、ハロゲン電球と光源の開発とともに歩んできた。LEDが一般化される直前には、美術・博物館用Hf蛍光灯ランプ、ハロゲン電球、ダイクロイックミラー付ハロゲン電球、それらハロゲン電球の低電圧タイプが基本的に使用されていた。これら光源は、美術館、博物館照明に必要な要素を兼ね備えており、美術品を鑑賞するために重要とされる演色性についても高い性能を有している(表1、表2)。

LEDは、青色LED励起タイプ白色LEDの発光原理の特徴である紫外線、赤外線という美術品の損傷の原因となる波長をほとんど含まないことから、早い段階から美術館、博物館への導入検討がされてきた。ただし演色性

表1 美術館照明に必要な光源の要素

Table 1 Element of the source of light necessary for art museum illumination.

波長特性	紫外線・赤外線といった展示物に有害な光線を有さないこと もしくはカットが可能であること
演色性	高い演色性を有すること 博物館ではRa90以上、美術館ではRa95以上が望ましい
色温度	適正な色温度であること
調光性能	適正な照度に調整が可能な調光性を有すること 可能な限り0-100%が望ましい
配光性能	適正な配光制御が可能であること

表2 代表的な美術館照明用光源の演色性

Table 2 Color rendering properties of the light source for art museum lighting.

		色温度	平均演色 評価数 Ra	R9 赤	R10 黄	R11 緑	R12 青	R13 西洋人肌色	R14 木の葉	R15 日本人肌色
ハロゲン電球	一般ハロゲン電球	2850K	100	100	100	100	100	100	100	100
	ダイクロミックミラー付	3000K	100	100	100	100	100	100	100	100
蛍光ランプ	美術・博物館用 Hf 形電球色	3000K	95	96	96	98	91	98	93	97
	美術・博物館用 Hf 形白色	4000K	98	94	98	99	93	99	97	99
	美術・博物館用 Hf 形昼白色	5000K	99	98	98	98	94	98	97	99

がネックであり，導入には博物館における演色性の最低ラインといわれる Ra90以上の白色 LED の製品実用化を待たねばならなかった．初期の導入事例としては，2007 年のサントリー美術館の壁面展示ケース下部照明，出光文化福祉財団展示室の壁面展示ケース照明があげられる（図1）．そして2009年の根津美術館，山種美術館の開館において美術館における LED 利用が一般化されるに至り，その後多くの美術館で LED 照明が導入されるに至った（図2）．しかしそれから4年弱の月日が流れているが，

美術館用 LED 照明の確立どころか，従来の美術館照明にもいまだに及んでいないのが現状である．それら現在の問題点と今後の可能性について，色の見え（演色性），色温度，保全，機器をキーワードに述べていきたい．

3. LED の高演色化について

これまでの美術館の主光源であった美術・博物館用蛍光ランプとハロゲン電球の演色性は表2に示すとおりであり，最低でも Ra95かつ R9=96，R12=91である．対して LED は，青色 LED 励起タイプ白色 LED で，Ra95以上のものも製品化されているが，R9は95程度あったとしても R12が低い傾向にある（表3）．これは分光分布を確認すればわかるが，青色 LED 励起タイプ白色 LED は，発光原理として青色 LED の光をそのまま利用するために，450nm ピークの青色光が残ることになる．このピークは色温度が高くなるほど顕著であり，R12の数値も同時に低くなる傾向にある．（図3）ここで注意しなければならないのは，青色 LED 励起タイプ白色 LED の場合，R9の数値が低いことは赤の彩度が落ちていることがほとんどであるが，R12の数値が低いのは青の彩度が落ちている場合ばかりでなく，青が過剰に鮮やか見えている場合も多いにあると思われる．

また最近では紫色 LED 励起タイプ白色 LED が製品化されてきた．数値上の特徴は，Ra97以上かつ R9=95以上，R12=90以上の高演色性能が3000～5000K 程度の色温度範囲で実現しており，美術・博物館用蛍光ランプの性能と

図1 出光文化福祉財団 展示室

Fig.1 The exhibition room in Idemitsu culture welfare foundation.

図2 山種美術館 展示室

Fig.2 The exhibition room in Yamatane Museum of Art .

図3 青色 LED 励起タイプ白色 LED の分光特性

Fig.3 The spectral characteristic of the white LEDs stimulated by blue LED.

表3 青色LED励起タイプ白色LEDの演色性(超高演色)

Table 3 Color rendering properties of the white LEDs stimulated by blue LED (Ra>95).

		色温度	平均演色 評価数 Ra	R9 赤	R10 黄	R11 緑	R12 青	R13 西洋人肌色	R14 木の葉	R15 日本人肌色
青色LED 励起タイプ	電球色	3000K	96	96	99	98	88	98	98	98
	白色	4100K	96	97	93	98	81	96	99	95

表4 紫色LED励起タイプ白色LEDの演色性(超高演色)

Table 4 Color rendering properties of the white LEDs stimulated by violet LED (Ra>95).

		色温度	平均演色 評価数 Ra	R9 赤	R10 黄	R11 緑	R12 青	R13 西洋人肌色	R14 木の葉	R15 日本人肌色
紫色LED 励起タイプ	電球色	3000K	98	93	99	96	93	98	98	99
	白色	4000K	97	97	95	97	90	96	98	96
	昼白色	5000K	98	98	90	90	96	96	98	96

図4 紫色LED励起タイプ白色LEDの分光特性

Fig.4 The spectral characteristic of the white LEDs stimulated by violet LED.

ほぼ同等である(表4)。つまり演色性能の点において初めて従来の美術館用光源と並んだLEDといえる。また、紫色LED励起タイプ白色LEDは、光のほとんどを励起した蛍光体から得ており、紫色LEDの直光は不必要であり、この紫色LEDの光をカットすると極めて自然光に近い分光分布を呈する(図4)。以上の点から、美術館用光源として紫色LED励起タイプの方が青色LED励起タイプよりも美術館用途に向いているといえるが、紫色LED励起タイプのLED照明機器を開発しているメーカーが少ないうえ、青色LED励起タイプに比べて発光効率は半分程度であるという問題もあり、市場では依然、青色LED励起タイプが主流である。

4. LED照明下による美術作品の見えについて

これまで青色LED励起タイプ高演色LEDを導入した美術館において、色の見えについて青や青緑を中心に従来のハロゲン電球よりも良くなったと評価される場合が多い。また同時に、LED化したことにより色が派手になり絵画がチグハグしている、画面が乾燥したかのようにカサつきを感じるなど負の評価も挙げられている。こ

図5 絵画面照度と好ましさのロジスティック解析

Fig.5 Logistic analysis of pictures side illumination and desirability.

これらの評価は演色性だけでなく、色温度の影響もあるが、総じて色の見えの評価は高い反面、バランスや絵画全体の評価はそうとは限らないことを示している。このようにLED照明下における美術作品の見えを評価する場合、色票だけでなく実際の作品による検証が重要である。実際に東京理科大学において、われわれが2011年度に行った実験¹⁾では絵画の見えに関する演色性の優位性が確認された(図5)。この実験では、Ra70、Ra90の青色LED励起タイプとRa95の紫色LED励起タイプ、それとRa100のハロゲン電球を用いたが、Ra95とRa100はほぼ同等の好ましさを示し、好ましさと平均演色評価数は高い相関関係を示した。

2012年度実験では絵画に併せて色票においても検証を行った。結果、絵画の好ましさ、鮮やかさはLED照明の演色性と相関関係にあるが、色票評価では逆に演色性の低いLEDの好ましさ、鮮やかさが高いという結果を得た。また色票各色の傾向においても赤、黄、青の鮮やかさにおいて演色性の高さとは逆の結果を得ている。当実験ではRa80、Ra90の青色LED励起タイプとRa95の紫色LED励起タイプの白色LEDを用いているが、色票評

図6 2012年度東京理科大学実験におけるLED分光特性
Fig.6 LED spectrum properties in the 2012 Science University of Tokyo experiment.

価はこれらの分光特性（図6）の影響が一因として考えられる結果となっている。これらの実験結果は、美術作品の色の見えに関して、次の可能性を明らかにしている。

- ・一般的な絵画（油彩）の好ましさと平均演色評価数にはある程度の相関関係が窺える
- ・色の好ましさと平均演色評価数は必ずしも相関するとはいえない
- ・色の好ましさは特徴的な分光特性との関係を窺わせる
- ・絵画の好ましさと色の好ましさは相関しない可能性が高い

とはいえ、今回の実験で使用した絵画は印象派以降の油絵が3点のみであり、被験者も一般学生のみである。絵画の好ましさは、作品の種類や被験者によって異なる可能性が高く、同様の実験をいろいろな作品、被験者で継続をしていく必要がある。また、この結果は現在取り沙汰されているLEDの演色評価方法の国際標準化にも大きく関わる問題である。現在、検討されている新しい評価方法の1つに、色ズレの中でも好ましいベクトルにあるズレに対しては許容する評価方法があり、実験で使ったRa80のLEDも新指標ならばもっと数値が上がる可能性がある。しかし今回の実験では、絵画作品の好ましさと現行の色ズレの忠実度をベースとする演色評価方法との相関関係の高さを窺えた。今後新しいLEDの演色評価方法が国際標準化された場合、その方法が絵画作品の好ましさと一致するか注意深く検証する必要がある。

5. 色温度可変技術の展示照明利用について

美術館照明におけるLEDの利点に色温度の自由度がある。従来光源では、ハロゲン電球は色温度3000K前後のみであり、かつ調光時に色温度が低くなる特性がある。美術・博物館用蛍光ランプは、3000K、4000K、5000Kの色温度バリエーションがあるが直管のみであり、器具と配光の制約が大きかった。対してLEDは蛍光体のブ

レンドによって波長、色温度を容易に調整でき、メーカー各社が差別化のためにそのブレンドでしのぎを削っているため選択肢が非常に多い。そのような色温度選択の自由の先にあるのが色温度可変タイプのLED照明である。色温度可変技術は、前述のサントリー美術館、出光文化福祉財団でも取り入れられているように、初期はラインタイプが中心であったが、最近ではLEDの高出力化に伴ってスポットライトでも色温度可変タイプが開発されている。色温度可変には、大きく次の2つの方法がある。

- ・高色温度と低色温度の白色LEDチップを混光調色
- ・4in1チップ(R,G,B,W)もしくは3in1チップ(R,G,B)を混光調色

高色温度と低色温度の白色LEDチップの混光調色は一番多い手法である。出力の問題もあり、現状では青色LED励起タイプ白色LEDで製品化されている。ただし青色LED励起タイプは、低色温度に比べ高色温度の演色性が劣るため、色温度の変化とともに演色性も変動する傾向にある。この手法に最も適しているのが、紫色LED励起タイプ白色LEDチップである。紫色LED励起タイプの高色温度チップと低色温度チップはともに高い演色性を有し、その分光分布は自然光に極めて近い自然な波長構成である。そのため、混光調色時においても自然な分光分布となり、高い演色性を保持することになる（図7）。とはいえ、紫色LED励起タイプはまだ出力が低いのでラインタイプは可能であるが、スポットライトはコストパフォーマンスや出力と灯体の大きさのバランスなど開発はまだ難しい。以上のように、高色温度と低色温度の混光調色タイプであっても、スポットライトにおいてはまだ発展途上にあるといえる。

4in1チップの混光調色タイプは、一粒の中にR,G,B,Wの4色のLEDが入っており、それらの出力調整により色温度を可変させる技術である。これは3in1チップ(R,G,B)では難しい白色表現に対し白色LEDを入れる

図7 紫色LED励起白色LEDにおける混光混色の分光特性

Fig.7 Spectrum properties of the mixed color in the white LEDs stimulated by violet LED.

図8 4in1混光チップの分光特性

Fig.8 Spectrum properties of the 4in1 blend light LED tip.

ことにより強化したLEDである。とはいえ、演出系LED照明として利用されるLEDであり、美術館に必要な演色性については考慮されていない。それは波長特性を見れば明らかだが、使われている白色LEDは演色性が高くない青色LED励起タイプであり、かつR、G、Bに対して出力がそれほど高くないために、混光した結果もR、G、Bの3つのピークに特徴を持つ極めて歪な波長特性となる(図8)。演色性Ra90を超えるブレンド状態は一瞬であり、ほとんどのブレンドはRa80前後の低い数値を示している。

しかし現在、このような美術館用途に適しているとはいえないLED照明が少なくない美術館で使用されている。これは、色温度を可変したいという学芸員側の欲望の結果でもあるが、学芸員側はこのような歪な波長特性や低い演色性については認識をしていない。これは学芸員がLEDに対する正しい知識を持たず、また美術館用LED照明についての指針もない中、間違った方法の比較実験とその実験での直観的な好み、中途半端な機能チェック体制で機器導入を決定する現在の在り方に問題があるといえる。

6. LED照明の美術品に対する影響について

青色LED励起タイプ白色LEDにおいては、その発光原理から紫外線や赤外線といった美術品に影響の大きい波長成分が少ないという点において美術館照明に適しているといわれていた。とはいえ、450nmにおける青色ピークは特徴的であり、その影響についてはいろいろな機関で研究されている。2012年にJR DruzikらがPacific Northwest National Laboratoryで行った実験²⁾においては、3000K程度の低い色温度のLEDの場合、退色に関して従来光源との大きい差は見られなかった。この結果は2007年に発表された、石井美恵、齊藤昌子らによる共立女子大学での実験結果³⁾とほぼ一致する。石井らの実験

では、色温度、演色性の異なる4種の青色LED励起タイプと1種の紫外LED励起タイプを用いて行っている。実験では、4種の青色LED励起タイプの中では色温度が低いほど退色が少なく、色温度が同じ場合、青色LED励起タイプよりも紫外LED励起タイプの退色が大きいという結果を得た。この結果は、退色においてLEDの色温度だけでなく、放射照度の波長域とその放射束値にも高い相関あることを示し、とりわけウコンやキハダなど黄色系染料は、LEDランプ特有の400～500nmの発光ピークに応答し退色を生じる結果を得た。

紫色LED励起タイプ白色LEDでは、紫色LEDのピークである400nm近傍の波長に対する影響が懸念される。2012年に発表した八木一乃大らが行った実験⁴⁾では、紫色LEDピークを演色性に影響の少ない範囲で抑制した白色LEDと従来光源であるハロゲンランプとの退色比較を行い、ほぼ同程度の退色結果を得ている。

これらの実験結果は、青色LED励起タイプであれ紫色LED励起タイプであれ、白色LEDにおいてはそれぞれ特徴的な波長ピークを抑制することが退色に有効な手段であることを示している。とはいえ、青色LED励起タイプは、色温度が高いほどその波長ピークが光の重要な要素となるため、これを抑制することは光源の効率を損ない、演色性や色温度にも大きな影響を及ぼすために現実的な手法ではない。対して紫色LED励起タイプはその発光原理から、高色温度でも紫色ピークの抑制による色温度や演色性に影響がわずかである。退色に関しては今後もさらなる研究が必要であるが、現状の白色LEDでは、ピーク抑制を施した紫色LED励起タイプ白色LEDと低色温度の青色LED励起タイプ白色LEDが退色に対して安全といえる。

7. LED照明機器について

ほとんどの分野がそうであるように、LEDは従来光源の代替として導入される例が多い。美術館においてもそれは同様であり、多くの場合は光の質の低下を招いているのが現状である。

スポットライトにおいては、従来光源であるハロゲン電球タイプがこの10年ほどの間に美術館専用機器として大きな進歩を遂げていたためにLEDスポットライトは質、機能ともに追いついていないのが現状である。特にスポットライトにおける最も重要な質である配光性能においてハロゲンランプに比べLEDは著しく劣っている。LEDスポットライトは大きくマルチチップタイプとラージサイズのシングルチップタイプの2種類に分かれる。マルチチップタイプはレンズで配光制御し、ラージサイズシングルチップタイプの多くは反射ミラーで配光制御するが、マルチチップタイプはマルチシャドウの問題、ラージサイズのシングルチップタイプは狭角配光へ

の制御の難しさという問題がある。これらは、光ムラやスカラップなどの配光上の問題も引き起こし、総じてハロゲン電球スポットライトよりも配光状態は良くないのが現状である。マルチチップタイプで起こるマルチシャドウをなくすことは原理的に難しいことを考えると、配光の質の向上は最終的にはシングルチップタイプの発達に掛かっているといえる。それは発光の高輝度化と小面積化が必須であり、窒化ガリウムなど新しい基盤素材の実用化が急務であるといえる。

美術・博物館用蛍光ランプの後継としては、ラインタイプの LED が導入される例が多いがその多くが器具一体型であり、故障時のコスト影響が大きいことから導入に不安の声が上がっている。対して、ランプ交換が可能な現在の直管タイプの LED ランプは、色温度、演色性、調光性能において適当なランプが存在せず、開発が待たれている。今後、水俣条約が施行され、その先に水銀の撤廃があるならば、蛍光ランプの LED 化は必須であり、早急な対応と蛍光ランプ同様に美術館用直管 LED ランプの規格化が必須である。

8. おわりに

LED 照明はまだ発達期にあり、今後も新しい素子や機器が開発されるであろうが、市場においては既に導入に待ったなしの状態となっている。このような現状で、

学芸員にすべての判断が委ねられるには、あまりにも情報が分散しており正しい判断をするには困難な状態にある。そのためにも早急に照明学会として美術館に LED 照明を導入する時の指針を示し、美術館に適さない LED 照明の導入を防ぐことが急務である。

参考文献

- 1) 浦谷, 吉澤, 藤原: 美術館展示における LED 照明の利用に関する研究, 建学全大 (2012).
- 2) NJ Miller, JR Druzik: Demonstration of LED Retrofit Lamps at an Exhibit of 19th Century Photography at the Getty Museum, U.S. DOE Solid-State Lighting Technology Demonstration GATEWAY Program (2012).
- 3) 石井, 森山, 戸田, 河本, 齊藤: 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正検証, 照学誌, 91-2, pp.79-86 (2007).
- 4) 八木, 問屋, 宮下, 小西, 河野, 井出: ハロゲンランプと同等の可視域分光分布を持つ LED の開発と被照射物に対する低損傷性の評価, 照学全大 (2012).

連絡先

㈱灯工舎

<http://www.lightmeister.co.jp/>

E-mail: hibiki.takumi@gmail.com