

# 青色励起方式による超高演色LED照明の用途

## Uses of Ultrahigh Color Rendering LED Illumination by Blue-LED Excitation Method

渡 邊 英 之\*  
Hideyuki Watanabe

**概要** LED照明器具が市場に広まり、一般家庭にまで使われるようになってきた。その一方で、特殊な用途として、印刷物の色評価用照明や、美術館の展示物を傷めない照明といった、一般的なLED照明器具では、要求仕様を満足できない市場がある。そこで、当社は、青色励起方式を用いて超高演色LED照明器具 ( $Ra \geq 95$ ,  $Ri \geq 90$ ) を実現した。本稿では、印刷会社や、美術館での展示用照明としての要求仕様を満足できるかを検証したので報告する。また、この超高演色LED照明器具を一般居住空間用途へと展開していきたいと考えており、その際の人体への影響などについても述べる。

### 1. まえがき

白色LEDの発光効率向上競争が進む中、それとは別な市場要求として、「光の質」を求める声がある。一般照明では、平均演色評価指数  $Ra70$  から  $Ra80$  へと、より自然なモノの見え方が好まれるようになってきている。そのような中、「ヒト・モノを照らす＝一般照明」だけでなく、「特殊な機能を付加した＝特殊照明」にもLED化が進んできている。ここでいう、平均演色評価指数  $Ra$  というのは、国際照明委員会 (CIE) が定めた、物体の色の見え方の指標 ( $R1 \sim R8$ ) の平均値であり、その他に、特殊演色評価指数 ( $R9 \sim R15$ ) もある (表1)。

表1 CIEによる演色評価指数  $Ri$  ( $i = 1 \sim 15$ ) と  $Ra$   
CIE color rendering index  $Ri$  ( $i = 1$  to  $15$ ) and  $Ra$

番号	試験色	色の三属性による表示記号	番号	試験色	色の三属性による表示記号
No. 1	中間色	7.5R6/4	No. 9	赤	4.5R4/13
No. 2		5Y6/4	No.10	黄	5Y8/10
No. 3		5GY6/8	No.11	緑	4.5G5/8
No. 4		2.5G6/6	No.12	青	3PB3/11
No. 5		10BG6/4	No.13	西洋人女性の肌色	5YR8/4
No. 6		5PB6/8	No.14	木の葉の緑	5GY4/4
No. 7		2.5P6/8	No.15	日本人女性の肌色	1YR6/4
No. 8		10P6/8			

平均演色評価指数  $Ra = (R1 + R2 + \dots + R7 + R8) \div 8$   
特殊演色評価指数  $R9 \sim R15$

この指数を用いて、JIS規格 Z-9112:2012 では蛍光ランプを区分している。演色AAA蛍光ランプは、 $Ra \geq 95$ ,  $R9 \geq 88$ ,  $R12 \geq 90$  を実現した蛍光ランプであり、特殊

な用途で使用されてきた。しかし、蛍光ランプは、水銀を使っており、この環境負荷物質を含む蛍光ランプは、今後製造・販売が難しくなる傾向である。そのような背景から、特殊用途の分野においても、LED化が求められている。

### 2. 青色励起方式の高演色LEDとは

演色AAA蛍光ランプと同等以上の  $Ri$  を実現する方法として、(1) 紫色LED (近紫外LED) を用いて、複数の蛍光体を励起するUV励起方式と、(2) 青色LEDと複数蛍光体を励起する青色励起方式とが考えられる。

そのなかで、当社は、(2)の青色LEDを用いた青色励起方式を採用している。青色励起方式は、他の方式と比較して、発光効率が高く、長期信頼性の面でも有利である。しかし、これまでの青色励起方式では、青色LEDと緑蛍光体の間に『谷』が生じ、 $Ri$  を上げられない (図1)。

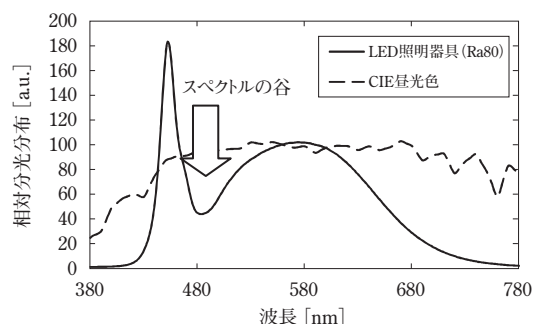


図1 昼白色LED照明器具の発光スペクトル  
Emission spectrum of daylight white LED lighting fixture

\*生産本部 LED統括部 LED先行技術室

そこでRiをあげるため、当社は、人間の視覚に着目し、錐体分光感度とCIE1931-XYZ等色関数とがほぼ同一形状であることに注目した。XYZ等色関数を図2に示す。x-bar(λ)のスペクトルは、赤色領域(500nm~700nm)以外にも感度があり、青色領域(400nm~500nm)も含んでいる。これは、R9の数値を決めているのは、赤色領域だけではなく、青色領域も重要であることを示唆している。

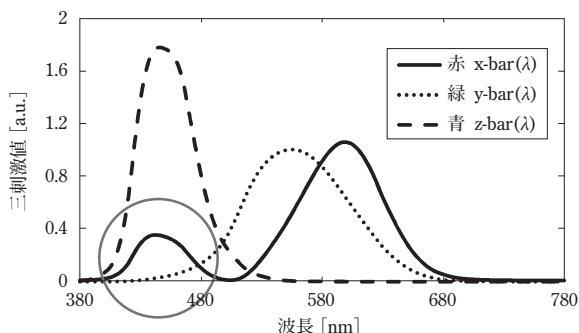


図2 CIE1931-XYZ等色関数  
CIE 1931-XYZ color matching function

青色励起方式で演色AAA蛍光ランプ以上の演色性を実現するために、青色LEDの発光スペクトル形状とピーク波長に拘り、緑蛍光体と赤蛍光体の組合せを最適化した。その結果、青色LEDと緑蛍光体の『谷』を埋めることができ、3000K~12000Kまでの色温度でRa ≥ 95, Ri ≥ 90を実現することができた<sup>(1)</sup>。このような演色性能をもったLED照明器具が実現できたことで、演色AAA蛍光ランプからの代替が可能になった。

演色AAA蛍光ランプを使用してきた業界は、印刷物の色評価用途、美術館・博物館の展示用途などがある。しかし、先述した背景から演色AAA蛍光ランプの生産を終了するメーカーが増えつつあり、入手困難になっていくため、LED化の要求が高まっている。

ここで青色励起方式ならではのメリットをUV励起方式と比較しながら述べていく。

### 3. 特殊市場への応用展開

#### 3.1 印刷色評価用への応用展開

印刷物色観察に関連したISO規格ISO3664-2009や、日本印刷学会推奨規格JSPST-1998改には、「D50」と呼ばれる、色評価用に特化した標準光源が規定されている。それらから要求される演色性の水準は、Ra ≥ 95, R9 ~ R15 ≥ 90であり、JIS規格(演色AAA蛍光ランプ)以上の演色性能が要求されている。

それに加えて、適用色度範囲も図3に示すように、一般照明用途に使用されているANSI規格よりも狭い。そ

のような色度要求に対し、青色励起方式の方がUV励起方式より有利である。UV励起方式の場合、少なくとも3種以上(赤、緑、青を含む)の蛍光体で所望の色度・Riに合わせ込まなければならないが、青色励起方式は、使用する蛍光体の種類が少ない分、簡便に色度・Riの合わせ込みができる。

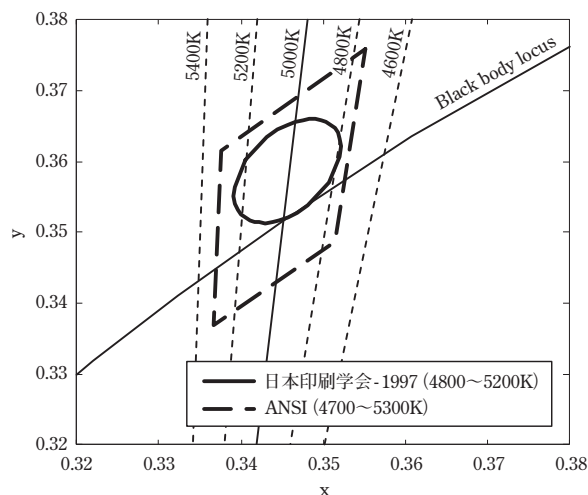


図3 各規格のx y色度座標  
The xy chromaticity coordinates of each standard

また、青色励起方式は、長期連続点灯させたときのRiの変化が少ない。これは、一般照明用途で十分に実績のある青色LEDと蛍光体、その他部材を選択することで、スペクトルの変形を抑えているためである。

実際に、当社製超高演色LED照明器具の長期連続点灯試験を実施した。その結果を図4に示す。20,000時間経過しても、各Riが90を下回ることがないことを確認しており、演色AAA蛍光ランプの定格寿命(約10,000時間)を十分に超えている。

その一方、印刷会社では、これまで演色AAA蛍光ランプで色検査をしてきたが、エンドユーザーから色違いの

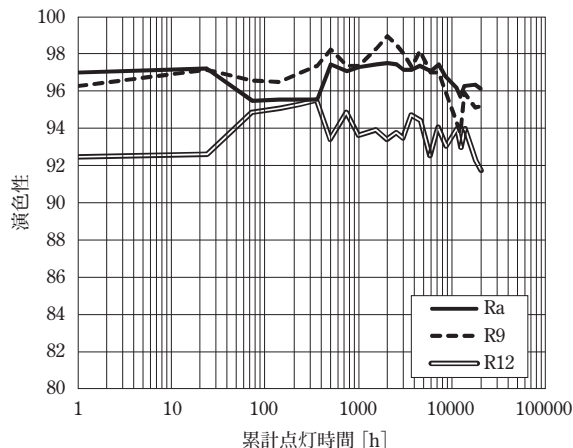


図4 演色性の経時変化(Ta=25℃)  
Time-dependent change in color rendering property

クレームがしばしば起こる。その実態は、エンドユーザー側で色確認している現場の照明が、色評価用ではなく、電球色や昼光色といった様々な光源を用いていることが主な要因である。

このため、印刷会社は、先に規定される「D50」の演色性能を持ちながら、様々なエンドユーザーの照明環境が再現可能な、調光調色機能付きの照明器具を求めている。具体的には、3000K～6500Kの調色範囲を要求している。

現時点のUV励起方式では、AAAクラスの演色性能を実現できるLED照明器具は、5000Kまでであり、6500Kはまだ量産化できていない。その点、当社の青色励起方式では、3000K～12000Kの範囲で超高演色LEDが実現可能なので、上記調色要求範囲を満足させることができる。

### 3.2 美術・博物館照明への応用展開

美術・博物館照明においても、演色性重視の蛍光灯からLED化が推進されている中で、UV成分の有無がポイントになる。

従来の蛍光灯の場合、水銀からUV成分を発光しており、このUV成分を抑制するために、紫外線吸収膜をつける。この紫外線吸収膜により、展示物の光劣化を防いでいるが、蛍光灯の寿命よりも、この紫外線吸収膜の方が早く劣化していくため、蛍光灯の交換頻度が多くなる。

また、歴史的書物、油絵などを保存する場合も、UV成分による光劣化を防ぐために高い照度で照らすことができなかった(古文書などは10～15lx)。UV成分を含まず、より明るく照らすためには、青色励起方式を用いた超高演色LED照明器具は、有効な照明である。

図5は、白色試験紙にa) 当社製超高演色LED照明、b) UV励起方式LED照明、c) 演色AAA蛍光灯の3種類の光源を同照度(2,000lx)・同時間(1,000Hrs)照射し、光劣化による変色具合を確認した。その結果、演色AAA蛍光灯では、試験紙が変色したのに対し、当社製超高演色LED照明では、変色は見られなかった。

また、美術・博物館は、季節や各種イベントに応じて、展示場のレイアウトを変更することが多く、その際、展示物や目的に合わせて、ショーケース内の蛍光灯の色温

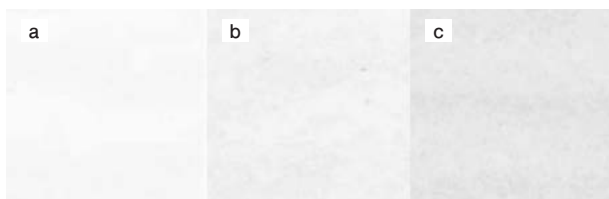


図5 照度2,000lx 時間1,000Hrs照射後の白色試験紙の変色具合(Ta=25°C)  
Illuminance 2,000lx 1,000Hrs after irradiation  
Degree of discoloration of white test paper (Ta=25°C.)

度を変更して使うことが多々ある。ショーケース内は、温湿度・気圧など、細かな管理を行っているが、蛍光灯の交換時には、ショーケースを開けて、ショーケース内の環境設定をやり直さなければならない。調光調色機能付き超高演色LED照明ならば、ショーケースの外から調光器で制御可能になるので、ショーケースを開けずに、色温度の変更が可能になる。

## 4. 特殊用途から市場の更なる拡大へ

これまで超高演色LED照明器具は、当面の需要から、一般的な演色AAA蛍光灯の置換え、各種目視検査用途等「物」に対する特殊照明市場に対応してきた。

しかし、この「質の良い光による照明」は、「人」に対応できてこそ初めて生きると考えている。

当社で採用している青色励起方式は、それを可能にできるソリューションだと考えており、今後、居住空間も視野に性能向上を追求していく。

### 4.1 青色光の人体への影響について

生活空間の照明用途を考える際に、考えなければならないのは青色光の健康被害に関することである。特に、網膜細胞に対する420nm～460nm青色光の及ぼす影響について、ブルーライト問題として知られており、細胞破壊が懸念されている。当初は直接光源を「見る」ディスプレイ等での問題であったが、昨今は照明(物体の反射光を見る)についても視野に入ることから問題視されてきている。

図6は眼の断面の概略図である。光は角膜を通過し、硝子体から網膜に至る。この水晶体がUV成分を吸収するため、紫外光は内部の硝子体、網膜には殆んど到達しない。その結果、網膜にまで到達する最短波長の光は青色光ということになる。

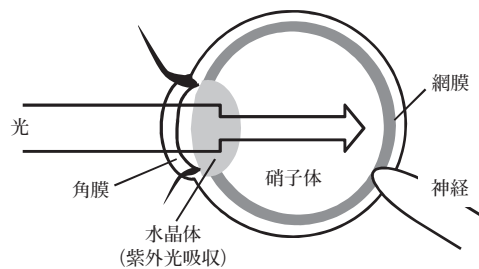


図6 眼の断面概略図  
Schematic cross-sectional view of the eye

図6に対応して、角膜→水晶体→硝子体および総合の光透過率分光分布を図7に示す。CIE技術報告書<sup>(2)</sup>を参考に抜粋したものである。図から、UV成分は、主に水

晶体での吸収が大きく、網膜に到達する量が制御されていることが分かる。

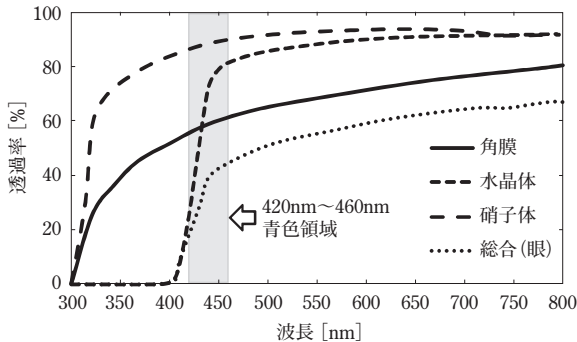


図7 眼の各部分の光透過率分光分布  
Light transmittance spectral distribution of each part of the eye

以上、光化学反応は短波長ほど強いこと、および、眼の光透過率(吸収率)などの関係から、網膜障害に対する作用度の分光分布は青色をピークにした関数になることが想像できる。図8に、国際規格：IEC 62471/CIE S009から公示された作用スペクトルを示す。

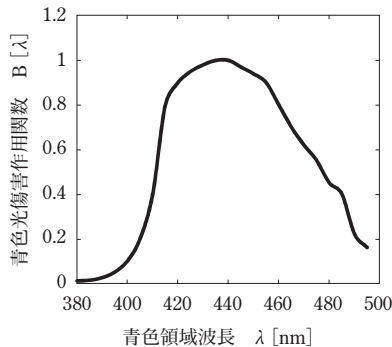


図8 青色光網膜障害作用スペクトル  
Action spectrum of blue-light hazard

「白色光」は「青成分」がなければ実現できない。それはLEDのみに関わらず、太陽光もそうであるし、一般蛍光灯ランプ、三波長蛍光灯、OLED(有機EL)、その他諸々の白色光源全てにいえることである。問題は、420nm～460nmの深い青色成分の量である。

この青色光網膜障害に対して、客観的な評価基準およびその計算法が、先に述べた国際規格：IEC 62471/CIE S009およびJIS規格：JIS C 7550として公布されている。青色光による網膜障害の実行放射輝度は、図8の作用スペクトルと光源スペクトルの積から計算され、その結果で4つのリスクグループ：免除(危険ほぼ無し)、低危険、中危険、高危険の4グループに分けられる。

色温度5000Kにおける、当社製LED搭載直管型照明(Ra=65(疑似白色), Ra=80, 超高演色LED)に併せて、他社UV励起方式の疑似太陽光LED(超高演色相当)、お

よび三波長蛍光灯(Ra=85)の実行放射輝度の測定結果を表2に示す。Ra=65疑似白色LED照明の放射輝度が若干高く、その他は全て同レベルであった。これら全て「免除グループ」範囲内であった。

また、当社製超高演色LED照明器具について、色温度：3000K～6500Kの実行放射輝度結果を比較すると、低色温度の方が青色成分が少なくなるので、より小さな値となる。なるべく低色温度の方が眼には良く、ここでも調色機能が生きてくると考えている。

表2 各種光源ランプの青色光による網膜障害危険度  
Risk of retinal damage by blue light of various light source lamps

	光源ランプ	実行放射輝度 $L_b$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ )				判定
		6500K	5000K	4000K	3000K	
他社	三波長蛍光灯		8~10			免除
	近紫外励起LED		10~12			免除
当社	超高演色LED	14~17	8~11	5~8	3~5	免除
	Ra83LED		9~12			免除
	Ra65LED		16~20			免除

照明器具の構成等で数値に幅を持つ  $L_b < 100$  で免除グループ ↗

#### 4.2 一般居住空間用途への課題

説明したとおり、当社製超高演色LED照明器具は、青色励起方式を採用したことで、信頼性や演色性維持性能は十分に市場に受け入れられるものに仕上げることができた。しかしながら、発光効率には、改善の余地が残る。

発光効率と演色性はトレードオフの関係にある。この関係だけで、居住空間対応現行照明(Ra=80相当)との効率差は15%～20%程度有り、この差は免れない。2016年、器具効率(直管型)は100 lm/Wを超え、現在はHF蛍光灯の器具効率を超えた段階である。青色励起方式の発光効率向上は、青色素子そのものの発光効率向上が不可欠である。構成改善等も含めて、2018年には器具効率として140 lm/Wを目標として開発をすすめていく。

### 5. むすび

青色励起方式を用いて、超高演色LED照明器具の製品化を実現した。長期連続使用時においても、高いRiを保持できている。本方式は、UV成分を含まないことから、歴史的書物などを光劣化から防ぐことができる。

居住空間での使用には、更なる発光効率の向上が必要であり、発光素子・構成部材の改善で実現していく。

### 参考文献

- (1) 室伏, 星野, 田中: サンケン技報, vol.47, p.57-60, (2015)
- (2) 国際照明委員会: CIE203 A Computerized Approach to Transmission and Absorption Characteristics of the Human Eye, (2012)