

LED 照明の測定評価

河本 康太郎

Optical Measurement and Evaluation on LED Lighting

Kohtaro KOHMOTO

Artificial light sources play very important roles to create lighted environment for humans. LEDs (light emitting diodes) are newly developed light sources and are expected to be widely applied for general illumination at human lighted environment. In order to apply LEDs to human environment, suitable measuring and evaluation system of optical properties of them are indispensable. As LEDs have unique special features and construction, conventional photometry and evaluation system developed for vacuum system light sources, shall be altered and improved. Several investigating items for this improvement are described hereinafter.

Key words: LED (light emitting diode), vacuum system light source, lighted environment, optical properties, quality of environment, photometry, CIE

1. 21 世紀の光源としての LED と一般照明への展開

LED (light emitting diode: 発光ダイオード) は、化合物半導体の p-n 接合において順方向電流を流したとき、n 型領域の電子が p 型領域に注入され、p 型領域のホールと再結合するときに発生する光 (再結合ルミネセンス) を利用する、電気-光エネルギー変換固体素子である^{1,2)}。

LED は、開発当初 (1969 年) は発光色が単色であったことのほかに、素子 1 個当たりの入力電力が 50 mW~100 mW 程度と小さいものしかできなかったため、用途も表示用やディスプレイ用、交通信号用や交通表示用などに限定されていた。

ところが、1996 年に青色 LED と黄色発光 YAG 蛍光体の組み合わせによる白色 LED が開発・商品化され³⁾、また、エネルギー変換機構の改善による効率向上や、大型パッケージの開発などによる素子 1 個当たりの大電力化などにより、従来の白熱電球、蛍光灯、HID (high intensity discharge) ランプなどの、いわゆる真空システム光源に替わる 21 世紀の新光源として一般照明用への普及・拡充も期待されるようになってきている⁴⁾。

一般照明用光源は、表示用光源や信号・ディスプレイ用光源と異なり、光の量や質の特性、特に全光束や光度や演色性などが、使用する上で重要となってくる。ただし、LED は従来の真空システム光源とは、構造や発光部の形状、大きさ、発光原理などが異なる⁵⁾ため、従来の測定・評価方法が必ずしもそのまま適用できるとは限らない。そのため、LED に対してより適合性のある、光の量や質の測定・評価方法の開発が必要となってくる。

以下に、一般照明用に使用するにあたっての LED の光特性の測定・評価技術の現状、および将来の開発・標準化の動向などについて述べる^{6,7)}。

2. 環境における照明の目的・機能と LED 光源の特徴

環境における照明の目的・機能は、表 1 のようにまとめることができる。この目的・機能を具現するための要素が人工光源である。したがって、環境の照明に使用するにあたっては、その人工光源の特徴を熟知することが重要である。LED 光源について、その特徴を従来の真空システム光源と対比すると、表 2 のようにまとめることができる。

(株)テクノログ (〒215-0033 川崎市麻生区栗木 2-8-18) E-mail: kohmoto@technolog.co.jp

表1 環境における照明の目的・機能と内容。

No.	目的・機能の種類	内容の詳細
1.	明視性の確保（環境よりの情報収集）	(1) 環境にある視対象物がすばやくよく見える (2) 視対象物より必要な情報を収集する
2.	快適性の創造	心理的・生理的に快適な光環境をつくり出す
3.	安全性・健康性の確保	(1) No. 1項により、環境の危険を未然に防止する (2) 光生物的傷害・障害を防止する
4.	演出性の付与	そのときの環境にふさわしい雰囲気演出する

表2 真空システム光源と対比した固体素子光源（LED光源）の特徴。

1. 光の細分化が可能	—— デジタルである
2. 組み合わせ、複合が容易	—— 要素の複合化が容易
3. 多機能を付加しうる	—— もとからの単位要素が小さい
4. 機械的強度が大きい	—— 真空容器を必要とせず、取り扱いが容易
5. 寿命が長い	—— 光源が交換部品でなくなる
6. 製造工程、材料が全く異なる	—— 新しい産業・雇用の創出が可能

表2の内容の詳細については、記述するスペースがないので省略する。関連の諸文献・資料の参照をお願いしたい⁸⁻¹²⁾。

表2に示したように、LED光源は、従来の真空システム光源とはかなり異質の特徴を有しており、うまく活用すると光環境の質的向上を図ることができる。

例えば、従来の真空システム光源による照明器具は、いったん設備してしまうと原則的に光源の発光色を調節したり、変更することはできない。ところが、LEDは固体を基本としているので、形状が小型であるほか、ほぼ同一構造でいろいろな発光色（青、緑、赤、アンバーなど）が得られるため、1つの照明器具（照明ユニット）に複数の発光色のLEDを搭載し、制御回路と組み合わせることにより、容易に可変色照明システムや可変色温度照明システムを実現することが可能である。また、別の制御ソフトと組み合わせることにより、夏-冬で照明光の（相関）色温度を自然光の状況に合わせて簡便に変更できる照明システムや、その場にいる人の人数や心理的・生理的状況に応じて照度や照明光の色を調整することのできる照明システムを具現することができ¹³⁾、光環境の質的向上に大きく貢献することができる。

3. 照明用光源に必要な測定評価特性項目とその内容

人工光源は、例えば白熱電球は1879年に開発・実用化されたというように、130年にもわたる長い歴史がある。光特性の測定・評価方法も、この人工光源の発達に伴って開発され、国際標準化も進められてきた。光特性の測定・評価方法の開発や（国際）標準化を主体的に推進してきたのは国際組織：CIE（Commission Internationale de

L'Eclairage, 国際照明委員会）である。表3に、現在までにCIEにより体系化され、標準化されてきた、照明用光源の光特性を評価するために必要な光の量と質、およびそれらの定義についてまとめたもの¹⁴⁾を示す。

4. 照明用LED光源の光特性の測定評価方法の現状と課題

4.1 LED光源についての照明用として重要な光特性

前章で述べたように、人工光源を一般照明用（光環境照明用）に使用するうえでの重要な光特性は表3に示した通りであるが、LED光源を一般照明用に使用する場合には、従来の真空システム光源と比較した場合、その構造的・発光機構的特徴から、光束、光度、輝度、光源色と相関色温度、演色性などが特に重要であると考えられる。

そこで、表3に示した光特性の中から、これらの5項目について、LEDの光特性測定・評価に適用するうえでの要点について述べる。

4.2 光 束

光環境における視作業のための光の量的要件の中で、明るさ、すなわち視作業対象物に届いている光の量は最も重要なものである。光がなければ何も見えない。何も見えなければ、人間は生活を送ることはできない。そして、通常的には、光の量が多くなれば、細かいものまでよく見分けられるようになり、色もよく見えるようになる。

この光の量のことを光束という。光束とは放射束（放射の様態のエネルギー）を人間の目の分光視感効果度で評価した量（表3）であり、光源に適用する場合の量として、全光束と部分光束とがある。LED光源は、光束の空間分布の指向性が大きいため、部分光束が重要な指標となる。

表3 照明用光源の光特性を評価するために必要な光の量と質、および定義。

項目	単位	内 容	備 考	
量	光 束 (luminous flux)	lm	放射束を明所視の標準分光視感効率（標準比視感度）と最大視感効果度に基づいて評価した量	光束 (Φ) は次の式で表される $\Phi = K_m \int \Phi_e, \lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$ K_m : 最大視覚効果度 (=683 [lm·W ⁻¹]) $\Phi_e, \lambda(\lambda)$: 放射源の分光分布 $V(\lambda)$: 明所視標準分光視感効率
	全光束 (total luminous flux)	lm	光源がすべての方向 (立体角: 4π [sr]) に放出する光束	
	部分光束 (partial luminous flux)	lm	光源が特定の限定された立体角の方向に放出する光束	上半球光束, 下半球光束, ビーム光束などがある
	光源効率 (luminous efficiency)	lm·W ⁻¹	光源の全光束を, その光源の入力電力 (消費電力) で除した値	
	光 度 (luminous intensity)	cd	光源を頂点とする錐体の単位立体角あたりに含まれる光束	
	平均化 LED 光度 (averaged LED intensity)	cd	規定された面積の受光面に入射する光源の光束を, その光源が受光面を見込む立体角で除した値, その立体角内の光度の平均値を示す	CIE 127 では, 規定された面積の受光面に 100 ± 5 [mm ²] の円形の受光面としている
	輝 度 (luminance)	cd·m ⁻²	光を放出するか, 反射している面において, 単位面積, 単位立体角あたりに含まれる光束	
質	分光分布 (spectral distribution)		放射の量の分光密度の波長に対する分布	放射の量の種類により, 分光放射束分布, 分光放射照度分布, などという
	光源色 (light-source color)		光源から光の知覚される色	通常, 色度座標や, 色名 (白色, 赤色, 緑色など) で表す
	色 度 (chromaticity)	(x, y)	心理物理色を表す三次元の要素から光の強弱に関する次元を除いた色の二次元的性質を座標で表したものの	色度は, 二次元の座標 (色度座標) 上座標 ((x, y)) として表される
	相関色温度 (correlated color temperature)	K	その放射の色度に最も近い色度をもつ黒体放射の温度	放射の色度が黒体放射軌跡上にあるときは色温度 (color temperature) を用いる
	演色性 (color rendering property)		光源からの光が, 照明している物体の色の見え方に及ぼす影響の一般的属性	通常, 同じ物体を, 基準の光で照明したときの見え方との比較により表される
演色評価数 (color rendering index)		CIE (国際照明委員会) により規定された演色性を表すための指数. 規定の試験色について, 資料光源で照明したときの色度座標の, 相関色温度の等しい基準の光で照明したときの色度座標からの変化量から計算して求める	1. CIE の規定では, 規定の試験色が 14 種類定められており, その 14 種類の試験色それぞれについて計算した評価数を “特殊演色評価数” といい, 量記号: $R_1, R_2, \sim R_{14}$ で表す 2. この 14 種類の試験色のうち, 中程度の明度および彩度をもつ 8 種類の試験色についての特殊演色評価数 (R_1, R_2, \sim, R_8) の平均値を “平均演色評価数” といい, 量記号: R_a で表す 3. JIS (日本工業規格) では, 15 番目の試験色として “日本人の肌色” (特殊演色評価数: R_{15}) を追加している	

CIE では, この部分光束の測定・評価方法を標準化している¹⁵⁾.

4.3 光 度

一般の光環境では, 光源そのものが重要な環境要素になっている場合が多い. 光環境における光源からの光の量を評価するうえで, 光束の立体角密度が重要である. ある方向における光源からの光束の立体角密度のことを光度という. LED は, 前項で述べたように, 光束の空間分布に指向性が強いので, 光度が重要な指標となる.

光源の光度は, 一般的には, 従来の真空システム光源に広く適用されてきたように, JIS で規定されている (すでに光度値の付与されている) 光度標準電球¹⁶⁾ との比較測定法により測定される. この方法は, 理論的には LED にもそのまま適用できるが, LED 光源には構造上・発光原理上および製造工程上特有の問題点があり, 実際の適用にあたってはいくつかの要検討点があるため, CIE により, LED 特有の光度測定方法が検討され, 標準化されている¹⁵⁾. この LED 光源に適用する特有の光度を “CIE 平均

化LED光度”と称している(表3)。

4.4 輝度

前節で述べたように、一般の光環境では、光源そのものが重要な環境要素のひとつになっている。この環境要素である光源からの光がそこに滞留する人の目に入り、その量によってはまぶしさを感じさせることとなる。このまぶしさの心理的感覚のことをグレアという。このグレアを感じる度合は、その光源の発光面(点光源の集合体)における点光源の光度の面密度に関係している。ある光源において、その光源の発光面における単位面積、単位立体角当たりに含まれる光束(光度の面密度)のことを輝度という。光環境におけるグレアは、この輝度を基本に定量評価される。

光源の輝度がさらに大きくなると、発光面を直視したときに、グレアを通り越して、目が痛くなることがある。これは目の網膜に入射する光の網膜上の面密度(網膜照度)が大きくなり過ぎ、網膜に光化学的傷害(青色光網膜傷害)が生じるためであり、ひどい場合には網膜剝離や失明につながるリスクがある。このリスクは対象の光源の輝度で定量評価することができる。この輝度によるリスク評価の方法がCIE規格化されている¹⁷⁾。この規格は一般照明用以外の光源にも広く適用されるため、現在はIEC(International Electro-technical Commission, 国際電気技術標準会議)でも追認され、IEC規格としても制定されている¹⁸⁾。

最近では、LED光源発光効率が改善されて1光源当たりの光束が大きくなってきたため、LED光源の輝度が大きくなり、この青色光網膜傷害のリスクが大きくなってきているので、この輝度の測定は重要である。さらに、LED光源は、従来の真空システム光源に比べて光源の構造が大きく異なっているため、輝度測定にあたってはLED特有の問題点があり、これを踏まえたLEDの輝度測定方法がCIEで検討されている¹⁹⁾。

4.5 光源色と相関色温度

光源の種類によって、いわゆる光の色(光色)が異なることはよく知られている。例えば、白熱電球や高圧ナトリウムランプからの光はやや赤みを帯びており、水銀ランプからの光は青みがかったり、蛍光ランプは白色のものが多いが、なかには赤みを帯びた光色のものや、青みを帯びた光色のものがある。LED光源には、使用される化合物半導体の種類によって、青、緑、赤などのように光の色が異なる。また、地表における太陽の光は時間帯や気象条件によって色味が異なっている。このような光の色のことを“光源色”と称し、定量的には“(相関)色温度”という数

値で表現される。光環境の(相関)色温度によって、そこに滞留する人間に与える心理的感覚(感覚)が異なることはよく知られている。

光源色の基本となる相関色温度は、正確にはその光源の分光分布を測定し、その結果から計算により求める。

LED光源は、この光源色が実用上重要な特性となり、製品をこの光源色で類別することが一般的に行われている。類別に基準については、アメリカの国家規格(ANSI規格)が制定・公布されている²⁰⁾。

4.6 演色性

光源で照明したとき、照明された目的物の色の見え方が変化することがよく知られている。“演色性”とは、光源のこの性質のことをいう。演色性は、CIEにより、定量評価するシステムが開発されている。このCIEシステムによる演色性を表す数値を“演色評価数(量記号:Raで表わす)”という²¹⁾。“演色評価数”というのは、表3に示すように、(人工)光源で照明された物体の色が、同じ相関色温度の基準の光(屋外の自然光を基準化した光)で照明されたときの物体の色に対する近似の度合を、同じ色に見えたときの数値を100として基準化したものである。

したがって、光源の演色評価数が大きくなる(Raが100に近くなる)ほど、光環境の要素としては、自然光における見え方に近くなるということになる。光源の演色評価数も、相関色温度と同様に、光源の分光分布の測定結果をもとにして計算される。

5. LED照明の今後

すでに述べたように、光は人間が生活していくうえで欠くことのできない重要な環境要素である。それゆえ、生活環境において最適な光(照明)の確保は最も重要な案件となってくる。

本稿の表1に示した光環境における照明の機能の中では、以前は1を達成することが優先された。今後は、表1の2~4を含めた総合的な適性の高い光環境を創出することが重要な要件となってくることを考えられる。

最適光環境創出のためには、照明も種々の新しい視点で検討される必要がある。それらのコンセプトをまとめたものを表4に示す。表4から明らかなように、最適光環境創出のための、LED光源の可能性は非常に大きいと考えられる。

21世紀を迎え、光(照明)はますます重要な環境要素となってきた。以上記述してきた内容が、光の環境要素としての重要性・機能を再認識し、最適光環境を創出することのための一助となることを願っている。

表4 最適光環境創出のための照明のコンセプト。

最適光環境創出のためのコンセプト		質的向上に適用する機器・システムの例
(1) 省エネルギー化の推進	エネルギー変換効率が改良された光源システムを使用する	<ul style="list-style-type: none"> ○赤外反射膜利用ハロゲン電球 ○三波長型蛍光ランプ ○5色発光型蛍光ランプ
		<ul style="list-style-type: none"> ○高周波インバーター点灯蛍光ランプシステム ○高周波点灯専用蛍光ランプ
	光源システムの種類を置き換えて変換効率の向上を図る	<ul style="list-style-type: none"> ○電球型蛍光ランプ ○コンパクト型蛍光ランプ ○LED 使用光源
(2) 光の空間分布の改良による光環境としての適性の増加		<ul style="list-style-type: none"> ○反射型電球 ○半拡散型高照度型電球 ○ダイクロイックミラー付ハロゲン電球 ○LED 照明器具
(3) 輝度分布 (グレア) の低減・改良・調節		<ul style="list-style-type: none"> ○ルーバーの使用 ○間接照明型器具
(4) 生活パターンに合わせた光の量, 空間分布の TPO 制御	自然光の明るさやその他必要ときに点灯する	<ul style="list-style-type: none"> ○フオトスイッチ付き照明器具 ○人感センサー付き照明器具 (防犯灯, トイレ用照明器具など)
	TPO に合わせて照度, 空間分布, 光色, 相関色温度などを調節する	<ul style="list-style-type: none"> ○調光機能付き LED 照明器具 ○多数光源分散配置型 LED 照明器具 (LED 使用建築化照明器具)
(5) 人間の心理的・生理的状況に合わせた光の量, 質, 空間分布などの TPO 制御	人間の睡眠-覚醒等内因リズムに対応させて照度を変化させる	<ul style="list-style-type: none"> ○サーカディアン・リズム調整用照明器具 (LED 光源, 蛍光ランプ)
	人間の心理状態に合わせて照度, 相関色温度などを調節する	<ul style="list-style-type: none"> ○人感センサー内蔵調光・調色機能付き LED 照明器具 ○LED 使用照度・色温度可変型照明器具
	光の量, 質, などを, 必要な TPO に合わせ, 演出的に調節する	<ul style="list-style-type: none"> ○LED 使用照度・色温度可変型照明器具 ○多数光源分散配置型 LED 照明器具 (LED 使用建築化照明器具)

太字: LED 関連照明機器。

文 献

- 1) 日本電球工業会編: 日本電球工業史, 追補版 (社団法人日本電球工業会, 1973).
- 2) 日本電球工業会編: 日本電球工業史, 第2追補版 (社団法人日本電球工業会, 1983).
- 3) 板東完治, 野口泰延, 阪野顕正, 清水義則: “白色 LED の開発と応用”, 第264回蛍光体同学会講演会予稿集 (2006) pp. 5-14.
- 4) 河本康太郎: “LED 照明の特長と安全性”, 人間生活工学, 4, No. 3 (2003) 16-20.
- 5) 河本康太郎: “照明用に使用することを考慮した固体素子光源と真空システム光源のエネルギー変換比較”, 日本学術振興会第162委員会・第41回研究会資料 (2005) pp. 16-21.
- 6) K. Muray: *CIE Work on LED Measurements, No. 1-3, 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement* (2001).
- 7) 河本康太郎: “LED の光学特性の測定”, 月刊ディスプレイ, 7, No. 8 (2001) 48-53.
- 8) LED 照明推進協議会編: LED 照明ハンドブック (オーム社, 2006).
- 9) LED 照明推進協議会編: LED 照明信頼性ハンドブック (日刊工業新聞社, 2007).
- 10) *Proceedings of SIL 2008* (Pennwell Inc., 2008).
- 11) *Proceedings of LEDs 2008* (Intertech Inc., 2008).
- 12) *Proceedings of SIL 2008 Japan* (イーエクスプレス, 2008).
- 13) 河本康太郎, 中村芳樹: 省エネルギー照明技術 ((財)省エネルギーセンター, 2005).
- 14) IEC 60050-845: *International Electrotechnical Vocabulary, chap.845: Lighting* (IEC, 1987)
- 15) CIE 127.2: *Measurement of LEDs*, 2nd ed. (CIE, 2007).
- 16) JIS C 7526: 光度標準電球 ((財)日本規格協会, 1992).
- 17) CIE S 009/E: *Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems* (CIE, 2002).
- 18) IEC 62471: *Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems* (IEC, 2007).
- 19) 河本康太郎: “CIE TC 2-58 「LED の放射輝度および輝度の測定」 会議報告”, 日本照明委員会誌, 21, No. 4 (2004) 160-164.
- 20) ANSI C78.377: *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products* (ANSI/NEMA, 2008).
- 21) CIE 13.3: *Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources* (CIE, 1995).

(2009年1月15日受理)