

## 論文

## 照明用 LED モジュールの光学特性測定システムの開発

岩永 敏秀\* 山本 哲雄\* 中村広隆\*

## Development of a measuring system of the photometry of LED modules

Toshihide Iwanaga\* , Tetsuo Yamamoto\* , Hirotaka Nakamura\*

We have developed the measuring system of the photometric quantities (illuminance, luminous intensity distribution and total luminous flux) of LED modules for lighting. This system is mainly composed at the photometer-bench, the light source mounting unit and the photometer unit. The photometric quantities can be measured automatically using the control system of the motorized linear stages (0.6-5 m) and the rotation stages (  $\pm 120$  degrees from the vertical,  $\pm 180$  degrees of horizontal-angle). The color correction factor can be measured by combining the spectrophotometer with the photometer when measuring colored LEDs.

We have developed a method that reduces the angle error when setting up an LED module. As a result, the photometric precision was improved by this system. Also, the appropriate measured distances have been obtained by verifying the error from the inverse-square law which causes large errors when measuring luminous intensity.

The uncertainty of the illuminance measurement was estimated across the system. As a result, the combined standard uncertainty was about 2% to the LED module with strong directivity and was about 1% to the LED module with weak directivity. Therefore, sufficient measurement reliability has been obtained across the system.

キーワード：光度，配光，全光束

Keywords : luminous intensity, luminous intensity distribution, total luminous flux

## 1. はじめに

近年，LED の小型，集積化可能な特長を生かした様々な構造・形状の LED モジュール(LED, 点灯回路, 光学部品などを組み合わせたもの)製品の開発が活発化している。LED の効率向上，演色性の改善，低価格化等にはめざましいものがあり，次世代の照明用光源として大いに期待されている。一方，照明用光源として用いられるためには，照度・光度・配光・全光束などの光学特性を正確に把握することが必要不可欠である。一般的には，これらの光学特性は電球や放電灯など従来光源用のシステムで測定が行われている。LED 素子(単体)については，従来光源にない測光上の問題点を考慮した規格・技術報告<sup>(1)(2)</sup>が発行され，それに沿った測定が行われている。当センターでも，LED 素子を測定するためのシステム開発を行い，依頼試験等に対応してきた<sup>(3)(4)</sup>。しかし，LED モジュールについては，従来光源用または LED 素子用の測定システムでは測定誤差が大きくなるなどの不具合が多い。そこで今回，LED モジュールの光学特性を測定する際に問題となる誤差要因について検討し，測定精度を向上させたシステムの開発を行ったので報告する。

## 2. 開発したシステムの概要

2.1 システムの構成と仕様 今回開発した測定システムの構成を図1に示す。システムは，電球測定用の測光ベンチ上に構築した。本測光ベンチは，リニアモータにより，受光器を設置したステージを駆動させることで 0.6m ~ 5m までの測光距離について， $\pm 0.1$ mm 以内の繰り返し精度で測光距離を設定することができる。LED モジュール設置部

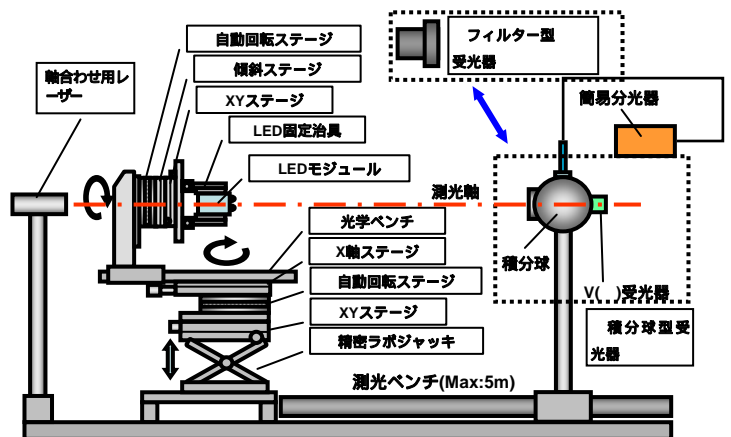


図1. 開発したシステムの概要

\*光音グループ

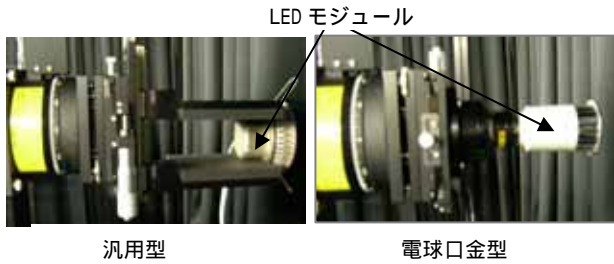


図2.測定 LED モジュール固定治具

は、各種ステージ類およびモジュール固定治具で構成されている。2 台の直交する自動回転ステージにより鉛直角 ± 120°、水平角 ± 180° の範囲内の配光測定を行うことが可能である。モジュール固定治具は、汎用型および電球口金型の 2 種類を用意し、100mm × 100mm 程度までの大きさの様々な形状のモジュールを設置することができる(図 2 参照)。受光器部は、フィルター型( )受光器、積分球型 V( )受光器および照度計を切り替えて設置できる構造となっている。また、光ファイバー導入式の簡易分光器(マルチチャンネル分光器)を並置することができ、有色 LED を測定する際に特に問題となる色彩誤差を補正することができる。

測光距離の設定、配光測定および全光束算出は、パーソナルコンピュータ上の専用ソフトウェアにより自動で行うことができる。

2.2 光学特性の測定方法

照度は、所望の測光距離に被測定 LED モジュール(以下、被測定モジュール)および照度計または V( )受光器を設置し、照度値を読み取る。V( )受光器については、光度標準電球を用いて予め照度応答度(V/lx)の校正を行っておく。光度は、光度標準電球との比較測定により(1)式から算出する<sup>(5)</sup>。ここで、 $I_t, I_s$  はそれぞれ被測定モジュール、標準電球の光度(cd)、 $K$  は色補正係数、 $r_t, r_s$  はそれぞれ被測定モジュール、標準電球を点灯したときの受光器の読み、 $d_t, d_s$  はそれぞれ被測定モジュールおよび標準電球の測光距離である。

$$I_t = K \cdot I_s \cdot \frac{r_t \cdot d_t^2}{r_s \cdot d_s^2} \dots\dots\dots (1)$$

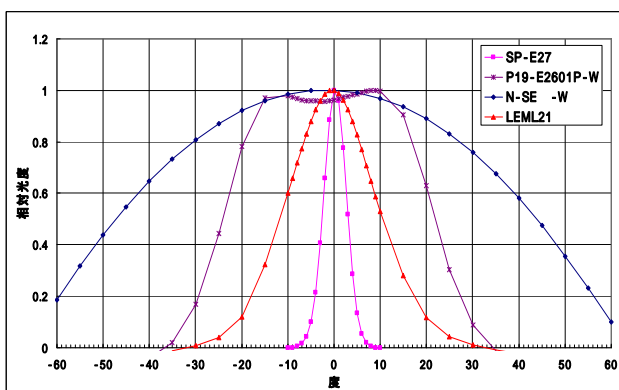


図3.配光特性の測定例

色補正係数は、光度標準電球および被測定モジュールの分光分布と受光器の分光応答度から算出する。配光特性は、2 軸の自動回転ステージを制御することにより鉛直角 ( ± 120° ), 水平角 ( ± 180° ) 内で求めることができる。全光束 (lm) は、配光特性の各方向の光度値を用いて球帯係数法により次式から求める<sup>(6)</sup>。

$$= \sum Z(\theta) \cdot I(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $Z(\theta)$  は球帯係数、 $I(\theta)$  は鉛直角  $\theta$  に被測定モジュールを設定したときの平均光度である。

配光特性の測定例を図 3 (サンプルは図 7 の一部) に示す。測定角度間隔は 5° 毎 (一部 1° 毎) である。

3. 誤差要因の検討と改善

3.1 異色測光誤差 照度や光度のような測光値  $F$  は、最大視感効率  $K_m$ 、被測定光源の相対分光分布  $P(\lambda)$  および人の眼の標準的な視感度を示す分光視感効率  $V(\lambda)$  から次式で定義される<sup>(7)</sup>。

$$F = K_m \int P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (3)$$

しかし、実際の測光においては、 $V(\lambda)$  に近似した分光応答度  $s(\lambda)$  を持つ受光器を用いて、次式から算出される。

$$F = K_m \int P(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (4)$$

$s(\lambda)$  は  $V(\lambda)$  に近似しているが完全には一致していないため、そのずれによる誤差が生じる。被測定光源が白色の場合このずれによる測光誤差は大きくない。しかし、有色(特に青や赤)の場合測光誤差が大きくなる。今回のシステムではこの誤差を低減するために  $V(\lambda)$  への一致度が高い受光器を使用している。また、分光器を組み合わせ、色補正係数を算出することにより、測光精度を大幅に向上させている。表 1 に従来の受光器と今回使用の受光器(フィルター型および積分球型)の測光誤差比較例を示す。

表 1. 分光視感効率からの外れによる測光誤差の比較

|                                    | 従来の受光器 | 今回使用の受光器 |      |
|------------------------------------|--------|----------|------|
|                                    |        | フィルター型   | 積分球型 |
| $f_{1'}$                           | 6.76   | 3.74     | 1.69 |
| 白色 LED                             | 1.5%   | 0.5%     | 0.2% |
| 青色 LED( $\lambda_p=465\text{nm}$ ) | 7.5%   | 2.3%     | 2.0% |
| 赤色 LED( $\lambda_p=640\text{nm}$ ) | 3.0%   | 1.8%     | 1.5% |

$f_{1'}$  は、分光視感効率  $V(\lambda)$  からの外れを示し、値が小さいほど一致度が高い。 $\lambda_p$  は LED のピーク波長を示す。

3.2 光源の設置角度再現性 LEDモジュールはLEDチップにレンズや反射板を組み合わせ、指向性を高めたものが多い。このような光源を測定する場合、測定システムの測光軸と光源の光軸がずれることによる測光誤差が大きくなる。従来システムでは、軸合わせを原点系およびレーザー光を使って行っている<sup>(8)</sup>が、今回システムでは測量器を使った手法を取り入れた(図4参照)。この手法による測光精度の向上を確認するために特に指向性が強いLEDモジュールについて次の実験を行った。被測定モジュールを従来法(原点系合わせ)と今回の手法(測量器合わせ)のそれぞれで軸合わせをした後、測光軸の周りに被測定モジュール(指向角 $2_{1/2}=4^\circ$ )を回転させたときの照度変動を記録した。結果を図5に示す。軸ずれが小さいほど回転による照度変動も小さくなると考えられる。図5に示す回転による照度変動を標準偏差で表すと今回の手法( $\sigma=2.1\%$ )は従来法( $\sigma=9.6\%$ )に比べて軸ずれが大きく抑えられていることが分かる。

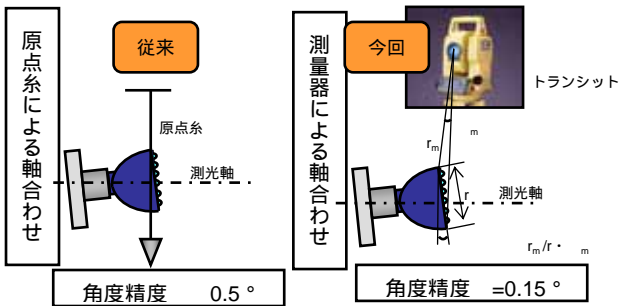


図4. 軸合わせ手法の比較

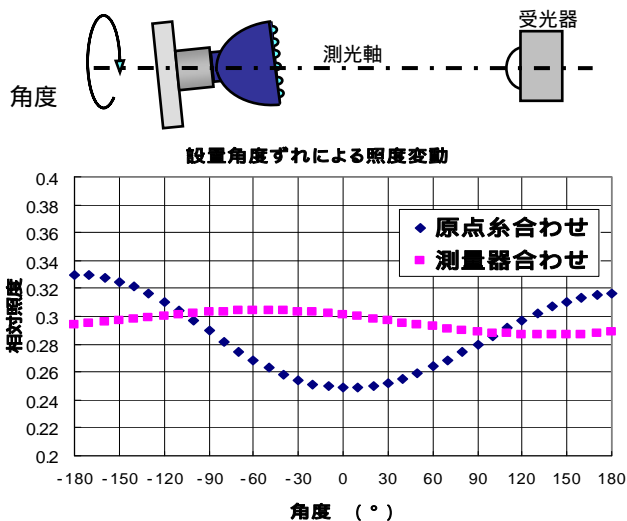


図5. 軸合わせ手法の違いによる測光誤差の比較

3.3 距離の逆二乗則からの外れ誤差 光度は、(1)式から求められるが、この式は(5)式に示す照度に関する距離の逆二乗則(以下、逆二乗則)が成立することが前提となっている。

$$I = E \cdot r^2 \dots\dots\dots(5)$$

ここで、Iは光源の光度(cd)、Eは光源の照度(lx)、rは測光距離(m)である。逆二乗則は、厳密には均等点光源についてのみ成立する法則である。均等点光源以外の光源については、光源の大きさや指向性による受光面の照度変動などを原因とする逆二乗則からの外れが生じる(図6参照)。このような場合でも測光距離を十分にとることにより近似的に逆二乗則が成立することが知られている。例えば、直管型の蛍光ランプでは、管長の10倍以上の測光距離をとれば誤差を0.5%以内に抑えることができる<sup>(9)</sup>。市販されているLEDモジュール製品は様々な大きさ、指向性を持っている

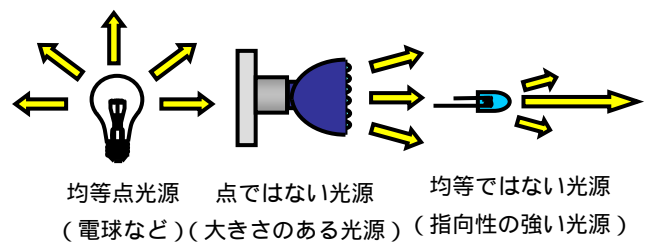


図6. (非)均等点光源の説明



図7. 距離の逆二乗則を評価したLEDモジュール

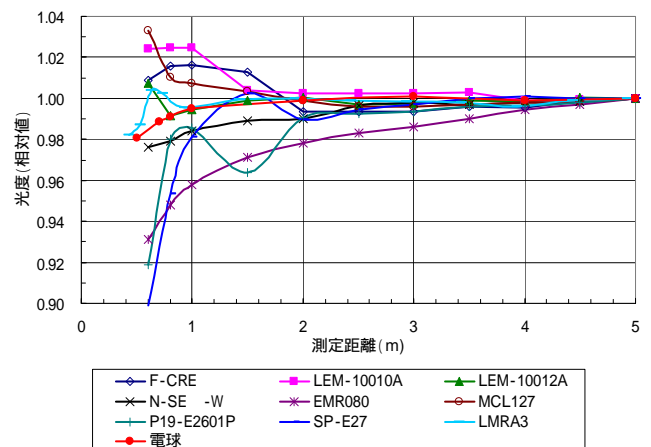


図8. 距離の逆二乗則の検証結果

ため、どの程度の測光距離をとれば逆二乗則が成立するのかを実験で求めた。実験に用いた LED モジュールは、図 7 の通りである。受光器は、照度計（一般型 AA 級、受光径 =23mm）を用いた。実験は 0.6m ~ 5m まで測光距離を変えながら照度を測定し、(5)式によって光源の光度を算出した。実験結果（図 8）から明らかなように測光距離が長くなるに従って光度は一定値に収束する。収束の仕方は、被測定光源によって異なる。比較のために測定した電球について、逆二乗則からの外れが 1%以内となる距離は、1m 以上である。一方、LED モジュールでは、もっとも外れが大きい製品について、逆二乗則からの外れが 1%以内および 2%以内となる距離は、それぞれ 3.5m 以上および 2.5m 以上と求められた。光度・配光・全光束測定では、本実験で求めた測光距離以上で測定を行う必要がある。

#### 4. 開発したシステムの評価

4.1 評価方法 本システムの評価は、照度測定についての主要な不確かさを算出することで行った。不確かさ要因としては、受光器の校正、受光器の安定性・直線性、光源の設置角度再現性、測光距離再現性、色補正係数の不確かさなどが挙げられる。受光器は、フィルター型 V( )受光器について評価した。光源の設置角度再現性については、指向性の非常に強いモジュール（指向角  $2_{1/2} = 4^\circ$ ）と指向性が弱いモジュール（指向角  $2_{1/2} = 50^\circ$ ）について評価した。色補正係数は、白色（青色 LED+黄色蛍光体）、青色（ピーク波長 465nm）、赤色（ピーク波長 640nm）の 3 種類の LED について評価した。また、光源(被測定モジュール)の点灯安定性・温度依存性などは光源によって様々であるので今回は考慮に入れていない。

4.2 評価結果と考察 不確かさの評価結果を表 2 に示す。その結果、まず受光器校正（標準不確かさ  $u=0.67\%$ ）、受光器の直線性( $u=0.46\%$ )が比較的大きな不確かさ要因であった。受光器校正は光度標準電球を用いて行うが、その不確かさ( $u=0.5\%$ )が校正不確かさのほとんどを占めている。指向性の強い LED モジュールでは、設置角度再現性( $u=1.83\%$ )が最も値の大きな不確かさ要因となっている。また、青色 LED、赤色 LED では色補正係数の不確かさ（それぞれ  $u=0.7\%, 0.37\%$ ）もかなり大きな不確かさ要因となっている。

合成標準不確かさを見ると、指向性の非常に強い LED モジュールについても 2.5%以下であり、実用上十分なレベルの不確かさに抑えられているといえる。

#### 5. まとめ

LED モジュールの光学特性測定システムの開発を行った。本システムは、0.6m ~ 5m までの測光距離で照度・光度・配光・全光束測定を行うことができる。専用治具を用意することにより、様々な形状・大きさ（100mm × 100mm まで）の LED モジュールに対応することができる。開発に当たり、LED モジュールを測定する際に大きな誤差要因となる色彩

表 2.照度測定の相対不確かさ（ $k=1, \%$ ）

|            | 白色 LED     | 青色 LED     | 赤色 LED     |
|------------|------------|------------|------------|
| 受光器の校正     | 0.67       |            |            |
| 受光器の直線性    | 0.46       |            |            |
| 迷光         | 0.08       |            |            |
| 測光距離(5m)   | 0.07       |            |            |
| 光源の設置角度再現性 | 1.83(0.05) |            |            |
| 色補正係数      | 0.06       | 0.70       | 0.37       |
| 合成標準不確かさ   | 2.04(0.90) | 2.20(1.21) | 2.08(0.98) |

主要要因を示す。( ) 内の値は、指向性が弱い LED モジュールの結果を示す。被測定 LED モジュールの安定性、温度依存性などは考慮されていない。

誤差、設置角度再現性、距離の逆二乗則からの外れについて検討を行い、測光精度を向上させた。システムの評価を行った結果、実用上十分なレベルの測定信頼性が確保できた。本システムは、照明用 LED モジュールに加えて、車載用（LED）光源、各種表示用(LED)光源などにも応用可能なシステムとなっている。

今後は、被測定 LED モジュールの点灯安定性、温度依存性要因の不確かさ評価、球形光束計による全光束値との比較・検討を行い、依頼試験等に対応していく。

（平成 19 年 6 月 29 日受付，平成 19 年 8 月 17 日再受付）

#### 文 献

- (1) CIE127: "Measurement of LEDs" (2007)
- (2) JIS C8152: 「照明用白色発光ダイオード(LED)の測光方法」(2007)
- (3) 岩永敏秀, 山本哲雄, 中村広隆: 「都産技研における LED 光度・配光・全光束測定システムの開発」, 平成 18 年度照明学会全国大会講演論文集, pp.223 (2006)
- (4) 岩永敏秀, 山本哲雄, 中村広隆: 「LED 光学特性測定システムの開発」, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 第 1 号 pp.102-103 (2006)
- (5) JIS C7613: 「測光標準用電球の測光方法」, pp.3 (1985)
- (6) JIEC-003: 「配光測定の学会技術基準」, pp.21 (1993)
- (7) (社) 照明学会編: 「光の計測マニュアル」, pp.10 (1990)
- (8) JIS C7613: 「測光標準用電球の測光方法」, pp.解 3 (1985)
- (9) JIEC-003: 「配光測定の学会技術基準」, pp.70 (1993)