

# 正確な紫外発光ダイオードの評価に向けたスペクトルミスマッチング補正の重要性を検討した紫外放射照度計の比較検証

木下 健一\*・神門 賢二\*・宮坂 勝也\*\*・利根 俊文\*\*・長沼 孝夫\*\*・芹澤 和泉\*\*

\*国立研究開発法人産業技術総合研究所物理計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

\*\*株式会社オーク製作所諏訪工場 〒391-0011 長野県茅野市玉川 4896

## Comparison of Commercial Ultraviolet-Irradiance Meters Examining the Importance of Spectral Mismatch Correction for Accurate Evaluation of Ultraviolet Light-Emitting Diodes

Kenichi KINOSITA\*, Kenji GODO\*, Katsuya MIYASAKA\*\*, Toshifumi TONE\*\*, Takao NAGANUMA\*\* and Izumi SERIZAWA\*\*

\*Research Institute for Physical Measurement, National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563

\*\*ORC Manufacturing Company, Limited, 4896 Tamagawa, Chino, Nagano, 391-0011

In recent years, conventional mercury lamps used for ultraviolet (UV) curing and other purposes are being replaced by UV-LEDs, which provide several important benefits such as longer lifetime, lower energy consumption, and no hazardous waste. However, difficulties of irradiance measurement of UV-LED and calibration problems of UV-irradiance meters have also arisen. This study compared commercial UV-irradiance meters of seven types to investigate irradiance measurements of UV-LEDs. As reference values for comparison, irradiance values of three types of standard LEDs for UV-LED were used, and they were calibrated against the spectral responsivity standard. Comparison results demonstrated that most of the reading of UV-irradiance meters differed from our UV-LED calibration values by about 10%-30%. These differences were resulted from disagreement of spectra between the reference source used in each UV-irradiance meter calibration and the UV-LED. It was improved by spectrum mismatch correction.

**Key words:** ultraviolet light-emitting diode (UV-LED), irradiance, ultraviolet-irradiance meter, spectrum mismatch correction, spectral responsivity

### はじめに

波長 400 nm 以下の紫外線の応用は、赤外線が熱的な作用を及ぼすことが多いのに対し、紫外線は化学的な作用が著しいことから、殺菌・浄化などにおける広い分野にわたっている。そして、常に生体安全性や光源・部品劣化などの観点から必要照射量、暴露量などを正確に測定する必要があり、紫外線の放射照度の測定方法やそれを計測する紫外放射照度計については、さまざまな分野で検討されてきた<sup>1-5)</sup>。

近年では紫外発光ダイオード (UV-LED) が登場し、その高強度化、高効率化、さらにはその発光波長の短波長化が進み、紫外線照射用の光源として普及が進んでいる。そ

の用途は紫外線硬化や非破壊検査、皮膚治療や水処理など、従来光源の代替光源として広く利用されつつある。UV-LED の特性として、水銀を含有していないことや光源サイズのコンパクト化が可能であるといった利点があり、従来の UV-A 領域 (320~400 nm) の紫外線光源である水銀ランプからの置き換えが特に著しい。それに伴い、計測上の問題も顕在化している<sup>6)</sup>。例えば、365 nm の水銀輝線代替として普及している UV-LED を用いた紫外線硬化樹脂用照射装置には、LED からプリント基板までの照射距離 10 mm、放射照度 1~10 W/cm<sup>2</sup> 程度の近距離かつ高放射照度の照射条件で使用するものがあり、その条件下で正確な必要放射照度の計測が要求される。一般に紫外線の放射照度

E-mail: kenji-goudo@aist.go.jp

は、製造現場では紫外放射照度計を用いて測定が行われてきた。しかし、市販される紫外放射照度計の校正条件と上記の紫外線硬化樹脂用照射装置の使用条件とは必ずしも一致しないため、計測の不確かさや指示値からの差異が大きくなる。また、従来の紫外放射照度計は、必ずしも分光応答度などの諸特性がUV-LED測定のために最適化されておらず、実際の放射照度と数倍程度大きく異なる計測値が表示されるといった事例も発生している。紫外線の放射照度計測の問題は、従来の水銀ランプなどの紫外線光源の計測でも報告されてきたが<sup>3)</sup>、上述の通り、UV-LEDの放射照度計測では、UV-LEDを用いれば従来装置の小型化が容易に可能であるため、小型化と同時に装置の照射距離も短くなるという測定幾何条件の違いなど、UV-LED特有の問題が発生している<sup>6-7)</sup>。

産業技術総合研究所では、国内で紫外線領域の放射照度計測の計量標準として利用される分光放射照度標準（波長範囲 200 nm～2500 nm）および分光応答度標準（波長範囲 200 nm～1150 nm）を整備・供給するとともに、近年のUV-LEDに対する測定ニーズの高まりを受けて、日亜化学工業社と共同開発したLEDベースの標準光源（UV-LED用標準LED）を仲介用標準器としたUV-LEDの全放射束標準の開発や、UV-LEDの近距離条件での放射照度計測に関する研究などを行ってきた<sup>8-10)</sup>。

本研究では、UV-LEDの放射照度計測の問題点を明らかにするために、市販の紫外放射照度計の測定値の比較検証やその特性を調査し、UV-LEDの放射照度計測の問題・改善点の検討を行った。

## 1. 紫外放射照度計の比較方法

### 1.1 評価用LED光源と放射照度値の絶対校正

市販の紫外放射照度計の比較を行うために、最初に比較測定の基準として用いるUV-LEDの放射照度値を決定した。本研究で行う比較測定では、日亜化学工業社から販売されている3種類のUV-LED用標準LEDを比較測定の基準として用いた。3種類のUV-LED用標準LEDは、その中心波長からU365、U385、U405と区別される。Fig. 1は、比較測定で用いたUV-LED用標準LEDの写真である。UV-LED用標準LEDの全長は約85 mmであり、先端部の直径は25 mmである。先端部で実際に発光するLED自身のサイズは6 mm角である。また、筐体内部に温度センサーとペルチェ素子を実装しており、専用ケーブルを市販温度コントローラーに接続し任意温度で制御（65°C）および点灯（200 mA）することにより、高い点灯再現性や光強度の安定性を実現できる<sup>8)</sup>。

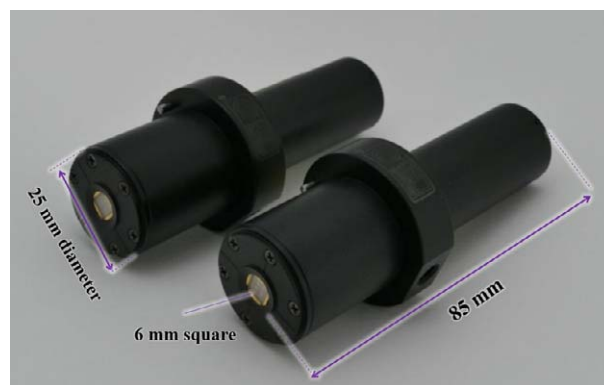


Fig. 1 Standard LED for UV-LED (made by Nichia Corporation).

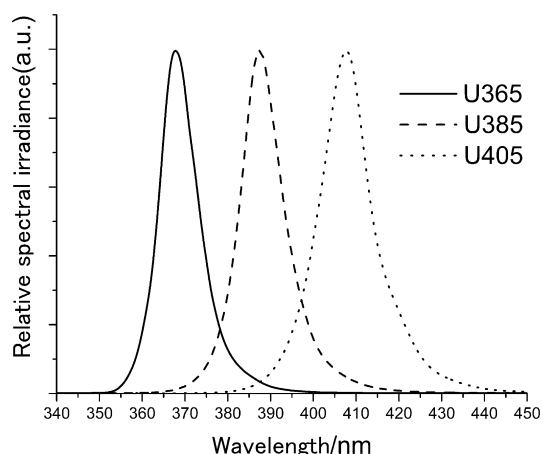


Fig. 2 Relative spectral distributions of the standard LEDs for UV-LED.

Fig. 2に、3種類のUV-LED用標準LEDの相対分光分布を示す。点灯条件は200 mA、65°Cである。比較的高温度で制御するため、中心波長は長波長側にシフトする。UV-LED用標準LEDに限らず、UV-A領域のUV-LEDの分光分布は半値幅20 nm程度の準単色の分光分布であり、さまざまな波長の輝線を含む水銀ランプとは、その分光分布が全く異なる。

UV-LED用標準LEDから放射される光の配光分布は、指向性が小さくランバーシアン配光になるように最適化されている。これは、受光器の余弦特性などが関係する不確かさをできるだけ小さくするためである。上記の点灯条件で、放射束は、約450 mW (U365)、約700 mW (U385)、約850 mW (U405)、測定距離10 mmでの放射照度は約150 mW/cm<sup>2</sup>～270 mW/cm<sup>2</sup>である。また光強度は、温度安定化を行うことにより、2時間の連続点灯で光変動は0.05%以下と非常に高安定な光安定性を達成した。さらに、筐体へ実装する前に200時間程度の枯化処理を行っている。この枯化処理により、一般にLEDで発生する初期

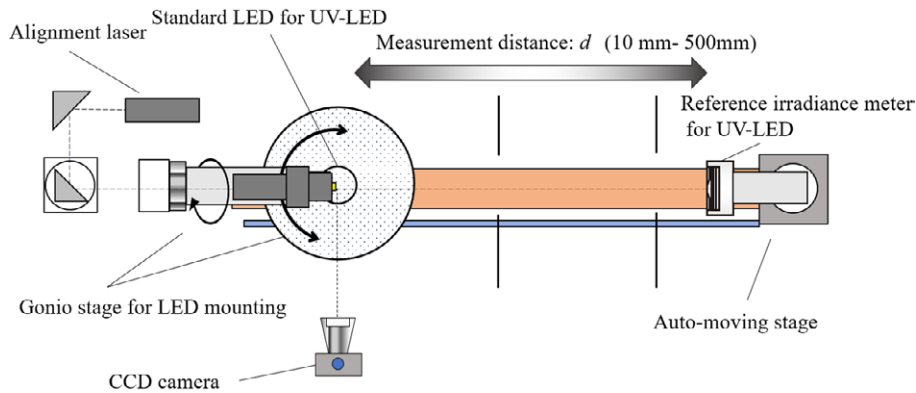


Fig. 3 LED calibration system at NMIJ/AIST.

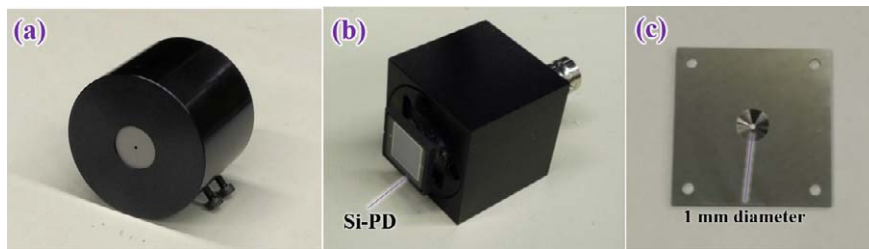


Fig. 4 Reference irradiance meter for UV-LED: (a) Appearance, (b) Si-PD part of the inside, (c) Precision aperture of 1 mm diameter.

劣化（初期点灯後、数 100 時間で発生する大きな変動特性）を避けることができ、安定した光強度を維持することができる。上記で述べた UV-LED 用標準 LED の特性により、今回の比較測定では、UV-LED の光変動などの特性に起因する不確かさを可能な限り小さくし、比較した。

Fig. 3 は、放射照度値の校正および紫外放射照度計の比較で使用した LED 光度・全光束校正装置である。この装置は産業技術総合研究所における単体 LED 素子の光度や全光束の校正をするために開発された装置であり、検出器を変更することにより放射照度計測に用いることもできる。UV-LED 用標準 LED は、この装置の 2 軸の自動回転ステージから構成される配光ステージ上に取り付けられる。LED および受光器の正確な位置合わせ用として、CCD カメラやアライメントレーザーを用いており、これにより約  $150 \mu\text{m}$  程度の不確かさで LED-受光器間距離を決定した。

放射照度値を測定する検出器は、直径 1 mm の精密アパーチャーと Si-PD（シリコンフォトダイオード）から構築される UV-LED 放射照度用受光器を用いた（Fig. 4）。UV-LED 放射照度用受光器は、LED 光度・全光束校正装置内の移動距離 1.2 m の自動移動ステージに取り付けられる。UV-LED 放射照度用受光器で用いた Si-PD は、測定波長範囲内（250 nm～1150 nm）で十分な分光応答度、さらには測定放射照度範囲内（約  $300 \text{ mW}/\text{cm}^2$  以下）で応答の

直線性（直線性からの外れが約 0.1% 程度）が成り立つものを用いた<sup>11)</sup>。直径 1 mm の精密アパーチャーは、真円度  $3 \mu\text{m}$  以下、エッジラフネス  $1 \mu\text{m}$  以下、さらには、表面に再反射防止のための低反射処理（反射率 30% 以下）を施したものを使用している。完全に黒色化しなかったのは、黒色化処理によるナイフエッジの劣化を避け、精密アパーチャーの精度を維持するためである。

UV-LED 放射照度用受光器の分光応答度 (A/W) である  $s(\lambda)$  は、あらかじめ産業技術総合研究所が有している分光応答度校正装置と分光応答度標準（200 nm～1150 nm）により校正されており、その放射照度値  $E_{\text{UV}}$  は、

$$E_{\text{UV}} = \frac{I_0 \int E_{\text{LED}}(\lambda) d\lambda}{A_0 \int E_{\text{LED}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $I_0$  は UV-LED 放射照度用受光器からの出力電流、 $A_0$  は UV-LED 放射照度用受光器の開口、 $E_{\text{LED}}(\lambda)$  は測定する UV-LED の相対分光分布、 $\lambda$  は波長である。式 (1) から、任意距離での UV-LED 用標準 LED の放射照度値を正確に導出することができる。

この方法による UV-LED 用標準 LED の距離 10 mm における放射照度の拡張不確かさ  $U$  は約 7.1% ( $k = 2$ ) である<sup>10)</sup>。大きな不確かさ要因は、10 mm の近距離計測であるために発生するアパーチャーのナイフエッジ裏面と Si-PD 面の相互反射の影響 ( $u = 2.0\%$ ) や、距離設定・測定の不

Table 1 Main specifications of the commercial UV-irradiance meters.

UV-irradiance meter	A	B	C	D	E	F	G
Wavelength range (nm)	310~ 385	340~ 470	320~ 490	380~ 450	345~ 385	300~ 400	320~ 390
Irradiance range (mW/cm <sup>2</sup> )	0.001~ 50	0.001~ 50	0.001~ 50	0~ 20,000	0~ 9999	0.1~ 1000	100~ 1000
Sensitive area diameter (mm)	18	19	20	1	3	1	21
Calibration uncertainty	8%	8%	8%	5%	5%	10%	10%
Application (center wavelength)	UV-line (365 nm)	UV-line (385 nm)	UV-line (405 nm)	UV-LED	UV-line (365 nm)	UV-A source	UV-A source

確かさ ( $u = 2.45\%$ ) などである。相互反射の影響による不確かさとは、測定距離が比較的長い場合（例えば、500 mm 以上）は、点光源である LED から受光器に入射する光はほぼ平行光と見なされるが、一方で近距離での計測になると LED 自身の大きさを無視できなくなり、斜め入射成分が増加し、それにより発生するアパーチャーのナイフエッジ裏面と Si-PD 面の相互反射により、分光応答度値が校正値から見かけ上変化することに起因する不確かさである。この相互反射の補正やその不確かさを、実験的には光度-照度に成り立つ逆二乗則からの外れの測定、理論的にはレイトレース計算から推測し、補正值およびその不確かさを評価した。距離設定・測定は、自動移動ステージや受光器および LED の先端部決定用の CCD カメラにより約 150  $\mu\text{m}$  程度の不確かさで決定しているが、10 mm の測定距離では、0.1 mm の違いが約 2% の放射照度値の違いになるため大きな不確かさ要因となる。これら 2 つが支配的な不確かさ要因であり、さらなる改善を進めている。点灯の再現性も含む、繰り返し測定の再現性は  $u = 1.4\%$  であり、今回の紫外放射照度計の比較では、十分な測定再現性がある結果が得られている。

また、本研究で用いた分光応答度標準により校正された UV-LED 放射照度用受光器を用いる方法は、他の計測方法である分光放射照度標準により校正された分光放射計により計測する方法 ( $U = \text{約} 7.7\% (k = 2)$ ) との比較検証を事前に行っており、2 つの方法による計測値の差は 3% 以内、すなわち不確かさの範囲以内で一致することを確認した<sup>10)</sup>。

## 1.2 紫外放射照度計

一般に、紫外放射照度計は Si-PD（または GaP-PD）などの半導体検出器および紫外の特定の光だけを通すバンドパスフィルターから構築されており、測定波長帯域や測定放射照度範囲は、メーカーごとに千差万別である。

Table 1 は、本研究で比較した市販の紫外放射照度計の主要な仕様一覧である。おもに UV-A 領域の光を測定対象としているメーカーや測定波長領域が異なる 7 種類の紫外

放射照度計を比較した。機種ごとに、その仕様は千差万別であることがわかる。表 1 の仕様は、おもにメーカー仕様書値（カタログ値）を記載したが、仕様書に記載がない受光面サイズなど、直接測定した値もある。校正精度は、仕様書に記載された数値であるが、校正条件（用いた参照標準、測定距離）などはほとんどのメーカーで公開されていない。一方で、水銀ランプ用など、その用途はほとんどの仕様書で記載されており、比較した紫外放射照度計は必ずしも UV-LED の計測用に最適化されたものではない。このため、以下で述べる比較結果は、共通の測定条件下で実施した場合の比較結果であり、必ずしもメーカーが意図している測定条件とは一致していないことにあらかじめ注意していただきたい。

紫外放射照度計の比較は、Fig. 3 の UV-LED 用放射照度受光器が取り付けられた自動移動ステージ上に設置し、あらかじめ任意距離（500 mm, 200 mm, 100 mm, 10 mm）で放射照度値が校正された UV-LED 用標準 LED（U365, U385, U405）を用いて行った。各測定距離における UV-LED 用標準 LED の放射照度値の拡張不確かさ  $U$  は、それぞれ 3.4% (500 mm), 4.0% (200 mm), 4.9% (100 mm), 8.8% (10 mm) である。測定距離に依存して不確かさ値が異なるのは、前述した相互反射の影響や距離設定の不確かさが、距離に依存して変動する、すなわち測定距離が短くなると増加するためである。

## 2. 放射照度値の比較

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に、各 UV-LED 用標準 LED の放射照度を紫外放射照度計で測定したときの指示値と参照値である UV-LED 放射照度用受光器で測定した値の比を示す。指示値は紫外放射照度計の測定値であり、メーカー校正に基づく値である。Fig. 5 は UV-LED 用標準 LED U365, Fig. 6 は UV-LED 用標準 LED U385, Fig. 7 は UV-LED 用標準 LED U405, それぞれを比較用 UV-LED として用いた場合の結果である。各測定は 4 点の測定距離で行っており、測

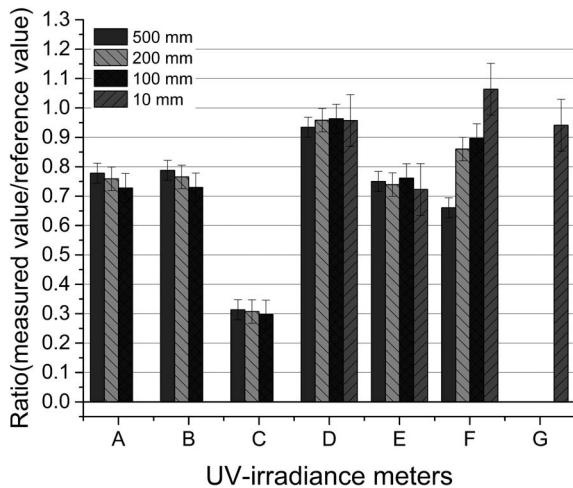


Fig. 5 Comparison of the measured values in the commercial UV-irradiance meters (U365).

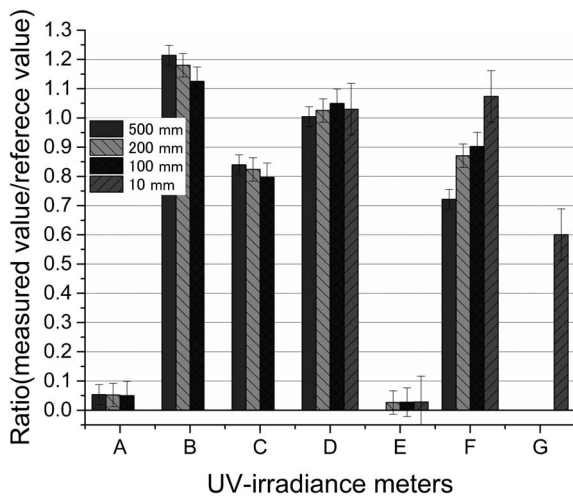


Fig. 6 Comparison of the measured values in the commercial UV-irradiance meters (U385).

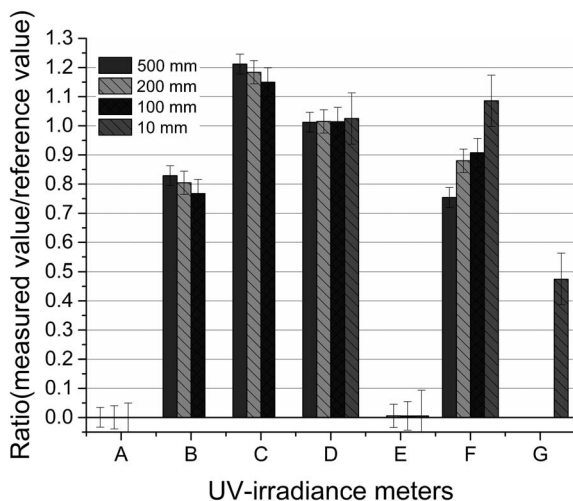


Fig. 7 Comparison of the measured values in the commercial UV-irradiance meters (U405).

定距離に依存してその放射照度値は変わる。例えば、U365で、その放射照度値は、測定距離 10 mm で約 165 mW/cm<sup>2</sup>、測定距離 200 mm で約 2.1 mW/cm<sup>2</sup>、測定距離 100 mm で約 0.5 mW/cm<sup>2</sup>、測定距離 500 mm で約 0.09 mW/cm<sup>2</sup>となる。各紫外放射照度計で測定可能な放射照度範囲が異なるため、測定ができなかった条件が存在する。また図に記載したエラーバーは、前述した UV-LED 用放射照度受光器を用いて UV-LED 用標準 LED の放射照度を校正したときの拡張不確かさを示している。

Fig. 5 から、ほとんどの紫外放射照度計で参照値から約 10%~30% 程度の違いがあることがわかる。これは、測定の再現性などでは説明することが難しい、各紫外放射照度計に依存する優位な差である。特に 405 nm の輝線用の紫外放射照度計 C は、カタログに記載されている測定波長領域としては測定可能な波長範囲であるが、70% 程度の差がある。一方で、UV-LED 用の紫外放射照度計 D は、参照値との差は少なく、5% 未満である。このため、紫外放射照度計 C と紫外放射照度計 D で測定した値は 3 倍近く異なる。

また測定距離に依存する傾向も紫外放射照度計ごとに異なる。例えば、紫外放射照度計 D は、他の受光器に比べて数% 程度しか、測定距離に依存した違いが発生しない。一方、紫外放射照度計 F は、測定距離に依存して大きな違いが発生する。10 mm と 500 mm の測定条件で約 2 倍近く値が異なる。これは、紫外放射照度計の余弦則からの外れが大き、応答の直線性が悪いなどの原因が考えられる。

U385 (Fig. 6) の結果、U405 (Fig. 7) の結果も、U365 の結果とほぼ同様の傾向であるが、中心波長が 365 nm から 385 nm、405 nm に変わるため、365 nm の輝線用である紫外放射照度計 A と紫外放射照度計 E は、測定値は出力されるが、その違いは非常に大きくなる。逆に、中心波長が一致している 385 nm の輝線用である紫外放射照度計 B や紫外放射照度計 C は、Fig. 5 の結果から大きく + 方向に変化する。この LED の中心波長に依存する傾向は、紫外放射照度計の相対分光応答特性が大きく関係していると考えられる。

### 3. 考察：分光応答度に基づく補正

Fig. 5~Fig. 7 の比較結果が示す傾向から、参照値からの違いの原因のひとつとして、校正で使用した輝線光源（測定対象とした光源）と被試験光源である UV-LED の分光分布の違いが関係していると考え、スペクトルミスマッチングの補正係数  $K_{smf}$  の導出を、式 (2) を用いて行った。

$$K_{smf} = \frac{\int E_{LED}(\lambda) d\lambda \cdot \int E_s(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int E_{LED}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \cdot \int E_s(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

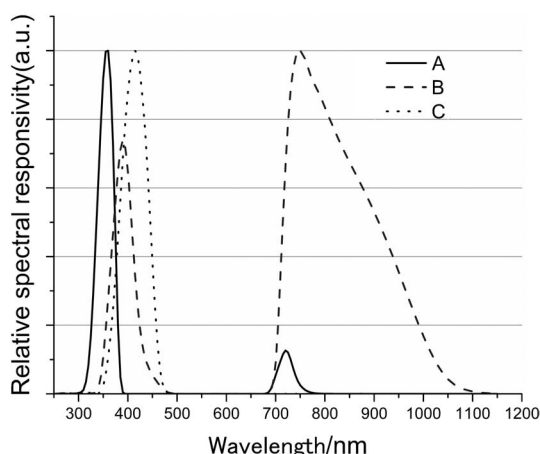


Fig. 8 Relative spectral responsivities of the UV-irradiance meter.

ここで、 $E_{LED}(\lambda)$  は UV-LED の相対分光分布、 $E_s(\lambda)$  は校正で使った光源 (輝線スペクトル)、 $s(\lambda)$  は紫外放射照度計の相対分光応答度である。紫外放射照度計の指示値に対して、 $K_{smf}$  を乗じて補正を行った。

Fig. 8 は、補正を行った紫外放射照度計 A, B, C の相対分光応答度である。相対分光応答度の測定には、UV-LED 放射照度用受光器と同様に分光応答度校正装置を用いた。測定した紫外放射照度計 A, B, C は、各測定対象である輝線スペクトルに対して最適な分光応答度になるように、最大感度が最適化されている。すなわち、感度がある波長帯域を特定輝線の測定のために狭くしている。逆に言えば、Fig. 5~Fig. 7 の結果が示す傾向の通り、測定対象の中心波長が変わると、その値が大きく変わることも容易に理解できる。さらに、紫外放射照度計 C は赤外波長域にも感度を有しているのが大きな特徴である。赤外域にも感度を有するのは、ある特定の紫外域の輝線のみを対象にしているためだと考えるが、特定の輝線以外の計測を行う場合は注意が必要である。

仕様書から、紫外放射照度計 A, B, C は、過去、産業界において紫外放射照度計の校正用光源として用いられてきたクレフト水銀ランプにより校正が行われたことがわかっており、スペクトルミスマッチング補正は、クレフト水銀ランプから UV-LED への補正となる<sup>12)</sup>。Fig. 9 は、式 (2) を用いて紫外放射照度計 A, B, C に対してスペクトルミスマッチングの補正を行った結果である。この補正により 1 に近づくという結果が得られた。例えば、U365 において紫外放射照度計 A の場合、30% 程度あった差が、5% 程度の違いまでに改善された。比較において最も結果がよかった紫外放射照度計 D とほぼ同じ結果である。一方、補正により改善はされるが、相対分光応答度が LED

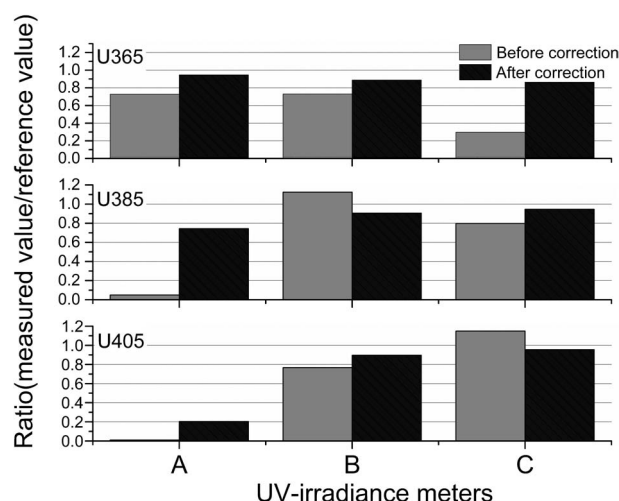


Fig. 9 Correction of measured values in the UV-irradiance meters at measurement distance 100 mm (From the upper of the figure, the results using U365, U385, and U405 are indicated, respectively).

の中心波長に対して最適化されていないため、例えば、U365 において紫外放射照度計 B, C は、補正後でも 10% 程度の違いが発生する。同様の傾向は、U385 を用いた紫外放射照度計 A でもみられ、補正を行っても、改善は限定される。

この結果から、紫外放射照度計を用いた計測では、測定対象とした光源や相対分光応答度の形状が、その測定結果に大きな影響を与えることがわかる。紫外線照度計の相対分光応答度はメーカーごとに異なり、分光視感効率曲線により、その作用範囲、さらには測定条件が限定される照度計などにはない大きな測定の難しさである。また、スペクトルミスマッチングの補正を行ったとしても、補正には限界があるため、UV-LED の計測では平坦な分光応答度をもつ受光器のほうが適していると考えられる。

## まとめ

本研究では、国家計量標準にトレーサブルな形で校正された UV-LED 放射照度用受光器と 3 種類の UV-LED 用標準 LED (中心波長 365 nm, 385 nm, 405 nm) を用いて、市販の紫外放射照度計の比較を行った。これにより、市販紫外放射照度計では UV-LED の測定値が機種によって大きく異なることが示された。参照値からの違いは、UV-LED 用標準 LED の中心波長によっても異なる。このことは、測定対象に合わせて正しく校正された紫外放射照度計を用いる必要があることを示している。測定対象である UV-LED と異なる光源で校正されている場合、スペクトルミスマッチング補正を算出することで参照値と合致する値が得られ

ることを示した。また、スペクトルミスマッチング補正は、一般にはUV-LEDの中心波長ごとに異なる値となる。そのため、UV-LED計測のためには、中心波長ごとに補正係数が与えられているか、中心波長の違いによって応答度が変わらない紫外放射照度計を用いることが好ましいと考える。加えて、測定距離に対して大きな距離依存性をもつ紫外放射照度計も存在するため、より正確に求めるためには測定距離などの校正条件も、できるだけ実際の測定条件に一致させる必要がある。

本研究の結果から、使用用途が従来の水銀ランプ以上に多岐にわたるUV-LEDの場合、使用するUV-LEDの特性や使用条件に応じた紫外放射照度計の校正が必要であることが示された。すなわち、今後より使用用途が広がるUV-LEDの諸特性を正確に測定するためには、計測器である紫外放射照度計の特性の改良（例えば、紫外線への高耐久性や小型化など）だけでなく、その校正方法の改善も重要であることを示した。

われわれは、今回の比較結果に基づき、新たなUV-LED用紫外放射照度計の開発を進めるだけでなく、その校正方法の改善も行い、より正確なUV-LEDの放射照度測定を実現させるための技術開発を行う予定である。そして、より短波長化・高強度化が進むUV-LEDの開発や紫外領域の放射照度計測の向上に貢献を行いたい。

## 文 献

- 1) 戸沢 均：照明学会誌，**77** (1993) 124-127.
- 2) 短波長紫外線の測定法に関する研究調査委員会：JIER-066 短波長紫外線の測定法に関する研究調査委員会報告書（照明学会，2000）.
- 3) 紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会：JIEG-007a 紫外放射の産業界における使用例とその実用測定機器方法の現状（照明学会，1994）.
- 4) 紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会：JIEG-007b 紫外放射の標準と校正技術（照明学会，1994）.
- 5) CIE 220:2016 Characterization and Calibration Methods of UV Radiometers (CIE, 2016).
- 6) G. P. Eppeldauer, C. C. Cooksey, H. W. Yoon, L. M. Hanssen, V. B. Podobedov, R. E. Vest, U. Arp and C. C. Miller: Proc. SPIE, **9954** (2016) 99540J.
- 7) B. Berg: "Comparison of Commercial UV LED Sources and Radiometers," *Presentations on Council for Optical Radiation Measurements 2016 Conference* (Maryland, 2016).
- 8) K. Kinoshita, K. Godo, T. Zama, S. Matsuoka, K. Ishida and Y. Yamaji: "Development of standard LED for UV-LEDS and establishment of calibration service for total radiant flux of UV-LED at NMIJ," *Proc. of the 28th CIE Session 2015* (Manchester, 2015) pp. 1338-1342.
- 9) 木下健一：照明学会誌，**100** (2016) 119-122.
- 10) K. Kinoshita and K. Godo: "UV-A irradiance measurement of a UV-LED under near-field conditions," *Proc. of International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD) 2017* (Tokyo, 2017) pp. 196-197.
- 11) 田辺 稔，木下健一：照明学会誌，**104** (2017) 234-238.
- 12) 鈴木 守，羽生光宏，長坂武彦，白石啓文：照明学会誌，**58** (1974) 97-102.