

# 単一波長光源を用いた放射照度応答度評価システムの開発

田辺 稔・木下 健一

国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター物理計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央 3-1

## Development of Irradiance Responsivity Evaluation System with Monochromatic Light Source

Minoru TANABE and Kenichi KINOSHITA

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

Accurate measurement of irradiance is of great importance in the fields of laser display and laser lighting. In this study, a standard optical sensor comprising a silicon photodiode and an optical aperture was fabricated and an irradiance responsivity evaluation system with a monochromatic light source was developed. To validate the proposed evaluation system, the experimentally measured output ratio, obtained using a standard optical sensor and a similar test optical sensor, was compared with the calculated output ratio using those sensors. These measured and calculated output ratios were in good agreement with each other. In addition, an expanded uncertainty of 1.9% was obtained for the proposed system. This system and the standard optical sensor contribute accurate radiation measurements in the fields of laser display and laser lighting.

**Key words:** photometry, radiometry, laser display, head mount display, head up display, silicon photodiode

### 1. はじめに

半導体レーザーは、光ファイバー通信や CD や DVD などの光記憶素子に代表される情報処理分野に広く利用されている。近年では、光の三原色（赤、青、緑）が、波長変換素子を介することなく、半導体レーザーのみで実現できるようになった。また、半導体レーザーの電気から光への変換効率が向上していることから、半導体レーザーは LED に替わる新たな光源として、レーザー照明やレーザーディスプレイ<sup>1)</sup>などの分野で注目を集めている。それらの一部は、レーザーバックライトテレビ<sup>2)</sup>、小型プロジェクター<sup>3)</sup>、車載用ヘッドアップディスプレイ<sup>4)</sup>、ヘッドマウントディスプレイ<sup>5)</sup>などへ商品化され、今度も市場規模の成長が著しいと予想される。

レーザー機器の信頼性や安全性を評価するためには、その光源となるレーザーの出力を高精度で計測することが重要である。通常、レーザーの出力測定では、その指向性のよさを利用してレーザービーム全体を光計測器に入射させ

ることにより、レーザーパワーやエネルギーの評価、そのレーザービームの強度プロファイルの評価を行う。ところが、レーザーディスプレイやレーザー照明などの分野におけるレーザー測定では、その測定対象が指向性の高いレーザービームだけでなく、光の空間的な取り扱い、つまり単位面積あたりや単位立体角あたりの光出力を評価する必要がある。このような空間的な光は、放射束、放射照度や放射輝度などの放射量で定量化できる<sup>6)</sup>。また、ディスプレイや照明などの人間の視覚に関わる光の評価には、輝度や照度といった測光量が用いられる<sup>6)</sup>。レーザーディスプレイやレーザー照明などの分野では、LED などの光源と比較して色域が約 1.5 倍と広く<sup>7)</sup>、かつ、使用される環境下の光強度の領域が暗所から明所まで 5 桁超と広い<sup>7)</sup>。よって、所望の色再現性、輝度値や照度値を得るために、単色で高安定かつ広い光強度での、放射量や測光量の高精度計測が求められる。

これまでの研究においては、光度標準電球などの広範な

E-mail: tanabe-m@aist.go.jp

波長光源と標準比視感度を考慮した光検出器を用いた照度応答度標準<sup>8)</sup>や、照度の標準として黒体炉を光源とした分光放射照度標準などが開発されてきた<sup>9)</sup>。このような高精度計測技術を用いてレーザーディスプレイやレーザー照明などの放射量の測定を実施した場合、単一波長への最適化が実施されていない点、5桁超の光強度の領域が達成されていない点、波長による標準比視感度の値のずれが大きくなる点などの技術的な問題が生じ、結果として4~5%超の大きな測定誤差(測定の不確かさ)を生じる。よって、レーザーディスプレイやレーザー照明などの分野における高精度光計測を実施するためには、レーザー光による時間的・空間的に均一で高安定な単一波長光源を用いた放射照度や放射輝度を評価するシステムや、その放射量の基準となる標準器が必要であるが、そのいずれに対しても実用可能な開発が行われていない。また、高精度光計測の実証には、その標準器や評価システムの不確かさ評価も課題としてあげられる。

そこで、本研究では単一波長に対する放射照度に着目し、国立研究開発法人産業技術総合研究所が所有する光放射に関する国家標準を用いて、単一波長光源を用いた放射照度を評価するシステムの開発を行った。また、広い光強度の領域で測定可能な標準器の開発を行い、その標準器と評価システムの測定の不確かさを定量的に明らかにするとともに、評価システム動作の妥当性を確認した。

## 2. 放射照度の絶対評価

### 2.1 標準光センサーの放射照度応答度の導出過程

レーザーディスプレイやレーザー照明などでは、その多様性により、数mWから数百nWまでの広範な放射束領域が測定対象となる。このような広範な放射束と光の三原色の波長に対する高精度測定を実施するために、光センサーの検出部にシリコンフォトダイオードを選択した。シリコンフォトダイオードの受光面に放射束 $P$ を入射させたとき、その放射束に対する出力(光電流) $I$ は、

$$I = P \cdot r \quad [\text{A}] \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、 $r$ はシリコンフォトダイオードの応答度(単位 $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ )である。また、放射面積 $S[\text{m}^2]$ で放射照度 $E[\text{W}/\text{m}^2]$ と表される放射束 $P$ を光センサーに入射させたときの出力(光電流) $I$ は、

$$I = E \cdot S \cdot r \quad [\text{A}] \quad (2)$$

で表すことができる。この式を以下のように変換することで、放射照度応答度 $R$ (単位 $\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ )を導出することができる。

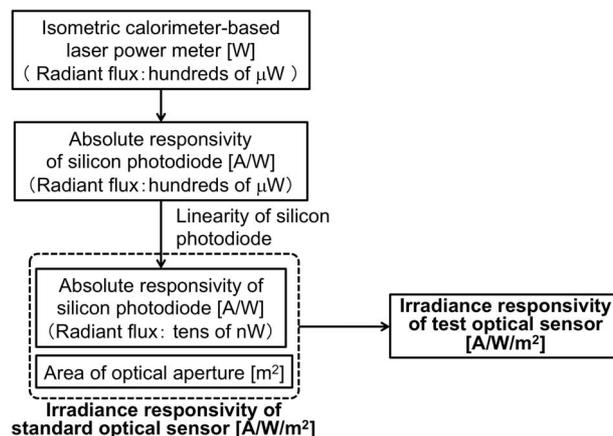


Fig. 1 Evaluation procedure of irradiance responsivity.

$$\frac{I}{E} = S \cdot r = R \quad (3)$$

次に、広範な放射束領域の放射照度に対する光センサーの放射照度応答度の導出過程を Fig. 1 に示す。まず、電力置換型カロリメータ<sup>10)</sup>を用いて、絶対光パワーとシリコンフォトダイオードの出力比である絶対応答度(単位 $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ )を評価する。電力置換型カロリメータは、光吸収体で入射光パワーをすべて熱変換させ、その温度上昇を測定する装置であり、その光パワーの下限値は熱的なノイズを考慮すると数十 $\mu\text{W}$ 程度である。そのため、それより低い光パワーに対する絶対応答度は、シリコンフォトダイオードの応答直線性を評価して拡張する。次に、照射面積を決定するため、そのシリコンフォトダイオードの前面に、径が評価されたアパーチャーを取り付ける。このセンサーは、シリコンフォトダイオードの直線性が担保されているため、広範な領域に対する放射照度応答度が評価された光センサー(標準光センサー)として使用可能になる。また、この標準光センサーの出力は光電流であるため、その光電流を測定することで、絶対放射照度の評価が可能となる。以下に、その標準光センサーに対して評価・校正した各項目について記述する。

### 2.2 電力置換型カロリメータを用いた標準光センサーの絶対応答度測定

電力置換型カロリメータ<sup>10)</sup>は、その内部の制御システムを用いて電氣的パワーを印加し、光受光部の等温状態を作る。この等温制御下で光を受光部に入射させると、その温度が上昇し等温状態が崩れるが、内部のフィードバック制御システムを用いて電氣的パワーを減少させることによって、再び等温状態にする。このときの電氣的パワーの変化から、入射レーザーパワーの絶対値を測定できる。今回使用した電力置換型カロリメータで測定可能なパワー

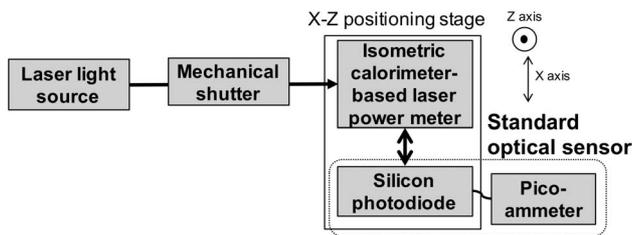


Fig. 2 Absolute responsivity measurement system with laser colorimeter.

範囲は数十  $\mu\text{W}$  から数十  $\text{mW}$  であり、測定の不確かさは  $0.15\sim 0.22\%$  ( $k=2$ ) である<sup>10)</sup>.

Fig. 2 に、電力置換型カロリメータを用いた絶対応答度測定システムの概要図を示す。単一波長光源は、光の三原色のひとつである赤色波長  $655\text{ nm}$  のファブリー・ペロー型半導体レーザーを用いた。この半導体レーザーにはペルチェ素子と温度センサーを用いた温度調整機構が取り付けられており、温度安定性が  $0.01^\circ\text{C}$  以下となるように調整することで、 $0.01\%$  毎時の安定度を達成している。電力置換型カロリメータの光受光部にレーザー光を入射させるため、レーザービーム径は、コロリメーターレンズとその他のレンズを用いて直径  $1.2\text{ mm}$  のガウシアンビームとなるように調整を行った。

レーザー光のオンとオフは、カロリメータの直前に設置した光シャッターの開閉で行った。レーザービームの軸合わせは、レーザー光の伝搬軸を Y 軸とした場合、これと垂直に設置した X-Z 軸可動の移動台に電力置換型カロリメータと標準光センサーを固定し、それぞれの光センサーに対して移動台を自動走査させることで行った。標準光センサーには、直径約  $12\text{ mm}$  のシリコンフォトダイオード（浜松ホトニクス社製、S2281）とピコアンメーター（ケースレー社製、6485/J）を用いた。まず、電力置換型カロリメータにパワー安定化したレーザー光を入射させ、放射束の絶対値を決定する。次に、レーザー光を標準光センサーに入射させて光電流値を記録する。この測定作業を 5 回繰り返し、電力置換型カロリメータで決定した、絶対放射束に対する標準光センサーの光電流値の比の平均値を、絶対応答度（単位  $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ ）として算出する。実測では、光減衰器を用いて測定時の光パワーを約  $351\ \mu\text{W}$  に調整し、上記の作業を実施することで、絶対応答度  $0.3644\ \text{A}\cdot\text{W}^{-1}$  を得た。

### 2.3 光センサーの応答非直線性

シリコンフォトダイオードをはじめとする光センサーは、光の入射強度に対して、その出力電流が比例関係となる直線性を示すことが理想である。しかし、ほとんどの光

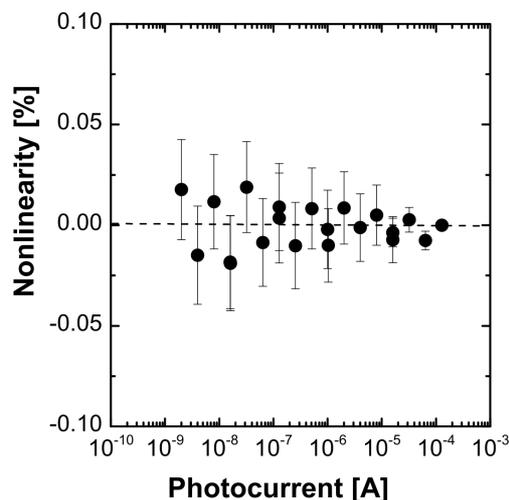


Fig. 3 Nonlinear behavior of silicon photodetector.

センサーには、その比例関係が成り立たない非直線性を示す領域が存在することが知られている<sup>11)</sup>。また、その非直線性は、光の入射波長に大きく依存する<sup>12,13)</sup>。そのため、絶対応答度で測定した光パワーと比較して、より低い光パワー領域においても応答が直線であるか否かを高精度に測定する必要がある。

標準光センサーの応答非直線性の評価には、光パワー重畳法を原理とした応答非直線性測定システムを用いた<sup>12,13)</sup>。以下に、光パワー重畳法の原理について説明する。まず、レーザービームを 2 経路に分け、2 経路同時に入射させた出力  $I_{12}$  と、2 経路を個別に入射させた出力  $I_1$ 、 $I_2$  の和の比  $LF(k)$  を、以下の式 (4) で求める。

$$LF(k) = \frac{I_{12}}{I_1 + I_2} \quad (4)$$

次に、そのパワーを 2 倍に調整し、上記の出力比を求める。最終的に、光パワーを 4 倍、8 倍、16 倍…としたとき、その光パワーでの  $LF(k)$  を求め、広範な光パワーに対する応答非直線性  $NL(n)$  を以下の式 (5) で導出する。

$$NL(n) = \prod_{k=1}^n LF(k) - 1 \quad (5)$$

式 (5) 中の  $n$  と  $k$  は、応答非直線性を導出するとき用いている係数である。光パワーを 2 倍する方法と対比して、光パワーを  $1/2$  倍にした場合の応答非直線性は、以下の式 (6) で導出できる。

$$NL'(n) = \frac{1}{\prod_{k=1}^n LF(k)} - 1 \quad (6)$$

Fig. 3 に、絶対応答度の測定時と同じレーザー条件を用いて測定し、標準光センサーの応答非直線性を導出した結果を示す。導出過程を以下に説明する。まず、絶対応答

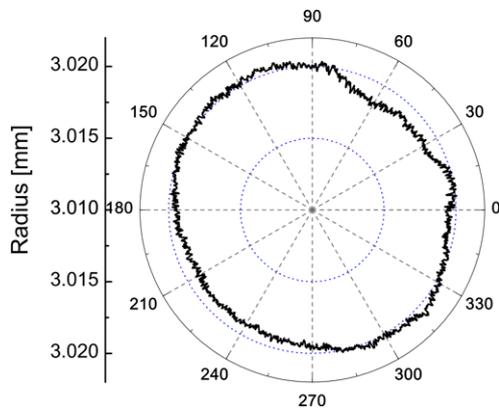


Fig. 4 Roundness of knife-edged-aperture measured by a coordinate measuring machine.

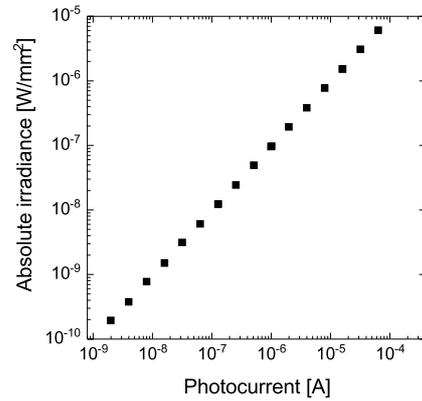


Fig. 5 Absolute irradiance for the generated photocurrent of standard optical sensor.

度を評価した  $128 \mu\text{A}$  (放射束  $351 \mu\text{W}$  に相当する値) で  $LF(1) = 1.0$  ( $k = 1$  とする) と規格化する. 次に, 規格化した  $1/2$  倍の光出力  $64 \mu\text{A}$  を  $k = 2$  として, 式 (6) を用いて応答非直線性を導出する. 最終的に, 係数  $k$  を増やすことにより, 光パワーを数 nA まで  $1/2$  倍ごとに減衰させ, それぞれの光電流における応答非直線性を式 (6) により導出する. Fig. 3 中の非直線性がゼロのとき, 応答が直線であることを示しており, 光電流が  $16 \mu\text{A}$ ,  $1 \mu\text{A}$ ,  $128 \text{nA}$ ,  $16 \text{nA}$  時は, 使用したピコアンメーターのレンジ間の応答非直線性を測定した結果を示している. Fig. 3 の結果より, 標準光センサーは, 波長  $655 \text{nm}$  に対して光電流が数 nA から数百  $\mu\text{A}$  の領域で, 応答が直線であることがわかった.

## 2.4 アパーチャー面積の決定

放射面積を決定するためには, 放射光・測光用のアパーチャーが用いられる. そのようなアパーチャーは, エッジ部分での光の反射や散乱による影響を抑制するため, ナイフエッジ構造となるように設計されている. 本研究で開発した標準光センサーには, 直径約  $6 \text{mm}$  のナイフエッジアパーチャーを選択した. Fig. 4 に, 放射照度の高精度測定を実現するため, このナイフエッジアパーチャー径の形状を三次元測定器で測定した結果を示す. 測定の結果, 半径  $3.020 \text{mm}$ , 真円度  $2.7 \mu\text{m}$  であった. また, アパーチャーのエッジに欠けがないことを確認し, 高精度な放射照度測定に適したナイフエッジアパーチャーであることがわかった. 以上の結果より, アパーチャー面積の計算を行い, 放射面積  $28.63 \text{mm}^2$  を得た.

## 2.5 標準光センサーを用いた絶対放射照度の評価

上記の絶対応答度とアパーチャー面積の値を式 (3) に代入し, 放射照度応答度を導出した結果,  $10.44 \text{A}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{W}^{-1}$  となった. また, Fig. 3 の結果より, 標準光センサー

の応答は直線であるため, 光電流が数 nA から数百  $\mu\text{A}$  の領域でも, この評価した放射照度応答度の値は同じとなる. これらの関係を用いて, この標準光センサーの出力電流値と放射照度の関係を導出した結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 より, 標準光センサーの絶対応答度と応答非直線性を評価することで, 5桁超の広範な放射照度の評価が可能となることが明らかとなった. この標準光センサーを用いて光の三原色波長に同様の評価を実施することで, 光の三原色に対する広範な絶対放射照度の評価が可能となる.

## 3. 放射照度応答度評価システムの開発と不確かさ評価

### 3.1 放射照度評価システムの構築

2章で述べた標準光センサーを用いて放射照度を測定するため, Fig. 6 のような単一波長光源を用いた放射照度評価システムを構築した. 均一な単一波長の放射照度場を構築するため, 積分球とスペックルリデューサーを用いた. 使用したレーザーは, 絶対応答度を測定したときと同様の波長とビーム径であり, スペックルリデューサーを介して約  $20^\circ$  に拡散させたビームを積分球に入射させた. スペックルリデューサーに照射した光パワーは約  $10 \text{mW}$  であった.

積分球からの放射発光面と標準光センサーの受光面は平行となるように調整を行った. この両者の距離は  $300 \text{mm}$  に設定した. 積分球から放射される光は, Fig. 6 に示す3枚の遮光板を通過して, ほぼ平行光として標準光センサーに照射される. 遮光板1はレーザーの直接光やスペックルリデューサーの反射光を遮光し, 遮光板2と3は遮光板1を通過した迷光が標準光センサーに到達するのを抑制している. また, 全体を暗箱で覆うことで, 外部からの迷光を抑制した. このような迷光対策をすることにより, レーザーオフ時にシリコンフォトダイオードの暗電流を  $1 \text{pA}$  以下まで抑制することに成功した. 以上の条件で, 標準光

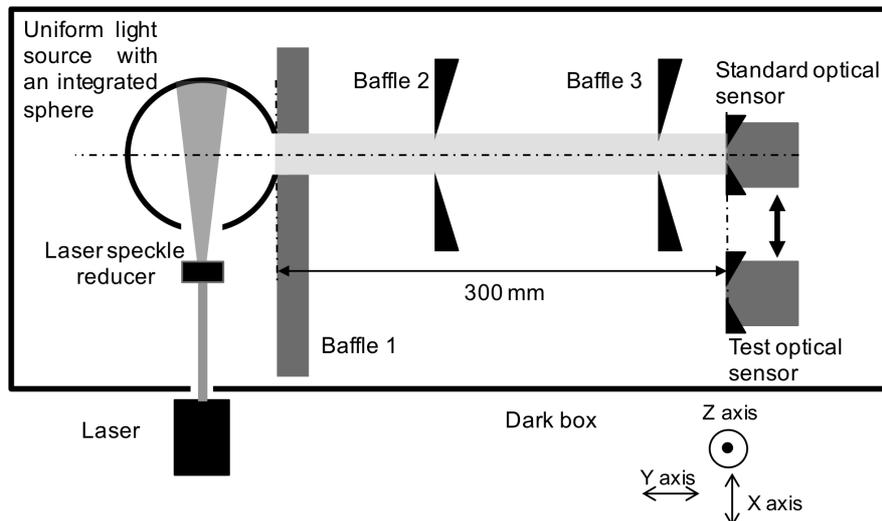


Fig. 6 Schematic diagram of irradiance evaluation system with monochromatic light source.

センサーを用いて測定した光電流の測定結果は 65.72 nA であり、放射照度に変換すると  $6.295 \text{ nW}\cdot\text{mm}^{-2}$  であった。

### 3.2 標準光センサーを用いた模擬光センサーへの値付け

Fig. 6 の評価システムを用いて、標準光センサーによる他の光センサーへの放射照度応答度の値付けを実施するために、標準光センサーとは異なるシリコンフォトダイオード（浜松ホトニクス社製、S1227-1010）とナイフエッジアパーチャを備え付けた光センサーとピコアンメーター（ケースレー社製、6487/J）（模擬光センサー）を準備した。Fig. 6 に示すように、光源から 2 つの光センサーまでの距離は等しくなるように調整した。標準光センサーと模擬光センサーは自動ステージに設置されており、2 つの光センサーを交互に合計 5 回入れ替え、その出力比（模擬光センサーの出力値 / 標準光センサーの出力値）の平均値を導出した結果、1.0037 となった。この模擬光センサーの値付けに関する考察は、3.4 節で述べる。

### 3.3 放射照度測定システムの不確かさ評価

構築した放射照度応答度評価システムと標準光センサーを用いて測定した放射照度値には、繰り返し測定によるばらつき、標準光センサーの設置の曖昧さなど、測定値に対する不確かさが生じる。この測定の不確かさを評価することで、測定値の精度管理が可能となる。また、測定の不確かさの評価は、レーザーディスプレイなどの製品の性能や信頼性、安全性の保証につながるため、重要である。本節では、その不確かさの各要因について定量的に評価した結果について、以下に述べる。

#### 3.3.1 光源の角度設定の不確かさ

積分球を用いた光源の放射面と標準光センサーの受光面はほぼ平行となるように設置されているが、その光軸調整

の不完全性などによりずれが生じるため、放射照度値が変動する。Fig. 7 と Fig. 8 に、光源の鉛直軸方向と水平軸方向の設置角度を変化させたときの、放射照度値の変動を示す。構築した評価システムでは、いずれの角度の設置精度も  $0.5^\circ$  である。したがって、Fig. 7 と Fig. 8 より、光源の鉛直軸方向と水平軸方向の設置角度のずれに対する放射照度応答度の不確かさは、それぞれ 0.21% と 0.01% となった。

#### 3.3.2 光源と光センサーの距離に関する不確かさ

一般に、放射照度値は距離の逆二乗則に従って小さくなる。よって、光源と標準光センサーの距離と、光源と比較対象となる光センサー（模擬光センサー）の距離のわずかな差が、放射照度値のずれとなる。Fig. 9 に、光源と標準光センサーの距離を変化させたときの放射照度値の変動を示す。実線は、放射照度の逆二乗則によるフィッティングを示している。このフィッティングの結果より、構築した評価システムは逆二乗則に従っていることがわかった。標準光センサーと模擬光センサーの距離の不確かさは、光センサーの設置調整の誤差や各センサーの固定治具の設計公差から、0.5 mm と見積もった。以上より、Fig. 9 に示すように、光源と光センサーの設置距離に関する不確かさは 0.19% となった。

#### 3.3.3 光源の面均一性による不確かさ

放射照度応答度を評価するには、時間的にも空間的にも均一な放射照度場であることが望ましい。そこで、Fig. 6 の積分球を用いた光源から放射される放射照度場の均一性を、以下のように評価した。標準光センサーの前に直径約 1 mm の開口を設置し、そのセンサー受光面を中心として、上下左右 (XZ 方向)  $\pm 5 \text{ mm}$  の領域に対して 0.5 mm ずつ動かし、それぞれの位置での標準光センサーの出力値を

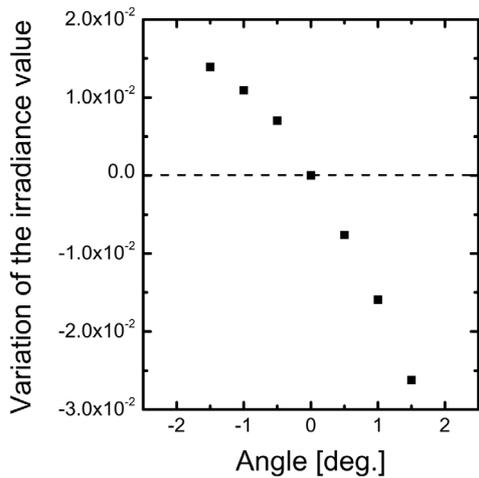


Fig. 7 Variation of the irradiance value for the perpendicular angle misalignment of the light source.

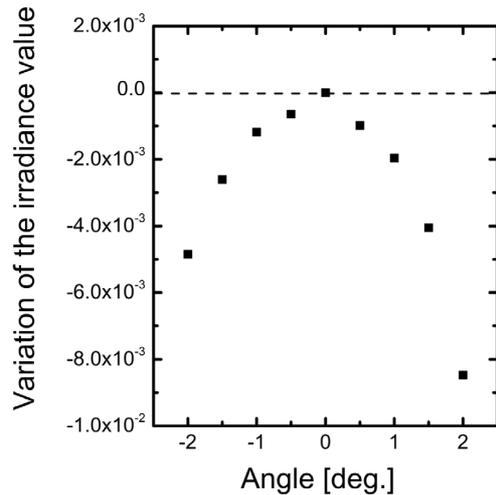


Fig. 8 Variation of the irradiance value for the horizontal angle misalignment of the light source.

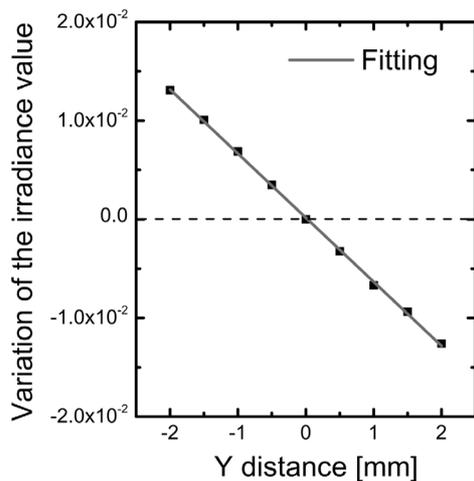


Fig. 9 Variation of the irradiance value for the difference of distance between the light source and the standard optical sensor.

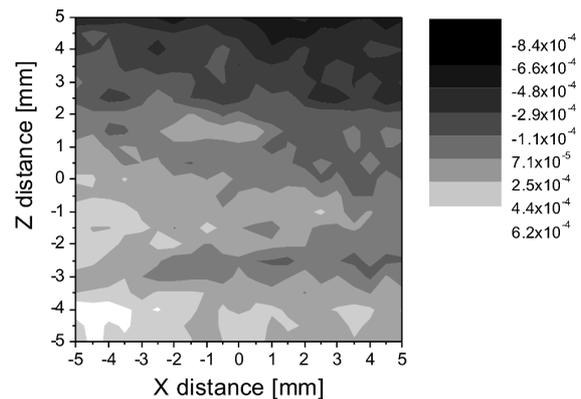


Fig. 10 Uniformity of the monochromatic light source.

取得した。次に、取得した出力値をセンサー受光面の中心の出力値で規格化することにより、放射照度場の均一性を導出した。以上の評価結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 中に示されている最小値と最大値を取ることにより、光源の時間的・空間的均一性を評価した結果、0.13%の放射照度場の均一性を得た。

### 3.3.4 標準光センサーの絶対応答度測定の不確かさ

標準光センサーの絶対応答度の校正は、産業技術総合研究所が実施する電力置換型カロリメータを用いた校正手法に基づいて不確かさ評価を行った。その結果、測定の不確かさ 0.09% を得た。

### 3.3.5 標準光センサーの応答非直線性の不確かさ

標準光センサーの応答非直線性については、産業技術総合研究所が実施する校正手法に基づいて不確かさ評価を

行った。その結果、放射束が数百  $\mu\text{W}$  から数十  $\text{nW}$  までの標準光センサーの応答非直線性の不確かさは、0.1%であった。

### 3.3.6 標準光センサーのアーチャー面積の不確かさ

ナイフエッジアーチャーを三次元測定器で測定した結果、真円度は  $2.7 \mu\text{m}$  であった。この真円度をアーチャー面積の不確かさとして評価した結果、不確かさは 0.03% となった。

### 3.3.7 標準光センサーの角度設置の不確かさ

光源の設置と同様、標準光センサーの設置も、光軸の鉛直軸方向と水平軸方向に対してずれる。Fig. 11 と Fig. 12 に、標準光センサーの鉛直軸方向と水平軸方向の設置角度ずれに対する放射照度の変化を示す。いずれの角度の設置精度も  $0.5^\circ$  である。したがって、Fig. 11 と Fig. 12 より、標準光センサーの鉛直軸方向と水平軸方向の設置角度ずれに対する放射照度の不確かさは、それぞれ 0.63% と 0.01% となった。

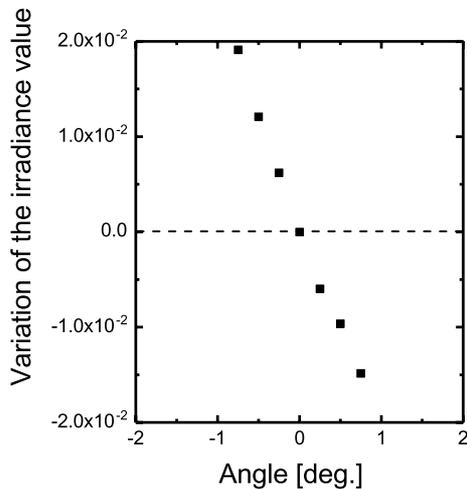


Fig. 11 Variation of the irradiance value for the perpendicular angle misalignment of the standard optical sensor.

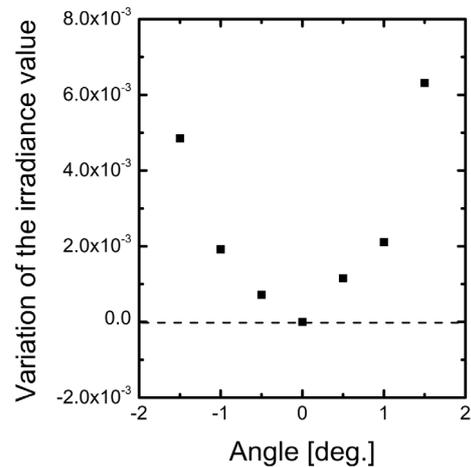


Fig. 12 Variation of the irradiance value for the horizontal angle misalignment of the standard optical sensor.

Table 1 Uncertainty budget table of the evaluated irradiance responsivity.

Uncertainty Contribution	Standard Uncertainty [%]
Uncertainty of irradiance responsivity evaluation system	
Horizontal angular deviation of light source	0.01
Vertical angular deviation of light source	0.21
Distance between light source and sensor	0.19
Uniformity of light source	0.13
Uncertainty of standard optical sensor	
Absolute responsivity measurement	0.09
Linearity of standard optical sensor	0.10
Area of optical aperture	0.03
Horizontal angular deviation of standard optical sensor	0.01
Vertical angular deviation of standard optical sensor	0.63
Uncertainty of test optical sensor	
Horizontal angular deviation of test optical sensor	0.01
Vertical angular deviation of test optical sensor	0.63
Repeated comparison measurement between standard optical sensor and test optical sensor	0.05
Combined standard uncertainty	0.96
Expanded uncertainty ( $k = 2$ )	1.9

3.3.8 模擬光センサーを用いた測定に関する不確かさ  
 模擬光センサーに関しては、模擬光センサー設置の不確かさと、標準光センサーと模擬光センサーの比較測定の不確かさの2つを評価する必要がある。模擬光センサー設置の不確かさを算出するため、標準光センサー設置の不確かさである水平軸の角度ずれ0.01%と、鉛直軸の角度ずれ0.63%を導入した。また、標準光センサーと模擬光センサーを測定ごとに入れ替え、合計5回の放射照度応答度の比を測定したときのばらつき0.05%を、比較測定の不確かさとした。

### 3.3.9 拡張不確かさの算出

合成標準不確かさは、上記の各項目に対して不確かさ伝搬則を適応して算出する。また、拡張不確かさは、原則として包含係数 $k$ を2として、約95%の信頼の水準が推定される区間を求める。Table 1に、放射照度応答度の測定の不確かさバジェットを示す。Table 1から構築した評価システムでは、拡張不確かさ1.9% ( $k = 2$ )を得た。以上の結果より、照度計や輝度計を用いて単一波長の光を測定した場合と比較して、小さい不確かさで測定が可能となることがわかった。

Table 1から、構築したシステムでは、光源や光センサーの鉛直軸の角度ずれが大きな不確かさ要因となってい

ることがわかる。この原因として、構築した評価システムでは、鉛直軸の角度を変化させたとき、同時に光源と光センサー間の距離も変化する構造となっていることが考えられる。実際に、Fig. 9より、距離が1mm変化すると1%程度の放射照度値が変化することがわかる。よって、この距離変化がない評価システムの構築や、光源や光センサーの設置精度を向上させることにより、放射照度応答度評価システムの不確かさをさらに低減させることが可能となる。

### 3.4 放射照度応答度評価システムを用いた模擬光センサーへの値付けに関する考察

標準光センサーから模擬光センサーへ、放射照度応答度の値付けが正常に実施されていることを確認するため、理論的に計算された2つのセンサーの出力比と、実測した2つのセンサーの出力比との比較を行った。標準光センサーと模擬光センサーは光源から同じ距離に設置されているため、放射照度値は同じである。そのため、模擬光センサーと標準光センサーの出力比  $CF$  は、理論的に以下の式(7)で求めることができる。

$$CF = \frac{R_{DUT} \cdot S_{DUT} \cdot E}{R_{STD} \cdot S_{STD} \cdot E} \quad (7)$$

ここで、 $R_{DUT}$ は模擬光センサーの絶対応答度、 $R_{STD}$ は標準光センサーの絶対応答度、 $S_{DUT}$ は模擬光センサーのアパーチャー面積、 $S_{STD}$ は標準光センサーのアパーチャー面積、 $E$ は放射照度を示している。この式から両センサーの出力比を求めるため、模擬光センサーの絶対応答度とナイフエッジアパーチャーの半径の測定を行った。その結果、応答度  $0.3564 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$  とアパーチャーの半径  $3.051 \text{ mm}$  を得た。この値と標準光センサーの各値を式(7)に代入し、理論計算の出力比を導出した結果、 $CF = 0.9985$  を得た。3.2節で実測した結果  $1.0037$  と比較すると、 $0.52\%$ の偏差であった。この偏差の原因として上記の不確かさ要因が考えられるが、2つの光センサー出力比に対する実測と理論計算の比較結果は、拡張不確かさ  $1.9\%$ の範囲内で一致した。以上より、この評価システムが正常動作していることがわかった。この開発した評価システムを用いることで、光の三原色の波長に対しても、標準光センサーからその他の光センサーへの放射照度応答度の値付けが可能となる。

### 4. レーザーディスプレイ等への応用に関する考察

本章では、開発した標準光センサーと放射照度応答度評価システムの、レーザーディスプレイやレーザー照明の分野への応用可能性について考察する。

レーザーディスプレイやレーザー照明の分野では、本研究において評価した波長  $655 \text{ nm}$  のほかに、さまざまな波

長や波長広がりを持つ光源が用いられる。例えば、同分野では、高出力化やスペckルの抑制のため、数  $\text{nm}$  程度の波長幅を持つマルチモードレーザーが使用されることがある<sup>11)</sup>。また、レーザー照明では、光の三原色以外の波長が使用されることが予想される<sup>14)</sup>。標準光センサーはシリコンフォトダイオードを用いているため、さまざまな可視光に対する測定が可能である。波長数  $\text{nm}$  程度の変化に対して、開発した標準光センサーの波長依存性を評価した結果、応答度が  $0.5\%$ 未満、応答非直線性が  $0.01\%$ 未満であった。以上より、さまざまな可視光や波長数  $\text{nm}$  程度の変化に対しても、波長  $655 \text{ nm}$  と同程度の不確かさで放射照度応答度を評価できる。

開発した評価システムも、さまざまなレーザー波長やその波長広がりを持つ光源を使用した放射照度応答度の評価に適用可能である。Fig. 6に記載されている標準光センサーと評価システムを用いることにより、その他の光センサー(商用の照度計など)の評価を実施し、評価された光センサーを用いることで、所望の放射照度値を調整することが可能となる。また、色は、各レーザー波長の光出力の相対値を使用することで表現される。各波長の光出力を高精度に評価できる光センサーを色の評価に用いることで、所望の色を表すのに必要な各波長の光出力の予測や、色の調整をすることが可能になる。

ヘッドアップディスプレイ等は、使用環境下での明暗の差が大きい。そのような条件で視認性を向上させるためには、2.1節で述べたように、広い範囲の光出力を高精度に評価する必要がある。使用される光センサーに対して、2.3節で述べた応答非直線性を評価することで、広い光出力に対する照度値や色の調整や評価ができると考えられる。

レーザーディスプレイやレーザープロジェクターの分野では、輝度の評価が重要である<sup>11)</sup>。開発した評価システムは放射照度に特化しており、単一波長光源を用いた放射輝度の評価は、現在のシステムでは不可能である。しかし、放射照度から放射輝度へ適応させるには、単位立体角あたりの放射量を評価することで可能であるため、本システムを放射輝度評価システムへ応用することは可能である。よって、上記のような改良を行い、放射輝度評価システムの開発と不確かさ評価を行うことが、今後の課題である。

また、本論文で開発した評価システムは、使用するレーザーが1波長のみで、かつ、放射束(単位:  $\text{W}$ )の測定を基盤としている。レーザーディスプレイ等の分野ではさまざまな波長の複数の光源を使用するため、分光放射計などを用いて、それらの光源からの放射光のレーザー波長、波長広がりや出力を同時に評価する方法がある。この分光ス

ペクトルの測定を基盤とする測定は、色などを測定する機器の高精度評価にとって重要である。よって、分光スペクトルの測定を基盤とする評価も可能となるように評価システムを改良し、放射束と分光スペクトルの両者同時測定が可能となる評価システムの開発や、分光スペクトルの測定を基盤とする評価システムに対する不確かさを評価することも、今後の課題である。

## 5. ま と め

光放射に関する国家標準を用いて、高精度に放射照度を評価でき、かつ広い光強度の領域で測定可能な、標準光センサーの開発を行った。また、単一波長光源をベースにした放射照度応答度評価システムの開発を行った。標準光センサーと評価システムの測定の不確かさを定量的に評価し、拡張不確かさ 1.9% ( $k = 2$ ) を得た。標準光センサーに対する模擬光センサーの出力比を、この評価システムを用いた実測と理論計算とで比較・検討した結果、両者の比が不確かさの範囲内で一致し、評価システムが正常動作していることを確認した。以上の結果より、光の三原色の波長のみならず、広域の可視光に対しても、標準光センサーから他の光センサーへの放射照度応答度の値付けが可能となる。この評価技術を用いると、さまざまな波長に対する絶対放射照度の値を評価できるので、レーザーディスプレイやレーザー照明などの分野における所望の放射照度値や色の再現などの高精度な放射光測定に貢献できる。また、本研究で開発した標準光センサーと評価システムのレーザーディスプレイ等への応用に関する考察を行った。考察の結果、数 nm 程度の波長幅を有するレーザーを用いた場合でも、1.9%の不確かさで評価できることがわかった。

今後の課題として、単一波長光源を用いた放射輝度の評価への拡張や、分光スペクトルの測定を基盤とした評価技術の開発が必要である。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 [B] 25790077 の助成を受けて実施した。アパーチャー径の測定には、国立研究開発法人産業技術総合研究所の近藤余範博士に多大な協力をいただいたので、ここに深く感謝する。

## 文 献

- 1) K. V. Chellappan, E. Erden and H. Urey: *Appl. Opt.*, **49** (2010) F79-F98.
- 2) 新倉栄二, 村瀬令奈, 中野菜美, 長瀬章裕, 坂本浩隆, 花井昌章, 志水浩二: *映像情報メディア学会誌*, **68** (2014) J30-J33.
- 3) 金野賢治, 久保直樹: *コニカミノルタテクノロジーレポート*, **7** (2010) 130-133.
- 4) 柳澤琢磨, 朝矢修己: *光学*, **43** (2014) 464-468.
- 5) 安藤英由樹, 雨宮智浩, 前田太郎: *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **10** (2005) 191-199.
- 6) 照明学会 (編): *光の計測マニュアル* (日本理工出版会, 2003)
- 7) 黒田和男, 山本和久: *レーザー照明・ディスプレイ* (オプトロニクス社, 2016)
- 8) 座間達也, 市野善朗, 薮 洋司, 神門賢二, 木下健一, 丹羽一樹, 福田大治, 雨宮邦招, 沼田孝之, 田辺 稔: *計測標準と計量管理*, **60**, No. 4 (2011) 23-35.
- 9) T. Zama and I. Saito: "Realization of the spectral irradiance at National Metrology Institute of Japan (NMIJ)," *Proc. of the 25th Session of the CIE*, 1 (San Diego, 2003) pp. D2-26-D2-29.
- 10) Y. Suzuki, A. Murata, M. Arangi and T. Inoue: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **40** (1991) 219-221.
- 11) L. P. Boivin: *Metrologia*, **30** (1993) 355-360.
- 12) M. Tanabe, K. Amemiya, T. Numata and D. Fukuda: *Appl. Opt.*, **54** (2015) 10705-10710.
- 13) M. Tanabe, K. Amemiya, T. Numata and D. Fukuda: *Appl. Opt.*, **55** (2016) 3084-3089.
- 14) S. Soltic and A. Chalmers: *Opt. Express*, **21** (2013) 8964-8971.