

# 積分球による全光束測定における 内部空間応答度分布関数の影響

正会員 田代 知範 (静岡県工業技術研究所) 正会員 志智 亘 (浜松工業技術支援センター)  
専門会員 大久保 和明 (山形大学) 専門会員 山内 泰樹 (山形大学)

## Effects of Internal Spatial Response Distribution Function of the Integrating Sphere on Total Luminous Flux Measurements

Member **Tomonori Tashiro** (Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture),

Member **Wataru Shichi** (Hamamatsu Technical Support Center),

Fellow Member **Kazuaki Ohkubo** (Yamagata University) and Fellow Member **Yasuki Yamauchi** (Yamagata University)

### ABSTRACT

In typical measurements of total luminous flux using an integrating sphere, non-uniformity of the spatial response distribution function (SRDF) inside the sphere can cause measurement errors. It is important to analyze the SRDF in order to evaluate any potential uncertainty of the integrating sphere measurements. If the SRDF can be quantified, it may be possible to reduce the measurement errors. Our findings in this study showed that when the light distribution of the test light sources are different, a difference in the total luminous flux measurement occurs due to the difference in the internal SRDF of the integrating sphere. We also found that it is possible to quantify the effect of SRDF on the total luminous flux measurement by examining the opening angle of the luminous intensity distribution of the light source.

KEYWORDS : integrating sphere, total luminous flux, SRDF, luminous intensity distribution

### 1. はじめに

全光束は光源の評価、特にエネルギー効率の観点から最も重要なパラメータの一つである。一般的な全光束導出法として、配光測定を利用した方法や球形光束計(積分球)を利用した方法が挙げられる<sup>1)</sup>。

配光測定を利用した方法は、ゴニオフォトメーターにより光源からの光度の空間分布を測定し、球帯係数により空間的に積分することで、比較的精度の高い全光束値を算出することが可能である<sup>2,3)</sup>。しかし、信頼性の高い全光束値を得るためには、より細かな測定分解能での測定が必要であり、それに伴って長い測定時間が必要となる。また、大きな暗室空間や高精度な回転ステージ機構も必要となる。

一方、球形光束計を利用した方法は、積分球内部に配置された光源からの光が、積分球の内壁で拡散反射を繰り返すことで、積分球内壁が全光束に比例した照度で照らされるため、全光束値が既知の全光束標準光源との比較測定により、高速度かつ簡単にテスト光源の全光束値を求めることができる<sup>4)</sup>。

積分球はその性質上、内部の空間応答度分布関数SRDF (Spatial Response Distribution Function) が一定であることが望ましい。しかし実際の積分球は、内壁の反射率ムラ、光検出器の斜め入射光特性の余弦則からのずれ、バッフルプレートの大きさや設置位置などの内部構造物によって、不均一なSRDFを持つ。そのため、全光束標準光源とテスト光源の配光特性が異なる場合、測定値に誤差が生じることが報告され

ている<sup>5-10)</sup>。

Ohnoら<sup>9)</sup>により、光源の配光特性の違いにより約2%の測定誤差が見られ、バッフルプレートの大きさの違いと積分球内壁の反射率のムラによってそれぞれ約3%の測定誤差が見られることが報告されている。また彼らは、理想的な積分球を使用することで、測定の不確かさを1/10程度に低減することができることを示唆している。

積分球測定の不確かさを評価するためには、積分球内のSRDFを特定することが重要であり、積分球内のSRDFを定量化すれば、その補正により不確かさを低減出来る。

大久保ら<sup>10)</sup>は、直径120 mmのLEDスポット光源を使用して、内径76 inchの積分球のSRDFを実測により求め、その積分球による全光束測定での積分球のSRDFの影響を評価した。結果は、積分球の受光器や遮光板、繋ぎ目付近でSRDFに変動が見られることを明らかにし、配光の異なる電球型LEDランプの全光束測定において、約0.5%~1%見られた測定値のズレが、SRDFに応じた補正により約0.2%~0.6%に低減できることを示した。

そこで本研究では、光学シミュレーションを利用して、積分球モデルのSRDFを求め、その補正の妥当性を検証することを目的とした。はじめに、様々な配光分布を持つ光源を定義し、光線追跡法により積分球測定の不確かさを評価した。次に、同じ積分球モデルのSRDFを求め、球帯係数法により求めた積分球測定の不確かさに対しSRDF補正を実施した。得られた結果を比較し、両者の整合性を検討した。

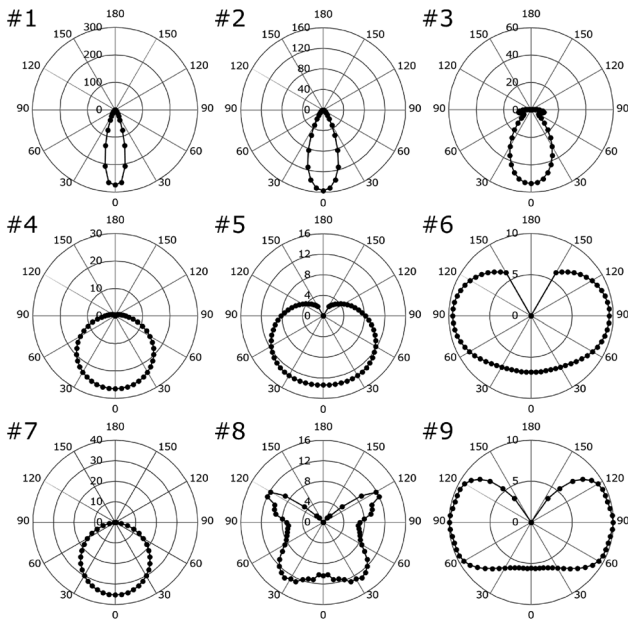


図1 評価光源の配光特性

Fig. 1 The light distributions of test sources.

## 2. 評価光源

光源の配光特性の違いが積分球による全光束の測定の不確かさに及ぼす影響を調べるために、全光束の等しい様々な配光パターンを持つ光源を仮定した。本稿では、市販の光源を参考に図1に示す9種の配光パターンを採用した。光源1, 2, 3, 7はLED, 光源4はOLED, 光源5, 6は蛍光灯, 光源8はミニクリプトン, 光源9はハロゲンをそれぞれ参照している。各配光パターンは、鉛直角 $\theta$ 方向を $5^\circ$ 間隔で定義し、理想環境下での全光束値が100 lmとなるようにピーク値を調整している。なお、発光は垂直軸に対し軸対象と仮定している。

## 3. 光線追跡法による検討

### 3.1 積分球モデル

シミュレーションに使用した積分球モデルを図2(a)に示す。このモデルの形状と極座標系は、静岡県工業技術研究所が所有する内径2000 mmの典型的な積分球を参考にした。積分球の内壁と内部構造物の拡散反射率は全ての波長で95%であり、その表面はランベルト面であると仮定した。光源は、積分球の頂部から直径40 mmの円筒型支柱によって支えられ、積分球の中心に位置している。本研究では、光源ユニットの形状および固定に使用する治具は考慮しないものとした。受光角が $180^\circ$ の光検出器は20 mm  $\times$  20 mmの矩形領域であり、積分球の赤道線上に配置されていた。図2(b)に示す様な、光検出器に入射する光源からの直接光を遮断するための光検出器用バツフルは、光検出器から約340 mm内側に設置されている。自己吸収ランプからの直接光を遮断するための小さな自己吸収ランプ用バツフルも積分球の下部に設置されている。

### 3.2 シミュレーションソフトウェア

シミュレーションには、双方向モンテカルロ光線追跡法によるハイブリッド光シミュレーションソフトウェア(Lumicept<sup>11)</sup>、株式会社インテグラ)を使用した。

光線追跡では、まず、光源と設定された点からの光線の放射を考え、光源から放出されたそれぞれの光線が空間上に配置された物体面上に到達する座標を光線追跡計算により計算

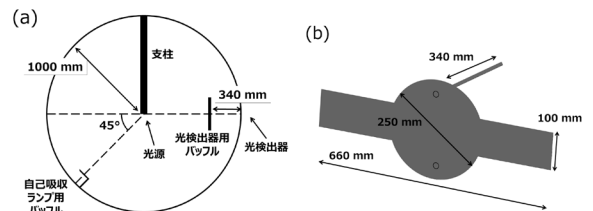


図2 シミュレーションに用いた積分球モデル (a: 全体, b: 光検出器用バツフル)

Fig. 2 Cross section of the integrating sphere model and baffle plate.

する。各光線が持つエネルギーを考慮した集計結果から、最終的に照度分布などを推定する。

ハイブリッド光シミュレーションソフトウェアLumiceptでは、光源からの光線の放出方向を決めるために、疑似乱数を使用したモンテカルロ法を採用している。全ての光線が等しいエネルギーを持つと仮定し、光線の放出方向が配光特性と等しくなるように三次元空間における光線の発生密度を定めている。そして、光源から放出されたそれぞれの光線を追跡し、積分球内壁や内部構造物表面での拡散反射を経て最終的に光検出器に到達した光線の照度に対応する物理量を算出する。

本ソフトウェアでは、光源側からの光線追跡とともに光受光器側からの逆光線追跡も同時に行い、二つの光線追跡の結果の誤差で計算収束条件を設定する。本検討では0.1%とした。乱数を利用したモンテカルロ法において、確率的に決定された光線追跡の結果が実際の物理現象と精度よく合うためには、大量の光線本数が必要となるが、本検討では、1試行あたり $3 \times 10^9$ 本を超える光線が使用された。

### 3.3 光線追跡法の結果

図3は、光線追跡法によって得られた各光源のシミュレーション結果を示している。横軸は光源の種類、縦軸は光線追跡法により求めた積分球出力をそれぞれ示している。結果の精度と再現性を検証するために、各光源に対するシミュレーションを5回ずつ実施し、平均値および標準偏差をプロットしている。

光線追跡法により求めた積分球出力は、光検出器に到達した光線の照度に対応する物理量である。今回用いた9つの評価光源は、理想環境下での全光束値を100 lmで統一しているため、シミュレーションによって得られる積分球出力は全て等しくなるはずである。しかし、図3に示す結果に対して分散分析を行った結果、光源間に有意な差が得られた( $F=5.24, p<0.01$ )。つまり、理想環境下で同じ全光束値を持つ光源であっても、配光特性が異なる場合、最大(光源4)と最小(光源6)の差で約0.3%の有意な計算結果の違いが生じることが明らかとなった。

## 4. 積分球モデルのSRDF

光線追跡法で確認された有意な計算結果の違いが積分球内部の不均一なSRDFによるものかどうかを明らかにするために、使用した積分球モデルのSRDFを推定し、その影響の程度を検討する。

積分球内のSRDFは、実測により積分球内のSRDFを取得した先行研究<sup>10,12)</sup>を参考に光学シミュレーションを使用して求めた。積分球モデルの中心にスポット光源を配置し、その照射位置を変えながら積分球出力を求める。スポット光源は、直径120 mmの円形スポットで積分球内壁を照らし、その照射角度は水平垂直方向ともに5度ずつ変化する。本研究

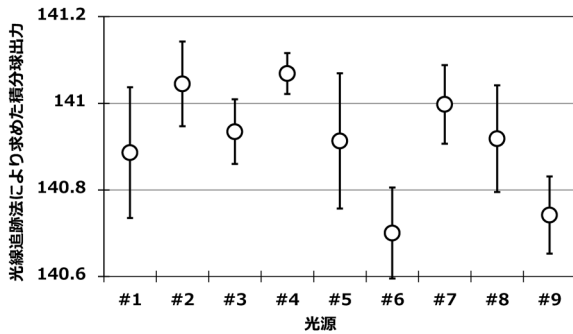


図3 光線追跡法により求めた積分球出力

Fig. 3 Results of simulation using integrating sphere model.

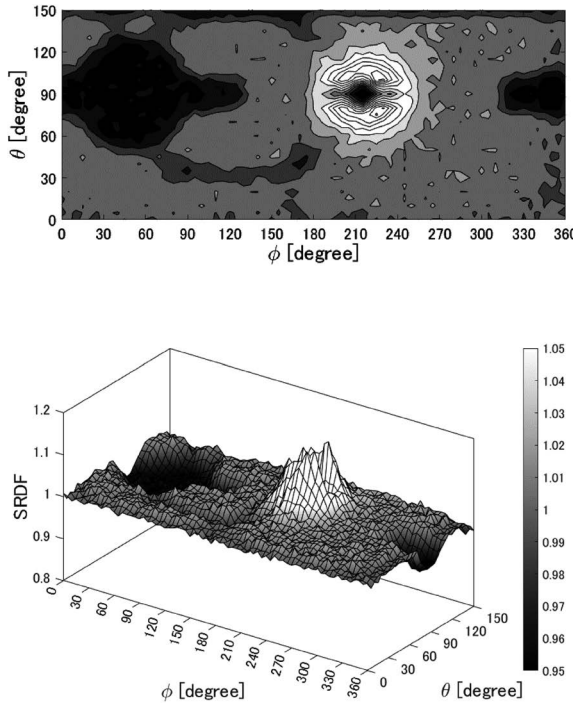


図4 積分球モデルのSRDF

Fig. 4 The estimated result of SRDF for integrating sphere model.

では、スポット光源の形状は考慮せず、シミュレーションの計算収束条件を0.5%とした。

図4に、シミュレーションによって得られた積分球モデルのSRDFを示す。横軸は水平角 $\phi$ 、縦軸は垂直角 $\theta$ をそれぞれ示している。各スポットの値は、全てのスポットの値の平均値によって正規化されている。図4では、垂直角 $\theta$ は鉛直下向きを $0^\circ$ としている。 $\phi=225^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$ に対応する位置に配置されている光検出器周辺のSRDF値は5%を超える顕著な不均一性を示した。 $\phi=0^\circ\sim 120^\circ$ 、 $320^\circ\sim 360^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$ に対応する領域では、光検出器用バッフルの影のために約4%の不均一性が観察された。図2(b)に示すような特殊な形状の光検出器用バッフルを使用した場合、SRDFの結果は光検出器用バッフルの形状を再現しており、積分球のSRDFの不均一性は、積分球内部の構造物、特に光検出器用バッフルの影響が大きいことが明らかとなった。

### 5. 球帯係数法による検討

図4に示すように、検討に用いた積分球モデルはSRDFに $-4\%\sim +5\%$ の大きな不均一性を持つことが明らかとなった。ここでは、球帯係数法を用いて配光特性の異なる光源の全光

束値を計算する際にSRDF補正を行うことで、先ほど示した光線追跡法で求めた各光源の有意な計算結果の違いを再現できるかを検討する。

球帯係数法に対するSRDF補正は以下のように行われる。鉛直方向を $\theta$ 、水平方向を $\phi$ とする空間座標系において、光源の配光を $I(\theta, \phi)$ とすれば、配光測定から得られる全光束 $P_g$ は、式1で定義される。

$$P_g = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \{I(\theta, \phi) \cdot \sin\theta\} d\theta d\phi \dots\dots\dots(1)$$

光源の配光が軸対称である場合、以下に示すようにSRDFによる積分球内の不均一性を考慮することにより、特定の積分球によって測定された全光束 $P_{is}$ を求めることができる。

$$P_{is} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \{K(\theta, \phi) \cdot I(\theta, \phi) \cdot \sin\theta\} d\theta d\phi$$

$$= \sum_{i=1}^n K^*(\theta_i) \cdot Z(\theta_i) \cdot \overline{I(\theta_i)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $I(\theta, \phi)$ : 光源の配光特性

$\overline{I(\theta_i)}$ : 垂直角 $\theta_i$ での平均光度

$K(\theta, \phi)$ : 積分球のSRDF

$K^*(\theta_i)$ : 垂直角 $\theta_i$ での平均SRDF

$Z(\theta_i)$ : 垂直角 $\theta_i$ での球面係数

$n$ : 水平方向の測定点数

結果の精度と再現性を先ほどと同様に繰り返しにより検討しようとしたが、図4に示すSRDFの結果を一つ計算するには非常に大きなコストと時間が必要なため、実施することが難しかった。本検討では、SRDFの取得間隔を水平角 $\phi=0^\circ\sim 360^\circ$ 、垂直角 $\theta=0^\circ\sim 150^\circ$ をとともに $5^\circ$ 間隔としたため、1つのSRDFを取得するためには計2160点のデータを取得する必要がある。1点のデータを取得するためには、約1時間程度のシミュレーションを行う必要があるため、繰り返し検討を行うのは現実的ではない。そこで、取得したSRDFの各データ点にランダムな誤差を追加して繰り返しによる精度および再現性の検証を行った。誤差の大きさは、シミュレーションにおける計算収束条件と同じ $\pm 0.5\%$ とした。

図5に、式2によって得られる配光特性の異なる光源に対するSRDF補正をした全光束値を示す。横軸はテスト光源、縦軸は球帯係数法により求めたSRDF補正をした全光束をそれぞれ示している。各光源に対して合計5つのSRDFデータ(オリジナルデータ1つとランダム誤差追加データ4つ)を使用して求めたSRDF補正した全光束の平均値および標準偏差をプロットしている。図5に示す結果に対して分散分析を行った結果、光源間に有意な差が得られた( $F=937.61$ ,  $p<0.01$ )。つまり、各光源の全光束値は、積分球モデルのSRDFを考慮することによって最大(光源7)と最小(光源6)の差で約0.3%の有意な差が生じることが明らかとなった。

図6に光線追跡法により求めた積分球出力と球帯係数法により求めたSRDF補正した全光束値の比較を示す。横軸が光線追跡法により求めた積分球出力、縦軸が球帯係数法により求めたSRDF補正した全光束値、点線は近似直線をそれぞれ示している。結果は、相関係数 $r=0.729$ 、標準誤差 $SE=0.068$ であり、両者の間に正の相関がみられることから、光線追跡法により求めた積分球出力の差は、積分球のSRDFの不均一性と関連があることが明らかとなった。

### 6. 光源の開き角を考慮したSRDF補正の検討

これまでの検討により、光線追跡法により求めた積分球出



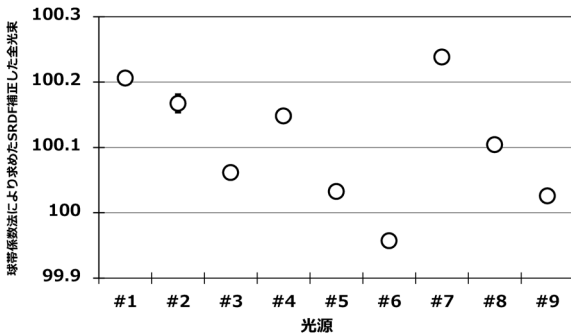


図5 SRDF補正した球帯係数法の結果

Fig. 5 Results of zonal factor method corrected by SRDF.

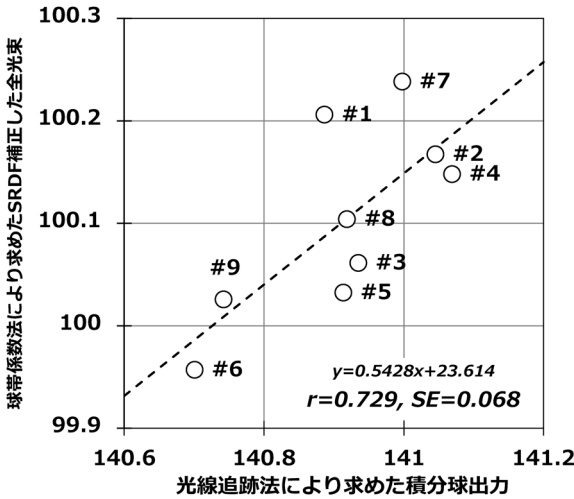


図6 光線追跡法と球帯係数法の結果比較

Fig. 6 Comparison result of spatial integral method and zonal factor method corrected by SRDF.

力の差は積分球のSRDFの不均一性に起因することが明らかとなった。つまり、SRDFの不均一性の影響を考慮することで、積分球による全光束測定の不確かさを低減できる。そこで、SRDFの不均一性が各光源に対して与える影響の程度を明らかにし、その補正によってどの程度積分球測定の不確かさが改善できるかを検討した。

先行研究<sup>10)</sup>を参考に、不均一なSRDFの影響を受ける光源特徴として光源の配光の開き角に着目した。配光の開き角を図1に示す配光特性において最大値の50%以上の出力を有する領域の中心角と定義し数値化した。本研究の配光特性は5°間隔で定義されているため、最大値の50%以上の出力を有する領域がデータ点の間に境界を持つ場合は、隣接するデータ点からの線形補間により配光の開き角を求めた。

図7に光線追跡法により求めた積分球出力と配光特性の開き角との関係を示す。横軸が配光特性の開き角、縦軸が光線追跡法により求めた積分球出力、点線は近似曲線をそれぞれ示している。結果は、近似曲線の相関係数 $r=0.899$ 、標準誤差 $SE=0.095$ であり、両者は間には高い相関関係があることが明らかとなった。これは、配光特性の開き角によってSRDFの影響を定量的に表すことが出来ることを示しており、配光特性の開き角に応じた係数を用いることで積分球による光線追跡法の計算誤差を低減できる。

図8に配光特性の開き角に応じた補正結果を示す。横軸が配光特性の開き角、縦軸が補正後の理想値とのズレをそれぞれ示している。図7中の近似曲線が示す値を、各配光特性の開き角における積分球出力の理想値と定め、光線追跡法により求めた積分球出力に対し各光源の配光特性の開き角に応じ

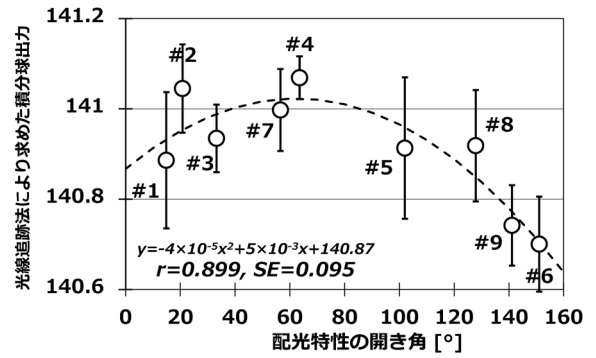


図7 光源の配光の開き角と光線追跡法による結果の関係

Fig. 7 Relationship between the result of ray tracing method and illumination angle of test source.

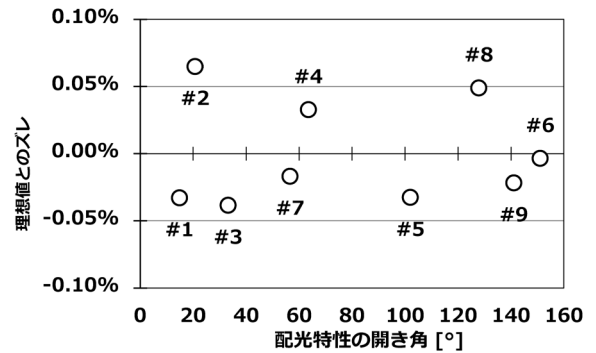


図8 配光特性の開き角に応じた結果補正

Fig. 8 Result correction according to the illumination angle of test source.

た補正を行った。図8が示すように、補正を行うことで、最大約0.3%見られた値のズレが最大約0.1%に低減することが示された。これは、SRDFの影響を考慮した補正を行うことで、積分球による全光束測定の不確かさを低減できる。

## 7. 実測による先行研究との比較

次に、実測により積分球のSRDFを求め、積分球での測定値の補正を行った先行研究<sup>10)</sup>と本研究との結果を比較し、光学シミュレーションの解析精度を検討した。

本研究と先行研究で用いた積分球は異なるため、直接的な比較はできないが、先行研究では、バッフルプレートの影響で2%~4%、積分球の繋ぎ目や経年劣化による下半球での内壁反射率の低下による影響で1%~2%のSRDFのムラが生じていた。図4に示すように、本研究では、光検出器用バッフルによる影響で約4%のSRDFのムラが見られたが、他の要因によるSRDFのムラは確認できなかった。これは、積分球の3Dモデルを作成する際に、外形を半球モデルの組み合わせではなく1つの球モデルとしたことや内壁反射率を一様に設定するなど、いくつかのパラメータを簡略化したことが原因であると考えられる。

実測で見られた積分球の繋ぎ目や内壁反射率のSRDFへの影響は、光検出器用バッフルによる影響に比べると小さいが、1%~2%のSRDFのムラは大きく、測定誤差要因として十分な影響が考えられる。本研究で行った光線追跡法による検討では、約0.3%の有意な計算結果の違いを示したが、シミュレーションにおけるモデル作成の簡略化の影響で、積分球での測定誤差を過小評価した可能性がある。現実の環境との乖離といったシミュレーションの不確かさを低減することで、解析の推定精度を高めることは可能である。しかし、こ

れはモデル容量や計算コストの増大を引き起こすため、コンピュータのパフォーマンスに依存する問題である。

本研究並びに先行研究の結果は、SRDFの影響を考慮した補正を行うことで、積分球による全光束測定の不確かさを低減できる。その影響の程度は、使用した積分球にのみ適応されるものであり、定量的な影響を論じるためには、様々な内部レイアウトを持つ積分球モデルで同様の解析を行い、その影響の傾向を検討する必要がある。また、SRDFの不均一性を生じさせる要因を追求することで、SRDFの不均一性の影響を最小化する積分球の内部レイアウトを最適化の可能性が考えられるが、それは今後の課題である。さらに、実測とシミュレーションの比較やシミュレーションにおいて全ての光源の全光束を100と仮定した点、結果で使用した近似曲線の物理的な根拠など解決すべき課題に関しては、今後引き続き検討を行っていく。

## 8. まとめ

本研究では、積分球を用いた光線追跡法による全光束測定の測定誤差を低減するために、光学シミュレーションを用いてSRDFが全光束測定に与える影響を評価した。結果は、テスト光源の配光特性の違いによる全光束測定の不確かさを明らかにした。また、配光の開き角によってSRDFが全光束測定に与える影響を定量的に表すことが可能であり、SRDFの影響を考慮した補正を行うことで、積分球による全光束測定の不確かさを低減できることを示した。

今後、様々な内部レイアウトの積分球に対しても同様の検討を行い、積分球内のSRDFの不均一性を最適化することが出来れば、積分球による全光束測定の不確かさを低減することが可能である。さらに、積分球設計における最適な内部構造物、特にバッフル形状の提案などを引き続き検討していく。

## 謝辞

本研究の一部は、一般社団法人照明学会研究・教育助成課題（第26CF001）の助成を受けて実施したものである。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人照明学会：新版光の計測マニュアル，日本理工出版会，第6章・第7章（2022）。
- 2) CIE 84-1989: The measurement of luminous flux (1989).
- 3) 中澤由莉，神門賢二，座間達也：配光測定 of の最適化に向けた全光束導出手法の検討，照学誌，100-2, pp. 67-73 (2016).
- 4) CIE S 025/E:2015: Test method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules (2015).
- 5) 田代知範，大久保和明，山内泰樹：積分球による全光束測定における自己吸収補正の誤差，照明学会2020年度全国大会講演論文集，8-O-02 (2020).
- 6) 大久保和明，大澤祥宏：積分球内壁反射材料BRDFの球形光束計のSRDFへの影響の検討，照学誌，100-10, pp. 455-461 (2016).
- 7) Wasapinyokul, K., Chuwongin, S. and Charoensook, A.: Effect of baffle reflection and shadow in an integrating sphere on the total luminous measurement of a linearly shaped lamp, Acta IMEKO, 6-4, pp. 105-112 (2017).
- 8) Ohno, Y.: Detector-based luminous-flux calibration using the

absolute integrating-sphere method, Metrologia, 35-4, pp. 473-478 (1998).

- 9) Ohno, Y. and Daubch, O. R.: Integrating sphere simulation on spatial nonuniformity errors in luminous flux measurement, J. Illum. Engng. Soc., 30-1, pp. 105-115 (2001).
- 10) 大久保和明，山内泰樹：積分球のSRDFが全光束測定値に与える影響の検討，照学誌，103-4, pp. 142-147 (2019).
- 11) 株式会社インテグラ，ハイブリッド光シミュレーションソフトウェアlumicept, <https://integra.jp/ja/products/lumicept>, (2022.12.28).
- 12) Shichi, W., Toyota, T., Suzuki, T. and Ohkubo, K.: Evaluation of the influence of an integrating sphere internal structure on total luminous flux measurement, Proc. CIE 2019, pp. 1238-1242 (2019).

(受付日2022年10月18日／採録日2023年4月24日)



田代 知範 (正会員)

静岡県工業技術研究所

〒421-1298 静岡県静岡市葵区牧ヶ谷2078  
2014年宇都宮大学大学院博士後期課程，  
2016年東フィンランド大学博士後期課程修了。  
宇都宮大学特任研究員，山形大学研究  
支援者，静岡県工業技術研究所研究員を経て，  
2022年より同主任研究員，(2023年7月より静岡大学電  
気電子工学科助教)。博士(工学)。照明学会，日本光学会，  
日本色彩学会，日本照明工業会会員。



志智 亘 (正会員)

浜松工業技術支援センター

〒431-2103 静岡県浜松市北区新都田1-3-3  
2009年甲南大学大学院博士後期課程修了。  
現在，浜松工業技術支援センター 光科上席  
研究員。博士(理学)。照明学会，応用物理学  
学会会員。



大久保 和明 (専門会員)

山形大学

〒992-0038 山形県米沢市城南4-3-16  
1979年埼玉大学大学院工学研究科卒業。同  
年，松下電器産業(株)入社。1995年博士  
(学術)。2007年大塚電子(株)入社。2020年  
山形大学大学院理工学研究科研究員。



山内 泰樹 (専門会員)

山形大学

〒992-0038 山形県米沢市城南4-3-16  
1999年東京工業大学大学院博士課程修了。  
ロチェスター大学視覚科学センター助教，  
富士ゼロックス(株)研究員，山形大学大学  
院准教授を経て，2013年より同教授。博士  
(工学)。照明学会，日本視覚学会，日本色彩学会，OSA，日  
本照明工業会会員。